

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร

Dynamic Properties of Reinforced Concrete Buildings in Bangkok

นคร ภู่วโรดม

มานะ จันทะสศ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

อำเภอ คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี 12121

โทร. 0-2564-3001 ถึง 9 โทรสาร 0-2564-3010

Email : pnakhorn@engr.tu.ac.th

เป็นหนึ่งใน วานิชชัย

สำนักวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

อำเภอ คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี 12120

โทร. 0-2524-5530 โทรสาร 0-2524-6059

Email : pennung@ait.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร ด้วยวิธีการตรวจวัดการสั่นไหวตามธรรมชาติ (Ambient Vibration) และวิเคราะห์ผลตอบสนองด้วยวิธีทาง Frequency Domain ของอาคารทั้งหมด 50 หลัง ที่มีความสูงประมาณ 20 ถึง 210 เมตร และจำนวนชั้น 5 ถึง 54 ชั้น ผลการวิจัยได้แสดงข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ ประกอบด้วย คาบธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และรูปร่างการสั่นไหว เพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหวและการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวต่อไปในอนาคต งานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติจากข้อมูลการตรวจวัดด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย และเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว Uniform Building Code 1997 และผลการตรวจวัดอาคารจากต่างประเทศ ผลการศึกษาพบว่าคาบธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของอาคารสูงปานกลางประมาณ 10-20 ชั้น และคาบธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวที่ 2 ของอาคารสูงประมาณ 30 ชั้นขึ้นไป มีค่าใกล้เคียงกับคาบที่ชั้นดินในกรุงเทพมหานครขยายขนาดคลื่นได้รุนแรง หรือประมาณ 1 วินาที ซึ่งสามารถทำให้กลุ่มอาคารเหล่านี้เกิดการโยกตัวอย่างรุนแรงด้วยการสั่นพ้องจากแผ่นดินไหวที่มีการขยายตัวของคลื่นได้ นอกจากนี้จากการตรวจวัดและการวิเคราะห์รูปร่างการสั่นไหวพบการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานของอาคารเทียบกับชั้นบน โดยพบว่าค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์นี้มีค่ามากสำหรับอาคารเดี่ยวหรือมีอัตราส่วนของสติเฟนของอาคารเทียบกับฐานรากสูง และมีค่ามากในรูปแบบการสั่นไหวที่สูงขึ้น

Abstract

This study investigates the dynamic properties of reinforced concrete buildings in Bangkok by an ambient vibration measurement approach to perceive their seismic hazard. The natural periods, damping ratios and mode shapes of fifty buildings, varying in height from 20 to 210 meters and number of stories from 5 to 54, were identified from ambient vibrations by a technique in frequency domain. Regression analyses of the measured natural periods are used to develop the empirical formulas for estimating the natural period of buildings. The comparisons of the fundamental periods of buildings in Bangkok with the periods measured from buildings under earthquake motion in other countries and the empirical formulas in the Uniform Building Code 1997 are presented. The fundamental periods of medium-rise buildings, about 10 to 20 stories, and the periods of the second mode of the high-rise buildings, about 30 stories or higher, were found to be in the vicinity of the predominant period of the amplified ground motion of Bangkok soft soil layer, which is about 1 second. This concurrence illustrates the potential of the subsequent resonance phenomena, which are the near-periodic amplified ground motion and the amplification of building responses at this predominant period. From the results of mode shape analysis, the relative movement at base of the building and top floor can be detected significantly. The movements caused by soil-structure interaction are more pronounced when the relative stiffness of the building with respect to the soil is increased.

1. บทนำ

เป็นที่เชื่อกันว่า ประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงภัยต่อแผ่นดินไหวค่อนข้างต่ำ เนื่องจากยังไม่มีหลักฐานบันทึกที่ชัดเจนถึงตัวอย่างเหตุการณ์ที่ทำให้เกิดความเสียหายรุนแรง ประกอบกับอัตราการเกิดแผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อประเทศไทยมีไม่บ่อยนัก และสำหรับกรุงเทพมหานคร ที่ไม่ได้ตั้งอยู่บริเวณแนวรอยเลื่อนที่มีพลัง ก็ยังอาจทำให้เชื่อมั่นว่ากรุงเทพมหานครจะปลอดภัยต่อแผ่นดินไหว ดังนั้นกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงสร้างด้านทานแผ่นดินไหวจึงไม่ได้ครอบคลุมถึงโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาอย่างต่อเนื่อง พบความเป็นไปได้ที่จะเกิดแผ่นดินไหวจากแนวรอยเลื่อนที่มีพลังทั้งที่อยู่ในประเทศและประเทศเพื่อนบ้านซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อหลายพื้นที่ในประเทศได้ นอกจากนี้งานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติของชั้นดินของกรุงเทพมหานคร [1] พบว่าสภาพดินอ่อนในบริเวณกรุงเทพมหานครสามารถขยายระดับการสั่นสะเทือนของพื้นดินได้ถึงประมาณ 3-4 เท่าของระดับปกติ เนื่องจากการสั่นพ้อง (Resonance) ของคลื่นแผ่นดินไหวภายในโครงสร้างชั้นดิน อีกทั้งการสั่นสะเทือนของพื้นดินที่ถูกขยายตัวยังมีลักษณะการสั่นที่มีจังหวะค่อนข้างชัดเจน เป็นจังหวะซ้ำๆ ประมาณ 1 รอบต่อวินาที ส่งผลให้อาคารสูงที่มีคาบธรรมชาติ (Natural Period) ใกล้เคียงกับจังหวะนี้เกิดการโยกไหวตัวที่รุนแรงเป็นพิเศษด้วยการสั่นพ้องอีกครั้งหนึ่ง ปรากฏการณ์ในลักษณะนี้ได้เคยเกิดขึ้นมาแล้วในหลายเมือง แต่ที่เด่นชัดและรุนแรงที่สุดเกิดขึ้นที่กรุงเม็กซิโก ในปี พ.ศ. 2528 ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ประมาณ 8.1 ริกเตอร์ มีศูนย์กลางห่างจากกรุงเม็กซิโก ถึง 350 กิโลเมตร ทำให้เกิดการพังทลายของอาคารกว่า 500 หลัง มีผู้เสียชีวิตถึง 8,000 คน โดยที่มีการศึกษาพบว่าสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสั่นไหวอย่างรุนแรงเป็นเพราะชั้นดินอ่อนใต้กรุงเม็กซิโก ได้ขยายคลื่นแผ่นดินไหวเป็น 4-5 เท่าจากระดับปกติ และอาคารที่วิบัติส่วนใหญ่มีคาบธรรมชาติใกล้เคียงกับคาบที่ชั้นดินขยายขนาดคลื่นแผ่นดินไหว ในลักษณะเดียวกันนี้กรุงเทพมหานครมีโอกาสเสี่ยงที่จะได้รับผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหวระยะไกลได้ ทั้งแผ่นดินไหวขนาดปานกลางที่เกิดขึ้นจากรอยเลื่อนมีพลังในประเทศ หรือแผ่นดินไหวขนาดใหญ่จากรอยเลื่อนที่มีพลังมากในแนวทะเลอันดามันและประเทศพม่า

จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการศึกษาวิจัยในด้านแผ่นดินไหวของประเทศไทย เพื่อเป็นการเข้าใจและเตรียมความพร้อมสำหรับแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านวิศวกรรม ที่ต้องมีการพัฒนาฐานการออกแบบโครงสร้างด้านทานแผ่นดินไหวที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย งานที่สำคัญสิ่งหนึ่งคือการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร อันได้แก่ คาบธรรมชาติของอาคาร ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) และรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมเชิง

พลศาสตร์ของอาคารและเป็นข้อมูลสำคัญให้วิศวกรสามารถคำนวณค่าแรงที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้างและระดับการโยกไหวของอาคารได้อย่างถูกต้องสมจริง

วิธีการที่สามารถหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุดคือการตรวจวัดกับอาคารจริง ซึ่งสามารถทำได้โดยสะดวกด้วยการตรวจวัดการสั่นไหวในระดับต่ำของอาคารที่เกิดขึ้นเนื่องจากสภาพแวดล้อม (Ambient Vibration) ด้วยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง ที่เป็นผลเนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น แรงลม การจราจร เป็นต้น และผลที่ได้จากการตรวจวัดอาคารกลุ่มตัวอย่างสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการประเมินค่าสำหรับอาคารอื่นๆในประเทศไทยได้

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาค้นคว้าสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากการตรวจวัดอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร จำนวน 50 อาคาร โดยมีขนาดตั้งแต่ 5 ถึง 54 ชั้น สูง 20 ถึง 210 เมตร [2-4] และนำค่าคาบที่ได้จากการตรวจวัดทั้งหมดของรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานทั้งสองทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนอาคาร (Transverse and Longitudinal Directions) มาเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) และเปรียบเทียบกับค่าคาบที่ได้จากการประมาณโดยมาตรฐานการออกแบบจากต่างประเทศ ผลการศึกษายังสามารถใช้อธิบายผลกระทบของแผ่นดินไหวระยะไกลต่ออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานครที่ทำให้เกิดการโยกตัวอย่างชัดเจนในกลุ่มอาคารสูงปานกลางประมาณ 10 ถึง 20 ชั้น และอาคารสูงหลายอาคาร

2. ผลของแผ่นดินไหวระยะไกลต่อกรุงเทพมหานคร

ผลของแผ่นดินไหวระยะไกลต่ออาคารในกรุงเทพมหานคร เนื่องจากการขยายขนาดคลื่นแผ่นดินไหวของดินอ่อนได้มีตัวอย่างที่แสดงเสมือนสัญญาณเตือนความเสี่ยงภัยอยู่ในระยะ ตัวอย่างของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อประเทศไทยใน พ.ศ. 2546 มี 2 เหตุการณ์โดยครั้งแรกเป็นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่ประเทศอินโดนีเซีย เมื่อเวลาประมาณ 10.00 น. ตามเวลาในประเทศไทย ของวันที่ 22 มกราคม 2546 แผ่นดินไหวดังกล่าวมีขนาด 5.7 ริกเตอร์ (จากข้อมูลของ US Geological Survey) และมีศูนย์กลางบริเวณ 4.58° N 97.54° E ใกล้เมืองเมดาน ทางตอนเหนือของเกาะสุมาตรา ประเทศอินโดนีเซีย ซึ่งอยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครกว่า 1000 กิโลเมตร โดยในครั้งนี้ไม่มีรายงานความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินใดๆเกิดขึ้นทั้งในประเทศอินโดนีเซีย และประเทศเพื่อนบ้าน และแผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อประเทศไทยในครั้งที่สองเกิดขึ้นที่ประเทศพม่า เมื่อเวลาประมาณ 1.16 น. ตามเวลาในประเทศไทย ของวันที่ 22 กันยายน 2546 แผ่นดินไหวดังกล่าวมีขนาด 6.5 ริกเตอร์ (จากข้อมูลของ US Geological Survey) และมีศูนย์กลางบริเวณ

19.4° N 96.2° E ใกล้เมืองเมคคิลา ทางตอนเหนือของกรุงย่างกุ้ง ประเทศพม่า ซึ่งอยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครกว่า 850 กิโลเมตร

แผ่นดินไหวที่เกาะสุมาตรา ถึงแม้ไม่ได้สร้างความเสียหายโดยตรงแต่ได้มีผลกระทบในเชิงจิตวิทยาเป็นอย่างยิ่งต่อประชาชนหลายพันคนในประเทศไทย ซึ่งได้ก่อให้เกิดความตื่นตระหนกเป็นอย่างมาก โดยผลกระทบต่อแผ่นดินไหวนี้คือ ในกรุงเทพมหานคร ผู้คนที่อยู่ในอาคารสูงหลายสิบอาคาร รู้สึกกังวลตื่นตระหนก และสามารถสังเกตพบการสั่นไหวของ มู่ลี่ คอมไฟแวน และกระจกของอาคาร เป็นต้น จึงมีความตื่นตระหนกและรีบออกจากอาคาร ส่วนในจังหวัดทางภาคใต้ เช่น ภูเก็ต สุราษฎร์ธานี สงขลา สตูล และตรัง เป็นต้น ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวที่ทำให้ผู้คนที่อยู่ในอาคาร 3 ถึง 5 ชั้นขึ้นไปบางอาคารรู้สึกถึงการสั่นไหวและรีบหนีออกจากอาคารเหล่านั้น รวมทั้งมีรายงานของการเกิดคลื่นสูงขึ้นในทะเลอันดามัน

สำหรับแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่พม่าซึ่งเกิดใกล้แหล่งชุมชนมากกว่าทำให้มีความเสียหายที่รุนแรงกว่า โดยในประเทศไทยมีรายงานผู้เสียชีวิต 10 คน และมีการพังทลายของเจดีย์ สะพาน และบ้านเรือนจำนวนหนึ่ง ส่วนผลกระทบต่อประเทศไทยคือ เกิดการสั่นไหวที่รู้สึกได้ในอาคารหลายแห่งในจังหวัดทางภาคเหนือและกรุงเทพมหานคร มีผู้คนที่พักนอนอยู่ในอาคารที่พักอาศัยและโรงแรมรู้สึกถึงการสั่นไหวและตื่นตระหนกเป็นจำนวนมาก มีความรู้สึกกังวลตื่นตระหนกและสังเกตพบการสั่นไหวตัวของสิ่งของต่างๆ โดยเฉพาะในอาคารสูง 10 ชั้นขึ้นไป และบางอาคารเกิดการเสียหายเล็กน้อยของส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างหลัก

แผ่นดินไหวทั้งสองครั้งจัดว่าเป็นแผ่นดินไหวขนาดกลาง ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้เฉลี่ยเดือนละหลายสิบครั้งตามรอยเลื่อนที่มีพลังต่างๆ ทั่วโลก และในความเป็นจริงแล้ว แผ่นดินไหวในประเทศไทยและประเทศเพื่อนบ้านที่มีผลกระทบรู้สึกได้ในประเทศอาจเกิดขึ้นได้โดยเฉลี่ยปีละหลายครั้ง

ส่วนแผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่อกรุงเทพมหานครจนทำให้ประชาชนตกใจคล้ายคลึงกับในครั้งนี้อันที่ วันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2518 มีศูนย์กลางที่บริเวณ อ.ท่าสองยาง จังหวัดตาก ขนาด 5.6 ริกเตอร์ และ 26 เมษายน 2526 ศูนย์กลางใกล้เขื่อนศรีนครินทร์ อ.ศรีสวัสดิ์ จ.กาญจนบุรี ขนาด 5.9 ริกเตอร์ ซึ่งในแต่ละครั้งได้สร้างความตื่นตระหนกต่อประชาชนโดยเฉพาะผู้ที่อยู่ในอาคารที่มีความสูงระดับปานกลางถึงระดับสูง

3. การหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารโดยการตรวจวัด

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างอาจประเมินได้โดยการวิเคราะห์โครงสร้างจากแบบรายละเอียดการก่อสร้าง ซึ่งปัจจุบันสามารถทำได้โดยสะดวกจากโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง อย่างไรก็ตาม แบบจำลองที่สร้างขึ้นจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบหลายด้าน

เช่น ผลในด้านความแข็งแกร่งจากส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (เช่น ผนังกำแพง บันได) การยึดรั้งของฐานราก คุณสมบัติทางกลของวัสดุและลักษณะอื่นๆ ในสภาพใช้งานจริงของโครงสร้าง เป็นต้น และค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จำเป็นต้องมีการตรวจสอบและปรับปรุงแบบจำลองให้เหมาะสมถูกต้องยิ่งขึ้น [5] นอกจากนี้ค่าคาบธรรมชาติของอาคารอาจประมาณได้โดยง่ายจากการใช้สูตรคำนวณซึ่งเสนอไว้ในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวต่างๆ ที่อยู่ในรูปความสัมพันธ์อย่างง่ายของค่าคาบธรรมชาติกับลักษณะทางกายภาพของอาคาร เช่น ความสูง ความกว้าง หรือ จำนวนชั้น สูตรคำนวณโดยประมาณเหล่านี้ได้พัฒนาขึ้นจากการศึกษาตัวอย่างอาคารในแต่ละประเทศ ซึ่งมีมาตรฐานการออกแบบและการก่อสร้างที่แตกต่างกัน นอกจากนั้น สภาพแวดล้อมและสภาวะการใช้งานของอาคารก็อาจแตกต่างกันด้วย ดังนั้น การประยุกต์ใช้สูตรในการประมาณเหล่านี้สำหรับอาคารในประเทศไทยจึงควรมีการศึกษาตัวอย่างอาคารจริงเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมก่อน วิธีการที่สามารถหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุดคือการตรวจวัดกับตัวอย่างอาคารจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ต่างๆ ของอาคารโดยการตรวจวัดกับกลุ่มอาคารตัวอย่าง และนำข้อมูลค่าคาบธรรมชาติมาพัฒนาเป็นสูตรการประมาณสำหรับอาคารทั่วไปในกรุงเทพมหานคร

อาคารที่ทำการตรวจวัดในการศึกษานี้เป็นอาคารที่มีลักษณะแตกต่างกันหลายด้าน ได้แก่ ระดับความสูง ขนาดของอาคาร ลักษณะการใช้งาน เช่น อาคารที่พักอาศัย อาคารสำนักงาน โรงแรม เป็นต้น และลักษณะโครงสร้าง เช่น โครงสร้างแบบเสา-คาน (Beam-Column Frame) โครงสร้างแบบเสา-พื้นไร้คาน (Slab-Beam Frame) หรือ โครงสร้างที่มีผนังรับแรงเฉือน รวมทั้งหมด 50 อาคาร ซึ่งใช้เป็นกลุ่มตัวอย่างแทนอาคารโดยทั่วไปในกรุงเทพมหานคร รายละเอียดของอาคารแสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง [4]

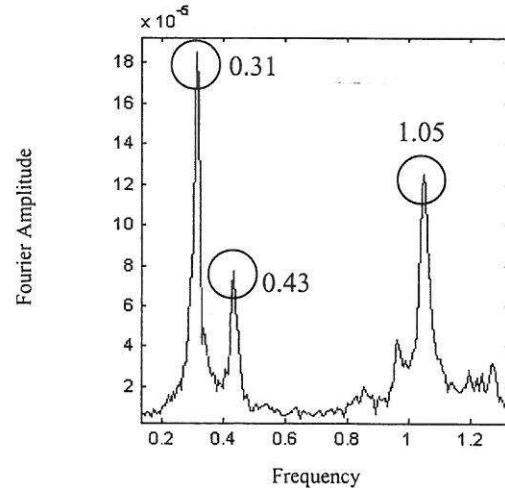
สำหรับการตรวจวัดอาคารในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการตรวจวัดการสั่นไหวโยกตัวของอาคารในระดับค่าที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) [6] ซึ่งเกิดจากแรงกระทำหรือการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมที่มีอยู่รอบๆ อาคารและภายในอาคาร เช่น แรงลม การสั่นสะเทือนของพื้นดินเนื่องจากการจราจร กิจกรรมของผู้คนในอาคาร ฯลฯ โดยทั่วไปแล้ว การสั่นไหวในลักษณะนี้จะมีระดับที่ต่ำจนผู้คนที่ทั่วไปในอาคารไม่สามารถรู้สึกได้แต่สามารถตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนที่มีความไวสูง

ในการตรวจวัดค่าคาบธรรมชาติของอาคารเริ่มจากการตรวจวัดการโยกตัวของอาคารที่ชั้นบนสุด โดยความเร็วหรือความเร่งจากการโยกตัวของอาคารจะถูกตรวจวัดจากหัววัดและส่งไปบันทึกในเครื่องบันทึกสัญญาณ จากนั้นสัญญาณที่บันทึกจะถูกวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ต่างๆ ของอาคารได้ โดยวิธีในพิสัยความถี่ (Frequency Domain) หลักพื้นฐานของวิธีนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อ

พิจารณาแบบโครงสร้างที่ถูกกระตุ้นด้วยแรงพลวัตแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่หนึ่งๆ ระบบจะมีผลตอบสนองด้วยความถี่ของการกระตุ้นนั้น และผลตอบสนองจะมีขนาดสูงสุดเมื่อความถี่ของการกระตุ้น มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของระบบนั้น (ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติของระบบอาจมีได้มากกว่าหนึ่งค่า) และความสัมพันธ์ของผลการตอบสนองกับความถี่ของการกระตุ้นในรูปของกราฟจะมีลักษณะเป็นยอดแหลมในบริเวณของค่าความถี่ธรรมชาติต่างๆ ของระบบนั้น และความสูงของยอดแหลมจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับค่าอัตราส่วนความหน่วงประจำรูปแบบการสั่นไหวนั้น

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ วิธีการที่จะควบคุมแรงกระตุ้นให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ อาจมีข้อจำกัด โดยเฉพาะกับ โครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในการศึกษานี้ ดังนั้น จึงใช้แนวคิดสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองเนื่องจากแรงจากสภาพแวดล้อม โดยใช้ทฤษฎีของ Random Vibration ช่วยในการวิเคราะห์ กล่าวคือ ด้วยสมมุติฐานที่ว่า แรงกระตุ้นจากสภาพแวดล้อมมีลักษณะที่เป็นส่วนผสมของแรงหลายชนิดจากแหล่งต่างๆ ซึ่งอาจพิจารณาว่ามีองค์ประกอบของความถี่ผสมอยู่มากมาย เป็นช่วงความถี่กว้าง (Wide Band) เมื่อแรงลักษณะนี้กระทำต่อโครงสร้างซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐาน ที่มีความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วง ประจำรูปแบบการสั่นไหวต่างๆ อยู่หลายค่า จึงพิจารณาได้ว่า โครงสร้างถูกแรงกระทำที่มีส่วนผสมของความถี่หลายๆค่า ดังนั้น ผลการตอบสนองจึงเป็นการผสมกันของผลตอบสนองในแต่ละองค์ประกอบของความถี่ ซึ่งจะมีค่ามากสำหรับองค์ประกอบที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ หรือการสั่นพ้อง และสำหรับระบบโครงสร้างในการศึกษานี้ การตอบสนองในแต่ละรูปแบบการสั่นไหวจะมีค่าความถี่ธรรมชาติแต่ละค่าแตกต่างกันชัดเจน และมีค่าอัตราส่วนความหน่วงค่อนข้างต่ำ ทำให้เส้นกราฟแสดงผลตอบสนองของระบบที่ความถี่ต่างๆ ของแรงกระตุ้น จึงมียอดแหลมปรากฏค่อนข้างชัดเจน ดังนั้น ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ต่างๆ จึงสามารถประเมินได้ ซึ่งความถี่ธรรมชาติสามารถคำนวณได้จาก Fourier Magnitude Spectra ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 1 และคาบธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนกลับของความถี่ธรรมชาติจะถูกนำมาศึกษาในบทความนี้เป็นหลัก

นอกจากนี้แล้ว รูปร่างการสั่นไหวของระบบสามารถคำนวณได้จากการพิจารณาอัตราส่วนของความสูงของยอดแหลม ที่ความถี่ธรรมชาติประจำรูปแบบการสั่นไหวต่างๆ (Fourier Spectral Ratio) และความแตกต่างของมุมเฟสของผลตอบสนอง ณ ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 1 ตัวอย่าง Fourier Magnitude Spectra จากการตรวจวัดอาคาร

4. สูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

การออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวโดยใช้หลักแรงสถิตเทียบเท่าต้องมีการประมาณค่าคาบธรรมชาติพื้นฐาน (T) ของอาคารในการคำนวณแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) ที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยค่า T อาจประมาณได้จากสูตรการประมาณในมาตรฐานของประเทศต่างๆ ตัวอย่างของสูตรคำนวณโดยประมาณเหล่านี้ ได้แก่

กฎกระทรวงฉบับที่ 49 [7] ที่มีต้นแบบจากมาตรฐาน UBC 1985 (Uniform Building Code 1985) [8] คาบธรรมชาติ T ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาที คำนวณได้จาก

$$T = 0.09 H / \sqrt{D} \quad (1)$$

$$T = 0.1 N \quad (2)$$

สมการที่ 1 ใช้สำหรับอาคารทั่วไป และ สมการที่ 2 สำหรับอาคารโครงสร้างที่มีความเหนียว โดยที่ H และ D คือความสูงของพื้นอาคารชั้นสูงสุดวัดจากระดับพื้นดิน และความกว้างของโครงสร้างของอาคารในทิศทางขนานกับแรงแผ่นดินไหวตามลำดับ มีหน่วยเป็นเมตร และ N คือจำนวนชั้นของอาคารทั้งหมดที่อยู่เหนือระดับพื้นดิน

สำหรับมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาในปัจจุบันคือ Uniform Building Code 1997 (UBC 1997) [9] สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ค่าคาบธรรมชาติ คำนวณได้ดังนี้

$$T = C_t H^{0.75} \quad (3)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ $C_r = 0.0731$ สำหรับอาคาร โครงข้อแข็งที่มีความเหนียว (Moment-Resisting Frame, MRF) และ $C_r = 0.0488$ สำหรับ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังรับแรงเฉือน (Shear Wall, SW)

นอกจากนี้ยังมีสูตรการประมาณสำหรับแต่ละประเทศ ซึ่งมีรูปแบบเดียวกันแต่อาจมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน เนื่องจากสูตรการประมาณเหล่านี้ได้พัฒนาขึ้นจากการศึกษาตัวอย่างอาคารในแต่ละประเทศ ซึ่งมีมาตรฐานการออกแบบและการก่อสร้างที่แตกต่างกัน นอกจากนั้น สภาพแวดล้อมและสภาวะการใช้งานของอาคารก็อาจแตกต่างกันด้วย ดังนั้น การประยุกต์ใช้สูตรในการประมาณเหล่านี้สำหรับอาคารในประเทศไทยจึงควรมีการศึกษาเพื่อตรวจสอบความถูกต้องกับตัวอย่างอาคารจริง

5. การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติ

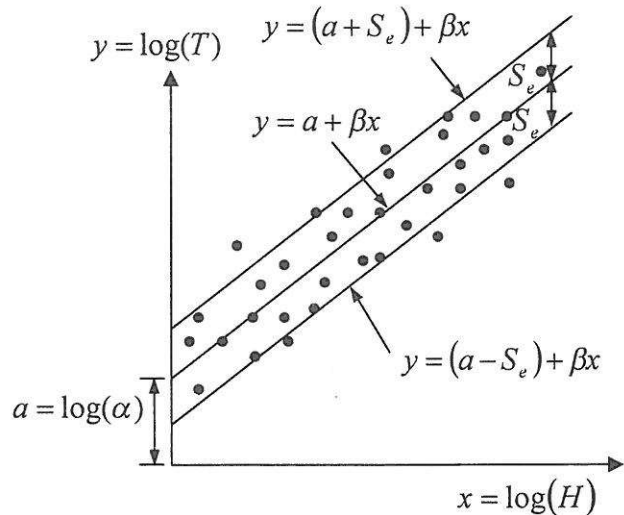
ในการพัฒนาสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติของมาตรฐานต่างๆ มีพื้นฐานจากวิธีการวิเคราะห์ตามหลักพลศาสตร์ โครงสร้าง โดยแสดงค่าคาบธรรมชาติให้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง โดยมีสมมุติฐานบางประการเพื่อให้สูตรการประมาณที่ได้อยู่ในรูปอย่างง่าย เช่น สมมุติฐานด้านการกระจายตัวของแรงทางด้านข้าง ความสัมพันธ์ของค่าแรงเฉือนที่ฐานจากแผ่นดินไหวกับค่าคาบธรรมชาติ การกระจายตัวของน้ำหนักและสถิติในสของอาคาร เป็นต้น [10] ซึ่งจะนำไปสู่ความสัมพันธ์ของค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคาร ได้คือ

$$T = \alpha H^\beta \quad (4)$$

α และ β คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้วิธี Regression Analysis จากสมการที่ 4 แปลงสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 5

$$y = a + \beta x \quad (5)$$

โดยที่ $y = \log(T)$, $a = \log(\alpha)$ และ $x = \log(H)$ จากสมการที่ 5 เป็นสมการเส้นตรงโดยจุดตัดแกน y ที่ a เมื่อ $x = 0$ และสมการเส้นตรงมีความชันเท่ากับ β โดยแสดงเป็นความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ Regression ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของข้อมูลและสมการจากการวิเคราะห์ Regression

จากรูปที่ 2 สามารถหาค่า จุดตัดแกน a และความชัน β ได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Minimizing the Standard Error) และหาค่า α ได้จากความสัมพันธ์ $a = \log(\alpha)$ โดยที่ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard Error, S_e) สามารถหาได้จากสมการที่ 6

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - (a + \beta x_i)]^2}{(n-1)}} \quad (6)$$

โดยที่ $y_i = \log(T_i)$ และ $(a + \beta x_i) = \log(\alpha) + \beta \log(H_i)$ คือข้อมูลการตรวจวัดอาคารที่ i และ n เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมด ด้วยวิธีการวิเคราะห์ Regression จากข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคาร สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ α_r และ β สำหรับสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติ โดยเป็นค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับสมการของค่าคาบโดยเฉลี่ย (T_R) จากข้อมูลทั้งหมด และมีสมการที่ให้ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (S_e) ของข้อมูลค่าที่ดีที่สุด (Best-Fit) ดังนั้นสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับการวิเคราะห์ Regression ในรูปแบบ Best-Fit ดังสมการที่ 7

$$T_R = \alpha_r H^\beta \quad (7)$$

ในการนำไปประยุกต์ใช้กับมาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานแรงแผ่นดินไหวสำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการกำหนดให้ค่าคาบธรรมชาติมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริง เนื่องจากการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่ต่ำกว่าทำให้การคำนวณค่าแรงเฉือนที่ฐานอาคารมีค่ามากกว่าเป็นผลให้การออกแบบอาคารมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น (Conservative)

ซึ่งเรียกว่า การประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง (Lower Bound Natural Period, T_L) การประมาณค่า T_L ได้มาจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับขอบเขตล่าง (α_L) โดยการสร้างเส้นสมการขอบเขตล่างในรูปแบบ Best-Fit ตามสมการที่ 5 โดยไม่เปลี่ยนค่าความชัน (β) และลบด้วยค่าความผิดพลาดมาตรฐาน โดยมีความหมายว่า มีประมาณ 15 % ของข้อมูลค่าคาบธรรมชาติที่จะมีค่าต่ำกว่าสูตรการประมาณ T_L ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2 ดังนั้นค่า T_L และค่าสัมประสิทธิ์ α_L คำนวณได้ดังนี้

$$T_L = \alpha_L H^\beta \quad (8)$$

$$\log \alpha_L = \log(\alpha_R) - S_e \quad (9)$$

จากสมการที่ 8 ได้ให้ค่าการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีความปลอดภัยสูงขึ้น นอกจากนี้ในข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวของประเทศสหรัฐอเมริกาได้ยอมให้ใช้วิธีอื่นที่เหมาะสมในการคำนวณค่าคาบธรรมชาติ และได้กำหนดขอบเขตบนที่ค่าจากการคำนวณไม่ควรเกินค่าจากสูตรการประมาณไว้ โดยสามารถพิจารณาด้วยการหาค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน (Upper Bound Natural Period, T_U) โดยค่า T_U และค่าค่าสัมประสิทธิ์ α_U มีขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนกับสมการขอบเขตล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2 และสมการที่ 10 และ 11

$$T_U = \alpha_U H^\beta \quad (10)$$

$$\log \alpha_U = \log(\alpha_R) + S_e \quad (11)$$

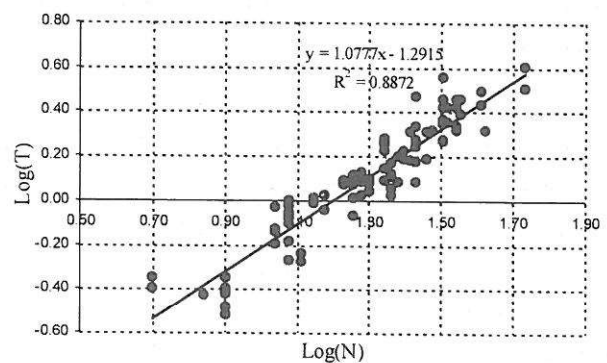
และโดยทั่วไปความสูงของอาคารมักมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับจำนวนชั้น ดังนั้นการหาสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติกับจำนวนชั้นจึงสามารถใช้หลักการที่แสดงมาแล้วเช่นกัน

6. ผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติ

จากข้อมูลการตรวจวัดอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานครทั้งหมด 50 อาคาร ที่มีความสูงตั้งแต่ 20 ถึง 210 เมตร และจำนวนชั้นตั้งแต่ 5 ถึง 54 ชั้น การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับลักษณะทางกายภาพของอาคารสามารถแสดงได้ 2 รูปแบบ คือ ความสัมพันธ์กับความสูง และจำนวนชั้น

เมื่อทำการวิเคราะห์ Regression สำหรับค่าคาบธรรมชาติกับจำนวนชั้นของอาคารได้สมการเส้นตรง $y = 1.07731x - 1.291$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) เท่ากับ 0.8872 ดังแสดงในรูปที่ 3 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ α_R และ β สำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติในสมการที่ 7 ได้ดังนี้ ค่า α_R มีค่าเท่ากับ

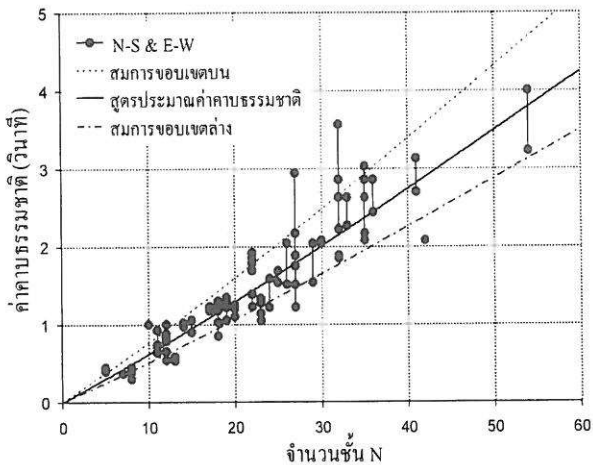
0.051 และ β มีค่าเท่ากับ 1.0773 คำนวณค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (S_e) ด้วยสมการที่ 6 มีค่าเท่ากับ 0.087 เพื่อหาสมการค่าคาบธรรมชาติสำหรับขอบเขตล่าง (Lower Bound) และขอบเขตบน (Upper Bound) ตามสมการที่ 8 และ 10 ตามลำดับ การวิเคราะห์ในรูปแบบที่กล่าวมานี้เป็นวิธีการวิเคราะห์แบบไม่มีเงื่อนไข (Unconstrained) ซึ่งเป็นสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่มีความผิดพลาดมาตรฐานต่ำที่สุด แต่สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป สมการควรมีรูปแบบที่ง่ายต่อการใช้งาน ดังนั้นจึงใช้วิธีวิเคราะห์แบบมีเงื่อนไข (Constrained) โดยกำหนดให้ค่า β มีค่าเท่ากับ 1.10 และ 1.0 ทำการวิเคราะห์ Regression ด้วยกระบวนการเดิมทำให้ได้สมการประมาณค่าคาบธรรมชาติในรูปแบบความสัมพันธ์กับจำนวนชั้นของอาคาร ดังแสดงในตารางที่ 1 และสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ในแต่ละรูปแบบการวิเคราะห์ Regression ได้ดังรูปที่ 4 ถึง 6



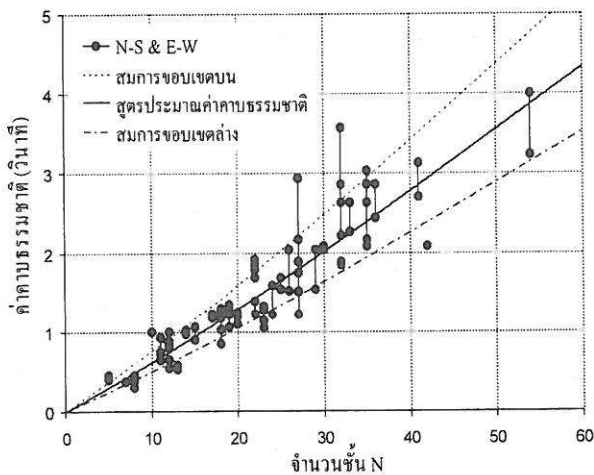
รูปที่ 3 การวิเคราะห์ Regression ของค่าคาบธรรมชาติกับจำนวนชั้น

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ Regression สำหรับค่าคาบธรรมชาติกับจำนวนชั้นของอาคาร

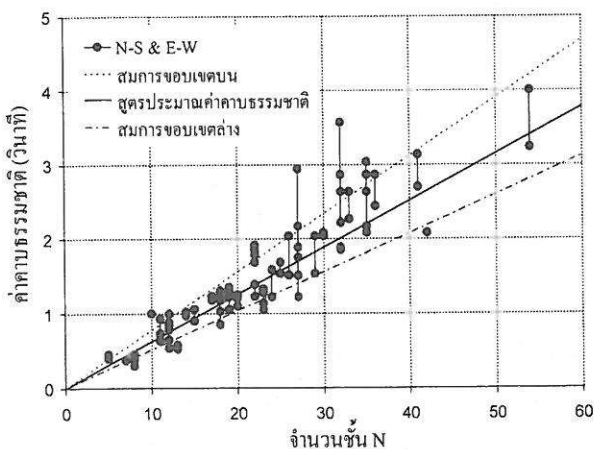
วิธีวิเคราะห์ Regression	ผลการวิเคราะห์ Regression			
	T_L	T_R	T_U	S_e
ไม่มีเงื่อนไข	$0.042N^{1.08}$	$0.051N^{1.08}$	$0.063N^{1.08}$	0.087
มีเงื่อนไข ($\beta = 1.1$)	$0.039N^{1.10}$	$0.048N^{1.10}$	$0.059N^{1.10}$	0.087
มีเงื่อนไข ($\beta = 1.0$)	$0.052N$	$0.063N$	$0.078N$	0.089



รูปที่ 4 สูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติกับจำนวนชั้น
ด้วยการวิเคราะห์แบบไม่มีเงื่อนไข

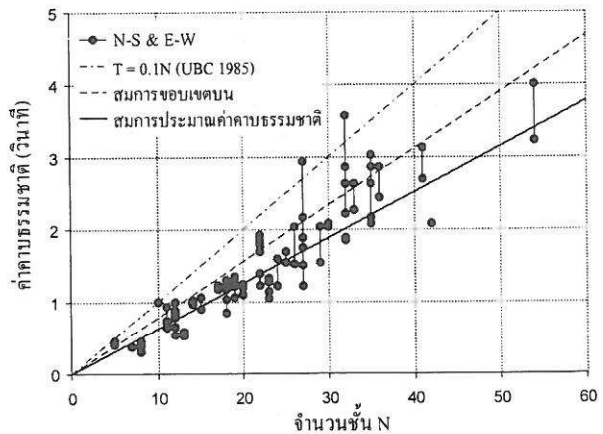


รูปที่ 5 สูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติกับจำนวนชั้น
ด้วยการวิเคราะห์แบบมีเงื่อนไข ($\beta=1.1$)



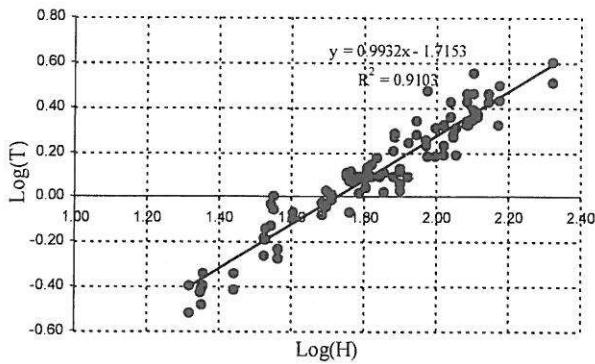
รูปที่ 6 สูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติกับจำนวนชั้น
ด้วยการวิเคราะห์แบบมีเงื่อนไข ($\beta=1.0$)

เมื่อเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติที่สัมพันธ์กับจำนวนชั้นระหว่างสูตรการประมาณในข้อกำหนด UBC 1985 ($T=0.1N$) กับสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติเฉลี่ย ($T_R=0.063N$) และสมการขอบเขตบน ($T_U=0.078N$) โดยวิธีการวิเคราะห์แบบมีเงื่อนไข ($\beta=1.0$) ที่ทุกสมการอยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น ได้ผลดังรูปที่ 7 พบว่าสูตรการประมาณในข้อกำหนด UBC1985 ได้ให้การประมาณค่าคาบธรรมชาติที่สูงกว่าทั้งสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติเฉลี่ยและสมการขอบเขตบน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสูตรการประมาณในข้อกำหนด UBC 1985 ไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการ Regression Analysis สำหรับค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร ซึ่งเมื่อนำไปใช้ประมาณค่าแรงเฉือนพื้นฐานอาคารอาจทำให้ได้ค่าที่แตกต่างจากค่าที่เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติ
กับจำนวนชั้นของอาคาร

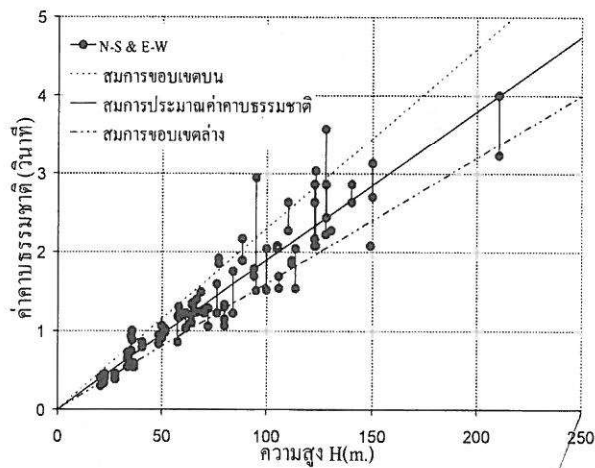
การสร้างสมการการประมาณค่าคาบธรรมชาติในรูปความสัมพันธ์กับความสูงมีขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนกับการสร้างสมการกับจำนวนชั้นทุกประการ โดยวิธีการวิเคราะห์ Regression ดังรูปที่ 8 ได้สมการเส้นตรง $y=0.9927x-1.7144$ ค่า R^2 เท่ากับ 0.9103 ค่าพหุคูณค่าสัมประสิทธิ์ α_x มีค่าเท่ากับ 0.019 และ β ใช้ค่า 1.0 ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (S_e) เท่ากับ 0.078 ดังนั้นค่า α_x และ α_y มีค่าเท่ากับ 0.016 และ 0.023 สำหรับสมการขอบเขตล่างและสมการขอบเขตบนตามลำดับ สำหรับสมการที่ค่า β เท่ากับ 1.0 เป็นรูปแบบสมการเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์แบบไม่มีเงื่อนไข ดังนั้นจึงไม่มีวิธีการวิเคราะห์แบบมีเงื่อนไขเพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ β ใหม่ โดยมีสมการสำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติเพียงหนึ่งรูปแบบเท่านั้นดังแสดงในตารางที่ 2 และแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับความสูงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 การวิเคราะห์ Regression ของค่าคาบธรรมชาติกับความสูง

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ Regression สำหรับค่าคาบธรรมชาติ
กับความสูงของอาคาร

วิธีวิเคราะห์	สมการค่าคาบธรรมชาติ			
Regression	T_L	T_R	T_C	S_e
ไม่มีเงื่อนไข	$0.016H$	$0.019H$	$0.023H$	0.078



รูปที่ 9 สูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติกับความสูง
ด้วยการวิเคราะห์แบบไม่มีเงื่อนไข

เพื่อเป็นการศึกษาเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติของอาคารในกรุงเทพมหานครกับค่าที่ได้จากสูตรการประมาณและค่าจากการตรวจวัดสำหรับอาคารในประเทศ การศึกษานี้จึงทำการเปรียบเทียบผลกับผลจากการตรวจวัดของอาคารสำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา โดย Goel and Chopra (1997) [10] ได้ศึกษาค่าคาบธรรมชาติของอาคารจากการตรวจวัดการสั่นไหวระหว่างเกิดแผ่นดินไหวหลายครั้ง ซึ่งความเร่งของพื้นดินมีค่าไม่เกิน 15% ของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และพฤติกรรมของโครงสร้างที่เกิดการสั่นไหวยังอยู่ในช่วงพิกัดยืดหยุ่น (Elastic) จากการวิเคราะห์ Regression แบบไม่มีเงื่อนไข การประมาณค่า

คาบธรรมชาติสำหรับโครงสร้างข้อแข็งที่มีความเหนียว (MRF) ได้ผลดังสมการที่ 12

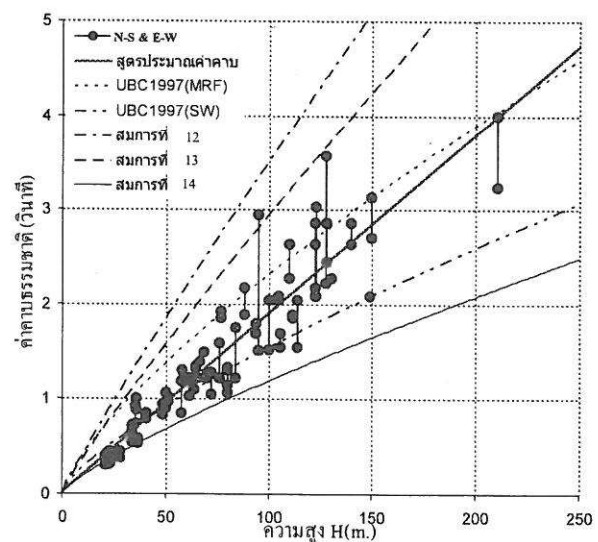
$$T = 0.0507H^{0.92} \quad (12)$$

และการวิเคราะห์แบบมีเงื่อนไข โดยกำหนดค่า β เท่ากับ 0.90 ค่าคาบธรรมชาติมีผลดังสมการที่ 13

$$T = 0.0466H^{0.90} \quad (13)$$

นอกจากนี้ได้มีงานวิจัยที่ทำการตรวจวัดค่าคาบธรรมชาติของอาคารภายใต้แรงกระทำจากสภาพแวดล้อมและแรงกระทำจากแผ่นดินไหวที่ระดับความรุนแรงระดับต่ำถึงปานกลางในประเทศไต้หวัน [11] โดยมีสมการจากการวิเคราะห์ Regression สำหรับข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก MRF ดังสมการที่ 14

$$T = 0.0294H^{0.804} \quad (14)$$

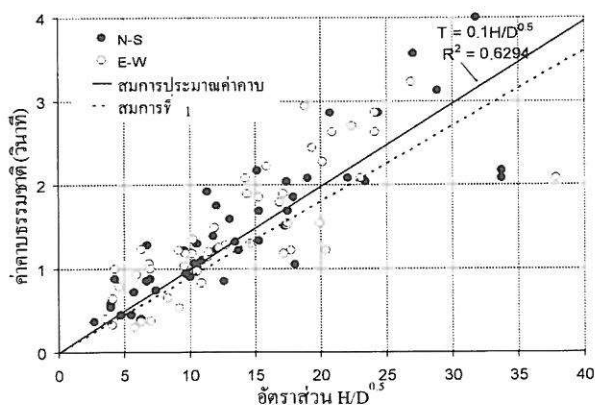


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบผลการศึกษาค่าคาบธรรมชาติ
กับงานวิจัยและมาตรฐานของต่างประเทศ

ในรูปที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้กับผลการวิจัยที่ตรวจวัดการสั่นไหวของอาคารตามสมการที่ 12 ถึง 14 และมาตรฐาน UBC1997 สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กแบบโครงสร้างข้อแข็งที่มีความเหนียว (Moment Resisting Frame, MRF) และแบบมีกำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall, SW) โดยค่าคาบธรรมชาติของอาคารในกรุงเทพมหานครสูงกว่าสมการที่ 14 เนื่องจาก

ประเทศได้วันมีการกำหนดให้อาคารมีการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว เป็นผลให้ค่าสถิติเอนด้านข้างของอาคารสูงกว่าอาคารในกรุงเทพมหานคร ซึ่งไม่มีการพิจารณาผลของแรงแผ่นดินไหวเป็นแรงหลักในการออกแบบอาคาร และผลกระทบเนื่องจากชั้นดินอ่อนใต้กรุงเทพมหานคร และสำหรับอาคารที่ตรวจวัดระหว่างเกิดแผ่นดินไหวระดับรุนแรงตามสมการที่ 12 และ 13 มีค่าคาบธรรมชาติที่สูงกว่าข้อมูลจากการศึกษามาก เนื่องจากขณะเกิดแผ่นดินไหวอาคารได้เกิดรอยร้าวในบางส่วนของคอนกรีตทำให้ค่าสถิติเอนของอาคารมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับ UBC1997 พบว่าโครงสร้างอาคารแบบ SW มีค่าอยู่บริเวณช่วงล่างของข้อมูลและโครงสร้างอาคาร MRF มีค่าอยู่ช่วงบนของข้อมูล

นอกเหนือจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับจำนวนชั้นและความสูงของอาคารที่นำเสนอมาแล้วนั้น ในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวในประเทศไทยได้กำหนดให้ประมาณค่าคาบธรรมชาติสัมพันธ์กับความสูงและรากที่สองของความกว้างของอาคารดังสมการที่ 1 ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับอัตราส่วนของความสูงกับรากที่สองของความกว้างของอาคาร โดยการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Linear Regression ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าสมการที่ 1 มีความแตกต่างจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ Linear Regression ไม่มากนัก อย่างไรก็ตามจากค่า R^2 ของข้อมูลมีค่าเพียง 0.63 ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์จากความสูงและจำนวนชั้น นอกจากนั้นข้อมูลขนาดความกว้างของอาคารที่สามารถบันทึกได้ในการตรวจวัดส่วนมากเป็นค่าที่ชั้นบนสุด ซึ่งแตกต่างจากข้อกำหนดของสมการที่ 1 ที่กำหนดให้ใช้ค่าความกว้างที่ฐานอาคาร

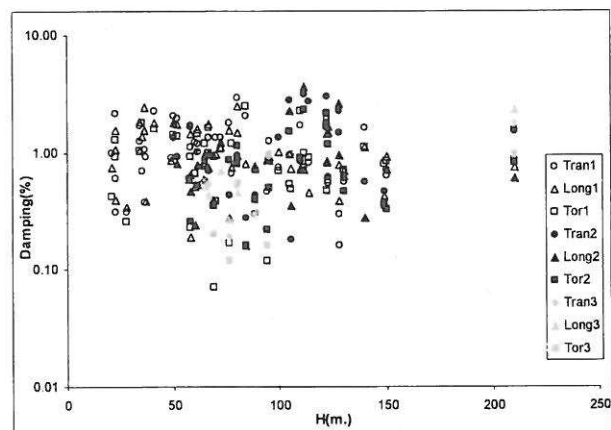


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับอัตราส่วน $H/D^{0.5}$

7. ค่าอัตราส่วนความหน่วง

จากการตรวจวัดอาคารด้วยวิธี Ambient Vibration สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารได้จากการวิเคราะห์ค่า

Autocorrelation โดยค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารได้รวมผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนความหน่วง เช่น ฐานราก ชั้นดิน สภาพแวดล้อมทั่วไป แรงเสียดทานที่ข้อต่อของอาคาร และคุณสมบัติวัสดุของอาคาร เป็นต้น รูปที่ 12 แสดงค่าอัตราส่วนความหน่วงในทิศทางและรูปแบบการสั่นไหวต่างๆ กับความสูงของอาคาร ซึ่งไม่พบแนวโน้มของความสัมพันธ์กับข้อมูลทางกายภาพของอาคารที่สามารถสรุปได้ และมีค่าเฉลี่ยสำหรับข้อมูลทั้งหมดประมาณ 1% อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนความหน่วงขึ้นอยู่กับขนาดของการสั่นไหวและอาจมีค่าต่ำมากที่ระดับการสั่นไหวต่ำ



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนความหน่วงกับ ความสูงของอาคาร

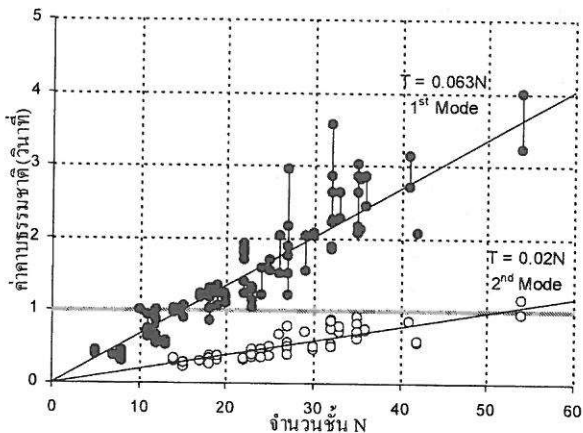
8. การตอบสนองต่อแผ่นดินไหวระยะไกลของอาคารในกรุงเทพมหานคร

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี พ.ศ. 2546 พบว่าในกลุ่มอาคารสูงปานกลางที่มีจำนวนชั้นประมาณ 10 ถึง 20 ชั้น และอาคารสูงหลายอาคารมีการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวค่อนข้างชัดเจน และข้อมูลของการขยายคลื่นของดินอ่อนที่มีจังหวะเด่นชัดประมาณ 1 รอบต่อวินาที ซึ่งส่งผลต่ออาคารที่มีคาบธรรมชาติใกล้เคียงกับ 1 วินาทีให้มีการโยกตัวที่รุนแรงได้จากการสั่นพ้อง และในผลการศึกษาที่แสดงค่าคาบธรรมชาติกับจำนวนชั้นของอาคารซึ่งเป็นข้อมูลของค่าคาบในรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 พบว่าอาคารสูงประมาณ 10-20 ชั้นมีค่าคาบประมาณ 1 วินาที ทำให้อาคารเหล่านี้เกิดการโยกตัวรุนแรงในลักษณะการสั่นพ้อง ส่วนอาคารสูงค่าคาบมีค่าสูงกว่าช่วงของการสั่นพ้อง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าคาบสำหรับรูปแบบการสั่นไหวที่ 2 ด้วยพบว่าอาคารสูงกว่า 30 ชั้นขึ้นไปอาจมีค่าคาบในรูปแบบการสั่นไหวที่ 2 ใกล้เคียง 1 วินาที ซึ่งเกิดการสั่นพ้องด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงใช้อธิบายผลกระทบของแผ่นดินไหวระยะไกลและการสั่นพ้องกับจังหวะที่คลื่นถูกขยายตัวในชั้นดินสำหรับอาคารในกรุงเทพมหานครที่มีผลชัดเจนสำหรับกลุ่มอาคารสูงปานกลางและอาคาร

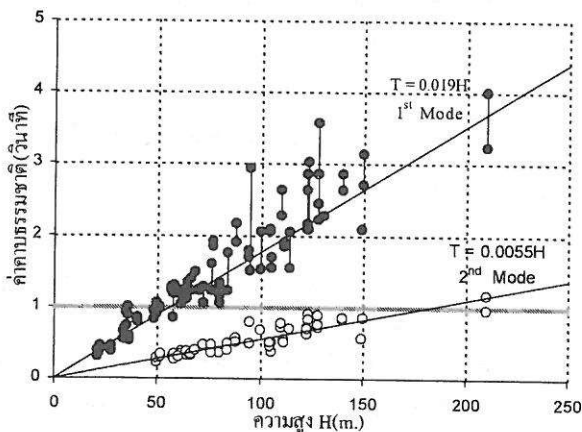
สูง และจากการข้อมูลวิเคราะห์แบบ Linear Regression เพื่อสร้างสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารในรูปแบบการสั่นไหวที่ 2 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 15 และ 16 สำหรับจำนวนชั้นและความสูงของอาคารตามลำดับ

$$T_2 = 0.020N \quad (15)$$

$$T_2 = 0.0055H \quad (16)$$



รูปที่ 13 ค่าคาบธรรมชาติในรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 และ 2 กับจำนวนชั้นของอาคาร



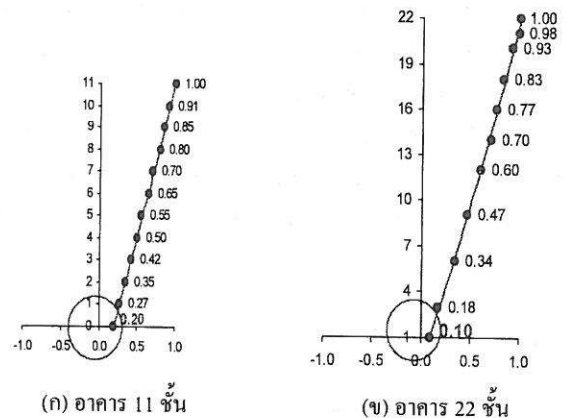
รูปที่ 14 ค่าคาบธรรมชาติในรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 และ 2 กับความสูงของอาคาร

9. พฤติกรรมการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานอาคาร

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารโดยทั่วไปได้พิจารณาให้ฐานของอาคารเป็นแบบยึดแน่น (Rigid Foundation) อย่างไรก็ตามจากการตรวจวัดการสั่นไหวจริงของอาคารโดยพิจารณาจากอัตราส่วนของขนาดฟูเรียร์ (Fourier Amplitude Ratio) ในรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) ระหว่างชั้นบนสุดกับที่ฐานอาคาร พบว่าที่ฐานอาคารเกิดการ

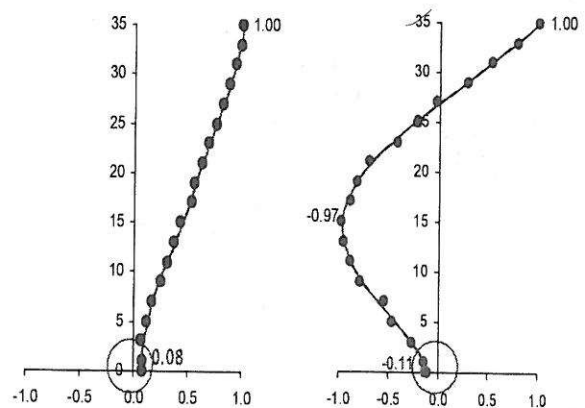
เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างสัมพันธ์กับยอดอาคาร ซึ่งเป็นผลกระทบของดินกับโครงสร้าง (Soil-Structure Interaction) ของอาคารที่ตั้งบนชั้นดินอ่อนในกรุงเทพมหานคร โดยค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ดังกล่าวมีค่ามากสำหรับอาคารเดี่ยวและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออาคารมีความสูงมากขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 15 (ก-ข) และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานมีค่ามากในรูปแบบการสั่นไหวที่สูงขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 15 (ค-ง) และค่าที่ได้จากการตรวจวัดอาคารทั้งหมดของรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 และ 2 แสดงในรูปที่ 16

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับคำอธิบายจากงานวิจัยของ Ellis (1980) [12] ที่กล่าวว่าผลกระทบของดินกับโครงสร้างจะมากตามอัตราส่วนค่าสปีฟเนสของอาคารต่อฐานราก สำหรับอาคารขนาดเดี่ยมีค่าอัตราส่วนค่าสปีฟเนส ที่มากกว่าอาคารสูงทำให้อาคารเดี่ยวเกิดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานมากกว่า และในรูปแบบการสั่นไหวที่ 2 พบว่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานมีค่าสูงขึ้น เป็นผลมาจากค่าสปีฟเนส ของอาคารในรูปแบบการสั่นไหวที่ 2 มีค่ามากกว่าค่าในรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ผลของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานรากเป็นข้อมูลที่สำคัญต่อการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคารต่อไป



(ก) อาคาร 11 ชั้น

(ข) อาคาร 22 ชั้น



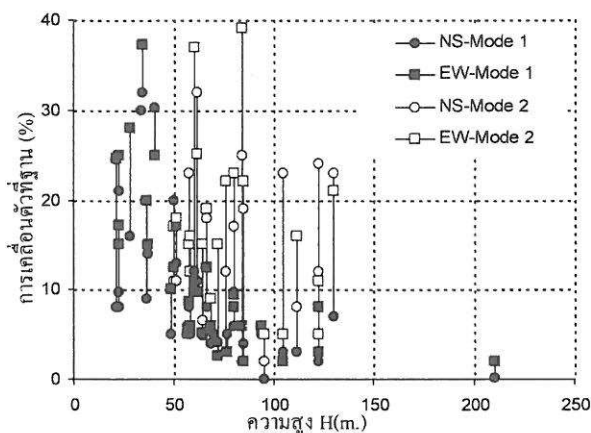
(ค) อาคาร 35 ชั้น

(ง) อาคาร 35 ชั้น

รูปแบบการสั่นไหวที่ 1

รูปแบบการสั่นไหวที่ 2

รูปที่ 15 ตัวอย่างรูปร่างการสั่นไหวและการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐาน



รูปที่ 16 ค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานอาคารเทียบกับชั้นบน

10. สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร ด้วยการตรวจวัดสภาพการสั่นไหวตามธรรมชาติของอาคาร ด้วยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง และการวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ต่างๆ ประกอบด้วย คาบธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และ รูปร่างการสั่นไหวด้วยวิธีใน Frequency Domain ซึ่งได้ทำการศึกษากับอาคารรวมทั้งสิ้น 50 หลัง ที่มีความสูงตั้งแต่ 20 ถึง 210 เมตร และมีจำนวนชั้น 5 ถึง 54 ชั้น โดยมีผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่ได้ในงานวิจัยนี้ แสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของอาคาร คือ ความสูง หรือ จำนวนชั้น โดยการวิเคราะห์ Regression ของข้อมูลค่าคาบธรรมชาติใน 2 ทิศทางหลักที่ตั้งฉากกับแกนของอาคาร ได้เป็นสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติ ซึ่งเป็นค่าคาบธรรมชาติเฉลี่ย ที่ให้ค่าความผิดพลาดมาตรฐานของข้อมูลต่ำที่สุด ดังนี้

สำหรับรูปแบบการสั่นไหวที่ 1

$$T_1 = 0.063N \text{ และ } T_1 = 0.019H$$

สำหรับรูปแบบการสั่นไหวที่ 2

$$T_2 = 0.020N \text{ และ } T_2 = 0.0055H$$

โดย N คือจำนวนชั้นและ H คือความสูง (เมตร) ของอาคาร

2. สมการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่ได้จากข้อมูลการตรวจวัดครั้งนี้มีความแตกต่างในระดับหนึ่งกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวที่ใช้อยู่ในประเทศไทยและมาตรฐานในต่างประเทศรวมถึงผลจากการตรวจวัดอาคารในประเทศที่มีการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว ในการนำผลการศึกษาไป

ประยุกต์ใช้กับมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว ควรต้องพิจารณาผลที่เกิดจากการประมาณค่าคาบที่คลาดเคลื่อนจากค่าจริง แล้วส่งผลกระทบต่อคำนวณค่าแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวต่อโครงสร้าง โดยต้องพิจารณาลักษณะของสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับพื้นที่ในประเทศเพื่อให้ค่าแรงที่คำนวณได้ทำให้การออกแบบมีความปลอดภัยสูงขึ้น (Conservative)

3. ค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารที่ตรวจวัดและวิเคราะห์โดยวิธี Autocorrelation มีค่าเฉลี่ยสำหรับอาคารทุกหลังประมาณ 1% และไม่พบแนวโน้มของความสัมพันธ์กับข้อมูลทางกายภาพของอาคารแต่อย่างใด

4. ผลกระทบของแผ่นดินไหวระยะไกลต่ออาคารในกรุงเทพมหานครทำให้กลุ่มอาคารสูงปานกลางและอาคารสูงโขกตัวรุนแรงเนื่องจากการสั่นพ้องของอาคารกับชั้นดินที่ค่าคาบประมาณ 1 วินาที โดยกลุ่มอาคารสูงปานกลางประมาณ 10-20 ชั้น เกิดการสั่นพ้องในรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ส่วนอาคารสูงประมาณ 30 ชั้นขึ้นไปเกิดการสั่นพ้องในรูปแบบการสั่นไหวที่ 2

5. จากการศึกษารูปร่างการสั่นไหวของอาคาร พบว่าอาคารส่วนมากมีการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานที่เทียบกับการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดของอาคาร โดยค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ดังกล่าวมีค่ามากสำหรับอาคารเตี้ยและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออาคารมีความสูงมากขึ้น และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานมีค่ามากในรูปแบบการสั่นไหวที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลกระทบของดินกับโครงสร้าง (Soil-Structure Interaction) ที่มีผลมากขึ้นตามค่าอัตราส่วนค่าสลิปเนสของอาคารต่อฐานราก

11. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wamitchai, P., Sangaranyakul, C., and Ashford, S.A. (2000). "Seismic Hazard in Bangkok due to Long-Distance Earthquake", *Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand. Paper no. 2145.
- [2] Petcharoen, C. (2002). "Identification of Dynamic Properties of Low and Medium-rise Buildings in Bangkok by an Ambient Vibration Method." Master's Thesis. Asian Institute of Technology.
- [3] ประยุทธ์ ชิงหาญ (2545), "การหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการตรวจวัด", วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [4] มานะ จันทะสด (2546), "คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร", วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [5] เฉลิมชัย เกียรติเรืองกมล และ นคร ภู่วโรดม (2545), "การศึกษาแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลวัตของอาคาร

คอนกรีตเสริมเหล็ก”, การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธา
แห่งชาติ ครั้งที่ 8, หน้าที่ STR 294-299

- [6] 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.
- [7] กระทรวงมหาดไทย, กฎกระทรวงฉบับที่ 49 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
- [8] Uniform Building Code. (1985). International Conference of Building Officials, Whittier, CA.
- [9] Uniform Building Code. (1997). International Conference of Building Officials, Whittier, CA.
- [10] Goel, R.K., and Chopra, A.K. (1997), ‘Vibration Property of Building determined from Recorded Earthquake Motion”, Report No. UBC/EERC-97/14, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
- [11] Hong, L.L. and Hwang, W.L.(2000), “Empirical formula for fundamental vibration period of reinforced concrete buildings in Taiwan. Earthquake”, Engineering and Structural Dynamics. pp. 327-337.
- [12] Ellis, B.R. (1980), “An assessment of the accuracy of predicting the fundamental natural frequency of building and the implications concerning the dynamic analysis of structure”. Proc.Instrn Civ.Engrs, Part 2, 69, Sept., 763-776