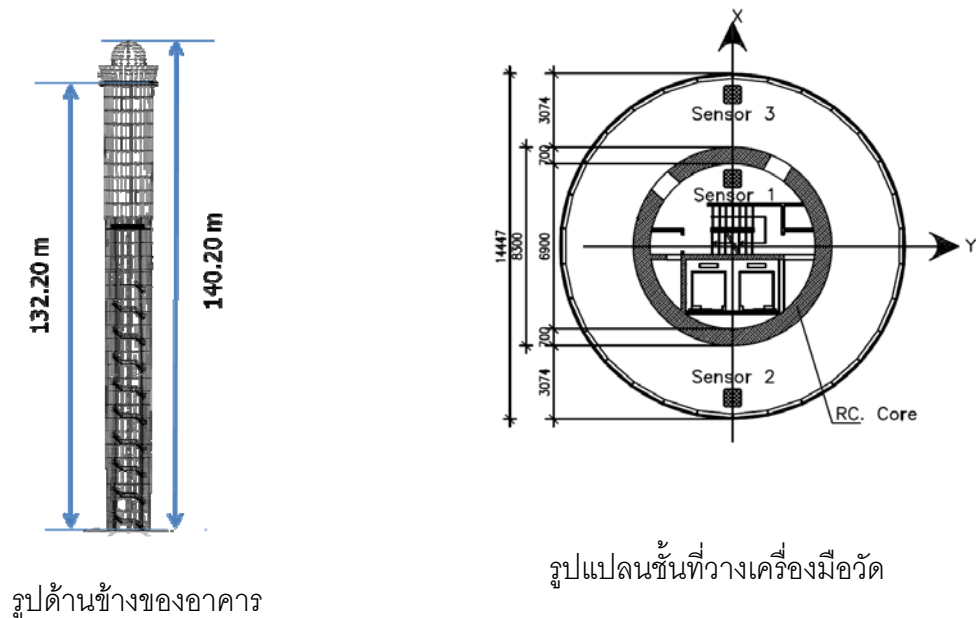


บทที่ 7

การศึกษาผลตอบสนองของอาคารจริงต่อแรงลม

7.1 ลักษณะทางกายภาพ และการติดตั้งเครื่องมือวัดผลการตอบสนองของอาคารตัวอย่าง

อาคารตัวอย่างที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปทรงกระบอก มีความสูงจากพื้นดิน ถึงยอดหลังคา 140.20 m. และถึงระดับพื้นชั้นบนสุด 132.20 m. โครงสร้างด้านในเป็นแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.30 m. และด้านนอกสุดเป็นผนังมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรวม 14.50 m. การตรวจวัดผลตอบสนองใช้เครื่องมือวัดความเร็วการเคลื่อนที่ จำนวน 3 ตัว ซึ่งแต่ละตัวสามารถวัดความเร็วในระดับต่ำมาก (ไมโครเมตรต่อวินาที) ได้พร้อมกัน 3 ทิศทาง คือ ทางระนาบ 2 ทิศทาง (ทิศทาง X และ Y) และทางตั้ง 1 ทิศทาง (ทิศทาง Z) ติดตั้งที่ระดับความสูง 124.40 เมตร (ชั้นต่ำกว่าชั้นบนสุด 1 ชั้น) เพื่อวัดการตอบสนองของอาคารในรูปความเร็วในการเคลื่อนตัวของอาคาร การเก็บข้อมูลใช้อัตราการเก็บข้อมูล 100 ครั้งต่อหนึ่งวินาที โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่วันที่ 10 ตุลาคม 2551 ถึงเวลา 16:00 น. วันที่ 12 ตุลาคม 2551 ลักษณะของอาคารและตำแหน่งที่วางเครื่องมือแสดงดังภาพที่ 6.1



ภาพที่ 7.1

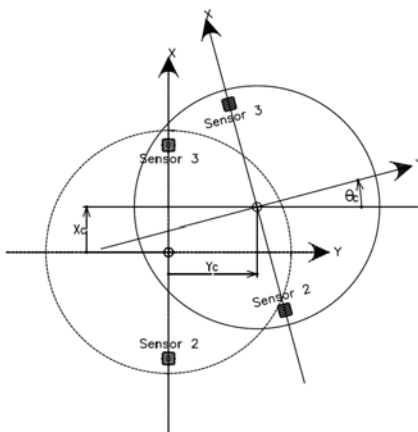
ลักษณะอาคารและตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็ว

เนื่องจากเครื่องบันทึกผลตอบสนองที่ต่อกับหัววัดความเร็วทั้ง 3 ตัวสามารถรับข้อมูลพร้อมกันได้สูงสุด 8 ช่องสัญญาณ งานวิจัยนี้จึงเลือกสัญญาณในทิศทาง X , Y และ Z ที่ได้จากหัววัดที่ 1 และ 2 และทิศทาง X และ Y จากหัววัดที่ 3 เพื่อวัดผลตอบสนองของอาคาร ซึ่งจากภาพที่ 6.1 เมื่อพิจารณาให้พื้นมีการเคลื่อนที่แบบแข็งเกร็ง (Rigid floor) หัววัดที่ 2 และ 3 ตั้งอยู่ที่ตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางของอาคารเป็นระยะ R และกำหนดให้ความเร็วที่วัดได้จากหัววัดที่ 2 และ 3 ในทิศทาง X และ Y มีค่าเป็น X_2 , Y_2 , X_3 และ Y_3 ตามลำดับ จากนั้นสามารถหาความเร็วการเคลื่อนที่ ของตำแหน่งศูนย์กลางอาคาร ในทิศทาง X , Y และทิศทางบิด ได้จากสมการที่ 6.1 ถึง 6.3 โดยทิศทางของความเร็วการเคลื่อนตัวของอาคารแสดงได้ดังภาพที่ 6.2

$$X_c = \frac{(X_2 + X_3)}{2} \quad (6.1)$$

$$Y_c = \frac{(Y_2 + Y_3)}{2} \quad (6.2)$$

$$\theta_c = \frac{(Y_2 - Y_3)}{2R} \quad (6.3)$$



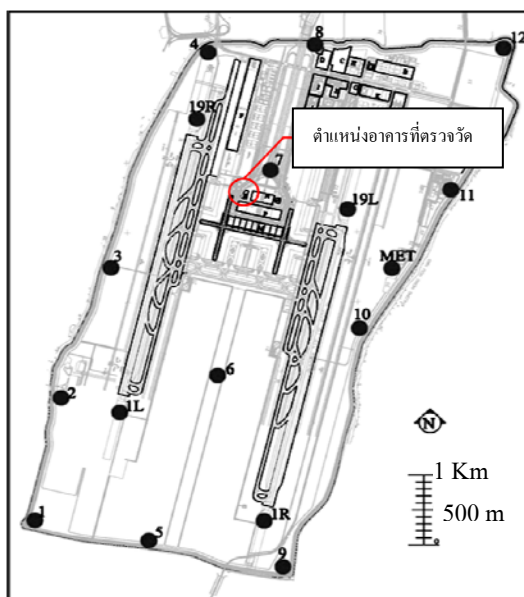
ภาพที่ 7.2

ลักษณะทิศทางการเคลื่อนตัวของอาคาร

7.2 ความเร็ว และทิศทางลมบริเวณใกล้เคียงกับอาคารตัวอย่าง

การศึกษาเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองของอาคารต่อแรงลมจำเป็นต้องทราบทิศทางของลมที่แน่นอน งานวิจัยนี้ได้ข้อมูลความเร็ว และทิศทางของลม จากสถานีตรวจวัด

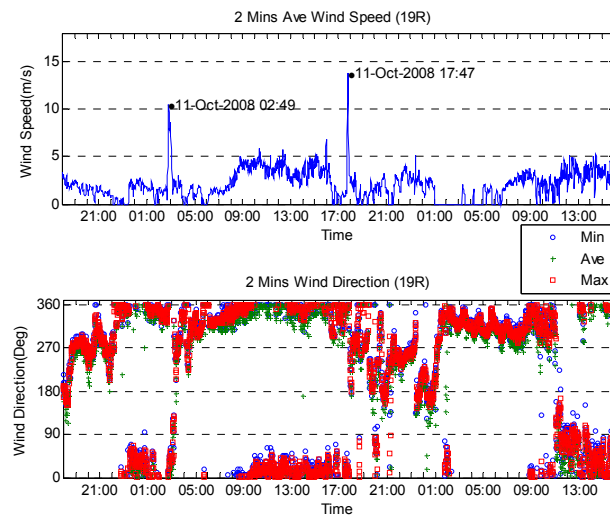
ความเร็วลมของกรมอุตุนิยมวิทยา ในบริเวณใกล้เคียงกับอาคารที่ทำการตรวจวัด จำนวน 4 สถานี คือ สถานี 01R 01L 19R และ 19L โดยตำแหน่งของสถานีตรวจวัดแรงลมแสดงในภาพที่ 7.3 ค่าความเร็วลมเฉลี่ย และทิศทางของลมของสถานี 19R ซึ่งอยู่ใกล้กับอาคารตัวอย่าง แสดงในภาพที่ 7.4



ภาพที่ 7.3

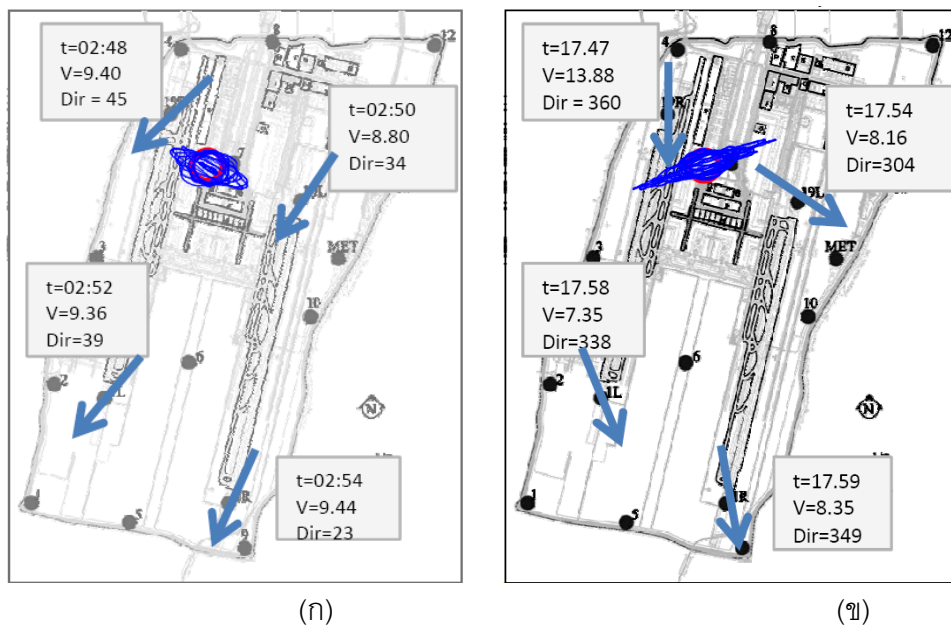
ตำแหน่งอาคารตัวอย่างและสถานีตรวจวัดความเร็วลม

จากสถานีตรวจวัดความเร็วลม พบว่าในช่วงที่ทำการตรวจวัดอาคารตัวอย่าง ได้มีลมแรงกระทำกับอาคาร 2 ช่วงคือ ช่วง 02.00-03.00 และ 17.00-18.00 น. วันที่ 11 ตุลาคม 2551 โดยความเร็วลมเฉลี่ย 2 นาทีก และทิศทางของความเร็วลมแสดงในภาพที่ 7.4 พบว่าทิศทางลมโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0 หรือ 360 องศาเทียบกับทิศเหนือ แต่ช่วงหลังจากเกิดลมแรง ทิศทางลมจะมีการเปลี่ยนทิศทางค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของอาคารเทียบกับทิศทางลม พบว่าในขณะที่เกิดลมแรงกระทำต่ออาคาร ทิศทางของความเร็วในการเคลื่อนตัวของอาคารตัวอย่าง มีค่าสอดคล้องกับทิศทางของลม โดยอาคารจะสั่นในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมมากกว่าทิศทางลม ดังภาพที่ 7.5



ภาพที่ 7.4

ความเร็วลมเฉลี่ย 2 นาที และทิศทางลม จากสถานี 19R

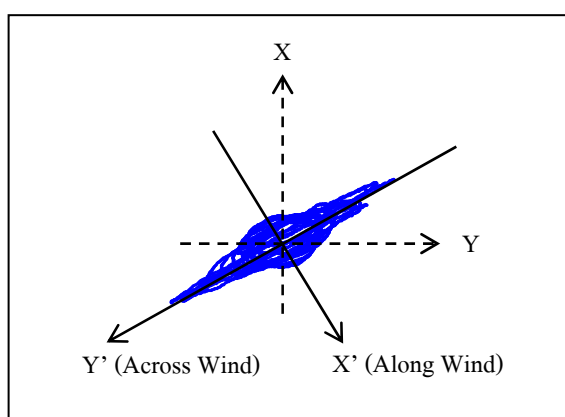


ภาพที่ 7.5

ทิศทางลมเฉลี่ย 2 นาที เมื่อความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละสถานีมีค่าสูงสุด
และลักษณะการ เคลื่อนตัวของอาคารตัวอย่าง

(ก) ช่วงเวลา 02:48 – 02:54 (ข) ช่วงเวลา 17:47 – 17:59 วันที่ 11 ตุลาคม 2551

เนื่องจากทิศทางลมในช่วงลมแรงมีทิศทางไม่คงที่ งานวิจัยนี้จึงประมาณทิศทางลมจากผลการตอบสนองของอาคารโดยใช้สมมุติฐานว่าผลตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมจะมีค่ามากกว่าผลตอบสนองในทิศทางลม และหาค่าทิศทางของแรงลมโดยประมาณโดยลากเส้นตั้งฉากกับทิศทางของผลตอบสนองที่มีค่ามาก และเปลี่ยนพิกัดแกน X และ Y จากภาพที่ 7.1 เป็นพิกัด X' และ Y' โดยทิศทาง X' ขนานกับทิศทางลม ดังภาพที่ 7.6 ซึ่งพิกัด X' และ Y' จะนำไปใช้สำหรับการศึกษาเรื่องความสัมพันธ์ของผลตอบสนองของโครงสร้างในแต่ละทิศทางต่อไป



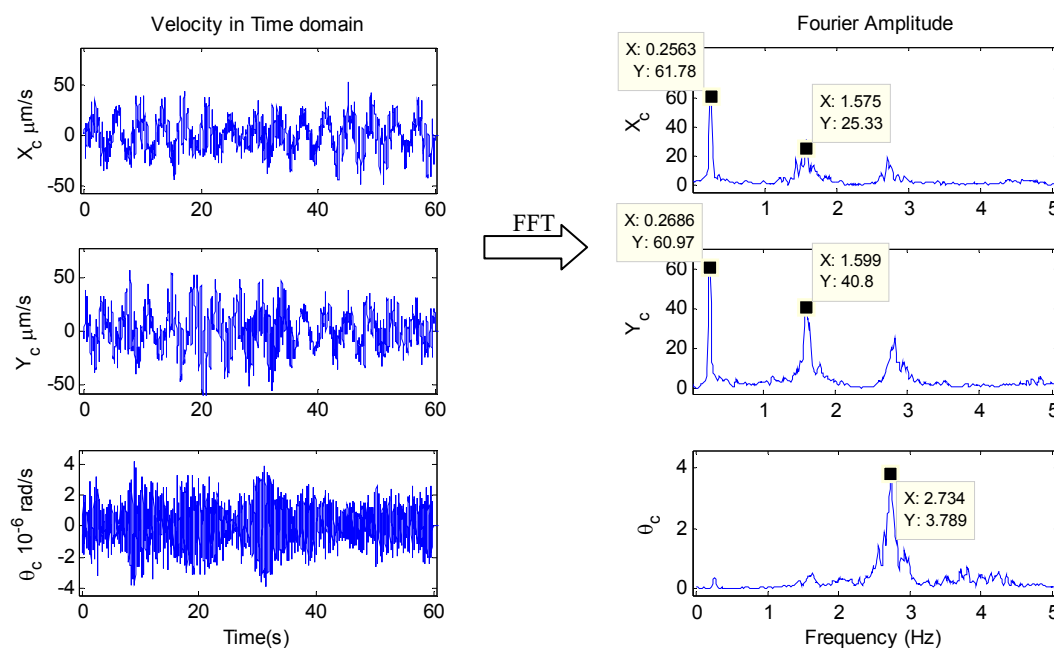
ภาพที่ 7.6

การเปลี่ยนพิกัดของอาคารให้อยู่ในพิกัดทิศทางลม

7.3 คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของอาคารตัวอย่าง

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารซึ่งประกอบด้วย ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) และรูปร่างการสั่นไหว (Vibration Mode Shape) เป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการคำนวณหาแรงเพื่อการออกแบบและการประเมินระดับการโยกตัวของอาคารต่างๆ ซึ่งค่าเหล่านี้อาจหาได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้าง หรือถ้าเป็นอาคารรูปร่างสม่ำเสมอทั่วไปอาจหาได้จากการประมาณซึ่งแนะนำไว้ในมาตรฐานต่างๆ แต่ความถูกต้องของค่าเหล่านี้จะตรวจสอบได้จากการตรวจวัดจริงเท่านั้น จากการติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดผลการตอบสนองของอาคารตัวอย่าง และการคำนวณผลการตอบสนองของอาคารตัวอย่าง ใน 3 ทิศทาง ดังแสดงไว้ในหัวข้อ 6.1 เมื่อได้ความเร็วในการเคลื่อนตัวของอาคารที่เวลาต่างๆ

สามารถหาค่า ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างในทิศทางต่างๆ โดยการแปลงสัญญาณที่วัดได้ให้อยู่ในโดเมนความถี่ด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) ดังภาพที่ 7.7



ภาพที่ 7.7

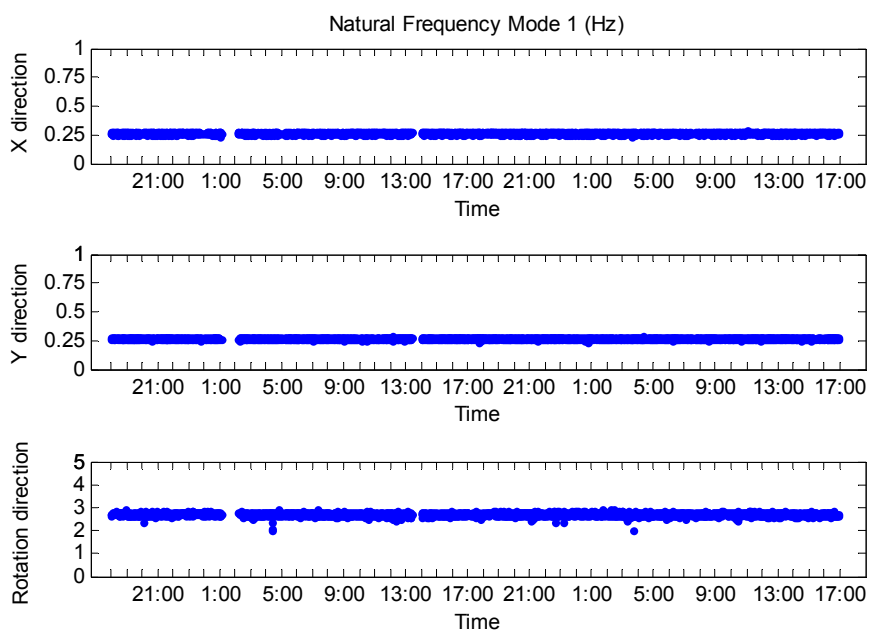
ผลตอบสนองของอาคารในโดเมนเวลา และ โดเมนความถี่

งานวิจัยนี้ได้แบ่งสัญญาณเป็นช่วงย่อย 1 นาที แล้วหาค่าความถี่ธรรมชาติ ในแต่ละช่วงเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติตลอดช่วงการวัด ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งพบว่า สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่ทำการตรวจวัด มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติน้อยมาก ผลความถี่ธรรมชาติใน mode 1 และ 2 ของแต่ละช่วงเวลา 1 นาที แสดงในภาพที่ 7.8 และ 6.9 ตามลำดับค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของค่าความถี่ธรรมชาติแต่ละช่วงเวลา 1 นาที ตลอดช่วงที่ทำการวัด แสดงในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1

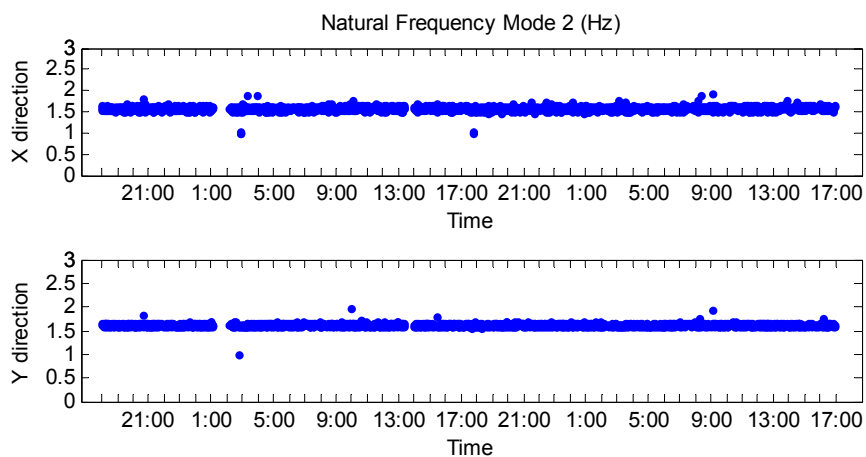
ค่าเฉลี่ย และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของความถี่ธรรมชาติ ตลอดช่วงที่ทำการวัด

Direction	Mean		S.D.	
	Mode 1	Mode 2	Mode 1	Mode 2
X	0.259	1.580	0.007	0.048
Y	0.263	1.624	0.007	0.028
θ	2.716	-	0.062	-



ภาพที่ 7.8

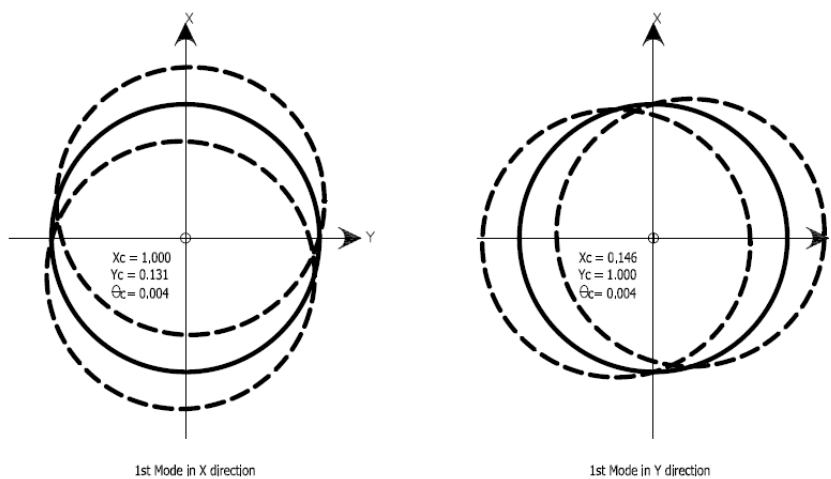
ความถี่ธรรมชาติ mode 1 ในแต่ละช่วงเวลา 1 นาที



ภาพที่ 7.9

ความถี่ธรรมชาติ mode 2 ในแต่ละช่วงเวลา 1 นาที

รูปแบบการสั่นไหว Mode 1 ของอาคาร ในทิศทาง X และ Y แสดงในภาพที่ 7.10 จะเห็นว่ารูปแบบการสั่นไหวของอาคารในทิศทาง X และ Y มีลักษณะที่สั่นไหวแบบควบคู่กัน (Coupling) ใน 2 ทิศทางเล็กน้อย



ภาพที่ 7.10

รูปแบบการสั่นไหว mode 1 ของอาคาร

อย่างไรก็ตามในการหาค่า ความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) ของอาคารจากข้อมูลซึ่งมีลักษณะเป็นสัญญาณแบบสุ่ม อาจหาได้จากหลายวิธี และในงานวิจัยนั้นนอกจากจะใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติแล้ว ได้ใช้วิธี Eigensystem Realization Algorithm, ERA (Juang & Pappa, 1984) ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติ และค่าอัตราส่วนความหน่วง ด้วย ซึ่งผลที่ได้จากวิธี ERA แสดงในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2

ความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วง จากวิธี ERA

รูปแบบการสั่นไหว	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	อัตราส่วนความหน่วง
Mode 1 ทิศทาง X	0.258	0.0005-0.0054
Mode 1 ทิศทาง Y	0.263	0.0045-0.0134
Mode 1 ทิศทาง บิด	2.685	0.0270-0.0327
Mode 2 ทิศทาง X	1.578	0.0277-0.0344
Mode 2 ทิศทาง Y	1.614	0.0197-0.0357

จากค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัดพบว่าอาคารมีค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงค่อนข้างต่ำมาก แสดงถึงว่าอาคารนี้มีลักษณะเป็นอาคารที่มีการสั่นไหวได้ง่าย(มาตรฐาน ASCE 7-05 และ AS/NZS 2002 จำแนกอาคารที่มีความถี่ธรรมชาติของอาคารน้อยกว่า 1 Hz. เป็นอาคารที่มีความอ่อนตัวและมีผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่มีนัยสำคัญ)

7.4 ผลการตอบสนองของอาคารจากการตรวจวัด

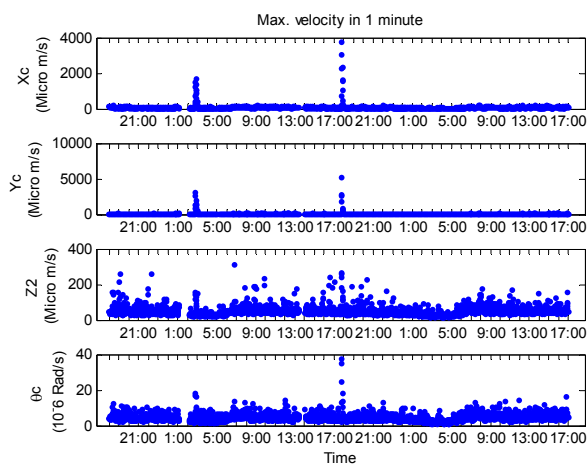
การตรวจวัดผลตอบสนองของอาคารในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 45 ชั่วโมงต่อเนื่องกันเพื่อให้ครอบคลุมถึงช่วงเวลาที่มียันตกและช่วงลมแรงกระทำกับอาคาร ผลค่าความเร็วสูงสุด และ ค่า Root Mean Square (RMS) ในการเคลื่อนตัวของพื้นอาคารในชั้นที่ทำการตรวจวัด ทุกช่วงเวลา 1 นาที ในทิศทาง X Y Z และทิศทางบิด แสดงในภาพที่ 7.11 และ 6.12 ตามลำดับ (ทิศทาง X Y และทิศทางบิด เป็นค่าที่จุดกึ่งกลางพื้นที่ ส่วนทิศทาง Z คือ ทิศทางในแนวตั้งของหัววัดตัวที่ 2) พบว่าในระหว่างการตรวจวัดได้มีช่วงเวลาที่ผลตอบสนองของอาคารมีค่าสูงกว่าปกติ 2 ช่วง คือ ช่วงเวลา 02.00-03.00 น. และ 17.00-18.00 น.ของวันที่ 11 ตุลาคม 2550 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดลมแรงกระทำกับอาคาร และจากภาพที่ 7.13 ซึ่งแสดงค่าความเร็วในการเคลื่อนตัวของพื้นอาคารในชั้นที่ทำการตรวจวัด ในช่วงเวลา 17.00-18.00 น. จะเห็นว่าผลตอบสนองของอาคารในช่วงเวลาที่ผลตอบสนองมีค่ามาก กับผลตอบสนองของอาคารในช่วงที่ผลตอบสนองมีค่าน้อย มีค่าแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลาดังกล่าวอาคารมีการตอบสนองต่อแรงลมค่อนข้างเด่นชัด ค่าสูงสุดและค่า RMS ของความเร็วอาคารในช่วงเวลาที่มีลมแรงแสดงในตารางที่ 7.3 ซึ่งพบว่าค่าความเร็วสูงสุดของพื้นที่ชั้นที่ทำการตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 3.783 5.297 และ 0.271 mm/s. ในทิศทาง X Y และ Z ตามลำดับ และใช้สมมุติฐานว่าการโยกตัวในแต่ละทิศทางมีลักษณะ Harmonic อย่างค่อนข้างสมบูรณ์ จะสามารถหาการขจัดสูงสุดเทียบเท่าของอาคารได้จากความสัมพันธ์ของการขจัดกับความเร็ว ตามสมการที่ 6.4 ได้เท่ากับ 2.334 และ 3.201 mm. ในทิศทาง X และ Y ตามลำดับ

$$D = \frac{V}{2\pi f} \quad (6.4)$$

โดย	V	=	ความเร็วของการเคลื่อนตัวของอาคาร (m/s)
	D	=	การขจัดเทียบเท่าของการเคลื่อนตัวของอาคาร (m/s)
	f	=	ความถี่ (Hz)

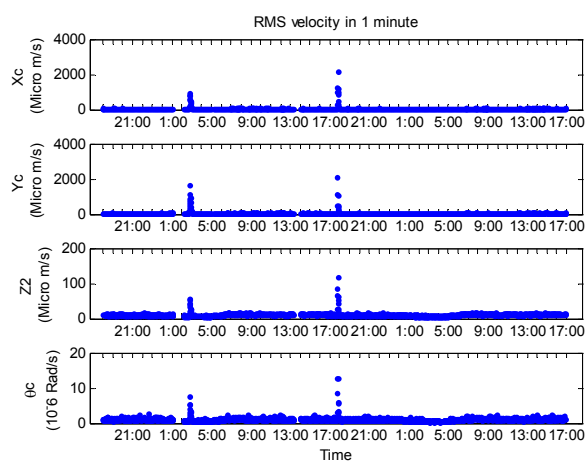
และจากความเร็วในการเคลื่อนตัวของอาคารที่ตรวจวัดได้สามารถหาความเร่งที่ยอดอาคารโดยการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา และพบว่าค่าความเร่งสูงสุดที่ยอดอาคารมีค่า เท่ากับ 10.76, 10.20 mm/s² และ 1136.2 x 10⁻⁶ rad/s² ในทิศทาง X , Y และ ทิศทางบิด ตามลำดับ เมื่อเทียบกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 ซึ่งค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้มีค่า $L/500$ เท่ากับ 280 mm

และความเร่งสูงสุดที่ยอมให้มีค่าเท่ากับ 150 mm/s^2 ซึ่งจะเห็นว่าผลตอบสนองสูงสุดของอาคารภายใต้แรงลมในช่วงที่ทำการศึกษามีค่าอยู่ในขอบเขตของค่าที่ยอมให้จากมาตรฐาน



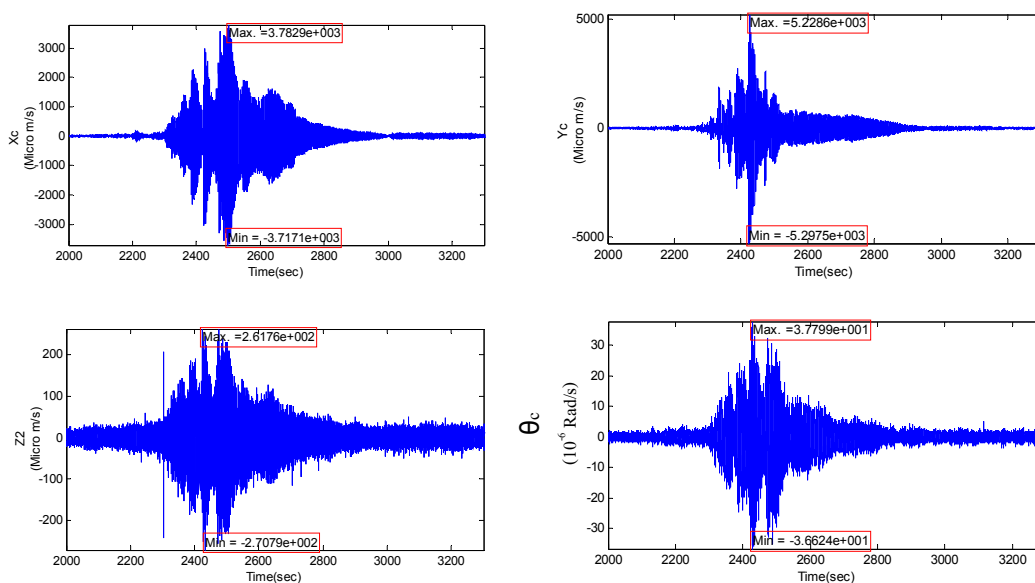
ภาพที่ 7.11

ความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนตัวของพื้นอาคารในชั้นที่ตรวจวัด ทุกช่วงเวลา 1 นาที



ภาพที่ 7.12

ค่า RMS ของความเร็วการเคลื่อนตัวของพื้นอาคารในชั้นที่ตรวจวัด ทุกช่วงเวลา 1 นาที



ภาพที่ 7.13

ความเร็วในการเคลื่อนตัวของพื้นอาคารในชั้นที่ทำการตรวจวัดช่วงเวลา 17.00 - 18.00 น.

	ช่วงเวลา	
ความเร็วสูงสุด	02.00 – 03.00	17.00 – 18.00
X_C (mm/s)	1.695	3.783
Y_C (mm/s)	3.116	5.297
Z_2 (mm/s)	0.155	0.271
θ_C (10^{-6} rad/s)	18.32	37.81
ค่า RMS ความเร็ว		
X_C (mm/s)	0.962	2.141
Y_C (mm/s)	1.647	2.105
Z_2 (mm/s)	0.055	0.118
θ_C (10^{-6} rad/s)	7.592	12.87

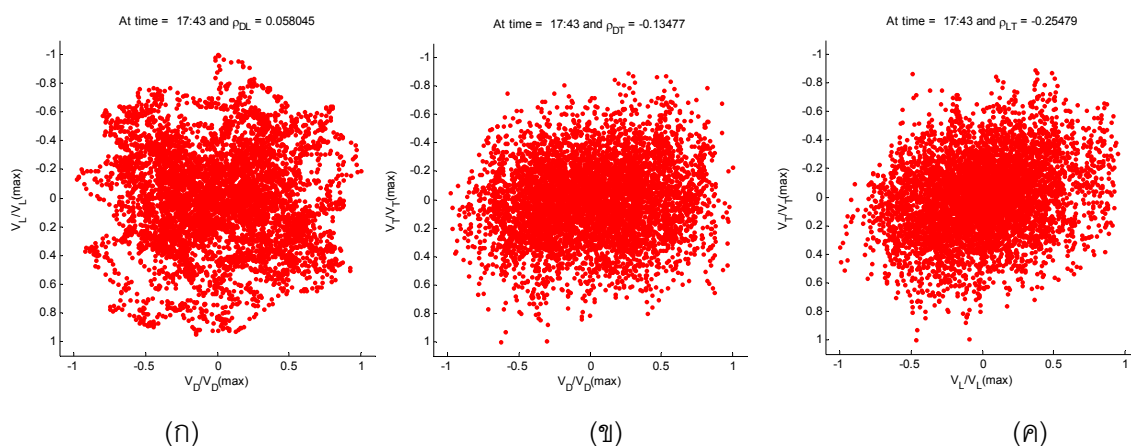
ตารางที่ 7.3

ค่าสูงสุดและค่า RMS ของความเร็วอาคารในช่วงเวลาที่มีลมแรง

7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนในแต่ละทิศทาง

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนของอาคารในแต่ละทิศทางของอาคารตัวอย่างภายใต้แรงลม งานวิจัยนี้พิจารณาแบ่งผลตอบแทนของแรงลมเป็นช่วงๆ ละ 1 นาที และกำหนดทิศทางลมที่กระทำต่ออาคารตัวอย่างตามสมมุติฐานในหัวข้อ 6.2 เพื่อพิจารณาผลตอบแทนในทิศทางลม ทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และทิศทางปิด และพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ผลตอบแทนใน 2 ทิศทางใดๆ ด้วย ค่า สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ร่วม (Correlation coefficient, ρ)

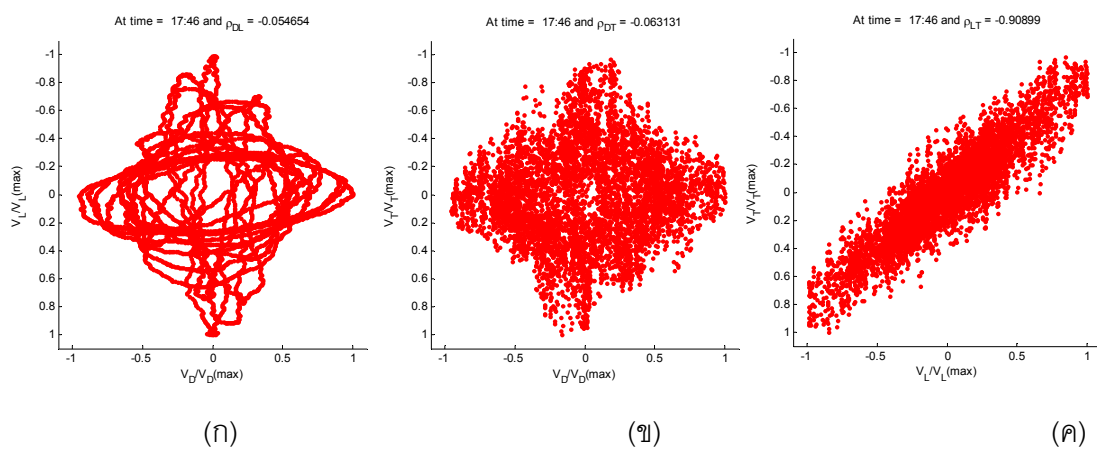
ลักษณะของความสัมพันธ์ของผลตอบแทนที่เกิดขึ้นในช่วงที่ลมไม่แรง มีลักษณะแตกต่างจากช่วงที่เกิดลมแรง เนื่องจากในสภาพจริงอาคารมิได้เกิดการสั่นไหวเนื่องจากแรงลมแต่เพียงอย่างเดียว ดังนั้นช่วงเวลาที่แรงลมกระทำกับอาคารมีค่าน้อย จึงแตกต่างกับช่วงเวลาโครงสร้างสั่นเนื่องจากแรงลมเป็นหลัก ความสัมพันธ์ของผลตอบแทนของอาคารในช่วงที่ลมไม่แรงแสดงในภาพที่ 7.14 และเมื่อพิจารณาภาพที่ 7.12 เฉพาะช่วงเวลาที่มียลมแรงกระทำกับอาคารพบว่าค่าความเร็วสูงสุดในทิศทางปิดของอาคารในช่วงเวลา 02:30 – 03:00 ของวันที่ 11 ตุลาคม 2551 มีค่าไม่เด่นชัดเมื่อเทียบกับ ความเร็วสูงสุดในทิศทางปิดของช่วงเวลา 17:00 – 18:00



ภาพที่ 7.14

ความสัมพันธ์ของผลตอบแทนสองทิศทางในช่วงเวลาที่ลมไม่แรง (ก) ผลตอบแทนในทิศทางลมและทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม (ข) ผลตอบแทนในทิศทางลมและทิศทางปิด (ค) ผลตอบแทนในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมและทิศทางปิด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนในแต่ละทิศทางของอาคารเฉพาะช่วงเวลา 17:00 – 18:00 ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างผลตอบแทนในทิศทางลมกับทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม (ρ_{DL}) และผลตอบแทนในทิศทางลมกับทิศทางปิด (ρ_{DT}) มีค่าน้อยมาก คือเท่ากับ 0.05 และ 0.06 ตามลำดับ ส่วนสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมกับทิศทางปิด (ρ_{LT}) มีค่าใกล้เคียง 1 ดังแสดงในภาพที่ 7.15



ภาพที่ 7.15

ความสัมพันธ์ของผลตอบแทนสองทิศทางในช่วงเวลาที่มีลมแรง

(ก) ผลตอบแทนในทิศทางลมและทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม

(ข) ผลตอบแทนในทิศทางลมและทิศทางปิด

(ค) ผลตอบแทนในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมและทิศทางปิด