



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 ในการศึกษาจึงทำการประยุกต์วิธีสำรวจภาคสนามโดยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของผิวดินในระดับตื้นที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (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 ส่วนในเขตกรุงเทพมหานครพบว่ามีค่า 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

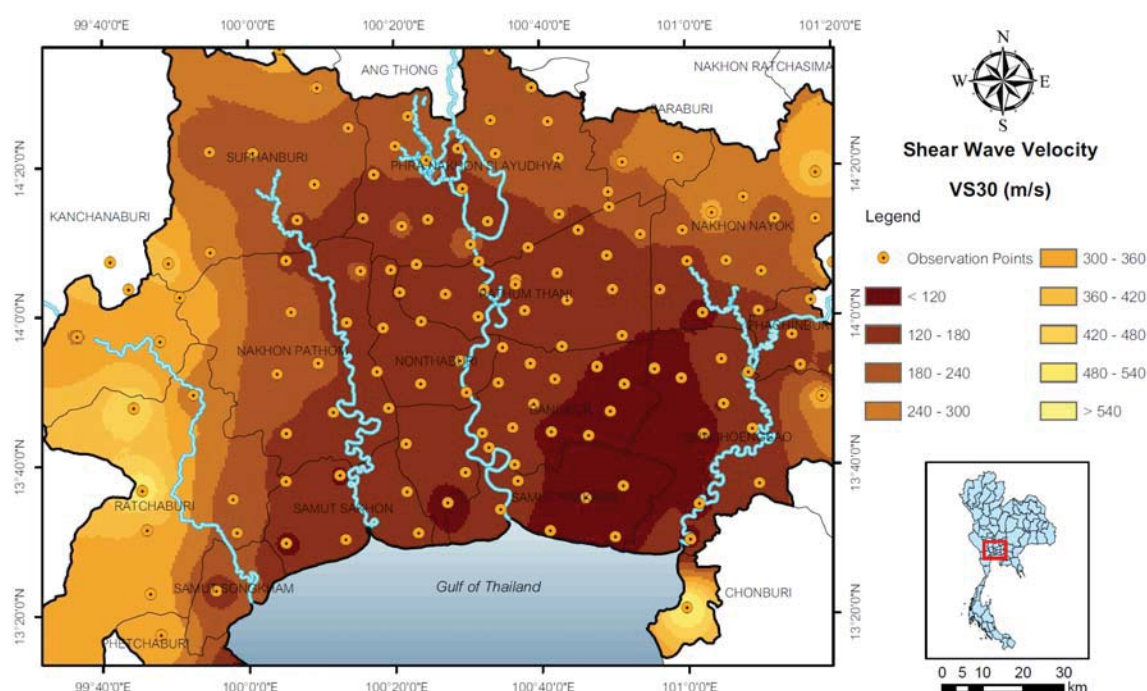
การดำเนินงานในงานวิจัยนี้ได้พบปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจวัด เช่น ความคลาดเคลื่อนในการวางอุปกรณ์ตรวจวัด ข้อจำกัดในการติดตั้งเครื่องขยายอาคาร และข้อจำกัดในการหาค่าอัตราส่วนความหน่วงที่แม่นยำ ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางแก้ไขโดยการพัฒนาอัลกอริทึมขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาเหล่านั้น รวมถึงประยุกต์ใช้อัลกอริทึม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

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

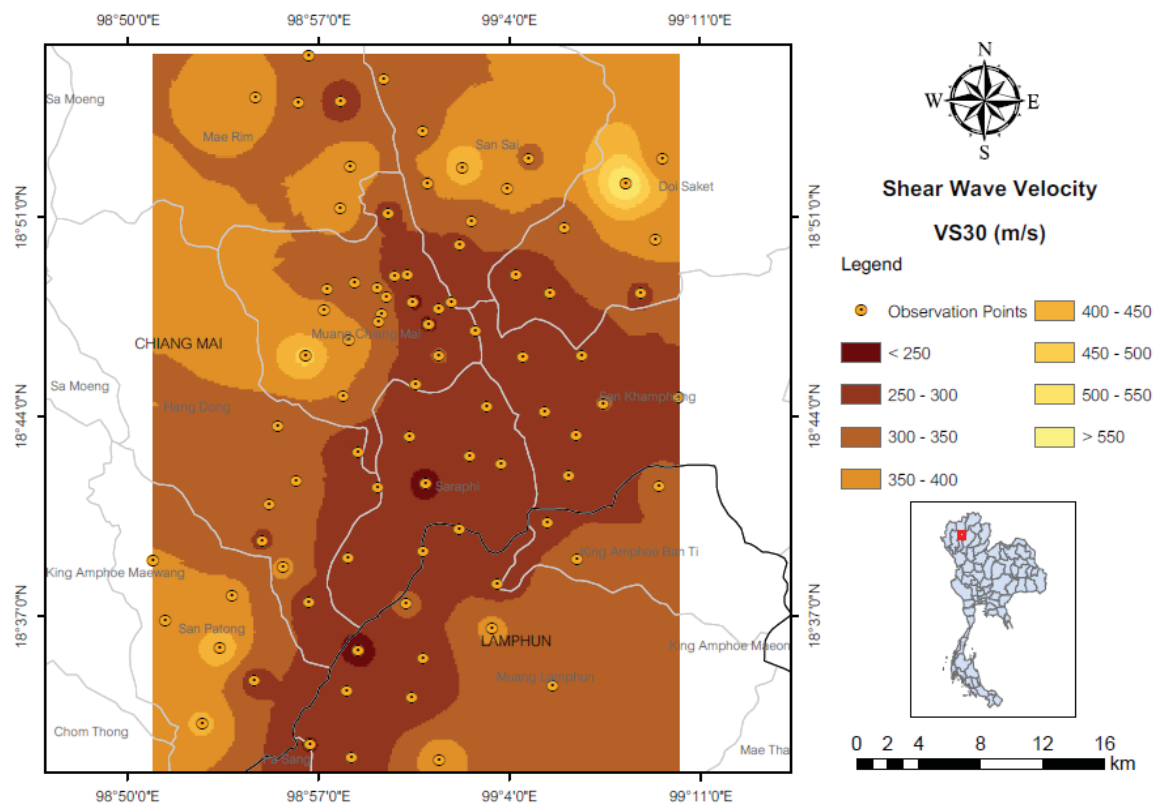
มากขึ้น ทำให้เสนอค่าประมาณค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารเมื่อสั่นอิสระเท่ากับ 2% ซึ่งเป็นค่าโดยเฉลี่ยจากทุกอาคารที่ทำการตรวจวัดซึ่งมีลักษณะการก่อสร้างคล้ายคลึงกัน

นอกจากนี้แล้ว ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ขึ้นมาเพื่อศึกษาพฤติกรรม 3 มิติของอาคาร เพื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ อาจให้ผลที่แตกต่างจากพฤติกรรมจริงของอาคารได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองนั้นด้วย การตรวจวัดพฤติกรรมอาคารจึงมีความสำคัญอย่างมากหากต้องการประเมินพฤติกรรมของอาคารให้ใกล้เคียงความจริงที่สุด

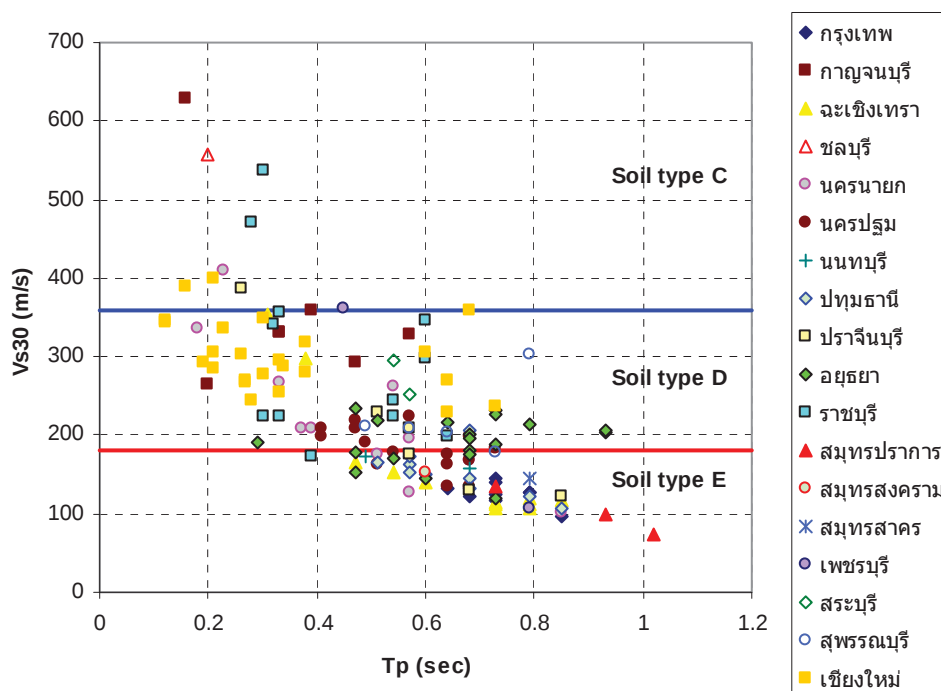
ข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ การนำข้อมูลด้านพฤติกรรมด้านการตอบสนองของชั้นดินไปใช้ปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบสำหรับพื้นที่ศึกษา รวมทั้งวางแผนการศึกษาเพื่อการปรับปรุงสำหรับพื้นที่อื่นด้วยการสำรวจและวิเคราะห์เพิ่มเติม และทำการสำรวจระดับชั้นหินของแอ่งดินพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพื่อข้อมูลที่ถูกต้องยิ่งขึ้นสำหรับการขยายคลื่นในช่วงคาบการสั่นยาวที่ส่งผลมากกับกลุ่มอาคารสูง และการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคารรูปแบบอื่นจากการตรวจวัดและวิเคราะห์แบบจำลองควบคู่กัน



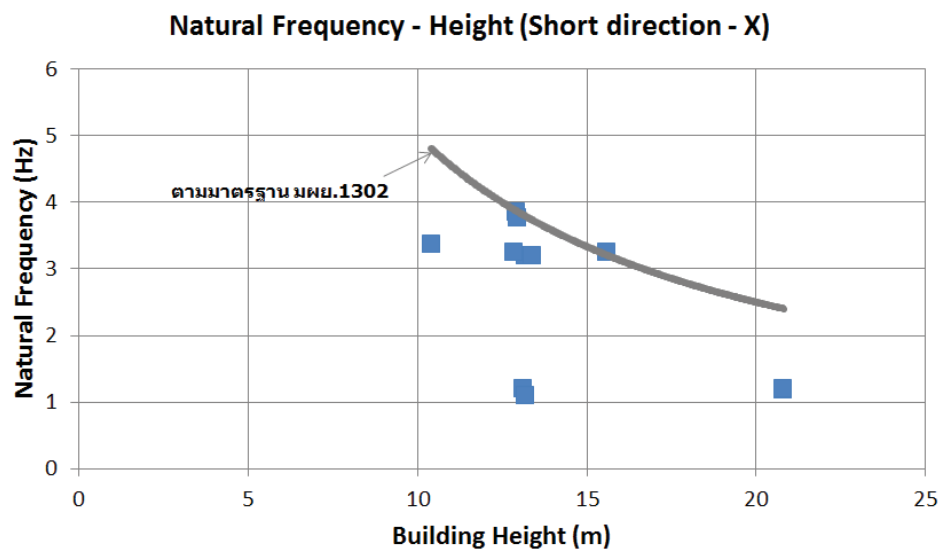
รูปที่ 1. แผนที่ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร สำหรับกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง



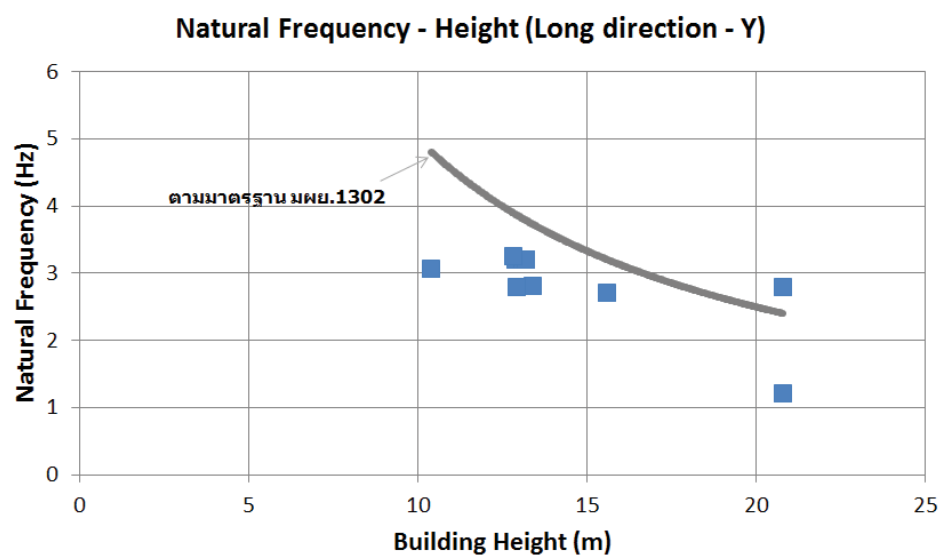
รูปที่ 2. แผนที่ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร สำหรับจังหวัดเชียงใหม่และบริเวณใกล้เคียง



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 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาผลของชั้นดินบริเวณที่ตั้งสำหรับบริเวณที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวและการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร 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 พบว่าพื้นที่เลียบบ่อไทยและบริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของพื้นที่ศึกษามีค่า 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 นั่นคือการได้มาซึ่งค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารตึกถึงสูงปานกลางประมาณ 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 ภูวโรตม¹ 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 ซึ่งเป็นการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดินเพื่อวิเคราะห์ค่าคาบอิทธิพลหลัก (T_p) ด้วยวิธี H/V spectral ratio และวิเคราะห์แบบ Spatial Autocorrelation (SPAC) สำหรับการสำรวจความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน (V_s) โดยผลการศึกษา 103 ตำแหน่งในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และบริเวณใกล้เคียงพบว่า V_s 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 ชั้นและมีความไม่สม่ำเสมอจำนวนทั้งสิ้น 11 หลังด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือน และสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรม 3 มิติของอาคาร ซึ่งในการวิจัยได้เสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาความคลาดเคลื่อนในการวางห้วัดและการหาค่าอัตราส่วนความหน่วงที่แม่นยำ 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 รวมทั้งผลกระทบจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่ส่งผลกระทบต่อประเทศจนสร้างความตื่นตระหนกเป็นระยะ 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 ของบริเวณที่ทำการศึกษา 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 ผลของคูณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งและการแบ่งเขตแผ่นดินไหวอย่างละเอียด

คลื่นแผ่นดินไหวจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนตัวผ่านสภาพธรณีต่าง ๆ จนกระทั่งถึงผิวดินที่ตั้งของอาคาร เส้นทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านจะมีผลอย่างมากในการปรับเปลี่ยนคูณลักษณะของคลื่น 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

นอกจากปัจจัยด้านการขยายคลื่นเนื่องจากชั้นดินอ่อนที่เกิดจากคูณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง 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 ใช้การตรวจวัดการสั่นสะเทือนของผิวดินในระดับตื้นที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (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 อย่างไรก็ตามพวกเขาก็ยืนยันว่า 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 ข้อมูลอาคารโครงสร้างพื้นฐานและสาทรูปโภคในเขตเมืองของ 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 การบันทึกสัญญาณวัดและวิเคราะห์ผลทำให้ระบบออนไลน์ 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 จึงได้มีการพัฒนาวิธีใหม่ๆ 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 สามารถใช้ได้กับอาคารสูงที่มีผลการตอบสนองชัดเจน แต่สำหรับอาคารเตี้ยจำเป็นต้องมีการกระตุ้นให้มีผลตอบสนองที่ชัดเจนขึ้น งานวิจัยด้านนี้ได้แก่ De Sortis และคณะ (2005) ได้วัดผลการตอบสนองของอาคารที่ก่อสร้างด้วยอิฐเพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยใช้อุปกรณ์ให้แรงกระทำกับโครงสร้าง แรงกระทำแบบ 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; ชากร, 2002; ประยุทธ์, 2545; มานะ, 2546; ครองสิน, 2550) จนสามารถได้ฐานข้อมูลด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจำนวนมาก และมีการศึกษาด้านเทคนิคในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์จากผลการตรวจวัดที่ให้ผลที่ถูกต้องและเหมาะสมในการใช้งานมากขึ้น (วีระศักดิ์, 2546 และ เยาวพรรณ, 2552)

2.5 โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย

การดำเนินการวิจัยก่อนหน้าในโครงการหลัก โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย โดยการสนับสนุนของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ประกอบด้วย โครงการวิจัยระยะที่ 1 เรื่อง

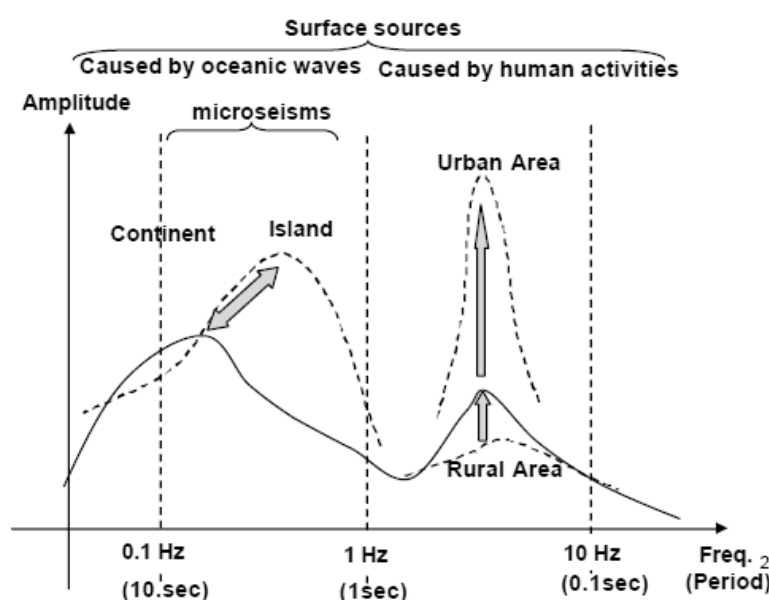
การตรวจวัดและศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร (นคร และ เป็นหนึ่ง 2547) และ โครงการวิจัยระยะที่ 2 เรื่อง คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินเพื่อการแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่ (นคร และคณะ 2553) สำหรับโครงการในระยะที่ 1 เป็นการตรวจวัดและสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างอาคารในกรุงเทพมหานครที่ตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อนงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติจากข้อมูลการตรวจวัดด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย 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)

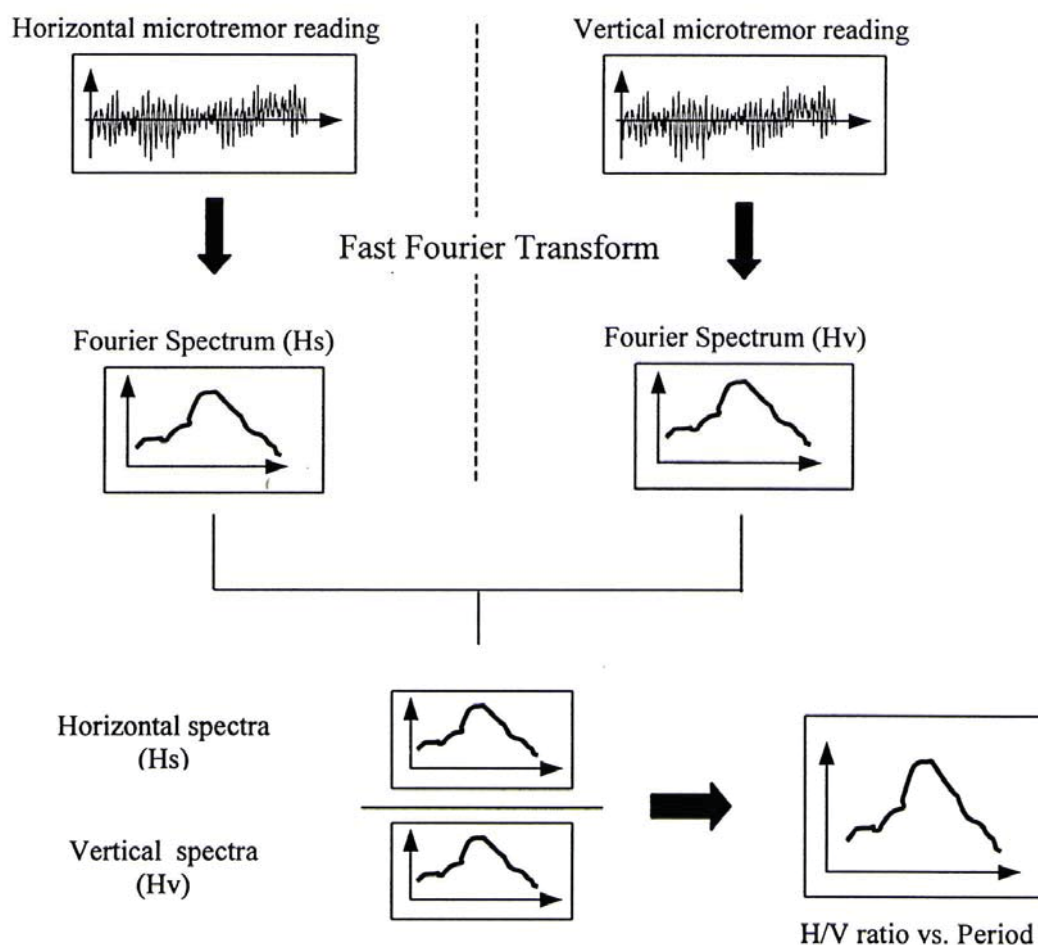
$$H/V \text{ spectrum} = \frac{\sqrt{F_{NS} \times F_{EW}}}{F_{UD}} \quad (3.1)$$

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)

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

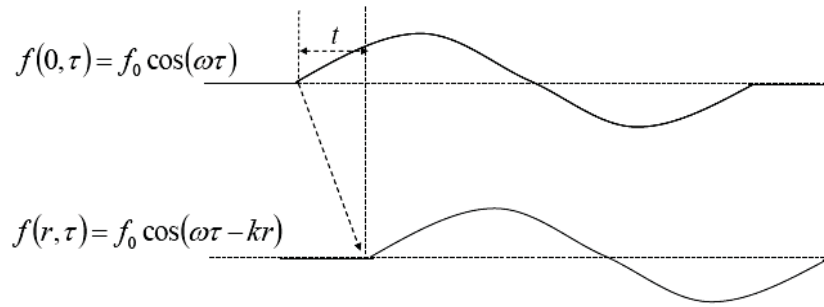
จึงสรุปได้ว่าอัตรากำลังขยายคลื่น (Amplification factor) ขององค์ประกอบคลื่นในแนวราบสามารถประเมินได้จากค่าสูงสุดของอัตราส่วนระหว่าง Horizontal spectrum และ Vertical spectrum ที่ได้จากการตรวจวัดที่พื้นผิวดินเท่านั้น และค่าคาบ ณ ตำแหน่งที่อัตราส่วนสเปกตรัมมีค่าสูงที่สุดเปรียบเสมือนค่าคาบธรรมชาติของสถานที่นั้นๆ อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อขัดแย้งในสมมติฐานสำหรับทฤษฎีนี้ โดยสมมติฐานของ Nakamura (1989) ได้สมมุติให้องค์ประกอบคลื่นหลัก 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

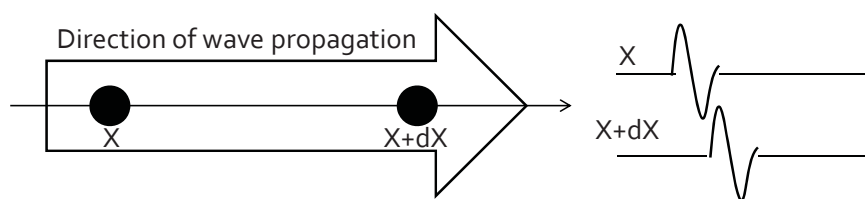
$$Cc(\Delta x, t) = f(x, t) * \overline{f(x + \Delta x, t)} \quad (3.14)$$

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

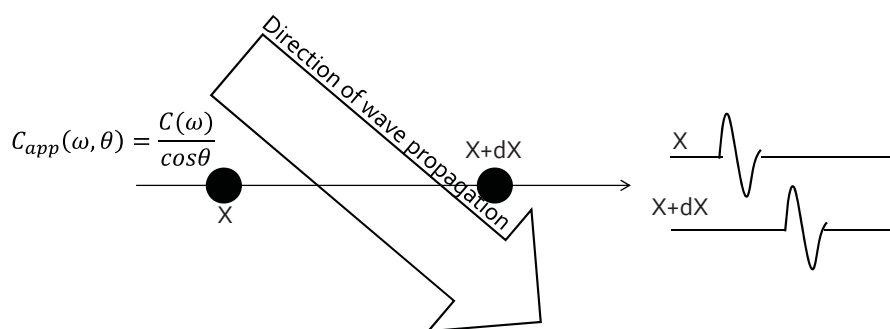
ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC สำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นจากตำแหน่ง x ไปยังตำแหน่ง $x+\Delta x$ ซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ Δx สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.16

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

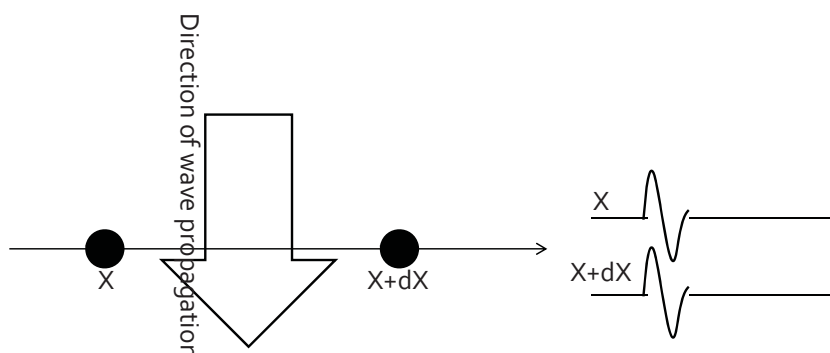
รูปแบบการแพร่ของคลื่นแบบทิศทางเดียวมีด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 คลื่นเคลื่อนที่ขนานกับแนวเส้นทางการตรวจวัดจากตำแหน่ง X ไปยังตำแหน่ง $X+\Delta x$ แสดงดังรูปที่ 3.4 รูปแบบที่ 2 คลื่นเคลื่อนที่เป็นมุม θ กับเส้นทางการตรวจวัดจากตำแหน่ง X ไปยังตำแหน่ง $X+\Delta x$ ความเร็วเฟสที่คำนวณได้จากการเคลื่อนที่ลักษณะนี้เรียกว่าเป็นความเร็วเฟสปรากฏ (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)

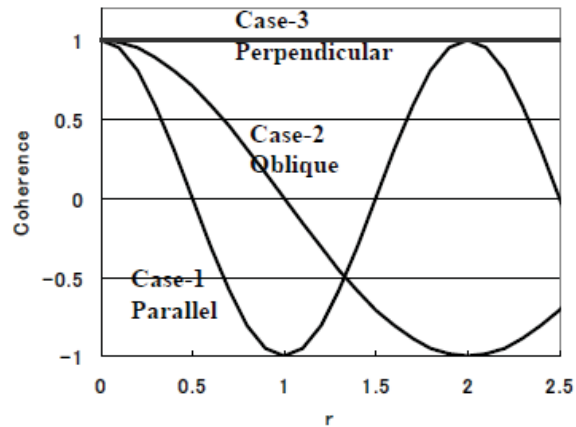


รูปที่ 3.5 การเคลื่อนที่ของคลื่นทำมุม θ กับเส้นทางตรวจวัด (Yokoi T., 2008)



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) ของคลื่นที่มุมต่างๆที่ผ่านเข้ามาในตำแหน่งของการตรวจวัด ดังสมการที่ 3.19-3.21

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

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

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

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

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

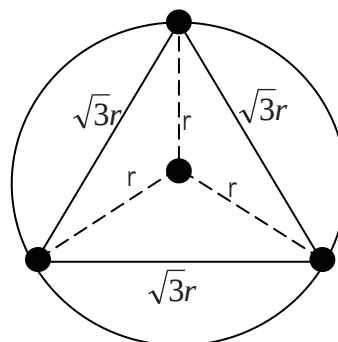
โดยที่ $\text{real}[\cdot]$ = ส่วนของจำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน

$S_{CX}(\omega, r, \theta)$ = 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 $X(r, \theta)$

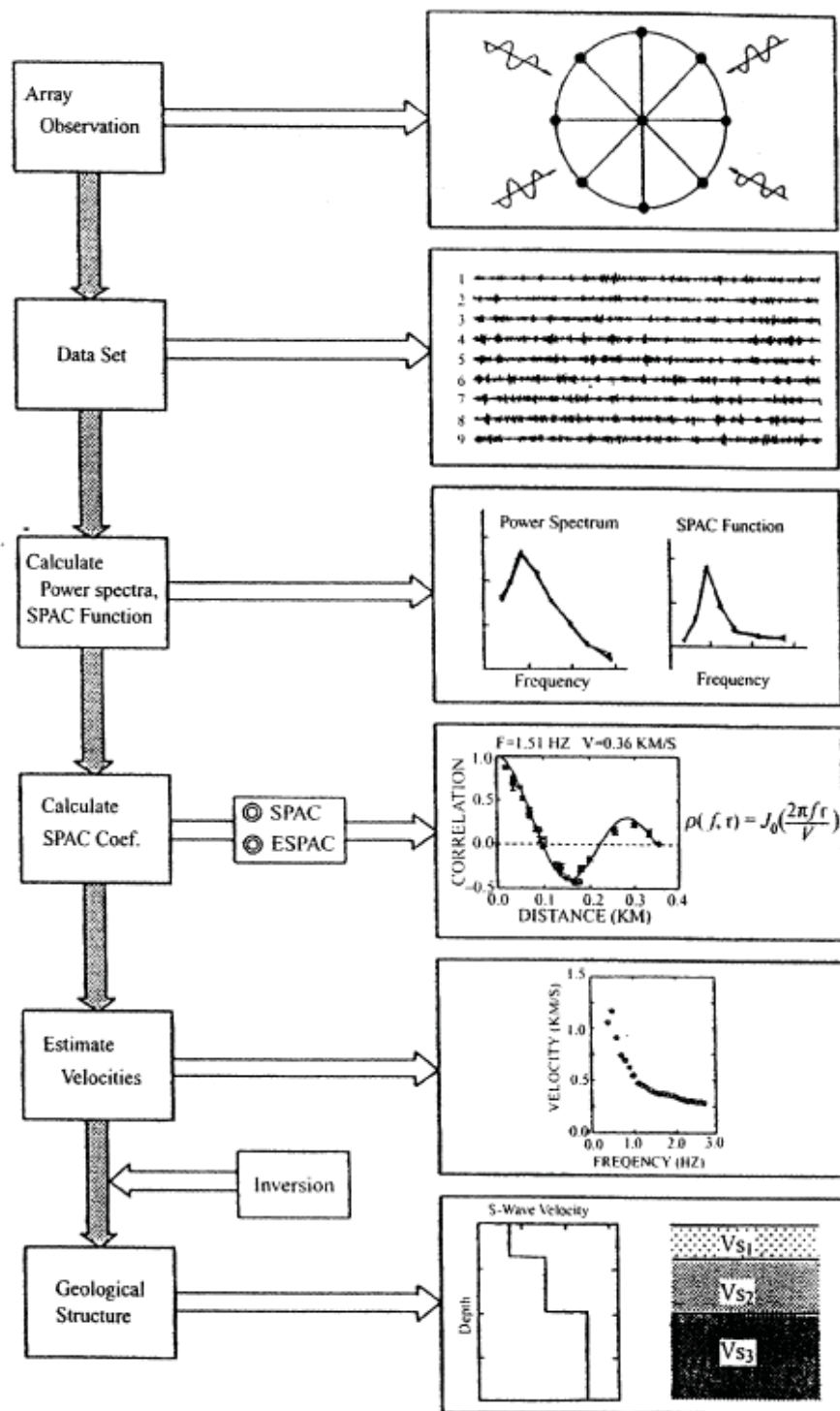
รูปแบบของการตรวจวัดด้วยวิธี SPAC ประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณจำนวน 4 ชุดโดยจัดวางเครื่องรับสัญญาณดังรูปที่ 3.8



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

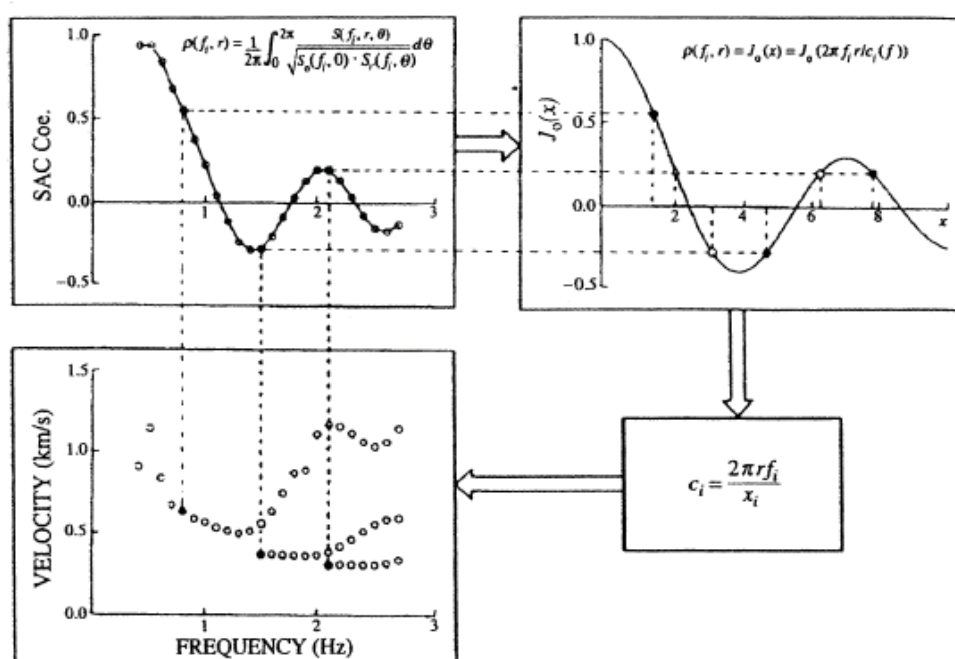
วิธีการคำนวณความเร็วเฟส (Phase Velocity) จากวิธี SPAC นั้นมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10

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)

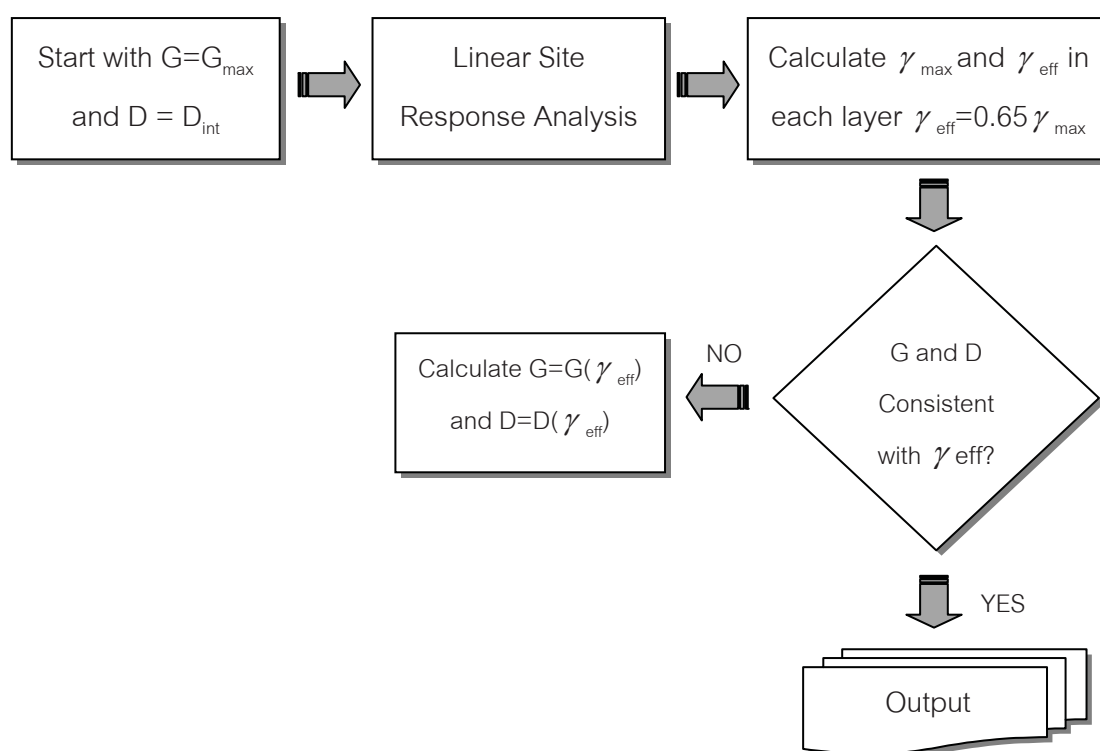
ผลตอบสนองของพื้นผิวดิน (Ground response) มีความสำคัญสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมแผ่นดินไหว ซึ่งใช้ในการประเมินความเสี่ยงภัยเนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหว เช่น การประเมินการขยายขนาดและการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหว ปัญหา liquefaction ปัญหาดินถล่ม และการวิบัติของโครงสร้างที่รับแรงด้านข้าง 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 ขอบเขตเป็นอนันต์ในทิศทางตามแนวยาว
- 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

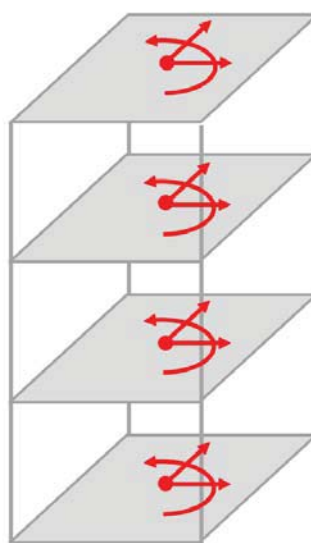
การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บข้อมูลที่สำคัญของโครงสร้างอันได้แก่ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่น และอัตราส่วนความหน่วง ซึ่งเป็นปริมาณที่สำคัญที่สุดสำหรับอธิบายพฤติกรรมของอาคาร การวัดปริมาณทั้งสามดังกล่าวนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจวัดวางที่พื้นอาคารแต่ละชั้น แล้ววัดการสั่นไหวของโครงสร้าง 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

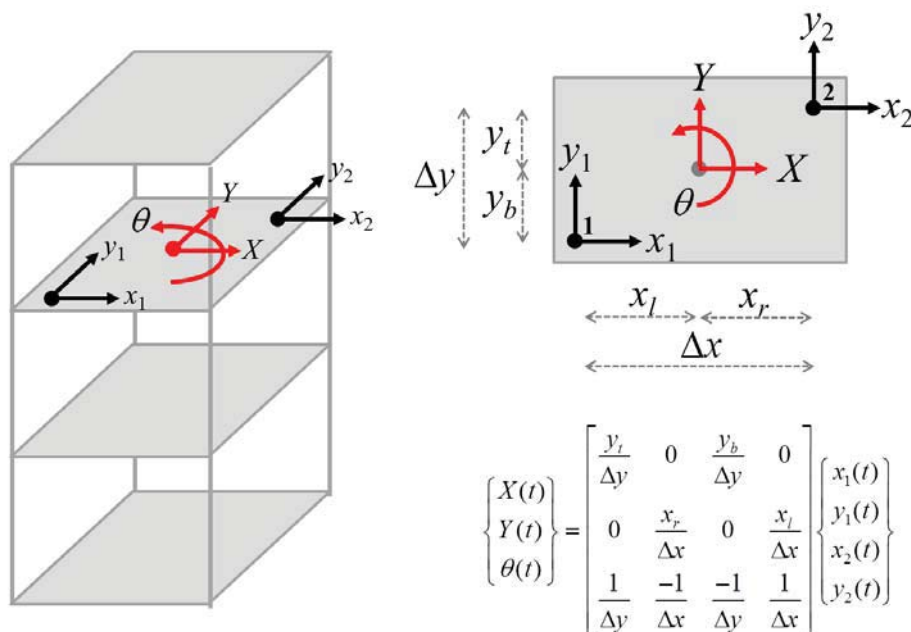
การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารซึ่งได้แก่ความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นไหว สามารถทำได้โดยการพิจารณาการสั่นไหวของอาคารแต่ละชั้น สมมติให้ในระนาบการเคลื่อนที่ของพื้นแต่ละชั้นมีลักษณะแข็งมาก การเคลื่อนที่ของแต่ละชั้นจึงเป็นการเคลื่อนที่แบบวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) ซึ่งแต่ละชั้นแสดงได้ด้วยระดับความอิสระ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



รูปที่ 3.12 การเคลื่อนที่ในแต่ละชั้นของอาคาร

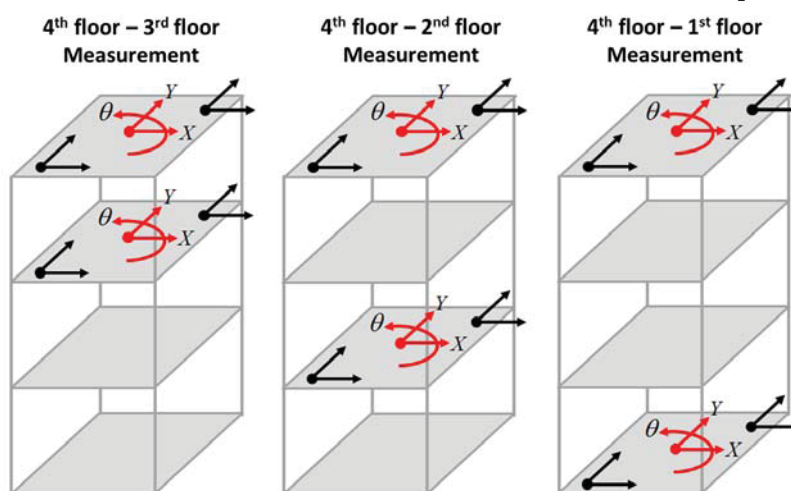
การคำนวณค่าการเคลื่อนที่ของชั้นใด ๆ กระทำได้โดยการติดตั้งหัววัดการสั่นไหว 2

ตำแหน่งที่มุมอาคารแต่ละชั้น ค่าการสั่นไหวจากหัววัดที่ได้สามารถนำมาคำนวณการเคลื่อนที่ของพื้นแต่ละชั้นได้ดังรูปที่ 13



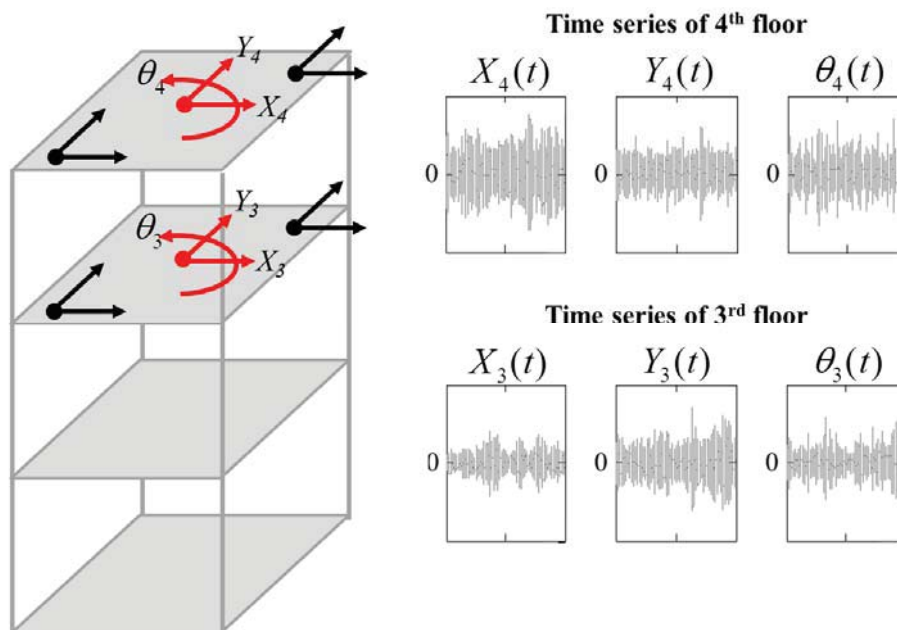
รูปที่ 3.13 วิธีการคำนวณการเคลื่อนที่ของอาคารจากข้อมูลหัววัด

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



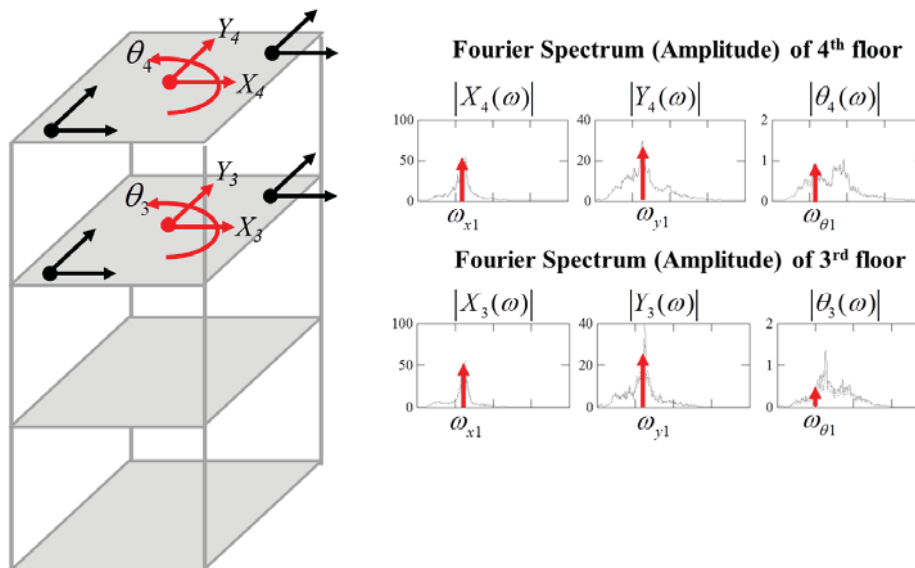
รูปที่ 3.14 วิธีการตรวจวัดโดยการจับคู่พื้นที่ชั้น

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดโดยการจับคู่ที่ละชั้นจะเป็นการเคลื่อนที่ตามเวลาหรือ Time series ของแต่ละชั้นดังตัวอย่างในรูปที่ 15



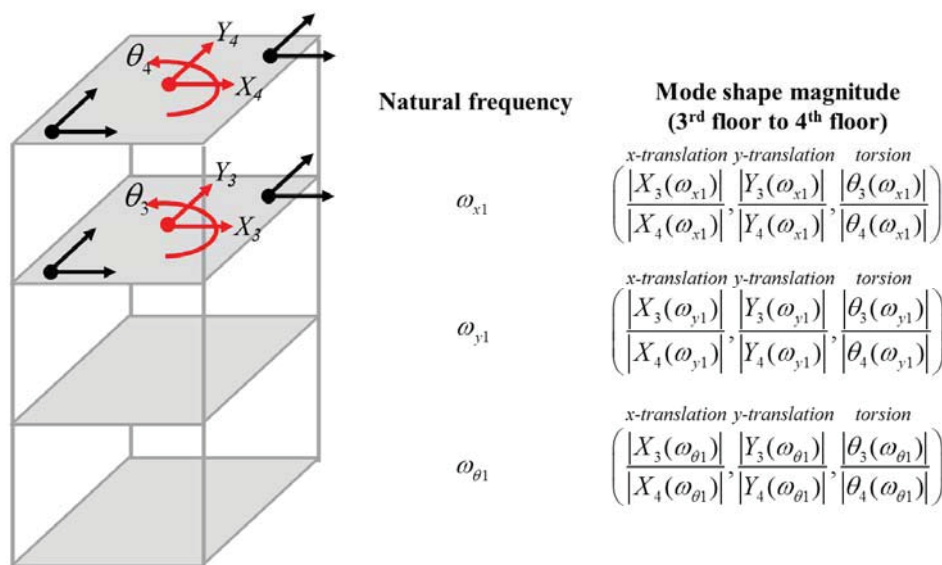
รูปที่ 3.15 ข้อมูลสั่นไหวของอาคารที่ได้จากการตรวจวัด

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

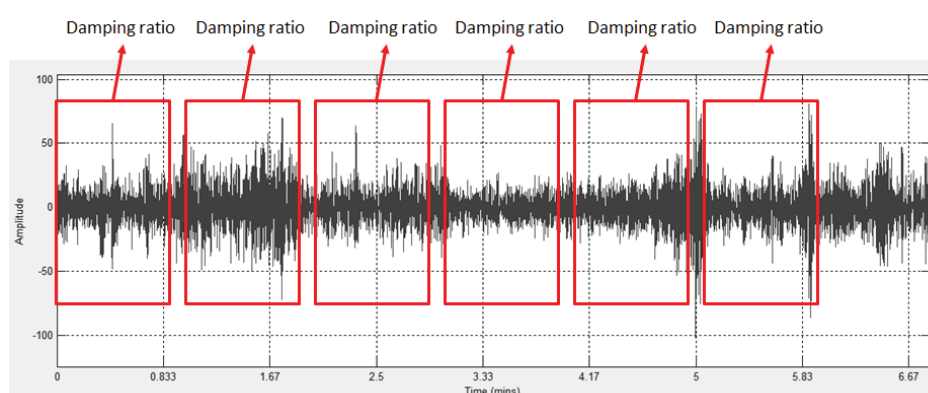
3.4.2 การวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง: อัตราส่วนความหน่วง

จากผลการตรวจวัดเบื้องต้นทำให้ทราบค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นไหว อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือค่าอัตราส่วนความหน่วงยังไม่ได้มีการคำนวณเอาไว้ ในทางปฏิบัติการประมาณค่าความหน่วงโดยเฉพาะโครงสร้างที่ไม่ได้อยู่ในห้องทดลองเช่น อาคาร เป็นสิ่งที่ทำได้ยากและให้ค่าไม่แน่นอน ที่ผ่านมานิเวศค่าความหน่วงสามารถหาได้จากสองวิธีคือ 1) โดยการตรวจจับสัญญาณการสั่นอิสระจากการตรวจวัดจริงหรือสังเคราะห์ขึ้นมาจาก Autocorrelation function ของการสั่นตามสภาวะแวดล้อม วิธีนี้ใช้ได้ดีเมื่อความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างในโหมดต่างๆไม่ใกล้กันมากนักและสัญญาณการสั่นอิสระมีคุณภาพที่ดีพอ และ 2) โดยการคำนวณจากฟูเรียร์สเปกตรัมในบริเวณตรงกับความถี่ธรรมชาติ (Half-power bandwidth) แต่ก็มี ความคลาดเคลื่อนอยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดในสองวิธีนั้นก็มักจะให้ค่าอัตราส่วนความหน่วงซึ่ง กระจัดกระจายไม่แน่นอนเช่นเดียวกัน

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

เชิงพลศาสตร์ในโดเมนเวลาเพื่อช่วยเพิ่มความถูกต้องให้กับเทคนิคที่ใช้อยู่ในปัจจุบันด้วย ส่วนรายละเอียดทางเทคนิคและการทดสอบประสิทธิภาพอัลกอริทึม SRIM ที่คณะผู้วิจัยได้นำมาประยุกต์ใช้ มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในภาคผนวกที่ 2.1

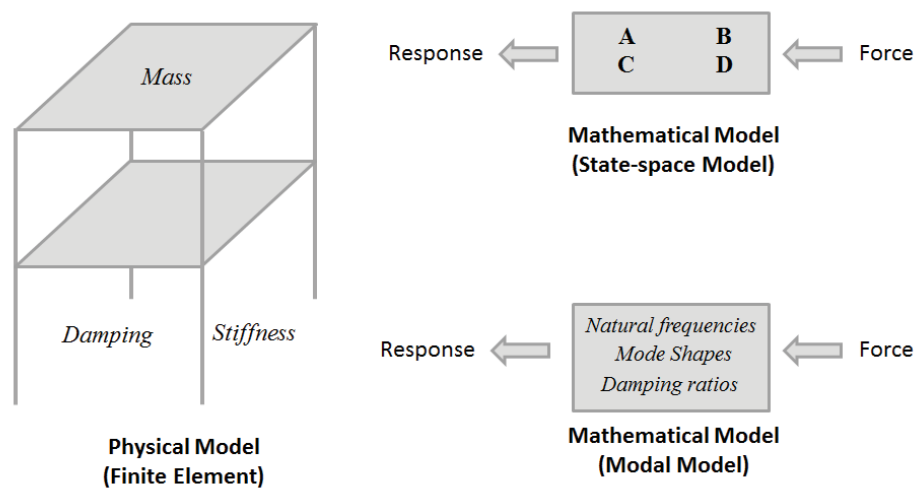
ในการคำนวณหาอัตราส่วนความหน่วง จำเป็นต้องใช้สัญญาณจากการวัดอาคารชั้นบนสุด เนื่องจากเป็นสัญญาณที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับชั้นอื่นๆ เมื่อแปลงสัญญาณการวัดให้เป็นค่าที่กึ่งกลางของแต่ละชั้นแล้วก็จะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนความหน่วงได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสัญญาณการวัดมีความยาวที่ยาวมาก การคำนวณหาอัตราส่วนความหน่วงจึงต้องตัดแบ่งช่วงสัญญาณออกเป็นช่วงสั้นๆ 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

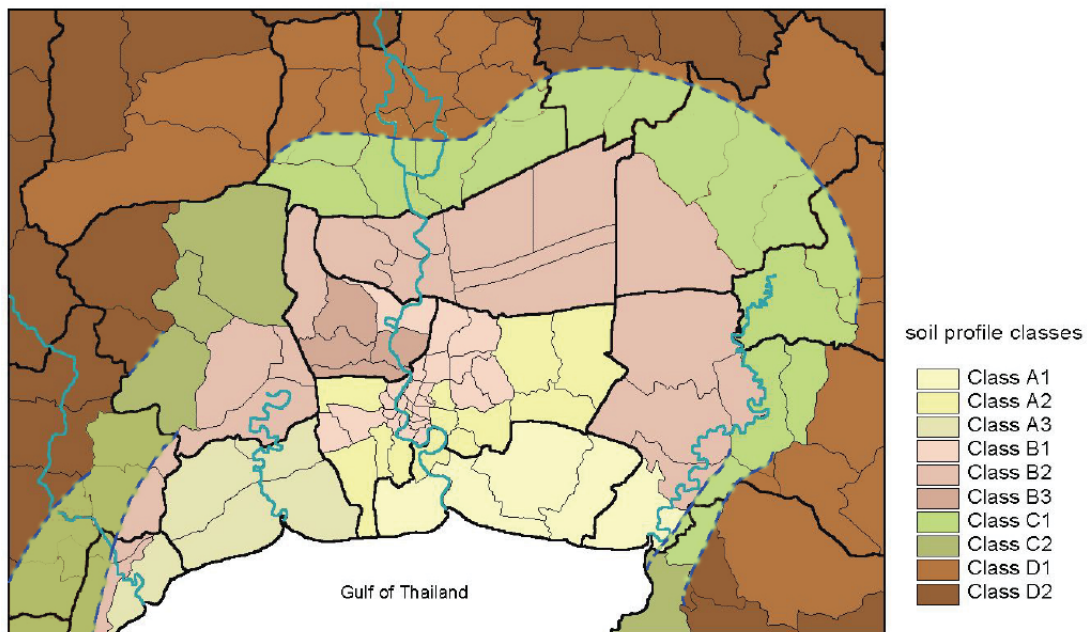
4.1 การรวบรวมข้อมูลทางธรณีเทคนิคของพื้นที่ศึกษา

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

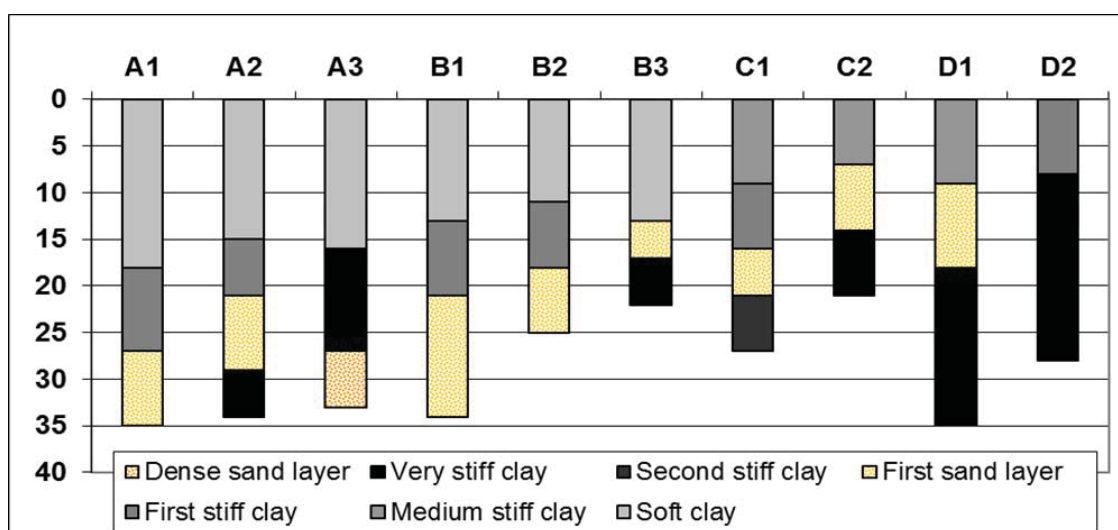
งานวิจัยที่ได้มีการทบทวนผลการวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล คือ Tuladhar (2003) ที่ได้ใช้ข้อมูลจากหลุมเจาะสำรวจดินและแบ่งประเภทชั้นดินบริเวณกรุงเทพมหานครออกเป็น 10 ประเภท และมีการอธิบายถึงลักษณะของชั้นดินในแต่ละระดับความลึก ความหนาของดินแต่ละชั้น และการประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนไว้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

4.2 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tuladhar (2003) ได้ใช้ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจเพื่อจำแนกชั้นดินในบริเวณพื้นที่ภาคกลางหรือกรุงเทพมหานคร 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

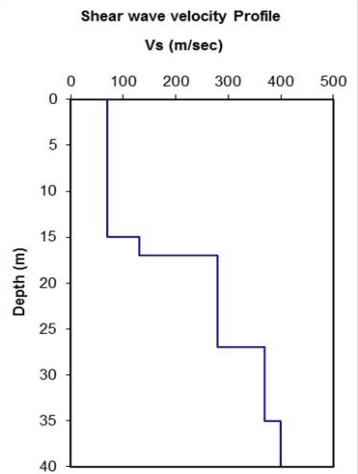
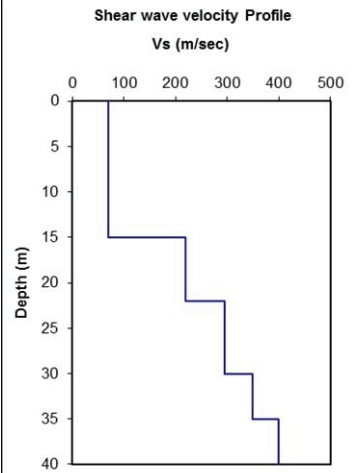
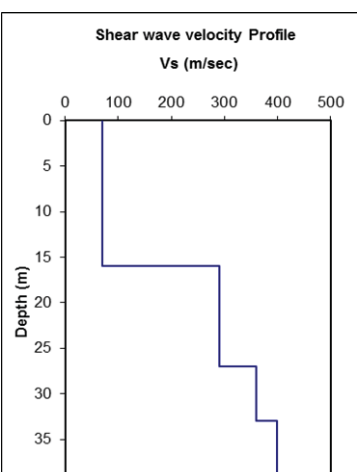


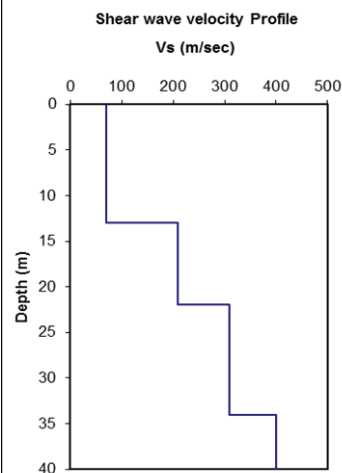
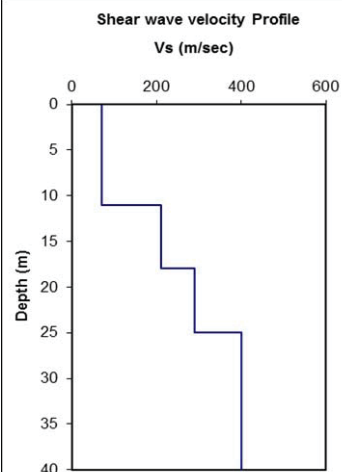
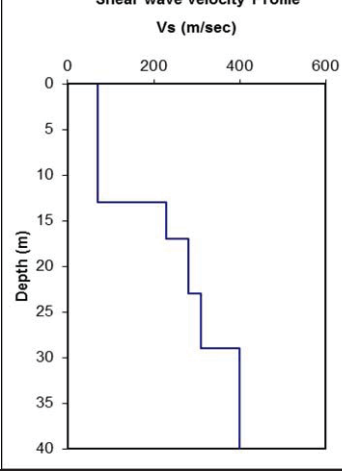
รูปที่ 4.1 แผนที่การจำแนกประเภทชั้นดิน บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (Tuladhar , 2003)

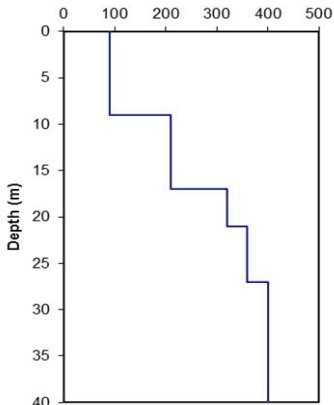
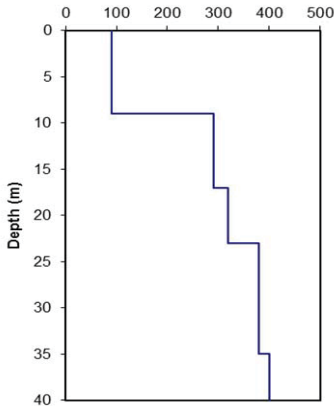
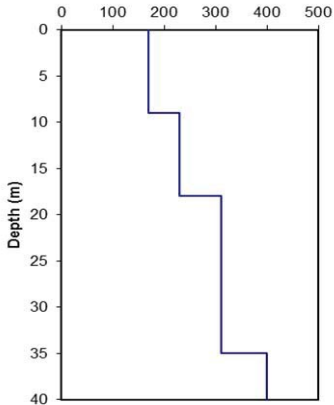


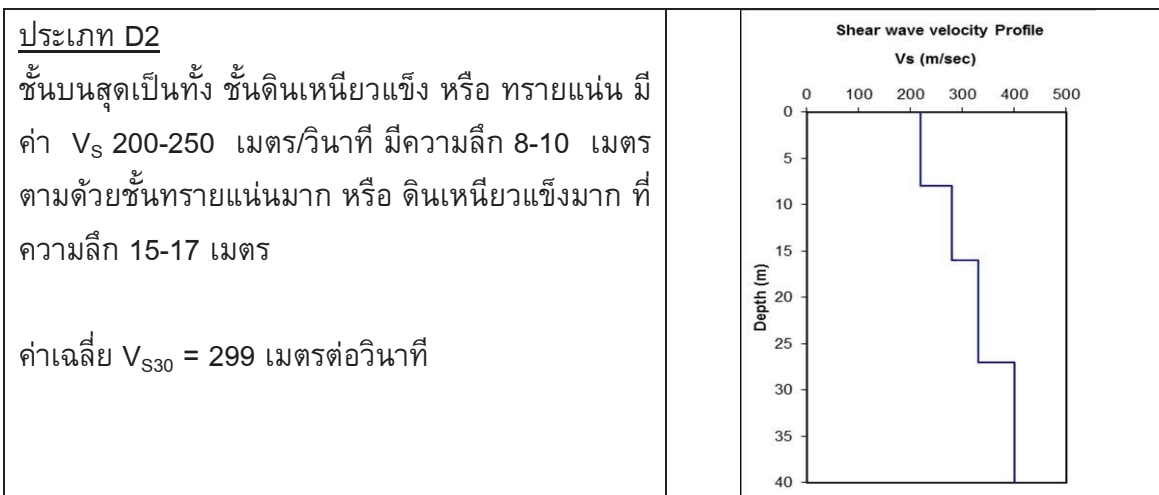
รูปที่ 4.2 แผนภูมิลักษณะของชั้นดินในแต่ละประเภท (Tuladhar, 2003)

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของชั้นดินที่จำแนกในเขต กทม และปริมณฑล (Tuladhar, 2003)

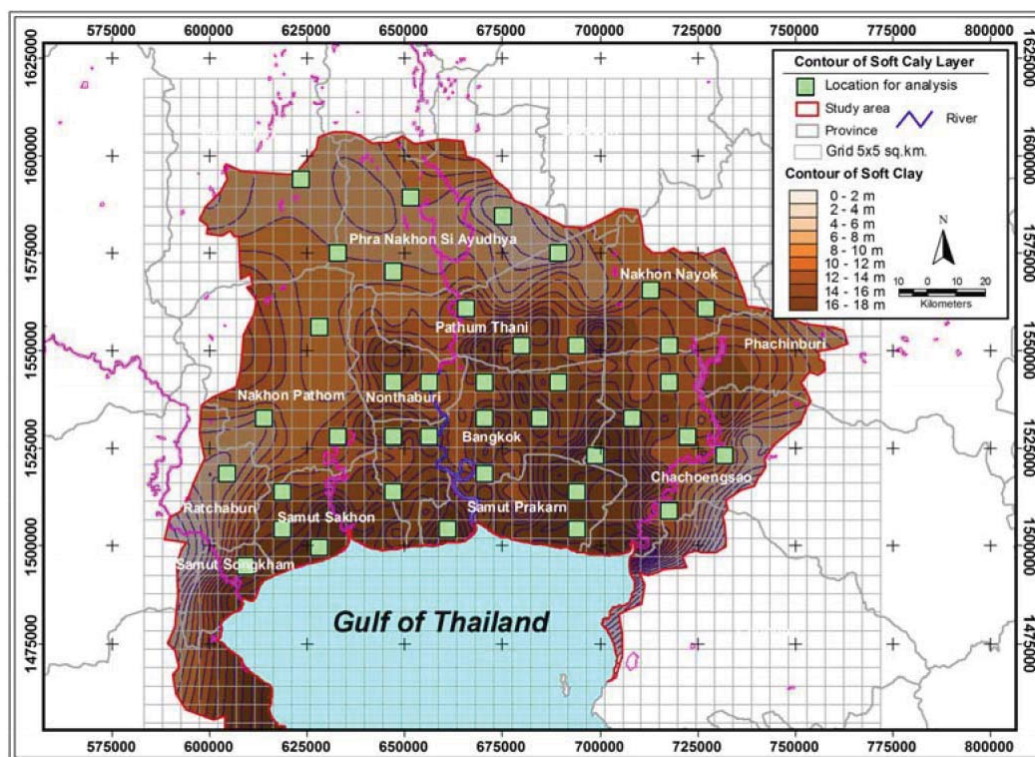
คำอธิบาย	ความเร็วคลื่นเฉือน (V_s)
ประเภท A1 อยู่บริเวณพื้นที่ใกล้กับอ่าวไทย ในจังหวัดสมุทรปราการ มีชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 16-20 เมตร มีค่า V_s 60-80 เมตร/วินาทีตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกที่มีความลึกถึง 26-28 เมตร มีค่า V_s 250-300 เมตร/วินาที สำหรับชั้นทรายชั้นแรกอยู่ที่ความลึกต่ำกว่า 35 เมตร มีค่า V_s 350-400 เมตร/วินาที ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 113$ เมตรต่อวินาที	
ประเภท A2 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 ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 110$ เมตรต่อวินาที	
ประเภท A3 อยู่บริเวณใกล้กับอ่าวไทย บริเวณจังหวัดสมุทรสาคร และอำเภอเมือง 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 ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 109$ เมตรต่อวินาที	

ประเภท B1 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 ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 118$ เมตรต่อวินาที	
ประเภท B2 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 ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 135$ เมตรต่อวินาที	
ประเภท B3 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 ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 122$ เมตรต่อวินาที	

ประเภท C1 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 ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 172$ เมตรต่อวินาที	Shear wave velocity Profile V_s (m/sec) 
ประเภท C2 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 ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 182$ เมตรต่อวินาที	Shear wave velocity Profile V_s (m/sec) 
ประเภท D1 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 ค่าเฉลี่ย $V_{s30} = 229$ เมตรต่อวินาที	Shear wave velocity Profile V_s (m/sec) 



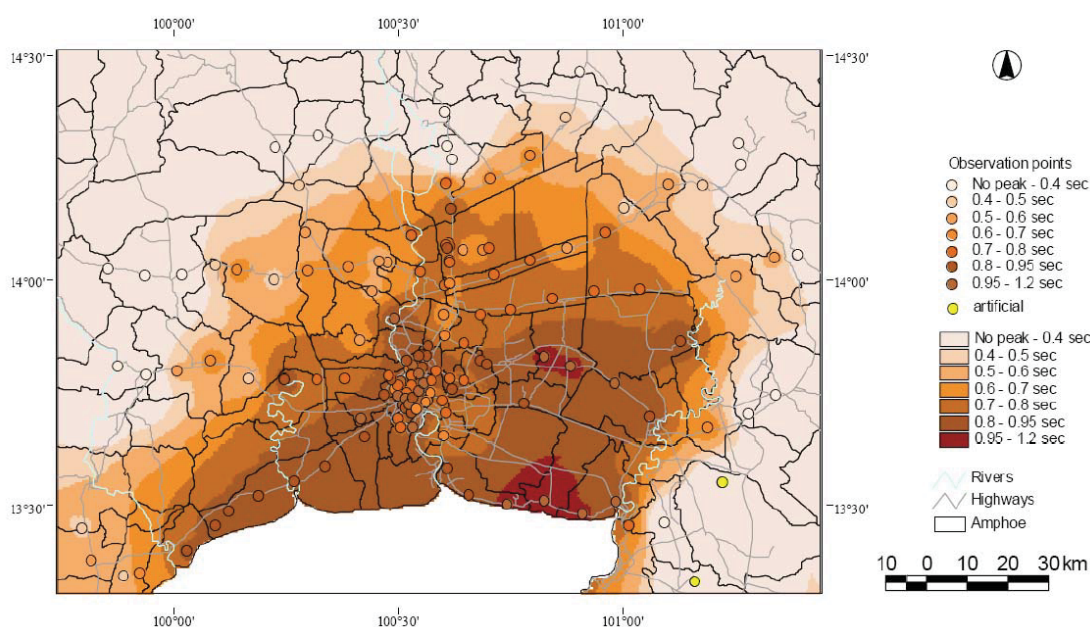
อำนาจ ยานูวริยะกุล (2552) ได้จัดทำแผนที่แสดงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยใช้ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจ 3,755 หลุม จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์เชิงพื้นที่โดยใช้คุณสมบัติดินในพื้นที่ย่อย 5X5 ตารางกิโลเมตร โดยการกำหนดตำแหน่งสำหรับเป็นตัวแทน การวิเคราะห์เชิงพื้นที่จะพิจารณาให้ตำแหน่งกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นที่จำนวน 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)

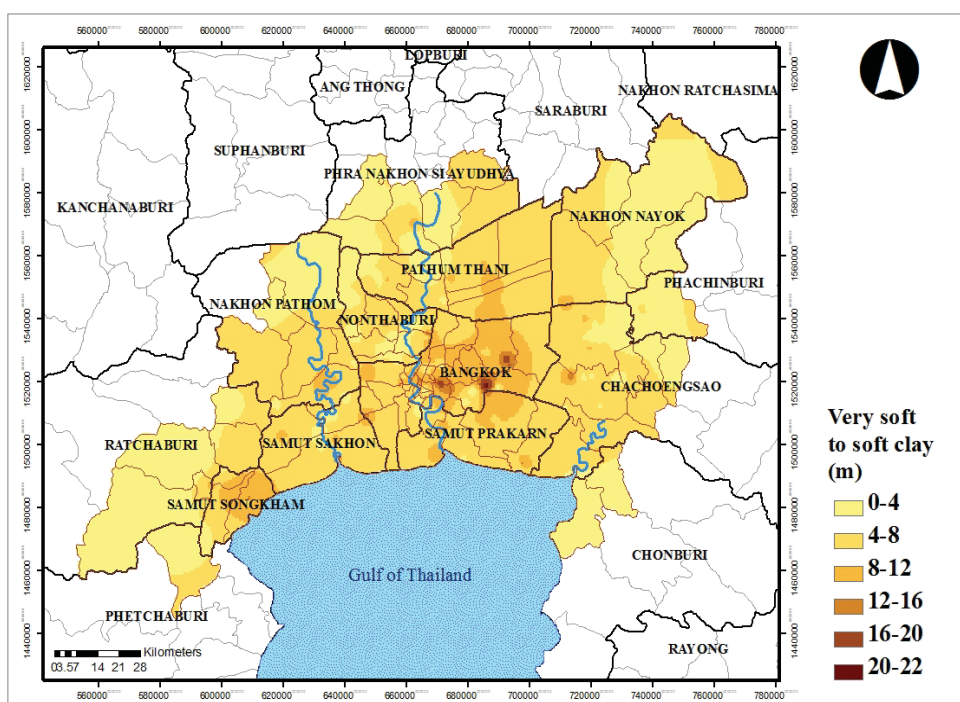
ประเภทชั้นดิน	Shear wave velocity*	SPT*	Undrained Shear Strength*
A	> 1500 เมตรต่อวินาที	-	-
B	750 - 1500 เมตรต่อวินาที	-	-
C	360 - 750 เมตรต่อวินาที	> 50	> 100 กิโลปาสคาล
D	180 - 360 เมตรต่อวินาที	15 - 50	50 - 100 กิโลปาสคาล
E	< 180 เมตรต่อวินาที	< 15	< 50 กิโลปาสคาล
	มีชั้นดินที่มีความหนามากกว่า 3 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

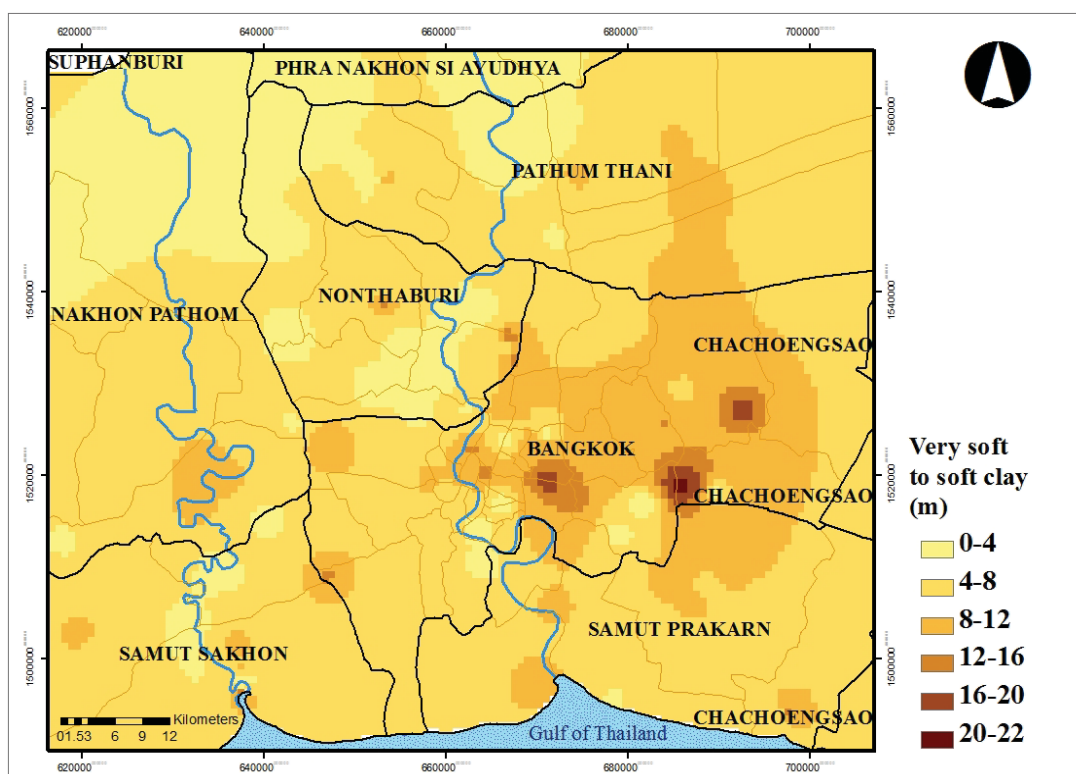
ก) กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

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

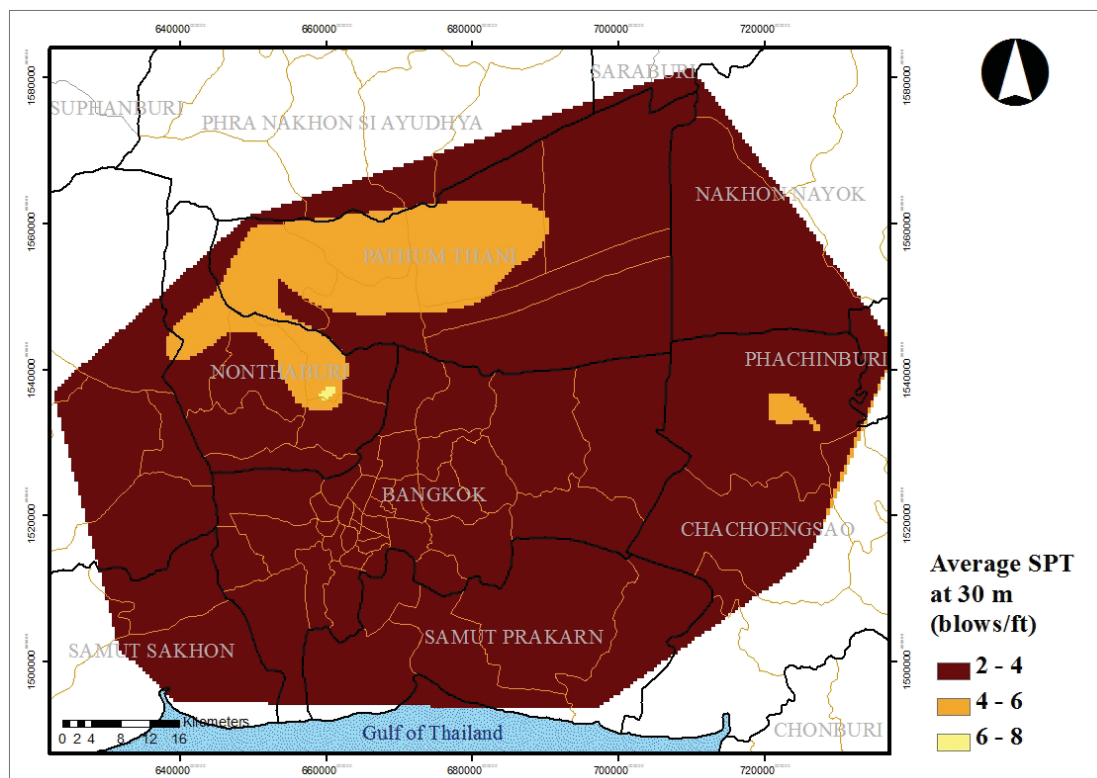
เมื่อนำผลการศึกษาที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ Tuladhar ในเรื่องการแบ่งความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนตามประเภทชั้นดินต่างๆ และเปรียบเทียบกับผลของ อำนาจ ยานูวิริยะกุล ในเรื่องของ การจำแนกความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษาความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมาก-ดินเหนียวอ่อนในเขต กทม และปริมณฑล

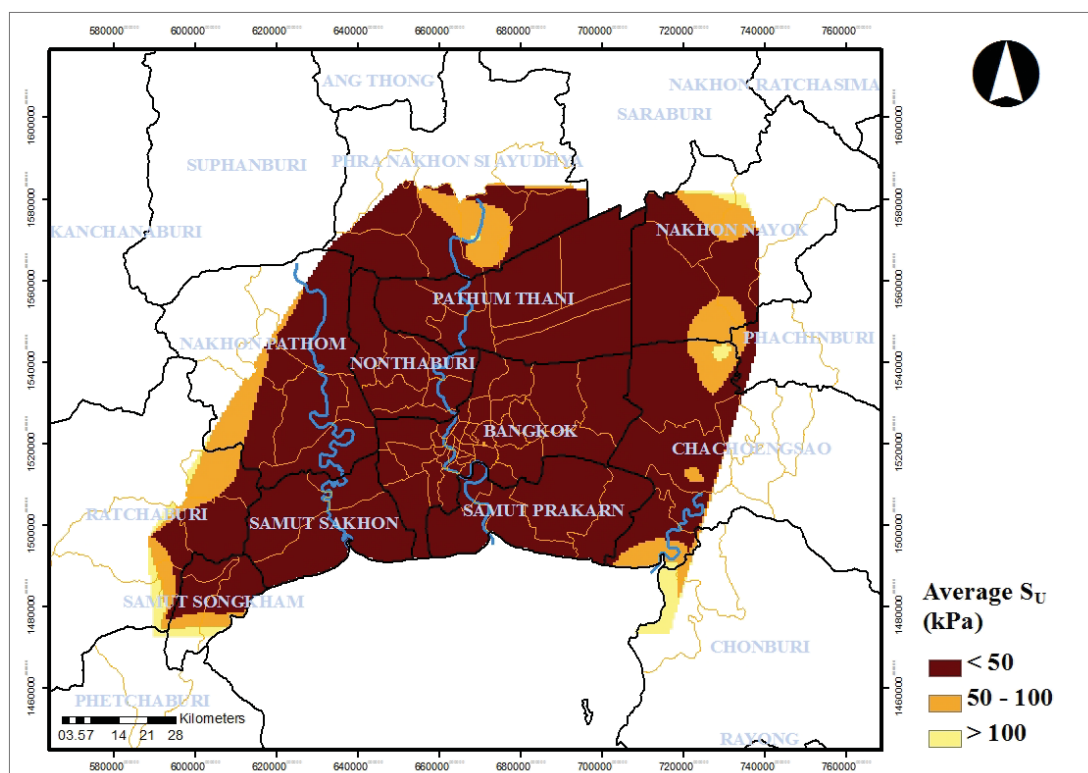
ประเภท	ผลจากข้อมูลงานนี้	Tuladhar (2003)	อำนาจ (พ.ศ. 2552)
A1	ดินเหนียวอ่อน 8-16 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 16-20 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 14-18 เมตร
A2	ดินเหนียวอ่อน 12-16 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 14-16 เมตร	ดินเหนียวอ่อน 12-16 เมตร

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 ครั้งต่อฟุต ซึ่งน้อยกว่า 15 ครั้งต่อฟุต และค่า S_u มีค่าน้อยกว่า 50 กิโลปาสกาล ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 30 เมตร บริเวณกรุงเทพและปริมณฑล

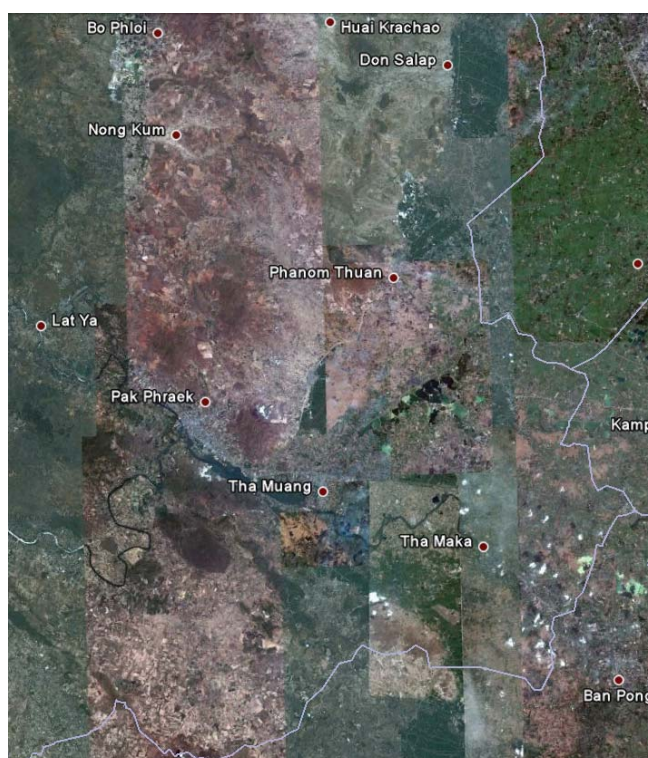


รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ที่ความลึกจากผิวถึง 30 เมตร

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 (มยผ.1302, 2552) ซึ่งไม่สอดคล้องกับค่าเฉลี่ย SPT ที่มีค่า น้อยกว่า 15 ครั้งต่อฟุต ที่บ่งบอกว่าพื้นที่บริเวณดังกล่าวควรถูกจัดให้อยู่ในประเภท E

ข) จังหวัดกาญจนบุรี

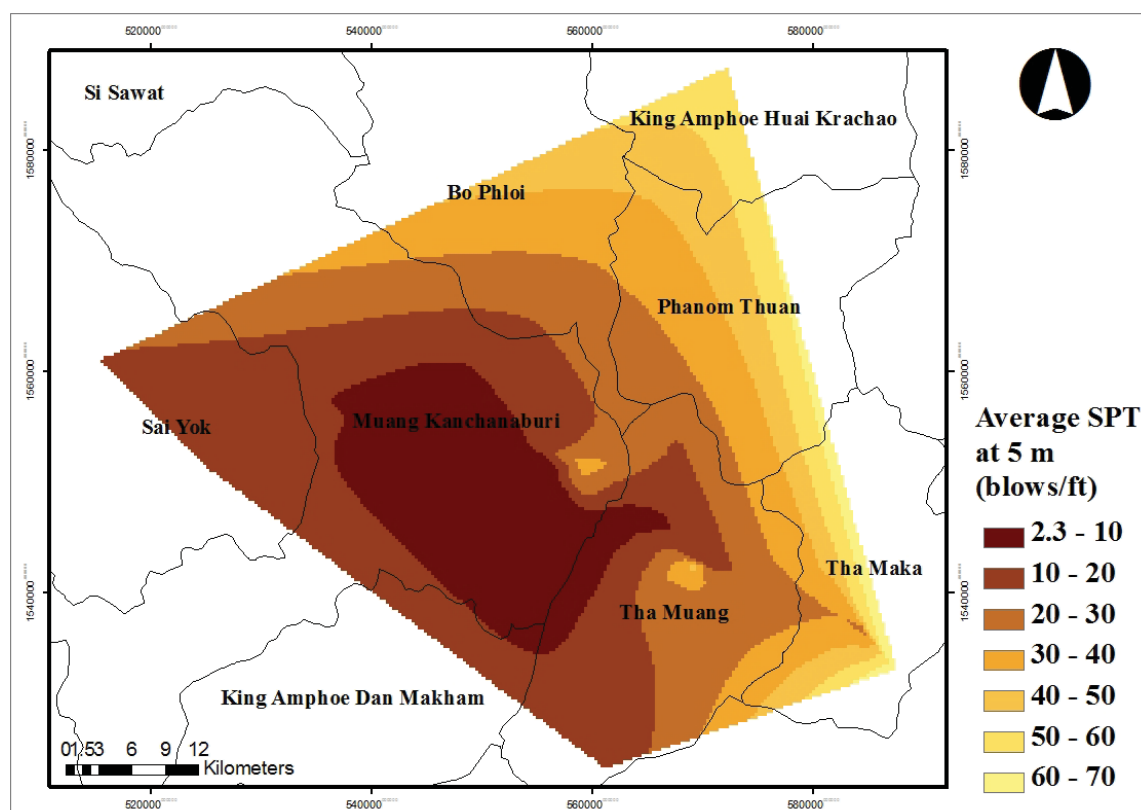
จังหวัดกาญจนบุรีตั้งอยู่ในภาคตะวันตกของประเทศไทย ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปมีแนวเขาอยู่ทางตะวันตกและทางตอนเหนือของจังหวัด มีแม่น้ำแควตัดผ่าน และมีแนวเขาใกล้กับแม่น้ำแคว ซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีชุมชนหนาแน่น สำหรับพื้นที่ที่อยู่ห่างจากชุมชนมีลักษณะโดยส่วนใหญ่ เป็นพื้นที่โล่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ลักษณะทางภูมิประเทศของจังหวัดกาญจนบุรี

จากการศึกษาในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี โดยการรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะทั้งหมด จำนวน 21 ข้อมูล ครอบคลุมพื้นที่อำเภอไทรโยค อำเภอเมือง อำเภอท่าม่วง อำเภอท่ามะกา และกิ่งอำเภอห้วยกระเจา เพื่อนำมาจัดทำฐานข้อมูลในรูปของแผนที่โดยใช้พารามิเตอร์เกี่ยวกับคุณสมบัติของดิน

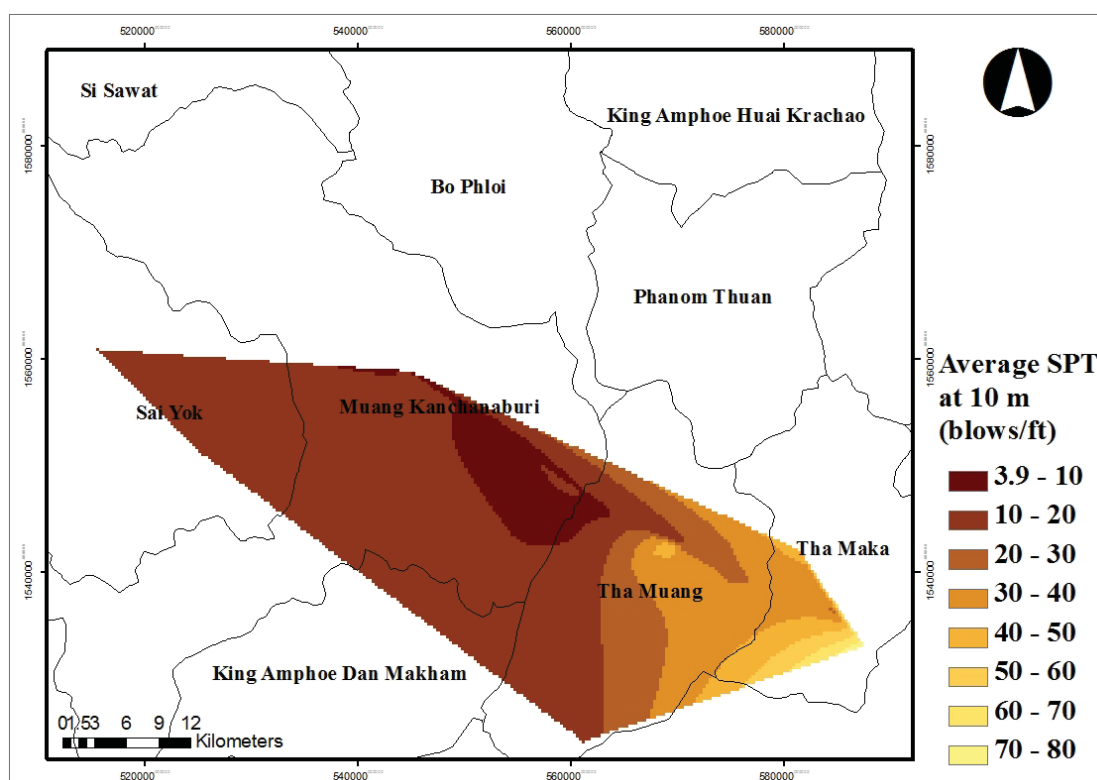
ได้แก่ ค่า SPT และค่า S_u เนื่องจากข้อมูลหลุมเจาะที่รวบรวมได้มีระดับความลึกไม่ถึง 30 เมตร การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย SPT ในแต่ละระดับความลึก จึงแบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 5 เมตร 10 เมตร และ 15 เมตร ดังรูปที่ 10 - 12 ตามลำดับ และความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็งแสดงดังรูปที่ 13 ซึ่งการจำแนกชั้นดินพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีนี้ 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 ไปในพื้นที่อำเภอไทรโยค บ่อพลอย พนมทวน ท่ามะกา ท่าม่วง และกิ่งอำเภอห้วยกระเจา จนมีค่าสูงสุดถึง 70 ครั้งต่อฟุต บริเวณอำเภอท่ามะกาและกิ่งอำเภอห้วยกระเจา ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 5 เมตร

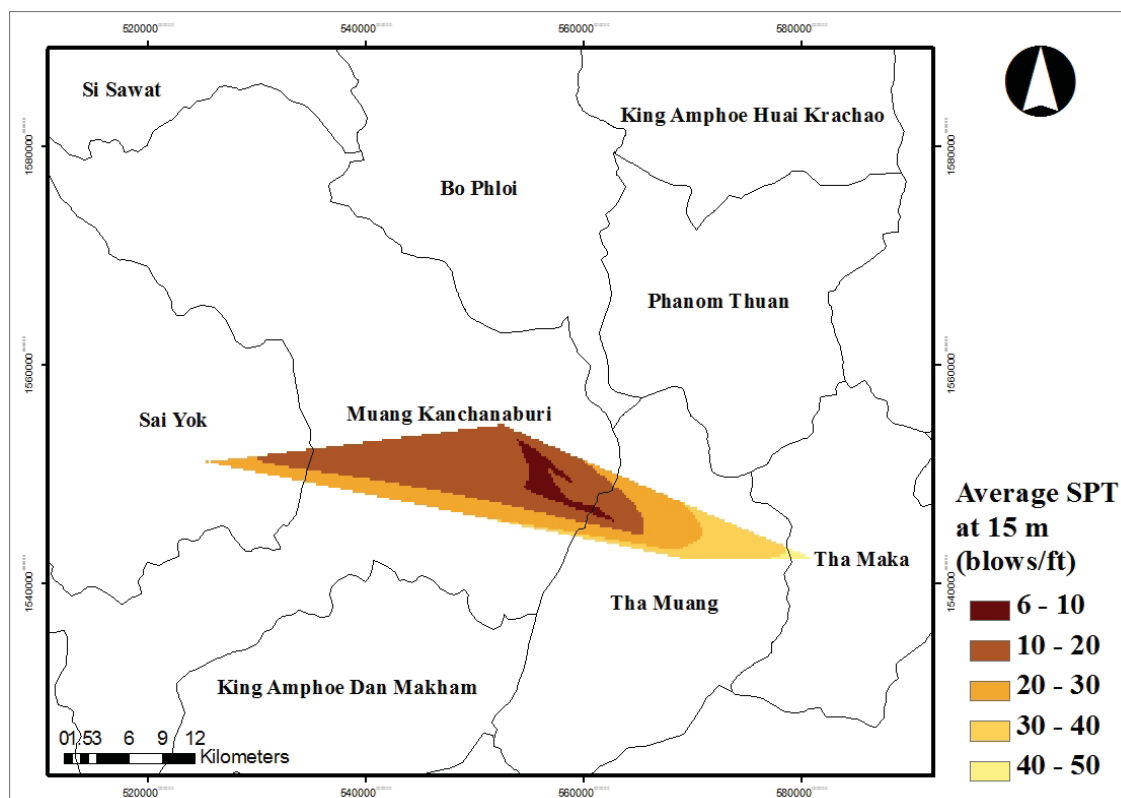
เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10 เมตร เนื่องจากสภาพดินส่วนใหญ่ในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี เป็นดินแข็ง ทำให้เมื่อเจาะสำรวจลงไปแล้วยากต่อการหาค่า SPT จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงมีจำนวนลดลง จากผลการศึกษาพบว่า บริเวณอำเภอเมืองที่ระดับความลึกจากผิวถึง 5 เมตร มีค่าเฉลี่ย SPT น้อยกว่า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



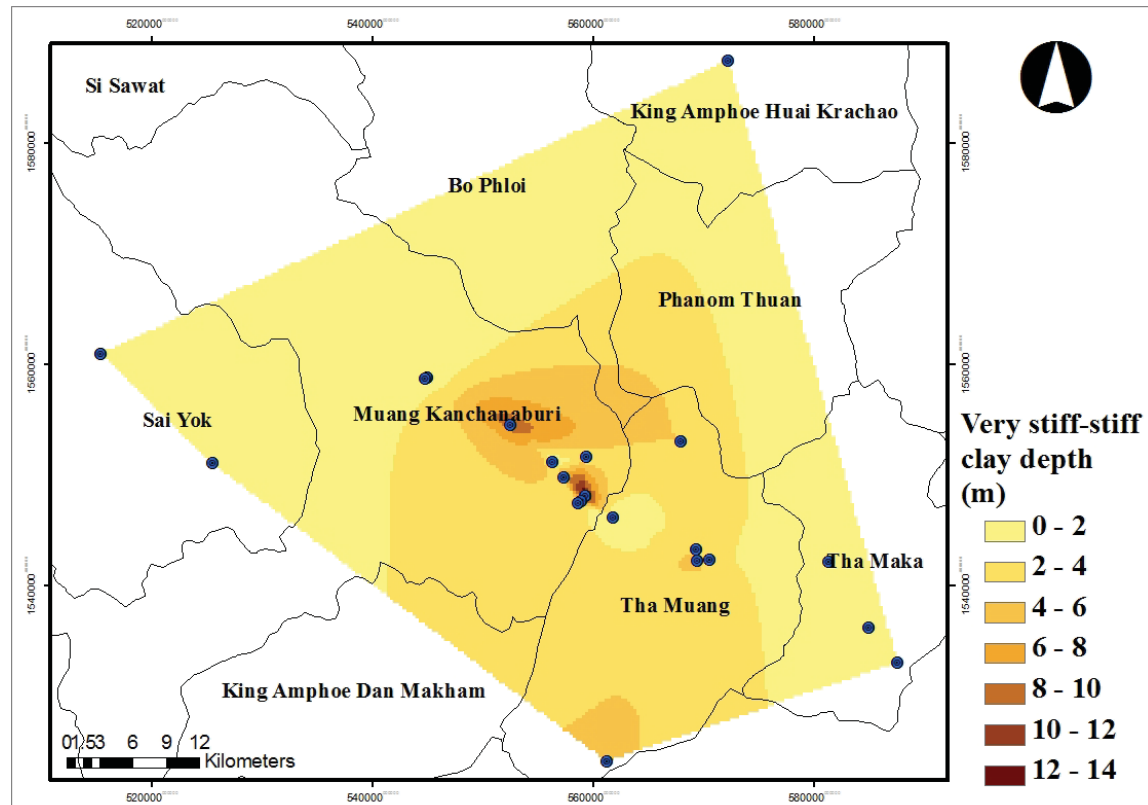
รูปที่ 4.11 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10 เมตร

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

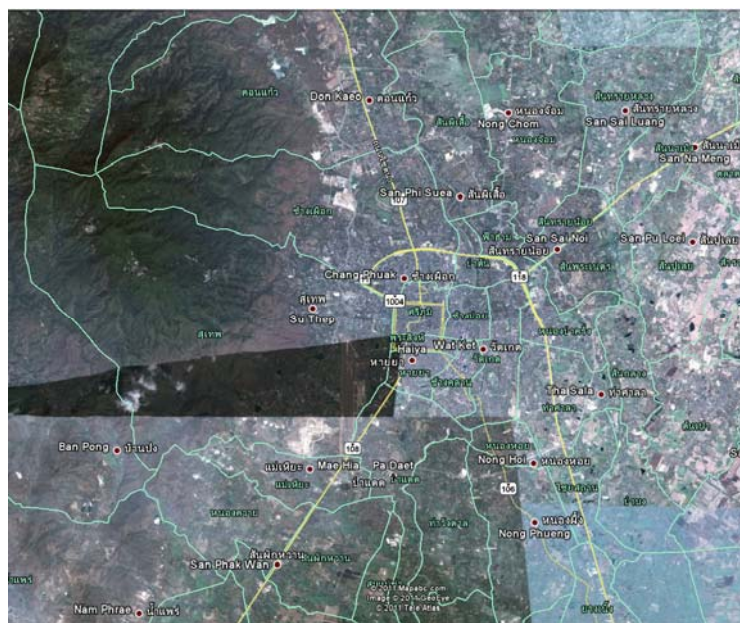
เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง โดยใช้ค่า S_u ที่มีค่าต่ำกว่า 20 ตันต่อตารางเมตร ผลการศึกษาพบว่า บริเวณที่มีความหนาของดินเหนียวแข็งมาก-ดินเหนียวแข็ง มากกว่า 10 เมตร พบอยู่ในบริเวณอำเภอเมือง จากนั้นความหนาจะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีความหนาน้อยกว่า 2 เมตรบริเวณอำเภอไทรโยค บ่อพลอย กิ่งอำเภอห้วยกระเจา 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

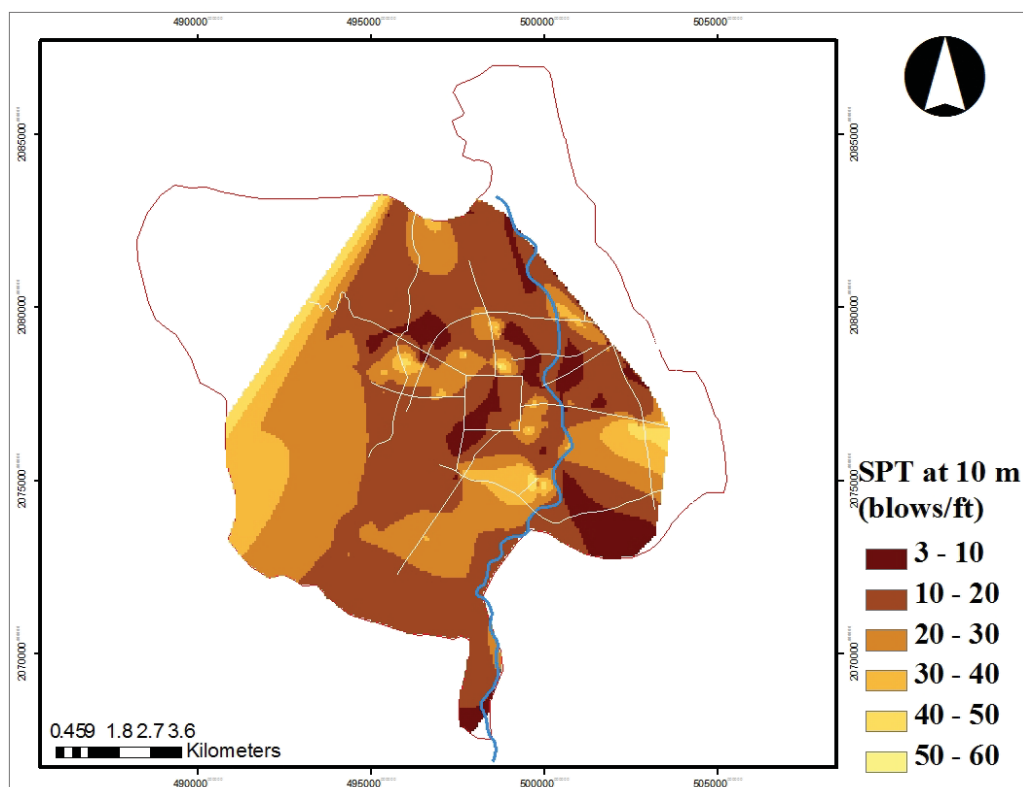
จังหวัดเชียงใหม่ตั้งอยู่ทางภาคเหนือของประเทศไทย มีแม่น้ำปิงไหลผ่าน และในอำเภอเมืองมีคูน้ำล้อมรอบเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับบริเวณที่ใช้ในการศึกษา คือบริเวณอำเภอเมือง มีแนวเขาอยู่ทางทิศตะวันตกของอำเภอเมือง และมีแม่น้ำปิงไหลผ่านทางทิศตะวันออกของคูเมือง แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ลักษณะภูมิประเทศบริเวณอำเภอเมืองเชียงใหม่

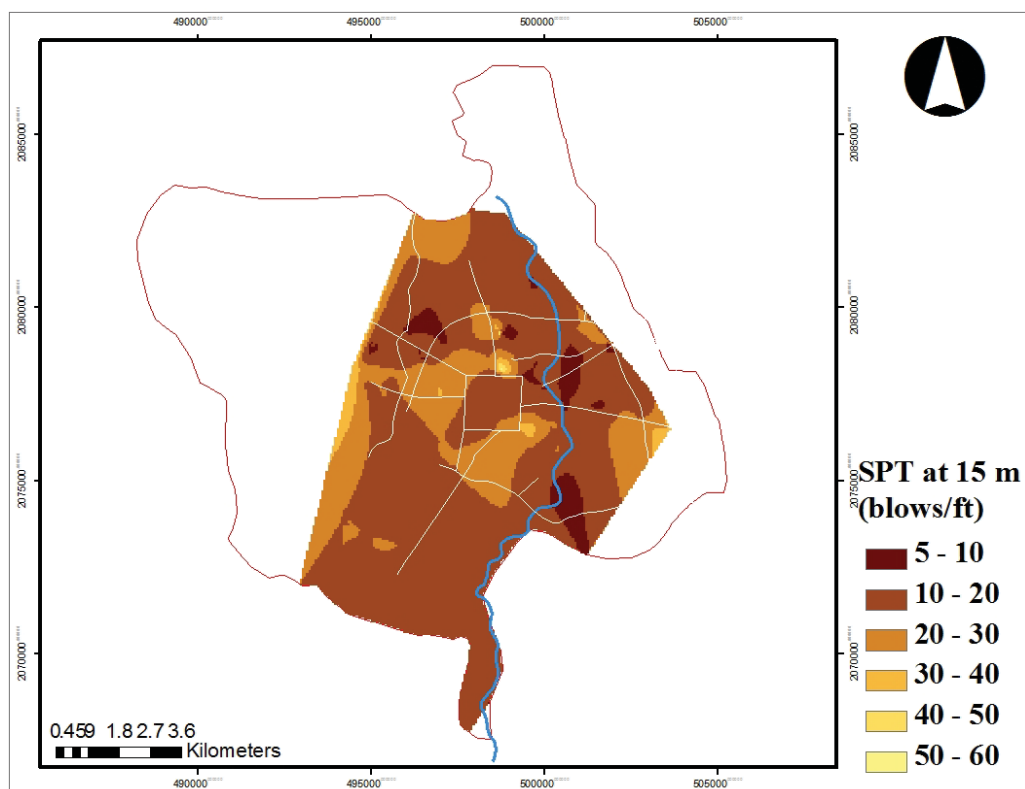
ในการศึกษาพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ได้ทำการรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะสำรวจจำนวนทั้งสิ้น 274 ข้อมูล ครอบคลุมพื้นที่อำเภอเมืองเชียงใหม่ แล้วจำแนกพารามิเตอร์ตามคุณสมบัติของดิน ได้แก่ ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10, 15, 20, และ 25 เมตร เนื่องจากระดับที่ใช้ในการวางปลายเสาเข็มของงานก่อสร้างในจังหวัดเชียงใหม่อยู่ที่ระดับ 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



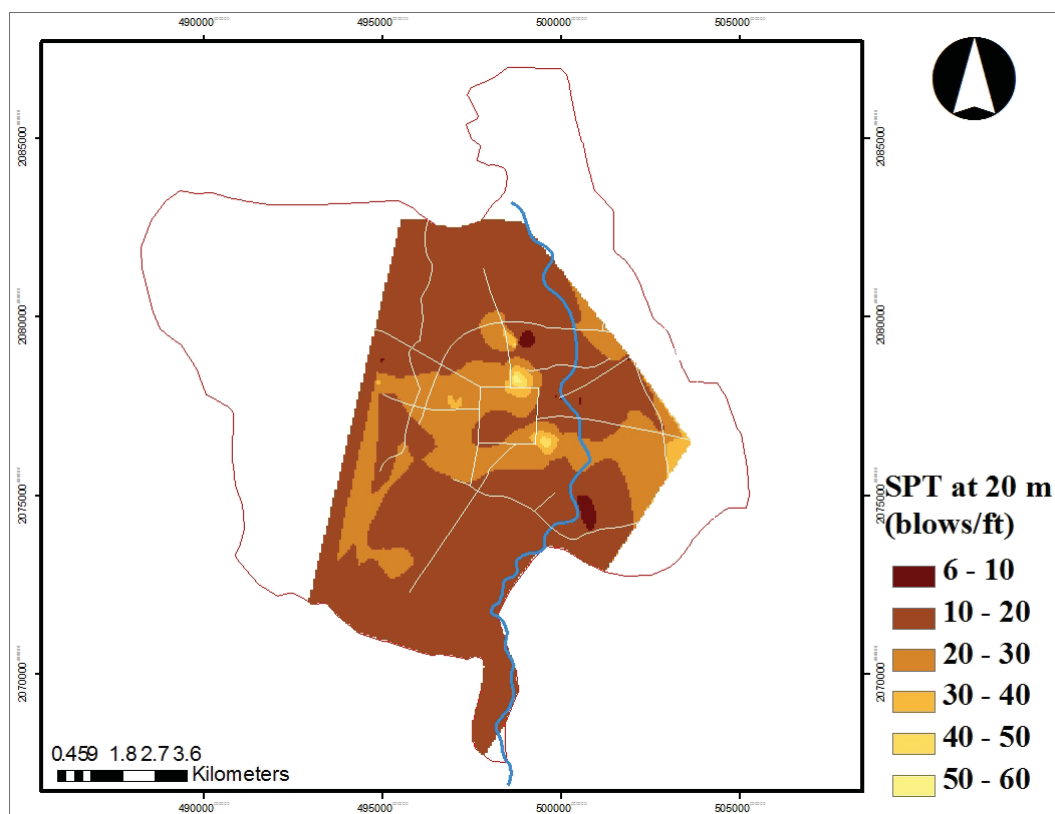
รูปที่ 4.15 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 10 เมตร

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



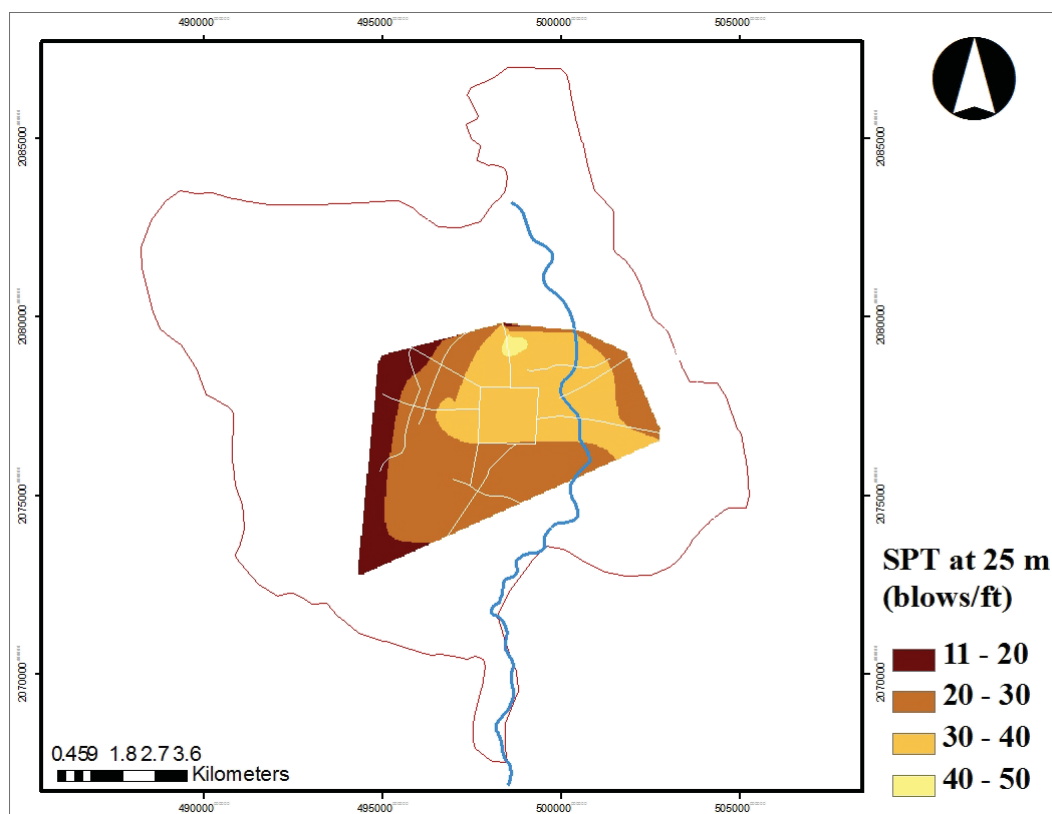
รูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 15 เมตร

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



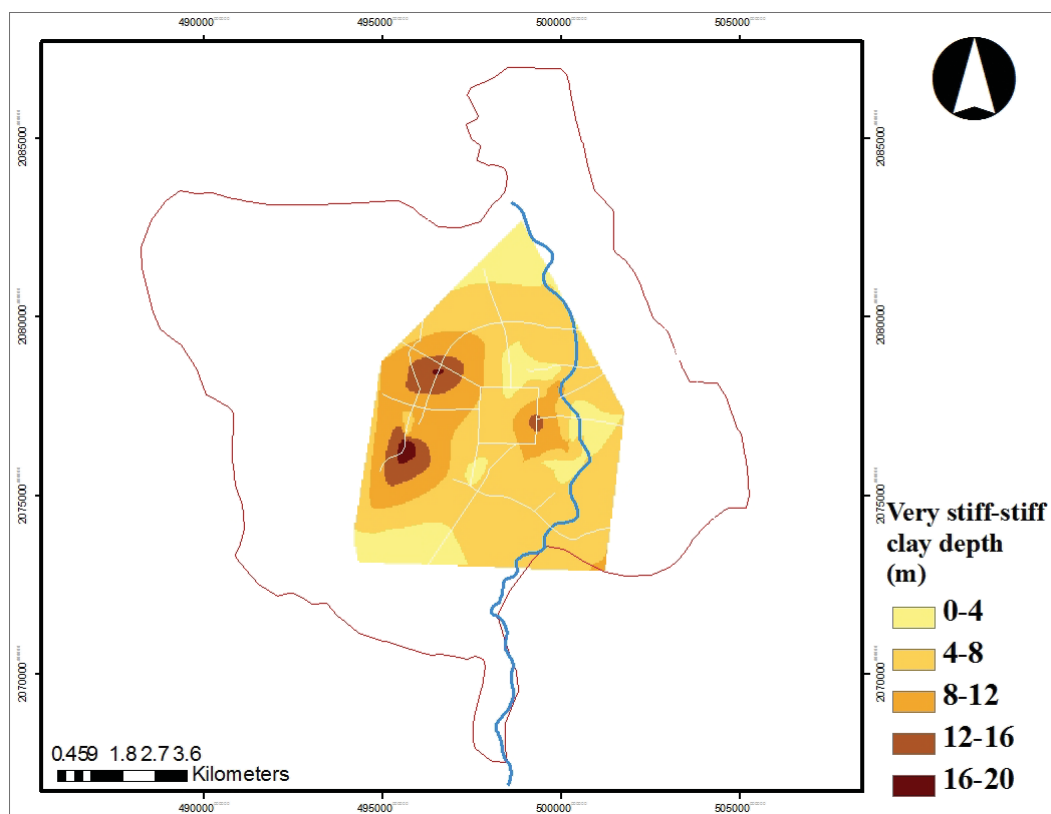
รูปที่ 4.17 ค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 20 เมตร

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



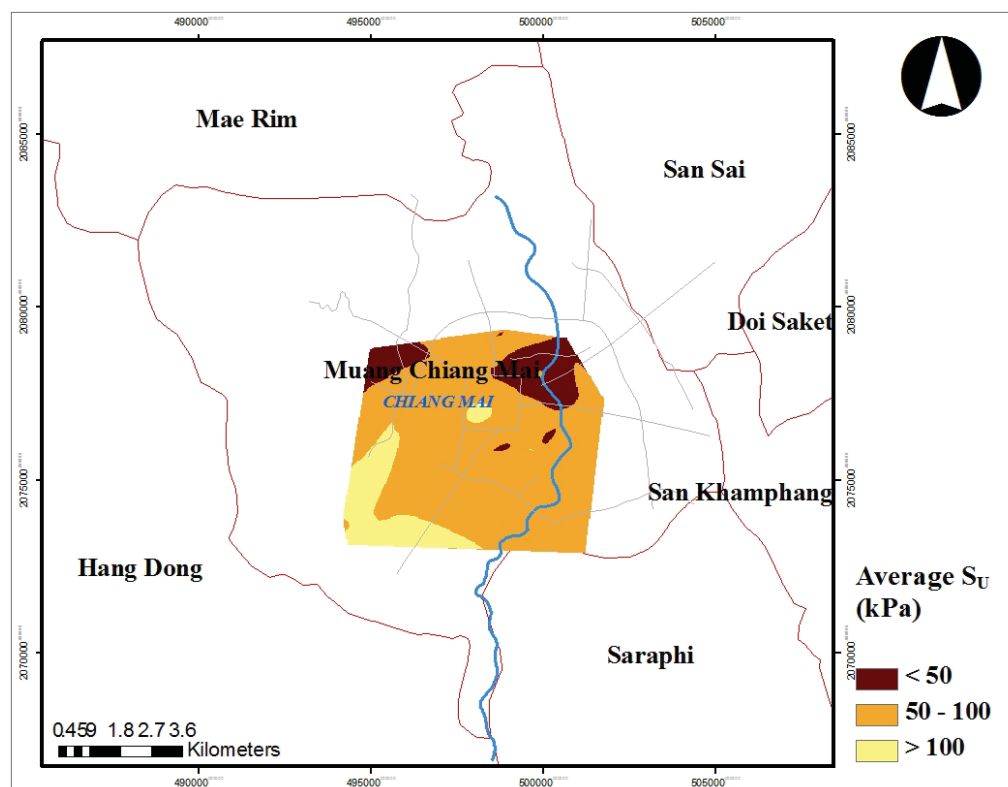
รูปที่ 4.18 แผนที่แสดงค่าเฉลี่ย SPT ที่ระดับความลึกจากผิวถึง 25 เมตร

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

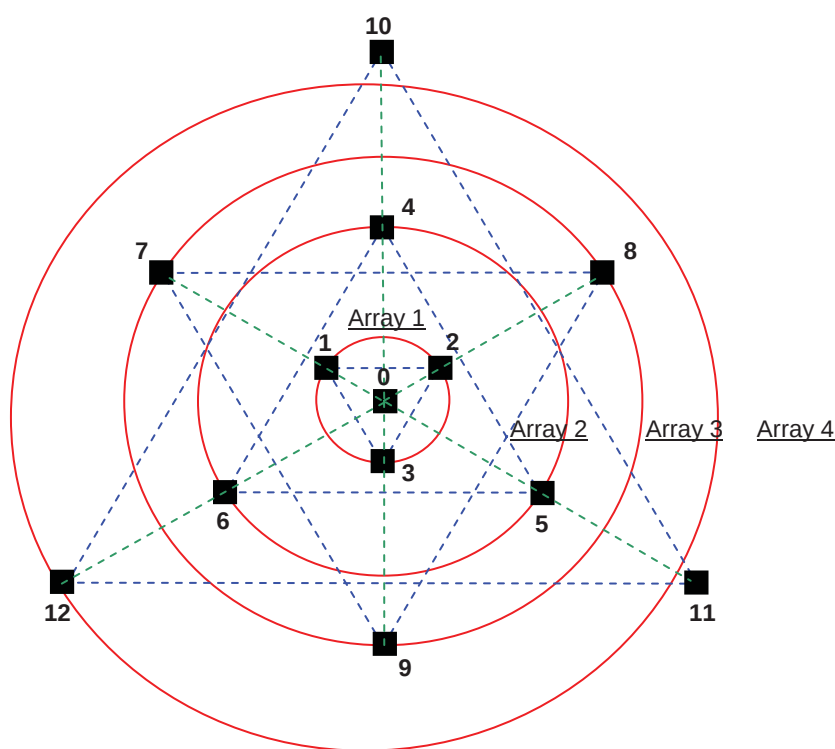
พื้นที่ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย 2 กลุ่มหลัก คือ พื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง และพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง โดยที่ กลุ่มที่ 1 ครอบคลุม 17 จังหวัดในพื้นที่ภาคกลางตอนล่าง ได้แก่ พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี นนทบุรี นครนายก กรุงเทพมหานคร นครปฐม ปราจีนบุรี ฉะเชิงเทรา สมุทรปราการ สมุทรสงคราม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

4.5 ขั้นตอนการวิจัย

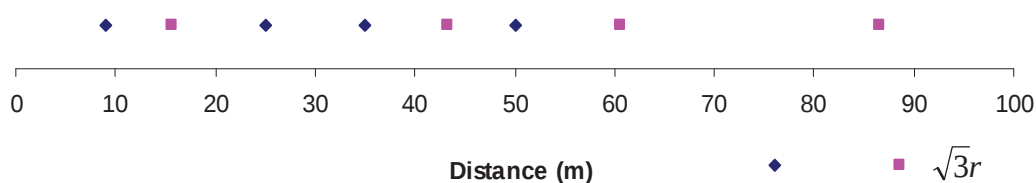
4.3.1 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

ในการเก็บข้อมูลภาคสนาม ใช้วิธีตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน (Microtremor) แบบ 1 จุด สำหรับการประเมินหาค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) และใช้วิธี SPAC เพื่อใช้ประเมินหาค่าความเร็วเฟส ด้วยวิธี SPAC โดยรูปแบบการวางห้ววัดเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับ วิธี SPAC คือรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยใช้ห้ววัด 4 ห้วพร้อมกัน และจัดเรียงเป็น Array ที่มีระยะต่างกัน 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 Ω
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

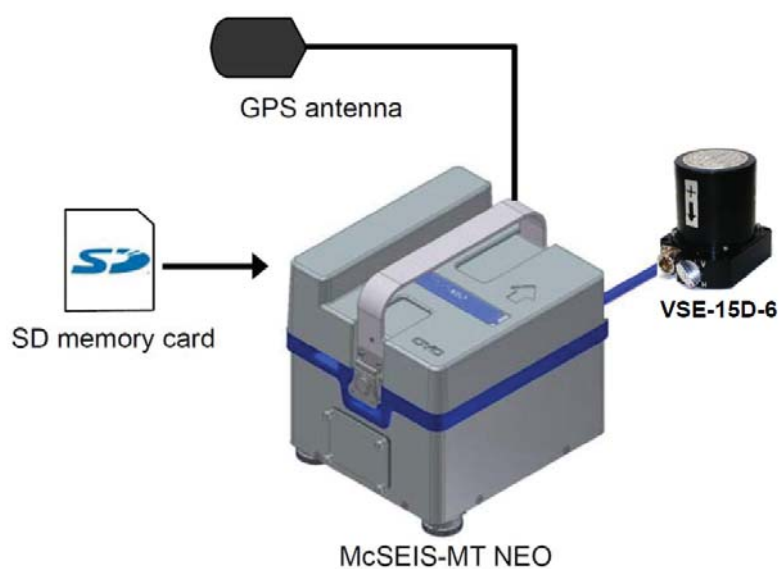
Frequency range	0.1 to 70 Hz.
Mode of operation	Horizontal, Vertical (switchable)
Max. measuring range	± 0.1 m/s
Max. output voltage	± 10 V
Linearity	0.03% of full scale
Resolution	Approximately 2×10^{-8} m/s ²
Dynamic range	Approximately 140 dB
Temperature range	-10 to 50 °C
Dimension	55x69.5x72 mm

- 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



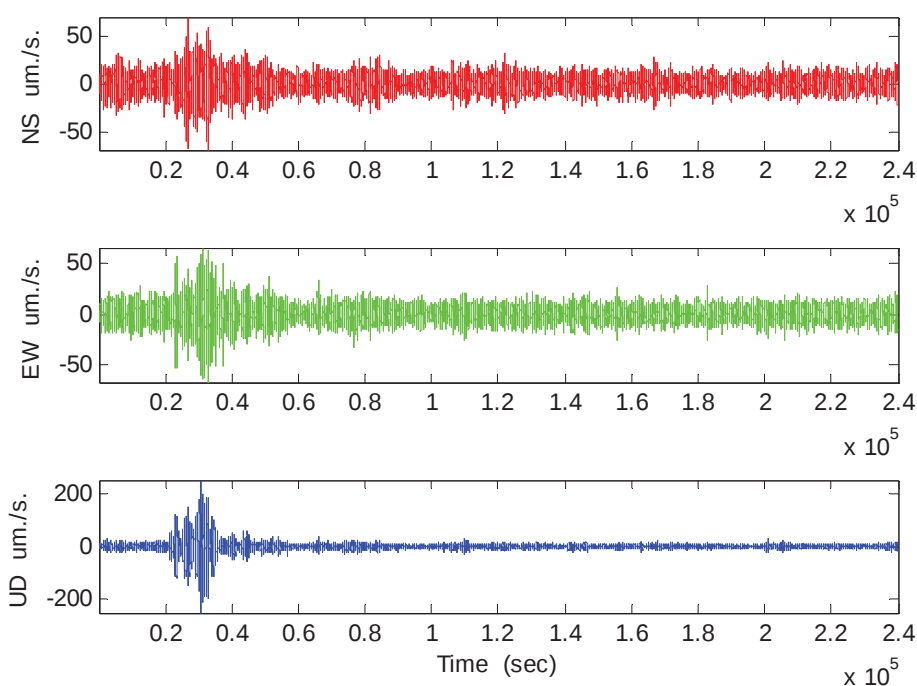
รูปที่ 4.25 ชุดอุปกรณ์การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน

ชุดอุปกรณ์การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน แสดงดังรูปที่ 4.25 และ โดยในการศึกษาี้ประกอบด้วยชุดอุปกรณ์จำนวน 3 ชุด ใช้ตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดินพร้อมกันเป็นโครงข่าย โดยแต่ละชุดวางห่างกันด้วยระยะห่างที่กำหนด และปรับเวลาที่บันทึกสัญญาณคลื่นที่วัดแต่ละชุดให้ตรงกันด้วยค่าเวลาจากระบบดาวเทียม GPS

4.7 การวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก

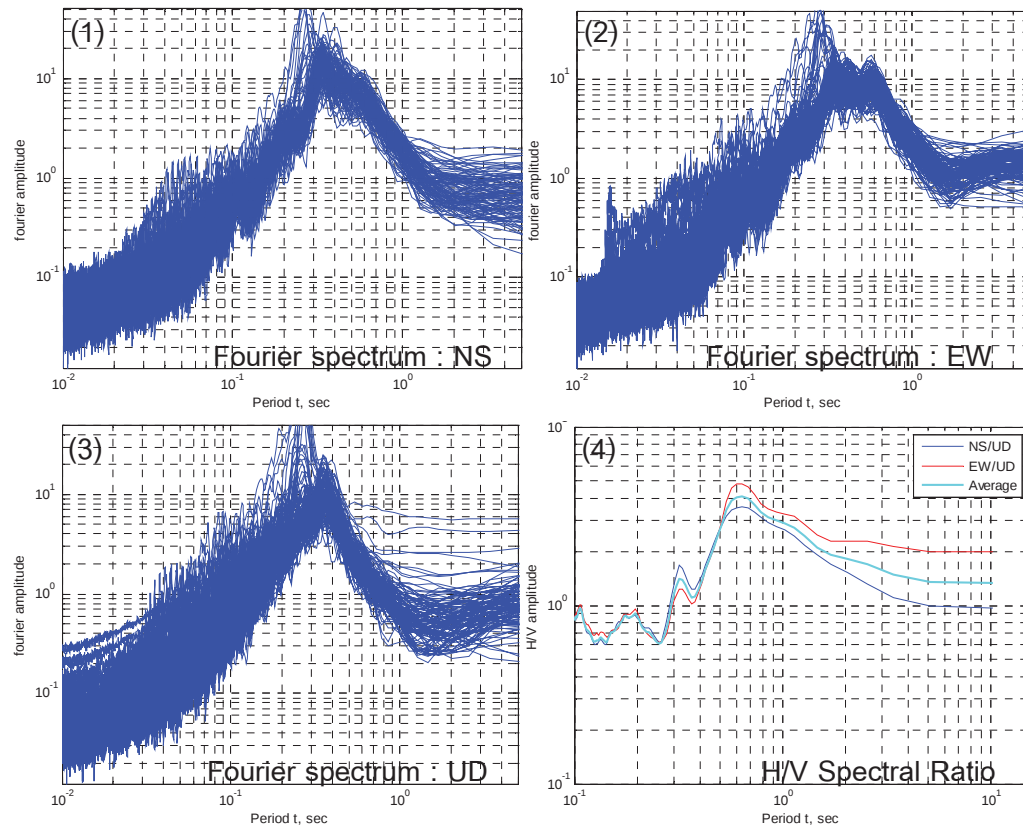
ในการวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก โดยวิธี H/V Spectrum Ratio มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

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

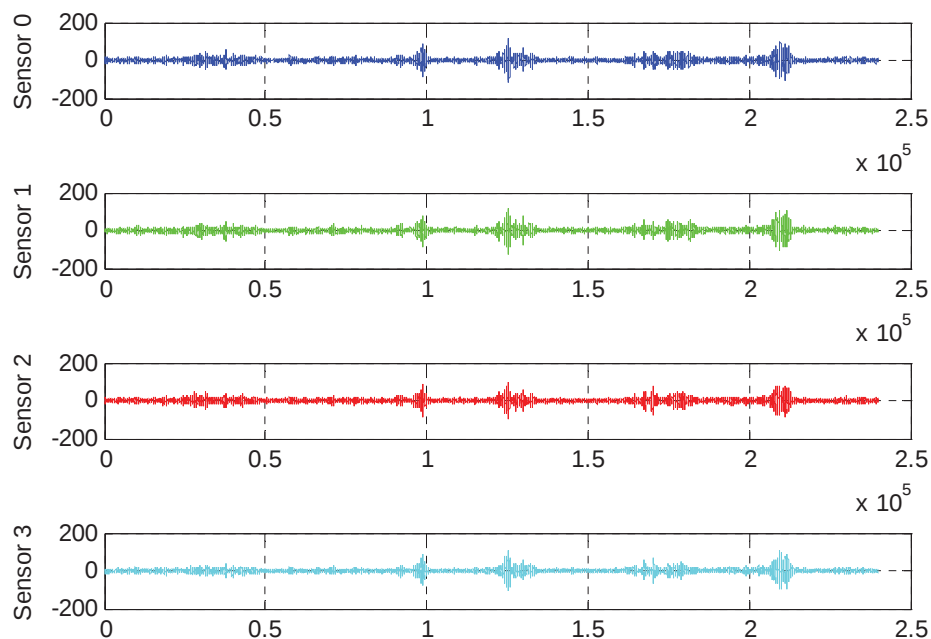


รูปที่ 4.27 ขั้นตอนวิเคราะห์หาค่าคาบอิทธิพลหลัก

4.8 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ SPAC

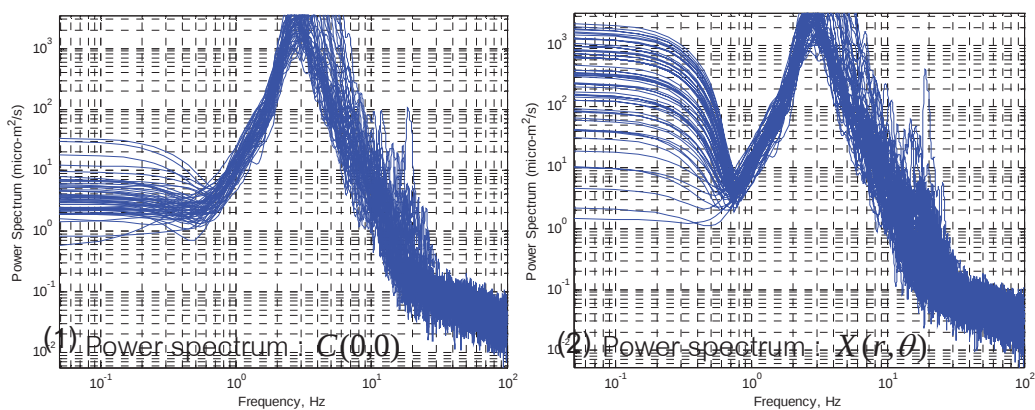
ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่า สัมประสิทธิ์ SPAC มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

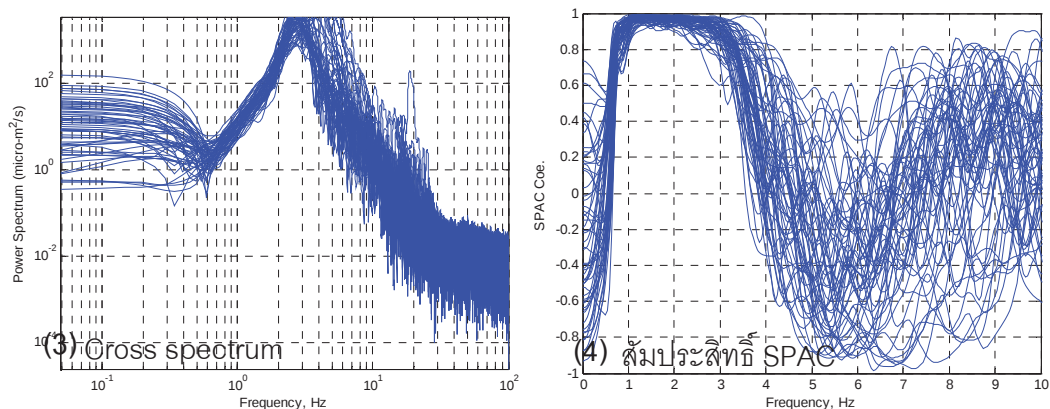
1. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่า สัมประสิทธิ์ SPAC นั้นมาจากข้อมูลที่มีองค์ประกอบในแนวดิ่งเท่านั้น ซึ่งมีทั้งหมด 4 ชุด และอยู่ในรูปของ Time Domain ดังแสดงในรูปที่ 4.28



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 จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC ด้วยสมการที่ 3.23 ดังแสดงในรูปที่ 4.29

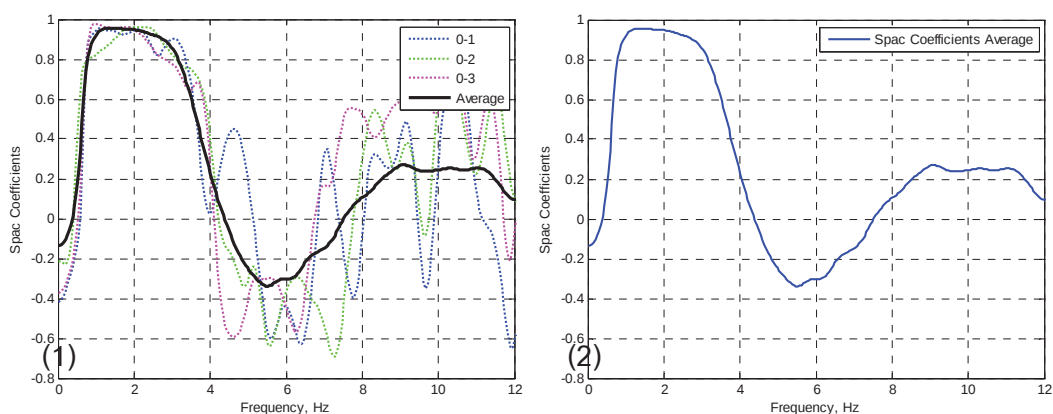




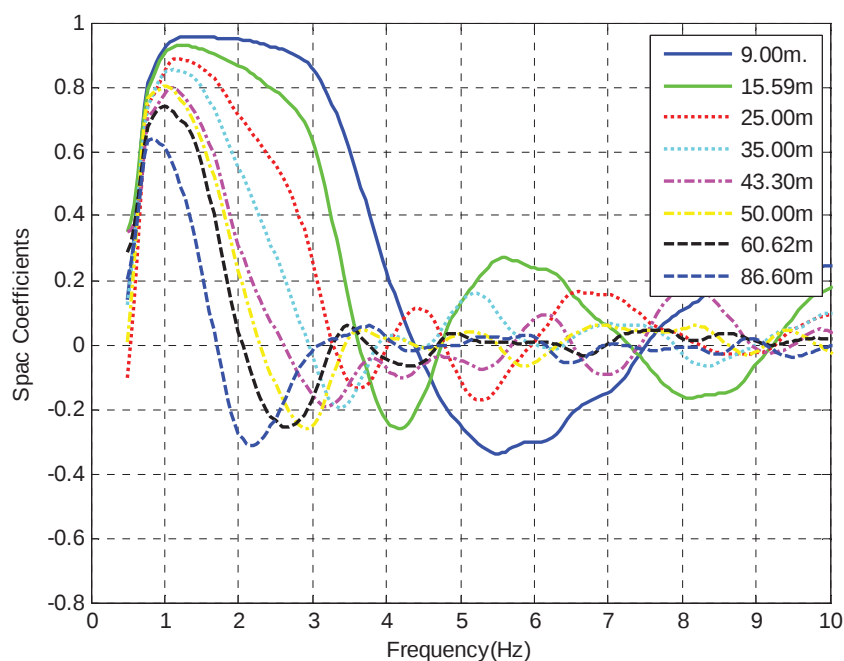
รูปที่ 4.29 ขั้นตอนวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ SPAC

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)



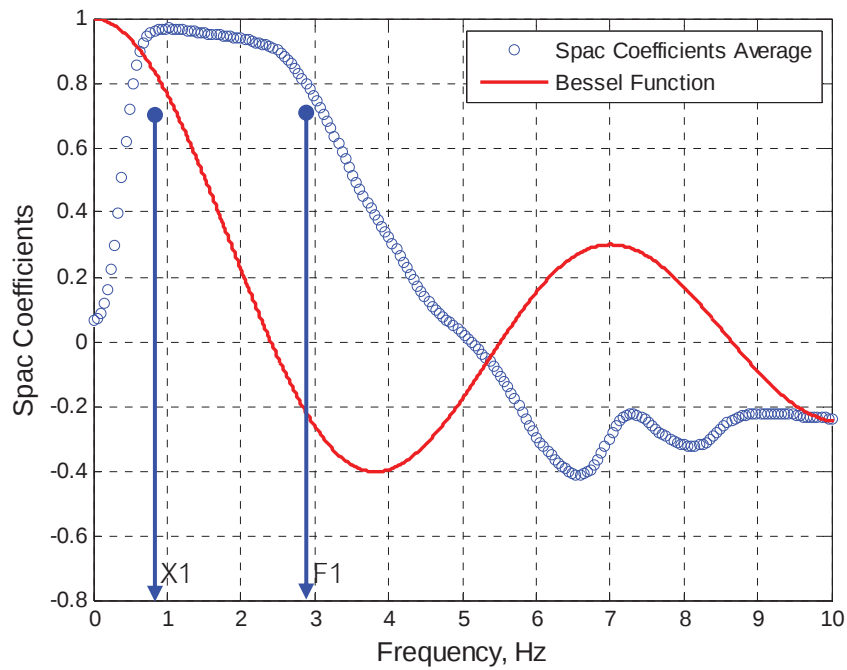
รูปที่ 4.31 ค่าเฉลี่ย สัมประสิทธิ์ SPAC ทั้ง 8 รัศมี

4.9 การวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟส

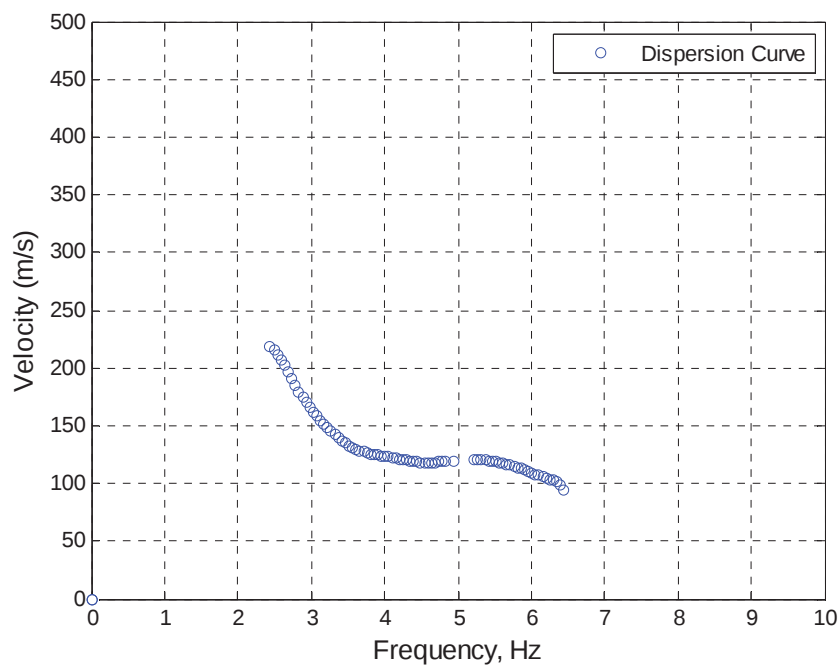
หลังจากวิเคราะห์หาค่า สัมประสิทธิ์ SPAC ครบทั้ง 8 รัศมีแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์หาค่าความเร็วเฟส ที่ความถี่ต่างๆ หรือการวิเคราะห์ Dispersion Curve โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

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

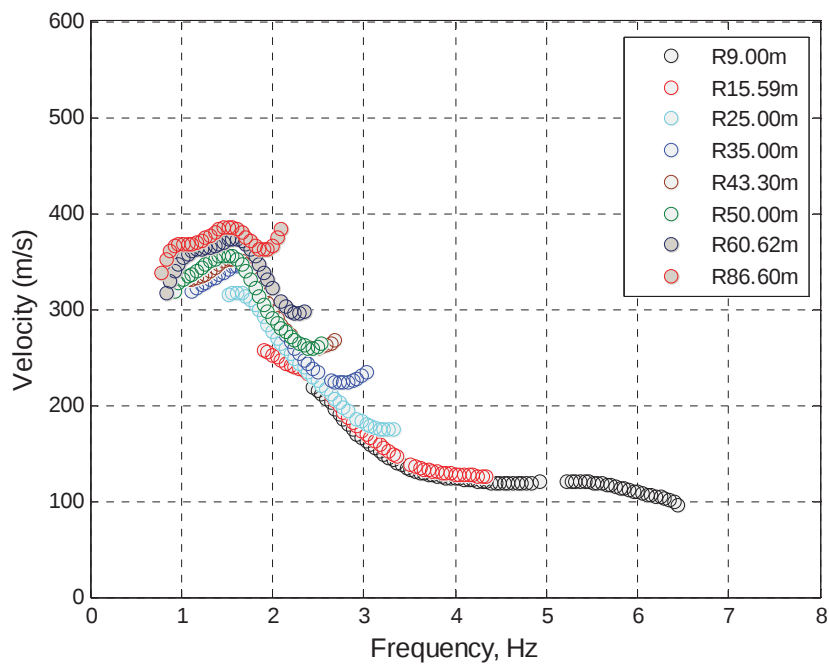
จากนั้นนำ Dispersion Curve ที่ได้จากการรวมกันของทุกระศมี มาทำการเลือกตัดเพื่อให้ออกมาเพียงเส้นเดียว ดังรูปที่ 4.35 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความเร็วคลื่นเฉือนในขั้นตอนการคำนวณย้อนกลับต่อไป



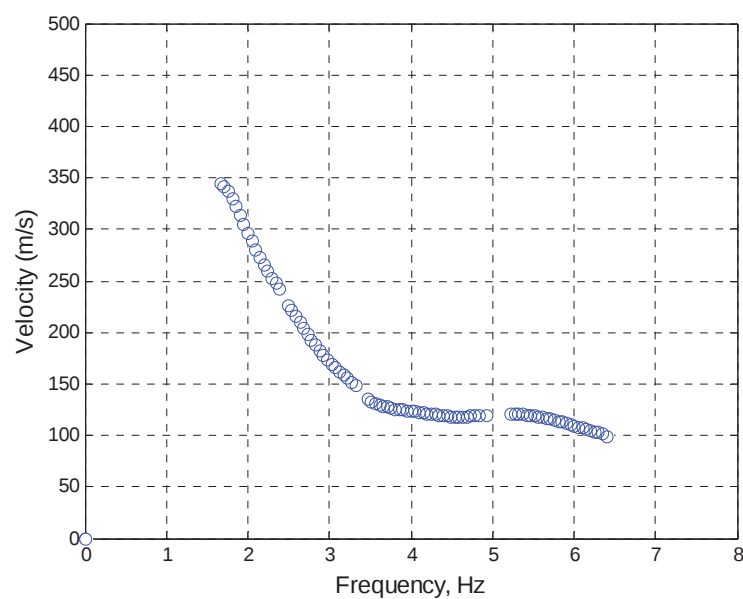
รูปที่ 4.32 กราฟ สัมประสิทธิ์ SPAC คู่กับ Bessel Function



รูปที่ 4.33 Dispersion Curve ของรัศมี 9 เมตร



รูปที่ 4.34 Dispersion Curve ของทุกรัศมี

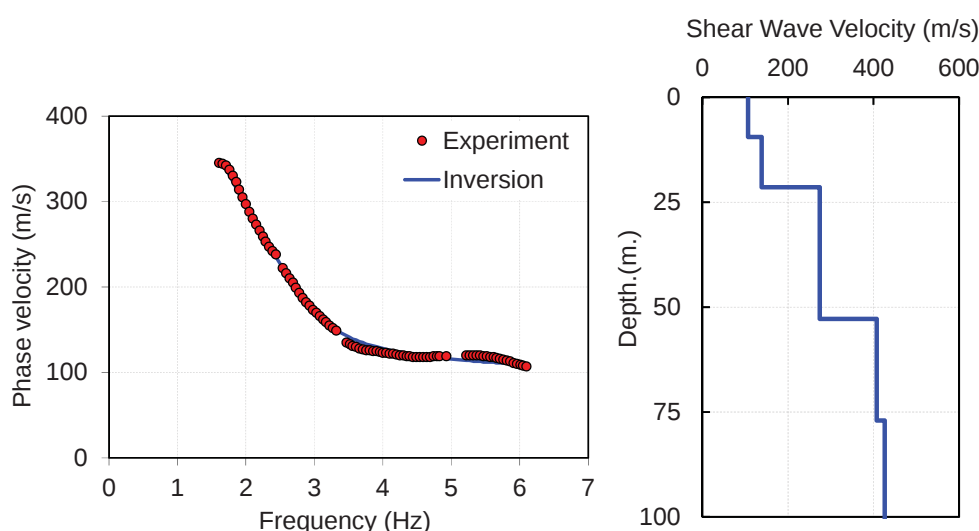


รูปที่ 4.35 Dispersion Curve ชั้นตอนสุดท้าย

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

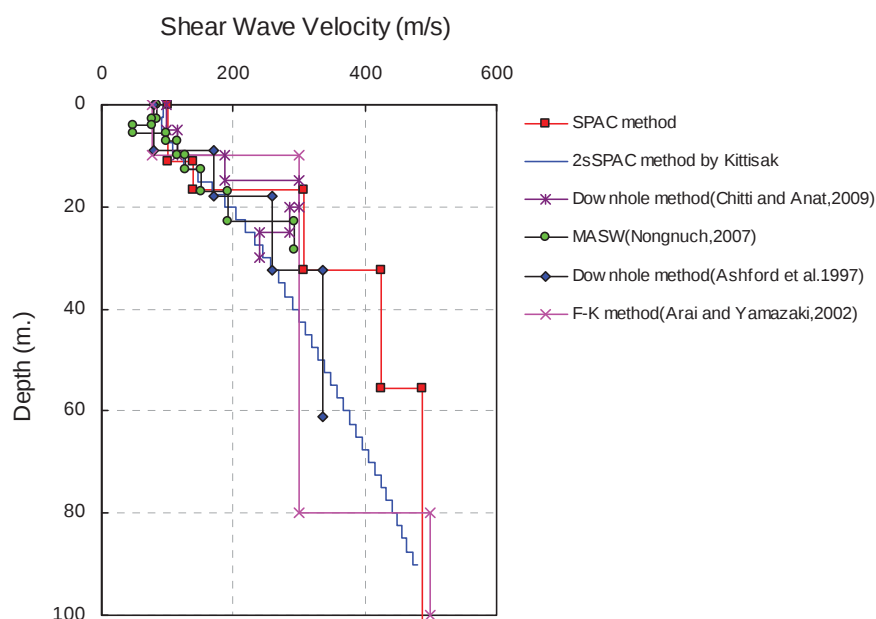


รูปที่ 4.36 Dispersion Curve ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณและความเร็วคลื่นเฉือน

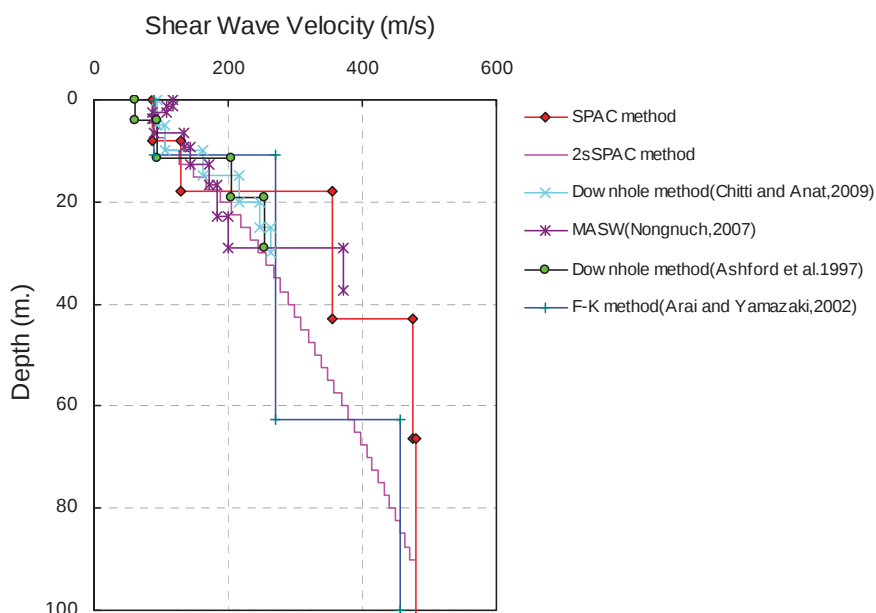
4.11 การเปรียบเทียบผลกับวิธีการสำรวจอื่น

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

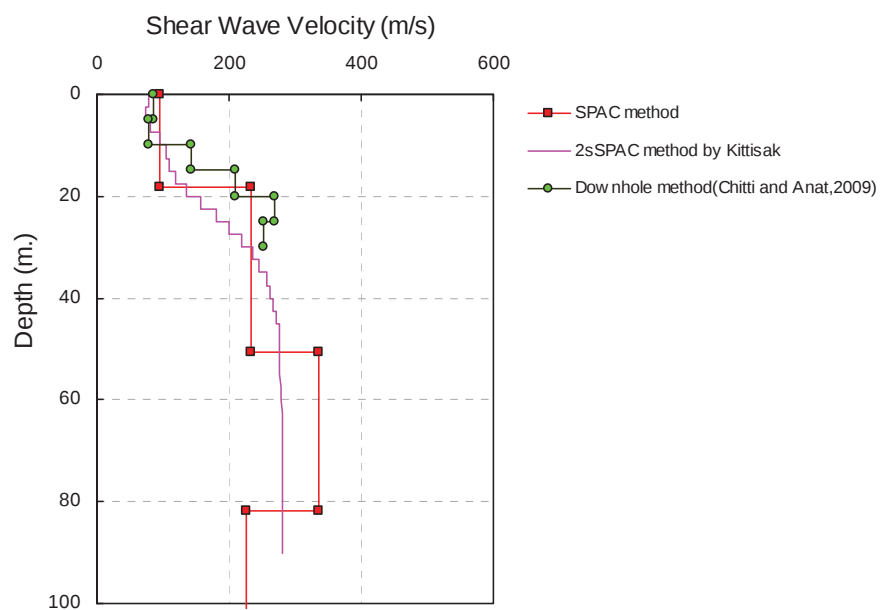
ถึง 4.41 และผลการเปรียบเทียบรวมในทุกบริเวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และ รูปที่ 4.42 พบว่าค่าที่ได้จากการศึกษานี้ให้ผลที่สอดคล้องดีกับการทดสอบด้วยเทคนิคต่าง ๆ



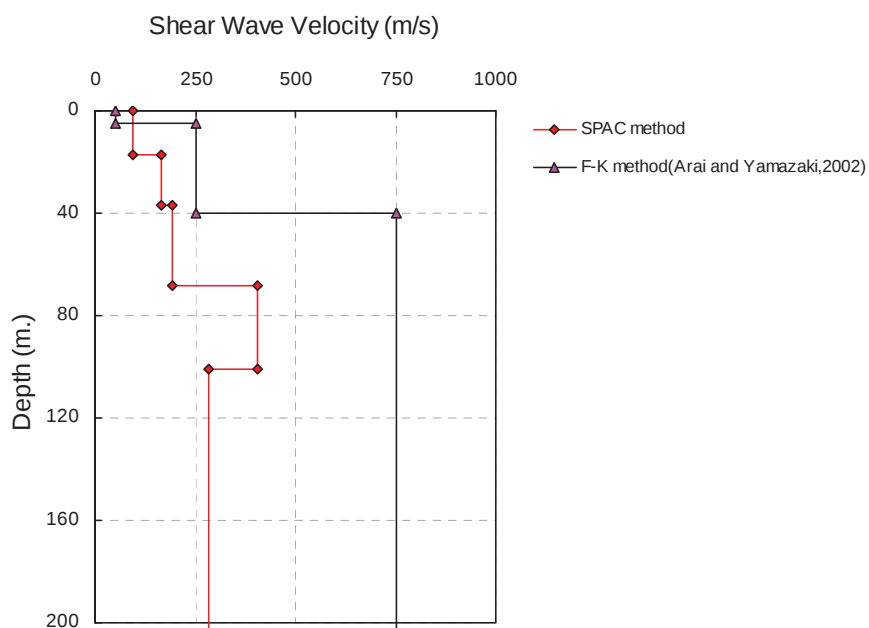
รูปที่ 4.37 ผลเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียกับงานวิจัยอื่น



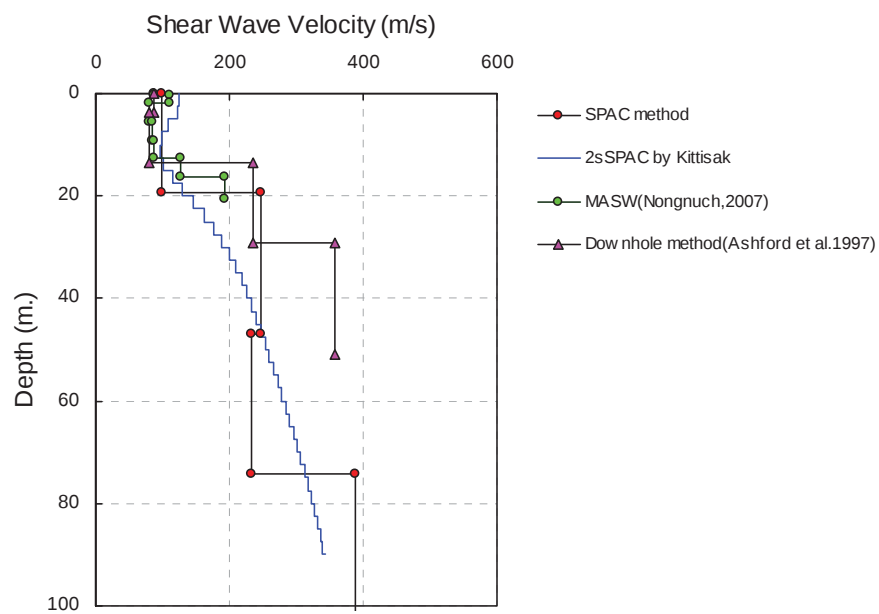
รูปที่ 4.38 ผลเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยกับงานวิจัยอื่น



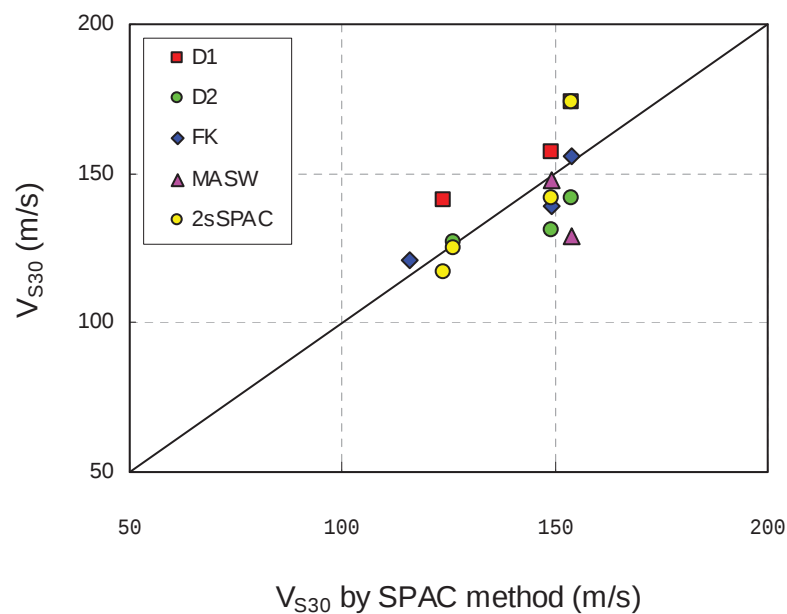
รูปที่ 4.39 ผลเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณกรมอุตุนิยมวิทยากับงานวิจัยอื่น



รูปที่ 4.40 ผลเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณวัดตำรุ จ. สมุทรปราการ กับงานวิจัยอื่น



รูปที่ 4.41 ผลเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์กับงานวิจัยอื่น



รูปที่ 4.42 ผลสรุปการเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร

ตารางที่ 4.9 ผลเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร กับงานวิจัยอื่น

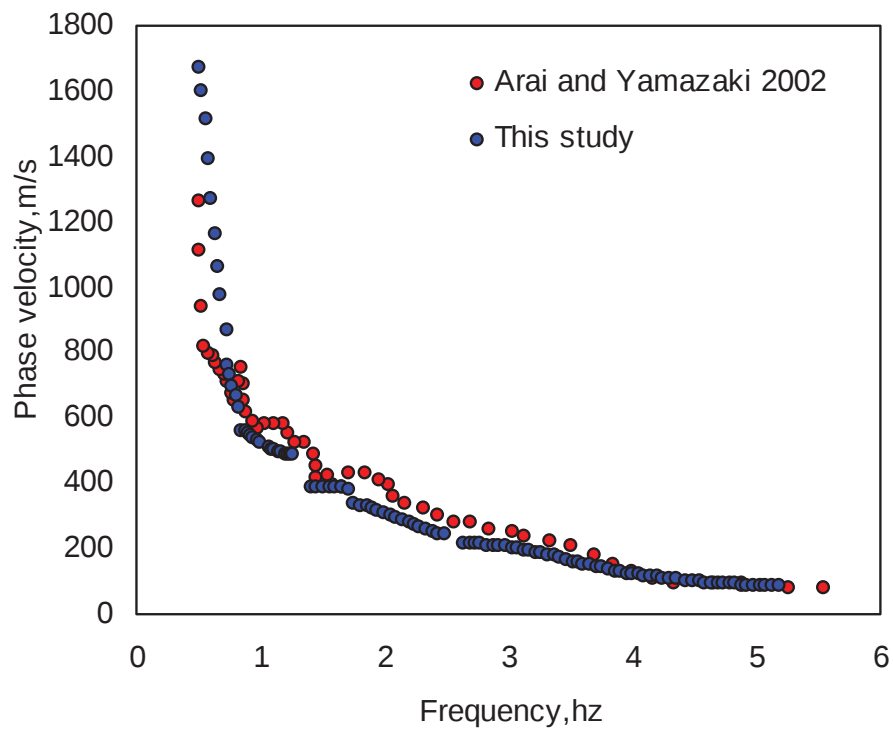
สถานที่	ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร					
	V_{S30} (m/s)					
	SPAC	2sSPAC	D1	MASW	D2	F-K
สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย	154	174	174	129	142	156
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	149	142	157	148	131	139
ม.ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต	126	125	-	104	127	-
กรมอุตุนิยมวิทยา	124	117	141	-	-	-
วัดตำหรุ สมุทรปราการ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

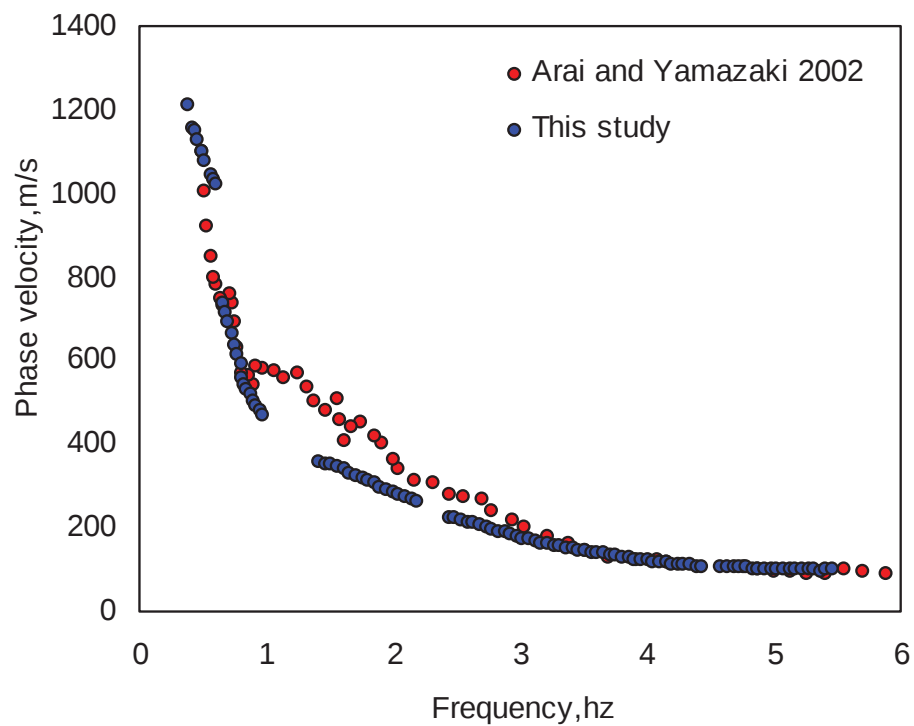
ตารางที่ 4.10 ตำแหน่งที่สำรวจของการศึกษานี้เปรียบเทียบกับงานของ Arai and Yamazaki 2002

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)

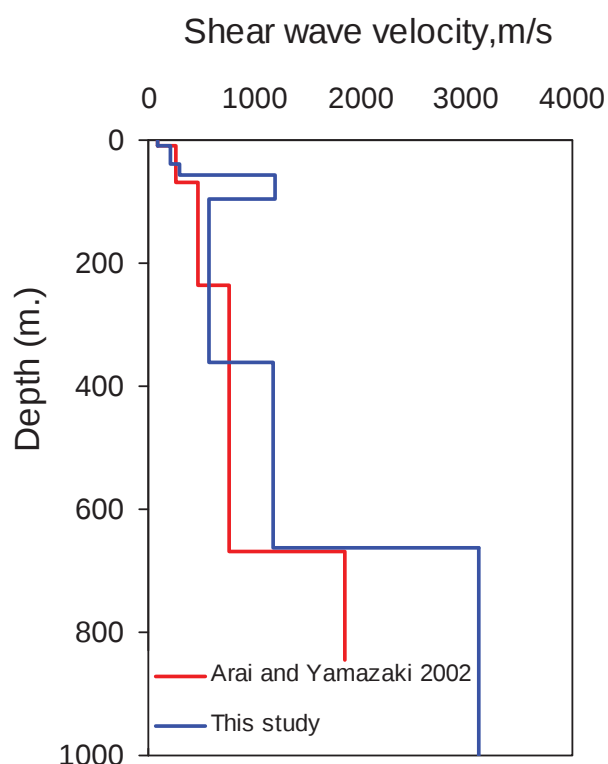


รูปที่ 4.43 ผลการเปรียบเทียบความเร็วเฟส สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

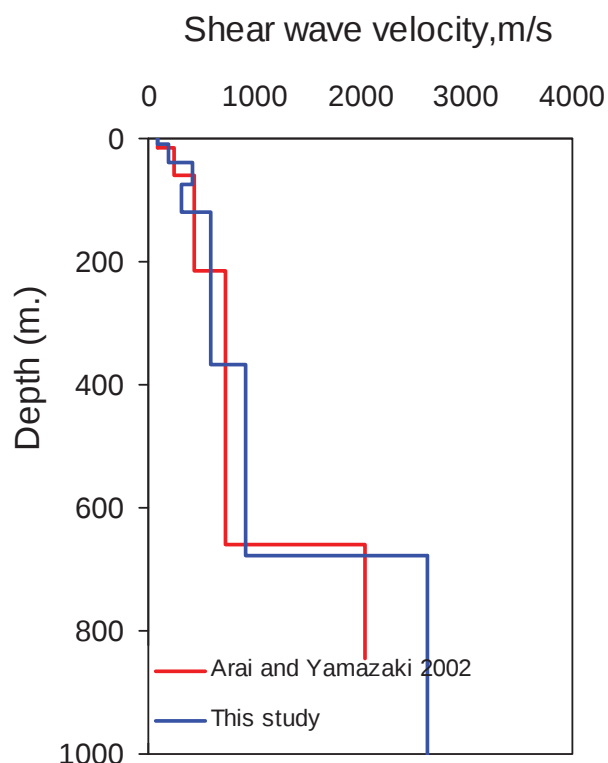


รูปที่ 4.44 ผลการเปรียบเทียบความเร็วเฟส จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก แสดงดังรูปที่ 4.45 และ 4.46 สำหรับตำแหน่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามลำดับ จากค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้พบว่าสอดคล้องกันดีจากทั้ง 2 การศึกษา และค่าความเร็วเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยที่ความเร็วเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 3000 m/s ที่ความลึกประมาณ 700 เมตร ซึ่งคาดว่าเป็นระดับของชั้นหินใต้กรุงเทพมหานคร



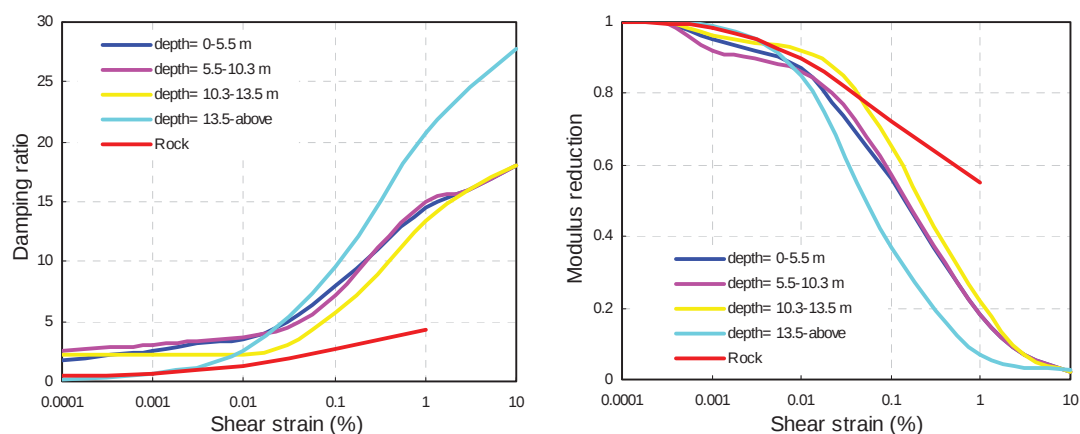
รูปที่ 4.45 ผลการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย



รูปที่ 4.46 ผลการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.12 การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเส้นเทียบเท่าด้วยแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ

ขั้นตอนหลังจากการคำนวณย้อนกลับเพื่อให้ได้โครงสร้างชั้นดิน หรือความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก คือการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินบริเวณนั้นๆ โดยการจำลองชั้นดินจากโครงสร้างชั้นดินที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้า แต่เนื่องจากโครงสร้างชั้นดินที่ได้จากการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดินด้วยวิธี SPAC นั้น สามารถประเมินโครงสร้างชั้นดินได้ลึกประมาณ 90 เมตร และจำเป็นต้องจำลองชั้นดินให้ลึกหลายร้อยเมตรให้ถึงชั้นหินเสมือน ดังนั้นในการศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลความลึกตั้งแต่ 90 เมตรลงไปจากงานวิจัยของ Arai และ Yamazaki (2002) ด้วยวิธี F-K จำนวน 3 ชุดในการศึกษาครั้งนี้ เลือกใช้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษา ประกอบด้วยค่า Shear Modulus กับ Damping Ratio ที่ขึ้นกับ Strain จากงานวิจัยของ Shibuya and Tamrakar (1999) ดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน (Shibuya and Tamrakar., 1999)

4.13 ผลการสำรวจภาคสนามสำหรับคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง

4.13.1 บริเวณที่ทำการศึกษา

ก. จังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง

บริเวณที่ทำการศึกษประกอบด้วย 85 ตำแหน่งในเขตชุมชนหลักของจังหวัดเชียงใหม่ ได้แก่ ในอำเภอเมืองเชียงใหม่ แมริม สันทราย สันกำแพง สันป่าตอง หางดง ดอยสะเก็ด และสารภี และต่อเนื่องถึงพื้นที่บางส่วนของจังหวัดลำพูนคือ อำเภอเมืองลำพูน บ้านธิ และป่าซาง รายละเอียดของตำแหน่งพื้นที่ศึกษา แสดงดังตารางที่ 4.11 (ลำดับที่ 1 ถึง 85) ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างเป็นแผนที่แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติของชั้นดินสำหรับผลการศึกษาได้ ส่วนบริเวณที่ทำการศึกษาในอำเภอรอบนอกที่ไม่ได้รวมเป็นแผนที่เนื่องจากพื้นที่กว้างขวางและมีการแปรปรวนของลักษณะทางภูมิศาสตร์มาก จึงได้เลือกสำรวจที่ศูนย์กลางของอำเภอต่าง ๆ จำนวน 18 ตำแหน่ง ในอำเภอ พร้าว แม่แตง สะเมิง แม่วาง ดอยหล่อ จอมทอง ไชยปราการ ฝาง แม่ฮาย ฮอด และอมก๋อย เพื่อเป็นข้อมูลลักษณะของชั้นดินของอำเภอรอบนอกเหล่านี้ รายละเอียดของตำแหน่งพื้นที่ศึกษา แสดงดังตารางที่ 4.11 (ลำดับที่ 86 ถึง 103) รวมตำแหน่งที่ศึกษาในพื้นที่นี้คือ 103 ตำแหน่ง

ตารางที่ 4.11 รายละเอียดของตำแหน่งศึกษา ในเขตชุมชนหลักของจังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง

Site	Location	อำเภอ	จังหวัด	Latitude	Longitude
N01	เทศบาลตำบลสันโป่ง	แมริม	เชียงใหม่	18°56'34.20"	98°56'37.11"
N02	โรงเรียนบ้านป่าบง	สันทราย	เชียงใหม่	18°55'45.44"	98°59'22.76"
N03	สนามกีฬาตำบลแม่แรม	แมริม	เชียงใหม่	18°55'7.69"	98°54'39.69"
N04	โรงเรียนแมริมวิทยาคม	แมริม	เชียงใหม่	18°54'55.62"	98°56'14.43"
N05	ตำบลลริมใต้	แมริม	เชียงใหม่	18°54'57.94"	98°57'47.42"

Site	Location	อำเภอ	จังหวัด	Latitude	Longitude
N06	มหาวิทยาลัยแม่โจ้	สันทราย	เชียงใหม่	18°53'53.67"	99° 0'47.99"
N07	โรงเรียนดอนแก้วนเรมิตปัญญา	แมริม	เชียงใหม่	18°52'40.48"	98°58'8.44"
N08	บ้านแม่แก้ด สันทราย	สันทราย	เชียงใหม่	18°52'39.26"	18°52'39.26"
N09	หรรษามินิกอล์ฟ สันทราย	สันทราย	เชียงใหม่	18°52'58.27"	99° 4'41.78"
N10	โรงเรียนดอยสะเก็ดวิทยาคม	ดอยสะเก็ด	เชียงใหม่	18°52'57.62"	99° 9'36.86"
N11	ตึกร้างหนองจ่อม	สันทราย	เชียงใหม่	18°52'4.96"	99° 0'59.13"
N12	โรงเรียนบ้านหัวฝาย	สันทราย	เชียงใหม่	18°51'54.51"	99° 3'54.28"
N13	เทศบาลตำบลดอยสะเก็ด	ดอยสะเก็ด	เชียงใหม่	18°52'5.49"	99° 8'15.37"
N14	โรงเรียนสงเคราะห์ศึกษาเชียงใหม่	แมริม	เชียงใหม่	18°51'13.64"	98°57'46.59"
N15	โรงเรียนสันทรายหลวง	สันทราย	เชียงใหม่	18°50'45.77"	99° 2'35.60"
N16	โรงเรียนวัดร่องอ้อ	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°51'3.34"	98°59'32.25"
N17	โรงเรียนวัดป่าติ้ว	ดอยสะเก็ด	เชียงใหม่	18°50'32.53"	99° 6'0.65"
N18	โรงเรียนผาไม้แดง	ดอยสะเก็ด	เชียงใหม่	18°50'7.21"	99° 9'21.11"
N19	ตำบลหนองจ่อม	สันทราย	เชียงใหม่	18°49'55.47"	99° 2'9.92"
N20	โรงเรียนวัดชะจาว	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°48'54.21"	99° 0'14.19"
N21	สนามฟุตบอลข้างโปลีเทคนิคลานนา	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°48'49.67"	98°59'46.38"
N22	เทศบาลตำบลสันปูเลย	ดอยสะเก็ด	เชียงใหม่	18°48'53.18"	99° 4'13.28"
N23	เทศบาลตำบลแม่ฮ้อยเงิน	ดอยสะเก็ด	เชียงใหม่	18°48'14.21"	99° 8'48.13"
N24	สนามรักบี้ มช.	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°48'23.15"	98°57'17.38"
N25	โรงเรียนวัดเจ็ดยอด	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°48'35.33"	98°58'18.32"
N26	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°48'25.76"	98°59'8.48"
N27	สนามกีฬาเทศบาลนครเชียงใหม่	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°48'5.69"	98°59'27.95"
N28	โรงเรียนปิ่นรุ้ง รอยัล วิทยาลัย	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°47'56.85"	99° 0'25.99"
N29	อินเด็กซ์ลิฟวิ่งมอลล์ อำเภอเมือง	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°47'41.67"	99° 1'23.94"
N30	มหาวิทยาลัยพายัพ	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°47'54.86"	99° 1'51.02"
N31	ตำบลลำราญราษฎร์	ดอยสะเก็ด	เชียงใหม่	18°48'16.04"	99° 5'28.66"
N32	สนามฟุตบอล วศ.มช.	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°47'39.77"	98°57'10.31"
N33	โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°47'30.17"	98°59'17.75"
N34	ตำบลหนองป่าครั่ง	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°46'56.53"	99° 2'43.70"

Site	Location	อำเภอ	จังหวัด	Latitude	Longitude
N35	สถานีรถไฟเชียงใหม่	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°47'9.92"	99° 1'1.14"
N36	วัดเจติยหลวง	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°47'14.41"	98°59'11.42"
N37	กองบิน 41	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°46'37.04"	98°58'5.60"
N38	โรงเรียนกาวิละ	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°46'3.14"	99° 1'23.94"
N39	โรงเรียนบ้านหนองโค้ง	สันกำแพง	เชียงใหม่	18°46'1.05"	99° 4'28.75"
N40	โรงเรียนบ้านแม่ปุดา	สันกำแพง	เชียงใหม่	18°46'2.18"	99° 6'38.27"
N41	สนามกีฬาเทศบาลตำบลสุเทพ	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°46'1.61"	98°56'30.11"
N42	เทศบาลตำบลแม่เหียะ	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18°44'37.26"	98°57'54.07"
N43	ถนน เชียงใหม่-ลำพูน ซอย 1	สารภี	เชียงใหม่	18°45'3.13"	99° 0'31.97"
N44	โรงเรียนวัดศรีคำชมพู	สารภี	เชียงใหม่	18°44'15.96"	99° 3'8.89"
N45	สถานีไฟฟ้าสันกำแพง	สันกำแพง	เชียงใหม่	18°44'4.32"	99° 5'16.99"
N46	โรงเรียนสันกำแพงวิทยาคม	สันกำแพง	เชียงใหม่	18°44'22.02"	99° 7'25.98"
N47	โรงเรียนวัดร่องวัวแดง	สันกำแพง	เชียงใหม่	18°44'35.10"	99°10'12.03"
N48	ตำบลหนองควาย	หางดง	เชียงใหม่	18°43'33.53"	98°55'29.34"
N49	ตำบลท่าวังตาล	สารภี	เชียงใหม่	18°43'13.74"	99° 0'18.58"
N50	โรงเรียนวัดป่าตาล สันกำแพง	สันกำแพง	เชียงใหม่	18°43'14.21"	99° 6'25.46"
N51	มหาวิทยาลัยฟาร์อีสเทิร์น หางดง	หางดง	เชียงใหม่	18°42'40.61"	98°58'25.93"
N52	สถานีรถไฟสารภี	สารภี	เชียงใหม่	18°42'31.42"	99° 2'30.92"
N53	วัดศรีดอนมูล	สารภี	เชียงใหม่	18°42'15.37"	99° 3'40.57"
N54	โรงเรียนบ้านกอสะเรียม	สันกำแพง	เชียงใหม่	18°41'50.38"	99° 6'9.19"
N55	โรงเรียนบ้านห้วยไซ	บ้านธิ	ลำพูน	18°41'28.39"	99° 9'28.22"
N56	ตำบลหนองแก้ว หางดง	หางดง	เชียงใหม่	18°41'39.78"	98°56'10.00"
N57	ตำบลสบแม่ข่า หางดง	หางดง	เชียงใหม่	18°41'26.24"	98°59'8.89"
N58	ตำบลหนองแฝก	สารภี	เชียงใหม่	18°41'34.14"	99° 0'54.76"
N59	ตำบลบ้านธิ	บ้านธิ	ลำพูน	18°40'12.60"	99° 5'21.92"
N60	โรงเรียนหางดงรัฐราษฎร์อุปถัมภ์	หางดง	เชียงใหม่	18°40'49.48"	98°55'10.37"
N61	วัดมะขุนหวาน	สันป่าตอง	เชียงใหม่	18°34'38.31"	98°54'37.75"
N62	โรงเรียนเทศบาลอุโมงค์	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°39'57.53"	99° 2'7.98"
N63	โรงเรียนเทพศิรินทร์เชียงใหม่	สันป่าตอง	เชียงใหม่	18°38'52.73"	98°50'55.46"

Site	Location	อำเภอ	จังหวัด	Latitude	Longitude
N64	มหาวิทยาลัยนอร์ทเชียงใหม่	หางดง	เชียงใหม่	18°39'34.23"	98°54'55.63"
N65	เทศบาลตำบลหารแก้ว	หางดง	เชียงใหม่	18°38'37.94"	98°55'40.73"
N66	โรงเรียนวัดศรีดอนชัย	สารภี	เชียงใหม่	18°38'58.09"	98°58'3.45"
N67	โรงเรียนบ้านหนองช้างคื่น	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°39'12.53"	99° 0'48.78"
N68	โรงเรียนวัดป่าตาล	บ้านธิ	ลำพูน	18°38'55.21"	99° 6'27.50"
N69	โรงเรียนพัฒนวิทย์	สันป่าตอง	เชียงใหม่	18°37'38.61"	98°53'48.16"
N70	เทศบาลตำบลหนองตองพัฒนา	หางดง	เชียงใหม่	18°37'25.01"	98°56'38.20"
N71	โรงเรียนวัดประตูป่า	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°37'22.44"	99° 0'11.30"
N72	วิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี ลำพูน	บ้านธิ	ลำพูน	18°38'3.92"	99° 3'32.36"
N73	โรงเรียนบ้านเปียง	สันป่าตอง	ลำพูน	18°36'46.58"	98°51'22.31"
N74	โรงเรียนเทศบาลตำบลริมปิง	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°35'41.34"	98°58'26.20"
N75	โรงเรียนจักรคำคณาทร	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°35'27.54"	99° 0'49.28"
N76	โรงเรียนบ้านฮ่องกอม่วง	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°36'30.21"	99° 3'19.90"
N77	โรงเรียนทุ่งฟ้าบดราษฎร์บำรุง	สันป่าตอง	เชียงใหม่	18°35'47.18"	98°53'21.72"
N78	โรงเรียนจักรคำกิมข	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°34'16.48"	98°58'1.17"
N79	สนามกีฬากลางจังหวัดลำพูน	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°34'3.80"	99° 0'23.98"
N80	สนามกีฬาตำบลมะเขือแจ้	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°34'30.24"	99° 5'34.26"
N81	โรงเรียนเวียงท่ากาน	สันป่าตอง	ลำพูน	18°33'8.64"	98°52'43.85"
N82	โรงเรียนเฉลิมพระเกียรติ 48 พรรษา	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°32'24.50"	98°56'40.31"
N83	วัดหนองเต่า ลำพูน	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°31'57.84"	98°58'11.87"
N84	อบจ. ลำพูน	เมืองลำพูน	ลำพูน	18°31'53.21"	99° 1'24.07"
N85	เทศบาลตำบลป่าซาง	ป่าซาง	ลำพูน	18°30'55.97"	98°56'18.42"
N86	โรงเรียนบ้านแจ่งกู๋เรือง	พร้าว	เชียงใหม่	19°21'59.46"	99°12'6.66"
N87	โรงเรียนประตู่วิทยา	พร้าว	เชียงใหม่	19°14'4.00"	99°11'11.38"
N88	โรงเรียนวัดซ่อแล	แม่แตง	เชียงใหม่	19° 8'37.04"	99° 0'47.96"
N89	โรงเรียนสันมหาพนวิทยา	แม่แตง	เชียงใหม่	19° 7'11.70"	98°56'29.46"
N90	โรงเรียนสะเมิงพิทยาคม	สะเมิง	เชียงใหม่	18°50'47.78"	98°44'1.41"
N91	โรงเรียนบ้านกาต	แม่วาง	เชียงใหม่	18°35'59.15"	98°49'4.90"
N92	สนามกีฬาอำเภอดอยหล่อ	ดอยหล่อ	เชียงใหม่	18°28'33.61"	98°46'54.19"

Site	Location	อำเภอ	จังหวัด	Latitude	Longitude
N93	โรงเรียนบ้านสามหลัง	ดอยหล่อ	เชียงใหม่	18°30'59.96"	98°50'40.27"
N94	โรงเรียนศรีจอมทอง	จอมทอง	เชียงใหม่	18°24'57.38"	98°40'30.85"
N95	โรงเรียนบ้านห้วยน้ำดิบ	จอมทอง	เชียงใหม่	18°27'8.16"	98°43'4.61"
N96	โรงเรียนไชยปราการ	ไชยปราการ	เชียงใหม่	19°43'26.96"	99° 8'23.72"
N97	โรงเรียนวัดอรุณญวาสี	ไชยปราการ	เชียงใหม่	19°45'20.93"	99° 8'57.63"
N98	ราชภัฏเชียงใหม่ วิทยาเขตฝาง	ฝาง	เชียงใหม่	19°51'52.56"	99°10'45.70"
N99	สนามกีฬาอำเภอฝาง	ฝาง	เชียงใหม่	19°55'38.03"	99°12'49.92"
N100	โรงเรียนไทยรัฐ	แม่สาย	เชียงใหม่	20° 2'2.53"	99°18'2.69"
N101	โรงเรียนห้วยป่าซาง	แม่สาย	เชียงใหม่	19°59'58.87"	99°15'23.25"
N102	โรงเรียนบ้านทุ่งโป่ง	ฮอด	เชียงใหม่	18° 7'47.70"	98°38'47.37"
N103	โรงเรียนบ้านยางเปา	อมก๋อย	เชียงใหม่	17°49'25.99"	98°19'12.34"

ข. กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง

บริเวณที่ศึกษาในเขตกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียงแบ่งเป็น การศึกษาด้วยการตรวจวัดโครงข่ายขนาดเล็ก (รัศมีสูงสุดประมาณ 50 ถึง 60 เมตร) และการตรวจวัดโครงข่ายขนาดใหญ่ (รัศมีสูงสุดประมาณ 500 ถึง 600 เมตร) โดยมีจำนวนบริเวณศึกษาทั้งสิ้น 149 ตำแหน่ง สำหรับการตรวจวัดโครงข่ายขนาดเล็ก และ 25 ตำแหน่งสำหรับการตรวจวัดโครงข่ายขนาดใหญ่ รวมตำแหน่งที่ศึกษาทั้งหมด 174 ตำแหน่ง โดยตารางที่ 4.12 และ 4.13 แสดงรายละเอียดของตำแหน่งตรวจวัดตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 รายละเอียดของตำแหน่งศึกษาในเขตกทม.และจังหวัดใกล้เคียง (โครงข่ายขนาดเล็ก)

Site	Location	อำเภอ	จังหวัด	Latitude	Longitude
C01	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	ทุ่งครุ	กรุงเทพฯ	13°39'2.81"	100°29'33.54"
C02	กรมอุตุนิยมวิทยา	บางนา	กรุงเทพฯ	13°40'1.31"	100°36'17.10"
C03	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ปทุมวัน	กรุงเทพฯ	13°44'18.49"	100°31'52.32"
C04	ใกล้ทางพิเศษรามอินทรา-อาจณรงค์	ห้วยขวาง	กรุงเทพฯ	13°45'2.23"	100°36'3.78"
C05	สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ลาดกระบัง	กรุงเทพฯ	13°43'52.14"	100°46'25.14"
C06	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	จตุจักร	กรุงเทพฯ	13°51'3.74"	100°34'6.53"
C07	ถัดไปทางตะวันออกของวัดสัมมาชัญญวาส	คลองสามวา	กรุงเทพฯ	13°51'25.45"	100°41'51.47"
C08	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	หนองจอก	กรุงเทพฯ	13°50'46.43"	100°51'22.61"
C09	วิทยาลัยเทคนิคดอนเมือง	ดอนเมือง	กรุงเทพฯ	13°55'41.76"	100°34'44.70"
C10	โรงเรียนวัดหนองไม้แก่น	ท่ามะกา	กาญจนบุรี	14° 2'31.08"	99°50'33.12"

Site	Location	อำเภอ	จังหวัด	Latitude	Longitude
C11	ลานหิน หมู่ 1	พนมทวน	กาญจนบุรี	14° 3'39.90"	99°43'32.64"
C12	วัดหนองลานราษฎร์บำรุง	ท่ามะกา	กาญจนบุรี	13°56'34.74"	99°47'50.88"
C13	โรงเรียนอนุบาลบ่อพลอย	บ่อพลอย	กาญจนบุรี	14°19'29.42"	99°31'11.23"
C14	วัดสันติคีรี	ห้วยกระเจา	กาญจนบุรี	14°15'45.60"	99°41'34.74"
C15	วัดตรงข้ามโรงเรียนบ้านหนองโพธิ์	พนมทวน	กาญจนบุรี	14°13'49.62"	99°39'50.70"
C16	วัดหนองปลิว	ห้วยกระเจา	กาญจนบุรี	14°17'34.92"	99°48'22.98"
C17	ลานกว้างตรงข้ามวัดสระลงเรือ	ห้วยกระเจา	กาญจนบุรี	14°21'5.88"	99°44'56.82"
C18	วัดนาใหม่	ห้วยกระเจา	กาญจนบุรี	14°23'4.32"	99°41'54.72"
C19	วัดพันเทา	สองพี่น้อง	กาญจนบุรี	14° 7'5.10"	99°49'0.18"
C20	โรงเรียนหนองขาวโกวิทพิทยาคม	ท่าม่วง	กาญจนบุรี	14° 3'16.56"	99°38'34.14"
C21	องค์การบริหารส่วนตำบลพนมทวน	พนมทวน	กาญจนบุรี	14° 7'16.80"	99°41'2.34"
C22	โรงเรียนวัดม่วงชุม	ท่าม่วง	กาญจนบุรี	13°57'20.88"	99°36'28.80"
C23	สนามกีฬากลิบบัว	อำเภอเมือง	กาญจนบุรี	14° 2'53.70"	99°30'19.50"
C24	เทศบาลตำบลปากแพรก	อำเภอเมือง	กาญจนบุรี	14° 2'19.98"	99°32'44.14"
C25	วัดดอนสามง่าม	ท่ามะกา	กาญจนบุรี	13°51'20.28"	99°47'55.74"
C26	โรงเรียนบ้านหนองมงคล	ท่าม่วง	กาญจนบุรี	13°52'10.74"	99°36'30.72"
C27	วัดเขาช่อง	ท่ามะกา	กาญจนบุรี	13°52'18.18"	99°42'37.20"
C28	โรงเรียนวัดวังศาลา	ท่าม่วง	กาญจนบุรี	13°57'14.64"	99°41'14.40"
C29	โรงเรียนอาทรสังฆะวัฒนะ 3	เมือง	กาญจนบุรี	14° 8'46.98"	99°23'29.22"
C30	โรงเรียนวัดเขาพุประดู่	เมือง	กาญจนบุรี	14° 2'4.80"	99°23'1.14"
C31	โรงเรียนบ้านวังตะเคียน	เมือง	กาญจนบุรี	13°57'23.16"	99°22'10.50"
C32	เทศบาลตำบลคลองมะขามเตี้ย	ด่านมะขามเตี้ย	กาญจนบุรี	13°51'8.22"	99°24'40.80"
C33	วัดขุนไทยธาราม	ท่าม่วง	กาญจนบุรี	13°52'14.58"	99°32'4.38"
C34	โรงเรียนบ้านแก่งหลวง	เมือง	กาญจนบุรี	13°56'21.36"	99°29'54.60"
C35	ลานหินคลุกติดถนนบางนา-ชลบุรี	บางปะกง	ฉะเชิงเทรา	13°29'52.80"	101° 0'14.40"
C36	โรงเรียนวัดพนมพนาวาส	บ้านโพธิ์	ฉะเชิงเทรา	13°37'19.20"	101° 9'43.20"
C37	ลานกีฬาเอนกประสงค์	บ้านโพธิ์	ฉะเชิงเทรา	13°34'40.81"	101° 1'30.02"
C38	โรงเรียนก้อนแก้ววิทยาคม	กิ่งคลองเขื่อน	ฉะเชิงเทรา	13°44'42.00"	101° 8'49.20"
C39	ลานดินถม ถนนไปบางน้ำเปรี้ยว	อำเภอเมือง	ฉะเชิงเทรา	13°43'58.81"	101° 2'9.66"
C40	โรงเรียนปากคลองบางขนาก	บางน้ำเปรี้ยว	ฉะเชิงเทรา	13°52'12.00"	101° 8'20.40"
C41	โรงเรียนหมอนทองวิทยา	บางน้ำเปรี้ยว	ฉะเชิงเทรา	13°51'28.80"	100°59'9.60"
C42	โรงเรียนวัดบึงน้ำรักษ์	หนองจอก	ฉะเชิงเทรา	13°52'46.98"	100°55'30.54"
C43	วัดโพธิ์แสงกาญจนารราษฎร์	บางน้ำเปรี้ยว	ฉะเชิงเทรา	13°54'0.36"	101° 4'37.62"
C44	วัดญาณรังษาราม	บางน้ำเปรี้ยว	ฉะเชิงเทรา	13°48'1.44"	101° 4'55.08"

Site	Location	อำเภอ	จังหวัด	Latitude	Longitude
C45	สนามกีฬา อบต.	ราชสาส์น	ฉะเชิงเทรา	13°49'1.02"	101°18'22.26"
C46	สนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติ ร.9	พนมสารคาม	ฉะเชิงเทรา	13°44'32.64"	101°21'13.98"
C47	ลานหินคลุกติดถนนเลียบเมืองชลบุรี	อำเภอเมืองชลบุรี	ชลบุรี	13°20'45.60"	100°59'42.00"
C48	วัดเข้มทอง	องครักษ์	นครนายก	14° 0'25.20"	101° 9'46.80"
C49	ลานโล่งใกล้โรงเรียนอัลฟาติฮ์ฮ์ตุคุดที่ 2	องครักษ์	นครนายก	14° 0'10.80"	101° 2'9.60"
C50	โรงเรียนวัดศรีจุฬา	อำเภอเมือง	นครนายก	14° 5'42.00"	101°10'12.00"
C51	ลานตลาดนัด หน้าธนาคารกสิกรไทย	องครักษ์	นครนายก	14° 7'8.40"	101° 0'3.61"
C52	วัดตะเคียนทอง	ปากพลี	นครนายก	14°12'43.20"	101°17'41.99"
C53	ลานโล่งข้างศาลากลางนครนายก	ปากพลี	นครนายก	14°12'43.20"	101°12'7.20"
C54	วัดกลางคลอง 30	องครักษ์	นครนายก	14°11'16.80"	100°59'27.61"
C55	โรงเรียนบ้านดงวิทยาคาร	อำเภอเมือง	นครนายก	14°18'50.40"	101°17'45.60"
C56	ตำบลศรีกะอาง	บ้านนา	นครนายก	14°20'56.40"	101° 6'39.60"
C57	วัดท่าทราย	บ้านนา	นครนายก	14°13'33.18"	101° 3'29.64"
C58	โรงเรียนวัดหนองรี	บ้านนา	นครนายก	14°15'37.98"	101° 7'49.44"
C59	โรงเรียนคลอง3วิทยา	อำเภอเมือง	นครนายก	14° 7'11.04"	101° 5'23.46"
C60	องค์การบริหารส่วนตำบลบึงศาล	องครักษ์	นครนายก	14° 3'18.96"	100°56'18.84"
C61	ดอนยายหอม	อำเภอเมือง	นครปฐม	13°44'21.18"	100°5'5.28"
C62	โรงเรียนเพิ่มวิทยา	นครชัยศรี	นครปฐม	13°47'12.48"	100°11'32.16"
C63	มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา	พุทธมณฑล	นครปฐม	13°47'41.14"	100°19'4.69"
C64	เลียบคลองประปา บางแค	อำเภอเมือง	นครปฐม	13°52'20.68"	100° 3'49.50"
C65	วัดมะเกลือ	พุทธมณฑล	นครปฐม	13°52'34.38"	100°17'31.98"
C66	โรงเรียนวัดลำลูกบัว	ดอนตูม	นครปฐม	14° 0'33.16"	100° 5'48.70"
C67	ลำพญา บางเลน นครปฐม	บางเลน	นครปฐม	13°59'7.08"	100°13'22.58"
C68	วัดลัญจิวาราม	บางเลน	นครปฐม	14°7'27.01"	100°5'9.46"
C69	วัดเกษตราม	บางเลน	นครปฐม	14°6'0.00"	100°15'21.23"
C70	วัดลานแหลม	นครชัยศรี	นครปฐม	13°53'44.52"	100° 9'29.04"
C71	โรงเรียนวัดศรีวิสารวาจา	เมือง	นครปฐม	13°50'46.68"	99°58'47.22"
C72	วัดบางไผ่นารถ	บางเลน	นครปฐม	14° 3'12.60"	100°10'36.90"
C73	วัดบัวหวั่น	บางเลน	นครปฐม	14°10'41.58"	100°12'41.82"
C74	วัดลานตากฟ้า	นครชัยศรี	นครปฐม	13°49'40.50"	100°13'30.78"
C75	กศน.นครปฐม	เมือง	นครปฐม	13°48'40.14"	100° 6'47.34"
C76	วัดหลักบาง	บางใหญ่	นนทบุรี	13°50'57.96"	100°23'31.62"
C77	ต.คลองข่อย อ.ปากเกร็ด	ปากเกร็ด	นนทบุรี	13°59'13.85"	100°23'35.74"
C78	วัดราษฎร์บำรุง	หนองเสือ	ปทุมธานี	14°14'27.60"	100°49'26.40"

Site	Location	อำเภอ	จังหวัด	Latitude	Longitude
C79	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	ธัญบุรี	ปทุมธานี	14°1'55.06"	100°43'37.70"
C80	ริมคลองหลังโรงเรียนพระสุทิวรวังค์	ลำลูกกา	ปทุมธานี	13°57'12.13"	100°51'5.76"
C81	วัดเจติยหอย จ.ปทุมธานี	ลาดหลุมแก้ว	ปทุมธานี	14°6'51.70"	100°22'59.63"
C82	AIT	คลองหลวง	ปทุมธานี	14° 4'45.52"	100°36'36.36"
C83	โรงเรียนมัธยมหัตถสารเกษตร	คลองหลวง	ปทุมธานี	14°5'39.34"	100°42'16.02"
C84	โรงเรียนหนองเสือวิทยาคม	หนองเสือ	ปทุมธานี	14°7'51.60"	100°49'1.20"
C85	ทุ่งนาโล่ง ซอยวัดบางหลวง	อำเภอเมือง	ปทุมธานี	13°59'51.00"	100°31'25.62"
C86	โรงเรียนวัดหน้าไม้	ลาดหลุมแก้ว	ปทุมธานี	14° 3'10.02"	100°20'41.28"
C87	สถาบันพัฒนาบุคลากรท้องถิ่น	คลองหลวง	ปทุมธานี	14° 0'38.10"	100°37'47.22"
C88	โรงเรียนวัดกระทุ่มแพ้ว	บ้านสร้าง	ปราชินบุรี	13°52'26.40"	101°20'2.40"
C89	โรงเรียนวัดหัวกรด	อำเภอเมือง	ปราชินบุรี	13°58'58.80"	101°20'31.20"
C90	วัดคลองหอยทง	บ้านสร้าง	ปราชินบุรี	13°57'16.14"	101°14'20.16"
C91	โรงเรียนบ้านบางขาม	บ้านสร้าง	ปราชินบุรี	13°53'10.74"	101°15'26.28"
C92	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	อำเภอเมือง	ปราชินบุรี	14° 6'42.00"	101°20'2.76"
C93	โรงเรียนบ้านคลองสารภี	บ้านสร้าง	ปราชินบุรี	14° 1'50.70"	101°16'57.00"
C94	ลานกว้างติดถนนพหลโยธิน	วังน้อย	พระนครศรีอยุธยา	14°13'30.00"	100°42'32.40"
C95	ศูนย์ศิลปาชีพเกาะเกิด	บางปะอิน	พระนครศรีอยุธยา	14°12'36.00"	100°32'49.20"
C96	วัดคู่สลอดวุฒิโสภณ	ลาดบัวหลวง	พระนครศรีอยุธยา	14°12'54.00"	100°24'36.00"
C97	วัดโพธิ์	เสนา	พระนครศรีอยุธยา	14°20'49.20"	100°24'25.20"
C98	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	พระนครศรีอยุธยา	พระนครศรีอยุธยา	14°21'39.60"	100°33'54.00"
C99	ลานดินข้างวัดนางชี	อุทัย	พระนครศรีอยุธยา	14°21'3.60"	100°42'32.40"
C100	วัดเขาดิน	บางปะหัน	พระนครศรีอยุธยา	14°26'8.64"	100°33'14.34"
C101	วัดเวฬุวัน	มหาราช	พระนครศรีอยุธยา	14°35'35.52"	100°33'7.56"
C102	โรงเรียนไตรราชวิทยา	บางไทร	พระนครศรีอยุธยา	14°9'29.22"	100°30'26.64"
C103	โรงเรียนวัดท่ายาง	ปากท่อ	ราชบุรี	13°15'50.40"	99°35'56.40"
C104	ตำบลทุ่งหลวง	ปากท่อ	ราชบุรี	13°23'27.60"	99°38'24.00"
C105	โรงเรียนบ้านเขาอีसान	โพธาราม	ราชบุรี	13°22'55.20"	99°46'26.40"
C106	โรงเรียนวัดน้ำพุ	อำเภอเมือง	ราชบุรี	13°31'37.20"	99°37'4.80"
C107	ลานหินคลุกตลาดนัดคลองเล็ก	อำเภอเมือง	ราชบุรี	13°31'26.40"	99°46'1.20"
C108	เรือนไทยรีสอร์ท	ดำเนินสะดวก	ราชบุรี	13°31'4.80"	99°58'19.20"
C109	โรงเรียนวัดโสดาประดิษฐาราม	อำเภอเมือง	ราชบุรี	13°36'43.20"	99°45'21.60"
C110	วัดโคกบารุงราษฎร์	ดำเนินสะดวก	ราชบุรี	13°35'31.20"	99°57'46.80"
C111	วัดสระสี่มุม	บ้านโป่ง	ราชบุรี	13°47'45.60"	99°44'13.20"
C112	สนามกีฬาบ้านโป่ง	บ้านโป่ง	ราชบุรี	13°49'33.60"	99°52'22.80"

Site	Location	อำเภอ	จังหวัด	Latitude	Longitude
C113	โรงเรียนกรับใหญ่ว่องกุศลกิจพิทยาคม	บ้านโป่ง	ราชบุรี	13°55'49.44"	99°51'57.78"
C114	วัดหนองปลาหมอ	บ้านโป่ง	ราชบุรี	13°47'35.34"	99°47'35.88"
C115	โรงเรียนวัดลำน้ำ	บางแพ	ราชบุรี	13°43'48.96"	99°59'46.44"
C116	โรงเรียนราษฎร์ศรัทธาธรรม	เมือง	ราชบุรี	13°36'2.94"	99°50'43.56"
C117	บริษัทอาร์ทีดีอุตสาหกรรมสิ่งทอจำกัด	เมือง	ราชบุรี	13°31'38.58"	99°52'2.34"
C118	ลานโล่งใกล้ศาลเยาวชนและครอบครัว	เมือง	ราชบุรี	13°33'48.06"	99°43'13.98"
C119	วัดหนองตาเน็ด	จอมบึง	ราชบุรี	13°40'6.12"	99°37'44.58"
C120	โรงเรียนวัดเขาชะงุ้ม	โพธาราม	ราชบุรี	13°42'58.98"	99°45'2.58"
C121	วัดหัวโพธิ์	บางแพ	ราชบุรี	13°39'15.60"	99°57'0.24"
C122	โรงเรียนป้อมพระจุลจอม	พระสมุทรเจดีย์	สมุทรปราการ	13°34'2.60"	100°34'19.78"
C123	โรงเรียนหลวงพ่อบ้านคลองด่าน	บางบ่อ	สมุทรปราการ	13°30'18.68"	100°49'59.20"
C124	โรงเรียนเคทีที	บางพลี	สมุทรปราการ	13°35'48.9"	100°46'42.84"
C125	วัดโคกเกตุบุญญศิริ	อัมพวา	สมุทรสงคราม	13°23'16.80"	99°55'26.40"
C126	ใกล้รางรถไฟ บางน้ำจืด (โรงเรียนบางน้ำจืด)	เมืองสมุทรสาคร	สมุทรสาคร	13°36'29.34"	100°21'33.11"
C127	โรงเรียนวัดหนองชุมพล	บ้านแหลม	เพชรบุรี	13°17'20.40"	99°47'52.80"
C128	ลานโล่ง	บ้านแหลม	เพชรบุรี	13°12'18.00"	99°58'40.80"
C129	วัดสหมิตรมงคล	หนองแค	สระบุรี	14°20'24.00"	100°51'18.00"
C130	ลานโล่งข้างโรงเรียนบำรุงปัญญา	วิหารแดง	สระบุรี	14°20'60.00"	100°58'55.20"
C131	โรงเรียนวัดทับกระดาน	สองพี่น้อง	สุพรรณบุรี	14° 8'31.86"	99°54'44.64"
C132	วัดสำเภาทอง	สองพี่น้อง	สุพรรณบุรี	14°12'54.06"	100° 6'41.34"
C133	โรงเรียนวัดโคกโพธิ์	บางปลาม้า	สุพรรณบุรี	14°17'41.34"	100° 9'5.34"
C134	วัดไผ่มั่ง	บางปลาม้า	สุพรรณบุรี	14°21'49.56"	100° 0'37.80"
C135	ลานดินถม	ศรีประจันต์	สุพรรณบุรี	14°35'47.76"	100° 4'22.86"
C136	โรงเรียนบ้านดอนโพธิ์	อำเภอเมือง	สุพรรณบุรี	14°30'32.82"	100° 9'28.92"
C137	วัดจระเข้ใหญ่	บางปลาม้า	สุพรรณบุรี	14°25'13.38"	100°13'46.44"
C138	วัดสองเขต	อำเภอเมือง	สุพรรณบุรี	14°34'20.33"	99°55'26.79"
C139	วัดสามัคคีธรรม	อู่ทอง	สุพรรณบุรี	14°22'3.48"	99°54'43.08"
C140	หน้าอาคารเพื่อนอนุสรณ์ โรงเรียนวัดกระแชง	บางไทร	อยุธยา	14°16'58.56"	100°29'22.44"
C141	วัดธรรมจริยา	หนองแค	อยุธยา	14°16'25.56"	100°49'19.74"
C142	วัดมฤคทายวัน	บางซ้าย	อยุธยา	14°13'2.46"	100°15'43.59"
C143	วัดคลองตัน	บางซ้าย	อยุธยา	14°18'56.64"	100°17'13.62"
C144	วัดไผ่ล้อม	บางบาล	อยุธยา	14°22'22.32"	100°28'46.56"
C145	วัดตาลานเหนือ	ผักไห่	อยุธยา	14°26'43.26"	100°21'55.74"
C146	วัดพระแก้ว	ภาชี	อยุธยา	14°25'55.86"	100°41'4.56"

Site	Location	อำเภอ	จังหวัด	Latitude	Longitude
C147	โรงเรียนท่าช้างวิทยาคม	นครหลวง	อยุธยา	14°30'30.12"	100°38'52.86"
C148	วัดใหม่หญ้าไทร	ลาดบัวหลวง	อยุธยา	14°12'2.22"	100°21'0.24"
C149	โรงเรียนวัดทางหลวง	บางไทร	อยุธยา	14°22'42.72"	100°20'9.12"

ตารางที่ 4.13 รายละเอียดของตำแหน่งศึกษาในเขตกทม.และจังหวัดใกล้เคียง (โครงข่ายขนาดใหญ่)

Site	Location	เขต	จังหวัด	Latitude	Longitude
B01	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	จตุจักร	กรุงเทพมหานคร	13°51'3.74"	100°34'6.53"
B02	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร	บางเขน	กรุงเทพมหานคร	13°52'40.25"	100°35'30.10"
B03	โรงเรียนวัดทรัพย์สโมสร	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13°51'0.96"	100°48'13.78"
B04	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ปทุมวัน	กรุงเทพมหานคร	13°44'18.72"	100°31'51.64"
B05	หมู่บ้านปัญญาเลิศโฮม	คลองสามวา	กรุงเทพมหานคร	13°52'7.53"	100°44'37.78"
B06	สวนเฉลิมพระเกียรติ 60 พรรษามหาราชนิ	ลาดกระบัง	กรุงเทพมหานคร	13°45'49.09"	100°43'52.13"
B07	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	ทุ่งครุ	กรุงเทพมหานคร	13°39'2.81"	100°29'33.54"
B08	หมู่บ้านคุณาลัย	บางขุนเทียน	กรุงเทพมหานคร	13°34'41.92"	100°25'3.72"
B09	หมู่บ้านกรีนวิลล์	ทวีวัฒนา	กรุงเทพมหานคร	13°47'36.59"	100°23'53.69"
B10	แปลงปลูกหญ้า	คลองสามวา	กรุงเทพมหานคร	13°54'52.54"	100°44'11.06"
B11	กรมอุตุนิยมวิทยา	บางนา	กรุงเทพมหานคร	13°40'1.31"	100°36'17.10"
B12	ถนนคลอง 13	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13°55'50.95"	100°53'41.71"
B13	หมู่บ้านซอยลาดกระบัง	ลาดกระบัง	กรุงเทพมหานคร	13°43'46.28"	100°51'43.21"
B14	หมู่บ้านแสงตะวัน	บางบอน	กรุงเทพมหานคร	13°38'18.02"	100°22'12.13"
B15	ราษฎร์อุทิศ 17	มีนบุรี	กรุงเทพมหานคร	13°49'20.19"	100°45'19.40"
B16	สวนหลวง ร.9	ประเวศ	กรุงเทพมหานคร	13°40'56.92"	100°39'41.93"
B17	ตำบลลำต้อยติ่ง	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13°47'35.10"	100°53'3.15"
B18	มัสยิดอัดเตาฮีด	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13°55'24.83"	100°49'0.11"
B19	ดินถมขนาดใหญ่	บางขุนเทียน	กรุงเทพมหานคร	13°37'18.14"	100°25'23.80"
B20	ศูนย์พัฒนาสุขภาพชุมชนจตุรัสผอณี	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13°50'5.65"	100°54'34.78"
B21	บ่อดิน	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13°53'5.93"	100°47'36.77"
B22	วัดวงษ์ลาภาราม	หนองแขม	กรุงเทพมหานคร	13°42'54.77"	100°21'27.20"
B23	มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี	ทวีวัฒนา	กรุงเทพมหานคร	13°46'13.06"	100°21'11.02"
B24	วัดบัวผ้น	ทุ่งครุ	กรุงเทพมหานคร	13°36'10.46"	100°28'55.12"
B25	คลอง 13 ฝั่งตะวันออก	หนองจอก	กรุงเทพมหานคร	13°53'33.84"	100°53'15.74"

4.13.2 ผลการศึกษา

ผลการวิเคราะห์ค่าคาบอิทธิพลหลักของชั้นดิน (T_p) และค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยถึงระดับ 30 เมตรจากผิวดิน (V_{s30}) ของบริเวณที่ศึกษาทั้งหมดแสดงผลเป็นค่าในตารางที่ 4.14 สำหรับพื้นที่ในเขตจังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง และ ตารางที่ 4.15 และ 4.16 สำหรับกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยแสดงค่า T_p หน่วยเป็นวินาที และเนื่องจากบางบริเวณที่มีลักษณะทางสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถให้ผลการตรวจวัดที่มีความถูกต้องได้ ค่า T_p จะแสดงผลในตารางด้วยข้อความ “no peak” หรือผลการตรวจวัดที่ไม่สามารถใช้ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อคำนวณความเร็วคลื่นเฉือนได้จะแสดงผลในตารางด้วยข้อความ “N/A” นอกจากนั้น ได้แสดงผลการจำแนกประเภทของชั้นดินตาม มยผ 1320 ด้วยค่า V_{s30} ไว้สำหรับแต่ละบริเวณที่ศึกษา

ก. ผลการศึกษาในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง

ตารางที่ 4.14 ค่าคาบอิทธิพลหลักและความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 ม. แรกสำหรับพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง

Site	Location	Predominant period (sec)	Vs30 (m/sec)	ประเภทดิน (มยผ. 1302)
N1	เทศบาลตำบลสันโป่ง	0.46	341	D
N2	โรงเรียนบ้านป่าบง	No peak	322	D
N3	สนามกีฬาตำบลแม่แรม	0.23	395	C
N4	โรงเรียนแม่ริมวิทยาคม	No peak	311	D
N5	ตำบลริมใต้	No peak	262	D
N6	มหาวิทยาลัยแม่โจ้	No peak	335	D
N7	โรงเรียนดอนแก้วเนรมิตปัญญา	No peak	388	C
N8	บ้านแม่กาด สันทราย	0.64	459	C
N9	หรรษามินิกอล์ฟ สันทราย	0.54	343	D
N10	โรงเรียนดอยสะเก็ดวิทยาคม	0.3	353	D
N11	ตึกร้างหนองจ่อม	No peak	348	D
N12	โรงเรียนบ้านหัวฝาย	No peak	379	C
N13	เทศบาลตำบลดอยสะเก็ด	0.12	562	C
N14	โรงเรียนสหราษฎร์ศึกษาเชียงใหม่	0.13	399	C
N15	โรงเรียนสันทรายหลวง	No peak	323	D

Site	Location	Predominant period (sec)	Vs30 (m/sec)	ประเภทดิน (มยผ. 1302)
N16	โรงเรียนวัดร่องอ้อ	0.27	278	D
N17	โรงเรียนวัดป่าดัว	0.45	312	D
N18	โรงเรียนผาไม้แดง	No peak	368	C
N19	ตำบลหนองจ้อม	No peak	286	D
N20	โรงเรียนวัดชะขาว	0.68	279	D
N21	สนามฟุตบอลข้างโปลีเทคนิคลานนา	No peak	265	D
N22	เทศบาลตำบลสันปูเลย	No peak	276	D
N23	เทศบาลตำบลแม่ฮ้อยเงิน	0.26	294	D
N24	สนามรักบี้ มช.	No peak	317	D
N25	โรงเรียนวัดเจ็ดยอด	No peak	333	D
N26	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่	No peak	331	D
N27	สนามกีฬาเทศบาลนครเชียงใหม่	No peak	311	D
N28	โรงเรียนปรินซ์ รอยัล วิทยาลัย	0.51	231	D
N29	อินเด็กซ์ลิฟวิ่งมอลล์ อำเภอเมือง	No peak	272	D
N30	มหาวิทยาลัยพายัพ	0.68	255	D
N31	ตำบลลำราญราษฎร์	No peak	292	D
N32	สนามฟุตบอล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มช.	0.68	371	C
N33	โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย	No peak	297	D
N34	ตำบลหนองป่าครั่ง	No peak	269	D
N35	สถานีรถไฟเชียงใหม่	0.48	236	D
N36	วัดเจติยหลวง	0.6	360	C
N37	กองบิน 41	No peak	406	C
N38	โรงเรียนกาวิละ	0.68	310	D
N39	โรงเรียนบ้านหนองโค้ง	No peak	271	D
N40	โรงเรียนบ้านแม่ปูคา	0.26	281	D
N41	สนามกีฬาเทศบาลตำบลสุเทพ	No peak	472	C
N42	เทศบาลตำบลแม่เหียะ	No peak	351	D
N43	ถนน เชียงใหม่-ลำพูน ซอย 1	No peak	257	D

Site	Location	Predominant period (sec)	Vs30 (m/sec)	ประเภทดิน (มยผ. 1302)
N44	โรงเรียนวัดศรีคำชมภู	No peak	275	D
N45	สถานีไฟฟ้าสันกำแพง	0.27	269	D
N46	โรงเรียนสันกำแพงวิทยาคม	0.26	302	D
N47	โรงเรียนวัดร่องวัวแดง	0.33	295	D
N48	ตำบลหนองควาย	No peak	308	D
N49	ตำบลท่าวังตาล	No peak	266	D
N50	โรงเรียนวัดป่าตาล สันกำแพง	No peak	293	D
N51	มหาวิทยาลัยฟาร์อีสเทิร์น หางดง	No peak	246	D
N52	สถานีรถไฟสารภี	No peak	281	D
N53	วัดศรีดอนมูล	No peak	297	D
N54	โรงเรียนบ้านกอกสะเรียม	No peak	273	D
N55	โรงเรียนบ้านห้วยไซ	0.21	305	D
N56	ตำบลหนองแก้ว หางดง	No peak	326	D
N57	ตำบลสบแม่ข่า หางดง	0.27	267	D
N58	ตำบลหนองแฝก	0.73	237	D
N59	ตำบลบ้านธิ	No peak	261	D
N60	โรงเรียนหางดงรัฐราษฎร์อุปถัมภ์	No peak	332	D
N61	วัดมะขุนหวาน	0.38	281	D
N62	โรงเรียนเทศบาลอุโมงค์	0.19	293	D
N63	โรงเรียนเทพศิรินทร์เชียงใหม่	No peak	350	D
N64	มหาวิทยาลัยนอร์ทเชียงใหม่	No peak	289	D
N65	เทศบาลตำบลหารแก้ว	No peak	365	D
N66	โรงเรียนวัดศรีดอนชัย	No peak	250	D
N67	โรงเรียนบ้านหนองช้างคืบ	No peak	257	D
N68	โรงเรียนวัดป่าตาล	0.3	350	D
N69	โรงเรียนพัฒนวิทย์	0.68	360	C
N70	เทศบาลตำบลหนองตองพัฒนา	No peak	278	D
N71	โรงเรียนวัดประดู่ป่า	No peak	310	D

Site	Location	Predominant period (sec)	Vs30 (m/sec)	ประเภทดิน (มยผ. 1302)
N72	วิทยาลัยเทคโนโลยีธนบุรี ลำพูน	0.3	277	D
N73	โรงเรียนบ้านเปียง	No peak	370	C
N74	โรงเรียนเทศบาลตำบลริมปิง	0.64	230	D
N75	โรงเรียนจักรคำคณาทร	No peak	285	D
N76	โรงเรียนบ้านฮ่องกอม่วง	No peak	369	C
N77	โรงเรียนทุ่งฟ้าบดราษฎร์บำรุง	No peak	440	C
N78	โรงเรียนจักรคำคณาทร	No peak	281	D
N79	สนามกีฬาากลางจังหวัดลำพูน	No peak	270	D
N80	สนามกีฬาตำบลมะเขือแจ้	0.38	318	D
N81	โรงเรียนเวียงท่ากาน	No peak	410	C
N82	โรงเรียนเฉลิมพระเกียรติ 48 พรรษา	0.28	245	D
N83	วัดหนองเต่า ลำพูน	0.21	286	D
N84	อบจ. ลำพูน	No peak	384	C
N85	เทศบาลตำบลป่าซาง	No peak	293	D
N86	โรงเรียนบ้านแจ่งกูเรือ	No peak	306	D
N87	โรงเรียนประตู่วิทยา	No peak	410	C
N88	โรงเรียนวัดซ่อแล	0.12	344	D
N89	โรงเรียนสันมหาพนวิทยา	0.23	335	D
N90	โรงเรียนสะเมิงพิทยาคม	0.34	287	D
N91	โรงเรียนบ้านกาด	0.21	400	C
N92	สนามกีฬาอำเภอถอยหล่อ	No peak	297	D
N93	โรงเรียนบ้านสามหลัง	No peak	394	C
N94	โรงเรียนศรีจอมทอง	No peak	485	C
N95	โรงเรียนบ้านห้วยน้ำดิบ	No peak	419	C
N96	โรงเรียนไชยปราการ	No peak	396	C
N97	โรงเรียนวัดอรัญญวาสี	0.12	347	D
N98	ราชภัฏเชียงใหม่ วิทยาเขตฝาง	No peak	281	D
N99	สนามกีฬาอำเภอฝาง	0.6	306	D

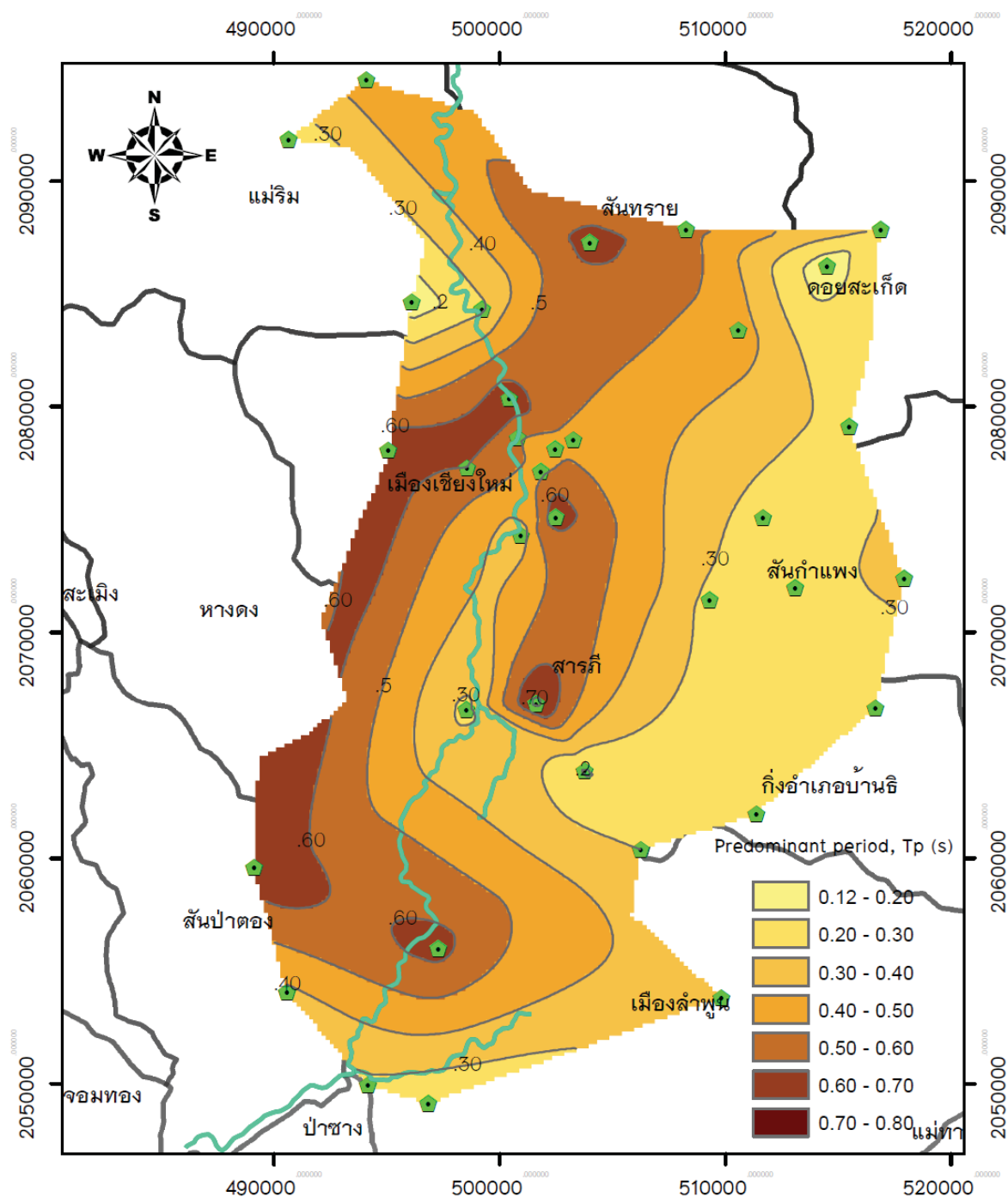
Site	Location	Predominant period (sec)	Vs30 (m/sec)	ประเภทดิน (มยผ. 1302)
N100	โรงเรียนไทยรัฐ	0.33	255	D
N101	โรงเรียนห้วยป่าซาง	0.64	271	D
N102	โรงเรียนบ้านทุ่งโป่ง	No peak	426	C
N103	โรงเรียนบ้านยางเปา	0.16	390	C

ผลการศึกษาค่า T_p และ V_{S30} ถูกแสดงในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าตามพิกัดในแนวราบ ดังรูปที่ 4.48 และ รูปที่ 4.49 สำหรับแผนที่ค่า T_p และค่า V_{S30} ตามลำดับ จากผลค่า T_p สามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าคาบอิทธิพลหลักของชั้นดิน โดยพื้นที่ที่มีค่าคาบสั้นคือ บริเวณที่เป็นชั้นดินแข็ง ซึ่งจากการตรวจวัดของพื้นที่ศึกษาพบว่าพื้นที่ที่มีค่า T_p สั้นที่สุด (ดินแข็ง) คือ อำเภอแมริม สันป่าตอง และดอยสะเก็ด โดยมีค่าต่ำสุดประมาณ 0.12 วินาที และพบว่าพื้นที่ที่มีค่า T_p สูงที่สุด (หรือดินอ่อน) คือ อำเภอเมืองเชียงใหม่ สารภี และอำเภอเมืองลำพูน โดยมีค่าประมาณ 0.65-0.70 วินาที และจากผลการวิเคราะห์ค่า V_{S30} สามารถแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า V_{S30} ตามลักษณะของชั้นดิน โดยชั้นดินแข็งมีค่า V_{S30} มากกว่าชั้นดินอ่อน ซึ่งผลการศึกษาพบว่า บริเวณที่มี V_{S30} สูงสุดคือที่อำเภอดอยสะเก็ด มีค่าเท่ากับ 562 เมตรต่อวินาที และบริเวณที่มี V_{S30} ต่ำสุดคือที่อำเภอเมืองเชียงใหม่ สารภี และอำเภอเมืองลำพูน โดยมีค่าประมาณ 230-240 เมตรต่อวินาที แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงลักษณะชั้นดินคือ พบบริเวณที่มีดินอ่อนในบริเวณส่วนกลางของพื้นที่ศึกษาซึ่งเป็นที่ราบตามแนวแม่น้ำปิง โดยสามารถจำแนกเป็นชั้นดินประเภท D ตามมาตรฐาน มยผ.1302 ส่วนบริเวณดินแข็งคือพื้นที่ใกล้เชิงเขา เช่นทิศเหนือและทิศตะวันตกของพื้นที่ศึกษาซึ่งจำแนกเป็นชั้นดินประเภท C ตามมาตรฐาน มยผ.1302

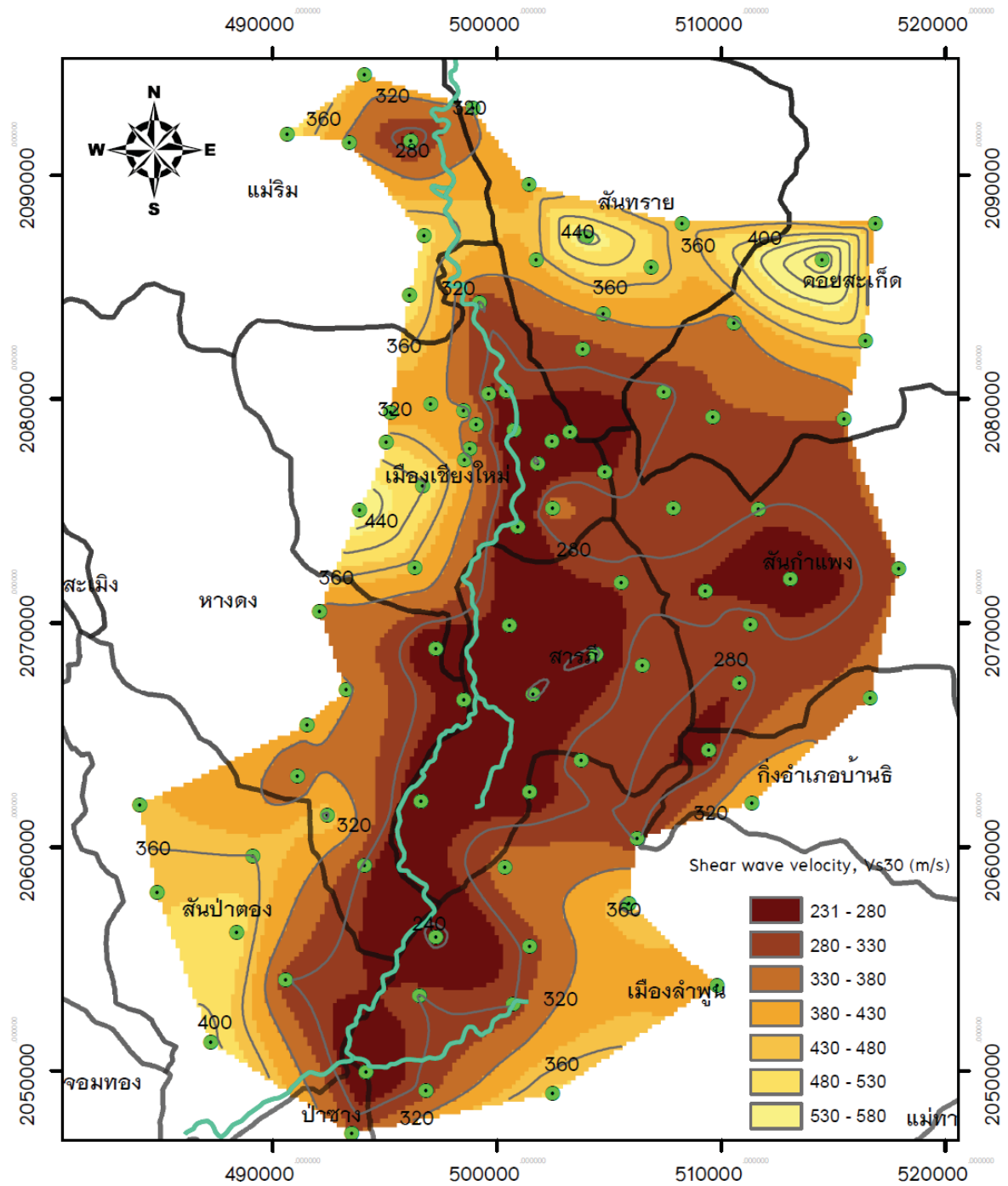
จากผลการวิเคราะห์ค่า V_{S30} ของพื้นที่ศึกษา ทำให้สามารถจำแนกประเภทของชั้นดินตามข้อกำหนดของมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1302) ออกเป็น 2 ประเภท คือ ชั้นดินประเภท D ซึ่งมีค่า V_{S30} ตั้งแต่ 180-360 เมตรต่อวินาที และชั้นดินประเภท C ซึ่งมีค่า V_{S30} ตั้งแต่ 360-750 เมตรต่อวินาที ซึ่งบริเวณที่ใกล้กับแม่น้ำปิงสามารถจำแนกเป็นชั้นดินประเภท D แล้วจึงเปลี่ยนแปลงลักษณะของชั้นดินไปเป็นชั้นดินประเภท C เมื่อพื้นที่เริ่มห่างจากแม่น้ำปิงเข้าสู่พื้นที่ที่เป็นเนินเขา ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางภูมิประเทศของจังหวัดเชียงใหม่

อย่างไรก็ตามจากผลในรูปที่ 4.48 และ 4.49 พบว่าค่า T_p มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกับผลการวิเคราะห์ค่า V_{S30} บ้างในบางส่วนเมื่อพิจารณาจากแผนที่แสดงค่า T_p ในรูปที่ 4.48 ซึ่งแสดงให้เห็นการกระจายตัวของชั้นดินอ่อนบริเวณทิศตะวันตกของพื้นที่ศึกษา แต่บริเวณแม่น้ำปิงแสดงให้เห็นถึงชั้นดินแข็งเป็นส่วนใหญ่ แตกต่างจากแผนที่แสดงค่า V_{S30} ที่แสดงว่าบริเวณพื้นที่ข้างแม่น้ำปิงมีลักษณะของดินอ่อนจากค่า V_{S30} ที่ต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ข้อแตกต่างนี้

ผู้วิจัยสันนิษฐานว่าเกิดจากระหว่างการตรวจวัดค่า T_p ซึ่งเป็นการวัดเพียงตำแหน่งเดียวนั้นอาจเกิดการรบกวนจากกิจกรรมที่กระทำโดยมนุษย์อย่างมาก แต่การตรวจวัด V_{S30} แบบหลายจุดพร้อมกันทำให้ลดผลรบกวนเหล่านี้ได้ดีกว่า จึงทำให้ผลของ V_{S30} มีความสอดคล้องกับลักษณะการแปรเปลี่ยนสภาพทางธรณีเทคนิคมากกว่า



รูปที่ 4.48 แผนที่ค่าคาบอิทธิพลหลักในบริเวณที่ศึกษาของจังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง



รูปที่ 4.49 แผนที่ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ความลึก 30 เมตร
ในบริเวณที่ศึกษาของจังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง

ข. ผลการศึกษาในพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง

ผลการศึกษาประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ (1) ผลการศึกษาจากการตรวจวัดโครงข่ายขนาดเล็ก ที่มีจุดประสงค์เพื่อสำรวจคุณสมบัติของชั้นดินคือ T_p และ V_{s30} (2) ผลการศึกษาจากการตรวจวัดโครงข่ายขนาดใหญ่ ที่มีจุดประสงค์เพื่อสำรวจความลึกถึงระดับชั้นหิน โดยมีผลของแต่ละส่วนดังนี้

(1) ผลการศึกษาจากการตรวจวัดโครงข่ายขนาดเล็ก โดยแสดงค่า T_p และ V_{s30} ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าคาบอิทธิพลหลักและความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 ม. แรกสำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง

Site	Location	Predominant period (sec)	Vs30 (m/sec)	ประเภทดิน (NERHP 2003)
C01	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	0.73	125	E
C02	กรมอุตุนิยมวิทยา	0.68	123	E
C03	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	0.73	144	E
C04	ใกล้ทางพิเศษรามอินทรา-อจณรงค์	0.79	127	E
C05	สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	0.85	97	E
C06	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.64	133	E
C07	ถัดไปทางตะวันออกของวัดสัมมาชัญญาวาส	0.79	127	E
C08	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	0.73	118	E
C09	วิทยาลัยเทคนิคดอนเมือง	0.73	140	E
C10	โรงเรียนวัดหนองไม้แก่น	No peak	362	C
C11	ลานหิน หมู่ 1	No peak	305	D
C12	วัดหนองลานราษฎร์บำรุง	0.33	330	D
C13	โรงเรียนอนุบาลบ่อพลอย	No peak	n/a	n/a
C14	วัดสันติคีรี	No peak	n/a	n/a
C15	วัดตรงข้ามโรงเรียนบ้านหนองโพธิ์	No peak	n/a	n/a
C16	วัดหนองปลิว	0.22	n/a	n/a
C17	ลานกว้างตรงข้ามวัดสระลงเรือ	No peak	n/a	n/a
C18	วัดนาใหม่	No peak	n/a	n/a
C19	วัดพันเทา	No peak	386	C
C20	โรงเรียนหนองขาวโกวิทพิทยาคม	0.3	n/a	n/a
C21	องค์การบริหารส่วนตำบลพนมทวน	No peak	556	C
C22	โรงเรียนวัดม่วงชุม	0.47	294	D

Site	Location	Predominant period (sec)	Vs30 (m/sec)	ประเภทดิน (NERHP 2003)
C23	สนามกีฬาพลับบัว	0.33	332	D
C24	เทศบาลตำบลปากแพรก	0.12	n/a	n/a
C25	วัดดอนสามง่าม	0.2	265	D
C26	โรงเรียนบ้านหนองมกคล	No peak	n/a	n/a
C27	วัดเขาช่อง	0.39	360	D
C28	โรงเรียนวัดวังศาลา	0.57	329	D
C29	โรงเรียนอาทรสังฆะวัฒนะ 3	No peak	n/a	n/a
C30	โรงเรียนวัดเขาพุประดู่	No peak	n/a	n/a
C31	โรงเรียนบ้านวังตะเคียน	No peak	n/a	n/a
C32	เทศบาลตำบลคลองมะขามเตี้ย	0.1	n/a	n/a
C33	วัดขุนไทยธาราม	0.16	629	C
C34	โรงเรียนบ้านแก่งหลวง	No peak	n/a	n/a
C35	ลานหินคลุกติดถนนบางนา-ชลบุรี	0.79	112	E
C36	โรงเรียนวัดพนมพนาवास	0.47	166	E
C37	ลานกีฬาเอนกประสงค์	0.73	112	E
C38	โรงเรียนก้อนแก้ววิทยาคม	0.54	153	E
C39	ลานดินถม ถนนไปบางน้ำเปรี้ยว	0.79	107	E
C40	โรงเรียนปากคลองบางขนาก	0.85	117	E
C41	โรงเรียนหมอนทองวิทยา	0.73	115	E
C42	โรงเรียนวัดบึงน้ำรักษ์	0.73	106	E
C43	วัดโพธิ์แสงกาญจนาราษฎร์	0.6	141	E
C44	วัดญาณรังษาราม	0.79	119	E
C45	สนามกีฬา อบต.	0.31	355	D
C46	สนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติ ร.9	0.38	299	D
C47	ลานหินคลุกติดถนนเลี่ยงเมืองชลบุรี	0.2	558	C
C48	วัดเข้มทอง	0.68	169	E
C49	ลานโล่งใกล้โรงเรียนอัลฟาติฮะห์คู่คุดที่ 2	0.85	101	E
C50	โรงเรียนวัดศรีจุฬา	0.57	196	D
C51	ลานตลาดนัด หน้าธนาคารกสิกรไทย	0.68	132	E
C52	วัดตะเคียนทอง	0.33	268	D
C53	ลานโล่งข้างศาลากลางนครนายก	0.51	176	E
C54	วัดกลางคลอง 30	0.37	209	D
C55	โรงเรียนบ้านดงวิทยาคาร	0.23	409	C
C56	ตำบลศรีกะอาง	0.13	n/a	n/a

Site	Location	Predominant period (sec)	Vs30 (m/sec)	ประเภทดิน (NERHP 2003)
C57	วัดท่าทราย	0.18	336	D
C58	โรงเรียนวัดหนองรี	0.54	262	D
C59	โรงเรียนคลอง3วิทยา	0.39	209	D
C60	องค์การบริหารส่วนตำบลบึงศาล	0.57	127	E
C61	ดอนยายหอม	0.54	179	E
C62	โรงเรียนเพิ่มวิทยา	0.51	163	E
C63	มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา	0.64	162	E
C64	เลียบคลองประปา บางแค	0.47	219	D
C65	วัดมะเกลือ	0.64	136	E
C66	โรงเรียนวัดลำลูกบัว	0.41	208	D
C67	ลำพญา บางเลน นครปฐม	0.68	167	E
C68	วัดลัฏฐิวนาราม	0.64	175	E
C69	วัดเกษตรราชม	0.49	191	D
C70	วัดลานแหลม	0.41	199	D
C71	โรงเรียนวัดศรีวิสารวาจา	0.47	208	D
C72	วัดบางไผ่นารถ	0.68	198	D
C73	วัดบัวหวั่น	0.68	135	E
C74	วัดลานตากฟ้า	0.73	184	D
C75	กศน.นครปฐม	0.57	224	D
C76	วัดหลักบาง	0.49	172	E
C77	ต.คลองข่อย อ.ปากเกร็ด	0.68	159	E
C78	วัดราษฎร์บำรุง	0.68	207	D
C79	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	0.6	149	E
C80	ริมคลองหลังโรงเรียนพระสุทิววงศ์	0.79	121	E
C81	วัดเจติยหอย จ.ปทุมธานี	0.51	166	E
C82	AIT	0.68	144	E
C83	โรงเรียนมัธยมหัตถสารเกษตร	0.57	162	E
C84	โรงเรียนหนองเสือวิทยาคม	0.57	153	E
C85	ทุ่งนาโล่ง ซอยวัดบางหลวง	0.57	174	E
C86	โรงเรียนวัดหน้าไม้	0.85	108	E
C87	สถาบันพัฒนาบุคลากรท้องถิ่น	0.68	132	E
C88	โรงเรียนวัดกระทุ่มแพ้ว	0.68	130	E
C89	โรงเรียนวัดหัวกรด	0.51	228	D
C90	วัดคลองหอยทอง	0.85	122	E

Site	Location	Predominant period (sec)	Vs30 (m/sec)	ประเภทดิน (NERHP 2003)
C91	โรงเรียนบ้านบางขาม	0.57	175	E
C92	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	0.26	386	C
C93	โรงเรียนบ้านคลองสารภี	0.57	210	D
C94	ลานกว้างติดถนนพหลโยธิน	0.73	189	D
C95	ศูนย์ศิลปาชีพเกาะเกิด	0.6	146	E
C96	วัดคู่สลอดวุฒิโสภณ	0.47	154	E
C97	วัดโพธิ์	0.68	181	D
C98	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	0.93	204	D
C99	ลานดินข้างวัดนางชี	0.73	232	D
C100	วัดเขาดิน	0.68	201	D
C101	วัดเวฬุวัน	0.64	216	D
C102	โรงเรียนไตรราชวิทยา	0.51	219	D
C103	โรงเรียนวัดท่ายาง	No peak	n/a	n/a
C104	ตำบลทุ่งหลวง	No peak	n/a	n/a
C105	โรงเรียนบ้านเขาอีसान	0.32	340	D
C106	โรงเรียนวัดน้ำพุ	No peak	n/a	n/a
C107	ลานหินคลุกตลาดนัดคลองเล็ก	0.33	357	D
C108	เรือนไทยริสอร์ท	0.54	225	D
C109	โรงเรียนวัดโสดาประดิษฐาราม	0.3	538	C
C110	วัดโคกบำรุงราษฎร์	0.3	225	D
C111	วัดสระสัสมุม	0.28	472	C
C112	สนามกีฬาบ้านโป่ง	No peak	277	D
C113	โรงเรียนรับใหญ่ว่องกุศลกิจพิทยาคม	0.6	297	D
C114	วัดหนองปลาหมอ	0.6	347	D
C115	โรงเรียนวัดลำน้ำ	0.39	173	E
C116	โรงเรียนราษฎร์ศรัทธาธรรม	0.54	245	D
C117	บริษัทอาร์ทีดีอุตสาหกรรมสิ่งทอจำกัด	0.33	225	D
C118	ลานโล่งใกล้ศาลเยาวชนและครอบครัว	0.11	n/a	n/a
C119	วัดหนองตาเน็ด	No peak	n/a	n/a
C120	โรงเรียนวัดเขาชะงุ้ม	0.16	n/a	n/a
C121	วัดหัวโพธิ์	0.64	198	D
C122	โรงเรียนป้อมพระจุลจอม	0.73	135	E
C123	โรงเรียนหลวงพ่อบ้านคลองด่าน	1.02	73	E
C124	โรงเรียนเคทีที	0.93	100	E

Site	Location	Predominant period (sec)	Vs30 (m/sec)	ประเภทดิน (NERHP 2003)
C125	วัดโคกเกตุบุญญศิริ	0.6	152	E
C126	ใกล้รางรถไฟ บางน้ำจืด (โรงเรียนบางน้ำจืด)	0.79	146	E
C127	โรงเรียนวัดหนองชุมพล	0.45	361	C
C128	ลานโล่ง	0.79	106	E
C129	วัดสหมิตรมงคล	0.57	251	D
C130	ลานโล่งข้างโรงเรียนบำรุงปัญญา	0.54	296	D
C131	โรงเรียนวัดทับกระดาน	No peak	253	D
C132	วัดสำเภาทอง	0.73	177	E
C133	โรงเรียนวัดโคกโพธิ์	0.57	210	D
C134	วัดไผ่ม่วง	No peak	221	D
C135	ลานดินถม	No peak	342	D
C136	โรงเรียนบ้านดอนโพธิ์	0.79	303	D
C137	วัดจระเข้ใหญ่	0.49	211	D
C138	วัดสองเขต	No peak	n/a	n/a
C139	วัดสามัคคีธรรม	0.64	204	D
C140	หน้าอาคารเรือนอนุสรณ์ โรงเรียนวัดกระแซง	0.54	170	E
C141	วัดธรรมจริยา	0.79	214	D
C142	วัดมฤคทายวัน	0.73	119	E
C143	วัดคลองตัน	0.47	178	E
C144	วัดไผ่ล้อม	0.68	175	E
C145	วัดตาลานเหนือ	0.47	235	D
C146	วัดพระแก้ว	0.73	227	D
C147	โรงเรียนท่าช้างวิทยาคม	0.93	207	D
C148	วัดใหม่หญ้าไทร	0.68	196	D
C149	โรงเรียนวัดทางหลวง	0.29	191	D

การตรวจวัดคลื่นขนาดเล็บบนผิวดินเพื่อประเมินหาค่าคาบอิทธิพลหลัก พื้นที่ศึกษาครอบคลุมที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง 14 จังหวัด ผลที่ได้มีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.2-1.14 วินาที บริเวณที่มีค่าคาบยาวที่สุดอยู่บริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของพื้นที่ศึกษาในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการใกล้อ่าวไทย ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.8-1.14 วินาที ในขณะที่บริเวณพื้นที่กรุงเทพฯ มีค่าอยู่ในช่วง 0.7-0.8 วินาที และมีแนวโน้มลดลงตามระยะห่างจากบริเวณอ่าวไทย จนกระทั่งมีค่าต่ำกว่า 0.5 วินาที บริเวณขอบพื้นที่ศึกษาในจังหวัด ราชบุรี นครปฐม อโยธยา และ

นครนายก ค่าคาบอิทธิพลหลักของบริเวณศึกษามีค่าแตกต่างกันไปตามพื้นที่สำรวจ และสามารถจำแนกเป็น 5 กลุ่มย่อยตามค่าคาบที่ใกล้เคียงกัน ดังนี้คือ

กลุ่มที่ 1 – ค่าคาบอิทธิพลหลักน้อยกว่า 0.5 วินาที

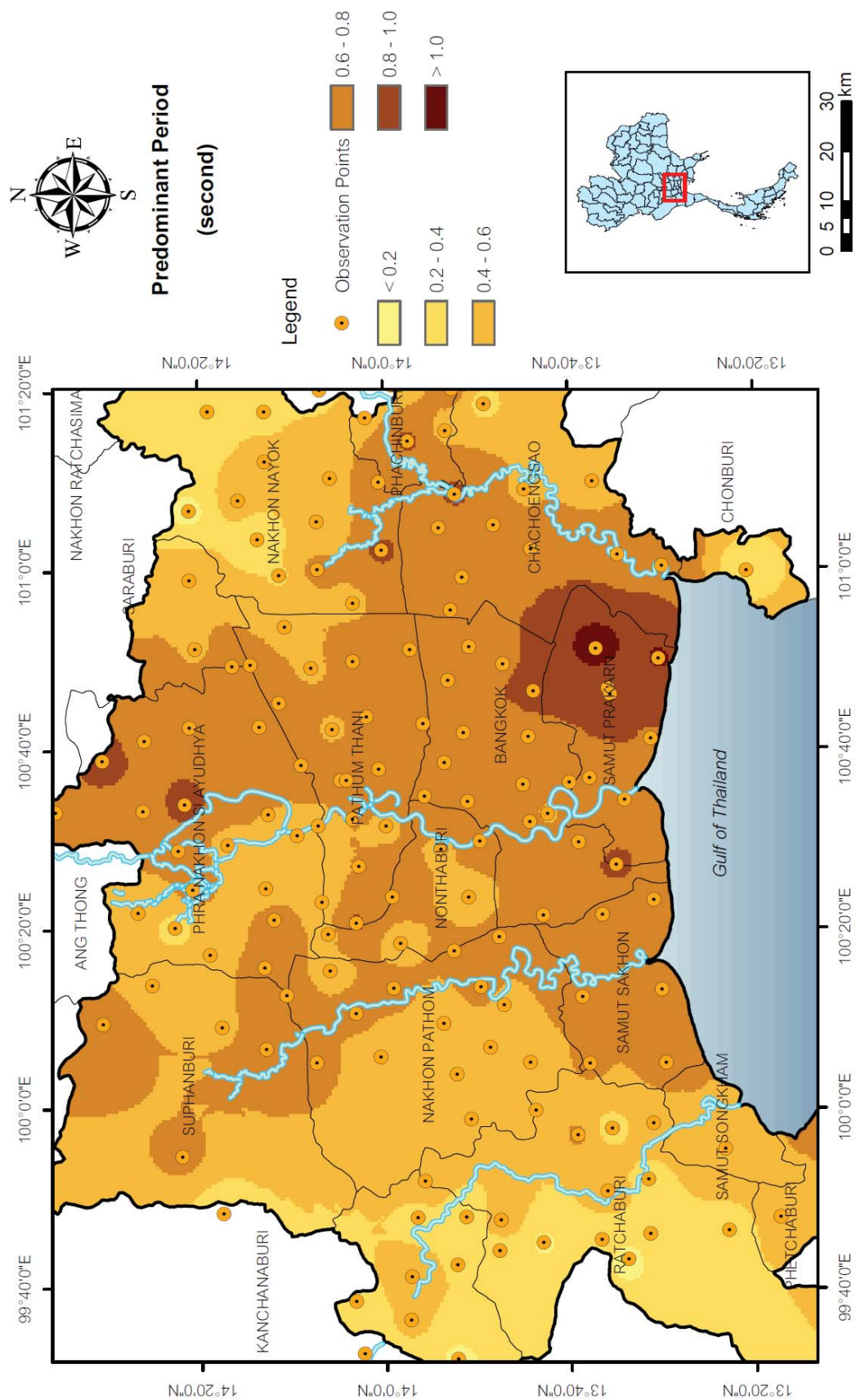
กลุ่มที่ 2 – ค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.5-0.6 วินาที

กลุ่มที่ 3 – ค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.6-0.7 วินาที

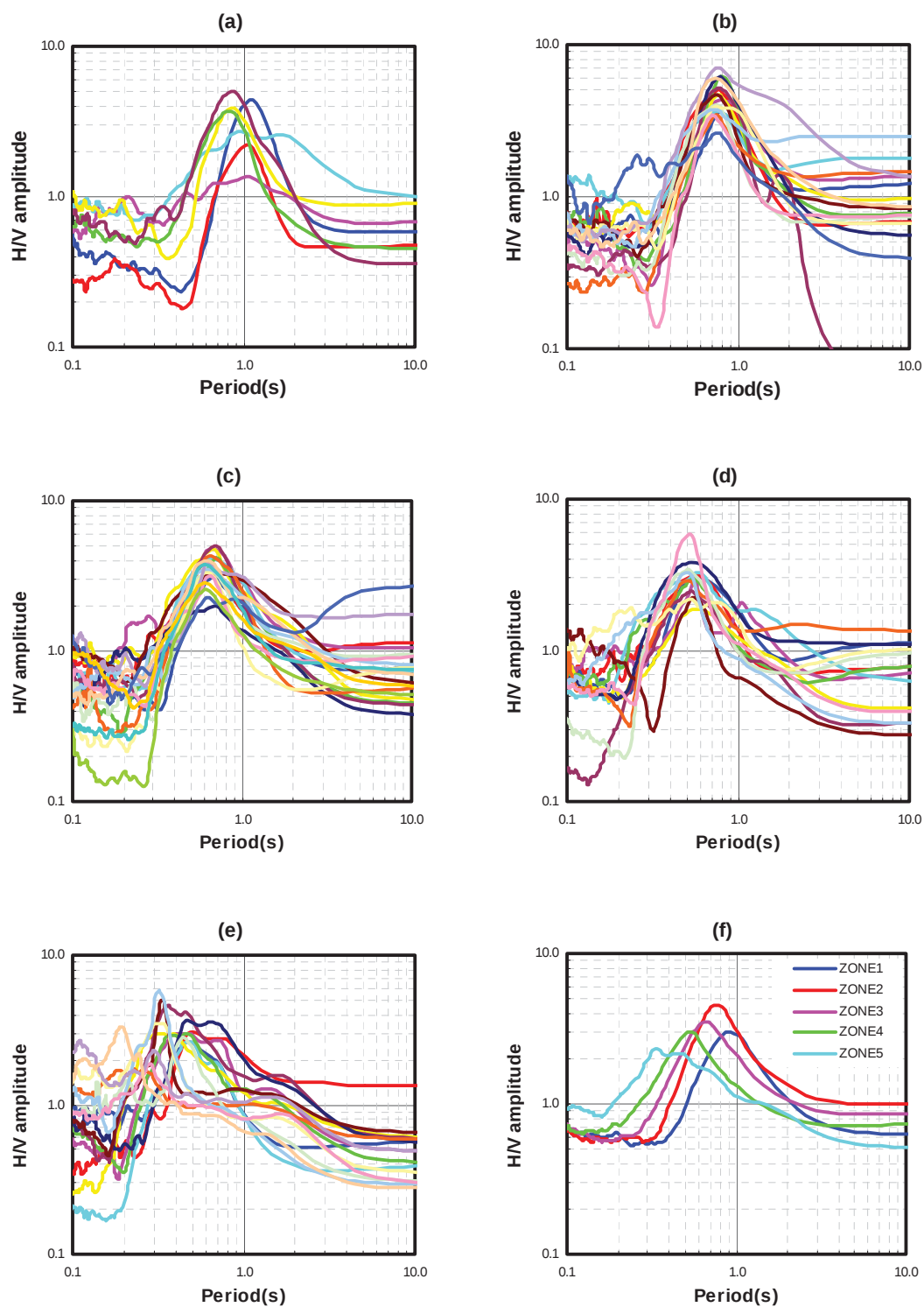
กลุ่มที่ 4 – ค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.7-0.8 วินาที

กลุ่มที่ 5 – ค่าคาบอิทธิพลหลักมากกว่า 0.8 วินาที

จากการจำแนกเป็น 5 กลุ่มย่อย สามารถแสดงผลในรูปแบบแผนที่ดังในรูปที่ 4.50 และกราฟ H/V spectrum ratio ทุกจุดสำรวจซึ่งจำแนกตามกลุ่ม และกราฟค่าเฉลี่ย H/V spectrum ratio (ในรูป f) ซึ่งเป็นตัวแทนของแต่ละกลุ่ม แสดงไว้ในรูปที่ 4.51



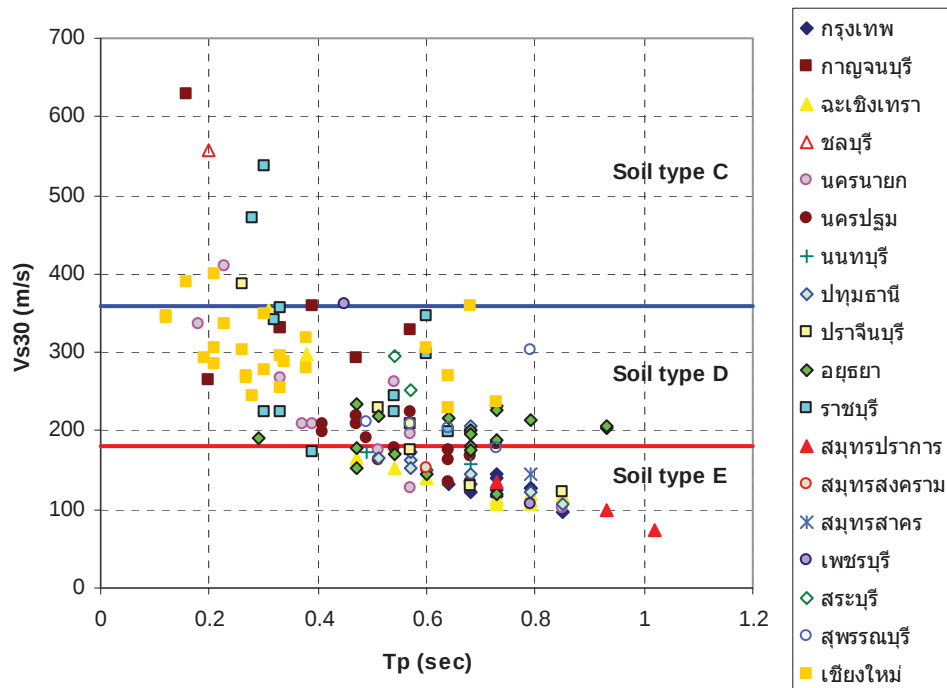
รูปที่ 4.50 แผนที่ค่าคาบอิทธิพลหลักในบริเวณที่ศึกษาของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล



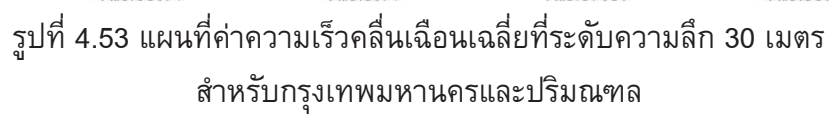
รูปที่ 4.51 กราฟ H/V spectrum ratio สำหรับกลุ่มต่าง ๆ (a) กลุ่มที่ 1, (b) กลุ่มที่ 2, (c) กลุ่มที่ 3, (d) กลุ่มที่ 4, (e) กลุ่มที่ 5 และ (f) ค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่ม

ผลการศึกษาหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการสำรวจทั้งสิ้น 75 บริเวณ แสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ยตามความลึก 30 เมตร ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.15 และนำเสนอในรูปแบบแผนที่ดังรูปที่ 4.53 ผลที่ได้จาก V_{S30} สามารถใช้จำแนกประเภทของดินได้อย่างชัดเจน โดยค่า V_{S30} ที่พบมีค่าอยู่ในช่วง 70-560 เมตร/วินาที ซึ่งเกณฑ์ตาม มยพ. 1302 ได้กำหนดให้ บริเวณที่มี V_{S30} ต่ำกว่า 180 เมตร/วินาที เป็นดินประเภท E (ดินอ่อน) V_{S30} ที่มีค่าระหว่าง 180 ถึง 360 เมตร/วินาที เป็นดินประเภท D (ดินปกติ) และ V_{S30} ที่มีค่าระหว่าง 360 ถึง 750 เมตร/วินาที เป็นดินประเภท C (ดินแข็ง) และมีข้อกำหนดในการคำนวณแรงจากแผ่นดินไหวที่แตกต่างกันสำหรับชั้นดินลักษณะต่าง ๆ ส่วนค่า T_p มีค่าอยู่ในช่วง 0.2-1.1 วินาที บริเวณที่มีค่า V_{S30} ต่ำที่สุดหรือค่า T_p ยาวที่สุดคือ บริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของพื้นที่ศึกษา ในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการใกล้อ่าวไทย ซึ่งมีดินชั้นแรกประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาที่สุด พื้นที่โดยทั่วไปบริเวณตามแนวปากอ่าวไทยมีแนวโน้มของค่า V_{S30} ต่ำ และค่า T_p ยาว บริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษาพบว่า V_{S30} มีค่าเพิ่มขึ้นและค่า T_p มีค่าลดลงตามสภาพความแข็งของดินเนื่องจากความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนน้อยกว่าบริเวณใกล้อ่าวไทย ซึ่งบริเวณที่กล่าวมานี้ จำแนกได้เป็นชั้นดินประเภท E ส่วนบริเวณตะวันตกของพื้นที่ศึกษา คือจังหวัดราชบุรี เพชรบุรี และบริเวณตะวันออก คือจังหวัด ชลบุรี ปราจีนบุรีและนครนายก มีค่า V_{S30} สูงที่สุด จำแนกเป็นชั้นดินประเภท C และค่า T_p สั้นที่สุด แสดงถึงลักษณะของชั้นดินแข็ง ซึ่งความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าน้อยที่สุด

เมื่อนำค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตรจากผิวดินกับค่าคาบอิทธิพลหลักมาเปรียบเทียบกับเพื่อใช้แบ่งประเภทชั้นดินตามมาตรฐาน พบว่า พื้นที่ที่จัดอยู่ในกลุ่มดินประเภท E ซึ่งมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตรจากผิวดินต่ำกว่า 180 เมตรต่อวินาที ประกอบด้วย จังหวัดกรุงเทพมหานคร จังหวัดสมุทรปราการ จังหวัดนนทบุรี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จังหวัดปทุมธานี และจังหวัดฉะเชิงเทรา สำหรับพื้นที่ที่จัดอยู่ในกลุ่มดินประเภท D ซึ่งมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตรจากผิวดินอยู่ในช่วง 180-360 เมตรต่อวินาที ประกอบด้วย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จังหวัดสุพรรณบุรี จังหวัดราชบุรี จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดนครนายก จังหวัดฉะเชิงเทรา และจังหวัดนครปฐม ส่วนพื้นที่บางส่วนของจังหวัดกาญจนบุรี และปราจีนบุรี มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตรจากผิวดินมากกว่า 360 เมตรต่อวินาที จัดอยู่ในกลุ่มดินประเภท C ดังรูปที่ 4.52



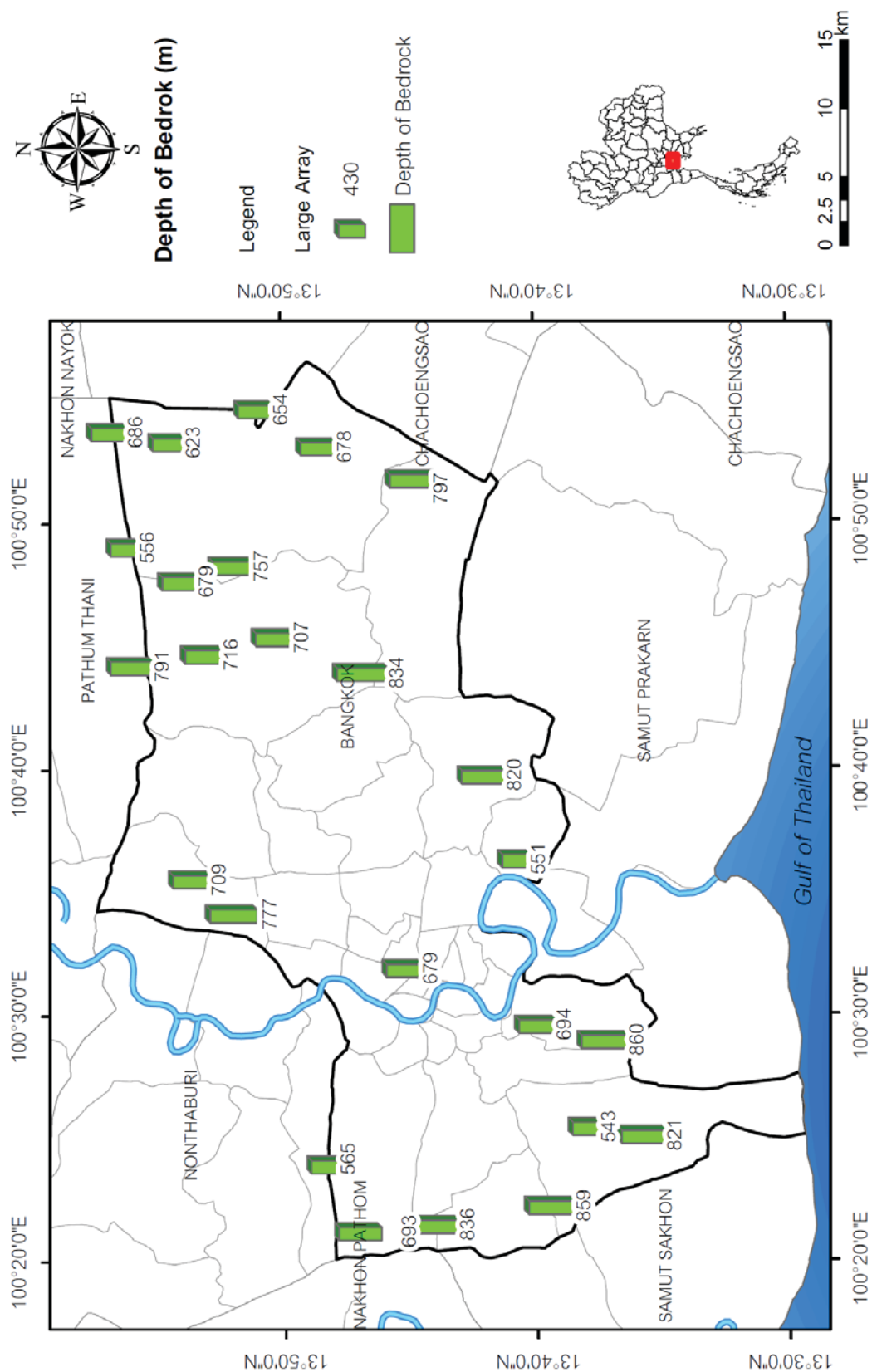
รูปที่ 4.52 ค่า V_{s30} และ T_p สำหรับพื้นที่สำรวจในจังหวัดต่าง ๆ



(2) ผลการศึกษาจากการตรวจวัดโครงข่ายขนาดใหญ่ โดยแสดงค่า T_p , V_{S30} และความลึกถึงชั้นหินดังตารางที่ 4.16 โดยพบว่าค่า T_p มีค่าตั้งแต่ 0.6 ถึง 1.1 วินาที และ V_{S30} มีค่าอยู่ในช่วง 100 ถึง 170 เมตรต่อวินาที ในส่วนความลึกที่ชั้นหินพบว่ามีค่าในช่วง 550 ถึง 850 เมตร โดยค่าความลึกของชั้นหินของแต่ละตำแหน่งแสดงในรูปของแผนที่ได้ดังรูปที่ 4.54

ตารางที่ 4.16 ค่าคาบอิทธิพลหลัก ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 ม. แรก และความลึกถึงชั้นหินสำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานคร

Site	Location	Depth (m)	VS30	TP
B01	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	777	138	0.64
B02	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร	709	158	1.02
B03	โรงเรียนวัดทรัพย์สโมสร	757	138	0.82
B04	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	679	137	0.76
B05	หมู่บ้านปัญญาเลิศโฮม	716	162	0.79
B06	สวนเฉลิมพระเกียรติ 60 พรรษามหาราชนิ	834	124	0.71
B07	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	694	130	0.93
B08	หมู่บ้านคุณาลัย	821	143	0.59
B09	หมู่บ้านกรีนวิลล์	565	165	0.79
B10	แปลงปลูกหญ้า	791	155	0.79
B11	กรมอุตุนิยมวิทยา	551	142	0.76
B12	ถนนคลอง 13	686	128	0.68
B13	หมู่บ้านซอยลาดกระบัง	797	125	0.93
B14	หมู่บ้านแสงตะวัน	859	126	0.71
B15	ราษฎร์อุทิศ 17	707	130	0.73
B16	สวนหลวง ร.9	820	147	0.68
B17	ตำบลลำต้อยติ่ง	678	106	0.98
B18	มัสยิดอัสเตฮีด	556	135	0.71
B19	ดินถมขนาดใหญ่	543	108	0.93
B20	ศูนย์พัฒนาสุขภาพชุมชนดารุลม่อน	654	102	0.98
B21	บ่อดิน	679	137	0.82
B22	วัดวงษ์ลาภาราม	836	154	0.68
B23	มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี	693	174	0.79
B24	วัดบัวผ้น	860	104	1.14
B25	คลอง 13 ฝั่งตะวันออก	623	126	0.68



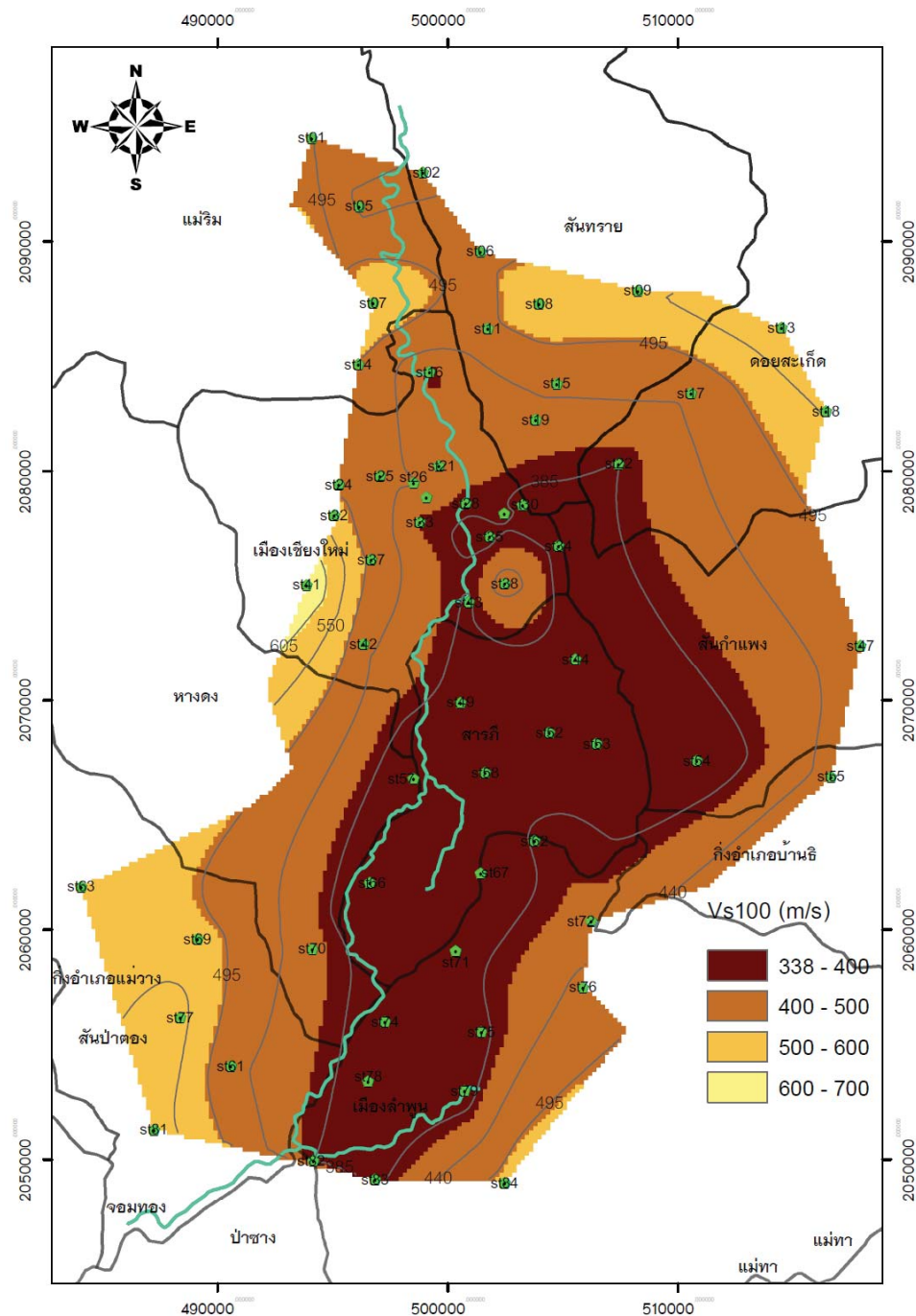
รูปที่ 4.54 แผนที่ระดับความลึกชั้นหินของตำแหน่งสำรวจในกรุงเทพมหานคร

4.14 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นผิวดิน (Ground Response Analysis)

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นผิวดิน หรือ การวิเคราะห์พฤติกรรมของชั้นดินด้านการขยายคลื่นแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นที่ตำแหน่งศึกษา สำหรับทั้งสองกลุ่มพื้นที่ศึกษา เริ่มต้นจากการจัดพื้นที่เป็นกลุ่มหรือ โซนย่อยที่มีลักษณะของคุณสมบัติบริเวณที่ตั้งคล้ายกัน และหาค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติที่เป็นตัวแทนของโซนย่อยเหล่านั้นเพื่อศึกษาคุณลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณโซนย่อย และสามารถจัดทำเป็นแผนที่ของการแบ่งเขตแผ่นดินไหวอย่างละเอียดด้วยคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งได้ ในการจัดกลุ่มบริเวณที่ศึกษาออกเป็นโซนย่อยตามคุณสมบัติบริเวณที่ตั้งของชั้นดินในการศึกษานี้ สามารถพิจารณาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจัดกลุ่มได้ 2 ชุดคือ ใช้คาบอิทธิพลหลัก และความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยตามความลึก ซึ่งความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกที่ได้จากการสำรวจนี้มีความน่าเชื่อถือสูงกว่าคาบอิทธิพลหลักเนื่องจากลักษณะการเก็บข้อมูลและทฤษฎีพื้นฐานของวิธี ดังนั้นการศึกษาขั้นต่อไปจึงใช้ค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือน และเนื่องจากการสำรวจสามารถได้ข้อมูลถึงระดับชั้นดินที่ลึกประมาณ 90 ถึง 100 เมตร จึงเลือกใช้ค่าเฉลี่ยถึงระดับความลึกที่สำรวจได้เป็นพารามิเตอร์ในการจัดกลุ่มพื้นที่ ผลการศึกษาของแต่ละกลุ่มพื้นที่ มีดังนี้

4.14.1 พื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดใกล้เคียง

ผลการศึกษาในเขตเมืองเชียงใหม่และใกล้เคียงที่ได้แสดงไว้ก่อนหน้านี้ในรูปของ T_p และ V_{S30} นั้น ในที่นี้ได้ทำการคำนวณความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยถึงระดับ 100 เมตร (V_{S100}) และสามารถแสดงเป็นแผนที่การเปลี่ยนแปลงค่าได้ดังรูปที่ 4.55 ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกับ V_{S30} ที่นำเสนอไปก่อนหน้านี้ นั่นคือ บริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษาจัดเป็นชั้นดินที่อ่อนที่สุดเนื่องจากมีค่า V_{S100} ต่ำที่สุดตามแนวของที่ราบข้างแม่น้ำปิง และพบชั้นดินแข็งจากที่มี V_{S100} สูงตามแนวของเชิงเขาบริเวณรอบนอก



รูปที่ 4.55 แผนที่ค่า V_{s100} ในเขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง

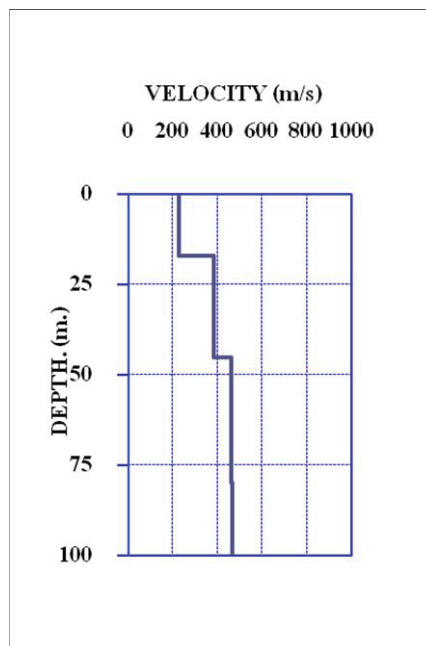
จากนั้นสามารถแบ่งโซนย่อยออกเป็น 3 โซนตามค่า V_{s100} ได้ดังนี้

โซนที่ 1 มีค่า V_{s100} ไม่เกิน 400 เมตรต่อวินาที

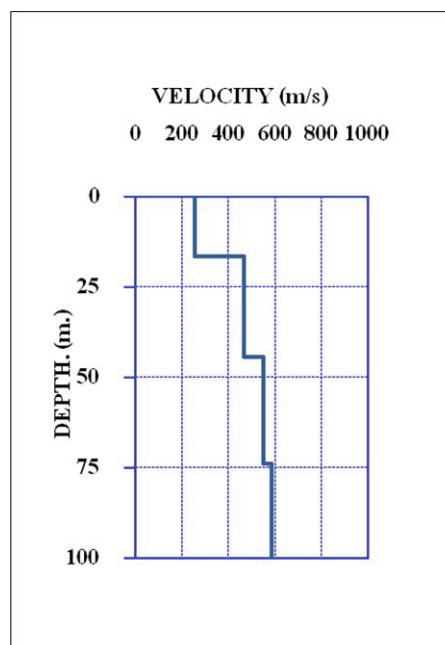
โซนที่ 2 มีค่า V_{s100} อยู่ในช่วง 400 ถึง 500 เมตรต่อวินาที

โซนที่ 3 มีค่า V_{s100} สูงกว่า 500 เมตรต่อวินาที

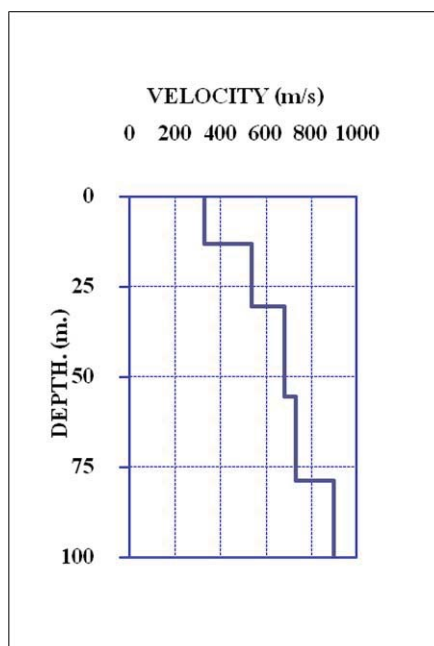
ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกที่เป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละตำแหน่งสำรวจในแต่ละโซนแสดงไว้ในรูปที่ 4.56 ถึง 4.58



รูปที่ 4.56 ค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของโซนที่ 1 (เชียงใหม่)

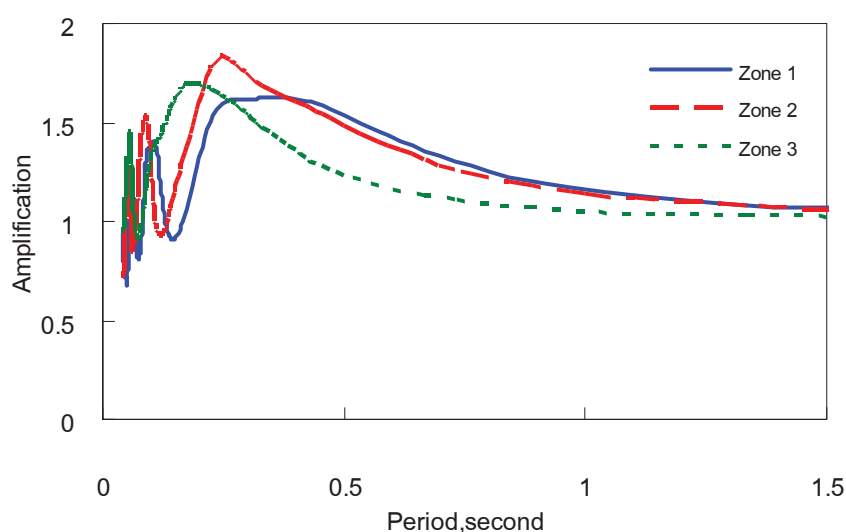


รูปที่ 4.57 ค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของโซนที่ 2 (เชียงใหม่)



รูปที่ 4.58 ค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของโซนที่ 3 (เชียงใหม่)

การประเมินพฤติกรรมด้านการขยายคลื่นแผ่นดินไหวสามารถพิจารณาได้จาก Transfer function ที่มีนิยามคืออัตราส่วนของแอมพลิจูดของผลตอบสนองที่ผิวดินต่อแอมพลิจูดของคลื่นแบบฮาร์โมนิกที่ป้อนเข้าไปที่ชั้นหินโผล่ (Rock outcrop) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของผลตอบสนองต่อคลื่นที่มีคาบของการสั่นต่าง ๆ เป็นลักษณะเฉพาะของชั้นดินและไม่ขึ้นอยู่กับรูปแบบแผ่นดินไหว การวิเคราะห์ทำการสร้างแบบจำลองชั้นดินในการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งผลของ Transfer function ที่ได้จากการวิเคราะห์ของแต่ละโซนในเขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียงแสดงดังรูปที่ 4.59



รูปที่ 4.59 Transfer function ของแต่ละโซนในเขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง

ผลที่ได้พบว่า กำลังขยายจาก Transfer function ที่เป็นพฤติกรรมที่ระดับความเครียดของชั้นดินต่ำ ในพื้นที่ศึกษานี้มีค่าสูงสุดประมาณ 1.6 ถึง 1.8 เท่า ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และสังเกตพบว่าค่าคาบการสั่นหลักมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยในโซนที่ 1 มีคาบการสั่นหลักที่ให้ค่ากำลังขยายสูงสุดเป็นช่วงตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.5 วินาที โซนที่ 2 มีคาบการสั่นหลักประมาณ 0.23 วินาที และ โซนที่ 3 มีคาบการสั่นหลักประมาณ 0.16 วินาที ซึ่งมีแนวโน้มคือสำหรับบริเวณที่เป็นดินแข็งมีค่าคาบอิทธิพลหลัก ที่สอดคล้องกับคาบการสั่นหลักที่ให้ค่ากำลังขยายสูงสุด มีค่าสั้นกว่าชั้นดินที่อ่อนกว่า รวมทั้งที่บริเวณชั้นดินอ่อนมีการขยายคลื่นที่คาบการสั่นเป็นช่วงกว้าง อย่างไรก็ตามโดยภาพรวมผลของการขยายคลื่นในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ไม่มีผลมากนักเนื่องจากดินค่อนข้างแข็ง

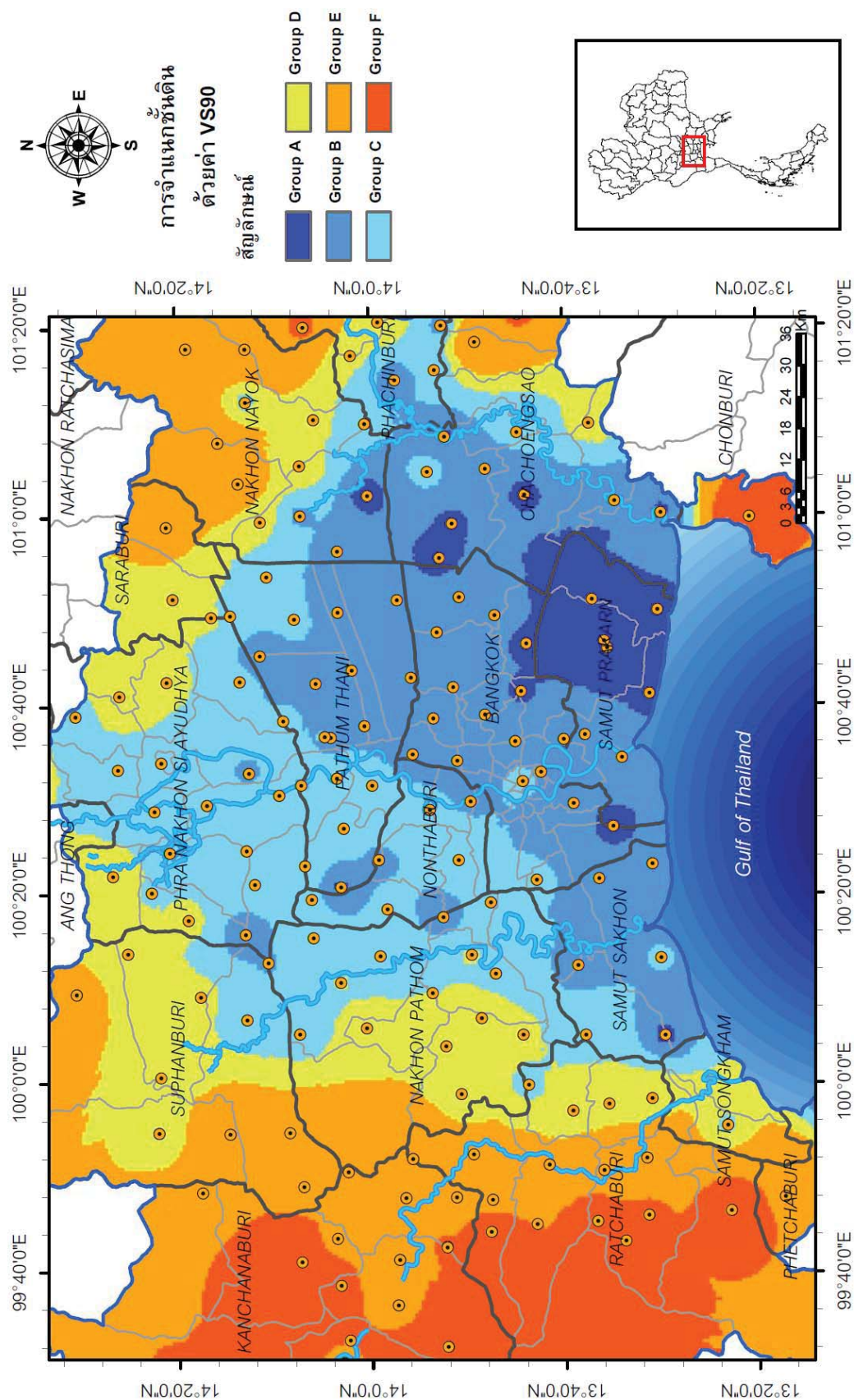
4.14.2 พื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียง

ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวนี้ ได้ทำการแบ่งกลุ่มพื้นที่ศึกษาออกเป็น 6 กลุ่ม สำหรับใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่างๆ ของชั้นดิน โดยใช้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 90 เมตรจากผิว (V_{S90}) เป็นคุณสมบัติหลักที่ใช้สำหรับการแบ่งกลุ่ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

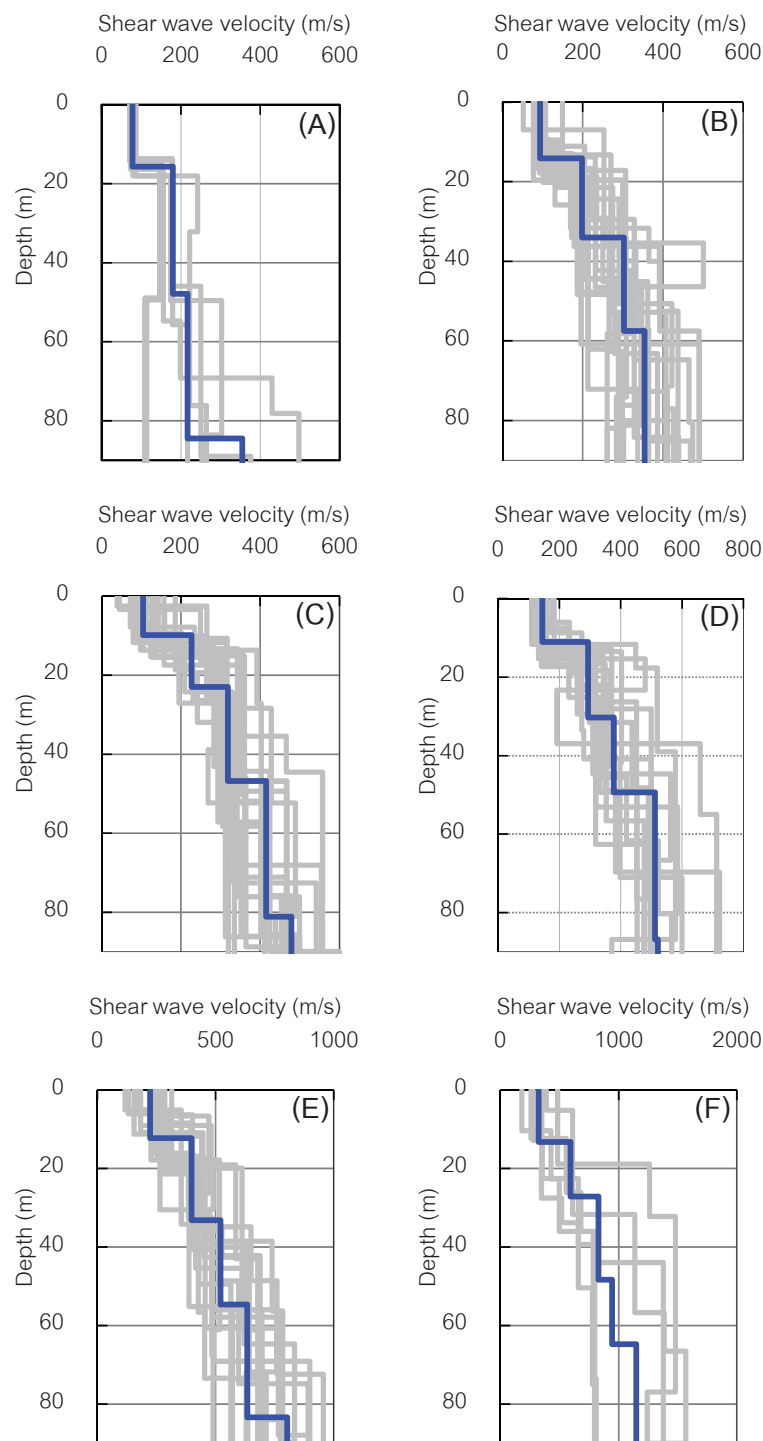
- กลุ่ม A : มีค่า V_{S90} น้อยกว่า 180 เมตรต่อวินาที
- กลุ่ม B : มีค่า V_{S90} อยู่ในช่วง 180 - 240 เมตรต่อวินาที
- กลุ่ม C : มีค่า V_{S90} อยู่ในช่วง 240 - 300 เมตรต่อวินาที
- กลุ่ม D : มีค่า V_{S90} อยู่ในช่วง 300 - 360 เมตรต่อวินาที
- กลุ่ม E : มีค่า V_{S90} อยู่ในช่วง 360 - 540 เมตรต่อวินาที
- กลุ่ม F : มีค่า V_{S90} มากกว่า 540 เมตรต่อวินาที

แผนที่ทั้ง 6 กลุ่มที่ใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่างๆของชั้นดินแสดงดังรูปที่

4.60 นอกจากนี้รูปที่ 4.61 แสดงถึงค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับความลึกถึง 90 เมตรจากผิวดินของกลุ่ม A-F



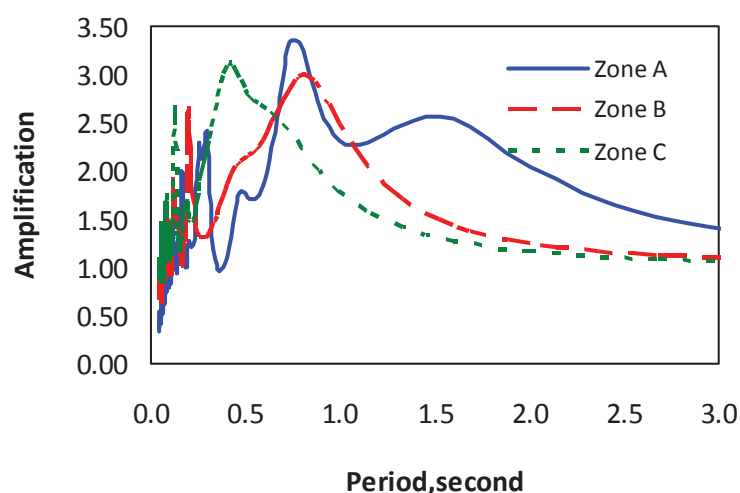
รูปที่ 4.60 แผนที่พื้นที่แบ่งกลุ่มตาม V_{s90} (กทม.)



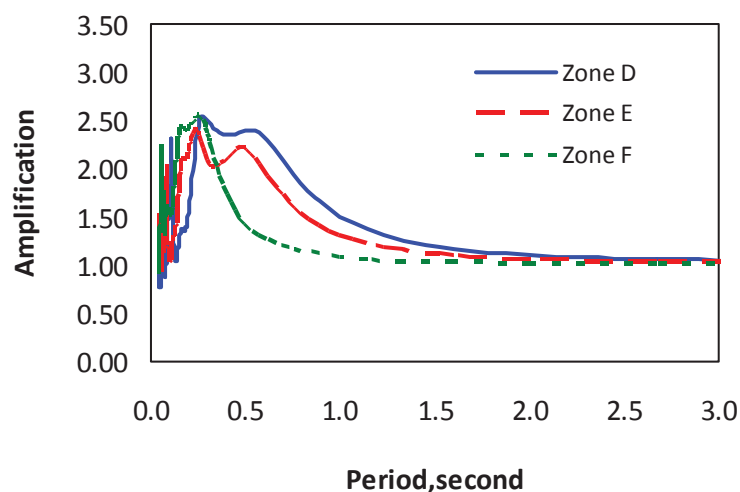
รูปที่ 4.61 ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกสำหรับ 6 กลุ่ม (กทม.)

ผลของ Transfer function ที่ได้จากการวิเคราะห์ของแต่ละโซนในเขต กทม. และจังหวัดใกล้เคียงแสดงดังรูปที่ 4.62 และ 4.63 ผลที่ได้พบว่า กำลังขยายจาก Transfer function ในพื้นที่ศึกษานี้มีค่าสูงสุดประมาณ 2.5 ถึง 3.3 เท่า โดยในโซน A มีคาบการสั่นหลักที่ให้ค่ากำลังขยาย

สูงสุดประมาณ 0.73 วินาทีและมีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 3.3 เท่าซึ่งสูงที่สุดในพื้นที่ศึกษา นอกจากนั้นแล้วยังพบว่ามีกำลังขยายค่อนข้างสูงในช่วงคาบการสั่นยาว โดยมียอดที่ประมาณ 1.5 วินาที และกำลังขยายมากถึงคาบการสั่นยาวประมาณ 3 วินาทีหรือมากกว่า ผลของกำลังขยายคลื่นในช่วงยาวเช่นนี้มีความสำคัญเนื่องจากการสั่นสะเทือนของพื้นดินที่มีคาบการสั่นยาวจะส่งผลกระทบต่ออาคารสูงที่มีคาบธรรมชาติของอาคารใกล้เคียงกับคาบการสั่นของพื้นด้วยหลักของการสั่นพ้อง ในโซน B พบคาบการสั่นหลักที่ประมาณ 0.8 วินาทีที่มีกำลังขยายประมาณ 3 เท่า และกำลังขยายในช่วงคาบการสั่นยาวมีค่าลดลงกว่าโซน A ทั้งนี้เป็นผลมาจากชั้นดินที่แข็งกว่าตามความเร็วคลื่นเฉือนที่สูงขึ้น โดยแนวโน้มของ Transfer function สำหรับโซนที่ดินแข็งขึ้น โซน C ถึง F มีลักษณะสอดคล้องกับคำอธิบายข้างต้น กล่าวคือกำลังขยายมีค่าลดลง คาบอิทธิพลหลักสั้นลง และผลการขยายคลื่นในช่วงคาบการสั่นยาวมีค่าลดลง ผลการขยายคลื่นมีค่าสูงกว่าในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่อย่างมีนัยสำคัญ และมีลักษณะที่ขยายคลื่นในช่วงคาบการสั่นยาวได้สูง ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ด้านพฤติกรรมการขยายคลื่นของชั้นดินอย่างละเอียดสำหรับพื้นที่นี้



รูปที่ 4.62 Transfer function ของโซน A, B, C ในเขต กทม. และใกล้เคียง



รูปที่ 4.63 Transfer function ของโซน D, E, F ในเขต กทม. และใกล้เคียง

4.15 การพัฒนาค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

จากการที่ในปัจจุบันได้มีการกำหนดค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวไว้ในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302) แต่ข้อมูลที่ได้ใช้ในการสร้างความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมดังกล่าวได้มาจากการประมาณคุณสมบัติด้านความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทางธรณีเทคนิคจากหลุมเจาะสำรวจสำหรับงานก่อสร้างกับความเร็วคลื่นเฉือน ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนสูง อีกทั้งหลุมเจาะส่วนใหญ่สำรวจเพียงระดับไม่ลึกมาก (ไม่เกิน 30 เมตร) ทำให้ผลการวิเคราะห์มีโอกาสที่จะได้ค่าที่ผิดไปจากค่าที่แท้จริงได้ จากงานวิจัยนี้ที่ได้มีข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนจำนวนมาก จึงได้ดำเนินการศึกษาเพื่อกำหนดค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว โดยยึดหลักแนวทางเดียวกับการพัฒนาในมาตรฐาน มยผ. 1302 โดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินจากงานวิจัยนี้ โดยมีขั้นตอนการศึกษาคือ

- 1) ทำการจัดกลุ่มพื้นที่ย่อยที่มีลักษณะการขยายคลื่นคล้ายกัน โดยเริ่มต้นจากพื้นที่ย่อยที่แบ่งไว้ 6 กลุ่มก่อนหน้า
- 2) เลือกคลื่นแผ่นดินไหวตัวอย่างเพื่อใช้ศึกษากำลังขยายคลื่นที่เกิดขึ้นได้ ในบริเวณพื้นที่ย่อยของแต่ละกลุ่ม
- 3) ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบเชิงเส้นเทียบเท่า ของผลจากคลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด และใช้ค่าเฉลี่ยเพื่อการประเมินกำลังขยายที่คาบการสั่นต่าง ๆ คือ 0 (หรือ PGA), 0.2, 1.0, 2.0 และ 3.0 วินาที แล้วจัดกลุ่มพื้นที่ย่อยที่ใหม่ตามลักษณะของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมในแต่ละพื้นที่ย่อย
- 4) ใช้ค่ากำลังขยายที่คาบการสั่นค่าต่าง ๆ คุณขยายค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ชั้นหินที่ป้อน ณ ตำแหน่งศึกษาต่าง ๆ (ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ชั้นหินนี้ได้จากการวิเคราะห์ PSHA ของงานวิจัยที่พัฒนามาตรฐาน มยผ. 1302)
- 5) สร้างความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมเพื่อการออกแบบที่รวมผลของคุณสมบัติชั้นดินบริเวณที่ตั้งแล้ว และทำการเปรียบเทียบผลกับมาตรฐาน มยผ. 1302

คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการศึกษานี้ใช้จำนวน 7 คลื่น ซึ่งเป็นชุดคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาในขั้นตอนการกำหนดมาตรฐาน มยผ. 1302 โดยกำหนดจากแนวคิดที่เลือกคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาด ระยะทาง และกลไกของแหล่งกำเนิด เทียบเคียงกับแผ่นดินไหวที่คาดว่าจะเกิดขึ้นที่ระดับชั้นหินใต้ กทม. และแผ่นดินไหวเหล่านี้ได้ถูกปรับลักษณะองค์ประกอบความถี่และขนาด ด้วยกระบวนการ Spectral Matching ตารางที่ 4.17 แสดงคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้เป็นคลื่นตั้งต้นทั้ง 7 คลื่น

ตารางที่ 4.17 รายละเอียดคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนอง

No	Earthquake	Date	Station	Dist (km)	A _{max} (g)	T _p (sec)	M
1	Denali Alaska (North America)	3-11-2002	Anchorage, AK – Police Headquarters	286	0.062	0.28	7.9
2	Hector Mine California	16-10-1999	FRINK, CA	144	0.047	0.24	7.1
3	Landers California	28-06-1992	Pomona – 4th & Locust	117	0.057	0.20	7.3
4	Tangshan (northeastern China)	28-07-1976	Hongshan – Hebei	140	0.056	0.20	7.8
5	Borrego Mountain	9-04-1968	135LA-Hollywood Stor PE Lot	211	0.050	0.26	6.5
6	Kern County	21-07-1952	135LA-Hollywood Stor FF	107	0.068	0.20	7.7
7	Kocaceli Turkey	17-08-1999	Botas	136	0.063	0.28	7.4

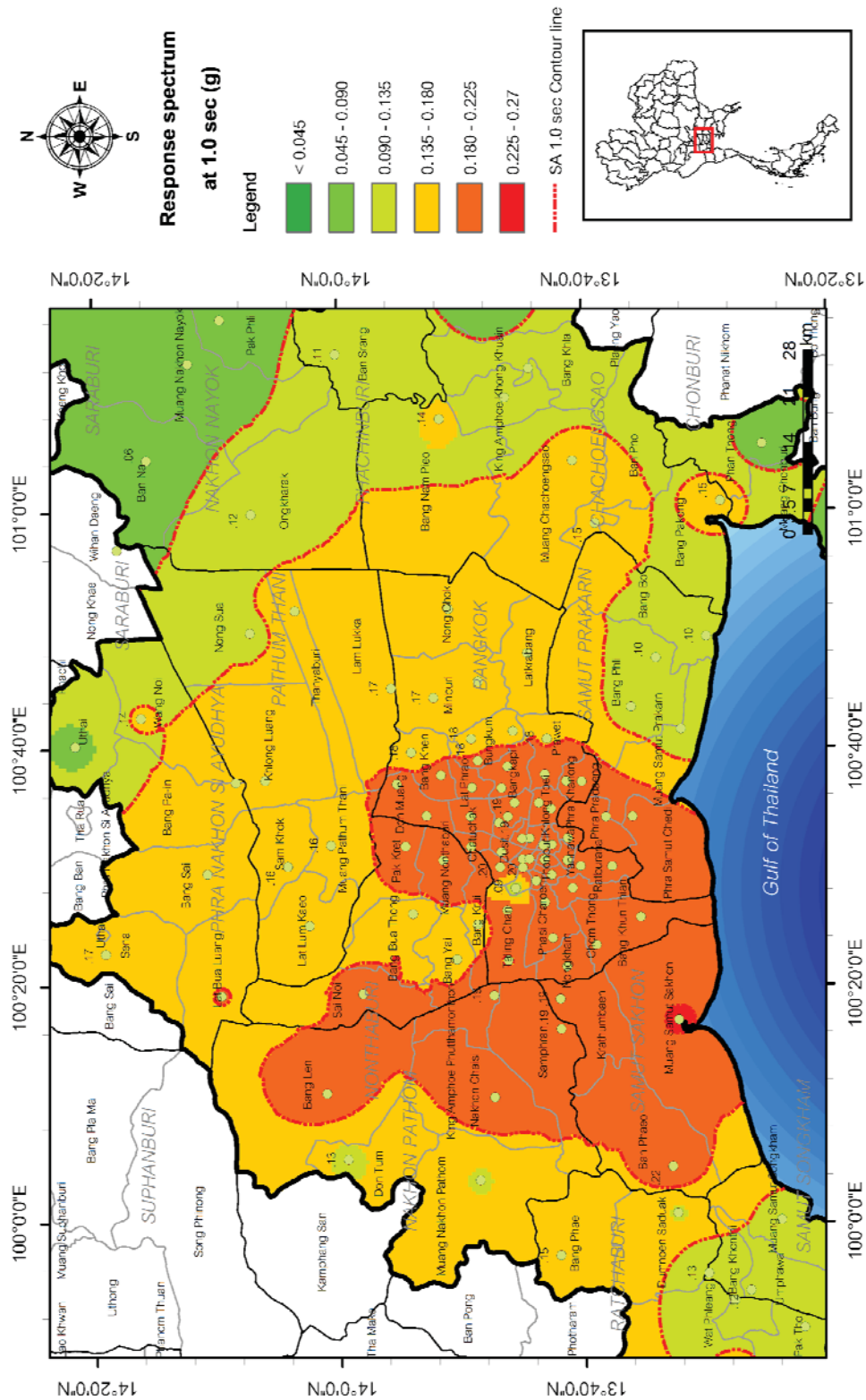
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้เป็นความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ได้ทำการแบ่งโซนพื้นที่ใหม่เป็น 8 โซน โดยเริ่มจากนำค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่คาบการสั่นต่างๆ จัดทำเป็นแผนที่ และสร้างเส้น Contour เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่ม ผลการสร้างแผนที่สำหรับความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ PGA, 0.2, 1.0, 2.0 และ 3.0 วินาทีแสดงในรูปที่ 4.64 ถึง 4.68 โดยรูปที่ 4.69 แสดงแผนที่หลังจากการแบ่งโซนทั้ง 8 ตารางที่ 4.18 แสดงผลของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับคาบการสั่นต่าง ๆ ในแต่ละโซน และผลการเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโซนใหม่ทั้ง 8 กับมาตรฐาน มยผ.1302 ทั้ง 7 โซน แสดงดังรูปที่ 4.70-4.73ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่คาบการสั่นต่างๆ ใน 8 โซน

โซน	Sa (PGA,g)	Sa (0.2 sec,g)	Sa (1.0 sec,g)	Sa (2.0 sec,g)	Sa (3.0 sec,g)
1	0.187	0.434	0.168	0.169	0.079
2	0.136	0.251	0.213	0.172	0.085
3	0.104	0.189	0.206	0.167	0.081
4	0.080	0.121	0.195	0.167	0.079
5	0.075	0.110	0.175	0.174	0.092
6	0.082	0.152	0.135	0.146	0.067
7	0.063	0.112	0.155	0.152	0.071
8	0.055	0.131	0.093	0.135	0.062



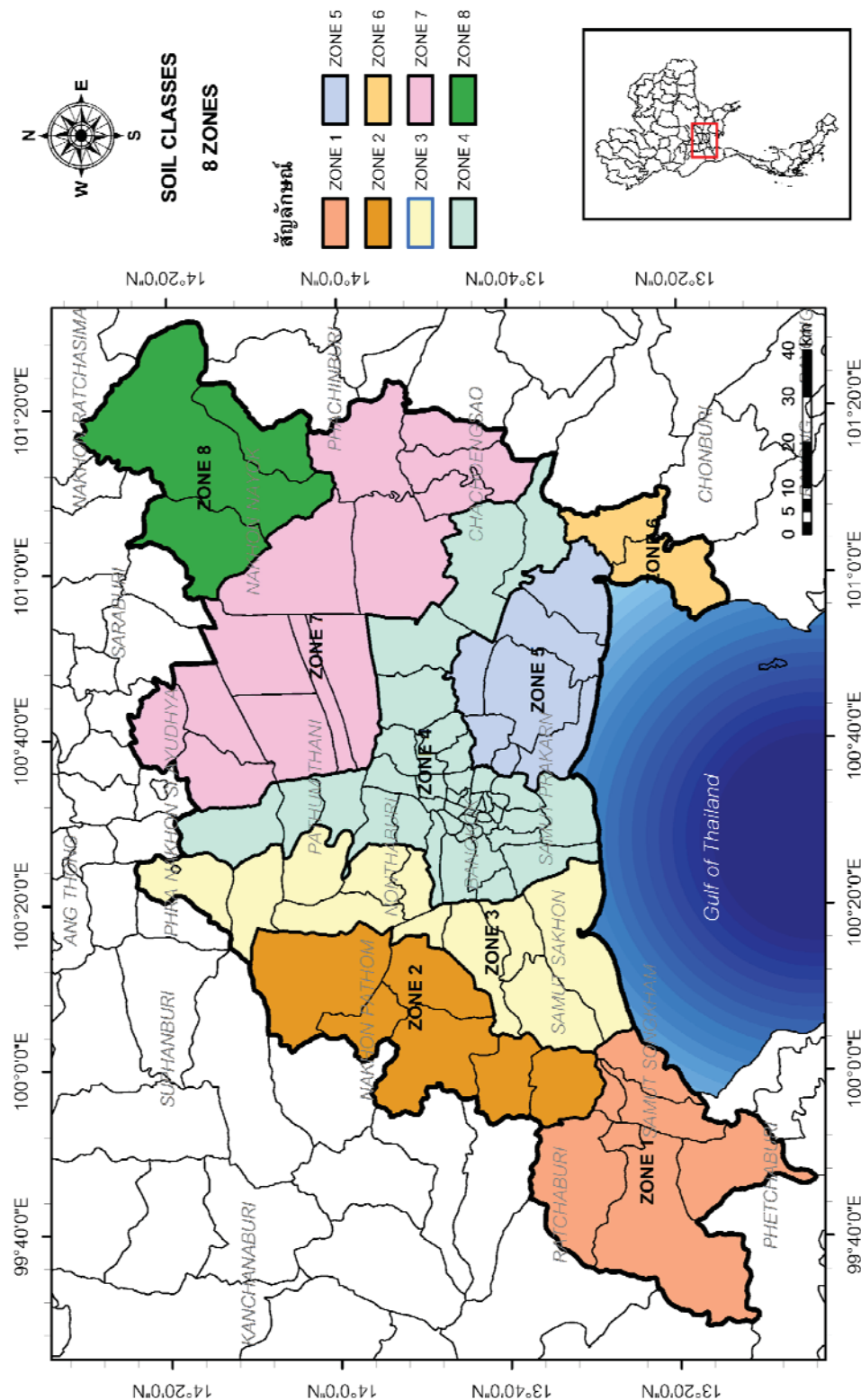




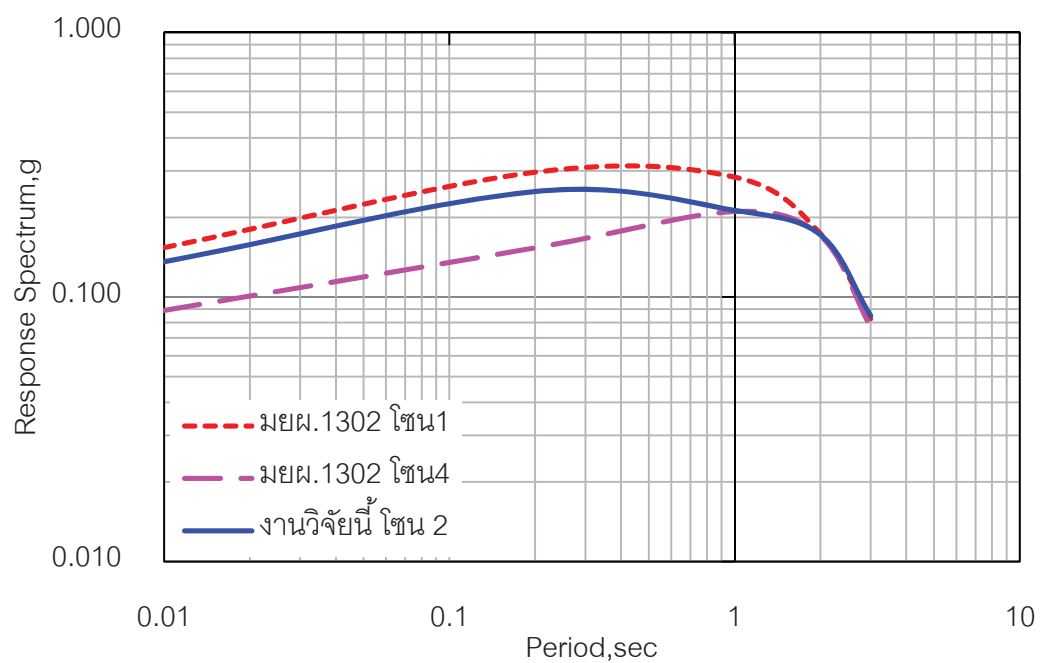
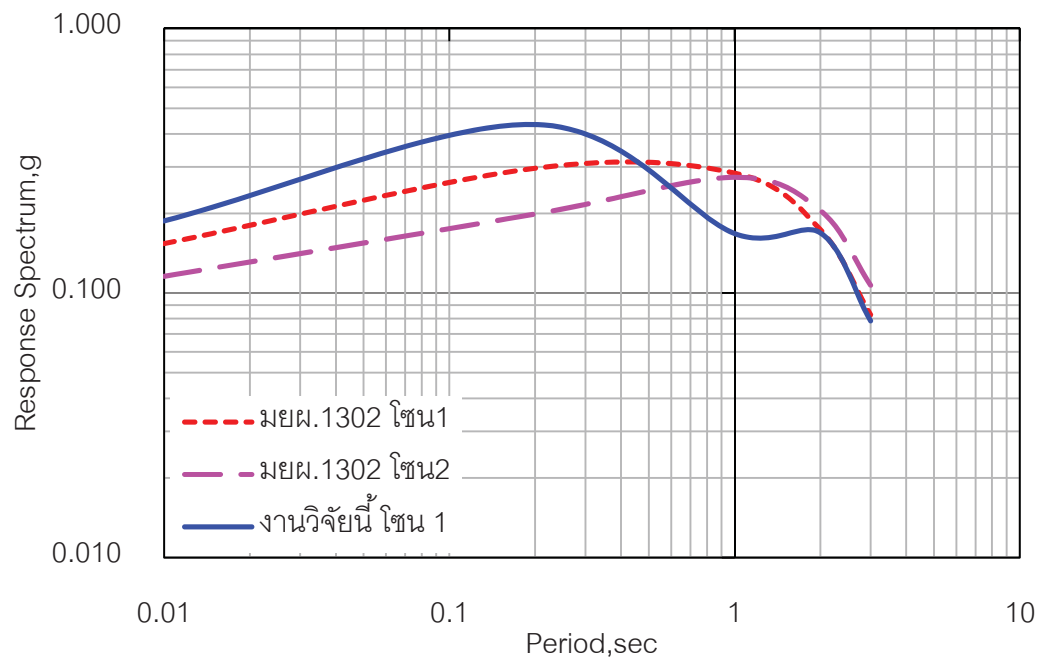
รูปที่ 4.66 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่คาบ 1.0 วินาที



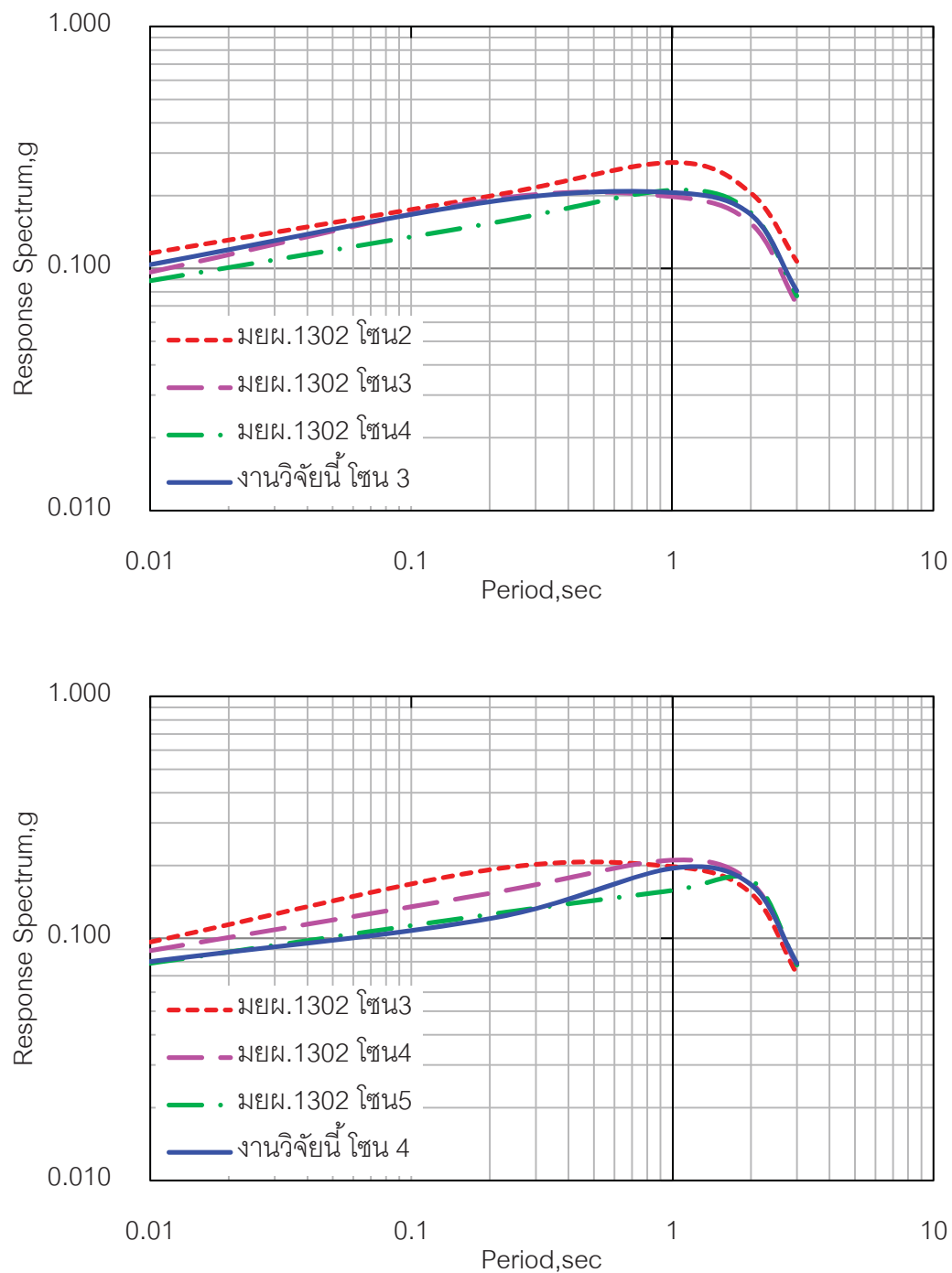




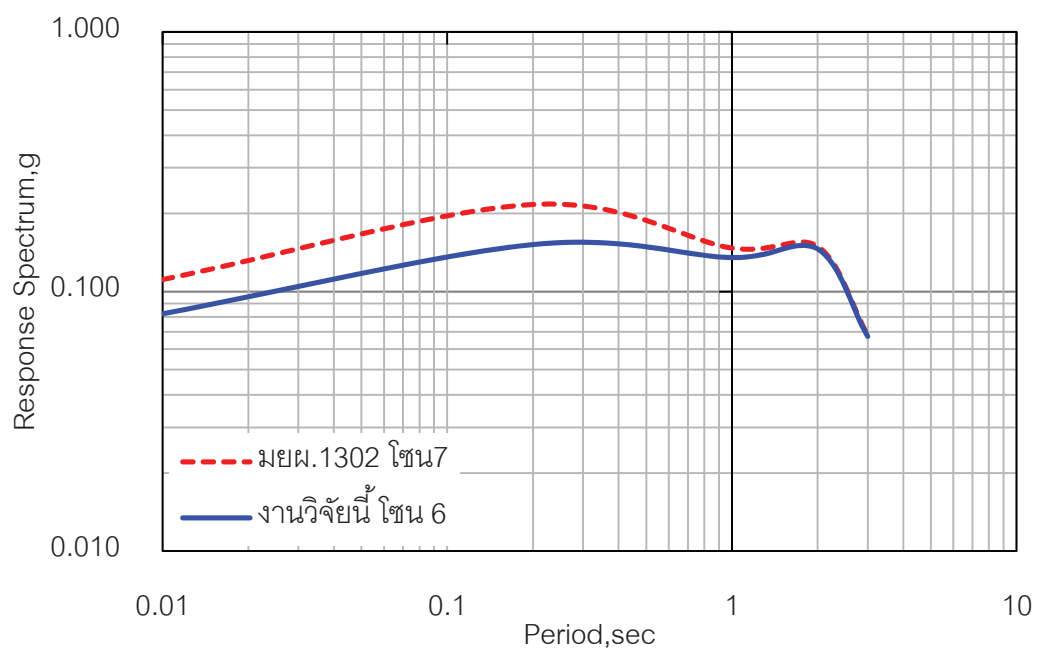
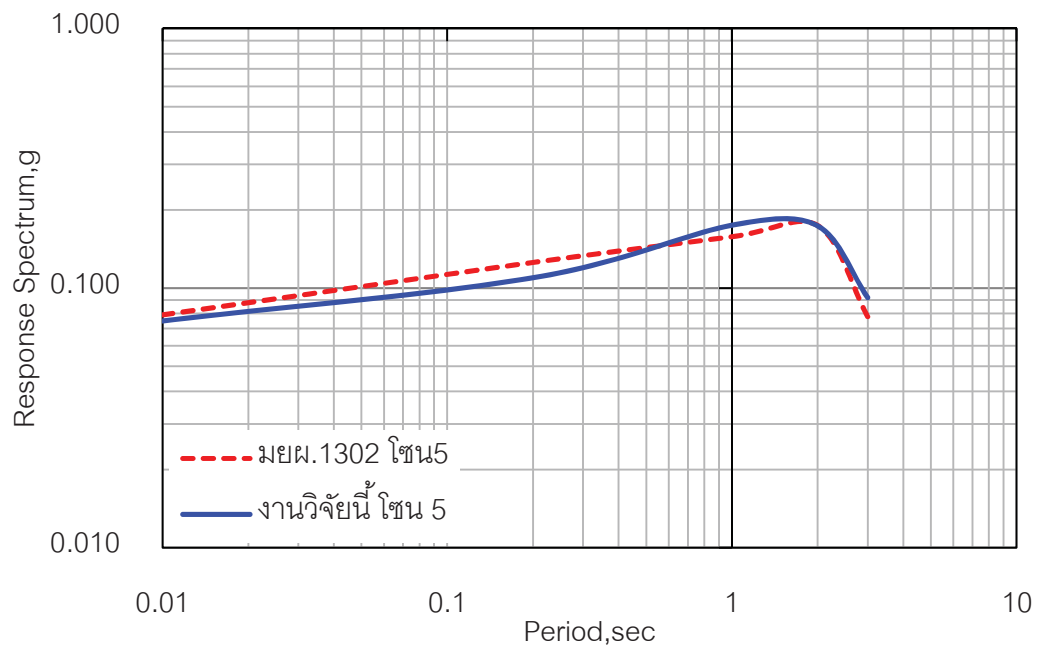
รูปที่ 4.69 ผลการจำแนกพื้นที่ใหม่เป็น 8 โซน



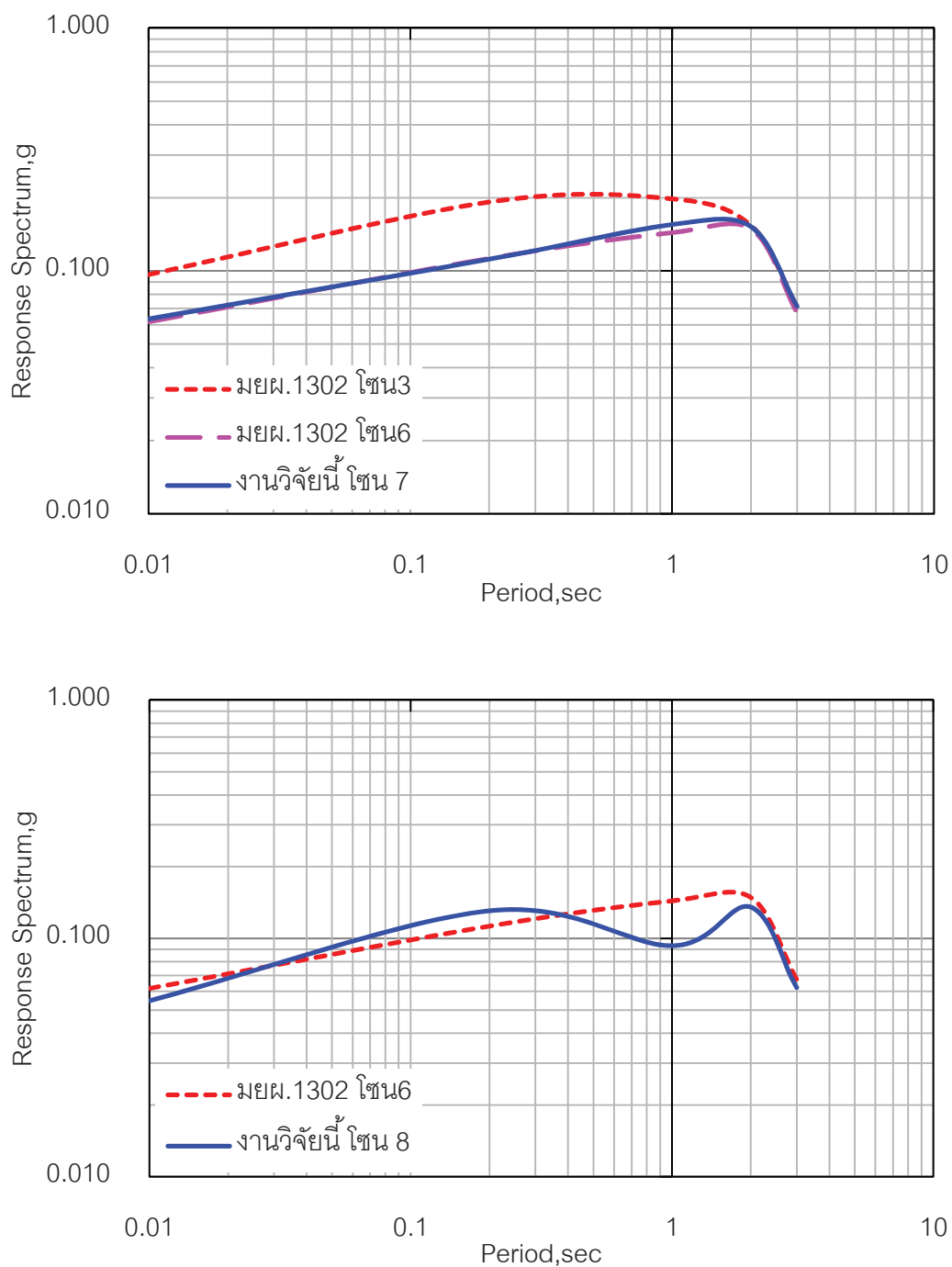
รูปที่ 4.70 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม สำหรับโซน 1-2



รูปที่ 4.71 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม สำหรับโซน 3-4



รูปที่ 4.72 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม สำหรับโซน 5-6



รูปที่ 4.73 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม สำหรับโซน 7-8

ผลจากการแบ่งพื้นที่ศึกษาบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ออกเป็น 8 โซน สามารถสรุปประเด็นที่แตกต่างกับค่าในมาตรฐาน มยผ.1302 ได้ดังนี้

โซน 1 พื้นที่ขอบตะวันตกเฉียงใต้ของพื้นที่ศึกษา ที่มีพื้นที่ของจังหวัด เพชรบุรี ราชบุรี และสมุทรสงคราม การแบ่งโซนใหม่ทำให้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงขึ้นกว่าเดิมในบริเวณคาบสั้นตั้งแต่ PGA ถึงประมาณ 0.4 วินาที และมีค่าน้อยกว่า มยผ.1302 ในช่วงคาบยาวกว่า 0.4 วินาที

โซน 2 พื้นที่ขอบตะวันตกของพื้นที่ศึกษา ที่มีพื้นที่ของจังหวัด นครปฐม การแบ่งโซนใหม่ทำให้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมมีค่าอยู่ในขอบเขตของโซนเดิมตาม มยผ.1302 โดยมีค่าสูงกว่าโซน 4 ตาม มยผ.1302 และต่ำกว่า โซน 1 ตาม มยผ.1302

โซน 3 พื้นที่ด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษา ที่มีพื้นที่ของจังหวัด สมุทรสาคร นนทบุรี การแบ่งโซนใหม่ทำให้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมมีค่าใกล้เคียงกับ โซน 2 ตาม มยผ.1302 ในช่วงคาบสั้นถึงประมาณ 0.3 วินาที และใกล้เคียงกับโซน 3 และ 4 ตาม มยผ.1302 ตั้งแต่คาบประมาณ 0.6 วินาทีขึ้นไป

โซน 4 พื้นที่ตอนกลางของพื้นที่ศึกษา ที่มีพื้นที่ของ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ฉะเชิงเทรา การแบ่งโซนใหม่ทำให้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมมีค่าต่ำกว่า โซน 3, 4 และ 5 ตาม มยผ.1302

โซน 5 พื้นที่ตอนกลางของพื้นที่ศึกษา ที่มีพื้นที่ของจังหวัด สมุทรปราการ การแบ่งโซนใหม่ทำให้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมมีค่าใกล้เคียงกับ โซน 5 ตาม มยผ.1302

โซน 6 พื้นที่ขอบตะวันออกเฉียงใต้ของพื้นที่ศึกษา ที่มีพื้นที่ของจังหวัด ชลบุรี การแบ่งโซนใหม่ทำให้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมมีค่าต่ำกว่า โซน 7 ตาม มยผ.1302

โซน 7 พื้นที่ตอนบนของพื้นที่ศึกษา ที่มีพื้นที่ของจังหวัด ปทุมธานี พระนครศรีอยุธยา ฉะเชิงเทรา การแบ่งโซนใหม่ทำให้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมมีค่าใกล้เคียงกับ โซน 6 ตาม มยผ.1302 แต่ต่ำกว่าโซน 3 ตาม มยผ.1302

โซน 8 พื้นที่ขอบตะวันตกเฉียงใต้ของพื้นที่ศึกษา ที่มีพื้นที่ของจังหวัด นครนายก การแบ่งโซนใหม่ทำให้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมมีค่าใกล้เคียงกับ โซน 6 ตาม มยผ.1302 ในช่วงคาบสั้นถึงประมาณ 0.4 วินาที แต่มีค่าน้อยกว่าในช่วงคาบปานกลางถึงประมาณ 2 วินาที

4.16 การศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินต่อผลวิเคราะห์การตอบสนองของพื้นดิน

เพื่อทำการศึกษาผลของการสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนที่มีอิทธิพลต่อผลการตอบสนองของพื้นดิน งานวิจัยในส่วนนี้จึงทำการศึกษาผลของการจำลองคุณสมบัติด้านความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดินเพื่อประเมินลักษณะของการสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหวที่ผิวพื้นดิน โดยใช้ข้อมูลการสำรวจภาคสนามมาสร้างแบบจำลองชั้นดินลักษณะต่าง ๆ และวิเคราะห์ผลของการตอบสนองของพื้นดินที่แตกต่างในแบบจำลองต่าง ๆ โดยผลที่ได้เพื่อสร้างความเข้าใจเพิ่มเติมและบ่งชี้ถึงประเด็นที่ควรมีการศึกษาเพื่อการพัฒนาการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวให้เหมาะสมยิ่งขึ้น ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปของ Transfer function ของแต่ละแบบจำลอง และกำลังขยายคลื่นจากความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม รวมถึงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลจากการตรวจวัดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวจริง

4.16.1 แบบจำลองชั้นดินและคลื่นแผ่นดินไหวศึกษา

แบบจำลองชั้นดินที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 7 รูปแบบ ที่จำลองด้วย V_s ตามความลึกของชั้นดินที่แตกต่างกัน โดยที่แบบจำลองที่ 1 ถึง 3 อ้างอิงจากงานวิจัยของ Ashford และคณะ (1997) โดยกำหนดค่า V_s ของชั้นที่มีคุณสมบัติคล้ายหินเท่ากับ 900 เมตรต่อวินาทีที่ระดับลึก 80 160 และ 300 เมตรตามลำดับ (มีค่า V_s เฉลี่ยลึก 30 เมตรเท่ากับ 125 เมตรต่อวินาที) แบบจำลองที่ 4 ถึง 7 เป็นการจำลองถึงระดับความลึกมากตามข้อมูลของวิธี Microtremor โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัด 2 ตำแหน่งคือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (มีค่า V_s เฉลี่ยลึก 30 เมตรเท่ากับ 144 เมตรต่อวินาที) และวัดตำหุ จ.สมุทรปราการ (มีค่า V_s เฉลี่ยลึก 30 เมตรเท่ากับ 116 เมตรต่อวินาที) ซึ่งแบ่งค่า V_s ออกเป็น ช่วงของชั้นดินต้น ถึงระดับ 90 เมตร ช่วง 90 ถึง 400 เมตร และช่วงลึกตั้งแต่ 400 เมตรถึงชั้นหิน เพื่อศึกษาถึงลักษณะการขยายคลื่นเนื่องจากผลจากการจำลองความเร็วคลื่นเฉือนแบบต่างๆ

แบบจำลองที่ 4 ใช้ข้อมูล V_s ช่วง 0 ถึง 90 เมตรจากวิธี SPAC และตั้งแต่ 90 เมตรถึงชั้นหินใช้ข้อมูลจากวิธี FK (อ้างอิงจากงานวิจัยของ Arai และ Yamazaki 2002) ที่ตำแหน่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งพบชั้นหิน มีค่า V_s ประมาณ 2000 เมตรต่อวินาทีที่ระดับความลึก 670 เมตร

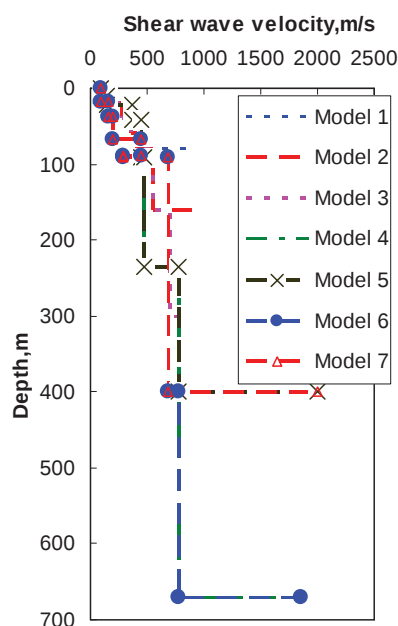
แบบจำลองที่ 5 ใช้ข้อมูล V_s ช่วง 0 ถึง 90 เมตรจากวิธี SPAC ช่วง 90 ถึง 400 เมตร จากวิธี FK ที่ตำแหน่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และตั้งแต่ 400 เมตรเป็นชั้นหินตามข้อมูลที่ตำแหน่ง วัดตำหุ จ.สมุทรปราการจากวิธี FK ซึ่งพบชั้นหิน มีค่า V_s ประมาณ 2000 เมตรต่อวินาทีที่ระดับความลึก 400 เมตร

แบบจำลองที่ 6 ใช้ข้อมูล V_s ช่วง 0 ถึง 90 เมตรจากวิธี SPAC ช่วง 90 ถึง 400 เมตร จากวิธี FK ที่ตำแหน่งวัดตำหุ จ.สมุทรปราการ และตั้งแต่ 400 เมตรถึงชั้นหินใช้ข้อมูลที่ตำแหน่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจากวิธี FK ซึ่งพบชั้นหิน มีค่า V_s ประมาณ 2000 เมตรต่อวินาทีที่ระดับความลึก 670 เมตร

แบบจำลองที่ 7 ใช้ข้อมูล V_s ช่วง 0 ถึง 90 เมตรจากวิธี SPAC และตั้งแต่ 90 เมตรถึงชั้นหินใช้ข้อมูลจากวิธี FK ที่ตำแหน่ง วัดตำหุ จ.สมุทรปราการ ซึ่งพบชั้นหิน มีค่า V_s ประมาณ 2000 เมตรต่อวินาทีที่ระดับความลึก 400 เมตร

วัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองที่ 4 ถึง 7 คือ เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าความเร็วคลื่นเฉือนในช่วงลึกต่าง ๆ โดยเลือกตำแหน่งตัวอย่าง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แทนย่านศูนย์กลางธุรกิจของ กทม. และจังหวัดสมุทรปราการแทนบริเวณที่มีชั้นดินอ่อนหนาที่สุดในแอ่งดินอ่อนกทม. การสร้างแบบจำลองต่าง ๆ เป็นการใช้อยู่ข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนสลับในตำแหน่ง เพื่อศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองต่อการขยายคลื่น ซึ่งแบบจำลองที่ 4 แทนตำแหน่งศูนย์กลางของ กทม. ตั้งแต่ 0 เมตรถึงชั้นหิน แบบจำลองที่ 5 มีช่วง 0 ถึง 400 เมตร แทนตำแหน่งศูนย์กลางของ กทม. จากนั้นจนถึงชั้นหินเป็นข้อมูลจากตำแหน่งดินอ่อนหนาที่สุด แบบจำลองที่ 6 ช่วง 0 ถึง 400 เมตร แทนตำแหน่งดินอ่อนหนาที่สุด จากนั้นจนถึงชั้นหินเป็นข้อมูลจากตำแหน่งศูนย์กลางของ กทม.

แบบจำลองที่ 7 แทนตำแหน่งดินอ่อนหนาที่สุด ตั้งแต่ 0 เมตรถึงชั้นหิน รูปที่ 4.74 แสดงค่า V_s ตามระดับความลึกของแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษา



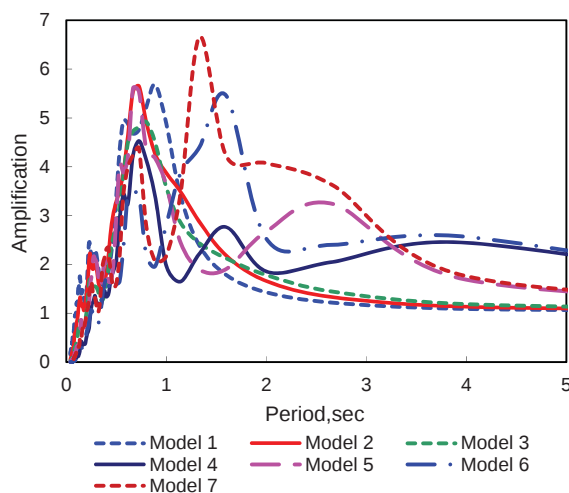
รูปที่ 4.74 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือน

4.16.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ

ผลการวิเคราะห์นำเสนอในรูปของ Transfer function ของชั้นดิน ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม และอัตราการขยายคลื่น โดยมีผลดังนี้

1. Transfer function

ผลของการวิเคราะห์ทั้ง 7 แบบจำลองแสดงในรูปที่ 4.75

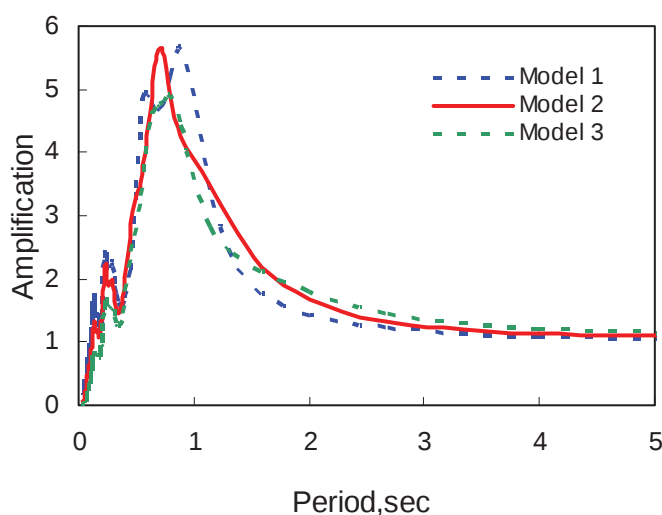


รูปที่ 4.75 Transfer function ของชั้นดิน 7 รูปแบบ

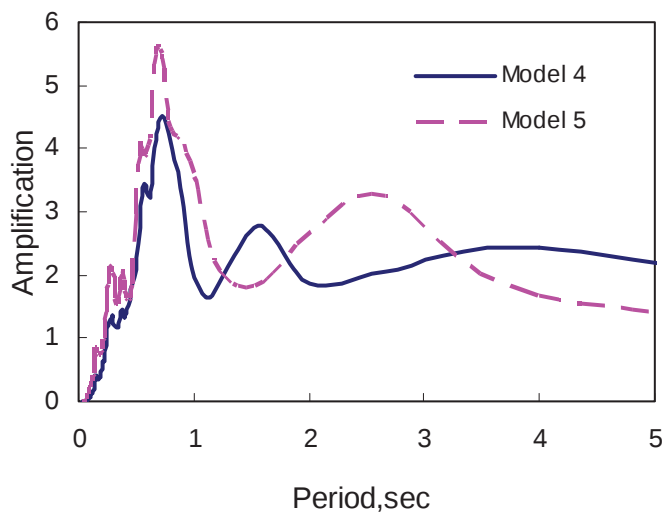
ลักษณะของ Transfer function แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ (1) สำหรับแบบจำลองชั้นดินที่ 1, 2 และ 3 ที่มีระดับของชั้นดินตั้งแต่ 80 ถึง 300 เมตร Transfer function มีลักษณะที่มียอดแหลม (Peak) ในช่วงคาบ ที่คาบประมาณ 0.7 ถึง 0.9 วินาที ซึ่งมีค่ากำลังขยายสูงสุดประมาณ 5 ถึง 6 เท่าตัว และกำลังขยายมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่คาบตั้งแต่ประมาณ 1.5 วินาทีขึ้นไป รูปที่ 4.76 แสดง Transfer function ของแบบจำลองชั้นดินในกลุ่มนี้

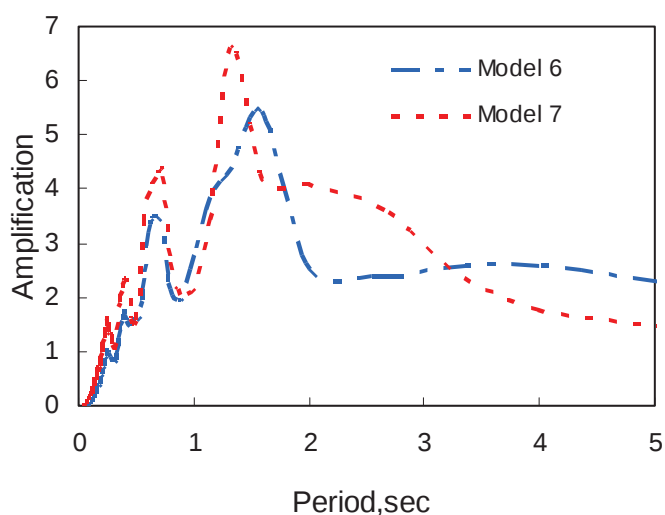
กลุ่มที่ (2) สำหรับแบบจำลองชั้นดินที่ 4 และ 5 ที่ใช้ข้อมูลช่วง 400 เมตรแรกของศูนย์กลาง กทม. และระดับชั้นดินด้านล่างต่างกัน ดังรูปที่ 4.77 และกลุ่มที่ (3) สำหรับแบบจำลองชั้นดินที่ 6 และ 7 ที่ใช้ข้อมูลช่วง 400 เมตรแรกของบริเวณดินอ่อนหนาที่สุด และระดับชั้นดินด้านล่างต่างกัน ดังรูปที่ 4.78 พบว่ามีลักษณะที่มียอดแหลมที่ชัดเจน 2 ถึง 3 ตำแหน่ง ที่คาบประมาณ 0.7, 1.6 และ 2.5 วินาที ซึ่งในช่วงคาบสั้นไม่เกิน 1 วินาที ผลในแต่ละกลุ่มมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างในช่วงคาบยาวเป็นต้นไป ซึ่งลักษณะ Transfer function ในช่วงคาบสั้นเป็นผลหลักมาจากอิทธิพลของความเร็วคลื่นเฉือนในช่วงตื้น ซึ่งแบบจำลองในแต่ละกลุ่มเหมือนกัน ส่วนในช่วงคาบยาวเป็นผลจากความเร็วคลื่นเฉือนในช่วงลึก โดยที่แบบจำลองที่ 4 และ 6 ที่มีระดับของชั้นดินลึกมากกว่า ให้ผลกำลังขยายมากกว่าแบบจำลองที่ 5 และ 7 ในช่วงคาบยาวมากกว่า 3 วินาที แนวโน้มของผลคือ แบบจำลองทั้ง 2 กลุ่มนี้มีกำลังขยายน้อยกว่ากลุ่มที่ (1) ในช่วงคาบสั้นแต่มีกำลังขยายในช่วงคาบยาวมากกว่า



รูปที่ 4.76 Transfer function ของชั้นดินแบบ 1-3



รูปที่ 4.77 Transfer function ของชั้นดินแบบ 4-5



รูปที่ 4.78 Transfer function ของชั้นดินแบบ 6-7

Transfer function ของชั้นดินเพียง 1 ชั้นสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยหลักการแพร่ของคลื่นในดิน (Kramer 1996) ซึ่งเป็นพื้นฐานของการพัฒนาเป็นโปรแกรมช่วยคำนวณสำหรับแบบจำลองของชั้นดินหลายชั้นที่มีความยุ่งยากในกระบวนการวิเคราะห์มากขึ้น หลักพื้นฐานของการวิเคราะห์ Transfer function สรุปเป็นความสัมพันธ์ที่สำคัญได้คือ

ก) คาบการสั่นหลัก (T_p) สามารถประเมินได้ดังนี้

$$T_p \approx \frac{4H}{V_s} \quad (4.3)$$

โดยที่ H คือความหนาของชั้นดิน และ V_s คือความเร็วคลื่นเฉือนสำหรับชั้นดินนั้น

ข) กำลังขยายคลื่น สำหรับค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูดของคลื่นที่ชั้น A ต่อค่าของชั้นดิน B ที่ติดกัน อยู่ด้านล่างสามารถประเมินได้ดังนี้ (Dobry 2000)

$$\left[\frac{a_A}{a_B} \right]_{\max} \approx \frac{1}{(1/I) + (\pi/2)\beta_s} \quad (4.4)$$

โดยที่ I = Impedance ratio คืออัตราส่วนของค่าหน่วยน้ำหนักและความเร็วคลื่นเฉือนของ 2 ชั้น เทียบกัน ($I = \gamma_B V_{SB} / \gamma_A V_{SA}$)

γ คือ หน่วยน้ำหนักของชั้นดินที่พิจารณา

β_s คือ อัตราส่วนความหน่วงของชั้นดินที่พิจารณา

โดยทั่วไปค่า I มีค่ามากกว่า 1.0 และสำหรับชั้นดินที่มีความแตกต่างของ V_s ระหว่างชั้นมากจะทำให้เกิดการขยายคลื่นได้สูงตามสมการที่ 4.4

เนื่องจากแบบจำลองที่ศึกษาประกอบด้วยชั้นดินจำนวนมาก (ประมาณ 10 ชั้น) ที่มีค่า I และอัตราส่วนความหน่วงที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการอธิบายภาพรวมของ Transfer function ของชั้นดินรวม จึงพิจารณากำลังขยายที่ขอบเขตของชั้นดินที่มีค่า I สูงเนื่องจากความแตกต่างของค่าความเร็วคลื่นเฉือนอย่างมากเท่านั้น โดยประมาณว่าหน่วยน้ำหนักและอัตราส่วนความหน่วงมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละชั้นดิน

เมื่อพิจารณาผลของ Transfer function ของแต่ละแบบจำลองที่มีลักษณะแตกต่างกันดังหัวข้อที่ 4.1 สามารถอธิบายพฤติกรรมในแบบจำลองชั้นดินที่ซับซ้อนด้วยสมการที่ 4.3 และ 4.4 ได้ คือ ในแบบจำลองที่ 1 ถึง 3 พบว่ามีค่า I ที่สูงที่สุดจากค่า V_s เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าตัวที่บริเวณความลึกประมาณ 14 เมตร และเมื่อประมาณค่า T_p ด้วยสมการที่ 4.3 สำหรับข้อมูลถึงชั้นนี้พบว่ามีค่าประมาณ 0.7 ถึง 0.8 วินาทีซึ่งใกล้เคียงกับยอดแหลมใน Transfer function ที่แทนถึงการขยายคลื่นหลักที่คาบการสั่นนี้ ส่วนค่า I ในช่วงอื่น ๆ มีค่าน้อย เนื่องจากค่า V_s เปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ในระดับความลึกอื่น ๆ รวมทั้งแบบจำลองมีความลึกเพียง 300 เมตร ทำให้คาบการสั่นที่พิจารณาได้ไม่สูงมากตามลักษณะของการประมาณค่า T_p ตามสมการที่ 4.3 แบบจำลองที่ 4 และ 5 มีค่า I สูงที่ระดับ 20 และ 240 เมตร และเมื่อประมาณค่า T_p จากข้อมูลถึงชั้นนี้พบว่ามีค่าประมาณ 0.7 และ 2.6 วินาที แบบจำลองที่ 6 และ 7 มีค่า I สูงที่ระดับ 17, 70 และ 90 เมตร และเมื่อประมาณค่า T_p จากข้อมูลถึงชั้นนี้พบว่ามีค่าประมาณ 0.7, 1.8 และ 2.0 วินาที ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าคาบที่ประมาณได้ตามสมการที่ 4.3 และข้อมูล V_s ในการศึกษาแล้วพบว่า แบบจำลองที่มีความลึกมากกว่าสามารถแสดงพฤติกรรมการขยายคลื่นได้ในช่วงคาบที่ยาวขึ้น

นอกจากนี้แล้วสามารถสังเกตได้ว่า ค่ากำลังขยายสูงสุดมีค่ามากตามค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย สำหรับในทุกแบบจำลองพบว่ามีค่ากำลังขยายสูงสุดในช่วงไม่เกิน 1.5 วินาที ซึ่งความเร็ว

คลื่นเฉือนในช่วงต้นมีอิทธิพลสูงต่อผลในช่วงคาบสั้นนี้ ดังนั้นจึงพบว่าแบบจำลองที่ 5 และ 7 มีกำลังขยายสูงสุดเนื่องจากค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยถึงความลึก 30 เมตรที่น้อยที่สุด

2. ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ชั้นผิวดิน

ผลค่าเฉลี่ยของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ชั้นผิวดิน (S_A) จาก 7 คลื่นแผ่นดินไหวที่ป้อนเข้าแบบจำลองชั้นดินต่าง ๆ สำหรับอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.05 แสดงดังรูปที่ 4.79 ซึ่งรวมผลที่ชั้นหินโผล่ (Rock outcrop) ไว้ในรูปด้วย จากผลพบว่า ค่า S_A จากชั้นดินรูปแบบที่ 1 ถึง 3 มีค่าสูงสุดที่คาบการสั่นประมาณ 1 วินาที และมีค่า S_A สูงที่คาบประมาณ 0.3 วินาทีด้วย ซึ่งผล S_A ที่เกิดขึ้นสูงในช่วงคาบสั้นนี้เป็นผลจากลักษณะของ Transfer function ของชั้นดินกลุ่มนี้ ประกอบกับลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ป้อนดังสังเกตได้จากค่า S_A ที่ชั้นหินโผล่

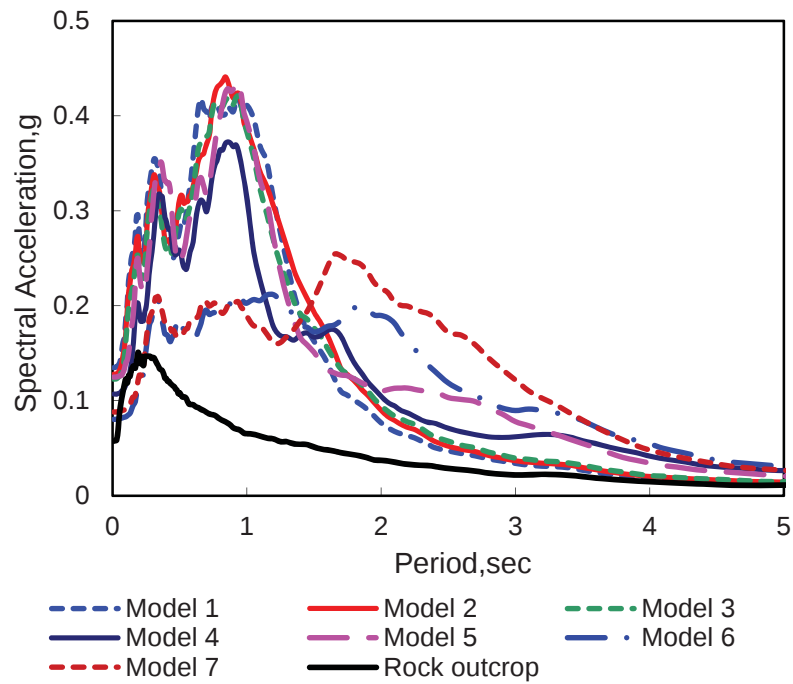
ผล S_A ของแบบจำลองชั้นดินลึกรูปแบบที่ 4 และ 5 มีลักษณะใกล้เคียงกันและคล้ายกับ รูปแบบที่ 1 ถึง 3 ในช่วงคาบสั้น โดยมีค่า S_A สูงสุดในช่วงคาบการสั่นประมาณ 1 วินาที แต่มีค่า S_A สูงกว่าในช่วงคาบการสั่นยาวกว่า 2 วินาที

แบบจำลองชั้นดินลึกรูปแบบที่ 6 และ 7 มีลักษณะของ S_A ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงคาบตั้งแต่ประมาณ 0.3 ถึง 2.5 วินาที โดยมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองที่ 1 ถึง 5 ในช่วงคาบสั้นแต่มีค่ามากกว่าในช่วงคาบยาวกว่า 2 วินาทีขึ้นไป

ผลที่ได้แสดงถึงอิทธิพลของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนต่อ S_A อย่างชัดเจน กล่าวคือแบบจำลองที่ 1 ถึง 3 ให้ผล S_A สูงที่คาบการสั่นสั้นและไม่แสดงผลในช่วงคาบการสั่นยาวเนื่องจากความลึกของชั้นดินในแบบจำลอง

แบบจำลองที่ 4 และ 5 มีผลคล้ายกับแบบจำลองที่ 1 ถึง 3 ในช่วงคาบการสั่นสั้น ทั้งนี้เป็นผลจากแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนถึงระดับความลึกประมาณ 300 เมตร แต่มีค่า S_A ในช่วงคาบยาวเนื่องจากผลของความเร็วคลื่นเฉือนที่ลึกขึ้น

แบบจำลองที่ 6 และ 7 ค่า S_A ในช่วงคาบสั้นมีค่าต่ำกว่าเป็นผลจากแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนที่มีค่า T_p ยาวกว่าคาบการสั่นหลักของคลื่นตัวอย่างที่ใช้ ส่วนค่า S_A ในช่วงคาบยาวเป็นผลของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนในช่วงลึก

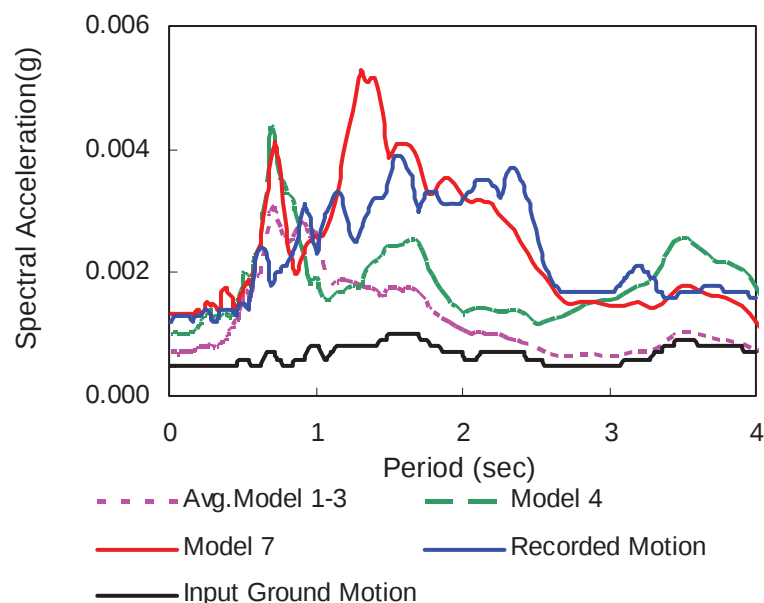


รูปที่ 4.79 ความเร่งผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ชั้นผิวดิน

4.16.3 การเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ผิวดินกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.8 ริคเตอร์ เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2554 ที่มีจุดศูนย์กลางในประเทศพม่าใกล้ อ.แม่สาย จ.เชียงราย ที่มีข้อมูลการตรวจวัดคลื่นการสั่นสะเทือนได้ที่สถานีตรวจวัดต่าง ๆ ในประเทศ ทำให้สามารถนำมาทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกับแบบจำลองที่ได้ใช้ในการศึกษา ข้อมูลสำคัญที่เลือกมาใช้คือ (1) ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่สถานีกม. (ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา) มีระยะทางห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวประมาณ 787 กม. เพื่อใช้เป็นค่าตรวจสอบกับผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดิน (2) ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่สถานีสถานีจังหวัดสุรินทร์ (ที่อ่างเก็บน้ำอำปี้ม) มีระยะห่างประมาณ 773 กม. ซึ่งถือว่าทั้ง 2 สถานีอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวใกล้เคียงกัน แต่สถานีสุรินทร์ตั้งอยู่บนชั้นดินแข็ง ในการวิเคราะห์จึงทำการสมมุติให้สภาพของที่ตั้งสถานีสุรินทร์เป็นชั้นหินโผล่ (Rock outcrop) ที่ใช้เป็นตัวแทนของชั้นหินเสมือนของใต้ชั้นดินอ่อนในเขตกม.และได้รับผลของแผ่นดินไหวที่เดินทางมาด้วยระยะประมาณเท่ากัน ดังนั้น จึงจำลองชั้นดินในเขตกม. ด้วยความเร็วคลื่นเฉือนที่เปลี่ยนตามความลึกแบบต่าง ๆ และนำคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ที่สถานีจังหวัดสุรินทร์มาใช้ป้อนเสมือนเป็นคลื่นที่ชั้นหินใต้กม.

ผลการวิเคราะห์ค่า S_A ที่ผิวดินสำหรับค่าเฉลี่ยของแบบจำลองที่ 1 ถึง 3 แบบจำลองที่ 4 และ 7 ร่วมกับผลการตรวจวัดแสดงในรูปที่ 4.80 จากข้อมูลที่ตรวจวัดได้แสดงถึงดินอ่อนใน กม. ขยายขนาดความรุนแรงจากแผ่นดินไหวได้ถึง 5 เท่า โดยมีช่วงของค่าคาบที่มีการขยายคลื่นสูงมากเป็นช่วงกว้างประมาณ 0.6 ถึง 2.7 วินาที และจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นหินดินแบบที่ 1 ถึง 3 แสดงเพียงการขยายคลื่นในช่วงคาบสั้นกว่า 1 วินาที แบบจำลองที่ 4 สำหรับชั้นหินลึก 670 เมตรให้ผลในช่วงคาบการสั่นยาวกว่า 1 วินาทีเพิ่มขึ้นแต่ยังต่ำกว่าค่าที่ตรวจวัดได้ ส่วนแบบจำลองที่ 7 สำหรับชั้นหินลึก 400 เมตรให้ผล S_A ในช่วงคาบการสั่นยาวได้ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดมากที่สุด แต่ให้ผล S_A สูงกว่าที่คาบประมาณ 1.5 วินาที



รูปที่ 4.80 S_A จากเหตุการณ์ 24 มี.ค. 54 ที่ชั้นผิวดินที่ได้จากการวิเคราะห์และการตรวจวัด

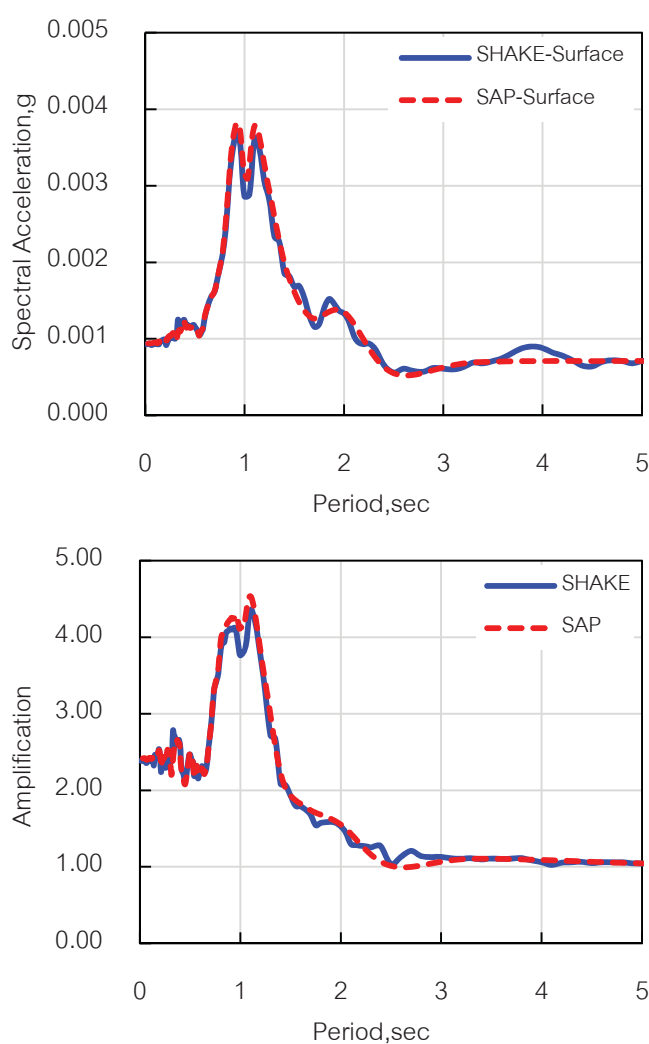
4.17 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 2 มิติด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

การวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าด้วยโปรแกรม SHAKE มีข้อจำกัดที่จำลองชั้นดินเป็นชั้นที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอในแนวราบ หรือเป็นการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ ซึ่งเหมาะสมกับพื้นที่กว้าง เช่น ตอนกลางของแอ่งกรุงเทพฯ แต่ไม่สามารถใช้ได้กับบริเวณขอบแอ่งที่มีความแตกต่างของคุณสมบัติของด้านข้างเนื่องจากชั้นหินที่ขอบ ในการศึกษาผลของลักษณะดังกล่าว จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ที่จำลองชั้นดินแบบ 2 หรือ 3 มิติ ซึ่งงานวิจัยในส่วนต่อไปเป็นการศึกษาหาวิธีในการประยุกต์ใช้กับปัญหาแบบ 2 มิติเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ที่บริเวณขอบแอ่งกรุงเทพฯ ภายหลังจากที่มีผลของระดับความลึกของชั้นหินที่ชัดเจนในอนาคต

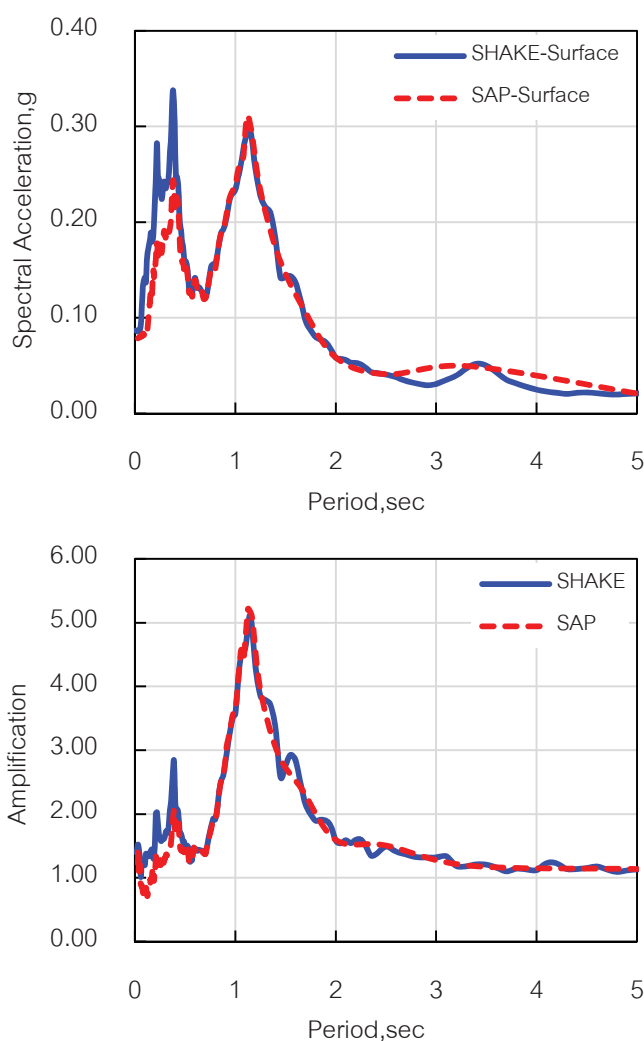
จากที่ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจแนวทางในการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ พบว่า เป็นการใช้หลักการทางไฟไนต์อีลิเมนต์มาประยุกต์ และไม่มีโปรแกรมสำเร็จรูปในรูปแบบที่เปิดให้ใช้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย ผู้วิจัยจึงทำการศึกษากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในงานวิศวกรรมโครงสร้างและแผ่นดินไหว คือโปรแกรม SAP 2000 ที่ใช้หลักการไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของการใช้โปรแกรมกับตัวอย่างแบบ 2 มิติ ที่มีการเปรียบคำตอบ โดยจำลองให้ชั้นดินเป็นชั้นส่วนแบบสี่เหลี่ยมและความกว้างของแบบจำลองทั้งหมดประมาณ 5 ถึง 10 เท่าของความลึก โดยมีลักษณะเป็นที่ขอบด้านข้างและด้านล่างที่แทนด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติตามลักษณะของชั้นหิน แล้วนำผลตอบสนองที่ผิวดิน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลอง 1 มิติด้วยโปรแกรม SHAKE ตัวอย่างที่แสดงต่อไปนี้เป็นแบบจำลองชั้นดินที่มีความลึกเท่ากับ 100 เมตร ความเร็วคลื่นเฉือนเท่ากับ 400 เมตรต่อวินาทีและคงที่ตลอดความลึก 100 เมตร โดยกำหนดให้ชั้นดินมีค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) เท่ากับ 20 kN/m^3 ขนาดของชั้นส่วน

(Element) เท่ากับ 5x5 เมตร สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มี 2 คลื่น ได้แก่ คลื่น Denali ที่เป็นตัวแทนของแผ่นดินไหวที่มีคาบการสั่นหลักสั้น และคลื่นที่ตรวจวัดได้จริงบนผิวดินบริเวณจังหวัดสุรินทร์เมื่อ 24 มี.ค. 56 ที่เป็นตัวแทนของแผ่นดินไหวที่มีคาบการสั่นหลักยาว ผลการศึกษาที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบประกอบด้วย ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ผิวดิน และอัตราการขยายกำลังที่ได้จากอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมที่ผิวดินต่อที่ชั้นหิน

ผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าและวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 2 พบว่า วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ให้ผลสอดคล้องกับวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติอย่างดีทั้งค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ชั้นผิวดินและอัตราการขยายกำลังจากทั้ง 2 คลื่น โดยเฉพาะที่คาบการสั่นที่ให้ค่าสเปกตรัมสูงสุด แต่มีความแตกต่างเล็กน้อยในช่วงคาบยาวและสั้นนอกช่วงของคาบที่ตอบสนองหลัก รูปที่ 4.81 และ 4.82 แสดงความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ชั้นผิวดินและอัตราการขยายกำลังเนื่องจากคลื่นที่ตรวจวัดได้ที่จังหวัดสุรินทร์ และคลื่น Denali ตามลำดับ



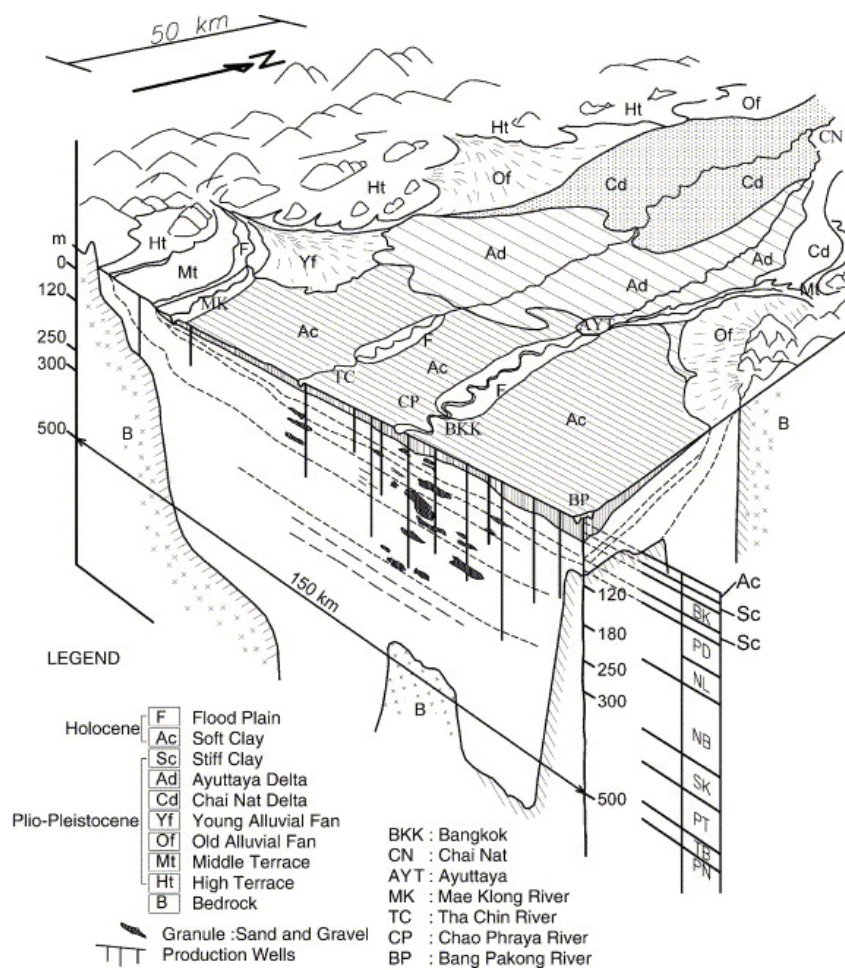
รูปที่ 4.81 Spectral Acceleration ที่ชั้นผิวดิน และ อัตราการขยายกำลัง สำหรับคลื่นสุรินทร์



รูปที่ 4.82 Spectral Acceleration ที่ชั้นผิวดิน และ อัตราการขยายกำลัง สำหรับคลื่น Denali

4.18 แนวทางการพัฒนาแบบจำลอง 2 มิติ สำหรับแอ่งกรุงเทพฯ

จากผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ ระหว่างวิธีเชิงเส้นเทียบกับวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ได้ผลสอดคล้องกัน ขั้นตอนถัดไปของการศึกษาคือการประยุกต์วิธีเพื่อพัฒนาแบบจำลองจาก 1 มิติ เป็น 2 มิติ โดยเฉพาะบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ ที่คาดว่าจะมีการแปรเปลี่ยนสภาพของธรณีวิทยาดังตัวอย่างในรูปที่ 4.83 ที่ต้องอาศัยข้อมูลความลึกของชั้นหินใต้แอ่ง กทม. ที่บริเวณต่าง ๆ โดยเฉพาะบริเวณขอบแอ่งที่ถูกต้อง เพื่อใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลจากขอบแอ่งหินต่อการขยายกำลังของคลื่นเนื่องจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ศึกษานี้ โดยที่คณะผู้วิจัยคาดหวังที่จะพัฒนากระบวนการสำรวจระดับความลึกของชั้นหินให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้นด้วยวิธีการตรวจวัดแบบ Microtremor ในอนาคต



รูปที่ 4.83 แบบจำลองชั้นดินบริเวณแอ่งกรุงเทพฯ (ว.ส.ท. 2548)

บทที่ 5

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

ผลการศึกษาในส่วนที่ 2 มีประเด็นหลัก 4 ประเด็นดังนี้คือ

- **คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากการตรวจวัด**

สรุปคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารทุกหลังที่ได้จากการตรวจวัด คุณสมบัติดังกล่าวประกอบด้วย ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่นไหว และอัตราส่วนความหน่วง ปริมาณทั้งสามนี้ถือเป็นแบบจำลองคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ซึ่งเป็นสาระสำคัญที่สุดของผลการศึกษาครั้งนี้

- **คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์**

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากการตรวจวัด ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากการตรวจวัดจริงเทียบกับที่คำนวณจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ความแตกต่างที่แสดงออกมาจะบ่งบอกถึงพฤติกรรมจริงของอาคารกับแบบจำลองซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างทั่วไปว่ามีแนวโน้มต่างกันเพียงใด

- **การปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร**

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงภาพรวมของวิธีการตรวจวัดและปัญหาที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งแนวทางการปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัดที่ได้พัฒนามาทั้งหมด และสรุปผลลัพธ์ของแนวทางการที่เสนอมาว่ามีการปรับปรุงผลลัพธ์เป็นรูปธรรมอย่างไร

- **บทสรุปสาระสำคัญจากข้อมูลที่ได้ตรวจวัด**

หัวข้อนี้จะสรุปสาระสำคัญของข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ได้มาทั้งหมด เพื่อนำไปสู่การใช้งานในเชิงวิจัยและเชิงปฏิบัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงสำหรับกลุ่มอาคารที่มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการศึกษาในโครงการนี้

5.1 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากการตรวจวัด

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอแบบจำลองพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอาคารที่ได้ตรวจวัดมาทั้งสิ้น 11 อาคาร ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภท Modal model อันประกอบไปด้วยความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่น และ อัตราส่วนความหน่วงดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1.1 อาคารชุดสูง 7 ชั้น โครงการเดอะทรีคอนโด ลาดพร้าว

ข้อมูลเบื้องต้น

เจ้าของอาคาร:	บริษัท พฤษา เรียวเอสเตท จำกัด (มหาชน)
ที่ตั้ง:	ถนนลาดพร้าว –วังหิน ระหว่างซอย 12 กับ 14
ลักษณะอาคาร:	อาคารชุดพักอาศัย สูง 7 ชั้น
สภาพอาคารขณะตรวจวัด:	อยู่ระหว่างดำเนินการตกแต่งภายใน



รูปที่ 5.1 อาคารที่ทำการตรวจวัด

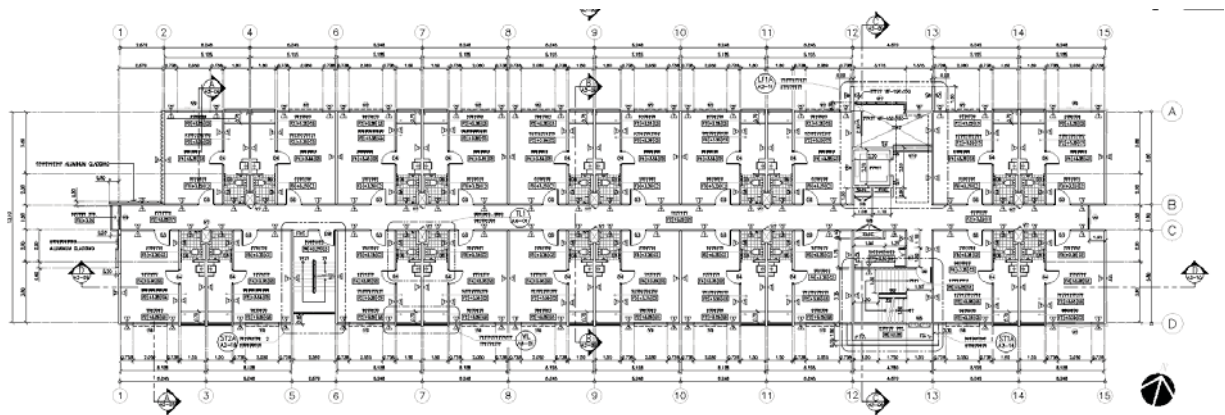


รูปที่ 5.2 อาคารที่ทำการตรวจวัด

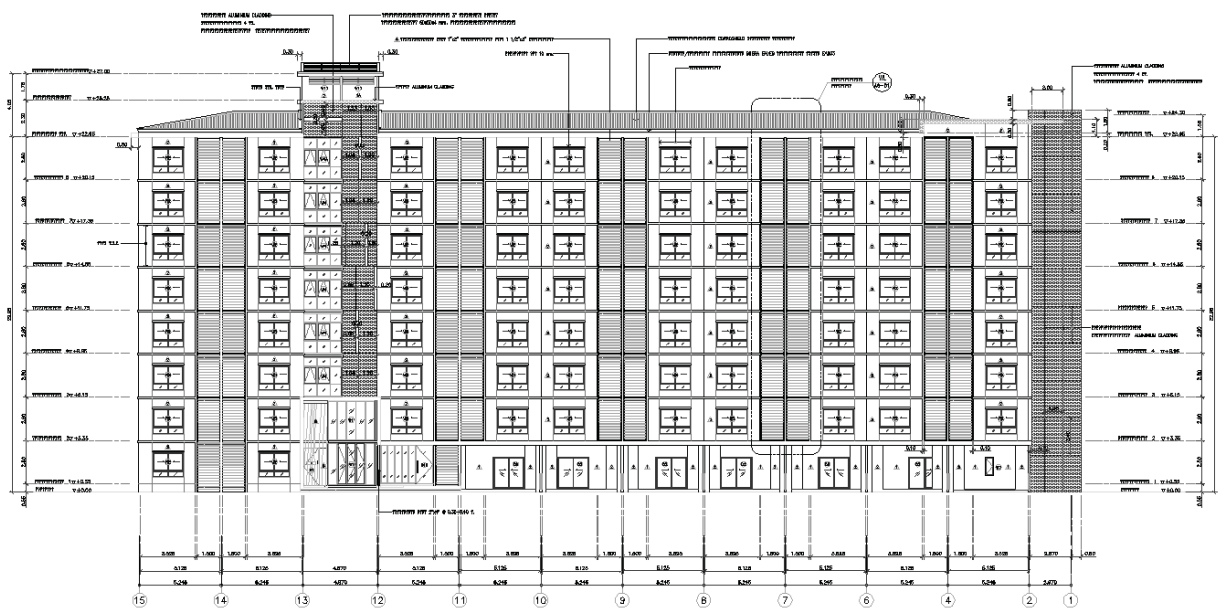
ลักษณะโครงสร้าง

โครงสร้างเป็นแบบรับน้ำหนักด้วยผนัง (Wall-bearing System) โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) ร่วมกับชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Members) อาคารหลังนี้สร้างจากชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปมาประกอบกันซึ่งน่าจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างจากระบบเสา-คานาที่นิยมใช้กันอยู่โดยทั่วไป นอกจากนี้ระบบโครงสร้างดังกล่าวก็มีแนวโน้มเป็นที่นิยม

มากขึ้นในปัจจุบัน ข้อมูลที่ได้มาจากอาคารหลังนี้จึงน่าจะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของอาคารที่ใช้โครงสร้างประเภทนี้ได้มากขึ้น



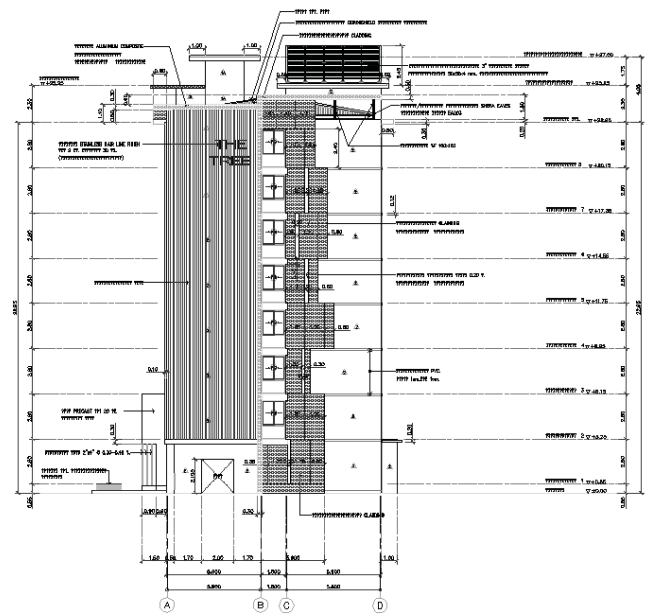
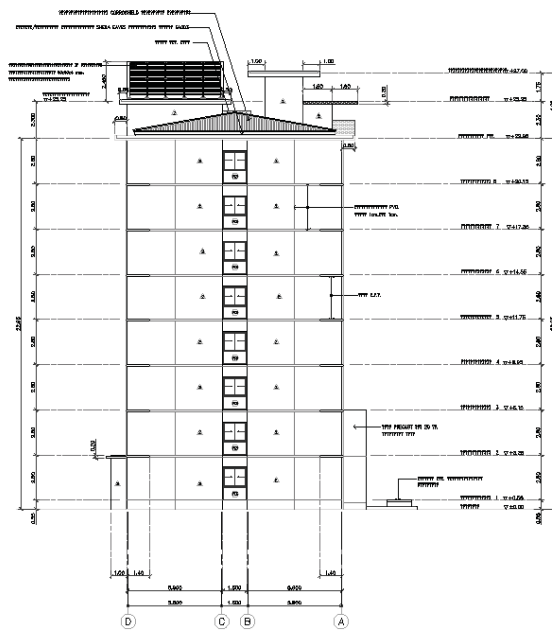
รูปที่ 5.3 ผังพื้นอาคาร



รูปที่ 5.4 รูปด้านข้างอาคาร

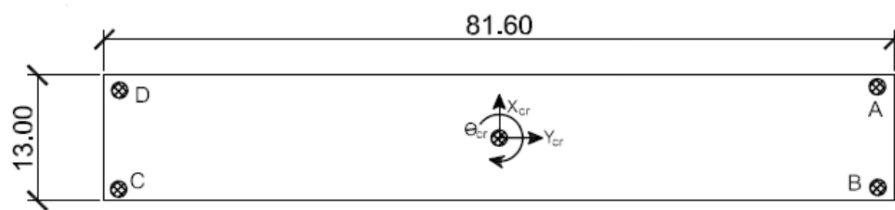


รูปที่ 5.5 รูปด้านข้างอาคาร



รูปที่ 5.6 รูปด้านข้างอาคาร

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์



รูปที่ 5.7 ผังการวางเครื่องมือตรวจวัดและแกนอ้างอิง

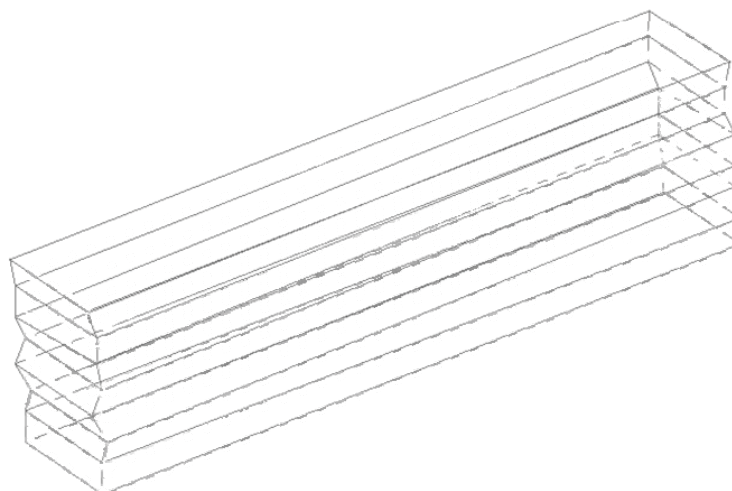
ความถี่ธรรมชาติ

Major Direction	Natural frequency (Hz)
X	2.62
Y	1.19
	2.66
θ	2.64

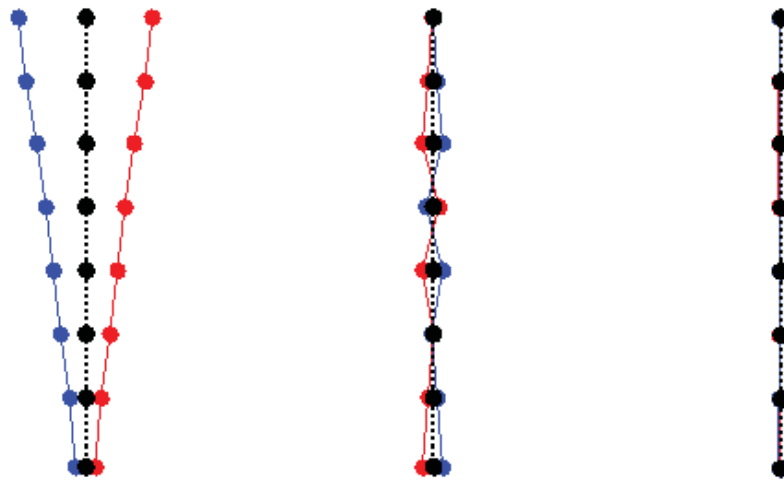
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 2.62 Hz

$$X=1.0000 \quad Y=-0.0230 \quad \theta=0.0620$$

รูปที่ 5.8 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.9 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

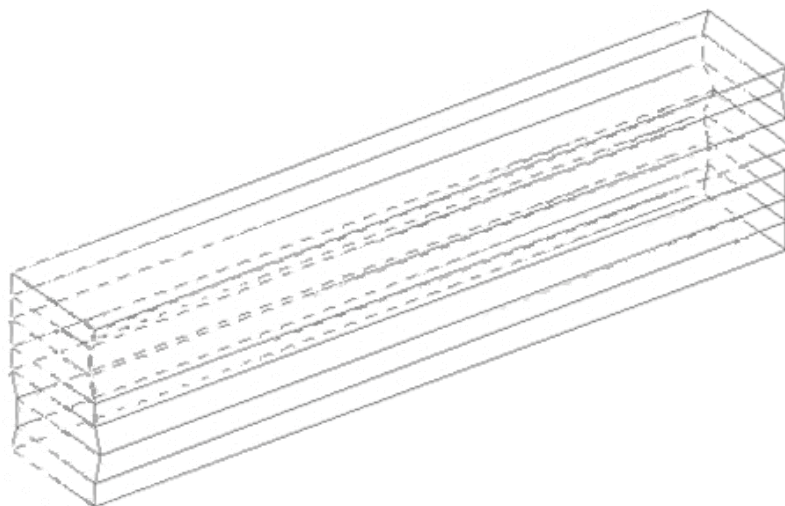


รูปที่ 5.10 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

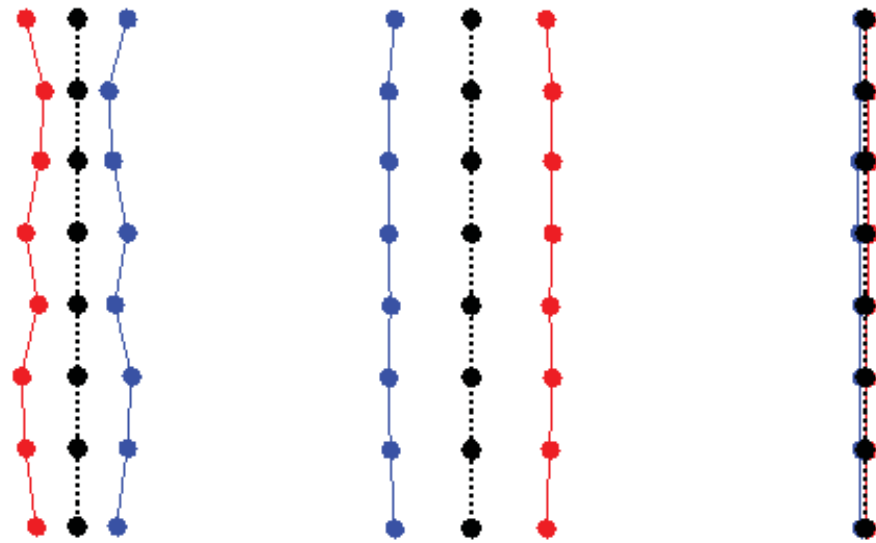
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 1.19 Hz

$$X = -0.6720 \quad Y = 1.0000 \quad \theta = 0.0080$$

รูปที่ 5.11 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.12 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

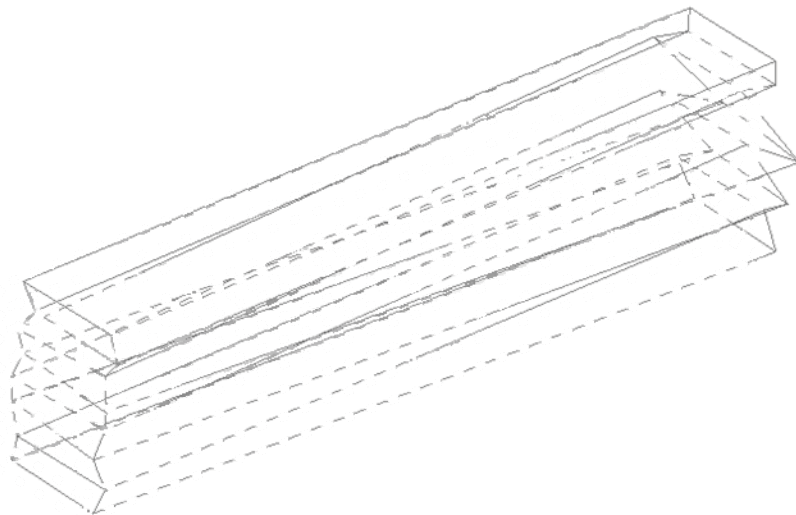


รูปที่ 5.13 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

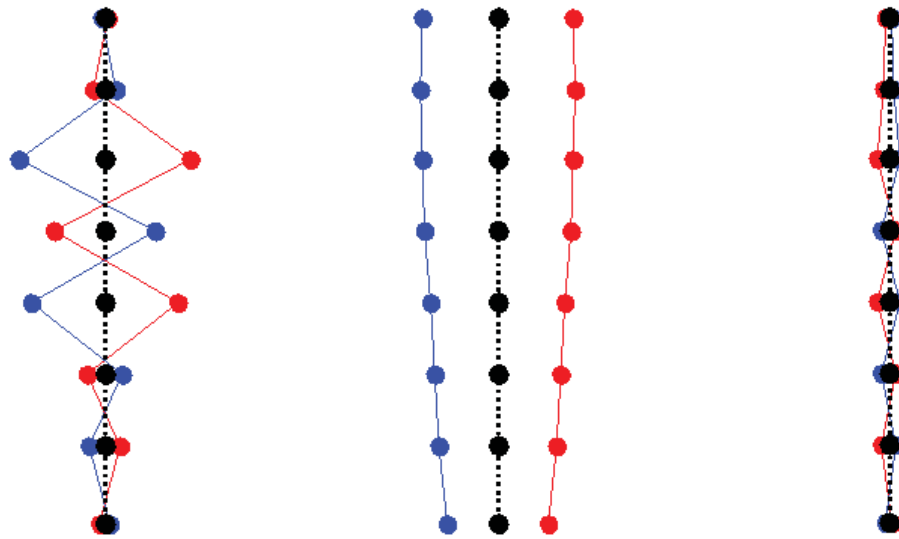
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 2.66 Hz

$$X=0.0280 \ Y=1.0000 \ \theta=-0.0080$$

รูปที่ 5.14 รูปแปลนบนสุด

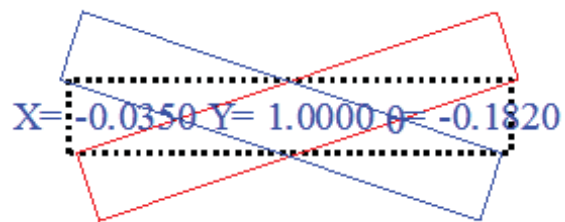


รูปที่ 5.15 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

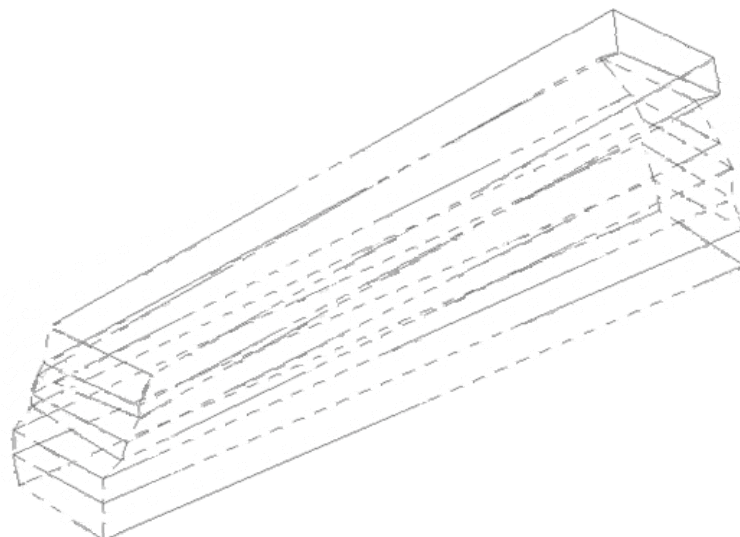


รูปที่ 5.16 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

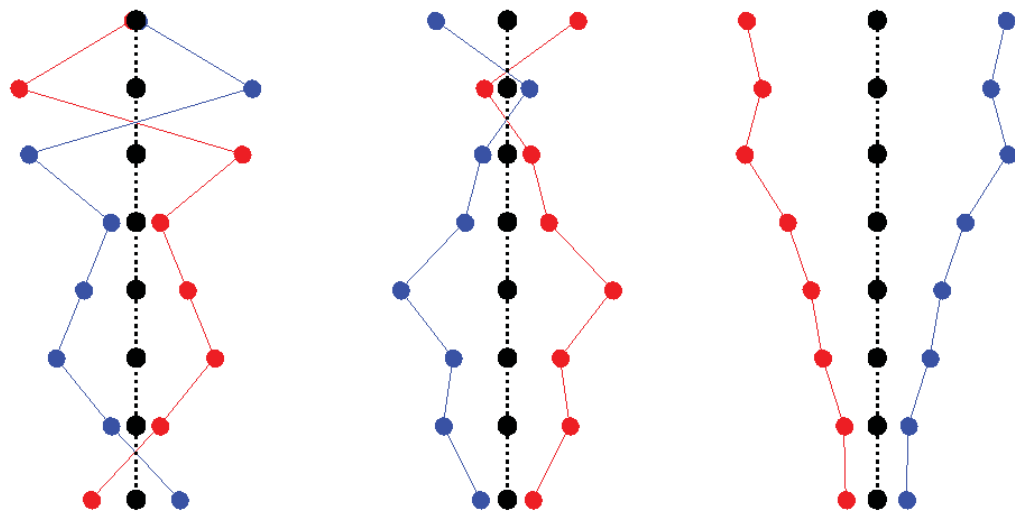
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 2.64 Hz



รูปที่ 5.17 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.18 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ



รูปที่ 5.19 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

อัตราส่วนความหน่วง

อัตราส่วน ความหน่วง	ทิศทาง X	ทิศทาง Y	ทิศทาง Y	ทิศทางหมุน
	ความถี่ 2.62 Hz	ความถี่ 1.19 Hz	ความถี่ 2.66 Hz	ความถี่ 2.64 Hz
Maximum	0.0177	0.0608	0.0553	0.0199
Average	0.0112	0.0289	0.0175	0.0101
Minimum	0.0029	0.0015	0.0091	0.0025

5.1.2 อาคารชุดสูง 7 ชั้น โครงการคอนโดเลท ลาดพร้าว

ข้อมูลเบื้องต้น

เจ้าของอาคาร:	บริษัท พฤษา เรียวเอสเตท จำกัด (มหาชน)
ที่ตั้ง:	ถนนเสรีไทย
ลักษณะอาคาร:	อาคารชุดพักอาศัย สูง 8 ชั้น
สภาพอาคารขณะตรวจวัด:	อยู่ระหว่างดำเนินการตกแต่งภายใน



รูปที่ 5.20 อาคารที่ทำการตรวจวัด

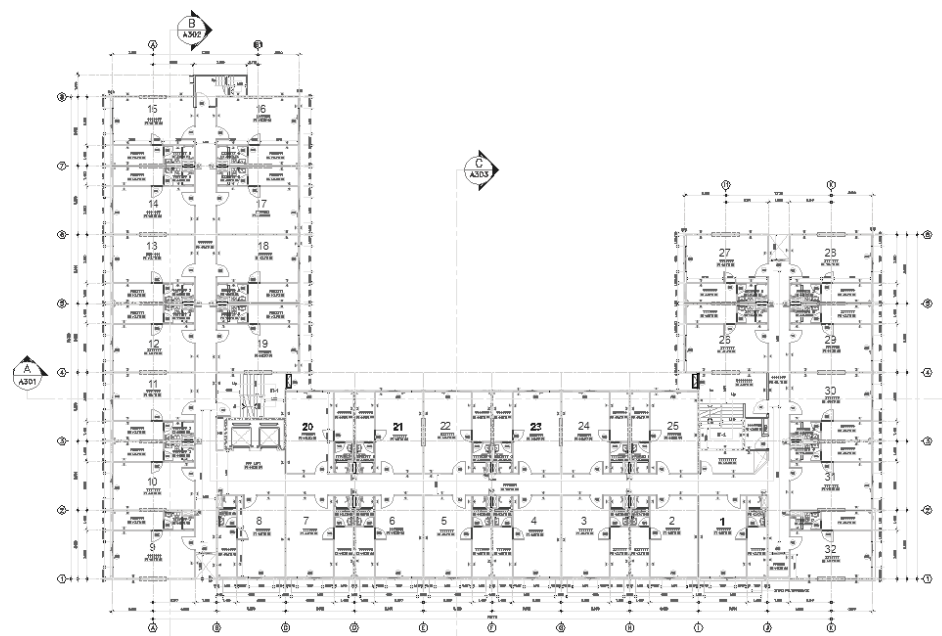


รูปที่ 5.21 อาคารที่ทำการตรวจวัด

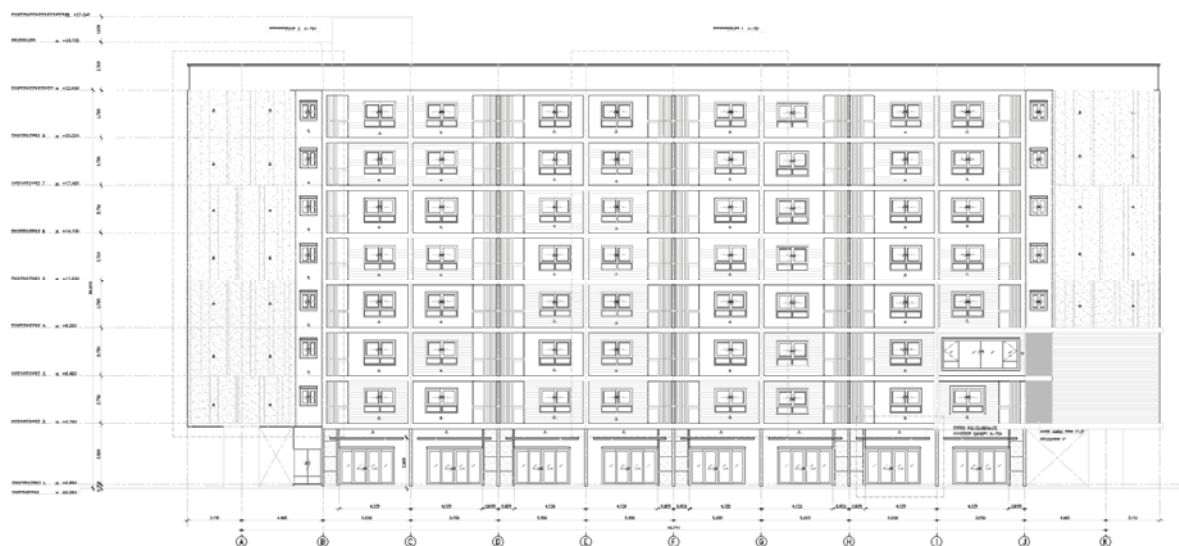
ลักษณะโครงสร้าง

โครงสร้างเป็นแบบรับน้ำหนักด้วยผนัง (Wall-bearing System) โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) ร่วมกับชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Members)

โครงสร้างนี้มีลักษณะพิเศษคือชั้นล่างเปิดโล่ง และแผนผังพื้นไม่สมมาตร มีส่วนที่มาเชื่อมต่อเป็นลักษณะตัว U จึงน่าจะมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนหากเกิดแผ่นดินไหว



รูปที่ 5.22 ผังพื้นอาคาร



รูปที่ 5.23 รูปด้านข้างอาคาร



รูปที่ 5.24 รูปด้านข้างอาคาร

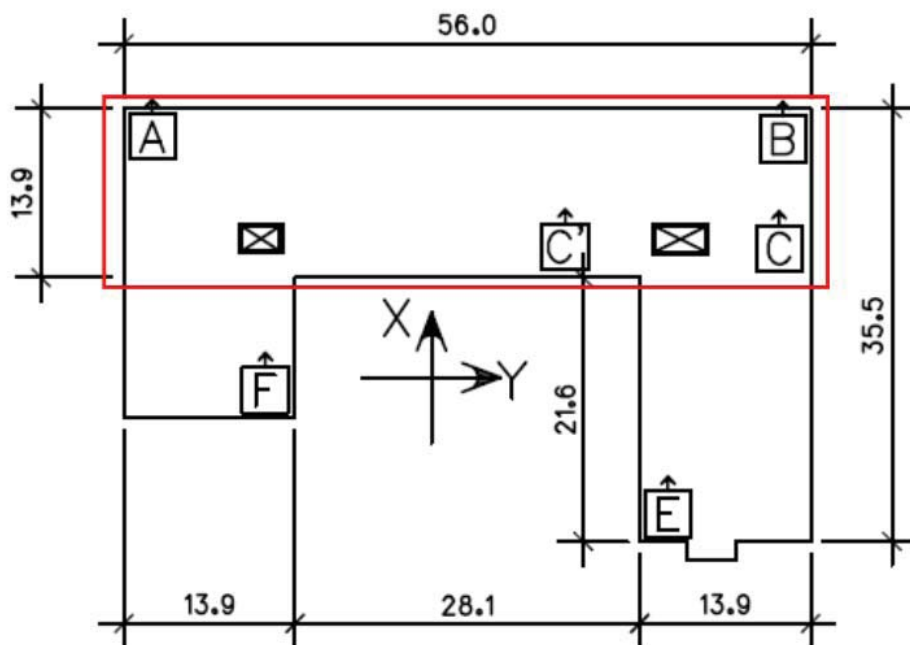


รูปที่ 5.25 รูปด้านข้างอาคาร



รูปที่ 5.26 รูปด้านข้างอาคาร

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์



รูปที่ 5.27 แผงการวางเครื่องมือตรวจวัดและแกนอ้างอิง

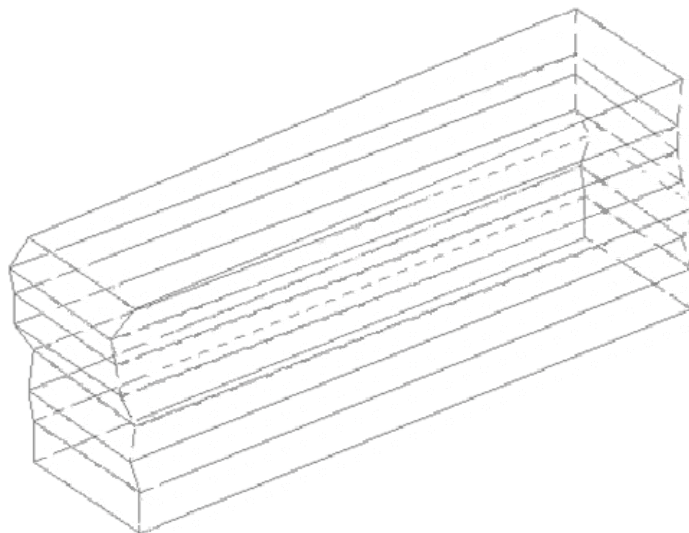
ความถี่ธรรมชาติ

Major Direction	Natural frequency (Hz)
X	1.2
Y	1.2
θ	3.1

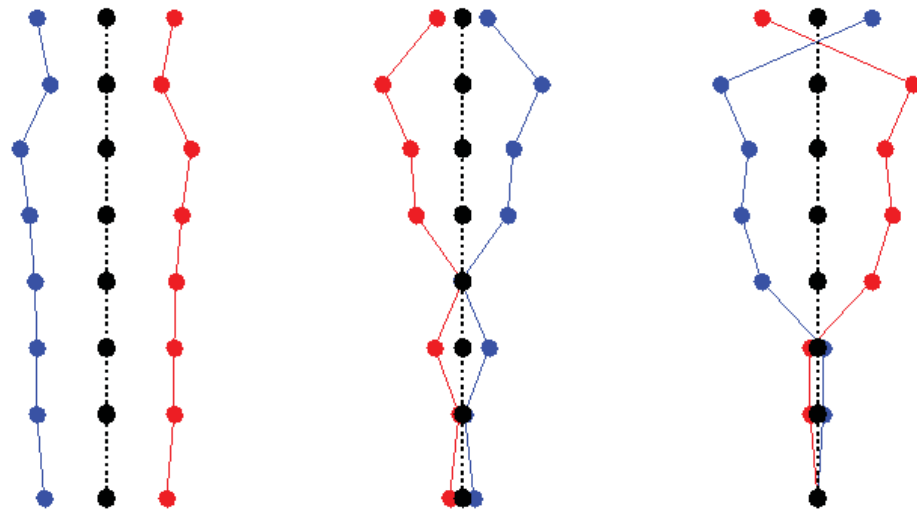
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 1.2 Hz (แนว X)

$$X=1.0000 \ Y=-0.3790 \ \theta=-0.0080$$

รูปที่ 5.28 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.29 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

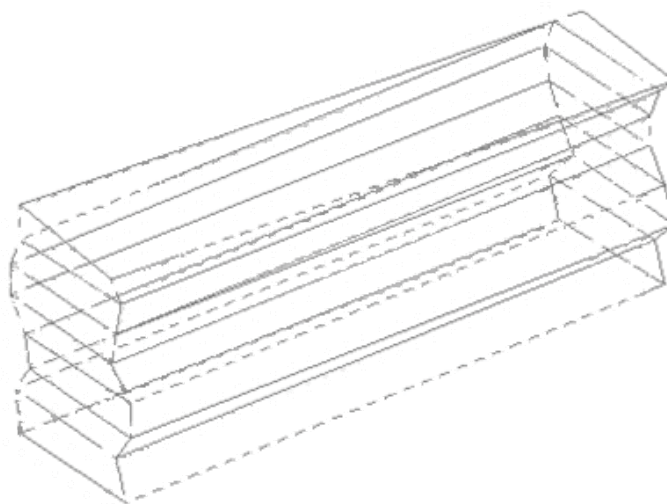


รูปที่ 5.30 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง XY และการหมุน

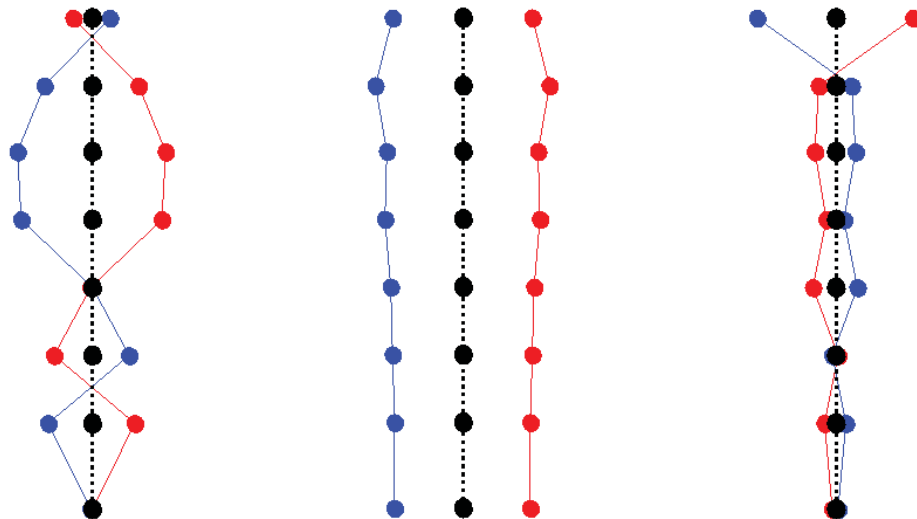
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 1.2 Hz (แนว Y)

$$X = -0.2590 \quad Y = 1.0000 \quad \theta = 0.0280$$

รูปที่ 5.31 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.32 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

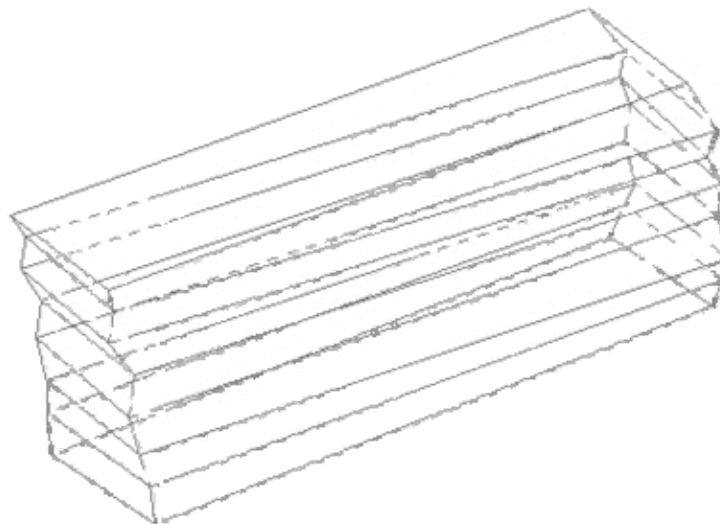


รูปที่ 5.33 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

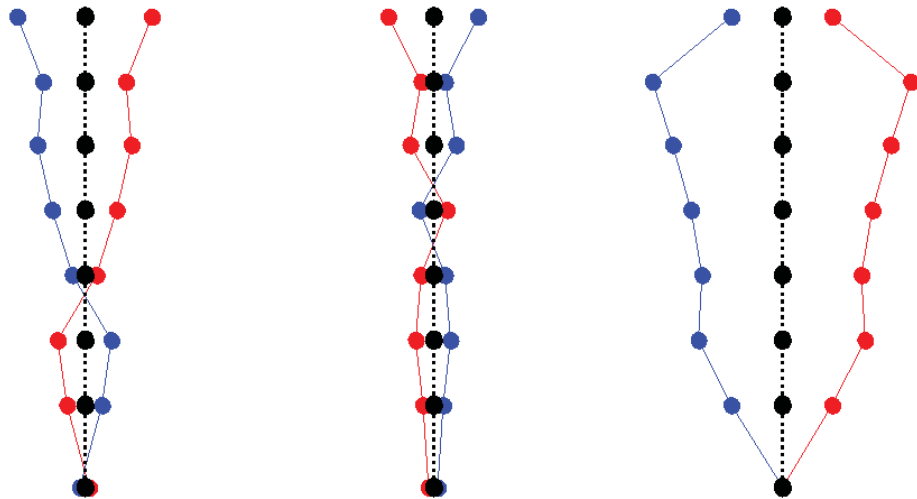
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.1 Hz

$$X=1.0000 \ Y=-0.6830 \ \theta=0.0190$$

รูปที่ 5.34 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.35 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ



รูปที่ 5.36 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

อัตราส่วนความหน่วง

อัตราส่วน ความหน่วง	ทิศทาง X	ทิศทาง Y	ทิศทางหมุน
	ความถี่ 1.2 Hz	ความถี่ 1.2 Hz	ความถี่ 3.1 Hz
Maximum	0.0515	0.0243	0.0318
Average	0.0243	0.0148	0.0158
Minimum	0.0064	0.0018	0.0018

5.1.3 หอพักเชฟทรัพย์ สูง 5 ชั้น

ข้อมูลเบื้องต้น

เจ้าของอาคาร:	ผู้ประกอบการเอกชน
ที่ตั้ง:	ถนนบางนา-ตราด กม.7
ลักษณะอาคาร:	อาคารชุดพักอาศัย สูง 5 ชั้น
สภาพอาคารขณะตรวจวัด:	อยู่ระหว่างการใช้งานตามปกติ



รูปที่ 5.37 หอพักที่ทำการตรวจวัด



รูปที่ 5.38 หอพักที่ทำการตรวจวัด

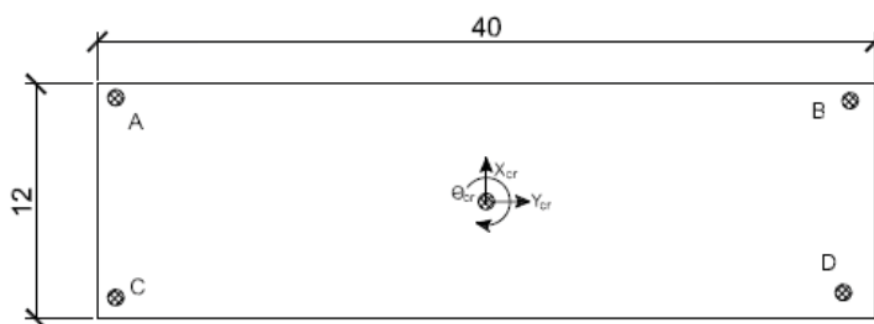


รูปที่ 5.39 หอพักที่ทำการตรวจวัด

ลักษณะโครงสร้าง

โครงสร้างเป็นแบบเสาและคาน (Frame System) โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) โครงสร้างลักษณะดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่ใช้กันมากสำหรับหอพักที่สร้างโดยผู้ประกอบการเอกชนในเขตใกล้นิคมอุตสาหกรรม และเป็นอาคารที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในย่านดังกล่าว

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์



รูปที่ 5.40 ผังการวางเครื่องมือตรวจวัดและแกนอ้างอิง

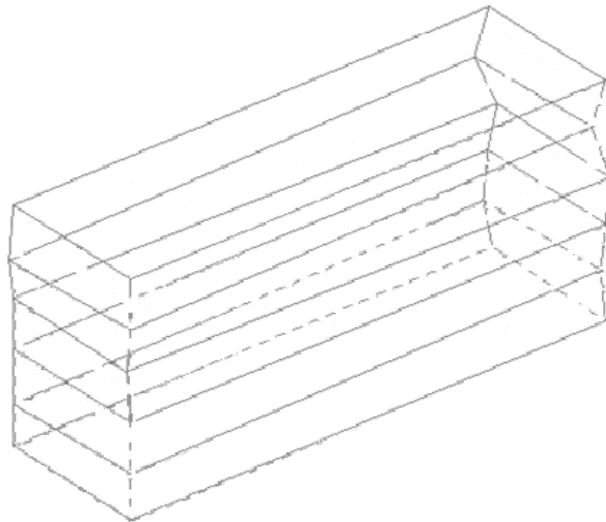
ความถี่ธรรมชาติ

Major Direction	Natural frequency (Hz)
X	3.19
Y	3.19
θ	4.78

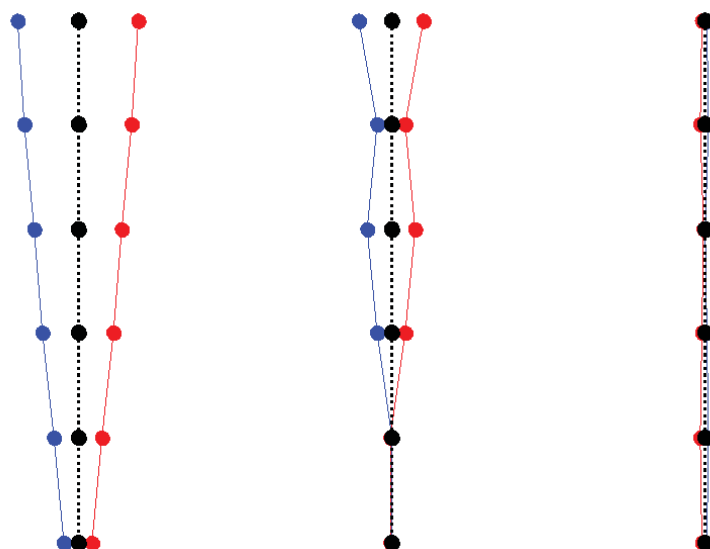
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.19 Hz (แนว X)

$$X=1.0000 \ Y=0.5330 \ \theta=-0.0120$$

รูปที่ 5.41 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.42 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

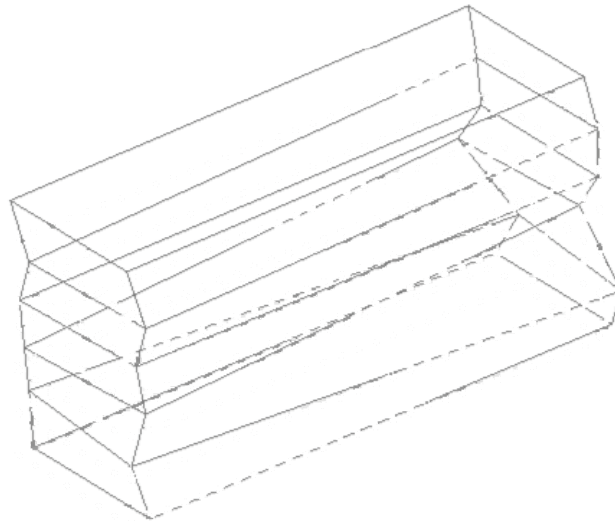


รูปที่ 5.43 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

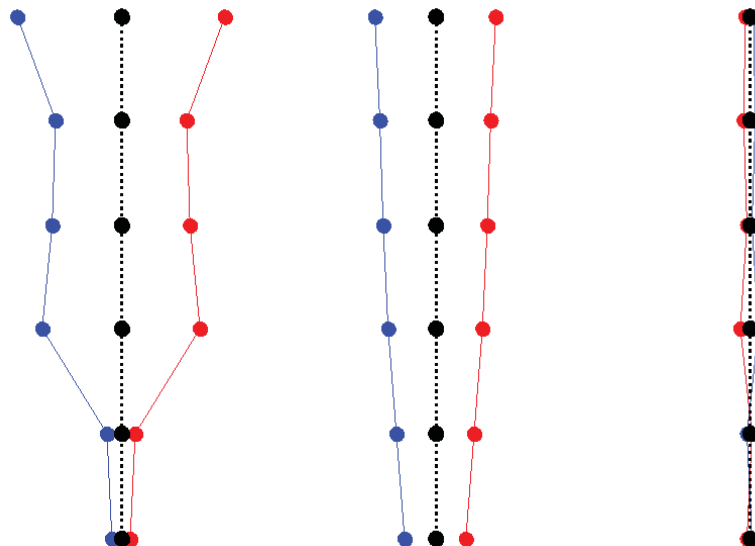
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.19 Hz (แนว Y)

$$X=1.7160 \ Y=1.0000 \ \theta=-0.0360$$

รูปที่ 5.44 รูปแปลนบนสุด

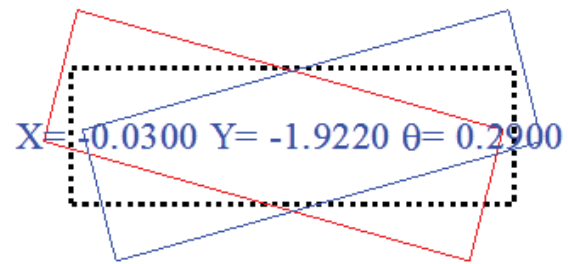


รูปที่ 5.45 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

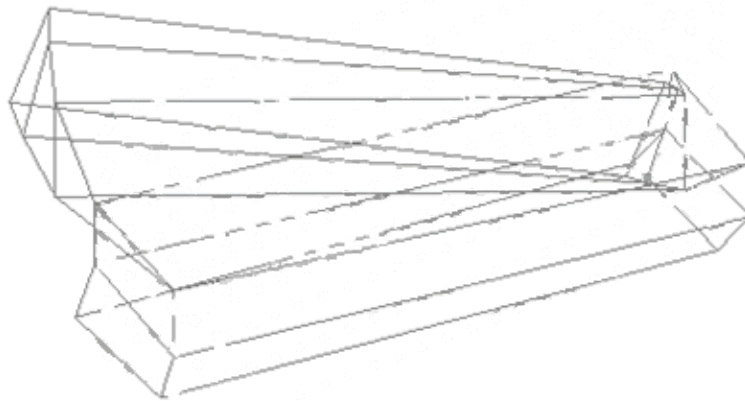


รูปที่ 5.46 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

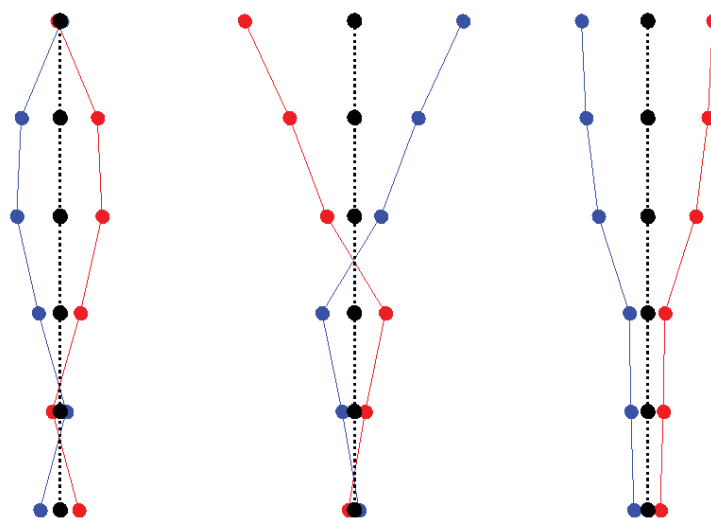
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 4.78 Hz



รูปที่ 5.47 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.48 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ



รูปที่ 5.49 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

อัตราส่วนความหน่วง

อัตราส่วน ความหน่วง	ทิศทาง X	ทิศทาง Y	ทิศทางหมุน
	ความถี่ 3.19 Hz	ความถี่ 3.19 Hz	ความถี่ 4.78 Hz
Maximum	0.0189	0.0105	0.0066
Average	0.0078	0.0054	0.0037
Minimum	0.0006	0.0005	0.0012

5.1.4 หอพัทธนารักษ์ สูง 6 ชั้น

ข้อมูลเบื้องต้น

เจ้าของอาคาร:	ผู้ประกอบการเอกชน
ที่ตั้ง:	ถนนบางนา-ตราด กม.7
ลักษณะอาคาร:	อาคารชุดพักอาศัย สูง 6 ชั้น
สภาพอาคารขณะตรวจวัด:	อยู่ระหว่างการใช้งานตามปกติ



รูปที่ 5.50 อาคารที่ทำการตรวจวัด



รูปที่ 5.51 อาคารที่ทำการตรวจวัด

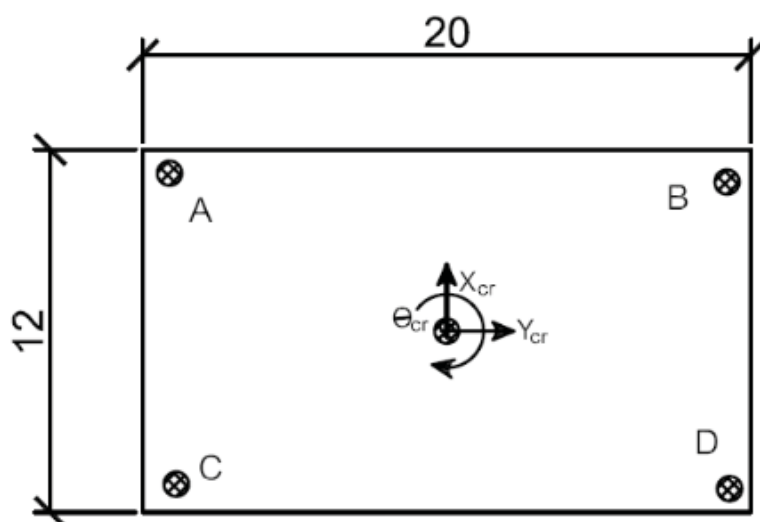


รูปที่ 5.52 อาคารที่ทำการตรวจวัด

ลักษณะโครงสร้าง

โครงสร้างเป็นแบบเสาและคาน (Frame System) โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete)) โครงสร้างลักษณะดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่ใช้กันมากสำหรับหอพักที่สร้างโดยผู้ประกอบการเอกชนในเขตใกล้นิคมอุตสาหกรรม และเป็นอาคารที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในย่านดังกล่าว อีกประการที่สำคัญคือชั้นล่างได้เว้นว่างไว้เป็นที่จอดรถมอเตอร์ไซด์ซึ่งเปิดโล่งโดยไม่มีกำแพงด้วย

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

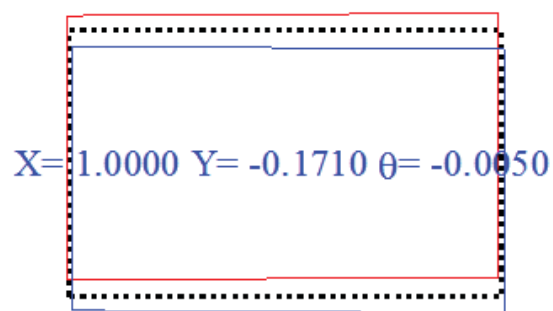


รูปที่ 5.53 ผังการวางเครื่องมือตรวจวัดและแกนอ้างอิง

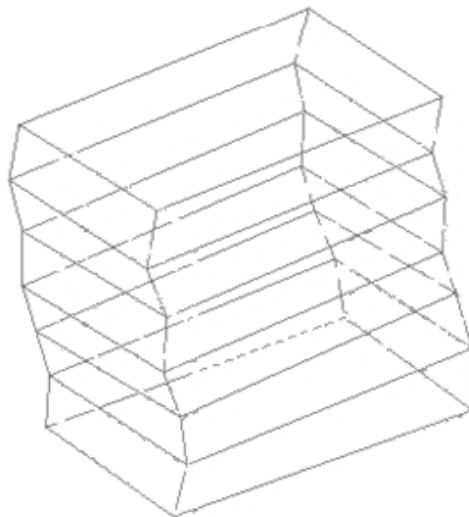
ความถี่ธรรมชาติ

Major Direction	Natural frequency (Hz)
X	2.70
	3.25
Y	3.25
θ	4.93

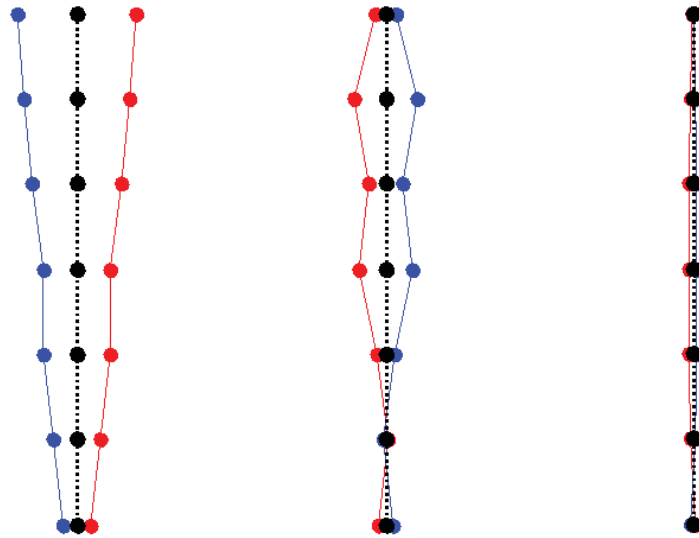
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 2.70 Hz



รูปที่ 5.54 รูปแปลนบนสุด

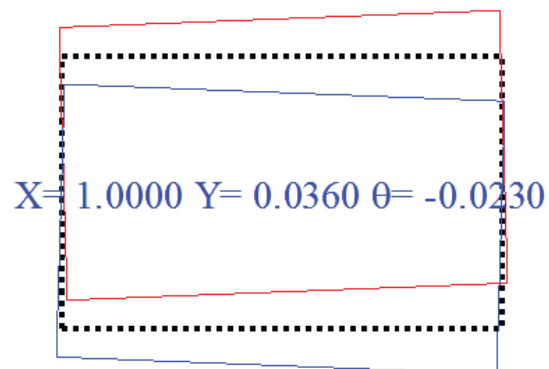


รูปที่ 5.55 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

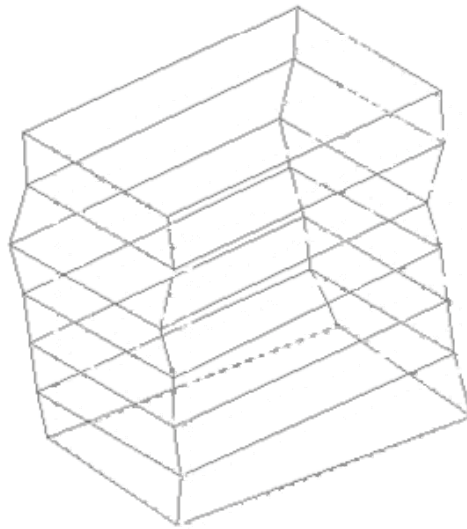


รูปที่ 5.56 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

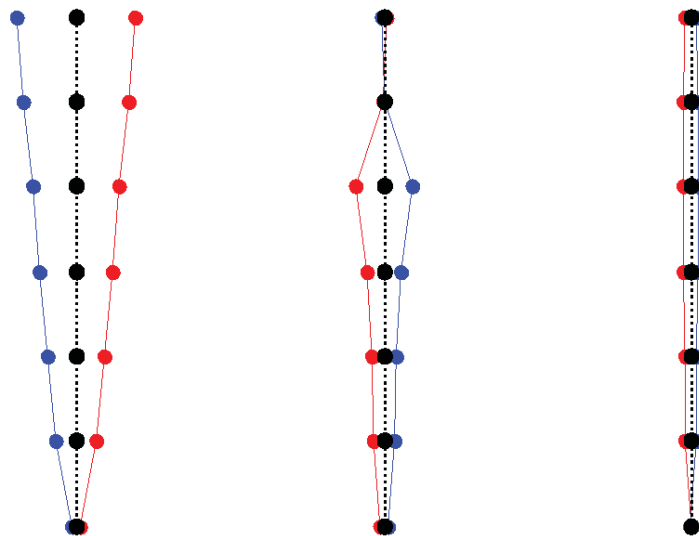
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.25 Hz (แนว X)



รูปที่ 5.57 รูปแปลนบนสุด

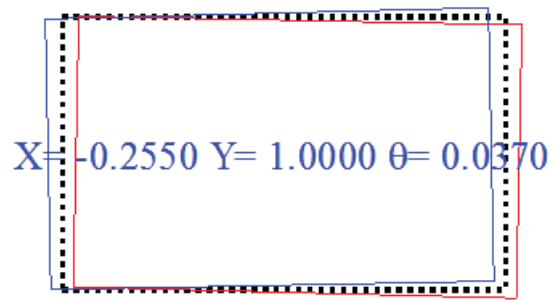


รูปที่ 5.58 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

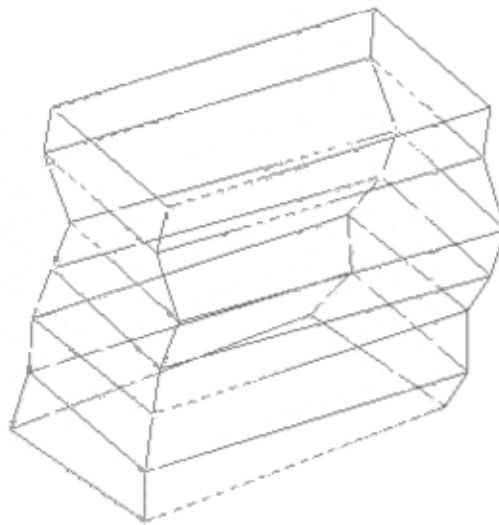


รูปที่ 5.59 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง XY และการหมุน

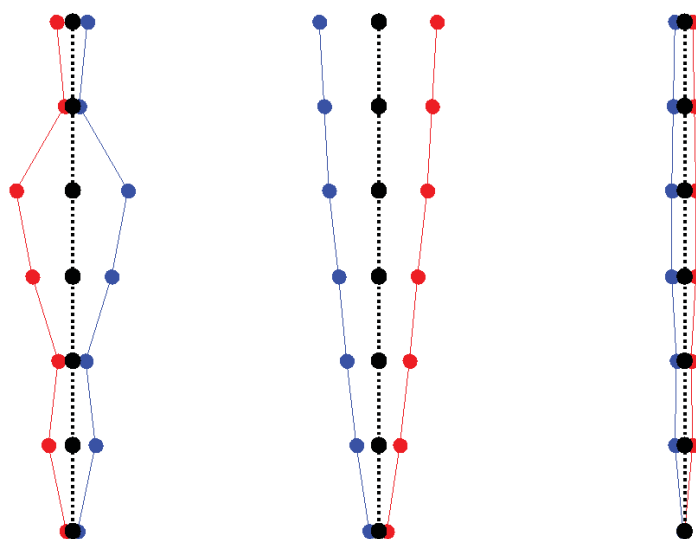
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.25 Hz (แนว Y)



รูปที่ 5.60 รูปแปลนบนสุด

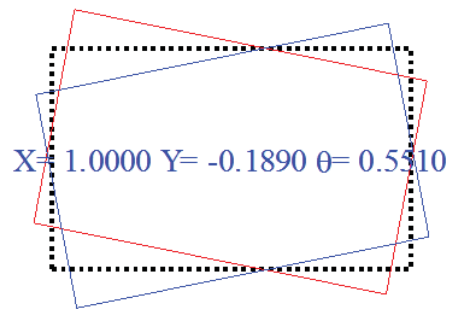


รูปที่ 5.61 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

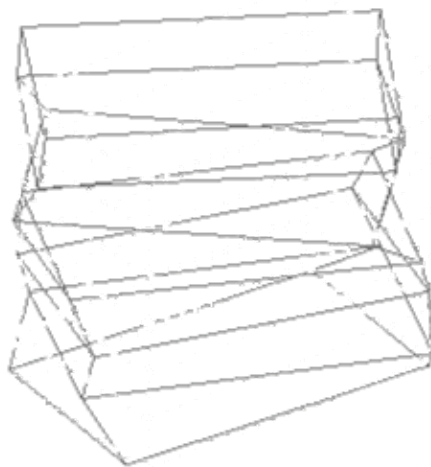


รูปที่ 5.62 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง XY และการหมุน

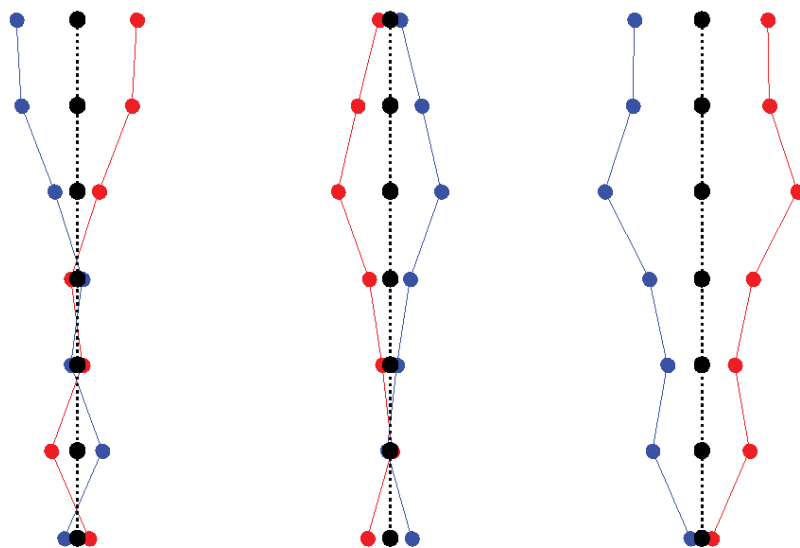
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 4.93 Hz



รูปที่ 5.63 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.64 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ



รูปที่ 5.65 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

อัตราส่วนความหน่วง

อัตราส่วน ความหน่วง	ทิศทาง X	ทิศทาง X	ทิศทาง Y	ทิศทางหมุน
	ความถี่ 2.70 Hz	ความถี่ 3.25 Hz	ความถี่ 3.25 Hz	ความถี่ 4.93 Hz
Maximum	0.0155	0.0097	0.0405	0.0125
Average	0.0079	0.0044	0.0146	0.0051
Minimum	0.0006	0.0005	0.0008	0.0020

5.1.5 หอพักพรสมนึก สูง 5 ชั้น

ข้อมูลเบื้องต้น

เจ้าของอาคาร:	ผู้ประกอบการเอกชน
ที่ตั้ง:	ถนนบางนา-ตราด กม.7
ลักษณะอาคาร:	อาคารชุดพักอาศัย สูง 5 ชั้น
สภาพอาคารขณะตรวจวัด:	อยู่ระหว่างการใช้งานตามปกติ

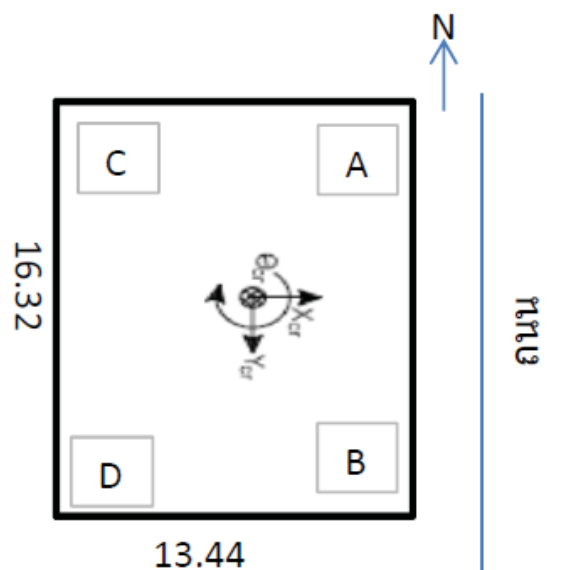


รูปที่ 5.66 หอพักพรสมนึก

ลักษณะโครงสร้าง

โครงสร้างเป็นแบบเสาและคาน (Frame System) โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete)) โครงสร้างลักษณะดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่ใช้กันมากสำหรับหอพักที่สร้างโดยผู้ประกอบการเอกชนในเขตใกล้ถนนอุตสาหกรรม และเป็นอาคารที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในย่านดังกล่าว

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์เบื้องต้น

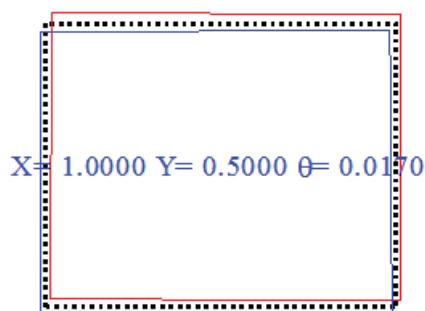


รูปที่ 5.67 การวางเครื่องมือตรวจวัดและแกนอ้างอิง

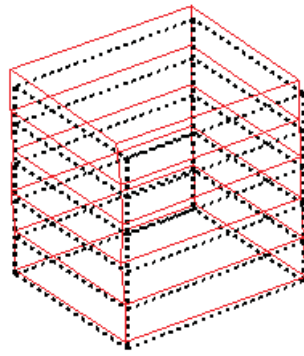
ความถี่ธรรมชาติ

Major Direction	Natural frequency (Hz)
X	3.19
Y	3.85
θ	6.23

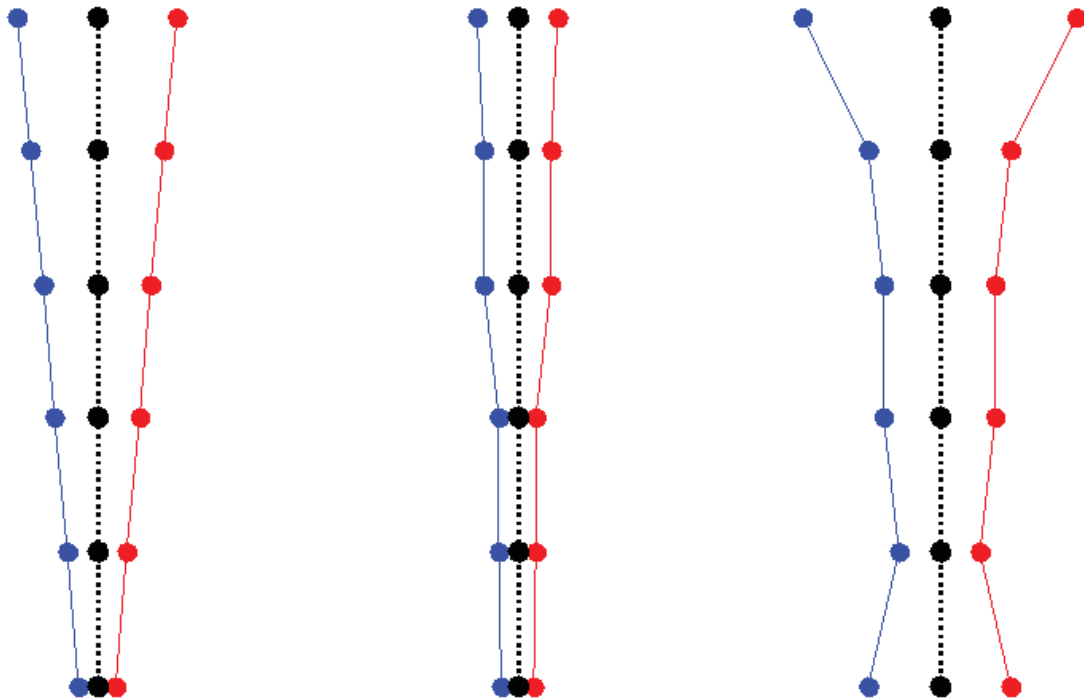
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.19 Hz



รูปที่ 5.68 รูปแปลนบนสุด

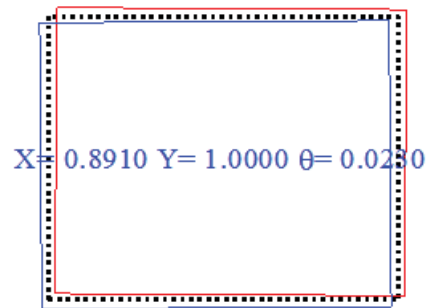


รูปที่ 5.69 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

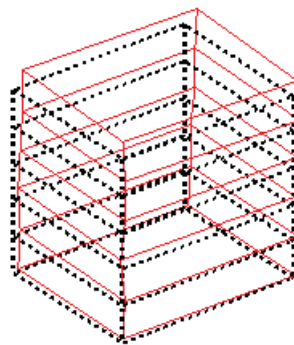


รูปที่ 5.70 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง xy และการหมุน

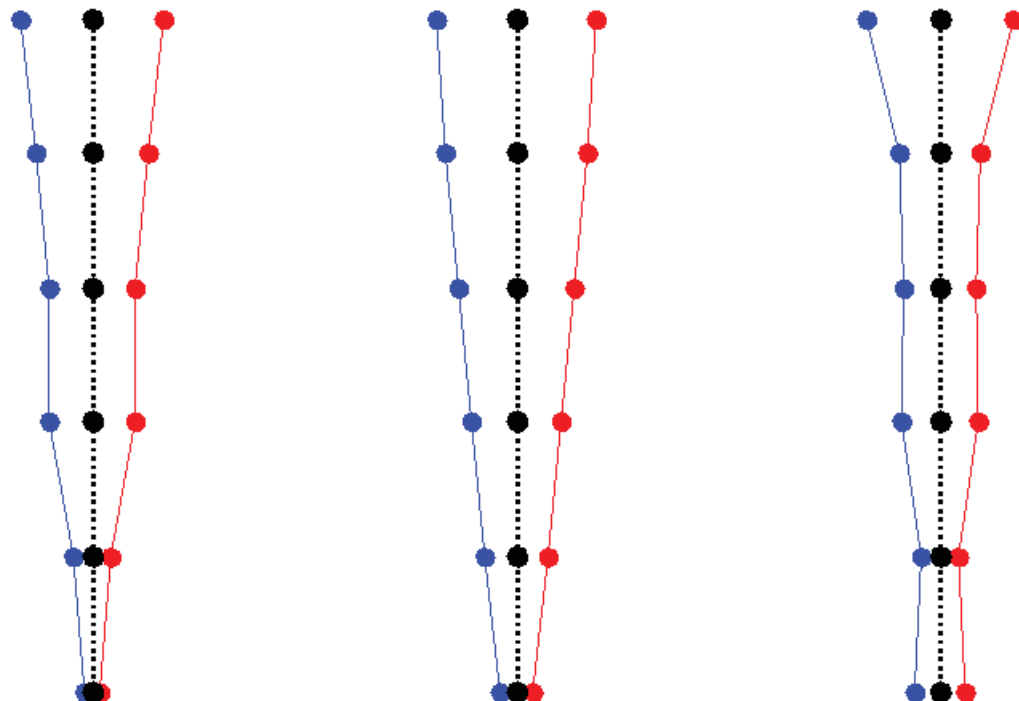
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.85 Hz



รูปที่ 5.71 รูปแปลนบนสุด

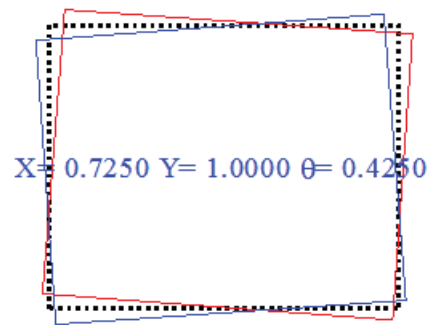


รูปที่ 5.72 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

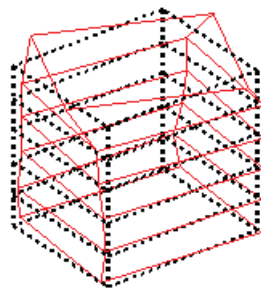


รูปที่ 5.73 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง XY และการหมุน

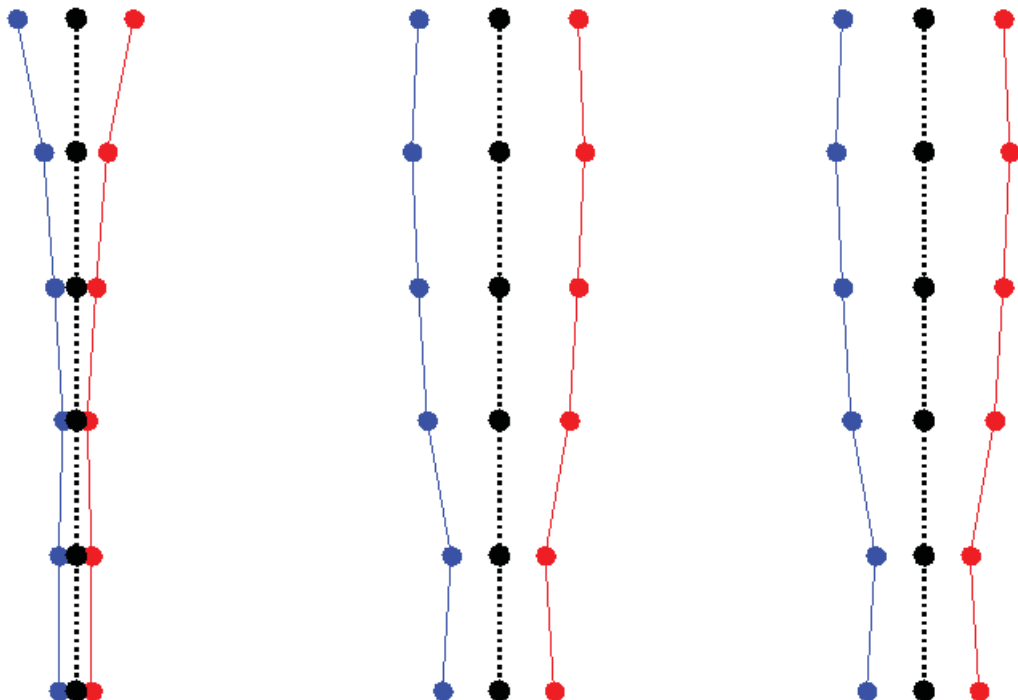
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 6.23 Hz



รูปที่ 5.74 รูปแปดบนบนสุด



รูปที่ 5.75 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ



รูปที่ 5.76 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

อัตราส่วนความหน่วง

อัตราส่วน ความหน่วง	ทิศทาง X	ทิศทาง Y	ทิศทางหมุน
	ความถี่ 3.19 Hz	ความถี่ 3.85 Hz	ความถี่ 6.23 Hz
Maximum	0.0123	0.0091	0.0074
Average	0.0069	0.0046	0.0051
Minimum	0.0005	0.0007	0.0040

5.1.6 หอพักจันทร์แก้วสูง 5 ชั้น

ข้อมูลเบื้องต้น

เจ้าของอาคาร:	ผู้ประกอบการเอกชน
ที่ตั้ง:	ถนนบางนา-ตราด กม.7
ลักษณะอาคาร:	อาคารชุดพักอาศัย สูง 5 ชั้น
สภาพอาคารขณะตรวจวัด:	อยู่ระหว่างการใช้งานตามปกติ

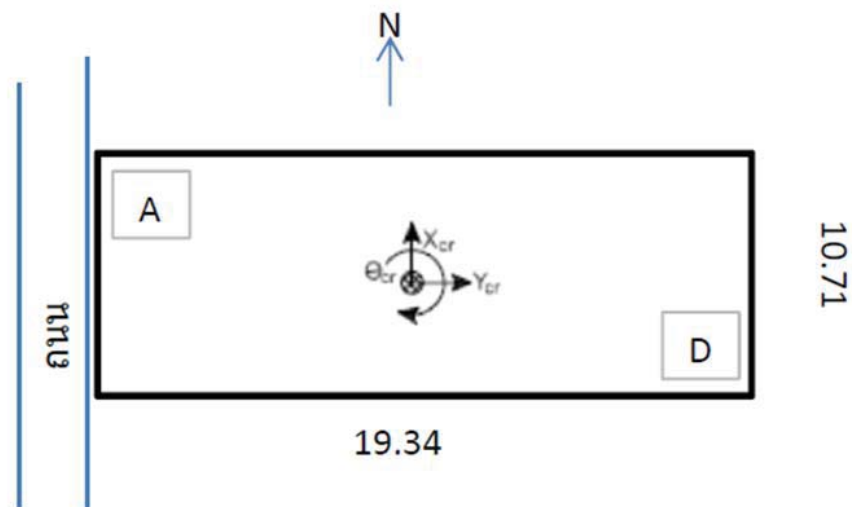


รูปที่ 5.77 หอพักจันทร์แก้ว

ลักษณะโครงสร้าง

โครงสร้างเป็นแบบเสาและคาน (Frame System) โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete)) โครงสร้างลักษณะดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่ใช้กันมากสำหรับหอพักที่สร้างโดยผู้ประกอบการเอกชนในเขตใกล้นิคมอุตสาหกรรม และเป็นอาคารที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในย่านดังกล่าว อีกประการที่สำคัญคือชั้นล่างได้เว้นว่างไว้เป็นที่จอดรถมอเตอร์ไซด์ซึ่งเปิดโล่งโดยไม่มีกำแพงด้วย

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์เบื้องต้น

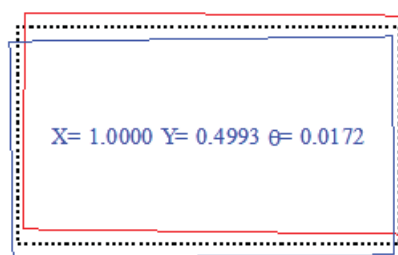


รูปที่ 5.78 การวางเครื่องมือตรวจวัดและแกนอ้างอิง

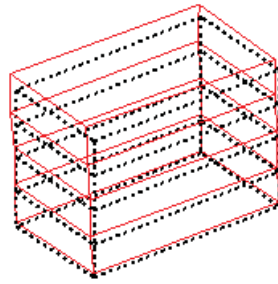
ความถี่ธรรมชาติ

Major Direction	Natural frequency (Hz)
X	2.81
Y	3.19
θ	4.43

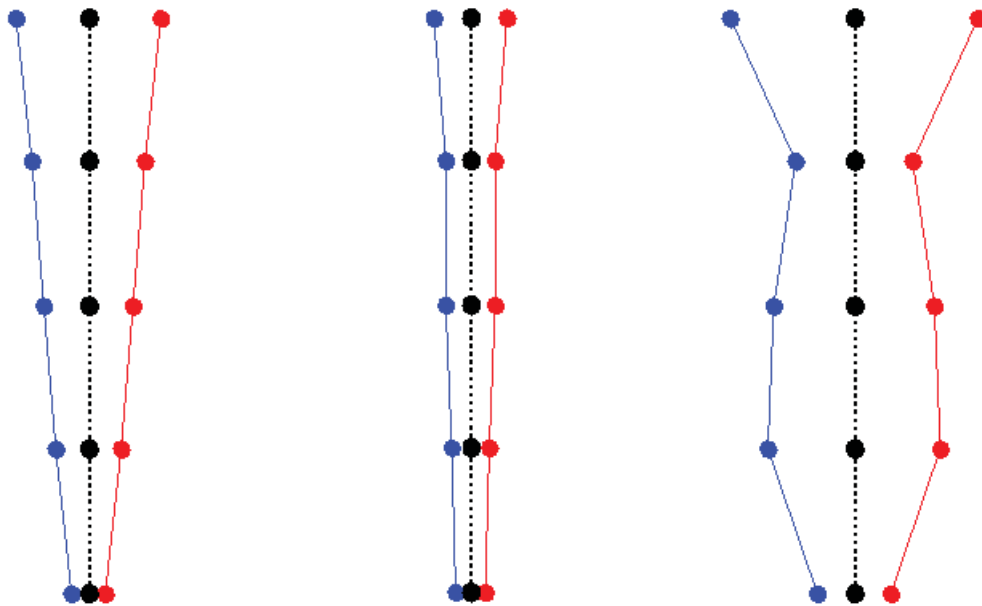
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 2.81 Hz



รูปที่ 5.79 รูปแปลนบนสุด

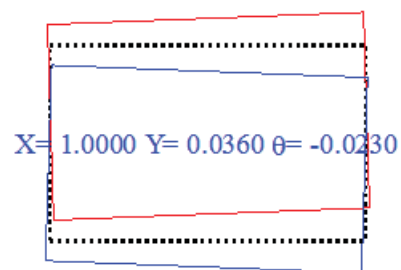


รูปที่ 5.80 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

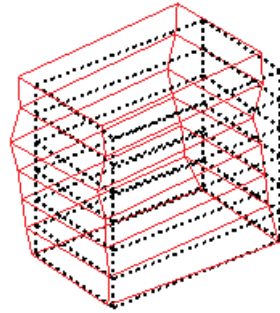


รูปที่ 5.81 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง XY และการหมุน

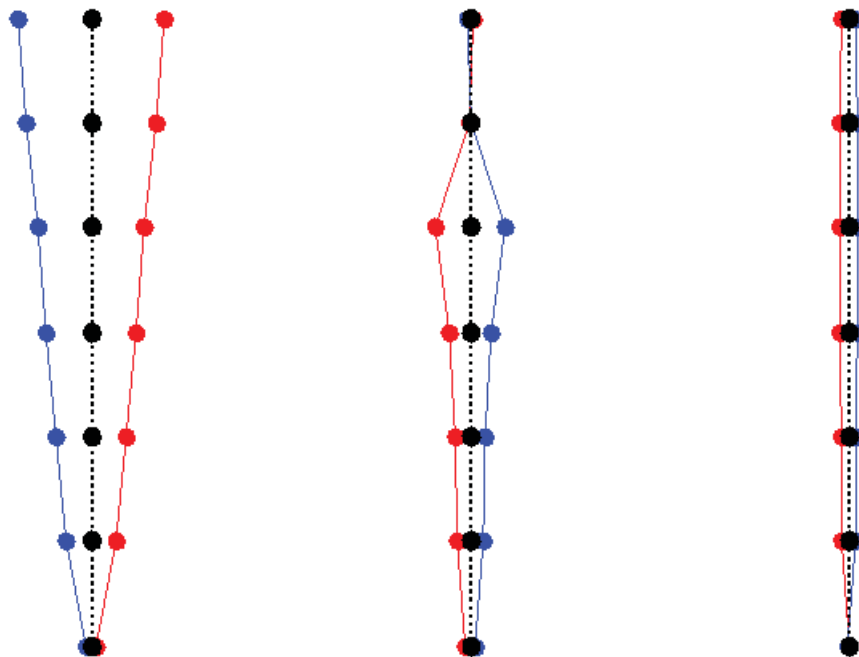
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ **3.19 Hz**



รูปที่ 5.82 รูปแปลนบนสุด

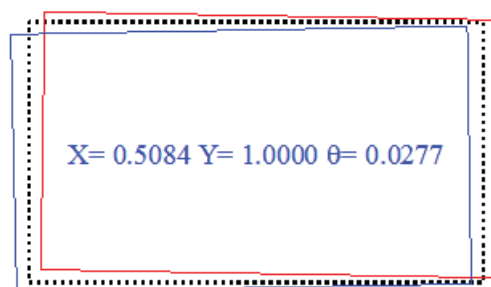


รูปที่ 5.83 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ

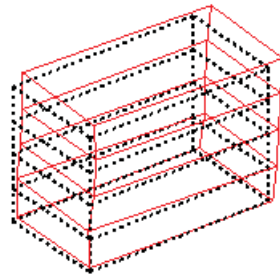


รูปที่ 5.84 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

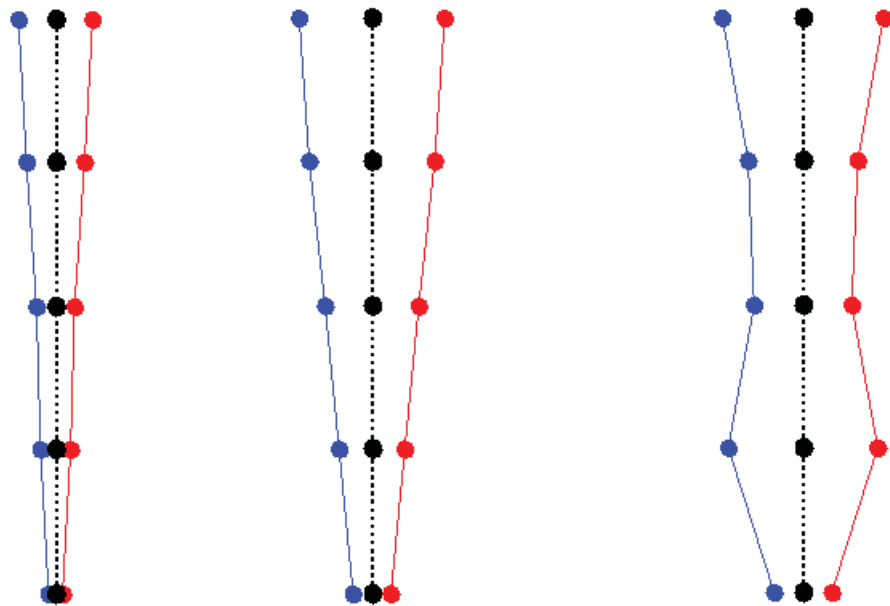
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 4.43 Hz



รูปที่ 5.85 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.86 รูปร่างการสั่นไหวแบบ 3 มิติ



รูปที่ 5.87 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน

อัตราส่วนความหน่วง

อัตราส่วน ความหน่วง	ทิศทาง X	ทิศทาง Y	ทิศทางหมุน
	ความถี่ 2.81 Hz	ความถี่ 3.19 Hz	ความถี่ 4.43 Hz
Maximum	0.0104	0.0112	0.0086
Average	0.0068	0.0046	0.0044
Minimum	0.0007	0.0010	0.0015

5.1.7 หอพักเบญจพรสูง 5 ชั้น

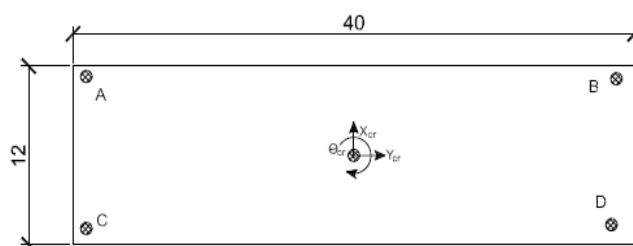
ข้อมูลเบื้องต้น

เจ้าของอาคาร:	ผู้ประกอบการเอกชน
ที่ตั้ง:	ย่านมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต
ลักษณะอาคาร:	อาคารชุดพักอาศัย สูง 5 ชั้น
สภาพอาคารขณะตรวจวัด:	อยู่ระหว่างการใช้งานตามปกติ

ลักษณะโครงสร้าง

โครงสร้างเป็นแบบเสาและคาน (Frame System) โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) โครงสร้างลักษณะดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่ใช้กันมากสำหรับหอพักที่สร้างโดยผู้ประกอบการเอกชนในเขตใกล้มหาวิทยาลัย

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์เบื้องต้น

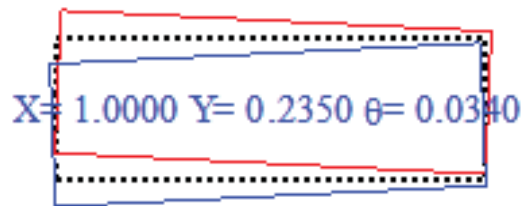


รูปที่ 5.88 การวางเครื่องมือตรวจวัดและแกนอ้างอิง

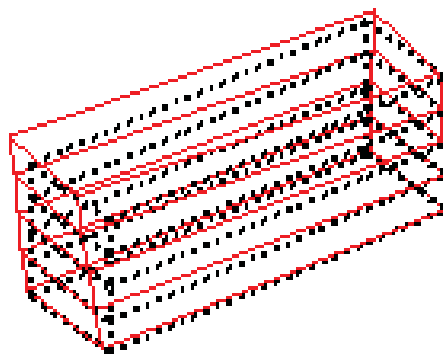
ความถี่ธรรมชาติ

Major Direction	Natural frequency (Hz)
X	3.20
Y	1.20
	2.03
θ	4.78

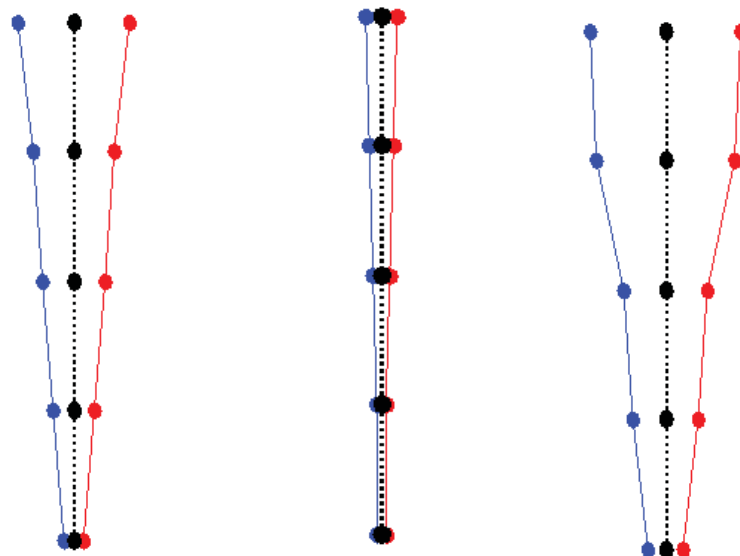
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.20 Hz (แนว X)



รูปที่ 5.89 รูปแปลนบนสุด

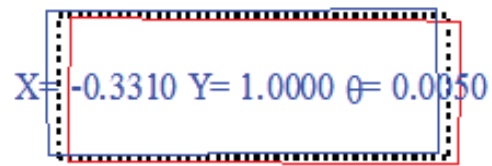


รูปที่ 5.90 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ

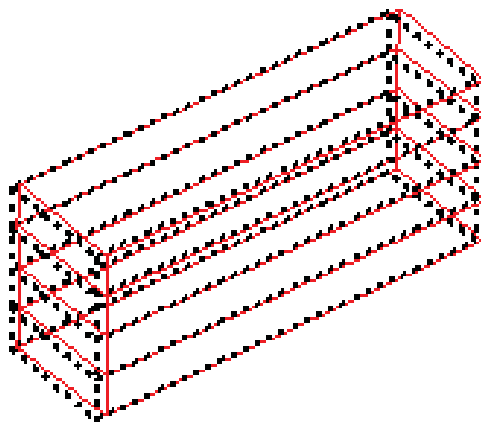


รูปที่ 5.91 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

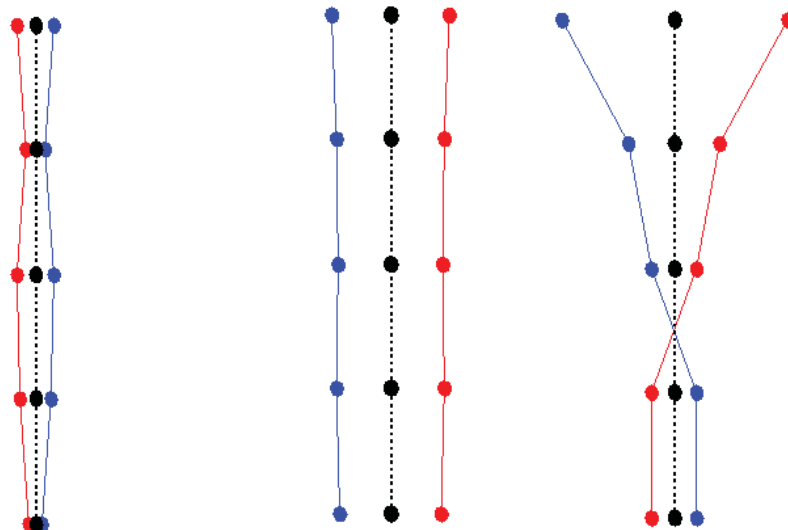
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 1.20 Hz (แนว Y)



รูปที่ 5.92 รูปแปลนบนสุด

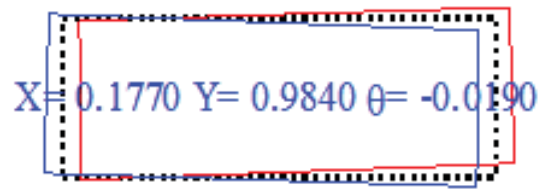


รูปที่ 5.93 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ

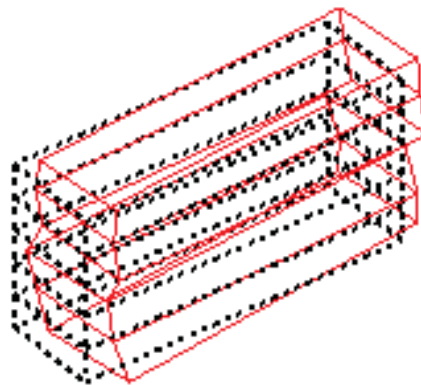


รูปที่ 5.94 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

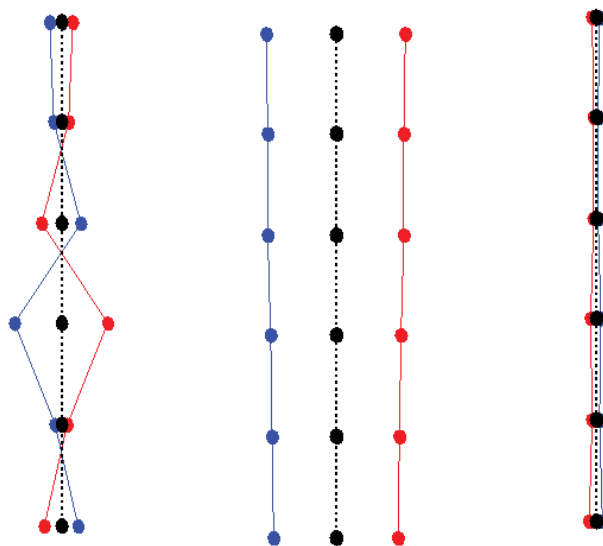
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 2.03 Hz (แนว Y)



รูปที่ 5.95 รูปแปลนบนสุด

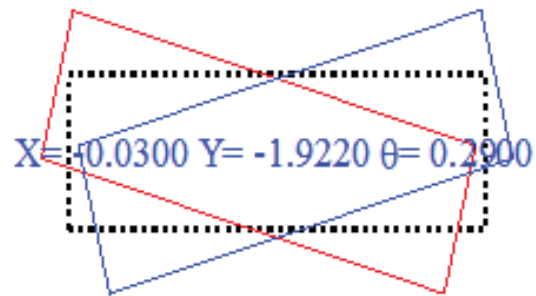


รูปที่ 5.96 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ

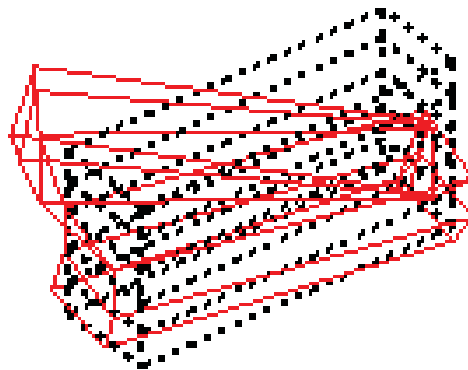


รูปที่ 5.97 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

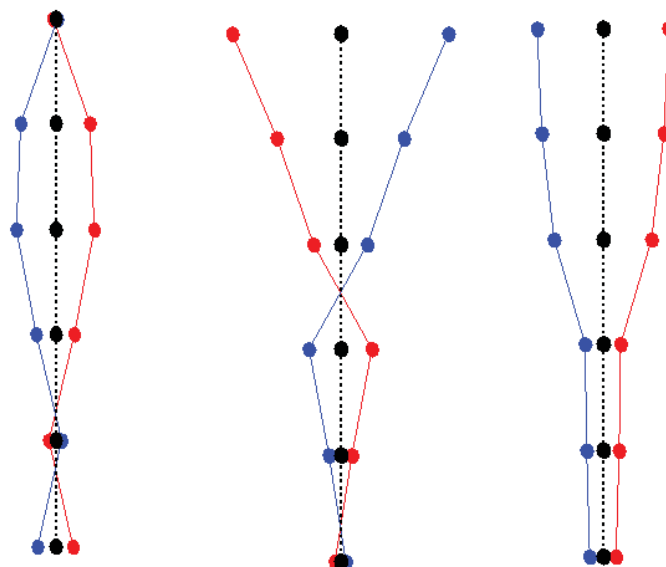
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 4.78 Hz



รูปที่ 5.98 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.99 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ



รูปที่ 5.100 รูปร่างการสั่นในทิศทาง x y และการหมุน

5.1.8 หอพักถนพร1 สูง 5 ชั้น

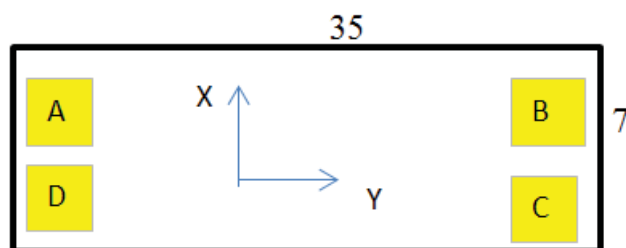
ข้อมูลเบื้องต้น

เจ้าของอาคาร:	ผู้ประกอบการเอกชน
ที่ตั้ง:	ย่านมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต
ลักษณะอาคาร:	อาคารชุดพักอาศัย สูง 5 ชั้น
สภาพอาคารขณะตรวจวัด:	อยู่ระหว่างการใช้งานตามปกติ

ลักษณะโครงสร้าง

โครงสร้างเป็นแบบเสาและคาน (Frame System) โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) โครงสร้างลักษณะดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่ใช้กันมากสำหรับหอพักที่สร้างโดยผู้ประกอบการเอกชนในเขตใกล้มหาวิทยาลัย

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์เบื้องต้น

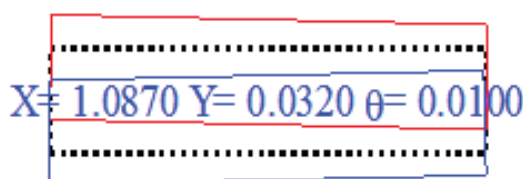


รูปที่ 5.101 การวางเครื่องมือตรวจวัดและแกนอ้างอิง

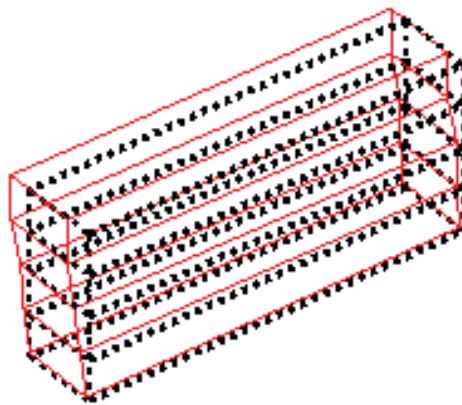
ความถี่ธรรมชาติ

Major Direction	Natural frequency (Hz)
X	3.19
Y	1.10
θ	3.83

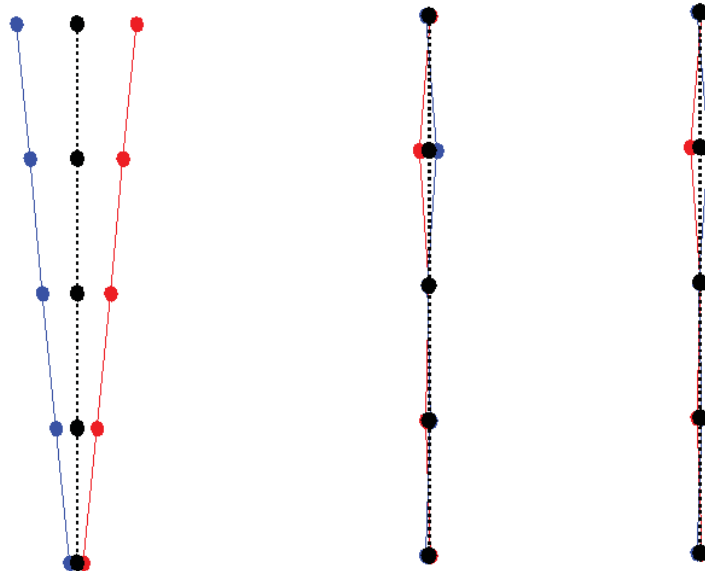
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.19 Hz



รูปที่ 5.102 รูปแปลนบนสุด

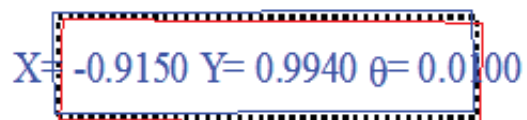


รูปที่ 5.103 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ

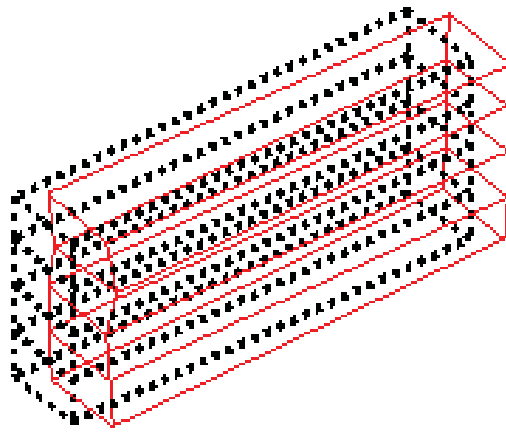


รูปที่ 5.104 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

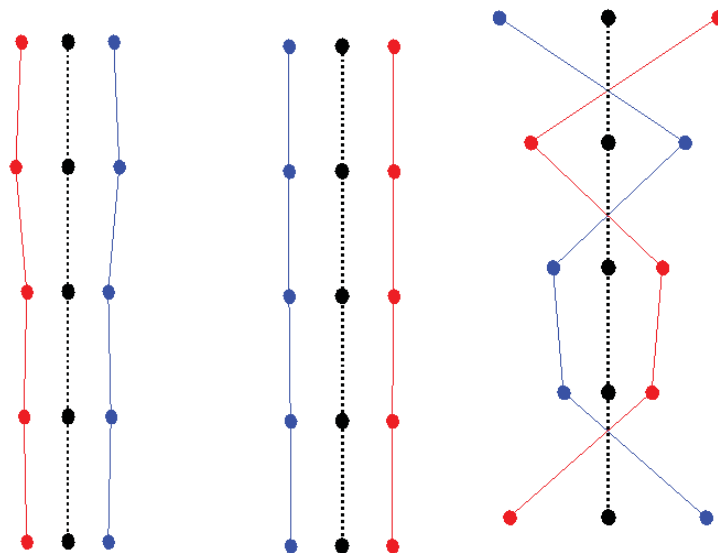
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 1.10 Hz



รูปที่ 5.105 รูปแปลนบนสุด

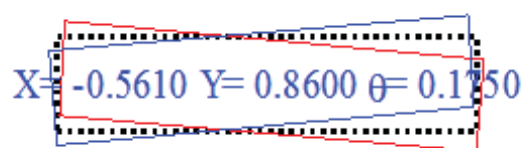


รูปที่ 5.106 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ

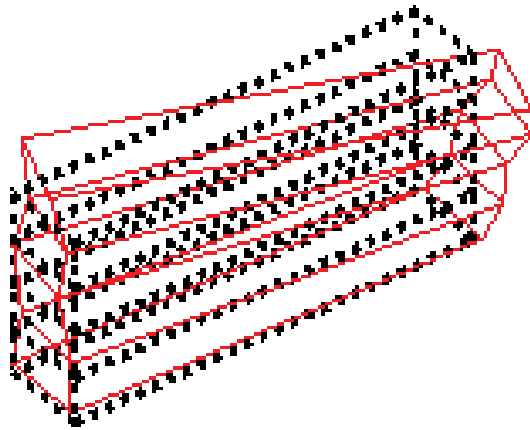


รูปที่ 5.107 รูปร่างการสั่นในทิศทาง XY และการหมุน

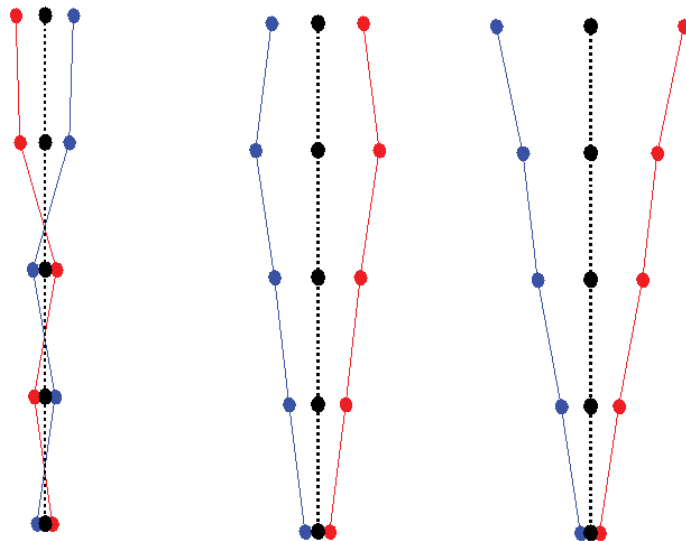
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.83 Hz



รูปที่ 5.108 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.109 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ



รูปที่ 5.110 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

5.1.9 หอพักนิวแมนชั้น สูง 4 ชั้น

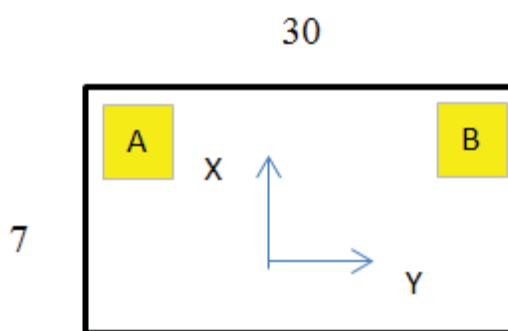
ข้อมูลเบื้องต้น

เจ้าของอาคาร:	ผู้ประกอบการเอกชน
ที่ตั้ง:	ย่านมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต
ลักษณะอาคาร:	อาคารชุดพักอาศัย สูง 4 ชั้น
สภาพอาคารขณะตรวจวัด:	อยู่ระหว่างการใช้งานตามปกติ

ลักษณะโครงสร้าง

โครงสร้างเป็นแบบเสาและคาน (Frame System) โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) โครงสร้างลักษณะดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่ใช้กันมากสำหรับหอพักที่สร้างโดยผู้ประกอบการเอกชนในเขตใกล้มหาวิทยาลัย

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์เบื้องต้น

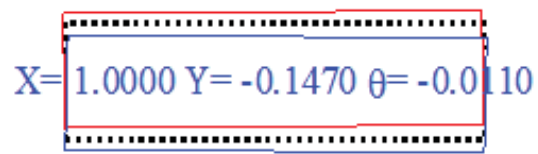


รูปที่ 5.111 การวางเครื่องมือตรวจวัดและแกนอ้างอิง

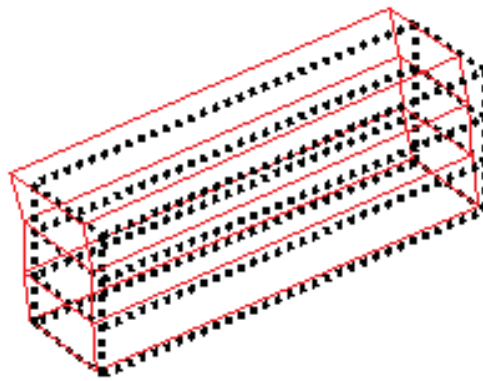
ความถี่ธรรมชาติ

Major Direction	Natural frequency (Hz)
X	3.06
Y	3.37
θ	3.51

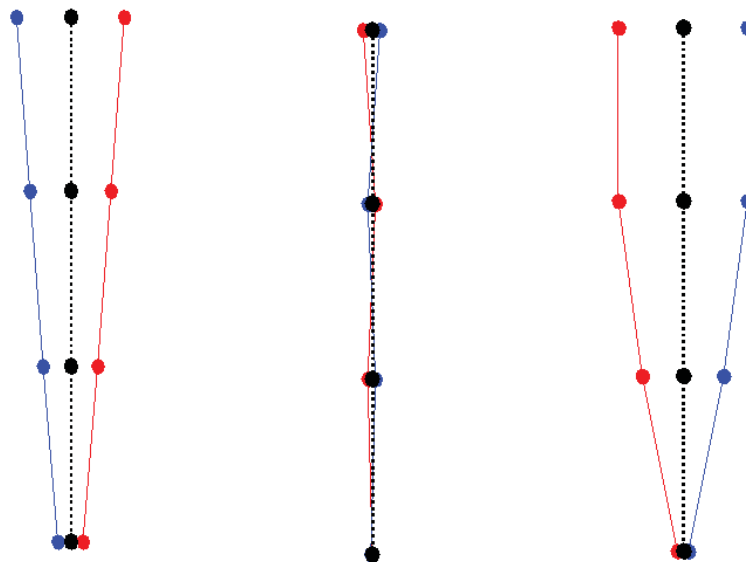
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.06 Hz



รูปที่ 5.112 รูปแปลนบนสุด

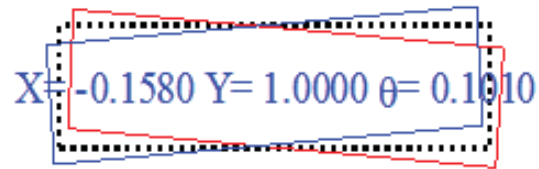


รูปที่ 5.113 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ

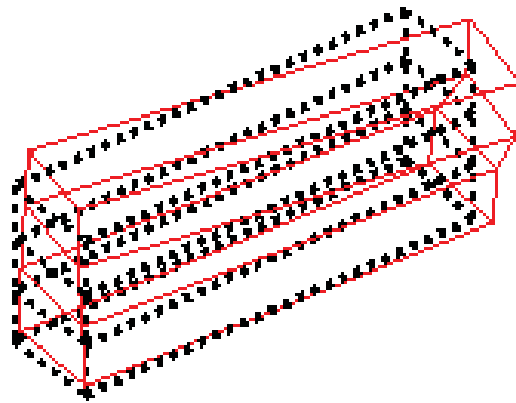


รูปที่ 5.114 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

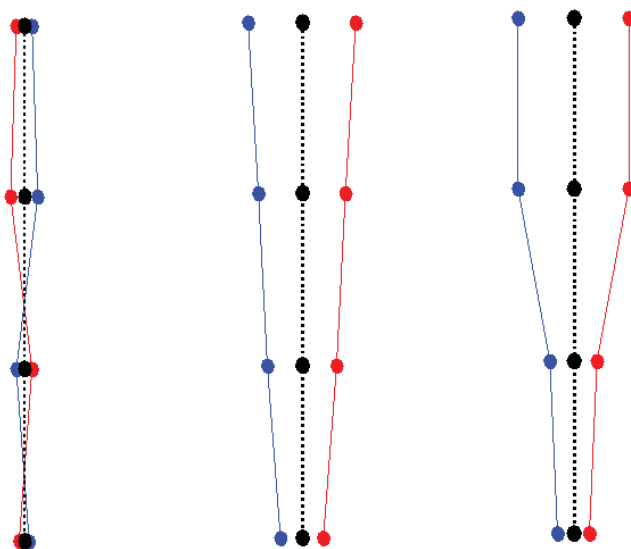
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.37 Hz



รูปที่ 5.115 รูปแปลนบนสุด

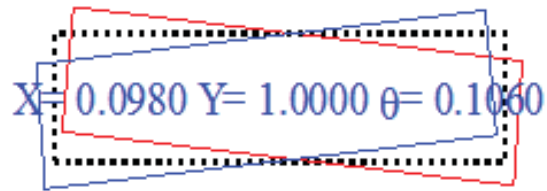


รูปที่ 5.116 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ

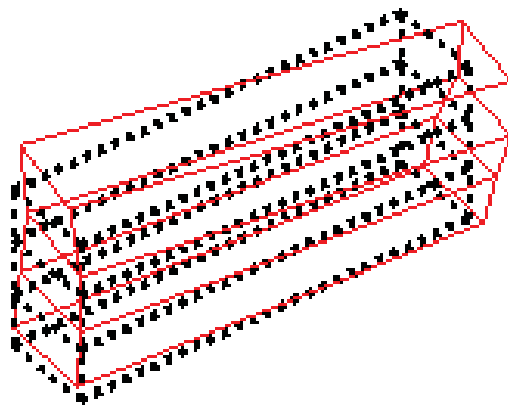


รูปที่ 5.117 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

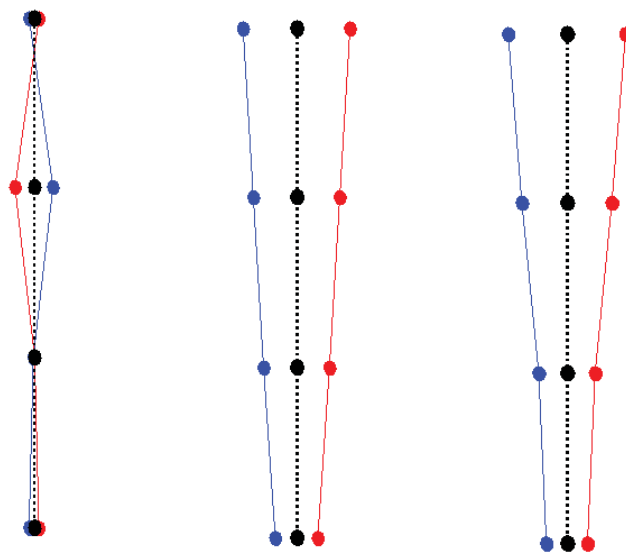
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.51 Hz



รูปที่ 5.118 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.119 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ



รูปที่ 5.120 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

5.1.10 หอพักพระคุณพ่อแม่ สูง 5 ชั้น

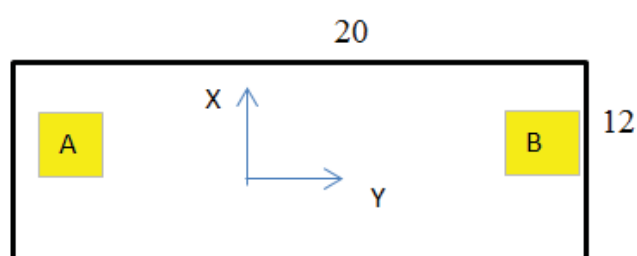
ข้อมูลเบื้องต้น

เจ้าของอาคาร:	ผู้ประกอบการเอกชน
ที่ตั้ง:	ย่านมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต
ลักษณะอาคาร:	อาคารชุดพักอาศัย สูง 5 ชั้น
สภาพอาคารขณะตรวจวัด:	อยู่ระหว่างการใช้งานตามปกติ

ลักษณะโครงสร้าง

โครงสร้างเป็นแบบเสาและคาน (Frame System) โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) โครงสร้างลักษณะดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่ใช้กันมากสำหรับหอพักที่สร้างโดยผู้ประกอบการเอกชนในเขตใกล้มหาวิทยาลัย

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์เบื้องต้น

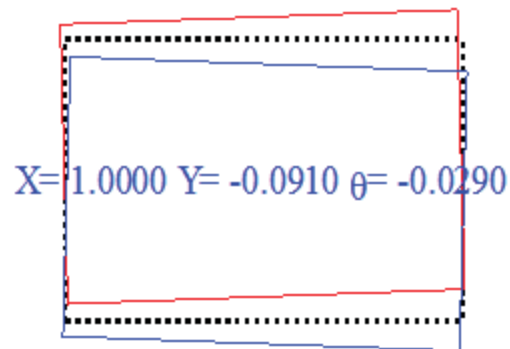


รูปที่ 5.121 การวางเครื่องมือตรวจวัดและแกนอ้างอิง

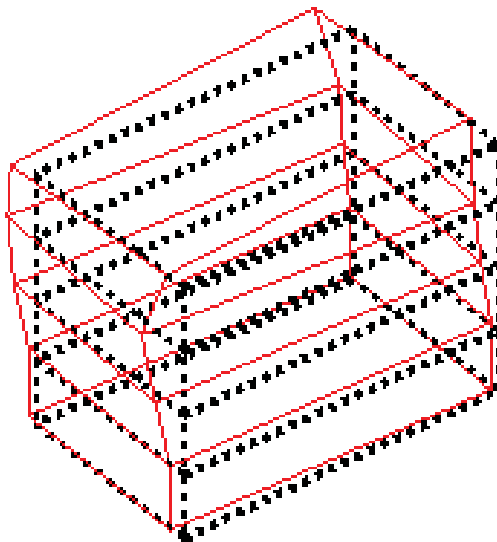
ความถี่ธรรมชาติ

Major Direction	Natural frequency (Hz)
X	3.24
Y	1.10
	3.25
θ	-

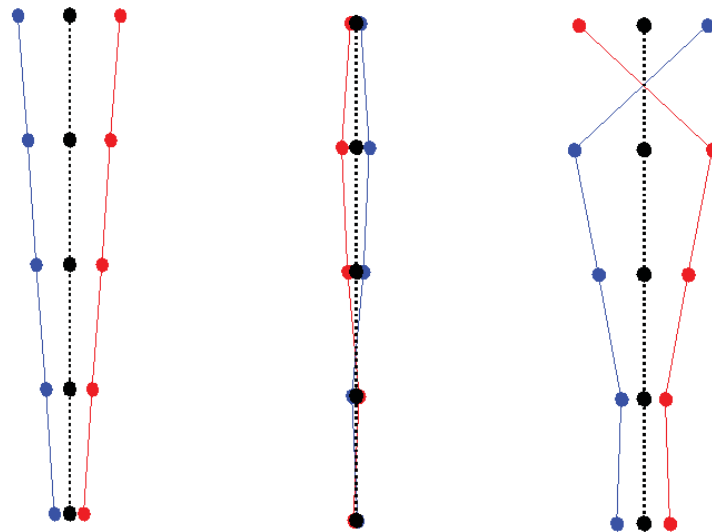
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.24 Hz



รูปที่ 5.122 รูปแปลนบนสุด

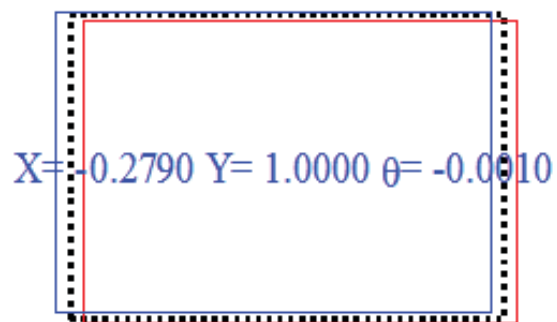


รูปที่ 5.123 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ

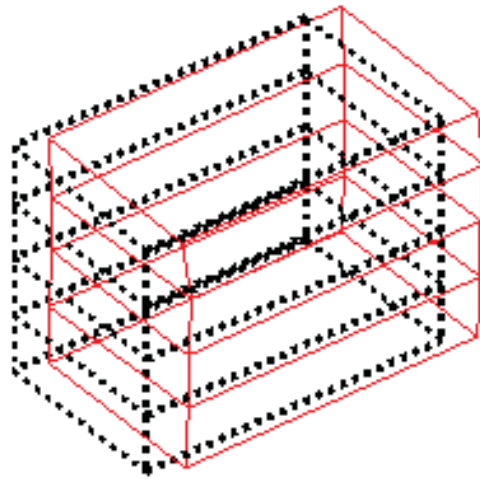


รูปที่ 5.124 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

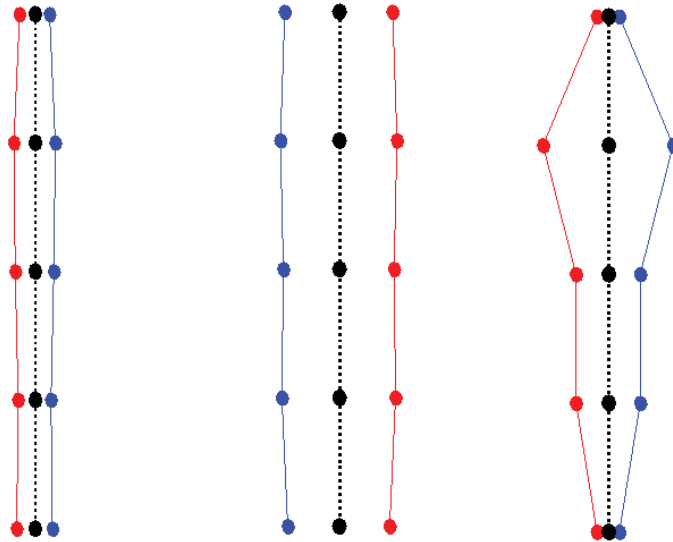
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 1.10 Hz



รูปที่ 5.125 รูปแปลนบนสุด

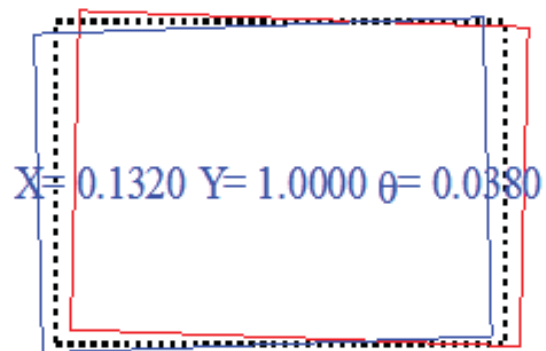


รูปที่ 5.126 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ

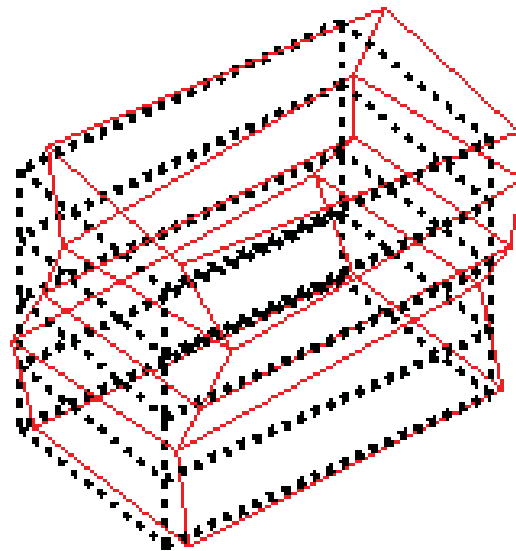


รูปที่ 5.127 รูปร่างการสั่นในทิศทาง x y และการหมุน

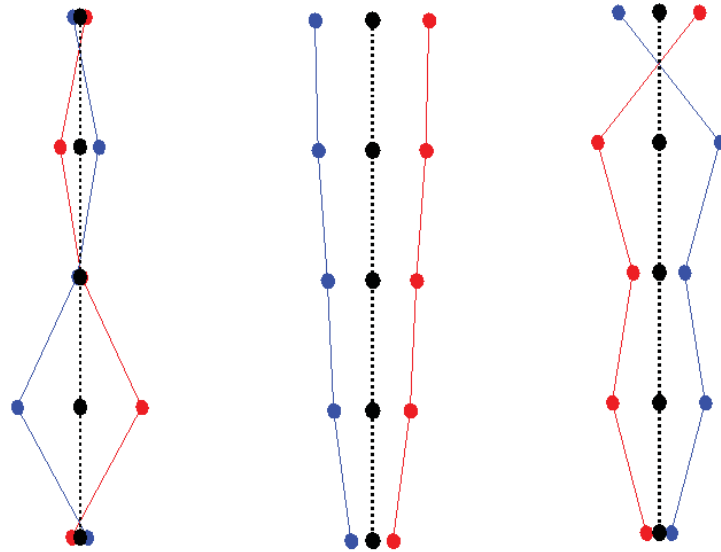
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.25 Hz



รูปที่ 5.128 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.129 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ



รูปที่ 5.130 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X-Y และการหมุน

5.1.11 หอพักวีรภัทร สูง 5 ชั้น

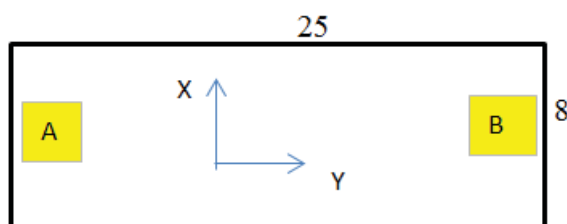
ข้อมูลเบื้องต้น

เจ้าของอาคาร:	ผู้ประกอบการเอกชน
ที่ตั้ง:	ย่านมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต
ลักษณะอาคาร:	อาคารชุดพักอาศัย สูง 5 ชั้น
สภาพอาคารขณะตรวจวัด:	อยู่ระหว่างการใช้งานตามปกติ

ลักษณะโครงสร้าง

โครงสร้างเป็นแบบเสาและคาน (Frame System) โดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) โครงสร้างลักษณะดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่ใช้กันมากสำหรับหอพักที่สร้างโดยผู้ประกอบการเอกชนในเขตใกล้มหาวิทยาลัย

ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์เบื้องต้น

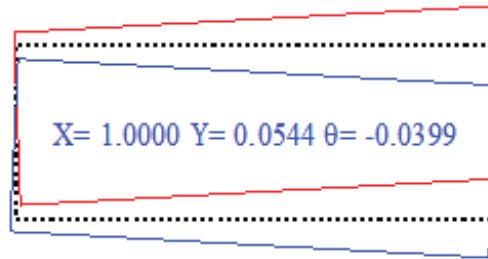


รูปที่ 5.131 การวางเครื่องมือตรวจวัดและแกนอ้างอิง

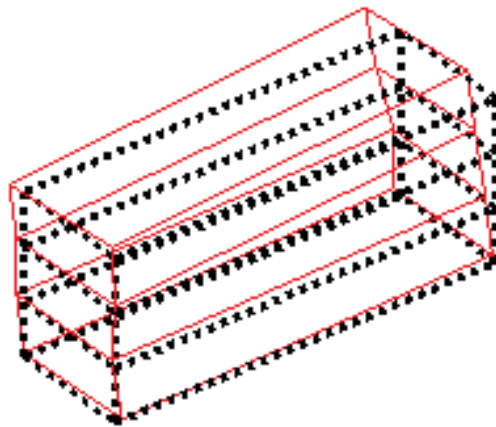
ความถี่ธรรมชาติ

Major Direction	Natural frequency (Hz)
X	2.79
	2.94
Y	3.77
θ	-

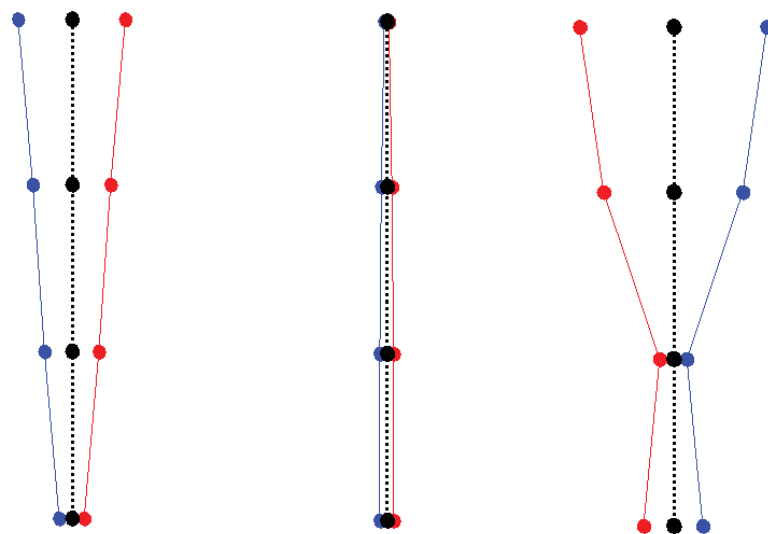
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 2.79 Hz



รูปที่ 5.132 รูปแปลนบนสุด

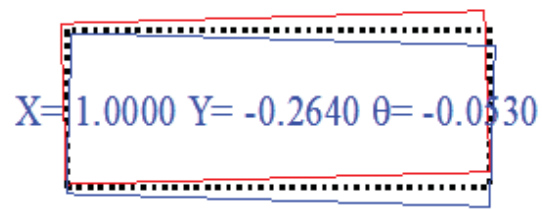


รูปที่ 5.133 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ

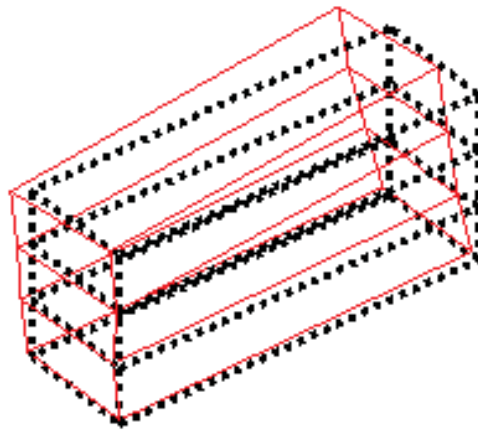


รูปที่ 5.134 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

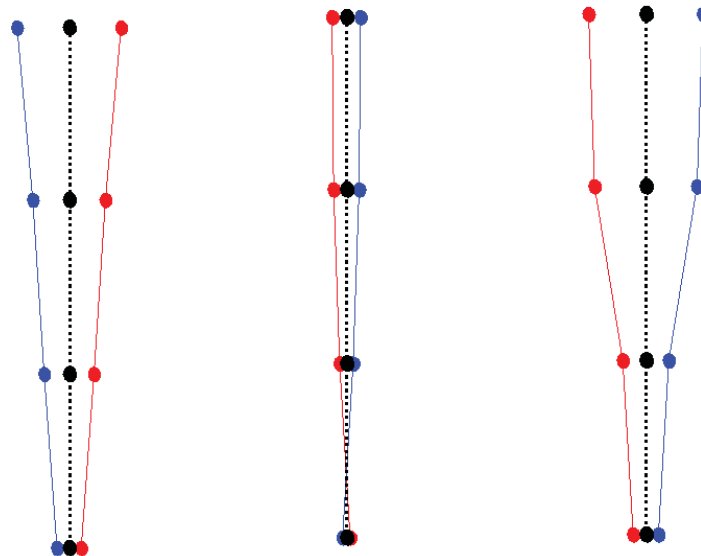
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 2.94 Hz



รูปที่ 5.135 รูปแปลงบนสุด

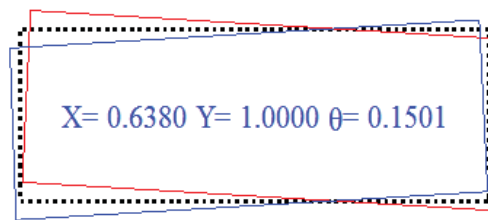


รูปที่ 5.136 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ

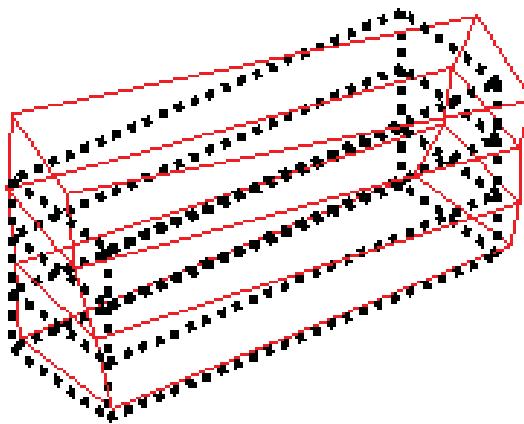


รูปที่ 5.137 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

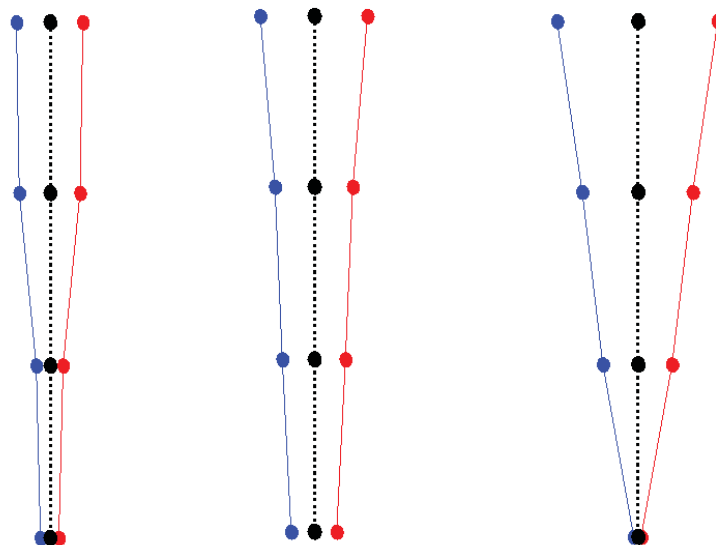
รูปร่างการสั่นไหวที่ความถี่ 3.77 Hz



รูปที่ 5.138 รูปแปลนบนสุด



รูปที่ 5.139 รูปร่างการสั่นแบบ 3 มิติ



รูปที่ 5.140 รูปร่างการสั่นในทิศทาง X Y และการหมุน

5.2 แบบจำลองและคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับอาคารที่อยู่ในขั้นตอนการออกแบบ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถือเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่ใช้ประมาณค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารในเบื้องต้น เมื่อได้ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์จากแบบจำลองแล้ว ก็สามารถนำค่าเหล่านั้นมาออกแบบที่เกี่ยวกับพลศาสตร์ได้ทันที แม้ว่าจะไม่มีการตรวจวัดเพื่อยืนยันในภายหลังก็ตาม

อย่างไรก็ดี ความแม่นยำของคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับสมมติฐานที่กำหนดไว้ในขณะสร้างแบบจำลองเป็นอย่างมาก ในกรณีที่สมมติฐานสอดคล้องความเป็นจริง แบบจำลองกับโครงสร้างจริงจะมีคุณสมบัติทางพลศาสตร์ใกล้เคียงกันมาก แต่กรณีที่สมมติฐานไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง แบบจำลองกับโครงสร้างจริงจะมีคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่แตกต่างกันอย่างมาก

ในหัวข้อนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากการตรวจวัดจริงของอาคารสูง 7 ชั้น โครงการเดอะทรีคอนโด ลาดพร้าว เทียบกับผลการจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งใช้สมมติฐานแบบทั่วไปในการออกแบบ ความแตกต่างที่จะแสดงดังต่อไปนี้สามารถบ่งบอกถึงความสำคัญของการตรวจวัดในโครงการวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดี

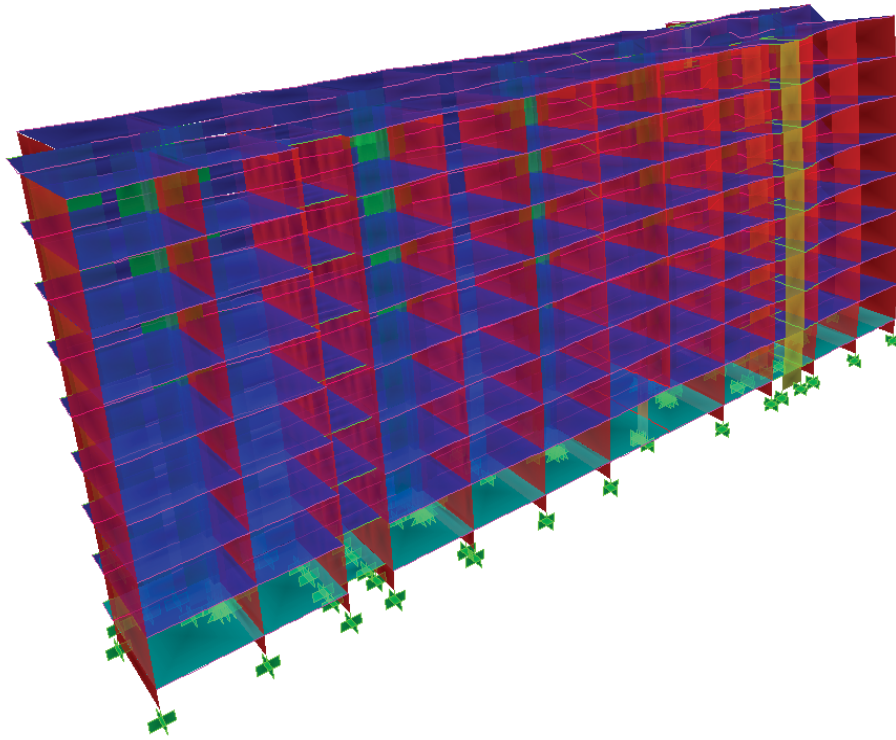
นอกจากนี้แล้ว ความแตกต่างระหว่างผลจากการตรวจวัดจริงและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ยังสามารถนำมาอัปเดตแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอาคารที่ได้ก่อสร้างไปแล้วให้แม่นยำมากขึ้นได้อีก ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์อาคารนั้นในแง่อื่นๆหลังจากก่อสร้างแล้วเสร็จไปแล้ว

5.2.1 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารตัวอย่าง

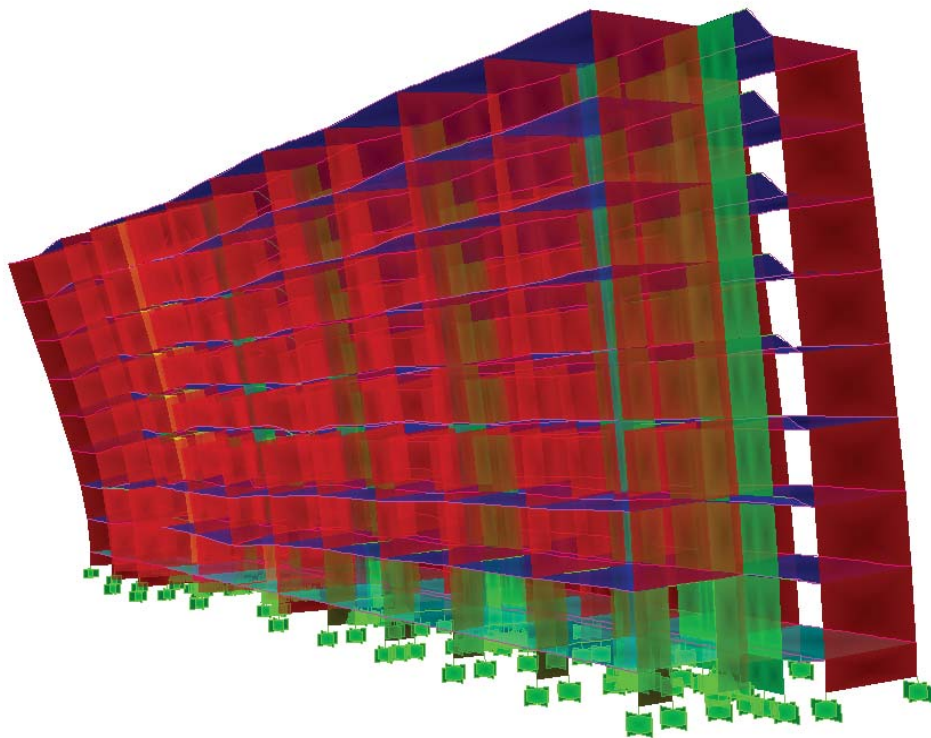
สมมติฐานที่ใช้

คณะผู้วิจัยได้วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารตัวอย่างดังรูปที่ 5.141 สมมติฐานที่ใช้กับอาคารนี้ เป็นสมมติฐานเดียวกับที่ผู้ออกแบบโครงสร้างทั่วไปใช้ (ในกรณีที่ไม่ทราบพฤติกรรมของโครงสร้าง) นั่นคือ

- เสาและคาน ใช้ beam element ขนาดตามแบบ
- แผ่นพื้นและกำแพงรับแรงเฉือน ใช้ shell element ขนาดตามแบบ
- รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ แม้ว่าจะเป็นชิ้นส่วน precast แต่เมื่อนำมาใส่ในโครงสร้างก็สมมติให้เป็นรอยต่อที่ rigid สามารถรับโมเมนต์ได้อย่างเต็มที่
- ฐานรากของเสาทุกต้น สมมติเป็นฐานรากยึดรั้งที่ไม่สามารถหมุนหรือเคลื่อนตัวได้



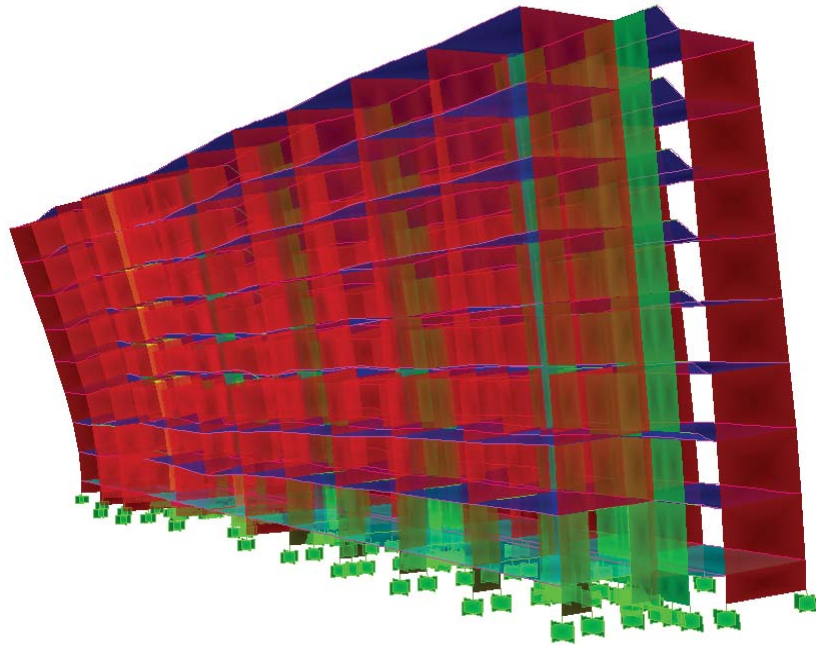
รูปที่ 5.141 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคาร



รูปที่ 5.142 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคาร

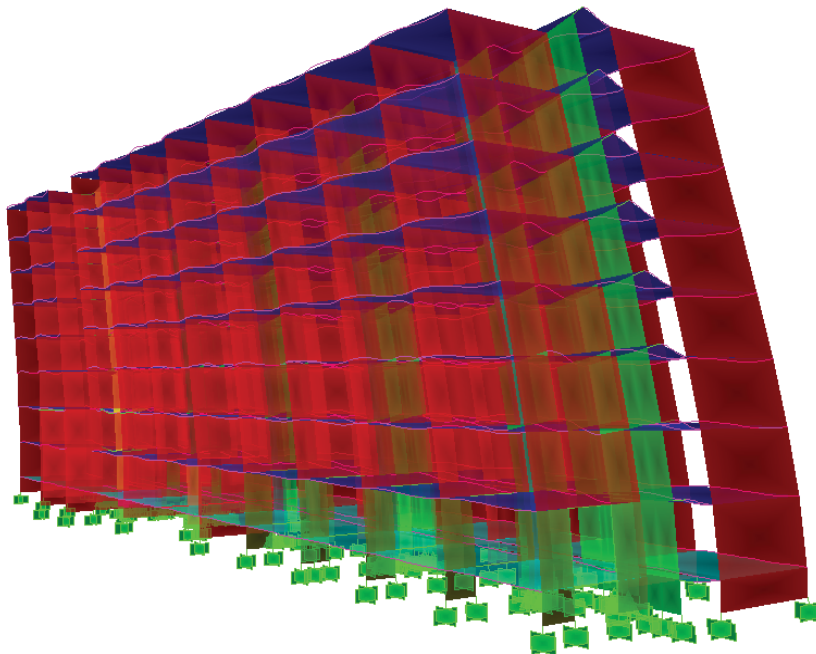
จากการคำนวณค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ ได้ผลดังแสดงไว้ดังนี้

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ทิศทาง X

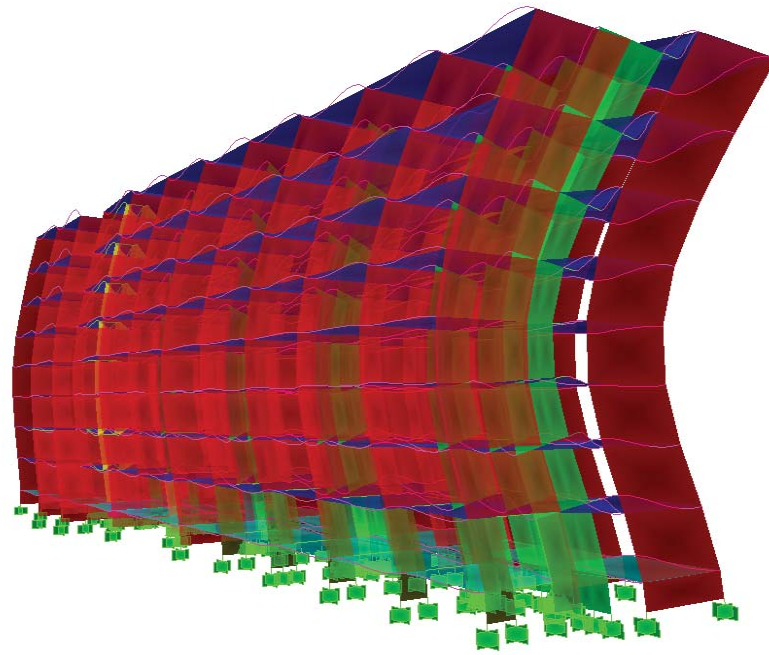


รูปที่ 5.143 รูปร่างการสั่นที่ความถี่ธรรมชาติ 2.64 Hz

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ทิศทาง Y

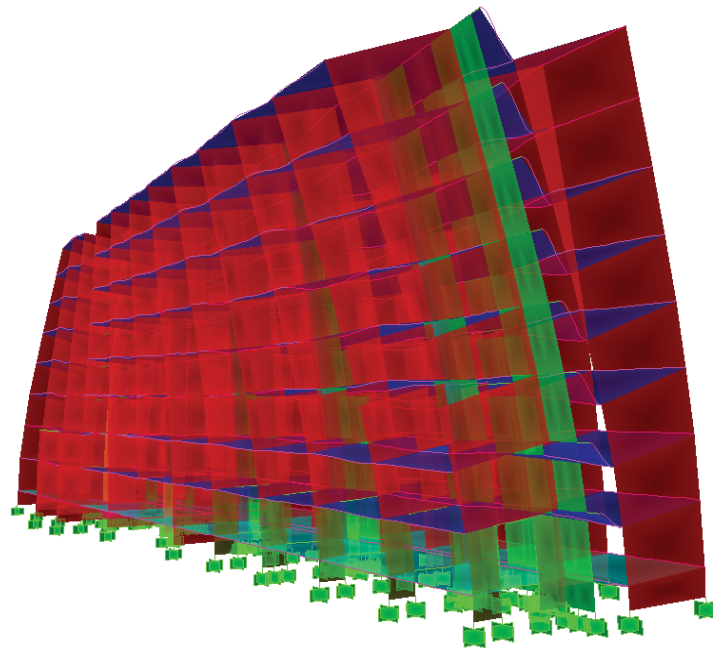


รูปที่ 5.144 รูปร่างการสั่นที่ความถี่ธรรมชาติ 0.81 Hz



รูปที่ 5.145 รูปร่างการสั่นที่ความถี่ธรรมชาติ 4.04 Hz

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ทิศทางการหมุน



รูปที่ 5.146 รูปร่างการสั่นที่ความถี่ธรรมชาติ 2.67 Hz

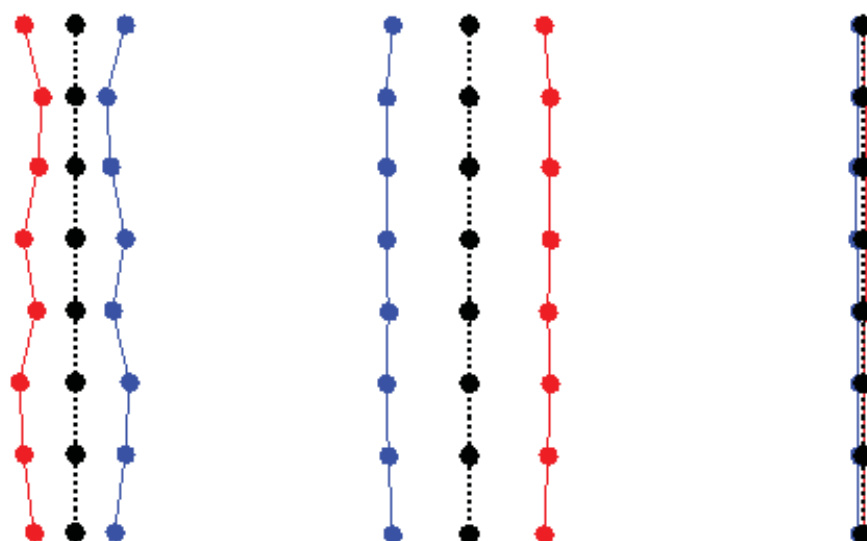
5.2.2 เปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์กับค่าที่ได้จากการตรวจวัด

เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดจริง สามารถสรุปได้ดังนี้

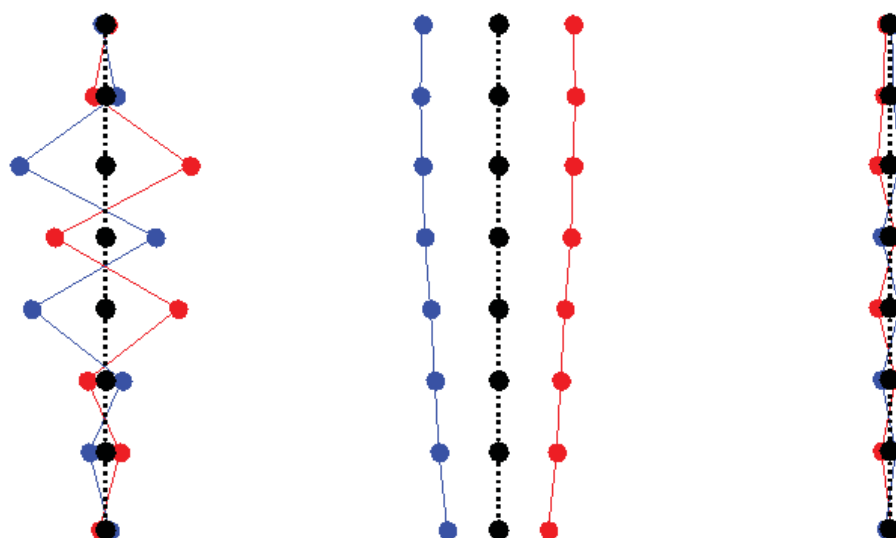
คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)		ความแตกต่างเทียบกับการตรวจวัดจริง
	แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์	การตรวจวัดจริง	
ทิศทาง X	2.64	2.62	-0.76 %
ทิศทาง Y	0.81	ไม่ปรากฏ	-
	ไม่ปรากฏ	1.19	-
	ไม่ปรากฏ	2.66	-
	4.04	ไม่ปรากฏ	-
ทิศทางการหมุน	2.67	2.64	-1.12 %

จากตารางจะเห็นว่า ในทิศทาง X และ ทิศทางการหมุน แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์และการตรวจวัดจริงให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของสมมติฐานที่ใช้ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมจริง อย่างไรก็ตามในทิศทาง Y กลับตรวจไม่พบรูปร่างการสั่นที่ตรงกับแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ในทางปฏิบัติหากไม่มีการยืนยันด้วยผลการตรวจวัดก็จะไม่สามารถตรวจพบได้เลยว่ามี ความแตกต่างจากแบบจำลองได้เลย ส่วนสาเหตุของความคลาดเคลื่อนในทิศทาง Y สามารถอธิบายได้จากผลการตรวจวัดดังนี้

เมื่อพิจารณารูปร่างการสั่นที่ได้จากการตรวจวัดที่ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.19 Hz และ 2.66 Hz ดังรูปที่ 5.147



รูปที่ 5.147 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง X Y และการหมุน ที่ความถี่ 1.19 Hz



รูปที่ 5.148 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทาง XY และการหมุน ที่ความถี่ 2.66 Hz

จะเห็นได้ว่า ข้อมูลจากการตรวจวัดโครงสร้างจริง ที่อาคารชั้นล่างสุดของทิศทาง Y มีการเคลื่อนตัวอยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับชั้นอื่นๆ แสดงว่าสมมติฐานฐานรากยัดตรงที่ไม่สามารถเคลื่อนตัวได้นั้นไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง ลักษณะดังกล่าวจะไม่สามารถตรวจพบได้เลยถ้าไม่ได้ทำการตรวจวัดจริง

กรณีศึกษาที่แสดงไว้ในหัวข้อนี้ ทำให้ได้ตระหนักว่าแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์และสมมติฐานที่ใช้ร่วมในการจำลองโครงสร้างที่วิศวกรโครงสร้างทั่วไปใช้นั้น อาจจะตรงหรือไม่ตรงกับพฤติกรรมจริงของอาคารก็ได้ การตรวจวัดอาคารจึงมีความสำคัญอย่างมากหากต้องการประเมินพฤติกรรมของอาคารให้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

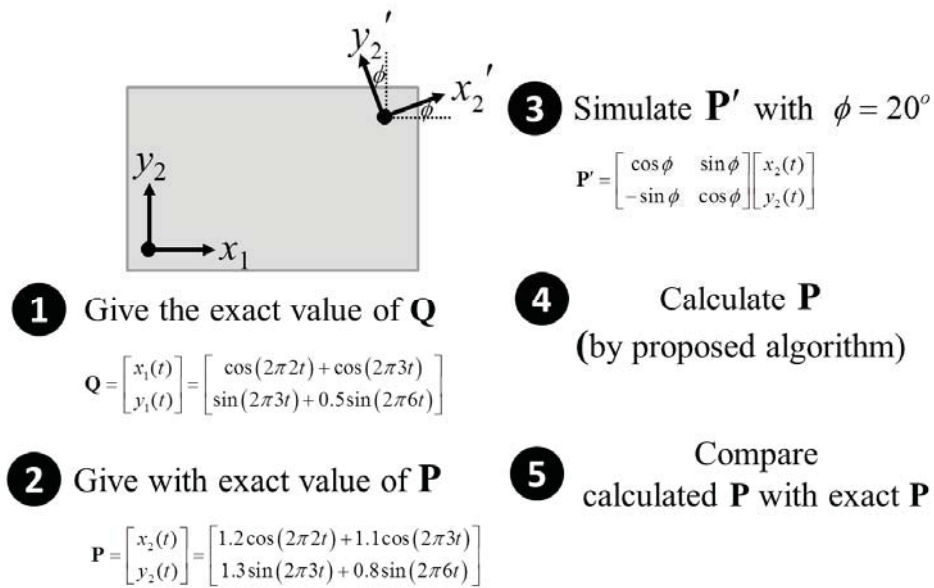
5.3 การปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

คณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดอาคารและได้พบปัญหาและอุปสรรคต่างๆในการตรวจวัด ในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นพร้อมกับผลลัพธ์ที่อาจจะนำมาใช้ประโยชน์ได้ในอนาคต

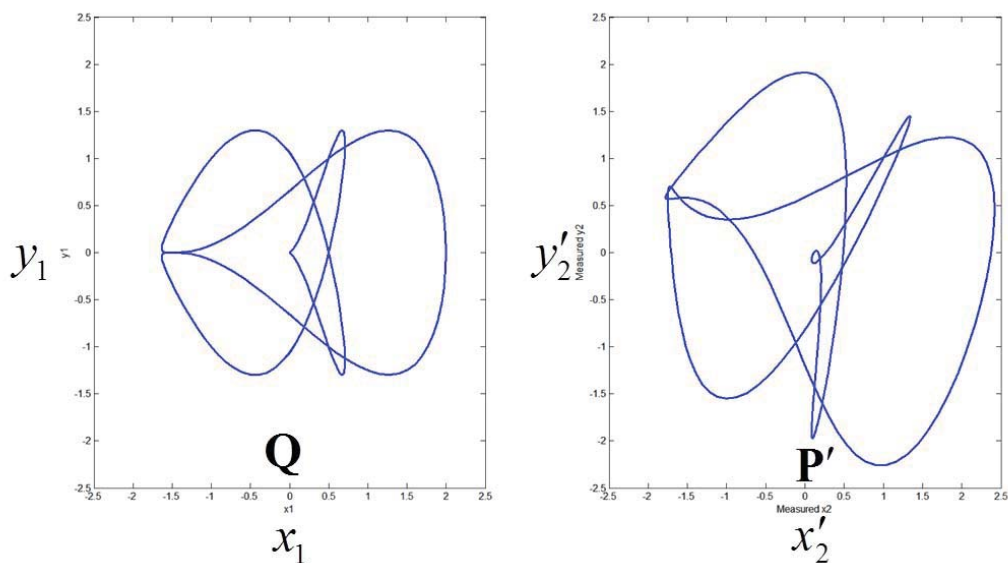
5.3.2 การแก้ปัญหาเรื่องการวางหัววัดที่เอียงผิดมุม

จากการตรวจวัด ได้พบปัญหาคือความคลาดเคลื่อนในการวางหัววัด กล่าวคือการวางหัววัดที่เอียงทำมุมไม่เท่ากันทำให้การคำนวณรูปร่างการสั่นไหวมีความคลาดเคลื่อน ในโครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับแก้ไขปัญหาที่ดังกล่าว ซึ่งมีรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก 2.4 ในกรณีที่เป็นข้อมูลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ พบอัลกอริทึมดังกล่าวจะสามารถแก้ปัญหาได้อย่างดีเยี่ยม นั่นคืออัลกอริทึมสามารถคำนวณมุมที่หมุนผิดเพี้ยนไปได้อย่างถูกต้องดังรูปที่ 5.149

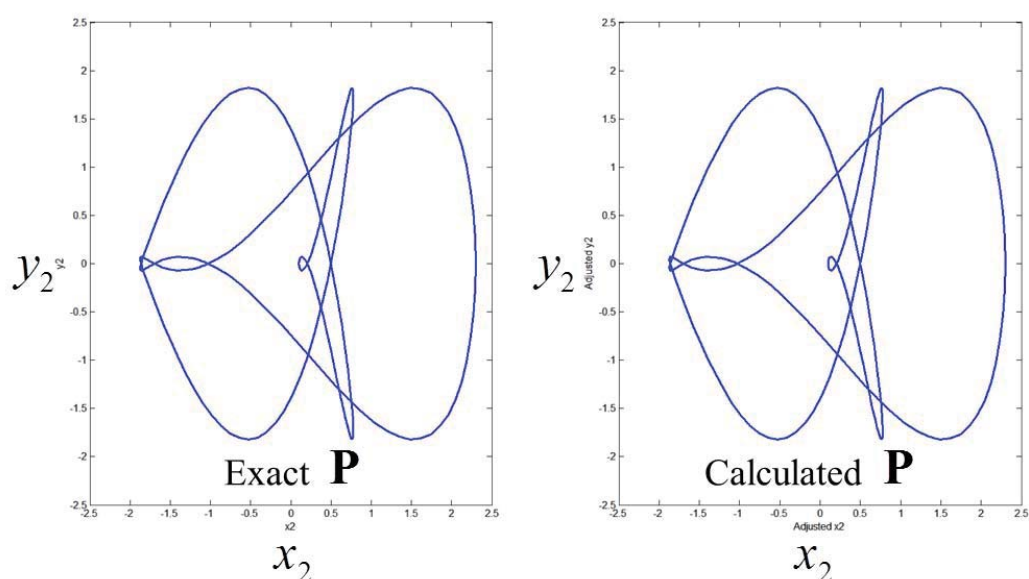
ถึง รูปที่ 5.151 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่ว่าจะวางหัววัดเอียงทำมุมอย่างไร ก็จะสามารถคำนวณกลับมาได้เสมอ



รูปที่ 5.149 ลำดับการทดสอบอัลกอริทึมสำหรับปรับแก้ (ดูภาคผนวก 2.4 ประกอบ)



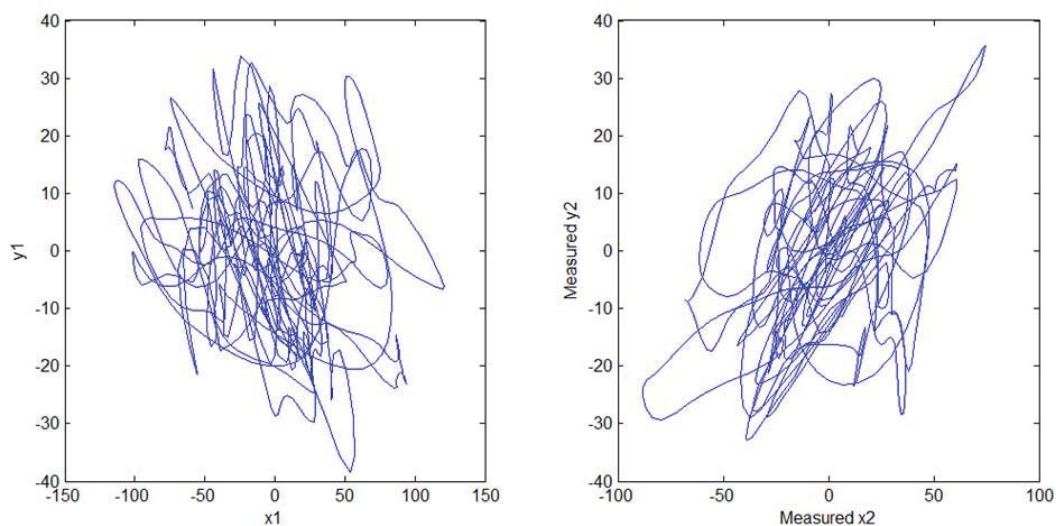
รูปที่ 5.150 เส้นทางแสดงการเคลื่อนที่ที่จุด 1 และ 2 (กรณีมีมุมเอียง)



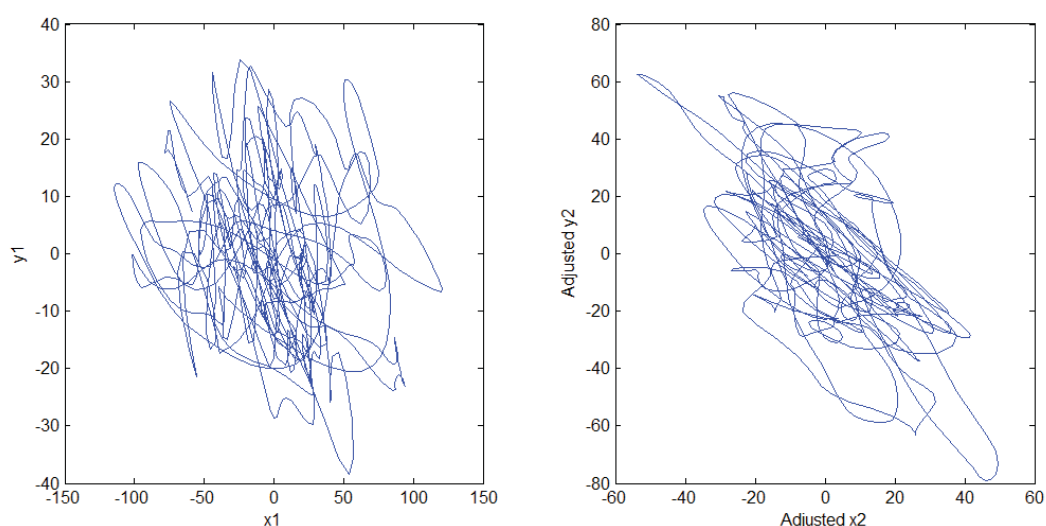
รูปที่ 5.151 เส้นทางแสดงการเคลื่อนที่ที่จุด 2 หลังปรับแก้ด้วยอัลกอริทึมแล้ว

อย่างไรก็ตามเมื่อนำอัลกอริทึมดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่วัดจริงจากอาคาร พบว่ายังมีข้อจำกัดในการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 5.152 และ รูปที่ 5.153 ทั้งนี้เพราะว่ามุมที่ปรับแก้ขึ้นกลับขึ้นอยู่กับความยาวข้อมูลที่นำมาใช้คำนวณเป็นอย่างมาก เช่นบางกรณีกลับคำนวณค่ามุมได้ถึง 105 องศาขณะที่บางกรณีคำนวณค่ามุมได้เพียง 55 องศาเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงไม่ควรที่จะมีการวางมุมผิดพลาดได้มากถึงขนาดนั้นได้

กล่าวโดยสรุปการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมดังกล่าวอาจต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมเป็นกรณีๆไป และที่สำคัญยังต้องมีการพัฒนาอัลกอริทึมนี้เพื่อแก้ปัญหาเรื่องความอ่อนไหวต่อความยาวข้อมูลนี้ด้วย



รูปที่ 5.152 เส้นทางแสดงการเคลื่อนที่ที่จุด 1 และ 2 (จากการวัดจริง)



รูปที่ 5.153 เส้นทางแสดงการเคลื่อนที่ที่จุด 1 และ 2 (หลังจากการปรับแก้)

อย่างไรก็ดี เนื่องจากปัจจุบันได้มีอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือที่มีแอปพลิเคชันสามารถวัดมุมได้ เช่นเดียวกับเข็มทิศโดยที่ไม่มีการรบกวนจากสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์วัดดังรูปที่ 5.154 ประเด็นเรื่องการวางหัววัดผิดมุมสำหรับการตรวจวัดในอนาคตจึงไม่น่าจะเป็นปัญหาอีกต่อไป ที่พบว่ามีปัญหามีเพียงแต่ชุดข้อมูลเก่าๆที่ได้ตรวจวัดไว้ก่อนหน้านี้เท่านั้น



รูปที่ 5.154 โทรศัพท์มือถือที่สามารถใช้เป็นเข็มทิศได้

5.3.3 การแก้ปัญหาเรื่องการตั้งเครื่องเขย่าในอาคาร

อาคารที่เตี้ยและแข็งแรงมากเช่นอาคารที่สูงไม่มากนัก การสั่นโดยธรรมชาติจะมีค่าน้อยมากจนไม่อาจตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์วัดสัญญาณที่มีอยู่ได้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้เครื่องเขย่าอาคารเพื่อกระตุ้นให้เกิดการสั่นอย่างชัดเจนจนตรวจวัดได้ ลักษณะของเครื่องเขย่าอาคารแสดงไว้ดังรูปที่ 5.155



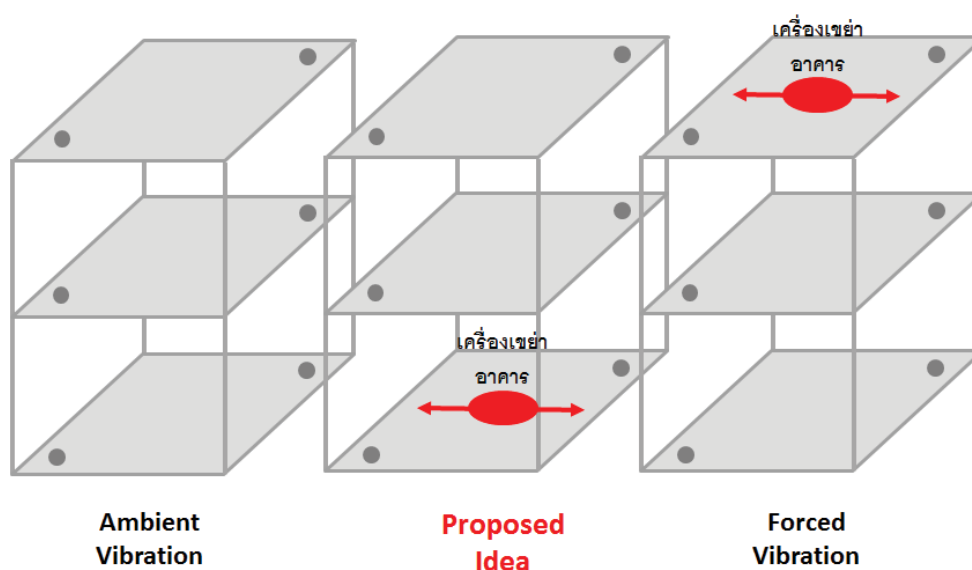
รูปที่ 5.155 เครื่องเขย่าอาคาร

เนื่องจากการใช้งานเครื่องเขย่าอาคารนี้ จำเป็นต้องนำเครื่องเขย่าอาคารขึ้นไปติดตั้ง ณ ชั้นบนสุดของอาคารดังรูปที่ 5.156 แต่ปัญหาที่ตามมาเกิดจากการที่อุปกรณ์ค่อนข้างใหญ่ ทำให้ขนย้ายขึ้นไปค่อนข้างยากลำบาก ในกรณีที่เจ้าของอาคารเป็นเอกชนมักจะมีแนวโน้มไม่ให้ทำการ

ทดสอบในอาคารของตนเนื่องจากเกรงอันตราย ในที่นี้จึงได้เสนอแนวทางการตรวจวัดอาคารเพื่อ
แก้ปัญหาดังกล่าวดังรูปที่ 5.157



รูปที่ 5.156 เครื่องเขย่าอาคารขณะใช้งาน



รูปที่ 5.157 แนวทางแก้ไขปัญหาเรื่องเครื่องเขย่าอาคาร

รูปที่ 5.157 ได้แสดงแนวทางสำหรับการตรวจวัดที่เป็นไปได้ 3 แบบ แบบแรก (ซ้ายสุด) เป็นการวัดการสั่นตามธรรมชาติ ลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องเขย่าอาคารแต่อย่างใด แบบที่สอง (ขวาสุด) เป็นการวัดการสั่นไหวในกรณีที่อาคารแข็งแรงมากและไม่อาจสั่นตามธรรมชาติได้ จึงต้องติดตั้งเครื่องเขย่าอาคารไว้ชั้นบน อย่างไรก็ตามจากปัญหาดังกล่าวที่ได้พบตลอดในการตรวจวัด

แนวทางที่เป็นไปได้ ก็คือการติดตั้งเครื่องเขย่าอาคารไว้ที่ชั้นล่างสุดของอาคาร (รูปกลาง) ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการตรวจวัดด้วยวิธีนี้อาจจะไม่ได้สูงมากนัก แต่ก็ชัดเจนได้ด้วยการปฏิบัติงานที่ง่าย ขึ้นและความเป็นไปได้ในการอนุญาตให้ตรวจวัดอาคารที่มากขึ้นด้วย

รายละเอียดทางเทคนิคและการคำนวณประสิทธิภาพการตรวจวัดด้วยเครื่องเขย่าอาคารที่ พัฒนาโดยคณะผู้วิจัย ได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก 2.5

5.3.4 การแก้ปัญหาเรื่องการหาอัตราส่วนความหน่วงที่แม่นยำ

จากผลการตรวจวัดเบื้องต้นทำให้ทราบค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นไหว อย่างไรก็ตามการประมาณค่าความหน่วงโดยเฉพาะโครงสร้างที่ไม่ได้อยู่ในห้องทดลองเช่นอาคารเป็นสิ่งที่ทำได้ยากและให้ค่าไม่แน่นอน ที่ผ่านมานในอดีต ค่าความหน่วงสามารถหาได้จากสองวิธีคือ 1) โดยการตรวจจับสัญญาณการสั่นอิสระจากการตรวจวัดจริงหรือสังเคราะห์ขึ้นมาจาก Autocorrelation function ของการสั่นตามสภาวะแวดล้อม วิธีนี้ใช้ได้ดีเมื่อความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างในโหมดต่างๆไม่ใกล้กันมากนักและสัญญาณการสั่นอิสระมีคุณภาพที่ดีพอ และ 2) โดยการคำนวณจากฟูเรียร์สเปกตรัมในบริเวณตรงกับความถี่ธรรมชาติ (Half-power bandwidth) แต่ก็มี ความคลาดเคลื่อนอยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดในสองวิธีนั้นก็มักจะให้ค่าอัตราส่วนความหน่วงซึ่งกระจาย ไม่แน่นอนเช่นเดียวกัน

เพื่อการปรับปรุงวิธีการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งหมายรวมทั้งหมดคือ ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่นไหวและอัตราส่วนความหน่วง ในโครงการวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมที่ชื่อ System Realization using Information Matrix (SRIM) มาใช้คำนวณคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ในโดเมนเวลาเพื่อช่วยเพิ่มความถูกต้องให้กับเทคนิคที่ใช้อยู่ในปัจจุบันด้วย

รายละเอียดทางเทคนิคและการทดสอบประสิทธิภาพอัลกอริทึมที่คณะผู้วิจัยได้นำมา ประยุกต์ใช้ มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในภาคผนวก 2.1

5.3.4 สรุปการปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัด

คณะผู้วิจัย ได้ดำเนินการทดสอบและแก้ไขปัญหาทั้งสามประการดังกล่าว และได้สรุปผล ทั้งหมดไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปการปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัด

ประเภท ปัญหา	1.การวางหัววัด เอียงผิดมุม	2. การตั้งเครื่อง เขย่าภายในอาคารเตี้ย	3. การคำนวณอัตราส่วน ความหน่วง
ลักษณะ	ผู้ตรวจวัดวางหัววัดเอียงผิด มุม	เจ้าของอาคารมักจะไม่ อนุญาตให้ตั้งเครื่องเขย่า อาคารที่ชั้นบน	วิธีการคำนวณอัตราส่วน ความหน่วงที่ใช้กันในปัจจุบัน มีความคลาดเคลื่อนสูงมาก
ผลเสียที่ เกิดขึ้น	การคำนวณรูปร่างการสั่น แบบ 3 มิติเกิดความ	บางกรณีอาจทำให้ตรวจวัด ความถี่ธรรมชาติได้อย่างมีไม่	การอธิบายพฤติกรรมทาง พลศาสตร์จะไม่ถูกต้อง ถ้าไม่

	คลาดเคลื่อน	มีประสิทธิภาพ	มีอัตราส่วนความหน่วงที่น่าเชื่อถือ
ความรุนแรงของปัญหา	น้อย	ปานกลาง	มาก
แนวทางแก้ปัญหา	กรณีข้อมูลที่มีอยู่เดิม: พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับปรับแก้ในภาคผนวก 2.4 กรณีข้อมูลใหม่: ใช้เข็มทิศจากสมาร์ทโฟน	ใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาในภาคผนวก 2.5	ใช้อัลกอริทึม SRIM ในภาคผนวก 2.1
ผลการปรับปรุง	ไม่สามารถแก้ไขได้อย่างมีประสิทธิภาพ	เนื่องจากอาคารที่ได้ตรวจวัดยังสามารถตรวจวัดด้วยวิธีปรกติได้ จึงยังไม่สามารถสรุปได้ ณ ปัจจุบัน	มีประสิทธิภาพการหาอัตราส่วนความหน่วงสูงขึ้นมาก

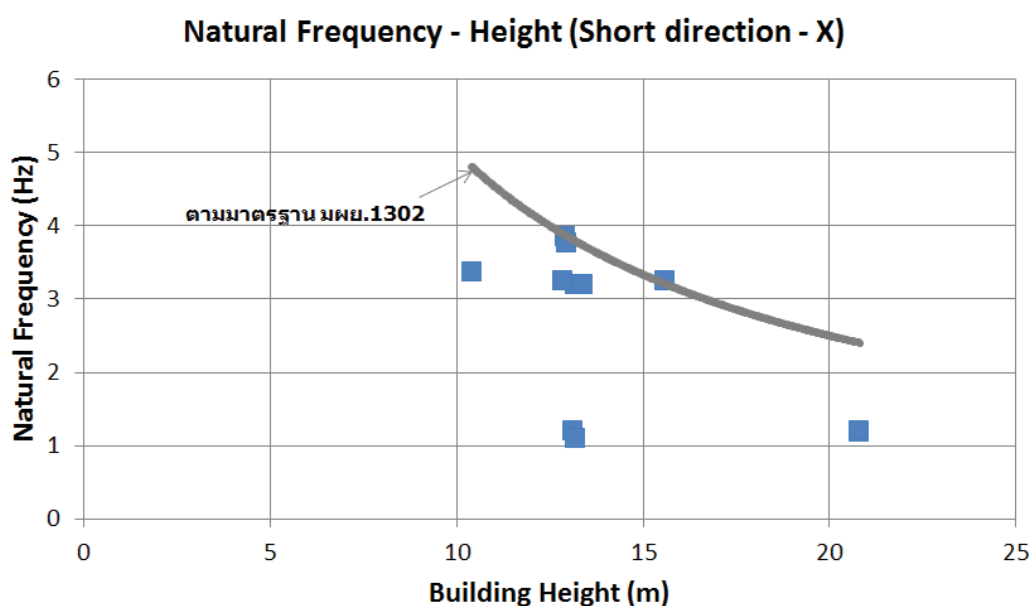
5.4 บทสรุปสาระสำคัญจากข้อมูลเชิงพลศาสตร์

สาระสำคัญของข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการวัด แยกออกได้ 2 ส่วนคือ 1) ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหาความถี่ธรรมชาติ และ 2) ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหาอัตราส่วนความหน่วง ทั้งสองส่วนนี้ มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบเชิงพลศาสตร์ ในรายงานส่วนนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของปริมาณทั้งสองข้างต้น

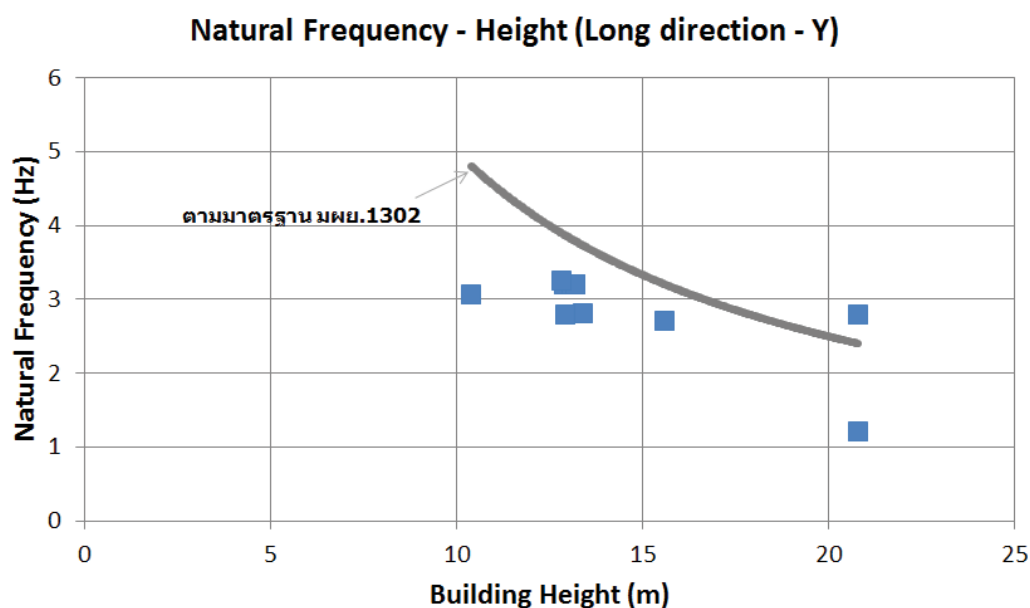
5.4.1 ความถี่ธรรมชาติของอาคารที่ได้จากการตรวจวัด

จากข้อมูลที่ได้วัดมา เมื่อเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่วัดมาได้กับสูตรประมาณค่าความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302) กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2552 พบว่าได้ผลดังรูปที่ 5.158 สำหรับการสั่นไหวในทิศทางด้านสั้น (ทิศทาง X) และ รูปที่ 5.159 สำหรับการสั่นไหวทิศทางด้านยาว (ทิศทาง Y)

สูตรประมาณค่าความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในมาตรฐาน มยผ.1302 นั่นคือ ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 50หารด้วยความสูง (เมตร) ของอาคาร ซึ่งเป็นสูตรที่พัฒนามาจากการศึกษาในอดีตซึ่งแตกต่างจากกลุ่มอาคารที่ทำการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้



รูปที่ 5.158 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติ-ความสูงอาคาร



รูปที่ 5.159 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติ-ความสูงอาคาร

เมื่อเทียบผลการตรวจวัดกลุ่มอาคารในการศึกษานี้กับค่าประมาณความถี่ธรรมชาติของทั้งสองทิศทางพบว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดมีแนวโน้มต่ำกว่าสูตรประมาณเพียงเล็กน้อย นั่นคือการอาคารกลุ่มที่ได้ตรวจวัด มีค่าความถี่ธรรมชาติที่ค่อนข้างต่ำกว่าหรืออีกนัยหนึ่งอาคารเหล่านี้ค่อนข้างอ่อนกว่าที่คำนวณได้จากสูตรประมาณค่านั่นเอง โดยที่สาเหตุหนึ่งมาจากการที่มาตรฐาน มผย. กำหนดสมการที่เป็นค่าที่ประมาณให้ความถี่ธรรมชาติสูงกว่าค่าเฉลี่ยเพื่อการออกแบบแรงอย่างปลอดภัย

5.4.1 อัตราส่วนความหน่วงของอาคารที่ได้จากการตรวจวัด

จากผลการตรวจวัดค่าอัตราส่วนความหน่วงในแต่ละอาคาร ค่อนข้างผันผวนมากจนยากที่จะหาความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งได้ไม่ว่าจะเป็นความสูงอาคาร ทิศทางการสั่นหรือว่าลักษณะทางด้านเรขาคณิต อย่างไรก็ตาม ค่าอัตราส่วนความหน่วงมีค่าเฉลี่ยผันผวนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.8% ถึง 2.9% ในงานวิจัยนี้ จึงแนะนำค่าอัตราส่วนความหน่วงในอาคารไว้ที่ 2 % ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของทุกค่าที่ได้ทำการตรวจวัด

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษา

6.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งและการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดิน

การดำเนินการในส่วนแรกคือการศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน โดยการตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุด (Single Point Microtremor Observation) เพื่อประเมินค่าคาบอิทธิพลหลักและ การตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation) เพื่อประเมินความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ แล้วนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้านการขยายขนาดคลื่นแผ่นดินไหว มีผลการดำเนินงานและข้อสรุปจากการวิจัยดังนี้

6.1.1 การตรวจวัด Microtremor ดำเนินการศึกษารวมทั้งหมด 103 ตำแหน่งในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และลำพูน และ 149 ตำแหน่งในพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียงด้วยการตรวจวัดแบบ Array Microtremor ขนาดเล็ก และอีก 25 ตำแหน่งในกรุงเทพมหานครด้วยการตรวจวัดแบบ Array Microtremor ขนาดใหญ่

6.1.2 ผลการศึกษาความเร็วคลื่นเฉือนจากการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค Spatial Autocorrelation (SPAC) ซึ่งพบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นมีข้อดีต่อการประยุกต์ใช้ศึกษาคือ สามารถปฏิบัติได้โดยสะดวก เนื่องจากไม่ต้องทำการเจาะหลุมสำรวจและใช้อุปกรณ์และบุคลากรน้อยกว่า ทำให้ประหยัดทั้งค่าใช้จ่ายและเวลาในการตรวจวัด นอกจากนี้ ค่าที่วิเคราะห์ได้ให้ผลถึงระดับความลึกเกินจากช่วงที่หลุมเจาะโดยทั่วไปมาก ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งของจำนวนมากในพื้นที่ศึกษา และสามารถแสดงเป็นแผนที่การแปรเปลี่ยนของค่าเพื่อการแบ่งเป็นเขตพื้นที่ย่อยได้

6.1.3 ผลการสำรวจในพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียงพบว่าค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร (V_{S30}) มีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 70 ถึง 600 เมตร/วินาที โดยบริเวณที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำพบอยู่ใกล้แนวไทย พื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ ส่วนพื้นที่ตอนบนของพื้นที่ศึกษาและทิศตะวันตก มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่สูง ส่วนค่าคาบอิทธิพลหลัก (T_p) มีค่าอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 1.1 วินาที โดยพบว่าบริเวณใกล้แนวไทยจังหวัดสมุทรปราการมีค่า T_p ยาวที่สุดประมาณ 1.1 วินาที และมีแนวโน้มสั้นขึ้นเมื่อออกห่างจากแนวไทยไปทางตะวันตกเฉียงเหนือ และมีค่าสั้นที่สุดน้อยกว่า 0.2 วินาที บริเวณตะวันตกและตะวันตกเฉียงเหนือของพื้นที่ศึกษา และพบความสัมพันธ์ที่ค่า T_p ลดลงสำหรับ V_{S30} ที่เพิ่มขึ้น ส่วนพื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานครมีค่า V_{S30} ประมาณ 100 ถึง 170 เมตรต่อวินาที และ T_p มีค่าประมาณ 0.7 ถึง 1.1 วินาที

6.1.4 ผลการสำรวจในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดใกล้เคียงพบว่าพื้นที่ที่มีค่า T_p สั้นที่สุด (ดินแข็ง) คือ อำเภอแมริม สันป่าตอง และดอยสะเก็ด โดยมีค่าต่ำสุดประมาณ 0.12 วินาที และพบว่าพื้นที่ที่มีค่า T_p สูงที่สุด (หรือดินอ่อน) คือ อำเภอเมืองเชียงใหม่ สารภี และอำเภอเมือง

ลำพูน โดยมีค่าประมาณ 0.65-0.70 วินาที และจากผลการวิเคราะห์ค่า V_{S30} พบว่า บริเวณที่มีค่าสูงสุดคือที่อำเภอฝายสะแก มีค่าเท่ากับ 562 เมตรต่อวินาที และบริเวณที่มีค่าต่ำสุดคือที่อำเภอเมืองเชียงใหม่ สารภี และอำเภอเมืองลำพูน โดยมีค่าประมาณ 230-240 เมตรต่อวินาที

6.1.5 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินโดยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ แสดงผลเป็นลักษณะของ Transfer function ของชั้นดินมีผลจากแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือน กล่าวคือ ค่ากำลังขยายสูงสุดมีค่ามากกว่าและมีการขยายคลื่นในช่วงคาบการสั่นยาวขึ้นสำหรับชั้นดินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า

6.1.6 ผลการเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว (S_A) โดยการใช้แบบจำลองของชั้นดินที่สร้างจากข้อมูลจากการตรวจวัดจริง แล้ววิเคราะห์ผลภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดใน มยผ.1302 จากการศึกษาคพบว่า S_A ที่ได้จากการแบ่งพื้นที่ใหม่ มีทั้งมากกว่า น้อยกว่า หรือใกล้เคียงกับค่าจากการแบ่งพื้นที่ตาม มยผ.1302 ซึ่งแสดงถึงแนวทางที่ควรปรับปรุงมาตรฐานให้มีความสอดคล้องกับสภาพจริงมากยิ่งขึ้น

6.1.7 ผล S_A จากการวิเคราะห์แบบจำลองชั้นดินแบบต่าง ๆ ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวตัวอย่าง มีลักษณะสอดคล้องกับผลของ Transfer function ของแต่ละแบบจำลอง และมีผลจากองค์ประกอบความถี่ของคลื่นตัวอย่างที่ใช้ศึกษา ผลที่ได้แสดงว่า กำลังขยายมีค่าสูงในช่วงคาบการสั่นสั้นสำหรับแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนต้นและความเร็วคลื่นเฉือนที่มีค่าสูง และพบว่า กำลังขยายมีค่าต่ำในช่วงคาบการสั่นสั้นแต่มีค่าสูงในช่วงคาบการสั่นยาวสำหรับแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนที่มีค่าต่ำและมีความลึกมาก

6.1.8 ผลการเปรียบเทียบค่า S_A จากการวิเคราะห์แบบจำลองชั้นดินกับค่าที่ตรวจวัดได้จากบริเวณเขตบางนา กทม. เนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวจริงพบว่าแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนต้นไม่สามารถทำนายการขยายคลื่นในช่วงคาบการสั่นยาวได้ดี โดยมีกำลังขยายสูงเฉพาะในช่วงคาบการสั่นสั้น และได้แสดงไว้ว่าแบบจำลองที่มีความลึกถึงประมาณ 400 เมตรให้ผลในช่วงคาบการสั่นยาวสอดคล้องกับผลจากการตรวจวัดจริงมากกว่า

6.1.9 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เปรียบเทียบกับวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ พบว่า ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ผิวดินและอัตราการขยายกำลังของคลื่นที่วิเคราะห์ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ มีค่าที่สอดคล้องกับผลจากวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ ซึ่งเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการพัฒนาแบบจำลองจาก 1 มิติ เป็น 2 มิติ ของแอ่งกรุงเทพ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความลึกของชั้นดินที่ขอบแอ่งต่ออัตราการขยายกำลังของคลื่นต่อไปในอนาคต

6.2 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

งานวิจัยในส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอาคารสูงประมาณ 5 ชั้นและมีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่งหรือแนวราบจำนวนทั้งสิ้น 11 หลัง โดยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ด้วยอุปกรณ์ที่มีความไวสูง จากนั้นจึงนำค่าที่ตรวจวัดได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์อื่นได้แก่ ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่น และอัตราส่วนความหน่วง ซึ่งปริมาณทั้ง 3 นี้ มีความสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมของอาคารเชิงพลศาสตร์

อย่างไรก็ดีในกระบวนการตรวจวัด ได้พบปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจวัด เช่น ความคลาดเคลื่อนในการวางอุปกรณ์ตรวจวัด ข้อจำกัดในการติดตั้งเครื่องเขย่าอาคาร และข้อจำกัดในการหาค่าอัตราส่วนความหน่วงที่แม่นยำ ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการเสนอแนวทางแก้ไขโดยการพัฒนาอัลกอริทึมขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาเหล่านั้น รวมถึงประยุกต์ใช้อัลกอริทึมที่ทันสมัยและเหมาะสมกับการวัดอัตราส่วนความหน่วงมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ด้วย ถึงแม้บางปัญหายังไม่สามารถแก้ไขได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามในภาพรวมทั้งหมด กระบวนการตรวจวัดสามารถบรรลุวัตถุประสงค์หลักของการศึกษา นั่นคือการได้มาซึ่งค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารได้ถึงสูงปานกลางประมาณ 5 ชั้น

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

นอกจากนี้แล้ว ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ขึ้นมาเพื่อศึกษาพฤติกรรม 3 มิติของอาคาร เพื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์อาจให้ผลที่แตกต่างจากพฤติกรรมจริงของอาคารได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองนั้นด้วย การตรวจวัดพฤติกรรมอาคารจึงมีความสำคัญอย่างมากหากต้องการประเมินพฤติกรรมของอาคารให้ใกล้เคียงความจริงที่สุด

6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการดำเนินการต่อไป

โครงการวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินและอาคารที่มีผลต่อระดับการสั่นสะเทือนของพื้นและการตอบสนองของอาคารต่อแผ่นดินไหว ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในประเทศไทยยิ่งขึ้น ข้อเสนอแนะที่ได้ผลจากการศึกษานี้มีดังนี้

6.3.1 ในการศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินที่ให้ข้อมูลของพฤติกรรมด้านการขยายคลื่นแผ่นดินไหวที่บริเวณต่าง ๆ และได้ถูกจัดกลุ่มเป็นพื้นที่ย่อยตามพฤติกรรมที่คล้ายกันแล้วนั้น รวมทั้งผลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์จากข้อมูลใหม่กับค่าที่ใช้ในมาตรฐานปัจจุบัน จึงควรนำไปใช้ในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพจริงยิ่งขึ้น

6.3.2 งานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคที่สามารถดำเนินการศึกษาได้อย่างรวดเร็ว และได้พยายามขยายขอบเขตพื้นที่ศึกษาให้ครอบคลุมพื้นที่สำคัญด้านความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศ อย่างไรก็ตาม ยังมีพื้นที่ในเสี่ยงภัยสำคัญที่ยังไม่ได้ศึกษาอีกจำนวนมาก จึงควรมีการขยายพื้นที่ศึกษาให้มากขึ้น โดยดำเนินการตามลำดับความสำคัญ ทั้งในเขตเมืองและพื้นที่ที่จะพัฒนาในอนาคต และทำการวิเคราะห์เพื่อประเมินกำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ย่อย และจัดทำเป็น แผนที่เขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียด ในพื้นที่อีกหลายส่วนของประเทศ

6.3.3 แบบจำลองที่ถูกต้องของความเร็วคลื่นเฉือนถึงระดับชั้นหินมีความสำคัญมากต่อการวิเคราะห์การตอบสนองของพื้นดินจากแผ่นดินไหว โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการสั่นสะเทือนในช่วงคาบยาวที่มีผลมากกับอาคารสูง ข้อมูลเหล่านี้ควรได้รับการศึกษาให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นเพื่อการประเมินพฤติกรรมการขยายคลื่นของชั้นดินในพื้นที่แอ่งกทม.และผลกระทบต่ออาคารสูงอย่างถูกต้อง

6.3.4 การศึกษาด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ควรมีการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคารรูปแบบต่าง ๆ เพิ่มเติม โดยใช้การตรวจวัดและผลการวิเคราะห์แบบจำลองควบคู่กันเพื่อปรับปรุงวิธีการสร้างแบบจำลองให้เหมาะสมยิ่งขึ้น และใช้ในการทำนายพฤติกรรมของอาคารได้แม่นยำ

เอกสารอ้างอิง

- กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย กระทรวงมหาดไทย (2552) โครงการจัดทำแผนแม่บทป้องกันและบรรเทาภัยจากแผ่นดินไหวและอาคารถล่ม (ระยะที่ 1) (รายงานนี้จัดทำโดย บริษัท ปัญญาคอนซัลแตนท์ และ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย)
- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2552, มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302)
- ครองสิน เจริญพงษ์ 2550 “การศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กระหว่างการก่อสร้าง และ อาคารที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- จิตติ ปาลศรี และ อาณัติ เรืองรัมย์, 2552, “ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน ค่า N สำหรับการตอกกระบอกผ่าทดสอบ และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่คายน้ำของดินในกรุงเทพมหานครและบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย”, GTE50407, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ชาคร เพชรเจริญ, 2002, “Identification of Dynamic Properties of Low and Medium-rise Buildings in Bangkok by an Ambient Vibration Method”, Master Thesis No. ST-02-14, Asian Institute of Technology.
- เดชฤทธิ์ รัตนพร, เฉลิมพล วิเศษทุม, จตุรงค์ ทองจารุแข และ จิรวัตถ์ บุญญะจู้, 2553, การเปรียบเทียบผลสำรวจเชิงจีโอฟิสิกส์ด้วยการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแบบแอดทีฟและแพสซีฟ, GTE066, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
- ธีรพล ลีลาวรรณ, 2001, “Identification of Dynamic properties of Tall Buildings in Bangkok by an Ambient Vibration Method”, Master Thesis No. ST-01-9, Asian Institute of Technology.
- นคร ภู่วโรดม และ เป็นหนึ่ง วานิชชัย (2547) รายงานวิจัยเรื่อง การตรวจวัดและศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
- นคร ภู่วโรดม เป็นหนึ่ง วานิชชัย และ ชยานนท์ ธรรมภิญโญ (2553) รายงานวิจัยเรื่อง คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินเพื่อการแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
- ประภาพร จันทะมาศ, 2007, “การเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพฯที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบ หลายช่องทางรับสัญญาณกับวิธีวัดจากหลุมเจาะ”, คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ประยุทธ์ ยิ่งหาญ, 2545, “การหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการตรวจวัด”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

- เป็นหนึ่งใน วาณิชชัย และ อาเด ลิซานโตโน. 2537. “การวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- มานะ จันทะสด, 2546, “คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- เยาวพรรณ ไชยคำภา 2552 “การวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างจากผลตอบสนองแบบไม่สม่ำเสมอ” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2549, ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
- วีระศักดิ์ เกิดศิริมงคล , 2546, “การระบุคุณสมบัติของระบบโครงสร้างจากผลการตอบสนองโดยวิธี Natural Excitation Technique และ Eigensystem Realization Algorithm”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- สมจิต อำนาจสาน, 2000, “Identification of Dynamic Properties of Buildings and Structures from Microtremor Vibrations”, Master Thesis No. ST-00-15, Asian Institute of Technology.
- อำนาจ ยานูวิริยะกุล และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, 2553, อิทธิพลความหนาของชั้นดินกรุงเทพมหานครต่อพฤติกรรมการตอบสนองเนื่องจากแรงกระทำแผ่นดินไหว, GTE076, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
- AFPS, 1995, Guidelines for seismic microzonation studies. French Association for Earthquake Engineering.
- Almasani M. A. M., 2004, “Estimation of the Shear Wave Velocity of Shallow Structure from Short Period Microtremor using Simultaneous Measurements of SPAC and 2sSPAC Methods”, Document for the course of Seismology, Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (2004-2005)
- Ansary M. A., Yamazaki F., and Katayama T., 1996, “Application of Microtremor Measurements to the Estimation of Site Amplification Characteristics”, Bullentin of ERS, No. 29, pp 95-113.
- Arai H., and Yamazaki F., 2002, “Exploration of S-Wave Velocity Sstructure Using Microtremor Arrays in the Greater Bangkok, Thailand”, EDM Technical Report No.15, Earthquake Disaster Mitigation Research Center (EDM)
- Ashford, S.A., Jakrapyanun, W., and Lukkanaprasit, P. (1997). Amplification of Earthquake Ground Motions in Bangkok. AIT research report submitted to the Public Works Department, Thailand.

- Bard, P.Y., and Gariel, J.G., 1986. The seismic response of two-dimensional sedimentary deposits with large vertical velocity gradients Bulletin of the Seismological Society of America, 76: 343 - 366.
- Braja M.Das. (2008). Advanced Soil Mechanics. 270 Madison Ave New York NY 10016, USA. Taylor & Francis.
- Chávez-García, F.J., Sánchez, L.R. and Hatzfeld, D., 1996. Topographic site effects and HVSR. A comparison between observations and theory. Bulletin of the Seismological Society of America, 86: 1559 - 1573.
- Chávez-García, F.J., Rodríguez, M., Field, E.H. and Hatzfeld, D., 1997, Topographic site effects. A comparison of two nonreference methods. Bulletin of the Seismological Society of America, 87: 1667 - 1673.
- Cole H.A., 1973, "On-line Failure and Damping Measurement of Aerospace Structures by Random Decrement Signatures", NASA CR-2205.
- Crawford R. and Ward H.S., 1964, "Determination of the Natural Period of Building", Bulletin of the Seismological Society of America, 54, 6, pp. 1743-1756.
- De Sortis, A., Antonacci, E. and Vestroni, F., 2005, "Dynamic identification of a masonry building using forced vibration tests", Engineering Structures, Vol. 27, pp.155-165.
- Dobry, M. et al., 2000, "New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions", Earthquake spectra, Vol. 16, No.1.
- DRM, 2004 Seismic Microzonation for Municipalities Manual, World institute for Disaster Risk Management (DRM), Published in online www.DRMonline.net
- Geli, L., Bard, P.Y., and Jullien, B., 1988, The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: A Review and New Results, Bulletin of the Seismological Society of America, 78, 42-63.
- Huang, N.E. , Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.L., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C., and Liu, H.H. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proceedings of the Royal Society of London A 454 (1998) 903–995.
- Ibrahim S.R. and Pappa R.S., 1981, "A Parametric Study of the Ibrahim Time Domain Modal identification Algorithm", Shock and Vibration Bulletin, 51(3), pp. 43-72.
- Idriss, I. M., and Sun, J. I. (1992), User's Manual for SHAKE91, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Davis.

- ISSMGE, 1999. Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard, Revised edition, Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering (TC4) of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).
- Juang J.N., 1994. Applied System Identification. Eagle Wood Cliffs. New Jersey : Prentice Hall
- Konno K., and Ohmachi T., 1998, "Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 88, No. 1, pp. 228-241.
- Kramer, S.L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, New Jersey.
- Lermo J., and Chavez-Garcia F.J., 1994, "Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 5, pp. 1350-1364.
- Morikawa H., Sawada S., and Akamatsu J., 2004, "A Method to Estimate Phase Velocity of Rayleigh Waves Using Microseisms Simultaneously Observed at Two Sites", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No. 3, pp. 961-976
- Nakamura Y., 1989, "A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface", Quarterly Report of RTRI, Vol. 30, No. 1, pp. 25-30.
- Nutalaya P., Sodsri S., and Arnold E.P. 1985. "Series on Seismology Volume II-Thailand", Southeast Asia Association of Seismology and Earthquake Engineering, 403p
- Sarkar, P., Prasad, A.M., and Menon, D., 2010, "Vertical geometric irregularity in stepped building frames", Engineering Structures, Vol. 32, pp. 2175-2182.
- Schnabel, P.B. Lysmer, J. and Seed, H. Bolton (1972), SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. UBC/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed, H.B., Romo, M.P., Sun, J.I., Jaime A. and Lysmer J., 1987, Relationships Between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions in Mexico City in the Earthquake of September 19, 1985. Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-87/15
- Shibuya, S. and Tamrakar, S.B., 1999, In-situ and Laboratory Investigations into Engineering Properties of Bangkok Clay. Proc. of Int. Symp. Characterization of Soft Marine Clays-Bothkennar, Drammen, Quebec and Ariake Clays, Balkema.
- Srisoros W., 2003, "Seismic Microzonation of Chiangmai City Using Microtremor Observations", Master Thesis No. ST-03-15, Asian Institute of Technology.

- Thenhaus, P.C. 1986. "Site Response from Distant Large Earthquake and Issues Concerning the Earthquake Hazard at Bangkok, Thailand" Proc. 1st Workshop on Earthquake Engineering and Hazard Mitigation, Bangkok, Thailand
- Tokimatsu K., 1997, "Geotechnical Site Characterization Using Surface Wave", Proc., 1st International Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, 3, pp. 1333-1367.
- Trifunac M.D., 1970, "Ambient Vibration Test of A Thirty-nine story Steel Frame Building", Report No. EERL 70-02, Earthquake Engineering Research Lab, California Institute of Technology, Pasadena.
- Tuladhar R., 2002, "Seismic Microzonation of Greater Bangkok Using Microtremor Observation" Master Thesis No. ST-02-4, Asian Institute of Technology.
- Tuladhar R., 2003, "Classification of Soil Profile and Seismic Response Analysis (Elastic) in The Greater Bangkok Area", Asian Institute of Technology.
- Wolfgang, K., (1976), A solution of the best rotation to relate two sets of vectors, Acta Crystallographica 32:922,
- Yokoi, T. (2005), Combination of down hill simplex algorithm with very fast simulated annealing method-an effective cooling schedule for inversion of surface wave's dispersion curve, Proc. of the Fall Meeting of Seismological Society of Japan. B049.

ภาคผนวก 1

ผ1.1 กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยด้านคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ทำให้สามารถประเมินพฤติกรรมด้านการขยายคลื่นเนื่องจากแผ่นดินไหวของแต่ละบริเวณ และจัดกลุ่มเป็นพื้นที่ย่อยที่มีพฤติกรรมคล้ายกันได้ ซึ่งสามารถใช้ในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวในส่วน of แผนที่มีความรุนแรงแผ่นดินไหวที่ได้จากข้อมูลใหม่นี้ และผู้วิจัยคาดหวังที่จะผลนำไปปรับปรุงมาตรฐานดังกล่าวได้สำหรับรอบของการปรับปรุงต่อไป

นอกจากนี้ ผลการวิจัยในโครงการนี้ ได้ตีพิมพ์และเผยแพร่ในรูปแบบต่าง ๆ คือ

- วารสารระดับนานาชาติ
 - Poovarodom, N. and Plalinyot N. (2013), "Site Characterization in the Greater Bangkok Area by Microtremor Observations, Journal of Earthquake Engineering, 17 (Febuary): 209-226.
- วารสารในประเทศ
 - นคร ภูวโรดม และ นนทกร พลินยศ (2554) "คุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจากการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน" วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 22 ฉบับที่ 3
- ที่ประชุมนานาชาติ
 - Poovarodom, N., Jirasakjamroonsri, A. and Plalinyot, N. (2013). Exploration of Site Characteristics by Microtremor Observations in the Central Area of Thailand. 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering. Tokyo, Japan.
 - Poovarodom, N. and Plalinyot N. (2012), Evaluation of Site Effects in the Greater Bangkok by Microtremor Observations, Proc. of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, paper No. 4115, Lisbon, Portugal.
- ที่ประชุมในประเทศ
 - นรากร บุญเต็ม และ นคร ภูวโรดม (2555) "คุณสมบัติของชั้นดินบริเวณที่ตั้งในจังหวัดเชียงใหม่เพื่อการประเมินความรุนแรงจากแผ่นดินไหว" การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17
- สัมมนาวิชาการในประเทศ
 - การประเมินค่าการสั่นของคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับงานทางวิศวกรรมและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านแผ่นดินไหวของประเทศไทย จัดโดย วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ วันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2555

ผ1.2 ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

ก. ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ของโครงการ

ข้อเสนอโครงการ	ผลการดำเนินการศึกษา
1. ศึกษาหาความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินบริเวณต่าง ๆ จำนวนมาก ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดกาญจนบุรี ด้วยเทคนิคการตรวจวัดคลื่นผิวดิน	1. ดำเนินการตรงตามวัตถุประสงค์ โดยศึกษาความเร็วคลื่นเฉือนและคาบอิทธิพลหลักของชั้นดินบริเวณต่าง ๆ จำนวน 174 ตำแหน่ง ในเขตพื้นที่ กรุงเทพมหานครและปริมณฑลรวม จังหวัดกาญจนบุรี และจำนวน 103 ตำแหน่ง ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง ด้วยเทคนิคการตรวจวัดคลื่นผิวดิน
2. ศึกษาข้อมูลด้านธรณีเทคนิคและสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา เพื่อการประเมินโอกาสที่จะเกิดผลกระทบต่อการขยายคลื่นแผ่นดินไหว	2. ดำเนินการตรงตามวัตถุประสงค์ โดยรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยและการดำเนินงานในอดีต (หัวข้อที่ 4.1 ถึง 4.3)
3. วิเคราะห์ผลการตอบสนองของชั้นดินที่ผิวดินเพื่อประเมินกำลังการขยายคลื่นจากแผ่นดินไหว	3. ดำเนินการตรงตามวัตถุประสงค์ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าของแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติที่สร้างจากข้อมูลการสำรวจภาคสนาม และศึกษาผลในด้านพฤติกรรมการขยายคลื่นจากแผ่นดินไหวสำหรับแบบจำลองชั้นดินในพื้นที่ต่าง ๆ
4. จัดทำแผนที่ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวอย่างละเอียดสำหรับพื้นที่ศึกษา จากข้อมูลการตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว	4. ดำเนินการตรงตามวัตถุประสงค์ โดยใช้ผลจากการศึกษาพฤติกรรมการขยายคลื่นจากแผ่นดินไหวสำหรับแบบจำลองชั้นดินในพื้นที่ต่าง ๆ (ในวัตถุประสงค์ข้อที่ 3) เพื่อจัดกลุ่มเป็นพื้นที่ย่อยที่มีพฤติกรรมคล้ายกัน และมีการเปรียบเทียบผลกับมาตรฐาน มยผ. 1302 เพื่อการปรับปรุงในอนาคต
5. ศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารเตี้ยถึงสูงปานกลาง ที่มีรูปทรงไม่สม่ำเสมอ ด้วยการตรวจวัดที่มีการกระตุ้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมในการโยกตัวในรูปแบบ 3 มิติ	5. ดำเนินการตรงตามวัตถุประสงค์ โดยตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารสูงประมาณ 5 ชั้น จำนวน 11 หลัง (บทที่ 5)

ข. ตารางเปรียบเทียบผลที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละช่วงระยะเวลา (แบ่งเป็นราย 6 เดือน)

6 เดือนที่ 1

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน
1. การศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง • ทบทวนงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และเตรียมโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ • รวบรวมข้อมูลด้านสภาพทางธรณีวิทยาและสภาพภูมิประเทศ • วางแผนกำหนดบริเวณสำรวจกลุ่มที่ 1	• เตรียมความพร้อมการตรวจวัดและการวิเคราะห์ • ข้อมูลธรณีวิทยาและภูมิประเทศ • แผนการสำรวจ 1	• เตรียมความพร้อมการตรวจวัดและการวิเคราะห์ • ข้อมูลธรณีวิทยาและภูมิประเทศ • แผนการสำรวจ 1
2. การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร • จัดเตรียมอุปกรณ์และบุคลากร/สร้างเครื่องเขย่า/ทดสอบเบื้องต้น • คัดเลือกอาคาร/ติดต่อขออนุญาตเพื่อเข้าตรวจวัด	• บุคลากรและเครื่องมือสำหรับการตรวจวัด	• บุคลากรและเครื่องมือสำหรับการตรวจวัด • อาคารที่ได้รับอนุญาต

6 เดือนที่ 2

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน
1. การศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ● ทำการตรวจวัด Array Microtremor สำหรับกลุ่มที่ 1 ประมาณ 50 บริเวณ ● วิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนและการตอบสนองของพื้นดิน กลุ่มที่ 1 ● ปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ● วางแผนกำหนดบริเวณสำรวจกลุ่มที่ 2	● ผล Array Microtremor ประมาณ 50 บริเวณ ● ผลการตอบสนองของพื้นดิน สำหรับกลุ่มที่ 1 ● แผนการสำรวจ 2	● ผล Array Microtremor 50 บริเวณ ● ผลการตอบสนองของพื้นดิน สำหรับกลุ่มที่ 1 ● แผนการสำรวจ 2
2. การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ● ตรวจวัดอาคาร จำนวน 2-3 อาคาร เบื้องต้น/วิเคราะห์ผลการตรวจวัด ● วิเคราะห์ปัญหาและประสิทธิภาพของการตรวจวัดปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัด	● ผลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารเบื้องต้น	● ผลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารเบื้องต้น จำนวน

6 เดือนที่ 3

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน
1. การศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง - ปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง (ต่อ) - ทำการตรวจวัด Array Microtremor สำหรับกลุ่มที่ 2 ประมาณ 100 บริเวณ - วิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนและการตอบสนองของพื้นดิน กลุ่มที่ 2 - วางแผนกำหนดบริเวณสำรวจกลุ่มที่ 3 - ทำการตรวจวัด Array Microtremor สำหรับกลุ่มที่ 3	- เทคนิควิธีการตรวจวัดและการวิเคราะห์ที่ให้ผลถูกต้อง - ผล Array Microtremor ประมาณ 100 บริเวณ - ผลการตอบสนองของพื้นดิน สำหรับกลุ่มที่ 2 - แผนการสำรวจ 3	- เทคนิควิธีการตรวจวัดและการวิเคราะห์ที่ให้ผลถูกต้อง - ผล Array Microtremor 114 บริเวณ - ผลการตอบสนองของพื้นดิน สำหรับกลุ่มที่ 2 - แผนการสำรวจ - ดำเนินการสำรวจเพิ่มเติม
2. การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร - วิเคราะห์ปัญหาและประสิทธิภาพของการตรวจวัดปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัด (ต่อ) - สร้างแบบจำลองสำหรับอาคารกลุ่มแรก/ ปรับแก้ให้ถูกต้อง - ตรวจวัดอาคาร เพิ่มเติม / วิเคราะห์ผลการตรวจวัด	- เทคนิคการตรวจวัดที่เหมาะสมขึ้น - แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์	- พัฒนาเทคนิคการตรวจวัดด้วยแรงกระตุ้นที่ฐานอาคาร - ปรับปรุงเทคนิคการตรวจวัดอัตราส่วนความหน่วง - แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอาคารสำหรับการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์

6 เดือนที่ 4

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน
1. การศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ● ทำการตรวจวัด Array Microtremor สำหรับกลุ่มที่ 3 (ต่อ) ● วิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนและการตอบสนองของพื้นดิน กลุ่มที่ 3 ● วิเคราะห์ข้อมูล และประมวลผลทั้งหมด จัดทำ Microzonation map ● สรุปผลและจัดทำรายงาน	● ผล Array Microtremor ประมาณ 100 บริเวณ ● ผลการตอบสนองของพื้นดิน สำหรับกลุ่มที่ 3 ● Microzonation map ● รายงานสรุปผลการศึกษา	● ผล Array Microtremor เพิ่มเติมจำนวน 113 บริเวณ ● ผลการตอบสนองของพื้นดิน สำหรับพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และใกล้เคียง และ กทม. และจังหวัดใกล้เคียง ● Microzonation map ตามค่า V_{s30} และ T_p ของพื้นที่ศึกษา ● รายงานสรุปผลการศึกษา
2. การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ● ตรวจวัดอาคาร เพิ่มเติม / วิเคราะห์ผลการตรวจวัด (ต่อ) ● สร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายพฤติกรรมอาคาร ● สรุปผลและจัดทำรายงาน	● ผลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ● พฤติกรรมของอาคารแบบ 3 มิติ ● รายงานสรุปผลการศึกษา	● ผลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ● พฤติกรรมของอาคารแบบ 3 มิติ ● รายงานสรุปผลการศึกษา

ภาคผนวก 2

ผ2.1 อัลกอริทึมสำหรับคำนวณค่าอัตราส่วนความหน่วง

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ในรูปของ State-space representation

ในกรณีของโครงสร้างที่มีระดับความอิสระเท่ากับหนึ่ง พฤติกรรมทางพลศาสตร์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองดังนี้

$$m\ddot{w}(t) + c\dot{w}(t) + kw(t) = p(t) \quad (\text{A2.1.1})$$

โดยที่ w คือระยะกระจัด m คือมวล c คือสัมประสิทธิ์ความหน่วง k คือค่าสติฟเนส และ $p(t)$ คือแรงกระทำกับโครงสร้างที่เวลา t ใดๆ สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองข้างต้น สามารถเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งสองสมการหรือที่เรียกว่า State-space representation ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \dot{w} \\ \ddot{w} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ \dot{w} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} p(t) \quad (\text{A2.1.2})$$

โดยทั่วไปจะเขียนรูปของเมตริกซ์ โดยกำหนดให้ระยะกระจัดและความเร็วอยู่ในรูปของ state vector $\mathbf{x}$ จะได้รูปแบบสมการดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (\text{A2.1.3})$$

ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่สำคัญอันได้แก่ ความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วง จะทราบได้ก็เมื่อหาค่าเมตริกซ์ $\mathbf{A}$ ออกมาได้

สำหรับการตรวจวัดใดๆไม่ว่าจะเป็นระยะกระจัด ความเร็ว หรือความเร่ง สามารถเขียนฟังก์ชันของค่าที่เซนเซอร์วัดได้ในรูปของตัวแปร $\mathbf{y}$ ได้ดังนี้

$$y = C_a \ddot{w} + C_v \dot{w} + C_d w \quad (\text{A2.1.4})$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ต่างๆ เป็นค่าที่สอดคล้องกับปริมาณที่วัดได้ เมื่อเขียนสมการข้างต้นในรูปของ State vector จะได้ว่า

$$y = \left[\left(C_d - C_a \frac{k}{m} \right) \quad \left(C_v - C_a \frac{c}{m} \right) \right] \begin{Bmatrix} w \\ \dot{w} \end{Bmatrix} + \frac{C_a}{m} p(t) \quad (\text{A2.1.5})$$

หรือในรูปของเมตริกซ์คือ

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (\text{A2.1.5})$$

รูปร่างการสั่นไหว (Mode shape) ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งเซนเซอร์ สามารถคำนวณได้เมื่อทราบเมตริกซ์ $\mathbf{C}$ กล่าวโดยย่อ เมตริกซ์ $\mathbf{A}$ และ $\mathbf{C}$ จะแสดงคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์นั่นเอง

สมการ state-space ในรูปเวลาดิสครีต

สมการ State-space ณ สเปปเวลาต่างๆ (k) สามารถเขียนได้อยู่ในรูปดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{Ax}(k) + \mathbf{Bu}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{Cx}(k) + \mathbf{Du}(k) \end{aligned} \quad (\text{A2.1.6})$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \mathbf{y}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{u}(k) \end{bmatrix} \quad (\text{A2.1.7})$$

ปริมาณที่ต้องการทราบค่าคือเมตริกซ์ $\mathbf{A}$ และ $\mathbf{C}$ ซึ่งจะต้องคำนวณให้ได้จากข้อมูลเท่าที่มีอยู่นั้นคือ $\mathbf{y}$ (การทดสอบของโครงการนี้ $\mathbf{u} = \mathbf{0}$) ปัญหาดังกล่าวไม่สามารถแก้ได้จากสมการข้างต้น จึงต้องจัดรูปสมการเสียใหม่โดยนำข้อมูลหลายๆช่วงมาซ้อนกันเป็นจำนวน p ชุดดังนี้

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) \\ \mathbf{y}(k+2) \\ \vdots \\ \mathbf{y}(k+p-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{D} \\ \mathbf{CB} & \mathbf{CB} \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-2}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{p-3}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{p-4}\mathbf{B} & \cdots & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{u}(k+1) \\ \mathbf{u}(k+2) \\ \vdots \\ \mathbf{u}(k+p-1) \end{bmatrix} \quad (\text{A21.1.8})$$

หรือ

$$\mathbf{y}_p(k) = \mathbf{O}_p \mathbf{x}(k) + \mathbf{T}_p \mathbf{u}_p(k) \quad (\text{A2.1.9})$$

ด้วยรูปแบบสมการข้างต้น จะทำให้แก้ทั้ง $\mathbf{A}$ และ $\mathbf{C}$ ออกมาให้ได้จากเมตริกซ์ $\mathbf{O}_p$ ได้ อย่างไรก็ตาม ด้วยรูปแบบสมการข้างต้น ก็ยังไม่สามารถคำนวณคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ออกมาได้โดยทันที จึงต้องจัดรูปสมการในรูปแบบของ Hankel matrix โดยใช้จำนวนคอลัมน์เท่ากับ N ชุดดังนี้

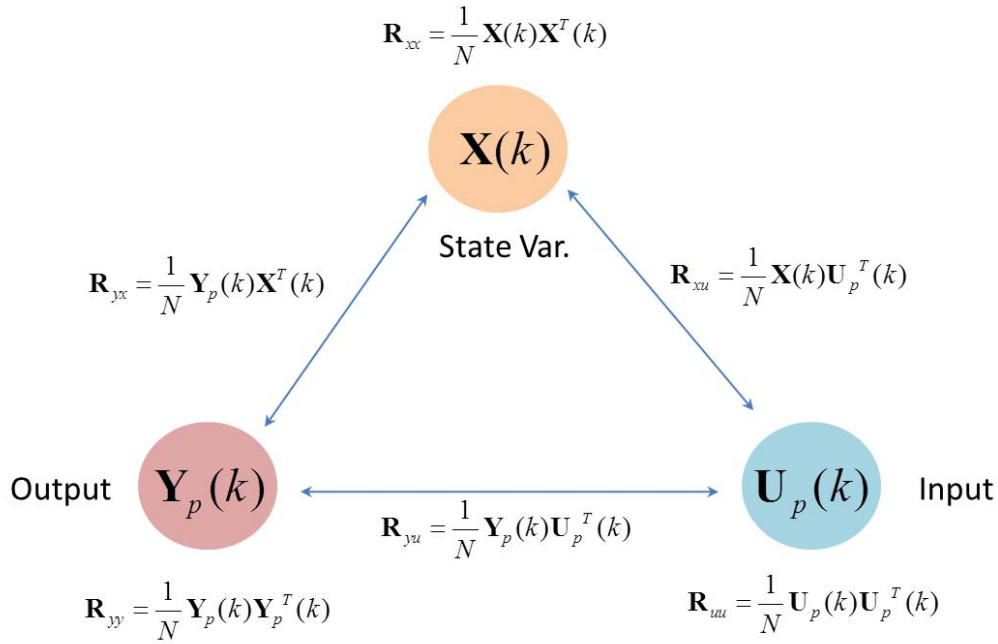
$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}(k) & \mathbf{y}(k+1) & \cdots & \mathbf{y}(k+N-1) \\ \mathbf{y}(k+1) & \mathbf{y}(k+2) & \cdots & \mathbf{y}(k+N) \\ \mathbf{y}(k+2) & \mathbf{y}(k+3) & \cdots & \mathbf{y}(k+N+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}(k+p-1) & \mathbf{y}(k+p) & \cdots & \mathbf{y}(k+p+N-2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) & \mathbf{x}(k+1) & \cdots & \mathbf{x}(k+N-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{D} \\ \mathbf{CB} & \mathbf{CB} \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-2}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{p-3}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{p-4}\mathbf{B} & \cdots & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k) & \mathbf{u}(k+1) & \cdots & \mathbf{u}(k+N-1) \\ \mathbf{u}(k+1) & \mathbf{u}(k+2) & \cdots & \mathbf{u}(k+N) \\ \mathbf{u}(k+2) & \mathbf{u}(k+3) & \cdots & \mathbf{u}(k+N+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{u}(k+p-1) & \mathbf{u}(k+p) & \cdots & \mathbf{u}(k+p+N-2) \end{bmatrix} \quad (\text{A21.1.10})$$

หรือ

$$\mathbf{Y}_p(k) = \mathbf{O}_p \mathbf{X}(k) + \mathbf{T}_p \mathbf{U}_p(k) \quad (\text{A2.1.11})$$

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่าง ๆ

จากสมการข้างต้นสามารถสร้างความสัมพันธ์ (Correlation function) ระหว่างปริมาณต่างๆจากการวัดได้ดังแผนภูมิดังรูปที่



รูปที่ A2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่างๆในสมการ

ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังแผนภูมิข้างบน จะทำให้เขียนสมการได้ใหม่ว่า

$$\mathbf{R}_{yy} - \mathbf{R}_{yu} \mathbf{R}_{uu}^{-1} \mathbf{R}_{yu}^T = \mathbf{O}_p \left(\mathbf{R}_{xx} - \mathbf{R}_{xu} \mathbf{R}_{uu}^{-1} \mathbf{R}_{xu}^T \right) \mathbf{O}_p^T \quad (\text{A2.1.12})$$

โดยที่พจน์ด้านซ้ายมือ ถูกนิยามใหม่ได้ดังนี้

$$\mathbf{R}_{hh} = \mathbf{R}_{yy} - \mathbf{R}_{yu} \mathbf{R}_{uu}^{-1} \mathbf{R}_{yu}^T \quad (\text{A2.1.13})$$

เนื่องจากโครงการวิจัยนี้เป็นการตรวจวัดการสั่นสะเทือนที่มีอยู่ตลอดเวลาตามธรรมชาติ (Ambient Vibration) ซึ่งมีสมมติฐานว่าแรงกระทำภายนอก ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าที่วัดได้ พจน์ด้านขวามือของสมการดังกล่าวจะลดรูปเป็น

$$\mathbf{R}_{hh} = \mathbf{R}_{yy} \quad (\text{A2.1.14})$$

เมื่อใช้ Singular value decomposition จะได้ว่า

$$\mathbf{R}_{hh} = \mathbf{O}_p \tilde{\mathbf{R}}_{xx} \mathbf{O}_p^T \quad (\text{A2.1.15})$$

ด้วยวิธีการดังกล่าว จึงสามารถหาเมตริกซ์ $\mathbf{O}_p$ ได้ ผลที่ตามมาคือเมตริกซ์ $\mathbf{A}$ และ $\mathbf{C}$ ก็จะหาค่าได้นั่นเอง

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

จากเมตริกซ์ $\mathbf{O}_p$ สามารถหาค่า $\mathbf{C}$ ได้จากจากเมตริกซ์ย่อยส่วนบนสุดดังนี้

$$\mathbf{O}_p = \begin{bmatrix} \text{Calculated Value} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-1} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{C}$$

จากเมตริกซ์ O_p สามารถหาค่า A ได้ด้วยวิธีการคือนำเมตริกซ์ O_p มาตัดเมตริกซ์ย่อยส่วนบนสุด และส่วนล่างสุดออกไปแล้วใช้ Pseudo-inverse คำนวณค่า A ออกมาดังนี้

$$\begin{bmatrix} \boxed{C} \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{p-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ \boxed{CA^{p-1}} \end{bmatrix} \textcircled{A} \longrightarrow A = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ \boxed{CA^{p-1}} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \boxed{C} \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{p-1} \end{bmatrix}$$

จากเมตริกซ์ ค่า A สามารถนำมาคำนวณหาความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงได้จาก Eigenvalues ของ A ซึ่งจะออกมาในรูปของ Complex conjugate ยกตัวอย่างดังเช่น

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix}$$

ค่า Eigenvalues ของ A จะได้ออกมาเป็น

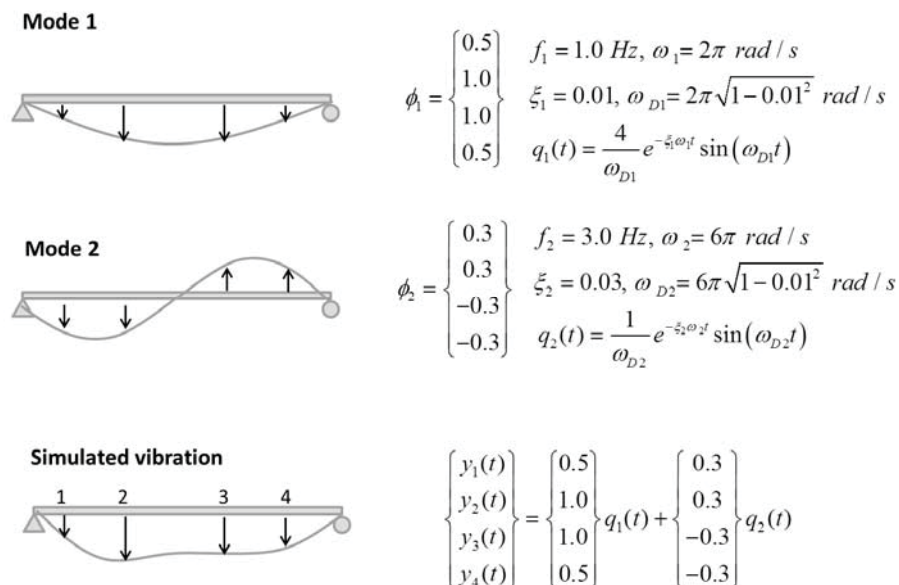
$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -\xi\omega_n + i\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \\ \lambda_2 &= -\xi\omega_n - i\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \end{aligned}$$

ซึ่งสามารถนำไปคำนวณความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงได้

ส่วนการคำนวณรูปร่างการสั่นไหวโหมดต่างๆ ต้องใช้ข้อมูลสองชุดคือ Eigenvectors ของ A และ เมตริกซ์ C สมมุติให้ Eigenvectors ของ A มีค่าเท่ากับ Ψ ค่าของรูปร่างการสั่นไหวของ โหมดต่างๆ ณ ตำแหน่งที่มีเซ็นเซอร์คำนวณได้จาก $C\Psi$ ซึ่งเป็นเวกเตอร์ของจำนวนเชิงซ้อน ขนาดของจำนวนเชิงซ้อนจะบ่งบอกถึงค่ารูปร่างการสั่นไหว ส่วนมุมระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริง (หรือเฟส) จะบ่งบอกถึงทิศทางที่สั่นไวนั้นเอง

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม SRIM

เพื่อการตรวจสอบอัลกอริทึมดังกล่าว จึงได้จำลองระบบการสั่นของโครงสร้างง่ายๆที่มี 2 โหมดและใช้พาริเตอร์ต่างๆดังรูปที่ จากนั้นจึงใช้อัลกอริทึม SRIM คำนวณออกความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และรูปร่างการสั่นไหวออกมา



รูปที่ A2.2 ค่าที่ใช้จำลองระบบทางพลศาสตร์สำหรับการทดสอบอัลกอริทึม SRIM

จากผลการทดสอบการจำลองผลการตรวจวัดซึ่งไม่มี Noise และผลการตรวจวัดที่มี Signal-to-noise ratio (SNR) อยู่ในระดับ 80 เดซิเบล (สัญญาณระดับดี) และ 20 เดซิเบล (สัญญาณระดับต่ำมาก) พบว่าได้ผลดังรูปที่

Exact value	SRIM Algorithm (noise 0%) Perfect signal	SRIM Algorithm (SNR 70 dB) Good signal	SRIM Algorithm (SNR 20 dB) Poor signal
$f_1 = 1.0 \text{ Hz}$ $\xi_1 = 0.01$ $\phi_1 = \begin{Bmatrix} 0.5 \\ 1.0 \\ 1.0 \\ 0.5 \end{Bmatrix}$	$f_1 = 1.0 \text{ Hz}$ $\xi_1 = 0.01$ $\phi_1 = \begin{Bmatrix} 0.5 \\ 1.0 \\ 1.0 \\ 0.5 \end{Bmatrix}$	$f_1 = 1.0 \text{ Hz}$ $\xi_1 = 0.01$ $\phi_1 = \begin{Bmatrix} 0.501 \\ 1.000 \\ 1.000 \\ 0.501 \end{Bmatrix}$	$f_1 = 1.02 \text{ Hz}$ $\xi_1 = 0.0151$ $\phi_1 = \begin{Bmatrix} 0.502 \\ 1.000 \\ 0.990 \\ 0.491 \end{Bmatrix}$
$f_2 = 3.0 \text{ Hz}$ $\xi_1 = 0.03$ $\phi_2 = \begin{Bmatrix} 0.3 \\ 0.3 \\ -0.3 \\ -0.3 \end{Bmatrix}$	$f_2 = 3.0 \text{ Hz}$ $\xi_1 = 0.03$ $\phi_2 = \begin{Bmatrix} 0.3 \\ 0.3 \\ -0.3 \\ -0.3 \end{Bmatrix}$	$f_2 = 3.0002 \text{ Hz}$ $\xi_1 = 0.0301$ $\phi_2 = \begin{Bmatrix} 0.3 \\ 0.3 \\ -0.3 \\ -0.3 \end{Bmatrix}$	Unable to detect

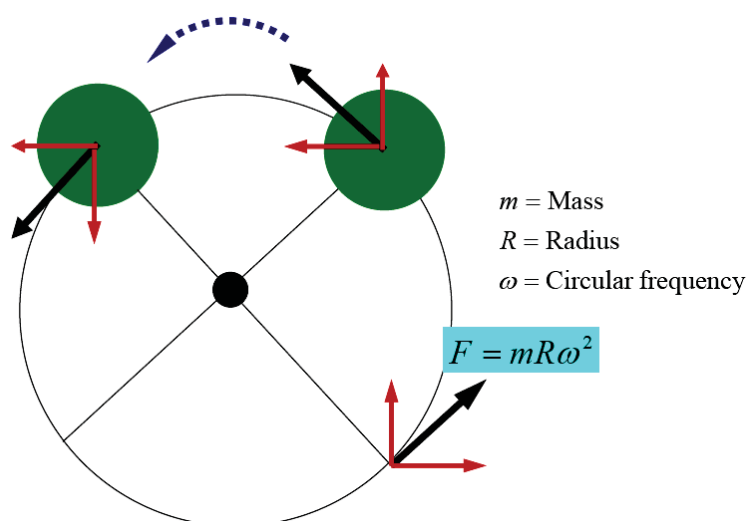
รูปที่ A2.3 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่คำนวณด้วย SRIM

จากรูปที่ พบว่าเมื่อสัญญาณมี SNR อยู่ในระดับปกติ อัลกอริทึมนี้สามารถตรวจสอบคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ได้อย่างแม่นยำมาก อย่างไรก็ตามเมื่อ SNR อยู่ในระดับที่ต่ำมาก (20 เดซิเบล) อัลกอริทึมดังกล่าวก็ยังตรวจพบคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโหมดที่ 1 ได้อย่างแม่นยำ แต่ไม่สามารถตรวจสอบคุณสมบัติของโหมดที่ 2 ได้เลย

กล่าวโดยสรุป อัลกอริทึมที่เสนอมานี้สามารถใช้คำนวณค่าอัตราความหน่วงได้เป็นอย่างดี ซึ่งน่าจะให้ผลที่ดีกับการประยุกต์ใช้กับการตรวจวัดในโครงการนี้ โครงการในระยะถัดไปจะเป็นการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมนี้กับผลที่ได้จากการตรวจวัดจริงเพื่อช่วยในการคำนวณหาอัตราความหน่วงที่แม่นยำขึ้น

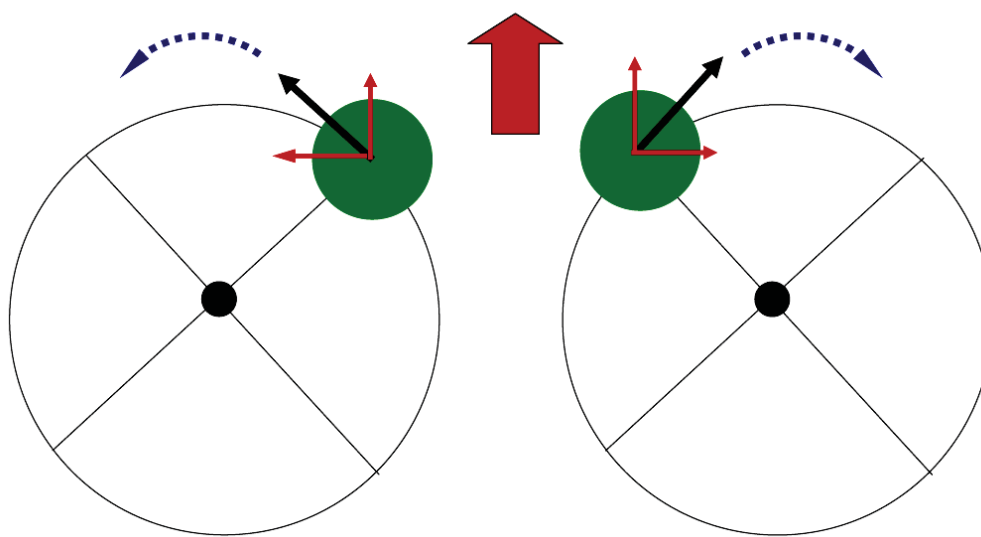
ผ2.2 เครื่องเขย่าอาคาร

เครื่องเขย่าอาคารทำหน้าที่ในการสร้างแรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคในแนวราบต่อโครงสร้างอาคาร โดยใช้หลักการของการเกิดแรงหนีศูนย์กลางของมวลที่หมุนเป็นวงกลม ดังรูปที่ A2.6 โดยแรงที่เกิดจากการหมุนในแนวเส้นสัมผัสวงกลม มีค่าตาม มวล รัศมี และกำลังสองของความเร็วเชิงมุมหรือความถี่ของการหมุน และหากใช้ระบบที่มีมวล 2 ชุด หมุนในทิศทางสวนกันดังรูปที่ A2.7 องค์ประกอบของแรงในแนวนอนกับเส้นตรงที่ลากเชื่อมจุดศูนย์กลางของการหมุนของวงกลมทั้งสอง จะหักล้างกัน เหลือองค์ประกอบแรงในแนวตั้งฉากกับเส้นตรงที่ลากเชื่อมจุดศูนย์กลางของการหมุนของวงกลม ทำให้ได้เป็นแรงที่มีลักษณะเป็นฮาร์โมนิคอย่างสม่ำเสมอ และปรับความถี่ของแรงได้จากความเร็วของการหมุน



รูปที่ A2.6 แรงจากการหมุนของก้อนมวลเป็นวงกลม

Resultant Force

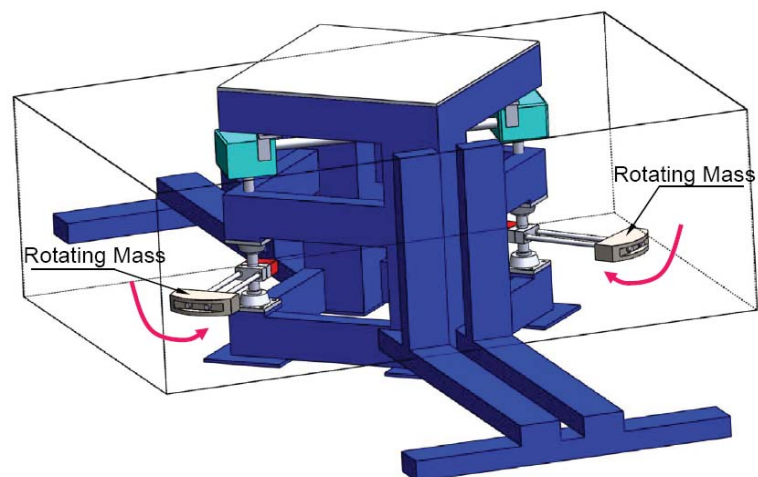


รูปที่ A2.7 แรงจากการหมุนของระบบที่มีมวล 2 ชุด

เครื่องเขย่าอาคารที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ออกแบบให้มีคุณสมบัติหลัก ดังนี้

- มวลก้อนละ 3 กิโลกรัม
- รัศมี 250 มิลลิเมตร และปรับลดลงได้
- ช่วงความถี่ในการทำงานได้สูงสุด 6 Hz.
- มิติประมาณ 1560x1000x780 (มิลลิเมตร)

รูปที่ A2.8 และ A2.9 แสดงภาพร่างและภาพถ่ายของเครื่องเขย่าอาคารที่พัฒนาขึ้น ตามลำดับ



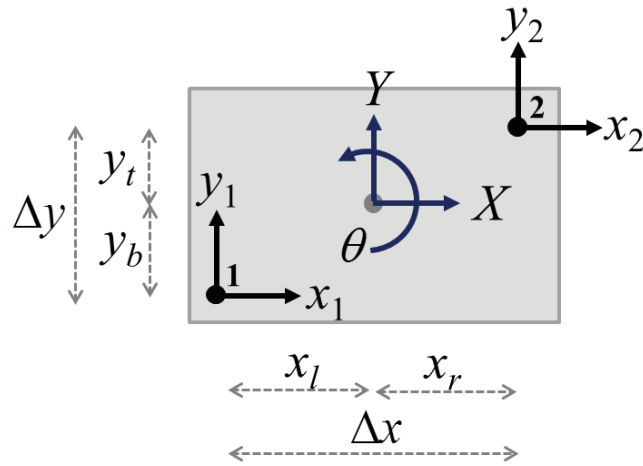
รูปที่ A2.8 ภาพร่างของเครื่องเขย่าอาคาร



รูปที่ A2.9 ภาพถ่ายของเครื่องเขย่าอาคาร

ผ2.3 อัลกอริทึมสำหรับปรับแก้หัววัดที่วางผิดมุม

สมมติให้ที่ชั้นใดชั้นหนึ่งของอาคาร มีการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์ 2 จุด ทิศทางของการตรวจวัดและค่าระยะอ้างอิงต่างๆแสดงไว้ดังรูปที่

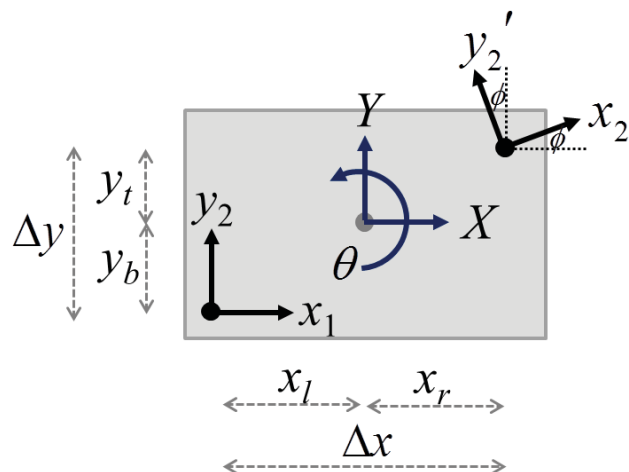


รูปที่ A2.10 การวางเซ็นเซอร์ตรวจวัดที่จุด 1 และ 2

ด้วยสมมติฐานที่ว่าพื้นมีการเคลื่อนที่แบบวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body motion) ทำให้สามารถคำนวณหาการเคลื่อนที่ ณ จุดอ้างอิงใดๆ (เช่นจุดกึ่งกลาง) จากค่าที่ตรวจวัดได้ดังสมการ

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_t}{\Delta y} & 0 & \frac{y_b}{\Delta y} & 0 \\ 0 & \frac{x_r}{\Delta x} & 0 & \frac{x_l}{\Delta x} \\ \frac{1}{\Delta y} & \frac{-1}{\Delta x} & \frac{-1}{\Delta y} & \frac{1}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{Bmatrix} \quad (A2.4.1)$$

อย่างไรก็ตาม ในบางครั้งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการวางเซ็นเซอร์ (สมมติให้เป็นที่จุด 2) ทำให้เกิดมุมเอียงที่ไม่เท่ากันรูปที่



รูปที่ A2.11 ความคลาดเคลื่อนในการวางเซ็นเซอร์

เมื่อต้องคำนวณค่าการเคลื่อนที่แบบวัตถุแข็งเกร็ง จึงเกิดความคลาดเคลื่อนดังนี้

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_t}{\Delta y} & 0 & \frac{y_b}{\Delta y} & 0 \\ 0 & \frac{x_t}{\Delta x} & 0 & \frac{x_l}{\Delta x} \\ \frac{1}{\Delta y} & \frac{-1}{\Delta x} & \frac{-1}{\Delta y} & \frac{1}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2' \\ y_2' \end{Bmatrix} \quad (\text{A2.4.2})$$

สังเกตได้ว่าในด้านขวาของสมการ ค่าที่วัดได้จากจุดที่ 2 เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อการคำนวณทั้งหมด ซึ่งส่งผลถึงความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นไหว หากมุมเอียงยังมีค่ามาก ก็จะมีผลกระทบมาก ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวถ้าทราบมุมเอียง ϕ ที่ผิดพลาดไป ก็จะทำให้ปรับแก้ค่าที่จุด 2 ให้กลับมาเป็นปกติได้ตั้งสมการต่อไปนี้

$$\begin{Bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2' \\ y_2' \end{Bmatrix} \quad (\text{A2.4.3})$$

อย่างไรก็ตาม ในการตรวจวัดที่ผ่านมาไม่มีทางทราบมุมเอียง ϕ ที่วางผิดพลาดไปแล้วได้ เพราะได้ยกเซ็นเซอร์ออกไปแล้ว โครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับข้อมูลที่ได้ออกมาแล้วโดยอาศัยอัลกอริทึมของ Kabsch ซึ่งใช้สำหรับคำนวณ Rotation matrix ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับข้อมูล 2 ชุด ดังนี้

กำหนดให้ค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์ ณ จุดที่ 1 เป็นค่าสำหรับใช้อ้างอิง สามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t_1) & x_1(t_2) & \dots & x_1(t_N) \\ y_1(t_1) & y_1(t_2) & \dots & y_1(t_N) \end{bmatrix} \quad (\text{A2.4.4})$$

โดยที่ตัวแปร t แสดงถึงค่าที่ตรวจวัด ณ เวลาใดๆ

กำหนดให้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดเมื่อเซ็นเซอร์ทำมุมเอียง ϕ สามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{P}' = \begin{bmatrix} x_2'(t_1) & x_2'(t_2) & \dots & x_2'(t_N) \\ y_2'(t_1) & y_2'(t_2) & \dots & y_2'(t_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2' \\ \mathbf{y}_2' \end{bmatrix} \quad (\text{A2.4.5})$$

โดยที่ตัวแปร t แสดงถึงค่าที่ตรวจวัด ณ เวลาใดๆ

กำหนดให้ค่าที่ควรจะเป็นหลังจากการปรับแก้ $\mathbf{P}$ สามารถคำนวณได้จากมุมเอียง ϕ ดังนี้

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2' \\ \mathbf{y}_2' \end{bmatrix} = \mathbf{U} \mathbf{P}' \quad (\text{A2.4.6})$$

โดยที่ $\mathbf{U}$ เป็นเมตริกซ์หมุน (Rotation Matrix) สำหรับการแปลง

เงื่อนไขของการหาเมตริกซ์ $\mathbf{U}$ คือการทำให้เมตริกซ์ $\mathbf{P}$ มีความแตกต่างจากเมตริกซ์ $\mathbf{Q}$ น้อยที่สุด นั่นคือ

$$Error = Tr[(\mathbf{P} - \mathbf{Q})(\mathbf{P} - \mathbf{Q})^T] \quad (A2.4.7)$$

โดยที่ Tr หมายถึงผลรวมของสมาชิกแนวทแยงมุมของเมตริกซ์ (Trace) ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) สามารถกระจายได้ดังนี้

$$Error = Tr(\mathbf{P}\mathbf{P}^T) + Tr(\mathbf{Q}\mathbf{Q}^T) - 2Tr(\mathbf{P}\mathbf{Q}^T) \quad (A2.4.8)$$

จากสมการพบว่าความแตกต่างระหว่างเมตริกซ์ $\mathbf{P}$ และ $\mathbf{Q}$ จะมีค่าน้อยที่สุดก็ต่อเมื่อพจน์สุดท้ายในสมการข้างบนมีค่ามากที่สุด เงื่อนไขดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ เมื่อ $\mathbf{U}$ มีค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่งที่ทำให้พจน์สุดท้ายมีค่าสูงสุด

พจน์สุดท้ายของสมการข้างต้น สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$Tr(\mathbf{P}\mathbf{Q}^T) = Tr[(\mathbf{U}\mathbf{P}')\mathbf{Q}^T] = Tr[\mathbf{U}(\mathbf{P}'\mathbf{Q}^T)] \quad (A2.4.9)$$

จาก Singular value decomposition สามารถเขียนได้ว่า

$$\mathbf{P}'\mathbf{Q}^T = \mathbf{V}\mathbf{S}\mathbf{W}^T \quad (A2.4.10)$$

โดยที่เมตริกซ์ $\mathbf{V}$ และ $\mathbf{W}$ คือ Orthogonal matrix และ $\mathbf{S}$ เป็นเมตริกซ์ของ Eigenvalue ที่เรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ด้วยวิธี Singular value decomposition จะทำให้เมตริกซ์ $\mathbf{P}'\mathbf{Q}^T$ ถูกแยกให้อยู่ในรูป Orthogonal matrix ซึ่งแต่ละหลักในเมตริกซ์ก็คือทิศทางที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดนั่นเอง ด้วยกระบวนการนี้ จึงทำให้เขียนพจน์สุดท้ายของความคลาดเคลื่อนได้ใหม่ดังนี้

$$Tr[\mathbf{U}(\mathbf{P}'\mathbf{Q}^T)] = Tr[\mathbf{U}(\mathbf{V}\mathbf{S}\mathbf{W}^T)] = Tr[(\mathbf{U}\mathbf{V})(\mathbf{S}\mathbf{W}^T)] = Tr[\mathbf{S}\mathbf{W}^T\mathbf{U}\mathbf{V}] \quad (A2.4.11)$$

เนื่องจากเมตริกซ์ $\mathbf{V}$ และ $\mathbf{W}$ เป็น Orthogonal matrix และ ดีเทอร์มิแนนท์ของ Rotation matrix $\mathbf{U}$ ต้องเป็น 1 เสมอ จึงทำให้

$$\mathbf{W}^T\mathbf{U}\mathbf{V} = \mathbf{I} \quad (A2.4.12)$$

หรืออีกนัยหนึ่ง Rotation matrix ก็คือ

$$\mathbf{U} = \mathbf{W}\mathbf{V}^T \quad (A2.4.13)$$

อย่างไรก็ตามในบางกรณี $\mathbf{U}$ ที่ได้อาจมีดีเทอร์มิแนนท์เป็น -1 ได้ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงนิยาม $\mathbf{U}$ ในรูปต่อไปนี้ ซึ่งจะทำให้ใช้ได้กับทุกกรณี

$$\mathbf{U} = \mathbf{W} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & d \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (A2.4.14)$$

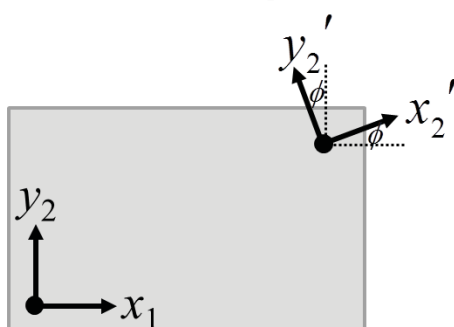
โดยที่ $d = \text{sign}(\det \mathbf{C})$ และ $\mathbf{C} = \mathbf{P}'\mathbf{Q}^T$

สรุปขั้นตอนของการปรับแก้

1. สร้างเมตริกซ์สำหรับข้อมูลเซ็นเซอร์ที่ใช้อ้างอิง $\mathbf{Q}$
2. สร้างเมตริกซ์สำหรับข้อมูลเซ็นเซอร์ที่จะถูกปรับแก้ $\mathbf{P}'$
3. คำนวณ Covariant matrix $\mathbf{C} = \mathbf{P}'\mathbf{Q}^T$
4. คำนวณ Singular value decomposition $\mathbf{C} = \mathbf{V}\mathbf{S}\mathbf{W}^T$
5. คำนวณเครื่องหมายของดีเทอร์มิแนนต์ $d = \text{sign}(\det \mathbf{C})$
6. คำนวณ Rotation matrix $\mathbf{U} = \mathbf{W} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & d \end{bmatrix} \mathbf{V}^T$
7. เมตริกซ์สำหรับข้อมูลที่ถูกปรับแก้แล้วคือ $\mathbf{P} = \mathbf{U}\mathbf{P}'$

ผลการทดสอบการปรับแก้มุมเอียง

การทดสอบอัลกอริทึมดังกล่าวทำได้โดยการจำลองข้อมูลจากเซ็นเซอร์ โดยกำหนดมุมเอียงที่ผิดเพี้ยนไปซึ่งมีลำดับการคำนวณดังรูปที่



1 Give the exact value of $\mathbf{Q}$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ y_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\pi 2t) + \cos(2\pi 3t) \\ \sin(2\pi 3t) + 0.5\sin(2\pi 6t) \end{bmatrix}$$

2 Give with exact value of $\mathbf{P}$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.2\cos(2\pi 2t) + 1.1\cos(2\pi 3t) \\ 1.3\sin(2\pi 3t) + 0.8\sin(2\pi 6t) \end{bmatrix}$$

3 Simulate $\mathbf{P}'$ with $\phi = 20^\circ$

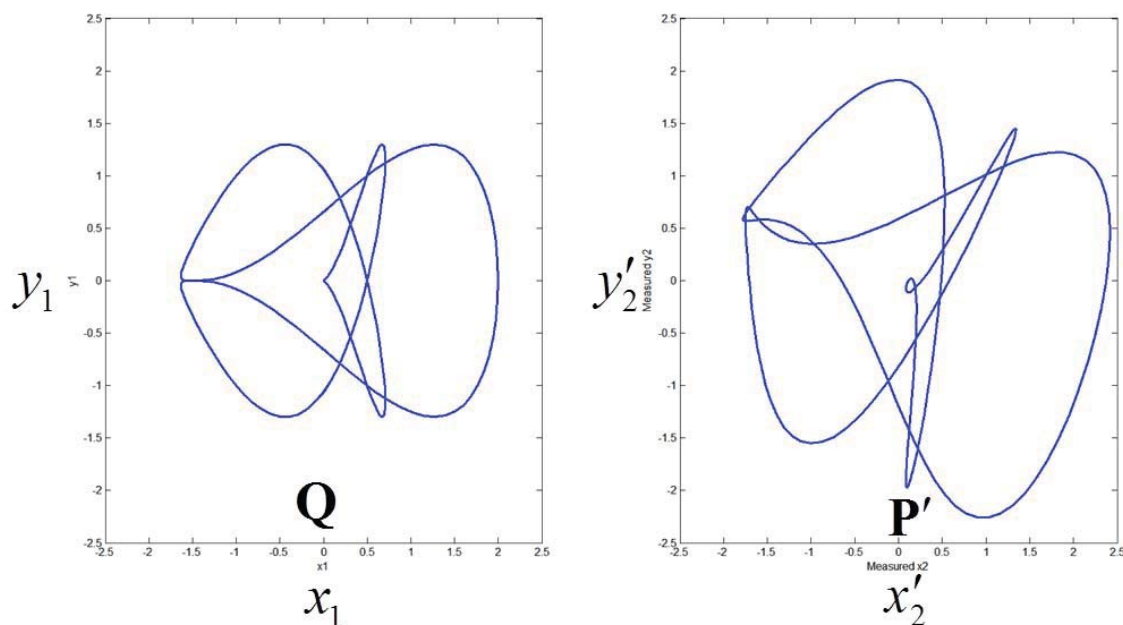
$$\mathbf{P}' = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix}$$

4 Calculate $\mathbf{P}$
(by proposed algorithm)

5 Compare
calculated $\mathbf{P}$ with exact $\mathbf{P}$

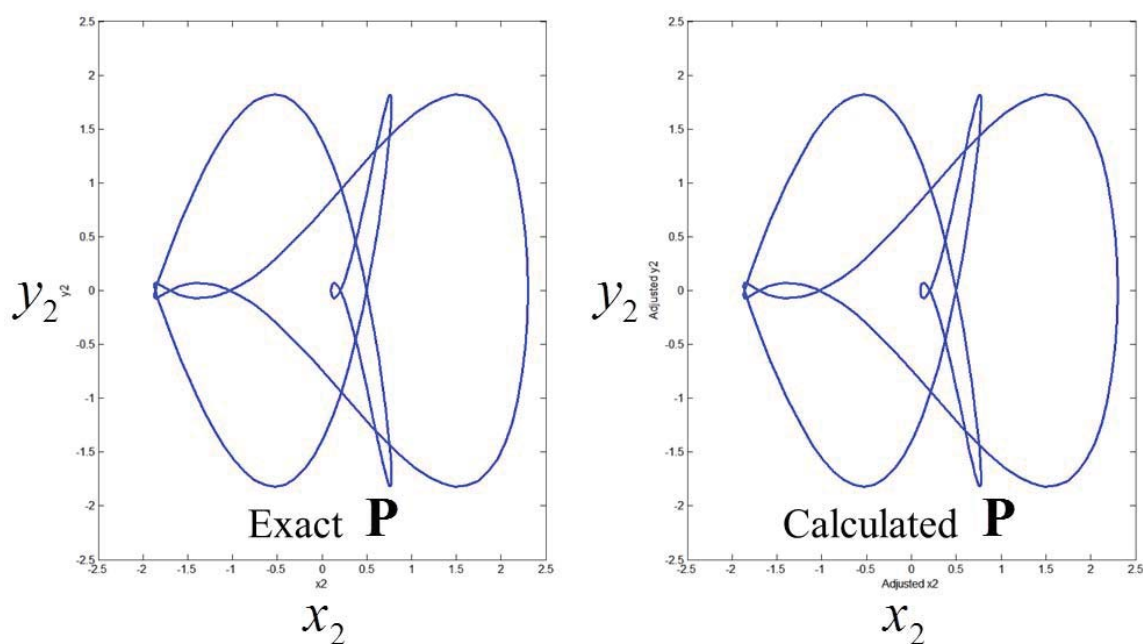
รูปที่ A2.12 ลำดับการทดสอบอัลกอริทึมสำหรับปรับแก้

ผลที่ได้แสดงในรูปของเส้นทางแสดงการเคลื่อนที่ (Trajectory) ของจุด 1 และ 2 ที่เวลาต่าง ๆ ดังรูปที่ พบว่ารูปด้านขวาเกิดการบิดเบี้ยวเนื่องการวางเซ็นเซอร์เป็นมุมเอียง 20 องศา



รูปที่ A2.13 เส้นทางแสดงการเคลื่อนที่ที่จุด 1 และ 2 (กรณีมีมุมเอียง)

หลังจากการปรับแก้ด้วยอัลกอริทึมที่เสนอมา เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ปรับแก้กับค่าที่ถูกต้อง พบว่าอัลกอริทึมที่ใช้ปรับแก้ให้ผลที่ดีมากดังรูปที่ สำหรับมุมเอียงค่าอื่น ๆ หรือลักษณะการเคลื่อนที่แบบอื่นก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน (มิได้แสดงไว้ในที่นี้)

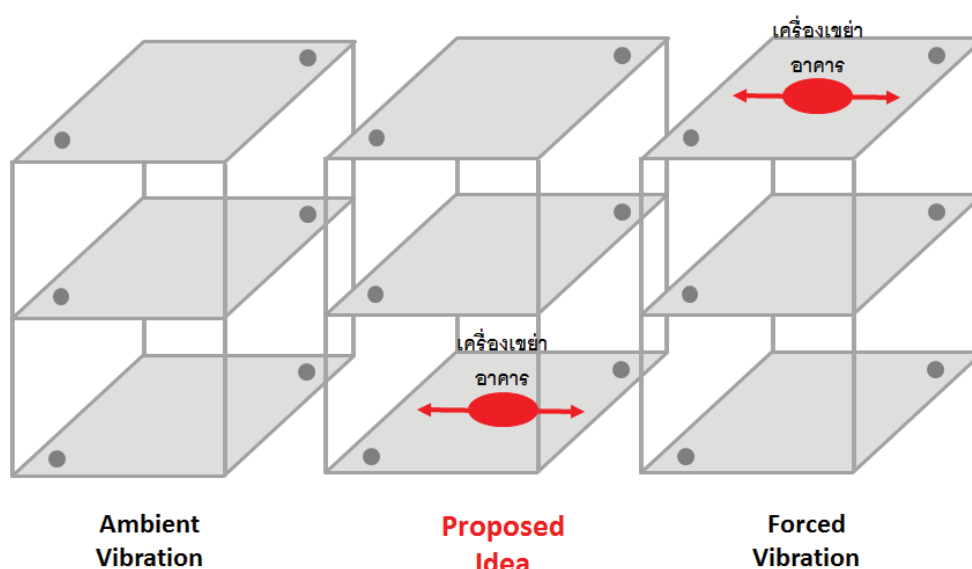


รูปที่ A2.14 เส้นทางแสดงการเคลื่อนที่ที่จุด 2 หลังปรับแก้ด้วยอัลกอริทึมแล้ว

โดยสรุป อัลกอริทึมที่เสนอมາสามารถใช้แก้ปัญหาเซนเซอร์ที่วางเอียงผิดมุมได้ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาเรื่องเฟสระหว่างเซนเซอร์ที่ผิดเพี้ยนไป ท้ายสุดจะส่งผลให้การคำนวณคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ต่างๆ เช่น ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่นไหว มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นด้วย

ผ2.4 แนวทางการแก้ปัญหาเรื่องเครื่องเขย่าอาคาร

อาคารที่เตี้ยและแข็งแรงมากเช่นอาคารที่สูงไม่มากนัก ปรกติกการสั่นโดยธรรมชาติจะมีค่าน้อยมากจนไม่อาจตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์วัดสัญญาณที่มีอยู่ได้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้เครื่องเขย่าอาคารเพื่อกระตุ้นให้เกิดการสั่นอย่างชัดเจนจนตรวจวัดได้



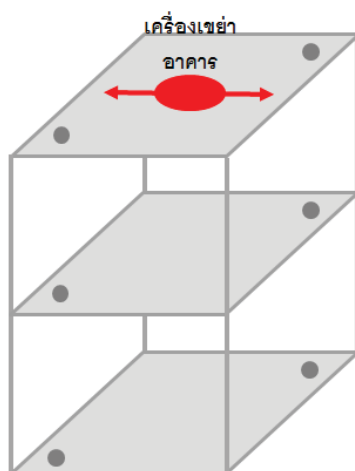
รูปที่ A2.15 แนวทางแก้ไขปัญหาเรื่องเครื่องเขย่าอาคาร

รูปที่ A2.15 ได้แสดงแนวทางสำหรับการตรวจวัดที่เป็นไปได้ 3 แบบ แบบแรก (ซ้ายสุด) เป็นการวัดการสั่นตามธรรมชาติ ลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องเขย่าอาคารแต่อย่างใด แบบที่สอง (ขวาสุด) เป็นการวัดการสั่นไหวในกรณีที่อาคารแข็งแรงมากและไม่อาจสั่นตามธรรมชาติได้ จึงต้องติดตั้งเครื่องเขย่าอาคารไว้ชั้นบน อย่างไรก็ตามจากปัญหาดังกล่าวที่ได้พบตลอดในการตรวจวัดแนวทางที่เป็นไปได้ ก็คือการติดตั้งเครื่องเขย่าอาคารไว้ที่ชั้นล่างสุดของอาคาร (รูปกลาง) ทั้งนี้ประสิทธิภาพการตรวจวัดด้วยวิธีนี้อาจจะไม่ได้สูงมากนัก แต่ก็ชัดเจนได้ด้วยการปฏิบัติงานที่ง่ายขึ้นและความเป็นไปได้ในการอนุญาตให้ตรวจวัดอาคารที่มากขึ้นด้วย

การวัดประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอ

สำหรับประสิทธิภาพของการตรวจวัดที่นำเสนอ นั้น สามารถคำนวณได้ดังนี้ ในกรณีที่เป็น การทดสอบแบบใช้เครื่องเขย่าอาคาร ค่าแอมพลิจูดของการสั่นของชั้นบนและชั้นล่างสุด สามารถหาได้จากรูปที่ A2.16 ค่าแอมพลิจูดของการสั่นจะขึ้นอยู่กับขนาดแอมพลิจูดของแรง สติฟเนสของอาคาร รวมทั้งค่ารูปร่างการสั่นไหวของแต่ละชั้นด้วย

ในลำดับถัดมา เมื่อนำเครื่องกระตุ้นการสั่นมาวางไว้ที่ชั้นล่างของอาคารเดิม แอมพลิจูดของการสั่นของชั้นบนและชั้นล่าง สามารถคำนวณได้จากรูปที่ A2.17



**Forced
Vibration**

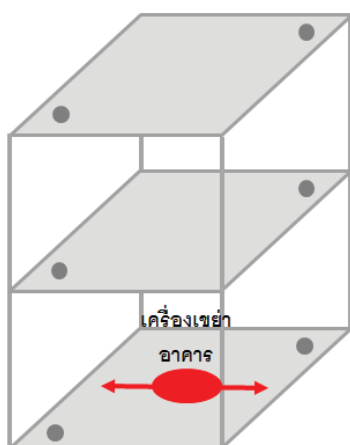
$$Top\ Amplitude \propto \frac{Top\ Force\ Amplitude}{Stiffness} \phi(H)\phi(H)$$

$$Bottom\ Amplitude \propto \frac{Top\ Force\ Amplitude}{Stiffness} \phi(b)\phi(H)$$

$\phi(H)$ = Mode shape at top floor

$\phi(b)$ = Mode shape at bottom floor

รูปที่ A2.16 แอมพลิจูดการสั่นเมื่อใช้เครื่องกระตุ้นชั้นบนของอาคาร



**Proposed
Idea**

$$Top\ Amplitude \propto \frac{Bottom\ Force\ Amplitude}{Stiffness} \phi(b)\phi(H)$$

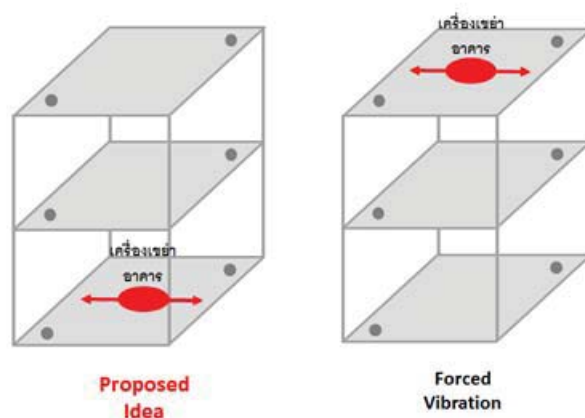
$$Bottom\ Amplitude \propto \frac{Bottom\ Force\ Amplitude}{Stiffness} \phi(b)\phi(b)$$

$\phi(H)$ = Mode shape at top floor

$\phi(b)$ = Mode shape at bottom floor

รูปที่ A2.17 แอมพลิจูดการสั่นเมื่อใช้เครื่องกระตุ้นชั้นล่างของอาคาร

ประสิทธิภาพของการตรวจวัด หาได้จากการเปรียบเทียบระหว่างแอมพลิจูดการสั่นเมื่อกระตุ้นชั้นล่างเทียบกับเมื่อกระตุ้นชั้นบน ซึ่งปรกติจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 100 สูตรคำนวณประสิทธิภาพ หาได้จากรูป A2.18 โดยที่ ประสิทธิภาพของการตรวจวัดด้วยวิธีที่นำเสนอนี้ เป็นผลคูณระหว่าง Force Factor ซึ่งก็คือขนาดแรงที่ใช้กระตุ้นชั้นล่างเทียบกับชั้นบน (ปรกติจะมากกว่าหรือเท่ากับ 1) และอัตราส่วน Shape Factor ซึ่งก็คือขนาดโดยประมาณของรูปร่างการสั่นที่ชั้นล่างเทียบกับชั้นบน (ปรกติจะน้อยกว่า 1)



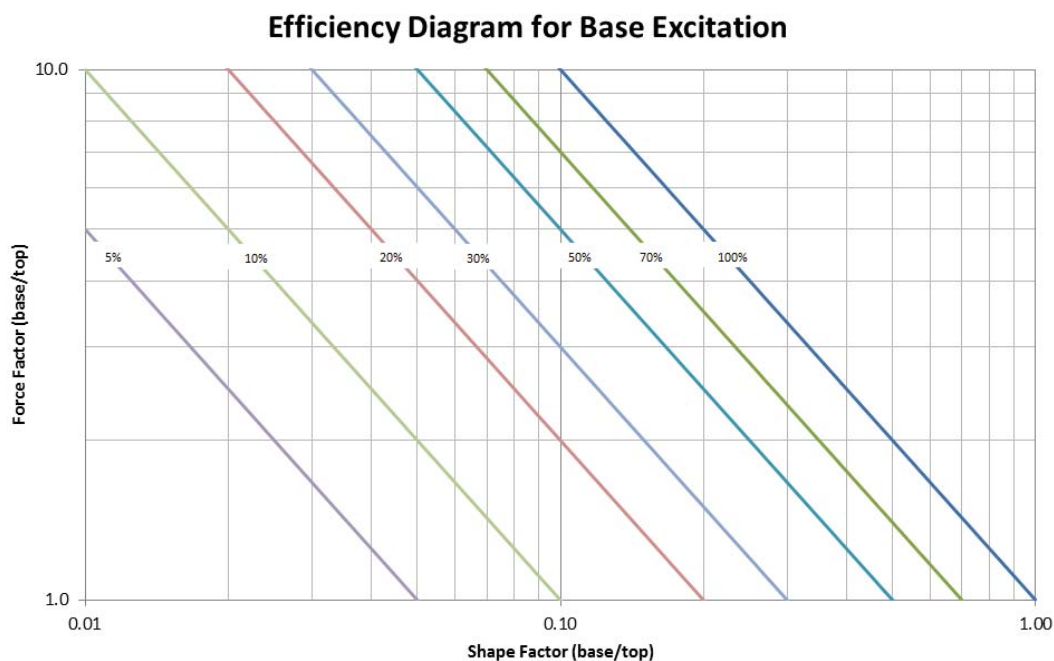
$$Efficiency = \frac{Forced\ vibration - Amplitude}{Proposed\ idea - Amplitude} \times 100\%$$

$$Efficiency = \frac{Bottom\ force\ Amplitude}{Top\ force\ Amplitude} \times \frac{\phi(b)}{\phi(H)} \times 100\%$$

$$Efficiency = Force\ Factor \times Shape\ Factor \times 100\%$$

รูปที่ A2.18 แอมพลิจูดการสั่นเมื่อใช้เครื่องกระตุ้นชั้นล่างของอาคาร

เพื่อช่วยในการคำนวณให้ง่ายขึ้น คณะผู้วิจัยจึงได้จัดทำแผนภูมิสำหรับการใช้งานในภาคสนามอย่างง่ายดังรูปที่ A2.19



รูปที่ A2.19 แผนภูมิสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพของวิธีตรวจวัดที่นำเสนอ

ตัวอย่างเช่นเมื่อต้องการทดสอบอาคาร 2 ชั้น จากการประมาณโดยคร่าว ๆ พบว่าอัตราส่วน Shape Factor ระหว่างชั้นล่างและชั้นบนมีค่าประมาณ 0.10 จากแผนภูมิเมื่อใช้ขนาดของแรงเท่าเดิม หรือ Force Factor เท่ากับ 1.0 ในการกระตุ้นอาคาร จะพบว่ามีประสิทธิภาพเหลือเพียงร้อยละ 10 เท่านั้น อย่างไรก็ตาม หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดให้ดียิ่งขึ้น จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของแรง (หรือขนาดของมวล) เป็น 2 เท่า หรืออีกนัยหนึ่งคือ เพิ่ม Force Factor เป็น 2.0 ก็จะได้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 เป็นต้น ด้วยวิธีการดังนี้จะทำให้ประเมินประสิทธิภาพของการตรวจวัดล่วงหน้าได้ก่อนทำการทดสอบ