



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (ระยะที่ 2)

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน
เพื่อการแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม และคณะ

กุมภาพันธ์ 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (ระยะที่ 2)

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน
เพื่อการแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่

คณะผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม

รองศาสตราจารย์ ดร. เป็นหนึ่ง วานิชชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชยานนท์ พรรษภิญโญ

สังกัด

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

ผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหวต่ออาคารมีระดับความรุนแรงที่ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลัก คือ คุณลักษณะของอาคารด้านการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว หรือคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และ ระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของพื้นดิน ณ บริเวณที่ตั้ง ซึ่งส่วนนี้เป็นผลมาจากองค์ประกอบหลักคือ คุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งอาคาร ได้แก่ คาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) และ ค่าความเร็วเฉือน (Shear Wave Velocity) ของชั้นดิน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้น ชั้นดินอาจสามารถขยายขนาดคลื่นและเพิ่มระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวได้โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นชั้นดินอ่อน และอาคารอาจเกิดการตอบสนองอย่างรุนแรงแบบการสั่นพ้อง หากคาบธรรมชาติของอาคารมีค่าใกล้เคียงกับคาบการสั่นหลักของคลื่นแผ่นดินไหว

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารซึ่งประกอบด้วย คาบธรรมชาติ (Natural Period) อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) และรูปร่างการสั่นไหว (Vibration Mode Shape) เป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการคำนวณหาระดับการโยกตัวของอาคารต่าง ๆ จากผลของแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้ววิธีหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ให้ผลถูกต้องที่สุดคือการตรวจวัดการสั่นไหวของอาคารจริง เนื่องจากการศึกษาพฤติกรรมที่รวมทุกองค์ประกอบของอาคาร อย่างไรก็ตามการตรวจวัดอาคารมีค่าใช้จ่ายสูง และสำหรับในขั้นตอนการออกแบบที่ยังไม่สามารถทำตรวจวัดอาคารได้ จำเป็นต้องมีแนวทางช่วยในการประมาณค่า ดังนั้นการเลือกตรวจวัดกลุ่มตัวอย่างของอาคารที่มีขนาด รูปร่าง และลักษณะการใช้งานต่าง ๆ จำนวนหลายอาคาร เพื่อนำข้อมูลไปพัฒนาเป็นสูตรการประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารเหล่านั้นที่ถูกต้องแม่นยำ และประเมินผลของแผ่นดินไหวต่ออาคารได้อย่างเหมาะสม จะเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวอย่างยิ่ง

ในการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง เพื่อประเมินระดับการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหว อาจทำได้โดยการเจาะสำรวจภาคสนาม ซึ่งสามารถได้ค่าที่ค่อนข้างแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติสูงมากและใช้เวลานาน จึงไม่สามารถทำการสำรวจหลาย ๆ ตำแหน่งได้ การศึกษาที่เป็นทางเลือกที่สามารถทำได้ดีคือ การตรวจวัดการสั่นสะเทือนของผิวดินในระดับตื้นที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นจากแรงที่เกิดตามธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนตัวของชั้นดินเอง หรือจากแรงต่าง ๆ บนผิวดิน เป็นต้น การตรวจวัดนี้ต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดในระดับ Micron และสามารถศึกษาได้ดีแม้ในบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวของชั้นดินด้วยค่าต่ำ ๆ วิธีนี้เรียกว่า การตรวจวัด Microtremor ซึ่งได้รับการพัฒนาประสิทธิภาพมากขึ้นในปัจจุบัน แต่ขาดการนำมาประยุกต์ใช้ในปัญหาด้านแผ่นดินไหวในประเทศไทย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร เพื่อการพัฒนาสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่เหมาะสมสำหรับใช้ออกแบบอาคารต้านทาน

แผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย โดยเป็นการศึกษากับกลุ่มอาคารที่ตั้งอยู่บนชั้นดินแข็ง คือเขตจังหวัดเชียงใหม่ เพื่อรวมกับข้อมูลของกลุ่มอาคารที่ตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อน คือเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่ได้ดำเนินการวิจัยแล้วเสร็จไปก่อนหน้านี้ และทำการสำรวจคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ที่มีผลต่อระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว โดยพื้นที่ศึกษาหลักคือ จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดเชียงราย และจังหวัดกาญจนบุรี รวมทั้ง กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

ขั้นตอนการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารประกอบด้วย การตรวจวัดสภาพการสั่นไหวที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ของอาคารจำนวนมากที่มี รูปทรง ขนาด ลักษณะโครงสร้าง และลักษณะการใช้งานต่างๆ ด้วยอุปกรณ์วัดที่มีความไวสูง แล้ววิเคราะห์หาคาบธรรมชาติ รูปร่างการสั่นไหว โดยวิธีใน Frequency domain และ ค่าอัตราส่วนความหน่วง ด้วยเทคนิค Eigensystem Realization Algorithm

งานวิจัยได้ดำเนินการศึกษากับอาคารในจังหวัดเชียงใหม่รวม 51 หลัง ที่มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 4 ถึง 22 ชั้นและความสูง 13 ถึง 67 เมตร และอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 20 หลัง ที่มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 4 ถึง 9 ชั้นและความสูง 15 ถึง 30 เมตร และรวมกับข้อมูลจากโครงการวิจัยก่อนหน้านี้จำนวน 50 หลัง รวมจำนวนอาคารทั้งหมด 121 หลัง

ผลการศึกษาค่าคาบธรรมชาติของอาคาร (T หน่วย วินาที) ที่ได้แสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับความสูงของอาคาร (H หน่วย เมตร) และจากการวิเคราะห์ Regression ของข้อมูลค่าคาบธรรมชาติในแต่ละทิศทางของการเสียรูปใน 2 แกนหลักที่ตั้งฉากกับแกนของอาคาร (Transverse and Longitudinal Direction) สำหรับกลุ่มอาคารในจังหวัดเชียงใหม่และอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล พบว่ามีความแตกต่างกันไม่มาก จึงพิจารณาใช้สมการในการประมาณค่าคาบธรรมชาติเดียวกันสำหรับทั้งสองกลุ่มอาคารเพื่อเป็นแนวทางที่สะดวกในการปฏิบัติ โดยผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารทั้งหมดจากการวิเคราะห์แบบมีเงื่อนไขให้เป็นสมการเส้นตรงแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสมการประมาณค่าในรูปแบบ สมการขอบเขตล่าง สมการค่าเฉลี่ย และสมการขอบเขตบน มีค่าเท่ากับ $0.0152H$ $0.0185H$ และ $0.0225H$ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสมการขอบเขตล่าง ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการตอบสนองภายใต้แผ่นดินไหว จึงสรุปเสนอสมการสำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทยคือ $T = 0.02H$ โดยสมการที่เสนอนี้ มีการเปรียบเทียบกับสมการที่เสนอไว้ในกฎกระทรวงแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550 ที่มีต้นแบบจากสมการประมาณค่าที่พัฒนาสำหรับอาคารของประเทศสหรัฐอเมริกา พบถึงความแตกต่างทั้งในรูปแบบของสมการ และค่าที่คำนวณได้

ผลการพิจารณาสมการแบบขอบเขตล่างและขอบเขตบนเพื่อกำหนดขอบเขตของค่าคาบที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีอื่นนอกเหนือจากการใช้สมการการประมาณ เสนอให้ หากใช้การคำนวณเพื่อการหาค่าคาบธรรมชาติโดยหลักการของพลศาสตร์โครงสร้าง ค่าคาบธรรมชาติที่ได้ไม่ควรมีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของค่าที่ได้จากสูตรการประมาณ

ในส่วนของการศึกษาคูณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ประกอบด้วยงาน 2 ส่วนคือ การตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุด (Single-Point Microtremor Observation) และการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation) เพื่อศึกษาคูณสมบัติของชั้นดินด้านการขยายขนาดคลื่นแผ่นดินไหว คือ คาบอิทธิพลหลัก และ ความเร็วคลื่นเฉือน หลักการตรวจวัดแบบ Microtremor แบบ 1 จุด คือการใช้เครื่องมือตรวจวัดคลื่นที่ผิวดินขนาดเล็กมากตามสภาพแวดล้อมปกติ ตรวจวัดเพียง 1 จุด โดยไม่ต้องทำการเจาะหลุมทดสอบหรือกระตุ้นด้วยแรงภายนอก แล้ววิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลักจากอัตราส่วนของ Spectrum ในแนวตั้งและในแนวนอนด้วยเทคนิค H/V spectrum ratio ส่วนการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน มีพื้นฐานคือการวัดการตอบสนองในแนวตั้งของผิวดินหลายตำแหน่งพร้อมกันและหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อหาคุณลักษณะด้านความเร็วเฟส ด้วยเทคนิค 2-sites Spatial Autocorrelation (2sSPAC) และทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาเป็นความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับความลึกต่าง ๆ

สำหรับการตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุด ดำเนินการศึกษารวมทั้งหมด 100 ตำแหน่งในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ และการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน ดำเนินการศึกษากำหนด 30 บริเวณในจังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 25 บริเวณในจังหวัดเชียงราย จำนวน 16 บริเวณในจังหวัดกาญจนบุรี และ จำนวน 4 บริเวณในกรุงเทพมหานคร

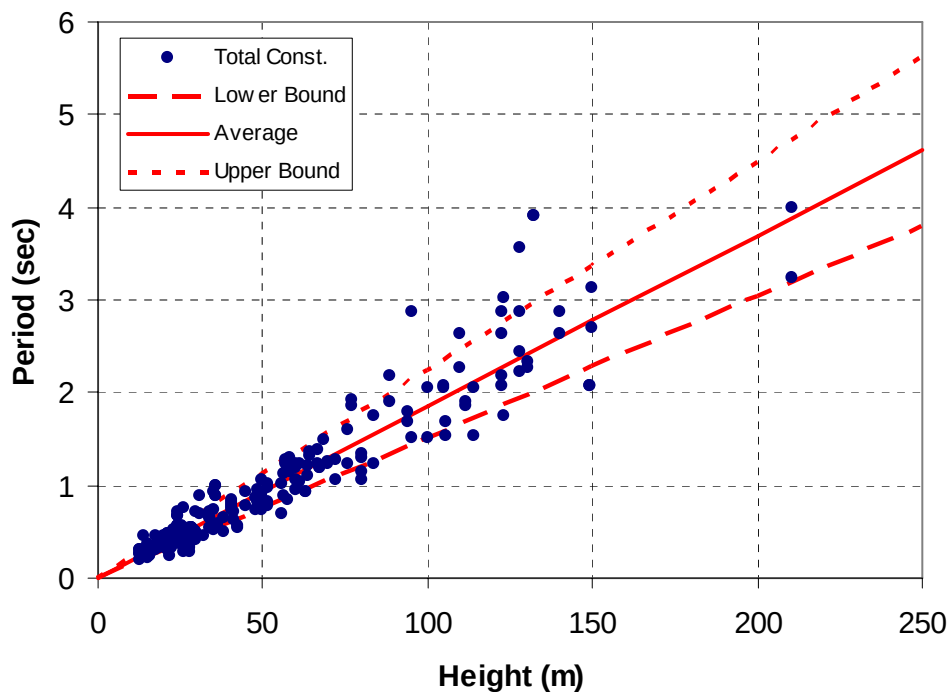
ผลการศึกษาค่าคาบอิทธิพลหลักจากการตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุดในจังหวัดเชียงใหม่ พบว่ามีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.8 วินาที เป็นส่วนมาก โดยในแต่ละบริเวณมีลักษณะที่แตกต่างกันตามสภาพธรณีวิทยาของชั้นดินที่มีความแตกต่างในแต่ละพื้นที่ ดังนี้ บริเวณ อ.เมือง มีค่าคาบอิทธิพลหลักแตกต่างกันอย่างมาก คือ บริเวณคูเมืองมีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.60 – 0.80 วินาที และพื้นที่บางส่วนของพื้นที่สูงกว่า 0.80 วินาที บริเวณรอบนอก อ.เมือง รัศมีประมาณ 15 กิโลเมตร มีค่าคาบอิทธิพลหลัก อยู่ในช่วง 0.40 – 0.60 วินาที ส่วนบริเวณทิศเหนือของพื้นที่ศึกษา คือ อ.แอมริม และ อ.สันทราย มีค่าคาบอิทธิพลหลักต่ำกว่า 0.40 วินาที

ผลการศึกษาความเร็วคลื่นเฉือนจากการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค 2-site Spatial Autocorrelation (2s-SPAC) ในส่วนแรกเป็นการพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งพบว่าวิธีที่พัฒนาให้ผลของค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดินสอดคล้องกับผลการสำรวจโดยการเจาะหลุมทดสอบและการตรวจวัดแบบ Array Microtremor ของงานวิจัยอื่นอย่างดี และจำแนกชั้นดินได้เป็นประเภทเดียวกัน ข้อดีต่อการประยุกต์ใช้ศึกษา คือ สามารถปฏิบัติได้โดยสะดวก เนื่องจากไม่ต้องทำการเจาะหลุมสำรวจและใช้อุปกรณ์และบุคลากรน้อยกว่าวิธีอื่นทำให้ประหยัดทั้งค่าใช้จ่ายและเวลาในการตรวจวัด นอกจากนี้ ค่าที่วิเคราะห์ได้ให้ผลถึงระดับความลึกเกินจากช่วงที่หลุมเจาะโดยทั่วไปมาก (ระดับ 80-100 เมตร ในงานวิจัยนี้)

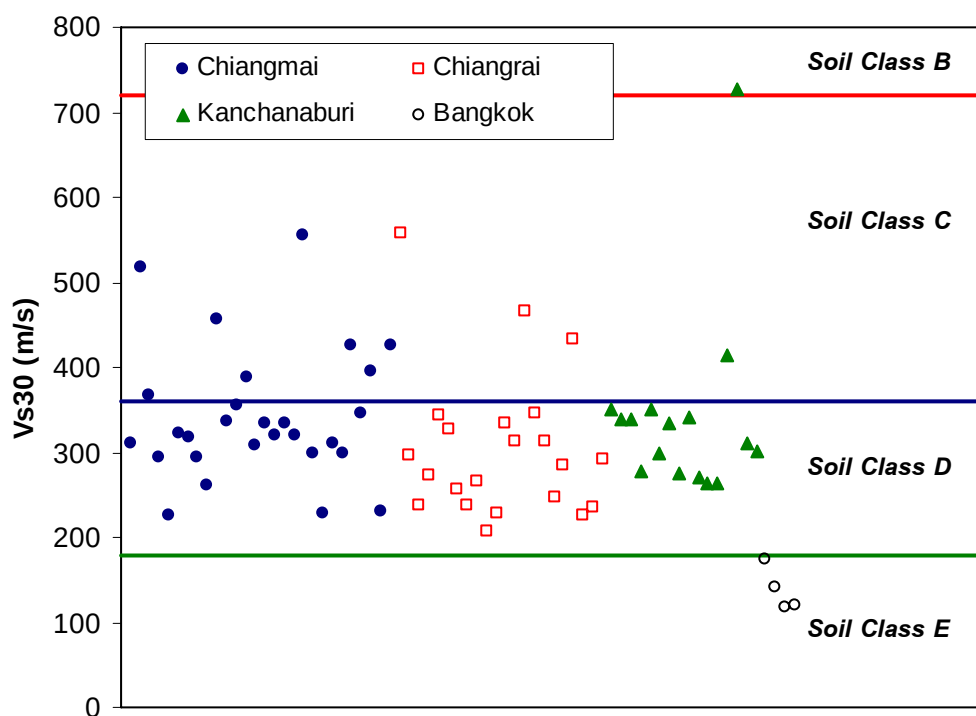
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบอิทธิพลหลักและความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร ของบริเวณที่ศึกษาแสดงเป็นแนวโน้มว่า บริเวณที่มีคาบอิทธิพลหลักต่ำจะมีความเร็วคลื่น

เนือสูง แสดงถึงเป็นบริเวณชั้นดินแข็ง ในทางกลับกัน บริเวณที่เป็นดินอ่อนมีค่าคาบอิทธิพลหลักสูงและความเร็วคลื่นเนือต่ำ ผลการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเนือเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร เมื่อนำมาใช้จำแนกชั้นดินตามข้อกำหนดของ NEHRP (2003) ได้ผลซึ่งแสดงถึงลักษณะของชั้นดินที่บริเวณที่ศึกษา เปรียบเทียบรวมไว้ในรูปที่ 2 โดยบริเวณที่ศึกษาในจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และกาญจนบุรี พื้นที่ราบในเขตอำเภอเมืองส่วนใหญ่จำแนกเป็น ชั้นดินประเภท D (ดินแข็ง) บางส่วนจำแนกเป็นชั้นดินประเภท C (ดินแข็งมาก กึ่งหิน) สำหรับบริเวณใกล้เชิงเขา และไม่พบชั้นดินประเภท E (ดินอ่อน) ส่วนผลการศึกษาในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลพบว่าทุกบริเวณจำแนกเป็น ชั้นดินประเภท E (ดินอ่อน)

ผลการวิจัยด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ได้ถูกนำไปใช้ในการพัฒนาเป็นการคำนวณค่าคาบธรรมชาติสำหรับอาคาร ใน มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302) กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2552 และผลการวิจัยด้านคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ทำให้สามารถจำแนกประเภทของดินเพื่อการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวบริเวณนั้นได้อย่างเหมาะสมสำหรับพื้นที่ศึกษา นอกจากนั้น วิธีวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้นในโครงการนี้ สามารถนำไปใช้สำรวจกับพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวอื่นๆ ในประเทศ รวมทั้ง สามารถนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อประเมินกำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ย่อย และจัดทำเป็น แผนที่เขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดสำหรับเมืองใหญ่ เพื่อประโยชน์ในการวางแผนจัดการการป้องกันภัยเนื่องจากแผ่นดินไหวต่อไป



รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารทั้งหมดจากการวิเคราะห์แบบมีเงื่อนไขเป็นสมการเส้นตรง



รูปที่ 2 ผลการจำแนกชั้นดินจากข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนของบริเวณที่ศึกษา

บทคัดย่อ

การประเมินระดับความรุนแรงของผลตอบสนองของอาคารมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางแผนจัดการการป้องกันภัยเนื่องจากแผ่นดินไหว ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อระดับความรุนแรงนี้คือ คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และ คุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งอาคาร งานวิจัยนี้ได้กำหนดวัตถุประสงค์คือ เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่มีผลต่อพฤติกรรมการตอบสนองของอาคารภายใต้แรงกระทำแบบพลวัตโดยการตรวจวัดการสั่นไหวตามธรรมชาติของอาคาร และ ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งอาคารที่มีผลต่อลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเนื่องจากสภาพชั้นดินของบริเวณที่ตั้ง โดยการตรวจวัดคลื่นการสั่นขนาดเล็กที่ผิวดิน เพื่อให้ผลการวิจัยได้นำไปใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในประเทศไทย

ในส่วนแรกของงานวิจัยเป็นการตรวจวัดการสั่นไหวตามธรรมชาติของอาคารกับอาคารจำนวน 51 หลังในจังหวัดเชียงใหม่ และ 20 หลังในเขตกรุงเทพมหานคร แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและรวมกับข้อมูลที่ได้ดำเนินการในงานวิจัยก่อนหน้านี้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์เชิงถดถอยสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับคุณลักษณะทางกายภาพของอาคาร ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าคาบธรรมชาติ (T หน่วย วินาที) สามารถแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความสูงของอาคาร (H หน่วย เมตร) เมื่อใช้สูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่างเพื่อให้ประมาณค่าแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวที่ปลอดภัยต่อการออกแบบมากขึ้น และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่ได้จากการตรวจวัดในระดับแรงต่ำเป็นค่าที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการตอบสนองภายใต้แผ่นดินไหว สามารถสรุปเสนอสมการสำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทยคือ $T = 0.02H$

งานวิจัยในส่วนที่สองเป็นการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งอาคารโดยการตรวจวัดคลื่นการสั่นขนาดเล็กที่ผิวดินและไม่ต้องเจาะหลุมดินเพื่อการสำรวจ โดยวิธีที่ใช้ศึกษาได้พัฒนาให้เหมาะสมในทางปฏิบัติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีสำรวจอื่นๆ เช่นการวัดในหลุมเจาะสำรวจ เนื่องจากวิธีนี้ใช้อุปกรณ์และบุคลากรจำนวนน้อยได้และให้ผลที่มีความถูกต้อง โดยเฉพาะในกรณีที่มีข้อจำกัดในการเจาะหลุมสำรวจ หลักการพื้นฐานของวิธีศึกษาด้วยการตรวจวัดคลื่นการสั่นขนาดเล็กที่ผิวดินคือ การเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติที่ผิวดินและวิเคราะห์สำหรับคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ได้แก่ คาบอิทธิพลหลัก และ ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดินที่บริเวณนั้น งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการตรวจวัดแบบ 1 จุด และวิเคราะห์อัตราส่วนของสเปกตรัมในแนวราบต่อสเปกตรัมในแนวตั้งของคลื่นที่ผิวดินเพื่อวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลักของพื้นที่ศึกษาในจังหวัดเชียงใหม่จำนวน 100 ตำแหน่ง และใช้เทคนิคขั้นสูงของการตรวจวัดแบบหลายจุดพร้อมกันและวิธีวิเคราะห์แบบ 2-sites Spatial Autocorrelation (2sSPAC) สำหรับการสำรวจค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน โดยมีหลักการคือการวัดการตอบสนองใน

แนวโน้มของผิวดินหลายตำแหน่งพร้อมกันและหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อหาคุณลักษณะด้านความเร็วเฟสเพื่อนำไปคำนวณค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยการวิเคราะห์แบบย้อนกลับ โดยได้ดำเนินการศึกษากับ 30 บริเวณในจังหวัดเชียงใหม่ 25 บริเวณในจังหวัดเชียงราย 16 บริเวณในจังหวัดกาญจนบุรี และ 4 บริเวณในกรุงเทพมหานคร

ผลการศึกษาค่าคาบอิทธิพลหลักของพื้นที่ศึกษาในจังหวัดเชียงใหม่พบว่า มีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.8 วินาที เป็นส่วนมาก ผลการศึกษาความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดินจากเทคนิค 2sSPAC แสดงได้ว่าวิธีที่พัฒนาให้ผลของความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดินสอดคล้องกับผลการสำรวจโดยการเจาะหลุมทดสอบและการตรวจวัดด้วยเทคนิคอื่นที่เคยมีผู้วิจัยไว้ก่อนหน้านี้เป็นอย่างดี ผลการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย เมื่อนำมาใช้จำแนกชั้นดินตามข้อกำหนดของ NEHRP (2003) ได้ผลคือบริเวณที่ศึกษาในจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และกาญจนบุรี ส่วนใหญ่จำแนกเป็น ชั้นดินประเภท D (ดินแข็ง) ส่วนผลการศึกษาในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลพบว่าทุกบริเวณจำแนกเป็น ชั้นดินประเภท E (ดินอ่อน)

Abstract

A quantitative prediction of structural response is very essential for assessing and mitigating the earthquake disaster. The major factors that control the intensity of response are the dynamic characteristics of the structure and the ground motion characteristics taking into account source, path and site effects. In this research, the objectives are to investigate the dynamic properties of building, which characterize response of the structure under dynamic effects, by ambient vibration measurement, and to study the site effects, which characterize the seismic response of sedimentary deposit beneath the site, by microtremor observations. The results are expected to serve as supporting information to develop the new standard of earthquake resistant design for buildings in Thailand.

In the first part, the ambient vibration measurements were conducted comprehensively for 51 buildings in Chiangmai and 20 buildings in Bangkok. The dynamic characteristics of the building were identified and combined with the previous results of 50 buildings in Bangkok to provide data for regression analysis to obtain the relationship between the fundamental periods and physical properties of the building. It was found that, the fundamental periods are mainly correlated to height of the building as linear relationship. To develop the approximate formula of the fundamental period incorporated into the new earthquake resistant design for buildings in Thailand, the lower bound formula of period versus height of the building was selected for the subsequent evaluation as a reason to provide conservative design seismic forces. The correction of period from low strain vibration to strong shaking level was made by collecting the observation results from literatures of period elongation due to earthquake. The recommended formula for the fundamental period in second, T , with height of the building in meter, H , is presented as $T = 0.02H$.

In the second part, the site effects of subsoils were extensively studied by microtremor observation techniques. This technique has superior outstanding features than the convention geophysics means such as PS logging test with boreholes that it requires less measurement efforts yet provides rationally accurate results, especially when the preparation of borehole has limitation and the results of deep soil deposit cannot be achieved. The basic principle of the microtremor observation is to record ambient vibration at the ground surface and analyze for the site characteristics such as the predominant period and the shear wave velocity profile at a given site. The technique of single point microtremor observation with Horizontal-to-Vertical spectral ratio (H/V) method was applied

to estimate the predominant period at 100 sites in Chiangmai. More comprehensive technique of array microtremor observation with 2-sites Spatial Autocorrelation (2sSPAC) was applied for exploration of shear wave velocity profile. The basis of 2sSPAC method is to simultaneously record the vertical component of microtremors for several positions and evaluates the correlation among them to determine phase velocity characteristic, then the shear wave velocity can be obtained by inversion analysis. In this study, 30 sites in Chiangmai, 25 sites in Chiangrai, 16 sites in Kanchanaburi and 4 sites in Bangkok were investigated.

The results of H/V microtremor observation in Chiangmai showed that the predominant periods are in the range of 0.4 to 0.8 second. The results of shear wave velocity profiles from 2sSPAC technique were in good agreement when compared with the results from downhole investigation and the other techniques performed by previous researchers. Site classification based on average shear wave velocity can be done and the results revealed that subsoils of Chiangmai, Chiangrai and Kanchanaburi are classified as class D (dense or stiff soil) in most area while all sites in Bangkok are classified as class E (soft soil), regarding to the definition in NEHRP 2003.

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	i
บทคัดย่อ	vi
Abstract	viii
สารบัญ	x
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตของการศึกษา	4
2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	5
2.2 การประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	6
2.3 การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินโดยการตรวจวัด Microtremor	8
2.4 การหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation)	10
2.5 การหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนในประเทศไทย	12
3 ทฤษฎีและระเบียบวิธีที่ใช้วิจัย	13
3.1 การเตรียมความพร้อมสำหรับการ ตรวจวัดแบบ Ambient Vibration หรือ Microtremor	13
3.1.1 อุปกรณ์รับข้อมูล (Data Acquisition Instrument)	13
3.1.2 หัววัดสัญญาณ (Sensor)	14
3.2 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	16
3.2.1 การตรวจวัดค่าความถี่ธรรมชาติ	16
3.2.2 การตรวจวัดรูปร่างการสั่นไหว (Vibration Mode Shape)	16
3.2.3 การคำนวณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	17
3.2.4 การวิเคราะห์รูปร่างการสั่นไหว	18
3.3 การพัฒนาสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคาร สำหรับการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว	19
3.4 สูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารในมาตรฐาน การออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว	21

3.4.1 National Building Code of Canada (NBC)	21
3.4.2 American Society of Engineers (ASCE)	22
3.4.3 สูตรการประมาณของประเทศญี่ปุ่น	23
3.4.4 Eurocodes	24
3.4.5 Australian Standard	25
3.4.6 British Standard	25
3.4.7 New Zealand code	25
3.4.8 Mexico City Building Code	26
3.4.9 กฎกระทรวงแผ่นดินไหวฯ พ.ศ. 2550	26
3.5 คลื่นแผ่นดินไหว (Seismic Wave)	28
3.5.1 Body Wave	28
3.5.2 Surface Wave	28
3.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธี H/V Spectrum Ratio	29
3.7 วิธี Spatial Autocorrelation (SPAC) และ 2sSPAC	33
3.7.1 ทฤษฎีของวิธี SPAC และ 2sSPAC	33
3.7.2 วิธีการตรวจวัดและการวิเคราะห์โดยวิธี 2sSPAC	35
3.7.3 วิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis)	38
3.7.4 รูปแบบการวางห้ววัดเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับวิธี 2-site Spatial Autocorrelation (2sSPAC)	38
3.8 การจำแนกประเภทของดิน	40
4 ผลการศึกษาการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	42
4.1 ค่าคาบธรรมชาติจากการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	42
4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าคาบธรรมชาติสำหรับประเทศไทย	52
4.3 การปรับค่าคาบธรรมชาติจากผลการวัดแบบ Ambient Vibration เป็นค่าสำหรับผลตอบสนองในระดับรุนแรง	60
4.4 การพิจารณาข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่ศึกษา	70
5 ผลการศึกษาการศึกษาคูณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง	78
5.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูล	78
5.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าคาบอิทธิพลหลักโดยวิธี H/V Spectrum Ratio	78
5.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกโดยวิธี 2sSPAC	84
5.1.3 การบันทึกข้อมูลที่ตรวจวัด	85
5.1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก	86

5.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งโดยการวัด Microtremor บนพื้นดิน แบบ 1 จุด	99
5.3 ผลการศึกษาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก โดยวิธี 2sSPAC	108
6 สรุปผลการศึกษา	127
6.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	127
6.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน	128
6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป	130
เอกสารอ้างอิง	131
ภาคผนวก	135

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

แผ่นดินไหวเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่สามารถก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงที่สุดต่อมวลมนุษย์ เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เคยเกิดในต่างประเทศหลายครั้งได้สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมาก สำหรับประเทศไทยประชาชนทั่วไปมักมีความเชื่อว่าภัยพิบัติแผ่นดินไหวที่รุนแรงเช่นนั้นจะไม่มีโอกาสเกิดขึ้นในประเทศไทย เพราะไม่เคยมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีผลกระทบรุนแรงที่เกิดขึ้นในอดีตมาก่อน อย่างไรก็ตามมีผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหวในด้านต่าง ๆ เช่น การตรวจสอบหลักฐานทางประวัติศาสตร์ การตรวจวัดด้วยเครือข่ายสถานีวัดแผ่นดินไหว รายงานการสำรวจรอยเลื่อนในเบื้องต้น งานวิจัยใหม่ ๆ ที่เกี่ยวกับแผ่นดินไหวในประเทศไทย รวมทั้งผลกระทบจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่ส่งผลชัดเจนต่อประเทศจนสร้างความตื่นตระหนกเป็นระยะ ๆ ข้อมูลเหล่านี้ได้แสดงให้เห็นถึงความเสี่ยงภัยเนื่องจากแผ่นดินไหวของประเทศไทย กล่าวคือภัยพิบัติแผ่นดินไหวที่รุนแรงนั้นมีโอกาสเกิดขึ้นได้จริงในพื้นที่บางส่วนของประเทศไทย เช่น บริเวณภาคเหนือและตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศ เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีแนวรอยเลื่อนที่อาจทำให้เกิดแผ่นดินไหวขนาดกลางประมาณ 5-6 ริคเตอร์ อันเป็นแผ่นดินไหวที่มีศักยภาพในการทำลายสูงในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว แผ่นดินไหวขนาดปานกลางดังกล่าวได้เกิดขึ้นแล้วหลายครั้งในประเทศไทย แต่ทว่าในการเกิดที่ผ่านมาศูนย์กลางของแผ่นดินไหวมิได้อยู่ใกล้กับชุมชน จึงไม่มีรายงานความเสียหายที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นกรุงเทพมหานครและปริมณฑลก็อาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวระยะไกลได้ เนื่องด้วยสภาพดินใต้กรุงเทพมหานครเป็นดินอ่อน และไต่ลงไปเป็นชั้นของดินแข็ง ซึ่งมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงสภาพดินในลักษณะนี้สามารถขยายคลื่นแผ่นดินไหวได้หลายเท่าตัว ดังนั้น จึงอาจเกิดผลกระทบจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในระยะไกลได้

ระดับความรุนแรงของผลกระทบต่ออาคารเนื่องจากแผ่นดินไหวขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลัก คือ คุณลักษณะของอาคารด้านการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว หรือคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และ ระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของพื้นดิน ณ บริเวณที่ตั้ง โดยในส่วนนี้เป็นผลมาจากหลายองค์ประกอบ และองค์ประกอบหลักคือ คุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งอาคาร ซึ่งค่าที่สำคัญที่จำเป็นต่อการศึกษาค่าได้แก่ ค่าคาบธรรมชาติ หรือคาบอิทธิพลหลัก (Natural Period or Predominant Period) และ ค่าความเร็วเฉือน (Shear wave velocity) ของชั้นดิน ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้น ชั้นดินอาจสามารถขยายขนาดคลื่นและเพิ่มระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวได้โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นชั้นดินอ่อน และอาคารอาจเกิดการตอบสนองอย่างรุนแรงแบบการสั่นพ้อง หากค่าคาบธรรมชาติของอาคารมีค่าใกล้เคียงกับค่าคาบการสั่นหลักของคลื่นแผ่นดินไหว ซึ่งมีตัวอย่างคือเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ประเทศเม็กซิโกเมื่อวันที่ 19 กันยายน ค.ศ. 1985 โดยมีศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ห่างจากเมืองเม็กซิโกซิตีประมาณ 350 กม. ซึ่งบริเวณฝั่ง

ตะวันตกของเมืองเม็กซิโกซิตีตั้งอยู่บนชั้นดินที่เคยเป็นทะเลสาบในอดีต โดยมีชั้นดินอ่อนวางตัวเหนือชั้นดินแข็งทำให้เมื่อเกิดแผ่นดินไหว มีการขยายคลื่นแผ่นดินไหวส่งผลให้เกิดความเสียหายรุนแรงอย่างมาก ซึ่งต่างจากฝั่งตะวันตกเฉียงใต้ที่ตั้งอยู่บนชั้นดินแข็งและมีความเสียหายน้อยกว่าเนื่องจากมีลักษณะทางธรณีวิทยาที่ต่างกันแม้จะอยู่ในบริเวณเมืองเดียวกันก็ตาม และอาคารที่ได้รับความเสียหายเป็นกลุ่มอาคารที่มีค่าคาบธรรมชาติใกล้เคียงกับค่าคาบการสั่นหลักของคลื่นแผ่นดินไหวที่ถูกขยายนั้น จากเหตุการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณสมบัติของชั้นดินบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อการประเมินผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหวต่อโครงสร้าง

ดังนั้น คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารซึ่งประกอบด้วย คาบธรรมชาติ (Natural Period) อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) และรูปร่างการสั่นไหว (Vibration Mode Shape) จึงเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการคำนวณหาระดับการโยกตัวของอาคารต่าง ๆ จากผลของแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้ววิธีหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ให้ผลถูกต้องที่สุดคือการตรวจวัดการสั่นไหวของอาคารจริง เนื่องจากการศึกษาพฤติกรรมที่รวมทุกองค์ประกอบของอาคาร อย่างไรก็ตามการตรวจวัดอาคารมีค่าใช้จ่ายสูง และสำหรับในขั้นตอนการออกแบบที่ยังไม่สามารถทำตรวจวัดอาคารได้ จำเป็นต้องมีแนวทางช่วยในการประมาณค่า ดังนั้นการเลือกตรวจวัดกลุ่มตัวอย่างของอาคารที่มีขนาด รูปร่าง และลักษณะการใช้งานต่าง ๆ จำนวนหลายอาคาร เพื่อนำข้อมูลไปพัฒนาเป็นสูตรการประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารเหล่านั้นที่ถูกต้องแม่นยำ และประเมินผลของแผ่นดินไหวต่ออาคารได้อย่างเหมาะสม จะเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวอย่างยิ่ง

จากผลการดำเนินงานโครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยในระยะที่ 1 ของโครงการย่อยที่ 3 “การตรวจวัดและศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Properties) ของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร” ภายใต้การสนับสนุนจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้บรรลุวัตถุประสงค์ของการตรวจวัดค่าคุณสมบัติของโครงสร้างอาคารในกรุงเทพมหานครที่ตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อน โดยสามารถหาแนวทางการประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารทั่วไปในกรุงเทพมหานครได้ การดำเนินงานในขั้นต่อไปคือขยายขอบเขตการวิจัยไปสู่การศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ดังกล่าวสำหรับอาคารที่ตั้งอยู่บนชั้นดินที่มีสภาพแตกต่างกัน เช่นชั้นดินแข็งที่บริเวณภาคเหนือ และยังอยู่ในพื้นที่ที่ใกล้แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวอันเป็นปัญหาในลักษณะของแผ่นดินไหวใกล้แนวรอยเลื่อน ซึ่งมีลักษณะของการสั่นสะเทือนของพื้นดินแตกต่างจากปัญหาของกรุงเทพมหานครที่เป็นปัญหาของแผ่นดินไหวระยะไกล เพื่อให้มีข้อมูลสำหรับอาคารที่อยู่ในพื้นที่ลักษณะต่าง ๆ และพิจารณาการกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวที่เหมาะสมได้

นอกเหนือไปจากคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่มีผลต่อการโยกตัวของอาคารแล้วระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่เกิดต่ออาคารขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของชั้นดินที่บริเวณนั้นด้วยในการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินที่ใช้ประเมินระดับการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหว

อาจทำได้โดยการเจาะสำรวจภาคสนาม (Borehole method) ซึ่งสามารถได้ค่าที่ค่อนข้างแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติสูงมากและใช้เวลานาน จึงไม่สามารถทำการสำรวจหลาย ๆ ตำแหน่งได้ การศึกษาที่เป็นทางเลือกที่สามารถทำได้ก็คือ การตรวจวัดการสั่นสะเทือนของผิวดินในระดับตื้นที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นจากแรงที่เกิดตามธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนตัวของชั้นดินเอง หรือจากแรงต่าง ๆ บนผิวดิน เป็นต้น การตรวจวัดนี้ต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดในระดับ Micron และสามารถใช้ศึกษาได้ดีแม้ในบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวของชั้นดินด้วยค่าต่ำ ๆ วิธีนี้เรียกว่า การตรวจวัด Microtremor ซึ่งได้รับการพัฒนาประสิทธิภาพมากขึ้นในปัจจุบัน และมีเทคนิคการศึกษาหลายรูปแบบ เช่น การตรวจวัด 1 ตำแหน่งเพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นในแนวราบต่อคลื่นในแนวตั้ง (Horizontal/Vertical ratio หรือ H/V spectral ratio method) และวิธีที่ตรวจวัดหลายตำแหน่งพร้อมกันเป็นโครงข่าย (Array Microtremor Observation) ที่ให้ผลการศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินในเชิงพลศาสตร์ได้สมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม การศึกษาแบบ Array Microtremor Observation ต้องใช้บุคลากรเครื่องมือ และกระบวนการวิเคราะห์ขั้นสูง จึงขาดการนำมาประยุกต์ใช้ในปัญหาด้านแผ่นดินไหวในประเทศไทย

ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาด้านคุณสมบัติของอาคาร เพิ่มเติมให้สมบูรณ์เพื่อการพัฒนาสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่เหมาะสมสำหรับใช้ออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย และทำการสำรวจคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ที่มีผลต่อระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว เพื่อสามารถนำข้อมูลไปวางแผนจัดทำแผนที่แบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียด (Seismic Microzonation) โดยพื้นที่ศึกษาหลักคือ การศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ดำเนินการศึกษาที่อาคารในจังหวัดเชียงใหม่ และการสำรวจคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ดำเนินกับเขตเมืองใหญ่ที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว และยังขาดข้อมูลดังกล่าว โดยดำเนินการศึกษาในบริเวณ จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดเชียงราย และจังหวัดกาญจนบุรี รวมทั้ง กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

ผลการศึกษาที่ได้คาดว่าจะประโยชน์ต่อการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้องสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในประเทศไทย ซึ่งในที่สุดจะส่งผลให้โครงสร้างที่ได้รับการออกแบบตามมาตรฐานที่ถูกปรับปรุงมีความปลอดภัยยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ ด้วยการตรวจวัดสภาพการสั่นไหวของอาคารจริงเป็นจำนวนมากที่มี รูปทรง ขนาด ลักษณะโครงสร้าง และลักษณะการใช้งานแตกต่างกัน

2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติในการหน่วงหรือขยายสัญญาณคลื่นแผ่นดินไหวของชั้นดินตัวกลางในเขตจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย กาญจนบุรี และเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยวิธีการตรวจวัด Microtremor
3. เพื่อนำความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติดังกล่าวมาจัดทำข้อเสนอในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในประเทศไทย

1.3 ระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตของการศึกษา

1. ตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารที่อยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ด้วยอุปกรณ์วัดที่มีความไวสูง โดยทำการตรวจวัดอาคารในเขตจังหวัดเชียงใหม่ ที่มีรูปทรง, ขนาด, ลักษณะโครงสร้าง, และลักษณะการใช้สอยที่แตกต่างกัน เป็นจำนวนรวมทั้งสิ้น ประมาณ 50 อาคาร
2. นำผลการตรวจวัดซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัล มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคที่เหมาะสมเพื่อหาความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies), รูปแบบของการสั่นสะเทือน (Vibration Mode Shapes) และ ค่าความหน่วง (Damping Ratios) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่สำคัญของอาคาร
3. ศึกษาหาความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์กับคุณสมบัติพื้นฐานด้านอื่นๆของอาคาร ที่สามารถประเมินได้ง่าย เช่น ขนาดความกว้าง, ยาว, สูง ของอาคาร
4. ตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินในภาคสนาม โดยตรวจวัดการสั่นสะเทือนที่มีอยู่ในธรรมชาติที่ผิวดิน (Microtremor) แบบ 1 จุด ด้วยอุปกรณ์วัดที่มีความไวสูง พื้นที่ที่ศึกษาครอบคลุมพื้นที่ในเขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่ โดยที่จุดตำแหน่งที่ตรวจวัดกระจายอยู่ในพื้นที่นี้และจำนวนจุดวัดรวมทั้งสิ้น ประมาณ 100 ตำแหน่ง
5. ตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินในภาคสนาม โดยตรวจวัดการสั่นสะเทือนที่มีอยู่ในธรรมชาติที่ผิวดิน แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation) พื้นที่ที่ศึกษาครอบคลุมพื้นที่ในเขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดเชียงราย และจังหวัดกาญจนบุรี รวมทั้ง กรุงเทพมหานครและปริมณฑล
6. ประเมินค่าคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งอาคาร ได้แก่ ค่าคาบอิทธิพลหลัก ด้วยเทคนิค H/V spectrum ratio และ Shear wave velocity ของชั้นดินด้วยเทคนิค 2-site Spatial Autocorrelation (2s-SPAC)

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

การหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารด้วยวิธีตรวจวัดสภาพการสั่นไหวของอาคารนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมปฏิบัติ คือ การตรวจวัดการสั่นไหวโยกตัวของอาคารในระดับต่ำที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ซึ่งเกิดจากแรงกระทำหรือการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมที่มีอยู่รอบๆอาคารและภายในอาคาร เช่น แรงลม การสั่นสะเทือนของพื้นดินเนื่องจากการจราจร กิจกรรมของผู้คนในอาคาร ฯลฯ โดยทั่วไปแล้ว การสั่นไหวในลักษณะนี้จะมีระดับที่ต่ำจนผู้คนทั่วไปในอาคารไม่สามารถรู้สึกได้แต่สามารถตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนที่มีความไวสูง

การตรวจหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจาก Ambient Vibration ได้เริ่มขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1964 โดย Crawford และ Ward (1964) ได้นำอุปกรณ์วัดคลื่นแผ่นดินไหว (Seismometer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดความเร็วของการสั่นสะเทือน (Velocity Transducer) ในระดับต่ำได้มาใช้ การบันทึกสัญญาณวัดและวิเคราะห์ผลทำให้ระบบบนาล็อก ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากไม่สะดวกในทางปฏิบัติ ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 Trifunac (1970) ได้ปรับปรุงระบบการบันทึกสัญญาณวัดและวิเคราะห์ผลให้เป็นระบบดิจิทัล และได้นำเทคนิคที่เรียกว่า Fast Fourier Transform (FFT) มาใช้แปลงสัญญาณวัดให้เป็น Fourier Amplitude Spectrum ซึ่งแสดงให้เห็นส่วนผสมของคลื่นความถี่ต่างๆในสัญญาณวัดได้อย่างชัดเจน เส้นกราฟ Spectrum นี้จะปรากฏมียอดแหลมที่ทุก ๆ ตำแหน่งที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของอาคาร (อาคารแต่ละหลังมีการสั่นไหวหลายรูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบจะมีความถี่ธรรมชาติ 1 ค่า และอัตราความหน่วง 1 ค่า) ทำให้สามารถตรวจหาค่าความถี่ธรรมชาติได้โดยง่าย ค่าอัตราส่วนความหน่วงหาได้จากความกว้างของยอดแหลมด้วยวิธีที่เรียกว่า Half-power Bandwidth ส่วนรูปแบบการสั่นไหว (Vibration Mode Shape) สามารถคำนวณได้จาก สัดส่วนความสูงของยอดแหลมของ spectrum ที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนของอาคารในหลายตำแหน่งพร้อมกัน (Fourier Spectral Ratio)

วิธีของ Trifunac เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับกันว่า วิธีนี้สามารถนำไปใช้หาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างต่างๆได้เป็นอย่างดีในกรณีที่ความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหวรูปแบบต่างๆ มีค่าที่กระจายตัวแยกห่างออกจากกัน ซึ่งอาคารส่วนใหญ่มักจะเป็นเช่นนี้ แต่ในบางกรณีที่อาคารมีค่าความถี่ธรรมชาติบางค่าใกล้เคียงกันมาก วิธีของ Trifunac อาจให้ผลที่คลาดเคลื่อนได้ ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาวิธีใหม่อีกหลายวิธีเพื่อแก้ปัญหาในกรณีเช่นนี้ ตัวอย่างเช่น วิธี Curve-fitting ของ Meyyappa (1981) วิธี Rational Fraction Polynomial ของ Richardson (1982) เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาเทคนิควิธีการใหม่ๆในการวิเคราะห์สัญญาณวัดเพื่อหาค่าอัตราส่วนความหน่วง เช่น วิธี Auto Correlation โดย Taoka (1975) วิธี Random Decrement โดย Cole (1973) วิธี Ibrahim Time Domain โดย Ibrahim และ Pappa

(1981) วิธี Natural Excitation Technique/ Eigensystem Realization Algorithm (NExT/ERA) โดย Juang (1994) เป็นต้น วิธีต่างๆเหล่านี้มีจุดเด่นและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน การนำมาประยุกต์ใช้จึงจำเป็นต้องพิจารณาเลือกวิธีที่เหมาะสมกับสถานการณ์

ในปี ค.ศ. 2000 สมจิต (2000) ได้เริ่มนำวิธีของ Trifunac มาตรวจหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างต่างๆในประเทศไทย ได้แก่ สะพานคนเดินเท้า (Pedestrian Bridge) พื้นอาคารขนาดใหญ่ของโรงยิมเนเซียม และอาคารสูง อุปกรณ์วัดที่นำมาใช้เป็นเครื่องวัดความเร่งของการสั่นสะเทือน (Accelerometer) ที่มีความไวสูง มี resolution ในระดับ micro-g (g คือ ค่าความเร่งของสนามโน้มถ่วงโลก = 9.81 m/s^2) และสามารถเก็บบันทึกสัญญาณดิจิทัลได้ด้วยเครื่องบันทึกแบบพกพา (Portable Seismic Recorder) ต่อมาในปี ค.ศ. 2001 ธีรพล (2001) ได้ทำการปรับปรุงเทคนิควิธีของ Trifunac ให้สามารถตรวจวัดรูปแบบการสั่นไหวของอาคารที่มีส่วนผสมของการโยกตัว (Lateral Deformation) และบิดตัว (Torsion) ได้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังได้ทดลองนำกลุ่มคนมาช่วยเขย่าอาคารด้วยการให้ทุกคนเหวี่ยงตัวพร้อมกันไปบนยอดอาคารตามเครื่องให้จังหวะ (Metronome) ซึ่งกำหนดให้มีจังหวะใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวที่ต้องการตรวจวัด ด้วยวิธีดังกล่าวนี้ ธีรพลสามารถกระตุ้นให้สภาพการสั่นไหวของอาคารในรูปแบบที่สนใจมีความชัดเจนดีขึ้นมาก ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ตรวจวัดได้มีความถูกต้องแม่นยำขึ้น และต่อมาได้มีการตรวจวัดอาคารในกรุงเทพมหานครอย่างต่อเนื่อง (ชาคร, 2002; ประยุทธ์, 2545; มานะ, 2546) จนสามารถได้ฐานข้อมูลด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจำนวน 50 หลัง และมีการศึกษาด้านเทคนิคในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์จากผลการตรวจวัดที่ให้ผลที่ถูกต้องและเหมาะสมในการใช้งานมากขึ้น (วีระศักดิ์, 2546)

2.2 การประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

แนวทางในการประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารสามารถแบ่งได้เป็น 2 แนวทางหลัก คือ การคำนวณด้วยสูตรประมาณค่า (Empirical Approach) และการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอาคาร (Numerical Analysis Approach)

แนวทางแรก คือ การคำนวณด้วยสูตรประมาณค่า เป็นแนวทางที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติเนื่องจากง่ายและสะดวก สูตรประมาณค่าที่ใช้มักเป็นสูตร Empirical แสดงความสัมพันธ์โดยเฉลี่ยระหว่างความถี่ธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน (Fundamental Mode) ของอาคาร กับคุณสมบัติบางอย่างของอาคารที่สามารถประเมินได้ง่ายๆ เช่น ขนาดความกว้าง ยาว สูง ของอาคาร ประเภทของวัสดุและโครงสร้างของอาคาร พื้นที่หน้าตัดและความยาวของกำแพงคอนกรีตรับแรงเฉือนของอาคาร เป็นต้น สูตร Empirical เหล่านี้ได้ถูกสร้างขึ้นมาจากข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารเป็นจำนวนมากที่ได้จากการตรวจวัดจริง (Goel, 1997) ดังนั้นจึงแสดงความสัมพันธ์โดยเฉลี่ยที่ถูกต้อง

อย่างไรก็ดี แนวทางนี้มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ที่สำคัญ คือ (1) ความถี่ธรรมชาติของอาคารจริงแต่ละหลังอาจมีค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยที่คำนวณจากสูตรได้มาก เนื่องจากสูตรประมาณค่าเหล่านี้ยังไม่ได้ครอบคลุมถึงปัจจัยอีกหลายประการที่อาจส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของอาคาร (2) สูตร Empirical ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวในหลายๆ ประเทศมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจากแนวทางปฏิบัติในการออกแบบก่อสร้างอาคารนั้นแตกต่างกัน (Seed, 1989) ด้วยเหตุนี้ การนำสูตร Empirical เหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในประเทศไทยโดยมิได้ทำการตรวจสอบก่อนก็อาจทำให้การประมาณค่ามีความคลาดเคลื่อนสูง (3) สูตร Empirical เหล่านี้มักใช้ประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานเท่านั้น ไม่ได้ครอบคลุมถึง คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ในรูปแบบอื่นๆ

แนวทางที่ 2 ในการประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร คือ การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอาคาร ซึ่งมักอยู่ในรูปของแบบจำลอง Finite Element แบบจำลองในลักษณะนี้จะช่วยให้สามารถจำลองพฤติกรรมความยืดหยุ่นของอาคารในรูปของ Stiffness Matrix และจำลองลักษณะการกระจายตัวของมวลในอาคารในรูปของ Mass Matrix เมื่อนำข้อมูลทั้ง 2 แบบไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Eigen Analysis จะทำให้สามารถคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติ และรูปแบบการสั่นไหวของอาคารได้ (Clough, 1993; Chopra, 1995)

โดยปกติในขั้นตอนการออกแบบอาคาร วิศวกรจำเป็นต้องสร้างแบบจำลอง Finite Element ของอาคารเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างเมื่อรับน้ำหนักหรือแรงกระทำ แบบจำลองเหล่านี้มักเป็นแบบจำลองแบบง่าย (Simplified Model) ที่ไม่ได้คำนึงถึงส่วนผลเนื่องจากส่วนประกอบของอาคารที่ไม่ใช่โครงสร้าง (Non-Structure Components) และสร้างขึ้นบนพื้นฐานของข้อสมมุติฐานหลายข้อที่ไม่สมจริง เช่น สมมุติว่าฐานรากของอาคารไม่มีการเคลื่อนตัวหรือเปลี่ยนรูป (Rigid Foundation) เป็นต้น แบบจำลองเหล่านี้หากนำไปใช้วิเคราะห์เพื่อประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ก็อาจให้ผลที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้มาก เพราะไม่สามารถจำลองพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอาคารได้อย่างถูกต้อง

ตัวอย่างเช่น Meyyapa et.al. (1981) และ Torkamani et.al. (1988) ได้ทำการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารด้วยวิธี Ambient Vibration ในระหว่างการก่อสร้าง พบว่าการเพิ่มส่วนประกอบของอาคารที่ไม่ใช่ส่วนของโครงสร้างเช่น ผนังกำแพงอิฐก่อ (Masonry Infill Wall) มีผลต่อการเพิ่มค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารอย่างชัดเจน ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 Chaker (1999) ได้ทำการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร 3 ชั้น 2 หลัง อาคารหลังที่ 1 มีโครงสร้างเป็น Frame คอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) และไม่มีผนังกำแพงอิฐก่อ ส่วนอาคารหลังที่ 2 มีโครงสร้างเหมือนอาคารหลังที่ 1 แต่มีผนังกำแพงอิฐก่อ ผลการตรวจวัดชี้ว่าอาคารหลังที่ 2 มีความถี่ธรรมชาติสูงถึงประมาณ 2 เท่าตัวของอาคารหลังที่ 1

ในประเด็นที่เกี่ยวกับฐานราก Bouwkamp และคณะ (1980) ในปี ค.ศ. 1980 ได้ทดลองสร้างแบบจำลอง Finite Element ของอาคาร 12 ชั้นขึ้นมา 2 แบบ โดยที่แบบแรกกำหนดให้ฐานรากของอาคารยึดแน่นไม่มีการเคลื่อนตัวหรือเปลี่ยนรูป ส่วนแบบที่ 2 จำลองฐานรากให้มีความยืด

หยุนไกล์เคียงสภาพจริง Bouwkamp ได้ทำการคำนวณคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากแบบจำลองทั้ง 2 แบบ และนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดอาคารจริง พบว่าแบบจำลองที่ 2 ให้ผลที่สอดคล้องกับความเป็นจริง

Muria-Vila และคณะ (2000) ในปี ค.ศ. 2000 ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารในกรุงเม็กซิโกซิตี ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ความแปรปรวนของค่า Modulus of Elasticity ของวัสดุ ความคลาดเคลื่อนของขนาดรูปตัดขวางขององค์อาคาร การแตกร้าวขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อแบกรับน้ำหนักบรรทุกตามปกติ ผนังกำแพงอิฐก่อความยืดหยุ่นของฐานราก ผลของ Rigid Zone ในบริเวณจุดต่อขององค์อาคาร ฯลฯ ดังนั้นการสร้างแบบจำลอง Finite element ของอาคารจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ มิฉะนั้นคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองอาจมีความคลาดเคลื่อนได้มาก

2.3 การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินโดยการตรวจวัด Microtremor

ในการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดิน อาจทำได้โดยการเจาะสำรวจภาคสนามเช่น การทดสอบในหลุมเจาะแบบดาวน์โฮล โดยมีหลักการทดสอบโดยทำให้เกิดคลื่นความเค้น (Stress wave) บริเวณผิวดิน เช่นกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนัก แล้วตรวจจับคลื่นความเค้นที่วิ่งผ่านชั้นดินในหลุมเจาะที่ระดับความลึกต่างๆ แล้วคำนวณเป็นค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามระดับความลึก วิธีนี้ถือว่าการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ค่อนข้างแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติสูงมากและใช้เวลานาน จึงไม่สามารถทำการเจาะสำรวจหลาย ๆ ตำแหน่งได้ การศึกษาอีกวิธีที่สามารถทำได้คือ ใช้การตรวจวัดการสั่นสะเทือนของผิวดินในระดับต่ำที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นจากแรงที่เกิดตามธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนตัวของชั้นดินเอง หรือจากแรงต่างๆบนผิวดิน เป็นต้น การตรวจวัดนี้ต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดในระดับ Micron และสามารถใช้ศึกษาได้ดีแม้ในบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวของชั้นดินด้วยค่าต่ำ ๆ วิธีนี้เรียกว่า Microtremor ซึ่งเสนอโดย Kannai และ Tanaka (ดังในเอกสารอ้างอิงของ Tokimatsu, 1997) โดยมีแนวคิดที่ว่า แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อชั้นดินมีลักษณะแบบสุ่ม และ ชั้นดินมีคุณสมบัติทางพลศาสตร์เฉพาะตัว ดังนั้นเมื่อตรวจวัดผลการสั่นสะเทือนโดยแรงดังกล่าวแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อแปลงสัญญาณวัดให้อยู่ในรูปของการผสมกันของความถี่หลาย ๆ ค่า เรียกว่า Fourier Amplitude Spectrum และกราฟความสัมพันธ์ของ Fourier Amplitude กับความถี่ จะพบเป็นยอดแหลมที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งแสดงถึง ความถี่หลักในการสั่นหรือ Predominant Frequency ของชั้นดินนั่นเอง เนื่องจากความสะดวกในการปฏิบัติงานเพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน จึงได้มีการศึกษาวิจัยด้านต่างๆ ของวิธี Microtremor อย่างต่อเนื่อง Nakamura (1989) ได้แก้ไขข้อขัดแย้งของวิธีนี้ที่ว่า การตรวจวัดการสั่นสะเทือนในแนวราบนั้นจะแทนคุณลักษณะของดินบริเวณแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวไม่ใช่คุณลักษณะของดินที่บริเวณตรวจวัด เขาจึงได้เสนอวิธีชื่อ H/V method โดยทำการลดผลของคุณลักษณะของดิน

บริเวณแหล่งกำเนิดด้วยด้วยการหาค่า Spectra ของการสั่นสะเทือนในแนวราบด้วย Spectra ของการสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง และวิธีนี้ก็ได้รับการปรับปรุงและประยุกต์ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินมาตามลำดับ (Lermo et al, 1994; Tokimatsu, 1997; Konno และ Ohmachi, 1998)

Tokimatsu (1997) เสนอวิธีการใช้ Microtremor ที่ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดมากกว่าสองตัววัดพร้อม ๆ กัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติการกระจายตัว (Dispersion Characteristic) ของคลื่นแผ่นดินไหวตัวหนึ่ง ที่ชื่อ Rayleigh Wave โดยเป็นคลื่นที่บริเวณผิวดิน จากคุณสมบัติการกระจายตัวนี้ ทำให้สามารถได้การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในแนวดิ่งของ Shear Wave ซึ่งเป็นองค์ประกอบของคลื่นแผ่นดินไหวที่สำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างบนดิน การตรวจวัดโดยใช้อุปกรณ์วัดมากกว่าหนึ่งสถานีนี้เรียกว่า Array Measurement โดย Ansary et.al (1996) ได้ศึกษาวิธีนี้และพบว่า การขยายตัวของความเร็วคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ Frequency-Wave Number Spectrum ของการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่ได้จาก Microtremor นั้นสอดคล้องกับ Phase Velocity ของ Rayleigh Wave อย่างไรก็ตาม การตรวจวัดแบบ Array Measurement มีข้อจำกัดคือต้องใช้เครื่องมือวัดพร้อมกันไม่น้อยกว่า 4 ชุด ซึ่ง Almasani ได้รายงานผลการประยุกต์ใช้การวัดแบบใช้หัววัดพร้อมกัน 2 ชุด ซึ่งสามารถประเมินค่า Shear wave velocity ที่เป็นค่าสำคัญในการประมาณระดับการขยายผลจากคลื่นแผ่นดินไหวของดินที่ตั้งได้ นอกเหนือจากค่าคาบอิทธิพลหลักที่ได้จากการวัดตรวจวัดด้วยเครื่องมือเพียงชุดเดียว และเสนอแนวทางการตรวจวัดที่สะดวกในทางปฏิบัติ

Nakamura (1989) ได้ปรับปรุงการการตรวจวัดการตรวจวัดการสั่นของคลื่นผิวดิน (Microtremor) โดยการเสนอเทคนิคใหม่ คือวิธี H/V Method ในเทคนิคนี้โดยการใช้ Horizontal Spectra Amplitude และ Vertical Spectra Amplitude วิธีนี้ทำให้มีสมมติฐาน คือ

1. Microtremor ประกอบด้วยคลื่นหลักคือ Shear Wave
2. การสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง (Vertical Component) จะไม่มีการขยายในชั้นดินอ่อน โดยจะมีเพียง การสั่นสะเทือนในแนวราบ (Horizontal component) เท่านั้นที่มีการขยาย
3. ไม่มีการขยายคลื่นในทุก ทิศทางในชั้นหิน
4. Rayleigh Wave ถูกสมมุติฐานเป็นคลื่นรอบกว

Nakamura แสดงให้เห็นว่าวิธี H/V Spectrum Ratio เกือบจะเท่ากับ S-Wave Transfer Function ระหว่างพื้นดินและชั้นหินด้านล่าง ซึ่งกล่าวคือ H/V Peak Period คือคาบธรรมชาติของที่ตั้งและค่าตอบสนองสูงสุดคือ ค่าการขยายคลื่น(Amplification Factor) ซึ่งวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้การเจาะสำรวจดิน วิธีนี้จึงสะดวกและประหยัดในการใช้งาน วิธีนี้มีการใช้อย่างกว้างขวางแม้จะขาดทฤษฎีสนับสนุนก็ตาม

หลังจากปี ค.ศ.1989 ที่ Nakamura เสนอวิธี H/V Method ก็ยังมีข้อโต้แย้งกันอยู่เกี่ยวกับธรรมชาติ ของ Microtremor นักวิจัยบางคน ยืนยันว่า Microtremor ประกอบด้วยคลื่นพื้นฐานคือ Rayleigh Wave ซึ่งขัดแย้งกับสมมุติฐานของ Nakamura แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคของ Nakamura ได้นำไปใช้และเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น

Ohmachi (1991) ได้แปลผลที่ได้จากการตรวจวัด Microtremor ในพื้นที่ของซานฟรานซิสโก รวมทั้งในปี ค.ศ.1992 Lermo (1992) ได้ใช้วิธี H/V Method ทำการวิเคราะห์บันทึกข้อมูลของ Microtremor ใน 4 เมืองที่ต่าง ๆ ของเม็กซิโกและผลที่ได้ก็สอดคล้องกับ Spectrum Ratio โดยวิธีการวัดความเร็วแผ่นดินไหวที่มีการบันทึกไว้

Lermo และ Chavez-Garcia (1994) แสดงให้เห็นว่า H/V Method ของ Nakamura เป็นวิธีการทำนายผลที่เกิดกับสถานที่ที่เกิดแผ่นดินไหว (Site Effect) แต่อย่างไรก็ตาม มันเป็นจริงเพียง Fundamental Resonance Peak ของ Transfer Function จากเหตุผลนี้เป็นการสนับสนุนแนวคิดที่ว่าเทคนิคของ Nakamura ว่ามีประสิทธิภาพในการหาผลที่เกิดกับสถานที่ที่เกิดแผ่นดินไหว

Konno และ Ohmachi (1998) เสนอว่า Microtremor ประกอบด้วยคลื่นหลัก คือ Surface Wave อย่างไรก็ตามพวกเขายืนยันว่า H/V Spectrum Ratio ที่เสนอโดย Nakamura ยังเป็นตัวแทนของลักษณะของสถานที่ได้ โดยการเปรียบเทียบสเปกตรัมของ Microtremor กับสเปกตรัมของคลื่นหลัก Rayleigh Wave และวิธีเจาะสำรวจดิน (Downhole Method) ซึ่งผลของทั้ง 3 วิธีสามารถเทียบเคียงกันได้

Tuladhar R. (2002) ได้สร้าง Seismic Microzonation Map ของกรุงเทพโดยใช้การตรวจวัด Microtremor วัดแบบ 1 จุด ซึ่งทำการวัด 150 ตำแหน่งในกรุงเทพ และใช้วิธี H/V Spectrum Ratio สำหรับการหาคาบอทธิพลหลัก (Predominant Period) ของการสั่นที่พื้นดินในแต่ละตำแหน่งที่ได้และมีการเปรียบเทียบ Transfer Function จากวิธี H/V Spectrum Ratio และ โปรแกรม SHAKE 91ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

Srisoros W. (2003) ได้สร้าง Seismic Microzonation Map ของจังหวัดเชียงใหม่โดยใช้การตรวจวัด Microtremor วัดแบบ 1 จุด โดยใช้วิธี H/V Spectrum Ratio ของ Nakamura สำหรับการหาคาบอทธิพลหลัก (Predominant Period) ของการสั่นที่พื้นดินในแต่ละตำแหน่งที่ได้และมีการเปรียบเทียบ Transfer Function จากวิธี H/V Spectrum Ratio และ โปรแกรม SHAKE 91ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวิธี H/V Spectrum Ratio ของ Nakamura มีความสามารถในการหาค่าคาบธรรมชาติของสถานที่ได้ รวมทั้งวิธีดังกล่าวยังเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

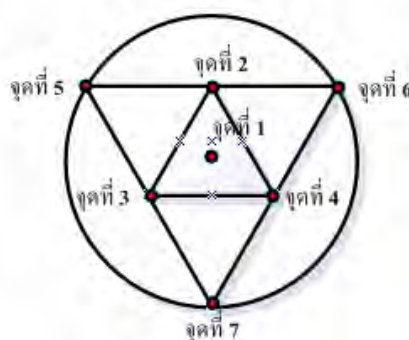
2.4 การหาค่าความเร็วคลื่นเนื่องด้วยการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation)

การหาค่าความเร็วคลื่นเนื่องด้วยการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation) มีเทคนิคที่ได้พัฒนาและใช้อยู่ 2 วิธีหลัก คือ Frequency-wavenumber spectral method (F-K method) และ Spatial autocorrelation method (SPAC) โดยทั้งสองวิธีมี

พื้นฐานของสมมติฐานที่ว่า ถ้าคลื่นผิวดินมีลักษณะคงตัว ทั้งด้านตำแหน่งและเวลา ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้ วิธี 2-site Spatial Autocorrelation ซึ่งอาศัยหลักการเดียวกับวิธี SPAC

วิธี F-K มีรูปแบบการวัด (Array) ที่ไม่แน่นอนจึงต้องใช้จุดที่ทำการตรวจวัดอย่างน้อย 7 จุด พร้อมกัน ซึ่งใช้สำหรับการตรวจวัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งที่เกิด Rayleigh Wave โดยผู้ที่เสนอวิธีนี้คือ Capon (1969) ในปี 1969 และ Lacos (1969) ในปี 1969 เช่นกัน

วิธี SPAC ผู้ที่เสนอวิธีนี้คือ Aki (1957) ในปี 1957 โดยวิธีนี้ต้องทำการวัดพร้อมกัน 4 ถึง 7 จุดถึงจะมีได้ค่าที่ถูกต้องโดยมีรูปแบบการวัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าตั้งรูปที่ 2.1 ซึ่งทั้งสองวิธีต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือและจำนวนคนมากในการทำการตรวจวัดแต่ละครั้ง



รูปที่ 2.1 รูปแบบการวัดโดยวิธี SPAC

Hiroshi Arai และ Fumio Yamazaki (2002) ได้หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนโดยวิธี F-K Method และ H/V Method ของกรุงเทพและปริมณฑลจำนวน 4 จุด ผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบดินมีค่าที่สอดคล้องกัน

Tsuno และ Kudo (2004) ได้ทำการหาความเร็วคลื่นเฉือนโดยใช้วิธี SPAC ที่เมืองคันโตะ ประเทศญี่ปุ่น ผลที่ได้มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะประมาณค่าความถี่สูงสุดและค่าแอมพลิจูดของแต่ละสถานที่ได้

Hitoshi Morikawa (2004) ได้ทำการเสนอวิธี 2sSPAC ซึ่งมีพื้นฐานมาจากวิธี SPAC โดยใช้วิธีการตรวจวัดพร้อมกันครั้งละ 2 จุดพร้อมกันโดยกำหนดจุดคงที่ไว้จุดหนึ่งแล้วทำการเปลี่ยนจุดวัดจนครบทุกตำแหน่งซึ่งจะประหยัดทั้งเครื่องมือและจำนวนคนที่ทำการตรวจวัดและการตรวจวัดใช้คาบยาวอยู่ระหว่าง 1-10 วินาที ผลการศึกษาของ Morikawa ผลที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Phase Velocity กับ ความถี่ (Dispersion Curve) ของวิธี 2sSPAC เปรียบเทียบกับวิธี SPAC และวิธี F-K มีค่าที่สอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธี 2sSPAC ที่ใช้วัด Phase Velocity ที่เกิดจาก Rayleigh Wave

Abdullah M. Alsamani M. (2004) ได้ใช้วิธี SPAC และ 2sSPAC ทำการประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่เมืองซีกูบะ ประเทศญี่ปุ่น โดยความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการวัด

Microtremor มีค่าสอดคล้องกับวิธีเจาะสำรวจดิน (PS Logging) และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากวิธี SPAC และวิธี 2sSPAC มีค่าสอดคล้องกัน

2.5 การหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนในประเทศไทย

Ashford et al. (1997, 2000) สำรวจวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณกรุงเทพ โดยวิธี วิธีวัดโดยตรงแบบดาวน์โฮล (Downhole method) 4 แห่งคือสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (รังสิต) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และลาดกระบัง

Shibuya S. และ Tamrakar S.B. (2003) ทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ รวมทั้งคุณสมบัติทางพลศาสตร์ โดยการวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือน โดยวิธี Seismic Penetration Test (SCPT) ของดินบริเวณกรุงเทพ พบว่าดินเหนียวอ่อนด้านบมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 100 ม./วินาที และความเร็วคลื่นเฉือนจะเพิ่มขึ้นจนถึงชั้นดินเหนียวมีค่าอยู่ระหว่าง 180 ม./วินาที ถึง 210 ม./วินาที สำหรับชั้นทรายแรกวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 250 ม./วินาที

ประภาพร จันทะมาศ (2007) ทำการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบหลายช่องทางรับสัญญาณ (Multi-channel analysis of surface wave –MASW) กับวิธีวัดจากหลุมเจาะ ของพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล จำนวน 4 แห่งคือสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีสิรินธรและสนามบิณสุวรรณภูมิ สามารถจำแนกดินตามข้อกำหนดของ NERHP 2003 ได้ดังนี้ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นดินชนิด E

จิตติ ปาลศรีและอาณัติ เรืองรัมย์ (2009) ใช้วิธีวัดโดยตรงแบบดาวน์โฮล (Downhole method) ของดินในกรุงเทพมหานคร, เชียงใหม่และเชียงราย และ ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน ค่า N สำหรับการตอกกระบอกผ่าทดสอบ และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่คายน้ำของดินในกรุงเทพมหานคร, เชียงใหม่และเชียงราย สามารถนำมาหาความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงเฉือนแบบอัดตัวไม่คายน้ำ (S_u) และจำนวนครั้งในการตอกกระบอกผ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุต (N) ของดินในกรุงเทพมหานครและบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย

บทที่ 3 ทฤษฎีและระเบียบวิธีที่ใช้วิจัย

3.1 การเตรียมความพร้อมสำหรับการตรวจวัดแบบ Ambient Vibration และ Microtremor

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร และคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินด้วยการตรวจวัด โดยใช้การตรวจวัดแบบ Ambient vibration หรือ Microtremor ซึ่งเป็นการตรวจวัดการสั่นไหวของอาคาร หรือการสั่นสะเทือนที่พื้นผิวดิน ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระตุ้นตามธรรมชาติและไม่ได้ใช้แหล่งกระตุ้นจากภายนอกใด ๆ ดังนั้น เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดจะต้องมีความสามารถในการตรวจวัดที่ระดับการสั่นสะเทือนต่ำมาก ๆ ได้ เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ อุปกรณ์วัดความเร็ว (Velocity Sensor) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

3.1.1 อุปกรณ์รับข้อมูล (Data Acquisition Instrument)

อุปกรณ์รับข้อมูลมีชื่อว่า GEODAS-10-24DS ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งพัฒนาโดย Buttan Service Co.,Ltd. ของประเทศญี่ปุ่นและมีคุณสมบัติของเครื่องดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์รับข้อมูล (Data Acquisition Instrument) GEODAS-10-24DS

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับข้อมูล GEODAS-10-24DS

จำนวนช่องสัญญาณวัด	8 หรือ 24 ช่อง
A/D Conversion Method	$\Delta - \Sigma$ Over Sampling (ทุกช่องสัญญาณที่วัดพร้อมกัน)
A/D Resolution/Dynamic Range	24 Bit
A/D Conversion Speed (Stationary)	50kHz
Signal Voltage(Full Scale)	± 2.5 V.
Sampling Rate (Frequency)	50/100/200/500/1K/2K Hz
Pre-Amplifier Impedance	10 k Ω
Pre-Amplifier Gain	0/20/40/dB
Low-Pass Filter	12.4/50/150/0 Hz
แหล่งจ่ายไฟ	DC.12 V.
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้	36 VA(Maximum)
อุณหภูมิที่เหมาะสม	10-45 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	20-80%
ขนาด (กว้างxยาวxสูง)	367x270x90 (mm.)
น้ำหนัก	5 kg.

3.1.2 หัววัดสัญญาณ (Sensor)

หัววัดสัญญาณมีชื่อว่า CR4.5-2S ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งพัฒนาโดย Buttan Service Co,Ltd. ของประเทศญี่ปุ่น เช่นเดียวกับอุปกรณ์รับข้อมูล ซึ่งสามารถวัดทิศทางการสั่นได้ 3 ส่วน (Component) คือ 1 แนวตั้ง และ 2 แนวระนาบ มีคุณสมบัติของเครื่องดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หัววัดสัญญาณ (Sensor) CR4.5-2S

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของหัววัดสัญญาณ (Sensor) CR4.5-2S

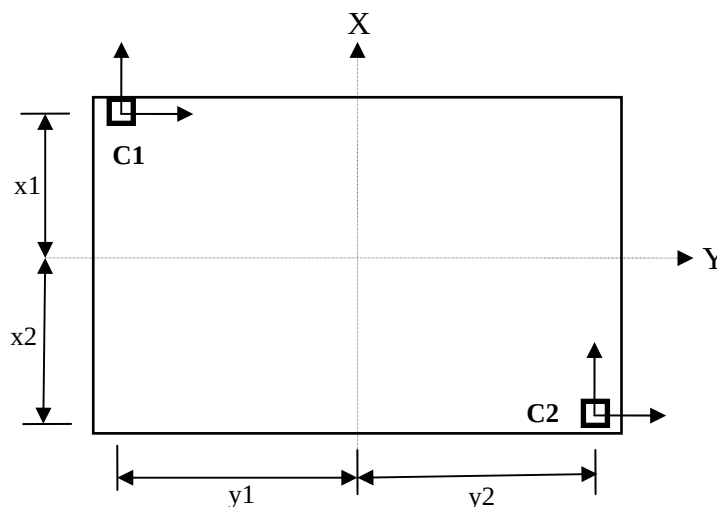
จำนวนทิศทางที่วัดได้ (Component)	3 (1 แนวตั้งและ 2 แนวระนาบ)
Element	4
Coil Reactance	4 $k\Omega$
Natural Period (Frequency)	2 s(0.5Hz)
Sensitivity	1.0V./cm/s
Available Frequency Range	0.5-20 Hz (-3dB)
Available Stroke	± 1 mm.
แหล่งจ่ายไฟ	DC.12 V. (จาก GEODAS)
ขนาด (กว้างxยาวxสูง)	100x100x105 (mm.)
น้ำหนัก	1.2 kg.

3.2 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่สำคัญประกอบด้วย ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency), อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) และรูปร่างการสั่นไหว (Vibration Mode Shape) โดยที่การตรวจวัดเพื่อนำรูปแบบสัญญาณผลตอบสนองไปวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์มีขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การตรวจวัดค่าความถี่ธรรมชาติ

เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดทั้งหมดจะเริ่มติดตั้งที่ชั้นบนสุดของอาคาร (รูปที่ 3.3) เนื่องจากการสั่นไหวในรูปแบบแรก ๆ การเคลื่อนที่ของอาคารที่ชั้นบนสุดจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งทำให้การวัดสัญญาณผลตอบสนองมีความชัดเจนมากกว่าชั้นที่ต่ำลงมา นอกจากนี้ ที่ชั้นบนสุดของอาคารมักเป็นพื้นที่โล่งทำให้สะดวกต่อการตรวจวัด เมื่อนำผลการตรวจวัดไปวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติโดยการแปลงจากค่าที่บันทึกอ้างอิงกับเวลา (ใน Time domain) เป็นค่าที่อยู่ใน Frequency domain ในรูปแบบ Fourier Magnitude Spectrum ซึ่งผลที่ได้เป็นความสัมพันธ์ของระดับผลตอบสนองกับความถี่ในการสั่นไหว โดยมีลักษณะที่มียอดแหลมของค่า Spectrum ที่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติของอาคาร



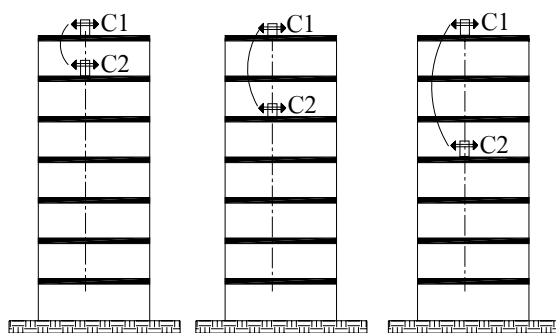
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งหัววัดความเร็ว

3.2.2 การตรวจวัดรูปร่างการสั่นไหว (Vibration Mode Shape)

การติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วเพื่อทำการตรวจวัดรูปร่างการสั่นไหว สามารถใช้วิธีการเดียวกับการตรวจวัดหาความถี่ธรรมชาติ สำหรับการหาการรูปร่างการสั่นไหวด้านผนังอาคารหรือในแนวราบ ส่วนกรณีการหาการรูปร่างการสั่นไหวด้านข้างอาคารหรือในแนวตั้ง ต้องมีวิธีการติดตั้งหัววัดของเครื่องมือที่แตกต่างจากการหาการรูปร่างการสั่นไหวในแนวผนังอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยที่ตำแหน่งของหัววัดจะต้องติดตั้งที่ชั้นบนสุด 1 ตัวเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง ส่วนหัววัดตัวที่ 2 จะถูก

ย้ายมาติดตั้งชั้นที่ต่ำกว่าลงมาเรื่อยๆ จนถึงชั้นล่างสุด การย้ายห้วงนี้จะต้องวางที่แนวดิ่งเดียวกัน อาจเป็นช่องบันไดหรือลิฟต์ และจะต้องทำการบันทึกสัญญาณ 1 ครั้ง ที่แต่ละชั้นที่คู่กัน

การหารูปแบบการสั่นไหวในผังอาคารของอาคารทั้งการเคลื่อนที่ (Translation) และการบิดตัว (Torsion) สามารถพิจารณาจากขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่ระหว่างห้วง (ความต่างเฟส) ของ Fourier Magnitude ที่คำนวณได้จากข้อมูลที่ตรวจวัด, ขนาดของ Fourier Magnitude จะมีขนาดสูงกว่าในกรณีที่เป็นทิศทางการเคลื่อนที่หลักของความถี่นั้นสำหรับการสั่นไหวแบบเคลื่อนที่ (Translation) และในกรณีที่เป็นการบิดตัว (Torsion) จะต้องพิจารณาค่าขนาดของ Fourier Magnitude ประกอบกับค่าความต่างเฟสด้วย กรณีที่ความต่างเฟสระหว่างตำแหน่งและทิศทางของห้วงทั้งสองเท่ากับศูนย์หมายถึง ทั้งสองตำแหน่งและทิศทางของห้วงมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน (Translation) และกรณีที่ความต่างเฟสเท่ากับ 180 องศา หมายถึง ทั้งสองตำแหน่งและทิศทางของห้วงมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน (Torsion) จากการตรวจวัดอาคารส่วนมากมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอและการจัดวางองค์อาคารไม่มีความสมมาตรทำให้ Center of mass และ Center of rigidity ของแต่ละชั้นไม่ตรงกัน ส่งผลให้รูปแบบการสั่นไหวไม่สามารถแยกกันได้อย่างชัดเจน เช่น กรณีที่มีการเคลื่อนที่ที่เกิดจากความถี่ใดๆ ของอาคารมีทิศทาง Y เป็นทิศทางการเคลื่อนที่หลัก แต่ขณะเดียวกันก็มีผลของการเคลื่อนที่ของทิศทาง X ผสมอยู่ด้วย



รูปที่ 3.4 การวัดรูปแบบการสั่นไหวแนวด้านข้างอาคาร

3.2.3 การคำนวณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

ในการศึกษาวิจัยนี้ คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ ได้แก่ ความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และรูปแบบการสั่นไหว ของอาคาร จะถูกคำนวณจากผลการตรวจวัดโดยวิเคราะห์ข้อมูลในเชิง Frequency Domain หลักพื้นฐานของวิธีนี้สามารถอธิบายได้จาก เมื่อพิจารณาระบบโครงสร้างที่ถูกกระตุ้นด้วยแรงพลวัตแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่หนึ่งๆ ระบบจะมีผลตอบสนองด้วยความถี่ของการกระตุ้นนั้น และผลตอบสนองจะมีขนาดสูงสุดเมื่อความถี่ของการกระตุ้นมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ ของระบบนั้น (ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติของระบบอาจมีได้มากกว่าหนึ่งค่า) และความสัมพันธ์ของผลการตอบสนองกับความถี่ของการกระตุ้นในรูปของกราฟจะมีลักษณะเป็นยอดแหลมในบริเวณของค่าความถี่ธรรมชาติต่างๆ ของระบบนั้น และความสูงของยอดแหลมจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับค่าอัตราส่วนความหน่วงประจำรูปแบบการสั่นไวนั้นๆ นอกจากนี้แล้ว รูปแบบ

การสั่นไหวของระบบสามารถคำนวณได้จากการพิจารณาอัตราส่วนของความสูงของยอดแหลม ที่ความถี่ธรรมชาติประจำรูปแบบการสั่นไหวนั้นๆ ของผลตอบสนอง ณ ตำแหน่งต่างๆ

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ วิธีการที่จะควบคุมแรงกระตุ้นให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการอาจมีข้อจำกัดโดยเฉพาะกับโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในการศึกษานี้ ดังนั้น แนวคิดสำหรับการใช้ผลตอบสนองเนื่องจากแรงจากสภาพแวดล้อม (Ambient Vibration) โดยใช้ทฤษฎีของ Random Vibration ช่วยในการวิเคราะห์ กล่าวคือ ด้วยสมมุติฐานที่ว่า แรงกระตุ้นจากสภาพแวดล้อมมีลักษณะที่เป็นส่วนผสมของแรงหลายชนิดจากแหล่งต่างๆ ซึ่งอาจพิจารณาว่ามียอดแหลมของความถี่ผสมอยู่มากมาย เป็นช่วงความถี่กว้าง (Wide Band) เมื่อแรงลักษณะนี้กระทำต่อโครงสร้างซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐาน ที่มีความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงประจำรูปแบบการสั่นไหวใดๆ จึงพิจารณาได้ว่า โครงสร้างถูกแรงกระทำที่มีส่วนผสมของความถี่หลายๆค่า ดังนั้น ผลการตอบสนองจึงเป็นการผสมกันของผลตอบสนองในแต่ละองค์ประกอบของความถี่ และมีค่ามากสำหรับองค์ประกอบที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ หรือการสั่นพ้อง (Resonance) และสำหรับระบบโครงสร้างในปัญหานี้ การตอบสนองในแต่ละทิศทางจะมีค่าความถี่ธรรมชาติแต่ละค่าแตกต่างกันชัดเจน และมีค่าอัตราส่วนความหน่วงค่อนข้างต่ำ ทำให้เส้นกราฟแสดงผลตอบสนองของระบบที่ความถี่ต่างๆ ของแรงกระตุ้น จึงมียอดแหลมปรากฏค่อนข้างชัดเจน ดังนั้น ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ต่างๆจึงสามารถประเมินได้

3.2.4 การวิเคราะห์รูปร่างการสั่นไหว

รูปแบบการสั่นไหวของอาคารโดยทั่วไปจะพิจารณาที่ชั้นบนสุดของอาคารที่จุดศูนย์กลางการหมุน โดยที่จุดศูนย์กลางการหมุนจะหาได้จาก Fourier Magnitude ของผลตอบสนองจากหัววัดทุกเครื่องในทิศทางเดียวกัน รูปแบบการสั่นไหวจะเกิดขึ้นได้ 3 แบบ คือ Translation ในทิศ X, Translation ในทิศ Y และ Torsion รอบจุดศูนย์กลางการหมุน อาคารส่วนมากจะไม่เกิดรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งอย่างชัดเจน โดยที่ค่า Discrete Fourier Magnitude ของผลตอบสนองที่ความถี่ธรรมชาติค่าหนึ่งจะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการสั่นไหวตามสมการที่ 3.1

$$\frac{|F_{x1}(\omega_1)|}{|F_{x2}(\omega_2)|} = \frac{\Phi_{11}}{\Phi_{21}} \quad (3.1)$$

โดยที่ $|F_{x1}(\omega_1)|$ คือ Discrete Fourier Magnitude ของผลตอบสนองที่ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ ω_1 ที่ตำแหน่ง X_1 ของชั้นบนสุด

$|F_{x2}(\omega_1)|$ คือ Discrete Fourier Magnitude ของผลตอบสนองที่ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ ω_2 ที่ตำแหน่ง X_2 ของชั้นบนสุด

Φ_{11} คือ รูปแบบการสั่นไหวที่ชั้นบนสุด ในทิศทาง 1 ที่ตำแหน่ง X_1

Φ_{21} คือ รูปแบบการสั่นไหวที่ชั้นบนสุด ในทิศทาง 1 ที่ตำแหน่ง X_2

3.3 การพัฒนาสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารสำหรับการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว

จากข้อมูลคาบธรรมชาติของอาคารที่ได้จากการตรวจวัดสามารถนำมาวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อพัฒนาเป็นสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารสำหรับการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวได้ ซึ่งจากการศึกษาวิจัยในต่างประเทศที่ดำเนินการพัฒนาสูตรการประมาณได้พบว่า ค่าคาบธรรมชาติที่จำแนกตามลักษณะของโครงสร้างอาคารมีค่าขึ้นกับความสูงของอาคารเป็นหลัก โดยไม่ได้มีการเสนอสูตรการประมาณให้มีความสัมพันธ์กับความกว้างหรือความลึกของอาคาร

สำหรับสูตรโดยประมาณของคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารในรูปทั่วไปสามารถแสดงได้ดังนี้

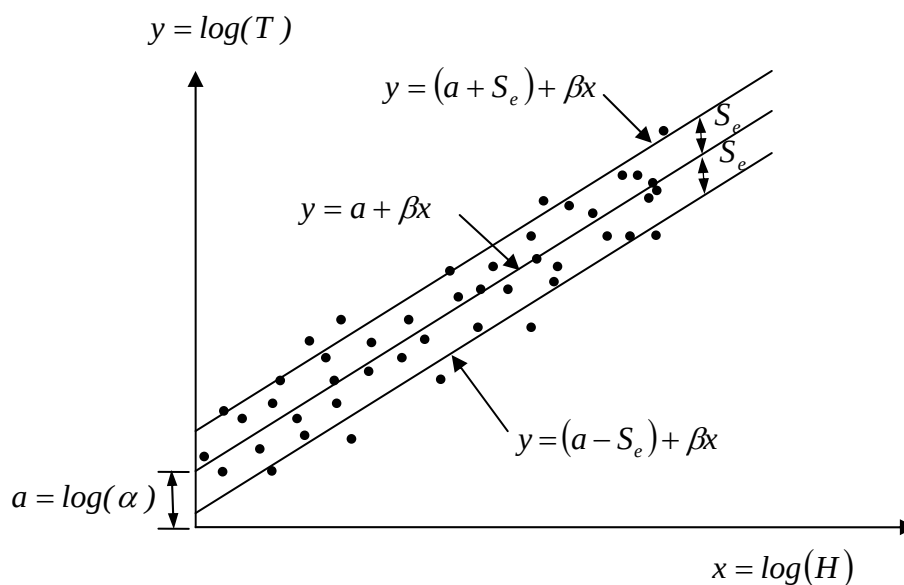
$$T = \alpha H^\beta \quad (3.2)$$

α และ β คือ ค่าคงที่ซึ่งจะคำนวณมาจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้วิธี Regression Analysis จากสมการที่ 3.2 แปลงสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$y = a + \beta x \quad (3.3)$$

โดยที่ $y = \log(T)$, $a = \log(\alpha)$ และ $x = \log(H)$

จากสมการที่ 3.3 เป็นสมการเส้นตรงโดยจุดตัดแกน y ที่ a เมื่อ $x = 0$ และสมการเส้นตรงมีความชันเท่ากับ β จากสมการที่ 3.3 แสดงเป็นความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ Regression ได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แนวคิดการวิเคราะห์ Regression

จากรูปที่ 3.5 สามารถหาค่า จุดตัดแกน a และ ความชัน β ได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Minimizing the Standard Error) และหาค่า α ได้จากความสัมพันธ์ $a = \log(\alpha)$ โดยที่ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard Error, S_e) สามารถหาได้ดังนี้

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - (a + \beta x_i)]^2}{(n-1)}} \quad (3.4)$$

โดยที่ $y_i = \log(T_i)$ และ $(a + \beta x_i) = \log(\alpha) + \beta \log(H_i)$ มาจากการตรวจวัดค่าคาบธรรมชาติ ข้อมูลที่ i โดยที่ n เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมด

ด้วยวิธีการวิเคราะห์ Regression จากข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคาร สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ α_R และ β สำหรับสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติ โดยเป็นค่าสัมประสิทธิ์ ที่ให้ค่าคาบโดยเฉลี่ยที่ดีที่สุด (T_R) สำหรับชุดข้อมูลการตรวจวัดค่าคาบธรรมชาติทั้งหมด และมีเส้นสมการที่ให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_e) ของข้อมูลต่ำที่สุด (Best-Fit) ดังนั้นสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับการวิเคราะห์ Regression ในรูปแบบ Best-Fit แสดงได้คือ

$$T_R = \alpha_R H^\beta \quad (3.5)$$

ในการนำไปประยุกต์ใช้กับมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยทั่วไปมักมีการกำหนดให้ค่าคาบธรรมชาติมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริง เนื่องจากการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่ต่ำกว่าทำให้การคำนวณค่าแรงเฉือนที่ฐานอาคารมีค่ามากกว่า เป็นผลให้การออกแบบอาคารมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น (Conservative) ซึ่งเรียกว่า การประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง (Lower Bound Natural Period, T_L) การประมาณค่า T_L ได้มาจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับขอบเขตล่าง (α_L) โดยการสร้างเส้นสมการขอบเขตล่างในรูปแบบ Best-Fit ตามสมการที่ 3.3 โดยไม่เปลี่ยนค่า Slope (β) และลบด้วยค่าความผิดพลาดมาตรฐาน โดยมีความหมายว่า มีประมาณ 15 % ของข้อมูลค่าคาบธรรมชาติที่จะมีค่าต่ำกว่าสูตรการประมาณ T_L ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 3.5 ดังนั้นค่า T_L และค่าสัมประสิทธิ์ α_L คำนวณได้ดังนี้

$$T_L = \alpha_L H^\beta \quad (3.6)$$

$$\log(\alpha_L) = \log(\alpha_R) - S_e \quad (3.7)$$

จากสมการที่ 3.6 ได้ให้ค่าการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีความปลอดภัยสูงขึ้น แต่สำหรับข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยทั่วไปได้ยอมให้ใช้วิธีอื่นที่เหมาะสมในการคำนวณค่าคาบธรรมชาติ แต่ได้กำหนดขอบเขตบนที่ค่าจากการคำนวณไม่ควรเกินค่าจากสูตรการประมาณไว้ โดย

สามารถพิจารณาด้วยการหาค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน (Upper Bound Natural Period, T_U) โดยค่า T_U และค่าค่าสัมประสิทธิ์ α_U มีขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนกับสมการขอบเขตล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และสมการที่ 3.8 และ 3.9

$$T_U = \alpha_U H^\beta \quad (3.8)$$

$$\log(\alpha_U) = \log(\alpha_R) + S_e \quad (3.9)$$

3.4 สูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารในมาตรฐานการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว

ในการคำนวณแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวและผลตอบสนองของอาคาร จำเป็นต้องมีข้อมูลด้านคาบธรรมชาติของอาคาร ซึ่งมีนิยามคือ เวลาที่ใช้ในการสั่นไหวไป-กลับ ครบหนึ่งรอบหากอาคารนั้นสั่นไหวโดยไม่มีแรงภายนอกกระทำขณะสั่นไหว โดยที่คาบธรรมชาติสามารถหาได้โดยถูกต้องจากการตรวจวัดอาคารโดยตรง อย่างไรก็ตามสำหรับในขั้นตอนการออกแบบ มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวโดยทั่วไปได้เสนอสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติไว้ให้ โดยที่สูตรดังกล่าวใช้สำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติของการสั่นไหวในรูปแบบพื้นฐาน หรือ โหมดที่หนึ่ง และเป็นค่าคาบธรรมชาติสำหรับการสั่นไหวทางด้านข้างของอาคาร โดยมาตรฐานจากต่างประเทศที่เป็นสากลได้เสนอวิธีการหาค่าคาบธรรมชาติไว้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.1 National Building Code of Canada (NBC)

National Building Code of Canada (NBC) ของประเทศแคนาดา NBCC-2005 หัวข้อ 4.1.8.11.(3) ได้เสนอวิธีการคำนวณคาบธรรมชาติ T_a ไว้ ดังนี้ โดยที่ h_n คือความสูงของอาคาร มีหน่วยเป็นเมตร และ N คือจำนวนชั้นของอาคาร

- a) สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์ที่ต้านทานแรงทางด้านข้างทั้งหมด และไม่ถูกล้อมรอบหรือยึดติดกับชิ้นส่วนที่มีความแข็งแรงหรืออาจทำหน้าที่ช่วยรับแรงทางด้านข้างด้วย ให้ใช้ค่าดังนี้
 - i) $0.085(h_n)^{3/4}$ สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างหลัก
 - ii) $0.075(h_n)^{3/4}$ สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต
 - iii) $0.1N$ สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์แบบอื่น ๆ
- b) $0.025h_n$ สำหรับโครงข้อแข็งที่มีการค้ำยัน (braced frame)
- c) $0.05(h_n)^{3/4}$ สำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงสร้างประเภทอื่น ๆ
- d) วิธีอื่นใดที่ใช้การจำลองระบบโครงสร้างอย่างเหมาะสม โดยมีข้อยกเว้นคือ

- i) สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์ T_a ต้องมีค่าไม่มากกว่า 1.5 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณในข้อ a)
- ii) สำหรับโครงข้อแข็งที่มีการค้ำยัน T_a ต้องมีค่าไม่มากกว่า 2.0 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณในข้อ b)
- iii) สำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือน T_a ต้องมีค่าไม่มากกว่า 2.0 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณในข้อ c)
- iv) ในการคำนวณการโก่งตัว ให้ใช้ค่าคาบธรรมชาติโดยไม่มีขอบเขตจำกัด

3.4.2 American Society of Engineers (ASCE)

American Society of Engineers (ASCE) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ASCE 7-05 หัวข้อ 12.8.2 คาบธรรมชาติ T_a ให้คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$T_a = C_t h_n^x$$

โดย h_n คือความสูงของอาคารมีหน่วยเป็นฟุต ค่าสัมประสิทธิ์ C_t และค่ายกกำลัง x คำนวณจากตารางที่ 3.3 โดยที่ตัวเลขแสดงในวงเล็บใช้สำหรับระบบหน่วยเมตริก

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ C_t และค่ายกกำลัง x

ชนิดของโครงสร้าง	C_t	x
โครงข้อแข็งรับโมเมนต์ที่ต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวทั้งหมดและไม่ถูกล้อมรอบหรือยึดติดกับชั้นส่วนที่มีความแข็งแกร่งกว่าและช่วยต้านการโก่งตัวเมื่อต้องรับแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว จำแนกเป็นชนิดดังต่อไปนี้:		
โครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็ก	0.028 (0.0724)	0.8
โครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต	0.016 (0.0466)	0.9
โครงข้อแข็งที่มีการค้ำยันแบบเยื้องศูนย์กลางโครงสร้างเหล็ก (eccentrically braced steel frame)	0.03 (0.0731)	0.75
โครงสร้างประเภทอื่น	0.02 (0.0488)	0.75

นอกจากนั้น ยังยอมให้ใช้สูตรประมาณสำหรับอาคารที่สูงไม่เกิน 12 ชั้น ที่มีระบบต้านทานแรงจากแผ่นดินไหวทั้งหมดเป็นโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็กหรือคอนกรีต และมีความสูงของชั้นอย่างน้อย 10 ฟุต (หรือ 3 เมตร) ดังนี้

$$T_a = 0.1N$$

โดย N คือจำนวนชั้น

สำหรับโครงสร้าง Masonry หรือกำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีต สามารถใช้สูตรการประมาณ T_a ดังนี้

$$T_a = \frac{0.0019}{\sqrt{C_w}} h_n$$

และ C_w คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$C_w = \frac{100}{A_B} \sum_{i=1}^x \left(\frac{h_n}{h_i} \right)^2 \left[\frac{A_i}{1 + 0.83 \left(\frac{h_i}{D_i} \right)^2} \right]$$

โดยที่ A_B คือพื้นที่ของฐานของอาคาร หน่วยเป็น ตารางฟุต

A_i คือพื้นที่ของ Web ของกำแพงรับแรงเฉือนตัวที่ i หน่วยเป็น ตารางฟุต

D_i คือความยาวของกำแพงรับแรงเฉือนตัวที่ i หน่วยเป็น ฟุต

h_i คือความสูงของกำแพงรับแรงเฉือนตัวที่ i หน่วยเป็น ฟุต

x คือ จำนวนกำแพงรับแรงเฉือนในอาคารที่สามารถต้านทานแรงทางด้านข้างในทิศทางที่พิจารณา

3.4.3 สูตรการประมาณของประเทศญี่ปุ่น

สูตรการประมาณของประเทศญี่ปุ่นมี 2 ส่วนได้แก่ The Building Standard Law in Japan (BSLJ) ฉบับ ค.ศ.1987 และ Architectural Institute of Japan (AIJ) มาตรฐาน AIJ-2004

สำหรับ BSLJ 1987 เสนอสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติคือ

$$T = (0.02 + 0.01\alpha)H \quad (3.10)$$

โดยที่ α คือสัดส่วนระหว่างโครงสร้างเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตของอาคาร โดยทำให้ได้สมการสำหรับโครงสร้างคอนกรีตคือ

$$T = 0.02H \quad (3.11)$$

และโครงสร้างเหล็กคือ

$$T = 0.03H \quad (3.12)$$

Architectural Institute of Japan (AIJ) ของประเทศญี่ปุ่น มาตรฐาน AIJ-2004 หัวข้อคำอธิบายสำหรับหัวข้อ 7.2 ได้แนะนำแนวทางการหาค่าคาบธรรมชาติไว้ว่า หากไม่ใช้การวิเคราะห์ eigenvalue จากสมการการเคลื่อนที่ สามารถหาค่าคาบธรรมชาติ T_1 ดังต่อไปนี้

- วิธี Weight

สำหรับค่าการโก่งตัวที่ยอดอาคารเท่ากับ δ (หน่วยเป็น เซนติเมตร) ที่ได้จากการให้แรงเฉื่อยจากน้ำหนักอาคารด้านที่พิจารณากระทำต่อตัวอาคาร ให้คำนวณ T_1 ดังนี้

$$T_1 = \frac{\sqrt{\delta}}{5} \sim \frac{\sqrt{\delta}}{5.7}$$

โดยที่สำหรับระบบแบบด็กีร์แห่งความอิสระเท่ากับหนึ่งให้ใช้ $\sqrt{\delta}/5$ และระบบที่มีด็กีร์แห่งความอิสระมากกว่าหนึ่งให้ใช้ $\sqrt{\delta}/5.7$

- สูตรการประมาณ ค่า T_1 สามารถประมาณจากความสูงของอาคาร h (หน่วย เมตร) สำหรับโครงสร้างที่ตัดตัวทางด้านข้างแบบเฉือน ดังนี้

$$T_1 = (0.02 + 0.01\alpha_h)h$$

โดยค่า α_h คืออัตราส่วนระหว่างโครงสร้างหลักต่อความสูงของโครงสร้าง

นอกจากนี้ สูตรการประมาณ T_1 ที่สัมพันธ์กับจำนวนชั้น n แสดงไว้ดังนี้

$$\text{สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก } T_1 = (0.06 \pm 0.02)n$$

$$\text{สำหรับโครงสร้างเหล็ก } T_1 = (0.1 \pm 0.03)n$$

3.4.4 Eurocodes

Eurocodes ของประเทศในทวีปยุโรป Eurocode 8 EN 1998-1:2004 หัวข้อ 4.3.3.2.2

การคำนวณค่าคาบธรรมชาติสำหรับโหมดที่หนึ่ง T_1 ของอาคาร อาจใช้วิธีตามหลักพลศาสตร์โครงสร้าง เช่นวิธี Rayleigh

สำหรับอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 40 เมตร ค่า T_1 อาจประมาณได้ดังนี้

$$T_1 = C_t H^{3/4}$$

โดยที่ C_t เท่ากับ 0.085 สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็กสามมิติ เท่ากับ 0.075

สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีตสามมิติและโครงข้อแข็งที่มีการค้ำยันแบบเยื้องศูนย์โครงสร้างเหล็ก และเท่ากับ 0.050 สำหรับโครงสร้างประเภทอื่น

H คือความสูงของอาคาร หน่วยเป็นเมตร วัดจากฐานรากหรือจากส่วนบนของชั้นพื้นส่วนที่แข็งแรง

นอกจากนั้น สำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีตหรือ masonry ใช้ค่า C_t ดังนี้

$$C_t = 0.075/\sqrt{A_c}$$

$$\text{โดยที่ } A_c = \sum [A_i (0.2 + (l_{wi}/H))^2]$$

และ A_c คือพื้นที่ประสิทธิผลรวมของกำแพงรับแรงเฉือนในชั้นแรกของอาคาร หน่วยเป็นตาราง

เมตร A_i คือพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของกำแพงรับแรงเฉือนตัวที่ i ในทิศทางที่พิจารณา ในชั้นแรกของอาคาร หน่วยเป็นตารางเมตร l_{wi} คือความยาวของกำแพงรับแรงเฉือนตัวที่ i ในชั้นแรก

และในทิศทางที่ขนานกับแรงที่กระทำ หน่วยเป็นเมตร และมีค่า l_{wi}/H ไม่เกิน 0.9

นอกจากนั้น ค่า T_1 อาจประมาณได้ดังนี้

$$T_1 = 2\sqrt{d}$$

โดย d คือการเคลื่อนตัวทางข้างของยอดอาคารในช่วงพฤติกรรมยืดหยุ่น หน่วยเป็นเมตร เนื่องจากแรงโน้มถ่วงกระทำทางด้านข้าง

3.4.5 Australian Standard

Australian Standard ของประเทศออสเตรเลีย AS 1170.4—2007 หัวข้อ 6.2.3

ค่าคาบธรรมชาติ T_1 สำหรับโหมดที่หนึ่ง ในการเคลื่อนที่ทางข้าง สามารถหาจากการวิเคราะห์โครงสร้าง หรือจากการประมาณจากสูตร ดังนี้

$$T_1 = 1.25k_t h_n^{0.75}$$

ค่า k_t ใช้ดังนี้

0.11 สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างหลัก

0.075 สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต

0.06 สำหรับโครงข้อแข็งที่มีการค้ำยันแบบเยื้องศูนย์โครงสร้างหลัก

0.05 สำหรับโครงสร้างประเภทอื่น

ค่าแรงเฉือนที่ฐานที่คำนวณจาก T_1 ที่หาโดยการวิเคราะห์โครงสร้าง ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของค่าที่ได้จากการคำนวณจาก T_1 ที่หาจากสูตรประมาณข้างต้น

3.4.6 British Standard

British Standard ของประเทศสหราชอาณาจักร BS EN 1998-1:2004 หัวข้อ 4.3.3.2.2

มีเนื้อหาเดียวกับ Eurocodes

3.4.7 New Zealand code

New Zealand code ของประเทศนิวซีแลนด์ NZS 1170.5:2007 หัวข้อ 4.1

ค่าคาบธรรมชาติ T_1 สามารถหาได้จากข้อมูล และ/หรือ การคำนวณ โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุและหน้าตัดที่เหมาะสม

สำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ค่าคาบธรรมชาติในทิศทางที่พิจารณาอาจคำนวณได้ดังนี้

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i d_i^2)}{g \sum_{i=1}^n (F_i d_i)}}$$

โดยที่

d_i คือ การเคลื่อนตัวในแนวราบของจุดศูนย์กลางมวลที่ระดับ i โดยไม่รวมผลของการบิด

F_i คือแรงที่กระทำที่ระดับ i

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

i คือระดับชั้นที่พิจารณาของโครงสร้าง

n คือจำนวนชั้นของโครงสร้าง

W_i คือน้ำหนักที่ใช้พิจารณาแผ่นดินไหวของชั้นที่ i

3.4.8 Mexico City Building Code

Mexico City Building Code 1995 (MCBC1995) หัวข้อ 8.2 a) ค่าคาบธรรมชาติ คำนวณได้ดังนี้ (จากหลักการของ Rayleigh)

$$T = 6.3 \times \sqrt{\frac{\sum (W_i x_i^2)}{g \sum (P_i x_i)}}$$

โดยที่

W_i คือน้ำหนักของชั้นที่ i

P_i คือแรงทางด้านข้าง ซึ่งคำนวณจากแรงเฉือนที่ระดับ i กระทำที่มวลนั้น

x_i คือ การเคลื่อนตัวในแนวของแรงทางด้านข้าง

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

3.4.9 กฎกระทรวงแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550

คาบธรรมชาติของอาคาร (T) ถ้าไม่สามารถ คำนวณหา คาบธรรมชาติของอาคารได้ ถูกต้องโดยวิธีอื่น ให้คำนวณตามสูตรดังต่อไปนี้

1. สำหรับอาคารทั่วไปทุกชนิด ให้คำนวณตามสูตร $T = \frac{0.09h_n}{\sqrt{D}}$
2. สำหรับโครงข้อแข็งที่มีความเหนียว ให้คำนวณตามสูตร $T = 0.1N$

โดยที่ h_n คือ ความสูงของพื้นอาคารชั้นสูงสุดวัดจากระดับพื้นดินมีหน่วยเป็นเมตร D คือ ความกว้างของโครงสร้างของอาคารในทิศทางขนานกับแรงแผ่นดินไหว มีหน่วยเป็นเมตร และ N คือ จำนวนชั้นของอาคารทั้งหมดที่อยู่เหนือระดับพื้นดิน

ในการเปรียบเทียบสูตรการประมาณคาบธรรมชาติ T_1 สำหรับแต่ละมาตรฐานที่จำแนก ลักษณะของโครงสร้างไว้เหมือนกัน ได้แก่ โครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็ก และโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต โดยแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ (H คือความสูงของอาคาร หน่วยเป็นเมตร และ n คือจำนวนชั้นของอาคาร)

ตารางที่ 3.4 สูตรการประมาณคาบธรรมชาติของโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็ก

Standard or Code	T_1
NBCC 2005	$0.085(H)^{3/4}$
ASCE 7-05	$0.0724H^{0.8}$
BSLJ 1987	$0.03H$
AIJ 2004	$(0.1 \pm 0.03)n$
Eurocode 8 EN 1998-1:2004 and BS Code	$0.085(H)^{3/4}$
AS 1170.4-2007	$0.1375(H)^{3/4}$
NZS 1170.5:2007	มีเฉพาะสูตรคำนวณโดยหลักการของ Rayleigh
MCBC1995	มีเฉพาะสูตรคำนวณโดยหลักการของ Rayleigh
กฎกระทรวงแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550	$\frac{0.09h_n}{\sqrt{D}}$ หรือ $0.1N$ โดยไม่จำแนกว่าสำหรับ โครงสร้างเหล็กหรือคอนกรีต

ตารางที่ 3.5 สูตรการประมาณคาบธรรมชาติของโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต

Standard or Code	T_1
NBCC 2005	$0.075(H)^{3/4}$
ASCE 7-05	$0.0466H^{0.9}$
BSLJ 1987	$0.02H$
AIJ 2004	$(0.06 \pm 0.02)n$
Eurocode 8 EN 1998-1:2004 and BS Code	$0.075(H)^{3/4}$
AS 1170.4-2007	$0.09375(H)^{3/4}$
NZS 1170.5:2007	มีเฉพาะสูตรคำนวณโดยหลักการของ Rayleigh
MCBC1995	มีเฉพาะสูตรคำนวณโดยหลักการของ Rayleigh
กฎกระทรวงแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550	$\frac{0.09h_n}{\sqrt{D}}$ หรือ $0.1N$ โดยไม่จำแนกว่าสำหรับ โครงสร้างเหล็กหรือคอนกรีต

3.5 คลื่นแผ่นดินไหว (Seismic Wave)

คลื่นแผ่นดินไหว แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

3.5.1 Body Wave เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ทุกที่ภายในโลกและแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ P Wave หรือ Primary Wave มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบอัดและยืด ขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นและเป็นคลื่นแรกที่มาถึงสถานีตรวจวัด เนื่องจากมีความเร็วสูงสุดและสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในตัวกลางที่เป็นของแข็งและของเหลวและ S Wave หรือ Secondary Wave หรือ Shear Wave มีลักษณะการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น สามารถเคลื่อนที่ได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็งเท่านั้น มีความเร็วน้อยกว่า P Wave

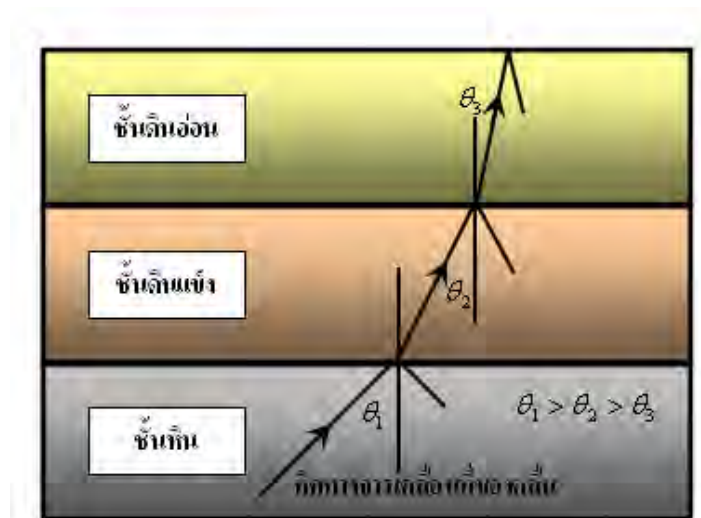
3.5.2 Surface Wave เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามผิวบนของเปลือกโลกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Rayleigh Wave มีการเคลื่อนที่ทั้งแนวตั้งและแนวนอนกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นและ Love Wave มีการเคลื่อนที่ขวางกับการเคลื่อนที่ของคลื่น S wave

จากคลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมดคลื่นที่ทำความเสียหายรุนแรงมาก คือ Rayleigh Wave และ Shear Wave โดยเมื่อ Body Wave เคลื่อนที่ในชั้นดินและชั้นหินจะเกิดการหักเหและการสะท้อนของคลื่นตามกฎของ Snell's Law

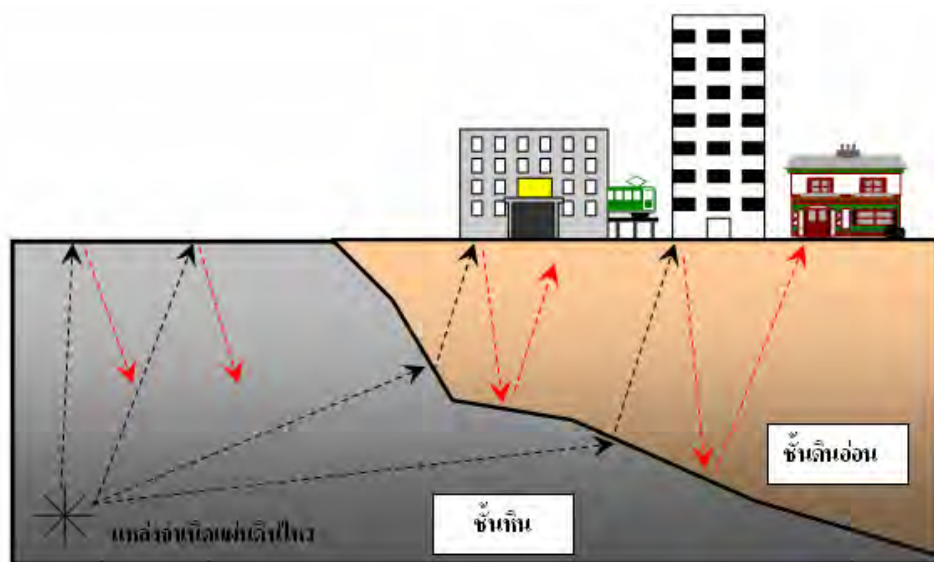
$$\frac{\sin i}{V_i} = \frac{\sin r}{V_2} \quad (3.13)$$

เมื่อ $\sin i = \sin$ ของมุมตกกระทบ, $\sin r = \sin$ ของมุมสะท้อน, V_1 และ V_2 เป็นความเร็วคลื่นในตัวกลาง

ความเร็วของคลื่น Shear Wave จะน้อยกว่าในชั้นดินอ่อนเมื่อเทียบกับชั้นดินแข็ง และจากกฎของ Snell's Law ทำให้ Transverse Wave จะเดินทางเกือบจะตั้งฉากสู่พื้นดิน(รูปที่ 3.6) เนื่องจากแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่แนวราบตั้งฉากกับทิศของการเคลื่อนที่ของคลื่น นอกจากนี้ในชั้นดินอ่อนมีปรากฏการณ์การสะท้อนกลับคลื่นกลับไปกลับมาของคลื่นแผ่นดินไหว (Multi Reflection Phenomenon) ซึ่งในชั้นดินอ่อนคลื่นสามารถผ่านไปด้านบนได้ง่าย ในขณะที่ชั้นดินแข็งจะมีการสะท้อนของคลื่นกลับได้(รูปที่ 3.7) ด้วยเหตุที่เหมือนกับการดักคลื่นแผ่นดินไหวนี้ไว้สามารถทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ที่สูงขึ้น เป็นเหตุให้ผิวดินจะมีการสั่นอย่างรุนแรงได้



รูปที่ 3.6 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแผ่นดินไหวตามกฎของ Snell's Law



รูปที่ 3.7 ปรากฏการณ์การสะท้อนกลับคลื่นกลับไปกลับมาของคลื่นแผ่นดินไหว

3.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธี H/V Spectrum Ratio

ในปี ค.ศ.1989 Nakamura ได้ปรับปรุงการการตรวจวัด Microtremor โดยการเสนอเทคนิคใหม่ คือ H/V Method ในเทคนิคนี้โดยการใช้ Horizontal Spectra Amplitude และ Vertical Spectra Amplitude วิธีนี้ทำให้มีสมมติฐาน คือ

1. Microtremor ประกอบด้วยคลื่นหลักคือ Shear Wave
2. การสั่นสะเทือนในแนวตั้ง (Vertical Component) จะไม่มีการขยายในชั้นดินอ่อน โดยจะมีเพียง การสั่นสะเทือนในแนวนอน (Horizontal component) เท่านั้นที่มีการขยาย

3. ไม่มีการขยายคลื่นในทุก ทิศทางในชั้นหิน
4. Rayleigh Wave ถูกสมมุติฐานเป็นคลื่นรบกวน

Nakamura แสดงให้เห็นว่า H/V Spectrum Ratio เกือบจะเท่ากับ S-Wave Transfer Function ระหว่างพื้นดินและชั้นหินด้านล่าง ซึ่งกล่าวคือ H/V Peak Period คือคาบธรรมชาติของที่ตั้งและค่าตอบสนองสูงสุดคือ ค่าการขยายคลื่น (Amplification Factor) ซึ่งวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้การเจาะสำรวจดิน วิธีนี้จึงสะดวกและประหยัดในการใช้งาน วิธีนี้มีการใช้อย่างกว้างขวาง

ทฤษฎี H/V Method ที่เสนอโดย Nakamura

ให้ Transfer Function ในแต่ละชั้นเขียนได้ดังสมการ

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (3.14)$$

S_T = Transfer Function

S_{HS} = Horizontal Tremor Spectrum ของดินชั้นบนสุด

S_{HB} = Horizontal Tremor Spectrum ของการตกกระทบของคลื่นจากชั้นหินด้านล่างถึงดินชั้นบนสุด

จากสมมติฐาน S_{HS} มีผลกระทบมาจาก Surface Wave คือผลมาจาก Rayleigh Wave โดยผลกระทบของ Rayleigh Wave ซึ่งจะพิจารณาเป็นสัญญาณรบกวนโดยมีผลต่อ The Vertical Spectrum ของดินชั้นบนสุด (S_{VS}) แต่ไม่มีผลต่อ Vertical Spectrum ของชั้นหินด้านล่าง (S_{VB}) และจากสมมติฐานที่ว่าจะไม่มีการขยายคลื่นในส่วนของการสั่นในแนวตั้ง (Vertical Tremor) ในชั้นดินอ่อน ดังนั้น ปริมาณ E_S คือผลของ Rayleigh Wave ที่มีในการสั่นในแนวตั้ง (Vertical Tremor) ดังสมการที่ 3.15

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (3.15)$$

E_S = ผลของ Rayleigh Wave ที่มีในการสั่นในแนวตั้ง (Vertical Tremor)

S_{VS} = Horizontal Tremor Spectrum ของดินชั้นบนสุด

S_{VB} = Horizontal Tremor Spectrum ของชั้นหินด้านล่าง

โดยถ้าไม่มีผลของ Rayleigh Wave $E_S=1$ ถ้า E_S มากกว่า 1 ผลกระทบของ Rayleigh Wave ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

สมมติผลของ Rayleigh Wave เท่ากันทั้งแนวราบและแนวตั้ง

S_T/E_S เป็น Transfer Function (S_{TT}) ที่ตัดผลกระทบของ Rayleigh Wave แล้วจะได้ว่า

$$\begin{aligned} S_{TT} &= \frac{S_T}{E_S} \\ &= \frac{R_S}{R_B} \end{aligned} \quad (3.16)$$

โดยที่

$$R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}}$$

$$R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}}$$

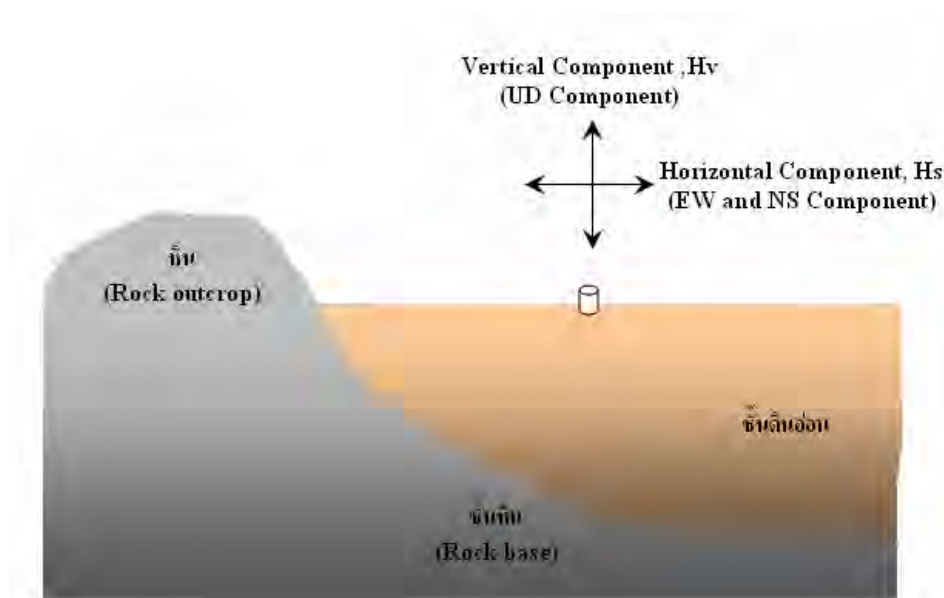
จากสมมติฐานที่ว่าไม่มีการขยายคลื่นในทุกทิศทางในชั้นหินดังนั้น $R_B = 1$ ซึ่งแสดงว่า Transfer Function ของ Shear Wave ที่ตัดผลของ Rayleigh Wave แล้วจะได้ว่า

$$S_{TT} = R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (3.17)$$

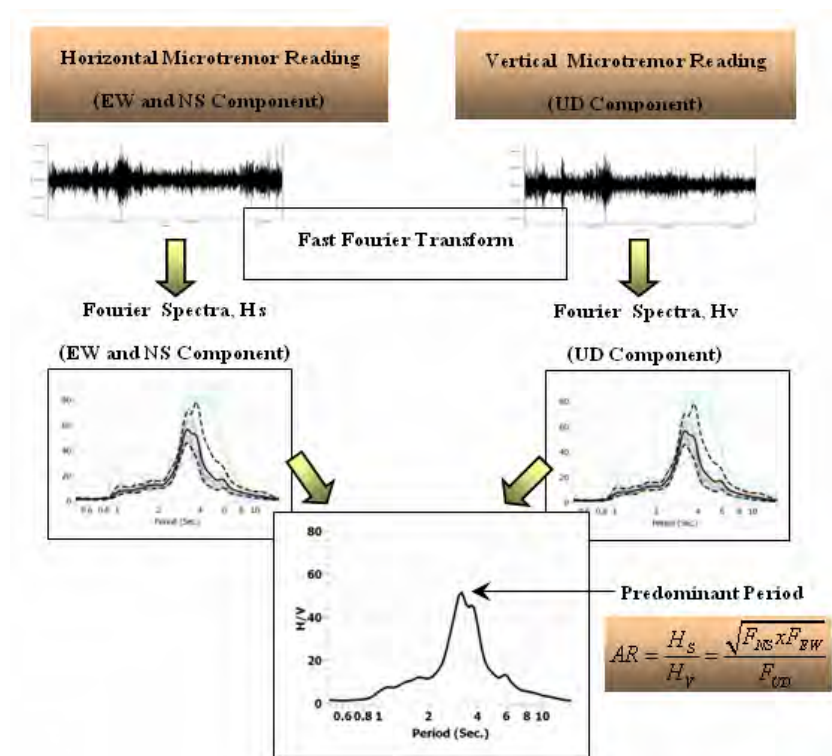
ดังนั้นจึงแสดงว่า ค่าการขยายคลื่น (Amplification Factor) ของส่วนประกอบในแนวดิ่งสามารถประมาณค่าได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าสเปกตรัมสูงสุดของในแนวดิ่งกับสเปกตรัมสูงสุดของในแนวราบที่พื้นดินชั้นบน และคาบสูงสุดของอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมดังกล่าวเปรียบเสมือนคาบธรรมชาติ (Predominant Period) บริเวณสถานที่นั้น ๆ

การวิเคราะห์ผลโดยวิธี H/V Spectrum Ratio

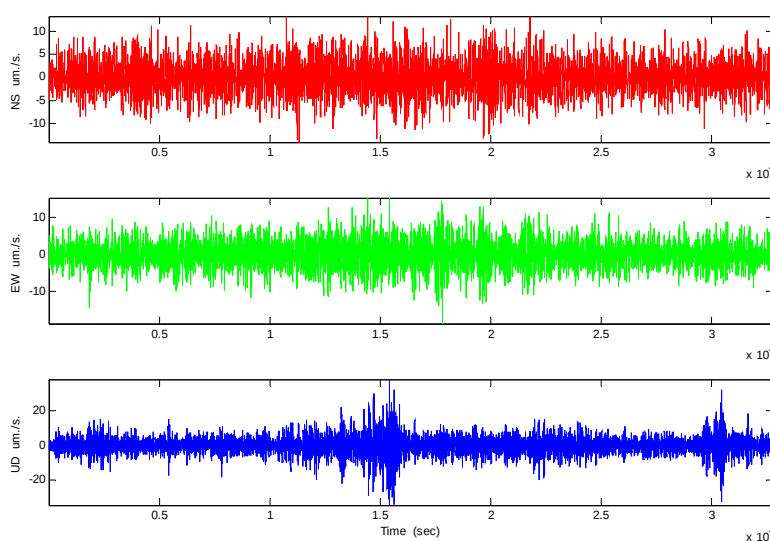
ในปี ค.ศ. 1989 Nakamura ได้เสนอวิธี H/V Method โดยการใช้การตรวจวัดสถานที่ละ 1 จุด และผลการตรวจวัดต้องไม่มีการรบกวนจากสัญญาณอื่นๆ โดย วิธี H/V Method นี้จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของส่วนประกอบฟูเรียร์สเปกตรัมในแนวดิ่ง (Fourier Spectrum of Horizontal Component, H_S) กับส่วนประกอบฟูเรียร์สเปกตรัมในแนวดิ่ง (Fourier Spectrum of Vertical Component, H_V) ซึ่งส่วนประกอบฟูเรียร์สเปกตรัมในแนวราบ (Fourier Spectrum of Horizontal Component, H_S) กับส่วนประกอบฟูเรียร์สเปกตรัมดิ่ง (Fourier Spectrum of Vertical Component, H_V) ดูจากรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดง H_S และ H_V ตามวิธี H/V Spectrum Ratio



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลโดยวิธี H/V Spectrum Ratio



รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่าง Microtremor Data –NS, EW and UD Component

ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์วิธี H/V Spectral Ratio แสดงในรูปที่ 3.9 และตัวอย่างสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการสั่นของคลื่นผิวดินแสดงในรูปที่ 3.10

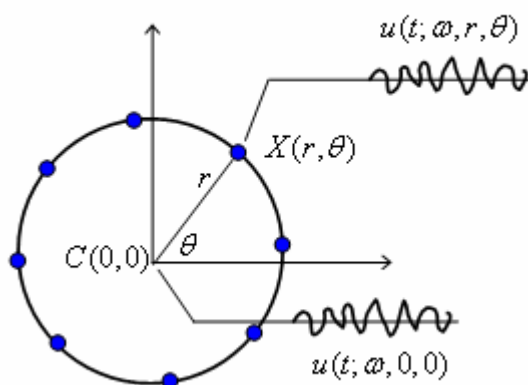
โดยถ้า Fourier Amplitude Spectra จาก Microtremor ในทิศเหนือ-ใต้ (NS), ตะวันออก-ตะวันตก(EW), ขึ้น-ลง (UD) เขียนแทนด้วย F_{NS} F_{EW} F_{UD} ดังนั้น Fourier Amplitude Ratio (AR) ของ Microtremor ซึ่งคือวิธี H/V Spectral Ratio จะได้ว่า

$$AR = \frac{H_S}{H_V} = \frac{\sqrt{F_{NS} \times F_{EW}}}{F_{UD}} \quad (3.18)$$

3.7 วิธี Spatial Autocorrelation (SPAC) และ 2sSPAC

3.7.1 ทฤษฎีของวิธี SPAC และ 2sSPAC

วิธี Spatial Autocorrelation (SPAC) ซึ่งเป็นวิธีสำหรับประมาณค่า ความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของชั้นดิน ซึ่งนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีคำนวณกลับเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนได้ วิธีนี้ได้เสนอไว้โดย Aki (1957) ในปี 1957 โดยต้องมีการเก็บข้อมูลการสั่นของคลื่นผิวดินในแนวตั้งที่หลายจุดพร้อมกัน (Array) ที่ระยะทางจากจุดคงที่จุดใด ๆ เป็นระยะเท่ากัน ดังตัวอย่างรูปแบบวงกลมที่แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 รูปแบบการวัดแบบ Array โดยวิธี SPAC

จากรูปที่ 3.11 กำหนดให้

r = รัศมีของ Array สำหรับการตรวจวัด

ω = ความถี่ในการสั่นขององค์ประกอบคลื่นในแนวตั้ง

$u(t; \omega, 0, 0)$ = องค์ประกอบคลื่นในแนวตั้ง ที่จุด $C(0,0)$

$u(t; \omega, r, \theta)$ = องค์ประกอบคลื่นในแนวตั้ง ที่จุด $X(r, \theta)$

องค์ประกอบคลื่นในแนวตั้ง ประกอบด้วยคลื่นพื้นฐานคือ Rayleigh Wave ดังนั้น Spatial autocorrelation function (SPAC function) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\phi(\omega; r, \theta) = \langle u(t; \omega, 0, 0).u(t; \omega, r, \theta) \rangle \quad (3.19)$$

ซึ่งเครื่องหมาย $\langle \rangle$ คือค่าเฉลี่ยตลอดช่วงเวลา T ที่พิจารณา

และ Spatial autocorrelation coefficient (SPAC coefficient) คือค่าเฉลี่ยของ SPAC function รอบจุดที่ตรวจวัดซึ่งเป็นวงกลม สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\rho(\omega; r) = \frac{1}{2\pi \cdot \phi(\omega; 0, 0)} \int_0^{2\pi} \phi(\omega; r, \theta) d\theta \quad (3.20)$$

$\phi(\omega; 0, 0)$ เป็น Autocorrelation function ที่จุด $C(0,0)$ หลังจากทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.20 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.21

$$\rho(\omega; r) = J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) \quad (3.21)$$

ซึ่ง J_0 = The Bessel function of the first kind with zero order

$c(\omega)$ = Phase Velocity ของ ความถี่ ω ($\omega = 2\pi f$)

SPAC coefficient สามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ 3.20 และสามารถคำนวณได้ใน Frequency domain โดยใช้ Fourier transform แสดงได้ดังสมการที่ 3.22

$$\rho(\omega; r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\text{real}[S_{CX}(\omega; r, \theta)]}{\sqrt{S_C(\omega; 0, 0) \cdot S_X(\omega; r, \theta)}} d\theta \quad (3.22)$$

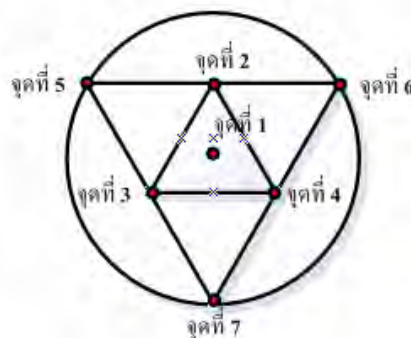
ซึ่ง $\text{real}[.]$ = ส่วนของจำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน

$S_C(\omega; 0, 0)$ = The power spectrum ของจุด $C(0,0)$

$S_X(\omega; r, \theta)$ = The power spectrum ของจุด $X(r, \theta)$

$S_{CX}(\omega; r, \theta)$ = The cross spectrum ระหว่าง $u(t; \omega, 0, 0)$ และ $u(t; \omega, r, \theta)$

ตำแหน่งในการตรวจวัด จำเป็นต้องมีรัศมีของ Array ที่แตกต่างกันเพื่อให้ครอบคลุมองค์ประกอบของความยาวคลื่น (Wave length) ได้อย่างเพียงพอ และในแต่ละ Array ต้องกำหนดจุดศูนย์กลางวงกลมและอีก 3 จุดบนรูปสามเหลี่ยม รวม 4 จุดสำหรับ 1 Array ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.12 ดังนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจวัดพร้อมกันอย่างน้อย 4 ถึง 7 จุด

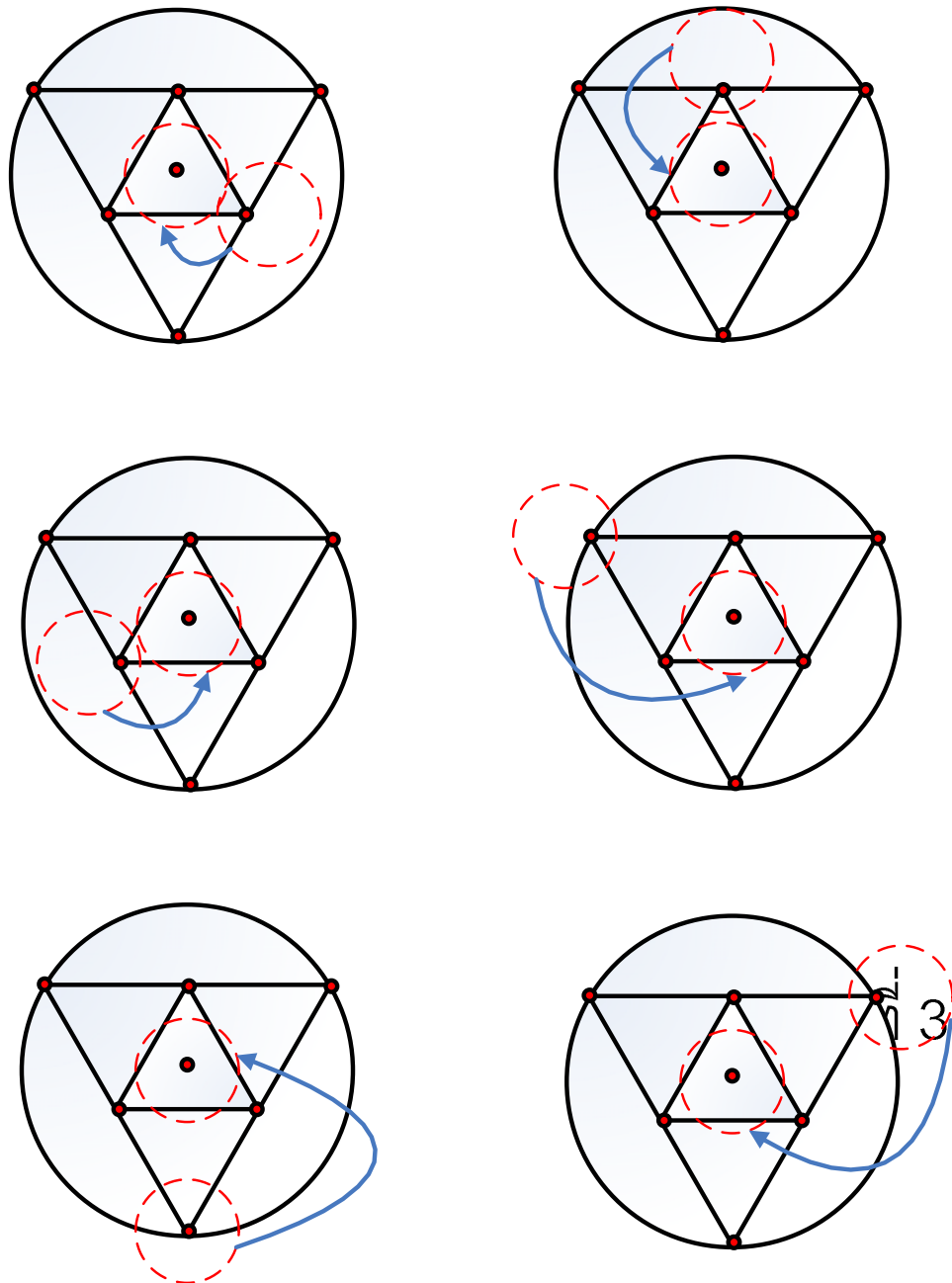


รูปที่ 3.12 รูปแบบการวัดแบบ Array โดยวิธี SPAC

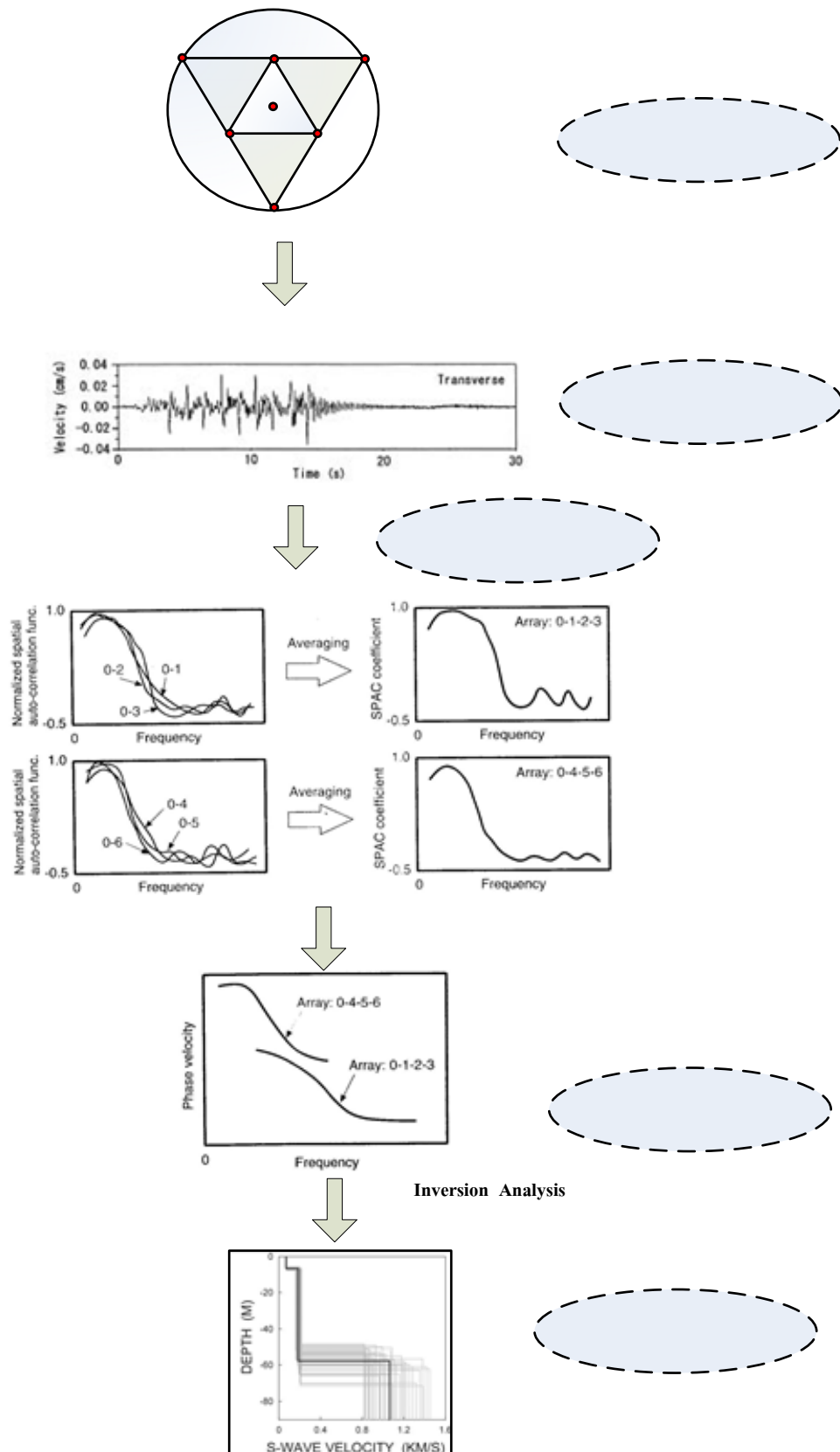
Morikawa (2004) เสนอว่าการตรวจวัดพร้อมกันจำนวนหลายจุดนั้น จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์และบุคลากรจำนวนมาก จึงเสนอแนวทางที่เหมาะสมขึ้นในการปฏิบัติ โดยแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของ SPAC Coefficient ไม่ขึ้นกับเวลาของการตรวจวัดในแต่ละคู่ของจุด $C(0,0)$ และ $X(r, \theta)$ ถ้าคลื่นผิวดินมีลักษณะคงตัว ทั้งด้านตำแหน่ง (Spatial) และเวลา (Temporally) คงที่ ซึ่งหมายความว่าสามารถหาค่า SPAC Coefficient จากการวัด 2 จุดในเวลาเดียวกันที่จุด $C(0,0)$ และ $X(r, \theta)$ แทนที่จะวัดพร้อมกันหมดทั้งรูปแบบ และปรับสมการที่ 3.22 ให้ทำการอินทิเกรตในแต่ละมุม θ ของแต่ละคู่ที่ทำการตรวจวัดเท่านั้น ทำให้สามารถดำเนินการศึกษาได้โดยใช้อุปกรณ์และบุคลากรเพียง 2 ชุด เท่านั้น

3.7.2 วิธีการตรวจวัดและการวิเคราะห์โดยวิธี 2sSPAC

ขั้นตอนการตรวจวัดและการวิเคราะห์โดยวิธี 2sSPAC สามารถอธิบายด้วยรูปที่ 3.13 และภาพรูปที่ 3.14 ซึ่งมีจุดวัดทั้งหมด 7 จุด โดยวิธี 2sSPAC ต้องทำการกำหนดจุดอ้างอิง 1 จุด คือ จุดที่ 1 และในการตรวจวัดจะตรวจวัดเป็นคู่พร้อมกันคือ จุดที่ 1-2, จุดที่ 1-3, จุดที่ 1-4 สำหรับรัศมีเล็ก และ จุดที่ 1-5, จุดที่ 1-6, จุดที่ 1-7 สำหรับรัศมีใหญ่ โดยจะทำการวัดทั้งหมด 6 ครั้งและมีกลุ่มชุดข้อมูล 2 กลุ่มที่มีรัศมีการวัดต่างกัน จากนั้นจะใช้สมการที่ 3.22 ในการหาค่า SPAC Coefficient ($\rho(\omega; r)$) ในแต่ละชุดข้อมูล แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยกราฟที่แสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง SPAC Coefficient และความถี่ขององค์ประกอบคลื่น หลังจากนั้นทำการคำนวณ Dispersion Curve ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Phase Velocity ($c(\omega)$) และความถี่ ขั้นตอนสุดท้ายคือใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis) เพื่อคำนวณหาความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน (Shear Wave Velocity Profile)



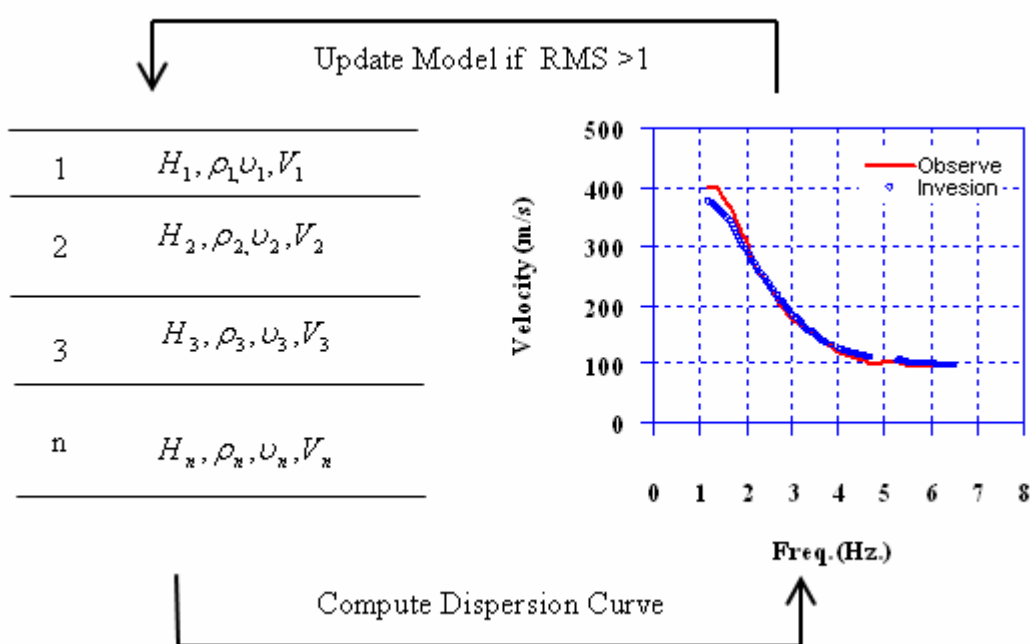
รูปที่ 3.13 แสดงรูปแบบการวัดโดยวิธี 2sSPAC



รูปที่ 3.14 แสดงขั้นตอนวิธีการตรวจวัดและการวิเคราะห์โดยวิธี 2sSPAC

3.7.3 วิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis)

การคำนวณแบบย้อนกลับเป็นการคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน (Shear Wave Velocity Profile) โดยเริ่มต้นป้อนข้อมูลสมมติสภาพทางธรณีวิทยาของตำแหน่งที่ตรวจวัดซึ่งจากรูปที่ 3.15 จะมีค่าที่ต้องสมมุติสำหรับการคำนวณแบบย้อนกลับ คือความหนาของชั้นดิน ความหนาแน่นของดิน ค่าปัวส์ซองของดิน และค่าความเร็วคลื่นเฉือนเริ่มต้น แล้วจึงคำนวณหา Dispersion Curve จากสภาพที่สมมติ ซึ่งขั้นตอนจะสิ้นสุดลงเมื่อ Dispersion Curve ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการตรวจวัด ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับ โดยใช้โปรแกรม Surface Wave Modal Inversion (Swami) ซึ่งพัฒนาโดย Lai and Rix (1998) โดยโปรแกรมนี้ใช้หลักการ Occam algorithm



รูปที่ 3.15 แสดงขั้นตอนวิธีวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis)

3.7.4 รูปแบบการวางห้ววัดเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับ วิธี 2-site Spatial Autocorrelation (2sSPAC)

รูปแบบการเก็บข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาค้นนี้ 3 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3.16 ถึง รูปที่ 3.17 ซึ่งในแต่ละรูปแบบมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับ Circular Array รูปแบบที่ 1 แสดงในรูปที่ 3.16 เป็นรูปแบบที่ใช้จำนวนจุดในแต่ละรัศมีจำนวน 4 จุดและมี 3 รัศมี ซึ่งเมื่อเชื่อมต่อแต่ละจุดในแต่ละรัศมีเข้าด้วยกันจะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และมุมที่วัดในแต่ละจุดต่างกัน 120 องศา โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้ ดังนี้

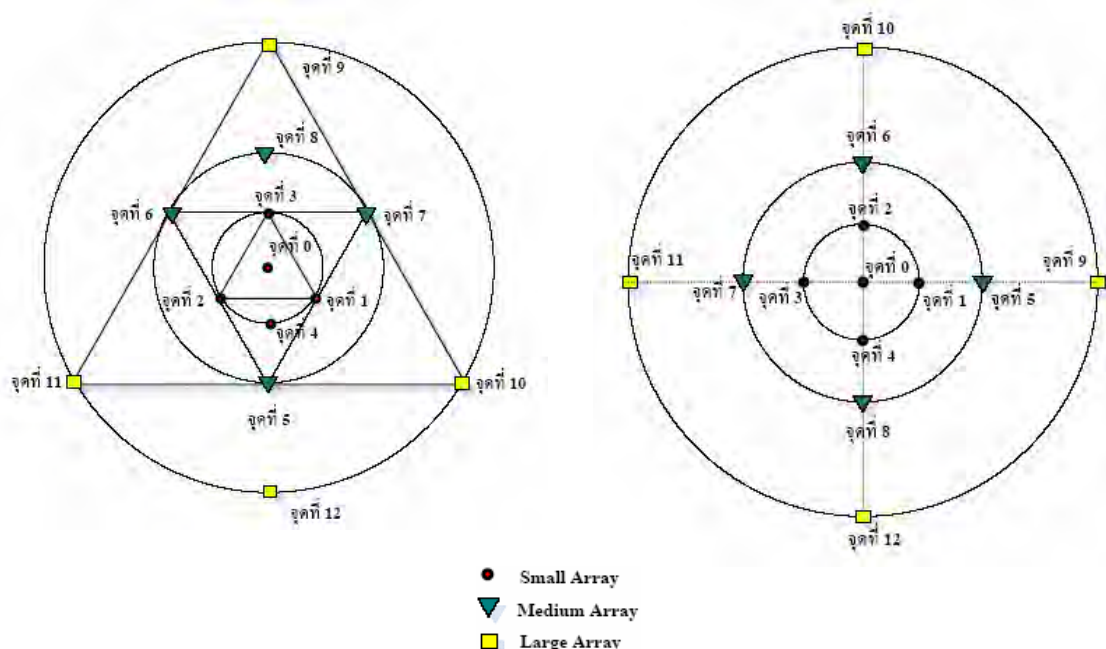
- รัศมีเล็ก (Small Array) ได้ข้อมูล 3 ชุดข้อมูลคือ 0-1 ,0-2 และ 0-3
- รัศมีกลาง (Medium Array) ได้ข้อมูล 3 ชุดข้อมูลคือ 0-5 ,0-6 และ 0-7
- รัศมีใหญ่ (Large Array) ได้ข้อมูล 3 ชุดข้อมูลคือ 0-9 ,0-10 และ 0-11

สำหรับ Circular Array รูปแบบที่ 2 แสดงในรูปที่ 3.16 เป็นรูปแบบที่ใช้จำนวนจุดในแต่ละรัศมีจำนวน 5 จุดและมี 3 รัศมี และมีมุมที่วัดในแต่ละจุดต่างกัน 90 องศา โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้ มีดังนี้

- รัศมีเล็ก (Small Array) ได้ข้อมูล 4 ชุดข้อมูลคือ 0-1 ,0-2 ,0-3 และ 0-4
- รัศมีกลาง (Medium Array) ได้ข้อมูล 4 ชุดข้อมูลคือ 0-5 ,0-6 ,0-7 และ 0-8
- รัศมีใหญ่ (Large Array) ได้ข้อมูล 4 ชุดข้อมูลคือ 0-9 ,0-10 ,0-11 และ 0-12

สำหรับ Linear Array แสดงในรูปที่ 3.17 เป็นรูปแบบที่ใช้จำนวนจุดในแต่ละรัศมีจำนวน 3 จุดและมี 3 รัศมี และมีมุมที่วัดในแต่ละจุดต่างกัน 180 องศา โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้ มีดังนี้

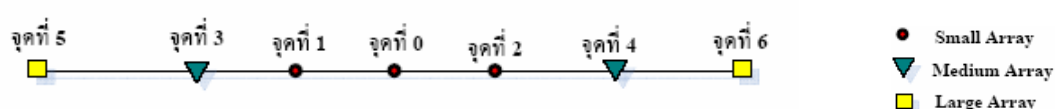
- รัศมีเล็ก (Small Array) ได้ข้อมูล 2 ชุดข้อมูลคือ 0-1 และ 0-2
- รัศมีกลาง (Medium Array) ได้ข้อมูล 2 ชุดข้อมูลคือ 0-3 และ 0-4
- รัศมีใหญ่ (Large Array) ได้ข้อมูล 2 ชุดข้อมูลคือ 0-5 และ 0-6



Circular Array รูปแบบที่ 1

Circular Array รูปแบบที่ 2

รูปที่ 3.16 การเก็บข้อมูลแบบ Circular Array



รูปที่ 3.17 การเก็บข้อมูลแบบ Linear Array

3.8 การจำแนกประเภทของดิน

การจำแนกประเภทของดินแต่ละบริเวณ จะสามารถทำได้โดยเฉลี่ยค่าความเร็วคลื่นเฉือน ($\bar{V}_s$) ค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำ ($\bar{S}_u$) และจำนวนครั้งในการตอกกระบอกฝ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุต (ค่า $\bar{N}$) และนำค่าเฉลี่ยดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับตาม National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP 2003) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การจำแนกประเภทของดินตาม NEHRP (2003)

Soil Class	Soil Type	$\bar{V}_s$ (m/s)	$\bar{S}_u$ (kPa)	$\bar{N}$ (blow/ft)
A	Hard Rock	$\bar{V}_s > 1500$	--	--
B	Rock	$760 < \bar{V}_s \leq 1500$	--	--
C	Very dense soil and soft rock	$360 < \bar{V}_s \leq 760$	$\bar{S}_u < 50$	$\bar{N} < 15$
D	Dense/Stiff soil	$180 < \bar{V}_s \leq 360$	$50 \leq \bar{S}_u \leq 100$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$
E	Loose/Soft soil	$180 < \bar{V}_s$	$\bar{S}_u > 100$	$\bar{N} > 50$

วิธีการเฉลี่ยค่าความเร็วคลื่นเฉือน ($\bar{V}_s$) ค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำ ($\bar{S}_u$) และจำนวนครั้งในการตอกกระบอกฝ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุต (ค่า $\bar{N}$) ตามมาตรฐานดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการ

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (3.23)$$

$$\bar{S}_u = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{S_{ui}}} \quad (3.24)$$

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (3.25)$$

โดยที่ $\bar{S}_u$ คือค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำเฉลี่ยสำหรับชั้นดิน 30 เมตรแรก

$\bar{V}_s$ คือค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยสำหรับชั้นดิน 30 เมตรแรก

$\bar{N}$ คือจำนวนครั้งในการตอกกระบอกฝ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุตเฉลี่ยสำหรับ 30 เมตรแรก

n คือจำนวนชั้นดินใน 30 เมตรแรก

d_i คือความหนาของชั้นดินชั้นที่ i

N_i คือจำนวนครั้งในการตอกกระบอกฝ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุตในชั้นที่ i

V_{si} คือความเร็วคลื่นเฉือนของดินชั้นที่ i

S_{ui} คือค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำของดินชั้นที่ i

บทที่ 4 ผลการศึกษา

การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

4.1 ค่าคาบธรรมชาติจากการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

งานวิจัยในส่วนของการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร มีเป้าหมายในการนำค่าที่ได้ไปพัฒนาเป็นค่าที่แนะนำสำหรับการออกแบบอาคารในประเทศ โดยโครงการวิจัยในระยะที่ 1¹ ที่ดำเนินการเสร็จสิ้นแล้วก่อนหน้านี้ได้ดำเนินการตรวจวัดกับอาคารในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 50 หลัง ที่มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 5 ถึง 54 ชั้นและความสูง 20-210 เมตร และในการดำเนินการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ เป็นการศึกษาสำหรับอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ที่ตั้งอยู่บนชั้นดินที่มีสภาพแตกต่างไปจากบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งจากการพิจารณาเบื้องต้นพบว่า ความสูงของอาคารทั้งหมดในจังหวัดเชียงใหม่ไม่เกิน 70 เมตร และข้อมูลที่ตรวจวัดอาคารที่ดำเนินไปแล้วในกรุงเทพมหานครที่มีความสูงไม่เกิน 70 เมตรมีประมาณเพียง 30 หลัง ดังนั้นเพื่อให้ข้อมูลการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มอาคารทั้งสองมีปริมาณข้อมูลใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้จึงขยายขอบเขตการศึกษาโดยการเก็บข้อมูลอาคารเพิ่มเติมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลอีก 20 หลัง ทำให้ข้อมูลการศึกษาดังกล่าวมีจำนวนอาคารทั้งหมดรวม 121 หลัง โดยเป็นอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 70 หลัง และอาคารในเขตจังหวัดเชียงใหม่จำนวน 51 หลัง ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลขนาด ความสูงและลักษณะการใช้งานของอาคาร แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 สำหรับอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล และตารางที่ 4.2 สำหรับอาคารในเขตจังหวัดเชียงใหม่ ข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่ได้จากการวิเคราะห์ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และ 4.4 สำหรับอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลและอาคารในเขตจังหวัดเชียงใหม่ ตามลำดับ โดยประกอบด้วย ค่าคาบธรรมชาติในทิศทางการเคลื่อนที่ใน 2 แกนที่ตั้งฉากกัน (Transverse and Longitudinal directions) และแนวการบิด (Torsion) ของรูปแบบการสั่นไหวลำดับที่ 1 และบางอาคารสามารถวิเคราะห์ได้ค่าสำหรับรูปแบบการสั่นไหวที่ 2 และ 3 ได้ด้วย สัญลักษณ์ N.A. สำหรับข้อมูลลักษณะอาคารแสดงถึงไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ เนื่องจากอาคารมีรูปทรงที่ไม่สม่ำเสมอหรือไม่สามารถทำการเก็บข้อมูลได้จากข้อจำกัดในการทำงาน และสัญลักษณ์ N.A. สำหรับข้อมูลค่าคาบธรรมชาติ แสดงถึงการที่ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าสำหรับรูปแบบการสั่นไหวนั้นได้

¹ งานวิจัยเรื่อง “การตรวจวัดและศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Properties) ของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร” ทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย พ.ศ. 2545-2547 โดย รองศาสตราจารย์ ดร. เป็นหนึ่ง วานิชชัย และรองศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม

ตารางที่ 4.1 ขนาด ความสูงและลักษณะการใช้งานของอาคารในกรุงเทพมหานคร

อาคารที่	ชั้น	สูง	ขนาดอาคาร		ลักษณะการใช้งาน
		(m.)	Trans.	Long.	
1	33	110	N.A	N.A	สำนักงาน
2	26	100	33	33	สำนักงาน
3	25	105.7	36.6	36.6	สำนักงาน
4	29	113.8	23.7	32.7	สำนักงาน
5	32	128.0	22.4	65	สำนักงาน
6	36	128.0	38.2	43.8	สำนักงาน
7	32	140.1	33	45	สำนักงาน
8	41	150	27	45	สำนักงาน
9	8	21	11.2	13.2	ที่พักอาศัย
10	8	22.6	13.1	30.3	ที่พักอาศัย
11	5	22.8	16.9	41.4	อาคารปฏิบัติการ
12	11	34	35	68	ที่พักอาศัย
13	12	40.7	36.8	76.8	ที่พักอาศัย
14	15	50	25	52.5	ที่พักอาศัย
15	14	51.4	24	28.2	ที่พักอาศัย
16	18	57.6	21	37	ที่พักอาศัย
17	18	61.4	41.2	41.2	สำนักงาน
18	19	64.6	23	40	สำนักงาน
19	22	66.5	32	111.5	สำนักงาน
20	23	72	16	32	โรงแรม
21	23	80	27.5	50	ที่พักอาศัย
22	20	70	26	33	สำนักงาน
23	23	68.6	33.5	36.5	ที่พักอาศัย
24	12	48.6	20	25.2	สำนักงาน

25	27	88.4	34	37.7	สำนักงาน
26	32	130.5	41.9	41.9	สำนักงาน
27	42	149	15.5	15.5	โรงแรม
28	24	76.1	18.5	34	ที่พักอาศัย
29	27	84	17	49	ที่พักอาศัย
30	22	94	31	38	อาคารเรียน
31	13	36.7	16	85	ที่พักอาศัย
32	8	28	16	35	ที่พักอาศัย
33	7	22.4	12.7	68	ที่พักอาศัย
34	22	77	25.5	46.5	สำนักงาน
35	12	36	26.7	70.6	ที่พักอาศัย
36	12	33.7	16.5	72.1	ที่พักอาศัย
37	18	58.1	30.5	36	สำนักงาน
38	17	60.1	12.2	25.1	สำนักงาน
39	20	64	22.4	31.5	สำนักงาน
40	19	57	24.9	40.4	สำนักงาน
41	30	105	20.8	46.4	สำนักงาน
42	35	123.1	20	52.8	สำนักงาน
43	12	36	27	75	ที่พักอาศัย
44	11	35.4	27	35.7	ที่พักอาศัย
45	54	210.4	35.1	38.2	สำนักงาน
46	27	95	25.5	30.3	สำนักงาน
47	35	122.6	13.2	25.8	ที่พักอาศัย
48	35	122.6	13.2	25.8	ที่พักอาศัย
49	19	80	24.5	44.1	สำนักงาน
50	32	111.7	13.2	25.8	สำนักงาน
51	○	132	8.3	8.3	สำนักงาน*
52	8	24	14.5	10.2	ที่พักอาศัย
53	5	15.5	35.8	14.4	ตึกแถว

54	5	19	19	15.6	ที่พักอาศัย
55	4	15	42.6	8	ที่พักอาศัย
56	5	17	26	13	ที่พักอาศัย
57	5	16	18	15	ที่พักอาศัย
58	7	30	70	19	สำนักงาน
59	7	24	70	19	สำนักงาน
60	7	24	32	15	ที่พักอาศัย
61	8	24	40	10.2	ที่พักอาศัย
62	8	24	67.5	11.4	ที่พักอาศัย
63	7	21	30	15	ที่พักอาศัย
64	9	28	32	10	ที่พักอาศัย
65	8	25	24	14	ที่พักอาศัย
66	7	26	20	8	สำนักงาน
67	9	30	36	17	ที่พักอาศัย
68	8	28	27	12	ที่พักอาศัย
69	6	22	20	14	ที่พักอาศัย
70	8	28	42	16	ที่พักอาศัย

*หมายเหตุ อาคารที่ 51 มีรูปตัดเป็นวงกลม และเป็นอาคารหอตรวจการ จึงไม่มีชั้นเหมือนกับอาคารทั่วไป

ตารางที่ 4.2 ขนาด ความสูงและลักษณะการใช้งานของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

อาคารที่	ชั้น	สูง	ขนาดอาคาร		ลักษณะการใช้งาน
		(m.)	Trans.	Long.	
1	10	35.2	49.9	50.3	อาคารเรียน
2	5	16.0	12.0	24.0	โรงแรม
3	16	48.0	23.0	51.0	โรงแรม
4	10	29.0	31.0	34.0	ที่พักอาศัย
5	12	42.2	32.0	46.0	อาคารเรียน
6	7	21.0	15.8	26.0	โรงแรม

7	9	26.8	14.7	29.0	โรงแรม
8	9	25.5	18.0	70.0	โรงแรม
9	8	26.5	24.2	40.2	อาคารเรียน
10	6	17.5	12.0	33.0	อาคารเรียน
11	5	14.0	12.0	47.5	อาคารเรียน
12	9	23.0	21.5	22.9	ที่พักอาศัย
13	17	51.3	49.2	58.3	โรงพยาบาล
14	5	14.5	13.7	40.0	อาคารเรียน
15	16	45.2	24.5	50.0	อาคารเรียน
16	7	21.5	14.2	42.5	อาคารเรียน
17	9	32.0	19.6	64.6	อาคารเรียน
18	11	40.5	19.0	60.0	อาคารเรียน
19	9	23.5	12.0	28.0	ที่พักอาศัย
20	5	13.0	14.0	50.0	อาคารเรียน
21	8	22.5	15.5	38.8	ที่พักอาศัย
22	14	41.3	26.0	36.0	อาคารเรียน
23	17	63.0	20.0	64.0	โรงพยาบาล
24	6	16.5	14.5	62.0	อาคารเรียน
25	5	15.2	11.5	59.0	อาคารเรียน
26	5	13.0	11.5	69.0	อาคารเรียน
27	9	22.4	17.0	33.0	ที่พักอาศัย
28	9	22.4	17.0	33.0	ที่พักอาศัย
29	14	40.8	N.A	N.A	ที่พักอาศัย
30	19	60.2	N.A	N.A	ที่พักอาศัย
31	16	56.0	N.A	N.A	โรงแรม
32	10	38	N.A	N.A	อาคารเรียน
33	8	24.3	16.1	39.8	ที่พักอาศัย
34	8	24.4	16.9	28.1	ที่พักอาศัย
35	8	21.0	16.9	27.9	ที่พักอาศัย

36	17	56.6	N.A	N.A	โรงแรม
37	16	50.0	16.0	52.5	โรงแรม
38	8	24.40	18.3	55.1	โรงแรม
39	11	31.2	18.0	70.0	ที่พักอาศัย
40	5	14.0	12.6	30.4	ที่พักอาศัย
41	6	26.3	12.5	72.6	อาคารเรียน
42	7	21.2	35.7	35.7	อาคารเรียน
43	5	20.2	14.3	52.3	อาคารเรียน
44	4	16.0	10.2	30.0	อาคารเรียน
45	10	28.5	17.8	60.4	ที่พักอาศัย
46	10	28.5	17.8	60.4	ที่พักอาศัย
47	4	12.8	8.0	38.0	ที่พักอาศัย
48	5	22.2	32.0	36.0	สำนักงาน
49	5	14.9	16.0	44.0	ที่พักอาศัย
50	5	17.4	25.0	64.0	ที่พักอาศัย
51	22	67.4	19.5	39.8	โรงแรม

ตารางที่ 4.3 ค่าคาบธรรมชาติของอาคาร (วินาที) ของอาคารในกรุงเทพมหานคร

อาคาร ที่	ค่าคาบธรรมชาติ								
	Mode 1			Mode 2			Mode 3		
	Tran.	Long.	Tor.	Tran.	Long.	Tor.	Tran.	Long.	Tor.
1	2.27	2.63	1.82	0.71	0.78	0.63	N.A	N.A	N.A
2	2.04	1.52	1.61	0.67	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
3	1.69	1.54	0.9	0.5	0.37	N.A	N.A	N.A	N.A
4	2.04	1.54	1.23	0.69	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
5	3.57	2.22	N.A	0.88	0.75	N.A	N.A	N.A	N.A
6	2.86	2.44	N.A	0.72	0.75	N.A	N.A	N.A	N.A
7	2.86	2.63	1.54	0.83	0.85	N.A	N.A	N.A	N.A
8	3.13	2.7	2.04	0.85	0.85	0.63	N.A	N.A	N.A

9	0.4	0.3	0.15	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
10	0.39	0.33	0.27	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
11	0.45	0.4	0.36	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
12	0.72	0.64	0.57	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
13	0.85	0.79	0.74	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
14	0.9	1.06	0.72	0.23	0.28	N.A	N.A	N.A	N.A
15	0.97	1.02	0.7	0.33	0.3	N.A	N.A	N.A	N.A
16	0.85	1.18	0.79	N.A	0.31	N.A	N.A	N.A	N.A
17	1.22	1.03	0.61	0.37	0.34	0.21	N.A	N.A	N.A
18	1.32	1.35	0.89	0.32	0.38	0.28	N.A	0.2	N.A
19	1.39	1.23	1.3	0.32	0.34	0.39	0.23	0.17	N.A
20	1.05	1.28	0.7	N.A	0.47	N.A	N.A	0.28	N.A
21	1.33	1.14	1.06	0.38	0.36	0.34	0.18	0.17	0.19
22	1.25	1.22	0.78	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
23	N.A	1.49	1.28	N.A	0.4	0.36	N.A	N.A	0.18
24	0.83	0.94	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
25	1.89	2.17	1.45	0.51	0.56	0.4	N.A	0.3	N.A
26	2.27	2.33	1.67	0.72	0.69	0.5	N.A	N.A	N.A
27	2.08	2.08	1.03	0.56	0.57	0.36	N.A	N.A	N.A
28	1.59	1.22	0.93	0.46	0.35	0.28	0.2	0.18	0.16
29	1.75	1.22	1.08	0.49	0.39	0.34	N.A	N.A	N.A
30	1.69	1.79	1.32	N.A	N.A	0.42	N.A	N.A	0.23
31	0.58	0.53	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
32	0.45	0.38	0.35	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
33	0.37	0.37	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
34	1.92	1.85	1.75	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
35	0.88	1	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
36	0.54	0.65	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
37	1.14	1.3	0.93	0.26	0.33	0.29	N.A	N.A	N.A

38	1.18	1.23	0.72	N.A	0.3	N.A	N.A	N.A	N.A
39	1.1	1.2	0.87	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
40	1.23	1.28	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
41	2.04	2.08	1.16	0.46	0.51	0.3	N.A	N.A	N.A
42	3.03	1.75	2.08	0.91	0.6	0.82	N.A	N.A	N.A
43	0.88	1	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
44	0.74	0.93	0.56	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
45	4	3.23	2.33	1.16	0.96	0.79	0.61	0.56	0.45
46	2.86	1.52	1.89	0.79	0.49	0.59	0.36	N.A	0.31
47	2.86	2.17	1.49	0.71	0.63	0.44	N.A	N.A	N.A
48	2.63	2.08	1.43	0.7	0.62	0.42	N.A	N.A	N.A
49	1.3	1.06	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
50	1.89	1.85	1.11	0.51	0.54	0.4	N.A	N.A	N.A
51	3.906	3.906	0.369	0.624	0.624	N.A	0.216	0.216	N.A
52	0.46	0.40	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
53	0.33	0.24	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
54	0.36	0.32	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
55	0.36	0.32	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
56	0.33	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
57	0.33	0.29	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
58	0.71	0.50	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
59	0.56	0.50	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
60	0.67	0.45	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
61	0.67	0.53	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
62	0.71	0.56	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
63	0.33	0.30	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
64	0.53	0.35	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
65	0.45	0.36	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A

66	0.76	0.29	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
67	0.49	0.40	0.32	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
68	0.41	0.29	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
69	0.34	0.24	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
70	0.37	0.32	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A

ตารางที่ 4.4 ค่าคาบธรรมชาติของอาคาร (วินาที) ของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

อาคาร ที่	ค่าคาบธรรมชาติ					
	Mode 1			Mode 2		
	Tran.	Long.	Tor.	Tran.	Long.	Tor.
1	0.56	0.52	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
2	0.25	0.28	0.20	N.A.	N.A.	N.A.
3	0.74	0.86	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
4	0.49	0.51	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
5	0.56	0.53	0.38	0.17	0.15	N.A.
6	0.45	0.48	0.32	N.A.	0.15	N.A.
7	0.51	0.46	0.33	N.A.	N.A.	N.A.
8	0.56	0.53	N.A.	0.15	N.A.	N.A.
9	0.40	0.52	0.32	N.A.	0.17	N.A.
10	0.35	0.46	0.27	N.A.	N.A.	N.A.
11	0.31	0.45	0.26	N.A.	N.A.	N.A.
12	0.51	0.41	0.35	0.16	N.A.	N.A.
13	0.81	0.78	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
14	0.26	0.24	0.20	N.A.	N.A.	N.A.
15	0.78	0.93	0.65	0.23	0.29	0.20
16	0.38	0.47	0.35	N.A.	0.14	N.A.
17	0.45	N.A.	0.34	N.A.	N.A.	N.A.
18	0.83	0.78	0.61	0.24	N.A.	N.A.

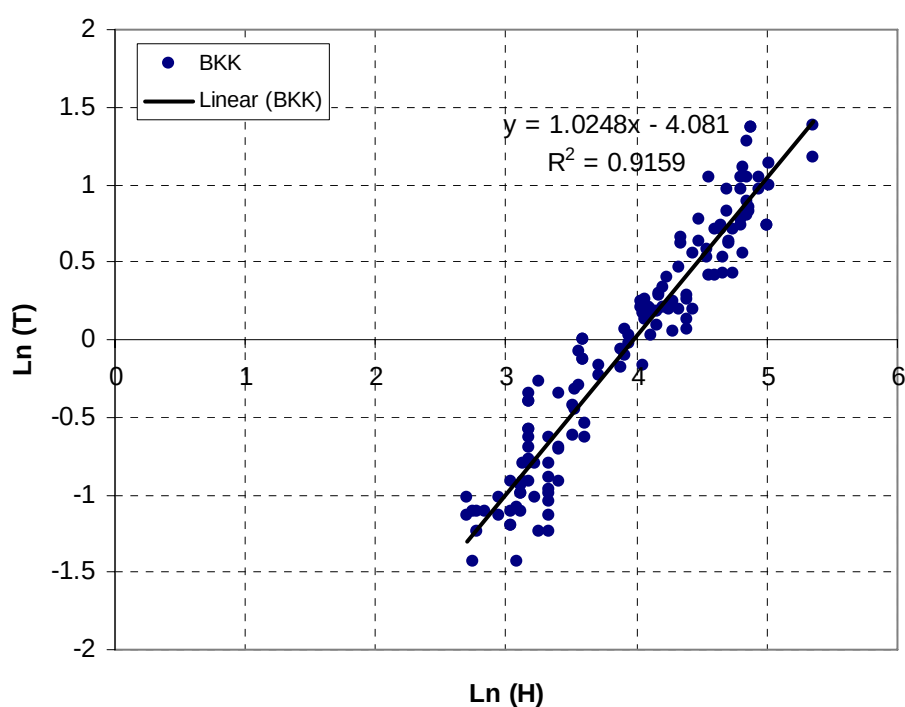
19	0.50	0.46	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
20	0.30	0.26	0.21	N.A.	N.A.	N.A.
21	0.45	0.43	0.36	N.A.	N.A.	N.A.
22	0.71	0.62	0.55	0.22	0.18	0.17
23	0.92	0.92	0.81	N.A.	0.32	N.A.
24	0.30	0.29	0.21	N.A.	N.A.	N.A.
25	0.26	0.33	0.23	N.A.	N.A.	N.A.
26	0.25	0.30	0.22	N.A.	N.A.	N.A.
27	0.41	0.39	0.32	N.A.	N.A.	N.A.
28	0.40	0.39	0.31	N.A.	N.A.	N.A.
29	0.763	0.730	0.610	N.A.	N.A.	N.A.
30	1.053	0.952	1.163	N.A.	N.A.	N.A.
31	1.020	0.694	0.730	N.A.	N.A.	N.A.
32	0.645	0.503	0.602	N.A.	N.A.	N.A.
33	0.43	0.44	0.41	N.A.	0.14	N.A.
34	0.40	0.52	0.37	0.13	0.15	N.A.
35	0.41	0.44	0.35	N.A.	0.14	N.A.
36	1.12	0.88	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
37	0.90	0.74	0.65	N.A.	N.A.	N.A.
38	0.54	0.54	0.41	N.A.	N.A.	N.A.
39	0.89	0.68	0.62	N.A.	N.A.	N.A.
40	0.24	0.29	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
41	0.48	0.55	0.38	N.A.	N.A.	N.A.
42	0.42	0.36	0.30	N.A.	N.A.	N.A.
43	0.42	0.45	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
44	0.24	0.30	0.18	N.A.	N.A.	N.A.
45	0.53	0.53	0.46	N.A.	N.A.	N.A.
46	0.54	0.54	0.45	N.A.	N.A.	N.A.
47	0.12	0.20	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

48	0.43	0.37	0.26	N.A.	N.A.	N.A.
49	0.21	0.29	0.20	N.A.	N.A.	N.A.
50	0.34	0.30	0.29	N.A.	N.A.	N.A.
51	1.19	1.19	0.94	0.38	N.A.	N.A.

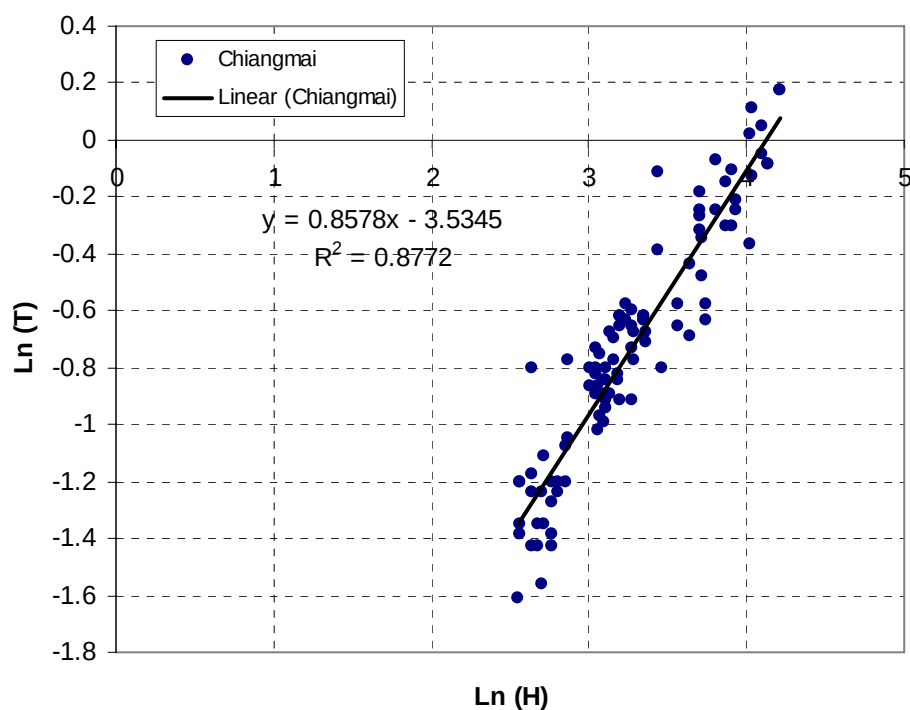
4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าคาบธรรมชาติสำหรับประเทศไทย

ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression analysis) สำหรับข้อมูลค่าคาบธรรมชาติ สำหรับความความสัมพันธ์กับความสูงของอาคาร ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.1 สำหรับกลุ่มอาคารในกรุงเทพมหานคร จังหวัดเชียงใหม่ และรวมทั้งสองกลุ่มอาคาร ตามลำดับ โดยที่การวิเคราะห์นี้พิจารณาข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารในทิศทางการตัดตัวใน 2 แกนหลักของอาคาร (X และ Y) โดยอาคารหนึ่ง ๆ ใช้ข้อมูลค่าคาบ 2 ค่า จากแต่ละทิศทาง

โดยการวิเคราะห์ Regression ของอาคารใน กทม. ดังรูปที่ 4.1 ได้สมการเส้นตรง $y = 1.0248x - 4.081$ ค่า R^2 เท่ากับ 0.9159 ค่าพารามิเตอร์ α และ β ดังนิยามในสมการที่ 1-2 มีค่าเท่ากับ 0.0169 และ 1.0248 ตามลำดับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_e) เท่ากับ 0.218 ดังนั้นค่า α_L และ α_U มีค่าเท่ากับ 0.0136 และ 0.0210 สำหรับสมการขอบเขตล่างและสมการขอบเขตบนตามลำดับ

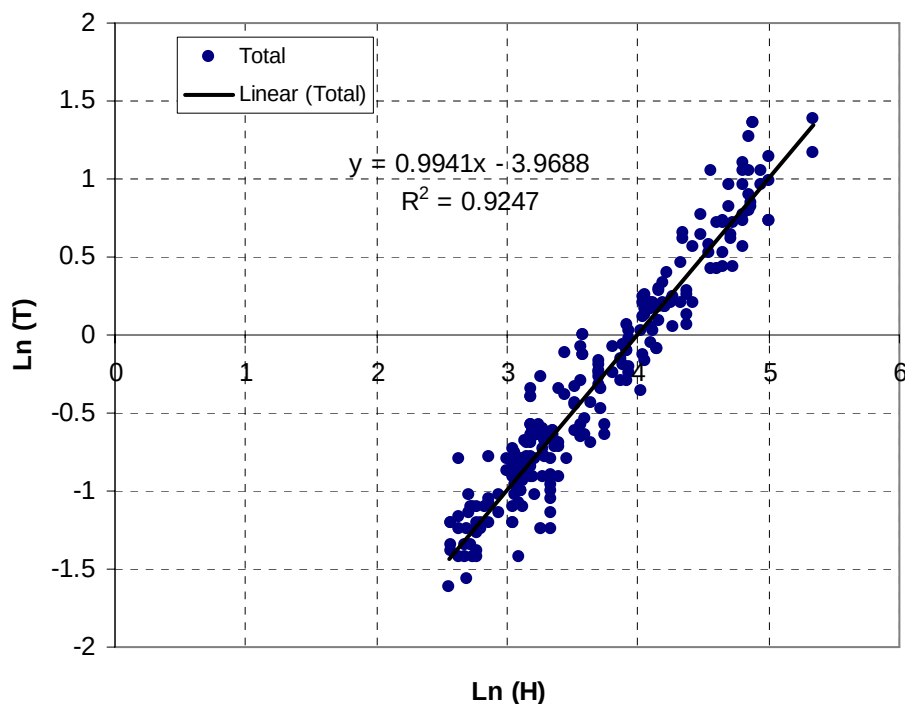


รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ Regression ของคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารในกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ Regression ของคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร จ.เชียงใหม่

ผลการวิเคราะห์ Regression ของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ ดังรูปที่ 4.2 ได้สมการเส้นตรง $y = 0.8578x - 3.5345$ ค่า R^2 เท่ากับ 0.8772 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ α และ β ดังนิยามในสมการที่ 1-2 มีค่าเท่ากับ 0.0292 และ 0.8578 ตามลำดับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_e) เท่ากับ 0.162 ดังนั้นค่า α_L และ α_U มีค่าเท่ากับ 0.0248 และ 0.0343 สำหรับสมการขอบเขตล่างและสมการขอบเขตบนตามลำดับ



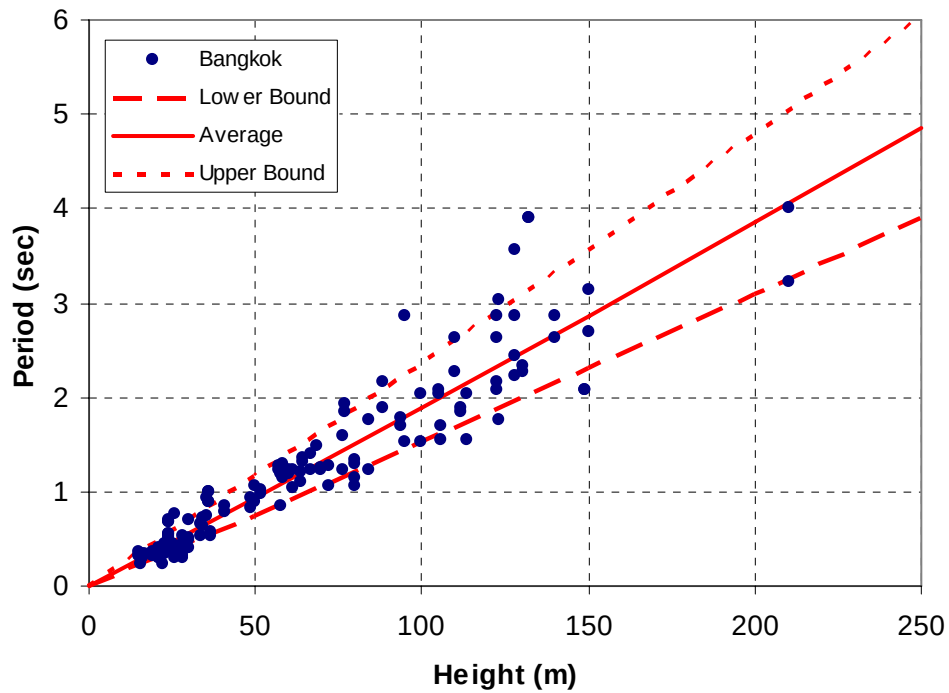
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ Regression ของคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารทั้งหมด

ผลการวิเคราะห์ Regression ของอาคารรวมทั้งหมด ดังรูปที่ 4.3 ได้สมการเส้นตรง $y = 0.9941x - 3.9688$ ค่า R^2 เท่ากับ 0.9247 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ α และ β ดังนิยามในสมการที่ 1-2 มีค่าเท่ากับ 0.0189 และ 0.9247 ตามลำดับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_e) เท่ากับ 0.197 ดังนั้นค่า α_L และ α_U มีค่าเท่ากับ 0.0155 และ 0.0230 สำหรับสมการขอบเขตล่างและสมการขอบเขตบนตามลำดับ

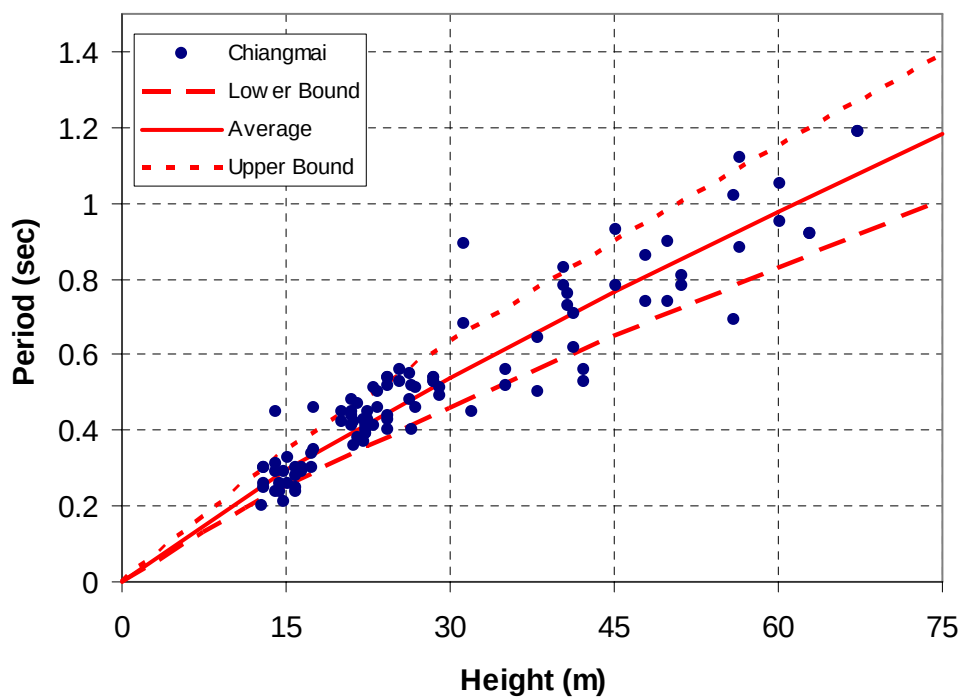
จากข้อมูลผลดังกล่าว สามารถสรุปสมการสำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.4 ถึง 4.6 แสดงผลข้อมูลจากการตรวจวัดและสมการประมาณค่าในรูปแบบ สมการขอบเขตล่าง สมการค่าเฉลี่ย และสมการขอบเขตบน

ตารางที่ 4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติ

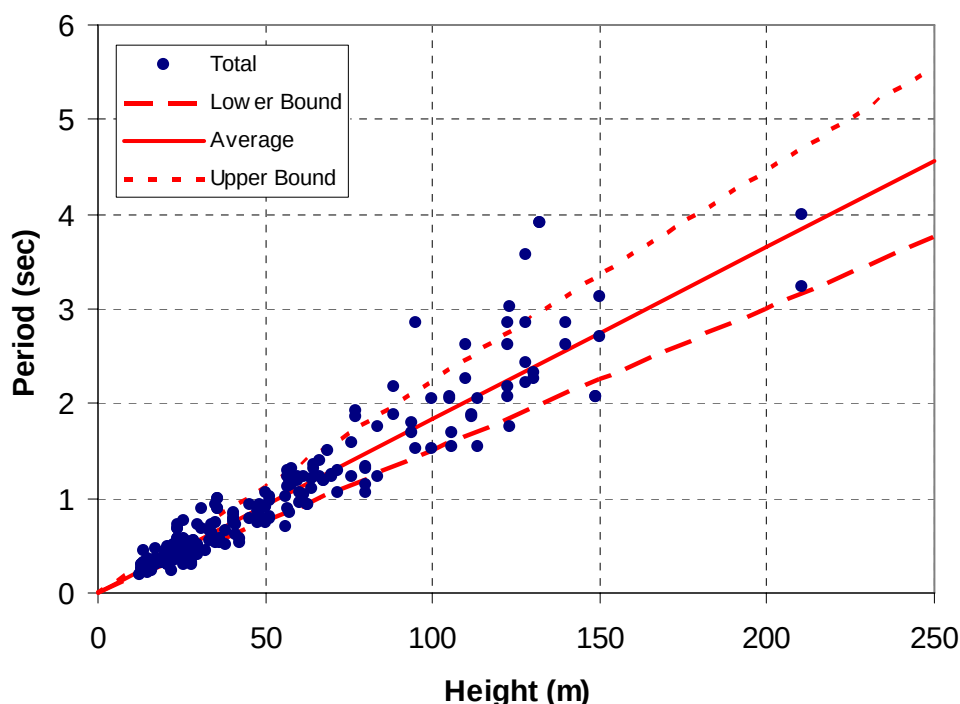
ข้อมูล	สมการค่าคาบธรรมชาติ			
	ขอบเขตล่าง (T_L)	ค่าเฉลี่ย (T_R)	ขอบเขตบน (T_U)	S_e
กทม.	$0.0136H^{1.0248}$	$0.0169H^{1.0248}$	$0.0210H^{1.0248}$	0.218
เชียงใหม่	$0.0248H^{0.8578}$	$0.0292H^{0.8578}$	$0.0343H^{0.8578}$	0.162
รวมทั้งหมด	$0.0155H^{0.9941}$	$0.0189H^{0.9941}$	$0.0230H^{0.9941}$	0.197



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารในกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารทั้งหมด

ในการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดจากกลุ่มอาคารในกรุงเทพมหานครและจังหวัดเชียงใหม่ เมื่อนำสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ Regression มาพิจารณาความแตกต่างได้ดังนี้

สมการการประมาณแบบค่าเฉลี่ยสำหรับกรุงเทพมหานคร

$$T = 0.0169H^{1.0248} \quad (4.1)$$

สมการการประมาณแบบค่าเฉลี่ยสำหรับจังหวัดเชียงใหม่

$$T = 0.0292H^{0.8578} \quad (4.2)$$

สมการการประมาณแบบค่าเฉลี่ยสำหรับอาคารรวมทั้งหมด

$$T = 0.0189H^{0.9941} \quad (4.3)$$

และเมื่อพิจารณาผลความแตกต่างที่ได้จากการใช้สมการเหล่านี้สำหรับอาคารที่มีความสูงต่าง ๆ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.6 และพบว่า ค่าคาบธรรมชาติที่ใช้การประมาณจากสมการของอาคารรวมทั้งหมด (T_{Total}) มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการของอาคารในแต่ละพื้นที่ (T_{BKK} สำหรับอาคารในกทม. และ T_{CM} สำหรับอาคารในจังหวัดเชียงใหม่) กล่าวคือ T_{Total} แตกต่างจาก T_{BKK} เพียงประมาณ 2 % สำหรับอาคารที่สูงไม่เกิน 80 เมตร และ T_{Total} แตกต่างจาก T_{CM} เล็กน้อย คือ สำหรับอาคารเตี้ย (ประมาณ 20 เมตร) T_{Total} มีค่าน้อยกว่า T_{CM} ไม่เกิน 3 % และเมื่อ

อาคารมีความสูงมากขึ้น T_{Total} มีค่ามากกว่า T_{CM} โดยสำหรับอาคารสูง 80 เมตร T_{Total} มากกว่า T_{CM} ประมาณ 18 %

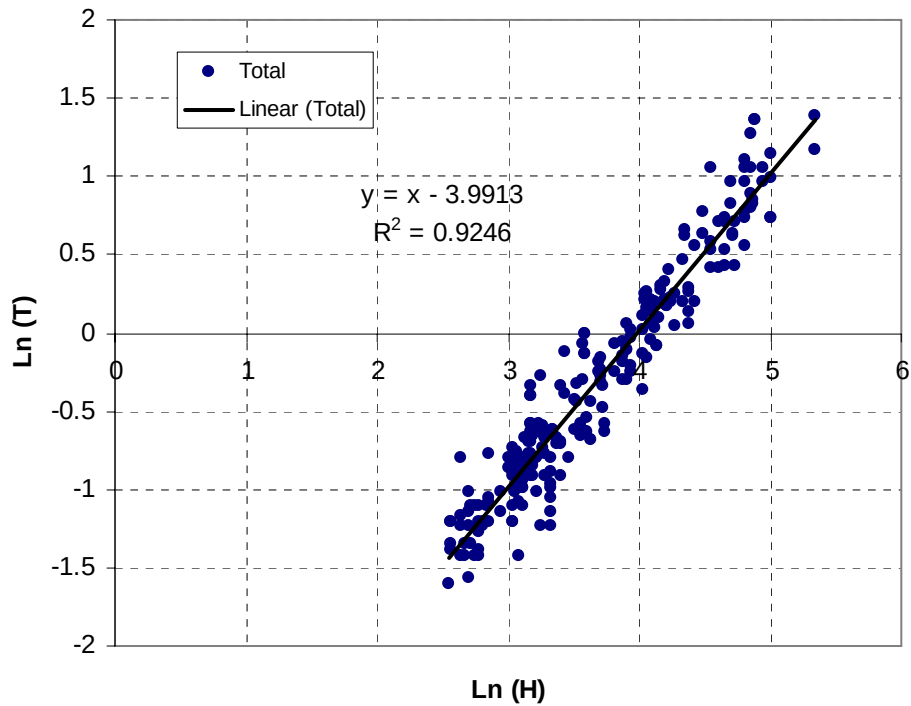
ตารางที่ 4.6 คาบธรรมชาติสำหรับอาคารที่ความสูงต่าง ๆ เมื่อใช้สูตรการประมาณของแต่ละกลุ่มอาคาร

$H(m)$	T_{BKK}	T_{CM}	T_{Total}	T_{Total}/T_{BKK}	T_{Total}/T_{CM}
20	0.364	0.381	0.371	1.020	0.974
40	0.741	0.691	0.740	0.999	1.070
60	1.122	0.979	1.107	0.986	1.131
80	1.507	1.253	1.473	0.978	1.176

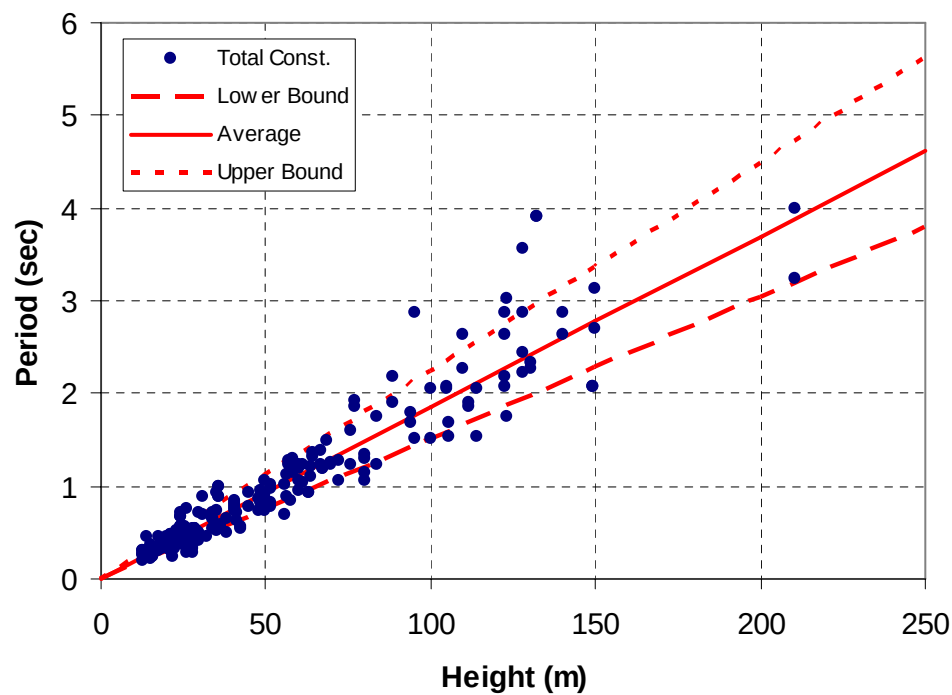
จากผลความแตกต่างที่ได้ พบว่า ความแตกต่างของข้อมูลค่าคาบธรรมชาติจากอาคารทั้ง 2 กลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอาคารเดี่ยวที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวได้มาก และเพื่อเป็นแนวทางที่สะดวกในการปฏิบัติ จึงควรมีการใช้สมการในการประมาณค่าคาบธรรมชาติเดียวกันสำหรับทั้งสองกลุ่มอาคาร นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาสมการยกกำลังที่สะดวกต่อการใช้งาน ควรเลือกกำหนดให้ตัวเลขยกกำลังเป็นตัวเลขจำนวนเต็มหรือเลขที่ง่าย โดยสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบมีเงื่อนไข (Constrained Regression) สำหรับข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารรวมทั้งหมดที่มีเลขยกกำลัง 0.9941 การวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบมีเงื่อนไขในขั้นต่อไปเลือกให้เลขยกกำลังมีค่า 1.0 และได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยได้สมการเส้นตรง $y = 1.0x - 3.9913$ ค่า R^2 เท่ากับ 0.9246 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ α และ β ดังนิยามในสมการที่ 1-2 มีค่าเท่ากับ 0.0185 และ 1.0 ตามลำดับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_e) เท่ากับ 0.197 ดังนั้นค่า α_L และ α_U มีค่าเท่ากับ 0.0152 และ 0.0225 สำหรับสมการขอบเขตล่างและสมการขอบเขตบนตามลำดับ ตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 แสดงผลข้อมูลจากการตรวจวัดและสมการประมาณค่าในรูปแบบ สมการขอบเขตล่าง สมการค่าเฉลี่ย และสมการขอบเขตบน

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติแบบมีเงื่อนไข

ข้อมูล	สมการค่าคาบธรรมชาติ			
	ขอบเขตล่าง (T_L)	ค่าเฉลี่ย (T_R)	ขอบเขตบน (T_U)	S_e
รวมทั้งหมด	$0.0152H$	$0.0185H$	$0.0225H$	0.197

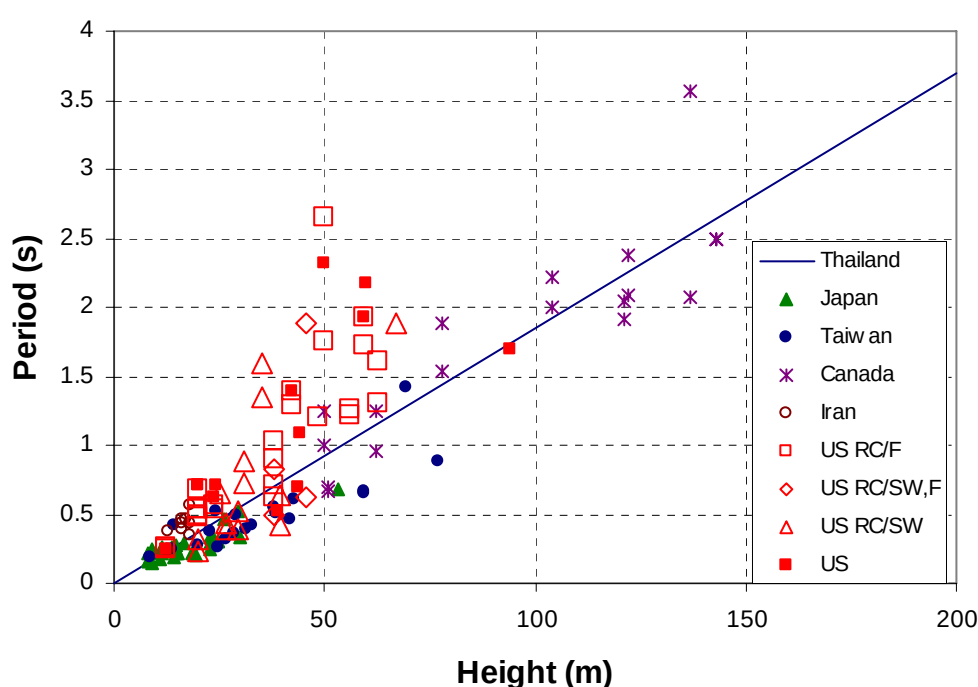


รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ Constrained Regression ($\alpha = 1.0$) สำหรับข้อมูลคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารทั้งหมด

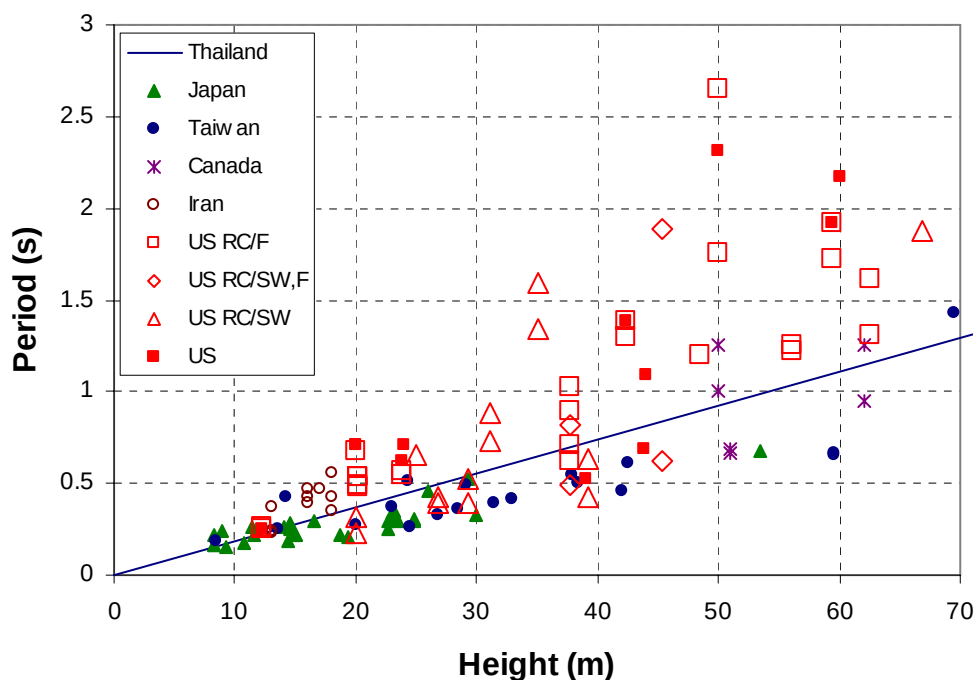


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารทั้งหมดจากการวิเคราะห์ Constrained Regression ($\alpha = 1.0$)

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการตรวจวัดในประเทศไทยที่แสดงด้วยสมการค่าเฉลี่ย กับงานวิจัยด้านการตรวจวัดอาคารคอนกรีตในระดับการสั่นไหวต่ำ หรือ Ambient vibration ของประเทศต่าง ๆ คือ สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น ไต้หวัน อิหร่าน และสำหรับงานวิจัยในสหรัฐอเมริกา สามารถจำแนกข้อมูลได้ตามลักษณะของอาคารคือ อาคารประเภทโครงข้อแข็งรับแรงดัด (RC/F) ประเภทกำแพงรับแรงเฉือน (RC/SW) และประเภทผสมระหว่างโครงข้อแข็งรับแรงดัดกับกำแพงรับแรงเฉือน (RC/SW,F) และอาคารบางส่วนที่ไม่มีข้อมูลของโครงสร้าง และเมื่อพิจารณาข้อมูลจากสหรัฐอเมริกาพบว่า ค่าคาบธรรมชาติมีค่าค่อนข้างสูงกว่าข้อมูลของประเทศอื่น ๆ และอาคารประเภทโครงข้อแข็งรับแรงดัดมีแนวโน้มที่จะมีค่าคาบธรรมชาติสูงกว่าอาคารประเภทอื่น



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติที่ตรวจวัดในประเทศไทยกับประเทศต่าง ๆ

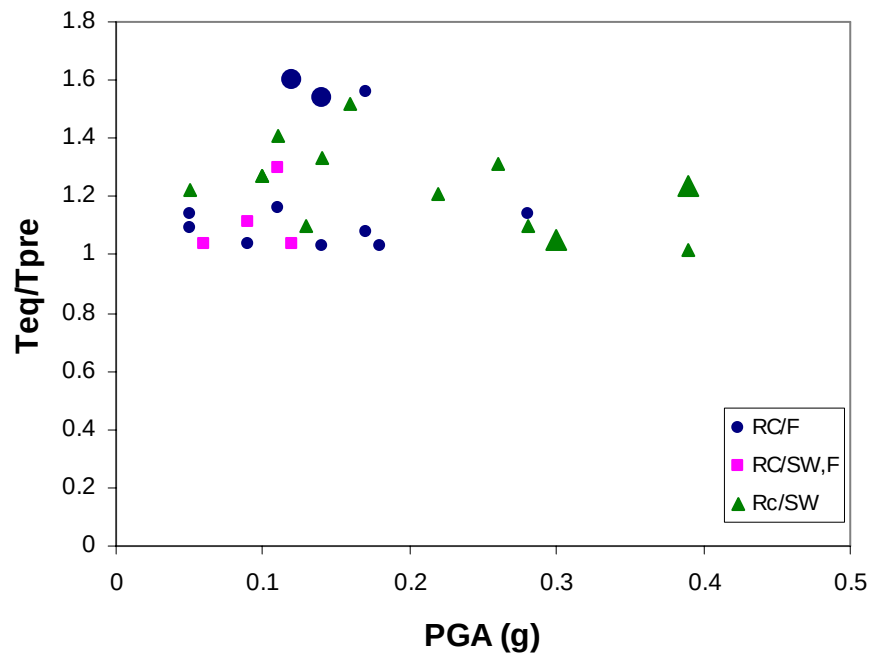


รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติที่ตรวจวัดในประเทศไทยกับประเทศต่าง ๆ (ความสูงอาคารไม่เกิน 70 เมตร)

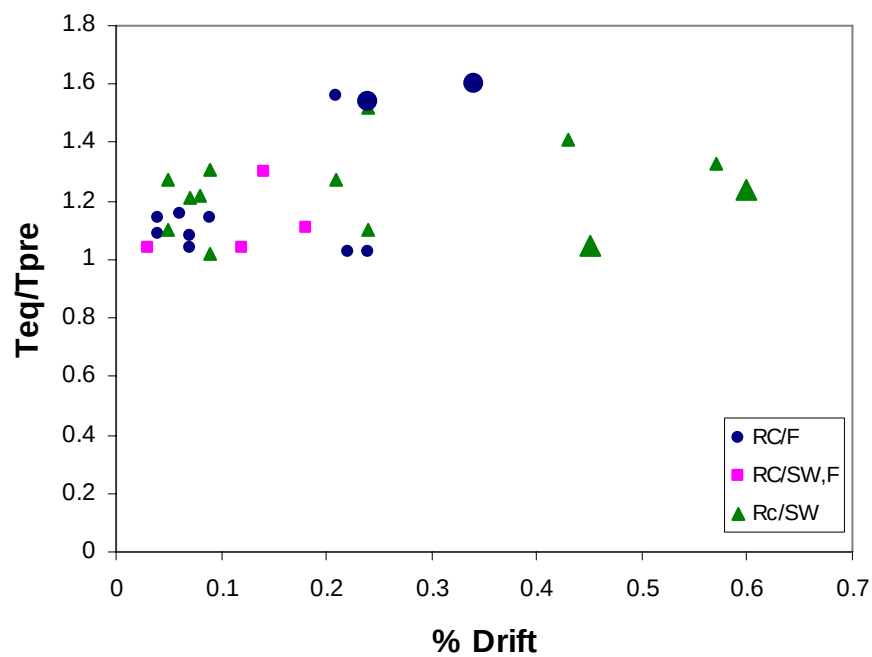
4.3 การปรับค่าคาบธรรมชาติจากผลการวัดแบบ Ambient Vibration เป็นค่าสำหรับผลตอบแทนในระดับรุนแรง

ผลการตรวจวัดค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่ได้ดำเนินการมาทั้งหมดนั้นได้มาจากการตรวจวัดที่ระดับการสั่นไหวต่ำมาก หรือแบบ Ambient Vibration อย่างไรก็ตาม เมื่ออาคารเกิดการโยกตัวเนื่องจากแผ่นดินไหว จะเกิดการตอบสนองที่ระดับรุนแรง ดังนั้น ค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมที่ควรใช้พิจารณาในขั้นตอนการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวจึงควรเป็นค่าที่โครงสร้างมีสภาวะที่รับแรงจนถึงกำลังสูงสุดก่อนเกิดการครากหรือวิบัติขององค์อาคาร ซึ่งที่สภาวะดังกล่าว โครงสร้างอาจเกิดความเสียหายในส่วนองค์ประกอบที่ไม่ใช่โครงสร้างหลัก และ/หรือเกิดผลปฏิสัมพันธ์ของดินกับโครงสร้าง ซึ่งทำให้ค่าคาบธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้นจากระดับที่ตอบสนองในระดับ Ambient Vibration ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่าคาบธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัดให้เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมภายใต้แผ่นดินไหว โดยการดำเนินการศึกษาขั้นต่อไปได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากแผ่นดินไหวในต่างประเทศเพื่อประเมินระดับของการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติและใช้เป็นแนวทางในการเสนอสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย ซึ่งมีข้อมูลดังต่อไปนี้

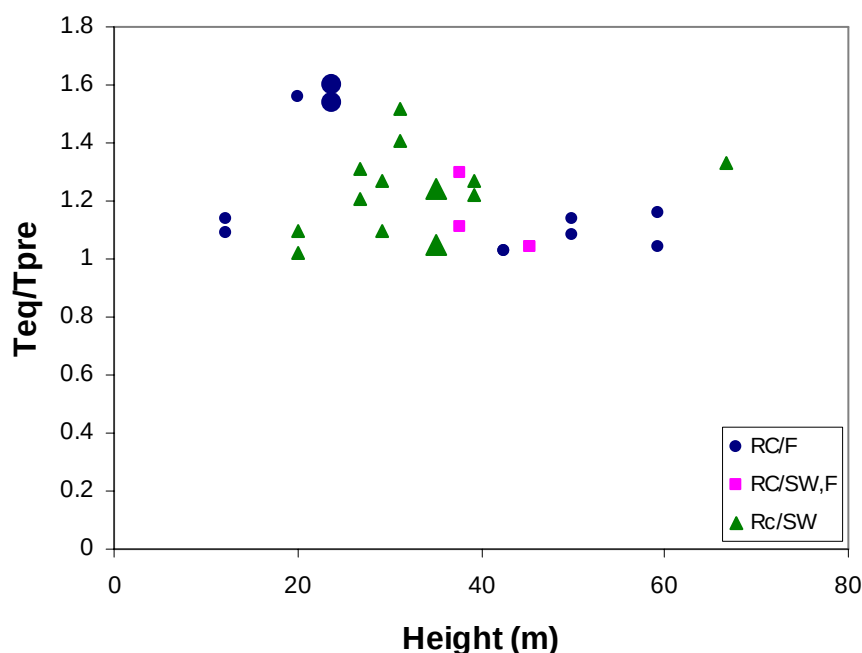
Li and Mau (1997) ได้วิเคราะห์ผลการตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว Loma Prieta ค.ศ. 1989 และ Whittier ค.ศ. 1987 ของอาคารจำนวน 21 หลัง ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการตอบสนองของอาคาร สำหรับผลของอาคารประเภทคอนกรีตจำนวน 15 หลัง ซึ่งสามารถจำแนกต่อออกเป็นอาคารประเภทโครงข้อแข็งรับแรงดัด (RC/F) จำนวน 6 หลัง ประเภทกำแพงรับแรงเฉือน (RC/SW) จำนวน 7 หลัง และประเภทผสมระหว่างโครงข้อแข็งรับแรงดัดกับกำแพงรับแรงเฉือน (RC/SW,F) จำนวน 2 หลัง โดยในอาคารเหล่านี้ มีอาคารประเภทโครงข้อแข็งรับแรงดัด จำนวน 1 หลัง และประเภทกำแพงรับแรงเฉือนจำนวน 1 หลังที่มีรายงานว่าได้รับความเสียหายในระบบโครงสร้างเล็กน้อย ผลการศึกษาของงานวิจัยดังกล่าว สามารถนำมาวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติได้ โดยแสดงในอัตราส่วนค่าคาบธรรมชาติในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวต่อค่าคาบธรรมชาติก่อนเกิดแผ่นดินไหวหรือที่ได้จากการตรวจวัดผลตอบสนองในระดับต่ำ (T_{eq}/T_{pre}) ดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 และสำหรับข้อมูลของอาคารที่ได้รับความเสียหายได้ถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์ที่มีขนาดใหญ่ ในรูปที่ 4.11 แสดงค่า T_{eq}/T_{pre} กับค่าความเร่งสูงสุดที่พื้นดิน (Peak ground acceleration, PGA) หน่วยเป็นความเร่งโน้มถ่วงของโลก (g หรือ 9.81 m/s^2) โดยพบว่า ค่าคาบธรรมชาติที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นดินไหวมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดที่ระดับการสั่นไหวต่ำ โดยอาจเพิ่มขึ้นสูงสุดได้ถึง 60% และมีค่าการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยประมาณ 20% นอกจากนี้ อาจคาดหมายได้ว่า การเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตาม ผลของงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้แสดงแนวโน้มที่ชัดเจนเช่นนั้น และพบว่า ลักษณะของโครงสร้างและผลของความเสียหายต่อโครงสร้างก็ไม่ได้มีผลอย่างชัดเจนต่อแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติ ในรูปที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติกับระดับการเคลื่อนตัวของยอดอาคาร และรูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคาร ซึ่งไม่ปรากฏแนวโน้มที่ชัดเจนที่เป็นผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติจึงน่าจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบจำนวนมากที่ไม่ได้มีการบันทึกข้อมูลไว้ได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติตามระดับความเร่งสูงสุดที่พื้น (Li and Mau 1997)

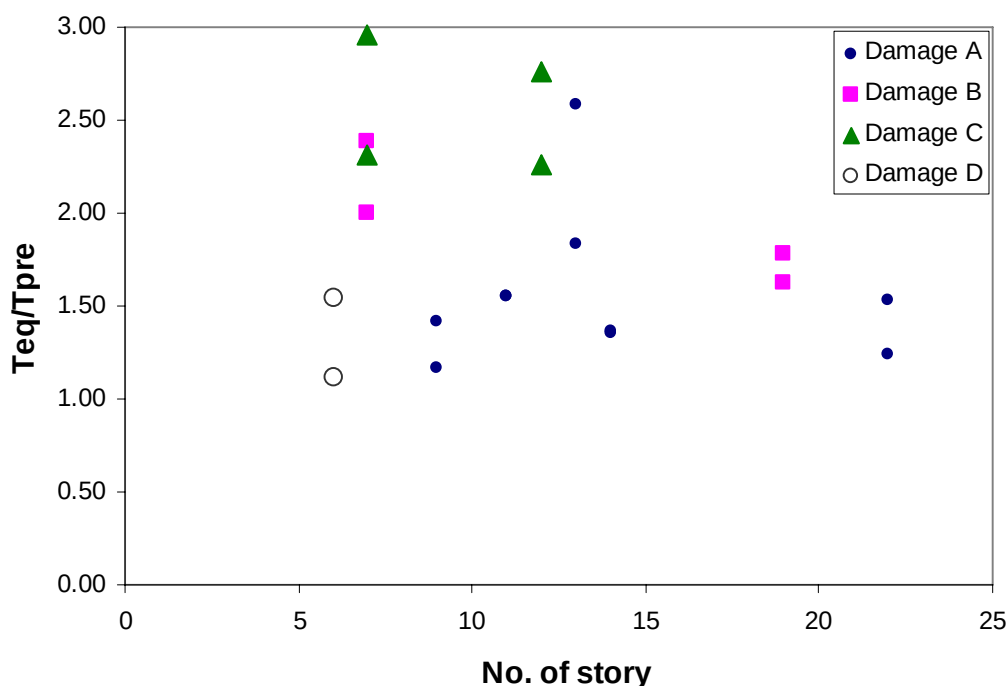


รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติตามร้อยละของการเคลื่อนตัวของยอดอาคาร (Li and Mau 1997)



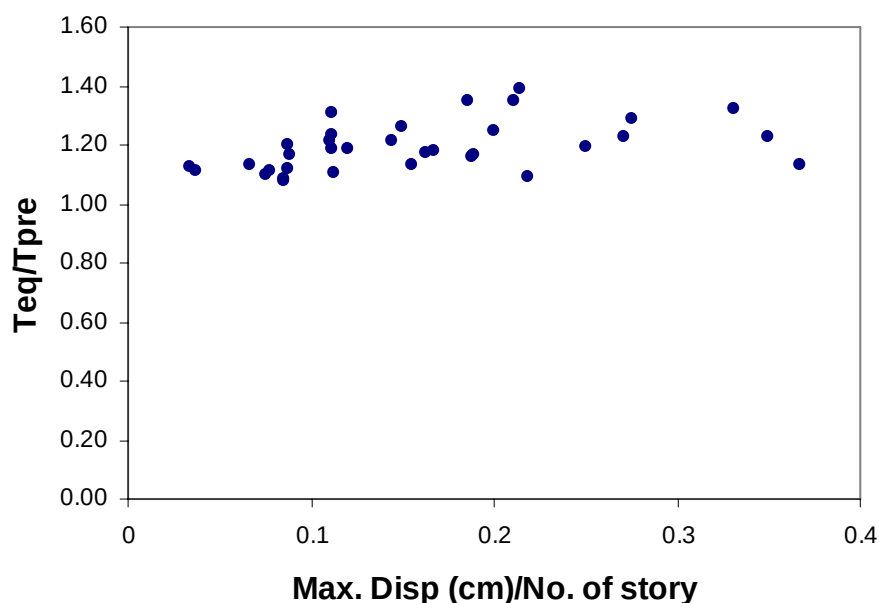
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติตามความสูงของอาคาร (Li and Mau 1997)

จากงานวิจัยของ Anderson และคณะในปี ค.ศ. 1991 ได้มีการทบทวนงานที่เก็บข้อมูลผลการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติของอาคาร สำหรับอาคารคอนกรีตประเภทโครงสร้างรับแรงดัดทั้งสิ้น 14 หลัง ซึ่งมีผลความรุนแรงจากแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างที่แตกต่างกันจำแนกออกเป็น 4 ระดับคือ ระดับ A ไม่มีความเสียหายต่อโครงสร้างและมีความเสียหายเล็กน้อยกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ระดับ B ไม่มีความเสียหายต่อโครงสร้างและมีความเสียหายกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ระดับ C มีความเสียหายเล็กน้อยต่อโครงสร้างและมีความเสียหายกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ระดับ D มีความเสียหายรุนแรงต่อโครงสร้างและชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ผลแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งพบว่า ค่าคาบธรรมชาติในบางกรณีอาจเพิ่มขึ้นสูงสุดได้ถึง 3 เท่า และโดยทั่วไป การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติขึ้นกับระดับของความเสียหาย นั่นคือ หากเกิดความเสียหายมากการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ยกเว้นอาคารที่เกิดความเสียหายที่ระดับ D) สำหรับอาคารที่เกิดความเสียหายในระดับ A ค่าเฉลี่ยของการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติคือประมาณ 50%



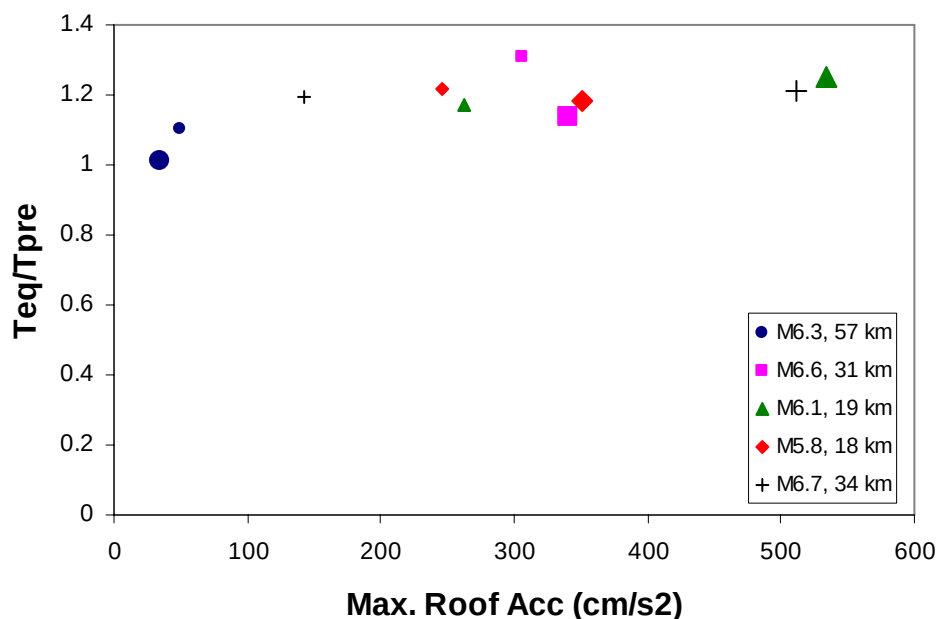
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติและระดับความเสียหายจากแผ่นดินไหว (Anderson et.al. 1991)

นอกจากนี้ Anderson และคณะในปี ค.ศ. 1991 ได้รวบรวมผลการศึกษาลักษณะการตอบสนองของอาคารแผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 1968 ขนาด 6.1 มีศูนย์กลางประมาณ 45 กม. จากกรุงโตเกียว โดยสำหรับตัวอย่างอาคารประเภทคอนกรีตผสมกับโครงสร้างเหล็กจำนวน 17 หลัง ที่มีความสูงเฉลี่ยประมาณ 10 ชั้น และมีการบันทึกค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของแต่ละอาคารไว้ รูปที่ 4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่หารด้วยจำนวนชั้น พบว่าค่าการเพิ่มขึ้นของคาบธรรมชาติโดยเฉลี่ยประมาณ 20% และการเพิ่มขึ้นของคาบธรรมชาติค่อนข้างมีแนวโน้มตามการเพิ่มขึ้นของระดับการเคลื่อนตัวสูงสุดของอาคารหารด้วยจำนวนชั้น



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติและค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดจากแผ่นดินไหว (Anderson et.al. 1991)

Clinton และคณะในปี ค.ศ. 2006 ได้ทำการรวบรวมการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีต 9 ชั้น สูง 44 เมตร ลักษณะโครงสร้างเป็นโครงข้อแข็งรับแรงดัดผสมกับกำแพงรับแรงเฉือน โดยกำแพงรับแรงเฉือนให้ผลหลักในแนวเหนือ-ใต้ของอาคาร อาคารหลังนี้ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวขนาดค่อนข้างใหญ่ 5 ครั้ง ได้แก่ ขนาด 6.3 ที่ระยะทางห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว 57 กม., ขนาด 6.6 ที่ระยะทาง 31 กม., ขนาด 6.1 ที่ระยะทาง 19 กม., ขนาด 5.8 ที่ระยะทาง 18 กม. และ ขนาด 6.7 ที่ระยะทาง 34 กม. โดยผลการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติเนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเหล่านั้นและค่าความเร่งที่ยอดอาคารสูงสุด ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 ผลในแนวตะวันออก-ตก และแนวเหนือ-ใต้ของอาคารได้ถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์ที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ตามลำดับ พบว่าค่าการเพิ่มขึ้นของคาบธรรมชาติโดยเฉลี่ยประมาณ 20% และการเพิ่มขึ้นของคาบธรรมชาติค่อนข้างมีแนวโน้มตามการเพิ่มขึ้นของระดับความเร่งสูงสุดของยอดอาคาร



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติและความเร่งสูงสุดที่ยอดอาคารคอนกรีต 9 ชั้นจากแผ่นดินไหว (Clinton et.al., 2006)

จากผลการทบทวนงานวิจัยที่กล่าวมานั้น มีข้อสรุปที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับแก้ค่าคาบธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัดแบบ Ambient vibration ที่ดำเนินการในประเทศไทยให้เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมภายใต้แผ่นดินไหว ดังนี้

- การตอบสนองของอาคารเนื่องจากแผ่นดินไหวทำให้ค่าคาบธรรมชาติของอาคารเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าคาบธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัดแบบ Ambient vibration
- โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติเนื่องจากแผ่นดินไหวมีแนวโน้มมากขึ้นตามระดับความรุนแรงของผลตอบสนองของอาคาร (ยกเว้นในงานวิจัยของ Li and Mau 1997 ที่มีข้อมูลบางส่วนที่ไม่แสดงแนวโน้มเช่นนี้)
- การเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติมีแนวโน้มมากขึ้นตามระดับความเสียหายของอาคาร
- งานวิจัยที่ได้ทำการทบทวนแสดงค่าการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติในช่วงกว้าง ตั้งแต่ 0 ถึง ประมาณ 300% ทั้งนี้อาจมีปัจจัยหลายประการที่ข้อมูลไม่ได้บันทึกได้อย่างสมบูรณ์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างเช่นนี้
- อย่างไรก็ตามอาจสังเกตพบว่สำหรับผลจากแผ่นดินไหวขนาดปานกลางถึงค่อนข้างใหญ่ และมีผลทำให้อาคารเกิดการเสียหายที่ไม่รุนแรง ค่าการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 20 ถึง 40%

ในการเสนอสมการการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับประเทศไทย มีประเด็นที่ต้องพิจารณาร่วมคือ ผลจากการตรวจวัด และค่าการปรับแก้ที่เหมาะสม ในส่วนของผลการตรวจวัด จำเป็นต้องพิจารณาเลือกค่าที่ทำให้การพิจารณาแรงสำหรับออกแบบให้มีความปลอดภัย ซึ่งโดยทั่วไปคือ

อาคารที่มีค่าคาบธรรมชาติสั้นจะมีแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวสูง ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกใช้สมการในการประมาณค่าคาบธรรมชาติแบบขอบเขตล่าง ($T_L = 0.0152H$) และในส่วนของการปรับแก้ งานวิจัยนี้สรุปเสนอใช้ค่าการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติของอาคารในระดับของแผ่นดินไหวที่ไม่รุนแรงคือ 30% ดังนั้นสมการในการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมแสดงได้ดังนี้

$$T = T_L \times 1.3 = 0.0152H \times 1.3 = 0.01976H \quad (4.4)$$

สมการสำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทยที่เสนอคือ

$$T = 0.02H \quad (4.5)$$

นอกเหนือจากการประมาณค่าคาบธรรมชาติจากสูตรการประมาณที่เสนอให้ใช้ในมาตรฐานการออกแบบทั่วไปแล้ว วิธีอื่นที่เป็นการคำนวณตามหลักการของพลศาสตร์โครงสร้างก็สามารถยอมให้ใช้ได้ อย่างไรก็ตาม ค่าคาบธรรมชาติจากการคำนวณไม่ควรมีค่ามากเกินไปจนอาจทำให้แรงแผ่นดินไหวมีค่าต่ำไป จึงต้องกำหนดขอบเขตของค่าที่ได้จากการคำนวณไว้ไม่ให้มากเกินไปเทียบกับค่าจากสูตรการประมาณ ค่าขอบเขตดังกล่าวนี้สามารถกำหนดได้จากข้อมูลการตรวจวัดซึ่งได้ว่าค่าคาบธรรมชาติแบบขอบเขตบน ($T_U = 0.0225H$) และสมการค่าคาบธรรมชาติแบบขอบเขตล่าง ($T_L = 0.0152H$) มีอัตราส่วนที่แตกต่างกัน (T_U/T_L) เท่ากับ 1.480 ดังนั้น จึงเลือกกำหนดให้ หากใช้การคำนวณเพื่อการหาค่าคาบธรรมชาติโดยหลักการของพลศาสตร์โครงสร้าง ค่าคาบธรรมชาติที่ได้ไม่ควรมีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของค่าที่ได้จากสูตรการประมาณ

จากสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เสนอสำหรับประเทศไทย ควรมีการพิจารณาเปรียบเทียบกับสูตรการประมาณที่เสนอในมาตรฐานการออกแบบของต่างประเทศที่เป็นสากลเพื่อตรวจสอบความใกล้เคียงของช่วงค่าคาบให้มีค่าที่เหมาะสม โดยสำหรับสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติในมาตรฐานการออกแบบของต่างประเทศที่เป็นสากลที่นำมาเปรียบเทียบคือ มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย และกลุ่มประเทศยุโรป โดยจากการพิจารณาในรายละเอียดของอาคารคอนกรีตสามารถจำแนกลักษณะของสูตรการประมาณได้ 3 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

ก. สูตรประมาณที่มีรูปแบบเหมือนกับใน Uniform Building Code ปี ค.ศ. 1997 ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีสมการดังนี้

$$T = C_t H^{3/4} \quad (4.6)$$

โดยที่ C_t เท่ากับ 0.0731 (หรือใช้ 0.075 ในมาตรฐานอื่นที่นำ UBC-97 ไปประยุกต์ใช้ต่อ) สำหรับโครงสร้างรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีตสามมิติ และเท่ากับ 0.0488 (หรือใช้ 0.05 ในมาตรฐานอื่นที่นำ UBC-97 ไปประยุกต์ใช้ต่อ) สำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงสร้างประเภทอื่น ๆ H คือความสูงของอาคาร หน่วยเป็นเมตร

ซึ่งสูตรการประมาณใน National Building Code of Canada (NBC) ของประเทศแคนาดา NBCC-2005 และ Eurocodes ของประเทศในทวีปยุโรป Eurocode 8 EN 1998-1:2004 ใช้สมการเดียวกันทั้งสิ้น และ Australian Standard ของประเทศออสเตรเลีย AS 1170.4—2007 ใช้รูปแบบเช่นเดียวกันแต่คูณเพิ่มด้วยค่าประกอบ 1.25

ข. สูตรการประมาณโดย American Society of Engineers (ASCE) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ASCE 7 ค.ศ. 2005 ซึ่งมีที่มาจากการวิจัยของ Goel และ Chopra (1997) มีสมการดังนี้

สำหรับโครงสร้างรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต

$$T = 0.0466H^{0.9} \quad (4.7)$$

ส่วนโครงสร้างประเภทอื่น ๆ ได้กำหนดให้ใช้สมการเดียวกับ UBC-97 นั่นคือ

$$T = 0.0488H^{3/4} \quad (4.8)$$

สำหรับโครงสร้างประเภทกำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีตมีสมการเฉพาะที่ต้องคำนวณปริมาณกำแพงในอาคารด้วย

ค. สูตรการประมาณของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมี 2 ส่วนได้แก่ The Building Standard Law in Japan (BSLJ) ฉบับ ค.ศ.1987 และ Architectural Institute of Japan (AIJ) มาตรฐาน AIJ-2004 สำหรับ BSLJ 1987 เสนอสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติคือ

$$T = (0.02 + 0.01\alpha)H \quad (4.9)$$

โดยที่ α คือสัดส่วนระหว่างโครงสร้างหลักและโครงสร้างคอนกรีตของอาคาร โดยทำให้ได้สมการสำหรับโครงสร้างคอนกรีตคือ

$$T = 0.02H \quad (4.10)$$

และโครงสร้างหลักคือ

$$T = 0.03H \quad (4.11)$$

สำหรับ AIJ-2004 มีสูตรประมาณที่เพิ่มเติมจาก BSLJ คือ สูตรการประมาณที่สัมพันธ์กับจำนวนชั้น n โดยเสนอเป็นช่วงกว้าง ดังนี้

สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$T = (0.06 \pm 0.02)n \quad (4.12)$$

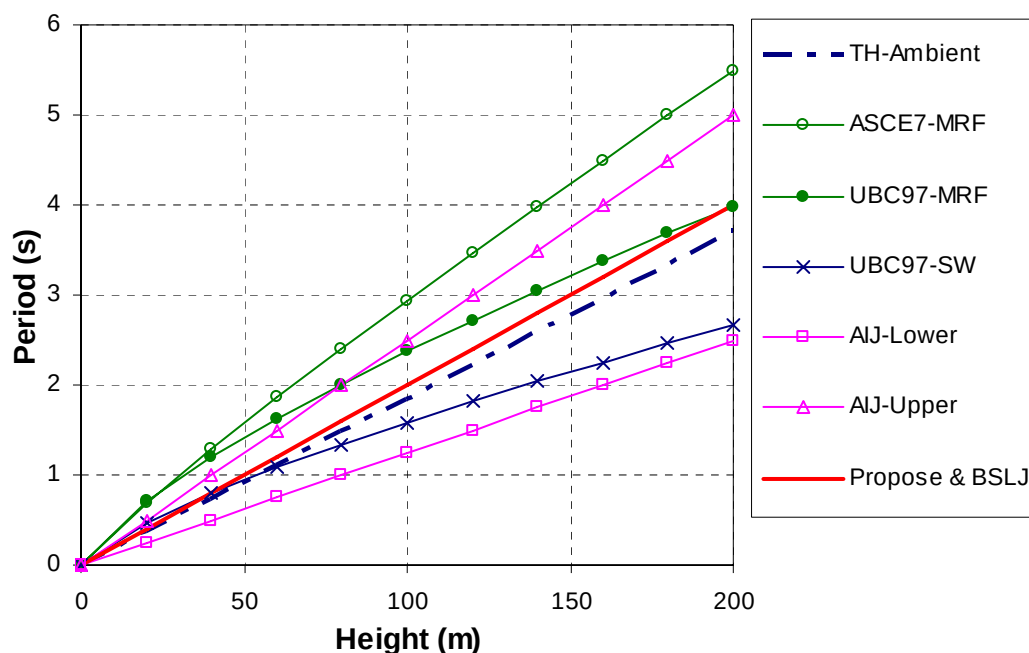
สำหรับโครงสร้างเหล็ก

$$T = (0.1 \pm 0.03)n \quad (4.13)$$

ซึ่งสำหรับอาคารคอนกรีตค้ำอยู่ในช่วง $0.04n \leq T \leq 0.08n$ ซึ่งมีความแตกต่างในค่าจากขอบเขตล่างถึงขอบเขตบนได้ 100%

การเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติจากสูตรการประมาณที่นำเสนอสำหรับประเทศไทยและค่าจากสูตรการประมาณของ 3 กลุ่มข้างต้น แสดงดังรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงข้อมูลที่ประกอบด้วย

- TH-Ambient คือสมการค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดในประเทศไทย
- ASCE7-MRF คือสมการสำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีตจาก ASCE7-05
- UBC97-MRF คือสมการสำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีตจาก UBC97
- UBC97-SW คือสมการสำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงสร้างประเภทอื่นๆ จาก UBC97 และ ASCE7-05
- AIJ-Lower คือสมการสำหรับค่าแบบขอบเขตล่างจาก AIJ-2004 (ใช้ความสูงแต่ละชั้นเท่ากับ 3.2 เมตร)
- AIJ-Upper คือสมการสำหรับค่าแบบขอบเขตบนจาก AIJ-2004 (ใช้ความสูงแต่ละชั้นเท่ากับ 3.2 เมตร)
- Propose & BSLJ คือสมการที่นำเสนอสำหรับประเทศไทย ซึ่งเท่ากับ BSLJ-87



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติของสมการที่เสนอและมาตรฐานจากประเทศต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.17 ค่าคาบจากสมการสำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีตจาก ASCE7-05 (ASCE7-MRF) มีค่ามากที่สุด สมการจากค่าแบบขอบเขตล่างจาก AIJ-2004 และสำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงสร้างประเภทอื่น ๆ จาก UBC97 และ ASCE7-05 ให้ค่าคาบที่น้อยที่สุด และค่าที่ได้จากการตรวจวัดในประเทศรวมถึงสมการที่นำเสนอมีค่าอยู่ในช่วงของขอบเขตทั้งสอง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบก่อนหน้าดังรูปที่ 4.9 และ 4.10

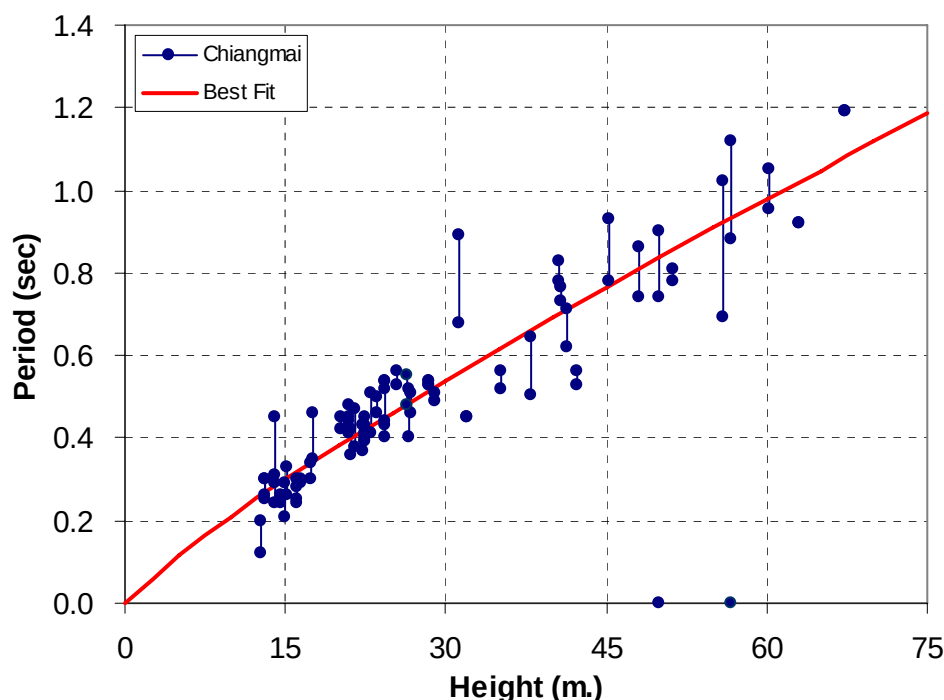
4.4 การพิจารณาข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่ศึกษา

ในส่วนนี้ เป็นการวิเคราะห์ลักษณะของข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่ได้จากการศึกษาในแง่ต่าง ๆ ได้แก่

- ความสัมพันธ์ของค่าคาบธรรมชาติของอาคารกับลักษณะทางกายภาพของอาคาร เช่น ความสูง ความกว้าง ความลึก จำนวนชั้น
- ผลกระทบเนื่องจากชั้นดิน จังหวัดเชียงใหม่ (ดินแข็ง) และกรุงเทพมหานคร (ดินอ่อน) ที่มีผลต่อรูปร่างการสั่นไหวจากการพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดอาคาร
- อัตราส่วนความหน่วงของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

จากค่าคาบธรรมชาติที่ตรวจวัดจากอาคารในจังหวัดเชียงใหม่จำนวน 51 หลัง และได้นำเสนอการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับความสูงของอาคารดังที่แสดงไว้ในส่วนต้น และได้แสดงในรูปที่

4.18 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับความสูง จุดแสดงค่าคาบธรรมชาติ เส้นเชื่อมระหว่างจุดหมายถึงเป็นอาคารเดียวกันแต่เป็นค่าในแต่ละทิศทาง เช่น เหนือ-ใต้ และ ตะวันออก-ตะวันตก สมการที่ได้จากการวิเคราะห์ Regression ที่ดีที่สุด แสดงไว้ด้วยเส้นแนวโน้มต่อเนื่อง จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) มีค่าเท่ากับ 0.8776 และลักษณะข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารแต่ละหลังในแต่ละทิศทางมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.18 คาบธรรมชาติของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ตามความสูง

สำหรับสมการการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่กำหนดไว้ในกฎกระทรวงแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550 ที่กำหนดไว้คือ

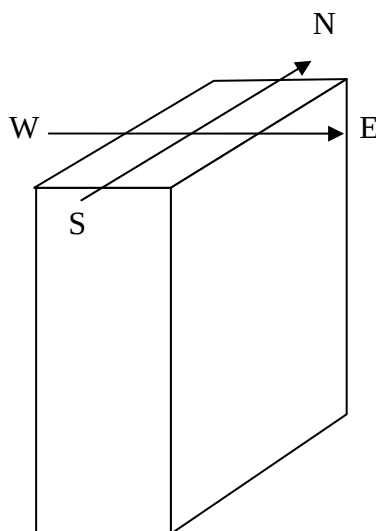
$$\text{สำหรับอาคารทั่วไปทุกชนิด ให้คำนวณตามสูตร } T = \frac{0.09h_n}{\sqrt{D}} \quad (4.14)$$

$$\text{สำหรับโครงสร้างที่มีความเหนียว ให้คำนวณตามสูตร } T = 0.1N \quad (4.15)$$

h_n คือ ความสูงของพื้นอาคารชั้นสูงสุดวัดจากระดับพื้นดินมีหน่วยเป็นเมตร D คือ ความกว้างของโครงสร้างของอาคารในทิศทางขนานกับแรงแผ่นดินไหว มีหน่วยเป็นเมตร และ N คือ จำนวนชั้นของอาคารทั้งหมดที่อยู่เหนือระดับพื้นดิน

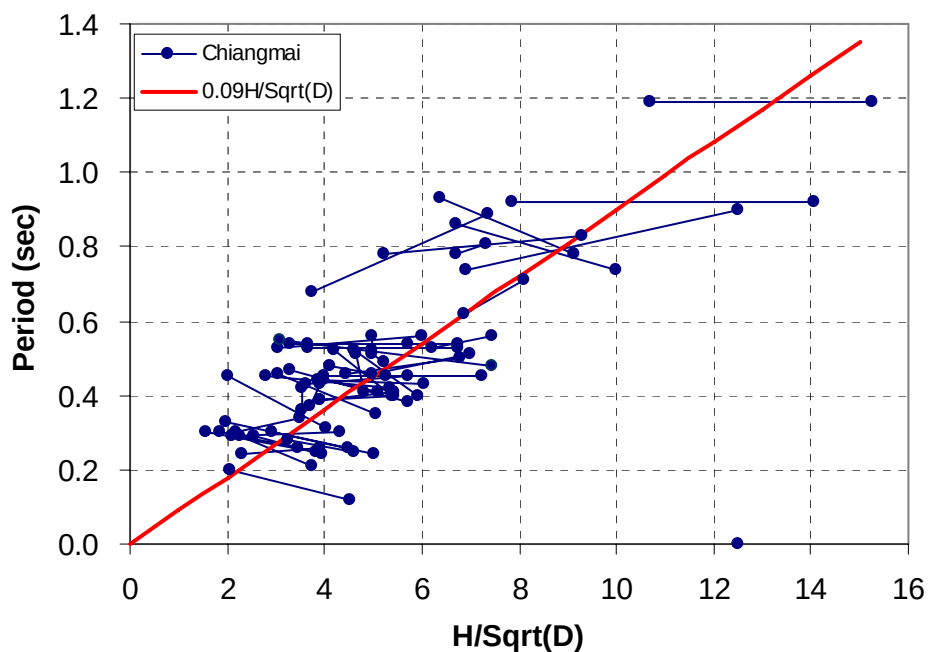
โดยที่สมการแรกของกฎกระทรวงฯ แสดงถึงค่าคาบธรรมชาติที่ขึ้นอยู่กับความสูงและความกว้างของอาคารด้วย โดยค่าคาบธรรมชาติของอาคารในทิศทางขนานกับด้านที่มีความกว้างมากจะ

มีค่าต่ำกว่าอีกด้านหนึ่ง ดังตัวอย่างดังรูปที่ 4.19 ค่าคาบธรรมชาติที่คำนวณตามสมการ 4.14 ในแนว N-S จะมีค่าต่ำกว่าแนว E-W ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะเกิดขึ้นจริงหากอาคารมีการกระจายคุณสมบัติด้านความแข็งแกร่ง และมวล อย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ตัดขวาง



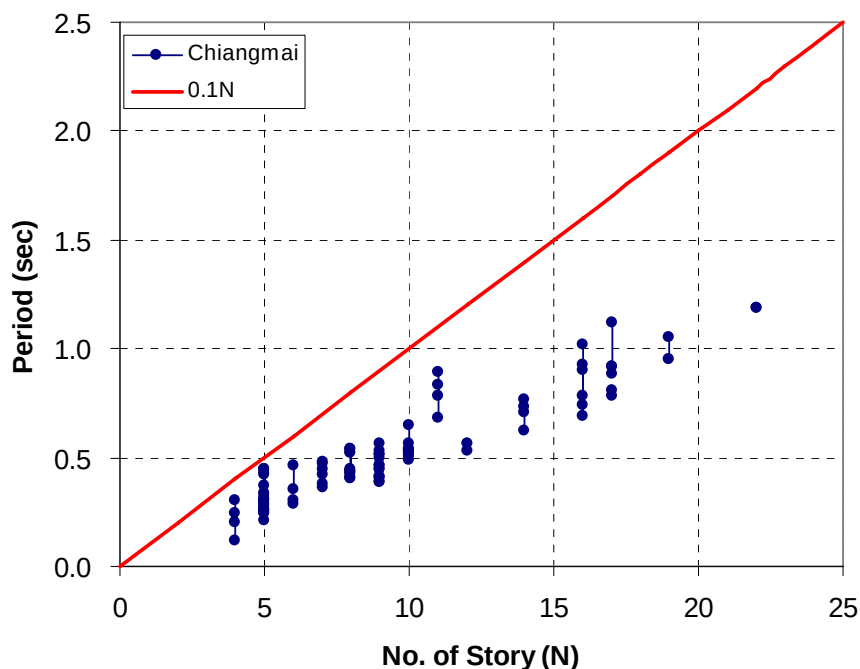
รูปที่ 4.19 มิติของอาคารสำหรับการพิจารณาคาบธรรมชาติในแต่ละทิศทาง

เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการตรวจวัดอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับค่า $H/\sqrt{D}$ ดังรูปที่ 4.20 โดยจุดแสดงค่าคาบธรรมชาติ เส้นเชื่อมระหว่างจุดหมายถึงเป็นอาคารเดียวกันแต่เป็นค่าในแต่ละทิศทาง พบว่า ค่าคาบธรรมชาติมีแนวโน้มเพิ่มตามค่า $H/\sqrt{D}$ จริง แต่ข้อมูลมีการกระจายตัวมาก โดยจากการวิเคราะห์เชิงถดถอยได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เพียง 0.5116 นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาข้อมูลของอาคารแต่ละหลังที่มีค่า $H/\sqrt{D}$ ของแต่ละด้านแตกต่างกัน หากพฤติกรรมเป็นไปตามสมการที่ 4.14 จริง ค่าคาบจะต้องมีแนวโน้มตามค่า $H/\sqrt{D}$ หรือเส้นเชื่อมจุดของแต่ละอาคารควรมีแนวโน้มเฉียงขึ้น แต่กลับพบว่าอาคารส่วนใหญ่ไม่มีพฤติกรรมเช่นนั้น นั่นคือ อาคารที่มี $H/\sqrt{D}$ ของแต่ละด้านต่างกัน ยังมีค่าคาบไม่ต่างกัน และข้อมูลจำนวนมากของอาคารด้านที่มี $H/\sqrt{D}$ มากกลับมีค่าคาบต่ำกว่าอีกด้าน ซึ่งตรงกันข้ามกับพฤติกรรมตามสมการที่ 4.14 นั้นแสดงถึงว่า ในอาคารโดยทั่วไปได้มีการจัดเรียงองค์ประกอบของโครงสร้าง เช่นแนวกำแพงรับแรงเฉือน แนวเสา เพื่อให้อาคารมีความแข็งแรงในแต่ละด้านอย่างเพียงพอ ทำให้ค่าคาบธรรมชาติไม่ได้ขึ้นอยู่กับความกว้างด้านนอกอาคาร รูปแบบของสมการที่ 4.14 จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาเป็นสูตรการประมาณ



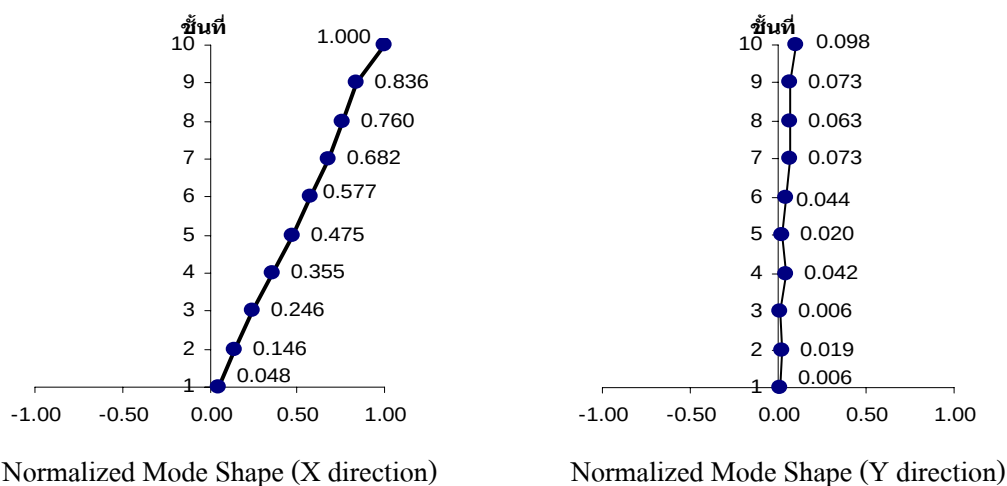
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติกับค่า $H/\sqrt{D}$ ของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

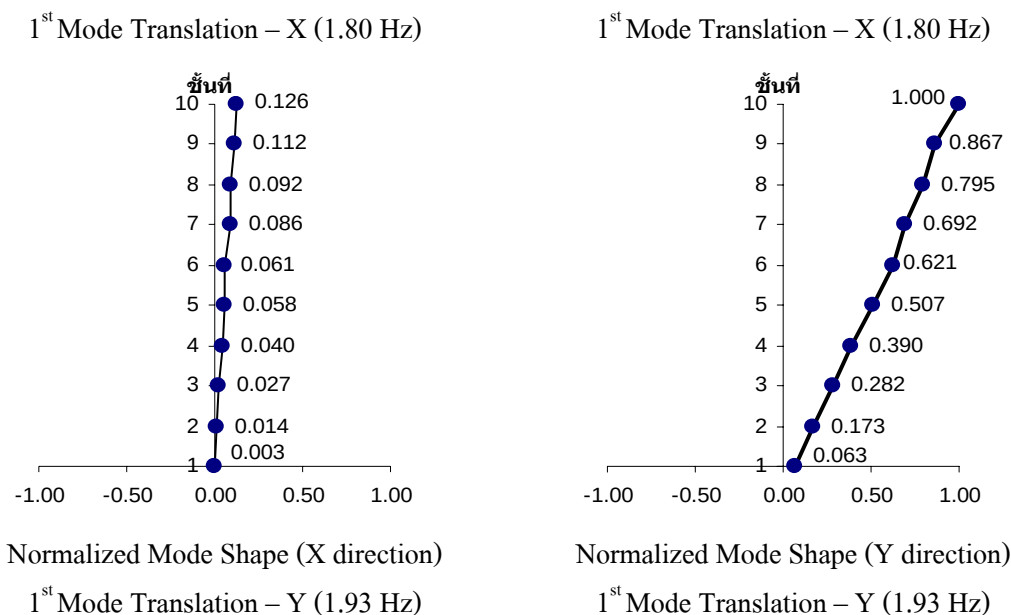
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าคาบกับจำนวนชั้นของอาคารตาม สมการที่ 4.15 จากข้อมูลของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ พบว่า ค่าคาบที่ตรวจวัดได้ มีค่าต่ำกว่าค่าจากสมการที่ 4.15 มาก เนื่องจากสมการดังกล่าวนี้ได้พัฒนาใช้สำหรับอาคารในประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ออกแบบให้สามารถตอบสนองในช่วงอินอีลาสติกได้อย่างดี (หรือมีความเหนียวมาก) สมการนี้จึงให้ค่าคาบที่สูงมาก และอาจไม่ตรงกับพฤติกรรมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยที่ไม่ได้รับการออกแบบให้มีความเหนียวเทียบเท่าได้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติกับจำนวนชั้นของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

สำหรับผลกระทบเนื่องจากชั้นดินที่มีผลต่อรูปร่างการสั่นไหวจากการพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดอาคาร ดังตัวอย่างที่แสดงดังรูปที่ 4.22 ที่แสดงรูปร่างการสั่นไหวของอาคารตัวอย่าง เลขที่ 1 ของจังหวัดเชียงใหม่ ในการสั่นไหวในแกนหลัก 2 ทิศทาง (X และ Y) มีค่าความถี่ธรรมชาติของแต่ละทิศทางและรูปร่างการสั่นไหวแสดงดังรูป โดยค่าของรูปร่างการสั่นไหวเป็นค่าขนาดการโยกตัวที่ระดับต่างๆของอาคารเทียบกับค่าสูงที่สุดที่เกิดขึ้น (ค่าสูงที่สุดเทียบเท่า 1.0) ซึ่งนิยามของค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดอาคารคือค่าที่เกิดขึ้นที่ฐานอาคาร เทียบกับค่าสูงสุด ดังรูปที่ 4.22 ค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานสำหรับรูปแบบการสั่นไหวตามแนว X มีค่าเท่ากับ 4.8% ของค่าที่ยอด และแนว Y มีค่าเท่ากับ 6.3%

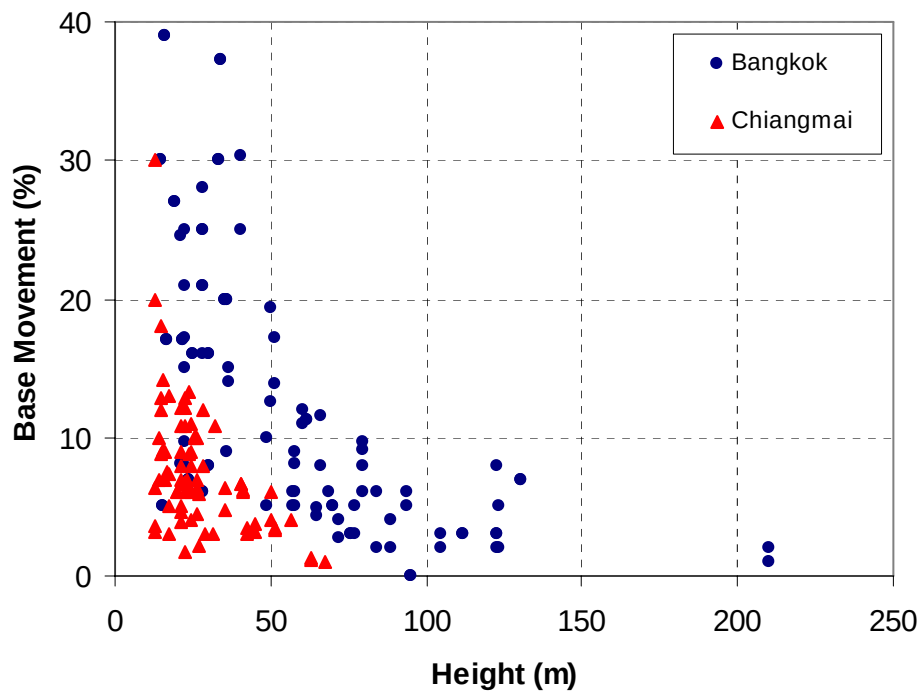




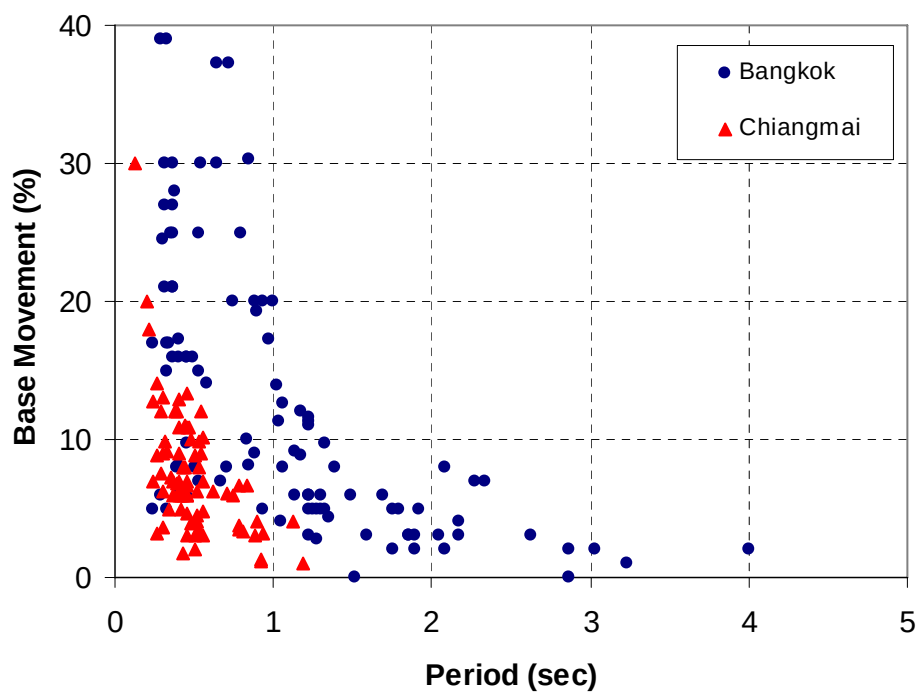
รูปที่ 4.22 ตัวอย่างรูปแบบการสั่นไหวของอาคาร

ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ (ดินแข็ง) และกรุงเทพมหานคร (ดินอ่อน) แสดงเป็นความสัมพันธ์กับความสูง และค่าคาบธรรมชาติของอาคารดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่า การเคลื่อนตัวที่ฐานของอาคารมีค่ามากสำหรับอาคารเตี้ย มีคาบธรรมชาติต่ำ หรือมีค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) ทางด้านข้างสูง และค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานสำหรับกลุ่มอาคารในจังหวัดเชียงใหม่มีค่าในช่วงต่ำกว่ากลุ่มอาคารในกรุงเทพมหานครอย่างชัดเจน การเคลื่อนตัวที่ฐานดังกล่าวนี้ แสดงผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและอาคาร (Soil-Structure Interaction) กล่าวคือ สำหรับระบบอาคารที่ไม่มีการเคลื่อนตัวที่ฐาน หมายถึงไม่มีผลจากดินต่ออาคารต่อรูปแบบการโยกตัว และหากมีค่ามากแสดงถึงผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและอาคารมีมาก และมีความสำคัญต่อการพิจารณาในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบอาคารให้ถูกต้อง

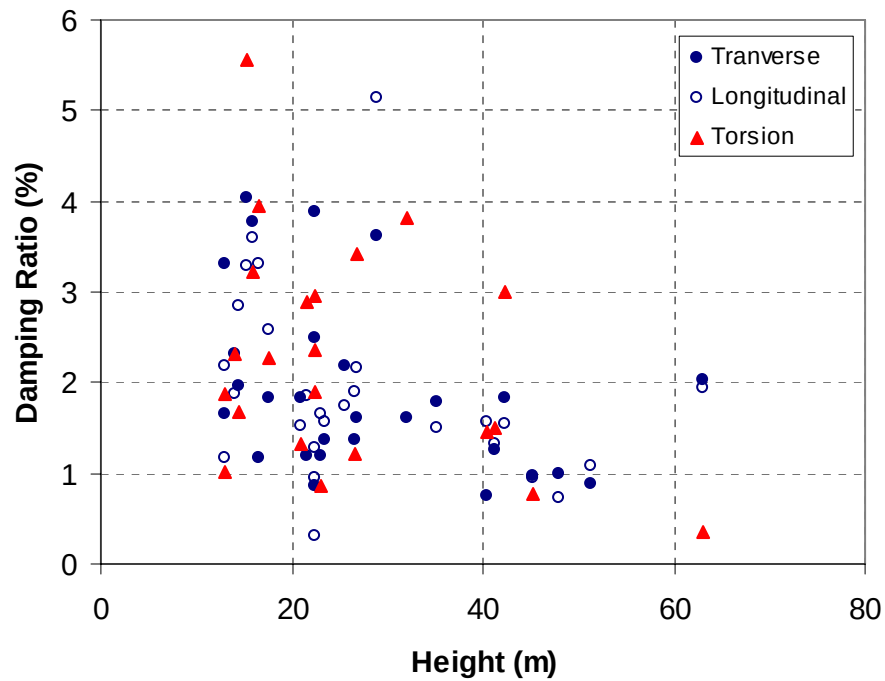
ค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ หาได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Natural Excitation Technique/ Eigensystem Realization Algorithm (NExT/ERA) โดย Juang (1994) และแสดงเป็นความสัมพันธ์กับความสูงและคาบธรรมชาติ ในรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ โดยพบค่าอัตราส่วนความหน่วงส่วนมากอยู่ในช่วง 1-3 % และมีแนวโน้มน้อยลงสำหรับอาคารที่มีความอ่อนตัว ได้แก่ อาคารสูง หรือมีคาบธรรมชาติต่ำ



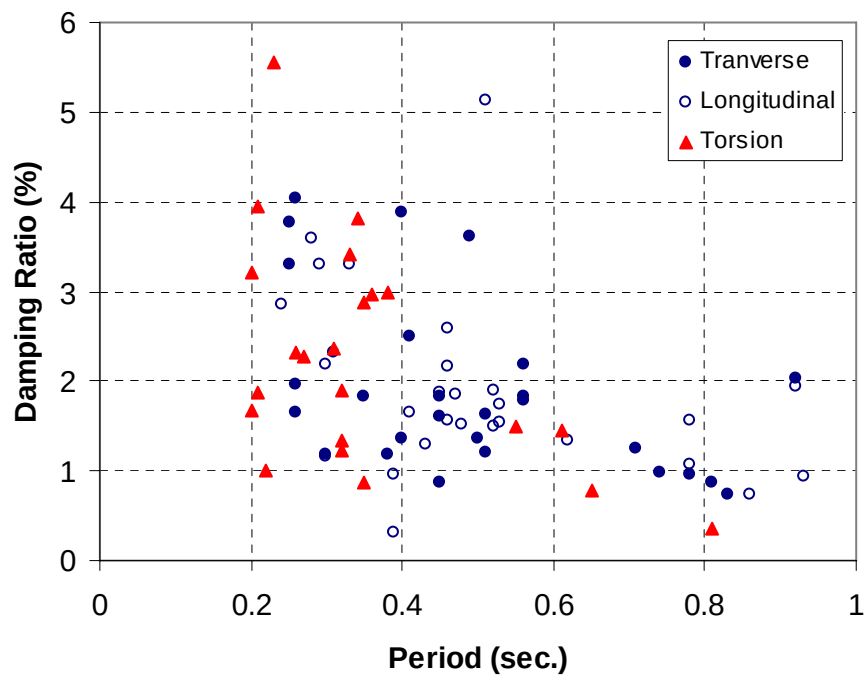
รูปที่ 4.23 การเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดกับความสูงของอาคารจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 4.24 การเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดกับคาบธรรมชาติของอาคารจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 4.25 อัตราส่วนความหน่วงกับความสูงของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 4.26 อัตราส่วนความหน่วงกับคาบธรรมชาติของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

บทที่ 5 ผลการศึกษา

การศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง

5.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูล

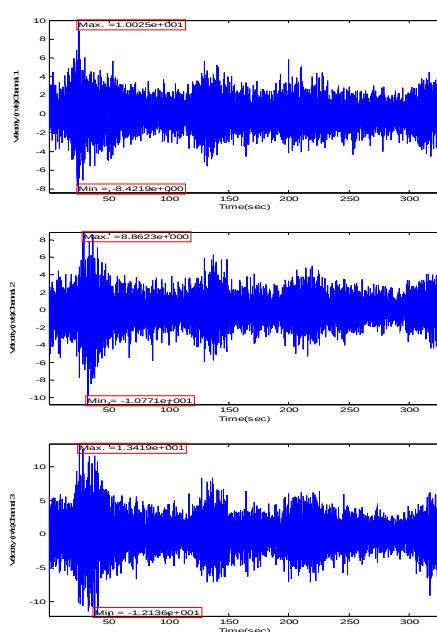
5.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าคาบอิทธิพลหลัก โดยวิธี H/V Spectrum Ratio

ในส่วนนี้จะแสดงการวิเคราะห์การศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) โดยวิธี H/V Spectrum Ratio ในจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งจะอธิบายกระบวนการโดยใช้ตัวอย่างวัดเจ็ดยอด ซึ่งมีการเก็บข้อมูลทั้งหมด 32,768 ข้อมูล, Sampling Rate 100 Hz เพื่อแสดงให้เห็นถึงกระบวนการต่าง ๆ ในการวิเคราะห์โดยวิธีนี้

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการวิเคราะห์

1. ข้อมูลการตรวจวัดได้ข้อมูลทั้งหมด 32,768 ข้อมูล นำข้อมูลที่ได้มาแบ่งเป็น 16 ส่วน ส่วนละ $2^{11} = 2048$ ข้อมูล = 20.48 วินาที เพื่อให้สามารถใช้ Fast Fourier Transform (FFT) ดังรูปที่ 5.1

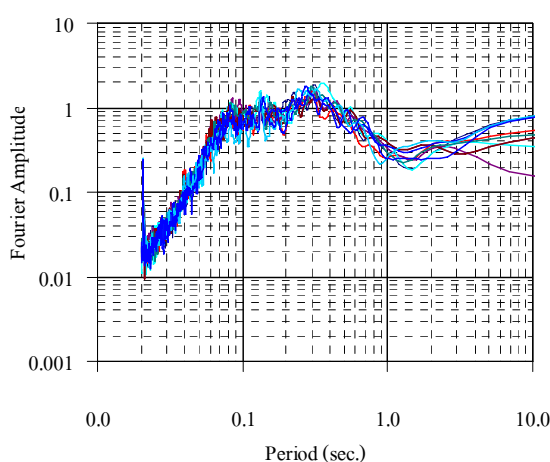
2. นำข้อมูลทั้งหมด 16 ส่วน มาตัดส่วนของสัญญาณที่ถูกรบกวนจากแหล่งภายนอก เช่น จากยานพาหนะหรือคนเดินรบกวนออก (โดยพิจารณาโดยผู้ทำการวิเคราะห์ เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลส่วนต่าง ๆ หากมีช่วงใดที่มีผลตอบสนองรุนแรงผิดปกติมาก จัดเป็นสัญญาณที่ถูกรบกวน) โดยข้อมูลของตัวอย่างนี้ในส่วนที่ไม่มีสัญญาณรบกวนมีทั้งหมด 10 ส่วนและข้อมูลในส่วนที่สัญญาณรบกวนมีทั้งหมด 6 ส่วน



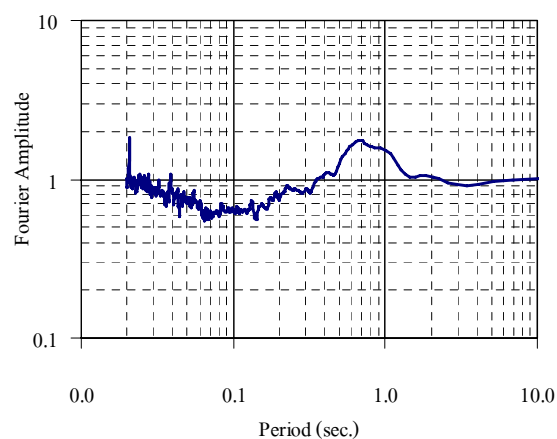
รูปที่ 5.1 ข้อมูลการตรวจวัด วัดเจ็ดยอด จังหวัดเชียงใหม่ (NS, EW และ UD ตามลำดับ)

3. จากข้อมูลที่ตัดสัญญาณออกเหลือจำนวน 10 ส่วน แล้วนำไปวิเคราะห์หา Fourier Spectrum โดยใช้ Fast Fourier Transform (FFT) ของแต่ละส่วน ใช้ Parzen Window 0.40 Hz จากนั้นหาค่า Average Fourier Spectrum ของแต่ละแกน โดยข้อมูลทั้งหมดมีดังนี้

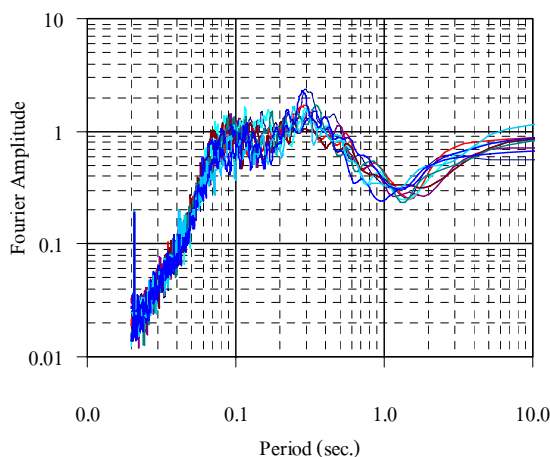
- Fourier Spectrum ของแกน NS จำนวน 10 ส่วนคำนวณเป็น Average Fourier Spectrum ของแกน NS
- Fourier Spectrum ของแกน EW จำนวน 10 ส่วนคำนวณเป็น Average Fourier Spectrum ของแกน EW
- Fourier Spectrum ของแกน UD จำนวน 10 ส่วนคำนวณเป็น Average Fourier Spectrum ของแกน UD



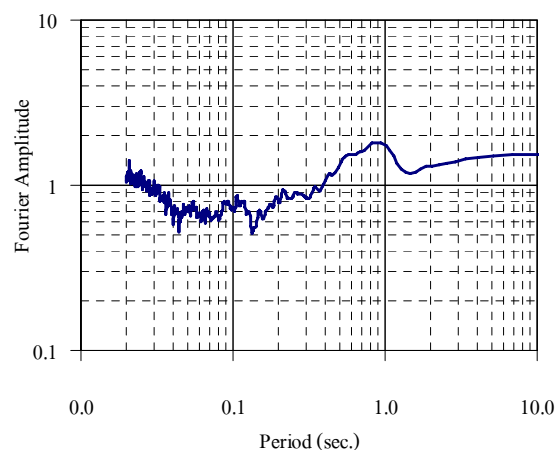
Fourier Spectrum ของแกน NS



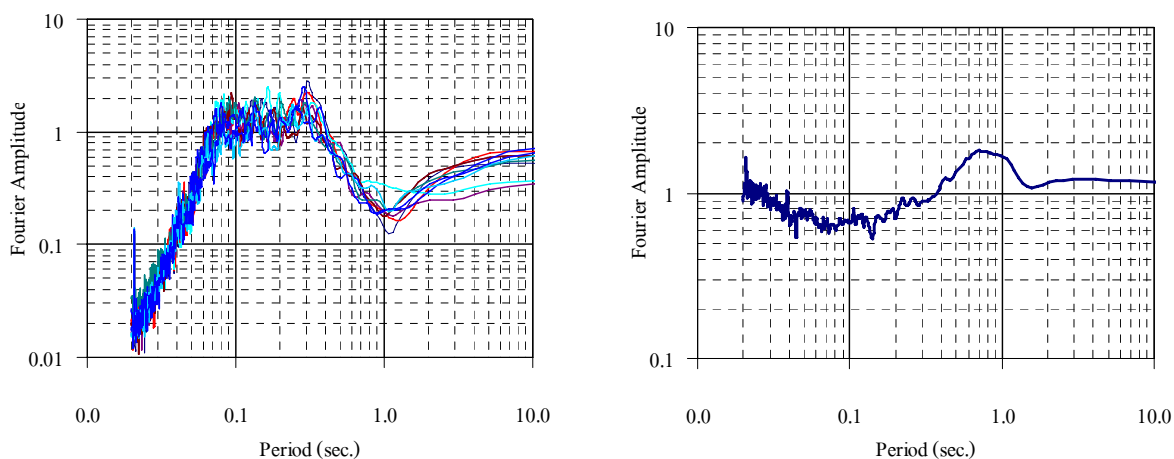
Average Fourier Spectrum ของแกน NS



Fourier Spectrum ของแกน EW



Average Fourier Spectrum ของแกน EW



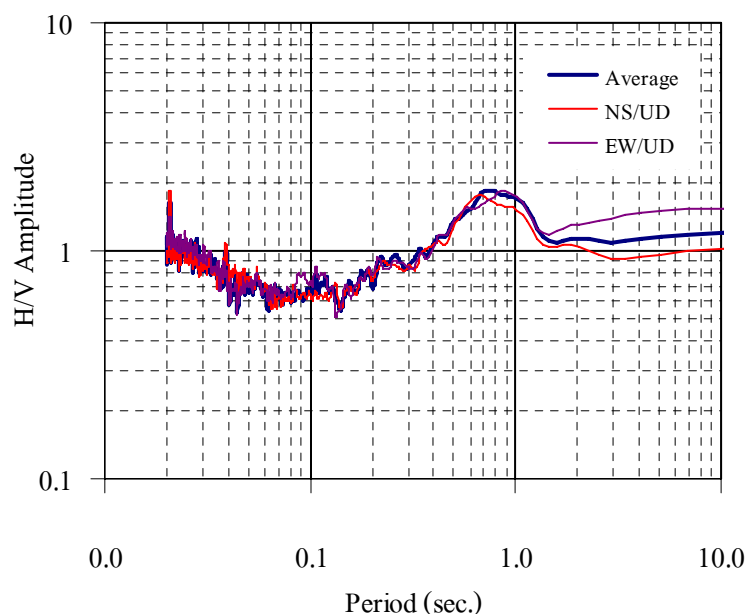
Fourier Spectrum ของแกน UD

Average Fourier Spectrum ของแกน UD

รูปที่ 5.2 Fourier Spectrum และ Average Fourier Spectrum ของแกน NS, EW, UD

4. จาก Average Fourier Spectrum ของแกน NS, EW, UD ใช้สมการ 5.1 คำนวณหาค่า H/V Spectrum Ratio

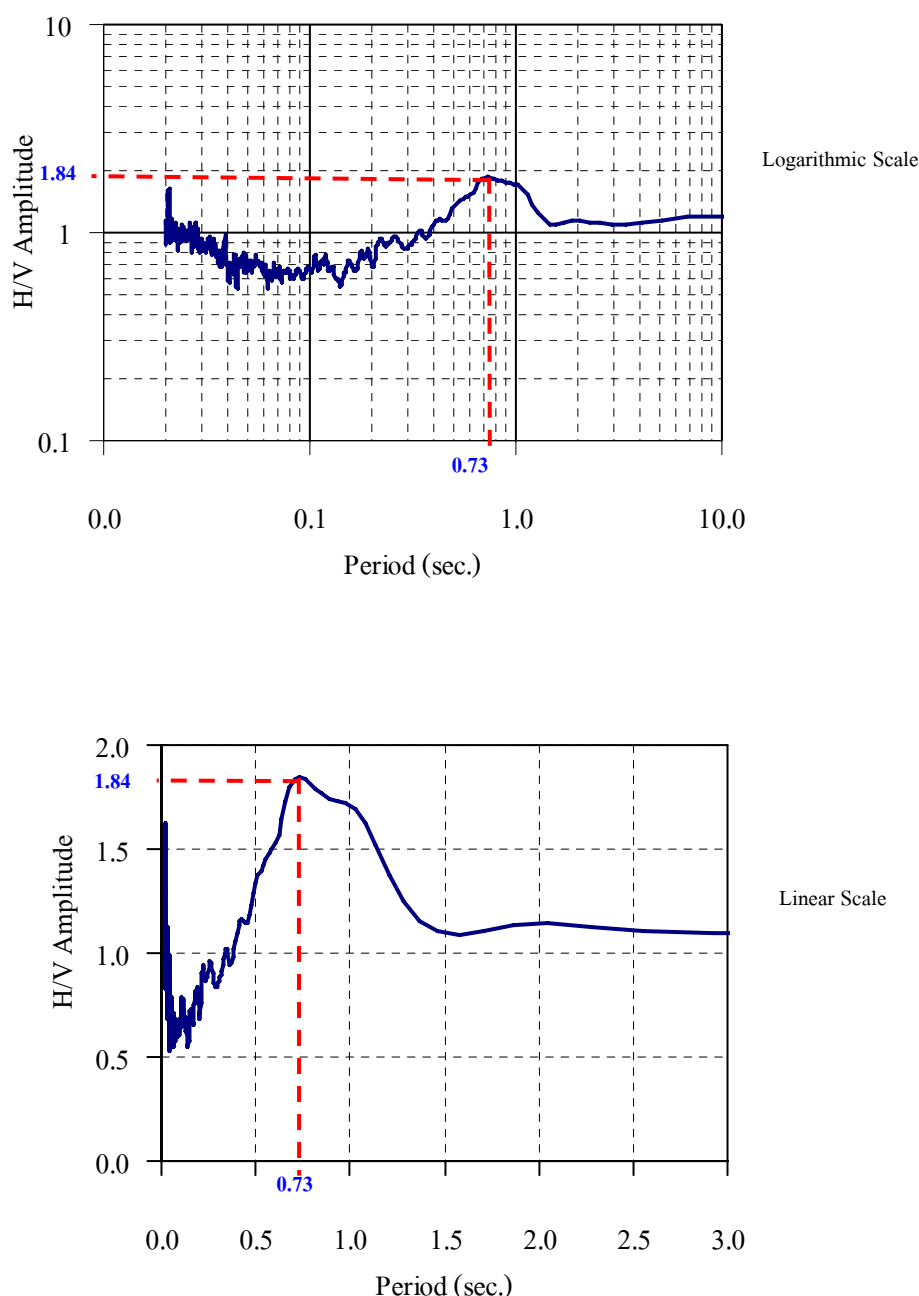
$$\text{Fourier Amplitude Ratio} = AR = \frac{H_S}{H_V} = \frac{\sqrt{F_{NS} \times F_{EW}}}{F_{UD}} \quad (5.1)$$



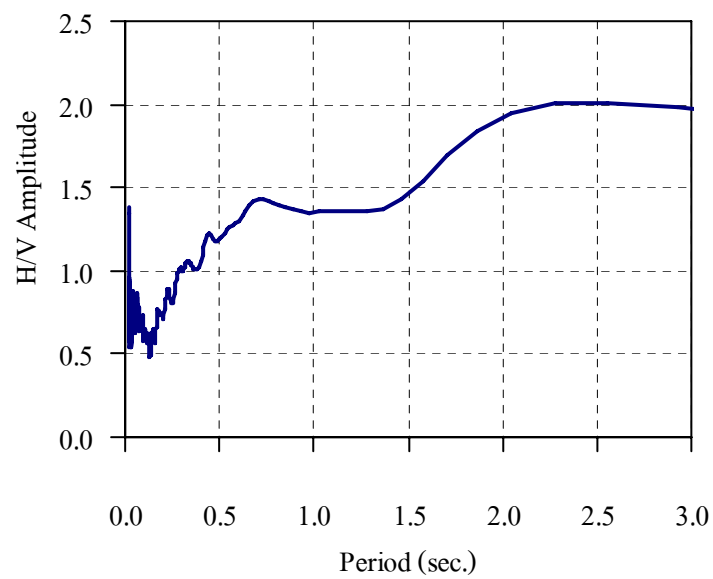
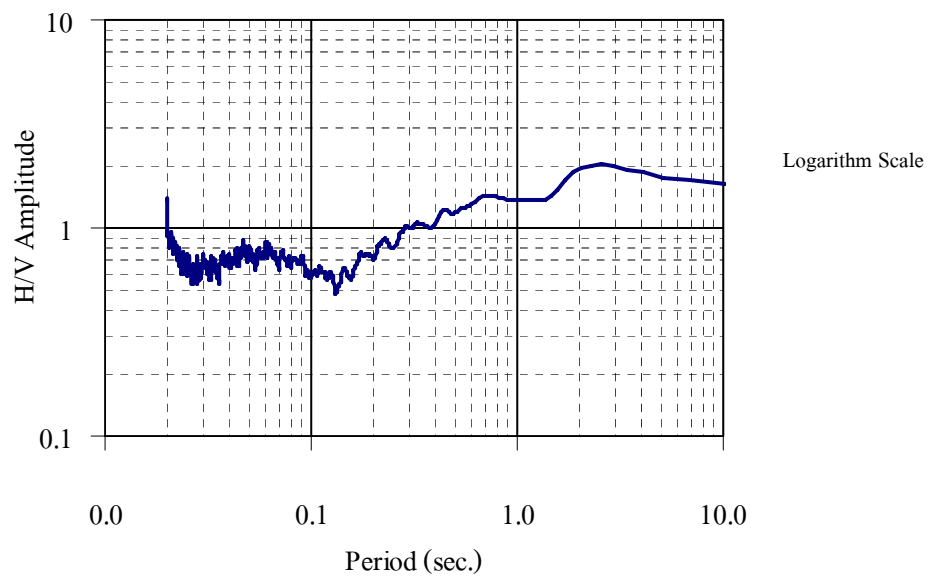
รูปที่ 5.3 H/V Spectrum Ratio ของวัดเจ็ดยอด จังหวัดเชียงใหม่

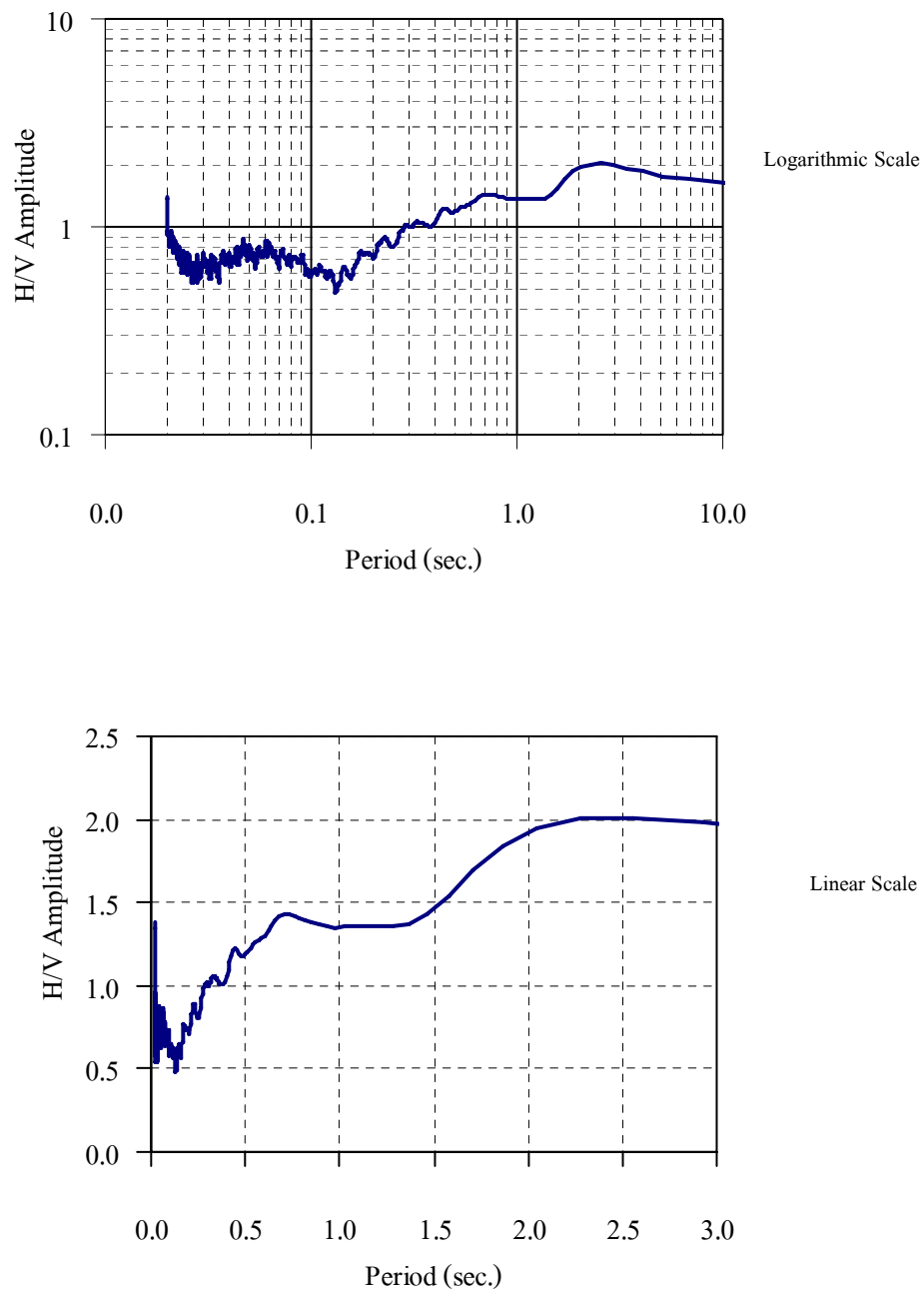
5. หาค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) และค่า จาก H/V Spectrum Ratio ซึ่งค่าคาบอิทธิพลหลักหาได้จาก ค่าคาบที่มี H/V Amplitude สูงสุด เช่น ดังรูปที่ 5.4 แสดงค่า คาบ

อิทธิพลหลัก (Predominant Period) และค่า Amplification Factor ของวัดเจ็ดยอดในจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งมีค่า คาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) เท่ากับ 0.73 วินาที และมี Amplification Factor เท่ากับ 1.84 แต่สำหรับบางจุดที่ไม่สามารถระบุค่าเหลือไม่สามารถระบุค่า คาบอิทธิพลหลัก (NO CLEAR PEAK) ได้เนื่องจากไม่ค่าคาบที่มี H/V Amplitude สูงสุด อยู่ในกราฟ ตัวอย่างเช่น วัดเจ็ดยอดหลวงในจังหวัดเชียงใหม่ ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 H/V Spectrum Ratio ของวัดเจ็ดยอด จังหวัดเชียงใหม่



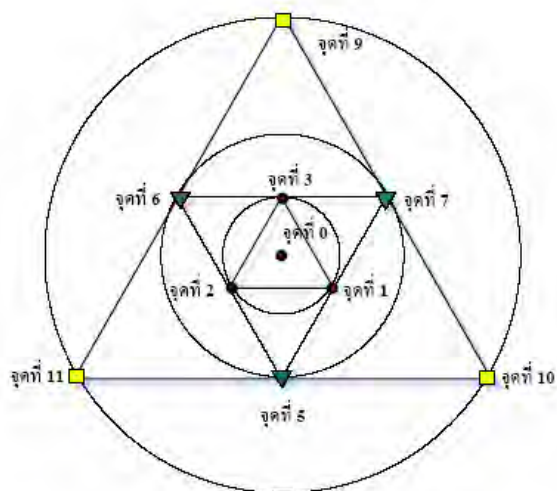


รูปที่ 5.5 H/V Spectrum Ratio ของวัดเจดีย์หลวง จังหวัดเชียงใหม่

5.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก โดยวิธี 2sSPAC

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก โดยใช้ข้อมูลของบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีการเก็บข้อมูลจำนวน 6 ครั้ง สำหรับรัศมีการวัด 3 รัศมี คือ 50 ม. 25 ม. และ 12.5 ม. โดยใช้ห้วงวัดจำนวน 3 ชุด มีลำดับการตรวจวัดดังตาราง 5.1 และมีรูปแบบดังรูปที่ 5.6 ซึ่งข้อมูลการตรวจวัดมี 9 ชุดข้อมูล เพื่อบันทึกค่า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ สำหรับรัศมีทั้งหมดดังนี้

- สำหรับรัศมี 50 ม. ได้ข้อมูล 3 ชุดข้อมูลสำหรับตำแหน่ง 0-9, 0-10 และ 0-11
- สำหรับรัศมี 25 ม. ได้ข้อมูล 3 ชุดข้อมูลสำหรับตำแหน่ง 0-5, 0-6 และ 0-7
- สำหรับรัศมี 12.5 ม. ได้ข้อมูล 3 ชุดข้อมูลสำหรับตำแหน่ง 0-1, 0-2 และ 0-3



รูปที่ 5.6 การเก็บข้อมูลแบบ Circular Array บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลการตรวจวัดหาความเร็วคลื่นเฉือน บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถานที่	รูปแบบการวัด	ครั้งที่	รัศมี ม.	ตำแหน่ง		
				Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ข้อมูลการวัด Sampling Rate = 100 Hz ความยาวข้อมูล = 20 นาที (120,000 data)	Circular Array รูปแบบที่ 1	1	50	0	11	9
		2	50	0	10	9
		3	25	0	6	5
		4	25	0	6	7
		5	12.5	0	3	1
		6	12.5	0	3	2

5.1.3 การบันทึกข้อมูลที่ตรวจวัด

ข้อมูลที่ตรวจวัดได้เมื่อแปลงข้อมูลแล้วจะมีการบันทึกลงในรูปแบบ ASCII ซึ่งมีจำนวนแถว (row) ตามความยาวข้อมูล ซึ่งในกรณีนี้คือ 120,000 แถว และมีจำนวนหลัก (column) ตามจำนวนหัววัด คือ หัววัด 1 หัววัดจะวัด 3 คือ แกนการสั่นแนวตั้ง 1 แกน (Z) และแนวราบ 2 แกน(X, Y) ดังนั้นจำนวนหลักของข้อมูล

- การตรวจวัดด้วยหัววัด 1 หัววัด จะมีจำนวนหลัก 3 หลัก
- การตรวจวัดด้วยหัววัด 2 หัววัด จะมีจำนวนหลัก 6 หลัก
- การตรวจวัดด้วยหัววัด 3 หัววัด จะมีจำนวนหลัก 8 หลัก เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องรับสัญญาณที่สามารถรับหัววัดตัวที่ 3 ได้เพียงสองแกนเท่านั้นซึ่งต้องเลือกกว่าจะเก็บข้อมูลแกนใด

ข้อมูลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.7 เป็นข้อมูลที่บันทึกจากการเก็บข้อมูลจากจำนวน 3 หัววัด ซึ่งมีจำนวนหลักทั้งหมด 8 หลัก โดยที่ หลักที่ 1 หลักที่ 2 หลักที่ 3 เป็นข้อมูลที่ได้จากหัววัดที่ 1 (Sensor 1) โดยหลักที่ 1 และหลักที่ 2 เป็นค่าความเร็วในแนวราบ 2 แกนซึ่งตั้งฉากกันจะเรียกว่า NS1, EW1 ในการศึกษาจะจัดให้กำหนดให้ทิศทางของแกน X ของทุกหัววัดมีทิศเหนือ หลักที่ 3 เป็นความเร็วในแนวตั้งจะเรียกว่า UD1

สำหรับหลักที่ 4 หลักที่ 5 หลักที่ 6 เป็นข้อมูลที่ได้จากหัววัดที่ 2 (Sensor 2) โดยหลักที่ 4 และหลักที่ 5 เป็นค่าความเร็วในแนวราบ 2 แกนซึ่งตั้งฉากกันจะเรียกว่า NS2, EW2 หลักที่ 6 เป็นความเร็วในแนวตั้งจะเรียกว่า UD2

สำหรับหลักที่ 6 หลักที่ 7 เป็นข้อมูลที่ได้จากหัววัดที่ 3 (Sensor 3) โดยหลักที่ 7 จะเป็นค่าความเร็วในแนวราบ 1 แกนซึ่งตั้งฉากกันจะเรียกว่า NS3 สำหรับหลักที่ 8 เป็นความเร็วใน

แนวดิ่งหรือแนวราบ ซึ่งต้องเลือกที่จะบันทึกแกนใด ซึ่งในการศึกษานี้ต้องการค่าความเร็วแนวดิ่ง จึงเรียกว่า UD3

Sensor 1			Sensor 2			Sensor 3	
Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8
NS1	EW1	UD1	NS2	EW2	UD2	NS3	UD3
-10.450400	1.012500	2.792200	-1.553800	16.059100	-20.715200	-1.456900	7.436200
-10.843800	1.453400	2.271000	-6.039200	10.768100	-16.230400	-2.684100	13.469800
-11.291100	0.407300	1.544700	-11.831900	4.411100	-11.669900	-6.397700	18.126000
-12.125600	-3.319300	1.581800	-15.746500	-1.234300	-7.634300	-10.221900	19.215400
-13.137800	-8.215500	0.583900	-15.944400	-6.173900	-2.904600	-12.200900	16.168400
-12.781100	-12.250600	-2.452000	-12.997800	-10.418100	3.308400	-11.560200	11.090400
-9.960900	-14.610400	-6.964000	-9.111800	-13.844800	9.507700	-9.344700	7.324000
-4.967300	-14.834400	-10.640900	-6.591100	-17.335300	13.921300	-7.225200	6.552000
0.436000	-14.805800	-11.227600	-5.368600	-21.264500	16.418300	-6.729900	7.325400
5.241200	-15.600500	-7.819800	-4.257400	-25.126900	17.797300	-7.611600	6.853600
8.063200	-18.011500	-1.611700	-2.762400	-27.320900	18.897100	-8.781900	4.028900
7.989900	-20.843100	5.453600	-1.401100	-27.376200	19.964700	-8.661100	-0.915000
6.027600	-22.088500	12.430200	-0.841200	-26.211900	20.783900	-6.289700	-5.405900
3.328700	-21.090800	18.782400	-0.562200	-24.507600	20.496400	-2.228500	-6.406700
1.421700	-19.173600	23.136000	0.229300	-22.556700	18.924200	2.049400	-3.230200
0.538300	-17.379300	24.647400	0.885000	-20.356700	16.127500	4.515200	2.240300
-0.232400	-16.603600	23.040700	1.439900	-18.360900	11.510800	4.685000	7.113100
-1.405900	-16.923600	19.116100	2.627300	-16.935800	5.193700	2.850400	8.941400
-2.583200	-16.835700	13.392800	5.362500	-16.383100	-1.678900	0.713100	7.467100
-3.490900	-15.171200	6.075800	9.700100	-16.360100	-8.029200	-0.949000	3.157800
-3.560700	-11.543500	-1.959000	14.532300	-16.721000	-13.213700	-1.699800	-2.403300
-2.732700	-6.584100	-8.918500	17.959800	-16.910600	-15.972700	-0.096400	-7.381500
-1.620400	-0.881100	-13.642600	18.654100	-15.564800	-14.678600	3.639100	-9.609400
-0.527300	4.438200	-16.299700	16.572700	-12.462000	-9.042000	8.361300	-8.092900
-0.252700	7.749500	-17.665700	13.417100	-7.808400	-0.261000	12.201700	-3.389300
-0.469000	8.844300	-18.784500	10.395100	-2.610400	8.997200	12.988600	1.986500
0.314400	8.938800	-19.926600	8.373200	2.373600	15.815800	9.651900	5.775600
3.370700	9.114600	-19.565600	7.021900	6.579700	17.989900	3.984300	6.450000

รูปที่ 5.7 ตัวอย่างข้อมูลที่บันทึกจากการตรวจวัดโดยใช้ 3 หัววัด

การศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก ต้องการข้อมูลเพียงความเร็วในแนวดิ่ง คือ UD1, UD2 และ UD3 เท่านั้นแต่ข้อมูลที่เหลือคือ NS1, EW1, NS2 และ EW2 สามารถนำไปใช้ในการศึกษาค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) โดยวิธี H/V Spectrum Ratio ได้โดยการตรวจวัดไปพร้อมกัน

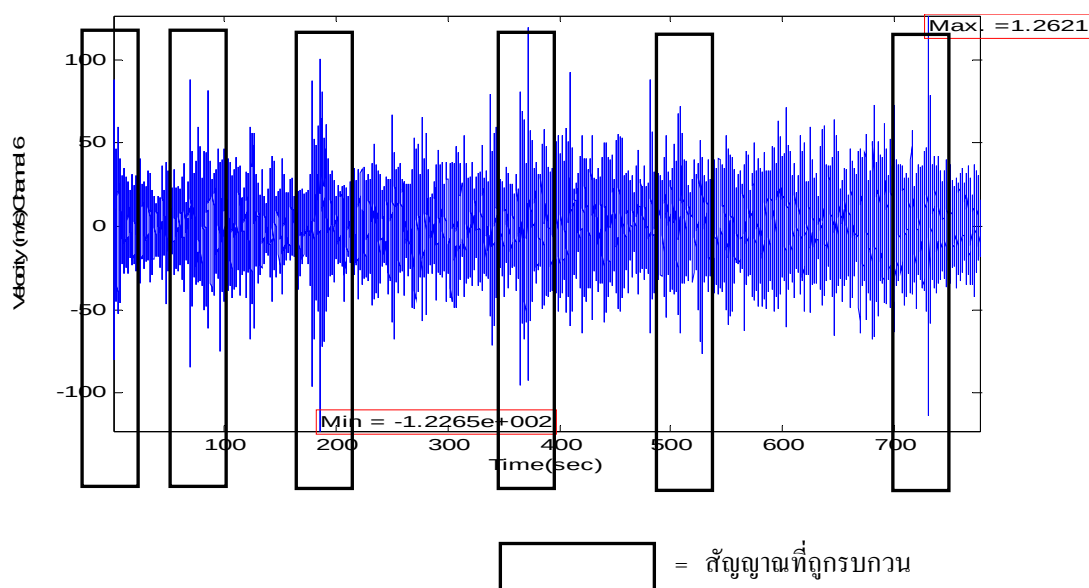
5.1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก

1. ข้อมูลการตรวจวัดที่ได้ จะได้ข้อมูลทั้งหมด 120,000 ข้อมูล นำข้อมูลที่ได้มาแบ่งเป็นส่วนส่วนละ $2^{12} = 4096$ data = 40.96 วินาที เพื่อให้สามารถใช้ Fast Fourier Transform (FFT) ได้ ซึ่งจะได้ทั้งหมด 29 ส่วน ซึ่งในที่นี้ต้องทำทั้ง 6 ไฟล์ที่บันทึกข้อมูลไว้

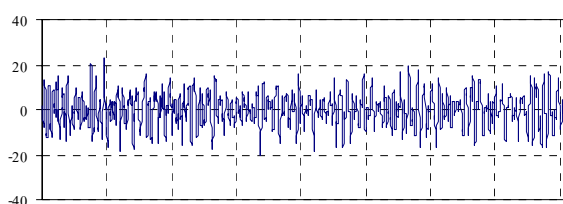
2. นำข้อมูลทั้งหมด 29 ส่วน มาตัดส่วนของสัญญาณที่ถูกรบกวนจากแหล่งภายนอก เช่น จากยานพาหนะหรือคนเดินรบกวนออก ดังรูปที่ 5.8 แสดงถึงสัญญาณในการตรวจวัดครั้งที่ 1 รัศมี

50 ม. และมีตำแหน่งการตรวจวัดคือ หัววัดที่ 1 อยู่ที่ตำแหน่ง 0 (UD1) หัววัดที่ 2 อยู่ที่ตำแหน่ง 11 (UD2) และหัววัดที่ 3 อยู่ที่ตำแหน่ง 9 (UD3) โดยดัดแปลงเป็นสัญญาณของ UD2 สำหรับข้อมูลในส่วนที่ไม่มีสัญญาณรบกวนมีทั้งหมด 19 ส่วนและข้อมูลในส่วนที่มีสัญญาณรบกวนมีทั้งหมด 10 ส่วน

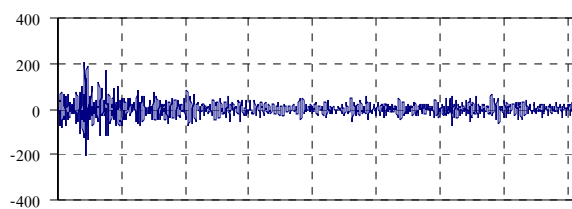
โดยวิธีการการตัดสัญญาณที่รบกวนออก พิจารณาจากค่าสูงสุดของความเร็วในช่วงที่วัดได้ ว่าเกินจากข้อมูลส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 5.9 แสดงส่วนที่ไม่มีสัญญาณรบกวนมีค่าความเร็วสูงสุดไม่เกิน 40 ไมโครเมตรต่อวินาที สำหรับส่วนของสัญญาณรบกวนมีค่าความเร็วสูงสุดเกินกว่า 40 ไมโครเมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงใน รูปที่ 5.10



รูปที่ 5.8 สัญญาณในการตรวจวัดมีความยาวข้อมูล 20 นาที (120,000 data)

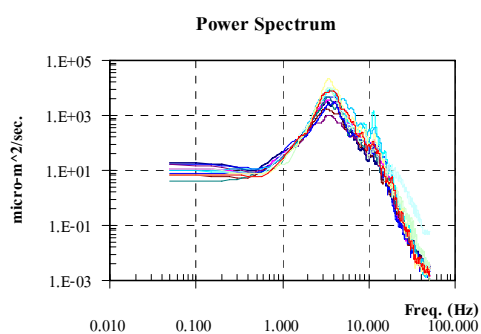


รูปที่ 5.9 ข้อมูลที่ไม่มีสัญญาณรบกวน

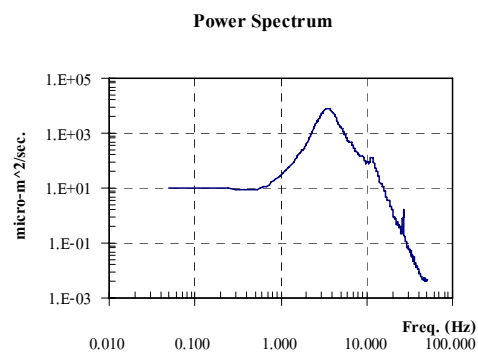


รูปที่ 5.10 ข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวน

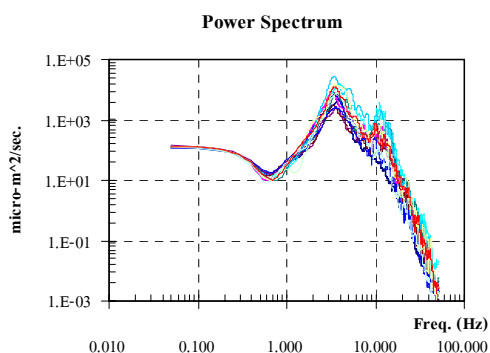
3. จากข้อมูลที่ตัดสัญญาณออกแล้วนำมาหา Power Spectrum และ Cross Power Spectrum ของแต่ละส่วนที่แบ่งออกมา สำหรับรัศมี 50 ม. จะมีชุดข้อมูล 0-9, 0-10 , 0-11 สำหรับรัศมี 25 ม. จะมีชุดข้อมูล 0-5, 0-6, 0-7 และสำหรับรัศมี 12.50 ม. จะมีชุดข้อมูล 0-1, 0-2, 0-3



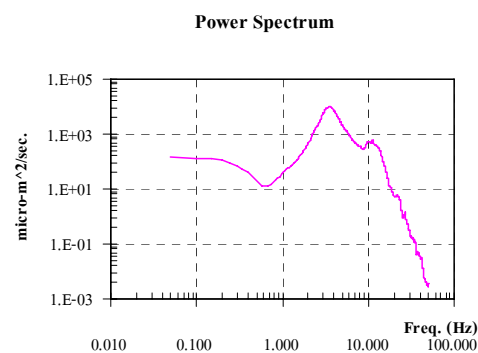
Power Spectrum จุด 0



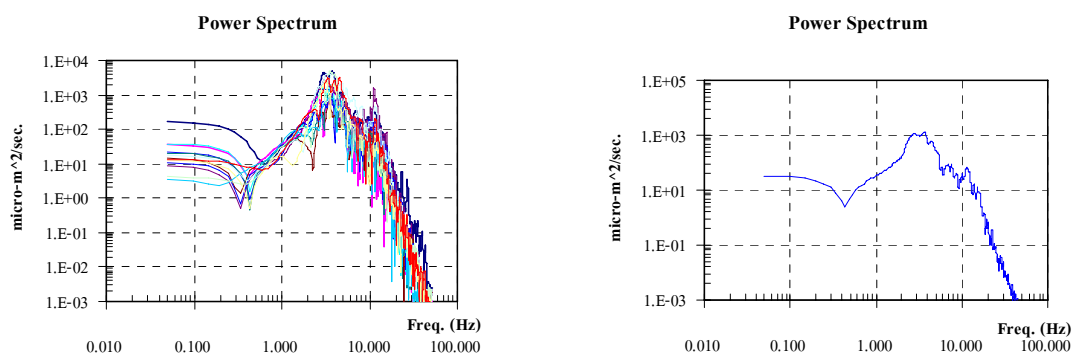
Average Power Spectrum จุด 0



Power Spectrum จุด 9



Average Power Spectrum จุด 9



Cross Power Spectrum จุด 0-9

Average Cross Power Spectrum จุด 0-9

รูปที่ 5.11 Power Spectrum และ Cross Power Spectrum ของจุด 0-9

จากรูปที่ 5.11 แสดง ถึงขั้นตอนการหา Power Spectrum และ Cross Power Spectrum ของจุด 0-9 โดยสุดท้ายผลที่ได้จะนำมาเฉลี่ยในแต่ละส่วนที่แบ่งไว้ได้เป็น Average Power Spectrum และ Average Cross Power Spectrum การหาค่าดังกล่าวต้องทำทั้งหมดทุกชุดข้อมูล ซึ่งสุดท้ายข้อมูลทั้งหมดมีดังนี้

สำหรับรัศมี 50 ม.

- ค่า Average Power Spectrum จุด 0, Average Power Spectrum จุด 9, Average Cross Power Spectrum จุด 0-9
- ค่า Average Power Spectrum จุด 0, Average Power Spectrum จุด 10, Average Cross Power Spectrum จุด 0-10
- ค่า Average Power Spectrum จุด 0, Average Power Spectrum จุด 11, Average Cross Power Spectrum จุด 0-11

สำหรับรัศมี 25 ม.

- ค่า Average Power Spectrum จุด 0, Average Power Spectrum จุด 5, Average Cross Power Spectrum จุด 0-5
- ค่า Average Power Spectrum จุด 0, Average Power Spectrum จุด 6, Average Cross Power Spectrum จุด 0-6
- ค่า Average Power Spectrum จุด 0, Average Power Spectrum จุด 7, Average Cross Power Spectrum จุด 0-7

สำหรับรัศมี 12.50 ม.

- ค่า Average Power Spectrum จุด 0, Average Power Spectrum จุด 1, Average Cross Power Spectrum จุด 0-1

- ค่า Average Power Spectrum จุด 0, Average Power Spectrum จุด 2, Average Cross Power Spectrum จุด 0-2

- ค่า Average Power Spectrum จุด 0, Average Power Spectrum จุด 3, Average Cross Power Spectrum จุด 0-3

4. จาก Average Power Spectrum และ Average Cross Power Spectrum ของแต่ละชุดข้อมูล ใช้สมการ 5.2 คำนวณหาค่า SPAC coefficient

$$\rho(\omega; r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\text{real}[S_{CX}(\omega; r, \theta)]}{\sqrt{S_C(\omega; 0, 0) \cdot S_X(\omega; r, \theta)}} d\theta \quad (5.2)$$

ซึ่ง $\text{real}[.]$ = ส่วนของจำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน

$S_C(\omega; 0, 0)$ = The power spectrum ของจุด C(0, 0)

$S_X(\omega; r, \theta)$ = The power spectrum ของจุด X(r, θ)

$S_{CX}(\omega; r, \theta)$ = The cross spectrum ระหว่าง $u(t; \omega, 0, 0)$ และ $u(t; \omega, r, \theta)$

ตัวอย่างการคำนวณ SPAC coefficient ของรัศมี 50 ม.

จากข้อมูลข้อ 3 กำหนดให้

ชุดข้อมูล 0-9

- S_{00} = Average Power Spectrum จุด 0

- S_9 = Average Power Spectrum จุด 9

- S_{0-9} = จำนวนจริง ของ Average Cross Power Spectrum จุด 0-9

ชุดข้อมูล 0-10

- S_{01} = Average Power Spectrum จุด 0

- S_{10} = Average Power Spectrum จุด 10

- S_{0-10} = จำนวนจริง ของ Average Cross Power Spectrum จุด 0-10

ชุดข้อมูล 0-11

- S_{02} = Average Power Spectrum จุด 0

- S_{11} = Average Power Spectrum จุด 11

- S_{0-11} = จำนวนจริง ของ Average Cross Power Spectrum จุด 0-11

สมการ 5.3 เมื่อมุมของแต่ละชุดข้อมูล คือ 120 องศา $= \frac{2\pi}{3}$ ได้ว่า

$$\rho(\omega; r) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2\pi}{3} \frac{S_{0-9}}{S_{00} \times S_9} + \frac{2\pi}{3} \frac{S_{0-10}}{S_{01} \times S_{10}} + \frac{2\pi}{3} \frac{S_{0-11}}{S_{02} \times S_{11}} \right) \quad (5.3)$$

$$\rho(\omega; r) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{2\pi}{3} \left(\frac{S_{0-9}}{S_{00} \times S_9} + \frac{S_{0-10}}{S_{01} \times S_{10}} + \frac{S_{0-11}}{S_{02} \times S_{11}} \right) \quad (5.4)$$

$$\rho(\omega; r) = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{0-9}}{S_{00} \times S_9} + \frac{S_{0-10}}{S_{01} \times S_{10}} + \frac{S_{0-11}}{S_{02} \times S_{11}} \right) \quad (5.5)$$

กำหนดให้

$$\text{SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-9} = \frac{S_{0-9}}{S_{00} \times S_9}$$

$$\text{SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-10} = \frac{S_{0-10}}{S_{01} \times S_{10}}$$

$$\text{SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-11} = \frac{S_{0-11}}{S_{02} \times S_{11}}$$

จากสมการ 5.5 แสดงให้เห็นว่า SPAC coefficient ของการวัดรูปแบบนี้ เป็นค่าเฉลี่ยของ SPAC coefficient (Average SPAC coefficient) ของแต่ละชุดข้อมูลจำนวน 3 ชุดข้อมูล

จากการหา SPAC coefficient ดังที่แสดงในเบื้องต้น ทำให้ได้ข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.12 โดยข้อมูลทั้งหมดมีดังนี้

สำหรับรัศมี 50 ม. (Average SPAC coefficient รัศมี 50 ม.)

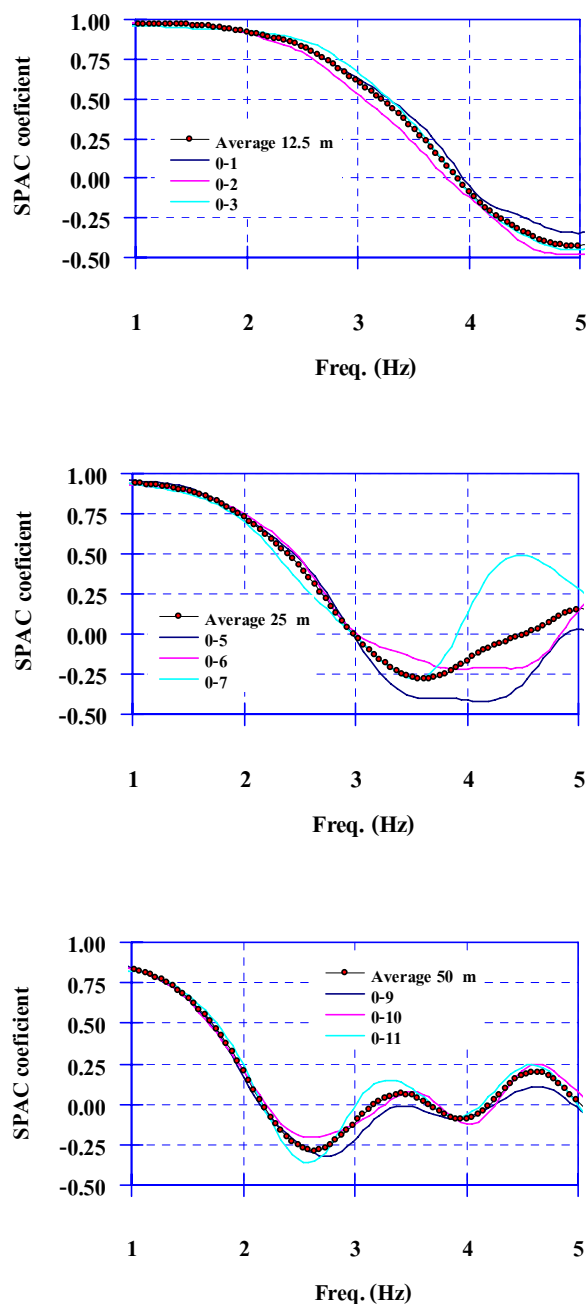
- SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-9
- SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-10
- SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-11

สำหรับรัศมี 25 ม. (Average SPAC coefficient รัศมี 25 ม.)

- SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-5
- SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-6
- SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-7

สำหรับรัศมี 12.50 ม. (Average SPAC coefficient รัศมี 12.5 ม.)

- SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-1
- SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-2
- SPAC coefficient ของชุดข้อมูล 0-3



รูปที่ 5.12 SPAC Coefficient ของรัศมี 50 ม., รัศมี 25 ม. และรัศมี 12.5 ม.

5. คำนวณ Dispersion Curve ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Phase Velocity ($c(\omega)$) และความถี่ โดยรูปที่ 5.14 แสดงการคำนวณ Dispersion Curve โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จาก SPAC Coefficient และ The Bessel function of the first kind with zero order ซึ่งกำหนดให้ S1, S2, S3 เป็นค่าของ SPAC Coefficient โดยมี F1, F2, F3 เป็นความถี่ของ SPAC Coefficient ดังกล่าวตามลำดับ จากค่า S1 หาค่า X1 ได้โดยค่า S1 ของ SPAC Coefficient

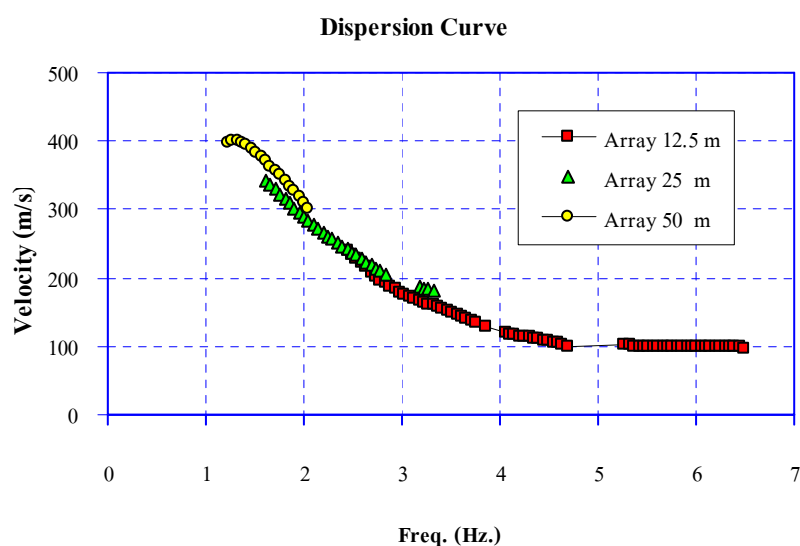
มีค่าเท่ากับ J_1 ของ The Bessel function of the first kind with zero order ค่า X_1 คือคู่อันดับของ J_1 สำหรับค่า X_2 และ X_3 หาค่าได้จากวิธีเดียวกับ X_1

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้ค่า X_1 , X_2 และ X_3 แล้ว จึงใช้สมการ

$$Velocity = c_i = \left(\frac{2\pi r f_i}{x_i} \right)$$

$$\text{เมื่อแทนค่า จะได้ } C1 = \left(\frac{2 \times \pi \times R \times F1}{X1} \right), C2 = \left(\frac{2 \times \pi \times R \times F2}{X2} \right) \text{ และ } C3 = \left(\frac{2 \times \pi \times R \times F3}{X3} \right)$$

Dispersion Curve ของจุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คำนวณได้จาก 3 รัศมีแสดงในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 Dispersion Curve ของจุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. การคำนวณแบบย้อนกลับเป็นการคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน (Shear Wave Velocity Profile) โดยใช้โปรแกรม Surface Wave Modal Inversion (Swami) โดยมีข้อมูลที่ดัดแปลงโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 5.15 และ ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 5.16

[illegible]

รูปที่ 5.15 ข้อมูลป้อนเข้าโปรแกรม Swami

```
# Example input file

# Shear Wave Velocity Profiles

# Layer      Iteration Number
# Thickness  1      2      3      4      5      6
2.5  1000.0   9.1  232.3  145.8  101.0  106.8
2.5  1000.0   9.3  236.9  146.0  101.7  105.5
2.5  1000.0   9.5  237.5  146.3  104.1  103.9
2.5  1000.0   9.8  237.5  147.1  109.9  111.5
2.5  1000.0  10.1  237.5  148.6  119.7  126.8
2.5  1000.0  10.4  237.5  150.9  132.9  144.8
2.5  1000.0  10.8  237.5  154.0  148.7  162.4
2.5  1000.0  11.3  237.5  158.0  166.0  178.3
2.5  1000.0  11.8  237.5  162.6  183.9  192.6
2.5  1000.0  12.5  237.5  167.9  201.7  205.7
2.5  1000.0  13.2  237.5  173.5  219.0  217.8
2.5  1000.0  14.0  237.5  179.6  235.5  229.3
2.5  1000.0  15.0  237.5  185.9  251.0  240.4
2.5  1000.0  16.2  237.5  192.4  265.5  251.2
2.5  1000.0  17.5  237.5  198.9  278.9  261.9
2.5  1000.0  19.0  237.5  205.5  291.3  272.6
2.5  1000.0  20.8  237.5  212.0  302.7  283.3
2.5  1000.0  22.7  237.5  218.4  313.2  294.0
2.5  1000.0  24.9  237.5  224.7  322.8  304.8
2.5  1000.0  27.3  237.5  230.9  331.7  315.6
2.5  1000.0  29.9  237.5  236.8  339.9  326.4
2.5  1000.0  32.8  237.5  242.6  347.4  337.2
2.5  1000.0  35.9  237.5  248.1  354.3  347.9
2.5  1000.0  39.3  237.5  253.4  360.6  358.5
2.5  1000.0  42.9  237.5  258.5  366.5  369.0
2.5  1000.0  46.7  237.5  263.4  371.9  379.3
2.5  1000.0  50.8  237.5  268.0  376.9  389.4
2.5  1000.0  55.1  237.5  272.5  381.5  399.4
2.5  1000.0  59.6  237.5  276.7  385.8  409.0
2.5  1000.0  64.3  237.5  280.7  389.7  418.4
2.5  1000.0  69.2  237.5  284.5  393.3  427.6
2.5  1000.0  74.3  237.5  288.2  396.7  436.4
2.5  1000.0  79.6  237.5  291.6  399.8  444.9
2.5  1000.0  85.1  237.5  294.8  402.7  453.2
2.5  1000.0  90.7  237.5  297.9  405.4  461.1
2.5  1000.0  96.5  237.5  300.8  407.9  468.7
0    1000.0  102.5  237.5  303.6  410.2  476.0

RMS Error  49.50  13.60   7.05   4.74   1.45   0.48

# Final Shear Wave Velocity Profile

# Depth to      Layer      Shear Wave      Standard
# Top of Layer  Thickness  Velocity        Deviation
0.0            2.5          106.8           4.2
2.5            2.5          105.5           3.6
5.0            2.5          103.9           2.4
7.5            2.5          111.5           2.1
10.0           2.5          126.8           2.2
12.5           2.5          144.8           2.0
15.0           2.5          162.4           2.1
17.5           2.5          178.3           2.7
20.0           2.5          192.6           3.6
22.5           2.5          205.7           4.3
25.0           2.5          217.8           4.9
27.5           2.5          229.3           5.3
30.0           2.5          240.4           5.5
32.5           2.5          251.2           5.6
35.0           2.5          261.9           5.6
37.5           2.5          272.6           5.5
40.0           2.5          283.3           5.5
42.5           2.5          294.0           5.4
45.0           2.5          304.8           5.3
47.5           2.5          315.6           5.2
50.0           2.5          326.4           5.2
52.5           2.5          337.2           5.1
55.0           2.5          347.9           5.2
57.5           2.5          358.5           5.2
60.0           2.5          369.0           5.3
62.5           2.5          379.3           5.4
65.0           2.5          389.4           5.5
67.5           2.5          399.4           5.7
70.0           2.5          409.0           5.8
72.5           2.5          418.4           6.0
```

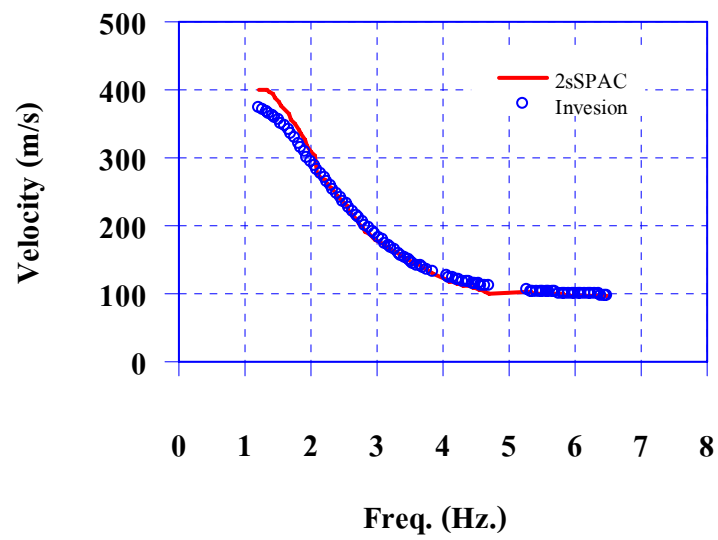
รูปในการวิเคราะห์ผลโดยใช้วิธีการ
คำนวณย้อนกลับ โปรแกรมจะหยุด
วิเคราะห์เมื่อ
RMS Error < 1

รูปที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม Swami

# Frequency #	Experimental Phase Velocity	Theoretical Phase Velocity	Residual Phase Velocity
1.22	399.06	402.04	-2.98
1.27	400.04	399.07	0.96
1.32	399.40	395.71	3.69
1.37	396.96	391.83	5.13
1.42	393.68	387.29	6.39
1.46	388.68	381.88	6.80
1.51	383.19	375.47	7.72
1.56	377.02	368.04	8.97
1.61	370.31	359.82	10.49
1.66	363.71	351.15	12.55
1.71	356.74	342.39	14.35
1.76	349.51	333.77	15.75
1.81	342.12	325.42	16.70
1.86	334.43	317.40	17.03
1.90	326.38	309.74	16.64
1.95	318.09	302.41	15.68
2.00	309.67	295.38	14.29
2.05	301.63	288.61	13.01
2.10	277.38	282.07	-4.69
2.15	271.72	275.71	-3.99
2.20	266.32	269.48	-3.16
2.25	261.34	263.35	-2.01
2.29	256.39	257.30	-0.91
2.34	251.64	251.32	0.32
2.39	244.04	245.39	-1.35
2.44	239.39	239.53	-0.14
2.49	234.23	233.74	0.49
2.54	228.17	228.05	0.12
2.59	221.65	222.46	-0.81
2.64	215.04	216.99	-1.95
2.69	208.42	211.66	-3.24
2.73	202.22	206.47	-4.25
2.78	196.58	201.43	-4.85
2.83	191.58	196.54	-4.96
2.88	186.99	191.82	-4.83
2.93	182.91	187.27	-4.36
2.98	179.40	182.89	-3.49
3.03	176.12	178.68	-2.55
3.08	173.07	174.64	-1.57
3.13	170.21	170.78	-0.57
3.17	167.41	167.10	0.31
3.22	164.78	163.59	1.19
3.27	162.11	160.25	1.85
3.32	159.40	157.09	2.31
3.37	156.67	154.09	2.57
3.42	153.93	151.26	2.67
3.47	151.18	148.58	2.60
3.52	148.37	146.05	2.32
3.56	145.58	143.67	1.91
3.61	142.75	141.42	1.33
3.66	139.89	139.31	0.59
3.71	137.09	137.31	-0.22
3.76	134.28	135.44	-1.15
3.86	128.92	132.00	-3.08
4.05	119.89	126.24	-6.35
4.10	118.13	125.00	-6.87
4.15	116.58	123.82	-7.24
4.20	115.24	122.71	-7.47
4.25	113.99	121.66	-7.67
4.30	112.87	120.67	-7.80
4.35	111.76	119.72	-7.96
4.39	110.62	118.83	-8.21
4.44	109.43	117.98	-8.55
4.49	108.09	117.18	-9.08
4.54	106.59	116.41	-9.82
4.59	104.88	115.69	-10.80
4.64	102.86	114.99	-12.14
4.69	99.88	114.34	-14.46
5.27	103.05	108.43	-5.37
5.32	101.58	108.06	-6.48

Dispersion Curve โดยวิธี
2sSPAC เปรียบเทียบ
Dispersion Curve โดยวิธีการ
คำนวณย้อนกลับของ
โปรแกรม Swami

รูปที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม Swami (ต่อ)



รูปที่ 5.17 Dispersion Curve ที่ได้จาก วิธี 2sSPAC เปรียบเทียบกับโปรแกรม Swami

5.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งโดยการวัด Microtremor บนพื้นดิน แบบ 1 จุด

การศึกษาในส่วนนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินด้วยการตรวจวัด ในส่วนแรกคือผลการตรวจวัดด้วยวิธีการวัดการสั่นไหวในระดับต่ำ หรือ Microtremor บนพื้นดิน แบบ 1 จุด (Single-Point Microtremor Observation) โดยได้ดำเนินการศึกษารวมทั้งหมด 100 ตำแหน่ง ผลที่วิเคราะห์คือค่าคาบการตอบสนองหลักของชั้นดิน หรือ Predominant period ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 5.2 และได้มีการเปรียบเทียบกับข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งดำเนินการในลักษณะเดียวกัน คือ Srisoros (2003) โดยที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดแสดงในรูปที่ 5.18 ข้อมูลในตารางที่ 5.2 แสดงตำแหน่งที่ตรวจวัด ค่า Predominant period ที่วิเคราะห์ได้ รวมทั้งค่าจากงานของ Srisoros (2003) ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันซึ่งแสดงเป็นระยะทางที่ห่างกันเพื่อการเปรียบเทียบไว้ อย่างไรก็ตาม พบว่าข้อมูลจากหลายตำแหน่ง ไม่ปรากฏค่า Predominant period ที่ชัดเจน ซึ่งสำหรับผลจากการวัด 100 ตำแหน่งของงานวิจัยนี้พบว่า มีถึง 48 ตำแหน่ง ที่ไม่สามารถหาค่า Predominant period ได้ และเพื่อเปรียบเทียบกับผลจาก Srisoros (2003) ข้อมูลที่ไม่สามารถระบุค่าได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ได้ถูกตัดออกและเสนอผลเฉพาะตำแหน่งที่หาค่าได้ดังแสดงในตารางที่ 5.3 ซึ่งพบว่า ค่า Predominant period มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย (ไม่เกิน 15%) หากตำแหน่งของการตรวจวัดใกล้เคียงกัน (ห่างกันไม่เกิน 50 เมตร) แต่ผลจะมีความแตกต่างกันได้มากหากตำแหน่งตรวจวัดไม่ตรงกัน (หรือห่างกันหลายร้อยเมตร) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบค่า Predominant period ที่ค่อนข้างต่ำกว่าผลจาก Srisoros (2003) ซึ่งในงานวิจัยนั้นแสดงค่า Predominant period ที่ใกล้เคียงกับหรือมากกว่า 1 วินาที อยู่หลายตำแหน่ง ซึ่งผู้วิจัยตั้งข้อสังเกตว่า ค่า Predominant period ของดินอ่อนบริเวณ กทม.และปริมณฑล มีค่าในช่วง 0.8-1.2 วินาที ซึ่งสำหรับจังหวัดเชียงใหม่ที่ตั้งอยู่บริเวณชั้นดินที่แข็งกว่า ค่า Predominant period ควรมีค่าต่ำ ซึ่งเป็นตามลักษณะที่พบในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 5.2 ผลการตรวจวัด Microtremor บนพื้นดิน แบบ 1 จุด รวม 100 ตำแหน่ง

No.	Site Location	Location		Predominant Period (s)		Siroros' site	
		N	E	This study	Siroros	Ref. name	Distance (m)
1	ค่ายกาวิละ	18-46-36.0	99-00-29.0	0.49	0.51	CD13	452
					0.70	CE05	471
					0.52	CC19	418
2	วัดศรีโฆง	18-47-46.0	99-00-05.1	0.71	0.73	CD09	745
					0.37	CD10	1847
					0.59	CE12	950
					0.38	CD07	784
3	วัดฟ้าฮ่าม	18-48-13.9	99-00-20.2	0.54	NO PEAK	CC20	166
4	พอรัส เชียงใหม่	18-41-39.5	98-55-39.6	0.54	NO PEAK	CC06	1208
5	บ้านพักนักกีฬา	18-50-17.5	98-57-54.5	NO PEAK	NO PEAK	CB03	800
6	ข้ามมหาวิทยาลัย คอนโดร้าง	18-49-00.5	98-57-40.2	0.53	NO PEAK	CE01	940
7	ติด อบต. สุเทพ	18-46-37.7	98-57-09.9	0.76	NO PEAK	CC01	1800
8	หอประชุม มข	18-47-34.8	98-57-54.6	NO PEAK	NO PEAK	CE04	195
9	วัดสวนดอก	18-47-20.5	98-58-05.5	1.28	NO PEAK	CE04	356
10	วัดโลกโมฬี	18-47-46.7	98-58-57.5	0.93	NO PEAK	CD27	160
11	วัดพระสิงห์	18-47-17.7	98-58-54.8	NO PEAK	NO PEAK	CD28	186
12	วัดหมื่นสาร	18-46-38.8	98-59-03.6	NO PEAK	NO PEAK	CD21	277
					0.82	CD19	292
13	ใกล้ ROMANA CM	18-46-15.5	98-59-13.0	NO PEAK	0.79	CD18	493
					0.82	CD19	580
					0.76	CB21	463
14	วัดชัยมงคล	18-46-51.4	99-00-16.2	0.63	0.52	CC19	338
15	วัดบุพพาราม	18-47-17.5	98-59-53.6	0.73	1.10	CD12	
					NO PEAK	CA06	117
					NO PEAK	CD11	221
16	วัดป่าแพ่ง	18-48-14.8	98-59-59.0	Error	0.38	CD07	196

No.	Site Location	Location		Predominant Period (s)		Siroros' site	
		N	E	This study	Siroros	Ref. name	Distance (m)
17	วัดเจดีย์หลวง	18-47-14.0	98-59-15.6	NO PEAK	NO PEAK	CA03	70
18	คณะวิศวกรรม	18-47-42.2	98-57-07.8	0.47	0.39	CA02	24
19	บ้านสวนคอรัท	18-47-38.5	98-58-36.3	NO PEAK	NO PEAK	CB22	397
20	พณิชยการเชียงใหม่	18-47-00.2	98-59-37.5	NO PEAK	NO PEAK	CD24	560
21	ฟิเอสคอนโด	18-47-36.6	99-01-32.6	NO PEAK	0.40	CE09	600
22	ราชภัฏเชียงใหม่	18-48-28.8	98-59-07.3	0.85	NO PEAK	CD03	270
					NO PEAK	CB01	610
23	ริมน้ำแม่จัน	18-47-59.6	98-57-35.2	0.21	NO PEAK	CD30	640
24	ริเวอร์ไซด์คอนโด	18-45-55.5	99-00-18.0	0.46	0.70	CD14	250
25	โรงแรมธารินทร์	18-48-19.5	98-58-09.0	0.26	0.85	CE14	425
					1.10	CD02	650
26	โรงแรมสมิต	18-47-29.6	98-59-25.4	NO PEAK	NO PEAK	CD25	230
27	วิทยาลัยพลศึกษาเชียงใหม่	18-47-57.3	98-59-19.6	NO PEAK	0.98	CD05	420
					0.93	CD06	580
28	วิทยาลัยฟาสต์เกิน	18-46-15.7	98-58-33.3	NO PEAK	NO PEAK	CC02	450
					NO PEAK	CC08	750
29	ศรีธนาพานิช	18-47-53.0	98-58-21.0	NO PEAK	NO PEAK	CB22	360
30	ศรีพัฒน์	18-47-21.4	98-58-29.8	NO PEAK	NO PEAK	CD29	400
31	อาเขตอิน	18-48-05.9	99-00-56.8	0.38	0.69	CE10	180
32	อาคารคณะมนุษยศาสตร์	18-48-12.5	98-57-00.8	0.37	0.32	CE03	140
33	อาคารเรียนคณะแพทย์	18-47-24.0	98-58-21.6	NO PEAK	NO PEAK	CD29	120
34	อาคารคณะวิทยาศาสตร์ 40 ปี	18-48-04.9	98-57-22.1	NO PEAK	0.32	CE03	780
					NO PEAK	CE02	910
35	อาเอสคอนโด	18-47-07.0	99-01-24.0	NO PEAK	0.71	CA10	700
					0.59	CA14	500
					0.40	CE09	460

No.	Site Location	Location		Predominant Period (s)		Siroros' site	
		N	E	This study	Siroros	Ref. name	Distance (m)
36	อิมพีเรียลแม่ปิง	18-46-58.8	98-59-52.8	NO PEAK	NO PEAK	CD11	320
					1.10	CD12	310
37	อุตุณิยวิทยา	18-48-50.4	98-56-40.0	NO PEAK	NO PEAK	CE15	200
38	เอสเคเคแมนชั่น	18-48-33.0	98-59-33.8	0.47	0.35	CD04	300
39	ลานจอดรถ	18-47.749	98- 58.462	NO PEAK	NO PEAK	CB22	180
40	บ้านพักคณะแพทย์ มช	18-47.597	98-58.171	NO PEAK	NO PEAK	CD29	370
					NO PEAK	CE04	464
41	บ้านพักคณะแพทย์ มช	18-47.464	98-58.104	NO PEAK	NO PEAK	CD29	400
					NO PEAK	CE04	400
42	ซอยครัวต้นแก้ว	18-47.250	98-58.261	NO PEAK	NO PEAK	CD29	400
					NO PEAK	CE04	400
43	บ้านพักตรงข้ามเทคนิคการแพทย์ มช	18-47.177	98-58.526	NO PEAK	NO PEAK	CD29	650
					NO PEAK	CA05	620
44	บ้านพักตรงข้ามเทคนิคการแพทย์ มช	18-47.177	98-58.526	NO PEAK	NO PEAK	CD29	650
					NO PEAK	CA05	620
45	รอบคูเมือง ถ. สนามกีฬา	18-47.861	98-59.366	NO PEAK	0.93	CD06	375
46	ถ. สนามกีฬา	18-47.840	98-59.447	0.35	0.93	CD06	235
47	ถ. ลิทวิงส์	18-47.565	98-59.714	0.35	0.73	CD09	200
48	ซอยใกล้กับเอทีคอมพิวเตอร์	18-47.656	98-59.828	0.41	0.73	CD09	350
49	ถ. คชสาร 3	18-47.134	98-59.643	0.40	NO PEAK	CD11	540
50	ดวงกมล เชียงใหม่ ไกลคูเมือง	18-47.059	98-59.630	0.66	NO PEAK	CD11	580
51	ซอยเยื้องกับโรงแรมณีนารากร	18-46.824	98-59.822	0.66	0.93	CD16	150
52	ซอยมีหอพัก ไกลคูเมือง	18-46.780	98-59.499	NO PEAK	0.73	CD20	400
53	ข้างโรงงาน,โรงเรียนอนุบาล ไกลคูเมือง	18-46.778	98-59.330	NO PEAK	NO PEAK	CD21	580
54	รพ. สวณปรุง	18-46.809	98-58.771	NO PEAK	NO PEAK	CA05	250
					NO PEAK	CD22	360

No.	Site Location	Location		Predominant Period (s)		Siroros' site	
		N	E	This study	Siroros	Ref. name	Distance (m)
55	ใกล้ร้านตะวันแดงสดแสงเดือน	18-47.921	98-57.758	0.4	NO PEAK	CD30	300
				NO PEAK	NO PEAK	CD30	300
56	หน้า อบต.สันผีเสื้อ อ.เมือง	18-49.634	98-59.886	0.57	NO PEAK	CC22	550
				NO PEAK	NO PEAK	CC22	550
57	ใกล้บ้านเอื้ออาทรป่าตัน	18-49.788	98-58.807	0.76	NO PEAK	CB03	1500
				0.7	NO PEAK	CB03	1500
58	วัดดับภัย	18-47.572	98-58.893	0.82	NO PEAK	CD28	460
59	SR Land	18-49.753	99-03.238	0.76	NO PEAK	CB13	450
				0.6	NO PEAK	CB13	450
60	บ้านพักบ. พีวีเอฟ อ.แมริม	18-56.175	98-55.968	0.21	NO PEAK	CB05	2800
61	สะพานข้ามแม่น้ำปิง	18-51.859	98-58.158	NO PEAK	NO PEAK	CB04	2400
					0.26	CC23	2420
					0.39	CC24	2000
62	ที่พักริมทางหลวง	18-51.364	98-58.102	NO PEAK	NO PEAK	CB03	1700
					0.39	CC24	1700
63	วัดเจดีย์หลวง	18-47.257	98-59.254	NO PEAK	NO PEAK	CA03	70
					NO PEAK	CA04	120
64	วัดช้างมัน	18-48.966	99-23.973	0.79	NO PEAK	CD25	335
65	วัดพระสิงห์	18-47.326	98-58.867	0.93	NO PEAK	CD28	80
66	สนามบอลราชมงคล	18-48.723	98-57.354	0.4	NO PEAK	CE01	600
					NO PEAK	CE15	1100
67	วัดคูเพ่า	18-48.161	98-59.312	0.85	0.98	CD05	20
68	วัดโลกโมฬี	18-47.779	98-58.995	0.73	NO PEAK	CD27	160
69	วัดช้างยืน	18-47.787	98-59.359	NO PEAK	0.61	CD26	370
70	วัดเจ็ดยอด	18-48.506	98-58.321	0.73	0.85	CE14	30

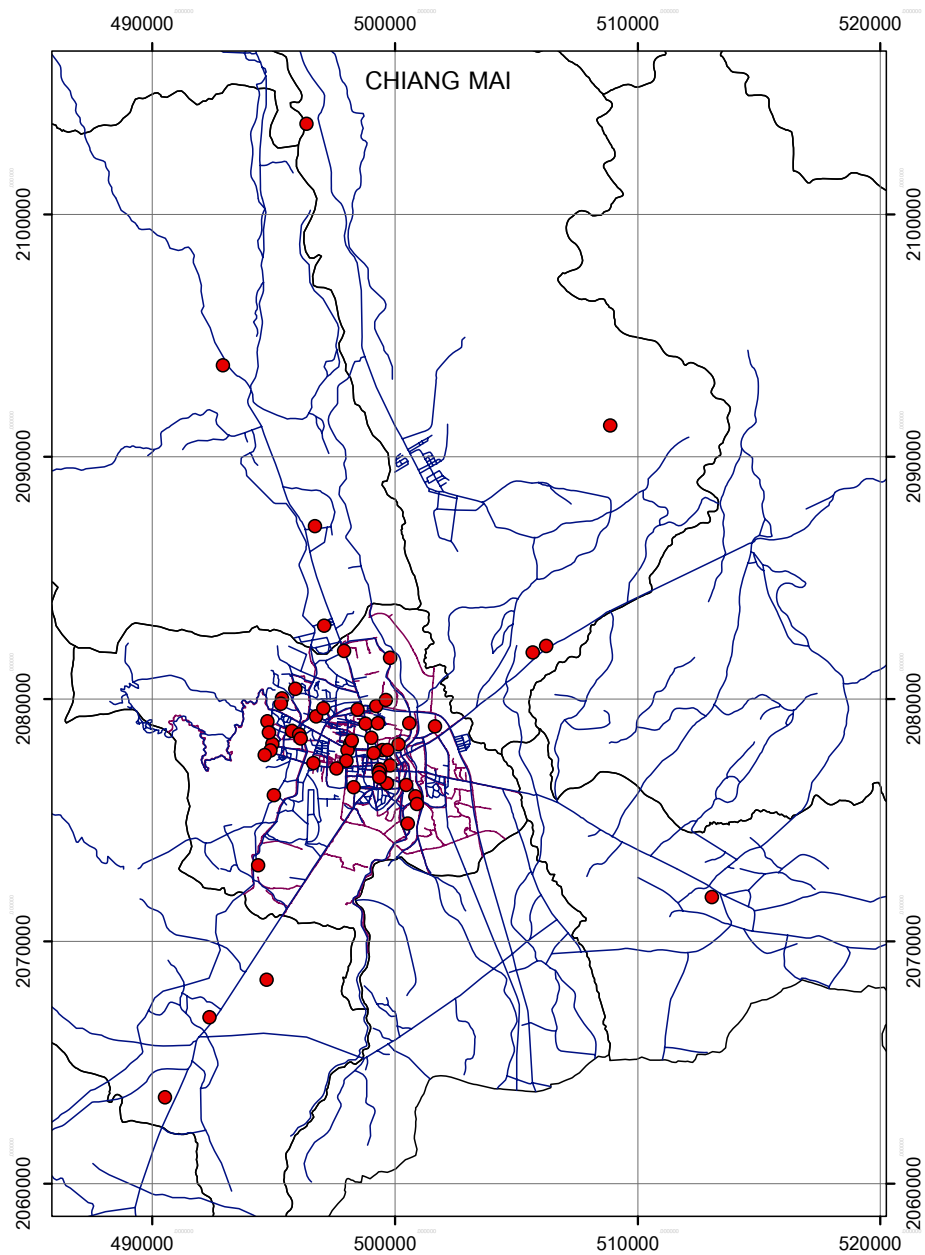
No.	Site Location	Location		Predominant Period (s)		Siroros' site	
		N	E	This study	Siroros	Ref. name	Distance (m)
71	ดวงกมล เชียงใหม่	18-47.049	98-59.639	0.68	0.93	CD16	316
					NO PEAK	CD24	576
72	คณะวิศวกรรมโยธา ม.เชียงใหม่	18-47.651	98-57.08	0.41	0.39	CA02	310
73	ศาลากลาง	18-50.444	98-58.339	0.73	NO PEAK	CB03	240
74	ตะวันแดงสดแสงเดือน	18-47.915	98-57.792	0.51	NO PEAK	CD30	321
75	รร.ปรีณรย์อัส	18-47.94	99-0.439	NO PEAK	0.59	CE12	518
					0.50	CE13	641
					NO PEAK	CC20	780
76	วัดเจดีย์หลวง	18-48.053	98-57.049	0.85	NO PEAK	CA04	100
77	คณะเศรษฐศาสตร์ ม.เชียงใหม่	18-47.246	98-59.187	0.44	0.39	CA02	590
78	กาดสวนแก้ว	18-47.749	98-58.627	NO PEAK	NO PEAK	CB22	350
79	โปลีเทคนิคลานนา	18-48.786	98-59.789	0.27	0.73	CD08	530
					0.35	CD04	600
80	รร.ดอนแก้ว อ.แม่ริม	18-52.668	98-58.13	0.27	NO PEAK	CB04	1300
					0.26	CC23	1400
81	สถานทูตจีน	18-46.826	98-59.033	1.00	NO PEAK	CD21	50
82	ร้านแก้วปลาสด	18-47.546	98-56.946	0.15	0.39	CA02	650
83	รร.สันผักหวาน	18-42.519	98-56.991	0.13	NO PEAK	CC05	1400
84	ต.สันพระนอน	18-45.082	98-56.792	0.85	NO PEAK	CC03	2000
85	รร.สันทรายหลวง	18-50.761	99-2.593	NO PEAK	0.62	CB09	3000
86	ม.แม่โจ้	18-53.743	99-0.389	NO PEAK	NO PEAK	CB08	600
87	รร.ยุพราชวิทยาลัย	18-47.504	98-59.297	NO PEAK	NO PEAK	CD25	200
88	เวียงกุมกาม	18-44.403	98-57.992	NO PEAK	NO PEAK	CC03	950
89	ราชมงคลล้านนา	18-48.697	98-57.33	0.39	NO PEAK	CE01	450
90	รร.บ้านห้วยฮัก	18-54.925	99-5.059	0.35			
91	รร.บ้านหลักป็น	18-49.991	99-3.557	0.73	NO PEAK	CB13	400

No.	Site Location	Location		Predominant Period (s)		Siroros' site	
		N	E	This study	Siroros	Ref. name	Distance (m)
92	สนามกอล์ฟ ยิมคาน่า	18-46.45	99-0.519	0.60	0.7	CE05	380
					0.51	CD13	500
93	ร.ร.สันกำแพงวิทยาคม	18-44.367	99-7.432	0.24	NO PEAK	CC16	2200
94	ร.ร.บ้านศรีงาม อ.สันทราย	19-1.676	98-57.922	0.25			
95	สามแยก ร.ร.สันทรายพิทยาคม	18-55.22	98-59.638	NO PEAK	NO PEAK	CB07	300
96	สามแยกแมริม (บ้านอรวี)	18-54.492	98-56.969	NO PEAK	NO PEAK	CB05	750
97	ม.นอร์ทเชียงใหม่	18-39.886	98-54.614	0.68	NO PEAK	CC06	2700
98	สถาบันวิจัยข้าว อ.สันป่าตอง	18-36.54	98-54.161	NO PEAK			
99	บ้านฉัตร แมนชั่น	18-48.26	98-59.606	0.39	0.35	CD04	500
					0.98	CD05	500
100	ร.ร.แมริม	18-54.923	98-56.24	NO PEAK	NO PEAK	CB05	750

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลการตรวจวัด Microtremor บนพื้นดิน แบบ 1 จุด กับงานวิจัยของ Siroros (2003)

No.	Site Location	Predominant Period (s)		Siroros' site		B/A
		This study (A)	Siroros (B)	Ref. name	Distance (m)	
1	ค่ายกาวิละ	0.49	0.51	CD13	452	1.041
			0.70	CE05	471	1.429
			0.52	CC19	418	1.061
2	วัดศรีโฆง	0.71	0.73	CD09	745	1.028
			0.37	CD10	1847	0.521
			0.59	CE12	950	0.831
			0.38	CD07	784	0.535
14	วัดชัยมงคล	0.63	0.52	CC19	338	0.825
15	วัดบุพพาราม	0.73	1.10	CD12		1.507
18	คณะวิศวกรรม	0.47	0.39	CA02	24	0.830
24	ริเวอร์ไซด์คอนโด	0.46	0.70	CD14	250	1.522
25	โรงแรมธารินทร์	0.26	0.85	CE14	425	3.269
			1.10	CD02	650	4.231
31	อาเขตอิน	0.38	0.69	CE10	180	1.816
32	อาคารคณะมนุษยศาสตร์	0.37	0.32	CE03	140	0.865
38	เอสเคเคแมนชั่น	0.47	0.35	CD04	300	0.745
46	ถ. สนามกีฬา	0.35	0.93	CD06	235	2.657
47	ถ. สิทธิวงศ์	0.35	0.73	CD09	200	2.086
48	ซอยใกล้กับเอทีคอมพิวเตอร์	0.41	0.73	CD09	350	1.780
51	ซอยเยื้องกับโรงแรมมณีนารากร	0.66	0.93	CD16	150	1.409
67	วัดคูแฝด	0.85	0.98	CD05	20	1.153
70	วัดเจ็ดยอด	0.73	0.85	CE14	30	1.164
71	ดวงกมล เชียงใหม่	0.68	0.93	CD16	316	1.368
72	วิศวกรรมโยธา ม.เชียงใหม่	0.41	0.39	CA02	310	0.951
77	คณะเศรษฐศาสตร์ ม.เชียงใหม่	0.44	0.39	CA02	590	0.886
79	โปลีเทคนิคลานนา	0.27	0.73	CD08	530	2.704
			0.35	CD04	600	1.296

80	รร.ดอนแก้ว อ.แม่ริม	0.27	0.26	CC23	1400	0.963
82	ร้านแก้วพลาสติก	0.15	0.39	CA02	650	2.600
92	สนามกอล์ฟ	0.60	0.7	CE05	380	1.167
			0.51	CD13	500	0.850
99	บ้านฉกัทร แมนชั่น	0.39	0.35	CD04	500	0.897
			0.98	CD05	500	2.513

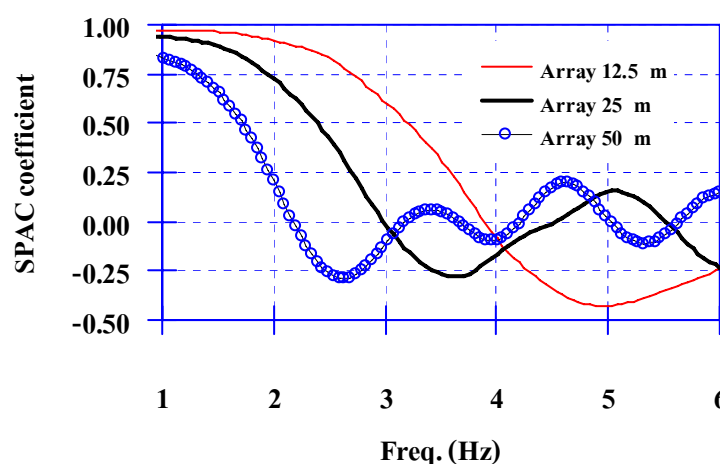


รูปที่ 5.18 ตำแหน่งการตรวจวัด Microtremor บนพื้นดิน แบบ 1 จุด

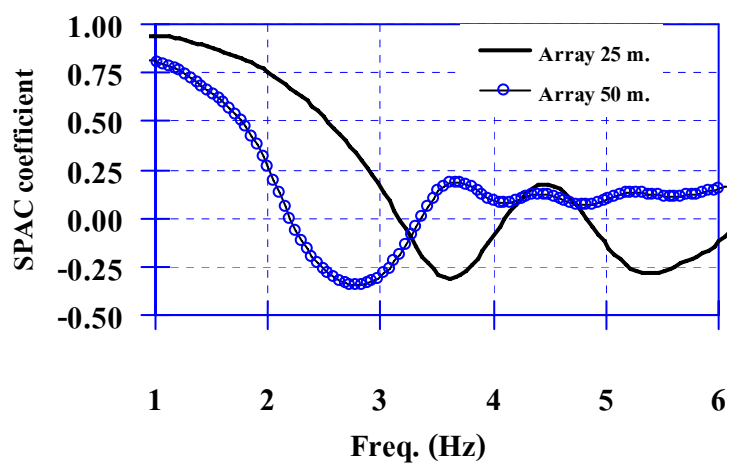
5.3 ผลการศึกษาความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก โดยวิธี 2sSPAC

งานวิจัยในส่วนนี้ ได้ดำเนินการศึกษาการตรวจวัดเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการประเมินระดับการสั่นสะเทือนของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวที่มีผลเฉพาะที่บริเวณที่ตั้ง โดยในขั้นตอนแรกเป็นการพัฒนากระบวนการวิจัยและตรวจสอบความถูกต้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีทั้งการสำรวจโดยการเจาะหลุมทดสอบและการตรวจวัดแบบ Array Microtremor โดยเริ่มศึกษากับ 4 บริเวณ คือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จังหวัดปทุมธานี, กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา และอำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี (ร.ร.เทศบาล 5)

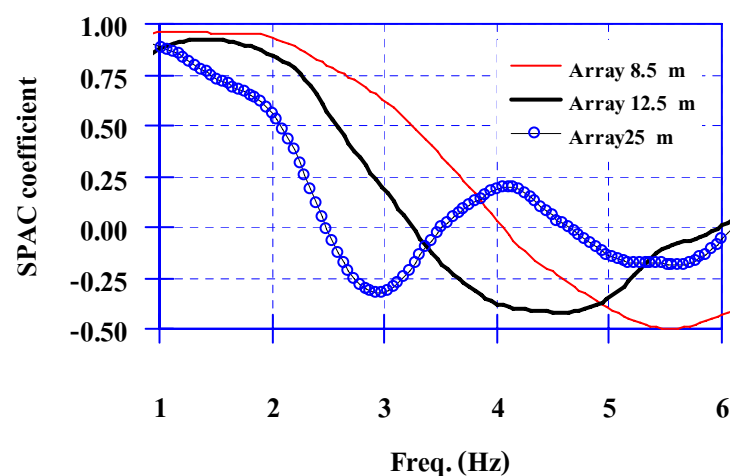
ผลการศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก สำหรับความสัมพันธ์ของค่า SPAC Coefficient กับความถี่ในบริเวณต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 23 ถึง 26 ส่วน Dispersion Curve ของความเร็วคลื่นกับความถี่แสดงรวมในรูปที่ 27 และค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกแสดงในรูปที่ 28 ถึง 31 และเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ คือ การตรวจวัดแบบ Array Microtremor และวิเคราะห์โดยวิธี FK (Arai and Yamazaki, 2002) และการวัดโดยตรงในหลุมเจาะแบบดาวน์โฮล (จิตติ และ อาณัติ 2552) จากผลการวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกโดยวิธี 2sSPAC และคำนวณค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 ม. แรก เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีวัดโดยตรงแบบดาวน์โฮลสามารถจัดกลุ่มประเภทชั้นดินได้ ตามข้อกำหนดของ National Earthquake Hazards Reduction Program ฉบับปี ค.ศ. 2003 (NEHRP 2003) ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.3 และผลการศึกษาและเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 5.4 โดยพบว่าการจัดกลุ่มประเภทชั้นดินของทั้ง 4 สถานที่ที่ทดสอบได้ผลออกมาตรงกับวิธีวัดโดยตรงแบบดาวน์โฮล ซึ่งผลคือสำหรับตำแหน่งสำรวจในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ได้แก่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และกรมอุตุนิยมวิทยา บางนา จัดเป็นชั้นดินกลุ่ม E และอำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี จัดเป็นชั้นดินกลุ่ม D



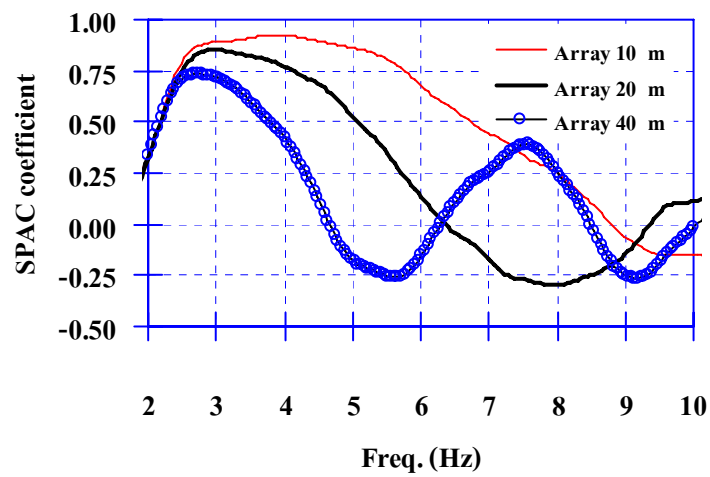
รูปที่ 5.19 SPAC Coefficient บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



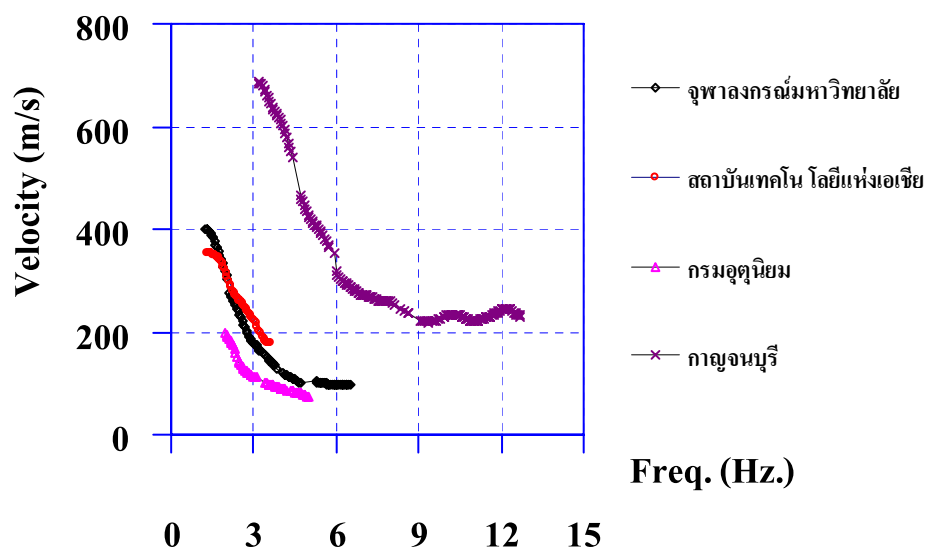
รูปที่ 5.20 SPAC Coefficient บริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย



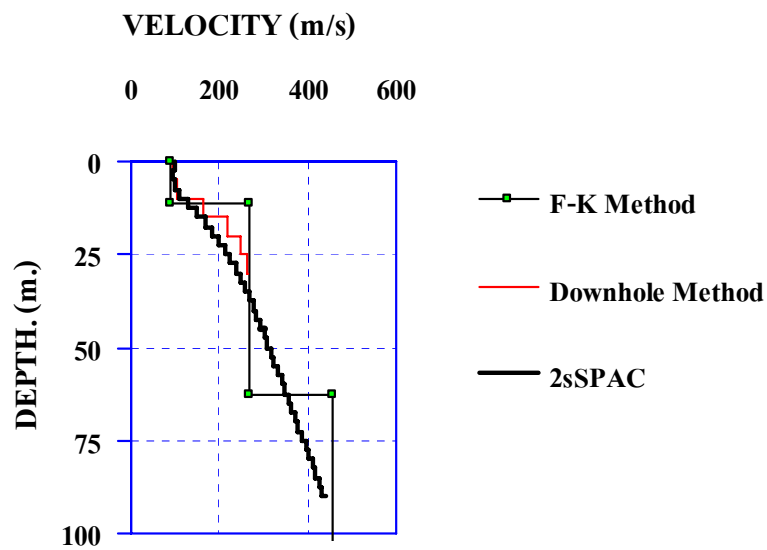
รูปที่ 5.21 SPAC Coefficient บริเวณกรมอุตุนิยมวิทยา บางนา



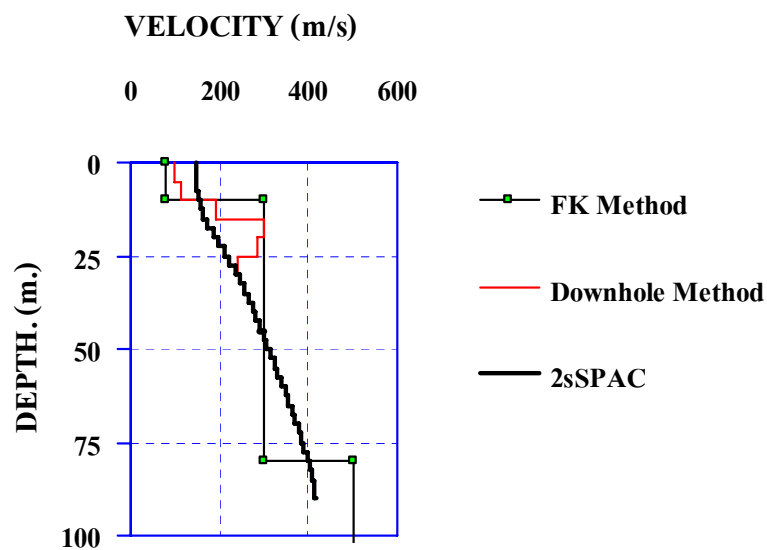
รูปที่ 5.22 SPAC Coefficient บริเวณ อ. เมือง จ. กาญจนบุรี



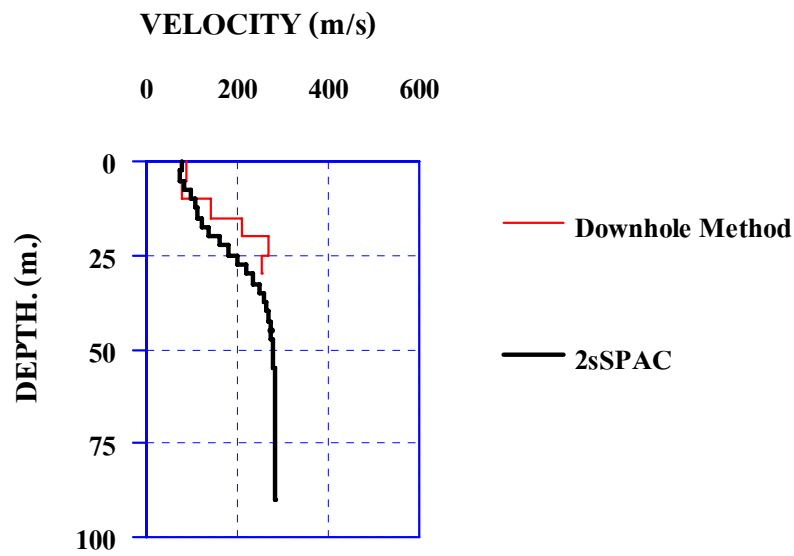
รูปที่ 5.23 Dispersion Curve รวมสำหรับแต่ละบริเวณ



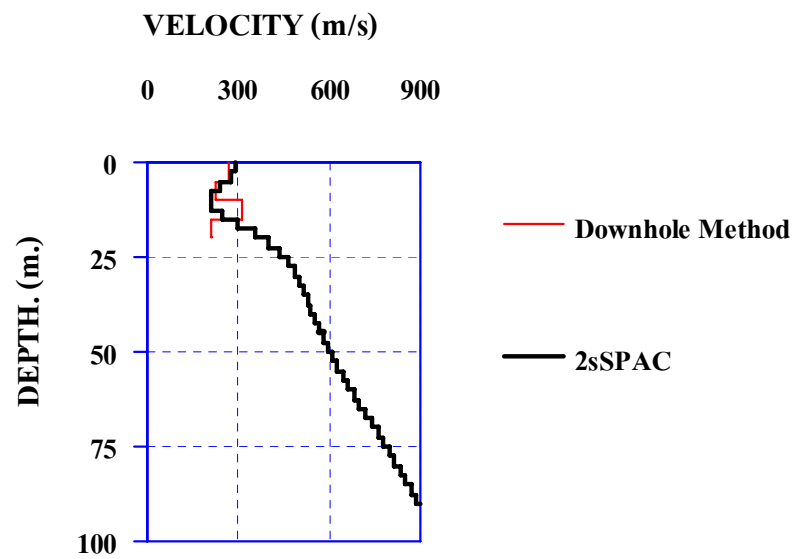
รูปที่ 5.24 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.25 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย



รูปที่ 5.26 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณกรมอุตุนิยมวิทยาบางนา



รูปที่ 5.27 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกบริเวณ อ. เมือง จ. กาญจนบุรี

ตารางที่ 5.3 การจำแนกประเภทของดินตามข้อกำหนดของ National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP)

Soil Class	Soil Type	Shear Wave Velocity (m/s)
A	Hard Rock	$V_s > 1500$
B	Rock	$760 < V_s \leq 1500$
C	Very dense soil and soft rock	$360 < V_s \leq 760$
D	Dense/Stiff soil	$180 < V_s \leq 360$
E	Loose/Soft soil	$180 < V_s$

ตารางที่ 5.4 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ความลึก 30 ม. แรก โดยวิธี 2sSPAC เปรียบเทียบการทดสอบดาวินโฮล

สถานที่	Shear Wave Velocity (m/s)		Soil Class		% แตกต่าง
	2sSPAC	Downhole	2sSPAC	Downhole	
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	142	157	E	E	10.56 %
สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย	174	174	E	E	-
กรมอุตุนิยมวิทยา	117	141	E	E	21.55 %
อ. เมือง จ.กาญจนบุรี (รร. เทศบาล 5)	300	257	D	D	14.33 %

จากนั้น การวิจัยได้ประยุกต์วิธีที่พัฒนาขึ้นสำหรับพื้นที่ศึกษาตามวัตถุประสงค์ของโครงการ โดยการศึกษาได้วางแผนขอบเขตการศึกษาไว้เฉพาะในเขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่เท่านั้น แต่ระหว่างการดำเนินการวิจัยพบว่า ได้สามารถพัฒนากระบวนการสำรวจที่มีประสิทธิภาพ จึงได้ขยายขอบเขตการศึกษาให้ครอบคลุมพื้นที่เสี่ยงภัยของประเทศ ทำให้ได้เป็นการสำรวจในพื้นที่ จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย กาญจนบุรี และ กรุงเทพมหานคร² โดยทำการสำรวจจำนวน 30 บริเวณในจังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 25 บริเวณในจังหวัดเชียงราย จำนวน 16 บริเวณในจังหวัดกาญจนบุรี และ จำนวน 4 บริเวณในกรุงเทพมหานคร ตารางที่ 5.5 ถึง 5.8 แสดงรายละเอียดของบริเวณที่ดำเนินการศึกษา ที่แสดงตำแหน่ง พิกัด วิธีที่ใช้สำรวจและรัศมีของการวัดในแต่ละบริเวณ ความหมายของวิธีตรวจวัดคือ 2sSPAC หมายถึงการตรวจวัดที่มีการวางหัววัดครบรูปวงกลมที่ใช้

² สำหรับพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีและกรุงเทพมหานคร ดำเนินการร่วมกับการสนับสนุนจาก ทุนวิจัยประเภททั่วไป ปีงบประมาณ 2552

กับพื้นที่โล่งกว้าง และ Linear หมายถึงการตรวจวัดที่มีการวางห้ววัดเป็นแนวเส้นตรงที่ใช้กับพื้นที่ที่มีสิ่งปลูกสร้างใกล้เคียง

ตารางที่ 5.5 รายละเอียดของบริเวณที่ดำเนินการศึกษาในจังหวัดเชียงใหม่

No.	Site Location	GPS (UTM)		Observation	
		N	E	Technique	Radius (m)
1	ดวงกมล เชียงใหม่	499366	2076776	Linear	19, 38
2	วิศวกรรมโยธา มช.	494872	2077887	Linear	12.5, 25, 50
3	ศาลากลาง	497084	2083037	2sSPAC	12.5, 25, 50
4	ตะวันแดงสดแสงเดือน	496123	2078373	2sSPAC	12.5, 25, 50
5	รร.ปิ่นศรีร้อยล	500771	2078419	2sSPAC	12.5, 25, 50
6	วัดเจดีย์หลวง	494818	2078628	Linear	11.75,23.5,47
7	คณะเศรษฐศาสตร์ มช.	497589	2077140	Linear	12.5, 25, 50
8	กาดสวนแก้ว	497589	2078067	Linear	12.5, 25, 50
9	โปลีเทคนิคลานนา	499630	2079979	2sSPAC	12.5, 25, 50
10	รร.ดอนแก้ว อ.แม่ริม	496718	2087138	2sSPAC	12.5, 25, 50
11	สถานทูตจีน	498302	2076365	2sSPAC	11.25,22.5,45
12	ร้านแก้วพลาสติก ไกล่ มช.	494637	2077693	Linear	12.5, 25, 50
13	รร.สันผักหวาน	494713	2068424	2sSPAC	7.5, 15, 30
14	ต.สันพระนอน	494365	2073150	2sSPAC	12.5, 25, 50
15	รร.สันทรายหลวง	504552	2083621	2sSPAC	8.75,17.5,35
16	ม.แม่ใจ	500683	2089119	2sSPAC	10.5, 21, 42
17	รร.ยุพราชวิทยาลัย	498765	2077615	2sSPAC	12.5, 25, 50
18	เวียงกุมกาม	496473	2071897	2sSPAC	12.5, 25, 50
19	ม.ราชมงคลล้านนา	495312	2079816	2sSPAC	7.5, 15, 30
20	รร.บ้านห้วยฮัก	508878	2091301	2sSPAC	12.5, 25, 50
21	รร.บ้านหลักปัน	506245	2082202	2sSPAC	12.5, 25, 50
22	สนามกอล์ฟ ยิมคาน่า	500912	2075672	2sSPAC	12.5, 25, 50
23	รร.สันกำแพงวิทยาคม	513055	2071835	2sSPAC	12.5, 25, 50
24	รร.บ้านศรีงาม อ.สันทราย	496356	2103748	2sSPAC	7.5, 15, 30
25	สามแยก รร.สันทรายพิทยาคม	499365	2091843	2sSPAC	12.5, 25, 50

26	สามแยกแมริม (บ้านอรวิ)	494202	2090501	2sSPAC	12.5, 25, 50
27	ม.นอร์ทเชียงใหม่	490535	2063571	2sSPAC	10, 20, 40
28	สถาบันวิจัยข้าวอ.สันป่าตอง	489735	2057401	2sSPAC	12.5, 25, 50
29	บ้านนักทร แมนชั่น ไกล่ ม. ราชภัฏ	499308	2079009	Linear	9.25,18.5,37
30	รร.แมริม	498666	2091295	Linear	12.5, 25, 50

ตารางที่ 5.6 รายละเอียดของบริเวณที่ดำเนินการศึกษาในจังหวัดเชียงราย

No.	Site Location	GPS (UTM)		Observe Type	
		N	E	Technique	Radius (m)
1	ศาลจังหวัดเชียงราย	587124	2201424	Linear	39
2	บ้านแป้นเกร็ด	585840	2199252	Linear	24
3	อบต.ธารทอง	575180	2179820	2sSPAC	12.5, 25, 50
4	หมวดการทางเก่า	588665	2202328	2sSPAC	7.5, 15, 30
5	สนามฝึก รด.	585978	2202907	2sSPAC	12.5, 25
6	อาชีวะศึกษาเชียงราย	586609	2200755	Linear	19.5
7	เทคนิคเชียงราย	587527	2201461	Linear	30
8	น้ำลัด	585377	2203911	2sSPAC	7.5, 15, 30
9	เกาะโรงแรมดุสิต	586978	2202323	2sSPAC	10, 20, 40
10	อปพร. เชียงราย	586173	2201598	Linear	25
11	โรงแรมเพชรสยาม	587645	2200478	2sSPAC	12.5, 25, 50
12	กรมโยธาธิการ เชียงราย	591141	2203596	2sSPAC	7.5, 15, 30
13	รร.อนุบาลแม่จัน อ.แม่จัน	589325	2227741	2sSPAC	10, 20, 40
14	รร.แม่สายประสิทธิ์ศาสตร์ อ.แม่สาย	592026	2258827	2sSPAC	12.5, 25, 50
15	อาชาแลนด์ อ.เชียงแสน	609434	2238023	2sSPAC	12.5, 25, 50
16	ทะเลสาบเชียงแสน อ.เชียง แสน	609967	2238482	Linear	47
17	รร.อนุบาลเชียงของ อ.เชียง ของ	646707	2240205	2sSPAC	12.5, 25, 50
18	สถานีอนามัย บ.ทุ่งอ่างเต็น อ.เชียงของ	649015	2233220	Linear	20

19	มหาวิทยาลัยราชภัฏ เชียงราย	589180	2209156	2sSPAC	12.5, 25, 50
20	ศูนย์วิทยุการบินเชียงราย	592007	2206777	2sSPAC	12.5, 25, 50
21	ไซโลเก็บข้าวโพด อ.พาน	578801	2161122	2sSPAC	7, 14, 28
22	ราชมงคลเชียงราย	576317	2176570	2sSPAC	12.5, 25, 50
23	โรงพยาบาลพาน	578020	2158446	Linear	10, 25
24	สนามกีฬากลางเชียงราย	591430	2202242	2sSPAC	12.5, 25, 50
25	โรงแรมลิตเติ้ลดัก	587114	2198156	2sSPAC	12.5, 25, 50

ตารางที่ 5.7 รายละเอียดของบริเวณที่ดำเนินการศึกษาในจังหวัดกาญจนบุรี

No.	Site Location	Location (UTM)		Observe Type	
		N	E	Technique	Radius (m)
1	ต.ท่าเรือพระแท่น	582318	1547682	2sSPAC	12.5, 25, 50
2	รร.วัดวังศาลา	574201	1542634	2sSPAC	12.5, 25, 50
3	ศาลากลางจังหวัด	559295	1548046	2sSPAC	12.5, 25, 50
4	รร.วัดบ้านยาง	555137	1550047	2sSPAC	12.5, 25, 50
5	รร.หนองพังตรุราษฎร์ รังสรรค์	572782	1537978	2sSPAC	12.5, 25, 50
6	สวนหลวง ร.9 ต.ท่าเรือ	581500	1542257	2sSPAC	12.5, 25, 50
7	ด้านหลังโลตัส ท่ามะกา	582732	1538207	2sSPAC	12.5, 25, 50
8	รร.ท่าม่วงราษฎร์บำรุง	569188	1543315	2sSPAC	12.5, 25, 50
9	สนามกีฬาท่าม่วง	567953	1545257	2sSPAC	12.5, 25, 50
10	วัดบ้านทองท่าล้อ	561219	1546526	2sSPAC	12.5, 25, 50
11	หน่วยปฏิบัติการพิเศษ	557831	1547775	2sSPAC	11.25,22.5,45
12	ที่จอดรถสะพานข้ามแม่น้ำ แคว	556685	1550102	2sSPAC	12.5, 25, 50
13	สนามกีฬากลิบบัว	554526	1552992	2sSPAC	12.5, 25, 50
14	สนง.เทศบาล ต.ปากแพรก	558975	1551982	2sSPAC	11.25,22.5,45
15	กองบังคับการตำรวจภูธร กาญจนบุรี	556132	1551666	2sSPAC	12.5, 25, 50
16	รร.เทศบาล 5	557717	1549657	2sSPAC	10, 20, 40

ตารางที่ 5.8 รายละเอียดของบริเวณที่ดำเนินการศึกษาในกรุงเทพมหานคร

No.	Site Location	Location (UTM)		Observe Type	
		N	E	Technique	Radius (m)
1	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (สนามฟุตบอล)	1555967	673491	2sSPAC	25, 50
2	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สนามรักบี้ ประตูใหญ่)	1519329	665439	2sSPAC	12.5, 25, 50
3	กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา (สนามด้านหน้า)	1511477	673583	2sSPAC	8.5,12.5,25
4	ม.ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต (สนามรักบี้ ข้าง SIIT)	1555974	673749	2sSPAC	12.5, 25, 50

ผลการศึกษาของแต่ละจังหวัด ในรูปของค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร ผลเปรียบเทียบกับค่าการวัดตรงจากหลุมสำรวจ (จิตติ และ อาณัติ, 2552) และผลการจำแนกชั้นดินตาม NEHRP จากการสำรวจแบบ 2sSAC และผลการหาค่าคาบอทธิพลหลักจากการสำรวจแบบ H/V

โดยผลการสำรวจในจังหวัดเชียงใหม่ มี 2 บริเวณที่ไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้ ในจังหวัดเชียงใหม่มี 3 บริเวณที่ไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้ ตารางที่ 5.9 ถึง 5.12 แสดงผลการศึกษาของบริเวณที่ดำเนินการสำรวจ

ตารางที่ 5.9 ผลการศึกษาของบริเวณสำรวจในจังหวัดเชียงใหม่

No.	Site Location	Vs30 (m/s) 2sSPAC	Vs (m/s)* Downhole	Soil Class	Predominant Period (s)
1	ดวงกมล เชียงใหม่	311	-	D	No Clear Peak
2	วิศวกรรมโยธา มช.	518	368	C	0.41,0.43
3	ศาลากลาง	368	-	C	No Clear Peak
4	ตะวันแดงสดแสงเดือน	295	-	D	No Clear Peak
5	รร.ปริญธร้อยล	226	-	D	No Clear Peak
6	วัดเจดีย์หลวง	322	326	D	No Clear Peak
7	คณะเศรษฐศาสตร์ มช.	318	-	D	0.38, 0.45
8	กาดสวนแก้ว	293	-	D	No Clear Peak
9	โปลีเทคนิคลานนา	261	-	D	No Clear Peak

10	รร.ดอนแก้ว อ.แม่ริม	456	-	C	No Clear Peak
11	สถานทูตจีน	336	-	D	No Clear Peak
12	ร้านแก้วพลาสติก ไกล่ มช.	N.A.	-	N.A.	No Clear Peak
13	รร.สันผักหวาน	355	-	D	No Clear Peak
14	ต.สันพระนอน	388	-	C	No Clear Peak
15	รร.สันทรายหลวง	308	-	D	No Clear Peak
16	ม.แม่ใจ	333	-	D	No Clear Peak
17	รร.ยุพราชวิทยาลัย	319	-	D	No Clear Peak
18	เวียงกุมกาม	334	-	D	No Clear Peak
19	ม.ราชมงคลล้านนา	319	274	D	No Clear Peak
20	รร.บ้านห้วยฮัก	556	-	C	No Clear Peak
21	รร.บ้านหลักปัน	299	-	D	No Clear Peak
22	สนามกอล์ฟ อ.เมือง	228	-	D	No Clear Peak
23	รร.สันกำแพงวิทยาคม	311	-	D	No Clear Peak
24	รร.บ้านศรีงาม อ.สันทราย	300	-	D	No Clear Peak
25	สามแยก รร.สันทรายพิทยาคม	427	-	C	No Clear Peak
26	สามแยกแม่ริม (บ้านอรวิ)	347	-	D	No Clear Peak
27	ม.นอร์ทเชียงใหม่	396	-	C	No Clear Peak
28	สถาบันวิจัยข้าว อ.สันป่าตอง	N.A.	-	N.A.	No Clear Peak
29	บ้านฉกัทร แมนชั่น ไกล่ ม.ราชภัฏ	231	-	D	0.39
30	รร.แม่ริม	425	-	C	No Clear Peak

(* ความลึกของหลุมสำรวจ downhole ประมาณ 20 เมตร)

ตารางที่ 5.10 ผลการศึกษาของบริเวณสำรวจในจังหวัดเชียงราย

No.	Site Location	Vs30 (m/s) 2sSPAC	Vs (m/s)* Downhole	Soil Class	Predominant Period (s)
1	ศาลจังหวัดเชียงราย	558	-	C	0.28
2	บ้านแป้นเกร็ด	N.A.	-	N.A.	0.13
3	อบต.ธารทอง	296	-	D	0.33

4	หมวดการทางเก่า	238	-	D	0.49
5	สนามฝึก รด.	272	-	D	0.26
6	อาชีวศึกษาเชียงราย	344	-	D	0.34
7	เทคนิคเชียงราย	326	-	D	0.35
8	น้ำลัด	256	-	D	0.28
9	เกาะโรงแรมดุสิต	237	-	D	0.29
10	อปพร. เชียงราย	N.A.	-	N.A.	0.31
11	โรงแรมเพชรสยาม	266	-	D	0.45
12	กรมโยธาธิการ เชียงราย	208	188	D	0.64
13	รร.อนุบาลแม่จัน อ.แม่จัน	229	-	D	0.64
14	รร.แม่สายประสิทธิ์ศาสตร์ อ. แม่สาย	335	-	D	0.41
15	อาซาแลนด์ อ.เชียงแสน	313	-	D	0.37
16	ทะเลสาบเชียงแสน อ.เชียงแสน	N.A.	-	N.A.	0.32
17	รร.อนุบาลเชียงของ อ.เชียงของ	467	-	C	0.15
18	สถานีอนามัย บ.ทุ่งอ่างเต็น อ. เชียงของ	345	-	D	0.32
19	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย	312	-	D	0.28
20	ศูนย์วิทยุการบินเชียงราย	246	-	D	0.47
21	ไซโลเก็บข้าวโพด อ.พาน	285	-	D	0.73
22	ราชมงคลเชียงราย	432	-	C	0.16
23	โรงพยาบาลพาน	225	-	D	0.64
24	สนามกีฬากลางเชียงราย	235	-	D	0.51
25	โรงแรมลิตเติ้ลดัก	292	-	D	0.38

(* ความลึกของหลุมสำรวจ downhole ประมาณ 13 เมตร และจุดสำรวจห่างกันประมาณ 200 เมตร)

ตารางที่ 5.11 ผลการศึกษาของบริเวณสำรวจในจังหวัดกาญจนบุรี

No.	Site Location	Vs30 (m/s) 2sSPAC	Vs (m/s) Downhole	Soil Class	Predominant Period (s)
1	ต.ท่าเรือพระแท่น	351	-	D	0.60
2	รร.วัดวังศาลา	339	-	D	0.64
3	ศาลากลางจังหวัด	338	-	D	0.35
4	รร.วัดบ้านยาง	278	-	D	0.32
5	รร.หนองพังตรุราษฎร์รังสรรค์	351	-	D	NOT CLEAR PEAK
6	สวนหลวง ร.9	300	-	D	0.79
7	โลตัส ท่ามะกา	335	-	D	0.79
8	รร.ท่าม่วงราษฎร์บำรุง	275	-	D	0.64
9	สนามกีฬาท่าม่วง	341	-	D	0.54
10	วัดบ้านทองท่าล้อ	270	-	D	0.49
11	หน่วยปฏิบัติการพิเศษ	264	-	D	0.41
12	ที่จอดรถสะพานข้ามแม่น้ำแคว	263	-	D	0.34
13	สนามกีฬากลีสบิว	415	-	C	0.32
14	สนง.เทศบาล ต.ปากแพรก	Vs>726	-	C OR B	NOT CLEAR PEAK
15	กองบังคับการตำรวจภูธร กาญจนบุรี	310	-	D	0.33
16	รร.เทศบาล 5	301	257	D	0.40

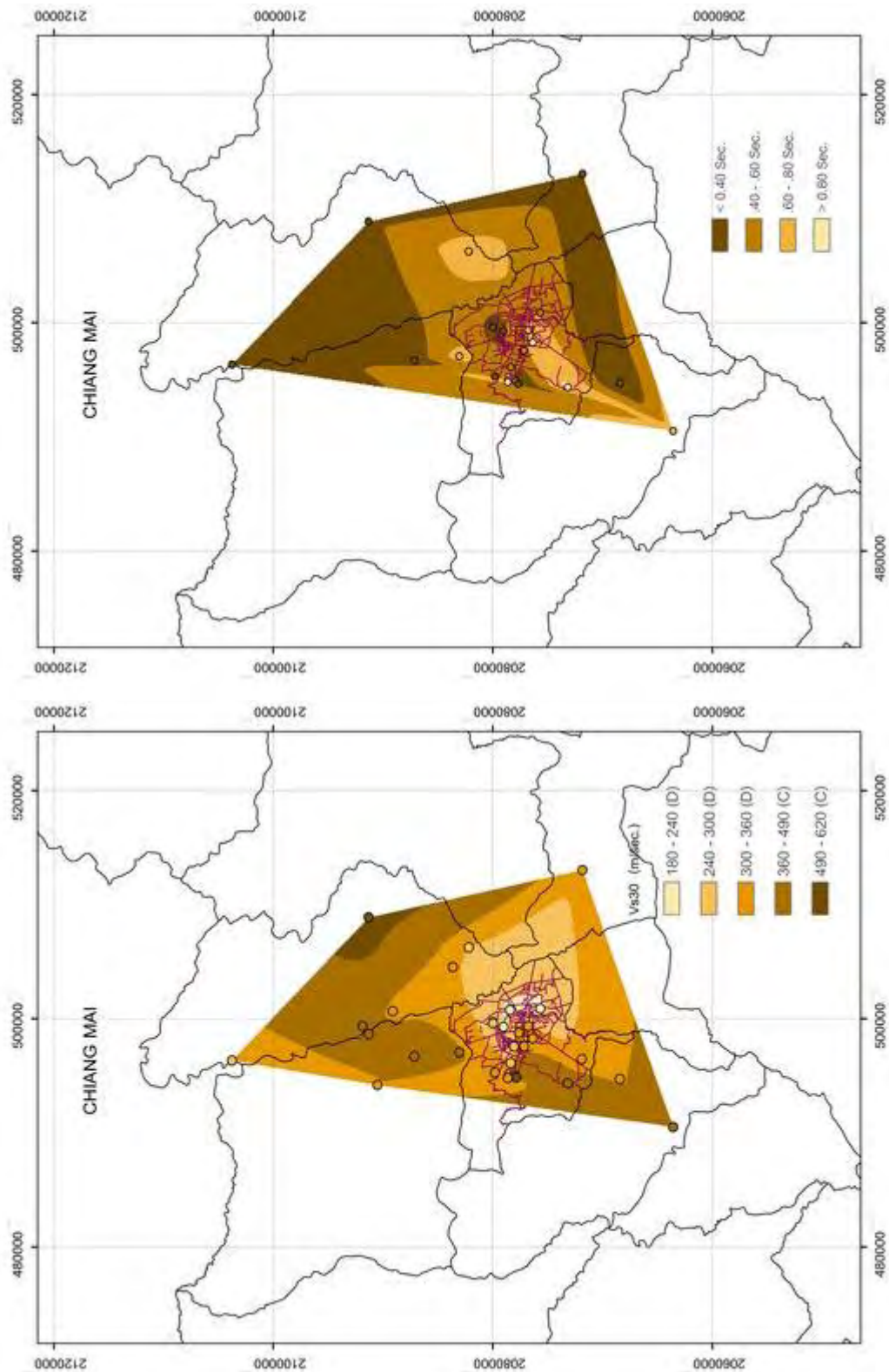
(* ความลึกของหลุมสำรวจ downhole ประมาณ 18 เมตร และจุดสำรวจห่างกันประมาณ 600 ม.)

ตารางที่ 5.12 ผลการศึกษาของบริเวณสำรวจในกรุงเทพมหานคร

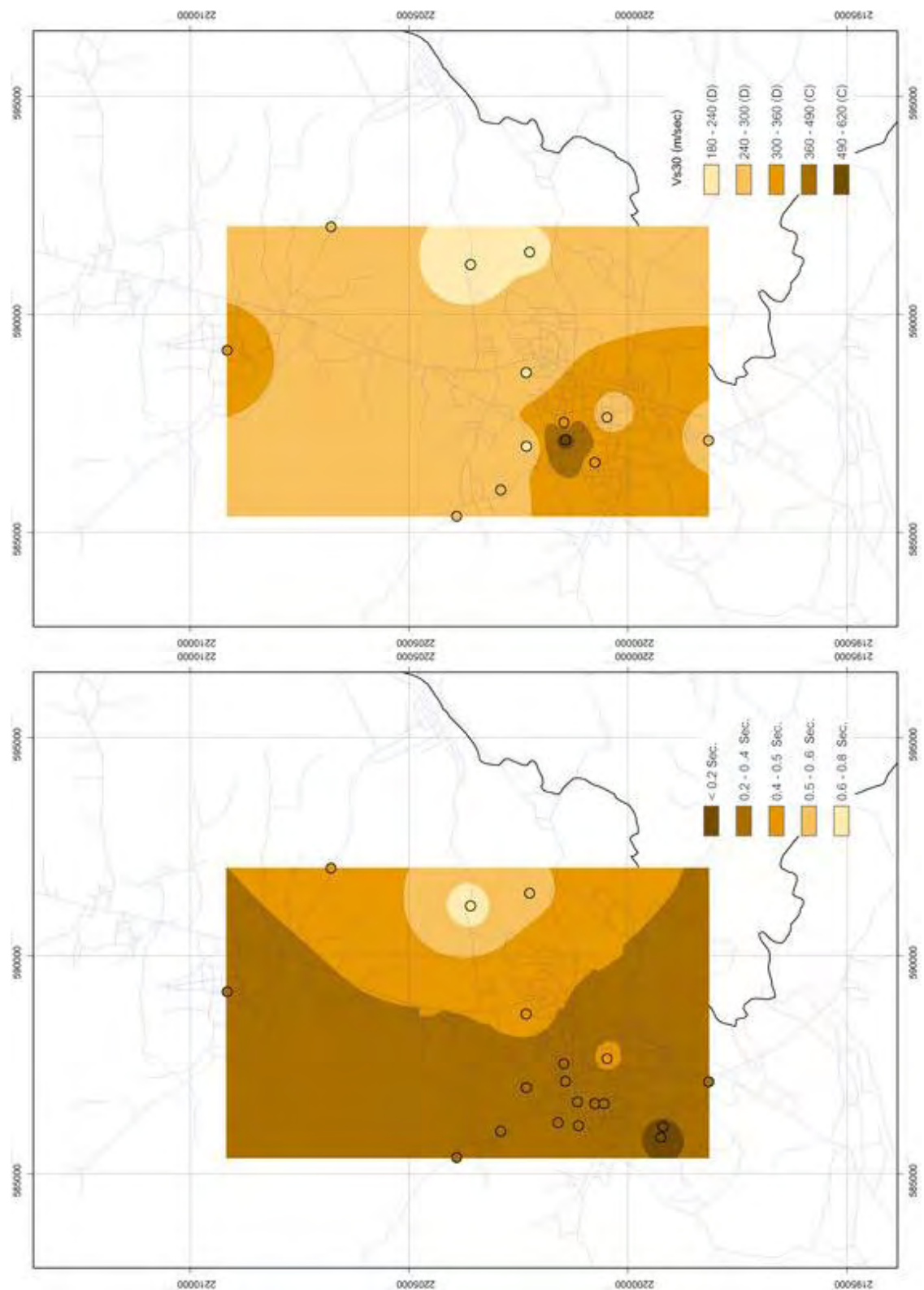
No.	Site Location	Vs30 (m/s) 2sSPAC	Vs (m/s) Downhole	Soil Class	Predominant Period (s)
1	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย	174	174 *	E	0.64 - 0.85
2	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	142	157 *	E	0.76
3	กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา	117	141 *	E	0.66
4	ม.ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต	121	129 **	E	0.73

(* ความลึกของหลุมสำรวจ downhole ประมาณ 30 เมตร)

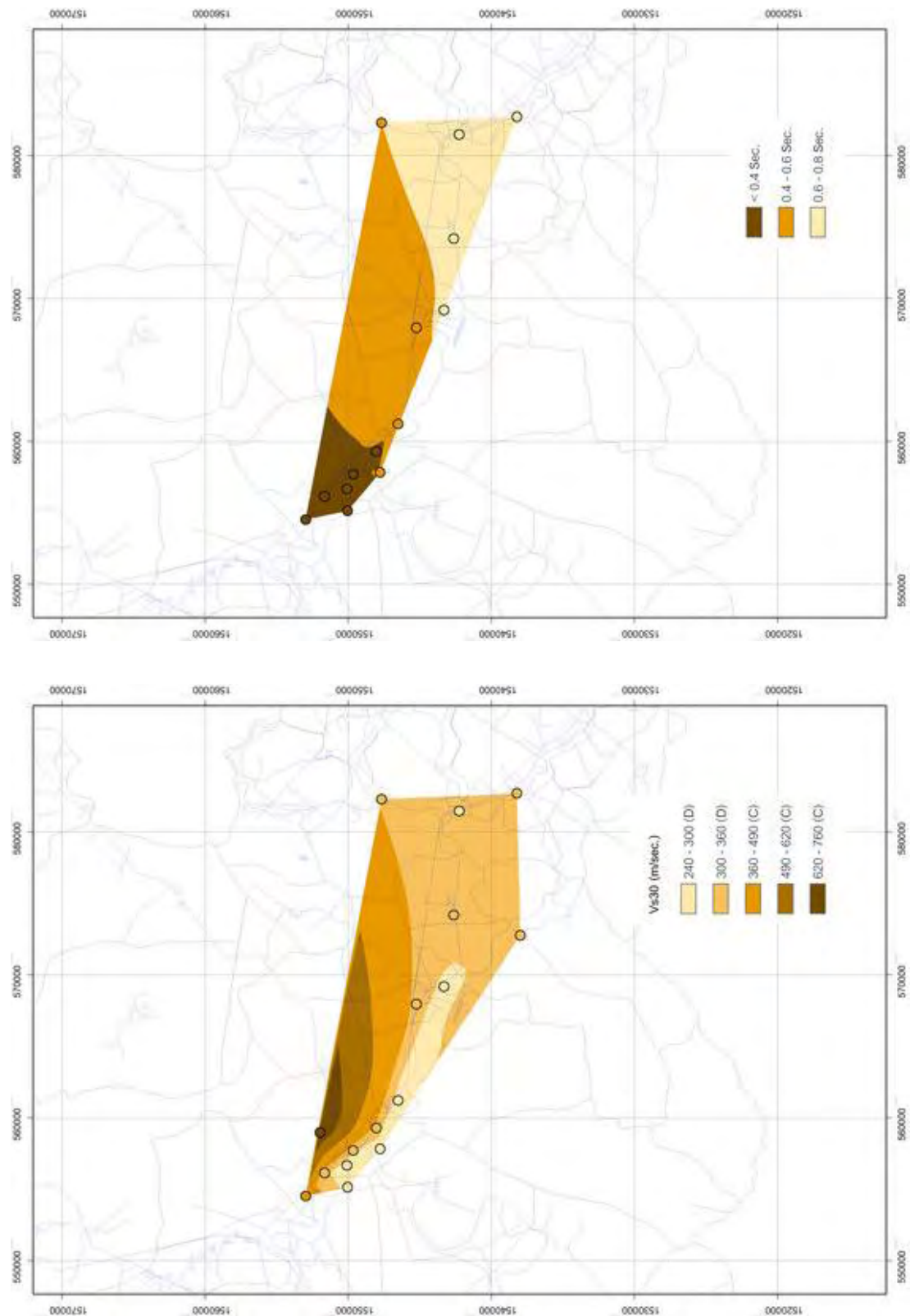
ผลการศึกษาของค่าคาบอิทธิพลหลักและความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตรของแต่ละจังหวัด แสดงในรูปของค่าของแต่ละบริเวณตามพิภพที่ตั้งรูปที่ 5.28 ถึง 5.30 และแสดงในเชิงการเปรียบเทียบแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่าคาบอิทธิพลหลักและความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย ซึ่งพบแนวโน้มว่า บริเวณที่มีคาบอิทธิพลหลักต่ำจะมีความเร็วคลื่นเฉือนสูง แสดงถึงเป็นบริเวณชั้นดินแข็ง ในทางกลับกัน บริเวณที่เป็นดินอ่อนมีผลค่าคาบอิทธิพลหลักสูงและความเร็วคลื่นเฉือนต่ำ



รูปที่ 5.28 (ก) คาบอิทธิพลหลัก (ข) ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยลึก 30 ม. สำหรับพื้นที่ศึกษาในจังหวัดเชียงใหม่

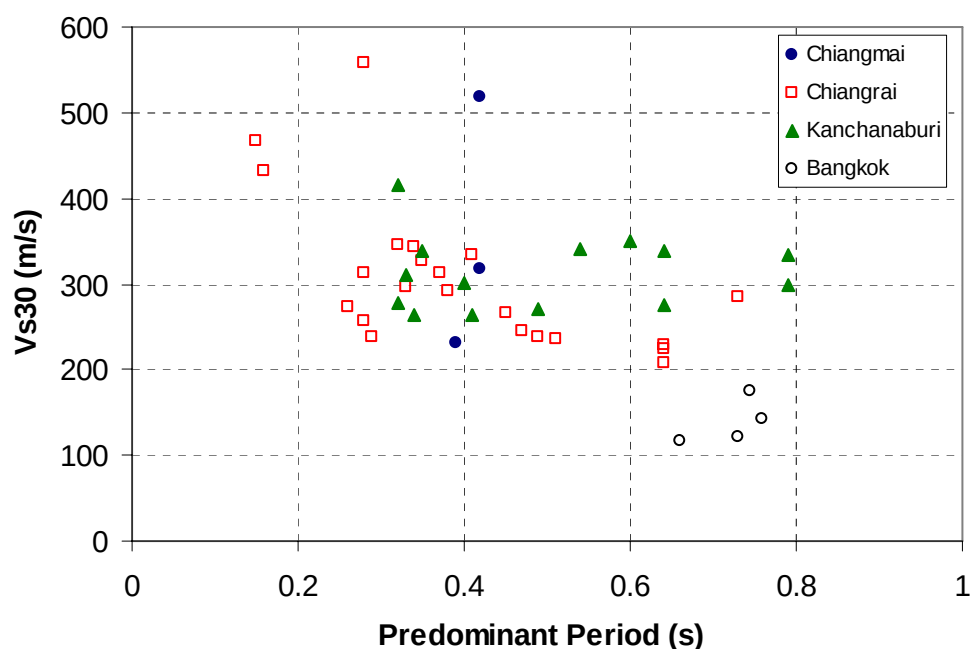


รูปที่ 5.29 (ก) คาบอิทธิพลหลัก (ข) ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยลึก 30 ม. สำหรับพื้นที่ศึกษาในจังหวัดเชียงราย



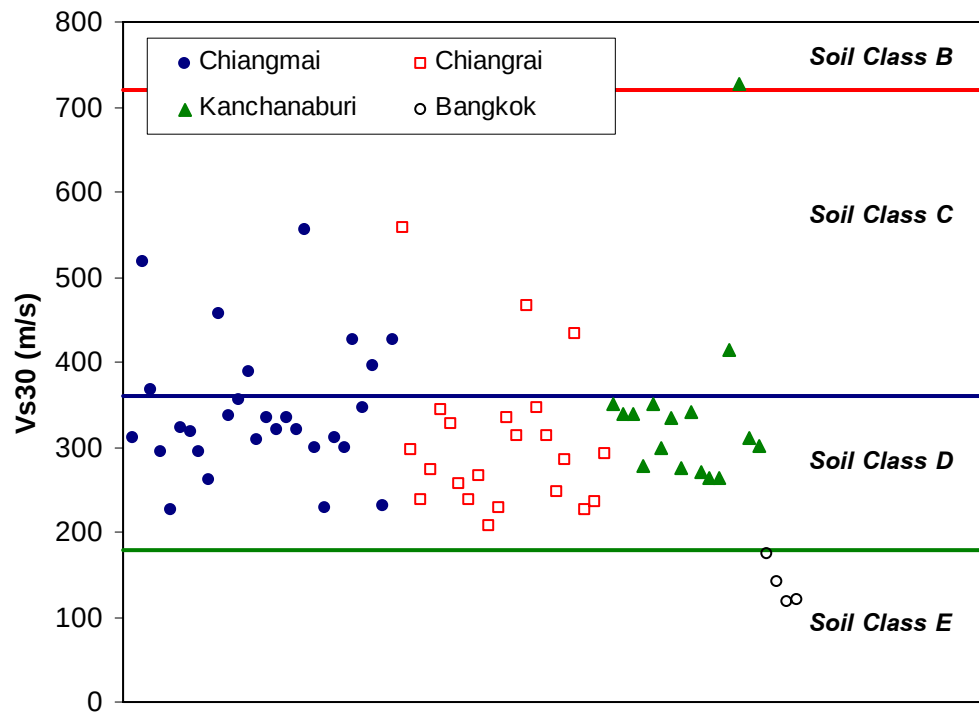
รูปที่ 5.30 (ก) คาบอิทธิพลหลัก (ข) ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยลึก 30 ม. สำหรับพื้นที่ศึกษาในจังหวัดกาญจนบุรี

ความสัมพันธ์ระหว่างคาบอิทธิพลหลักและความเร็วคลื่นเฉือนของแต่ละบริเวณศึกษาแสดงดังรูปที่ 5.31 โดยสามารถพบแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่ชัดเจนถึงค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่แปรผกผันกับค่าคาบอิทธิพลหลัก



รูปที่ 5.31 ความความสัมพันธ์ระหว่างคาบอิทธิพลหลักและความเร็วคลื่นเฉือนของแต่ละบริเวณศึกษา

จากข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนของบริเวณที่ศึกษา เมื่อนำมาใช้จำแนกชั้นดินตามข้อกำหนดของ NEHRP (2003) ได้ผลดังตารางข้อมูลข้างต้น และเมื่อนำมาแสดงรวมกันสำหรับพื้นที่ทั้งหมดที่ศึกษาได้ดังรูปที่ 5.32 ซึ่งแสดงถึงลักษณะของชั้นดินที่บริเวณที่ศึกษา โดยบริเวณที่ศึกษาในจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และกาญจนบุรี พื้นที่ราบในเขตอำเภอเมืองส่วนใหญ่จำแนกเป็น ชั้นดินประเภท D (ดินแข็ง) บางส่วนจำแนกเป็นชั้นดินประเภท C (ดินแข็งมาก กึ่งหิน) สำหรับบริเวณใกล้เชิงเขาและไม่พบ ชั้นดินประเภท E (ดินอ่อน) ส่วนผลการศึกษาในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลพบว่าทุกบริเวณจำแนกเป็น ชั้นดินประเภท E (ดินอ่อน)



รูปที่ 5.32 ผลการจำแนกชั้นดินจากข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนของบริเวณที่ศึกษา

บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา

6.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

การดำเนินการในส่วนแรกคือการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารโดยการตรวจวัดและพัฒนาสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวของประเทศไทย โดยมีผลการดำเนินงานและข้อสรุปจากการวิจัยดังนี้

6.1.1 การดำเนินการศึกษาได้ทำการตรวจวัดอาคารในจังหวัดเชียงใหม่รวม 51 หลัง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับกลุ่มอาคารที่ตั้งอยู่บนชั้นดินแข็ง และอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพิ่มเติมจำนวน 20 หลัง และรวมกับผลการศึกษาในโครงการวิจัยก่อนหน้าไปแล้วจำนวน 50 หลัง รวมเป็น 70 หลัง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับกลุ่มอาคารที่ตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อน รวมจำนวนอาคาร 121 หลัง

6.1.2 ผลการศึกษาค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่ได้ในงานวิจัยนี้แสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับความสูงของอาคาร จากการวิเคราะห์ Regression ของข้อมูลค่าคาบธรรมชาติในแต่ละทิศทางของการเสียรูปใน 2 แกนหลักที่ตั้งฉากกับแกนของอาคาร (Transverse and Longitudinal Direction) ได้เป็นสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติพื้นฐาน ซึ่งเป็นค่าคาบธรรมชาติเฉลี่ย (T_R) ที่ให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลต่ำที่สุด (Best-Fit) นอกจากนั้นการนำไปประยุกต์ใช้กับมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว อาจพิจารณาค่าคาบธรรมชาติที่มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูล เป็นการประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง (T_L) เพื่อให้การออกแบบมีความปลอดภัยสูงขึ้น (Conservative) และสำหรับข้อกำหนดในมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดค่าขอบเขตบน (T_U) ไว้สำหรับค่าคาบที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีอื่น

โดยรายละเอียดสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติ T หน่วยเป็นวินาที กับความสูงของอาคาร H (เมตร) ของแต่ละกลุ่มอาคารที่ศึกษา แสดงได้ดังนี้

อาคารในจังหวัดเชียงใหม่

$$T_U = 0.0343H^{0.8578} \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน}$$

$$T_R = 0.0292H^{0.8578} \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติการสั่นพื้นฐาน}$$

$$T_L = 0.0248H^{0.8578} \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง}$$

อาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

$$T_U = 0.0210H^{1.0248} \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน}$$

$$T_R = 0.0169H^{1.0248} \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติการสั่นพื้นฐาน}$$

$$T_L = 0.0136H^{1.0248} \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง}$$

กรณีพิจารณาข้อมูลทั้งสองกลุ่มอาคาร

$$T_U = 0.0230H^{0.9941} \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน}$$

$$T_R = 0.0189H^{0.9941} \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติการสั่นพื้นฐาน}$$

$$T_L = 0.0155H^{0.9941} \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง}$$

6.1.3 ผลการพิจารณาข้อมูลทั้งสองกลุ่มอาคารพบว่ามีความแตกต่างกันไม่มาก จึงเสนอใช้สมการในการประมาณค่าคาบธรรมชาติเดียวกันสำหรับทั้งสองกลุ่มอาคารเพื่อเป็นแนวทางที่สะดวกในการปฏิบัติ และได้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติ T หน่วยเป็นวินาทีกับความสูงของอาคาร H (เมตร) ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นคือ

$$T_U = 0.0225H \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน}$$

$$T_R = 0.0185H \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติการสั่นพื้นฐาน}$$

$$T_L = 0.0152H \quad \text{สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง}$$

6.1.4 เมื่อใช้สูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการตอบสนองภายใต้แผ่นดินไหว สามารถสรุปเสนอสมการสำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทยคือ $T = 0.02H$

6.1.5 ผลการพิจารณาสมการแบบขอบเขตล่างและขอบเขตบนเพื่อกำหนดขอบเขตของค่าคาบที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีอื่นนอกเหนือจากการใช้สมการการประมาณ เสนอให้ หากใช้การคำนวณเพื่อการหาค่าคาบธรรมชาติโดยหลักการของพลศาสตร์โครงสร้าง ค่าคาบธรรมชาติที่ได้ไม่ควรมีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของค่าที่ได้จากสูตรการประมาณ

6.1.6 ข้อมูลจากการวิเคราะห์แสดงคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกับสภาพอาคารจริงในประเทศไทย แต่มีความแตกต่างจากสมการการประมาณในกฎกระทรวงแผ่นดินไหว พศ 2550 ที่มีต้นแบบจากสมการประมาณค่าที่พัฒนาสำหรับอาคารของประเทศสหรัฐอเมริกา ทั้งใน รูปแบบของสมการและค่าที่คำนวณได้

6.1.7 จากการศึกษารูปร่างการสั่นไหวของอาคาร พบว่าอาคารมีการเคลื่อนตัวที่ฐานที่เทียบกับการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดของอาคาร โดยมีค่ามากสำหรับอาคารเตี้ย อาคารที่มีคาบธรรมชาติต่ำหรืออาคารที่มีค่าอัตราส่วนสติฟเนสของอาคารต่อสติฟเนสของฐานรากและชั้นดินสูง โดยกลุ่มอาคารในจังหวัดเชียงใหม่พบว่าการเคลื่อนตัวที่ฐานเกิดน้อยกว่ากลุ่มอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลอย่างชัดเจน

6.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน

การดำเนินการในส่วนที่สองคือการศึกษาคคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน โดยประกอบด้วยการตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุด (Single-Point Microtremor Observation) และการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation) เพื่อศึกษาคคุณสมบัติของชั้นดินด้านการขยายขนาดคลื่นแผ่นดินไหว คือ คาบอิทธิพลหลัก และ ความเร็วคลื่นเฉือน โดยมีผลการดำเนินงานและข้อสรุปจากการวิจัยดังนี้

6.2.1 การตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุด ดำเนินการศึกษารวมทั้งหมด 100 ตำแหน่งในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ และการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน ดำเนินการศึกษา 30 บริเวณในจังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 25 บริเวณในจังหวัดเชียงราย จำนวน 16 บริเวณในจังหวัดกาญจนบุรี และ จำนวน 4 บริเวณในกรุงเทพมหานคร

6.2.2 ผลการศึกษาค่าคาบอิทธิพลหลักจากการตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุดในจังหวัดเชียงใหม่ และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค H/V spectrum ratio พบว่าข้อมูล 48 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 100 ตำแหน่ง) ไม่สามารถหาค่าคาบอิทธิพลหลักได้ สำหรับพื้นที่อื่น พบว่ามีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.8 วินาที เป็นส่วนมาก โดยในแต่ละบริเวณมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนี้ บริเวณ อ.เมือง มีค่าคาบอิทธิพลหลักแตกต่างกันอย่างมาก คือ บริเวณคูเมืองมีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.60 – 0.80 วินาที และพื้นที่บางส่วนของสูงกว่า 0.80 วินาที บริเวณรอบนอก อ.เมือง รัศมี ประมาณ 15 กม. มีค่าคาบอิทธิพลหลัก อยู่ในช่วง 0.40 – 0.60 วินาที ส่วนบริเวณทิศเหนือของพื้นที่ศึกษา คือ อ.แมริม และ อ.สันทราย มีค่าคาบอิทธิพลหลักต่ำกว่า 0.40 วินาที ซึ่งแสดงถึงลักษณะทางสภาพธรณีวิทยาของชั้นดินที่มีความแตกต่างในแต่ละพื้นที่

6.2.3 ผลการศึกษาความเร็วคลื่นเฉือนจากการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค 2-site Spatial Autocorrelation (2s-SPAC) ในส่วนแรกเป็นการพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องกับงานวิจัยก่อนหน้า ซึ่งพบว่าวิธีที่พัฒนาให้ผลของค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดินสอดคล้องกับผลการสำรวจโดยการเจาะหลุมทดสอบและการตรวจวัดแบบ Array Microtremor ของงานวิจัยอื่นอย่างดี และจำแนกชั้นดินได้เป็นประเภทเดียวกัน ข้อดีต่อการประยุกต์ใช้ศึกษา คือ สามารถปฏิบัติได้โดยสะดวก เนื่องจากไม่ต้องทำการเจาะหลุมสำรวจและใช้อุปกรณ์และบุคลากรน้อยกว่าวิธีอื่นทำให้ประหยัดทั้งค่าใช้จ่ายและเวลาในการตรวจวัด นอกจากนี้ ค่าที่วิเคราะห์ได้ให้ผลถึงระดับความลึกเกินจากช่วงที่หลุมเจาะโดยทั่วไปมาก (ระดับ 80-100 เมตร ในงานวิจัยนี้)

6.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบอิทธิพลหลักและความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร ของบริเวณที่ศึกษาแสดงเป็นแนวโน้มว่า บริเวณที่มีคาบอิทธิพลหลักต่ำจะมีความเร็วคลื่นเฉือนสูง แสดงถึงเป็นบริเวณชั้นดินแข็ง ในทางกลับกัน บริเวณที่เป็นดินอ่อนมีค่าคาบอิทธิพลหลักสูงและความเร็วคลื่นเฉือนต่ำ

6.2.5 ผลการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร เมื่อนำมาใช้จำแนกชั้นดินตามข้อกำหนดของ NEHRP (2003) ได้ผลซึ่งแสดงถึงลักษณะของชั้นดินที่บริเวณที่ศึกษา โดยบริเวณที่ศึกษาในจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และกาญจนบุรี พื้นที่ราบในเขตอำเภอเมืองส่วนใหญ่จำแนกเป็น ชั้นดินประเภท D (ดินแข็ง) บางส่วนจำแนกเป็นชั้นดินประเภท C (ดินแข็งมาก กึ่งหิน) สำหรับบริเวณใกล้เชิงเขา และไม่พบ ชั้นดินประเภท E (ดินอ่อน) ส่วนผลการศึกษาในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลพบว่าทุกบริเวณจำแนกเป็น ชั้นดินประเภท E (ดินอ่อน)

6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาพัฒนาด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและชั้นดินที่มีผลต่อระดับแรงและการตอบสนองของอาคารต่อแรงแผ่นดินไหว ข้อมูลที่ได้ส่วนหนึ่งได้นำไปใช้ในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในประเทศไทยแล้ว อย่างไรก็ตาม ขอบเขตของงานวิจัยที่สำคัญต่อการพัฒนาในด้านนี้ยังคงเหลืออยู่อีกในหลายประเด็น โดยมีประเด็นหลัก ดังนี้

6.3.1 การศึกษาด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร เนื่องจากการศึกษาที่ดำเนินการมา มุ่งเน้นเพื่อพัฒนาสูตรการประมาณค่าสำหรับอาคารและกำหนดในมาตรฐานการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว ซึ่งใช้กับอาคารที่มีรูปทรง และคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว อย่างสม่ำเสมอตลอดความสูง จึงได้ดำเนินการศึกษากับอาคารที่เป็นตัวแทนอาคารทั่วไปจำนวนมาก โดยยังไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากรูปทรงหรือลักษณะความไม่สม่ำเสมอดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ผลจากรูปทรงและความไม่สม่ำเสมอของอาคารมีผลอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว ซึ่งสามารถศึกษาได้ด้วยเทคนิคการตรวจวัดที่ใช้ดำเนินการศึกษาในงานนี้ แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่อธิบายพฤติกรรมของอาคารได้เหมาะสมกับกลุ่มอาคารที่ใช้กันหลักในประเทศไทย เช่น อาคารพาณิชย์ อาคารที่มีช่องเปิดด้านล่าง เป็นต้น ดังนั้น จึงควรมีการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่เป็นผลจากรูปทรงและลักษณะความไม่สม่ำเสมอของอาคาร เพื่อความเข้าใจและปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับพฤติกรรมจริงได้อย่างเหมาะสม

6.3.2 การศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเทคนิคที่สามารถดำเนินการศึกษาได้อย่างรวดเร็ว และได้พยายามขยายขอบเขตพื้นที่ศึกษาให้ครอบคลุมพื้นที่สำคัญด้านความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศ อย่างไรก็ตาม ยังมีพื้นที่ที่ยังไม่ได้ศึกษาอีกจำนวนมาก จึงควรมีการขยายพื้นที่ศึกษาให้มากขึ้น โดยดำเนินการตามลำดับความสำคัญ ทั้งในเขตเมืองและพื้นที่ที่จะพัฒนาในอนาคต นอกจากนั้นแล้ว ผลการศึกษาที่ได้ สามารถนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อประเมินกำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ย่อย และจัดทำเป็น แผนที่เขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียด ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งโดยเฉพาะเมืองใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และพื้นที่อีกหลายส่วนของประเทศ

เอกสารอ้างอิง

- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550, กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนักความต้านทานความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550
- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2552, มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302)
- จิตติ ปาลศรี และ อาณัติ เรืองรัมย์, 2552, “ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน ค่า N สำหรับการตอกกระบอกฝาทดสอบ และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่คายน้ำของดินในกรุงเทพมหานครและบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย”, GTE50407, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ชาคร เพชรเจริญ, 2002, “Identification of Dynamic Properties of Low and Medium-rise Buildings in Bangkok by an Ambient Vibration Method”, Master Thesis No. ST-02-14, Asian Institute of Technology.
- ธีรพล ลีลาวรรณ, 2001, “Identification of Dynamic properties of Tall Buildings in Bangkok by an Ambient Vibration Method”, Master Thesis No. ST-01-9, Asian Institute of Technology.
- น้องนุช เหลืองถาวรกุล, 2007, “ตัวแปรที่เหมาะสมของการเก็บข้อมูลคลื่นผิวดินเพื่อการสำรวจแบบของชั้นดินกรุงเทพมหานคร”, คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ประภาพร จันทะมาศ, 2007, “การเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพฯที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบ หลายช่องทางรับสัญญาณกับวิธีวัดจากหลุมเจาะ”, คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ประยุทธ์ ยิ่งหาญ, 2545, “การหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการตรวจวัด”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- มานะ จันทะสัด, 2546, “คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- วีระศักดิ์ เกิดศิริมงคล, 2546, “การระบุคุณสมบัติของระบบโครงสร้างจากผลการตอบสนองโดยวิธี Natural Excitation Technique และ Eigensystem Realization Algorithm”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- สมจิต อำนาจสาน, 2000, “Identification of Dynamic Properties of Buildings and Structures from Microtremor Vibrations”, Master Thesis No. ST-00-15, Asian Institute of Technology.
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, 2551, “เอกสารการสอนวิชา 203555 ไดนามิกส์ของดิน ปีการศึกษา 1/2551”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 2549, “พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Abdullah M. and Alsamani M., 2004-2005, “Estimation of the Shear Wave Velocity of Shallow Structure from Short Period Microtremor using Simultaneous Measurement of SPAC and 2sSPAC Methods”, Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (2004-2005)
- Almasani M. A. M., 2004, “Estimation of the Shear Wave Velocity of Shallow Structure from Short Period Microtremor using Simultaneous Measurements of SPAC and 2sSPAC Methods”, Document for the course of Seismology, Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (2004-2005)
- Ansary M. A., Yamazaki F., and Katayama T., 1996, “Application of Microtremor Measurements to the Estimation of Site Amplification Characteristics”, Bullentin of ERS, No. 29, pp 95-113.
- Arai H., and Yamazaki F., 2002, “Exploration of S-Wave Velocity Sstructure Using Microtremor Arrays in the Greater Bangkok, Thailand”, EDM Technical Report No.15, Earthquake Disaster Mitigation Research Center (EDM)
- Ashford, S.A., Jakrapyanun, W., and Lukkanaprasit, P. (1997). Amplification of Earthquake Ground Motions in Bangkok. AIT research report submitted to the Public Works Department, Thailand.
- Ashford, S.A. (2000). Shear Wave Velocity Testing at Chulalongkorn University and S.I.I.T. Test Report No. TR-2000/15, Bangkok, Thailand.
- Bouwkamp J.G., Kollegger J.P., and Stephen R.M., 1980, “Dynamic Properties of A Twelve-story Prefabricated Panel Building”, Report No. UBC/EERC-80/29, Earthquake Engineering Reaearch Center, University of California at Berkley.
- Building Seismic Safety Council, 2004, “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1: Provisions (2003 Edition)”, FEMA 450, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C
- Chaker A.A. and Cherifati A., 1999, “Influence of Masonry Infill Panels on the Vibration and Stiffness Characteristics of R/C Frame Buildings”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28, pp. 1061-1065.
- Chopra A.K., 1995, “Dynamics of structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering”, New Jersey, Prentice-Hall.
- Clough R.W. and Penzien J., 1993, “Dynamics of Structures”, 2nd Edition, Singapore, McGraw-Hill.

- Cole H.A., 1973, "On-line Failure and Damping Measurement of Aerospace Structures by Random Decrement Signatures", NASA CR-2205.
- Crawford R. and Ward H.S., 1964, "Determination of the Natural Period of Building", Bulletin of the Seismological Society of America, 54, 6, pp. 1743-1756.
- Goel R.K. and Chopra A.K., 1997, "Vibration Properties of Buildings determined from Recorded Earthquake Motion", Report No. UBC/EERC-97/14, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkley.
- Ibrahim S.R. and Pappa R.S., 1981, "A Parametric Study of the Ibrahim Time Domain Modal identification Algorithm", Shock and Vibration Bulletin, 51(3), pp. 43-72.
- Juang J.N., 1994. Applied System Identification. Eagle Wood Cliffs. New Jersey : Prentice Hall
- Konno K., and Ohmachi T., 1998, "Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 88, No. 1, pp. 228-241.
- Lai C.G. and Rix G.J., 1998, "Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization", Report No. GIT-CEE/GEO-98-2, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology
- Lermo J., and Chavez-Garcia F.J., 1994, "Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 5, pp. 1350-1364.
- Meyyappa M., Palsson H., and Craig J.I., 1981, "Modal Parameter Estimation for A High-rise Building using Ambient Response Data taken during Construction", Proceedings of the Second Specialty Conference on Dynamic Response of Structures : Experimental, Observation, Prediction and Control, ASCE.
- Morikawa H., Sawada S., and Akamatsu J., 2004, "A Method to Estimate Phase Velocity of Rayleigh Waves Using Microseisms Simultaneously Observed at Two Sites", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No. 3, pp. 961-976
- Muria-Vila D., Fuentes O.L. and Gonzalez A.R., 2000, "Uncertainties in the Estimation of Natural Frequencies of Buildings in Mexico City", Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Paper No. 2092.
- Nakamura Y., 1989, "A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface", Quarterly Report of RTRI, Vol. 30, No. 1, pp. 25-30.

- Ohori M., Nobata A., and Wakamatsu K, 2002, "A Comparison of ESAC and FK Methods of Estimating Phase Velocity Using Arbitrarily Shaped Microtremor Arrays", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.92, No.6, pp.2323-2332
- Okada H., 2003, "The Microtremor Survey Method", Geophysical Monograph Series No.12, Society of Exploration Geophysics
- Okada H., 2006, "Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method", Exploration Geophysics, 37, pp.73-85
- Richardson M.H. and Formenti D.L., 1982, "Parameter Estimation from Frequency Response Measurements using Rational Fraction Polynomials", Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida.
- Seed H. B., 1989, "Implications of Site Effects in the Mexico City Earthquake of Sept. 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California", Report No. UCB/EERC-89/03, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkley, California.
- Srisoros W., 2003, "Seismic Microzonation of Chiangmai City Using Microtremor Observations", thesis No. ST-03-05, A.I.T
- Taoka G.T., Hogan M., Khan F., and Scanlan R.H., 1975, "Ambient Response Analysis of Some Tall Structures", Journal of the Structural Division, ASCE, 101(ST1), pp. 49-65.
- Tokimatsu K., 1997, "Geotechnical Site Characterization Using Surface Wave", Proc., 1st International Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, 3, pp. 1333-1367.
- Tokimatsu K., and Miyadera Y., 1992, "Determine of shear wave velocity structures from spectrum analysis", Earthquake Engineering, 3, 10th World conference, pp.253-258
- Torkamani M.A.M. and Ahmadi A.K., 1988, "Stiffness Identifications of A Tall Building during Construction Period using Ambient Tests", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 16, pp. 1177-1188.
- Trifunac M.D., 1970, "Ambient Vibration Test of A Thirty-nine story Steel Frame Building", Report No. EERL 70-02, Earthquake Engineering Research Lab, California Institute of Technology, Pasadena.
- Tuladhar R., 2003, "Classification of Soil Profile and Seismic Response Analysis (Elastic) in The Greater Bangkok Area", A.I.T
- Tuladhar R., Yamazaki F., Wanitchai P., and Saita J., 2004, "Seismic Microzonation of Greater Bangkok Using Microtremor Observation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 33, pp.211-225

ภาคผนวก

กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ได้ถูกนำไปใช้ในการพัฒนาเป็นการคำนวณค่าคาบธรรมชาติสำหรับอาคาร ใน มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302) กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2552

ผลการวิจัยด้านคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ทำให้สามารถจำแนกประเภทของดินเพื่อการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวบริเวณนั้นได้อย่างเหมาะสมสำหรับพื้นที่ศึกษาเนื่องจากในมาตรฐาน มยผ. 1302 และ มาตรฐานอื่นๆ ที่เป็นสากล กำหนดให้ต้องจำแนกประเภทของชั้นดิน โดยสามารถใช้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตรในการจำแนก

วิธีวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้นในโครงการนี้ สามารถนำไปใช้สำรวจกับพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวอื่นๆ ในประเทศ รวมทั้ง สามารถนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อประเมินกำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ย่อย และจัดทำเป็น แผนที่เขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดสำหรับเมืองใหญ่ เพื่อประโยชน์ในการวางแผนจัดการการป้องกันภัยเนื่องจากแผ่นดินไหวต่อไป

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ของโครงการ

ข้อเสนอโครงการ	ผลการดำเนินการศึกษา
1. ศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ ด้วยการตรวจวัดสภาพการสั่นไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นจำนวนมากที่มี รูปทรง ขนาด ลักษณะโครงสร้าง และลักษณะการใช้งานแตกต่างกัน	1. ดำเนินการตรงตามวัตถุประสงค์ในข้อเสนอของโครงการ โดยศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ และ ดำเนินการศึกษากับอาคารในเขตกรุงเทพมหานครเพิ่มเติมจากข้อเสนอโครงการ
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติในการหน่วงหรือขยายสัญญาณคลื่นแผ่นดินไหวของชั้นดินตัวกลางในเขตจังหวัดเชียงใหม่ ด้วยวิธีการตรวจวัด Microtremor	2. ดำเนินการตรงตามวัตถุประสงค์ในข้อเสนอของโครงการ โดยศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งในจังหวัดเชียงใหม่ และ ดำเนินการศึกษากับบริเวณจังหวัดเชียงราย จังหวัดกาญจนบุรี และเขตกรุงเทพมหานครเพิ่มเติมจากข้อเสนอโครงการ

ข้อเสนอโครงการ	ผลการดำเนินการศึกษา
3. เพื่อนำความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติดังกล่าวมาจัดทำข้อเสนอในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในประเทศไทย	3. นำผลการวิจัยด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ไปใช้ในการพัฒนาเป็นการคำนวณค่าคาบธรรมชาติสำหรับอาคาร ใน มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302) กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2552

ตารางเปรียบเทียบระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตของการศึกษา

ข้อเสนอโครงการ	ผลการดำเนินการศึกษา
1. ตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารที่อยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ด้วยอุปกรณ์วัดที่มีความไวสูง โดยทำการตรวจวัดอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตจังหวัดเชียงใหม่ ที่มีรูปทรง, ขนาด, ความสูง, ลักษณะโครงสร้าง, และลักษณะการใช้สอยที่แตกต่างกันเป็นจำนวนรวมทั้งสิ้น ประมาณ 50 อาคาร	1. ดำเนินการตรงตามขอบเขตในข้อเสนอโครงการ โดยตรวจวัดอาคารในจังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 51 หลัง และอาคารในเขตกรุงเทพมหานครจำนวน 20 หลัง
2. นำผลการตรวจวัดซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัล มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคที่เหมาะสมเพื่อหาความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies), รูปแบบของการสั่นสะเทือน (Vibration Mode Shapes) และ ค่าความหน่วง (Damping Ratios) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่สำคัญของอาคาร	2. ดำเนินการตรงตามขอบเขตในข้อเสนอโครงการ
3. ศึกษาหาความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์กับคุณสมบัติพื้นฐานด้านอื่นๆของอาคาร ที่สามารถประเมินได้ง่าย เช่น ขนาดความกว้าง, ยาว,สูง ของอาคาร	3. ดำเนินการตรงตามขอบเขตในข้อเสนอโครงการ

ข้อเสนอโครงการ	ผลการดำเนินการศึกษา
4. ตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินในภาคสนาม โดยตรวจวัดการสั่นสะเทือนที่มีอยู่ในธรรมชาติที่ผิวดิน (Microtremor) ด้วยอุปกรณ์วัดที่มีความไวสูง พื้นที่ที่ศึกษาครอบคลุมพื้นที่ในเขตเทศบาลจังหวัดเชียงใหม่ (หรือครอบคลุมพื้นที่รอบนอกเพิ่มเติม แล้วแต่ความเหมาะสม ซึ่งอาจมีข้อจำกัดในด้านสภาพภูมิประเทศสำหรับการวางเครื่องมือวัด) โดยที่จุดตำแหน่งที่ตรวจวัดจะกระจายอยู่ในพื้นที่นี้ และจำนวนจุดวัดรวมทั้งสิ้นไม่ต่ำกว่า 100 ตำแหน่ง	4. ดำเนินการตรงตามขอบเขตในข้อเสนอโครงการ โดยทำการตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุด รวมทั้งหมด 100 ตำแหน่งในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ และ ดำเนินการเพิ่มเติมการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน ดำเนินการศึกษาจำนวน 30 บริเวณในจังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 25 บริเวณในจังหวัดเชียงราย จำนวน 16 บริเวณในจังหวัดกาญจนบุรี และ จำนวน 4 บริเวณในกรุงเทพมหานคร ³
5. ประเมินค่าคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งอาคาร ได้แก่ ค่าคาบอิทธิพลหลัก ตัวคูณขยาย และ Shear wave velocity ของชั้นดิน	5. ดำเนินการตรงตามขอบเขตในข้อเสนอโครงการ

³ สำหรับพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีและกรุงเทพมหานคร ดำเนินการร่วมกับการสนับสนุนจาก ทุนวิจัยประเภททั่วไป ปีงบประมาณ 2552