



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเทคนิค high frequency force balance เพื่อ
การประมาณค่าแรงลมและการตอบสนองของอาคาร
สูงที่มีการโยกตัวในแนวนราบและแนวนวดพร้อมกัน

โดย ผศ.ดร.สุกิตย์ เทพมังกร และคณะ

สิงหาคม 2548



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเทคนิค high frequency force balance เพื่อ
การประมาณค่าแรงลมและการตอบสนองของอาคาร
สูงที่มีการโยกตัวในแนวนอนและแนวบิดพร้อมกัน

โดย ผศ.ดร.สุกิตย์ เทพมังกร และคณะ

สิงหาคม 2548

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเทคนิค High frequency force balance เพื่อ
การประมาณค่าแรงลมและการตอบสนองของอาคาร
สูงที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวดิ่งพร้อมกัน

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1. ผศ.ดร.สุกิตย์ เทพมังกร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 2. นายอัศรพล ตนสุขชื่น | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 3. นายชาญณรงค์ ฟุสกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 4. นายสุรัฐชล ช่วยทุกข์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 5. รศ.ดร.เป็นหนึ่ง วานิชชัย | สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

อาคารสูงสมัยใหม่ที่ออกแบบและก่อสร้างในปัจจุบัน มักจะมีความสูงและความชะลูดมากขึ้น ตลอดจนมีน้ำหนักเบากว่าอาคารที่ก่อสร้างแล้วเสร็จในอดีต ทั้งนี้เนื่องมาจากพัฒนาการที่รวดเร็ว และต่อเนื่องของเทคโนโลยีทางด้านการออกแบบและการก่อสร้าง อาคารสูงสมัยใหม่มักกล่าวเมื่อรับแรงลม มักจะมีระดับการสั่นไหวที่รุนแรงมากขึ้นด้วย ดังนั้นในขั้นตอนของการออกแบบอาคาร วิศวกรและผู้ที่เกี่ยวข้องจึงมักที่จะบรรจุเรื่องของการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของอาคารในอุโมงค์ลมเพื่อศึกษาผลกระทบของลมที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้าง

การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี High frequency force balance (HFFB) model tests เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่า สามารถทำได้ง่าย สะดวกรวดเร็วและประหยัด ตลอดจนมีความคล่องตัวสูงในเรื่องของการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการประมาณค่าการสั่นไหวของโครงสร้างอาคาร ดังนั้นวิธี HFFB นี้จึงเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายและได้พัฒนาจนกลายมาเป็นวิธีมาตรฐานวิธีหนึ่ง สำหรับใช้ในการศึกษาเรื่องผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างอาคารในปัจจุบัน ตลอดช่วงระยะเวลาสองทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการทำวิจัยเพื่อพัฒนาวิธีการ HFFB และแก้ไขข้อจำกัดของวิธีการนี้มาโดยตลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อจำกัดในเรื่องของการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากการโยกตัวของอาคารในแนวราบและแนวบิดพร้อมกัน ซึ่งมักจะก่อให้เกิดปัญหาให้กับอาคารที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางระหว่างจุดศูนย์กลางมวลและจุดศูนย์กลางความแข็ง รวมทั้งการวิเคราะห์ผลทางด้าน Flow-structure interaction หรือที่เรียกว่า Aeroelastic effects ที่มีต่อโครงสร้างอาคาร

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้ระยะเวลากว่าสองปี เพื่อทำการวิจัยและพัฒนาวิธี HFFB ตลอดจนสร้างองค์ความรู้ใหม่ที่สำคัญดังต่อไปนี้ 1) พัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี HFFB 2) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประมาณค่าแรงและการสั่นไหวของโครงสร้าง 3) ทำการทดสอบเพื่อหาข้อจำกัดตลอดจนปรับปรุงขีดความสามารถของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น 4) ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงลมของอาคารสูงที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า 5) ศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารและการสั่นไหวของอาคารโดยการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคารในหลายลักษณะ 6) ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงลมของอาคารสูงคู่แฝดที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมฉากและที่มีการปรับแต่งมุมเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบนอกเหนือไปจากการใช้มาตรฐานคำนวณแรงลม 7) ศึกษาและพัฒนาวิธีการ HFFB เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารสูงที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวบิดพร้อมกัน และ 8) ดำเนินการทดสอบแบบจำลองอาคารในอุโมงค์ลม เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเยื้องศูนย์กลาง

มวลและจุดศูนย์กลางความแข็ง ที่มีต่อการสั่นไหวของอาคารและแรงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง งานวิจัยได้ดำเนินมาอย่างต่อเนื่อง และอยู่ระหว่างการสรุปรายละเอียดของการวิเคราะห์หาค่า แรงลมและการสั่นไหวของอาคารสูงที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวดิ่งพร้อมกัน (Building with 3-D complex mode shapes) รวมทั้งการศึกษาอิทธิพลของระยะเยื้องศูนย์กลางระหว่างจุดศูนย์กลาง มวลและจุดศูนย์กลางความแข็ง ที่มีต่อการสั่นไหวของอาคารมาตรฐาน CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) และแรงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างอาคารดังกล่าว ปัจจัย สำคัญที่มีผลต่อค่าแรงและการสั่นไหวของอาคาร ได้แก่ ความถี่ธรรมชาติของอาคาร รูปแบบการ สั่นไหวในทิศทางต่างๆของอาคารที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางระหว่างจุดศูนย์กลางมวลและจุดศูนย์กลาง ความแข็ง การโยกตัวของอาคารในแนวราบและแนวดิ่งพร้อมกัน ตลอดจนทิศทางการปะทะของ ลม จะได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่องต่อไปในอนาคต

ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยต่อเนื่องดังกล่าวนี้คาดว่าจะมีประโยชน์โดยตรงต่อองค์ความรู้เกี่ยวกับ แรงลมที่กระทำกับอาคารที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวดิ่งพร้อมกัน ซึ่งสามารถนำมา ประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาและการออกแบบอาคารสูงสมัยใหม่ที่มีรูปทรงทางสถาปัตยกรรม ภายนอกที่ซับซ้อนได้

Abstract

There is a tremendous growth of taller and more slender buildings to grace the skyline of major cities all over the world. This is due to the rapid and continuous development of design and construction technologies. These modern tall and slender buildings are usually light-weight and less-damped, hence they are likely to have significant dynamic responses due to wind loadings. A programme of wind tunnel model tests is frequently integrated into the design process.

Because of the advantages in terms of simplicity for the model construction, less wind tunnel testing time and flexibility for the data analysis, the high frequency force balance (HFFB) model test is recently considered to be a cost effective method for wind tunnel model tests. This technique has become a standard method for the determination of the wind-induced loads and responses of buildings. During the past two decades, this technique has been steadily developed to overcome its major limitations, for example, neglecting the 3-D complex building vibration mode shapes, which frequently affect the stability and serviceability designs of tall buildings with eccentricity between centre of mass and centre of stiffness, and the aeroelastic effects.

This research project has spanned for more than two years in order to 1) develop the necessary experimental apparatus for wind tunnel high frequency force balance (HFFB) model tests; 2) develop a computer program for the relevant data analysis; 3) experimentally investigate the validation and limitation of the developed testing apparatus and analysis program by benchmarking the wind tunnel test results with the previous published records; 4) experimentally investigate the aerodynamic behaviours of tall buildings with square and rectangular cross-sections; 5) experimentally investigate the effects of corner modifications on a reduction of aerodynamic wind loads and wind-induced responses of buildings; 6) experimentally investigate the structural wind loads of twin tall buildings with various corner modifications and provide guidance for the structural design; 7) refine the experimental set up and data analysis methodology to incorporate the effects of 3-D complex mode shapes on the building's structural wind loads and wind-induced responses, and 8) develop a systematic study to experimentally investigate the effects of eccentricity on the wind loadings and wind-induced responses of buildings. It is now in the stage, where the methodologies for the determination of structural wind loads and wind-induced responses of the building with 3-D complex mode shapes by the HFFB technique are being summarised. Wind tunnel model tests of the Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council (CAARC) standard tall building to investigate the effects of building eccentricity on the structural wind loads and wind-induced responses of a tall building have been carried out and the corresponding data analysis, including finite element models of the building structures, is being conducted. The results of wind tunnel model tests will be analysed to examine the effects of eccentricity between centre of mass and centre of stiffness for various wind incident angles. Parameters such as the building mode shapes and frequencies of vibration will be estimated for different eccentricity conditions. The effects of eccentricities, coupling parameters and wind directions on the wind-induced displacement responses will be presented and discussed. These will be the objectives for the follow up research.

The outcomes are expected to be useful for the design of modern tall buildings with complex geometrical shapes, which are likely to have significant coupling between translational and torsional motions due to 3-D complex mode shapes.

Executive summary

เนื้อหาของโครงการวิจัยนี้ ครอบคลุมตั้งแต่การศึกษาหลักการพื้นฐานของการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี High frequency force balance (HFFB) การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบการทดสอบ การศึกษาผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างอาคารสูง การลดค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารสูงโดยการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร การศึกษาค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารสูงที่มีลักษณะเป็นอาคารคู่แฝด และแนวทางการพัฒนาวิธี (HFFB) เพื่อใช้ศึกษาระงลมและสั่นไหวของอาคารที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวดิ่งพร้อมกัน

อาคารมาตรฐาน CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) เป็นอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 30 เมตร ความยาว 45 เมตร ความสูง 180 เมตร และมีความหนาแน่น 160 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ได้รับการคัดเลือกเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการศึกษาค้นต้น แบบจำลองย่อส่วนของอาคารได้รับการจัดทำโดยใช้มาตราส่วน 1:400 มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง เมื่อนำมาติดตั้งบนเครื่องมือวัดแรงแล้วมีค่าความถี่ธรรมชาติในแนวราบและแนวดิ่งสูงเกินกว่า 100 Hz ซึ่งสูงเพียงพอที่จะทำให้แรงและ โมเมนต์ซึ่งวัดพร้อมกันทั้ง 6 ทิศทาง มีความถูกต้องไม่มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของการสั่นไหวของแบบจำลอง

การทดสอบได้กระทำที่ห้องปฏิบัติการอุโมงค์ลม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้สภาพลมจำลองสำหรับพื้นที่แบบเปิดโล่ง (Open terrain exposure) โดยทำการทดสอบในทิศทางลมตั้งฉากกับด้านกว้างและด้านยาวของอาคาร ผลการทดสอบได้ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบในรูปของการแอ่นตัวและการบิดของโครงสร้างที่ระดับยอดของอาคาร นอกเหนือจากการทดสอบแล้วงานวิจัยนี้ยังได้จัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าแรงและการแอ่นตัวของอาคารได้ทั้งตามหลักการของ Frequency domain analysis และ Time domain analysis และสามารถใช้งานได้อย่างสะดวกเนื่องจากมี Graphic user interface

จากการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของอาคารในแนวทิศทางลม ในแนวตั้งฉากกับทิศทางลม และในแนวดิ่ง พบว่าค่าที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของวิธี HFFB ในการประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคาร ตลอดจนประสิทธิภาพของเครื่องมือและ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในครั้งนี้

จากการศึกษาอาคารที่มีการปรับแต่งรูปร่างของมุมอาคารสองลักษณะคือ มุมเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมุมโค้งมน พบว่าการปรับแต่งมุมของอาคารสามารถลดระดับการแอ่นตัวของอาคารได้

ทั้งนี้เนื่องจากการปรับแต่งมูมมีผลกระทบต่อการแยกตัวของลมที่เกิดขึ้นบริเวณมุมอาคาร การพัดผ่านและวกกลับของลมด้านข้างอาคาร ตลอดจนความปั่นป่วนของลมที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังอาคาร นอกจากนี้ยังมีผลกระทบอย่างมากต่อกลไก Vortex shedding process ซึ่งส่งผลให้ระดับการสั่นไหวสามารถลดลงได้ถึง 40 % ในบางกรณี ประสิทธิภาพในการลดระดับการแอ่นตัวของอาคารเนื่องจากการปรับแต่งมูมจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อทิศทางลมกระทำตั้งฉากกับผนังด้านใดด้านหนึ่งของอาคาร

งานวิจัยนี้ได้ศึกษารายละเอียดแรงลมและการสั่นไหวของอาคารคู่แฝดที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 30x30 เมตร ความสูง (H) 180 เมตร (อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 6:1:1) และมีความหนาแน่นของอาคารเท่ากับ 160 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยเน้นการศึกษาเพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่างอาคารและการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมของอาคารที่แตกต่างกันสามลักษณะคือ มุมเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยม มุมตัด และมุมโค้งมน โดยกำหนดให้ขนาดของการปรับแต่งมูมเท่ากับ 0.20 เท่าของความกว้างอาคาร

การทดสอบแบบจำลองอาคารในครั้งนี้ได้กระทำในอุโมงค์ลมของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารในแต่ละกรณีได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนของแรงลมที่เรียกว่า Interference factors (IF) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงลมเนื่องจากอาคารข้างเคียง จากการศึกษาพบว่าตำแหน่งที่ตั้งของอาคารข้างเคียงที่มีผลมากที่สุดอยู่บริเวณเหนือลมในแนวทะแยงทำมุมกับแกน x ประมาณ 20 ถึง 45 องศา ซึ่งสามารถทำให้แรงพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเพิ่มขึ้นได้ถึง 80% นอกจากนี้ยังพบว่าความรุนแรงที่เกิดเนื่องจากอาคารข้างเคียงยังขึ้นอยู่กับลักษณะของมุมอาคารด้วย โดยที่การปรับแต่งมูมแบบเว้าและแบบโค้งมน มีผลในการลดค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารคู่แฝด ได้ดีกว่าการปรับแต่งมูมแบบตัด โดยสามารถลดแรงลมได้ถึง 50% ในบางตำแหน่งของอาคารข้างเคียง

ในปัจจุบันได้มีความพยายามอย่างต่อเนื่องที่จะพัฒนาหลักการของวิธี HFFB ให้สามารถใช้ในการคำนวณหาค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวดิ่งพร้อมกัน (Buildings with 3-D complex mode shapes) ซึ่งพบเห็นได้มากขึ้นในกรณีของอาคารสูงสมัยใหม่ที่มีรูปทรงทางสถาปัตยกรรมที่ซับซ้อน งานวิจัยต่อเนื่องที่จะได้จัดทำต่อไปเพื่อทำให้การวิเคราะห์หาค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ได้นำเสนอไว้ในรูปของแผนภูมิ ทั้งนี้คาดว่าจะใช้เวลาในการพัฒนาอีกประมาณหนึ่งถึงสองปี และจะต้องมีการทดสอบในอุโมงค์ลมเพิ่มเติมด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
Abstract	iii
Executive summary	v
สารบัญ	vii
เนื้อหางานวิจัย	1
1. หลักการของวิธี High frequency force balance (HFFB) สำหรับประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคาร	1
2. การพัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี High frequency force balance การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล และผลการทดสอบอาคารมาตรฐาน CAARC	4
3. การศึกษาแนวทางการลดแรงลมที่กระทำกับอาคารสูงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร	7
4. การศึกษาแรงลมที่กระทำกับอาคารคู่แฝดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และผลกระทบที่เกิดจากการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร	11
5. แนวทางการพัฒนาวิธี High frequency force balance เพื่อศึกษาอาคารที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวดิ่งพร้อมกัน	15
เอกสารอ้างอิง	16
Output ที่ได้จากโครงการ	49
ภาคผนวก	50

เนื้อหางานวิจัย

เนื้อหาที่สำคัญของโครงการวิจัยนี้ ครอบคลุมตั้งแต่การศึกษาหลักการพื้นฐานของการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนในอุโมงค์ลมโดยวิธี High frequency force balance (HFFB) การวิเคราะห์ผลการทดสอบ การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบการทดสอบ การศึกษาผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างอาคารสูง การลดค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารสูงโดยการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร การศึกษาค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารสูงที่มีลักษณะเป็นอาคารคู่แฝด และแนวทางการพัฒนาวิธี (HFFB) เพื่อใช้ศึกษาแรงลมและสั่นไหวของอาคารที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวบิดพร้อมกัน เนื้อหาดังกล่าวสามารถสรุปได้เป็น 5 หัวข้อดังต่อไปนี้ คือ

1. หลักการของวิธี High frequency force balance (HFFB) สำหรับประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคาร (Tschanz 1982, Tschanz and Davenport 1983, Steckley 1989, Thepmongkorn et al. 2000, Clough and Penzien 1993)

ถ้ากำหนดให้ค่า Generalised forces, $P(t)$, คือค่าแรงภายนอกที่กระทำกับระบบสำหรับการเคลื่อนที่ในแต่ละ Mode ค่าแรง $P(t)$ ดังกล่าวนี้นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ตามสมการที่ 1

$$P(t) = \int_0^h w(z,t) \cdot \phi(z) \cdot dz \quad (1)$$

โดยที่ $w(z,t)$ คือแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างอาคารที่ความสูง z เหนือพื้นดิน และ $\phi(z)$ คือรูปแบบการสั่นไหวหรือการแอ่นตัว (Mode shape) ของโครงสร้าง ส่วน h คือ ความสูงของอาคาร

ในขณะเดียวกันค่าโมเมนต์ที่ฐานของอาคาร (Base overturning moments), $M(t)$, ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลมที่กระทำตลอดความสูงของอาคาร สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$M(t) = \int_0^h w(z,t) \cdot z \cdot dz \quad (2)$$

สำหรับในกรณีทั่วไปที่ Mode shape ของอาคารมีลักษณะเป็นรูปเส้นตรง ซึ่งหมายถึงกรณีที่ค่า $\phi(z) = (z/h)$ พบว่าค่าโมเมนต์ที่ฐานของอาคาร $M(t)$ จะมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่า Generalised forces, $P(t)$, ตามสมการที่ 3

$$P(t) = \frac{M(t)}{h} \quad (3)$$

นอกเหนือไปจากค่าแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (Base shears) โมเมนต์ที่ฐานของอาคาร (Base overturning moments) และค่าโมเมนต์บิดที่ฐานของอาคาร (Base twisting moments) ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงจากการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมแล้ว ข้อได้เปรียบซึ่งถือเป็นหลักการพื้นฐานที่สำคัญของวิธี High frequency force balance (HFFB) ก็คือการประมาณค่า Generalised forces จากค่าโมเมนต์ที่ฐานของอาคาร (Base overturning moments) ซึ่งในภายหลังจะถูกนำมาใช้เพื่อการประมาณค่าการแอ่นตัวและการตอบสนองอื่นๆของอาคารที่มีต่อแรงลม หลังจากที่ได้ประมาณค่า Generalised forces สำหรับการเคลื่อนที่ในแต่ละ Mode แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าการแอ่นตัวของโครงสร้าง ตามหลักการทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง (Structural dynamics) และทฤษฎีการสั่นไหวของโครงสร้าง (Theory of vibration) ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.1 การคำนวณค่าการแอ่นตัวตามหลักการ Frequency domain analysis

ค่าเฉลี่ยของการแอ่นตัว (Mean generalised deflection responses), $\bar{R}$, ของอาคาร สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉลี่ย, $\bar{P}$, และสติเฟเนส, k , ของโครงสร้างตามสมการที่ 4

$$\bar{R} = \frac{\bar{P}}{k} \quad (4)$$

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัว (Standard deviation of the deflection response), σ_R , ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้วัดค่าการแอ่นตัวพลศาสตร์ (Dynamic deflection responses) ของโครงสร้าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_R^2} = \sqrt{\frac{1}{k^2} \int_0^\infty |H(n)|^2 \cdot S_p(n) \cdot dn} \quad (5)$$

โดยที่ $|H(n)|^2$ เรียกว่า Mechanical admittance function ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของโครงสร้างในการตอบสนองต่อแรงพลศาสตร์ในช่วงความถี่ต่างๆ ค่า $|H(n)|^2$ นี้ขึ้นอยู่กับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency of vibration), n , และความหน่วง (Damping), ζ , ของโครงสร้าง ตามสมการที่ 6

$$|H(n)|^2 = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2 \cdot \zeta \cdot n}{n_0}\right)^2} \quad (6)$$

ส่วน $S_p(n)$ เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงปริมาณของแรง Generalised forces, $P(t)$, ที่กระจายอยู่ในช่วงความถี่ต่างๆ เรียกว่า Spectrum of the generalised force ซึ่งสามารถประมาณได้โดยตรงจากค่า Spectrum ของโมเมนต์ $S_M(n)$ ตามสมการที่ 7

$$S_p(n) = \frac{S_M(n)}{h^2} \quad (7)$$

ค่าสูงสุดของการแอ่นตัว $\hat{R}$ สามารถประมาณได้จาก ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัว ตามสมการที่ 8

$$\hat{R} = \bar{R} + g \cdot \sigma_R \quad (8)$$

โดยที่ g คือค่าทางสถิติที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของค่าสูงสุดต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เรียกว่า Statistical peak factor ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.0-4.5

1.2 การคำนวณค่าการแอ่นตัวตามหลักการ Time domain analysis

การวิเคราะห์หาค่าการแอ่นตัวและการตอบสนองของโครงสร้างตามหลักการของ Time domain analysis ได้รับการพัฒนาและใช้กันแพร่หลายมากขึ้นในระยะหลัง ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องของการประมวลผลโดยใช้คอมพิวเตอร์ การวิเคราะห์หาค่าการแอ่นตัวของอาคารในแต่ละ Mode ของการเคลื่อนที่ (Generalised deflection responses), $R(t)$, สามารถกระทำได้โดยการแก้สมการการเคลื่อนที่ของระบบซึ่งมีรูปแบบทั่วไปตามสมการที่ 9 สมการการเคลื่อนที่ดังกล่าวนี้แท้ที่จริงแล้วก็คือสมการสมดุลระหว่างแรงพลศาสตร์ประเภทต่างๆที่กระทำกับระบบนั่นเอง

$$m\ddot{R}(t) + c\dot{R}(t) + kR(t) = P(t) \quad (9)$$

โดยที่ m c และ k คือ มวล ความหน่วง และสติฟเฟส ของอาคารตามลำดับ สำหรับการเคลื่อนที่ในแต่ละ Mode ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 10 ถึงสมการที่ 12

$$m = \int_0^h m(z) \cdot \phi^2(z) \cdot dz \tag{10}$$

$$c = 2 \cdot \zeta \sqrt{k \cdot m} \tag{11}$$

$$k = (2\pi n)^2 \cdot m \tag{12}$$

หลังจากที่คำนวณหาค่า Generalised deflection responses, $R(t)$ ของอาคารในช่วงระยะเวลาที่ต้องการแล้ว (ปกติคือ 1 ชั่วโมง) จึงทำการหาค่าเฉลี่ย, $\bar{R}$, และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, σ_R , โดยใช้หลักการทางสถิติทั่วไป หลังจากนั้นจึงประมาณค่าสูงสุดของการแอ่นตัว $\hat{R}$ ตามสมการที่ 8

2. การพัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี High frequency force balance การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล และผลการทดสอบอาคารมาตรฐาน CAARC

ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 1 ว่าหลักการพื้นฐานที่สำคัญประการหนึ่งของวิธี High frequency force balance (HFFB) คือการประมาณค่า Generalised forces จากค่าโมเมนต์ที่ฐานของอาคาร (Base overturning moments) ซึ่งมีความสำคัญต่อการประมาณค่าการแอ่นตัวและการตอบสนองอื่นๆของอาคารที่มีต่อแรงลม ดังนั้นเครื่องมือที่สำคัญและถือเป็นหัวใจของการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี HFFB คือเครื่องมือวัดแรงและโมเมนต์ที่มีความละเอียดสูงเพื่อให้สามารถวัดค่าแรงและโมเมนต์ได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้แล้วเครื่องมือดังกล่าวจะต้องมีความแข็งแรงเป็นอย่างมากเพื่อให้ค่าความถี่ธรรมชาติที่สูง ซึ่งโดยปกติแล้วจะจัดทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากต้องอาศัยช่างฝีมือที่มีความชำนาญและเครื่องมือที่มีคุณภาพ ดังนั้นในการศึกษารั้งนี้จึงได้เลือกใช้เครื่องมือวัดแรงและโมเมนต์ของบริษัท JR3 Inc. ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดแรงที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมหลายประเภท

นอกเหนือไปจากเครื่องมือวัดแรงแล้ว การออกแบบและจัดทำแบบจำลองย่อส่วนของอาคาร ก็ถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้จะต้องมีน้ำหนักเบาและความแข็งแรงมาก เพื่อให้ค่าแรงและโมเมนต์ที่วัดได้เป็นค่าแรงและโมเมนต์ที่

เกิดขึ้นจากแรงลมที่กระทำกับอาคารเพียงอย่างเดียว ไม่มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการขยายตัวของแรงที่เป็นผลมาจากการสั่นไหวของแบบจำลองอาคารเอง ในช่วงเริ่มต้นของการศึกษานี้ได้ทดลองใช้วัสดุหลายประเภทสำหรับการจัดทำแบบจำลอง โดยในท้ายที่สุดได้เลือกใช้ไม้บัลซ่า (Balsa wood) สำหรับการจำลองรูปร่างภายนอกของอาคารและใช้แผ่นอลูมิเนียม (Aluminium plate) สำหรับฐานของแบบจำลองเพื่อการส่งถ่ายแรงไปยังเครื่องมือวัดแรงและโมเมนต์ที่อยู่ใต้แบบจำลองต่อไป

เครื่องมือวัดแรงและโมเมนต์ รวมทั้งตัวอย่างแบบจำลองอาคารที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 และ รูปที่ 2 ตามลำดับ

อาคารมาตรฐาน CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) ที่แสดงในรูปที่ 3 เป็นอาคารสมมติที่ถูกกำหนดขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1970-1980 เพื่อใช้เป็นตัวแทนสำหรับการศึกษาผลกระทบของลมที่มีต่ออาคารสูง อาคารดังกล่าวเป็นอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 30 เมตร ความยาว 45 เมตร ความสูง 180 เมตร มีความหนาแน่น 160 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การสั่นไหวในแนวราบทั้งสองทิศทาง มี Mode shape เป็นรูปเส้นตรง มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 0.2 Hz และมีความหน่วงเท่ากับ 0.01 รายละเอียดดังกล่าวข้างต้นได้แสดงไว้ในงานของ Melbourne (1980) นอกจากนี้เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการแอ่นตัวในทิศทางการบิดกับงานวิจัยอื่นได้ งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดเพิ่มเติมให้อาคารดังกล่าวมีค่าความถี่ธรรมชาติและความหน่วงในแนวบิดเท่ากับ 0.36 Hz และ 0.014 ตามลำดับ และ Mode shape ในแนวบิดมีค่าคงที่ตลอดความสูงของอาคาร

แบบจำลองย่อส่วนของอาคารได้รับการจัดทำโดยใช้มาตราส่วน 1:400 มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง เมื่อนำมาติดตั้งบนเครื่องมือวัดแรงแล้วมีค่าความถี่ธรรมชาติในแนวราบและแนวบิดสูงเกินกว่า 100 Hz ซึ่งสูงเพียงพอที่จะทำให้แรงและโมเมนต์ซึ่งวัดพร้อมกันทั้ง 6 ทิศทางระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลม มีความถูกต้องไม่มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของการสั่นไหวของแบบจำลอง

การทดสอบได้กระทำที่ห้องปฏิบัติการอุโมงค์ลม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขนาดหน้าตัดของอุโมงค์ลมเท่ากับ 1.6 x 1.6 เมตร และมีความยาวประมาณ 7 เมตร แบบจำลองอาคารได้รับการทดสอบภายใต้สภาพลมจำลองสำหรับพื้นที่แบบเปิดโล่ง (Open terrain exposure) โดยทำการทดสอบในทิศทางลมตั้งฉากกับด้านกว้างและด้านยาวของอาคาร ที่ความเร็วลมเฉลี่ยระดับยอดอาคารประมาณ 7 เมตรต่อวินาที และเก็บข้อมูลด้วยความเร็ว 1000 ข้อมูลต่อวินาที เป็นจำนวน

ทั้งสิ้น 65,536 ข้อมูล (เวลาประมาณ 65.5 วินาที) ผลการทดสอบได้ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบในรูปของการแอ่นตัวและการบิดของโครงสร้างที่ระดับยอดของอาคาร (สุกิตย์ เทพมังกร 2547)

งานวิจัยนี้ได้จัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยการผสมผสานระหว่างโปรแกรม MATLAB Visual Basic 6.0 และทฤษฎีของ Newmark Beta ทำให้สามารถสร้างโปรแกรมที่สามารถใช้ในการคำนวณหาค่าแรงและการแอ่นตัวของอาคารได้ ทั้งตามหลักการของ Frequency domain analysis และ Time domain analysis และที่สำคัญคือโปรแกรมดังกล่าวสามารถใช้งานได้อย่างสะดวกและรวดเร็วเนื่องจากมี Graphic user interface รายละเอียดของโปรแกรมหาดังกล่าวได้แสดงไว้ในงานของ ขงยุทธ กฤตยาจรรโลงและคณะ (2546) และอักรพล ตนสุขชื่น (2546)

เมื่อทิศทางลมตั้งฉากกับด้านยาวของอาคารมาตรฐาน CAARC ค่าการแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคารในแนวทิศทางลม และในแนวตั้งฉากกับทิศทางลมได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 ตามลำดับ ส่วนค่าการแอ่นตัวของอาคารเมื่อทิศทางลมตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคารได้แสดงในรูปที่ 6 และ รูปที่ 7 ตามลำดับ ค่าความเร็วลมเฉลี่ยของทั้งสองกรณีดังกล่าวได้ถูกแปลงให้อยู่ในรูปของ Reduced wind velocity, $\bar{U}_h/n_{y-y}D_y$ และ $\bar{U}_h/n_{x-x}D_y$, ซึ่งไม่มีหน่วย สำหรับเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวในทิศทาง x และ y ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นที่ผ่านมาพบว่า ค่าการแอ่นตัวในแนวทิศทางลมและแนวตั้งฉากกับทิศทางลมที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ตามหลักการของ Time domain analysis และ Frequency domain analysis ในครั้งนี้มีค่าสอดคล้องเป็นอย่างดีกับงานวิจัยอื่นที่ผ่านมา

ค่าการแอ่นตัวในแนวบิดที่ระดับยอดของอาคาร (σ_z) เมื่อทิศทางลมตั้งฉากกับด้านยาวของอาคารได้แสดงในรูปที่ 8 ในกรณีนี้ค่า Reduced wind velocity ที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีค่าเท่ากับ $\bar{U}_h/n_{z-z}D_y$ จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่เรียกว่า BHA model ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมการ โยกตัวของอาคารในแนวนอนและแนวบิดได้พร้อมกัน (Thepmongkorn and Kwok 1999) พบว่าค่าการบิดของอาคารที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ยกเว้นในช่วง Reduced wind velocity เท่ากับ 5 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการกำทอนของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับลมและเกิดการส่งถ่ายพลังงานมายังทิศทางการบิดและทำให้ค่าการบิดมีค่าสูงมากขึ้น ซึ่งเป็นกลไกทางด้าน Aeroelastic effects ที่วิธี HFFB ไม่สามารถจำลองได้ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการบิดของอาคาร CAARC (อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 1.5) มีค่าอยู่ระหว่างค่าการบิดของอาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2 และ 1 ที่ได้จากงานของ Xu (1991) และ Zhang et al. (1993) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของวิธี

HFFB ในการประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคาร ตลอดจนประสิทธิภาพของเครื่องมือ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในครั้งนี้

ค่าการบิดตัวบริเวณยอดอาคารเมื่อทิศทางลมตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคารได้แสดงในรูปที่ 9 ในกรณีนี้ค่า Reduced wind velocity ได้ถูกนำเสนอในรูปของ $\bar{U}_h / n_{z-z} D_x$ เพื่อความเหมาะสมในการเปรียบเทียบ จากการศึกษาพบว่าค่าโมเมนต์บิดที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมมีค่าค่อนข้างต่ำสำหรับทิศทางลมนี้ เนื่องจากเป็นทิศทางที่ลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านแคบของอาคาร ซึ่งมีผลทำให้ค่าการบิดของอาคารที่คำนวณได้ มีความแตกต่างจากงานวิจัยอื่นอยู่บ้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความเร็วลมสูงๆ อย่างไรก็ตามที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

3. การศึกษาแนวทางการลดแรงลมที่กระทำกับอาคารสูงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร

การปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมของอาคารเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดระดับความรุนแรงในการแอ่นตัวของอาคารได้เป็นอย่างดี (Kareem 1999) ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงอิทธิพลของการปรับแต่งมุมของอาคารลักษณะต่างๆ เช่น มุมมน มุมตัด และมุมเว้า ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Kwok (1988), Kwok et al. (1988), Kawai (1998), Choi and Kwon (1999) และ Choi and Kwon (2003) เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบต่ออาคารที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2 โดยที่การศึกษานิธิผลของการปรับแต่งขอบมุมของอาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 1.5 ยังมีไม่มากเท่าที่ควร ทั้งๆที่อาคารดังกล่าวมีพฤติกรรมการรับแรงลมที่แตกต่างไปจากอาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าลักษณะอื่น (Simiu and Scanlan 1996)

เพื่อเป็นการเสริมสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการลดแรงลมที่กระทำกับอาคารโดยการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมของอาคารให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของการปรับแต่งขอบมุมของอาคารที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรง และการสั่นไหวของอาคารมาตรฐาน CAARC ซึ่งมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 1.5 และมีคุณสมบัติต่างๆที่สำคัญตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2 การปรับแต่งมุมอาคารที่เลือกทำการศึกษาในครั้งนี้มีด้วยกันสองลักษณะคือ มุมมน (Roundness corners) และมุมเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Recession corners) โดยมีอัตราส่วนการปรับแต่งมุม (b/B) เท่ากับ 0.05, 0.10 และ 0.15 ดังแสดงในรูปที่ 10 การศึกษาใช้วิธีการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนในอุโมงค์ลมโดยเทคนิค High frequency force balance (HFFB)

model tests เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรง และการสั่นไหวของโครงสร้างอาคาร ภายใต้ทิศทางลม (β) เท่ากับ 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา

การทดสอบได้กระทำในห้องปฏิบัติการอุโมงค์ลมของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แบบจำลองอาคาร ได้จัดทำโดยการย่อขนาดด้วยมาตราส่วน 1:400 และทดสอบในสภาพลมสำหรับพื้นที่เปิดโล่ง (Open terrain) โดยใช้ความเร็วลมเฉลี่ยในการทดสอบเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาทีที่ระดับยอดของอาคาร และเก็บข้อมูลด้วยความเร็ว 1,000 ข้อมูลต่อวินาทีเป็นเวลาทั้งสิ้น 11 นาที งานศึกษาได้ใช้แบบจำลองทั้งสิ้น 7 ตัวอย่าง ได้แก่ อาคารมาตรฐาน CAARC 1 ตัวอย่าง อาคารมาตรฐาน CAARC ที่มีการปรับแต่งขอบมุมอาคารแบบมน 3 ตัวอย่าง และอาคารมาตรฐาน CAARC ที่มีการปรับแต่งขอบมุมของอาคารแบบเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 11 และรูปที่ 12

จากการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนในอุโมงค์ลมพบว่า อาคารที่มีการปรับแต่งมุมมีระดับการสั่นไหวแตกต่างไปจากอาคารรูปทรงปกติ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับแต่งมุมทั้งสองลักษณะมีผลกระทบต่อการพฤติกรรมของการแยกตัวของลมที่เกิดขึ้นบริเวณมุมอาคาร และการรวมกลับของลมที่พัดปะทะด้านข้างอาคาร (Separation and reattachment processes) ซึ่งมีผลต่อค่าแรงลมและการแอ่นตัวของอาคารในทิศทางตามกระแสลม ทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม และทิศทางการบิดของอาคาร นอกจากนี้การปรับแต่งมุมยังมีผลอย่างมากต่อกลไก Vortex shedding process ซึ่งเป็นกลไกที่สำคัญทางด้าน Bluff body aerodynamics ประสิทธิภาพในการลดค่าการแอ่นตัวในแนวราบและแนวบิดของอาคารจะมีค่าสูงสุดเมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับผนังด้านใดด้านหนึ่งของอาคาร รายละเอียดของผลการศึกษาได้แสดงไว้ในงานของ อัครพล ตนสุขชื่น (2546) และ อัครพล ตนสุขชื่นและสุกิตย์ เทพมังกร (2547) ซึ่งได้คัดลอกบางส่วนที่สำคัญมาเพื่อนำเสนอในรายงานฉบับนี้ด้วย

ผลการทดสอบบางส่วนที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความเร็วลมได้แสดงในรูปที่ 13 ถึงรูปที่ 18 และผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของทิศทางการปะทะของลมได้แสดงในรูปที่ 19 ถึงรูปที่ 20

3.1 อิทธิพลของความเร็วลมที่มีต่อการแอ่นตัวและการบิดตัวของอาคารที่มีการปรับแต่งมุม

ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของอาคารในทิศทางตามกระแสลม (Along wind mean displacement) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวในทิศทางตามกระแสลม (Along wind standard deviation displacement) ที่แสดงในรูปที่ 13 ซึ่งให้เห็นว่าอาคารที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมของอาคารมีระดับการแอ่นตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุม โดยที่การลดลงของค่าการ

แอ่นตัวเฉลี่ยของอาคารขึ้นอยู่กับลักษณะและอัตราส่วนการปรับแต่งมุมของอาคารดังสรุปให้เห็นได้ในตารางที่ 1 สาเหตุของการลดลงดังกล่าวเนื่องมาจากแรงลมเฉลี่ยที่กระทำกับอาคารที่มีการปรับแต่งมุมมีขนาดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุมดังแสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคารในทิศทางตามกระแสลมที่มีขนาดลดลง มีสาเหตุเนื่องมาจากขนาดของแรงพลศาสตร์ (Dynamic wind force) ที่กระทำกับอาคารมีขนาดลดลง โดยสามารถพิจารณาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ Power spectral density ของแรงลมพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารในทิศทางตามกระแสลม ที่แสดงในรูปที่ 14

ตารางที่ 1 สัดส่วนของระยะการแอ่นตัวเฉลี่ยของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมเปรียบเทียบกับอาคารปกติ

	re05	re10	Re15	ro05	ro10	ro15
ทิศทางลม = 0 องศา	0.654	0.591	0.727	0.795	0.734	0.578
ทิศทางลม = 90 องศา	0.595	0.794	0.748	0.722	0.589	0.489

ตารางที่ 2 สัดส่วนของค่าแรงลมเฉลี่ยในทิศทางตามกระแสลมที่กระทำกับอาคารที่มีการปรับแต่งมุมเปรียบเทียบกับอาคารปกติ

	re05	re10	re15	ro05	ro10	ro15
ทิศทางลม = 0 องศา	0.754	0.682	0.748	0.806	0.722	0.677
ทิศทางลม = 90 องศา	0.705	0.797	0.748	0.770	0.622	0.597

หมายเหตุ re05, re10, re15 คืออาคารที่มีการปรับแต่งมุมแบบเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยอัตราส่วน 0.05, 0.10, 0.15 ตามลำดับ ส่วน ro05, ro10, ro15 คืออาคารที่มีการปรับแต่งมุมแบบมนด้วยอัตราส่วน 0.05, 0.10, 0.15 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมที่แสดงในรูปที่ 15 พบว่าระดับการแอ่นตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมของอาคารเมื่อการปะทะของลมทำมุม 0 และ 90 องศา มีลักษณะแตกต่างกัน การแอ่นตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมเมื่อการปะทะของลมทำมุม 0 องศา มีค่าลดลงสำหรับความเร็วลมต่ำๆ แต่เมื่อความเร็วลมสูงขึ้น อาคารที่มีการปรับแต่งมุมบางอาคารมีค่าการแอ่นตัวสูงกว่าอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุม ในทางตรงกันข้ามเมื่อทิศทางลมทำมุม 90 องศาการปรับแต่งมุมไม่มีผลต่อการแอ่นตัวของอาคารสำหรับความเร็วลมต่ำๆ แต่เมื่อความเร็วลมสูงขึ้นอาคารที่มีการปรับแต่งมุมมีค่าการแอ่นตัวลดลง ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมจะมี

แนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากแรงลมพลศาสตร์ที่กระทำต่ออาคารมีขนาดลดลง ข้อสรุปนี้สามารถพิสูจน์ได้โดยการพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟ Power spectral density ของแรงที่กระทำต่ออาคารในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม ตามที่แสดงในรูปที่ 16

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการบิดตัวของอาคาร (Standard deviation angle of twist) ที่แสดงในรูปที่ 17 แสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งมุมของอาคารมีผลต่อค่าการบิดตัวของอาคารสำหรับทั้งทิศทางลมเท่ากับ 0 องศาและ 90 องศา โดยที่การปรับแต่งมุมแบบเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีประสิทธิภาพในการลดค่าองศาการบิดตัวของอาคารได้ดีกว่าการปรับแต่งมุมแบบโค้งมน เนื่องจากแรงพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารมีขนาดลดลงเมื่อเทียบกับอาคารปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟของ Power spectral density ของแรงที่กระทำในทิศทางการบิดของอาคาร ดังตัวอย่างของทิศทางลมเท่ากับ 90 องศา ที่แสดงในรูปที่ 18

จากตัวอย่างของผลการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้น สามารถชี้ให้เห็นว่าการปรับแต่งมุมของอาคารสามารถลดระดับการแอ่นตัวของอาคารได้ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับแต่งมุมมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการแยกตัวของลมที่เกิดขึ้นบริเวณมุมอาคาร การพัดผ่านและวกกลับของลมด้านข้างของอาคาร ตลอดจนความปั่นป่วนของลมที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของอาคาร โดยที่พฤติกรรมการแยกตัวของลมบริเวณมุมอาคารและการพัดของลมที่ปั่นป่วนบริเวณด้านหลังอาคารเป็นกลไกสำคัญสำหรับการสั่นไหวในทิศทางตามกระแสลม ส่วนการแยกตัวบริเวณมุมอาคาร และการพัดผ่านด้านข้างของอาคารเป็นกลไกสำคัญสำหรับการสั่นไหวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม และในทิศทางการบิด

3.2 อิทธิพลของทิศทางลมที่มีต่อการแอ่นตัวและการบิดของอาคารที่มีการปรับแต่งมุม

การแอ่นตัวเฉลี่ยในทิศทางตามแกน x และ แกน y ของอาคารสำหรับค่าความเร็วไร้หน่วย (Reduced wind velocity) เท่ากับ 4 ที่แสดงในรูปที่ 19 ชี้ให้เห็นว่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุมอาคารในทุกทิศทางการปะทะของลมตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการลดระดับการแอ่นตัวของอาคารเนื่องจากการปรับแต่งมุมจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อทิศทางการปะทะของลมกระทำตั้งฉากกับผนังด้านใดด้านหนึ่งของอาคาร ทั้งนี้เนื่องจากทิศทางการปะทะของลมที่มียิ่งมากขึ้น จะส่งผลให้รูปแบบการแยกตัวของลมที่เกิดขึ้นบริเวณมุมของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมมีความใกล้เคียงกับการแยกตัวของลมที่เกิดขึ้นบริเวณมุมของอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุม

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวในแนวแกน x และ y และค่าการบิดตัวของอาคารสำหรับค่าความเร็วลมไร้หน่วยเท่ากับ 4 ที่แสดงในรูปที่ 20 แสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งมุมของอาคารสามารถลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการแอ่นตัวและการบิดตัวของอาคารได้ดีที่สุดเมื่อลมกระทำในทิศทางตั้งฉากกับผนังอาคาร และเมื่อทิศทางการปะทะของลมทำมุมมากขึ้น ประสิทธิภาพในการลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคารจะมีแนวโน้มที่ลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากรูปแบบการแยกตัวของลมที่เกิดขึ้นบริเวณมุมของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมมีความใกล้เคียงกับการแยกตัวของลมที่เกิดขึ้นบริเวณมุมของอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุม ซึ่งเป็นสาเหตุเดียวกับการฉีกในของการแอ่นตัวเฉลี่ย

4. การศึกษาแรงลมที่กระทำกับอาคารคู่แฝดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และผลกระทบที่เกิดจากการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร

แรงลมที่กระทำกับโครงสร้างอาคารสูงที่มีอาคารข้างเคียงขนาดใหญ่ล้อมรอบ อาทิเช่น อาคารที่ตั้งอยู่ในบริเวณศูนย์กลางเมืองขนาดใหญ่ที่มีอาคารสูงตั้งอยู่อย่างหนาแน่น หรือในกรณีของอาคารคู่แฝด เป็นต้น อาจจะมีค่าแตกต่างไปอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ตั้งอยู่โดดเดี่ยวเพียงอาคารเดียว ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของอาคารข้างเคียงที่เรียกว่า Interference effects ซึ่งมักจะมีสาเหตุมาจากระลอกลมที่เกิดขึ้นจากอาคารข้างเคียง พัดเข้ามาปะทะกับอาคารหลัก ตัวอย่างของระลอกลมที่ม้วนตัวสลับไปสลับมา (Vortex shedding wakes) ซึ่งเกิดขึ้นจากโครงสร้างที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและวงกลมได้แสดงไว้ในรูปที่ 21

งานวิจัยของ Saunders and Melbourne (1980), Bailey and Kwok (1985), Khanduri et al. (1998) และ Thepmongkorn et al. (2002) แสดงให้เห็นว่าขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของอาคาร ความเร็วลม ทิศทางลม สภาพภูมิประเทศโดยรอบอาคาร ตลอดจนระยะห่างระหว่างอาคาร ล้วนแล้วแต่มีผลต่อลักษณะของลมที่พัดผ่านโดยรอบอาคาร ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างและการสั่นไหวของอาคาร ในกรณีของอาคารคู่แฝดที่มีรูปร่างอาคารเหมือนกัน มีความสูงของอาคารเท่ากันและอยู่ใกล้กันมาก ค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารจะมีค่าแตกต่างไปจากกรณีของอาคารเดี่ยว (Isolated building) ดังนั้นการออกแบบอาคารคู่แฝดโดยใช้ข้อมูลของแรงลมสำหรับอาคารเดี่ยวจึงอาจให้ค่าที่ไม่ปลอดภัยในบางกรณี

งานวิจัยนี้จึงได้ขยายขอบเขตของการศึกษา โดยทำการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของอาคารในอุโมงค์ลมเพื่อศึกษารายละเอียดแรงลมและการตอบสนองของโครงสร้างอาคารคู่แฝดที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square) โดยเน้นการศึกษาเพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่าง

อาคารและการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมของอาคารที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะคือ มุมเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Recession) มุมตัด (Cut) และมุมโค้งมน (Roundness) โดยมีขนาดของการปรับแต่งมุมเท่ากับ 0.20 เท่าของความกว้างอาคาร (D) ดังแสดงในรูปที่ 22 รายละเอียดของการศึกษาได้แสดงไว้ในงานของ ชาญณรงค์ พุสกุล (2547) และ ชาญณรงค์ พุสกุล และ สุจิตต์ เทพมังกร (2548) ซึ่งได้นำผลการศึกษางานส่วนมานำเสนอในรายงานฉบับนี้

อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้เป็นพื้นฐานของการศึกษาในครั้งนี้เป็นอาคารที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 30x30 เมตร มีความสูง (H) เท่ากับ 180 เมตร (อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 6:1:1) ความหนาแน่นของอาคารเท่ากับ 160 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อาคารดังกล่าวมีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 0.2 Hz และค่าการสลายพลังงาน (Damping) เท่ากับ 0.01 สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวราบทั้งสองทิศทาง และมีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 0.36 Hz และค่าการสลายพลังงานเท่ากับ 0.014 สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวการบิดของอาคาร ระยะห่างระหว่างอาคารคู่แฝดที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 เท่าของความกว้างอาคารดังแสดงในรูปที่ 23 โดยเน้นการศึกษาในช่วงระยะห่างที่ใกล้เคียงกันมากๆ เพื่อประโยชน์ในการออกแบบอาคารคู่แฝดในสภาพความเป็นจริง แบบจำลองย่อส่วนของอาคารในทุกกรณีได้รับการจัดทำโดยใช้มาตราส่วน 1:400

การทดสอบครั้งนี้ได้กระทำในอุโมงค์ลมของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขนาดหน้าตัด 1.60x1.60 เมตร ภายในอุโมงค์ลมได้ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปรับสภาพลม เพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงกับลมตามธรรมชาติที่พัดผ่านภูมิประเทศแบบเปิดโล่ง อุปกรณ์ที่สำคัญได้แก่ Spire, Grid และ Roughness block ดังแสดงในรูปที่ 24 ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกันกับที่ใช้ในการจำลองลมธรรมชาติสำหรับการศึกษาในหัวข้อที่ 2 และ 3

ลักษณะของลมที่จำลองในอุโมงค์ลม ได้ถูกตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดลมที่เรียกว่า Hot wire anemometer และนำผลลัพธ์ในรูปของค่าความเร็วลมเฉลี่ย (Mean wind speed) ค่าความปั่นป่วนของลม (Turbulence intensity) และความถี่ของลมที่ปั่นป่วน (Longitudinal velocity spectrum) มาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ควรจะเป็นสำหรับสภาพภูมิประเทศแบบเปิดโล่ง (Open Terrain) ตามข้อกำหนดของ ASCE (1999) ดังแสดงในรูปที่ 25 ลักษณะของลมจำลองนี้เป็นลักษณะเดียวกันกับที่ใช้ศึกษาในหัวข้อที่ 2 และ 3

ตัวอย่างการติดตั้งแบบจำลองอาคารคู่แฝดในอุโมงค์ลมได้แสดงไว้ในรูปที่ 26 การทดสอบแบบจำลองในแต่ละครั้งได้กระทำที่ความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที ที่ระดับยอดอาคาร และเก็บข้อมูลด้วยความเร็ว 1000 ข้อมูลต่อวินาที เป็นจำนวนทั้งสิ้น 120,000 ข้อมูล (120 วินาที)

โดยพิจารณาทิศทางลม (β) ที่กระทำต่ออาคารเท่ากับ 0 องศา วิธีการวัดแรงและการประมาณค่าการสั่นไหวของอาคารเป็นไปตามหลักการของ High frequency force balance (HFFB) model tests ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 1

ค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารในแต่ละกรณีได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนของแรงลมที่เรียกว่า Interference factors (IF) ตามสมการที่ 13

$$IF = \frac{\text{แรงที่กระทำบนอาคารหลัก เมื่อมีอาคารข้างเคียง}}{\text{แรงที่กระทำบนอาคารหลักเมื่อไม่มีอาคารข้างเคียง}} \tag{13}$$

ค่า IF สำหรับอาคารที่มีอาคารข้างเคียงตั้งอยู่ในตำแหน่งต่างๆ ได้ถูกนำมาแสดงผลในรูปของ Contours ที่เรียกว่า Iso-buffets ซึ่งเป็นแผนภาพที่ได้จากการลากเส้นเชื่อมโยงค่า IF ที่มีค่าเท่ากัน ซึ่งเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของอาคารข้างเคียง ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 27 ถึง รูปที่ 32 แผนภาพ Iso-buffets ดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบอาคารที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากอาคารข้างเคียงได้

ค่า IF ที่ไม่เท่ากัน มีสาเหตุมาจากอาคารข้างเคียงที่ทำให้ความเร็วลม ความปั่นป่วนของลม ตลอดจนการแยกตัวและม้วนตัวสลับไปสลับมาเป็นระลอกของลม ที่เรียกว่า Vortex shedding wakes เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าแรงที่กระทำกับอาคาร ซึ่งอิทธิพลดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งที่ตั้งของอาคารข้างเคียง

ผลการเปรียบเทียบค่า IF ของแรงในแนวแกน x และ y ในรูปที่ 27 (ก) และรูปที่ 28 (ก) สำหรับอาคารที่มีรูปร่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส พบว่าโดยรวมแล้วค่าแรงที่ตรวจวัดได้จากการศึกษาในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาอื่นเป็นอย่างดี ความแตกต่างระหว่างผลการศึกษาที่ได้ในครั้งนี้กับงานวิจัยอื่น เป็นผลมาจากความแตกต่างของวิธีการที่ใช้ในการทดสอบ และคุณสมบัติของอาคารที่ใช้ในงานศึกษาแต่ละงาน ดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติที่ใช้ในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติ	Bailey and Kwok (1985)	Saunders and Melbourne (1980)	Khanduri et al. (2000)	งานวิจัยนี้
อาคาร	216mx24mx24m (9:1:1)	150mx37mx37m (4:1:1)	80mx20mx20m (4:1:1)	180mx30mx30m (6:1:1)
สภาพพื้นที่	Open terrain	Open terrain	Open terrain	Open terrain
ความเร็วลมไร้หน่วย	6	6	-	6
วิธีการวัดแรง	Aeroelastic models	Aeroelastic models	Rigid models	Rigid models
ค่าการสลายพลังงาน	1%	1%	1%	1%

ในกรณีที่ทิศทางการปะทะของลม (β) เท่ากับ 0 องศา ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่กระทำกับอาคารตามแนวแกน x ($\tilde{C}_{Fx}$) ตามแนวแกน y ($\tilde{C}_{Fy}$) และในแนวบิดรอบแกน z ($\tilde{C}_m$) ที่ฐานของอาคารสำหรับความเร็วลมไร้หน่วย ($\bar{U}_H / (n_{x-x} D_y)$) เท่ากับ 6 ได้นำเสนอไว้ในรูปของแผนภาพ Iso-buffets ที่แสดงในรูปที่ 27 ถึง รูปที่ 29 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าตำแหน่งที่ตั้งของอาคารข้างเคียงที่มีผลมากที่สุดอยู่บริเวณเหนือลมในแนวทะแยงทำมุมกับแกน x ประมาณ 20 ถึง 45 องศา ซึ่งสามารถทำให้แรงพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเพิ่มขึ้นได้ถึง 80% นอกจากนี้ยังพบว่าความรุนแรงที่เกิดเนื่องจากอาคารข้างเคียงยังขึ้นอยู่กับลักษณะของมุมอาคารด้วย ดังนั้นเพื่อให้เห็นอิทธิพลของอาคารข้างเคียงและรูปร่างบริเวณมุมอาคารได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ค่าแรงพลศาสตร์ที่วัดได้จากอาคารที่มีการปรับแต่งมุมในแต่ละลักษณะ จึงถูกนำมาคำนวณอีกครั้งหนึ่งเพื่อหาค่า IF โดยเปรียบเทียบกับอาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตามสมการที่ 14

$$IF = \frac{\text{แรงที่กระทำบนอาคารหลักที่มีการปรับแต่งมุม เมื่อมีอาคารข้างเคียง}}{\text{แรงที่กระทำบนอาคารหลักรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก เมื่อมีอาคารข้างเคียง}}$$

(14)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 14 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 30 ถึงรูปที่ 32 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การปรับแต่งมุมแบบเว้าและแบบโค้งมน มีผลในการลดค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารคู่แฝด ได้ดีกว่าการปรับแต่งมุมแบบตัด โดยสามารถลดแรงลมได้ถึง 50% ในบางตำแหน่งของอาคารข้างเคียง

5. แนวทางการพัฒนาวิธี High frequency force balance เพื่อศึกษาอาคารที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวดิ่งพร้อมกัน

ในปัจจุบันได้มีความพยายามอย่างต่อเนื่องที่จะพัฒนาหลักการวิเคราะห์โดยวิธี HFFB ให้สามารถใช้ในการคำนวณหาค่าแรงที่กระทำกับโครงสร้างและการสั่นไหวของอาคารที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวดิ่งพร้อมกัน (Buildings with 3-D complex mode shapes) ซึ่งพบเห็นได้มากขึ้นในกรณีของอาคารสูงสมัยใหม่ที่มีรูปทรงทางสถาปัตยกรรมที่ซับซ้อน ตลอดจนมีลักษณะของระบบโครงสร้างที่แตกต่างไปจากในอดีต

ตัวอย่างงานวิจัยที่สำคัญทั้งในอดีตและในปัจจุบัน ได้แก่ Steckley (1989), Yip (1995), Yip and Flay (1995), Xie and Irwin (1998), Xie and Irwin (2001), Holmes et al. (2003) และ Chen and Kareem (2005) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพัฒนาการของเทคนิค HFFB นี้ งานวิจัยต่อเนื่องซึ่งจะได้จัดทำต่อไปเพื่อทำให้การวิเคราะห์หาค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ได้แสดงไว้ในรูปของแผนภูมิตามรูปที่ 33 ทั้งนี้คาดว่าจะใช้เวลาในการพัฒนาอีกประมาณหนึ่งถึงสองปี และจะต้องมีการทดสอบในอุโมงค์ลมเพิ่มเติมด้วย

เอกสารอ้างอิง

ชาญณรงค์ ฟุสกุล (2547), พฤติกรรมการรับแรงลมและการตอบสนองของอาคารคู่แฝดที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร, วิทยานิพนธ์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, ISBN:974-7990-73-3.

ชาญณรงค์ ฟุสกุล และ สุกิจทย์ เทพมังกร (2548), แรงลมที่กระทำกับอาคารคู่แฝดซึ่งมีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, ชลบุรี, พฤษภาคม, เล่มที่ 1, หน้า STR-192 ถึง STR-197.

ขงยุทธ กฤตยาจรโลง สุรัฐชล ช่วยทุกข์ นฤมล จตุพงษ์ และเอกกมล สุพรมอินทร์ (2546), การประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารสูงโดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม, ปรินูญานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

สุกิจทย์ เทพมังกร (2547), การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี High frequency force balance เพื่อการประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคาร, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, เพชรบุรี, พฤษภาคม, เล่มที่ 1, หน้า STR-120 ถึง STR-125.

อักรพล ดนสุขชื่น (2546), การศึกษาพฤติกรรมการรับแรง และการตอบสนองของอาคารสูงที่มีการปรับแต่งมุมอาคาร โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม ด้วยเทคนิค High Frequency Force Balance, วิทยานิพนธ์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, ISBN:974-7990-08-3.

อักรพล ดนสุขชื่น และ สุกิจทย์ เทพมังกร (2547), ผลกระทบของรูปร่างบริเวณมุมอาคารที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงลม และการตอบสนองของอาคาร, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, เพชรบุรี, พฤษภาคม, เล่มที่ 1, หน้า STR-252 ถึง STR-257.

American Society of Civil Engineers, Task Committee on Wind Tunnel Testing of Buildings and Structures, Aerodynamics Committee, Aerospace Division (1999), Wind tunnel studies of buildings and structures, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 67.

Bailey, P.A. and Kwok, K.C.S. (1985), Interference excitation of twin tall buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 21, pp. 323-338.

Chen, X. and Kareem, A. (2005), Coupled dynamic analysis and equivalent static wind loads on buildings with three-dimensional modes, Journal of Structural Engineering, ASCE, July, pp. 1071-1082.

Choi, C. and Kwon, D. (1999), Aerodynamic stability for square cylinder with various corner cuts, Wind and Structures, Vol. 2, No. 3, Page 173 – 187.

- Choi, C. and Kwon, D. (2003), Effect of corner cuts and angles of attack on the Strouhal number of rectangular cylinders, *Wind and Structures*, Vol. 6, No. 2, Page 127 – 140.
- Clough, R.W. and Penzien, J. (1993), *Dynamics of structures*, 2nd Edition, McGraw-Hill Inc.
- Dobrodzicki, G.A. (1972), Flow visualization in the national aeronautical establishment's water tunnel, Aeronautical report No. LR-557, National research council of Canada, Ottawa.
- Engineering Sciences Data Unit (1974), Characteristics of atmospheric turbulence near the ground, Part II: Single point data for strong winds (neutral atmosphere), Data Item ESDU 74031.
- Holmes, J., Rofail, A. and Aurelius (2003), High frequency base balance methodologies for tall buildings with torsional and coupled resonant modes, *Proceedings of 11th International Conference on Wind Engineering*, LUBBOCK, Texas, U.S.A., June, pp. 2381-2388.
- Kareem, A., Kijewski, T. and Tamura, Y. (1999), Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications, *Wind and Structures*, Vol. 2, No. 3, Page 210 – 205.
- Kawai, H. (1998), Effect of corner modifications on aeroelastic instabilities of tall building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74 - 76, Page 719 - 729.
- Khanduri, A.C., Stathopoulos, T. and Be'dard, C. (1998), Wind-induced interference effects on buildings - a review of the state-of-the-art, *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 7, pp. 617-630.
- Khanduri, A.C., Stathopoulos, T. and Be'dard, C. (2000), Generalization of wind-induced interference effects for two buildings, *Wind and Structures*, Vol. 3, No 4, pp. 255-266.
- Kwok, K.C.S. (1988), Effect of building shape on wind-induced response of tall building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 28, pp. 381 – 390.
- Kwok, K.C.S., Wilhelm, P.A., Wilkie, B.G. (1988), Effect of edge configuration on wind-induced response of tall buildings, *Engineering Structures*, Vol. 10, pp. 135 – 140.
- Melbourne, W.H. (1980), Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 6, pp. 73-88.
- Nakamura, Y. (1993), Bluff-Body aerodynamics and turbulence, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 49, pp. 65-78.
- Saunders, J.W. and Melbourne, W.H. (1980), Buffeting effects of upstream buildings, *Proc. 5th International Conference on Wind Engineering*, Fort Collins, USA, pp. 593-606.
- Simui, E. and Scanlan, R.H. (1996), *Wind effects on structures*, 3rd Edition, John Willy & Sons, New York.

- Steckley, A. (1989), Motion-induced wind forces on chimneys and tall buildings, Ph.D. thesis, University of Western Ontario, Canada.
- Thepmongkorn, S., Kwok, K.C.S. and Lakshmanan, N. (1999), A two- degree-of-freedom base hinged aeroelastic (BHA) model for response predictions, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 83, pp. 171 – 181.
- Thepmongkorn, S. and Kwok, K.C.S. (1999), Load combination and response combination of wind-excited tall buildings and the effects of structural eccentricity, *Proceedings of 10th International Conference on Wind Engineering*, Copenhagen, Denmark, pp. 713-720.
- Thepmongkorn, S., Wood, G.S., Hitchcock, P.A. and Kwok, K.C.S. (2000), High frequency force balance model tests, unpublished paper.
- Thepmongkorn, S., Wood, G.S. and Kwok, K.C.S. (2002), Interference effects on wind-induced coupled motion of a tall building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, pp. 1807-1815.
- Tschanz, T. (1982), Measurement of total dynamic loads using elastic models with high natural frequencies, *Proceedings of International Workshop on Wind Tunnel Modelling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications*, Gaithersburg, USA, pp. 296-312.
- Tschanz, T. and Davenport, A.G. (1983), The base balance technique for the determination of dynamic wind loads, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 13, pp. 429-439.
- Xie, J. and Irwin, P.A. (1998), Application of the force balance technique to a building complex, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 77&78, pp. 579-590.
- Xie, J. and Irwin, P.A. (2001), Wind-induced response of a twin-tower structure, *Wind and Structures*, Vol. 4, No. 6, pp. 459-504.
- Xu, Y.L. (1991), Vibration control of wind-excited tall/slender structures, Ph.D. thesis, School of Civil and Mining Engineering, The University of Sydney, Australia.
- Yip, D.Y.N. (1995), Wind-induced dynamic response of tall buildings with coupled 3D modes of vibration, Ph.D. thesis, The University of Auckland, New Zealand.
- Yip, D.Y.N. and Flay, R.G.J. (1995), A new force balance data analysis method for wind response predictions of tall buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 54/55, pp. 457-471.

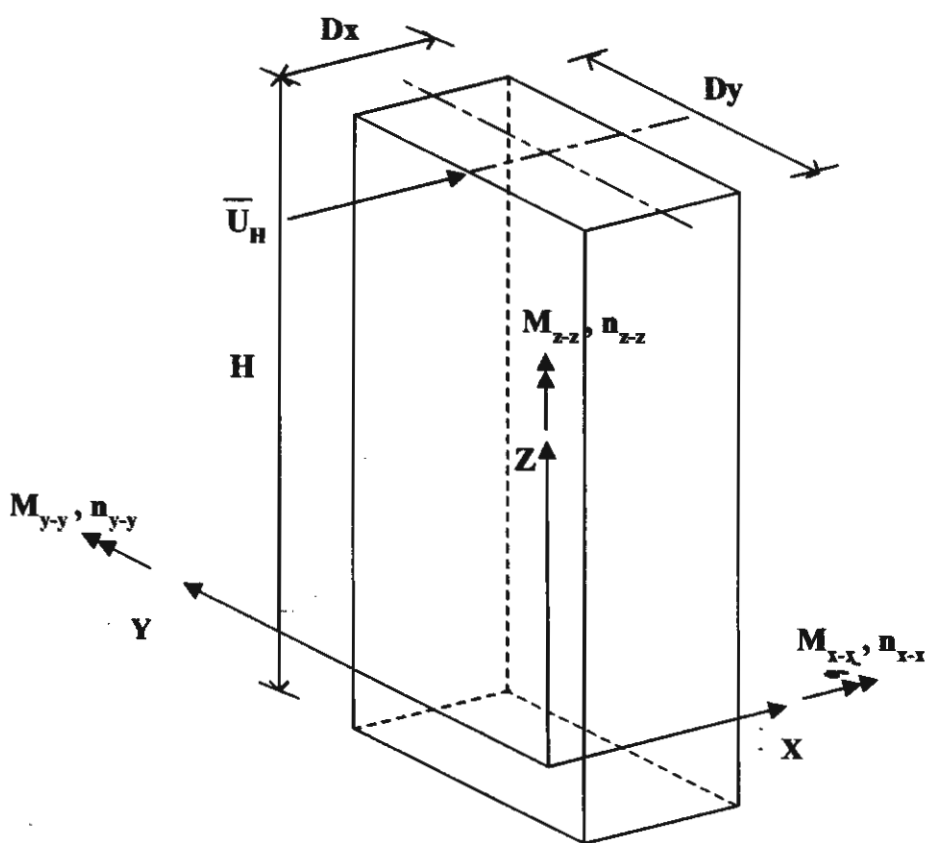
Zhang, W.J., Xu, Y.L. and Kwok, K.C.S. (1993), Torsional vibration and stability of wind-excited tall buildings with eccentricity, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 50, pp. 299-308.



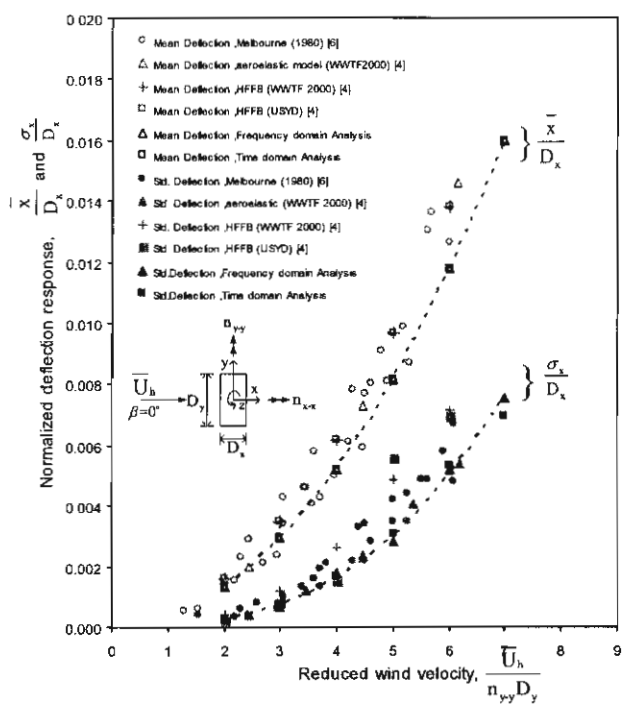
รูปที่ 1 เครื่องมือวัดแรงและโมเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



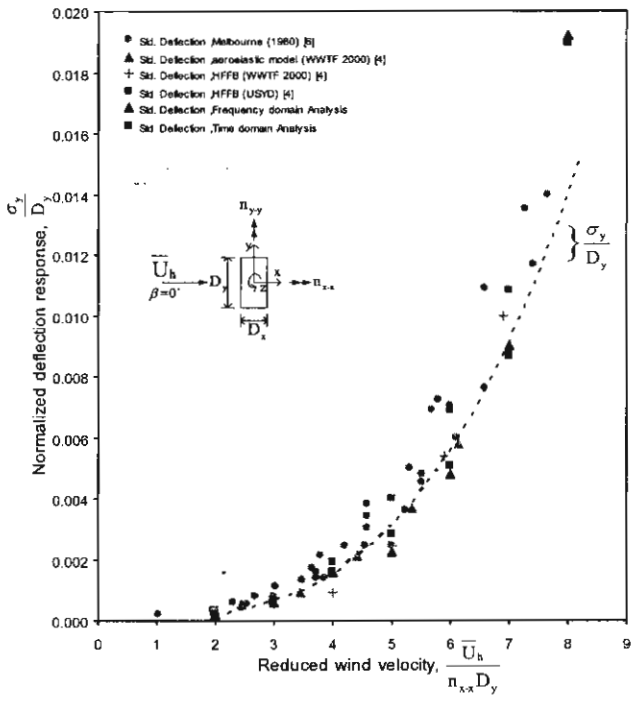
รูปที่ 2 ตัวอย่างแบบจำลองย่อส่วนของอาคารที่ใช้สำหรับการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม



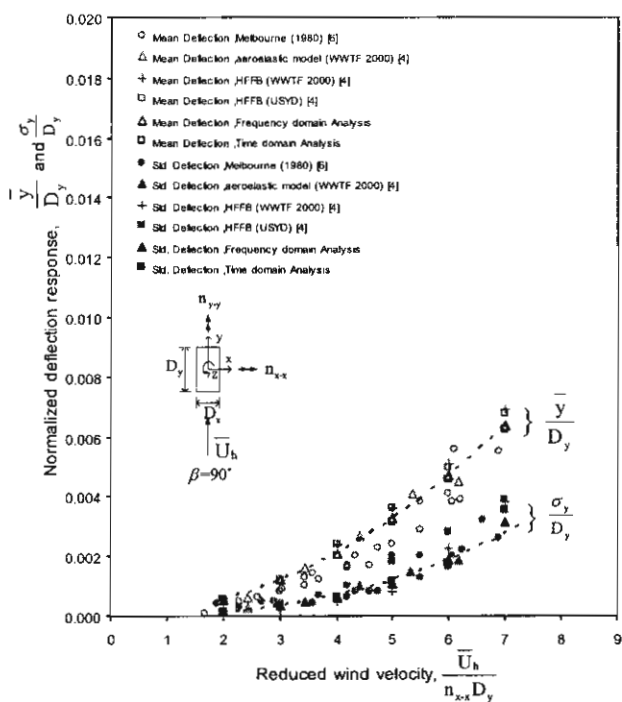
รูปที่ 3 รายละเอียดของอาคารมาตรฐาน CAARC และสัญลักษณ์ที่สำคัญ



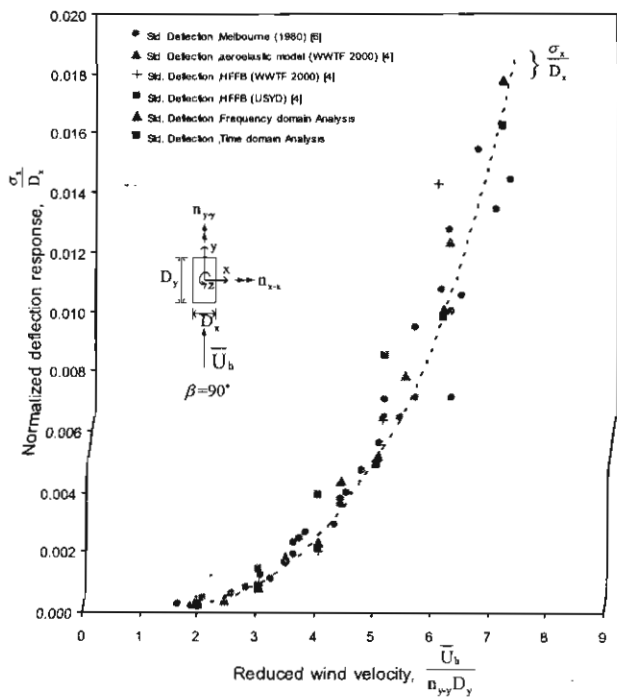
รูปที่ 4 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านยาวของอาคาร



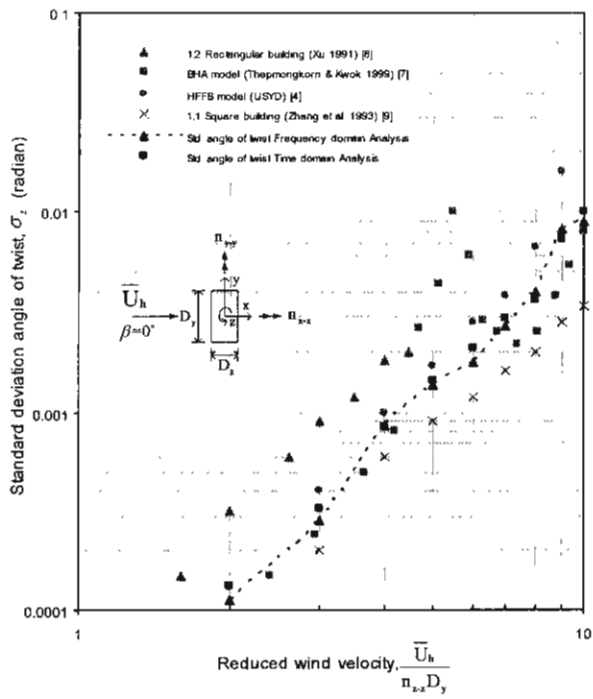
รูปที่ 5 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวตั้งฉากกับทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านยาวของอาคาร



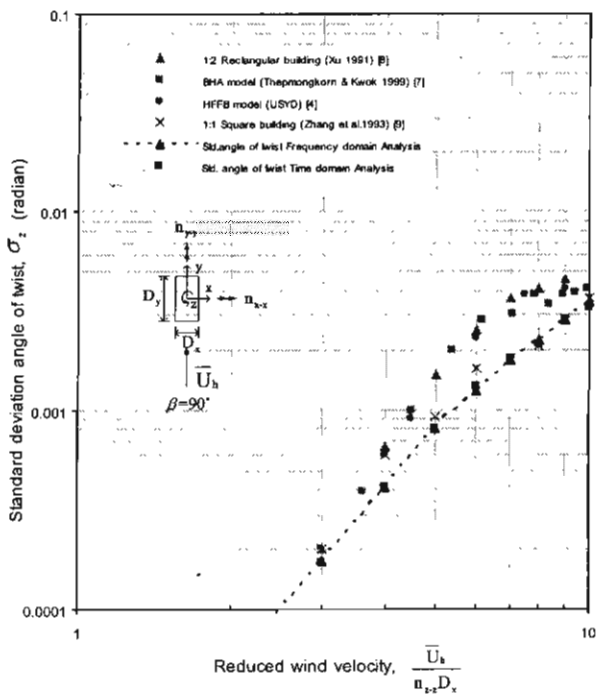
รูปที่ 6 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคาร



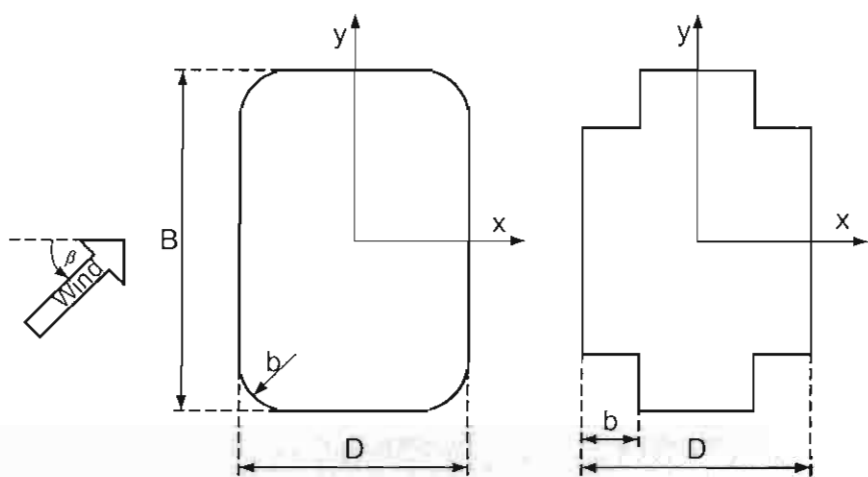
รูปที่ 7 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวตั้งฉากกับทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคาร



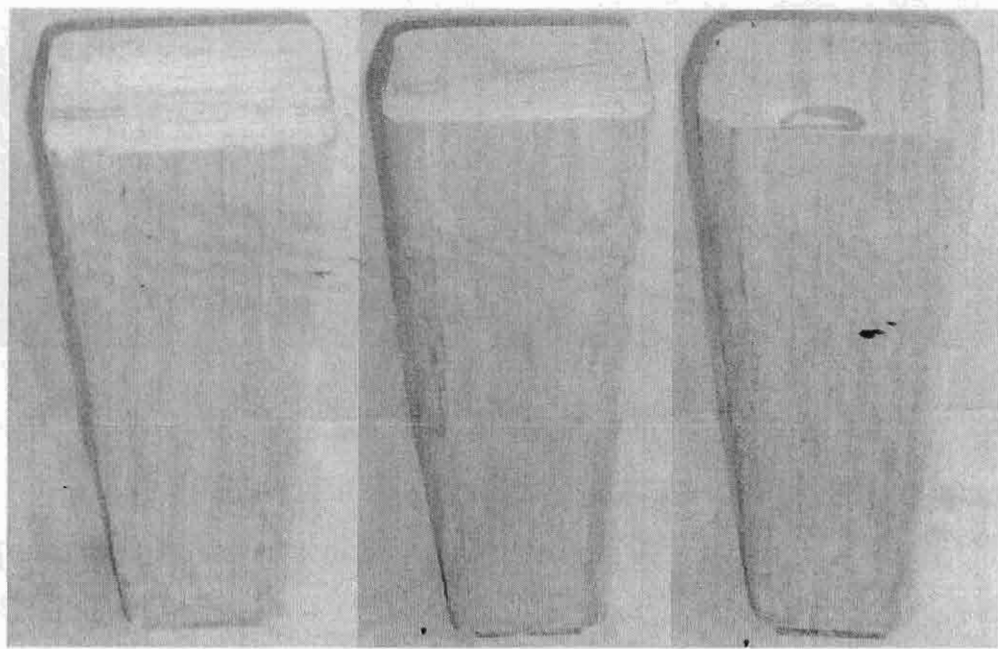
รูปที่ 8 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวนอน สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านยาวของอาคาร



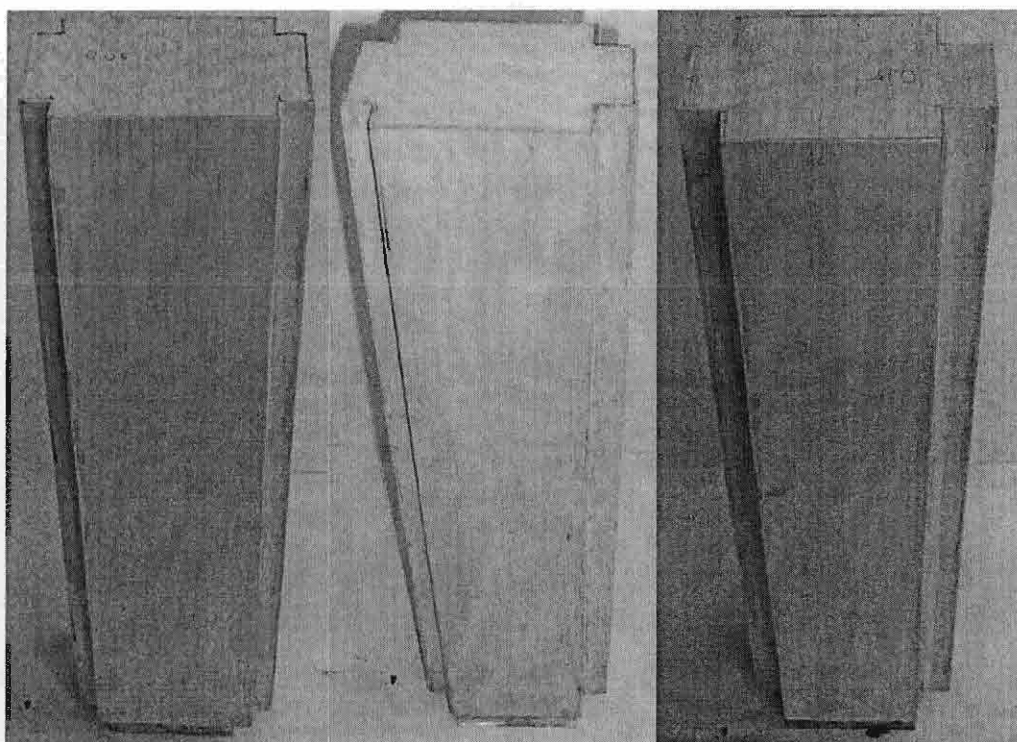
รูปที่ 9 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวนอน สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคาร



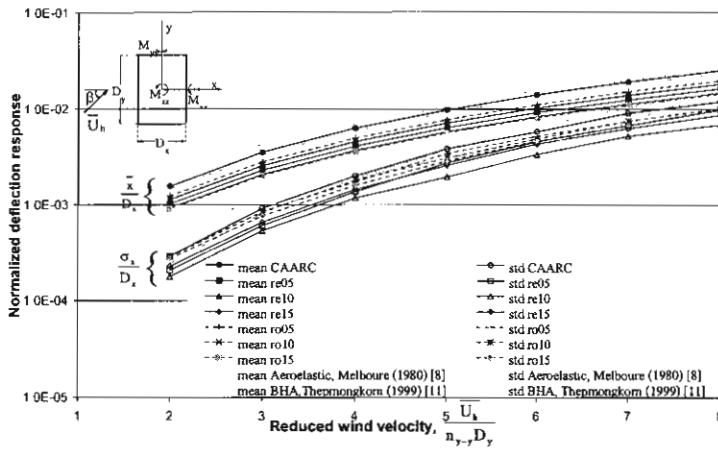
รูปที่ 10 รูปหน้าตัดของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมลักษณะ มุมโค้งมน (Roundness corners) และ มุมเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Recession corners)



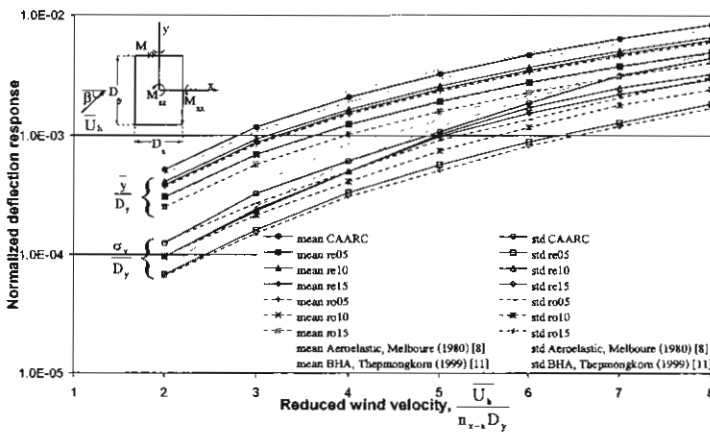
รูปที่ 11 แบบจำลองอาคารมาตรฐาน CAARC ที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคารแบบมุมโค้งมนด้วยอัตราส่วน (ก) 0.05 (ข) 0.10 (ค) 0.15



รูปที่ 12 แบบจำลองอาคารมาตรฐาน CAARC ที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคารแบบมนเว้า
เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยอัตราส่วน (ก) 0.05 (ข) 0.10 (ค) 0.15

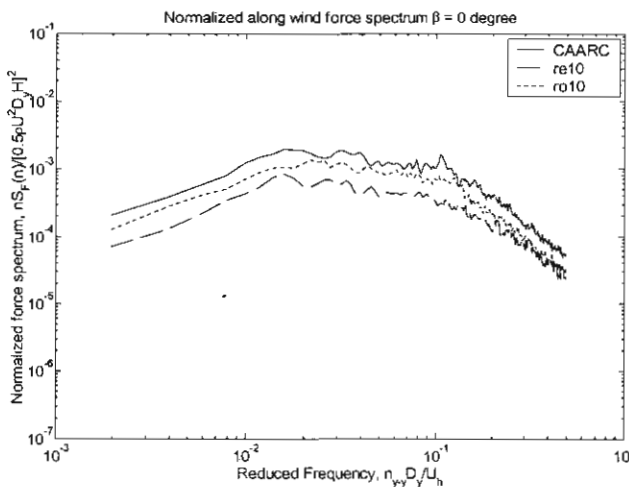


(ก)

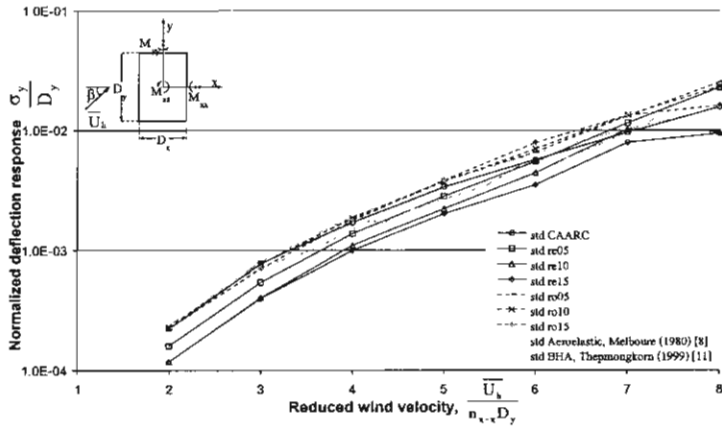


(ข)

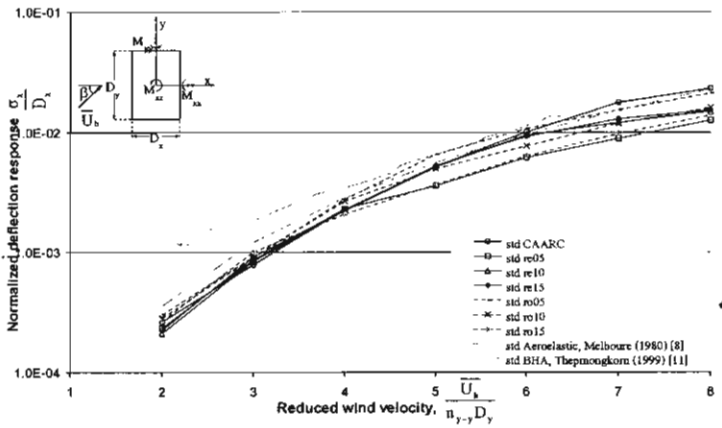
รูปที่ 13 ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคารใน
แนวทิศทางลม (ก) $\beta = 0$ องศา (ข) $\beta = 90$ องศา



รูปที่ 14 Power spectral density ของแรงลมที่กระทำกับอาคารในทิศทางตามกระแสลม
(Normalized along wind force spectrum)

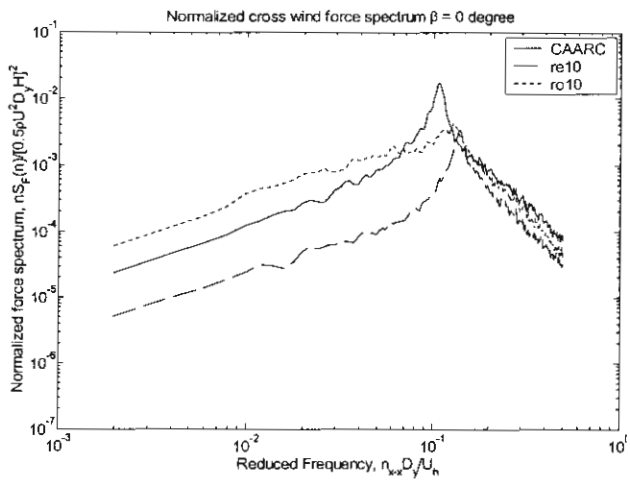


(ก)

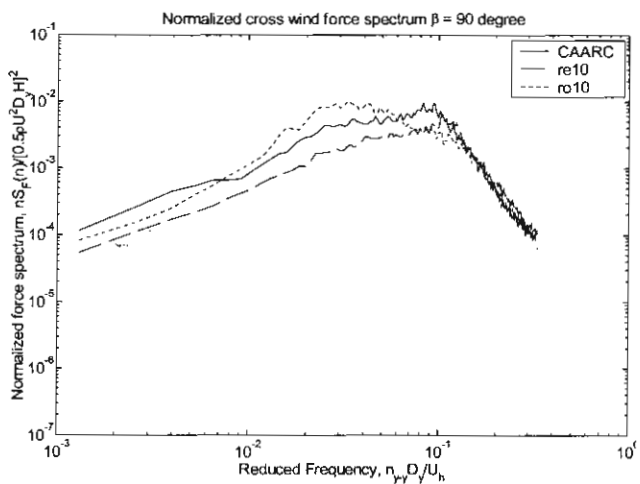


(ข)

รูปที่ 15 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคารที่ระดับยอดอาคารในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม (ก) $\beta = 0$ องศา (ข) $\beta = 90$ องศา

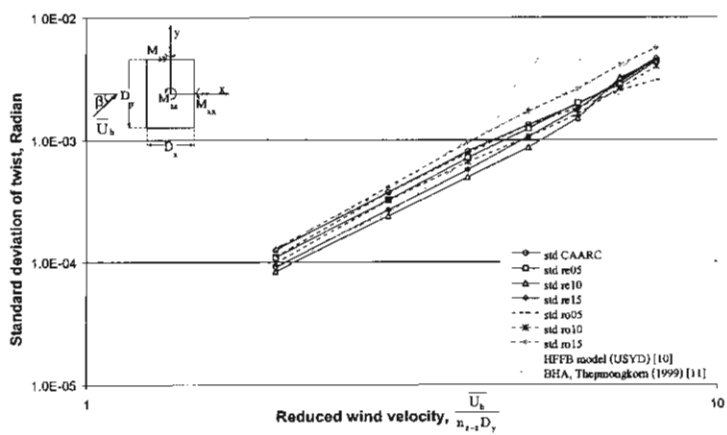


(ก)

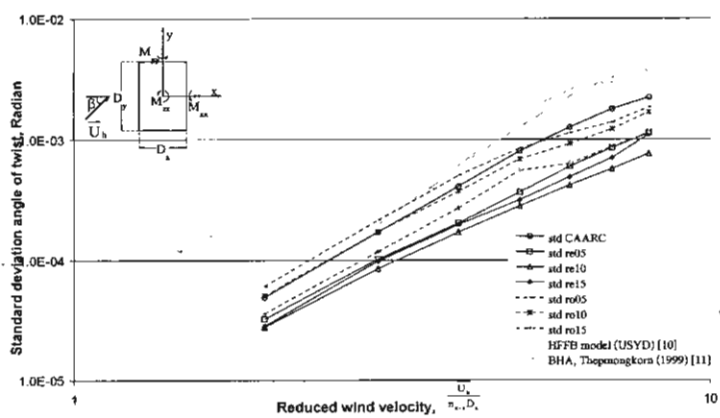


(ข)

รูปที่ 16 Power spectral density ของแรงลมที่กระทำกับอาคารในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม
(Normalized cross wind force spectrum) (ก) $\beta = 0$ องศา (ข) $\beta = 90$ องศา

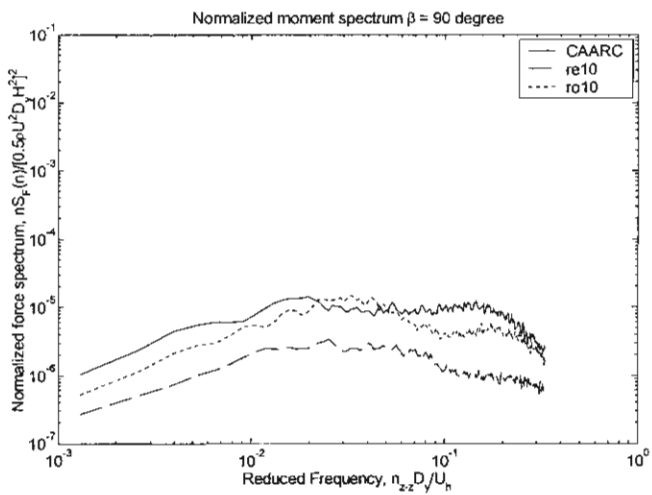


(ก)

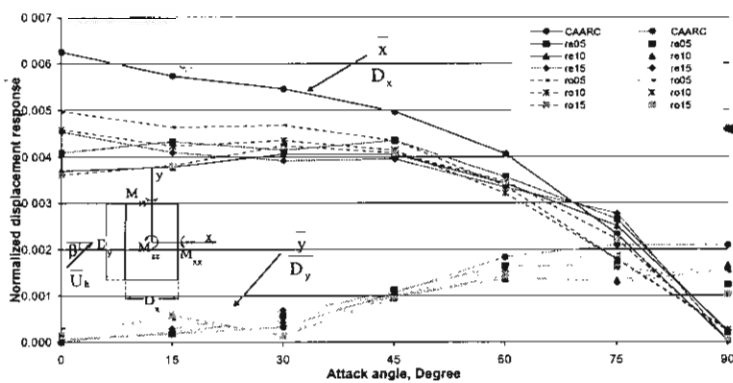


(ข)

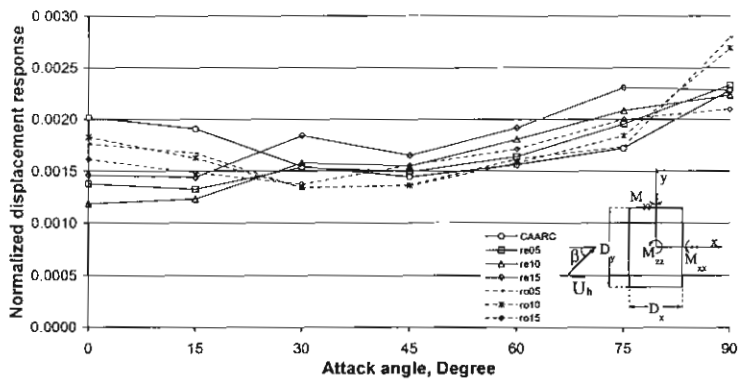
รูปที่ 17 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการบิดตัวของอาคาร (ก) $\beta = 0$ องศา (ข) $\beta = 90$ องศา



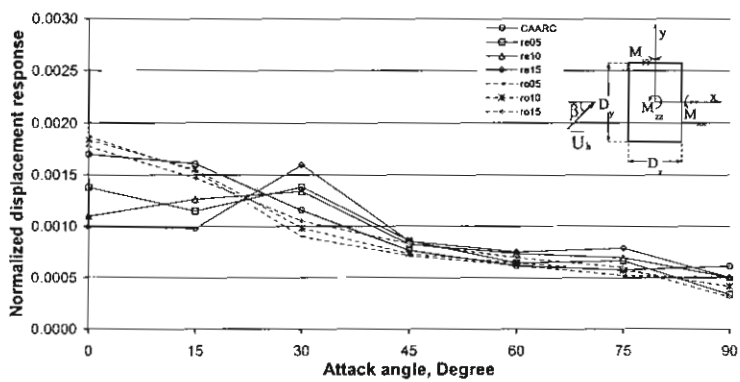
รูปที่ 18 Power spectral density ของแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างในทิศทางกรปิดตัว (Normalized twisting moment spectrum) เมื่อลมปะทะทำมุม 90 องศาับอาคาร



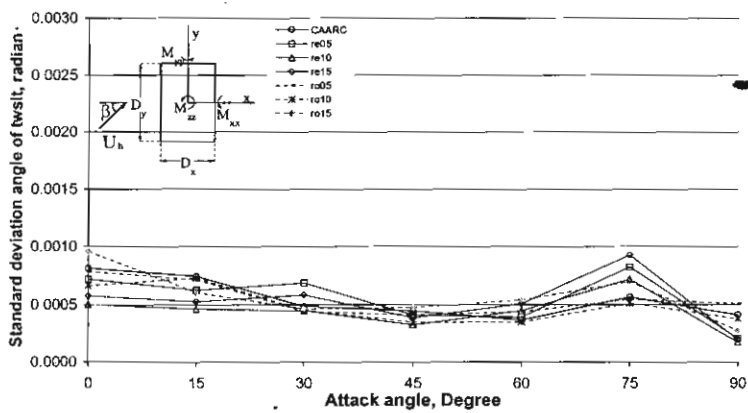
รูปที่ 19 การแอ่นตัวเฉลี่ยในแนวแกน x และ y ของอาคารเมื่อทิศทางลมเท่ากับ 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา



(ก)

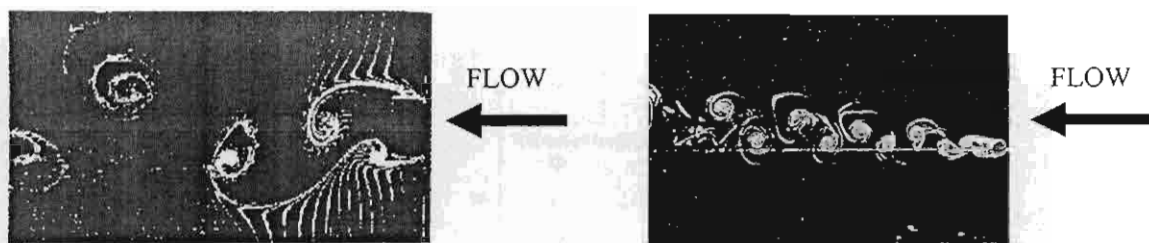


(ข)

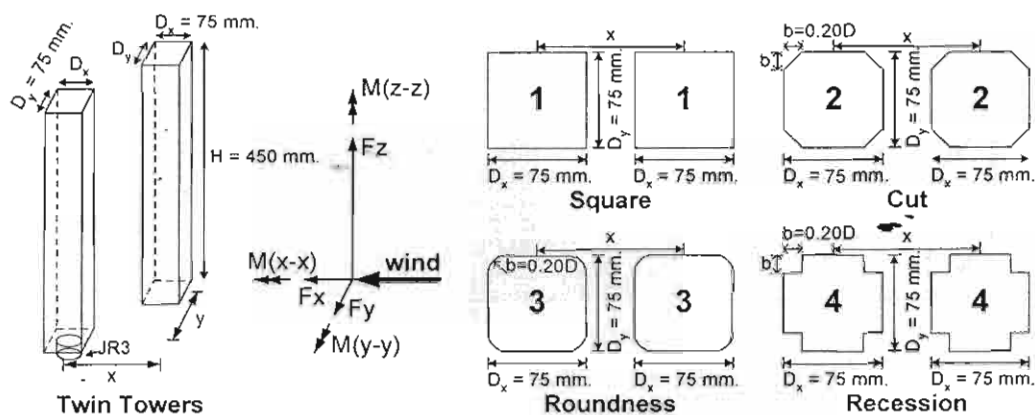


(ค)

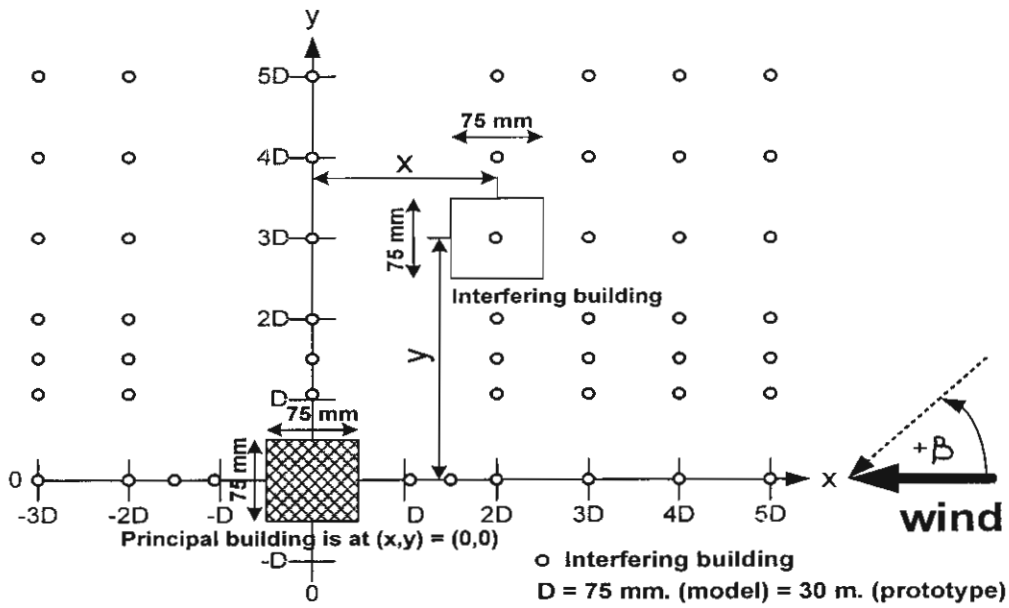
รูปที่ 20 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคาร (ก) การแอ่นตัวของอาคารในแนวแกน x (ข) การแอ่นตัวของอาคารในแนวแกน y (ค) การบิดตัวของอาคาร



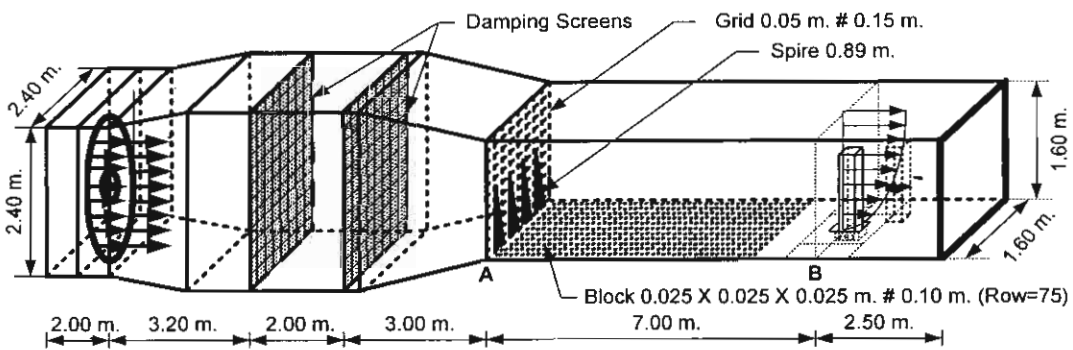
รูปที่ 21 Vortex shedding wakes ที่เกิดจากอาคารสองลักษณะ (ก) อาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ($b/h = 0.4$, $Re = 200$, จากงานของ Nakamura (1993)) (ข) อาคารรูปทรงกลม ($30 \leq Re \leq 5000$, จากงานของ Dobrodzicki (1972))



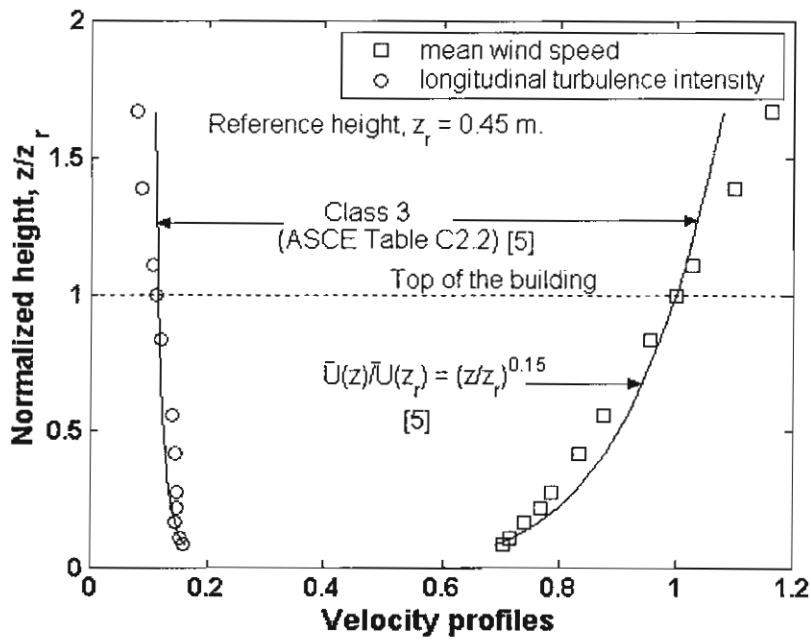
รูปที่ 22 รูปร่างและลักษณะของแบบจำลองอาคารคู่แฝดที่ใช้ในการศึกษา



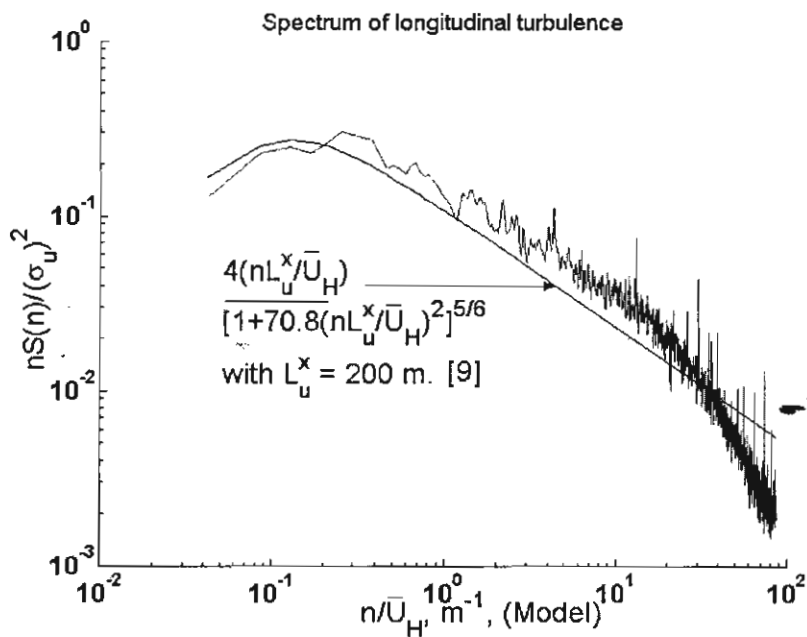
รูปที่ 23 ตำแหน่งของอาคารข้างเคียงที่ใช้ในการทดสอบอาคารคู่แฝด



รูปที่ 24 อุโมงค์ลมของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองลมธรรมชาติ

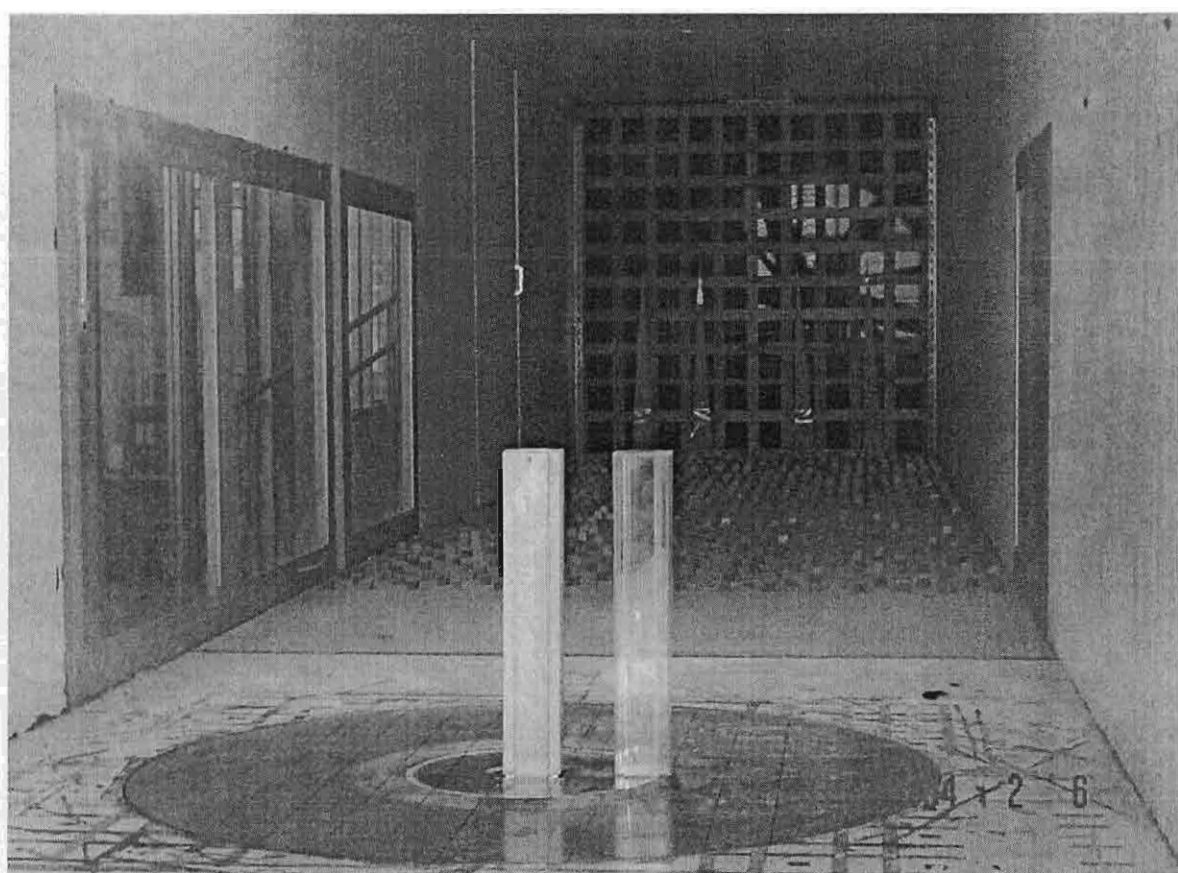


(ก) Mean wind speed and Longitudinal turbulence intensity profiles



(ข) Longitudinal velocity spectrum at the top of the model

รูปที่ 25 ลักษณะของลมที่จำลองได้ในอุโมงค์ลมเมื่อเปรียบเทียบกับลมตามธรรมชาติ (ASCE 1999 และ ESDU 1974)



รูปที่ 26 ตัวอย่างแบบจำลองอาคารคู่แฝดที่ติดตั้งในอุโมงค์ลม