



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว
ในอำเภอแม่ลาวจังหวัดเชียงราย

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ และคณะ

4 มกราคม 2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว

ในอำเภอแม่ลาวจังหวัดเชียงราย

คณะผู้วิจัย		สังกัด
1. รศ.ดร.สุทธิตักดิ์	ศรลัมพ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. ดร.สุสิทธิ์	ฉายประกายแก้ว	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
3. ดร.สุรียน	เปรมปราโมทย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
4. นายรัฐธรรม	อิสโรฟาร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
5. นายวรวัชร	ตอวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
6. นายมนตรี	จินากุลวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
7. นายจิตรกร	ประสมศรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
8. นายสิริศาสตร์	ยังแสนภู	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้การสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในโครงการ “ศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว ในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย” ในครั้งนี้ รวมทั้งผู้เชี่ยวชาญที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบผลงาน ทั้งในรายงานความก้าวหน้าของโครงการ และรายงานฉบับสมบูรณ์มาโดยตลอด ซึ่งคำแนะนำและข้อคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญทุกท่าน เป็นประโยชน์ต่อแนวทางการดำเนินงานของคณะผู้วิจัยอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ สำนักโยธาธิการ จังหวัดเชียงราย วัดร่องขุน และชาวบ้านในพื้นที่อำเภอแม่ลาว อำเภอพาน อำเภอแม่สรวย ที่ได้อนุญาตให้เข้าไปดำเนินการสำรวจและทดสอบคุณสมบัติดิน ตลอดจนอนุเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาประกอบการทำงานในโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ส่วนวิจัยรอยเลื่อนมีพลัง กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลให้กับโครงการ ศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว ในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย” ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานศึกษาในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คณะนักวิจัยในโครงการฯ ทุกๆ ท่านที่ได้มีส่วนช่วยให้โครงการวิจัยในครั้งนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิตศักดิ์ ศรีลัมพ์
หัวหน้าโครงการวิจัย

รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร

โครงการ ศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว ในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

1. บทนำ

เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรงสูงสุดที่เคยวัดได้ในประเทศไทย คือ เหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ตามมาตราริกเตอร์ มีศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ประชาชนสามารถรับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือนทั่วทั้งภาคเหนือ และมีความเสียหายรุนแรงในหลายพื้นที่ ทั้งบ้านเรือนและโครงสร้างสาธารณะ เป็นต้น จากบทเรียนของการเกิดแผ่นดินไหวดังกล่าว ยังมี “ปรากฏการณ์ดินเหลว (Liquefaction)” เกิดขึ้น นับเป็นสิ่งแปลกใหม่ที่ประชาชนให้สนใจอย่างมาก ดังนั้น การพัฒนาองค์ความรู้ งานวิจัย และวิธีการวิเคราะห์โอกาสเกิด liquefaction จึงเป็นสิ่งจำเป็น สำหรับการออกแบบบ้านเรือนเพื่อป้องกันภัยแผ่นดินไหวในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินต่อการเกิด liquefaction ของพื้นที่ศึกษา
- 2.2 ศึกษาการเกิด liquefaction จากการทดสอบ shear wave velocity
- 2.3 ศึกษาการเกิด liquefaction ของพื้นที่ศึกษา โดยสอบเทียบผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณีกับข้อมูลการเกิด liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเชียงรายขนาด 6.3
- 2.4 ประเมินโอกาสเกิด liquefaction จากขนาดแผ่นดินไหวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในพื้นที่ศึกษา (Annual probability of liquefaction)
- 2.5 ประเมินความมั่นคงของตัวร่องชุมชน อ.เมือง จ.เชียงราย จากขนาดแผ่นดินไหวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในพื้นที่ศึกษา
- 2.6 พัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ประเมินการเกิด liquefaction ในสนาม

3. วิธีการวิจัย

คณะวิจัยฯ ได้ใช้อำเภอแม่ลาวเป็นพื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ สำหรับระเบียบวิธีวิจัยและกระบวนการวิเคราะห์ จะเน้นศึกษาลักษณะธรณีวิทยา และลักษณะชั้นดินที่ส่งผลต่อการเกิด liquefaction โดยดำเนินการ

ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้จะมีการพัฒนาเครื่องมือ เพื่อใช้ทดสอบและวิเคราะห์การเกิด liquefaction สำหรับผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ จะทำให้ทราบถึงปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมการเกิดปรากฏการณ์ liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเชียงราย นอกจากนี้วิธีการวิเคราะห์และสอบเทียบกับเหตุการณ์จริงที่ผ่านมา จะทำให้มั่นใจในกระบวนการวิเคราะห์ และสามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบสำหรับวิเคราะห์ในพื้นที่อื่นๆ หรือสามารถทำเป็นแผนที่แสดงโอกาสเกิด liquefaction เพื่อให้ประชาชนได้ใช้ประโยชน์ต่อการสร้างบ้านเรือนในอนาคต

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 โอกาสเกิด liquefaction จากผลการตรวจวัดน้ำใต้ดิน (ground water table)

ผลการศึกษาข้อมูลน้ำใต้ดินจากหลุมวัดน้ำ (observation well) ตลอดระยะเวลา 1 ปี ในพื้นที่ศึกษาอำเภอแม่ลาว พบว่ามีน้ำใต้ดินอยู่ในระดับสูงและมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ตามเวลา โดยเฉพาะในบริเวณที่เป็นพื้นที่ราบ เช่น บริเวณตำบลดงมะดะ และตำบลหมอกแก้ว บริเวณพื้นที่นี้มีโอกาสในการเกิด liquefaction ค่อนข้างสูง ส่วนบริเวณตำบลโป่งแพร่ ซึ่งเป็นพื้นที่ราบเชิงเขา แม้ระดับน้ำใต้ดินมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ตามเวลา แต่ระดับน้ำค่อนข้างต่ำจากผิวดิน โอกาสในการเกิด liquefaction มีน้อย

4.2 การประเมิน liquefaction จากผลการทดสอบความเร็วคลื่นเฉือน

ผลการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลว (Liquefaction) ด้วยวิธีคลื่นสั้นสะเทือน (Shear wave velocity) จากผลการทดสอบ spectral analysis of surface wave (SASW) สามารถสร้างความสัมพันธ์เชิงประจักษ์การเบื้องต้นระหว่าง ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) และจำนวนครั้งที่ตอกมาตรฐาน (SPT number) ในพื้นที่ศึกษาอำเภอแม่ลาว เป็นไปดังสมการ $Y = 133X^{0.161}$

เมื่อนำข้อมูลจากผลการทดสอบข้างต้น ไปวิเคราะห์โอกาสเกิด liquefaction ด้วยวิธีของ Andrus and Stokoe (2000) และ Kayen et al. (2013) พบว่า ผลการวิเคราะห์ค่อนข้างสอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ดังนั้น มีความเป็นไปได้ที่จะทำการตรวจสอบโอกาสการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลว (Liquefaction) ด้วยวิธีคลื่นสั้นสะเทือน

4.3 การวิเคราะห์ Liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

ผลการศึกษาการเกิด liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว ขนาด 6.3 (back analysis) ด้วยวิธี Cyclic stress ratio (CSR), Liquefaction Potential Index (LPI) และ Liquefaction

Manifestation พบว่าวิธีดังกล่าวมีความเหมาะสมกับการศึกษาในพื้นที่ อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย นอกจากนี้ ในการวิเคราะห์ค่า Liquefaction Potential Index (LPI) ที่ใช้ค่า Cyclic stress ratio (CSR) จากการวิเคราะห์ ground response analysis ให้ค่าที่สอดคล้องกับหลักฐานการเกิด liquefaction มากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการของ Seed et al. (2003)

ผลการศึกษาเหตุการณ์ liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว พบว่า แผ่นดินไหวรอง (Aftershock) สามารถส่งผลให้เกิด liquefaction ได้ ทั้งนี้ขนาดแผ่นดินไหวรองต้องมีขนาดมากกว่า 5.0 และอยู่ในรัศมีประมาณ 10 กิโลเมตร

หลักฐานการเกิด liquefaction ส่วนใหญ่จะอยู่บนชั้นหินตะกอนใหม่ (Quaternary deposit) และเป็นตะกอนจำพวกตะกอนน้ำพา (Fluvial deposit, Qa) และนอกจากดินทรายสภาพหลวมที่สามารถเกิด liquefaction ได้แล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ ยังพบว่าชั้นดินเม็ดละเอียดจำพวกดินทรายแป้ง (silty soil) สามารถเกิด liquefaction ได้เช่นกัน

4.4 การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงจากปรากฏการณ์ Liquefaction ในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

เมื่อใช้วิธีการตามข้อ 4.3 และพิจารณาข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลให้เกิด liquefaction ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงน้ำใต้ดิน คุณสมบัติชั้นดิน และความรุนแรงของแผ่นดินไหว สามารถวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงต่อการเกิด liquefaction และโอกาสพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction พร้อมทั้งสร้างแผนที่เสี่ยงภัยจากโอกาสเกิด Liquefaction และโอกาสพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน ให้ปลอดภัยจาก liquefaction เนื่องจากแผ่นดินไหว

4.5 ประเมินความมั่นคงของวัดร่องขุน อ.เมือง จ.เชียงราย จากขนาดแผ่นดินไหวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในพื้นที่ศึกษา

ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ของวัดร่องขุน พบมีโอกาสเกิด Liquefaction ได้ในกรณีที่มีการรับแรงกระทำแผ่นดินไหวที่ความรุนแรงสูงสุดขนาด 6.8 และผลการประเมินความปลอดภัยของฐานรากด้วยวิธี Punching shear analysis กรณีแรงกระทำแผ่นดินไหวความรุนแรงสูงสุดขนาด 6.8 ที่คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี พบว่า ความหนาของชั้นดินเหนียวใต้ฐานรากอุโบสถเพียงพอต่อการต้านทานการพิบัติเนื่องจากฐานรากเจาะทะลุในกรณีที่ชั้นดินทรายหลวมด้านล่างสูญเสียกำลัง หรือชั้นดินทรายหลวมเกิด Liquefaction แต่เมื่อพิจารณากำลังแบกทานของชั้นดินเหนียวใต้ฐานรากอุโบสถ พบว่า กำลังรับแบกทานของชั้นดินไม่เพียงพอ จึงมีโอกาสที่ฐานรากของอุโบสถจะเกิดการทรุดตัวได้

ผลการประเมินความมั่นคงของโครงสร้างหลักของอุโบสถวัดร่องชุ่นต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว ด้วยวิธี มยพ. 1302, วิธีวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Earthquake Analysis) จากรอยเลื่อนแม่ลาว ขนาดแผ่นดินไหว 5.91 คาบอุบัติซ้ำ 475 ปี และผลการวิเคราะห์ย้อนกลับเหตุการณ์แผ่นดินไหว เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ขนาด 6.3 พบว่า โครงสร้างอุโบสถทั้งสองหลังไม่เกิดความเสียหาย แต่พบว่า ผลการวิเคราะห์โครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวขนาดความรุนแรงสูงสุด 6.8 คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี พบว่า โครงสร้างเสาอาจเกิดความเสียหาย เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำแผ่นดินไหวมากเกินไปกำลังรับโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วนโครงสร้างเสา

ข้อเสนอแนะเพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นแก่อุโบสถวัดร่องชุ่น ควรเสริมความมั่นคงของโครงสร้างอุโบสถวัดร่องชุ่น เช่น การเสริมเสาเข็มลงถึงชั้นดินทรายแน่น การติดตั้ง Base isolator หรือการเสริมค้ำยันทั้งนี้ควรทำการวิเคราะห์เพื่อหาวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.6 พัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ประเมินการเกิด liquefaction ในสนาม

ในงานศึกษานี้ ได้พัฒนาเครื่องมือทดสอบ liquefaction ในสนาม ได้แก่ Screw Driving Sounding (SDS) เป็นเครื่องมือที่มีขนาดเล็กสามารถใช้คนเพียง 1-2 คนควบคุมและทดสอบ หลักการทำงาน ใช้ก้านเจาะหมุนลงไปในเนื้อดิน ด้วยระบบ monotonic loading ให้ก้านเจาะหมุนและกดด้วยอัตราคงที่ นอกจากนี้สามารถปรับขนาด loading ตามความลึกของก้านเจาะที่เพิ่มขึ้น เครื่องมือสามารถตรวจวัดค่า Torque (T), Total penetration length (L) และ Settlement velocity (V) เพื่อนำไปคำนวณกำลังของดินและจำแนกประเภทดิน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โอกาสเกิด liquefaction

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : RDG5830014

ชื่อโครงการ : การศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

นักวิจัยผู้รับทุน : รศ.ดร.สุทธิดี ศรลัมพ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระยะเวลาโครงการ : 18 สิงหาคม 2558 สิ้นสุดโครงการวันที่ 1 มิถุนายน 2560

เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรงสูงสุดที่เคยวัดได้ในประเทศไทย คือ เหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ตามมาตราริกเตอร์ มีศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ประชาชนสามารถรับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือนทั่วทั้งภาคเหนือ และมีความเสียหายรุนแรงในหลายพื้นที่ ทั้งบ้านเรือนและโครงสร้างสาธารณะ เป็นต้น จากบทเรียนของการเกิดแผ่นดินไหวดังกล่าว ยังมี “ปรากฏการณ์ดินเหลว (Liquefaction)” เกิดขึ้น นับเป็นสิ่งแปลกใหม่ที่ประชาชนให้สนใจอย่างมาก ดังนั้น การพัฒนาองค์ความรู้ งานวิจัย และวิธีการวิเคราะห์โอกาสเกิด liquefaction จึงเป็นสิ่งจำเป็น สำหรับการออกแบบบ้านเรือนเพื่อป้องกันภัยแผ่นดินไหวในอนาคต

การดำเนินการศึกษาในโครงการนี้ ประกอบด้วย การสำรวจข้อมูลการเกิด liquefaction ในสนาม การสำรวจทางธรณีวิทยา การเจาะสำรวจและทดสอบคุณสมบัติดิน การติดตั้งท่อวัดการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน การติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน และทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน หลังจากได้ข้อมูลในภาคสนาม ได้ทำการวิเคราะห์และประเมินโอกาสในการเกิด liquefaction เพื่อจัดทำแผนที่เสี่ยงภัยต่อการเกิด liquefaction นอกจากนี้ ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ความมั่นคงของอุโบสถวัดร่องขุนต่อการเกิด Liquefaction จากแผ่นดินไหว และพัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม

ผลการศึกษาข้อมูลน้ำใต้ดินตลอดระยะเวลา 1 ปี ในพื้นที่ศึกษาอำเภอแม่ลาว พบว่ามีน้ำใต้ดินอยู่ในระดับสูงและมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ตามเวลาในบริเวณที่เป็นพื้นที่ราบ เช่น บริเวณตำบลดงมะตะ และตำบลหมอกแก้ว บริเวณพื้นที่นี้จึงมีโอกาสในการเกิด liquefaction ค่อนข้างสูง ส่วนบริเวณตำบลโป่งแพร่ ซึ่งเป็นพื้นที่ราบเชิงเขา แม้ระดับน้ำใต้ดินมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ตามเวลา แต่ระดับน้ำค่อนข้างต่ำจากผิวดิน โอกาสในการเกิด liquefaction มีน้อย

ผลการศึกษาการเกิด liquefaction ด้วยวิธี Cyclic stress ratio (CSR), Liquefaction Potential Index (LPI) และ Liquefaction Manifestation พบว่ามีความเหมาะสมกับการศึกษาในพื้นที่ อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย และสามารถใช่วิธีดังกล่าวในการสร้างแผนที่เสี่ยงภัยจากโอกาสเกิด Liquefaction และโอกาสพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน ให้ปลอดภัยจาก liquefaction เนื่องจากแผ่นดินไหว ผลการวิเคราะห์ความมั่นคงของอุโบสถวัดร่องขุนในกรณีที่เกิดแผ่นดินไหวสูงสุดขนาด 6.8 พบว่า ฐานรากอุโบสถมีโอกาสเกิด Liquefaction ส่วนกำลังแบกทานได้ ฐานรากอุโบสถไม่เพียงพอต่อการรับน้ำหนัก ดังนั้น มีโอกาสที่ฐานรากเกิดการทรุดตัวได้ นอกจากนี้ ผลวิเคราะห์ความมั่นคงของโครงสร้าง พบว่า โครงสร้างอุโบสถมีโอกาสเกิดความเสียหายเช่นกัน

Abstract

Project Code : RDG5830014
Project Title : Studies of liquefaction potential soil for Maelao, Chiangrai Province
Research Scholar : Assoc.Prof.Suttisak Soralump, Civil Engineering, Kasetsart University
Duration : August 18, 2015 to June 1, 2017

On 5th May 2014, there is the 6.3 magnitude earthquake occurred in Chiang Rai province. This earthquake is the largest magnitude earthquake that could record in the history of Thailand. The epicenter of earthquake located in the Phayao fault zone on the part of Mao Lao district, Chiang Rai province. After earthquake, there were more than 10,000 houses that were damaged. Furthermore, there were some zones that were affected from liquefaction. The evidences of liquefaction made Thai people become aware of danger from liquefaction. For mitigation of damage from liquefaction, the liquefaction assessment in Mae Lao district should be done.

The process in this study including field observation of liquefaction evidences, geology survey, and soil exploration and testing, ground water monitoring, and rainfall monitoring, and shear wave velocity. Then the data will be used for liquefaction assessment and establishes liquefaction potential map. Moreover, the scope in this study included analysis of stability of Wat Rong Khun and development of liquefaction evaluation by using equipment.

From ground water monitoring, river plain areas have high and fluctuate ground water level. However, the trend of ground water in terrace area is low ground water level. The result from ground water monitoring is corresponding with the liquefaction evidences. There are many liquefaction evidences in the river plain area. Therefore, river plain deposit is appropriate for liquefaction.

From liquefaction verification, the result from liquefaction assessment based on 2014 Chiang Rai earthquake is corresponding with real liquefaction evidences. Therefore, liquefaction mitigation can be done by using analysis model in this study. In additional, the analysis of stability of Wat Rong Khun will not be affected if the analysis is based on 2014 Chiang Rai earthquake. On the other hand, the foundation and column of Wat Rong Khun will failure if earthquake magnitude reach the maximum credible earthquake.

สารบัญ

การศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1-1
1.1 บทนำ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1-2
1.3 ระยะเวลาการดำเนินงาน	1-2
1.4 แผนการดำเนินงาน	1-2
1.4.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิที่เกี่ยวข้องต่างๆ	1-2
1.4.2 การดำเนินการในสนาม	1-2
1.4.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	1-3
1.4.4 การวิเคราะห์ Dynamic Response Analysis	1-3
1.4.5 การประเมินโอกาสเกิด liquefaction	1-3
1.4.6 การพัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด liquefaction ในสนาม มีแนวคิดดังนี้	1-3
บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลทุติยภูมิและข้อมูล Liquefaction	2-1
2.1 พื้นที่ศึกษา	2-1
2.2 ธรณีวิทยาชนิดหิน	2-2
2.2.1 หินตะกอนและหินแปร	2-2
2.2.2 หินอัคนี	2-3
2.2.3 ตะกอนสะสมตัวยุคควอเตอร์เทอร์นารี	2-3
2.3 ธรณีสัณฐาน	2-5
2.4 ธรณีวิทยาแผ่นดินไหว	2-6
2.4.1 ลักษณะการเกิดแผ่นดินไหว	2-6
2.4.2 ตำแหน่งและสถิติการเกิดแผ่นดินไหว	2-6
2.4.3 ความรุนแรงของการเกิดแผ่นดินไหว	2-6
2.5 เหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว	2-11
2.6 หลักฐานการเกิด liquefaction	2-11
บทที่ 3 การเจาะสำรวจชั้นดินและทดสอบคุณสมบัติดิน (Geotechnical Investigation)	3-1
3.1 การกำหนดตำแหน่งการเจาะสำรวจชั้นดินและการติดตั้งหลุมวัดน้ำ	3-1
3.2 สรุปผลการเจาะสำรวจและคุณสมบัติพื้นฐานของดิน และลักษณะการวางตัวของชั้นดิน	3-4

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินต่อการเกิด liquefaction	4-1
4.1 หลุมวัดน้ำใต้ดิน	4-1
4.2 ข้อมูลการตรวจวัดน้ำใต้ดิน	4-5
4.3 สรุปผลการศึกษาระดับน้ำใต้ดิน	4-9
บทที่ 5 การศึกษาการเกิด Liquefaction จากการทดสอบ Shear Wave Velocity	5-1
5.1 การทดสอบ Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)	5-1
5.2 การทดสอบ SASW บริเวณอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย	5-3
5.2.1 ตำแหน่ง Vs 1 วัดร่องขุน (ลานจอดรถด้านทิศใต้)	5-4
5.2.2 ตำแหน่ง Vs 3 วัดร่องขุน (ถนนสาย 1208)	5-7
5.2.3 ตำแหน่ง Vs 4 วัดน้ำล้อม	5-9
5.2.4 ตำแหน่ง Vs 5 โรงเรียนบ้านหนองเก้าห้อง	5-12
5.2.5 ตำแหน่ง Vs 6 บ้านสันกันแหว	5-14
5.2.6 ตำแหน่ง Vs 7 วัดสันต้นม่วง	5-17
5.2.7 ตำแหน่ง Vs 8 เขื่อนห้วยแม่มอญ (ไหลเขาด้านขวา)	5-19
5.2.8 ตำแหน่ง Vs 9 ชุมชนโป่งปูเฟือง (หมู่บ้านหนองผำ)	5-22
5.2.9 ตำแหน่ง Vs 10 โรงเรียนบ้านทรายขาว	5-24
5.2.10 ตำแหน่ง Vs 11 วัดท้าวแก่นจันทร์	5-27
5.2.11 ตำแหน่ง Vs 12 โรงเรียนแม่ลาววิทยาคม	5-27
5.2.12 ตำแหน่ง Vs 13 ถนนเส้น 118	5-33
5.2.13 ตำแหน่ง Vs 14 โรงเรียนโป่งแพร่วิทยา	5-33
5.2.14 ตำแหน่ง Vs 15 สหกรณ์เครดิตยูเนียน จุดบริการประชาชน	5-33
5.3 สรุปผลการทดสอบและแผนการวิจัยต่อ	5-41
บทที่ 6 การวิเคราะห์ Liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว จังหวัดเชียงราย	6-1
6.1 ขั้นตอนการศึกษา Liquefaction จากแผ่นดินไหวแม่ลาวขนาด 6.3	6-1
6.2 วิธีการวิเคราะห์ Liquefaction	6-2
6.2.1 Liquefaction Susceptibility Criteria	6-2
6.2.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety)	6-4
6.2.3 การวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index	6-5

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของชั้นดินต่อการเกิด Liquefaction	6-6
6.4 ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI)	6-9
6.4.1 Deterministic Seismic hazard analysis (DSHA)	6-10
6.4.2 การเลือกคลื่นแผ่นดินไหว	6-11
6.4.3 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน (Ground response analysis)	6-12
6.4.4 ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index	6-13
6.5 ผลการวิเคราะห์ Liquefaction manifestation	6-17
6.6 สรุปผลการวิเคราะห์	6-21
 บทที่ 7 การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงภัยจากปรากฏการณ์ Liquefaction	
ในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย	7-1
7.1 หลักการวิเคราะห์ความเสี่ยงโดยแผนภูมิเหตุการณ์	7-1
7.2 การวิเคราะห์ความเสี่ยงโดยแผนภูมิเหตุการณ์	7-2
7.3 วิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็น	7-3
7.3.1 ความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหว	7-3
7.3.2 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเร่งที่ผิวดิน	7-4
7.3.3 ความน่าจะเป็นของระดับน้ำใต้ดินที่ขนาดต่างๆ	7-7
7.3.4 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุด (Liquefaction Manifestation)	7-7
7.3.5 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพิบัติของฐานรากตื้น	7-13
7.4 ความน่าจะเป็นของการเกิด Liquefaction และความน่าจะเป็นของการพิบัติของฐานรากตื้น เนื่องจาก Liquefaction	7-15
7.5 สรุปผลการวิเคราะห์	7-21
 บทที่ 8 การวิเคราะห์ความมั่นคงของอุโบสถของวัดร่องขุนต่อการเกิด Liquefaction จากแผ่นดินไหว	8-1
8.1 บทนำ	8-1
8.2 ขั้นตอนการศึกษา	8-1
8.3 ผลการดำเนินงาน	8-3
8.3.1 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของชั้นดินต่อการเกิด Liquefaction	8-3
8.3.2 สเปกตรัมผลตอบสนองและ Time History Acceleration สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างวัดร่องขุน	8-4

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

8.3.3 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction Triggering	8-13
8.3.4 ผลการประเมินความเสียหายที่ผิวดินเนื่องจาก Liquefaction	8-16
8.3.5 การวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อโครงสร้างอุโบสถ	8-17
8.3.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างและฐานราก	8-19
8.3.7 ผลการวิเคราะห์ฐานราก	8-21
8.3.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง	8-23
8.4 สรุปผลการดำเนินงาน	8-28

บทที่ 9 การพัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม	9-1
---	------------

9.1 เครื่องมือทดสอบ	9-1
9.2 ตำแหน่งการทดสอบ	9-1
9.3 ผลการทดสอบ SDS	9-3
9.3.1 ผลการทดสอบ	9-3
9.3.2 การจำแนกประเภทดินด้วยผล SDS และการวิเคราะห์ค่า NSDS	9-4
9.4 ผลการประเมิน Liquefaction จากผลทดสอบ SDS	9-8

บทที่ 10 สรุปผลการศึกษา	10-1
--------------------------------	-------------

ภาคผนวก

- ภาคผนวก ก ผลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินและหลุมวัดน้ำ
- ภาคผนวก ข รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดินและการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน
- ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI)
- ภาคผนวก ง บทความสำหรับเผยแพร่
- ภาคผนวก จ กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำจากโครงการไปใช้ประโยชน์
ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้
กิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1-1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	1-4
2-1 พื้นที่ศึกษาอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย	2-1
2-2 แผนที่ธรณีสัณฐานมาตราส่วน 1: 50,000 บริเวณพื้นที่ศึกษา	2-4
2-3 ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศบริเวณพื้นที่ศึกษา	2-5
2-4 การเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก	2-7
2-5 ตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวหรือสถิติการเกิดแผ่นดินไหวในพื้นที่โครงการฯ ภายในรัศมี 200 กิโลเมตร	2-8
2-6 แผนที่แสดงพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว	2-10
2-7 ตำแหน่งจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหวของแผ่นดินไหวหลัก (Mainshock) รอยเลื่อนพะเยา	2-12
2-8 แผ่นดินไหวตามตั้งแต่เดือน พฤษภาคม – ธันวาคม พ.ศ.2557	2-13
2-9 ลักษณะเฉพาะของแผ่นดินไหวหลักและแผ่นดินไหวตามของเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว	2-13
2-10 การเกิด liquefaction ที่บ้านสันกันแฮ้ว ต.จอมหมอกแก้ว อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย	2-14
2-11 การเกิด liquefaction ที่บ้านท้าวแก่นจันทน์ อำเภอแม่สรวย จังหวัดเชียงราย	2-14
2-12 การเกิด liquefaction ที่โรงเรียน อบต.ทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย	2-15
2-13 ตำแหน่งการเกิด liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว	2-15
3-1 ตำแหน่งการสำรวจและทดสอบในสนามบนแผนที่ธรณีสัณฐาน 1:200,000	3-2
3-2 ตำแหน่งการสำรวจและทดสอบในสนามบนแผนที่ธรณีสัณฐาน 1:50,000	3-2
3-3 สรุปตำแหน่งการสำรวจและทดสอบในสนาม	3-3
3-4 สภาพชั้นดิน BH-1 วัดร่องขุน อ.เมือง จ.เชียงราย	3-5
3-5 สภาพชั้นดิน BH-2 วัดร่องขุน อ.เมือง จ.เชียงราย	3-5
3-6 สภาพชั้นดิน BH-3 วัดร่องขุน อ.เมือง จ.เชียงราย	3-6
3-7 สภาพชั้นดิน BH-4 วัดน้ำล้อม ต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย	3-6
3-8 สภาพชั้นดิน BH-5 โรงเรียนบ้านหนองแก้วห้อย ต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย	3-7
3-9 สภาพชั้นดิน BH-6 บ้านสันกันแฮ้ว ต.จอมหมอกแก้ว อ.แม่ลาว จ.เชียงราย	3-7
3-10 สภาพชั้นดิน BH-7 วัดสันตันม่วง ต.ปากอคำ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย	3-8
3-11 สภาพชั้นดิน BH-8 เขื่อนห้วยแม่มอญ ต.ปากอคำ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย	3-8
3-12 สภาพชั้นดิน BH-9 ชุมชนโป่งปูเฟื่อง อ.แม่ลาว จ.เชียงราย	3-9
3-13 สภาพชั้นดิน BH-10 โรงเรียนบ้านท่าฮ่อ ต.บ้านทรายขาว อ.พาน จ.เชียงราย	3-9
3-14 สภาพชั้นดิน BH-11 วัดท้าวแก่นจันทน์ ต.ป่าแดด อ.แม่สรวย จ.เชียงราย	3-10
3-15 สภาพชั้นดิน BH-12 โรงเรียนแม่ลาววิทยาคม ต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย	3-10

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3-16	สภาพชั้นดิน BH-13 ถนนสาย 118 อ.แม่ลาว จ.เชียงราย
3-17	สภาพชั้นดิน BH-14 โรงเรียนโป่งแพรววิทยา อ.แม่ลาว จ.เชียงราย
3-18	สภาพชั้นดิน BH-15 สหกรณ์โป่งแพรว ต.โป่งแพรว อ.แม่ลาว จ.เชียงราย
4-1	ขั้นตอนการติดตั้งหลุมวัดน้ำใต้ดินและการอ่านค่า
4-2	หลุมวัดน้ำแบบ real time ณ หลุมเจาะ BH-10
4-3	สถานีวัดน้ำฝนแบบ real time ณ หลุมเจาะ BH-10
4-4	ข้อมูลน้ำใต้ดินและน้ำฝนแบบ real time ณ หลุมเจาะ BH-10
4-5	ระดับน้ำใต้ตามเวลาที่วัดแบบ manual ของหลุมเจาะ BH-1 ถึง BH-15
4-6	กลุ่มของระดับน้ำใต้ดินสูงใกล้เคียงระดับผิวดินและคงที่ตลอดทั้งปี
4-7	กลุ่มของระดับน้ำใต้ดินอยู่ในระดับต่ำจากผิวดินและคงที่ตลอดทั้งปี
4-8	กลุ่มของระดับน้ำใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลง (fluctuation)
4-9	ระดับน้ำใต้ตามเวลาที่วัดแบบ real time ของหลุมเจาะ BH-10
5-1	การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการทดสอบ SASW
5-2	ตัวอย่าง Phase Spectrum จากตัวรับสัญญาณคลื่นทั้งสอง
5-3	ตัวอย่าง Shear Wave Velocity Profile
5-4	แหล่งกำเนิดคลื่นประเภทค้อนปอนด์และตุ้มน้ำหนักขนาด 100 กิโลกรัม
5-5	ตัวรับสัญญาณคลื่นประเภท 4.5-Hz Geophone และเครื่องประมวลสัญญาณ (Spectrum Analyzer)
5-6	ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณลานจอดรถด้านทิศใต้ของวัดร่องขุน
5-7	ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณลานจอดรถด้านทิศใต้ของวัดร่องขุน
5-8	Dispersion Curves บริเวณลานจอดรถด้านทิศใต้ของวัดร่องขุน
5-9	Shear Wave Velocity Profile บริเวณลานจอดรถด้านทิศใต้ของวัดร่องขุน
5-10	ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 1208 ด้านทิศเหนือของวัดร่องขุน
5-11	ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 1208 ด้านทิศเหนือของวัดร่องขุน
5-12	Dispersion Curves บริเวณถนนสาย 1208 ด้านทิศเหนือของวัดร่องขุน
5-13	Shear Wave Velocity Profile บริเวณถนนสาย 1208 ด้านทิศเหนือของวัดร่องขุน
5-14	ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณวัดน้ำล้อม
5-15	ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณวัดน้ำล้อม
5-16	Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณวัดน้ำล้อม
5-17	Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณวัดน้ำล้อม

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-18 ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณสนามหญ้าหน้าโรงเรียนบ้านหนองเก้าห้อง	5-12
5-19 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณสนามหญ้าหน้าโรงเรียนบ้านหนองเก้าห้อง	5-13
5-20 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณสนามหญ้าหน้าโรงเรียนบ้านหนองเก้าห้อง	5-13
5-21 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณสนามหญ้าหน้าโรงเรียนบ้านหนองเก้าห้อง	5-14
5-22 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณลานดินในพื้นที่ส่วนบุคคล บ้านสันกันแฮว	5-15
5-23 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณลานดินในพื้นที่ส่วนบุคคล บ้านสันกันแฮว	5-15
5-24 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณลานดินในพื้นที่ส่วนบุคคล บ้านสันกันแฮว	5-16
5-25 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณลานดินในพื้นที่ส่วนบุคคล บ้านสันกันแฮว	5-16
5-26 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณไหล่ทางของถนนที่อยู่ด้านทิศใต้ของวัดสันตันม่วง	5-17
5-27 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณไหล่ทางของถนนที่อยู่ด้านทิศใต้ของวัดสันตันม่วง	5-18
5-28 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณไหล่ทางของถนนที่อยู่ด้านทิศใต้ของวัดสันตันม่วง	5-18
5-29 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณไหล่ทางของถนนที่อยู่ด้านทิศใต้ของวัดสันตันม่วง	5-19
5-30 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณไหล่เขื่อนด้านขวาของเขื่อนห้วยแม่มอญ	5-20
5-31 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณไหล่เขื่อนด้านขวาของเขื่อนห้วยแม่มอญ	5-20
5-32 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณไหล่เขื่อนด้านขวาของเขื่อนห้วยแม่มอญ	5-21
5-33 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณไหล่เขื่อนด้านขวาของเขื่อนห้วยแม่มอญ	5-21
5-34 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณถนนดินในชุมชนโป่งปูเฟื่อง (หมู่บ้านหนองผำ)	5-22
5-35 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณถนนดินในชุมชนโป่งปูเฟื่อง (หมู่บ้านหนองผำ)	5-23
5-36 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณบริเวณถนนดินในชุมชนโป่งปูเฟื่อง (หมู่บ้านหนองผำ)	5-23
5-37 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณบริเวณถนนดินในชุมชนโป่งปูเฟื่อง (หมู่บ้านหนองผำ)	5-24
5-38 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนบ้านทรายขาว	5-25
5-39 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนบ้านทรายขาว	5-25
5-40 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนบ้านทรายขาว	5-26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-41 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนบ้านทรายขาว	5-26
5-42 ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณทุ่งนาใกล้วัดท่าแถมจันทร์	5-28
5-43 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณทุ่งนาใกล้วัดท่าแถมจันทร์	5-28
5-44 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณทุ่งนาใกล้วัดท่าแถมจันทร์	5-29
5-45 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณทุ่งนาใกล้วัดท่าแถมจันทร์	5-29
5-46 ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม	5-30
5-47 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม	5-31
5-48 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม	5-31
5-49 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม	5-32
5-50 ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 118	5-34
5-51 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 118	5-34
5-52 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 118	5-35
5-53 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 118	5-35
5-54 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนโป่งแพร่วิทยา	5-36
5-55 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนโป่งแพร่วิทยา	5-37
5-56 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนโป่งแพร่วิทยา	5-37
5-57 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนโป่งแพร่วิทยา	5-38
5-58 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณสหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพร่	5-39
5-59 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณสหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพร่	5-39
5-60 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณสหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพร่	5-40
5-61 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณสหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพร่	5-40
5-62 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW ในตำแหน่งที่เคยเกิดปรากฏการณ์ Liquefaction เนื่องจากแผ่นดินไหวในปี พ.ศ. 2557	5-42
5-63 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW ในตำแหน่งที่ไม่เกิดปรากฏการณ์ Liquefaction เนื่องจากแผ่นดินไหวในปี พ.ศ. 2557	5-42
6-1 ขั้นตอนการประเมิน Liquefaction จากแผ่นดินไหวขนาด 6.3	6-1
6-2 การประเมิน Liquefaction susceptibility จากลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดิน	6-3
6-3 การประเมิน Liquefaction susceptibility จาก Plasticity chart	6-3
6-4 ตัวอย่างการวิเคราะห์การกระจายตัวของดินของหลุมเจาะ BH-6	6-8

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6-5 ตัวอย่างการวิเคราะห์คุณสมบัติความเหนียวใน Plasticity chart ของหลุมเจาะ BH-6	6-8
6-6 ผลการวิเคราะห์ Target response acceleration ของแต่ละหลุมเจาะ	6-11
6-7 ตัวอย่างการเลือกข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจาก PEER ground motion database	6-11
6-8 ตัวอย่างการกำหนดชั้นดินและคุณสมบัติดินในโปรแกรม Deepsoil	6-12
6-9 เปรียบเทียบค่า CSR จากการวิเคราะห์ด้วยสมการของ Seed et al (2003) กับแบบจำลองชั้นดินในหนึ่งมิติ	6-14
6-10 กราฟความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ Liquefaction manifestation	6-17
6-11 การเกิด Liquefaction บริเวณผิวดินที่หลุมเจาะ BH-4	6-19
6-12 การเกิด Liquefaction บริเวณผิวดินที่หลุมเจาะ BH-6	6-19
6-13 การเกิด Liquefaction บริเวณผิวดินที่หลุมเจาะ BH-9	6-20
6-14 การเกิด Liquefaction บริเวณผิวดินที่หลุมเจาะ BH-10	6-20
7-1 แผนภูมิขั้นตอนการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง	7-2
7-2 แผนภูมิ (Event tree) ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงจาก Liquefaction	7-3
7-3 Seismic hazard map ของอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย	7-4
7-4 annual probability of peak ground acceleration of BH-3	7-5
7-5 annual probability of peak ground acceleration of BH-4	7-5
7-6 annual probability of peak ground acceleration of BH-6	7-5
7-7 annual probability of peak ground acceleration of BH-7	7-6
7-8 annual probability of peak ground acceleration of BH-9	7-6
7-9 annual probability of peak ground acceleration of BH-10	7-6
7-10 annual probability of peak ground acceleration of BH-12	7-7
7-11 annual probability of peak ground acceleration of BH-15	7-7
7-12 กราฟความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุด (Liquefaction manifestation) กับค่า Liquefaction potential index	7-8
7-13 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 1 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.8 (MCE)	7-9
7-14 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 2 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.8 (MCE)	7-9
7-15 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 3 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.8 (MCE)	7-9
7-16 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 1 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.4	7-10
7-17 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 2 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.4	7-10
7-18 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 3 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.4	7-10

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7-19 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 1 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.5	7-11
7-20 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 2 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.5	7-11
7-21 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 3 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.5	7-11
7-22 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 1 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.46 (มยผ.)	7-12
7-23 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 2 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.46 (มยผ.)	7-12
7-24 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 3 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.46 (มยผ.)	7-12
7-25 Simplified first-order second moment technique	7-13
7-26 ค่าความน่าจะเป็นรวมของกึ่งเหตุการณ์จากการพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก liquefaction	7-16
8-27 Annual probability of liquefaction manifestation กรณีแผ่นดินไหวสูงสุด	7-17
7-28 Annual probability of liquefaction manifestation กรณีขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของ มยผ.	7-17
7-29 Annual probability ของการพิบัติของฐานรากตื้น กรณีแผ่นดินไหวสูงสุด	7-18
7-30 Annual probability ของการพิบัติของฐานรากตื้น กรณีขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของ มยผ.	7-18
7-31 A acceptable risk and consequences of failure	7-19
7-32 The potential map of liquefaction manifestation considering characteristic of Phayao fault	7-19
7-33 The potential map of liquefaction manifestation considering return period 475 years.	7-20
7-34 The potential map of shallow foundation failure considering characteristic of Phayao fault	7-20
7-35 The potential map of shallow foundation failure considering return period 475 years	7-21
8-1 ความเสียหายเนื่องจากแผ่นดินไหวที่วัดร่องขุน	8-1
8-2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความมั่นคงของอุโบสถของวัดร่องขุน ต่อการเกิด Liquefaction จากแผ่นดินไหว	8-2
8-3 แผนที่แสดงระยะทางจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว	8-5
8-4 การลดทอนความรุนแรงของแผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557	8-5
8-5 สเปกตรัมผลตอบสนองเหตุการณ์แผ่นดินไหว 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557	8-6
8-6 Time History Acceleration เหตุการณ์แผ่นดินไหว 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557	8-6

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8-7 สเปกตรัมผลตอบสนอง วิธี มยผ.1302 วัดร่องขุน จ.เชียงราย	8-7
8-8 แผนที่หมู่บ้านรอยเลื่อนที่มีพลังพาดผ่าน จังหวัดเชียงราย แสดงระยะทางจากวัดร่องขุนถึงรอยเลื่อนที่ใกล้ที่สุด	8-8
8-9 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบ วัดร่องขุน จ.เชียงราย	8-9
8-10 สเปกตรัมผลตอบสนอง วัดร่องขุน จ.เชียงราย คาบอุบัติซ้ำ 475 ปี, $M = 5.91$	8-10
8-11 Time History Acceleration วัดร่องขุน จ.เชียงราย คาบอุบัติซ้ำ 475 ปี, $M = 5.91$	8-10
8-12 Spectral Acceleration วัดร่องขุน จ.เชียงราย คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี, $M = 6.80$	8-11
8-13 Time History Acceleration วัดร่องขุน จ.เชียงราย คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี, $M = 6.80$	8-11
8-14 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอุโบสถวัดร่องขุน	8-11
8-15 กราฟเปรียบเทียบค่า CSR ที่ได้จากวิธีของ Seed และ Idriss (1971) และจากการวิเคราะห์พฤติกรรมตอบสนองเชิงพลศาสตร์	8-15
8-16 กราฟเปรียบเทียบค่า LPI ที่ได้จากวิธีของ Seed และ Idriss (1971) และจากการวิเคราะห์พฤติกรรมตอบสนองเชิงพลศาสตร์	8-15
8-17 ผลการประเมินความเสียหายที่ผิวดินเนื่องจาก Liquefaction	8-16
8-18 สเปกตรัมผลตอบสนองวัดร่องขุน จ.เชียงราย เทียบกับคาบการสั่นพื้นฐานของอุโบสถ	8-18
8-19 แบบจำลองโครงสร้างอุโบสถหลัก	8-20
8-20 แบบจำลองโครงสร้างอุโบสถรอง	8-20
8-21 ผลการวิเคราะห์ชิ้นส่วนโครงสร้างจากสเปกตรัมผลตอบสนองออกแบบตามวิธีมยผ.1302	8-23
8-22 ผลการวิเคราะห์ชิ้นส่วนโครงสร้างกรณีแผ่นดินไหวขนาด 5.91 คาบอุบัติซ้ำ 475 ปี	8-23
8-23 ผลการวิเคราะห์ชิ้นส่วนโครงสร้างกรณีแผ่นดินไหวขนาด 6.3	8-24
8-24 ผลการวิเคราะห์ชิ้นส่วนโครงสร้างกรณีแผ่นดินไหวขนาด 6.80 คาบอุบัติซ้ำ 3000 ปี	8-24
8-25 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอุโบสถวัดร่องขุน เทียบกับคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างอุโบสถ	8-24
8-26 โมเมนต์และการเคลื่อนตัวของโครงสร้างอุโบสถเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี	8-25
9-1 หลักการของเครื่องมือ SDS	9-1
9-2 เครื่องมือ Screw Driving Sounding (SDS) สำหรับทดสอบ liquefaction ในสนาม	9-2
9-3 ตำแหน่งการทดสอบ Screw Driving Sounding (SDS) 3 ตำแหน่ง	9-2
9-4 ตัวอย่างผลการทดสอบ SDS ของหลุม BH-3	9-3
9-5 การแปลผลประเภทดินจากการทดสอบ SDS (Torque) ของหลุม BH-3	9-4
9-6 เปรียบเทียบผลการจำแนกประเภทดินจากการทดสอบ SDS และ Boring log BH-3	9-5

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
9-7	เปรียบเทียบผลการจำแนกประเภทดินจากการทดสอบ SDS และ Boring log BH-4	9-6
9-8	เปรียบเทียบผลการจำแนกประเภทดินจากการทดสอบ SDS และ Boring log BH-5	9-6
9-9	ความสัมพันธ์ของ N-SPT กับ NSDS ของการทดสอบ	9-7
9-10	ผลการวิเคราะห์ liquefaction และ LPI จากการทดสอบ SDS	9-8

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 โปรแกรมรายละเอียดแผนการดำเนินงานวิจัย	1-5
2-1 สถิติข้อมูลแผ่นดินไหวรอบพื้นที่โครงการฯ ภายในรัศมี 200 กิโลเมตร โดยสืบค้นข้อมูลล่าสุดเมื่อวันที่ 19 เมษายน พ.ศ. 2559	2-9
2-2 การเปรียบเทียบขนาดแผ่นดินไหว ความรุนแรง และอัตราเร่งของพื้นดิน ณ บริเวณจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว	2-9
3-1 การประเมินและสรุปตำแหน่งการสำรวจและทดสอบในสนาม	3-3
4-1 ข้อมูลการตรวจวัดระดับน้ำใต้ดินแบบ Manual ของหลุม OW-1 ถึง OW-9	4-5
4-2 ข้อมูลการตรวจวัดระดับน้ำใต้ดินแบบ Manual ของหลุม OW-10 ถึง OW-15	4-6
5-1 รายละเอียดการทดสอบ SASW บริเวณอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย	5-3
5-2 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณลานจอดรถด้านทิศใต้ของวัดร่องขุน	5-7
5-3 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณถนนสาย 1208 ด้านทิศเหนือของวัดร่องขุน	5-9
5-4 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณวัดน้ำล้อม	5-12
5-5 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณสนามหญ้าหน้าโรงเรียนบ้านหนองเก้าห้อง	5-14
5-6 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณลานดินในพื้นที่ส่วนบุคคล บ้านสันกันแหว	5-17
5-7 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณไหล่ทางของถนนที่อยู่ด้านทิศใต้ของวัดสันตันม่วง	5-19
5-8 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณไหล่เขื่อนด้านขวาของเขื่อนห้วยแม่มอญ	5-22
5-9 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณบริเวณถนนดินในชุมชนโป่งปูเฟือง (หมู่บ้านหนองผำ)	5-24
5-10 คุณสมบัติชั้นดินโรงเรียนบ้านทรายขาว	5-27
5-11 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณทุ่งนาใกล้วัดท่าแถมจันทร์	5-30
5-12 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม	5-32
5-13 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณถนนสาย 118	5-36
5-14 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณโรงเรียนโป่งแพร่วิทยา	5-38
5-15 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณสหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพร่	5-41
6-1 เกณฑ์ความสามารถในการเกิด Liquefaction จากค่า LPI	6-6
6-2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อการเกิด Liquefaction ของหลุมเจาะ BH-10	6-9
6-3 ขนาดอัตราเร่งพื้นดิน ณ หลุมเจาะในพื้นที่ศึกษา	6-10
6-4 ผลการวิเคราะห์ a_{max} และการขยายขนาดอัตราเร่งพื้นดิน	6-13
6-5 ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-10	6-15
6-6 สรุปผลการวิเคราะห์และตรวจสอบกับข้อมูลการสำรวจในสนาม	6-16
6-7 สรุปผลการวิเคราะห์ Liquefaction manifestation	6-18

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7-1 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดแผ่นดินไหวที่ขนาดต่างๆ	7-4
7-2 ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน	7-8
7-3 ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพิบัติของฐานรากตื้น โดยกำหนดขนาดของฐานรากแผ่เป็น 1.0x1.0 เมตร	7-14
7-4 ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพิบัติของฐานรากตื้น โดยกำหนดขนาดของฐานรากแผ่เป็น 2.0x2.0 เมตร	7-14
7-5 ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพิบัติของฐานรากตื้น โดยกำหนดขนาดของฐานรากแผ่เป็น 3.0x3.0 เมตร	7-15
8-1 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ด้วยลักษณะทางกายภาพ (BH-1)	8-3
8-2 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ด้วยลักษณะทางกายภาพ (BH-2)	8-4
8-3 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ด้วยลักษณะทางกายภาพ (BH-3)	8-4
8-4 การประเมินคุณสมบัติรอยเลื่อนย่อยแม่ลาว กลุ่มรอยเลื่อนพะเยา วิธีวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Earthquake Analysis)	8-9
8-5 สรุปการประเมินคุณสมบัติแผ่นดินไหวของรอยเลื่อนแม่ลาวสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอุโบสถ	8-12
8-6 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction เหตุการณ์แผ่นดินไหว เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 โดยวิธี Cyclic Stress และ Liquefaction Potential Index	8-13
8-7 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ที่ขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด 6.8 โดยวิธี Cyclic Stress และ Liquefaction Potential Index	8-13
8-8 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ที่ขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด 6.8 ด้วยค่า CSR จากโปรแกรม DEEPSOIL และ Liquefaction Potential Index	8-14
8-9 การคำนวณแรงกระทำด้านข้างของอุโบสถหลักโดยวิธีแรงสถิตย์เทียบเท่า	8-19
8-10 การคำนวณแรงกระทำด้านข้างของอุโบสถรองโดยวิธีแรงสถิตย์เทียบเท่า	8-19
8-11 กรณีร่วมของแรงกระทำต่อโครงสร้างอุโบสถวัดร่องขุน	8-21
8-12 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ฐานรากบนดินที่เกิด Liquefaction โดยวิธี Punching Shear Analysis	8-22
8-13 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ฐานรากบนดินที่เกิด Liquefaction โดยวิธี Bearing Capacity	8-22

บทที่ 1

โครงการ ศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว ในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

1.1 บทนำ

เมื่อวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ.2554 ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.8 ตามมาตราริกเตอร์ มีจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ในประเทศพม่า เหตุการณ์ดังกล่าวสร้างความเสียหายแก่บ้านเรือน ถนนของหน่วยงานราชการในพื้นที่เขตอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย และมีผู้เสียชีวิต 1 คน เนื่องจากกำแพงบ้านล้มทับ และเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรงสูงสุดที่เคยวัดได้ในประเทศไทย คือ เหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ตามมาตราริกเตอร์ มีศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ประชาชนสามารถรับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือนทั่วทั้งภาคเหนือ และมีความเสียหายรุนแรงในหลายพื้นที่ ทั้งบ้านเรือนและโครงสร้างสาธารณะ เป็นต้น เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกประเทศสร้างความกังวลแก่ประชาชนเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะกับการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนบนพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว และจากบทเรียนของการเกิดแผ่นดินไหวทั้งสอง ยังมีการเกิดปรากฏการณ์ดินเหลวตัว (ต่อไปจะเรียกว่า *Liquefaction*) ปรากฏการณ์นี้ นับเป็นสิ่งแปลกใหม่ที่ประชาชนให้ความสนใจอย่างมาก ดังนั้น การพัฒนาองค์ความรู้ งานวิจัย และวิธีการวิเคราะห์โอกาสเกิด *Liquefaction* จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบบ้านเรือนเพื่อป้องกันภัยแผ่นดินไหวในอนาคต

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ. 1302) ที่ประกาศโดยกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ปี 2552 แต่ในมาตรฐานการออกแบบดังกล่าวนี้ พิจารณาที่แรงสั่นสะเทือนต่ออาคารซึ่งวางอยู่บนพื้นดินเป็นหลัก ทั้งนี้การศึกษาพฤติกรรม การพิบัติของอาคารนั้นอาจมีสาเหตุอื่นร่วมด้วย ได้แก่ การสูญเสียกำลังของดินฐานรากที่เกิดจากปรากฏการณ์ *Liquefaction* การขยายขนาดอัตราเร่งพื้นดิน เป็นต้น

คณะวิจัยฯ ได้ใช้อำเภอแม่ลาวเป็นพื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ สำหรับระเบียบวิธีวิจัยและกระบวนการวิเคราะห์ จะเน้นศึกษาลักษณะธรณีวิทยา และลักษณะชั้นดินที่ส่งผลต่อการเกิด *Liquefaction* โดยดำเนินการทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้จะมีการพัฒนาเครื่องมือ เพื่อใช้ทดสอบและวิเคราะห์การเกิด *Liquefaction* สำหรับผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ จะทำให้ทราบถึงปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมการเกิดปรากฏการณ์ *Liquefaction* จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเชียงราย นอกจากนี้วิธีการวิเคราะห์และสอบเทียบกับเหตุการณ์จริงที่ผ่านมา จะทำให้มั่นใจในกระบวนการวิเคราะห์ และสามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบสำหรับวิเคราะห์ในพื้นที่อื่นๆ หรือสามารถทำเป็นแผนที่แสดงโอกาสเกิด *Liquefaction* เพื่อให้ประชาชนได้ใช้ประโยชน์ต่อการสร้างบ้านเรือนในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินต่อการเกิด Liquefaction ของพื้นที่ศึกษา
- 1.2.2 ศึกษาการเกิด Liquefaction จากการทดสอบ shear wave velocity
- 1.2.3 ศึกษาการเกิด Liquefaction ของพื้นที่ศึกษา โดยสอบเทียบผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณีกับข้อมูลการเกิด Liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเชียงรายขนาด 6.3
- 1.2.4 ประเมินโอกาสเกิด Liquefaction จากขนาดแผ่นดินไหวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในพื้นที่ศึกษา (Annual probability of Liquefaction)
- 1.2.5 ประเมินความมั่นคงของวัดร่องขุน อ.เมือง จ.เชียงราย จากขนาดแผ่นดินไหวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในพื้นที่ศึกษา
- 1.2.6 พัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม

1.3 ระยะเวลาการดำเนินงาน

การดำเนินการวิจัยของโครงการฯ มีระยะเวลารวม 540 วัน (18 เดือน) โดยรายละเอียดแผนการดำเนินงานวิจัยและผลที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละช่วงเวลาสามารถสรุปดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

1.4 แผนการดำเนินงาน

แนวทางการวิจัยฯ แสดงในรูปที่ 1-1 ประกอบด้วย

1.4.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิที่เกี่ยวข้องต่างๆ

ประกอบด้วยการเก็บข้อมูลตำแหน่งและผลกระทบที่เกิดจาก Liquefaction ลักษณะธรณีวิทยา ลักษณะธรณีสัณฐาน ลักษณะภูมิประเทศ ข้อมูลแผ่นดินไหวและรอยเลื่อนมีพลัง ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลบ่อบาดาลหรือบ่อน้ำใต้ดิน ข้อมูลปริมาณน้ำฝน และผลการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องอื่นๆ เป็นต้น

1.4.2 การดำเนินการในสนาม

- การเจาะสำรวจชั้นดิน (Soil Boring) และติดตั้งท่อสำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน (Observation Well) จำนวนรวมทั้งหมด 15 หลุม โดยตำแหน่งการเจาะสำรวจจะดำเนินการให้ครอบคลุมทั้ง

ในพื้นที่ที่เคยเกิดและไม่เคยเกิดปรากฏการณ์ Liquefaction รวมทั้งพื้นที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อสังคม เช่น พื้นที่ในตัวอำเภอเมือง ซึ่งมีสถานที่สำคัญและประชาชนอาศัยอยู่หนาแน่น เป็นต้น

- การติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน (Rain gauge) จำนวนรวมทั้งหมด 1 จุด และการติดตั้ง Sensor วัดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินแบบ Real times เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำแบบรายวัน (เก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติโดยใช้ Data logger) จำนวนรวมทั้งหมด 3 จุด (หลุม)

- การทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) ของชั้นดินด้วยวิธี Spectral Analysis of Surface wave (SASW) จำนวนรวมทั้งหมด 15 จุด เป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน

1.4.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติ

- การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน (Basic soil properties)

1.4.4 การวิเคราะห์ Dynamic Response Analysis

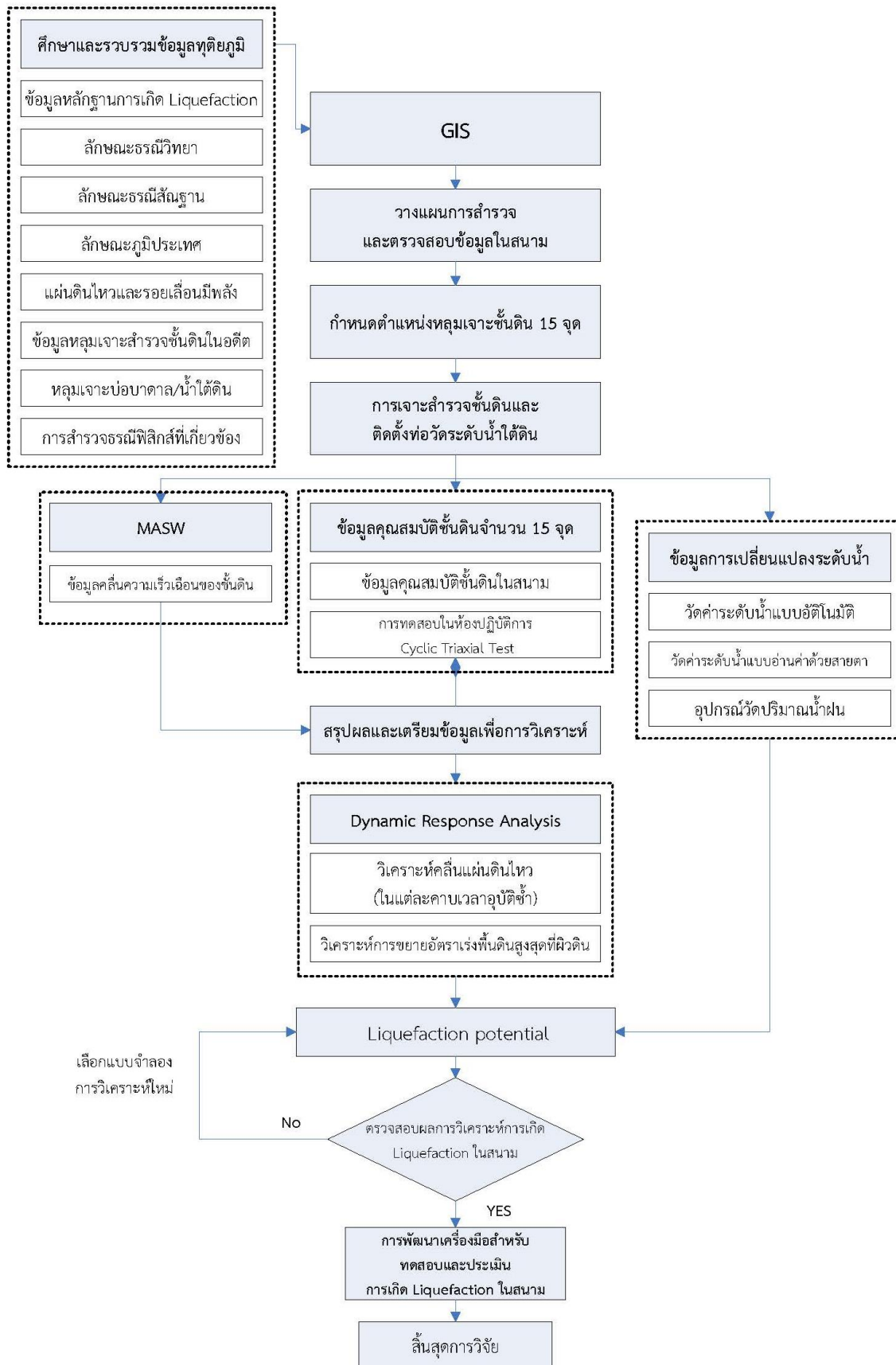
- การวิเคราะห์ Deterministic Seismic Hazard Analysis
- การวิเคราะห์การขยายอัตราเร่งสูงสุดของชั้นดินในลักษณะ 1 มิติ (One dimensional dynamic response analysis)

1.4.5 การประเมินโอกาสเกิด Liquefaction

- โดยวิธี Cyclic stress approach (Seed et al., 1971)
- Liquefaction Potential Index (LPI)

1.4.6 การพัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม มีแนวคิดดังนี้

- เครื่องมือสามารถประเมินหาค่า SPT (Standard Penetration Test) และ FC (Fines content) ได้ในสนาม



รูปที่ 1-1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

ตารางที่ 1-1 โปรแกรมรายละเอียดแผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน (18 เดือน)																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1. ศึกษาข้อมูลภูมิและสภาพแวดล้อมสำรวจในสนาม																		
2. ตรวจสอบข้อมูลในสนามและกำหนดตำแหน่งการสำรวจ																		
3. เจาะสำรวจชั้นดินและติดตั้งท่อสำหรับวัดระดับน้ำใต้ดิน 15 จุด																		
4. ติดตั้งอุปกรณ์และเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงแบบอัตโนมัติ 3 จุด																		
5. ติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำ 1 จุด																		
6. สำรวจหาความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยการวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบหลายช่องสัญญาณ 15 จุด																		
7. ทดสอบคุณสมบัติทางธรณีวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการ (Cyclic triaxial test)																		
8. นำผลเจาะสำรวจและทดสอบมาปรับปรุงข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์																		
9. รวบรวมและสรุปผลข้อมูลทั้งหมดสำหรับการวิเคราะห์																		
10. วิเคราะห์ Dynamic Response Analysis ของชั้น																		
10.1 วิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหว (ในแต่ละคาบเวลาจุด)																		
10.2 วิเคราะห์ Dynamic response analysis ของชั้นดินจำนวน 15 จุด																		
11. ประเมินโอกาสเกิด Liquefaction โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน																		
12. การสร้างสมการ/วิธีการประเมินโอกาสเกิด Liquefaction																		
13. พัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม																		
14. จัดทำรายงานและนำเสนอผลงาน																		
14.1 รายงานการเริ่มงานและการนำเสนอ																		
14.2 รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 และการนำเสนอ																		
14.3 รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2 และการนำเสนอ																		
14.4 รายงานฉบับสมบูรณ์และสรุปผลงานวิจัย																		



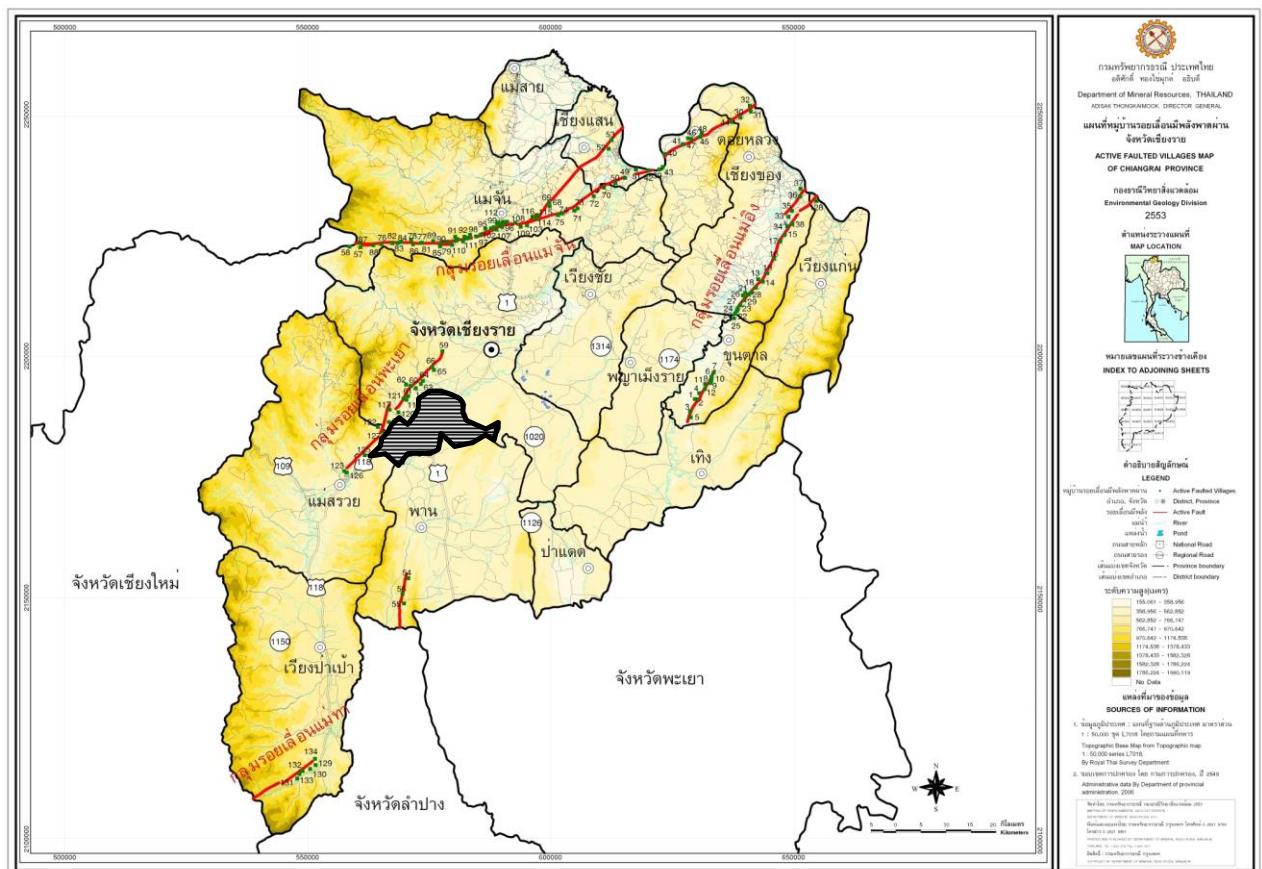
ตารางที่ 1-2 ผลที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละช่วงเวลาของการดำเนินการวิจัย (แบ่งเป็นราย 6 เดือน)

เดือนที่	รายละเอียดกิจกรรม	ผลที่คาดว่าจะได้รับ
6 เดือนที่ 1	1. ศึกษาข้อมูลภูมิทัศน์และการวางแผนสำรวจในสนาม	1. แนวทางการดำเนินงานที่เหมาะสมในภาคสนาม
	2. ตรวจสอบข้อมูลในสนามและกำหนดตำแหน่งการสำรวจ	2. ตำแหน่งเจาะสำรวจชั้นดินและติดตั้งท่อสำหรับวัดระดับน้ำใต้ดิน 15 จุด
	3. เจาะสำรวจชั้นดินและติดตั้งท่อสำหรับวัดระดับน้ำใต้ดิน 15 จุด	3. ข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินและผลการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน
	4. ติดตั้งอุปกรณ์และเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินแบบอัตโนมัติ 3 จุด	4. ผลการตรวจวัดค่าระดับการเปลี่ยนแปลงน้ำใต้ดินรายวัน จำนวน 3 จุด
	5. ติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนจำนวน 1 จุด	5. ข้อมูลปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ศึกษา
	6. สำรวจหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยการวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบหลายช่องสัญญาณ 15 จุด	6. คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินจำนวน 15 จุด
	7. พัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม	7. การประดิษฐ์และพัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม
6 เดือนที่ 2	1. การทดสอบ Cyclic triaxial test ในห้องปฏิบัติการ จำนวน 4 ตัวอย่าง	1. ข้อมูลผลการตรวจสอบดินที่มีโอกาสเกิดและไม่เกิด liquefaction
	2. ปรับปรุงข้อมูลการแปลความลักษณะการวางชั้นตะกอนดิน	2. ผลการปรับปรุงข้อมูลการแปลความลักษณะการวางชั้นตะกอนดินทางธรณีวิทยา
	3. รวบรวมและสรุปผลข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์	3. ผลการรวบรวมและสรุปคุณสมบัติทางธรณีวิศวกรรมสำหรับการวิเคราะห์ Dynamic Response Analysis
	4. วิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหว (ในแต่ละคาบเวลาอุบัติน้ำ)	4. คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์ Dynamic Response Analysis
	5. วิเคราะห์ Dynamic response analysis ของชั้นดิน จำนวน 15 จุด	5. ผลการตอบสนองของชั้นดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว จำนวน 15 จุด
	6. พัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม	6. ความก้าวหน้าการพัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม
6 เดือนที่ 3	1. ประเมินโอกาสเกิด Liquefaction โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน	1. ผลการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินที่มีผลต่อการเกิด Liquefaction
	2. การสร้างวิธีการประเมินโอกาสเกิด Liquefaction	2. การสร้างวิธีวิเคราะห์การประเมินการเกิด Liquefaction
	3. พัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม	3. เครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม

การศึกษาข้อมูลพฤติกรรมและข้อมูล Liquefaction

อำเภอแม่ลาว ตั้งอยู่ทางตอนกลางของจังหวัดเชียงราย มีพื้นที่ประมาณ 220 ตร.กม. ประกอบด้วย 5 ตำบล คือ 1) ตำบลวสี 2) ตำบลปากอคำ 3) ตำบลหมอกแก้ว 4) ตำบลดงมะตะ และ 5) ตำบลโป่งแพร์ มีอาณาเขตติดต่อ (รูปที่ 2-1) กับอำเภอต่างๆ ดังนี้

ทิศตะวันตก ติดต่อกับอำเภอแม่สรวย



รูปที่ 2-1 พื้นที่ศึกษาอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย (กรมทรัพยากรธรณี, 2553)

2.2 ธรณีวิทยาชนิดหิน

ข้อมูลจากแผนที่ธรณีวิทยามาตราส่วน 1: 50,000 บริเวณพื้นที่ศึกษา ซึ่งคัดลอกจากกรมทรัพยากรธรณี (แสดงดังรูปที่ 2-2) พบว่าธรณีวิทยาชนิดหินบริเวณพื้นที่อำเภอแม่ลาว ประกอบด้วยหินและตะกอนดินหลายชนิด อันได้แก่ หินตะกอนและหินแปร หินอัคนี และตะกอนสะสมตัวยุคควอเตอร์เทอร์นารี โดยสามารถอธิบายรายละเอียดดังนี้

2.2.1 หินตะกอนและหินแปร

- กระจายตัวอยู่ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกของพื้นที่ มีลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสูงประกอบด้วย
- SD-หินไมกาชีสต์ หินแอนทิโอไนต์-เทรโมไลต์ชีสต์ หินควอร์ตซ์ชีสต์ หินแกรไฟติกชีสต์ หินฟิลไลต์ หินควอร์ตไซต์ หินปูนตกผลึกใหม่ และหินชีสต์ แทรกสลับด้วยหินภูเขาไฟพวกเบสิก
- CP-หินชั้นที่เกิดจากเศษตะกอน หินทราย เนื้อละเอียด-ปานกลาง หินทรายแป้ง หินดินดาน เนื้อหยาบ และหินกรวดมน สีนํ้าตาล-นํ้าตาลแดง เป็นชั้นความหนา 20-40 ซม. การคัดขนาดปานกลาง
- P2-ส่วนบน: หินดินดาน หินดินดานฟิลลิติก หินทรายเนื้อละเอียด หินดินดานเนื้อหยาบ หินดินดานสลับด้วยหินทราย สีนํ้าตาลถึงนํ้าตาลแกมเทา และหินปูนเป็นเลนส์ ส่วนล่าง: หินปูน หินปูนตกผลึกใหม่ สีเทาถึงเทาเข้ม เนื้อละเอียด เนื้อสมานแน่นถึงเป็นชั้น
- Tr-ส่วนบน: หินปูน สีเทาถึงเทาเข้ม เนื้อละเอียด เป็นชั้นถึงเนื้อแน่นสมาน ส่วนล่าง: หินดินดาน สีเทาถึงนํ้าตาลเทา มีซากดึกดำบรรพ์พวกฮาโลเปียและโพซิโดเนีย และหินทราย สีเทาถึงนํ้าตาลเทา เนื้อละเอียด
- TrL-หินปูน สีเทา-เทาดำ ขนาดชั้นบาง-ชั้นหนา เนื้อละเอียด-หยาบ
- TrJ-หินทราย หินทรายแป้ง และหินดินดาน สีเทาเขียว เทาดำ-นํ้าตาลแดง ขนาดชั้นบาง-ปานกลาง มีเนื้อดินประสมและเนื้อประสานซิลิกา มีแร่ไมก้าขนาดเล็กในเนื้อหิน
- J1-หินทราย หินดินดาน หินทรายแป้ง เนื้อละเอียด-หยาบ สีแดง สีนํ้าตาล เป็นชั้นบาง
- J2-หินทรายเนื้อควอร์ตซ์ เนื้อละเอียด-ปานกลาง สีขาว สีเหลือง สีเทาจาง สีนํ้าตาลอ่อน แสดงการวางชั้นเฉียงระดับ

- K-หินทราย หินทรายแป้ง หินกรวดมน และหินเคลย์ สีแดง-ม่วงแดง ขนาดชั้นบาง-หนา เนื้อดินประสม และสารเชื่อมประสานซิลิกา

2.2.2 หินอัคนี

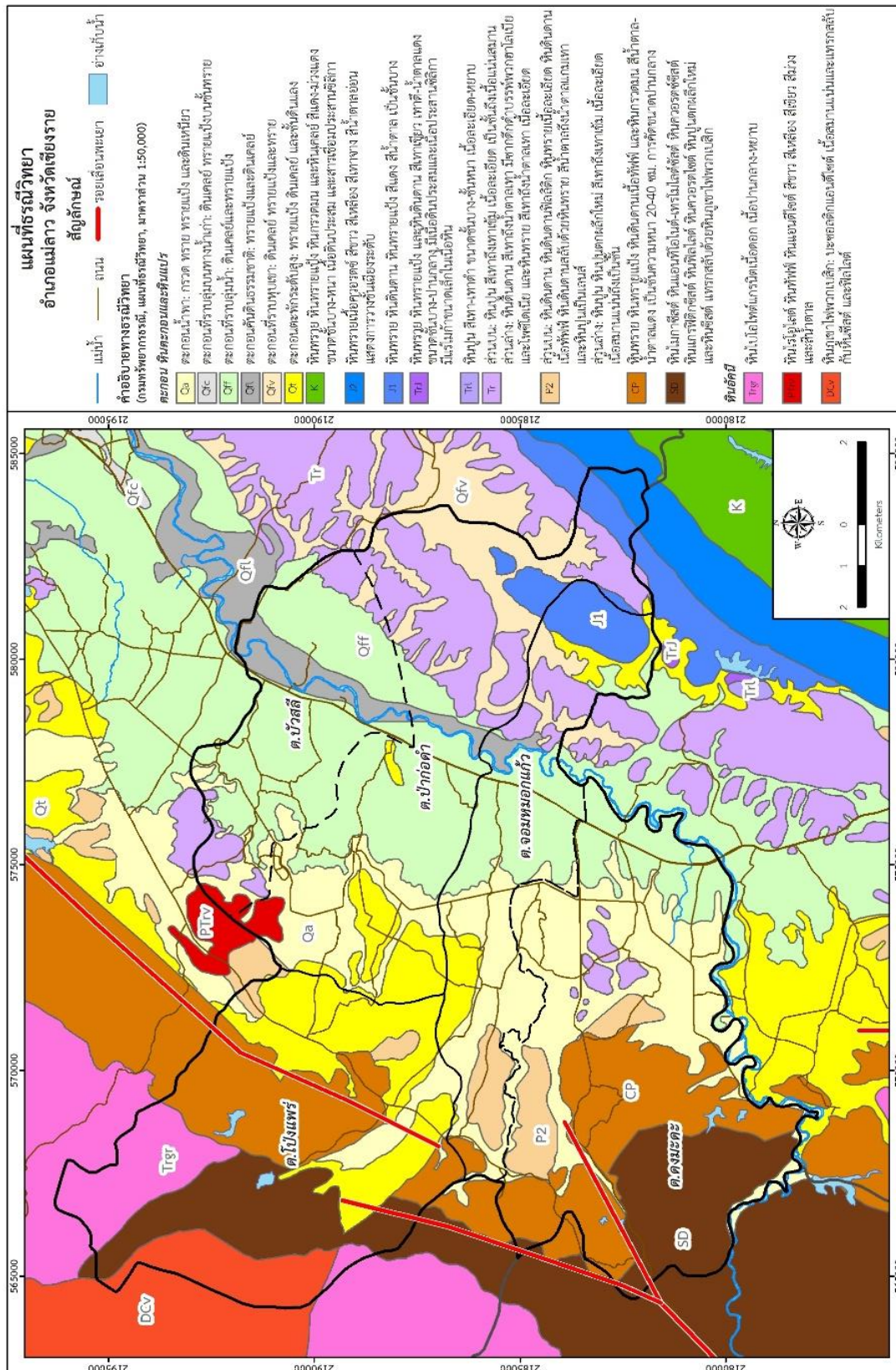
กระจายตัวอยู่บริเวณขอบของพื้นที่ทางด้านทิศตะวันตก มีลักษณะภูมิเทศเป็นภูเขาสูง ประกอบด้วย

- DCv-หินภูเขาไฟพวกเบสิก: บะซอลติกแอนดีไซต์ เนื้อสมานแน่นและแทรกสลับกับหินชีสต์ และฟิลไลต์
- PTRv-หินภูเขาไฟ: ไรโอไลต์ และไรโอลิติกทัฟฟ์
- Trgr-หินไบโอไทต์แกรนิตเนื้อดอก เนื้อปานกลาง-หยาบ

2.2.3 ตะกอนสะสมตัวยุคควอร์เทอร์นารี

กระจายตัวอยู่บริเวณตอนกลางของพื้นที่ มีลักษณะภูมิเทศเป็นที่ราบลุ่ม ที่มีทิศทางการไหลสะสมตัวของตะกอนจากทางด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือลงสู่ทางด้านทิศตะวันออกเฉียงใต้ ประกอบด้วย

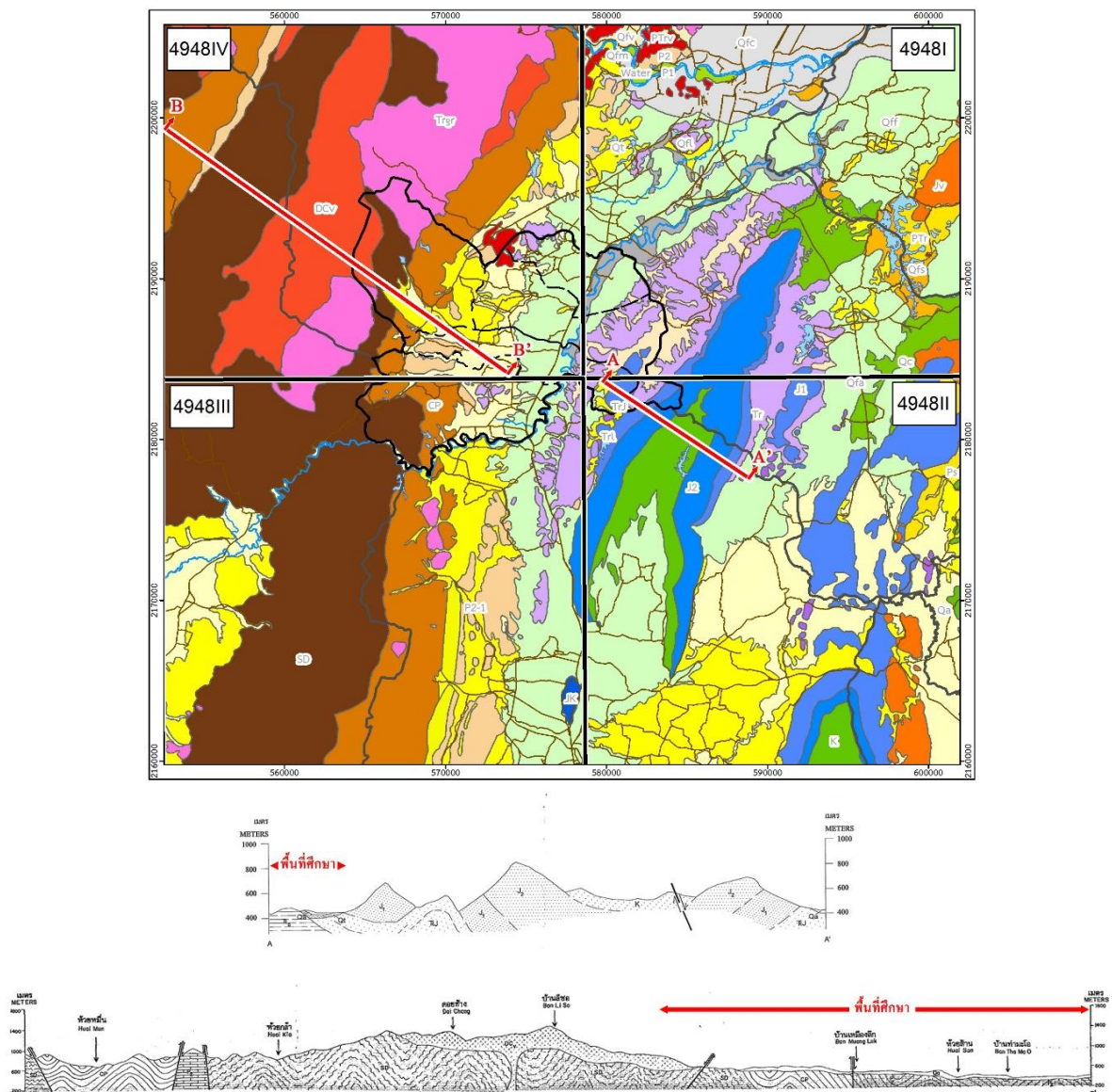
- Qt-ตะกอนตะกักระดับสูง: ทรายแป้ง ดินเคลย์ และชั้นดินแลง
- Qfv-ตะกอนที่ราบหุบเขา: ดินเคลย์ ทรายแป้งและทราย
- Qfl-ตะกอนคันดินธรรมชาติ: ทรายแป้งและดินเคลย์
- Qff-ตะกอนที่ราบลุ่มน้ำ: ดินเคลย์และทรายแป้ง
- Qfc-ตะกอนที่ราบลุ่มบนทางน้ำเก่า: ดินเคลย์ ทรายแป้งบนชั้นทราย
- Qa-ตะกอนน้ำพา: กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว



รูปที่ 2-2 แผนกธรณีวิทยา มาตราส่วน 1: 50,000 บริเวณพื้นที่ศึกษา

2.3 ธรณีสัณฐาน

จากข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศทางธรณีวิทยาแสดงดังรูปที่ 2-3 (ได้จากแผนที่ธรณีวิทยามาตราส่วน 1: 50,000) สามารถประเมินลักษณะธรณีสัณฐานได้ว่า บริเวณพื้นที่ศึกษาตั้งอยู่บนชั้นตะกอนสะสมตัวยุคควอเตอร์นารี (Quaternary deposits) ที่ไม่สามารถระบุความหนาของชั้นตะกอนได้ชัดเจน ชั้นตะกอนดังกล่าวนี้วางสัมพันธ์แบบรอยชั้นความไม่ต่อเนื่อง (Unconformity) กับมวลหินแข็งที่แสดงลักษณะการคดโค้งของชั้นหิน (Folding) แบบประทุนคว่ำสลับกับแบบประทุนหงาย ซึ่งคาดว่ามีแนวการคดโค้ง (Fold axis) ในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ และนอกจากนั้นบางบริเวณพบการตัดผ่านของกลุ่มแนวรอยเลื่อนพะเยา (Phayao Fault) ในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ หรือเกือบขนานแนวการคดโค้งของชั้นหิน



รูปที่ 2-3 ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศทางธรณีวิทยาบบริเวณพื้นที่ศึกษา

2.4 ธรณีวิทยาแผ่นดินไหว

2.4.1 ลักษณะการเกิดแผ่นดินไหว

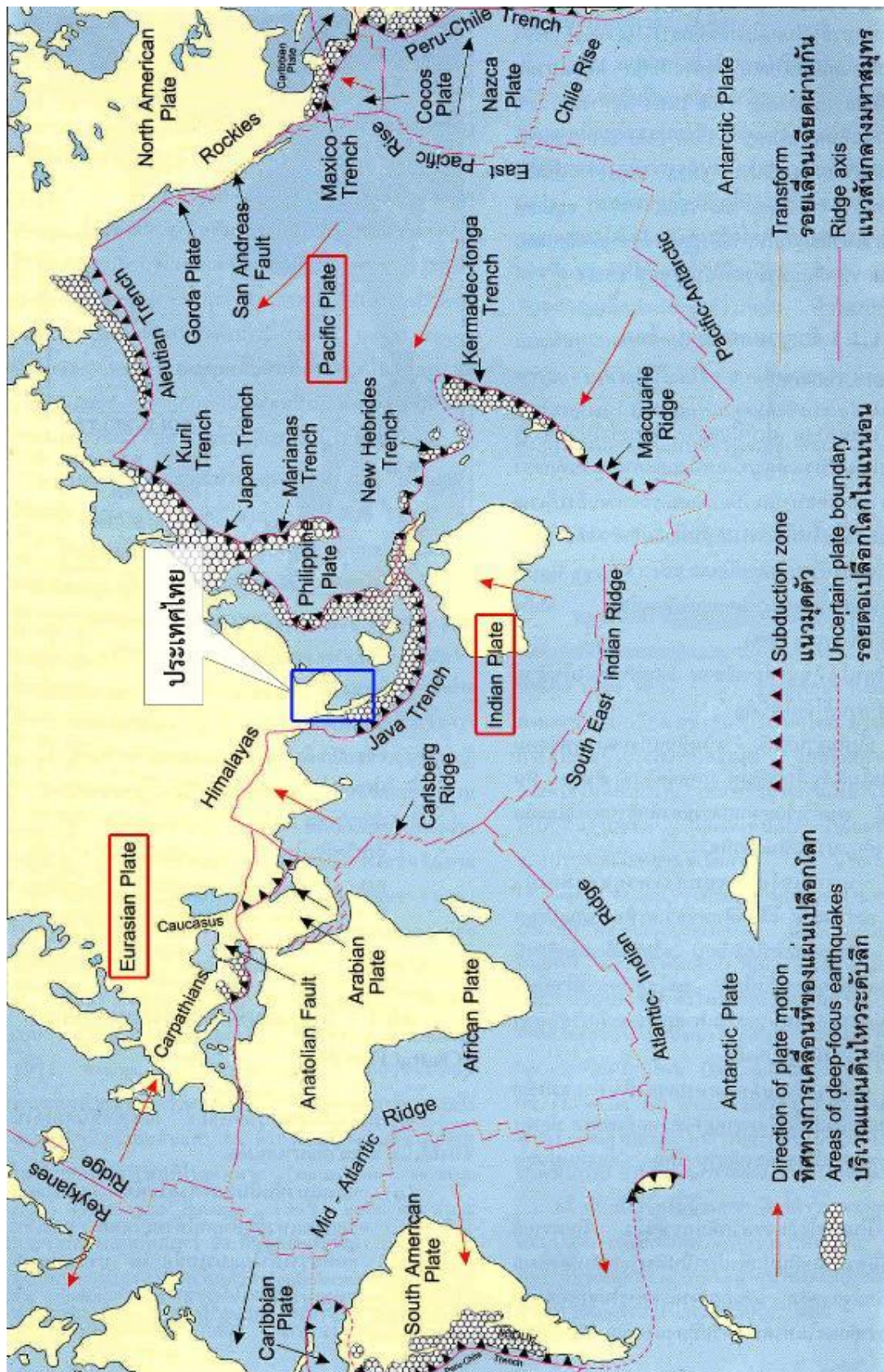
การเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก (Plate Tectonics) เกี่ยวข้องที่สำคัญ 3 แผ่น คือ แผ่นเปลือกโลกชนิดแผ่นทวีปที่เรียกว่าแผ่นยูเรเชีย (Eurasian plate) และแผ่นเปลือกโลกชนิดแผ่นมหาสมุทรอีก 2 แผ่น คือ แผ่นอินเดีย (Indian plate) และแผ่นมหาสมุทรแปซิฟิก (Pacific plate) ดังรูปที่ 2-4 โดยพบว่าแผ่นมหาสมุทรแผ่นอินเดีย มีการเคลื่อนขึ้นทางด้านทิศเหนือในลักษณะตามเข็มนาฬิกา (clockwise component) เคลื่อนชนแล้วมุดตัวลง (Subduction) ใต้แผ่นทวีปยูเรเชียและแผ่นมหาสมุทรแปซิฟิกก็มีการเคลื่อนที่ออกไปทางด้านตะวันตก

2.4.2 ตำแหน่งและสถิติการเกิดแผ่นดินไหว

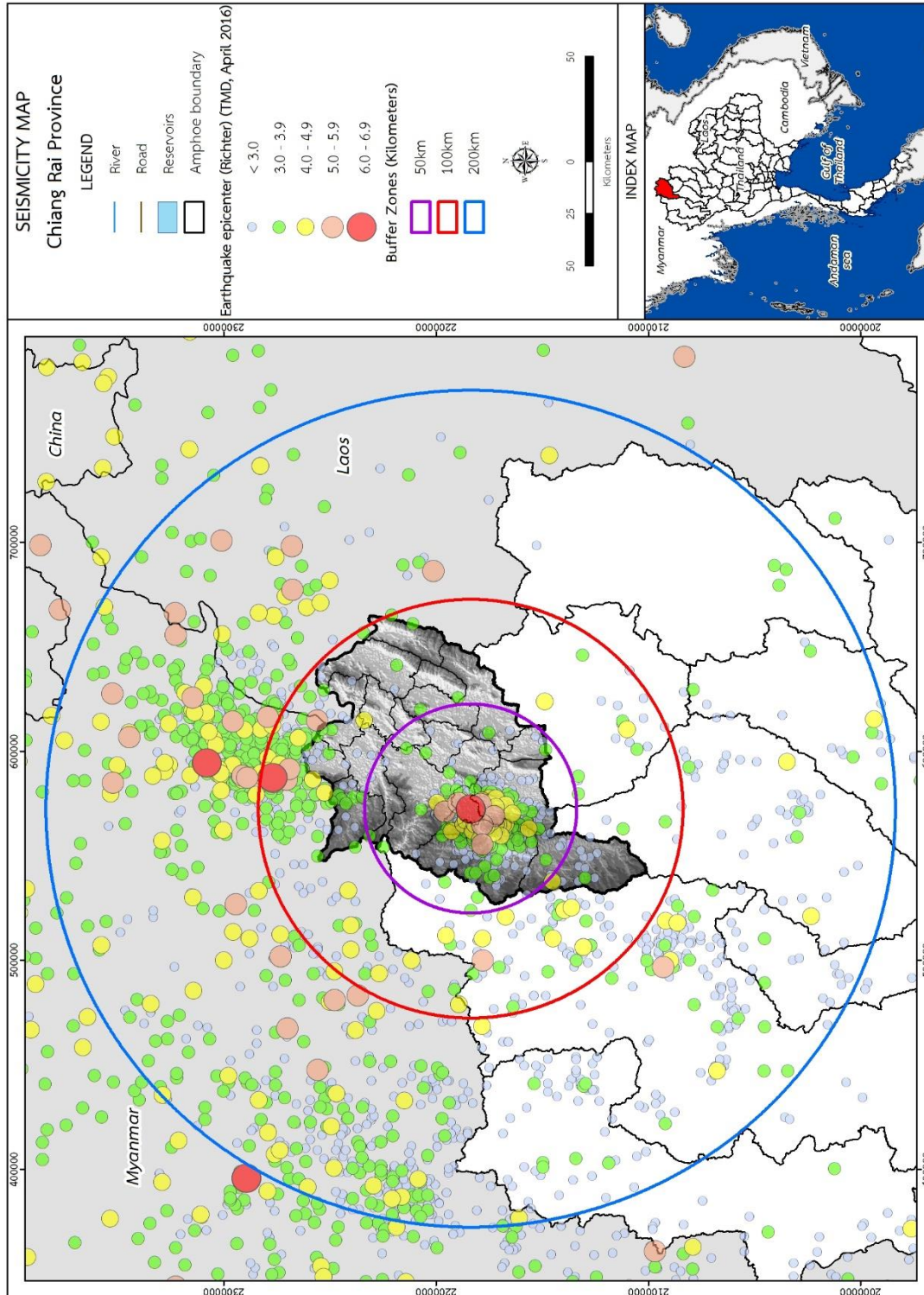
จากการพิจารณาข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2455-2553 ร่วมกับข้อมูลแผ่นดินไหวในประเทศไทยและประเทศใกล้เคียง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550-2559 (สืบค้นข้อมูลล่าสุดเมื่อวันที่ 19 เมษายน พ.ศ. 2559) ของกรมอุตุนิยมวิทยา แสดงดังรูปที่ 2-5 พบว่าตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวหรือสถิติการเกิดแผ่นดินไหวในพื้นที่โครงการฯ ภายในรัศมี 200 กิโลเมตร มีจำนวนทั้งหมด 2,451 ครั้ง ซึ่งรวมถึงเหตุการณ์ 6.3 ริคเตอร์ เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 โดยสามารถแสดงรายละเอียดข้อมูลได้ดังตารางที่ 2-1

2.4.3 ความรุนแรงของการเกิดแผ่นดินไหว

ความรุนแรงของการเกิดแผ่นดินไหว (Intensity) เป็นหน่วยมาตรวัดความรุนแรงแผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบหรือความเสียหายบนผิวโลก ในประเทศไทยนิยมใช้มาตราเมอร์คัลลี (Mercalli Scale) ซึ่งมีทั้งหมด 12 ระดับ (I-XII) โดยสามารถเปรียบเทียบขนาดแผ่นดินไหว ความรุนแรงและอัตราเร่งของพื้นดินได้ดังตารางที่ 2-2 และเมื่อพิจารณาจากข้อมูลแผนที่แสดงพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว (กรมทรัพยากรธรณี, 2548) ดังรูปที่ 2-6 พบว่าพื้นที่โครงการฯ จัดอยู่ในเขตพื้นที่ 2ข คือ มีศักยภาพความรุนแรงของการเกิดแผ่นดินไหว 7-8 เมอร์คัลลี ซึ่งในแผนที่ระบุว่า “สิ่งก่อสร้างออกแบบดีเสียหายเล็กน้อย (มีความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายในระดับปานกลาง)”



รูปที่ 2-4 การเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)



รูปที่ 2-5 ตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวหรือสถิติการเกิดแผ่นดินไหวในพื้นที่โครงการฯ ภายในรัศมี 200 กิโลเมตร

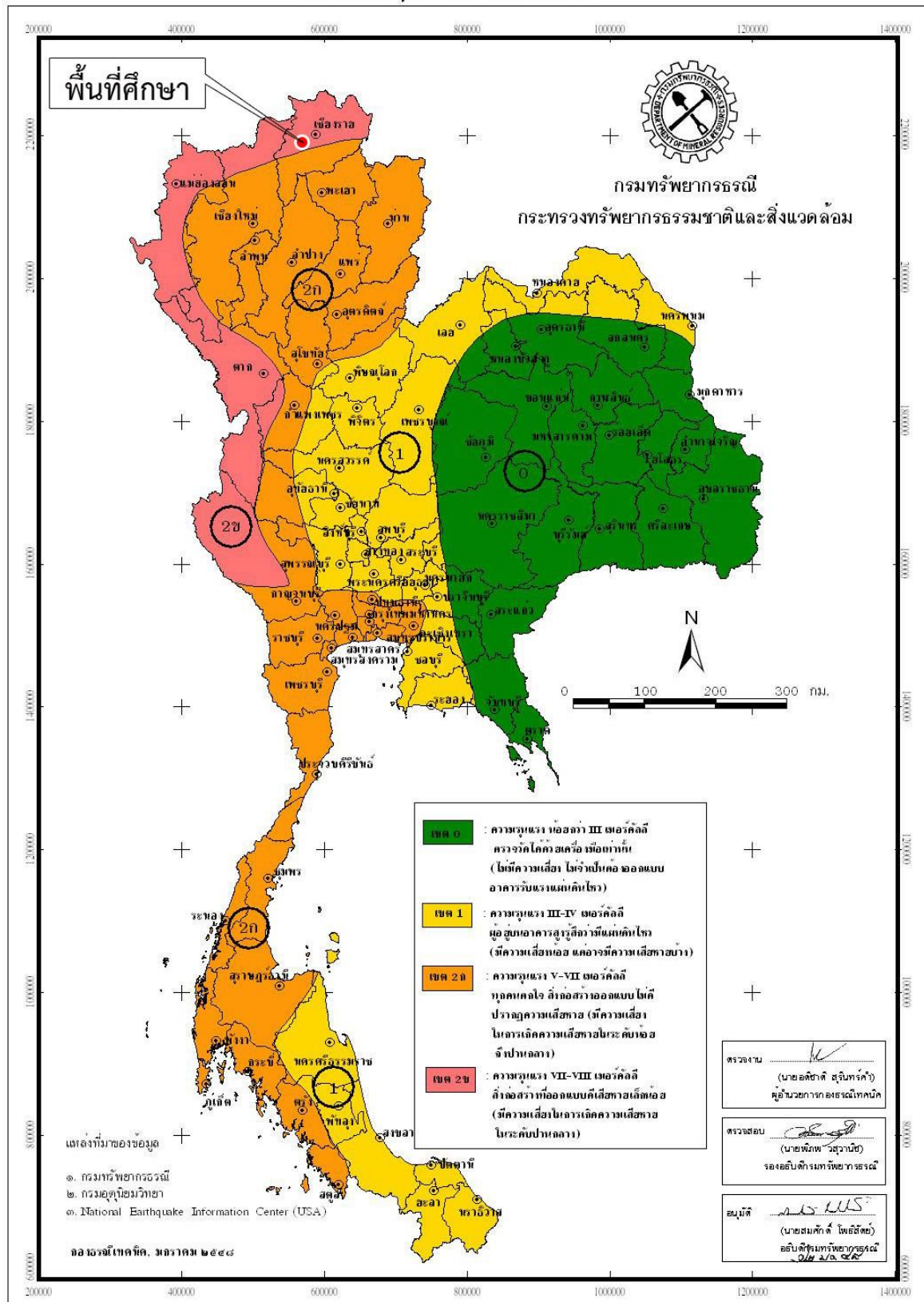
ตารางที่ 2-1 สถิติข้อมูลแผ่นดินไหวรอบพื้นที่โครงการฯ ภายในรัศมี 200 กิโลเมตร (www.tmd.go.th) โดยสืบค้นข้อมูลล่าสุดเมื่อวันที่ 19 เมษายน พ.ศ. 2559

Richter	ข้อมูลแผ่นดินไหว		
	ภายในรัศมี	ภายในรัศมี	ภายในรัศมี
	50 km.	100 km.	200 km.
< 3.0	715	922	1525
3.0-3.9	249	380	731
4.0-4.9	44	71	158
5.0-5.9	8	13	34
6.0-6.9	1	2	3
	(6.3 ริกเตอร์ 05.05.2557)	(6.1 และ 6.7 ริกเตอร์)	
Total	1,017	1,388	2,451

ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบขนาดแผ่นดินไหว ความรุนแรง และอัตราเร่งของพื้นดิน ณ บริเวณจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว (www.dmr.go.th/main.php?filename=Severity)

ขนาดแผ่นดินไหว (ริกเตอร์)	ความรุนแรง (เมอร์คัลลี)		อัตราเร่งพื้นดิน (%g)
น้อยกว่า 3.0	I-II	ประชาชนไม่รู้สึก ตรวจวัดได้เฉพาะเครื่องมือ	น้อยกว่า 0.1 - 0.19
3.0 - 3.9	III	คนอยู่ในบ้านเท่านั้นรู้สึก	0.2 - 0.49
4.0 - 4.9	IV-V	ประชาชนส่วนใหญ่รู้สึกได้	0.5 - 1.9
5.0 - 5.9	VI-VII	ประชาชนทุกคนรู้สึกและอาคารเสียหาย	2.0 - 9.9
6.0 - 6.9	VII-VIII	ประชาชนตื่นตกใจและอาคารเสียหายปานกลาง	10.0 - 19.9
7.0 - 7.9	IX-X	อาคารเสียหายอย่างมาก	20.0 - 99.9
มากกว่า 8.0	XI-XII	อาคารเสียหายเกือบทั้งหมด	มากกว่า 100.0

แผนที่บริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทย
(ฉบับปรับปรุงครั้งที่ ๒ พ.ศ. ๒๕๕๘)



รูปที่ 2-6 แผนที่แสดงพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว (กรมทรัพยากรธรณี, 2548)

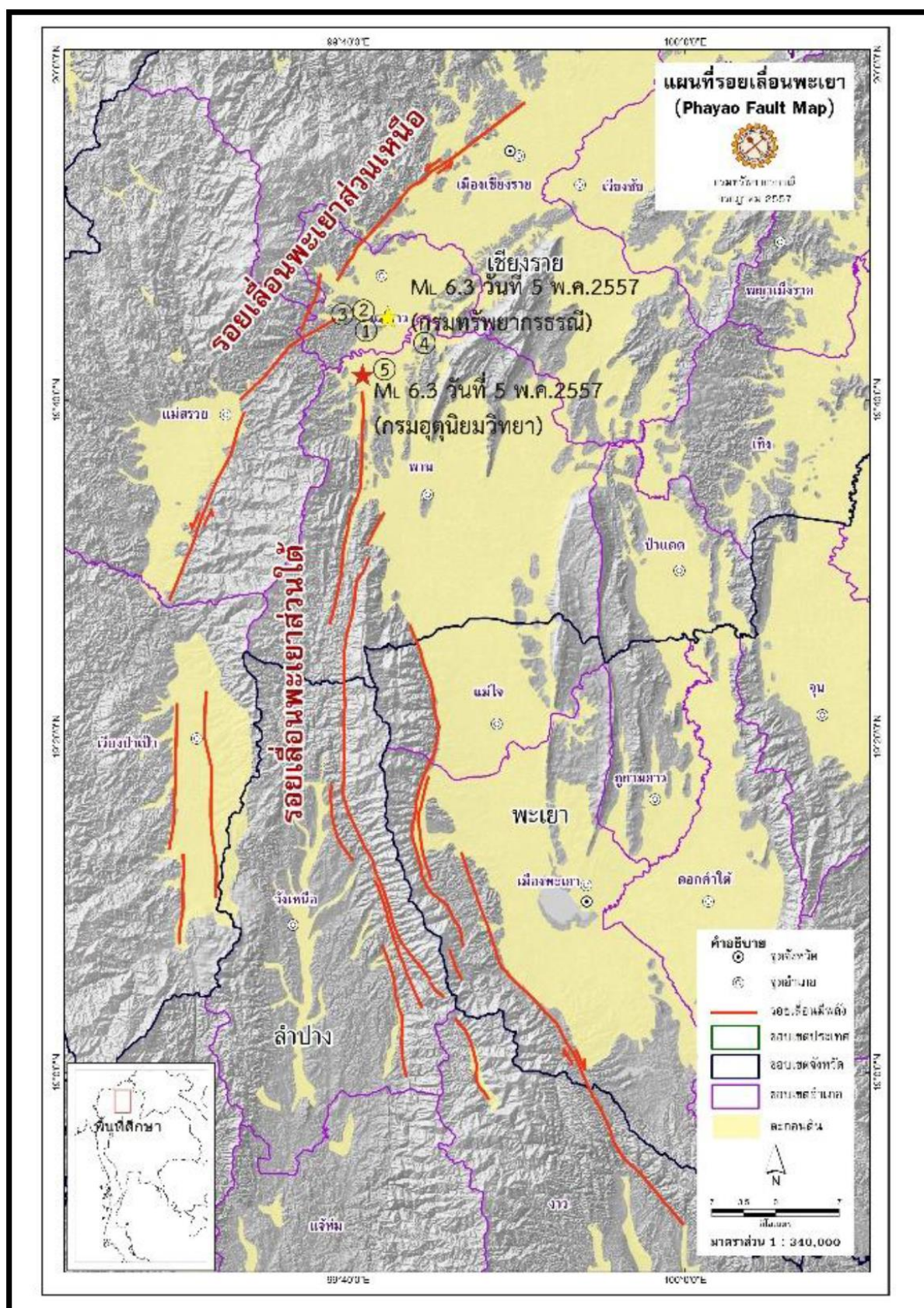
2.5 เหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว

ส่วนวิจัยรอยเลื่อนมีพลัง สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม กรมทรัพยากรธรณี (2557) ได้สรุปเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ตามมาตราริกเตอร์ เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 เวลา 18.08 น. โดยมีจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหวอยู่ในพื้นที่ตำบลดงมะดะ อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย (รูปที่ 2-7) เป็นแผ่นดินไหวที่มีขนาดสูงสุดที่ตรวจวัดได้ในประเทศไทย สาเหตุของการเกิดแผ่นดินไหวในครั้งนี้ เกิดจากการเลื่อนตัวของกลุ่มรอยเลื่อนพะเยาส่วนเหนือ (ส่วนแม่ลาว) โดยเลื่อนตัวในแนวระนาบเลื่อนซ้าย (Left-lateral strike-slip movement) วางตัวในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ นอกจากแผ่นดินไหวหลักแล้ว ยังตรวจวัดแผ่นดินไหวตาม (Aftershock) ไม่น้อยกว่า 1,000 ครั้ง (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2557) ดร.ไพบุลย์ นวลนิล ได้สรุปจำนวนแผ่นดินไหวตามตั้งแต่เดือนพฤษภาคม ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2557 โดยใช้ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาแสดงดังรูปที่ 2-8

ภาสกร และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของแผ่นดินไหวหลักและแผ่นดินไหวตามของเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 จ.เชียงราย พบว่า แผ่นดินไหวตามมีการเกิดตามแนวรอยเลื่อนพะเยา 2 แนว คือ แนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ และแนวเหนือ-ใต้ ดังแสดงในรูปที่ 2-9 ดังนั้นหากพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นที่อำเภอพานและอำเภอแม่สรวย จังหวัดเชียงราย ความเสียหายเหล่านั้นมีแนวโน้มการได้รับอิทธิพลมาจากแผ่นดินไหวตาม เนื่องจากแผ่นดินไหวตามที่มีขนาดเกิดกว่า 5.0 ตามมาตราริกเตอร์ อยู่ใกล้มากกว่าแผ่นดินไหวหลัก

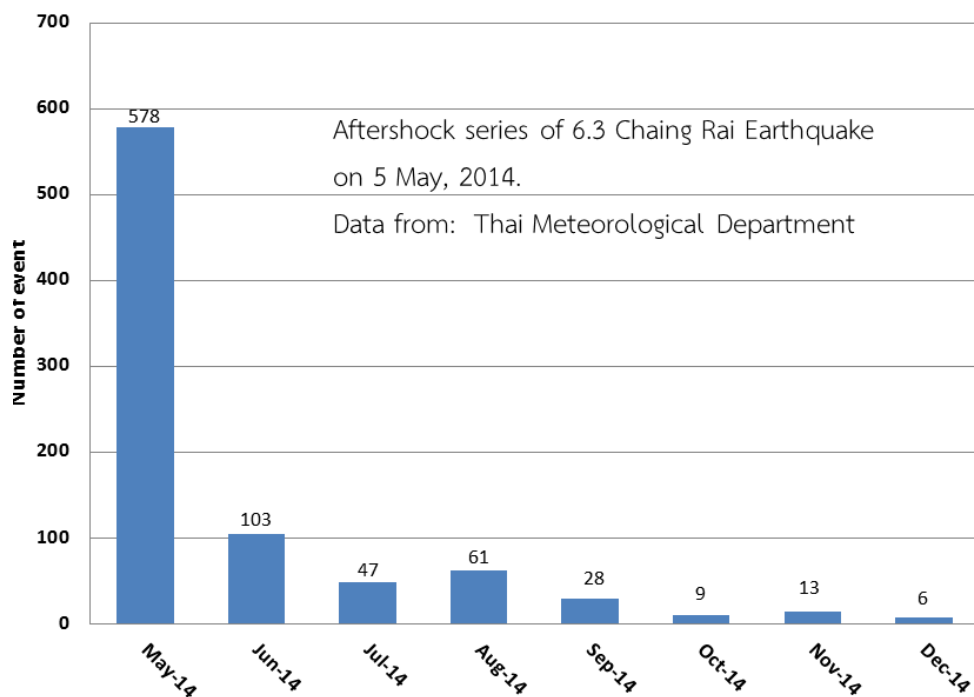
2.6 หลักฐานการเกิด Liquefaction

ภายหลังเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว ระหว่างวันที่ 7-8 พฤษภาคม พ.ศ.2557 หน่วยวิจัยธรณีวิศวกรรมแผ่นดินไหว ของศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้ลงพื้นที่สำรวจแผ่นดินไหว โดยหนึ่งในนั้นเป็นการสำรวจการเกิดสภาพ Liquefaction ซึ่งมีกระจายอยู่หลายพื้นที่ในทั้งในอำเภอแม่ลาว อำเภอพาน และอำเภอแม่สรวย ดังแสดงในรูปที่ 2-10 ถึง รูปที่ 2-12 เมื่อนำข้อมูลจากส่วนวิจัยรอยเลื่อนมีพลัง สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม กรมทรัพยากรธรณี ที่ได้ดำเนินการสำรวจพบการเกิด Liquefaction จำนวน 86 จุด ร่วมกับข้อมูลของศูนย์วิจัยฯ ที่สำรวจพบจำนวน 11 จุด สามารถรวบรวมตำแหน่งการเกิด Liquefaction ได้ทั้งหมด 97 จุด ส่วนใหญ่กระจายอยู่ในอำเภอแม่ลาว และพบเป็นบางพื้นที่ของอำเภอพานและอำเภอแม่สรวย ในรูปที่ 2-13 แสดงตำแหน่งการเกิด Liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว

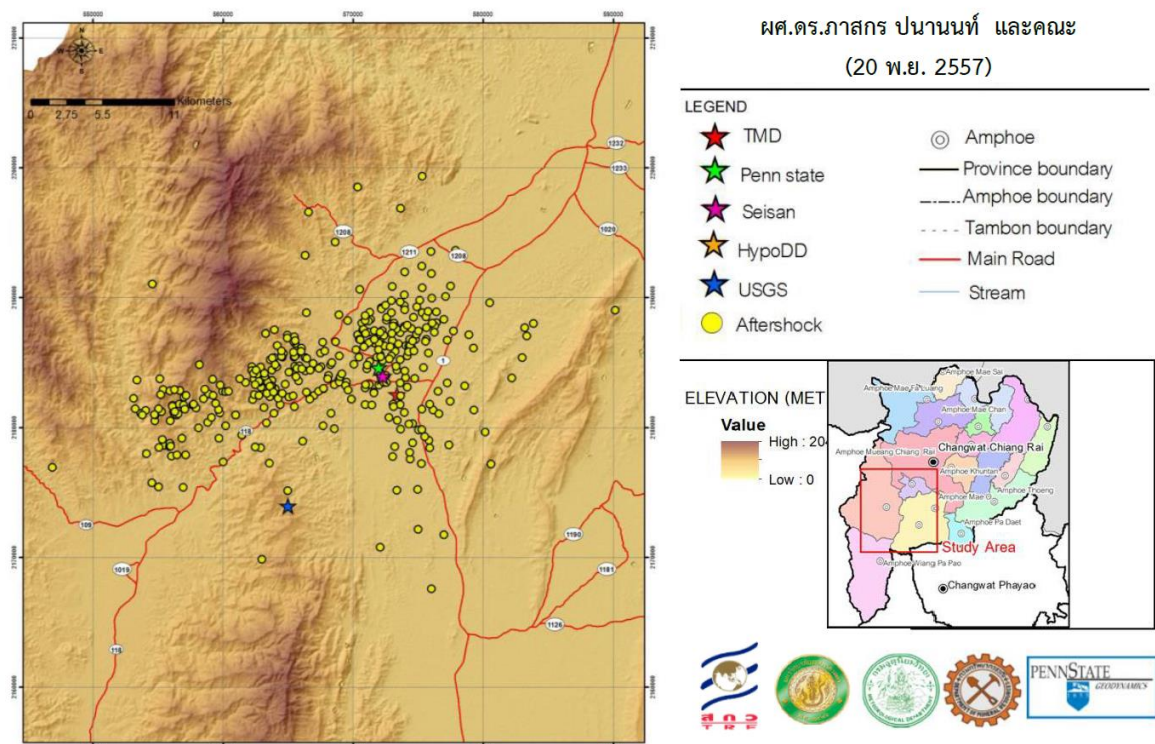


รูปที่ 2-7 ตำแหน่งจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหวของแผ่นดินไหวหลัก (Mainshock) รอยเลื่อนพะเยา (กรมทรัพยากรธรณี, 2557)

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 2-8 แผ่นดินไหวตามตั้งแต่เดือน พฤษภาคม – ธันวาคม พ.ศ.2557 (ดร.ไพบุลย์ นวลนิล)



รูปที่ 2-9 ลักษณะเฉพาะของแผ่นดินไหวหลักและแผ่นดินไหวตามของเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว (ภาสกร และคณะ, 2557)



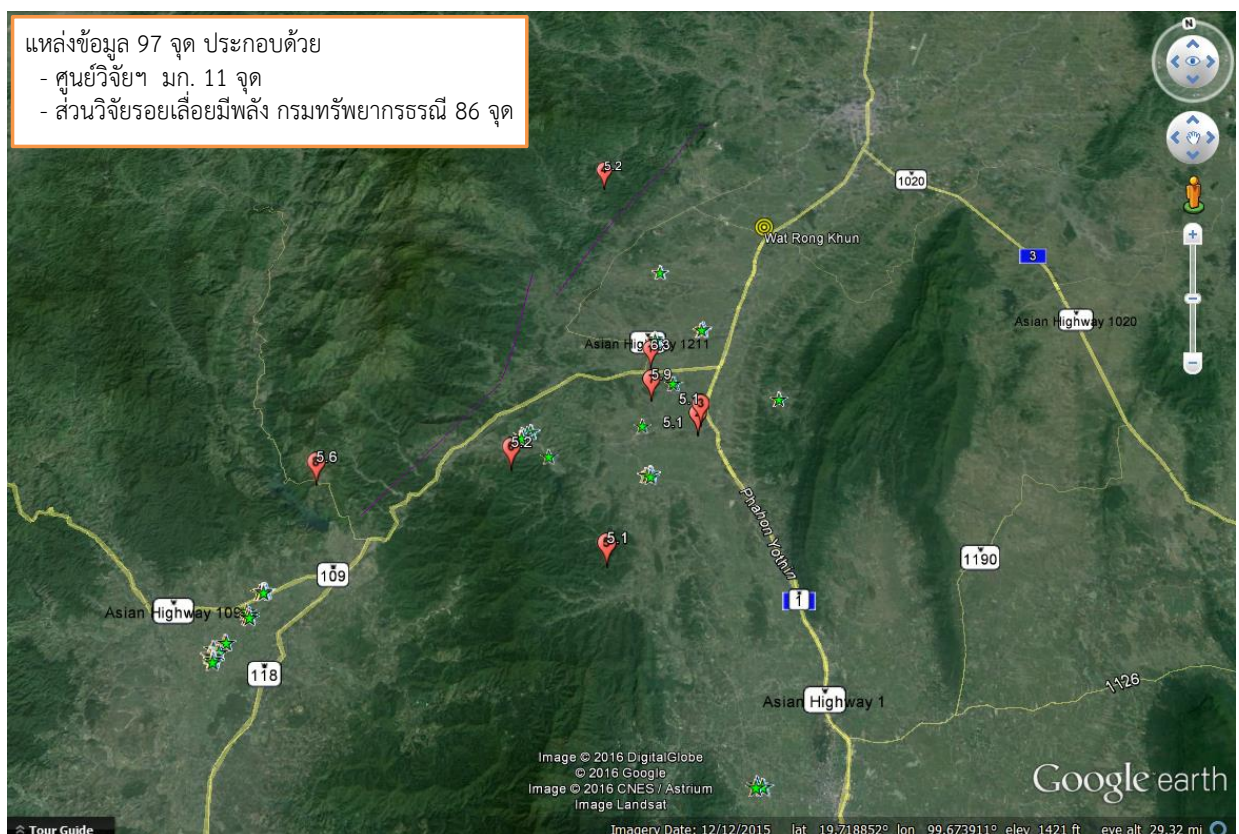
รูปที่ 2-10 การเกิด Liquefaction ที่บ้านสันกันแฮว ต.จอมหมอกแก้ว อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 2-11 การเกิด Liquefaction ที่บ้านท้าวแก่นจันทน์ อำเภอแม่สรวย จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 2-12 การเกิด Liquefaction ที่โรงเรียน อบต.ทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 2-13 ตำแหน่งการเกิด Liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว

บทที่ 3

การเจาะสำรวจชั้นดินและทดสอบคุณสมบัติดิน (Geotechnical Investigation)

3.1 การกำหนดตำแหน่งการเจาะสำรวจชั้นดินและการติดตั้งหลุมวัดน้ำ

การเลือกตำแหน่งสำรวจและทดสอบในสนาม พิจารณาจากปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด Liquefaction โดยปัจจัยในเบื้องต้นที่ใช้พิจารณา ได้แก่ มีหลักฐานการเกิด Liquefaction จริง (Eyewitness) ลักษณะทางธรณีวิทยา (Geological) ขนาดความแรงจากแผ่นดินไหว (Magnitude และ Peak ground acceleration) แผ่นดินไหวตาม (Aftershock) ข้อมูลหลุมเจาะเดิม (Boring log) น้ำใต้ดิน (Ground water table, G.W.T) เป็นต้น

รูปที่ 3-1 แสดงตำแหน่งของการเจาะสำรวจและทดสอบในสนามบนแผนที่ธรณีวิทยา 1:200,000 ส่วนรูปที่ 3-2 แสดงตำแหน่งการสำรวจและทดสอบในสนามบนแผนที่ธรณีวิทยา 1:50,000 จากรูปสามารถสรุปข้อสันนิษฐานของตำแหน่งที่กำหนดให้เจาะสำรวจและทดสอบในสนาม ดังนี้

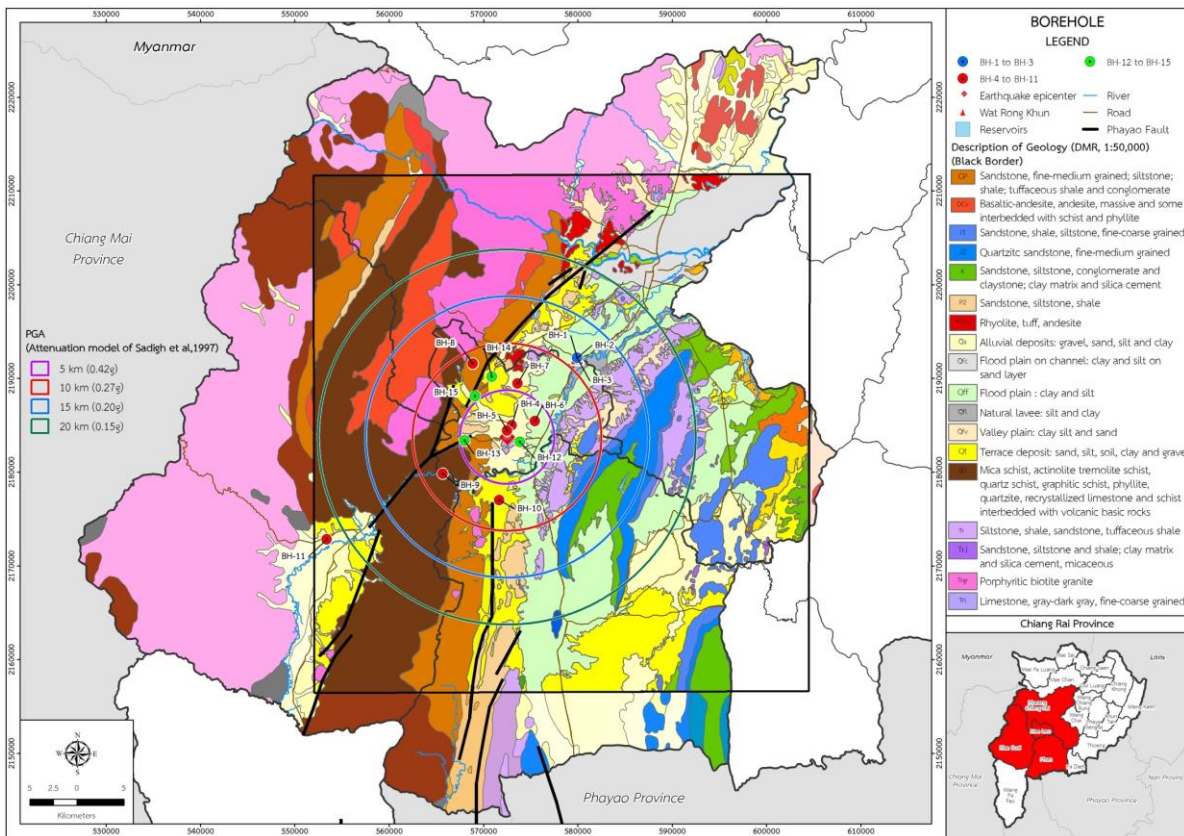
BH-4 ถึง BH-11 เป็นตัวแทนของหลุมที่มีศักยภาพการเกิด Liquefaction เนื่องจากอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นตะกอนน้ำพัดพา (Alluvium deposit, Qa) นอกจากนั้น ความรุนแรงจากแผ่นดินไหวซึ่งคำนวณเบื้องต้นจากสมการลดทอนพลังงานของ Sadigh et al. (1997) มีขนาดอัตราเร่งพื้นดินมากกว่า 0.2g ซึ่งจากงานวิจัยของ Soralump and Feungaugorn (2013) พบว่าขนาดอัตราเร่งพื้นดินน้อยสุดที่ส่งผลให้เกิด Liquefaction คือ 0.15g

ในบางหลุมเจาะ เช่น BH-11 วัดท้าวแก่นจันทน์ อำเภอแม่สรวย จังหวัดเชียงราย อยู่ห่างจากแผ่นดินไหวหลักประมาณ 22 กิโลเมตร สามารถเกิดอัตราเร่งพื้นดินประมาณ 0.12g ซึ่งด้วยขนาดอัตราเร่งนี้ไม่น่าจะเกิด Liquefaction แต่เนื่องจากอยู่ใกล้กับแผ่นดินไหวตามขนาด 5.3 ตามมาตราริกเตอร์ และมีระยะห่างประมาณ 6 กิโลเมตร ซึ่งสามารถเกิดอัตราเร่งพื้นดินได้ 0.24g

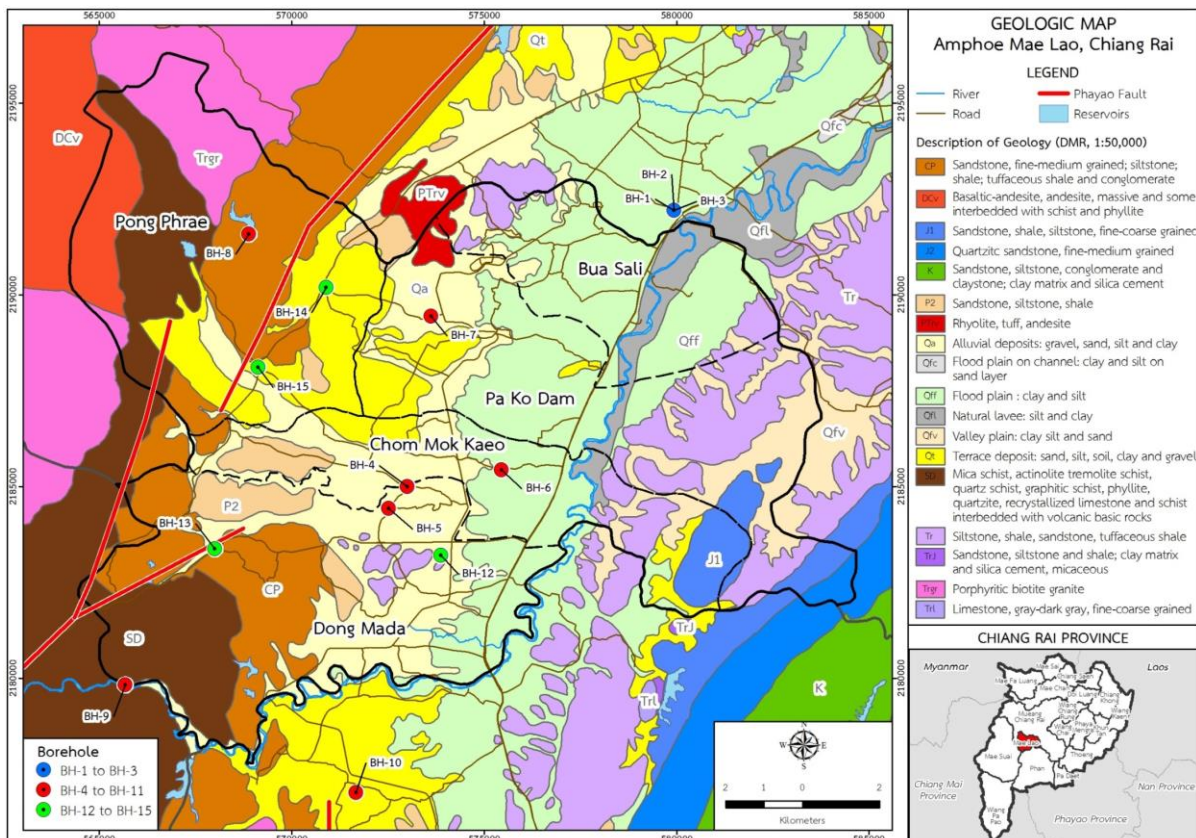
BH-12 ถึง BH-15 เป็นตัวแทนของหลุมที่ไม่มีศักยภาพการเกิด Liquefaction ถึงแม้ว่าทั้ง 4 หลุมเจาะอยู่ใกล้ศูนย์กลางแผ่นดินไหว และสามารถเกิดอัตราเร่งพื้นดินระหว่าง 0.39g – 0.59g แต่เนื่องจากสภาพทางธรณีที่เป็นหินหรือเป็น Qt (ตะกอนตะกักระดับสูง: หินแกรนิต ดินเคลย์ และชั้นดินเล่ง) ดังนั้นจึงไม่มีศักยภาพในการเกิด Liquefaction

BH-1 ถึง BH-3 เป็นตัวแทนของหลุมที่เป็นสถานที่สำคัญและมีประชาชนหนาแน่น

โดยรูปที่ 3-3 และตารางที่ 3-1 สรุปตำแหน่งของการสำรวจและทดสอบในสนาม

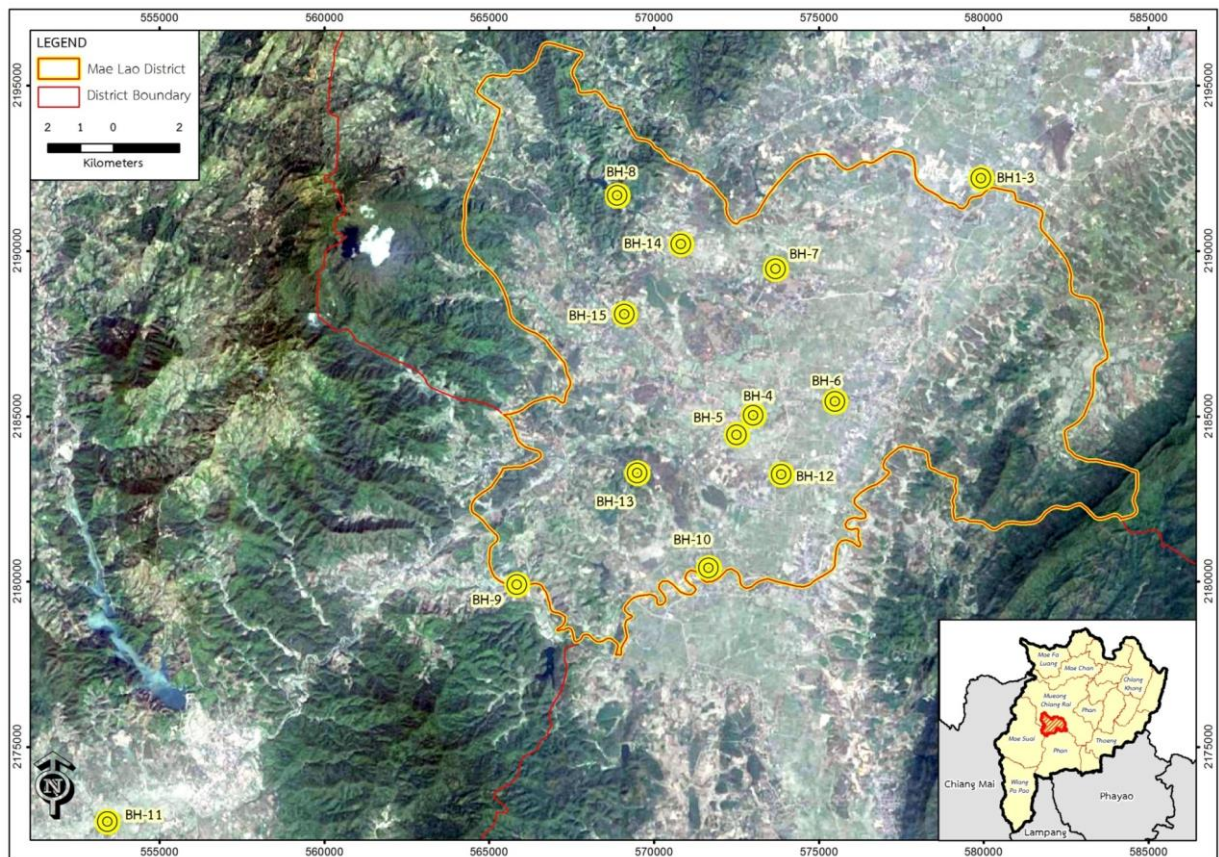


รูปที่ 3-1 ตำแหน่งการสำรวจและทดสอบในสนามบนแผนที่ธรณีวิทยา 1:200,000



รูปที่ 3-2 ตำแหน่งการสำรวจและทดสอบในสนามบนแผนที่ธรณีวิทยา 1:50,000

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 3-3 สรุปตำแหน่งการสำรวจและทดสอบในสนาม

ตารางที่ 3-1 การประเมินและสรุปตำแหน่งการสำรวจและทดสอบในสนาม

หลุมเจาะ	พื้นที่	ลักษณะตะกอน	Liquefaction eyewitness	Distance (km)	Estimates PGA	N	E
BH-1	วัดร่องขุน อ.เมือง	Qff	ไม่เกิด	11.25	0.24	19.8242	99.7632
BH-2	วัดร่องขุน อ.เมือง	Qff	ไม่เกิด	11.25	0.24	19.8242	99.7632
BH-3	วัดร่องขุน อ.เมือง	Qff	ไม่เกิด	11.25	0.24	19.8242	99.7632
BH-4	วัดน้ำล้อม ต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว	Qa	เกิด	1.35	0.60	19.7593	99.6968
BH-5	โรงเรียนบ้านหนองเก้าห้อง ต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว	Qa	เกิด	1.50	0.59	19.7541	99.6921
BH-6	ม.4 บ้านสันกันแฮ้ว ต.จอมหมอกแก้ว อ.แม่ลาว	Qa	เกิด	3.50	0.48	19.7632	99.7201
BH-7	วัดสันตันม่วง ต.ปากอคำ อ.แม่ลาว	Qa	เกิด	5.85	0.38	19.7995	99.7028

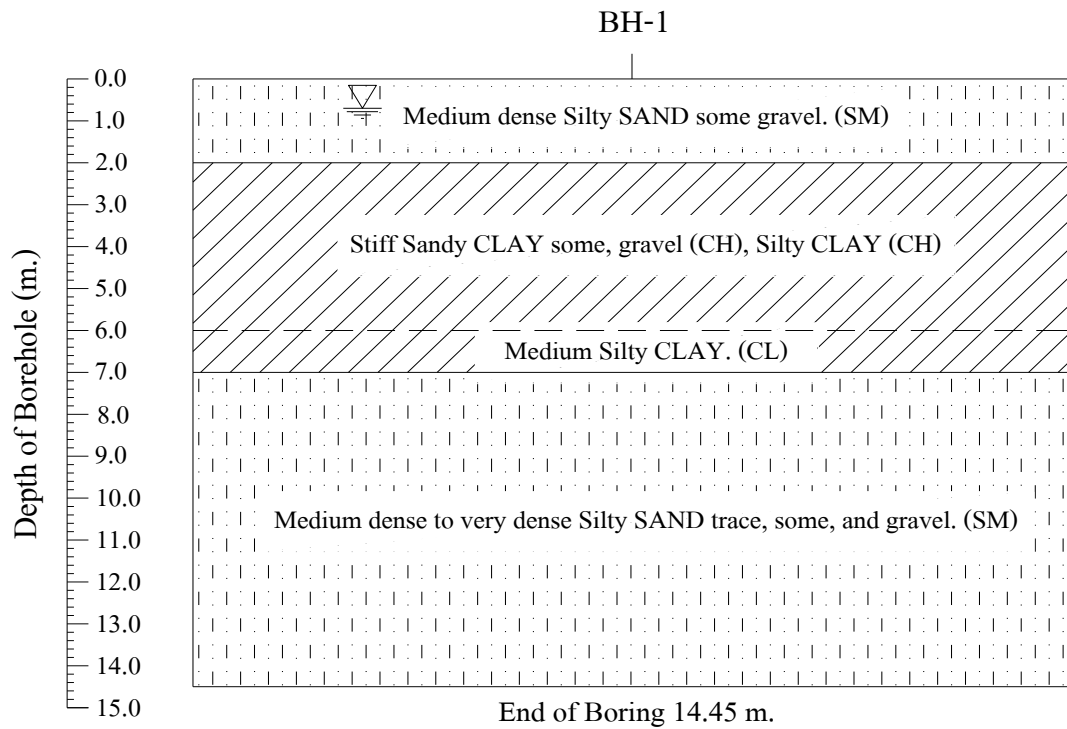
ตารางที่ 3-1 (ต่อ) การประเมินและสรุปตำแหน่งการสำรวจและทดสอบในสนาม

หลุม เจาะ	พื้นที่	ลักษณะ ตะกอน	Liquefaction eyewitness	Distance (km)	Estimates PGA	N	E
BH-8	เขื่อนห้วยแม่มอญ ต.ปากอคำ อ.แม่ลาว	Qa	เกิด	8.70	0.30	19.8190	99.6578
BH-9	ชุมชนโป่งปูเฟือง อ.แม่ลาว	Qa	เกิด	7.90	0.32	19.7129	99.6267
BH-10	โรงเรียนบ้านท่าฮ่อ ต.บ้านทรายขาว อ.พาน	Qa	เกิด	6.60	0.36	19.6873	99.6838
BH-11	วัดท่าแถมจันทน์ ต.ป่าแดด อ.แม่สรวย	Qa	เกิด	6.0*	0.24*	19.6498	99.5092
BH-12	โรงเรียนแม่ลาววิทยาคม ต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว	Siltstone	ไม่เกิด	1.50	0.59	19.7431	99.7050
BH-13	ทางหลวงหมายเลข 118 อ.แม่ลาว	Sandstone / Qt / Qa	ไม่เกิด	4.50	0.43	19.7447	99.6490
BH-14	โรงเรียนโป่งแพร่วิทยา อ. แม่ลาว	Q _t / Q _a	ไม่เกิด	6.60	0.36	19.8063	99.6768
BH-15	สหกรณ์โป่งแพร่ ต.โป่งแพร่ อ.แม่ลาว	Q _t / Q _a	ไม่เกิด	5.50	0.39	19.7875	99.6598

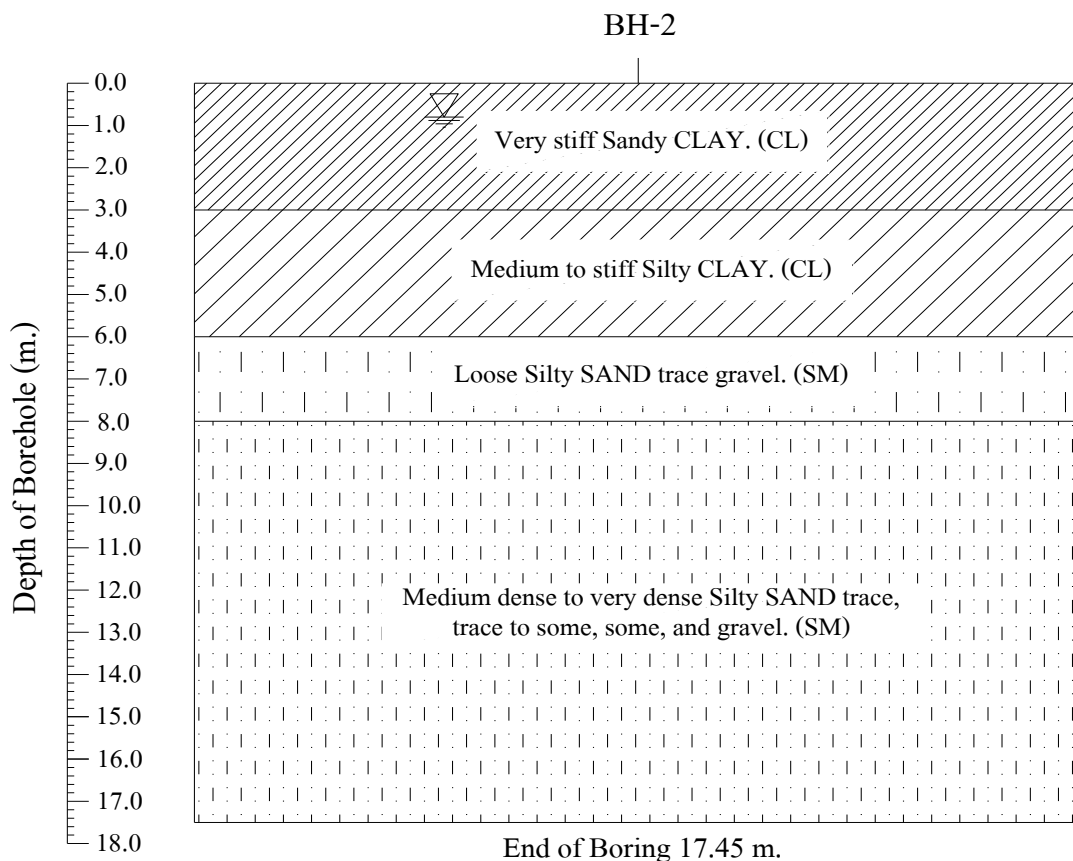
3.2 สรุปผลการเจาะสำรวจและคุณสมบัติพื้นฐานของดิน และลักษณะการวางตัวของชั้นดิน

ผลการเจาะสำรวจดิน (Boring log) และสรุปคุณสมบัติพื้นฐาน (Summary test report) ของหลุมเจาะทั้ง 15 หลุม แสดงไว้ในภาคผนวก ก จากผลการเจาะสำรวจดังกล่าว พบว่าหลุมเจาะมีความลึกตั้งแต่ 7.00-20.00 เมตร ความลึกของหลุมเจาะขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดิน โดยหลุมเจาะที่ตื้นส่วนใหญ่มักเป็นดินกรวดและวางตัวใกล้พื้นที่เชิงเขา ส่วนหลุมเจาะที่เจาะได้ลึกมักเป็นดินที่ไม่แข็ง เช่น ดินเหนียว ดินทราย เป็นต้น และวางตัวในพื้นที่ราบ

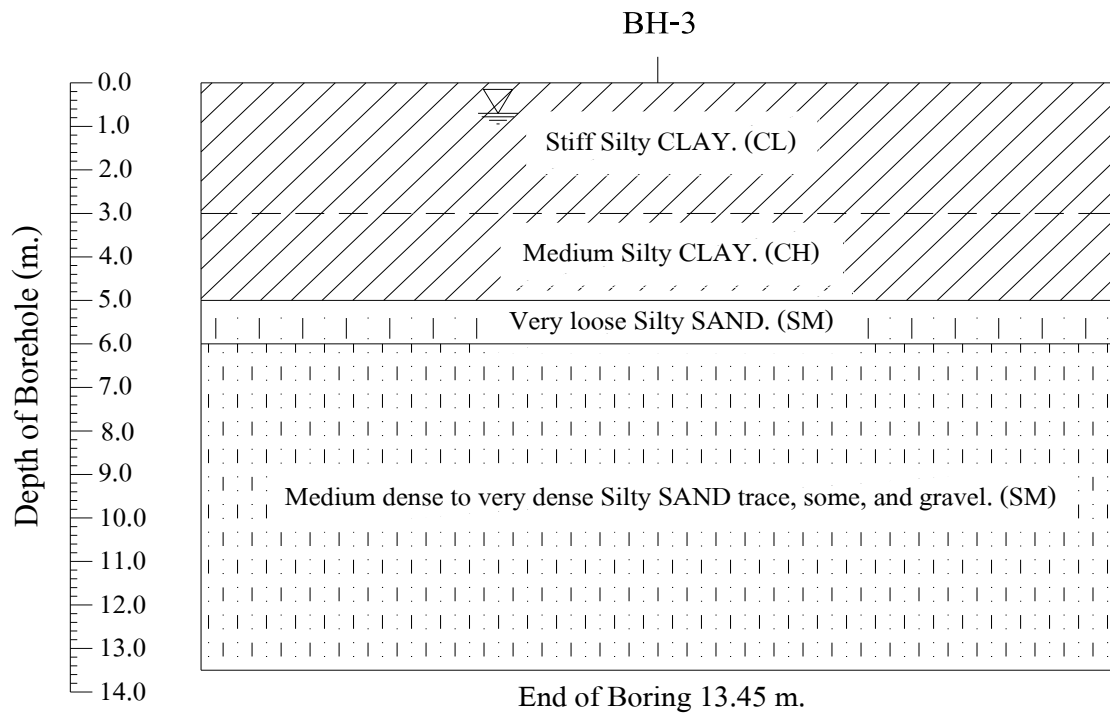
รูปที่ 3-4 ถึง 3-18 แสดงลักษณะการวางตัวของชั้นดินทั้ง 15 หลุม พบว่าลักษณะชั้นดินเกือบทั้งหมดในการศึกษานี้ เป็นชั้นดินทรายที่มีดินประเภทอื่นวางตัวแทรกสลับชั้นกัน (Cap layer) ยกเว้นที่หลุมเจาะ BH-10 มีลักษณะเป็นดินทรายเพียงชนิดเดียว (Pure layer) ซึ่งข้อมูลการวางตัวของชั้นดินและคุณสมบัติดินจะนำไปใช้วิเคราะห์ Liquefaction ในบทถัดไป



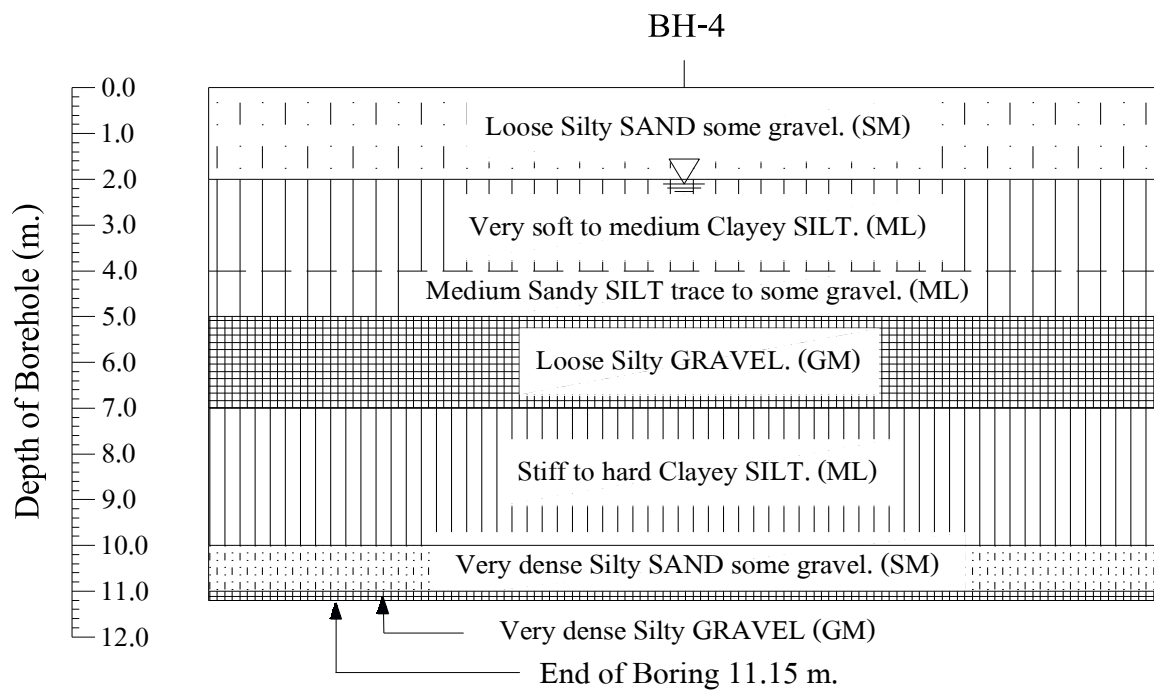
รูปที่ 3-4 สภาพชั้นดิน BH-1 วัดร่องขุน อ.เมือง จ.เชียงราย



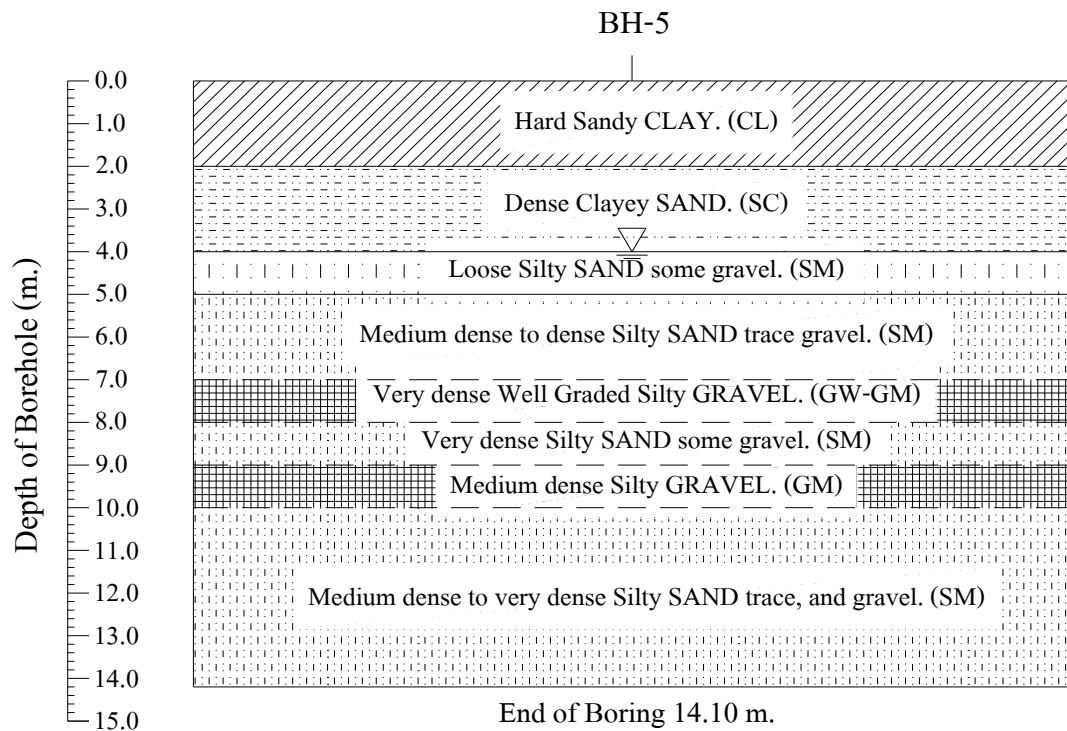
รูปที่ 3-5 สภาพชั้นดิน BH-2 วัดร่องขุน อ.เมือง จ.เชียงราย



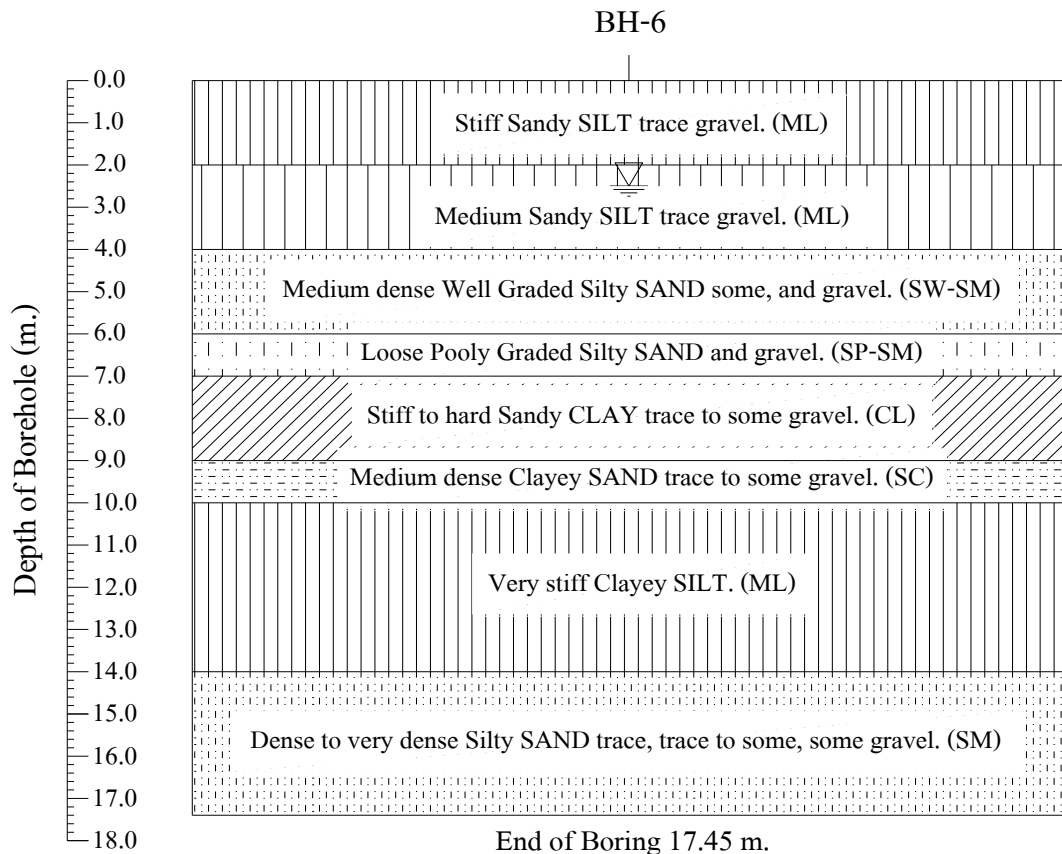
รูปที่ 3-6 สภาพชั้นดิน BH-3 วัดร่องขุน อ.เมือง จ.เชียงราย



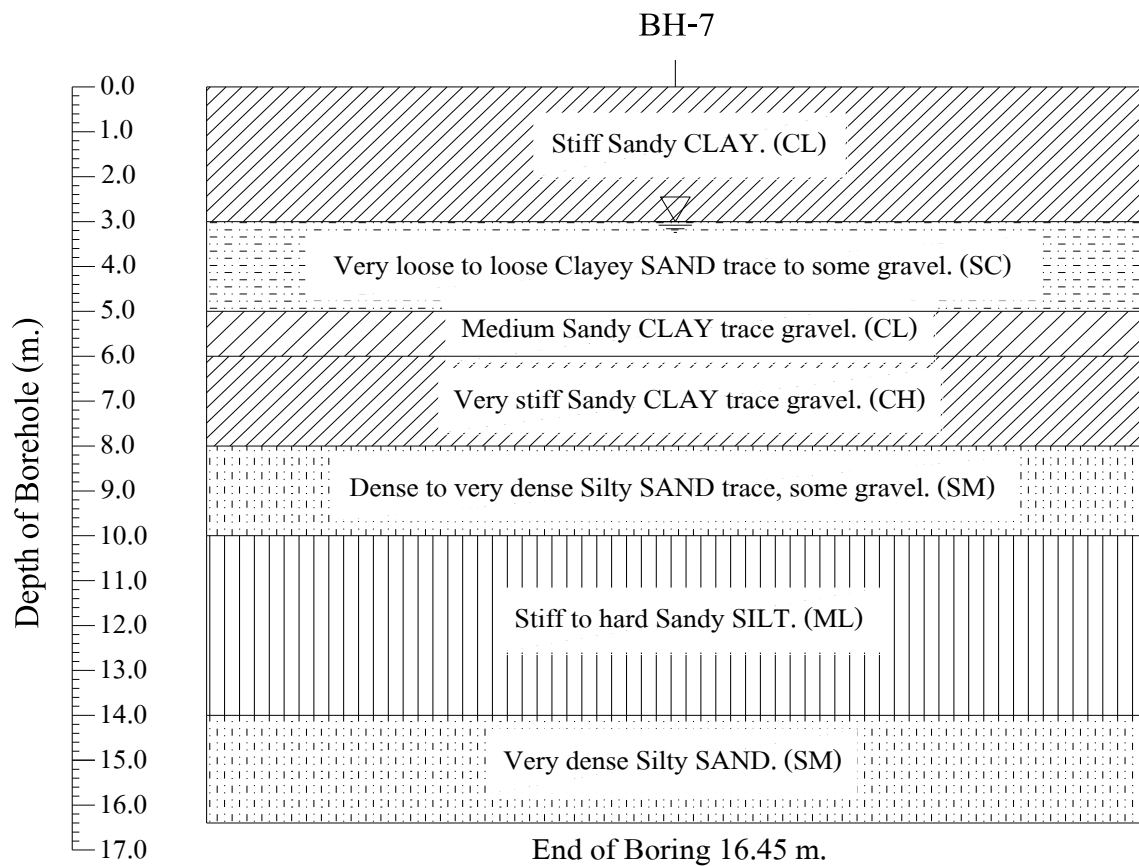
รูปที่ 3-7 สภาพชั้นดิน BH-4 วัดน้ำล้อม ต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย



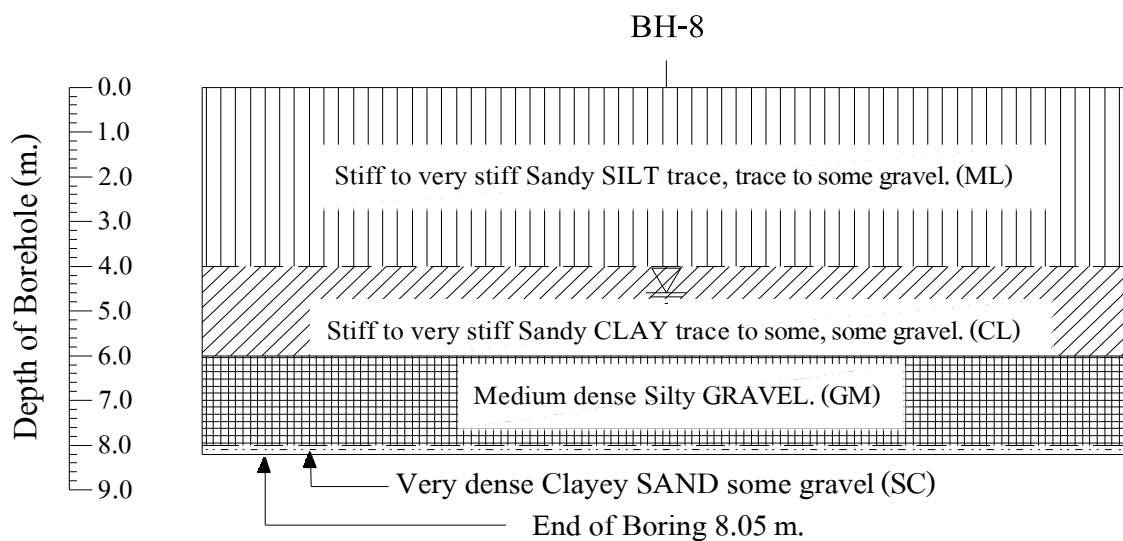
รูปที่ 3-8 สภาพชั้นดิน BH-5 โรงเรียนบ้านหนองเก้าห้อง ต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย



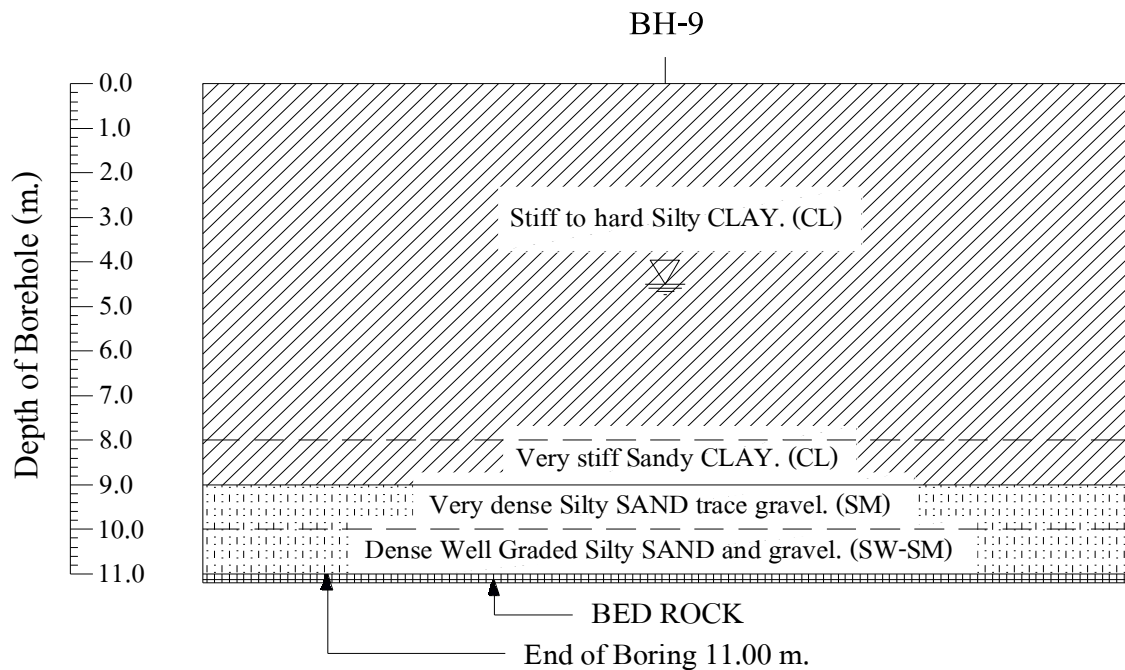
รูปที่ 3-9 สภาพชั้นดิน BH-6 บ้านสันกันแฮ้ว ต.จอมหมอกแก้ว อ.แม่ลาว จ.เชียงราย



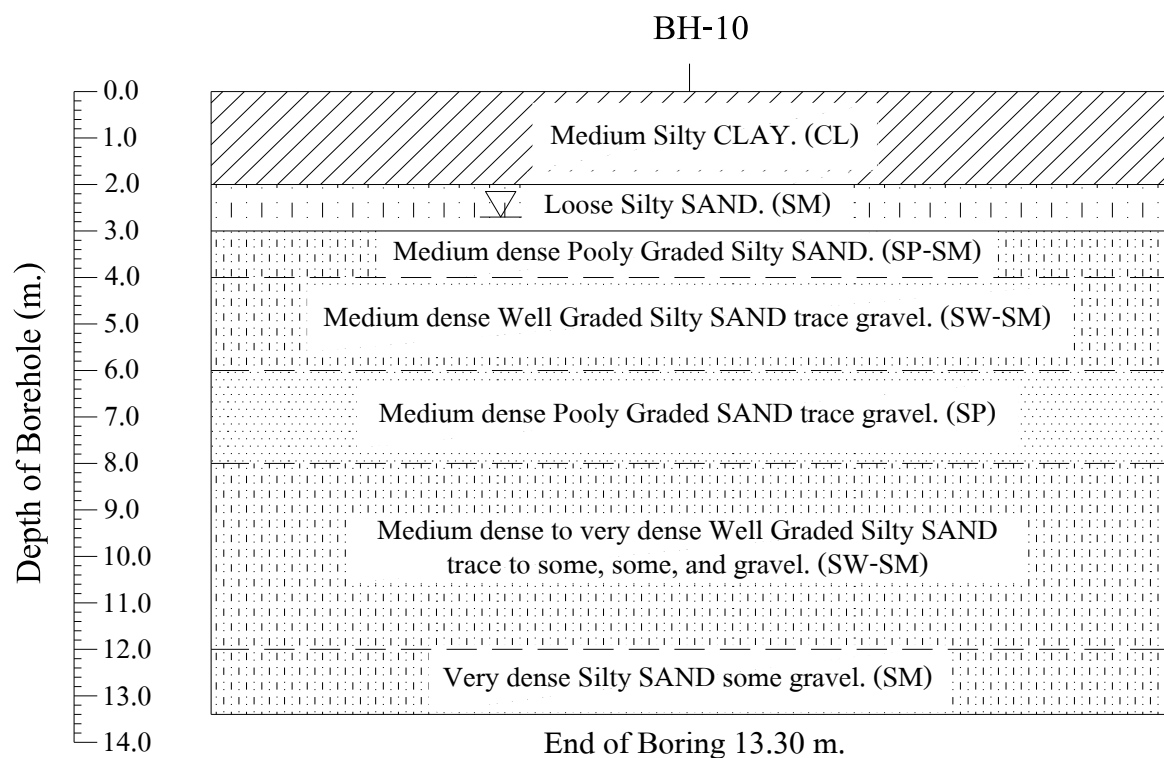
รูปที่ 3-10 สภาพชั้นดิน BH-7 วัดสันตันม่วง ต.ป่าก่อดำ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย



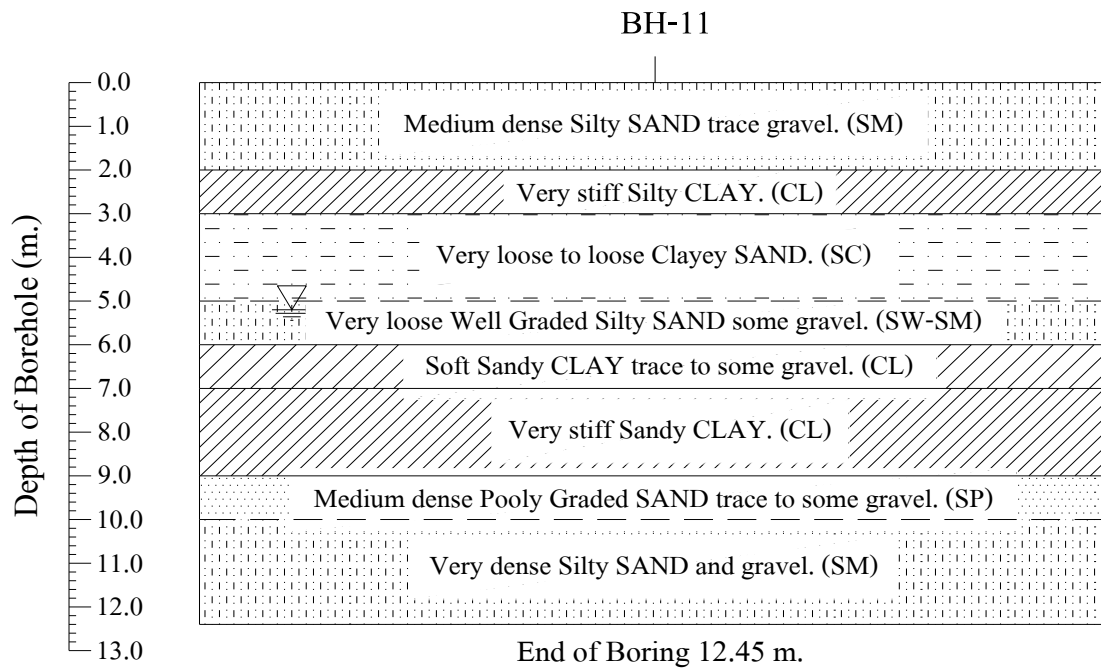
รูปที่ 3-11 สภาพชั้นดิน BH-8 เขื่อนห้วยแม่มอญ ต.ป่าก่อดำ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย



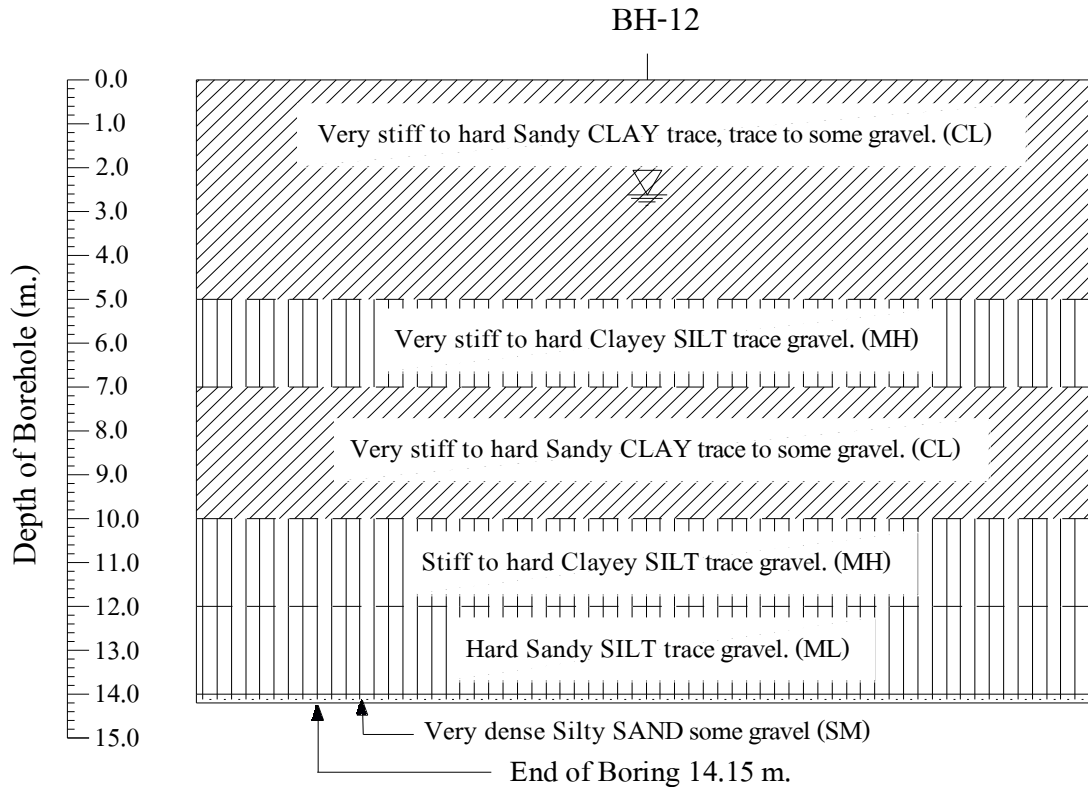
รูปที่ 3-12 สภาพชั้นดิน BH-9 ชุมชนโป่งปูเฟือง อ.แม่ลาวจ.เชียงราย



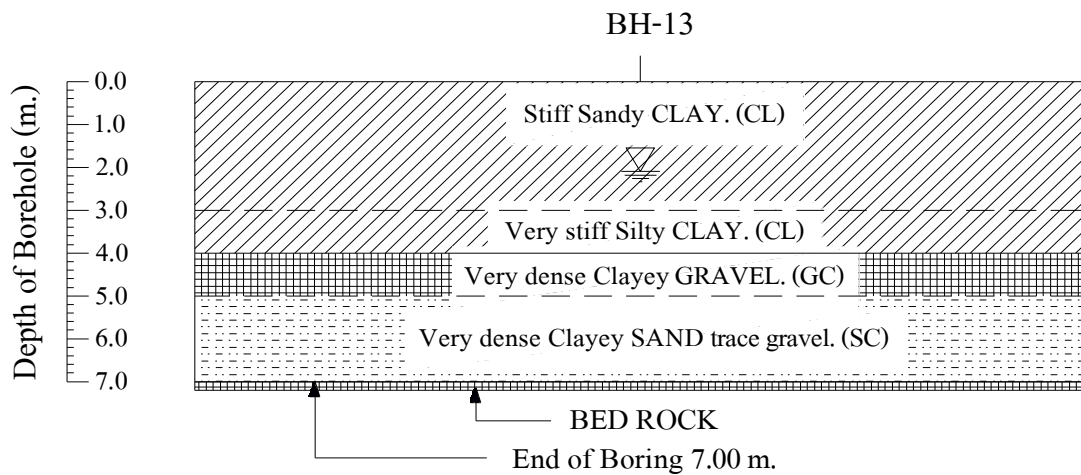
รูปที่ 3-13 สภาพชั้นดิน BH-10 โรงเรียนบ้านท่าฮ้อ ต.บ้านทรายขาว อ.พาน จ.เชียงราย



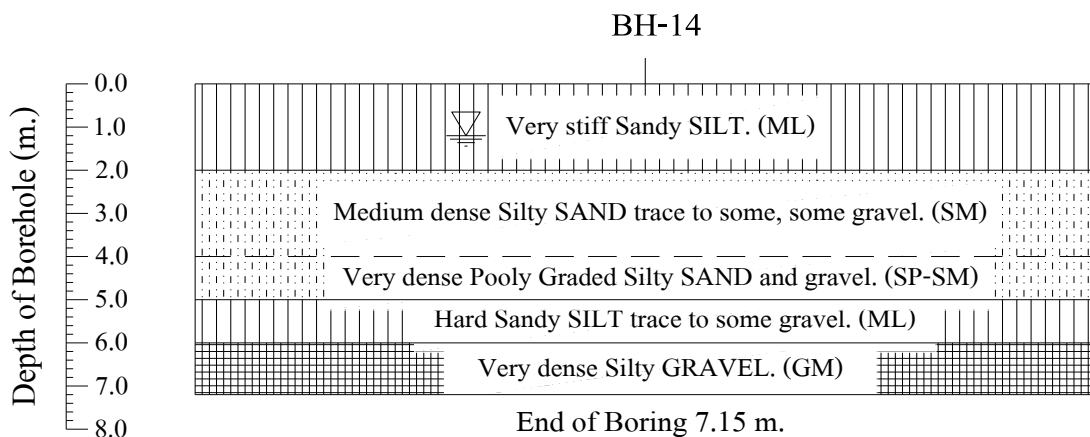
รูปที่ 3-14 สภาพชั้นดิน BH-11 วัดท่าเวกแก่นจันทน์ ต.ป่าแดด อ.แม่สรวย จ.เชียงราย



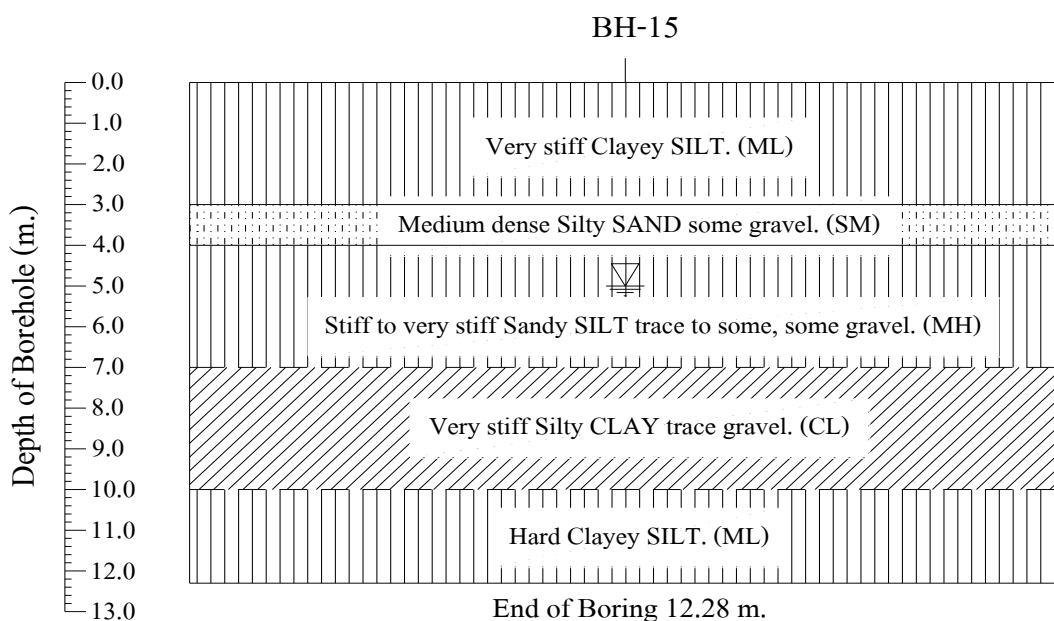
รูปที่ 3-15 สภาพชั้นดิน BH-12 โรงเรียนแม่ลาววิทยาคม ต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย



รูปที่ 3-16 สภาพชั้นดิน BH-13 ถนนสาย 118 อ.แม่ลาว จ.เชียงราย



รูปที่ 3-17 สภาพชั้นดิน BH-14 โรงเรียนโป่งแพร่วิทยา อ.แม่ลาว จ.เชียงราย



รูปที่ 3-18 สภาพชั้นดิน BH-15 สหกรณ์โป่งแพร่ ต.โป่งแพร่ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย

บทที่ 4

ผลการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินต่อการเกิด Liquefaction

นอกจากประเภทของดินและความรุนแรงของอัตราเร่งพื้นดินจากแผ่นดินไหวแล้ว น้ำใต้ดิน (ground water table) เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Liquefaction โดยระดับน้ำใต้ดินที่สูงและสามารถทำให้ดินมีความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated) ก็ย่อมจะมีโอกาสสูงต่อการเกิด Liquefaction ได้ ในบทนี้ได้ศึกษาระดับความสูง-ต่ำของระดับน้ำใต้ดิน และการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินตลอดทั้งปีของแต่ละหลุมเจาะทั้ง 15 หลุม เพื่อนำผลดังกล่าวมาประเมินการเกิด Liquefaction จากอิทธิพลของน้ำใต้ดิน

4.1 หลุมวัดน้ำใต้ดิน

ตำแหน่งของการติดตั้งหลุมวัดน้ำใต้ดิน เป็นตำแหน่งเดียวกันกับการเจาะสำรวจชั้นดิน ดังแสดงไว้ในบทที่ 3 และภาคผนวก ก การติดตั้งหลุมวัดน้ำใต้ดินดำเนินการหลังจากที่เจาะสำรวจและทดสอบดินในสนามแล้วเสร็จ โดยจะติดตั้งท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว ลงไปในหลุม ที่ปลายของท่อ PVC มีการปิดหัวและเจาะรูเพื่อให้น้ำไหลเข้ามาในท่อ ช่วงของการเจาะรูหรือ sensing length อยู่ที่ 2.0 เมตร รอบๆ รูที่เจาะพันด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) เพื่อทำหน้าที่กรองไม่ให้เม็ดดินไหลเข้าไปในท่อ ที่ด้านบนผิวดินติดตั้งโครงเหล็กครอบท่อ PVC ไว้ การอ่านค่าใช้เครื่องมือ Dip meter หย่อนลงไปในหลุม เมื่อ Dip meter สัมผัสน้ำจะส่งสัญญาณ แล้วทำการวัดความลึกของระดับน้ำจากสายวัดที่หย่อนด้วย Dip meter รูปที่ 4-1 แสดงขั้นตอนการติดตั้งและอ่านค่าน้ำใต้ดินแบบ manual

นอกจากการวัดแบบ manual ในงานศึกษานี้ได้ติดตั้งหลุมวัดน้ำและอ่านค่าแบบ real time โดยดำเนินการติดตั้งที่หลุมเจาะ BH-10 ตัวอย่างการติดตั้งแสดงในรูปที่ 4-2 สำหรับขั้นตอนการติดตั้งเหมือนกันกับการวัดแบบ manual แตกต่างกันเพียงการใช้หัว piezometer จำนวน 3 sensor ติดตั้งไว้เพิ่ม พร้อมกันนั้นได้ทำระบบเก็บข้อมูลด้วย Data logger และติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ในการสำรองไฟ สำหรับข้อมูลน้ำใต้ดินสามารถศึกษาได้ผ่าน <http://158.108.44.241/wisserv/util/login.php> ดังแสดงในรูปที่ 4-3

สำหรับตำแหน่งการติดตั้งหัว piezometer มี 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ที่ระดับลึก (Bottom) ระดับต้น (Top) และระดับพื้นดิน (Ground) โดยนอกจากจะวัดการเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ในแต่ละระดับแล้วยังศึกษาอิทธิพลของน้ำผิวดิน (Surface runoff) สามารถไหลซึมรวมกับน้ำใต้ดินได้หรือไม่ เพราะหากน้ำทั้งสองส่วนเชื่อมต่อกัน โอกาสเกิด Liquefaction สามารถเกิดขึ้นได้ง่าย

ดังนั้นเพื่อแยกปริมาณของน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน ณ หลุมเจาะ BH-10 ได้ติดตั้งสถานีวัดน้ำฝนจำนวน 1 สถานี เพื่อวัดปริมาณน้ำฝนที่ตกในบริเวณนั้นดังแสดงในรูปที่ 4-4 ข้อมูลน้ำฝนนำไปใช้หาปริมาณน้ำฝนที่ไหลซึมลงสู่ชั้นดิน



เจาะรู sensing length



ปิดฝาท่อและพันรอบด้วย Geotextile
แล้วหย่อนลงในหลุมเจาะ



ปิดฝาครอบท่อ PVC และทำโครงเหล็กกัน



การอ่านค่าด้วย Dipmeter

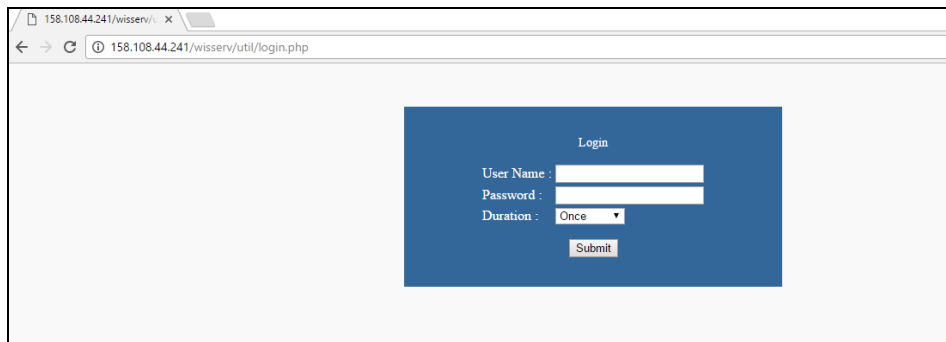
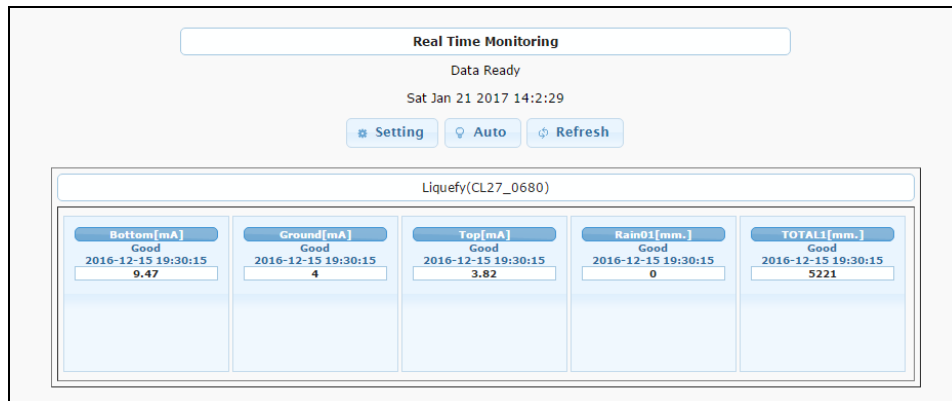
รูปที่ 4-1 ขั้นตอนการติดตั้งหลุมวัดน้ำใต้ดินและการอ่านค่า



รูปที่ 4-2 หลุมวัดน้ำแบบ real time ณ หลุมเจาะ BH-10



รูปที่ 4-3 สถานีวัดน้ำฝนแบบ real time ณ หลุมเจาะ BH-10

Bottom[mA]	Ground[mA]	Top[mA]	Rain01[mm.]	TOTAL1[mm.]
Good	Good	Good	Good	Good
2016-12-15 19:30:15	2016-12-15 19:30:15	2016-12-15 19:30:15	2016-12-15 19:30:15	2016-12-15 19:30:15
9.47	4	3.82	0	5221

Table History

Total Record = 264668

Page Number 1

No.	Date-Time	Liquefy(CL27_0680)				
		Bottom mA	Ground mA	Top mA	Rain01 mm.	TOTAL1 mm.
1	2016-06-02 17:44:53	11.88	3.99	3.98	0.00	0
2	2016-06-02 17:45:53	10.28	3.99	3.98	0.00	0
3	2016-06-02 17:46:53	7.02	3.99	3.98	0.00	0
4	2016-06-02 17:47:53	5.42	3.99	3.98	0.00	0
5	2016-06-02 17:48:53	11.89	3.99	3.98	0.00	0
6	2016-06-02 17:49:53	5.42	3.99	3.98	0.00	0
7	2016-06-02 17:50:53	4.01	3.99	3.98	0.00	0
8	2016-06-02 17:51:53	4.01	3.99	4.02	0.00	0
9	2016-06-02 17:52:53	4.01	3.99	11.86	0.00	0
10	2016-06-02 17:53:53	4.25	3.99	12.14	0.00	0
11	2016-06-02 17:54:53	4.26	3.99	6.10	0.00	0
12	2016-06-02 17:55:53	4.17	3.99	10.33	0.00	0
13	2016-06-02 17:56:53	4.16	3.99	12.23	0.00	0
14	2016-06-02 17:57:53	4.16	3.99	7.59	0.00	0
15	2016-06-02 17:58:53	4.16	3.99	5.43	0.00	0
16	2016-06-02 17:59:53	4.16	4.02	4.05	0.00	0

รูปที่ 4-4 ข้อมูลน้ำใต้ดินและน้ำฝนแบบ real time ณ หลุมเจาะ BH-10

4.2 ข้อมูลการตรวจวัดน้ำใต้ดิน

การตรวจวัดระดับน้ำใต้ดินเริ่มดำเนินการตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ.2559 ถึงเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2560 รวมระยะเวลา 1 ปี (12 เดือน) หลุม OW-1 ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ครบเนื่องจากหลุมเกิดความเสียหาย ส่วนข้อมูลการตรวจวัดระดับน้ำใต้ดินที่ปรับแก้ระดับปากหลุมแล้วของหลุมอื่นๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4-1 และ 4-2 ตามลำดับ ข้อมูลน้ำใต้ดินที่ตรวจวัดตามเวลาของทั้ง 15 หลุม OW แสดงในรูปที่ 4-5 และเมื่อแยกออกเป็นกลุ่มๆ สามารถสรุปได้ใน 3 รูปแบบ คือ

- ระดับน้ำใต้ดินสูงใกล้เคียงระดับผิวดินและคงที่ตลอดทั้งปีที่หลุมวัด OW-4, OW-6, OW-7, OW-12 และ OW-13 ดังแสดงในรูปที่ 4-6 โดยในรอบหนึ่งปีมีโอกาสน้ำใต้ดินสูงกว่าระดับ -2.0 เมตรจากระดับผิวดิน เท่ากับ 95%
- ระดับน้ำใต้ดินอยู่ในระดับต่ำกว่าผิวดินและคงที่ตลอดทั้งปีที่หลุมวัด OW-8, OW-9, OW-14 และ OW-15 ดังแสดงในรูปที่ 4-7 โดยในรอบหนึ่งปีไม่มีโอกาสน้ำใต้ดินสูงกว่าระดับ -2.0 เมตรจากระดับผิวดิน
- ระดับน้ำใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ที่หลุมวัด OW-5, และ OW-10 ดังแสดงในรูปที่ 4-8 โดยในรอบหนึ่งปีมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง ตั้งแต่ 0.0 ถึง -5.0 เมตร จากระดับผิวดิน
- ปัจจุบันไม่สามารถอ่านค่าที่หลุม OW-1 ได้เนื่องจากปัญหาจากหินอุดตันในท่อ และ OW-13 เนื่องจากน้ำท่วมหลุม

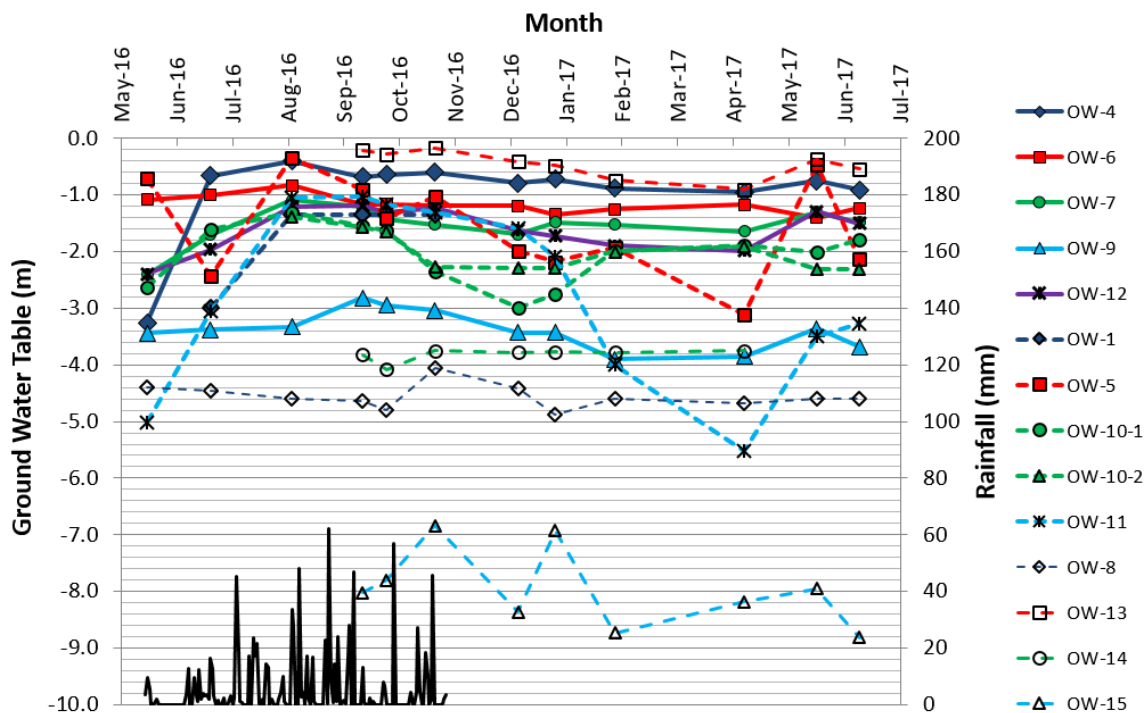
ตารางที่ 4-1 ข้อมูลการตรวจวัดระดับน้ำใต้ดินแบบ Manual ของหลุม OW-1 ถึง OW-9

วันที่ตรวจวัด	OW-1	OW-4	OW-5	OW-6	OW-7	OW-8	OW-9
03/06/2016		-1.260	-0.710	-1.080	-2.402	-4.400	-3.440
07/07/2016	-3.000	-0.660	-2.440	-1.000	-1.702	-4.454	-3.380
20/08/2016	-1.350	-0.400	-0.340	-0.830	-1.092	-4.590	-3.330
27/09/2016	-1.350	-0.680	-0.900	-1.170	-1.212	-4.630	-2.820
10/10/2016	-1.350	-0.640	-1.400	-1.160	-1.422	-4.790	-2.950
05/11/2016	-1.350	-0.600	-1.020	-1.190	-1.522	-4.060	-3.040
20/12/2016	- **	-1.300	-2.460	-1.710	-2.240	-4.910	-3.900
09/01/2017	- **	-1.230	-2.650	-1.860	-2.030	-5.370	-3.900
10/02/2017	- **	-1.390	-2.400	-1.770	-2.070	-5.100	-4.370
21/04/2017	- **	-1.460	-3.580	-1.690	-2.190	-5.170	-4.320
30/05/2017	- **	-1.260	-0.940	-1.920	-1.850	-5.100	-3.830
22/06/2017	- **	-1.420	-2.600	-1.750	-2.030	-5.100	-4.150

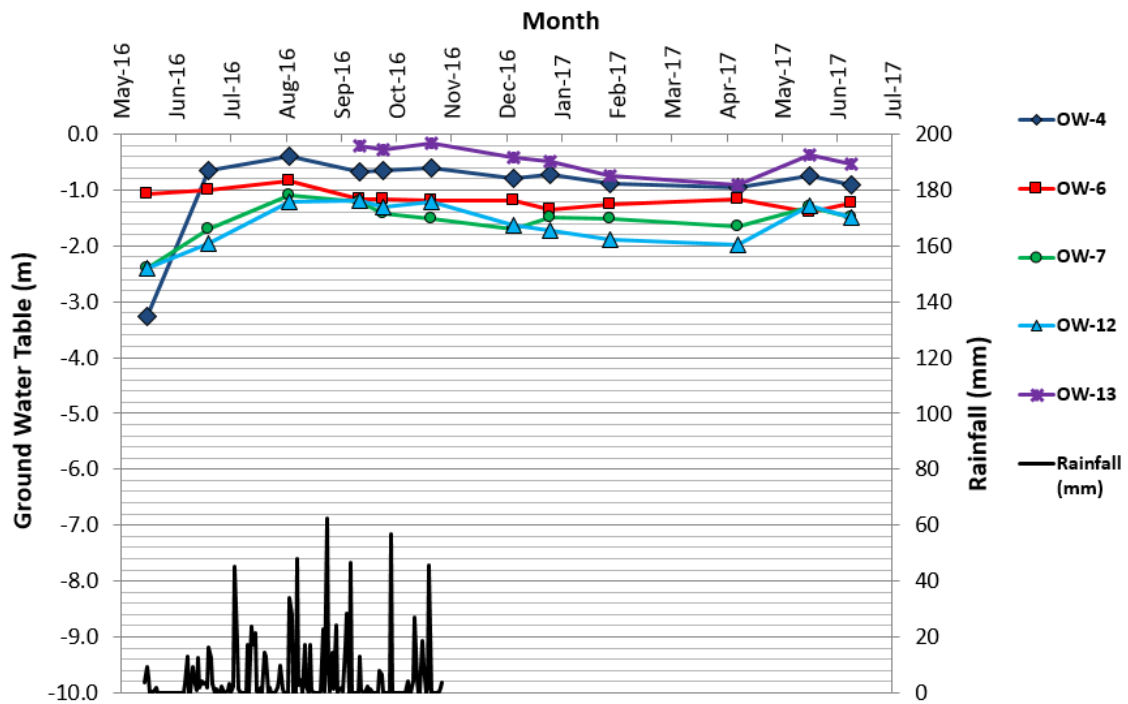
** หลุมวัดน้ำเสียหาย ไม่สามารถอ่านข้อมูลต่อได้

ตารางที่ 4-2 ข้อมูลการตรวจวัดระดับน้ำใต้ดินแบบ Manual ของหลุม OW-10 ถึง OW-15

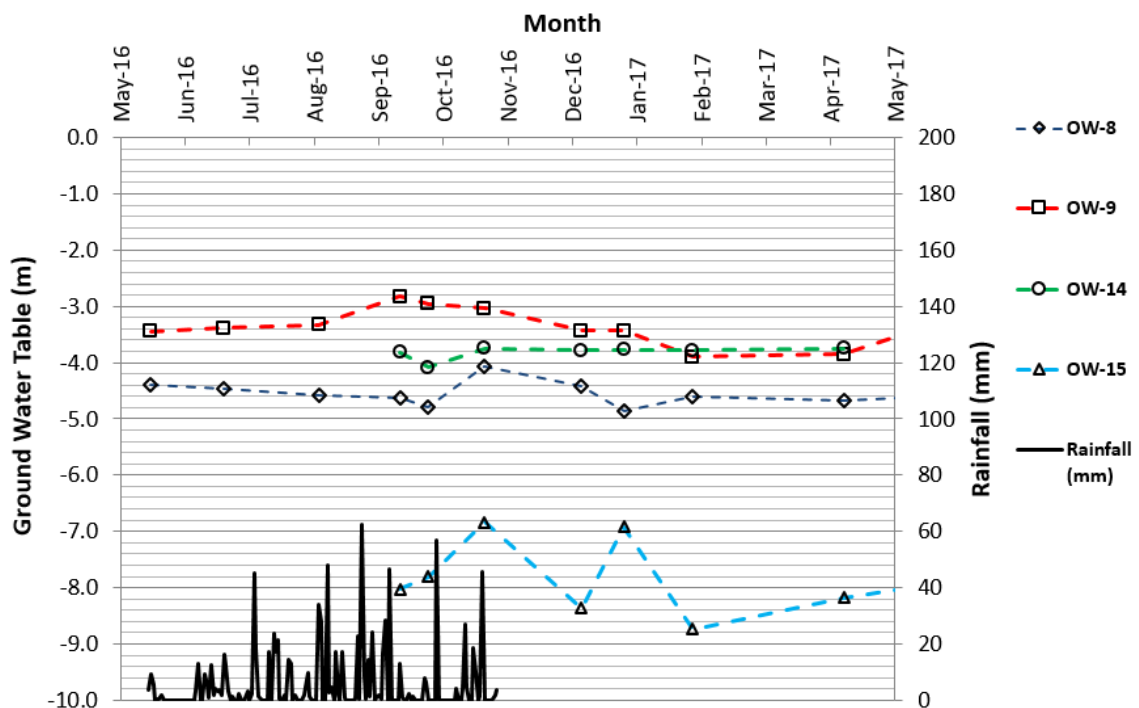
วันที่ตรวจวัด	OW-10/1	OW-10/2	OW-11	OW-12	OW-13	OW-14	OW-15
03/06/2016	-2.640		-5.022	-2.400			
07/07/2016	-1.600		-3.052	-1.960			
20/08/2016	-1.300	-1.390	-1.052	-1.200			
27/09/2016	-1.540	-1.560	-1.032	-1.190	-0.206	-3.820	-8.024
10/10/2016	-1.620	-1.640	-1.172	-1.310	-0.276	-4.080	-7.804
05/11/2016	-2.360	-2.270	-1.302	-1.220	-0.166	-3.750	-6.834
20/12/2016	-3.500	-2.880	-2.030	-2.080	-0.870	-4.300	-8.860
09/01/2017	-3.250	-2.880	-2.530	-2.180	-0.940	-4.290	-7.420
10/02/2017	-2.480	-2.590	-4.450	-2.350	-1.200	-4.300	-9.230
21/04/2017	-2.380	-2.500	-5.960	-2.440	-1.370	-4.270	-8.680
30/05/2017	-2.510	-2.900	-3.950	-1.750	-0.830	-4.290	-8.450
22/06/2017	-2.280	-2.900	-3.720	-1.960	-1.000	-4.310	-9.310



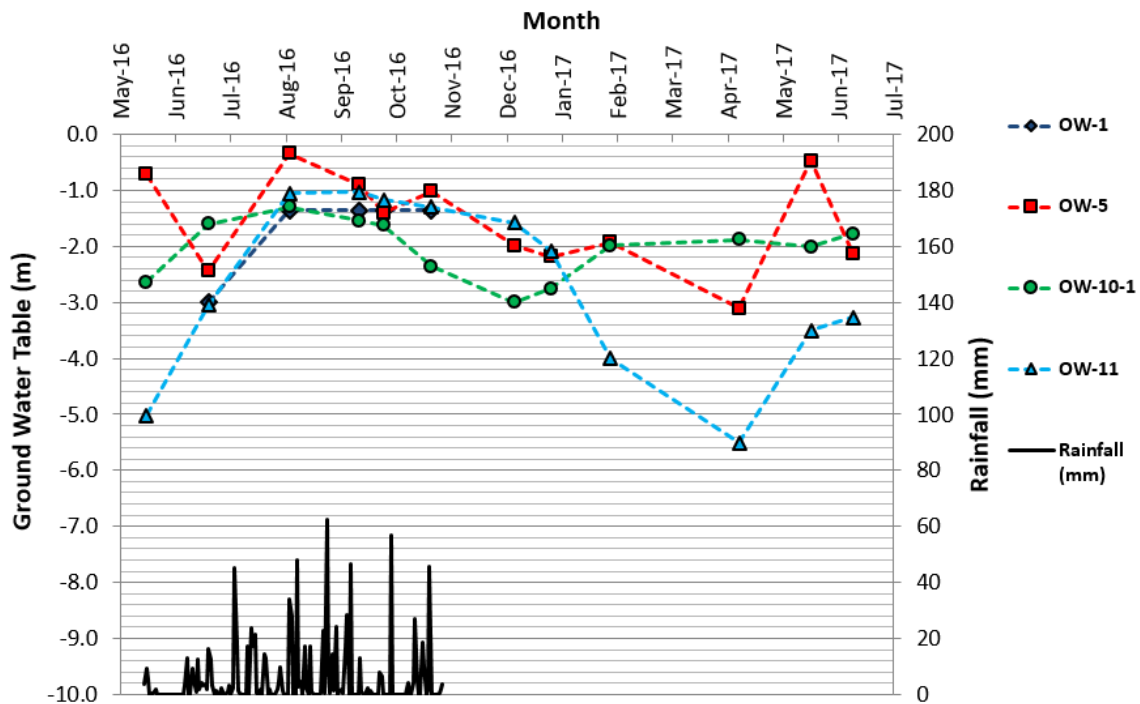
รูปที่ 4-5 ระดับน้ำใต้ตามเวลาที่วัดแบบ manual ของหลุมเจาะ BH-1 ถึง BH-15



รูปที่ 4-6 กลุ่มของระดับน้ำใต้ดินสูงใกล้ถึงระดับผิวดินและคงที่ตลอดทั้งปี

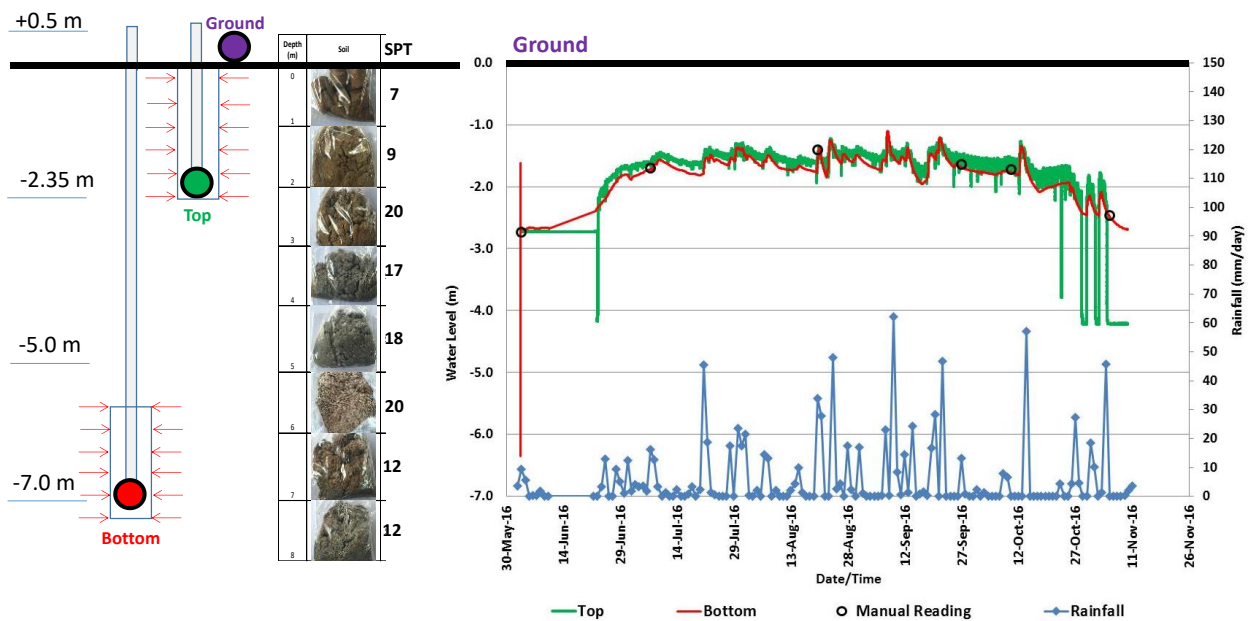


รูปที่ 4-7 กลุ่มของระดับน้ำใต้ดินอยู่ในระดับต่ำจากผิวดินและคงที่ตลอดทั้งปี



รูปที่ 4-8 กลุ่มของระดับน้ำใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลง (fluctuation)

ส่วนรูปที่ 4-9 แสดงผลการตรวจวัดแบบ real time ที่หลุม OW-10 จากผลตรวจวัดพบว่าน้ำใต้ดินที่ตรวจวัดระดับลึกกับระดับตื้นมีการเชื่อมต่องัน ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงสอดคล้องกับระดับน้ำฝน และจากการเปรียบเทียบข้อมูลแบบ manual กับข้อมูลแบบ real time พบว่ามีค่าที่สอดคล้องกัน



รูปที่ 4-9 ระดับน้ำใต้ตามเวลาที่วัดแบบ real time ของหลุมเจาะ BH-10

4.3 สรุปผลการศึกษาระดับน้ำใต้ดิน

4.3.1 น้ำใต้ดินหลุม OW-4 ถึง OW-12 (ยกเว้น OW-8) มีระดับน้ำใต้ดินสูงและเปลี่ยนแปลงขึ้นลง เมื่อเทียบกับระดับผิวดิน ดังนั้นบริเวณนี้สามารถเกิด Liquefaction ได้ง่ายกว่าหลุม OW-14 ถึง BH-15 ที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำและเปลี่ยนแปลงขึ้นลงน้อย

4.3.2 หลุม OW-8 ติดตั้งไว้ที่ไหลเชื่อมฝั่งขวาของเขื่อนห้วยแม่มอญ เป็นวัสดุถม ดังนั้นจึงไม่ใช่ระดับน้ำใต้ดินที่แท้จริง เป็นระดับน้ำที่ขึ้นลงตามระดับในอ่างเก็บน้ำ

4.3.3 หลุม real time OW-10 น้ำใต้ดินที่ตรวจวัดระดับลึกกับระดับตื้นมีการเชื่อมต่อถึงกัน ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงสอดคล้องกับระดับน้ำฝน ดังนั้นโอกาสเกิด Liquefaction ณ บริเวณนี้จึงมีสูง

4.3.4 ข้อมูลน้ำใต้ดินที่ตรวจวัดได้ จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์โอกาสเกิด Liquefaction โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

4.3.5 ผลการศึกษาข้อมูลน้ำใต้ดินจากหลุมวัดน้ำ (observation well) ตลอดระยะเวลา 1 ปี ในพื้นที่ศึกษาอำเภอแม่ลาว พบว่ามีน้ำใต้ดินอยู่ในระดับสูงและมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ตามเวลา โดยเฉพาะในบริเวณที่เป็นพื้นที่ราบ เช่น บริเวณตำบลดงมะตะ และตำบลหมอกแก้ว บริเวณพื้นที่นี้มีโอกาสในการเกิด Liquefaction ค่อนข้างสูง ส่วนบริเวณตำบลโป่งแพร่ ซึ่งเป็นพื้นที่ราบเชิงเขา แม้ระดับน้ำใต้ดินมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ตามเวลา แต่ระดับน้ำค่อนข้างต่ำจากผิวดิน โอกาสในการเกิด Liquefaction มีน้อย

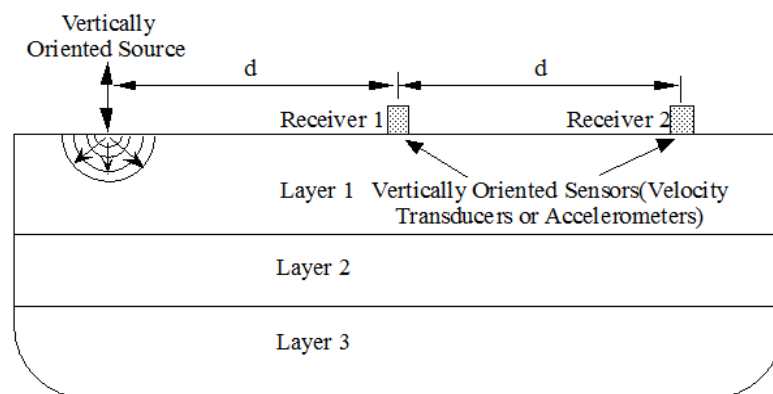
บทที่ 5

การศึกษาการเกิด Liquefaction จากการทดสอบ Shear Wave Velocity

5.1 การทดสอบ Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)

การทดสอบ Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) เป็นการทดสอบในสนามที่ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นโดย University of Texas at Austin (Nazarian and Stokoe, 1983 และ Stokoe et al. 1994) การทดสอบ SASW เป็นวิธีที่อาศัยคุณสมบัติการกระจายตัวของคลื่นเรย์ลี (Dispersive Characteristic of Rayleigh Waves) ในการพิจารณาความแตกต่างของความเร็วคลื่นเนื่องที่ความลึกต่างๆ กัน

วิธีการทดสอบ SASW สามารถดำเนินการได้ที่ผิวดิน ทำให้วิธีการทดสอบนี้ไม่มีความจำเป็นต้องเจาะหลุมลึกหรือนับเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งสามารถดำเนินการได้ง่ายเนื่องจากอุปกรณ์ที่ต้องใช้ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดคลื่นแบบกระทบ (Impact Source) และเครื่องรับสัญญาณคลื่นเพียง 2 เครื่อง ซึ่งลักษณะการติดตั้งเครื่องมือทดสอบนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการทดสอบ SASW (Bay, 2002)

หลักการทดสอบด้วยวิธี SASW นั้นต้องมีการสร้างคลื่นที่มีความยาวคลื่น (ความถี่) แตกต่างกันไป วัดค่าความเร็วคลื่นที่ค่าความถี่ต่างๆ เนื่องจากคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้น (ความถี่สูง) จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนบริเวณใกล้เคียงกับผิวดิน ส่วนคลื่นที่มีความยาวคลื่นยาว (ความถี่ต่ำ) จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนในระดับลึกลงไป ดังนั้นจึงต้องมีการใช้แหล่งกำเนิดคลื่นขนาดต่างๆ เพื่อที่จะสร้างคลื่นที่มีความถี่แตกต่างกันได้

การวิเคราะห์ผลการทดสอบนั้นสามารถกระทำได้โดยการนำสัญญาณคลื่นที่วัดได้ใน Time Domain มาแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างเฟสระหว่างตัวรับสัญญาณทั้งสอง (รูปที่ 5-2) เพื่อคำนวณหาความเร็วคลื่นผิวดิน (Rayleigh Waves) ของวัสดุที่ค่าความถี่ต่างๆ กัน ซึ่งเรียกว่า Dispersion Curve โดยสมการสำหรับการคำนวณค่าความเร็วคลื่นผิวดินแสดงไว้ดังสมการที่ 5-1 และ 5-2

จากนั้นจะสามารถวิเคราะห์ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับความลึกต่าง ๆ ซึ่งเรียกว่า Shear Wave Velocity Profile (รูปที่ 5-3) ได้ด้วยวิธี Forward Modeling

$$\lambda_R = d * \left(\frac{360}{\phi_{21}} \right) \quad (5-1)$$

$$v_R = f * \lambda_R \quad (5-2)$$

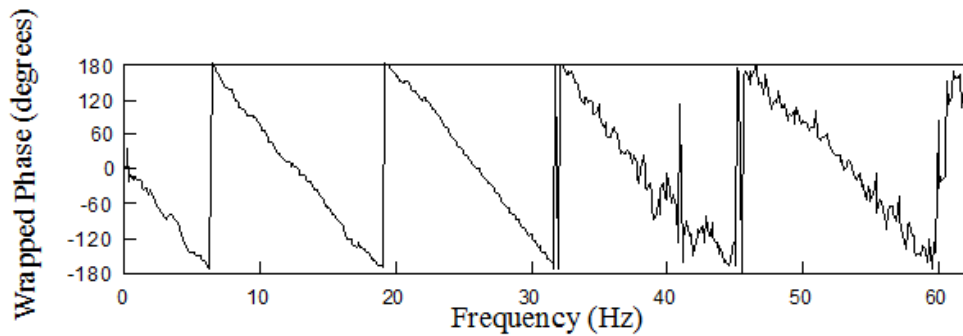
เมื่อ λ_R = ความยาวคลื่น Rayleigh Waves

d = ระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณทั้งสอง

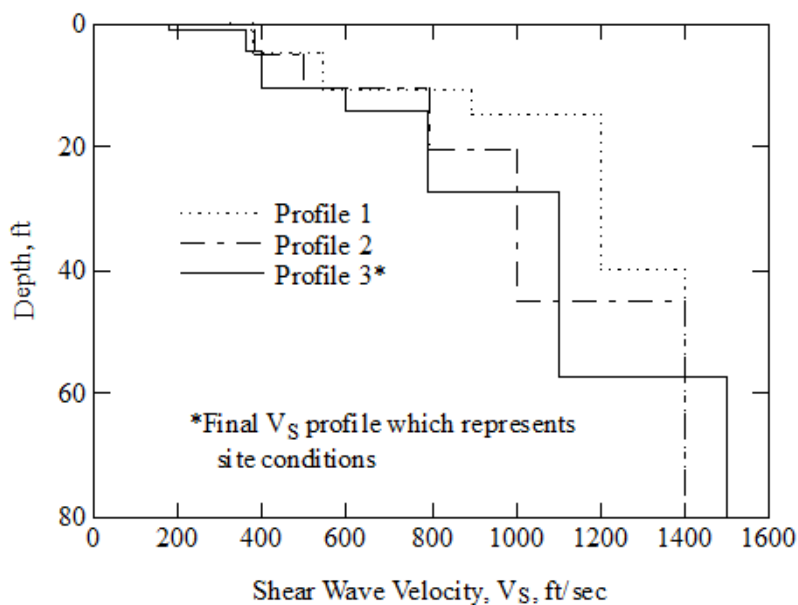
ϕ_{21} = ความแตกต่างเฟสระหว่างตัวรับสัญญาณทั้งสอง

v_R = ความเร็วคลื่น Rayleigh Waves

f = ความถี่



รูปที่ 5-2 ตัวอย่าง Phase Spectrum จากตัวรับสัญญาณคลื่นทั้งสอง (Bay, 2002)



รูปที่ 5-3 ตัวอย่าง Shear Wave Velocity Profile (Bay, 2002)

5.2 การทดสอบ SASW บริเวณอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

การทดสอบ SASW เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการเกิดสภาวะ Liquefaction บริเวณอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ได้ดำเนินการทดสอบระหว่างวันที่ 6-10 มิถุนายน พ.ศ. 2559 เป็นจำนวนทั้งสิ้น 15 ตำแหน่ง สำหรับตำแหน่งทดสอบ SASW เป็นตำแหน่งใกล้กับตำแหน่งการเจาะสำรวจและติดตั้งหลุมวัดน้ำ ดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 5-1 โดยการทดสอบนั้นใช้ระยะห่าง (Spacing) ระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นกับตัวรับสัญญาณตัวที่ 1 และระหว่างตัวรับสัญญาณตัวที่ 1 กับตัวรับสัญญาณตัวที่ 2 ตั้งแต่ 0.5-30 เมตร แหล่งกำเนิดคลื่นที่ใช้ (รูปที่ 5-4) ประกอบไปด้วยค้อนปอนด์ เพื่อสร้างคลื่นความถี่สูงสำหรับทดสอบชั้นดินตื้นและตุ้มน้ำหนักขนาด 100 กิโลกรัม เพื่อสร้างคลื่นความถี่ต่ำสำหรับทดสอบชั้นดินที่ลึกลงไปเท่านั้น ตัวรับสัญญาณที่ใช้ได้แก่ 4.5-Hz Geophone และเครื่องประมวลสัญญาณ (Spectrum Analyzer) ที่ใช้ได้แก่รุ่น Quattro ผลิตโดยบริษัท Dataphysics แสดงในรูปที่ 5-5

ตารางที่ 5-1 รายละเอียดการทดสอบ SASW บริเวณอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

ตำแหน่ง	สถานที่	พิกัด		หมายเหตุ
		N	E	
Vs 1	วัดร่องขุ่น (ลานจอดรถ)	19.823095	99.762140	
Vs 3	วัดร่องขุ่น	19.824534	99.763285	
Vs 4	วัดน้ำล้อม	19.759151	99.697129	
Vs 5	โรงเรียนบ้านหนองเก่าห้อง	19.754383	99.692171	
Vs 6	บ้านสันกันแฮว	19.763687	99.720268	
Vs 7	วัดสันตันม่วง	19.799597	99.703626	
Vs 8	เขื่อนห้วยแม่มอญ (ไหล่เขาด้านขวา)	19.819817	99.657889	ทดสอบ 2 จุด
Vs 9	ชุมชนโป่งปูเฟื่อง (หมู่บ้านหนองผำ)	19.712954	99.628431	
Vs 10	โรงเรียนบ้านทรายขาว	19.687402	99.684394	
Vs 11	วัดท่าแว่นจันทร์	19.648839	99.509686	
Vs 12	โรงเรียนแม่ลาววิทยาคม	19.743119	99.705309	
Vs 13	ถนนเส้น 118	19.744258	99.663354	
Vs 14	โรงเรียนโป่งแพร่วิทยา	19.806892	99.676598	
Vs 15	สหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพร่	19.787483	99.659824	



รูปที่ 5-4 แหล่งกำเนิดคลื่นประเภทค้อนปอนด์และค้อนน้ำหนักขนาด 100 กิโลกรัม



รูปที่ 5-5 ตัวรับสัญญาณคลื่นประเภท 4.5-Hz Geophone และเครื่องประมวลสัญญาณ (Spectrum Analyzer)

5.2.1 ตำแหน่ง Vs 1 วัดร่องซุ่น (ลานจอดรถด้านทิศใต้)

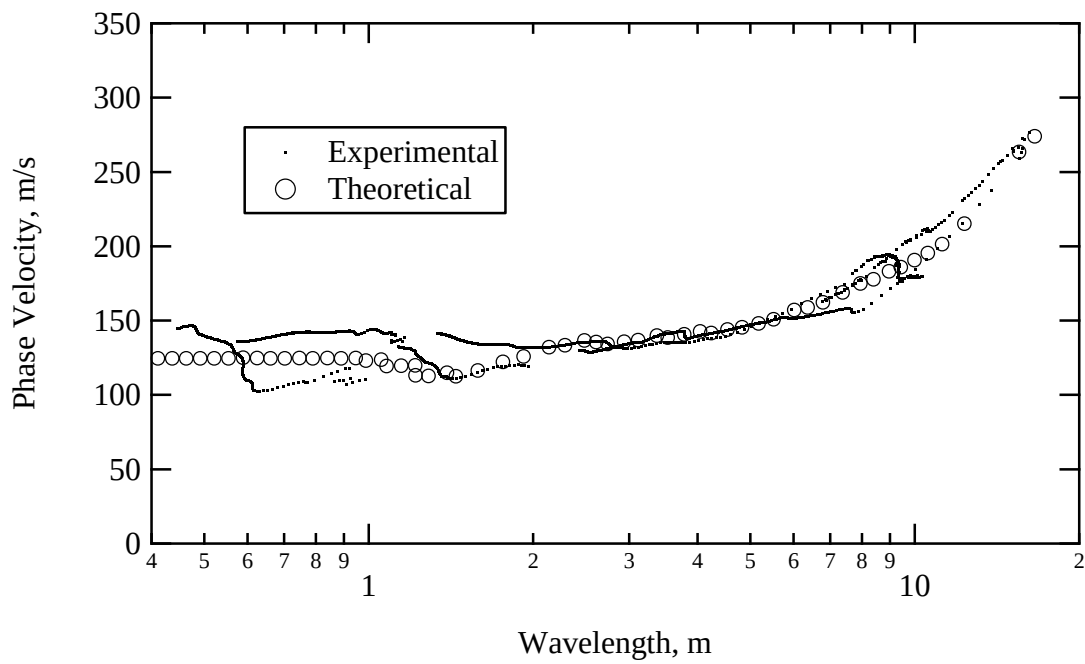
การทดสอบ SASW บริเวณลานจอดรถด้านทิศใต้ของวัดร่องซุ่น ที่พิกัด N : 19.823095, E : 99.762140 แสดงดังรูปที่ 5-6 ระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ตั้งแต่ 0.5-16 เมตร โดยรูปที่ 5-7 แสดงภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างาน จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ตรวจวัดในสนามจะได้ Dispersion Curves (กราฟระหว่างค่าความเร็วคลื่นกับความยาวคลื่น Rayleigh Waves) แสดงไว้ในรูปที่ 5-8 และจากการคำนวณด้วยวิธี Forward Modeling จะสามารถหาค่า Shear Wave Velocity Profiles ได้ดังแสดงในรูปที่ 5-9 ตารางที่ 5-2 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชั้นดิน 2.0 เมตรแรกมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 150 เมตร/วินาที และที่ระดับ 3.0-5.0 เมตร มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 200 เมตร/วินาที ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าเป็นดินที่สามารถเกิดปรากฏการณ์ Liquefaction ได้



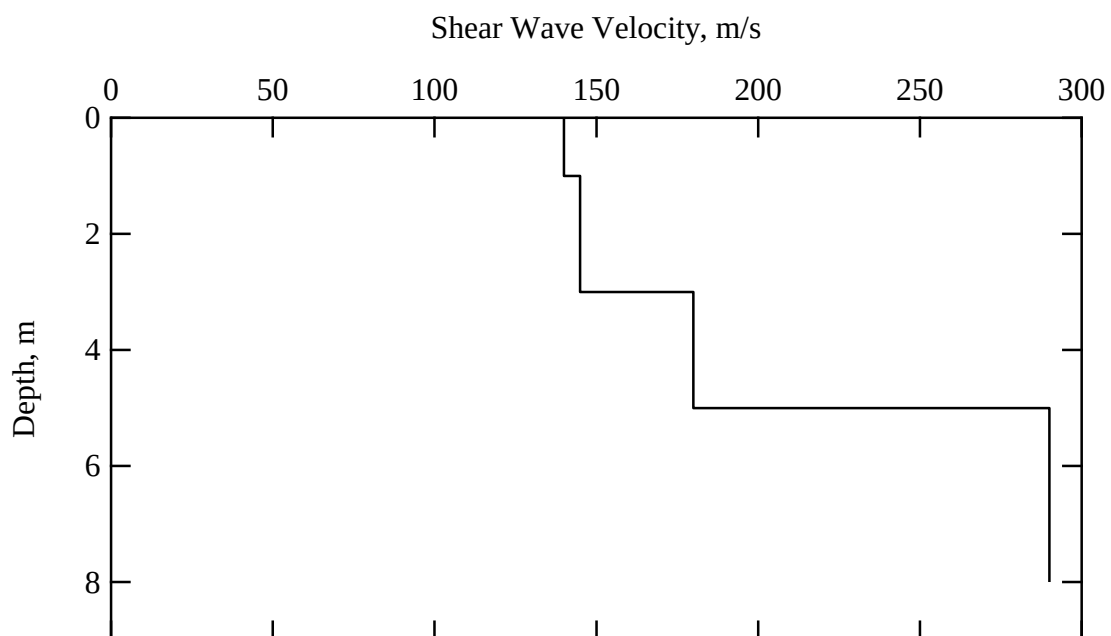
รูปที่ 5-6 ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณลานจอดรถด้านทิศใต้ของวัดร่องขุน



รูปที่ 5-7 ภาพถ่ายภาพการทดสอบ SASW บริเวณลานจอดรถด้านทิศใต้ของวัดร่องขุน



รูปที่ 5-8 Dispersion Curves บริเวณลานจอดรถด้านทิศใต้ของวัดร่องขุน



รูปที่ 5-9 Shear Wave Velocity Profile บริเวณลานจอดรถด้านทิศใต้ของวัดร่องขุน

ตารางที่ 5-2 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณลานจอดรถด้านทิศใต้ของวัดร่องขุน

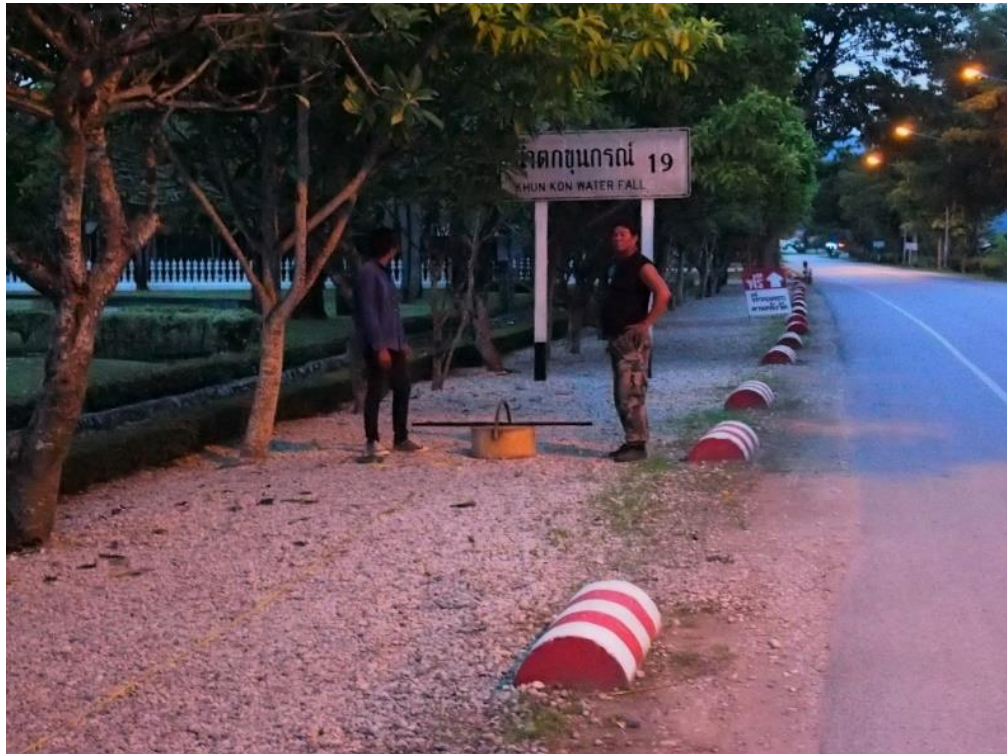
Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	1	140	262	0.3	1.8
1	2	145	1500	0.495	1.8
3	2	180	1500	0.493	2.0
5	3	290	1500	0.481	2.0

5.2.2 ตำแหน่ง Vs 3 วัดร่องขุน (ถนนสาย 1208)

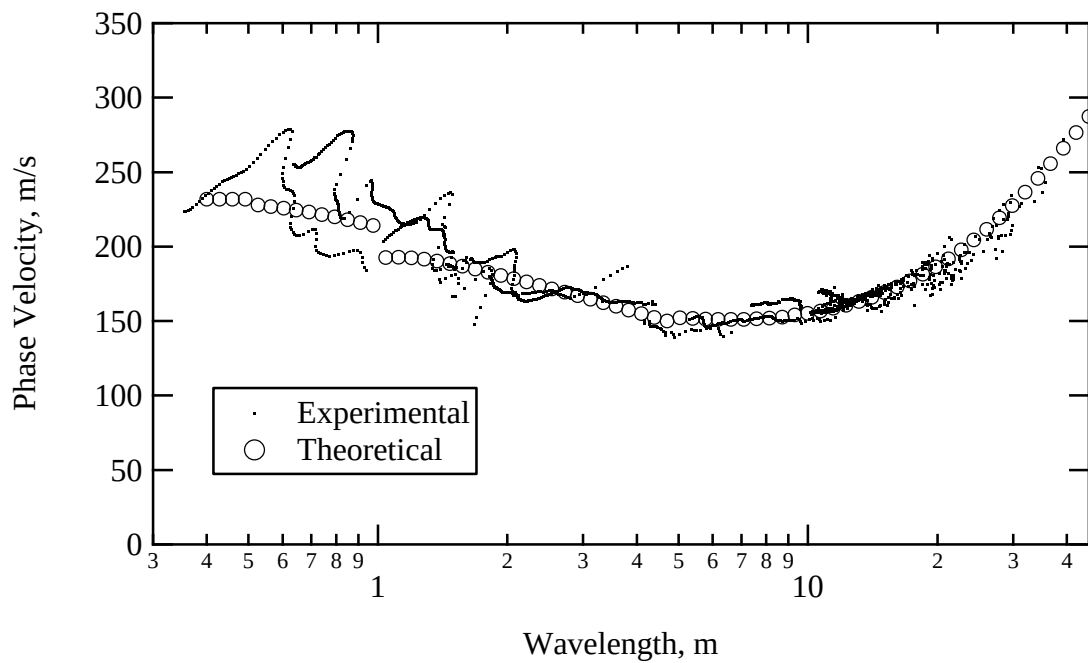
การทดสอบ SASW อีกตำแหน่งหนึ่งที่วัดร่องขุน บริเวณไหล่ทางของถนนสาย 1208 ซึ่งอยู่ด้านทิศเหนือของวัดร่องขุน ดังแสดงในรูปที่ 5-10 โดยพิกัดทดสอบได้แก่ N : 19.824534 , E : 99.763285 ระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ตั้งแต่ 0.5-20 เมตร ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างานแสดงไว้ในรูปที่ 5-11 ส่วน Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles ของตำแหน่งทดสอบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 5-12 รูปที่ 5-13 และตารางที่ 5-3 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ชั้นดินด้านบน ซึ่งคาดว่าเป็นส่วนของไหล่ทางถนนหลัก ส่วนชั้นดินเดิมนั้นพบว่ามีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 200 เมตร/วินาที จนถึงระดับความลึกประมาณ 9 เมตร จากนั้นความเร็วคลื่นจึงเริ่มสูงขึ้นตามระดับความลึกของชั้นดิน



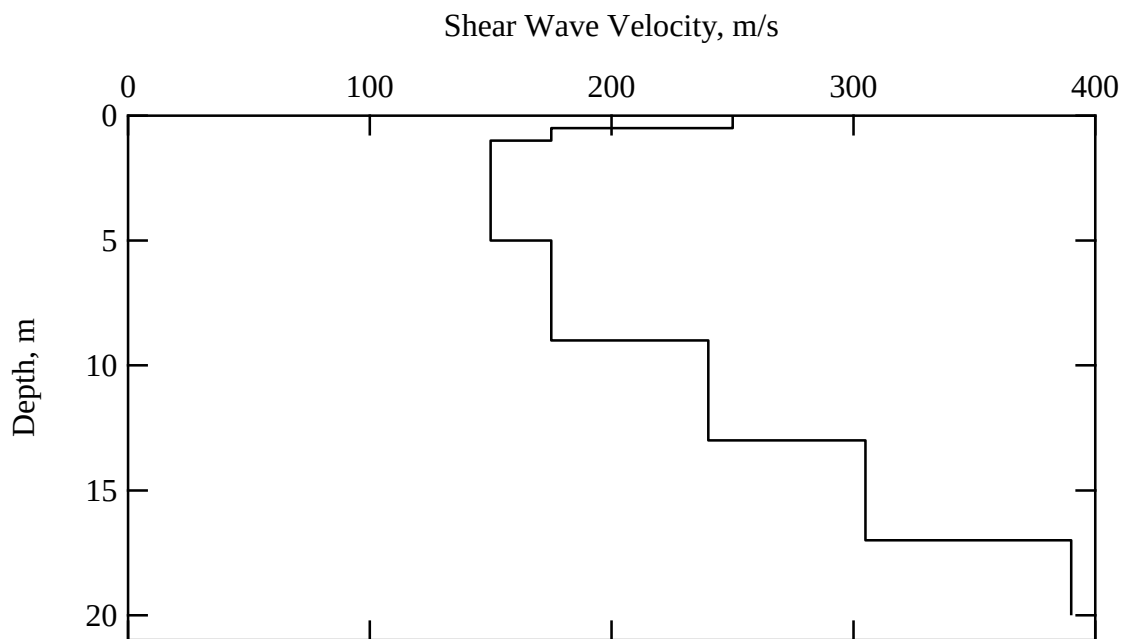
รูปที่ 5-10 ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 1208 ด้านทิศเหนือของวัดร่องขุน



รูปที่ 5-11 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 1208 ด้านทิศเหนือของวัดร่องขุน



รูปที่ 5-12 Dispersion Curves บริเวณถนนสาย 1208 ด้านทิศเหนือของวัดร่องขุน



รูปที่ 5-13 Shear Wave Velocity Profile บริเวณถนนสาย 1208 ด้านทิศเหนือของวัดร่องขุน

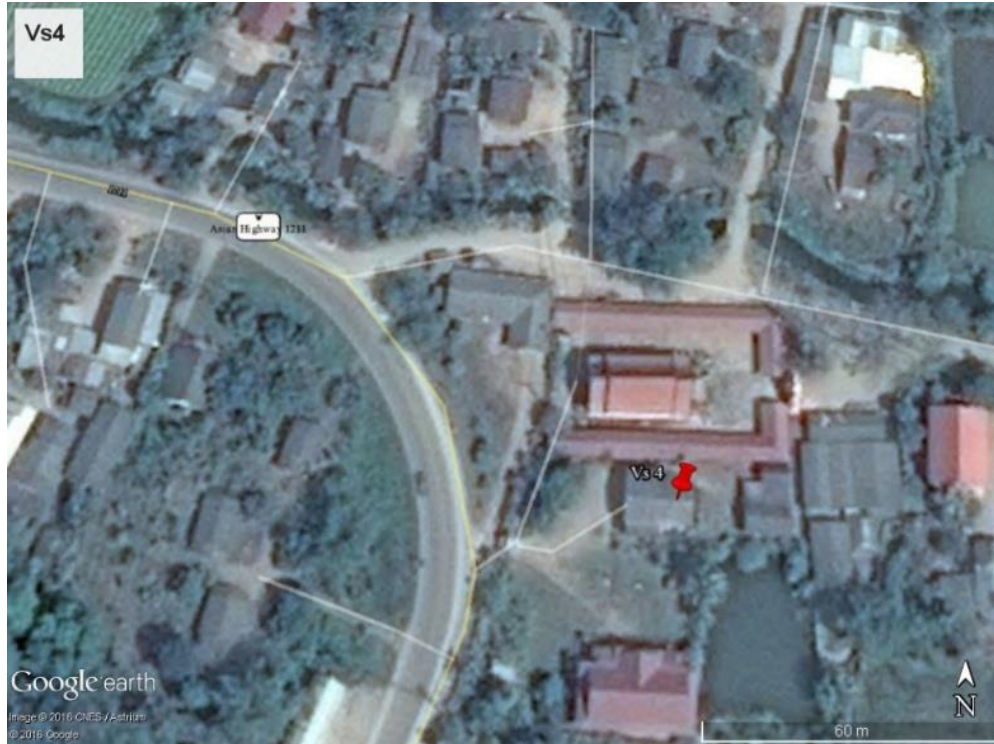
ตารางที่ 5-3 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณถนนสาย 1208 ด้านทิศเหนือของวัดร่องขุน

Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	0.5	250	468	0.300	2.0
0.5	0.5	175	327	0.300	2.0
1	4	150	1500	0.495	1.8
5	4	175	1500	0.493	2.0
9	4	240	1500	0.487	2.0
13	4	305	1500	0.478	2.0
17	3*	390	1500	0.464	2.0

5.2.3 ตำแหน่ง Vs 4 วัดน้ำล้อม

การทดสอบ SASW บริเวณวัดน้ำล้อมแสดงตำแหน่งทดสอบไว้ในรูปที่ 5-14 ทั้งนี้ก็ทดสอบได้แก่ N : 19.759151, E : 99.697129 และระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบคือ 0.5-20 เมตร รูปที่ 5-15 แสดงภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างาน ส่วนรูปที่ 5-16 รูปที่ 5-17 และตารางที่ 5-4

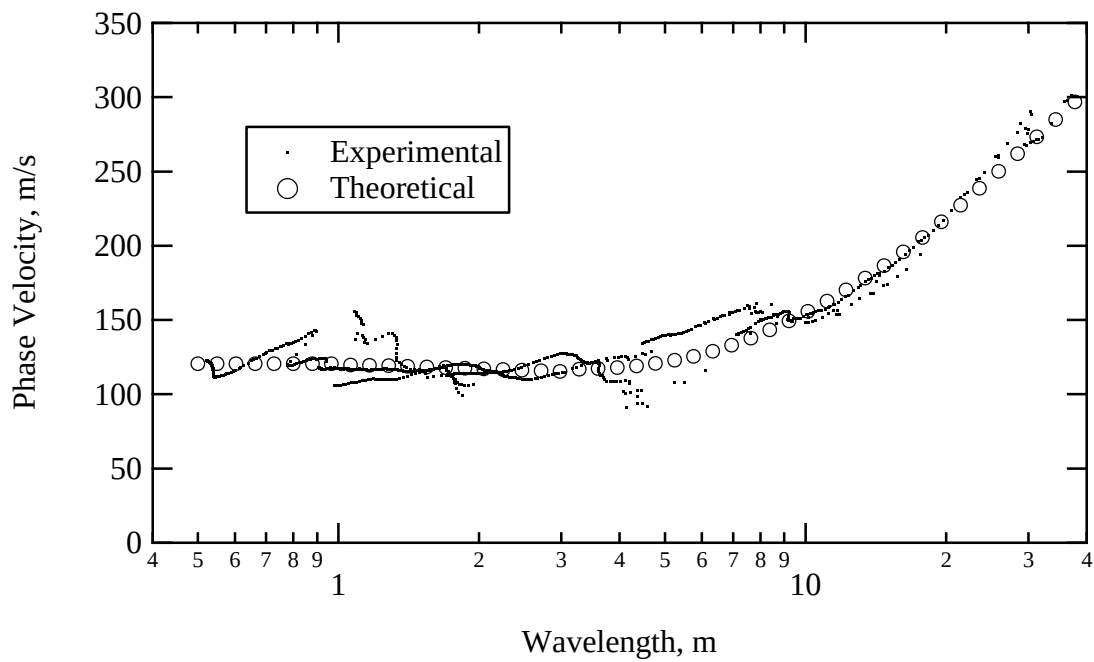
แสดง Dispersion Curves และค่า Shear Wave Velocity Profiles ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบชั้นดินที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 200 เมตร/วินาที หนาประมาณ 7 เมตร จากผิวดิน



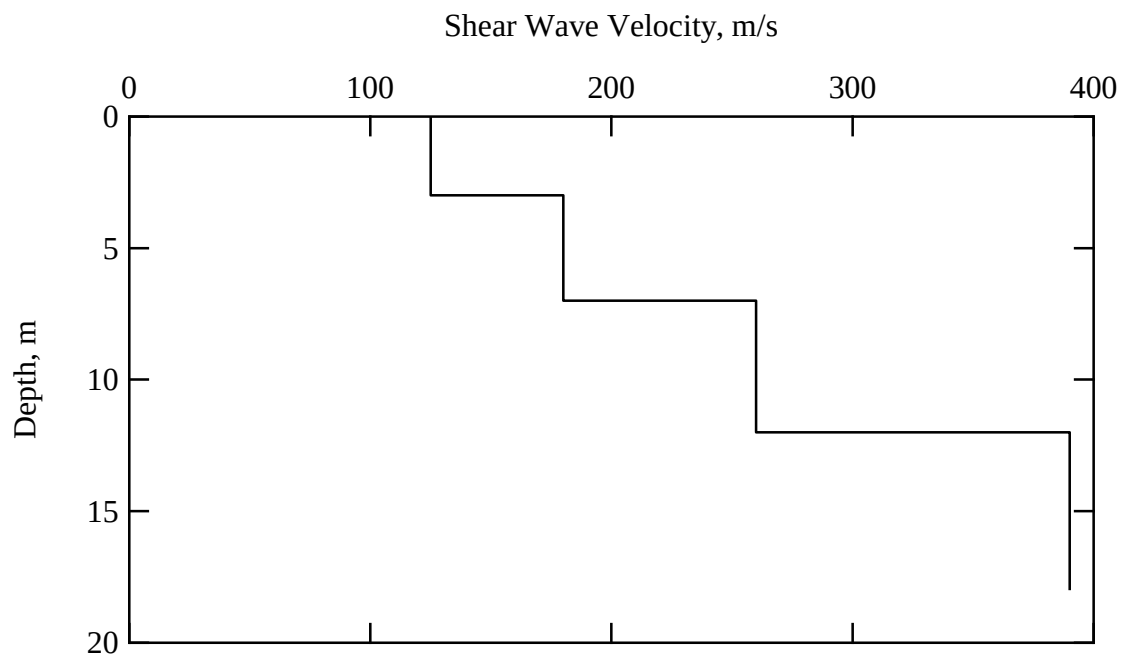
รูปที่ 5-14 ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณวัดน้ำล้อม



รูปที่ 5-15 ภาพถ่ายภาพการทดสอบ SASW บริเวณวัดน้ำล้อม



รูปที่ 5-16 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณวัดน้ำล้อม



รูปที่ 5-17 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณวัดน้ำล้อม

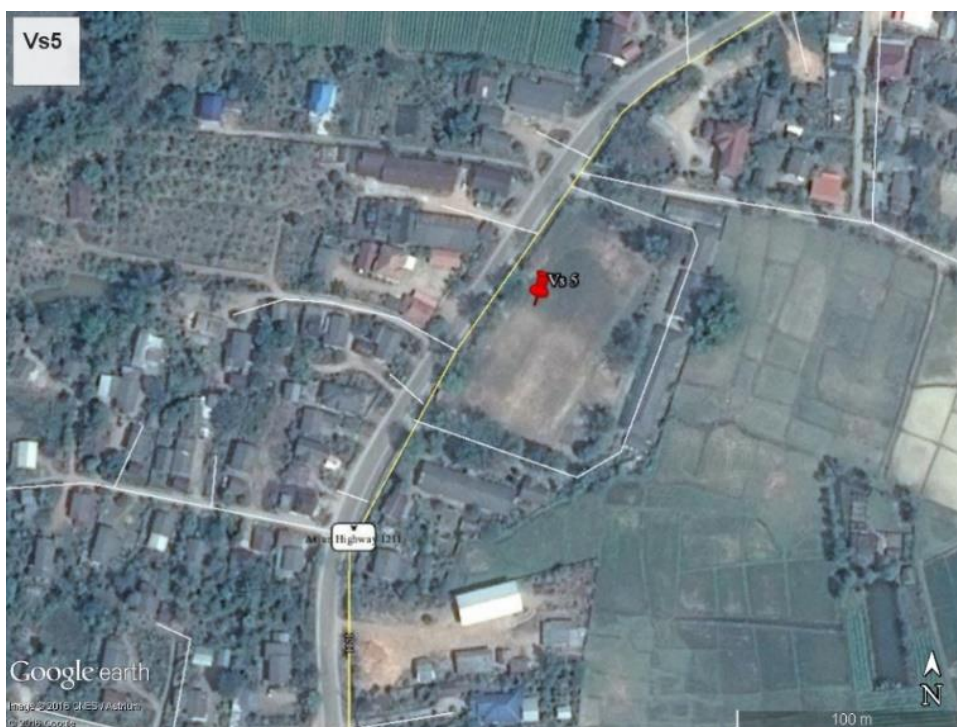
ตารางที่ 5-4 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณวัดน้ำล้อม

Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	2	125	234	0.300	1.8
2	1	125	1500	0.497	1.8
3	4	180	1500	0.493	2.0
7	5	260	1500	0.485	2.0
12	6*	390	1500	0.464	2.0

*Half-space in model

5.2.4 ตำแหน่ง Vs 5 โรงเรียนบ้านหนองเก่าห้อง

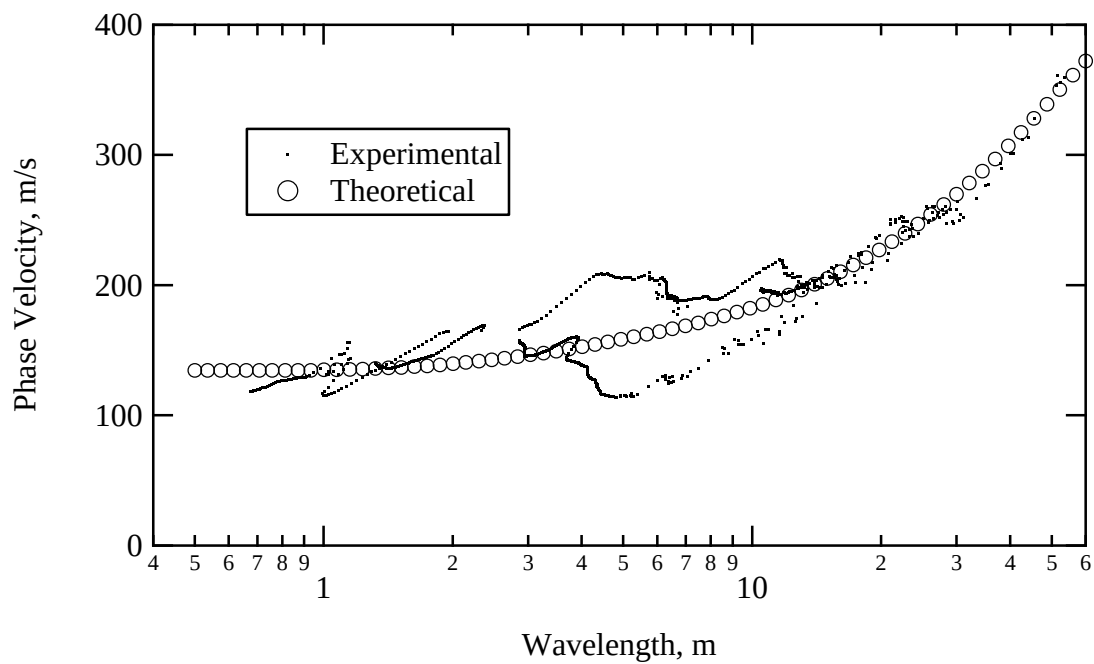
การทดสอบ SASW บริเวณสนามหญ้าด้านหน้าโรงเรียนหนองเก่าห้อง ที่พิกัด N : 19.754383, E : 99.692171 แสดงในรูปที่ 5-18 มีระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบคือ 0.5-30 เมตร ทั้งนี้ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 5-19 ส่วน Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles ของตำแหน่งทดสอบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 5-20 รูปที่ 5-21 และตารางที่ 5-5 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบชั้นดินที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 200 เมตร/วินาที หนาประมาณ 4 เมตร จากผิวดิน



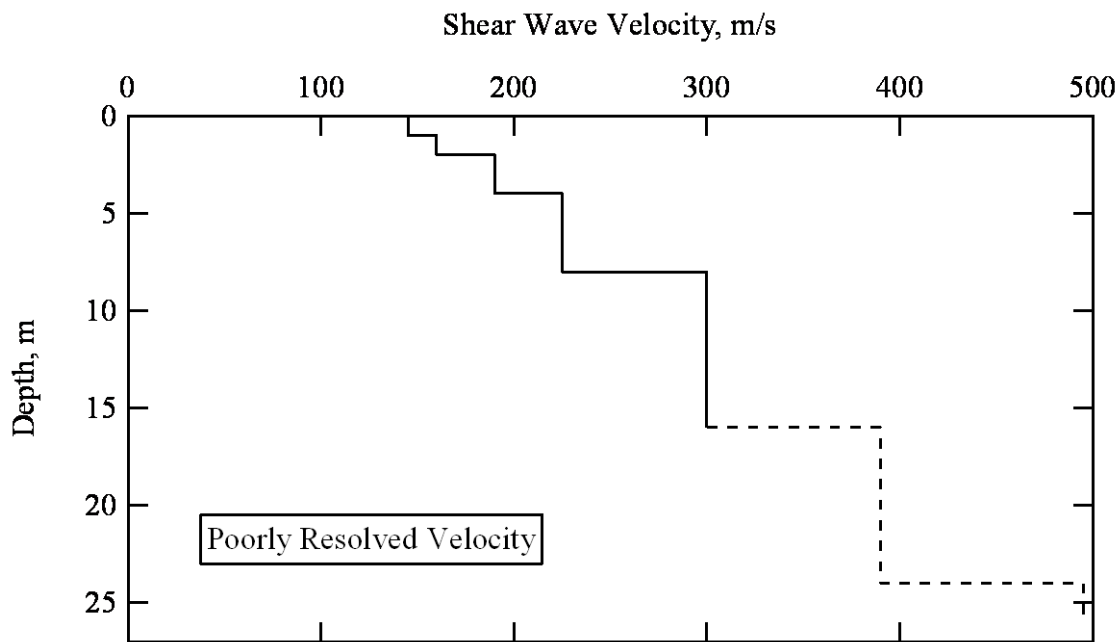
รูปที่ 5-18 ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณสนามหญ้าหน้าโรงเรียนบ้านหนองเก่าห้อง



รูปที่ 5-19 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณสนามหญ้าหน้าโรงเรียนบ้านหนองเก่าห้อง



รูปที่ 5-20 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW
บริเวณสนามหญ้าหน้าโรงเรียนบ้านหนองเก่าห้อง



รูปที่ 5-21 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW

บริเวณสนามหญ้าหน้าโรงเรียนบ้านหนองเก่าห้อง

ตารางที่ 5-5 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณสนามหญ้าหน้าโรงเรียนบ้านหนองเก่าห้อง

Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	1	145	271	0.300	1.8
1	1	160	299	0.300	2.0
2	2	190	356	0.300	2.0
4	4	225	1500	0.489	2.0
8	8	300	1500	0.479	2.0
16	8	390**	1500	0.464	2.0
24	2*	495**	1500	0.439	2.0

*Half-space in model

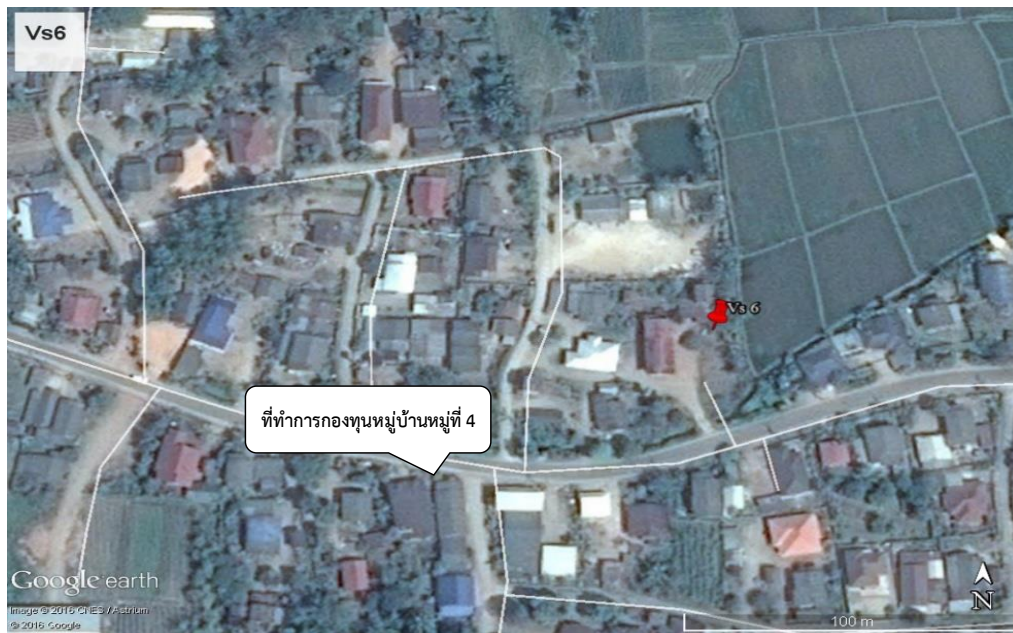
**Poorly resolved velocity

5.2.5 ตำแหน่ง Vs 6 บานสั่นกันแหว

การทดสอบ SASW บริเวณลานดินในพื้นที่ส่วนบุคคลของบ้านสั่นกันแหว ที่พิกัด

N : 19.763687 , E : 99.720268 แสดงในรูปที่ 5-22 ระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบคือ

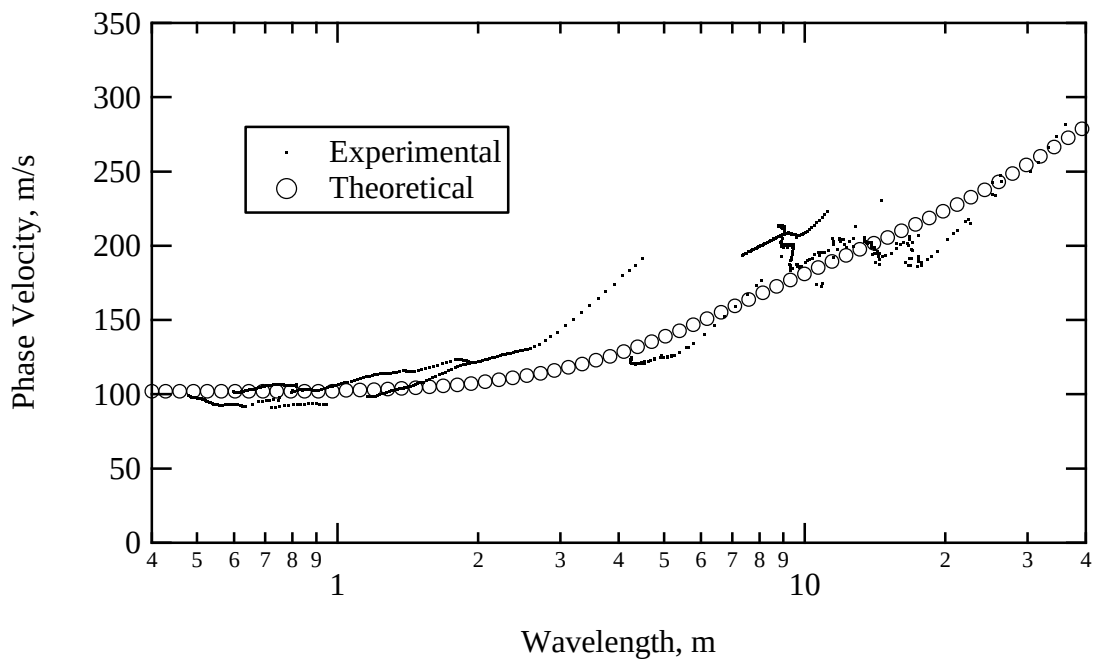
0.5-20 เมตร ทั้งนี้ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างานแสดงไว้ในรูปที่ 5-23 ส่วน Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles ของตำแหน่งทดสอบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 5-24 รูปที่ 5-25 และตารางที่ 5-6 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบชั้นดินมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนค่อนข้างต่ำลึกประมาณ 4 เมตร โดยเฉพาะดินบริเวณ 2 เมตรแรก มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 150 เมตร/วินาที



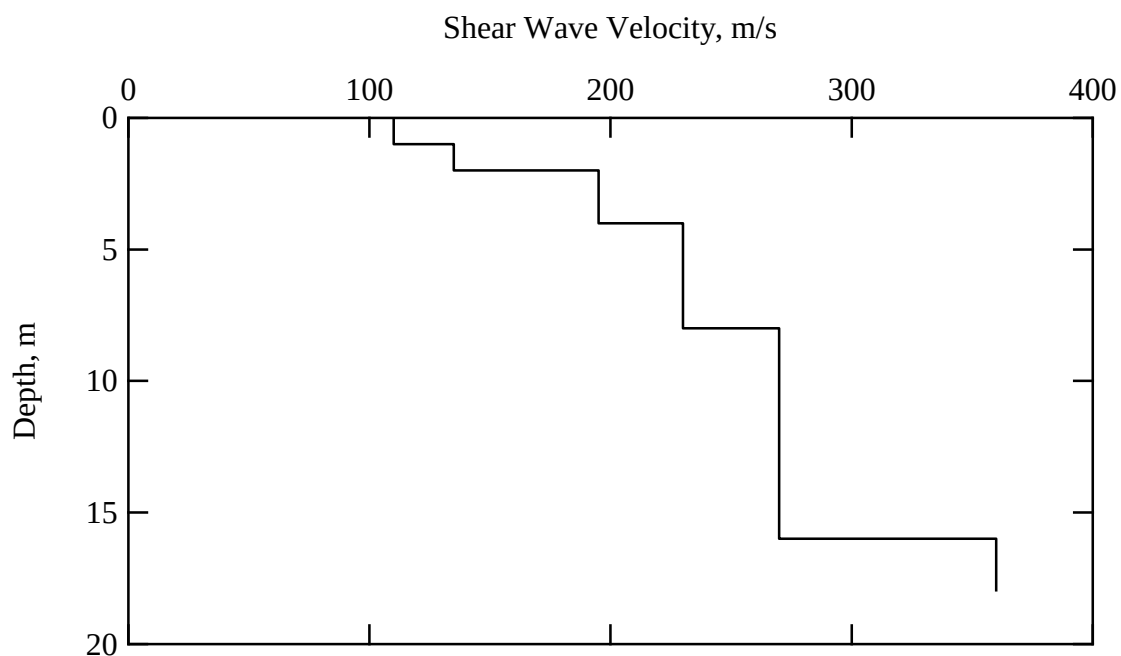
รูปที่ 5-22 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณลานดินในพื้นที่ส่วนบุคคล บ้านสันกันแฮว



รูปที่ 5-23 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณลานดินในพื้นที่ส่วนบุคคล บ้านสันกันแฮว



รูปที่ 5-24 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW
บริเวณลานดินในพื้นที่ส่วนบุคคล บ้านสันกันแฮว



รูปที่ 5-25 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW
บริเวณลานดินในพื้นที่ส่วนบุคคล บ้านสันกันแฮว

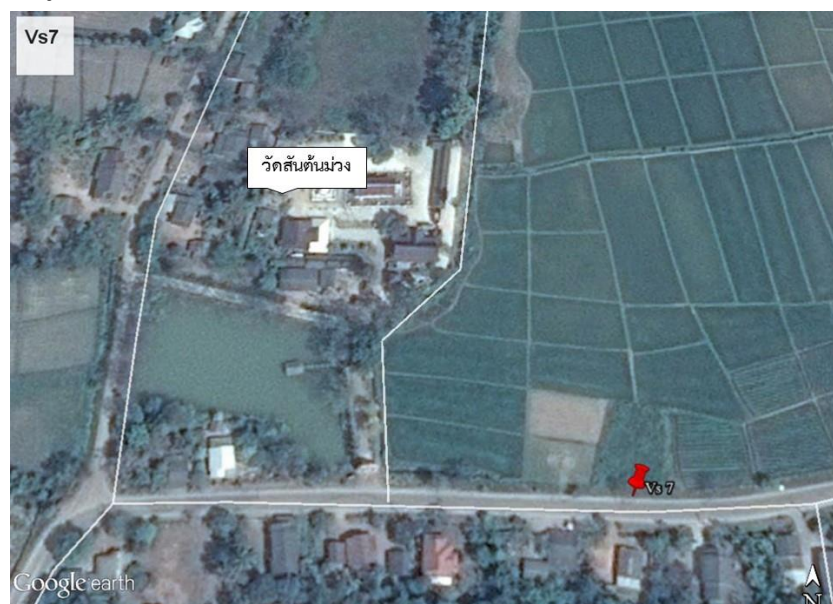
ตารางที่ 5-6 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณลานดินในพื้นที่ส่วนบุคคล บ้านสันกันแฮว

Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	1	110	206	0.300	1.8
1	1	135	253	0.300	1.8
2	2	195	1500	0.491	2.0
4	4	230	1500	0.488	2.0
8	8	270	1500	0.483	2.0
16	2*	360	1500	0.469	2.0

*Half-space in model

5.2.6 ตำแหน่ง Vs 7 วัดสันตันม่วง

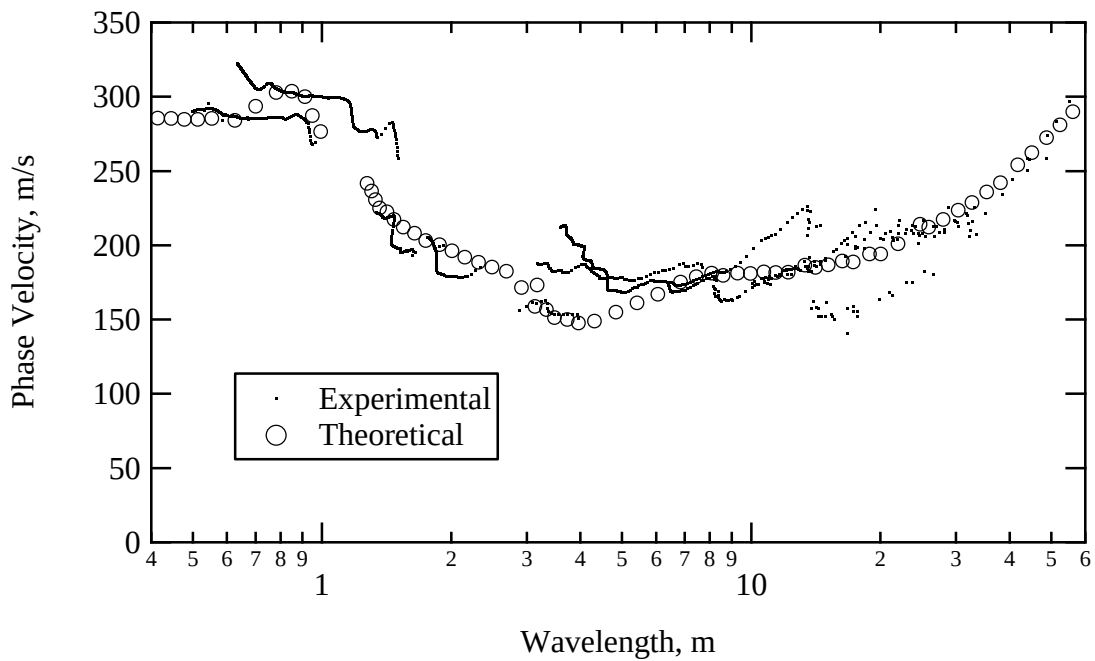
การทดสอบ SASW บริเวณไหล่ทางของถนนที่อยู่ด้านทิศใต้ของวัดสันตันม่วง พิกัด N : 19.799597, E : 99.703626 แสดงไว้ดังรูปที่ 5-26 มีระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ตั้งแต่ 0.5-30 เมตร ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างานแสดงไว้ในรูปที่ 5-27 ส่วน Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles ของตำแหน่งทดสอบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 5-28 รูปที่ 5-29 และตารางที่ 5-7 ตามลำดับ ผลการทดสอบความเร็วคลื่นเฉือนมีค่าสูงที่ชั้นดินด้านบน ซึ่งคาดว่าเป็นส่วนของชั้นโครงสร้างทาง ส่วนชั้นดินด้านล่าง พบว่ามีความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 200 เมตร/วินาที จนถึงระดับความลึกประมาณ 7 เมตร จากนั้นความเร็วคลื่นจึงเริ่มสูงขึ้น



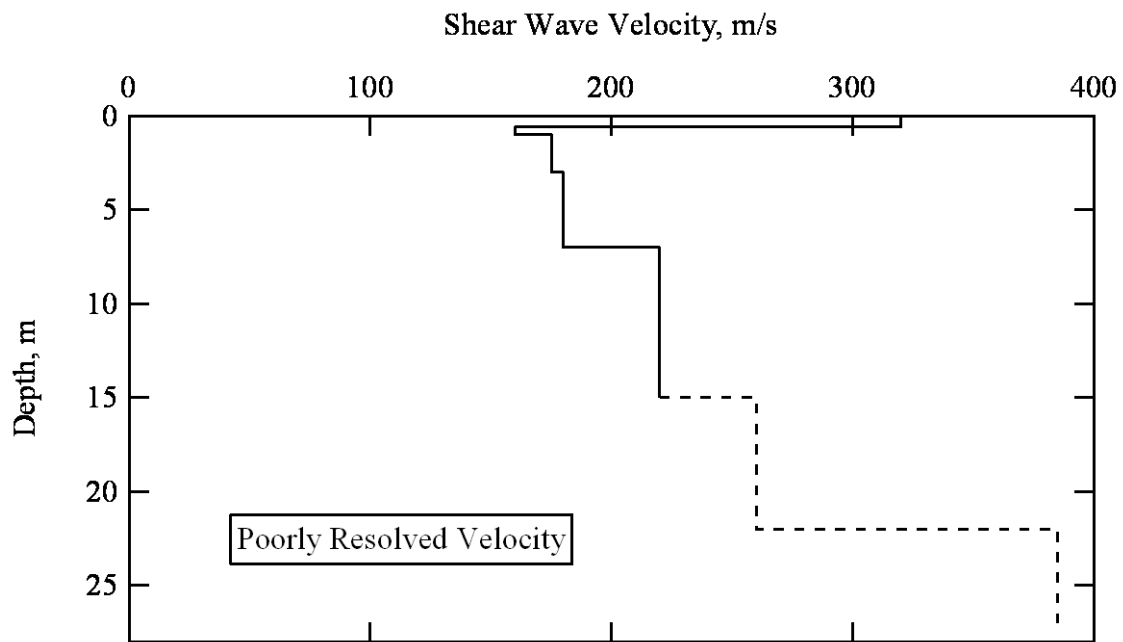
รูปที่ 5-26 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณไหล่ทางของถนนที่อยู่ด้านทิศใต้ของวัดสันตันม่วง



รูปที่ 5-27 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณไหล่ทางของถนนที่อยู่ด้านทิศใต้ของวัดสันตันม่วง



รูปที่ 5-28 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณไหล่ทางของถนนที่อยู่ด้านทิศใต้ของวัดสันตันม่วง



รูปที่ 5-29 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW
บริเวณไหล่ทางของถนนที่อยู่ด้านทิศใต้ของวัดสันตันม่วง

ตารางที่ 5-7 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณไหล่ทางของถนนที่อยู่ด้านทิศใต้ของวัดสันตันม่วง

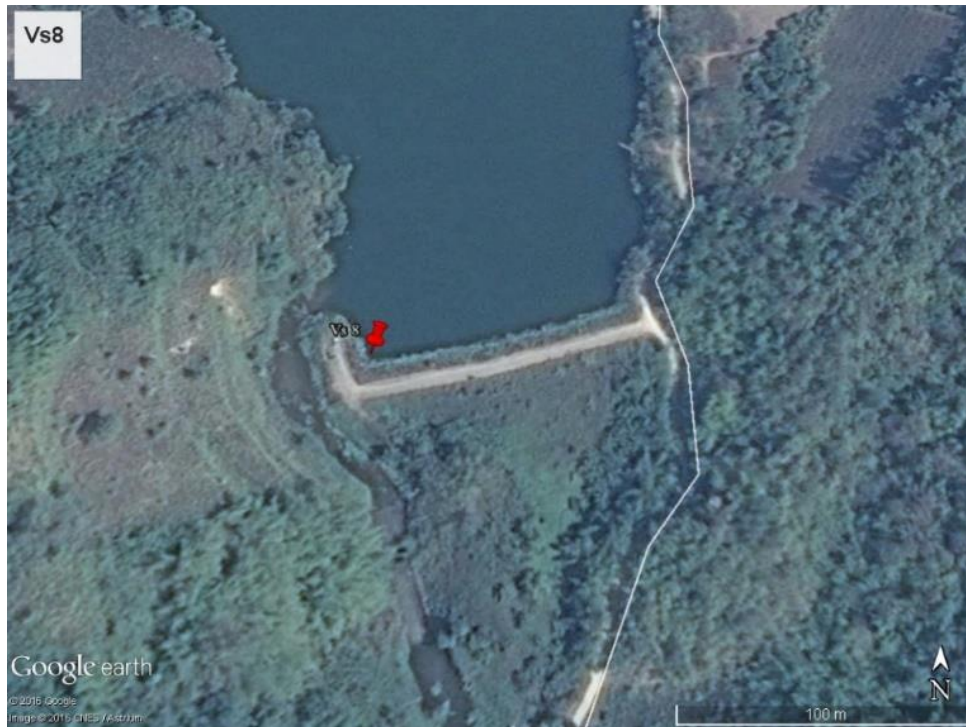
Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	0.6	320	599	0.300	2.0
0.6	0.4	160	299	0.300	2.0
1	2	175	327	0.300	2.0
3	4	180	1500	0.493	2.0
7	8	220	1500	0.489	2.0
15	7	260**	1500	0.485	2.0
22	5*	385**	1500	0.465	2.0

*Half-space in model **Poorly resolved velocity

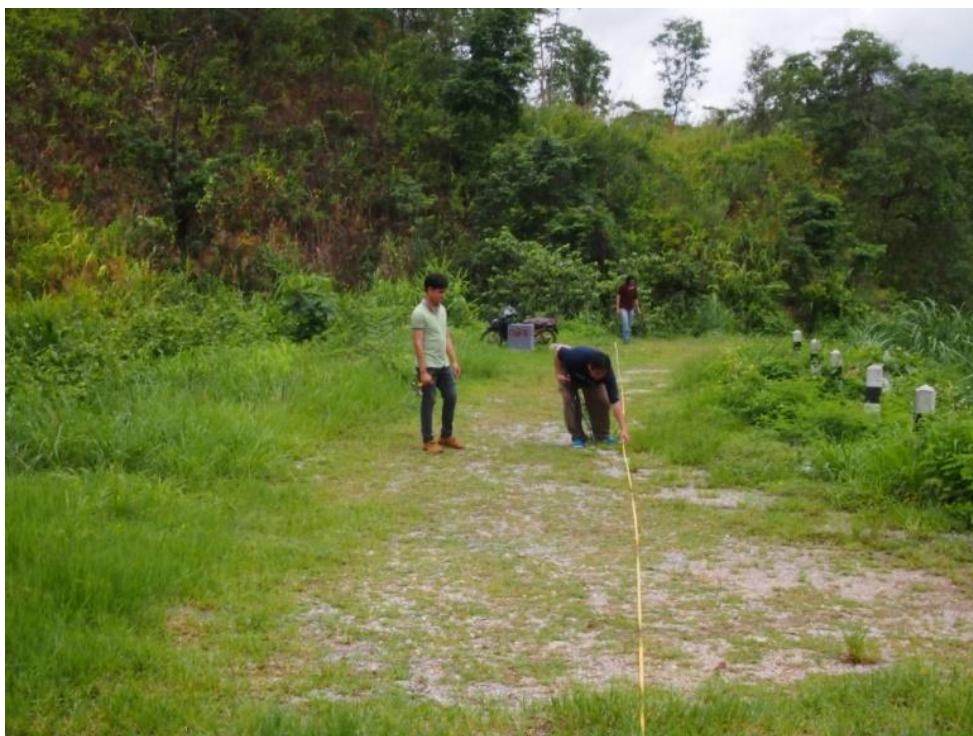
5.2.7 ตำแหน่ง Vs 8 เชื้อนห้วยแม่มอญ (ไหล่เขาด้านขวา)

การทดสอบ SASW บริเวณไหล่เขาด้านขวาของเชื้อนห้วยแม่มอญ ที่พิกัด N : 19.819817, E : 99.657889 แสดงในรูปที่ 5-30 เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านพื้นที่การทดสอบ ระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้จึงเริ่มตั้งแต่ 0.5-16 เมตร รูปที่ 5-31 แสดงภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างาน ส่วนรูปที่ 5-32 รูปที่

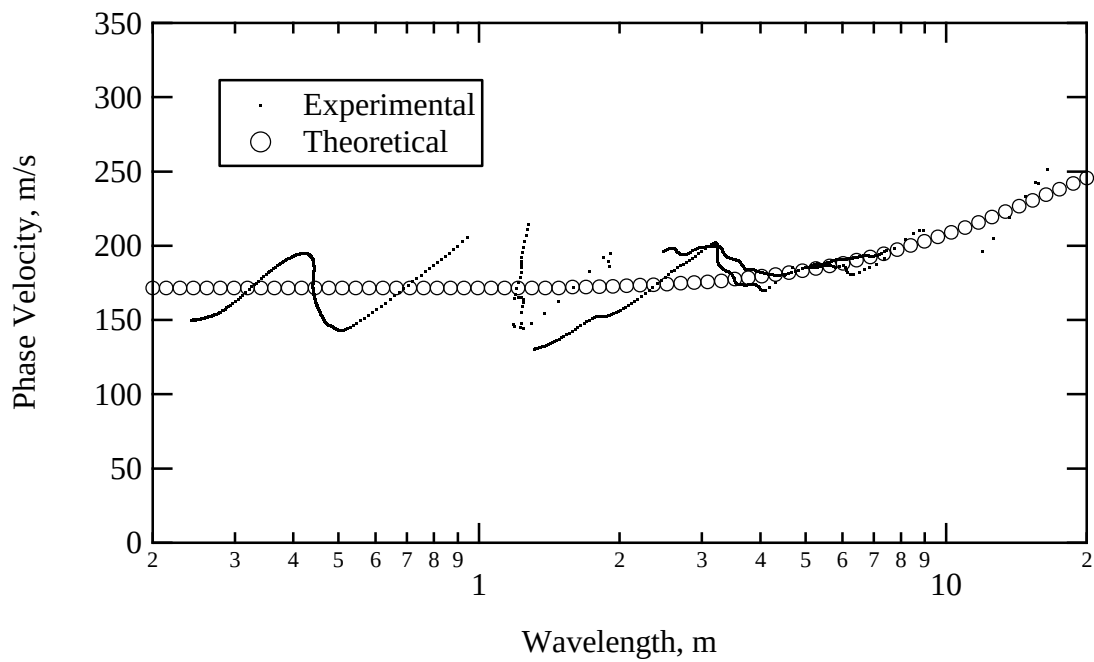
5-33 และตารางที่ 5-8 แสดง Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles ตามลำดับ ผลการทดสอบพบชั้นดินที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 185 เมตร/วินาที ที่ระดับความลึกไม่เกิน 1.5 เมตร จากนั้นชั้นดินมีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนมากกว่า 200 เมตร/วินาที ขึ้นไป



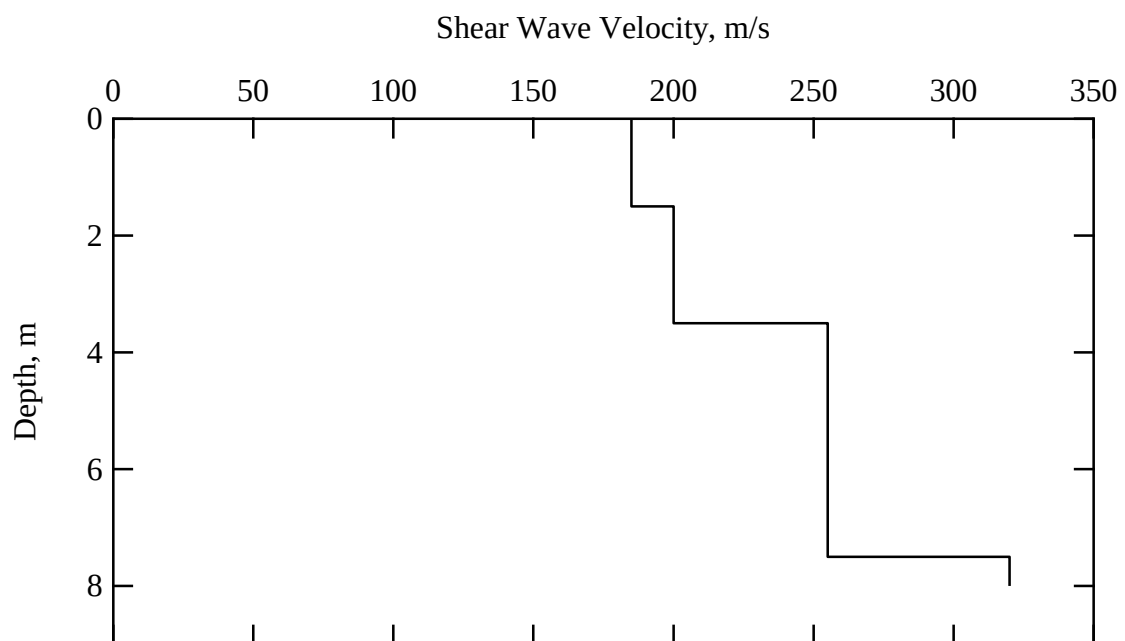
รูปที่ 5-30 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณไหล่เขาด้านขวาของเขื่อนห้วยแม่มอญ



รูปที่ 5-31 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณไหล่เขาด้านขวาของเขื่อนห้วยแม่มอญ



รูปที่ 5-32 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณไหล่เขาด้านขวาของเขื่อนห้วยแม่มอญ



รูปที่ 5-33 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW
บริเวณไหล่เขาด้านขวาของเขื่อนห้วยแม่มอญ

ตารางที่ 5-8 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณไหล่เขาด้านขวาของเขื่อนห้วยแม่มอญ

Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	1.5	185	346	0.300	2.0
1.5	2	200	374	0.300	2.0
3.5	4	255	477	0.300	2.0
7.5	0.5*	320	599	0.300	2.0

*Half-space in model

5.2.8 ตำแหน่ง Vs 9 ชุมชนโป่งปูเฟื่อง (หมู่บ้านหนองผำ)

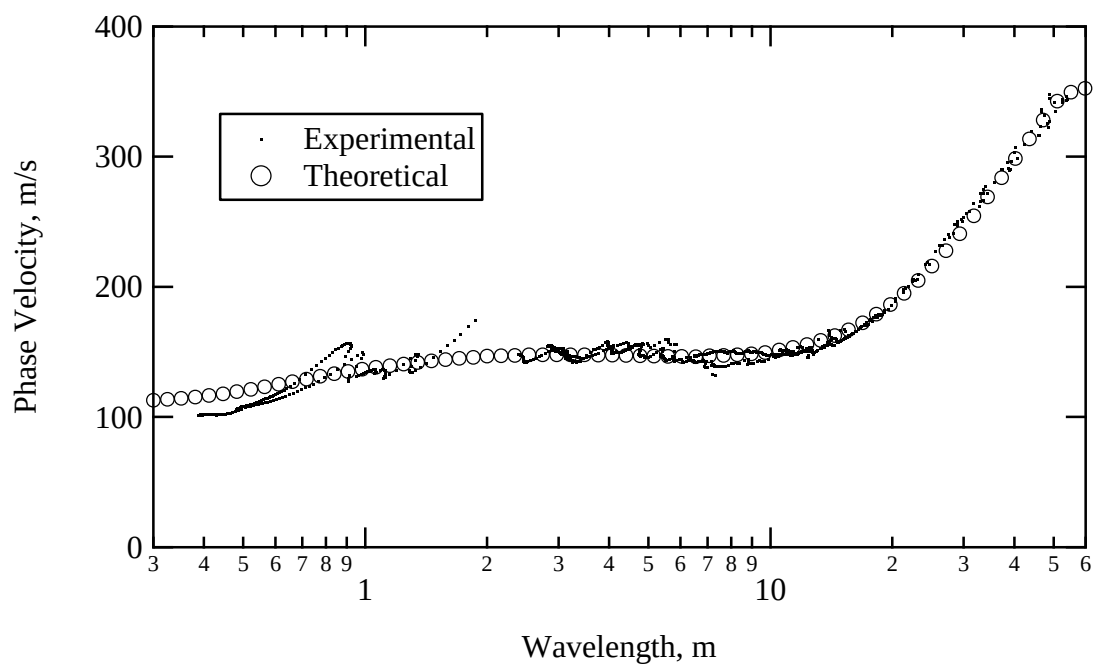
การทดสอบ SASW บริเวณชุมชนโป่งปูเฟื่องที่พิกัด N : 19.712954, E : 99.628431 แสดงในรูปที่ 5-34 ระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบคือ 0.5-30 เมตร ส่วนรูปที่ 5-35 แสดงภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างาน กราฟ Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles แสดงไว้ในรูปที่ 5-36 รูปที่ 5-37 และตารางที่ 5-9 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบชั้นดินมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนค่อนข้างต่ำ ตั้งแต่จากระดับผิวดินจนถึงระดับความลึกประมาณ 7 เมตร



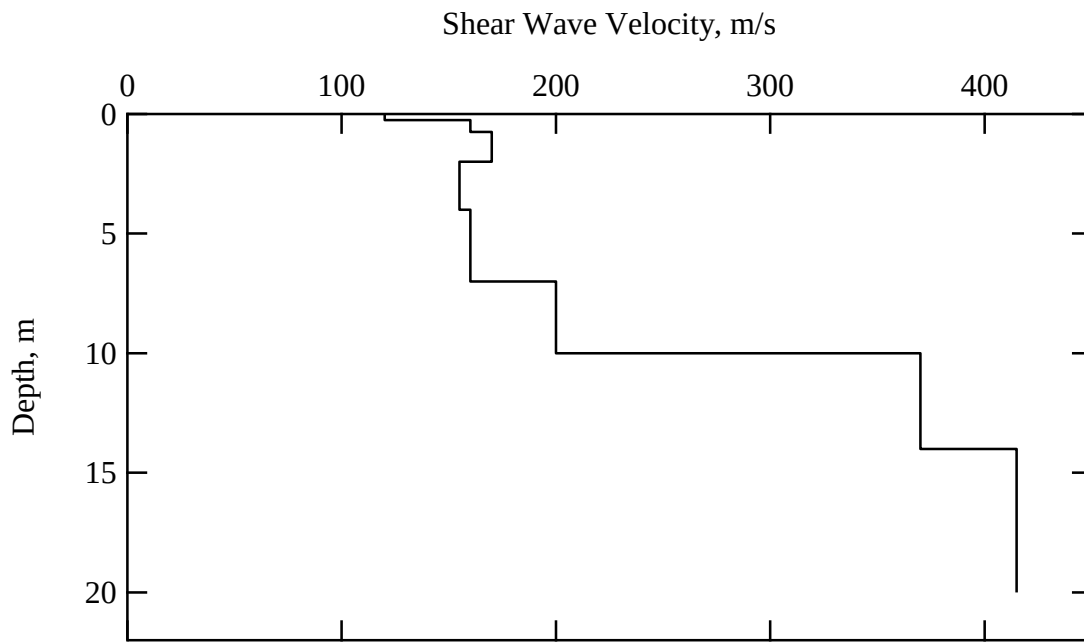
รูปที่ 5-34 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณถนนดินในชุมชนโป่งปูเฟื่อง (หมู่บ้านหนองผำ)



รูปที่ 5-35 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณถนนดินในชุมชนโป่งปูเฟือง (หมู่บ้านหนองผำ)



รูปที่ 5-36 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณบริเวณถนนดินในชุมชนโป่งปูเฟือง (หมู่บ้านหนองผำ)



รูปที่ 5-37 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW
บริเวณบริเวณถนนดินในชุมชนโป่งปูเฟื่อง (หมู่บ้านหนองผำ)

ตารางที่ 5-9 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณบริเวณถนนดินในชุมชนโป่งปูเฟื่อง (หมู่บ้านหนองผำ)

Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	0.25	120	225	0.300	1.8
0.25	0.5	160	299	0.300	2.0
0.75	1.25	170	318	0.300	2.0
2	2	155	290	0.300	2.0
4	3	160	1500	0.494	2.0
7	3	200	1500	0.491	2.0
10	4	370	1500	0.468	2.0
14	6*	415	1500	0.459	2.0

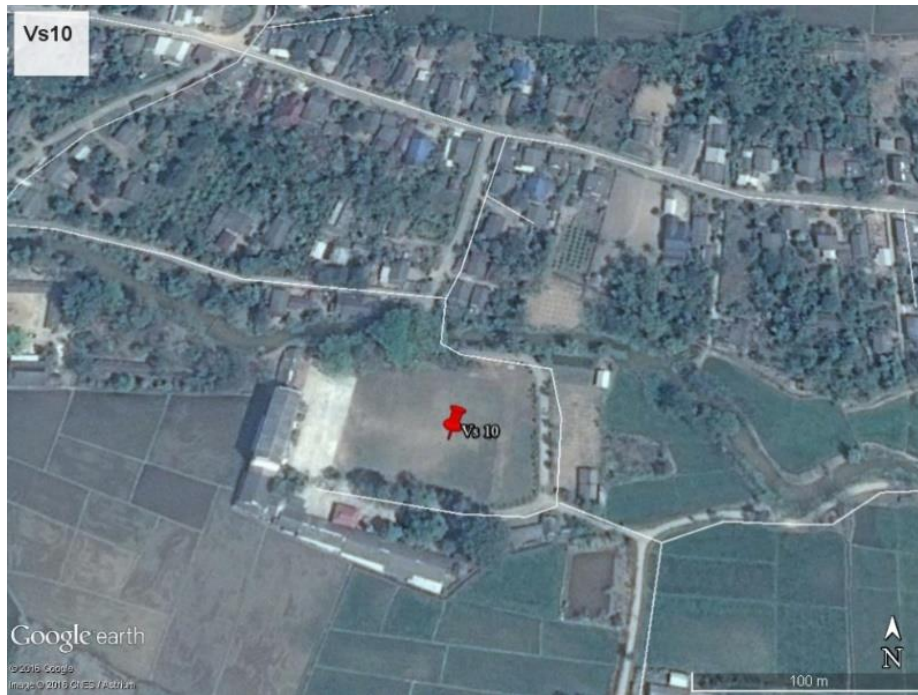
*Half-space in model

5.2.9 ตำแหน่ง Vs 10 โรงเรียนบ้านทรายขาว

การทดสอบ SASW บริเวณสนามหญ้าด้านทิศตะวันออกของอาคารเรียน ที่พิกัด
N : 19.687402 , E : 99.684394 แสดงในรูปที่ 5-38 ระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบคือ

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

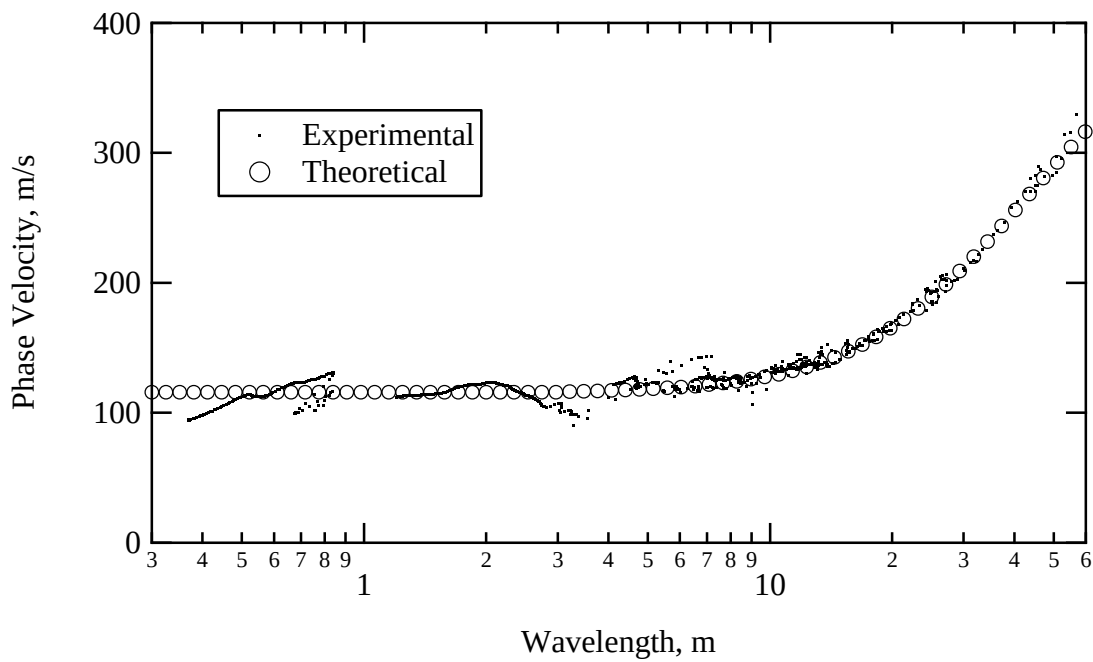
0.5-30 เมตร รูปที่ 5-39 แสดงภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างาน ส่วนรูปที่ 5-40 รูปที่ 5-41 และตารางที่ 5-10 แสดง Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles ตามลำดับ ผลการทดสอบพบชั้นดินมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 150 เมตร/วินาที ตั้งแต่จากระดับผิวดินจนถึงระดับความลึกประมาณ 7 เมตร และมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 200 เมตร/วินาที จนถึงระดับความลึกประมาณ 11 เมตร จากนั้นจึงพบชั้นดินที่มีความแน่นมากขึ้น



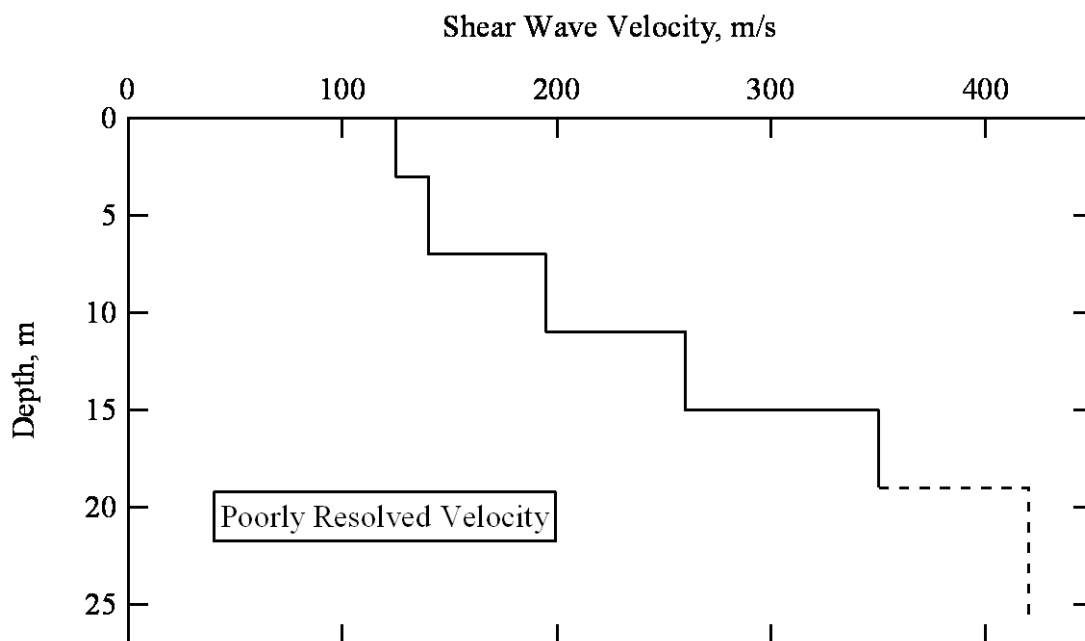
รูปที่ 5-38 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนบ้านทรายขาว



รูปที่ 5-39 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนบ้านทรายขาว



รูปที่ 5-40 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนบ้านทรายขาว



รูปที่ 5-41 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนบ้านทรายขาว

ตารางที่ 5-10 คุณสมบัติชั้นดินโรงเรียนบ้านทรายขาว

Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	3	125	234	0.300	1.8
3	4	140	1500	0.496	1.8
7	4	195	1500	0.491	2.0
11	4	260	1500	0.485	2.0
15	4	350	1500	0.471	2.0
19	7*	420**	1500	0.458	2.0

*Half-space in model

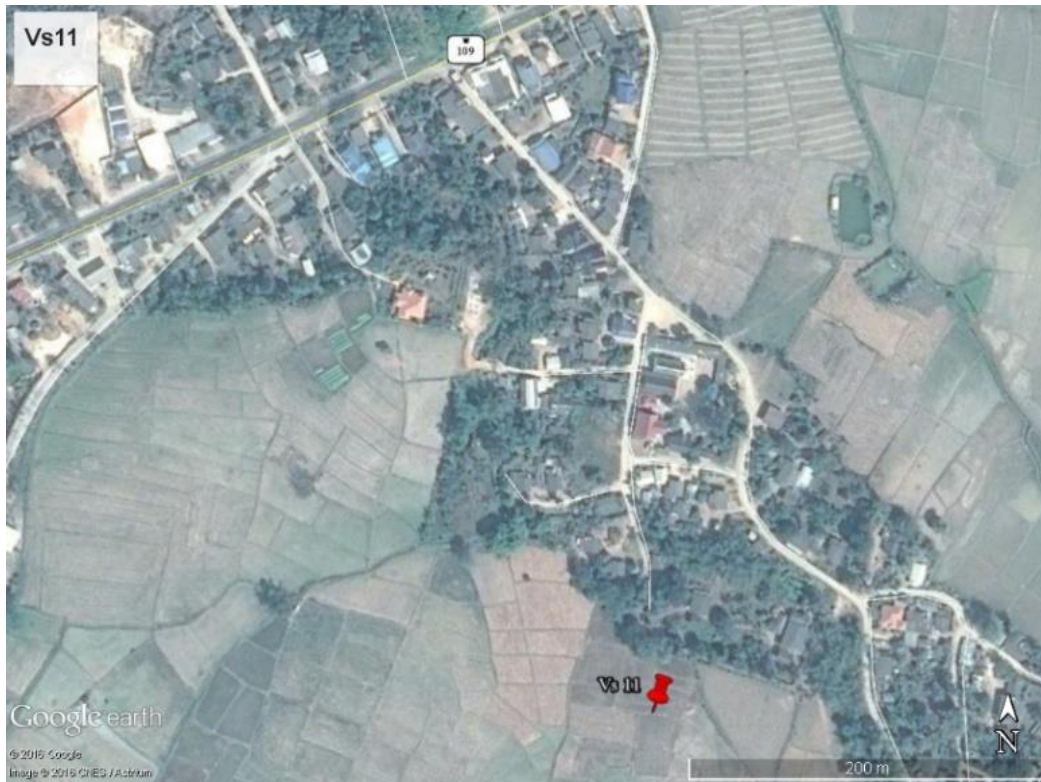
**Poorly resolved velocity

5.2.10 ตำแหน่ง Vs 11 วัดท่าวแก่นจันทร์

การทดสอบ SASW บริเวณทุ่งนาใกล้วัดท่าวแก่นจันทร์ ที่พิกัด N : 19.648839, E : 99.509686 แสดงในรูปที่ 5-42 ระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบคือ 0.5-30 เมตร รูปที่ 5-43 แสดงภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างาน ส่วนรูปที่ 5-44 รูปที่ 5-45 และตารางที่ 5-11 แสดง Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles ตามลำดับ ผลการทดสอบพบชั้นดินที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนค่อนข้างต่ำตั้งแต่จากระดับผิวดินจนถึงระดับความลึกประมาณ 8 เมตร

5.2.11 ตำแหน่ง Vs 12 โรงเรียนแม่ลาววิทยาคม

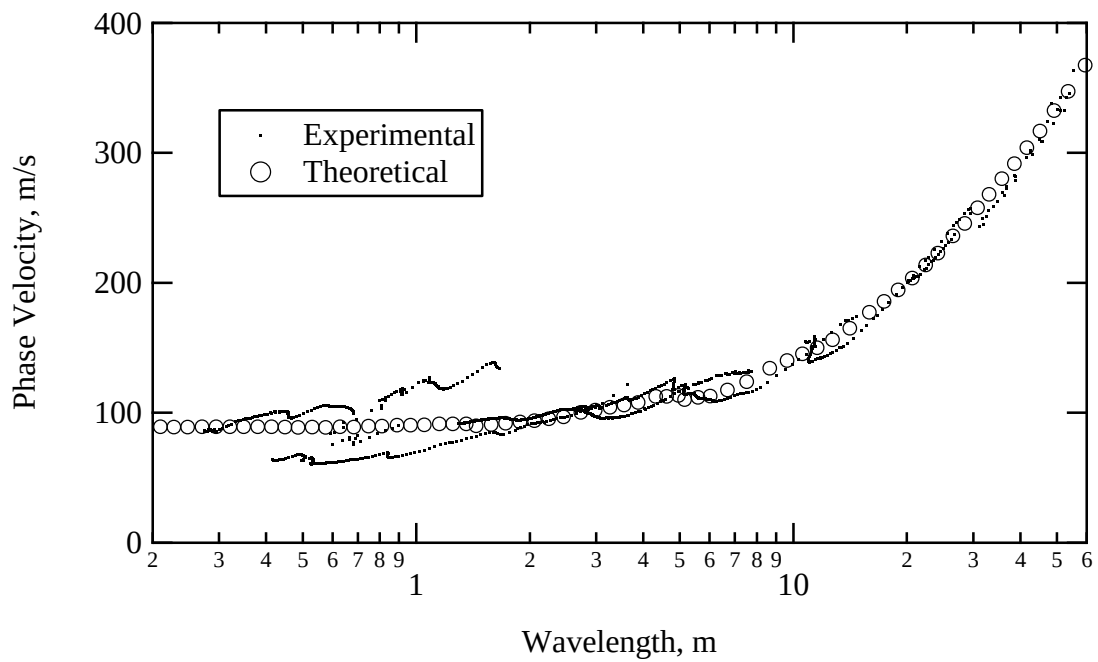
การทดสอบ SASW บริเวณสนามด้านทิศเหนือของอาคารเรียนที่กำลังดำเนินการก่อสร้าง ที่พิกัด N: 19.743119, E : 99.705309 แสดงในรูปที่ 5-46 ระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบคือ 0.5-30 เมตร รูปที่ 5-47 แสดงภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างาน ส่วนรูปที่ 5-48 รูปที่ 5-49 และตารางที่ 5-12 แสดง Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles ตามลำดับ ผลการทดสอบพบชั้นดินที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 180 เมตร/วินาที หนาเพียง 50 ซม. ที่บริเวณผิวดิน จากนั้นเป็นชั้นดินที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนเกิน 200 เมตร/วินาทีทั้งสิ้น



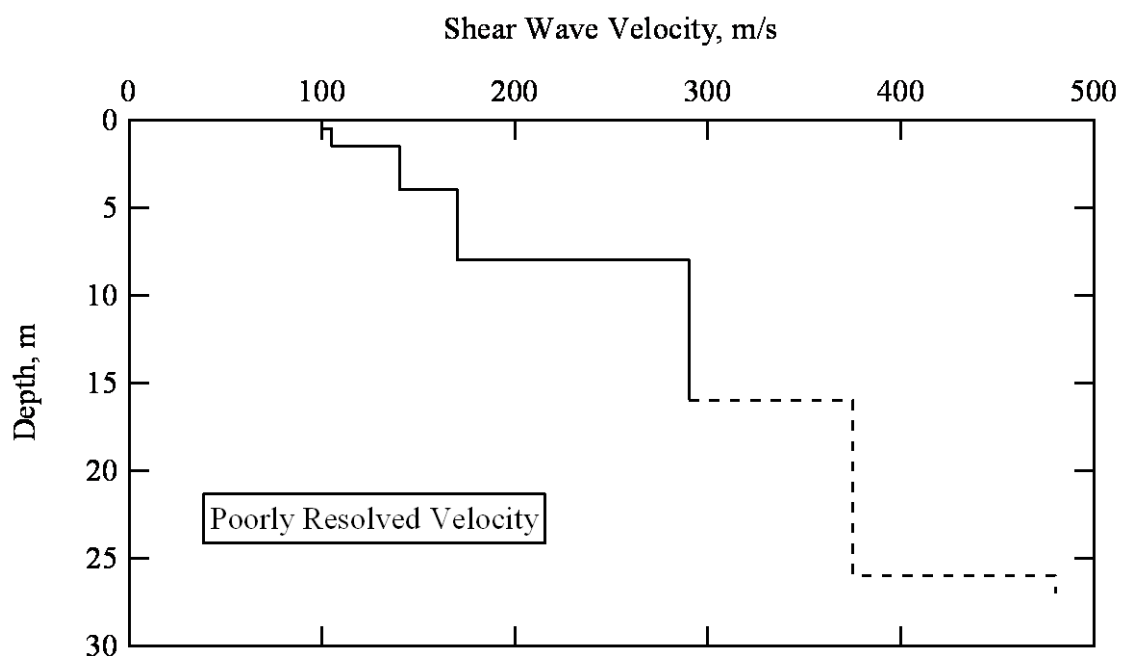
รูปที่ 5-42 ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณทุ่งนาใกล้วัดท่าวแก่นจันทร์



รูปที่ 5-43 ภาพถ่ายภาพการทดสอบ SASW บริเวณทุ่งนาใกล้วัดท่าวแก่นจันทร์



รูปที่ 5-44 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณทุ่งนาใกล้วัดท่าแว่นจันทร์



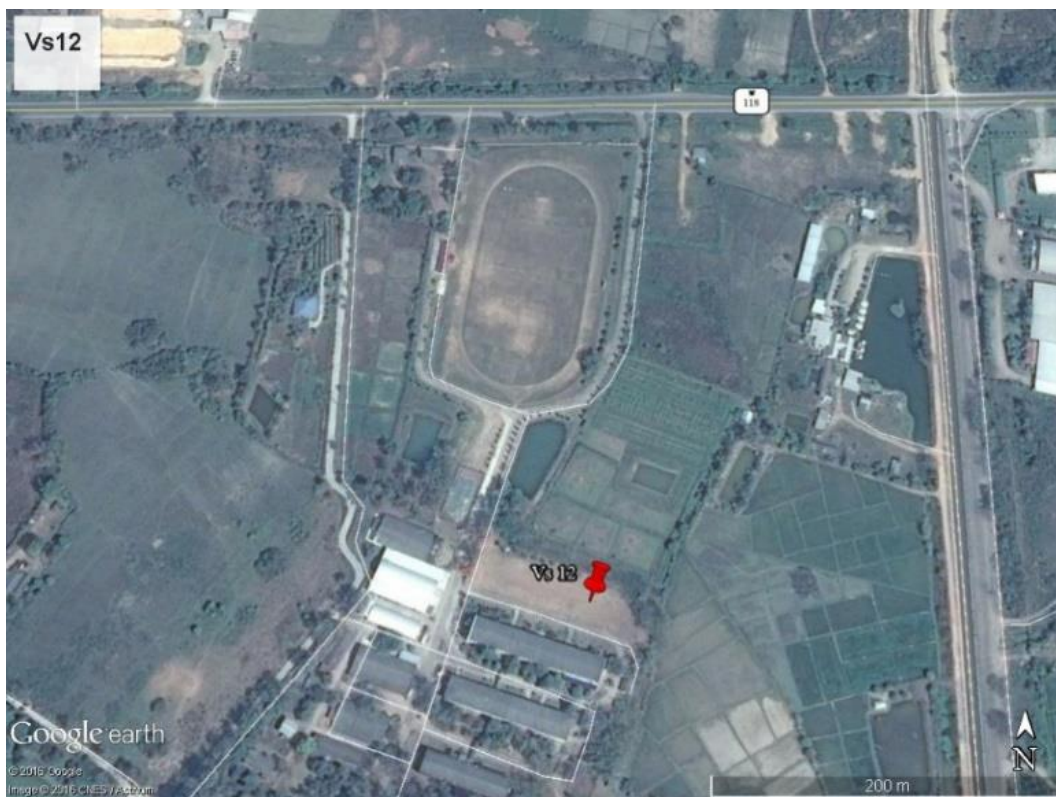
รูปที่ 5-45 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณทุ่งนาใกล้วัดท่าแว่นจันทร์

ตารางที่ 5-11 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณทุ่งนาใกล้วัดท่าแว่นจันทร์

Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	0.5	100	187	0.300	1.8
0.5	1	105	196	0.300	1.8
1.5	2.5	140	262	0.300	1.8
4	4	170	1500	0.494	2.0
8	8	290	1500	0.481	2.0
16	10	375**	1500	0.467	2.0
26	1*	480**	1500	0.443	2.0

*Half-space in model

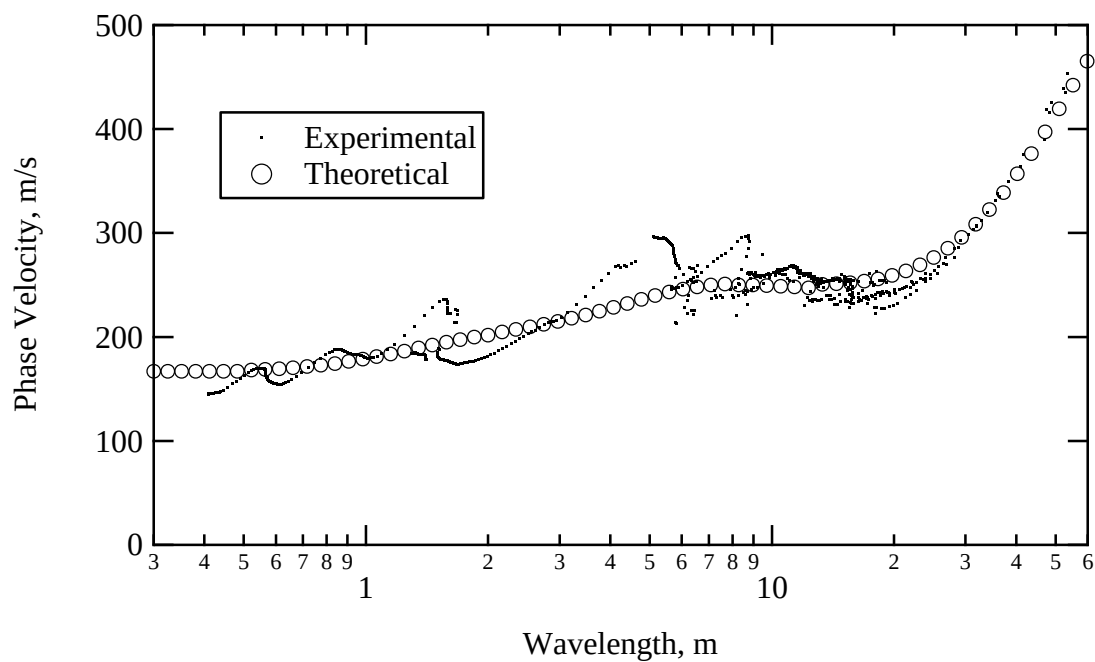
**Poorly resolved velocity



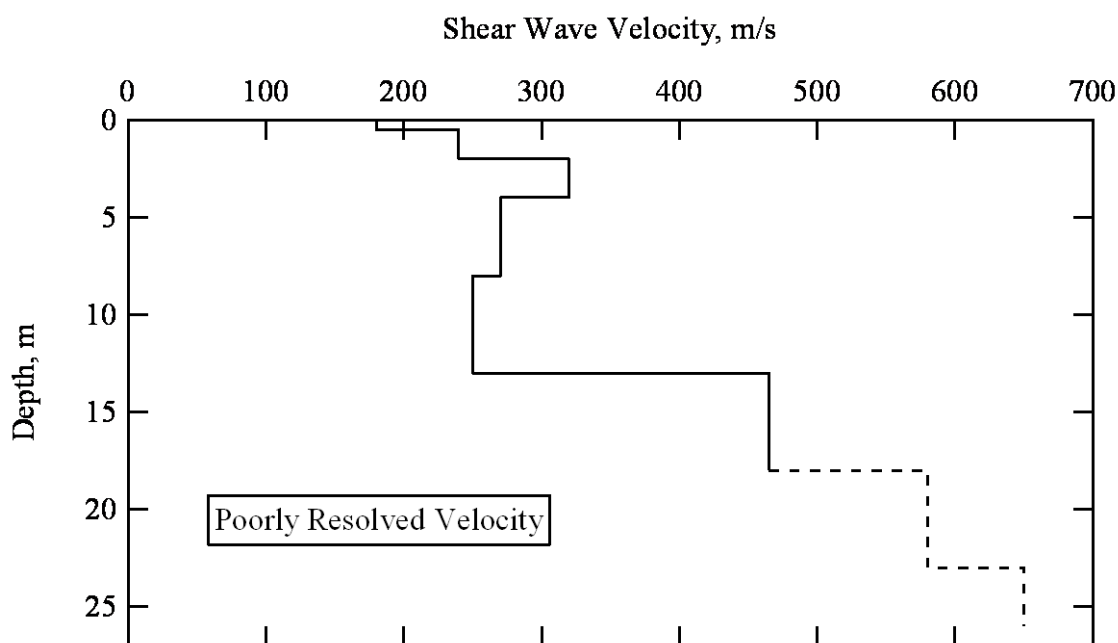
รูปที่ 5-46 ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม



รูปที่ 5-47 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม



รูปที่ 5-48 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม



รูปที่ 5-49 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม

ตารางที่ 5-12 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม

Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	0.5	180	337	0.300	2.0
0.5	1.5	240	449	0.300	2.0
2	2	320	1500	0.476	2.0
4	4	270	1500	0.483	2.0
8	5	250	1500	0.486	2.0
13	5	465	1500	0.447	2.1
18	5	580**	1500	0.412	2.1
23	3*	650**	1500	0.384	2.1

*Half-space in model

**Poorly resolved velocity

5.2.12 ตำแหน่ง Vs 13 ถนนเส้น 118

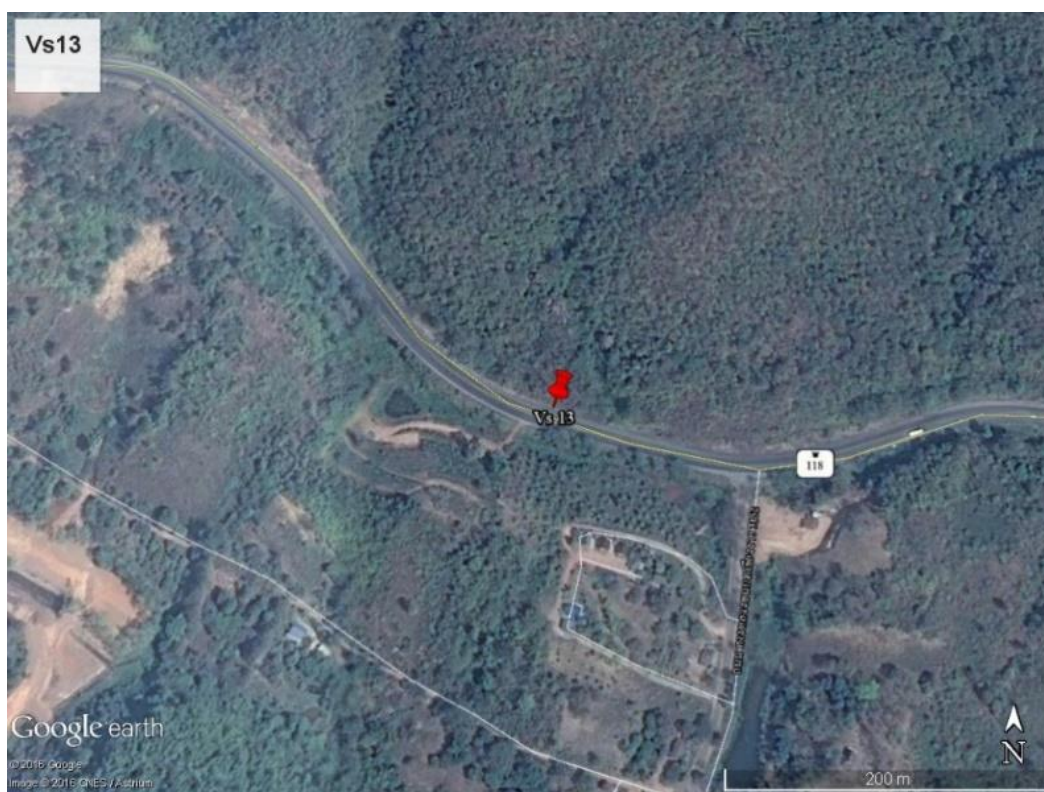
การทดสอบ SASW ที่ถนนสาย 118 บริเวณที่ถนนเกิดความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเชียงราย ในปีพ.ศ. 2557 (พิกัดทดสอบ N : 19.744258, E : 99.663354) แสดงในรูปที่ 5-50 มีระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบคือ 0.5-20 เมตร ทั้งนี้ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างานแสดงไว้ในรูปที่ 5-51 ส่วน Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles ของตำแหน่งทดสอบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 5-52 รูปที่ 5-53 และตารางที่ 5-13 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนสูงที่ชั้นดินด้านบน ซึ่งคาดว่าเป็นส่วนของถนนเดิมที่ได้รับการบดอัดแล้ว ส่วนชั้นดินเดิมนั้นพบว่ามีค่าความเร็วคลื่นเฉือนค่อนข้างสูง ยกเว้นที่ระดับความลึกช่วง 2.5-4.0 เมตร ที่พบดินที่มีค่าความเร็วต่ำกว่า 200 เมตร/วินาที

5.2.13 ตำแหน่ง Vs 14 โรงเรียนโป่งแพร่วิทยา

การทดสอบ SASW บริเวณสนามหญ้าด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือของอาคารเรียน โรงเรียนโป่งแพร่วิทยา ที่พิกัดทดสอบ N : 19.806892, E : 99.676598 แสดงในรูปที่ 5-54 ระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบคือ 0.5-20 เมตร ทั้งนี้ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างานถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5-55 ส่วน Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles ของตำแหน่งทดสอบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 5-56 รูปที่ 5-57 และตารางที่ 5-14 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 200 เมตร/วินาทีที่ระดับความลึกไม่เกิน 1.5 เมตรเท่านั้น

5.2.14 ตำแหน่ง Vs 15 สหกรณ์เครดิตยูเนียน จุดบริการประชาชน

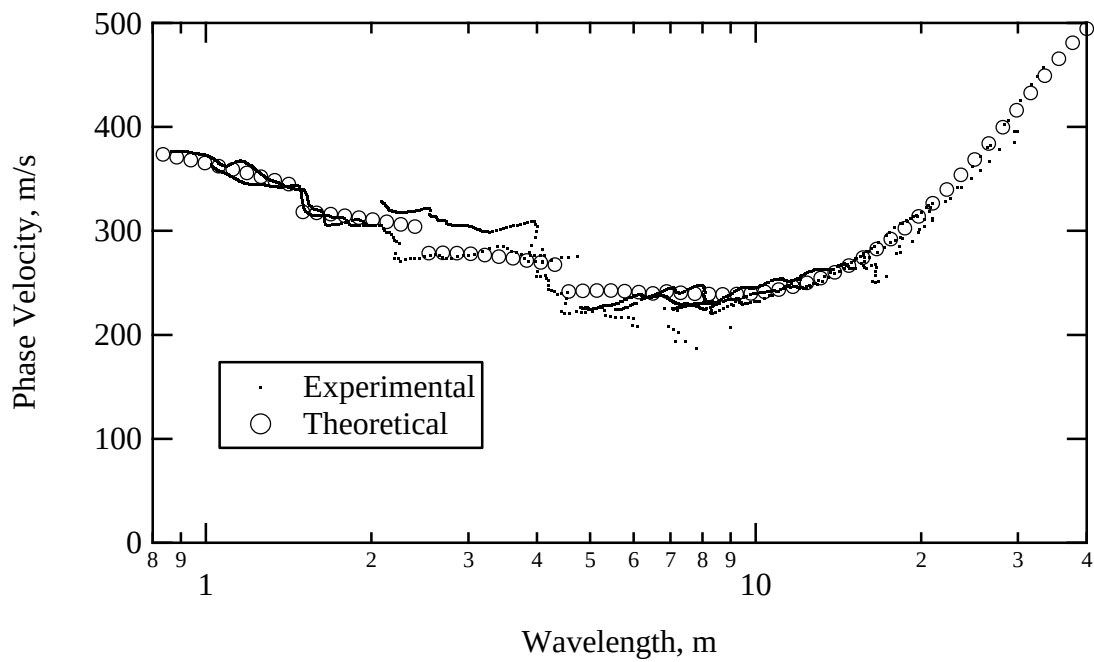
การทดสอบ SASW ที่บริเวณลานด้านทิศตะวันออกของสหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพร่ (พิกัดทดสอบ N : 19.787483, E : 99.659824) แสดงในรูปที่ 5-58 มีระยะห่างของตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบคือ 0.5-15 เมตร ทั้งนี้ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบบริเวณหน้างานถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5-59 ส่วน Dispersion Curves และ Shear Wave Velocity Profiles ของตำแหน่งทดสอบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 5-60 รูปที่ 5-61 และตารางที่ 5-15 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชั้นดินบริเวณนี้เป็นชั้นดินที่ความแน่นมากเป็นผลให้ค่าความเร็วคลื่นที่ตรวจวัดได้มีค่าสูง



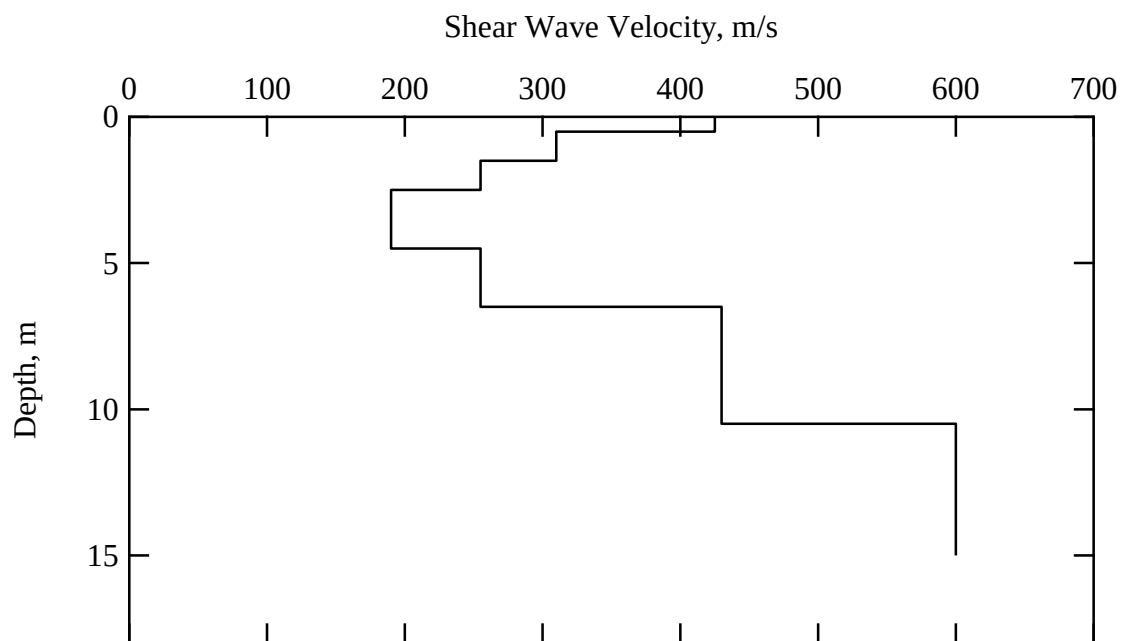
รูปที่ 5-50 ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 118



รูปที่ 5-51 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 118



รูปที่ 5-52 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 118

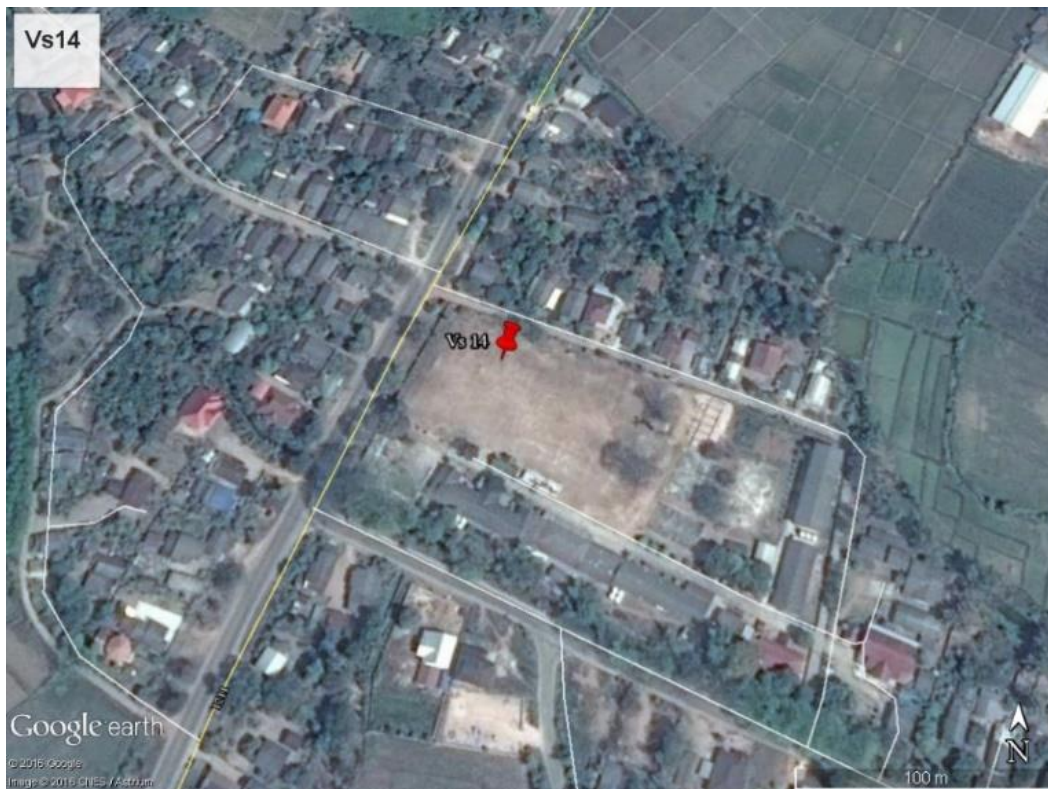


รูปที่ 5-53 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณถนนสาย 118

ตารางที่ 5-13 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณถนนสาย 118

Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	0.5	425	795	0.300	2.0
0.5	1	310	580	0.300	2.0
1.5	1	255	477	0.300	2.0
2.5	2	190	1500	0.492	2.0
4.5	2	255	1500	0.485	2.0
6.5	4	430	1500	0.455	2.0
10.5	4.5*	600	1500	0.405	2.1

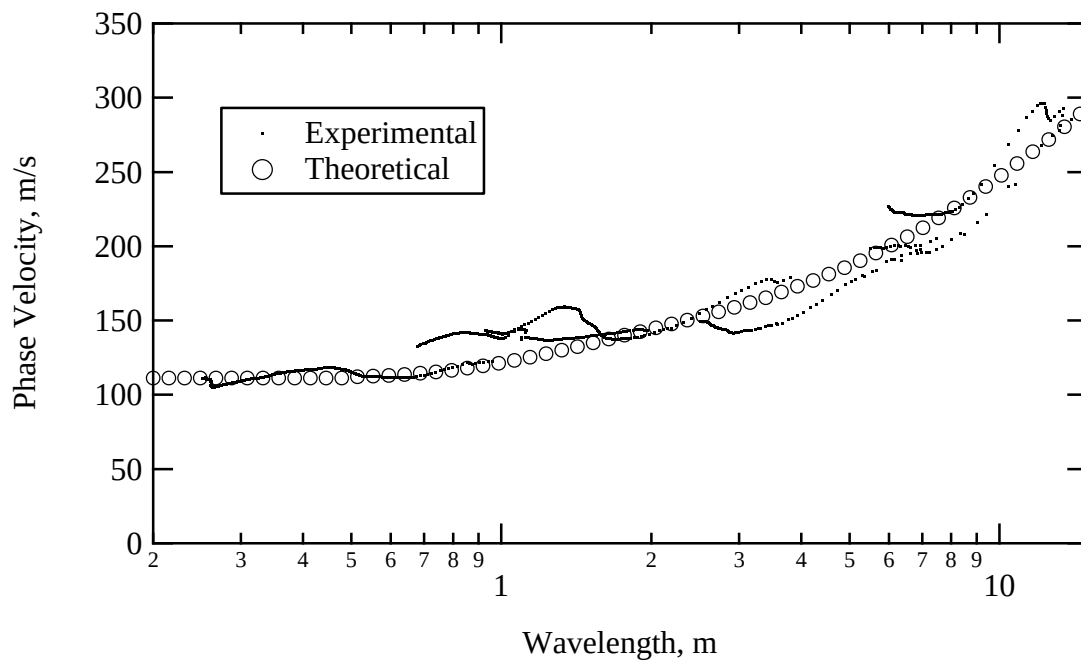
*Half-space in model



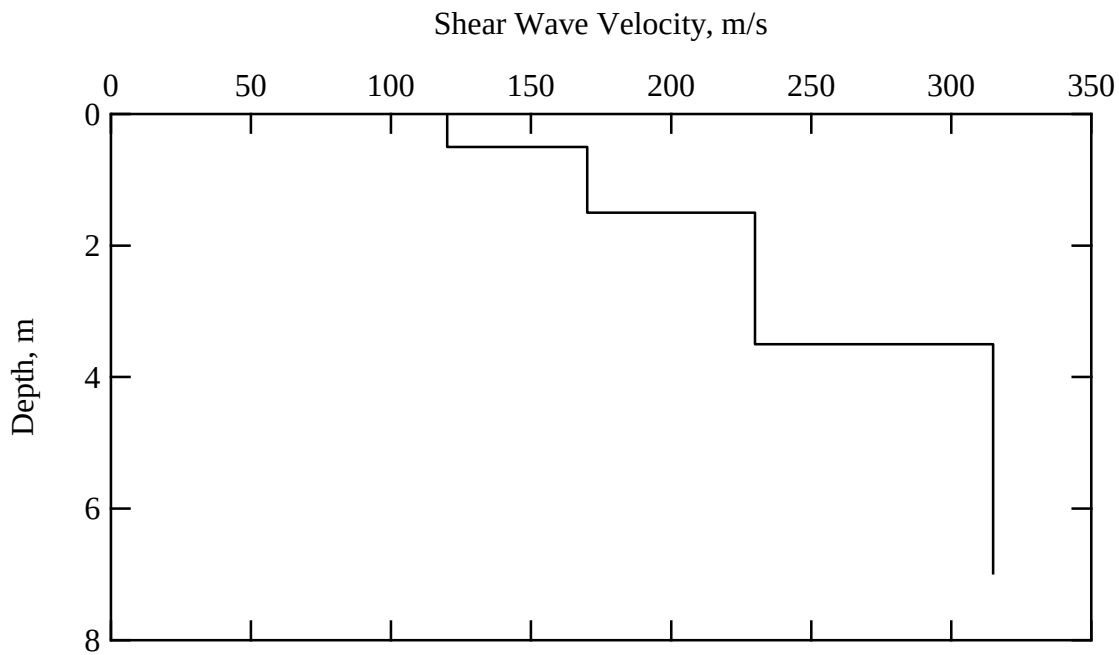
รูปที่ 5-54 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนโป่งแพรววิทยา



รูปที่ 5-55 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนโป่งแพรววิทยา



รูปที่ 5-56 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนโป่งแพรววิทยา



รูปที่ 5-57 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW บริเวณโรงเรียนโป่งแพร่วิทยา

ตารางที่ 5-14 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณโรงเรียนโป่งแพร่วิทยา

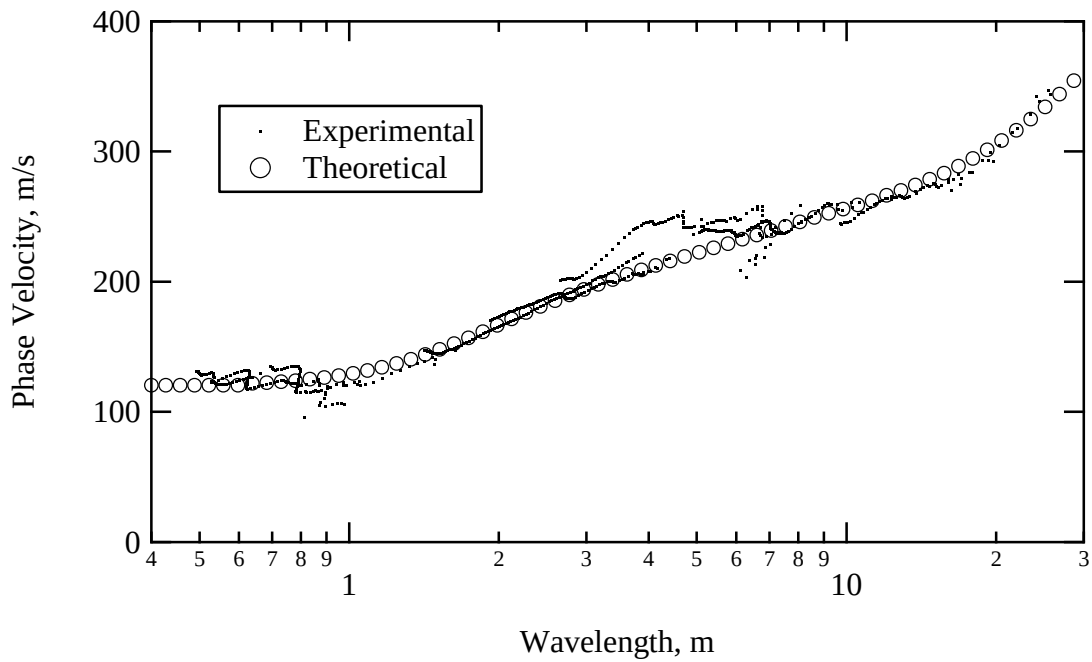
Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	0.5	120	225	0.300	1.8
0.5	1	170	318	0.300	2.0
1.5	2	230	1500	0.488	2.0
3.5	3.5	315	1500	0.477	2.0



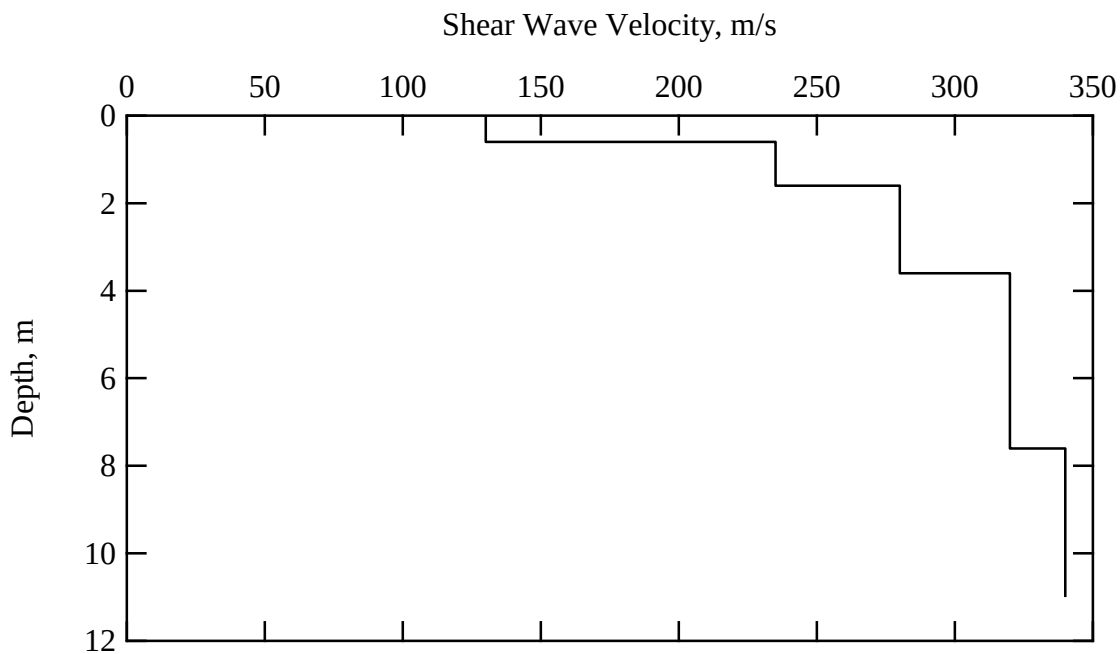
รูปที่ 5-58 แผนที่ตำแหน่งทดสอบ SASW บริเวณสหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพ้ว



รูปที่ 5-59 ภาพถ่ายการทดสอบ SASW บริเวณสหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพ้ว



รูปที่ 5-60 Dispersion Curves จากการทดสอบ SASW บริเวณสหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพร่



รูปที่ 5-61 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW
บริเวณสหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพร่

ตารางที่ 5-15 คุณสมบัติชั้นดินบริเวณสหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพะ

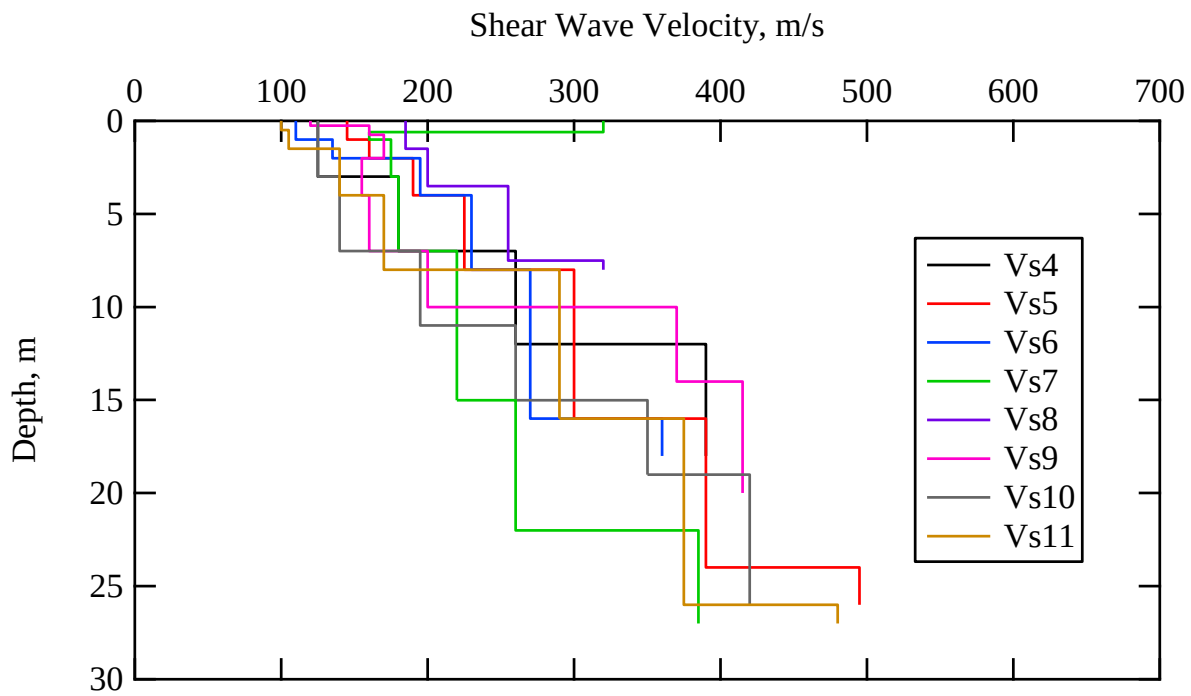
Depth to Top of Layer (m)	Layer Thickness (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	Assumed Values		
			P-Wave Velocity, (m/s)	Poisson's Ratio	Mass Density (tons/m ³)
0	0.6	130	243	0.300	1.8
0.6	1	235	440	0.300	2.0
1.6	2	280	524	0.300	2.0
3.6	2	320	599	0.300	2.0
5.6	2	320	1500	0.476	2.0
7.6	3.4	340	1500	0.473	2.0

5.3 สรุปผลการทดสอบและแผนการวิจัยต่อ

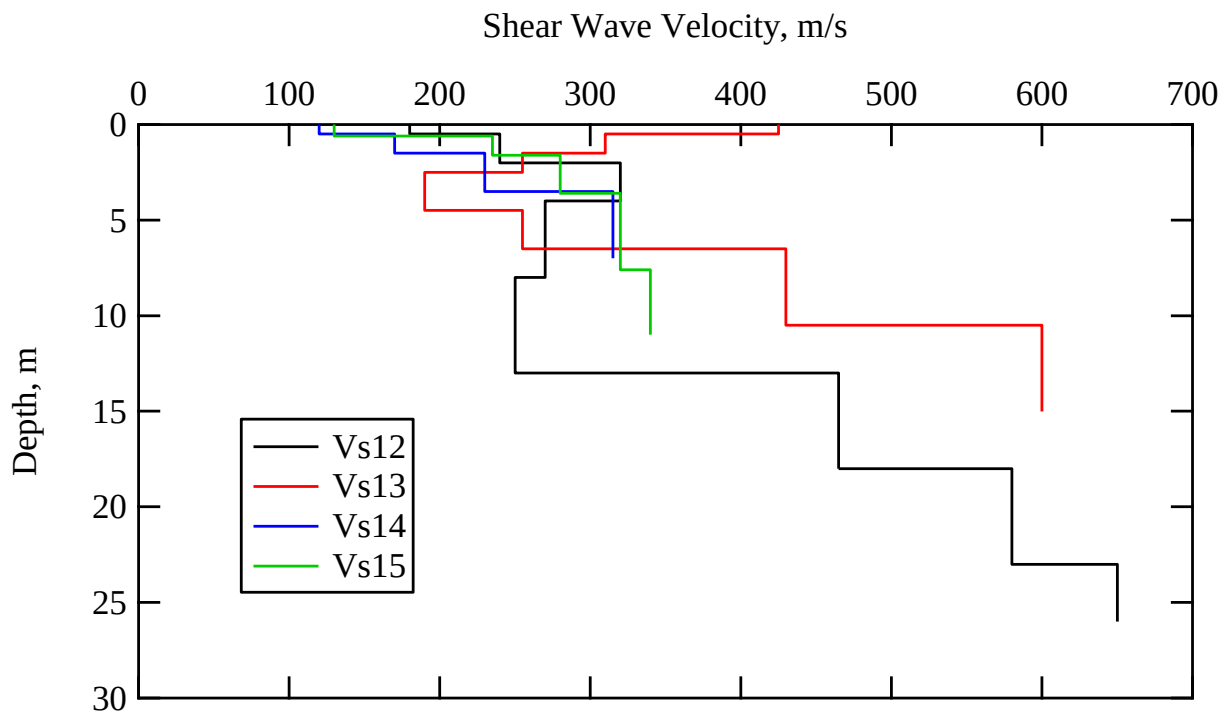
5.3.1 จากผลการทดสอบ SASW เพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน ภายในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบต่อปรากฏการณ์ Liquefaction เนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี พ.ศ. 2557 ได้คือ เป็นที่น่าสังเกตว่าบริเวณตำแหน่งที่เคยเกิดปรากฏการณ์ Liquefaction มักจะพบเจอชั้นดินที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 200 เมตร/วินาที และมีความหนาของชั้นดินตั้งแต่ 4 เมตรขึ้นไป (ความหนามากที่สุดประมาณ 11 เมตร ยกเว้นที่ตำแหน่งทดสอบ Vs8 มีความหนาเพียงแค่ 1.5 เมตร เท่านั้น) ส่วนบริเวณตำแหน่งที่ไม่เกิดปรากฏการณ์ Liquefaction ในปี พ.ศ. 2557 พบเจอชั้นดินที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 200 เมตร/วินาที หนาเพียงแค่ 0.5 – 2 เมตร เท่านั้น ทั้งนี้ Shear Wave Velocity Profile ที่ได้จากการทดสอบ SASW ของทั้งสองกรณีแสดงไว้ในรูปที่ 5-62 และ 5-63 ตามลำดับ

5.3.2 ผลการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ Liquefaction ด้วยวิธีคลื่นสั่นสะเทือน (Shear wave velocity) ด้วยวิธีของ Andrus and Stokoe (2000) และ Kayen et al. (2013) ให้ผลค่อนข้างสอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ดังนั้น มีความเป็นไปได้ที่จะทำการตรวจสอบโอกาสการเกิดปรากฏการณ์ Liquefaction ด้วยวิธีคลื่นสั่นสะเทือน

5.3.3 ค่าความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์เบื้องต้นระหว่าง ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) และจำนวนครั้งการตอกมาตรฐาน (SPT number) ในพื้นที่ศึกษาอำเภอแม่ลาว เป็นไปดังสมการ $Y = 133X^{0.161}$



รูปที่ 5-62 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW ในตำแหน่งที่เคยเกิดปรากฏการณ์ Liquefaction เนื่องจากแผ่นดินไหวในปี พ.ศ. 2557



รูปที่ 5-63 Shear Wave Velocity Profile จากการทดสอบ SASW ในตำแหน่งที่ไม่เกิดปรากฏการณ์ Liquefaction เนื่องจากแผ่นดินไหวในปี พ.ศ. 2557

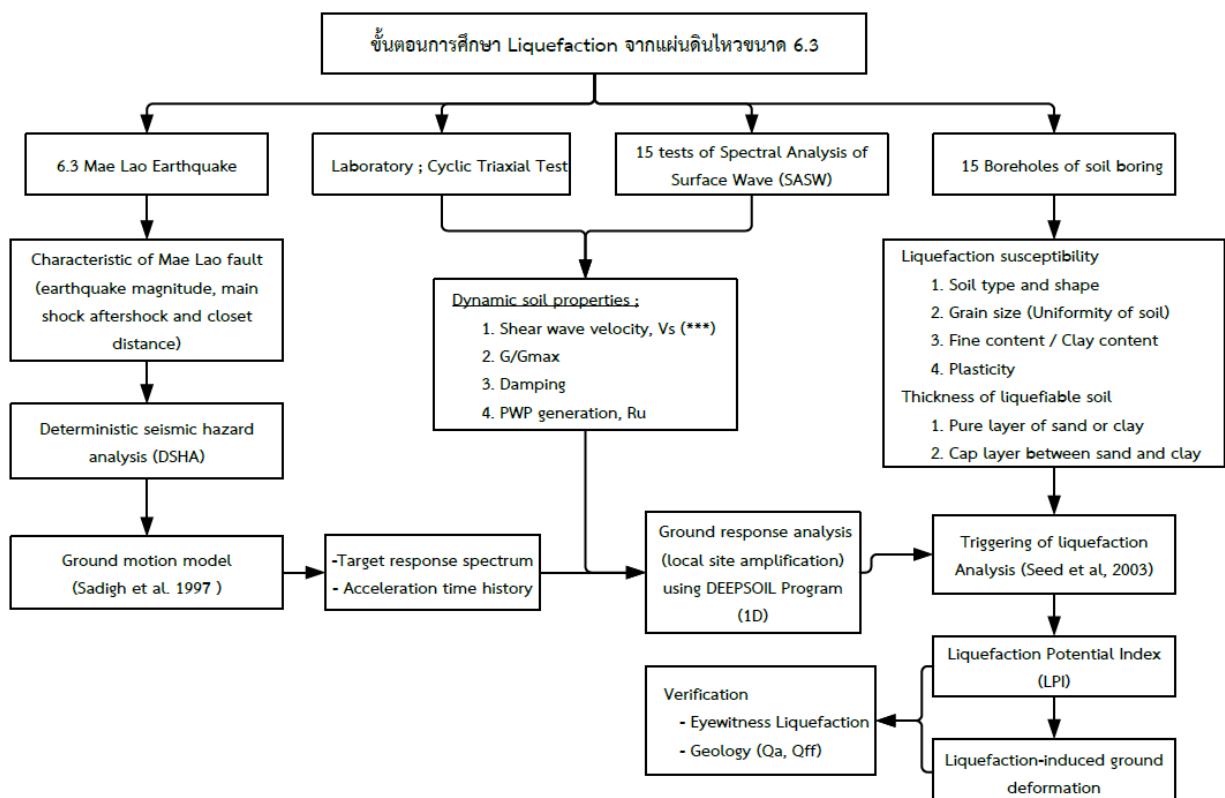
บทที่ 6

การวิเคราะห์ Liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ Liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาวขนาด 6.3 นั้น เพื่อศึกษากระบวนการวิเคราะห์และปัจจัยของคุณสมบัติของชั้นดินในพื้นที่ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย ที่ส่งผลให้เกิด Liquefaction ผลจากการวิเคราะห์สามารถเปรียบเทียบ (calibrate) กับข้อมูลการเกิดหรือไม่เกิด Liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาวขนาด 6.3 เมื่อได้ผลสรุปและเปรียบเทียบจากบทนี้ ในบทที่ 7 และบทที่ 8 จะใช้วิธีการเดียวกันเพื่อวิเคราะห์และจัดทำแผนที่เสี่ยงภัยการเกิด Liquefaction จากขนาดแผ่นดินไหวสูงสุดและขนาดแผ่นดินไหวที่มีผลต่อการก่อสร้างอาคาร รวมทั้งการวิเคราะห์ความมั่นคงของอุโมงค์วัดร่องขุน จังหวัดเชียงรายต่อการเกิด Liquefaction เป็นต้น

6.1 ขั้นตอนการศึกษา Liquefaction จากแผ่นดินไหวแม่ลาวขนาด 6.3

ขั้นตอนการวิเคราะห์ Liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาวขนาด 6.3 สามารถแสดงในรูปที่ 6-1 สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์มีรายละเอียดเบื้องต้น ดังนี้



รูปที่ 6-1 ขั้นตอนการประเมิน Liquefaction จากแผ่นดินไหวขนาด 6.3

1. การวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อการเกิด Liquefaction หรือ Liquefaction susceptibility และสรุปลักษณะชั้นดินที่สามารถเกิด Liquefaction จากข้อมูลผลการเจาะสำรวจชั้นดินและทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน จำนวนทั้งหมด 15 หลุม (ในบทที่ 3)

2. การวิเคราะห์โอกาสเกิด Liquefaction หรือ (Liquefaction triggering) ด้วยวิธี Cyclic stress approach (CSR) และ Liquefaction Potential Index (LPI) ในชั้นต่อนี้ จะต้องมีการทำ Seismic Hazard Analysis การทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือน และการทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ

3. การประเมินการเกิด Liquefaction ที่ผิวดิน (Liquefaction induced ground deformation or Liquefaction manifestation) และเปรียบเทียบผลการเกิด Liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาวขนาด 6.3

6.2 วิธีการวิเคราะห์ Liquefaction

Liquefaction เป็นพฤติกรรมการสูญเสียกำลังรับแรงเฉือนของดินทราย ทรายแป้ง และกรวดปนทราย ที่อยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยเมื่อดินดังกล่าวถูกแรงกระทำจากแผ่นดินไหว แรงเฉือนระหว่างเม็ดดินจะเพิ่มขึ้นหากแผ่นดินไหวมีความรุนแรงพอ เม็ดดินจะเกิดการขยับตัวและยุบตัวลง โดยการยุบตัวดังกล่าวเกิดขึ้นในสถานะไม่ระบายน้ำ (undrained condition) ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน และทำให้หน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) ระหว่างเม็ดดินลดลงและในที่สุดกำลังรับแรงเฉือนจะลดลง

6.2.1 Liquefaction Susceptibility Criteria

การประเมิน Liquefaction susceptibility ประกอบด้วย 1. การวิเคราะห์การกระจายตัวของดิน (Grain size distribution curve) 2. การวิเคราะห์ร้อยละของดินเม็ดละเอียด (Fine content) และ 3. การวิเคราะห์องค์ประกอบของดัชนีความเหนียว (Soil consistency)

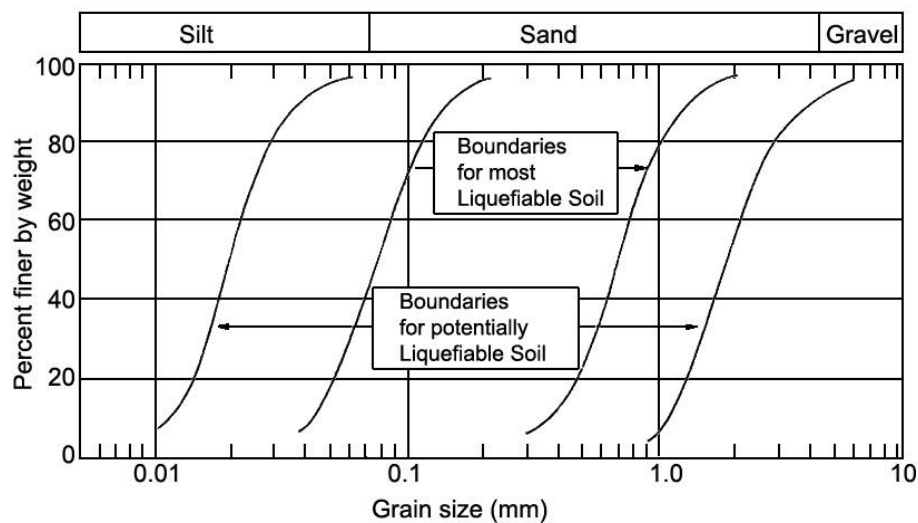
Tsuchida (1970) พบว่า ประเภทของดินที่สามารถเกิด Liquefaction เมื่อรับแรงกระทำจากแผ่นดินไหว คือ ดินประเภทดินทราย (Sand) และ ดินทรายผสมดินทรายแป้ง (Silty sand) โดย Tsuchida (1970) ได้เสนอช่วงของขนาดคละเม็ดดินที่สามารถเกิด Liquefaction ได้ดังแสดงในรูปที่ 6-2

Seed et al. (2003) ได้ศึกษาพฤติกรรมการเกิด Liquefaction ของดินเม็ดละเอียด จำพวกดินทรายแป้งและดินเหนียว (Silty clay) ดังแสดงในรูปที่ 6-3 พบว่าดินเหล่านั้นสามารถเกิด Liquefaction ได้ แต่ทั้งนี้คุณสมบัติของดินได้แก่ ค่า Plasticity index (PI), Liquid limit (LL), Fine content (FC) และ Water content (w%) ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

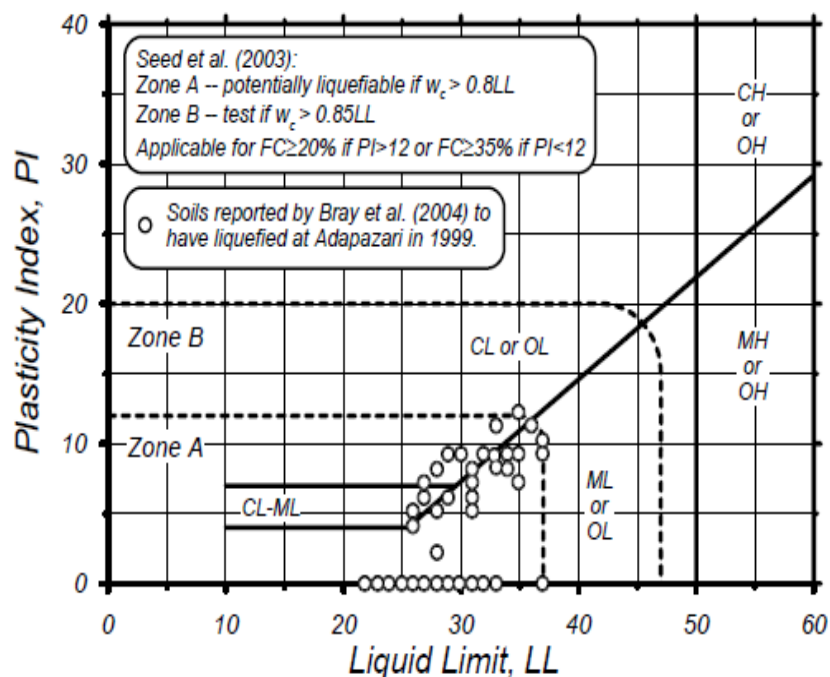
ส่วน A : ดินที่อยู่ในพื้นที่ส่วน A จะมีโอกาสเกิด Liquefaction ถ้าดินมีปริมาณความชื้นในดิน (Water content) มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ของ Liquid limit

ส่วน B : ดินที่อยู่ในพื้นที่ B จะมีโอกาสเกิด Liquefaction ถ้าดินมีปริมาณความชื้นในดิน มากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ ของ Liquid limit

ส่วน C : คือดินที่ไม่ตอบสนองต่อการเกิด Liquefaction



รูปที่ 6-2 การประเมิน Liquefaction susceptibility จากลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดิน (Tsuchida, 1970)



รูปที่ 6-3 การประเมิน Liquefaction susceptibility จาก Plasticity chart (Seed et al., 2003)

6.2.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety)

การวิเคราะห์การเกิด Liquefaction ของชั้นดินในแต่ละระดับความลึก จะพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety) ดังแสดงในสมการที่ 6-1 โดยคิดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากค่าความต้านทานแรงเฉือนของดิน (Cyclic Resistance Ratio, CRR) เทียบกับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในดินจากแรงแผ่นดินไหว (Cyclic Stress Ratio, CSR) ถ้าค่าหน่วยความปลอดภัยของดินมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าดินในชั้นดังกล่าวมีโอกาสเกิด Liquefaction

$$FS_{liq} = \frac{CRR_{M, \sigma'_{vc}}}{CSR} \quad (6-1)$$

โดยทั่วไปแล้วค่าความต้านทานแรงเฉือนของดิน สามารถหาได้หลายวิธี แต่ในการวิเคราะห์นี้ คณะวิจัยฯ จะใช้ความต้านทานแรงเฉือนของดินจากค่า Standard Penetration Test (SPT) ซึ่ง Idriss and Boulanger (2004) ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณค่า CRR ดังแสดงในสมการที่ 6-2

$$CRR_{M=7.5} = \exp \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right) \quad (6-2)$$

โดยที่ $(N_1)_{60cs}$ = ค่า standard penetration test (SPT) ที่ผ่านการปรับแก้แล้ว

$CRR_{M=7.5}$ = ค่า CRR เทียบที่ขนาดของแผ่นดินไหวขนาด 7.5

การหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินที่ขนาดแผ่นดินไหวใดๆ ต้องผ่านการปรับแก้จาก Magnitude scaling factor (MSF) ก่อน ดังแสดงในสมการที่ 6-3

$$CRR_{M, \sigma'_{vc}} = CRR_{M=7.5, \sigma'_{vc}=1} \cdot MSF \quad (6-3)$$

ส่วนการหาค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว Seed and Idriss (1971) ได้เสนอสมการวิเคราะห์ดังแสดงในสมการที่ 6-4

$$CSR = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \gamma_d \quad (6-4)$$

โดยที่ CSR = Cyclic shear ratio induced by earthquake

σ_v = Total overburden pressure in subsoil layers (t/m^2)

σ'_v = Effective overburden pressure in subsoil layers (t/m^2)

g = Gravity's acceleration (m/s^2)

a_{max} = Peak horizontal ground acceleration (m/s^2)

γ_d = Stress reduction factor

นอกจากนี้ ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในดินจากแรงแผ่นดินไหว สามารถวิเคราะห์ได้ในการตอบสนองของชั้นดิน (Ground response analysis) ซึ่งในการศึกษานี้ จะใช้ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในดินจากการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในดินจากวิธีการประมาณของ Seed and Idriss (1971) ด้วย

6.2.3 การวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index

Liquefaction Potential Index (LPI) คือ ค่าที่บ่งบอกความสามารถในการเกิด Liquefaction ตลอดทั้งความยาวของชั้นดินที่พิจารณา โดยที่ค่า LPI สามารถคำนวณได้จากค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของดินในแต่ละชั้น (ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 6.2.2) มาคิดรวมกันตลอดความลึกของหลุมเจาะ Iwasaki et al. (1982) ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณค่า LPI ดังแสดงในสมการที่ 6-5 สำหรับเกณฑ์ที่ใช้จำแนกระดับความสามารถในการเกิด Liquefaction นั้นแสดงในตารางที่ 6-1

$$LPI = \sum_{i=1}^n w_i F_i H_i \quad (6-5)$$

โดยที่

$$F_i = 1 - FS_i \quad \text{สำหรับ } FS_i < 1.0$$

$$F_i = 0 \quad \text{สำหรับ } FS_i \geq 1.0$$

$$w_i = 10 - 0.5 z_i \quad \text{สำหรับ } z < 20 \text{ m}$$

$$w_i = 0 \quad \text{สำหรับ } z > 20 \text{ m}$$

$$H_i = \text{ความหนาของชั้นดิน (เมตร)}$$

$$n = \text{จำนวนของชั้นดิน}$$

$$z_i = \text{ความลึกของชั้นดิน (เมตร)}$$

ตารางที่ 6-1 เกณฑ์ความสามารถในการเกิด Liquefaction จากค่า LPI

Liquefaction potentials	Iwasaki (1986)	Liquefaction Potentials (severity)	Luna and Frost (1988)	Keng at al. (2014) study	
				Chinese criteria	Bray-Sancio criteria
Very Low	LPI=0	Little to none	LPI=0	LPI=0	LPI=0
Low	$0 < LPI < 5$	Low (Minor)	$0 < LPI < 5$	$0 < LPI < 11$	$0 < LPI < 14$
High	$5 \leq LPI < 15$	Moderate	$5 \leq LPI < 15$	$11 \leq LPI < 15$	$14 \leq LPI < 21$
Very High	$15 \leq LPI < 100$	High (Major)	$15 \leq LPI < 100$	$15 \leq LPI < 100$	$21 \leq LPI < 100$

6.3 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของชั้นดินต่อการเกิด Liquefaction

ตัวอย่างของการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของดิน (Grain size distribution) ชนิดของดิน และคุณสมบัติด้านความเหนียวใน Plasticity chart แสดงในรูปที่ 6-4 และรูปที่ 6-5 ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์ของตัวอย่างดินทั้ง 15 หลุมเจาะแสดงไว้ในภาคผนวก ข

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของชั้นดินต่อการเกิด Liquefaction แสดงในตารางที่ 6-2 ส่วนผลการวิเคราะห์ทั้งหมดของข้อมูลชั้นดินทั้ง 15 หลุมเจาะ (ภาคผนวก ข) จากผลการวิเคราะห์ พบว่า โดยส่วนใหญ่มีทั้งดินเหนียว ดินทรายแป้ง และดินทรายเป็นองค์ประกอบ หลุมเจาะ BH-1 ถึง BH-11 จะมีชั้นดินทรายที่มีขนาดเม็ดใกล้เคียงกัน (Uniform grade) ซึ่งมีความอ่อนไหวต่อการเกิด Liquefaction แทรกสลับชั้นอยู่ ส่วนที่หลุมเจาะ BH-10 พบดินทรายเม็ดใกล้เคียงกันเกือบตลอดทั้งหลุมเจาะ นอกจากนี้ยังพบลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของหลุมเจาะทั้งหมด คือ สัดส่วนของดินทรายแป้งที่มีความเหนียวต่ำ (low plasticity silt) มีเปอร์เซ็นต์สูงเมื่อเทียบกับดินประเภทอื่น ทั้งนี้ ในงานศึกษาของ Seed et al. (2003) ได้บ่งบอกว่าดินทรายแป้งเป็นดินที่สามารถเกิด Liquefaction ได้เช่นกัน ดังนั้นจากข้อมูลชั้นดินและเกณฑ์ตามที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถสรุปชั้นดินที่สามารถเกิด Liquefaction ได้ดังนี้

BH-1: วัดร่องชุ่น พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ตั้งแต่ 6.0 เมตร ลงไปถึง 14.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 5.0 ถึง 6.0 เมตร

BH-2: วัดร่องชุ่น พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ตั้งแต่ 5.0 เมตร ลงไปถึง 14.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 0.0 ถึง 2.0 เมตร

BH-3: วัดร่องชุ่น พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ตั้งแต่ 4.0 เมตร ลงไปถึง 13.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 0.0 ถึง 4.0 เมตร

BH-4: วัดน้ำล้อม พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 5.0 เมตร ถึง 6.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 1.0 และ 3.0 เมตร และ 6.0 ถึง 8.0 เมตร

BH-5: โรงเรียนบ้านหนองเก้าห้อง พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 3.0 เมตร ถึง 6.0 เมตร และ 11.0 เมตร ถึง 12.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 0.0 ถึง 1.0 เมตร

BH-6: บ้านสันกันแหว พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 3.0 เมตร ถึง 6.0 เมตร ถึง 8.0 เมตร ถึง 11.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 6.0 ถึง 9.0 เมตร

BH-7: วันสันตันม่วง พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ตั้งแต่ 8.0 เมตร ถึง 9.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 0.0 ถึง 3.0 เมตร และ 10.0 ถึง 13.0 เมตร

BH-8: เชื้อนห้วยแม่มอญ (ไหล่เขาด้านขวา) พบชั้นดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 5.0 ถึง 8.0 เมตร

BH-9: ชุมชนโป่งปูเฟื่อง (หมู่บ้านหนองผำ) พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 8.0 เมตร ถึง 10.0 เมตร ดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 0.0 ถึง 8.0 เมตร ตามลำดับ

BH-10: โรงเรียนบ้านทรายขาว พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ตั้งแต่ 1.0 เมตร ลงไป ถึง 10.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 0.0 ถึง 1.0 เมตร ตามลำดับ

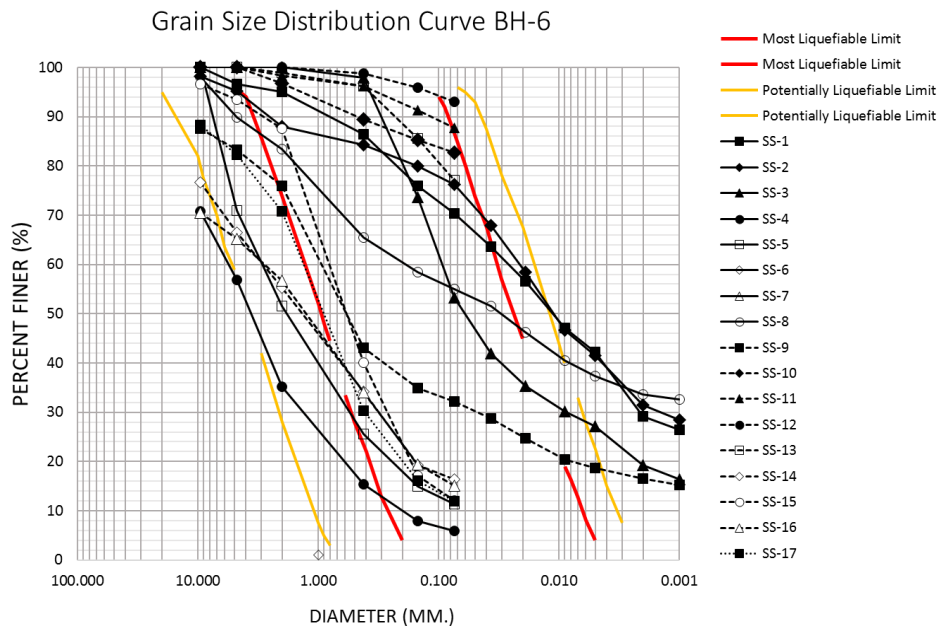
BH-11: วัดท่าแถมจันทร์ พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ตั้งแต่ 2.0- 5.0 เมตร และ ตั้งแต่ 8.0-12.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 1.0-2.0 เมตร และ 5.0-8.0 เมตร

BH-12: โรงเรียนแม่ลาววิทยาคม พบชั้นดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ตลอดทั้งหลุมเจาะ

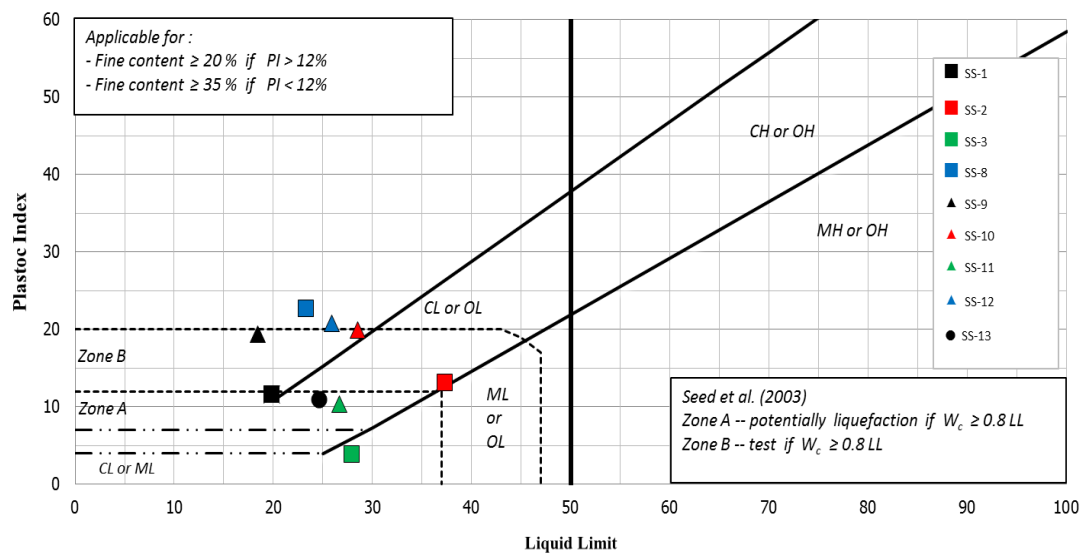
BH-13: ทางหลวงหมายเลข 118 พบชั้นดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ตลอดทั้งหลุมเจาะ

BH-14: โรงเรียนโป่งแพร่วิทยา พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ตั้งแต่ 1.0 เมตร ถึง 4.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 0.0 ถึง 1.0 เมตร

BH-15: สหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพร่ พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ที่ความลึก 2.0 เมตร ถึง 3.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด Liquefaction ตลอดทั้งหลุมเจาะ



รูปที่ 6-4 ตัวอย่างการวิเคราะห์การกระจายตัวของดินของหลุมเจาะ BH-6



รูปที่ 6-5 ตัวอย่างการวิเคราะห์คุณสมบัติความเหนียวใน Plasticity chart ของหลุมเจาะ BH-6

ตารางที่ 6-2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อการเกิด Liquefaction ของหลุมเจาะ BH-10

Depth (m)	Soil	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay (%)	Corrected SPT	Plasticity of silty soil (PI)	Plasticity of silty soil (LL)	Liquefaction Susceptibility
0		CL	-	79.27	22.66	7	9.98	30.59	Potentially Liquefiable
1									
2		SM	Uniform grade	23.70	5.24	9			Liquefiable
3		SP-SM	Uniform grade	5.20	-	22			Liquefiable
4		SW-SM	Well grade	8.56	-	17			Potentially Liquefiable
5		SW-SM	Well grade	11.00	2.07	18			Potentially Liquefiable
6		SP	-	-	-	20			Liquefiable
7		SP	Uniform grade	5.50	-	12			Liquefiable
8		SW-SM	Uniform grade	6.80	-	12			Liquefiable

6.4 ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI)

ขั้นตอนก่อนการวิเคราะห์หาอัตราส่วนความปลอดภัยการเกิด Liquefaction ด้วยวิธี Cyclic Stress Approach (CSR) และการวิเคราะห์ค่า Liquefaction Potential Index จะต้องสร้างแบบจำลองในลักษณะ 1 มิติ และคัดเลือกคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อวิเคราะห์หาขนาดอัตราเร่งที่ผิวดิน (a_{max}) และค่า Cyclic Shear Stress ตลอดทั้งความยาวของชั้นดิน

6.4.1 Deterministic Seismic hazard analysis (DSHA)

การวิเคราะห์หาค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration) และ Spectral Acceleration พิจารณาที่เหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาวขนาด 6.3 และใช้แบบจำลองลดทอนพลังงานของ Sadigh et al. (1997) (Soralump et al., 2010) เมื่อวัดระยะห่างจากหลุมเจาะทั้ง 15 หลุม ไปยังจุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหวขนาด 6.3 สามารถวิเคราะห์ขนาดอัตราเร่งพื้นดิน (PGA) ณ ชั้นหินแข็งมีค่าตั้งแต่ 0.128g ถึง 0.649g ดังแสดงในตารางที่ 6-3 จากงานศึกษาของ Soralump and Feungaugsorn (2013) พบว่าขนาดอัตราเร่งพื้นดินที่เริ่มส่งผลให้เกิด Liquefaction ต้องมีค่ามากกว่า 0.2g ขึ้นไป ดังนั้นจากการประมาณค่า PGA ที่หลุมเจาะทั้ง 15 หลุมในงานศึกษานี้ พบว่าเกือบทุกหลุมเจาะมีความแรงของแผ่นดินไหวพอที่จะก่อให้เกิด Liquefaction ยกเว้นหลุมเจาะ BH-11 ที่มีค่า PGA ประมาณ 0.128g

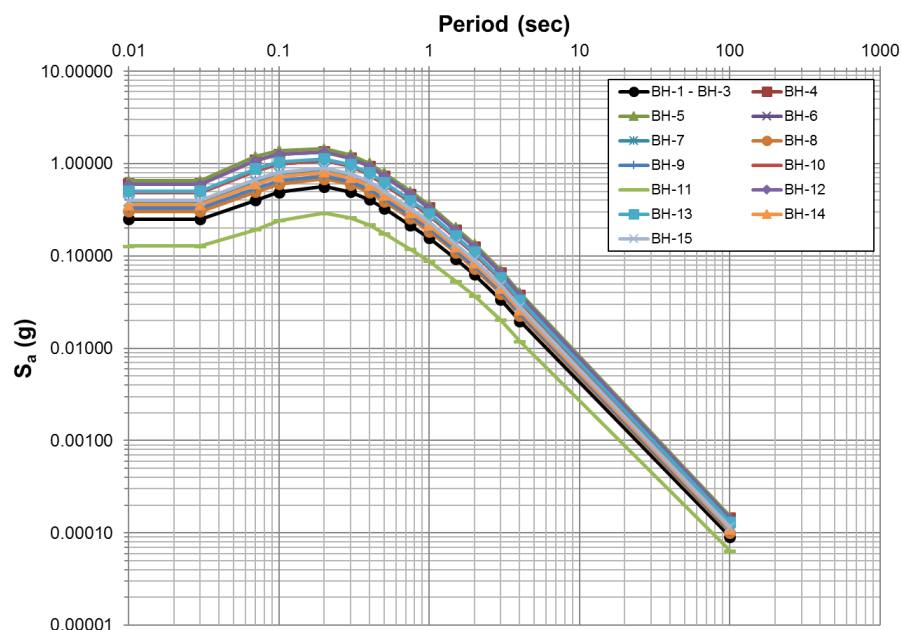
ในภายหลังได้ตรวจสอบแผ่นดินไหวรอง (Aftershock) ซึ่งมีขนาด 5.3 และระยะห่างจากหลุมเจาะ BH-11 ประมาณ 5 กิโลเมตร พบว่าสามารถสร้างขนาดอัตราเร่งพื้นดิน (PGA) ณ ชั้นหินแข็งประมาณ 0.27g จากข้อมูลนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า นอกจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวหลัก (Main shock) แล้ว แผ่นดินไหวรอง (Aftershock) ก็สามารถส่งผลให้เกิด Liquefaction ได้เช่นกัน ทั้งนี้ แผ่นดินไหวรองต้องมีขนาดมากกว่า 5.0 และอยู่ในรัศมีประมาณ 10 กิโลเมตร

ตารางที่ 6-3 ขนาดอัตราเร่งพื้นดิน ณ หลุมเจาะในพื้นที่ศึกษา

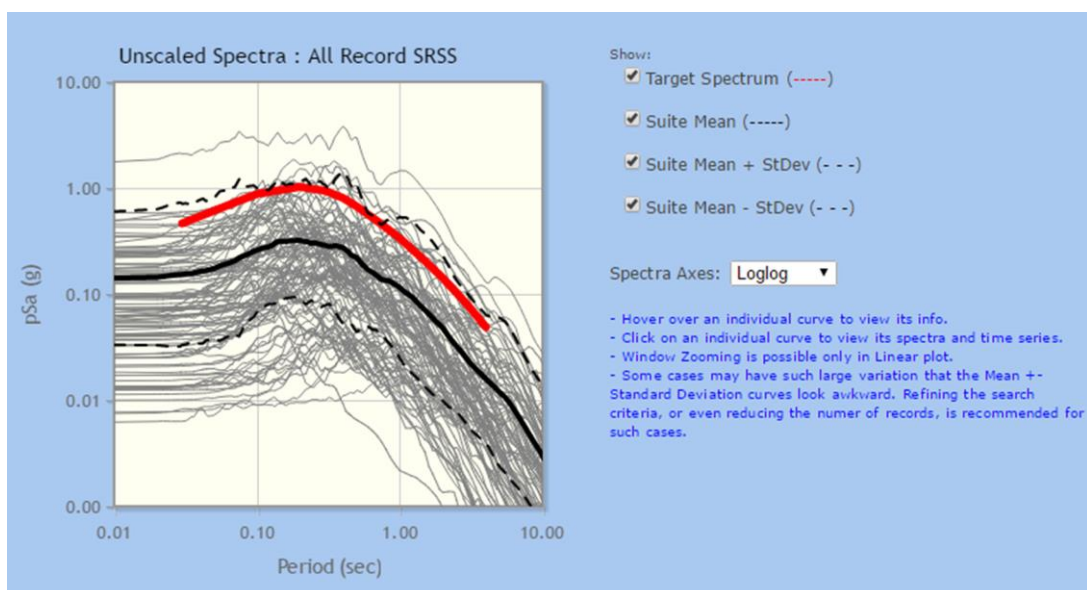
Borehole No.	N	E	ระยะใกล้สุดจาก M 6.3 (km)	PGA (g)
BH-1	19.824	99.763	11.212	0.250
BH-2	19.824	99.763	11.212	0.250
BH-3	19.824	99.763	11.212	0.250
BH-4	19.759	99.696	1.400	0.598
BH-5	19.754	99.692	0.671	0.649
BH-6	19.763	99.720	3.446	0.483
BH-7	19.799	99.703	5.809	0.386
BH-8	19.819	99.657	8.700	0.303
BH-9	19.713	99.628	7.725	0.328
BH-10	19.687	99.683	3.478	0.481
BH-11	19.649	99.509	22.080	0.128
BH-12	19.743	99.704	1.433	0.596
BH-13	19.744	99.663	3.030	0.503
BH-14	19.806	99.676	6.646	0.359
BH-15	19.787	99.659	5.465	0.398

6.4.2 การเลือกคลื่นแผ่นดินไหว

นอกจากขนาดอัตราเร่งพื้นดิน (PGA) แล้วจากการวิเคราะห์ DSHA ยังต้องวิเคราะห์หา Target response acceleration (S_a) ของแต่ละหลุมเจาะ (ดังแสดงรูปที่ 6-6) เพื่อนำไปใช้คัดเลือกคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการสร้างแบบจำลองการตอบสนองของชั้นดิน การนำ Target response acceleration ไปหาข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจริงและมีความถี่ใกล้เคียง Target response acceleration อ้างอิงจากฐานข้อมูล PEER Ground Motion Database (<http://ngawest2.berkeley.edu/>) ดังแสดงในรูปที่ 6-7 และเลือกข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อไปใช้วิเคราะห์ ณ ระดับชั้นหินแข็งของแต่ละหลุมเจาะ



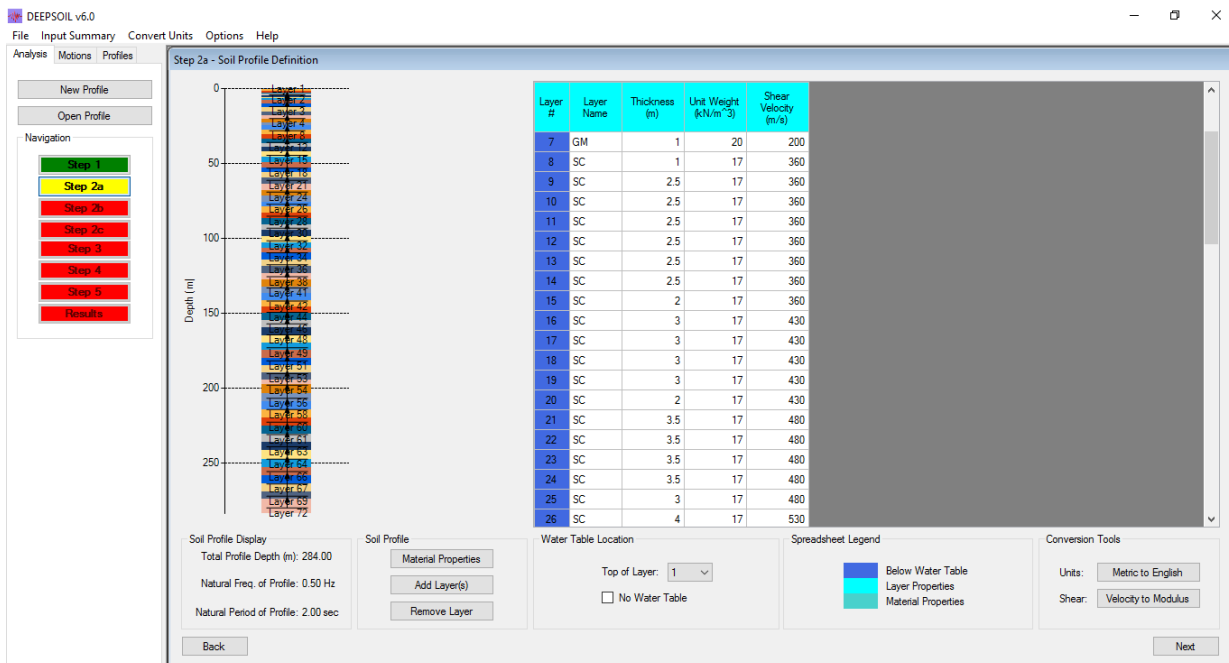
รูปที่ 6-6 ผลการวิเคราะห์ Target response acceleration ของแต่ละหลุมเจาะ



รูปที่ 6-7 ตัวอย่างการเลือกข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจาก PEER ground motion database

6.4.3 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน (Ground response analysis)

การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน ดำเนินการวิเคราะห์ในลักษณะ 1 มิติ (One Dimensional) ด้วยแบบจำลอง equivalent linear model ในโปรแกรม DeepSoil ข้อมูลชั้นดินพิจารณาตามผลการเจาะสำรวจดินในบ่อที่ 3 ซึ่งมีความลึกตั้งแต่ 7.0-25.0 เมตร โดยประมาณ นอกจากนี้การแบ่งชั้นดินพิจารณาตามผลวิเคราะห์ Liquefaction susceptibility ซึ่งพบ ลักษณะของชั้นดินของหลุมเจาะ BH-1 ถึง BH-11 ส่วนใหญ่เป็นชั้นดินทราย ดินทรายแป้ง และดินเหนียว และอยู่บริเวณพื้นที่ราบ ซึ่งมีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นแบบ Qa และ Qff ส่วนหลุมเจาะ BH-12 ถึง BH-15 เป็นดินทราย ดินทรายแป้ง ที่มีเม็ดกรวดผสม เนื่องจากอยู่ใกล้กับพื้นที่เชิงเขา ลักษณะตะกอนเป็นแบบ Qt สำหรับตัวอย่างการแบ่งความหนาชั้นดินและข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity), หน่วยน้ำหนักของดิน, (Unit weight) ค่า Modulus reduction and damping ratio เป็นต้น แสดงในแบบจำลองในโปรแกรม DeepSoil ในรูปที่ 6-8 ระดับของชั้นหินแข็ง (bed rock) สำหรับการปล่อยคลื่นแผ่นดินไหว ต้องมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนมากกว่า 760 m/s^2 ขึ้นไป



รูปที่ 6-8 ตัวอย่างการกำหนดชั้นดินและคุณสมบัติดินในโปรแกรม Deepsoil

ผลวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินแสดงค่าอัตราเร่งที่ผิวดิน (a_{max}) และอัตราส่วนการขยายอัตราเร่งในตารางที่ 6-4 จากผลการวิเคราะห์การตอบสนองชั้นดิน พบว่ามีพฤติกรรมลดขนาดอัตราเร่ง (De-amplification) ที่หลุมเจาะ BH-1 ถึง BH-8 ส่วนที่หลุมเจาะ BH-9 ถึง BH-15 มีพฤติกรรมขยายขนาดอัตราเร่ง (Amplification) สำหรับพฤติกรรมหรือขยายขนาดอัตราเร่งสอดคล้องกับลักษณะทางธรณีวิทยา โดยที่หลุมเจาะที่มีชั้นดินตะกอน เช่น Qa และ Qff มีพฤติกรรมลดขนาดอัตราเร่ง ส่วนหลุมเจาะที่มีชั้นดินแข็งหรือตะกอนที่ผุพังกับที่ เช่น Qt มีพฤติกรรมขยายขนาดอัตราเร่ง

ตารางที่ 6-4 ผลการวิเคราะห์ a_{max} และการขยายขนาดอัตราเร่งพื้นดิน

BH	PGA at bedrock (g)	PGA at surface (g)	Amplification ratio	Geology type
1	0.250	0.228	0.911	Q_{ff}
2	0.250	0.228	0.913	Q_{ff}
3	0.250	0.255	1.021	Q_{ff}
4	0.598	0.287	0.480	Q_a
5	0.649	0.529	0.815	Q_a
6	0.483	0.323	0.669	Q_a
7	0.386	0.209	0.541	Q_a
8	0.303	0.287	0.947	Q_a
9	0.328	0.424	1.293	Q_a
10	0.481	0.482	1.002	Q_a
11	0.128	0.202	1.578	Q_a
12	0.596	0.603	1.012	Q_t
13	0.503	0.527	1.048	Q_t
14	0.360	0.671	1.863	Q_t
15	0.398	0.475	1.193	Q_t

6.4.4 ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index

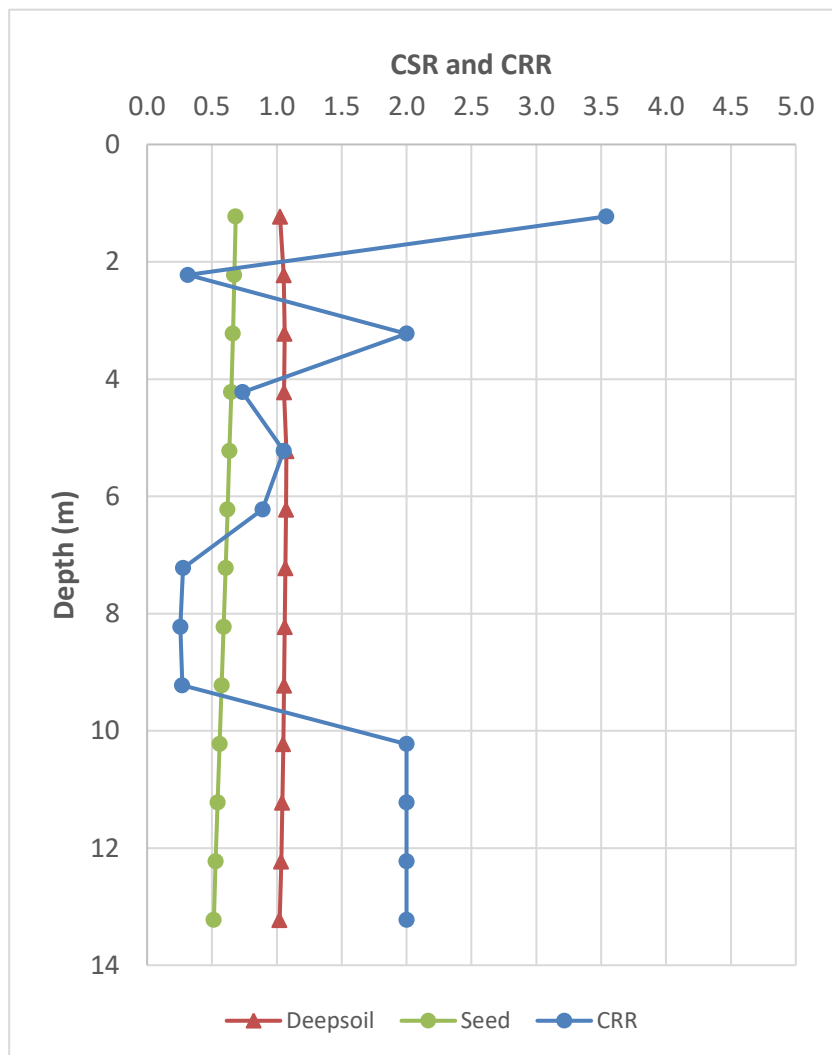
ค่าอัตราเร่งที่ผิวดินของแต่ละหลุมเจาะนำมาใช้คำนวณค่า Cyclic Stress Ratio (CSR) ด้วยสมการของ Seed et al.(2003) และเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ค่า CSR จากแบบจำลองชั้นดินในหนึ่งมิติ ดังแสดงในรูปที่ 6-9 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยการใช้แบบจำลองฯ ให้ค่า CSR ที่มากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการของ Seed et al. (2003) ทั้งนี้เนื่องจากสมการของ Seed et al (2003) ใช้วิธีการพิจารณาค่าอัตราเร่งเฉลี่ย ไม่ได้พิจารณาขนาดอัตราเร่งตามที่เกิดขึ้นจริงตลอดความลึกชั้นดิน

ผลการวิเคราะห์ค่า CSR นำไปคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยในแต่ละชั้นดินและค่า Liquefaction Potential Index (LPI) ดังแสดงตัวอย่างของผลการวิเคราะห์ที่หลุมเจาะ BH-10 ในตารางที่ 6-5 ส่วนผลการวิเคราะห์ของแต่ละหลุมเจาะทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ค

ในตารางที่ 6-6 เป็นการสรุปผลการวิเคราะห์ค่า LPI และตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อมูลการสำรวจการเกิด Liquefaction ในสนาม ผลการวิเคราะห์พบว่า หลุมเจาะที่มีหลักฐานการเกิด Liquefaction ที่ BH-4 ถึง BH-11 จะมีผลการวิเคราะห์ค่า LPI อยู่ในเกณฑ์ High (LPI มากกว่า 5) ยกเว้นหลุม BH-8 หลุมเดียวที่ได้ค่า LPI ต่ำกว่าเกณฑ์ เนื่องจากไม่ได้เป็นชั้นดินตามธรรมชาติ ผลการติดตามข้อมูล

ภายหลังทราบว่าเป็นทรายที่นำไปโรยเพื่ออุดรอยแยกของชั้นดิน สำหรับหลุมเจาะที่ไม่มีหลักฐานการเกิด Liquefaction ที่ BH-12 ถึง BH-15 ผลการวิเคราะห์ค่า LPI อยู่ในเกณฑ์ Low (LPI น้อยกว่า 5)

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการวิเคราะห์ Liquefaction ด้วยวิธี cyclic stress approach และใช้ผลการวิเคราะห์ Cyclic Stress Ratio (CSR) จากการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน ให้ผลที่สอดคล้องและเหมาะสมกับพื้นที่ศึกษา อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 6-9 เปรียบเทียบค่า CSR จากการวิเคราะห์ด้วยสมการของ Seed et al (2003) กับแบบจำลองชั้นดินในหนึ่งมิติ

ตารางที่ 6-5 ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-10

Input parameters:		Peak ground accel (g) = 0.482003		Name of boring log BH-10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
-------------------	--	----------------------------------	--	--------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

ตารางที่ 6-6 สรุปผลการวิเคราะห์และตรวจสอบกับข้อมูลการสำรวจในสนาม

BH	การสำรวจ ในสนาม	Liquefaction Susceptibility	Geology	LPI (*)	LPI (**)
1	None liquefied	Potentially to liquefiable	Q_{ff}	0.982	0.000
2	None liquefied	Potentially to liquefiable	Q_{ff}	2.872	0.000
3	None liquefied	Potentially to liquefiable	Q_{ff}	3.793	2.625
4	liquefied	Potentially to liquefiable	Q_a	15.710	9.307
5	liquefied	Potentially to liquefiable	Q_a	8.984	5.307
6	liquefied	Potentially to liquefiable	Q_a	7.520	3.943
7	liquefied	Potentially to liquefiable	Q_a	9.156	4.971
8	liquefied	Potentially to liquefiable	Q_t	0.000	0.000
9	liquefied	Potentially to liquefiable	Q_a	9.766	6.220
10	liquefied	Potentially to liquefiable	Q_a	23.136	14.290
11	Liquefied	Potentially to liquefiable	Q_a	21.933	13.089
	Liquefied	Potentially to liquefiable	Q_a	25.349	18.117
12	None liquefied	None liquefiable to potentially	Q_t	1.286	0
13	None liquefied	None liquefiable to potentially	Q_t	0	0
14	None liquefied	None liquefiable to potentially	Q_t	0	0
15	None liquefied	None liquefiable to potentially	Q_t	0	0

* การคำนวณ LPI โดยใช้ค่าแรงเฉือนแผ่นดินไหวจากการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน

** การคำนวณ LPI โดยใช้ค่าแรงเฉือนแผ่นดินไหวจากสมการประมาณโดย Seed et al (2003)

*** $LPI < 5.0$ Low,

*** $5.0 < LPI < 15.0$ High

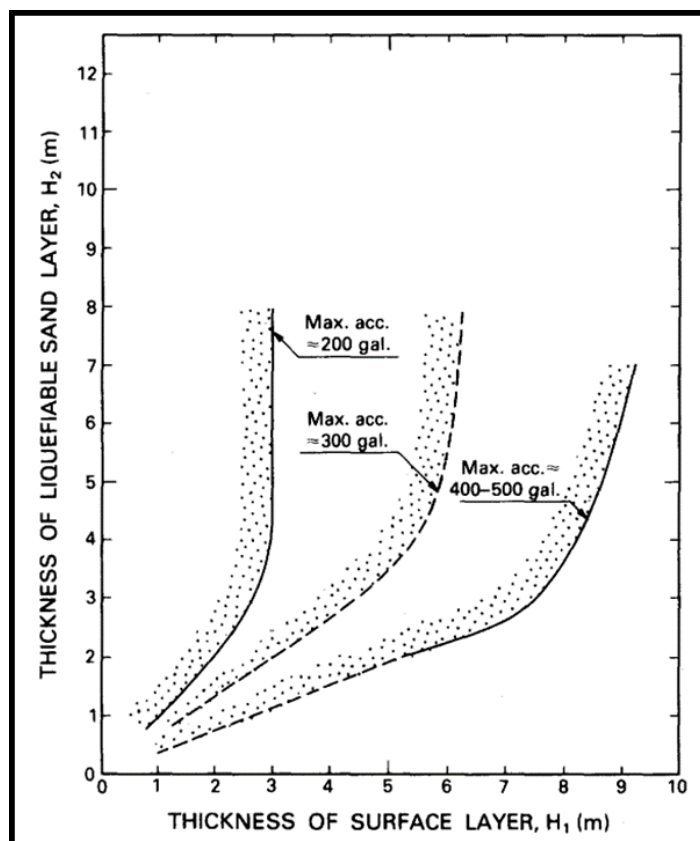
*** $LPI > 15.0$ Very high

6.5 ผลการวิเคราะห์ Liquefaction manifestation

การวิเคราะห์การเกิด Liquefaction manifestation คือ การตรวจสอบว่าชั้นดินมีโอกาสที่จะเสียหายจาก Liquefaction หรือไม่ ซึ่งโดยปกติแล้วการเกิด Liquefaction อาจจะไม่ปรากฏความเสียหายบนผิวดินให้เห็นก็ได้ ขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นดินว่ามีขนาดหนาเพียงพอที่จะป้องกันการผุดขึ้นมาของแรงดันน้ำกับทรายได้หรือไม่ (Cap layer) หรือความแรงของแผ่นดินไหวไม่เพียงพอ เป็นต้น

การวิเคราะห์ Liquefaction manifestation ใช้วิธีการที่เสนอโดย Ishihara (1985) ดังแสดงในรูปที่ 6-10 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ อัตราเร่งที่ผิวดิน (PGA) ความหนาของชั้นดินที่สามารถเกิด Liquefaction (H_2) ความหนาชั้นดินปิดทับที่ต้องการ และความหนาจริง (H_1) ของหลุมเจาะ BH-4 ถึง BH-11 แสดงดังตาราง 6-7

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ (ตารางที่ 6-7) หลุมเจาะทั้ง 7 หลุมซึ่งมีหลักฐานการเกิด Liquefaction ที่ผิวดิน พบว่า ความหนาชั้นดินปิดทับไม่เพียงพอต่อการต้านแรงดันจากการเกิด Liquefaction ผลทำให้เกิดการผุดของทรายขึ้นมาที่ผิวดิน ซึ่งสอดคล้องกับหลักฐานที่เกิด Liquefaction ที่ผิวดิน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6-11 ถึง 6-14 ตามลำดับ



รูปที่ 6-10 กราฟความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ Liquefaction manifestation (Ishihara, 1985)

ตารางที่ 6-7 สรุปผลการวิเคราะห์ Liquefaction manifestation

Borehole No.	Input PGA (g)	Amax (g)	ความหนาของชั้นดินที่สามารถเกิด Liquefaction, H2 (m)	ความหนาชั้นดินปิดทับที่ต้องการ (m)	ความหนาจริง, H1 (m)	ผลสรุปการเปรียบเทียบ
BH-1	0.250	0.228				
BH-2	0.250	0.228				
BH-3	0.250	0.255				
BH-4	0.598	0.287	3.0	3.0	1.0	ไม่เพียงพอ
BH-5	0.649	0.529	2.0	6.0	3.0	ไม่เพียงพอ
BH-6	0.483	0.323	2.0	3.0	3.0	เท่ากัน
BH-7	0.386	0.209	2.0	2.0	2.5	เกือบเท่ากัน
BH-8	0.303	0.287	-	-	-	-
BH-9	0.328	0.424	2.0	5.0	5.0	เท่ากัน
BH-10	0.481	0.482	7.0	9.0	2.0	ไม่เพียงพอ
BH-11	0.128	0.202	3.0	3.0	3.0	เท่ากัน
BH-12	0.596	0.603				
BH-13	0.503	0.527				
BH-14	0.360	0.671				
BH-15	0.398	0.475				



รูปที่ 6-11 การเกิด Liquefaction บริเวณผิวดินที่หลุมเจาะ BH-4



รูปที่ 6-12 การเกิด Liquefaction บริเวณผิวดินที่หลุมเจาะ BH-6



รูปที่ 6-13 การเกิด Liquefaction บริเวณผิวดินที่หลุมเจาะ BH-9



รูปที่ 6-14 การเกิด Liquefaction บริเวณผิวดินที่หลุมเจาะ BH-10

6.6 สรุปผลการวิเคราะห์

6.6.1 วิธีการวิเคราะห์การเกิด Liquefaction ด้วยวิธี Cyclic stress ratio (CSR) Liquefaction Potential Index (LPI) และ Liquefaction Manifestation เหมาะสมกับการศึกษาในพื้นที่ อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ส่วนการวิเคราะห์ค่า LPI ที่ใช้ค่า Cyclic stress ratio (CSR) จากการวิเคราะห์ ground response analysis ให้ค่าที่สอดคล้องกับหลักฐานการเกิด Liquefaction มากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการของ Seed et al. (2003)

6.6.2 กรณีของการเกิด Liquefaction ที่อำเภอแม่สรวย จังหวัดเชียงราย เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหวตาม (Aftershock) แต่ทั้งนี้ ขนาดของแผ่นดินไหวต้องมากกว่า 5.0 และศูนย์กลางแผ่นดินไหวต้องอยู่ในรัศมีไม่มากกว่า 10 กิโลเมตร ถึงจะสามารถเกิด Liquefaction ได้

6.6.3 บริเวณที่พบหลักฐานการเกิด Liquefaction จะอยู่บนชั้นหินตะกอนใหม่ (Quaternary deposit) และเป็นตะกอนจำพวกตะกอนน้ำพา (Fluvial deposit, Qa)

6.6.4 นอกจากดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ได้แล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ยังพบว่าชั้นดินเม็ดละเอียดจำพวกดินทรายแป้ง (silty soil) สามารถเกิด Liquefaction ได้เช่นกัน สอดคล้องทั้งหลักฐานที่ปรากฏในสนามและการวิธีการวิเคราะห์

บทที่ 7

การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงภัยจากปรากฏการณ์ Liquefaction ในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

7.1 หลักการวิเคราะห์ความเสี่ยงโดยแผนภูมิเหตุการณ์

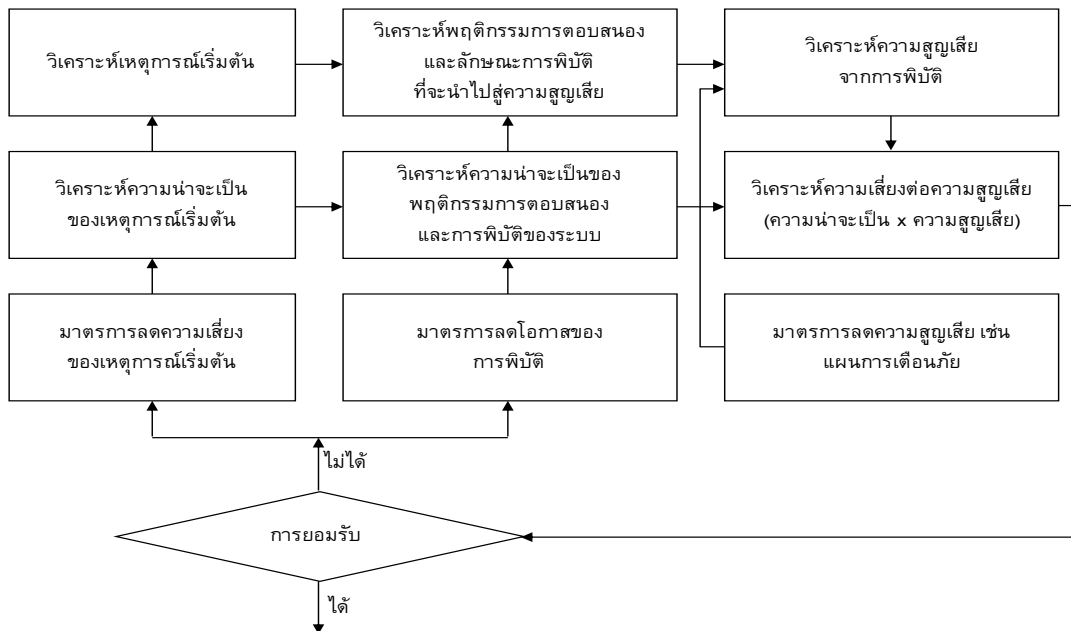
การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงภัยจากปรากฏการณ์ Liquefaction ในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย เพื่อการจัดลำดับพื้นที่เสี่ยงภัยและเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบสิ่งก่อสร้าง เช่น อาคาร บ้านเรือน เชื้อน เป็นต้น ให้ปลอดภัยจากเหตุการณ์ Liquefaction หลักการวิเคราะห์ความเสี่ยง ประกอบด้วย การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ และผลกระทบจากเหตุการณ์ ดังนี้

$$\text{ความเสี่ยง} = \text{ความน่าจะเป็น} \times \text{ผลกระทบ}$$

การวิเคราะห์ความเสี่ยงเพื่อวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวข้างต้นประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ แสดงในรูปที่ 7-1 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การกำหนดเหตุการณ์เริ่มต้น ในกรณีของการศึกษานี้ เหตุการณ์เริ่มต้นของการพิบัติจาก Liquefaction ได้แก่ แผ่นดินไหวและอัตราเร่งพื้นดิน
2. การลำดับเหตุการณ์การตอบสนองของระบบ การลำดับการตอบสนองของระบบเป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์ความเสี่ยง เทคนิคในการวิเคราะห์ คือ การใช้แผนภูมิเหตุการณ์ ซึ่งเป็นแผนภูมิที่ลำดับเหตุการณ์ตั้งแต่เริ่มจนถึงสุด โดยพิจารณาเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้และสามารถวิเคราะห์ได้
3. การประเมินความสูญเสีย ความสูญเสียในแต่ละกรณีของการพิบัติสามารถวิเคราะห์ได้โดยการวิเคราะห์พื้นที่ผลกระทบจากการวิเคราะห์การพังทลายของอาคารบ้านเรือน เชื้อน เพื่อประเมินความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกรณีการพิบัติต่างๆ ซึ่งในการประเมินความสูญเสียได้แบ่งเป็น ความสูญเสียในชีวิตและความสูญเสียในทรัพย์สิน
4. การวิเคราะห์ความน่าจะเป็น ความเสี่ยงต่อการสูญเสีย คือ ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์เริ่มต้น $\times$ ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ตอบสนอง $\times$ ความสูญเสียจากการพิบัติของอาคาร โดยความน่าจะเป็นของเหตุการณ์เริ่มต้นจากแผ่นดินไหวจะได้พิจารณาจากผลการศึกษารอยเลื่อน สำหรับความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ตอบสนองจะใช้การประเมินจากผู้เชี่ยวชาญร่วมกับข้อมูลทางสถิติ

5. การจัดลำดับกรณีการพิบัติที่มีความเสี่ยงสูงสุด กรณีการพิบัติต่างๆ ได้ถูกจัดลำดับตามความสูญเสียและโอกาสเกิดที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความยุติธรรมในการเลือกกรณีการพิบัติที่สมควรใช้ในการเตือนภัย



ที่มา: สุทธิศักดิ์และวรการ (2548)

รูปที่ 7-1 แผนภูมิขั้นตอนการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง

7.2 การวิเคราะห์ความเสี่ยงโดยแผนภูมิเหตุการณ์

แผนภูมิเหตุการณ์ของความเสี่ยงภัยจาก Liquefaction แสดงในรูปที่ 7-2 ประกอบด้วย

1. เหตุการณ์เริ่มต้น ได้แก่ การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่เกิดแผ่นดินไหว (probability of earthquake magnitude) และความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเร่งที่ผิวดิน (probability of peak ground acceleration) ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน (probability of ground water table)
2. เหตุการณ์ตอบสนอง (system response) ได้แก่ การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุด (probability of Liquefaction manifestation)
3. เหตุการณ์ที่สร้างผลกระทบ ได้แก่ การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพังทลายของฐานรากตื้น (probability of shallow foundation failure) ซึ่งมีรูปแบบการพิบัติได้ 2 รูปแบบ คือ End bearing failure และ punching shear failure

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

Mw	PGA	GWT.	Probability of liquefaction manifestation	Probability of shallow foundation failure		Annual probability of shallow foundation failure
				End bearing	Punching	
6.8(MCE) x.xxx	> 0.60g x.xxx	-0.00m to -1.00m x.xxx	Yes x.xxx	Yes x.xxx		x.xxx
.				No	Yes	
.	0.50g - 0.60g x.xxx			x.xxx	x.xxx	x.xxx
6.4 x.xxx						
	0.40g - 0.50g x.xxx		No x.xxx	Yes x.xxx		x.xxx
5.5 x.xxx						
	0.30g - 0.40g x.xxx			No x.xxx	Yes x.xxx	x.xxx
5.47(STD) x.xxx						
		-1.00m to -2.00m x.xxx	.	.	.	
	0.20g - 0.30g x.xxx					
		-0.00m to -1.00m x.xxx	.	.	.	

รูปที่ 7-2 แผนภูมิ (Event tree) ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงจาก Liquefaction

7.3 วิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็น

ค่าความน่าจะเป็น เป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ค่าความเสี่ยงดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยต้องหาทุกลำดับของเหตุการณ์ในแผนภูมิถึงเหตุการณ์ ตั้งแต่เหตุการณ์เริ่มต้น (Initiating event) ไปจนถึงเหตุการณ์การตอบสนองและผลกระทบในทุกลำดับชั้น วิธีการหาค่าความน่าจะเป็นนี้มีอยู่ 3 ลักษณะ

1. วิเคราะห์หาค่าความน่าจะเป็นตามหลักสถิติ
2. วิเคราะห์หาค่าความน่าจะเป็นด้วยการจำลอง
3. กำหนดค่าความน่าจะเป็นตามความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ

7.3.1 ความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหว

ความน่าจะเป็นที่จะเกิดแผ่นดินไหวที่ขนาดต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่เสนอโดย Gutenberg และ Richter (1954) ดังแสดงในสมการที่ 7-1

$$\log n(M) = a - bM \quad (7-1)$$

โดยที่ค่า M คือ ขนาดแผ่นดินไหว (Mw)

n (M) คือ คาบเวลาการเกิดอุบัติเหตุซ้ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 1/T โดยที่ค่า T มีหน่วยเป็นปี

a และ b คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ขึ้นอยู่กับลักษณะแผ่นดินไหวในแต่ละบริเวณ

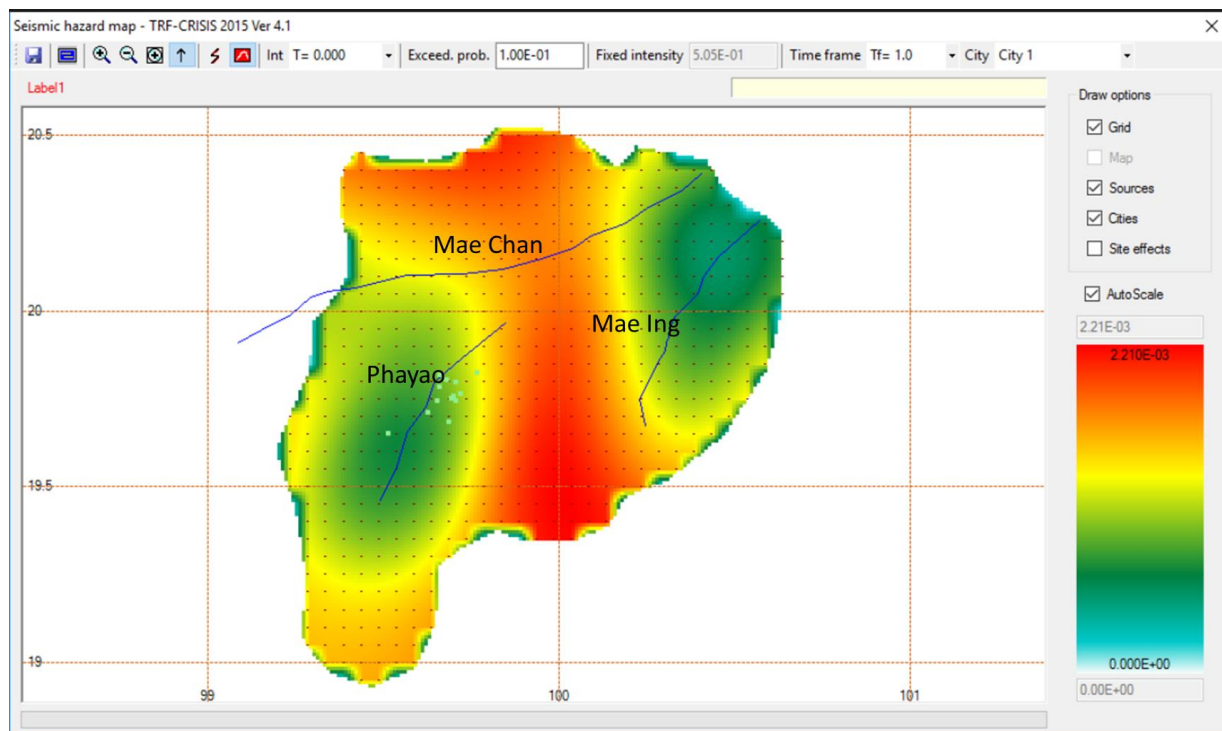
ในงานศึกษานี้ พิจารณาแผ่นดินไหวจากรอยเลื่อนพะเยา ที่ขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด (MCE) ขนาด 6.8 ขนาดแผ่นดินไหว 6.0 – 6.8 และขนาดแผ่นดินไหวตามมาตรฐานการออกแบบกรณโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) ขนาด 5.46 ซึ่งความน่าจะเป็นที่จะเกิดแผ่นดินไหวที่ขนาดต่างสรุปไว้ในตาราง 7-1

ตารางที่ 7-1 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดแผ่นดินไหวที่ขนาดต่างๆ

Earthquake magnitude	Probability of earthquake occurrence
6.8 (MCE)	0.000043853
6.0 - 6.8	0.000139959
5.0 - 6.0	0.001905461
5.46 (STD)	0.002105263

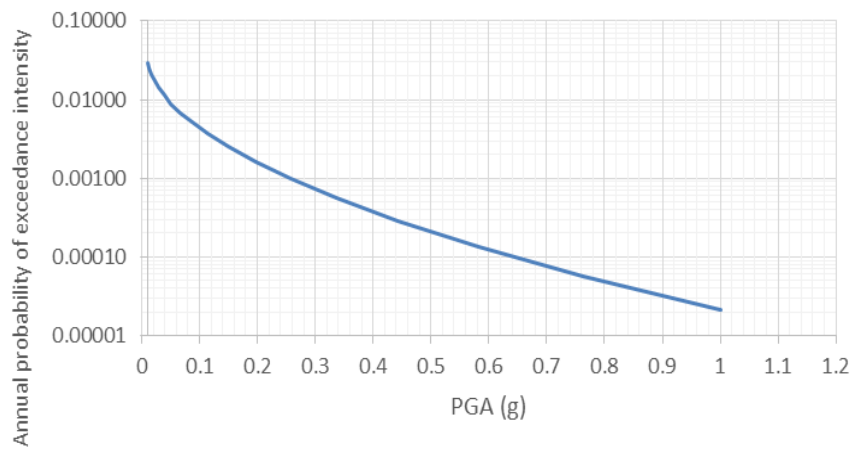
7.3.2 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเร่งที่ผิวดิน

ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเร่งที่ผิวดิน ณ ตำแหน่งต่างของหลุมเจาะ ดำเนินการจากการทำ Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) ด้วยโปรแกรม Crisis 2015 สำหรับการกำหนดรอยเลื่อนมีพลังในพื้นที่ศึกษา ประกอบด้วย รอยเลื่อนพะเยา รอยเลื่อนแม่จัน รอยเลื่อนแม่ือง เมื่อกำหนดความแปรปรวนอื่นๆ ทั้งหมด อันได้แก่ ขนาดของแผ่นดินไหว ระยะทาง สมการวิเคราะห้ ช่วงความเชื่อมั่น สามารถสร้าง Seismic hazard map ของพื้นที่อำเภอแม่ลาวดังแสดงได้จากรูป 7-3 และในแต่ละหลุมเจาะสามารถหา annual probability of peak ground acceleration ดังแสดงในรูป 7-4 ถึง 8-11



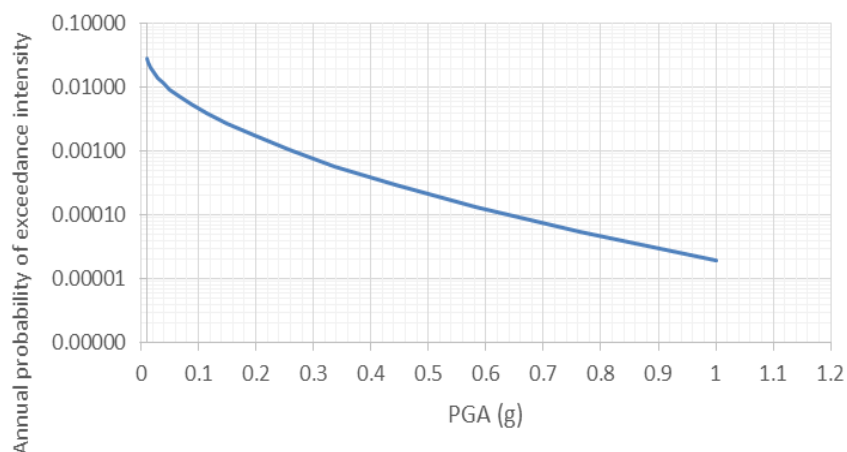
รูปที่ 7-3 Seismic hazard map ของอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

BH-3



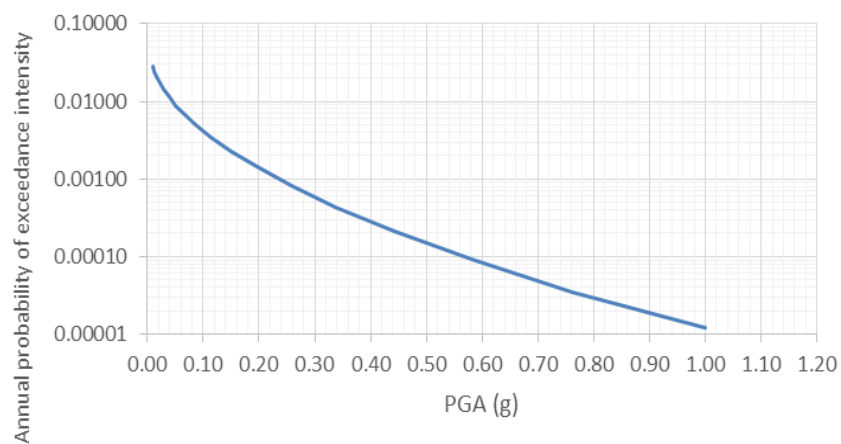
รูปที่ 7-4 annual probability of peak ground acceleration of BH-3

BH-4

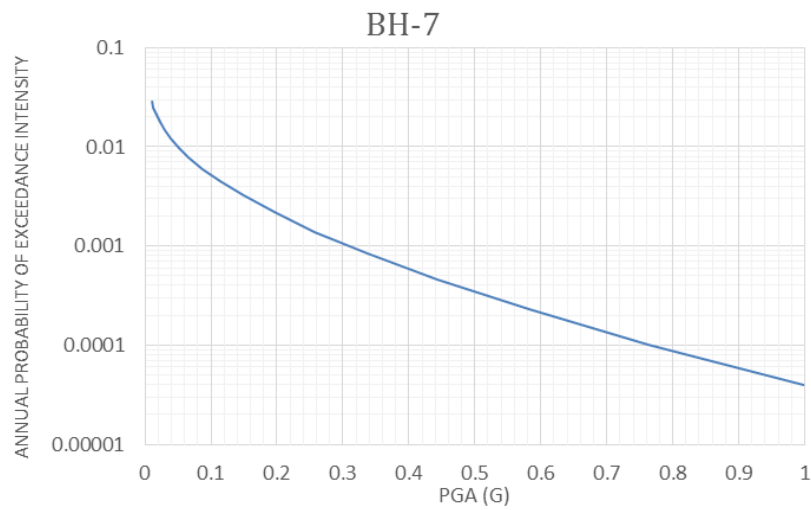


รูปที่ 7-5 annual probability of peak ground acceleration of BH-4

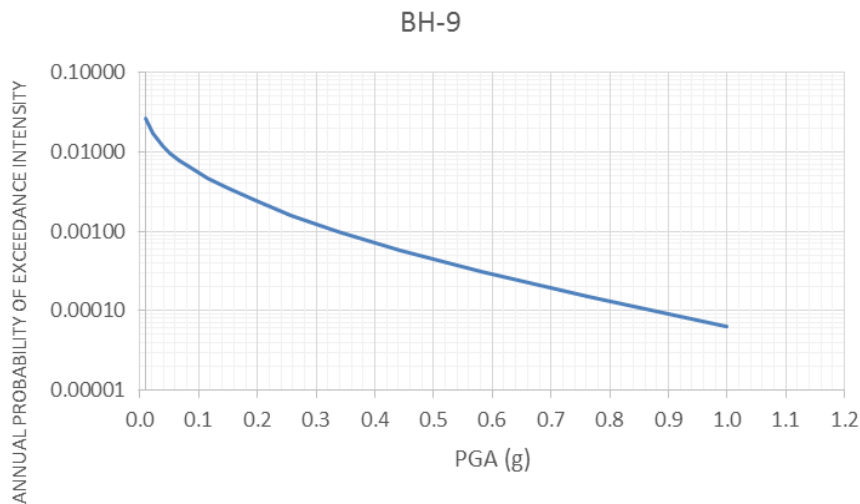
BH-6



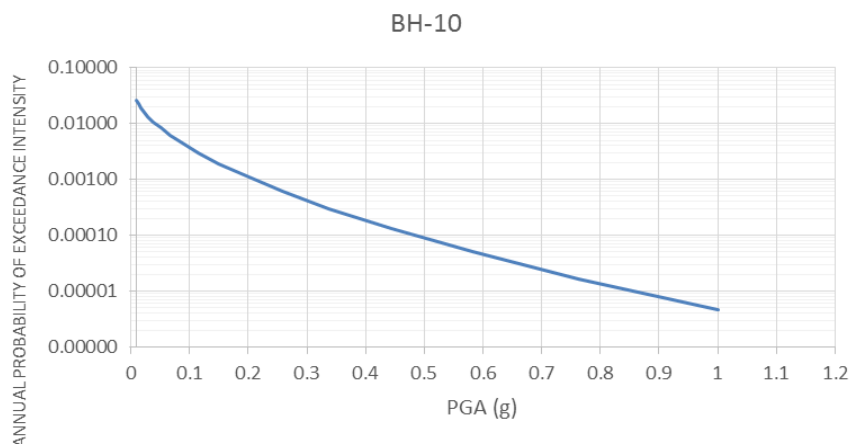
รูปที่ 7-6 annual probability of peak ground acceleration of BH-6



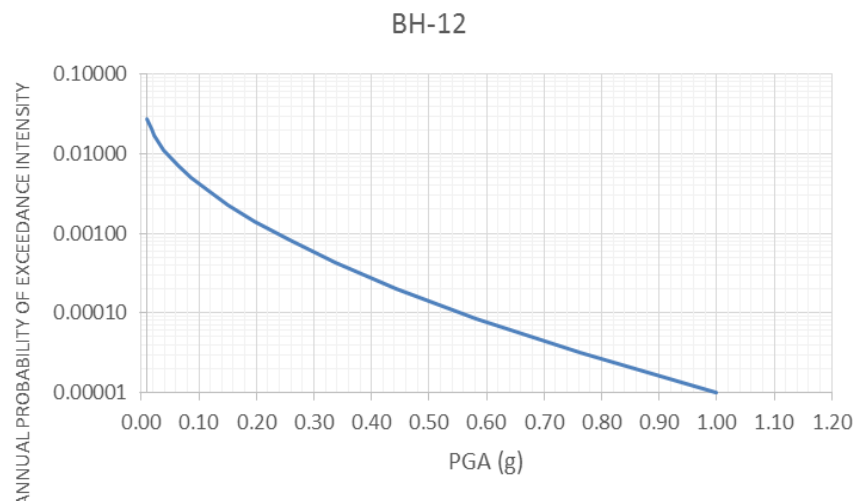
รูปที่ 7-7 annual probability of peak ground acceleration of BH-7



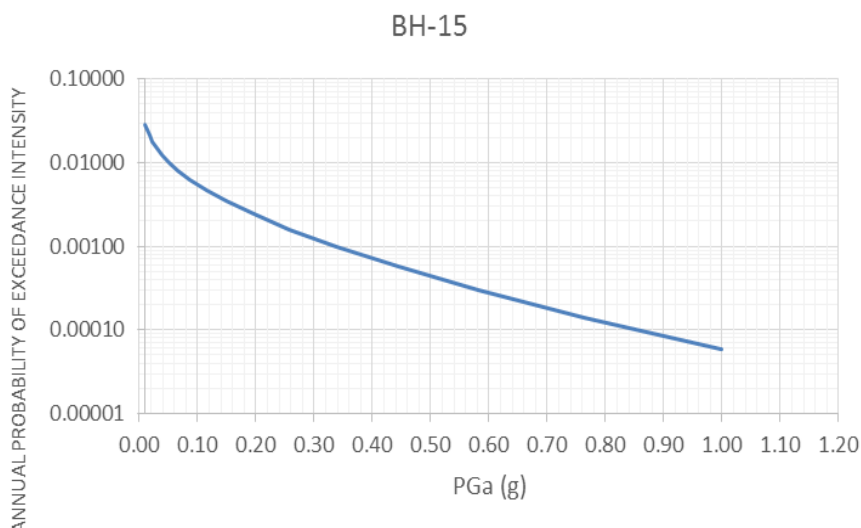
รูปที่ 7-8 annual probability of peak ground acceleration of BH-9



รูปที่ 7-9 annual probability of peak ground acceleration of BH-10



รูปที่ 7-10 annual probability of peak ground acceleration of BH-12



รูปที่ 7-11 annual probability of peak ground acceleration of BH-15

7.3.3 ความน่าจะเป็นของระดับน้ำใต้ดินที่ขนาดต่างๆ

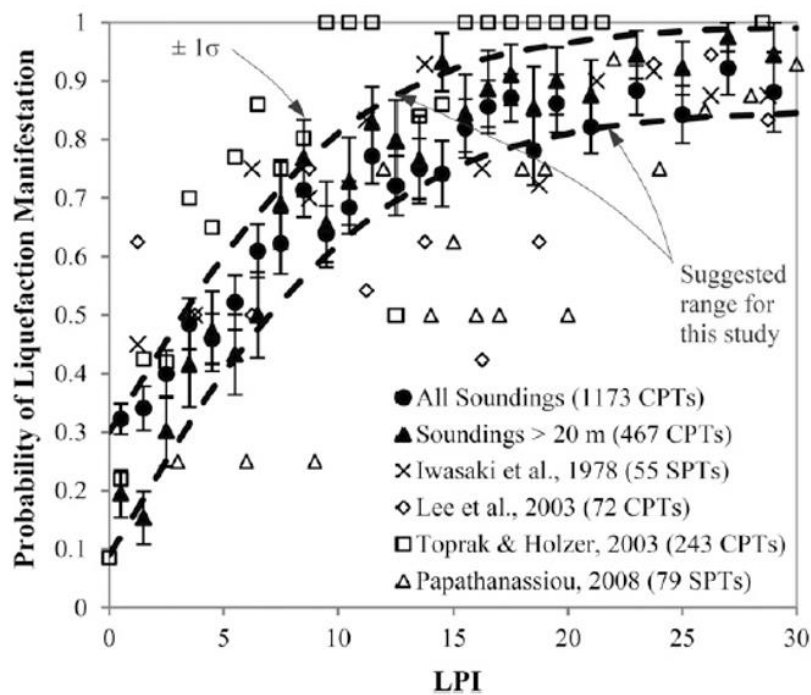
ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน (ตารางที่ 7-2) คำนวณได้โดยตรงจากข้อมูลการตรวจวัดระดับน้ำใต้ดินจากบพที่ 4

7.3.4 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุด (Liquefaction Manifestation)

ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุด (Liquefaction Manifestation) สามารถหาได้จากข้อมูลทางสถิติที่เสนอโดย Maurer et al. (2014) รูปที่ 7-12 แสดงการหาค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดและค่า Liquefaction potential index (LPI) ส่วนการคำนวณความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่พิจารณาจากค่าขนาดแผ่นดินไหว ค่าอัตราเร่งที่ผิวดินตั้งแต่ 0.2g ถึง 0.6 g และการเปลี่ยนแปลงน้ำใต้ดิน แสดงในรูป 7-13 ถึง 7-24 ตามลำดับ

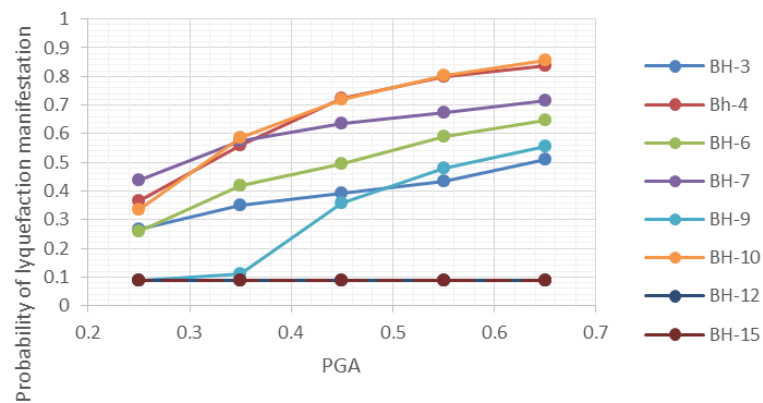
ตารางที่ 7-2 ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน

BH	Probability of ground water level		
	0-1 m	1-2 m	>2 m
1-3	0.000	0.800	0.200
4	0.857	0.000	0.143
5	0.429	0.286	0.286
6	0.286	0.714	0.000
7	0.000	0.857	0.143
9	0.000	0.000	1.000
10	0.000	0.836	0.164
11	0.000	0.571	0.429
12	0.000	0.857	0.143
13	1.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	1.000
15	0.000	0.000	1.000



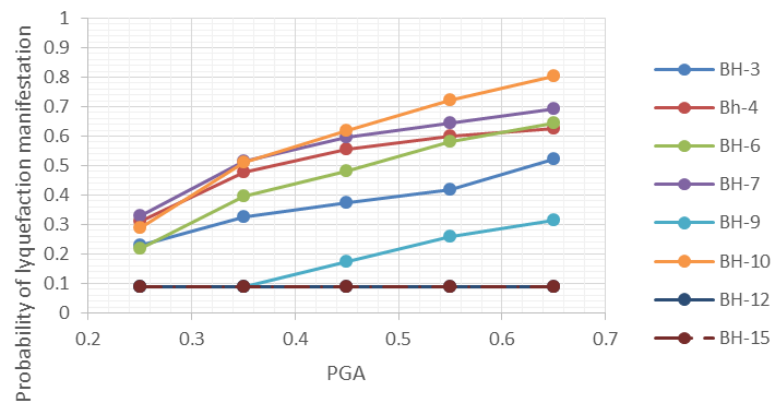
รูปที่ 7-12 กราฟความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุด (Liquefaction manifestation) กับค่า Liquefaction potential index (Maurer et al, 2014)

GWL. at -1 m, Mw = MCE



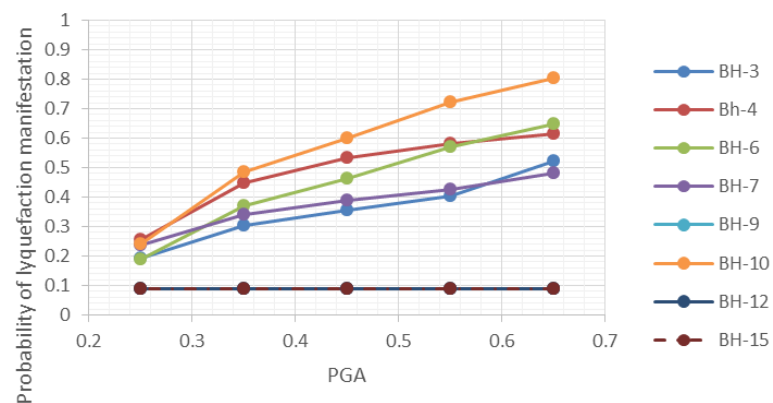
รูปที่ 7-13 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 1 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.8 (MCE)

GWL. at -2 m, Mw = MCE

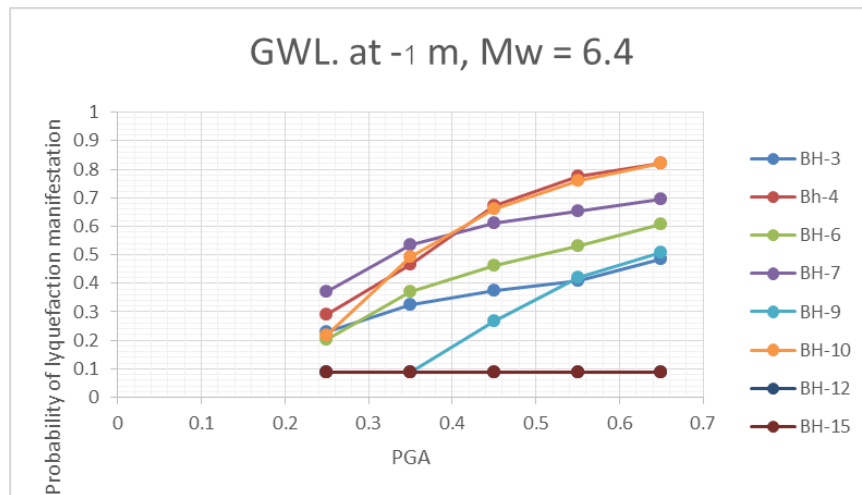


รูปที่ 7-14 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 2 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.8 (MCE)

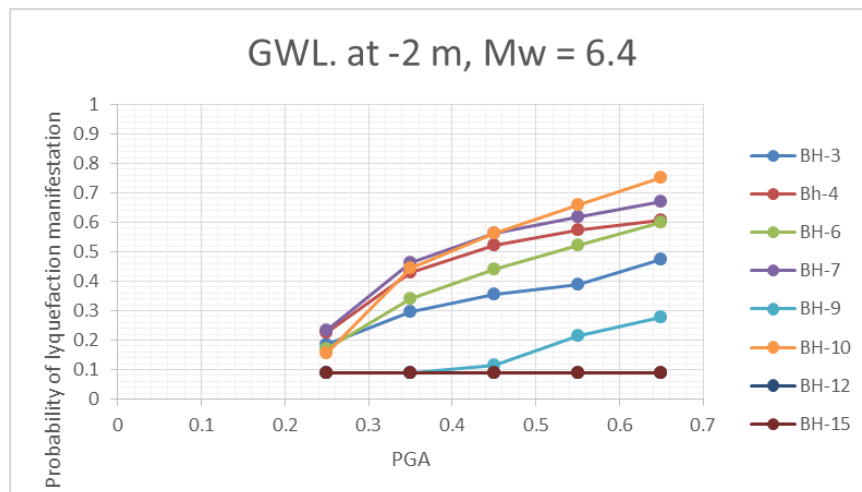
GWL. at -3 m, Mw = MCE



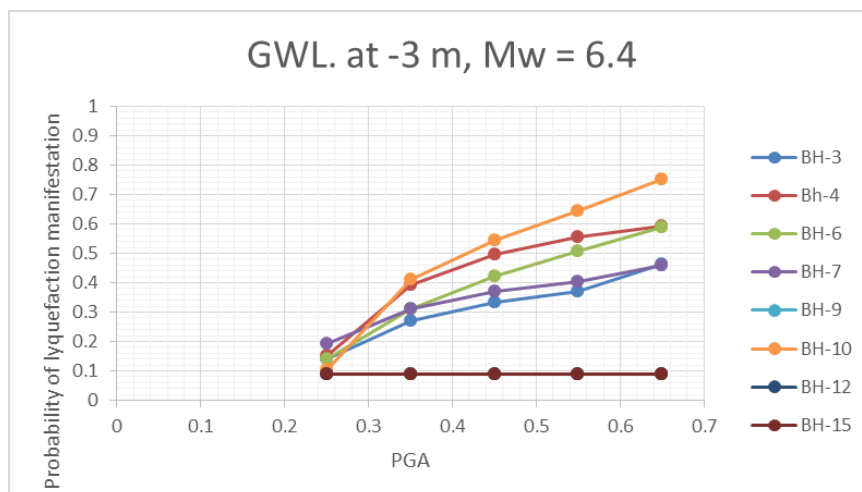
รูปที่ 7-15 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 3 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.8 (MCE)



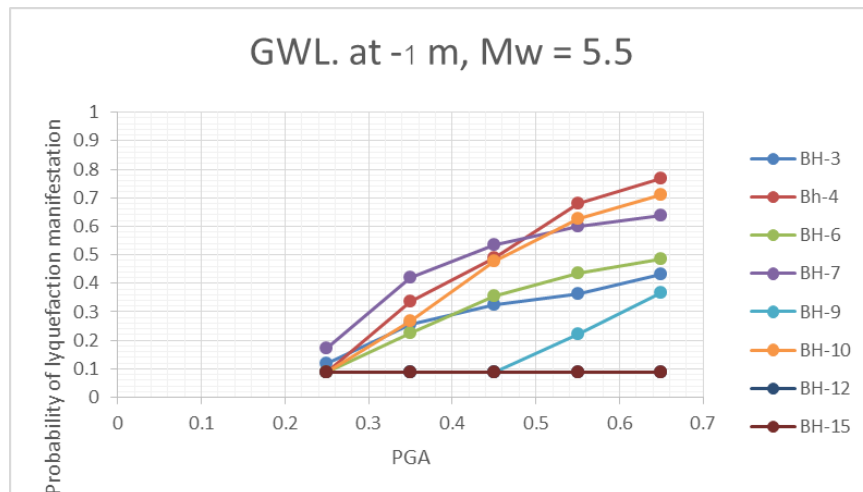
รูปที่ 7-16 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 1 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.4



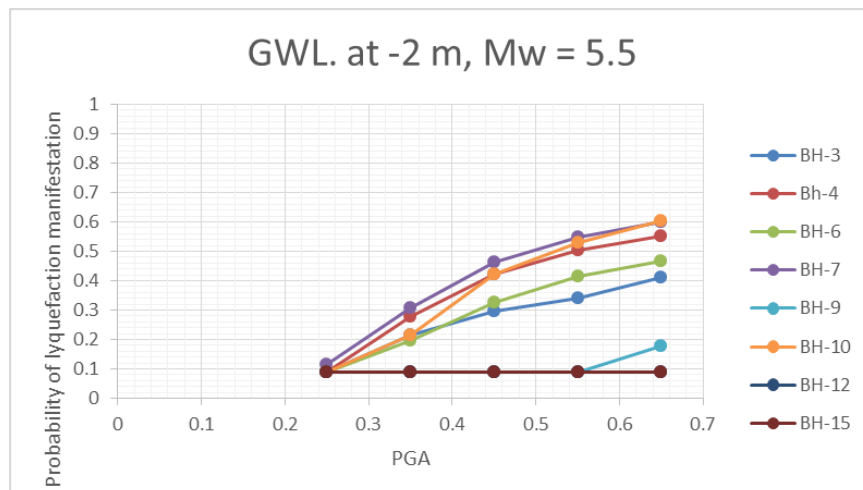
รูปที่ 7-17 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 2 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.4



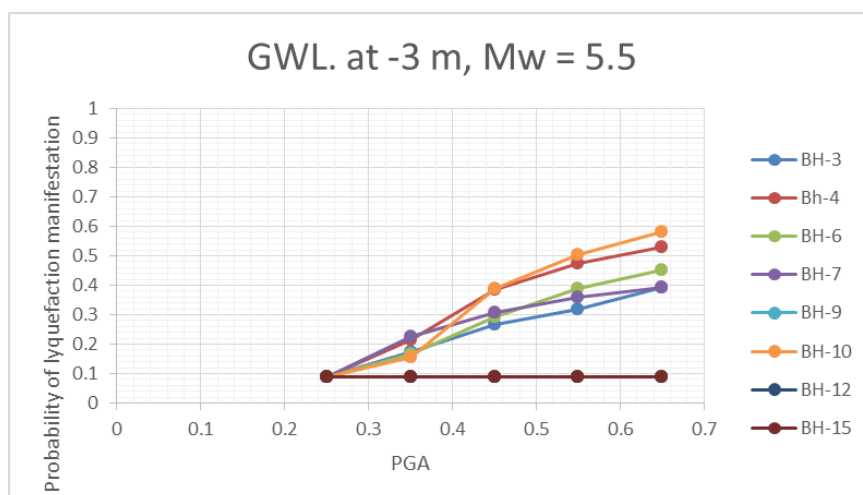
รูปที่ 7-18 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 3 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 6.4



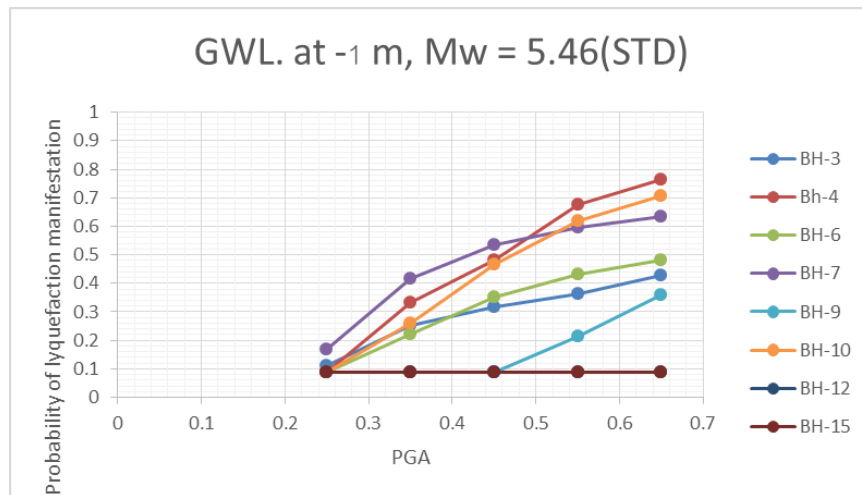
รูปที่ 7-19 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 1 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.5



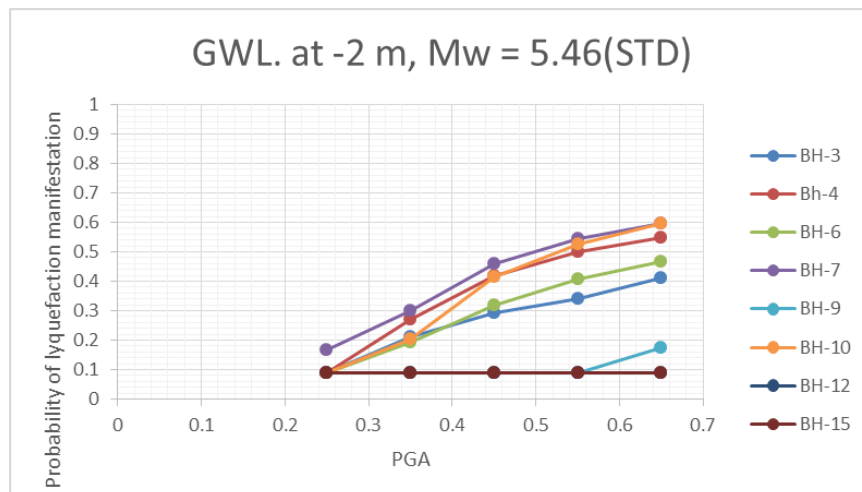
รูปที่ 7-20 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 2 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.5



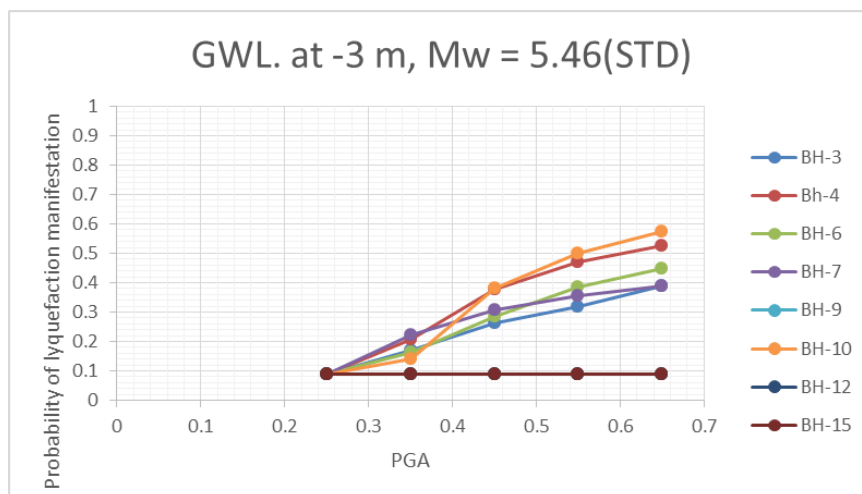
รูปที่ 7-21 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุดที่ระดับน้ำใต้ดิน 3 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.5



รูปที่ 7-22 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุที่ระดับน้ำใต้ดิน 1 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.46 (มยผ.)



รูปที่ 7-23 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุที่ระดับน้ำใต้ดิน 2 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.46 (มยผ.)



รูปที่ 7-24 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดทรายผุที่ระดับน้ำใต้ดิน 3 เมตร และแผ่นดินไหวขนาด 5.46 (มยผ.)

7.3.5 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพิบัติของฐานรากตื้น

การหาความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพิบัติของฐานรากตื้นของการศึกษานี้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การพิบัติแบบเฉือนทะลุ (Punching Shear Analysis) และการพิบัติเพราะดินสูญเสียกำลังรับน้ำหนัก (Bearing failure) การคำนวณความน่าจะเป็นของการเกิดการพิบัติของฐานรากตื้นใช้วิธี simplified first-order second moment technique (SFOSM) (Soralump, 2002)

การคำนวณของการพิบัติแบบเฉือนทะลุ (Punching Shear Analysis) และการพิบัติเพราะดินสูญเสียกำลังรับน้ำหนัก (Bearing failure) หาได้โดยสมการ 7-3 และสมการ 7-4 ตามลำดับ เมื่อกำหนดตัวแปรและค่าความแปรปรวน ในการวิเคราะห์ SFOSM จะหาความน่าจะเป็นที่พิบัติดังแสดงในรูปที่ 7-25

$$FS = \frac{2(B+L) \cdot T \cdot \tau_f}{P} \quad (7-3)$$

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma N_\gamma \quad (7-4)$$

โดยที่ B&L = ขนาดของฐานราก

T = ความหนาของชั้น cap layer

τ_f = กำลังของดิน

P = น้ำหนักของฐานราก

Run	x_1	x_2	x_3	x_n	Performance Function, $g(x)$	Variance Component	% of Variance
E[x]	E[x ₁]	E[x ₂]	E[x ₃]	E[x _n]	$H[\delta] = g(E[x_1], E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n])$		
2	E[x ₁]- σ_{x1}	E[x ₂]	E[x ₃]	E[x _n]	$g(x_{1-}) = g(E[x_1]-\sigma_{x1}, E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n])$	$\frac{[g(x_{1+}) - g(x_{1-})]^2}{2}$	$\frac{(\Delta g(x_1))^2}{V[\delta]} \times 100$
3	E[x ₁]+ σ_{x1}	E[x ₂]	E[x ₃]	E[x _n]	$g(x_{1+}) = g(E[x_1]+\sigma_{x1}, E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n])$		
4	E[x ₁]	E[x ₂]- σ_{x2}	E[x ₃]	E[x _n]	$g(E[x_1], E[x_2]-\sigma_{x2}, E[x_3], \dots, E[x_n])$	$\frac{[g(x_{2+}) - g(x_{2-})]^2}{2}$	$\frac{(\Delta g(x_2))^2}{V[\delta]} \times 100$
5	E[x ₁]	E[x ₂]+ σ_{x2}	E[x ₃]	E[x _n]	$g(E[x_1], E[x_2]+\sigma_{x2}, E[x_3], \dots, E[x_n])$		
6	E[x ₁]	E[x ₂]	E[x ₃]- σ_{x3}	E[x _n]	$g(x_{3-})$	$\frac{[\Delta g(x_3)]^2}{2}$	$\frac{(\Delta g(x_3))^2}{V[\delta]} \times 100$
7	E[x ₁]	E[x ₂]	E[x ₃]+ σ_{x3}	E[x _n]	$g(x_{3+})$		
↓							
n	E[x ₁]	E[x ₂]	E[x ₃]	E[x _n]- σ_{xn}	$g(E[x_1], E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n]-\sigma_{xn})$	$\frac{[g(x_{n+}) - g(x_{n-})]^2}{2\sigma_{x_n}}$	$\frac{(\Delta g(x_n))^2}{V[\delta]} \times 100$
n+1	E[x ₁]	E[x ₂]	E[x ₃]	E[x _n]+ σ_{xn}	$g(E[x_1], E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n]+\sigma_{xn})$		
SUM					$V[\delta] \approx \sum_{i=1}^k \frac{[\Delta g(x_i)]^2}{2}$		
					100%		

รูปที่ 7-25 Simplified first-order second moment technique (Soralump, 2002)

ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพิบัติของฐานรากตื้นสำหรับการพิบัติแบบเฉือนทะลุ (Punching Shear Analysis) และค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพิบัติของฐานรากตื้นสำหรับการพิบัติเพราะดินสูญเสียกำลังรับน้ำหนัก (Bearing failure) ตามขนาดของฐานรากที่ 1.0x1.0 เมตร, 2.0x2.0 เมตร และ 3.0x3.0 เมตร แสดงในตารางที่ 7-3 ถึง ตารางที่ 7-5

ตารางที่ 7-3 ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพิบัติของฐานรากตื้น โดยกำหนดขนาดของฐานรากแผ่เป็น 1.0x1.0 เมตร

BH	Probability of shallow foundation failure	
	Punching failure	Bearing failure
3	0.8014	0.7890
4	0.9135	0.6456
6	0.4628	0.2121
7	0.4171	0.2061
9	0.2267	0.1015
10	0.9948	0.1006
12	0.0109	0.0420
15	0.0758	0.1457

ตารางที่ 7-4 ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพิบัติของฐานรากตื้น โดยกำหนดขนาดของฐานรากแผ่เป็น 2.0x2.0 เมตร

BH	Probability of shallow foundation failure	
	Punching failure	Bearing failure
3	0.3529	0.0307
4	0.6659	0.0268
6	0.2607	0.0153
7	0.0621	0.0152
9	0.0741	0.0242
10	0.9042	0.0228
12	0.0083	0.0092
15	0.0225	0.0130

ตารางที่ 7-5 ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการพิบัติของฐานรากตื้น โดยกำหนดขนาดของฐานรากแผ่เป็น 3.0x3.0 เมตร

BH	Probability of shallow foundation failure	
	Punching failure	Bearing failure
3	0.216	0.009
4	0.547	0.009
6	0.205	0.008
7	0.024	0.008
9	0.047	0.018
10	0.813	0.016
12	0.008	0.007
15	0.014	0.007

7.4 ความน่าจะเป็นของการเกิด Liquefaction และความน่าจะเป็นของการพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction

เมื่อได้ผลการวิเคราะห์หาค่าความน่าจะเป็นของแต่ละกิ่งย่อยจะถูกนำมารวมกันบนแผนภูมิกิ่งเหตุการณ์ ซึ่งค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์รวมตลอดทั้งกิ่งเหตุการณ์ (Pathway probability) และความน่าจะเป็นรวม (Annual probability) แสดงในรูปที่ 7-26

บริเวณที่มีผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นรวมของโอกาสเกิด Liquefaction สูงสุด (กรณีกำหนดขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด) ได้แก่ หลุมเจาะ BH-7 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 1.17×10^{-6} ต่อปี และหลุมเจาะ BH-10 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 1.00×10^{-6} ต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 7-27

บริเวณที่มีผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นรวมของโอกาสเกิด Liquefaction สูงสุด (กรณีกำหนดขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของ มยผ.) ได้แก่ หลุมเจาะ BH-7 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 5.68×10^{-7} ต่อปี และหลุมเจาะ BH-10 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 4.82×10^{-7} ต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 7-28

บริเวณที่มีผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นรวมของการพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction สูงสุด (กรณีกำหนดขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด) ได้แก่ หลุมเจาะ BH-10 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 8.0×10^{-6} ต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 7-29

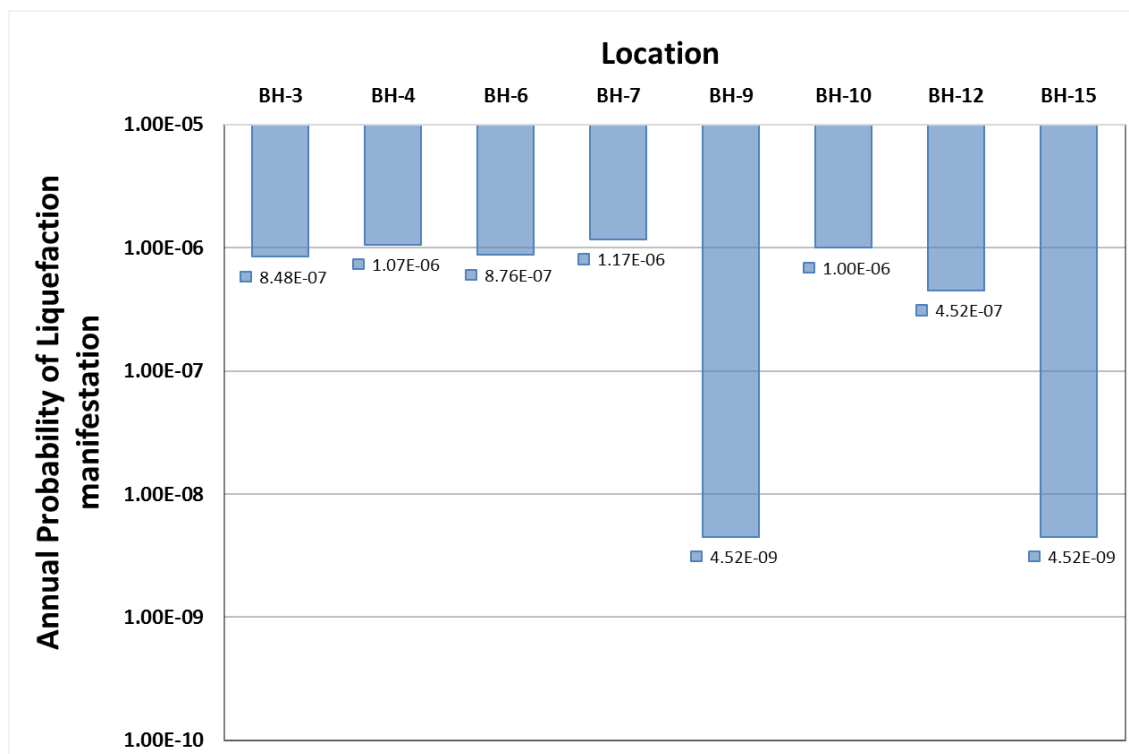
บริเวณที่มีผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นรวมของการพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction สูงสุด (กรณีกำหนดขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของ มยผ.) ได้แก่ หลุมเจาะ BH-10 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 5.0×10^{-6} ต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 7-30

จากผลการศึกษาพบว่า โครงสร้างที่มีฐานรากขนาด 1.0×1.0 เมตรขึ้นไปในอำเภอแม่ลาว มีความปลอดภัยจากการพิบัติเนื่องจาก Liquefaction เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นรวมรายปีของการเกิดการพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction มีค่าระหว่าง 10^{-6} ถึง 10^{-8} ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยเมื่อเทียบกับ Acceptable risk ที่เสนอโดย Whitman (1984) ในรูปที่ 7-31

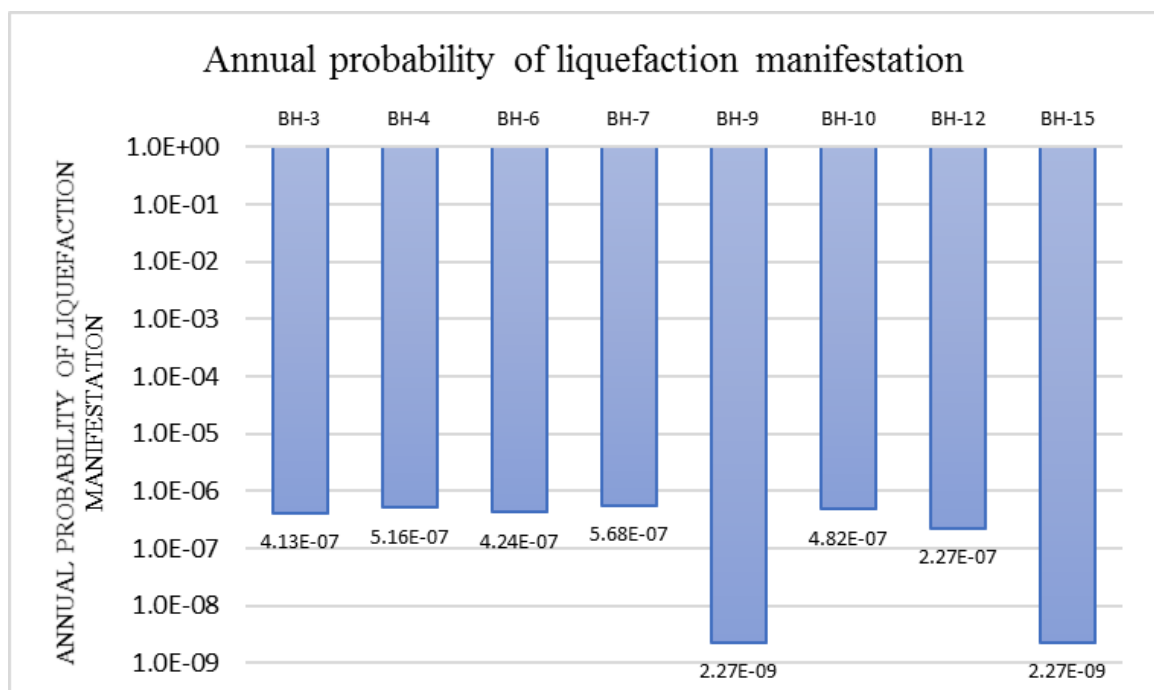
ผลสุดท้าย สามารถสร้างแผนที่เสี่ยงภัยจากโอกาสเกิด Liquefaction และการพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction ดังแสดงในรูปที่ 7-32 ถึง 7-33 ตามลำดับ

Mw	PGA	GWT.	Liquefaction probability of surface manifestation	Punching probability of shallow foundation	pathway probability
6.8(MCE) 0.000 044	> 0.60g 0.000 035	-0.00m to -1.00m 0.000	Yes 0.999987139 No 1.2861E-05	Yes 0.24138161 No 0.75861839	0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
		-1.00m to -2.00m 0.034	Yes 0.999609221 No 0.000390679	Yes 0.24138161 No 0.75861839	1.28E-09 1.21E-13 3.80E-13
		>2.00 m 0.164	Yes 0.999601563 No 0.000398437	Yes 0.24138161 No 0.75861839	2.52E-10 2.43E-14 7.62E-14
	0.50g - 0.60g 0.000 060	-0.00 to -1.00 0.000	Yes 0.999987139		0.00E+00
Annual probability of liquefaction					5.14E-06
Probability of liquefaction based on MCE					5.37E-08
Probability of liquefaction based on STD					2.58E-06

รูปที่ 7-26 ค่าความน่าจะเป็นรวมของกึ่งเหตุการณ์จากการพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction

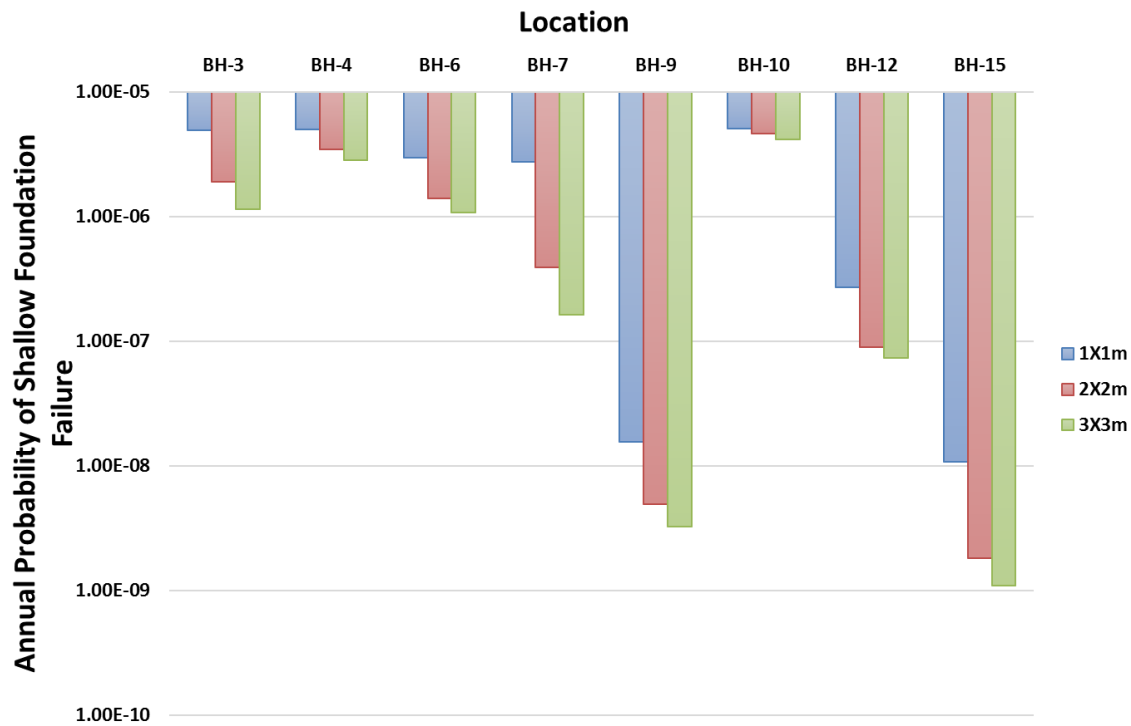


รูปที่ 8-27 Annual probability of Liquefaction manifestation กรณีแผ่นดินไหวสูงสุด

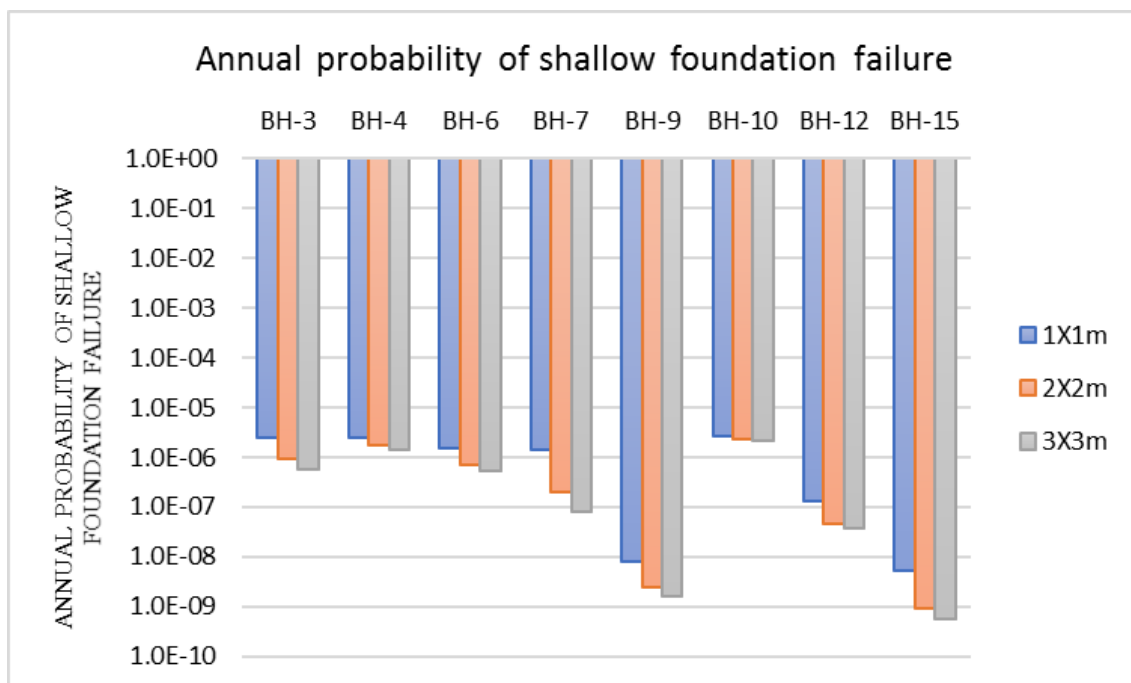


รูปที่ 7-28 Annual probability of Liquefaction manifestation

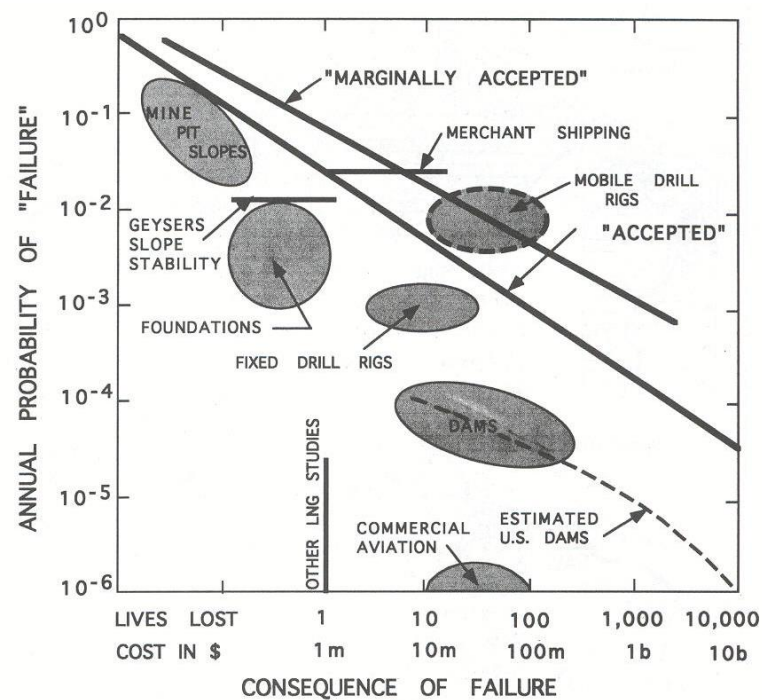
กรณีขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของ มยผ.



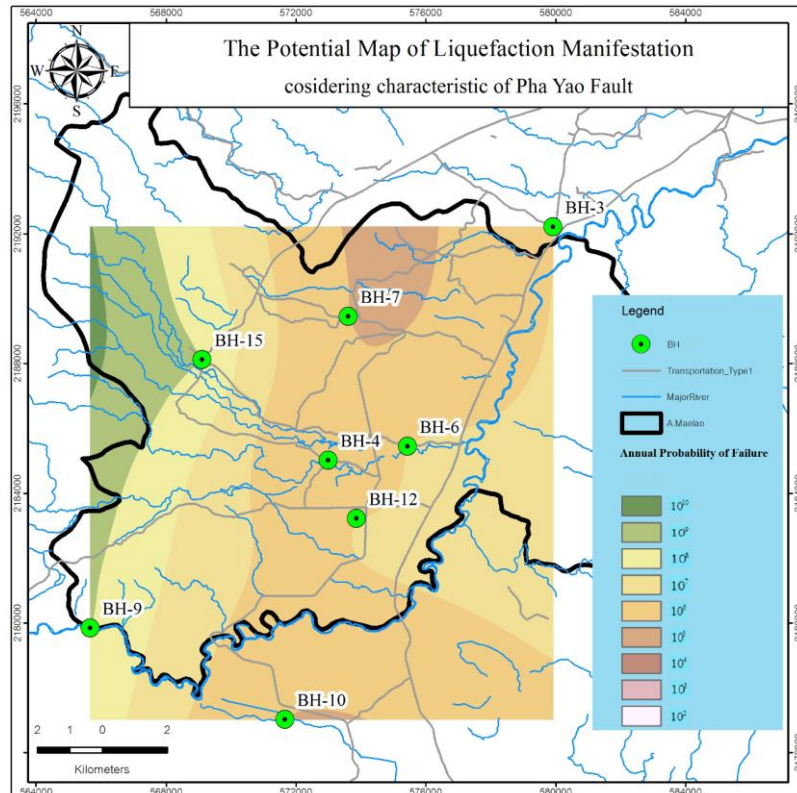
รูปที่ 7-29 Annual probability ของการพิบัติของฐานรากตื้น กรณีแผ่นดินไหวสูงสุด



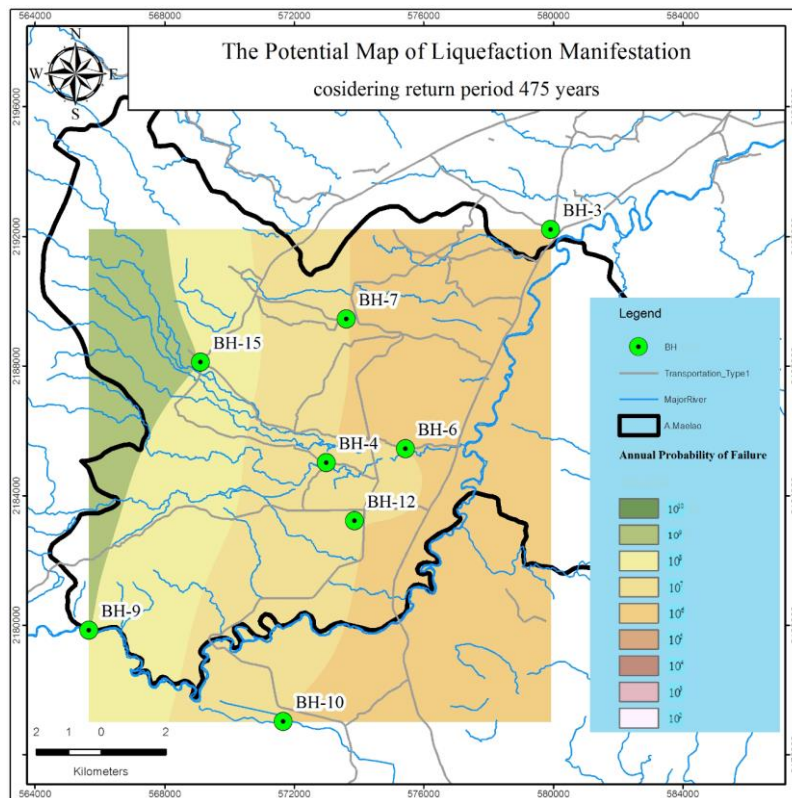
รูปที่ 7-30 Annual probability ของการพิบัติของฐานรากตื้น
กรณีขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของ มยผ.



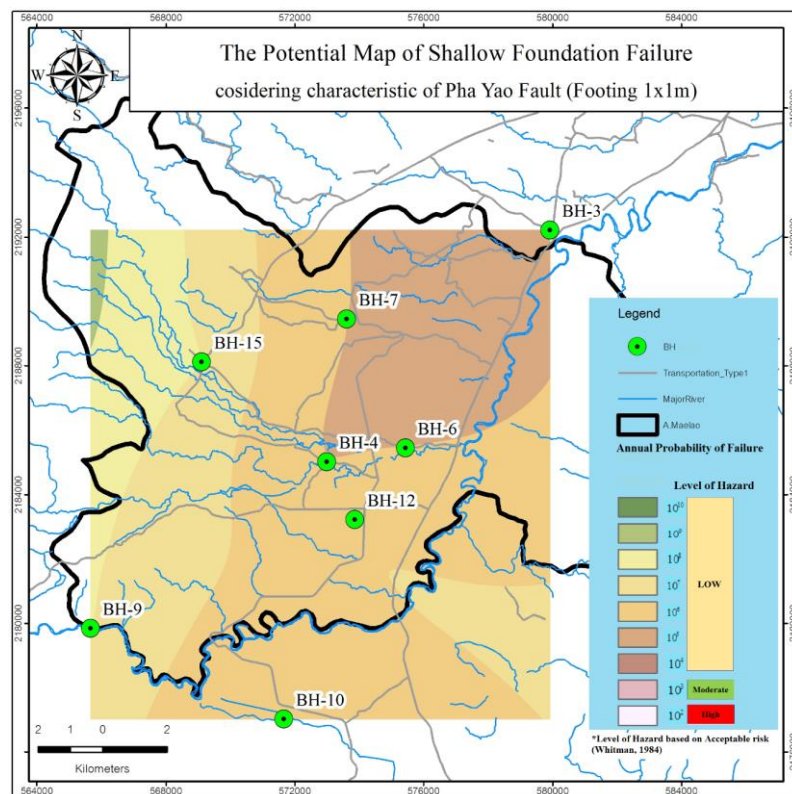
รูปที่ 7-31 A acceptable risk and consequences of failure (Whitman,1984)



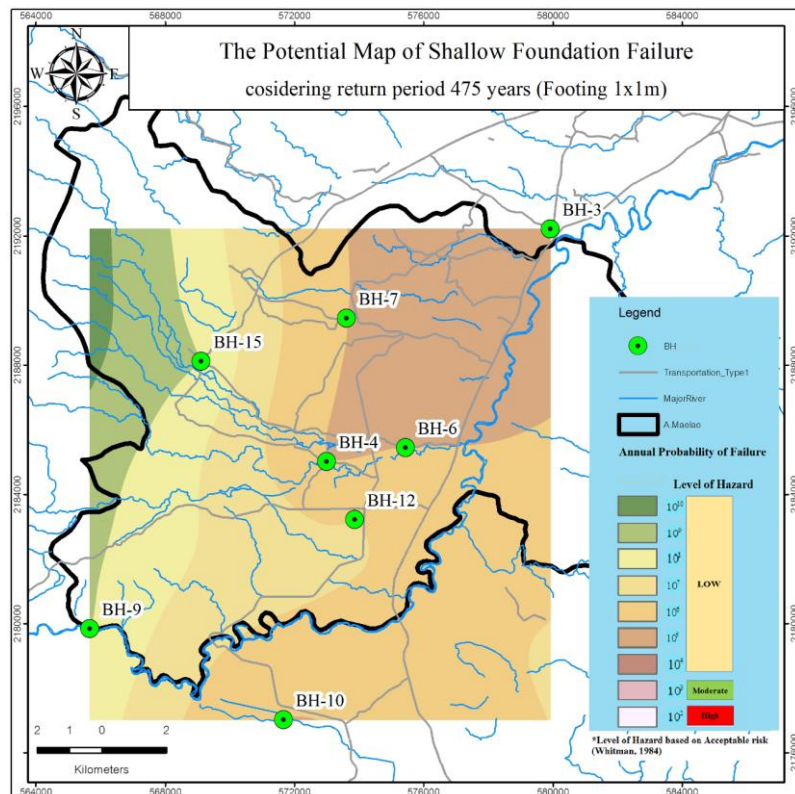
รูปที่ 7-32 The potential map of Liquefaction manifestation considering characteristic of Phayao fault



รูปที่ 7-33 The potential map of Liquefaction manifestation considering return period 475 years



รูปที่ 7-34 The potential map of shallow foundation failure considering characteristic of Phayao fault



รูปที่ 7-35 The potential map of shallow foundation failure considering return period 475 years

7.5 สรุปผลการวิเคราะห์

7.5.1 บริเวณที่มีผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นรวมของโอกาสเกิด Liquefaction สูงสุด (กรณีกำหนดขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด) ได้แก่ หลุมเจาะ BH-7 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 1.17×10^{-6} ต่อปี และหลุมเจาะ BH-10 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 1.00×10^{-6} ต่อปี

7.5.2 บริเวณที่มีผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นรวมของโอกาสเกิด Liquefaction สูงสุด (กรณีกำหนดขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของ มยผ.) ได้แก่ หลุมเจาะ BH-7 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 5.68×10^{-7} ต่อปี และหลุมเจาะ BH-10 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 4.82×10^{-7} ต่อปี

7.5.3 บริเวณที่มีผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นรวมของการพิบัติของฐานรากดินเนื่องจาก Liquefaction สูงสุด (กรณีกำหนดขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด) ได้แก่ หลุมเจาะ BH-10 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 8.0×10^{-6} ต่อปี

7.5.4 บริเวณที่มีผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นรวมของการพิบัติของฐานรากดินเนื่องจาก Liquefaction สูงสุด (กรณีกำหนดขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของ มยผ.) ได้แก่ หลุมเจาะ BH-10 มีค่าความน่าจะเป็นรวม 5.0×10^{-6} ต่อปี

7.5.5 สามารถใช้ผลการประเมินโอกาสเกิด Liquefaction และโอกาสพังทลายของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction ไปใช้ในการพิจารณาการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน ให้ปลอดภัยจาก Liquefaction เนื่องจากแผ่นดินไหว

บทที่ 8

การวิเคราะห์ความมั่นคงของอุโบสถของวัดร่องขุน ต่อการเกิด Liquefaction จากแผ่นดินไหว

8.1 บทนำ

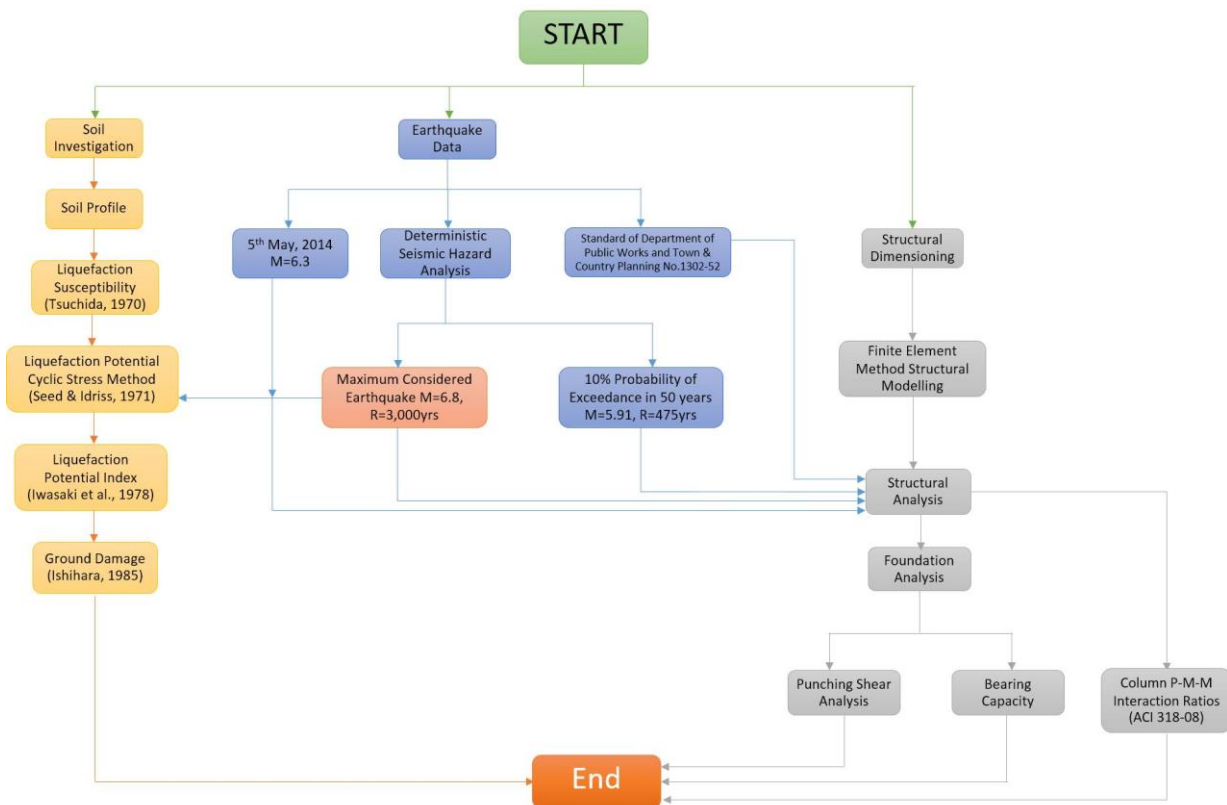
วัดร่องขุน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย เป็นวัดที่มีความสวยงาม เป็นงานพุทธศิลป์ที่ยิ่งใหญ่ และเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญแห่งหนึ่งของจังหวัดเชียงราย วัดแห่งนี้ออกแบบและก่อสร้างโดยอาจารย์เฉลิมชัย โฆษิตพิพัฒน์ ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2540 จนถึงปัจจุบัน โดยใช้ฐานรากตื้นรับโครงสร้างอุโบสถ จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ได้สร้างความเสียหายให้กับวัดร่องขุนเป็นอย่างมาก ทั้งผนังอุโบสถมีปูนกะเทาะออก กระเบื้องหลุด ยอดพระธาตุหัก ภาพเขียนเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 8-1 วัดอุปประสงค์ของบทนี้ เพื่อศึกษาโอกาสในการเกิด Liquefaction ในบริเวณวัดร่องขุน และวิเคราะห์ฐานรากและโครงสร้างของวัดร่องขุนภายใต้สภาวะการเกิดแผ่นดินไหวและ Liquefaction



รูปที่ 8-1 ความเสียหายเนื่องจากแผ่นดินไหวที่วัดร่องขุน
(สืบค้นจาก sanook.com และ kapook.com, 2557)

8.2 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาและการวิเคราะห์ความมั่นคงของอุโบสถของวัดร่องขุนต่อการเกิด Liquefaction จากแผ่นดินไหว สามารถแสดงในรูปที่ 8-2 สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์มีรายละเอียดเบื้องต้น ดังนี้



รูปที่ 8-2 ขั้นตอนการการวิเคราะห์ความมั่นคงของอุโบสถของวัดร่องขุน

ต่อการเกิด Liquefaction จากแผ่นดินไหว

1. สำรวจพื้นที่ และถอดแบบโครงสร้างอุโบสถวัดร่องขุนโดยใช้ Drone และตลับเมตร
2. เก็บตัวอย่างดินโดยใช้วิธี Wash boring และทำ Standard penetration test
3. นำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบ Sieve analysis และ Atterberg's limits

4. หาข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหว แรงสั่นสะเทือนที่ส่งมาถึงบริเวณวัดร่องขุน จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวจังหวัดเชียงราย วันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 รวมถึงวิธีวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Earthquake Analysis) ของรอยเลื่อนที่ใกล้ที่สุด โดยพิจารณาคาบอุบัติซ้ำ 475 ปี, 2,475 ปี และ 3,000 ปี และวิธีมาตรฐาน มยพ.1302

5. คำนวณโอกาสการเกิด Liquefaction และความเสียหายที่ผิวดิน โดยประเมินจากลักษณะทางกายภาพของดิน วิธี Cyclic Stress (Seed และ Idriss, 1971) และ LPI และวิเคราะห์พฤติกรรมตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของดิน

6. วิเคราะห์ฐานราก โดยหาค่า Bearing capacity และ Punching shear analysis วิเคราะห์โครงสร้างบนโปรแกรม ETABS ในกรณีที่เกิดแผ่นดินไหว และในกรณีที่เกิดและไม่เกิด Liquefaction

8.3 ผลการดำเนินงาน

8.3.1 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของชั้นดินต่อการเกิด Liquefaction

จากผลการทดสอบดินที่ได้จากหลุมเจาะบริเวณวัดร่องชุ่น (ภาคผนวก ก) สามารถสรุปได้ดังนี้

BH-1: วัดร่องชุ่น พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด liquefaction ตั้งแต่ 6.0 เมตร ลงไปถึง 14.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด liquefaction ที่ความลึก 5.0 ถึง 6.0 เมตร

BH-2: วัดร่องชุ่น พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด liquefaction ตั้งแต่ 5.0 เมตร ลงไปถึง 14.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด liquefaction ที่ความลึก 0.0 ถึง 2.0 เมตร

BH-3: วัดร่องชุ่น พบชั้นดินทรายที่สามารถเกิด liquefaction ตั้งแต่ 4.0 เมตร ลงไปถึง 13.0 เมตร และดินทรายแป้งและดินเหนียวที่สามารถเกิด liquefaction ที่ความลึก 0.0 ถึง 4.0 เมตร

การประเมินจาก Grain Size Distribution Curve (Tsuchida, 1970) พบว่าขนาดคละของดินทรายทุกตัวอย่างในทุกหลุมเจาะมีโอกาสเกิด Liquefaction ตั้งแต่เล็กน้อยถึงมาก และจากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของดินที่มีค่า $(N_1)_{60} < 30$ และมีเปอร์เซ็นต์เม็ดละเอียด < 35% พบตัวอย่างดินที่มีโอกาสเกิด Liquefaction ดังตารางที่ 8-1 ถึง 8-3 ตามลำดับ

ตารางที่ 8-1 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ด้วยลักษณะทางกายภาพ (BH-1)

BH	Sample No.	Depth, m		USCS Group	Soil Description	Percent Finer	$(N_1)_{60}$	Liquefaction Susceptibility
		From	To					
1	SS-7	7.00	7.45	SM	ทรายละเอียด เม็ดเล็ก เหลี่ยม	28.92	29.5	Liquefy
1	SS-8	8.00	8.45	SM	ทรายละเอียด	23.47	31.9	Liquefy
1	SS-9	9.00	9.45	SM	ทรายละเอียด มีหิน/กรวดปน เม็ดเหลี่ยม	14.28	41.1	Liquefy
1	SS-10	10.00	10.45	SM	ดินทรายเม็ดเหลี่ยม มีกรวดและหินปน	13.14	18.3	Liquefy

ตารางที่ 8-2 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ด้วยลักษณะทางกายภาพ (BH-2)

BH	Sample No.	Depth, m		USCS Group	Soil Description	Percent Finer	$(N_1)_{60}$	Liquefaction Susceptibility
		From	To					
2	SS-6	6.00	6.45	SM	ดินทรายปนดินเหนียว	35.91	13.8	Liquefy
2	SS-7	7.00	7.45	SM	ดินทรายหยาบ เม็ดเหลี่ยม	21.68	14.2	Liquefy
2	SS-9	9.00	9.45	SM	ดินทรายหยาบ เม็ดเหลี่ยม	22.65	28.8	Liquefy
2	SS-14	14.00	14.45	SM	ดินทราย เม็ดละเอียด มีกรวดปนบ้าง	20.99	34.3	Liquefy

ตารางที่ 8-3 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ด้วยลักษณะทางกายภาพ (BH-3)

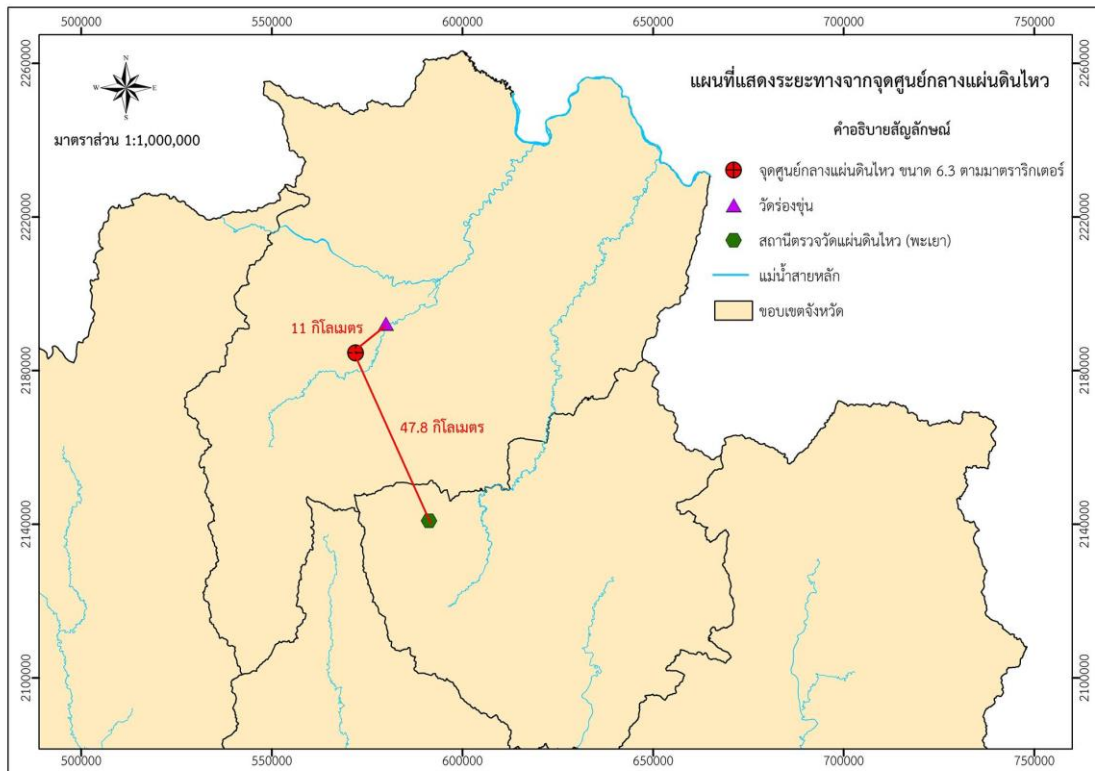
BH	Sample No.	Depth, m		USCS Group	Soil Description	Percent Finer	$(N_1)_{60}$	Liquefaction Susceptibility
		From	To					
3	SS-5	5.00	5.45	SM	ดินทรายละเอียด เม็ดเหลี่ยมปนดินเหนียว	40.17	7.3	Liquefy
3	SS-6	6.00	6.45	SM	ดินทรายละเอียด เม็ดเหลี่ยม	18.05	26.8	Liquefy
3	SS-7	7.00	7.45	SM	ดินทราย เม็ดเหลี่ยม	12.03	33.1	Liquefy
3	SS-8	8.00	8.45	SM	ดินทรายละเอียด	23.80	36.5	Liquefy
3	SS-10	10.00	10.45	SM	ดินทราย เม็ดหยาบ ปนกรวด	15.22	40.9	Liquefy

8.3.2 สเปกตรัมผลตอบสนองและ Time History Acceleration สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างตัวรองรับ

(1) เหตุการณ์แผ่นดินไหวจังหวัดเชียงราย วันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 ขนาด 6.3

จากรายงานการเกิดแผ่นดินไหวบริเวณจังหวัดเชียงราย วันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 โดยสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา วัดอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดินได้ 0.069g ที่สถานี PAYA อ่างเก็บน้ำแม่มปืม จังหวัดพะเยา ห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว 47.8 กิโลเมตร

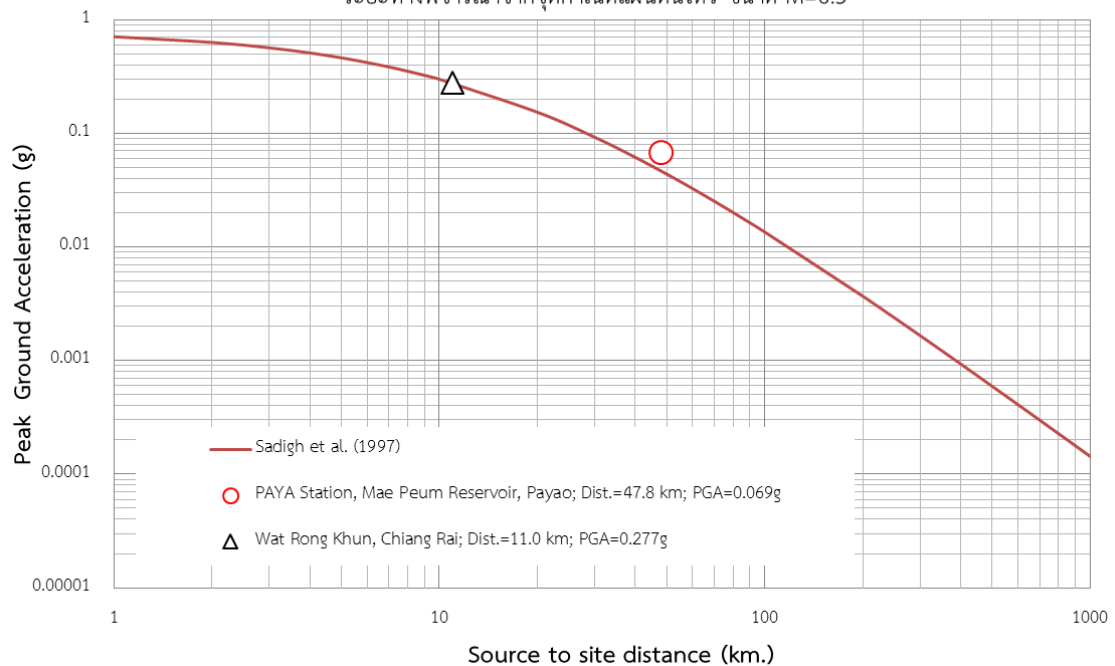
จากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวมายังตัวรองรับและสถานี PAYA เลือกคำนวณการลดทอนความรุนแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีของ Sadigh (1997) ซึ่งตัวรองรับห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว 11 กิโลเมตร ดังรูปที่ 8-3 จะได้อัตราเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.277g ดังรูปที่ 8-4 และมีสเปกตรัมผลตอบสนอง (Response spectral acceleration) และ Time history acceleration ดังรูปที่ 8-5 และ 8-6 ตามลำดับ



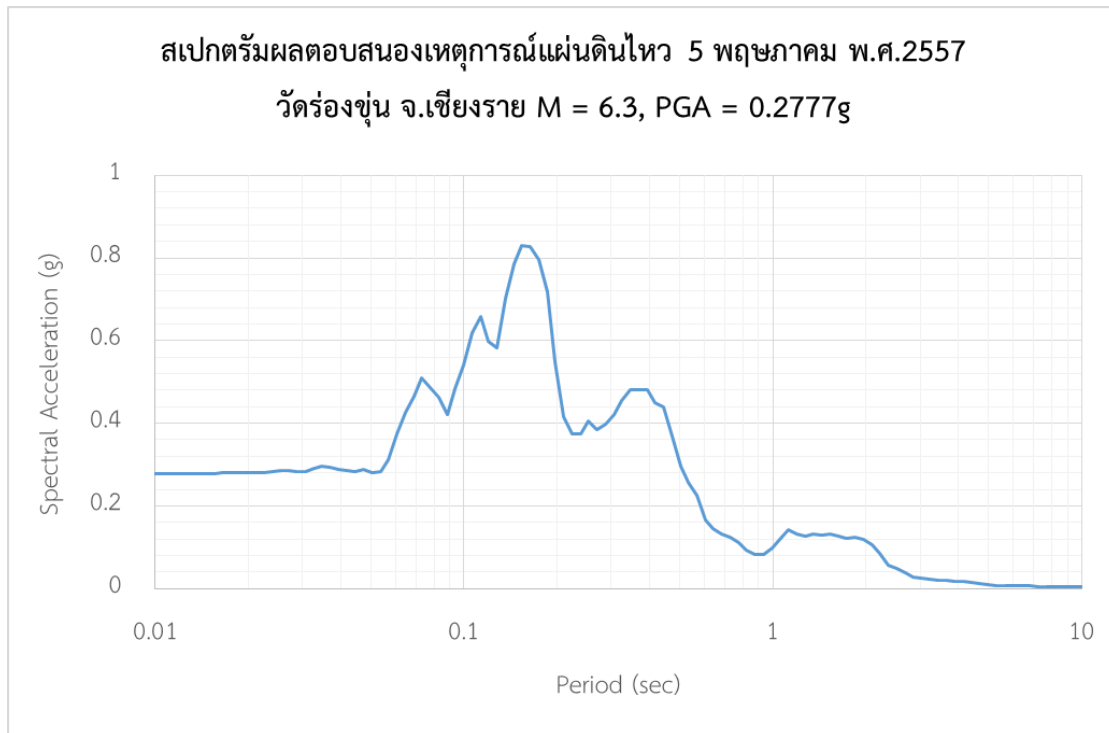
รูปที่ 8-3 แผนที่แสดงระยะทางจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว

การลดทอนความรุนแรงของแผ่นดินไหวเหตุการณ์เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557

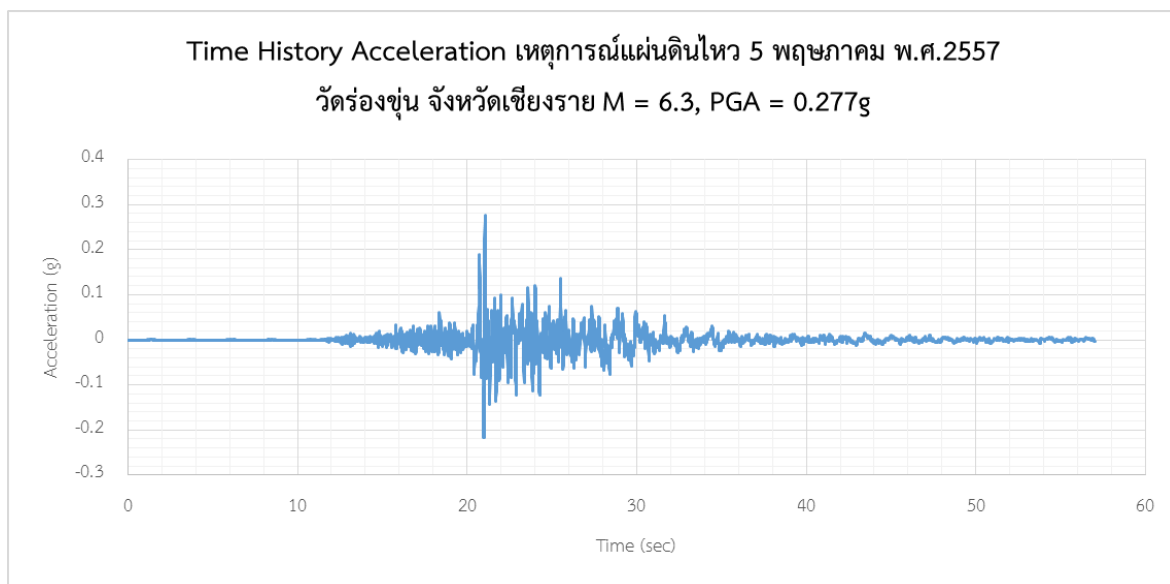
ระยะทางพิจารณาจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหว ขนาด M=6.3



รูปที่ 8-4 การลดทอนความรุนแรงของแผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557



รูปที่ 8-5 สเปกตรัมผลตอบสนองเหตุการณ์แผ่นดินไหว 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557



รูปที่ 8-6 Time History Acceleration เหตุการณ์แผ่นดินไหว 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557

(2) วิธี มยพ.1302 มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

วัดร่องขุนตั้งอยู่ที่อำเภอเมืองเชียงราย จังหวัดเชียงราย

$$\begin{aligned} \text{ความเร่งตอบสนอง} \quad S_s &= 0.798 \text{ g} \\ S_1 &= 0.232 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สัมประสิทธิ์ชั้นดิน} \quad F_a &= 1.2 \\ F_v &= 2.0 \end{aligned}$$

คำนวณความเร่งตอบสนองสำหรับการออกแบบ

$$\begin{aligned} SMS &= F_a \cdot S_s = 0.958 \text{ g} \\ SM_1 &= F_v \cdot S_1 = 0.464 \text{ g} \end{aligned}$$

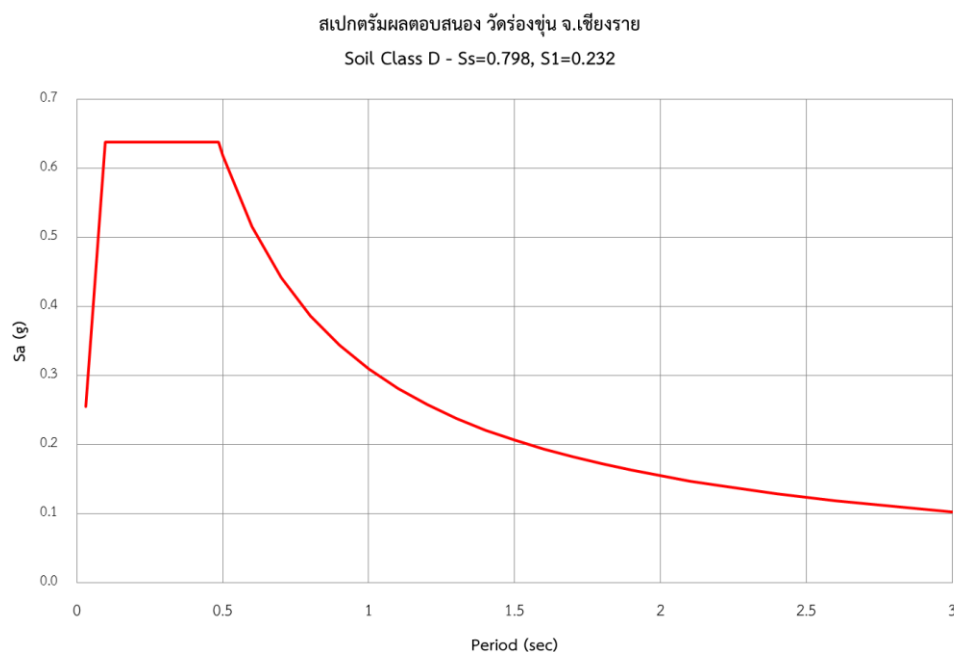
เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} SDS &= (2/3)SMS = 0.638 \text{ g} \\ SD_1 &= (2/3)SM_1 = 0.309 \text{ g} \end{aligned}$$

เนื่องจากใช้วิธีเชิงพลศาสตร์และค่า SD_1 น้อยกว่า SDS

$$\begin{aligned} T_o &= 0.2SD_1/SDS = 0.097 \text{ วินาที} \\ T_s &= SD_1/SDS = 0.485 \text{ วินาที} \end{aligned}$$

จะได้สเปกตรัมตอบสนองแผ่นดินไหวตามวิธี มยพ. 1302 ดังรูปที่ 8-7

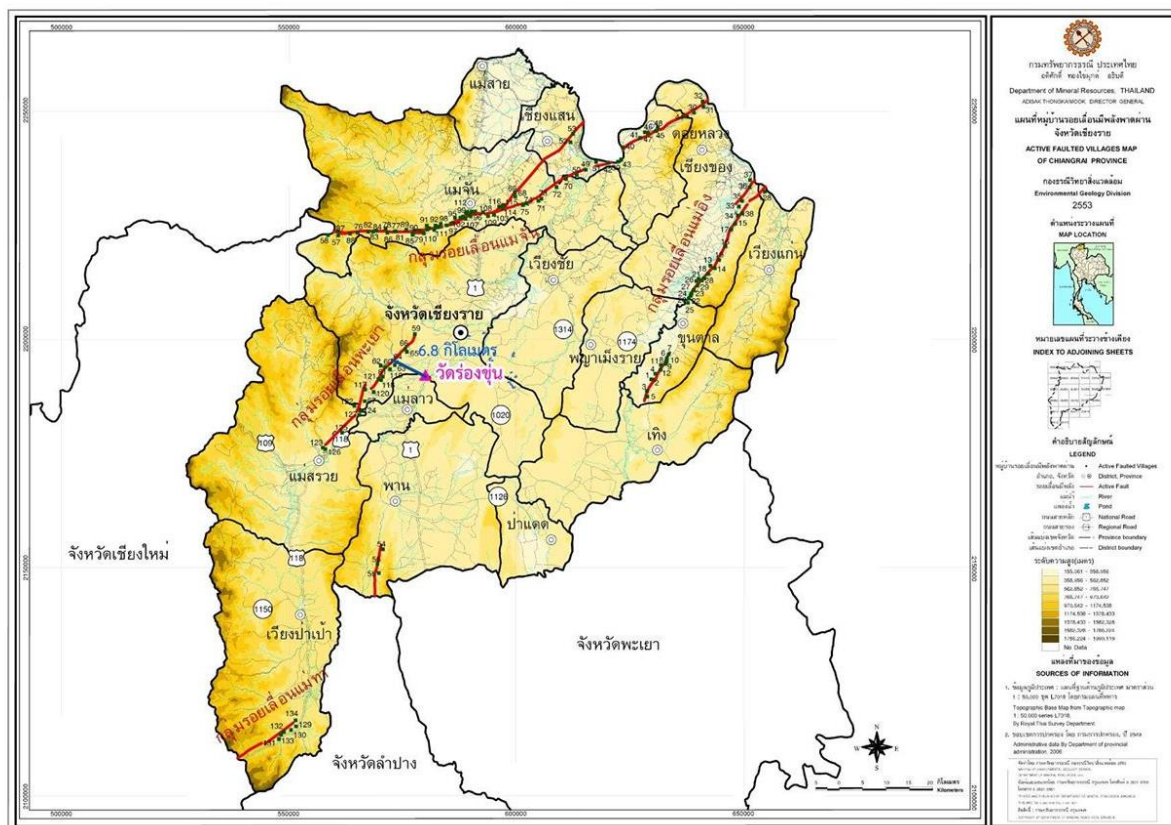


รูปที่ 8-7 สเปกตรัมผลตอบสนอง วิธี มยพ.1302 วัดร่องขุน จ.เชียงราย

(3) วิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Earthquake Analysis)

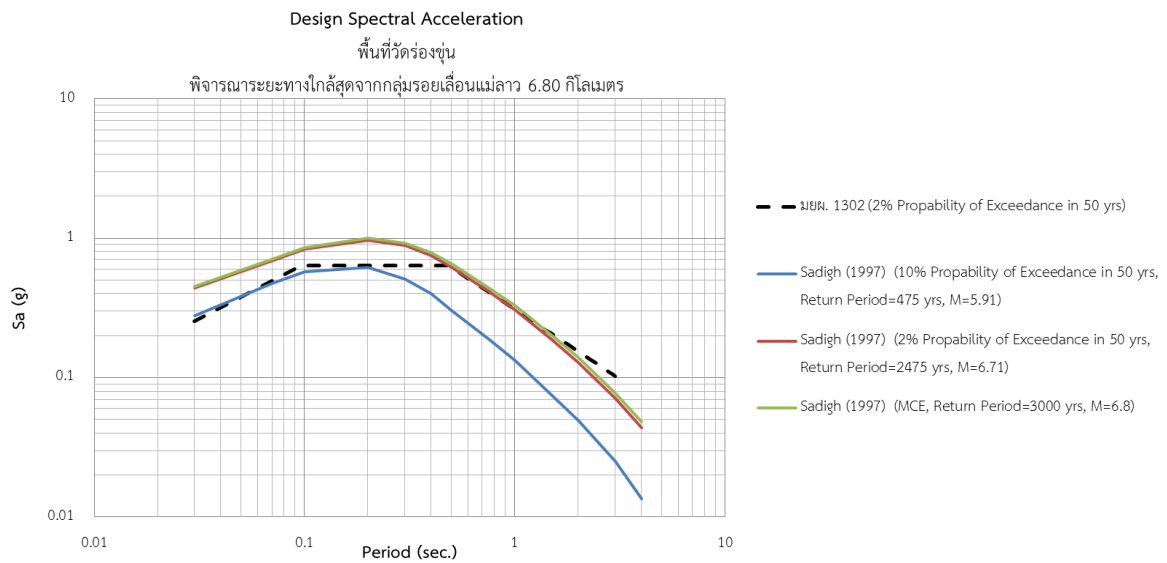
แผนที่รอยเลื่อนมีพลังประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2555) ระบุว่ารอยเลื่อนมีพลังที่อาจส่งผลกระทบต่อร่องขุนคือรอยเลื่อนย่อยแม่ลาว กลุ่มรอยเลื่อนพะเยา อยู่ห่างจากวัดประมาณ 6.8 กิโลเมตร ดังรูปที่ 8-8 ซึ่งรอยเลื่อนนี้มีการวางตัวในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ พาดผ่านอำเภอเมือง อำเภอแม่ลาว และอำเภอแม่สรวยของจังหวัดเชียงราย มีคาบการอุบัติซ้ำการเกิดแผ่นดินไหว (Return Period) 3,000 ปี สามารถเกิดแผ่นดินไหวความรุนแรงสูงสุดขนาด 6.80 (กรมทรัพยากรธรณี, 2552)

การวิเคราะห์ขนาดแผ่นดินไหวของรอยเลื่อนแม่ลาว สามารถประเมินได้จากความสัมพันธ์ของ Gutenberg-Richter ซึ่งมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ ขนาดของแผ่นดินไหวและจำนวนเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจริงในอดีตบริเวณพื้นที่นั้นๆ โดยประเมินขนาดแผ่นดินไหวที่สามารถเกิดในบริเวณร่องขุน ดังตารางที่ 8-4 และคำนวณอัตราเร่งสูงสุด และสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบ (Design Spectral Acceleration) โดยวิธีของ Sadigh (1997) แสดงดังรูปที่ 8-9



รูปที่ 8-8 แผนที่หมู่บ้านรอยเลื่อนที่มีพลังพาดผ่าน จังหวัดเชียงราย
แสดงระยะทางจากวัดร่องขุนถึงรอยเลื่อนที่ใกล้ที่สุด

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

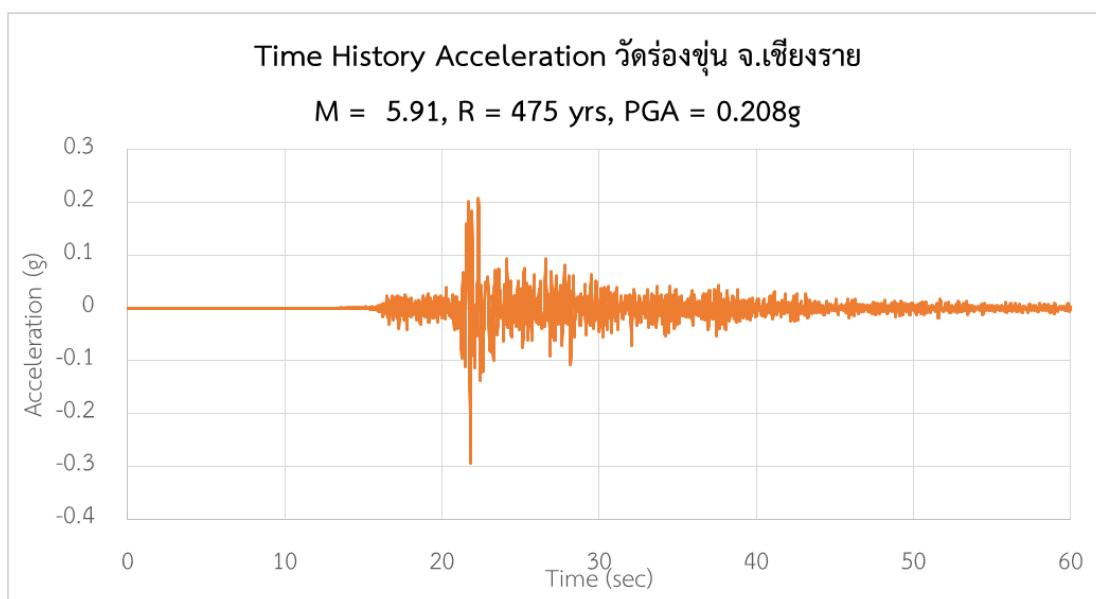
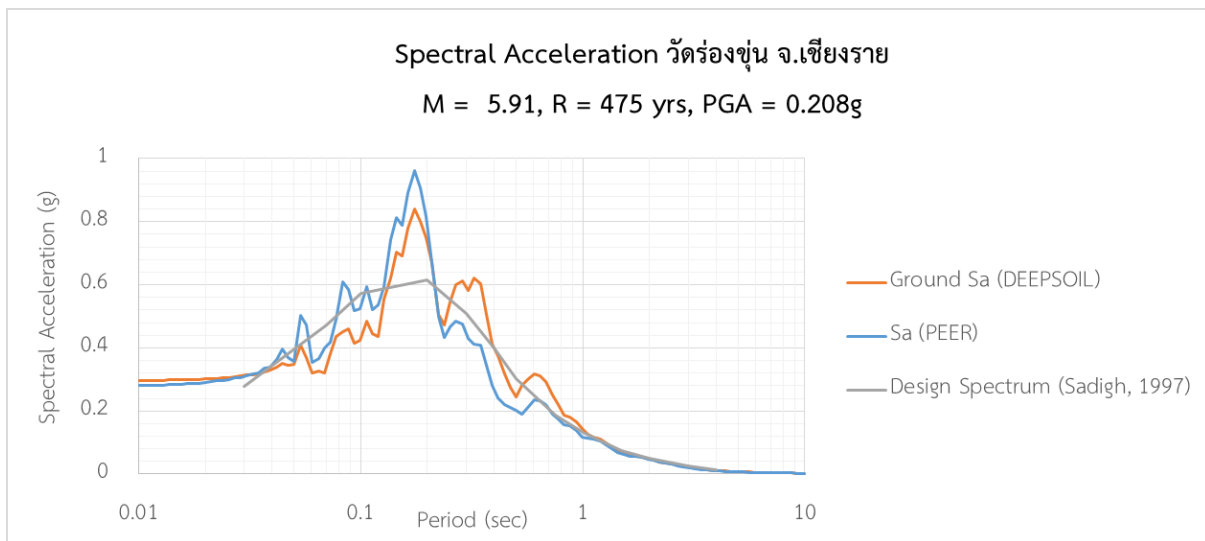


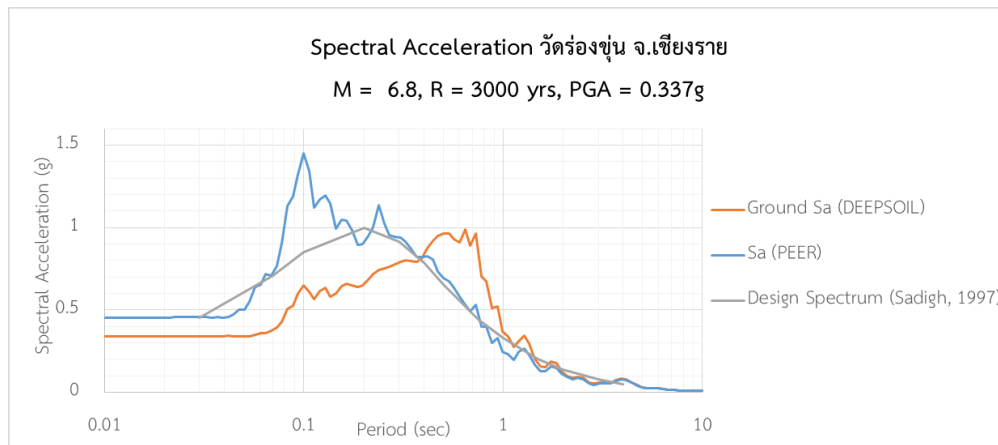
รูปที่ 8-9 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบ วัดร่องซุ่น จ.เชียงราย

ตารางที่ 8-4 การประเมินคุณสมบัติรอยเลื่อนย่อยแม่ลาว กลุ่มรอยเลื่อนพะเยา วิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Earthquake Analysis)

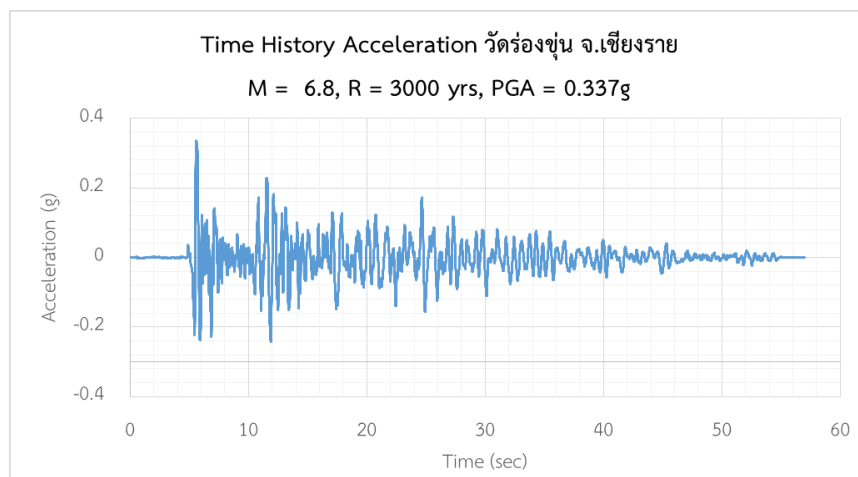
ลำดับ	วิธีการคำนวณ	คาบอุบัติซ้ำ (ปี)	ขนาดแผ่นดินไหว (Mw)	อัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน ณ รอยเลื่อน(g)	อ้างอิงจาก
1	ความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาส 2% ที่จะมีค่าสูงกว่าในคาบเวลา 50 ปี	475	5.91	0.277	- คาบอุบัติซ้ำและขนาดแผ่นดินไหว อ้างอิงจากกรมทรัพยากรธรณี (2552) - ค่า b parameter ของสมการ Gutenberg-Richter อ้างอิงจาก กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (2552)
2	ความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาส 10% ที่จะมีค่าสูงกว่าในคาบเวลา 50 ปี	2475	6.71	0.441	
3	ความรุนแรงสูงสุดของแผ่นดินไหว	3000	6.80	0.452	

เนื่องจากขนาดแผ่นดินไหวและสเปกตรัมผลตอบแทนสำหรับการออกแบบที่คาบอุบัติซ้ำ 2,475 ปีและ 3,000 ปี มีขนาดใกล้เคียงกันมาก จึงเลือกวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้เฉพาะที่คาบอุบัติซ้ำ 475 ปีและ 3,000 ปี เท่านั้น จากนั้นสืบค้นข้อมูลสเปกตรัมผลตอบแทนในช่วงคาบอุบัติซ้ำดังกล่าวบนฐานข้อมูลออนไลน์ PEER และทำการวิเคราะห์พฤติกรรมตอบสนองเชิงพลศาสตร์ (Site dynamic response) โดยใช้คุณสมบัติของดินดังข้อ 8.3.1 ในโปรแกรม DEEPSOIL เพื่อปรับค่าอัตราเร่งสูงสุด สเปกตรัมผลตอบแทน และ Time History Acceleration บริเวณวัดร่องขุน ดังรูปที่ 8-10 ถึงรูปที่ 8-13



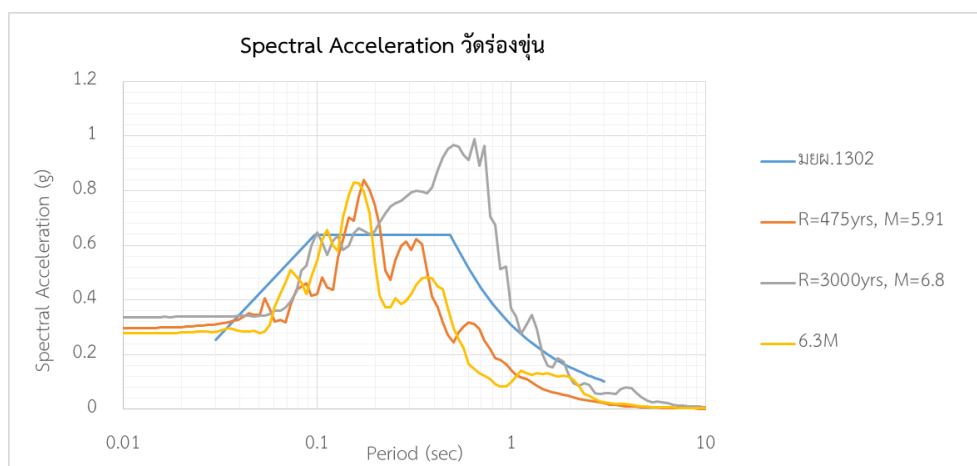


รูปที่ 8-12 Spectral Acceleration วัดร่องขุน จ.เชียงราย คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี, M = 6.80



รูปที่ 8-13 Time History Acceleration วัดร่องขุน จ.เชียงราย คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี, M = 6.80

สรุปและเปรียบเทียบขนาดแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอุโบสถทั้ง 4 กรณี ดังตารางที่ 8-5 และรูปที่ 8-14



รูปที่ 8-14 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอุโบสถวัดร่องขุน

ตารางที่ 8-5 สรุปการประเมินคุณสมบัติแผ่นดินไหวของรอยเลื่อนแม่ลาวสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอุโบสถ

ลำดับ	วิธีการคำนวณ	คาบ อุบัติซ้ำ (ปี)	ขนาด แผ่นดินไหว (Mw)	อัตราเร่งสูงสุด ของพื้นดิน (g)	อ้างอิงจาก
1.	เหตุการณ์แผ่นดินไหว วันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557	N/A	6.3	0.277	กรมทรัพยากรธรณี (2558)
2.	มยพ.1302 มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว				
2.1	ความรุนแรงของ แผ่นดินไหวที่มีโอกาส 2% ที่จะมีค่าสูงกว่าใน คาบเวลา 50 ปี	475	N/A	N/A	กรมโยธาธิการและผัง เมือง (2552)
3.	การวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Earthquake Analysis)				
3.1	ความรุนแรงของ แผ่นดินไหวที่มีโอกาส 2% ที่จะมีค่าสูงกว่าใน คาบเวลา 50 ปี	475	5.91	0.208	- คาบอุบัติซ้ำและขนาด แผ่นดินไหว อ้างอิงจาก กรมทรัพยากรธรณี (2552) - ค่า b parameter ของสมการ Gutenberg-Richter
3.2	ความรุนแรงสูงสุดของ แผ่นดินไหว	3000	6.80	0.337	อ้างอิงจาก กรมป้องกัน และบรรเทาสาธารณภัย (2552)

8.3.3 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction Triggering

(1) เหตุการณ์แผ่นดินไหวจังหวัดเชียงราย วันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ขนาด 6.3

ตารางที่ 8-6 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction เหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 โดยวิธี Cyclic Stress (Seed และ Idriss, 1971) และ Liquefaction Potential Index

BH	Sample No.	Depth (m.)		(N1)60	CSR	CRR	FS	LPI
		From	To					
1	10	10	10.5	11	0.295	0.200	0.68	1.57
2	6	6	6.5	8.5	0.301	0.214	0.71	4.02
	7	7	7.5	8.7	0.298	0.204	0.68	
3	5	5	5.5	4.5	0.311	0.173	0.55	3.29

เมื่อเทียบค่า LPI กับโอกาสการเกิด Liquefaction โดย Iwasaki และคณะ (1982) ในตารางที่ 8-1 ถึง 8-3 พบว่าดินบริเวณวัดร่องขุนเกิด Liquefaction น้อยมาก ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557

(2) แผ่นดินไหวความรุนแรงสูงสุดขนาด 6.8 คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี

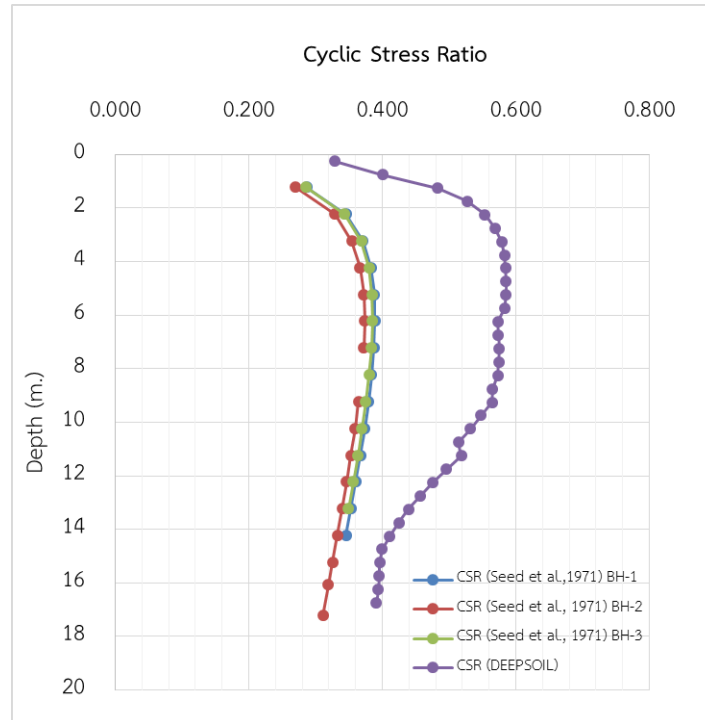
ตารางที่ 8-7 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ที่ขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด 6.8 โดยวิธี Cyclic Stress (Seed และ Idriss, 1971) และ Liquefaction Potential Index

BH	Sample No.	Depth (m.)		(N1)60	CSR	CRR	FS	LPI
		From	To					
1	7	7	7.5	18.3	0.387	0.334	0.86	3.94
	8	8	8.5	19.6	0.384	0.353	0.92	
	10	10	10.5	11	0.374	0.176	0.47	
2	6	6	6.5	8.5	0.373	0.187	0.50	7.92
	7	7	7.5	8.7	0.372	0.179	0.48	
	9	9	9.5	17.5	0.365	0.292	0.80	
	14	14	14.5	20	0.333	0.322	0.97	
3	5	5	5.5	4.5	0.385	0.151	0.39	7.58
	6	6	6.5	16.8	0.386	0.281	0.73	
	7	7	7.5	20.6	0.384	0.310	0.81	

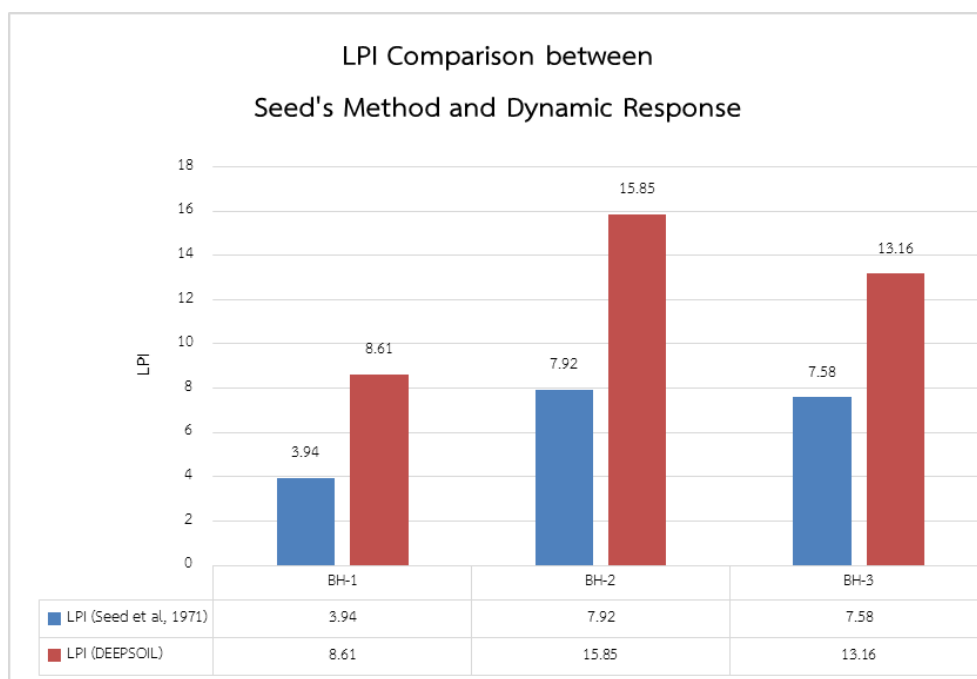
ตารางที่ 8-8 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ที่ขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด 6.8 ด้วยค่า CSR จากโปรแกรม DEEPSOIL และ Liquefaction Potential Index

BH	Depth	CSR (DEEPSOIL)	CRR	FS	Delta H_i (m)	wi	LPI
1	7.25	0.575	0.334	0.58	0.50	6.38	8.61
	7.75	0.574	0.334	0.58	0.50	6.13	
	8.25	0.573	0.353	0.62	0.50	5.88	
	8.75	0.565	0.353	0.63	0.50	5.63	
	9.25	0.565	0.487	0.86	0.50	5.38	
	9.75	0.548	0.487	0.89	0.50	5.13	
	10.25	0.532	0.176	0.33	0.50	4.88	
	10.75	0.514	0.176	0.34	0.50	4.63	
2	6.25	0.573	0.187	0.33	0.50	6.88	15.85
	6.75	0.574	0.187	0.33	0.50	6.63	
	7.25	0.575	0.179	0.31	0.50	6.38	
	7.75	0.574	0.179	0.31	0.50	6.13	
	8.25	0.573	0.179	0.31	0.50	5.88	
	8.75	0.565	0.179	0.32	0.50	5.63	
	9.25	0.565	0.292	0.52	0.50	5.38	
	9.75	0.548	0.292	0.53	0.50	5.13	
	14.25	0.411	0.322	0.78	0.50	2.88	
	14.75	0.400	0.322	0.81	0.50	2.63	
3	5.25	0.585	0.151	0.26	0.50	7.38	13.26
	5.75	0.583	0.151	0.26	0.50	7.13	
	6.25	0.573	0.281	0.49	0.50	6.88	
	6.75	0.574	0.281	0.49	0.50	6.63	
	7.25	0.575	0.310	0.54	0.50	6.38	
	7.75	0.574	0.310	0.54	0.50	6.13	
	8.25	0.573	0.460	0.80	0.50	5.88	
	8.75	0.565	0.460	0.82	0.50	5.63	
	10.25	0.532	0.472	0.89	0.50	4.88	
	10.75	0.514	0.472	0.92	0.50	4.63	

จากค่า LPI ที่ขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด 6.8 พบว่าชั้นดินบริเวณร่องขุนมีโอกาเกิด Liquefaction สูง ที่ความลึก 5-10 เมตร (Iwasaki และคณะ, 1982) ในทั้งสองวิธี โดยเปรียบเทียบค่า CSR และ LPI ที่ได้ดังรูปที่ 8-15 และ 8-16 ตามลำดับ



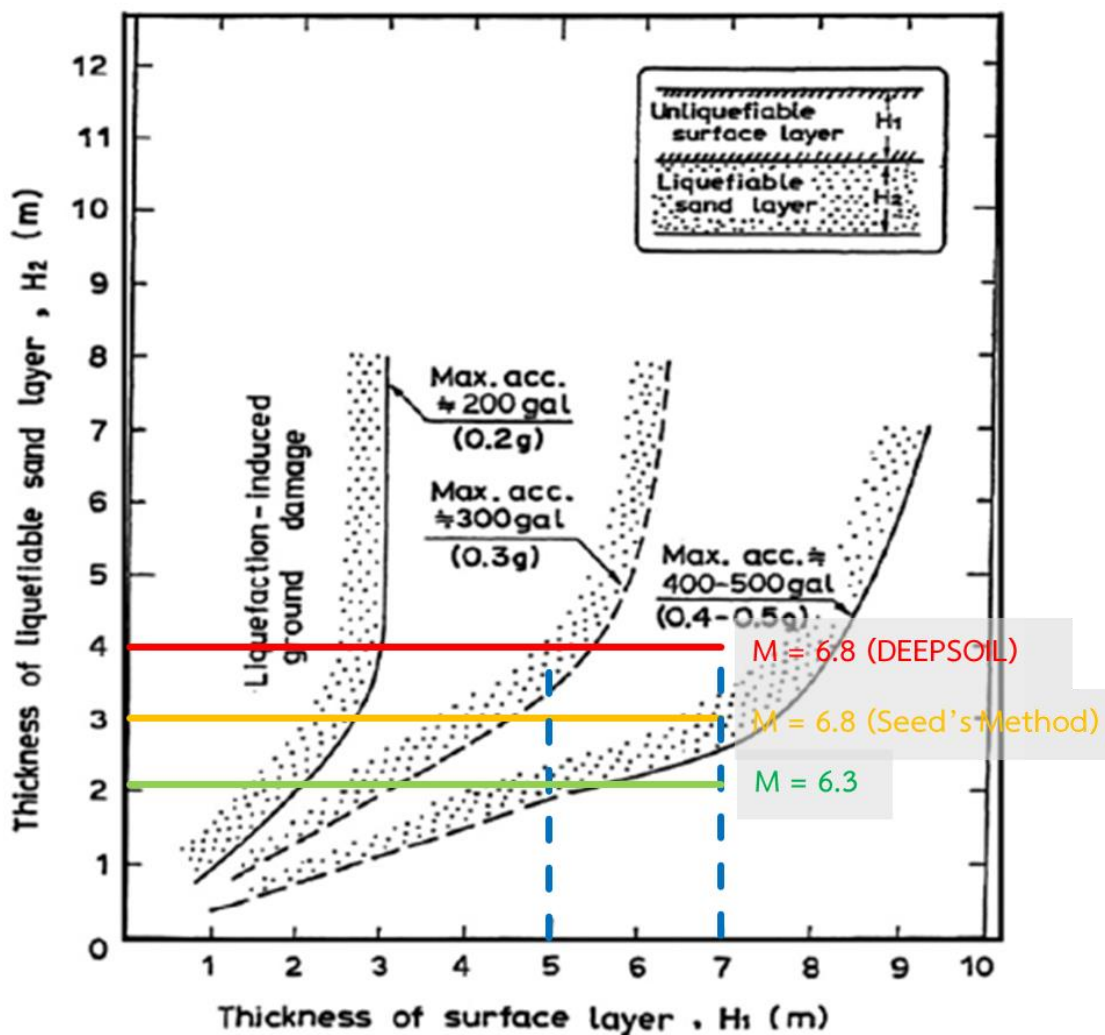
รูปที่ 8-15 กราฟเปรียบเทียบค่า CSR ที่ได้จากวิธีของ Seed และ Idriss (1971) และจากการวิเคราะห์พฤติกรรมตอบสนองเชิงพลศาสตร์



รูปที่ 8-16 กราฟเปรียบเทียบค่า LPI ที่ได้จากจากวิธีของ Seed และ Idriss (1971) และจากการวิเคราะห์พฤติกรรมตอบสนองเชิงพลศาสตร์

8.3.4 ผลการประเมินความเสียหายที่ผิวดินเนื่องจาก Liquefaction

จากกราฟเกณฑ์ความหนาของชั้นดินที่ Non-liquefied ของ Ishihara (1985) พบว่า เหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ขนาด 6.3 ไม่เกิดความเสียหายที่ผิวดินซึ่งตรงกับ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง แต่จะเกิดความเสียหายที่ผิวดินบริเวณวัดร่องขุนเมื่อได้รับแรงกระทำจากแผ่นดินไหว สูงสุด ขนาด 6.8 ค่าอัตราเร่งสูงสุดของดิน 0.4-0.5 g ดังรูปที่ 8-17



รูปที่ 8-17 ผลการประเมินความเสียหายที่ผิวดินเนื่องจาก Liquefaction

8.3.5 การวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อโครงสร้างอุโบสถ

(1) ข้อกำหนดการวิเคราะห์และออกแบบ

$$\text{หน่วยน้ำหนักคอนกรีต} = 2,400 \text{ kg/m}^3$$

กำลังของวัสดุ (แบบศาสนสถาน กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2548)

$$\text{- เหล็กข้ออ้อย SD 30} \quad f_y = 3,000 \text{ ksc}$$

$$\text{- เหล็กกลม SR 24} \quad f_y = 2,400 \text{ ksc}$$

$$\text{- คอนกรีต} \quad f_c' = 200 \text{ ksc}$$

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม (Super Dead Load)

$$\text{- กำแพงรอบอุโบสถ} = 330 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{- ผนังก่ออิฐเต็มแผ่น} = 360 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{- ผนังก่ออิฐครึ่งแผ่น} = 180 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{- น้ำหนักจากประติมากรรมตกแต่งวัด}$$

น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

$$\text{- พื้น} = 100 \text{ kg/m}^2$$

(2) การคำนวณแรงเฉือนที่ฐานอาคาร (V) วิธี มยพ.1302

$$\text{จากสมการ} \quad V = C_s W \quad (8.2)$$

$$C_s = S_a \left(\frac{I}{R} \right) \quad (8.3)$$

คาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างอุโบสถ คำนวณจากโปรแกรม ETABS

$$T \text{ อุโบสถหลัก} = 0.363 \text{ วินาที}$$

$$T \text{ อุโบสถรอง} = 0.307 \text{ วินาที}$$

จาก มยพ.1302 อาคารที่เป็นที่ชุมนุมในพื้นที่หนึ่งๆ มากกว่า 300 คน ประเภท
ความสำคัญ III (มาก)

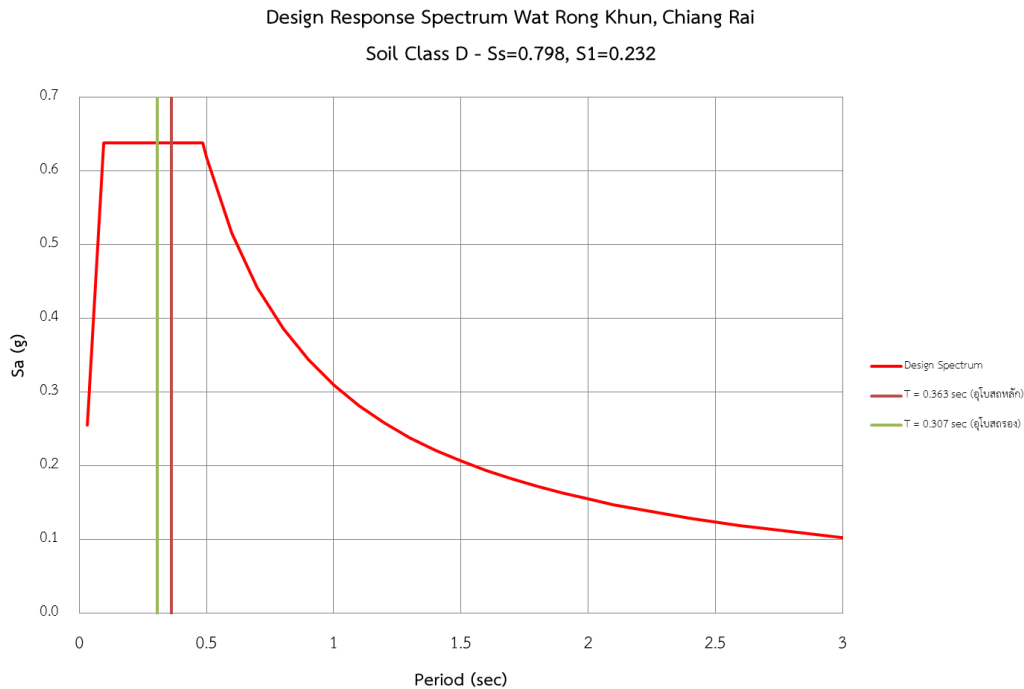
$$I = 1.25$$

$$\text{จาก มยพ.1302 เมื่อค่า} \quad SDS \geq 0.50 \quad \text{ออกแบบแผ่นดินไหวเป็นประเภท ง}$$

$$SD1 \geq 0.20 \quad \text{ออกแบบแผ่นดินไหวเป็นประเภท ง}$$

ดังนั้นเลือกประเภทการออกแบบแผ่นดินไหว ง จัดเป็นประเภทรุนแรง

จากตารางที่ 10 เลือกชนิดโครงสร้างระบบโครงอาคาร ผนังเอนแบบเหนียวพิเศษ (Special RC Shear Wall) จะได้ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (Response Modification Factor, R) = 6 ตัวประกอบกำลัง ส่วนเกิน (System Overstrength Factor, Ω_0) = 2.5 และ ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d) = 5 และสเปกตรัมตอบสนองวิธี มยผ.1302 จะได้ S_a ดังรูปที่ 8-18



รูปที่ 8-18 สเปกตรัมผลตอบแทนวัตถุทรงชุน จ.เชียงราย เทียบกับคาบการสั่นพื้นฐานของอุโบสถ

จะได้ว่าค่าสเปกตรัมออกแบบ $S_a = S_{DS} = 0.638g$

สัมประสิทธิ์ผลตอบแทนแผ่นดินไหว

$$C_s = S_a \left(\frac{1}{R} \right) = 0.638 \left(\frac{1.25}{6} \right) = 0.133g > 0.01g$$

แรงเฉือนที่ฐานอาคาร $V = C_s W = 0.133W$ (13.3% ของน้ำหนักอาคาร)

การกระจายแรงแผ่นดินไหวในแนวดิ่ง (F_x) และการกระจายแรงเฉือนในแนวนอน

$$\begin{aligned} \text{การกระจายแรงแผ่นดินไหว} \quad F_x &= C_{vx} V \\ C_{vx} &= \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \end{aligned}$$

$$\text{การกระจายแรงเฉือนในแนวนอน} \quad V_x = \sum_{i=x}^n F_i$$

จะได้แรงกระทำในแนวนอนของอุโบสถหลักดังตารางที่ 8-9 และตารางที่ 8-10 สำหรับอุโบสถ

รอง

ตารางที่ 8-9 การคำนวณแรงกระทำด้านข้างของอุโบสถหลักโดยวิธีแรงสถิตย์เทียบเท่า

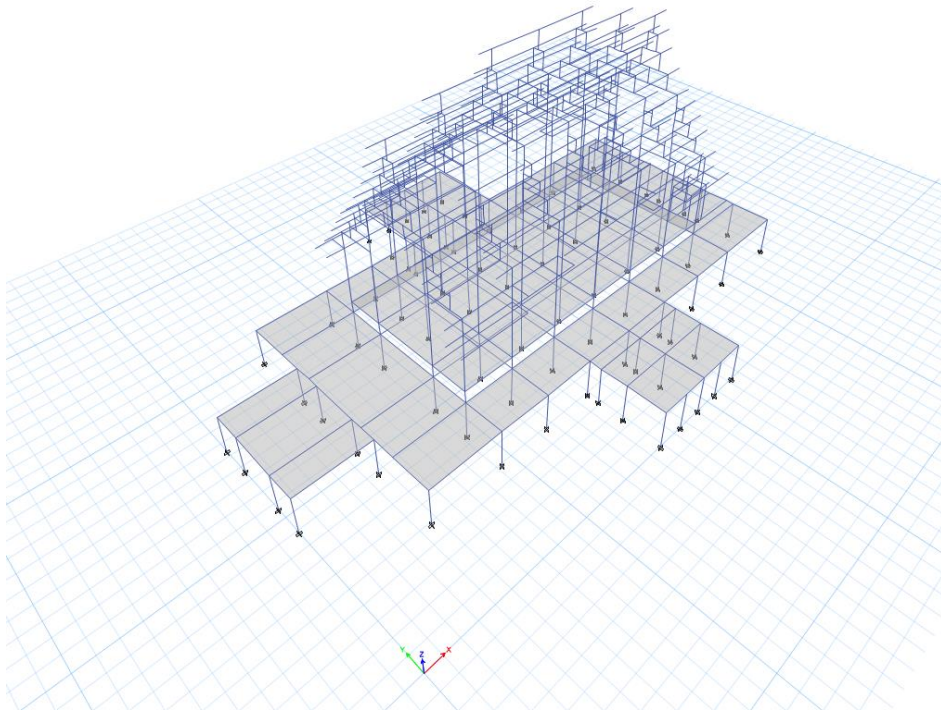
Story	Wx (kg)	hx (m.)	Wx(hx ^k)	Cvx	Fx (kg)	V (kg)
10	923.19	16.55	15278.79	0.01	354.22	354.22
9	4630.07	15.55	71997.59	0.02	1669.16	2023.38
8	12002.30	14.55	174633.47	0.06	4048.63	6072.01
7	22960.69	13.55	311117.35	0.10	7212.82	13284.84
6	40862.25	12.55	512821.24	0.17	11889.04	25173.88
5	47241.50	11.55	545639.33	0.18	12649.89	37823.76
4	39243.45	10.55	414018.40	0.14	9598.44	47422.20
3	174825.60	3.05	533218.06	0.18	12361.92	59784.12
2	178299.25	2.30	410088.28	0.14	9507.32	69291.44
1	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	69291.44
Base	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	69291.44
Sum	520988.30		2988812.50	1.00	69291.44	

ตารางที่ 8-10 การคำนวณแรงกระทำด้านข้างของอุโบสถรองโดยวิธีแรงสถิตย์เทียบเท่า

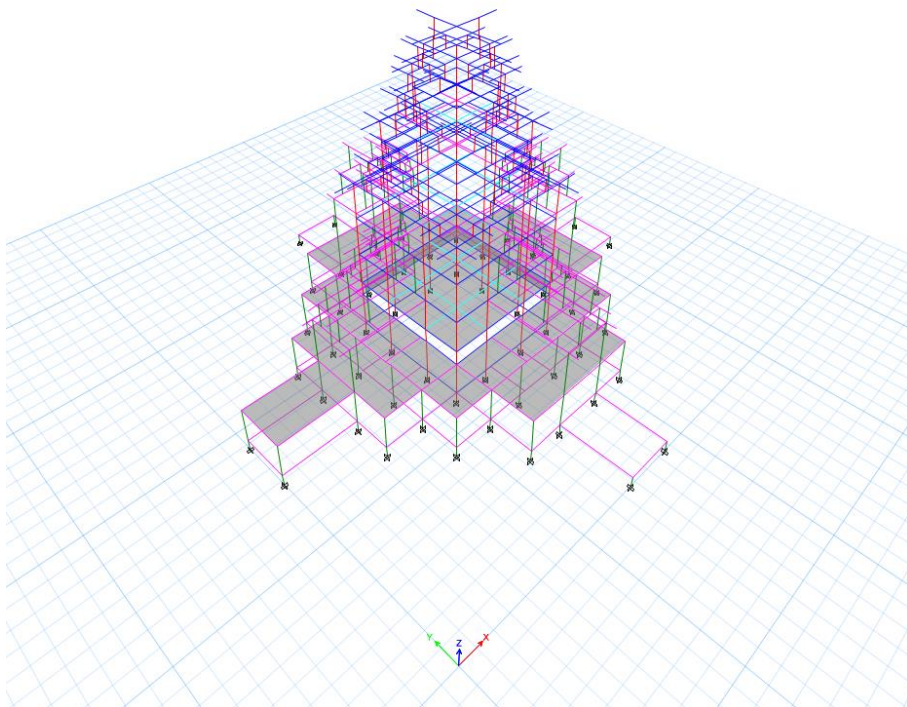
Story	Wx (kg)	hx (m.)	Wx(hx ^k)	Cvx	Fx (kg)	V (kg)
5	63376.34	6.70	424621.48	0.32	17615.52	17615.52
4	83659.14	4.70	393197.96	0.30	16311.91	33927.43
3	99335.23	3.05	302972.45	0.23	12568.88	46496.31
2	69817.77	2.30	160580.87	0.12	6661.73	53158.04
1	98924.23	0.50	49462.11	0.04	2051.95	55209.99
Base	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55209.99
Sum	415112.71		1330834.87	1.00	55209.99	

8.3.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างและฐานราก

ทำแบบจำลองโครงสร้างอุโบสถหลักและอุโบสถรองของวัดร่องขุนด้วยวิธี Finite Element ดังรูปที่ 8-19 ถึง รูปที่ 8-20 ทำการวิเคราะห์แรงภายในโครงสร้างทั้งสองโดยกำหนดกรณีรวมของแรงกระทำ (Load Combination) จากน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม น้ำหนักบรรทุกจร และแรงกระทำจากแผ่นดินไหวกรณีต่างๆ ดังตารางที่ 8-11



รูปที่ 8-19 แบบจำลองโครงสร้างอุโบสถหลัก



รูปที่ 8-20 แบบจำลองโครงสร้างอุโบสถรอง

ตารางที่ 8-11 กรณีรวมของแรงกระทำต่อโครงสร้างอุโบสถวัดร่องขุน

ลำดับที่	ชื่อ	Load Combination
1	COMBO1	DL+SDL+LL
2	QL_X	DL+SDL+LL+QLX
3	QL_Y	DL+SDL+LL+QLY
4	6.3M_XZ	DL+SDL+LL+Time History Function 6.3M XZ
5	6.3M_Y	DL+SDL+LL+Time History Function 6.3M Y
6	475yrs_XZ	DL+SDL+LL+Time History Function 475yrs XZ
7	475yrs_Y	DL+SDL+LL+Time History Function 475yrs Y
8	3000yrs_XZ	DL+SDL+LL+Time History Function 3000yrs XZ
9	3000yrs_Y	DL+SDL+LL+Time History Function 3000yrs Y

เมื่อ DL คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่

SDL คือ น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม

LL คือ น้ำหนักบรรทุกจร

QLX คือ แรงต้านข้างจากแผ่นดินไหวตามแนวแกน X ที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม

QLY คือ แรงต้านข้างจากแผ่นดินไหวตามแนวแกน Y ที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม

8.3.7 ผลการวิเคราะห์ฐานราก

จากแบบศาสนสถาน กรมโยธาธิการและผังเมือง (2548) ได้ออกแบบฐานรากพระวิหารภาคเหนือไว้ 2 ขนาด ได้แก่ 1.50x1.50 ตารางเมตร และ 1.80x1.80 ตารางเมตร และแรงกระทำต่อฐานรากที่ได้จากโปรแกรม ETABS ภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวสูงสุด 6.8 ขนาด 78.105 ตัน ได้ผลการวิเคราะห์ฐานรากดังนี้

Punching Shear Analysis พบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่ามากกว่า 1.5 ทั้งสองขนาด เพราะฉะนั้นฐานรากจะไม่วิบัติเนื่องจากการเจาะทะลุ ดังแสดงในตารางที่ 8-12

ตารางที่ 8-12 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ฐานรากบนดินที่เกิด Liquefaction โดยวิธี Punching Shear Analysis

	BH-3							
Sample No.	Depth (m)		Soil Type	SPT-N	N'	Su (t/m2)	Phi	Tf
	From	To				(เชิดพันธุ์, 2553)	(เชิดพันธุ์, 2553)	
1	-1	-1.45	C	10	10	6.31		6.31
2	-2	-2.45	C	10	10	6.31		6.31
3	-3	-3.45	C	6	6	2.78		2.78
4	-4	-4.45	C	5	5	1.90		1.90
5	-5	-5.45	S	4	4		29.06	
6	-6	-6.45	S	18	16.5		31.14	
7	-7	-7.45	S	24	19.5		31.60	
8	-8	-8.45	S	28	21.5		31.90	
9	-9	-9.45	S	46	30.5		33.17	
10	-10	-10.45	S	32	23.5		32.20	
11	-11	-11.45	S	57	36		33.88	
12	-12	-12.45	S	84	49.5		35.42	
13	-13	-13.45	S	81	48		35.27	
					avg.	4.33		4.33
		T	5	m		T	5	m
		B	1.8	m		B	1.5	m
		L	1.8	m		L	1.5	m
		P	78.105	ton		P	78.105	ton
		R	155.72			R	129.76	
		FS	1.99			FS	1.66	

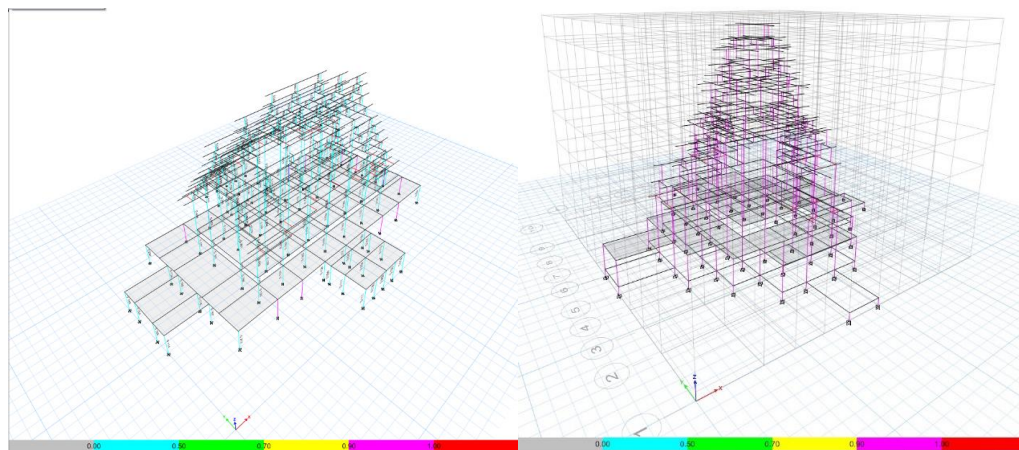
Bearing Capacity พบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าน้อยกว่า 1.5 ทั้งสองขนาด เพราะฉะนั้นดินฐานรากจะไม่สามารถรับแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหวได้ ดังตารางที่ 8-13

ตารางที่ 8-13 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ฐานรากบนดินที่เกิด Liquefaction โดยวิธี Bearing Capacity

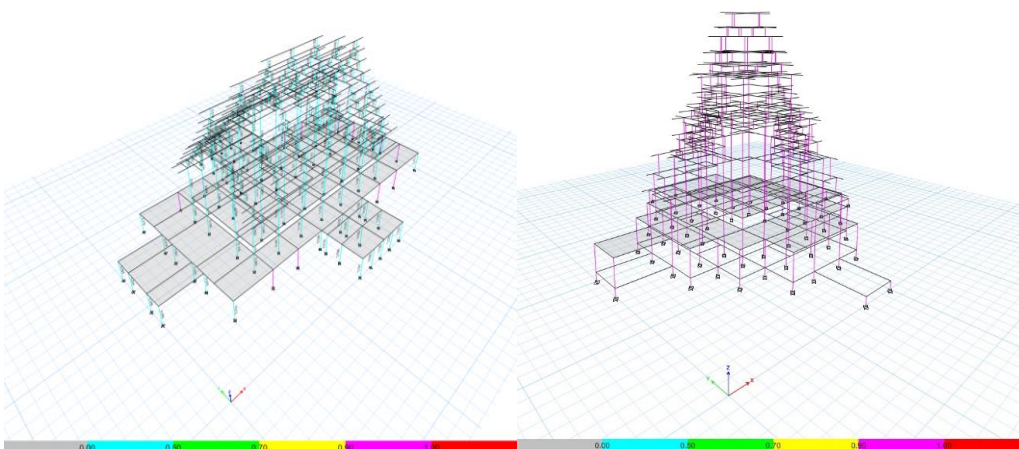
BH3					
T	3.50	m			
B	1.80	m	T	3.50	m
L	1.80	m	B	1.50	m
T/B	1.94		L	1.50	m
Nc	5.53	จากกราฟ	T/B	2.33	
c=Su avg	4.33	t/m2	Nc	5.53	จากกราฟ
			c=Su avg	4.33	t/m2
qult	31.13	t/m2	qult	31.13	t/m2
Qult	100.86	tons	Qult	70.04	tons
P	78.11	tons	P	78.11	tons
FS	1.29		FS	0.90	

8.3.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง

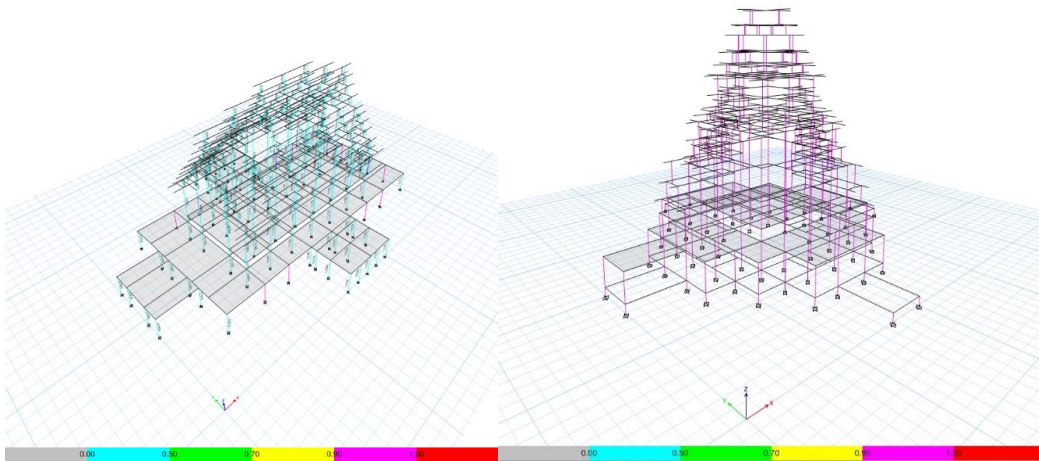
วิเคราะห์กำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างในทุกกรณีรวมของแรงกระทำตามมาตรฐาน ACI 318-08 ดังรูปที่ 8-21 ถึง 8-24 โดยโปรแกรม ETABS วิธี Column P-M-m Interaction Ratios จะแสดงผลการวิเคราะห์เป็นแถบสี หากชิ้นส่วนเป็นเส้นสีแดง แสดงว่าโครงสร้างชิ้นนั้นวิบัติเนื่องจากรับแรงกระทำมากกว่ากำลังรับแรงของชิ้นส่วนนั้น จากผลการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างหลักของอุโบสถทั้งสองไม่วิบัติเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวขนาด 6.3, แรงแผ่นดินไหวตามวิธี มยพ.1302 และแรงแผ่นดินไหวขนาด 5.91 คาบอุบัติซ้ำ 475 ปี เนื่องจากคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างไม่ตรงกับคาบอัตราเร่งสูงสุด ดังรูปที่ 8-25



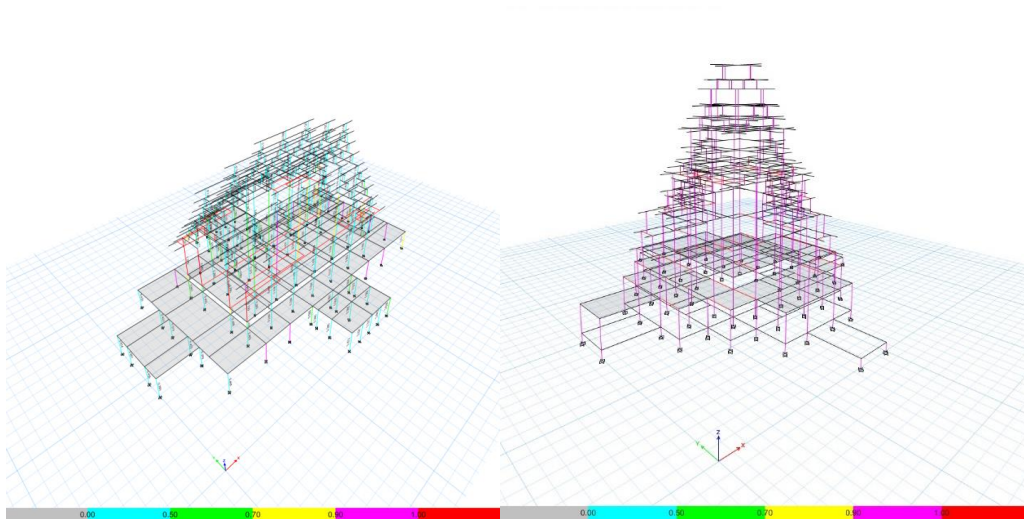
รูปที่ 8-21 ผลการวิเคราะห์ชิ้นส่วนโครงสร้างจากสเปกตรัมผลตอบสนองออกแบบตามวิธีมยพ.1302



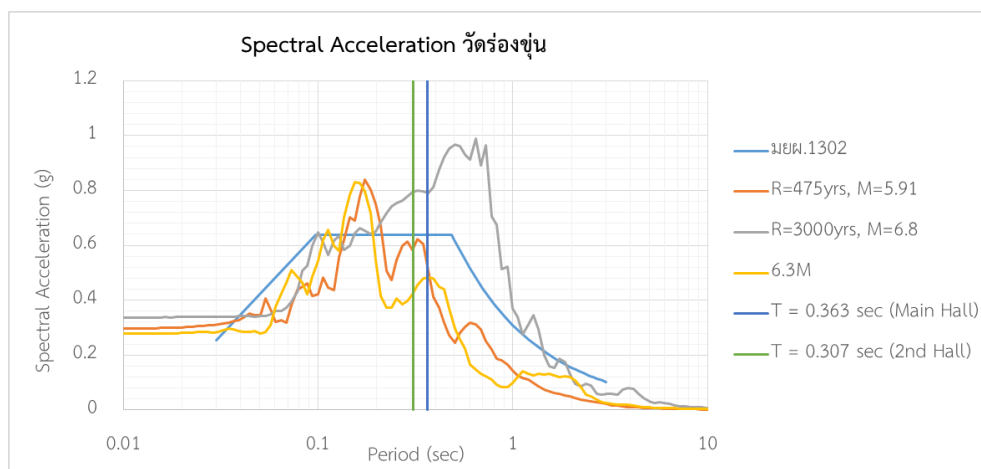
รูปที่ 8-22 ผลการวิเคราะห์ชิ้นส่วนโครงสร้างกรณีแผ่นดินไหวขนาด 5.91 คาบอุบัติซ้ำ 475 ปี



รูปที่ 8-23 ผลการวิเคราะห์ชิ้นส่วนโครงสร้างกรณีแผ่นดินไหวขนาด 6.3

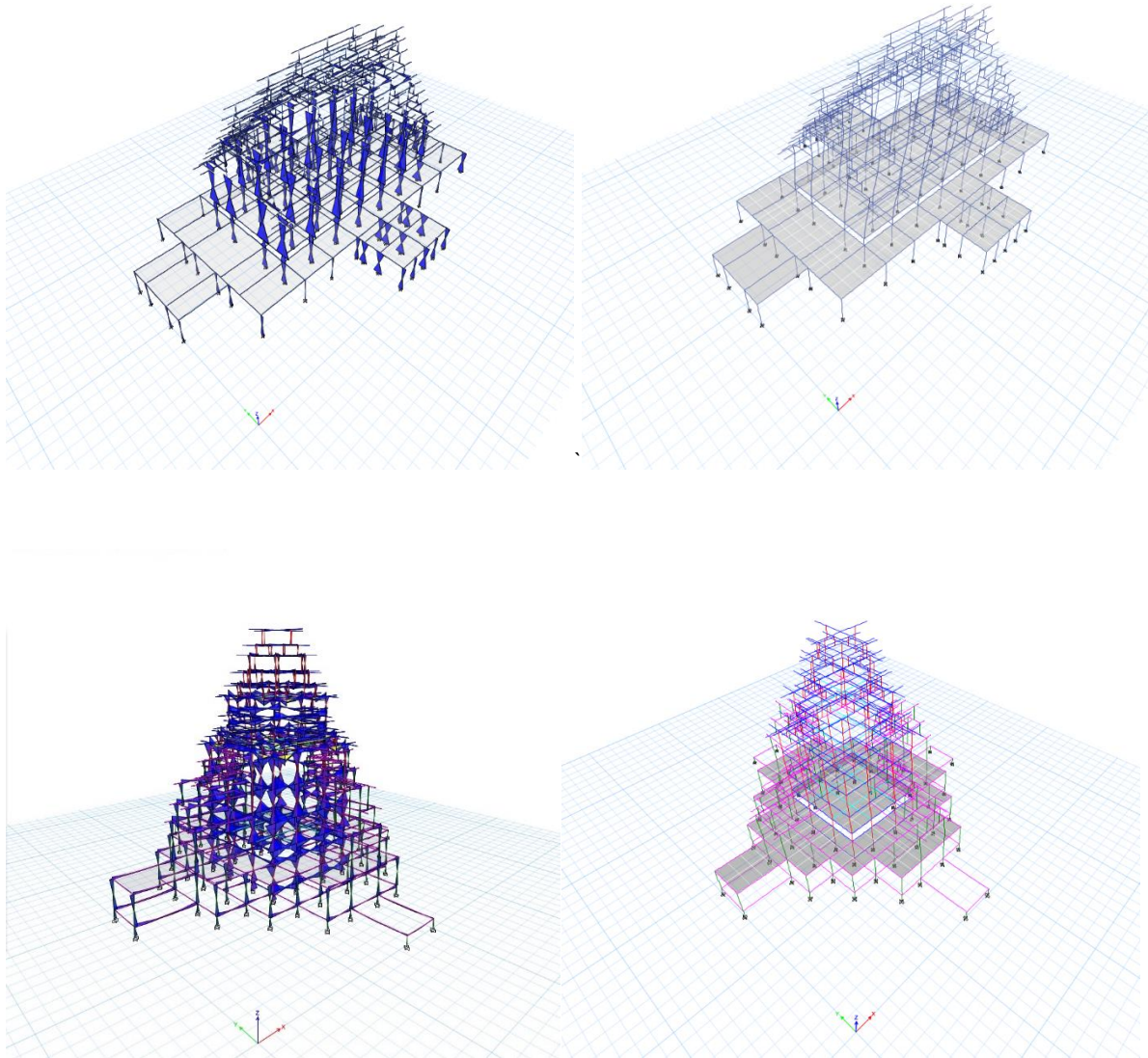


รูปที่ 8-24 ผลการวิเคราะห์ชิ้นส่วนโครงสร้างกรณีแผ่นดินไหวขนาด 6.80 คาบอุบัติซ้ำ 3000 ปี



รูปที่ 8-25 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอุโบสถวัดร่องขุน
เทียบกับคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างอุโบสถ

แต่ในกรณีความรุนแรงแผ่นดินไหวความรุนแรงสูงสุดขนาด 6.8 คาบการอุบัติซ้ำ 3,000 ปี โครงสร้างเสาของอุโบสถหลักและอุโบสถรองเกิดการวิบัติเนื่องจากเกิดโมเมนต์ดัดสูงกว่ากำลังที่เสาจะรับได้ และทำให้เกิดความเคลื่อนตัวดังรูปที่ 8-26



รูปที่ 8-26 โมเมนต์และการเคลื่อนตัวของโครงสร้างอุโบสถเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี

เมื่อนำเสาที่วิบัติตามที่ระบุในโปรแกรม ETABS มาวิเคราะห์กำลังที่เสาสามารถรับได้ด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน พบว่าเสาไม่สามารถรับแรงกระทำและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหวความรุนแรงสูงสุดขนาด 6.8 ได้ เช่นเดียวกับที่โปรแกรมระบุไว้ ดังรายการคำนวณต่อไปนี้

DESIGN RC. COLUMN

[I.Data For Design]

[II.Results of Design Section&Reinf.]

Type of Column	Short Column		2.1.Value of m	20.40	
1.1.Reduction Factor	1.000	kh/r=8.3	2.2.Value of I_{x-x}	116,574	cm. ⁴
1.2.Shape of Column	1	จตุรัส	2.3.Value of I_{y-y}	116,574	cm. ⁴
1.3.High of Column	0.75	m.	2.4.Value of cx	15.00	cm.
1.4.Req. bx $\geq$	15.00	cm.	2.5.Value of cy	15.00	cm.
1.5.Req. ty $\geq$	15.00	cm.	2.6.Value of fa	42.35	kg./cm. ²
1.6.Design Wide(bx)	30.00	cm.	2.7.Value of fbx	97.76	kg./cm. ²
1.7.Design Depth(ty)	30.00	cm.	2.8.Value of fby		kg./cm. ²
1.8.Dia. of drain Pipe		cm. OK.!	2.9.Value of Fa	80.28	kg./cm. ²
1.9.Vertical Load(P_z)	38,111	kg. หนัก	2.10.Value of Fb	77.85	kg./cm. ²
1.10.Horiz. Load(P_y)		kg.	2.11.Value of Pa	49,500	kg.
1.11.Moment(M_{x-x})	7,597.38	kg.-m.	2.12.Value of Pbx	19,413	kg.
1.12.Moment(M_{y-y})		kg.-m.	2.13.Value of Pby	19,413	kg.
1.13.Design Ratio(p_g)	1.79	% OK.!	2.14.Value of Po	72,248	kg.
8 - DB	16	mm.	2.15.Value of Mb_{x-x}	2,212	kg.-m.
1.14.Design Stirrup Dia.	6	mm.	2.16.Value of Mb_{y-y}	2,212	kg.-m.
2 - RB 6 mm. @	26 cm.		2.17.Value of Mo_{x-x}	1,448	kg.-m.
---[e>eb:Tension zone3]---			2.18.Value of Mo_{y-y}	1,448	kg.-m.

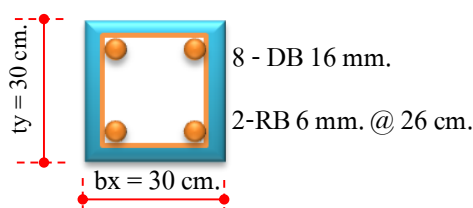
Status of Design Section & Reinforcement

$$(fa/Fa)+(fbx/Fb)+(fby/Fb) = 1.78 \leq 1.00 \text{ FAIL!}$$

$$(Mx/Mox)+(My/Moy) = 5.25 \leq 1.00 \text{ FAIL!}$$

Trial Section & Reinforced Again

C-329



DESIGN RC. COLUMN

[I.Data For Design]

[II.Results of Design Section&Reinf.]

Type of Column	Long Column		2.1.Value of m	20.40	
1.1.Reduction Factor	0.710	kh/r =45	2.2.Value of I_{x-x}	173,756	cm. ⁴
1.2.Shape of Column	3	เสากลม	2.3.Value of I_{y-y}	173,756	cm. ⁴
1.3.High of Column	4.50	m.	2.4.Value of cx	20.00	cm.
1.4.Req. Dia. $\geq$	30.00	cm.	2.5.Value of cy	20.00	cm.
1.5.Req. Dia. $\geq$	*****	cm.	2.6.Value of fa	0.51	kg./cm. ²
1.6.Design Diameter	40.00	cm.	2.7.Value of fbx	57.81	kg./cm. ²
1.7.Design Diameter	40.00	cm.	2.8.Value of fby		kg./cm. ²
1.8.Dia. of drain Pipe		cm. OK.!	2.9.Value of Fa	74.19	kg./cm. ²
1.9.Vertical Load(P_z)	459	kg. หนัก	2.10.Value of Fb	77.85	kg./cm. ²
1.10.Horiz. Load(P_y)		kg.	2.11.Value of Pa	73,659	kg.
1.11.Moment(M_{x-x})	6,352.61	kg.-m.	2.12.Value of Pbx	25,699	kg.
1.12.Moment(M_{y-y})		kg.-m.	2.13.Value of Pby	25,699	kg.
1.13.Design Ratio(p_g)	1.28	% OK.!	2.14.Value of Po	93,225	kg.
8 - DB	16	mm.	2.15.Value of $M_{b_{x-x}}$	2,450	kg.-m.
1.14.Design Stirrup Dia.	6	mm.	2.16.Value of $M_{b_{y-y}}$	2,450	kg.-m.
1 - RB 6 mm. @	5	cm.	2.17.Value of $M_{o_{x-x}}$	2,028	kg.-m.
----[e>eb:Tension zone3]----			2.18.Value of $M_{o_{y-y}}$	2,028	kg.-m.

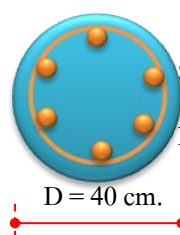
Status of Design Section & Reinforcement

$$(f_a/F_a)+(f_{bx}/F_b)+(f_{by}/F_b) = 0.75 \leq 1.00 \text{ OK.!}$$

$$(M_x/M_{ox})+(M_y/M_{oy}) = 4.41 \leq 1.00 \text{ FAIL!}$$

Trial Section & Reinforced Again

C-57



8 - DB 16 mm.

RB 6 mm. @ 5 cm.

D = 40 cm.

8.4 สรุปผลการดำเนินงาน

8.4.1 ผลการประเมินความอ่อนไหวของการเกิด Liquefaction ด้วยขนาดคละของเม็ดดิน เสนอโดย Tsuchida (1970) และคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของดิน พบว่า ชั้นดินทรายที่ความลึก 5-10 เมตร จากผิวดิน มีโอกาสเกิด Liquefaction

8.4.2 ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ด้วยวิธี Cyclic Stress Ratio (Seed และ Idriss, 1971) และ Liquefaction Potential Index, LPI (Iwasaki และคณะ, 1978) เทียบตามเกณฑ์โอกาสการเกิด Liquefaction (Iwasaki และคณะ, 1982) และผลการประเมินความเสียหายที่ผิวดิน (Ishihara, 1985) พบว่าจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว ขนาด 6.3 ชั้นดินบริเวณวัดร่องขุ่นมีโอกาสเกิด Liquefaction น้อยมาก แต่ทว่าเมื่อพิจารณาแรงกระทำแผ่นดินไหวความรุนแรงสูงสุดขนาด 6.8 ชั้นดินจะมีโอกาสเกิด Liquefaction สูง และก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวดิน

8.4.3 จากการประเมินความปลอดภัยของฐานรากด้วยวิธี Punching shear analysis กรณีแรงกระทำแผ่นดินไหวความรุนแรงสูงสุดขนาด 6.8 ที่คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี พบว่า ความหนาของชั้นดินเหนียวใต้ฐานรากอุโบสถเพียงพอต่อการต้านทานการพังทลายเนื่องจากฐานรากเจาะทะลุในกรณีที่ชั้นดินทรายหลวมด้านล่างสูญเสียกำลัง หรือชั้นดินทรายหลวมเกิด Liquefaction แต่เมื่อพิจารณากำลังแบกทานของชั้นดินเหนียวใต้ฐานรากอุโบสถ พบว่า กำลังรับแบกทานของชั้นดินไม่เพียงพอ จึงมีโอกาสที่ฐานรากของอุโบสถจะเกิดการทรุดตัวได้

8.4.4 จากผลการประเมินความมั่นคงของโครงสร้างหลักของอุโบสถวัดร่องขุ่นต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว ด้วยวิธี มยพ. 1302, วิธีวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Earthquake Analysis) จาการอย่เลื่อนแม่ลาว ขนาดแผ่นดินไหว 5.91 คาบอุบัติซ้ำ 475 ปี และผลการวิเคราะห์ย้อนกลับเหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ขนาด 6.3 พบว่า โครงสร้างอุโบสถทั้งสองหลังไม่เกิดความเสียหาย แต่ทว่าผลการวิเคราะห์โครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวขนาดความรุนแรงสูงสุด 6.8 คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี พบว่า โครงสร้างเสาอาจเกิดความเสียหาย เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำแผ่นดินไหวมากเกินไปกว่ากำลังรับโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วนโครงสร้างเสา

8.4.5 ข้อเสนอแนะเพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นแก่อุโบสถวัดร่องขุ่น ควรเสริมความมั่นคงของโครงสร้างอุโบสถวัดร่องขุ่น เช่น การเสริมเสาเข็มลงถึงชั้นดินทรายแน่น การติดตั้ง Base isolator หรือการเสริมค้ำยัน ทั้งนี้ควรทำการวิเคราะห์เพื่อหาวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

บทที่ 9

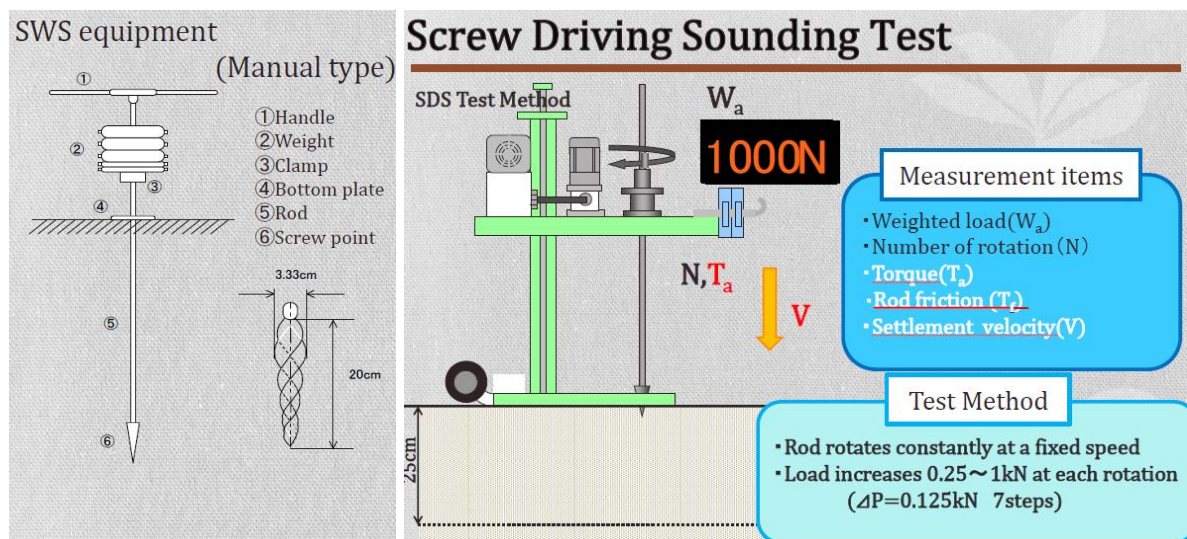
การพัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม

9.1 เครื่องมือทดสอบ

เครื่องมือทดสอบ Screw Driving Sounding (SDS) เป็นเครื่องมือที่มีขนาดเล็กสามารถใช้คนเพียง 1-2 คน ควบคุมและทดสอบ หลักการทำงานใช้ก้านเจาะหมุนลงไปในเนื้อดินเหมือนกับเครื่องมือ Swedish Weight Sounding (SWS) ดังแสดงในรูปที่ 9-1 เครื่องมือทดสอบ SDS (รูปที่ 9-2) ใช้ระบบ monotonic loading ให้ก้านเจาะหมุนและกดด้วยอัตราคงที่ สามารถปรับขนาด loading ตามความลึกของก้านเจาะที่เพิ่มขึ้น สำหรับขนาดของ loading เริ่มจาก 0.25 kN โดยเพิ่มน้ำหนักกดครั้งละ 0.125 kN ถึง 1.0 kN. แล้ววัดค่า Torque (T), Total penetration length (L) และ Settlement velocity (V)

9.2 ตำแหน่งการทดสอบ

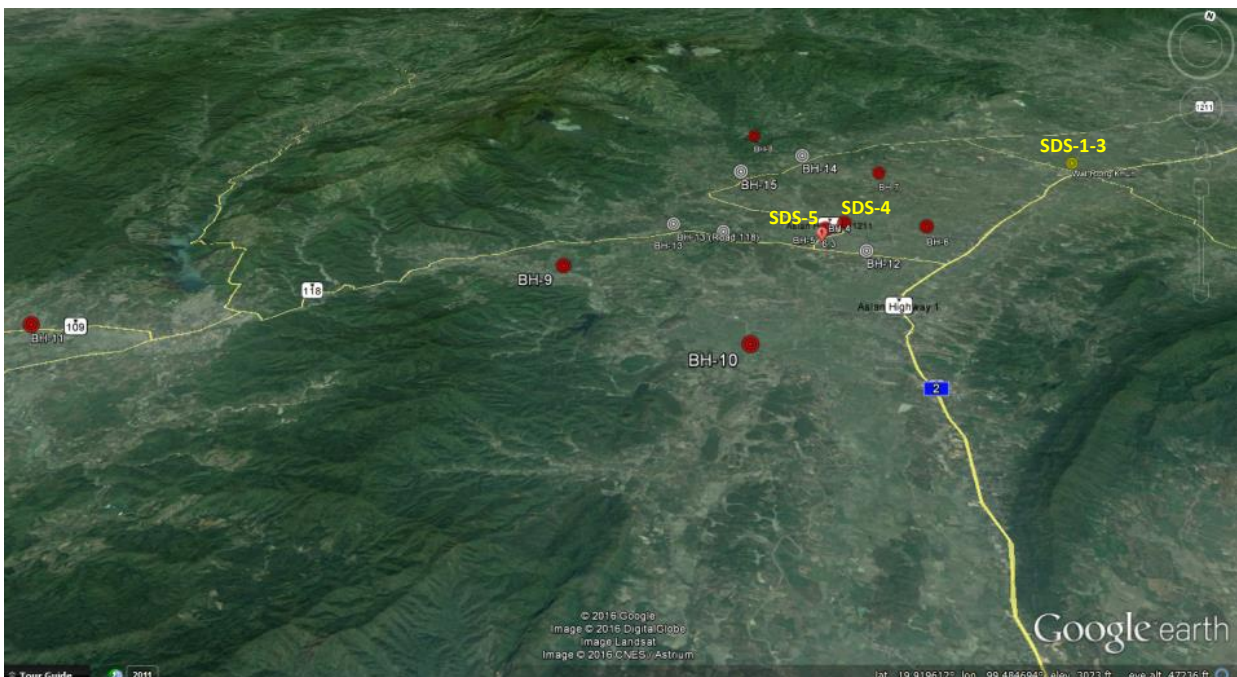
การทดสอบที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย จำนวน 3 จุด ใกล้กับจุดที่ทำการเจาะสำรวจและทดสอบคุณสมบัติดิน ทั้งนี้เพื่อจะต้องนำผลที่ได้จากการทดสอบ SDS มาหาความสัมพันธ์กับค่า SPT ซึ่งดำเนินการด้วยวิธีการดั้งเดิม สำหรับตำแหน่งของการทดสอบ ประกอบด้วย บริเวณวัดร่องขุ่น (BH-3) วัดน้ำล้อม (BH-4) และโรงเรียนบ้านหนองแก้วห้อย (BH-5) แสดงในรูปที่ 9-3



รูปที่ 9-1 หลักการของเครื่องมือ SDS



รูปที่ 9-2 เครื่องมือ Screw Driving Sounding (SDS) สำหรับทดสอบ liquefaction ในสนาม

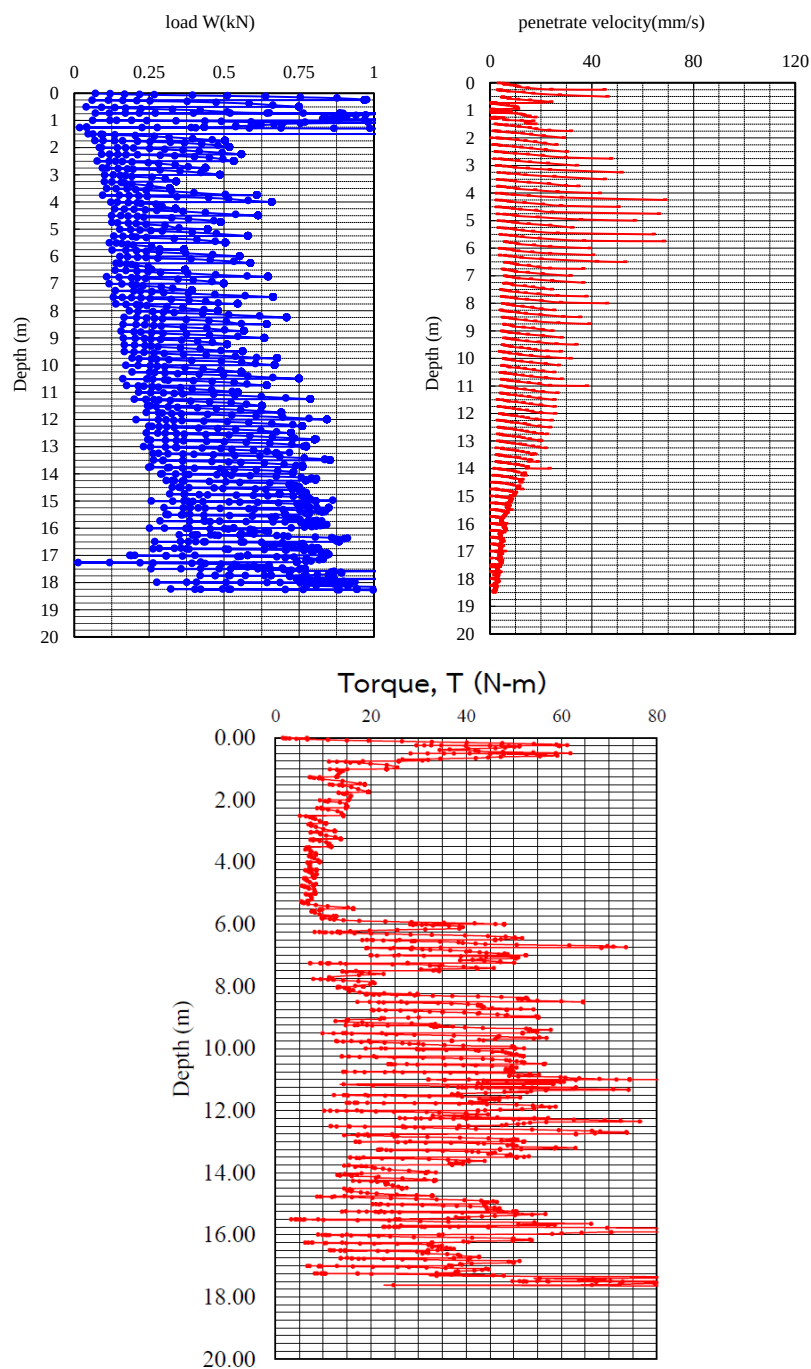


รูปที่ 9-3 ตำแหน่งการทดสอบ Screw Driving Sounding (SDS) 3 ตำแหน่ง

9.3 ผลการทดสอบ SDS

9.3.1 ผลการทดสอบ

ตัวอย่างผลการทดสอบประกอบด้วย Torque (T), Total penetration length (L) และ Settlement velocity (V) ของหลุมเจาะ BH-3 แสดงในรูปที่ 9-4



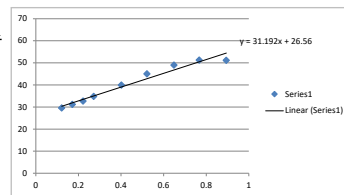
รูปที่ 9-4 ตัวอย่างผลการทดสอบ SDS ของหลุม BH-3

9.3.2 การจำแนกประเภทดินด้วยผล SDS และการวิเคราะห์ค่า N_{SDS}

ผลการทดสอบ Torque (T) และ Load (W) นำมาใช้ในการจำแนกประเภทดิน หากมีความชัน (dT/dW) มากกว่า 5 มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นดินแข็ง เช่น กรวด ดินทราย เป็นต้น ในทางกลับกัน หากความชัน (dT/dW) น้อยกว่า 5 หรือติดลบ สามารถตีความได้ว่าเป็นดินอ่อน เช่น ดินเหนียว ดินทรายแป้ง เป็นต้น รูปที่ 9-5 แสดงการแปลผลประเภทดินจากผลการทดสอบ SDS

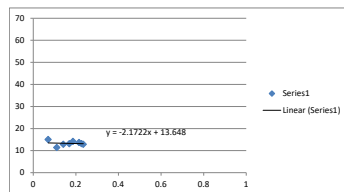
0.0 – 1.0 m. Top crust/ Backfill

0.50 m. $dT / dW = 31.19$
0.75 m. $dT / dW = 34.64$



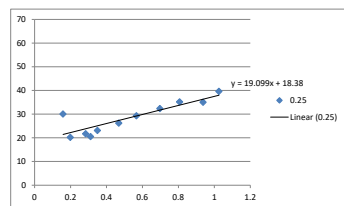
1.0 – 5.0 m. Clay - silt

2.0 m. $dT / dW = 15.85$
4.0 m. $dT / dW = 9.88$



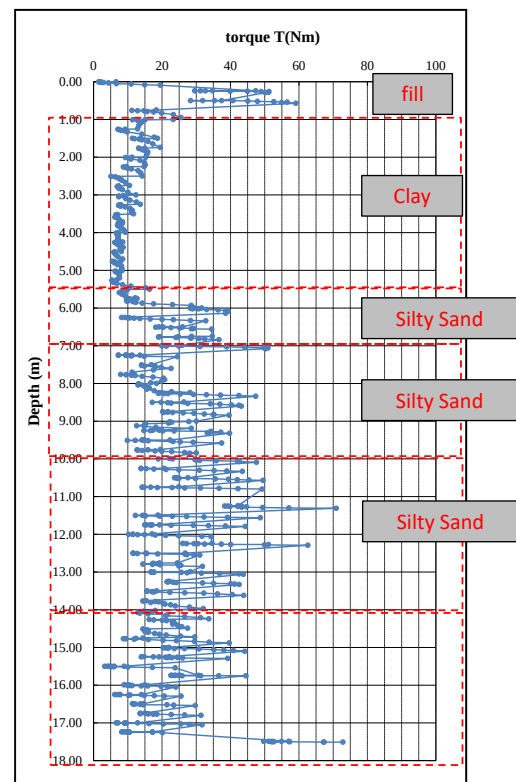
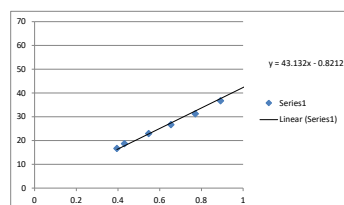
7.0 – 10.0 m. Sand

9.0 m. $dT / dW = 26.88$



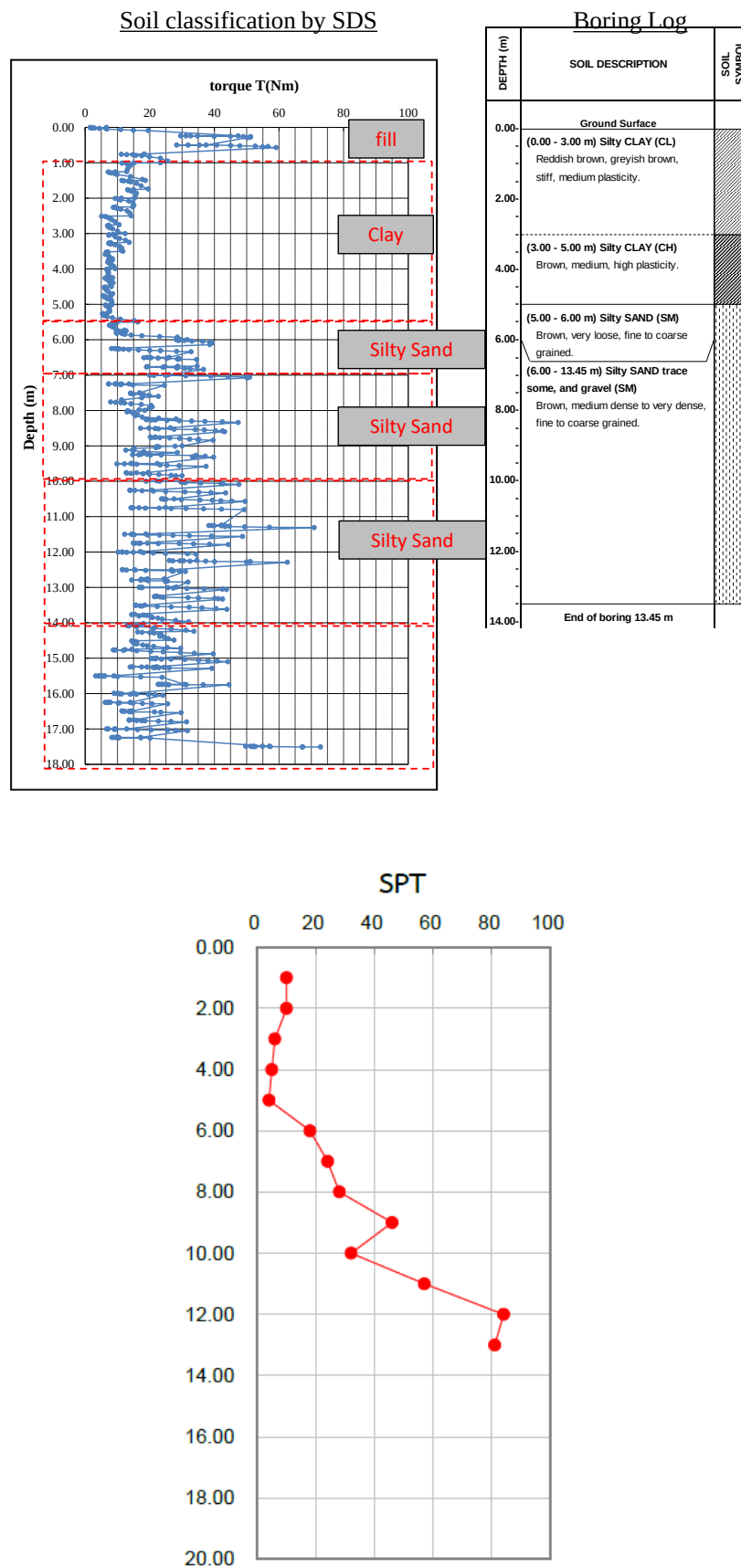
11.0 – 14.0 m. Sand/Gravel

11.0 m. $dT / dW = 43.13$
12.0 m. $dT / dW = 33.56$
14.0 m. $dT / dW = 33.06$

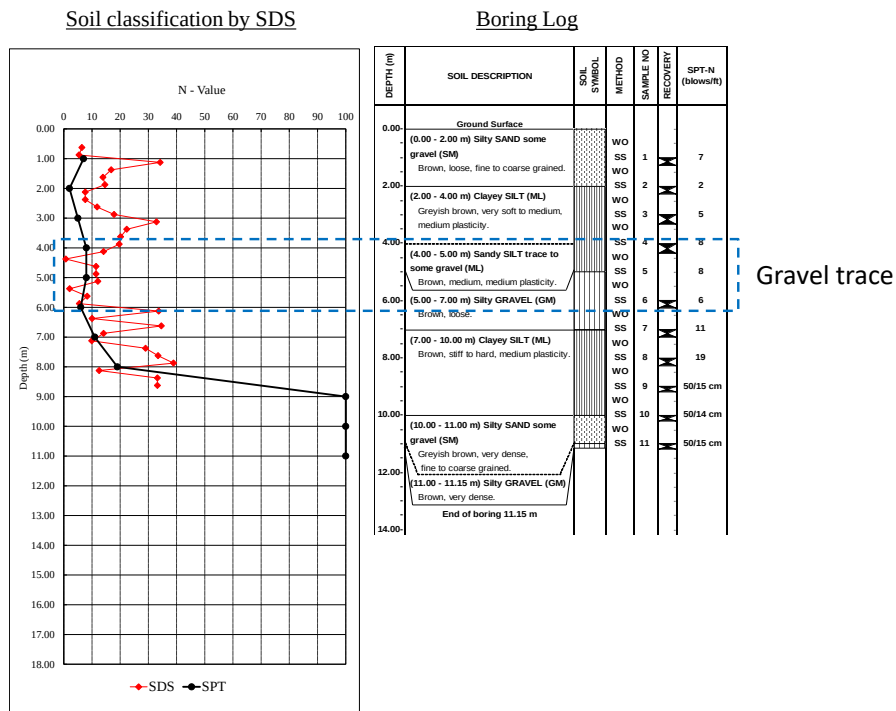


รูปที่ 9-5 การแปลผลประเภทดินจากผลการทดสอบ SDS (Torque) ของหลุม BH-3

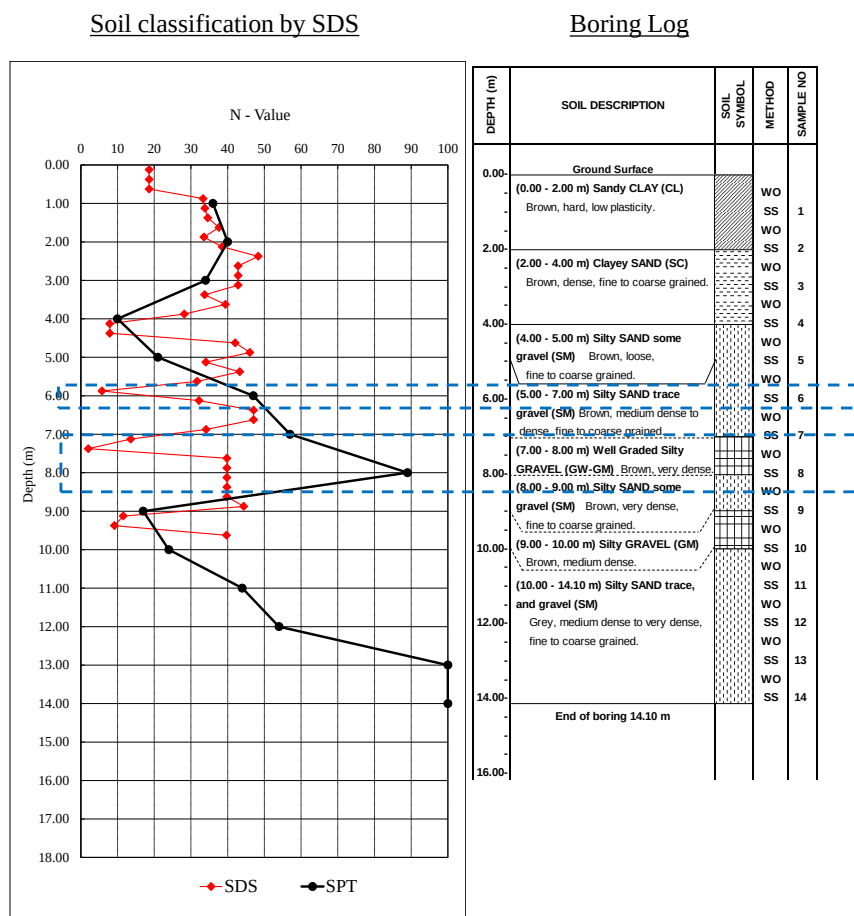
หลังจากจำแนกประเภทดิน ต่อไปเป็นการประเมินค่า Standard Penetration Test จากผลการทดสอบ SDS ผลการแปลความชั้นดินจากการทดสอบ SDS และ Boring log รวมทั้งเปรียบเทียบค่า N-SPT กับ N_{SDS} ของ 3 การทดสอบ แสดงในรูปที่ 9-6 ถึง 9-8 ส่วนความสัมพันธ์ของ N-SPT กับ N_{SDS} ของการทดสอบทั้งหมดแสดงในรูปที่ 9-9 จากความสัมพันธ์ พบว่า เครื่องมือเหมาะสมกับดินประเภทที่มีความอ่อน (soft material) เช่น ดินเหนียว ดินทรายแป้ง ดินทรายที่อยู่ในสภาพหลวม เป็นต้น



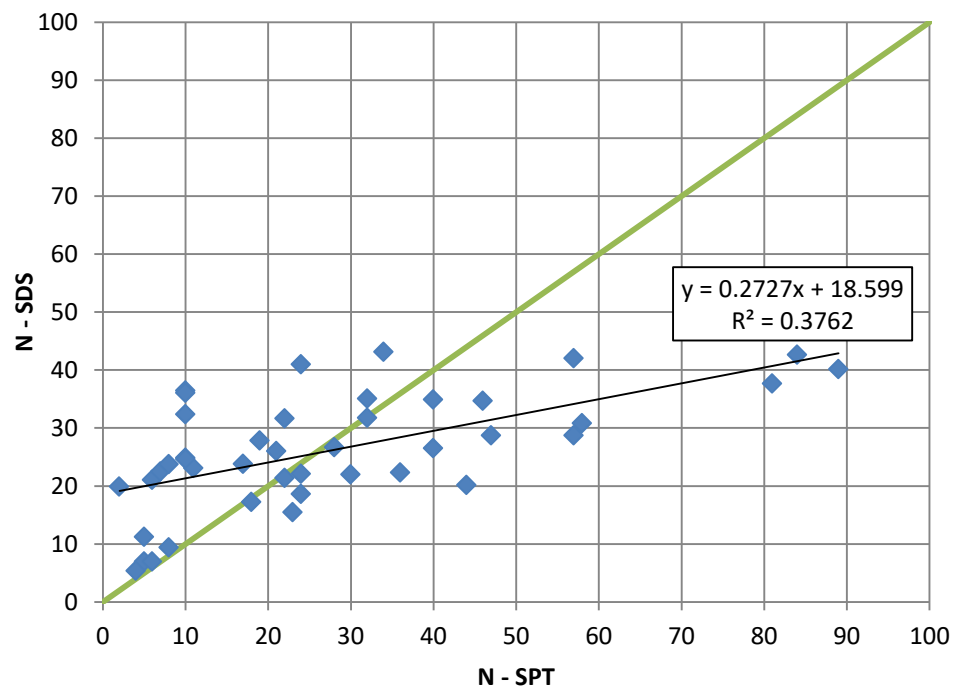
รูปที่ 9-6 เปรียบเทียบผลการจำแนกประเภทดินจากการทดสอบ SDS และ Boring log BH-3



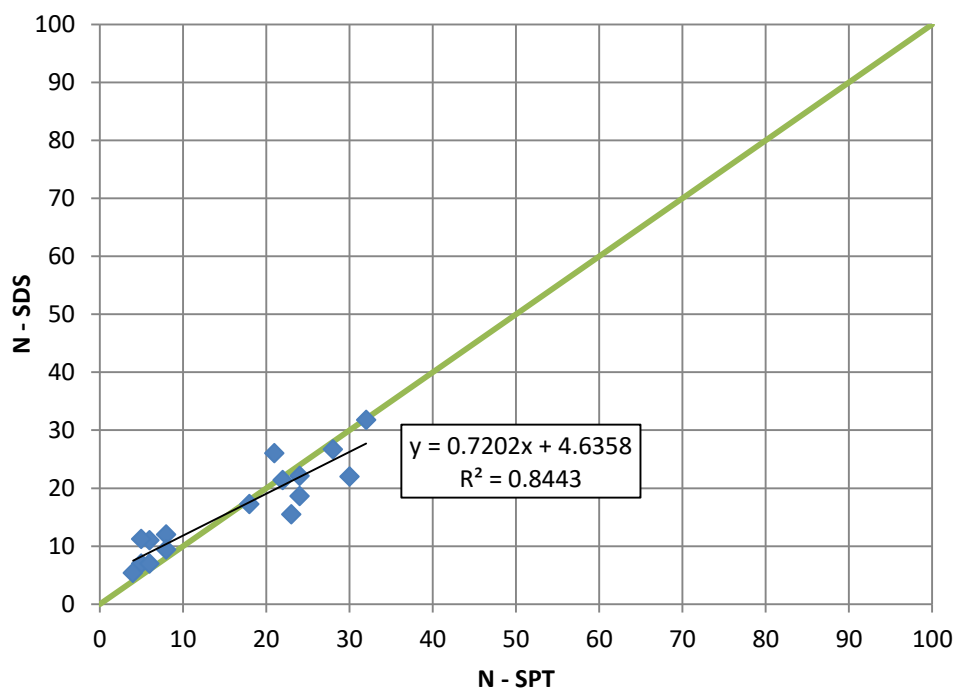
รูปที่ 9-7 เปรียบเทียบผลการจำแนกประเภทดินจากการทดสอบ SDS และ Boring log BH-4



รูปที่ 9-8 เปรียบเทียบผลการจำแนกประเภทดินจากการทดสอบ SDS และ Boring log BH-5



(ก) ดินทุกชนิด (Stiff material)

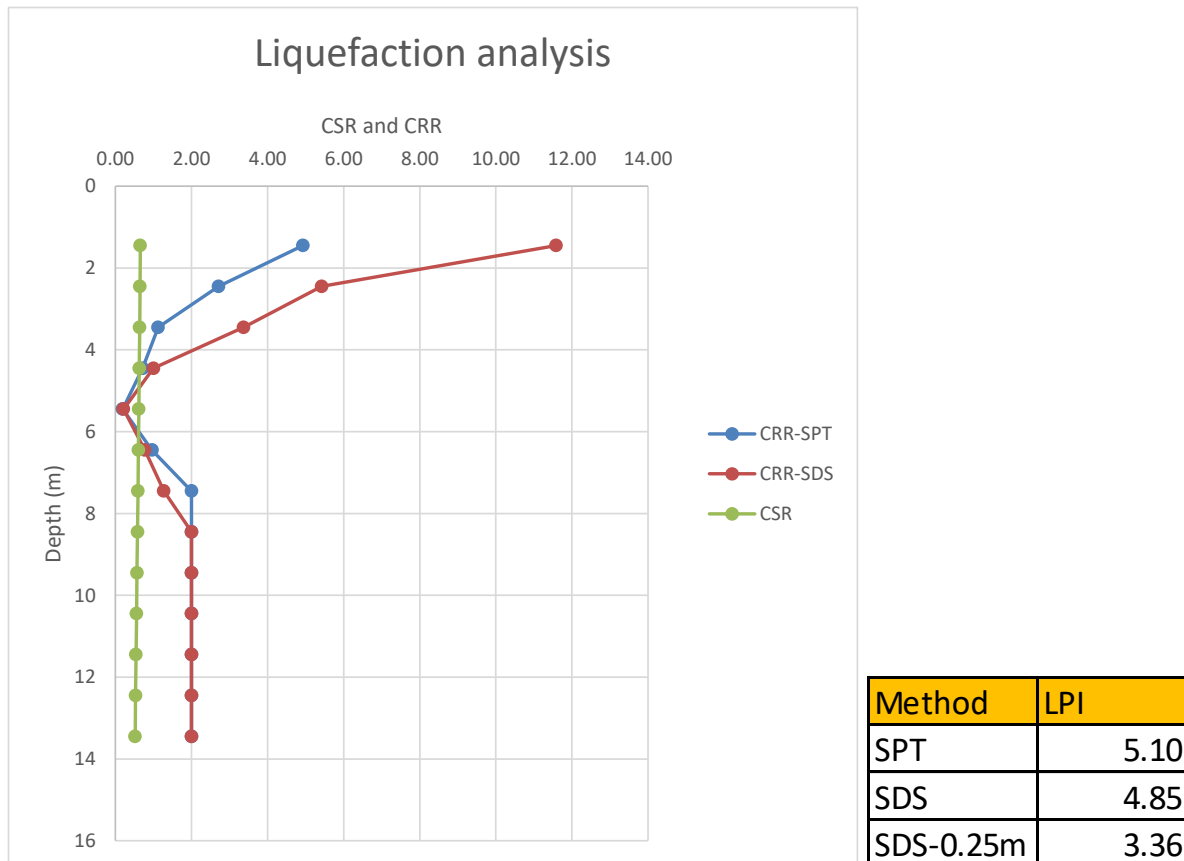


(ข) เฉพาะดินอ่อน (soft material)

รูปที่ 9-9 ความสัมพันธ์ของ $N-SPT$ กับ N_{SDS} ของการทดสอบ

9.4 ผลการประเมิน Liquefaction จากผลทดสอบ SDS

ค่า NSDS นำมาใช้ในการประเมิน Liquefaction เมื่อเปรียบเทียบกับค่าวิเคราะห์โดยวิธีปกติ (บทที่ 6) สามารถแสดงในรูปที่ 9-10 วิธี SDS ให้ค่า LPI แตกต่างกับวิธีปกติเล็กน้อย เครื่องมือจึงสามารถใช้ได้ โดยเฉพาะกับดินอ่อน



รูปที่ 9-10 ผลการวิเคราะห์ liquefaction และ LPI จากการทดสอบ SDS

บทที่ 10

สรุปผลการศึกษา

1. ผลการศึกษาข้อมูลน้ำใต้ดินจากหลุมวัดน้ำ (observation well) ตลอดระยะเวลา 1 ปี ในพื้นที่ศึกษาอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย พบว่ามีน้ำใต้ดินอยู่ในระดับสูงและมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ตามเวลา โดยเฉพาะในบริเวณที่เป็นพื้นที่ราบ เช่น บริเวณตำบลงมะดะ และตำบลหมอกแก้ว บริเวณพื้นที่นี้มีโอกาสในการเกิด Liquefaction ค่อนข้างสูง ส่วนบริเวณตำบลโป่งแพร่ ซึ่งเป็นพื้นที่ราบเชิงเขา แม้ระดับน้ำใต้ดินมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลง (fluctuation) ตามเวลา แต่ระดับน้ำค่อนข้างต่ำจากผิวดิน โอกาสในการเกิด liquefaction มีน้อย
2. ผลการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ Liquefaction ด้วยวิธีคลื่นสั่นสะเทือน (Shear wave velocity) ด้วยวิธีของ Andrus and Stokoe (2000) และ Kayen et al. (2013) ให้ผลค่อนข้างสอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ดังนั้น มีความเป็นไปได้ที่จะทำการตรวจสอบโอกาสการเกิดปรากฏการณ์ Liquefaction ด้วยวิธีคลื่นสั่นสะเทือน
3. ค่าความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์เบื้องต้นระหว่าง ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) และจำนวนครั้งการตอกมาตรฐาน (SPT number) ในพื้นที่ศึกษาอำเภอแม่ลาว เป็นไปตามสมการ $Y = 133X^{0.161}$
4. ผลการศึกษาการเกิด Liquefaction ด้วยวิธี Cyclic stress ratio (CSR), Liquefaction Potential Index (LPI) และ Liquefaction Manifestation มีความเหมาะสมกับการศึกษาในพื้นที่อำเภอแม่ลาว
5. การวิเคราะห์ค่า Liquefaction Potential Index (LPI) ที่ใช้ค่า Cyclic stress ratio (CSR) จากการวิเคราะห์ ground response analysis ให้ค่าที่สอดคล้องกับหลักฐานการเกิด liquefaction มากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการของ Seed et al. (2003)
6. นอกจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวหลัก (Main shock) แล้ว เหตุการณ์แผ่นดินไหวรอง (Aftershock) ยังสามารถส่งผลให้เกิด Liquefaction ได้เช่นกัน ทั้งนี้ขนาดแผ่นดินไหวรองต้องมีขนาดมากกว่า 5.0 และอยู่ในรัศมีประมาณ 10 กิโลเมตร
7. บริเวณที่พบหลักฐานการเกิด Liquefaction จะอยู่บนชั้นหินตะกอนใหม่ (Quaternary deposit) และเป็นตะกอนจำพวกตะกอนน้ำพา (Fluvial deposit, Qa) และนอกจากดินทรายที่สามารถเกิด Liquefaction ได้แล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ยังพบว่าชั้นดินเม็ดละเอียดจำพวกดินทรายแป้ง (silty soil) สามารถเกิด Liquefaction ได้เช่นกัน สอดคล้องทั้งหลักฐานที่ปรากฏในสนามและการวิเคราะห์

8. ผลการศึกษาการเกิด Liquefaction ด้วยขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด สามารถสร้างแผนที่เสี่ยงภัยจากโอกาสเกิด Liquefaction และโอกาสพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน ให้ปลอดภัยจาก Liquefaction เนื่องจากแผ่นดินไหว

9. ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ของวัดร่องขุน พบมีโอกาสเกิด Liquefaction ได้ในกรณีที่มีการรับแรงกระทำแผ่นดินไหวที่ความรุนแรงสูงสุดขนาด 6.8

10. ผลการประเมินความปลอดภัยของฐานรากด้วยวิธี Punching shear analysis กรณีแรงกระทำแผ่นดินไหวความรุนแรงสูงสุดขนาด 6.8 ที่คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี พบว่า ความหนาของชั้นดินเหนียวใต้ฐานรากอุโบสถเพียงพอต่อการต้านทานการพิบัติเนื่องจากฐานรากเจาะทะลุในกรณีที่ชั้นดินทรายหลวมด้านล่างสูญเสียกำลัง หรือชั้นดินทรายหลวมเกิด Liquefaction แต่เมื่อพิจารณากำลังแบกทานของชั้นดินเหนียวใต้ฐานรากอุโบสถ พบว่า กำลังรับแบกทานของชั้นดินไม่เพียงพอ จึงมีโอกาสที่ฐานรากของอุโบสถจะเกิดการทรุดตัวได้

11. ผลการประเมินความมั่นคงของโครงสร้างหลักของอุโบสถวัดร่องขุนต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวด้วยวิธี มยผ. 1302, วิธีวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Earthquake Analysis) จากรอยเลื่อนแม่ลาว ขนาดแผ่นดินไหว 5.91 คาบอุบัติซ้ำ 475 ปี และผลการวิเคราะห์ย้อนกลับเหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ขนาด 6.3 พบว่า โครงสร้างอุโบสถทั้งสองหลังไม่เกิดความเสียหาย แต่ทว่าผลการวิเคราะห์โครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวขนาดความรุนแรงสูงสุด 6.8 คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี พบว่า โครงสร้างเสาอาจเกิดความเสียหาย เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำแผ่นดินไหวมากเกินไปกำลังรับโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วนโครงสร้างเสา

12. ข้อเสนอแนะเพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นแก่อุโบสถวัดร่องขุน ควรเสริมความมั่นคงของโครงสร้างอุโบสถวัดร่องขุน เช่น การเสริมเสาเข็มลงถึงชั้นดินทรายแน่น การติดตั้ง Base isolator หรือการเสริมค้ำยัน ทั้งนี้ควรทำการวิเคราะห์เพื่อหาวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

- Abrahamson, N.A. and W.J. Silva. 1997. **Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal Earthquakes** Seism. Res. Lett., 68, 1, pp 94-127.
- Abrahamson, N.A. and W. J. Silva. 2008. **Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations Earthquake Spectra**, vol. 24, no. 1, pp. 67-97.
- Ambraseys, N. N. 1988. **Engineering seismology, Earthquake Eng. and Structural Dynamics** 17(1), 1-105.
- Ambraseys, N.N. and J.J. Bommer. 1992. **On the attenuation of ground acceleration in Europe Proc. 10th World Conf. on Earthq. Eng.**, Rotterdam, 2, pp 675-678.
- Andrews, D.C.A. and G.R. Martin. 2000. **Criteria for Liquefaction of Silty Soils** 12th World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, Auckland, New Zealand.
- Andrus, R. D. and K. H. II. Stokoe. 2000. **Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126, No. 11, November, 2000.
- Andrus, R. D. and K. H. II. Stokoe. 1997. **Liquefaction resistance based on shear wave velocity**. Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Tech.
- Arango, I. 1996. **Magnitude scaling factors for soil liquefaction evaluations**. J. Geotechnical Eng., ASCE 122(11), 929-36, 1996.
- Asuda, A. 1998. **Simplified prediction of liquefaction-induced damage to individual houses and its mitigation 15-year anniversary of 1983 Nihonkai-chubu earthquake**, Chap.9 (in Japanese).
- Baecher G. B. and J. T. Christain. 2003. **Reliability and statistics in Geotechnical Engineering** John Wiley & Sons Ltd, England.
- Baker, J. W. 2008. **An introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) Version 1.3** October 1st, 2008.
- Bennett, M. 1994. **Subsurface investigation for liquefaction analysis and piezometer calibration at Treasure Island Naval Station, California**. Open File Rep. 94-709, U.S. Geological Survey, Menlo Park, Calif.
- Boonlue, S. 1998. **Solid waste disposal site selection : A case study of sanitary districts of Maesai, Maechan and Chiang Saen** Thesis of Master degree, Department Geography, Chulalongkorn University. P. 257.

- Boore, D.M., W. B Joyner and T. E. Fumal. 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes a summary of recent work Seism. Res. Lett., 68, 1, pp 128-151.
- Boore, D.M., and G. M. Atkinson. 2008. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5% damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10.0s: Earthquake Spectra, vol. 24, no. 1, pp. 99-138.
- Bott, J., I. Wong, S. Prachuab, B. Wechbunthung, C. Hinthong, and S. Sarapirome. 1997. Contemporary seismicity in Northern Thailand and its tectonic implications in Proceedings of the International Conference on Stratigraphy and Tectonic Evolution of Southeast Asia and the South Pacific, edited by Dheeradilok, P, C. Hinthong, P. Chaodumrong, P. Putthapiban, W. Tansathien, C. Utha-aroon, N. Sattayarak, T. Nuchanong and S. Techawan. (Department of Mineral Resources), 453-464.
- Boulanger, R.W. and I. M. Idriss. 2004. State normalization of penetration resistances and the effect of overburden stress on liquefaction resistance. in Proceedings, 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., eds., Stallion Press, Vol. 2, pp. 484-91.
- Bray, J. D. et. al. 2001. Ground Failure In Adapazari, Turkey Proceedings of Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference of the XVth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Istanbul, Turkey, August 24-25.
- Bray, J.D., R. B. Sancio. 2006. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils J. Geotech. Geoenviron. 132 (99), 1165-1177.
- BSSC. 1997. NEHRP Recommended Provision for seismic regulations for new building, Part 1-Provision Washington D.C. p 337.
- Building Seismic Safety Council (BSSC). 2003. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures and Accompanying Commentary and Maps, FEMA 450 Chapter 3, pp. 17-49.
- Campbell, K. W. and Y. Bozorgnia. 1994. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration from worldwide accelerograms recorded from 1957 to 1993 Proc. 5th U.S. Natl. Conf. On Earthq. Eng., California, 3, pp 283-292.

- Campbell, K.W., and Y. Bozorgnia. 2008. NGA ground motion Model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD, and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01s to 10.0s Earthquake Spectra, vol. 24, no. 1, pp. 139-171.
- Cetin, K. O., R. B. Seed, A. Der Kiureghian, K. Tokimatsu, L. F. Harder, R. E. Kayen, and R. E. S. Moss. 2004. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE 130(12), 1314-340.
- Chang, W. S., J. D. Bray, W. B. Gookin, and M. F. Riemer. 1997. Seismic response of deep stiff soil deposits in the Los Angeles, California Area During The 1994 Northridge Earthquake Geotechnical Research Report No. UCB/GT/97-01, University of California, Berkeley.
- Charusiri, P., M. Choowong, T. Charoentitirat, K. Jankaew, V. Chutakositkanon, and P. Kanjanapayont 2005. Geological and physical effect evaluation in the tsunami damage area for restoration and warning system Technical report, Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.
- Chintanapakdee, C., M.E. Naguit and M. Charoenyuth. 2008. Suitable attenuation model for Thailand. The 14 th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Chung, J. W. and J. D. Rogers. 2011. Simplified method for spatial evaluation of liquefaction potential in the St. Louis Area Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 137, No. 5, May 1, 2011. ASCE.
- Crouse, C.B. 1991. Ground motion attenuation equation for earthquakes on Cascadia subduction zones Earthquake Spectra 7(2), 201-236.
- Day, R. W. 2002. Geotechnical Earthquake Engineering handbook The McGraw-Hill Companies.
- Department mineral resources (DMR). 1988. Geological map of Thailand F4949, Amphoe Maesai Bangkok, Thailand.
- Department mineral resources (DMR). 2006. Active fault map in Thailand. In map, Bangkok, Thailand.
- Department of groundwater resources (DGR). 2009. โครงการประเมินศักยภาพน้ำบาดาลชั้นรายละเอียดพื้นที่ลุ่มน้ำกก (แอ่งเชียงราย-พะเยา) Report in Thai, Bangkok, Thailand.

- Department mineral resources (DMR). 2009 a. The study of earthquake recurrent interval along the Mae Chan and Pha Yao active faults in Chiang Rai, Chiang Mai, and Pha Yao provinces Report in Thai, Bangkok, Thailand.
- Department mineral resources (DMR). 2009 b. การประเมินภัยพิบัติแผ่นดินไหวภาคเหนือ สธส 2/2554. Report in Thai, Bangkok, Thailand.
- Department of groundwater resources (DGR). 2011. รายงานสถานการณ์น้ำบาดาลประเทศไทย พ.ศ. 2557 Report in Thai, Bangkok, Thailand.
- Department mineral resources (DMR). 2014. โครงการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยการวัดความเร็วคลื่นเฉือนในหลุมเจาะปี 2557 จังหวัดลาปูน จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดเชียงราย.
- Dixit, J., D. M. Dewaikar and R. S. Jangid. 2012. Assessment of liquefaction potential index for Mumbai city Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 2759–2768, 2012.
- Dobry, R., R. D. Borcherdt, C. B. Crouse, I. M. Idriss, W. B. Joyner, G. R. Martin, M. S. Power, E. E. Rinne and R. B. Seed. 2000. New site coefficients and site classification system used in recent building code provisions Earthquake Spectra 16 (1), 41–68.
- Dobry, R. and T. Abdoun. 2014. An investigation into why liquefaction charts work : A necessary step toward integrating the states of art and practice Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 0267-7261/& 2014 Published by Elsevier Ltd.
- Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT). 1980. Evaluation of Guy Anchorage Strength in Clay for Transmission Tower
- Esteva, L. and R. Villaverde. 1973. Seismic risk, design spectra and structural reliability Proc. 5th World Conf. on Earthq. Eng., Rome, 2, pp 2586-2596.
- Fenton, C. H., P. Charusiri and S. H. Wood. 2003. Recent paleoseismic investigations in Northern and Western Thailand Annals of Geophysics, Vol. 46, No. 5, October 2003.
- Finn W. D. L. 2000. State-of-the-art of geotechnical earthquake engineering practice Soil Dynamics and Earthquake Engineering 20 (2000) 1-15.
- Gauchan, J. 1984. Liquefaction tests on sand using a cyclic triaxial apparatus Master's Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Gutenberg, B. and C.F. Richter. 1944. Frequency of earthquakes in California Bull. Seismol. Soc. Am., 34, 185-188.
- Hashash, Y.M.A., M. I. Musgrove, J.A. Harmon, D. R. Groholski, C. A. Phillips and D. Park. 2016. DEEPSOIL 6.1, User Manual Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign.

- Idriss, I.M. 1993. Procedures for selecting earthquake ground motions at rock sites Report to National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Davis, Report No. NIST GCR 93-625.
- Idriss, I.M., 2008. An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes Earthquake Spectra, vol. 24, no. 1, pp. 217-242.
- Idriss, I. M. 1999. An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential in Proceedings, TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction, Publication No. FHWA-RD-99-165, Federal Highway Administration, January.
- Idriss, I.M. 1990. Response of soft soil sites during earthquakes in J.M. Duncan, ed., Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium, BiTech Publishers, Vancouver, British Columbia, Vol. 2, pp.273-289.
- Idriss, I. M. and H. B. Seed. 1967. Response of Horizontal Soil Layers During Earthquakes Soil Mechanics and Bituminous Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley, CA.
- Idriss, I. M. and J. I. Sun. 1992. SHAKE91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits User's Guide, University of California, Davis, 13 pp.
- Idriss, I. M. and R. W. Boulanger. 2003. Estimating $K\alpha$ for use in evaluating cyclic resistance of sloping ground, in Proceedings. 8th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction, Hamada, O'Rourke, and Bardet, eds., Report MCEER-03-0003, MCEER, SUNY Buffalo, NY, pp. 449-68.
- Idriss, I. M. and R.W. Boulanger. 2004. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. in Proceedings, 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., eds., Stallion Press, Vol. 1, pp. 32-56.
- Idriss, I. M. and R.W. Boulanger. 2008. Soil liquefaction during earthquakes. United States of America. EERI Publication No. MNO-12.
- Ishihara, K. 1985. Stability of natural deposits during earthquakes. Proc., 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 321-376.

- Iwasaki, T. 1986. Soil liquefaction studies in Japan, State-of- Art Soil Dyn. Earthq. Eng., 5(1), 2–68, doi:10.1016/0267-7261(86)90024-2.
- Iwasaki, T., T. Arakawa and K. Tokida. 1982. Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. Proceeding of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Southampton. UK., pp.925-939.
- Iwasaki, T., K. Tokida, F. Tatsuoka, S. Watanabe, S. Yasuda, H. Sato. 1982. Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. Proceeding of the 3rd International Conference on Microzonation, Seattle, USA, pp. 1319–1330.
- Iwasaki, T. 1986. Soil liquefaction studies in Japan: state of the art. Soil Dyn. Earthq. Eng. 5 (1), 2–68.
- Juang, C.H., H. Yuan, D. H. Lee, P. S. Lin. 2003. Simplified cone penetration test-based method for evaluating liquefaction resistance of soils. J. Geotech. Geoenviron. 129 (1), 66–80.
- Juang, C. H., H. Yuan, D. K. Li, S. H. Yang and R. A. Christopher. 2005. Estimating severity of liquefaction-induced damage near foundation Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25 (2005) 403–411.
- Juang, C. H, C. N. Liu, C. H. Chen, J. H. Hwang and C. C. Lu. 2008. Calibration of liquefaction potential index: A re-visit focusing on a new CPTU model Engineering Geology 102 (2008) 19–30.
- Kang, G. C., J. W. Chung and J. David Rogers. 2014. Re-calibrating the thresholds for the classification of liquefaction potential index based on the 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake. Engineering Geology 169 (2014) 30–40.
- Kayen, R. E. and J. K. Mitchell. 1997. Assessment of liquefaction potential during earthquakes by arias intensity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 123. No. 12. December 1997. ASCE.
- Kostadinov, M. V. and I. Towhata. 2002. Assessment of liquefaction inducing peak ground velocity and frequency of horizontal ground shaking at onset of phenomena Soil Dynamic and Earthquake engineering 22 (2002) 309-322.
- Kramer, S. L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.
- Li, D.K., C. H Juang and R. D. Andrus. 2006. Liquefaction potential index: a critical assessment Journal of GeoEngineering, Taiwanese Geotechnical Society 1 (1), 11–24.

- Lee, D. H., C. S. Ku, H. Yuan. 2003. A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin, Taiwan. Eng. Geol. 71, 97–117.
- Lee M. K., K. Y. Lum and Hartford DND. Calculation of the seismic risk of an earth dam susceptible to liquefaction. Submitted for publication.
- Luna, R. and J.D. Frost. 1998. Spatial liquefaction analysis system. J. Comput. Civ. Eng. 12 (1), 48–56.
- Maurer, B. W., A. G. M. Russell, M. Cubrinovski and B. A. Bradley. 2014. Evaluation of the liquefaction potential index for assessing liquefaction hazard in Christchurch, New Zealand Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.
- Miyajima, M., S. Inagaki, H. Nishikawa and M. Kitaura. 2004. Detection of ground failure by using strong ground motion records 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 3411.
- Morley, C.K. 2002. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in Southeast Asia Tectonophysics, v.347, p. 189-215.
- National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER). 1997. Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, T. L. Youd and I. M. Idriss, editors, Technical Report NCEER-97-022, 41–88.
- Norris, G.M. 1977. The Drained Shear Strength of Uniform Quartz Sand as Related to Particle Size and Natural Variation in Particle Shape and Surface Roughness. (Ph.D Dissertation) University of California, Berkeley (326 pp.).
- Nutalaya, P. and Shrestha. 1990. Earthquake ground motions and seismic risk in Thailand Proc. 1990 Annual Conf., Engineering Institute of Thailand, Bangkok, pp 55-77.
- Olsen, R.S. 1997. Cyclic liquefaction based on the cone penetration test. Proceedings of the NCEER Workshop of Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, pp. 225–276.
- Orense, R. P. 2005. Assessment of liquefaction potential based on peak ground motion parameters Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25 (2005) 225–240.
- Ornthammarath, T. 2013. A note on the strong ground motion recorded during the Mw 6.8 earthquake.
- Ornthammarath, T., P. Warnitchai, K. Worakanchana, S. Zaman, R. Sigbjörnsson and C. G. Lai. 2010. Probabilistic seismic hazard assessment for Thailand Bull Earthquake Eng DOI 10.1007/s10518-010-9197-3.

- Pailoplee, S., P. Channarong and V. Chutakositkanon. 2013. Earthquake activities in the Thailand-Laos-Myanmar Border Region: A Statistical Approach Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 24, No. 4, Part II, 721-730, August 2013.
- Pailoplee, S., Y. Sugiyama and P. Charusiri. 2010. Deterministic and probabilistic seismic hazard analyses in Thailand and adjacent areas using active fault data Earth Planets Space, 61, 1313-1325.
- Pailoplee, S., Y. Sugiyama and P. Charusiri. 2010. Probabilistic seismic hazard analysis in Thailand and adjacent areas by using regional seismic source zones Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 21, No. 5, 757-766, October 2010.
- Papathanassiou, G. 2008. LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence Engineering Geology 96 (2008) 94-104.
- Papathanassiou, G., S. Pavlides and A. Ganas. 2005. The 2003 Lefkada earthquake: Field observations and preliminary microzonation map based on liquefaction potential index for the town of Lefkada Engineering Geology 82 (2005) 12- 31.
- Pathak, S. R. and A. N. Dalvi. 2013. Elementary empirical model to assess seismic soil liquefaction. Nat Hazards (2013) 69:425-440 DOI 10.1007/s11069-013-0723-x.
- Pitilakis, K. and A. Anastasiadis. 2007. Local Site Effects Seismic Response Implications to Seismic Codes Laboratory of Soils Mechanics, Foundation and Geotechnical Earthquake Engineering, Civil engineering department, Aristotle University of Thessaloniki.
- Pongvithayapanu, P. 2009. Liquefaction potential assessment at Laem Chabang port, Thailand Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation Oka, Murakami & Kimoto (eds) : 577-582.
- Poovarodom, N. and A. Jirasakjamroonsri. 2014. Effects of Local Site Characteristics on Ground Shakings in the Affected Areas after 5 May 2014 Earthquake การประชุมสัมมนาเรื่อง บทเรียนแผ่นดินไหวแม่ลาว เชียงราย ภัยพิบัติใกล้ตัว 20 พฤศจิกายน 2557, pp. 77-88.
- Robertson, P.K., C. E. Wride. 1998. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Can. Geotech. J. 35 (3), 442-459.
- Robertson, P. K., D. J. Woeller, and W. D. L. Finn. 1992. Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading. Can. Geotech. J., Ottawa,

- 29, 686–695. Rep. NCEER-97-0022, T. L. Youd and I. M. Idriss, eds., National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, 89–128.
- Royal Irrigation Department (RID), Hydrology and water management center for upper Northern region (Chiangmai), Office of water management and hydrology.
- Ruangrassamee, A., T. Ornthammarath and P. Lukkunaprasit. 2012. Damage due to 24 March 2011 M6.8 Tarlay Earthquake in Northern Thailand 15WCEE, Lisboa.
- Sabetta, F. and A. Pugliese. 1987. Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strongmotion records Bull. Seism. Soc. Am., 77, 5, pp 1491-1513.
- Sadigh, K. 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data Seismological Research Letters 68:1, 180-189.
- Sadigh, K., C. Y. Chang, N. A. Abrahamson, S. J. Chiou and M. S. Power. 1993. Specification of long-period ground motions: updated attenuation relationships for rock site conditions and adjustment factors for near-fault Effects Proc. ATC-17-1, Applied Technology Council, California, 1993, pp 59-70.
- Sakulnee R. and P. Pananont. 2016. Resistivity Imaging to Detect the Liquefaction Induced by the M 6.8 Earthquake in Myanmar on March 24th, 2011 in Chiang Rai Province, Northern Thailand 7th International conference on applied geophysics, Bangkok, Thailand. P.23.
- Schnabel, P. B., J. Lysmer and H. B. Seed. 1972. SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B. 1983. Earthquake resistant design of earth dams. in Proceedings, Symposium on Seismic Design of Embankments and Caverns, Pennsylvania, ASCE, NY, pp. 41–64.
- Seed, H. B. et. al. 2003. Recent advances in soil liquefaction engineering: A unified and consistent framework Kenote presentation, 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Long Beach, CA.
- Seed, H. B. and I. M. Idriss. 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. Rep. No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, Calif.
- Seed, H.B. and I. M. Idriss. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential J. Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE 97(SM9), 1249–273.
- Seed, H.B. and I.M. Idriss. 1982. Ground motion and soil liquefaction during earthquakes Monograph, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, Ca.

- Seed, H. B., R. Murarka, I. Lysmer. and I. M. Idriss. 1976. Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source and local site conditions for moderately strong earthquakes Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 66, No.4, pp. 1323-1342.
- Seed, R. B., K. O. Cetin, R. E. S. Moss, A., Kammerer, J. Wu, J. Pestana, M. Riemer. 2001. Recent advances in soil liquefaction engineering and seismic site response evaluation, in Proceedings, 4th International Conference and Symposium on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri, Rolla, MO, Paper SPL-2.
- Seed, R.B., K. O. Cetin, R.E.S. Moss, A. M. Kammerer, J. Wu, J.M. Pestana, M. F. Riemer, R. B. Sancio, J. D. Bray, R. E. Kayen, A. Faris. 2003. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. Proceedings of the 26th Annual ASCE L.A. Geotechnical Spring Seminar, Long Beach, CA.
- Seed, H. B., K. Tokimatsu, L. F. Jr. Harder and R. Chung. 1984. The Influence of SPT Procedures on Soil Liquefaction Resistance Evaluations Report No. UCB/EERC-84/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
- Seed, R. B, and L. F. Harder. 1990. SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength. in Proceedings, Seed Memorial Symposium, J. M. Duncan, ed., BiTech Publishers, Vancouver, British Columbia, pp. 351-76.
- Seed, H.B., and W. H. Peacock. 1971. Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics J. Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE 97(SM8), Proceedings Paper 8330, August, pp. 1099-119.
- Seed, R., R. E. S. Moss, A. M. Krammer, J. Wu, J. M. Pestana, M. F. Reimer and K. O. Cetin. 2001. Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering and Seismic Site Response Evaluation" (March 26, 2001) International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Paper 2.
- Seed, R. B., S. W. Chang, S. E. Dickenson and J. D. Bray. 1997. Site-Dependent Seismic Response Including Recent Strong Motion Data Proc., Special Session on Earthquake Geotechnical Engineering, XIV International Conf. On Soil Mechanics and Foundtion Engineering, Hamburg, Germany, A. A, Balkema Publ., Sept. 6-12, pp. 125-134.

- Skempton, A. W. 1986. Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation, *Geotechnique*, 36(3), 425–47.
- Sonmez, H. 2003. Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey). *Environ. Geol.* 44 (7), 862–871.
- Soralump, S. and J. Feungaugorn. 2013. Probabilistic Analysis of Liquefaction Potential: the First Eyewitness Case in Thailand. 18NCCE, Chiangmai, Thailand.
- Sykora, D. W. 1987. Creation of a data base of seismic shear wave velocities for correlation analysis. *Geotech. Lab. Miscellaneous Paper GL-87-26*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Tanapalungkorn, V. and S. Teachavorasinskun. 2015. Liquefaction susceptibility due to earthquake.
- Teachavorasinskun, S., P. Pattararattanakul and P. Pongvithayapranu. 2009. Liquefaction Susceptibility in the Northern Provinces of Thailand *American J. of Engineering and Applied Sciences* 2 (1):194-201.
- Tokimatsu, K. and Y. Yoshimi. 1983. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering 23(4), 56–74.
- Toprak, S. and T. L. Holzer, 2003. Liquefaction potential index: field assessment. *J. Geotech. Geoenviron.* 129 (4), 315–322.
- Toro, G.R. 2002. Modification of the Toro et al. (1997) Attenuation equations for large magnitudes and short distances *Risk Engineering, Inc*, 4-1 to 4-10.
- Toro, G.R. and R.K. McGuire. 1987. An investigation into earthquake ground motion characteristics in eastern North America *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 2, pp 468-489.
- Ukritchon, B. and T. Sangkhawilai. An analysis of liquefaction potential for Bangkok first sand layer.
- Vucetic, M. and R. Dobry, R. 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotech. Eng.*, 117(1), 89–107.
- Wair, B. R., J. T. DeJong and T. Shantz. 2012. Guidelines for estimation of shear wave velocity profiles PEER Report 2012/08 Pacific Earthquake Engineering Research Center Headquarters at the University of California, December 2012.

- Warnitchai, P., C. Sangarayakul and S. A. Ashford. 2000. Seismic hazard in Bangkok due to long-distance earthquake 12WCEE.
- Wills, C. J. and K. B. Clahan. 2006. Developing a map of geologically defined site-condition categories for California Bull. Seismo. Soc. Am., 96(4A):1483–1501.
- Wells, D.L. and K.J. Coppersmith. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 974-1002.
- Wood, S. H., F. S. Singharajwarapan, T. Bundarnsin and E. Rothwell. 2004. Mae Sai basin and Wiang Nong Lom: Radiocarbon Dating and Relation to the Active Strike-Slip Mae Chan Fault, Northern Thailand. International Conference on Applied Geophysics. November 2004, Chiang Mai, Thailand.
- Youd, T.L. 1998. Screening guide for rapid assessment of liquefaction hazard at highway bridge sites Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research Technical Report MCEER-98-0005, p. 58.
- Youd, T. L., I. M. Idriss, R. D. Andrus, I. Arango, G. Castro, J. T. Christian, R. Dobry, W. D. L. Finn, L. F. Harder, M. E. Hynes, K. Ishihara, J. P. Koester, S. S. C. Liao, W. F. Marcuson, G. R. Martin, J. K. Mitchell, Y. Moriwaki, M. S. Power, P. K. Robertson, R. B. Seed, and K. H. Stokoe. 2001. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE 127(10), 817–33.
- Zhang. L. 2010. A simple method for evaluating liquefaction potential from shear wave velocity. Front. Archit. Civ. Eng. China 2010, 4(2): 178–195 DOI 10.1007/s11709-010-0023-4.
- Zhang L. 1998. Predicting seismic liquefaction potential of sands by optimum seeking method. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1998, 19: 219–226.
- Zhang L. 1998. Assessment of liquefaction potential using optimum seeking method. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(8): 739–748.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินและหลุมวัดน้ำ



รูปผนวก ก-1 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-1 วัดร่องขุน



รูปผนวก ก-2 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-4 วัดน้ำล้น



รูปผนวก ก-3 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-5 โรงเรียนบ้านหนองแก้วห้อง



รูปผนวก ก-4 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-6 บ้านสันกันแฮว



รูปผนวก ก-5 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-7 วัดสันตันม่วง



รูปผนวก ก-6 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-8 เชื้อนห้วยแม่มอญ



รูปผนวก ก-7 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-9 บ้านหนองผำ



รูปผนวก ก-8 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-10 โรงเรียน อบต.บ้านทรายขาว



รูปผนวก ก-9 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-11 วัดท้าวแก่นจันทน์



รูปผนวก ก-10 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-13 ถนนเส้น 118



รูปผนวก ก-11 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-14 โรงเรียนโป่งแพร่วิทยา

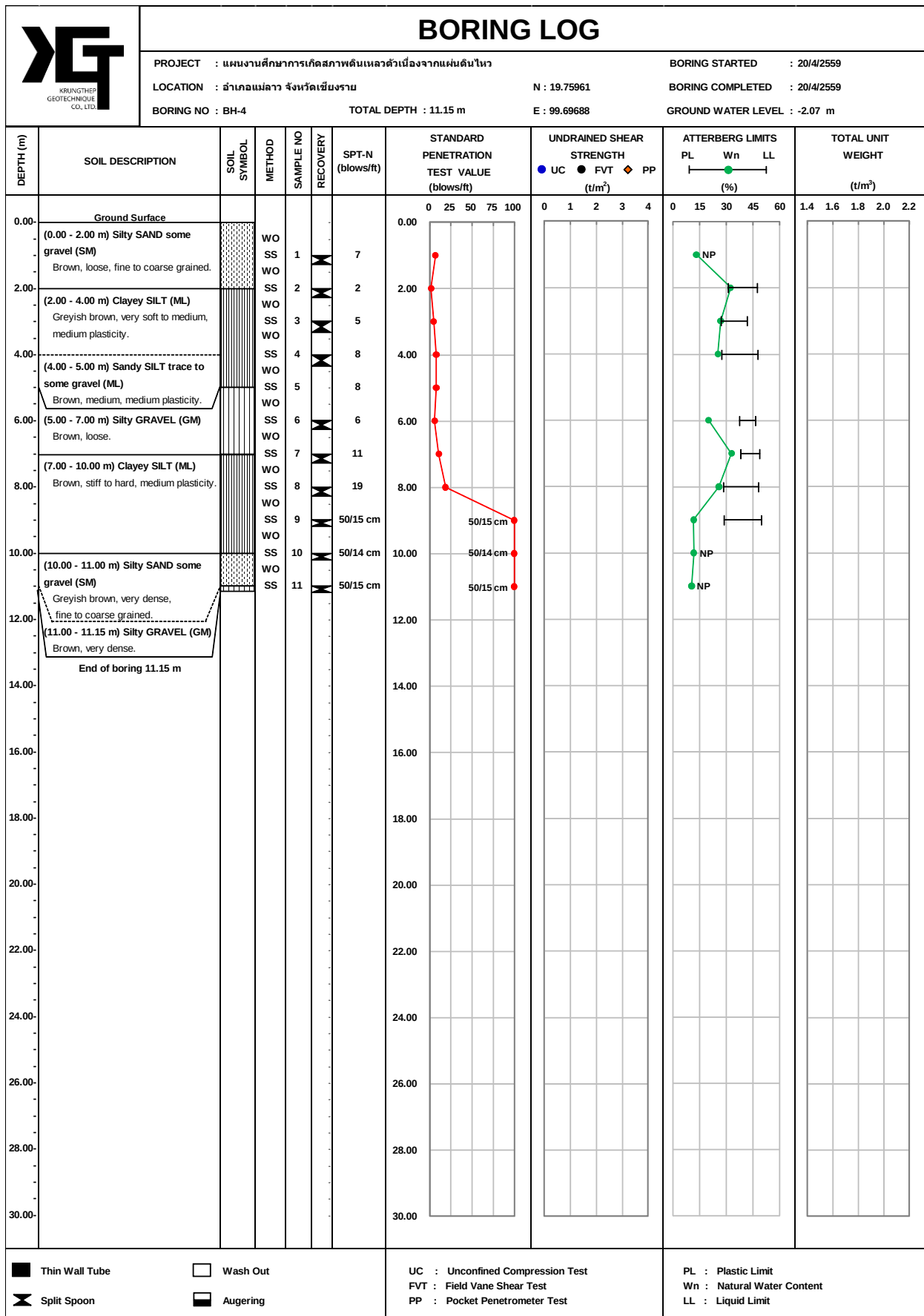


รูปผนวก ก-12 ตำแหน่งหลุมเจาะและหลุมวัดน้ำ BH-15 สหกรณ์โป่งแพร์



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปผนวก ก-13 ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-4 วัดน้ำล้นมต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

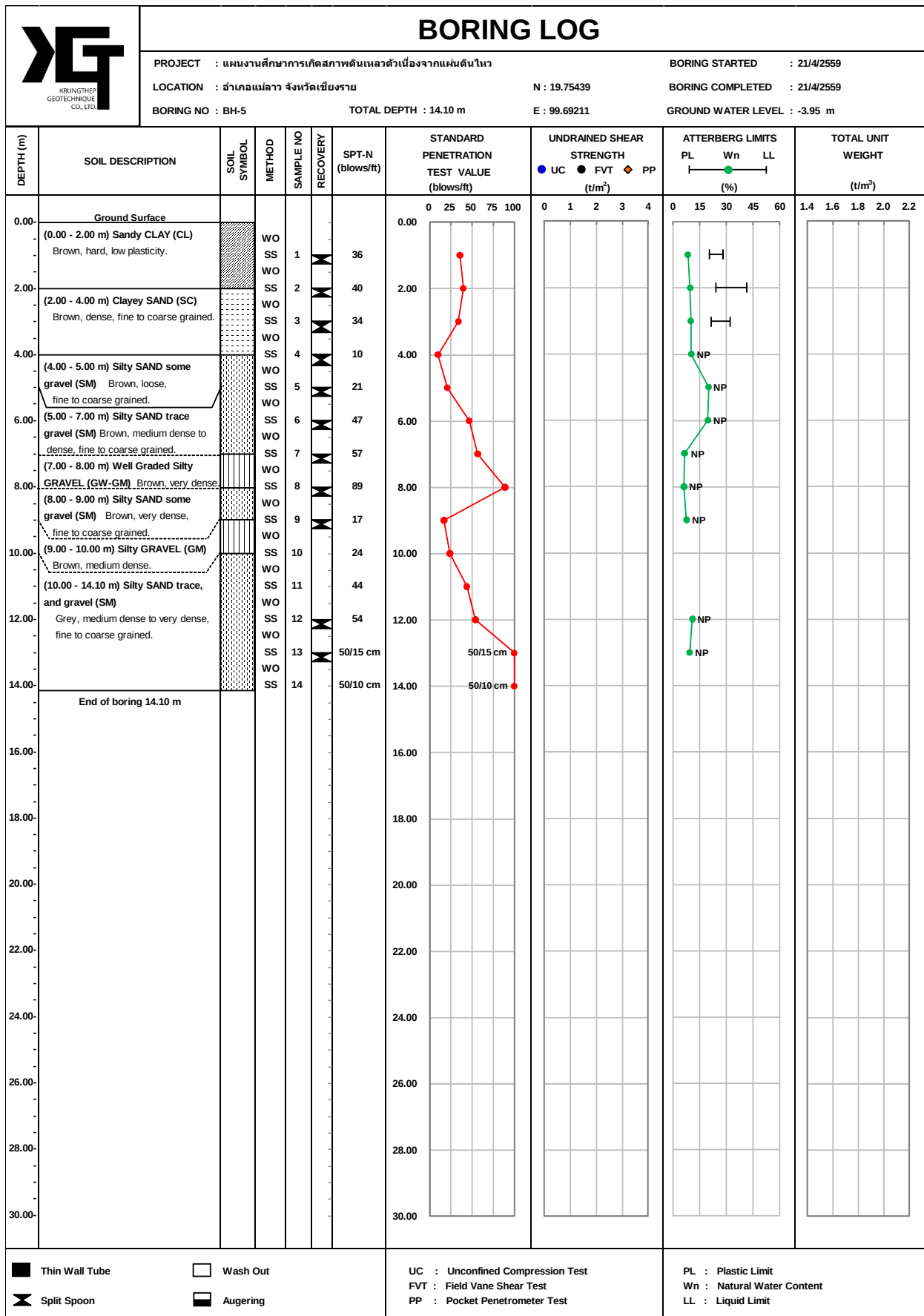
SUMMARY OF TEST RESULTS																								
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว										Date of Boring : 20/4/2559					Ground Water Level (m) : -2.07									
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย										Boring No : BH-4					N : 19.75961					E : 99.69688				
Sample No.	Depth, m		Wh (%)	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis						USCS	γ _t (t/m ³)	γ _d (t/m ³)	SPT-N (blows/cm)			N value					
	From	To		LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200				1st	2nd	3rd						
SS-1	1.00	1.45	13.15	NP			87.96	74.01	64.26	52.05	44.31	40.25	SM			3	3	4	7					
SS-2	2.00	2.45	32.43	47.51	31.02	16.48	100.00	100.00	99.30	96.08	92.27	90.94	ML			2	1	1	2					
SS-3	3.00	3.45	26.83	41.44	27.31	14.13	100.00	100.00	99.42	87.00	76.77	71.61	ML			2	2	3	5					
SS-4	4.00	4.45	25.31	47.80	27.73	20.07	100.00	86.18	74.00	64.73	57.57	54.18	ML			3	4	4	8					
SS-5	5.00	5.45					NO RECOVERY						(GM)			3	4	4	8					
SS-6	6.00	6.45	20.07	46.26	37.36	8.90	54.03	48.14	46.16	43.01	41.30	40.41	GM			4	3	3	6					
SS-7	7.00	7.45	32.91	48.98	38.18	10.80	100.00	100.00	100.00	97.20	90.45	86.67	ML			3	4	7	11					
SS-8	8.00	8.45	25.85	48.29	28.41	19.88	100.00	100.00	100.00	97.66	86.28	79.64	ML			6	7	12	19					
SS-9	9.00	9.30	11.64	49.96	28.72	21.24	100.00	100.00	98.97	94.57	89.46	86.76	ML			29	50	-	50/15 cm					
SS-10	10.00	10.14	11.67	NP			88.62	70.27	53.39	35.81	26.00	23.29	SM			50/14 cm	-	-	50/14 cm					
SS-11	11.00	11.15	10.53	NP			74.67	56.30	47.30	31.43	22.92	19.73	GM			50	-	-	50/15 cm					

รูปผนวก ก-13 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-4 วัตน้ำล้อมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปผนวก ก-14 ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-5 วัดน้ำล้นมต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

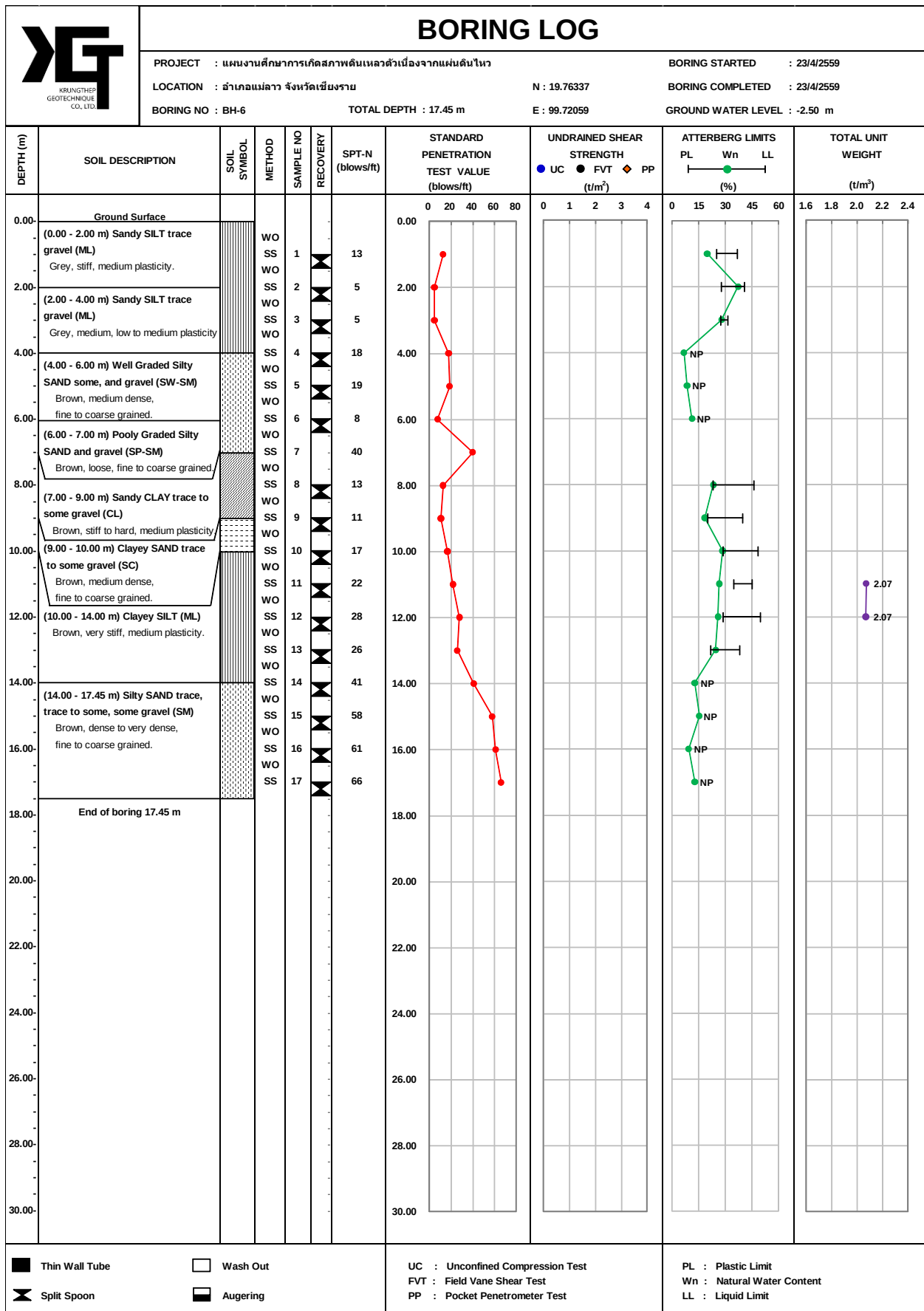
SUMMARY OF TEST RESULTS																										
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว										Date of Boring : 21/4/2559										Ground Water Level (m) : -3.95						
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย										Boring No : BH-5										N : 19.75439		E : 99.69211				
Sample	Depth, m		Wn	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis						USCS	γ_t	γ_d	SPT-N (blows/cm)			N value							
No.	From	To	(%)	LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200	Group	(t/m ³)	(t/m ³)	1st	2nd	3rd								
SS-1	1.00	1.45	8.35	28.03	20.57	7.46	100.00	100.00	100.00	83.13	62.59	53.22	CL			14	16	20	36							
SS-2	2.00	2.45	9.61	41.48	24.17	17.31	100.00	100.00	97.68	75.27	53.27	43.38	SC			19	19	21	40							
SS-3	3.00	3.45	10.03	31.94	21.37	10.56	100.00	100.00	98.99	78.73	53.05	43.40	SC			24	20	14	34							
SS-4	4.00	4.45	10.29	NP			82.97	73.88	61.10	34.63	21.38	17.28	SM			13	5	5	10							
SS-5	5.00	5.45	20.01	NP			100.00	100.00	95.77	59.31	28.82	21.91	SM			8	10	11	21							
SS-6	6.00	6.45	19.57	NP			96.52	94.16	90.41	75.49	43.42	33.23	SM			16	24	23	47							
SS-7	7.00	7.45	6.46	NP			56.81	50.55	42.44	21.43	12.70	10.07	GW-GM			29	24	33	57							
SS-8	8.00	8.45	6.22	NP			78.33	70.56	51.29	30.90	21.76	18.23	SM			29	39	50	89							
SS-9	9.00	9.45	7.66	NP			56.62	51.23	43.71	23.03	15.31	12.97	GM			7	8	9	17							
SS-10	10.00	10.45	NO RECOVERY																	(SM)			11	10	14	24
SS-11	11.00	11.45	NO RECOVERY																	(SM)			13	18	26	44
SS-12	12.00	12.45	10.95	NP			100.00	90.33	83.57	36.72	18.69	14.47	SM				30	28	26	54						
SS-13	13.00	13.15	9.42	NP			75.48	61.46	50.29	33.15	24.94	21.89	SM			50	-	-	50/15 cm							
SS-14	14.00	14.10	NO RECOVERY																	(SM)			50/10 cm	-	-	50/10 cm

รูปผนวก ก-14 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-5 วัดน้ำล้นมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปผนวก ก-15 ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-6 วัตน้ำล้อมต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

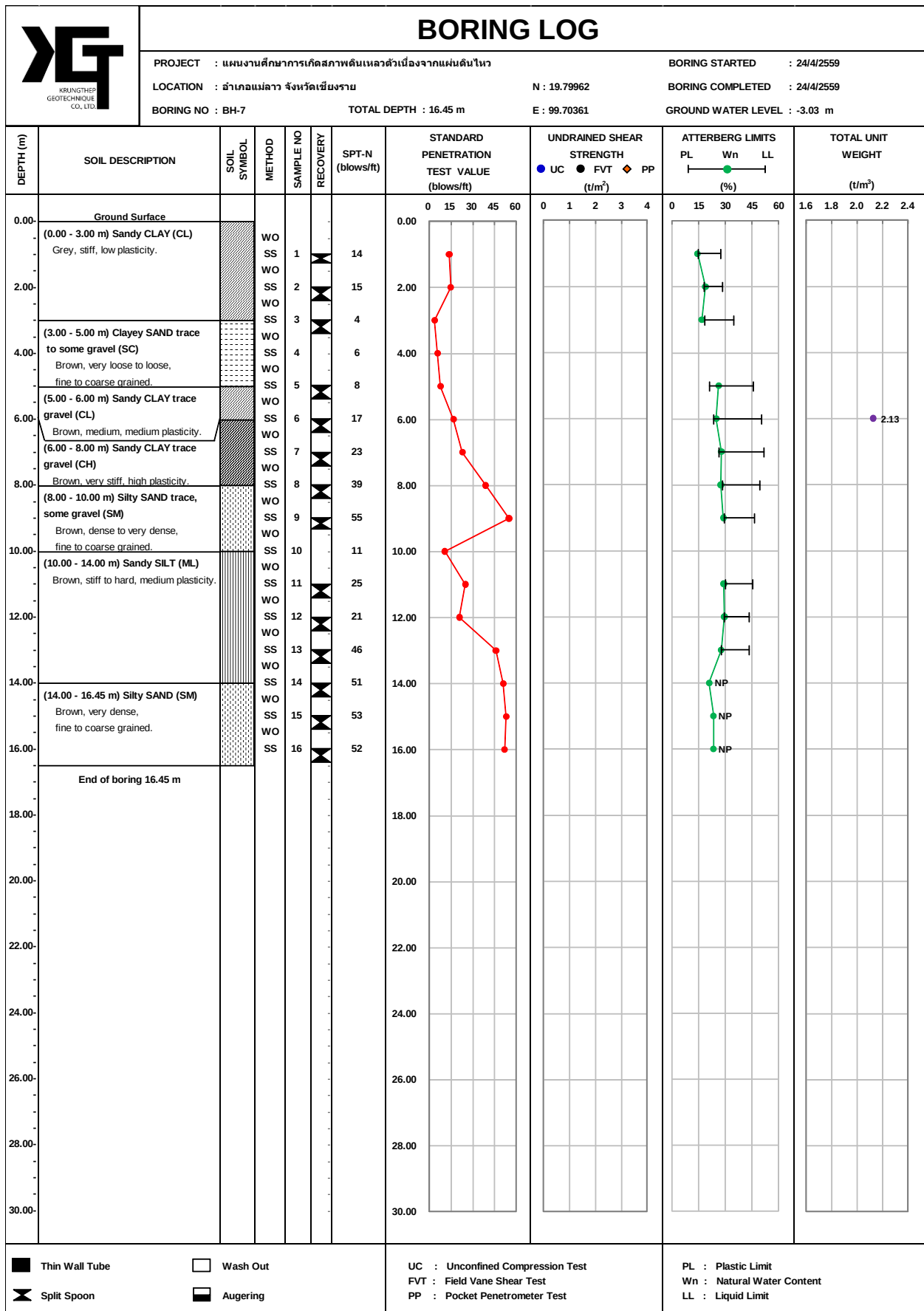
SUMMARY OF TEST RESULTS																									
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว										Date of Boring : 23/4/2559					Ground Water Level (m) : -2.50										
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย										Boring No : BH-6					N : 19.76337					E : 99.72059					
Sample	Depth, m		Wn (%)	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis							USCS	γ _i (t/m ³)	γ _d (t/m ³)	SPT-N (blows/cm)			N value					
	From	To		LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200	Group				1st	2nd	3rd						
No.																									
SS-1	1.00	1.45	19.79	36.74	25.03	11.71	100.00	96.67	95.08	86.44	75.97	70.30	ML			6	6	7	13						
SS-2	2.00	2.45	37.30	40.98	27.86	13.12	98.19	95.13	88.05	84.22	80.02	76.19	ML			3	2	3	5						
SS-3	3.00	3.45	27.91	31.31	27.40	3.91	100.00	100.00	100.00	97.91	73.68	53.25	ML			2	2	3	5						
SS-4	4.00	4.45	6.77	NP			70.72	56.78	35.22	15.32	7.92	5.90	SW-SM			6	9	9	18						
SS-5	5.00	5.45	8.46	NP			100.00	70.85	51.51	25.52	14.89	11.31	SW-SM			7	9	10	19						
SS-6	6.00	6.45	11.30	NP			65.67	56.16	50.57	32.40	15.25	10.79	SP-SM			4	3	5	8						
SS-7	7.00	7.45	NO RECOVERY																	(CL)		27	23	17	40
SS-8	8.00	8.45	23.25	46.08	23.36	22.72	98.10	89.89	83.46	65.48	58.46	54.93	CL			6	6	7	13						
SS-9	9.00	9.45	18.46	39.91	20.55	19.36	87.58	83.30	75.89	43.12	34.86	32.18	SC			6	5	6	11						
SS-10	10.00	10.45	28.52	48.63	28.70	19.93	100.00	100.00	96.75	89.37	85.27	82.64	ML			6	7	10	17						
SS-11	11.00	11.45	26.64	45.29	34.94	10.36	100.00	100.00	98.28	96.12	91.28	87.72	ML	2.07	1.64	7	11	11	22						
SS-12	12.00	12.45	25.89	49.79	28.98	20.80	100.00	100.00	100.00	98.79	95.94	93.04	ML	2.07	1.65	6	10	18	28						
SS-13	13.00	13.45	24.62	37.73	26.77	10.96	100.00	100.00	98.88	96.11	85.50	77.15	ML			7	12	14	26						
SS-14	14.00	14.45	12.85	NP			76.65	66.46	55.21	34.15	19.24	16.36	SM			16	18	23	41						
SS-15	15.00	15.45	15.40	NP			96.58	93.48	87.60	39.99	17.08	12.05	SM			13	24	34	58						
SS-16	16.00	16.45	9.34	NP			70.42	65.22	56.75	34.05	19.37	15.12	SM			24	27	34	61						
SS-17	17.00	17.45	12.83	NP			88.29	82.30	70.77	30.24	16.10	12.10	SM			25	30	36	66						

รูปผนวก ก-15 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-6 วัตน้ำล้อมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปผนวก ก-16 ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-7 วัดน้ำล้นมต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว



โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

SUMMARY OF TEST RESULTS																			
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว										Date of Boring : 24/4/2559					Ground Water Level (m) : -3.03				
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย										Boring No : BH-7					N : 19.79962				
															E : 99.70361				
Sample	Depth, m		Wh	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis						USCS	γ_s	γ_d	SPT-N (blows/cm)			N value
No.	From	To	(%)	LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200	Group	(γ_m)	(γ_m)	1st	2nd	3rd	
SS-1	1.00	1.45	14.34	27.19	14.91	12.28	100.00	100.00	94.29	80.14	66.47	60.11	CL			6	6	8	14
SS-2	2.00	2.45	18.82	28.36	18.02	10.34	100.00	100.00	100.00	91.16	65.91	51.38	CL			7	8	7	15
SS-3	3.00	3.45	16.79	34.76	18.39	16.37	98.04	87.58	78.09	56.13	41.53	36.79	SC			2	2	2	4
SS-4	4.00	4.45											(SC)			3	3	3	6
SS-5	5.00	5.45	26.29	45.82	21.28	24.54	100.00	96.69	92.55	83.15	75.10	71.47	CL			4	4	4	8
SS-6	6.00	6.45	24.94	50.19	23.63	26.56	100.00	95.58	92.79	80.23	69.48	64.51	CH	2.13	1.71	7	8	9	17
SS-7	7.00	7.45	27.79	51.81	26.34	25.47	100.00	97.52	94.21	78.58	71.58	70.15	CH			9	10	13	23
SS-8	8.00	8.45	27.46	49.34	28.46	20.88	96.51	92.40	89.12	62.04	49.96	47.59	SM			7	13	26	39
SS-9	9.00	9.45	28.94	46.24	29.35	16.89	86.11	75.97	64.75	49.80	43.78	41.21	SM			12	16	39	55
SS-10	10.00	10.45											(ML)			4	4	7	11
SS-11	11.00	11.45	29.13	45.62	30.19	15.43	100.00	100.00	98.01	79.28	69.80	66.81	ML			10	12	13	25
SS-12	12.00	12.45	29.49	43.56	29.50	14.06	100.00	100.00	94.95	76.21	70.41	68.01	ML			8	10	11	21
SS-13	13.00	13.45	27.75	43.43	27.89	15.54	100.00	100.00	97.79	79.49	72.17	70.56	ML			12	20	26	46
SS-14	14.00	14.45	20.96		NP		100.00	100.00	94.96	65.97	51.26	48.30	SM			13	23	28	51
SS-15	15.00	15.45	23.41		NP		100.00	100.00	93.82	65.33	51.54	46.45	SM			22	21	32	53
SS-16	16.00	16.45	23.38		NP		100.00	100.00	95.32	67.30	55.41	49.05	SM			10	23	29	52

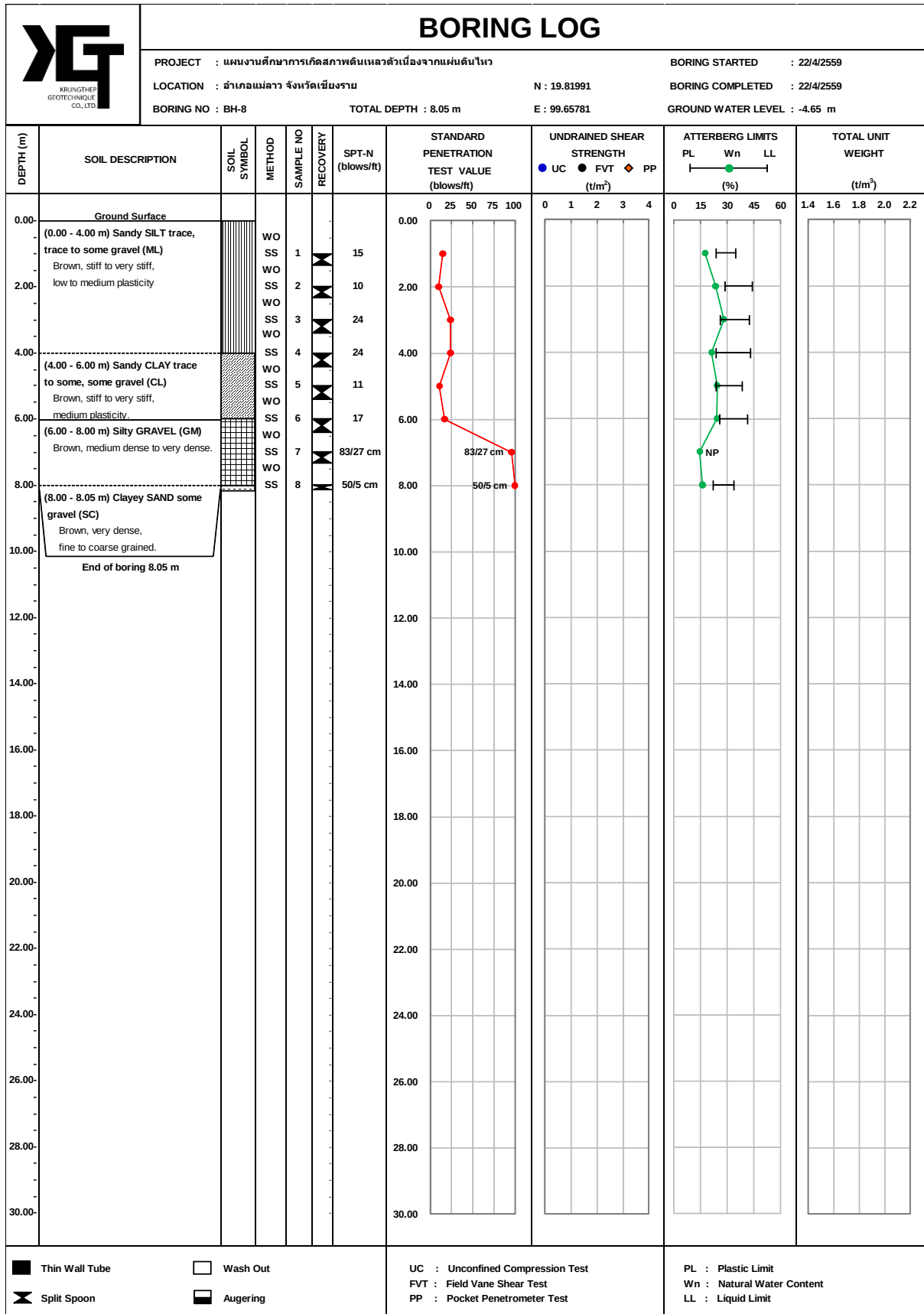
รูปผนวก ก-16 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-7 วัดน้ำล้นมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว





รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปผนวก ก-17 ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-8 วัดน้ำล้นต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว



SUMMARY OF TEST RESULTS																					
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว										Date of Boring : 22/4/2559										Ground Water Level (m) : -4.65	
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย										Boring No : BH-8		N : 19.81991		E : 99.65781							
Sample No.	Depth, m		Wn (%)	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis						USCS	γ _t (t/m ³)	γ _d (t/m ³)	SPT-N , (blows/cm)			N value		
	From	To		LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200				Group	1st	2nd		3rd	
SS-1	1.00	1.45	17.56	34.89	24.05	10.84	100.00	96.06	86.69	74.39	67.23	64.00	ML			11	8	7	15		
SS-2	2.00	2.45	23.52	44.14	28.92	15.22	94.57	87.41	76.73	62.64	56.94	53.91	ML			4	4	6	10		
SS-3	3.00	3.45	28.04	42.50	26.30	16.20	100.00	100.00	94.32	81.91	74.38	71.24	ML			6	9	15	24		
SS-4	4.00	4.45	21.29	43.03	23.73	19.30	88.62	80.83	72.73	63.29	59.10	57.02	CL			10	11	13	24		
SS-5	5.00	5.45	24.44	38.51	23.97	14.54	85.38	77.58	71.40	62.82	60.09	58.83	CL			5	5	6	11		
SS-6	6.00	6.45	24.31	41.63	25.93	15.70	71.12	63.13	50.43	39.93	36.11	34.70	GM			7	8	9	17		
SS-7	7.00	7.42	14.57	NP			71.43	59.45	47.28	33.32	25.88	22.98	GM			23	33	50/12 cm	83/27 cm		
SS-8	8.00	8.05	16.12	33.68	22.46	11.22	80.05	71.88	61.99	46.12	37.65	34.23	SC			50/5 cm	-	-	50/5 cm		

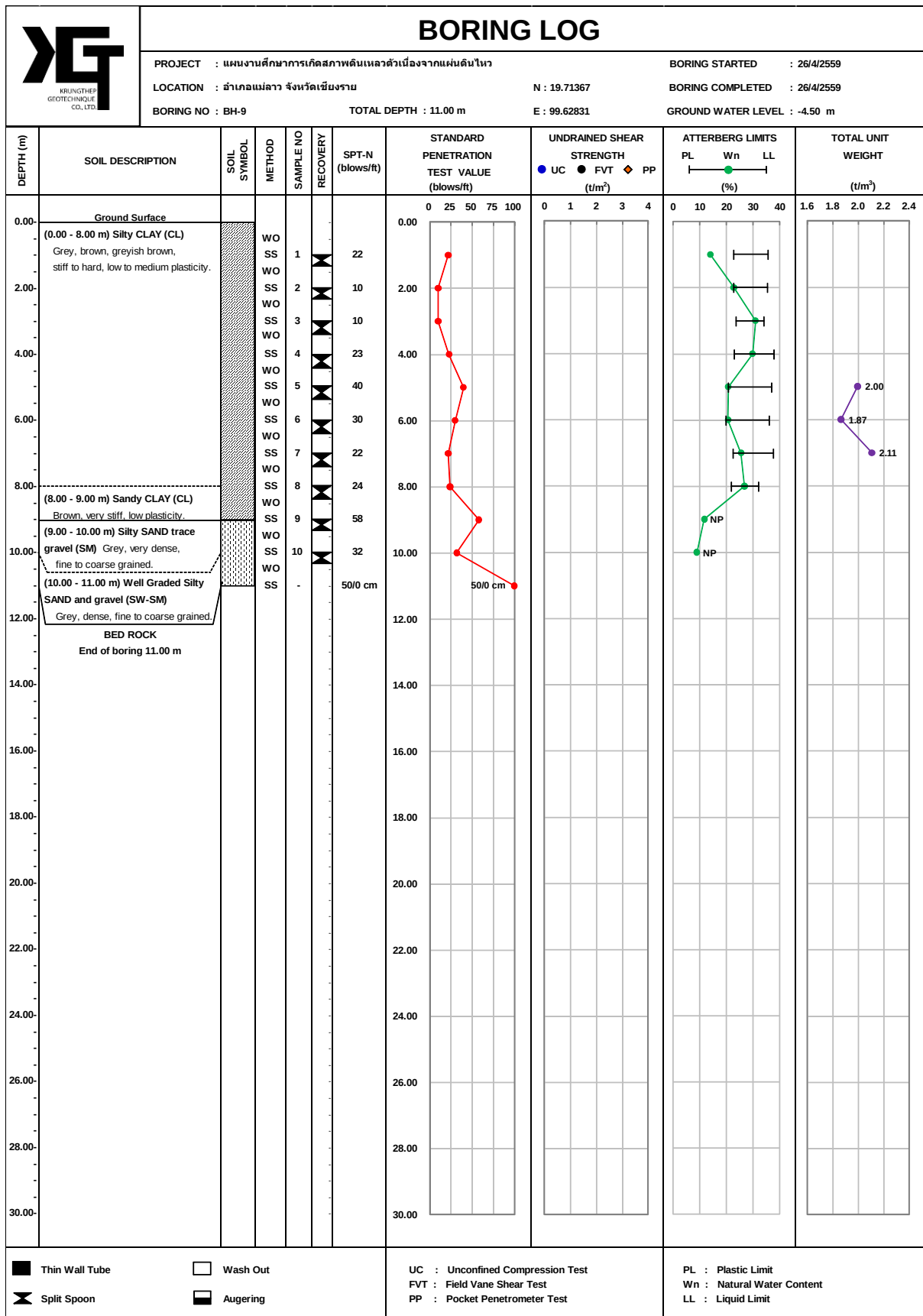
รูปผนวก ก-17 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-8 วัดน้ำล้นมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว





รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

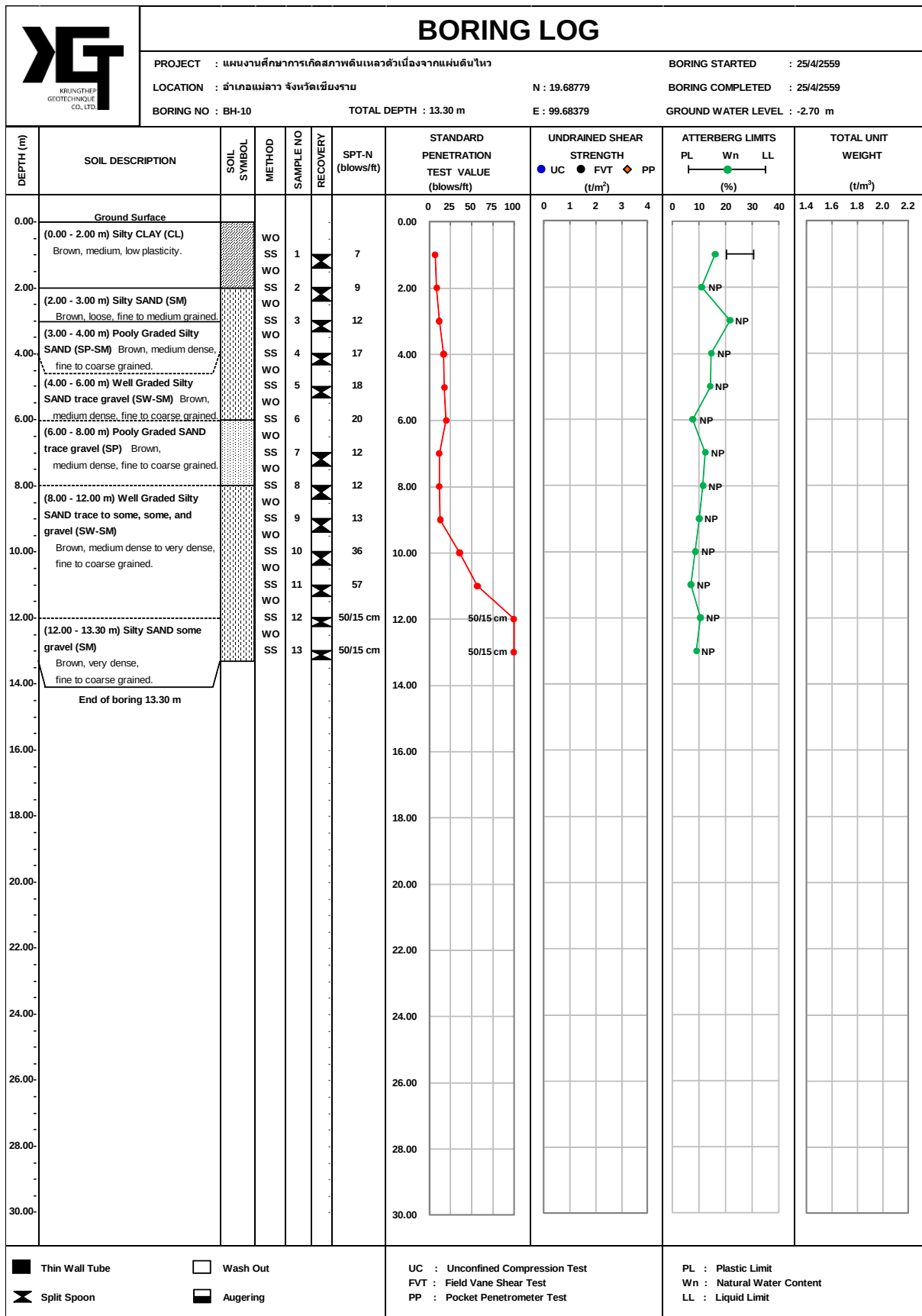
SUMMARY OF TEST RESULTS																			
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว																			
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย																			
Date of Boring : 26/4/2559																			
Ground Water Level (m) : -4.50																			
Boring No : BH-9																			
N : 19.71367																			
E : 99.62831																			
Sample No.	Depth, m		W _n (%)	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis						USCS Group	γ _t (t/m ³)	γ _d (t/m ³)	SPT-N _t (blows/cm)			N value
	From	To		LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200				1st	2nd	3rd	
SS-1	1.00	1.45	13.96	35.63	22.72	12.91	100.00	100.00	100.00	97.53	93.65	88.53	CL			11	11	11	22
SS-2	2.00	2.45	22.79	35.42	22.81	12.62	100.00	100.00	100.00	100.00	98.17	90.68	CL			6	5	5	10
SS-3	3.00	3.45	30.93	34.21	23.58	10.63	100.00	100.00	100.00	95.50	90.30	84.70	CL			2	2	8	10
SS-4	4.00	4.45	29.78	37.81	23.10	14.71	100.00	100.00	100.00	100.00	99.70	95.72	CL			10	11	12	23
SS-5	5.00	5.45	20.73	36.95	20.76	16.19	100.00	100.00	100.00	99.14	96.26	87.20	CL	2.00	1.65	15	19	21	40
SS-6	6.00	6.45	20.59	35.82	19.78	16.04	100.00	100.00	100.00	99.39	97.78	89.84	CL	1.87	1.55	10	14	16	30
SS-7	7.00	7.45	25.51	37.75	22.65	15.10	100.00	100.00	100.00	100.00	99.58	98.39	CL	2.11	1.68	10	9	13	22
SS-8	8.00	8.45	26.75	32.19	21.79	10.40	100.00	100.00	100.00	98.99	87.46	62.79	CL			6	10	14	24
SS-9	9.00	9.45	11.75	NP			100.00	90.24	79.22	38.42	20.20	14.73	SM			13	22	36	58
SS-10	10.00	10.45	8.93	NP			61.86	55.00	43.58	21.73	12.88	9.63	SW-SM			33	16	16	32
-	11.00	11.00		BED ROCK												50/0 cm	-	-	50/0 cm

รูปผนวก ก-18 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-9 วัดน้ำล้นมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปผนวก ก-19 ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-10 วัดน้ำล้นต.ตงมะตะ อ.แม่ลาว

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

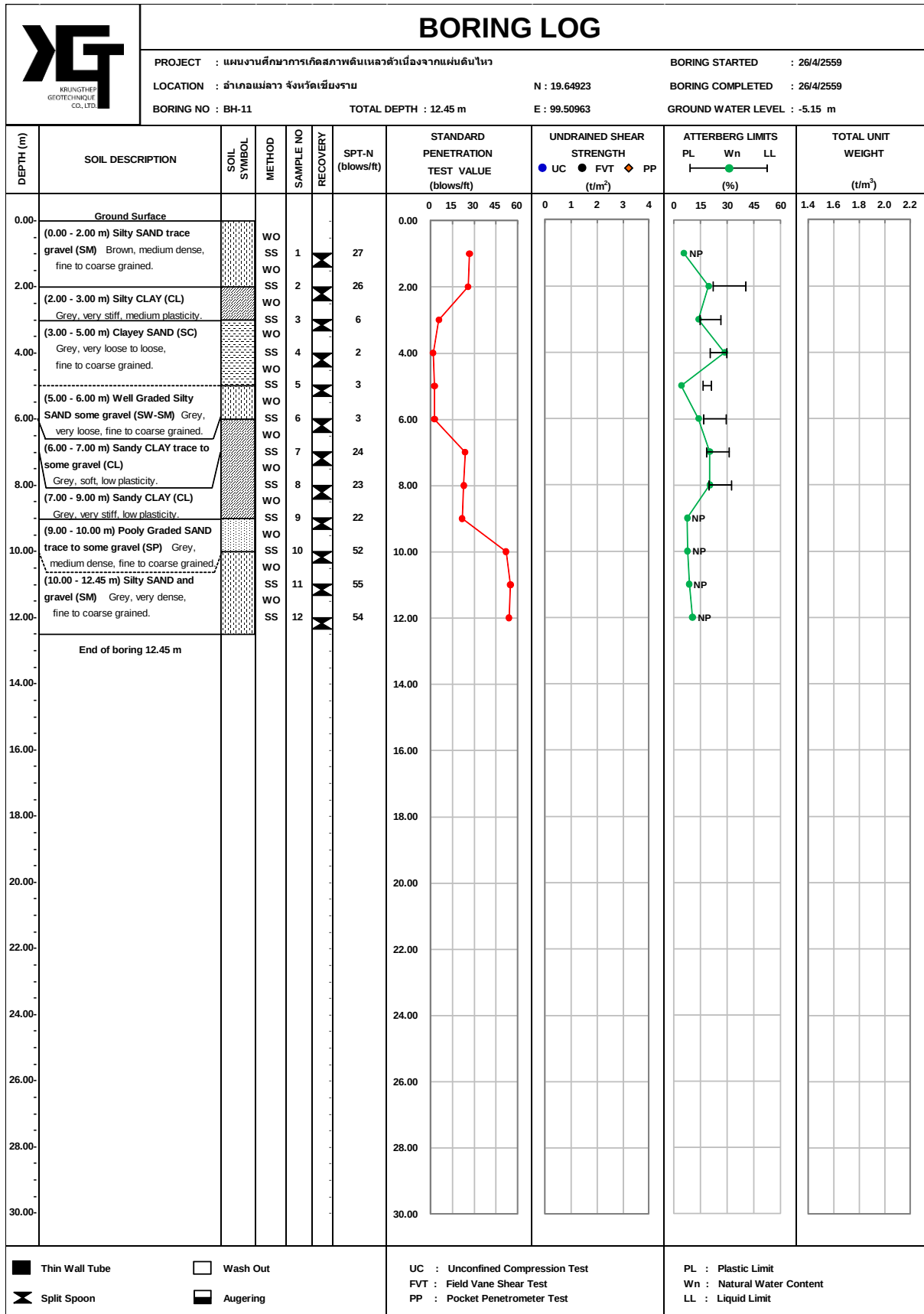
SUMMARY OF TEST RESULTS																			
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว										Date of Boring : 25/4/2559									
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย										Ground Water Level (m) : -2.70									
										N : 19.68779									
										E : 99.68379									
										Boring No : BH-10									
Sample No.	Depth, m		Wn (%)	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis						USCS Group	γ_t (t/m^3)	γ_d (t/m^3)	SPT-N (blows/cm)			N value
	From	To		LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200				1st	2nd	3rd	
SS-1	1.00	1.45	16.11	30.59	20.61	9.98	100.00	100.00	100.00	98.69	93.27	79.27	CL			3	3	4	7
SS-2	2.00	2.45	10.98	NP			100.00	100.00	100.00	98.34	49.36	23.70	SM			3	4	5	9
SS-3	3.00	3.45	21.64	NP			100.00	100.00	98.37	42.76	8.13	5.20	SP-SM			4	5	7	12
SS-4	4.00	4.45	14.63	NP			100.00	96.58	72.05	22.58	11.51	8.56	SW-SM			6	8	9	17
SS-5	5.00	5.45	14.28	NP			100.00	90.49	70.20	31.15	16.87	11.00	SW-SM			12	10	8	18
SS-6	6.00	6.45	7.65	NP			100.00	99.05	78.53	13.67	3.83	2.83	SP			10	12	8	20
SS-7	7.00	7.45	12.40	NP			100.00	96.90	85.88	28.33	8.31	4.50	SP			5	6	6	12
SS-8	8.00	8.45	11.49	NP			92.89	85.54	63.95	19.16	8.78	6.80	SW-SM			6	6	6	12
SS-9	9.00	9.45	10.09	NP			86.28	72.07	51.43	14.85	6.80	5.45	SW-SM			8	7	6	13
SS-10	10.00	10.45	8.67	NP			81.98	72.40	52.74	24.29	15.45	11.71	SW-SM			11	16	20	36
SS-11	11.00	11.45	6.98	NP			58.32	54.94	38.75	17.65	10.56	7.76	SW-SM			21	27	30	57
SS-12	12.00	12.30	10.55	NP			81.50	76.79	66.48	52.37	38.10	34.05	SM			30	50	-	50/15 cm
SS-13	13.00	13.30	9.05	NP			83.83	71.35	52.79	30.06	17.92	13.41	SM			25	50	-	50/15 cm

รูปผนวก ก-19 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-10 วัดน้ำล้นมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปผนวก ก-20 ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-11 วัดน้ำล้นมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

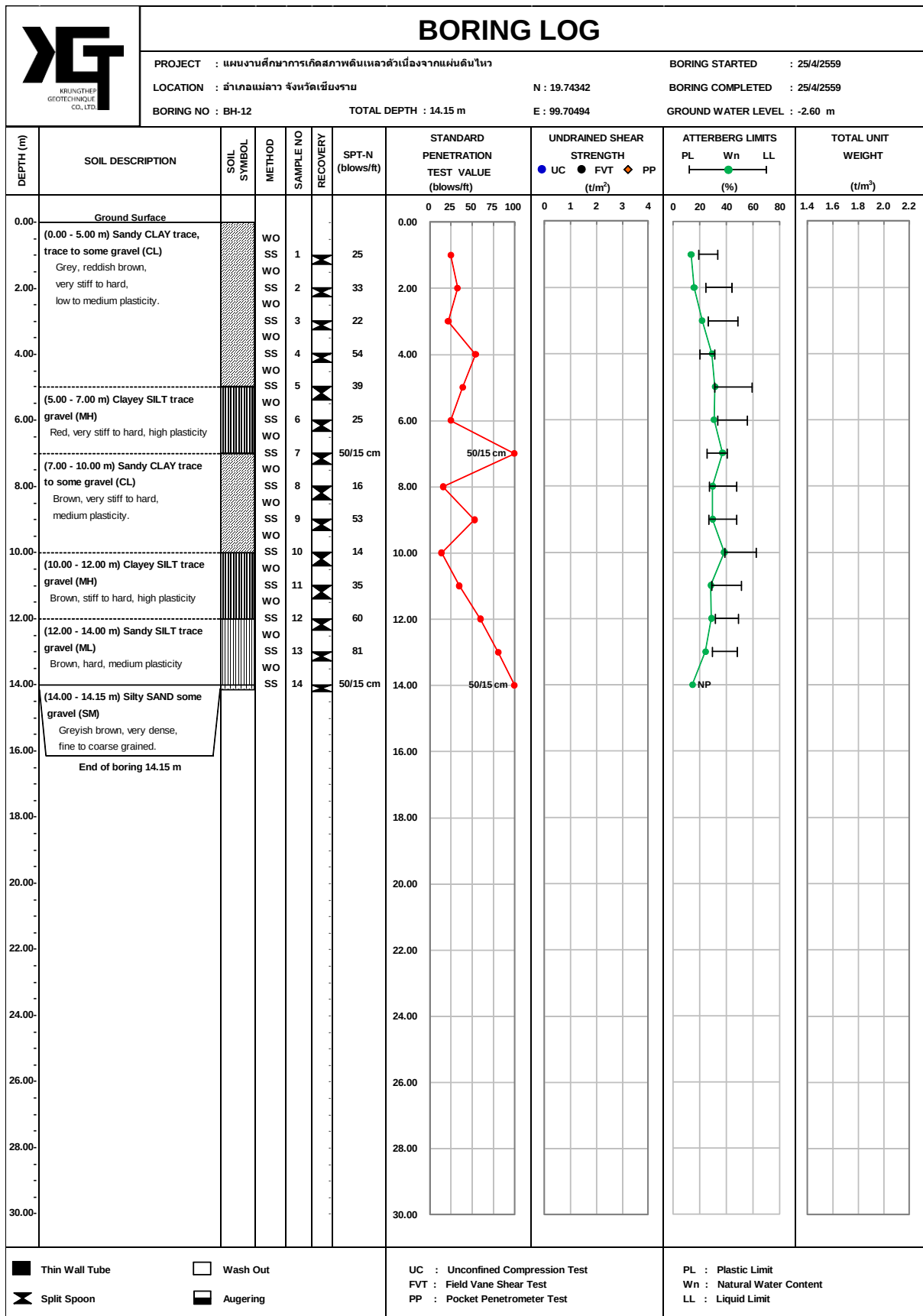
SUMMARY OF TEST RESULTS																			
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว																			
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย																			
Date of Boring : 26/4/2559																			
Ground Water Level (m) : -5.15																			
Boring No : BH-11																			
N : 19.64923																			
E : 99.50963																			
Sample No.	Depth, m		Wn (%)	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis						USCS Group	γ _t (t/m ³)	γ _d (t/m ³)	SPT-N _s (blows/cm)			N value
	From	To		LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200				1st	2nd	3rd	
SS-1	1.00	1.45	5.59	NP			100.00	97.05	82.28	60.75	44.62	35.92	SM			17	13	14	27
SS-2	2.00	2.45	19.58	40.15	22.17	17.98	100.00	100.00	100.00	94.93	89.75	84.95	CL			10	12	14	26
SS-3	3.00	3.45	13.97	26.56	14.72	11.85	100.00	100.00	93.59	61.34	49.92	44.76	SC			3	4	2	6
SS-4	4.00	4.45	28.64	29.78	20.53	9.25	100.00	100.00	98.41	77.61	65.32	49.45	SC			2	1	1	2
SS-5	5.00	5.45	4.27	21.15	17.00	4.15	77.56	67.75	51.24	22.66	11.14	8.00	SW-SM			1	1	2	3
SS-6	6.00	6.45	13.99	29.41	16.77	12.64	89.36	86.53	82.67	69.13	60.57	54.94	CL			1	1	2	3
SS-7	7.00	7.45	20.21	31.06	18.63	12.43	100.00	100.00	94.23	73.08	67.70	64.10	CL			15	14	10	24
SS-8	8.00	8.45	20.23	32.62	19.86	12.76	100.00	100.00	99.02	72.52	64.88	57.41	CL			7	10	13	23
SS-9	9.00	9.45	7.62	NP			100.00	80.88	40.94	2.84	2.59	2.49	SP			11	13	9	22
SS-10	10.00	10.45	7.71	NP			59.33	57.33	43.60	21.23	12.16	12.28	SM			19	25	27	52
SS-11	11.00	11.45	8.76	NP			86.12	62.52	48.18	27.69	17.32	13.36	SM			8	18	37	55
SS-12	12.00	12.45	10.50	NP			77.87	64.14	51.95	28.26	16.01	12.64	SM			17	23	31	54

ปผนวก ก-20 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-11 วัดน้ำล้นมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปผนวก ก-21 ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-12 วัตน้ำล้อมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

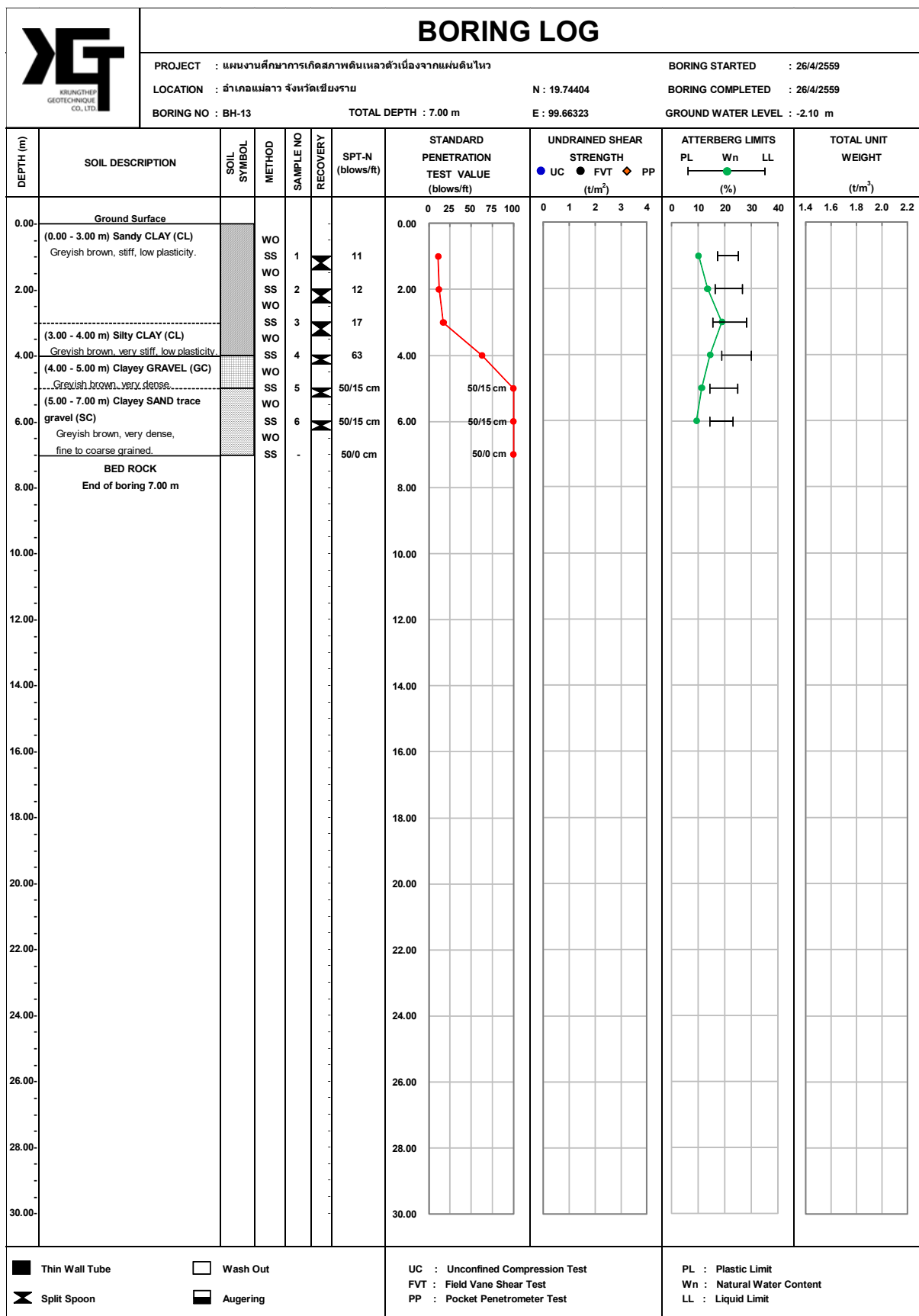
SUMMARY OF TEST RESULTS																							
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว										Date of Boring : 25/4/2559										Ground Water Level (m) : -2.60			
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย										Boring No : BH-12										N : 19.74342		E : 99.70494	
Sample	Depth, m		Wn (%)	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis						USCS	γ _i (t/m ³)	γ _d (t/m ³)	SPT-N ,(blows/cm)			N value				
	From	To		LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200				Group	1st	2nd		3rd			
No.																							
SS-1	1.00	1.45	13.58	33.64	19.29	14.34	96.87	91.66	86.51	78.21	67.51	63.05	CL			12	12	13	25				
SS-2	2.00	2.45	15.85	43.77	24.83	18.95	96.20	80.50	64.38	57.11	52.73	50.83	CL			14	15	18	33				
SS-3	3.00	3.45	21.88	48.57	26.63	21.95	97.86	89.05	73.18	63.70	57.59	54.06	CL			12	11	11	22				
SS-4	4.00	4.45	29.30	31.33	20.08	11.25	100.00	96.52	88.73	79.88	71.15	66.53	CL			7	10	44	54				
SS-5	5.00	5.45	31.47	59.16	31.31	27.85	100.00	100.00	100.00	95.81	91.55	86.33	MH			10	19	20	39				
SS-6	6.00	6.45	30.79	55.81	33.60	22.21	100.00	96.98	93.58	89.99	85.60	82.07	MH			9	11	14	25				
SS-7	7.00	7.30	37.18	40.68	25.38	15.30	97.76	89.90	84.72	78.89	72.00	68.61	CL			8	50	-	50/15 cm				
SS-8	8.00	8.45	29.63	47.71	27.30	20.41	100.00	100.00	100.00	93.88	77.55	72.95	CL			7	8	8	16				
SS-9	9.00	9.45	29.65	47.99	26.96	21.04	89.29	81.12	74.69	66.86	57.83	54.95	CL			9	10	43	53				
SS-10	10.00	10.45	38.45	62.56	38.98	23.58	100.00	96.41	91.54	83.29	75.69	71.98	MH			7	7	7	14				
SS-11	11.00	11.45	28.43	51.13	29.20	21.93	100.00	100.00	100.00	96.79	88.55	82.75	MH			16	17	18	35				
SS-12	12.00	12.45	28.77	48.77	32.03	16.74	100.00	98.52	90.68	74.04	65.47	59.76	ML			23	27	33	60				
SS-13	13.00	13.45	24.37	48.12	29.61	18.51	100.00	94.33	88.59	78.13	67.62	62.66	ML			23	38	43	81				
SS-14	14.00	14.15	14.54		NP		70.09	66.87	61.61	53.84	40.58	33.49	SM			50	-	-	50/15 cm				

รูปผนวก ก-21 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-12 วัดน้ำล้นมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปผนวก ก-22 ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-13 วัดน้ำล้นต.ตงมะตะ อ.แม่ลาว

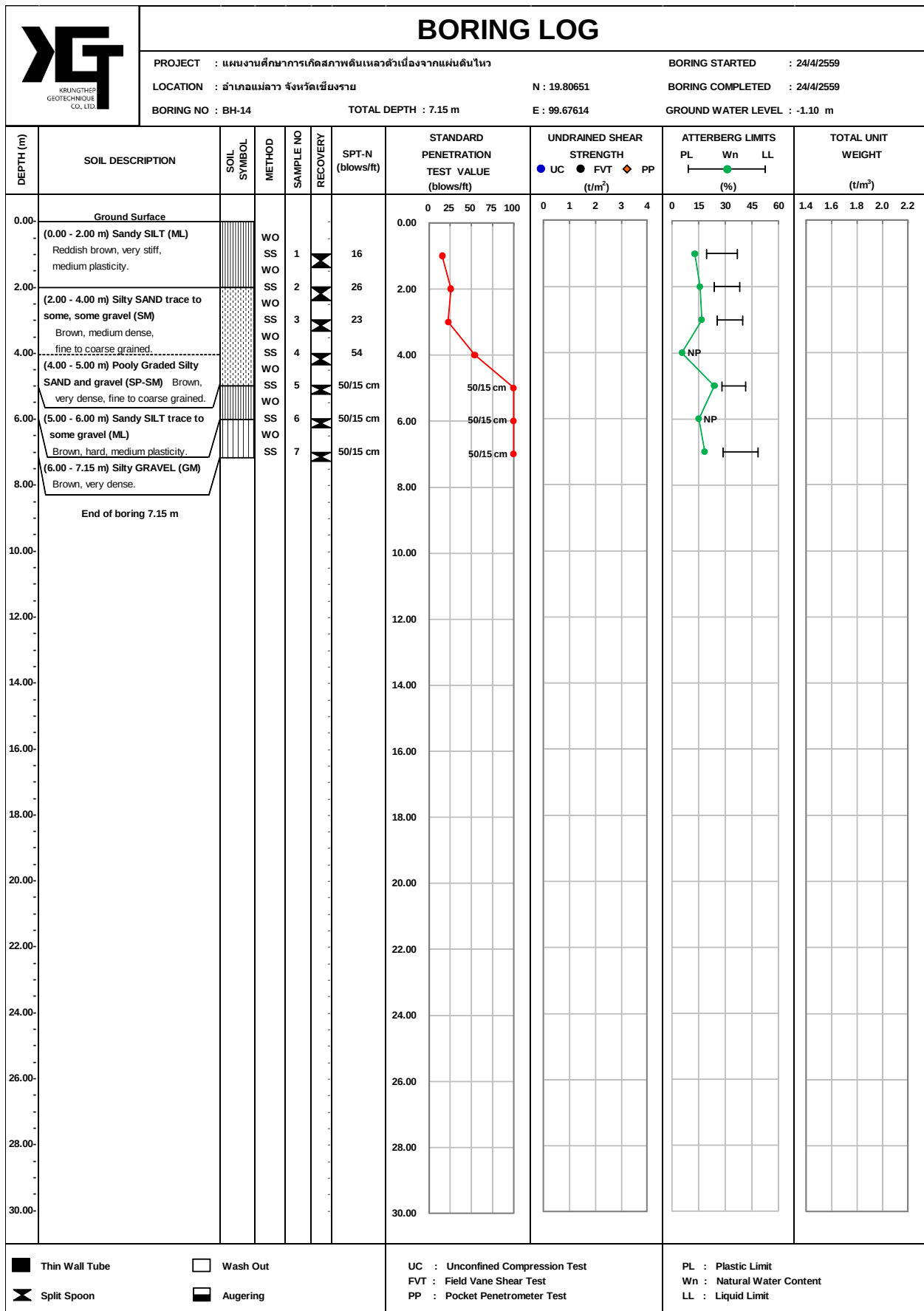
SUMMARY OF TEST RESULTS																								
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว										Date of Boring : 26/4/2559					Ground Water Level (m) : -2.10									
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย										Boring No : BH-13					N : 19.74404					E : 99.66323				
Sample No.	Depth, m		Wn (%)	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis						USCS	γ _t (t/m ³)	γ _d (t/m ³)	SPT-N (blows/cm)			N value					
	From	To		LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200				Group	1st	2nd		3rd				
SS-1	1.00	1.45	10.03	25.04	17.50	7.55	100.00	100.00	100.00	96.83	85.56	74.85	CL			10	7	4	11					
SS-2	2.00	2.45	13.43	26.49	16.30	10.19	100.00	100.00	95.74	92.50	74.24	59.84	CL			5	6	6	12					
SS-3	3.00	3.45	18.84	27.85	15.51	12.35	100.00	100.00	100.00	99.40	90.29	82.16	CL			6	8	9	17					
SS-4	4.00	4.45	14.42	29.60	18.87	10.73	86.91	62.13	49.06	39.92	36.15	34.62	GC			15	23	40	63					
SS-5	5.00	5.30	11.20	24.85	14.37	10.48	100.00	100.00	91.60	64.19	50.84	46.70	SC			30	50	-	50/15 cm					
SS-6	6.00	6.15	9.28	23.07	14.41	8.66	100.00	97.70	81.13	57.12	45.34	40.75	SC			50	-	-	50/15 cm					
-	7.00	7.00											BED ROCK			50/0 cm	-	-	50/0 cm					

รูปผนวก ก-22 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-13 วัดน้ำล้นมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปผนวก ก-23 ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-14 วัดน้ำล้นต.ตงมะตะ อ.แม่ลาว

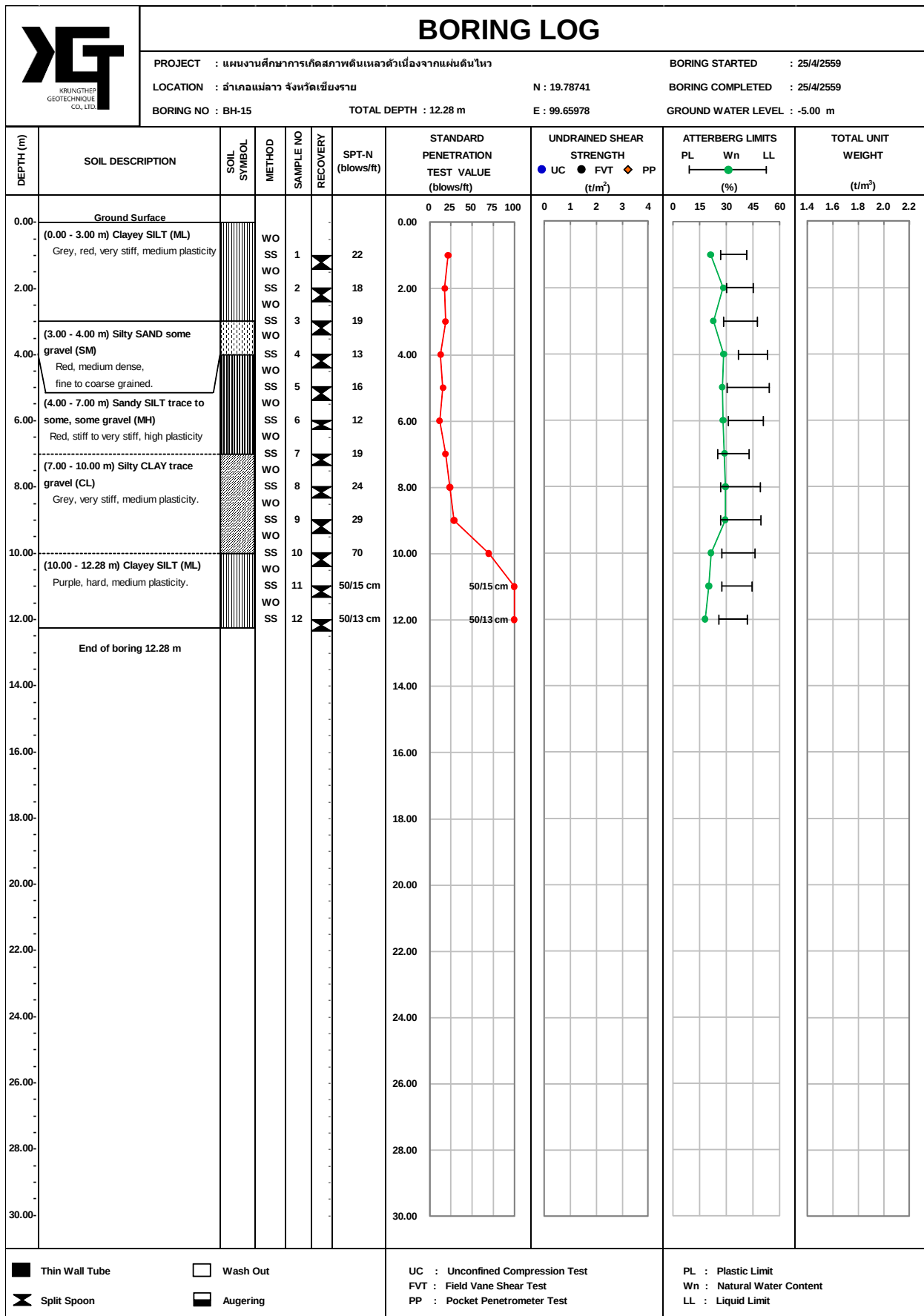
SUMMARY OF TEST RESULTS																								
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว										Date of Boring : 24/4/2559					Ground Water Level (m) : -1.10									
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย										Boring No : BH-14					N : 19.80651					E : 99.67614				
Sample No.	Depth, m		Wn (%)	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis						USCS	γ _t (t/m ³)	γ _d (t/m ³)	SPT-N (blows/cm)			N value					
	From	To		LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200				1st	2nd	3rd						
SS-1	1.00	1.45	12.83	36.89	19.66	17.23	100.00	100.00	100.00	84.09	66.57	59.31	ML			8	7	9	16					
SS-2	2.00	2.45	15.71	38.12	23.97	14.14	96.22	88.38	73.21	62.60	54.37	49.56	SM			8	11	15	26					
SS-3	3.00	3.45	16.70	39.86	25.49	14.37	88.08	76.61	68.11	57.83	50.66	46.61	SM			9	11	12	23					
SS-4	4.00	4.45	5.59	NP			100.00	62.26	15.57	9.18	7.76	7.27	SP-SM			16	24	30	54					
SS-5	5.00	5.15	23.81	41.46	28.11	13.36	100.00	87.20	81.55	75.66	69.44	66.76	ML			50	-	-	50/15 cm					
SS-6	6.00	6.15	15.03	NP			76.48	63.01	54.52	50.80	49.19	48.40	GM			50	-	-	50/15 cm					
SS-7	7.00	7.15	18.34	48.52	28.92	19.60	79.41	65.74	57.92	51.83	47.71	45.86	GM			50	-	-	50/15 cm					

รูปผนวก ก-23 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-14 วัดน้ำล้นมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย



รูปผนวก ก-24 ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-15 วัดน้ำล้นต.ตงมะตะ อ.แม่ลาว

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

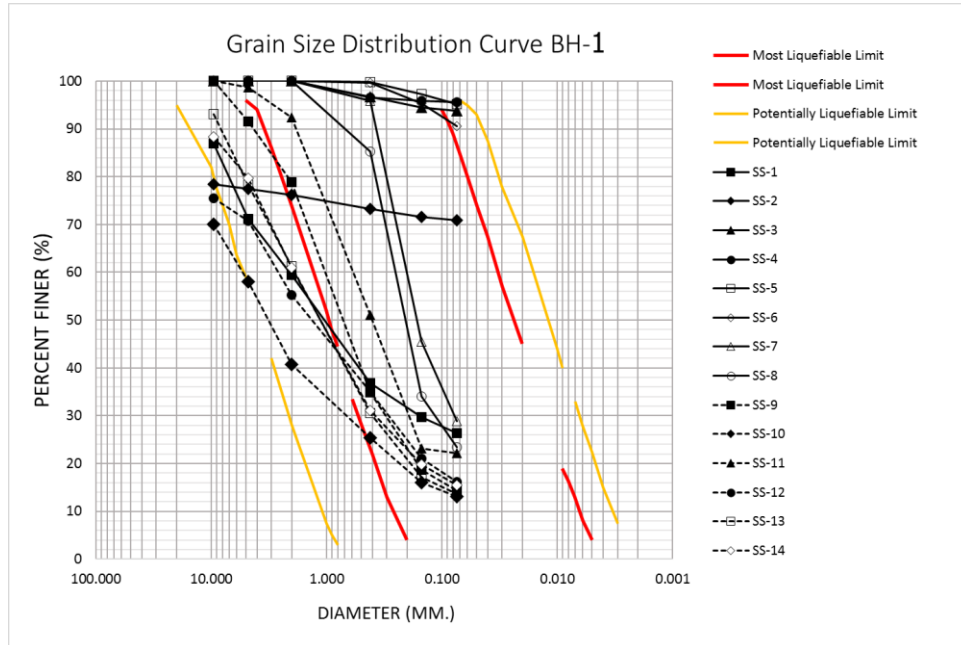
SUMMARY OF TEST RESULTS																			
Project : แผนงานศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว																			
Date of Boring : 25/4/2559 Ground Water Level (m) : -5.00																			
Location : อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย																			
Boring No : BH-15 N : 19.78741 E : 99.65978																			
Sample	Depth, m		Wn (%)	Atterberg Limits (%)			Grain Size Analysis						USCS	γ _t (t/m ³)	γ _d (t/m ³)	SPT-N _s (blows/cm)			N value
	From	To		LL	PL	PI	3/8"	#4	#10	#40	#100	#200				Group	1st	2nd	
No.																			
SS-1	1.00	1.45	21.20	41.43	26.84	14.59	100.00	100.00	98.25	95.16	90.61	87.05	ML			12	10	12	22
SS-2	2.00	2.45	28.23	45.18	30.44	14.74	100.00	100.00	100.00	95.98	93.45	91.39	ML			6	9	9	18
SS-3	3.00	3.45	22.69	47.59	28.46	19.13	94.25	73.02	50.82	43.82	40.90	39.58	SM			7	9	10	19
SS-4	4.00	4.45	28.52	53.20	36.79	16.41	90.29	75.91	63.98	61.69	60.83	59.84	MH			6	6	7	13
SS-5	5.00	5.45	27.74	54.31	30.40	23.91	100.00	79.75	69.55	67.22	66.49	65.37	MH			6	7	9	16
SS-6	6.00	6.45	28.18	50.84	31.01	19.83	96.59	82.12	74.97	73.41	73.00	71.67	MH			4	5	7	12
SS-7	7.00	7.45	28.92	42.89	25.65	17.24	100.00	94.17	89.24	87.73	87.16	83.98	CL			7	8	11	19
SS-8	8.00	8.45	29.51	49.05	26.90	22.15	100.00	100.00	96.86	92.26	89.63	87.90	CL			9	11	13	24
SS-9	9.00	9.45	29.42	49.51	26.78	22.73	100.00	100.00	100.00	97.83	95.29	93.53	CL			11	13	16	29
SS-10	10.00	10.45	21.37	46.16	27.35	18.81	100.00	100.00	100.00	98.33	94.10	92.23	ML			20	29	41	70
SS-11	11.00	11.30	20.12	44.42	27.59	16.83	100.00	100.00	100.00	98.34	94.56	92.42	ML			27	50	-	50/15 cm
SS-12	12.00	12.28	18.01	41.88	25.79	16.10	100.00	100.00	100.00	91.34	85.88	84.96	ML			36	50/13 cm	-	50/13 cm

รูปผนวก ก-24 (ต่อ) ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน BH-15 วัตน้ำล้อมต.ดงมะตะ อ.แม่ลาว

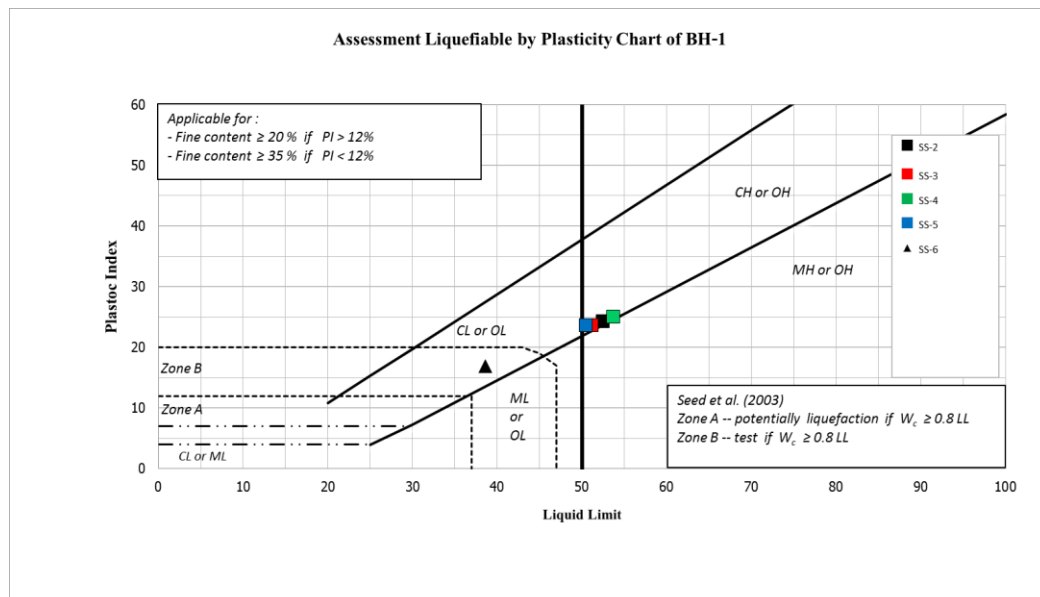
ภาคผนวก ข

รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน
และการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน

BH-1: วัดร่องขุน

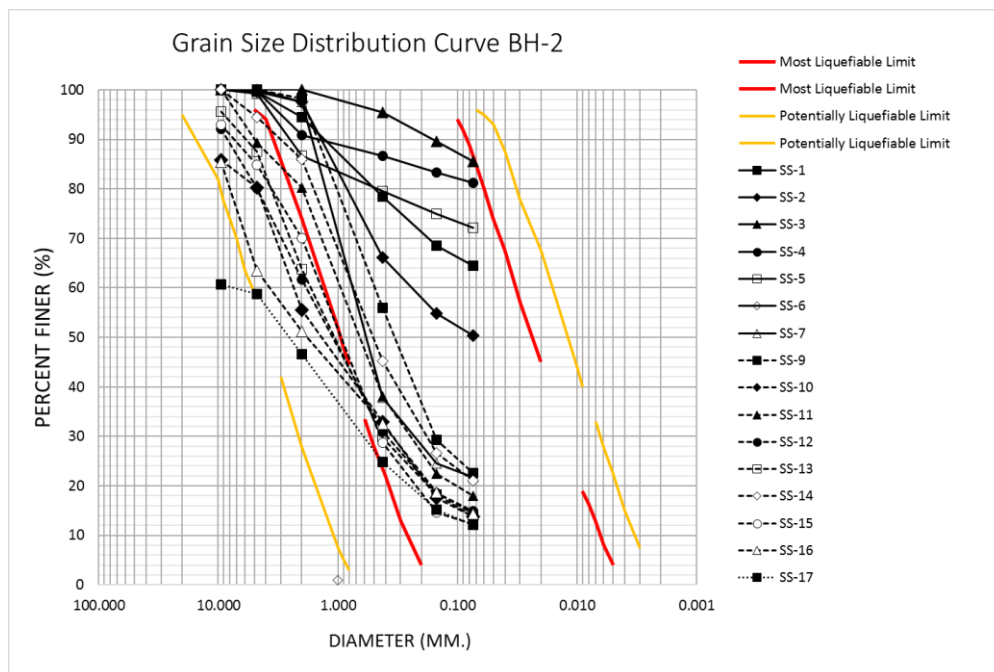


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-1

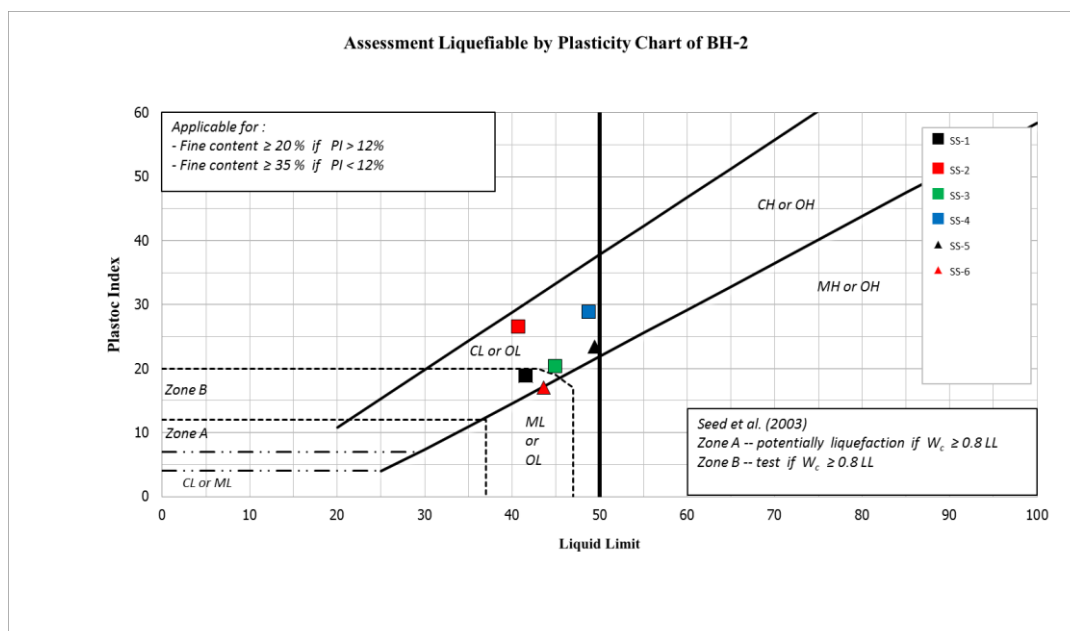


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-1.

BH-2: วัดร่องขุน

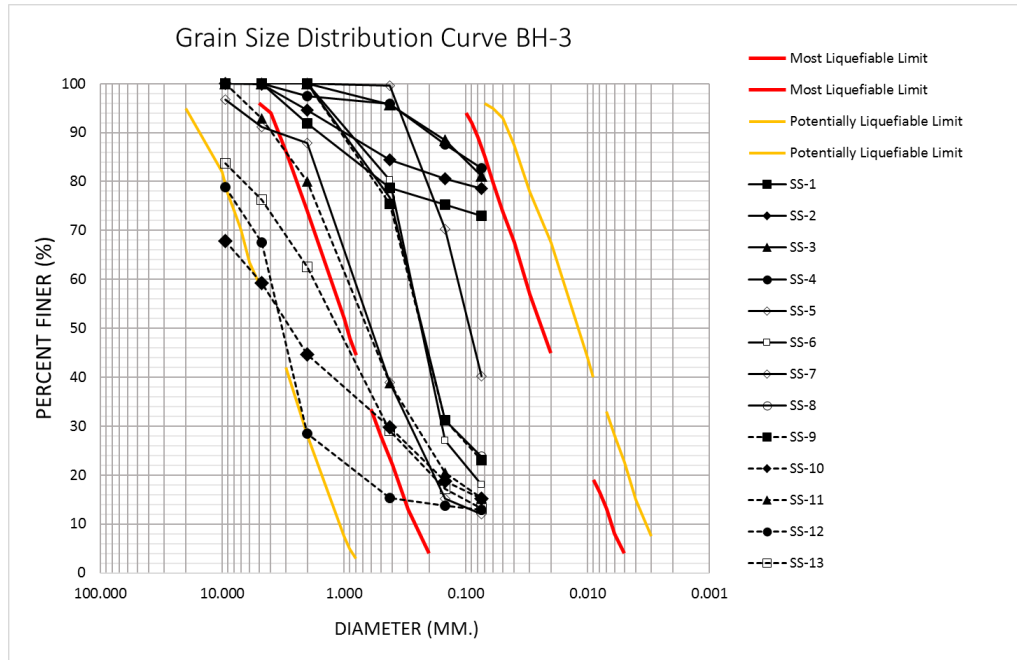


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-2

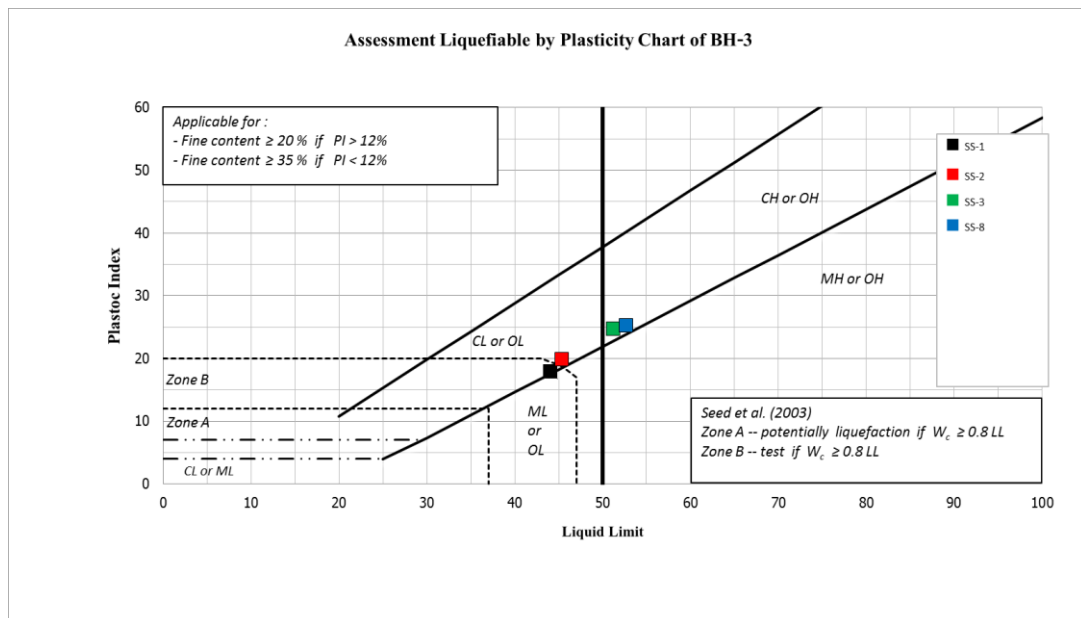


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-2.

BH-3: วัดร่องขุน

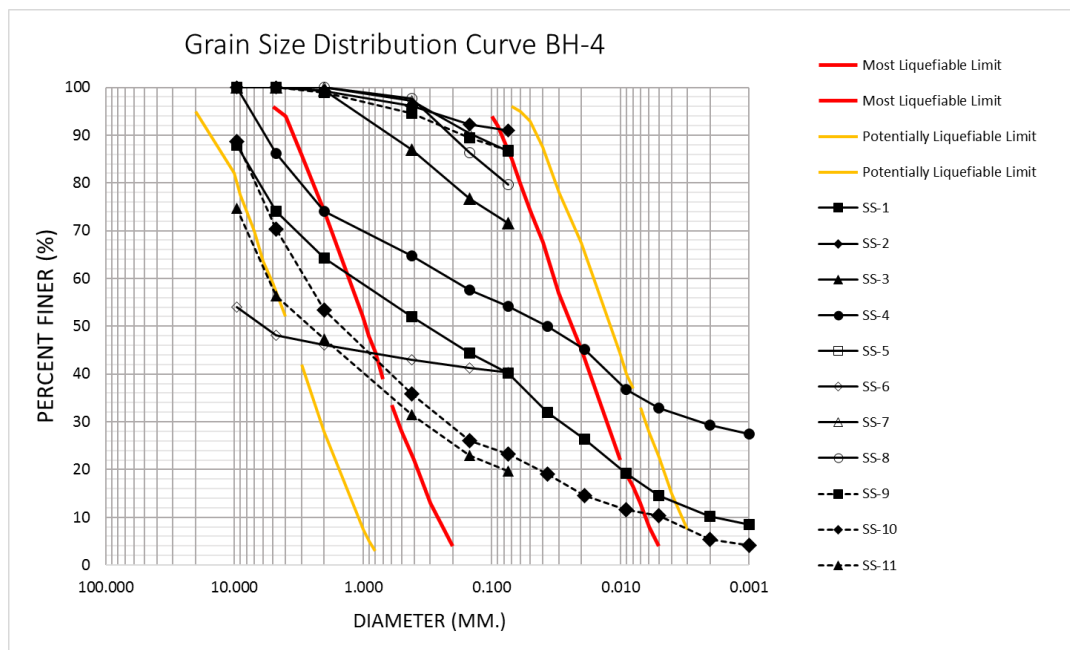


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-3

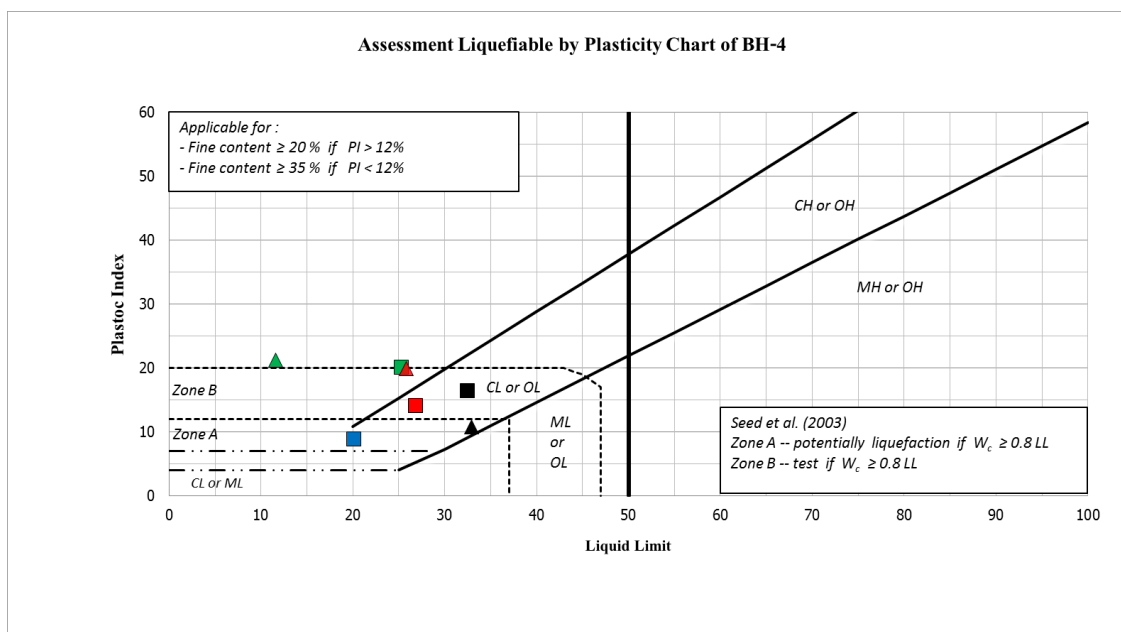


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-3

BH-4: วัตน้ำล่อม

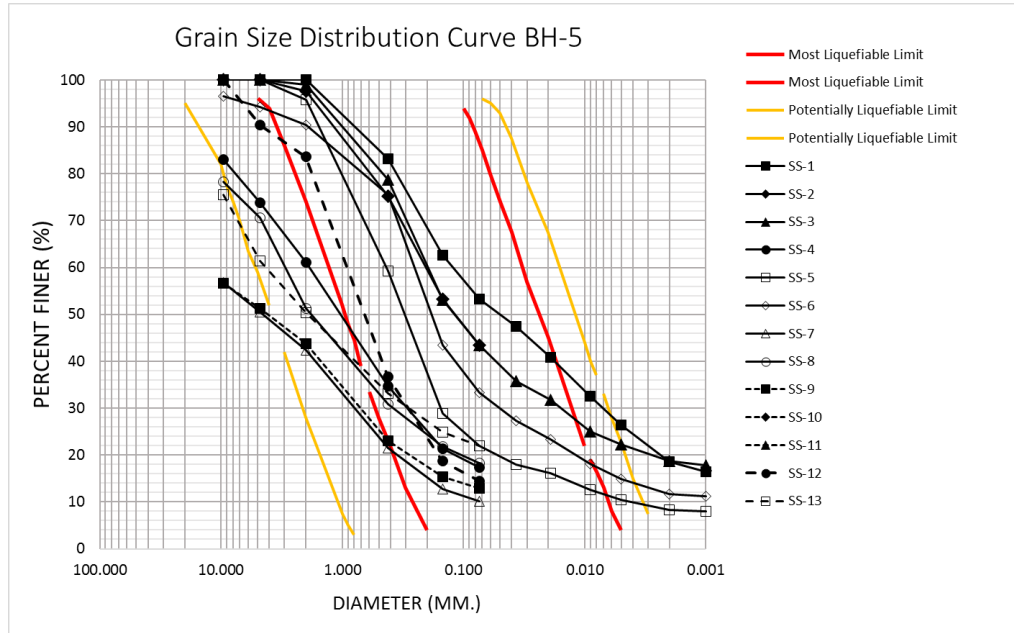


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-4

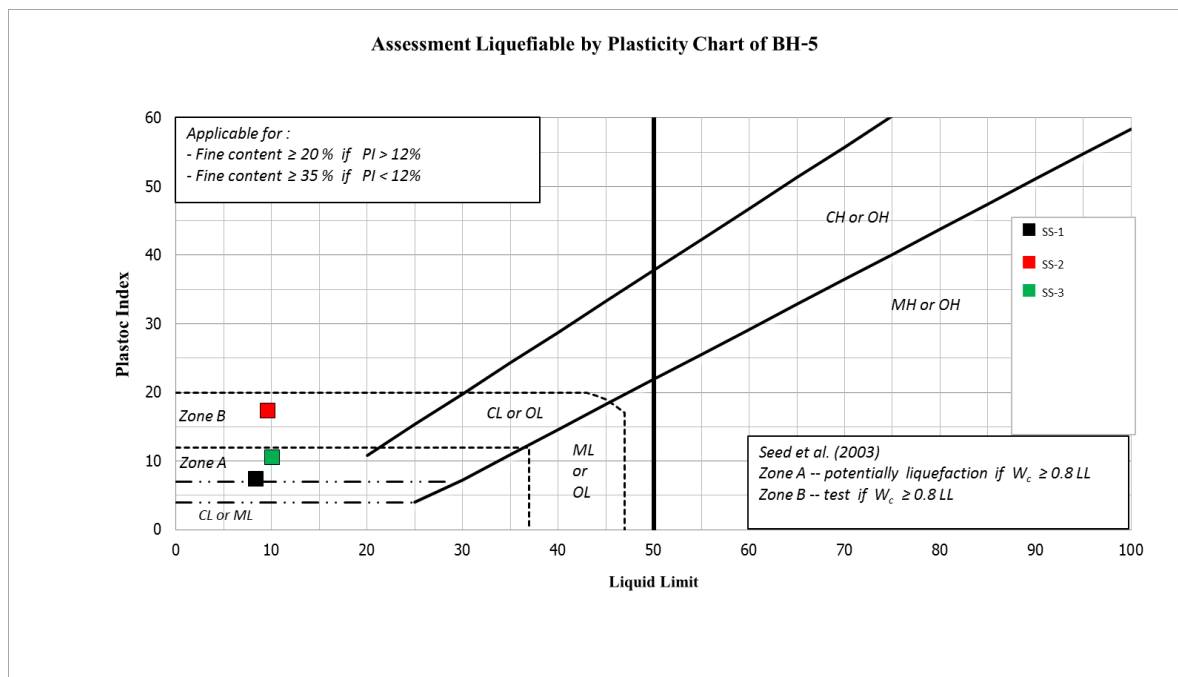


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-4

BH-5: โรงเรียนบ้านหนองเก้าห้อง

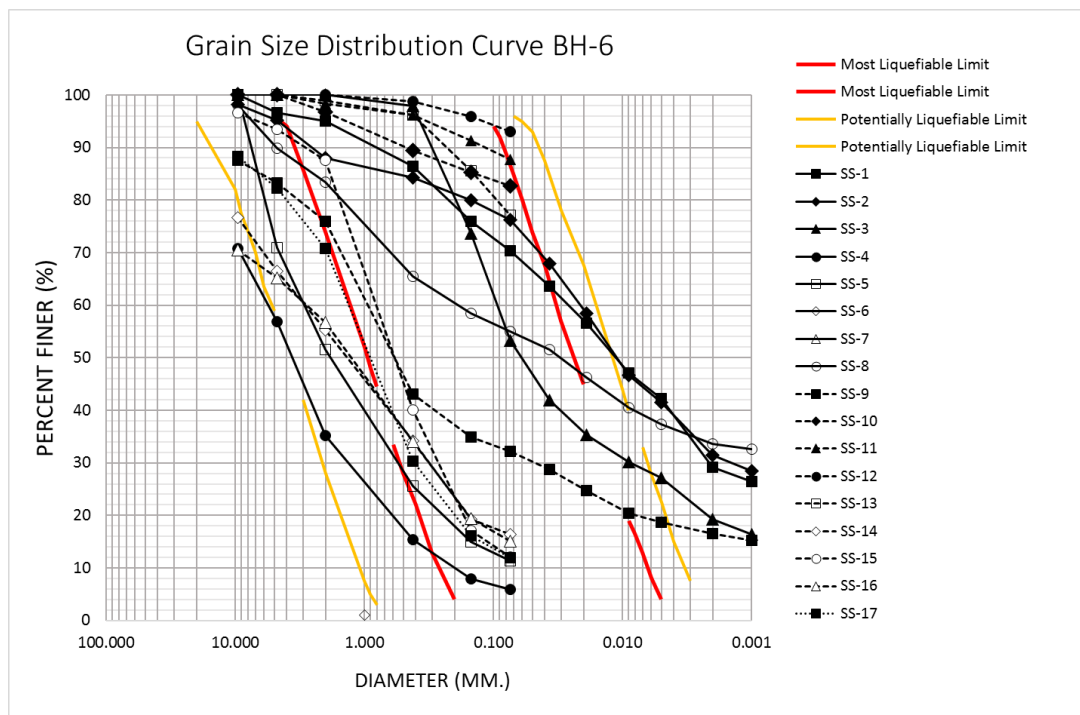


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-5

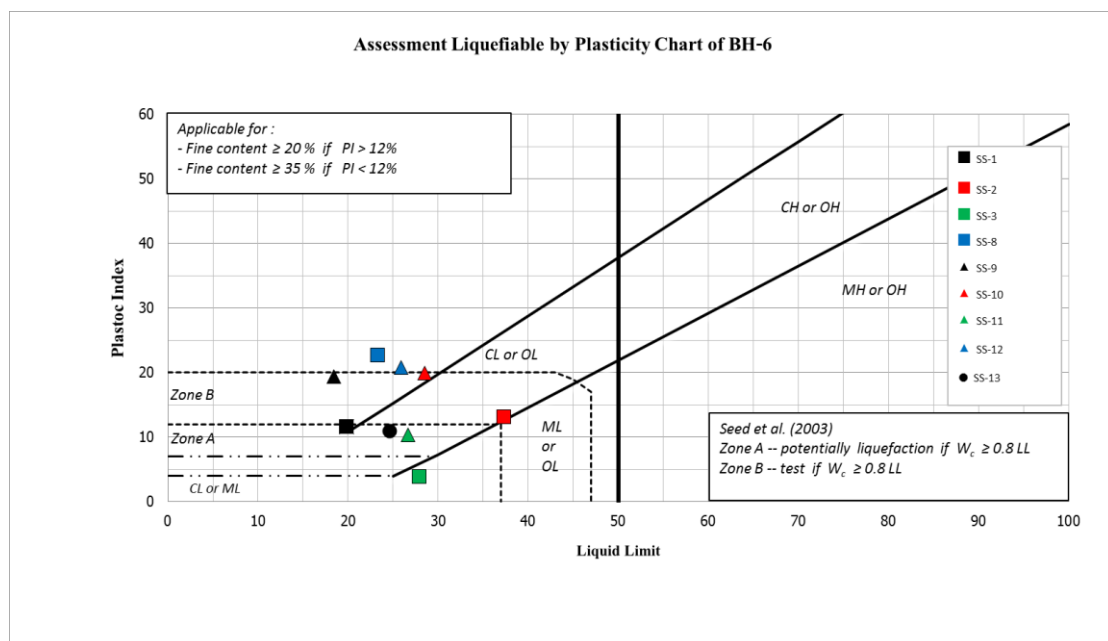


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-5

BH-6: บ้านสันกันแฮว

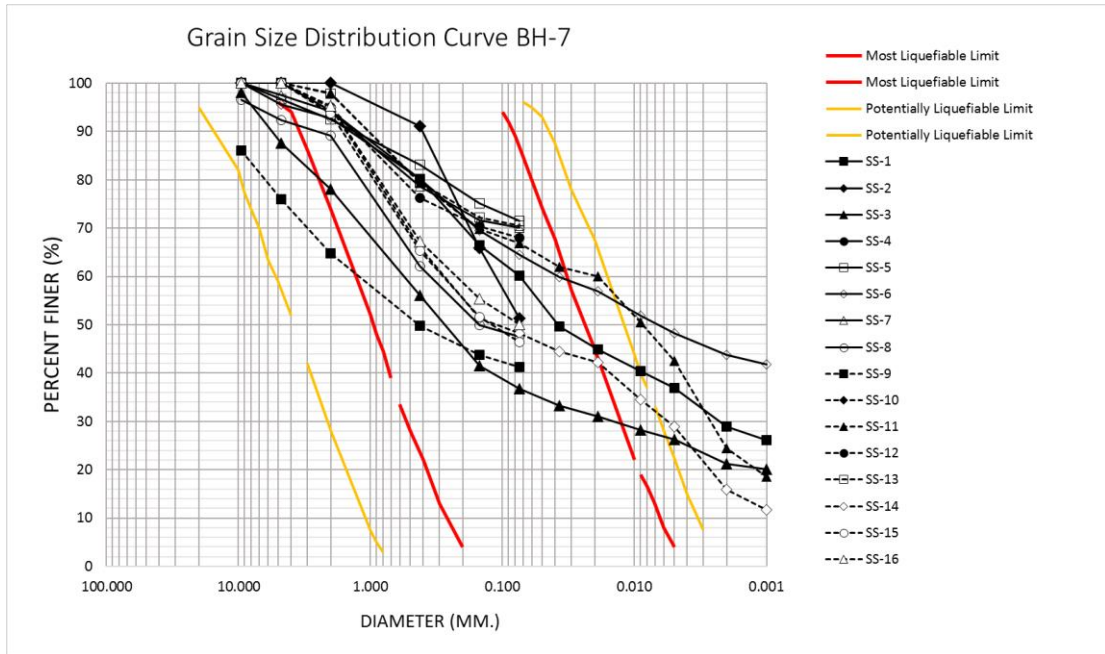


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-6

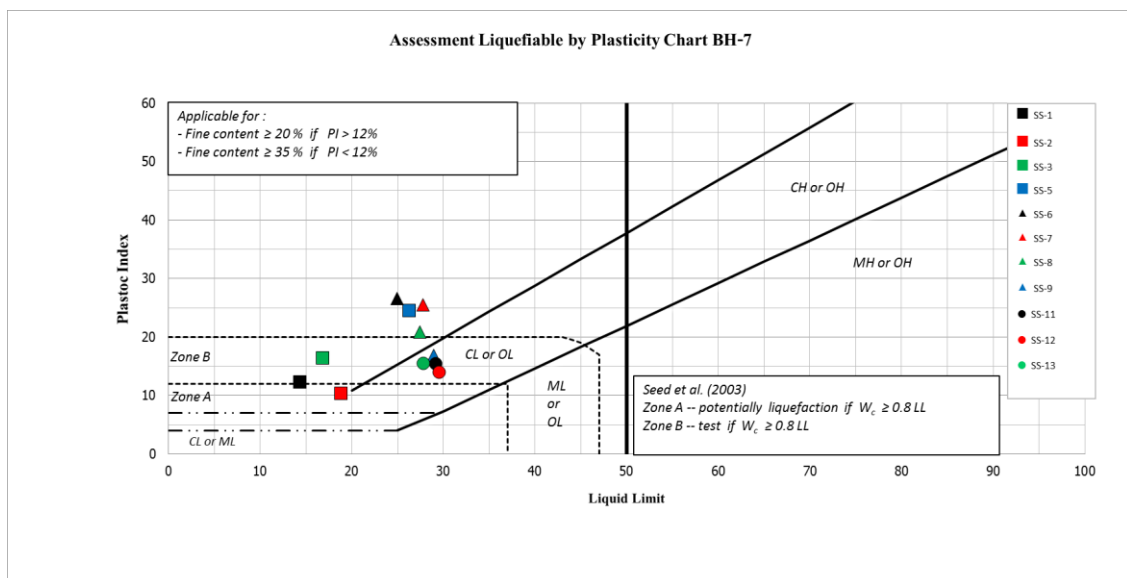


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-6

BH-7: วันสันตันม่วง

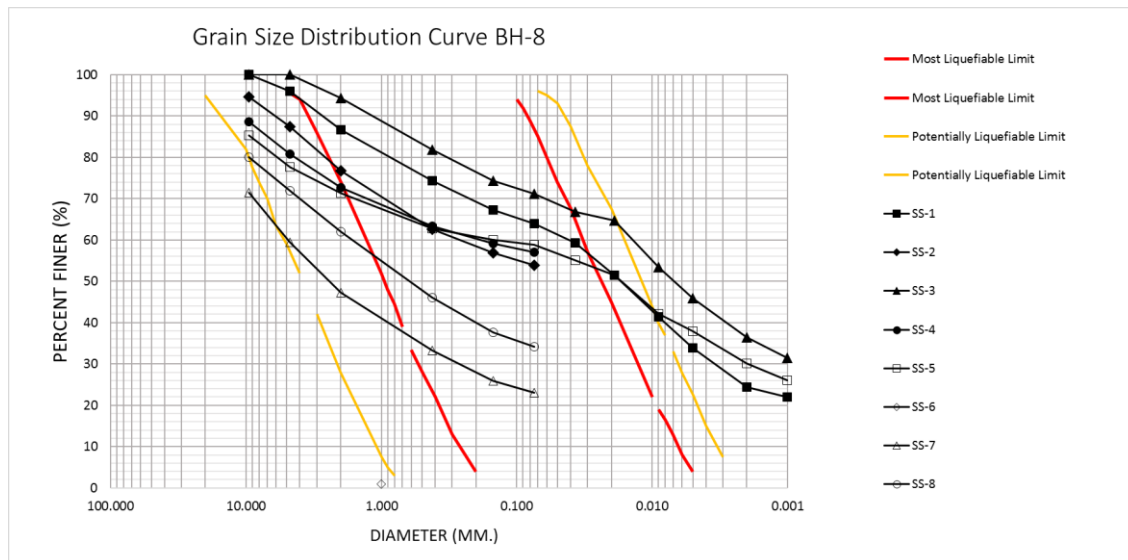


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-7

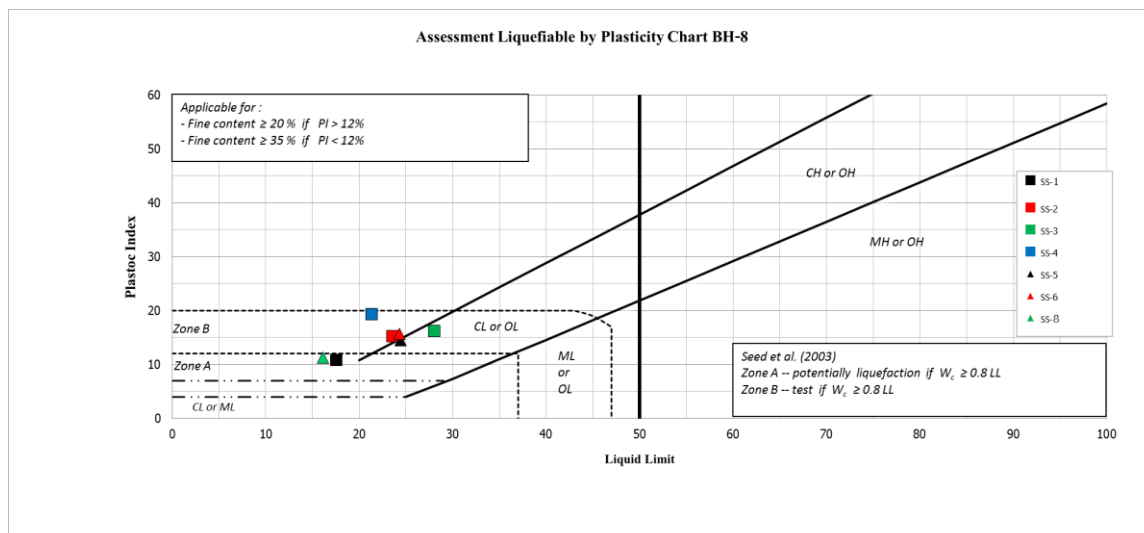


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-7

BH-8: เชื้อนห้วยแม่มอญ (ไหล่เขาด้านขวา)

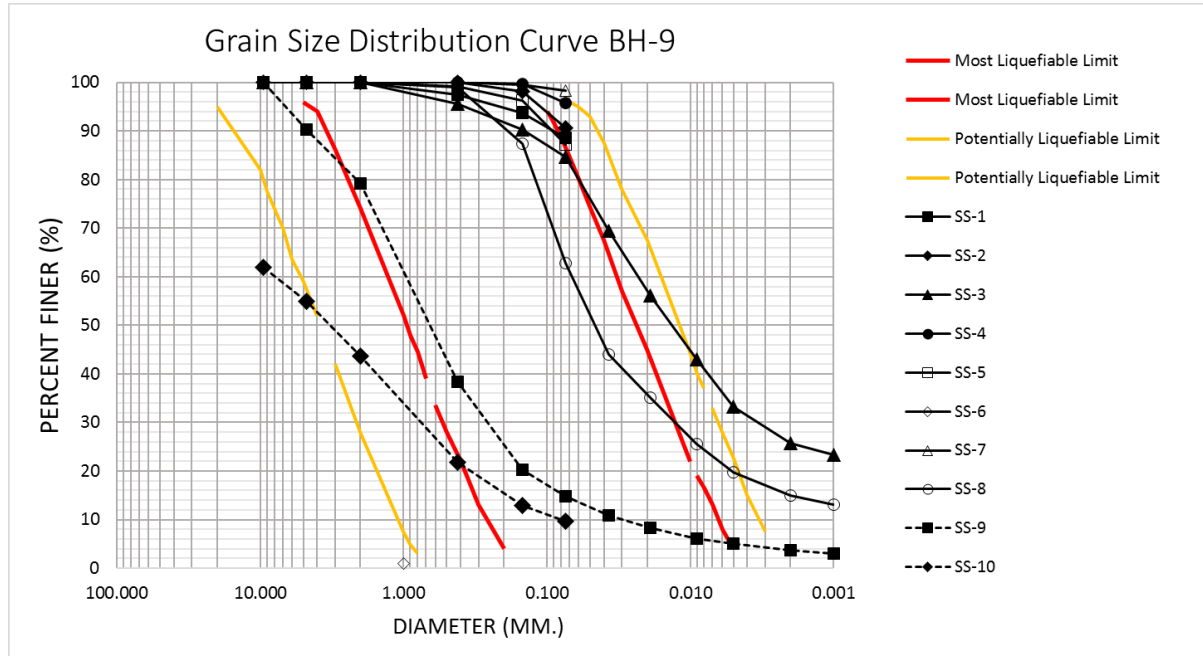


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-8

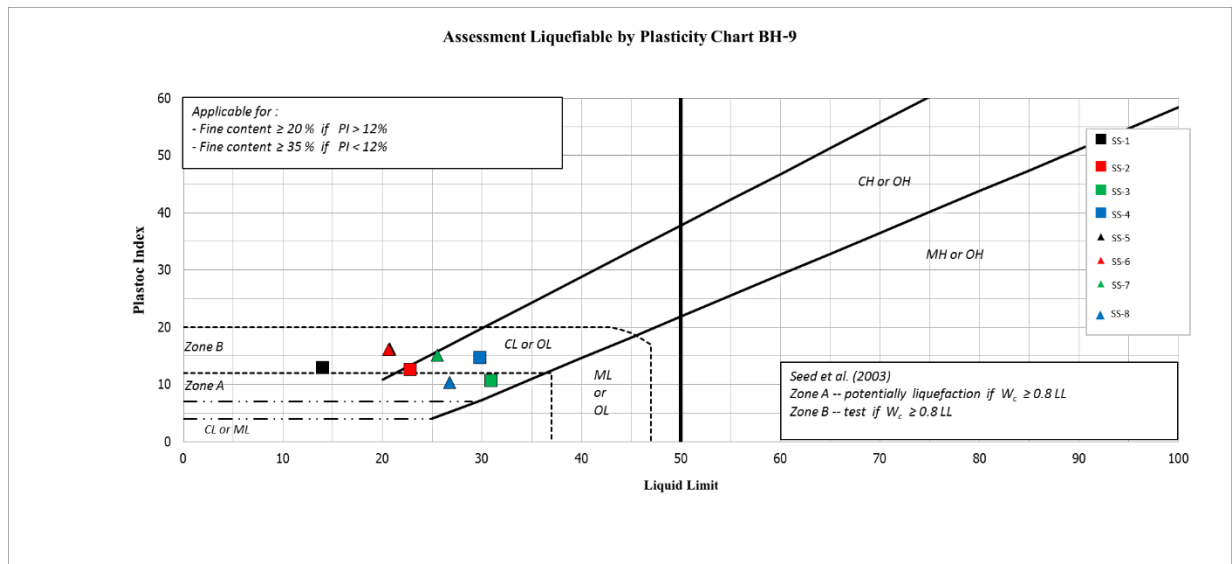


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-8

BH-9: ชุมชนโป่งปูเฟื่อง (หมู่บ้านหนองผำ)

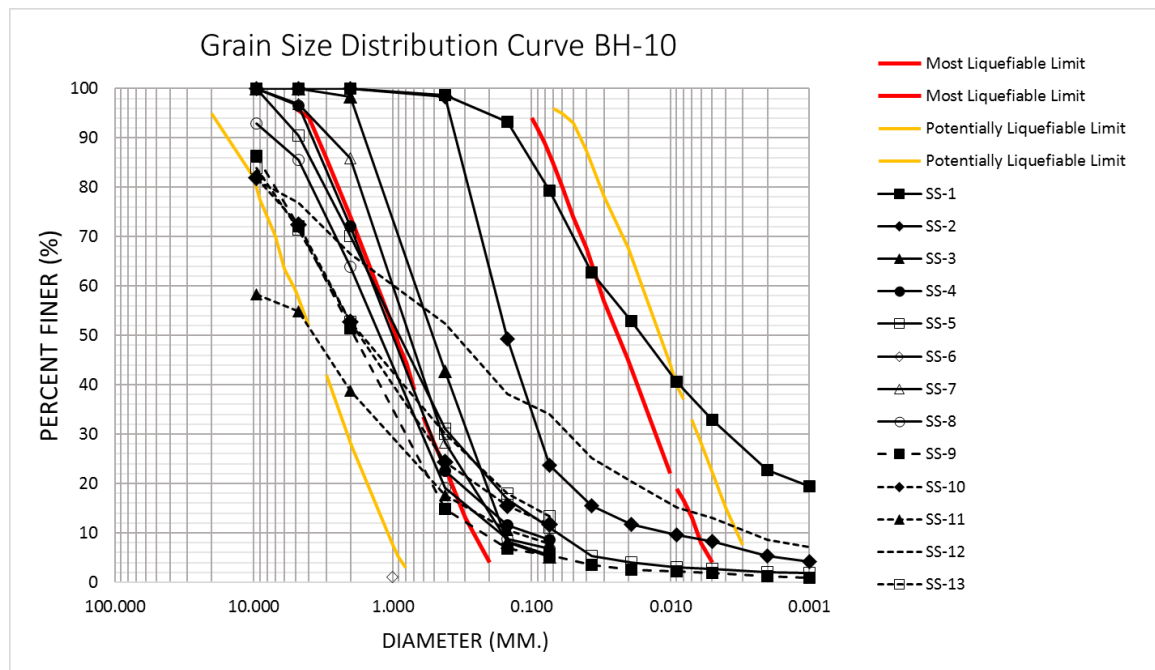


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-9

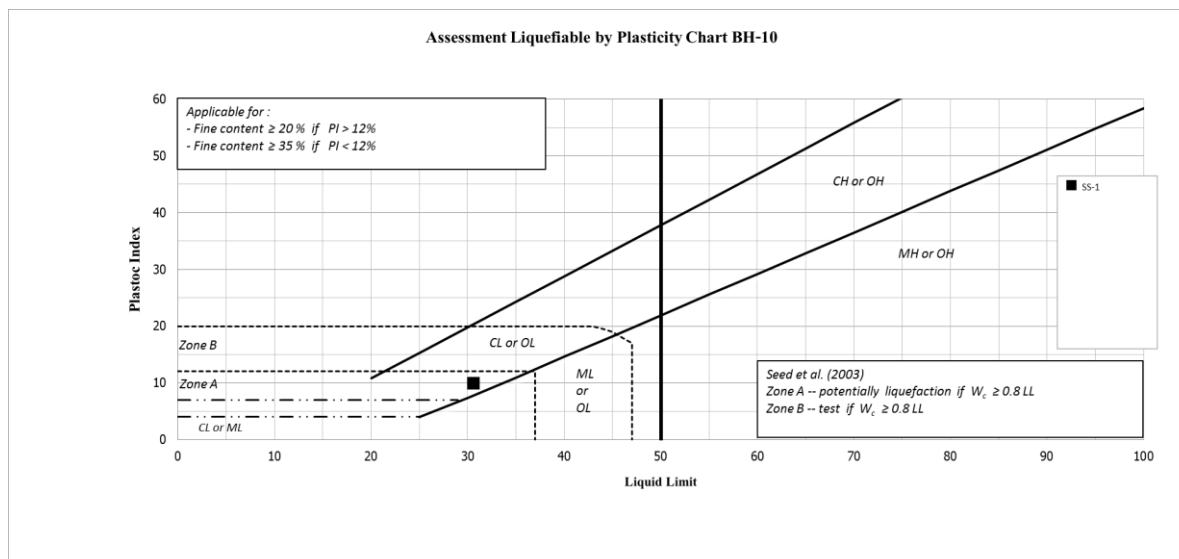


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-9

BH-10: โรงเรียนบ้านทรายขาว

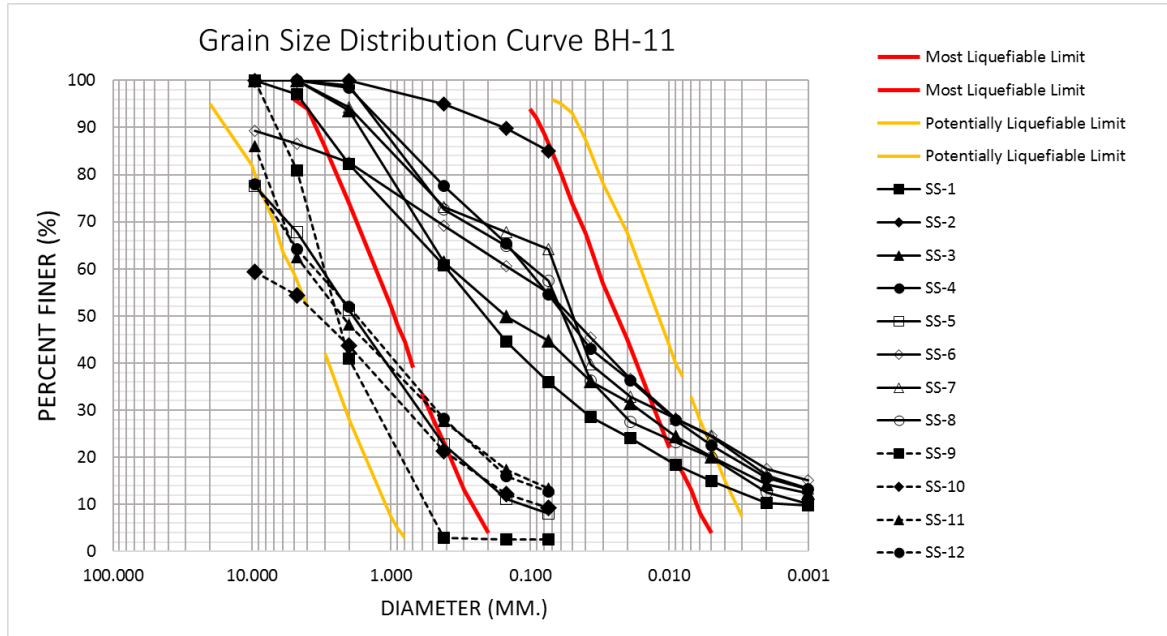


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-10

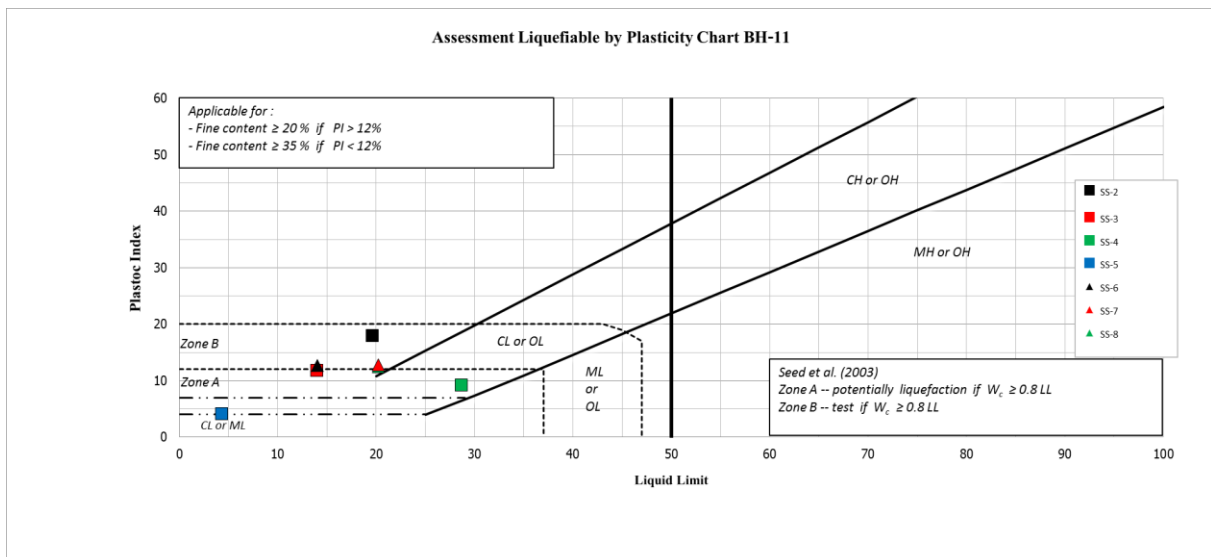


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-10

BH-11: วัดท่าวแก่นจันทร์

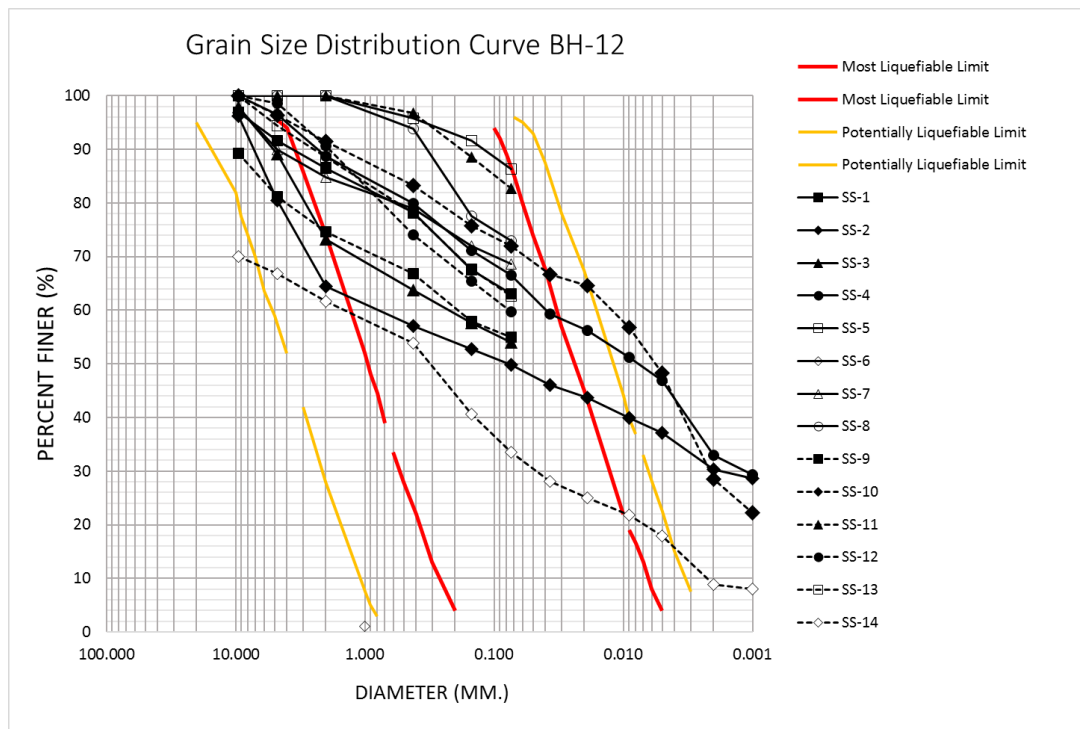


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-11

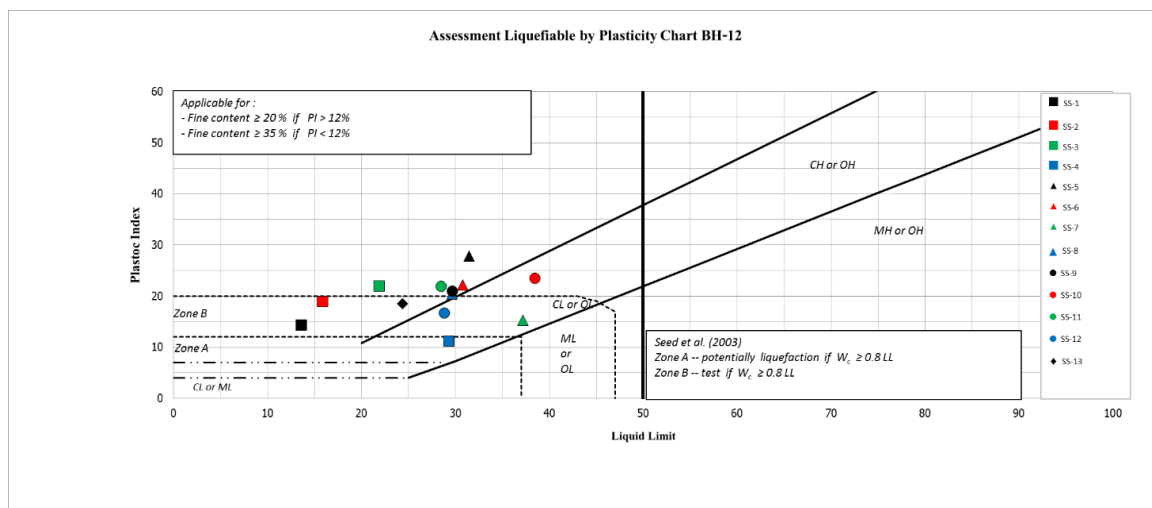


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-11

BH-12: โรงเรียนแม่ลาววิทยาคม

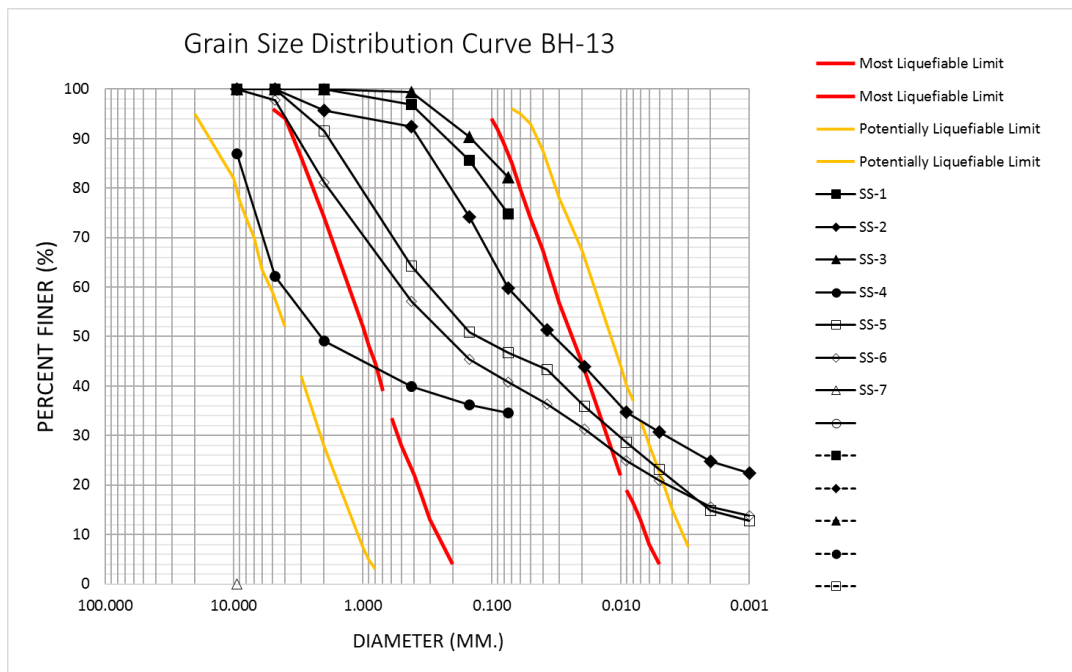


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-12

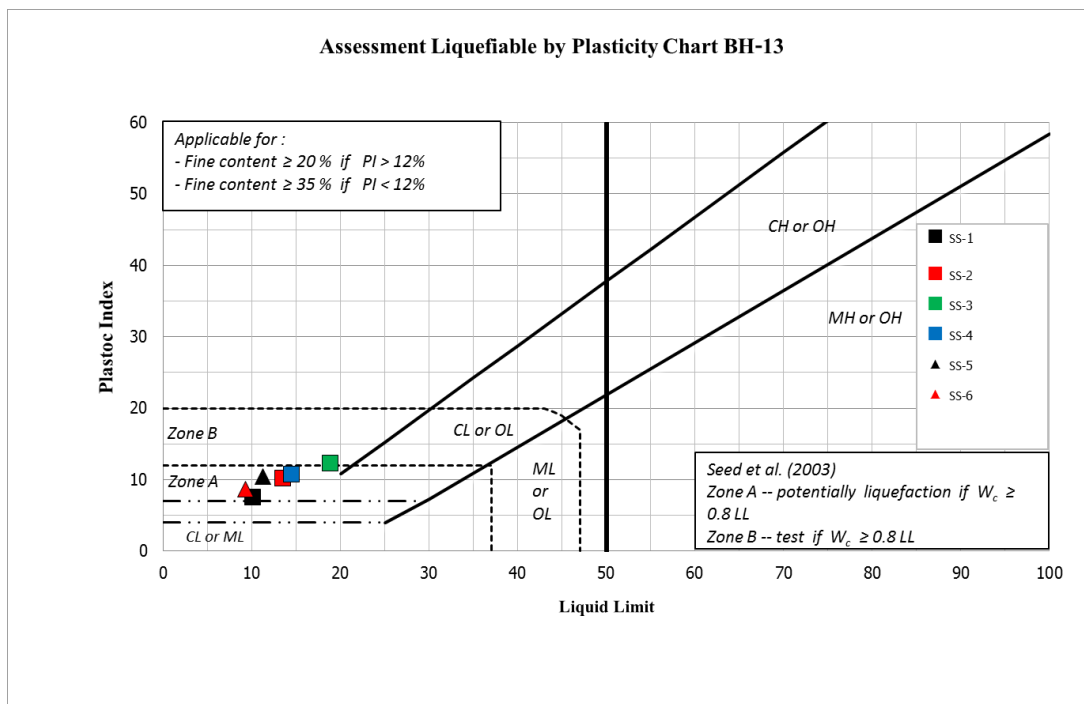


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-12

BH-13: ถนนเส้น 118

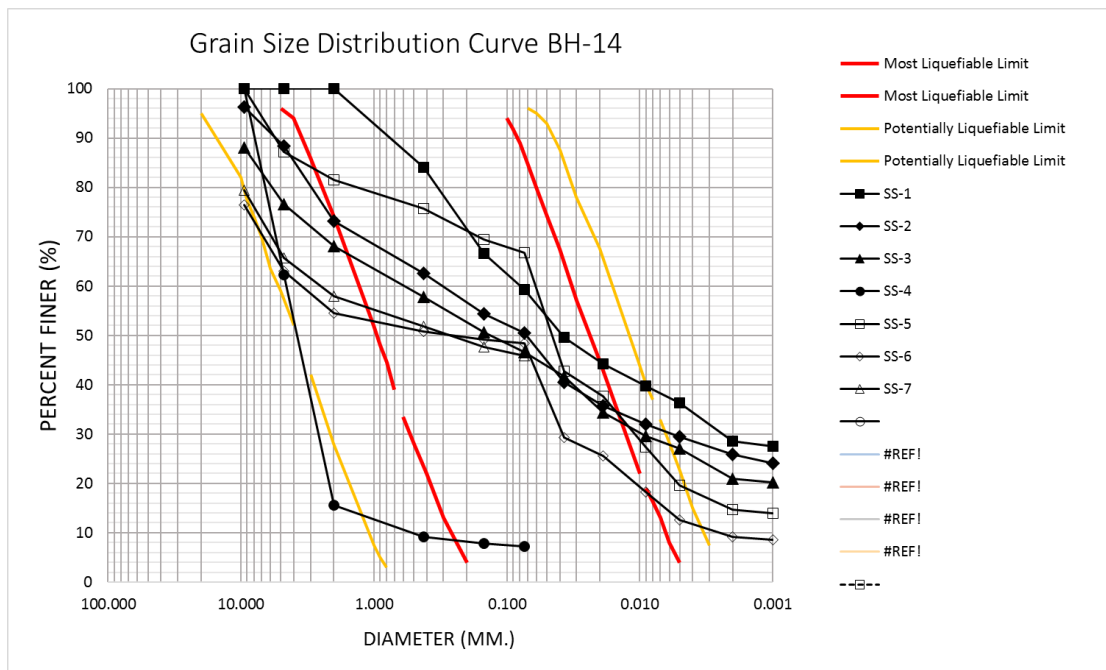


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-13

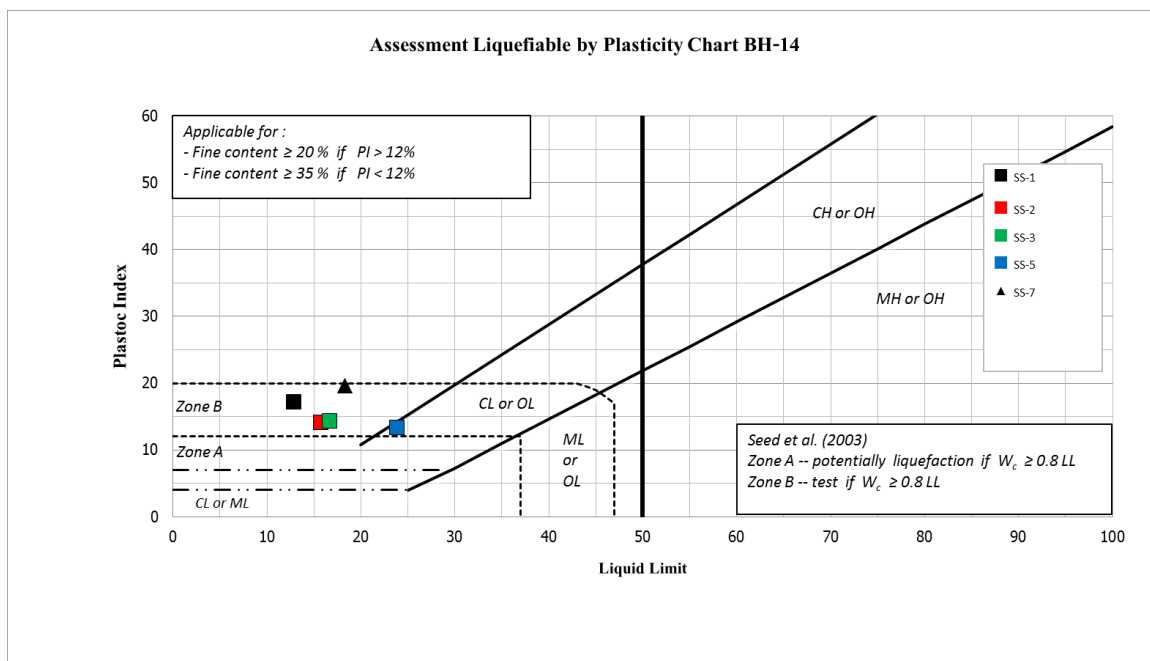


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-13

BH-14: โรงเรียนโป่งแพรววิทยา

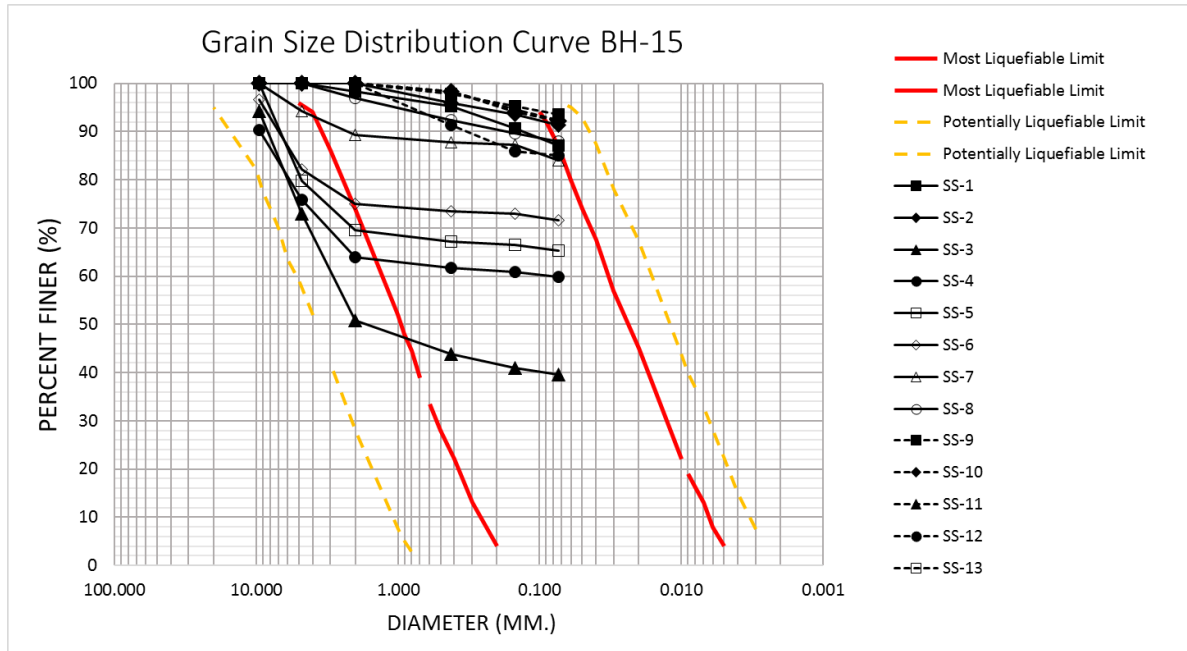


รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-14

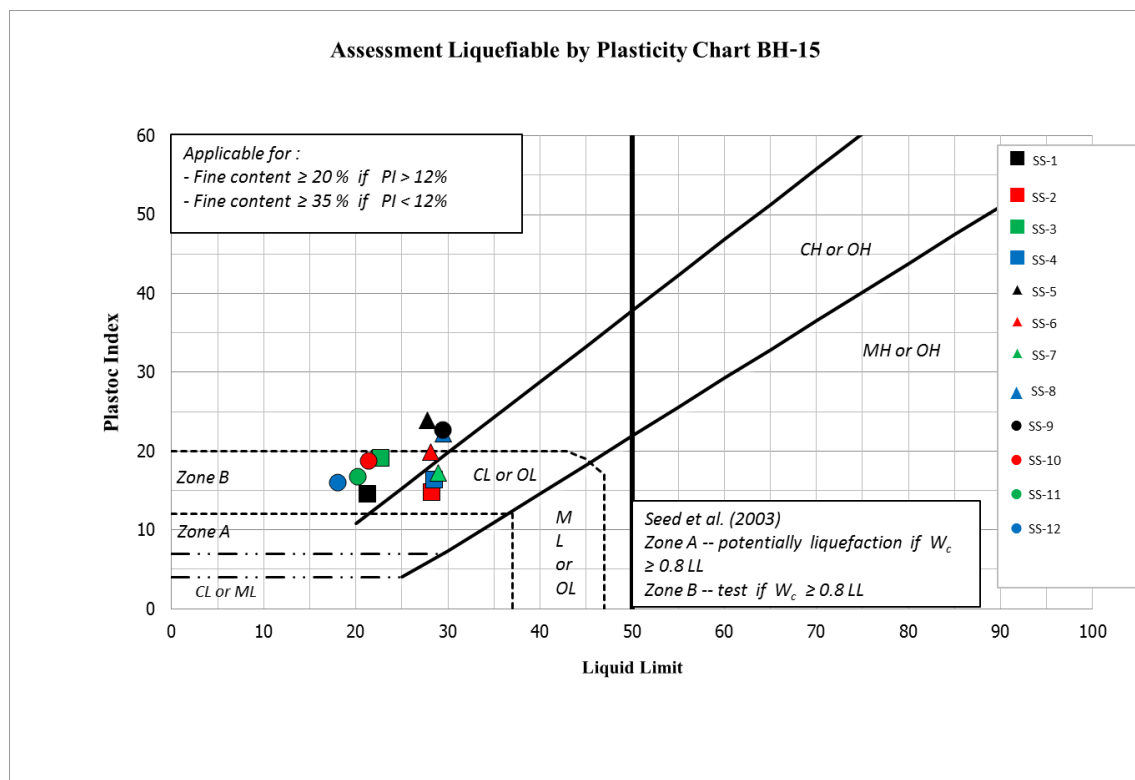


รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-14

BH-15: สหกรณ์เครดิตยูเนียน ต.โป่งแพร์



รูปแสดงช่วงและลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินของดิน BH-15



รูปแสดงการวิเคราะห์โดย Plasticity chart ของดิน BH-15

ตารางที่ ข-1 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-1

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	SM	Gap	26.33		30			Potentially Liquefiable
1-2	CH	-	70.94		10	24.29	52.46	Non Liquefiable
2-3	CH	-	93.78		14	23.70	51.12	Non Liquefiable
3-4	CH	-	95.55		9	25.09	53.66	Non Liquefiable
4-5	CH	-	95.15		11	23.66	50.43	Non Liquefiable
5-6	CL	-	90.58		6	16.90	38.57	Potentially Liquefiable
6-7	SM	Uniform	28.92		21			Liquefiable
7-8	SM	Uniform	23.47		24			Liquefiable
8-9	SM	Uniform	14.28		31			Liquefiable
9-10	SM	Gap	13.14		14			Potentially Liquefiable
10-11	SM	Uniform	22.19		49			Liquefiable
11-12	SM	Gap	16.18		51			Potentially Liquefiable
12-13	SM	Uniform	13.62		57			Potentially Liquefiable
13-14	SM	Uniform	15.41		68			Potentially Liquefiable

ตารางที่ ข-2 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-2.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	CL	-	64.52		21	18.89	41.50	Potentially Liquefiable
1-2	CL	Gap	50.44		16	26.57	40.67	Liquefiable
2-3	CL	-	85.60		8	20.41	44.92	Non Liquefiable
3-4	CL	-	81.21		12	28.92	48.75	Non Liquefiable
4-5	CL	-	72.16		7	23.44	49.46	Non Liquefiable
5-6	SM	-	35.91		9	17.08	43.56	Potentially Liquefiable
6-7	SM	Uniform	21.68		10			Liquefiable
7-8	(SM)	-			15			Non Liquefiable
8-9	SM	Uniform	22.65		22			Liquefiable
9-10	SM	Gap	13.73		35			Potentially Liquefiable
10-11	SM	Uniform	17.98		57			Liquefiable
11-12	SM	Uniform	14.87		39			Potentially Liquefiable
12-13	SM	Uniform	13.82		46			Potentially Liquefiable
13-14	SM	Uniform	20.99		30			Liquefiable
14-15	SM	Uniform	12.29		62			Potentially Liquefiable
15-16	SM	Gap	14.36		50/6"			Potentially Liquefiable
16-17	SM	Gap	12.12		85			Potentially Liquefiable

ตารางที่ ข-3 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-3.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	CL	-	72.94		10	17.99	44.03	Potentially Liquefiable
1-2	CL	-	78.54		10	19.89	45.36	Non Liquefiable
2-3	CH	-	81.13		6	24.70	51.22	Non Liquefiable
3-4	CH	-	82.67		5	25.28	52.67	Non Liquefiable
4-5	SM	Uniform	40.17		4			Liquefiable
5-6	SM	Uniform	18.05		18			Liquefiable
6-7	SM	Uniform	12.03		24			Liquefiable
7-8	SM	Uniform	23.80		28			Liquefiable
8-9	SM	Uniform	23.08		46			Liquefiable
9-10	SM	Gap	15.22		32			Potentially Liquefiable
10-11	SM	Uniform	15.27		57			Liquefiable
11-12	SM	Gap	12.86		84			Potentially Liquefiable
12-13	SM	Uniform	13.12		81			Potentially Liquefiable

ตารางที่ ข-4 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-4.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	SM	well	40.25	10.21	7			Non Liquefiable
1-2	ML	-	90.94		2	16.48	47.51	Potentially Liquefiable
2-3	ML	-	71.61		5	14.13	41.44	Potentially Liquefiable
3-4	ML	Gap	54.18	29.34	8	20.07	47.80	Non Liquefiable
4-5	GM	-			8			Non Liquefiable
5-6	GM	Gap	40.41		6	8.90	46.26	Potentially Liquefiable
6-7	ML	-	86.67		11	10.80	48.98	Potentially Liquefiable
7-8	ML	-	79.64		19	19.88	48.29	Potentially Liquefiable
8-9	ML	-	86.76		50/15 cm	21.24	49.96	Non Liquefiable
9-10	SM	Gap	23.29	5.39	50/14 cm			Non Liquefiable
10-11	GM	-	19.73		50/15 cm			Non Liquefiable

ตารางที่ ข-5 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-5.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	CL	Well	53.22	18.56	36	7.46	28.03	Potentially Liquefiable
1-2	SC	Well	43.38		40	17.31	41.48	Potentially Liquefiable
2-3	SC	Well	43.40	18.72	34	10.56	31.94	Potentially Liquefiable
3-4	SM	Uniform	17.28		10			Potentially Liquefiable
4-5	SM	Uniform	21.91	8.36	21			Liquefiable
5-6	SM	Gap	33.23	11.63	47			Liquefiable
6-7	GW-GM	Gap	10.07		57			Non Liquefiable
7-8	SM	Gap	18.23		89			Non Liquefiable
8-9	GM	Uniform	12.97		17			Potentially Liquefiable
9-10	SM	-			24			Non Liquefiable
10-11	(SM)	-			44			Non Liquefiable
11-12	SM	Uniform	14.47		54			Liquefiable
12-13	SM	Gap	21.89		50/15 cm			Non Liquefiable
13-14	SM				50/10 cm			Non Liquefiable

ตารางที่ ข-6 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-6.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	ML	Gap	70.30	29.17	13	11.71	36.74	Non Liquefiable
1-2	ML	Gap	76.19	31.51	5	13.12	40.98	Non Liquefiable
2-3	ML	Gap	53.25	19.28	5	3.91	31.31	Liquefiable
3-4	SW-SM	Gap	5.90		18			Potentially Liquefiable
4-5	SW-SM	Uniform	11.31		19			Potentially Liquefiable
5-6	SP-SM	Uniform	10.79		8			Liquefiable
6-7	CL	Gap			40			Liquefiable
7-8	CL	Well	54.93	33.57	13	22.72	46.08	Non Liquefiable
8-9	SC	Gap	32.18	16.47	11	19.36	39.91	Liquefiable
9-10	ML	-	82.64		17	19.93	48.63	Non Liquefiable
10-11	ML	-	87.72		22	10.36	45.29	Non Liquefiable
11-12	ML	-	93.04		28	20.80	49.79	Non Liquefiable
12-13	ML	-	77.15		26	10.96	37.73	Non Liquefiable
13-14	SM	Gap	16.36		41			Potentially Liquefiable
14-15	SM	Uniform	12.05		58			Liquefiable
15-16	SM	Gap	15.12		61			Potentially Liquefiable
16-17	SM	Uniform	11.99		66			Liquefiable

ตารางที่ ข-7 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-7.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	CL	Gap	60.11	28.98	14	12.28	27.19	Potentially Liquefiable
1-2	CL	-	51.38		15	10.34	28.36	Potentially Liquefiable
2-3	SC	Gap	36.79	21.27	4	16.37	34.76	Potentially Liquefiable
3-4	(SC)	-			6			Non Liquefiable
4-5	CL	-	71.47		8	24.54	45.82	Non Liquefiable
5-6	CH	Gap	64.51	43.79	17	26.56	50.19	Non Liquefiable
6-7	CH	-	70.15		23	25.47	51.81	Non Liquefiable
7-8	SM	-	47.59		39	20.88	49.34	Non Liquefiable
8-9	SM	-	41.21		55	16.89	46.24	Potentially Liquefiable
9-10	(ML)	-			11			Non Liquefiable
10-11	ML	Gap	66.81	24.41	25	15.43	45.62	Potentially Liquefiable
11-12	ML	-	68.01		21	14.06	43.56	Potentially Liquefiable
12-13	ML	-	70.56		46	15.54	43.43	Potentially Liquefiable
13-14	SM	Gap	48.30	15.92	51			Non Liquefiable
14-15	SM	-	46.45		53			Non Liquefiable
15-16	SM	-	50.05		52			Non Liquefiable

ตารางที่ ข-8 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-8.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	ML	Gap	64.00	24.44	15	10.84	34.89	Potentially Liquefiable
1-2	ML	Gap	53.91		10	15.22	44.14	Potentially Liquefiable
2-3	ML	-	71.24	36.43	24	16.20	42.50	Potentially Liquefiable
3-4	CL	-	57.02		24	19.30	43.03	Potentially Liquefiable
4-5	CL	Gap	58.83	30.11	11	14.54	38.51	Potentially Liquefiable
5-6	GM	-	34.70		17	15.70	41.63	Potentially Liquefiable
6-7	GM	-	22.98		83/27 cm			-
7-8	SC	-	34.23		50/5 cm	11.22	33.68	Potentially Liquefiable

ตารางที่ ข-9 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-9.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	CL	-	88.53		22	12.91	35.63	Potentially Liquefiable
1-2	CL	-	90.68		10	12.62	35.42	Potentially Liquefiable
2-3	CL	-	84.70	25.64	10	10.63	34.21	Potentially Liquefiable
3-4	CL	-	95.72		23	14.71	37.81	Potentially Liquefiable
4-5	CL	-	87.20		40	16.19	36.95	Potentially Liquefiable
5-6	CL	-	89.84		30	16.04	35.82	Potentially Liquefiable
6-7	CL	-	98.39		22	15.10	37.75	Potentially Liquefiable
7-8	CL	-	62.79	15.02	24	10.40	32.19	Potentially Liquefiable
8-9	SM	Uniform	14.73	3.69	58		NP	Liquefiable
9-10	SW-SM	Gap	9.63		32		NP	Potentially Liquefiable
10-11	Rock				50/0 cm			

ตารางที่ ข-10 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-10.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	CL	-	79.27	22.66	7	9.98	30.59	Potentially Liquefiable
1-2	SM	Uniform grade	23.70	5.24	9			Liquefiable
2-3	SP-SM	Uniform grade	5.20	-	22			Liquefiable
3-4	SW-SM	Well grade	8.56	-	17			Potentially Liquefiable
4-5	SW-SM	Well grade	11.00	2.07	18			Potentially Liquefiable
5-6	SP	-	-	-	20			Liquefiable
6-7	SP	Uniform grade	5.50	-	12			Liquefiable
7-8	SW-SM	Uniform grade	6.80	-	12			Liquefiable
8-9	SW-SM	Well grade	5.45	1.20	13			Potentially Liquefiable
9-10	SW-SM	Uniform grade	11.71	-	36			Potentially Liquefiable
10-11	SW-SM	-	7.76	-	57			Non Liquefiable
11-12	SP	Well grade	34.05	8.61	100			Non Liquefiable
12-13	SP	-	13.41	-	100			Non Liquefiable

ตารางที่ ข-11 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-11.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	SM	Well	35.92	10.27	27			Non Liquefiable
1-2	CL	-	84.95		26	17.98	40.15	Potentially Liquefiable
2-3	SC	Gap	44.76	14.25	6	11.85	26.56	Potentially Liquefiable
3-4	SC	well	54.45	15.54	2	9.25	29.78	Potentially Liquefiable
4-5	SW-SM	-	8.00		3	4.15	21.15	Potentially Liquefiable
5-6	CL	Well	54.94	17.50	3	12.64	29.41	Potentially Liquefiable
6-7	CL	Gap	64.10	16.21	24	12.43	31.06	Potentially Liquefiable
7-8	CL	Gap	57.41	12.60	23	12.76	32.62	Potentially Liquefiable
8-9	SP	Uniform	2.49		22			Potentially Liquefiable
9-10	SM	Gap	9.28		52			Potentially Liquefiable
10-11	SM	Uniform	13.36		55			Potentially Liquefiable
11-12	SM	Uniform	12.64		54			Potentially Liquefiable

ตารางที่ ข-12 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-12.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	CL	-	63.05		25	14.34	33.64	Potentially Liquefiable
1-2	CL	Gap	49.83	30.38	33	18.95	43.77	Potentially Liquefiable
2-3	CL	-	54.06		22	21.95	48.57	Non Liquefiable
3-4	CL	Gap	66.53	33.01	54	11.25	31.33	Potentially Liquefiable
4-5	MH	-	86.33		39	27.85	59.16	Non Liquefiable
5-6	MH	-	82.07		25	22.21	55.81	Non Liquefiable
6-7	CL	-	68.61		50/15 cm	15.30	40.68	Potentially Liquefiable
7-8	CL	-	72.95		16	20.41	47.71	Non Liquefiable
8-9	CL	-	54.95		53	21.04	47.99	Non Liquefiable
9-10	MH	Gap	71.98	28.57	14	23.58	62.56	Non Liquefiable
10-11	MH	-	82.75		35	21.93	51.13	Non Liquefiable
11-12	ML	-	59.76		60	16.74	48.77	Potentially Liquefiable

ตารางที่ ข-13 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-13.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	CL	-	74.85		11	7.55	25.04	Potentially Liquefiable
1-2	CL	Gap	59.84	24.82	12	10.19	26.49	Potentially Liquefiable
2-3	CL	-	82.16		17	12.35	27.85	Potentially Liquefiable
3-4	GC	Gap	34.62		63	10.73	29.60	Potentially Liquefiable
4-5	SC	Gap	46.70	14.77	50/15 cm	10.48	24.85	Potentially Liquefiable
5-6	SC	Well	40.75	15.52	50/15 cm	8.66	23.07	Potentially Liquefiable
6-7	Rock				50/0 cm			

ตารางที่ ข-14 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-14.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	ML	Gap	59.31	28.51	16	17.23	36.89	Potentially Liquefiable
1-2	SM	Gap	50.56	25.81	26	14.14	38.12	Potentially Liquefiable
2-3	SM	Gap	46.61	20.90	23	14.37	39.86	Potentially Liquefiable
3-4	SP-SM	Gap	7.27		54			Potentially Liquefiable
4-5	ML	Gap	66.76	14.74	50/15 cm	13.36	41.46	Potentially Liquefiable
5-6	GM	Gap	48.40	9.10	50/15 cm			-
6-7	GM	Gap	45.86		50/15 cm	19.60	48.52	Potentially Liquefiable

ตารางที่ ข-15 แสดงสรุปผลการประเมินการเกิด Liquefaction ของ BH-15.

Depth (m)	USCS	Distribution of soil	FC (%)	% Clay	Corrected SPT	Plasticity Index (PI)	Liquid Limit (LL)	Liquefaction Susceptibility
0-1	ML	Gap	87.05	-	22	14.59	41.43	Potentially Liquefiable
1-2	ML	Gap	91.39	-	18	14.74	45.18	Potentially Liquefiable
2-3	SM	Gap	39.58	-	19	19.13	47.59	Potentially Liquefiable
3-4	MH	Gap	59.84	-	13	16.41	53.20	Potentially Liquefiable
4-5	MH	Gap	65.37	-	16	23.91	54.31	-
5-6	MH	Gap	71.67	-	12	19.83	50.84	Potentially Liquefiable
6-7	CL	Gap	83.98	-	19	17.24	42.89	Potentially Liquefiable
7-8	CL	Gap	87.90	-	24	22.15	49.05	-
8-9	CL	Gap	93.53	-	29	22.73	49.51	-
9-10	ML	Gap	92.23	-	70	18.81	46.16	Potentially Liquefiable
10-11	ML	Gap	92.42	-	50/15 cm	16.83	44.42	Potentially Liquefiable
11-12	ML	Gap	84.96	-	50/13 cm	16.10	41.88	Potentially Liquefiable

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI)

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-1

Input parameters:										Output parameters:																							
Peak ground accel (g) = 0.2277					Name of boring log = BH-1					Peak ground accel (g) = 0.2277																							
Earthquake magnitude, M = 6.3					Date of drilling = 2/1/2016					Earthquake magnitude, M = 6.3																							
Water table depth (m) = 0					Location = Wat Rong Khun					Water table depth (m) = 0																							
Average γ above water table (kN/m ³) = 0										Average γ above water table (kN/m ³) = 0																							
Average γ below water table (kN/m ³) = 18										Average γ below water table (kN/m ³) = 18																							
Borehole diameter (mm) = 100										Borehole diameter (mm) = 100																							
Requires correction for sampler liners (YES/NO): NO										Requires correction for sampler liners (YES/NO): NO																							
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5 m (for the above ground extension).																																	
SPT sample number	Depth (m)	Measure dN	Soil type (USCS)	Flag "Clay" "Unsaturated" "Unreliable"	Fines content (%)	Energy ratio, ER (%)	C _e	C _b	C _s	N ₆₀	σ'_{vc} (kPa)	C _{th}	(N ₁) ₆₀	ΔN for fines content	Stress reduct. coeff., C_{σ}	CSR for Sand	MSF for Sand	K _c for sand	CRR for M=7.5 & σ'_{vc} = 1 atm	Factor of safety	Limiting strain γ_{lim}	Parameter σ'_{vc} er F_{cr}	Maximum shear strain γ_{max}	ΔH_i (m)	ΔLDI_i (m)	Vertical reconst.	ΔS_i (m)	wi	LPI				
1	1.225	30	SM		26.33	75	1.25	1	0.75	1	28.1	22	10	1.70	47.8	5.2	52.98	0.99	0.323	1.37	1.10	2.000	2	2	0.000	-1.833	0.000	0.000	0.000	9.39	0.00		
2	2.225	10	CH	Clay	70.94	75	1.25	1	0.8	1	100	40	18	1.70	n.a.	n.a.	n.a.	0.98	0.318	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.89	0.00		
3	3.225	14	CH	Clay	93.78	75	1.25	1	0.85	1	14.9	58	26	1.70	n.a.	n.a.	n.a.	0.96	0.312	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.39	0.00		
4	4.225	9	CH	Clay	95.55	75	1.25	1	0.85	1	9.6	76	35	1.70	n.a.	n.a.	n.a.	0.94	0.306	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.89	0.00		
5	5.225	11	CH	Clay	95.15	75	1.25	1	0.95	1	13.1	94	43	1.54	n.a.	n.a.	n.a.	0.92	0.300	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.39	0.00		
6	6.225	6	CL	Clay	90.58	75	1.25	1	0.95	1	7.1	112	51	1.49	n.a.	n.a.	n.a.	0.90	0.293	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.89	0.00		
7	7.225	21	SM		28.92	75	1.25	1	0.95	1	24.9	130	59	1.24	30.9	5.3	36.21	0.88	0.286	1.37	1.10	1.446	2.000	2.00	0.018	-0.523	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.39	0.00
8	8.225	24	SM		23.47	75	1.25	1	0.95	1	28.5	148	67	1.16	33.2	4.9	38.10	0.86	0.279	1.37	1.10	2.000	2.000	2.00	0.013	-0.662	0.000	1	0.000	0.000	0.000	5.89	0.00
9	9.225	31	SM		14.28	75	1.25	1	1	1	38.8	166	76	1.09	42.3	3.0	45.36	0.84	0.272	1.37	1.09	2.000	2.000	2.00	0.002	-1.218	0.000	1	0.000	0.000	0.000	5.39	0.00
10	10.225	14	SM		13.14	75	1.25	1	1	1	17.5	184	84	1.09	19.1	2.6	21.65	0.81	0.264	1.37	1.03	0.228	0.321	1.21	0.132	0.428	0.020	1	0.020	0.005	0.005	4.89	0.00
11	11.223	49	SM		22.19	75	1.25	1	1	1	63.8	202	92	1.08	62.8	4.8	67.58	0.79	0.257	1.37	1.03	2.000	2.000	2.00	0.000	-3.081	0.000	1	0.000	0.000	0.000	4.39	0.00
12	12.23	51	SM		16.18	75	1.25	1	1	1	61.3	220	100	1.00	63.9	3.6	67.53	0.77	0.249	1.37	1.00	2.000	2.000	2.00	0.000	-3.076	0.000	1	0.000	0.000	0.000	3.89	0.00
13	13.23	57	SM		13.62	75	1.25	1	1	1	71.3	238	108	0.98	70.0	2.8	72.71	0.74	0.242	1.37	0.98	2.000	2.000	2.00	0.000	-3.537	0.000	1	0.000	0.000	0.000	3.39	0.00
14	14.23	68	SM		15.41	75	1.25	1	1	1	85.0	256	117	0.96	81.9	3.4	85.26	0.72	0.235	1.37	0.96	2.000	2.000	2.00	0.000	-4.681	0.000	1	0.000	0.000	0.000	2.89	0.00
														LDI =		0.020		S=		0.005		LPI=		0.00									

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-2

Input parameters										Name of boring log																								
Peak ground accel (g) =		0.2282								BH-2																								
Earthquake magnitude, M =		6.3								2/1/2016																								
Water table depth (m) =		0								Wat Rong Khun																								
Average γ above water table (kN/m ³) =		0																																
Average γ below water table (kN/m ³) =		18																																
Borehole diameter (mm) =		100																																
Requires correction for sampler liners (YES/NO) :NO																																		
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5m (for the above ground extension).																																		
SPT sample number	Depth (m)	Measure	Soil type (USCS)	Flag "Clay" "Unsaturated" "Unreliable"	Fines content t (%)	Energy ratio, ER (%)	C _e	C _b	C _s	N ₆₀	σ'_{vc} (kPa)	σ_{vc} (kPa)	C _u	(N ₁) ₆₀	AN for fines content	(N ₁) _{60cs}	Stress reduct. Coeff, C _r	CSR	MSF for Sand	K _s for sand	CRR for M=7.5 & $\sigma_{vc}=1$ atm	CRR	Factor of safety	Limiting shear strain γ_{lim}	Parameter for F_{eq}	Maximum shear strain γ_{max}	ΔH_i (m)	ΔLDI_i (m)	Vertical reconsol. Strain ϵ_{vz}	ΔS_i (m)	w _i	LPI		
1	1.225	21	CL	Clay	64.52	75	1.25	1	0.75	1	19.7	22	10	170	n.a.	n.a.	0.99	0.323	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.225	0.000	0.000	0.000	9.39	0.00
2	2.225	16	CL	Clay	50.44	75	1.25	1	0.8	1	16.0	40	18	170	n.a.	n.a.	0.98	0.318	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	8.89	0.00
3	3.225	8	CL	Clay	85.60	75	1.25	1	0.85	1	8.5	58	26	170	n.a.	n.a.	0.96	0.313	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	8.39	0.00
4	4.225	12	CL	Clay	81.21	75	1.25	1	0.85	1	12.8	76	35	170	n.a.	n.a.	0.94	0.307	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.89	0.00
5	5.225	7	CL	Clay	72.16	75	1.25	1	0.95	1	8.3	94	43	162	n.a.	n.a.	0.92	0.301	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.39	0.00
6	6.225	9	SM		35.91	75	1.25	1	0.95	1	10.7	112	51	144	5.5	20.91	0.90	0.294	1.37	1.09	0.217	0.326	1.11	0.144	0.469	0.026	1	0.026	0.007	0.007	6.89	0.00		
7	7.225	10	SM		21.68	75	1.25	1	0.95	1	11.9	130	59	132	15.7	4.7	20.40	0.88	0.287	1.37	1.07	0.211	0.310	1.08	0.152	0.496	0.028	1	0.028	0.008	0.008	6.39	0.00	
8	8.225	Not Recovery																																
9	9.225	22	SM		22.65	75	1.25	1	1	1	27.5	166	76	112	30.7	4.8	35.56	0.84	0.272	1.37	1.08	1.250	1.847	2.00	0.020	-0.476	0.000	1	0.000	0.000	0.000	5.39	0.00	
10	10.23	35	SM		13.73	75	1.25	1	1	1	43.8	184	84	105	46.1	2.8	48.87	0.81	0.265	1.37	1.06	2.000	2.000	2.00	0.001	-1.498	0.000	1	0.000	0.000	0.000	4.89	0.00	
11	11.23	57	SM		17.98	75	1.25	1	1	1	71.3	202	92	103	73.0	4.1	77.12	0.79	0.257	1.37	1.03	2.000	2.000	2.00	0.000	-3.934	0.000	1	0.000	0.000	0.000	4.39	0.00	
12	12.23	39	SM		14.87	75	1.25	1	1	1	48.8	220	100	100	48.9	3.2	52.08	0.77	0.250	1.37	1.00	2.000	2.000	2.00	0.000	-1.759	0.000	1	0.000	0.000	0.000	3.89	0.00	
13	13.23	46	SM		13.82	75	1.25	1	1	1	57.5	238	108	98	56.5	2.8	59.29	0.74	0.243	1.37	0.98	2.000	2.000	2.00	0.000	-2.363	0.000	1	0.000	0.000	0.000	3.39	0.00	
14	14.23	30	SM		20.99	75	1.25	1	1	1	37.5	256	117	96	35.9	4.6	40.49	0.72	0.235	1.37	0.96	2.000	2.000	2.00	0.008	-0.841	0.000	1	0.000	0.000	0.000	2.89	0.00	
15	15.23	62	SM		12.29	75	1.25	1	1	1	77.5	274	125	95	73.3	2.2	75.52	0.70	0.228	1.37	0.94	2.000	2.000	2.00	0.000	-3.790	0.000	1	0.000	0.000	0.000	2.39	0.00	
16	16.08	100	SM		14.36	75	1.25	1	1	1	125.0	289	132	93	116.6	3.0	119.62	0.68	0.222	1.37	0.92	2.000	2.000	2.00	0.000	-7.972	0.000	0.85	0.000	0.000	0.000	1.96	0.00	
17	17.23	85	SM		12.12	75	1.25	1	1	1	106.3	310	141	92	97.3	2.1	99.43	0.66	0.215	1.37	0.90	2.000	2.000	2.00	0.000	-6.014	0.000	1.15	0.000	0.000	0.000	1.39	0.00	
																	S _u		LDI = 0.054		LPI = 0.015		0.005		0.005		0.005		0.005		0.005		0.005	

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-3

Input parameters																																																	
Peak ground accel (g) =		0.2553		Name of boring log		BH-3																																											
Earthquake magnitude, M =		6.3		Date of drilling		2/2/2016																																											
Water table depth (m) =		0		Location		Wat Rong Khun																																											
Average γ above water table (kN/m ³)		0																																															
Average γ below water table (kN/m ³)		18																																															
Borehole diameter (mm)		100																																															
Requires correction for sampler liners (YES/NO)		NO																																															
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5 m (for the above ground extension).																																																	
SPT sample number	Depth (m)	Measure	Soil type (USCS)	Flag "Clay" "Unsaturated" "Unreliable"	Fines content t (%)	Energy ratio, ER (%)	C _E	C _R	C _S	N ₆₀	σ'_{vc} (kPa)	C _N	(N ₁) ₆₀	ΔN for fines content	Stress reduct. Coeff., r _d	CSR	MSF for Sand	K _{cs} for sand	CRR for M=7.5 & σ'_{vc} = 1 atm	Factor of safety	Limiting shear strain γ_{lim}	Parameter F _{cs}	Maximum shear strain γ_{max}	ΔH_v (m)	ΔLDI (m)	Vertical reconsol. Strain ϵ_v	ΔS_v (m)	wi	LPI																				
1	1.225	10	CL	Clay	72.94	75	1.25	1	0.75	1	9.4	22	10	170	n.a.	0.99	0.362	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9.39	0.00																			
2	2.225	10	CL	Clay	78.54	75	1.25	1	0.8	1	10.0	40	18	170	n.a.	0.98	0.356	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.89	0.00																			
3	3.225	6	CH	Clay	81.13	75	1.25	1	0.85	1	6.4	58	26	170	n.a.	0.96	0.350	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.39	0.00																			
4	4.225	5	CH	Clay	82.67	75	1.25	1	0.85	1	5.3	76	35	170	n.a.	0.94	0.343	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.89	0.00																			
5	5.225	4	SM		40.17	75	1.25	1	0.95	1	4.8	94	43	170	8.1	0.92	0.336	1.37	1.09	0.145	0.217	0.64	0.318	0.807	0.318	1	0.318	0.031	7.39	2.63																			
6	6.225	18	SM		18.05	75	1.25	1	0.95	1	21.4	112	51	134	28.7	0.90	0.329	1.37	1.10	0.728	1.098	2.00	0.031	-0.277	0.000	1	0.000	0.000	6.89	0.00																			
7	7.225	24	SM		12.03	75	1.25	1	0.95	1	28.5	130	59	122	34.8	0.88	0.321	1.37	1.10	1.704	2.000	2.00	0.016	-0.573	0.000	1	0.000	0.000	6.39	0.00																			
8	8.225	28	SM		23.797	75	1.25	1	0.95	1	33.3	148	67	115	38.2	0.86	0.313	1.37	1.10	2.000	2.000	2.00	0.004	-1.044	0.000	1	0.000	0.000	5.89	0.00																			
9	9.225	46	SM		23.08	75	1.25	1	1	1	57.5	166	76	108	62.1	0.84	0.305	1.37	1.09	2.000	2.000	2.00	0.000	-3.026	0.000	1	0.000	0.000	5.39	0.00																			
10	10.23	32	SM		15.22	75	1.25	1	1	1	40.0	184	84	106	42.3	0.81	0.296	1.37	1.06	2.000	2.000	2.00	0.002	-1.239	0.000	1	0.000	0.000	4.89	0.00																			
11	11.23	57	SM		15.27	75	1.25	1	1	1	71.3	202	92	103	73.0	0.79	0.288	1.37	1.03	2.000	2.000	2.00	0.000	-3.868	0.000	1	0.000	0.000	4.39	0.00																			
12	12.23	84	SM		12.86	75	1.25	1	1	1	105.0	220	100	100	105.2	0.77	0.280	1.37	1.00	2.000	2.000	2.00	0.000	-6.807	0.000	1	0.000	0.000	3.89	0.00																			
13	13.23	81	SM		13.12	75	1.25	1	1	1	101.3	238	108	98.4	99.4	0.74	0.271	1.37	0.98	2.000	2.000	2.00	0.000	-6.256	0.000	1	0.000	0.000	3.39	0.00																			
LDI = 0.318 S= 0.031 LPI= 2.63																																																	

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-4

Input parameters										Test results										Analysis										Remarks									
Peak ground accel (g) = 0.287855143					Name of boring log BH-4					Date of drilling 2/2/2016					Location					Soil type					Soil description					Soil classification									
Earthquake magnitude, M = 6.3																																							
Water table depth (m) = 0																																							
Average γ above water table (kN/m ³) = 0																																							
Average γ below water table (kN/m ³) = 18																																							
Borehole diameter (mm) = 100																																							
Requires correction for sampler liners (YES/NO) : NO																																							
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5m (for the above ground extension).																																							
SPT sample number	Depth (m)	Measure	Soil type (USCS)	Flag "Unsaturated"	Fines content (%)	Energy ratio, ER (%)	C _t	C ₈	C ₆	C ₅	N ₆₀	σ_{vc} (kPa)	C _N	(N ₁) ₆₀	ΔN for fines content	Stress reduct. Coeff., r _s	CSR for sand	MSF for sand	K _s for sand	CRR for M=7.5 & $\sigma'_{vc}=1$ atm	Factor of safety	Limiting shear strain, γ_{lim}	Parameter σ'_{vc}	Maximum shear strain, γ_{max}	ΔH_1 (m)	ΔLDI_1 (m)	Vertical reconsol. Strain ϵ_v	ΔS_1	wi	LPI									
1	1.23	7	SM		40.25	75	1.25	1	0.75	1	6.6	22	10	1.70	11.2	5.6	16.73	0.99	0.408	1.37	1.10	0.171	0.258	0.6335	0.228	0.679	0.228	1.225	0.279	0.027	0.032	9.39	4.21						
2	2.23	2	ML	clay	90.94	75	1.25	1	0.8	1	2.0	40	18	1.70	n.a.	n.a.	n.a.	0.98	0.402	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	8.89	0.00							
3	3.23	5	ML	clay	71.61	75	1.25	1	0.85	1	5.3	58	26	1.70	n.a.	n.a.	0.96	0.395	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	8.39	0.00							
4	4.23	8	ML	clay	54.18	75	1.25	1	0.85	1	8.5	76	35	1.70	n.a.	n.a.	0.94	0.387	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.89	0.00							
5	5.23	8	GM		75	1.25	1	0.95	1	0.95	1	9.5	94	43	1.60	15.2	0.0	15.20	0.92	0.379	1.37	1.10	0.158	0.237	0.62	0.269	0.746	0.269	1	0.269	0.028	0.028	7.39	2.77					
6	6.23	6	GM		40.41	75	1.25	1	0.95	1	7.1	112	51	1.49	10.6	5.6	16.16	0.90	0.371	1.37	1.08	0.166	0.246	0.66	0.243	0.705	0.243	1	0.243	0.027	0.027	6.89	2.32						
7	7.23	11	ML	clay	86.67	75	1.25	1	0.95	1	13.1	130	59	1.31	n.a.	n.a.	0.88	0.362	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.39	0.00							
8	8.23	19	ML	clay	79.64	75	1.25	1	0.95	1	22.6	148	67	1.19	n.a.	n.a.	0.86	0.353	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	5.89	0.00							
9	9.15	100	ML	clay	86.76	75	1.25	1	1	1	125.0	165	75	1.08	n.a.	n.a.	0.84	0.344	1.37	1.09	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.925	0.000	0.000	0.000	5.43	0.00								
10	10.07	100	SM		23.29	75	1.25	1	1	1	125.0	181	82	1.05	131.8	4.9	136.76	0.82	0.336	1.37	1.06	2.000	2.000	0.000	0.000	-9.678	0.000	0.92	0.000	0.000	4.97	0.00							
11	11.08	100	GM		19.73	75	1.25	1	1	1	125.0	199	91	1.03	128.6	4.4	133.02	0.79	0.326	1.37	1.03	2.000	2.000	0.000	0.000	-9.302	0.000	1.005	0.000	0.000	4.46	0.00							

Input parameters	Peak ground accel (g)	0.529/425	Name of boring log	BH-5	Date of drilling	2/2/2016	Location	Tallapudi, in the suburb of Hyderabad	SPT sample number	Depth Measure (m)	d N (USCS)	Flag "Clay" "Unsaturation" "Unreliable"	Fines Content (%)	Energy ratio, ER (%)	C _E	C _R	C _S	N ₆₀	σ _{vc} (kPa)	σ _{vc}	C _N	(N ₁) _{log}	ΔN for fines content	Stress reduct. Coeff.	CSR	MSF for Sand	K _c for sand	CRR for M=7.5 & σ _{vc} =1 atm	Factor of safety	Limiting shear strain γ _{lim}	Parameter of failure	Maximum shear strain γ _{max}	ΔH _i (m)	ΔLD _i	Vertical reconsol. Strain ε _v	ΔS _i	w _i	LPI
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5m (for the above ground extension).																																						
1	1.23	36	CL		53.22	75	1.25	1	0.75	1	33.8	22	10	170	n.a.	0.99	0.750	1.37	1.10	1.10	1.10	2.000	2.000	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9.39	0.00					
2	2.23	40	SC		43.38	75	1.25	1	0.8	1	40.0	40	18	167	66.7	0.98	0.739	1.37	1.10	1.10	1.10	2.000	2.000	2.000	2.000	0.000	0.000	-3.497	0.000	1	0.000	0.000	0.000	8.89	0.00			
3	3.23	34	SC		43.40	75	1.25	1	0.85	1	36.1	58	26	154	55.7	0.96	0.726	1.37	1.10	1.10	1.10	2.000	2.000	2.000	2.000	0.000	0.000	-2.532	0.000	1	0.000	0.000	0.000	8.39	0.00			
4	4.23	10	SM		17.28	75	1.25	1	0.85	1	10.6	76	35	170	18.1	0.94	0.712	1.37	1.10	1.10	1.10	2.000	2.000	0.351	0.49	0.127	0.409	0.127	0.021	0.021	0.021	7.89	4.00					
5	5.23	21	SM		21.91	75	1.25	1	0.95	1	24.9	94	43	141	35.2	0.92	0.697	1.37	1.10	1.10	1.10	2.000	2.000	2.000	2.000	0.009	-0.799	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.39	0.00			
6	6.23	47	SM		33.23	75	1.25	1	0.95	1	55.8	112	51	120	66.8	0.90	0.682	1.37	1.10	1.10	1.10	2.000	2.000	2.000	2.000	0.000	-3.498	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.89	0.00			
7	7.23	57	GW-GM		10.07	75	1.25	1	0.95	1	67.7	130	59	115	77.9	0.88	0.666	1.37	1.10	1.10	1.10	2.000	2.000	2.000	2.000	0.000	-4.114	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.39	0.00			
8	8.23	100	SM		18.23	75	1.25	1	0.95	1	118.8	148	67	111	132.1	0.86	0.649	1.37	1.10	1.10	1.10	2.000	2.000	2.000	2.000	0.000	-9.626	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	5.89	0.00			
9	9.23	17	GM		12.97	75	1.25	1	1	1	21.3	166	76	113	24.1	0.84	0.632	1.37	1.05	1.05	1.05	2.000	2.000	0.479	0.76	0.073	0.135	0.060	0.014	0.014	0.014	5.39	1.31					
10	10.23	24	(SM)			75	1.25	1	1	1	30.0	184	84	107	32.1	0.81	0.615	1.37	1.04	1.04	1.04	2.000	2.000	0.937	1.52	0.034	-0.233	0.012	1	0.012	0.002	0.002	4.89	0.00				
11	11.23	44	(SM)			75	1.25	1	1	1	55.0	202	92	103	56.4	0.0	0.5638	0.79	0.597	1.37	1.03	2.000	2.000	2.000	2.000	0.000	-2.116	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	4.39	0.00			
12	12.23	54	SM		14.47	75	1.25	1	1	1	67.5	220	100	10																								

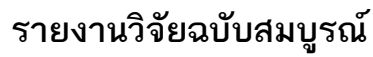
ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-6

Input parameters:																																							
Peak ground accel (g) =		0.322983								Name of boring log		BH-6																											
Earthquake magnitude, M =		6.3								Date of drilling		2/2/2016																											
Water table depth (m) =		0								Location		บ้านสันกั้นเขื่อนแม่ลาว จ.เชียงราย																											
Average γ above water table (kN/m ³) =		0																																					
Average γ below water table (kN/m ³) =		18																																					
Borehole diameter (mm) =		100																																					
Requires correction for sampler liners (YES/NO) :										NO																													
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5 m (for the above ground extension):																																							
SPT sample number	Depth (m)	Measure d N	Soil type (USCS)	Flag "Clay" "Unsaturated" "Unreliable"	Fines content t (%)	Energy ratio, ER (%)	C _E	C _B	C _S	N ₆₀	σ'_{vc} (kPa)	σ'_{vc} (kPa)	C _N	ΔN for fines content (N ₁) _{60cs}	Stress reduct. Coeff, r _d	CSR	MSF for Sand	K _c for sand	CRR for M=7.5 & $\sigma'_{vc}=1$ atm	Factor of safety	Limiting shear strain γ_{lim}	Parameter σ'_{vm} er Fr _u	Maximum shear strain γ_{max}	ΔH_1 (m)	ΔLDI_1 (m)	Vertical reconsol. Strain ϵ_v	ΔS_1 (m)	w _i	LPI										
1	1.23	13	ML		70.30	75	1.25	1	0.75	1	12.2	22	10	170	20.7	5.6	26.29	0.99	0.458	1.37	1.10	0.324	0.489	1.0678	0.076	0.152	0.030	1.225	0.037	0.007	0.008	9.39	0.00						
2	2.23	5	ML		76.19	75	1.25	1	0.8	1	5.0	40	18	170	8.5	5.6	14.06	0.98	0.451	1.37	1.10	0.148	0.224	0.50	0.305	0.792	0.305	1	0.305	0.030	0.030	8.89	4.48						
3	3.23	5	ML		53.25	75	1.25	1	0.85	1	5.3	58	26	170	9.0	5.6	14.65	0.96	0.443	1.37	1.10	0.153	0.231	0.52	0.286	0.769	0.286	1	0.286	0.029	0.029	8.39	4.02						
4	4.23	18	SW-SM		5.90	75	1.25	1	0.85	1	19.1	76	35	162	30.9	0.0	30.93	0.94	0.435	1.37	1.10	0.550	0.829	1.91	0.041	-0.152	0.002	1	0.002	0.000	0.000	7.89	0.00						
5	5.23	19	SW-SM		11.31	75	1.25	1	0.95	1	22.6	94	43	143	32.3	1.8	34.09	0.92	0.426	1.37	1.10	0.925	1.395	2.00	0.025	-0.371	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.39	0.00						
6	6.23	8	SP-SM		10.79	75	1.25	1	0.95	1	9.5	112	51	145	13.8	1.5	15.33	0.90	0.416	1.37	1.08	0.159	0.234	0.56	0.266	0.741	0.266	1	0.266	0.028	0.028	6.89	3.01						
7	7.23	40	(CL)	clay		75	1.25	1	0.95	1	47.5	130	59	115	n.a.	n.a.	n.a.	0.88	0.406	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.39	0.00							
8	8.23	13	CL	clay	54.93	75	1.25	1	0.95	1	15.4	148	67	122	n.a.	n.a.	n.a.	0.86	0.396	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.89	0.00							
9	9.23	11	SC		32.18	75	1.25	1	1	1	13.8	166	76	116	15.9	5.4	21.33	0.84	0.385	1.37	1.04	0.223	0.318	0.83	0.137	0.446	0.060	1	0.060	0.016	0.016	5.39	0.94						
10	10.23	17	ML		82.64	75	1.25	1	1	1	21.3	184	84	108	23.0	5.5	28.57	0.81	0.375	1.37	1.04	0.408	0.579	1.55	0.056	0.006	0.010	1	0.010	0.002	0.002	4.89	0.00						
11	11.23	22	ML		87.72	75	1.25	1	1	1	27.5	202	92	104	28.5	5.5	34.02	0.79	0.364	1.37	1.02	0.913	1.281	2.00	0.026	-0.366	0.000	1	0.000	0.000	0.000	4.39	0.00						
12	12.225	28	ML		93.04	75	1.25	1	1	1	35.0	220	100	100	35.1	5.5	40.61	0.77	0.354	1.37	1.00	2.000	2.000	2.00	0.008	-0.850	0.000	1	0.000	0.000	0.000	3.89	0.00						
13	13.225	26	ML		77.15	75	1.25	1	1	1	32.5	238	108	98	31.7	5.6	37.28	0.74	0.343	1.37	0.98	1.876	2.000	2.00	0.015	-0.601	0.000	1	0.000	0.000	0.000	3.39	0.00						
14	14.225	43	SM		16.36	75	1.25	1	1	1	53.8	256	117	96	51.8	3.7	55.45	0.72	0.333	1.37	0.96	2.000	2.000	2.00	0.000	-2.038	0.000	1	0.000	0.000	0.000	2.89	0.00						
15	15.225	58	SM		12.05	75	1.25	1	1	1	72.5	274	125	95	68.6	2.1	70.68	0.70	0.323	1.37	0.94	2.000	2.000	2.00	0.000	-3.356	0.000	1	0.000	0.000	0.000	2.39	0.00						
16	16.225	61	SM		15.12	75	1.25	1	1	1	76.3	292	133	93	70.9	3.3	74.24	0.68	0.313	1.37	0.92	2.000	2.000	2.00	0.000	-3.674	0.000	1	0.000	0.000	0.000	1.89	0.00						
17	17.225	66	SM		11.99	75	1.25	1	1	1	82.5	310	141	92	75.6	2.1	77.62	0.66	0.304	1.37	0.90	2.000	2.000	2.00	0.000	-3.980	0.000	1	0.000	0.000	0.000	1.39	0.00						
18																																							
										LDI = 0.965										S = 0.115										PI = 12.44									

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-7

Input parameters		Name of boring log		BH-7																												
Peak ground accel (g) =	0.20964	Date of drilling	2/2/2016																													
Earthquake magnitude, M =	6.3	Location	วัดคลื่นไหวสะเทือนอำเภอแม่ลาว จ.เชียงราย																													
Water table depth (m) =	0																															
Average γ above water table (kN/m ³) =	0																															
Average γ below water table (kN/m ³) =	18																															
Borehole diameter (mm) =	100																															
Requires correction for sampler liners (YES/NO)																																
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5 m (for the above ground extension).																																
SPT sample number	Depth (m)	Measure	Soil type (USCS)	Flag "Clay" "Unsaturated"	Fines content ratio, t (%)	Energy ratio, ER (%)	C _E	C _B	C _L	C _S	N ₆₀	σ'_{vc} (kPa)	σ'_{vc}	C _u	(N ₁) ₆₀	ΔN for fines content	(N ₁) _{60-s}	Stress red. Coeff., r _d	CSR	MSF for Sand	K _c for sand	CRR for M=7.5 & σ'_{vc} = 1 atm	Factor of safety	Limiting shear strain, γ_{lim}	Parameter σ'_{vc}	Maximum shear strain, γ_{max}	ΔH_i	ΔLDI_i	Vertical reconsol. Strain $\epsilon_{v,cr}$	ΔS_i	w _i	LPI
1	1.23	14	CL	clay	60.11	75	1.25	1	0.75	1	13.1	22	10	1.70	n.a.	n.a.	n.a.	0.99	0.297	1.37	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1.225	0.000	0.000	0.000	9.39	0.00
2	2.23	15	CL	clay	51.38	75	1.25	1	0.8	1	15.0	40	18	1.70	n.a.	n.a.	n.a.	0.98	0.293	1.37	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	8.89	0.00
3	3.23	4	SC		36.79	75	1.25	1	0.85	1	4.3	58	26	1.70	7.2	5.5	12.76	0.96	0.287	1.37	1.37	1.10	0.138	0.72	0.350	0.838	1	0.350	0.032	0.032	8.39	2.31
4	4.23	6	(SC)			75	1.25	1	0.85	1	6.4	76	35	1.70	10.8	0.0	10.84	0.94	0.282	1.37	1.37	1.10	0.124	0.66	0.432	0.895	1	0.432	0.036	0.036	7.89	2.66
5	5.23	8	CL	clay	71.47	75	1.25	1	0.95	1	9.5	94	43	1.60	n.a.	n.a.	n.a.	0.92	0.276	1.37	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.39	0.00
6	6.23	17	CH	clay	64.51	75	1.25	1	0.95	1	20.2	112	51	1.35	n.a.	n.a.	n.a.	0.90	0.270	1.37	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.89	0.00
7	7.23	23	CH	clay	70.15	75	1.25	1	0.95	1	27.3	130	59	1.23	n.a.	n.a.	n.a.	0.88	0.264	1.37	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.39	0.00
8	8.23	39	SM		47.59	75	1.25	1	0.95	1	46.3	148	67	1.11	51.5	5.6	57.13	0.86	0.257	1.37	1.37	1.10	2.000	2.00	0.000	-2.180	1	0.000	0.000	0.000	5.89	0.00
9	9.23	55	SM		41.21	75	1.25	1	1	1	68.8	166	76	1.08	74.2	5.6	79.79	0.84	0.250	1.37	1.37	1.09	2.000	2.00	0.000	-4.178	1	0.000	0.000	0.000	5.39	0.00
10	10.23	11	(ML)	clay		75	1.25	1	1	1	13.8	184	84	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.81	0.243	1.37	1.37	1.06	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	4.89	0.00
11	11.23	25	ML		66.81	75	1.25	1	1	1	31.3	202	92	1.03	32.3	5.6	37.89	0.79	0.236	1.37	1.37	1.03	2.000	2.00	0.013	-0.647	1	0.000	0.000	0.000	4.39	0.00
12	12.23	21	ML	clay	68.01	75	1.25	1	1	1	26.3	220	100	1.00	n.a.	n.a.	n.a.	0.77	0.230	1.37	1.37	1.00	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	3.89	0.00
13	13.23	46	ML	clay	70.56	75	1.25	1	1	1	57.5	238	108	0.98	n.a.	n.a.	n.a.	0.74	0.223	1.37	1.37	0.98	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	3.39	0.00
14	14.23	51	SM		48.30	75	1.25	1	1	1	63.8	256	117	0.96	61.4	5.6	67.01	0.72	0.216	1.37	1.37	0.96	2.000	2.00	0.000	-3.031	1	0.000	0.000	0.000	2.89	0.00
15	15.23	53	SM		46.45	75	1.25	1	1	1	66.3	274	125	0.95	62.7	5.6	68.29	0.70	0.210	1.37	1.37	0.94	2.000	2.00	0.000	-3.143	1	0.000	0.000	0.000	2.39	0.00
16	16.23	52	SM		50.05	75	1.25	1	1	1	65.0	292	133	0.93	60.5	5.6	66.09	0.68	0.203	1.37	1.37	0.92	2.000	2.00	0.000	-2.950	1	0.000	0.000	0.000	1.89	0.00
																LDI =	0.782		S =		0.068		LPI =		4.97							



โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-8

[illegible]

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-9

Input parameters																																							
Peak ground accel (g) =		0.42/28								Name of boring log		BH-9																											
Earthquake magnitude, M		6.3								Date of drilling		2/2/2016																											
Water table depth (m) =		0								Location		บ.ป่าขี้ผึ้ง บ.ป่าขี้ผึ้ง																											
Average γ above water table (kN/n		0																																					
Average γ below water table (kN/n		18																																					
Borehole diameter (mm) =		100																																					
Requires correction for sampler liners (YES/NO)										NO																													
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5 m (for the above ground extension).																																							
SPT sample number	Depth (m)	d N	Measure	Soil type (USCS)	Flag "Clay" "Unsaturated"	Fines content (%)	Energy ratio, ER (%)	C_E	C_B	C_R	C_S	N_{60}	σ_{vc} (kPa)	σ_{vc}	C_N	$(N_1)_{60}$	ΔN for fines content	Stress reduct. Coeff, r_v	CSR	MSF for Sand	K_c for sand	CRR for $M=7.5$ & $\sigma_{vc}=1$	Factor of safety	Limiting shear strain γ_{lim}	Parameter for σ_{vc}	Maximum shear strain γ_{max}	ΔH_v (m)	ΔLDI_v (m)	Vertical reconsol. Strain ϵ_{vz}	ΔS_v (m)	wi	LPI							
1	1.23	22		CL		88.53	75	1.25	1	0.75	1	20.6	22	10	1.70	35.1	5.5	0.99	0.601	1.37	1.10	2.000	2	0.008	-0.848	0.000	1.225	0.000	0.000	0.000	9.39	0.00							
2	2.25	10		CL		90.68	75	1.25	1	0.8	1	10.0	41	18	1.70	17.0	5.5	0.98	0.592	1.37	1.10	0.241	0.363	0.61	0.119	0.379	0.119	1.025	0.122	0.021	0.021	8.88	3.51						
3	3.23	10		CL		84.70	75	1.25	1	0.85	1	10.6	58	26	1.70	18.1	5.5	0.96	0.582	1.37	1.10	0.260	0.392	0.67	0.105	0.316	0.089	0.975	0.087	0.020	0.019	8.39	2.67						
4	4.23	23		CL		95.72	75	1.25	1	0.85	1	24.4	76	35	1.54	37.7	5.5	0.94	0.571	1.37	1.10	2.000	2.000	2.00	0.004	-1.048	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.89	0.00						
5	5.23	40		CL		87.20	75	1.25	1	0.95	1	47.5	94	43	1.25	59.5	5.5	0.92	0.559	1.37	1.10	2.000	2.000	2.00	0.000	-2.861	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.39	0.00						
6	6.23	30		CL		89.84	75	1.25	1	0.95	1	35.6	112	51	1.25	44.5	5.5	0.90	0.546	1.37	1.10	2.000	2.000	2.00	0.000	-1.591	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.89	0.00						
7	7.23	22		CL		98.39	75	1.25	1	0.95	1	26.1	130	59	1.23	32.2	5.5	0.88	0.533	1.37	1.10	2.000	2.000	2.00	0.014	-0.632	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.39	0.00						
8	8.23	24		CL		62.79	75	1.25	1	0.95	1	28.5	148	67	1.16	33.2	5.6	0.86	0.520	1.37	1.10	2.000	2.000	2.00	0.011	-0.711	0.000	1	0.000	0.000	0.000	5.89	0.00						
9	9.23	58		SM		14.73	75	1.25	1	1	1	72.5	166	76	1.08	78.3	3.2	0.84	0.506	1.37	1.09	2.000	2.000	2.00	0.000	-4.327	0.000	1	0.000	0.000	0.000	5.39	0.00						
10	10.23	32		SW-SM		9.63	75	1.25	1	1	1	40.0	184	84	1.06	42.3	1.0	0.81	0.493	1.37	1.06	2.000	2.000	2.00	0.004	-1.055	0.000	1	0.000	0.000	0.000	4.89	0.00						
11	11.73	-		rock																							LDI =	0.209	S =	0.041	LPI =	6.18							

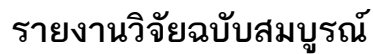
ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-10

Input parameters:		0.482003		Name of boring log		BH-10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
-------------------	--	----------	--	--------------------	--	-------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-11

Input parameters																																							
Peak ground accel (g) =		0.202031								Name of boring log		BH-11																											
Earthquake magnitude, M =		6.3								Date of drilling		2/2/2016																											
Water table depth (m) =		0								Location		วัดท่าเวียงเหนือ ตำบลแม่ลาว อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย																											
Average γ above water table (kN/m ³) =		0																																					
Average γ below water table (kN/m ³) =		18																																					
Borehole diameter (mm) =		100																																					
Requires correction for sampler liners (YES/NO) NO																																							
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5 m (for the above ground extension).																																							
SPT sample number	Depth (m)	N	Soil type (USCS)	Flag "Clay" "Unsaturated"	Fines content (%)	Energy ratio, ER (%)	C_E	C_B	C_R	C_S	N_{60}	σ'_{vc} (kPa)	σ_{vc} (kPa)	C_N	$(N_1)_{60}$	ΔN for fines content	$(N_1)_{60-15}$	Stress red. Coeff., r_d	CSR	MSF for Sand	k_c for sand	CRR for $M=7.5$ & $\sigma'_{vc} = 1$ atm	Factor of safety	Limiting shear strain, γ_{lim}	Parameter $er F_{cr}$	Maximum shear strain, γ_{max}	ΔH_i (m)	ΔLDI_i (m)	Vertical reconsol. Strain ϵ_v	ΔS_i	wi	LPI							
1	1.23	27	SM		35.92	75	1.25	1	0.75	1	25.3	22	10	1.70	43.0	5.5	48.55	0.99	0.286	1.37	1.37	1.10	2.000	2	0.001	-1.472	0.000	1.225	0.000	0.000	0.000	9.39	0.00						
2	2.23	26	CL	clay	84.95	75	1.25	1	0.8	1	26.0	40	18	1.70	n.a.	n.a.	n.a.	0.98	0.282	1.37	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	8.89	0.00						
3	3.23	6	SC		44.76	75	1.25	1	0.85	1	6.4	58	26	1.70	10.8	5.6	16.44	0.96	0.277	1.37	1.37	1.10	0.169	0.254	0.92	0.692	0.052	1	0.052	0.017	0.017	8.39	0.69						
4	4.23	2	SC		54.45	75	1.25	1	0.85	1	2.1	76	35	1.70	3.6	5.6	9.23	0.94	0.272	1.37	1.37	1.10	0.113	0.169	0.62	0.928	0.500	1	0.500	0.039	0.039	7.89	2.97						
5	5.23	3	SW-SM		8.00	75	1.25	1	0.95	1	3.6	94	43	1.70	6.1	0.4	6.42	0.92	0.266	1.37	1.37	1.07	0.095	0.139	0.52	0.948	0.500	1	0.500	0.047	0.047	7.39	3.54						
6	6.23	3	CL	clay	54.94	75	1.25	1	0.95	1	3.6	112	51	1.55	n.a.	n.a.	n.a.	0.90	0.260	1.37	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.89	0.00						
7	7.23	24	CL	clay	64.10	75	1.25	1	0.95	1	28.5	130	59	1.22	n.a.	n.a.	n.a.	0.88	0.254	1.37	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.39	0.00						
8	8.23	23	CL	clay	57.41	75	1.25	1	0.95	1	27.3	148	67	1.17	n.a.	n.a.	n.a.	0.86	0.248	1.37	1.37	1.10	n.a.	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	5.89	0.00						
9	9.23	32	SP		2.49	75	1.25	1	1	1	40.0	166	76	1.09	43.6	0.0	43.62	0.84	0.241	1.37	1.37	1.09	2.000	2.000	0.004	-1.081	0.000	1	0.000	0.000	0.000	5.39	0.00						
10	10.23	52	SM		9.28	75	1.25	1	1	1	65.0	184	84	1.05	68.3	0.8	69.12	0.81	0.235	1.37	1.37	1.06	2.000	2.000	0.000	-3.217	0.000	1	0.000	0.000	0.000	4.89	0.00						
11	11.23	55	SM		13.36	75	1.25	1	1	1	68.8	202	92	1.03	70.5	2.7	73.13	0.79	0.228	1.37	1.37	1.03	2.000	2.000	0.000	-3.574	0.000	1	0.000	0.000	0.000	4.39	0.00						
12	12.23	54	SM		12.64	75	1.25	1	1	1	67.5	220	100	1.00	67.7	2.4	70.01	0.77	0.221	1.37	1.37	1.00	2.000	2.000	0.000	-3.296	0.000	1	0.000	0.000	0.000	3.89	0.00						
																												LDI =	1.052	S =	0.104	LPI =	7.20						



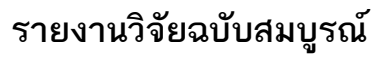
โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของกลุ่มเจาะ BH-11 (กรณีแผ่นดินไหวตามขนาด 5.3)

[illegible]

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-12

Input parameters		Peak ground accel (g) = 0.60337		Name of boring log BH-12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
------------------	--	---------------------------------	--	--------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



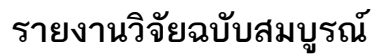
โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-13

[illegible]

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-14

Input parameters										Output parameters																						
Peak ground accel (g) =	0.372758143	Name of boring log		BH-14		Date of drilling		2/2/2016		Location		โรงเรียนโปลีเทคนิค แม่ลาว จ. เชียงราย																				
Earthquake magnitude, M =	6.3																															
Water table depth (m) =	0																															
Average γ above water table (kN/m ³) =	0																															
Average γ below water table (kN/m ³) =	18																															
Borehole diameter (mm) =	100																															
Requires correction for sampler liners (YES/NO) :	NO																															
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5 m (for the above ground extension).																																
SPT sample number	Depth (m)	N	Soil type (USCS)	Flag "Clay" "Unsaturated" "Unreliable"	Fines content t (%)	Energy ratio, ER (%)	C _E	C _R	C _S	N ₆₀	σ'_{vc} (kPa)	σ'_{vc} (kPa)	C _h	(N ₁) _{log}	AN for fines content	Stress reduct. Coeff, r _s	CSR	MSF for Sand	K _o for sand	CRR for M=7.5 & $\sigma'_{vc}=1$ atm	Factor of safety	Limiting shear strain γ^{lim}	Parameter for σ'_{vc}	Maximum shear strain γ_{max}	ΔH_i (m)	ΔLDI_i (m)	Vertical reconsolidation Strain ϵ_v	ΔS_i	w _i	LPI		
1	1.23	16	ML	clay	59.31	75	1.25	1	0.75	1	15.0	22	10	1.70	n.a.	n.a.	n.a.	0.99	0.464	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1.225	0.000	0.000	0.000	9.39	0.00	
2	2.23	26	SM		50.56	75	1.25	1	0.8	1	26.0	40	18	1.70	44.2	5.6	49.81	0.98	0.457	1.37	1.10	2.000	2.000	0.000	-1.574	0.000	1	0.000	0.000	0.000	8.89	0.00
3	3.23	23	SM		46.61	75	1.25	1	0.85	1	24.4	58	26	1.70	41.5	5.6	47.15	0.96	0.449	1.37	1.10	2.000	2.000	0.001	-1.360	0.000	1	0.000	0.000	0.000	8.39	0.00
4	4.23	60	SP-SM		7.27	75	1.25	1	0.85	1	63.8	76	35	1.33	84.5	0.2	84.69	0.94	0.440	1.37	1.10	2.000	2.000	0.000	-4.628	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.89	0.00
5	5.23	100	ML	clay	66.76	75	1.25	1	0.95	1	118.8	94	43	1.25	n.a.	n.a.	n.a.	0.92	0.431	1.37	1.10	n.a.	n.a.	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.39	0.00	
6	6.23	100	GM		48.40	75	1.25	1	0.95	1	118.8	112	51	1.20	142.2	5.6	147.77	0.90	0.422	1.37	1.10	2.000	2.000	0.000	-10.790	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.89	0.00
7	7.23	100	GM		45.86	75	1.25	1	0.95	1	118.8	130	59	1.15	136.7	5.6	142.30	0.88	0.411	1.37	1.10	2.000	2.000	0.000	-10.236	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.39	0.00
															LDI = 0.000		S = 0.000		LPI = 0.00													



โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

ผลการวิเคราะห์ Liquefaction Potential Index (LPI) ของหลุมเจาะ BH-15

Input parameters	SPT sample number	Depth (m)	Measured Soil type (USCS)	Flag "Clay" or "Unsaturated"	Fines content (%)	Energy ratio, ER (%)	C _e	C _b	C _r	C _s	N ₆₀ (kPa)	σ _{vc} (kPa)	C _N (N ₁) ₆₀	ΔN for fines content	(N ₁) ₆₀₋₅	Stress reduct. Coeff., r _c	CSR	MSF for Sand	K _c for sand	CRR for M=7.5 & σ _{vc} =1	Factor of safety	Limiting shear strain γ _{lim}	Parameter for F _{cr}	Maximum shear strain γ _{max}	ΔH _i (m)	ΔLDL _i (m)	Vertical reconsol. Strain ε _{vc}	ΔS _i	w _i	LPI	
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5 m (for the above ground extension).																															
Peak ground accel (g) = 0.4749237																															
Earthquake magnitude, M = 6.3																															
Water table depth (m) = 0																															
Average γ above water table (kN/m ³) = 0																															
Average γ below water table (kN/m ³) = 18																															
Borehole diameter (mm) = 100																															
Requires correction for sampler liners (YES/NO) NO																															
Rod lengths assumed equal to the depth plus 1.5 m (for the above ground extension).																															
	1	1.23	22	ML clay	87.05	75	1.25	1	0.75	1	20.6	22	10	1.70	n.a.	n.a.	0.99	0.673	1.37	1.10	n.a.	0.000	0.000	0.000	1.225	0.000	0.000	0.000	9.39	0.00	
	2	2.23	18	ML clay	91.39	75	1.25	1	0.8	1	18.0	40	18	1.70	n.a.	n.a.	0.98	0.663	1.37	1.10	n.a.	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	8.89	0.00	
	3	3.23	19	SM clay	39.58	75	1.25	1	0.85	1	20.2	58	26	1.70	34.3	5.6	39.89	0.96	0.651	1.37	1.10	2.000	0.009	-0.796	0.000	1	0.000	0.000	8.39	0.00	
	4	4.23	13	MH clay	59.84	75	1.25	1	0.85	1	13.8	76	35	1.70	n.a.	n.a.	0.94	0.639	1.37	1.10	n.a.	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.89	0.00	
	5	5.23	16	MH clay	65.37	75	1.25	1	0.95	1	19.0	94	43	1.47	n.a.	n.a.	0.92	0.626	1.37	1.10	n.a.	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	7.39	0.00	
	6	6.23	12	MH clay	71.67	75	1.25	1	0.95	1	14.3	112	51	1.40	n.a.	n.a.	0.90	0.612	1.37	1.10	n.a.	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.89	0.00	
	7	7.23	19	CL clay	83.98	75	1.25	1	0.95	1	22.6	130	59	1.25	n.a.	n.a.	0.88	0.597	1.37	1.10	n.a.	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	6.39	0.00	
	8	8.23	24	CL clay	87.90	75	1.25	1	0.95	1	28.5	148	67	1.16	n.a.	n.a.	0.86	0.582	1.37	1.10	n.a.	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	5.89	0.00	
	9	9.23	29	CL clay	93.53	75	1.25	1	1	1	36.3	166	76	1.10	n.a.	n.a.	0.84	0.567	1.37	1.09	n.a.	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	5.39	0.00	
	10	10.23	70	ML clay	92.23	75	1.25	1	1	1	87.5	184	84	1.05	n.a.	n.a.	0.81	0.551	1.37	1.06	n.a.	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	4.89	0.00	
	11	11.15	100	ML clay	92.42	75	1.25	1	1	1	125.0	201	91	1.03	n.a.	n.a.	0.79	0.537	1.37	1.03	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.925	0.000	0.000	0.000	4.43	0.00	
	12	12.14	100	ML clay	84.96	75	1.25	1	1	1	125.0	219	99	1.00	n.a.	n.a.	0.77	0.522	1.37	1.00	n.a.	0.000	0.000	0.000	0.99	0.000	0.000	0.000	3.93	0.00	
																									0.99	0.000	S=	0.000	LPI=	0.00	

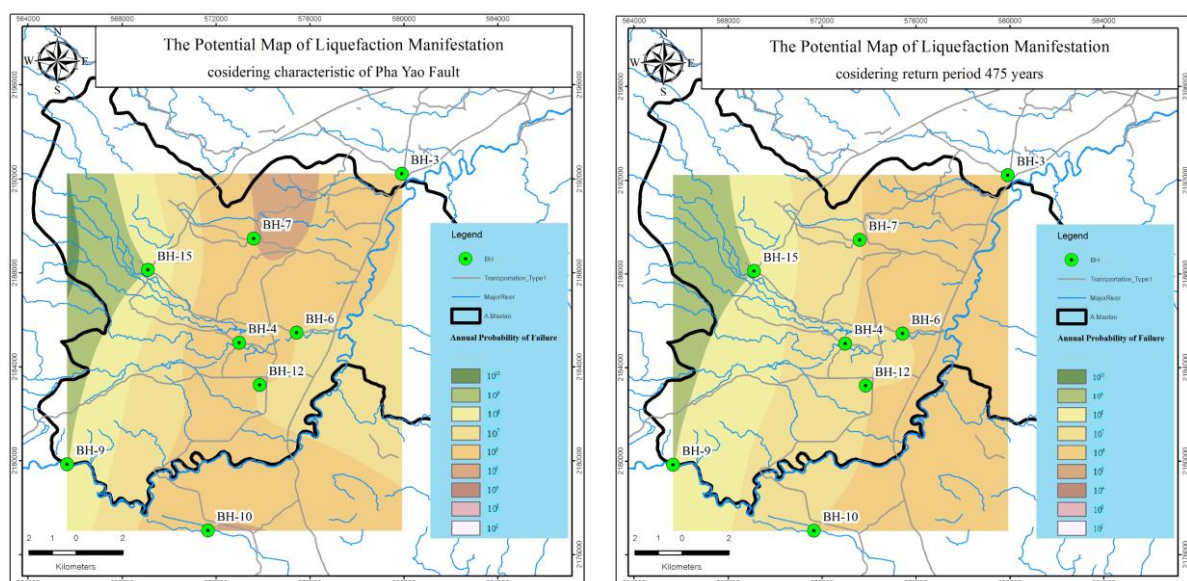
ภาคผนวก ง

บทความสำหรับเผยแพร่

ความเสี่ยงภัยจากปรากฏการณ์ Liquefaction ในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ซึ่งมีขนาดความรุนแรงสูงสุดที่เคยวัดได้ในประเทศไทย คือ เหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ตามมาตราริกเตอร์ มีศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ประชาชนสามารถรับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือนทั่วทั้งภาคเหนือ และมีความเสียหายรุนแรงในหลายพื้นที่ ทั้งบ้านเรือนและโครงสร้างสาธารณะ เป็นต้น จากบทเรียนของการเกิดแผ่นดินไหวดังกล่าว ยังมี “ปรากฏการณ์ดินเหลว (Liquefaction)” เกิดขึ้น นับเป็นสิ่งแปลกใหม่ที่ประชาชนให้สนใจอย่างมาก ดังนั้น การพัฒนาองค์ความรู้ งานวิจัย และวิธีการวิเคราะห์ liquefaction จึงเป็นสิ่งจำเป็น สำหรับการออกแบบบ้านเรือนเพื่อป้องกันภัยแผ่นดินไหวในอนาคต

การดำเนินการศึกษาในงานนี้ ได้แก่ การพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด liquefaction ประกอบด้วย ข้อมูลทางธรณีวิทยา ข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติดิน ข้อมูลน้ำใต้ดิน ค่าความเร็วคลื่นเฉือน เป็นต้น หลังจากได้ข้อมูลในภาคสนาม ได้ทำการการวิเคราะห์และประเมินโอกาสในการเกิด liquefaction เพื่อจัดทำแผนที่เสี่ยงภัยต่อการเกิด liquefaction นอกจากนี้ ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ความมั่นคงของอุโบสถวัดร่องขุนต่อการเกิด Liquefaction จากแผ่นดินไหว และพัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม ผลการศึกษาการเกิด liquefaction ด้วยวิธี Cyclic stress ratio (CSR), Liquefaction Potential Index (LPI) และ Liquefaction Manifestation พิจารณาร่วมกับผลการศึกษาข้อมูลน้ำใต้ดินตลอดระยะเวลา 1 ปี ในพื้นที่ศึกษาอำเภอแม่ลาว สามารถพบว่ามีความเหมาะสมกับการศึกษาในพื้นที่ อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย และสามารถสร้างแผนที่เสี่ยงภัยจากโอกาสเกิด Liquefaction และโอกาสพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนให้ปลอดภัยจาก liquefaction เนื่องจากแผ่นดินไหว



แผนที่เสี่ยงภัยต่อการเกิด liquefaction พิจารณาจากรอยเลื่อนพะเยาที่ return period 475 ปี

การวิเคราะห์ความมั่นคงของอุโบสถของวัดร่องขุนต่อการเกิด Liquefaction จากแผ่นดินไหว

Stability Analysis of Wat Rong Khun's Main Hall

Subjected to Liquefaction Induced by Earthquake

กัญญารัตน์ นันทวิสิทธิ์, ธีรณัฐ วงศ์ตระกูล และสุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์

Kanyarat Nanthavisit, Thun Wongtragool and Suttisak Soralump

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทร.02-797-0999 โทรสาร.02-797-0999

E-mail: am.vv.37@gmail.com, w.thun.mlv@gmail.com, soralump_s@yahoo.com

บทคัดย่อ

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหววันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ขนาดแผ่นดินไหว 6.3 ความรุนแรงระดับ VIII ตามมาตราเมอร์คัลลี ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ศาสนสถานเป็นจำนวนมาก รวมถึงวัดร่องขุนซึ่งเป็นศาสนสถานและสถานที่ท่องเที่ยวที่สำคัญของจังหวัดเชียงราย เพื่อประเมินความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อวัดร่องขุนในอนาคต จึงได้มีการสำรวจสภาพชั้นดินเพื่อประเมินโอกาสการเกิดปรากฏการณ์ทรายนุ้ (Liquefaction) และความเสียหายที่ผิวดินจากคุณสมบัติของชั้นดินทางวิศวกรรมโดยใช้วิธี Cyclic Stress (Seed และ Idriss, 1971) และ Liquefaction Potential Index, LPI (Iwasaki และคณะ, 1978) รวมถึงสำรวจโครงสร้างหลักของอุโบสถเพื่อสร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยวิธี Finite Element และประเมินความเสียหายจากแรงกระทำแผ่นดินไหว โดยพิจารณาวิธี มยผ. 1302, วิธีวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Earthquake Analysis) ของรอยเลื่อนแม่ลาว โดยพิจารณาคาบอุบัติซ้ำ 475 ปีและ 3,000 ปี และวิเคราะห์ย้อนกลับเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 รวมถึงทำการประเมินความปลอดภัยของฐานรากด้วยวิธีแรงเฉือนเจาะทะลุ (Punching Shear Analysis) และวิธีกำลังแบกทาน (Bearing Capacity) จากผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี มยผ. 1302, วิธีวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่าของรอยเลื่อนแม่ลาว คาบอุบัติซ้ำ 475 ปี และวิเคราะห์ย้อนกลับเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 จะมี

โอกาสเกิด Liquefaction น้อยและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ ต่อฐานรากและโครงสร้างหลักของอุโบสถ แต่ทว่าเมื่อได้รับแรงกระทำแผ่นดินไหวความรุนแรงสูงสุดที่คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปีของรอยเลื่อนแม่ลาว พบว่าชั้นดินบริเวณวัดร่องขุนจะมีโอกาสเกิด Liquefaction ที่ความลึก 5-10 เมตร และก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวดิน ส่งผลให้กำลังแบกทานของดินไม่เพียงพอ และเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างหลัก ดังนั้นจึงควรเสริมความมั่นคงให้ฐานรากและโครงสร้างเพื่อป้องกันและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

Abstract

Since May 5th, 2014 at Mae Lao, Chiang Rai, earthquake magnitude of 6.3, Mercalli Intensity Scale of VIII, affected Buddhist temples including Wat Rong Khun in Chiang Rai. In order to evaluate possible damage that would take place in the future, soil investigation is needed to determine liquefaction potential and ground damage from engineering properties of soil, using Cyclic Stress method (Seed and Idriss, 1971), and Liquefaction Potential Index, LPI (Iwasaki et al., 1972). Additionally, main hall's structure dimensioning for structural modelling using Finite Element method, to evaluate structural damage subjected to earthquake force using Standard of Department of Public Works and Town & Country Planning No. 1302-52,

Deterministic Earthquake Analysis of Mae Lao Fault at 475 and 3000 years of return period, and back-analyzing May 5th, 2014 situation. Also, analyze foundation safety using punching shear analysis, and bearing capacity. As a result, there is a low chance of liquefaction and no foundation and structural damage due to earthquake force using Standard of Department of Public Works and Town & Country Planning No. 1302-52, Deterministic Seismic Hazard Analysis of Mae Lao Fault at 475 years of return period, and back-analyzing May 5th, 2014 situation. In contrast, Wat Rong Khun's subsoil has a high chance of liquefaction at 5-10 meter depth, which causes ground damage and inefficient bearing capacity. Main structures also are damaged. Therefore, foundation and structural reinforcement is required to prevent and minimize future damage.

1. บทนำ

เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว มีศูนย์กลางอยู่บริเวณตำบลดงมะดะ อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ขนาดแผ่นดินไหว 6.3 ความลึก 7 กิโลเมตร ความรุนแรงระดับ VIII ตามมาตราเมอร์คัลลี ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก รอยเลื่อนพะเยา ส่งผลให้เกิดรอยแยกของพื้นดิน, ทรายพุ (Liquefaction) ซึ่งปรากฏการณ์ทรายนั่นจะสร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างที่อยู่บนฐานรากตื้นเป็นอย่างมาก และยังทำให้อาคารและโครงสร้างที่ไม่ได้ถูกออกแบบเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวหรือปรากฏการณ์ทรายนุเกิดความเสียหาย

วัดร่องขุน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย เป็นวัดที่มีความสวยงามโดดเด่นจากวัดอื่นๆ นับเป็นงานพุทธศิลป์ที่ยิ่งใหญ่ และเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญแห่งหนึ่งของจังหวัดเชียงราย วัดแห่งนี้ออกแบบและก่อสร้างโดยอาจารย์เฉลิมชัย โฆษิตพิพัฒน์ ตั้งแต่ปี 2540 จนถึง

ปัจจุบัน โดยใช้ฐานรากตื้นรับโครงสร้างอุโบสถ จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ได้สร้างความเสียหายให้กับวัดร่องขุนเป็นอย่างมาก และได้ทำการซ่อมแซมตั้งแต่บัดนั้นเป็นต้นมา ผู้จัดทำโครงการจึงเล็งเห็นความสำคัญของการวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อนำไปแก้ไขและปรับปรุงโครงสร้างฐานรากและอุโบสถเพื่อลดความเสียหายจากการเกิด Liquefaction ที่อาจเกิดได้ในบริเวณวัดร่องขุน และเพื่อคงไว้ซึ่งความงดงามของโครงสร้างให้อยู่คู่บ้านคูเมืองได้อย่างยั่งยืน

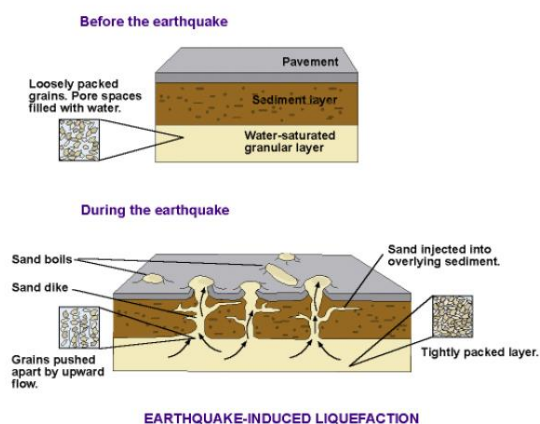
2. วัตถุประสงค์

2.1. เพื่อศึกษาโอกาสการเกิด Liquefaction ในบริเวณวัดร่องขุน

2.2. เพื่อวิเคราะห์ฐานรากและโครงสร้างของวัดร่องขุนภายใต้สภาวะการเกิดแผ่นดินไหว และ Liquefaction

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรากฏการณ์ทรายนุ หรือ Liquefaction เกิดจากการบีบอัดตัวของชั้นดินทรายและดินทรายแป้ง ที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรืออิ่มตัวบางส่วนสูญเสียความแข็งแรงและความมั่นคงในการตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวหรือแรงอื่นๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดในทันที ส่งผลให้ดินเหล่านั้นประพฤติตัวเหมือนของเหลว ทั้งดินและน้ำถูกดันขึ้นมาหลังจากเกิดแผ่นดินไหว ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ปรากฏการณ์ Liquefaction

3.1. การทดสอบพื้นฐานเพื่อหาโอกาสการเกิด Liquefaction

3.1.1. การใช้ขนาดคละของเม็ดดิน (Particle Size Distribution) – Tsuchida (1970) ได้สรุปช่วงในกราฟขนาดคละของดิน โดยแยกประเภทดิน Liquefied และ Non-Liquefied ซึ่งช่วงของดินทรายและดินทรายแป้งซึ่งมีความต้านทานต่อการเกิด Liquefaction น้อยที่สุด ดินที่มีขนาดคละกระจายอยู่ในช่วงถัดออกมาจะมีโอกาสน้อยกว่าในการเกิด Liquefaction และดินที่มีอัตราส่วนของกรวดเยอะมีโอกาสน้อยมาก เนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงและสามารถลด excess pore water pressure ได้เร็วกว่าทราย

3.1.2. วิธี Cyclic Stress – วิธีนี้ถูกพัฒนาโดย Seed และ Idriss (1971) หาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเกิด Liquefaction โดยโอกาสการเกิดปรากฏการณ์นี้ได้อธิบายในรูปแบบการเปรียบเทียบ Cyclic Resistance Ratio (CRR) และ Cyclic Stress Ratio (CSR) ดังสมการที่ 1

$$F. S. = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

3.1.3. Liquefaction Potential Index (LPI) - พัฒนาขึ้นโดย Iwasaki และคณะ (1978) ได้เสนอข้อสรุปเกี่ยวกับตัวแปรของ Liquefaction Potential Index (LPI) ได้ 3 อย่าง คือ

1. ความหนาของชั้นดิน
2. ระยะจากผิวบนของชั้นดินถึงหน้าดิน
3. ชั้นดินที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัย < 1

ซึ่งค่า Liquefaction Potential Index (LPI) กับโอกาสการเกิด Liquefaction (Iwasaki และคณะ, 1982)

3.2. การประเมินโอกาสการเกิดความเสียหายที่ผิวดิน

การประเมินโอกาสการเกิดความเสียหายที่ผิวดินใช้วิธีการเสนอโดย Ishihara (1985) ได้กำหนดเกณฑ์ความหนาของชั้นดินที่ไม่เกิดปรากฏการณ์ Liquefaction เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่ผิวดินเนื่องจากมีชั้นดินที่เกิด Liquefaction

4. วิธีการดำเนินงาน

4.1 เก็บรวบรวมข้อมูล

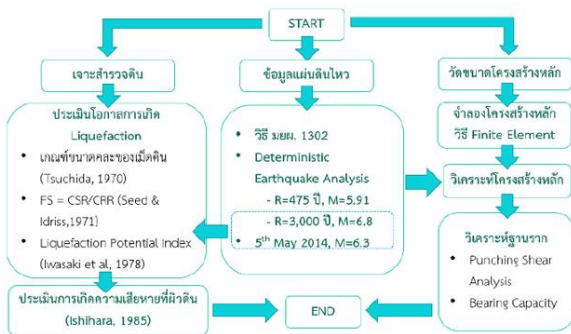
เจาะสำรวจและทดสอบดินบริเวณวัดร่องชุ่นเพื่อหาคุณสมบัติของดิน สำรวจและถอดแบบโครงสร้างอุโมงค์ รวมถึงหาข้อมูลแผ่นดินไหวด้วยวิธี มยผ. 1302, วิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Seismic Hazard Analysis) ที่คาบอุบัติซ้ำ 475 ปีและขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด 6.8 คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี และข้อมูลเหตุการณ์วันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 สำหรับการวิเคราะห์ย้อนกลับ

4.2 การประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction

ประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction เบื้องต้นจากคุณสมบัติของดินและขนาดคละของเม็ดดิน จากนั้นจึงวิเคราะห์ด้วยวิธี Cyclic Stress, หาค่า LPI, ประเมินโอกาสการเกิดความเสียหายที่ผิวดิน และวิเคราะห์พฤติกรรมตอบสนองเชิงพลศาสตร์ (Dynamic response) ด้วยโปรแกรม DEEPSOIL โดยสมมติให้ชั้นดินอยู่ที่ความลึกสูงสุดของหลุมเจาะสำรวจ และค่าคุณสมบัติดินเชิงพลศาสตร์คำนวณจากสมการเชิงประสบการณ์ (Empirical equation) โดย Modulus reduction curve, Damping ratio คำนวณจากสมการของ Darendeli (2001) และ Shear wave velocity จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Shear wave velocity กับ $(N_1)_{60}$ ที่เสนอโดย Hasancebi และ Ulusay (2007)

4.3 การวิเคราะห์ฐานรากและโครงสร้าง

วิเคราะห์ฐานราก โดยหาค่า Bearing capacity และ Punching shear analysis วิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม ETABS ในกรณีที่เกิดแผ่นดินไหวกรณีต่างๆ และในกรณีที่เกิดและไม่เกิด Liquefaction โดยสรุปเป็นแผนผังการทำงานดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังการทำงาน

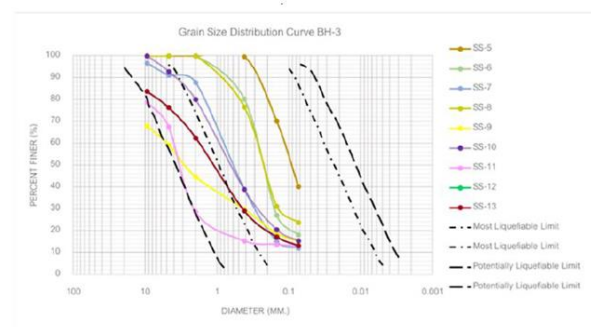
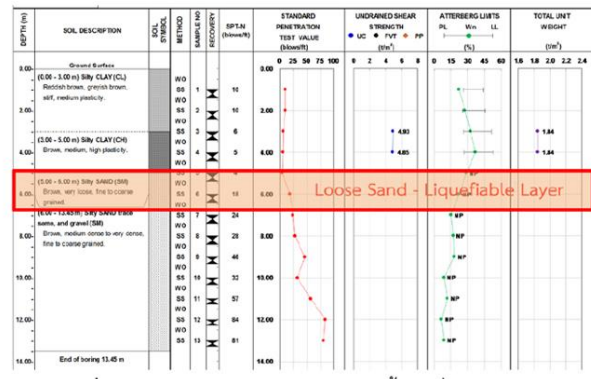
5. ผลการดำเนินงาน

5.1. ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction และความเสียหายที่ผิวดิน

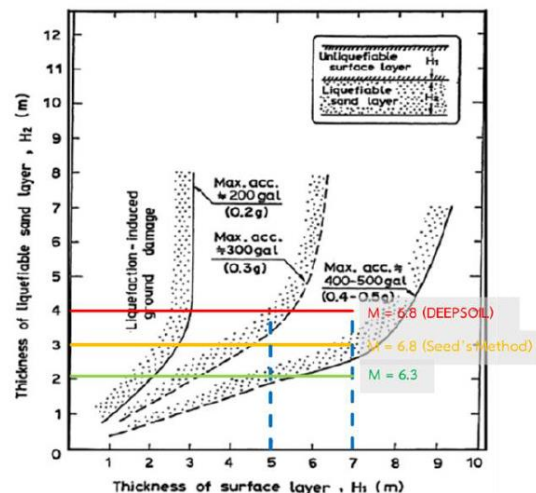
จากการนำผลจาก Boring Log มาประเมินค่า LPI ของ BH-1, BH-2 และ BH-3 รอบอุโบสถวัดร่องขุนดังรูปที่ 3 และ 4 พบว่าชั้นทรายที่เกิด Liquefaction อยู่ที่ความลึกตั้งแต่ 5-7 เมตรลงไป เมื่อเหตุการณ์แผ่นดินไหววันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 ดินมีโอกาสเกิด Liquefaction น้อยมาก และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวดิน เนื่องจากอัตราแรงผิวดินสูงสุดไม่มากพอที่จะทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งตรงกับเหตุการณ์จริง แต่ทว่าเมื่อดินได้รับแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหวขนาดสูงสุด 6.8 คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี ค่า LPI อยู่ระหว่าง 5-15 แสดงว่าดินมีโอกาสเกิด Liquefaction สูงและจะสร้างความเสียหายแก่ผิวดินเมื่อ PGA อยู่ระหว่าง 0.4-0.5g ดังรูปที่ 6



รูปที่ 3 ตำแหน่งหลุมเจาะ



รูปที่ 5 ตัวอย่างการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ด้วยขนาดผลของเม็ดดิน



รูปที่ 6 การประเมินความเสียหายที่ผิวดิน

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

5.2. ผลการวิเคราะห์ฐานรากและโครงสร้าง

5.2.1. ผลการวิเคราะห์ฐานราก –แบบศาสนสถาน กรมโยธาธิการและผังเมือง (2548) ออกแบบฐานรากตื้นสำหรับพระวิหารภาคเหนือไว้ 2 ขนาด ได้แก่ 1.50x1.50 และ 1.80x1.80 ตารางเมตร จากการประเมินความปลอดภัยของฐานรากด้วยวิธี Punching shear analysis กรณีแรงกระทำแผ่นดินไหวความรุนแรงสูงสุดขนาด 6.8 ที่คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี พบว่า ความหนาของชั้นดินเหนียวใต้ฐานรากอุโบสถเพียงพอต่อการต้านทานการพิบัติเนื่องจากฐานรากเจาะทะลุในกรณีที่ชั้นดินทรายเป็นหลวมด้านล่างสูญเสียกำลัง หรือชั้นดินทรายเป็นหลวมเกิด Liquefaction แต่เมื่อพิจารณากำลังแบกทานของชั้นดินเหนียวใต้ฐานรากอุโบสถ พบว่า กำลังรับแบกทานของชั้นดินไม่เพียงพอ จึงมีโอกาสที่ฐานรากของอุโบสถจะเกิดการทรุดตัวได้

5.2.2. ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง – หลังจากทำการสำรวจโครงสร้างได้ทำการจำลองโครงสร้างและวิเคราะห์อุโบสถตามมาตรฐาน ACI 318-08 ต่อแรงแผ่นดินไหวในกรณีต่างๆ ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 7

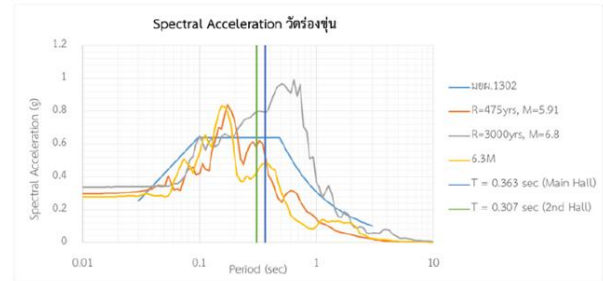
ตารางที่ 1 การประเมินคุณสมบัติแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอุโบสถ

ลำดับ	วิธีการคำนวณ	คาบอุบัติซ้ำ (ปี)	ขนาดแผ่นดินไหว (Mw)	อัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (g)	อ้างอิงจาก
1.	เหตุการณ์แผ่นดินไหววันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557	N/A	6.3	0.277	กรมทรัพยากรธรณี (2557)
2.	มยพ.1302 มาตราฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของ				
2.1	ความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาส 2% ที่จะมีความสูงกว่าในคาบเวลา 50 ปี	475	N/A	N/A	กรมโยธาธิการและผังเมือง (2552)
3.	การวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Seismic Hazard Analysis)				
3.1	ความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาส 2% ที่จะมีความสูงกว่าในคาบเวลา 50 ปี	475	5.91	0.208	- คาบอุบัติซ้ำและขนาดแผ่นดินไหว อ้างอิงจากกรมทรัพยากรธรณี (2552) - ค่า b parameter ของสมการ Gutenberg-Richter อ้างอิงจากกรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (2552)
3.2	ความรุนแรงสูงสุดของแผ่นดินไหว	3000	6.80	0.337	

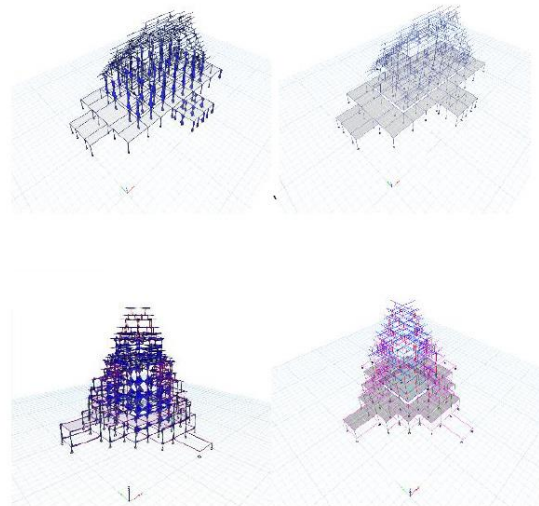
พบว่าโครงสร้างอุโบสถทั้งสองไม่วิบัติเนื่องจากกรณีแผ่นดินไหวขนาด 6.3, กรณีคาบอุบัติซ้ำ 475 ปี และวิธี มยพ.1302 เนื่องจากคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างไม่ตรงกับคาบความเร่งสูงสุด

แต่กรณีความรุนแรงแผ่นดินไหวสูงสุดขนาด 6.8 คาบการสั่น 3,000 ปี โครงสร้างเสาของอุโบสถหลัก

และอุโบสถรองเกิดการวิบัติเนื่องจากเกิดโมเมนต์จากแรงกระทำด้านข้างสูงกว่ากำลังที่เสาจะรับได้ และทำให้เกิดการเคลื่อนตัวดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 สเปกตรัมผลตอบสนองเทียบกับคาบการสั่นพื้นฐานของอุโบสถวัดร่องขุน



รูปที่ 8 โมเมนต์และการเคลื่อนตัวของโครงสร้างอุโบสถเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวสูงสุดขนาด 6.8 คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี

6. สรุปผลการดำเนินงาน

เมื่อวิเคราะห์โอกาสการเกิด Liquefaction และผลกระทบต่อฐานรากและโครงสร้างอุโบสถวัดร่องขุนด้วยวิธี มยพ. 1302, วิธีวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่าที่คาบอุบัติซ้ำ 475 ปี และวิเคราะห์ย้อนกลับเหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 ขนาด 6.3

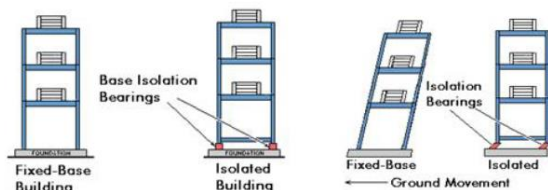
พบว่าโอกาสเกิด Liquefaction น้อย ไม่เกิดความเสียหายที่ผิวดิน ฐานรากและโครงสร้าง

แต่ทว่าเมื่อวิเคราะห์แผ่นดินไหวขนาดความรุนแรงสูงสุด 6.8 คาบอุบัติซ้ำ 3,000 ปี พบว่า

- ดินบริเวณตัวร่องชุมชนจะเกิด Liquefaction และจะก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวดิน
- กำลังแบกทานของชั้นดินไม่เพียงพอต่อแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหว
- โครงสร้างหลักวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดมากเกินไปกว่ากำลังรับแรงของชิ้นส่วนโครงสร้าง

7. ข้อเสนอแนะ

ควรทำการศึกษาอันตรายหรือเทคนิคต่างๆ เช่น เสริมเสาเข็มให้ลงไปถึงชั้นทรายแน่นหรือติดตั้ง Base isolator ที่ฐานของโครงสร้าง เพื่อหาวิธีลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับฐานรากและโครงสร้างหลักได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 9 Base Isolator

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าของท่าน เพื่อมาให้ความรู้ คำแนะนำ ที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการนี้ รวมทั้งช่วยแก้ปัญหาให้ข้อคิดและคำสอนต่างๆ ทำให้โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เฉลิมชัย โฆษิตพิพัฒน์ที่อนุญาตให้ใช้พื้นที่บริเวณวัดในการทำโครงการ รวมถึงขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนและสนับสนุนการวิจัย ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และมูลนิธิมณฑลนักษะภัย ที่ได้

เอื้อเฟื้อข้อมูลอันเป็นประโยชน์ในโครงการงาน และสนับสนุนทุนในการดำเนินการโครงการงาน ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2548. *แบบศาสนสถาน*. สืบค้นจาก <http://www.dpt.go.th/download/PW/religion/b01.php> สืบค้นวันที่ 8 มกราคม 2559.
- [2] กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2552. *มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302)*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. บริษัท ดิจิตอล ออฟเซต เอเชีย แปซิฟิก จำกัด.
- [3] เชิดพันธุ์ อมรกุล. 2553. *ฐานข้อมูลชั้นดินทางวิศวกรรมบริเวณที่ราบภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [4] บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด. ม.ป.ป. *ปรากฏการณ์ทรายเหลว*. สืบค้นจาก <http://www.panyaconsult.co.th/th/ผลกระทบ/305-ปรากฏการณ์ทรายเหลว.html> สืบค้นวันที่ 19 กันยายน 2558.
- [5] มงคล จิรวรรณเดช. 2557. *Reinforced Concrete Design (Strength Design Method)*.
- [6] สยาม ยัมศิริ. 2557. *การศึกษาพลังงานประสิทธิผลในการทดสอบ Standard Penetration Test ตามแนวทางการทดสอบที่ดำเนินการในประเทศไทย*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- [7] สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา. มิถุนายน 2557. *รายงานการเกิดแผ่นดินไหว บริเวณจังหวัดเชียงราย วันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 เวลา 18.08 น.*
- [8] สุขสันต์ หอพิบูลสุข. 2546. *วิศวกรรมฐานราก*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [9] เสริมพันธ์ เอี่ยมจะบก. 2555. *NEO RC DESIGN v.5*. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี.

โครงการศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย

- [10] Bernard R. Wair, Jason T. DeJong, and Thomas Shantz. (2012). *Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles*. PEER Report 2012/08. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Headquarters at University of California.
- [11] Darendeli, M. 2001. *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng., Univ. of Texas, Austin.
- [12] Hasancebi N, Ulusay R. 2007. *Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments*. Bull Eng Geol Environ 66(2):203–213.
- [13] Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. 2015. *DEEPSOIL 6.1, User Manual*. Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign
- [14] Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., and Yasuda, S. 1978. *A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan*. Proc., 2nd Int. Conf. on Microzonation, San Francisco, 885–896.
- [15] Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., Sato, H. 1982. *Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods*. Proceedings of 3rd International Conference on Microzonation, Seattle, 3, 1319-1330.
- [16] Jaky, J. 1948. *Pressure in silos*.”Proc. 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Nederland, 1, 103–107.
- [17] Robert W Day. 2002. *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*. McGraw–Hill.
- [18] Seed, H. B., and Idriss, I. M. 1971. *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 97(9), 1249–1273.
- [19] Soralump S., Feungaugorn J., Yangsanphu S., Jinagoolwipat M., Thongthamchart C., and Isaroranit R. 2014. *Impacts of 2014 Chiangrai Earthquake from Geotechnical Perspectives*. EIT-JSCE Joint International Symposium on Human Resource Development for Disaster-Resilient Countries. 25-26 August, 2014.
- [20] U.S. Geological Survey. 2006, August 18. *About Liquefaction*. [Online].URL: <http://geomaps.wr.usgs.gov/sfgeo/liquefaction/aboutliq.html>, Retrieved on September 19, 2015.

การวิเคราะห์ความมั่นคงของอุโบสถของวัดร่องขุน ต่อการเกิด Liquefaction จากแผ่นดินไหว

Stability Analysis of Wat Rong Khun's Main Hall Subjected to Liquefaction Induced by Earthquake

นางสาวกัญญารัตน์ นันทวิสิทธิ์, นายธัญญ์ วงศ์ตระกูล, รศ.ดร.สุทธิตกดิ์ ศรีลัมพ์



ที่มาและความสำคัญ

เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว มีศูนย์กลางอยู่ที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ขนาดแผ่นดินไหว 6.3 ความรุนแรงระดับ VIII ตามมาตราเมอร์คัลลี ส่งผลให้เกิดรอยแยกของพื้นดิน, ทรายพุ หรือ Liquefaction และได้สร้างความเสียหายให้กับศาสนสถานในจังหวัดเชียงรายเป็นอย่างมาก รวมถึงวัดร่องขุนซึ่งเป็นศาสนสถานและแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญแห่งหนึ่งของจังหวัดเชียงราย ซึ่งจากการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction และความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับมณฑปบริเวณวัดร่องขุนและโครงสร้างหลักของอุโบสถ โดยสามารถนำผลการประเมินดังกล่าวไปวางแผนการป้องกันและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวในอนาคต คงไว้ซึ่งความงดงามของพุทธศิลป์ให้อยู่คู่บ้านคูเมืองได้อย่างยั่งยืน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโอกาสการเกิด Liquefaction ในบริเวณวัดร่องขุน
2. เพื่อวิเคราะห์ฐานรากและโครงสร้างของวัดร่องขุนภายใต้ผลกระทบการเกิดแผ่นดินไหวและ Liquefaction

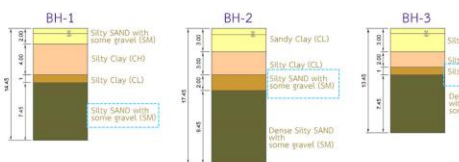
ขั้นตอนการดำเนินงาน



ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

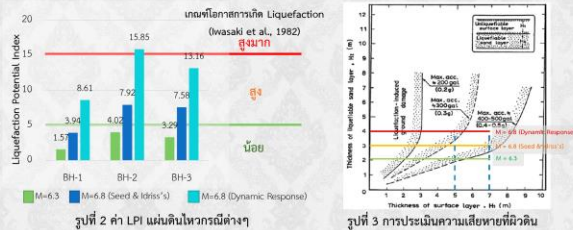
ตารางที่ 1 การประเมินคุณสมบัติแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอุโบสถ

ลำดับ	วิธีการคำนวณ	คาบอุบัติซ้ำ (ปี)	ขนาดแผ่นดินไหว (Mw)	อัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (g)	อ้างอิงจาก
1.	เหตุการณ์แผ่นดินไหววันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557	N/A	6.3	0.277	กรมทรัพยากรธรณี (2557)
2.	มย.1302 มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว	475	N/A	N/A	กรมโยธาธิการและผังเมือง (2552)
3.	การวิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่า (Deterministic Earthquake Analysis) พิกฐานจากรอยเลื่อนแม่ลาว	475	5.91	0.208	- กรมทรัพยากรธรณี (2552) - กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (2552)
3.2	ความรุนแรงสูงสุดของแผ่นดินไหว	3000	6.80	0.337	



รูปที่ 1 ผลการเจาะสำรวจอุโบสถ แสดงชั้นดินทรายที่มีโอกาสเกิด Liquefaction

ผลการวิเคราะห์



รูปที่ 2 ค่า LPI แผ่นดินไหวกรณีต่างๆ

ผลการประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction และความเสียหายที่ผิวดิน
เมื่อนำผลจาก Boring Log ดังรูปที่ 1 มาประเมินโอกาสการเกิด Liquefaction ด้วยวิธีต่างๆ พบว่าชั้นดินทรายบริเวณวัดร่องขุนจะเกิด Liquefaction ที่ความลึกตั้งแต่ 5-7 เมตรลงไป โดยเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ชั้นดินมีโอกาส Liquefy น้อยและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวดิน แต่ทว่าเมื่อได้รับแรงแผ่นดินไหวขนาดสูงสุด 6.8 ค่า LPI อยู่ระหว่าง 5 ถึง 15 แสดงว่าดินมีโอกาสเกิด Liquefaction สูงและจะสร้างความเสียหายแก่ผิวดินเมื่อ PGA อยู่ระหว่าง 0.4g ถึง 0.5g ดังรูปที่ 2 และ 3



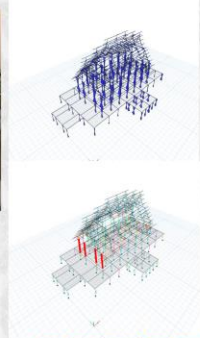
รูปที่ 4 แบบจำลองสามมิติสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างหลัก เพื่อนำไปจำลองโครงสร้างหลักด้วยวิธี Finite Element

ผลการวิเคราะห์ฐานราก

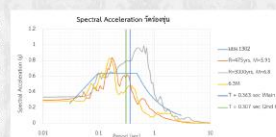
เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว ดินใต้ฐานรากจะวิบัติเนื่องจากกำลังรับแรงเกินความทนทานไม่เพียงพอ แต่จะไม่วิบัติเนื่องจากการเจาะทะลุ เพราะดินเหนียวชั้นบนสุดมีความหนาแน่นถึง 5-7 เมตร

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหลัก

วิเคราะห์อุโบสถตามมาตรฐาน ACI 318-08 กรณีแผ่นดินไหวขนาดสูงสุด 6.8 โครงสร้างเสาของอุโบสถเกิดความเสียหายเนื่องจากเกิดในแนบตัดสูงกวากำลังที่เสาจะรับได้ โดยเกิดในแนบตัดและเสาที่เสียหาย ดังรูปที่ 5 แต่จะไม่เกิดความเสียหายในแผ่นดินไหวกรณีอื่นๆ เนื่องจากคานการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างไม่ตรงกับคาบอัตราเร่งสูงสุดของแผ่นดินไหว ดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 Bending Moment Diagram และตำแหน่งเสาที่เสียหาย



รูปที่ 6 Natural Period ของโครงสร้างเทียบกับคาบอัตราเร่งของแผ่นดินไหวกรณีต่างๆ

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อวิเคราะห์โอกาสการเกิด Liquefaction และผลกระทบต่อฐานรากและโครงสร้างหลักของอุโบสถวัดร่องขุน ด้วยวิธี มข. 1302, วิเคราะห์แผ่นดินไหวเชิงกำหนดค่าที่คาบอุบัติซ้ำ 475 ปี และวิเคราะห์ย้อนกลับเหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 ขนาด 6.3 พบว่าโอกาสเกิด Liquefaction น้อย ไม่เกิดความเสียหายที่ผิวดิน ฐานรากและโครงสร้าง

แต่ทว่าผลการวิเคราะห์ต่อแรงแผ่นดินไหวขนาดความรุนแรง 6.8 ซึ่งเป็นขนาดสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในพื้นที่พบว่า

1. ดินบริเวณวัดร่องขุนจะเกิด Liquefaction และจะก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวดิน
 2. กำลังแบกทานไม่เพียงพอต่อแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหว
 3. โครงสร้างหลักอาจเสียหายเนื่องจากในแนบตัดมากเกินไปกำลังรับแรงของโครงสร้างนั้น
- ดังนั้นจึงควรเสริมความมั่นคงให้ฐานรากและโครงสร้างเพื่อป้องกันและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

ภาคผนวก จ

- กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำจากโครงการไปใช้
ประโยชน์
- ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้
กิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

โครงการ “ศึกษาการเกิดสภาพดินเหลวตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว ในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย” เป็นการดำเนินการศึกษาและเก็บข้อมูลในสนาม เช่น การสำรวจทางธรณีวิทยา การเจาะสำรวจและทดสอบคุณสมบัติดิน การติดตั้งท่อวัดการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน การติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน และทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการการวิเคราะห์และประเมินโอกาสในการเกิด liquefaction เพื่อจัดทำแผนที่เสี่ยงภัยต่อการเกิด liquefaction นอกจากนี้ ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ความมั่นคงของโบสถ์วัดร่องขุนต่อการเกิด Liquefaction จากแผ่นดินไหว และพัฒนาเครื่องมือสำหรับประเมินการเกิด Liquefaction ในสนาม ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

ผลที่ได้รับจากงานวิจัย	กิจกรรมที่นำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์
1. ข้อมูลชั้นดิน ข้อมูลน้ำใต้ดิน ข้อมูล shear wave velocity	เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบอาคารบ้านเรือน
2. แผนที่เสี่ยงภัยต่อการเกิด liquefaction และแผนที่เสี่ยงต่อการพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction	นำไปใช้ในการออกแบบอาคารบ้านเรือนให้มีความแข็งแรง ปลอดภัยจากพิบัติภัยจากแผ่นดินไหวและปรากฏการณ์ liquefaction
3. เครื่องมือ Screw Driving Sounding (SDS)	นำไปใช้เป็นเครื่องมือประเมินโอกาสการเกิด liquefaction สำหรับพื้นที่อื่นๆ
4. ความมั่นคงปลอดภัยของวัดร่องขุน ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวและ liquefaction ในอนาคต	เป็นแนวทางในการเสริมความมั่นคงให้กับวัดร่องขุน เช่น การออกแบบเสริมฐานรากเขื่อน ด้วยวิธี underpinning หรือการทำ base isolator เป็นต้น

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้

กิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

ลำดับ	วัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้	ผลที่คาดว่าจะได้รับ	ผลที่ได้รับจริง	ผลการดำเนินงาน
1.	ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินต่อการเกิด liquefaction ของพื้นที่ศึกษา	พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา	1. พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา 2. ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา สำหรับนำไปใช้วิเคราะห์จัดทำแผนที่เสี่ยงต่อการเกิด liquefaction	เป็นไปตามวัตถุประสงค์
2.	ศึกษาการเกิด liquefaction ของพื้นที่ศึกษา โดยสอบเทียบผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณีกับข้อมูลการเกิด liquefaction จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเชียงราย ขนาด 6.3	ตรวจสอบวิธีการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับพื้นที่ศึกษาหรือไม่	1. วิธี Cyclic stress ratio (CSR), Liquefaction Potential Index และ Liquefaction Manifestation มีความเหมาะสมกับการศึกษาในพื้นที่ อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย 2. การวิเคราะห์ค่า Liquefaction Potential Index ที่ใช้ค่า Cyclic stress ratio จากการวิเคราะห์ ground response analysis ให้ค่าที่สอดคล้องกับหลักฐานการเกิด liquefaction มากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการของ Seed et al. (2003)	เป็นไปตามวัตถุประสงค์
3.	พัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ประเมินการเกิด liquefaction ในสนาม	เครื่องมือเพื่อใช้ประเมินการเกิด liquefaction ในสนาม	เครื่องมือทดสอบ Screw Driving Sounding (SDS)	เป็นไปตามวัตถุประสงค์

ลำดับ	วัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้	ผลที่คาดว่าจะได้รับ	ผลที่ได้รับจริง	ผลการดำเนินงาน
4.	ศึกษาการเกิด liquefaction จากการทดสอบ shear wave velocity	วิธีการในการประเมิน liquefaction นอกเหนือจากข้อที่ 2	1. วิธีของ Andrus and Stokoe (2000) และ Kayen et al. (2013) สามารถใช้ตรวจสอบโอกาสการเกิด Liquefaction ด้วยวิธีคลื่นสั้นสะเทือน 2. ค่าความสัมพันธ์เชิงประพจน์เบื้องต้นระหว่าง ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) และจำนวนครั้งการตอกมาตรฐาน (SPT number) ในพื้นที่ศึกษา อำเภอแม่ลาว เป็นไปดังสมการ $Y = 133X^{0.161}$	เป็นไปตามวัตถุประสงค์
5.	ประเมินโอกาสเกิด liquefaction จากขนาดแผ่นดินไหวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในพื้นที่ศึกษา (Annual probability of liquefaction)	สร้างแผนที่เสี่ยงภัยต่อการเกิด liquefaction และแผนที่เสี่ยงต่อการพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction	1. แผนที่เสี่ยงภัยต่อการเกิด liquefaction 2. แผนที่เสี่ยงต่อการพิบัติของฐานรากตื้นเนื่องจาก Liquefaction	เป็นไปตามวัตถุประสงค์
6.	ประเมินความมั่นคงของวัดร่องขุน อ. เมือง จ.เชียงราย จากขนาดแผ่นดินไหวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในพื้นที่ศึกษา	ความมั่นคงของวัดร่องขุนต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว	1. มีโอกาสเสียหายหากเกิดแผ่นดินไหวสูงสุดขนาด 6.8 2. แนวทางในการเสริมความมั่นคงให้กับวัดร่องขุน เช่น การออกแบบเสริมฐานรากเขื่อน ด้วยวิธี underpinning หรือการทำ base isolator เป็นต้น	เป็นไปตามวัตถุประสงค์



รศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ และคณะ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ

โทรศัพท์/ โทรสาร 0 2579 2265 www.gerd.eng.ku.ac.th