

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



246386



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (ระยะที่ 2)

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน  
เพื่อการแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. นคร กุ้วโรดม และคณะ

กุมภาพันธ์ 2553



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

## โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (ระยะที่ 2)

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน  
เพื่อการแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่

คณะผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม

รองศาสตราจารย์ ดร. เป็นหนึ่ง วานิชชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชยานนท์ หารัชชภิญโญ

สังกัด

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

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

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

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

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร เพื่อการพัฒนาสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่เหมาะสมสำหรับใช้ออกแบบอาคารต้านทาน

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

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

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

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

ผลการพิจารณาสมการแบบขอบเขตล่างและขอบเขตบนเพื่อกำหนดขอบเขตของค่าคาบที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีอื่นนอกเหนือจากการใช้สมการการประมาณ เสนอให้ หากใช้การคำนวณเพื่อหาค่าคาบธรรมชาติโดยหลักการของพลศาสตร์โครงสร้าง ค่าคาบธรรมชาติที่ได้ไม่ควรมีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของค่าที่ได้จากสูตรการประมาณ

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

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

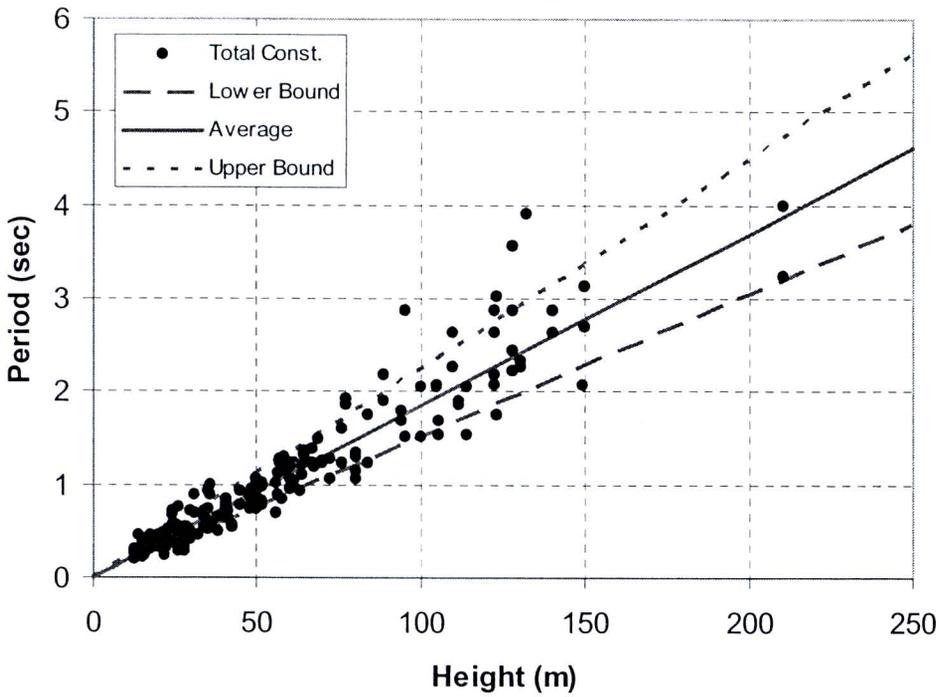
ผลการศึกษาค่าคาบอิทธิพลหลักจากการตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุดในจังหวัดเชียงใหม่ พบว่ามีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.8 วินาที เป็นส่วนมาก โดยในแต่ละบริเวณมีลักษณะที่แตกต่างกันตามสภาพธรณีวิทยาของชั้นดินที่มีความแตกต่างในแต่ละพื้นที่ ดังนี้ บริเวณ อ.เมือง มีค่าคาบอิทธิพลหลักแตกต่างกันอย่างมาก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

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

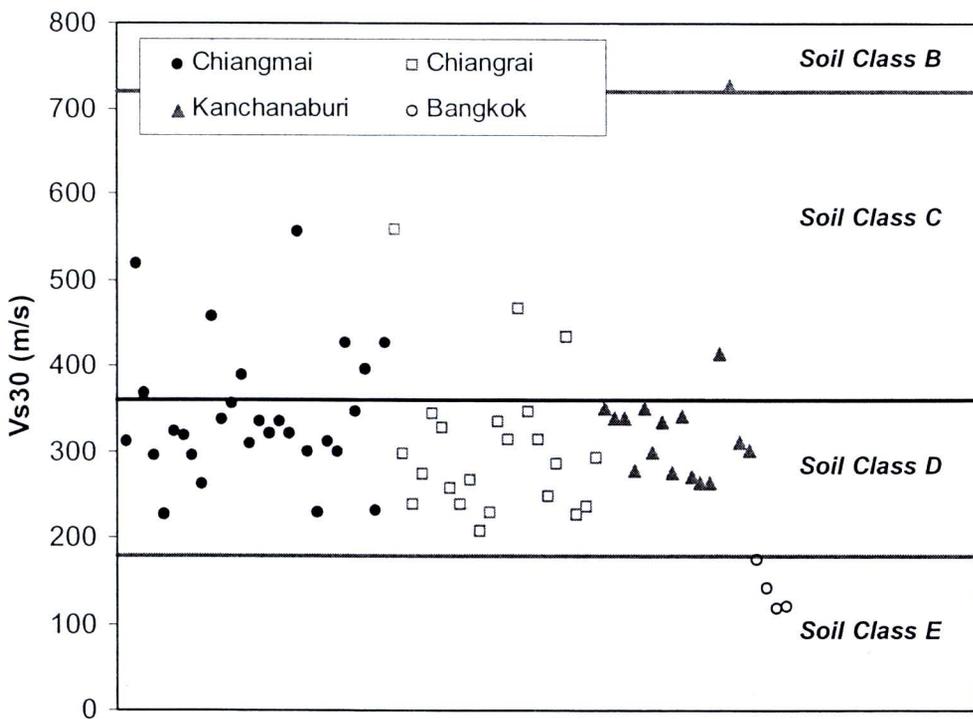
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบอิทธิพลหลักและความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร ของบริเวณที่ศึกษาแสดงเป็นแนวโน้มว่า บริเวณที่มีคาบอิทธิพลหลักต่ำจะมีความเร็วคลื่น

เฉือนสูง แสดงถึงเป็นบริเวณชั้นดินแข็ง ในทางกลับกัน บริเวณที่เป็นดินอ่อนมีค่าคาบอิทธิพลหลักสูงและความเร็วคลื่นเฉือนต่ำ ผลการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร เมื่อนำมาใช้จำแนกชั้นดินตามข้อกำหนดของ NEHRP (2003) ได้ผลซึ่งแสดงถึงลักษณะของชั้นดินที่บริเวณที่ศึกษา เปรียบเทียบรวมไว้ในรูปที่ 2 โดยบริเวณที่ศึกษาในจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และกาญจนบุรี พื้นที่ราบในเขตอำเภอเมืองส่วนใหญ่จำแนกเป็น ชั้นดินประเภท D (ดินแข็ง) บางส่วนจำแนกเป็นชั้นดินประเภท C (ดินแข็งมาก กิ่งหิน) สำหรับบริเวณใกล้เชิงเขา และไม่พบชั้นดินประเภท E (ดินอ่อน) ส่วนผลการศึกษาในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลพบว่าทุกบริเวณจำแนกเป็น ชั้นดินประเภท E (ดินอ่อน)

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



รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารทั้งหมดจากการวิเคราะห์แบบมีเงื่อนไขเป็นสมการเส้นตรง



รูปที่ 2 ผลการจำแนกชั้นดินจากข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนของบริเวณที่ศึกษา

## บทคัดย่อ

การประเมินระดับความรุนแรงของผลตอบสนองของอาคารมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางแผนจัดการการป้องกันภัยเนื่องจากแผ่นดินไหว ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อระดับความรุนแรงนี้คือ คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และ คุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งอาคาร งานวิจัยนี้ได้กำหนดวัตถุประสงค์คือ เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่มีผลต่อพฤติกรรมการตอบสนองของอาคารภายใต้แรงกระทำแบบพลวัตโดยการตรวจวัดการสั่นไหวตามธรรมชาติของอาคาร และ ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งอาคารที่มีผลต่อลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเนื่องจากสภาพชั้นดินของบริเวณที่ตั้งโดยการตรวจวัดคลื่นการสั่นขนาดเล็กที่ผิวดิน เพื่อให้ผลการวิจัยได้นำไปใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในประเทศไทย

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

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

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

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

## Abstract

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

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

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

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

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

## สารบัญ

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

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

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