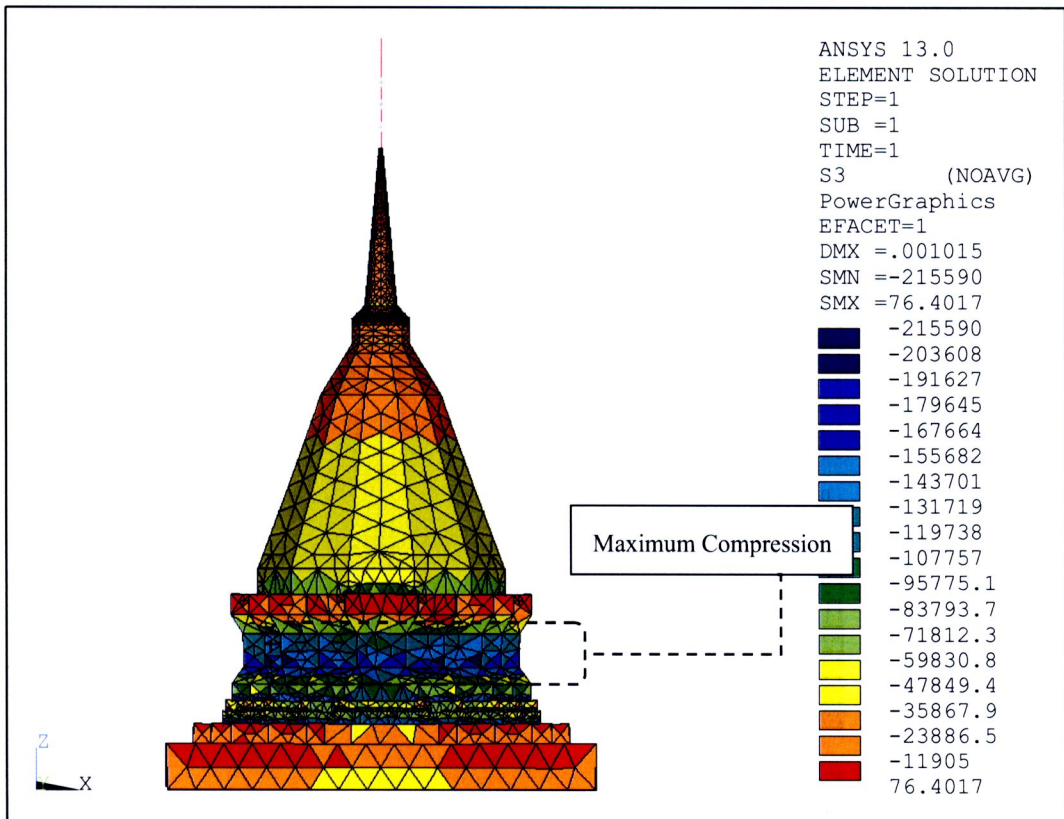


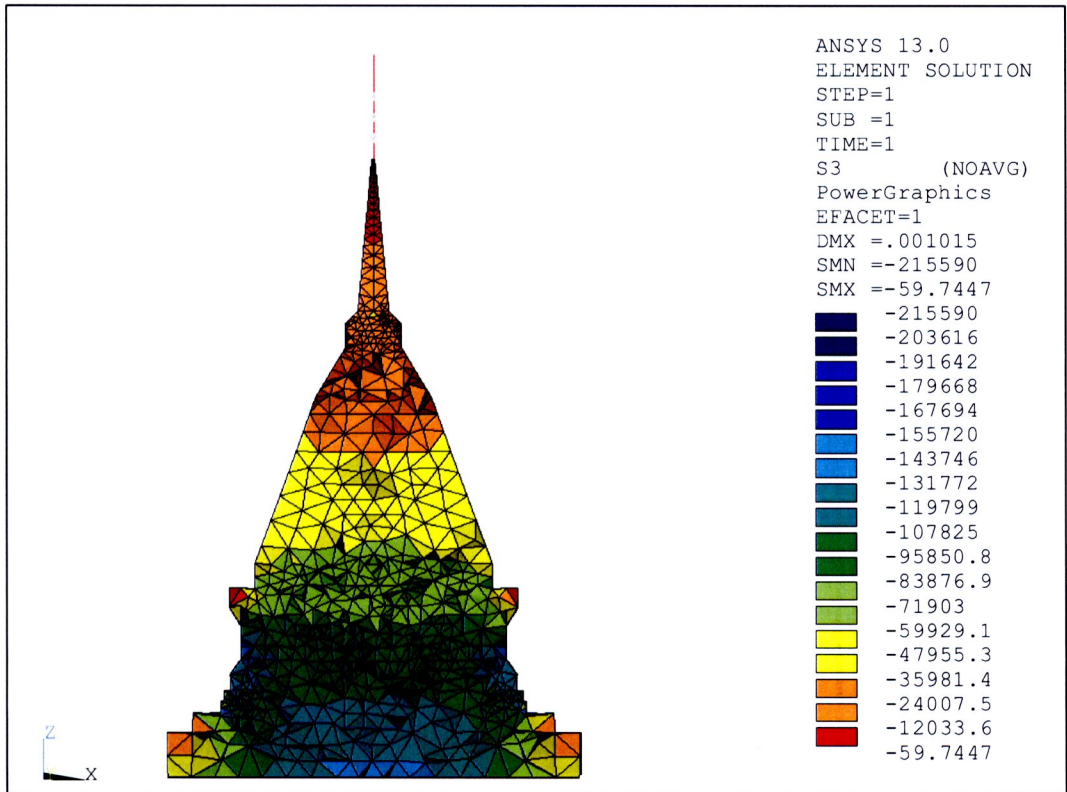
## บทที่ ๕ ผลการวิเคราะห์

### ๕.๑ ภาวะการรับน้ำหนักตัวเองของเจดีย์

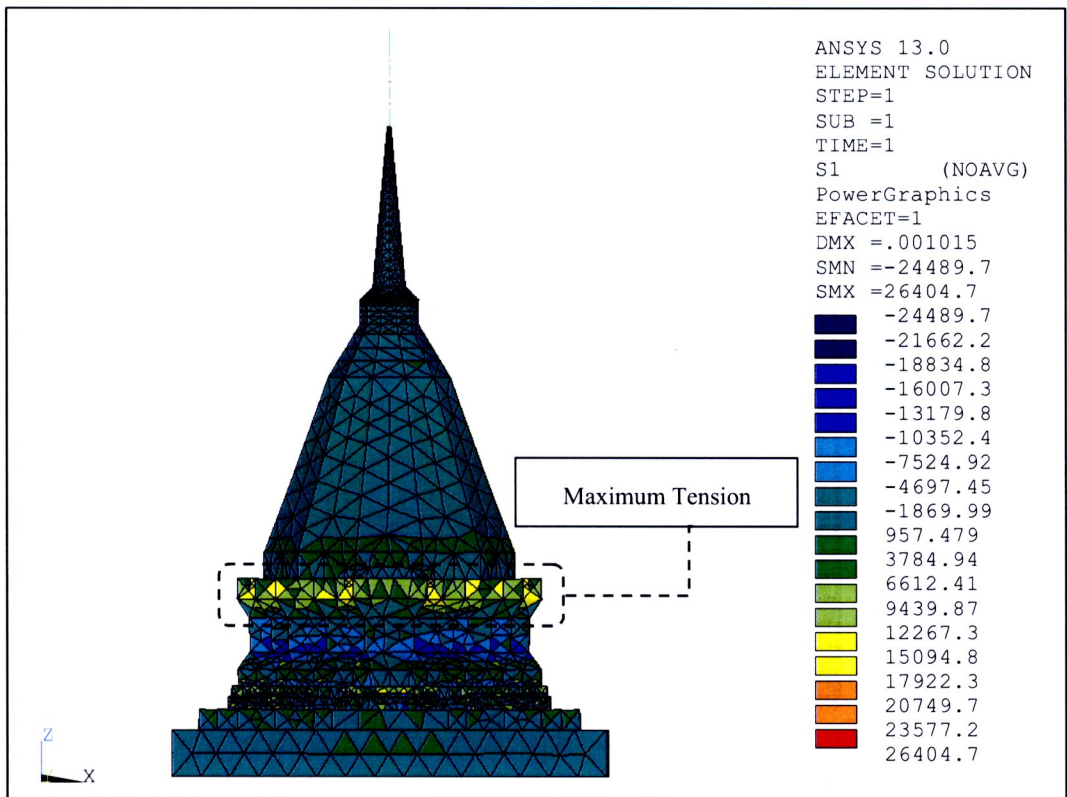
เพื่อเป็นการตรวจสอบแบบจำลองเบื้องต้นจึงได้พิจารณาพฤติกรรมการรับน้ำหนักตัวเอง ผลจากการวิเคราะห์การรับน้ำหนักตัวเองของเจดีย์ได้ค่าแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งรวมมีค่าเท่ากับ ๑๐,๘๙๑ kN สอดคล้องกับหน่วยน้ำหนักตามปริมาตรของเจดีย์ที่จำลอง ส่วนหน่วยแรงดินใต้ฐานรากเฉลี่ยเท่ากับ ๑๑๓ kPa (๑๑.๕๒ t/m<sup>๒</sup>) และเมื่อพิจารณาหน่วยแรงหลัก (Principal Stress) ที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่า หน่วยแรงอัดสูงสุด (ค่าลบ) จะเกิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอกของฐานเชิงเนื่องจากเป็นส่วนฐานของเจดีย์ที่อยู่ระดับล่างและมีพื้นที่หน้าตัดเล็กที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ที่ ๐.๒๑ MPa ส่วนหน่วยแรงดึงสูงสุด (ค่าบวก) จะเกิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอกของฐานเชิงบริเวณติดกันฐานระฆัง ซึ่งมีค่าอยู่ที่ ๐.๐๓ MPa ดังแสดงในรูป ๕.๑ ถึง ๕.๔



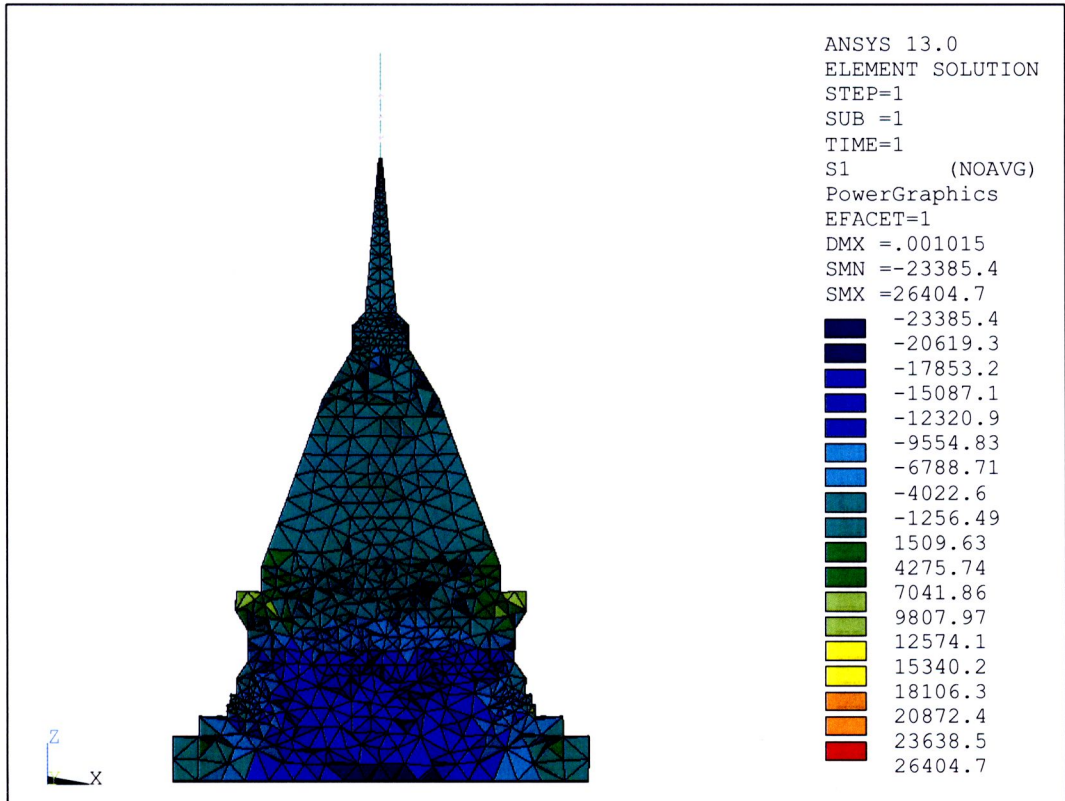
รูป ๕.๑ หน่วยแรงอัดสูงสุดที่ผิวของเจดีย์ภายใต้น้ำหนักตัวเอง (N/m<sup>๒</sup>)



รูป ๕.๒ หน่วยแรงอัดสูงสุดภายใต้น้ำหนักตัวเอง (รูปตัด) (N/m<sup>๒</sup>)



รูป ๕.๓ หน่วยแรงดึงสูงสุดที่ผิวภายใต้น้ำหนักตัวเอง (N/m<sup>๒</sup>)



รูป ๕.๔ หน่วยแรงดึงสูงสุดภายใต้น้ำหนักตัวเอง (รูปตัด) (N/m<sup>๒</sup>)

## ๕.๒ คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้าง (Dynamic Properties) ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) และรูปแบบการสั่นไหว (Mode Shapes) ผลจากการวิเคราะห์ได้แสดงค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวใน ๑๐ รูปแบบแรกของแบบจำลอง และจากการตรวจวัดโดยวิธี Ambient vibration

### ๕.๒.๑ ผลการตรวจวัดการสั่นไหวโดยวิธี Ambient vibration

รูปแบบการสั่นไหวคำนวณจากอัตราส่วนระหว่าง Fourier Magnitude ของผลตอบสนองที่ระดับบนสุด(จุด "A") เป็นระดับอ้างอิงเทียบกับระดับอื่นๆ ในระดับต่ำลงมีทำการวัดช่วงเวลาเดียวกัน โดยให้ Fourier Magnitude ของระดับบนสุดมีค่าเท่ากับ ๑.๐๐ แสดงดังตาราง ๕.๑ และ ๕.๒ สำหรับการเคลื่อนที่แบบเลื่อน และการเคลื่อนที่บิดรอบแกน Z ตามลำดับ ส่วนค่าความถี่ธรรมชาติของเจดีย์จะพิจารณาที่จุดยอดของกราฟ Fourier amplitude ของเจดีย์ ที่ตำแหน่ง F โดยอ้างอิงที่ตำแหน่ง A ดังรูป ๕.๕ พบว่าความถี่ที่เด่นชัดของเจดีย์มีดังนี้ ๕.๐๘๖ Hz, ๕.๐๒๕ Hz และ ๑๐.๘๑๙ Hz ตามลำดับตาราง ๕.๑ ความถี่ธรรมชาติและ Mode shape



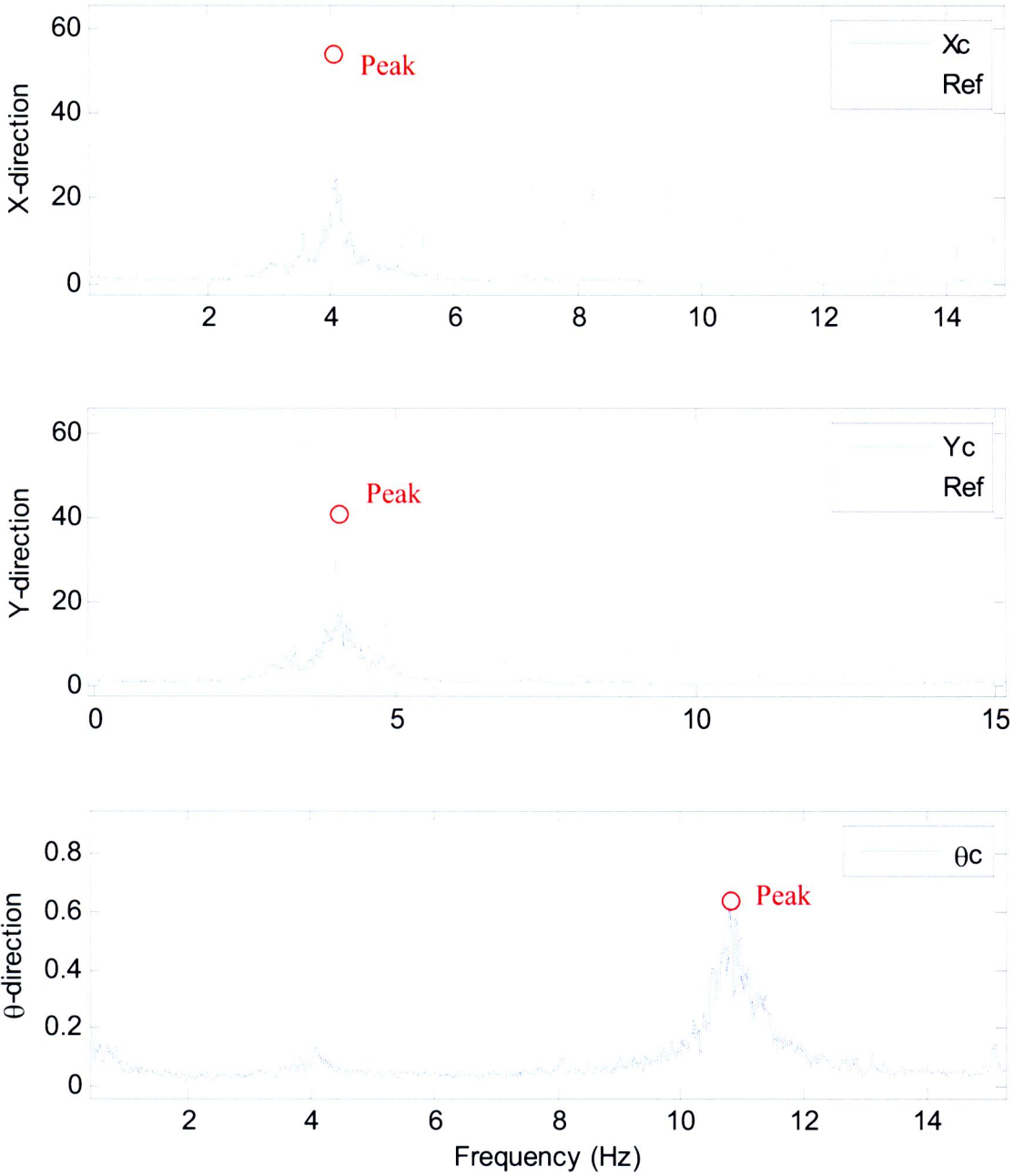
ตาราง ๕.๑ ความถี่ธรรมชาติ และ Mode shape

		Mode Shape				Installation location
		๑ <sup>st</sup> mode Tran. X-dir		๑ <sup>st</sup> mode Tran. Y-dir		
Frequency		๕.๐๘๖		๕.๐๒๕		
Leve	H (m.)	x	y	x	y	
A	๑๕.๘	๑.๐๐๐	๐.๕๑๑	๐.๘๒	๑.๐๐๐	
B	๑๑.๗	๐.๖๐๙	๐.๓๒	๐.๕๘	๐.๖๗	
D	๙.๑๓	๐.๕๘	๐.๒๗	๐.๓๙	๐.๕๖๑	
E	๗.๒๘	๐.๓๗	๐.๓๕	๐.๓๗	๐.๒๕	
H	๕.๖๖	๐.๒๑	๐.๒๓๖	๐.๒๒๐	๐.๑๕	
I	๒.๘๖	๐.๑๒๒	๐.๑๕๒	๐.๑๒	๐.๐๙	
J	๑.๖๐	๐.๐๗	๐.๑๐๒	๐.๐๗	๐.๐๙	
K	๐.๐๐	๐.๐๕๕	๐.๐๓๐	๐.๐๖๑	๐.๐๓	

ตาราง ๕.๒ ความถี่ธรรมชาติ และ Mode shape เคลื่อนที่ปิดรอบแกน Z

		Mode shape								
		๑ <sup>st</sup> mode Tran. X-dir			๑ <sup>st</sup> mode Tran. Y-dir			๑ <sup>st</sup> mode Torsion-dir		
Frequency (Hz)		๕.๐๘๖			๕.๐๒๕			๑๐.๘๑๙		
Level	H (m)	x <sub>c</sub>	y <sub>c</sub>	c	x <sub>c</sub>	y <sub>c</sub>	c	x <sub>c</sub>	y <sub>c</sub>	c
C	๙.๙๒	๐.๕๕๐	๐.๓๗๕	๐.๐๐๕	๐.๓๕๓	๐.๕๕๓	๐.๐๐๓	๐.๑๙๕	๐.๒๒๗	๐.๑๕๑
F	๖.๘๐	๐.๓๐๘	๐.๒๘๑	๐.๐๐๒	๐.๕๒๕	๐.๒๙๖	๐.๐๐๓	๐.๐๓๕	๐.๐๕๘	๐.๐๗๕
G	๕.๓๖	๐.๑๙๒	๐.๑๕๑	๐.๐๐๑	๐.๒๓๕	๐.๒๑๒	๐.๐๐๑	๐.๐๗๓	๐.๑๗๒	๐.๐๒๖
J	๑.๘๐	๐.๐๗๕	๐.๐๖๙	๐.๐๐๑	๐.๐๘๕	๐.๐๙๑	๐.๐๐๑	๐.๐๕๖	๐.๐๖๓	๐.๐๐๕





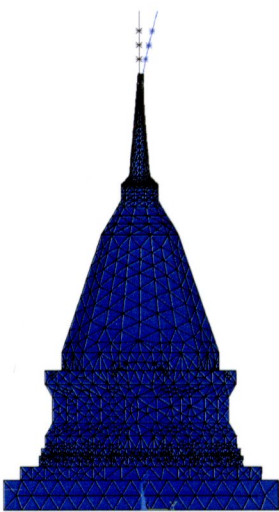
รูป ๕.๕ ผลการตอบสนองที่ตำแหน่ง F (อ้างอิงตำแหน่ง A)

๕.๒.๒ ผลจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) และรูปแบบการสั่นไหว (Mode Shapes) ๑๐ รูปแบบแรก แสดงดังตาราง ๕.๓ และรูป ๕.๖

ตาราง ๕.๓ ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้

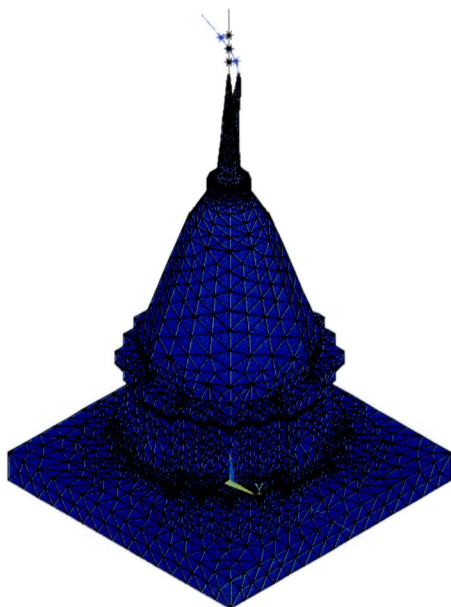
รูปแบบการสั่นไหว (Mode Shape)	Frequencies (Hz)		Error %
	Ambient vibration	Analysis	
๑. x-direction (Mode๑)	๔.๐๘๖	๓.๘๑๓	๖.๕๙
๒. y-direction (Mode๒)	๔.๐๒๕	๓.๘๓๖	๔.๓๐
๓. x-direction	-	๓.๔๒๔	-
๔. y-direction	-	๓.๔๒๖	-
๕. x-direction	-	๑๐.๐๖๔	-
๖. y-direction	-	๑๐.๐๘๕	-
๓. torsion	๑๐.๘๑๙	๑๓.๒๕๙	๓๓.๓๑
๘. x-direction	-	๑๓.๘๖๘	-
๙. y-direction	-	๑๓.๙๒๕	-
๑๐.z-direction	-	๑๙.๙๕๖	-



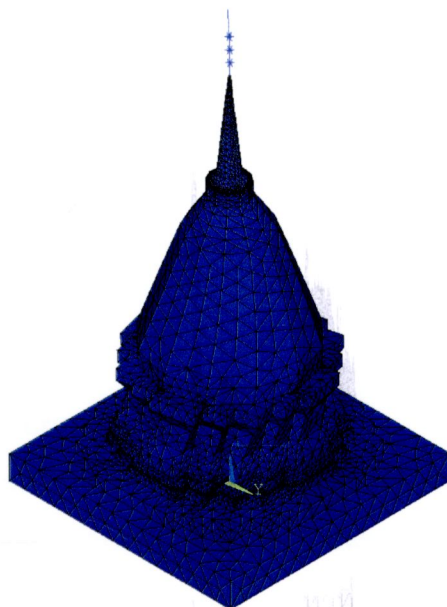
(ก) รูปแบบการสั่นไหวที่ ๑



(ข) รูปแบบการสั่นไหวที่ ๓



(ค) รูปแบบการสันไหวที่ ๕



(ง) รูปแบบการสันไหวที่ ๗



(จ) รูปแบบการสันไหวที่ ๘



(ฉ) รูปแบบการสันไหวที่ ๑๐

รูป ๕.๖ รูปแบบการสันไหวธรรมชาติ

๕.๓ การวิเคราะห์การรับแรงแผ่นดินไหว

๕.๓.๑ เสถียรภาพของเจดีย์ภายใต้แรงแผ่นดินไหว

แรงแผ่นดินไหวที่ส่งผลให้เกิดแรงผลักในแนวราบ อาจส่งผลให้อาคารพลิกคว่ำหรือเกิดหน่วยแรงที่พื้นดินที่รองรับที่ฐานมากเกินไป จากค่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากกรณีแรง



แผ่นดินไหวทั้ง ๓ เหตุการณ์นั้น ไม่เกิดแรงดึงที่ฐานขึ้นเลย เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดที่ปลายด้านหนึ่งเท่ากับ ๙๒ kPa (๙.๓๘ t/m<sup>๒</sup>) เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดที่ปลายอีกด้านต่ำสุดเท่ากับ ๒๕ kPa (๒.๕๕ t/m<sup>๒</sup>) และเกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดที่กลางเจดีย์เท่ากับ ๑๕๓ kPa (๑๕.๖๐ t/m<sup>๒</sup>) หากพิจารณาค่าหน่วยแรงต้านทานของดินได้ฐานรากเท่ากับ ๑๖๘ kPa (๑๗.๑๒ t/m<sup>๒</sup>) (จากผลการศึกษาของ AIT, ๒๕๔๑) แสดงให้เห็นว่าเจดีย์พระธาตุคอกยสุเทพมีความปลอดภัยจากเหตุเสียหายเนื่องจากภาระต้านทานของดินที่มากเกินไป

### ๕.๓.๒ หน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงภายใต้แรงแผ่นดินไหว

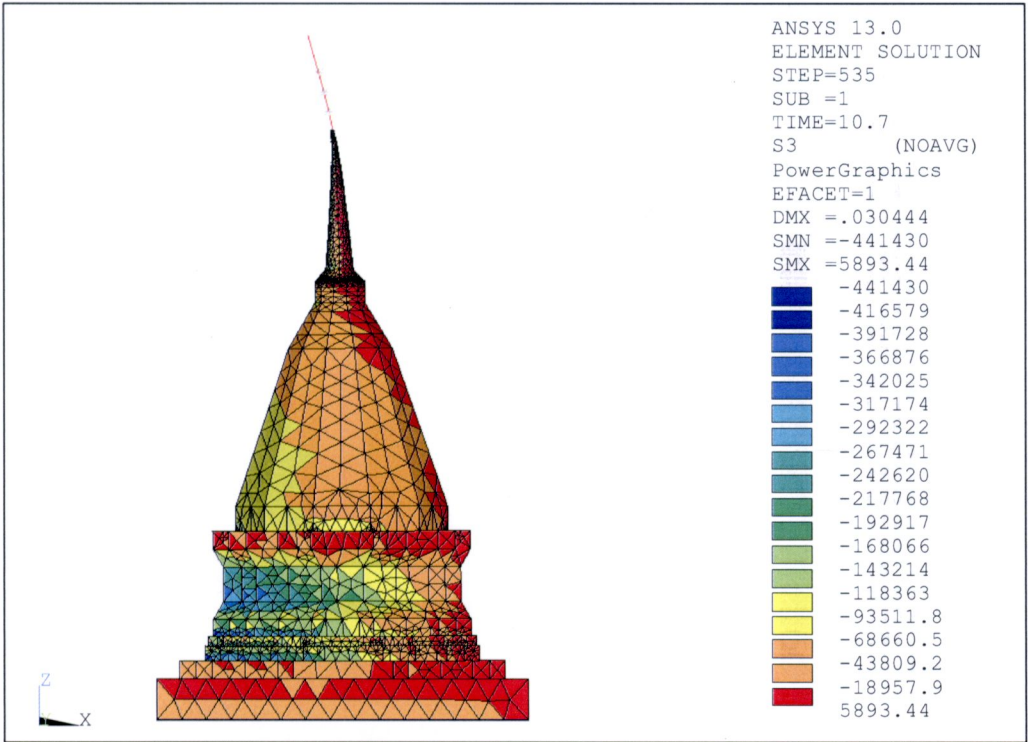
ในการวิเคราะห์การรับแรงแผ่นดินไหวของเจดีย์ โดยใช้แรงแผ่นดินไหวที่ได้จากการคำนวณในบทที่ ๓ พิจารณาหน่วยแรงหลัก (Principal Stress) ณ เวลาที่หน่วยแรงมีค่าสูงสุดหรือมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงของวัสดุ เพื่อแสดงแนวโน้มของความเสียหายที่สามารถเกิดขึ้นได้ในส่วนต่างๆ ของเจดีย์ หรือส่วนที่เจดีย์เกิดความเสียหายทันทีเมื่อหน่วยแรงเกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุ แสดงในตาราง ๕.๔ และ ๕.๕ จากการวิเคราะห์พบว่า เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดบริเวณฐานเชิงเท่ากับ ๐.๔๔ MPa ซึ่งน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ ๒.๖๘ MPa แต่เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดที่บริเวณปล้องโฉนเท่ากับ ๐.๓๓ MPa ซึ่งมากกว่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ ๐.๒๗ MPa ทำให้เจดีย์ได้รับความเสียหายได้ ดังแสดงในรูป ๕.๗ ถึง ๕.๑๒

ตาราง ๕.๔ หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นขององค์เจดีย์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวและน้ำหนักตัวเอง

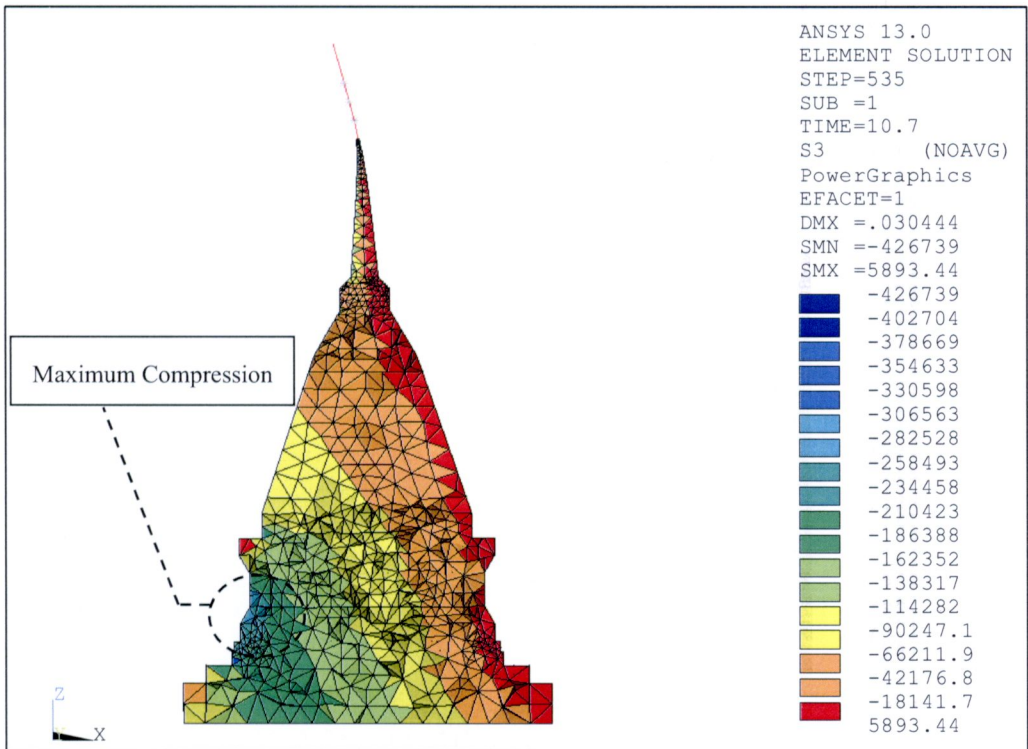
คลื่นแผ่นดินไหวที่มากที่สุด	เวลา ณ วินาทีที่เกิดแรงสูงสุด	ตำแหน่งที่เกิดแรงมากที่สุด	หน่วยแรงอัด (MPa)	รูปร่าง
Morgan Hill (1984)	๑๐.๗๐	บริเวณฐานเชิง	๐.๔๔	รูปที่ ๕.๗
Imperial Valley (1979)	๕.๗๔	บริเวณฐานเชิง	๐.๔๐	รูปที่ ๕.๘
Kocaeli, Turkey (1999)	๒๘.๔๐	บริเวณฐานเชิง	๐.๒๙	รูปที่ ๕.๑๑

ตาราง ๕.๕ หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นขององค์เจดีย์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวและน้ำหนักตัวเอง

คลื่นแผ่นดินไหวที่มากที่สุด	เวลา ณ วินาทีที่เกิดแรงสูงสุด	ตำแหน่งที่เกิดแรงมากที่สุด	หน่วยแรงดึง (MPa)	รูปร่าง
Morgan Hill (1984)	๑๐.๗๐	บริเวณปล้องโฉน	๐.๓๓	รูปที่ ๕.๘
Imperial Valley (1979)	๕.๗๔	บริเวณปล้องโฉน	๐.๓๐	รูปที่ ๕.๑๐
Kocaeli, Turkey (1999)	๒๘.๔๐	บริเวณปล้องโฉน	๐.๒๐	รูปที่ ๕.๑๒

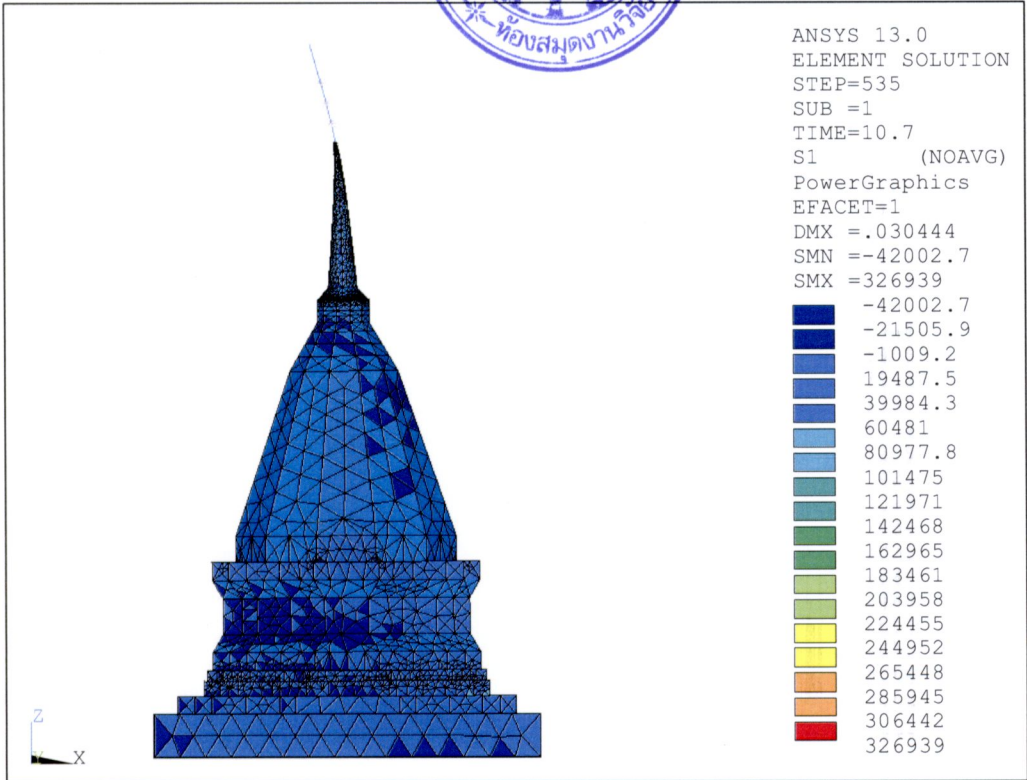


(ก) หน่วยแรงอัดที่ผิวของเจดีย์ (N/m<sup>๒</sup>)

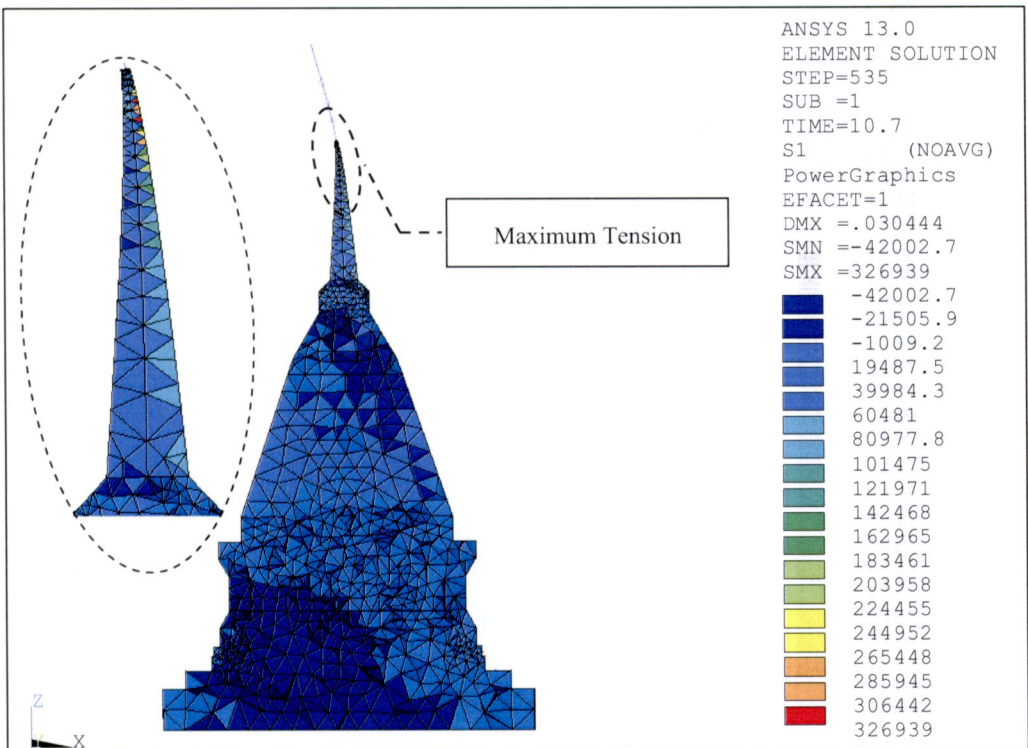


(ข) หน่วยแรงอัด (รูปตัด) (N/m<sup>๒</sup>)

รูป ๕.๓ หน่วยแรงอัดภายใต้แรงแผ่นดินไหว Morgan Hill (1984) ที่เวลา ๑๐.๗๐ วินาที



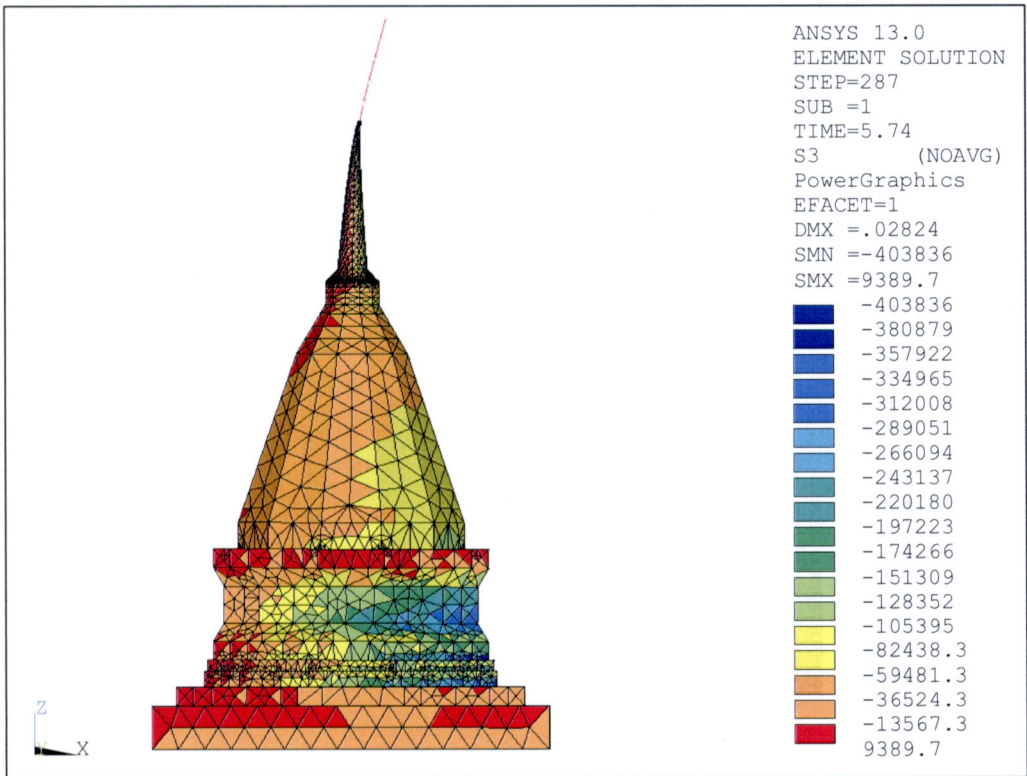
(ก) หน่วยแรงดึงที่ผิวของเจดีย์ (N/m<sup>๒</sup>)



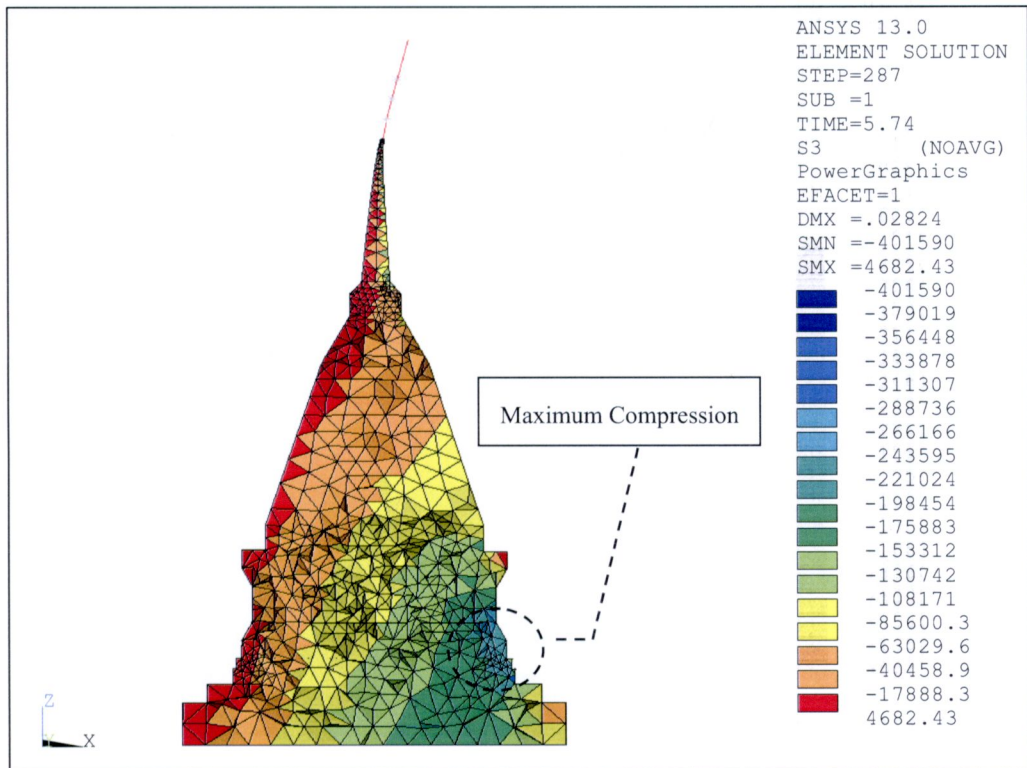
(ข) หน่วยแรงดึง (รูปตัด) (N/m<sup>๒</sup>)

รูป ๕.๘ หน่วยแรงดึงภายใต้แรงแผ่นดินไหว Morgan Hill (1984) ที่เวลา ๑๐.๓๐ วินาที



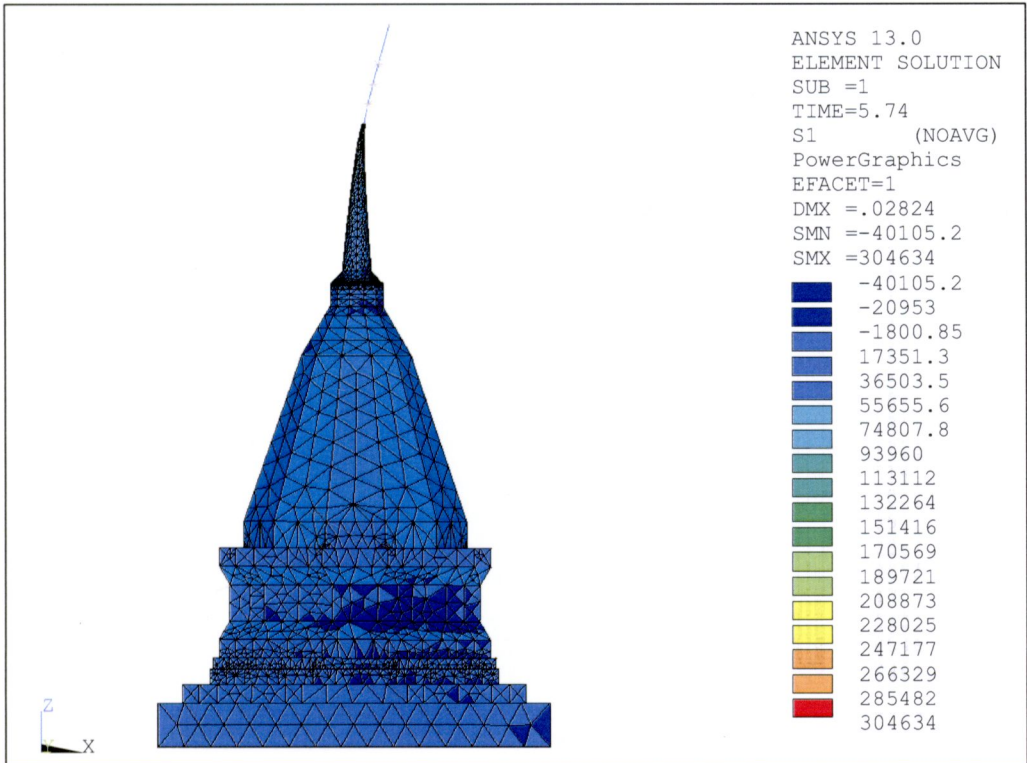


(ก) หน่วยแรงอัดที่ผิวของเจดีย์ (N/m<sup>2</sup>)

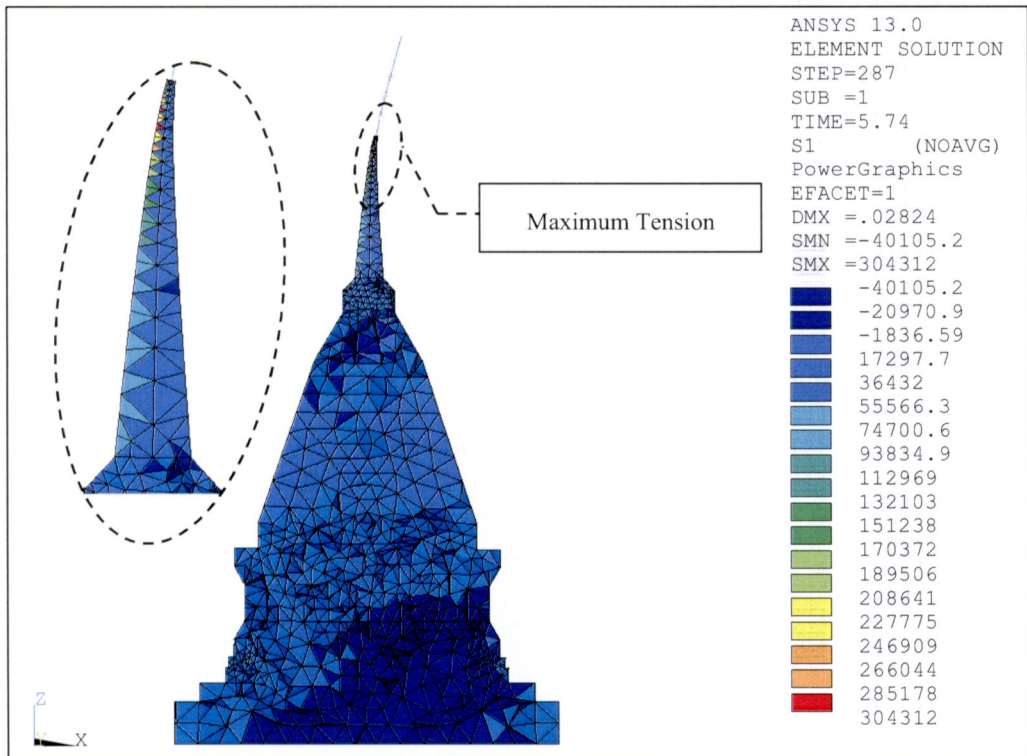


(ข) หน่วยแรงอัด (รูปตัด) (N/m<sup>2</sup>)

รูป ๕.๙ หน่วยแรงอัดภายใต้แรงแผ่นดินไหว Imperial Valley (1979) ที่เวลา ๕.๗๔ วินาที

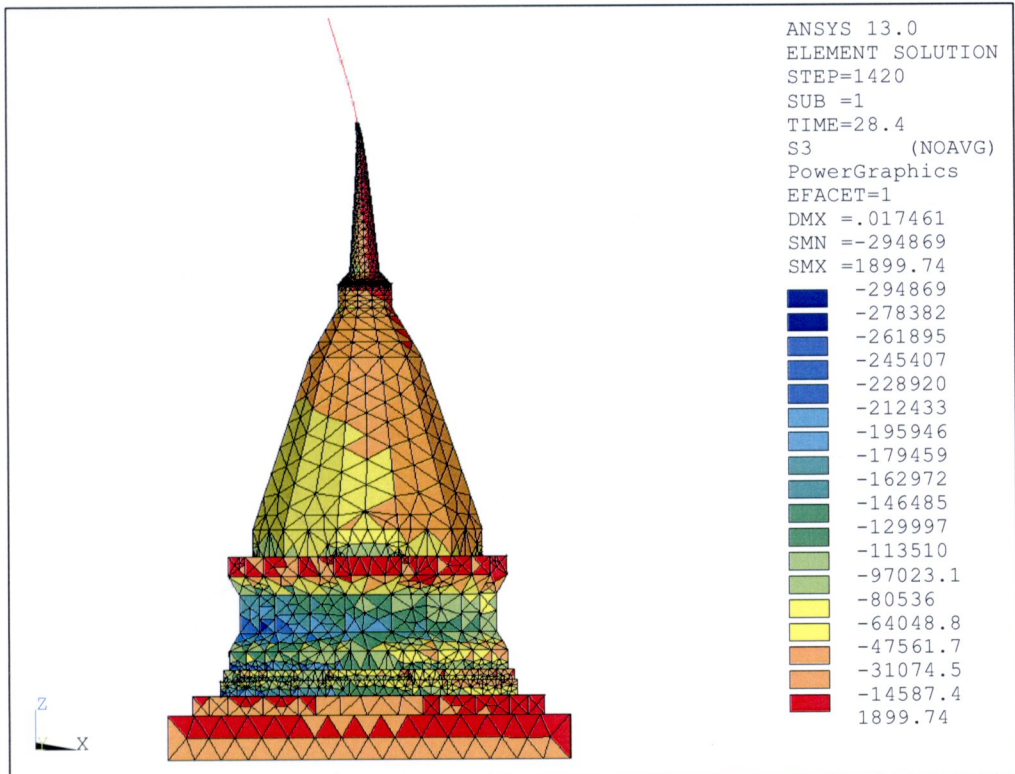


(ก) หน่วยแรงดึงที่ผิวของเจดีย์ (N/m<sup>๒</sup>)

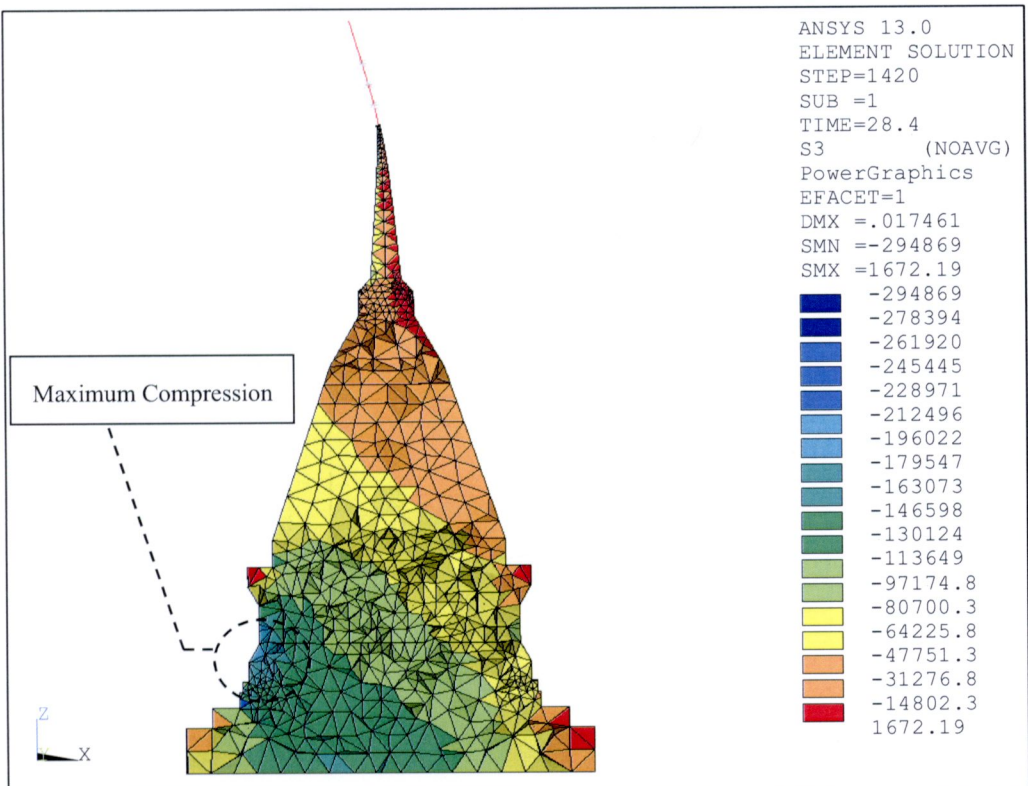


(ข) หน่วยแรงดึง (รูปตัด) (N/m<sup>๒</sup>)

รูป ๕.๑๐ หน่วยแรงดึงภายใต้แรงแผ่นดินไหว Imperial Valley (1979) ที่เวลา ๕.๗๔ วินาที



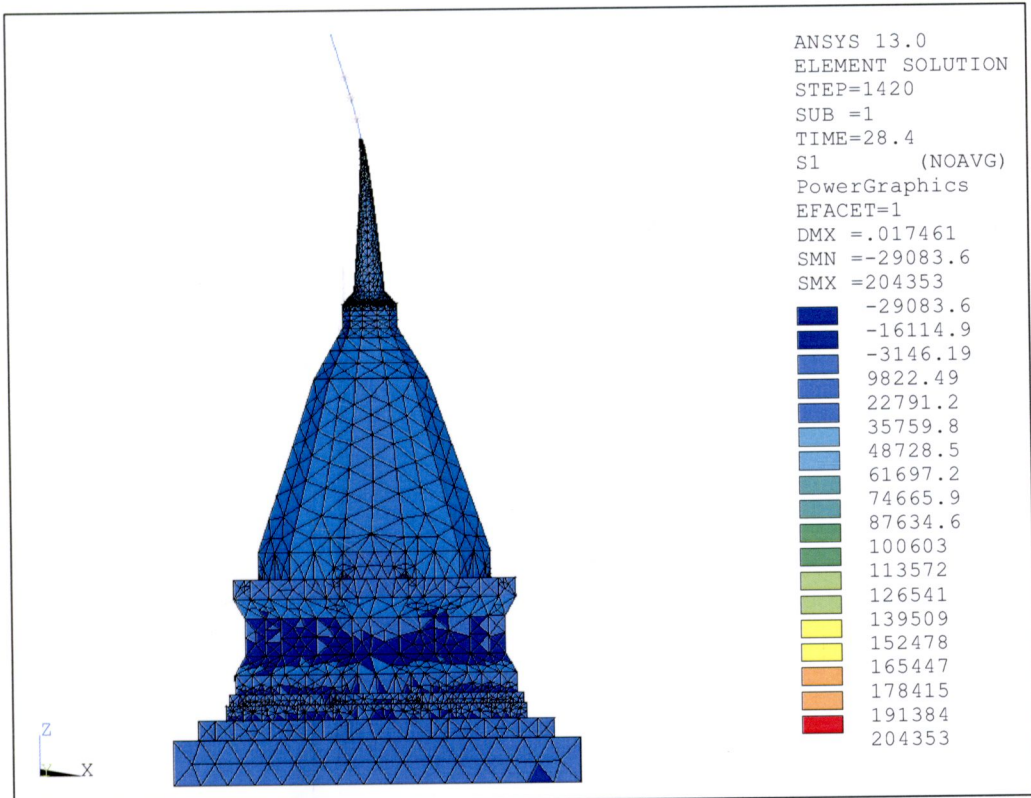
(ก) หน่วยแรงอัดที่ผิวของเจดีย์ ( $N/m^2$ )



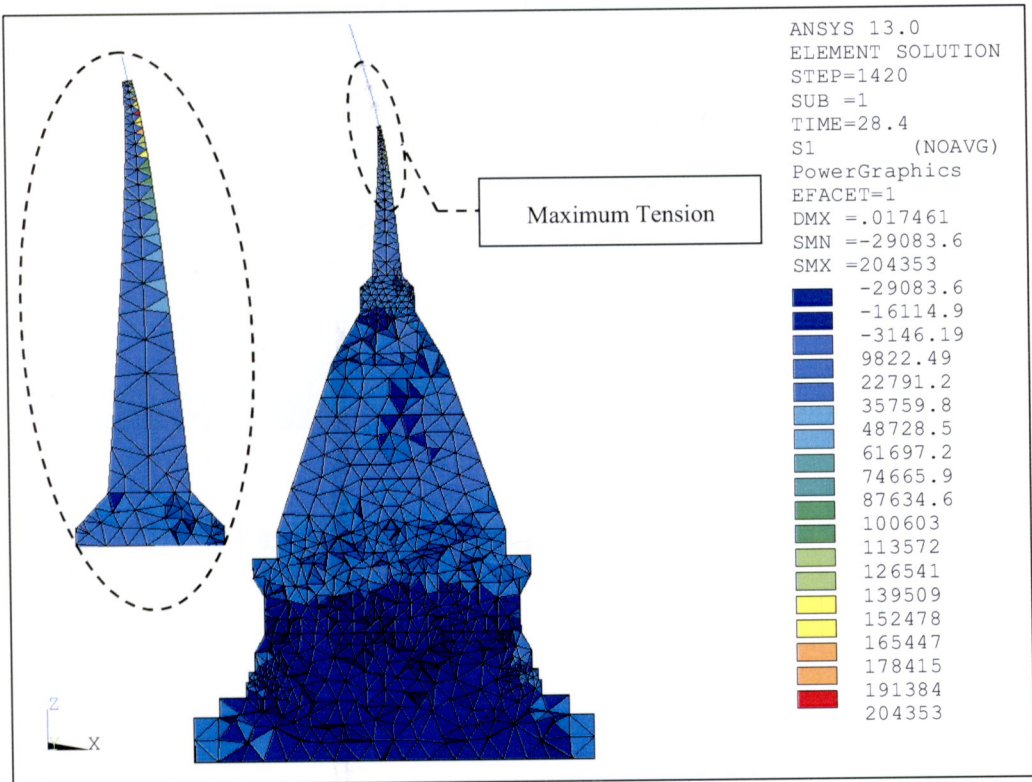
(ข) หน่วยแรงอัด (รูปตัด) ( $N/m^2$ )

รูป ๕.๑๑ หน่วยแรงอัดแรงแผ่นดินไหว Kocaeli, Turkey (1999) ที่เวลา ๒๘.๕๐วินาที





(ก) หน่วยแรงดึงที่ผิวของเจดีย์ ( $N/m^2$ )



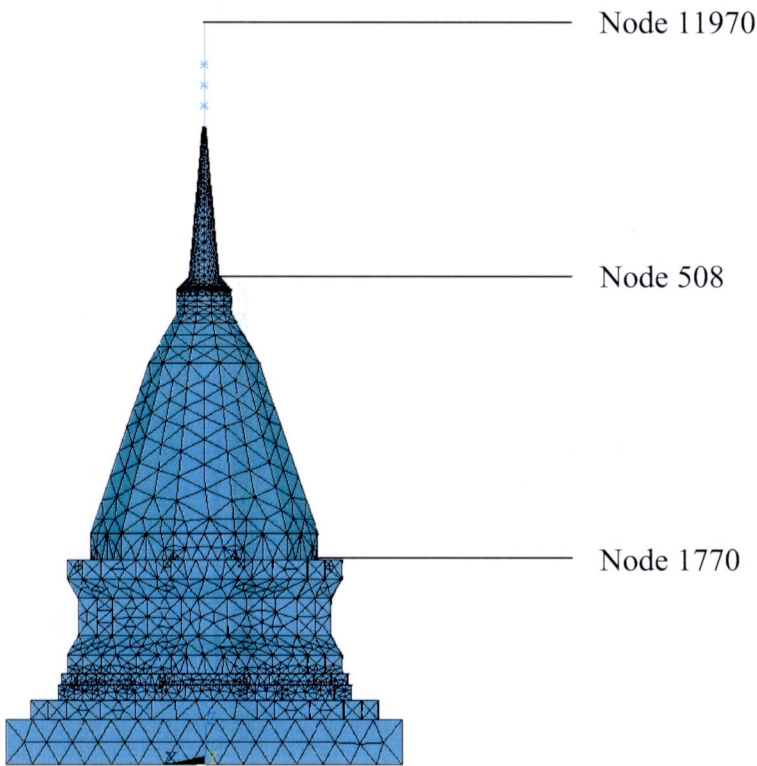
(ข) หน่วยแรงดึง (รูปตัด) ( $N/m^2$ )

รูป ๕.๑๒ หน่วยแรงดึงภายใต้แรงแผ่นดินไหว Kocaeli, Turkey (๑๙๙๙) ที่เวลา ๒๘.๔๐วินาที

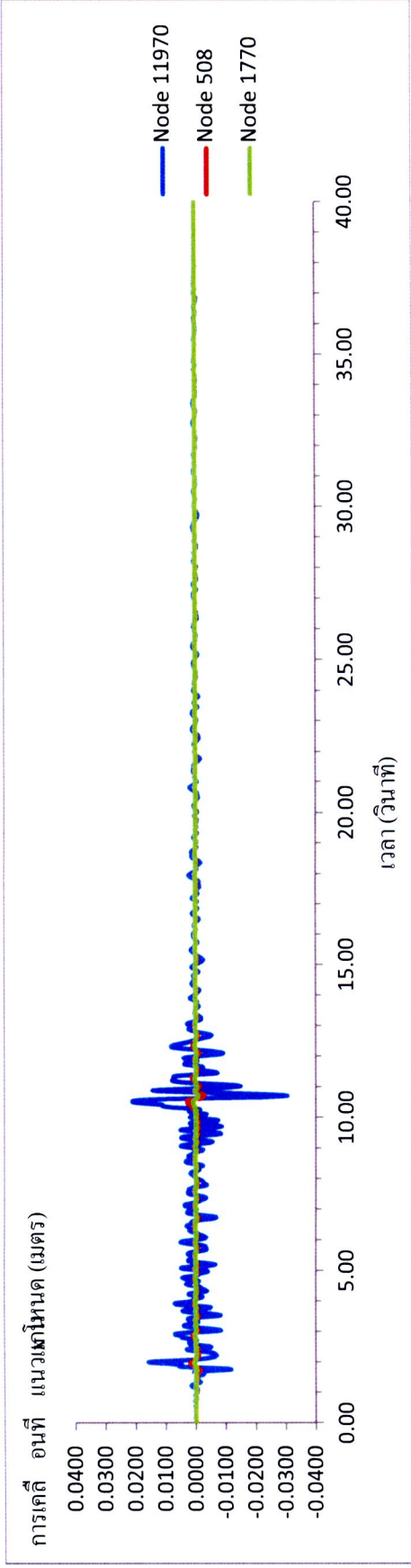
### ๕.๓.๓ การสั่นไหวของเจดีย์ภายใต้แรงแผ่นดินไหว

#### ๕.๓.๓.๑ ระยะการเคลื่อนตัว

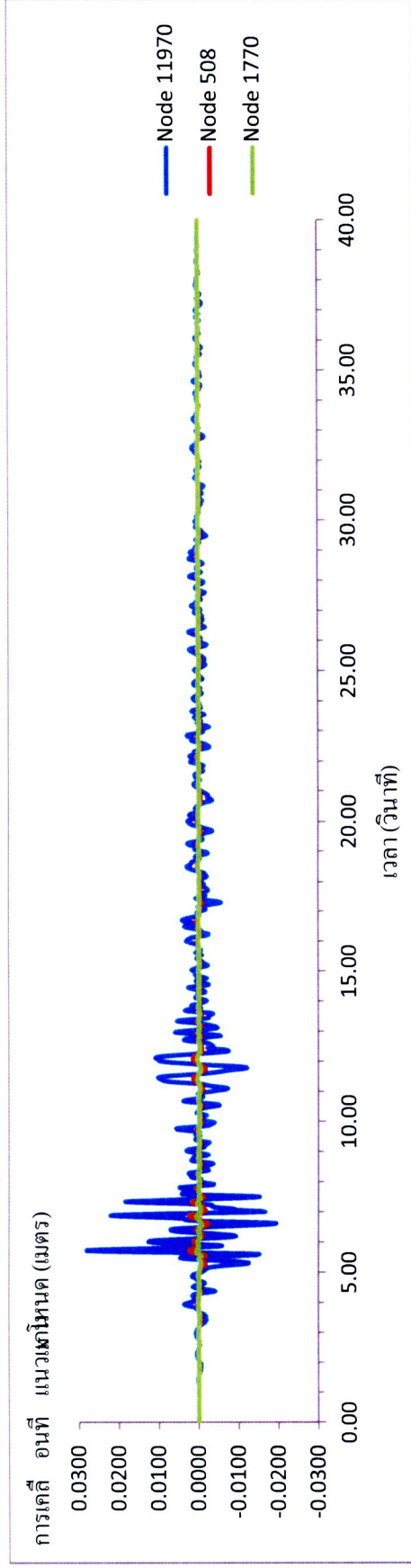
การสั่นไหวของเจดีย์เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวทั้ง ๓ รูปแบบมากระทำทั้ง โดยพิจารณาตำแหน่งการเคลื่อนตัวของเจดีย์ ดังรูป ๕.๑๓ จากการวิเคราะห์พบว่าส่วนที่มีการสั่นไหวมากที่สุดคือ ก้านฉัตร และปลียอด โดยการเคลื่อนตัวของเจดีย์ แสดงดังกราฟการเคลื่อนที่ ในตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ ยอดฉัตร โคนของปล้องโฉนด บริเวณตอนกลาง และส่วนฐานของเจดีย์ ณ เวลาใดๆ แสดงดังรูป ๕.๑๔ ถึง ๕.๑๖



รูป ๕.๑๓ ตำแหน่งที่พิจารณการเคลื่อนที่ของเจดีย์

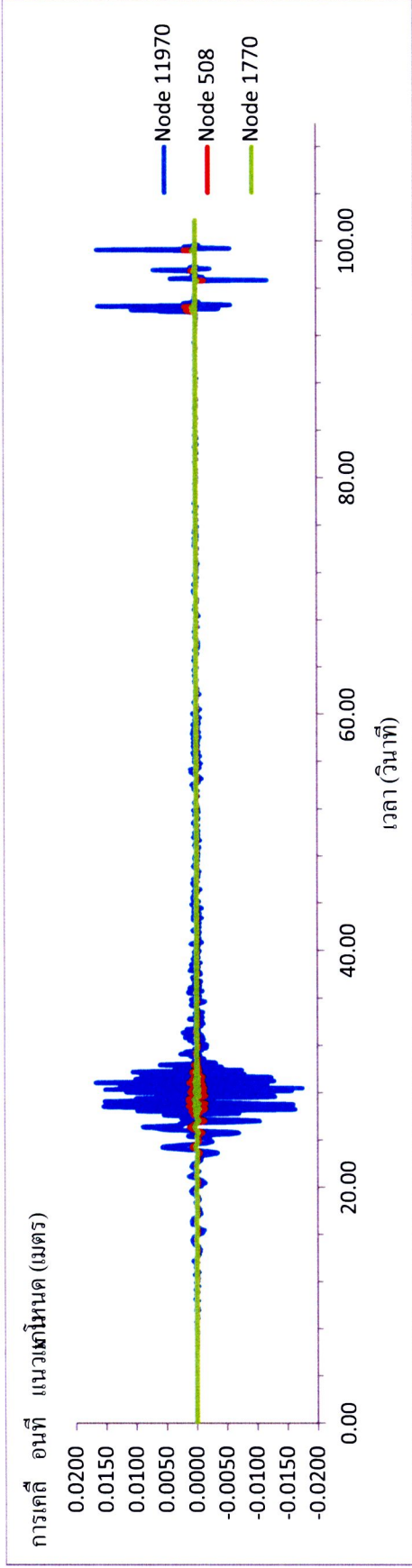


รูป ๕.๑๔ การเคลื่อนที่ตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ของแผ่นดินไหว Morgan Hill



รูป ๕.๑๕ การเคลื่อนที่ตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ของแผ่นดินไหว Imperial Valley

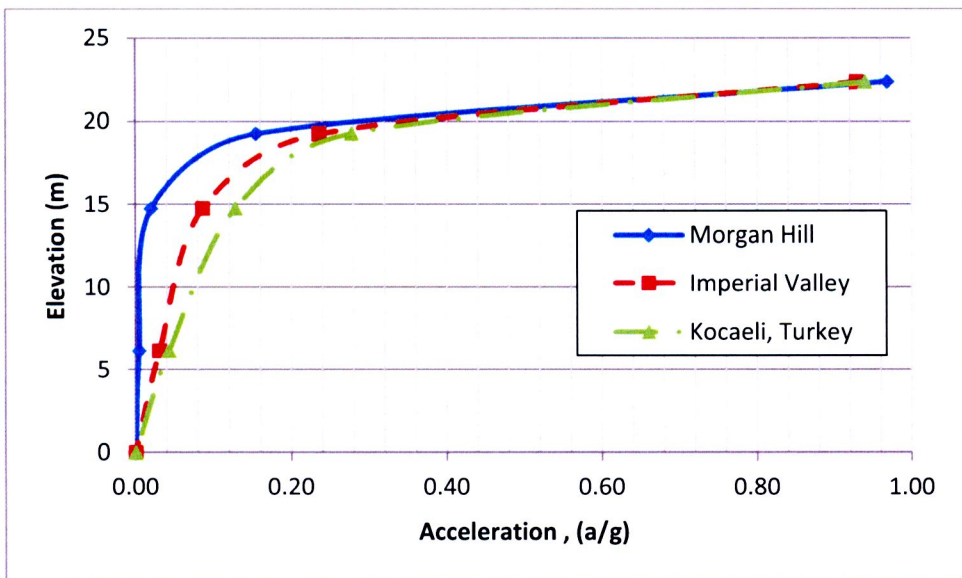




รูป ๕.๑๖ การเคลื่อนที่ตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ของแผ่นดินไหว Kocaeli, Turkey

### ๕.๓.๓.๒ ความเร่ง

ความเร่งจากแผ่นดินไหวทั้ง ๓ รูปแบบมากกระทำกับเจดีย์ โดยประกอบด้วย ๑. ความเร่งจากคลื่น Morgan Hill (EQ๑) ๒. ความเร่งจากคลื่น Imperial Valley (EQ๒) และ ๓. ความเร่งจากคลื่น Kocaeli, Turkey (EQ๓) จากการวิเคราะห์พบว่า ความเร่งจาก EQ๑ จะมีค่าความเร่งสูงสุดที่ Node ๑๑๙๓/๐ ณ เวลา ๑๐.๓๐ วินาที ส่วน EQ๒ จะมีความเร่งสูงสุด ณ เวลา ๕.๗๔ วินาที และ EQ๓ จะมีความเร่งสูงสุด ณ เวลา ๒๘.๔๐ วินาที เมื่อนำค่าความเร่งจากทั้ง ๓ คลื่นแผ่นดินไหว มาเปรียบเทียบกันจะพบว่าความเร่งของทั้ง ๓ คลื่นจะมีความคล้ายคลึงกันคือ ปลายยอดจะมีความเร่งสูงสุดประมาณ ๑ เท่าของความเร่งตามแนวโน้มถ่วง ดังรูป ๕.๑๓



รูป ๕.๑๓ ความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวในรูปแบบต่างๆ

**๕.๔ การรับแรงแผ่นดินไหวของเจดีย์ที่เสริมกำลังโดยแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว(๒๕:๗๕)**

**๕.๔.๑ หน่วยแรงภายใต้แรงแผ่นดินไหว**

จากผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมาในหัวข้อที่ ๕.๓ จะเห็นได้ว่า เจดีย์จะเกิดความเสียหายได้ในบริเวณส่วนปล้องโหนด ดังนั้น จึงได้ทำการเสริมกำลังโดยได้พิจารณาเสริมกำลังโดยวิธีเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้วในอัตราส่วน ๒๕:๗๕ หุ้มรอบ ในบริเวณดังกล่าว

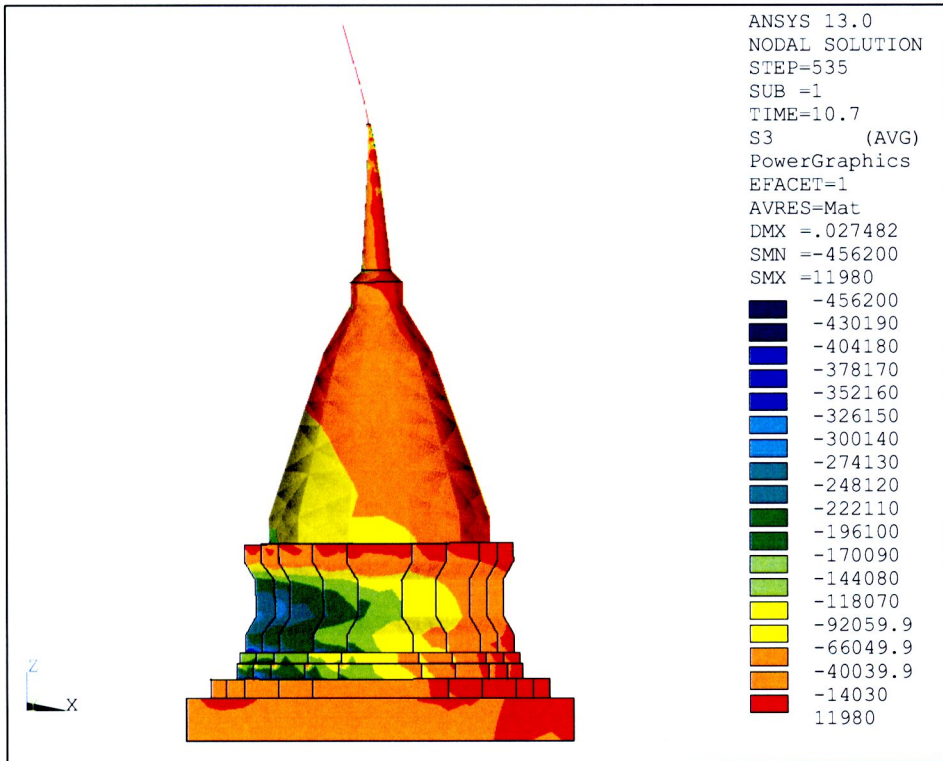
จากการวิเคราะห์เมื่อทำการเสริมกำลังแล้วพบว่า จุดที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดจะมีลักษณะคล้ายกันกับเจดีย์ที่ไม่มีการเสริมกำลังแต่จะมีความแตกต่างกันที่บริเวณปล้องโหนดซึ่งแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว ที่ทำการเสริมกำลังจะดูดซับหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น ทำให้บริเวณวัสดุที่เป็นอิฐมีค่าหน่วยแรงดึงลดลงดังตาราง ๕.๗

**ตารางที่ ๕.๖** เปรียบเทียบหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นขององค์เจดีย์ที่ไม่มีการเสริม FRP กับ องค์เจดีย์ที่ทำการเสริม FRP ภายใต้แรงแผ่นดินไหวและน้ำหนักตัวเอง

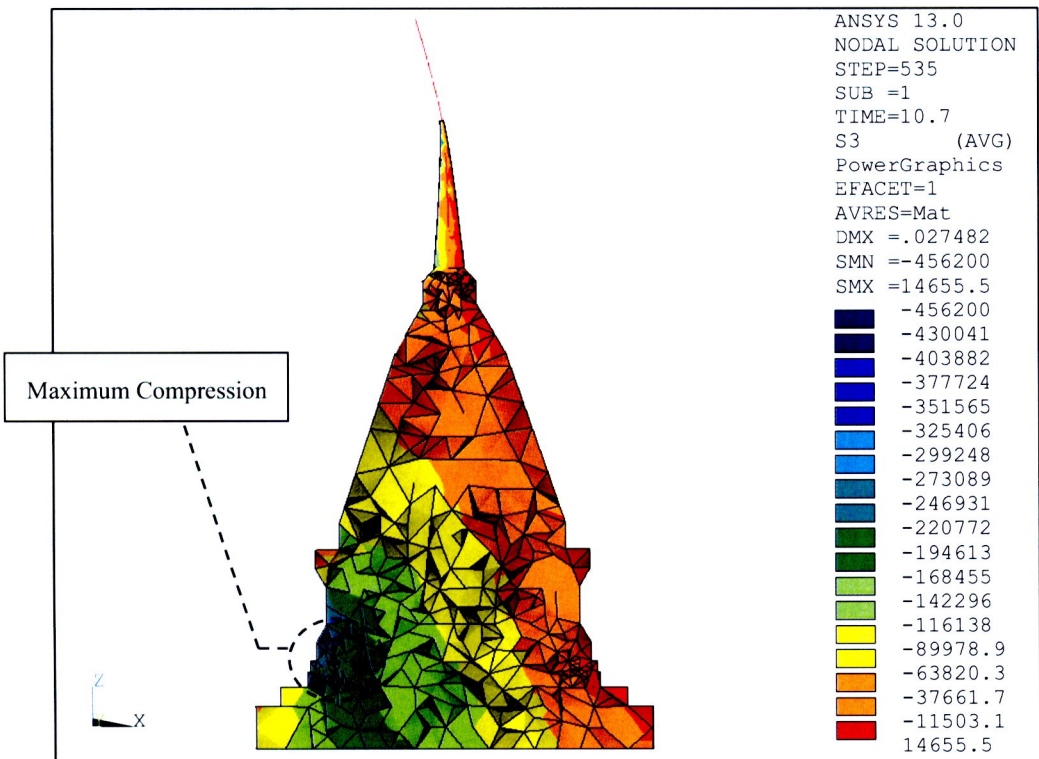
คลื่นแผ่นดินไหว ที่มากระทำ	หน่วยแรงอัดสูงสุดในอิฐ (MPa)		รูปอ้างอิง
	ไม่เสริม FRP	เสริมกำลังโดย FRP	
Morgan Hill (1984)	๐.๔๔	๐.๕๖	รูปที่ ๕.๑๘
Imperial Valley (1979)	๐.๔๐	๐.๕๖	รูปที่ ๕.๒๐
Kocaeli, Turkey (1999)	๐.๒๙	๐.๓๐	รูปที่ ๕.๒๒

**ตารางที่ ๕.๗** เปรียบเทียบหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นขององค์เจดีย์ที่ไม่มีการเสริม FRP กับ องค์เจดีย์ที่ทำการเสริม FRP ภายใต้แรงแผ่นดินไหวและน้ำหนักตัวเอง

คลื่นแผ่นดินไหว ที่มากระทำ	หน่วยแรงดึงในอิฐ ณ ตำแหน่งวิบัติเดิม (MPa)		หน่วยแรงดึงสูงสุดใน FRP (MPa)	รูปอ้างอิง
	ไม่เสริม FRP	เสริม FRP		
Morgan Hill (1984)	๐.๓๓	๐.๒๐	๐.๔๙	รูปที่ ๕.๑๙
Imperial Valley (1979)	๐.๓๐	๐.๑๗	๐.๓๙	รูปที่ ๕.๒๑
Kocaeli, Turkey (1999)	๐.๒๐	๐.๑๓	๐.๓๓	รูปที่ ๕.๒๓



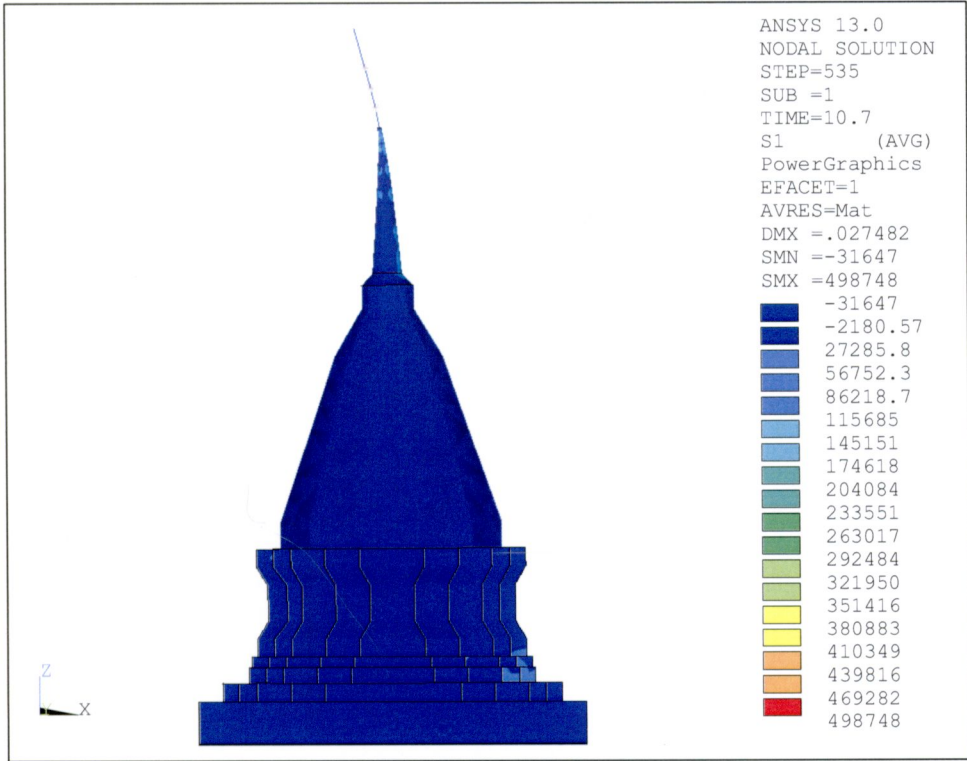
(ก) หน่วยแรงอัดที่ผิวของเจดีย์ (N/m<sup>๒</sup>)



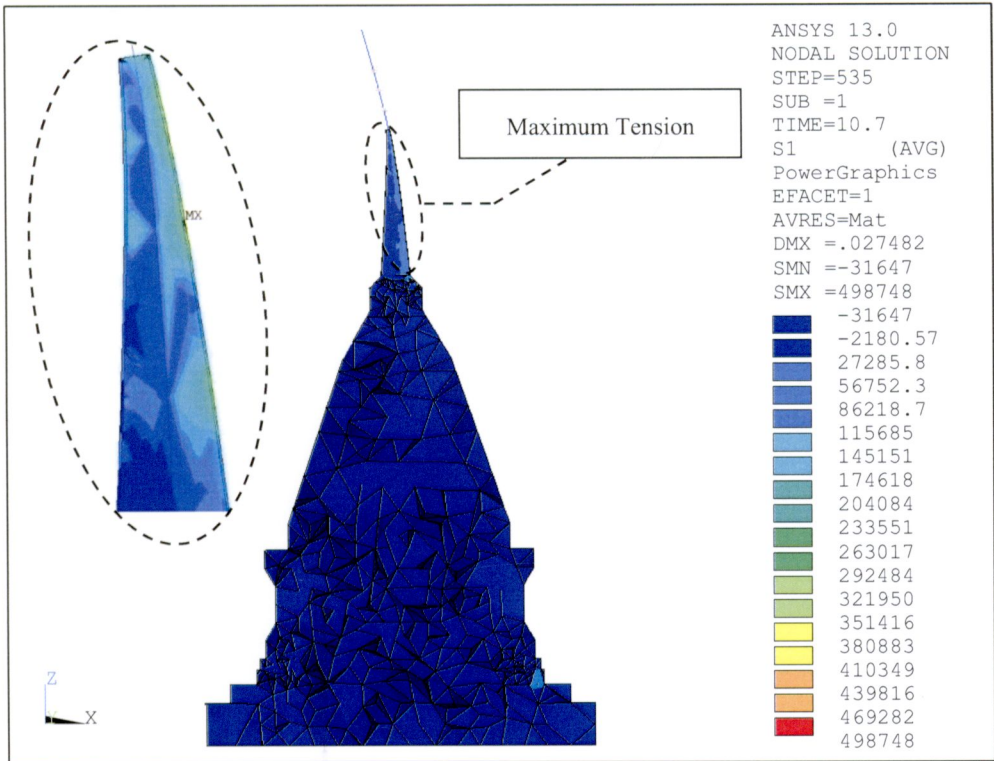
(ข) หน่วยแรงอัด (รูปตัด) (N/m<sup>๒</sup>)

รูป ๕.๑๘ หน่วยแรงอัดภายใต้แรงแผ่นดินไหว Morgan Hill (1984) ที่เสริมกำลัง FRP



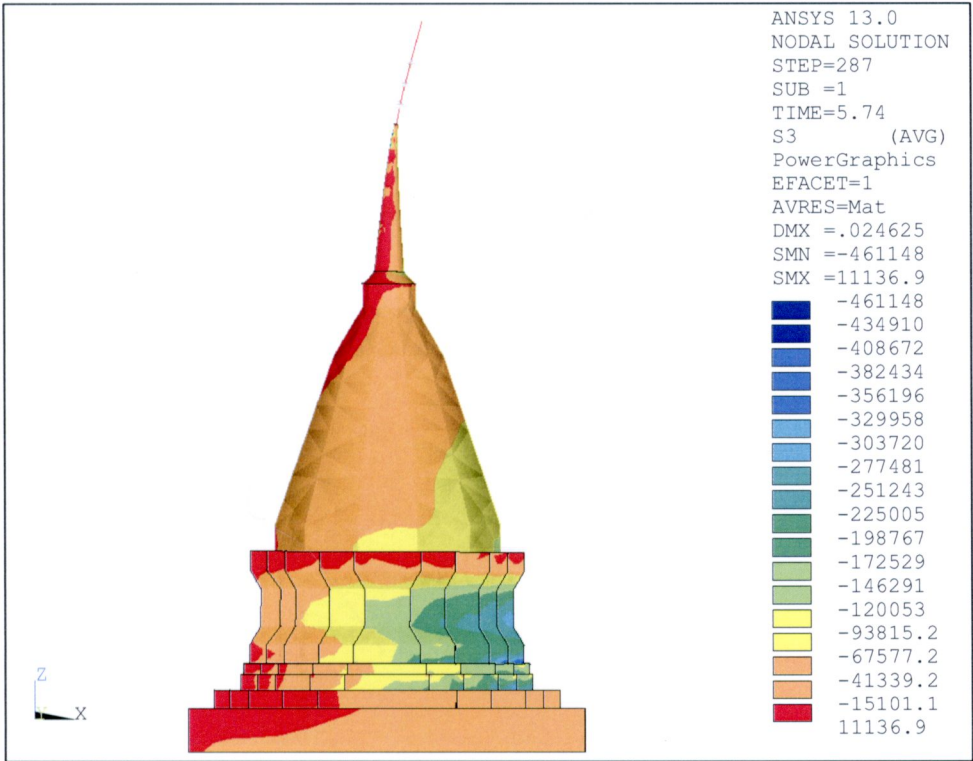


(ก) หน่วยแรงดึงที่ผิวของเจดีย์ (N/m<sup>๒</sup>)

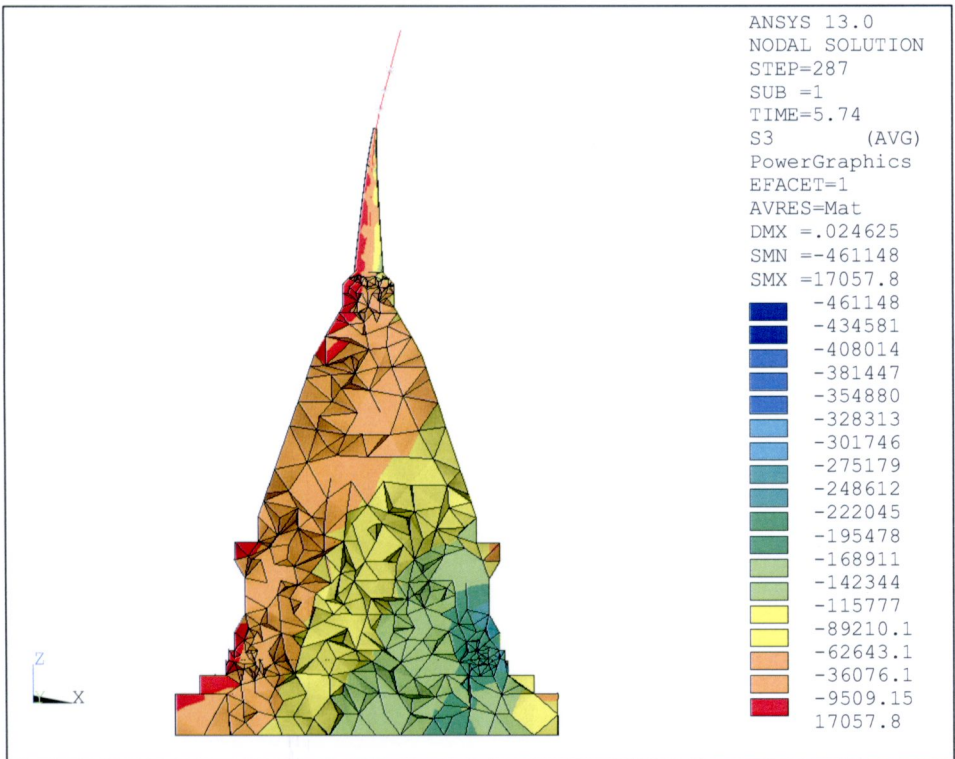


(ข) หน่วยแรงดึง (รูปตัด) (N/m<sup>๒</sup>)

รูป ๕.๑๙ หน่วยแรงดึงภายใต้แรงแผ่นดินไหว Morgan Hill (1984) ที่เสริมกำลัง FRP

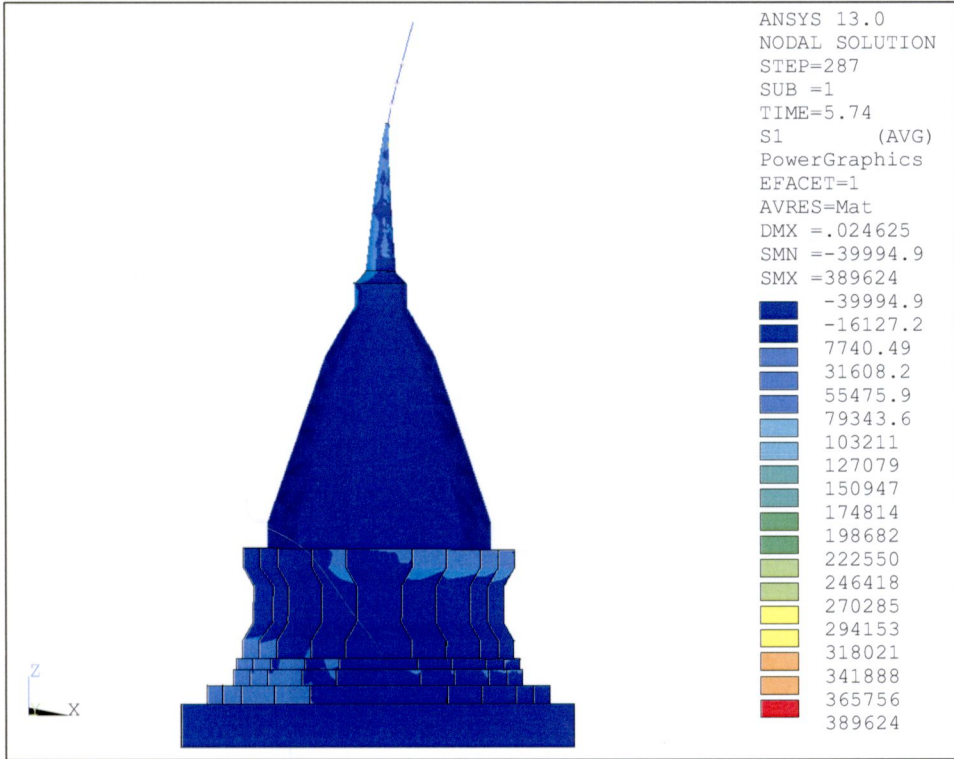


(ก) หน่วยแรงอัดที่ผิวของเจดีย์

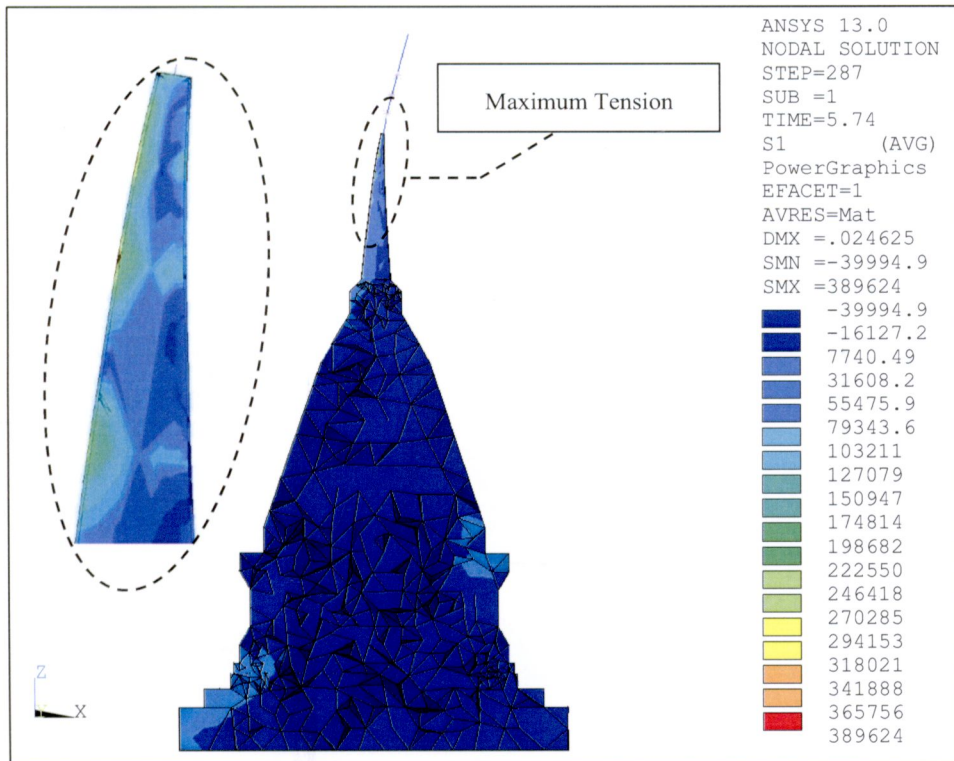


(ข) หน่วยแรงอัด (รูปตัด) ( $N/m^2$ )

รูป ๕.๒๐ หน่วยแรงอัดภายใต้แรงแผ่นดินไหว Imperial Valley (1979) ที่เสริมกำลัง FRP

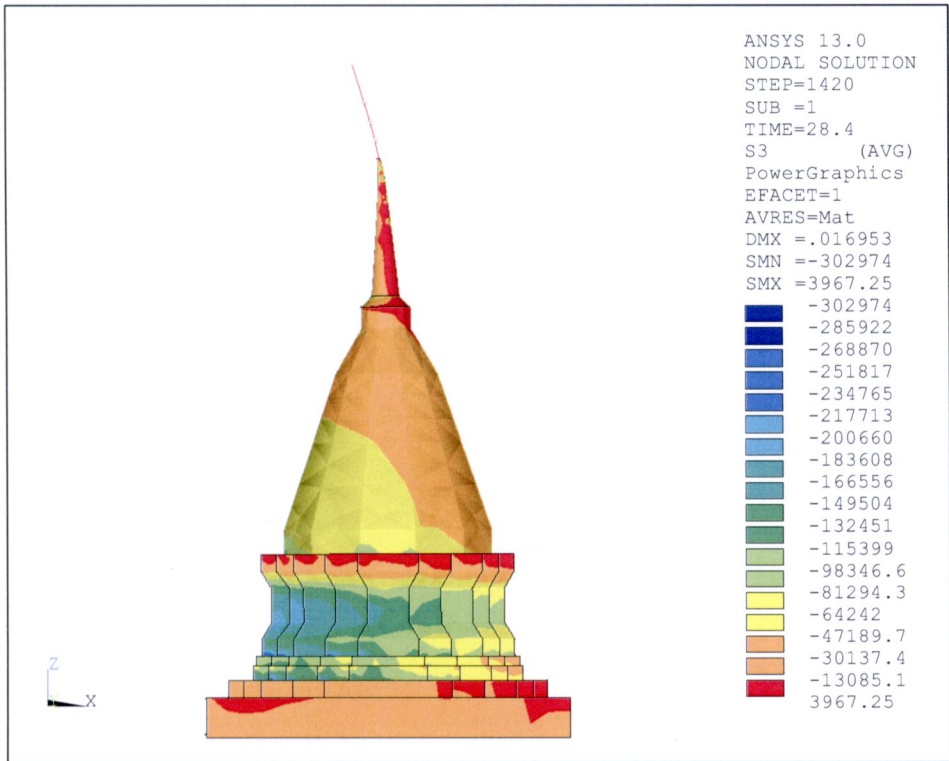


(ก) หน่วยแรงดึงที่ผิวของเจดีย์ (N/m<sup>๒</sup>)

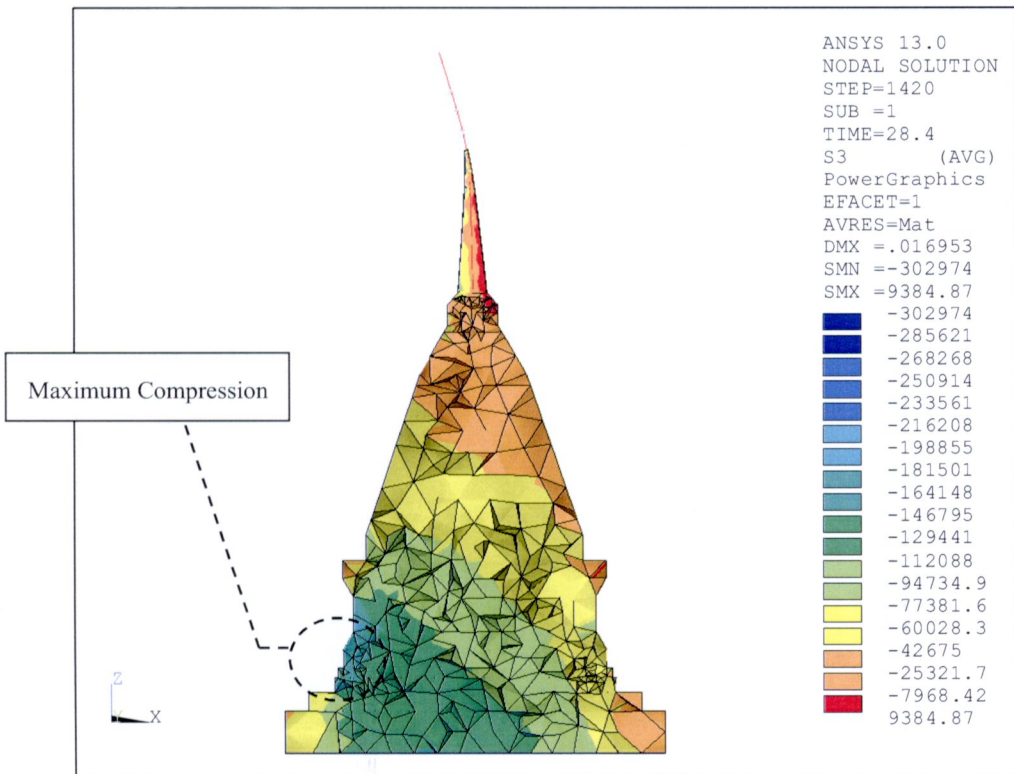


(ข) หน่วยแรงดึง (รูปตัด) (N/m<sup>๒</sup>)

รูป ๕.๒๑ หน่วยแรงดึงภายใต้แรงแผ่นดินไหว Imperial Valley (1979) ที่เสริมกำลัง FRP



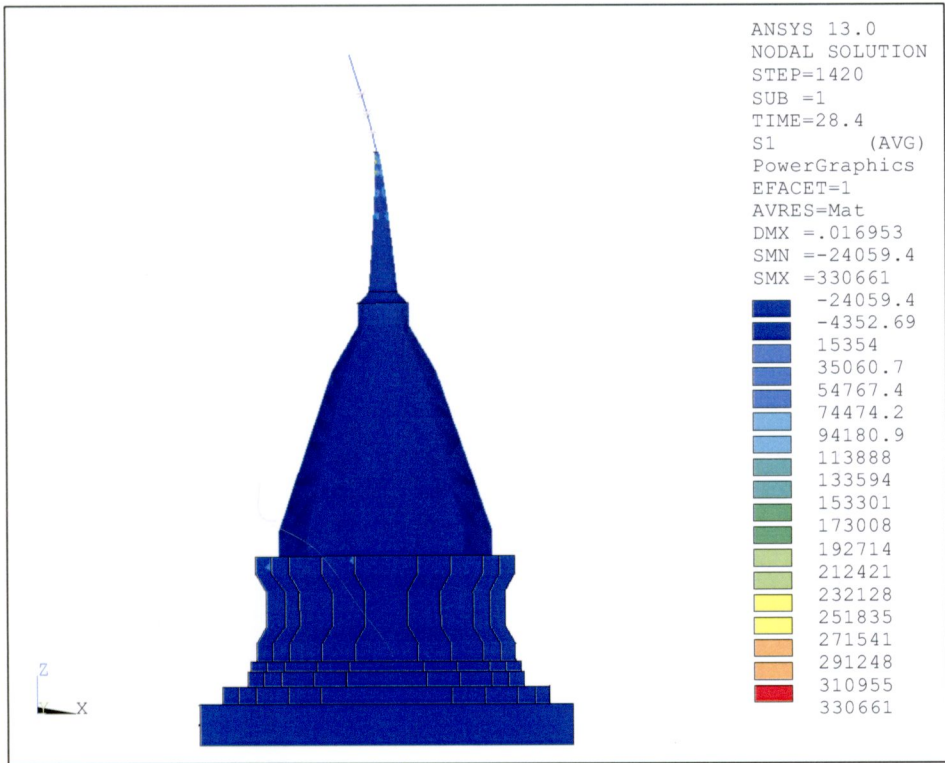
(ก) หน่วยแรงอัดที่ผิวของเจดีย์ (N/m<sup>๒</sup>)



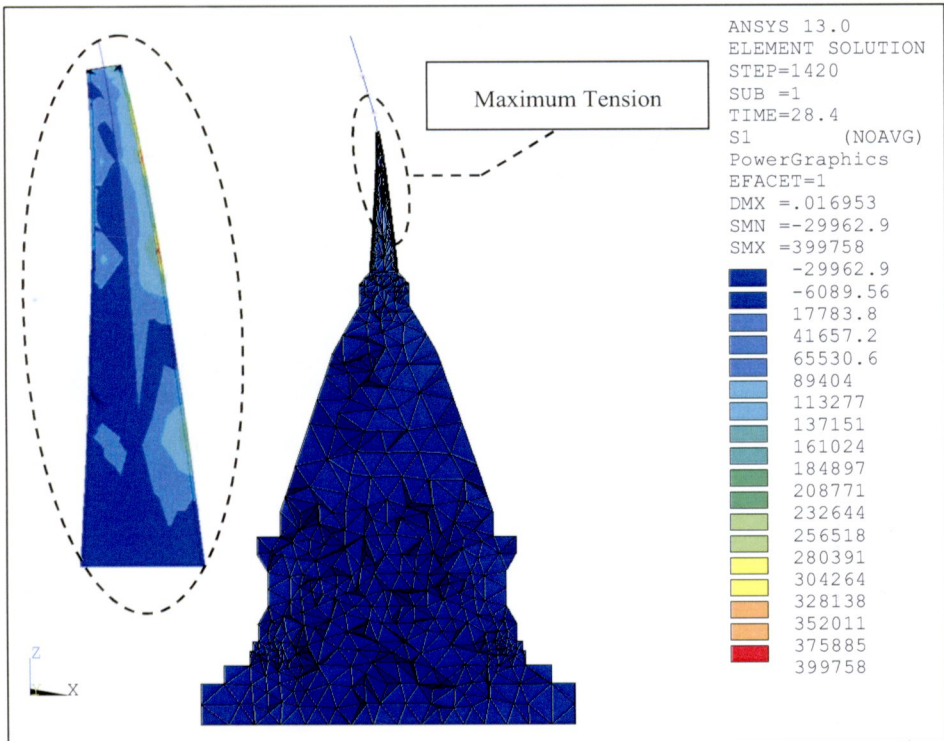
(ข) หน่วยแรงอัด (รูปตัด) (N/m<sup>๒</sup>)

รูป ๕.๒๒ หน่วยแรงอัดภายใต้แรงแผ่นดินไหว Kocaeli, Turkey (1999) ที่เสริมกำลัง FRP





(ก) หน่วยแรงดึงที่ผิวของเจดีย์ (N/m<sup>๒</sup>)



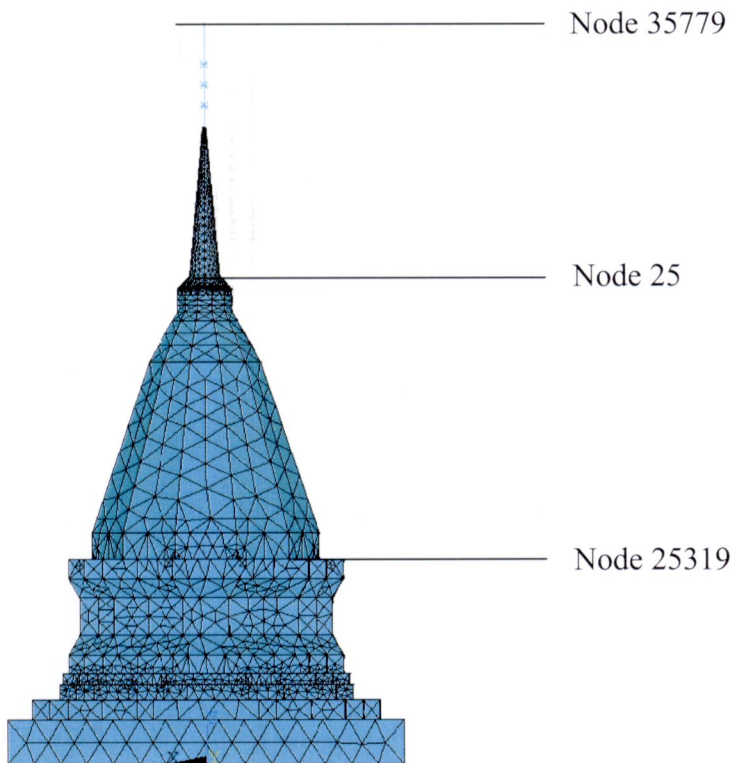
(ข) หน่วยแรงดึง(รูปตัด) (N/m<sup>๒</sup>)

รูป ๕.๒๓ หน่วยแรงดึงภายใต้แรงแผ่นดินไหว Kocaeli, Turkey (1999) ที่เสริมกำลัง FRP

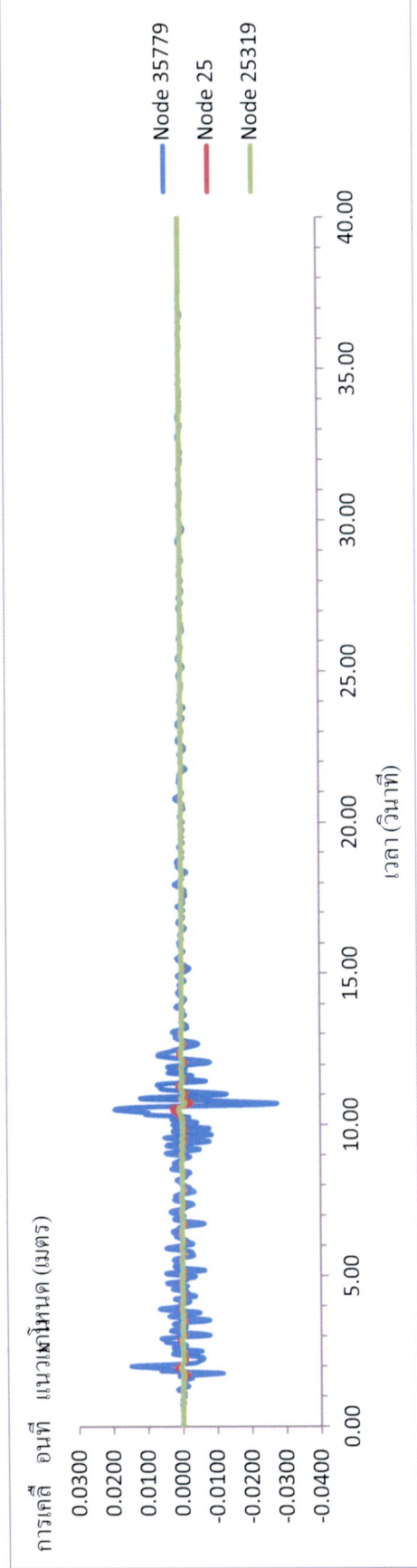
## ๕.๔.๒ การสั่นไหวของเจดีย์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวของเจดีย์ที่ทำการเสริม FRP

### ๕.๔.๒.๑ ระยะการเคลื่อนตัว

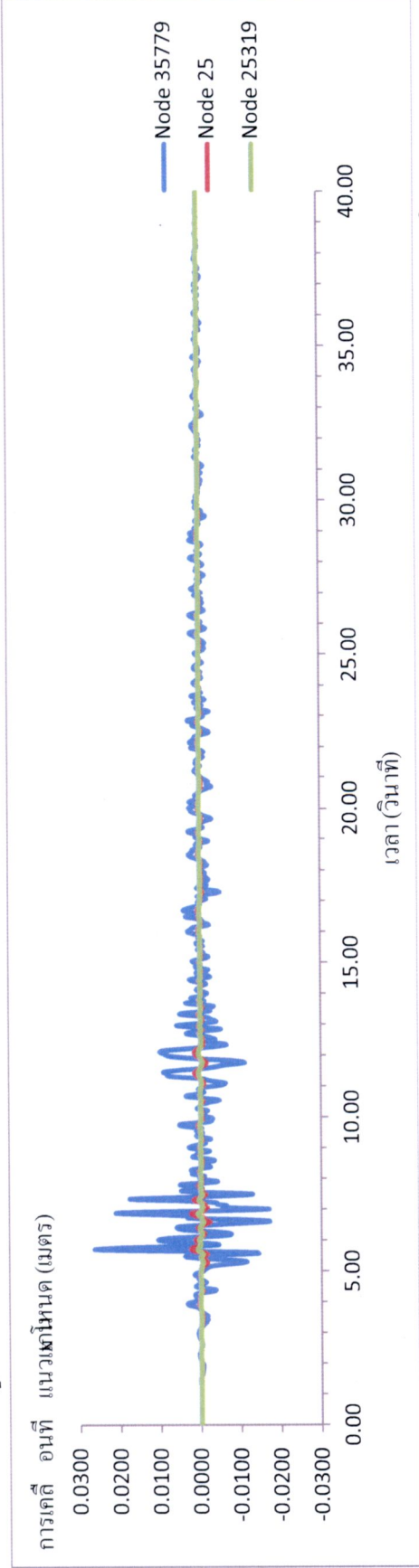
การสั่นไหวของเจดีย์เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวทั้ง ๓ รูปแบบมากระทำทั้ง โดยพิจารณาตำแหน่งการเคลื่อนตัวของเจดีย์ ดังรูป ๕.๒๔ จากการวิเคราะห์พบว่าส่วนที่มีการสั่นไหวมากที่สุดคือ ก้านฉัตร และปลียอด โดยการเคลื่อนตัวของเจดีย์ แสดงดังกราฟการเคลื่อนที่ ในตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ ยอดฉัตร โคนของปล้องโฉน บริเวณตอนกลาง และส่วนฐานของเจดีย์ ณ เวลาใดๆ แสดงดังรูป ๕.๒๕ ถึง ๕.๒๗



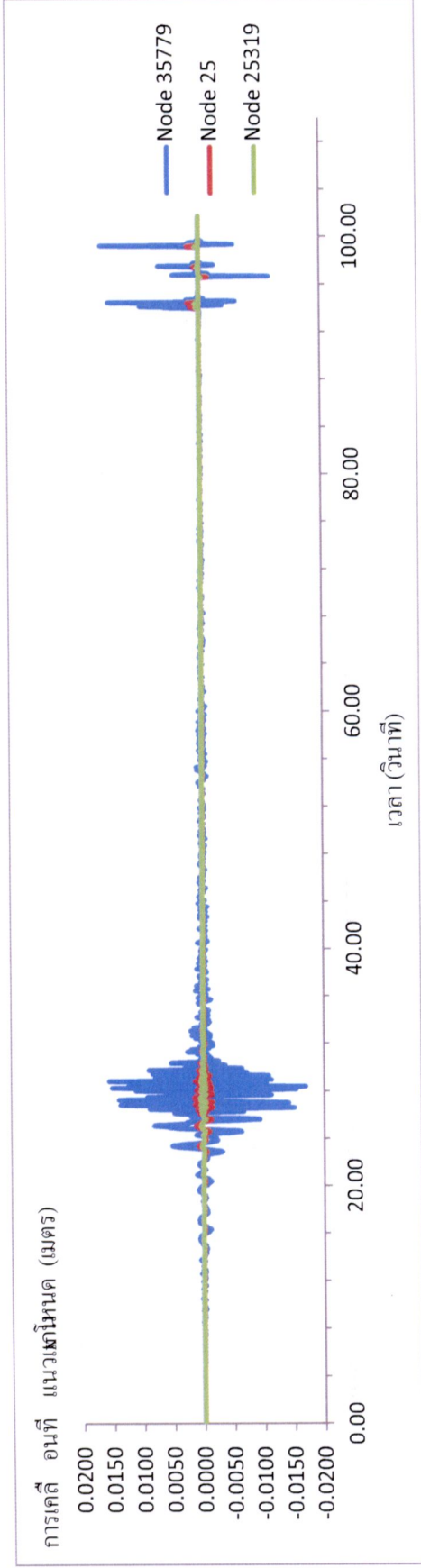
รูป ๕.๒๔ ตำแหน่งที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของเจดีย์ที่เสริม FRP



รูป ๕.๒๕ การเคลื่อนที่ตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ของแผ่นดินไหว Morgan Hill (เสริมเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว)



รูป ๕.๒๖ การเคลื่อนที่ตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ของแผ่นดินไหว Imperial Valley (เสริมเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว)

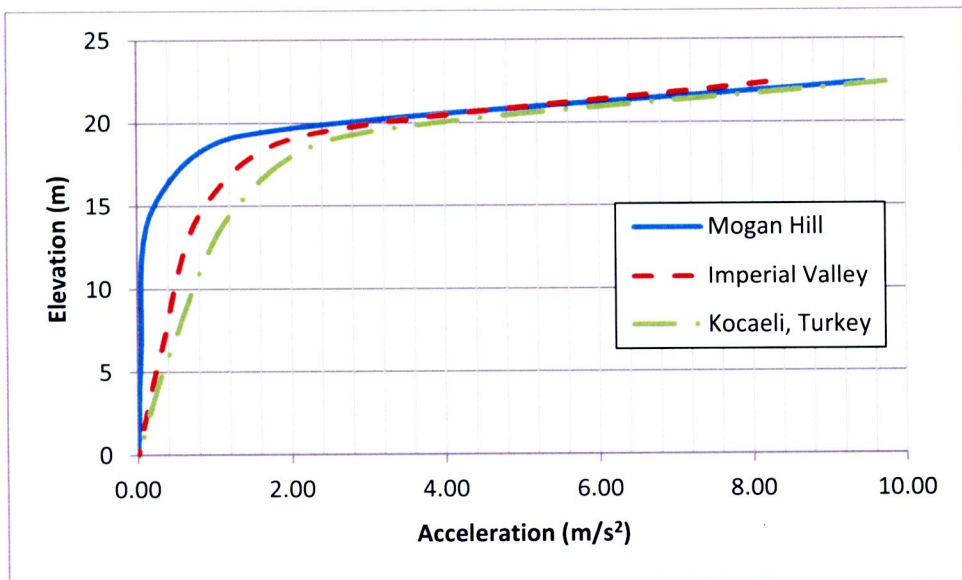


รูป ๔.๒๓ การเคลื่อนที่ตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ของแผ่นดินไหว Kocaeli, Turkey (เสริมเส้นเขียวผสมเส้นสีแดง)



### ๕.๔.๒.๒ ความเร่ง

ความเร่งจากแผ่นดินไหวทั้ง ๓ รูปแบบมากระทำกับเจดีย์ โดยประกอบด้วย ๑. ความเร่งจากคลื่น Morgan Hill (EQ๑) ๒.ความเร่งจากคลื่น Imperial Valley (EQ๒) และ ๓. ความเร่งจากคลื่น Kocaeli, Turkey (EQ๓) จากการวิเคราะห์พบว่า ความเร่งจาก EQ๑ จะมีค่าความเร่งสูงสุดที่ Node ๓๕๓/๓/๙ ณ เวลา ๑๐.๗๐ วินาที ส่วน EQ๒ จะมีความเร่งสูงสุด ณ เวลา ๕.๓๔ วินาที และ EQ๓ จะมีความเร่งสูงสุด ณ เวลา ๒๘.๔๐ วินาที เมื่อนำค่าความเร่งจากทั้ง ๓ คลื่นแผ่นดินไหว มาเปรียบเทียบกันจะพบว่าความเร่งของทั้ง ๓ คลื่นจะมีความคล้ายคลึงกันคือ ปลายยอดจะมีความเร่งสูงสุดประมาณ ๑ เท่าของความเร่งตามแนวโน้มถ่วง ดังรูป ๕.๒๘



รูป ๕.๒๘ ความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวในรูปแบบต่างๆ (เสริมเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว)

### ๕.๕ การเสริมด้วยเส้นใยคาร์บอน

เนื่องจากเส้นใยเสริมกำลังมีหลายชนิดค่าที่ได้กล่าวในบทที่ ๒.๖ ดังนั้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ กรณีใช้เส้นใยคาร์บอนเพื่อการเสริมกำลังด้วย เนื่องจากเป็นเส้นใยที่นิยมนำมาใช้เพื่อการเสริมกำลังเช่นกัน คุณสมบัติที่ใช้ของเส้นใยคาร์บอนในการวิเคราะห์แสดงในหัวข้อที่ ๓.๑.๑

ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นแสดงในตาราง ๕.๘ ซึ่งเห็นได้ว่าเส้นใยคาร์บอนจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีความสามารถในการรับแรงดึงที่สูงกว่า แต่ในค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดมีค่าที่ใกล้เคียงกับการไม่เสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้วและ แผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมใยเส้น

ตารางที่ ๕.๘ เปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นขององค์เจดีย์เดิม, เจดีย์ที่ทำการเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว และเจดีย์ที่เสริมด้วยแผ่นเส้นใยคาร์บอน

วัสดุ	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	ไม่มีการเสริม	เสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว	เสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว
อิฐ	แรงอัด	๐.๔๔	๐.๔๖	๐.๕๑
	แรงดึง	๐.๓๓	๐.๒๐	๐.๔๔
วัสดุเสริมกำลัง	แรงอัด	-	-	-
	แรงดึง	-	๐.๔๙	๑.๒๐