

ผลกระทบของรูปแบบการสั่นไหวที่สูงขึ้นต่อแรงลมและการตอบสนองของอาคารสูง Higher Mode Effects on Wind Loads and Responses of Tall Buildings

วศิน แท่งทอง¹ วิโรจน์ บุญญภิญโญ^{2*} และ จิรวัดณ์ จันทร์เรือง³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: bvirote@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลตอบสนองของอาคารสูงภายใต้แรงลม โดยการทดสอบแบบจำลองอาคารสูงในอุโมงค์ลมด้วยเทคนิคการรวบรวมผลของแรงดันลม (High Frequency Pressure Integration, HFPI) ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงลมเชิงโหมด (Generalized wind force analysis) เพื่อศึกษาผลตอบสนองเนื่องจากโหมดการสั่นไหวที่สูงขึ้น หรือรูปแบบการสั่นไหวที่สูงขึ้น (Higher mode) ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของอาคาร ความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคาร และโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคาร ทั้งในทิศทางตามลม ตั้งฉากกับทิศทางลม และทิศทางบิด จากการศึกษาพบว่าผลของแรงลมในโหมดการสั่นไหวที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของอาคาร กับโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารสูงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสอย่างมาก ซึ่งการวิเคราะห์โดยการรวมผลเพียงแคโหมดแรกเพียงโหมดเดียวนั้นเพียงพอแล้ว แต่ผลของโหมดการสั่นไหวสูง ๆ สำหรับความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคารในทิศทางลมมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการไม่พิจารณาผลของโหมดการสั่นไหวสูง ๆ สำหรับความเร่งตอบสนองของอาคารสูงอาจนำไปสู่การประมาณผลที่ต่ำไปได้

คำสำคัญ: วิธีการรวบรวมผลของแรงดัน, ผลของการสั่นไหวที่สูงขึ้นต่อแรงลม, ผลของแรงลมต่ออาคารสูง, การทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ลม

Abstract

This paper presents wind-induced response of tall buildings based on High Frequency Pressure Integration (HFPI) tests. The Generalized Wind Force Analysis are used to analyze the data obtained from the HFPI test to determine the contributions of higher modes to building responses (top displacement, top acceleration, base moments in along-wind, across-wind and torsional directions). The results show that the fundamental mode is adequate for the top displacement and base overturning moment of square tall buildings but neglecting the contribution of higher modes may result in an underestimate of the top acceleration response in wind direction.

Keywords: High Frequency Pressure Integration, Higher mode effect, Wind-induced loads, Wind Tunnel Test.

1. คำนำ

การวิเคราะห์และประเมินผลของแรงลมที่กระทำกับอาคารสูงนิยมใช้การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม เนื่องจากผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความแม่นยำที่สูงมาก ซึ่งวิธีการวิเคราะห์แรงลมโดยรวมที่นิยมใช้กันมาอย่าง

ยาวนานและแพร่หลายได้แก่วิธีวัดแรงลัพธ์ที่ฐานของแบบจำลองที่มีความถี่สูง (High Frequency Force Balance, HFFB) หรืออาจเรียกสั้น ๆ ได้ว่าวิธีวัดแรงลัพธ์ที่ฐานของแบบจำลอง ซึ่งเป็นการหาค่าแรงลมโดยรวมจากการวัดค่าแรงที่ฐานของแบบจำลองทั้ง 6 ทิศทาง ได้แก่ แรง 3 ทิศทาง และโมเมนต์ 3 ทิศทาง โดยสามารถนำค่าแรงที่ได้จากการทดสอบนี้ไปทำการออกแบบโครงสร้างหลักของอาคารเพื่อด้านทางแรงลมได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีวัดแรงลัพธ์ที่ฐานของแบบจำลอง ยังต้องใช้สมมติฐานการกระจายแรงในส่วนของแรงลมเฉลี่ย และแรงลมส่วนกึ่งสถิต โดยจะกระจายผลของแรงลมตามค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังความเร็วลมเฉลี่ย โดยมีแค่ส่วนของแรงลมสันพ้องเท่านั้นที่กระจายตามรูปร่างการสั่นไหวของอาคารแต่ก็เป็นการสั่นไหวแคโหมดที่หนึ่งเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเราไม่สามารถคิดผลของโหมดการสั่นไหวสูง ๆ จากวิธีวัดแรงลัพธ์ที่ฐานของแบบจำลองได้ [1-3]

วิธีการวิเคราะห์ค่าแรงลมโดยรวมโดยใช้การรวมผลจากการวัดความดันเป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาผลของแรงลมโดยรวมที่กระทำกับอาคารได้ไม่แพ้วิธีวัดแรงลัพธ์ที่ฐานของแบบจำลอง โดยเป็นการทดสอบด้วยการวัดความดันผ่านท่อวัดความดันบนโมเดลคลิกแข็ง ซึ่งแรงลมโดยรวมที่กระทำกับอาคารจะได้รับการรวมผลของความดันที่วัดได้จากท่อวัดความดันที่ติดตั้งไว้ทั่วทั้งอาคารโดยเรียกวิธีนี้ว่าวิธีการรวบรวมผลของแรงดัน (Pressure Integration Method) หรืออาจเรียกชื่อเต็มได้อีกหนึ่งชื่อว่า High Frequency Pressure Integration (HFPI) เพราะเนื่องจากว่าหลักการในการวิเคราะห์หาผลของแรงนั้นใช้หลักการในการคำนวณบ้างส่วนคล้ายคลึงกับวิธี High Frequency Force Balance รวมไปถึงเงื่อนไขของการสร้างแบบจำลองที่ต้องสร้างแบบจำลองให้มีความถี่ที่สูงเพื่อหลีกเลี่ยงช่วงของความถี่ที่ไม่สนใจออกไป จึงใช้คำว่า High Frequency นำหน้าเหมือนกัน โดยวิธีการรวบรวมผลของแรงดันจะให้การกระจายตัวของแรงตลอดความสูงของอาคารได้ดีและสมจริงกว่าวิธีวัดแรงลัพธ์ที่ฐานของแบบจำลอง และเนื่องด้วยวิธีการรวบรวมผลของแรงดันนั้นให้การกระจายตัวของแรงตามความสูงของอาคารที่สมจริง จึงทำให้สามารถคิดผลของโหมดการสั่นไหวสูง ๆ ในแต่ละทิศทางได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ข้อมูลแรงดันที่ได้จากการทดสอบไปออกแบบส่วนปกคลุมของอาคารได้อีกด้วย [4-7]

การศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ผลของแรงลมโดยรวมและผลตอบสนองในโหมดการสั่นไหวสูง ๆ จากวิธีการรวบรวมผลของแรงดันเพื่อดูว่าผลของโหมดการสั่นไหวสูง ๆ มีผลมากน้อยเพียงใด และการละเลยหรือการไม่คิดผลของโหมดการสั่นไหวสูง ๆ จะทำให้ผลการวิเคราะห์แรงลมโดยรวมที่กระทำกับอาคารและผลตอบสนองของอาคารเนื่องจากแรงลมลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยการรวมผลของโหมดการสั่นไหวสูง ๆ สำหรับทิศทาง x และ y จะรวมทั้งหมด 3 โหมด ส่วนทิศทาง z จะรวมเพียง 2 โหมด

2. การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

2.1 การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

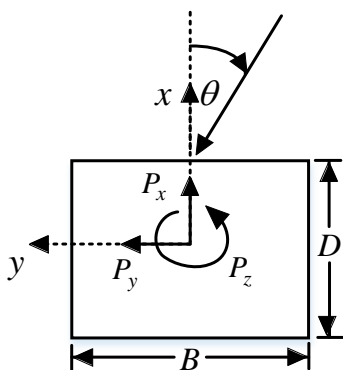
การศึกษากลศาสตร์ของแรงลมโดยรวมและผลตอบสนองของอาคารสูง ดำเนินการด้วยการทดสอบแบบจำลอง ณ ห้องปฏิบัติการอุโมงค์ลม ธรรมศาสตร์-เอไอที (TU-AIT Wind Tunnel Laboratory) ณ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ซึ่งอุโมงค์มีความ ยาวช่วงทดสอบ 25.5 เมตร ขนาดหน้าตัดกว้าง 2.5 เมตร สูง 2.5 เมตร ดัง แสดงในรูปที่ 1 ความเร็วลมอ้างอิงที่ใช้สำหรับอาคารจริงเท่ากับ 25 เมตร ต่อวินาที โดยทำการย่อขนาดแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบด้วยมาตราส่วน 1/400 และทำการทดสอบตั้งแต่มุม 0 ถึง 360 องศา โดยเพิ่มทีละ 10 องศา ในสภาพภูมิประเทศแบบเมืองใหญ่ โดยตำแหน่งและทิศทางการ ปะทะของลมกับแบบจำลองแสดงในรูปที่ 2

การทดสอบแบบจำลองด้วยวิธีวัดแรงลัพธ์ที่ฐานของแบบจำลอง ดำเนินการโดยการสร้างแบบจำลองด้วยไม้บัลซ่าและมีความถี่ธรรมชาติของ แบบจำลองสูงมากดังแสดงในรูปที่ 3 ทำการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องวัดแรงที่ ฐาน JR3 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดแรงและโมเมนต์ที่มีความละเอียดสูง โดยทำ การวัดเก็บค่าแรงที่ฐานทั้ง 3 ทิศทาง (P_x, P_y, P_z) และโมเมนต์ที่ฐานทั้ง 3 ทิศทาง (M_x, M_y, M_z) โดยใช้เวลาในการเก็บข้อมูล 3.5 นาที ด้วย อัตราการเก็บข้อมูลเท่ากับ 1,000 ข้อมูลต่อวินาที ต่อการวัดหนึ่งรอบมุม โดยมีความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดแบบจำลองเท่ากับ 8.87 เมตรต่อวินาที

ส่วนวิธีการรวบรวมผลของแรงดัน ดำเนินการโดยการสร้างแบบจำลอง ด้วยอะคริลิกแข็งดังแสดงในรูปที่ 4 และทำการเก็บข้อมูลแรงดันพร้อมกัน ผ่านท่อวัดความดันที่ติดตั้งอยู่บริเวณทั่วทั้งแบบจำลองจำนวน 180 จุด โดย ใช้เวลาในการเก็บข้อมูล 2 นาที ด้วยอัตราการเก็บข้อมูลเท่ากับ 400 ข้อมูล ต่อวินาที ต่อการวัดหนึ่งรอบมุม โดยมีความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดแบบจำลอง เท่ากับ 8.94 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 1 อุโมงค์ลมธรรมศาสตร์-เอไอที ตั้งอยู่ที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



รูปที่ 2 ทิศทางและตำแหน่งการปะทะของลมกับแบบจำลอง



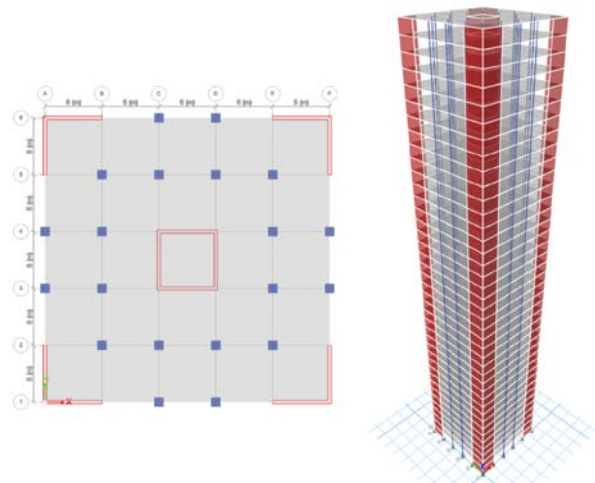
รูปที่ 3 แบบจำลองอาคารที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธี HFFB



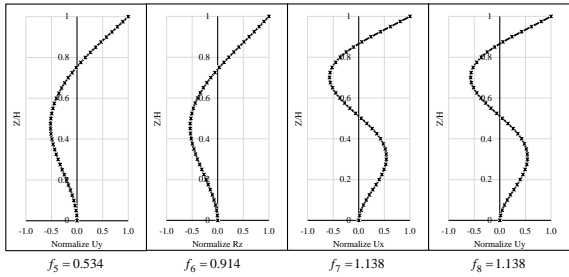
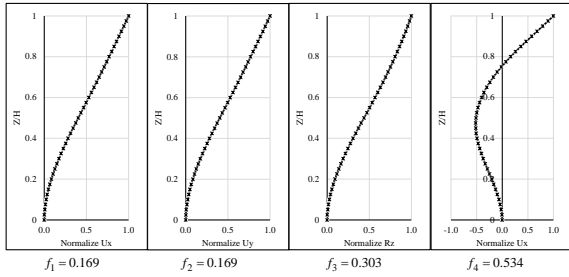
รูปที่ 4 แบบจำลองอาคารที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธี HFPI

2.2 รูปแบบและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารที่ใช้ในการศึกษา

อาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีขนาด กว้าง 30 ม. ยาว 30 ม. และ สูง 160 ม. โดยแบบจำลองโครงสร้างได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์ เอลิเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีจำนวน ชั้นทั้งหมด 40 ชั้น ความสูงระหว่างชั้นเท่ากับ 4 ม. ความหนาแน่นของ อาคารเท่ากับ 382 กก./ลบ.ม. ความถี่ธรรมชาติ 8 โหมดแรกของโครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 6 โดยความถี่โหมดที่ 1, 4 และ 7 เป็นความถี่ในทิศทาง x เท่ากับ 0.169, 0.534 และ 1.138 Hz ความถี่โหมดที่ 2, 5 และ 8 เป็น ความถี่ในทิศทาง y เท่ากับ 0.169, 0.534 และ 1.138 Hz และความถี่ โหมดที่ 3 และ 6 เป็นความถี่ในทิศทาง z เท่ากับ 0.303 และ 0.914 Hz สำหรับความหน่วงในแต่ละรูปแบบการสั่นไหวใช้ค่าเท่ากับ 0.02 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างอาคารสูงในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์



รูปที่ 6 รูปปร่างการสั้นไหว 8 โหมดแรกของอาคารที่ศึกษา

3. การวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ผลของแรงลมโดยรวมและผลตอบสนองของอาคารสูงด้วยการใช้ค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง (Base Moment Analysis) จะต้องใช้ข้อมูลโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองมาทำการคำนวณ ซึ่งจะเหมาะสมกับ HFFB เนื่องจากวิธีนี้จะได้ค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองจากการทดสอบในอุโมงค์ลมมาโดยตรง จึงทำให้ง่ายต่อการนำไปคำนวณและยังมีความถูกต้องและแม่นยำสูง [1-3] แต่สำหรับ HFPI จะต้องทำการแปลงค่าความดันลมที่ได้จากแบบจำลองให้เป็นค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง แล้วนำค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาแรงลมโดยรวมและผลตอบสนองของอาคารสูง

3.1 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย

เป็นการหารปรับค่าในส่วนของค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานส่วนเฉลี่ย (Mean) ให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงลมไร้หน่วย เพื่อใช้ในการพิจารณาถึงผลของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานส่วนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงลมที่กระทำกับอาคารสูงในแต่ละองศาการปะทะ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_x = \frac{\bar{M}_{ym}(2 + 2\alpha_m)}{q_{Hm} B_m H_m^2} \quad (1)$$

$$C_y = \frac{\bar{M}_{xm}(2 + 2\alpha_m)}{q_{Hm} D_m H_m^2} (-1) \quad (2)$$

$$C_z = \frac{\bar{M}_{zm}(1 + 2\alpha_m)}{q_{Hm} B_m D_m H_m} \quad (3)$$

โดยที่ C_x , C_y และ C_z คือค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของหน่วยแรงลม ในทิศทางตามลม ทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และทิศทางปิด \bar{M}_{xm} , \bar{M}_{ym} และ \bar{M}_{zm} คือค่าเฉลี่ยของโมเมนต์รวมที่ฐานของแบบจำลองรอบแกน x , y และ z α_m คือเลขยกกำลังความเร็วลมเฉลี่ยให้แปรเปลี่ยนตาม

ความสูงตามสภาพภูมิประเทศที่จำลองในอุโมงค์ลม ρ_m คือความหนาแน่นของอากาศ \bar{U}_{Hm} คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดของแบบจำลอง H_m , B_m และ D_m คือ ความสูง ความกว้าง และความลึกแบบจำลอง q_{Hm} คือหน่วยแรงลมจากความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดของแบบจำลอง โดยสามารถคำนวณได้จาก $0.5\rho_m\bar{U}_{Hm}^2$

3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำ

เป็นการหารปรับแก้ค่าของโมเมนต์ที่ฐานของแบบจำลองส่วนกิ่งสถิติ (Background) ซึ่งผลของโมเมนต์ในส่วนนี้จะเป็นส่วนแปรปรวนจากการสั้นไหวของแรงลมที่กระทำกับอาคารสูงแต่เป็นการสั้นด้วยความถี่ที่ต่ำมาก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma_{cmx} = \frac{\sigma_{mx}}{\frac{1}{2}\rho_m\bar{U}_{Hm}^2 D_m H_m^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{cmx} = \frac{\sigma_{my}}{\frac{1}{2}\rho_m\bar{U}_{Hm}^2 B_m H_m^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{cmz} = \frac{\sigma_{mz}}{\frac{1}{2}\rho_m\bar{U}_{Hm}^2 B_m D_m H_m} \quad (6)$$

โดยที่ σ_{cmx} , σ_{cmx} และ σ_{cmz} คือค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำรอบแกน x , y และ z σ_{mx} , σ_{my} และ σ_{mz} คือค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองรอบแกน x , y และ z

3.3 ค่าสเปกตรัมของโมเมนต์พลิกคว่ำที่แปรปรวนของแรงลม

เป็นการแปลงค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองที่เป็นข้อมูล ณ เวลาใด ๆ ให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ โดยค่าสเปกตรัมของโมเมนต์พลิกคว่ำจะแสดงถึงพลังงานเนื่องจากโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงลมส่วนแปรปรวนในความถี่ต่าง ๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_m(f_x) = \frac{f_x \times S_m(f_x)}{\sigma_{mx}^2} \quad (7)$$

$$C_m(f_y) = \frac{f_y \times S_m(f_y)}{\sigma_{my}^2} \quad (8)$$

$$C_m(f_z) = \frac{f_z \times S_m(f_z)}{\sigma_{mz}^2} \quad (9)$$

โดยที่ $C_m(f_x)$, $C_m(f_y)$ และ $C_m(f_z)$ คือค่าสัมประสิทธิ์ไร้หน่วยของโมเมนต์พลิกคว่ำที่แปรปรวนของแรงลมรอบแกน x , y และ z $S_m(f_x)$, $S_m(f_y)$ และ $S_m(f_z)$ คือค่าสเปกตรัมโมเมนต์พลิกคว่ำที่แปรปรวนของแรงลมรอบแกน x , y และ z

4. การวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหนด

วิธีการวิเคราะห์ผลของแรงลมโดยรวมและผลตอบสนองของอาคารสูงด้วยแรงลมเชิงโหนด (Generalized Wind Force Analysis) เป็นวิธีการคำนวณโดยจำเป็นต้องมีข้อมูลของแรงลมที่กระทำ ณ ระดับชั้นต่าง ๆ ตาม

ความสูงของของแบบจำลอง ซึ่งจะเหมาะกับ HFPI เพราะว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถนำมาคำนวณผลเป็นแรงลมที่กระทำที่แต่ละระดับชั้นตามความสูงของแบบจำลอง [4,5] โดยข้อดีของวิธีการวิเคราะห์ผลโดยใช้แรงลมเชิงโหมต คือ สามารถคำนวณผลของแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับอาคารได้อย่างสมจริง เนื่องจากการกระจายตัวตามมวลและรูปร่างการสั่นไหวของอาคาร นอกจากนี้วิธีการวิเคราะห์ผลโดยใช้แรงลมเชิงโหมตยังสามารถคำนวณผลของโหมตการสั่นไหวสูง ๆ ได้อีกด้วย แต่สำหรับวิธี HFFB จะต้องทำการกระจายผลของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานให้เป็นแรงลมที่กระทำในแต่ละชั้นตามความสูงจากสมมติฐานค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังแรงลมเฉลี่ยก่อน ซึ่งการใช้สมมติฐานการกระจายแรงนำไปสู่การประมาณผลที่มากเกินไป

4.1 การแปลงค่าแรงจากการทดสอบ

แรงและโมเมนต์ที่วัดได้จากการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมสามารถแปลงเป็นค่าแรงและโมเมนต์ของอาคารจริงได้จากความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$M_s(t) = M_m(t_m) / (\lambda_p \lambda_L^3 \lambda_U^2) \quad (10)$$

โดยที่ $M_s(t)$ คือค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารจริง $M_m(t_m)$ คือค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง $\lambda_p = \rho_m / \rho_p$ คือมาตราส่วนความหนาแน่นของอากาศ $\lambda_L = B_m / B_p$ คือมาตราส่วนความยาว $\lambda_U = U_m / U_p$ คือมาตราส่วนความเร็ว ตัวห้อย m, p หมายถึงแบบจำลองกับอาคารจริง

4.2 แรงลมเชิงโหมตส่วนเฉลี่ย

แรงลมเชิงโหมตส่วนเฉลี่ยสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{Q}_j = \sum_{i=1}^N (\phi_{ijx} \bar{P}_{ix} + \phi_{ijy} \bar{P}_{iy} + \phi_{ijz} \bar{P}_{iz}) \quad (11)$$

โดยที่ \bar{Q}_j คือแรงลมเชิงโหมตส่วนเฉลี่ยของโหมตที่ j \bar{P}_{ix} , \bar{P}_{iy} และ \bar{P}_{iz} คือแรงลมเฉลี่ยที่กระทำกับอาคารจริงของชั้นที่ i ในทิศทาง x, y และ z ϕ_{ijx} , ϕ_{ijy} และ ϕ_{ijz} คือรูปร่างการสั่นไหวของอาคารชั้นที่ i โหมตที่ j ทิศทาง x, y และ z

4.3 แรงลมเชิงโหมตส่วนพลศาสตร์

แรงลมเชิงโหมตส่วนพลศาสตร์สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_j(t) = \sum_{i=1}^N (\phi_{ijx} P_{ix}(t) + \phi_{ijy} P_{iy}(t) + \phi_{ijz} P_{iz}(t)) \quad (12)$$

โดยที่ $Q_j(t)$ คือแรงลมเชิงโหมตส่วนพลศาสตร์ของโหมตที่ j $P_{ix}(t)$, $P_{iy}(t)$ และ $P_{iz}(t)$ คือแรงลมส่วนพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารจริงของชั้นที่ i ในทิศทาง x, y และ z

4.4 การเคลื่อนที่ตอบสนองเชิงโหมต

การคำนวณผลของแรงลมโดยรวมด้วยแรงลมเชิงโหมตจะเป็นการคำนวณผลตามหลักพลศาสตร์โครงสร้าง โดยเป็นการใช้แรงลมที่กระทำตามความสูงของอาคารเพื่อคำนวณผลของการเคลื่อนที่ตอบสนองของแ

ลโหมต ที่เรียกว่า การเคลื่อนที่ตอบสนองเชิงโหมต จากความสัมพันธ์ของสมการดังต่อไปนี้ ซึ่งเสนอโดย Chen และ Kareem [4]

$$\bar{q}_j = \frac{\bar{Q}_j}{K_j} \quad (13)$$

$$\sigma_{q_{jb}}^2 = \frac{1}{K_j^2} \int_0^\infty S_{Q_{jj}}(f) df \quad (14)$$

$$\sigma_{q_{jr}}^2 = \frac{1}{K_j^2} \frac{\pi}{4\xi_j} f_j S_{Q_{jj}}(f_j) \quad (15)$$

$$K_j = (2\pi f_j)^2 \sum_{k=1}^N (m_i \phi_{ijx}^2 + m_i \phi_{ijy}^2 + I_i \phi_{ijz}^2) \quad (16)$$

$$\sigma_{q_j} = \sqrt{\sigma_{q_{jb}}^2 + \sigma_{q_{jr}}^2} \quad (17)$$

โดย \bar{q}_j , $\sigma_{q_{jb}}^2$, $\sigma_{q_{jr}}^2$ และ σ_{q_j} คือการเคลื่อนที่ตอบสนองเชิงโหมตส่วนเฉลี่ย ส่วนกึ่งสถิต ส่วนกำหนดและส่วนพลศาสตร์ของโหมตที่ j K_j , f_j และ ξ_j คือสถิติพเนสเชิงโหมต ความถี่เชิงโหมต และความหน่วงเชิงโหมตของโหมตที่ j m_i คือมวลของชั้นที่ i I_i คือโมเมนต์ความเฉื่อยของชั้นที่ i $S_{Q_{jj}}$ คือ Power Spectrum Density ของ $Q_j(t)$

4.5 แรงลมสถิตเทียบเท่า

การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าสามารถคำนวณได้จากผลของการเคลื่อนที่เชิงโหมต

4.5.1 แรงลมสถิตเทียบเท่าส่วนเฉลี่ย

$$\bar{F}_{ijs} = (2\pi f_j)^2 m_{is} \phi_{ijs} \bar{q}_j \quad (s = x, y, z) \quad (18)$$

โดยที่ \bar{F}_{ijs} คือแรงลมสถิตเทียบเท่าเฉลี่ยที่กระทำตามความสูงของอาคารชั้นที่ i โหมตที่ j ในทิศทาง $s = x, y, z$

4.5.2 แรงลมสถิตเทียบเท่าส่วนพลศาสตร์

$$F_{ijs} = (2\pi f_j)^2 m_{is} \phi_{ijs} g \sigma_{q_{jb}} \quad (s = x, y, z) \quad (19)$$

$$g = \sqrt{2 \ln(fT)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(fT)}} \quad (20)$$

โดยที่ F_{ijs} คือแรงลมสถิตเทียบเท่าส่วนพลศาสตร์ที่กระทำตามความสูงของอาคารชั้นที่ i โหมตที่ j ในทิศทาง $s = x, y, z$ g คือค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองให้เป็นค่าสูงสุด

5. การวิเคราะห์ผลของรูปร่างการสั่นไหวสูง

การวิเคราะห์ผลของโหมตการสั่นไหวสูง ๆ จะเริ่มจากการแก้ปัญหาเชิงโหมตจากสมการการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปของการวิเคราะห์เชิงโหมต (Modal Analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในรูปของสมการอนุพันธ์ตัวแปรเดียว และ

สามารถวิเคราะห์หาคำตอบได้ด้วยกระบวนการเดียวกันกับปัญหาของระบบที่มีระดับชั้นความเสรีเท่ากับหนึ่ง (SDOF) ดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{t}) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(\mathbf{t}) + \mathbf{K}\mathbf{u}(\mathbf{t}) = \mathbf{P}(\mathbf{t}) \quad (21)$$

เมื่อ $\mathbf{M} = \Phi^T \mathbf{m} \Phi$, $\mathbf{C} = 2\xi \mathbf{M} \omega$ และ $\mathbf{K} = \omega^2 \mathbf{M}$ คือ เมทริกซ์มวลเชิงโหมต เมทริกซ์ความหน่วงเชิงโหมต และเมทริกซ์ความแข็งเชิงโหมต ตามลำดับ ξ , ω และ ω^2 คือ เมทริกซ์ที่ภายในมีความหน่วงของแต่ละโหมต ξ_j , ω_j และ ω_j^2 ตามลำดับ โดย ξ_j และ ω_j คือ อัตราส่วนความหน่วงและความถี่ธรรมชาติของโหมตที่ j $\mathbf{P}(\mathbf{t}) = \Phi^T \mathbf{p}(\mathbf{t})$ คือ เวกเตอร์ของแรงลมเชิงโหมต $\Phi = [\{\phi_1\}, \{\phi_2\}, \dots, \{\phi_k\}]$ คือ เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยเวกเตอร์ของรูปร่างการสั่นไหวในโหมตต่าง ๆ และ $\mathbf{u}^T = [u_1, u_2, \dots, u_k]$ คือ เวกเตอร์ของการเคลื่อนที่เชิงโหมต $\dot{\mathbf{u}}^T = [\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dots, \dot{u}_k]$ คือ เวกเตอร์ของความเร็วเชิงโหมต $\ddot{\mathbf{u}}^T = [\ddot{u}_1, \ddot{u}_2, \dots, \ddot{u}_k]$ คือ เวกเตอร์ของความเร่งเชิงโหมต โดยตัวห้อย k คือ จำนวนของโหมตการสั่นไหวที่พิจารณา

โดยที่คำตอบที่ได้จากการแก้สมการอนุพันธ์ คือการเคลื่อนที่ตอบสนองเชิงโหมต (Generalized Displacement) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองอื่น ๆ ที่ต้องการพิจารณา โดยผ่านค่าประกอบการมีส่วนร่วมเชิงโหมต (Modal participation coefficients) (Chen and Kareem, 2005b) โดยที่ตัวประกอบการมีส่วนร่วมเชิงโหมตไม่ว่าจะเป็นของการเคลื่อนที่ ความเร่ง แรงเฉือน โมเมนต์ดัด และ โมเมนต์บิด สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\Gamma_{dlj} = \phi_{ijs} \quad (s = x, y, \theta) \quad (22)$$

$$\Gamma_{alj} = \omega_j^2 \phi_{ijs} \quad (s = x, y, \theta) \quad (23)$$

$$\Gamma_{vlj} = \sum_{i=1}^n \omega_j^2 m_i \phi_{ijs} \quad (s = x, y) \quad (24)$$

$$\Gamma_{mlj} = \sum_{i=1}^n (z) \omega_j^2 m_i \phi_{ijs} \quad (s = x, y, \theta) \quad (25)$$

$$z = \begin{cases} z_i & \text{if } l = 1 \\ z_i - z_{l-1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Gamma_{tij} = \sum_{i=1}^n \omega_j^2 I_i \phi_{ij\theta} \quad (26)$$

เมื่อ Γ คือ ตัวประกอบการมีส่วนร่วมเชิงโหมต ตัวห้อย d, a, v, m และ t ซึ่งเป็นตัวแทนของการเคลื่อนที่ของแต่ละชั้น ความเร่งของแต่ละชั้น แรงเฉือนของแต่ละชั้น โมเมนต์ดัดของแต่ละชั้น และแรงบิดของแต่ละชั้นของอาคาร ตามลำดับ Z คือแกนของโมเมนต์ดัด ϕ_{ijx} , ϕ_{ijy} และ $\phi_{ij\theta}$ คือ รูปร่างการสั่นไหวชั้นที่ l ในทิศทาง x, y และ θ ตามลำดับ

ส่วนแปรปรวน (fluctuate Part) ของผลตอบสนองด้านพลศาสตร์ใด ๆ ที่พิจารณา (R) ของโหมตที่ j สามารถหาได้จากส่วนแปรปรวนของการเคลื่อนที่เชิงโหมตดังนี้

$$\sigma_{R_j} = \Gamma_{R_j} \sigma_{q_j} \quad (27)$$

ส่วนแปรปรวนของผลตอบสนองเชิงโหมตสามารถนำมารวมกันเพื่อให้ได้ส่วนแปรปรวนของผลตอบสนองลัพธ์ สำหรับวิธีการอย่างง่ายสามารถใช้ในการรวมผลของแต่ละโหมตด้วยวิธีการรวมแบบรากที่สองของผลรวมของค่ากำลังสอง (Square Root of Sum of Squares, SRSS)

$$\sigma_R = \sqrt{\sum_{j=1}^k \sigma_{R_{jj}}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^k (\Gamma_{R_j} \sigma_{q_{jj}})^2} \quad (28)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมการที่ 28 ไม่ได้คิดผลของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองเชิงโหมต (Cross correlations)

5.1 ผลของโหมตการสั่นไหวสูงตามทิศทางลม

สำหรับการวิเคราะห์แรงลมโดยและผลตอบสนองของโหมตการสั่นไหวสูง ๆ จะแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการคิดผลของโหมตการสั่นไหวสูง และไม่คิดผลของโหมตการสั่นไหวสูง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta\sigma_R = \frac{\sigma_{R2} - \sigma_{R1}}{\sigma_{R1}} \times 100 \quad (29)$$

โดยที่ σ_{R1} และ σ_{R2} คือผลลัพธ์ของผลตอบสนองที่ได้จากการไม่คิดผลของโหมตการสั่นไหวสูง และการคิดผลของโหมตการสั่นไหวสูง $\Delta\sigma_R$ หมายความว่าผลของโหมตการสั่นไหวสูง มีค่าเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของโหมตแรก ซึ่งจะสื่อถึงว่าการที่คิดผลของโหมตแรกเพียงโหมตเดียวจะทำให้เกิดความผิดพลาดไปถึงกี่เปอร์เซ็นต์ ส่วนตัวห้อย R คือผลตอบสนองที่ต้องการพิจารณา

5.2 ผลของโหมตการสั่นไหวสูงตามความสูงของอาคาร

ผลตอบสนองจากแรงลมในโหมตการสั่นไหวสูงที่แปรเปลี่ยนตามความสูงของอาคารเป็นการแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบผลตอบสนองกรณีที่ดีและไม่คิดผลของโหมตการสั่นไหวสูงตามความสูงของอาคาร เพื่อให้เข้าใจและเห็นภาพสำหรับผลการคิดผลของโหมตการสั่นไหวสูงที่ดีขึ้น โดยในการเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ต้องการ จะทำการหารปรับแก้ด้วยค่าสูงสุดจากการรวมผลของโหมตการสั่นไหวสูงแทนการแสดงค่าผลตอบสนองจริงที่เกิดขึ้น ดังแสดงตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\sigma_{R1n} = \frac{\sigma_{R1}}{\max(\sigma_{R1}, \sigma_{R2})} \quad (30)$$

$$\sigma_{R2n} = \frac{\sigma_{R2}}{\max(\sigma_{R1}, \sigma_{R2})} \quad (31)$$

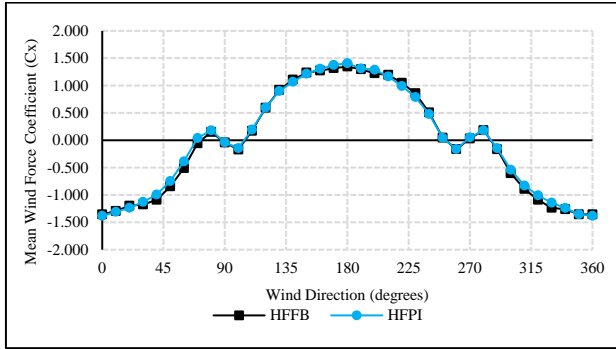
โดยที่ σ_{R1n} และ σ_{R2n} คือค่าการปรับแก้ผลลัพธ์ของผลตอบสนองที่ไม่คิดผลของโหมตการสั่นไหวสูง และคิดผลของโหมตการสั่นไหวสูง ตัวห้อย n แสดงถึงการปรับแก้ และตัวห้อย R คือผลตอบสนองด้านพลศาสตร์ที่ต้องการพิจารณา

6. ผลการศึกษา

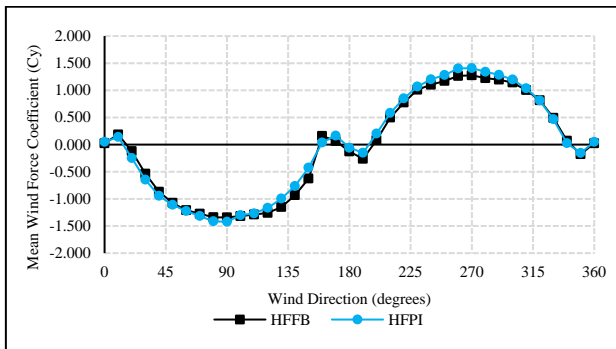
6.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่าง HFFB กับ HFPI ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง

จากการศึกษาพบว่าการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองระหว่างการทดสอบด้วยวิธี HFFB กับ HFPI มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ทั้งค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของ

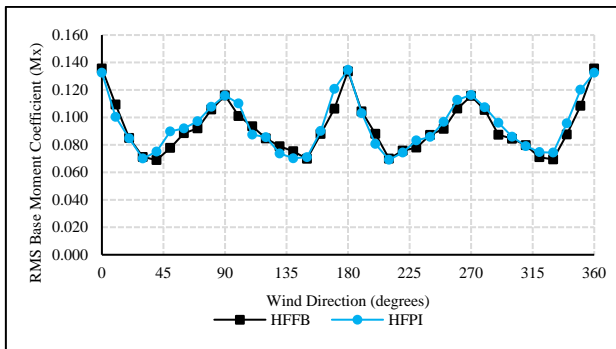
โมเมนต์พลิกคว่ำ และค่าสเปกตรัมของโมเมนต์พลิกคว่ำที่แปรปรวนของแรงลมดังแสดงในรูปที่ 7 ถึง 12



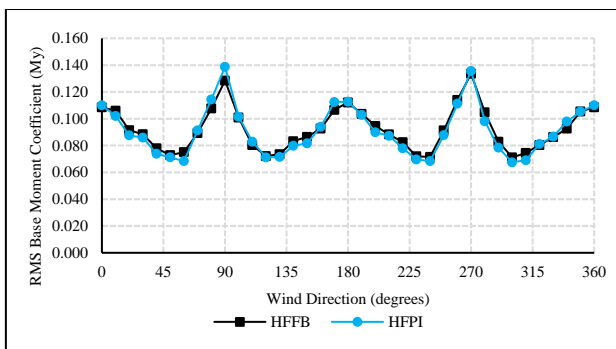
รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน y



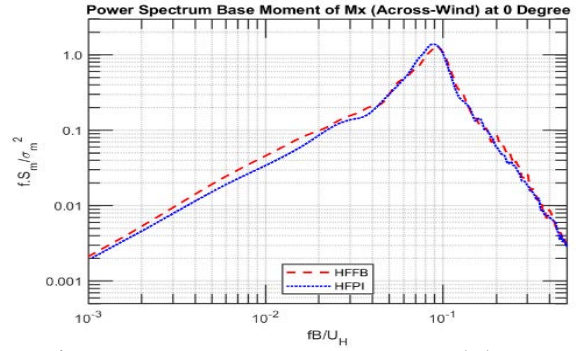
รูปที่ 8 สัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน x



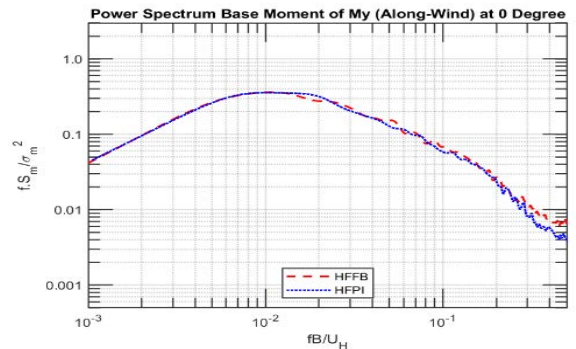
รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน x



รูปที่ 10 สัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน y



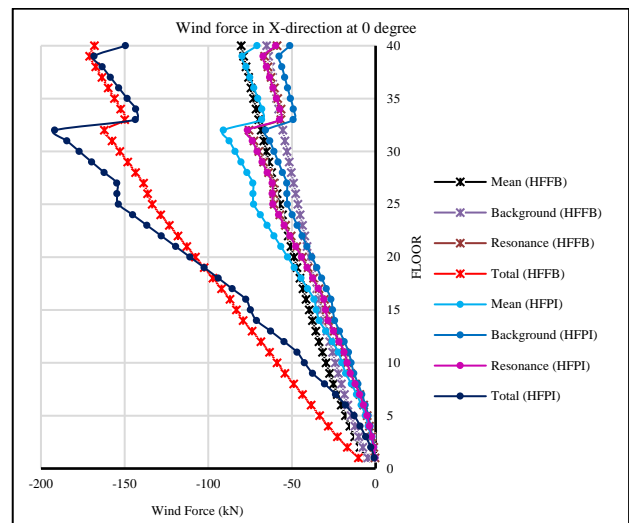
รูปที่ 11 Power spectrum density ของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน x



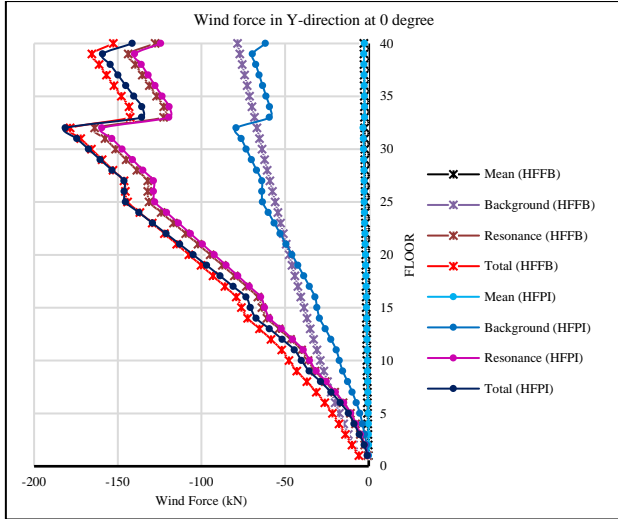
รูปที่ 12 Power spectrum density ของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน y

6.2 ผลการเปรียบเทียบแรงลมสถิตเทียบเท่าระหว่างวิธี HFFB กับ HFPI

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลของแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำตามระดับชั้นตามความสูงของอาคารระหว่างการทดสอบด้วยวิธี HFFB ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับการทดสอบด้วยวิธี HFPI ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงลมเชิงโหมด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 13 และ 14



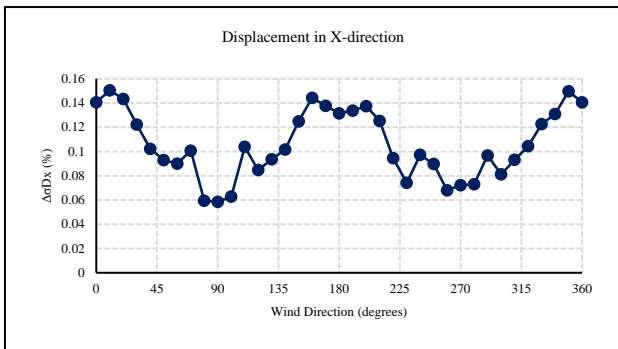
รูปที่ 13 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทาง x ระหว่างวิธี HFFB กับ HFPI



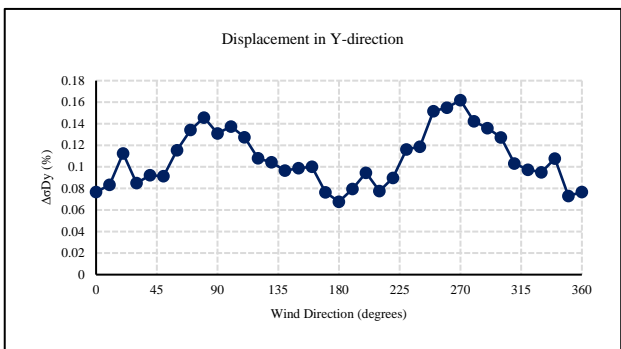
รูปที่ 14 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทาง y ระหว่างวิธี HFFB กับ HFPI

6.3 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์การสั่นไหวสูงตามทิศทางลม

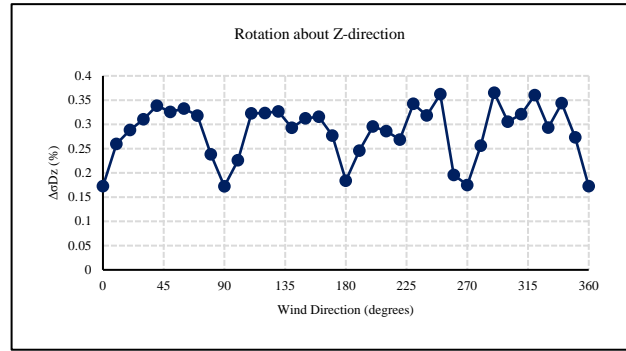
ผลการวิเคราะห์ผลของโมเมนต์สูง ๆ ที่ได้ไม่ว่าจะเป็น การเคลื่อนที่ตอบสนองที่ยอดอาคาร (Top Displacement Response) โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐาน (Base Moment) และความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคาร (Top Acceleration Response) ในทิศทาง X, Y และ Z จะแสดงดังรูปภาพและตารางดังต่อไปนี้



รูปที่ 15 ผลของโมเมนต์การสั่นไหวสูงสำหรับการเคลื่อนที่ตอบสนองที่ยอดอาคารในทิศทาง x



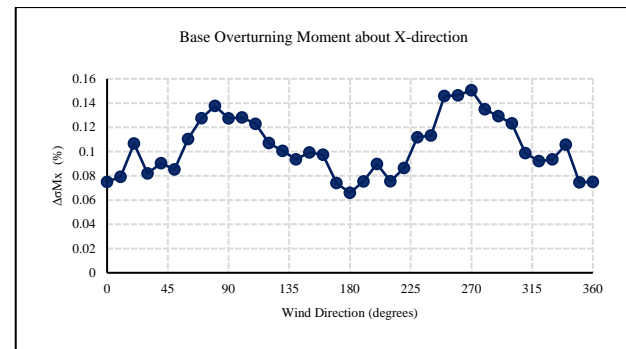
รูปที่ 16 ผลของโมเมนต์การสั่นไหวสูงสำหรับการเคลื่อนที่ตอบสนองที่ยอดอาคารในทิศทาง y



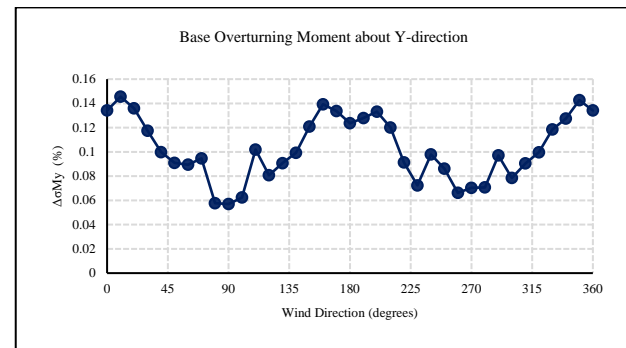
รูปที่ 17 ผลของโมเมนต์การสั่นไหวสูงสำหรับการเคลื่อนที่ตอบสนองที่ยอดอาคารในทิศทางรอบ z

จากรูปที่ 15 ถึง 17 จะเห็นได้ว่าผลของโมเมนต์การสั่นไหวสูงสำหรับการเคลื่อนที่ตอบสนองที่ยอดอาคารทั้งในทิศทาง x, y และ รอบ z มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.15%, 0.16% และ 0.36% ตามลำดับ ซึ่งผลของโมเมนต์การสั่นไหวสูงสำหรับการเคลื่อนที่ตอบสนองที่ยอดอาคารมีผลน้อยมาก

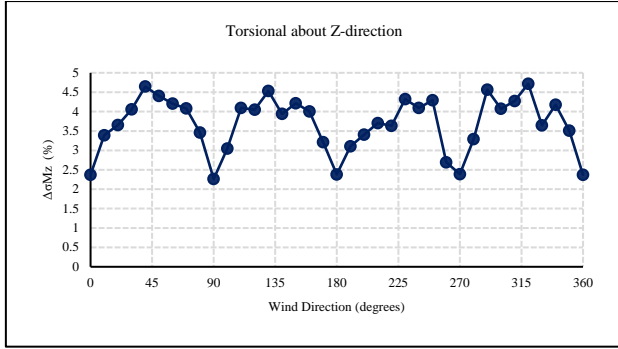
จากรูปที่ 18 ถึง 20 จะเห็นได้ว่าผลของโมเมนต์การสั่นไหวสูงสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารรอบทิศทาง x, y และ z มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.15%, 0.15% และ 4.72% ตามลำดับ ซึ่งผลของโมเมนต์การสั่นไหวสูงสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารมีผลน้อยมาก



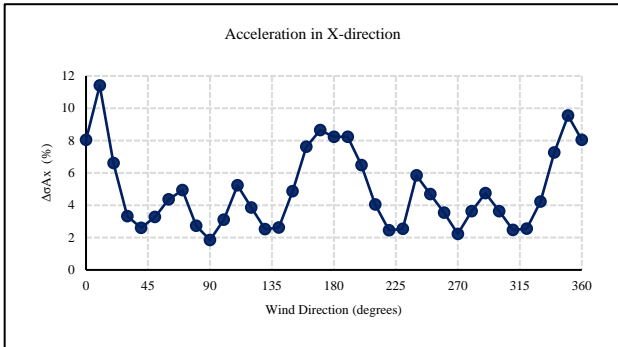
รูปที่ 18 ผลของโมเมนต์การสั่นไหวสูงสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารรอบทิศทาง x



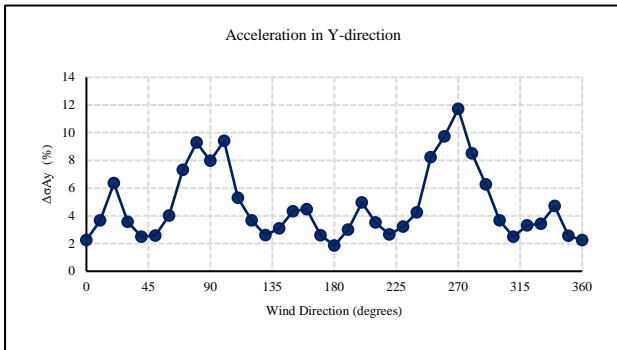
รูปที่ 19 ผลของโมเมนต์การสั่นไหวสูงสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารรอบทิศทาง y



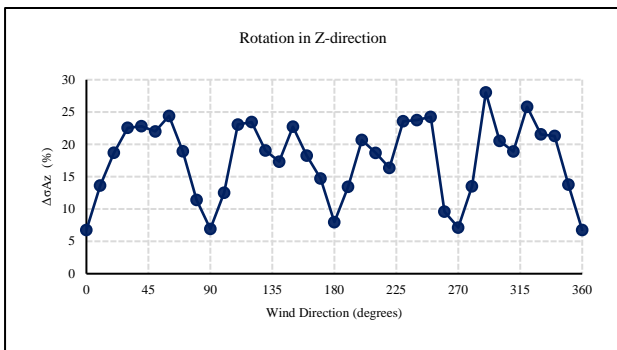
รูปที่ 20 ผลของโหมดการสั่นไหวสูงสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารรอบทิศทาง z



รูปที่ 21 ผลของโหมดการสั่นไหวสูงสำหรับความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคารในทิศทาง x

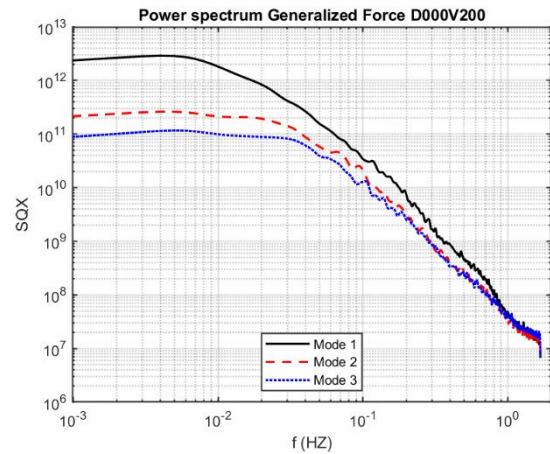


รูปที่ 22 ผลของโหมดการสั่นไหวสูงสำหรับความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคารในทิศทาง y

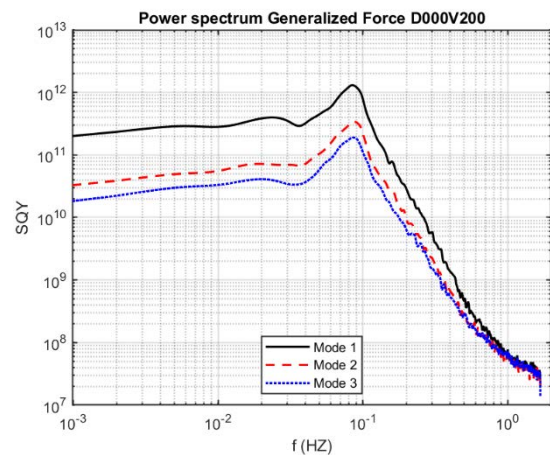


รูปที่ 23 ผลของโหมดการสั่นไหวสูงสำหรับความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคารในทิศทางรอบ z

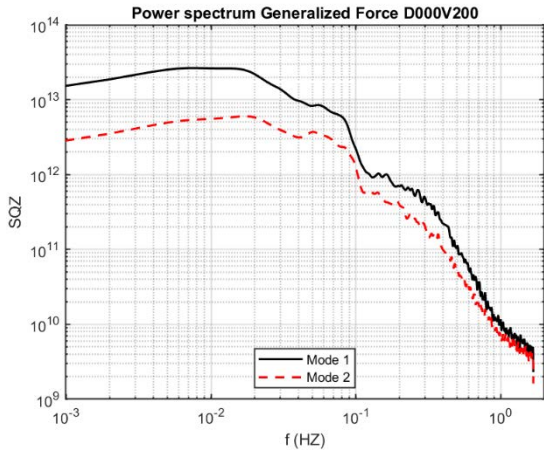
จากรูปที่ 21 ถึง 23 พบว่าผลของโหมดการสั่นไหวสูงสำหรับความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคารทั้งในทิศทาง x, y และ รอบ z มีค่าสูงสุดเท่ากับ 11.41% (Along-wind acceleration), 11.72% (Along-wind acceleration) และ 28.03% (Torsional acceleration) ตามลำดับ ทั้งนี้ผลของโหมดการสั่นไหวสูงขึ้นกับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างและลักษณะของแรงลมโดยเฉพาะสเปกตรัมของแรงลม (Power spectrum of generalized wind force) ในตัวอย่างที่ศึกษาผลของโหมดการสั่นไหวสูงสำหรับความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคารมีผลทางนัยสำคัญ อีกทั้งยังจะเห็นได้ว่าผลของโหมดการสั่นไหวสูงของความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคารจะมีผลมากในทิศทางตามลม ส่วนผลของโหมดการสั่นไหวสูงของความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมกลับมามีผลน้อย ซึ่งการที่ผลของโหมดการสั่นไหวสูงของความเร่งตอบสนองในทิศทางตามลมมีค่าสูงเนื่อง Power spectrum density ของแรงลมเชิงโหมดในทิศทางตามลมมีแอมพลิจูดที่ไม่ต่างกันมากในช่วงความถี่ที่เริ่มสูง จึงส่งผลให้แอมพลิจูดของโหมดที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกับโหมดสูง ๆ แต่สำหรับ Power spectrum density ของแรงลมเชิงโหมดในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมจะมีแอมพลิจูดที่ต่ำลงอย่างมากในช่วงความถี่ที่เริ่มสูง ทำให้แอมพลิจูดของโหมดที่ 1 มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับแอมพลิจูดของโหมดสูง ๆ จึงทำให้ผลของโหมดการสั่นไหวสูง ๆ ของความเร่งตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมมีค่าที่ต่ำ แสดงได้ดังรูปที่ 24 ถึง 26



รูปที่ 24 PSD of Generalized Force in X direction (Along-wind)



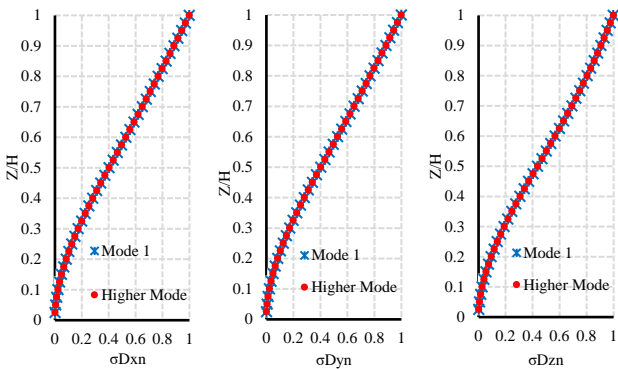
รูปที่ 25 PSD of Generalized Force in Y direction (Across-wind)



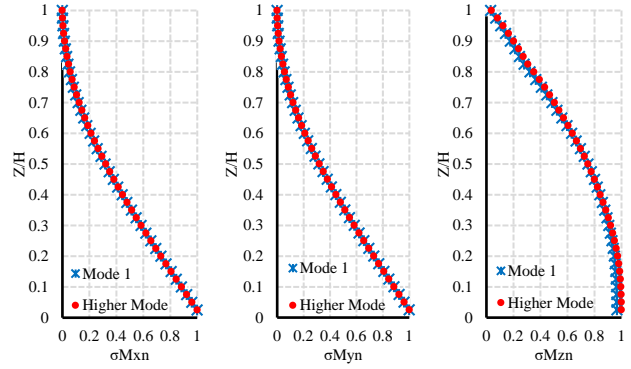
รูปที่ 26 PSD of Generalized Force in Z direction (Torsional)

6.4 ผลการวิเคราะห์โหมดการสั่นไหวสูงตามความสูง

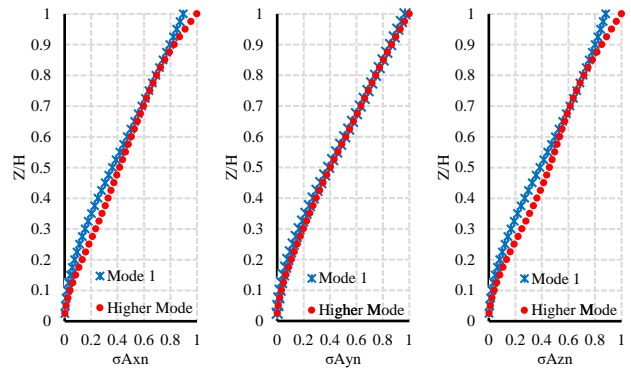
หัวข้อนี้จะแสดงผลของโหมดการสั่นไหวสูงตามความสูงของอาคาร เฉพาะทิศทางลมที่ส่งผลต่อโหมดการสั่นไหวสูง โดยพิจารณาจากหัวข้อที่ 6.3 จะเห็นว่าผลของโหมดการสั่นไหวสูง สำหรับความเร่งตอบสนองในทิศทางลมมีค่าสูงที่ทิศทางลม 10 องศา (ในทิศทาง X) , 270 องศา (ในทิศทาง Y) ซึ่งจะให้เห็นภาพและเข้าใจผลถึงผลตอบสนองของอาคารสูง ภายใต้แรงลมกระทำสำหรับโหมดการสั่นไหวสูงได้ดียิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่ตอบสนองของอาคาร โมเมนต์พลิกคว่ำของอาคาร และความเร่งตอบสนองของอาคาร โดยผลการวิเคราะห์สำหรับบทนี้จะแสดงผลที่เป็นการกระจายตัวของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นกับอาคารตามความสูง ซึ่งเป็นการหารปรับแก้ค่าด้วยค่าผลตอบสนองที่สูงสุด เพื่อดูว่าผลตอบสนองของอาคารสูง สำหรับโหมดแรกเพียงโหมดเดียวกับผลตอบสนองของอาคารสูงที่รวมผลของโหมดการสั่นไหวสูง เข้าไปด้วยมีรูปแบบการกระจายตัวและผลลัพธ์ที่แตกต่างกันมากเพียงใด ซึ่งในบทนี้จะแสดงผลที่องศาการปะทะที่มุม 10 และ 270 องศา โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 27 ถึง 32



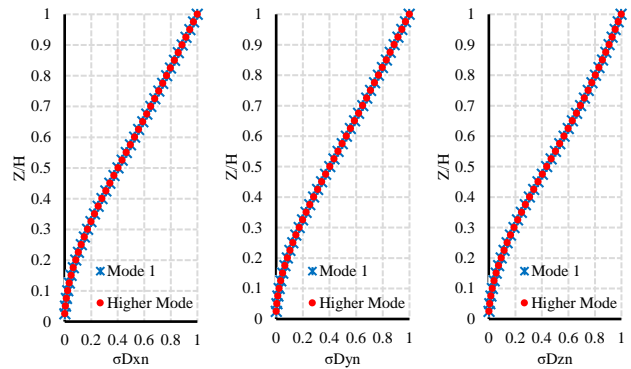
รูปที่ 27 ผลของโหมดการสั่นไหวสูงตามความสูงของอาคารสำหรับการเคลื่อนที่ในทิศทาง x, y และ z สำหรับทิศทางลม 10 องศา



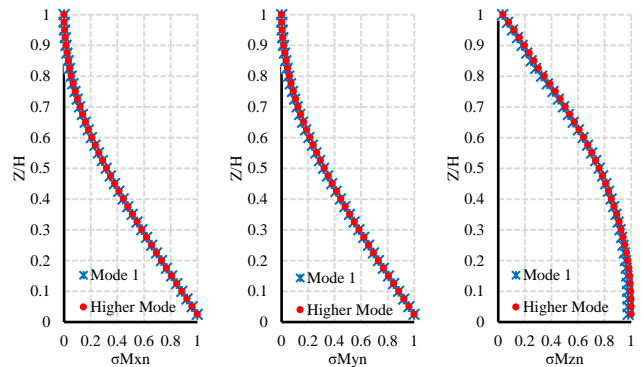
รูปที่ 28 ผลของโหมดการสั่นไหวสูงตามความสูงของอาคารสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำรอบแกน x, y และ z สำหรับทิศทางลม 10 องศา



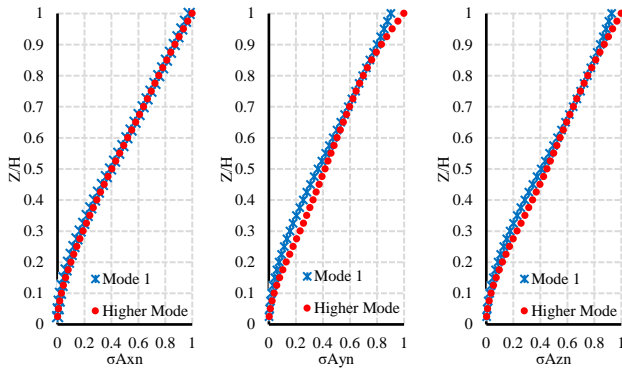
รูปที่ 29 ผลของโหมดการสั่นไหวสูงตามความสูงของอาคารสำหรับความเร่งตอบสนองในทิศทาง x, y และ z สำหรับทิศทางลม 10 องศา



รูปที่ 30 ผลของโหมดการสั่นไหวสูงตามความสูงของอาคารสำหรับการเคลื่อนที่ในทิศทาง x, y และ z สำหรับทิศทางลม 270 องศา



รูปที่ 31 ผลของโหมดการสั่นไหวสูงตามความสูงของอาคารสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำรอบแกน x, y และ z สำหรับทิศทางลม 270 องศา



รูปที่ 32 ผลของโหมดการสั่นไหวสูงตามความสูงของอาคารสำหรับความเร่งตอบสนองในทิศทาง x, y และ z สำหรับทิศทางลม 270 องศา

จากรูปที่ 27, 28, 30 และ 31 จะเห็นว่าสำหรับการเคลื่อนที่และโมเมนต์พลิกคว่ำ การคิดผลของโหมดการสั่นไหวแรกเพียงโหมดเดียวมีค่าไม่ต่างจากการคิดผลของโหมดการสั่นไหวสูง โดยสังเกตได้จากรูปแบบการเคลื่อนที่ตัวและโมเมนต์เป็นรูปแบบของการสั่นไหวโหมดแรกเป็นหลัก แต่สำหรับความเร่งตอบสนอง การคิดผลของโหมดการสั่นไหวแรกเพียงโหมดเดียวจะให้ค่าที่ต่ำกว่าการคิดผลของโหมดการสั่นไหวสูง โดยสังเกตได้จากรูปแบบการสั่นไหวของความเร่งตอบสนองมีผลของโหมดการสั่นไหวสูงเข้ามามีส่วนร่วมอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงในรูปที่ 29 และ 32

7. บทสรุป

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างวิธี HFFB กับ HFPI จะเห็นได้ว่าวิธี HFPI ให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างจากวิธี HFFB อีกทั้งการใช้วิธี HFPI ร่วมกับการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีแรงลมเชิงโหมดทำให้สามารถผลของการกระจายตัวของแรงลมตามระดับชั้นความสูงได้อย่างสมจริง โดยที่ไม่ต้องอาศัยสมมติฐานในการกระจายผลของแรงลมตามความสูงเหมือนกับวิธี HFFB รวมไปถึงยังสามารถคิดผลของแรงลมในโหมดการสั่นไหวสูงได้อีกด้วย

การวิเคราะห์ผลของแรงลมโดยรวมและผลตอบสนองของอาคารสูงในโหมดการสั่นไหวสูง สามารถสรุปได้ดังนี้

- ผลของโหมดการสั่นไหวสูงต่อการเคลื่อนที่ตอบสนองที่ยอดอาคาร และโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐาน มีผลน้อยมาก ทำให้สามารถคิดผลเพียงแคโหมดเดียวก็เพียงพอ
- ผลของโหมดการสั่นไหวสูงต่อความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคารมีผลทางนัยสำคัญในทิศทางลมและการบิดของอาคาร โดยในทิศทางลมมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ และในทิศทางบิดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามความเร่งตอบสนองในทิศทางลมสำหรับอาคารสูงมีค่าที่ต่ำกว่าความเร่งตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมเป็นอย่างมาก
- ผลของโหมดการสั่นไหวสูงต่อความเร่งตอบสนองที่ยอดอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมากประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์
ผลของโหมดการสั่นไหวสูงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างและลักษณะของแรงลมโดยเฉพาะสเปกตรัมของแรงลม ดังนั้นผลของอาคารที่มีรูปทรงและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่ต่างกันย่อมมีผลกระทบที่แตกต่างกันไป จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhou, Y., Kijewski, T., & Kareem, A. (2003). Aerodynamic loads on tall buildings: interactive database. *Journal of structural engineering*, 129(3), pp. 394-404.
- [2] Kwon, D. K., Kijewski-Correa, T., & Kareem, A. (2008). e-Analysis of high-rise buildings subjected to wind loads. *Journal of Structural Engineering*, 134(7), pp. 1139-1153.
- [3] วิโรจน์ บุญญภิญโญ (2561). การออกแบบและพฤติกรรมโครงสร้างเหล็ก รับแรงในแนวตั้งและแรงด้านข้าง. บริษัท เอสพีเอ็ม การพิมพ์ จำกัด, หน้า 674-679.
- [4] Chen, X., & Kareem, A. (2005). Coupled dynamic analysis and equivalent static wind loads on buildings with three-dimensional modes. *Journal of structural Engineering*, 131(7), pp. 1071-1082.
- [5] Huang, G., & Chen, X. (2007). Wind load effects and equivalent static wind loads of tall buildings based on synchronous pressure measurements. *Engineering Structures*, 29(10), pp. 2641-2653.
- [6] Steckley, A., Accardo, M., Gamble, S. L., & Irwin, P. A. (1992). The use of integrated pressures to determine overall wind-induced response. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 42(1-3), pp. 1023-1034.
- [7] Aly, A. M. (2013). Pressure integration technique for predicting wind-induced response in high-rise buildings. *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), pp. 717-731.