



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (ระยะที่ 3)

การแบ่งเขตแผ่นดินไหวอย่างละเอียดด้วยการศึกษา
คุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม และคณะ

กรกฎาคม 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (ระยะที่ 3)

การแบ่งเขตแผ่นดินไหวอย่างละเอียดด้วยการศึกษา

คุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง

คณะผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิพงศ์ จันทร์เพ็ง

รองศาสตราจารย์ ดร. เปิ่นหนึ่ง วานิชชัย

สังกัด

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่เป็นปัจจัยหลักต่อระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวต่ออาคาร คือ คุณสมบัติของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ได้แก่ ความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity) และคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) ซึ่งมีอิทธิพลอย่างสูงต่อการขยายความรุนแรง หรือการเปลี่ยนแปลงลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่ประกอบด้วยขนาด (Amplitude) องค์ประกอบความถี่ (Frequency Content) และระยะเวลา (Duration) ของการสั่นสะเทือน และคุณสมบัติของอาคารที่ประกอบด้วย คาบธรรมชาติ (Natural Period) อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) และรูปร่างการสั่นไหว (Vibration Mode Shape) ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการคำนวณหาระดับการโยกตัวของอาคารต่าง ๆ จากผลของแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้น ชั้นดินอาจสามารถขยายขนาดคลื่นทำให้เพิ่มระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวได้โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นชั้นดินอ่อน และอาคารอาจเกิดการตอบสนองอย่างรุนแรงแบบการสั่นพ้อง หากคาบธรรมชาติของอาคารมีค่าใกล้เคียงกับคาบการสั่นหลักของคลื่นแผ่นดินไหว

จากความสำคัญของคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อศึกษาผลของคุณสมบัติของชั้นดินบริเวณที่ตั้งที่มีต่อลักษณะและระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวในบริเวณเมืองใหญ่ เพื่อประเมินความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในแต่ละพื้นที่ย่อย แล้วสร้างเป็นแผนที่แบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียด (Seismic Microzonation Map) และเพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงของแผ่นดินไหวของอาคารที่มีรูปแบบที่เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายและมีการใช้งานจำนวนมาก ซึ่งผลการศึกษาที่ได้คาดว่าจะจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนจัดการด้านความเสี่ยงภัยและการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้องสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในประเทศไทยมากยิ่งขึ้น

ในการศึกษาส่วนแรกด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินที่ใช้ประเมินพฤติกรรมด้านการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหวนั้นอาจทำได้โดยการเจาะหลุมสำรวจภาคสนาม ซึ่งสามารถได้ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ค่อนข้างแม่นยำ อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติสูงมากและใช้เวลานาน จึงไม่สามารถทำการเจาะสำรวจหลาย ๆ ตำแหน่งได้ ในการศึกษาจึงทำการประยุกต์วิธีสำรวจภาคสนามโดยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของผิวดินในระดับต้ำที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration หรือ Microtremor) โดยไม่ต้องเจาะหลุม เพื่อการสำรวจที่ตำแหน่งต่าง ๆ จำนวนมากในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวที่สำคัญของประเทศ คือ กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียงที่รวมจังหวัดกาญจนบุรี และพื้นที่ในเขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่และบริเวณใกล้เคียง โดยทำการวิเคราะห์เป็นค่าคาบอิทธิพลหลัก (T_p) และความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก (V_s) ซึ่งมีตำแหน่งสำรวจ 103 ตำแหน่งที่จังหวัดเชียงใหม่และบริเวณใกล้เคียง และ 174 ตำแหน่งในพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง ผลการสำรวจภาคสนามที่สำคัญคือความเร็วคลื่นเฉือน ซึ่งใช้แสดงเพื่อการเปรียบเทียบของแต่ละพื้นที่ด้วยค่าเฉลี่ยถึงระดับลึก 30 เมตร (V_{s30})

ผลการศึกษาสำหรับพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และบริเวณใกล้เคียงพบว่า พื้นที่ที่มีค่า V_{S30} ต่ำที่สุดอยู่บริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษา คือบริเวณบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำปิง โดยมีค่าต่ำสุดคือ 230 เมตรต่อวินาที และมีแนวโน้มของค่า V_{S30} ที่เพิ่มสูงขึ้นในพื้นที่ห่างออกจากบริเวณแม่น้ำปิงโดยค่าสูงสุดอยู่ที่ตอนเหนือของพื้นที่ศึกษา คือบริเวณเทศบาลตำบลดอยสะเก็ด มีค่าประมาณ 560 เมตรต่อวินาที ตามลักษณะพื้นที่เปลี่ยนแปลงจากพื้นที่ราบเข้าสู่พื้นที่เชิงเขา และเมื่อพิจารณาค่า T_p พบว่าบริเวณพื้นที่ที่เป็นชั้นดินอ่อนอยู่ในบริเวณตอนกลางใกล้กับแม่น้ำปิง โดยค่า T_p สูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.73 วินาที ส่วนบริเวณที่เป็นชั้นดินแข็งอยู่ในบริเวณทิศตะวันออกไปจนถึงทิศตะวันออกเฉียงเหนือที่อำเภอดอยสะเก็ด รวมถึงบริเวณบางส่วนของจังหวัดลำพูนทางทิศใต้ โดยค่า T_p ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.12 วินาที

สำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง ผลการศึกษาพบว่าชั้นดินบริเวณอ่าวไทย โดยเฉพาะเขตจังหวัดสมุทรปราการมีค่า V_{S30} ต่ำที่สุด ประมาณ 70 เมตรต่อวินาที และค่า T_p มีค่ายาวที่สุดประมาณ 1.1 วินาที เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมากที่สุด ส่วนในเขตกรุงเทพมหานครพบว่าค่า V_{S30} ประมาณ 100 ถึง 170 เมตรต่อวินาที และ T_p มีค่าประมาณ 0.7 ถึง 1.1 วินาที ซึ่งพื้นที่ตอนกลางของกรุงเทพมหานครมีค่า V_{S30} ประมาณ 140 ถึง 160 เมตรต่อวินาที พื้นที่ด้านตะวันออกเช่น เขตมีนบุรี หนองจอก ลาดกระบังมีค่า V_{S30} ประมาณ 100 ถึง 140 เมตรต่อวินาที พื้นที่ด้านตะวันตกที่ติดกับจังหวัดนครปฐมมีค่า V_{S30} ประมาณ 150 ถึง 170 เมตรต่อวินาที และแนวโน้มของบริเวณในจังหวัดอื่นคือ ค่า V_{S30} เพิ่มขึ้น และ T_p สั้นลงในพื้นที่ขอบของพื้นที่ศึกษาที่ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าลดลง โดยบริเวณตะวันตกเฉียงเหนือของพื้นที่ศึกษาในจังหวัดกาญจนบุรีมีค่า V_{S30} สูงมากกว่า 600 เมตรต่อวินาที และค่า T_p มีค่าสั้นกว่า 0.2 วินาที

ผลของการศึกษา V_{S30} แสดงเป็นแผนที่สำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียงดังรูปที่ 1 และสำหรับพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และบริเวณใกล้เคียงแสดงดังรูปที่ 2 และภาพรวมของค่า T_p และ V_{S30} ที่สำรวจได้ในแต่ละจังหวัด แสดงดังรูปที่ 3

จากข้อมูลการสำรวจภาคสนาม ได้นำไปใช้จัดทำเป็นแผนที่เพื่อแบ่งเขตย่อยตามลักษณะที่อาจตอบสนองต่อแผ่นดินไหวคล้ายคลึงกันด้วยค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับ 90 ถึง 100 เมตร และสร้างแบบจำลองของชั้นดินตามข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนของแต่ละกลุ่มย่อยเพื่อทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวด้วยหลักการเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ ผลการพิจารณา Transfer function ของพื้นที่แต่ละกลุ่มพบว่า สำหรับพื้นที่ที่มีความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยต่ำ มีแนวโน้มที่มีค่ากำลังขยายคลื่นมากกว่า คาบการสั่นหลักยาวกว่า และช่วงคาบการสั่นที่เกิดการขยายคลื่นได้กว้างขึ้น เมื่อเทียบกับพื้นที่ที่มีความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยสูง

จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวสำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง เพื่อการเปรียบเทียบและเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ. 1302) โดยทำการจัด

กลุ่มพื้นที่ย่อยใหม่และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบและวิจารณ์ผลความแตกต่างกับมาตรฐาน มยผ. 1302 ซึ่งพบว่า การแบ่งกลุ่มพื้นที่ใหม่ให้ค่าที่มากกว่า น้อยกว่า หรือใกล้เคียงกับค่าจากการแบ่งพื้นที่ตาม มยผ.1302 ซึ่งแสดงถึงแนวทางที่ควรปรับปรุงมาตรฐานให้มีความสอดคล้องกับสภาพจริงมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของการจำลองคุณสมบัติด้านความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดินเพื่อประเมินลักษณะของการสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหวที่ผิวพื้นดิน และวิจารณ์ผลที่ทำให้เกิดความแตกต่าง โดยผลที่ได้เพื่อสร้างความเข้าใจเพิ่มเติมและบ่งชี้ถึงประเด็นที่ควรมีการศึกษาเพื่อการพัฒนาการออกแบบด้านทานแผ่นดินไหวให้เหมาะสมยิ่งขึ้น ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปของ Transfer function ของแต่ละแบบจำลอง และกำลังขยายคลื่นจากความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม รวมถึงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลจากการตรวจวัดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวจริงซึ่งพบความสอดคล้องดีของผลเมื่อใช้แบบจำลองระดับความลึกชั้นหินประมาณ 400 เมตร ที่สถานีตรวจวัด และในส่วนสุดท้ายคือ การศึกษาวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ในการประยุกต์ใช้กับปัญหาแบบ 2 มิติเพื่อใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองชั้นดินที่บริเวณขอบแอ่งกรุงเทพฯ ภายหลังจากที่มีผลของระดับความลึกของชั้นหินที่ชัดเจนในอนาคต

งานวิจัยในส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอาคารสูงประมาณ 5 ชั้น และมีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่งหรือแนวราบจำนวนทั้งสิ้น 11 หลัง โดยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ด้วยอุปกรณ์ที่มีความไวสูง จากนั้นจึงนำค่าที่ตรวจวัดได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์อันได้แก่ ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่น และอัตราส่วนความหน่วง

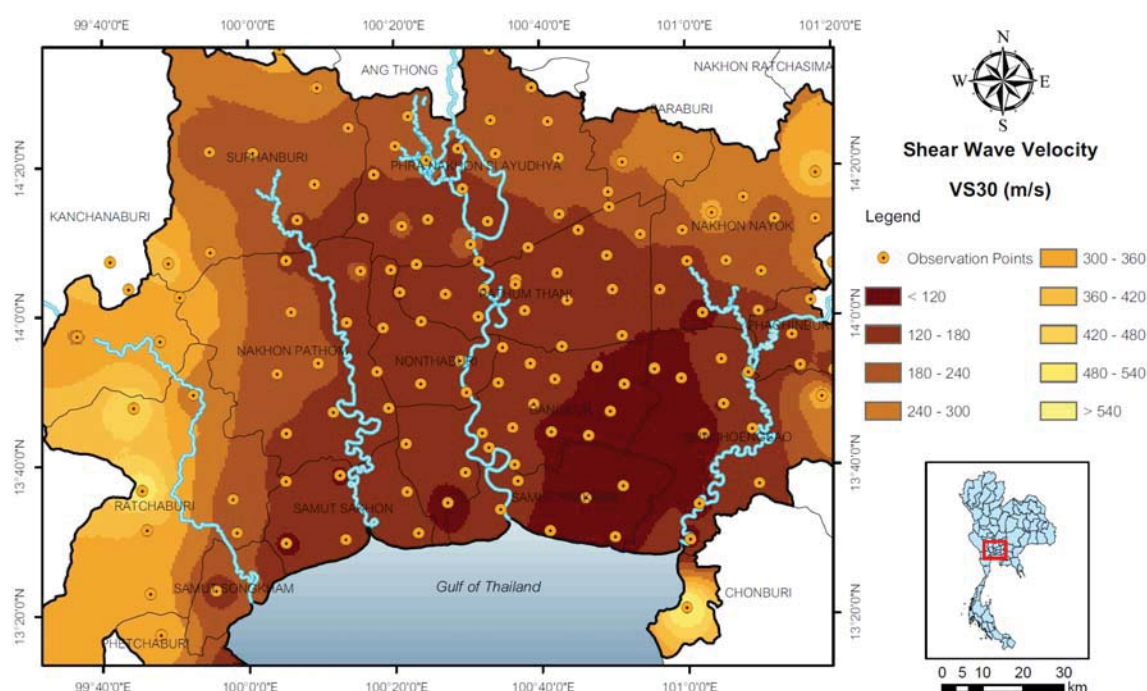
การดำเนินงานในงานวิจัยนี้ได้พบปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจวัด เช่น ความคลาดเคลื่อนในการวางอุปกรณ์ตรวจวัด ข้อจำกัดในการติดตั้งเครื่องขยายอาคาร และข้อจำกัดในการหาค่าอัตราส่วนความหน่วงที่แม่นยำ ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางแก้ไขโดยการพัฒนาอัลกอริทึมขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาเหล่านั้น รวมถึงประยุกต์ใช้อัลกอริทึม System Realization Information Matrix ที่เหมาะสมกับการวัดอัตราส่วนความหน่วงมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ด้วย ถึงแม้บางปัญหายังไม่สามารถแก้ไขได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามในภาพรวมทั้งหมด กระบวนการตรวจวัดสามารถบรรลุวัตถุประสงค์หลักของการศึกษา นั่นคือการได้มาซึ่งค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารเตี้ยถึงสูงปานกลางประมาณ 5 ชั้น

จากผลการศึกษาความถี่ธรรมชาติของอาคารทั้งสิ้น 11 หลัง พบว่ามีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าสูตรประมาณค่าความถี่ธรรมชาติตามมาตรฐาน มยผ. 1302 ไม่มากนักซึ่งสูตรประมาณค่าความถี่ธรรมชาติดังกล่าวได้พัฒนามาจากงานวิจัยในอดีตที่ศึกษากลุ่มอาคารที่ค่อนข้างสูงและมีรูปทรงและการตอบสนองแผ่นดินไหวอย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งค่าที่กำหนดเป็นค่าที่ประมาณให้ความถี่ธรรมชาติสูงกว่าค่าเฉลี่ย ถึงแม้การศึกษาครั้งนี้จะเป็นกลุ่มอาคารที่สูงประมาณ 5 ชั้นและความไม่สม่ำเสมออยู่ แต่สูตรประมาณค่าดังกล่าวก็ยังสอดคล้องกับพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอาคารกลุ่มนี้ในระดับที่ยอมรับได้ ดังรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 สำหรับค่าอัตราส่วนความหน่วง จากการใช้อัลกอริทึมที่ทันสมัย

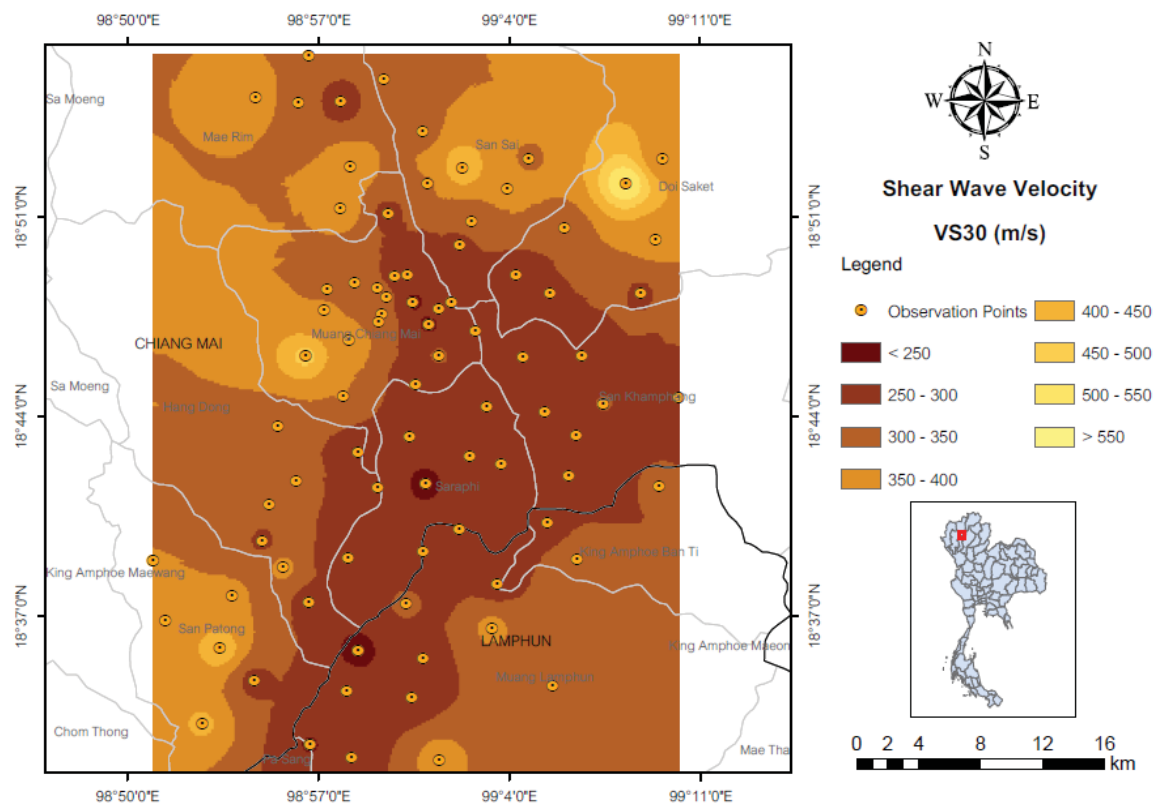
มากขึ้น ทำให้เสนอค่าประมาณค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารเมื่อสั่นอิสระเท่ากับ 2% ซึ่งเป็นค่าโดยเฉลี่ยจากทุกอาคารที่ทำการตรวจวัดซึ่งมีลักษณะการก่อสร้างคล้ายคลึงกัน

นอกจากนี้แล้ว ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ขึ้นมาเพื่อศึกษาพฤติกรรม 3 มิติของอาคาร เพื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ อาจให้ผลที่แตกต่างจากพฤติกรรมจริงของอาคารได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองนั้นด้วย การตรวจวัดพฤติกรรมอาคารจึงมีความสำคัญอย่างมากหากต้องการประเมินพฤติกรรมของอาคารให้ใกล้เคียงความจริงที่สุด

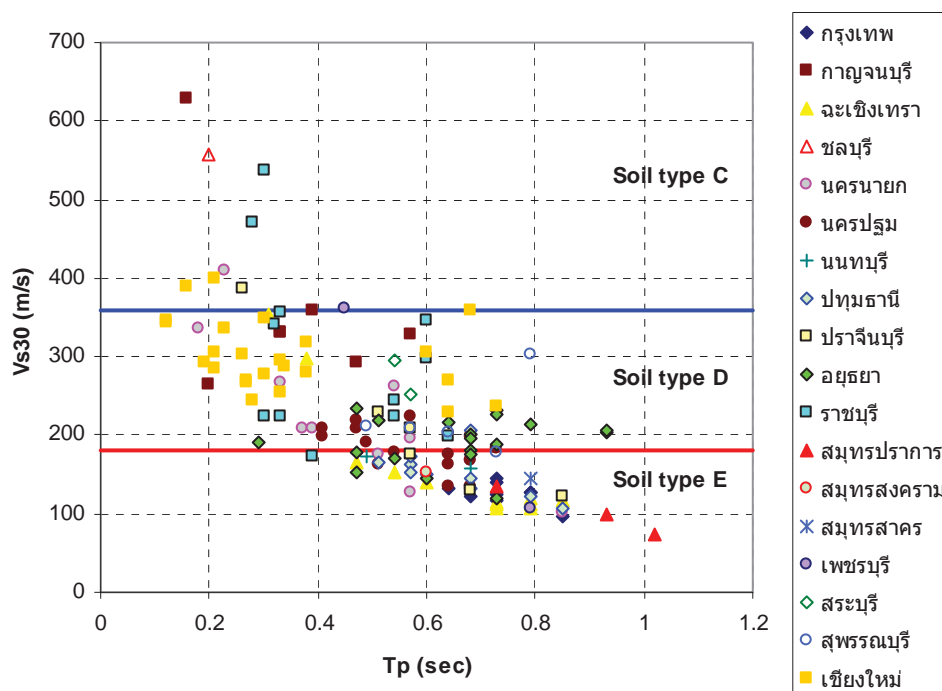
ข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ การนำข้อมูลด้านพฤติกรรมด้านการตอบสนองของชั้นดินไปใช้ปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบสำหรับพื้นที่ศึกษา รวมทั้งวางแผนการศึกษาเพื่อการปรับปรุงสำหรับพื้นที่อื่นด้วยการสำรวจและวิเคราะห์เพิ่มเติม และทำการสำรวจระดับชั้นหินของแอ่งดินพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพื่อข้อมูลที่ถูกต้องยิ่งขึ้นสำหรับการขยายคลื่นในช่วงคาบการสั่นยาวที่ส่งผลมากกับกลุ่มอาคารสูง และการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคารรูปแบบอื่นจากการตรวจวัดและวิเคราะห์แบบจำลองควบคู่กัน



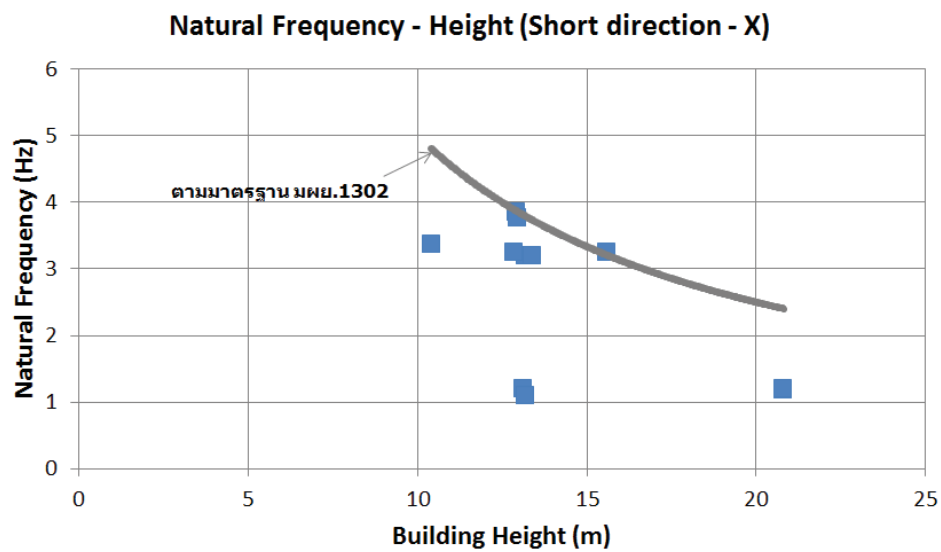
รูปที่ 1. แผนที่ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร สำหรับกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง



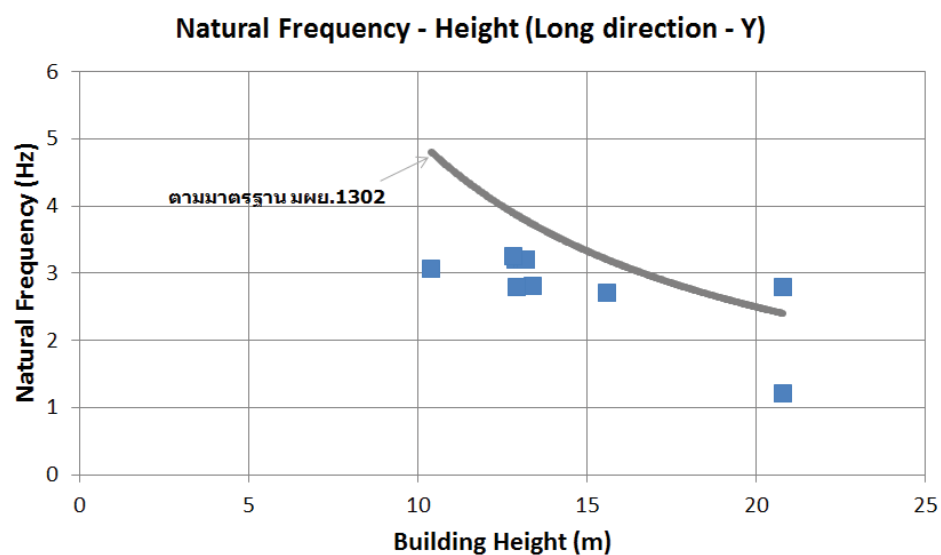
รูปที่ 2. แผนที่ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร สำหรับจังหวัดเชียงใหม่และบริเวณใกล้เคียง



รูปที่ 3. ค่า V_{s30} และ T_p สำหรับพื้นที่สำรวจในจังหวัดต่าง ๆ



รูปที่ 4. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติ-ความสูงอาคาร ทิศทางด้านสั้น



รูปที่ 5. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติ-ความสูงอาคาร ทิศทางด้านยาว

บทคัดย่อ

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ทั้งของชั้นดินและโครงสร้างมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการกำหนดคุณลักษณะของแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่ตั้ง ซึ่งส่งผลสืบเนื่องต่อผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแผ่นดินไหว ดังนั้นการออกแบบต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยเหล่านี้ไว้ด้วย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งสำหรับบริเวณที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวและการศึกษาคูณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถใช้ในการประเมินความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวแบบแบ่งเขตย่อยสำหรับพื้นที่ศึกษา

ในงานส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งจากการตรวจวัดภาคสนามแบบ Microtremor โดยดำเนินการเพื่อจำแนกคุณลักษณะของชั้นดินเพื่อการประเมินระดับความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นและนำไปจัดทำเป็นแผนที่แบ่งเขตย่อย โดยการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดินด้วยเทคนิคการตรวจวัดแบบ 1 จุด เพื่อวิเคราะห์ค่าคาบอิทธิพลหลัก (T_p) และใช้เทคนิคการตรวจวัดแบบหลายจุดพร้อมกันเพื่อวิเคราะห์แบบ Spatial Autocorrelation (SPAC) สำหรับการสำรวจค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน (V_s) โดยดำเนินการกับ 103 ตำแหน่งในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และบริเวณใกล้เคียง และ 174 ตำแหน่งในพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง แล้วจำแนกชั้นดินตามค่า T_p และ V_s

ลักษณะการแปรเปลี่ยนของคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งเป็นไปอย่างชัดเจน โดยค่า T_p และ V_s เฉลี่ยที่ระดับ 30 เมตร (V_{s30}) มีค่าแตกต่างกันอย่างมากในพื้นที่ศึกษา ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และบริเวณใกล้เคียงมีค่า V_{s30} ต่ำสุดประมาณ 230 เมตรต่อวินาทีและ T_p ยาวที่สุดประมาณ 0.7 วินาทีที่บริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำปิง และดินมีลักษณะแข็งมากขึ้นด้วยค่า V_{s30} สูงสุดประมาณ 560 เมตรต่อวินาทีและ T_p สั้นที่สุดประมาณ 0.12 วินาทีที่บริเวณตอนเหนือและตะวันตกของพื้นที่ศึกษา สำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง พบว่าพื้นที่เลียบริมอ่าวไทยและบริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของพื้นที่ศึกษามีค่า V_{s30} ต่ำสุดประมาณ 70 เมตรต่อวินาทีและ T_p ยาวที่สุดประมาณ 1.1 วินาที และ V_{s30} สูงสุดประมาณ 600 เมตรต่อวินาทีและ T_p สั้นที่สุดประมาณ 0.2 วินาทีที่บริเวณตอนเหนือและตะวันตกและตะวันออกที่เป็นขอบของแอ่งดินอ่อน

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินโดยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าใช้ศึกษาลักษณะ Transfer function และอธิบายพฤติกรรมด้านการขยายขนาดคลื่นในแต่ละพื้นที่ที่พิจารณาเป็นโซนย่อย สำหรับโซนที่มีค่า V_s ต่ำพบว่ามีกำลังขยายสูงและคาบการสั่นหลักยาว นอกจากนี้ยังพบการขยายขนาดคลื่นในช่วงคาบการสั่นยาวตามคุณลักษณะของดินอ่อน และเมื่อ V_s เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ คาบการสั่นหลักสั้นลง กำลังขยายลดลง และไม่ปรากฏผลการขยายคลื่นในช่วงคาบการสั่นยาว

ผลการเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมจากการศึกษานี้กับค่าที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างและความสอดคล้องกันในแต่ละโซนย่อย และแนวทางที่ต้องพัฒนามาตรฐาน

แบบจำลองของชั้นดินสำหรับแอ่งกรุงเทพมหานครสร้างขึ้นเพื่อการศึกษาผลของการจำลองคุณสมบัติของชั้นดินต่อลักษณะการขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหว ผลการศึกษาแสดงในรูปของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวตัวอย่าง และวิจารณ์ผลในด้านการขยายคลื่นและคาบการสั่นหลัก โดยพบว่ากำลังขยายสูงสุดคือประมาณ 6 เท่าเกิดขึ้นที่คาบการสั่นประมาณ 1.0 วินาทีในแบบจำลองของชั้นดินด้วยระดับความลึกชั้นหินประมาณ 160 ถึง 300 เมตร ส่วนแบบจำลองที่ชั้นหินมีความลึกมากประมาณ 400 ถึง 700 เมตร มีผลของกำลังขยายสูงในช่วงคาบยาวประมาณ 2 ถึง 3 วินาทีอยู่ด้วย และมีการเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์กับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวซึ่งพบความสอดคล้องดีของผลเมื่อใช้แบบจำลองระดับความลึกชั้นหินประมาณ 400 เมตร ที่สถานีตรวจวัด และงานวิจัยนี้ได้แสดงแนวทางในการประยุกต์ใช้กระบวนการไฟไนต์อีลิเมนต์จากโปรแกรมทางวิศวกรรมโครงสร้างเพื่อการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 2 มิติ ซึ่งได้แสดงถึงแนวทางใช้งานเพื่อการศึกษาผลกระทบของขอบแอ่งในอนาคต

งานในส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอาคารสูงประมาณ 5 ชั้นและมีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่งหรือแนวราบจำนวนทั้งสิ้น 11 หลัง โดยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ด้วยอุปกรณ์ที่มีความไวสูง จากนั้นจึงนำค่าที่ตรวจวัดได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์อันได้แก่ ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่น และอัตราส่วนความหน่วง

กระบวนการตรวจวัดในงานวิจัยนี้ได้พบข้อจำกัดในการตรวจวัดเช่นความคลาดเคลื่อนในการวางอุปกรณ์ตรวจวัด ข้อจำกัดในการติดตั้งเครื่องเขย่าอาคาร และการหาค่าอัตราส่วนความหน่วงอย่างแม่นยำ ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางแก้ไขโดยการพัฒนาอัลกอริทึมขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาเหล่านั้น รวมถึงประยุกต์ใช้อัลกอริทึม System Realization Information Matrix ที่เหมาะสมกับการวัดอัตราส่วนความหน่วงมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ด้วย ถึงแม้ยังไม่สามารถแก้ไขทุกข้อจำกัดได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามในภาพรวมทั้งหมด กระบวนการตรวจวัดสามารถบรรลุวัตถุประสงค์หลักของการศึกษา นั่นคือการได้มาซึ่งค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารได้ถึงสูงปานกลางประมาณ 5 ชั้น

จากผลการศึกษาความถี่ธรรมชาติของอาคารทั้งสิ้น 11 หลัง พบว่ามีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าสูตรประมาณค่าความถี่ธรรมชาติตามมาตรฐาน มยผ. 1302 ไม่มากนักซึ่งสูตรประมาณค่าความถี่ธรรมชาติดังกล่าวได้พัฒนามาจากงานวิจัยในอดีตที่ศึกษากลุ่มอาคารที่ค่อนข้างสูงและมีรูปทรงและการตอบสนองแผ่นดินไหวอย่างสม่ำเสมอ ถึงแม้การศึกษาครั้งนี้จะเป็นกลุ่มอาคารที่สูงประมาณ 5 ชั้นและมีความไม่สม่ำเสมออยู่ แต่สูตรประมาณค่าดังกล่าวก็ยังสอดคล้องกับพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอาคารกลุ่มนี้ในระดับที่ยอมรับได้ สำหรับค่าอัตราส่วนความหน่วงจากการใช้อัลกอริทึมที่ทันสมัยมากขึ้น ทำให้คณะผู้วิจัยเสนอค่าประมาณค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารเมื่อสันนิษฐานได้ที่ 2% ซึ่งเป็นค่าโดยเฉลี่ยจากทุกอาคารที่ทำการตรวจวัดซึ่งมีลักษณะการก่อสร้างคล้ายคลึงกัน

นอกจากนี้แล้ว ในงานวิจัยนี้ยังได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ขึ้นมาเพื่อศึกษาพฤติกรรม 3 มิติของอาคารว่าสอดคล้องอย่างไรกับผลการตรวจวัด จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์อาจให้ผลที่แตกต่างจากพฤติกรรมจริงของอาคารได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองนั้นด้วย การตรวจวัดพฤติกรรมอาคารจึงมีความสำคัญอย่างมากหากต้องการประเมินพฤติกรรมของอาคารให้ใกล้เคียงความจริงที่สุด

Abstract

Dynamic properties of both sites and structures are the key parameters which can substantially influence the characteristics of ground response caused by earthquake and subsequently govern the structural response. As a result, the local site effects and dynamic characteristics of structures are indispensable to be taken into account for seismic design. In this research, the objectives are to examine site effects of potential seismic risk area and investigate the dynamic properties of buildings. These results are valuable for seismic hazard assessment and further microzonation study in the investigated area.

In the first part of the study, site effects are examined from investigations of site characteristics of subsoil by microtremor techniques. The objective is to characterize subsoils for seismic hazard assessment and microzonation study. The technique of single point observation with Horizontal-to-Vertical spectral ratio (H/V) to estimate the predominant period (T_p) and the technique of array observation with Spatial Autocorrelation (SPAC) for exploration of shear wave velocity (V_s) were conducted for 103 sites in Chiangmai and the vicinity area, and 174 sites in Bangkok and the vicinity area. Site classifications based on T_p and the average V_s are presented.

The variation of the site characteristics can be clearly distinguished where the average of shear wave velocity from the surface to 30-m depth (V_{s30}) and the predominant periods vary significantly within the survey area. In Chiangmai area, the lowest V_{s30} of 230 m/s and longest T_p of 0.7 second were found along Ping river area, while more stiff soil with higher V_{s30} of 560 m/s and shorter T_p of 0.12 second were found in the north and west of the investigated area. In Bangkok area, it was shown that the area along the Gulf of Thailand and the south-east part exhibit very low V_{s30} of 70 m/s and long T_p of 1.1 second, while high V_{s30} of 600 m/s and short T_p of 0.2 second were found in the north, west and east parts which are boundary of the plain.

Seismic site response analyses were conducted using equivalent linear method. The transfer functions obtained from equivalent linear analysis of the soil model for microzonation zones provided amplification characteristics of each area. In the zones of low V_s , high amplification and long predominant period were identified. In addition, amplification in the long period ranges was observed due to characteristics of soft soil layers. The predominant periods became shorter, amplification ratios were decreased, and long period effects were diminished in the zone of high V_s .

Comparison of spectral acceleration obtained by this study with the existing values specified in the current standard of Thailand, DPT 1302, was examined. It was pointed out both discrepancy and agreement of the design spectral acceleration for different zones.

The models of subsoil were constructed based on shear wave velocity in Bangkok to study the effects of subsoil models on modification of ground motions induced from seismic waves. The acceleration response spectral resulted from a set of earthquake waves were presented and examined for their characteristics of amplification and dominant period. The amplification factor of about 6 was found around the period of 1.0 second for the model of 160 to 300 m depth of bedrock. For deeper bedrock model, 400 to 700 m, amplifications in long period ranges of 2 to 3 second were significantly observed. Comparison of results from the analysis and the observed record was made and their good agreement was achieved when using the model of 400 m depth bedrock at the seismometer station. In addition, this study presents an application of 2-dimensional ground response analysis by using finite element analysis software for structural engineering. The applicability of the technique was examined showing its potential for ground response analysis considering basin edge effects.

The second part of the study showed the results of dynamic behaviors of 11 buildings, low-rise and containing some degree of irregularities. The dynamic properties such as natural frequencies, damping ratios, and vibration mode shapes were extracted from their natural ambient vibrations, which were recorded by sensitive velocity sensors.

The process of measuring these dynamic properties had faced some limitations; these were placing the sensors in the right position, installation of a vibration shaker, and extracting the reliable damping ratios. This research applied algorithms to solve those difficulties, especially, the process of extracting the damping ratios by System Realization Information Matrix (SRIM) algorithm, which is a modern time-domain algorithm. Although some limitations still remain technically unsolved, the main objective of the research, i.e. the extraction of dynamic properties of mid-rise irregular buildings, has been accomplished.

Measured natural frequencies from 11 buildings shows that they are close to, or lower than in some cases, the approximated values from a formula given in the seismic design standard of Thailand. Although that formula was derived from regular high-rise buildings, it is still applicable to those mid-rise irregular buildings in this research. For the damping ratios extracted by SRIM algorithm, the damping ratio of 2%, which is the average measured value from all 11 buildings, is recommended for these mid-rise buildings.

This research also compared the measured behaviors of a real building with its three dimensional behaviors predicted by finite element analysis. It was found that the finite element model may not represent the real behaviors accurately. These differences were caused by some assumptions in the modeling process. This evidence shows that measurement of dynamic properties is really important to predict the real response of buildings.

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: RDG5330026

ชื่อโครงการ: การแบ่งเขตแผ่นดินไหวอย่างละเอียดด้วยการศึกษาคูณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง

ชื่อนักวิจัย: นคร ภู่วโรดม¹ ชีรพงศ์ จันทรเพ็ง² และ เป็นหนึ่ง วานิชชัย³

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

e-mail address: pnakhorn@engr.tu.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: สิงหาคม 2553 - เมษายน 2556

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งและคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่มีผลต่อลักษณะของแผ่นดินไหวและผลตอบสนองของอาคาร งานหลักส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งจากการตรวจวัดภาคสนามแบบ Microtremor ซึ่งเป็นการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน เพื่อวิเคราะห์ค่าคาบอิทธิพลหลัก (T_p) ด้วยวิธี H/V spectral ratio และวิเคราะห์แบบ Spatial Autocorrelation (SPAC) สำหรับการสำรวจความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน (V_s) โดยผลการศึกษา 103 ตำแหน่งในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และบริเวณใกล้เคียงพบว่า V_{s30} เฉลี่ยที่ระดับ 30 เมตร (V_{s30}) มีค่าต่ำสุดประมาณ 230 เมตรต่อวินาทีและ T_p ยาวสุดประมาณ 0.7 วินาทีที่บริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำปิง และค่า V_{s30} สูงสุดประมาณ 560 เมตรต่อวินาทีและ T_p สั้นสุดประมาณ 0.12 วินาทีที่บริเวณตอนเหนือและตะวันตกของพื้นที่ศึกษา ส่วนผลการศึกษาใน 174 ตำแหน่งในพื้นที่กทม.และจังหวัดใกล้เคียงพบว่า พื้นที่เลียบอ่าวไทยและบริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของพื้นที่ศึกษามีค่า V_{s30} ต่ำสุดประมาณ 70 เมตรต่อวินาทีและ T_p ยาวสุดประมาณ 1.1 วินาที และ V_{s30} สูงสุดประมาณ 600 เมตรต่อวินาทีและ T_p สั้นสุดประมาณ 0.2 วินาทีที่บริเวณขอบแอ่งดินอ่อน จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินโดยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าเพื่อแบ่งพื้นที่เป็นโซนย่อยตามพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดิน แสดงผลการเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบของประเทศ (มยผ. 1302) รวมทั้งเริ่มศึกษาผลของชั้นดินลึกมากในแอ่งดินอ่อนกทม.ที่พบว่ามีผลกำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวสูงในช่วงคาบยาวประมาณ 2 ถึง 3 วินาที และมีการเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ชั้นดินกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวจริงซึ่งพบความสอดคล้องดี งานในส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอาคารสูงไม่เกิน 5 ชั้นและความไม่สม่ำเสมอจำนวนทั้งสิ้น 11 หลังด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือน และสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรม 3 มิติของอาคาร ซึ่งในการวิจัยได้เสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาความคลาดเคลื่อนในการวางห้ววัดและการหาค่าอัตราส่วนความหน่วงที่แม่นยำ ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปคือ การนำผลไปใช้ในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบ การขยายพื้นที่การศึกษาและสำรวจชั้นดินในระดับลึกมากขึ้นกับแอ่งดินอ่อนกทม. และการปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์อาคารให้มีความถูกต้องมากขึ้น

คำหลัก: แผ่นดินไหว คุณสมบัติบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร การสั่นขนาดเล็ก การตรวจวัดการสั่นไหว

Abstract

Project Code: RDG5330026

Project Title: Seismic Microzonation by Investigation of Local Site Characteristics

Investigators: Nakhorn Poovarodom¹ Theeraphong Chanpheng² Pennung Warnitchai³

¹Faculty of Engineering Thammasat University ²Faculty of Engineering Kasetsart University

³Asian Institute of Technology

e-mail address: pnakhorn@engr.tu.ac.th

Project Duration: August 2010 – April 2013

In this research, the objectives are to examine seismic site effects and dynamic properties of buildings which can substantially influence the characteristics of ground shaking and structural response. In the first part, site effects were studied from characteristics of subsoil using microtremor observation techniques to estimate the predominant period (T_p) by H/V spectral ratio and the shear wave velocity (V_s) by Spatial Autocorrelation (SPAC) method. The results of 103 sites in Chiangmai area show that the average of shear wave velocity from the surface to 30-m depth (V_{s30}) is lowest of 230 m/s and T_p is longest of 0.7 second along Ping river area. More stiff soil with higher V_{s30} of 560 m/s and shorter T_p of 0.12 second was found in the north and west parts of the investigated area. In 174 sites in Bangkok area, it was shown that the area along the Gulf of Thailand and the south-east part exhibit very low V_{s30} of 70 m/s and long T_p of 1.1 second, while high V_{s30} of 600 m/s and short T_p of 0.2 second were found in the boundary of the plain. Seismic site response analyses were conducted using equivalent linear method to subdivide area having similar site effects, or microzonation. Comparison of spectral acceleration obtained in this study with the current standard of Thailand, DPT 1302, was presented. Deep basin effects of Bangkok soft clay were preliminary investigated and the amplifications at long period of 2 to 3 second were indicated. The ground responses from analysis were in agreement with the observed records. The second part investigated dynamic behaviors of 11 buildings, low-rise and containing some degree of irregularities by vibration measurement, and three dimensional behaviors of a model by finite element analysis. The algorithms to correct the effect of error from sensor's directions and the process of extracting accurate damping ratios were discussed. The results from the study are appropriate for an amendment of the current design standard. Further investigations in other cities and deep basin in Bangkok, as well as improvement of model for analysis of building are recommended.

Keywords: Earthquake, Site characteristics of soil, Dynamic properties of building, Microtremor, Vibration measurement

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	i
บทคัดย่อ	vii
Abstract	x
สารบัญ	xiii
1 บทนำ	1-1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1-4
1.3 ระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตของการศึกษา	1-4
2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-1
2.1 ผลของคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งและการแบ่งเขตแผ่นดินไหวอย่างละเอียด	2-1
2.2 การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินโดยการตรวจวัด Microtremor	2-2
2.3 การศึกษาความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศ	2-5
2.4 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	2-8
2.5 โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศ	2-9
3 ทฤษฎีและระเบียบวิธีวิจัย	3-1
3.1 การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน	3-1
3.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นผิวดิน	3-14
3.3 การจำแนกประเภทของดิน	3-17
3.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	3-19
4 ผลการศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง	4-1
4.1 การรวบรวมข้อมูลทางธรณีเทคนิคของพื้นที่ศึกษา	4-1
4.2 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4-1
4.3 ผลของการรวบรวมข้อมูล	4-8
4.4 พื้นที่ศึกษาภาคสนาม	4-25
4.5 ขั้นตอนการวิจัย	4-25
4.6 อุปกรณ์ในการวิจัย	4-27
4.7 การวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก	4-31
4.8 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ SPAC	4-32

4.9 การวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟส	4-35
4.10 การวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือน	4-37
4.11 การเปรียบเทียบผลกับวิธีการสำรวจอื่น	4-38
4.12 การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเส้นเทียบเท่ากับแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ	4-45
4.13 ผลการสำรวจภาคสนามสำหรับคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง	4-46
4.14 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นผิวดิน (Ground Response Analysis)	4-76
4.15 การพัฒนาค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบอาคาร	4-84
4.16 การศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินต่อผล วิเคราะห์การตอบสนองของพื้นดิน	4-96
4.17 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 2 มิติด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	4-105
4.18 แนวทางการพัฒนาแบบจำลอง 2 มิติ สำหรับกรุงเทพฯ	4-107
5 ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	5-1
5.1 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากการตรวจวัด	5-1
5.2 แบบจำลองและคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากการวิเคราะห์ ไฟไนต์อีลีเมนต์	5-66
5.3 การปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	5-71
5.4 บทสรุปสาระสำคัญจากข้อมูลเชิงพลศาสตร์	5-79
6 สรุปผลการศึกษา	6-1
6.1 ผลการศึกษาคูณลักษณะบริเวณที่ตั้งและการวิเคราะห์ผลตอบสนอง ของชั้นดิน	6-1
6.2 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร	6-3
6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป	6-4

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

แผ่นดินไหวคือการสั่นสะเทือนที่พื้นดินเนื่องจากการเคลื่อนตัวอย่างฉับพลันของเปลือกโลก และสามารถก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงที่สุดต่อมวลมนุษย์ เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เคยเกิดในต่างประเทศหลายครั้งทั่วโลกได้สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมาก สำหรับประเทศไทยถึงแม้ไม่เคยเกิดภัยพิบัติร้ายแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวในอดีตมาก่อน 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 และใต้ลงไปเป็นชั้นของดินแข็ง ซึ่งมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงสภาพดินในลักษณะนี้สามารถขยายคลื่นแผ่นดินไหวได้หลายเท่าตัว ดังนั้น จึงอาจเกิดผลกระทบจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในระยะไกลได้

ผลกระทบจากแผ่นดินไหวทำให้เกิดความเสียหายต่ออาคารและสิ่งปลูกสร้างที่บริเวณหนึ่งด้วยระดับความรุนแรงที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการคือ (1) ระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของพื้นดิน ณ บริเวณที่ตั้ง โดยในส่วนนี้เป็นผลมาจากหลายองค์ประกอบ และองค์ประกอบหลักคือ คุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งอาคาร (Local site characteristics หรือ Local site effects) ซึ่งค่าที่สำคัญที่จำเป็นต่อการศึกษาค่าค่าคาบธรรมชาติ หรือคาบอิทธิพลหลัก (Natural Period or Predominant Period) และ ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) ของชั้นดิน รวมทั้งลักษณะทางภูมิประเทศและธรณีเทคนิคอื่น ๆ ของบริเวณนั้น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้น ชั้นดินอาจขยายขนาดคลื่นและเพิ่มระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวได้โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นชั้นดินอ่อน และ (2) คุณลักษณะของอาคารด้านการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว หรือคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ตามหลักของพลศาสตร์โครงสร้างที่อาคารอาจตอบสนองรุนแรงหากอาคารนั้นมีจังหวะการสั่นตามธรรมชาติของตัวเอง (หรือคาบธรรมชาติ) ใกล้กับคาบการสั่นหลักของคลื่นแผ่นดินไหว รวมทั้งอาคารอาจเกิดรูปแบบการ

ตอบสนองด้วยลักษณะเฉพาะ เช่นการบิดตัว หรือการที่เกิดแรงในบางชั้นส่วนชั้นสูงมาก หากมีลักษณะการกระจายของมวลและความแข็งแกร่งของอาคารที่ไม่สม่ำเสมอตลอดโครงสร้างอาคาร ด้วยปัจจัยหลัก 2 ประการดังกล่าวนี้ แผ่นดินไหวสามารถทำให้เกิดผลกระทบที่รุนแรงที่บริเวณหนึ่ง ๆ และกับกลุ่มอาคารหนึ่ง ๆ ได้ ซึ่งมีตัวอย่างสำคัญคือเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ประเทศเม็กซิโกเมื่อวันที่ 19 กันยายน ค.ศ. 1985 โดยมีศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ห่างจากเมืองเม็กซิโกซิตีประมาณ 350 กิโลเมตร ซึ่งบริเวณของเมืองเม็กซิโกซิตีตั้งอยู่บนชั้นดินที่เคยเป็นทะเลสาบในอดีต โดยมีชั้นดินอ่อนหนาวางตัวเหนือชั้นดินแข็งทำให้เมื่อเกิดแผ่นดินไหว มีการขยายคลื่นแผ่นดินไหว ส่งผลให้เกิดความเสียหายรุนแรงอย่างมาก ซึ่งต่างจากฝั่งตะวันตกเฉียงใต้ที่ตั้งอยู่บนชั้นดินแข็งเชิงเขาและมีความเสียหายน้อยกว่าเนื่องจากมีลักษณะทางธรณีวิทยาที่ต่างกันแม้จะอยู่ในบริเวณเมืองเดียวกันก็ตาม และอาคารที่ได้รับความเสียหายเป็นกลุ่มอาคารที่มีค่าคาบธรรมชาติใกล้เคียงกับค่าคาบการสั่นหลักของคลื่นแผ่นดินไหวที่ถูกขยายนั้น จากเหตุการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และคุณสมบัติของชั้นดินบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อการประเมินผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหวต่อโครงสร้าง

ในด้านการป้องกันภัยพิบัติเนื่องจากแผ่นดินไหวจึงเกี่ยวข้องกับการพิจารณา 2 ประเด็นหลัก คือ ความปลอดภัยของโครงสร้างที่ต้องต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว และระดับการสั่นสะเทือนของบริเวณที่ตั้ง ในการปฏิบัติคือการกำหนดเป็นมาตรฐานการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว โดยที่ผลการตอบสนองของอาคารได้ถูกกำหนดให้มีทางประเมินไว้โดยใช้คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่พื้น ถูกกำหนดด้วยขนาดของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้นและคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งอาคารนั้น และสำหรับบริเวณสำคัญที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว เช่น ในเขตเมืองใหญ่ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการพิจารณาจำแนกความเสี่ยงภัยออกเป็นเขตย่อยอย่างละเอียด เพื่อประเมินระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นและพฤติกรรมของอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหวอย่างถูกต้องที่สุด ซึ่งการดำเนินการดังกล่าว คือ การแบ่งเขตแผ่นดินไหวอย่างละเอียด (Seismic Microzonation)

ในปัจจุบัน การศึกษาวิจัยด้านแผ่นดินไหวในประเทศไทยได้ดำเนินการต่อเนื่องจนได้ผลการวิจัยที่สามารถสรุปความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในระดับโดยรวมของประเทศได้ ดังนั้นจึงได้มีการออกมาตรการเพื่อการป้องกันภัยพิบัติที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยมาตรการที่เป็นรูปธรรมชัดเจนคือการออกกฎกระทรวงเพื่อกำหนดแบบอาคารต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวที่เริ่มบังคับใช้ตั้งแต่ พ.ศ. 2540 และมีการปรับปรุงใน พ.ศ.2550 รวมทั้งการพัฒนาเป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบอาคารในปี พ.ศ.2552 โดยในการพัฒนาเหล่านี้จำเป็นต้องมีการศึกษาข้อมูลเฉพาะของประเทศในหลายองค์ประกอบ ที่รวมถึงคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน ที่จำเป็นต่อการประเมินระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว โดยงานวิจัยในโครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยในระยะที่ 1 “การตรวจวัดและศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Properties) ของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร” และระยะที่ 2 “คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินเพื่อการแบ่งเขต

ความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่” ภายใต้การสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้ศึกษาพัฒนาด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและชั้นดินที่มีผลต่อระดับแรงและการตอบสนองของอาคารต่อแรงแผ่นดินไหว ข้อมูลที่ได้ส่วนหนึ่งได้นำไปใช้ในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในประเทศไทยแล้ว อย่างไรก็ตาม ปัญหาวิจัยที่สำคัญต่อการพัฒนาในด้านนี้ยังคงเหลืออยู่อีกในหลายประเด็น โดยมีประเด็นหลัก ดังนี้

ก. การศึกษาด้านคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน โครงการวิจัยระยะที่ 2 ได้พัฒนาเทคนิคที่สามารถดำเนินการศึกษาได้อย่างรวดเร็ว และได้เริ่มต้นสำรวจกับพื้นที่ศึกษาที่สำคัญด้านความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศ อย่างไรก็ตาม ยังมีพื้นที่ที่ยังไม่ได้ศึกษาอีกจำนวนมาก จึงควรมีการขยายพื้นที่ศึกษาให้มากขึ้น และได้จำนวนข้อมูลหลายบริเวณให้มากพอ เพื่อนำผลไปวิเคราะห์ประเมินกำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ย่อย และจัดทำเป็น แผนที่เขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียด ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งโดยเฉพาะเมืองใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดกาญจนบุรี และพื้นที่อีกหลายส่วนของประเทศ รวมทั้งเพื่อศึกษาปัจจัยอื่นด้านคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินอื่นที่อาจมีผล ได้แก่ ผลจากสภาพภูมิประเทศ (Topographic effect) และผลเนื่องจากขอบของแอ่งชั้นหินใต้ชั้นดิน (Basin edge effect)

ข. การศึกษาด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร เนื่องจากการศึกษาที่ดำเนินการมา มุ่งเน้นเพื่อพัฒนาสูตรการประมาณค่าสำหรับอาคารและกำหนดในมาตรฐานการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว ซึ่งใช้กับอาคารที่มีรูปทรง และคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวอย่างสม่ำเสมอตลอดความสูง จึงได้ดำเนินการศึกษากับอาคารที่เป็นตัวแทนอาคารทั่วไปจำนวนมาก โดยยังไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากรูปทรงหรือลักษณะความไม่สม่ำเสมอ จึงควรมีการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่เป็นผลจากรูปทรงและลักษณะความไม่สม่ำเสมอของอาคาร เพื่อความเข้าใจและปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับพฤติกรรมจริงได้อย่างเหมาะสม

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาผลของคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งที่มีต่อลักษณะและระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวในบริเวณเมืองใหญ่ เพื่อประเมินความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในแต่ละพื้นที่ย่อย แล้วสร้างเป็นแผนที่แบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียด (Seismic Microzonation Map) โดยพื้นที่ที่สนใจศึกษาคือบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ที่เป็นศูนย์กลางของประเทศ มีประชากรและสิ่งปลูกสร้างหนาแน่นที่สุด มีลักษณะเป็นแอ่งดินตะกอนที่ราบขนาดใหญ่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางธรณีเทคนิคบริเวณขอบแอ่งและบริเวณเมืองจังหวัดเชียงใหม่และกาญจนบุรี ที่มีสภาพทางธรณีเทคนิคเป็นเนินเขาสลับกับที่ราบ และเป็นเมืองใหญ่ที่อยู่ใกล้รอยเลื่อนที่มีพลัง เพื่อเป็นตัวแทนของพื้นที่เสี่ยงภัยที่สำคัญของประเทศ และเนื่องจากคณะผู้วิจัย เครื่องมือที่ใช้ และพื้นฐานทฤษฎี มีความเหมาะสมและสามารถที่จะประยุกต์เพื่อใช้ศึกษาด้านการตรวจวัดคุณสมบัติของอาคารได้ รวมทั้งเพื่อประกอบการประเมินความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวให้สมบูรณ์ด้วยการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคาร งานวิจัยนี้

จึงกำหนดวัตถุประสงค์เพิ่มเติมคือเพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงของแผ่นดินไหวของอาคารที่มีรูปแบบที่เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายรุนแรงและมีการใช้งานจำนวนมาก ซึ่งจากการศึกษาทั้งสองข้างต้นจะช่วยในการจัดกลุ่มความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้ทั้งปัจจัยจากลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวและผลตอบสนองของอาคารที่เป็นกลุ่มตัวอย่างศึกษา ผลการศึกษาที่ได้คาดว่าจะประโยชน์ต่อการวางแผนจัดการด้านความเสี่ยงภัยและการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้องสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในประเทศไทยมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- (1) ศึกษาหาความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินบริเวณต่าง ๆ จำนวนมาก ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดกาญจนบุรี ด้วยเทคนิคการตรวจวัดคลื่นผิวดิน
- (2) ศึกษาข้อมูลด้านธรณีเทคนิคและสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา เพื่อการประเมินโอกาสที่จะเกิดผลกระทบต่อการขยายคลื่นแผ่นดินไหว
- (3) วิเคราะห์ผลการตอบสนองของชั้นดินที่ผิวดินเพื่อประเมินกำลังการขยายคลื่นจากแผ่นดินไหว
- (4) จัดทำแผนที่ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวอย่างละเอียดสำหรับพื้นที่ศึกษา จากข้อมูลการตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว
- (5) ศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารเตี้ยถึงสูงปานกลาง ที่มีรูปทรงไม่สม่ำเสมอ ด้วยการตรวจวัดที่มีการกระตุ้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมในการโยกตัวในรูปแบบ 3 มิติ

1.3 ระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยประกอบด้วยการศึกษา 2 เรื่องหลัก คือการศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน และการตรวจวัดอาคาร โดยมีรายละเอียดของวิธีวิจัยดังนี้

- (1) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง คือ ทฤษฎีที่ต้องใช้ในงานวิจัย และทำการเตรียมโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์ตามทฤษฎี รวมทั้งศึกษาและรวบรวมข้อมูลพื้นฐานด้านธรณีเทคนิค และสภาพภูมิประเทศ ของบริเวณที่ทำการการศึกษา โดยรวบรวมจากฐานข้อมูลที่มีอยู่แล้วจากแหล่งต่าง ๆ
- (2) ศึกษาและทดลองใช้เครื่องมือตรวจวัด เครื่องมือที่ใช้ในภาคสนาม เตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล Microtremor สร้างและทดสอบเครื่องมือที่จะใช้เขย่าอาคาร และฝึกอบรมบุคลากร
- (3) วางแผนเพื่อกำหนดตำแหน่งที่จะทำการสำรวจ โดยทำการกำหนดตำแหน่งจากการพิจารณาบริเวณที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาทั้งหมด บริเวณที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาต่าง ๆ บริเวณที่มีชุมชนหนาแน่น เป็นต้น และเดินทางไปสำรวจพื้นที่ล่วงหน้าเพื่อการเตรียมการอย่างเหมาะสม
- (4) ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามกลุ่มแรก สำหรับบริเวณต่าง ๆ เพื่อทดสอบความเหมาะสมของวิธีที่จะใช้ศึกษา

- (5) วิเคราะห์ข้อมูลผลการตรวจวัด โดยที่ในแต่ละครั้งที่ได้ทำการเก็บข้อมูลมาได้ จะนำมาวิเคราะห์เพื่อตรวจหาปัญหา ข้อจำกัด ที่อาจเกิดขึ้น และปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัด ก่อนออกไปตรวจวัดภาคสนามอีก จนกระทั่งได้เทคนิคที่สมบูรณ์
- (6) ทำการตรวจวัด และวิเคราะห์ข้อมูล สำหรับพื้นที่สำรวจที่เหลือ ด้วยวิธีที่ได้พัฒนาขึ้น
- (7) วิเคราะห์ผลการศึกษา ทำการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน ของบริเวณที่ทำการสำรวจ โดยค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการสำรวจ และข้อมูลด้านธรณีเทคนิคและสภาพภูมิประเทศที่รวบรวมในขั้นตอนที่ (1)
- (8) ประเมินผลตอบสนองของพื้นดินโดยการวิเคราะห์ จากข้อมูลที่ได้ในขั้นตอน (7) นำมาจัดเป็นกลุ่มพื้นที่เพื่อประเมินกำลังขยาย คาบการสั่นหลัก รวมทั้งการประเมินผลจากข้อมูลด้านธรณีเทคนิคและสภาพภูมิประเทศ ของแต่ละพื้นที่ศึกษา โดยประมวลข้อมูลและแสดงผลด้วยเทคนิค Geographical Information System
- (9) แสดงผลการศึกษาในรูปของแผนที่แสดงระดับความรุนแรงและลักษณะของแผ่นดินไหวที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณ หรือ Microzonation map สำหรับพื้นที่ที่ศึกษา โดยแสดงเป็นแผนที่แสดงค่าคาบอิทธิพลหลัก แผนที่แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือน และ แผนที่แสดงกำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวของชั้นดิน
- (10) ทำการคัดเลือกอาคารเพื่อการศึกษา เพื่อให้อยู่ในกลุ่มที่เป็นตัวแทนของอาคารจำนวนมาก และมีลักษณะของความไม่สม่ำเสมอแบบใดแบบหนึ่งหรือหลายแบบรวมกันอยู่ ได้แก่ ชั้นที่อ่อนแอ ความไม่สม่ำเสมอในระนาบ และ เสาสัน
- (11) ตรวจวัดเพื่อหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร โดยใช้หลักพื้นฐานคือการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารที่อยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ด้วยอุปกรณ์วัดที่มีความไวสูง อย่างไรก็ตาม การตรวจวัดแบบนี้มักมีข้อจำกัดกับอาคารที่ไม่ชะลุดเนื่องจากผลตอบสนองมีค่าในระดับต่ำมาก ผลการตรวจวัดจึงไม่ชัดเจน จึงต้องตรวจวัดแบบมีการกระตุ้นด้วยเครื่องเขย่า (Vibration shaker) เพื่อให้สามารถตรวจพบคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์อย่างชัดเจนได้
- (12) วิเคราะห์หาค่าคาบการสั่น และรูปแบบการสั่นไหว ที่มีลักษณะเฉพาะเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของอาคาร
- (13) ทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ โดยใช้ผลการตรวจวัดเป็นค่าอ้างอิง และปรับแก้แบบจำลองให้เหมาะสม เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมของอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหว
- (14) สรุปผลการวิจัย

1.3.2 ขอบเขตการวิจัย

- (1) พื้นที่ศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งคือ

- พื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (ตามการพิจารณาแอ่งกรุงเทพ ใน มยผ. 1302) ซึ่งครอบคลุมจังหวัด กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรปราการ สมุทรสาคร และพื้นที่รอบนอกคือบางส่วนของจังหวัด สมุทรสงคราม พระนครศรีอยุธยา นครปฐม และฉะเชิงเทรา

- จังหวัดเชียงใหม่ พื้นที่อำเภอเมือง และบางส่วนของอำเภอรอบนอก
- จังหวัดกาญจนบุรี พื้นที่อำเภอเมือง และบางส่วนของอำเภอรอบนอก

(2) ทำการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน วิเคราะห์เพื่อหาค่าคาบอิทธิพลหลักโดยวิธี H/V spectral ratio และหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยวิธี Spatial Autocorrelation (SPAC) จำนวนบริเวณที่ศึกษารวมไม่น้อยกว่า 250 แห่ง โดยเลือกตำแหน่งที่ศึกษาให้กระจายตามความแปรปรวนของสภาพธรณีวิทยา สำหรับบริเวณที่มีสภาพธรณีวิทยาที่ซับซ้อนจะศึกษาละเอียดกว่า

(3) ทำการวิเคราะห์เชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent linear analysis) เพื่อประเมินผลการตอบสนองของพื้น ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ สำหรับพื้นที่ที่มีลักษณะของชั้นดินหนาสม่ำเสมอ และด้วยแบบจำลอง 2 มิติ สำหรับพื้นที่ที่มีความไม่สม่ำเสมอของชั้นดินเช่นบริเวณขอบแอ่งเพื่อการศึกษาผลของขอบของแอ่งชั้นดิน (Basin edge effect) และพิจารณาสภาพภูมิประเทศถึงความเสี่ยงต่อการเกิดผลจากสภาพภูมิประเทศ (Topographic effect) จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(4) ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์อาคารที่สูงไม่เกิน 5 ชั้น และมีลักษณะของความไม่สม่ำเสมอ ได้แก่ ชั้นที่อ่อนแอ ความไม่สม่ำเสมอในระนาบ หรือ เสาสั้น จำนวนไม่น้อยกว่า 10 หลัง

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลของคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งและการแบ่งเขตแผ่นดินไหวอย่างละเอียด

คลื่นแผ่นดินไหวจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนตัวผ่านสภาพธรณีต่าง ๆ จนกระทั่งถึงผิวดินที่ตั้งของอาคาร เส้นทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านจะมีผลอย่างมากในการปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของคลื่น โดยเป็นที่เข้าใจกันทั่วไปว่า ชั้นดินหนามักจะขยายขนาดความรุนแรงของคลื่นได้ แผ่นดินไหวที่ Mexico city เมื่อ 19 กันยายน ค.ศ. 1985 เป็นตัวอย่างสำคัญของความเสียหายรุนแรงจากแผ่นดินไหวระยะไกลที่เกิดจากการขยายตัวเนื่องจากชั้นดินอ่อน Seed และคณะ (1987) อธิบายว่าเมืองเม็กซิโกซิตีตั้งอยู่บนชั้นดินตะกอนหนาเหนือชั้นหิน ผังทางด้านทิศตะวันตกของเมืองตั้งอยู่บนแนวขอบทะเลสาบเก่า ส่วนทางฝั่งตะวันออกตั้งอยู่บริเวณกลางของทะเลสาบเก่า พบว่าความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณกลางทะเลสาบเก่ามีค่าเพียงประมาณ 40 ถึง 90 เมตร/วินาที ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือชั้นหินแข็งมีความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 500 เมตร/วินาที หรือมากกว่า จากการศึกษพบว่าระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนกลับของคลื่นแผ่นดินไหว (Multi Reflection Phenomenon) ซึ่งในชั้นดินอ่อนคลื่นสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปด้านบนได้ง่าย ในขณะที่ชั้นดินแข็งจะมีการสะท้อนกลับของคลื่น คล้ายกับว่าเกิดการดักคลื่นแผ่นดินไหวไว้และสามารถทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ขยายขนาดคลื่นสูงขึ้น และมีระยะเวลาการสั่นนานขึ้น ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจพบบนชั้นดินอ่อนมีคาบการสั่นยาวประมาณ 2 วินาที และมีขนาดสูงสุดมากกว่าค่าที่ตรวจวัดบนชั้นดินแข็งประมาณ 5 เท่า ผลการขยายคลื่นแบบนี้พบอีกในเหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อ 19 ตุลาคม ค.ศ. 1989 ที่ Loma Prieta, California โดยความเสียหายหลักเกิดบริเวณอ่าว San Francisco ที่เป็นดินตะกอนหนาเช่นกัน

นอกจากปัจจัยด้านการขยายคลื่นเนื่องจากชั้นดินอ่อนที่เกิดจากคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ปัจจัยที่สำคัญที่อาจทำให้คลื่นแผ่นดินไหวมีระดับรุนแรงเพิ่มขึ้นได้แก่ ผลจากสภาพภูมิประเทศ (Topographic effect) และผลเนื่องจากขอบของแอ่งชั้นดิน (Basin edge effect) Geli และคณะ (1988) ได้รวบรวมผลจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีผลกระทบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ และการคำนวณเปรียบเทียบโดยสรุปชัดเจนว่าการสั่นสะเทือนจะถูกขยายตัวได้ที่บริเวณยอดของเนินสูง ซึ่งคาบการสั่นสามารถทำนายได้จากการคำนวณแต่ขนาดการขยายคลื่นไม่สามารถคำนวณได้ ถูกต้อง Chávez-García และคณะ (1996 และ 1997) ทำการเปรียบเทียบผลจากการวัดและการคำนวณ ซึ่งจากข้อมูลแผ่นดินไหวเมื่อมาวิเคราะห์ด้วยหลักของ H/V spectral ratio ให้ระดับการขยายคลื่นใกล้เคียงกับการคำนวณ และโต้แย้งข้อสรุปของ Geli และคณะ (1988) เนื่องจากงานของ Geli อาจได้รับผลกระทบจากจุดอ้างอิงที่ไม่ถูกต้อง จึงเสนอว่า วิธี H/V spectral ratio อาจใช้เป็นแนวทางในการประเมินผลจากสภาพภูมิประเทศได้

Kramer (1996) อธิบายผลเนื่องจากขอบของแอ่งชั้นดินไว้ว่า รูปทรงของแอ่งมีผลมากในการสะท้อนและกักคลื่นไว้ภายในชั้นดินในขอบเขตแอ่ง และคลื่นที่เคลื่อนสู่ผิวดินอาจมีความรุนแรง

และระยะเวลาการสั่นสะเทือนนานกว่าการวิเคราะห์ที่คิดเพียงผลของชั้นดิน เช่นการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ (One dimensional analysis) Bard และ Gariel (1986) แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ กับการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ ที่จำลองรูปร่างของขอบแอ่งไปด้วย ซึ่งผลของการวิเคราะห์ช่วงกลางแอ่งได้ผลจากทั้งสองวิธีใกล้เคียงกัน ส่วนบริเวณขอบแอ่งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

ข้อมูลการกระจายตัวของความเสียหายที่แตกต่างกันของบริเวณต่าง ๆ เนื่องจากแผ่นดินไหวในอดีตหลายครั้งแสดงยืนยันว่าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวขึ้นกับคุณลักษณะของชั้นดินอย่างสำคัญ และนำมาสู่แนวคิดในการแบ่งเขตความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวอย่างละเอียด (Seismic Microzonation) และพัฒนาไปสู่คู่มือเพื่อการจัดทำแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวอย่างละเอียด (AFPS 1995, ISSMGE 1999, DRM 2004)

2.2 การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินโดยการตรวจวัด Microtremor

2.2.1 การตรวจวัดแบบ 1 จุด และวิธี H/V spectral ratio

ในการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดิน อาจทำได้โดยการเจาะสำรวจภาคสนาม (Borehole method) ซึ่งสามารถได้ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ค่อนข้างแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติสูงมากและใช้เวลานาน จึงไม่สามารถทำการเจาะสำรวจหลาย ๆ ตำแหน่งได้ การศึกษาอีกวิธีที่สามารถทำได้คือ ใช้การตรวจวัดการสั่นสะเทือนของผิวดินในระดับต่ำที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นจากแรงที่เกิดตามธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนตัวของชั้นดินเอง หรือจากแรงต่างๆบนผิวดิน เป็นต้น การตรวจวัดนี้ต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดในระดับ Micron และสามารถใช้ศึกษาได้ดีแม้ในบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวของชั้นดินด้วยค่าต่ำ ๆ วิธีนี้เรียกว่า Microtremor ซึ่งเสนอโดย Kannai และ Tanaka (อ้างอิงใน Tokimatsu, 1997) โดยมีแนวคิดที่ว่า แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อชั้นดินมีลักษณะแบบสุ่ม และ ชั้นดินมีคุณสมบัติทางพลศาสตร์เฉพาะตัว ดังนั้นเมื่อตรวจวัดผลการสั่นสะเทือนโดยแรงดังกล่าวแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อแปลงสัญญาณวัดให้อยู่ในรูปของการผสมกันของความถี่หลาย ๆ ค่า เรียกว่า Fourier Amplitude Spectrum และกราฟความสัมพันธ์ของ Fourier Amplitude กับความถี่ จะพบเป็นยอดแหลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งแสดงถึง ความถี่หลักในการสั่นหรือ Predominant Frequency ของชั้นดินนั่นเอง เนื่องจากความสะดวกในการปฏิบัติงานเพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน จึงได้มีการศึกษาวิจัยด้านต่างๆ ของวิธี Microtremor อย่างต่อเนื่อง Nakamura (1989) ได้แก้ไขข้อขัดแย้งของวิธีนี้ที่ว่า การตรวจวัดการสั่นสะเทือนในแนวราบนั้นจะแทนคุณลักษณะของดินบริเวณแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวไม่ใช่คุณลักษณะของดินที่บริเวณตรวจวัด เขาจึงได้เสนอวิธีชื่อ H/V Spectrum Ratio โดยทำการลดผลของคุณลักษณะของดินบริเวณแหล่งกำเนิดด้วยด้วยการหารค่า Spectra ของการสั่นสะเทือนในแนวราบด้วย Spectra ของการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง และมีสมมติฐาน คือ

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

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 Spectrum Ratio 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 Spectrum Ratio ทำการวิเคราะห์บันทึกข้อมูลของ Microtremor ใน 4 เมืองที่ต่าง ๆ ของเม็กซิโกและผลที่ได้ก็สอดคล้องกับ Spectrum Ratio โดยวิธีการวัดความเร็วแผ่นดินไหวที่มีการบันทึกไว้

Lermo และ Chavez-Garcia (1994) แสดงให้เห็นว่า H/V Spectrum Ratio ของ Nakamura เป็นวิธีการทำนายผลของคุณสมบัติของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง (Site Effect) แต่อย่างไรก็ตาม สามารถทำนายได้เพียง Fundamental Resonance Peak ของ Transfer Function จากเหตุผลนี้เป็นการสนับสนุนแนวคิดที่ว่าเทคนิคของ Nakamura ว่ามีประสิทธิภาพในการหาผลของคุณสมบัติของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง

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

จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวิธี H/V Spectrum Ratio ของ Nakamura มีความสามารถในการหาค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant period) ของสถานที่ได้ รวมทั้งวิธีดังกล่าวยังเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

2.2.2 การหาความเร็วคลื่นเฉือนด้วยการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation)

การหาความเร็วคลื่นเฉือนด้วยการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation) มีเทคนิคที่ได้พัฒนาและใช้อยู่ 2 วิธีหลัก คือ Frequency–wavenumber spectral method (F-K method) และ Spatial autocorrelation method (SPAC) โดยทั้งสองวิธีมีพื้นฐานของสมมติฐานที่ว่า คลื่นผิวดินมีลักษณะคงตัว ทั้งด้านตำแหน่งและเวลา

วิธี F-K มีรูปแบบการวัด (Array) ที่ไม่แน่นอนจึงต้องใช้จุดที่ทำการตรวจวัดอย่างน้อย 7 จุดพร้อมกัน ซึ่งใช้สำหรับการตรวจวัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่เกิด Rayleigh Wave โดยผู้ที่เสนอวิธีนี้คือ Capon (1969) ในปี 1969 และ Lacos (1969) ในปี 1969 เช่นกัน Tokimatsu (1997) อธิบายวิธีการวัด 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

วิธี SPAC ผู้ที่เสนอวิธีนี้คือ Aki (1957) ในปี 1957 โดยวิธีนี้ต้องทำการวัดพร้อมกัน 4 ถึง 7 จุดถึงจะมีได้ค่าที่ถูกต้องโดยมีรูปแบบการวัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งต้องใช้เครื่องมือและจำนวนคนมากในการทำการตรวจวัดแต่ละครั้ง วิธี SPAC คือการหาความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของคลื่นที่ผิวดินโดยการตรวจวัดการสั่นในแนวดิ่งของคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดินในสภาพธรรมชาติ (ไม่มีการกระตุ้น) โดยพิจารณาว่าคลื่นผิวดินมีองค์ประกอบหลักคือโหมดพื้นฐานของคลื่น Rayleigh การตรวจวัดต้องเป็นแบบหลายตำแหน่งพร้อมกัน (Array) และนำข้อมูลที่วัดพร้อมกันมาหาความสัมพันธ์ (Coherency) ในด้าน ระยะทางและความถี่ของคลื่น แล้วนิยามสัมประสิทธิ์ Spatial Autocorrelation ในรูปของค่าเฉลี่ยของ Coherency จากคลื่นในทิศทางต่าง ๆ และด้วยคุณสมบัติที่ความเร็วเฟสมีค่าต่างกันตามความถี่ของคลื่น (Dispersion) จะได้ว่า สัมประสิทธิ์ Spatial Autocorrelation เป็นฟังก์ชันกับความถี่และความเร็วเฟสของคลื่นด้วยวิธีของการตรวจวัดที่ Array นั้น ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ที่เรียกว่า Dispersion Curve ของชั้นดินขึ้นมา และค่าความเร็วคลื่นเฉือนสามารถวิเคราะห์ได้ต่อไปด้วยการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis) สำหรับแบบจำลองของชั้นดินที่บริเวณศึกษา

Morikawa (2004) ได้ทำการเสนอวิธี 2sSPAC ซึ่งมีพื้นฐานมาจากวิธี SPAC โดยใช้วิธีการตรวจวัดพร้อมกันครั้งละ 2 จุดพร้อมกันโดยกำหนดจุดคงที่ไว้จุดหนึ่งแล้วทำการเปลี่ยนจุดวัดจนครบทุกตำแหน่งซึ่งจะประหยัดทั้งเครื่องมือและจำนวนคนที่ทำการตรวจวัดและการตรวจวัดใช้คาบยาวอยู่ระหว่าง 1-10 วินาที ผลการศึกษาของ Morikawa แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

Phase Velocity กับ ความถี่ (Dispersion Curve) ของวิธี 2sSPAC เปรียบเทียบกับวิธี SPAC และวิธี F-K พบว่ามีค่าที่สอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธี 2sSPAC ที่ใช้วัด Phase Velocity ที่เกิดจาก Rayleigh Wave ต่อมา Abdullah M. Alsamani M. (2004) ได้ใช้วิธี SPAC และ 2sSPAC ทำการประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่เมืองซีกูบะ ประเทศญี่ปุ่น โดยความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการวัด Microtremor มีค่าสอดคล้องกับวิธีเจาะสำรวจดิน (PS Logging) และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากวิธี SPAC และวิธี 2sSPAC มีค่าสอดคล้องกัน

2.3 การศึกษาความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศ

2.3.1 การกำหนดแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวและมาตรฐานการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว

งานวิจัยที่สำคัญด้านแผ่นดินไหวในประเทศไทยในระยะต้นคือจากการศึกษาถึงโครงสร้างธรณีวิทยาและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหวโดย Nutalaya และคณะ ในปี ค.ศ. 1985 ได้ศึกษาลักษณะ Seismo-tectonic ของพื้นที่ของประเทศไทยและประเทศเพื่อนบ้าน โดยได้รวบรวมแผ่นดินไหวในอดีตจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ และแบ่งโซนออกเป็น 12 ส่วน จากนั้น ได้มีงานวิจัยเพื่อประเมินความเสี่ยงภัยของประเทศ ได้แก่ เป็นหนึ่ง และ อาเต (2537) ทำการวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย แสดงเป็นเขตแผ่นดินไหวและค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย ที่สอดคล้องกับรูปแบบของ Uniform Building Code ปี ค.ศ. 1991 โดยใช้ค่าความเร่งสูงสุด (PGA) ที่มีโอกาสเพียง 10% ที่จะมีค่าที่รุนแรงกว่าภายในคาบเวลา 50 ปี

เพื่อการศึกษาผลกระทบจากแผ่นดินไหวเนื่องจากลักษณะของชั้นดินเฉพาะบริเวณ Tuladhar R. (2003) ทำการจำแนกคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยใช้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนในแต่ละชั้นดิน (shear wave velocity profile) ซึ่งประเมินจากสมการประมาณจาก ค่า N-SPT และ Su (Undrained Shear Strength) ที่ได้จากการเจาะสำรวจดิน จากการศึกษาจำแนกประเภทของดินออกเป็น 10 ประเภท และทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินด้วยการวิเคราะห์เชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ (One dimensional equivalent linear analysis) เพื่อประเมินกำลังขยายคลื่นในแต่ละพื้นที่ ผลการศึกษาพบว่าชั้นดินเหนียวหนาบริเวณใกล้อ่าวไทย มีกำลังขยายถึงประมาณ 4-5 เท่าด้วยค่าคาบประมาณ 1-1.5 วินาที ส่วนบริเวณอื่น ที่มีความหนาชั้นดินเหนียวลดลงมีกำลังขยายน้อยกว่าและคาบมากขึ้น

อำนาจ และ สุทธิศักดิ์ (2553) ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยพิจารณาปัจจัย ได้แก่ ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน ระดับความลึกของชั้นเสมือนชั้นหิน ที่เหมาะสมกับแบบจำลอง อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งระดับลึก และคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดิน โดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือนสำหรับพื้นที่ต่าง ๆ จากสมการการประมาณ แล้วทำการวิเคราะห์เชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ เพื่อประเมินการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน และ คาบอิทธิพลหลัก พบว่าการขยายคลื่นมีค่าสูงสุดในบริเวณที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-10 เมตร และค่าลดลงหากความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มขึ้น

การศึกษาของกรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (2552) ที่รายงานความเสี่ยงจากแผ่นดินไหวและอาคารถล่ม โดยพิจารณาข้อมูลแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว สภาพดิน ข้อมูลอาคารโครงสร้างพื้นฐานและสาหรณูปโภคในเขตเมืองของ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ และกาญจนบุรี ข้อมูลลักษณะอาคารโดยทั่วไปพบว่า อาคารส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 50) มีลักษณะเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวลักษณะหนึ่ง หรือหลายลักษณะร่วมกัน โดยที่พบมากคือลักษณะ ชั้นที่อ่อนแอ (Soft story) ความไม่สม่ำเสมอในระนาบ (Plan irregularity) และ เสาสั้น (Short column) งานวิจัยได้จัดทำแผนที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวของทั้งประเทศ โดยจำแนกเป็นพื้นที่ย่อยระดับอำเภอ โดยการสร้างแบบจำลองจากข้อมูลของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว การลดทอนคลื่นแผ่นดินไหว และข้อมูลด้านอัตราการขยายคลื่นของแต่ละบริเวณ (Site amplification) ซึ่งข้อมูลสุดท้ายนี้ได้จากการประเมินความเร็วคลื่นเฉือนจากแผนที่ความสูงของพื้นดินเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นวิธีการประมาณและมีข้อจำกัดด้านความละเอียดและความถูกต้อง ข้อมูลจากการวิจัยที่ได้ดำเนินการต่อเนื่องเหล่านี้ได้ใช้ช่วยในการพัฒนาเป็นมาตรฐานสำหรับประเทศไทย โดยในปัจจุบันคือ มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302) กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2552 ในมาตรฐานดังกล่าวนี้ มีการกำหนดค่าความรุนแรงของแผ่นดินไหวในรูปแบบสากลสำหรับพื้นที่ระดับอำเภอ

2.3.2 การศึกษากำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวในประเทศ

หลังเกิดแผ่นดินไหวใหญ่ที่ Mexico city นักวิจัยจำนวนมากได้ให้ความสนใจกับโอกาสการเกิดภัยพิบัติในลักษณะดังกล่าวในบริเวณอื่น ๆ ทั่วโลก Thenhaus P.C. (1986) ได้เสนอบทความเกี่ยวกับความเสี่ยงภัยของกรุงเทพมหานครเนื่องจากแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่มีศูนย์กลางระยะไกลไปหลายร้อยกิโลเมตร และเสนอข้อสังเกตว่า ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวที่สำคัญที่สุดสำหรับกรุงเทพมหานครมาจากแผ่นดินไหวระยะไกล สภาพชั้นดินของกรุงเทพมหานครเป็นชั้นดินอ่อนหนา ดังนั้น แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่มีคาบในการสั่นไหวค่อนข้างยาวที่จะส่งผลกระทบมากต่ออาคารสูง

Ashford และคณะ (1997) ทำการศึกษาคูณสมบัติของดินกรุงเทพมหานครจากตัวอย่างจาก 9 แหล่งในพื้นที่ เพื่อศึกษาความสามารถในการขยายคลื่นแผ่นดินไหวของชั้นดินนี้ โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองสภาพชั้นดินโดยทั่วไปของกรุงเทพมหานคร และแบบจำลองสำหรับความเร็วเฉือน (Shear Wave Velocity) ของชั้นดินนั้น โดยเริ่มจากคำนวณความเร็วเฉือนจากค่าคุณสมบัติของชั้นดิน 9 แหล่ง ด้วยความสัมพันธ์เชิง Empirical ที่เกี่ยวข้องแบบต่าง ๆ แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยวิธี Downhole จากแหล่งสำรวจ 4 แห่ง ซึ่งพบว่ามีผลสอดคล้องเป็นอย่างดีระหว่างการคำนวณกับการทดสอบ และค่าความเร็วเฉือนที่ได้จากการศึกษามีค่าต่ำมากสำหรับชั้นดินอ่อนกรุงเทพ โดยมีค่าประมาณ 60-100 เมตรต่อวินาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้วมีค่าใกล้เคียงกับค่าของชั้นดินที่กรุงเม็กซิโกซิตี ผลการศึกษาด้านการขยายคลื่นแผ่นดินไหวพบว่ามีสามารถในการขยายขนาดคลื่นได้ประมาณ 3-6 เท่า ผลการศึกษาที่แสดงในรูปของสเปกตรัมของอัตราเร่งของ

พื้นดินแสดงให้เห็นถึงการขยายคลื่นที่มีผลชัดเจนในช่วงคาบการสั่นของชั้นหินต้นกำเนิดแผ่นดินไหว และที่สำคัญคือการขยายที่เด่นชัดที่สุดบริเวณค่าคาบธรรมชาติของดินอ่อนในกรุงเทพมหานครที่มีค่าประมาณ 1 วินาที

งานวิจัยเพื่อสำรวจคุณสมบัติของชั้นดินต่อพฤติกรรมจากแผ่นดินไหวเกิดขึ้นต่อมาในหลายวิธี ได้แก่ Shibuya และ Tamrakar (1999) ทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ รวมทั้งคุณสมบัติทางพลศาสตร์ โดยการวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือน โดยวิธี Seismic Penetration Test (SCPT) ของดินบริเวณกรุงเทพ พบว่าดินเหนียวอ่อนด้านบนมีความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 100 ม./วินาที และความเร็วคลื่นเฉือนจะเพิ่มขึ้นจนถึงชั้นดินเหนียวมีค่าอยู่ระหว่าง 180 ม./วินาที ถึง 210 ม./วินาที สำหรับชั้นทรายแรกวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 250 ม./วินาที

เทคนิคการวัดคลื่นตามธรรมชาติขนาดเล็กที่ผิวดิน (Microtremor) ได้เริ่มมีการศึกษาในประเทศ โดย Tuladhar R. (2002) ได้สร้าง Seismic Microzonation Map ของกรุงเทพโดยใช้การตรวจวัด Microtremor วัดแบบ 1 จุด ซึ่งทำการวัด 150 ตำแหน่งในกรุงเทพ และใช้วิธี H/V Spectrum Ratio สำหรับการหาคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) ของการสั่นที่พื้นดินในแต่ละตำแหน่งที่ได้และมีการเปรียบเทียบ Transfer Function จากวิธี H/V Spectrum Ratio และการวิเคราะห์เชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติด้วยโปรแกรม SHAKE 91 ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน และ Srisoros W. (2003) ได้ประยุกต์เทคนิคเดียวกันสำหรับการศึกษาในเขตจังหวัดเชียงใหม่ Arai และ Yamazaki (2002) ได้หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนโดยวิธี F-K Method และ H/V Spectrum Ratio ของกรุงเทพและปริมณฑลจำนวน 4 จุด ผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบโดยการเจาะสำรวจดินให้ค่าที่สอดคล้องกัน

ประภาพร จันทะมาศ (2007) ทำการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพฯที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบหลายช่องทางรับสัญญาณ (Multi-channel analysis of surface wave –MASW) กับวิธีวัดจากหลุมเจาะ ของพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล จำนวน 4 แห่งคือสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีสิรินธรและสนามบินสุวรรณภูมิ

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

เดชฤทธิ์ และคณะ (2553) ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ (MASW) เพื่อประเมินค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยวิธีแอกทีฟและแพสซีฟ ซึ่งเสนอให้ใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันเพื่อให้สามารถสำรวจในระดับที่ลึกมากขึ้นได้

ข้อมูลทางธรณีเทคนิคของชั้นดินในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลได้สรุปไว้โดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2549) โดยอธิบายว่า ชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณนี้เป็นดินตะกอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำที่เกิดใน Holocene epoch ที่ได้รับอิทธิพลจากแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำท่าจีนเป็นส่วนใหญ่ มีแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำบางปะกงเสริมอยู่ทางทิศตะวันตกและตะวันออกตามลำดับ รูปลักษณะของชั้นดินเป็นรูปคล้ายแอ่งกระทะค่อนข้างลึก ท้องของแอ่งค่อนข้างลาดชันตามปากอ่าวไทย ความหนาของชั้นดินส่วนใหญ่ประมาณ 10-18 เมตร ยกเว้นพื้นที่ทางตอนเหนือตั้งแต่จังหวัดปทุมธานีขึ้นไปจนถึงที่บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ความหนาค่อยๆ ลดลงจาก 10 เมตร ไปเป็น 0 เมตร ที่ปลายด้านบนสุด สำหรับขอบของแอ่งด้านตะวันออกและตะวันตกมีความชันและความหนาลดลงรวดเร็วมากกว่าด้านทิศเหนือ

2.4 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

การหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารด้วยวิธีตรวจวัดสภาพการสั่นไหวของอาคารนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมปฏิบัติ คือ การตรวจวัดการสั่นไหวโดยกตัวของอาคารในระดับต่ำที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ซึ่งเกิดจากแรงกระทำหรือการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมที่มีอยู่รอบๆ อาคารและภายในอาคาร 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 ซึ่งแสดงให้เห็นส่วนผสมของคลื่นความถี่ต่างๆ ในสัญญาณวัดได้อย่างชัดเจน เส้นกราฟ Spectrum นี้จะปรากฏมียอดแหลมที่ทุกๆ 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 วิธีนี้สามารถนำไปใช้หาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างต่างๆ ได้เป็นอย่างดีในกรณีที่ความถี่ธรรมชาติของ

การสั่นไหวรูปแบบต่างๆ มีค่าที่กระจายตัวแยกห่างออกจากกัน ซึ่งอาคารส่วนใหญ่มักจะเป็นเช่นนี้ แต่ในบางกรณีที่อาคารมีค่าความถี่ธรรมชาติบางค่าใกล้เคียงกันมาก วิธีของ Trifunac อาจให้ผลที่คลาดเคลื่อนได้ ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาวิธีใหม่ ๆ ขึ้นมาอีกหลายวิธีเพื่อแก้ปัญหาในกรณีเช่นนี้ ตัวอย่างเช่น 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) วิธี Hilbert-Houng Transform (HHT) โดย Houng (1998) เป็นต้น วิธีต่างๆ เหล่านี้มีจุดเด่นและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน การนำมาประยุกต์ใช้จึงจำเป็นต้องพิจารณาเลือกวิธีที่เหมาะสมกับสภาพปัญหา

การตรวจวัดโดยเทคนิค Ambient Vibration สามารถใช้ได้ดีกับอาคารสูงที่มีผลการตอบสนองชัดเจน แต่สำหรับอาคารเตี้ยจำเป็นต้องมีการกระตุ้นให้มีผลตอบสนองที่ชัดเจนขึ้น งานวิจัยด้านนี้ได้แก่ De Sortis และคณะ (2005) ได้วัดผลการตอบสนองของอาคารที่ก่อสร้างด้วยอิฐเพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยใช้อุปกรณ์ให้แรงกระทำกับโครงสร้าง แรงกระทำแบบมีทั้งแบบ sinusoidal และแบบ sweep จากผลการทดสอบพบว่า การให้แรงกระทำแบบ sinusoidal ทำให้ตรวจวัดพฤติกรรมของอาคารได้ดีกว่าแบบ sweep ที่สำคัญยังพบว่าปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นของอาคารที่ก่อสร้างด้วยอิฐเกิดขึ้นได้แม้ระดับของแรงกระทำไม่สูงมากนัก ส่วนการหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ ได้ใช้ฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response function) มาวิเคราะห์เพื่อแยกความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นออกมาและนำผลที่ได้ไปปรับปรุงแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ด้านแผ่นดินไหวต่อไป Sarkar และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลของความไม่ต่อเนื่องของอาคารในแนวดิ่งหรืออาคารที่มีลักษณะเป็นขั้นๆ ที่มีต่อคาบธรรมชาติ ในงานวิจัยได้นำเสนอดัชนีความปกติ (regularity index) ซึ่งเป็นตัวบอกระดับความไม่ปกติของอาคารว่ามีมากน้อยขนาดใด ดัชนีดังกล่าวคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของมวลและสติเฟนสตลอดความสูงของอาคาร นอกจากนี้ยังได้เสนอสูตรประมาณคาบธรรมชาติของอาคารที่เป็นขั้นๆ โดยดัดแปลงจากสูตรของอาคารแบบปกติที่ขึ้นอยู่กับความสูงเพียงอย่างเดียว

สำหรับในประเทศไทย การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างโดยวิธี Ambient Vibration เริ่มจาก สมจิต (2000) ได้เริ่มนำวิธีของ Trifunac มาตรวจหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างต่างๆ ในประเทศไทย และได้มีการพัฒนาเทคนิคการศึกษาและดำเนินการต่อเนื่องกับอาคารจำนวนมากในประเทศ (ธีรพล, 2001; ชาคกร, 2002; ประยุทธ์, 2545; มานะ, 2546; ครองสิน, 2550) จนสามารถได้ฐานข้อมูลด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจำนวนมาก และมีการศึกษาด้านเทคนิคในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์จากผลการตรวจวัดที่ให้ผลที่ถูกต้องและเหมาะสมในการใช้งานมากขึ้น (วีระศักดิ์, 2546 และ เยาวพรรณ, 2552)

2.5 โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย

การดำเนินการวิจัยก่อนหน้าในโครงการหลัก โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย โดยการสนับสนุนของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ประกอบด้วย โครงการวิจัยระยะที่ 1 เรื่อง

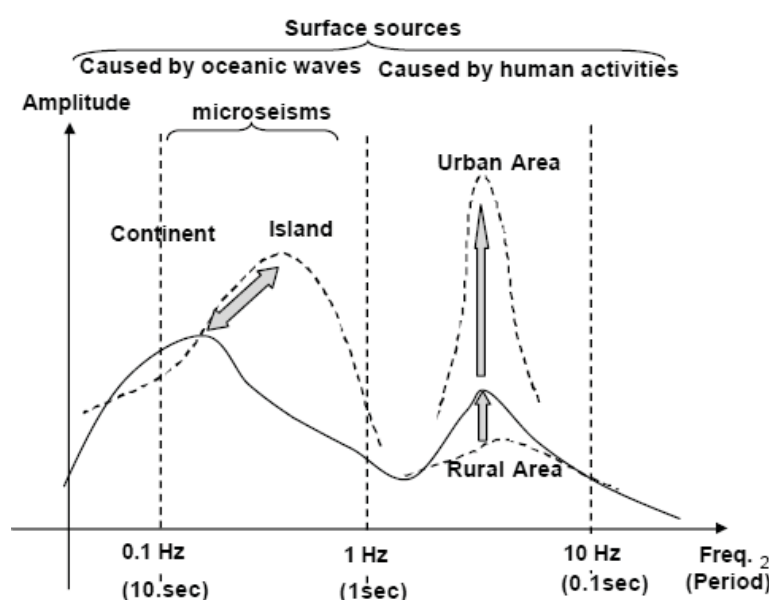
การตรวจวัดและศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร (นคร และ เป็นหนึ่ง 2547) และ โครงการวิจัยระยะที่ 2 เรื่อง คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินเพื่อการแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่ (นคร และคณะ 2553) สำหรับโครงการในระยะที่ 1 เป็นการตรวจวัดและสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างอาคารในกรุงเทพมหานครที่ตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อนงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติจากข้อมูลการตรวจวัดด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย ผลการศึกษาพบว่าค่าคาบธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของอาคารสูงปานกลางประมาณ 10-20 ชั้น และค่าคาบธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวที่ 2 ของอาคารสูงประมาณ 30 ชั้นขึ้นไป มีค่าใกล้เคียงกับค่าคาบที่ชั้นดินในกรุงเทพมหานครขยายขนาดคลื่นได้รุนแรง หรือประมาณ 1 วินาที ซึ่งสามารถทำให้กลุ่มอาคารเหล่านี้เกิดการโยกตัวอย่างรุนแรงด้วยการสั่นพ้องจากแผ่นดินไหวที่มีการขยายตัวของคลื่นได้ และเป็นการอธิบายผลกระทบของแผ่นดินไหวระยะไกลที่มีผลเด่นชัดต่ออาคารเหล่านี้ได้ จากนั้นงานวิจัยในระยะที่ 2 ได้ดำเนินการต่อเนื่องใน 2 เรื่องหลัก คือ การตรวจวัดอาคารเพิ่มเติมและพัฒนาสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติเพื่อการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย และเริ่มทำการศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งเพื่อประเมินระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว ผลของการตรวจวัดอาคารได้ข้อมูลเพื่อพัฒนาเป็นสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับการออกแบบอาคารที่มีรูปทรงสม่ำเสมอ และนำไปใช้ในการคำนวณค่าคาบธรรมชาติสำหรับอาคาร ใน มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (กรมโยธาธิการและผังเมือง 2552) ส่วนการวิจัยด้านคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ได้พัฒนาเทคนิคที่สามารถสำรวจภาคสนามได้อย่างรวดเร็ว ค่าใช้จ่ายต่ำ ให้ผลที่ใช้จำแนกประเภทของดินเพื่อการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวบริเวณนั้นได้อย่างเหมาะสมสำหรับพื้นที่ศึกษา และมีประโยชน์เพื่อการศึกษาสำหรับพื้นที่อื่น ๆ

บทที่ 3

ทฤษฎีและระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor Observations)

พื้นผิวของโลกมีการสั่นสะเทือนอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากกลไกการขยับตัวภายในของโลก ด้วยความถี่ที่มีลักษณะเฉพาะตัว แม้ว่าจะไม่เกิดแผ่นดินไหวก็ตาม การสั่นสะเทือนที่คงตัวของพื้นผิวโลกนี้เป็นต้นกำเนิดของคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremors) ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมแผ่นดินไหว โดยปกติแล้วขนาดของ Microtremors อยู่ในระดับที่ต่ำมาก โดยมีการจัดอยู่ระหว่างระดับ 10^{-4} ถึง 10^{-6} มิลลิเมตร ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ Microtremors เกิดจากแหล่งกำเนิด 2 ส่วนหลัก คือ จากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม การจราจรบนท้องถนน และการกระทำรูปแบบต่าง ๆ ของมนุษย์ เป็นต้น และจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น การไหลของแม่น้ำ ฝนตก กระแสลม ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศ และคลื่นมหาสมุทร เป็นต้น Microtremors ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ประกอบไปด้วยคลื่นที่มีคาบสั้นกว่า 1 วินาทีหรือความถี่สูงกว่า 1 เฮิร์ต เป็นหลัก ในขณะที่ Microtremors ที่เกิดจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติประกอบไปด้วยคลื่นที่มีคาบยาวกว่า 1 วินาทีหรือความถี่ต่ำกว่า 1 เฮิร์ตเป็นหลัก ดังรูปที่ 3.1 Microtremors มีคุณสมบัติคงตัวทั้งเชิงระยะและเวลาตามสมมติฐานพื้นฐานตามธรรมชาติ (Okada, 2003)



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของ Microtremors ในแต่ละช่วงความถี่ (Yokoi T., 2008)

การศึกษาทางธรณีแผ่นดินไหวของพื้นผิวโลกมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีทางธรณีฟิสิกส์ วิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น แต่วิธีการเหล่านั้นมีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และกระบวนการ

ทางเทคนิคค่อนข้างยุ่งยาก ทางเลือกที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งคือการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็บบนผิวดิน ข้อดีของเทคนิคนี้คือ ประหยัดค่าใช้จ่าย ไม่รบกวนพื้นผิวโดยเฉพาะหากทำการสำรวจในเขตชุมชนเมือง ให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อสำรวจในเขตพื้นที่แผ่นดินไหวขนาดเล็กถึงกลาง การศึกษานี้ดำเนินการสำรวจคลื่นขนาดเล็บบนผิวดินด้วยการตรวจวัดแบบ 1 จุด ด้วยเทคนิค Horizontal-to-Vertical spectral ratio (H/V) เพื่อประเมินค่าคาบการสั่นหลัก และตรวจวัดด้วยรูปแบบ Array ด้วยเทคนิค Spatial Autocorrelation Method (SPAC) เพื่อประเมินค่าความเร็วเฟสตามความถี่ (Dispersion curve) และประเมินค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการคำนวณย้อนกลับ (Inversion analysis) ซึ่งมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

3.1.1 ทฤษฎีสำหรับวิธี H/V Spectrum Ratio

วิธี H/V Spectrum ratio เสนอโดย Nakamura (1989) เป็นการตรวจวัดองค์ประกอบในแนวราบและแนวตั้งของคลื่นขนาดเล็บบนผิวดิน โดยการตรวจวัดเพียงสถานีเดียว แล้วคำนวณอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมของคลื่นในแนวราบต่อสเปกตรัมของคลื่นในแนวตั้ง ด้วยสมมุติฐานเพื่อลดทอนอิทธิพลของแหล่งกำเนิดที่ส่งผลต่อองค์ประกอบคลื่นในแนวราบและแนวตั้ง กล่าวคือเมื่อพิจารณาเฉพาะสเปกตรัมของคลื่นในแนวราบหรือแนวตั้งเพียงอย่างเดียว พบว่ามีค่าไม่คงที่ คือมีการเปลี่ยนแปลงตามการกระตุ้นของแหล่งกำเนิด ดังนั้นผลจากการวิเคราะห์ดังกล่าวไม่สามารถเป็นตัวแทนของสภาพดินในบริเวณนั้นๆ ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมของคลื่นในแนวราบต่อสเปกตรัมของคลื่นในแนวตั้ง พบว่ามีค่าคงที่เนื่องจากสามารถลดทอนอิทธิพลจากแหล่งกำเนิดรวมถึงเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นได้ ข้อดีของเทคนิคนี้คือองค์ประกอบคลื่นในแนวราบและแนวตั้งสามารถเก็บข้อมูลได้พร้อมกัน โดยการเก็บข้อมูลเพียงสถานีเดียวเท่านั้น ทำให้ประหยัดเวลาและผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ กราฟ H/V Spectrum สร้างจากอัตราส่วนระหว่างฟูเรียร์สเปกตรัมขององค์ประกอบคลื่นแนวราบและแนวตั้ง ดังแสดงในสมการ (3.1)

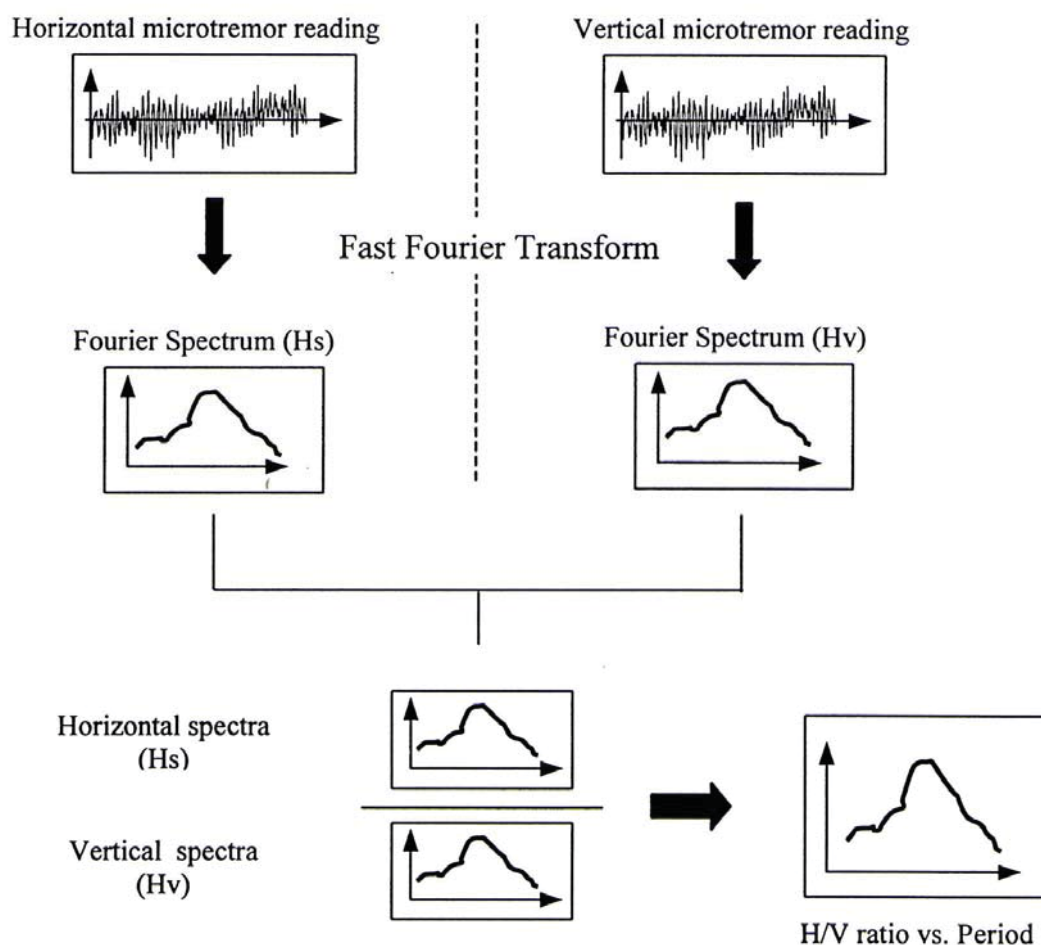
$$\text{H/V spectrum} = \frac{\sqrt{F_{NS} \times F_{EW}}}{F_{UD}} \quad (3.1)$$

F_{NS} = Fourier Amplitude Spectrum ในทิศเหนือ-ใต้ ของแนวราบ

F_{EW} = Fourier Amplitude Spectrum ในทิศตะวันออก-ตะวันตก ของแนวราบ

F_{UD} = Fourier Amplitude Spectrum ในแนวตั้ง

ผลที่ได้จากการหารฟูเรียร์สเปกตรัมแนวราบด้วยฟูเรียร์สเปกตรัมแนวตั้ง ส่งผลให้คำตอบมีค่าเสถียรสูง ซึ่งเป็นตัวแทนของคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณนั้นๆ ได้เป็นอย่างดี และเป็นที่ยอมรับกันว่าค่าคาบที่ตำแหน่งยอดของ H/V spectrum ratio แสดงถึงค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant period) ของดินบริเวณนั้นๆ ขั้นตอนในการวิเคราะห์โดยวิธี H/V Spectrum Ratio แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลโดยวิธี H/V Spectrum Ratio (Tuladhar, 2002)

สมมุติฐานของวิธี H/V Spectrum Ratio ที่เสนอโดย Nakamura ประกอบไปด้วย

1. Microtremors ที่คาบสั้น ประกอบด้วยคลื่นเฉือน (Shear wave) เป็นหลัก
2. ค่าสูงสุดของอัตราส่วนระหว่างองค์ประกอบคลื่นในแนวราบและแนวดิ่ง (A_H/A_V) ขึ้นอยู่กับประเภทของดิน และมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับชั้นหิน กล่าวคือ ค่าการสั่นสะเทือนมีค่าเท่ากับในทุกทิศทาง
3. องค์ประกอบในแนวราบของคลื่นเฉือน (Shear wave) ถูกขยายโดยชั้นดินอ่อนเนื่องจากปรากฏการณ์การสะท้อนกลับของคลื่น (Multiple-Reflection Phenomena) ในขณะที่องค์ประกอบคลื่นในแนวดิ่งจะไม่ถูกขยาย เช่น P-Wave
4. คลื่นเรย์เลห์ (Rayleigh wave) พิจารณาเป็นสัญญาณรบกวน

Transfer Function (S_T) ที่ชั้นผิวดินนิยามโดยอัตราส่วนระหว่าง Horizontal Tremor Spectrum ของพื้นดินชั้นบน (S_{HS}) และ Horizontal Tremor Spectrum ของชั้นหินด้านล่าง (S_{HB})

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (3.2)$$

จากสมการข้างต้น สมมติให้สเปกตรัมขององค์ประกอบคลื่นแนวราบ (Horizontal Tremor Spectrum) ของพื้นดินชั้นบนได้รับผลกระทบจากคลื่นเรย์เลห์ (Rayleigh wave) ซึ่งพิจารณาให้เป็นคลื่นรบกวน ดังนั้นจากสมมุติฐานข้างต้นคลื่นเรย์เลห์จะมีผลกระทบกับสเปกตรัมขององค์ประกอบคลื่นแนวตั้ง (Vertical Tremor Spectrum) ที่ผิวดินเท่านั้น แต่ไม่มีผลกระทบกับตำแหน่งชั้นหินด้านล่าง ประกอบกับสมมุติฐานที่ว่าไม่มีการขยายขององค์ประกอบคลื่นแนวตั้งในชั้นดินอ่อน ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลกระทบจากคลื่นเรย์เลห์สามารถประเมินได้จากอัตราส่วนระหว่างองค์ประกอบคลื่นในแนวตั้งที่พื้นผิวดิน (S_{VS}) และองค์ประกอบคลื่นในแนวตั้งที่พื้นชั้นหินด้านล่าง (S_{VB}) ดังแสดงในสมการ (3.3)

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (3.3)$$

ดังนั้น เมื่อพิจารณารวมผลกระทบของคลื่นเรย์เลห์ (Rayleigh wave) สามารถเขียน Transfer Function (S_{TT}) ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S_{TT} &= \frac{S_T}{E_S} \\ &= \frac{\left(\frac{S_{HS}}{S_{HB}} \right)}{\left(\frac{S_{VS}}{S_{VB}} \right)} \\ &= \left(\frac{S_{HS}}{S_{VS}} \right) \times \left(\frac{S_{VB}}{S_{HB}} \right) \\ &= \left(\frac{R_S}{R_B} \right) \\ R_S &= \left(\frac{S_{HS}}{S_{VS}} \right) \quad : \quad R_B = \left(\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

จากสมมุติฐานที่ว่า การแผ่กระจายคลื่นในชั้นดินแข็งหรือชั้นหินมีค่าสม่ำเสมอเท่ากันในทุกทิศทาง ดังนั้นอัตราส่วนระหว่าง Horizontal Spectrum และ Vertical Spectrum สำหรับชั้นหินมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสรุปได้ว่า Transfer Function ของคลื่นเฉือน (Shear Wave) ที่ไม่คิดผลกระทบของคลื่นเรย์เลห์จะเท่ากับอัตราส่วนระหว่าง Horizontal Spectrum และ Vertical Spectrum ของพื้นดินชั้น

บน ดังแสดงในสมการที่ (3.5)

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad R_B &= 1 \\ \text{ดังนั้น} \quad R_S &= S_{TT} = \left(\frac{S_{HS}}{S_{VS}} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

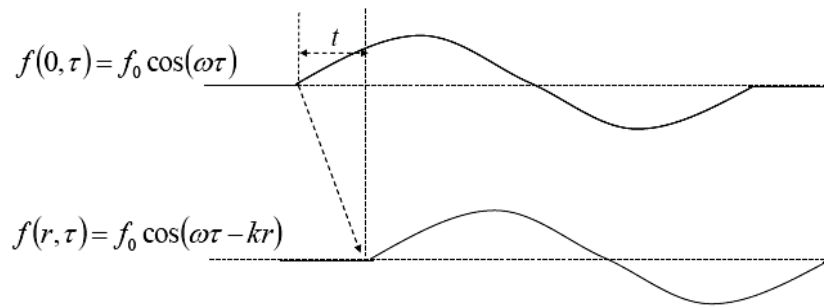
จึงสรุปได้ว่าอัตรากำลังขยายคลื่น (Amplification factor) ขององค์ประกอบคลื่นในแนวราบสามารถประเมินได้จากค่าสูงสุดของอัตราส่วนระหว่าง Horizontal spectrum และ Vertical spectrum ที่ได้จากการตรวจวัดที่พื้นผิวดินเท่านั้น และค่าคาบ ณ ตำแหน่งที่อัตราส่วนสเปกตรัมมีค่าสูงที่สุดเปรียบเสมือนค่าคาบธรรมชาติของสถานที่นั้นๆ อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อขัดแย้งในสมมติฐานสำหรับทฤษฎีนี้ โดยสมมติฐานของ Nakamura (1989) ได้สมมติให้องค์ประกอบคลื่นหลัก คือ body wave ซึ่งแย้งกับพื้นฐานของคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน อันมีองค์ประกอบหลักเป็นคลื่นพื้นผิว (surface wave) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความสะดวกในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล จึงมีการประยุกต์ใช้อย่างกันแพร่หลาย และในงานวิจัยนี้ได้ใช้ผลเป็นข้อมูลในการพิจารณาร่วมกับผลหลักคือความเร็วคลื่นเฉือนในหัวข้อต่อไป

3.1.2 ทฤษฎีของวิธี Spatial Auto-Correlation Coefficient (SPAC)

วิธี SPAC ถูกเสนอโดย Aki, K. (1957) เพื่อเป็นวิธีที่ใช้สำหรับการหาค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของคลื่นพื้นผิวที่มีค่าแตกต่างกันสำหรับความถี่คลื่นต่างๆ เนื่องจากคุณสมบัติกระจายตัวของคลื่น (Dispersive) ของดินที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันในแต่ละชั้นที่เรียงกันอยู่ บนพื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมเชิงระยะทางและเวลา โดยการตรวจวัดองค์ประกอบของคลื่นในแนวตั้งหลายจุดพร้อมกันในรูปแบบของโครงข่าย (Array) และคลื่นพื้นผิวที่บันทึกได้จะมีองค์ประกอบหลักคือโหมดพื้นฐานของคลื่นเรย์เลห์ (Rayleigh Wave) พื้นฐานของการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC เริ่มจากนิยามของ Cross-Correlation (C_{xy}) สำหรับสัญญาณที่ตำแหน่ง x และ y ซึ่งแสดงดังนี้

$$C_{xy}(t) \equiv \int x(\tau)y(t+\tau)d\tau \quad (3.6)$$

โดยที่ Cross-Correlation คือการนำข้อมูลคู่หนึ่งๆ มาคูณและทำการรวมข้อมูลทั้งหมดเข้าด้วยกันเพื่อหาค่าเฉลี่ย จากนั้นการคำนวณความเร็วเฟสด้วยวิธี Cross-Correlation แสดงด้วยฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine) กับความถี่เชิงมุม (ω) จำนวน 1 รอบ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างคลื่น Cosine จำนวน 1 รอบ (Yokoi T., 2008)

จากรูปที่ 3.3 หากมีการเลื่อนของเวลา (Time Lag) เท่ากับ t และระยะทางเท่ากับ r สามารถคำนวณความเร็วเฟสได้ดังสมการที่ 3.7

$$c = \frac{r}{t} \quad (3.7a)$$

$$\text{หรือ} \quad c = \frac{\omega}{k} \quad (3.7b)$$

ความสัมพันธ์ของคลื่น 2 ตำแหน่ง ในรูปของ Cross-correlation แสดงดังสมการที่ 3.8

$$\begin{aligned} Cc(0, r, t) &= f_0^2 \int \cos(\omega\tau) \cos(\omega\tau + \omega t - kr) d\tau \\ &= f_0^2 \left[\int \cos^2(\omega\tau) d\tau \cos(\omega t - kr) - \int \cos(\omega\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \sin(\omega t - kr) \right] \\ &\propto f_0^2 \cos(\omega t - kr) \end{aligned} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ 3.8 พบว่า ค่าของ Cross-correlation มีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การเลื่อนของเวลา (Time Lag, t) สำหรับข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในรูปของความถี่ (Frequency Domain) การคำนวณหาค่า Cross-Correlation สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.9

$$Cc(0, r, \omega) = F(0, \omega) \cdot \overline{F(r, \omega)} = |F(0, \omega)| \cdot |F(r, \omega)| \cdot \exp(i\Delta\phi(\omega)) \quad (3.9)$$

ความต่างเฟสเนื่องจากการกระจายตัวของคลื่น คือ $\Delta\phi = \omega r/c$ เนื่องมาจากสมการที่ 3.10

$$\exp\left\{i\omega\left(t + \frac{r}{c}\right)\right\} = \exp\left\{i\left(\omega t + \frac{\omega r}{c}\right)\right\} \quad (3.10)$$

ดังนั้นสมการที่ 3.9 สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปใหม่ดังสมการที่ 3.11

$$Cc(0, r, \omega) = |F(0, \omega)| \cdot |F(r, \omega)| \cdot \exp\left(i \frac{\omega r}{c}\right) \quad (3.11)$$

ความสอดคล้อง (Coherence) ของคลื่น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.12

$$Coh(0, r, \omega) = \text{Re} \left[\frac{Cc(0, r, \omega)}{|F(0, \omega)| \cdot |F(r, \omega)|} \right] = \text{Re} \left[\exp\left(i \frac{\omega r}{c}\right) \right] = \cos\left(\frac{\omega r}{c}\right) \quad (3.12)$$

โดยที่ c คือ ความเร็วเฟสที่วัดตามแนวเส้นที่ทำการตรวจวัด สำหรับ Auto-Correlation มีวิธีการคำนวณที่คล้ายกับ Cross-Correlation แต่ Auto-Correlation ใช้ข้อมูลที่จุดเดียวกันในการวิเคราะห์ ดังสมการที่ 3.13

$$Ac(0, \omega) = Cc(0, 0, \omega) = |F(0, \omega)|^2, Ac(r, \omega) = Cc(r, r, \omega) = |F(r, \omega)|^2 \quad (3.13)$$

จากนิยามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ 2 แนวทาง คือ ในพิสัยเวลา (Time Domain) และพิสัยความถี่ (Frequency Domain) ดังสมการที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ

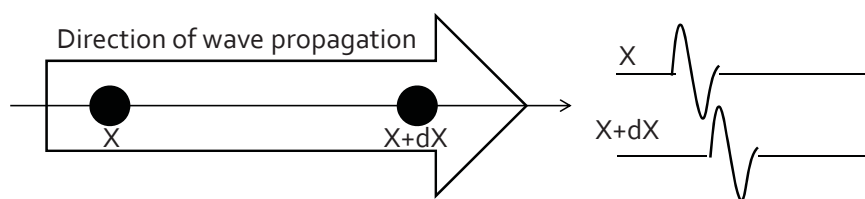
$$Cc(\Delta x, t) = f(x, t) * \overline{f(x + \Delta x, t)} \quad (3.14)$$

$$Cc(\Delta x, \omega) = f(x, \omega) \cdot \overline{f(x + \Delta x, \omega)} = |F(x, \omega)| |F(x + \Delta x, \omega)| \exp\left(\frac{i\omega\Delta x}{c(\omega)}\right) \quad (3.15)$$

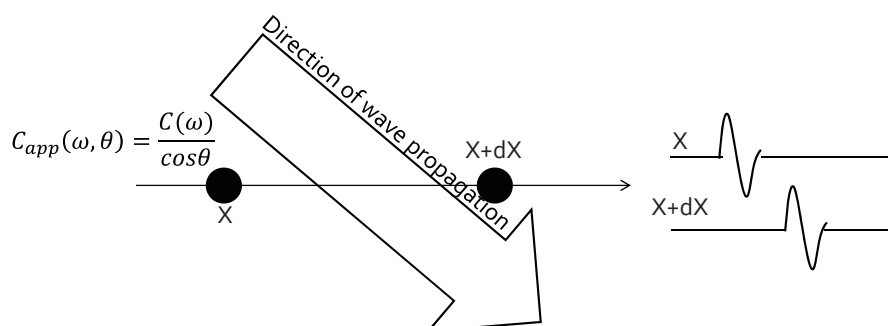
ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC สำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นจากตำแหน่ง x ไปยังตำแหน่ง $x+\Delta x$ ซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ Δx สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.16

$$\rho(\Delta x, \omega) \equiv \text{Re} \left[\frac{Cc(\Delta x, \omega)}{Cc(0, \omega)} \right] = \frac{|F(x + \Delta x, \omega)|}{|F(x, \omega)|} \text{Re} \left[\exp\left(\frac{i\omega\Delta x}{c(\omega)}\right) \right] \approx \cos\left(\frac{\omega\Delta x}{c(\omega)}\right) \quad (3.16)$$

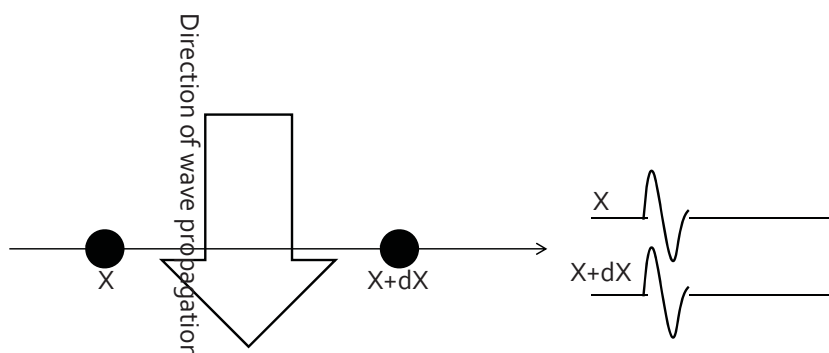
รูปแบบการแพร่ของคลื่นแบบทิศทางเดียวมีด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 คลื่นเคลื่อนที่ขนานกับแนวเส้นทางการตรวจวัดจากตำแหน่ง X ไปยังตำแหน่ง $X+\Delta x$ แสดงดังรูปที่ 3.4 รูปแบบที่ 2 คลื่นเคลื่อนที่เป็นมุม θ กับเส้นทางการตรวจวัดจากตำแหน่ง X ไปยังตำแหน่ง $X+\Delta x$ ความเร็วเฟสที่คำนวณได้จากการเคลื่อนที่ลักษณะนี้เรียกว่าเป็นความเร็วเฟสปรากฏ (Apparent Phase Velocity) ซึ่งมีค่าสูงกว่าความเร็วเฟสที่แท้จริง ดังรูปที่ 3.5 และรูปแบบที่ 3 คลื่นเคลื่อนที่ตั้งฉากกับเส้นทางการตรวจวัด ซึ่งความสอดคล้องกันของคลื่นที่เคลื่อนที่ลักษณะนี้จะมีค่าเหมือนกันทุกประการ ทั้งตำแหน่ง X และ $X+\Delta x$ นั่นคือมีความเร็วเฟสปรากฏเป็นอนันต์ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.4 การเคลื่อนที่ของคลื่นแนวนานกับเส้นทางตรวจวัด (Yokoi T., 2008)

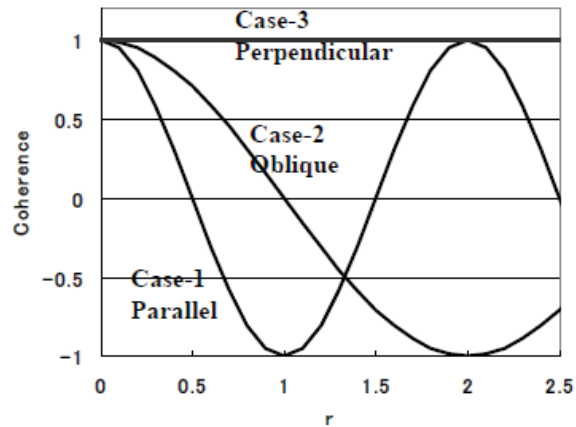


รูปที่ 3.5 การเคลื่อนที่ของคลื่นทำมุม θ กับเส้นทางตรวจวัด (Yokoi T., 2008)



รูปที่ 3.6 การเคลื่อนที่ของคลื่นตั้งฉากกับเส้นทางตรวจวัด (Yokoi T., 2008)

จากรูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่นทั้ง 3 รูปแบบ เมื่อพิจารณาถึงความสอดคล้อง (Coherence) ของคลื่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 โดยรูปแบบที่ 1 เป็นไปตามลักษณะที่ถูกต้องของการแพร่ของคลื่นในทิศทางเดียว แต่รูปแบบอื่น ๆ จำเป็นต้องมีการปรับแก้ด้วยการหารด้วยค่า $\cos \theta$



รูปที่ 3.7 ความสอดคล้องของคลื่นทั้ง 3 รูปแบบ (Yokoi T., 2008)

สำหรับข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณค่า Cross-Correlation ของการเคลื่อนที่ของคลื่นที่มีมากกว่า 1 ทิศทาง แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบของเวลา และ รูปแบบของความถี่ ดังสมการที่ 3.17-3.18 ตามลำดับ

$$Cc(\xi, \eta, t) = f(x, y, t) * f(x + \xi, y + \eta, t) \quad (3.17)$$

$$Cc(\xi, \eta, \omega) = F(x, y, \omega) \cdot \overline{F(x + \xi, y + \eta, \omega)} \quad (3.18)$$

$$\text{โดยที่ } \xi = r \cos \psi, \eta = r \sin \psi$$

จากนั้นการคำนวณหาความสัมพันธ์ SPAC, ρ , สำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ในระนาบ ซึ่งสามารถทำได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันความสอดคล้อง (Coherency) ของคลื่นที่มุมต่างๆ ที่ผ่านเข้ามาในตำแหน่งของการตรวจวัด ดังสมการที่ 3.19-3.21

$$\rho(r, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Coh(\xi, \eta, \omega) d\psi \quad (3.19)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re} \left[\int_0^{2\pi} \exp \left(\frac{i\omega r}{c_{\text{apparent}}} \right) d\psi \right] \quad (3.20)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re} \left[\int_0^{2\pi} \exp \left(\frac{i\omega r \cos \psi}{c(\omega)} \right) d\psi \right] \quad (3.21)$$

เนื่องจากเทอมของ $\left[\int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{i\omega r \cos\psi}{c(\omega)}\right) d\psi \right]$ เท่ากับค่าของ $2\pi J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right)$ ดังนั้นสัมประสิทธิ์ SPAC จึงสามารถเขียนใหม่ดังสมการที่ 3.22

$$\rho(r, \omega) = J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) \quad (3.22)$$

โดยที่ค่า $J_0(\cdot)$ คือ Bessel Function ชนิดที่ 1 ลำดับที่ 0

นอกจากนี้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC สามารถนำข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบ Frequency domain ที่ได้มาจากการแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบ Time domain จากนั้นใช้นิยามคณิตศาสตร์เพื่อเขียนอยู่ในรูปแบบเพื่อการคำนวณ ดังสมการที่ 3.23

$$\rho(\omega, r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\text{real}[S_{CX}(\omega, r, \theta)]}{\sqrt{S_C(\omega, 0, 0) \cdot S_X(\omega, r, \theta)}} d\theta \quad (3.23)$$

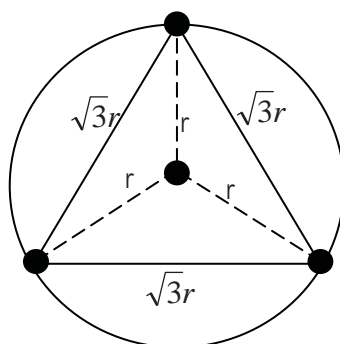
โดยที่ $\text{real}[\cdot]$ = ส่วนของจำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน

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

$S_C(\omega, 0, 0)$ = Power spectrum ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง $C(0, 0)$

$S_C(\omega, r, \theta)$ = Power spectrum ที่ตำแหน่ง r ของวงกลม $X(r, \theta)$

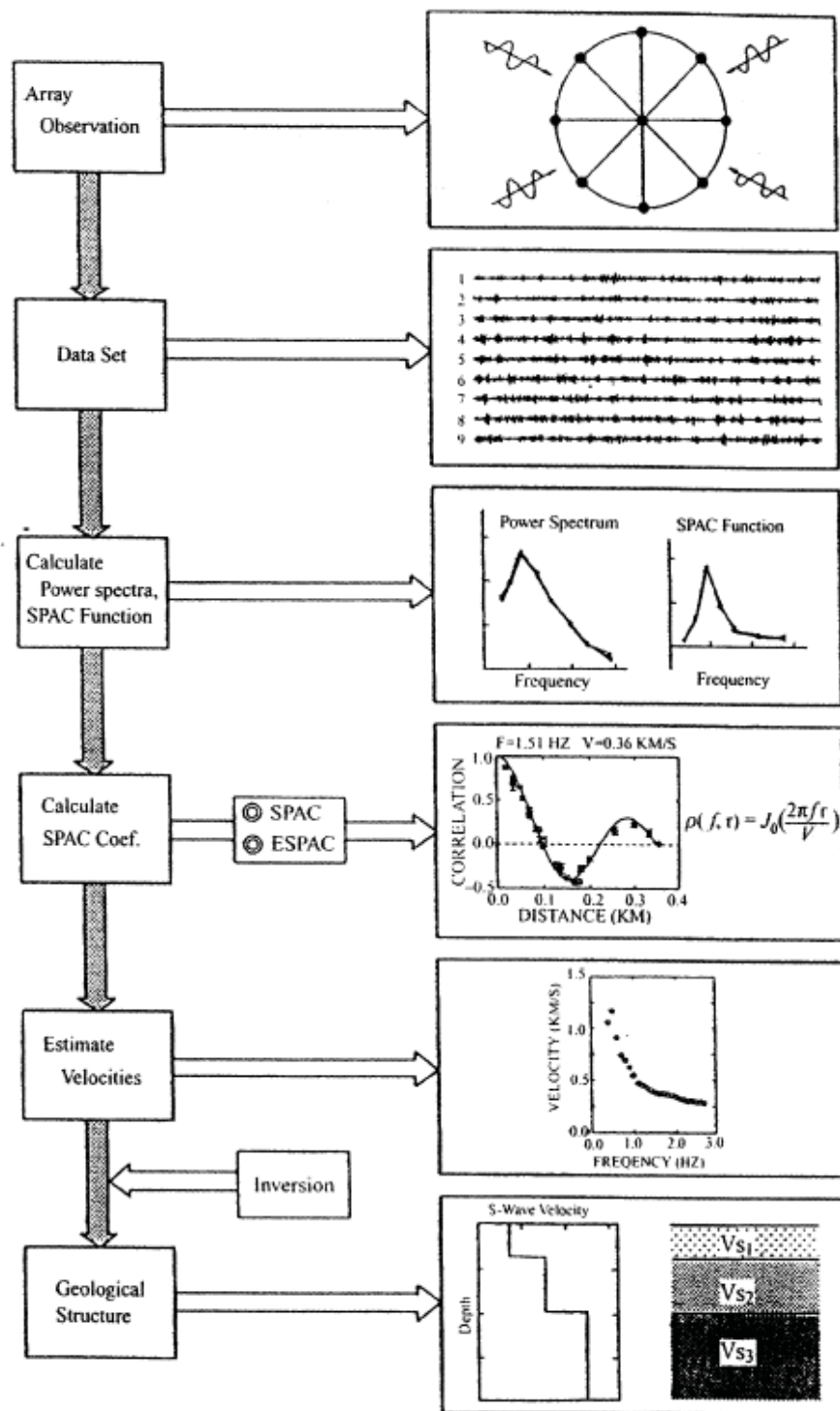
รูปแบบของการตรวจวัดด้วยวิธี SPAC ประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณจำนวน 4 ชุดโดยจัดวางเครื่องรับสัญญาณดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รูปแบบการตรวจวัดแบบ Array ด้วยวิธี SPAC

จากหลักการข้างต้นสามารถสรุปขั้นตอนการตรวจวัดและการวิเคราะห์โดยวิธี SPAC ได้ดังนี้ และแสดงแผนผังได้ดังรูปที่ 3.9

1. เก็บข้อมูลภาคสนาม โดยวางตำแหน่งห้ววัดเป็นรูปโครงข่ายวงกลม
2. เก็บข้อมูลองค์ประกอบของคลื่นในแนวดิ่งบนตำแหน่งที่กำหนดบนเส้นรอบรูปวงกลม
3. คำนวณ Power spectrum ของแต่ละตำแหน่งแล้วนำไปคำนวณ SPAC Function
4. คำนวณ สัมประสิทธิ์ SPAC ของแต่ละคู่ จนวนครบทุกคู่ที่วางอยู่บนเส้นรอบรูปวงกลม
5. ประเมินค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity) โดยกระบวนการทำ Dispersion Curve
6. นำ Dispersion Curve ที่ได้ไปคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis) เพื่อประเมินโครงสร้างของความเร็วคลื่นเนือนตามความลึก



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลโดยวิธี SPAC (Okada H., 2003)

ขั้นตอนการคำนวณความเร็วเฟส

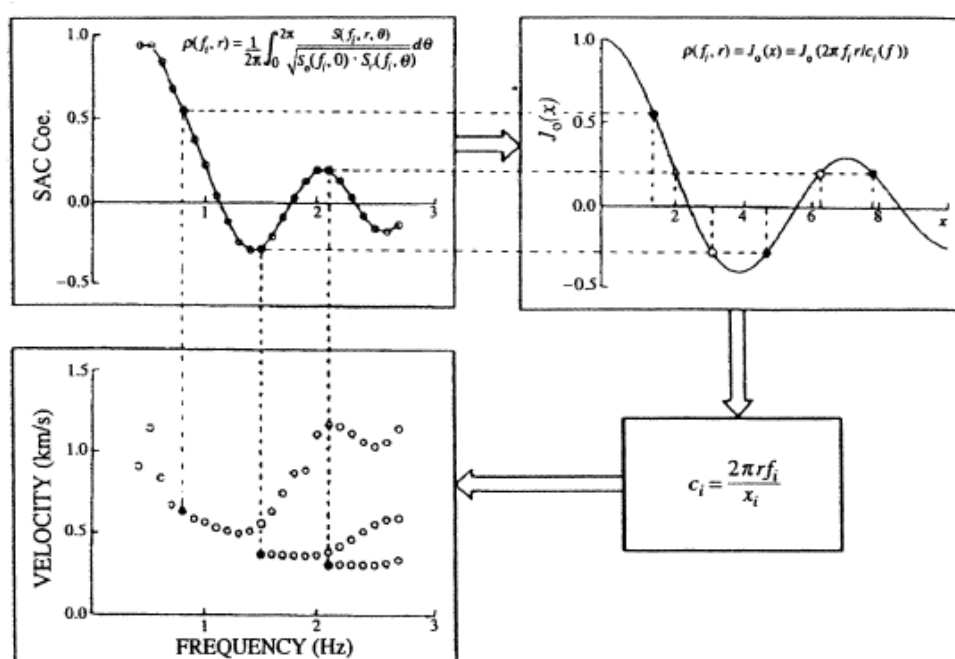
วิธีการคำนวณความเร็วเฟส (Phase Velocity) จากวิธี SPAC นั้นมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10

1. จากกราฟของ สัมประสิทธิ์ SPAC (บนซ้าย) และกราฟของ Bessel Function of the First Kind with Zero Order (บนขวา) กำหนดให้คู่ลำดับบนแกนราบและแกนตั้งสำหรับ (S_i, f_i) คือคู่ลำดับของสัมประสิทธิ์ SPAC ที่ตำแหน่งความถี่ใด ๆ f_i และ (J_{0i}, x_i) คือคู่ลำดับของ Bessel Function of the First Kind with Zero Order ที่ตำแหน่งที่ S_i เท่ากับ J_{0i} นั้นสามารถประเมินค่าของ x_i ได้จากคู่ลำดับของ (J_{0i}, x_i)

2. เมื่อได้ค่า x_i แล้ว สามารถประเมินค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity) ได้จากสมการที่ 3.24

$$\text{Phase velocity} = C_i = \left(\frac{2\pi f_i}{x_i} \right) \quad (3.24)$$

3. นำค่าความเร็วเฟส ไปสร้างเป็นคู่ลำดับ (C_i, f_i) และกระทำซ้ำที่ความถี่ต่างๆ ด้วยวิธีการเดิมจนได้เส้นกราฟของความเร็วเฟส (Phase Velocity) เป็น Dispersion curve (ล่างซ้าย)



รูปที่ 3.10

แผนผังแสดงวิธีการคำนวณความเร็วเฟส (Okada H., 2003)

3.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นผิวดิน (Ground Response Analysis)

3.2.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นผิวดินแบบ 1 มิติ (One-Dimensional Ground Response Analysis)

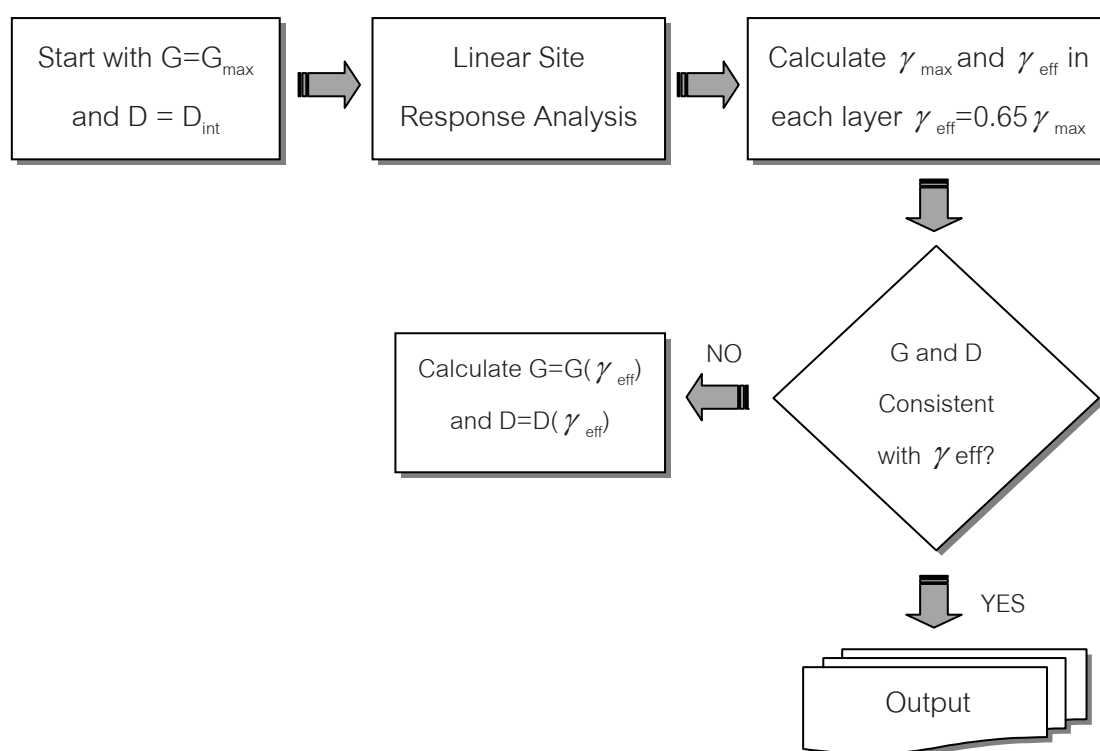
ผลตอบสนองของพื้นผิวดิน (Ground response) มีความสำคัญสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมแผ่นดินไหว ซึ่งใช้ในการประเมินความเสี่ยงภัยเนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหว เช่น การประเมินการขยายขนาดและการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหว ปัญหา liquefaction ปัญหาดินถล่ม และการวิบัติของโครงสร้างที่รับแรงด้านข้าง เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นวิธีหลักในการสร้างสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบ การวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นผิวดินสามารถจำแนกเป็นแบบ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ ตามความซับซ้อนของสภาพธรณีวิทยาของที่ตั้ง โดยที่การวิเคราะห์แบบ 1 มิติได้รับความนิยมสูง เนื่องจากมีความเหมาะสมในด้านสมมติฐานที่ใช้วิเคราะห์ที่ใช้ข้อมูลจากสภาพของที่ตั้งจริงใน 1 มิติ ที่สามารถประเมินได้ดีกว่าการวิเคราะห์แบบ 2 หรือ 3 มิติ อย่างไรก็ตาม หากมีข้อมูลที่แม่นยำสำหรับการวิเคราะห์แบบ 2 หรือ 3 มิติ การวิเคราะห์เหล่านี้อาจให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงขึ้น ในการศึกษานี้ได้กำหนดขอบเขตไว้คือการใช้การวิเคราะห์แบบ 1 มิติ โดยมีสมมติฐานหลักอยู่ 3 ประการ คือ (1) การสั่นสะเทือนเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับพื้นผิวดินซึ่งมีลักษณะเรียงตัวเป็นชั้นๆ โดยเกิดจากการแพร่กระจายขององค์ประกอบในแนวตั้งของคลื่นเฉือน (shear wave) (2) ลักษณะของชั้นดินเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ ในแนวนอนจนถึงชั้นหินด้านล่าง (3) คุณสมบัติของดินแต่ละชั้นมีความเป็น homogeneous viscoelastic แต่มีพฤติกรรมแบบ non-linear จากสมมติฐานข้างต้น ได้มีการพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินผลตอบสนองของพื้นผิวดินแบบ 1 มิติ หลายโปรแกรมด้วยกัน เช่น SHAKE, DEEPSOIL เป็นต้น โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบ Equivalent linear method ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.2.2 การวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent Linear Method)

พฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของดินไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีอีลาสติกสำหรับพฤติกรรมในช่วงที่ค่าโมดูลัสและอัตราส่วนความหน่วงมีค่าคงที่ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าขึ้นอยู่กับระดับความเครียด และภายใต้การตอบสนองจากแผ่นดินไหวที่ระดับความเครียดสูงจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสและอัตราส่วนความหน่วงแบบพฤติกรรมไร้เชิงเส้น อย่างไรก็ตาม สามารถแก้ปัญหาที่ซับซ้อนนี้ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent linear method) ซึ่งพิจารณาพฤติกรรมไร้เชิงเส้นของดินเข้าไปด้วย โดยอาศัยหลักการประเมินหาค่าโมดูลัสเฉือนและค่าอัตราส่วนความหน่วงที่สอดคล้องกับระดับค่าความเครียด ประกอบกับการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นซ้ำจำนวนหลายรอบ

การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent linear method) เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น โดยใช้คุณสมบัติจากค่าโมดูลัสเฉือน (G) และอัตราส่วนความหน่วง (β) ของดินในแต่ละชั้น ประกอบกับหลักความสอดคล้องของความเครียด

บริเวณรอยต่อของชั้นดิน ประเมินค่าความเครียดเฉือนในรูปแบบประวัติเวลา (Time histories of shear strain) สำหรับดินแต่ละชั้น และวิเคราะห์หาค่าความเครียดประสิทธิผล (Effective shear strain) จากค่าดังกล่าว ค่าความเครียดประสิทธิผล เป็นฟังก์ชันของขนาดแผ่นดินไหว โดยปกติมีค่าประมาณ 65% ของค่าความเครียดเฉือนสูงสุด จากค่าความเครียดประสิทธิผล นำไปวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสเฉือน (G) และอัตราส่วนความหน่วง (β) ในการคำนวณรอบถัดไป และดำเนินการตามกระบวนการขั้นตอนจนกว่าผลต่างระหว่างค่าโมดูลัสเฉือน (G) และอัตราส่วนความหน่วง (β) ในสองรอบการคำนวณหลังสุดอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดคือประมาณ 5% โดยปกติรอบการทำซ้ำจะอยู่ที่ประมาณ 5 รอบ (Schnabel et al., 1972) จากกระบวนการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent linear) คือ การวิเคราะห์แบบเชิงเส้นด้วยหลักความสอดคล้องและต่อเนื่องของความเครียดบริเวณรอยต่อของชั้นดิน โดยอาศัยพฤติกรรมแบบ non-linear ของดิน ประกอบกับการทำซ้ำจนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสม แผนผังการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนผังการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่า

3.2.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SHAKE91

โปรแกรม SHAKE91 พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยเริ่มต้นของ Schnabel และคณะในปี ค.ศ. 1972 ใช้สำหรับวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ สำหรับแบบจำลองที่มีลักษณะเรียงตัวเป็นชั้นๆ ตามแนวนอน และมีคุณสมบัติแบบ homogeneous viscoelastic ภายใต้แรงกระทำขององค์ประกอบแนวตั้งของคลื่นเฉือน และอาศัยหลักการวิเคราะห์ความต่อเนื่อง (continuous solution) จากสมการคลื่นของ Kanai, 1951 และสามารถประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์แบบ transient motion ผ่านกระบวนการ Fast Fourier Transform Algorithm (Cooley and Tukey, 1965) คุณสมบัติที่แสดงถึงพฤติกรรมไร้เชิงเส้นของดินถูกพิจารณาเข้าไปในกระบวนการการวิเคราะห์ผ่านตัวแปรหลัก 2 ค่า คือ ค่าโมดูลัสเฉือนและค่าอัตราส่วนความหน่วง ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเครียด สมมุติฐานหลักสำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SHAKE91 ประกอบไปด้วย

- แบบจำลองมีลักษณะเรียงตัวเป็นชั้นๆ ขอบเขตเป็นอนันต์ในทิศทางตามแนวนอน
- แบบจำลองในแต่ละชั้นถูกกำหนดด้วยค่าคุณสมบัติของดิน ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าโมดูลัสเฉือน อัตราส่วนความหน่วง ความหนาแน่น ความหนาของชั้นดิน ซึ่งค่าตัวแปรเหล่านี้ไม่ขึ้นกับความถี่
- การวิเคราะห์ผลตอบสนองของแบบจำลองเกิดจากแรงกระทำขององค์ประกอบแนวตั้งของคลื่นเฉือนจากชั้นหินด้านล่างผ่านชั้นดินขึ้นสู่ด้านบน
- คลื่นเฉือนแสดงอยู่ในรูปของค่าความเร่งกับเวลา (สำหรับการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาที่เท่ากัน) ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นค่าเริ่มต้นในการวิเคราะห์
- ค่าโมดูลัสเฉือนและค่าอัตราส่วนความหน่วงซึ่งขึ้นกับระดับความเครียด เป็นค่าตัวแปรหลักในการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent linear) ประเมินหาค่าเฉลี่ยของค่าตอบจากค่าความเครียดประสิทธิผลในแต่ละชั้น

โปรแกรม SHAKE91 ประกอบด้วย 10 ตัวเลือก สำหรับกระบวนการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ข้อมูลที่ป้อนให้กับโปรแกรมอยู่ในรูปแบบ ASCII file (*.dat) อ้างอิงจากภาษา FORTRAN จากตารางที่ 3.1 สามารถแบ่งตัวเลือกเป็น 2 กลุ่มหลักได้ดังนี้ คือ (1) Input Options ประกอบไปด้วย ตัวเลือก 1,2,3,4 และ 5 (2) Analysis Options ประกอบไปด้วย ตัวเลือก 6, 7, 9, 10 และ 11

ตารางที่ 3.1 รายการตัวเลือก สำหรับโปรแกรม SHAKE91

Option	Description
1	Dynamic soil properties
2	Data for soil profile
3	Input(object) motion

4	Assignment of object motion to the top of a specified sublayer or to the corresponding outcrop
5	Number of iterations specified & ratio of uniform strain to maximum strain
6	Sublayers at top of which peak accelerations & time histories are computed and saved
7	Sublayers at top of which time history of shear stress or strain is computed and saved
8	Save time history of object motion
9	Response spectrum
10	Amplification spectrum
11	Fourier amplitudes

ค. การเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์แบบ 1 มิติด้วยโปรแกรม SHAKE91

ข้อมูลคุณสมบัติตามความลึกของชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ ประกอบไปด้วย ค่าความเร็วคลื่นเฉือน หน่วยน้ำหนัก ชนิดของดิน และ ความหนาของชั้นดิน ประกอบกับความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับค่าความเครียด ($G/G_{\max}(\gamma)$) และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหน่วงกับค่าความเครียด ($\zeta(\gamma)$) ความหนาของชั้นดินแต่ละชั้นแนะนำให้ใช้ไม่เกิน $1/5$ เท่าของความยาวคลื่นเฉือน (wave length) (Idriss and Sun, 1992) ($t < 1/5\lambda$ or $t < (1/5)(V_s / f)$) และค่าอัตราส่วนค่าความเครียดเทียบเท่า (uniform equivalent strain) ต่อค่าความเครียดสูงสุด ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.75 ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นดินไหว ($ratio = \frac{M-1}{10}$)

3.3 การจำแนกประเภทของดิน

การจำแนกประเภทของดินแต่ละบริเวณ จะสามารถทำได้โดยเฉลี่ยค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) ค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำ (S_u) และจำนวนครั้งในการตอกกระบอกฝ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุต (ค่า N) และนำค่าเฉลี่ยดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับ National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP 2003) และ มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1302, 2552) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การจำแนกประเภทของดินตาม NEHRP (2003) และ มยพ.1302

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 (V_s) ค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำ (S_u) และจำนวนครั้งในการตอกกระบอกฝ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุต (ค่า N) ตามมาตรฐานดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการ

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (3.25)$$

$$\bar{S}_u = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{S_{ui}}} \quad (3.26)$$

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (3.27)$$

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

3.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

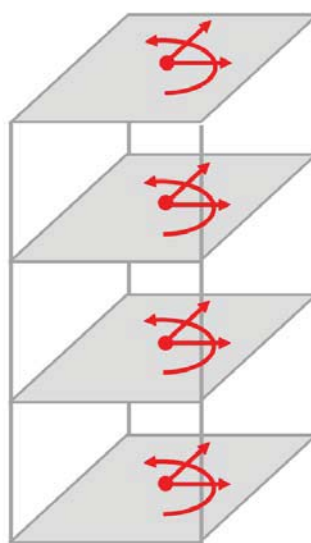
การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บข้อมูลที่สำคัญของโครงสร้างอันได้แก่ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่น และอัตราส่วนความหน่วง ซึ่งเป็นปริมาณที่สำคัญที่สุดสำหรับอธิบายพฤติกรรมของอาคาร การวัดปริมาณทั้งสามดังกล่าวนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจวัดวางที่พื้นอาคารแต่ละชั้น แล้ววัดการสั่นไหวของโครงสร้าง อุปกรณ์ที่มีความไวจะสามารถวัดการสั่นไหวทั้งที่เกิดโดยธรรมชาติหรือเกิดจากการกระตุ้นออกมาได้ จากนั้นจึงนำที่บันทึกมาได้มาวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ ในกระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้ปัจจัย 3 ประการคือ

- วิธีการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ (หัวข้อ 3.4.1-3.4.2 และภาคผนวกที่ 2.1)
- อุปกรณ์หัววัดสำหรับตรวจจับการเคลื่อนที่ (ภาคผนวกที่ 2.2)
- แรงกระตุ้นอาคาร ซึ่งมีสองกรณีคือ
 - แรงกระตุ้นแบบที่เกิดจากธรรมชาติ กรณีอาคารสูงที่ตรวจจับการไหวตัวได้ง่าย
 - แรงกระตุ้นจากเครื่องเขย่าอาคาร กรณีอาคารเตี้ยที่ค่อนข้างแข็ง (ภาคผนวกที่ 2.3)

รายงานในส่วนนี้จะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดปริมาณทั้ง 3 ประการดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.1 การวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง: ความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น

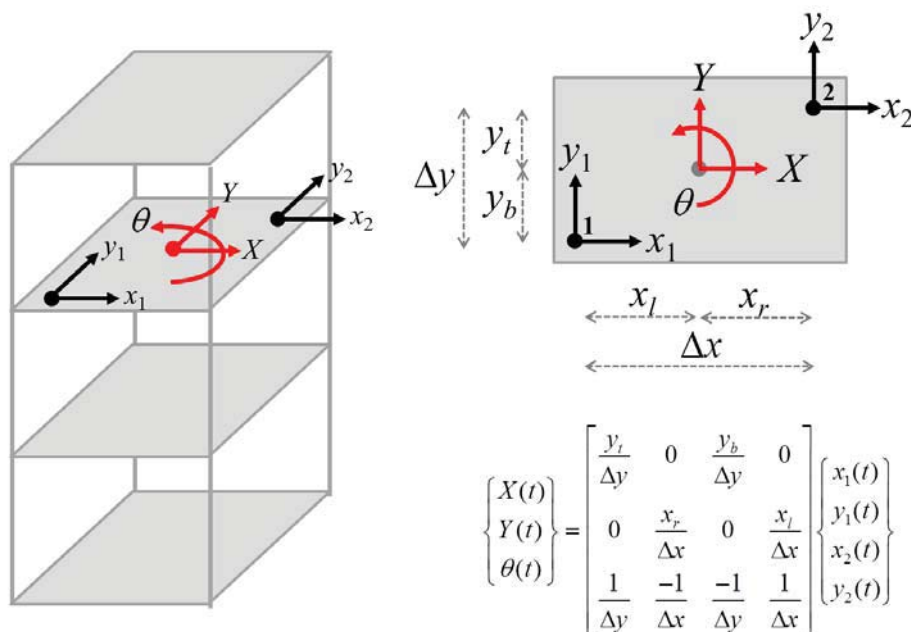
การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารซึ่งได้แก่ความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นไหว สามารถทำได้โดยการพิจารณาการสั่นไหวของอาคารแต่ละชั้น สมมติให้ในระนาบการเคลื่อนที่ของพื้นแต่ละชั้นมีลักษณะแข็งมาก การเคลื่อนที่ของแต่ละชั้นจึงเป็นการเคลื่อนที่แบบวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) ซึ่งแต่ละชั้นแสดงได้ด้วยระดับความอิสระ 3 ตัวคือการเคลื่อนที่แนวระนาบ 2 ทิศทาง และการหมุนอีก 1 ทิศทางดังรูปที่ 12



รูปที่ 3.12 การเคลื่อนที่ในแต่ละชั้นของอาคาร

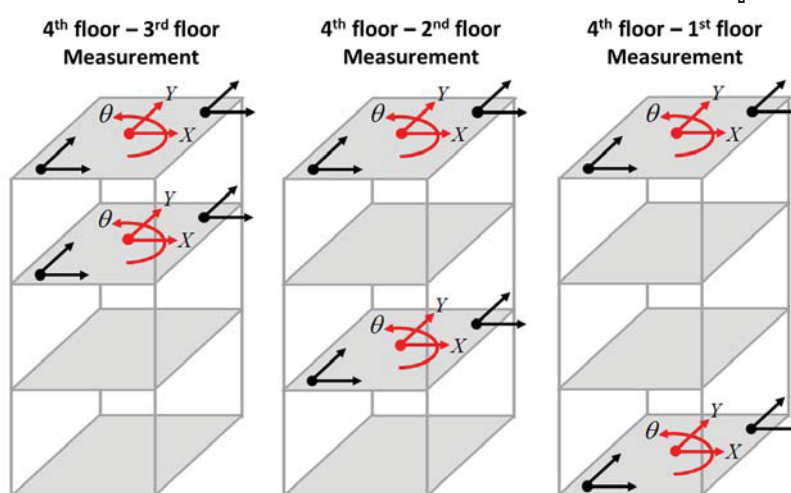
การคำนวณค่าการเคลื่อนที่ของชั้นใด ๆ กระทำได้โดยการติดตั้งหัววัดการสั่นไหว 2

ตำแหน่งที่มุมอาคารแต่ละชั้น ค่าการสั่นไหวจากหัววัดที่ได้สามารถนำมาคำนวณการเคลื่อนที่ของพื้นแต่ละชั้นได้ดังรูปที่ 13



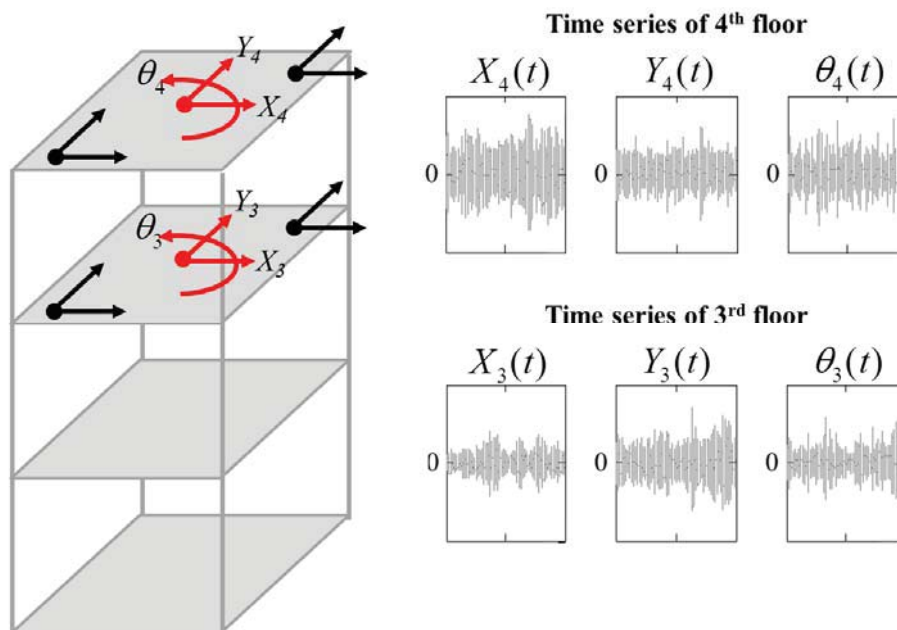
รูปที่ 3.13 วิธีการคำนวณการเคลื่อนที่ของอาคารจากข้อมูลหัววัด

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพื้นแต่ละชั้นของอาคารมีการสั่นไหวที่ไม่เป็นอิสระจากกันและกัน จึงต้องอ้างอิงการสั่นไหวของพื้นแต่ละชั้นและเปรียบเทียบกันจึงจะได้รูปร่างการสั่นไหวของทั้งอาคาร กระบวนการตรวจวัดจึงต้องใช้หัววัดทั้งหมด 4 ตัว โดยหัววัด 2 ตัวแรกจะวางอยู่บนพื้นอาคารชั้นบนสุดเพื่อใช้ในการอ้างอิง ส่วนหัววัดอีก 2 ตัวจะวางอยู่ในพื้นชั้นล่างลงมา การตรวจวัดจะกระทำในลักษณะจับคู่พื้นที่ทั้ง 2 ชั้นเช่นนี้และไล่ลงมาจนกว่าจะครบทั้งอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 3.14



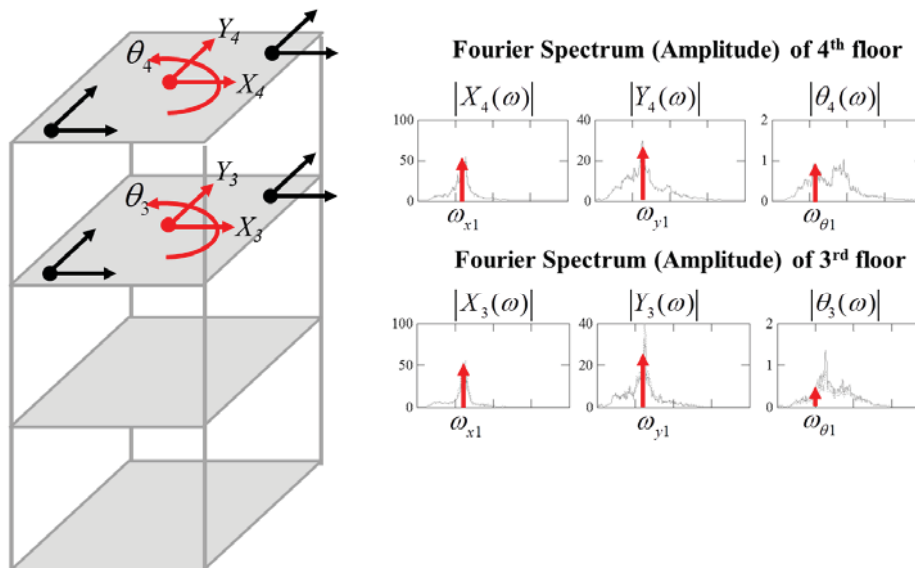
รูปที่ 3.14 วิธีการตรวจวัดโดยการจับคู่พื้นที่ชั้น

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดโดยการจับคู่ที่ละชั้นจะเป็นการเคลื่อนที่ตามเวลาหรือ Time series ของแต่ละชั้นดังตัวอย่างในรูปที่ 15



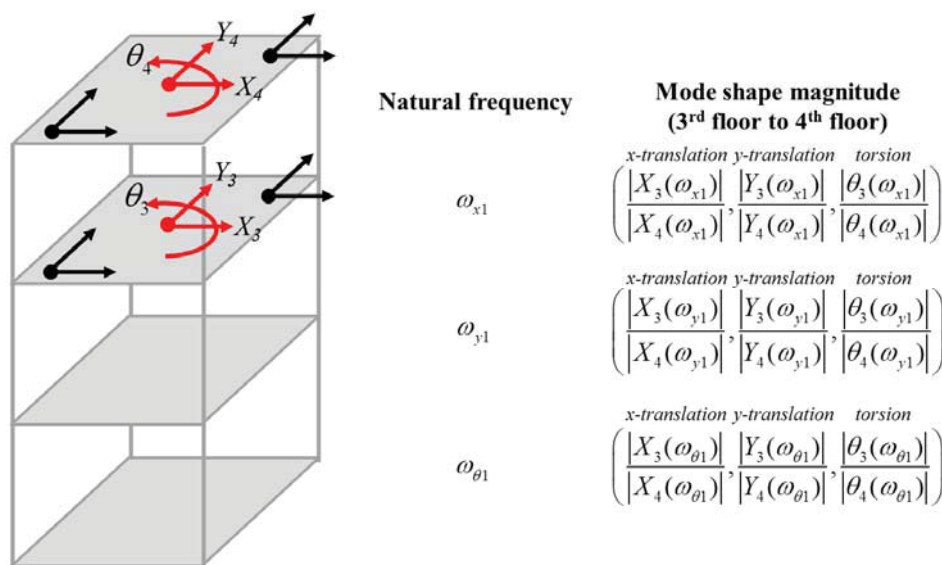
รูปที่ 3.15 ข้อมูลสั่นไหวของอาคารที่ได้จากการตรวจวัด

จากข้อมูลในรูปที่ 16 สามารถใช้การแปลงฟูเรียร์เพื่อให้อยู่ในรูปของฟูเรียร์สเปกตรัม (Fourier spectrum) ซึ่งประกอบด้วยสเปกตรัมของขนาด (Magnitude spectrum) และของเฟส (Phase spectrum) ตัวอย่างขนาดของฟูเรียร์สเปกตรัมของข้อมูลในรูปที่ 15 แสดงไว้ในรูปที่ 16



รูปที่ 3.16 ฟูเรียร์สเปกตรัมและความถี่ธรรมชาติของอาคาร

ความถี่ธรรมชาติในแต่ละทิศทางของอาคาร คำนวณได้จากตำแหน่งที่ฟูเรียร์สเปกตรัมมีค่าสูงสุดดังรูปที่ 16 ส่วนขนาดรูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ธรรมชาติใดๆ คำนวณได้จากขนาดสัมพัทธ์ระหว่างความสูงของฟูเรียร์สเปกตรัมดังแสดงไว้ในรูปที่ 17



รูปที่ 3.17 การคำนวณรูปร่างการสั่นไหวของอาคาร

ส่วนทิศทางของรูปร่างการสั่นไหว สามารถคำนวณได้จากเฟสเบ็คตรัมของพื้นทั้ง 2 ชั้น เทียบกัน เฟสที่ต่างกัน 0 องศาหรือ 360 องศาแสดงถึงการสั่นไหวไปในทิศทางเดียวกันขณะที่เฟสต่างกัน 180 องศา แสดงถึงการสั่นไหวไปในทิศทางตรงกันข้ามนั่นเอง

วิธีดังกล่าวเป็นการคำนวณความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นจากการตรวจวัดพื้นคู่หนึ่ง กระบวนการวิเคราะห์นี้จะเกิดขึ้นซ้ำอีกสำหรับข้อมูลที่วัดจากพื้นคู่อื่นๆจนกว่าจะครบทั้งอาคาร ด้วยวิธีการนี้จะทำให้ได้รูปร่างการสั่นของทั้งอาคาร

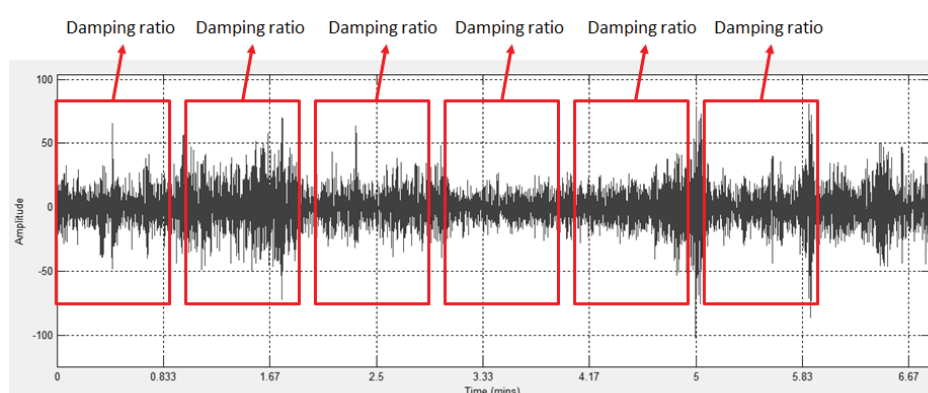
3.4.2 การวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง: อัตราส่วนความหน่วง

จากผลการตรวจวัดเบื้องต้นทำให้ทราบค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นไหว อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือค่าอัตราส่วนความหน่วงยังไม่ได้มีการคำนวณเอาไว้ ในทางปฏิบัติการประมาณค่าความหน่วงโดยเฉพาะโครงสร้างที่ไม่ได้อยู่ในห้องทดลองเช่น อาคาร เป็นสิ่งที่ทำได้ยากและให้ค่าไม่แน่นอน ที่ผ่านมานักคิดค่าความหน่วงสามารถหาได้จากสองวิธีคือ 1) โดยการตรวจจับสัญญาณการสั่นอิสระจากการตรวจวัดจริงหรือสังเคราะห์ขึ้นมาจาก Autocorrelation function ของการสั่นตามสภาวะแวดล้อม วิธีนี้ใช้ได้ดีเมื่อความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างในโหมดต่างๆไม่ใกล้กันมากนักและสัญญาณการสั่นอิสระมีคุณภาพที่ดีพอ และ 2) โดยการคำนวณจากฟูเรียร์สเปกตรัมในบริเวณตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติ (Half-power bandwidth) แต่ก็มีผลคลาดเคลื่อนอยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดในสองวิธีนั้นก็มักจะให้ค่าอัตราส่วนความหน่วงซึ่งกระจัดกระจายไม่แน่นอนเช่นเดียวกัน

เพื่อการปรับปรุงวิธีการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งหมายรวมทั้งหาค่าความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่นไหวและอัตราส่วนความหน่วง ในโครงการวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมที่ชื่อ System Realization using Information Matrix (SRIM) มาใช้คำนวณคุณสมบัติ

เชิงพลศาสตร์ในโดเมนเวลาเพื่อช่วยเพิ่มความถูกต้องให้กับเทคนิคที่ใช้อยู่ในปัจจุบันด้วย ส่วนรายละเอียดทางเทคนิคและการทดสอบประสิทธิภาพอัลกอริทึม SRIM ที่คณะผู้วิจัยได้นำมาประยุกต์ใช้ มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในภาคผนวกที่ 2.1

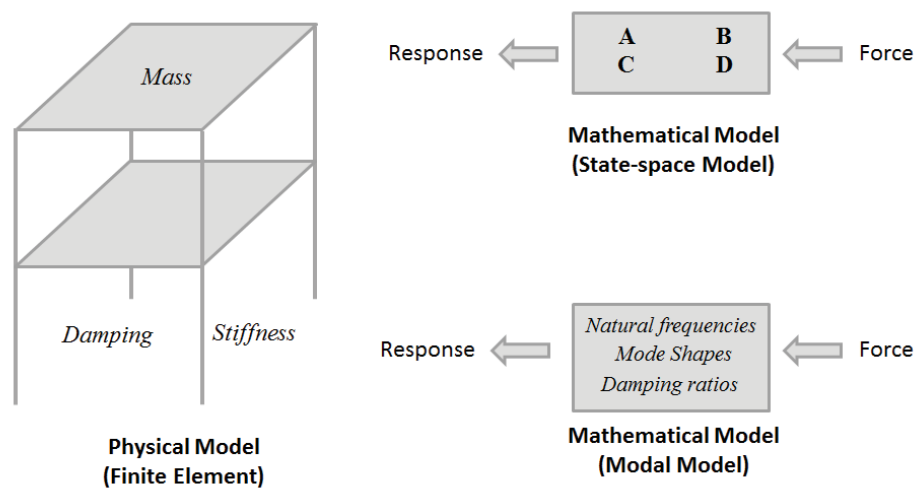
ในการคำนวณหาอัตราส่วนความหน่วง จำเป็นต้องใช้สัญญาณจากการวัดอาคารชั้นบนสุด เนื่องจากเป็นสัญญาณที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับชั้นอื่นๆ เมื่อแปลงสัญญาณการวัดให้เป็นค่าที่กึ่งกลางของแต่ละชั้นแล้วก็จะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนความหน่วงได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสัญญาณการวัดมีความยาวที่ยาวมาก การคำนวณหาอัตราส่วนความหน่วงจึงต้องตัดแบ่งช่วงสัญญาณออกเป็นช่วงสั้นๆ และคำนวณหาอัตราส่วนความหน่วงของแต่ละช่วง ดังรูปที่ 18 จากนั้นจึงนำทุกค่ามาเฉลี่ยกัน เมื่อได้ค่าความหน่วงของอาคาร จึงถือว่าแบบจำลองพฤติกรรมทางพลศาสตร์มีความสมบูรณ์



รูปที่ 3.18 แนวทางการคำนวณค่าความหน่วง

3.4.3 แบบจำลองพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง

แบบจำลองของโครงสร้างดังรูปที่ 19 อาจเป็นได้ทั้งแบบจำลองเชิงกายภาพ เช่น แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์แบบจำลองดังซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาพฤติกรรมเชิงกายภาพของแต่ละชั้นส่วนในอาคาร หรืออาจเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เช่นแบบจำลอง State-space ซึ่งเหมาะสมสำหรับการตรวจวัดการสั่นไหวจากข้อมูลจริง ส่วนแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพฤติกรรมทางพลศาสตร์ที่ได้มาจากการตรวจวัดก็คือแบบจำลองที่เรียกว่า Modal model ซึ่งในที่นี้ก็คือ ความถี่ธรรมชาติต่างๆ รูปร่างการสั่นต่างๆ และอัตราส่วนความหน่วง



รูปที่ 3.19 แบบจำลองพฤติกรรมประเภทต่างๆ

ในรายงานฉบับนี้จะนำเสนอแบบจำลองพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอาคารซึ่งเป็นแบบจำลองประเภท Modal model อันประกอบไปด้วยความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่น และอัตราส่วนความหน่วง

บทที่ 4

ผลการศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง

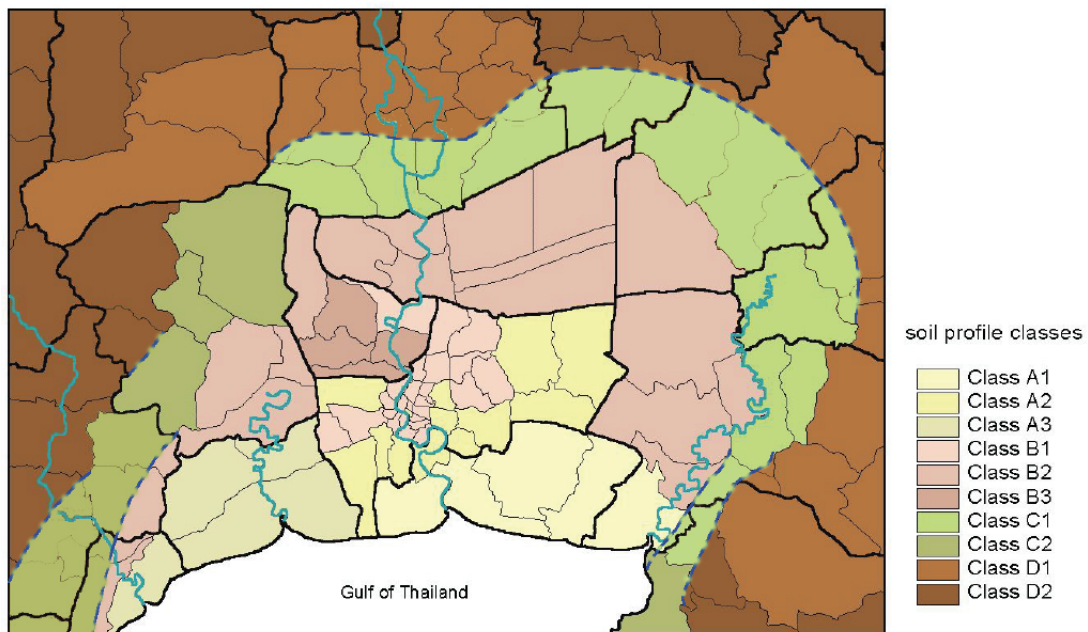
4.1 การรวบรวมข้อมูลทางธรณีเทคนิคของพื้นที่ศึกษา

การศึกษาในส่วนแรกคือการรวบรวมข้อมูลทางธรณีเทคนิคจากหลุมเจาะสำรวจดิน (Boring Log) และการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในพื้นที่ที่ศึกษา ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดกาญจนบุรีและกรุงเทพมหานคร โดยทำการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลต่างๆ ได้แก่ เว็บไซต์ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจดินของกรมโยธาธิการและผังเมือง (<http://www.dpt.go.th/soil>) บริษัทสำรวจเอกชน และจากงานวิจัยที่มีการศึกษามาก่อนหน้านี้

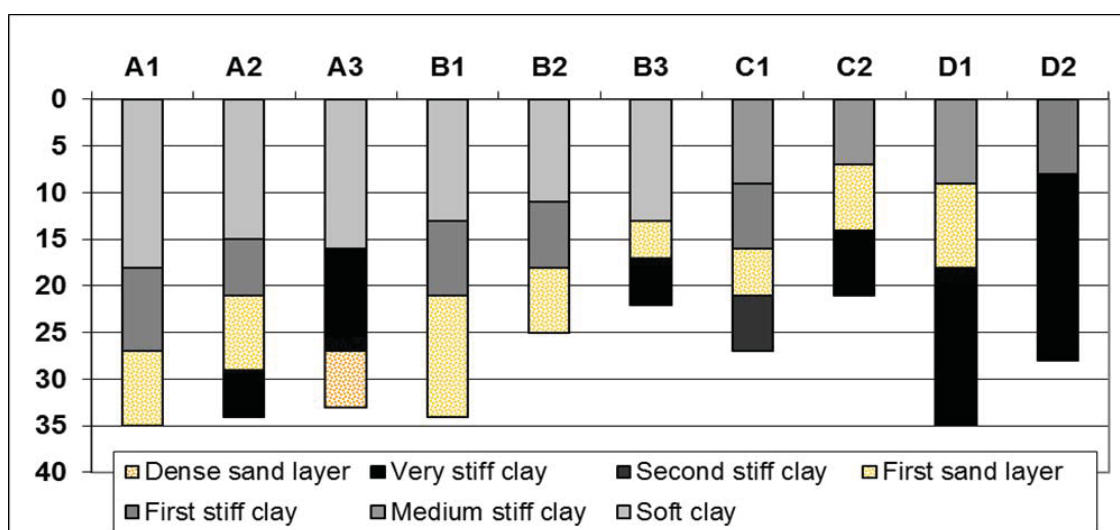
งานวิจัยที่ได้มีการทบทวนผลการวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล คือ Tuladhar (2003) ที่ได้ใช้ข้อมูลจากหลุมเจาะสำรวจดินและแบ่งประเภทชั้นดินบริเวณกรุงเทพมหานครออกเป็น 10 ประเภท และมีการอธิบายถึงลักษณะของชั้นดินในแต่ละระดับความลึก ความหนาของดินแต่ละชั้น และการประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนไว้ และ อำนาจ ยานูวิริยะกุล (2552) ที่จำแนกชั้นดินเหนียวอ่อนโดยพิจารณาความหนาของดินเหนียวอ่อนจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจทั่วทั้งบริเวณกรุงเทพฯ รวมทั้งการศึกษาของ Tuladhar (2004) ที่ได้เริ่มงานสำรวจค่าคาบอิทธิพลหลักของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยการตรวจวัดแบบหนึ่งจุดและวิเคราะห์ด้วยวิธี H/V spectral ratio

4.2 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tuladhar (2003) ได้ใช้ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจเพื่อจำแนกชั้นดินในบริเวณพื้นที่ภาคกลางหรือแห่งประเทศไทย โดยแสดงผลเป็น 10 ประเภท คือ A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, D1 และ D2 และสรุปความหนาของดินแต่ละชั้น ลักษณะของดินแต่ละชั้น ของแต่ละประเภท รวมถึงค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity, V_s) ตามความลึกของชั้นดินที่ได้จากการประมาณด้วยพารามิเตอร์จากข้อมูลหลุมเจาะ โดยพื้นที่ศึกษาและผลการจำแนกดินเป็นพื้นที่ย่อยจำนวน 10 ประเภท แสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของชั้นดินตามความลึกของดินประเภทต่าง ๆ ตารางที่ 4.1 แสดงถึงรายละเอียดของลักษณะของชั้นดินทั้ง 10 ประเภท

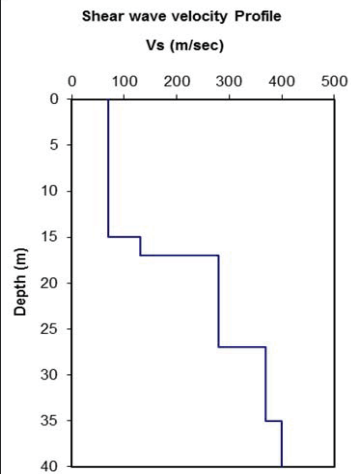
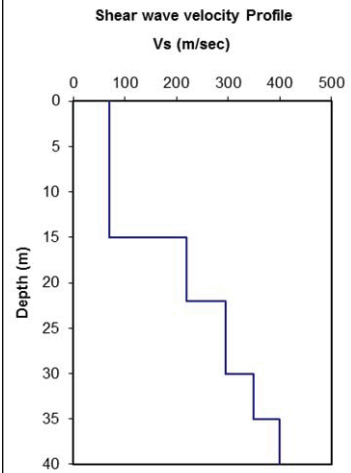
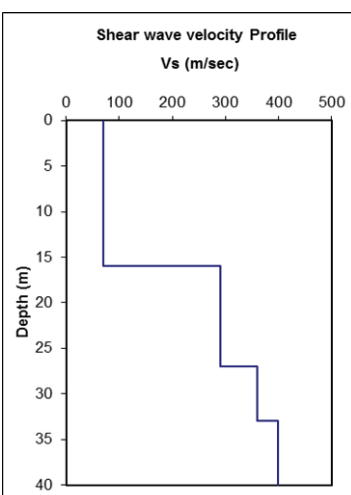


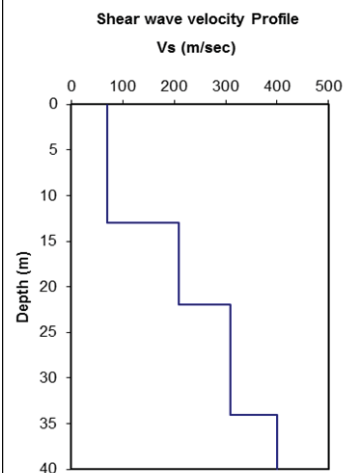
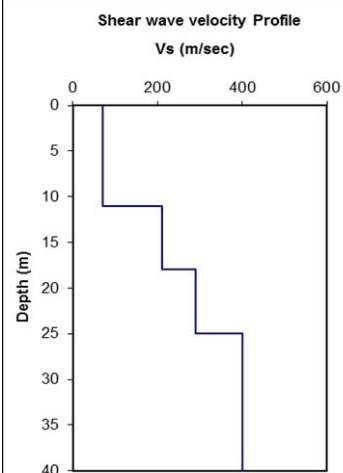
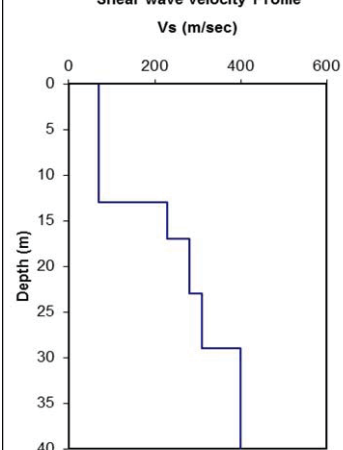
รูปที่ 4.1 แผนที่การจำแนกประเภทชั้นดิน บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (Tuladhar , 2003)

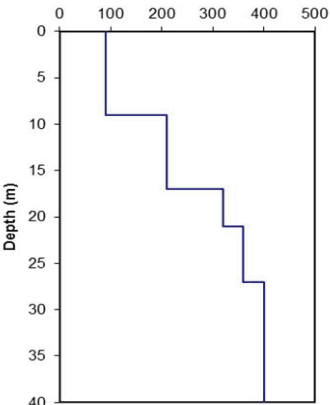
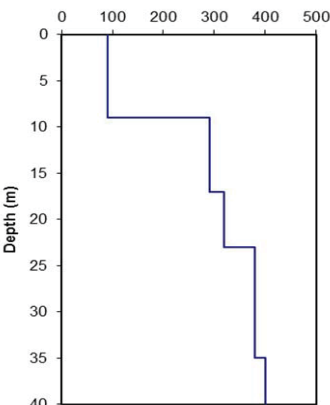
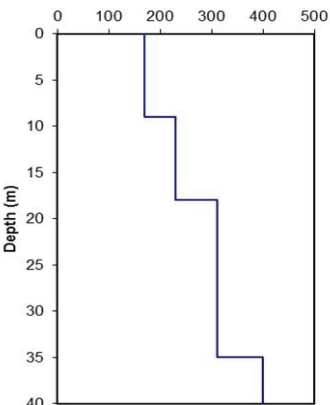


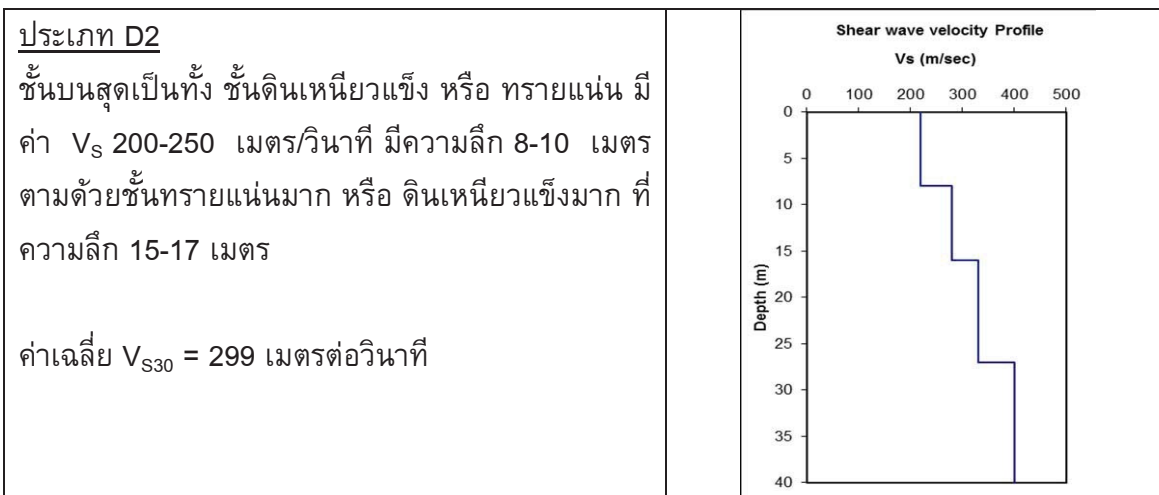
รูปที่ 4.2 แผนภูมิลักษณะของชั้นดินในแต่ละประเภท (Tuladhar, 2003)

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของชั้นดินที่จำแนกในเขต กทม และปริมณฑล (Tuladhar, 2003)

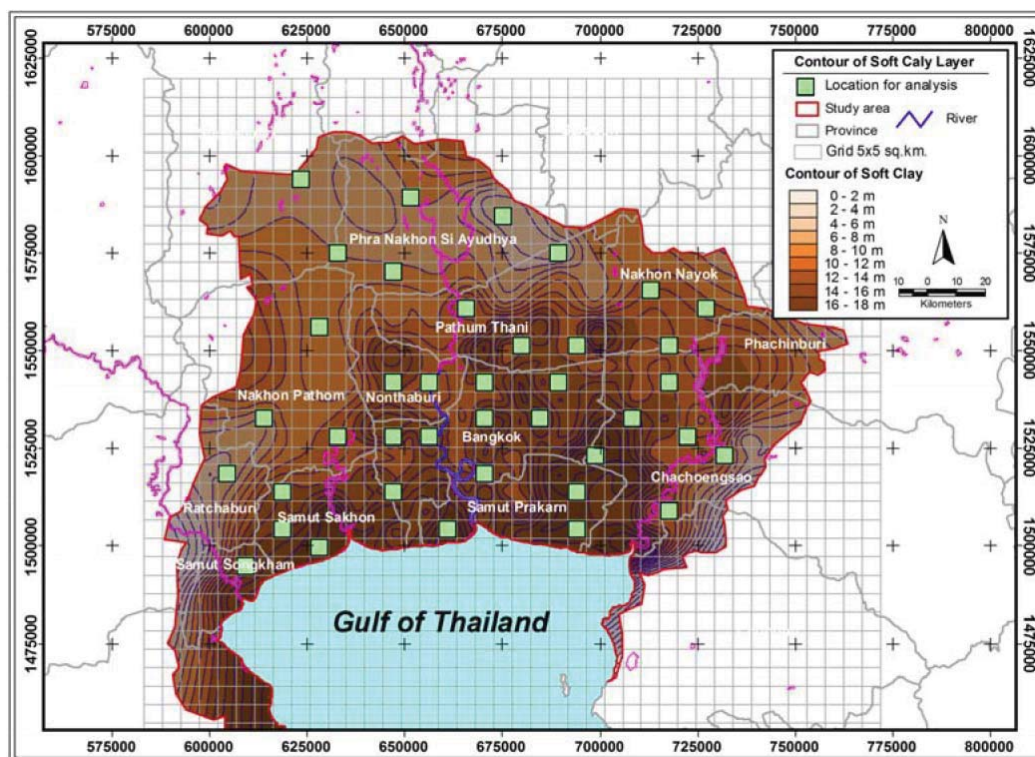
คำอธิบาย	ความเร็วคลื่นเฉือน (V_s)
<p>ประเภท A1</p> <p>อยู่บริเวณพื้นที่ใกล้กับอ่าวไทย ในจังหวัดสมุทรปราการ มีชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 16-20 เมตร มีค่า V_s 60-80 เมตร/วินาทีตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกที่มีความลึกถึง 26-28 เมตร มีค่า V_s 250-300 เมตร/วินาที สำหรับชั้นทรายชั้นแรกอยู่ที่ความลึกต่ำกว่า 35 เมตร มีค่า V_s 350-400 เมตร/วินาที</p> <p>ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 113$ เมตรต่อวินาที</p>	
<p>ประเภท A2</p> <p>อยู่บริเวณตอนล่างและทางทิศตะวันออกของพื้นที่กรุงเทพฯ ความหนาดินเหนียวอ่อนมีค่าตั้งแต่ 14-16 เมตร มีค่า V_s 60-80 เมตร/วินาที ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกที่มีค่า V_s 210-250 เมตร/วินาที ชั้นทรายชั้นแรกมีความลึกอยู่ต่ำกว่า 28-30 เมตรลงไป มีค่า V_s 270-320 เมตร/วินาที</p> <p>ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 110$ เมตรต่อวินาที</p>	
<p>ประเภท A3</p> <p>อยู่บริเวณใกล้กับอ่าวไทย บริเวณจังหวัดสมุทรสาครและอำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ความหนาของดินเหนียวอ่อนประมาณ 15-17 เมตร มีค่า V_s 60-80 เมตร/วินาที ตามด้วยดินเหนียวแข็งมาก มีค่า V_s 260-320 เมตร/วินาที ที่ระดับความลึก 25-30 เมตร ถัดไปเป็นชั้นทรายแน่นที่มีค่า V_s 350-380 เมตร/วินาที และตำแหน่งของดินเหนียวแข็งอยู่ที่ระดับ 30-35 เมตร</p> <p>ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 109$ เมตรต่อวินาที</p>	

<p>ประเภท B1</p> <p>อยู่บริเวณตะวันตกตอนบนของพื้นที่กรุงเทพฯ ความหนาของดินเหนียวอ่อนประมาณ 12-14 เมตร มีค่า V_s 60-80 เมตร/วินาที ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก มีค่า V_s 220-240 เมตร/วินาที ที่ระดับความลึก 20-22 เมตร ชั้นทรายชั้นแรกมีค่า V_s 280-340 เมตร/วินาที อยู่ในระดับความลึกต่ำกว่า 33-35 เมตร</p> <p>ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 118$ เมตรต่อวินาที</p>	
<p>ประเภท B2</p> <p>อยู่บริเวณจังหวัดปทุมธานีและทางทิศตะวันตกของจังหวัดฉะเชิงเทรา นครนายก และชลบุรี นอกจากนี้ยังพบในพื้นที่ทางทิศตะวันออกของจังหวัดนครปฐม กาญจนบุรี และสมุทรสงคราม มีค่า V_s 60-80 เมตร/วินาที ถึงระดับความลึก 10-12 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก มีค่า V_s 180-240 เมตร/วินาที ที่ระดับ 16-20 เมตร ชั้นทรายชั้นแรกอยู่ต่ำกว่าระดับ 22-28 เมตร มีค่า V_s 250-320 เมตร/วินาที</p> <p>ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 135$ เมตรต่อวินาที</p>	
<p>ประเภท B3</p> <p>อยู่บริเวณบางอำเภอของจังหวัดนนทบุรี มีความหนาของดินเหนียวอ่อนประมาณ 12-14 เมตร มีค่า V_s 60-80 เมตร/วินาที ตามด้วยชั้นทรายชั้นแรก มีค่า V_s 220-260 เมตร/วินาที ถึงระดับความลึก 16-18 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งมาก ที่มีค่า V_s 260-300 เมตร/วินาที ถึงระดับความลึก 20-25 เมตร</p> <p>ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 122$ เมตรต่อวินาที</p>	

<p>ประเภท C1</p> <p>ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง มีความหนาประมาณ 8-10 เมตร มีค่า V_s 80-100 เมตร/วินาที ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก และชั้นทรายชั้นแรก มีค่า V_s 200-250 เมตร/วินาที และ 300-350 เมตร/วินาที ตามลำดับ ซึ่งมีความหนาอยู่ที่ระดับ 15-18 เมตร และ 20-22 เมตร ตามลำดับ</p> <p>ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 172$ เมตรต่อวินาที</p>	<p style="text-align: center;">Shear wave velocity Profile</p> <p style="text-align: center;">V_s (m/sec)</p> 
<p>ประเภท C2</p> <p>ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง มีค่า V_s 80-100 เมตร/วินาที ที่ระดับ 8-10 เมตร ตามด้วยชั้นทรายชั้นแรก และดินเหนียวแข็งมาก มีค่า V_s 280-300 เมตร/วินาที และ 310-350 เมตร/วินาที ตามลำดับ อยู่ที่ระดับความลึก 15-18 เมตร และ 22-25 เมตร ตามลำดับ</p> <p>ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 182$ เมตรต่อวินาที</p>	<p style="text-align: center;">Shear wave velocity Profile</p> <p style="text-align: center;">V_s (m/sec)</p> 
<p>ประเภท D1</p> <p>ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง มีค่า V_s 160-180 เมตร/วินาที ที่ระดับ 8-10 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก และชั้นทรายชั้นแรก มีค่า V_s 200-280 เมตร/วินาที และ 280-350 เมตร/วินาที ตามลำดับ</p> <p>ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 229$ เมตรต่อวินาที</p>	<p style="text-align: center;">Shear wave velocity Profile</p> <p style="text-align: center;">V_s (m/sec)</p> 



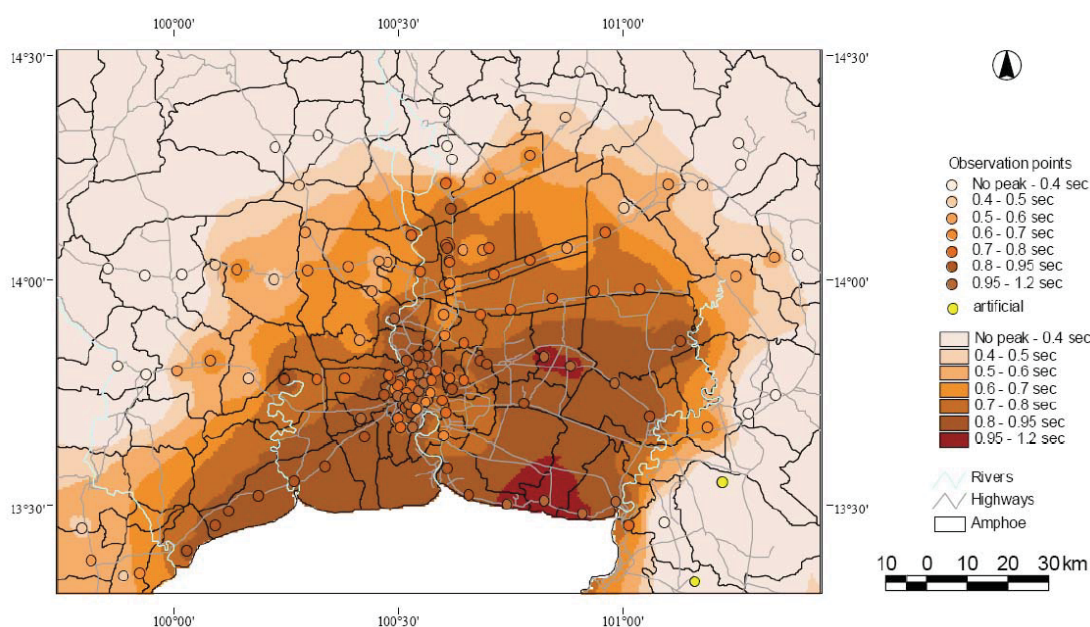
อำนาจ ยานูวริยะกุล (2552) ได้จัดทำแผนที่แสดงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยใช้ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจ 3,755 หลุม จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์เชิงพื้นที่โดยใช้คุณสมบัติดินในพื้นที่ย่อย 5X5 ตารางกิโลเมตร โดยการกำหนดตำแหน่งสำหรับเป็นตัวแทน การวิเคราะห์เชิงพื้นที่จะพิจารณาให้ตำแหน่งกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นที่จำนวน 39 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.3 มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนตั้งแต่ 6-18 เมตร ซึ่งความหนาของชั้นดินเหนียวนั้น จำแนกโดยใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u)



รูปที่ 4.3 ความหนาดินเหนียวอ่อนมาก-ดินเหนียวอ่อนบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ
(อำนาจ ยานูวริยะกุล, 2552)

จากรูปที่ 4.1 และ 4.3 สังเกตได้ว่า ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงอ่อนนั้นมีความหนาмаกบริเวณใกล้กับปากอ่าวไทย และค่อยๆลดลงเมื่อมีระยะห่างจากปากอ่าวไทยขึ้นไปทางตอนเหนือของแผนที่ บริเวณตอนบนของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา แต่เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดินในทิศตะวันตก-ตะวันออก บริเวณจังหวัดราชบุรี เพชรบุรี นครปฐม สุพรรณบุรี ชลบุรี และฉะเชิงเทรา แล้วจะพบว่า ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนจะลดลงเร็วกว่าทางตอนเหนือของพื้นที่ศึกษา

ในปี 2004 Tuladhar ได้ศึกษา Seismic Microzonation บริเวณแอ่งกรุงเทพฯ โดยวิธี Microtremor Observation แบบ 1 จุด แล้วนำข้อมูลจากการสำรวจมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant period, T_p) ของการสั่นไหวบริเวณผิวดินด้วยวิธี Horizontal to Vertical (H/V) spectral ratio analysis โดยที่ตำแหน่งการสำรวจด้วยวิธี Microtremor Observation กำหนดให้มีระยะห่างกันประมาณ 10 กิโลเมตร โดยมีข้อมูลทั้งหมด 145 ตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์ โดยพบว่าค่า T_p มีค่าค่อนข้างยาวประมาณ 0.8 ถึง 1.2 วินาทีในบริเวณใกล้อ่าวไทยของจังหวัดสมุทรปราการและสมุทรสาคร และมีความสอดคล้องกับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน ค่า T_p มีค่าประมาณ 0.8 ถึง 1.0 วินาที สำหรับบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษา และมีค่าลดลงบริเวณตอนเหนือบริเวณจังหวัดปทุมธานี โดย T_p มีค่าประมาณ 0.7 ถึง 0.8 วินาที จนถึงจังหวัดอยุธยาที่มีค่าต่ำกว่า 0.4 วินาที ค่า T_p ลดลงในด้านตะวันออก และตะวันตกเช่นกัน ผลการเปลี่ยนแปลงค่า T_p แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 คาบอิทธิพลหลัก (Predominant period, T_p) บริเวณแอ่งกรุงเทพฯ (Tuladhar, 2004)

4.3 ผลของการรวบรวมข้อมูล

จากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจที่รวบรวม ได้ทำการจำแนกลักษณะของชั้นดินโดยใช้พารามิเตอร์ที่สนใจ คือ ค่าการทดสอบฝังจรมมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) ที่ระดับความลึกต่าง ๆ และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) เพื่อนำไปจำแนกประเภทชั้นดินเหนียว ซึ่งค่า SPT ที่ระดับความลึกต่างๆ นี้จะนำมาทำการหาค่าเฉลี่ยจากผิวถึงระดับความลึก โดยมีเป้าหมายที่ 30 เมตร และหากหลุมเจาะตื้นกว่า 30 เมตร จะทำการหาค่าเฉลี่ยตามข้อมูลที่ได้ เช่น การหาค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึก (\bar{N}) ใช้การคำนวณดังสมการที่

4.1

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (4.1)$$

โดยที่ N_i เป็นค่าการทดสอบฝังจรมมาตรฐาน สำหรับชั้นดินทราย ดินเหนียว และหิน ชั้นดินที่ i
 d_i เป็นความหนา สำหรับชั้นดินทราย ดินเหนียว และหิน ชั้นดินที่ i
 n เป็น จำนวนชั้นดิน ในช่วงความลึกที่พิจารณา

ค่า S_u นำมาใช้ในการจำแนกชั้นดินเหนียวออกเป็นประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า Unconfined compressive strength ดังสมการที่ 4.2

$$S_u = Q_u/2 \quad (4.2)$$

โดยที่ S_u = Undrained shear strength (T/m^2)

Q_u = Unconfined compressive strength (T/m^2)

ที่มา : Braja M.Das, 2008

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT, Q_u กับความแข็งแรงของดินเหนียว

SPT (N) (blows/ft)	Unconfined compressive strength, Q_u (T/m^2)	Consistency
< 2	< 2.5	very soft
2 – 4	2.5 – 5.0	soft
4 – 8	5.0 – 10.0	medium stiff
8 – 15	10.0 – 20.0	stiff

SPT (N) (blows/ft)	Unconfined compressive strength, Q_u (T/m ²)	Consistency
15 – 30	20.0 – 40.0	very stiff
> 30	> 40.0	hard

ที่มา : http://www.gerd.eng.ku.ac.th/Cai/Ch16/ch162_theory.htm

ในการศึกษานี้ให้ความสนใจต่อชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) และชั้นดินเหนียวอ่อนมาก (Very Soft Clay) เนื่องจากเป็นชั้นดินเหนียวที่มีความสามารถในการแผ่ขยายคลื่นแผ่นดินไหวได้ในบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล ดังนั้น เมื่อนำเกณฑ์จากตารางที่ 4.2 และความสัมพันธ์กับสมการที่ 4.2 มาใช้พิจารณาหาค่าความหนาของชั้นดินเหนียวจากข้อมูลผลการเจาะสำรวจดิน จึงพิจารณาเฉพาะค่า S_u ที่มีค่าไม่เกิน 2.5 ตันต่อตารางเมตร หรือ Q_u ที่มีค่าไม่เกิน 5 ตันต่อตารางเมตร (เกณฑ์ของชั้นดินเหนียวอ่อน ดังตารางที่ 4.2) แล้วนำค่าความหนาของชั้นดินเหนียวในแต่ละพื้นที่ที่ได้นั้น ไปจัดทำฐานข้อมูลในรูปของแผนที่ของพื้นที่ศึกษา

จากข้อมูลของหลุมเจาะสำรวจที่รวบรวมได้ และตำแหน่งของหลุมเจาะที่ได้จากการอ้างอิงในข้อมูล ได้ถูกนำมาประมวลผล และแสดงเป็นรูปแผนที่ของค่าที่เปลี่ยนแปลงของบริเวณที่ทำการศึกษา โดยนำเสนอในรูปของ แผนที่แสดงผลของค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกต่างๆ ในพื้นที่ที่ทำการศึกษา และ แผนที่แสดงผลของความหนาของชั้นดินเหนียวประเภทต่างๆ โดยใช้ค่า S_u เป็นพารามิเตอร์ในการจำแนกชั้นดิน

ในการจำแนกชั้นดินเพื่อประโยชน์ในการศึกษาด้านแผ่นดินไหว ได้อ้างอิงกับมาตรฐานการจำแนกประเภทชั้นดินของมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302, 2552) ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การจำแนกประเภทชั้นดินตาม มยผ.1302 (พ.ศ. 2552)

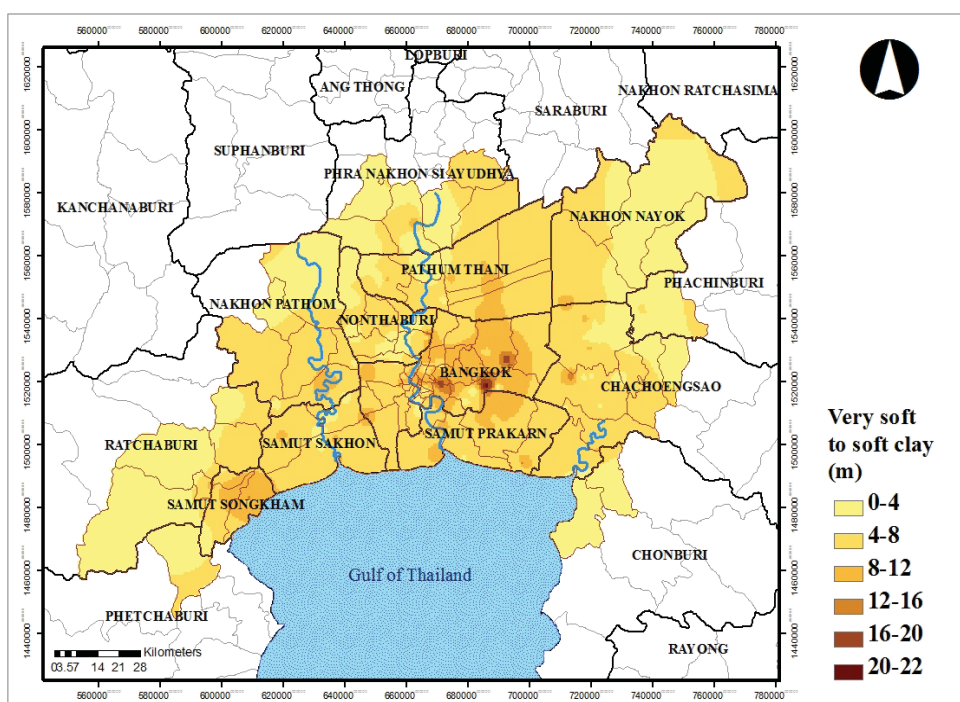
ประเภทชั้นดิน	Shear wave velocity*	SPT*	Undrained Shear Strength*
A	> 1500 เมตรต่อวินาที	-	-
B	750 - 1500 เมตรต่อวินาที	-	-
C	360 - 750 เมตรต่อวินาที	> 50	> 100 กิโลปาสคาล
D	180 - 360 เมตรต่อวินาที	15 - 50	50 - 100 กิโลปาสคาล
E	< 180 เมตรต่อวินาที	< 15	< 50 กิโลปาสคาล
	มีชั้นดินที่มีความหนามากกว่า 3 เมตร ที่มีคุณสมบัติดังนี้ Plasticity Index (PI) > 20 Moisture Content (w) > 40% S_u < 25 กิโลปาสคาล		

* ใช้ค่าเฉลี่ยถึงระดับความลึก 30 เมตรจากผิวดิน

พื้นที่ที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 3 พื้นที่หลักๆ ได้แก่ (ก) บริเวณแอ่งกรุงเทพฯ (ได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี นครปฐม สมุทรสาคร สมุทรปราการ สมุทรสงคราม ราชบุรี เพชรบุรี อัญญา นครนายก ฉะเชิงเทรา ชลบุรี และปราจีนบุรี) (ข) กาญจนบุรี และ (ค) เชียงใหม่ จากการรวบรวม ข้อมูลพารามิเตอร์เกี่ยวกับคุณสมบัติของดินซึ่งประกอบด้วย ค่าการทดสอบฝังจัมมาตรฐาน (Standard penetration test, SPT) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) ของพื้นที่ที่ทำการศึกษาทั้ง 3 พื้นที่หลัก จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นฐานข้อมูล ในรูปของแผนที่ ซึ่งการศึกษาวิจัยได้ผลดังนี้

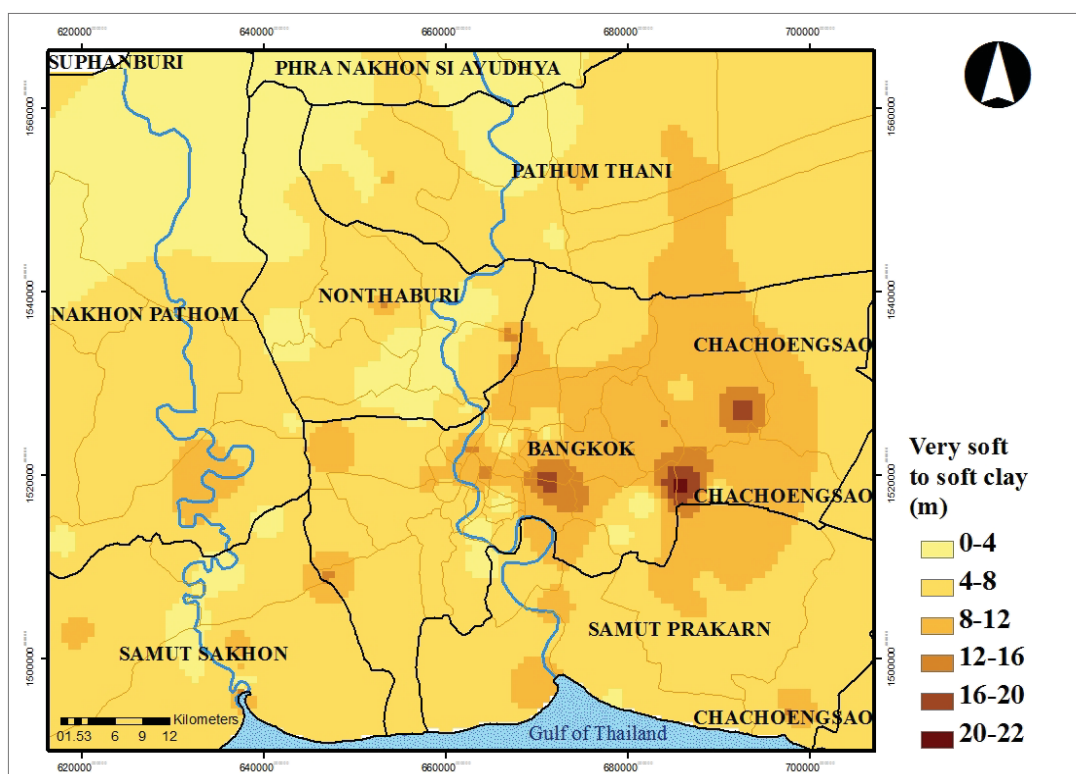
ก) กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

จากผลการศึกษาริเวณแอ่งกรุงเทพฯ โดยมีพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษานี้จำนวน 265 จุด พบว่า เมื่อจำแนกดินเหนียวอ่อนด้วยค่า S_u ที่มีค่าตั้งแต่ 0-2.5 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งจัดเป็นดินประเภท ดินเหนียวอ่อนมาก-ดินเหนียวอ่อน ได้ผลคือ ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมาก-ดินเหนียวอ่อน มีค่าตั้งแต่ 0-20 เมตร ซึ่งความหนาของดินเหนียวอ่อนมาก-ดินเหนียวอ่อน จะมากบริเวณพื้นที่ที่ ใกล้กับอ่าวไทย เมื่อสูงขึ้นไปทางเหนือของแอ่งกรุงเทพฯ พบว่าความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน มาก-ดินเหนียวอ่อน จะค่อยๆลดลง จนกระทั่งไม่มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเลย ในพื้นที่ของ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา แต่สังเกตพบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมาก- ดินเหนียวอ่อน ในแนวทิศตะวันตก-ตะวันออก บริเวณจังหวัดเพชรบุรี ราชบุรี นครปฐม สุพรรณบุรี ชลบุรี และฉะเชิงเทรา มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเร็วกว่า เมื่อ เปรียบเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนในแนวทิศเหนือ-ใต้ ดังแสดง ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนที่แสดงความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนมาก – ดินเหนียวอ่อน บริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล

เมื่อพิจารณาในพื้นที่ศูนย์กลางของพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของกรุงเทพฯ และปริมณฑล มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมาก-ดินเหนียวอ่อน ประมาณ 4-16 เมตร และพบว่าพื้นที่ทางตอนกลางของกรุงเทพมหานคร เลย์ไปทางทิศตะวันออกมีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมาก-ดินเหนียวอ่อน 20 เมตร และมีบางจุดที่มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมาก-ดินเหนียวอ่อนถึง 22 เมตร



รูปที่ 4.6 แผนที่แสดงความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนมาก บริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑล

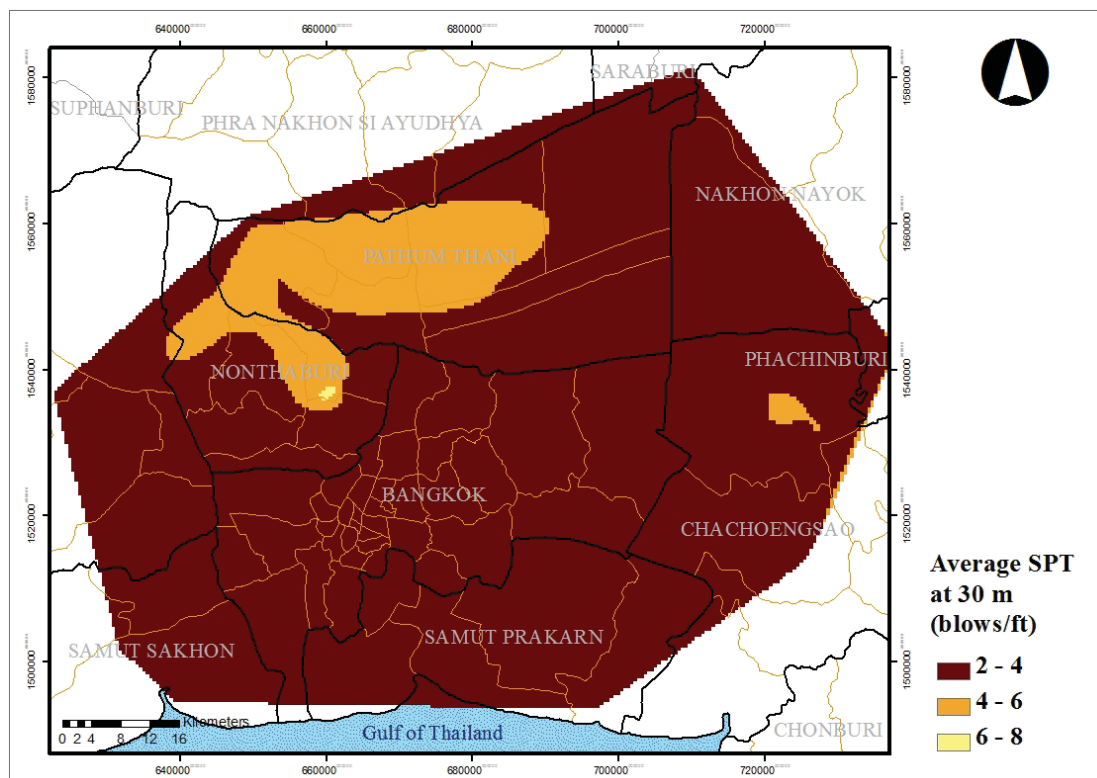
เมื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ Tuladhar ในเรื่องการแบ่งความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนตามประเภทชั้นดินต่างๆ และเปรียบเทียบกับผลของ อำนาจ ยานูวิริยะกุล ในเรื่องของ การจำแนกความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษาความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมาก-ดินเหนียวอ่อนในเขต กทม และปริมณฑล

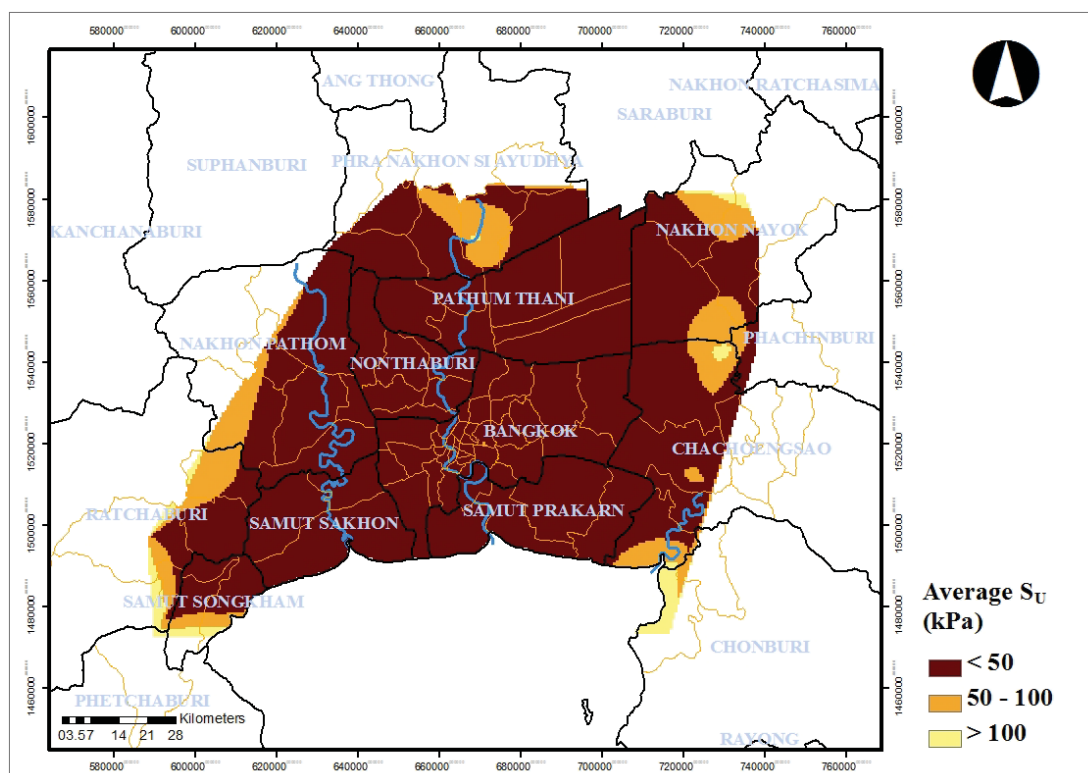
ประเภท	ผลจากข้อมูลงานนี้	Tuladhar (2003)	อำนาจ (พ.ศ. 2552)
A1	ดินเหนียวอ่อน 8-16 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 16-20 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 14-18 เมตร
A2	ดินเหนียวอ่อน 12-16 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 14-16 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 12-16 เมตร

ประเภท	ผลจากข้อมูลงานนี้	Tuladhar (2003)	อำนาจ (พ.ศ. 2552)
	บางบริเวณหนา 20-22 เมตร		
A3	ดินเหนียวอ่อน 8-16 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 15-17 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 14-18 เมตร
B1	ดินเหนียวอ่อน 8-16 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 12-14 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 12-16 เมตร
B2	ดินเหนียวอ่อน 8-16 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 10-12 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 2-14 เมตร
B3	ดินเหนียวอ่อน 4-12 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 12-14 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 10-16 เมตร
C1	ดินเหนียวอ่อนน้อยกว่า 4 เมตรหรือไม่มีความหนาของดินเหนียวอ่อน	ไม่พบความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน	ดินเหนียวอ่อน 0-4 เมตร
C2	ดินเหนียวอ่อนน้อยกว่า 4 เมตรหรือไม่มีความหนาของดินเหนียวอ่อน	ไม่พบความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน	ดินเหนียวอ่อน 0-4 เมตร
D1	ดินเหนียวอ่อนน้อยกว่า 4 เมตรหรือไม่มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเลย	ไม่พบความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน	ไม่พบความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน
D2	ดินเหนียวอ่อนน้อยกว่า 4 เมตรหรือไม่มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเลย	ไม่พบความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน	ไม่พบความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน

เมื่อจำแนกประเภทชั้นดินตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1302, 2552) พบว่า พื้นที่บริเวณจังหวัดสมุทรปราการ กรุงเทพฯ สมุทรสาคร นนทบุรี ปทุมธานี และบางพื้นที่ของจังหวัดนครปฐม จัดอยู่ในประเภท E ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1302, 2552) โดยมีค่า SPT อยู่ในช่วง 2-4 ครั้งตอฟุต ซึ่งน้อยกว่า 15 ครั้งตอฟุต และค่า S_u มีค่าน้อยกว่า 50 กิโลปาสกาล ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 30 เมตร บริเวณกรุงเทพและปริมณฑล

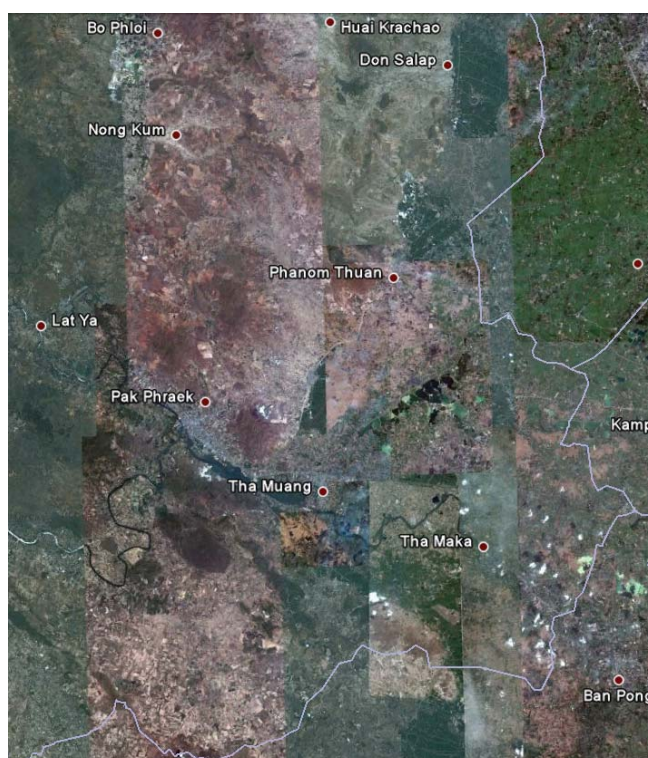


รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ที่ความลึกจากผิวถึง 30 เมตร

เมื่อพิจารณาพื้นที่โดยรอบกรุงเทพฯ จังหวัดสมุทรสาคร สมุทรปราการ และปทุมธานีแล้วพบว่า มีค่าเฉลี่ย S_u อยู่ในช่วง 50-100 กิโลปาสคาล และมีค่ามากกว่า 100 กิโลปาสคาลในบริเวณพื้นที่รอบๆขอบของข้อมูลที่ใช้ศึกษาได้แก่ จังหวัดชลบุรี เพชรบุรี ราชบุรี และนครปฐม หากพิจารณาเพียงค่าเฉลี่ย S_u พื้นที่ดังกล่าวนี้จะถูกจัดอยู่ในประเภท D ถึง C ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1302, 2552) ซึ่งไม่สอดคล้องกับค่าเฉลี่ย SPT ที่มีค่า น้อยกว่า 15 ครั้งต่อฟุต ที่บ่งบอกว่าพื้นที่บริเวณดังกล่าวควรถูกจัดให้อยู่ในประเภท E

ข) จังหวัดกาญจนบุรี

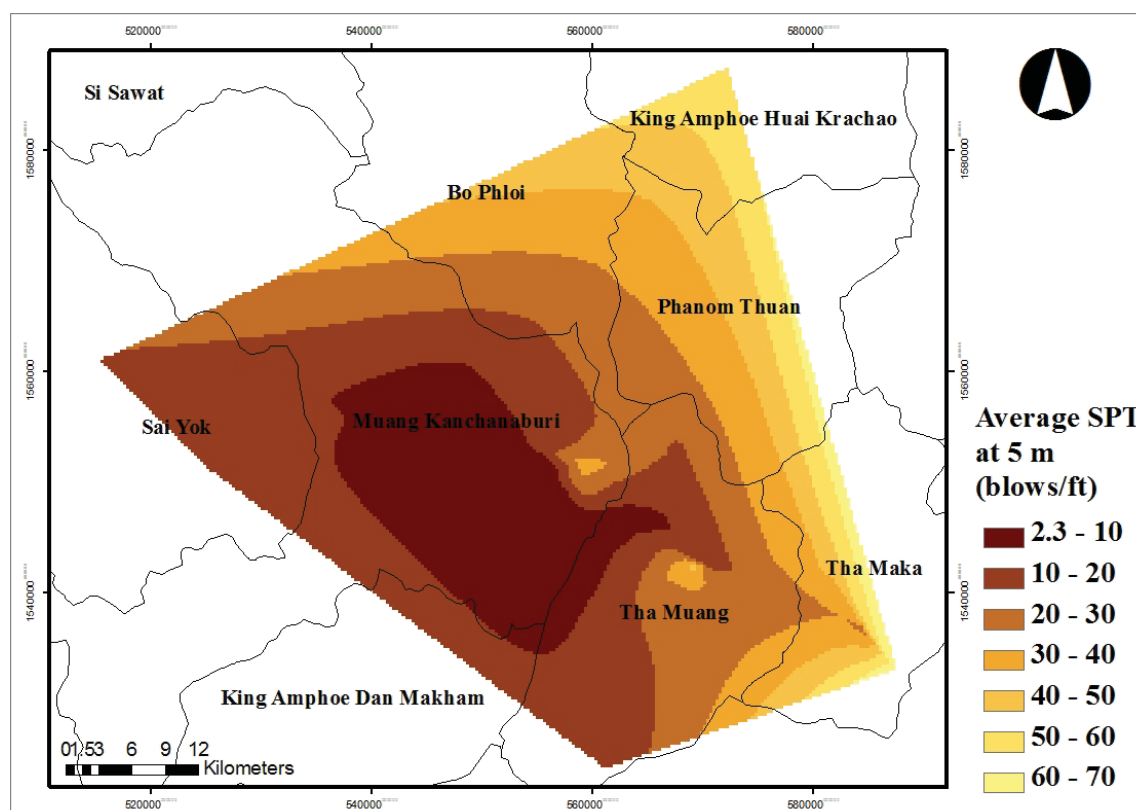
จังหวัดกาญจนบุรีตั้งอยู่ในภาคตะวันตกของประเทศไทย ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปมีแนวเขาอยู่ทางตะวันตกและทางตอนเหนือของจังหวัด มีแม่น้ำแควตัดผ่าน และมีแนวเขาใกล้กับแม่น้ำแคว ซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีชุมชนหนาแน่น สำหรับพื้นที่ที่อยู่ห่างจากชุมชนมีลักษณะโดยส่วนใหญ่ เป็นพื้นที่โล่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ลักษณะทางภูมิประเทศของจังหวัดกาญจนบุรี

จากการศึกษาในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี โดยการรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะทั้งหมด จำนวน 21 ข้อมูล ครอบคลุมพื้นที่อำเภอไทรโยค อำเภอเมือง อำเภอท่าม่วง อำเภอท่ามะกา และกิ่งอำเภอห้วยกระเจา แล้วนำมาจัดทำฐานข้อมูลในรูปของแผนที่โดยใช้พารามิเตอร์เกี่ยวกับคุณสมบัติของดิน

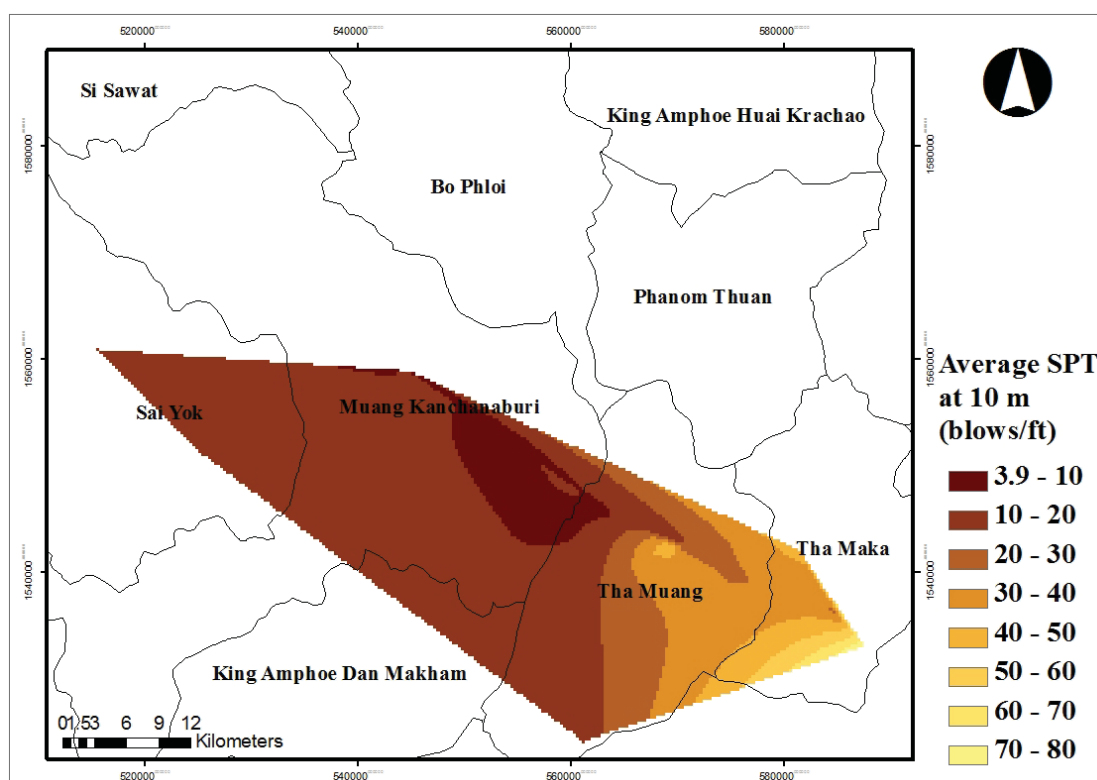
ได้แก่ ค่า SPT และค่า S_u เนื่องจากข้อมูลหลุมเจาะที่รวบรวมได้มีระดับความลึกไม่ถึง 30 เมตร การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย SPT ในแต่ละระดับความลึก จึงแบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 5 เมตร 10 เมตร และ 15 เมตร ดังรูปที่ 10 - 12 ตามลำดับ และความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง แสดงดังรูปที่ 13 ซึ่งการจำแนกชั้นดินพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีนี้ จำแนกด้วยค่า S_u ที่มีค่าไม่เกิน 20 ตันต่อตารางเมตร กล่าวคือ คิดความหนาชั้นดินเหนียวจนกระทั่งถึงชั้นดินประเภท very stiff clay และไม่สามารถจำแนกประเภทดินตามมาตรฐาน มยผ. 1302 ได้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการจำแนกประเภทจากหลุมเจาะ ดังนั้น จึงเป็นการศึกษาลักษณะของชั้นดินในภาพรวมของพื้นที่เท่านั้น เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 5 เมตร พบว่าพื้นที่อำเภอเมืองมีค่าเฉลี่ย SPT น้อยกว่า 10 ครั้งต่อฟุต จากนั้นค่าเฉลี่ย SPT จะเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ไกลจากอำเภอเมือง ไปในพื้นที่ อำเภอไทรโยค บ่อพลอย พนมทวน ท่ามะกา ท่าม่วง และกิ่งอำเภอห้วยกระเจา จนมีค่าสูงสุดถึง 70 ครั้งต่อฟุต บริเวณอำเภอท่ามะกาและกิ่งอำเภอห้วยกระเจา ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 5 เมตร

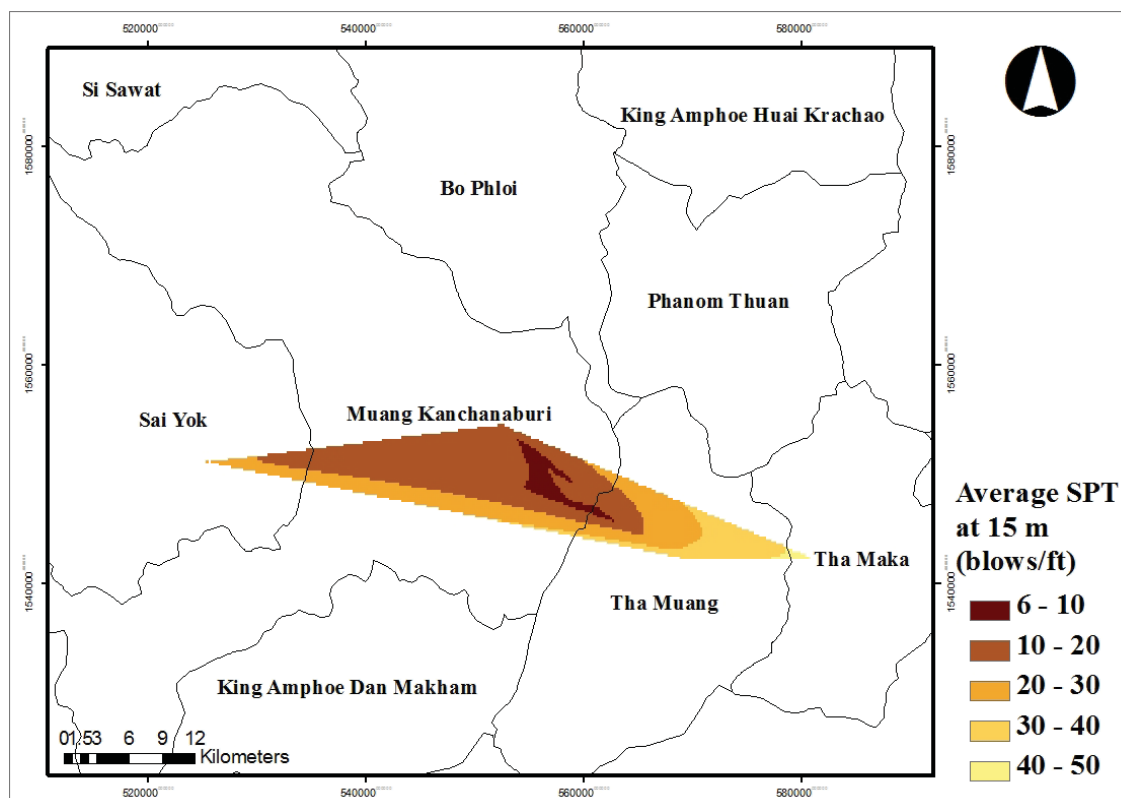
เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10 เมตร เนื่องจากสภาพดินส่วนใหญ่ในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี เป็นดินแข็ง ทำให้เมื่อเจาะสำรวจลงไปแล้วยากต่อการหาค่า SPT จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงมีจำนวนลดลง จากผลการศึกษาพบว่า บริเวณอำเภอเมืองที่ระดับความลึกจากผิวถึง 5 เมตร มีค่าเฉลี่ย SPT น้อยกว่า 10 ครั้งต่อฟุต ในระดับความลึกจากผิว

ถึง 10 เมตร ก็ยังคงพบว่าพื้นที่เดียวกันนี้ยังมีค่าเฉลี่ย SPT น้อยกว่า 10 ครั้งต่อฟุตเช่นเดิม แต่พื้นที่ที่มีขนาดเล็กลง พื้นที่อำเภอเมืองส่วนที่เหลือ และอำเภอไทรโยค มีค่าเฉลี่ย SPT ประมาณ 10 – 20 ครั้งต่อฟุต เมื่อพื้นที่อยู่ห่างจากอำเภอเมืองออกไป ค่าเฉลี่ย SPT มีค่าเพิ่มขึ้นไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของจังหวัด บริเวณอำเภอท่ามะกา ซึ่งมีค่าสูงถึง 70-80 ครั้งต่อฟุต แสดงดังรูปที่ 4.11



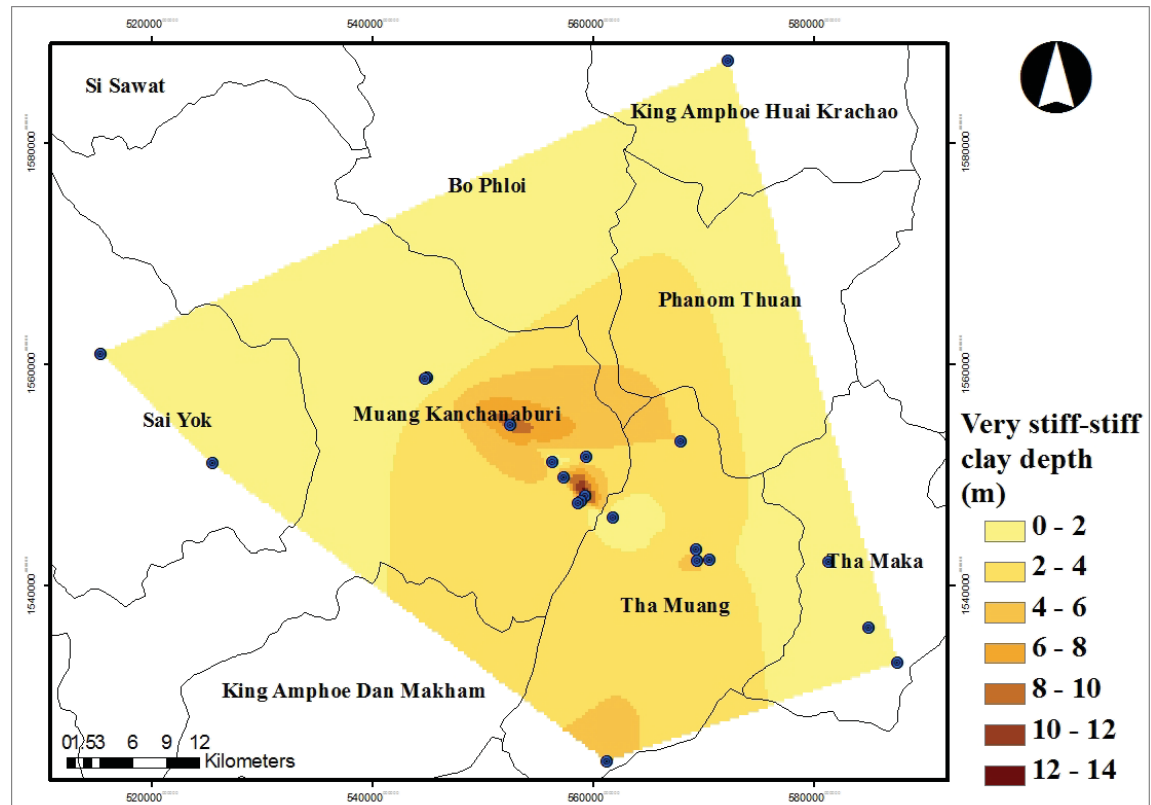
รูปที่ 4.11 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10 เมตร

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 15 เมตร ซึ่งอยู่ในพื้นที่อำเภอเมือง อำเภอไทรโยค อำเภอท่าม่วง และอำเภอท่ามะกาบางส่วน มีจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่จำนวนน้อย แต่แนวโน้มของผลการศึกษายังคงมีลักษณะที่คล้ายกัน กล่าวคือ มีบางพื้นที่ของอำเภอเมืองที่มีค่าเฉลี่ย SPT ต่ำกว่า 10 ครั้งต่อฟุต โดยพื้นที่ที่มีขนาดเล็กลง แต่พื้นที่ส่วนใหญ่ของอำเภอเมืองมีค่าประมาณ 10 – 20 ครั้งต่อฟุต ค่าเฉลี่ย SPT มีค่าเพิ่มขึ้นไปทางอำเภอท่าม่วงและอำเภอท่ามะกา มีค่าเฉลี่ย SPT 40 – 50 ครั้งต่อฟุตบริเวณอำเภอท่ามะกา และมีค่า 20 - 40 ครั้ง บริเวณอำเภอท่าม่วง สำหรับพื้นที่อำเภอไทรโยค มีค่าเฉลี่ย SPT ประมาณ 10 – 30 ครั้งต่อฟุต ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 15 เมตร

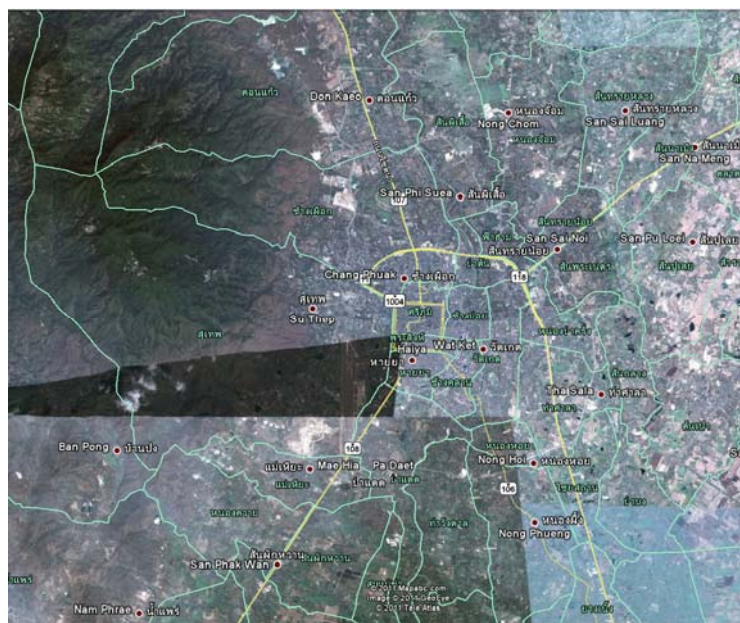
เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง โดยใช้ค่า S_u ที่มีค่าต่ำกว่า 20 ตันต่อตารางเมตร ผลการศึกษาพบว่า บริเวณที่มีความหนาของดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง มากกว่า 10 เมตร พบอยู่ในบริเวณอำเภอเมือง จากนั้นความหนาจะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีความหนาน้อยกว่า 2 เมตรบริเวณอำเภอไทรโยค บ่อพลอย กิ่งอำเภอห้วยกระเจา ท่ามะกา และบางพื้นที่ของอำเภอนมทวน ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.13 หากเปรียบเทียบความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง กับค่าเฉลี่ย SPT แล้วพบว่ามีความสอดคล้องกัน กล่าวคือ บริเวณที่มีความหนาของดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง มากกว่า 10 เมตรซึ่งอยู่บริเวณอำเภอเมือง มีค่าเฉลี่ย SPT ที่ต่ำกว่า 10 ครั้งต่อฟุต ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 5 เมตร และมีค่า น้อยกว่า 20 ครั้งต่อฟุต ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10 เมตร และ 15 เมตร ตามลำดับ สำหรับพื้นที่ที่ห่างจากอำเภอเมือง ความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็งมีค่าลดลง แต่มีค่าเฉลี่ย SPT ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากดินเริ่มแข็งขึ้น ได้แก่ บริเวณอำเภوتاมบ่อ ซึ่งมีความหนาน้อยกว่า 4 เมตร มีค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 5 เมตร, 10 เมตร, และ 15 เมตร ตามลำดับ ประมาณ 10-40 ครั้งต่อฟุต และอำเภوتاมะกาที่มีความหนาน้อยกว่า 2 เมตร มีค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 5 เมตร และ 10 เมตร ประมาณ 40-70 ครั้งต่อฟุต และมีค่า 40-50 ครั้งต่อฟุต ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 15 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 10-12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง

ค) จังหวัดเชียงใหม่

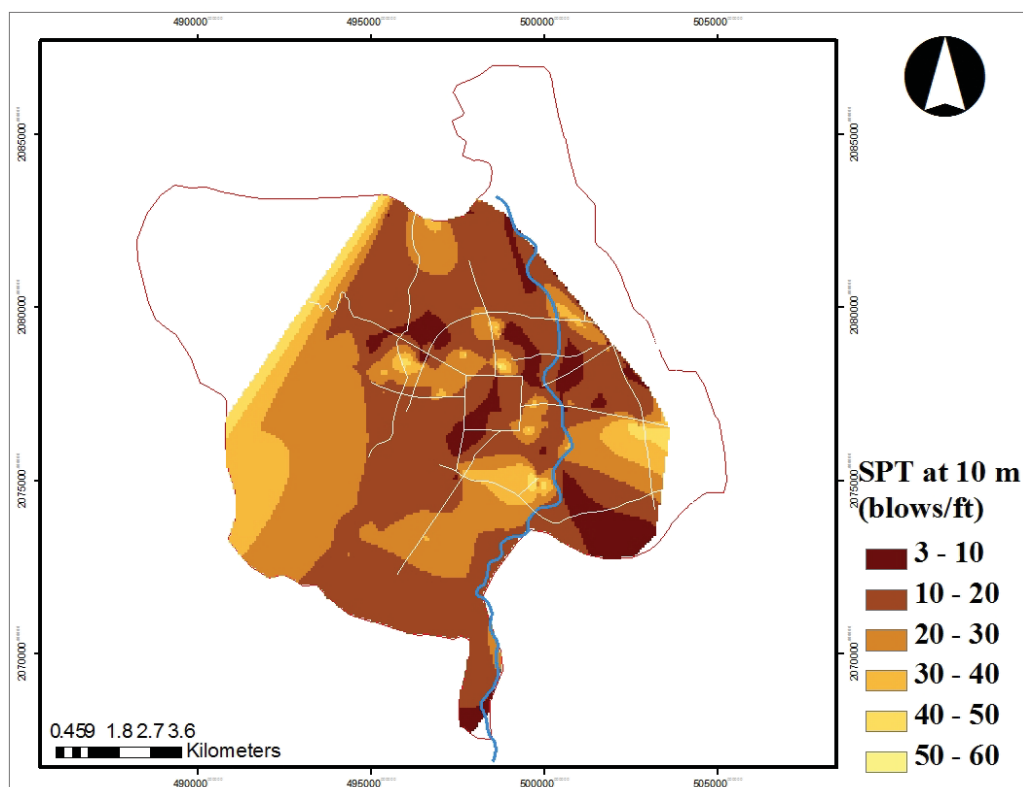
จังหวัดเชียงใหม่ตั้งอยู่ทางภาคเหนือของประเทศไทย มีแม่น้ำปิงไหลผ่าน และในอำเภอเมืองมีคูน้ำล้อมรอบเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับบริเวณที่ใช้ในการศึกษา คือบริเวณอำเภอเมือง มีแนวเขาอยู่ทางทิศตะวันตกของอำเภอเมือง และมีแม่น้ำปิงไหลผ่านทางทิศตะวันออกของคูเมือง แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ลักษณะภูมิประเทศบริเวณอำเภอเมืองเชียงใหม่

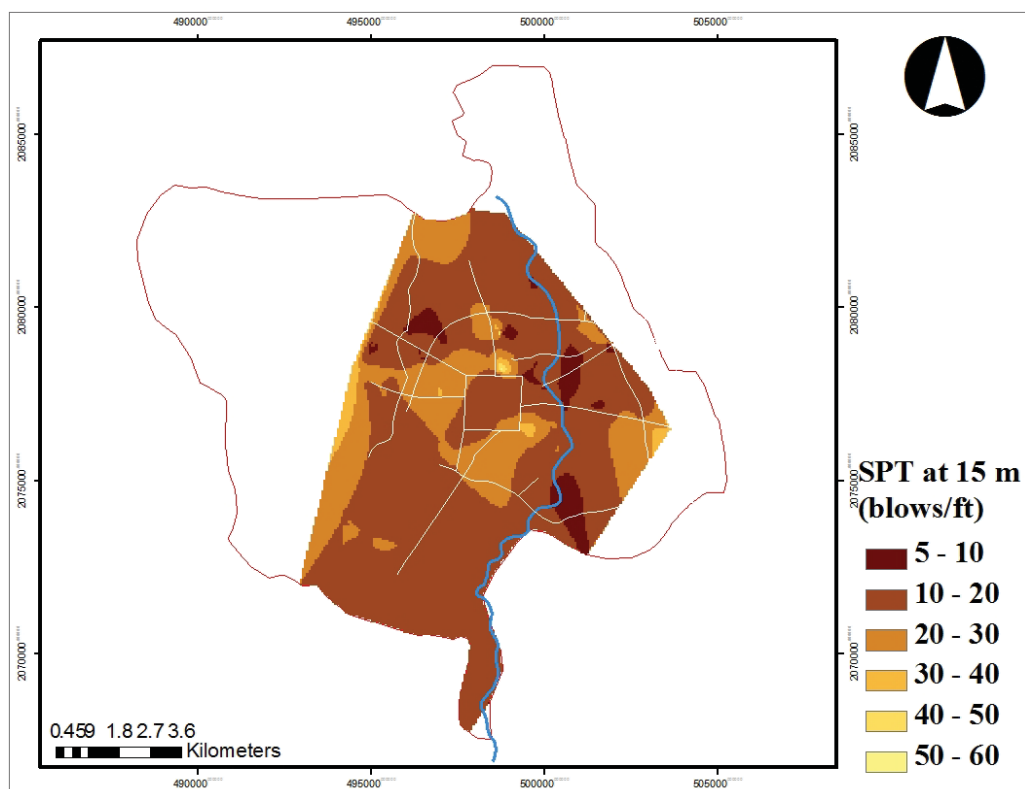
ในการศึกษาพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ได้ทำการรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะสำรวจจำนวนทั้งสิ้น 274 ข้อมูล ครอบคลุมพื้นที่อำเภอเมืองเชียงใหม่ แล้วจำแนกพารามิเตอร์ตามคุณสมบัติของดิน ได้แก่ ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10, 15, 20, และ 25 เมตร เนื่องจากระดับที่ใช้ในการวางแปลนเสาเข็มของงานก่อสร้างในจังหวัดเชียงใหม่อยู่ที่ระดับ 8-22 เมตร และค่า S_u เพื่อใช้สำหรับแบ่งความหนาของชั้นดิน ซึ่งใช้ค่าไม่เกิน 20 ตันต่อตารางเมตร กล่าวคือ พิจารณาความหนาของชั้นดินจนถึงชั้น very stiff clay

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10 , 15 , 20 และ 25 เมตร ตามลำดับ กับความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง พบว่าค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับ 10 เมตร มีค่าน้อยกว่า 10 ครั้งต่อฟุต บริเวณคูเมือง และบริเวณที่ใกล้กับแม่น้ำปิง และค่าเฉลี่ย SPT เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 60 ครั้งต่อฟุตเมื่อเข้าใกล้เชิงเขาบริเวณตำบลสุเทพ (ทิศตะวันตกของอำเภอเมือง) และบริเวณตำบลท่าศาลา (ทิศตะวันออกของอำเภอเมือง) และพบว่ามีบางจุดบริเวณทางเหนือและตะวันออกเฉียงใต้ของคูเมือง มีค่าเฉลี่ย SPT สูงถึง 50-60 ครั้งต่อฟุต ดังแสดงในรูปที่ 4.15



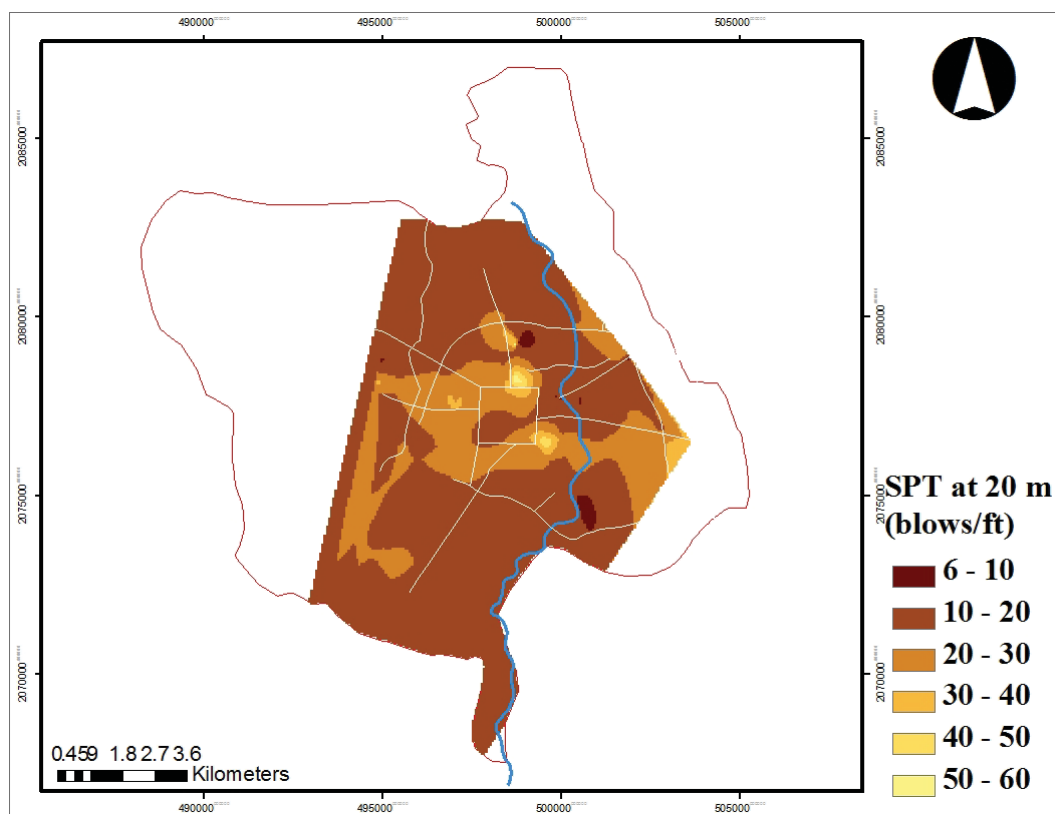
รูปที่ 4.15 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10 เมตร

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย SPT ที่ความลึกจากผิวถึง 15 เมตร แนวโน้มยังคงมีลักษณะที่คล้ายกับค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10 เมตร โดยมีค่าเฉลี่ย SPT ต่ำกว่า 10 ครั้งต่อฟุต บริเวณที่ใกล้กับแม่น้ำปิง และบริเวณที่ใกล้กับบ่อน้ำในเขตตำบลช้างเผือก สำหรับบริเวณตำบลสุเทพ ใกล้เชิงเขา มีค่าเฉลี่ย SPT ประมาณ 30-40 ครั้งต่อฟุต เช่นเดียวกับบริเวณตำบลท่าศาลา สำหรับพื้นที่ส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ย SPT ประมาณ 10-20 ครั้งต่อฟุต และพบว่ามีบางจุดบริเวณทางเหนือและตะวันออกเฉียงใต้ของคูเมือง มีค่าเฉลี่ย SPT สูงถึง 50-60 ครั้งต่อฟุต ดังแสดงในรูปที่ 4.16



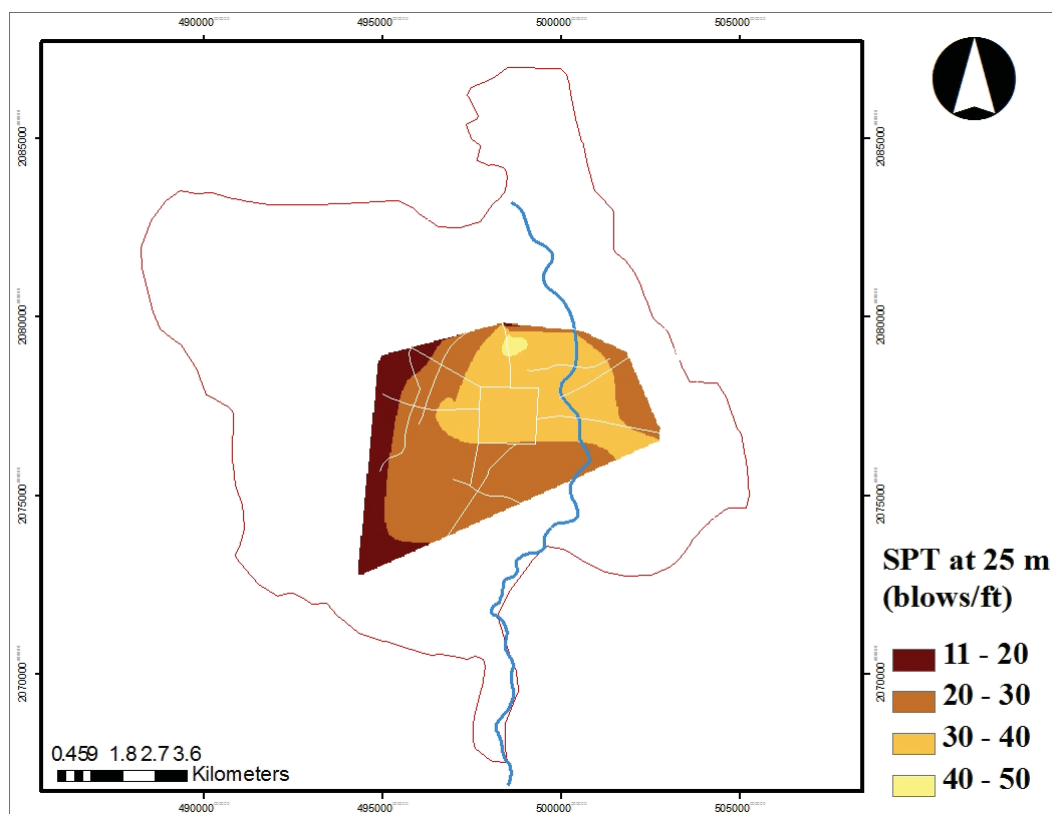
รูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 15 เมตร

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 20 เมตร พบว่ามีพื้นที่ใกล้เคียงกับแม่น้ำปิงบางพื้นที่ที่มีค่าเฉลี่ย SPT ต่ำกว่า 10 ครั้งต่อฟุต และพื้นที่บริเวณตำบลสุเทพใกล้เคียงกับเชิงเขามีค่าเฉลี่ย SPT ประมาณ 20-30 ครั้งต่อฟุต สำหรับพื้นที่ส่วนใหญ่ของอำเภอเมืองมีค่าเฉลี่ย SPT ประมาณ 10-20 ครั้งต่อฟุต และพบว่าพื้นที่ทางเหนือและตะวันออกเฉียงใต้ของคูเมือง มีค่าเฉลี่ย SPT สูงถึง 50-60 ครั้งต่อฟุต ดังแสดงในรูปที่ 4.17



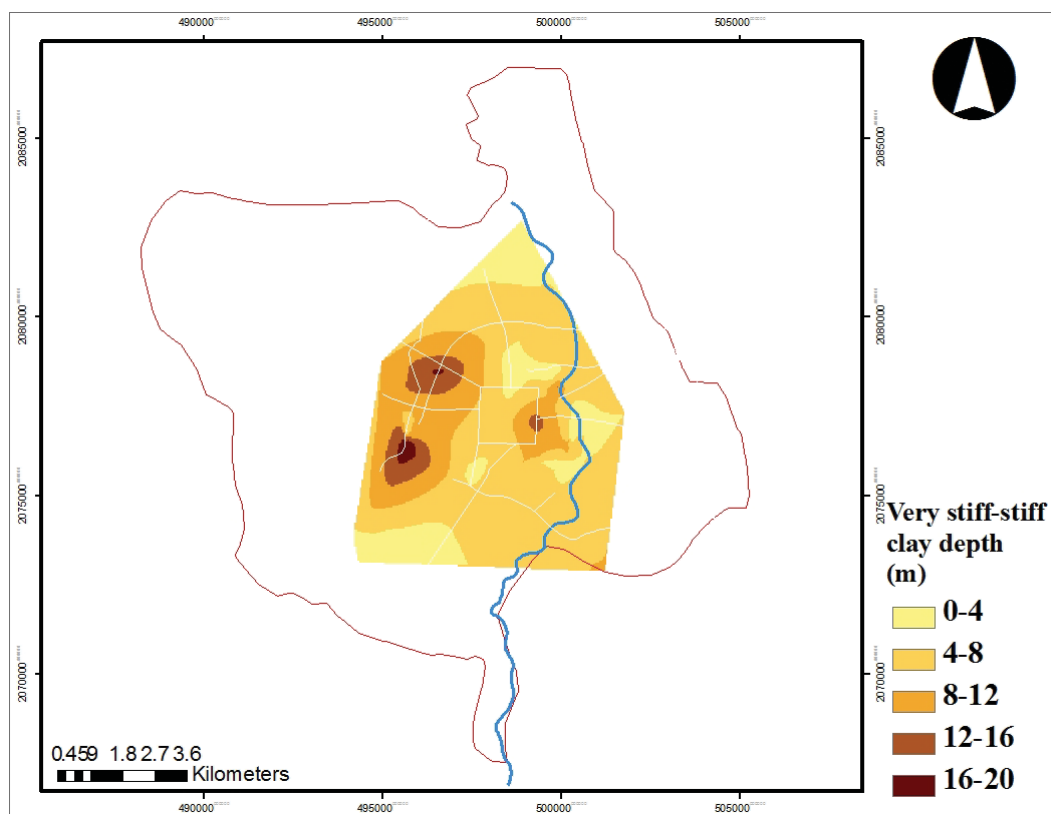
รูปที่ 4.17 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 20 เมตร

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 25 เมตร พบว่าบริเวณรอบคูเมือง มีค่าเฉลี่ย SPT ประมาณ 30-40 ครั้งต่อฟุต โดยบริเวณตอนเหนือของคูเมืองมีบางจุดที่มีค่าสูงถึง 40-50 ครั้งต่อฟุต ค่าเฉลี่ย SPT มีค่าลดลง เมื่อเข้าไปใกล้เชิงเขาบริเวณตำบลสุเทพโดยมีค่าเฉลี่ย SPT ประมาณ 20 ครั้งต่อฟุต ซึ่งมีค่าที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10 , 15, และ 20 เมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.18



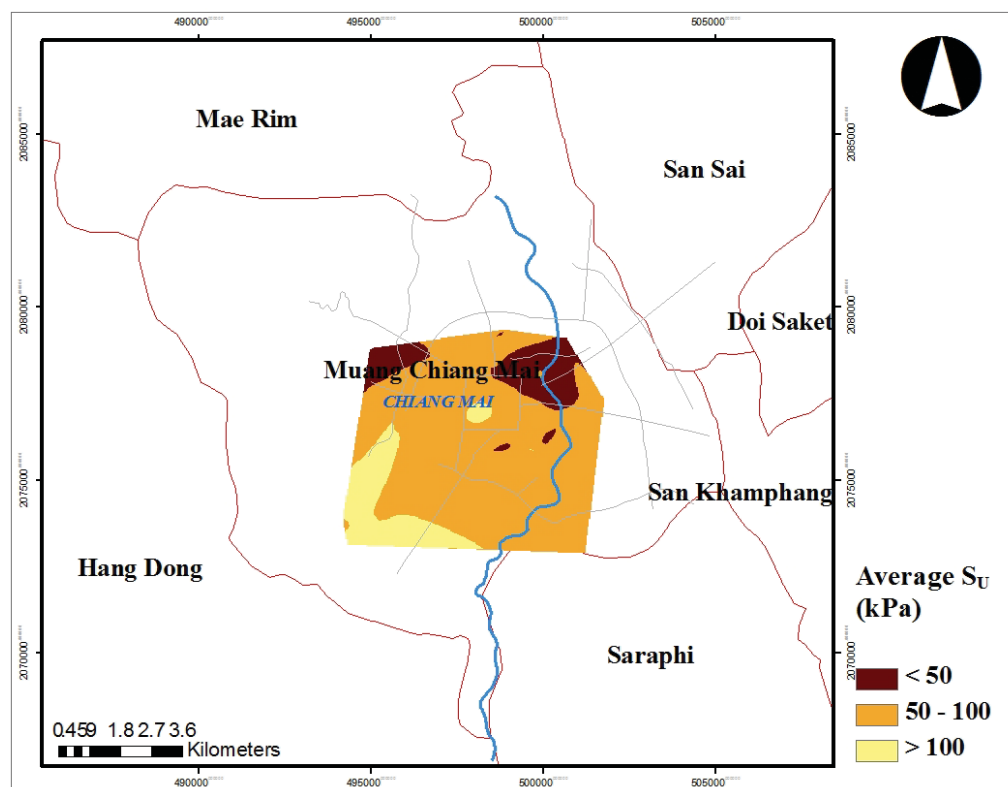
รูปที่ 4.18 แผนที่แสดงค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 25 เมตร

เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง ซึ่งจำแนกโดยใช้ค่า S_u ต่ำกว่า 20 ตันต่อตารางเมตร กล่าวคือ พิจารณาความหนาของดินเหนียวถึงชั้น very stiff clay ผลการศึกษาพบว่าความหนาของดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง มีค่าระหว่าง 0-20 เมตร เมื่อพิจารณาในแต่ละพื้นที่พบว่าบริเวณตะวันออกของคูเมืองมีความหนาประมาณ 8-16 เมตร และบริเวณตำบลสุเทพ ใกล้กับเชิงเขา มีความหนาประมาณ 8-20 เมตร แต่สำหรับพื้นที่โดยทั่วไปของอำเภอเมืองเชียงใหม่ มีความหนาประมาณ 4-8 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย S_u พบว่าบริเวณทางตะวันออกเฉียงเหนือของคูเมือง และบางพื้นที่ใกล้กับมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีค่าเฉลี่ย S_u ประมาณ 18-50 กิโลปาสคาล แนวโน้มของค่าเฉลี่ย S_u มีค่าเพิ่มขึ้นไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของอำเภอเมืองเชียงใหม่ โดยค่าเฉลี่ย S_u ส่วนใหญ่ของพื้นที่มีค่าประมาณ 50-100 กิโลปาสคาล และมีค่าสูงสุดประมาณ 150-200 กิโลปาสคาล บริเวณใกล้กับสนามบินเชียงใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ที่ความลึกจากผิวถึง 30 เมตร (S_u)

4.4 พื้นที่ศึกษาภาคสนาม

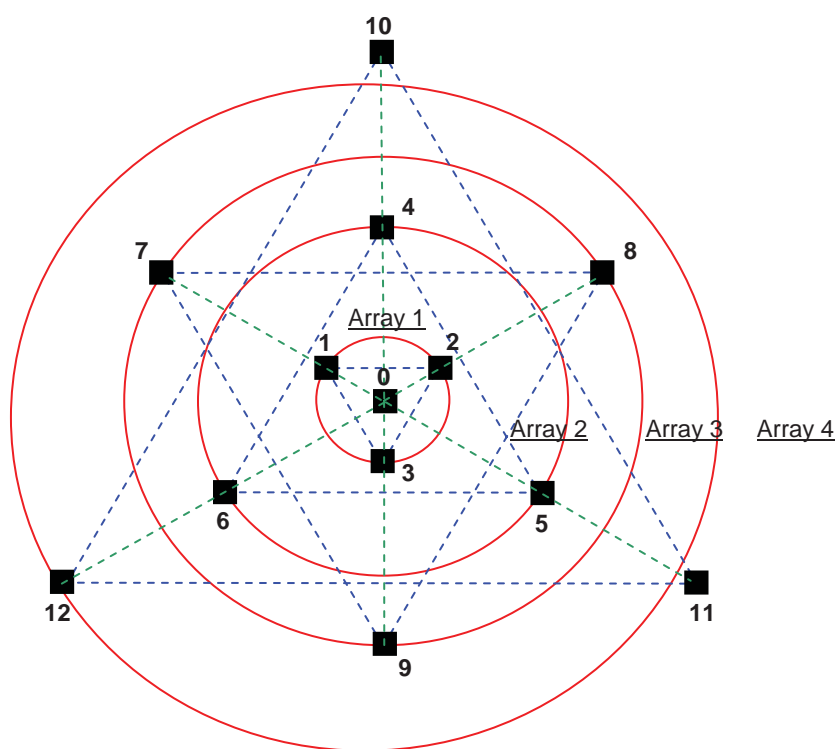
พื้นที่ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย 2 กลุ่มหลัก คือ พื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง และพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง โดยที่ กลุ่มที่ 1 ครอบคลุม 17 จังหวัดในพื้นที่ภาคกลางตอนล่าง ได้แก่ พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี นนทบุรี นครนายก กรุงเทพมหานคร นครปฐม ปราจีนบุรี ฉะเชิงเทรา สมุทรปราการ สมุทรสงคราม สมุทรสาคร เพชรบุรี ราชบุรี ชลบุรี สระบุรี กาญจนบุรี และสุพรรณบุรี ส่วนกลุ่มที่ 2 คือจังหวัดเชียงใหม่และบางส่วนของจังหวัดลำพูน

4.5 ขั้นตอนการวิจัย

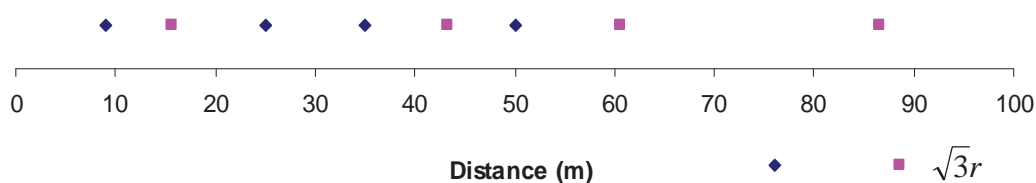
4.3.1 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

ในการเก็บข้อมูลภาคสนาม ใช้วิธีตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor) แบบ 1 จุด สำหรับการประเมินหาค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) และใช้วิธี SPAC เพื่อใช้ประเมินหาค่าความเร็วเฟส ด้วยวิธี SPAC โดยรูปแบบการวางห้ววัดเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับ วิธี SPAC คือรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยใช้ห้ววัด 4 ห้วพร้อมกัน และจัดเรียงเป็น Array ที่มีระยะห่างเท่า ๆ กัน รวม 4 Array ดังเช่นในรูปที่ 4.21 ตัวอย่างการเก็บข้อมูล เช่น ใน Array 1 ใช้สัญญาณจาก

ห้วงวัดที่คู่กันระหว่างตำแหน่งกลางกับตำแหน่งที่มุมของสามเหลี่ยมซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ r มาคำนวณ Spac coefficient ได้จำนวน 3 คู่ คือระหว่าง ห้วงวัด 0 กับ 1 ห้วงวัด 0 กับ 2 และห้วงวัด 0 กับ 3 นอกจากนี้ ยังสามารถใช้สัญญาณจากคู่ของห้วงวัดที่วางอยู่บนมุมของสามเหลี่ยมซึ่งมีระยะห่าง $\sqrt{3}r$ มาคำนวณ Spac coefficient ได้อีกจำนวน 3 คู่ คือระหว่าง ห้วงวัด 1 กับ 2 ห้วงวัด 2 กับ 3 และห้วงวัด 3 กับ 1 ทำให้ได้ข้อมูล 2 รัศมี ๆ ละ 3 ชุด จากการตรวจวัดหนึ่งครั้ง เมื่อตรวจวัดเสร็จสิ้นแล้วจึงทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของ Array เพื่อให้ได้การตรวจวัดที่ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ได้ โดยที่การตรวจวัดส่วนมากในการศึกษานี้ได้เลือก Array ที่มีรัศมี r คือ 9.00 เมตร 25.00 เมตร 35.00 เมตร และ 50.00 เมตร และได้ข้อมูลสำหรับระยะ $\sqrt{3}r$ คือ 15.59 เมตร 43.30 เมตร 60.62 เมตร และ 86.60 เมตร จากการใช้รัศมีการตรวจวัดดังกล่าวทำให้มีขนาดของ Array เพื่อใช้คำนวณ Spac coefficient รวม 8 รัศมี และมีการกระจายตัวของระยะค่อนข้างสม่ำเสมอแสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 การจัดเรียง Array ในการเก็บข้อมูล



รูปที่ 4.22 การกระจายตัวของระยะทางระหว่างห้วงวัดในรูปแบบที่ใช้ศึกษา

4.6 อุปกรณ์ในการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินด้วยการตรวจวัด โดยใช้การตรวจวัดแบบ Microtremor ซึ่งเป็นการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กที่พื้นผิวดิน ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระตุ้นตามธรรมชาติและไม่ได้ใช้แหล่งกระตุ้นจากภายนอกใด ๆ ดังนั้น เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดจะต้องมีความสามารถในการตรวจวัดที่ระดับการสั่นสะเทือนต่ำมาก ๆ ได้ เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ อุปกรณ์วัดความเร็ว (Velocity Sensor) ซึ่งใช้ 2 ชุด ชุดแรกสำหรับโครงข่ายขนาดเล็กที่มีรัศมีประมาณ 50 ถึง 60 เมตร และชุดที่สองสำหรับโครงข่ายขนาดใหญ่รัศมีหลายร้อยเมตร

4.6.1 อุปกรณ์สำหรับโครงข่ายขนาดเล็ก

1. อุปกรณ์รับข้อมูล (Data Acquisition Instrument)

อุปกรณ์รับข้อมูลเป็นรุ่น GEODAS-10-24DS ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งพัฒนาโดย Buttan Service Co,Ltd. ของประเทศญี่ปุ่นและมีคุณสมบัติของเครื่องดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.23 อุปกรณ์รับข้อมูล (Data Acquisition Instrument) GEODAS-10-24DS

ตารางที่ 4.5 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.

2. หัววัดสัญญาณ (Sensor)

หัววัดสัญญาณเป็นรุ่น CR4.5-2S ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งพัฒนาโดย Buttan Service Co,Ltd. ของประเทศญี่ปุ่น เช่นเดียวกับอุปกรณ์รับข้อมูล ซึ่งสามารถวัดทิศทางการสั่นได้ 3 ส่วน (Component) คือ 1 แนวตั้ง และ 2 แนวระนาบ มีคุณสมบัติของเครื่องดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.24 หัววัดสัญญาณ (Sensor) CR4.5-2S

ตารางที่ 4.6 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.

4.6.2 อุปกรณ์สำหรับโครงข่ายขนาดใหญ่

- 1) หัววัดการสั่นสะเทือนแบบวัดความเร็ว รุ่น VSE-15D-6 ผลิตโดยบริษัท Tokyo Sokushin ประเทศญี่ปุ่น ทำหน้าที่ตรวจจับการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งที่ติดตั้งในรูปของความเร็ว โดยมีคุณลักษณะที่สำคัญดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 คุณลักษณะของหัววัดการสั่นสะเทือนแบบวัดความเร็ว

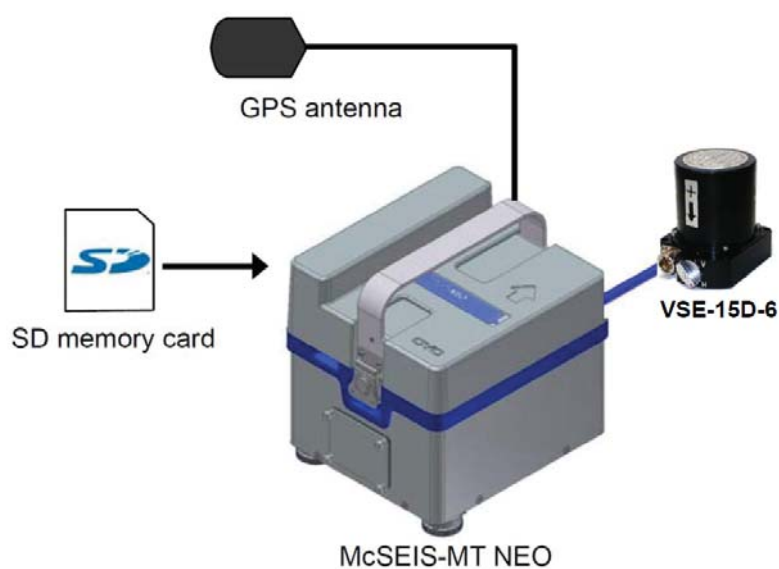
Frequency range	0.1 to 70 Hz.
Mode of operation	Horizontal, Vertical (switchable)
Max. measuring range	± 0.1 m/s
Max. output voltage	± 10 V
Linearity	0.03% of full scale
Resolution	Approximately 2×10^{-8} m/s ²
Dynamic range	Approximately 140 dB
Temperature range	-10 to 50 °C
Dimension	55x69.5x72 mm

- 2) อุปกรณ์ขยายสัญญาณและบันทึกข้อมูลการสั่นสะเทือน รุ่น McSEIS-MT NEO ผลิตโดยบริษัท OYO Cooperation ประเทศญี่ปุ่น ทำหน้าที่รับสัญญาณจากหัววัดการสั่นสะเทือนมาเพื่อขยายกำลัง แปลงให้เป็นข้อมูลเชิงดิจิทัล แล้วบันทึกลงการ์ดความจำ (Memory card)

นอกจากนั้นยังทำหน้าที่บันทึกเวลาที่ตรวจวัดด้วยความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1/100 วินาที และบันทึกตำแหน่งที่ตั้งห้ววัดโดยการรับสัญญาณกับระบบดาวเทียม GPS โดยมีคุณลักษณะที่สำคัญดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 คุณลักษณะของอุปกรณ์ขยายสัญญาณและบันทึกข้อมูลการสั่นสะเทือน

Built-in sensor	Servo accelerometer (vertical)
Dynamic range	120 dB
System dynamic range	156 dB
Frequency band	0.1 to 200 Hz.
A/D convertor	32-bit delta sigma type
Sampling time	2, 4, 10, 20, 50 ms
Indicator	128x64 dots monochrome LCD
Dynamic range	Approximately 140 dB
Temperature range	-10 to 50 °C
Dimension	55x69.5x72 mm
Power supply	Built-in lead-acid battery 12V, 7.2 Ah
Consumption current	500 mA
Temperature range	-20 to 55 °C
Dimension	250x220x245 mm
Weight	Approximately 7.5 kg



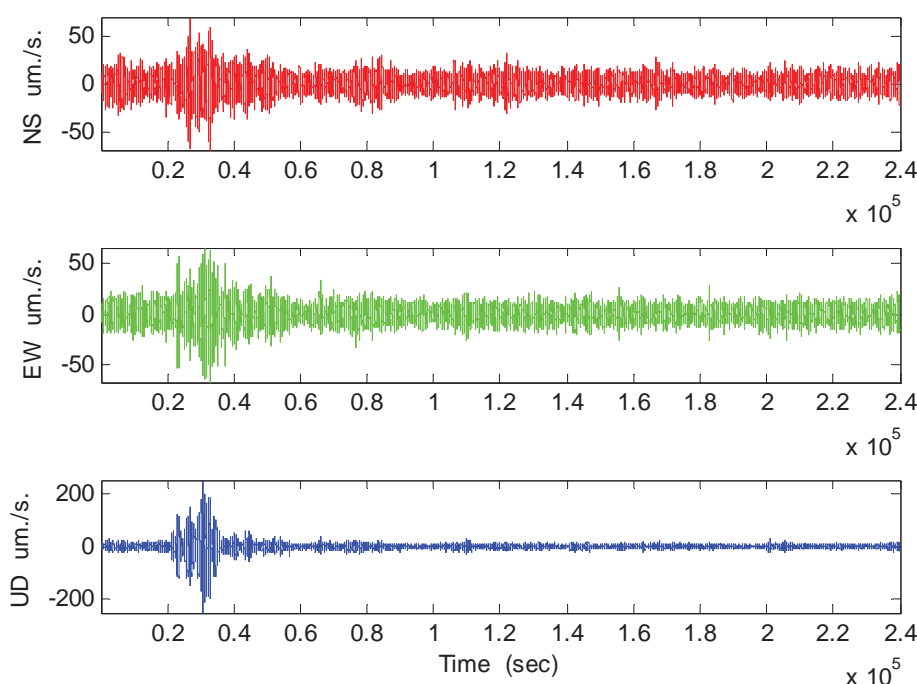
รูปที่ 4.25 ชุดอุปกรณ์การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน

ชุดอุปกรณ์การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน แสดงดังรูปที่ 4.25 และ โดยในการศึกษาี้ประกอบด้วยชุดอุปกรณ์จำนวน 3 ชุด ใช้ตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดินพร้อมกันเป็นโครงข่าย โดยแต่ละชุดวางห่างกันด้วยระยะห่างที่กำหนด และปรับเวลาที่บันทึกสัญญาณคลื่นที่วัดแต่ละชุดให้ตรงกันด้วยค่าเวลาจากระบบดาวเทียม GPS

4.7 การวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก

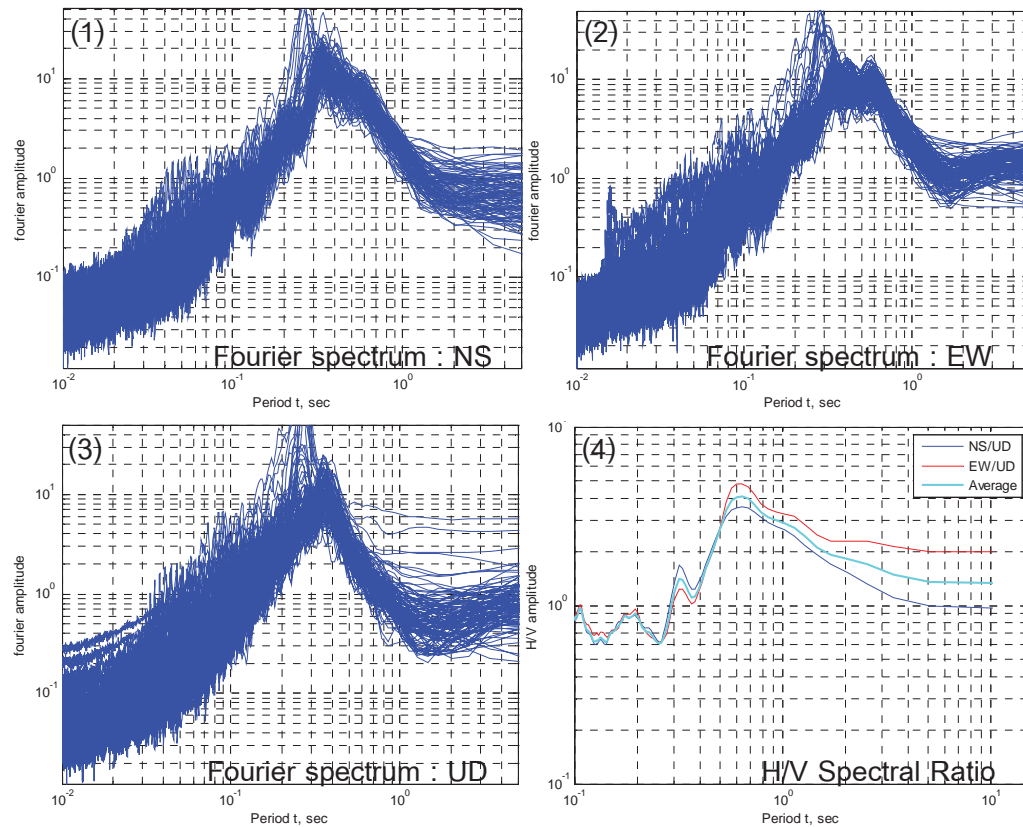
ในการวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก โดยวิธี H/V Spectrum Ratio มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินแบบ 1 จุด ซึ่งมีองค์ประกอบ 3 แกน ได้แก่ แกนราบ 2 แกน และแกนตั้ง 1 แกน โดยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดอยู่ในรูปของ Time Domain ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดทั้ง 3 แกน

2. คำนวณขนาดของฟูเรียร์สเปกตรัมของคลื่นในแนวเหนือ-ใต้,แนวตะวันออก-ตะวันตก และแนวตั้ง จากนั้นนำขนาดของฟูเรียร์สเปกตรัมทั้ง 3 แกนมาคำนวณหาค่าคาบอิทธิพลหลักด้วยสมการที่ 3.1 ได้ผลดังรูปที่ 4.27 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ H/V Spectral Ratio และคาบเวลา

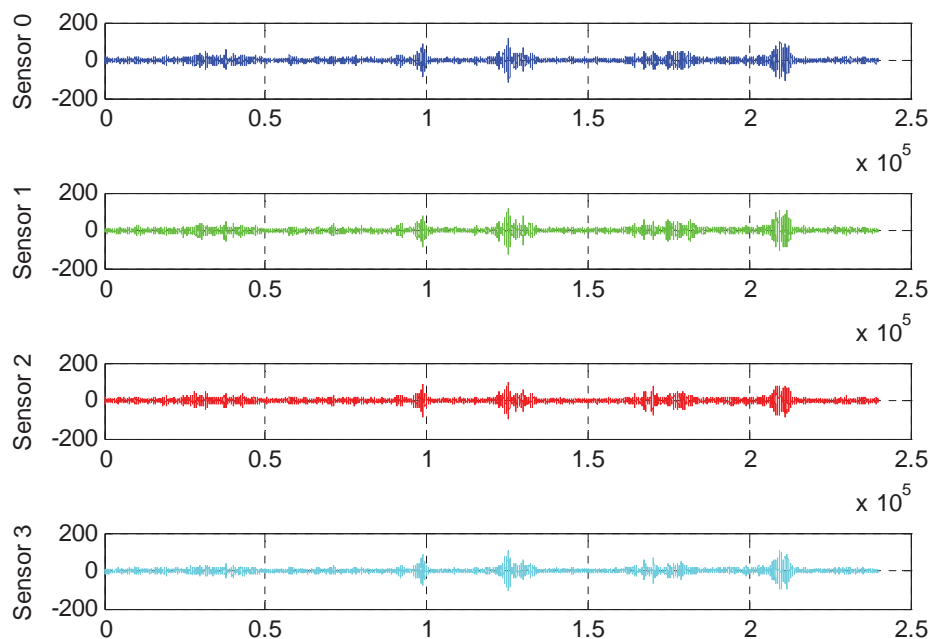


รูปที่ 4.27 ขั้นตอนวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก

4.8 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ SPAC

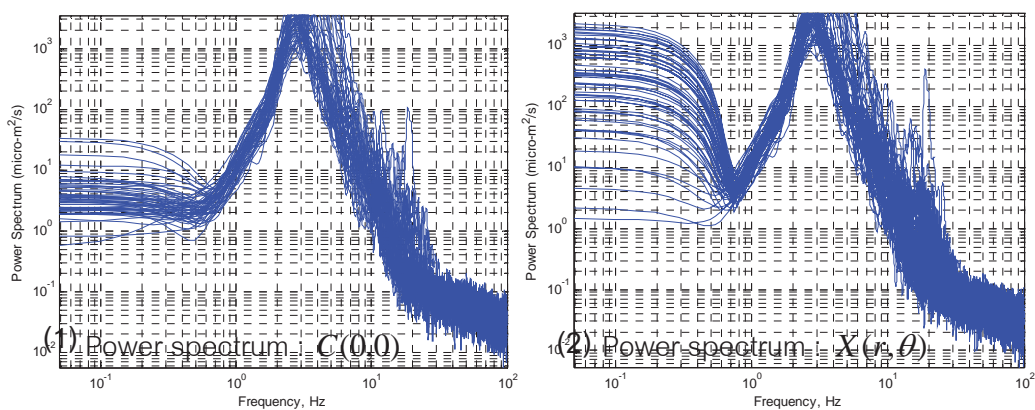
ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่า สัมประสิทธิ์ SPAC มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

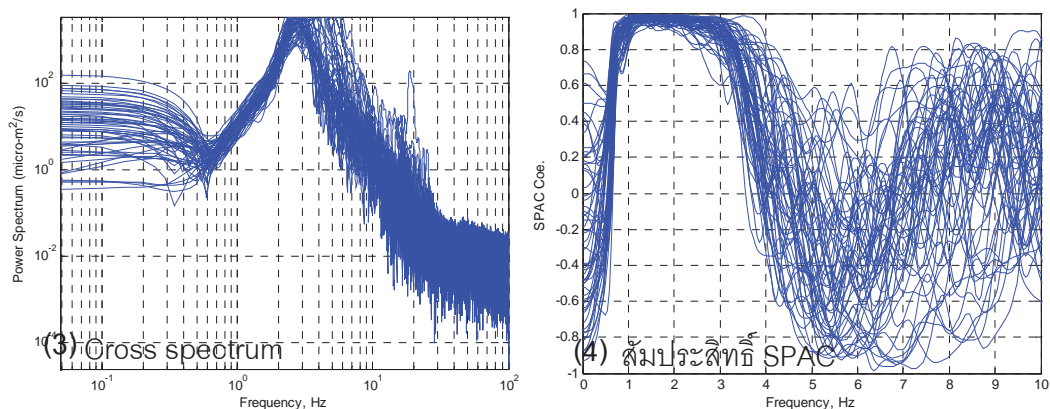
1. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่า สัมประสิทธิ์ SPAC นั้นมาจากข้อมูลที่มีองค์ประกอบในแนวดิ่งเท่านั้น ซึ่งมีทั้งหมด 4 ชุด และอยู่ในรูปของ Time Domain ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 องค์ประกอบของคลื่นในแนวดิ่ง

2. นำข้อมูลแต่ละคู่มาคำนวณหาค่า Power Spectrum ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง $C(0,0)$, Power Spectrum ที่ตำแหน่ง r ของวงกลม $X(r,\theta)$ และ Cross Spectrum ระหว่าง $u(t;\omega,0,0)$ และ $u(t;\omega,r,\theta)$ ซึ่งมีทั้งหมด 3 กราฟต่อหัววัด 1 คู่ จากนั้นคำนวณหาความสัมพันธ์ SPAC ด้วยสมการที่ 3.23 ดังแสดงในรูปที่ 4.29

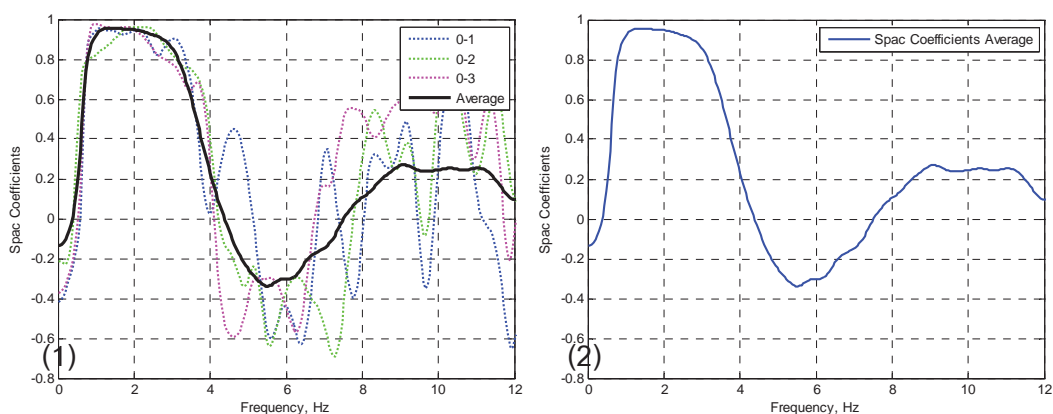




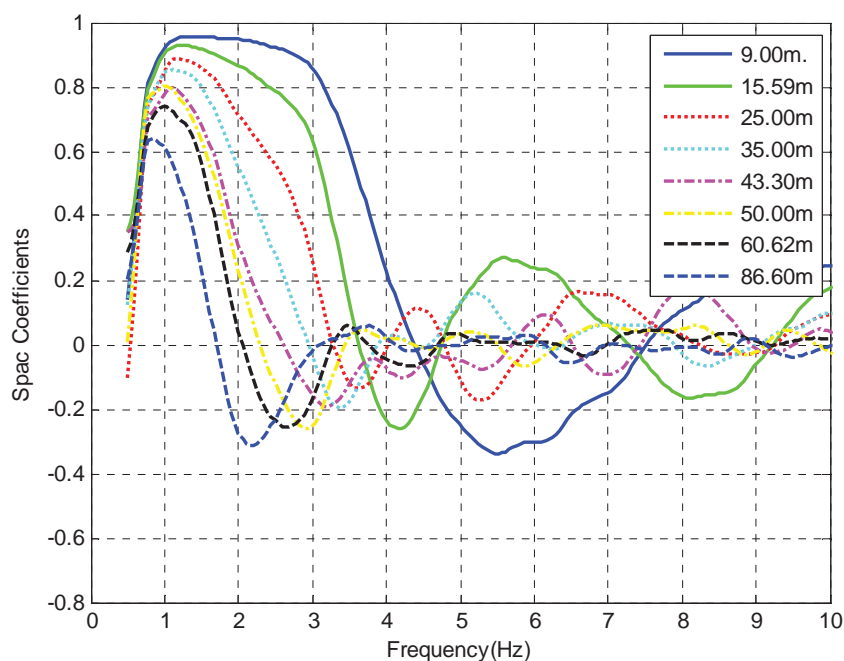
รูปที่ 4.29 ขั้นตอนวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC

ทำขั้นตอนที่ 2 จนครบทั้ง 3 คู่ จากนั้นหาค่าเฉลี่ยจากสัมประสิทธิ์ SPAC ทั้ง 3 คู่ ดังรูปที่ 4.30

3. วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC ตั้งแต่ข้อ 2-4 ข้ำจนครบทุกกรณี จากนั้นนำมาแสดงรวมกันดังรูปที่ 4.31 เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟสในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 4.30 สัมประสิทธิ์ SPAC (ซ้าย) และค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ SPAC (ขวา)



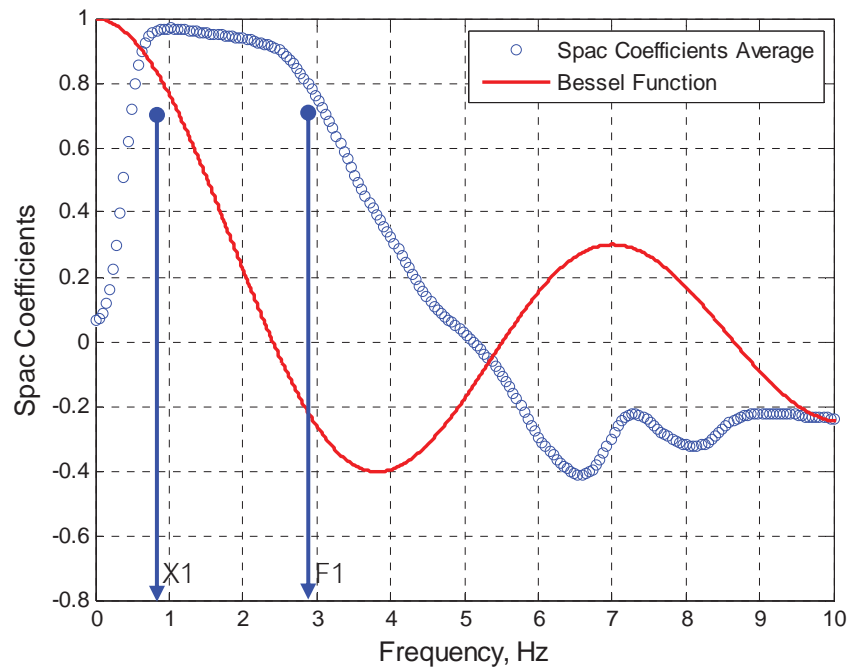
รูปที่ 4.31 ค่าเฉลี่ย สัมประสิทธิ์ SPAC ทั้ง 8 รัศมี

4.9 การวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟส

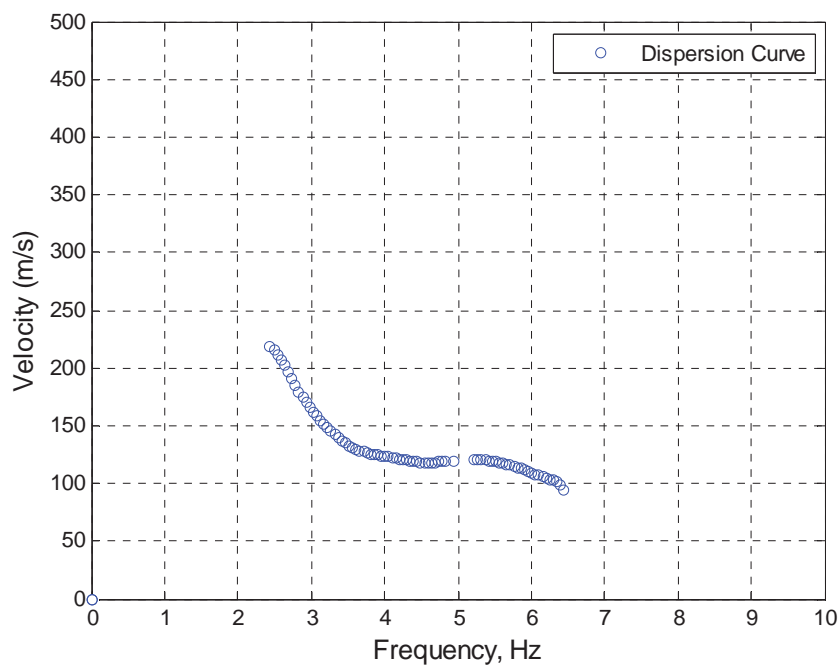
หลังจากวิเคราะห์หาค่า สัมประสิทธิ์ SPAC ครบทั้ง 8 รัศมีแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟส ที่ความถี่ต่างๆ หรือการวิเคราะห์ Dispersion Curve โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หา สัมประสิทธิ์ SPAC มาแสดงคู่กับ Bessel Function ชนิดที่ 1 ลำดับที่ 0 ดังรูปที่ 4.32
2. คำนวณหาค่าความเร็วเฟสที่ความถี่ต่างๆ ที่อยู่ในช่วงแรกของสัมประสิทธิ์ SPAC ด้วยสมการที่ 3.24 ได้ผลดังรูปที่ 4.33
3. ทำขั้นตอนที่ 3 ซ้ำจนกระทั่งครบทั้ง 8 ชุดของ สัมประสิทธิ์ SPAC
4. นำ Dispersion Curve ที่ได้ทั้ง 8 ชุดมาแสดงรวมกัน ดังรูปที่ 4.34

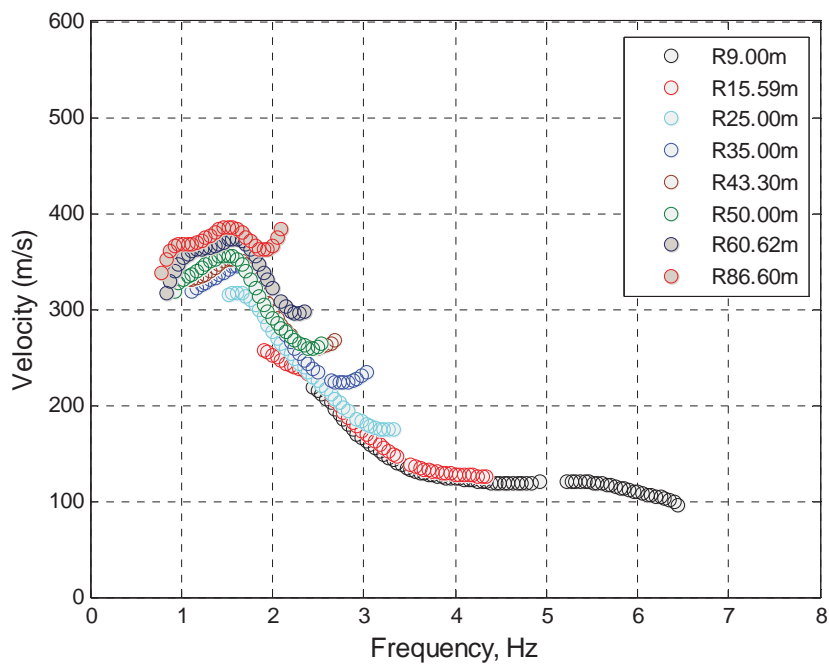
จากนั้นนำ Dispersion Curve ที่ได้จากการรวมกันของทุกระศมี มาทำการเลือกตัดเพื่อให้ออกมาเพียงเส้นเดียว ดังรูปที่ 4.35 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความเร็วคลื่นเฉือนในขั้นตอนการคำนวณย้อนกลับต่อไป



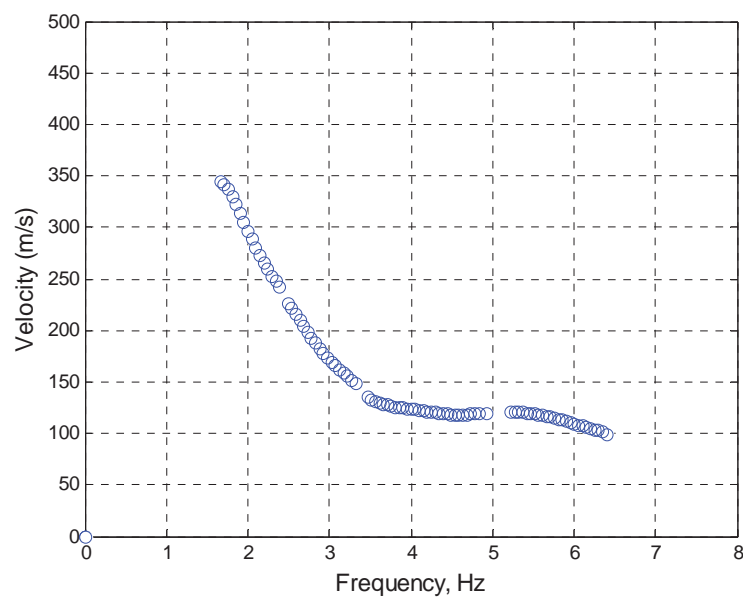
รูปที่ 4.32 กราฟ สัมประสิทธิ์ SPAC คู่กับ Bessel Function



รูปที่ 4.33 Dispersion Curve ของรัศมี 9 เมตร



รูปที่ 4.34 Dispersion Curve ของทุกรัศมี

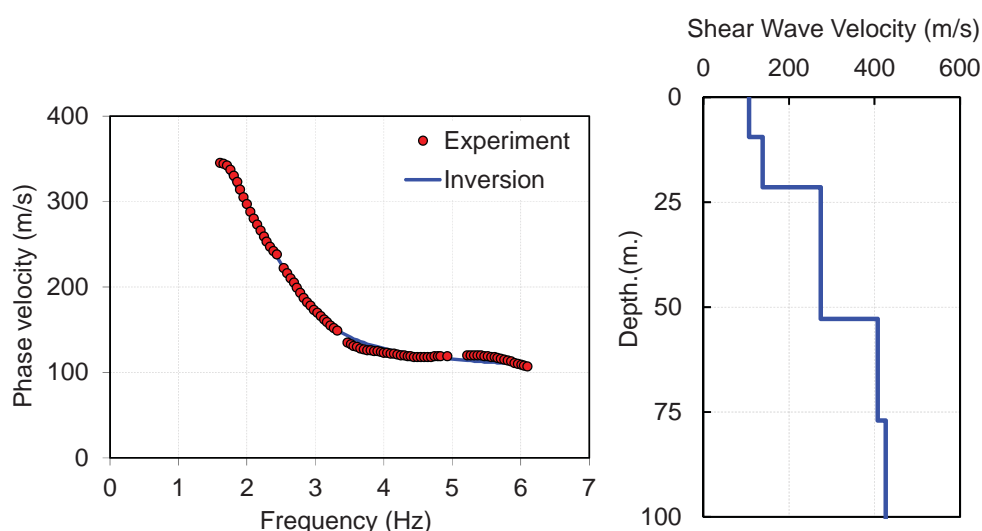


รูปที่ 4.35 Dispersion Curve ชั้นตอนสุดท้าย

4.10 การวิเคราะห์ค่าความเร็วคลื่นเฉือน

การวิเคราะห์ค่าความเร็วคลื่นเฉือน ด้วยวิธีคำนวณแบบย้อนกลับ (Inversion Analysis) พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบด้วย ความเร็วเฟสที่ความถี่ต่างๆ (Dispersion

Curve) และคุณสมบัติของดินบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ ผลที่ได้คือการเปรียบเทียบค่าระหว่าง Dispersion Curve ที่ได้จากการตรวจวัดจริง กับค่าที่ได้จากการคำนวณแบบย้อนกลับ หากค่าที่ได้จากการคำนวณแบบย้อนกลับมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง แสดงว่าผลของความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้มานั้นมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกไปใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินได้ในขั้นตอนถัดไป รูปที่ 4.36 แสดงค่า Dispersion Curve ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณและความเร็วคลื่นเฉือน

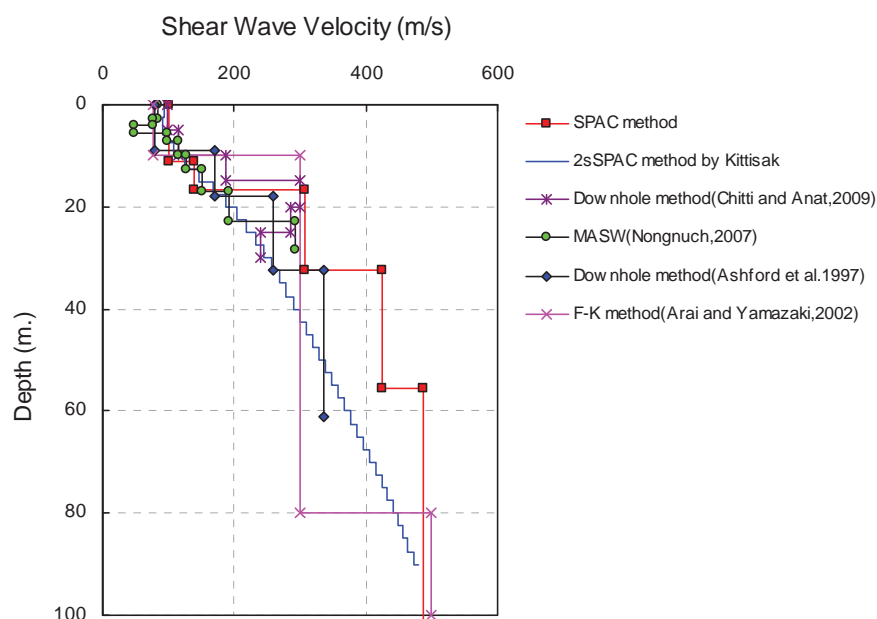


รูปที่ 4.36 Dispersion Curve ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณและความเร็วคลื่นเฉือน

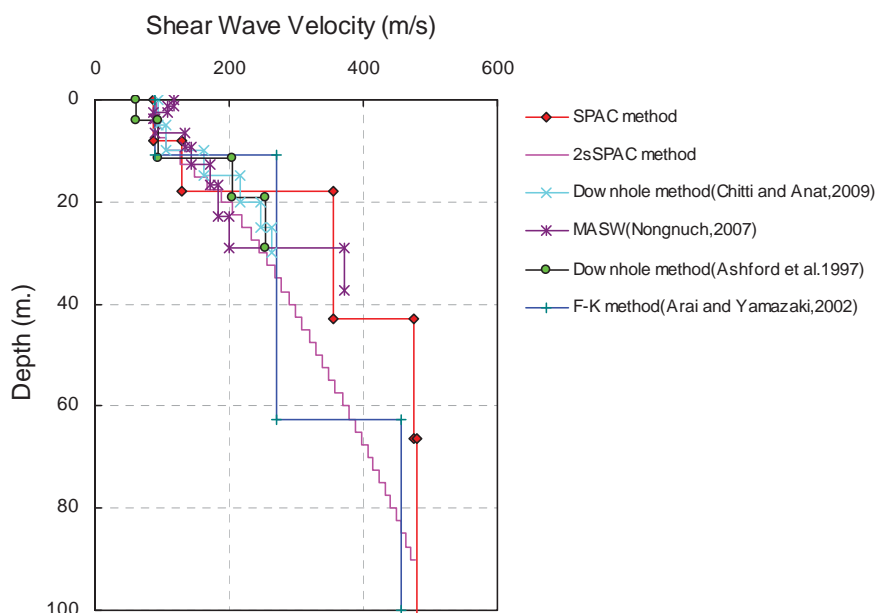
4.11 การเปรียบเทียบผลกับวิธีการสำรวจอื่น

เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของเทคนิคที่ใช้ศึกษา จึงมีการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับงานวิจัยอื่นก่อนหน้าที่ดำเนินการด้วยวิธีต่าง ๆ โดยการเปรียบเทียบในส่วนแรก พิจารณาค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร ที่ได้จากการศึกษานี้กับการทดสอบด้วยเทคนิคอื่นๆ ในบริเวณเดียวกันจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งประกอบไปด้วยวิธี seismic downhole โดย จิตติและอาณัติ (2552) แทนด้วยสัญลักษณ์ (D1) และ Ashford (2000) แทนด้วยสัญลักษณ์ (D2) วิธีการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินด้วยเทคนิค FK โดย Arai and Yamazaki (2002) แทนด้วยสัญลักษณ์ (FK) การวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบหลายช่องสัญญาณ โดยประภาพร (2550) แทนด้วยสัญลักษณ์ (MASW) และวิธีการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินด้วยเทคนิค โดย กิตติศักดิ์ (2553) แทนด้วยสัญลักษณ์ (2sSPAC) บริเวณที่มีข้อมูลเปรียบเทียบทั้งสิ้น 5 บริเวณ คือ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (สนามฟุตบอล) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สนามรักบี้ประตูใหญ่) ม.ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต (สนามรักบี้) กรมอุตุนิยมวิทยา (สนามฟุตบอล) และวัดตำหรุ จ.สมุทรปราการ (สนามด้านหลังวัด) ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบในแต่ละบริเวณแสดงไว้ในรูปที่ 4.37

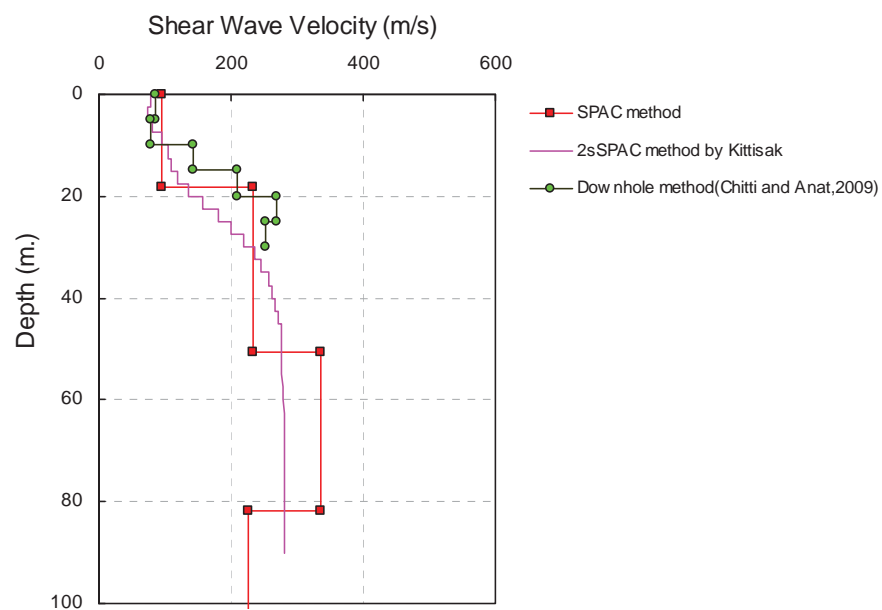
ถึง 4.41 และผลการเปรียบเทียบรวมในทุกบริเวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และ รูปที่ 4.42 พบว่าค่าที่ได้จากการศึกษานี้ให้ผลที่สอดคล้องดีกับการทดสอบด้วยเทคนิคต่าง ๆ



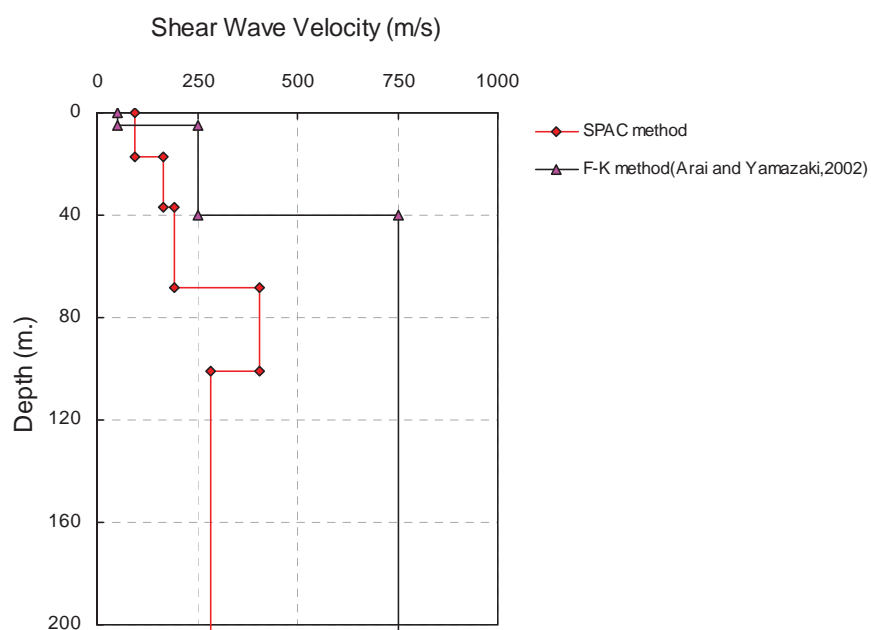
รูปที่ 4.37 ผลเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียกับงานวิจัยอื่น



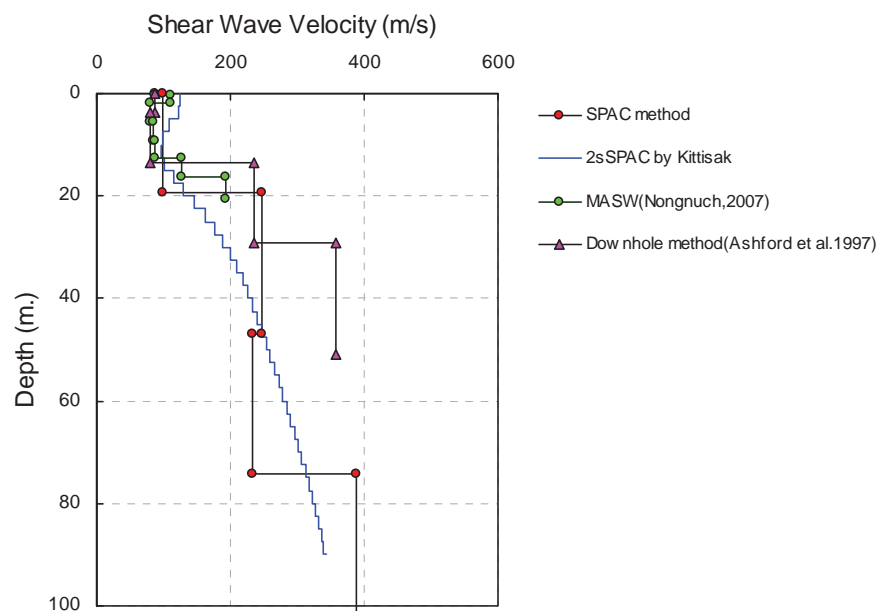
รูปที่ 4.38 ผลเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยกับงานวิจัยอื่น



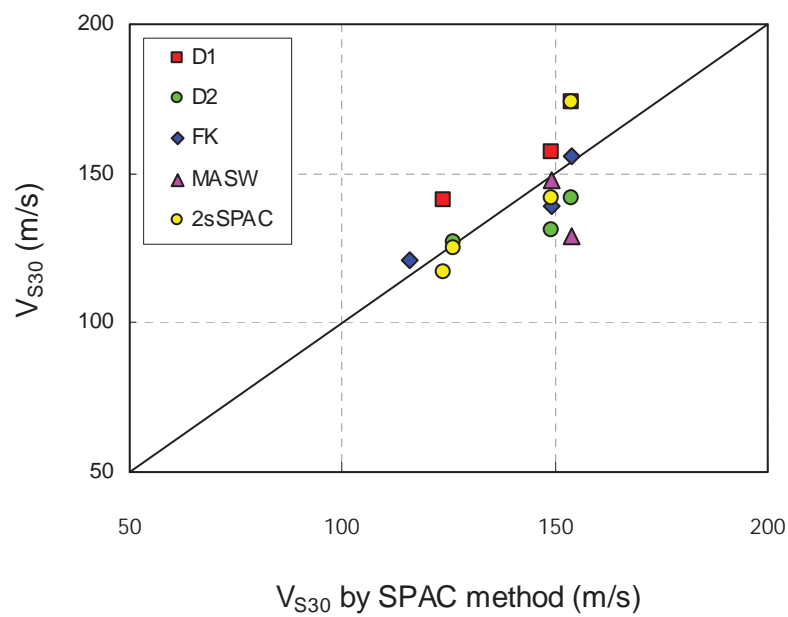
รูปที่ 4.39 ผลเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณกรมอุตุนิยมวิทยากับงานวิจัยอื่น



รูปที่ 4.40 ผลเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณวัดตำรุ จ. สมุทรปราการ กับงานวิจัยอื่น



รูปที่ 4.41 ผลเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์กับงานวิจัยอื่น



รูปที่ 4.42 ผลสรุปการเปรียบเทียบความเร็วเฉื่อยที่ระดับความลึก 30 เมตร

ตารางที่ 4.9 ผลเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร กับงานวิจัยอื่น

สถานที่	ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร					
	V_{S30} (m/s)					
	SPAC	2sSPAC	D1	MASW	D2	F-K
สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย	154	174	174	129	142	156
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	149	142	157	148	131	139
ม.ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต	126	125	-	104	127	-
กรมอุตุนิยมวิทยา	124	117	141	-	-	-
วัดตำหรุ สมุทรปราการ	116	-	-	-	-	121

ในการตรวจสอบความถูกต้องของการสำรวจด้วยโครงข่ายขนาดใหญ่ ได้ดำเนินการเพื่อศึกษาเปรียบเทียบกับผลจากงานวิจัยในอดีต (Arai and Yamazaki 2002) ที่ได้ทำการสำรวจความเร็วคลื่นเฉือนด้วยการตรวจวัดแบบ Array microtremor ขนาดใหญ่ และประเมินความเร็วคลื่นเฉือนถึงชั้นหินใต้ผิวดินด้วยระดับความลึกหลายร้อยเมตร โดยที่จุดสำรวจที่เปรียบเทียบมี 2 ตำแหน่งคือ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีตำแหน่งที่สำรวจของการศึกษานี้เปรียบเทียบกับงานของ Arai and Yamazaki 2002 แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ตำแหน่งที่สำรวจของการศึกษานี้เปรียบเทียบกับงานของ Arai and Yamazaki 2002

สถานที่	Arai and Yamazaki 2002		Array microtremor	
	ละติจูด	ลองจิจูด	ละติจูด	ลองจิจูด
สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย	14°4'27.34"	100°36'33.69"	14°4'45.91"	100°36'34.13"
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	13°43'59.91"	100°31'50.43"	13°44'18.72"	100°31'51.64"

ผลการเปรียบเทียบความเร็วเฟส แสดงดังรูปที่ 4.43 และ 4.44 สำหรับตำแหน่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามลำดับ ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบนี้พบว่า ค่าความเร็วเฟสตามความถี่จาก 2 การศึกษามีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่าความเร็วเฟสในช่วงความถี่ต่ำเป็นค่าที่สำคัญสำหรับการคำนวณความเร็วคลื่นเฉือนที่ความลึกมาก และจากผลการศึกษานี้พบว่าระดับความลึกที่สามารถประเมินความเร็วคลื่นเฉือนได้ดีถึงระดับลึกมากกว่า 1000 เมตร (ความลึกที่สำรวจได้ประเมินจาก ค่าประมาณของ $1/2$ ของค่าความยาวคลื่นที่ตรวจวัดได้ ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่ตรวจวัดได้หาจากค่าความเร็วเฟสหารด้วยความถี่)