



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเทคนิค high frequency force balance เพื่อ
การประมาณค่าแรงลมและการตอบสนองของอาคาร
สูงที่มีการโยกตัวในแนวนราบและแนวนวดพร้อมกัน

โดย ผศ.ดร.สุกิตย์ เทพมังกร และคณะ

สิงหาคม 2548



โครงการ การพัฒนาเทคนิค high frequency force balance เพื่อ
การประมาณค่าแรงลมและการตอบสนองของอาคาร
สูงที่มีการ โยกตัวในแนวนอนและแนวบิดพร้อมกัน

โดย ผศ.ดร.สุกิตย์ เทพมังกร และคณะ

สิงหาคม 2548

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเทคนิค High frequency force balance เพื่อ
การประมาณค่าแรงลมและการตอบสนองของอาคาร
สูงที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวบิดพร้อมกัน

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 ซึ่งมักจะก่อให้เกิดปัญหากับอาคารที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางระหว่างจุดศูนย์กลางมวลและจุดศูนย์กลางความแข็ง 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 ได้รับการคัดเลือกเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการศึกษาระดับขั้นต้น แบบจำลองย่อส่วนของอาคารได้รับการจัดทำโดยใช้มาตราส่วน 1:400 มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง เมื่อนำมาติดตั้งบนเครื่องมือวัดแรงแล้วมีค่าความถี่ธรรมชาติในแนวราบและแนวดิ่งสูงเกินกว่า 100 Hz ซึ่งสูงเพียงพอที่จะทำให้แรงและโมเมนต์ซึ่งวัดพร้อมกันทั้ง 6 ทิศทาง มีความถูกต้องไม่มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของการสั่นไหวของแบบจำลอง

การทดสอบได้กระทำที่ห้องปฏิบัติการอุโมงค์ลม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้สภาพลมจำลองสำหรับพื้นที่แบบเปิดโล่ง (Open terrain exposure) โดยทำการทดสอบในทิศทางลมตั้งฉากกับด้านกว้างและด้านยาวของอาคาร ผลการทดสอบได้ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบในรูปของการแอ่นตัวและการบิดของโครงสร้างที่ระดับยอดของอาคาร นอกเหนือจากการทดสอบแล้วงานวิจัยนี้ยังได้จัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ 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) เพื่อใช้ศึกษาแรงลมและสั่นไหวของอาคารที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวดิ่งพร้อมกัน 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 แล้วจึงทำการคำนวณหาการแอ่นตัวของโครงสร้าง ตามหลักการทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง (Structural dynamics) และทฤษฎีการสั่นไหวของโครงสร้าง (Theory of vibration) ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.1 การคำนวณค่าการแอ่นตัวตามหลักการ Frequency domain analysis

ค่าเฉลี่ยของการแอ่นตัว (Mean generalised deflection responses), $\bar{R}$, ของอาคาร สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉลี่ย, $\bar{P}$, และสติฟเนส, 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 สมการการเคลื่อนที่ดังกล่าวนี้แท้ที่จริงแล้วก็คือสมการสมดุลระหว่างแรงพลศาสตร์ประเภทต่างๆ ที่กระทำกับระบบนั่นเอง

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

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 ดังนั้นในการศึกษารุ่นนี้จึงได้เลือกใช้เครื่องมือวัดแรงและโมเมนต์ของบริษัท 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 อย่างไรก็ตามวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบต่ออาคารที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 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 ทั้งนี้เนื่องจากทิศทางการปะทะของลมที่มียองศามากขึ้น 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

ค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารในแต่ละกรณีได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนของแรงลมที่เรียกว่า 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 ตำแหน่งต่างๆของอาคารข้างเคียง 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 ฟูสกุล (2547), พฤติกรรมการรับแรงลมและการตอบสนองของอาคารคู่แฝดที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร, วิทยานิพนธ์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, ISBN:974-7990-73-3.
- ชาญณรงค์ ฟูสกุล และ สุกิจย์ เทพมังกร (2548), แรงลมที่กระทำกับอาคารคู่แฝดซึ่งมีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, ชลบุรี, พฤษภาคม, เล่มที่ 1, หน้า STR-192 ถึง STR-197.
- ขงยุทธ กฤตยาจรโลง สุรัฐชล ช่วยทุกข์ นฤมล จตุพงษ์ และเอกกมล สุพรรณอินทร์ (2546), การประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารสูงโดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม, ปริญญานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- สุกิจย์ 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 สุกิจย์ 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.

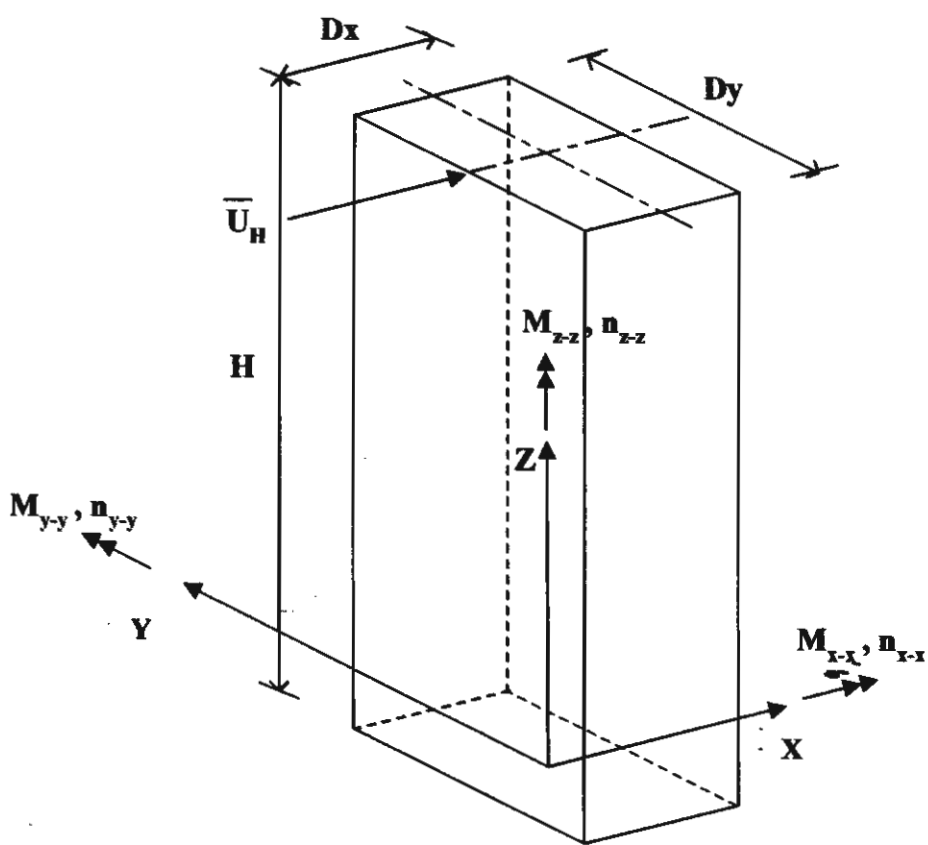
Zhang, W.J., Xu, Y.L. and Kwok, K.C.S. (1993), Torsional vibration and stability of wind-excited tall buildings with eccentricity, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 50, pp. 299-308.



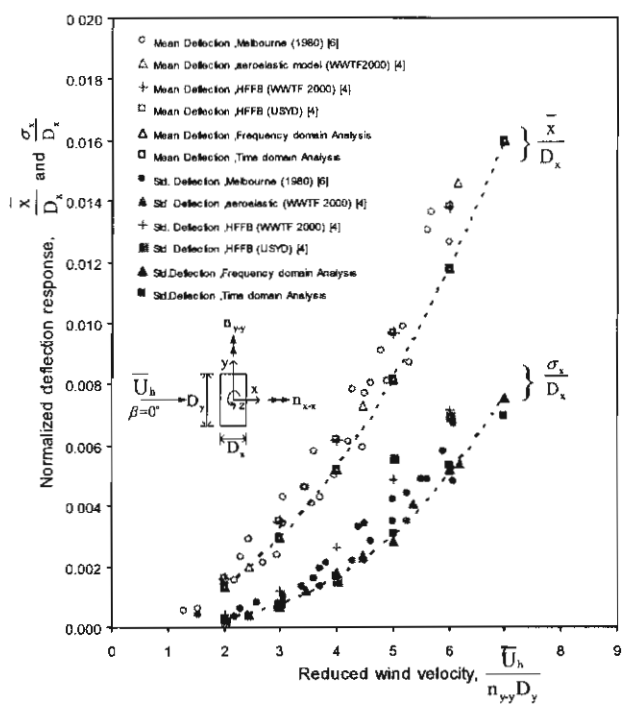
รูปที่ 1 เครื่องมือวัดแรงและโมเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



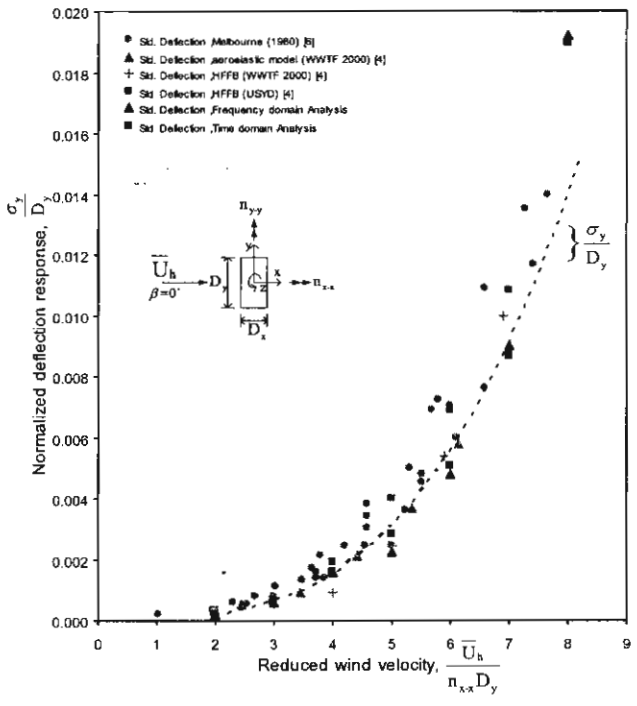
รูปที่ 2 ตัวอย่างแบบจำลองย่อส่วนของอาคารที่ใช้สำหรับการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม



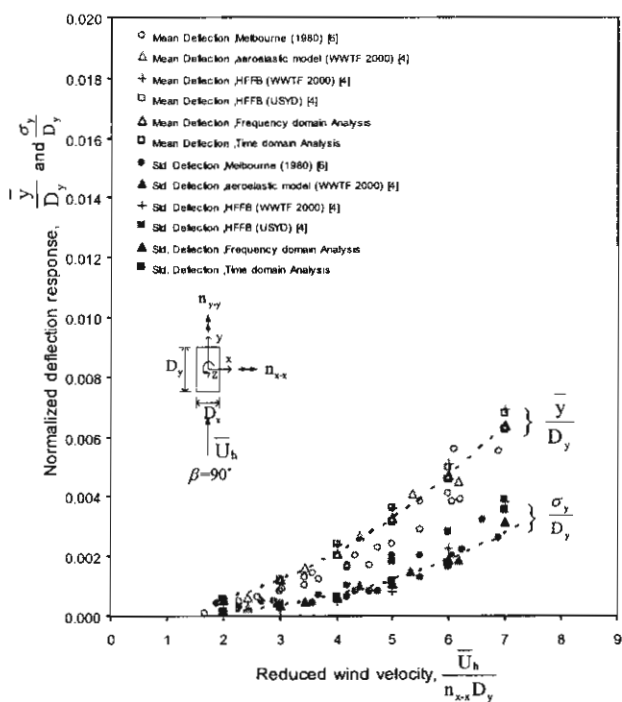
รูปที่ 3 รายละเอียดของอาคารมาตรฐาน CAARC และสัญลักษณ์ที่สำคัญ



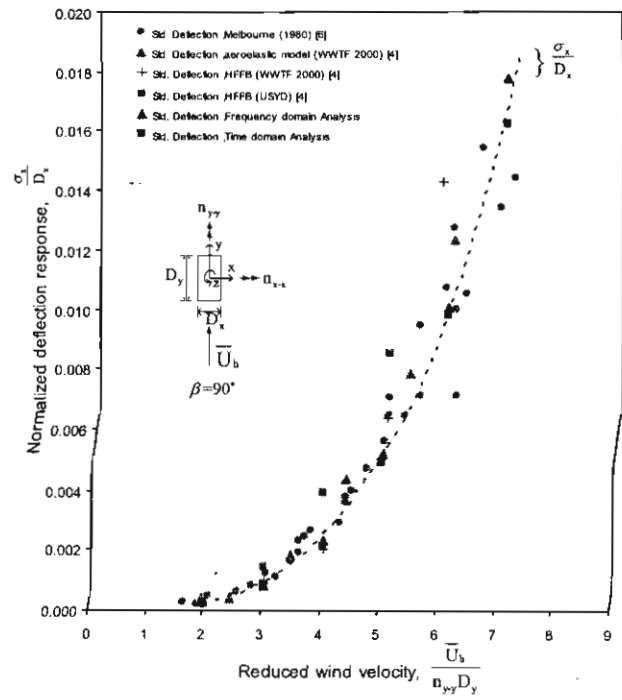
รูปที่ 4 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านยาวของอาคาร



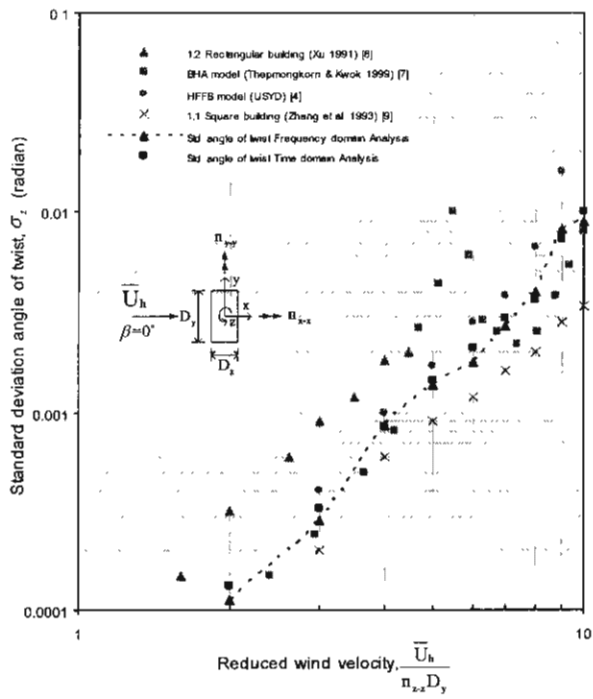
รูปที่ 5 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวตั้งฉากกับทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านยาวของอาคาร



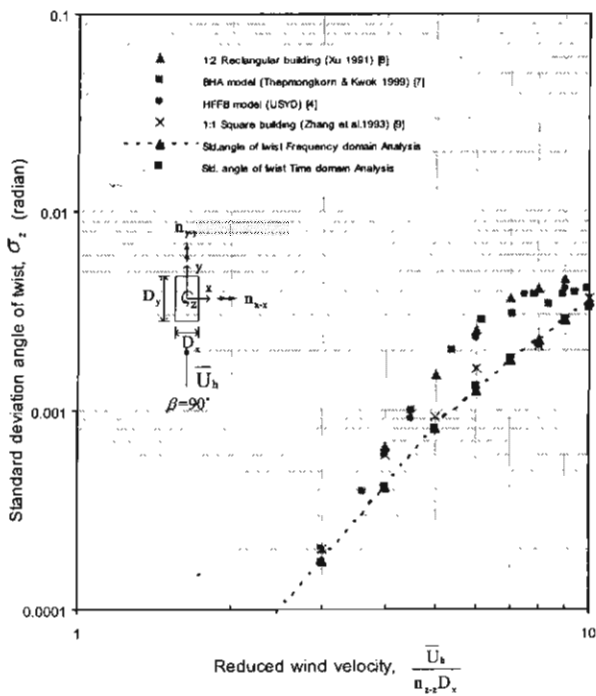
รูปที่ 6 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคาร



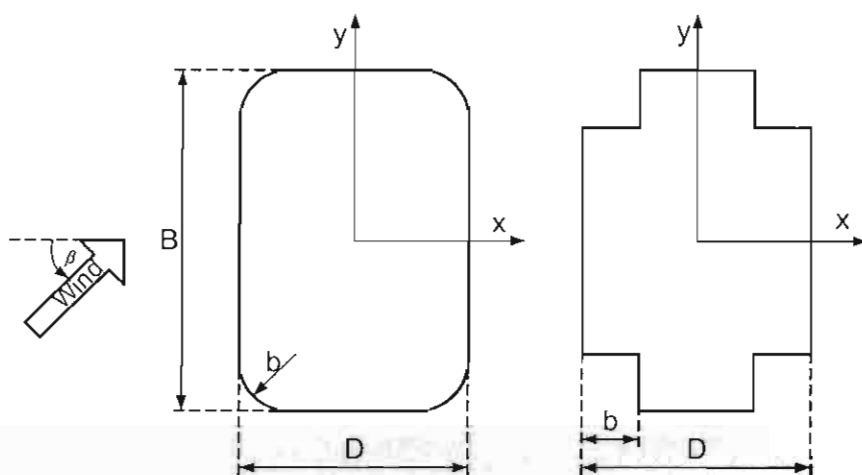
รูปที่ 7 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวตั้งฉากกับทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคาร



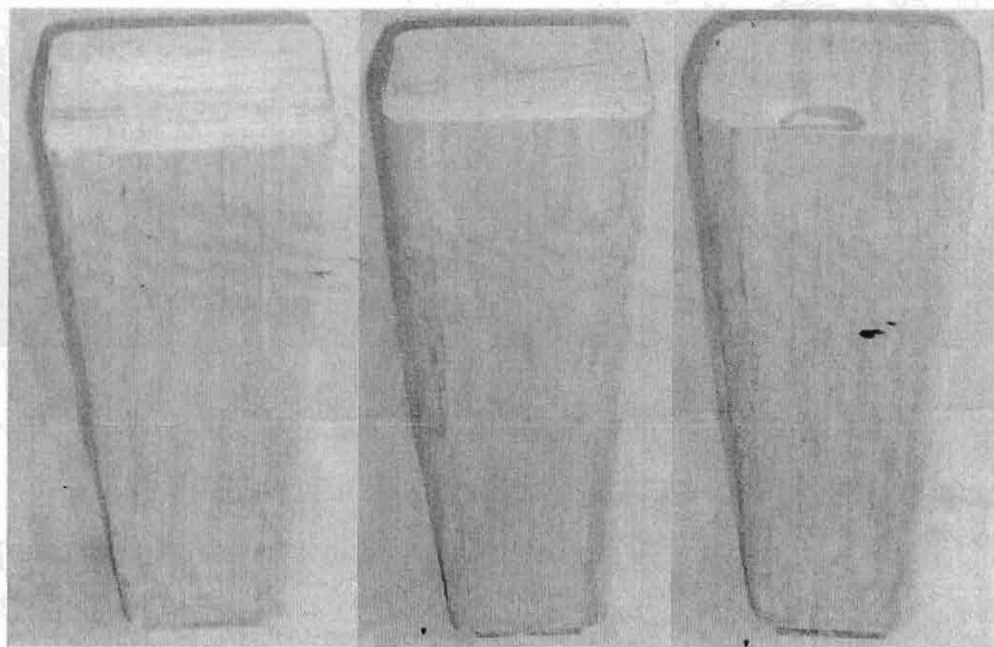
รูปที่ 8 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวนอน สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านยาวของอาคาร



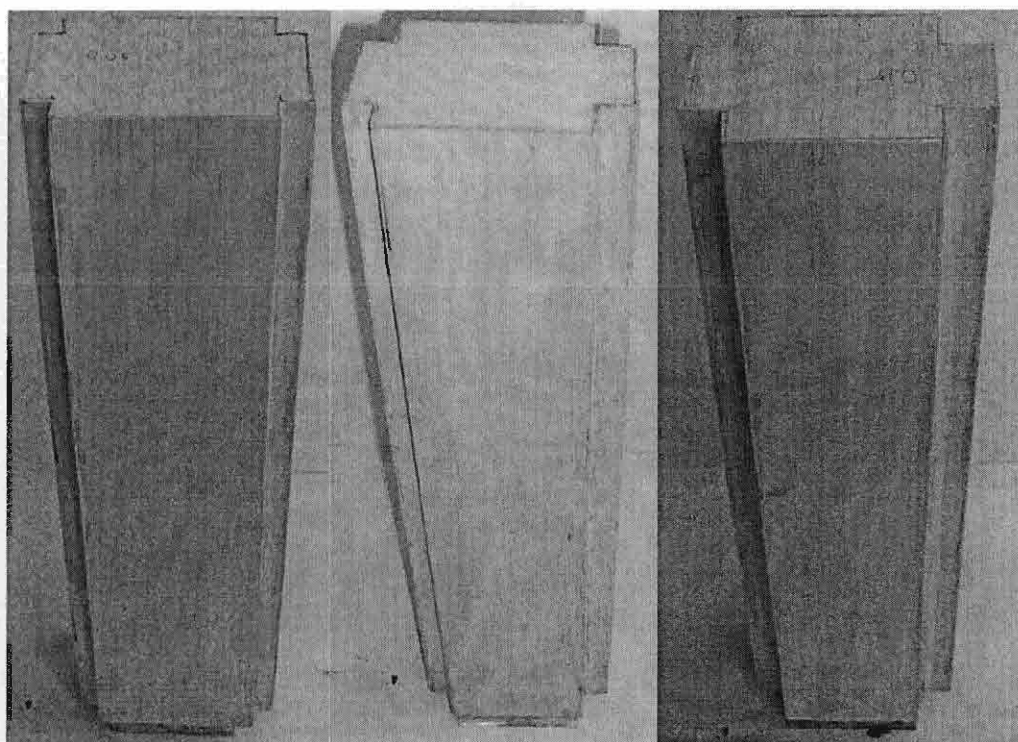
รูปที่ 9 การเอนตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวนอน สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคาร



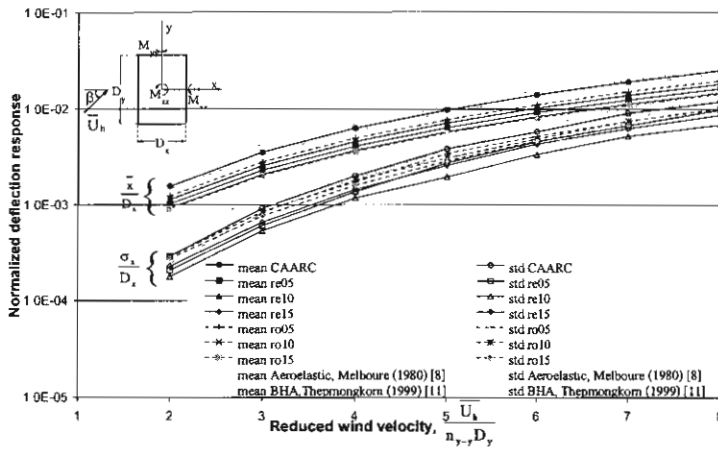
รูปที่ 10 รูปหน้าตัดของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมลักษณะ มุมโค้งมน (Roundness corners) และ มุมเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Recession corners)



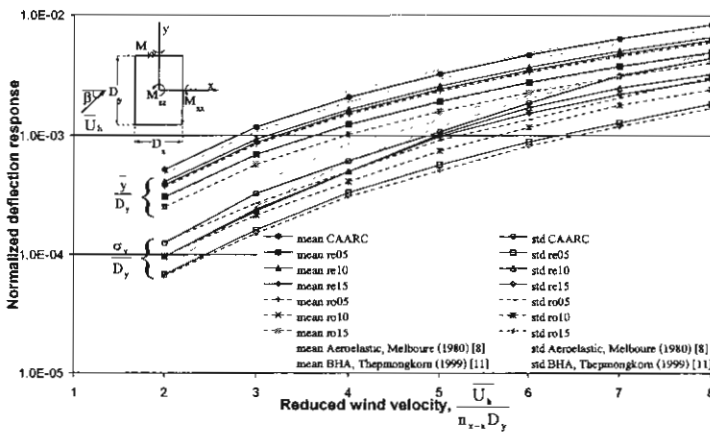
รูปที่ 11 แบบจำลองอาคารมาตรฐาน CAARC ที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคารแบบมุมโค้งมนด้วยอัตราส่วน (ก) 0.05 (ข) 0.10 (ค) 0.15



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

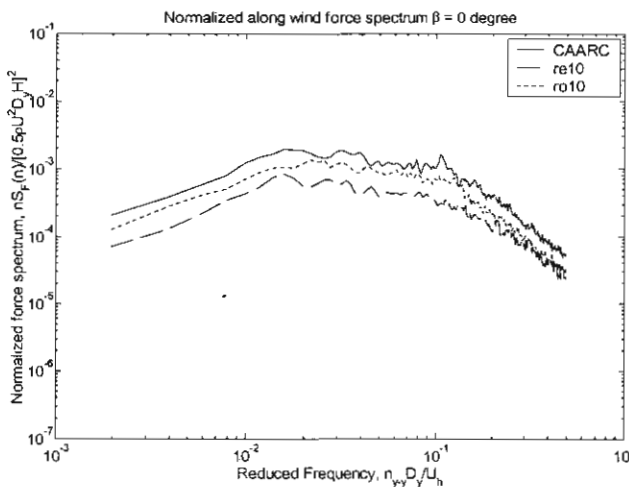


(ก)

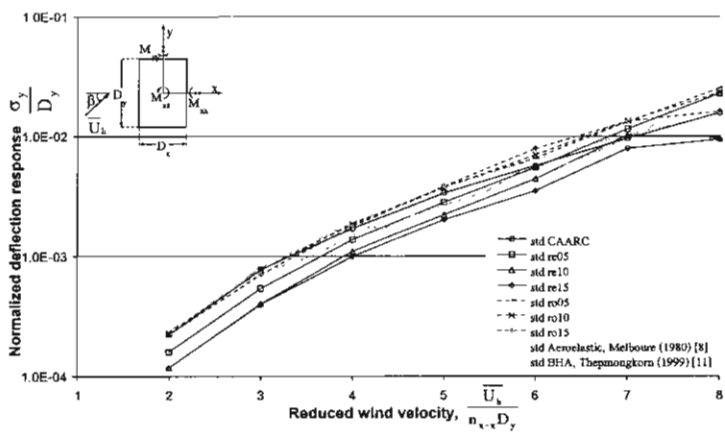


(ข)

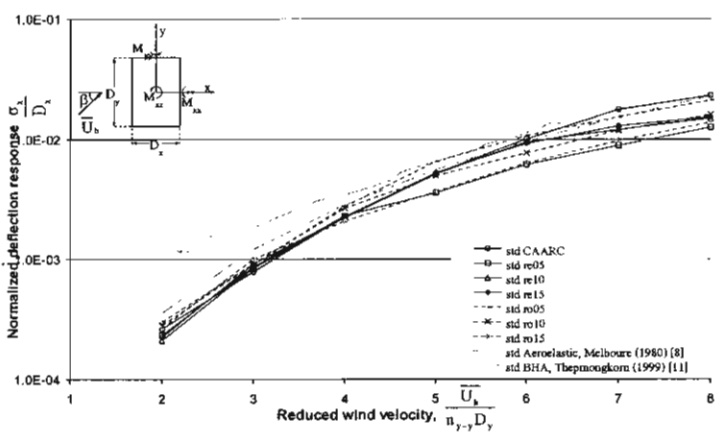
รูปที่ 13 ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคารใน
แนวทิศทางลม (ก) $\beta = 0$ องศา (ข) $\beta = 90$ องศา



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

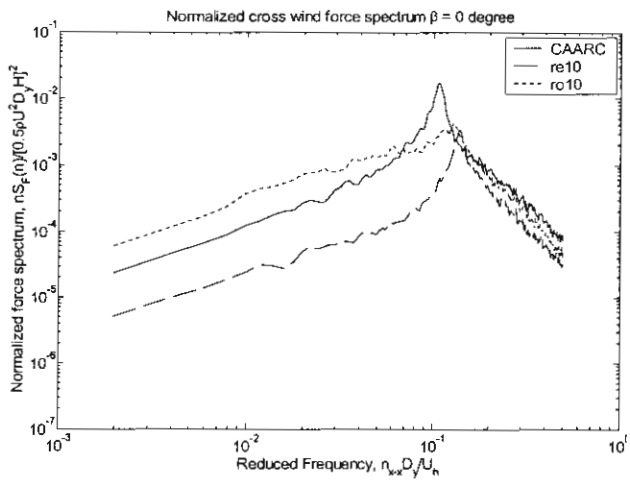


(ก)

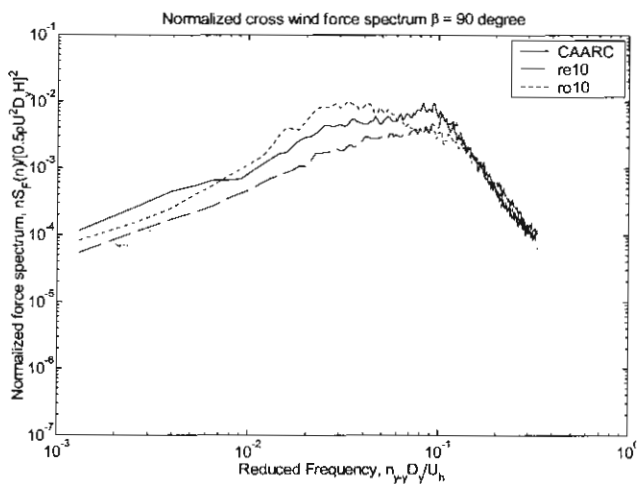


(ข)

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

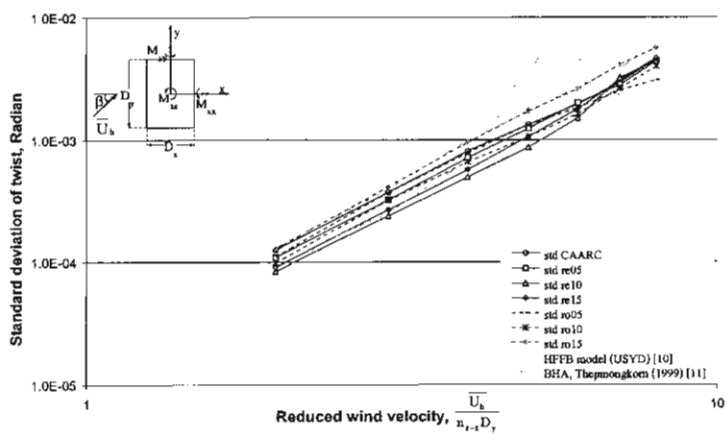


(ก)

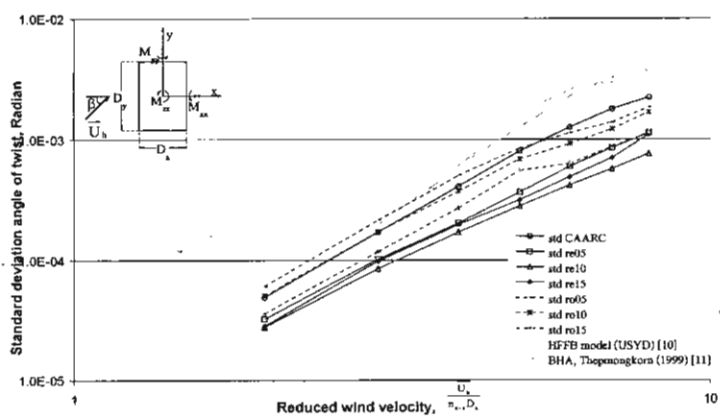


(ข)

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

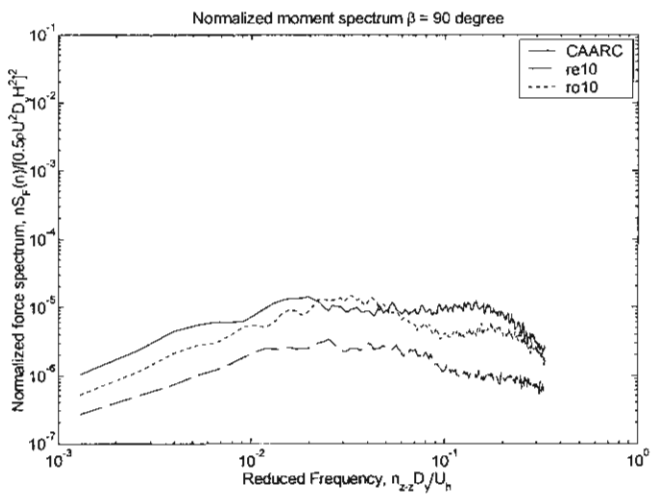


(ก)

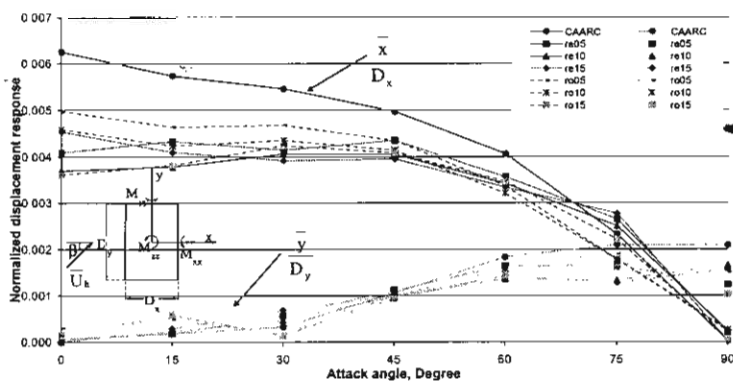


(ข)

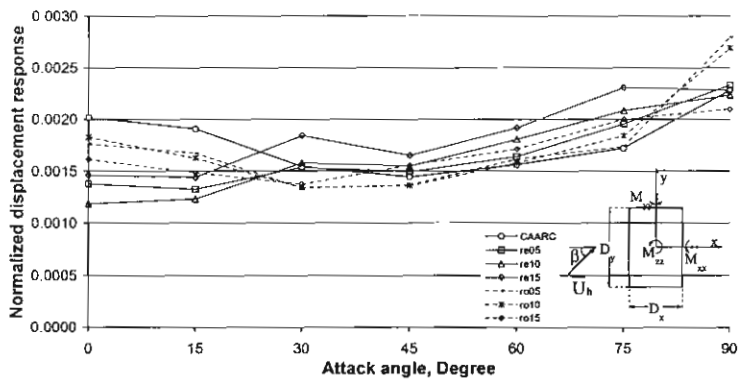
รูปที่ 17 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการบิดตัวของอาคาร (ก) $\beta = 0$ องศา (ข) $\beta = 90$ องศา



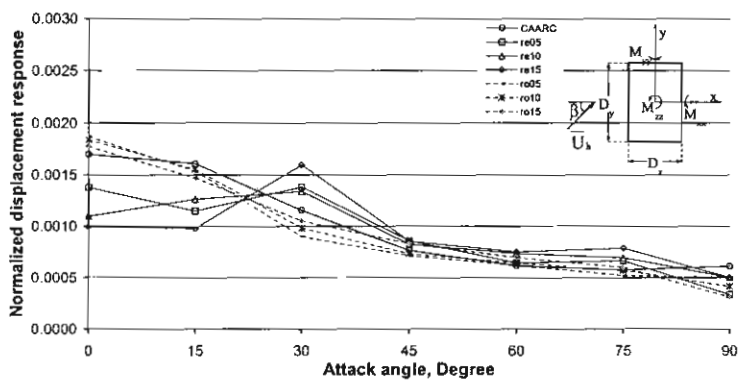
รูปที่ 18 Power spectral density ของแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างในทิศทางกรปิดตัว (Normalized twisting moment spectrum) เมื่อลมปะทะทำมุม 90 องศาับอาคาร



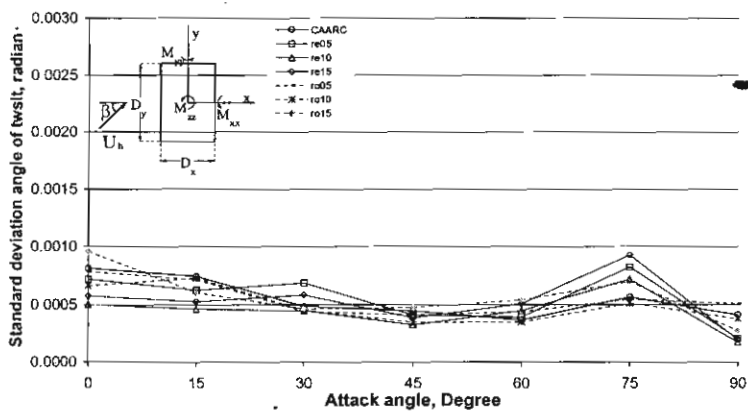
รูปที่ 19 การแอ่นตัวเฉลี่ยในแนวแกน x และ y ของอาคารเมื่อทิศทางลมเท่ากับ 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา



(ก)

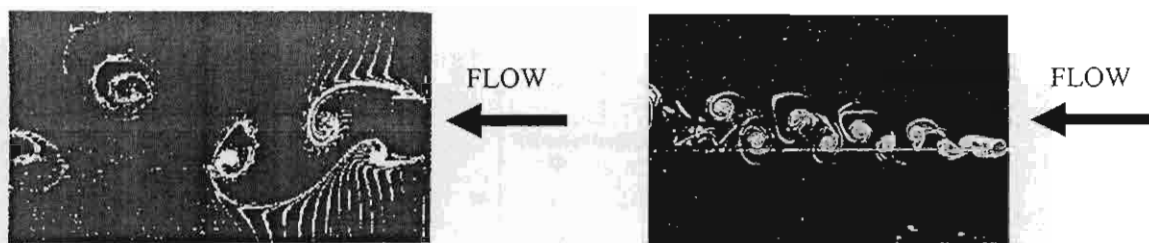


(ข)

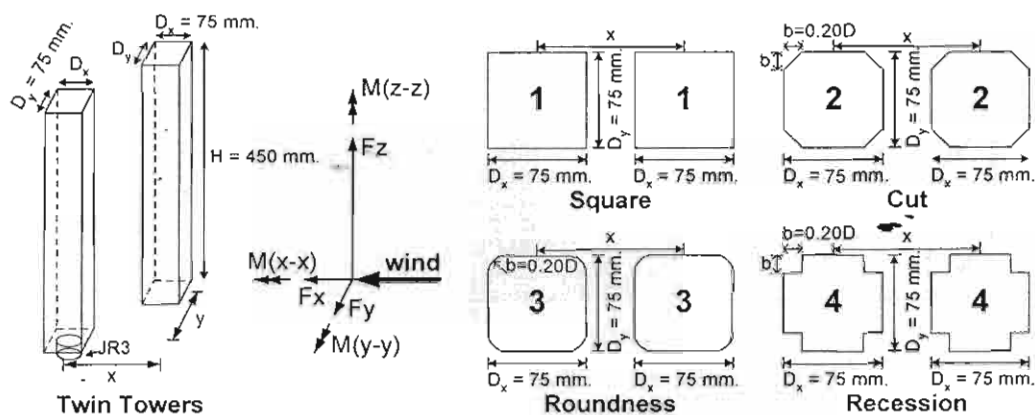


(ค)

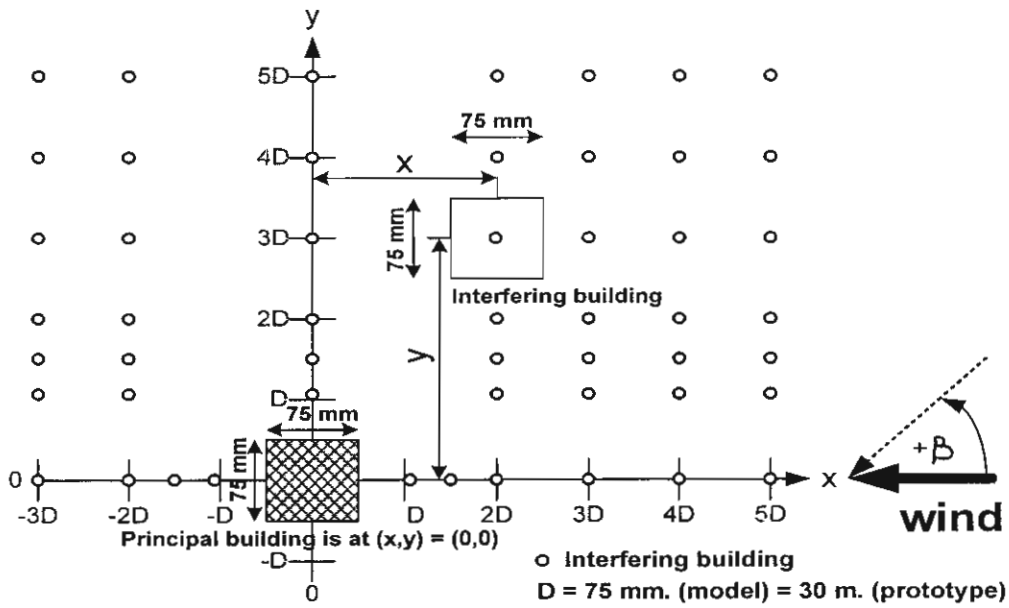
รูปที่ 20 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคาร (ก) การแอ่นตัวของอาคารในแนวแกน x (ข) การแอ่นตัวของอาคารในแนวแกน y (ค) การบิดตัวของอาคาร



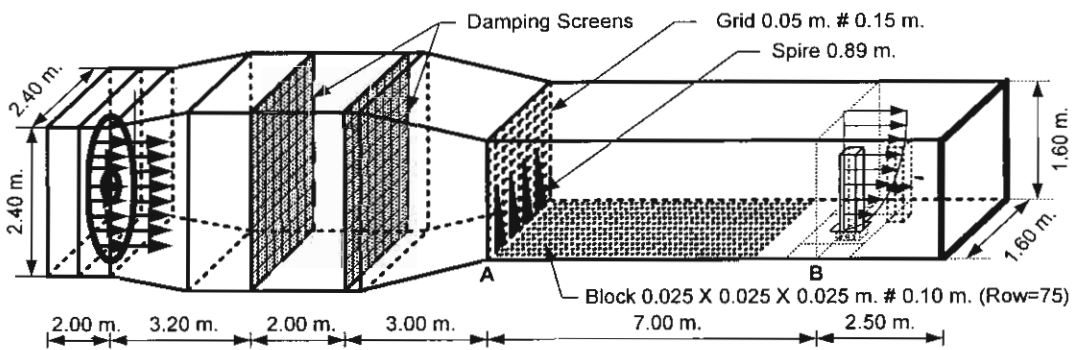
รูปที่ 21 Vortex shedding wakes ที่เกิดจากอาคารสองลักษณะ (ก) อาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ($b/h = 0.4$, $Re = 200$, จากงานของ Nakamura (1993)) (ข) อาคารรูปทรงกลม ($30 \leq Re \leq 5000$, จากงานของ Dobrodzicki (1972))



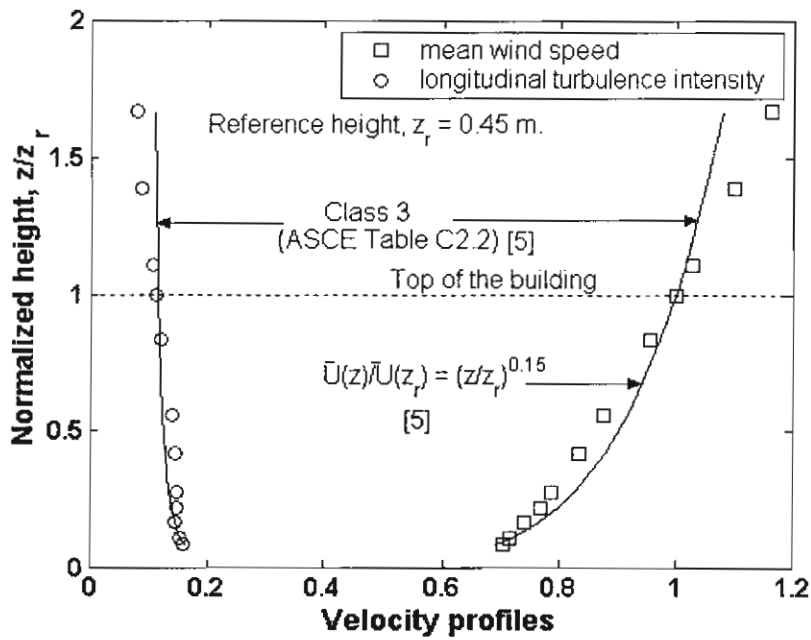
รูปที่ 22 รูปร่างและลักษณะของแบบจำลองอาคารคู่แฝดที่ใช้ในการศึกษา



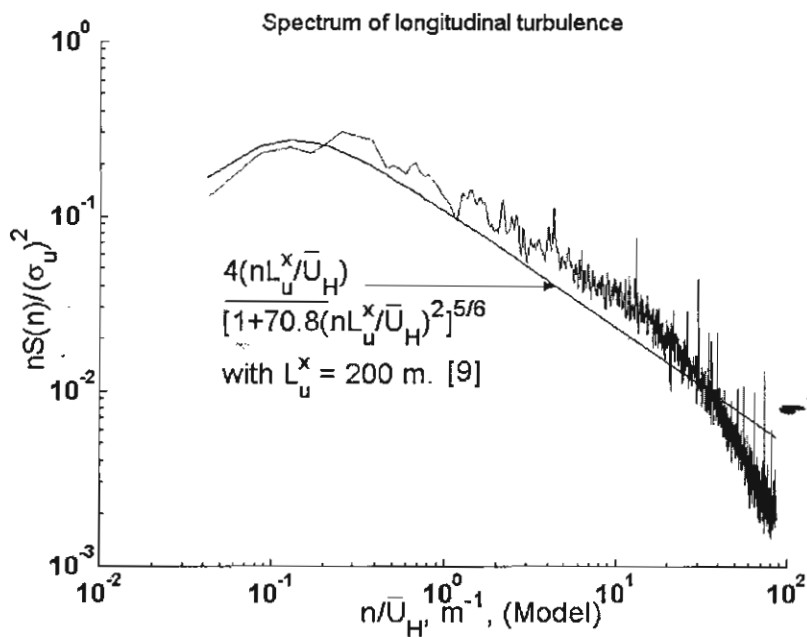
รูปที่ 23 ตำแหน่งของอาคารข้างเคียงที่ใช้ในการทดสอบอาคารคู่แฝด



รูปที่ 24 อุโมงค์ลมของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองลมธรรมชาติ

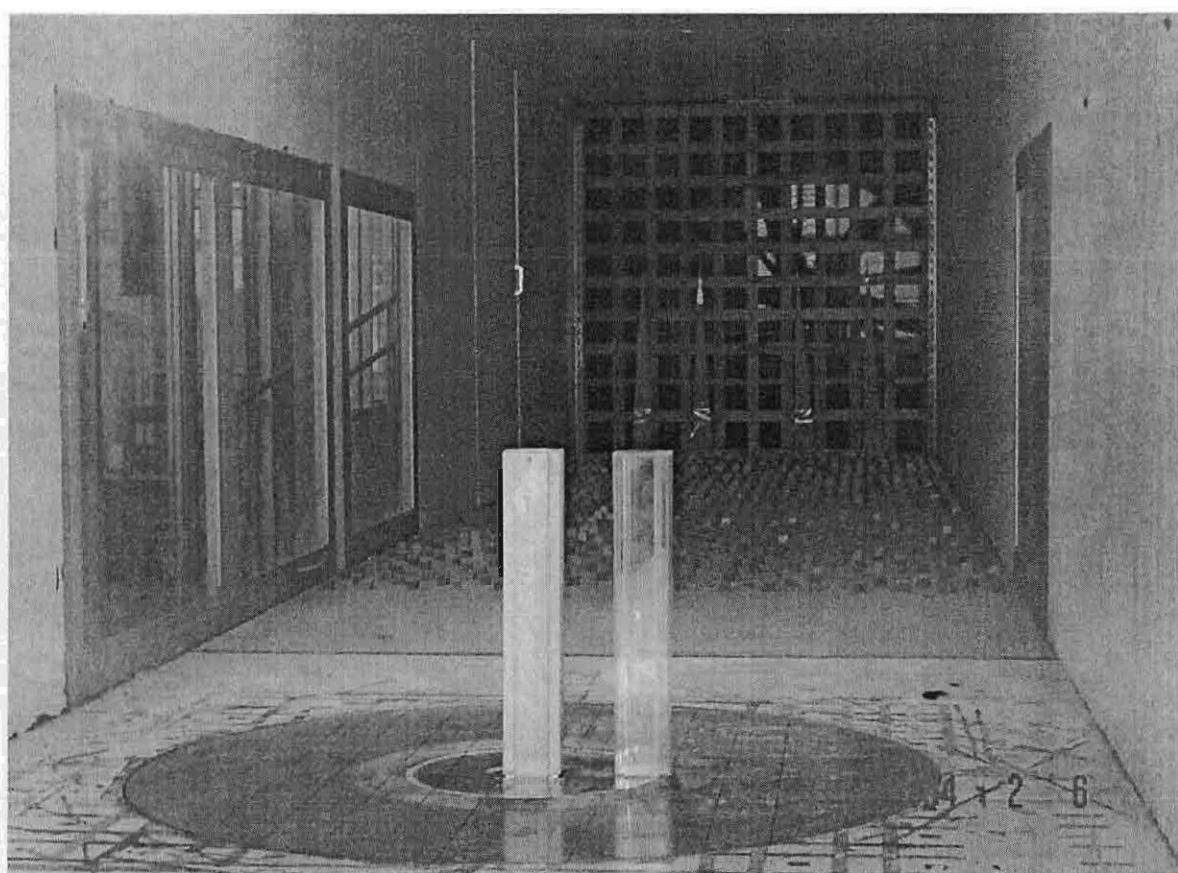


(ก) Mean wind speed and Longitudinal turbulence intensity profiles

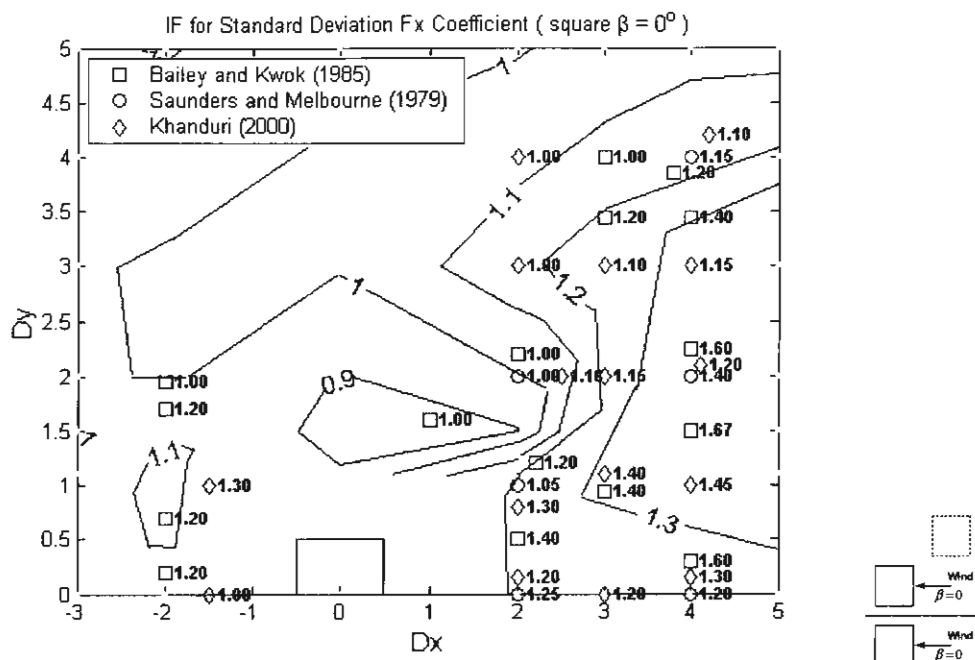


(ข) Longitudinal velocity spectrum at the top of the model

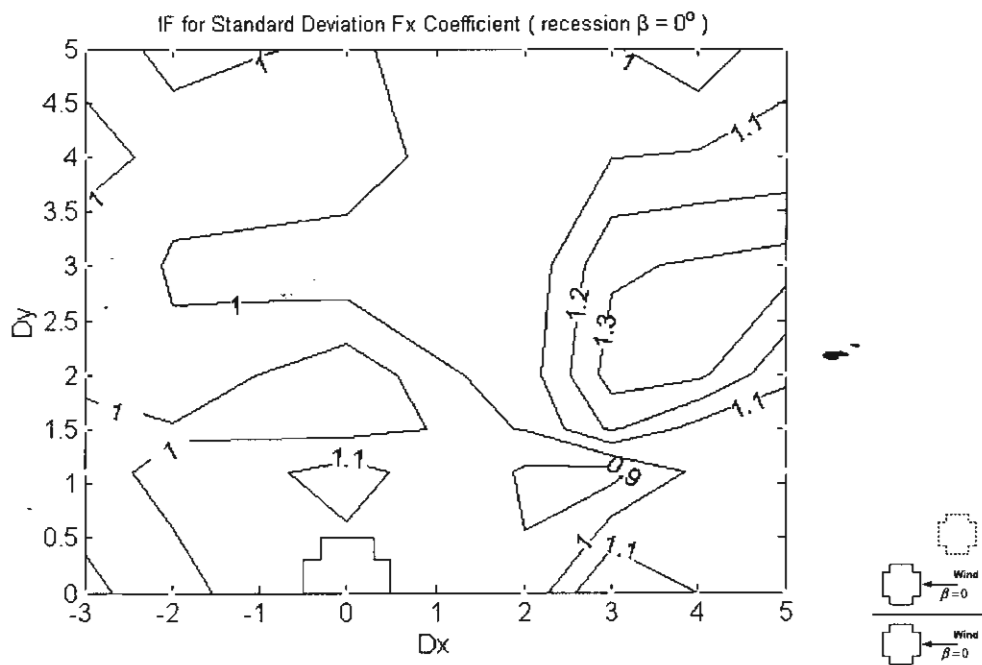
รูปที่ 25 ลักษณะของลมที่จำลองได้ในอุโมงค์ลมเมื่อเปรียบเทียบกับลมตามธรรมชาติ (ASCE 1999 และ ESDU 1974)



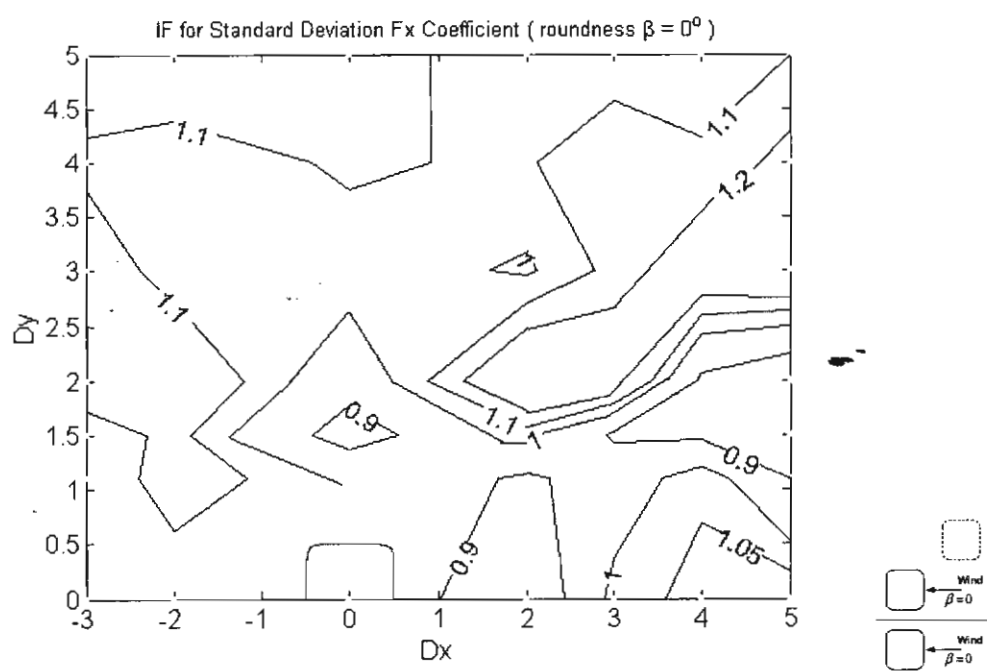
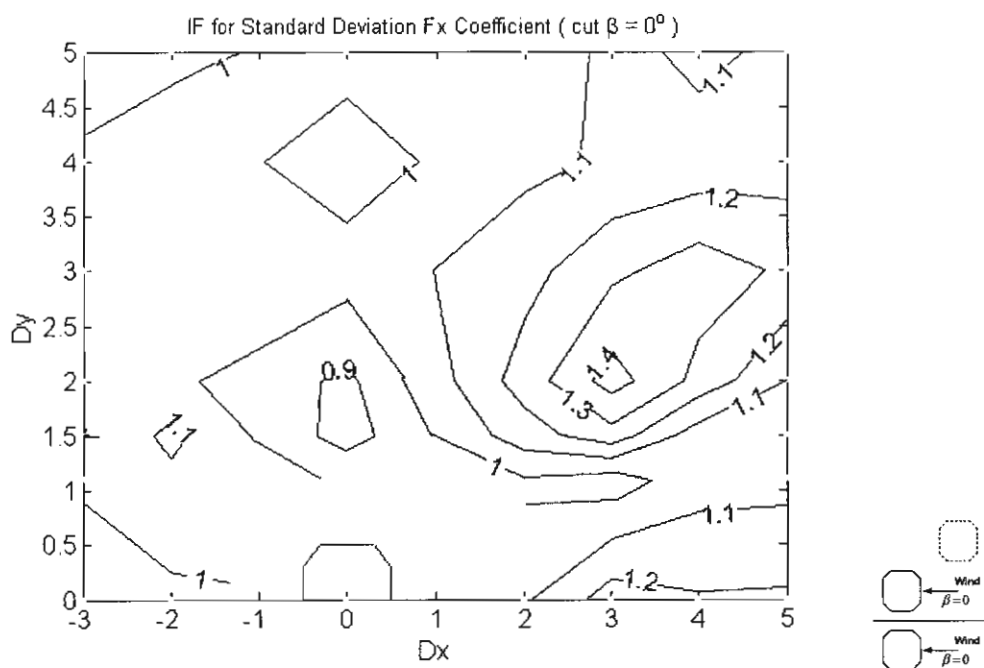
รูปที่ 26 ตัวอย่างแบบจำลองอาคารคู่แฝดที่ติดตั้งในอุโมงค์ลม



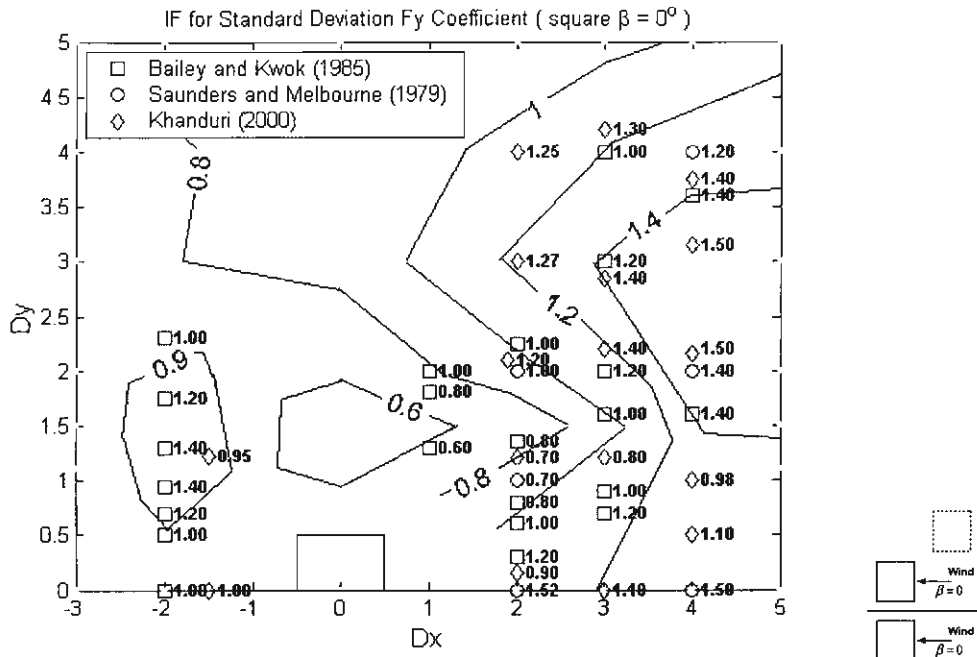
(ก) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก



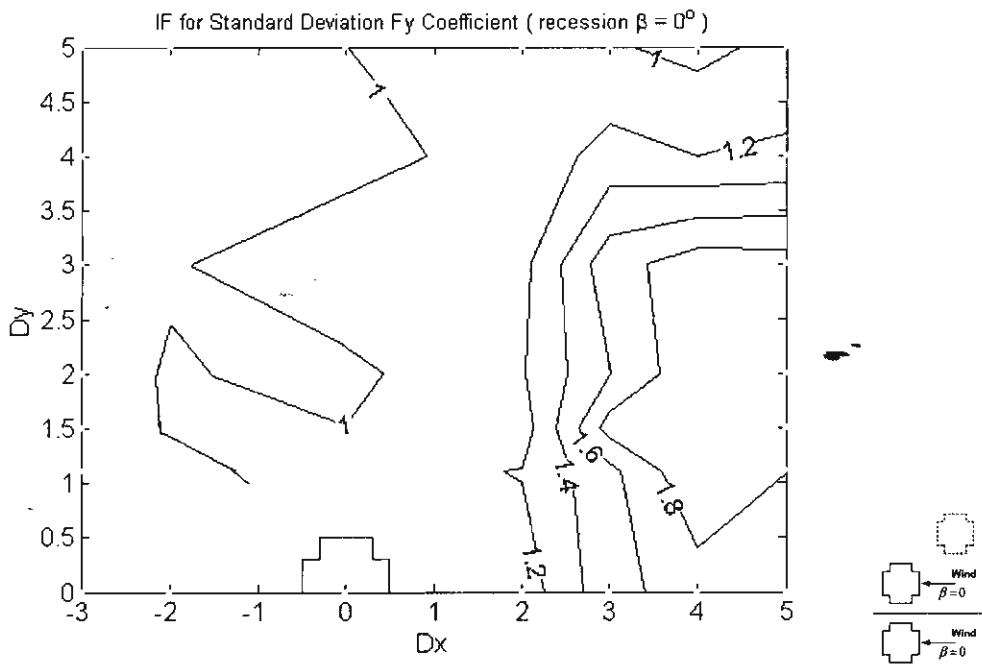
(ข) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมเว้า



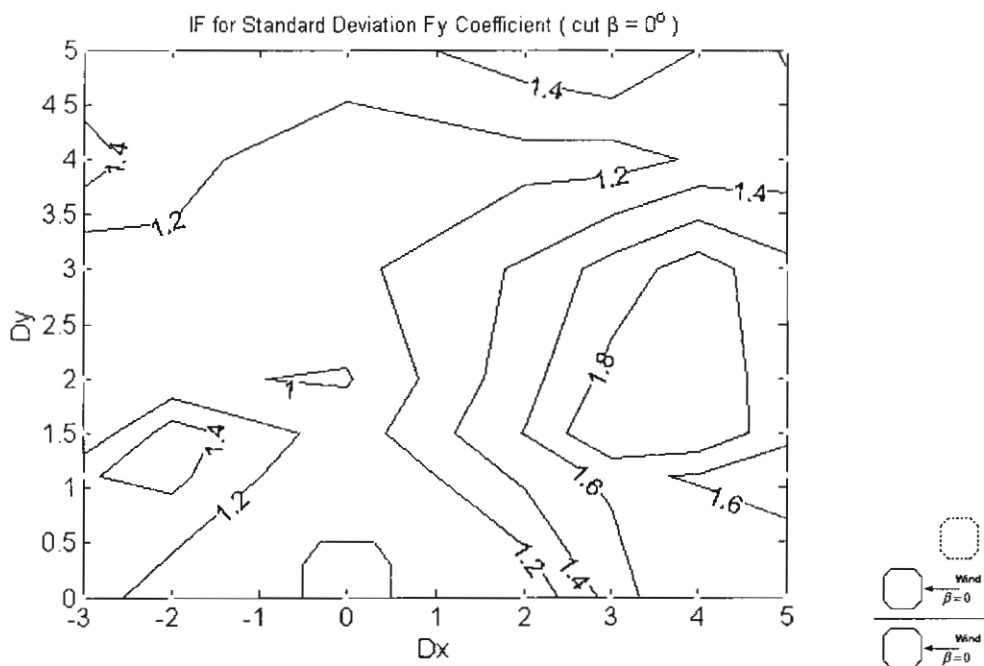
รูปที่ 27 Iso-buffets สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงในแนวแกน x ($\tilde{C}_{Fx}$) ที่ $\bar{U}_H / (n_{x-x} D_y) = 6$ และทิศทางลม (β) = 0 องศา



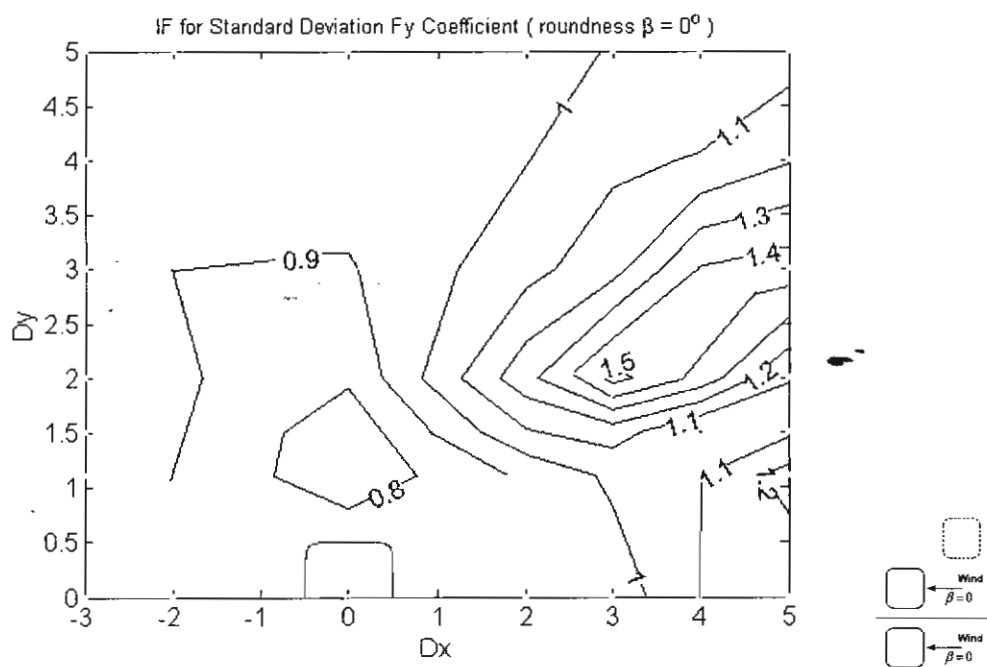
(ก) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก



(ข) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมเว้า

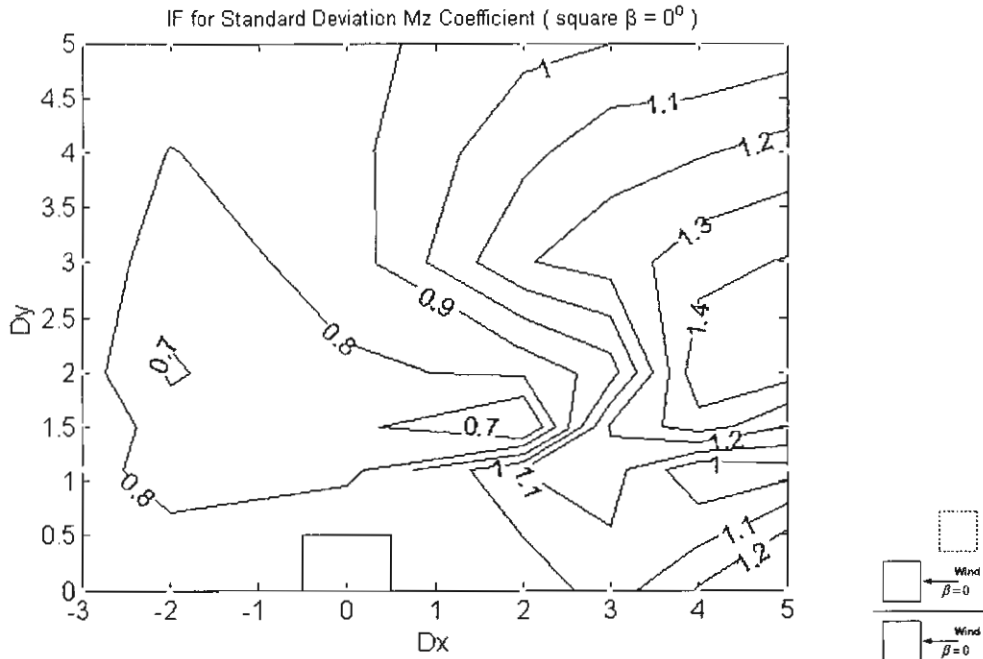


(ค) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมตัด

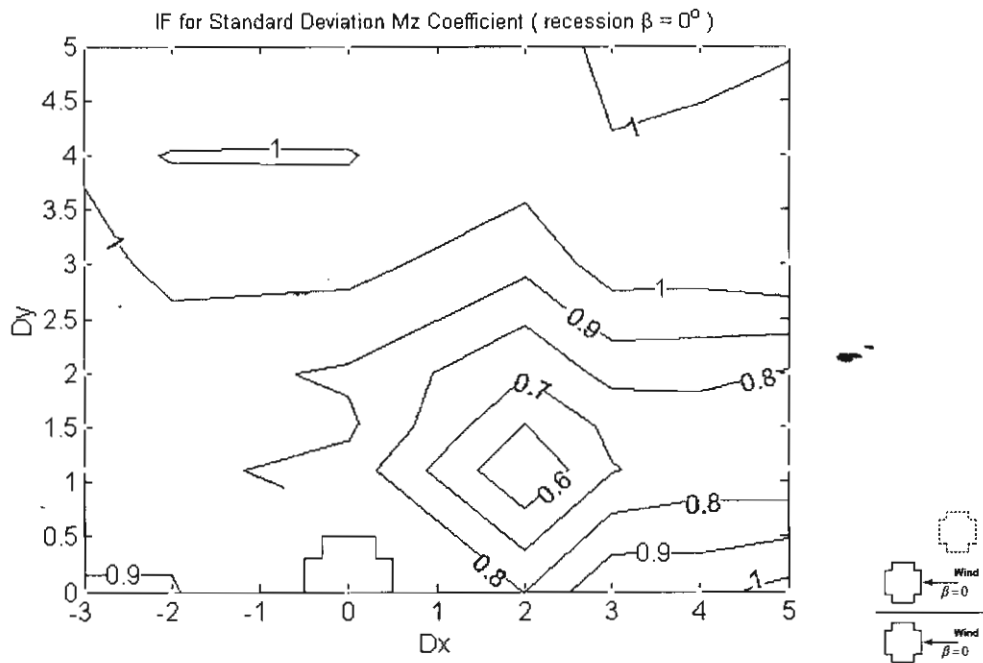


(ง) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมโค้งมน

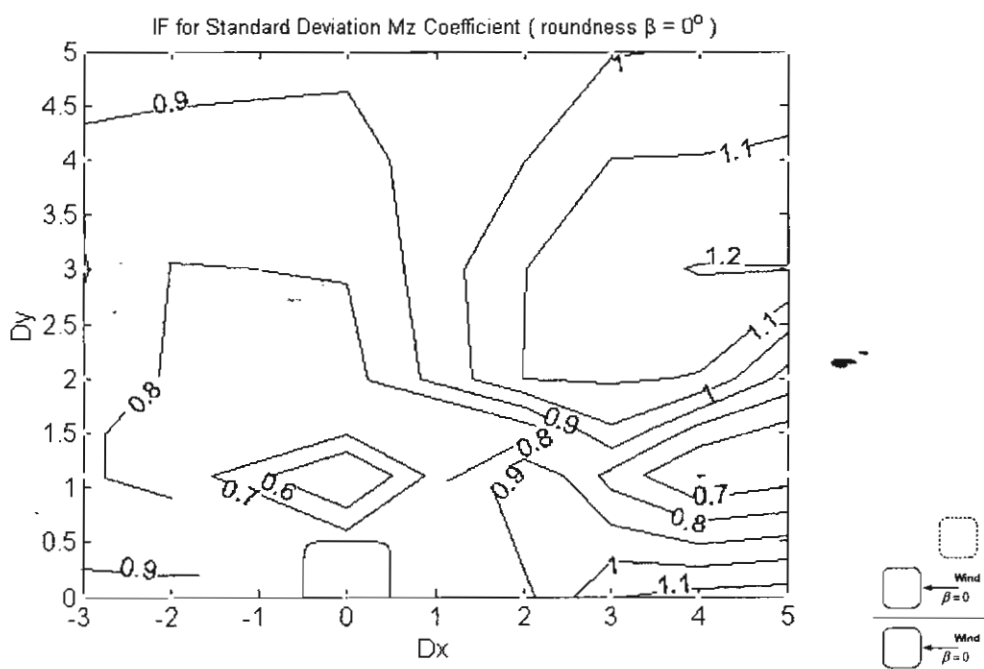
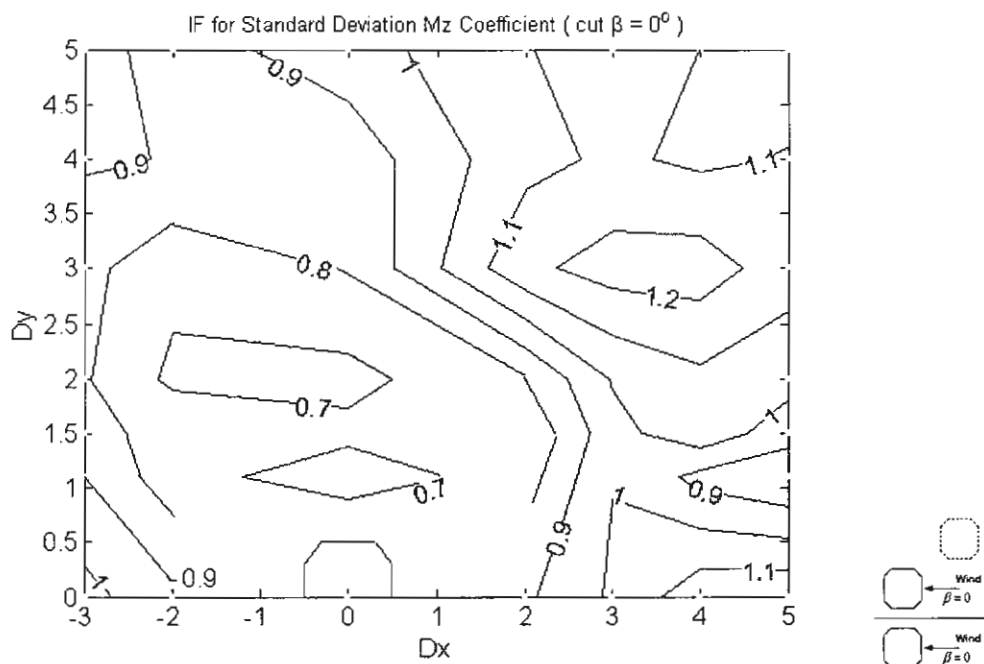
รูปที่ 28 Iso-buffets สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงในแนวแกน y ($\tilde{C}_{F_y}$) ที่ $\bar{U}_H / (n_{x-x} D_y) = 6$ และทิศทางลม (β) = 0 องศา



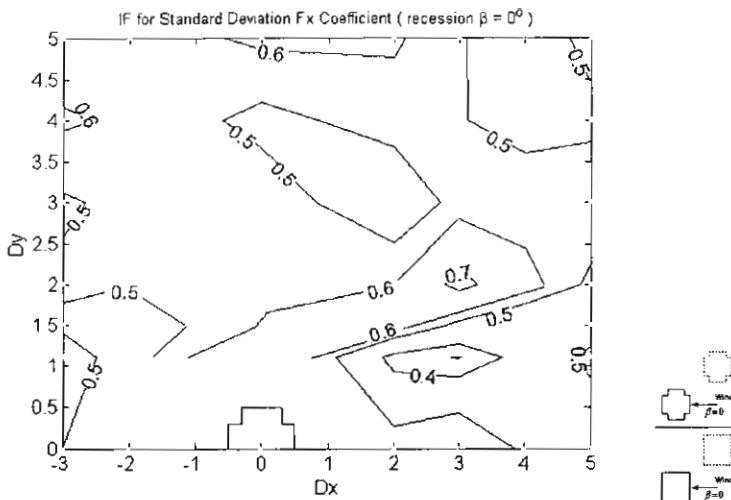
(ก) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสมุมฉาก



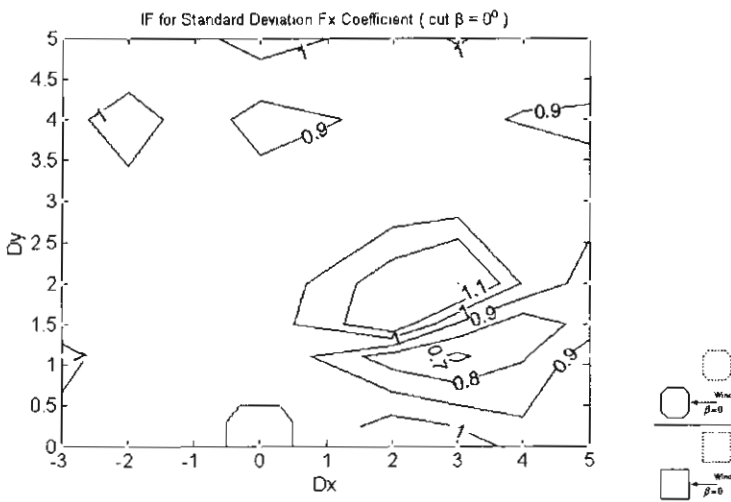
(ข) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสที่มีมุมเว้า



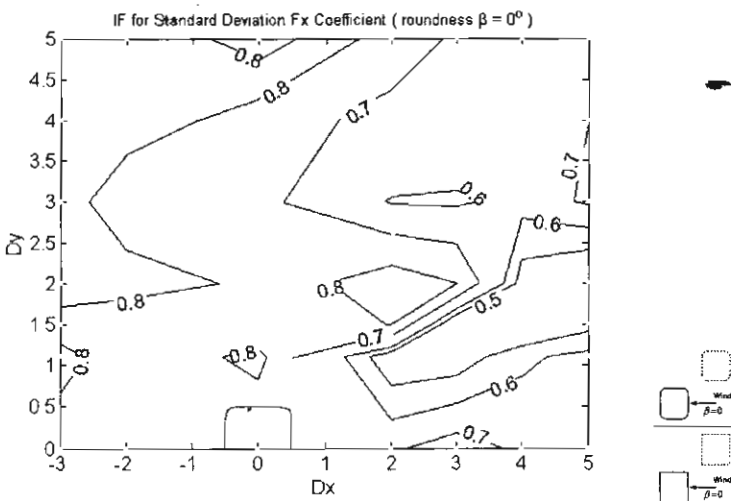
รูปที่ 29 Iso-buffets สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงบิดรอบแกน z ($\tilde{C}_m$) ที่ $\bar{U}_H / (n_{x-x} D_y) = 6$ และทิศทางลม (β) = 0 องศา



(ก) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสที่มีมุมเว้า

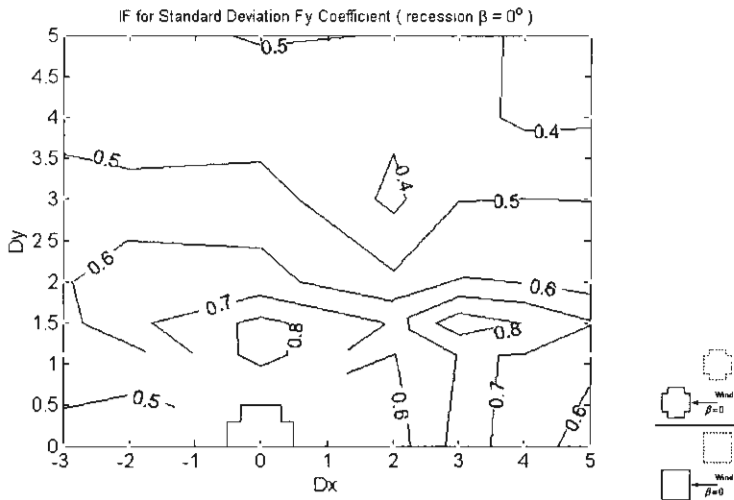


(ข) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสที่มีมุมตัด

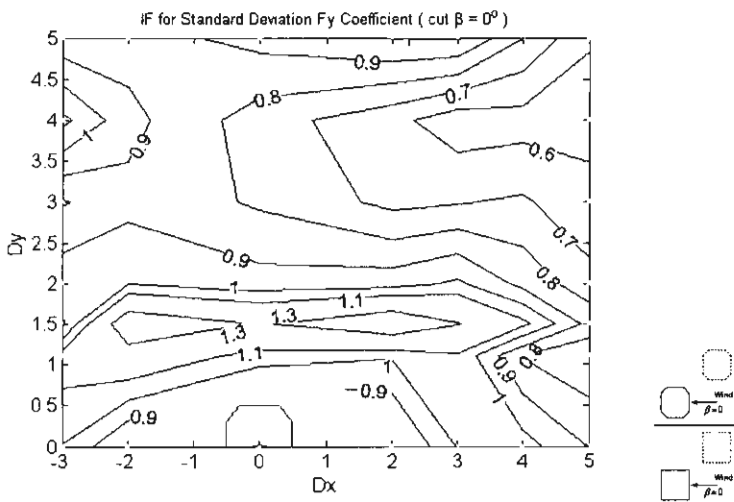


(ค) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสที่มีมุมโค้งมน

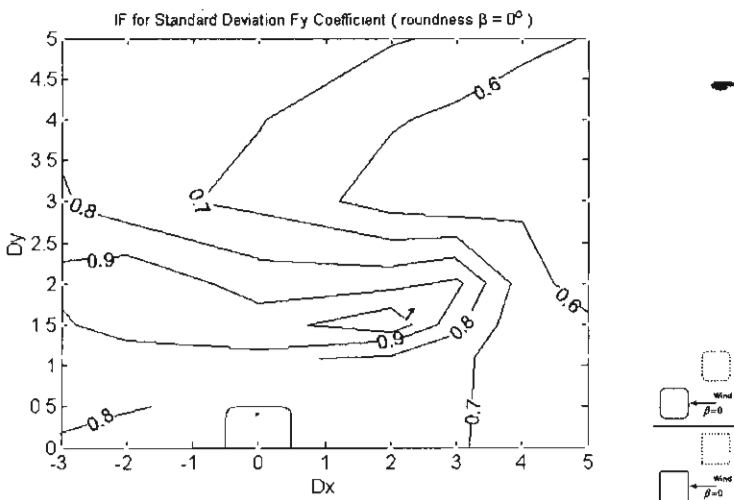
รูปที่ 30 Iso-buffets สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงตามแนวแกน x ($\tilde{C}_{Fx}$) เมื่อ $\bar{U}_H / (n_{x-x} D_y) = 6$ และทิศทางลม (β) = 0° องศา



(ก) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมเว้า

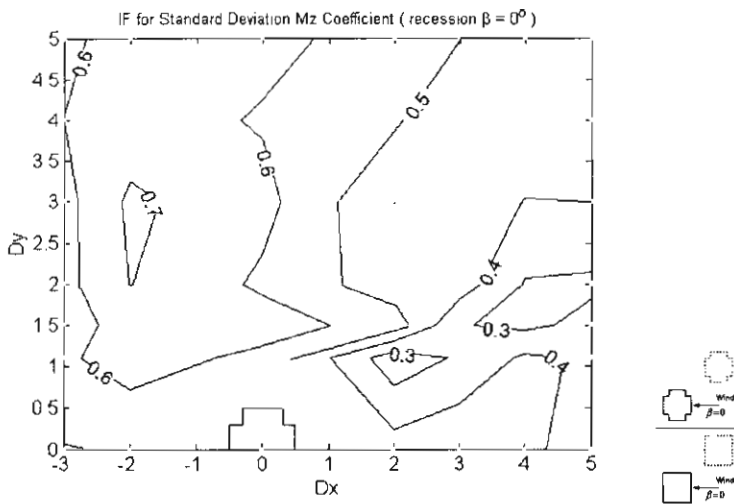


(ข) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมตัด

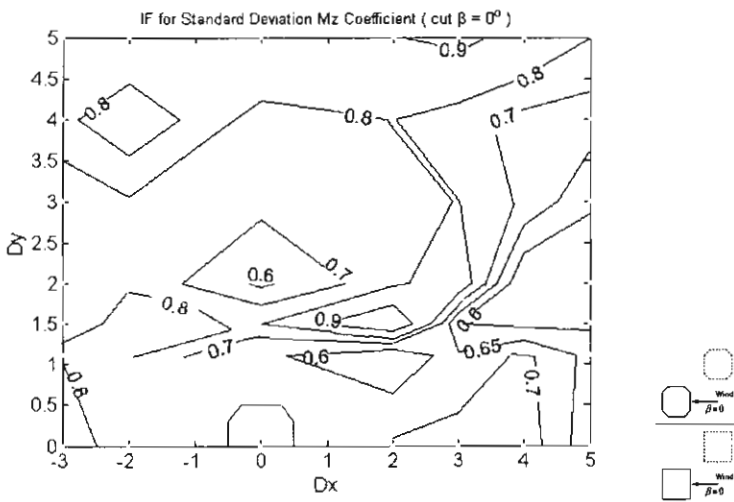


(ค) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมโค้งมน

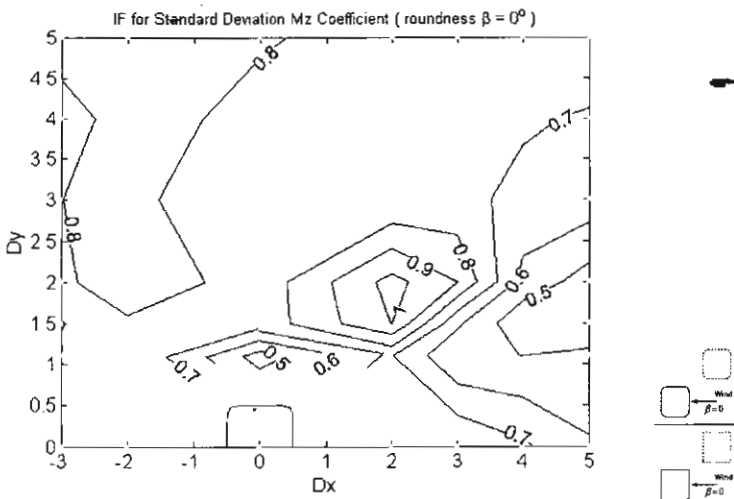
รูปที่ 31 Iso-buffets สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงในแนวแกน y ($\tilde{C}_{F_y}$) เมื่อ $\bar{U}_H / (n_{x-x} D_y) = 6$ และทิศทางลม (β) = 0 องศา



(ก) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมเว้า



(ค) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมตัด



(ค) อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมโค้งมน

รูปที่ 32 Iso-buffets สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงบิดในแนวแกน z ($\tilde{C}_m$) เมื่อ $\bar{U}_H / (n_{x-x} D_y) = 6$ และทิศทางลม (β) = 0 องศา

Flow chart for determining the displacement and moment responses of tall buildings with complex mode shapes

Geometric eqns

Computer modelling:
Free vibration analysis;
Mode shapes ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z ;
Natural frequencies of fundamental modes $n_j, j = 1-3$

Coupling parameters:
Mode shape contribution factors;
 C_{xj}, C_{yj}, C_{zj}

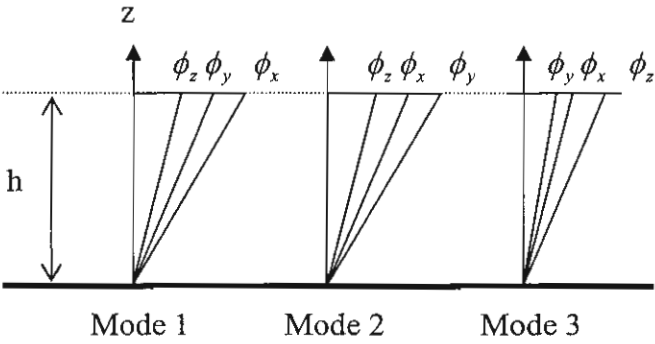
Complex mode shape:
 $\phi_j(z), j = 1-3$

Generalised mass for complex mode shape:
 $m_j, j = 1-3$

Generalised stiffness for complex mode shape:
 $k_j, j = 1-3$

Generalised damping for complex mode shape:
 $\zeta_j, j = 1-3$

It is where DOFs are defined



$$C_{xj} = \sqrt{\frac{\phi_{xj}^2(h)}{\sum (\phi^2(h))_j}}; C_{yj} = \sqrt{\frac{\phi_{yj}^2(h)}{\sum (\phi^2(h))_j}}$$

$$C_{zj} = \sqrt{\frac{\phi_{zj}^2(h)}{\sum (\phi^2(h))_j}}$$

Note: $\sum (\phi^2(h))_j = \phi_{xj}^2(h) + \phi_{yj}^2(h) + \phi_{zj}^2(h)$
 $\phi_{zj}^2(h)$ is translation-equivalent

$$\phi_j(z) = \phi_{xj}(z) \cdot C_{xj} + \phi_{yj}(z) \cdot C_{yj} + \phi_{zj}(z) \cdot C_{zj}$$

$$m_j = \int_0^h m(z) \phi_j^2(z) dz$$

$$k_j = (2\pi n_j)^2 m_j$$

$$\zeta_j = \text{any assumed values}$$

Generalised force for complex mode shape:
 $p_j, j = 1-3$

$$p_j = C_{xj} \left(\frac{1}{h} \right) M_{y-y}(t) + C_{yj} \left(\frac{1}{h} \right) M_{x-x}(t) + C_{zj} \left(\frac{1}{r} \right) M_{z-z}(t)$$

or

$$p_j = \chi_{xj} C_{xj} \left(\frac{1}{h} \right) M_{y-y}(t) + \chi_{yj} C_{yj} \left(\frac{1}{h} \right) M_{x-x}(t) + \chi_{zj} C_{zj} \left(\frac{1}{r} \right) M_{z-z}(t)$$

where $r = \sqrt{\frac{\sum J(z)}{\sum m(z)}}$ = radius of gyration

and $\chi_{xj}, \chi_{yj}, \chi_{zj}$ are mode shape correction factors for x, y and z respectively

Generalised response for complex mode building:

$$\xi_j, \dot{\xi}_j, \ddot{\xi}_j, j = 1-3$$

$$m_j \ddot{\xi}_j(t) + c_j \dot{\xi}_j(t) + k_j \xi_j(t) = p_j(t)$$

Displacement response for complex mode building:
 $\delta(z, t)$

$$\delta(z, t) = \sum_{j=1}^N \phi_j(z) \xi_j(t) = \sum_{j=1}^N \delta_j(z, t), \text{ N is equal to 3}$$

Components of displacement response for the building:

$$\delta_x(z, t)$$

$$\delta_y(z, t)$$

$$\delta_z(z, t)$$

$$\delta_{xj}(z, t) = C_{xj} \delta_j(z, t); \delta_x(z, t) = \sum_{j=1}^N \delta_{xj}(z, t)$$

$$\delta_{yj}(z, t) = C_{yj} \delta_j(z, t); \delta_y(z, t) = \sum_{j=1}^N \delta_{yj}(z, t)$$

$$\delta_{zj}(z, t) = C_{zj} \delta_j(z, t); \delta_z(z, t) = \sum_{j=1}^N \delta_{zj}(z, t)$$

N is equal to 3

$$\text{Note: } \delta_j^2(z, t) = \delta_{xj}^2(t) + \delta_{yj}^2(t) + \delta_{zj}^2(t)$$

$$\delta^2(z, t) = \delta_x^2(t) + \delta_y^2(t) + \delta_z^2(t)$$

$$\delta_\theta(z, t) = \frac{\delta_z(z, t)}{r(z)}$$

Moment response for the building:

$$M_{x-x}, M_{y-y}, M_{z-z}$$

Force-displacement relations:

$$\delta_{xy}(h,t) \Rightarrow M_{y-y_j}(t) ; M_{y-y}(t) = \sum_{j=1}^N M_{y-y_j}(t)$$

$$\delta_{yj}(h,t) \Rightarrow M_{x-x_j}(t) ; M_{x-x}(t) = \sum_{j=1}^N M_{x-x_j}(t)$$

$$\delta_{zj}(h,t) \Rightarrow M_{z-z_j}(t) ; M_{z-z}(t) = \sum_{j=1}^N M_{z-z_j}(t)$$

NB: Relationships between forces and point of application

Geometric centre (Aerodynamic centre): Wind forces (external dynamic forces)

Stiffness centre: Elastic forces
Measured forces and moments

Mass centre: Inertia forces

Generalized (Modal) coordinates: Degrees of freedom, Equation of motion
Damping forces
Generalized responses

Building coordinates: Desired displacement responses
Desired base shears and overturning moments

รูปที่ 33 แผนภูมิแสดงหลักการคำนวณหาค่าแรงและการแอ่นตัวของอาคารที่มีการโยกตัวในแนวราบและแนวบิดพร้อมกัน

Output ที่ได้จากโครงการ

1. บัณฑิตที่จบการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จำนวน 2 คน
2. วิทยานิพนธ์ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา 2 เรื่อง ได้แก่ “การศึกษาพฤติกรรมการรับแรง และการตอบสนองของอาคารสูงที่มีการปรับแต่งมุมอาคาร โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม ด้วยเทคนิค High Frequency Force Balance” และ “พฤติกรรม การรับแรงลมและการตอบสนองของอาคารคู่แฝดที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร”
3. ปริญญานิพนธ์ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา เรื่อง “การ ประเมินค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารสูงโดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม”
4. บทความวิชาการที่นำเสนอในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 เรื่อง “การ ทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี High frequency force balance เพื่อการประมาณค่า แรงลมและการสั่นไหวของอาคาร”
5. บทความวิชาการที่นำเสนอในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 เรื่อง “ผลกระทบของรูปร่างบริเวณมุมอาคารที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงลม และการตอบสนอง ของอาคาร”
6. บทความวิชาการที่นำเสนอในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10 เรื่อง “แรงลมที่กระทำกับอาคารคู่แฝดซึ่งมีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร”
7. บทคัดย่อของบทความวิชาการที่ได้รับการตอบรับเพื่อนำเสนอในงานประชุมวิชาการ 4th European & African Conference on Wind Engineering Czech Republic เรื่อง “Wind-induced loads and responses of a tall building with complex motion”
8. บทคัดย่อของบทความวิชาการที่ได้รับการตอบรับเพื่อนำเสนอในงานประชุมวิชาการ 4th European & African Conference on Wind Engineering Czech Republic เรื่อง “Effects of corners modifications on wind-induced loads and responses of a tall building”

ภาคผนวก

- เอกสารแนบหมายเลข 1 รายละเอียดและบทคัดย่อของวิทยานิพนธ์โดย อัครพล ตนสุขชื่น (2546), การศึกษาพฤติกรรมการรับแรง และการตอบสนองของอาคารสูงที่มีการปรับแต่งมุมอาคาร โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม ด้วยเทคนิค High Frequency Force Balance, วิทยานิพนธ์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, ISBN:974-7990-08-3.
- เอกสารแนบหมายเลข 2 รายละเอียดและบทคัดย่อของวิทยานิพนธ์โดย ชาณูณรงค์ ฟูสกุล (2547), พฤติกรรมการรับแรงลมและการตอบสนองของอาคารคู่แฝดที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร, วิทยานิพนธ์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, ISBN:974-7990-73-3.
- เอกสารแนบหมายเลข 3 รายละเอียดของบทความโดย สุกิตย์ เทพมังกร (2547), การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี High frequency force balance เพื่อการประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคาร, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, เพชรบุรี, พฤษภาคม, เล่มที่ 1, หน้า STR-120 ถึง STR-125.
- เอกสารแนบหมายเลข 4 รายละเอียดของบทความโดย อัครพล ตนสุขชื่น และ สุกิตย์ เทพมังกร (2547), ผลกระทบของรูปร่างบริเวณมุมอาคารที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงลม และการตอบสนองของอาคาร, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, เพชรบุรี, พฤษภาคม, เล่มที่ 1, หน้า STR-252 ถึง STR-257.
- เอกสารแนบหมายเลข 5 รายละเอียดของบทความโดย ชาณูณรงค์ ฟูสกุล และ สุกิตย์ เทพมังกร (2548), แรงลมที่กระทำกับอาคารคู่แฝดซึ่งมีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, ชลบุรี, พฤษภาคม, เล่มที่ 1, หน้า STR-192 ถึง STR-197.

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรง และการตอบสนองของอาคารสูงที่มี
การปรับแต่งมุมอาคาร โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม
ด้วยเทคนิค High Frequency Force Balance

Wind-Induced Loads and Responses of Tall Buildings with Various
Edge Configurations by a High Frequency Force Balance Model Test

อัศวพล ตนสุขชื่น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ปีการศึกษา 2546

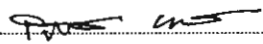
ISBN : 974-7990-08-3

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรง และการตอบสนองของอาคารสูงที่มี
การปรับแต่งมุมอาคาร โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม
ด้วยเทคนิค High Frequency Force Balance

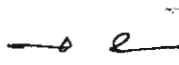
Wind-Induced Loads and Responses of Tall Buildings with Various
Edge Configurations by a High Frequency Force Balance Model Test

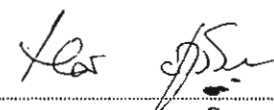
อัครพล ดนสุขชื่น เลขประจำตัว 43931010
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สุกิตย์ เทพมังกร

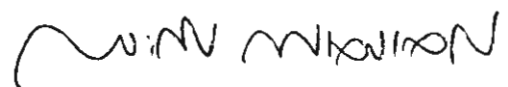
อาจารย์ที่ปรึกษา


(ผศ.ดร.สุกิตย์ เทพมังกร)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการ ดังมีรายชื่อต่อไปนี้


(รศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)


(รศ.ดร.นร ภู่วโรดม)


(ดร.ประกิจ เปรมธรรมกร)


(ผศ.ดร.สุกิตย์ เทพมังกร)

บทคัดย่อ

การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมของอาคารมาตรฐาน CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) ที่มีการปรับแต่งมุมของอาคารเป็นแบบเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแบบโค้งมนด้วยอัตราส่วนการปรับแต่งมุม 0.05 0.10. และ 0.15 ได้รับการจัดทำโดยใช้เทคนิค High Frequency Force Balance (HFFB) Model Tests โดยทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการอุโมงค์ลมของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีหน้าตัด 1.6×1.6 เมตร ยาว 7 เมตร การทดสอบได้กระทำภายใต้สภาพลมแบบเปิดโล่ง (Open Terrain) โดยใช้ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับยอดอาคารเท่ากับ 7 เมตร/วินาที ในงานศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของอาคาร สำหรับทิศทางการปะทะของลมเท่ากับ 0° 15° 30° 45° 60° 75° และ 90° องศา จากการทดสอบพบว่า การปรับแต่งมุมทั้งสองลักษณะมีผลกระทบอย่างมากต่อกลไก Vortex Shedding Process ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดแรงและการแอ่นตัวของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการแยกตัวของลมและการวกกลับของลมที่พัดปะทะด้านข้างอาคาร (Separation and Reattachment Processes) ซึ่งมีผลต่อค่าแรงและการแอ่นตัวของอาคารในทิศทางตามกระแสลม ทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม และทิศทางการบิดของอาคาร ประสิทธิภาพในการลดค่าการแอ่นตัวในแนวราบและแนวบิดตามทิศทางหลักของอาคารจะมีค่าสูงสุดเมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับผนังด้านใดด้านหนึ่งของอาคาร นอกจากนี้การใช้วิธีการปรับแต่งมุมแบบโค้งมนด้วยอัตราส่วนการปรับแต่งมุมที่มากขึ้น จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการลดค่าการแอ่นตัวของอาคาร อย่างไรก็ตามแนวโน้มดังกล่าวไม่เด่นชัดในกรณีของการปรับแต่งมุมแบบเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Abstract

Wind tunnel high frequency force balance model tests of the CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) standard tall building were conducted. The experiment programme was carried out in a turbulent boundary layer wind tunnel at the Chulalongkorn University, which has 1.6 x 1.6 metres in cross-section and 7 metre in length. The rigid building model was tested in an open terrain wind model at the mean wind speed of 7 m/s at the top of the building model. The effects of corner modifications, i.e. square recession corners and roundness corners, with the corner modification ratios (d_y / D_y ratio) of 0.05, 0.10 and 0.15, on the wind-induced loads and responses of the CAARC building model were investigated under the wind directions of 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 degrees. The experimental results indicated a significant effect of the corner modifications on the vortex shedding process, which is the main excitation mechanism in the cross-wind direction. In addition, the corner modifications appeared to have a significant effect on a separation process of the wind at the upstream corners and a reattachment process of the separated shear layers along the side faces of the building model. These caused significant changes to the along-wind, cross-wind and torsional forces and responses of the building. The effectiveness of the corner modifications in reducing the along-wind, cross-wind and torsional responses was highest when the incident wind was normal to the building faces. For the building with roundness corners, the effectiveness in reducing the building responses was increased with increasing modification ratios. However, this relationship was not evident for the building with square recession corners.

พฤติกรรมการรับแรงลมและการตอบสนองของอาคารคู่แฝดที่มีการปรับแต่ง
รูปร่างบริเวณมุมอาคาร
EFFECTS OF INTERFERENCE AND EDGE CONFIGURATIONS ON
WIND-INDUCED LOADS AND RESPONSES OF TWIN TOWERS

ชาณุณรงค์ ฟุสกุล
CHANNARONG FUSAKUL

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ปีการศึกษา 2547

ISBN : 974-7990-73-3

พฤติกรรมการรับแรงลมและการตอบสนองของอาคารคู่แฝดที่มีการปรับแต่ง
รูปร่างบริเวณมุมอาคาร

EFFECTS OF INTERFERENCE AND EDGE CONFIGURATIONS ON
WIND-INDUCED LOADS AND RESPONSES OF TWIN TOWERS

ชาญณรงค์ พุสกุล เลขประจำตัว 44931002

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สุกิตย์ เทพมังกร

อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.สุกิตย์ เทพมังกร)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการ ดังมีรายชื่อต่อไปนี้

.....
(รศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)

.....
(รศ.ดร.นคร ภู่วโรดม)

.....
(ดร.ประกิจ เปรมธรรมกร)

.....
(ผศ.ดร.สุกิตย์ เทพมังกร)

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอผลการศึกษาเพื่อประมาณค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารเดี่ยว และอาคารคู่แฝดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร โดยใช้วิธีการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของอาคารในอุโมงค์ลม ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงลมของอาคารเดี่ยวและอาคารคู่แฝดสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ 1. รูปแบบของการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร 3 ลักษณะ ได้แก่ การปรับแต่งมุมแบบ มุมเว้า มุมตัด และมุมโค้งมน โดยกำหนดให้ขนาดของการปรับแต่งมุมอาคารมีขนาดคงที่เท่ากับ 0.20 เท่าของความกว้างอาคาร 2. ตำแหน่งที่ตั้งของอาคารข้างเคียงจำนวนทั้งสิ้น 49 ตำแหน่ง ภายในรัศมี 5 เท่าของความกว้างอาคาร และ 3. ทิศทางลมที่กระทำต่ออาคารทั้งสิ้น 4 ทิศทาง ได้แก่ 0 15 30 และ 45 องศา การทดสอบได้กระทำภายในอุโมงค์ลมที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขนาดหน้าตัด 1.60×1.60 เมตร และมีความยาวของ Test Section เท่ากับ 7 เมตร การจำลองขนาดของอาคารใช้มาตราส่วนเท่ากับ 1:400 โดยที่แบบจำลองอาคารมีขนาดความกว้าง 0.075 เมตร ความยาว 0.075 เมตร และความสูง 0.45 เมตร (อัตราส่วนความกว้าง : ความยาว : ความสูงของอาคารเท่ากับ 1:1:6) วิธีการวัดแรงและการคำนวณค่าการแอ่นตัวของอาคารเป็นไปตามหลักการของเทคนิค High Frequency Force Balance (HFFB) Model Tests ลักษณะของลมจำลองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ลมที่พัดผ่านสภาพภูมิประเทศแบบเปิดโล่ง (Open Terrain, $\alpha = 0.15$) โดยใช้ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับยอดอาคารเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที ในการทดสอบแบบจำลอง จากการศึกษาพบว่ารูปแบบหน้าตัดของอาคาร ทิศทางลม และระยะห่างระหว่างอาคาร มีผลต่อค่าแรงลมและการแอ่นตัวของโครงสร้างอาคาร ซึ่งในบางกรณีสามารถทำให้อาคารหลักต้องรับแรงเพิ่มขึ้นถึง 50% ได้ ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยข้างต้นมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการแยกตัวของลมบริเวณมุมอาคาร (Separation Processes) การไหลเวียนของกระแสลมโดยรอบอาคาร และกลไก Vortex Shedding Process ซึ่งมีผลต่อค่าแรงพลศาสตร์และการแอ่นตัวพลศาสตร์ของอาคารในทิศทางตามกระแสลม ทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม และทิศทางการบิดของอาคาร การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงที่กระทำกับอาคารหลักเมื่อมีอาคารข้างเคียงล้อมรอบอยู่ในตำแหน่งต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปของ Contours ที่เรียกว่า Iso-buffets ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบอาคารคู่แฝดแต่ละประเภทได้โดยตรง นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับแต่งมุมอาคารเป็นแบบมุมเว้า และมุมโค้งมน มีผลในการลดค่าแรงลมพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารหลักของอาคารคู่แฝด ได้ดีกว่าการปรับแต่งมุมแบบมุมตัด โดยสามารถลดค่าแรงลมได้ถึง 50% ในบางตำแหน่งของอาคารข้างเคียง

Abstract

An investigation into the effects of interference and edge configurations on the wind-induced forces and responses of isolated and twin towers was carried out. The major parameters for a detailed study are: 1. forms of the corner modifications, i.e. recession, cut and roundness, with a corner modification ratio (d/D ratio) of 0.20; 2. locations of the interfering building, i.e. a total number of 49 locations including both upstream and downstream from the principal building; and 3. directions of the incident wind, i.e. 0, 15, 30 and 45 degrees. Wind tunnel model tests of the 1/400 scaled building models were conducted in a boundary layer wind tunnel at the Chulalongkorn University, which has 1.6 x 1.6 metres in cross-section and 7 metres in length. The sizes of the building model are 0.075 x 0.075 x 0.45 metres (width : length : height = 1:1:6). The building model was made from balsa woods and mounted on a six-component force transducer. The wind forces were measured and the responses of the building model were calculated using the principles of the high frequency force balance technique. The building models were tested in an open terrain wind environment, using the tested mean wind speed of 7 m/s at the top of the building model. The experimental results indicated significant effects of the corner modifications, wind incident angles and locations of the interfering building on the wind-induced forces and responses of the building. An increase by up to 50% in the dynamic wind forces acting on the principal building was observed for some locations of the interfering building. This is due to changes in the separation and vortex shedding processes, which affect the along-wind, cross-wind and torsional forces, causing by the corner modifications and interfering building, for the range of wind directions tested. The regions of increased or decreased forces were presented in the form of normalised forces, or buffeting factors, contours. This contour of buffeting factors, i.e. iso-buffets, can easily be used for the design of the building under interference effects from an identical interfering building. It was also found that the recession and roundness corners demonstrated higher efficiency of the reduction of dynamic wind forces than the cut corner. A decrease by up to 50% in the dynamic wind forces was observed from the wind tunnel model test.

การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี HIGH FREQUENCY FORCE BALANCE เพื่อ การประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคาร

HIGH FREQUENCY FORCE BALANCE MODEL TESTS FOR A PREDICTION OF WIND-INDUCED FORCES AND RESPONSES OF BUILDINGS

ร.สุกิตย์ เทพมังกร (Sukit Thepmongkorn)

ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร Email: sukit@mut.ac.th

บทคัดย่อ : การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม โดยวิธี High frequency force balance (HFFB) model tests ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยทางด้านผลกระทบของแรงลมที่มีต่อโครงสร้างอาคารและเพื่อให้บริการทางด้านการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมแก่ชาวไทย งานวิจัยครอบคลุมตั้งแต่การศึกษารายละเอียดของวิธี HFFB การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบและคำนวณหาค่าการแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคารตามหลักการของ Frequency domain analysis และ Time domain analysis การจัดทำแบบจำลองย่อส่วนของอาคารมาตรฐาน CAARC และการทดสอบแบบจำลองในสภาพลมสำหรับภูมิประเทศแบบเปิดโล่ง จากการศึกษาพบว่า ค่าการแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคารในแนวทิศทางลม ทิศทางตั้งฉากกับลม และในแนวนอนที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าสอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่าการแอ่นตัวที่ประมาณโดยการทดสอบแบบ HFFB และ Aeroelastic model tests ของนักวิจัยท่านอื่นที่ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้

ABSTRACT : Wind tunnel high frequency force balance (HFFB) model tests were developed for predicting wind-induced responses of buildings. The study included a literature review of the HFFB technique, a development of the computer program for response predictions for both time and frequency domain analyses, a construction of a lightweight rigid model of the CAARC standard tall building, and a wind tunnel model test. Along-wind, cross-wind, and torsional deflection responses of the CAARC standard tall building were estimated for incident wind normal to both the wide and narrow faces of the building model. The results obtained from this study are consistent with the results obtained from the HFFB and aeroelastic model tests reported by other researchers.

KEYWORDS : TALL BUILDINGS, WIND TUNNEL TESTS, HFFB TECHNIQUE, WIND LOADINGS, WIND-INDUCED RESPONSES

บทนำ

เทคโนโลยีที่ทันสมัยในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง ประกอบด้วยการทางด้านวัสดุและเทคโนโลยีที่ใช้ในงานก่อสร้าง เป็นปัจจัยที่ส่งผลให้มีการก่อสร้างอาคารสูงเกิดขึ้นมากมายทั่วโลก นอกจากนี้แนวโน้มของการก่อสร้างอาคารที่มี

ความสูงมากขึ้นและมีน้ำหนักเบาว่าในอดีตจะยังมีให้เห็นมากขึ้น เนื่องจากปัจจัยเสริมทางด้านจำนวนประชากรและราคาที่ดินที่พุ่งสูงขึ้น

แรงลมนับได้ว่าเป็นแรงที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการออกแบบอาคารสูง เพราะนอกจากจะทำให้เกิดหน่วยแรง

ต่างๆขึ้นภายในชิ้นส่วนของโครงสร้างและระบบผนังของอาคารแล้ว แรงลมยังทำให้อาคารเกิดการแอ่นตัวและสั่นไหวได้ ซึ่งมักก่อให้เกิดปัญหากับอาคารที่มีความขรุขระมากหรือมีรูปทรงภายนอกที่ซับซ้อน นอกจากนี้อาคารที่ก่อสร้างโดยใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติความหน่วงที่ต่ำ (Low damping) จะยังมีระดับการสั่นไหวที่สูงขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้ใช้อาคารและกำลังรับน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างได้

วิธีการวิเคราะห์หาผลกระทบของแรงลมที่มีต่อโครงสร้างอาคารที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือในปัจจุบัน คือการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของอาคารในอุโมงค์ลม เนื่องจากการจำลองพฤติกรรมที่แท้จริงและให้ผลลัพธ์ที่นำมาใช้เพื่อการออกแบบได้โดยตรง การทดสอบโดยวิธี High frequency force balance (HFFB) model tests เป็นวิธีที่มีความสะดวกรวดเร็วและประหยัด โดยอาศัยหลักการวัดค่าแรงและโมเมนต์ลัพธ์ (Shear forces, Overturning moments, and Torsional moments) ที่ฐานของอาคาร จากนั้นทำการประมาณค่าแรงที่กระทำกับโครงสร้างสำหรับการเคลื่อนที่ใน Mode ต่างๆที่เรียกว่า Generalised forces และคำนวณหาค่าการสั่นไหวหรือการตอบสนองของอาคารโดยอาศัยคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ (Dynamic properties) ของโครงสร้าง วิธีการดังกล่าวได้รับการพัฒนาขึ้นครั้งแรกในช่วงต้นทศวรรษที่ 80 [1,2] และเป็นที่นิยมแพร่หลายไปทั่วโลก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิค High frequency force balance model tests เพื่อใช้ในงานวิจัยทางด้านผลกระทบของแรงลมที่มีต่อโครงสร้างและเพื่อให้บริการทางด้านการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนในอุโมงค์ลมแก๊สวิศวกรรมไทย

2. วิธี HFFB และการคำนวณค่าการสั่นไหวของอาคาร

วิธี HFFB เป็นการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมเพื่อวัดแรงและโมเมนต์ลัพธ์ที่ฐานของอาคารที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงลม โดยใช้แบบจำลองประเภทแข็งเกร็ง (Rigid model) ซึ่งจำลองเพียงรูปทรงภายนอกของอาคารเท่านั้น หลังจากนั้นจึงประมาณค่าแรงและการสั่นไหวของอาคารโดยใช้คุณสมบัติทางด้าน มวล สถิตินิส และความหน่วงของโครงสร้าง ซึ่งวิศวกรผู้ออกแบบสามารถคำนวณค่า มวล สถิตินิส และความหน่วงของโครงสร้างพร้อมทั้งทดลองปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าว เพื่อตรวจสอบผลกระทบที่มีต่อค่าการแอ่นตัวของอาคาร และนำผลที่ได้มาใช้เป็นข้อมูล

เพื่อการออกแบบรายละเอียดของโครงสร้าง จุดเด่นดังกล่าวทำให้วิธีการนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย

รายละเอียดที่สำคัญของวิธี HFFB และการประมาณค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างตามที่แสดงใน [1,3,4,5] สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

2.1 หลักการพื้นฐานของวิธี HFFB

ค่า Generalised forces, $P(t)$, คือค่าแรงภายนอกที่กระทำกับระบบสำหรับการเคลื่อนที่ในแต่ละ Mode ตามสมการที่ 1

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

โดยที่ $w(z, t)$ คือแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างที่ความสูง z เหนือพื้นดิน และ $\phi(z)$ คือ รูปแบบการสั่นไหวหรือการแอ่นตัว (Mode shape) ของโครงสร้าง และ h คือ ความสูงของอาคาร

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

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

ในกรณีของอาคารที่มี Mode shape เป็นรูปเส้นตรง ($\phi(z) = (z/h)$) ค่าโมเมนต์ $M(t)$ ที่ฐานของอาคารจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่า Generalised forces, $P(t)$, ตามสมการที่ 3

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

หลังจากที่ประมาณค่า Generalised forces สำหรับการเคลื่อนที่ในแต่ละ Mode แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าการแอ่นตัวของโครงสร้าง ตามหลักการทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง (Structural dynamics) และทฤษฎีการสั่นไหวของโครงสร้าง (Theory of vibration) ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้

2.2 การคำนวณค่าการแอ่นตัวตามหลักการ Frequency domain analysis

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

$$\bar{R} = \frac{\bar{P}}{k} \tag{4}$$

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

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

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

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

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

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

ค่าสูงสุดของการแอ่นตัว $\hat{R}$ สามารถประมาณได้จากค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัว ตามสมการที่ 8

$$\hat{R} = \bar{R} + g \cdot \sigma_R \tag{8}$$

โดยที่ g คือค่าทางสถิติที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของค่าสูงสุดต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เรียกว่า Statistical peak factor ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.0-4.5

2.3 การคำนวณค่าการแอ่นตัวตามหลักการ Time domain analysis

ค่าการแอ่นตัวของอาคารในแต่ละ Mode การเคลื่อนที่ (Generalised deflection responses), $R(t)$, สามารถคำนวณได้โดยการแก้สมการการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นผลมาจากสมมูลของแรงที่กระทำกับระบบตามสมการที่ 9

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

โดยที่ m c และ k คือ มวล ความหน่วง และสติฟเนส ของอาคารตามลำดับ สำหรับการเคลื่อนที่ในแต่ละ Mode ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 10 ถึงสมการที่ 12

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

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

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

เมื่อทราบค่า $R(t)$ ทุกค่าในช่วงเวลาที่สนใจแล้ว (ปกติคือ 1 ชั่วโมง) จึงทำการหาค่าเฉลี่ย $\bar{R}$ และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_R หลังจากนั้นจึงประมาณค่าสูงสุดของการแอ่นตัว $\hat{R}$ ตามสมการที่ 8

3. ค่าการแอ่นตัวของอาคารมาตรฐาน CAARC

3.1 อาคารมาตรฐาน CAARC และแบบจำลอง

อาคารมาตรฐาน CAARC [6] เป็นอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีความกว้าง 30 เมตร ความยาว 45 เมตร ความสูง 180 เมตร มีความหนาแน่น 160 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การสั่นไหวใน

แนวราบทั้งสองทิศทาง มี Mode shape เป็นเส้นตรง มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 0.2 Hz และความหน่วงเท่ากับ 0.01 นอกจากนี้เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการแอนตัวในทิศทางการบิดกับงานวิจัยอื่นได้ จึงกำหนดเพิ่มเติมให้ความถี่ธรรมชาติและความหน่วงในแนวนอนเท่ากับ 0.36 Hz และ 0.014 ตามลำดับ และ Mode shape ในแนวนอนมีค่าคงที่ตลอดความสูงของอาคาร

แบบจำลองย่อยส่วนของอาคารได้รับการจัดทำโดยใช้มาตราส่วน 1:400 มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง ความถี่ธรรมชาติในแนวราบและแนวนอนมีค่าสูงเกินกว่า 100 Hz ซึ่งทำให้แรงและโมเมนต์ที่วัดได้มีความถูกต้องไม่มีการขยายตัวเนื่องจากผลของการสั่นไหวของแบบจำลอง

3.2 การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

แบบจำลองอาคารได้ถูกติดตั้งบนเครื่องมือวัดแรง-โมเมนต์ที่มีความละเอียดสูง สามารถวัดค่าแรง-โมเมนต์ได้พร้อมกันถึง 6 ทิศทาง การทดสอบได้กระทำที่ห้องปฏิบัติการอุโมงค์ลมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้สภาพลมจำลองสำหรับพื้นที่แบบเปิดโล่ง (Open terrain exposure) โดยทำการทดสอบในทิศทางลมตั้งฉากกับด้านกว้างและด้านยาวของอาคาร ที่ความเร็วลมเฉลี่ยระดับยอดอาคารประมาณ 6 เมตรต่อวินาที และเก็บข้อมูลด้วยความเร็ว 1000 ข้อมูลต่อวินาที เป็นจำนวนทั้งสิ้น 65536 ข้อมูล (เวลาประมาณ 65.5 วินาที) ผลการทดสอบได้ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบในรูปของการแอนตัวและการบิดที่ระดับยอดของอาคาร

3.3 การแอนตัวของอาคารมาตรฐาน CAARC ในแนว

ทิศทางลมและแนวตั้งฉากกับทิศทางลม

เมื่อทิศทางลมตั้งฉากกับด้านยาวของอาคาร ค่าการแอนตัวที่ระดับยอดของอาคารในแนวทิศทางลม และแนวตั้งฉากกับทิศทางลมได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนค่าการแอนตัวของอาคารเมื่อทิศทางลมตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคารได้แสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ค่าความเร็วลมเฉลี่ยของทั้งสองกรณีดังกล่าวได้ถูกแปลงให้อยู่ในรูปของ Reduced wind velocity, $\bar{U}_h / n_{y-y} D_y$ และ $\bar{U}_h / n_{x-x} D_y$, ซึ่งไม่มีหน่วยสำหรับเปรียบเทียบการแอนตัวในทิศทาง x และ y ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าการแอนตัวในแนวทิศทางลมและ

แนวตั้งฉากกับทิศทางลมมีค่าสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับงานวิจัยอื่นที่ผ่านมา

3.4 การแอนตัวของอาคารมาตรฐาน CAARC ในแนวนอน

ค่าการแอนตัวในแนวนอนที่ระดับยอดของอาคาร (σ_z) เมื่อทิศทางลมตั้งฉากกับด้านยาวของอาคารได้แสดงในรูปที่ 5 ในกรณีนี้ค่า Reduced wind velocity มีค่าเท่ากับ $\bar{U}_h / n_{z-z} D_y$ จากการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบโดยวิธี BHA model ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารในแนวราบและแนวนอนได้พร้อมกัน [7] พบว่าค่าการบิดของอาคารที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ยกเว้นในช่วง Reduced wind velocity เท่ากับ 5 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการกำทอนของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับลมและส่งถ่ายพลังงานมายังทิศทางการบิดและทำให้ค่าการบิดมีค่าสูงมากขึ้น ซึ่งเป็นกลไกทางด้าน Aeroelastic effects ที่วิธี HFFB ไม่สามารถจำลองได้ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการบิดของอาคาร CAARC (อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 1.5) มีค่าอยู่ระหว่างงานของ [8] และ [9] ซึ่งเป็นการศึกษาอาคารที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2 และ 1 ตามลำดับ

ค่าการบิดของอาคารเมื่อทิศทางลมตั้งฉากกับความกว้างของอาคารได้แสดงในรูปที่ 6 ในกรณีนี้ค่า Reduced wind velocity มีค่าเท่ากับ $\bar{U}_h / n_{z-z} D_x$ จากการศึกษาพบว่าค่าโมเมนต์บิดที่ตรวจวัดได้มีค่าค่อนข้างน้อยสำหรับทิศทางลมนี้ จึงทำให้ค่าการบิดมีความแตกต่างจากงานวิจัยอื่นอยู่บ้างในช่วงความเร็วลมสูงๆ อย่างไรก็ตามค่าที่ได้มีความสอดคล้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิค High frequency force balance model tests เพื่อใช้ในงานวิจัยทางด้านผลกระทบของแรงลมที่มีต่อโครงสร้างและเพื่อให้บริการทางด้านการทดสอบแบบจำลองย่อยส่วนในอุโมงค์ลมแก่วิศวกรไทย งานวิจัยครอบคลุมตั้งแต่การศึกษาหลักการของวิธี HFFB การทดสอบแบบจำลองอาคารมาตรฐาน CAARC และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ จากการศึกษาพบว่าค่าการแอนตัวที่ระดับยอดของอาคารมาตรฐาน CAARC ในแนวทิศทางลม ทิศทางตั้งฉากกับลม และในแนวนอนที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีค่าสอดคล้องเป็นอย่างดี

กับค่าการแอ่นตัวที่ประมาณโดยการทดสอบแบบ HFFB model tests และ Aeroelastic model tests ที่ตีพิมพ์ไว้ก่อนหน้านี้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยต่อเนื่องชิ้นนี้ได้เริ่มต้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ รศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อูโมงค์ลม และเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการทดสอบ ตลอดจนคำแนะนำที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ คุณอัครพล คนสุขชื่น คุณชาญณรงค์ ฟุสกุล และคุณสุรัฐชล ช่วยทุกข์ นักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สำหรับการจัดทำแบบจำลองอาคาร การทดสอบในอุโมงค์ลม และการวิเคราะห์ผล โครงการนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ทบวงมหาวิทยาลัย และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ความเห็นในบทความนี้เป็นของผู้วิจัยและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Tschanz, T., 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, 1982.

[2] Tschanz, T. and Davenport, A.G., The base balance technique for the determination of dynamic wind loads, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 13, pp. 429-439, 1983.

[3] Steckley, A., Motion-induced wind forces on chimneys and tall buildings, Ph.D. thesis, University of Western Ontario, Canada, 1989.

[4] Thepmongkorn, S., Wood, G.S., Hitchcock, P.A. and Kwok, K.C.S., High frequency force balance model tests, unpublished paper, 2000.

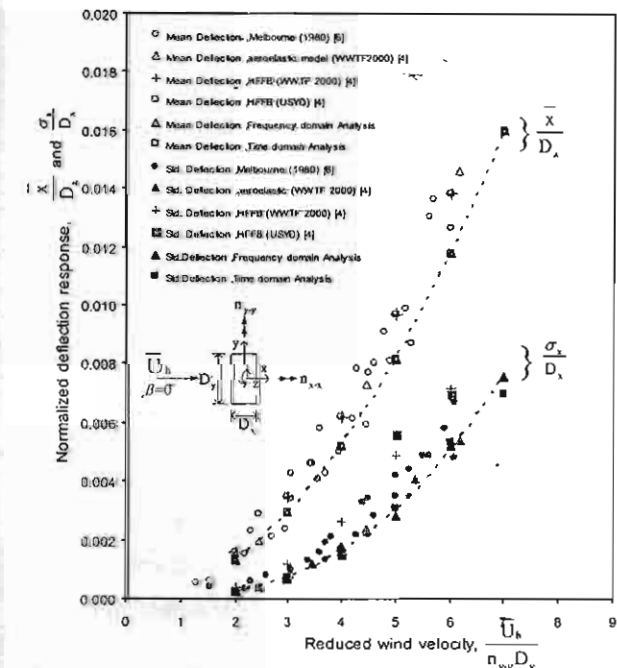
[5] Clough, R.W. and Penzien, J., Dynamics of structures, 2nd Edition, McGraw-Hill Inc., 1993.

[6] Melbourne, W.H., 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, 1980.

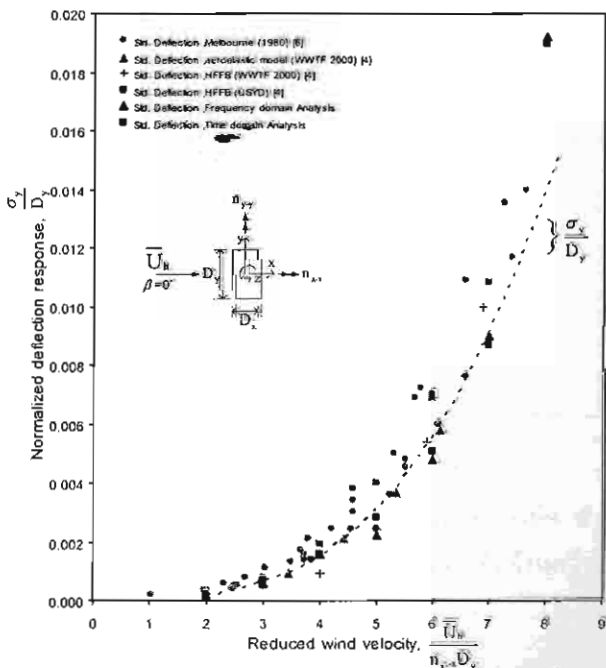
[7] Thepmongkorn, S. and Kwok, K.C.S., Load combination and response combination of wind-excited tall buildings and the effects of structural eccentricity, Proceedings of 10th International Conference on Wind Engineering, Copenhagen, Denmark, pp. 713-720, 1999.

[8] Xu, Y.L., Vibration control of wind-excited tall/slender structures, Ph.D. thesis, School of Civil and Mining Engineering, The University of Sydney, Australia, 1991.

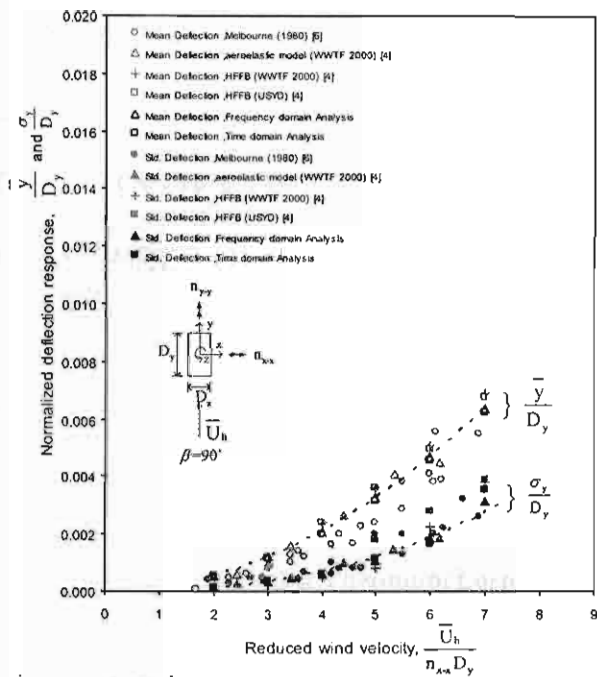
[9] Zhang, W.J., Xu, Y.L. and Kwok, K.C.S., Torsional vibration and stability of wind-excited tall buildings with eccentricity, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 50, pp. 299-308, 1993.



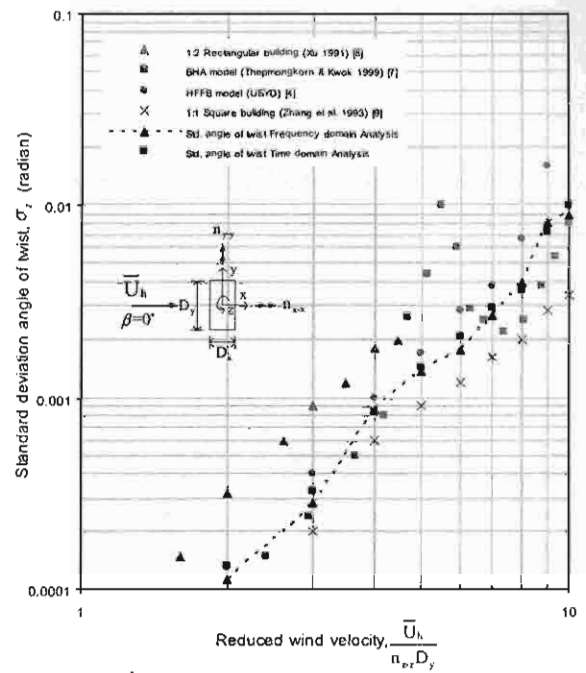
รูปที่ 1 การแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อสมพัทธ์ปะทะตั้งฉากกับด้านยาวของอาคาร



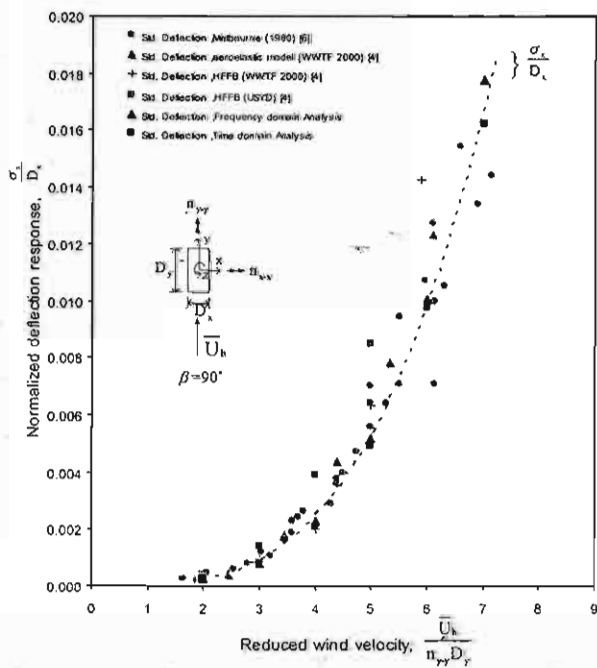
รูปที่ 2 การแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวตั้งฉากกับทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อสมพัทธ์ปะทะตั้งฉากกับด้านยาวของอาคาร



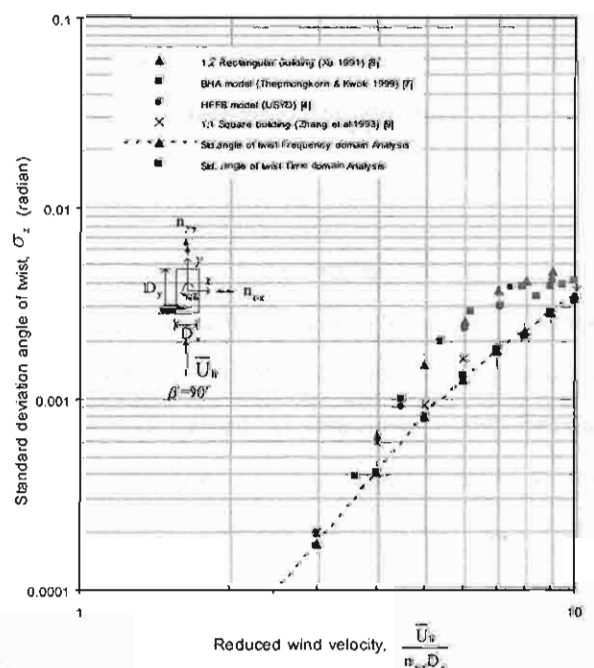
รูปที่ 3 การแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคาร



รูปที่ 5 การแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวบิด สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านยาวของอาคาร



รูปที่ 4 การแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวตั้งฉากกับทิศทางลม สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคาร



รูปที่ 6 การแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคาร CAARC ในแนวบิด สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ เมื่อลมพัดปะทะตั้งฉากกับด้านกว้างของอาคาร

ผลกระทบของรูปร่างบริเวณมุมอาคารที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงลม และการตอบสนองของอาคาร

EFFECTS OF CORNER MODIFICATIONS ON WIND-INDUCED LOADS AND RESPONSES OF TALL BUILDINGS

อักรพล ตนสุขชื่น (Akkraphon Tulsukchuen)

นักศึกษานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร Email: t_akk@yahoo.com

ดร.สุกิตย์ เทพมังกร (Sukit Thepmongkorn)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร Email: sukit@mut.ac.th

บทคัดย่อ : การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมของอาคารมาตรฐาน CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) ที่มีการปรับแต่งมุมของอาคารเป็นแบบโค้งมน และเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยอัตราส่วน 0.05, 0.10 และ 0.15 ได้รับการจัดทำโดยใช้เทคนิค High frequency force balance (HFFB) model tests จากการศึกษาพบว่า การปรับแต่งมุมทั้งสองลักษณะมีผลทำให้ค่าการแอ่นตัวของอาคารในทิศทางตามกระแสลม การแอ่นตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม และการบิดตัวของอาคารลดลง โดยที่การปรับแต่งมุมอาคารเป็นแบบเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีแนวโน้มที่จะลดระดับการแอ่นตัวและการบิดตัวของอาคารได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการลดระดับการแอ่นตัวและการบิดตัวของอาคารจะมีค่าสูงสุดเมื่อทิศทางการปะทะของลมตั้งฉากกับผนังอาคาร

ABSTRACT : Wind tunnel high frequency force balance model tests of the CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) standard tall building were carried out. The effects of the corner modifications, i.e. roundness corners and square recession corners, with ratios of 0.05, 0.10 and 0.15, on the wind-induced loads and responses of the CAARC building model were investigated. It was found that the along-wind, cross-wind and torsional responses of the building with corner modifications were generally lower than the responses of the CAARC building. In addition, the use of square recession corners to reduce the wind-induced responses tended to be more effective than the roundness corners, especially when the direction of the approach wind was normal to the building faces.

KEYWORDS : WIND LOADS, WIND-INDUCED RESPONSES, TALL BUILDINGS, CORNER MODIFICATIONS, HIGH FREQUENCY FORCE BALANCE TECHNIQUE

1. บทนำ

การปรับแต่งลักษณะขอบมุมของอาคารเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดระดับความรุนแรงในการแอ่นตัวของอาคารได้เป็นอย่างดี [1] ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงอิทธิพลของการปรับแต่งมุมของอาคารแบบต่างๆ เช่น มุมมน, มุมตัด และมุมเว้า เป็นต้น [2,3,4,5,6] งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบต่ออาคารที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2 อย่างไรก็ตาม การศึกษาอิทธิพลของการปรับแต่งขอบมุมของอาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 1.5 ยังมีไม่มากเท่าที่ควร ทั้งๆที่อาคารดังกล่าวมีพฤติกรรมการรับแรงลมที่แตกต่างไปจากอาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าลักษณะอื่น [7]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการปรับแต่งขอบมุมของอาคารที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรง และการสั่นไหวของอาคารมาตรฐาน CAARC (Commonwealth advisory aeronautical research council) [8] ซึ่งมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 1.5 และมีคุณสมบัติต่างๆดังแสดงในตารางที่ 1 การปรับแต่งมุมอาคารมี 2 ลักษณะคือมุมมน (Roundness corners) และมุมเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Recession corners) มีอัตราส่วนการปรับแต่งมุม (b/B) เท่ากับ 0.05, 0.10 และ 0.15 ดังแสดงในรูปที่ 1 การศึกษาใช้วิธีการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนในอุโมงค์ลมโดยเทคนิค High frequency force balance (HFFB) model tests [9,10] เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรง และการสั่นไหวของโครงสร้างอาคาร ภายใต้ทิศทางลม (β) เท่ากับ 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา

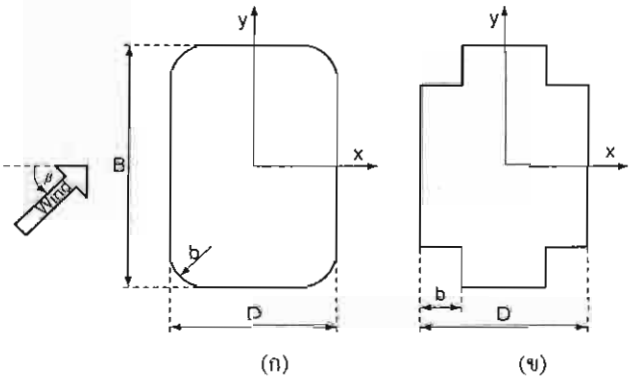
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอาคารมาตรฐาน CAARC

ขนาดมิติ กว้าง : ยาว : สูง	30 : 45 : 180 ม.
ความถี่ธรรมชาติสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวราบ	0.2 Hz
ความถี่ธรรมชาติสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวการบิด	0.36 Hz
ความหนาแน่นของอาคาร	160 กก./ลบ.ม.
อัตราตารสลายพลังงานการสั่นในแนวราบ	0.01
อัตราตารสลายพลังงานการสั่นในแนวการบิด	0.014

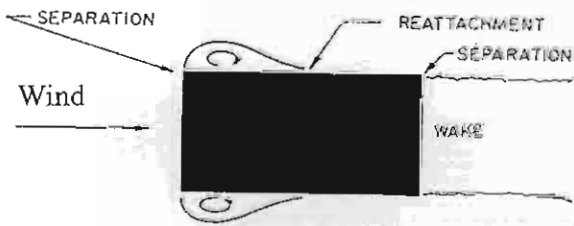
2. อาคารที่มีลักษณะของมุมที่แตกต่างกัน

การปรับแต่งขอบมุมของอาคารทำให้พื้นที่การปะทะของลมลดลง และส่งผลกระทบต่อกรไหลเวียนของลมโดยรอบอาคาร ทำให้แรงในทิศทางตามกระแสลม (Drag force) แรงในทิศทาง

ตั้งฉากกับกระแสลม (Lift force) และ แรงบิด (Twisting moment) ที่เกิดบนอาคารเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของแรงดังกล่าวเกิดขึ้นจากกลไก 3 ประการคือ การแยกตัวของลมบริเวณขอบมุมอาคาร (Separation) การพัดผ่านของลมด้านข้างอาคาร (Reattachment) และการพัดของลมที่ปั่นป่วนบริเวณด้านหลังของอาคาร (Wake) ซึ่งกลไกทั้ง 3 ประการจะเกิดขึ้นควบคู่กัน โดยเกิดการแยกตัวของลมบริเวณมุมของอาคารก่อน หลังจากนั้นจึงเกิดการพัดผ่านของลมด้านข้างอาคาร และการพัดของลมที่ปั่นป่วนบริเวณด้านหลังของอาคารดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ลักษณะหน้าตัดของอาคารที่ใช้ในการทดสอบ (ก) มุมมน (Roundness corners) และ (ข) มุมเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Recession corners)



รูปที่ 2 การแยกตัวของลมบริเวณมุมของอาคาร การพัดผ่านของลมด้านข้างอาคารและการเกิดลมปั่นป่วนด้านหลังอาคาร [7]

3. การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

การทดสอบได้กระทำในห้องปฏิบัติการอุโมงค์ลมของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขนาดหน้าตัดของอุโมงค์ลม 1.6 x 1.6 เมตร และมีความยาว 7 เมตร แบบจำลองอาคารได้จัดทำโดยการย่อขนาดด้วยมาตราส่วน 1/400 และทดสอบในสภาพลมสำหรับพื้นที่เปิดโล่ง (Open terrain) โดยใช้ความเร็วลมเฉลี่ยในการทดสอบเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาทีที่ระดับยอดของอาคาร และ

เก็บข้อมูลด้วยความเร็ว 1,000 ข้อมูลต่อวินาทีเป็นเวลาทั้งสิ้น 11 นาที

งานศึกษาได้ใช้แบบจำลองทั้งสิ้น 7 ตัวอย่าง ได้แก่ อาคารมาตรฐาน CAARC 1 ตัวอย่าง อาคารมาตรฐาน CAARC ที่มีการปรับแต่งขอบมุมอาคารแบบเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 3 ตัวอย่าง และอาคารมาตรฐาน CAARC ที่มีการปรับแต่งขอบมุมของอาคารแบบมน 3 ตัวอย่าง

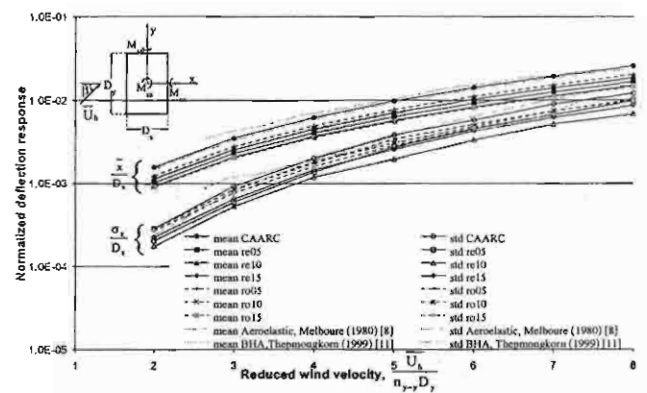
4. ผลการทดสอบ

จากการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนในอุโมงค์ลมพบว่า อาคารที่มีการปรับแต่งมุมมีระดับการสั่นไหวแตกต่างไปจากอาคารรูปทรงปกติ ผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความเร็วมได้แสดงในรูปที่ 3 ถึง 8 และผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของทิศทางลมได้แสดงในรูปที่ 9 ถึง 11

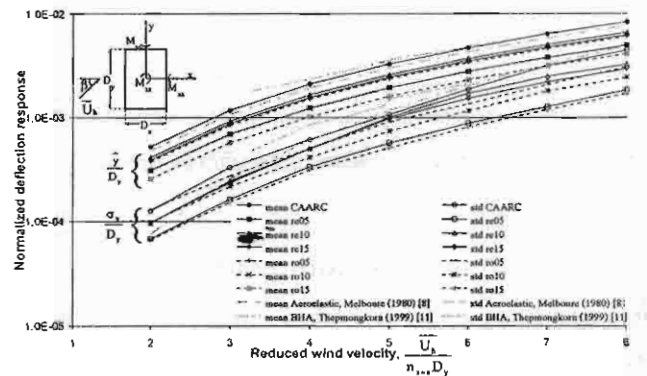
4.1 อิทธิพลของความเร็วมที่มีต่อการแอ่นตัวของอาคาร
ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของอาคารในทิศทางตามกระแสลม (Along wind mean displacement) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวในทิศทางตามกระแสลม (Along wind standard deviation displacement) ที่แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งให้เห็นว่าอาคารที่มีการปรับแต่งขอบมุมของอาคารมีระดับการแอ่นตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุม เมื่อพิจารณาค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของอาคารพบว่า มีค่าลดลง ขึ้นอยู่กับลักษณะและอัตราส่วนการปรับแต่งมุมของอาคารดังแสดงในตารางที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากแรงลมเฉลี่ยที่กระทำกับอาคารที่มีการปรับแต่งขอบมุมมีขนาดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุมดังแสดงในตารางที่ 3 เช่นเดียวกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคารในทิศทางตามกระแสลมที่มีขนาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของแรงพลศาสตร์ (Dynamic wind force) ที่กระทำกับอาคารมีขนาดลดลง โดยสามารถพิจารณาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ Power spectral density ของแรงที่กระทำกับอาคารในทิศทางตามกระแสลม ที่แสดงในรูปที่ 4

เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมที่แสดงในรูปที่ 5 พบว่าระดับการแอ่นตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมของอาคารเมื่อการปะทะของลมทำมุม 0 และ 90 องศา มีลักษณะแตกต่างกัน การแอ่นตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมเมื่อ

การปะทะของลมทำมุม 0 องศา มีค่าลดลงสำหรับความเร็วมต่ำๆ แต่เมื่อความเร็วมสูงขึ้น อาคารที่มีการปรับแต่งมุมบางอาคารมีค่าการแอ่นตัวสูงกว่าอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุมในทางตรงกันข้ามเมื่อทิศทางลมทำมุม 90 องศาการปรับแต่งมุมไม่มีผลต่อการแอ่นตัวของอาคารสำหรับความเร็วมต่ำๆ แต่เมื่อความเร็วมสูงขึ้นอาคารที่มีการปรับแต่งมุมมีค่าการแอ่นตัวลดลง โดยเฉลี่ยแล้วค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมจะมีค่าลดลงเนื่องจากแรงลมพลศาสตร์ที่กระทำต่ออาคารมีขนาดลดลงซึ่งสามารถพิจารณาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ Power spectral density ของแรงที่กระทำต่ออาคารในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม ตามที่แสดงในรูปที่ 6



(n)



(ข)

รูปที่ 3 ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคารในแนวทิศทางลม (n) $\beta = 0$ องศา (ข) $\beta = 90$ องศา

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการบิดตัวของอาคาร (Standard deviation angle of twist) ที่แสดงในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งมุมของอาคารมีผลต่อค่าการบิดตัวของอาคารสำหรับทิศทางลมเท่ากับ 0 องศาและ 90 องศา โดยที่การปรับแต่งมุมแบบเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีประสิทธิภาพในการลดค่าองศา

การบิดตัวของอาคารมากกว่าการปรับแต่งมุมแบบมน เนื่องจากแรงพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารมีขนาดลดลงเมื่อเทียบกับอาคารปกติ ซึ่งยืนยันได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ Power spectral density ของแรงที่กระทำกับอาคารในทิศทางการบิดของอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 8

ตารางที่ 2 สัดส่วนของระยะการแอ่นตัวเฉลี่ยของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมเปรียบเทียบกับอาคารปกติ

	re05	re10	re15	ro05	ro10	ro15
0 องศา	0.654	0.591	0.727	0.795	0.734	0.578
90 องศา	0.595	0.794	0.748	0.722	0.589	0.489

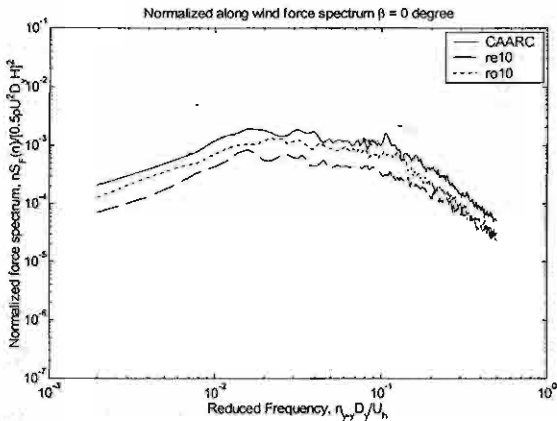
ตารางที่ 3 สัดส่วนของค่าเฉลี่ยแรงลมในทิศทางตามกระแสลมที่กระทำกับอาคารที่มีการปรับแต่งมุมเปรียบเทียบกับอาคารปกติ

	re05	re10	re15	ro05	ro10	ro15
0 องศา	0.754	0.682	0.748	0.806	0.722	0.677
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

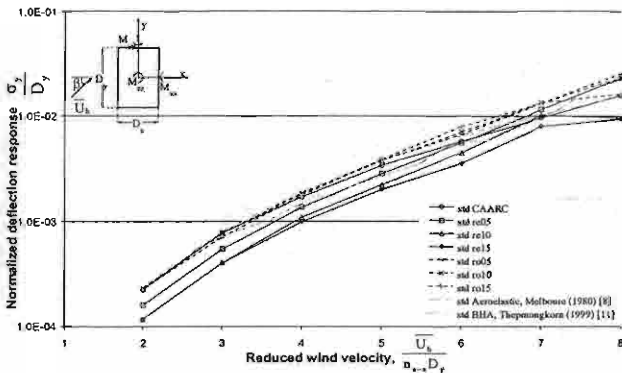
ro05, ro10, ro15 คืออาคารที่มีการปรับแต่งมุมแบบมนด้วยอัตราส่วน 0.05, 0.10, 0.15 ตามลำดับ



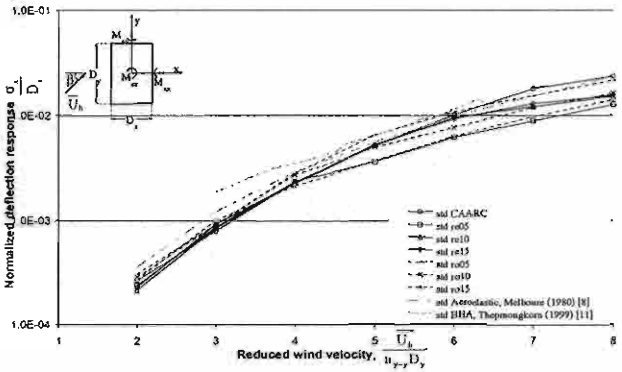
รูปที่ 4 Power spectral density ของแรงลมที่กระทำกับอาคารในทิศทางตามกระแสลม (Normalized along wind force spectrum)

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถชี้ให้เห็นว่าการปรับแต่งมุมของอาคารสามารถลดระดับการแอ่นตัวของอาคารได้เนื่องจากการปรับแต่งมุมมีผลต่อพฤติกรรมการแยกตัวของลมบริเวณมุมอาคาร การพัดผ่านด้านข้างของอาคาร และการพัดของลมที่ป้อนบริเวณด้านหลังของอาคาร โดยที่พฤติกรรมการแยกตัว

ของลมบริเวณมุมอาคาร และการพัดของลมที่ป้อนบริเวณด้านหลังอาคารเป็นกลไกสำคัญสำหรับการสั่นไหวในทิศทางตามกระแสลม และการแยกตัวบริเวณมุมอาคาร และการพัดผ่านด้านข้างของอาคารเป็นกลไกสำคัญสำหรับการสั่นไหวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม และในทิศทางการบิด



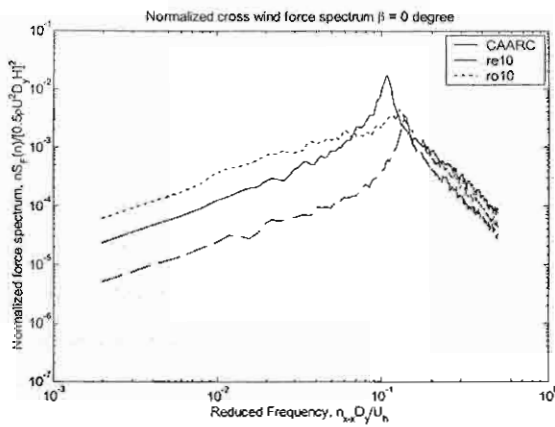
(ก)



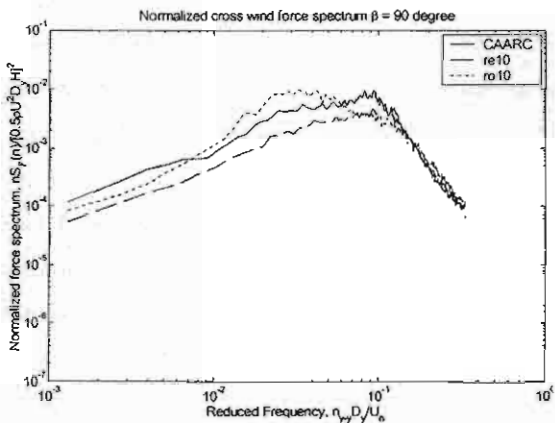
(ข)

รูปที่ 5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคารที่ระดับยอดอาคารในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม (ก) $\beta = 0$ องศา (ข) $\beta = 90$ องศา

4.2 อิทธิพลของทิศทางการที่มีต่อการแอ่นตัวของอาคาร
การแอ่นตัวเฉลี่ยของอาคารในทิศทางตามแกน x และ แกน y เมื่อความเร็วไร้หน่วย (Reduced wind velocity) เท่ากับ 4 ที่แสดงในรูปที่ 9 ชี้ให้เห็นว่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุมอาคารในทุกทิศทางการปะทะของลม อย่างไรก็ตาม การลดระดับการแอ่นตัวของอาคารมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อทิศทางการปะทะของลมกระทำตั้งฉากกับผนังอาคาร เนื่องจากเมื่อทิศทางการปะทะของลมมีองศามากขึ้น รูปแบบการแยกตัวของลมบริเวณขอบมุมอาคารที่มีการปรับแต่งมุมจะมีความใกล้เคียงกับการแยกตัวของลมบริเวณมุมของอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุม



(ก)



(ข)

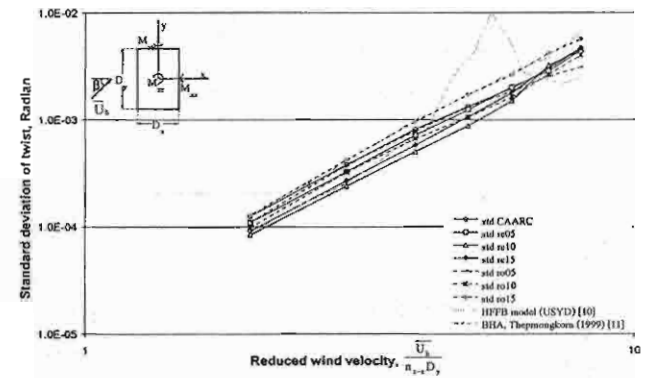
รูปที่ 6 Power spectral density ของแรงลมที่กระทำกับอาคารในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม (Normalized cross wind force spectrum) (ก) $\beta = 0$ องศา (ข) $\beta = 90$ องศา

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวในแนวแกน x และ y และค่าการบิดตัวของอาคารเมื่อความเร็วลมไร้หน่วยเท่ากับ 4 ที่แสดงในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งมุมของอาคารสามารถลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการแอ่นตัวและการบิดตัวของอาคารได้ดีที่สุดเมื่อลมกระทำในทิศทางตั้งฉากกับผนังอาคาร และเมื่อทิศทางการปะทะของลมเปลี่ยนไป ประสิทธิภาพในการลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคารจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากรูปแบบการแยกตัวของลมบริเวณขอบมุมของอาคารที่มีการปรับแต่งมุมจะมีความใกล้เคียงกับการแยกตัวของลมบริเวณมุมของอาคารที่ไม่มีการปรับแต่งมุม

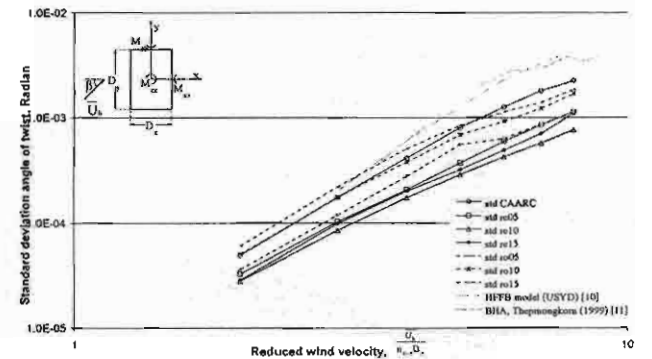
5. สรุปผล

การปรับแต่งขอบมุมของอาคารลักษณะว่าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีประสิทธิภาพในการลดการแอ่นตัวของอาคารได้ดีกว่าการปรับแต่งมุมอาคารแบบมุมมนสำหรับช่วงความเร็วลมที่ทำการทดสอบ

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบเนื่องจากทิศทางการปะทะของลม พบว่าการปรับแต่งมุมอาคารสามารถลดระดับความรุนแรงในการแอ่นตัวของอาคารได้ดีที่สุดเมื่อทิศทางทางลมกระทำตั้งฉากกับผนังอาคาร และเมื่อทิศทางการปะทะของลมมีองศามากขึ้น ประสิทธิภาพในการลดการแอ่นตัวของอาคารจะลดลง



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการบิดตัวของอาคาร (ก) $\beta = 0$ องศา (ข) $\beta = 90$ องศา

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ รศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้อนุเคราะห์ในการใช้ข้อมูล และเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการทดสอบ โครงการนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ความเห็นในบทความนี้เป็นของผู้วิจัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kareem, A., Kijewski, T. and Tamura, Y., Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications, Wind and Structures, Vol. 2, No. 3, Page 210 – 205, 1999.

[2] Kawai, H., Effect of corner modifications on aeroelastic instabilities of tall building, J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 74 - 76, Page 719 - 729, 1998.

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

[4] Choi, C. and Kwon, D., 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, 2003.

[5] Kwok, K.C.S., Wilhelm, P.A., Wilkie, B.G., Effect of edge configuration on wind-induced response of tall buildings, Engineering Structures, Vol. 10, Page 135 - 140, 1988.

[6] Kwok, K.C.S., Effect of building shape on wind-induced response of tall building, J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 28, Page 381 - 390, 1988.

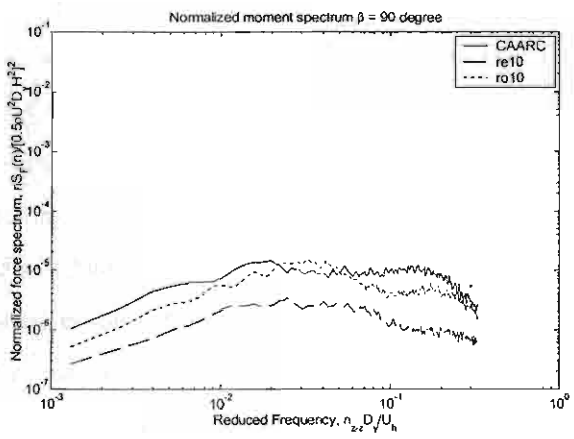
[7] Simui, E. and Scanlan, R.H., Wind effects on structures, 3rd Edition, John Willy & Sons, New York, 1996.

[8] Melbourne, W.H., Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows, J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 6, Page 73 - 88, 1980.

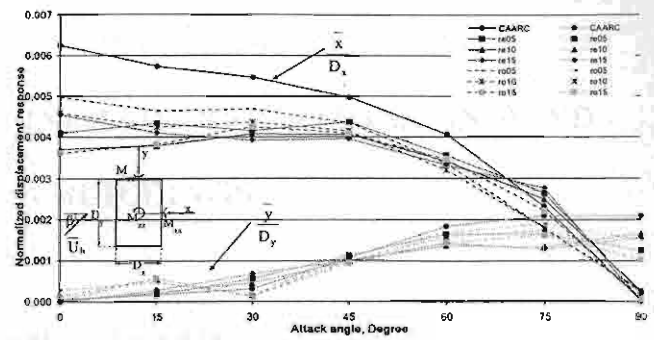
[9] Tschanz, T. and Davenport, A.G., The base balance technique for the determination of dynamic wind loads., J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 13, Page 429 - 439, 1983.

[10] Thepmongkorn, S., Wood, G.S., Hitchcock, P.A. and Kwok, K.C.S., High frequency force balance model tests, Unpublished paper, 2000.

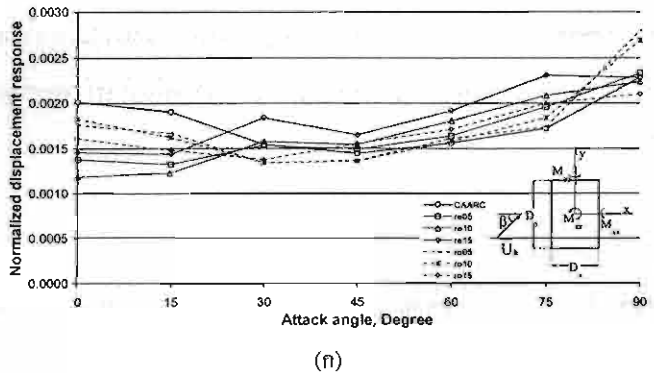
[11] Thepmongkorn, S., Kwok, K.C.S. and Lakshmanan, N., A two-degree-of-freedom base hinged aeroelastic (BHA) model for response predictions, J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 83, Page 171 - 181, 1999.



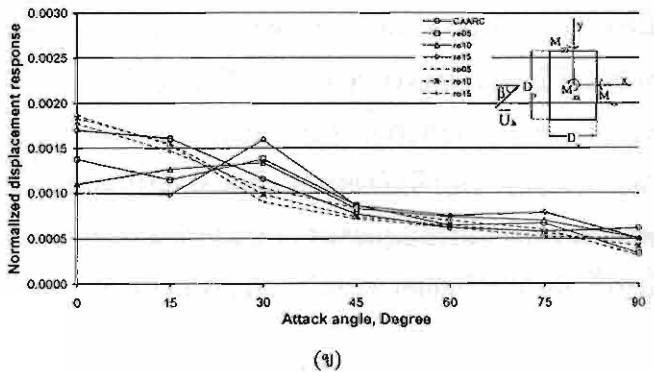
รูปที่ 8 Power spectral density ของแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างในทิศทาง การบิดตัว (Normalized twisting moment spectrum) เมื่อลมปะทะทำมุม 90 องศา กับอาคาร



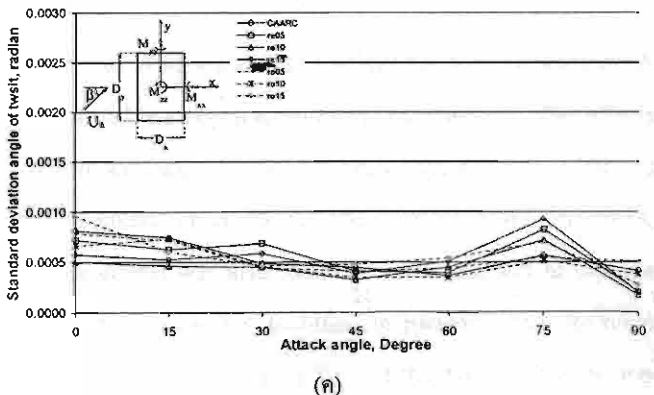
รูปที่ 9 การแอ่นตัวเฉลี่ยของอาคารในแนวแกน x และ y เมื่อทิศทางลมเท่ากับ 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 10 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัวของอาคาร (ก) การแอ่นตัวของอาคารในแนวแกน x (ข) การแอ่นตัวของอาคารในแนวแกน y (ค) การบิดตัวของอาคาร

แรงลมที่กระทำกับอาคารคู่แฝดซึ่งมีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร

EFFECTS OF INTERFERENCE AND CORNER MODIFICATIONS ON WIND LOADINGS OF TWIN BUILDINGS

ชาญณรงค์ ฟุสกุล (Channarong Fusakul)¹

ดร.สุกิตย์ เทพมังกร (Sukit Thepmongkorn)²

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร Email : fu449@hotmail.com

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร Email : sukitt@mut.ac.th

บทคัดย่อ : บทความนี้เสนอผลการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของอาคารคู่แฝดในอุโมงค์ลม เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะห่าง การจัดเรียงตัวของอาคาร และการปรับแต่งมุมอาคารเป็นแบบเว้า ตัด และโค้งมน ที่มีผลกระทบต่อค่าแรงพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารคู่แฝดซึ่งมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส การทดสอบในอุโมงค์ลมเลือกใช้แบบจำลองอาคารประเภทแข็งเกร็ง (Rigid model) ที่มีอัตราส่วนความสูง 6:1:1 และทำการย่อขนาดลงมาด้วยอัตราส่วน 1:400 หลังจากนั้นจึงทำการวัดค่าแรงและโมเมนต์พื้นฐานของแบบจำลองอาคาร จากการศึกษาพบว่าอาคารข้างเคียงที่อยู่เหนือลมในรัศมี 5 เท่าของความกว้างอาคาร มีผลกระทบอย่างมากต่อค่าแรงพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารที่ตั้งอยู่ในแนวทะแยงทำมุมประมาณ 20 ถึง 45 องศาทิศทางลม ซึ่งอาจส่งผลทำให้ค่าแรงพลศาสตร์ในบางทิศทางเพิ่มขึ้นได้ถึง 80% นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับแต่งมุมแบบเว้า และแบบโค้งมน มีผลในการลดแรงค่าแรงลมได้ดีกว่าการปรับแต่งมุมแบบตัด ซึ่งในบางกรณีสามารถลดได้ถึง 50% เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารคู่แฝดที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ABSTRACT : A wind tunnel high frequency force balance model test of a pair of identical tall buildings has been conducted. A 1:400 scaled rigid model of a tall building with an aspect ratio of 6:1:1 was tested in an open terrain wind environment. The effects of the locations of the neighboring buildings and distance between the two buildings within 5 times of the building width, in particular a close distance between the two buildings, were investigated. An investigation into the effects of corner modifications, i.e. recession corners, cut corners and roundness corners, on the interference effects was also carried out. It was evident that the interfering building has a significant impact on the wind-induced forces of the principal building, in particular the upstream interfering building located diagonally 20° - 45° from the wind direction. An increase of up to 80% of the dynamic forces was observed in some locations and configurations of the interfering buildings. It was also found that the buildings with recession corners and roundness corners can be effectively used to suppress the dynamic forces resulting from interference effects. A decrease of up to 50% of the dynamic forces was deduced from the wind tunnel model tests.

KEYWORDS : Twin tall buildings, Interference effects, Edge configurations, Wind loads, Wind tunnel tests

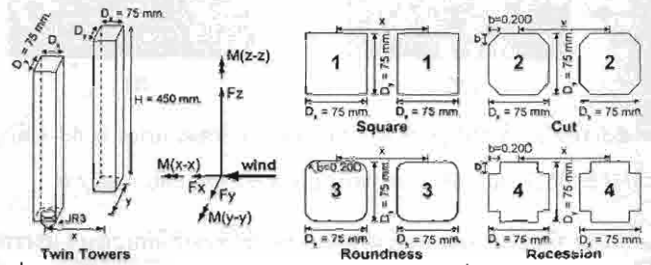
1. บทนำ

แรงลมเป็นแรงกระทำทางด้านข้างที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการออกแบบโครงสร้างอาคารสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของอาคารสูงที่มีอาคารข้างเคียงขนาดใหญ่ล้อมรอบอยู่ใกล้ๆ เช่น อาคารที่ตั้งอยู่ในบริเวณศูนย์กลางเมืองขนาดใหญ่ที่มีอาคารสูงตั้งอยู่อย่างหนาแน่น หรือในกรณีของอาคารคู่แฝด เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของอาคารข้างเคียงที่เรียกว่า Interference effects

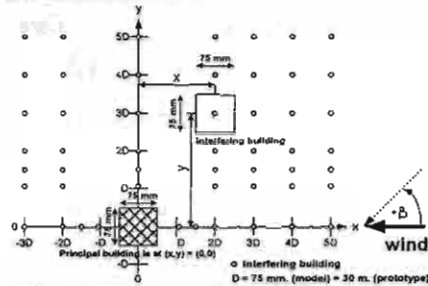
งานวิจัยของ Saunders and Melbourne [1] Bailey and Kwok [2] Khanduri et al. [3] และ Thepmongkorn et al. [4] แสดงให้เห็นว่าขนาด รูปร่างและคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของอาคาร ความเร็วลมและทิศทางลม สภาพภูมิประเทศโดยรอบอาคาร ตลอดจนระยะห่างระหว่างอาคาร ล้วนแล้วแต่มีผลต่อลักษณะของลมที่พัดผ่านโดยรอบอาคาร ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างและการสั่นไหวของอาคาร ในกรณีของอาคารคู่แฝดที่มีรูปร่างอาคารเหมือนกัน มีความสูงของอาคารเท่ากันและอยู่ใกล้กันมาก ค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคารจะมีค่าแตกต่างไปจากกรณีของอาคารเดี่ยว (Isolated building) ดังนั้นการออกแบบอาคารคู่แฝดโดยใช้ข้อมูลของแรงลมสำหรับอาคารเดี่ยวจึงอาจให้ค่าที่ไม่ปลอดภัยในบางกรณี

บทความนี้เสนอผลการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของอาคารในอุโมงค์ลมเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงลมและการตอบสนองของโครงสร้างอาคารคู่แฝดที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square) โดยเน้นการศึกษาเพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากระยะห่างระหว่างอาคารและการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมของอาคาร 3 ลักษณะคือ มุมเว้าเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Recession) มุมตัด (Cut) และมุมโค้งมน (Roundness) โดยมีขนาดของการปรับแต่งมุมเท่ากับ 0.20 เท่าของความกว้างอาคาร (D) ดังแสดงในรูปที่ 1 อาคารที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นอาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดหน้าตัดเท่ากับ 30x30 เมตร มีความสูง (H) เท่ากับ 180 เมตร (อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 6:1:1) ความหนาแน่นของอาคารเท่ากับ 160 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 0.2 Hz และค่าการสลายพลังงาน (Damping) เท่ากับ 0.01 สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวราบทั้งสองทิศทาง และมีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 0.36 Hz และค่าการสลายพลังงานเท่ากับ 0.014 สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ระยะห่างของอาคารที่ใช้ในการศึกษานี้ในช่วง 1 ถึง 5 เท่าของความกว้าง

อาคารดังแสดงในรูปที่ 2 โดยเน้นการศึกษาในช่วงระยะห่างที่ใกล้กันมากๆ เพื่อประโยชน์ในการออกแบบอาคารคู่แฝดในสภาพความเป็นจริง แบบจำลองย่อส่วนของอาคารในทุกกรณีได้รับการจัดทำโดยใช้มาตราส่วน 1:400



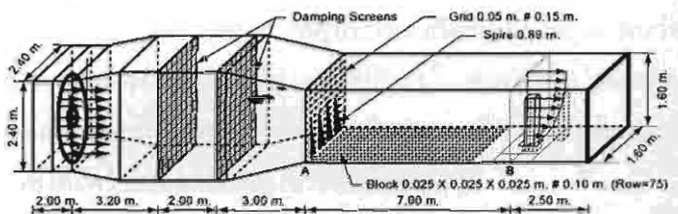
รูปที่ 1 รูปร่างและลักษณะของแบบจำลองอาคารคู่แฝดที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 2 ตำแหน่งของอาคารข้างเคียงที่ใช้ในการทดสอบอาคารคู่แฝด

2. การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

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

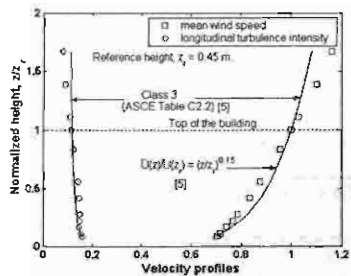


รูปที่ 3 อุโมงค์ลมของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

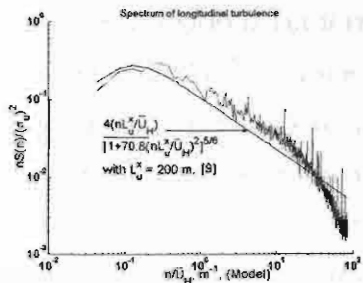
ลักษณะของลมที่จำลองในอุโมงค์ลม ได้ถูกตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดลมที่เรียกว่า Hot wire anemometer และนำผลลัพธ์ในรูปของค่าความเร็วลมเฉลี่ย (Mean wind speed) ค่าความปั่นป่วนของลม (Turbulence intensity) และความถี่ของลมที่ปั่นป่วน (Longitudinal velocity spectrum) มาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ควรจะเป็นสำหรับสภาพภูมิประเทศแบบเปิดโล่ง (Open Terrain)[5] ดังแสดงในรูปที่ 4

การทดสอบแบบจำลองในแต่ละครั้งได้กระทำที่ความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที ที่ระดับยอดอาคาร และเก็บข้อมูลด้วย

ความเร็ว 1000 ข้อมูลต่อวินาที เป็นจำนวนทั้งสิ้น 120,000 ข้อมูล (120 วินาที) โดยพิจารณาทิศทางลม (β) ที่กระทำต่ออาคารเท่ากับ 0 องศา วิธีการวัดแรงและการประมาณค่าการสั่นไหวของอาคารเป็นไปตามหลักการของ High frequency force balance (HFFB) model tests [6,7,8] ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอผลการทดสอบในรูปของแรงลมที่กระทำกับอาคารเท่านั้น



(n) Mean wind speed and Longitudinal turbulence intensity profiles



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

รูปที่ 4 ลักษณะของลมที่จำลองได้ในอุโมงค์ลมเมื่อเปรียบเทียบกับลมตามธรรมชาติ [5]

3. ผลการทดสอบ

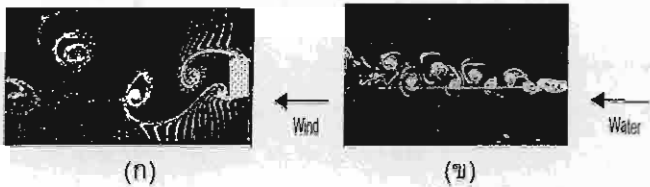
ค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารในแต่ละกรณีได้นำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาค่า Interference factors (IF) ตามสมการที่ 1

$$IF = \frac{\text{Force on principal building. (interfering buildings presented)}}{\text{Force on principal building. (isolated building)}} \quad (1)$$

ค่า IF สำหรับอาคารที่มีอาคารข้างเคียงตั้งอยู่ในตำแหน่งต่างๆได้นำมาแสดงผลในรูปของ Contours ที่เรียกว่า Iso-buffets ซึ่งเป็นแผนภาพที่ได้จากการลากเส้นเชื่อมโยงค่า IF ที่เท่ากัน ณ ตำแหน่งต่างๆของอาคารข้างเคียง ดังแสดงในรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 11

ค่า IF ที่ไม่เท่ากัน มีสาเหตุมาจากอาคารข้างเคียงที่ทำให้ความเร็วลม ความปั่นป่วนของลม ตลอดจนการแยกตัวและม้วนตัวกลับป้อนกลับมาเป็นระลอกของลม ที่เรียกว่า Shed vortices (ดังแสดงในรูปที่ 5) เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรง

ต่อค่าแรงที่กระทำกับอาคาร และอิทธิพลดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งที่ตั้งของอาคารข้างเคียง



รูปที่ 5 Shed vortices ที่เกิดจากอาคาร (ก) อาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ($b/h = 0.4$, $Re = 200$) [10] (ข) อาคารรูปทรงกลม ($30 \leq Re \leq 5000$) [11]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติต่างๆที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้และงานวิจัยที่ผ่านมา

คุณสมบัติ	Bailey and Kwok.[2]	Saunders and Melbourne.[1]
อาคาร	216mx24mx24m (9:1:1)	150mx37mx37m (4:1:1)
สภาพพื้นที่	Open terrain	Open terrain
ความเร็วลมไร้หน่วย	6	6
วิธีการวัดแรง	Aeroelastic models	Aeroelastic models
ค่าการสลายพลังงาน	1%	1%

ตารางที่ 1(ต่อ) คุณสมบัติต่างๆที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้และงานวิจัยที่ผ่านมา

คุณสมบัติ	Khanduri et al. [12]	งานวิจัยนี้
อาคาร	80mx20mx20m (4:1:1)	180mx30mx30m (6:1:1)
สภาพพื้นที่	Open terrain	Open terrain
ความเร็วลมไร้หน่วย	-	6
วิธีการวัดแรง	Rigid models	Rigid models
ค่าการสลายพลังงาน	1%	1%

ผลการเปรียบเทียบค่า IF ของแรงในแนวแกน x และ y ในรูปที่ 6 (ก) และ 7 (ก) สำหรับอาคารที่มีรูปร่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส พบว่ามีความแตกต่างกับงานวิจัยที่ผ่านมาอยู่บ้าง เนื่องจากวิธีการวัดแรงและคุณสมบัติต่างๆของอาคารแตกต่างกัน (ตารางที่ 1) แต่โดยรวมแล้วค่าที่ได้มีความสอดคล้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

Iso-buffets สำหรับกันบียงเบนมาตรฐานของแรงในแนวแกน x ($\tilde{C}_{Fx}$) แรงในแนวแกน y ($\tilde{C}_{Fy}$) และแรงบิดรอบแกน z ($\tilde{C}_m$) ที่ฐานของอาคารสำหรับความเร็วลมไร้หน่วย ($\bar{U}_H / (n_{x-x} D_s)$) เท่ากับ 6 และทิศทางของลม (β) 0 องศา ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 8 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าตำแหน่งที่ตั้งของอาคารข้างเคียงที่มีผลมากที่สุดคืออยู่บริเวณเหนือลมในแนวทะแยงทำมุมกับแกน x ประมาณ 20 ถึง 45 องศา โดยที่ความรุนแรง ที่เกิดเนื่องจากอาคารข้างเคียงจะขึ้นอยู่กับลักษณะของมุมอาคารด้วย ดังนั้นเพื่อให้เห็นอิทธิพลของอาคารข้างเคียงและรูปร่างบริเวณมุมอาคาร ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ค่าแรง

พลศาสตร์ที่วัดได้จากอาคารที่มีการปรับแต่งมุมในแต่ละลักษณะ ได้นำมาคำนวณเพื่อหาค่า IF โดยเปรียบเทียบกับอาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตามสมการที่ 2 และได้แสดงผลไว้ในรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 11

$$IF = \frac{\text{Force on principal building with corner modifications and interference.}}{\text{Force on principal square building with interference.}} \quad (2)$$

4. สรุปผล

ระยะห่างและการจัดเรียงตัวของอาคารข้างเคียง ตลอดจนรูปร่างบริเวณมุมของอาคาร มีผลเป็นอย่างมากต่อค่าแรงลมที่กระทำกับอาคาร จากผลการทดสอบแบบจำลองของอาคารคู่แฝดในอุโมงค์ลม ในสภาพภูมิประเทศแบบเปิดโล่ง พบว่าตำแหน่งที่ตั้งของอาคารข้างเคียงบริเวณเหนือลม ในแนวทะแยงทำมุมประมาณ 20 ถึง 45 องศาจะมีผลทำให้ค่าแรงพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารในแนวแกน x และ y และแรงบิดรอบแกน z เพิ่มขึ้น ซึ่งในบางตำแหน่งอาจทำให้ค่าแรงพลศาสตร์ดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นได้ถึง 80% นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับแต่งมุมแบบเว้า และแบบโค้งมน มีผลในการลดแรงค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารคู่แฝดได้ ดีกว่าการปรับแต่งมุมแบบตัด ซึ่งในบางตำแหน่งของอาคารข้างเคียงสามารถลดได้ถึง 50% เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารคู่แฝดที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสปกติ ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบได้โดยตรง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุโมงค์ลมและเครื่องมือวัดความเร็วลม ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ รศ.ดร. นคร ภู่วโรดม สำหรับการให้เครื่องมือบันทึกข้อมูล โครงการนี้ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ความเห็นในบทความนี้เป็นของผู้วิจัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Saunders, J.W. and Melbourne, W.H., 1980. Buffeting effects of upstream buildings. *Proc. 5th Int. Conf. Wind Eng.*, Fort Collins, USA, pp. 593-606.

[2] Bailey, P.A. and Kwok, K.C.S., 1985. Interference excitation of twin tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 21 : 323-338.

[3] 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, 617-630.

[4] 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 : 1807-1815.

[5] 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.

[6] 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 : 429-439.

[7] Thepmongkorn, S., Wood, G.S., Hitchcock, P.A. and Kwok, K.C.S., 2000. High frequency force balance model tests, *unpublished paper*.

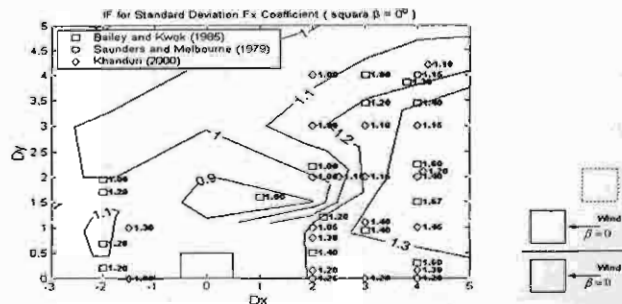
[8] สุทธิชัย เทพมังกร, 2004. การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี High frequency force balance เพื่อการประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคาร, *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9*, เพชรบุรี, Vol 1 : STR-120 ถึง STR-125.

[9] 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*.

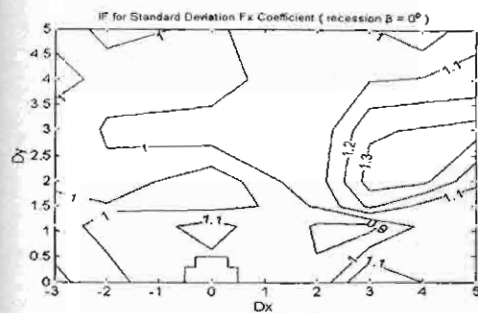
[10] Nakamura, Y., 1993. Bluff-Body aerodynamics and turbulence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 49 : 65-78.

[11] 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.

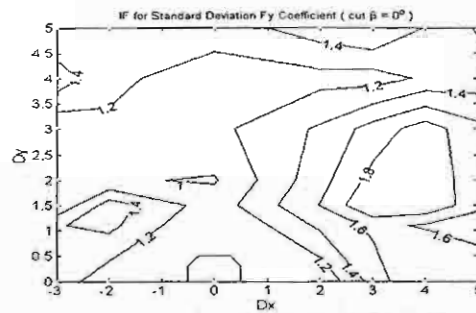
[12] Khanduri, A.C., Stathopoulos, T. and Be'dard, C., 2000. Generalization of wind-induced interference effects for two buildings. *Wind and Structures*, Vol. 3, No 4 : 255-266.



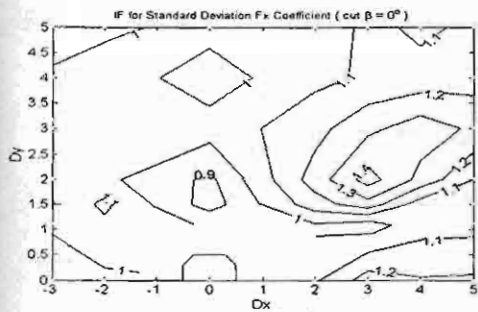
(ก) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก



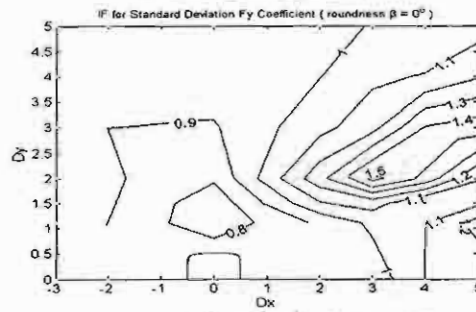
(ข) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแนว



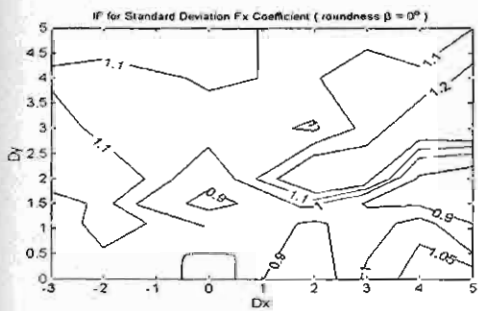
(ค) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแนวตัด



(ค) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแนวตัด

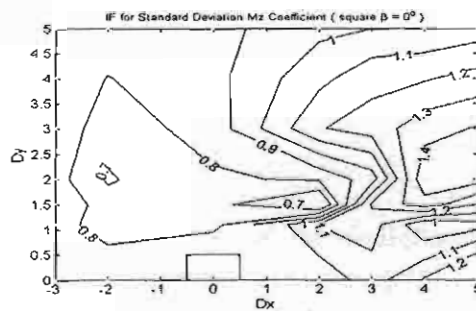


(ง) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสโค้งมน

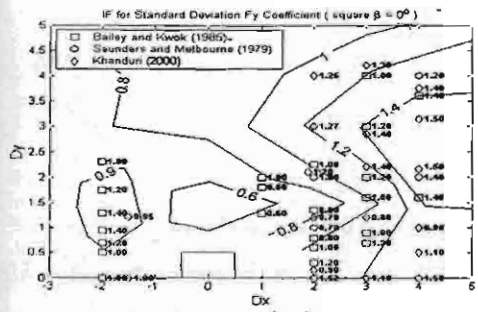


(ง) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสโค้งมน

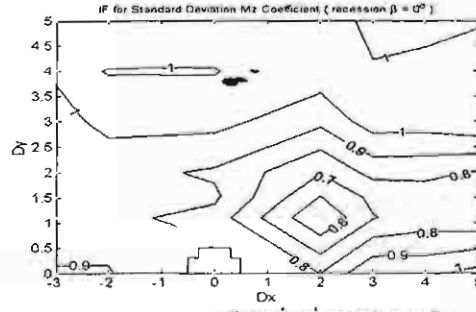
รูปที่ 7 Iso-buffets สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงในแนวแกน y ($\tilde{C}_{Fy}$) ที่ $\bar{U}_H / (n_{x-x} D_y) = 6$ และทิศทางลม (β) = 0 องศา



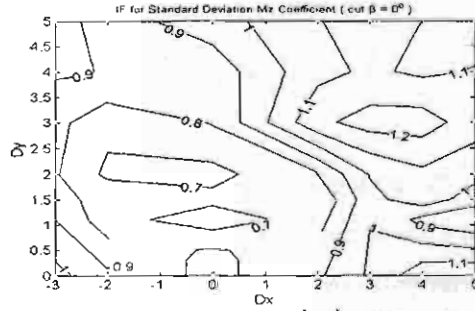
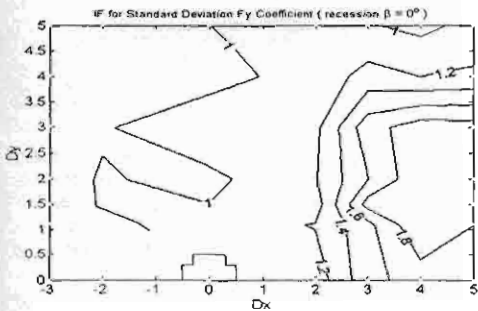
(ก) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสฉาก

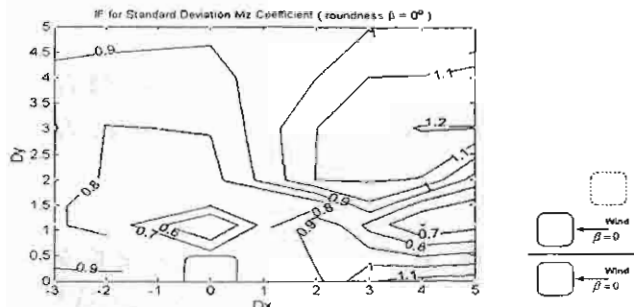


(ก) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสฉาก

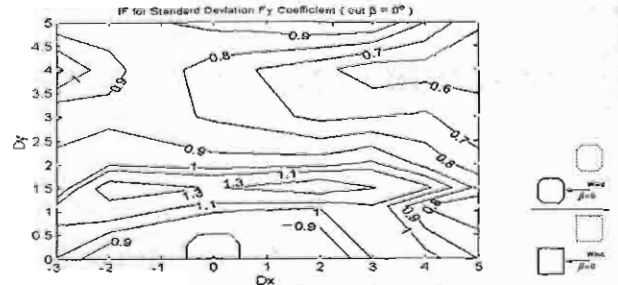


(ข) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแนว

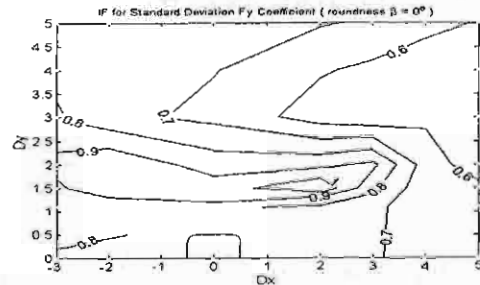




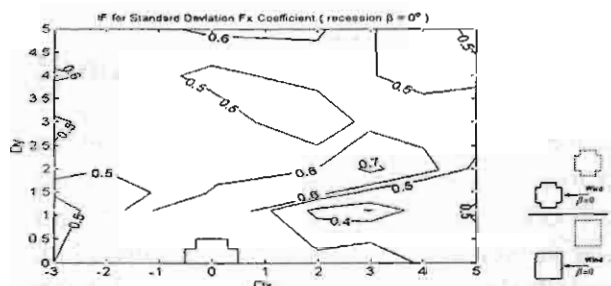
(ง) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผืนดินมน



(จ) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผืนดินตัด

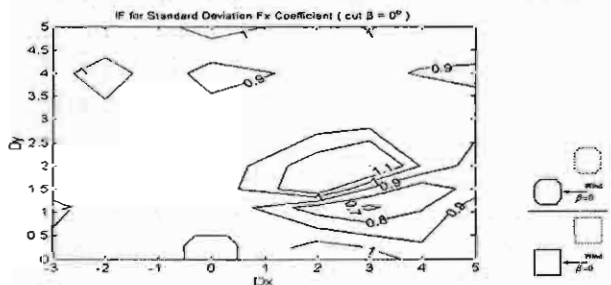


(ค) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผืนดินมน

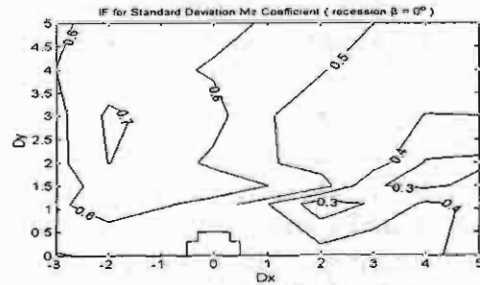


(ก) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผืนดินเว้า

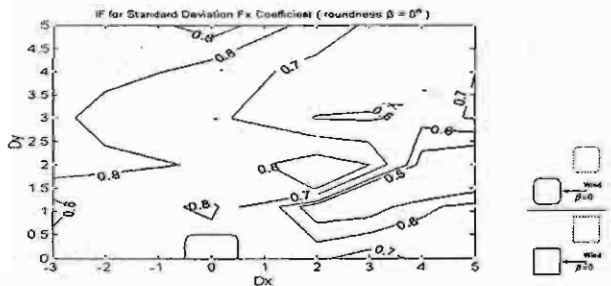
รูปที่ 10 Iso-buffer สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงในแนวแกน y ($\tilde{C}_{Fy}$) ที่ $\bar{U}_H / (n_{x-x} D_y) = 6$ และทิศทางลม (β) = 0 องศา



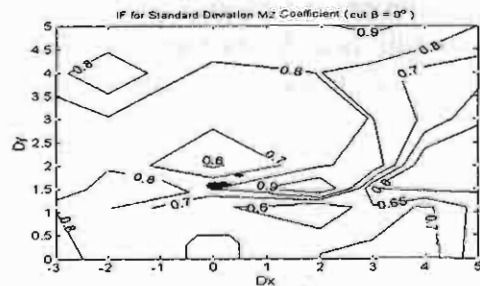
(ข) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผืนดินตัด



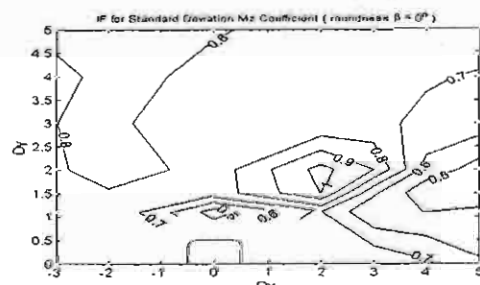
(ง) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผืนดินเว้า



(ค) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผืนดินมน

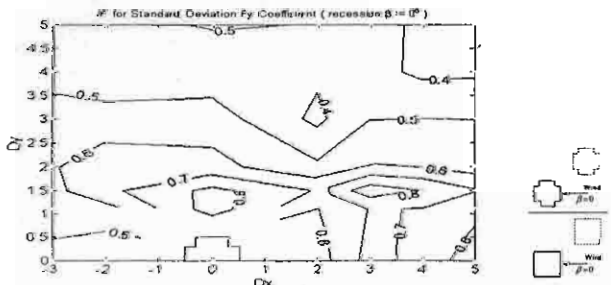


(จ) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผืนดินตัด



(ข) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผืนดินตัด

รูปที่ 9 Iso-buffer สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงในแนวแกน x ($\tilde{C}_{Fx}$) ที่ $\bar{U}_H / (n_{x-x} D_y) = 6$ และทิศทางลม (β) = 0 องศา



(ค) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผืนดินมน

รูปที่ 11 Iso-buffer สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงบิดในแนวแกน z ($\tilde{C}_m$) ที่ $\bar{U}_H / (n_{x-x} D_y) = 6$ และทิศทางลม (β) = 0 องศา

WIND-INDUCED LOADS AND RESPONSES OF A TALL BUILDING WITH COMPLEX MOTION

S. Thepmongkorn*, P.A. Hitchcock and P. Warnitchai*****

** Department of Civil Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand*

*** CLP Power Wind/Wave Tunnel Facility, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong S.A.R., P.R.China*

****School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Pathumthani, Thailand*

Summary

Modern tall buildings with complex geometrical shapes are likely to have significant coupling between translational and torsional motions. The resultant response may be greatly amplified at the corners of the building, in particular for buildings with eccentricity between centre of mass and centre of stiffness. A programme of wind tunnel model tests is frequently integrated into the design process. Because of the advantages in terms of simplicity and flexibility for the data analysis, the high frequency force balance (HFFB) model test 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 complex building motion and aeroelastic effects. In this paper, the methodologies for the determination of the complex building motion responses by the HFFB technique are outlined. The results of wind tunnel model tests of the CAARC standard tall building were 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 were estimated for different eccentricity conditions with the aid of the computer modelling. Discussions on the effects of eccentricities, coupling parameters and wind directions on the wind-induced displacement responses are presented and discussed. A comparison with the results from aeroelastic model studies are also presented and discussed.



EACWE 4, PRAGUE, 11-15 JULY, 2005

The Fourth European & African Conference on Wind Engineering

Chairman : Dr. J. Náprstek

Co-Chairman : Prof. M. Pirner

Institute of Theoretical and Applied Mechanics
Prosecká 76, CZ - 190 00 Prague 9, Czech Republic
Tel.: + 420.286 892 515; Fax : + 420.286 884 634

E-mail : EACWE2005 @ itam.cas.cz
www.itam.cas.cz/eacwe2005

30 November 2004

Id number: #177

Title: *Wind-induced loads and responses of a tall building with complex motion*

Author(s): S. Thepmongkorn, P.A. Hitchcock, P. Warnitchai

Dear Colleague,

We feel honored to let you know that the International Scientific Committee has selected your aforementioned paper for oral presentation at the 4th European & African Conference on Wind Engineering and publication in the EACWE 4 Proceedings. To keep the high level of the Conference, please be so kind to read carefully the text here below:

1. The final version of your paper will consist of two parts:

1.1 Full Text of your paper: It should contain 6 - 14 pages and will be published on the CD ROM in an electronic form. Colored figures and tables as well as half tones are allowed.

1.2 Extended Abstract of your paper: It should contain maximum 2 pages. The hard copy will be published in the **Book of Extended Abstracts**. Colored figures and tables are not recommended, as the Extended Abstracts will be printed in black & white. The Extended Abstract should summarize clearly the content of the Full Text, its motivation, main ideas and conclusions (the Summary, which has been used for submitting of the paper, is **highly non-recommended** for this purpose).

2. Both manuscripts (Full Text and Extended Abstract) must **strictly** follow the enclosed instructions **Preparing extended abstracts and full text papers for the EACWE4 Proceedings**. The **form** of both manuscripts is the same. The only difference is in the total length of the text (Extended Abstract 2 pages, Full Text max 14 pages). For details see the enclosure **Preparing extended abstracts and full text papers for the EACWE4 Proceedings**, which is written in a form of a sample text. For better convenience the Templates are provided. Two versions (i) for LATEX and for (ii) MS WORD are available at the website of the Conference www.itam.cas.cz/eacwe2005. Each one can be used for preparation of both the Full Text as well as the Extended Abstract. Please check the final form of the text using the **EACWE 4 – Text Formatting Summary** enclosed.

Whatever text processor is used for the text preparation, the PDF version of the Full Text and of the Extended Abstract should be sent to us by e-mail. They must reach the EACWE 4 Secretariat at the first convenience, but not later than 28 February 2005: eacwe2005@itam.cas.cz. Names of respective files should contain the last name of the corresponding author, id-number of the paper and the abbreviation FT or EA for the Full Text or the Extended Abstract respectively, in particular:

Thepmongkorn177FT.pdf - for the Full Text

Thepmongkorn177EA.pdf - for the Extended Abstract

In order to simplify some prospective format corrections, it would be useful to provide us also with corresponding source files, e.g. DOC files, TEX files together with figures, etc. **However, if you have any problem to prepare and send your paper in the electronic form, please be so kind to contact us immediately.**

3. Your paper has been provisionally included into:

Section: **HIG — High-rise buildings**

Subsection: **DYN — dynamic response due to wind effects**

Papers will be clustered into individual sessions for the oral presentation and into chapters for publication in the EACWE 4 Proceedings following Sections and Subsections. **EACWE 4 – List of Sections and Subsections** is enclosed and also available on the website of the Conference. It contains detailed description of every Section and relevant Subsections. If you disagree with the proposed allocation, please let us know your recommendation at the first convenience, but not later than 31 December 2004.

For your orientation and easier choice the **EACWE 4 - List of accepted papers** is available on the website of the Conference containing **provisionally allocated Section and Subsection identification**.

4. Rewiever's notes:

None

5. **The copyright remains with authors** and therefore no copyright transfer agreement to organizers of the EACWE 4 is requested. However, credit should be given to the EACWE 4 Proceedings, when the same or similar paper will be published in any journal or other proceedings.

Take into account that extended or corrected version of selected papers is expected to be published in a special issue of the *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. The selection will be made by the EACWE 4 International Scientific Committee after the Conference on the basis of session chairmen recommendation and quality of the paper published in the Proceedings. Subsequently relevant authors will be invited to prepare a separate manuscript for the *JWEIA*.

If you have any problem when preparing the text, please do not hesitate to contact us immediately. Thank you very much for your valuable cooperation.

We are looking forward to receiving your paper and for having the pleasure of your company at the 4th European & African Conference on Wind Engineering in Prague.

Yours sincerely,



Jiří Náprstek
EACWE 4 Chairman

Enclosures: **Preparing extended abstracts and full text papers for the EACWE4 Proceedings**
EACWE 4 – Text Formatting Summary
EACWE 4 – List of Sections and Subsections

EFFECTS OF CORNER MODIFICATIONS ON WIND-INDUCED LOADS AND RESPONSES OF A TALL BUILDING

S. Thepmongkorn and A. Tulsukchuen

Department of Civil Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand

Summary

Wind tunnel high frequency force balance model tests of the CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) standard tall building were conducted. The experimental programme was carried out in a turbulent boundary layer wind tunnel, in which the rigid building model was tested in an open terrain wind model. The effects of corner modifications, i.e. square recession corners and roundness corners, with the corner modification ratios (d_y / D_y ratio) of 0.05, 0.10 and 0.15, on the wind-induced loads and responses of the CAARC building model were investigated for various wind directions ranging from 0 to 90 degrees. The experimental results indicated a significant effect of the corner modifications on the peak and frequency components of the cross-wind forces caused by the vortex shedding process. In addition, the corner modifications appeared to have a significant effect on a separation process of the wind at the upstream corners and a reattachment process of the separated shear layers along the side faces of the building model, which significantly changed the along-wind, cross-wind and torsional forces and responses of the building. The effectiveness of the corner modifications in reducing the along-wind, cross-wind and torsional responses was highest when the incident wind was normal to the building faces. For the building with roundness corners, the effectiveness in reducing the building responses was increased with increasing modification ratios. However, this relationship was not evident for the building with square recession corners.



EACWE 4, PRAGUE, 11-15 JULY, 2005

The Fourth European & African Conference on Wind Engineering

Chairman : Dr. J. Náprstek

Co-Chairman : Prof. M. Pirner

Institute of Theoretical and Applied Mechanics
Prosecká 76, CZ - 190 00 Prague 9, Czech Republic
Tel.: + 420.286 892 515; Fax : + 420.286 884 634

E-mail : EACWE2005 @ itam.cas.cz
www.itam.cas.cz/eacwe2005

30 November 2004

Id number: #178

Title: *Effects of corner modifications on wind-induced loads and responses of a tall building*

Author(s): S. Thepmongkorn, A. Tulsukchuen

Dear Colleague,

We feel honored to let you know that the International Scientific Committee has selected your aforementioned paper for oral presentation at the 4th European & African Conference on Wind Engineering and publication in the EACWE 4 Proceedings. To keep the high level of the Conference, please be so kind to read carefully the text here below:

1. The final version of your paper will consist of two parts:

1.1 Full Text of your paper: It should contain 6 - 14 pages and will be published on the CD ROM in an electronic form. Colored figures and tables as well as half tones are allowed.

1.2 Extended Abstract of your paper: It should contain maximum 2 pages. The hard copy will be published in the **Book of Extended Abstracts**. Colored figures and tables are not recommended, as the Extended Abstracts will be printed in black & white. The Extended Abstract should summarize clearly the content of the Full Text, its motivation, main ideas, and conclusions (the Summary, which has been used for submitting of the paper, is **highly non-recommended** for this purpose).

2. Both manuscripts (Full Text and Extended Abstract) must **strictly** follow the enclosed instructions **Preparing extended abstracts and full text papers for the EACWE4 Proceedings**. The form of both manuscripts is the same. The only difference is in the total length of the text (Extended Abstract 2 pages, Full Text max 14 pages). For details see the enclosure **Preparing extended abstracts and full text papers for the EACWE4 Proceedings**, which is written in a form of a sample text. For better convenience the Templates are provided. Two versions (i) for LATEX and for (ii) MS WORD are available at the website of the Conference www.itam.cas.cz/eacwe2005. Each one can be used for preparation of both the Full Text as well as the Extended Abstract. Please check the final form of the text using the **EACWE 4 – Text Formatting Summary** enclosed.

Whatever text processor is used for the text preparation, the PDF version of the Full Text and of the Extended Abstract should be sent to us by e-mail. They must reach the EACWE 4 Secretariat at the first convenience, but not later than 28 February 2005: eacwe2005@itam.cas.cz. Names of respective files should contain the last name of the corresponding author, id number of the paper and the abbreviation FT or EA for the Full Text or the Extended Abstract respectively, in particular:

Thepmongkorn178FT.pdf - for the Full Text

Thepmongkorn178EA.pdf - for the Extended Abstract

In order to simplify some prospective format corrections, it would be useful to provide us also with corresponding source files, e.g. DOC files, TEX files together with figures, etc. **However, if you have any problem to prepare and send your paper in the electronic form, please be so kind to contact us immediately.**

3. Your paper has been provisionally included into:

Section: **HIG — High-rise buildings**

Subsection: **DYN — dynamic response due to wind effects**

Papers will be clustered into individual sessions for the oral presentation and into chapters for publication in the EACWE 4 Proceedings following Sections and Subsections. **EACWE 4 – List of Sections and Subsections** is enclosed and also available on the website of the Conference. It contains detailed description of every Section and relevant Subsections. If you disagree with the proposed allocation, please let us know your recommendation at the first convenience, but not later than 31 December 2004.

For your orientation and easier choice the **EACWE 4 - List of accepted papers** is available on the website of the Conference containing **provisionally allocated Section and Subsection identification**.

4. Rewiever's notes:

None

5. **The copyright remains with authors** and therefore no copyright transfer agreement to organizers of the EACWE 4 is requested. However, credit should be given to the EACWE 4 Proceedings, when the same or similar paper will be published in any journal or other proceedings.

Take into account that extended or corrected version of selected papers is expected to be published in a special issue of the *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. The selection will be made by the EACWE 4 International Scientific Committee after the Conference on the basis of session chairmen recommendation and quality of the paper published in the Proceedings. Subsequently relevant authors will be invited to prepare a separate manuscript for the *JWEIA*.

If you have any problem when preparing the text, please do not hesitate to contact us immediately. Thank you very much for your valuable cooperation.

We are looking forward to receiving your paper and for having the pleasure of your company at the 4th European & African Conference on Wind Engineering in Prague.

Yours sincerely,



Jiří Náprstek
EACWE 4 Chairman

Enclosures: **Preparing extended abstracts and full text papers for the EACWE4 Proceedings**
EACWE 4 – Text Formatting Summary
EACWE 4 – List of Sections and Subsections