

การศึกษามวลหน่วยปรับค่าสำหรับควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างอินดิลาสติก



นายพงษ์ธร จาญจน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

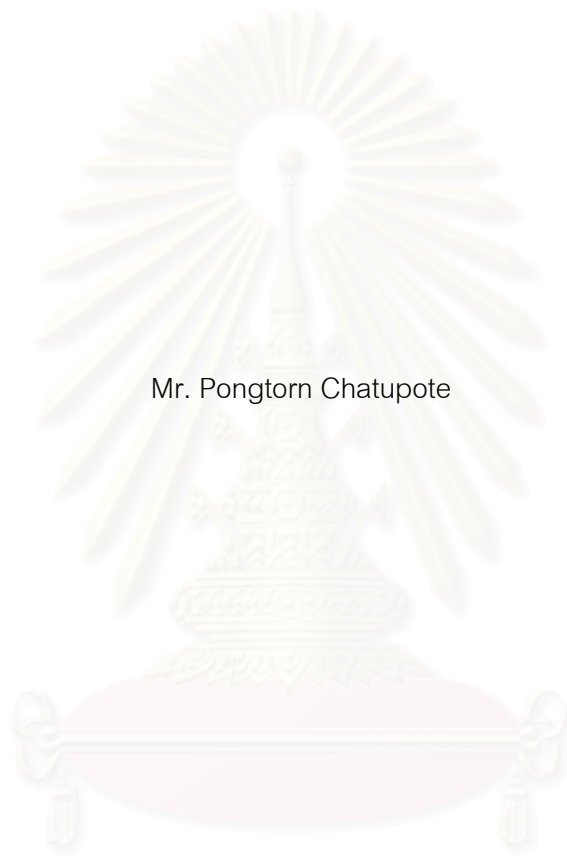
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-239-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON TUNED MASS DAMPERS FOR VIBRATION CONTROL OF INELASTIC STRUCTURES



Mr. Pongtorn Chatupote

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-346-239-2

|                   |  |
|-------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษามวลหนังสือปรับค่าสำหรับควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้าง<br>อินฮิลาสติก |
| โดย               | นายพงษ์ธร จาญพจน์  |
| ภาควิชา           | วิศวกรรมโยธา   |
| อาจารย์ที่ปรึกษา  | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว  |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนศักดิ์ เพียรสุขสม)

สภามหาวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พงษ์ธร จาญพจน์ : การศึกษามวลหน่วงปรับค่าสำหรับควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างอินอีลาสติก  
(A STUDY ON TUNED MASS DAMPERS FOR VIBRATION CONTROL OF INELASTIC  
STRUCTURES)

อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว, 147 หน้า. ISBN 974-346-239-2.

งานวิจัยนี้ ศึกษาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวและความเสียหายของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบอีลาสโตพลาสติกภายใต้การเคลื่อนตัวบริเวณฐานรองรับของโครงสร้างแบบฮาร์โมนิกและจากสัญญาณแผ่นดินไหว โดยวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมและข้อจำกัดของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวและความเสียหายของโครงสร้างอินอีลาสติก อันจะเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าต่อไป

เมื่อขนาดความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างอยู่ในระดับความรุนแรงต่ำจนถึงปานกลาง โครงสร้างสั่นไหวในช่วงอีลาสติกหรือในช่วงอินอีลาสติกที่เกิดความเสียหายไม่มาก มวลหน่วงปรับค่ามีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวและความเสียหายของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเพิ่มขึ้น โครงสร้างเกิดความเสียหายมากขึ้น ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าลดลง ถึงแม้ว่าความสามารถในการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าที่วัดจาก (1) ค่าอัตราส่วนความเร่งของมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างและ (2) ค่าความต่างระหว่างเฟสการสั่นของโครงสร้างและการสั่นของมวลหน่วงปรับค่า ยังคงมีสภาพที่เหมาะสมเหมือนเช่นในกรณีที่โครงสร้างมีพฤติกรรมในช่วงอีลาสติกก็ตาม ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าความหน่วงของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการสลายพลังงานของโครงสร้างอินอีลาสติกเป็นสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่ากับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยและระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ พบว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟมีประสิทธิภาพสูงสุดในขณะที่ประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยมีค่าใกล้เคียงกับระบบมวลหน่วงปรับค่า ดังนั้นระบบมวลหน่วงปรับค่าจึงเหมาะสำหรับการเพิ่มความสามารถใช้งานหรือลดทอนระดับความเสียหายให้แก่อาคารภายใต้แผ่นดินไหวที่มีระดับความรุนแรงต่ำถึงปานกลาง แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความต้านทานให้กับอาคารภายใต้แผ่นดินไหวความรุนแรงมากอย่างมีนัยสำคัญ

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2543.....

## 4170419021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: TUNED MASS DAMPER / INELASTIC STRUCTURE / VIBRATION CONTROL / GROUND EXCITATION

MR.PONGTORN CHATUPOTE : THESIS TITLE. (A STUDY ON TUNED MASS DAMPERS FOR VIBRATION CONTROL OF INELASTIC STRUCTURES) THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. TOSPOL PINKAEW,147 pp. ISBN 974-346-239-2.

This research studies the effectiveness of tuned mass damper (TMD) in reducing vibration and damage of an elasto-plastic SDOF structure subjected to harmonic and earthquake excitations. The main objective of this research is to study TMD's behavior and its limitations in reducing vibration and damage of an inelastic structure so that improvement on the performance of TMD can be properly effected.

For low to medium peak ground accelerations (PGA), where there is minor inelastic deformation in the structure, TMD effectively reduces the response and damage of the structure. However, its effectiveness decreases as the PGA increases although the performance index of TMD, determined from (1) the ratio between TMD acceleration to absolute structural acceleration and (2) the phase lag between structural and TMD response, remains in the proper condition as in the case of an elastic structure. This is mainly because of an increasing in structural damping caused by hysteresis of inelastic structure.

Comparing TMD with multiple tuned mass damper (MTMD) and semi-active tuned mass damper (STMD), the obtained results indicate that STMD is the most effective while the effectiveness of MTMD is close to TMD. Thus, TMD is useful only for reducing vibration and damage of the structure under low and medium intensity earthquakes. However, it is not effective under high intensity shaking.

Department.....CIVIL ENGINEERING..... Student's signature.....

Concentration.....CIVIL ENGINEERING..... Advisor's signature .....

Academic year .....2000.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยในครั้งนี้มาด้วยดีโดยตลอด รวมถึงการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ ในฐานะประธานกรรมการสอบ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุดสม ในฐานะกรรมการสอบ ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) และทางบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทางด้านเงินทุนที่ใช้งานวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอน และที่สำคัญผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา รวมทั้งญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจและผลักดันจนสำเร็จลุล่วง ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนฝูงทุกคน รวมทั้งรุ่นพี่และรุ่นน้องทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนความช่วยเหลือในด้านต่างๆจนสำเร็จการศึกษา

พงษ์ธร จาญพจน์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                     | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                  | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                     | ฉ    |
| สารบัญ.....  | ช    |
| สารบัญตาราง.....   | ณ    |
| สารบัญรูปภาพ.....  | ญ    |
| สัญลักษณ์.....   | ฬ    |
| <br>   |      |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ความนำ.....  | 1    |
| 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต.....                         | 2    |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                         | 6    |
| 1.4 ขอบเขตการวิจัย.....                                  | 6    |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....                               | 7    |
| 1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....                                 | 7    |
| <br>   |      |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                | 9    |
| 2.1 การเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว..... | 9    |
| 2.2 การหาคำตอบของสมการไร้เชิงเส้น.....                   | 12   |
| 2.3 โครงสร้างระบบอิลาสโตพลาสติก.....                     | 16   |
| 2.4 ระบบมวลหน่วงปรับค่า.....                             | 20   |
| 2.5 ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วย.....                 | 24   |
| 2.6 ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ.....                | 25   |
| <br>   |      |
| บทที่ 3 การพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์.....         | 29   |
| 3.1 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....                   | 29   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 อาคารตัวอย่างและแบบจำลองโครงสร้างทางพลวัต                       | 38   |
| 4.1 อาคารตัวอย่าง   | 38   |
| 4.2 การวิเคราะห์ด้วยแรงดันด้านข้าง                                      | 38   |
| 4.3 การจำลองอาคารตัวอย่าง   | 40   |
| 4.4 พารามิเตอร์ของโครงสร้างจำลอง  | 42   |
| 4.5 ค่าดัชนีความเสียหาย   | 42   |
| บทที่ 5 การตอบสนองของโครงสร้างฮิสตริกและอินฮิสตริก                      | 44   |
| 5.1 การตอบสนองของโครงสร้างในช่วงฮิสตริก                                 | 44   |
| 5.2 การตอบสนองของโครงสร้างในช่วงอินฮิสตริก                              | 48   |
| บทที่ 6 การตอบสนองของโครงสร้างฮิสตริกและอินฮิสตริกที่ติดมวลห่นวงปรับค่า | 66   |
| 6.1 การตอบสนองของโครงสร้างในช่วงฮิสตริกที่ติดมวลห่นวงปรับค่า            | 66   |
| 6.2 การตอบสนองของโครงสร้างในช่วงอินฮิสตริกที่ติดมวลห่นวงปรับค่า         | 72   |
| 6.3 ประสิทธิภาพของมวลห่นวงปรับค่าภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว                 | 88   |
| บทที่ 7 การปรับปรุงประสิทธิภาพของมวลห่นวงปรับค่า                        | 96   |
| 7.1 ปรับเฟสและการสั้นของมวลห่นวงปรับค่า                                 | 96   |
| 7.2 เปรียบเทียบกับระบบมวลห่นวงปรับค่าแบบหลายหน่วย                       | 103  |
| 7.3 เปรียบเทียบกับระบบมวลห่นวงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ                      | 107  |
| บทที่ 8 บทสรุป  | 121  |
| 8.1 สรุปผล  | 121  |
| รายการอ้างอิง   | 124  |
| ภาคผนวก   | 126  |
| ประวัติผู้วิจัย   | 147  |



## สารบัญตาราง

| ตาราง  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 3.1   |      |
| เปรียบเทียบความต่างของการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างที่คำนวณได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ฟังก์ชัน ODE23 และคำตอบที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์..... | 30   |
| ตารางที่ 3.2   |      |
| แสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเมื่อใช้ช่วงเวลาค่าต่างๆ.....  | 31   |
| ตารางที่ 3.3   |      |
| แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม.....   | 35   |
| ตารางที่ 3.4   |      |
| แสดงผลที่แสดงในหนังสือ Clough.....   | 36   |



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 (ก) แสดงระบบโครงสร้างที่มีระดับชั้นความอิสระเท่ากับหนึ่ง.....  | 10   |
| (ข) แสดงแผนภาพอิสระของโครงสร้าง.....  | 10   |
| รูปที่ 2.2 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในสปริงและระยะเวลาการกระจัดที่<br>เวลาต่างๆ.....  | 11   |
| (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเนื่องจากตัวหน่วงและความเร็วในการ<br>เคลื่อนที่.....  | 11   |
| รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาใดๆโดย<br>สมมติให้แปรผันเป็นเส้นตรง.....  | 13   |
| รูปที่ 2.4 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากสปริงที่<br>มีคุณสมบัติแบบอิลาสติก-พลาสติก และ ระยะเวลาการขจัดของมวลของโครง<br>สร้าง.....   | 16   |
| (ข) แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจาก<br>สปริงที่มีคุณสมบัติแบบอิลาสติก-พลาสติก และ ระยะเวลาการขจัดของมวล<br>ของโครงสร้าง.....  | 16   |
| รูปที่ 2.5 แสดงระบบโครงสร้างอิลาสติก SDOF ที่ติดมวลหน่วงปรับค่าไว้ที่ยอดของ<br>โครงสร้าง.....   | 20   |
| รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดและไม่<br>ติดมวลหน่วงปรับค่า โดยอัตราส่วนความถี่ของแรงกระทำต่อความถี่ของ<br>โครงสร้างเป็นค่าต่างๆ และสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า<br>มีค่า 0, 10 และ 20 เปอร์เซนต์..... | 21   |
| รูปที่ 2.7 แสดงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยที่ใช้จำนวนมวล<br>หน่วง 5 หน่วย โดยค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงมีค่า 1 และ 6 เปอร์เซนต์<br>ของค่าอัตราส่วนความหน่วงวิกฤติ.....  | 25   |
| รูปที่ 2.8 แสดงแบบจำลองของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ.....   | 26   |
| รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพอิสระของโครงสร้างและมวลหน่วงในวิธีการควบคุมแบบ<br>มวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ.....  | 27   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน ODE23 ในโปรแกรม Matlab และผลที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ ..... | 30   |
| รูปที่ 3.2 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างเมื่อใช้ช่วงเวลา (Time Step) ค่าต่างๆ .....   | 31   |
| รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมและค่าที่แสดงใน Chopra และผลของการกระจัดของโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม .....   | 32   |
| รูปที่ 4.1 รูปแปลนและรูปด้านของอาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา.....   | 38   |
| รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่ยอดของอาคารตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์ภายใต้แรงดันด้านข้างกระจายแบบสามเหลี่ยมหัวกลับกระทำต่อโครงสร้าง.....                                     | 39   |
| รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่ยอดของอาคารตัวอย่างที่จำลองให้มีพฤติกรรมแบบอีลาสโตพลาสติกที่มีพื้นที่ได้กราฟเท่ากัน.....   | 39   |
| รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่ยอดของโครงสร้างจำลองที่มีพฤติกรรมแบบอีลาสโตพลาสติกเช่นเดียวกับพฤติกรรมของอาคารตัวอย่าง.....  | 41   |
| รูปที่ 4.5 กราฟแสดงรูปแบบการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างภายใต้แรงดันด้านข้าง .....  | 42   |
| รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด ความเร็วและความเร่งของโครงสร้างอีลาสติกที่เวลาใดๆ.....  | 44   |
| รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเทอมต่างๆในสมการการเคลื่อนที่ที่เวลาต่างๆ.....   | 45   |
| รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในสปริงที่การกระจัดใดๆ.....  | 46   |
| รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการเคลื่อนที่ฐาน ความเร่งสัมพัทธ์และความเร่งสมบูรณ์ของโครงสร้างที่เวลาใดๆ.....   | 46   |
| รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่เวลาใดๆ เมื่อค่า ส.ป.ส. ความหน่วงของโครงสร้าง เท่ากับ 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์.....   | 47   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด ความเร็วและความเร่งสัมพัทธ์ของ<br>โครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ.....   | 48   |
| รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้าง<br>อินอีลาสติกและอีลาสติกที่เวลาใดๆ.....   | 48   |
| รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของระบบอินอีลาสติก<br>และอีลาสติกที่เวลาใดๆ.....   | 49   |
| รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของระบบอินอีลาสติก<br>และอีลาสติกที่เวลาใดๆ.....   | 49   |
| รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเฟสการสั่นของโครงสร้างและเฟส<br>ของความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง.....  | 50   |
| รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในสปริงและการกระจัดของ<br>โครงสร้างอินอีลาสติก.....   | 50   |
| รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐาน<br>ของโครงสร้าง ความเร่งสัมพัทธ์และความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้าง<br>อินอีลาสติกที่เวลาใดๆ.....        | 51   |
| รูปที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลา<br>ใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่า 50, 100 และ 200<br>gal .....                     | 52   |
| รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสัมพัทธ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่<br>เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่า 50, 100 และ<br>200 gal .....              | 52   |
| รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่<br>เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่า 50, 100 และ<br>200 gal .....              | 52   |
| รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้าง<br>อินอีลาสติกและโครงสร้างอีลาสติกที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่<br>ฐานของโครงสร้างค่าต่างๆ..... | 53   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้าง<br>อินอีลาสติกและโครงสร้างอีลาสติกที่ความถี่สูงสุดของการเคลื่อนที่ตัวที่<br>ฐานของโครงสร้างค่าต่างๆ..... | 53   |
| รูปที่ 5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในสปริงของโครงสร้าง<br>อินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อความถี่สูงสุดของการเคลื่อนที่ตัวที่ฐานมีค่า<br>50, 100 และ 200 gal.....         | 53   |
| รูปที่ 5.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สัมบูรณ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่<br>เวลาใดๆ เมื่อความถี่สูงสุดของการเคลื่อนที่ตัวที่ฐานมีค่า 50, 100 และ<br>200 gal.....              | 54   |
| รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ความถี่<br>สูงสุดของการเคลื่อนที่ตัวที่ฐานของโครงสร้างเป็นค่าต่างๆ.....                                      | 54   |
| รูปที่ 5.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานเนื่องจากการครากของโครงสร้างที่<br>เวลา 50 วินาทีเมื่อความถี่สูงสุดของการเคลื่อนที่ตัวที่ฐานของโครงสร้าง<br>เป็นค่าต่างๆ.....        | 55   |
| รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดสัมพัทธ์ของโครงสร้างอินอีลาสติก<br>ที่เวลาใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ<br>20 เปอร์เซนต์.....          | 56   |
| รูปที่ 5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสัมพัทธ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่<br>เวลาใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20<br>เปอร์เซนต์.....           | 56   |
| รูปที่ 5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่<br>เวลาใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20<br>เปอร์เซนต์.....            | 57   |
| รูปที่ 5.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในสปริงของโครงสร้าง<br>อินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2,<br>5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์.....       | 57   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อสัมพันธ์กับความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์.....   | 57   |
| รูปที่ 5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่สลายออกเนื่องจากการครากของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อสัมพันธ์กับความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์.....  | 58   |
| รูปที่ 5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างอินอีลาสติกภายใต้ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างค่าใดๆ เมื่อสัมพันธ์กับความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์.....  | 58   |
| รูปที่ 5.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเทอมแรกของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างอินอีลาสติกภายใต้ค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างค่าใดๆ เมื่อสัมพันธ์กับความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์.....                                 | 59   |
| รูปที่ 5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอีลาสติกภายใต้ค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างค่าใดๆ เมื่อสัมพันธ์กับความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์.....                                 | 59   |
| รูปที่ 5.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอีลาสติกและโครงสร้างอีลาสติกภายใต้ค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างค่าใดๆ เมื่อสัมพันธ์กับความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์..... | 60   |
| รูปที่ 5.32 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่าเป็น $0.5F_y$ , $F_y$ และ $2F_y$ .....  | 61   |
| รูปที่ 5.33 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่าเป็น $0.5F_y$ , $F_y$ และ $2F_y$ .....   | 61   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 5.34 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของโครงสร้าง<br>อินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่าเป็น<br>$0.5F_y$ , $F_y$ และ $2F_y$ .....   | 62   |
| รูปที่ 5.35 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในของโครง-<br>สร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่าเป็น<br>$0.5F_y$ , $F_y$ และ $2F_y$ .....   | 62   |
| รูปที่ 5.36 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เกิดจากการครากของ<br>โครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่า<br>เป็น $0.5F_y$ , $F_y$ และ $2F_y$ .....  | 63   |
| รูปที่ 5.37 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเสียหายของโครง-<br>สร้างอินอีลาสติกที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ เมื่อ<br>กำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่า เป็น $0.5F_y$ , $F_y$ และ $2F_y$ .....  | 63   |
| รูปที่ 5.38 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเทอมแรกของค่าดัชนีความเสีย-<br>หายของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐาน<br>เป็นค่าใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่า เป็น $0.5F_y$ , $F_y$ และ<br>$2F_y$ .....   | 63   |
| รูปที่ 5.39 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดที่สภาวะคงตัวของ<br>โครงสร้างอินอีลาสติกที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ<br>เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่า เป็น $0.5F_y$ , $F_y$ และ $2F_y$ .....   | 64   |
| รูปที่ 5.40 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดของการ<br>กระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอีลาสติกเทียบกับโครงสร้าง<br>อีลาสติกที่มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ $F_y$ ที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อน<br>ตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่า เป็น<br>$0.5F_y$ , $F_y$ และ $2F_y$ ..... | 64   |
| รูปที่ 6.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอีลาสติกที่ติดและไม่<br>ติดมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ ภายใต้สัญญาณความเร่งที่ฐานแบบฮาร์-<br>โมนิกที่มีความถี่พ้องกับความถี่ของโครงสร้าง.....   | 66   |

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 6.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วยปรับค่าที่เวลาใดๆ ภายใต้สัญญาณความเร่งที่ฐานแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่พ้องกับความถี่ของโครงสร้าง.....  | 67   |
| รูปที่ 6.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วยปรับค่าเทียบกับการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ไม่ติดมวลหน่วยปรับค่าเมื่ออัตราส่วนมวลของมวลหน่วยปรับค่ามีค่าใดๆ.....   | 68   |
| รูปที่ 6.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดของความเร่งที่สภาวะคงตัวของมวลหน่วยปรับค่าเทียบกับแอมพลิจูดของความเร่งที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วยปรับค่าเมื่ออัตราส่วนมวลของมวลหน่วยปรับค่ามีค่าใดๆ.....   | 68   |
| รูปที่ 6.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างระหว่างเฟสการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างและเฟสการสั่นที่สภาวะคงตัวของมวลหน่วยปรับค่าเมื่ออัตราส่วนมวลของมวลหน่วยปรับค่ามีค่าใดๆ.....  | 69   |
| รูปที่ 6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงค่าต่างๆ ที่ติดมวลหน่วยปรับค่าที่มีค่าอัตราส่วนมวลเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์เทียบกับการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วยปรับค่า..... | 69   |
| รูปที่ 6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงค่าใดๆ .....  | 70   |
| รูปที่ 6.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดของความเร่งที่สภาวะคงตัวของมวลหน่วยปรับค่าเทียบกับแอมพลิจูดของความเร่งที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วยปรับค่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเป็นค่าใดๆ.....  | 71   |
| รูปที่ 6.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างระหว่างเฟสการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างและเฟสการสั่นที่สภาวะคงตัวของมวลหน่วยปรับค่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่าใดๆ.....  | 71   |



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 6.10 แบบจำลองระบบโครงสร้างและระบบมวลห้วงปรับค่าภายใต้การเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง.....   | 72   |
| รูปที่ 6.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลห้วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 10 gal.....        | 74   |
| รูปที่ 6.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสัมพัทธ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลห้วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 10 gal..... | 75   |
| รูปที่ 6.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลห้วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 10 gal..... | 75   |
| รูปที่ 6.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลห้วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 50 gal.....        | 76   |
| รูปที่ 6.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลห้วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 50 gal.....         | 76   |
| รูปที่ 6.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลห้วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 50 gal.....         | 76   |
| รูปที่ 6.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลห้วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 100 gal.....       | 77   |
| รูปที่ 6.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลห้วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 100 gal.....        | 77   |

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 6.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของโครงสร้างอินอิลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 100 gal.....                           | 78   |
| รูปที่ 6.20 กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดของการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอิลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ.....                          | 78   |
| รูปที่ 6.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดของโครงสร้างอินอิลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ.....                                   | 79   |
| รูปที่ 6.22 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับการกระจัดขอบโครงสร้างอิลาสติก เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ..... | 80   |
| รูปที่ 6.23 กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างอินอิลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ.....   | 81   |
| รูปที่ 6.24 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเทอมแรกของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างของระบบที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเป็นค่าใดๆ.....    | 82   |
| รูปที่ 6.25 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเทอมหลังของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างของระบบที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเป็นค่าใดๆ.....   | 82   |
| รูปที่ 6.26 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดของความเร่งของมวลหน่วงปรับค่าต่อแอมพลิจูดของความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างและต่อแอมพลิจูดของความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้าง.....                      | 83   |
| รูปที่ 6.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสระหว่างเฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าและเฟสการสั่นของโครงสร้าง เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ.....                              | 84   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 6.28 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวล<br>ห่วงปรับค่าที่มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 0, 1, 2, 3, 10, 20, 50 และ 100<br>เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และการกระจัดของโครงสร้างอิลาสติก เมื่อความเร่ง<br>สูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าต่างๆ..... | 86   |
| รูปที่ 6.29 กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดมวลห่วงปรับ<br>ค่าที่มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 0, 1, 2, 3, 10, 20, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์<br>ตามลำดับ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าต่างๆ.....  | 86   |
| รูปที่ 6.30 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวจริงที่วัดได้ได้ตึกใบหยก 1 เมื่อปี 1995.....   | 88   |
| รูปที่ 6.31 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลห่วงปรับ<br>ค่า 3% ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ ที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูง<br>สุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 40 gal.....  | 89   |
| รูปที่ 6.32 กราฟเปรียบเทียบตำแหน่ง ระยะเวลาและจำนวนครั้งของการครากที่เกิด<br>ขึ้นในโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลห่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของ<br>สัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 40 gal.....   | 89   |
| รูปที่ 6.33 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลห่วงปรับค่าและ<br>การกระจัดของมวลห่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของ<br>สัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 40 gal.....   | 90   |
| รูปที่ 6.34 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลห่วงปรับ<br>ค่า 3% ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ ที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่ง<br>สูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal.....   | 90   |
| รูปที่ 6.35 กราฟเปรียบเทียบตำแหน่ง ระยะเวลาและจำนวนครั้งของการครากที่เกิด<br>ขึ้นในโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลห่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของ<br>สัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal.....  | 91   |
| รูปที่ 6.36 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลห่วงปรับค่าและ<br>การกระจัดของมวลห่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของ<br>สัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal.....  | 91   |

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 6.37 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งสัมพัทธ์และความเร่งสัมบูรณ์ของ<br>โครงสร้างที่ติดตามมวลห้วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของ<br>สัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal.....  | 92   |
| รูปที่ 6.38 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดตามมวลห้วงปรับ<br>ค่า 3% ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ ที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่ง<br>สูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal.....   | 92   |
| รูปที่ 6.39 กราฟเปรียบเทียบตำแหน่ง ระยะเวลาและจำนวนครั้งของการครากที่เกิด<br>ขึ้นในโครงสร้างที่ติดและไม่ติดตามมวลห้วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของ<br>สัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal .....   | 93   |
| รูปที่ 6.40 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตามมวลห้วงปรับค่าและ<br>การกระจัดของมวลห้วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของ<br>สัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal.....  | 93   |
| รูปที่ 6.41 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งสัมพัทธ์และความเร่งสัมบูรณ์ของ<br>โครงสร้างที่ติดตามมวลห้วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของ<br>สัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal.....  | 94   |
| รูปที่ 6.42 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างที่ติดและไม่<br>ติดตามมวลห้วงปรับค่าภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ เมื่อความเร่ง<br>สูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่าใดๆ .....   | 94   |
| รูปที่ 6.43 กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดตาม<br>มวลห้วงปรับค่าภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ เมื่อความเร่งสูงสุด<br>ของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่าใดๆ.....   | 94   |
| รูปที่ 7.1 เปรียบเทียบระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลห้วงปรับค่า<br>และการกระจัดของโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่า<br>กับสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างฮิสตริก<br>ที่ติดตั้งมวลห้วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัว<br>ที่ฐานเท่ากับ 10 gal ..... | 97   |

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ  | หน้า   |     |
|------------|--|-----|
| รูปที่ 7.2 | เปรียบเทียบระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอิลาสติกที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal.....  | 98  |
| รูปที่ 7.3 | เปรียบเทียบระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอิลาสติกที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal..... | 98  |
| รูปที่ 7.4 | กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าที่มีอัตราส่วนมวล 3 และ 20 เปอร์เซ็นต์ และโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าต่อการกระจัดของโครงสร้างอิลาสติก เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานค่าต่างๆ.....     | 99  |
| รูปที่ 7.5 | กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าที่มีอัตราส่วนมวล 3 และ 20 เปอร์เซ็นต์ และโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานค่าต่างๆ.....   | 100 |
| รูปที่ 7.6 | กราฟแสดงค่าแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีค่ากำลังที่จุดครากเป็นค่าต่างๆ เมื่อค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ.....   | 101 |
| รูปที่ 7.7 | กราฟแสดงค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีค่ากำลังที่จุดครากเป็นค่าต่างๆ เมื่อค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ.....  | 101 |
| รูปที่ 7.8 | กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดหลายมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 10 gal.....   | 103 |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 7.9 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่าแบบหลายหน่วยที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 50 gal.....                | 103  |
| รูปที่ 7.10 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่าแบบหลายหน่วยที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal.....              | 103  |
| รูปที่ 7.11 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 50 gal.....   | 105  |
| รูปที่ 7.12 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal.....  | 105  |
| รูปที่ 7.13 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้าง 3 ระบบต่อการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอิลาสติกเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ.....  | 105  |
| รูปที่ 7.14 กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ.....   | 106  |
| รูปที่ 7.15 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่า และโครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 10 gal..... | 107  |
| รูปที่ 7.16 (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 10 gal.....  | 108  |
| (ข) กราฟแสดงการปรับค่าความห้วงของมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่เวลาใดๆ.....  | 108  |
| รูปที่ 7.17 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่า และโครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 50 gal..... | 109  |

**สารบัญภาพ (ต่อ)**

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 7.18 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 50 gal.....  | 109  |
| รูปที่ 7.19 (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 50 gal.....   | 110  |
| (ข) กราฟแสดงการปรับค่าความห้วงของมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่ง-แอคทีฟที่เวลาใดๆ.....  | 110  |
| รูปที่ 7.20 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่า และโครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 100 gal.....                 | 111  |
| รูปที่ 7.21 (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 100 gal.....  | 111  |
| (ข) กราฟแสดงการปรับค่าความห้วงของมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่ง-แอคทีฟที่เวลาใดๆ.....  | 111  |
| รูปที่ 7.22 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal.....   | 112  |
| รูปที่ 7.23 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้าง 3 ระบบต่อการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอีลาสติก เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ.....  | 113  |
| รูปที่ 7.24 กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ.....  | 113  |
| รูปที่ 7.25 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาต่างๆภายใต้สัจพจน์แผ่นดินไหวกรุงเทพฯที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal..... | 114  |

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 7.26 (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวล<br>หน่วยปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว<br>กรุงเทพฯที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal.....   | 114  |
| (ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่ง-<br>แอคทีฟที่เวลาใดๆ.....  | 114  |
| รูปที่ 7.27 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติด<br>มวลหน่วยปรับค่าและโครงสร้างที่ติดมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่<br>เวลาต่างๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯที่มีความเร่งสูงสุดของ<br>การเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal..... | 115  |
| รูปที่ 7.28 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้าง<br>ทั้ง 3 ระบบภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯเมื่อความเร่งสูงสุดของ<br>การเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal.....  | 116  |
| รูปที่ 7.29 (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวล<br>หน่วยปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว<br>กรุงเทพฯที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal.....  | 116  |
| (ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่ง-<br>แอคทีฟที่เวลาใดๆ.....  | 116  |
| รูปที่ 7.30 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติด<br>มวลหน่วยปรับค่าและโครงสร้างที่ติดมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่<br>เวลาต่างๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯที่มีความเร่งสูงสุดของ<br>การเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 500 gal..... | 117  |
| รูปที่ 7.31 (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวล<br>หน่วยปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว<br>กรุงเทพฯที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 500 gal.....  | 117  |
| (ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่ง-<br>แอคทีฟที่เวลาใดๆ.....  | 117  |



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 7.32 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 500 gal..... | 118  |
| รูปที่ 7.33 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบต่อการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างอิลาสติกเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ.....           | 118  |
| รูปที่ 7.34 กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าต่างๆ.....  | 119  |
| รูปที่ 7.35 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเทอมแรกของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อขนาดความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ.....                    | 120  |
| รูปที่ 7.36 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเทอมหลังของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อขนาดความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ.....                   | 120  |

## สัญลักษณ์

|             |   |
|-------------|---|
| $C$         | คือ เมตริกซ์ความหน่วงของอาคารตัวอย่าง   |
| $c_i$       | คือ ความหน่วงของโครงสร้างและของมวลหน่วงปรับค่า เมื่อ $i = 1$ และ $2$ ตามลำดับ |
| $c^*$       | คือ ความหน่วงของโครงสร้างจำลอง  |
| $c_d$       | คือ ความหน่วงของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบปรับค่าได้                              |
| $c_{d,max}$ | คือ ความหน่วงสูงสุดที่ปรับค่าของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ              |
| $c_{d,min}$ | คือ ความหน่วงต่ำสุดที่ปรับค่าของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ              |
| $C_{eq}$    | คือ ความหน่วงประสิทธิผล   |
| $DI$        | คือ ดัชนีความเสียหาย  |
| $f_0$       | คือ กำลังของโครงสร้างที่ยังคงทำให้มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติก                |
| $\bar{f}_y$ | คือ อัตราส่วนกำลังที่จุดครากของระบบอิลาสโตพลาสติกและกำลังของระบบอิลาสติก      |
| $F$         | คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้าง   |
| $F_D$       | คือ แรงหน่วงภายในโครงสร้าง  |
| $F_I$       | คือ แรงเฉื่อยภายในโครงสร้าง   |
| $F_S$       | คือ แรงต้านทานภายในสปริงของโครงสร้าง  |
| $F_y$       | คือ กำลังที่จุดครากของโครงสร้าง   |
| $G$         | คือ เมตริกซ์ผล  |
| $J$         | คือ ดัชนีคุณภาพ   |
| $K$         | คือ เมตริกซ์สติฟเนสของอาคารตัวอย่าง   |
| $k_i$       | คือ สติฟเนสของโครงสร้างและของมวลหน่วงปรับค่า เมื่อ $i = 1$ และ $2$ ตามลำดับ   |
| $\bar{k}$   | คือ ค่าสติฟเนสเทียบเท่า   |
| $M$         | คือ เมตริกซ์มวลของอาคารตัวอย่าง   |
| $m_i$       | คือ มวลของโครงสร้างและของมวลหน่วงปรับค่า เมื่อ $i = 1$ และ $2$ ตามลำดับ       |
| $m^*$       | คือ มวลของโครงสร้างจำลอง  |
| $Q$         | คือ เมตริกซ์น้ำหนักสำหรับการตอบสนองของโครงสร้าง                               |
| $Q$         | คือ เวกเตอร์ของแรงต้านทานภายในสปริงที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่าง               |
| $Q_y$       | คือ เวกเตอร์ของแรงต้านทานภายในสปริงที่ชั้นต่างๆเมื่อมีระยะการกระจัดที่จุดคราก |
| $q_y^*$     | คือ กำลังที่จุดครากของโครงสร้างจำลอง  |
| $R$         | คือ เมตริกซ์น้ำหนัก สำหรับพลังงานที่ใช้ควบคุม                                 |
| $R_y$       | คือ อัตราส่วนกำลังของระบบอิลาสติกและกำลังที่จุดครากของระบบอิลาสโตพลาสติก      |

## สัญลักษณ์

|                   |   |
|-------------------|---|
| $u$               | คือ แรงควบคุม   |
| $u_i$             | คือ การกระจัดสัมพัทธ์ของโครงสร้างและของมวลหน่วงปรับค่า เมื่อ $i = 1$ และ $2$ ตามลำดับ |
| $u^*$             | คือ ระยะการกระจัดของอาคารจำลอง  |
| $u_m$             | คือ ระยะการกระจัดสูงสุดของโครงสร้าง   |
| $u_m^*$           | คือ ระยะการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างจำลอง  |
| $u_p$             | คือ ระยะการกระจัดถาวรของโครงสร้าง   |
| $u_{ult}$         | คือ ระยะการกระจัดประลัยของโครงสร้าง   |
| $u_{ult}^*$       | คือ ระยะการกระจัดประลัยของโครงสร้างจำลอง  |
| $u_y$             | คือ ระยะการกระจัดที่จุดครากของโครงสร้าง   |
| $\dot{u}_i$       | คือ ความเร็วสัมพัทธ์ของโครงสร้างและของมวลหน่วงปรับค่า เมื่อ $i = 1$ และ $2$ ตามลำดับ  |
| $\ddot{u}_g$      | คือ ความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง  |
| $\ddot{u}_i$      | คือ ความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างและของมวลหน่วงปรับค่า เมื่อ $i = 1$ และ $2$ ตามลำดับ  |
| $\ddot{u}_i'$     | คือ ความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้าง  |
| $\omega_i$        | คือ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างและของมวลหน่วงปรับค่า เมื่อ $i = 1$ และ $2$ ตามลำดับ   |
| $X$               | คือ เวกเตอร์ของการตอบสนองของระบบ  |
| $\Delta F$        | คือ ค่าแรงภายนอกที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา $\Delta t$                                   |
| $\Delta \bar{F}$  | คือ แรงกระทำเพิ่มขึ้นเทียบเท่า  |
| $\Delta F_D$      | คือ ค่าแรงหน่วงที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา $\Delta t$                                    |
| $\Delta F_f$      | คือ ค่าแรงเฉื่อยที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา $\Delta t$                                   |
| $\Delta F_S$      | คือ ค่าแรงต้านทานภายในสปริงที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา $\Delta t$                        |
| $\Delta t$        | คือ ช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลง  |
| $\Delta u$        | คือ การกระจัดสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา $\Delta t$                              |
| $\Delta \dot{u}$  | คือ ความเร็วสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา $\Delta t$                               |
| $\Delta \ddot{u}$ | คือ ความเร่งสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา $\Delta t$                               |
| $\alpha$          | คือ อัตราส่วนระหว่างความถี่ของโครงสร้างและความถี่ของมวลหน่วงปรับค่า                   |

## สัญลักษณ์

- $\beta$  คือ แฟคเตอร์ปรับค่าในสมการค่าดัชนีความเสียหาย
- $\mu$  คือ อัตราส่วนมวลของมวลหน่วยปรับค่าและโครงสร้าง
- $\mu_v$  คือ อัตราส่วนระหว่างการกระจัดสูงสุดและการกระจัดที่จุดครากของโครงสร้าง
- $\phi$  คือ เวกเตอร์แสดงรูปแบบการกระจัดของอาคารตัวอย่าง
- $\xi_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างและของมวลหน่วยปรับค่า เมื่อ  $i = 1$  และ  $2$  ตามลำดับ
- $\xi^*$  คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วงประสิทธิผล
- $\int dE$  คือ ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟวงปิดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในและการกระจัดของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบวิฤจักร
- $\int dE^*$  คือ ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟวงปิดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในและการกระจัดของโครงสร้างจำลองภายใต้แรงกระทำแบบวิฤจักร



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความนำ

มวลหน่วงปรับค่า (Tuned Mass Damper (TMD)) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างอาคาร โดยการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวกับโครงสร้าง ซึ่งจะมีผลทำให้ปริมาณพลังงานการสั่นไหวของโครงสร้างลดลง โดยปกติแล้วระบบมวลหน่วงปรับค่ามักประกอบด้วย มวล สปริง และ ตัวหน่วง ซึ่งจะต้องเลือกค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างสูงสุด

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า ระบบมวลหน่วงปรับค่ามีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากผลของแรงลมได้เป็นอย่างดี ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำเอา ระบบมวลหน่วงปรับค่าไปติดตั้งกับอาคารสูงและสะพานหลายแห่ง อาทิเช่น

- ตึก Centerpoint Tower ที่เมือง Sydney ประเทศออสเตรเลียเป็นตึกแรกที่มีการติดตั้ง TMD
- ตึก John Hancock Tower ที่เมือง Boston ประเทศสหรัฐอเมริกา สูง 244 เมตร ติดตั้ง TMD ขนาด 300 ตัน ซึ่งทำจากตะกั่วและเหล็ก
- ตึก Citicorp Center Office ที่เมืองนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา ติดตั้ง TMD หนัก 400 ตัน ซึ่งทำจากคอนกรีต
- ตึก Chiba Port Tower และ Funade Bridge Tower ที่เมืองโอซาก้า ประเทศญี่ปุ่น
- สะพาน Akashi-Kaikyo ในประเทศญี่ปุ่น
- สะพานพระรามเก้า กรุงเทพฯ ประเทศไทย

เป็นต้น

ด้วยประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่าอันเป็นที่น่าพอใจดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการขยายการขอบเขตการศึกษาออกไปเพื่อหาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างที่รับแรงแผ่นดินไหว แต่ด้วยลักษณะที่แตกต่างจากแรงลม อาทิเช่น ช่วงความถี่ของสัญญาณของแรงแผ่นดินไหว (Frequency Bandwidth) มีค่ากว้างกว่าช่วงความถี่ของแรงลม นอกจากนี้ ความถี่ของสัญญาณแผ่นดินไหวยังประกอบไปด้วยความถี่สูงหลายค่าด้วย ดังนั้น โหมดการสั่นอื่นๆของโครงสร้างก็จะเกิดการสั่นไปด้วย เป็นต้น ซึ่งดูเหมือนว่าผลการเปรียบเทียบเพื่อหาประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่าต่อโครงสร้าง

ที่รับแรงแผ่นดินไหวจากนักวิจัยหลายท่านในอดีตจะยังไม่สอดคล้องไปในทางเดียวกันนัก จึงยังเป็นปัญหาสำคัญที่จะต้องทำการศึกษาต่อไป

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาถึงการลดการสั่นไหวในกรณีที่เกิดแผ่นดินไหวนั้น ควรจะพิจารณาในกรณีที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดรุนแรง เพราะการทำงานที่มีประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่านั้น จะมีผลทำให้โครงสร้างสามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้ดีขึ้นด้วย จากผลการศึกษาพบว่า ในบางช่วงของการสั่นไหวนั้น มีขนาดของการกระจัดสูงกว่าค่าที่จะเป็นได้ในช่วงอิลาสติกนั้นแสดงว่า ทั้งโครงสร้างหลักและมวลหน่วงปรับค่าจะต้องมีพฤติกรรมเข้าไปในช่วงอินอิลาสติก โดยจะมีผลทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหว ของทั้งโครงสร้างและของมวลหน่วงปรับค่าต้องเปลี่ยนไป ทำให้ประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่ามีแนวโน้มลดลง

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น และการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่าเมื่อโครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบอินอิลาสติกยังมีอยู่ไม่มาก ประกอบกับลักษณะเฉพาะของคลื่นแผ่นดินไหวที่วัดได้ในกรุงเทพฯ และที่วัดได้ในประเทศเม็กซิโก มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ มีช่วงความถี่ที่แคบ (Narrow band) และระยะเวลา (Duration) ในการเกิดคลื่นแผ่นดินไหวที่ยาว ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับคลื่นแบบฮาร์โมนิก ที่ TMD มีประสิทธิภาพสูงในการลดการสั่นไหว ดังนั้นเป็นไปได้ว่ามวลหน่วงปรับค่าน่าจะมีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างที่รับแรงแผ่นดินไหวที่มีลักษณะเช่นนี้ได้ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะทำการศึกษาหาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวของโครงสร้าง อีกทั้งหาวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่าในกรณีที่โครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบอินอิลาสติกด้วย

## 1.2 งานวิจัยในอดีต

ในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวภายใต้แรงทั้งแบบฮาร์โมนิกและแบบ Random (Den Hartog 1956, Bishop and Webborn 1952, Falcon et al 1967, Ito and Ikeda 1978, Warburton and Ayoride 1980, Randall et al. 1981.)

นอกจากนั้น มีกลุ่มนักวิจัยอีกจำนวนหนึ่งพยายามนำเอาระบบ TMD มาใช้กับโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา โดยได้มีการศึกษาประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างที่

รับ แรง ลม (Wirsching 1964, R.J. Mcnamara 1977, Wiesner 1979, Kaynia 1981, N. B. Youssef 1993, T.Nagase 1993, Y.I. Xu 1998 ) ซึ่งพบว่ามวลหน่วงปรับค่ามีประสิทธิภาพค่อนข้างดีในการช่วยลดการสั่นไหวของโครงสร้าง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาให้โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว พบว่าประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่ายังได้ผลที่ไม่สอดคล้องไปในทางเดียวกันดังนี้

Jagadish, K.S. (1979) ศึกษาถึงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างหลัก โดยจำลองอาคารสูง 2 ชั้นที่มีพฤติกรรมเป็นแบบไบลิเนียร์ (Bilinear Hysteretic Structure) ให้เป็นโครงสร้างหลักที่ชั้นล่างและเป็นระบบมวลหน่วงปรับค่าที่ชั้นบน กำหนดให้ค่าอัตราส่วนของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าเท่ากับ 30 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของมวลของโครงสร้าง ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว Taft 1952, S69°E โดยใช้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ (Step time) เท่ากับ 1/70 เท่าของคาบการสั่นไหวของโครงสร้างหลัก พบว่ามวลหน่วงปรับค่ามีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างที่รับแรงแผ่นดินไหวนี้ได้เป็นอย่างดี เพราะสามารถลดค่าอัตราส่วนความเหนียวที่ต้องการ (Ductility Demand) ของโครงสร้างหลักได้ถึง 50%

Kaynia และคณะ (1981) ทำการศึกษาผลของมวลหน่วงปรับค่าต่อโครงสร้างอิลาสติกและโครงสร้างอิลาสโตพลาสติกภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวทั้งหมด 48 แห่งที่รวบรวมได้ในภาคตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยโครงสร้างอาคารเป็นระบบ SDOF ที่มีพารามิเตอร์ค่าต่างๆ ได้แก่ มวล ความหน่วงและสติฟเนสเป็นค่าในโหมดที่ 1 ของโครงสร้าง สำหรับพารามิเตอร์ของมวลหน่วงปรับค่าค่าต่างๆ โดยไม่ได้ใช้ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Den Hartog โดยเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดในโครงสร้างอิลาสติกและเปรียบเทียบค่าอัตราส่วน Cumulative Yielding Ductility และค่า Ductility Ratio ในกรณีโครงสร้างอิลาสโตพลาสติกเมื่อติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า พบว่าในกรณีโครงสร้างอิลาสโตพลาสติก การติดมวลหน่วงปรับค่าสามารถลดค่า Cumulative Yielding Ductility ได้เพียงเล็กน้อย แต่ไม่สามารถลดค่า Ductility Ratio ได้อย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด

Sladek, J.R. และ Klingner, R.E. (1983) ทำการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวโดยใช้มวลหน่วงปรับค่า โดยอาคารตัวอย่างเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 25 ชั้น มีระบบรับแรงด้านข้างด้วยกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหลัก โดยแบบจำลองของอาคารตัวอย่างมีความสูง 8 ชั้น ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.90 วินาที มีพฤติกรรมทั้งในช่วงอิลาสติกและอินอิลาสติกที่มีจุดหมุนที่ปลายเสาแต่ละชั้น ส่วนพารามิเตอร์ของมวลหน่วงปรับค่าใช้ตามความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Den Hartog ที่มีค่าอัตราส่วนมวล

เท่ากับ 2.6 เปอร์เซนต์เทียบกับมวลในโหมดที่ 1 ของโครงสร้าง ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว Elcentro 1940 ในแนว N-S เป็นระยะเวลา 30 วินาที และใช้โปรแกรม DRAIN 2D ในการวิเคราะห์ผล พบว่าประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวไม่สามารถลดค่าการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างได้ ทั้งนี้จากพฤติกรรมการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าที่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ทำให้ต้องอาศัยระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเมื่อค่าการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั่นเมื่อเกิดแผ่นดินไหว มวลหน่วงปรับค่าจะไม่สามารถลดการสั่นไหวได้

Chowdhury, A.H. และ Iwuchukwu, M.D. ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวโดยใช้มวลหน่วงปรับค่า โครงสร้างตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 25 ชั้นที่มีพฤติกรรมรับแรงแบบโครงข้อแข็ง (Frame) และกำแพง (Wall) จำลองให้เป็นโครงสร้างที่มี 8 โหนด 16 องศาการเคลื่อนตัวอิสระและมีความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และการโก่งตัว (curvature) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Sladek, J.R. และ Klingner, R.E. (1983) สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมวลหน่วงปรับค่าได้ออกแบบให้มี 9 ระบบที่แตกต่างกันโดยมีค่าอัตราส่วนมวลระหว่าง 0.125 ถึง 4.5 เปอร์เซนต์ของมวลทั้งหมดของโครงสร้างตัวอย่าง ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว 6 แห่งที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์หาการตอบสนองของโครงสร้างใช้โปรแกรม SALBO และ DRAIN-2D ซึ่งพบว่า ในช่วงอินทาสติก ประสิทธิภาพในการลดการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างโดยใช้มวลหน่วงปรับค่าจะมีความไม่แน่นอนขึ้นกับขนาด ลักษณะและช่วงเวลาของสัญญาณแผ่นดินไหวในแต่ละแห่ง ทั้งนี้เนื่องจากการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าขึ้นกับการสั่นของโครงสร้างเป็นหลัก ดังนั้นต้องอาศัยระยะเวลาและลักษณะการสั่นของโครงสร้างเป็นตัวสร้างการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่า ในช่วงอินทาสติก ประสิทธิภาพในการลดการกระจัดสูงสุดจะมีค่าลดลงเนื่องจากผลของการสูญเสียความสอดคล้องทางความถี่ระหว่างโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าและสรุปว่า มวลหน่วงปรับค่าไม่เหมาะที่จะใช้เป็นระบบในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว เนื่องจากความไม่แน่นอนของประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหว

Jara, J.M. (1996) ศึกษาหาประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างระบบ SDOF ที่มีพฤติกรรมอินทาสติก-พลาสติกภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่ประเทศเม็กซิโกเมื่อปี 1985 โดยใช้ระบบมวลหน่วงปรับค่า กำหนดให้โครงสร้างมีอัตราส่วนความเหนียว (Ductility Demand) เท่ากับ 2 และ 4 ส่วนมวลหน่วงปรับค่ามีค่าอัตราส่วนความเหนียวเท่ากับ 6 และมีพารามิเตอร์เป็นค่าต่างๆ โดยไม่ได้ใช้ตามความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Den Hartog คลื่นสัญญาณแผ่นดินไหวคือ SCT-EW, TACUBAYA-EW และ VIVEROS-EW ซึ่งแตกต่างกันตามลักษณะของ



ชั้นดินอ่อน ปานกลาง และแข็งตามลำดับ และวิเคราะห์หาการตอบสนองของโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม Drain-2Dx พบว่า มวลหน่วยปรับค่ามีประสิทธิภาพในการลดค่าการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างได้มากถึง 25-40% ในกรณีที่โครงสร้างมีอัตราส่วนความเหนียวเท่ากับ 4 และค่าอัตราส่วนมวลของมวลหน่วยปรับค่าเท่ากับ 4-6% แต่สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆของมวลหน่วยปรับค่าจะไม่สามารถลดการสั่นไหวได้ โดยให้เหตุผลว่า มวลหน่วยปรับค่ามีสภาพอินอีลาสติกก่อนที่จะทำงานได้เต็มที่ ดังนั้นทำให้ประสิทธิภาพของมวลหน่วยปรับค่าลดลง

Abe M. (1996) ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของมวลหน่วยปรับค่าที่มีพฤติกรรมแบบไบลิเนียร์ (Bilinear) ต่อโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบไบลิเนียร์ (Bilinear) เช่นกันแต่มีการกระจัดที่จุดคราก (Initial Yielding Displacement) ต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอัตราส่วนของแอมพลิจูดของมวลหน่วยปรับค่าต่อแอมพลิจูดของโครงสร้าง พบว่ามวลหน่วยปรับค่าที่มีพฤติกรรมไบลิเนียร์มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้าง

Brito, R.S. และ Ruiz, S.E. (1999) ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของอาคารภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวขนาดปานกลางและรุนแรงโดยใช้มวลหน่วยปรับค่าอาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นอาคารโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 22 ชั้น กว้าง 4 ช่วง คานมีพฤติกรรมไร้เชิงเส้น โดยมวลหน่วยปรับค่ามีค่าอัตราส่วนมวลเท่ากับ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 5, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนความถี่เท่ากับ 0.6-1.4 สำหรับสัญญาณแผ่นดินไหวใช้คลื่นที่วัดได้ที่ประเทศเม็กซิโก SCT-85 และ SCT-89 ที่มีระดับความรุนแรงสูงและปานกลางตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพของมวลหน่วยปรับค่าจะมีค่าลดลงเมื่อโครงสร้างมีพฤติกรรมเลยช่วงอีลาสติก เห็นได้จากประสิทธิภาพของมวลหน่วยปรับค่าในกรณีที่สัญญาณแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงปานกลางดีกว่าในกรณีที่สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีระดับความรุนแรงสูง ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีระดับปานกลางยังคงอยู่ในช่วงอีลาสติก

### 1.3 วัตถุประสงค์

ในงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาถึงพฤติกรรมของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวและเพิ่มความต้านทานให้กับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอินอีลาสติก
2. ศึกษาถึงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวและเพิ่มความต้านทานให้กับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอินอีลาสติก
3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่ากับระบบมวลหน่วงปรับค่าชนิดอื่น ได้แก่ ระบบมวลหน่วงปรับค่าหลายหน่วย (MTMD) และ ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ (STMD)
4. เสนอวิธีการปรับปรุงมวลหน่วงปรับค่าให้มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวและเพิ่มความต้านทานให้กับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอินอีลาสติก

### 1.4 ขอบเขตในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ มีขอบเขตในการศึกษาดังนี้

1. พิจารณาโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบอีลาสโตพลาสติกที่ไม่มีผลของสติฟเนสดีเกรดเดชั่น (Stiffness Degradation)
2. พิจารณาการสั่นไหวของโครงสร้างในแนวด้านข้างโดยกำหนดให้มีเพียงทิศทางเดียวในแกนหลักของโครงสร้าง
3. ศึกษาการตอบสนองของโครงสร้างที่รับแรงกระทำที่ฐานรองรับแบบฮาร์โมนิก รวมไปถึงสัญญาณแผ่นดินไหวระยะไกลที่บันทึกได้ในอดีต ได้แก่ สัญญาณแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในกรุงเม็กซิโก ปี 1985 และ สัญญาณแผ่นดินไหวที่วัดได้บริเวณใต้ตึกใบหยก กรุงเทพฯ ปี 1995
4. พฤติกรรมของมวลหน่วงปรับค่าเป็นแบบเชิงเส้นคืออยู่ในช่วงอีลาสติกและแบบอีลาสโตพลาสติก
5. พิจารณาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าโดยเปรียบเทียบผลการตอบสนองและค่าความเสียหายของโครงสร้าง

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ผลการวิจัย สามารถนำไปใช้ประโยชน์ดังต่อไปนี้

1. สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของมวลห่อวงปรับค่าเมื่อโครงสร้างมีพฤติกรรมแบบอีลาสโตพลาสติกกับกรณีที่โครงสร้างยังคงอยู่ในสภาพอีลาสติก
2. สามารถประเมินความเหมาะสมในการใช้งานมวลห่อวงปรับค่าในการลดการสั่นไหวและเพิ่มความต้านทานของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวระยะไกล
3. ศึกษาหาวิธีการที่เหมาะสมที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวระยะไกล
4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวกับระบบมวลห่อวงปรับค่าแบบอื่นๆ เช่น ระบบมวลห่อวงปรับค่าแบบหลายหน่วย (MTMD) และระบบมวลห่อวงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ (STMD)

## 1.6 ขั้นตอนในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ มีลำดับขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาบทความทางวิชาการและผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของมวลห่อวงปรับค่าในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว
2. ศึกษาการทำงานของมวลห่อวงปรับค่าที่ใช้กับโครงสร้างแบบอีลาสติก รวมไปถึงข้อดีข้อเสีย ตลอดจน การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของมวลห่อวงปรับค่า
3. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Dynamic of structure : SDOF และ 2-DOF subjected to ground excitation , Linear Elastic Analysis, Nonlinear Analysis , Integration of Nonlinear Equation using Linear Acceleration Step-by-Step method, Elastic-plastic behavior , Program Matlab , Program IDARC
4. พัฒนาโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างระบบ SDOF ที่จำลองให้มีพฤติกรรมอีลาสโตพลาสติก (Elastoplastic) ภายใต้สัญญาณการเคลื่อนตัวพื้นฐานของโครงสร้าง โดยใช้โปรแกรม

Matlabและอาศัยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีความเร่งแปรผันเชิงเส้นที่ละขั้น (Linear Acceleration Step-by-Step method)

5. ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาข้างต้น โดยแบ่งขั้นตอนการเปรียบเทียบไว้ดังนี้
  - 5.1. เปรียบเทียบกับฟังก์ชัน ODE23 (ซึ่งเป็นฟังก์ชันหนึ่งในโปรแกรม Matlab ที่ใช้หาคำตอบของสมการดิฟเฟอเรนเชียล) ในกรณีที่โครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติก โดยกำหนดค่ากำลังที่จุดคราก ( $F_y$ ) ของโครงสร้างในโปรแกรมให้มีค่าสูง
  - 5.2. ในกรณีที่โครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบอิลาสติก-พลาสติก จะทำการตรวจสอบกับ ที่มีผลที่มีอยู่ในเอกสารทางวิชาการต่างๆ
6. พัฒนาโปรแกรมข้างต้นให้มีความสามารถในการวิเคราะห์ระบบโครงสร้างที่มี 2 DOF เพื่อเป็นเครื่องมือในการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างระบบ SDOF/TMD ภายใต้สัญญาณการเคลื่อนตัวพื้นฐานของโครงสร้างและภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวระยะไกลที่บันทึกได้ในอดีต โดยโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่ามีพฤติกรรมทั้งแบบอิลาสติกและแบบอิลาสติก-พลาสติก
7. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่าโดยวัดจากอัตราส่วนระหว่างการกระจัดของระบบโครงสร้างที่มีพฤติกรรมเป็นแบบอิลาสติกและแบบอิลาสติก-พลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าตามลำดับ
8. เปรียบเทียบระบบมวลหน่วงปรับค่ากับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยและระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ
9. ปรับปรุงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่า
10. สรุปผลการวิจัย
11. รวบรวมรายงาน

## บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

### 2.1 สมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว

#### 2.1.1 โครงสร้างมีพฤติกรรมเชิงเส้น (Linear System)

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างที่มีระดับขั้นความอิสระเท่ากับหนึ่งภายใต้การเคลื่อนที่ฐานของโครงสร้างนั้น โครงสร้างที่ถูกจำลองขึ้นจะถูกกำหนดให้มีแรงต้านทานภายในเนื่องจากสติฟเนสของโครงสร้างมีค่าแปรผันโดยตรงกับระยะการกระจัดของโครงสร้าง นอกจากนี้ ยังสมมติให้พลังงานที่สามารถสลายออกจากโครงสร้าง เนื่องจากความหน่วงมีค่าแปรผันโดยตรงกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของโครงสร้างและกำหนดให้มวลของโครงสร้างมีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถเขียนสมการของการเคลื่อนที่ของโครงสร้างได้ดังนี้

$$m\ddot{u}'(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2.1ก)$$

$$\ddot{u}'(t) = \ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t) \quad (2.1ข)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ลักษณะของสมการจะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลดีกรี 2 ที่เป็นเชิงเส้นตรง และมีสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงที่

$m, c, k$  คือ มวล ความหน่วง และค่าสติฟเนสของโครงสร้างตามลำดับ

$\ddot{u}'(t)$  คือ ความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้าง

$\ddot{u}_g(t)$  คือ ความเร่งที่ฐานของโครงสร้างเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว

$u(t), \dot{u}(t), \ddot{u}(t)$  คือ การกระจัด ความเร็ว และความเร่งของการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่เวลา  $t$  ใดๆ เทียบกับตำแหน่งที่ฐานของโครงสร้าง

แทนค่าสมการ (2.1ข) ลงในสมการ (2.1ก)

$$m\{\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)\} + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2.1ค)$$

หรือ 
$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.1ง)$$

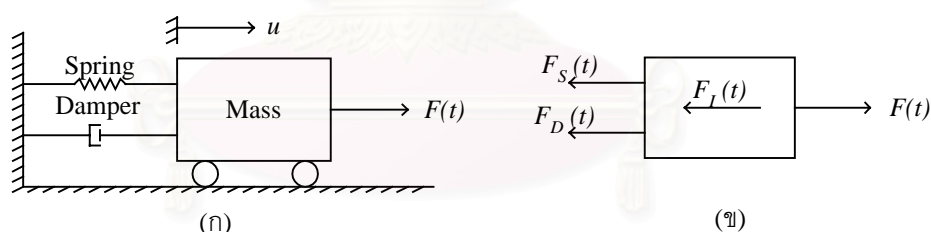
คำตอบของสมการที่ (2.1ง) สามารถหาได้โดยวิธี Duhamel's Integral (Clough R.W. และ Penzien J., 1993) สำหรับแรงกระทำใด ๆ

อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีการจำลองให้โครงสร้างมีพฤติกรรมเชิงเส้นอาจจะไม่เหมาะสมที่จะใช้อธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างในกรณีที่โครงสร้างมีการกระจัดมาก (Large Displacement) ดังนั้นเพื่อให้เกิดความถูกต้องมากขึ้น ค่าแรงต้านทานภายในเนื่องจากแรงสปริงและค่าความหน่วงอาจจำลองให้มีค่าไม่แปรผันโดยตรงกับการกระจัดและความเร็วในการเคลื่อนที่ของโครงสร้างตามลำดับ ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ก็จะไม่เป็นเชิงเส้นและคำตอบของสมการการเคลื่อนที่ก็จะมีความซับซ้อนมากขึ้น การหาคำตอบของสมการต้องอาศัยการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข

### 2.1.2 โครงสร้างพฤติกรรมไร้เชิงเส้น (Nonlinear System)

เมื่อพิจารณาระบบในรูปแบบที่ (2.1ก) และแผนภาพแสดงแรงกระทำต่างๆต่อโครงสร้างดังในรูปแบบที่ (2.1ข) สามารถเขียนสมการสมดุลย์ของระบบเนื่องจากผลรวมของแรงเฉื่อย,  $F_I(t)$ , แรงหน่วง,  $F_D(t)$ , แรงต้านทานภายในเนื่องจากสปริง,  $F_S(t)$ , และแรงภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้าง,  $F(t)$  ซึ่งที่เวลา  $t$  ใด ๆ ดังนี้

$$F_I(t_i) + F_D(t_i) + F_S(t_i) = F(t_i) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 : (ก) แสดงระบบที่มีระดับชั้นอิสระในการเคลื่อนที่เท่ากับ 1

(ข) Free body diagram ของโครงสร้าง

และ ที่เวลา  $t + \Delta t$  เขียนสมการของการเคลื่อนที่ได้ในทำนองเดียวกัน ดังนี้

$$F_I(t_i + \Delta t) + F_D(t_i + \Delta t) + F_S(t_i + \Delta t) = F(t_i + \Delta t) \quad (2.3)$$

เมื่อลบสมการที่ (2.3) ด้วยสมการที่ (2.2) จะได้

$$\Delta F_I + \Delta F_D + \Delta F_S = \Delta F_i \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\Delta F_I = F_I(t_i + \Delta t) - F_I(t_i) =$  ค่าแรงเฉื่อยที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเวลาผ่านไป  $\Delta t$

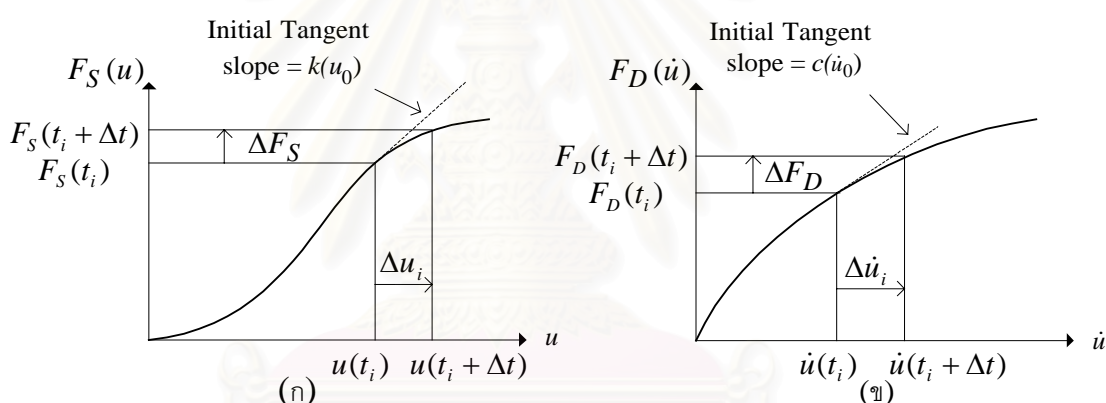
$$\Delta F_D = F_D(t_i + \Delta t) - F_D(t_i) = \text{ค่าแรงหน่วงที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเวลาผ่านไป } \Delta t$$

$$\Delta F_S = F_S(t_i + \Delta t) - F_S(t_i) = \text{ค่าแรงต้านทานภายในสปริงที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเวลาผ่านไป } \Delta t$$

$$\Delta F_i = F(t_i + \Delta t) - F(t_i) = \text{ค่าแรงภายนอกที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเวลาผ่านไป } \Delta t$$

หากสมมติว่า แรงต้านทานภายในเนื่องจากสปริงมีค่าขึ้นอยู่กับการกระจัดของโครงสร้างและแรงหน่วงมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วของการเคลื่อนที่มีค่าดังแสดงในรูปที่ (2.2ก) และ (2.2ข) ตามลำดับ ในขณะที่แรงเฉื่อยยังคงมีค่าแปรผันโดยตรงกับความเร่งของการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงทั้ง 3 ในรูปของค่าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเวลาผ่านไป  $\Delta t$  ได้ดังนี้

$$\Delta F_i = m\Delta\ddot{u}_i, \quad \Delta F_D = c_i\Delta\dot{u}_i, \quad \Delta F_S = k_i\Delta u_i \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.2 : (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเนื่องจากสปริงและระยะการกระจัดที่เวลาต่าง ๆ

(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเนื่องจากตัวหน่วงและความเร็วในการเคลื่อนที่เวลา

ต่างๆ

$$\text{โดยที่ } \Delta u_i = u(t_i + \Delta t) - u(t_i)$$

$$\Delta\dot{u}_i = \dot{u}(t_i + \Delta t) - \dot{u}(t_i)$$

$$\Delta\ddot{u}_i = \ddot{u}(t_i + \Delta t) - \ddot{u}(t_i)$$

ค่าสัมประสิทธิ์  $k_i$  ในสมการที่ (2.5) หาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงต้านทานภายในเนื่องจากสปริง  $F_S$  และการกระจัดของโครงสร้าง ที่เวลา  $t$  ใด ๆ ได้ดังนี้

$$k_i = \left( \frac{dF_S}{du} \right)_{u=u_i} \quad (2.6)$$

ทำนองเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์  $c_i$  ในสมการที่ (2.5) หาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงหน่วงและความเร็วของการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ที่เวลา  $t$  ใด ๆ ได้ดังนี้

$$c_i = \left( \frac{dF_D}{du} \right)_{u=u_i} \quad (2.7)$$

ดังนั้น หากแทนสมการ (2.5) ลงใน (2.4) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$m\Delta\ddot{u}_i + c_i\Delta\dot{u}_i + k_i\Delta u_i = \Delta F_i \quad (2.8)$$

ซึ่งอธิบายถึงความสัมพันธ์ของค่าของการกระจัดที่เปลี่ยนไป โดยสัมประสิทธิ์  $c_i$  และ  $k_i$  หาได้จากความเร็วและการกระจัดที่เวลา  $t_i$  ใด ๆ และสมมติให้มีค่าคงที่ในช่วงที่  $\Delta t$  ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคำตอบที่ได้จะเป็นค่าโดยประมาณ ทั้งนี้เพราะว่าค่าจริง ๆ ของ  $c_i$  และ  $k_i$  มีค่าไม่คงที่ในช่วงเวลา  $\Delta t$  ที่เพิ่มขึ้น

## 2.2 การหาคำตอบของสมการไร้เชิงเส้น

การหาคำตอบของสมการไร้เชิงเส้นมีด้วยกันหลายวิธี ระเบียบวิธีการอินทิเกรตทีละขั้น (Step-by-Step Integration Method) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ ในวิธีนี้จะหาการตอบสนองของโครงสร้างที่เวลา  $\Delta t$  ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปนิยมกำหนดให้เวลา  $\Delta t$  ที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากันโดยตลอด การวิเคราะห์เริ่มจากสมการสมดุลที่จุดเริ่มต้นของแต่ละช่วง แล้วคำนวณหาการตอบสนองที่เวลา  $\Delta t$  ที่เพิ่มขึ้นโดยวิธีการประมาณที่เสนอข้างต้น คือกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์  $k(u)$  และ  $c(\dot{u})$  มีค่าคงที่ในช่วงเวลา  $\Delta t$  นั้น ๆ และ ค่า  $k(u)$  และ  $c(\dot{u})$  จะถูกคำนวณใหม่ทุก ๆ ครั้งที่ตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของช่วงเวลาถัดไป ซึ่งค่าการตอบสนองที่คำนวณได้ ก็จะเป็นค่าสุดท้ายของช่วงเวลานั้น ๆ และก็จะเป็ค่าเริ่มต้นของช่วงเวลาถัดไปด้วย

จะเห็นได้ว่า จากการที่สมมติให้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์  $k(u)$  และ  $c(\dot{u})$  ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของแต่ละช่วงเวลา โดยกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองมีค่าคงที่ในช่วงเวลานั้น ๆ และจะเปลี่ยนค่าไปเมื่อคำนวณช่วงเวลาถัดไป ทำให้พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นของระบบสามารถประมาณได้จากการคำนวณแบบเชิงเส้นในแต่ละช่วงเวลา ๆ ต่อกันไปเรื่อย ๆ

ในการวิเคราะห์โดยวิธี Step-by-Step Integration method นี้ มี 2 วิธีการที่น่าสนใจคือ

1. ระเบียบวิธีความเร่งคงที่ (Constant acceleration method)
2. ระเบียบวิธีความเร่งแปรผันแบบเชิงเส้น (Linear acceleration method)



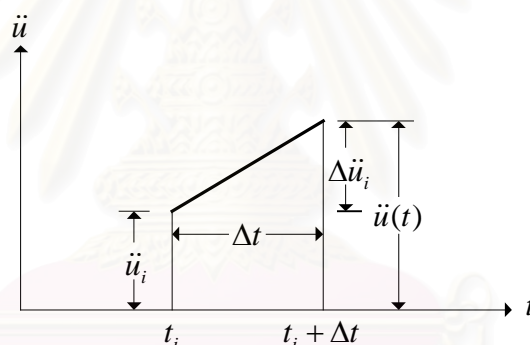
สำหรับวิธีแรกนั้น จะกำหนดให้ความเร่งมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลา  $\Delta t$  ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่วิธีหลังจะกำหนดให้ความเร่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปโดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตรงกับจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของช่วงเวลานั้น ๆ ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีหลังจะให้ค่าที่มีความถูกต้องมากกว่า หากใช้ช่วงเวลา  $\Delta t$  ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงเท่ากัน แต่ในการคำนวณจะยุ่งยากกว่าเล็กน้อย

## 2.2.1 ระเบียบวิธีความเร่งแปรผันแบบเชิงเส้น (Linear Acceleration Step-by-Step method)

สำหรับวิธีการนี้ จะกำหนดให้ความเร่งมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับเวลา  $t$  ใดๆ ในช่วงเวลา  $\Delta t$  หากกำหนดให้  $t_i$  และ  $t_i + \Delta t$  คือ เวลาเริ่มต้นและเวลาสุดท้ายในช่วงเวลา  $\Delta t$  ซึ่งจากรูปที่ (2.3) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของความเร่งได้ดังนี้

$$\ddot{u}(t) = \ddot{u}_i + \frac{\Delta \ddot{u}_i}{\Delta t} (t - t_i) \quad (2.9)$$

โดยค่า  $\Delta \ddot{u}_i$  คำนวณได้จากสมการที่ (2.8)



รูปที่ 2.3 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการเคลื่อนที่ในช่วงเวลา  $\Delta t$  ใดๆ โดยสมมติให้แปรผันเป็นเส้นตรง (Linear Acceleration Method)

เมื่อทำการอินทิเกรต สมการที่ (1.9) กับเวลา  $t$  ใดๆ ในช่วง  $t_i$  และ  $t$  จะได้

$$\dot{u}(t) = \dot{u}_i + \ddot{u}_i (t - t_i) + \frac{1}{2} \frac{\Delta \ddot{u}_i}{\Delta t} (t - t_i)^2 \quad (2.10)$$

และ

$$u(t) = u_i + \dot{u}_i (t - t_i) + \frac{1}{2} \ddot{u}_i (t - t_i)^2 + \frac{1}{6} \frac{\Delta \ddot{u}_i}{\Delta t} (t - t_i)^3 \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) , เมื่อแทนเวลา  $t = t_i + \Delta t$  จะได้

$$\Delta \dot{u}_i = \ddot{u}_i \Delta t + \frac{1}{2} \Delta \ddot{u}_i \Delta t \quad (2.12)$$

และ

$$\Delta u_i = \dot{u}_i \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{u}_i \Delta t^2 + \frac{1}{6} \Delta \ddot{u}_i \Delta t^2 \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.13) จะได้

$$\Delta \ddot{u}_i = 6 \frac{\Delta u_i}{\Delta t^2} - 6 \frac{\dot{u}_i}{\Delta t} - 3 \ddot{u}_i \quad (2.14)$$

เมื่อแทนค่า (2.14) ใน (2.12) จะได้

$$\Delta \dot{u}_i = 3 \frac{\Delta u_i}{\Delta t} - 3 \dot{u}_i - \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_i \quad (2.15)$$

แทนค่า (2.14) และ (2.15) ลงในสมการ (2.8) จะได้สมการการเคลื่อนที่ที่เป็น

$$m \left\{ 6 \frac{\Delta u_i}{\Delta t^2} - 6 \frac{\dot{u}_i}{\Delta t} - 3 \ddot{u}_i \right\} + c_i \left\{ 3 \frac{\Delta u_i}{\Delta t} - 3 \dot{u}_i - \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_i \right\} + k_i \Delta u_i = \Delta F_i \quad (2.16)$$

$$\left\{ \frac{6m}{\Delta t^2} + \frac{3c_i}{\Delta t} + k_i \right\} \Delta u_i = \Delta F_i + m \left\{ \frac{6\dot{u}_i}{\Delta t} + 3\ddot{u}_i \right\} + c_i \left\{ 3\dot{u}_i + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_i \right\} \quad (2.17)$$

สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในเทอม

$$\bar{k}_i \Delta u_i = \Delta \bar{F}_i \quad (2.18)$$

โดยที่  $\bar{k}_i = k_i + \frac{6m}{\Delta t^2} + \frac{3c_i}{\Delta t}$  = ค่าสติฟเนสเทียบเท่า (Equivalent Spring Constant) (2.19)

$$\Delta \bar{F}_i = \Delta F_i + m \left\{ \frac{6\dot{u}_i}{\Delta t} + 3\ddot{u}_i \right\} + c_i \left\{ 3\dot{u}_i + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_i \right\} = \text{แรงกระทำเพิ่มขึ้นเทียบเท่า}$$

Equivalent Incremental Load (2.20)

จากสมการที่ (2.18) จะสังเกตเห็นว่า สมการนั้นจะสอดคล้องกับสมการสมดุลย์สถิตย์ที่เวลา  $\Delta t$  ใดๆ ที่เปลี่ยนไป และสามารถหาการกระจัดที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา  $\Delta t$  ได้ดังนี้

$$\Delta u_i = \frac{\Delta \bar{F}_i}{\bar{k}_i} \quad (2.21)$$

และหาการกระจัดที่ช่วงถัดไปที่เวลา  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$  ได้จาก

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i \quad (2.22)$$

ในทำนองเดียวกัน ความเร็วในช่วงเวลาถัดไปที่เวลา  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$  ซึ่งหาจากความเร็วก่อนที่เปลี่ยนไปในสมการที่ (2.15) ได้ดังนี้

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i \quad (2.23)$$

ความเร่ง  $\ddot{u}_{i+1}$  ที่ตำแหน่งสุดท้ายของช่วงเวลา  $\Delta t$  สามารถหาได้โดยตรงจากสมการของการเคลื่อนที่ (2.1) ดังนี้

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{m} \{F(t_{i+1}) - c_{i+1}\dot{u}_{i+1} - k_{i+1}u_{i+1}\} \quad (2.24)$$

โดย สัมประสิทธิ์  $c_{i+1}$  และ  $k_{i+1}$  เป็นค่าที่วัดได้ที่ช่วง  $t_{i+1}$

เมื่อหาค่าการกระจัด ความเร็ว และความเร่งที่เวลา  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$  ได้ ก็ใช้วิธีการเดียวกันดังที่กล่าวมาข้างต้นหาค่าการกระจัด ความเร็ว และความเร่งที่ช่วงเวลาถัดไปได้ จนกระทั่งถึงช่วงเวลาที่ต้องการคำนวณได้

อย่างไรก็ตาม ได้มีการสมมติถึง 2 แห่ง คือ

1. สมมติให้ความเร่งมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเส้นตรงในช่วงเวลา  $\Delta t$  ใด ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป
2. สมมติให้ค่าความหน่วงและค่าสติฟเนสของระบบ สามารถหาจากเวลาที่ตำแหน่งเริ่มต้นของแต่ละช่วงและกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดทั้งช่วงเวลา  $\Delta t$

การสมมติข้างต้นทำให้เกิดค่าผิดพลาด (error) ขึ้นในแต่ละช่วงเวลา  $\Delta t$  โดยค่าผิดพลาดนี้จะลดลงหากใช้ช่วงเวลา  $\Delta t$  ที่สั้นลง อย่างไรก็ตามค่าผิดพลาดนี้จะสะสมไปเรื่อย ๆ ในแต่ละช่วงของการคำนวณ ดังนั้นเพื่อให้ค่าผิดพลาดลดลง ค่าความเร่งที่ใช้ในช่วงถัดไปจะคำนวณจากสมการการเคลื่อนที่ (2.1ง)

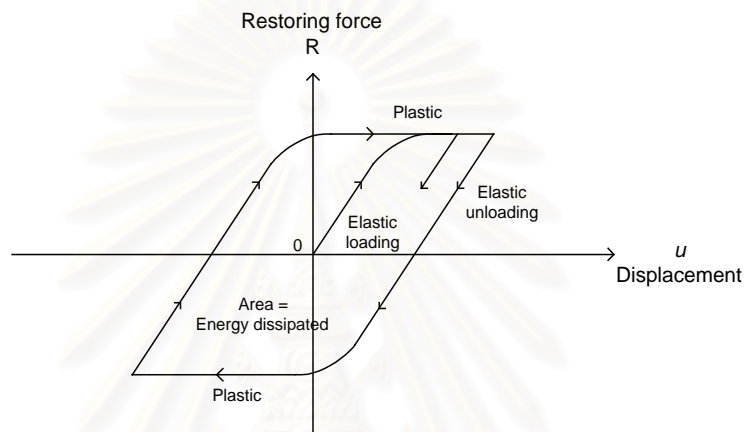
นอกจากนี้ จะต้องเลือกค่า  $\Delta t$  ที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง
2. อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงที่กระทำ
3. ความสัมพันธ์ของสติฟเนส และความหน่วง

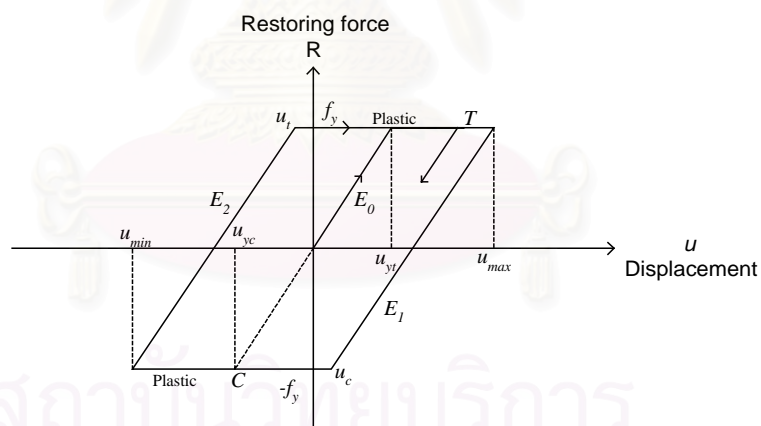
ซึ่งโดยทั่วไป ค่าเวลา  $\Delta t$  ที่ใช้ จะต้องไม่เกินกว่า 1 ใน 10 ของคาบของการสั่นของโครงสร้าง และ ควรมีค่าเพียงพอที่สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้างได้ นอกจากนี้ต้องสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันของค่าสติฟเนสและความหน่วงด้วย

## 2.3 โครงสร้างระบบอีลาสโตพลาสติก (Elastoplastic Behavior)

เนื่องจากแบบจำลองสำหรับพฤติกรรมของระบบอีลาสโตพลาสติกของโครงสร้างนั้น มีอยู่มากมายหลายชนิดที่แตกต่างกันออกไป แต่แบบจำลองหนึ่งซึ่งมีพฤติกรรมที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดและง่ายในการสร้างโปรแกรม โดยหากจำลองโครงสร้างให้เป็นระบบที่มีระดับขั้นอิสระของการเคลื่อนที่เท่ากับหนึ่ง (Single Degree of Freedom System) ที่สามารถเกิดจุดครากและเกิดสภาพพลาสติกได้ แรงต้านทานภายในเนื่องจากแรงสปริงจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ (2.4ก) ซึ่งจะมีทั้งส่วนที่มีพฤติกรรมเป็นแบบอีลาสติกและส่วนที่มีพฤติกรรมเป็นแบบพลาสติกเมื่อเกิดการ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 : (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากสปริงที่มีคุณสมบัติแบบอีลาสติก-พลาสติก และ ระยะการขจัดของมวลของโครงสร้าง

(ข) แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากสปริงที่มีคุณสมบัติแบบอีลาสติก-พลาสติก และ ระยะการขจัดของมวลของโครงสร้าง

เคลื่อนที่ในช่วงที่เป็นอีลาสติกไป หากโครงสร้างถูกแรงกระทำไปอีกทางหนึ่ง (unloaded) พฤติกรรมของโครงสร้างจะกลับมาเป็นแบบอีลาสติกอีกครั้งหนึ่ง เมื่อโครงสร้างรับแรงในทิศทางตรงกันข้ามไปเรื่อยๆ จะเกิดถึงสภาพพลาสติกขึ้นอีกทางด้านหนึ่งของหน้าตัดและจะมีสภาพพลาสติกไป

เรื่อยๆจนกระทั่งมีแรงภายนอกมากกระทำกลับทิศทาง ซึ่งจะวนเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ พลังงานที่สลายออกไปเมื่อเคลื่อนที่ไป 1 รอบ จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ของแรงภายในและการกระจัดในวงรอบนั้น เรียกว่า “ Hysteresis loop “ ดังแสดงในรูปที่ (2.4ก) ซึ่งพฤติกรรมแบบนี้สามารถอธิบายให้ง่ายขึ้นด้วยการสมมติให้ ระยะเวลาการกระจัดที่เกิดสภาพพลาสติกจะเกิดขึ้นเมื่อแรงต้านทานภายในเนื่องจากสปริงถึงค่าที่กำหนดไว้และจะมีค่าคงที่เมื่อการกระจัดเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกพฤติกรรมแบบนี้ว่า “ พฤติกรรมอีลาสโตพลาสติก “ ( Elastoplastic Behavior ) ซึ่งกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในและการกระจัดจะเป็นดังแสดงในรูปที่ (2.4ข)

สำหรับโครงสร้างที่จำลองให้เป็นระบบที่ประกอบด้วยมวลและสปริงนั้น ความสัมพันธ์ของแรงภายในสามารถเขียนขึ้นขึ้นมาได้ โดยจะขึ้นกับระยะเวลาการกระจัดและความเร็วในการเคลื่อนที่ของโครงสร้างดังในรูปที่ (2.4ข)

### 2.3.1 การครากของโครงสร้าง (Effect of Yielding)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของระบบอีลาสติกจะแตกต่างจากระบบอีลาสติก โดยสำหรับระบบอีลาสติกนั้นเมื่อถึงจุดครากแล้วระบบจะไม่สั่นรอบตำแหน่งสมดุลย์เดิม แต่จะไปสั่นรอบตำแหน่งสมดุลย์อันใหม่ที่ห่างออกมาจากตำแหน่งสมดุลย์เดิมเป็นระยะทางหนึ่ง ซึ่งระยะทางนี้จะเป็นการกระจัดที่ถาวร (Permanent Deformation) ของระบบ เมื่อแรงกระทำหมดไป ระบบก็จะกลับมาสั่นรอบตำแหน่งที่ไม่ใช่สมดุลย์เดิม ซึ่งแตกต่างจากระบบอีลาสติกที่เมื่อหมดแรงกระทำ ระบบจะกลับมาสั่นรอบตำแหน่งสมดุลย์เดิม นอกจากนี้ค่าการกระจัดสูงสุดในระบบอีลาสติก-พลาสติกก็จะมีค่าแตกต่างจากของระบบอีลาสติก และก็เกิดขึ้นที่เวลาต่างกันด้วย

### 2.3.2 กำลังครากปรับค่า (Normalized Yield Strength, $\bar{f}_y$ )

$\bar{f}_y$  คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังที่จุดครากของระบบอีลาสติก-พลาสติก และกำลังของระบบอีลาสติกที่สอดคล้องกัน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\bar{f}_y = \frac{f_y}{f_0} = \frac{u_y}{u_0} \quad (2.25)$$

โดยที่  $f_y$  คือ กำลังที่จุดครากของระบบอีลาสติก-พลาสติก

$f_0$  คือ กำลังที่ต้องการของโครงสร้างที่ยังคงทำให้โครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบอีลาสติกที่สอดคล้องกัน

ในกรณีที่  $\bar{f}_y < 1$  , ระบบจะสั่นจนถึงจุดคราก ทำให้พฤติกรรมเลยช่วงอีลาสติกไป

$\bar{f}_y = 1$  , ระบบจะยังคงมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติกหรือเป็นระบบอีลาสติก-พลาสติก  
ที่มีค่า  $f_y = f_0$

### 2.3.3 แฟคเตอร์ลดกำลังคราก (Yield Reduction Factor, $R_y$ )

$R_y$  คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังของระบบอีลาสติกที่สอดคล้องกันกับระบบอีลาสติก-พลาสติก และ กำลังที่จุดครากของระบบอีลาสติก-พลาสติก ซึ่งก็คือส่วนกลับของค่า Normalized Yield Strength,  $f_y$

$$R_y = \frac{1}{f_y} = \frac{f_0}{f_y} = \frac{u_0}{u_y} \quad (2.26)$$

ในกรณีที่  $R_y > 1$  , ระบบจะสั้นจนถึงจุดคราก ทำให้พฤติกรรมเลยช่วงอีลาสติกไป

$R_y = 1$  , ระบบจะยังคงมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติก

### 2.3.4 อัตราส่วนความเหนียว (Ductility Factor, $\mu_u$ )

$\mu_u$  คือ อัตราส่วนระหว่างการกระจัดที่มากที่สุดของระบบอีลาสติก-พลาสติก และการกระจัดที่ตำแหน่งที่เกิดจุดคราก ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\mu_u = \frac{u_m}{u_y} \quad (2.27)$$

โดยที่  $u_m$  คือ การกระจัดที่มากที่สุดของระบบอีลาสติก-พลาสติก

$u_y$  คือ การกระจัดที่ตำแหน่งที่เกิดจุดคราก

ในกรณีที่เป็นระบบอินอีลาสติก ค่า  $u_m$  จะมากกว่าค่า  $u_y$  นั่นคือ ค่า Ductility Factor จะมากกว่า 1 แต่ในกรณีที่เป็นระบบอีลาสติก ค่า Ductility Factor จะเท่ากับ 1 เสมอ

### 2.3.5 ดัชนีความเสียหาย (Damage Index)

Park และคณะ (1984) ได้เสนอความสัมพันธ์เพื่อวัดค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างขึ้น โดยค่าความเสียหายภายใต้แรงกระทำแบบวิภูจักรประกอบด้วยความเสียหาย 2 ส่วนรวมกันแบบเชิงเส้นได้แก่ ความเสียหายเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งแบบไม่ยืดหยุ่นและความเสียหายสะสมที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบเป็นวิภูจักรของโครงสร้างดั่งสมการ

$$DI = \frac{u_m}{u_{ult}} + \beta \frac{\int dE}{F_y u_{ult}} \quad (2.28)$$

โดยที่  $u_m$  คือ การกระจัดที่มากที่สุดของระบบอีลาสติก-พลาสติก

$u_{ult}$  คือ การกระจัดปลายของโครงสร้าง

$\beta$  คือ แฟคเตอร์ปรับค่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.27 (Willams M.S. และ SexSmith R.G. , 1995)

$\int dE$  คือ ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟวงปิดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในและการกระจัดของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบวิถัจกร

$F_y$  คือ กำลังครากของโครงสร้าง

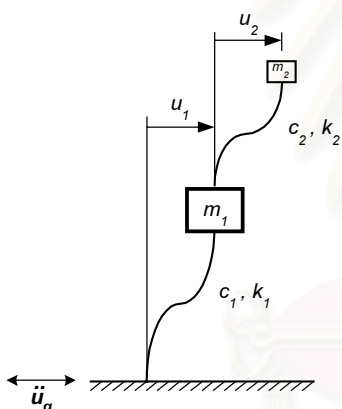


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.4 ระบบมวลหน่วงปรับค่า (Tuned Mass Damper, TMD)

มวลหน่วงปรับค่าคืออุปกรณ์ที่ติดตั้งเข้าไปกับโครงสร้างโดยมีคุณสมบัติในการสลายพลังงานของโครงสร้างด้วยหลักการที่ว่าพลังงานบางส่วน of โครงสร้างถูกถ่ายไปที่มวลหน่วงปรับค่าทำให้การสั่นของโครงสร้างมีค่าลดลง โดยมวลหน่วงปรับค่าที่ว่านี้ก็คือระบบที่ประกอบไปด้วย มวล สปริงและตัวหน่วงเช่นเดียวกับโครงสร้าง SDOF ใดๆ ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของมวลหน่วงปรับค่าได้ดังต่อไปนี้

จากระบบโครงสร้าง SDOF ที่มีพฤติกรรมในช่วงอิลาสติกโดยมีค่าพารามิเตอร์มวล, ความหน่วง และค่าสติฟเนสของโครงสร้าง เมื่อนำมวลหน่วงปรับค่าที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติกติดตั้งเข้ากับโครงสร้างทำให้กลายเป็นโครงสร้างระบบใหม่ซึ่งเปรียบเสมือนการเพิ่มดีกรีอิสระของโครงสร้างขึ้นมาอีกหนึ่งค่า ทำให้กลายเป็นระบบโครงสร้าง 2DOF โดยสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าเนื่องจากการเคลื่อนตัวของฐานรองรับของโครงสร้างได้ดังนี้



$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 = c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 - m_1 \ddot{u}_g \quad (2.29)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 = -m_2 \ddot{u}_1 - m_2 \ddot{u}_g \quad (2.30)$$

รูปที่ 2.5 แสดงระบบโครงสร้างอิลาสติก SDOF ที่ติดมวลหน่วงปรับค่าไว้ที่ยอดของโครงสร้าง

โดยที่  $m_1, c_1, k_1$  คือ มวล ความหน่วง และสติฟเนสของโครงสร้าง

$m_2, c_2, k_2$  คือ มวล ความหน่วง และสติฟเนสของมวลหน่วงปรับค่า

$u_1, \dot{u}_1, \ddot{u}_1$  คือ การกระจัดสัมพัทธ์ ความเร็วสัมพัทธ์ และความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างเทียบกับการเคลื่อนที่ที่ฐานของโครงสร้างที่เวลาใดๆ

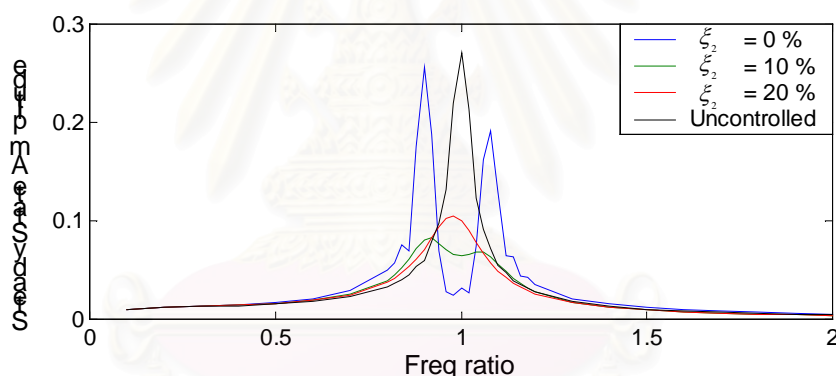
$u_2, \dot{u}_2, \ddot{u}_2$  คือ การกระจัดสัมพัทธ์ ความเร็วสัมพัทธ์ และความเร่งสัมพัทธ์ของมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับการเคลื่อนที่ที่ยอดของโครงสร้างที่เวลาใดๆ

จากสมการการเคลื่อนที่ (2.28) และ (2.29) สามารถแก้สมการหาค่าแอมพลิจูดของการกระจัดของโครงสร้างที่เวลาต่างๆได้ โดยแสดงผลเป็นแอมพลิจูดที่สภาวะคงตัวของการสั่นของโครงสร้าง ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่าอัตราส่วนความถี่ (Frequency ratio,  $\omega_2 / \omega_1$ ), ค่า



สัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า ( $\xi_2$ ), ค่าอัตราส่วนมวลระหว่างมวลของมวลหน่วงปรับค่าต่อมวลของโครงสร้าง (mass ratio,  $\mu$ ) และค่าอัตราส่วนระหว่างความถี่ของแรงกระทำต่อความถี่ของโครงสร้าง โดยในรูปที่ 2.6 เป็นการแสดงให้เห็นถึงค่าแอมพลิจูดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้าง เมื่ออัตราส่วนความถี่ของแรงกระทำเป็นค่าต่างๆ โดยมวลหน่วงปรับค่ามีค่าอัตราส่วนมวลเท่ากับ 3 เปอร์เซนต์ ค่าอัตราส่วนระหว่างความถี่ของมวลหน่วงปรับค่าและความถี่ของโครงสร้างเท่ากับ 1 (สั้นพ้อง) และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ 0, 10 และ 20 เปอร์เซนต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า หากต้องการให้การตอบสนองของโครงสร้างมีค่าต่ำในช่วงอัตราส่วนความถี่ของแรงกระทำใกล้กับ 1 นั้น จะต้องเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆข้างต้นให้มีค่าเหมาะสมสำหรับค่าอัตราส่วนมวลค่าหนึ่ง ซึ่งวิธีการที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปคือ การ optimization โดยในกรณีที่มีแรงฮาร์โมนิกกระทำต่อโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงต่ำๆ ค่าพารามิเตอร์ของมวลหน่วงปรับค่าเสนอโดย Den Hartog (Soong T.T. และ Dargush G.F., 1997) จะมีค่าดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{(1 + \mu)} \quad , \quad \xi_2 = \sqrt{\frac{3 \cdot \mu}{8 \cdot (1 + \mu)}} \quad (2.31)$$



รูปที่ 2.6 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า โดยอัตราส่วนความถี่ของแรงกระทำต่อความถี่ของโครงสร้างเป็นค่าต่างๆ และสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่ามีค่า 0, 10 และ 20 เปอร์เซนต์

นอกจากนี้หากพิจารณาว่าการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเปรียบเสมือนการเพิ่มสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้กับโครงสร้างนั้น สามารถพิจารณาได้ดังนี้ จากสมการการเคลื่อนที่ เมื่อรวมสมการที่ (2.28) และ (2.29) เข้าด้วยกัน จะได้

$$(m_1 + m_2) \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 = -(m_1 + m_2) \ddot{u}_g - m_2 \ddot{u}_2 \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.32) สามารถหาแรงที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$(m_1 + m_2) \ddot{u}_1 du_1 + c_1 \dot{u}_1 du_1 + k_1 u_1 du_1 = -(m_1 + m_2) \ddot{u}_g du_1 - m_2 \ddot{u}_2 du_1 \quad (2.33)$$

หรือพลังงานของแต่ละพจน์ที่เวลาใดๆ

$$\int (m_1 + m_2) \cdot \dot{u}_1 du_1 + \int c_1 \dot{u}_1^2 dt + \int k_1 u_1 \cdot \dot{u}_1 dt = - \int (m_1 + m_2) \ddot{u}_g \cdot \dot{u}_1 dt - \int m_2 \ddot{u}_2 \cdot \dot{u}_1 dt \quad (2.34)$$

โดยที่สภาวะคงตัว จะได้ว่า  $\int \ddot{u}_1 \cdot \dot{u}_1 dt = \int u_1 \cdot \dot{u}_1 dt = 0$  เนื่องจากฟังก์ชันตั้งฉากกัน (มีเฟสต่างกันเท่ากับ 90 องศา) เพราะฉะนั้น สมการที่ (2.34) จึงกลายเป็น

$$\int c_1 \dot{u}_1^2 dt = - \int (m_1 + m_2) \ddot{u}_g \cdot \dot{u}_1 dt - \int m_2 \ddot{u}_2 \cdot \dot{u}_1 dt \quad (2.35)$$

โดยที่ พจน์  $\int c_1 \dot{u}_1^2 dt$  คือ พลังงานที่สลายออกไปเนื่องจากค่าความหน่วงภายในโครงสร้างเอง  
พจน์  $-\int (m_1 + m_2) \ddot{u}_g \cdot \dot{u}_1 dt$  คือ พลังงานของแรงภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้างหลัก  
พจน์  $-\int m_2 \ddot{u}_2 \cdot \dot{u}_1 dt$  คือ พลังงานที่สลายออกจากโครงสร้างเนื่องจากมวลหน่วงปรับค่า

เดิมทีพลังงานที่ต้องสลายออกไปจากโครงสร้างในกรณีที่ไม่ได้ติดมวลหน่วงปรับค่ามีค่าเท่ากับเทอมแรกทางขวามือที่ไม่มีมวล  $m_2$  เข้าไปรวมด้วย แต่เมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับโครงสร้างแล้ว ซึ่งถึงแม้จะทำให้เทอมแรกทางขวามือจะมีพจน์ของมวล  $m_2$  เพิ่มเข้าไปด้วย แต่ก็มีอีกเทอมหนึ่งซึ่งก็คือเทอมหลังที่อยู่ทางขวามือที่เพิ่มเข้าไปในสมการโดยทำหน้าที่หักล้างพลังงานของเทอมแรกให้ลดลง ซึ่งเทอมหลังนี้จะมีค่ามากกว่าผลของเทอม  $m_2$  ที่เพิ่มเข้าไปในเทอมแรก ดังนั้นพลังงานที่ต้องสลายออกไปจากโครงสร้างจึงมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาเทอมหลังของด้านขวามือของสมการที่ (2.34) จะเห็นว่า ประกอบด้วยมวลของมวลหน่วงปรับค่าและความเร่งสัมพัทธ์ของมวลหน่วงปรับค่าที่เทียบกับโครงสร้าง ซึ่งหากทำให้เทอมนี้มีค่ามาก ย่อมหมายถึง พลังงานในโครงสร้างจะมีค่าลดลง ดังนั้นเงื่อนไขที่จะมีผลให้เทอมที่สองนี้มีค่ามากมีดังนี้

1. ในกรณีที่กำหนดให้มวลของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าคงที่ เทอมพลังงานที่สามารถสลายออกจากโครงสร้างหลักเนื่องจากมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่ามากก็ต่อเมื่อค่า  $\int \ddot{u}_2 \cdot \dot{u}_1 dt$  มีค่ามาก แต่กรณีที่  $\dot{u}_1$  มีค่ามากย่อมแสดงถึงการกระจัดที่มีค่ามากด้วย ซึ่งไม่สอดคล้องกับจุดประสงค์ของการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ดังนั้นการที่จะให้เทอมพลังงานที่สลายออกจากโครงสร้างหลักเนื่องจากมวลหน่วงปรับค่ามีค่ามากโดยทำให้เทอม  $\dot{u}_1$  มีค่าน้อย นั้น ต้องทำให้เทอม  $\ddot{u}_2$  มีค่ามากแทน อย่างไรก็ตาม หาก  $\ddot{u}_2$  จะมีค่ามาก แต่มีเฟสของการสั่นที่ไม่เหมาะสมกับค่า  $\dot{u}_1$  แล้ว ผลการอินทิเกรตหรือพลังงานรวมที่ได้ก็จะมีค่าไม่มากที่สุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นเงื่อนไขอีกเงื่อนไขหนึ่งที่จะทำให้ผลการอินทิเกรตมีค่ามาก ก็คือ  $\dot{u}_1$  และ  $\ddot{u}_2$  จะต้องมีการสั่นที่สอดคล้องกันหรือเรียกได้ว่า  $u_2$  ต้องมีเฟสการสั่นตามหลัง  $u_1$  อยู่ 90 องศา

2. ในกรณีที่กล่าวไปข้างต้นเมื่อเฟสของการสั่นระหว่างโครงสร้างและของมวลห้วงปรับค่ามีค่าที่เหมาะสมและการกระจัดของมวลห้วงปรับค่ามีค่าที่มากแล้ว (stroke) การเพิ่มมวลของมวลห้วงปรับค่าให้มากขึ้นก็จะทำให้พลังงานที่สลายออกไปโดยมวลห้วงปรับค่ามีค่ามากขึ้นไปด้วย ทำให้ปริมาณพลังงานที่โครงสร้างต้องสลายออกไปมีค่าน้อยลง ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานของเทอมหลังนี้แปรผันโดยตรงกับมวลของมวลห้วงปรับค่า

หากเปรียบเทียบการที่มวลห้วงปรับค่าสามารถสลายพลังงานของโครงสร้างออกไปนั้นเปรียบเสมือนการเพิ่มค่า(สัมประสิทธิ์)ความหน่วงของโครงสร้างให้มีค่ามากขึ้น โดย(สัมประสิทธิ์)ความหน่วงประสิทธิผล(Effective damping,  $C_{eq}$ ) ที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากผลรวมของค่า(สัมประสิทธิ์)ความหน่วงเดิมของโครงสร้างและค่า(สัมประสิทธิ์)ความหน่วงที่คิดเทียบเท่ากับพลังงานที่สลายออกไปเนื่องจากมวลห้วงปรับค่า ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$c_{eq} = c_1 + m_2 \cdot \frac{\int \ddot{u}_2 \cdot \dot{u}_1 dt}{\int \dot{u}_1^2 dt} \quad (2.36)$$

ดังนั้นเพื่อเป็นการแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงประสิทธิผลเนื่องจากการติดตั้งมวลห้วงปรับค่าที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเข้าไปกับโครงสร้าง โดยมีสมการการเคลื่อนที่ดังสมการที่ (2.28) และ (2.29) และกำหนดให้การตอบสนองของโครงสร้างมีเฟสการสั่นที่เหมาะสม (ความต่างเฟสระหว่างการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลห้วงปรับค่าต่างกันเท่ากับ 90 องศา) ซึ่งในความเป็นจริง ความต่างเฟสที่เกิดขึ้นจะไม่ได้มีค่าที่เหมาะสมเช่นนี้ ดังนั้นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จึงเป็นค่าประมาณที่มากกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเพื่อแสดงให้เห็นถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงประสิทธิผล โดยค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ได้มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\zeta^* = \zeta_1 + \frac{\mu}{4} \frac{\omega_2}{\omega_1 \zeta_2}, \quad \zeta^* = \zeta_1 + \frac{\mu}{4} \frac{1}{(1+\mu)\zeta_2} \quad (2.37)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า หากใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เสนอโดย Den Hartog โดยมีอัตราส่วนมวลเท่ากับ 3 เปอร์เซนต์ ( $\mu = 0.03$ ) ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงประสิทธิผลจะมีค่าประมาณ 9 เปอร์เซนต์ ทั้งที่จากเดิมที่โครงสร้างมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเพียง 2 เปอร์เซนต์เท่านั้น นั่นคือมวลห้วงปรับค่าสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้กับโครงสร้างได้มากถึง 350 เปอร์เซนต์เลยทีเดียว ทำให้การสั่นไหวของโครงสร้างลดลงได้อย่างมาก ดังที่ได้กล่าวแล้วในกรณีการเพิ่มสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้กับโครงสร้างอิลาสติกโดยที่แรงกระทำมีความถี่ตรงกับความถี่ของโครงสร้างนั้น หากเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้กับโครงสร้างเท่าตัวก็จะทำให้การกระจัดของโครง-

สร้างลดลงได้ถึงครึ่งหนึ่ง เพราะฉะนั้นสำหรับโครงสร้างอิลาสติก การที่สามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์ความหน่วงได้มากเท่าใดก็สามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้มากเท่านั้น

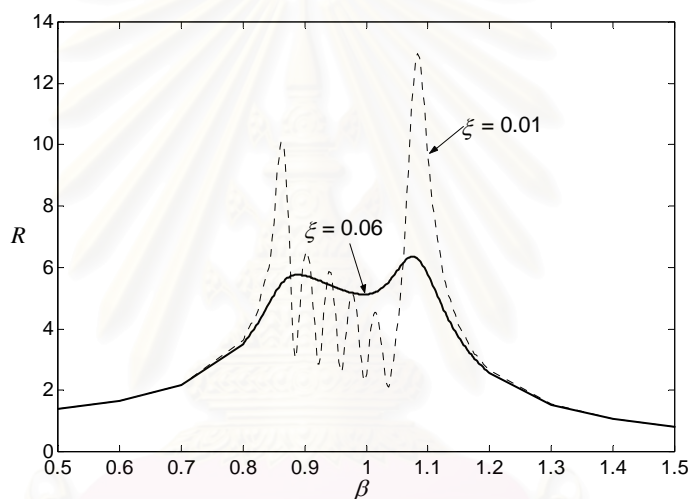
อย่างไรก็ตาม เมื่อความถี่ของแรงภายนอกที่กระทำกับโครงสร้างหรือความถี่ของการสั่นที่ฐานของโครงสร้างไม่ตรงกับความถี่ของโครงสร้าง ความสามารถในการเพิ่มสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าให้กับโครงสร้างหรือความสามารถในการลดการสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่าที่ปรับให้มีค่าความถี่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างก็จะมีค่าลดลงดังแสดงในกราฟรูปที่ 2.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการตอบสนองของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าน้อยกว่าการตอบสนองของโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าอยู่ช่วงหนึ่งซึ่งแสดงถึงความถี่ที่มวลหน่วงปรับค่าทำงานได้ดี แต่อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าความสามารถในการลดการสั่นไหวจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่ของแรงกระทำยิ่งห่างจากความถี่ของโครงสร้างมากขึ้นจนกระทั่งเลยขอบเขตที่มวลหน่วงปรับค่าสามารถลดการสั่นไหวได้ ซึ่งเมื่ออยู่นอกขอบเขตที่มวลหน่วงปรับค่าสามารถทำงานได้แล้ว การติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไปจะทำให้การสั่นไหวของโครงสร้างมีค่ามากขึ้น ซึ่งการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะไม่เหมาะสำหรับบริเวณนั้น

## 2.5 ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วย

ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยเป็นระบบที่ใช้มวลหน่วงมากกว่าหนึ่งหน่วยในการติดเข้ากับโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่มวลหน่วงแต่ละหน่วยจะมีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันเพื่อที่จะทำให้มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างสูงขึ้นและครอบคลุมช่วงความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำมากขึ้น

ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยมีค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องกำหนดในการออกแบบหลายค่าอันได้แก่ ค่าความถี่และอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงแต่ละหน่วยในการออกแบบระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยให้มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ทุกอย่างนั้นทำได้ยากเพราะว่ามีค่าพารามิเตอร์เป็นจำนวนมาก จากการศึกษานในอดีตพบว่าค่าพารามิเตอร์บางค่ามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบค่อนข้างมากแต่ค่าพารามิเตอร์บางค่ามีผลน้อย ดังนั้นการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยจึงมักจะกำหนดค่าพารามิเตอร์บางค่าไว้ก่อนและทำการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของระบบ ค่าพารามิเตอร์ที่มักจะกำหนดไว้ล่วงหน้าได้แก่ กำหนดให้มวลหน่วงแต่ละหน่วยมีค่ามวลและอัตราส่วนความหน่วงเท่ากัน ระยะห่างของความถี่ของมวลหน่วงแต่ละหน่วยมีค่าเท่ากัน ส่วนค่าพารามิเตอร์หลักที่จะต้องคำนวณเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพดีได้แก่ จำนวนหน่วยของมวลหน่วง, ช่วงความถี่ควบคุมของระบบมวลหน่วง, ค่าอัตราส่วนความหน่วง

ของมวลหน่วง และระยะห่างระหว่างความถี่กลางของระบบมวลหน่วงกับค่าความถี่ของโครงสร้าง การเลือกใช้จำนวนมวลหน่วงที่น้อยควรจะใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่มีค่าสูง ทั้งนี้เพราะความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายพลศาสตร์และค่าอัตราส่วนของความถี่ของแรงที่กระทำต่อความถี่ของโครงสร้างจะมีการคาบเกี่ยวกันที่ต่ำ การใช้อัตราส่วนความหน่วงที่มีค่าสูงจะช่วยลดผลของค่าการสั่นสูงสุดสัมพัทธ์น้อยได้ ในทางกลับกันการใช้มวลหน่วงที่มีจำนวนหน่วยมากจึงควรจะใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่มีค่าต่ำเพราะการคาบเกี่ยวกันของมวลหน่วงแต่ละหน่วยจะทำให้ผลของค่าการสั่นสูงสุดสัมพัทธ์น้อยลดลง รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่ใช้จำนวนมวลหน่วง 5 หน่วยและมีค่าอัตราส่วนความหน่วงเป็น 1 และ 6 เปอร์เซนต์ของค่าอัตราส่วนความหน่วงวิกฤติ ซึ่งในรูปได้แสดงให้เห็นผลของค่าสูงสุดสัมพัทธ์น้อยที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ต่ำ



รูปที่ 2.7 แสดงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยที่ใช้จำนวนมวลหน่วง 5 หน่วย โดยค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงมีค่า 1 และ 6 เปอร์เซนต์ของค่าอัตราส่วนความหน่วงวิกฤติ

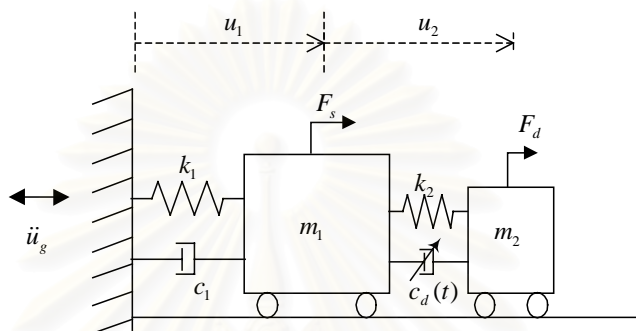
## 2.6 ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ (Semi-active Tuned Mass Damper, STMD)

ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟเป็นระบบที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวหน่วงสามารถปรับค่าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8

แอลกอริทึมที่ใช้ในระบบควบคุมแบบกึ่งแอกทีฟใช้วิธีการควบคุมแบบควอดราติกเชิงเส้น (Linear quadratic Control) [Soong T.T., 1990] ซึ่งจะเลือกดัชนีคุณภาพ (Performance index,  $J$ ) เป็นพลังงานที่ถ่ายเทเข้าสู่โครงสร้างเนื่องจากการเกิดการสั่นไหวและพลังงานที่ต้องให้เพื่อควบคุมการสั่นไหวที่เกิดขึ้นนับตั้งแต่เวลาที่เริ่มพิจารณา นั่นคือจะพยายามให้มีพลังงานการสั่นไหวของโครงสร้างน้อยที่สุดพร้อมกับใช้พลังงานน้อยที่สุดในการควบคุมการสั่นไหว ดังนั้นค่าดัชนีคุณภาพสามารถเขียนได้เป็น

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [\mathbf{X}^T(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{X}(\mathbf{t}) + u(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{R} \cdot u(\mathbf{t})] dt \quad (2.38)$$

โดยที่  $\mathbf{Q}$  เป็นเมตริกซ์น้ำหนัก (weight matrix) สำหรับการตอบสนองของโครงสร้าง  
 $\mathbf{R}$  เป็นเมตริกซ์น้ำหนัก (weight matrix) สำหรับพลังงานที่ใช้ในความคุมการสั่นไหว  
 $t_0, t_f$  เป็นเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดการควบคุมการสั่นไหว  
 $u(\mathbf{t})$  = ค่าแรงที่ได้จากการคำนวณตามวิธีการของมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ



รูปที่ 2.8 แสดงแบบจำลองของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ

จากหลักการของวิธี Linear Optimal Control สามารถหาค่าคำตอบของแรงควบคุม,  $u(\mathbf{t})$ , ได้จากผลคูณของค่าการตอบสนองของระบบ,  $\mathbf{X}(\mathbf{t})$ , กับเมตริกซ์ผล (Gain matrix,  $\mathbf{G}$ ) ดังนี้

$$u(\mathbf{t}) = \mathbf{G} \cdot \mathbf{X}(\mathbf{t}) = -\frac{1}{2} \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{X}(\mathbf{t}) \quad (2.39)$$

โดยที่เมตริกซ์  $\mathbf{P}$  เป็นเมตริกซ์คำตอบที่ได้จากสมการที่มีรูปแบบของสมการริคคาตี (Riccati equation) ดังนี้

$$\mathbf{P}\mathbf{A} - \frac{1}{2} \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} + 2\mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (2.40)$$

ตัวหน่วงที่มีความสามารถในการปรับค่าความหน่วงของตัวเองจะทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนสภาพของตัวเองให้มีความหน่วงที่เหมาะสมซึ่งค่าดังกล่าวมีสภาพเป็นเหมือนการให้แรงกระทำต่อโครงสร้างเพราะค่าความหน่วงในส่วนนี้เมื่อคูณกับความเร็วสัมพัทธ์ของมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับระบบโครงสร้างจะกลายเป็นแรงที่กระทำทั้งต่อระบบโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าซึ่งเป็นหลักการของวิธีการแบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ เพียงแต่ว่าค่าแรงดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดคือ ทิศทางของแรงที่กระทำขึ้นอยู่กับทิศทางของความเร็วสัมพัทธ์นั้นๆ ทั้งนี้เพราะแรงนี้เป็น

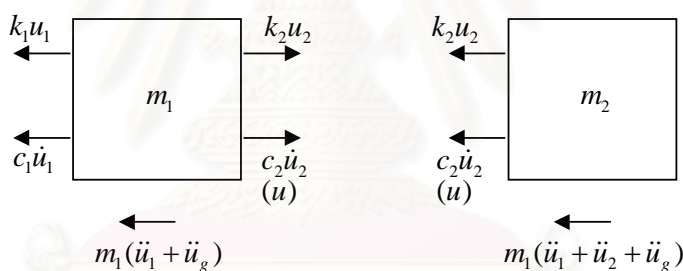
ผลเนื่องมาจากผลคูณระหว่างค่าความหน่วงของตัวหน่วงปรับค่ากับค่าความเร็วสัมพัทธ์ ดังนั้นข้อจำกัดของวิธีการแบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแยกที่พในการวิเคราะห์คือ  $u \cdot \dot{u}_2 \leq 0$

นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวหน่วงแม้จะสามารถปรับค่าความหน่วงได้แต่ก็มีขอบเขตในการปรับค่าคือสามารถปรับได้อยู่ในช่วง  $[c_{d,\min} - c_{d,\max}]$  ดังนั้นค่า  $c_d(t)$  สามารถคำนวณได้จาก

$$c_d(t) = \begin{cases} c_{d,\max} & ; c_d(t) \geq c_{d,\max} \\ c_d(t) & ; c_{d,\min} < c_d(t) < c_{d,\max} \\ c_{d,\min} & ; c_d(t) \leq c_{d,\min} \end{cases} \quad (2.41)$$

โดยที่ 
$$c_d(t) = -\frac{u(t)}{\dot{u}_2(t)} \quad ; \quad \dot{u}_2(t) \neq 0$$

ดังนั้นจะสามารถสร้างสมการการเคลื่อนที่เพื่อใช้วิเคราะห์ในระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแยกที่พดังนี้



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพอิสระของโครงสร้างและมวลหน่วงในวิธีการควบคุมแบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแยกที่พ

จากแผนภาพอิสระที่แสดงในรูป 2.9 สามารถเขียนสมการสมดุลได้ดังสมการที่ 2.42 และ 2.43 ดังนี้

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 - u - k_2 u_2 = -m_1 \ddot{u}_g \quad (2.42)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + m_2 \ddot{u}_2 + u + k_2 u_2 = -m_2 \ddot{u}_g \quad (2.43)$$

จากหลักการดังกล่าวจะพบได้ว่าการใช้ตัวหน่วงที่ปรับค่าได้นี้มิได้เป็นการใช้แรงกระทำต่อโครงสร้างโดยตรงแต่สามารถสร้างแรงที่เหมาะสมกระทำต่อโครงสร้างได้จากผลตอบสนองของโครงสร้างเอง ซึ่งโดยปกติแล้วถ้าหากว่าการตอบสนองของโครงสร้างมีค่ามากจำเป็น

จะต้องใช้แรงจำนวนมากในระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแอกทีฟ แต่สำหรับระบบมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟแล้วถ้าการตอบสนองของโครงสร้างมีค่ามาก ค่าแรงที่เกิดจากตัวห้วงปรับค่าก็จะมีค่ามากตามไปด้วยและถ้าการตอบสนองของโครงสร้างมีค่าน้อยแรงที่ตัวห้วงปรับค่าก็จะมีค่าน้อยเหมาะสมกันพอดี ดังนั้นระบบมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟจึงมีเสถียรภาพมากกว่าระบบมวลห้วงแบบแอกทีฟ นอกจากนี้หลักการนี้ยังแสดงให้เห็นด้วยว่าแม้ว่าระบบควบคุมการทำงานของตัวห้วงปรับค่าไม่ทำงานแต่สภาพโดยรวมของระบบก็จะมีสภาพเป็นระบบมวลห้วงปรับค่าระบบหนึ่งทั้งนี้เพราะตัวห้วงปรับค่าจะมีสภาพเป็นตัวห้วงคงที่ตัวหนึ่งเท่านั้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### บทที่ 3

## การพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์

หลังจากศึกษาทฤษฎีที่กล่าวข้างต้น จึงได้พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างระบบ SDOF ที่จำลองให้มีพฤติกรรมแบบอิลาสโตพลาสติคภายใต้การเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง โดยใช้โปรแกรม Matlab และอาศัยการวิเคราะห์คำนวณเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีความเร่งแปรผันแบบเชิงเส้น (Linear Acceleration Step-by-Step method)

แผนภาพแสดงหลักการและขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเป็นดังแสดงในภาคผนวก ก โดยมีฟังก์ชัน FS เป็นฟังก์ชันหลักที่ใช้ในการคำนวณหาค่าแรงต้านทานภายในเนื่องจากสปริงที่มีพฤติกรรมแบบอิลาสโตพลาสติค

### การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ได้ทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยมีค่าคุณสมบัติต่างๆ ของโครงสร้างดังนี้

### คุณสมบัติของโครงสร้าง

$$m_1 = 471.03 \text{ tons}, k_1 = 1492.41 \text{ KN/m}, \xi_1 = 2\%, c_1 = 33.54 \text{ KN.s/m}$$

$$P(t) = \sin(\omega_1 t), \quad \text{Initial condition} = \text{at rest}$$

สามารถแบ่งขั้นตอนการเปรียบเทียบได้ดังนี้

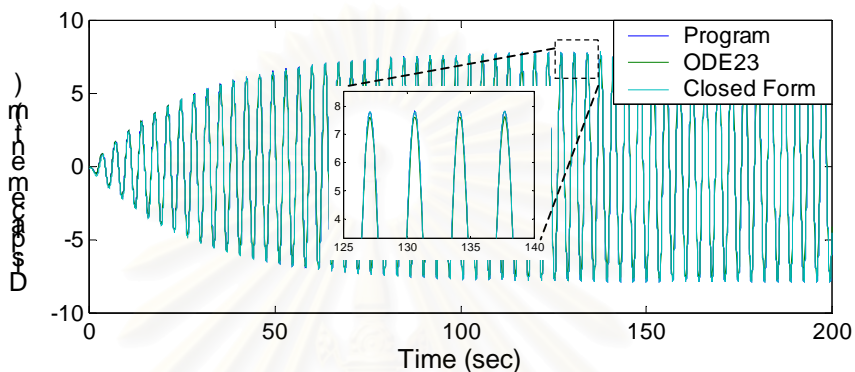
### 3.1. เมื่อโครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติค

กำหนดให้ค่า  $f_y$  ของโครงสร้างมีค่ามาก เพื่อไม่ให้เกิดการตอบสนองของโครงสร้างเกินระยะการกระจัดที่จุดคราก ดังนั้นโครงสร้างจะยังคงสั่นไหวอยู่ในช่วงอิลาสติคตลอดระยะเวลาที่สนใจ

3.1.1 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน ODE23 ในโปรแกรม Matlab และคำตอบจากการวิเคราะห์โดยสมการทางคณิตศาสตร์ (Closed Form Solution)

ฟังก์ชัน ODE23 เป็นฟังก์ชันมาตรฐานอันหนึ่งที่มีในโปรแกรม Matlab ซึ่งมีความสามารถในการคำนวณหาคำตอบของสมการดิฟเฟอเรนเชียลต่างๆ

การตอบสนองของโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทั้งสามข้างต้นจะเป็นดังกราฟดังในรูปที่ 3.1 โดยการกระตุ้นของโครงสร้าง SDOF ที่เวลาต่างๆภายใต้การเคลื่อนตัวพื้นฐานแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่ของการสั่นเท่ากับ 0.28 เฮิรท์ซึ่งเท่ากับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ช่วงเวลา (Time Step) เท่ากับ 0.02 วินาที สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้ฟังก์ชัน ODE23 ในโปรแกรม Matlab และผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์



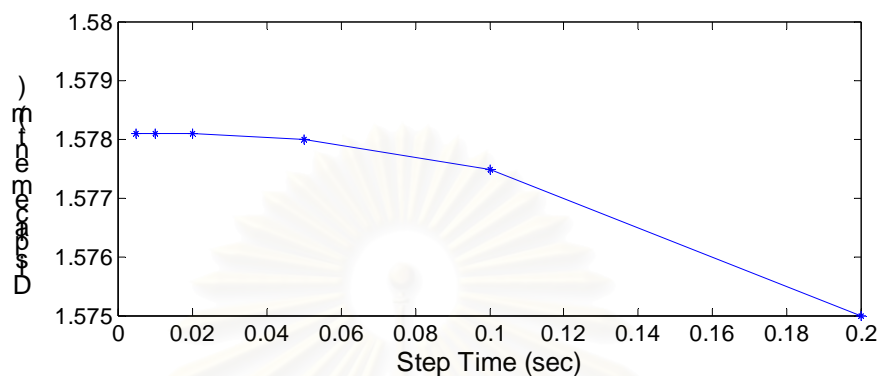
รูปที่ 3.1 กราฟเปรียบเทียบการกระตุ้นของโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน ODE23 ในโปรแกรม Matlab และผลที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ (Closed Form Solution)

เมื่อเปรียบเทียบค่าการกระตุ้นสูงสุด (Peak Response) ของโครงสร้างทั้ง 3 วิธี จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1 พบว่า มีความแตกต่างของผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีทั้งสาม แต่ก็เป็นค่าที่ค่อนข้างน้อย ซึ่งอาจจะเป็นผลเนื่องจากการคำนวณเชิงตัวเลขและเนื่องจากแบบจำลองในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน อาทิเช่น สำหรับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ได้สมมติให้ค่าความเร่งระหว่าง 2 ช่วง แปรผันโดยตรงกับความเร่งทั้งสองจุดนั้น แต่ในขณะที่ฟังก์ชัน ODE23 ในโปรแกรม Matlab ไม่ได้สมมติให้ค่าความเร่งระหว่าง 2 ช่วง แปรผันโดยตรง แต่ให้แปรผันเป็นฟังก์ชันที่มีดีกรีสูงกว่า

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบความต่างของการกระตุ้นสูงสุดของโครงสร้างที่คำนวณได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ฟังก์ชัน ODE23 และคำตอบที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์

|                         | Closed Form | ODE23  | Error | Program | Error |
|-------------------------|-------------|--------|-------|---------|-------|
| Maximum Displacement(m) | 7.8828      | 7.6799 | 2.57% | 7.8832  | 0.01% |

อย่างไรก็ตาม ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ค่าช่วงเวลา (Time step,  $\Delta t$ ) นั้นมีผลต่อความแม่นยำของคำตอบ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาถึงค่าช่วงเวลาต่างๆ เพื่อดูว่าค่าช่วงเวลาใดที่เหมาะสมที่จะใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรม ซึ่งผลที่ได้จากวิเคราะห์จะแสดงในกราฟรูปที่ 3.2 และเปรียบเทียบค่าผิดพลาดต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างเมื่อใช้ช่วงเวลา (Time Step) ค่าต่างๆ

หมายเหตุ ใช้ค่า  $\xi_1 = 10\%$  และเวลาในการวิเคราะห์ 70 วินาที

จากผลในตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า เปอร์เซ็นต์ของค่าผิดพลาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ช่วงเวลาเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ค่าช่วงเวลาในช่วง 0.01 – 0.1 จะให้เปอร์เซ็นต์ของค่าผิดพลาดที่มีค่าต่ำและหากพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ก็ไม่มากนัก ดังนั้นจะใช้ค่า  $\Delta t$  เท่ากับ 0.01 และ 0.02 ทั้งนี้จะได้ทำการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมทุกครั้ง เมื่อลักษณะของโครงสร้างหรือแรงที่มากระทำเปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเมื่อใช้ step time ต่างๆ

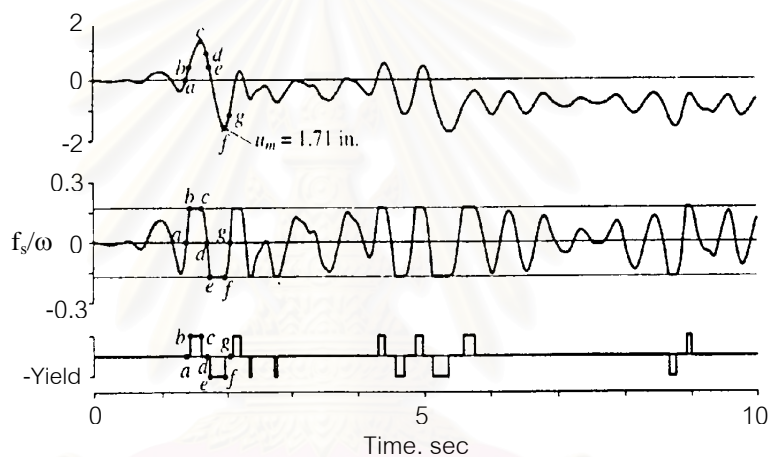
| Time Step | Maximum Displacement | Error(%) |
|-----------|----------------------|----------|
| 0.005     | 1.5781               | 0        |
| 0.01      | 1.5781               | 0        |
| 0.02      | 1.5781               | 0        |
| 0.05      | 1.5780               | -0.00    |
| 0.1       | 1.5775               | -0.04    |
| 0.2       | 1.5750               | -0.20    |

### 3.2 เมื่อโครงสร้างมีพฤติกรรมเลยช่วงอิลาสติก

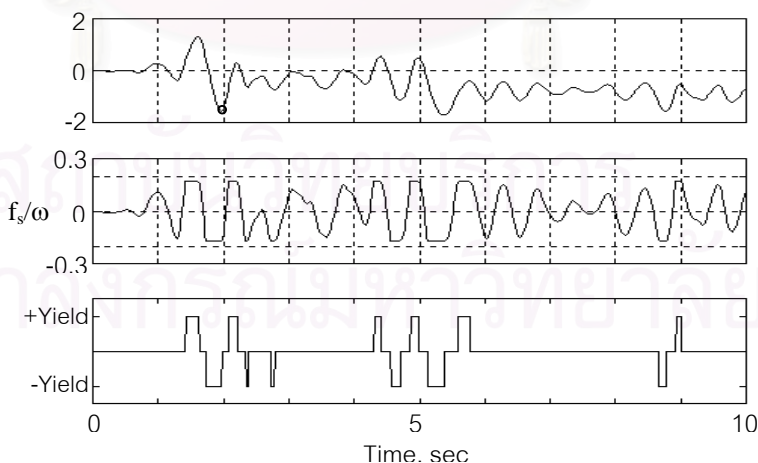
#### 3.2.1 เปรียบเทียบกับการตอบสนองของโครงสร้างที่มีผลอยู่ในเอกสารทางวิชาการ

ตัวอย่างที่ 1 เปรียบเทียบการตอบสนองของโครงสร้างกับผลการตอบสนองที่มีในหนังสือ “Dynamic of Structures” ของ Chopra. (1995) โดยโครงสร้างเป็นระบบ SDOF ที่มีน้ำหนัก W คาบการสั่นไหว 0.5 วินาที ไม่มีค่าความหน่วง ( $\xi=0$ ) และมีพฤติกรรมแบบอิลาสโตพลาสติกที่มีค่า Normalized Yield Strength,  $\bar{f}_y$  เท่ากับ 0.125 ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว El Centro เมื่อปี 1940 โดยหากกำหนดให้โครงสร้างมีพฤติกรรมอิลาสติกจะได้ค่า  $f_0 = 1.37W$  ดังนั้น  $f_y = 0.171W$  เป็นดังในกราฟรูปที่ (3.3ก) ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในโปรแกรมมีค่าดังนี้

$$W = 1 \text{ N.}, m = 1/9.81 \text{ kg.}, k = (2\pi)^2 m / (0.5)^2 = 16.1 \text{ N/m.}, \xi = 0, f_y = 0.171 \text{ N.}$$



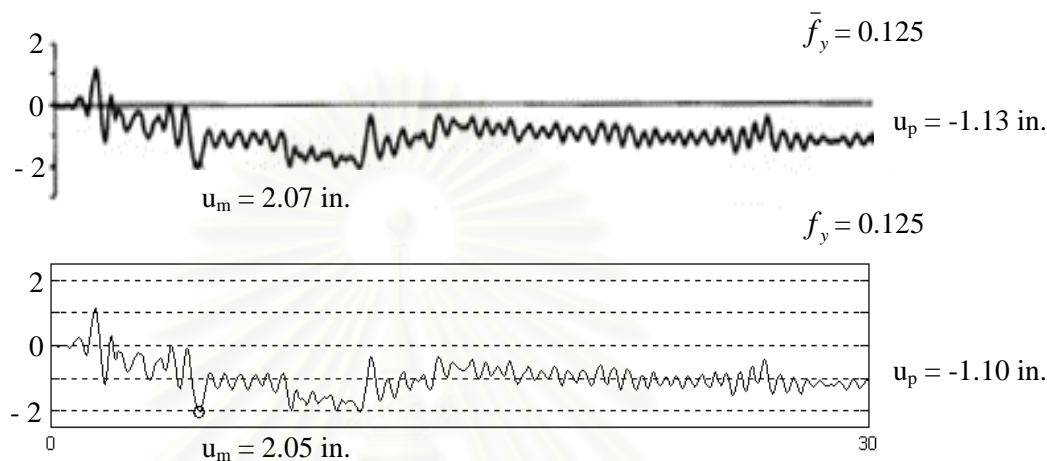
(ก) : การกระจัดของโครงสร้างที่เวลาต่างๆที่แสดงในหนังสือของ Chopra 1995 หน้า 252



(ข) : แสดงการกระจัดของโครงสร้างที่เวลาต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

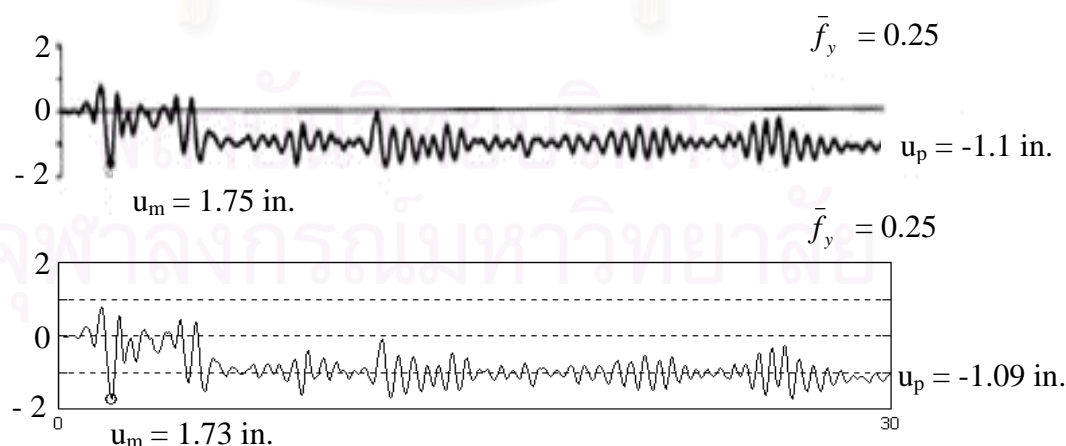
รูปที่ 3.3 : เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมและค่าที่แสดงใน Chopra และผลของการกระจัดของโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจะเป็นดังแสดงในรูปที่ (3.3ข)

ตัวอย่างที่ 2 เปรียบเทียบการตอบสนองของโครงสร้างระบบ SDOF ที่มีพารามิเตอร์และพฤติกรรมเช่นเดียวกับโครงสร้างในตัวอย่างที่ 1 และภายใต้แรงแผ่นดินไหวเดียวกัน แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ ( $\zeta = 5\%$ ) และมีค่า Normalized Yield Strength,  $\bar{f}_y$  เท่ากับ 0.125 ดังนั้น  $f_y = 0.125 f_0$  โดย  $f_0 = W \cdot u_0 \cdot \omega^2 / g = 0.92$  เพราะฉะนั้น  $f_y = 0.125 \times 0.92$



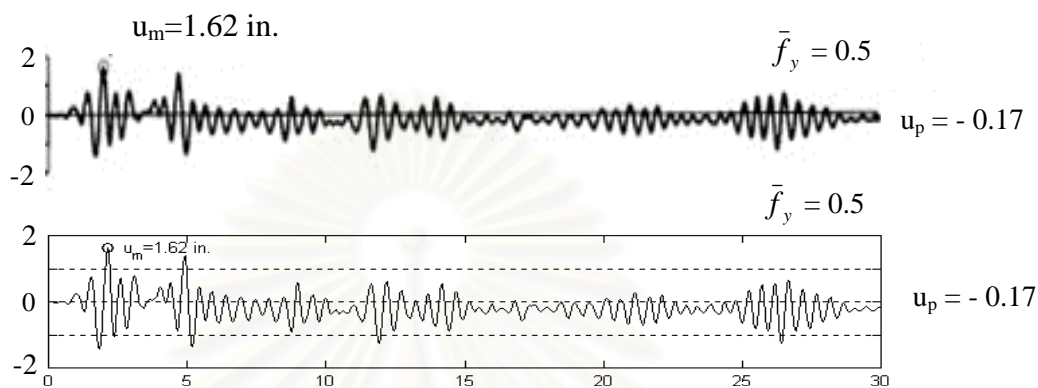
รูปที่ 3.4 : เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมและค่าที่แสดงใน Chopra กรณี  $\bar{f}_y$  เท่ากับ 0.125 และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างที่ 3 เปรียบเทียบการตอบสนองของโครงสร้างระบบ SDOF ที่มีพารามิเตอร์และพฤติกรรมเช่นเดียวกับโครงสร้างในตัวอย่างที่ 1 แต่โครงสร้างมีค่า Normalized Yield Strength,  $\bar{f}_y$  เท่ากับ 0.25 ดังนั้นค่า  $f_y = 0.25 f_0$  และจากการวิเคราะห์โครงสร้างอิลาสติกจะได้  $f_0 = W \cdot u_0 \cdot \omega^2 / g = 0.92$  เพราะฉะนั้น  $f_y = 0.25 \times 0.92$



รูปที่ 3.5 : เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมและค่าที่แสดงใน Chopra กรณี  $\bar{f}_y$  เท่ากับ 0.25

ตัวอย่างที่ 4 เปรียบเทียบการตอบสนองของโครงสร้างระบบ SDOF ที่มีพารามิเตอร์และพฤติกรรมเช่นเดียวกับโครงสร้างในตัวอย่างที่ 2 แต่มีค่า Normalized Yield Strength,  $\bar{f}_y$  เท่ากับ 0.5 ดังนั้น ค่า  $f_y = 0.5f_0$ , จากการวิเคราะห์โครงสร้างอิลาสติกจะได้  $f_0 = W \cdot u_0 \cdot \omega^2 / g = 0.92$  เพราะฉะนั้น  $f_y = 0.5 \times 0.92$



รูปที่ 3.6 : เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมและค่าที่แสดงใน Chopra กรณี  $\bar{f}_y$  เท่ากับ 0.50

จากผลเปรียบเทียบระหว่างกราฟแต่ละคู่ จะพบว่าผลที่ได้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน และให้ค่าการกระจัดที่เวลาต่างๆค่อนข้างตรงกัน จะแตกต่างกันบ้างก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังจะเห็นได้จากค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างมีค่าน้อยมาก

นอกจากนี้ ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในหนังสือของ Clough R.W. and Penzien J. (1993) (ดังแสดงในตารางที่ E7-1 หน้า 131 ในหนังสือ) และ แสดงในตารางที่ 3.4 ตามลำดับ

จากผลในตาราง จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่แสดงในหนังสือ Clough ซึ่งค่อนข้างแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันถึงความน่าเชื่อถือของโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมาที่สามารถใช้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีพฤติกรรมอิลาสโตพลาสติกอื่นๆได้

ตารางที่ 3.3 : Result of Program (Step time = 0.1 sec.)

Nonlinear response analysis **linear acceleration step-by-step method**

Structural Properties : m = 0.1 kips sec<sup>2</sup>/in. , c = 0.2 kips sec./in. , k = 5 kips./in. (total) , fy = 6 kips.

| T<br>sec. | p<br>kips. | u<br>in. | v<br>in./sec. | Fs<br>kips. | a<br>in./sec <sup>2</sup> | Δp<br>kips. | Δp*<br>kips. | K*<br>kips./in. | Δu<br>in. | Δv<br>in./s. |
|-----------|------------|----------|---------------|-------------|---------------------------|-------------|--------------|-----------------|-----------|--------------|
| 0.0       | 0          | 0.000    | 0.000         | 0.000       | 0.000                     | 5           | 5.000        | 71              | 0.070     | 2.113        |
| 0.1       | 5          | 0.070    | 2.113         | 0.352       | 42.254                    | 3           | 30.042       | 71              | 0.423     | 4.243        |
| 0.2       | 8          | 0.494    | 6.356         | 2.468       | 42.611                    | -1          | 54.158       | 71              | 0.763     | 1.686        |
| 0.3       | 7          | 1.256    | 8.041         | 6.000       | -6.083                    | -2          | 49.188       | 66              | 0.745     | -1.462       |
| 0.4       | 5          | 2.002    | 6.579         | 6.000       | -23.159                   | -2          | 34.244       | 66              | 0.519     | -3.014       |
| 0.5       | 3          | 2.520    | 3.565         | 6.000       | -37.130                   | -1          | 11.018       | 66              | 0.167     | -3.830       |
| 0.6       | 2          | 2.687    | -0.265        | 6.000       | -39.470                   | -1          | -14.985      | 71              | -0.211    | -3.563       |
| 0.7       | 1          | 2.476    | -3.828        | 4.945       | -31.791                   | -1          | -36.121      | 71              | -0.509    | -2.188       |
| 0.8       | 0          | 1.968    | -6.017        | 2.401       | -11.977                   | 0           | -43.422      | 71              | -0.612    | 0.301        |
| 0.9       | 0          | 1.356    | -5.715        | -0.657      | 17.999                    | 0           | -32.142      | 71              | -0.453    | 2.665        |

ตารางที่ 3.4 : Result from Clough (1993) Table E7-1, p.131

Nonlinear response analysis **linear acceleration step-by-step method**

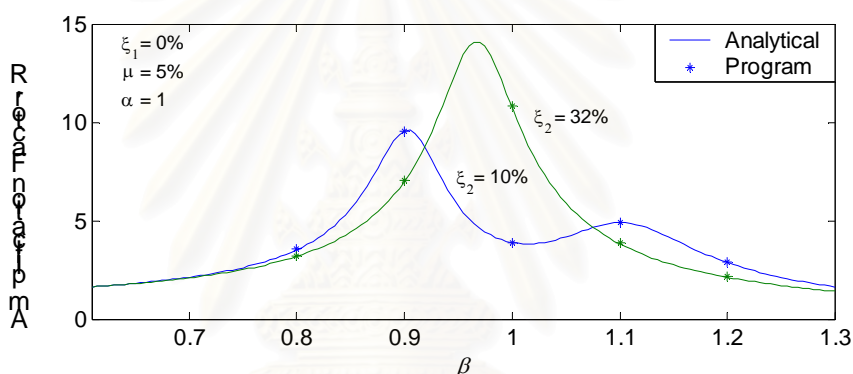
Structural Properties :  $m = 0.1 \text{ kips sec}^2/\text{in.}$  ,  $c = 0.2 \text{ kips sec./in.}$  ,  $k = 5 \text{ kips. / in. (total)}$  ,  $f_y = 6 \text{ kips.}$

| T<br>sec. | p<br>kips. | u<br>in. | v<br>in./sec. | Fs<br>kips. | a<br>in./sec <sup>2</sup> | $\Delta p$<br>kips. | $\Delta p^*$<br>kips. | K*<br>kips./in. | $\Delta u$<br>in. | $\Delta v$<br>in./s. |
|-----------|------------|----------|---------------|-------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|----------------------|
| 0.0       | 0          | 0        | 0             | 0           | 0                         | 5                   | 5                     | 71              | 0.070             | 2.11                 |
| 0.1       | 5          | 0.070    | 2.11          | 0.35        | 42.3                      | 3                   | 30.04                 | 71              | 0.423             | 4.24                 |
| 0.2       | 8          | 0.493    | 6.35          | 2.46        | 42.7                      | -1                  | 54.15                 | 71              | 0.763             | 1.68                 |
| 0.3       | 7          | 1.256    | 8.03          | 6           | -6.1                      | -2                  | 49.13                 | 66              | 0.744             | -1.45                |
| 0.4       | 5          | 2.000    | 6.58          | 6           | -23.2                     | -2                  | 34.24                 | 66              | 0.519             | -3.01                |
| 0.5       | 3          | 2.519    | 3.57          | 6           | -37.1                     | -1                  | 11.06                 | 66              | 0.168             | -3.85                |
| 0.6       | 2          | 2.687    | -0.28         | 6           | -39.4                     | -1                  | -15.07                | 71              | -0.212            | -3.55                |
| 0.7       | 1          | 2.475    | -3.83         | 4.94        | -31.7                     | -1                  | -36.10                | 71              | -0.508            | -2.17                |
| 0.8       | 0          | 1.967    | -6.00         | 2.40        | -12.0                     | 0                   | -43.32                | 71              | -0.610            | 0.30                 |
| 0.9       | 0          | 1.357    | -5.70         | -0.65       | 17.9                      | 0                   | -32.07                | 71              | -0.452            | 2.64                 |



### 3.3 เมื่อติดตามห้วงปรับค่าเข้ากับโครงสร้าง

พิจารณาค่าเฟคเตอร์การขยายของขนาดแอมพลิจูดการกระจัดของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวเทียบกับการกระจัดสถิตย์ของโครงสร้าง โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเทียบกับการตอบสนองของโครงสร้างที่เป็นสมการคณิตศาสตร์ (Closed Form Solution) ที่เสนอโดย Den Hartog ในหนังสือของ Soong T.T. และ Dargush G.F., 1997. โดยโครงสร้างมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักของมวลห้วงปรับค่าเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของโครงสร้างและปรับให้ความถี่ของมวลห้วงปรับค่าเท่ากับความถี่ของโครงสร้าง ภายใต้แรงแบบฮาร์โมนิกไซน์ความถี่ค่าต่างๆที่กระทำต่อโครงสร้าง ซึ่งผลที่ได้จะเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยเปรียบเทียบที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลห้วงปรับค่าเท่ากับ 0.10 และ 0.32 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบค่าเฟคเตอร์การขยายของขนาดแอมพลิจูดที่สภาวะคงตัวที่เทียบกับการกระจัดสถิตย์ของโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นและค่าที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์

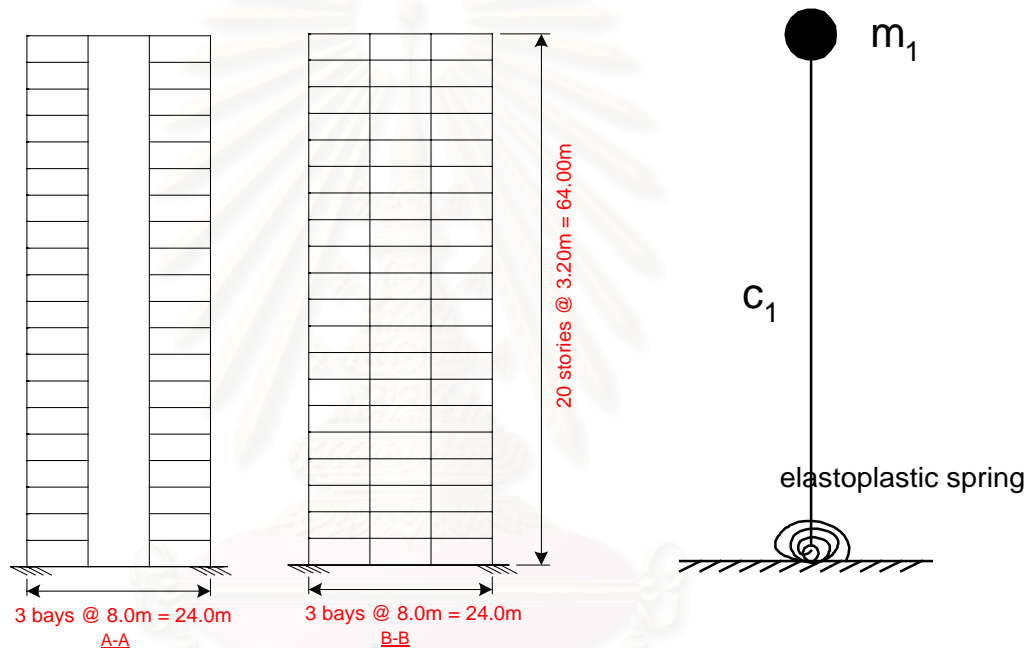
พบว่า ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมให้ค่าตรงกับค่าที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นยืนยันได้ว่าโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องแม่นยำ สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่ติดตามห้วงปรับค่าอื่นๆได้

## บทที่ 4

### อาคารตัวอย่างและแบบจำลองโครงสร้างทางพลวัต

#### 4.1 อาคารตัวอย่าง

โครงสร้างอาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 20 ชั้น ที่ได้ทำการออกแบบตามข้อกำหนดของสถาบันคอนกรีตแห่งสหรัฐอเมริกา ปี 1995 โดยไม่ได้คำนึงถึงผลเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว โดยรูปแบบและรูปด้านของอาคารตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.1



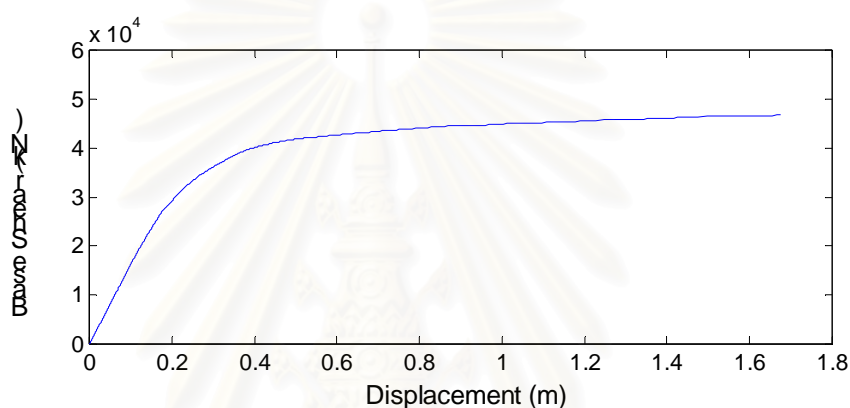
รูปที่ 4.1 (ด้านซ้าย) รูปแบบและรูปด้านของอาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา  
(ด้านขวา) โครงสร้างจำลอง

#### 4.2 การวิเคราะห์ด้วยแรงดันด้านข้าง (Push Over Nonlinear Analysis)

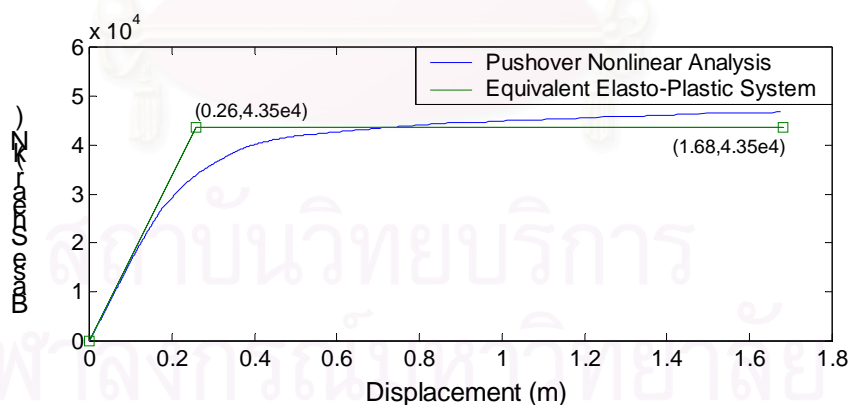
การวิเคราะห์ด้วยแรงดันด้านข้างเป็นการวิเคราะห์เพื่ออธิบายพฤติกรรมการตอบสนองและกำลังต้านทานของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำด้านข้าง โดยทั่วไปโครงสร้างจะสั่นไหวในโหมดที่ 1 (First Mode) ซึ่งเป็นโหมดที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติ (Fundamental Frequency) ของโครงสร้างเป็นหลัก การกระจายการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างมีลักษณะคล้ายรูปสามเหลี่ยมหัวกลับ (Inverted triangular distribution) ดังนั้นในการวิเคราะห์นี้จึงใช้แรงกระทำด้านข้างกระจายตามลักษณะดังกล่าวกระทำกับโครงสร้าง เพื่อให้มีสภาพที่ใกล้เคียงกับ

การเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างให้มากที่สุด นอกจากนี้ยังทั้งคิดผลของแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะที่เกิดขึ้นจริง แต่ไม่คิดผลของ  $P-\delta$  ในการคำนวณ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่ยอดของอาคารตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.2 ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แรงดันด้านข้างที่กระจายเป็นรูปสามเหลี่ยมหัวกลับกระทำแบบสถิตย์ต่อโครงสร้างและเพิ่มขนาดของแรงกระทำให้มีค่ามากขึ้นเพื่อดันให้โครงสร้างพังในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีแรงดันด้านข้างกระทำโดยใช้โปรแกรม IDARC\_5 [Valles และคณะ, 1996] โดยโปรแกรมได้กำหนดเงื่อนไขการพังของโครงสร้างไว้คือ โครงสร้างพังก็ต่อเมื่อค่าดัชนีความเสียหายในระดับชั้นมีค่าเท่ากับ 0.99 หรือมากกว่า



รูปที่ 4.2 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่ยอดของอาคารตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์ภายใต้แรงดันด้านข้างกระจายแบบสามเหลี่ยมหัวกลับกระทำต่อโครงสร้าง



รูปที่ 4.3 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่ยอดของอาคารตัวอย่างที่จำลองให้มีพฤติกรรมแบบอีลาสติก-พลาสติกที่มีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่ยอดของอาคารตัวอย่างข้างต้น สามารถจำลองพฤติกรรมการตอบสนองและกำลังรับแรงด้านข้างของโครงสร้างให้มีพฤติกรรมแบบอีลาสโตพลาสติกที่มีพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่

ยอดของโครงสร้างอิลาสโตพลาสติก มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์เดียวกันของอาคารตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แรงดันด้านข้างกระทำ โดยความชันของกราฟความสัมพันธ์ในช่วงอิลาสติกมีค่าเท่ากับความชันเริ่มต้นของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แรงดันด้านข้างและความชันมีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงพลาสติก นอกจากนี้กำหนดให้การกระจัดสูงสุดของโครงสร้างจำลองมีค่าเท่ากับการกระจัดสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แรงดันด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 4.3

#### 4.3 การจำลองอาคารตัวอย่าง

เนื่องจากการศึกษานี้ สนใจพิจารณาเฉพาะการเคลื่อนตัวทางข้างที่ยอดของอาคารตัวอย่างภายใต้แรงเนื่องจากการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง ดังนั้นจึงสามารถแทนการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างด้วยการวิเคราะห์อาคารจำลองที่มีระดับชั้นความอิสระเท่ากับ 1 (Equivalent SDOF) ในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนตัวทางข้างของอาคารตัวอย่าง ทั้งนี้อาคารตัวอย่างมีรูปแบบการสั่นไหวภายใต้แรงเนื่องจากการเคลื่อนตัวที่ฐานในโหมดที่ 1 เป็นหลัก โดยความสูงของโครงสร้างจำลองมีค่าเท่ากับ ความสูงของอาคารตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนตำแหน่งที่ยอดของโครงสร้าง โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงสร้างจำลองสามารถหาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่ยอดของอาคารตัวอย่างดังรูปที่ 4.3 โดยมีหลักการดังนี้

จากสมการการเคลื่อนที่ของระบบโครงสร้างที่มีหลายระดับความอิสระดังสมการที่ (4.1)

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{Q} = -\mathbf{M}\{1\}\ddot{u}_g \quad (4.1)$$

|        |                                |   |
|--------|--------------------------------|---|
| โดยที่ | <b>M</b>                       | คือ เมตริกซ์มวลของอาคารตัวอย่าง                                 |
|        | <b>C</b>                       | คือ เมตริกซ์ความหน่วงของอาคารตัวอย่าง                           |
|        | <b>K</b>                       | คือ เมตริกซ์สติฟเนสของอาคารตัวอย่างในช่วงอิลาสติก               |
|        | <b>{Q}</b>                     | คือ เวกเตอร์ของแรงต้านทานภายในสปริงที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่าง |
|        | <b>U</b>                       | คือ เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ของโครงสร้าง               |
|        | <b>{1}</b>                     | คือ เวกเตอร์ 1  |
|        | <b><math>\ddot{u}_g</math></b> | คือ ความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง                  |

โดยหลักการ สามารถสมมติให้การเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างที่ชั้นใดๆแทนด้วยรูปแบบการเปลี่ยนตำแหน่ง  $\{\phi\}$  คูณกับการกระจัดที่ยอดของอาคารตัวอย่างดังนี้

$$U = \{\phi\} \cdot u_t \quad (4.2)$$

โดย  $\{\phi\}$  คือ เวกเตอร์แสดงรูปแบบการกระจัด (mode shape) ของอาคารตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้แรงดันด้านข้าง

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในสมการที่ (4.1) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\mathbf{M}\{\phi\}\ddot{u}_t + \mathbf{C}\{\phi\}\dot{u}_t + \mathbf{Q} = -\mathbf{M}\{1\}\ddot{u}_g \quad (4.3)$$

เมื่อคูณด้วย  $\{\phi\}^T$  โดยตลอดในสมการที่ (4.3) จะได้

$$\{\phi\}^T \mathbf{M}\{\phi\}\ddot{u}_t + \{\phi\}^T \mathbf{C}\{\phi\}\dot{u}_t + \{\phi\}^T \mathbf{Q} = -\{\phi\}^T \mathbf{M}\{1\}\ddot{u}_g \quad (4.4)$$

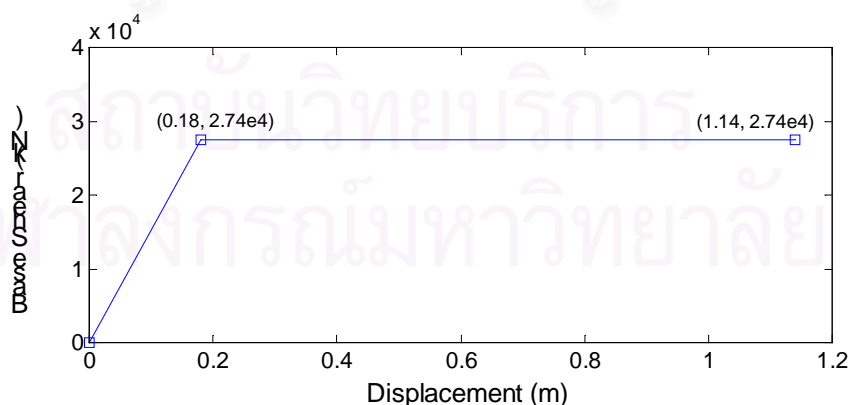
กำหนดให้  $u^* = \frac{\{\phi\}^T \mathbf{M}\{\phi\}}{\{\phi\}^T \mathbf{M}\{1\}} u_t$  คือ การเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างจำลอง

และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโครงสร้างจำลองมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของอาคารตัวอย่างดังนี้

$$m^* = \{\phi\}^T \mathbf{M}\{1\} \quad c^* = \{\phi\}^T \mathbf{C}\{\phi\} \frac{\{\phi\}^T \mathbf{M}\{1\}}{\{\phi\}^T \mathbf{M}\{\phi\}} \quad (4.6)$$

$$q_y^* = \{\phi\}^T Q_y \quad \text{เมื่อ} \quad Q_y = \mathbf{K}U_y$$

โดย ค่า  $\{\phi\}$  และความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่ยอดของโครงสร้างสามารถหาได้จาก การวิเคราะห์แบบไร้เชิงเส้นโดยมีแรงดันด้านข้างกระทำแบบสถิตย์ (Nonlinear Incremental Static Analysis)



รูปที่ 4.4 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่ยอดของโครงสร้างจำลองที่มีพฤติกรรมแบบอีลาสโตพลาสติกเช่นเดียวกับพฤติกรรมของอาคารตัวอย่าง

ส่วนค่าการกระจัดที่จุดตรวจของโครงสร้างจำลอง สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$u_y^* = \frac{\{\phi\}^T \mathbf{M} \{\phi\}}{\{\phi\}^T \mathbf{M} \{1\}} u_y \quad (4.7)$$

ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการกระจัดที่ยอดของโครงสร้างจำลองจะเป็นดังในรูปที่ 4.4

#### 4.4 พารามิเตอร์ของโครงสร้างจำลอง

ดังนั้นสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ มวล สติฟเนส ความหน่วง กำลังที่จุดครากและความเหนียว (Ductility) ของโครงสร้างจำลองจากคุณสมบัติของอาคารตัวอย่างได้ดังนี้

$$m^* = \{\phi\}^T \mathbf{M} \{1\} = 1.79 \times 10^7 \text{ kg}$$

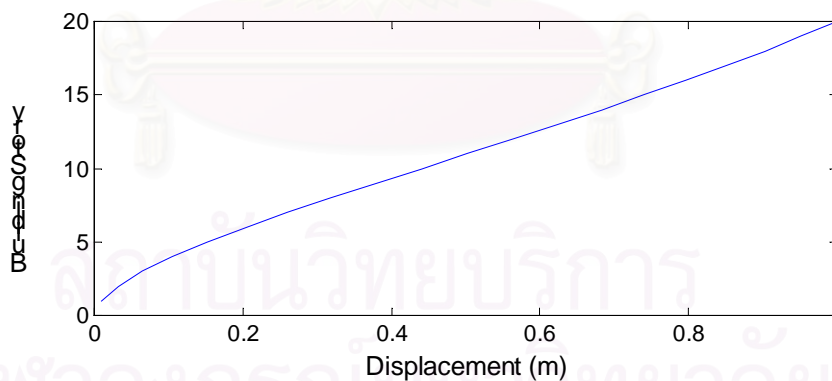
$$c^* = \{\phi\}^T \mathbf{C} \{\phi\} \frac{\{\phi\}^T \mathbf{M} \{1\}}{\{\phi\}^T \mathbf{M} \{\phi\}} = 2.11 \times 10^6 \text{ N.m/s}$$

$$K = \omega_1^2 M \quad k = \omega_1^2 m$$

$$F_y = q_y^* = \{\phi\}^T Q_y = 2.74 \times 10^7 \text{ N. where } Q_y = \mathbf{K} u_y$$

$$\mu_u = 6.5$$

และ  $\{\phi\}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้แรงดันด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 : กราฟแสดงรูปแบบการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างภายใต้แรงดันด้านข้าง

#### 4.5 ค่าดัชนีความเสียหาย

ค่าดัชนีความเสียหายของอาคารตัวอย่างมีความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$DI = \frac{u_m}{u_{ult}} + \beta \frac{\int dE}{Q_y \cdot u_{ult}} \quad (4.8)$$

และค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างจำลองเป็นดังนี้

$$DI = \frac{u_m^*}{u_{ult}^*} + \beta \frac{\int dE^*}{q_y^* \cdot u_{ult}^*} \quad (4.9)$$

เมื่อแทนค่า  $u_m^*$ ,  $u_{ult}^*$ ,  $q_y^*$  ตามความสัมพันธ์ดังในสมการที่ (4.5) และ (4.6) ตามลำดับ และค่า  $\int dE^*$  เท่ากับ  $q_y^* \cdot (u_{ult}^* - u_y^*)$  ลงในสมการที่ (4.9) แล้วทำการจัดรูปเสียใหม่ พบว่าค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างจำลองมีค่าเท่ากับดัชนีความเสียหายของอาคารตัวอย่าง ดังนั้นสามารถแทนค่าดัชนีความเสียหายของอาคารตัวอย่างได้ด้วยค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างจำลอง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### การตอบสนองของโครงสร้างในช่วงอิลาสติกและอินอิลาสติก

#### 5.1 การตอบสนองของโครงสร้างอิลาสติก

##### 5.1.1 การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้การสั่นที่ฐานแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่พ้องกับความถี่ของโครงสร้าง (Resonance)

จากสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง  $m_1\ddot{u}_1 + c_1\dot{u}_1 + k_1u_1 = -m_1\ddot{u}_g$  โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆแสดงในส่วนของการจำลองโครงสร้างข้างต้น เมื่อความถี่ของการเคลื่อนที่ฐานของโครงสร้างเป็นแบบฮาร์โมนิกที่มีแอมพลิจูด  $P_0$  สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$m_1\ddot{u}_1 + c_1\dot{u}_1 + k_1u_1 = -m_1P_0 \sin(\omega_1 t) \quad (5.1)$$

โดยที่  $\omega_1 = \sqrt{k_1/m_1}$  ซึ่งสามารถหาคำตอบทั่วไปและคำตอบที่สภาวะคงตัวคงของสมการได้ ตามลำดับดังต่อไปนี้

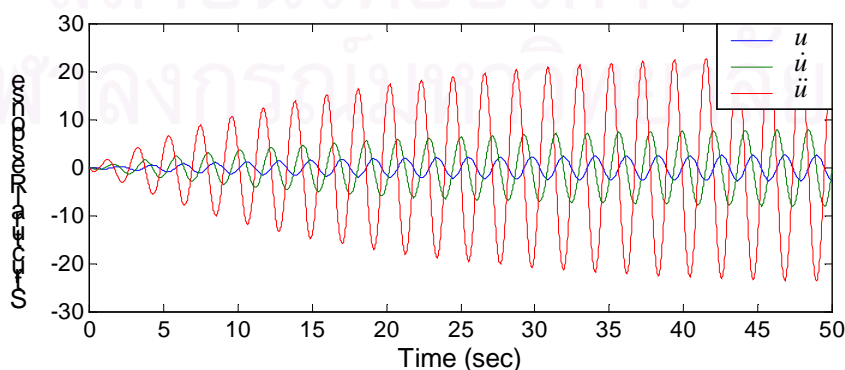
$$u_1 = e^{-\xi\omega_1 t} \left( \frac{-m_1P_0}{k_1} \cdot \frac{1}{2\xi} \cos(\omega_D t) + \frac{-m_1P_0}{k_1} \cdot \frac{1}{2\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_D t) \right) \quad (5.2)$$

$$u_{1s} = - \left( \frac{-m_1P_0}{k_1} \cdot \frac{1}{2\xi} \cdot \cos(\omega_D t) \right)$$

หรือคำตอบของสมการคือ

$$u(t) = \frac{-m_1P_0}{k_1} \cdot \frac{1}{2\xi_1} \cdot \left[ e^{-\xi_1\omega_1 t} \left( \cos(\omega_D t) + \frac{\xi_1}{\sqrt{1-\xi_1^2}} \sin(\omega_D t) \right) - \cos(\omega_D t) \right] \quad (5.3)$$

และดังในรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด ความเร็วและความเร่งของโครงสร้างที่เวลาใดๆ



รูปที่ 5.1 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด ความเร็วและความเร่งของโครงสร้างอิลาสติกที่เวลาใดๆ

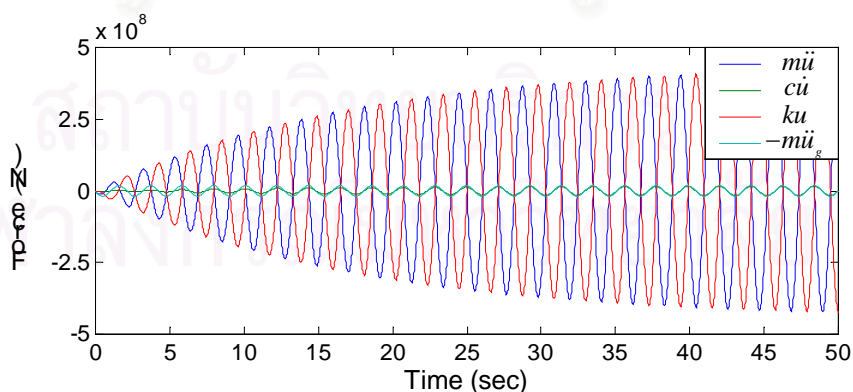


นอกจากนี้ ความเร็วและความเร่งที่สภาวะคงตัวของการกระจัดของโครงสร้างสามารถหาได้จากการดิฟเฟอเรนเชียลครั้งที่ 1 และ 2 ของการกระจัดของโครงสร้าง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\dot{u}_{1s} = \left( \frac{-m_1 P_0}{k_1} \cdot \frac{\omega_D}{2\xi} \cdot \sin(\omega_D t) \right) \quad (5.4)$$

$$\ddot{u}_{1s} = \left( \frac{-m_1 P_0}{k_1} \cdot \frac{\omega_D^2}{2\xi} \cdot \cos(\omega_D t) \right)$$

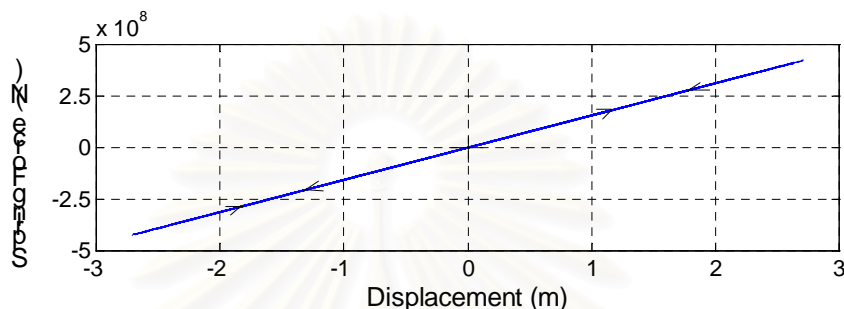
จากความสัมพันธ์และกราฟที่แสดงข้างต้น ซึ่งให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด ความเร็ว และความเร่ง สามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชันฮาร์โมนิกมาตรฐานทั่วไป แอมพลิจูดของการกระจัดจะมีค่าเป็น  $m_1 / (2 \cdot k_1 \cdot \xi_1)$  เท่าของแอมพลิจูดของความเร่งของการสั่นที่ฐาน โดยถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นเมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่าน้อยเนื่องจากการสั่นพ้องและมีเฟสของการกระจัดนำหน้าเฟสของความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานประมาณ 90 องศา ส่วนความเร็วสัมพันธ์จะมีแอมพลิจูดเป็น  $\omega_1$  เท่าของแอมพลิจูดของการกระจัดและมีเฟสนำหน้าเฟสของการกระจัด 90 องศา ในขณะที่ความเร่งสัมพันธ์จะมีค่าแอมพลิจูดเป็น  $\omega_1^2$  เท่าของแอมพลิจูดของการกระจัดและมีเฟสนำหน้าการกระจัดถึง 180 องศา (เฟสตรงกันข้ามกับการกระจัด) หรือความเร่งมีแอมพลิจูดเป็น  $\omega_1$  เท่าของแอมพลิจูดของความเร็วและเฟสของความเร่งสัมพันธ์จะนำเฟสของความเร็ว 90 องศา นอกจากนี้ หากพิจารณาแรงในแต่ละพจน์ในสมการการเคลื่อนที่ จะสังเกตเห็นว่ากรณีที่เกิดการสั่นพ้อง แรงเฉื่อยจะหักล้างกับแรงต้านทานในสปริง ดังนั้นแรงภายนอกที่กระทำจะเท่ากับแรงหน่วงดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 : แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเทอมต่างๆในสมการการเคลื่อนที่ที่เวลาต่างๆ

จากกราฟในรูปที่ 5.3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในสปริงและการกระจัดของโครงสร้าง ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ

ค่าสถิติของโครงสร้างและค่าแรงต้านทานภายในสปริงของโครงสร้างที่การกระทำใดๆเท่ากับ ผลคูณของค่าสถิติของโครงสร้างและการกระทำที่เวลานั้นๆ โดยโครงสร้างจะสั่นรอบจุดสมดุลเดิมของโครงสร้าง ซึ่งก็คือจุดที่มีการกระทำเท่ากับศูนย์ แรงต้านทานภายในสปริงเท่ากับศูนย์ เนื่องจากไม่มีการครากหรือเกิดความเสียหายใดๆขึ้นกับโครงสร้างทำให้ไม่เกิดการกระจัดถาวร (Permanent Displacement) เหมือนในกรณีที่โครงสร้างมีพฤติกรรมแบบอินอีลาสติกดังที่จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป



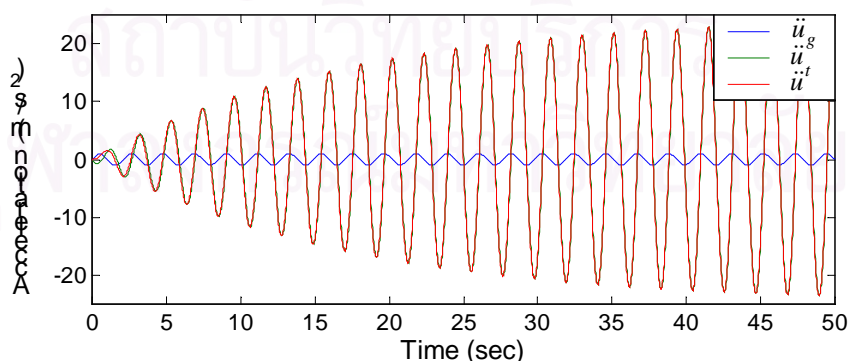
รูปที่ 5.3 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในสปริงที่การกระทำใดๆ

### 5.1.2 ความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้าง

ความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างสามารถหาได้จากผลรวมของความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างและความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.4 แอมพลิจูดและเฟสของความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างที่สภาวะคงตัว สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$u_s'' = \frac{m_1 P_0}{2\xi_1 k_1} (\cos(\omega_1 t) + P_0 \sin(\omega_1 t)) \quad (5.5)$$

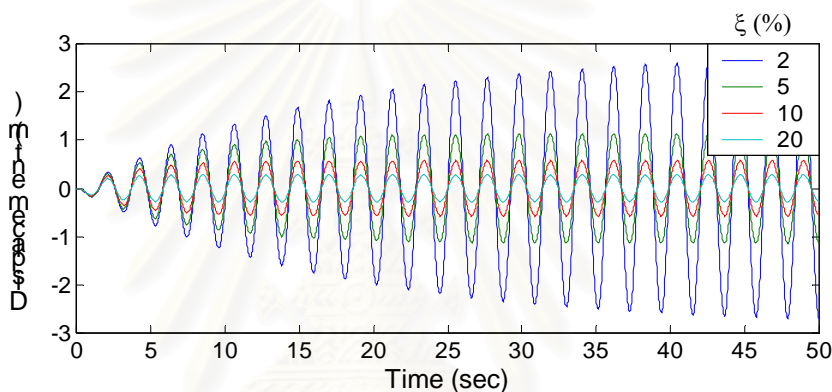
จะเห็นได้ว่า แอมพลิจูดและเฟสของความเร่งสัมบูรณ์ที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างมีขนาดและเฟสใกล้เคียงกับความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้าง ซึ่งอาจใช้แทนกันได้



รูปที่ 5.4 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐาน ความเร่งสัมพัทธ์ และความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างที่เวลาใดๆ

### 5.1.3 สัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้าง

จากสมการที่แสดงการกระจัดของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวชี้ให้เห็นว่า การกระจัดของโครงสร้างจะแปรผันตรงกับแอมพลิจูดของความเร่งของการสั่นที่ฐานและแปรผกผันกับผลคูณของกำลังสองของความเร่งเชิงมุมและค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้าง ดังนั้นในกรณีที่แอมพลิจูดของความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างมีค่าคงที่ แอมพลิจูดของการสั่นของโครงสร้างจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเป็นสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ที่แสดงถึงผลของการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างให้มีความมากขึ้น ซึ่งมีผลให้การกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างมีค่าลดลง นอกจากนี้การสั่นของโครงสร้างยังคงมีเฟสเช่นเดิม และยังคงล้อมรอบสมดุลย์เดิมเนื่องจากไม่เกิดความเสียหายของโครงสร้าง



รูปที่ 5.5 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่เวลาใดๆ เมื่อ ส.ป.ส. ความหน่วงของโครงสร้าง เท่ากับ 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

### 5.1.4 แอมพลิจูดของความเร่งที่ฐาน

เนื่องจากโครงสร้างเป็นระบบอิลาสติก ดังนั้นคุณสมบัติต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถนำไปใช้ในกรณีที่แอมพลิจูดของการสั่นที่ฐานของโครงสร้างมีค่าเพิ่มสูงขึ้นได้ โดยจะมีอัตราส่วนของการตอบสนองที่เพิ่มขึ้นเท่ากับอัตราส่วนของแอมพลิจูดของความเร่งของการสั่นที่ฐานที่เพิ่มขึ้น

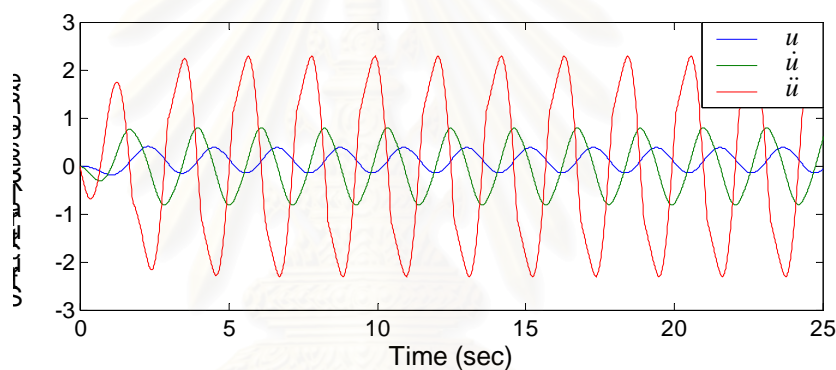
## 5.2 การตอบสนองของโครงสร้างในช่วงอินอีลาสติก

### 5.2.1 การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้การสั่นที่ฐานแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่พ้องกับความถี่ของโครงสร้าง (Resonance)

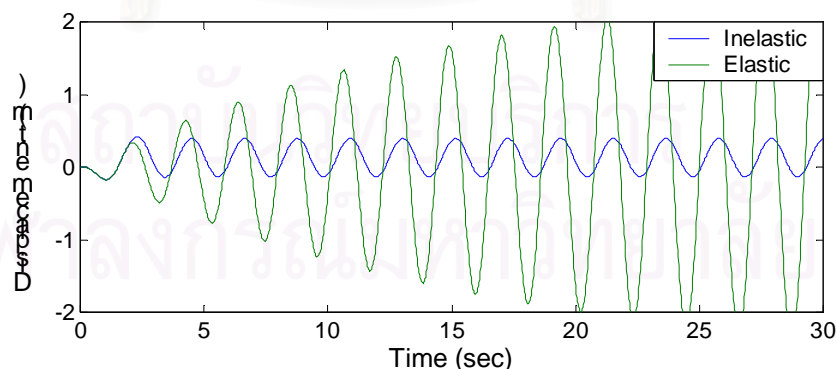
จากสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่มีสภาพอินอีลาสติกที่มีความถี่ของการเคลื่อนที่ฐานของโครงสร้างเป็นฟังก์ชันฮาร์โมนิกที่มีแอมพลิจูด  $P_0$  สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + f_s = -m_1 P_0 \sin(\omega_1 t) \quad (5.6)$$

โดย  $m_1 = 1.79 \times 10^7$  kg,  $c_1 = 2.11 \times 10^6$  N×m/s,  $f_y = 2.74 \times 10^7$  N และ  $P_0 = 1$  สามารถหาคำตอบของสมการการเคลื่อนที่ข้างต้นได้จากการวิเคราะห์หาคำตอบเชิงตัวเลข โดยการกระจายความเร็วและความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 5.6



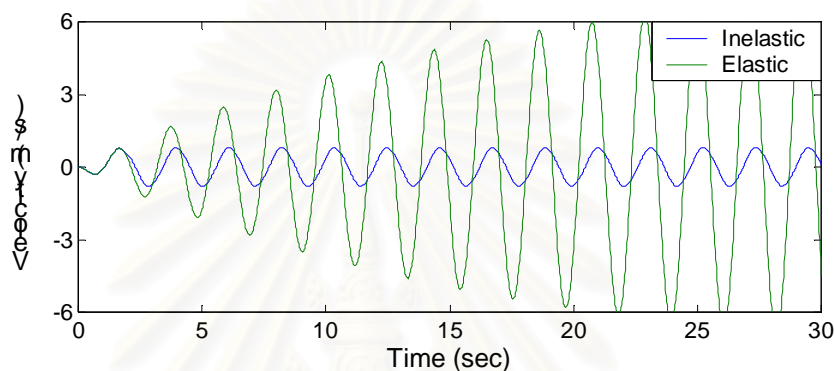
รูปที่ 5.6 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด ความเร็วและความเร่งสัมพันธ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ



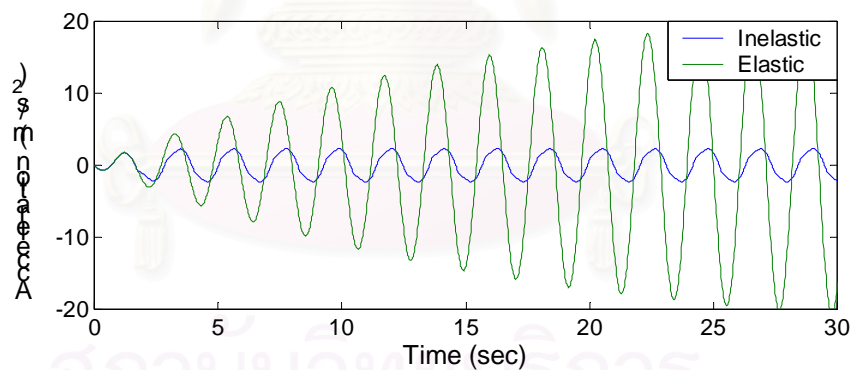
รูปที่ 5.7 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอินอีลาสติกและอีลาสติกที่เวลาใดๆ

กราฟในรูปที่ 5.7 เปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างอินอีลาสติกกับโครงสร้างอีลาสติกที่มีคุณสมบัติของโครงสร้างเหมือนกันและภายใต้แอมพลิจูดของความถี่ของการเคลื่อนที่

ตัวที่ฐานเท่ากัน ซึ่งเห็นได้ว่าแอมพลิจูดการสั่นของระบบอินอีลาสติกจะมีค่าน้อยกว่าแอมพลิจูดการสั่นของระบบอีลาสติกเนื่องจากในระบบอินอีลาสติกจะมีการสลายพลังงานของโครงสร้างออกไปเมื่อเกิดการครากขึ้น (Hysteresis Energy) ภายในชิ้นส่วนของโครงสร้าง ทำให้พลังงานภายในของระบบอินอีลาสติกน้อยกว่าของระบบอีลาสติกที่เวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การสลายพลังงานออกในระบบอินอีลาสติกมีผลทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายขึ้น ดังจะเห็นได้จากการที่ตำแหน่งสมดุทธ์ของการสั่นของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งสมดุทธ์เดิม โดยตำแหน่งสมดุทธ์ใหม่ที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับขนาดและทิศทางของแรงกระทำ



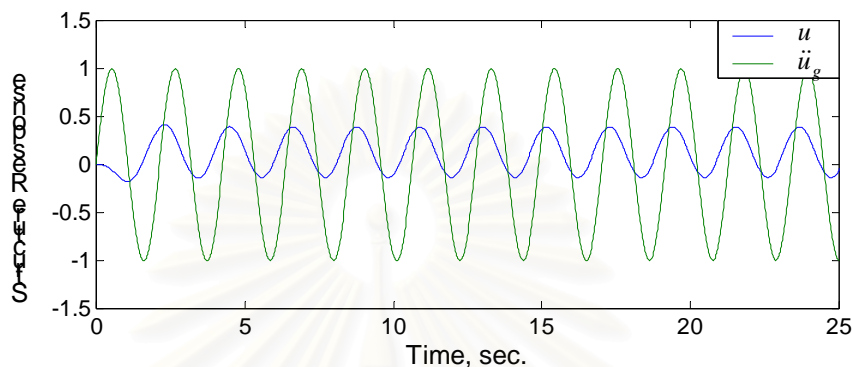
รูปที่ 5.8 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของระบบอินอีลาสติกและอีลาสติกที่เวลาใดๆ



รูปที่ 5.9 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของระบบอินอีลาสติกและอีลาสติกที่เวลาใดๆ

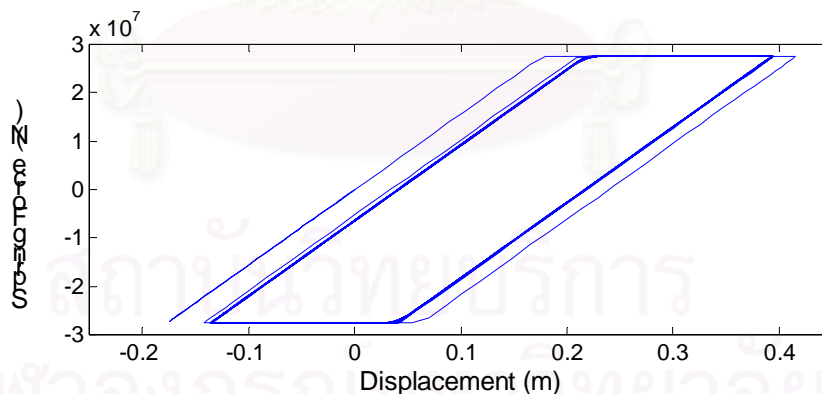
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกราฟความเร็วและความเร่งของระบบอินอีลาสติกและระบบอีลาสติกที่เวลาต่างๆดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ ก็จะได้ผลเช่นเดียวกับกราฟการกระจัด ขนาดของความเร็วและความเร่งจะมีขนาดลดลงเมื่อโครงสร้างเกิดการครากในระบบอินอีลาสติก ทั้งนี้หากพิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างจะพบว่า ความเร็วและความเร่งในสมการการเคลื่อนที่ของระบบอินอีลาสติกมีค่าน้อยกว่ากรณีอีลาสติก เนื่องจากเทอม  $f_s$  ของกรณีอินอีลาสติกมีค่าน้อยกว่าเทอม  $k_1 u_1$  ในกรณีอีลาสติก

ถึงแม้ความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างมีลักษณะเป็นแบบฮาร์โมนิกไซน์ก็ตาม แต่ฟังก์ชันของการกระจัด ความเร็วและความเร่งสัมพัทธ์ที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอีลาสติคจะมีลักษณะไม่เป็นฟังก์ชันฮาร์โมนิกไซน์ที่สมบูรณ์ (ในขณะที่การกระจัด ความเร็วและความเร่งสัมพัทธ์ที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอีลาสติคสามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชันไซน์) โดยความไม่สมบูรณ์ของฟังก์ชันไซน์จะมากขึ้นเมื่อช่วงเวลาที่เกิดการครากเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.10 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพัทธ์ระหว่างเฟสการสั่นของโครงสร้างและเฟสของความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง

นอกจากนี้ การที่โครงสร้างเกิดการครากมีผลทำให้เฟสการสั่นของโครงสร้างต่างกับเฟสของความเร่งที่ฐานไม่เท่ากับ 90 องศา เหมือนเช่นในกรณีอีลาสติคดังแสดงในรูปที่ 5.10 โดยความต่างเฟสจะห่างจากค่า 90 องศามากขึ้น เมื่อช่วงเวลาที่เกิดการครากเพิ่มขึ้น



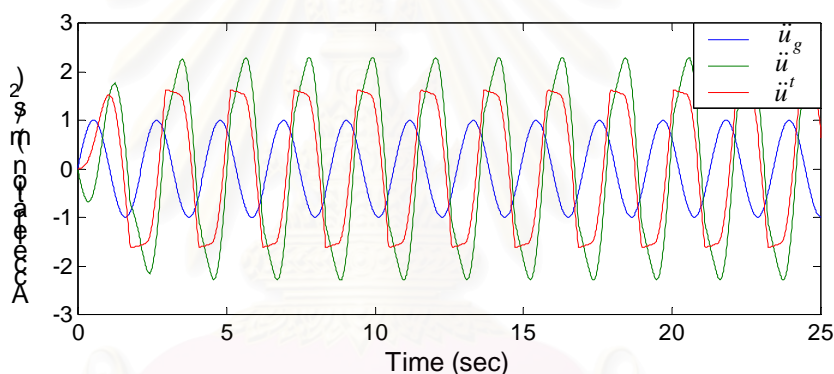
รูปที่ 5.11 : กราฟความสัมพัทธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในสปริงและการกระจัดของโครงสร้างอินอีลาสติค

อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงสภาวะคงตัวคาบการสั่นของโครงสร้างทั้งในกรณีโครงสร้างอีลาสติคและอินอีลาสติคจะมีค่าเท่ากับคาบการสั่นของแรงกระทำหรือคาบของความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง แต่ข้อแตกต่างระหว่างโครงสร้างทั้ง 2 แบบคือ โครงสร้างอินอีลาสติคภายใต้การเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง 1 รอบ โครงสร้างจะเกิดการครากขึ้น 2 ครั้ง โดยในแต่ละครั้ง

จะเกิดขึ้นที่แต่ละด้านของการสั่น ดังนั้นที่สภาวะคงตัว โครงสร้างจะสั่นรอบตำแหน่งสมดุลใหม่ที่เป็นค่าเฉลี่ยระหว่างระยะตัดแกนราบ 2 ค่า ดังแสดงในรูปที่ 5.11

## 5.2.2 ความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้าง

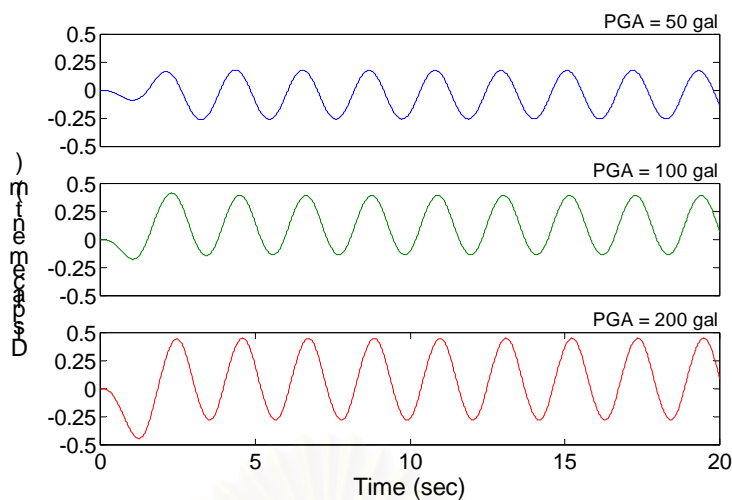
การครากมีผลให้แอมพลิจูดและเฟสของการสั่นของโครงสร้างเทียบกับแอมพลิจูดและเฟสการสั่นของแรงพื้นฐานของโครงสร้างมีลักษณะต่างไปจากกรณีของโครงสร้างอีลาสติก ดังนั้นความเร่งสัมบูรณ์ที่ยอดของโครงสร้างที่ขึ้นกับความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างและความเร่งของการเคลื่อนตัวพื้นฐานของโครงสร้างอินอีลาสติกจึงมีลักษณะที่แตกต่างไปจากความเร่งสัมบูรณ์ของระบบอีลาสติกเช่นกัน โดยความเร่งสัมบูรณ์ของระบบอินอีลาสติกจะมีแอมพลิจูดและเฟสที่แตกต่างจากความเร่งสัมพัทธ์ของระบบอินอีลาสติก เนื่องจากการเสียรูปของฟังก์ชันไซน์และคาบการสั่นที่ยาวขึ้นในช่วงแรกทำให้เฟสต่างระหว่างเฟสของความเร่งสัมพัทธ์และเฟสของความเร่งพื้นฐานไม่เท่ากับ 90 องศาที่สภาวะคงตัวเหมือนในกรณีอีลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 5.12



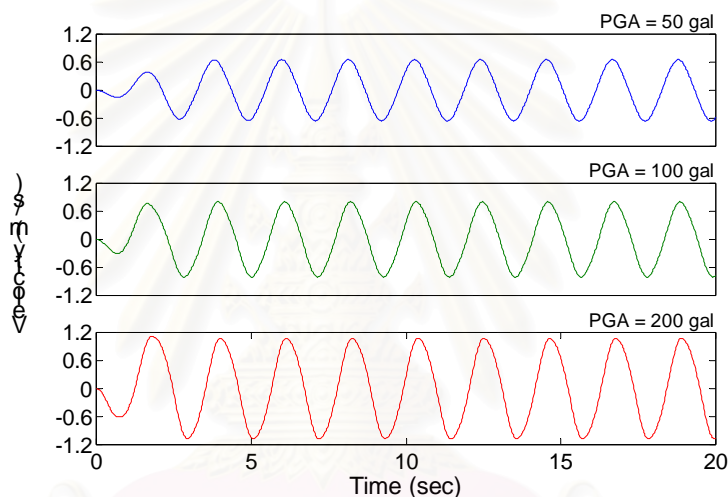
รูปที่ 5.12 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพัทธ์ระหว่างความเร่งของการเคลื่อนตัวพื้นฐานของโครงสร้าง ความเร่งสัมพัทธ์และความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ

## 5.2.3 เมื่อเพิ่มขนาดแอมพลิจูดของความเร่งของการเคลื่อนตัวพื้นฐานของโครงสร้าง

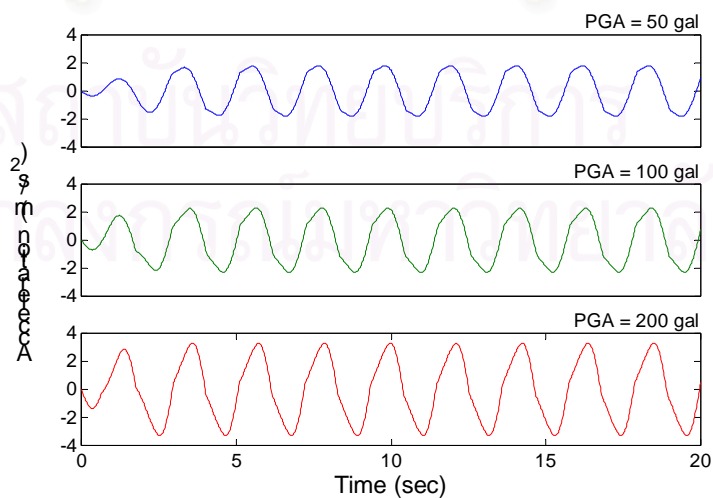
เมื่อแอมพลิจูดของความเร่งพื้นฐานของโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้น แอมพลิจูดของการกระจัด ความเร็วและความเร่งที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอีลาสติกจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.13, 5.14, และ 5.15 โดยอัตราส่วนของการตอบสนองที่เพิ่มขึ้นจะเป็นค่าคงที่ที่น้อยกว่าในกรณีอีลาสติกเมื่ออัตราส่วนของแอมพลิจูดของความเร่งพื้นฐานเพิ่มขึ้นเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 5.16 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดของการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอีลาสติกเทียบกับการกระจัดของโครงสร้างอีลาสติกจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.17 อัตราส่วนของการกระจัดจะมีเท่ากับ 1 เมื่อขนาดของความเร่งของการเคลื่อนตัวพื้นฐานมีค่าต่ำ ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างยังคงสั่นอยู่ในช่วงอีลาสติก เมื่อขนาดของความเร่งของการเคลื่อนตัวพื้นฐานเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของการกระจัดจะมีค่าน้อยกว่า 1 เนื่องจากการกระจัดของโครงสร้างอินอีลาสติกมีขนาดลดลง



รูปที่ 5.13 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอินีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่า 50, 100 และ 200 gal



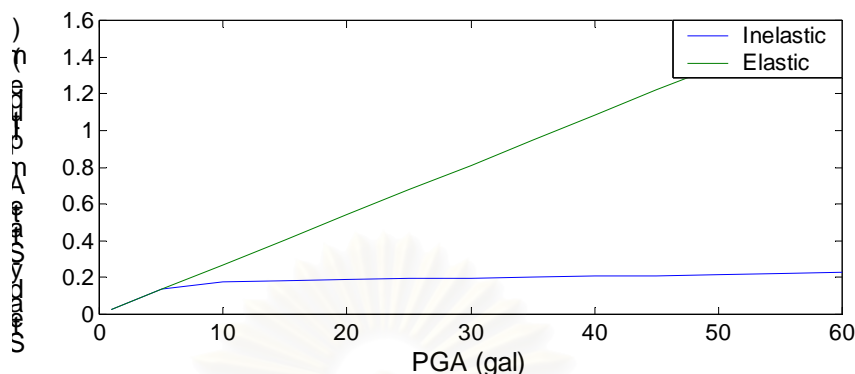
รูปที่ 5.14 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสัมพันธ์ของโครงสร้างอินีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่า 50, 100 และ 200 gal



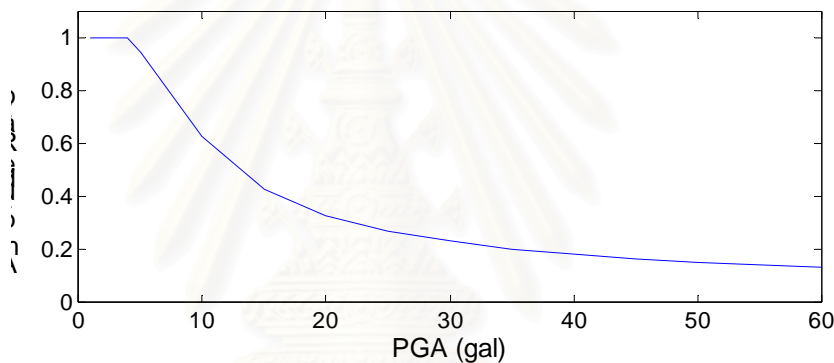
รูปที่ 5.15 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสัมพันธ์ของโครงสร้างอินีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่า 50, 100 และ 200 gal



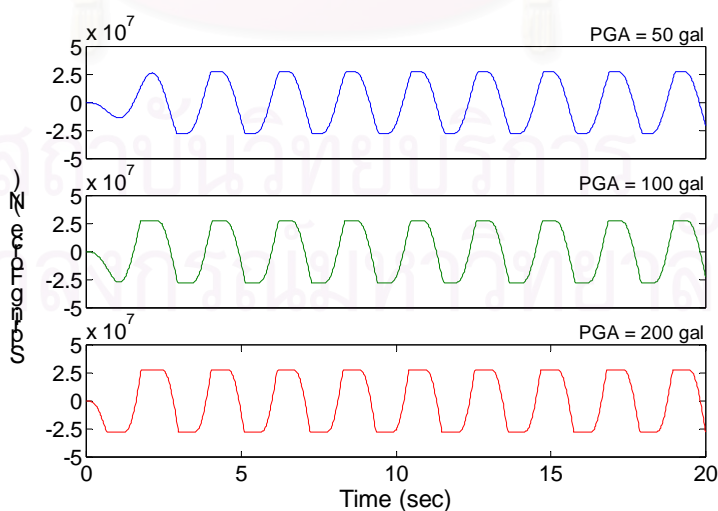
เพราะเกิดการสลายพลังงานหลังเกิดการคราก ซึ่งอัตราส่วนนี้จะมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อขนาดของความเร่งที่ฐานมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.16 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้างอินอีลาสติกและโครงสร้างอีลาสติกที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนที่ตัวที่ฐานของโครงสร้างค่าต่างๆ

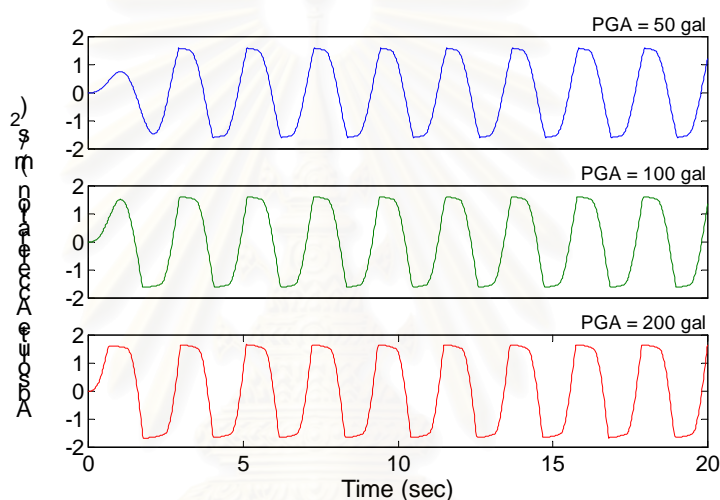


รูปที่ 5.17 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้างอินอีลาสติกและโครงสร้างอีลาสติกที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนที่ตัวที่ฐานของโครงสร้างค่าต่างๆ

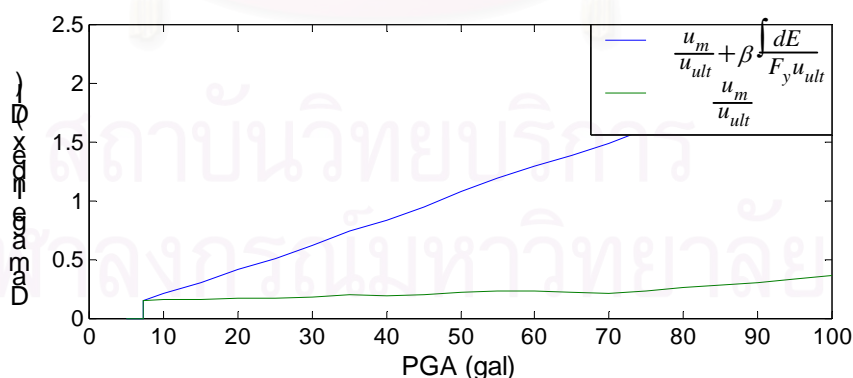


รูปที่ 5.18 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในสปริงของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนที่ตัวที่ฐานมีค่า 50, 100 และ 200 gal

ระยะเวลาที่เกิดการครากในแต่ละรอบการสั่นของโครงสร้างมีมากขึ้นดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในสปริงที่เวลาใดๆ ในรูปที่ 5.18 ที่ช่วงเวลาที่ค่าแรงต้านทานภายในสปริงมีค่าคงที่จะเพิ่มขึ้น การกระจัดถาวรมีแนวโน้มมากขึ้นเช่นกัน (แต่แนวโน้มนี้ไม่จริงเสมอ ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะของแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง) สอดคล้องกับระยะเวลาการครากที่มากขึ้น การเสียรูปของฟังก์ชันความเร่งมีค่ามากขึ้นและเฟสการสั่นแตกต่างจากเฟสของความเร่งพื้นฐานน้อยกว่า 90 องศามากยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างในรูปที่ 5.19 พบว่าแอมพลิจูดและเฟสการสั่นแตกต่างจากความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างมากขึ้น โดยความเร่งสัมบูรณ์มีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับความเร่งสัมพัทธ์เนื่องจากเฟสของความเร่งสัมพัทธ์ต่างกับเฟสของความเร่งพื้นฐานในลักษณะที่หักล้างกัน



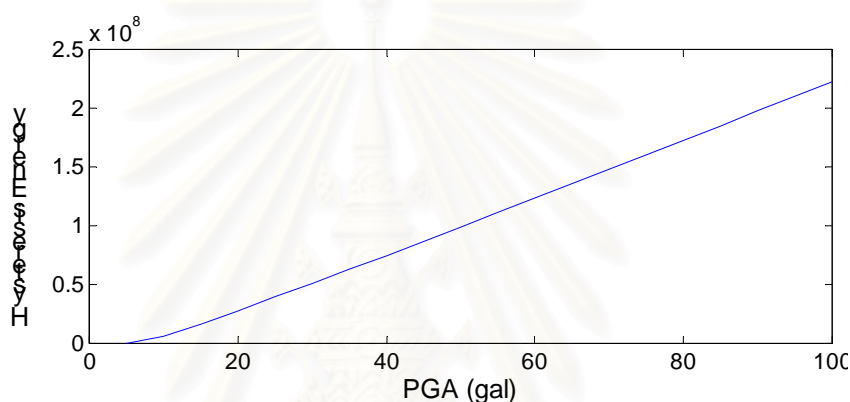
รูปที่ 5.19 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวพื้นฐานมีค่า 50, 100 และ 200 gal



รูปที่ 5.20 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวพื้นฐานของโครงสร้างเป็นค่าต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าความเสียหายของโครงสร้างที่เกิดขึ้นหลังจากการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างผ่านไป 50 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 5.20 เมื่อความเร่งของการเคลื่อนตัวพื้นฐานมีค่าต่ำ

โครงสร้างยังไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากยังคงสั่นไหวอยู่ในช่วงอีลาสติก การกระจัดสูงสุดไม่ถึง การกระจัดที่จุดครากดังนั้นค่าดัชนีความเสียหายจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อแอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานเพิ่มขึ้น การกระจัดของโครงสร้างมีค่ามากกว่าการกระจัดที่จุดคราก โครงสร้างเกิดความเสียหาย โดยค่าดัชนีความเสียหายค่าแรกจะเป็นผลเนื่องจากทอมอัตราส่วนระหว่างการกระจัดสูงสุด และการกระจัดประลัย ส่วนผลเนื่องจากทอมพลังงานมีค่าเท่ากับศูนย์เพราะพลังงานเนื่องจากการครากของโครงสร้างเพิ่งเริ่มจะมีค่าเท่านั้น ซึ่งตำแหน่งนี้การกระจัดสูงสุดจะเท่ากับการกระจัดที่จุดคราก ดังนั้นค่าอัตราส่วนที่ได้จึงมีค่าเท่ากับเศษหนึ่งส่วนค่าอัตราส่วนความเหนียว (Ductility Factor) ของโครงสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากกำหนดให้การกระจัดประลัยมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างค่าอัตราส่วนความเหนียวและการกระจัดที่จุดคราก



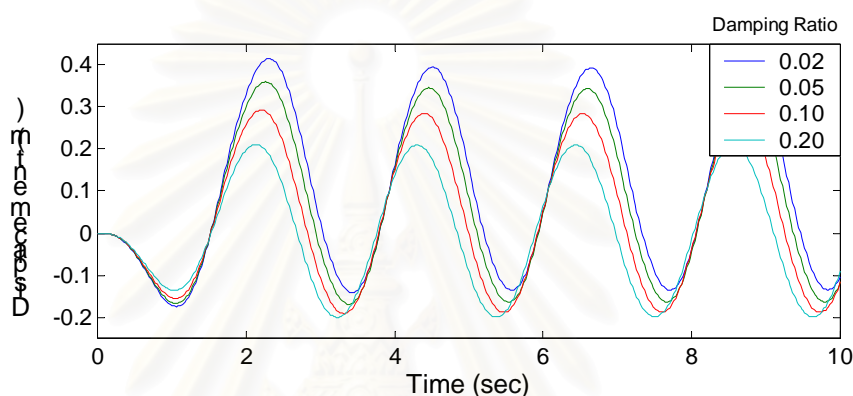
รูปที่ 5.21 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานเนื่องจากการครากของโครงสร้างที่เวลา 50 วินาทีเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเป็นค่าต่างๆ

เมื่อแอมพลิจูดของความเร่งของการสั่นที่ฐานเพิ่มขึ้นอีก โครงสร้างเกิดความเสียหายมากขึ้น สอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่สลายไปเนื่องจากการครากของโครงสร้างที่แอมพลิจูดของความเร่งของการสั่นที่ฐานเป็นค่าต่างๆดังในรูปที่ 5.21 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างก็จะพบว่า ทอมพลังงานที่สลายไปเนื่องจากการครากของโครงสร้าง (ทอมพลังในการคำนวณค่าดัชนีความเสียหายในสมการที่ 2.18) จะเป็นตัวกำหนดค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่เกิดขึ้น ดังจะเห็นได้ว่า ถึงแม้ค่าแอมพลิจูดความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานจะเพิ่มขึ้น แต่ค่าดัชนีความเสียหายที่คิดจากทอมของอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ในขณะที่ค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างจะเป็นผลเนื่องจากทอมพลังงานการครากเสียมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากความเร่งของการสั่นที่ฐานของโครงสร้างมีลักษณะเป็นสัญญาณฮาร์โมนิกที่มีแอมพลิจูดคงที่ ทำให้การครากเกิดขึ้นทุกรอบของการสั่นดังนั้นพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากจึงเพิ่มขึ้นทุกรอบของการสั่น ซึ่งถ้าหากความเร่งของการสั่นที่ฐานของโครงสร้างเปลี่ยนไป ทอมการกระจัด(ทอมแรก)อาจจะกำหนดค่า

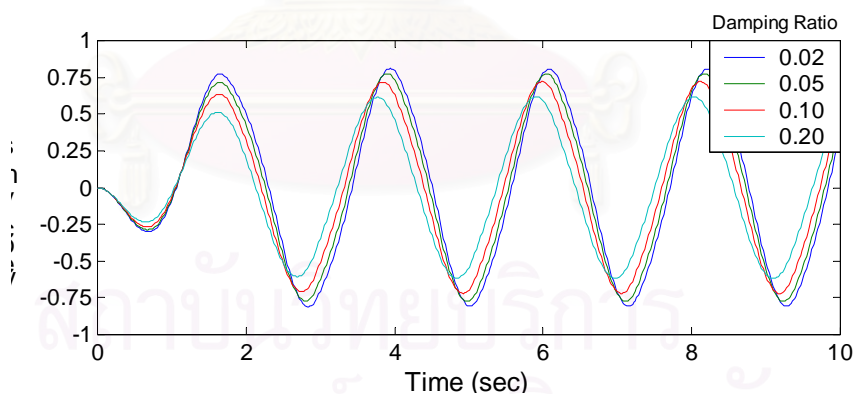
ดัชนีความเสียหายของโครงสร้างได้ (ดังนั้น เทอมไคจะเป็นตัวกำหนดค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างก็ต้องขึ้นกับลักษณะของสัญญาณของการสั่นที่ฐานของโครงสร้างเป็นหลัก)

#### 5.2.4 เมื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้าง

เมื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างอินีลาสติคให้มีค่ามากขึ้น การตอบสนองของโครงสร้างไม่ว่าจะเป็นการกระจัด ความเร็วและความเร่งสัมพัทธ์ตลอดจนค่าแรงของเทอมต่างๆในสมการการเคลื่อนที่ที่เวลาใดๆจะเป็นดังกราฟในรูปที่ 5.22, 5.23, 5.24, 5.25 และ 5.26 ตามลำดับ



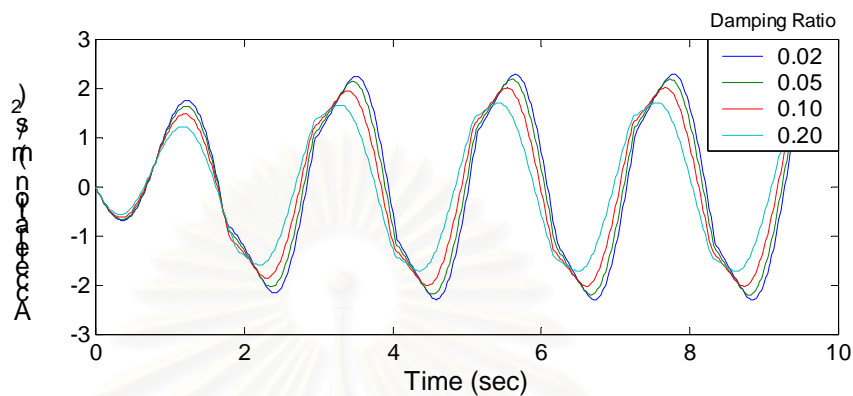
รูปที่ 5.22 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดสัมพัทธ์ของโครงสร้างอินีลาสติคที่เวลาใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



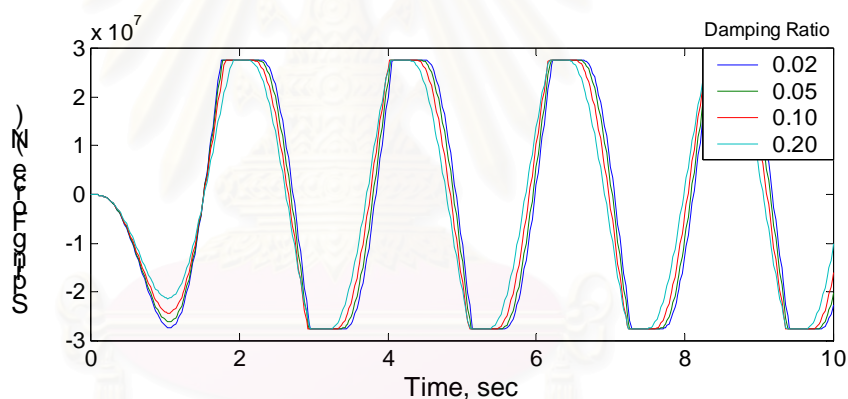
รูปที่ 5.23 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสัมพัทธ์ของโครงสร้างอินีลาสติคที่เวลาใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่เวลาใดๆ สังเกตได้ว่าการกระจัดที่สภาวะคงตัวและการกระจัดถาวรของโครงสร้างมีค่าลดลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเพิ่มขึ้น แต่ลักษณะการลดลงของการกระจัดที่สภาวะคงตัวจะไม่มากเท่าการลดลงในกรณีอินีลาสติค นอกจากนี้ช่วงเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างลดลงด้วย สังเกตได้จากกราฟการกระจัดของโครงสร้างจะมีเฟสต่างกับเฟสของความเร่งของการสั่นที่ฐานของโครงสร้างเข้าใกล้กับ

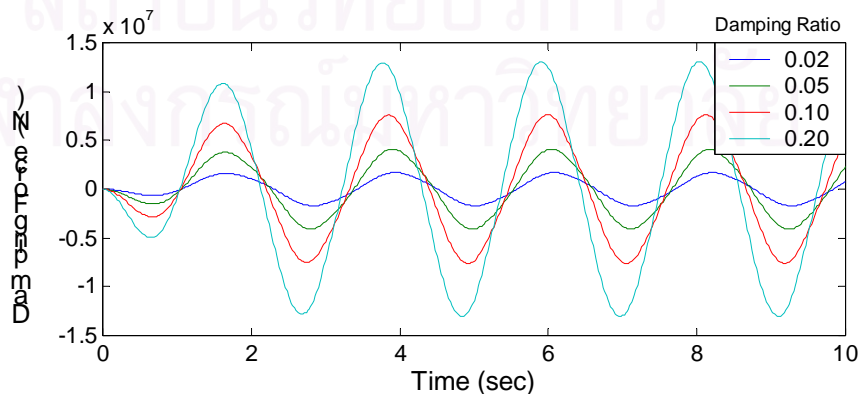
90 องศาเพิ่มขึ้นหรือจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในสปริงที่เวลาต่างๆ ซึ่งให้เห็นว่าการเสียรูปของฟังก์ชันความเร่งสัมพัทธ์น้อยลงและเฟสของความเร่งสัมพัทธ์ต่างกับเฟสของความเร่งที่ฐานใกล้เคียงกับ 90 องศาเพิ่มขึ้นเมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.24 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์

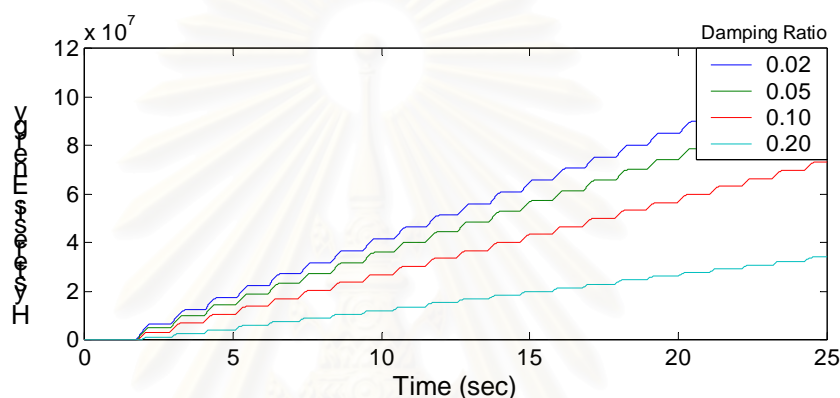


รูปที่ 5.25 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในสปริงของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์

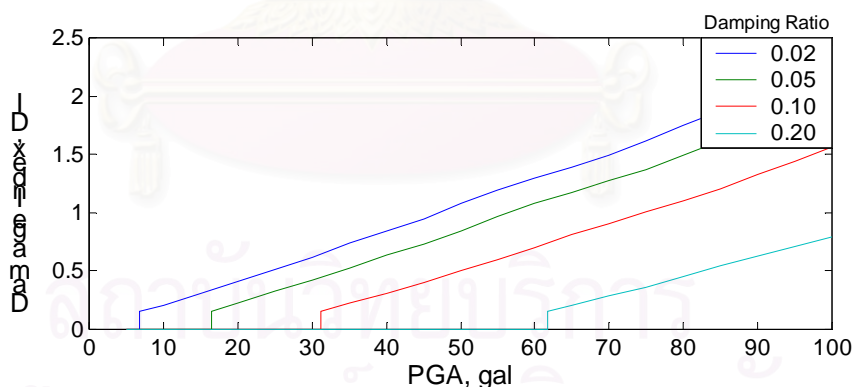


รูปที่ 5.26 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซนต์

ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้กับโครงสร้างคือการเพิ่มแรงหน่วงที่ต้านทานการเคลื่อนที่ให้กับโครงสร้างดังรูปที่ 5.26 ทำให้โครงสร้างสั่นน้อยลงและการกระจัดถาวรมีแนวโน้มลดลง ระยะเวลาที่เกิดการครากน้อยลง ทำให้การเสียรูปของฟังก์ชันความเร่งสัมพัทธ์น้อยลง ความต่างเฟสระหว่างเฟสของการกระจัดกับเฟสของความเร่งที่ฐานก็จะมีค่าเข้าใกล้ 90 องศามากขึ้น นอกจากนี้ ค่าพลังงานที่สลายออกไปเนื่องจากการครากของโครงสร้างมีค่าน้อยลงเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 5.27 สอดคล้องกับการที่โครงสร้างเกิดการครากน้อยลงในแต่ละรอบของการสั่น ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างดังในรูปที่ 5.28 ก็ให้ผลสอดคล้องกับค่าพลังงานของการครากที่เกิดขึ้น คือค่าดัชนีความเสียหายมีค่าลดลงเมื่อ

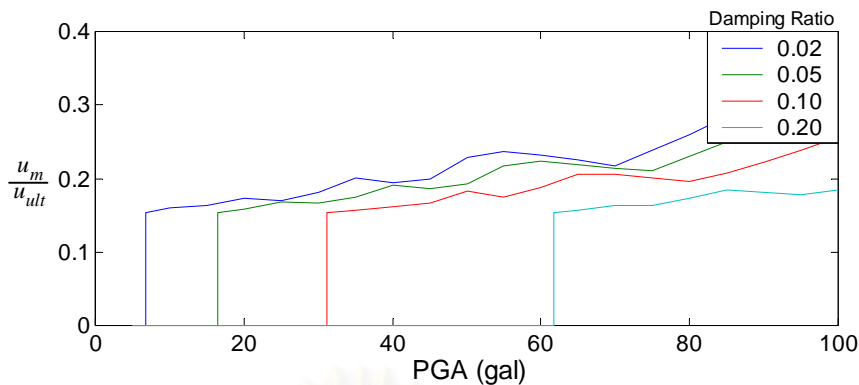


รูปที่ 5.27 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่สลายออกเนื่องจากการครากของโครงสร้างอินทิลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



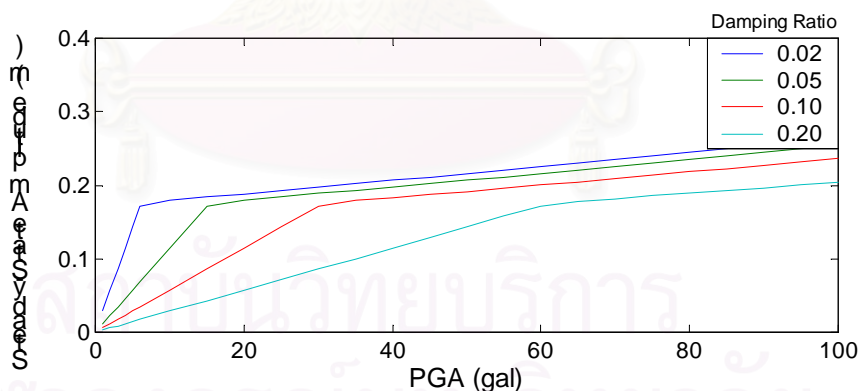
รูปที่ 5.28 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างอินทิลาสติกภายใต้ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนที่ที่ฐานของโครงสร้างค่าใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

สัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลเนื่องจากค่าพลังงานที่สลายออกเนื่องจากการครากมีค่าลดลงเป็นสำคัญ ทั้งที่การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีผลต่อการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างค่อนข้างน้อยในกรณีนี้ ดังจะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างอินอีลาสติกภายใต้ค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างค่าใด ๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

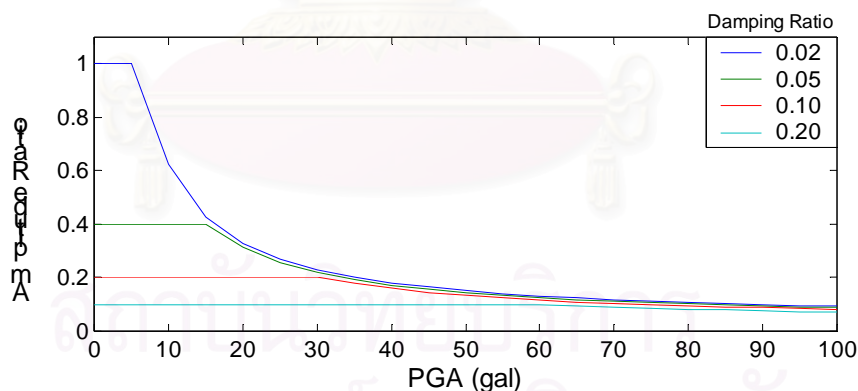
นอกจากนี้ การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีผลทำให้ความต้านทานของโครงสร้างมีค่ามากขึ้น ดังจะเห็นได้ว่า ค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างจะเริ่มมีขึ้นที่แอมพลิจูดของความเร่งสูงสุดที่ฐานของโครงสร้างเพิ่มขึ้นเมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้น ถึงแม้ขนาดแอมพลิจูดของความเร่งของการสั่นที่ฐานของโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างทำให้ค่าพลังงานที่สลายออกเนื่องจากการครากของโครงสร้างมีค่าลดลงค่อนข้างคงที่โดยตลอด ซึ่งย่อมแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเมื่อการครากของโครงสร้างมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 5.30 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอีลาสติกภายใต้ค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างค่าใด ๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างอินอีลาสติกเป็นการพยายามทำให้โครงสร้างมีสภาพใกล้เคียงกับสภาพอีลาสติกมากขึ้น เนื่องจากทำให้ความเสียหายของโครงสร้างลดลงมากกว่าที่จะทำให้แอมพลิจูดของการสั่นไหวของโครงสร้างลดลงในปริมาณที่

มากเหมือนเช่นในกรณีโครงสร้างอิลาสติก ซึ่งในรูปที่ 5.30 แสดงให้เห็นว่า แอมพลิจูดของการกระจัดที่สภาวะของตัวของโครงสร้างอินอิลาสติกจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเพิ่มขึ้น โดยค่าแอมพลิจูดของโครงสร้างอินอิลาสติกที่ลดลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างอินอิลาสติกเพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างอินอิลาสติกสองระบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงต่างกัน) จะมีค่าค่อนข้างคงที่โดยไม่ขึ้นกับค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นเป็นค่าเท่าใดก็ตาม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบเป็นค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของการสั่นไหวที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอิลาสติกและโครงสร้างอิลาสติกจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.31 โดยในกรณีที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าต่ำ โครงสร้างยังคงมีการสั่นไหวอยู่ในช่วงอิลาสติกหรือเกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อย การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างให้มากขึ้นสามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างลงได้ค่อนข้างมาก (เหลือเพียง 40 , 20 และ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างจาก 2 เปอร์เซ็นต์เป็น 5 , 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) และทำให้โครงสร้างมีสภาพอยู่ในช่วงอิลาสติกที่ขนาดของความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมากขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับกราฟดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ได้กล่าวไปแล้ว แต่เมื่อโครงสร้างมีสภาพอินอิลาสติก การกระจัดของโครงสร้างมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของกรณีโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเพิ่มขึ้น (5 , 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์) มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของโครงสร้างที่มีสัมประสิทธิ์ความหน่วง 2 เปอร์เซ็นต์

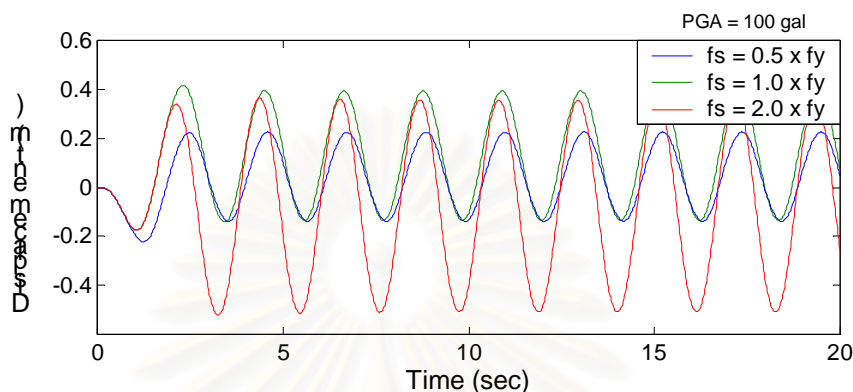


รูปที่ 5.31 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอิลาสติกและโครงสร้างอิลาสติกภายใต้ค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างค่าใดๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่า 2, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

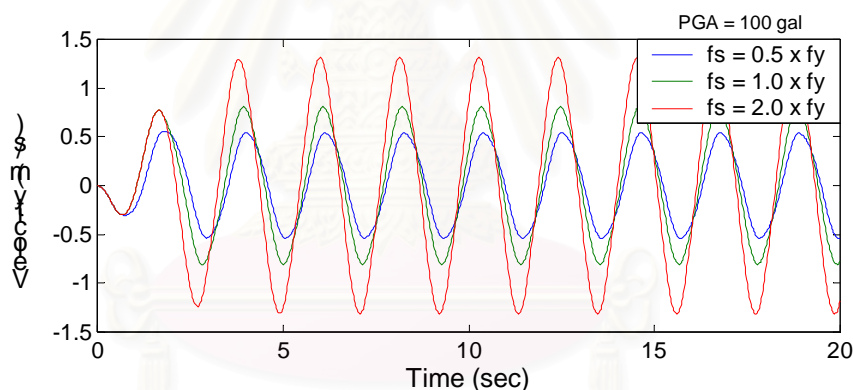


## 5.2.5 เมื่อเพิ่มค่ากำลังที่จุดครากของโครงสร้าง

เมื่อเพิ่มค่ากำลังที่จุดครากของโครงสร้างให้มีความมากขึ้น การตอบสนองของโครงสร้างไม่ว่าจะเป็นการกระจัด ความเร็วและความเร่งสัมพันธ์ตลอดจนค่าแรงภายในทอมต่างๆในสมการการเคลื่อนที่จะเป็นดังแสดงในรูปที่ 5.32, 5.33 , 5.34 , และ 5.35

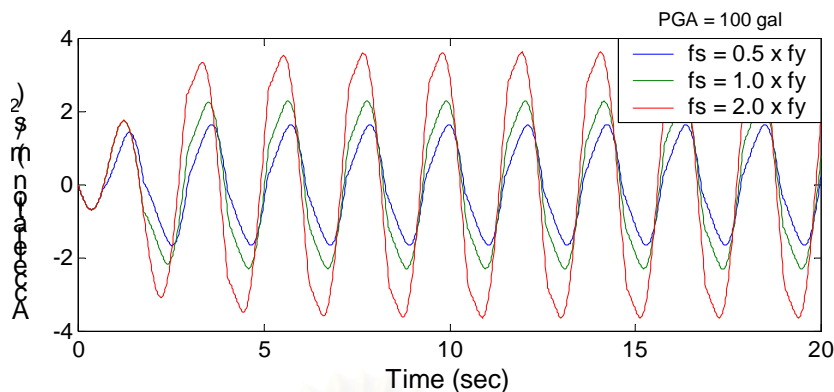


รูปที่ 5.32 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่าเป็น  $0.5F_y$ ,  $F_y$  และ  $2F_y$

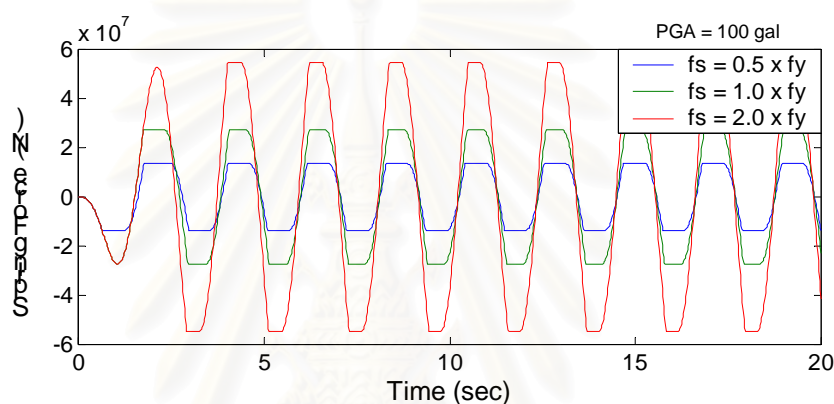


รูปที่ 5.33 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่าเป็น  $0.5F_y$ ,  $F_y$  และ  $2F_y$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่เวลาใดๆพบว่า เมื่อเพิ่มค่ากำลังที่จุดครากของโครงสร้าง การกระจัดของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการกระจัดที่จุดครากของโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างมีแอมพลิจูดของการสั่นในช่วงอีลาสติกมากขึ้น ก่อนที่การกระจัดของโครงสร้างจะถูกควบคุมโดยการครากของโครงสร้างเป็นสำคัญหลังจากที่การกระจัดเลยการกระจัดที่จุดครากไปแล้วนอกจากนี้ระยะเวลาที่เกิดการครากในแต่ละรอบของการสั่นของโครงสร้างจะลดลง ดังเห็นได้จากกราฟการกระจัดของโครงสร้างที่มีค่ากำลังที่จุดครากสูงกว่าจะมีเฟสต่างกับเฟสของความเร่งที่ฐานของโครงสร้างใกล้เคียงกับ 90 องศามากกว่ากรณีโครงสร้างที่มีค่ากำลังที่จุดครากต่ำกว่าหรือจากกราฟความเร่งสัมพันธ์ของ



รูปที่ 5.34 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่าเป็น  $0.5F_y$ ,  $F_y$  และ  $2F_y$

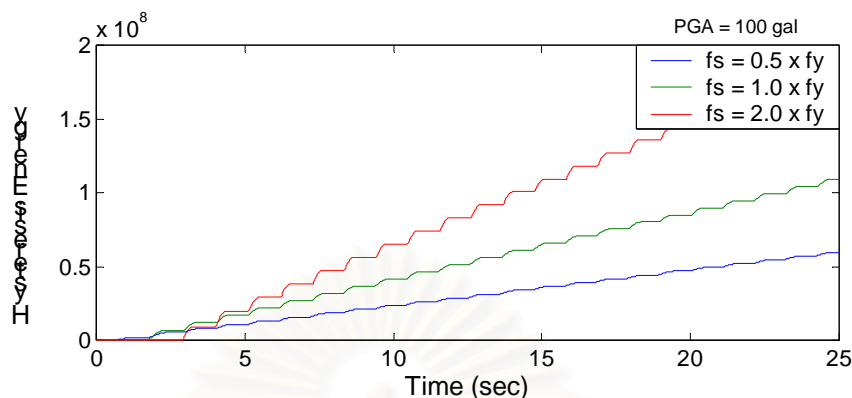


รูปที่ 5.35 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในของโครงสร้างอินอีลาสติกที่เวลาใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่าเป็น  $0.5F_y$ ,  $F_y$  และ  $2F_y$

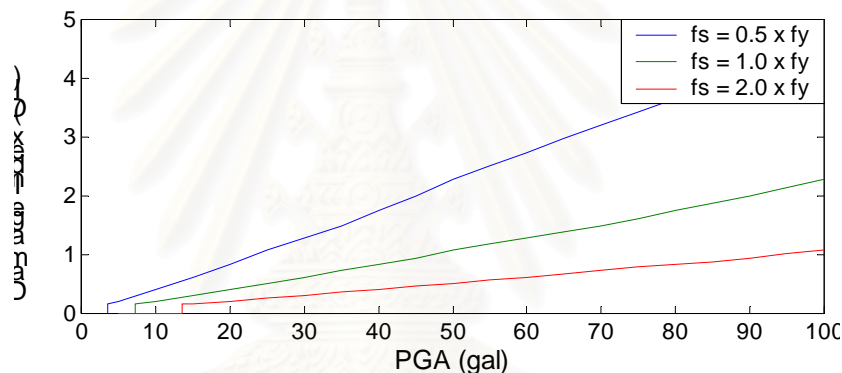
โครงสร้างและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานภายในที่เวลาต่างๆ จะเห็นได้ว่าการเสียรูปของฟังก์ชันความแข็งแรงสัมพันธ์ของโครงสร้างน้อยลง อาจกล่าวได้ว่าเมื่อค่ากำลังที่จุดครากของโครงสร้างเพิ่มขึ้นจะมีผลให้โครงสร้างมีแรงต้านทานการเคลื่อนที่มากขึ้น ทำให้ระยะเวลาที่เกิดการครากในแต่ละรอบของการสั่นของโครงสร้างลดลง เนื่องจากการกระจัดที่จุดครากมีค่ามากขึ้น การเสียรูปของฟังก์ชันความแข็งแรงน้อยลงและการกระจัดของโครงสร้างมีค่ามากขึ้น การกระจัดถาวรมีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อการครากน้อยลง ความต่างเฟสระหว่างการกระจัดกับความเร่งที่ฐานของโครงสร้างมีค่าใกล้ 90 องศามากขึ้น

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในแง่ของพลังงานของการครากที่เกิดขึ้น จะพบว่าที่เวลาเดียวกันระบบที่มีค่ากำลังที่จุดครากสูงกว่าจะมีค่าพลังงานของการครากที่เกิดขึ้นมากกว่า เนื่องจากการกระจายพลังงานในแต่ละรอบของการสั่นมีค่ามากกว่าดังแสดงในรูปที่ 5.36 แต่เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 5.37 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ระบบที่มีค่ากำลังที่จุดครากต่ำกว่าจะมีค่าดัชนีความเสียหายที่เวลาใดๆมากกว่าระบบที่มีค่ากำลังที่จุดครากมากกว่า

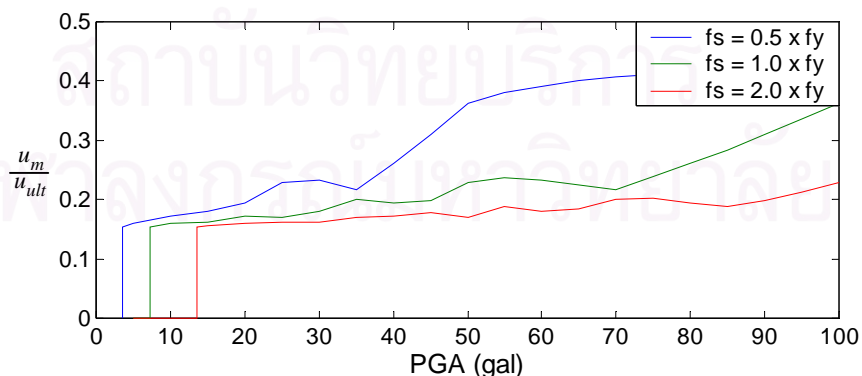
ซึ่งก็สอดคล้องกับความเป็นจริงที่ว่าโครงสร้างที่มีกำลังมากกว่าย่อมต้องมีความเสียหายน้อยกว่า เมื่อมีแรงกระทำขนาดเดียวกัน



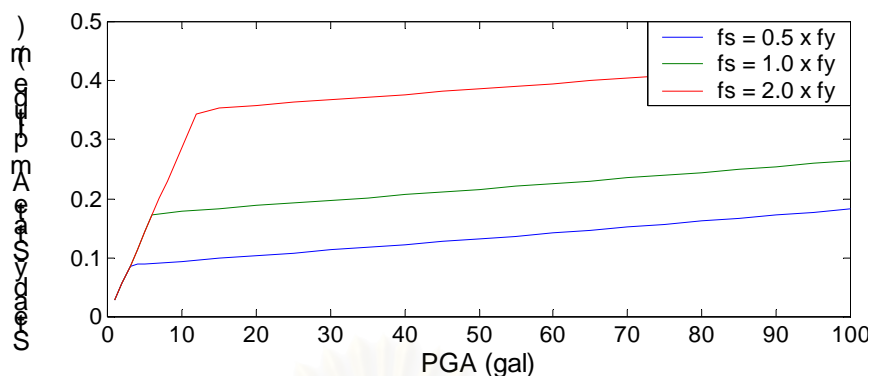
รูปที่ 5.36 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เกิดจากการครากของโครงสร้างอินฮิสเทอติกที่เวลาใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่า เป็น  $0.5F_y$ ,  $F_y$  และ  $2F_y$



รูปที่ 5.37 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างอินฮิสเทอติกที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่า เป็น  $0.5F_y$ ,  $F_y$  และ  $2F_y$

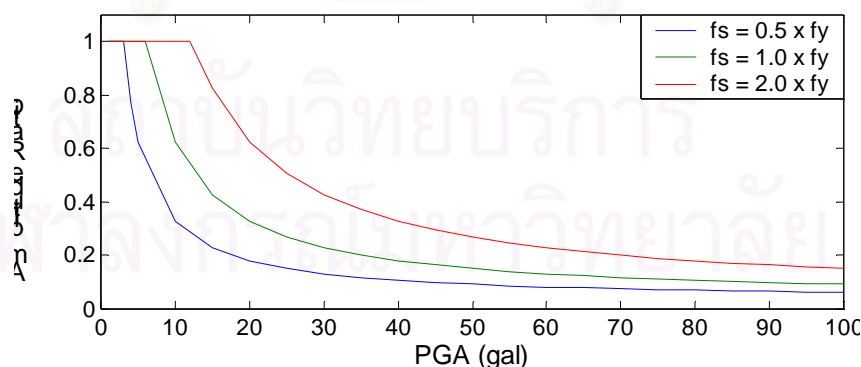


รูปที่ 5.38 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเทอมแรกของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างอินฮิสเทอติกที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่า เป็น  $0.5F_y$ ,  $F_y$  และ  $2F_y$



รูปที่ 5.39 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินทิลาสติกที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่า เป็น  $0.5F_y$ ,  $F_y$  และ  $2F_y$

เมื่อพิจารณาค่าแอมพลิจูดของการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่มีค่ากำลังที่จุดครากแตกต่างกันภายใต้ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเป็นค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.39 พบว่า การกระจัดของโครงสร้างสามารถแบ่งได้เป็นสองช่วงเหมือนที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.2.3 โดยในกรณีของโครงสร้างที่มีค่ากำลังที่จุดครากสูงกว่าจะมีตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงค่าความชันของกราฟที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานสูงกว่าในกรณีของโครงสร้างที่มีค่ากำลังที่จุดครากต่ำกว่า (จะเริ่มเกิดความเสียหายที่ระดับความรุนแรงสูงกว่า) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อแต่ละระบบมีการกระจัดถึงการกระจัดที่จุดคราก อัตราการเพิ่มของการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างเทียบกับความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างในกรณีที่มีค่ากำลังที่จุดครากต่างกันยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.40 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดของการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินทิลาสติกเทียบกับโครงสร้างอินทิลาสติกที่มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ  $F_y$  ที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ เมื่อกำลังที่จุดครากของโครงสร้างมีค่า เป็น  $0.5F_y$ ,  $F_y$  และ  $2F_y$

เมื่อเปรียบเทียบเป็นค่าอัตราส่วนของการกระจัดกับการกระจัดของโครงสร้าง อิลาสติกจะได้ผลดังในรูปที่ 5.40 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การที่โครงสร้างมีกำลังที่จุดครากเพิ่มขึ้นเท่าตัวจะทำให้โครงสร้างเริ่มเกิดการครากที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานได้เพิ่มขึ้นเท่าตัวเช่นกัน นอกจากนี้อัตราการลดลงของค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของกรณีที่โครงสร้างมีค่ากำลังที่จุดครากต่ำกว่าจะมีค่ามากกว่าในกรณีที่โครงสร้างมีค่ากำลังที่จุดครากสูงกว่า

จากผลการศึกษาข้างต้น กล่าวได้ว่าแอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอิลาสติกจะถูกกำหนดโดยการครากของโครงสร้างเป็นสำคัญ การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเพียงทำให้แอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่การเพิ่มค่ากำลังที่จุดครากของโครงสร้างจะทำให้ขนาดแอมพลิจูดการสั่นไหวของโครงสร้างเพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มของแอมพลิจูดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างเทียบกับความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างยังคงมีค่าใกล้เคียงกันไม่ว่ากำลังที่จุดครากจะเป็นเท่าใดก็ตาม



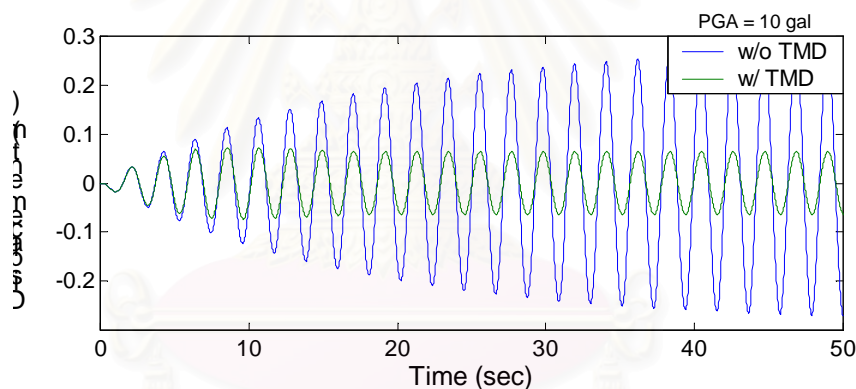
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### การตอบสนองของโครงสร้างอิลาสติกและอินอิลาสติกที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

#### 6.1 การตอบสนองของโครงสร้างอิลาสติกที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า (กรณีเกิดการสั่นพ้อง Resonance)

การตอบสนองของโครงสร้างอิลาสติกภายใต้สัญญาณความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ทั้งในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 6.1 เห็นได้ว่า การตอบสนองของระบบที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าลดลงจากระบบที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าได้กว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าทำให้การสลายพลังงานออกจากโครงสร้างมีค่ามากขึ้น โดยสามารถเปรียบเทียบเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างได้ถึง 8.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เพิ่มจากเดิมที่โครงสร้างมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเพียง 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้การตอบสนองของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ามีค่าลดลง

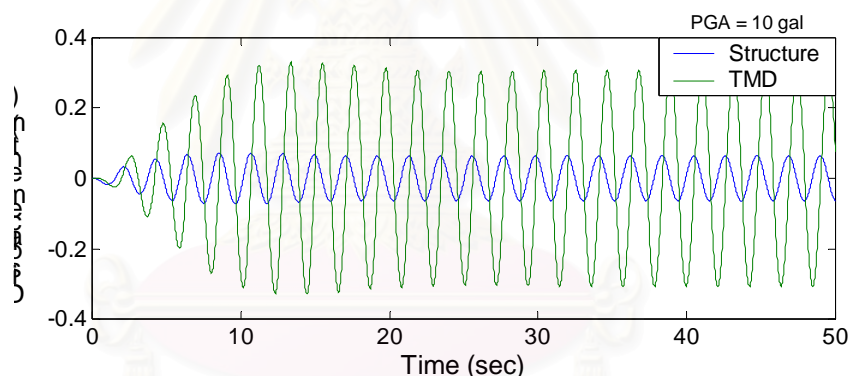


รูปที่ 6.1 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอิลาสติกที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ ภายใต้สัญญาณความเร่งที่ฐานแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่พ้องกับความถี่ของโครงสร้าง

จากกราฟในรูปที่ 6.1 เห็นได้ว่าการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าจะต้องอาศัยระยะเวลาช่วงหนึ่ง(เพื่อสร้างระยะการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าเอง) จึงจะสามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างลงได้ ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าขึ้นกับการสั่นของโครงสร้างเป็นหลัก นอกจากนี้การติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ามีผลทำให้การสั่นของโครงสร้างเข้าสู่สภาวะคงตัวด้วยระยะเวลาที่สั้นลงด้วย ซึ่งก็มีสาเหตุจากการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเป็นสำคัญ

### 6.1.1 การตอบสนองของมวลหน่วงปรับค่า

จากกราฟในรูปที่ 6.2 ที่เปรียบเทียบแอมพลิจูดและเฟสการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่า เห็นได้ว่าการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่ามีค่ามากกว่าการกระจัดของโครงสร้าง โดยค่าอัตราส่วนระหว่างการกระจัดทั้งสองค่านี้สามารถหาได้จากการวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของมวลหน่วงปรับค่าโดยให้ความเร่งสัมบูรณ์ที่ยอดของโครงสร้างเป็นเสมือนความเร่งของการเคลื่อนที่ที่ฐานของมวลหน่วงปรับค่า ซึ่งหากความถี่ของความเร่งที่ยอดของโครงสร้างตรงกับความถี่ของมวลหน่วงปรับค่า การกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าเหมือนเช่นในการวิเคราะห์ระบบ SDOF ในหัวข้อ 5.1 ซึ่งในกรณีนี้ค่าอัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่าเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดที่สภาวะคงตัวของการกระจัดจะมีค่าเท่ากับ 4.7 ส่วนความต่างระหว่างเฟสการสั่นของโครงสร้างและเฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าพบว่า เฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าตามหลังเฟสการสั่นของโครงสร้างประมาณ 95 องศา ซึ่งเป็นจังหวะที่เหมาะสมที่ช่วยลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้เป็นอย่างดี

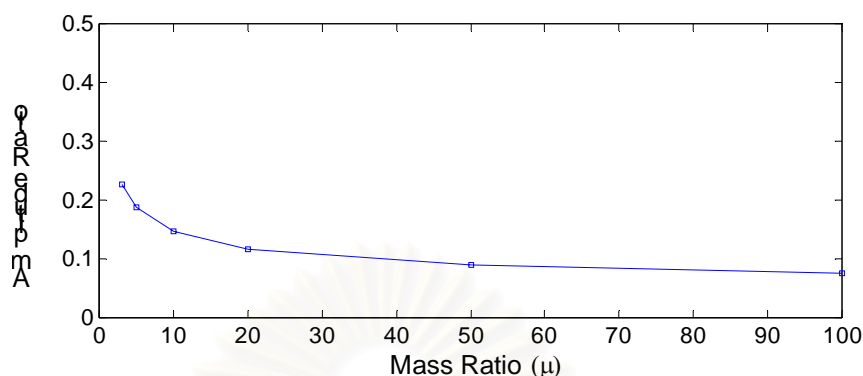


รูปที่ 6.2 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ ภายใต้สัญญาณความเร่งที่ฐานแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่พ้องกับความถี่ของโครงสร้าง

### 6.1.2 อิทธิพลเนื่องจากน้ำหนักของมวลหน่วงปรับค่า

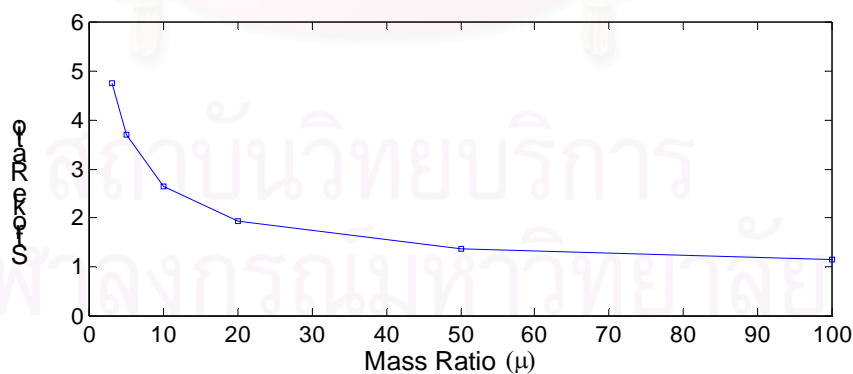
เมื่ออัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่ามีค่ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทำให้การตอบสนองของโครงสร้างมีขนาดลดลง ดังจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดของการกระจัดของกรณีที่มีค่าอัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่ามากกว่าจะมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ค่าอัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่าน้อยกว่าดังแสดงในรูปที่ 6.3 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มมวลและค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า

ให้มีค่ามากขึ้น จะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.3 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าเมื่ออัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าใดๆ

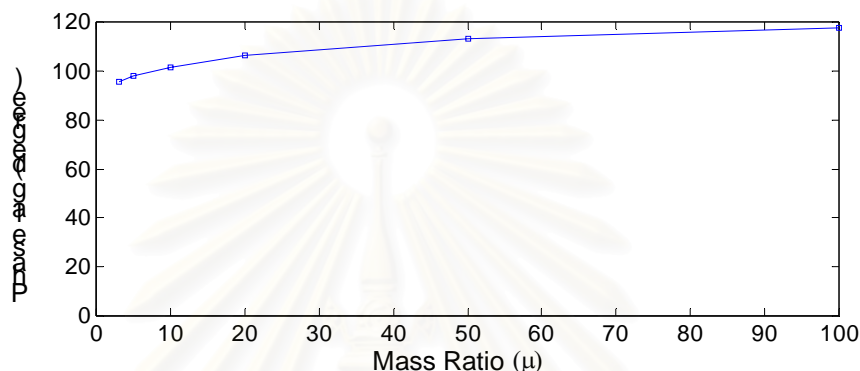
นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดระหว่างความเร่งของมวลหน่วงปรับค่าและความเร่งสัมบูรณ์ที่ยอดของโครงสร้างเมื่อค่าอัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่าเป็นค่าต่างๆ ดังในรูปที่ 6.4 ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยลงเมื่อค่าอัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากค่าอัตราส่วนระหว่างการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าต่อการกระจัดของโครงสร้างนี้แปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า ดังนั้นการที่ค่าอัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่ามีค่ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย ดังนั้นค่าอัตราส่วนการกระจัดจึงมีค่าน้อยลงนั่นเอง



รูปที่ 6.4 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดของความเร่งที่สภาวะคงตัวของมวลหน่วงปรับค่าเทียบแอมพลิจูดของความเร่งที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าเมื่ออัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าใดๆ

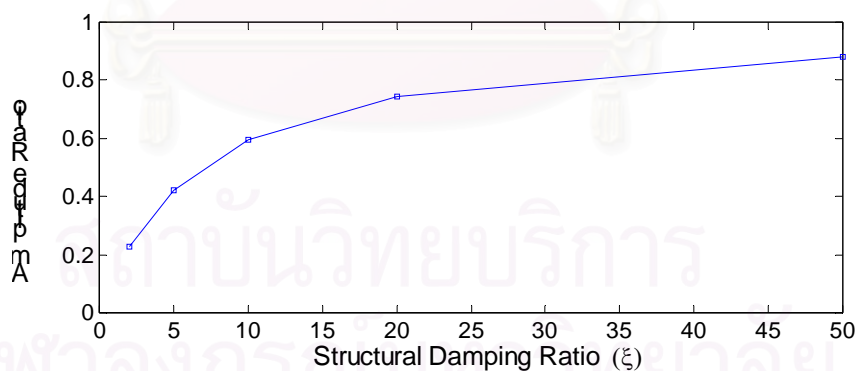


ส่วนผลการเปรียบเทียบความต่างเฟสระหว่างการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลห้วงปรับค่าเมื่อค่าอัตราส่วนมวลของมวลห้วงปรับค่ามีค่าต่างๆ ดังในรูปที่ 6.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าอัตราส่วนมวลเพิ่มขึ้น ความต่างระหว่างเฟสการสั่นของโครงสร้างและเฟสการสั่นของมวลห้วงปรับค่าจะมีค่ามากขึ้น โดยค่าสูงสุดของความต่างเฟสมีขอบเขตอยู่ที่ค่าประมาณ 120 องศา ซึ่งก็เป็นตำแหน่งที่มวลห้วงปรับค่ายังคงทำงานได้ดีถึงแม้จะไม่ใช่ว่าตำแหน่งที่ดีที่สุดก็ตาม



รูปที่ 6.5 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างระหว่างเฟสการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างและเฟสการสั่นที่สภาวะคงตัวของมวลห้วงปรับค่าเมื่ออัตราส่วนมวลของมวลห้วงปรับค่ามีค่าใดๆ

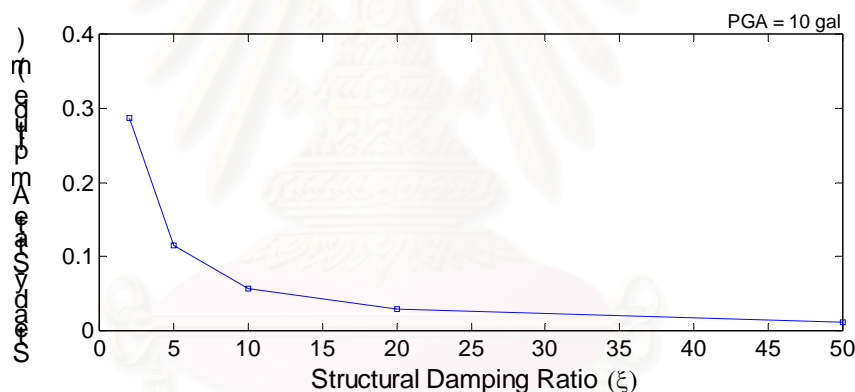
### 6.1.3 อิทธิพลเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้าง



รูปที่ 6.6 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงค่าต่างๆ ที่ติดมวลห้วงปรับค่าที่มีค่าอัตราส่วนมวลเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ ที่ไม่ได้ติดตั้งมวลห้วงปรับค่า

อย่างที่ได้อธิบายไปแล้วว่า แอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้างอิลาสติกภายใต้ความถี่ของการเคลื่อนตัวที่ฐานแบบฮาร์โมนิกที่สัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างแปร

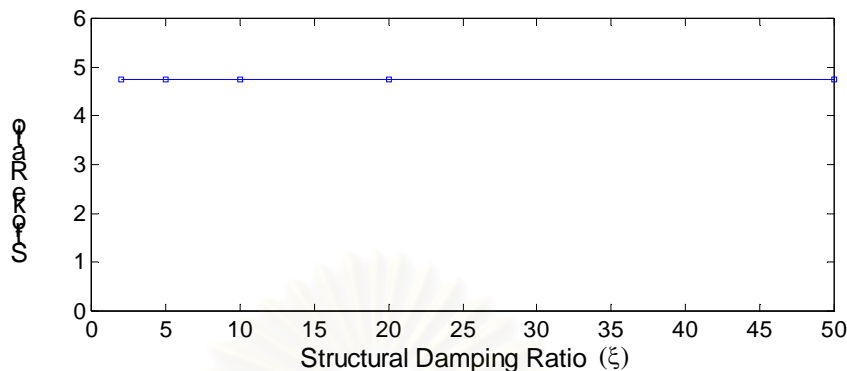
ผูกพันกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเป็นสำคัญ โดยหากเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างให้มากขึ้นจะมีผลทำให้การตอบสนองของโครงสร้างมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามตามค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างก่อนที่จะติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าก็จะมีผลต่อการลดลงของการกระจัดของโครงสร้างเมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับโครงสร้าง ทั้งนี้หากเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างระบบ SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างต่างกัน แต่ติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าที่มีน้ำหนักเท่ากันและมีสัญญาณความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานเหมือนกัน ซึ่งอัตราส่วนระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าของระบบต่างๆจะเป็นดังรูปที่ 6.6 โดยชี้ให้เห็นว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดของระบบโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงต่ำกว่าจะมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงสูงกว่า แสดงว่าประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าจะมีมากขึ้นในกรณีที่โครงสร้างมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากแอมพลิจูดของการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างดังกราฟในรูปที่ 6.7 ซึ่งมีผลต่ออัตราการลดลงของการกระจัดของโครงสร้าง



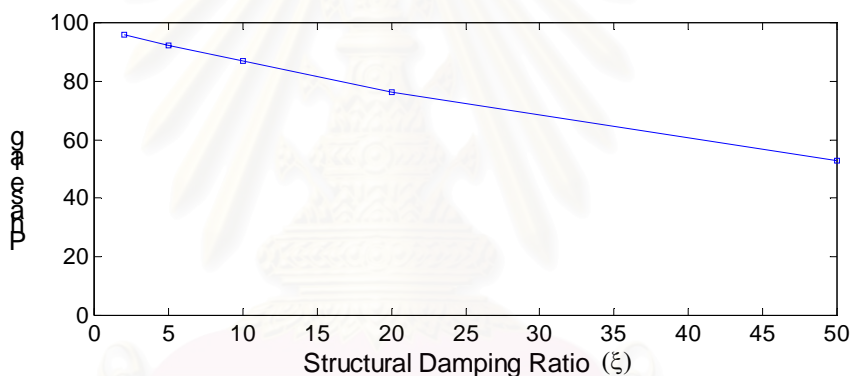
รูปที่ 6.7 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงค่าใดๆ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนระหว่างการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดสัมบูรณ์ที่ยอดของโครงสร้างและค่าความต่างเฟสระหว่างการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าดังแสดงในรูปที่ 6.8 และ 6.9 ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดของระบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมาก ยังคงมีค่าไม่ต่างไปจากระบบที่มีสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างน้อย ในขณะที่ค่าความต่างระหว่างเฟสการสั่นของโครงสร้างและเฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าลดลงเมื่อโครงสร้างมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ความต่างเฟสที่เกิดขึ้นยังคงอยู่ในตำแหน่งที่มีความเหมาะสม

ดังนั้นถือได้ว่ามวลหน่วงปรับค่ายังคงทำงานได้ แต่อัตราการลดแอมพลิจูดของการสั่นไหวของโครงสร้างมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างที่ต่างกันเป็นสำคัญ



รูปที่ 6.8 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดของความเร่งที่สภาวะคงตัวของมวลหน่วงปรับค่าเทียบแอมพลิจูดของความเร่งที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเป็นค่าใดๆ

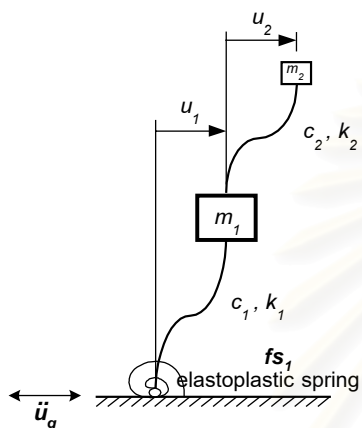


รูปที่ 6.9 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างระหว่างเฟสการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างและเฟสการสั่นที่สภาวะคงตัวของมวลหน่วงปรับค่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่าใดๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.2 การตอบสนองของโครงสร้างอินอีลาสติก SDOF ที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

จากระบบโครงสร้าง SDOF ที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอินอีลาสติกโดยมีมวล ความหน่วง และค่าสติเฟเนสส์ที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.2 เมื่อนำมวลหน่วงปรับค่าที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติกติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง ซึ่งเป็นการเพิ่มดีกรีอิสระของโครงสร้างอีกหนึ่งค่า ทำให้กลายเป็นระบบ 2DOF ซึ่งสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของทั้งโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าเนื่องจากการเคลื่อนตัวที่ฐานรองรับของโครงสร้างได้ดังนี้



$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + f_s(u_1, \dot{u}_1, t) = c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 - m_1 \ddot{u}_g \quad (6.1)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 = -m_2 \ddot{u}_1 + m_2 \ddot{u}_g \quad (6.2)$$

รูปที่ 6.10 แบบจำลองระบบโครงสร้างและระบบมวลหน่วงปรับค่าภายใต้การเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง

โดย  $m_1, c_1, k_1$  คือ มวล ความหน่วง และสติเฟเนสส์ของโครงสร้างในช่วงอีลาสติก

$m_2, c_2, k_2$  คือ มวล ความหน่วง และสติเฟเนสส์ของมวลหน่วงปรับค่าในช่วงอีลาสติก

$f_s$  คือ แรงต้านทานภายในสปริงของโครงสร้าง

$u_1, \dot{u}_1, \ddot{u}_1$  คือ การกระจัดสัมพัทธ์ ความเร็วสัมพัทธ์ และความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างเทียบกับฐานของโครงสร้าง

$u_2, \dot{u}_2, \ddot{u}_2$  คือ การกระจัดสัมพัทธ์ ความเร็วสัมพัทธ์ และความเร่งสัมพัทธ์ของมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับยอดของโครงสร้าง

$\ddot{u}_g$  คือ ความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้าง

จากสมการที่ (6.1) และ (6.2) จะเห็นได้ว่าการกระจัดของโครงสร้างจะขึ้นกับค่าอัตราส่วนความถี่ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า ค่าอัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่า และค่าอัตราส่วนความถี่ของแรงกระทำต่อความถี่ของโครงสร้าง เหมือนเช่นในกรณีของโครงสร้างอีลาสติก แต่ที่แตกต่างคือ สำหรับโครงสร้างอินอีลาสติกจะขึ้นกับกำลังที่จุดครากของโครงสร้างเพิ่มขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตาม ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมวลหน่วงปรับค่าที่ใช้กับโครงสร้างอินอีลาสติกนั้น จะใช้ค่าที่นำเสนอโดย Den Hartog ดังความสัมพันธ์ที่ได้แสดงไปแล้วในหัวข้อก่อน

ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้การตอบสนองของโครงสร้างอิลาสติกมีค่าต่ำในช่วงความถี่ที่เกิดการสั่นพ้อง ทั้งนี้ด้วยเหตุผลที่ว่า กว้างที่โครงสร้างจะมีพฤติกรรมเป็นแบบอินอิลาสติกนั้น โครงสร้างจะต้องสั่นอยู่ในช่วงอิลาสติกก่อน ซึ่งการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าในช่วงนี้ก็จะต้องเป็นค่าที่ดีที่สุดเพื่อลดการสั่นไหวของโครงสร้างให้ได้มากที่สุด

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.2 ว่าการหาคำตอบของสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอินอิลาสติกจะต้องอาศัยการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งค่าการกระจัดสัมพัทธ์ ความเร็วสัมพัทธ์และความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะได้นำไปเปรียบเทียบกับค่าการกระจัดสัมพัทธ์ ความเร็วสัมพัทธ์และความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า โดยความเร่งของการเคลื่อนที่ฐานของโครงสร้างทั้งสองเป็นฟังก์ชันฮาร์โมนิกไซน์เช่นเดียวกัน

เนื่องจากระบบที่กำลังพิจารณาเป็นระบบอินอิลาสติก จำนวนครั้งและระยะเวลาในการเกิดการครากของโครงสร้างจะขึ้นกับแอมพลิจูดของความเร่งของการเคลื่อนที่ฐานของโครงสร้าง ดังนั้นพฤติกรรมของโครงสร้างอินอิลาสติกเมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไป จึงสามารถจำแนกได้ตามพฤติกรรมของโครงสร้างได้ดังนี้

1. โครงสร้างมีพฤติกรรมในช่วงอิลาสติกเมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไป กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความรุนแรงของการเคลื่อนที่ฐานมีค่าไม่มากนัก

2. โครงสร้างยังคงมีพฤติกรรมในช่วงอินอิลาสติกถึงแม้ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไป กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความรุนแรงของการเคลื่อนที่ฐานมีค่ามากขึ้น แต่โครงสร้างมีความเสียหายไม่มากนัก

3. โครงสร้างมีพฤติกรรมในช่วงอินอิลาสติกถึงแม้ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไป กรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อความรุนแรงของการเคลื่อนที่ฐานมีค่ามาก และโครงสร้างเกิดความเสียหายมาก

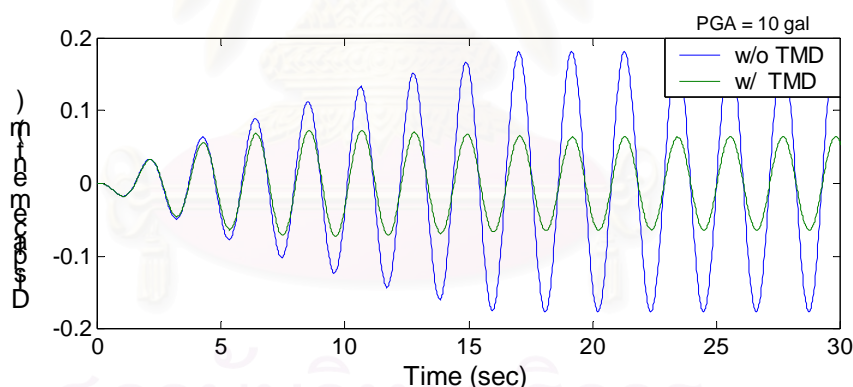
ดังนั้นเพื่อให้ครอบคลุมพฤติกรรมทั้งหมดของโครงสร้าง จึงได้แบ่งความรุนแรงของความเร่งของการสั่นที่ฐานของโครงสร้างออกเป็น 3 ระดับดังนี้

#### ก. ความเร่งของการเคลื่อนที่ฐานมีค่า PGA เท่ากับ 10 gal

ดังแสดงในโครงสร้างอินอิลาสติกที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เมื่อโครงสร้างเกิดการครากขึ้น แอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างจะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ

แอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของระบบอิลาสติกภายใต้สัญญาณความเร่งที่ฐานชนิดเดียวกัน นอกจากนี้การกระจัดถาวรก็อาจเกิดขึ้นได้และคาบการสั่นของโครงสร้างในช่วงเวลาเริ่มต้นจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากการครากของโครงสร้างและคาบของโครงสร้างมีค่าเท่ากับคาบของแรงกระทำเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ทำให้เฟสการสั่นไม่ได้แตกต่างจากเฟสของความเร่งที่ฐานเท่ากับ 90 องศาเหมือนในกรณีอิลาสติก ทั้งนี้ความไม่สอดคล้องของเฟสจะมีค่ามากขึ้น เมื่อช่วงเวลาที่เกิดการครากในแต่ละรอบของการสั่นมีค่ามากขึ้น แต่เนื่องจากความรุนแรงของความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานในกรณีนี้มีค่าน้อย ดังนั้นความแตกต่างระหว่างเฟสของการสั่นของโครงสร้างและเฟสของความเร่งที่ฐานยังคงใกล้เคียงกับ 90 องศา

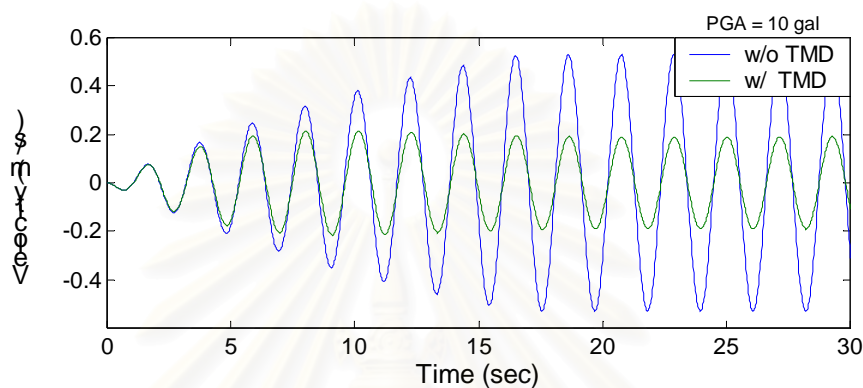
เมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับโครงสร้างจะทำให้การเคลื่อนที่ของโครงสร้างมีค่าน้อยลง ในกรณีนี้การกระจัดน้อยกว่าการกระจัดที่จุดครากทำให้โครงสร้างยังคงสั่นไหวอยู่ในช่วงอิลาสติกไม่เกิดความเสียหาย แอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่า (Equivalent damping ratio) ของโครงสร้างดังแสดงในโครงสร้างอิลาสติกที่ติดมวลหน่วงปรับค่า โครงสร้างยังคงสั่นรอบตำแหน่งสมดุลเดิมไม่เกิดการกระจัดถาวร ความต่างเฟสระหว่างเฟสการสั่นของโครงสร้างและเฟสของความเร่งที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 90 องศา



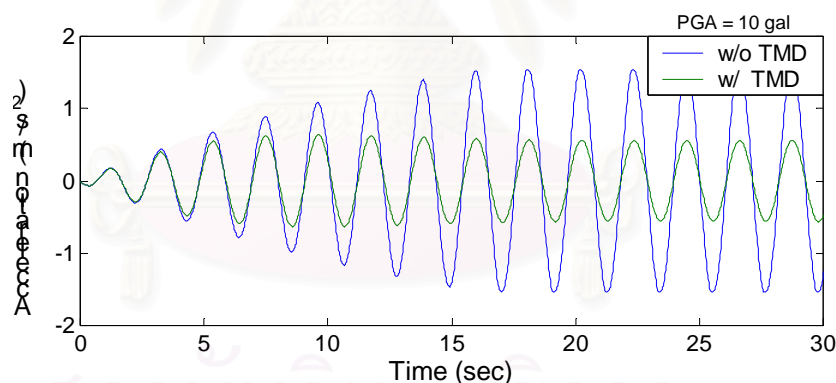
รูปที่ 6.11 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอินอิลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 10 gal

จากกราฟในรูปที่ 6.11 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างของระบบที่ไม่ได้ติดตั้งและติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ในช่วงระยะเวลา 5 วินาทีแรกการตอบสนองของทั้งสองระบบมีค่าใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นการตอบสนองของระบบที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ามีค่าต่ำกว่าและมีค่าคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ในเวลาต่อมา แสดงให้เห็นว่าการที่มวลหน่วงปรับค่าจะทำงานได้สูงสุดนั้นจะต้องอาศัยระยะเวลาช่วงหนึ่งเพื่อปรับการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าเองให้มีความเหมาะสมทั้งขนาดและเฟสของการสั่นกับการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ดังนั้นหากแรงลัพธ์ที่ทำ

ให้เกิดการเคลื่อนที่ของโครงสร้างมีค่ามากในช่วงเวลาแรกของสัญญาณแผ่นดินไหว ในขณะที่การทำงานของมวลหน่วงปรับค่ายังไม่ถึงเวลาที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด แรงต้านทานที่เกิดจากมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าน้อยกว่าค่าสูงสุดที่สามารถทำได้ ทำให้ไม่สามารถต้านทานแรงลัพท์ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่มีค่ามากได้ การกระจัดของโครงสร้างจึงมีโอกาที่จะเกิดการกระจัดที่จุดครากได้ ทำให้โครงสร้างมีสภาพอินอีลาสติกและเกิดความเสียหายขึ้นภายในโครงสร้าง ซึ่งส่งผลต่อกำลังต้านทานของโครงสร้างที่จะมีค่าลดลง



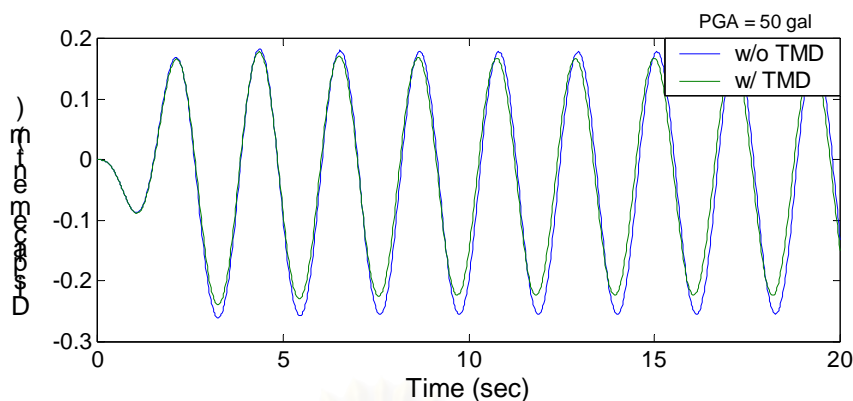
รูปที่ 6.12 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 10 gal



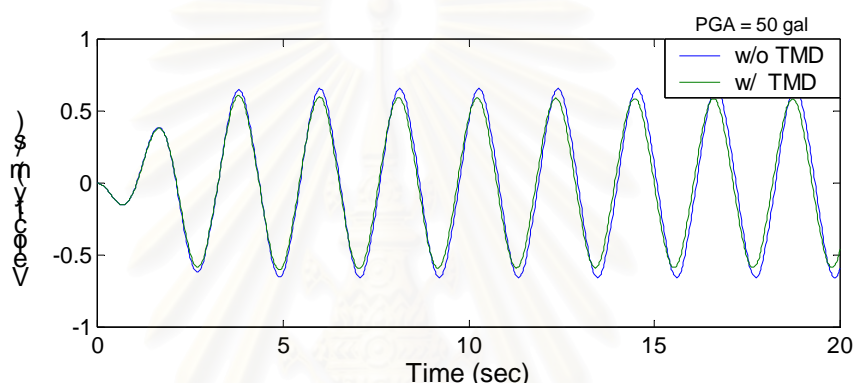
รูปที่ 6.13 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 10 gal

#### ข. ความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่า PGA เท่ากับ 50 gal

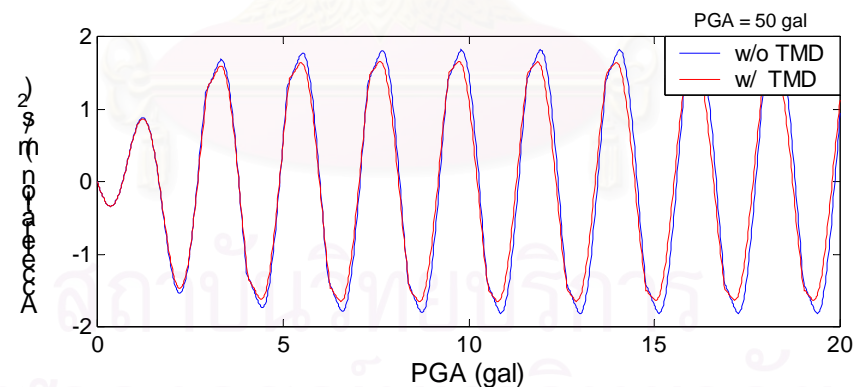
อย่างที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นว่า ความรุนแรงของการครากจะขึ้นอยู่กับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณแผ่นดินไหวที่ฐานของโครงสร้าง ดังนั้นเมื่อขนาดของสัญญาณแผ่นดินไหวในกรณีนี้เพิ่มขึ้น ระยะเวลาที่เกิดการครากในแต่ละรอบของการสั่นของโครงสร้างจะมีค่าเพิ่มขึ้นและคาบการสั่นของโครงสร้างก็จะมีค่ามากขึ้นเช่นกันทำให้เฟสการสั่นของโครงสร้างแตกต่างจากเฟสของความเร่งที่ฐาน (หรือการกระจัดในสภาพอีลาสติกมากขึ้น) มากกว่า 90 องศา



รูปที่ 6.14 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวล-  
หน่วยปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวพื้นฐานของโครงสร้างเท่ากับ 50 gal



รูปที่ 6.15 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวล-  
หน่วยปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวพื้นฐานของโครงสร้างเท่ากับ 50 gal



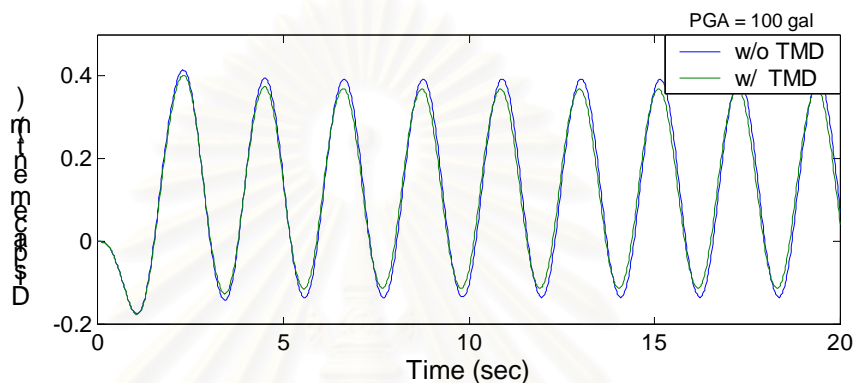
รูปที่ 6.16 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวล-  
หน่วยปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวพื้นฐานของโครงสร้างเท่ากับ 50 gal

เมื่อติดตั้งมวลหน่วยปรับค่าที่เหมาะสมเข้ากับโครงสร้าง จากผลการตอบสนอง  
ของโครงสร้างสามารถพิจารณาได้ว่าแรงต้านทานเนื่องจากมวลหน่วยปรับค่าที่กระทำต่อโครง-  
สร้างมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้การกระจัดของโครงสร้างยังคงอยู่ในช่วงอีลาสติก ทำให้โครงสร้าง  
ดังกล่าวสั้นไหวเกินกว่าการกระจัดที่จุดครากและมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอินอีลาสติก ซึ่งผลของการ

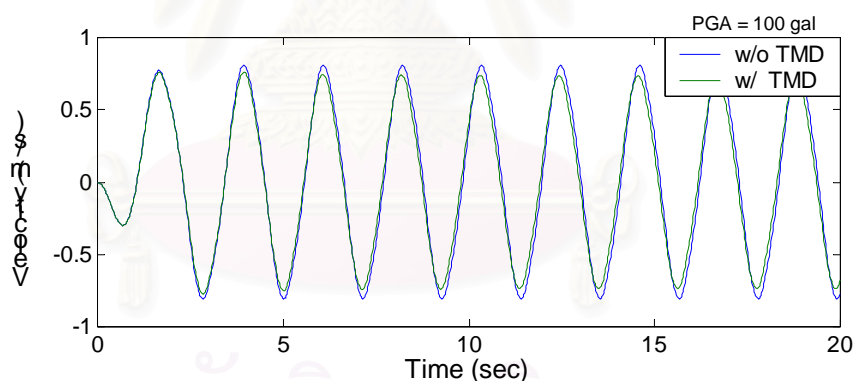


ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าสามารถทำให้การกระจัดของโครงสร้างลดลงได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ทั้งนี้ถ้าหากพิจารณาให้เป็นเสมือนการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้กับโครงสร้าง จะเห็นได้ว่าการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้กับโครงสร้างอินฮิลาสติกจะมีผลต่อการลดลงของแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้างค่อนข้างน้อยดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นในส่วนของการโครงสร้างอินฮิลาสติกที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

### ค. ความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่า PGA เท่ากับ 100 gal



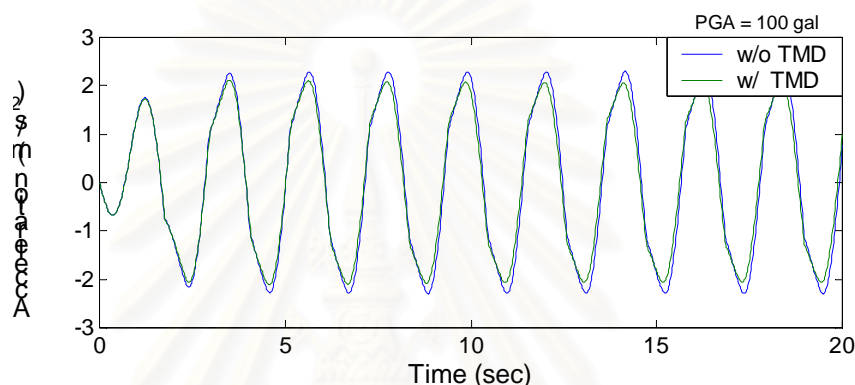
รูปที่ 6.17 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างอินฮิลาสติกที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 100 gal



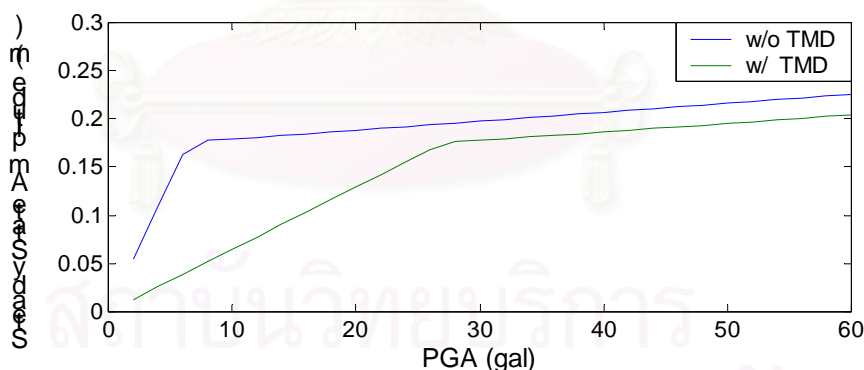
รูปที่ 6.18 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของโครงสร้างอินฮิลาสติกที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 100 gal

จะเห็นได้ว่าสำหรับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวขนาดนี้ โครงสร้างอินฮิลาสติกที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะเกิดความเสียหายมาก ระยะเวลาที่เกิดการครากในแต่ละรอบของการสั่นมีค่าสูงมาก คาบการสั่นของโครงสร้างก็จะมีค่ามากขึ้นในช่วงแรกๆ ทำให้เฟสการสั่นของโครงสร้างแตกต่างจากเฟสของความเร่งที่ฐานค่อนข้างมากและถึงแม้ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไป การตอบสนองของโครงสร้างก็ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับระบบที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า แสดงว่าในกรณีนี้ค่าแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากมวลหน่วงปรับค่ามีค่าน้อย

มากเมื่อเทียบกับแรงภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้างดังนั้นทำให้แรงลัพท์ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโครงสร้างลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้าม กลับมีโอกาสทำให้การกระจัดถาวรของโครงสร้างมีค่ามากขึ้นกว่าในกรณีไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า หากเฟสการสั่นระหว่างมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างมีค่าไม่เหมาะสม ซึ่งจะได้ทำการศึกษาต่อไป นอกจากนี้ระยะเวลาที่เกิดการครากและคาบการสั่นของโครงสร้างในแต่ละรอบยังคงมีค่าใกล้เคียงเดิม ดังนั้นพลังงานที่สลายออกเนื่องจากการครากจะไม่แตกต่างกัน จึงกล่าวได้ว่าในกรณีที่แรงกระทำหรือสัญญาณแผ่นดินไหวที่มีค่ามากนี้ การติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไปในโครงสร้างนั้นแทบจะไม่มีผลในทางที่ดีต่อการตอบสนองของโครงสร้างเลย



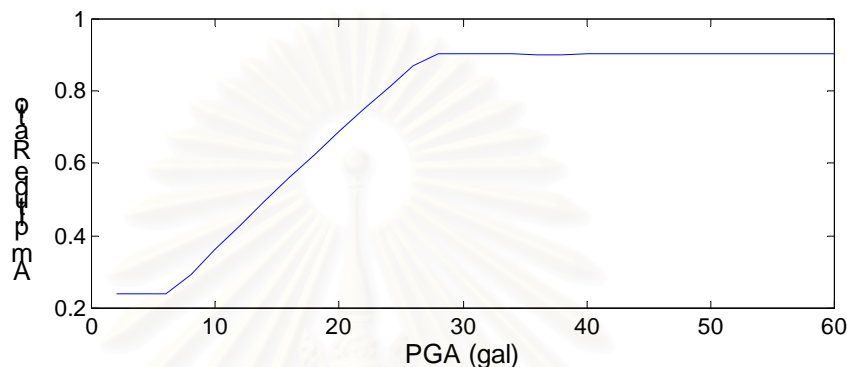
รูปที่ 6.19 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 100 gal



รูปที่ 6.20 : กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดของการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนที่ฐานเป็นค่าใดๆ

จากลักษณะพฤติกรรมของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไป โดยมีสัญญาณความเร่งของการเคลื่อนที่ฐานของโครงสร้างเป็นแบบฮาร์โมนิกไซน์ทั้ง 3 กรณีที่ได้กล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 6.20 ซึ่งแสดงถึงค่าแอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าเมื่อแอมพลิจูดของค่าความเร่งที่ฐานของโครงสร้างมีค่าต่างๆ สังเกตได้ว่า แอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ไม่ได้ติด

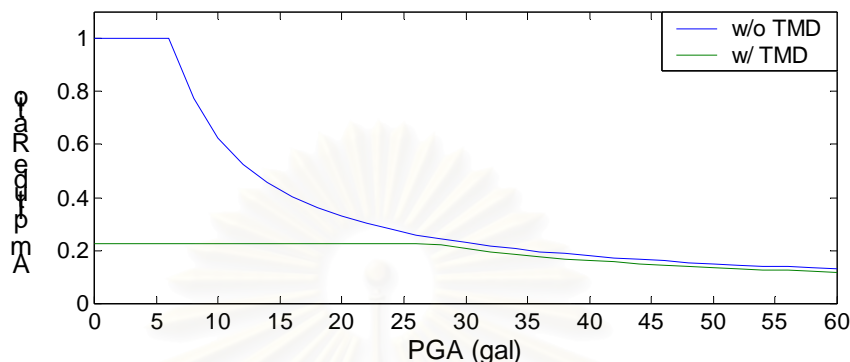
ตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของความเร่งที่ฐานเพิ่มขึ้น แต่ขนาดแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นนี้จะไม่ได้เป็นส่วนที่แปรผันตรงกับค่าแอมพลิจูดการสั่นที่เพิ่มขึ้นด้วยค่าคงที่ค่าเดียวกับในกรณีอีลาสติก แต่จะแปรผันตรงกับค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งมีค่าน้อยกว่าในกรณีอีลาสติกดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.2 เมื่อติดมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับโครงสร้างจะสังเกตได้ว่าแนวโน้มของค่าแอมพลิจูดที่สภาวะคงตัวก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ขนาดของแอมพลิจูดที่สภาวะคงตัวจะมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ไม่ได้ติดมวลหน่วงปรับค่า



รูปที่ 6.21 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดของโครงสร้างอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ

ในช่วงแรกที่ค่าความเร่งที่ฐานมีค่าต่ำ ค่าแอมพลิจูดที่สภาวะคงตัวที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับกรณีอีลาสติกคือแปรผันตรงกับค่าคงที่ที่มีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ไม่ได้ติดมวลหน่วงปรับค่า ซึ่งค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูดทั้งสองกรณีจะได้ค่าคงที่ดังในรูปที่ 6.21 เมื่อค่าแอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าแอมพลิจูดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่แตกต่างจากโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าคือค่าแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นยังคงแปรผันตรงกับค่าคงที่ค่าเดิมเหมือนในกรณีแอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานมีค่าต่ำ ในขณะที่แอมพลิจูดของโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยค่าคงที่ที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างชั้นเฉยช่วงอีลาสติก แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแอมพลิจูดของทั้งสองกรณี ค่าอัตราส่วนที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยความชันค่าหนึ่ง เนื่องจากการกระจัดของโครงสร้างกรณีติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าใกล้เคียงกับการกระจัดของโครงสร้างกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ามากยิ่งขึ้นเมื่อแอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงผลของการลดการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงนี้ และช่วงสุดท้ายที่แสดงให้เห็นถึงผลของการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับโครงสร้างที่เกิดสภาพอีลาสติกเนื่องจากความรุนแรงของสัญญาณความเร่งที่ฐานของโครงสร้างมีค่าสูงมาก มวลหน่วงปรับค่าแทบจะไม่มีผลในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญมากนัก ค่าแอมพลิจูดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าจะมีขนาดเพิ่มขึ้นโดยแปรผันตรงกับค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับค่าคง

ที่ของกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าแอมพลิจูดการสั่นที่ลดลงมาก่อนข้าง จะมีค่าคงที่ในช่วงของแอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานนี้ โดยค่าแอมพลิจูดการสั่นของทั้งสองกรณีมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดทั้งสองก็จะมีค่าใกล้เคียงกับ 1 มากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.21

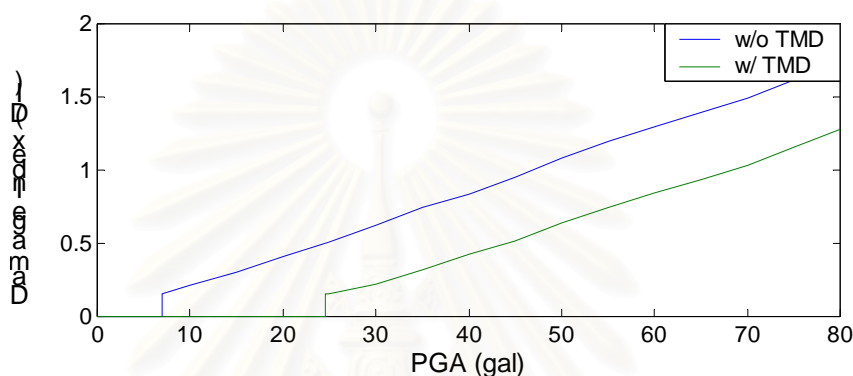


รูปที่ 6.22 : กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับการกระจัดของโครงสร้างอีลาสติก เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ

การติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าทำให้ค่าอัตราส่วนการกระจัดมีค่าน้อยกว่า 1 เมื่อขนาดของความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าต่ำดังในรูปที่ 6.22 ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่ามีการสั่นที่สภาวะคงตัวน้อยกว่าโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างยังคงอยู่ในช่วงอีลาสติกเนื่องจากมีค่าอัตราส่วนการกระจัดที่คงที่เหมือนที่กล่าวในหัวข้อ 6.1 โดยช่วงที่โครงสร้างมีการกระจัดในช่วงอีลาสติกจะครอบคลุมขนาดของความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงความสามารถของมวลหน่วงปรับค่าในการเพิ่มความต้านทานให้กับโครงสร้างให้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดของความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนของการกระจัดมีค่าน้อยลงเนื่องจากการกระจัดของโครงสร้างอีลาสติกมีค่าลดลงเพราะเกิดการครากของโครงสร้าง ซึ่งค่าอัตราส่วนของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการกระจัดที่สภาวะคงตัวมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 6.20 แต่ในระบบที่ติดมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย

เช่นเดียวกับกับกราฟเปรียบเทียบแอมพลิจูดของการกระจัด กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าที่พิจารณาที่เวลา 50 วินาที เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าต่างๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 6.23 ก็ให้ผลที่สอดคล้องไปในทางเดียวกันคือความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงได้ค่อนข้างมากที่แอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานค่าต่ำๆ จากเดิมที่โครงสร้างเกิดความเสียหายระดับหนึ่งเนื่องจากการสั่นในช่วงอีลาสติก

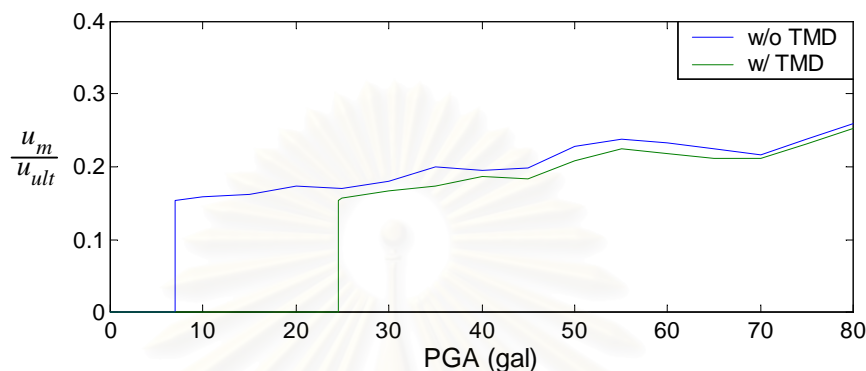
ที่มีการครากไม่รุนแรงนักแต่เมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไปก็สามารถลดการสั่นของโครงสร้างลง ทำให้โครงสร้างไม่เกิดความเสียหายแต่อย่างใด แต่เมื่อแอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานของโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงระดับความรุนแรงปานกลาง ความเสียหายมีมากขึ้นเรื่อยๆ สำหรับโครงสร้างกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า แต่เมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าไป ความเสียหายของโครงสร้างจะลดลง ซึ่งเป็นผลจากค่าพลังงานที่สลายออกไปเนื่องจากการครากของโครงสร้างในระบบที่ติดมวลหน่วงปรับค่ามีค่าลดลงนั่นเอง ในกรณีนี้ค่าการกระจัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก



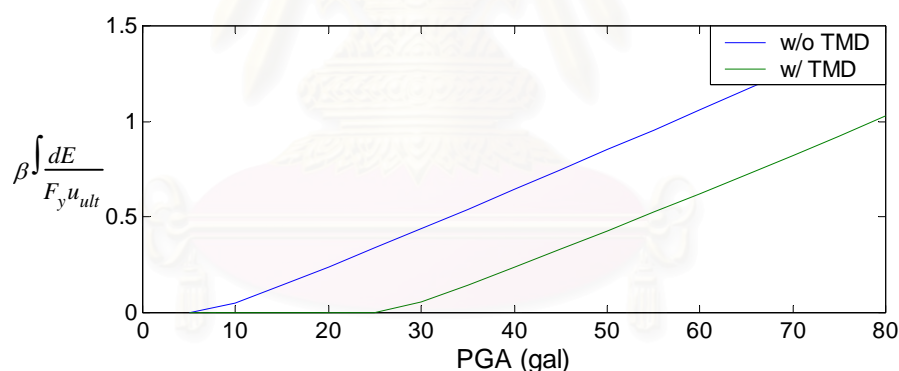
รูปที่ 6.23 : กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างอินอีลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสัญญาณความเร่งของการสั่นที่ฐานของโครงสร้างมีลักษณะเป็นฟังก์ชันฮาร์โมนิกไซน์ ค่าดัชนีความเสียหายที่เกิดจากเทอมพลังงานจะมีค่ามากกว่าค่าความเสียหายเนื่องจากการกระจัดสูงสุด ดังนั้นค่าดัชนีความเสียหายที่ลดลงจึงเป็นผลจากเทอมพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากมากกว่าที่จะขึ้นกับเทอมการกระจัดสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 6.24 และรูปที่ 6.25 ที่แสดงถึงค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าที่พิจารณาเฉพาะพจน์ของการกระจัดสูงสุดและพจน์ของพลังงานที่สลายออกไปเนื่องจากการครากเท่านั้นตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าดัชนีความเสียหายที่พิจารณาจากพจน์ของการกระจัดสูงสุดเท่านั้นจะให้ค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันสำหรับโครงสร้างทั้งสอง แต่ค่าดัชนีความเสียหายที่พิจารณาเฉพาะการสลายพลังงานเนื่องจากการครากของโครงสร้างเท่านั้นที่เห็นได้ว่ามีค่าลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ดูเหมือนค่าที่ลดลงของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าคงที่เมื่อความเร่งของการสั่นที่ฐานเพิ่มขึ้นนี้ แต่หากเปรียบเทียบเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่าดัชนีความเสียหายของกรณีที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าก็จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนนี้จะมีค่าเข้าใกล้หนึ่งมากขึ้นเมื่อความเร่งของการสั่นที่ฐานเพิ่มขึ้น ซึ่งก็แสดงให้เห็นว่าผลของการลดความเสียหายของมวลหน่วงปรับค่าก็จะมีค่าลดลงเมื่อความเร่งของการสั่นที่ฐานเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเสียหายของโครงสร้างที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น ซึ่งก็ให้ผลเช่นเดียวกับ

กราฟแสดงการกระจัดที่สภาวะคงตัวที่ได้กล่าวไปข้างต้น และช่วงสุดท้ายที่ค่าความเร่งที่ฐานของโครงสร้างมีความรุนแรงมากนั้น ค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้งสองระบบจะมีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันและค่าอัตราส่วนระหว่างค่าแอมพลิจูดทั้งสองก็จะมีค่าใกล้เคียงกับ 1 ซึ่งแสดงว่ามวลหน่วงปรับค่าไม่มีผลต่อการลดความเสียหายของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อแอมพลิจูดของความเร่งของการสั่นที่ฐานสูงๆ



รูปที่ 6.24 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างของระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเป็นค่าใดๆ



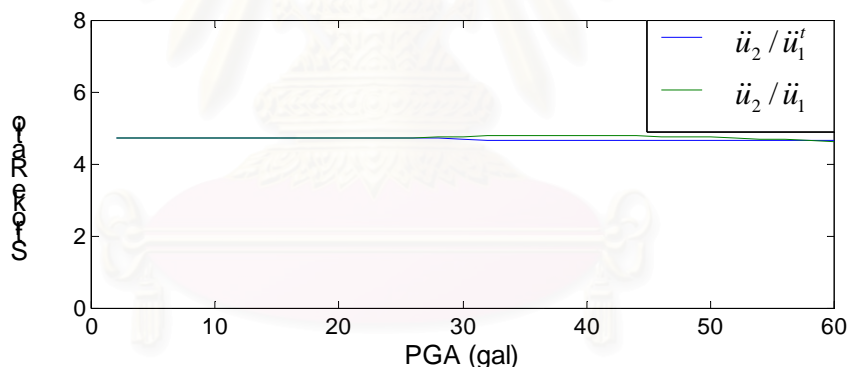
รูปที่ 6.25 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างของระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเป็นค่าใดๆ

### 6.2.1 การตอบสนองของมวลหน่วงปรับค่า

จากประสิทธิภาพในการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าที่สามารถวัดได้จากปริมาณพลังงานที่สลายออกไปจากโครงสร้างที่ขึ้นอยู่กับค่ามวลของมวลหน่วงปรับค่า การสั่น(stroke)ของมวลหน่วงปรับค่าและเฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับการสั่นของโครงสร้างดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 6.1 ดังนั้นเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการทำงานของมวลหน่วง

ปรับค่าในกรณีที่โครงสร้างมีพฤติกรรมในช่วงอินีลาสติก จึงจะได้ทำการศึกษาถึงการสั่น(stroke)และ เฟสการสั่นของมวลห้วงปรับค่าโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากสมการการเคลื่อนที่ของมวลห้วงปรับค่าจะเห็นได้ว่าการสั่นของมวลห้วงปรับค่าจะขึ้นกับความเร่งสัมบูรณ์ที่ยอดของโครงสร้างเช่นเดียวกับในกรณีโครงสร้างอินีลาสติกที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 6.1 แต่สำหรับกรณีที่โครงสร้างมีพฤติกรรมในช่วงอินีลาสติกนี้ การครากทำให้ฟังก์ชันความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างมีลักษณะที่ไม่เป็นฟังก์ชันฮาร์โมนิกไซน์ที่สมบูรณ์ มีลักษณะรูปร่าง ขนาดและเฟสแตกต่างไปจากความเร่งสัมพัทธ์ ทั้งนี้ขึ้นกับความรุนแรงของการครากที่เกิดขึ้นดังที่ได้แสดงในหัวข้อ 5.2 ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าการที่ฟังก์ชันความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างเกิดการเสียรูปไปจากฟังก์ชันไซน์นี้จะส่งผลอย่างไรต่อค่าอัตราส่วนการกระจัดของมวลห้วงปรับค่าต่อการกระจัดของโครงสร้างหรือพิจารณาเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างความเร่งของมวลห้วงปรับค่าและความเร่งที่ฐานของมวลห้วงปรับค่า ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 6.26 ที่แสดงค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของความเร่งสัมพัทธ์ของมวลห้วงปรับค่าต่อแอมพลิจูดของความเร่งสัมบูรณ์ที่ยอดของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวที่แอมพลิจูดการสั่นที่ฐานขนาดต่างๆ

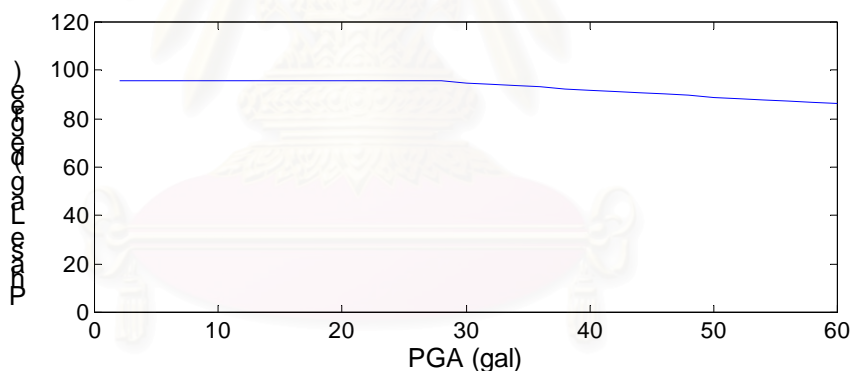


รูปที่ 6.26 : กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดของความเร่งของมวลห้วงปรับค่าต่อแอมพลิจูดของความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างและต่อแอมพลิจูดของความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้าง

จากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงที่แอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานมีความรุนแรงต่ำนั้น อัตราส่วนแอมพลิจูดของความเร่งที่คำนวณได้มีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากการสั่นของโครงสร้างยังคงอยู่ในช่วงอินีลาสติก ซึ่งค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของความเร่งจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลห้วงปรับค่าดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 6.1 เมื่อขนาดของความเร่งที่ฐานเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูดของความเร่งยังคงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณในกรณีที่แอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานมีค่าต่ำ ทั้งนี้อาจจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงบ้างแต่ก็

ไม่มากนัก นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดความเร่งสัมพัทธ์ของมวลหน่วงปรับค่าต่อแอมพลิจูดของความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวที่แอมพลิจูดการสั่นที่ฐานขนาดต่างๆ ก็ให้ผลใกล้เคียงกัน ดังนั้นกล่าวได้ว่ามวลหน่วงปรับค่ายังคงมีความสามารถที่จะสร้างการสั่นของมวลหน่วงปรับค่า(stroke)เทียบกับการสั่นที่ฐานของมวลหน่วงปรับค่าได้เท่ากับกรณีที่โครงสร้างอยู่ในช่วงอิลาสติก ถึงแม้สัญญาณความเร่งที่ฐานของมวลหน่วงปรับค่าจะไม่เป็นฟังก์ชันไซน์ที่สมบูรณ์ก็ตาม

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับเฟสการสั่นของโครงสร้างดังแสดงในกราฟรูปที่ 6.27 ซึ่งแสดงค่าความต่างเฟสระหว่างการสั่นของโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าที่สภาวะคงตัวที่แอมพลิจูดของความเร่งของการสั่นที่ฐานค่าต่างๆ ซึ่งจากกราฟชี้ให้เห็นว่า เมื่อแอมพลิจูดของความเร่งของการสั่นที่ฐานมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความต่างเฟสที่เกิดขึ้นจะมีค่าเปลี่ยนไป โดยในช่วงที่ค่าแอมพลิจูดการสั่นที่ฐานต่ำ ความต่างเฟสที่เกิดขึ้นจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างมีพฤติกรรมในช่วงอิลาสติก แต่เมื่อแอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานมีค่าสูงขึ้น ความต่างเฟสที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงจากค่าความต่างเฟสในกรณีอิลาสติกบ้างเล็กน้อย ซึ่งมีผลต่อพลังงานที่สามารถสลายออกจากโครงสร้างโดยมวลหน่วงปรับค่าไม่มากนัก



รูปที่ 6.27 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสระหว่างเฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าและเฟสการสั่นของโครงสร้าง เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าใดๆ

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าแอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานเพิ่มขึ้น พบว่าค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดระหว่างความเร่งสัมพัทธ์ของมวลหน่วงปรับค่าและความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวยังคงมีค่าใกล้เคียงเดิม ในขณะที่ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดระหว่างความเร่งสัมพัทธ์ของมวลหน่วงปรับค่าและความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวมีแนวโน้มลดลง ดังจะเห็นได้จากแอมพลิจูดการสั่นของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้าง นอกจากนี้ความต่างเฟสระหว่างการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าและการสั่นของโครงสร้างมีแนวโน้มลดลงจากค่าความต่างเฟสในกรณีอิลาสติกมากขึ้น ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้



ว่าเมื่อขนาดของความถี่ฐานของโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้น โครงสร้างเกิดความเสียหายมากขึ้น การครากของโครงสร้างส่งผลให้อัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของมวลหน่วงปรับค่าต่อแอมพลิจูดการสั่นสัมพันธ์กับฐานของโครงสร้างมีค่าลดลง ซึ่งจะมีผลต่อขนาดของแรงกระทำต่อโครงสร้างเนื่องจากมวลหน่วงปรับค่ามีค่าลดลงและความต่างเฟสระหว่างเฟสการสั่นของโครงสร้างและเฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่ามีความแตกต่างกันในทิศทางที่ไม่เหมาะสม โดยความไม่เหมาะสมทั้งสองอย่างนี้ จะมีแนวโน้มมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อความรุนแรงของการครากมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งยอมเป็นดัชนีที่ชี้ประสิทธิภาพการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อโครงสร้างเกิดความเสียหายมากขึ้น ถึงแม้คาบการสั่นของโครงสร้างและคาบการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าเท่ากับคาบการสั่นของสัญญาณความถี่ฐานที่สภาวะคงตัวก็ตาม ซึ่งไม่มีผลของการเกิดความสูญเสียความสอดคล้องของความถี่ (Detuning) ระหว่างโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าแต่อย่างใด

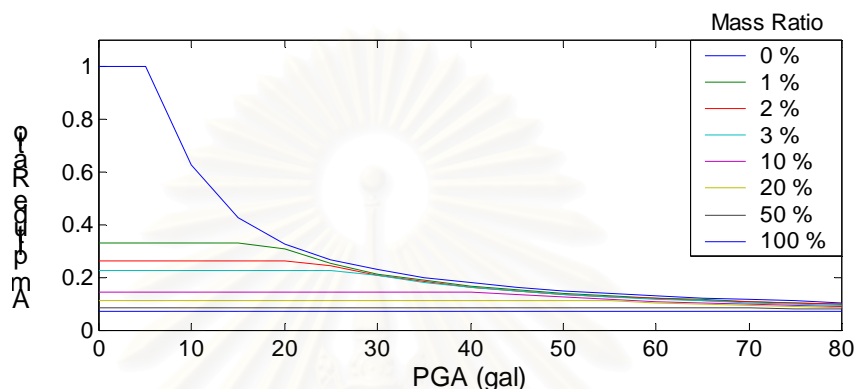
## 6.2.2 อิทธิพลเนื่องจากน้ำหนักของมวลหน่วงปรับค่า

อย่างที่ได้อธิบายไปข้างต้นว่า นอกเหนือจากแอมพลิจูดการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าและเฟสการสั่นระหว่างโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าที่มีผลต่อปริมาณพลังงานที่สามารถสลายออกไปได้โดยใช้มวลหน่วงปรับค่าแล้ว ขนาดของมวลหน่วงปรับค่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณพลังงานที่สลายออกจากโครงสร้างโดยหากขนาดมวลของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณพลังงานที่สลายออกไปก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าเมื่อขนาดมวลของมวลหน่วงปรับค่ามีค่ามากขึ้น จึงได้ทำการศึกษาโดยเพิ่มขนาดมวลของมวลหน่วงปรับค่าที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้างให้มีค่ามากขึ้น

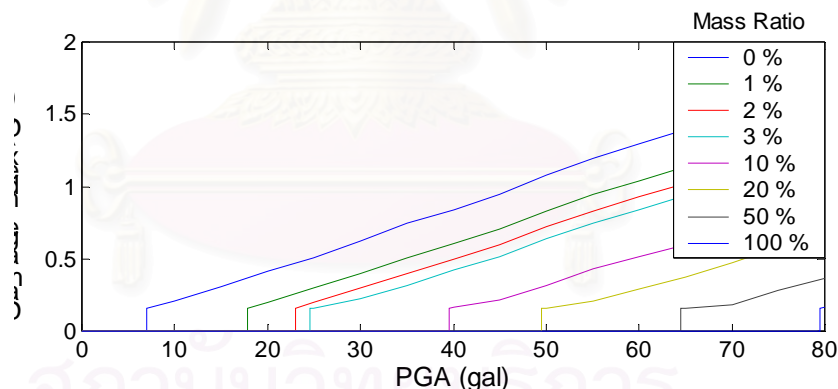
ผลที่ได้เป็นดังในรูปที่ 6.28 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนของแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้างอินฮิลาสติกที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าต่อแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้างฮิลาสติกที่สมมูลกันที่แอมพลิจูดการสั่นของความถี่ฐานเป็นค่าต่างๆ โดยค่าอัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่าต่อมวลของโครงสร้างมีค่า 0, 1, 2, 3, 10, 20 50 และ 100 เปอร์เซนต์ตามลำดับ และกราฟในรูปที่ 6.29 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าที่ค่าแอมพลิจูดของความถี่ฐานเป็นค่าต่างๆ โดยค่าอัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่าต่อมวลของโครงสร้างมีค่าเช่นเดียวกับกราฟข้างต้น

จากกราฟเปรียบเทียบแอมพลิจูดของการกระจัดชี้ให้เห็นว่า ในกรณีที่ค่าอัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่าต่อมวลของโครงสร้างมีค่ามากขึ้นค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของการกระจัดมีค่าลดลง ในบริเวณที่แอมพลิจูดการสั่นที่ฐานมีค่าต่ำ ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดจะเปลี่ยน

เป็นค่าคงที่ค่าใหม่ซึ่งมีค่าน้อยลงเมื่ออัตราส่วนมวลมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ช่วงที่อัตราส่วนแอมพลิจูดมีค่าคงที่ก็จะขยายครอบคลุมช่วงความเร่งที่ฐานที่มากขึ้น แสดงว่าโครงสร้างมีความต้านทานต่อขนาดของแผ่นดินไหวได้มากขึ้นก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้นภายในโครงสร้างและในกรณีที่โครงสร้างเกิดความเสียหายทั้งที่ได้ติดตามมวลห่อปรับค่าแล้ว การติดตามมวลห่อปรับค่าที่มีอัตราส่วนมวลมากขึ้นสามารถลดการสั่นไหวได้ค่าหนึ่งแต่ไม่มากเท่าการลดการสั่นไหวในกรณีอิลาสติก



รูปที่ 6.28 : กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตามมวลห่อปรับค่าที่มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 0, 1, 2, 3, 10, 20, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และการกระจัดของโครงสร้างอิลาสติก เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าต่างๆ



รูปที่ 6.29 : กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดตามมวลห่อปรับค่าที่มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 0, 1, 2, 3, 10, 20, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าต่างๆ

จากกราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างจะเห็นได้ว่า ค่าดัชนีความเสียหายที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าดัชนีความเสียหายของระบบที่มีค่าอัตราส่วนมวลของมวลห่อปรับค่าต่ำกว่า โดยในช่วงที่ค่าแอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานต่ำ ระบบที่ติดตั้งมวลห่อปรับค่าที่มีอัตราส่วนมวลมากกว่าจะเริ่มมีค่าความเสียหายที่แอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานมีค่าสูงขึ้น เมื่อแอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานอยู่ในระดับความรุนแรงปานกลาง ค่าดัชนีความเสียหายที่

ลดลงมาเนื่องจากการติดมวลงปรับค่าจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนมวลงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าดัชนีความเสียหายที่ลดลงมาจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งสำหรับอัตราส่วนมวลงค่าหนึ่งในช่วงระดับความรุนแรงนี้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าพลังงานที่สลายโดยการครากของโครงสร้างที่ลดลงมา และในช่วงแอมพลิฟูดการสั่นที่ฐานมีค่ามากขึ้น ค่าดัชนีความเสียหายของระบบที่ติดตั้งมวลงปรับค่าที่มีค่าอัตราส่วนมวลงค่าต่างๆ จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ติดมวลงปรับค่า ซึ่งย่อมแสดงถึงประสิทธิภาพของมวลงปรับค่าที่ไม่มีผลในการลดการสั่นไหวและความเสียหายของโครงสร้างเมื่อความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าสูงมาก

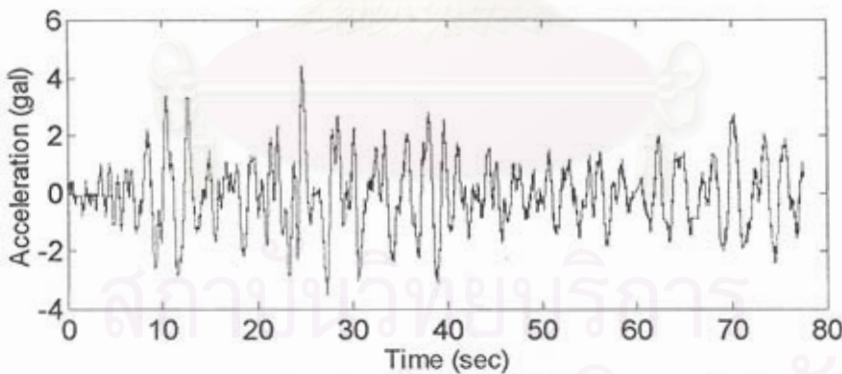


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 6.3 ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว

นอกเหนือจากการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าภายใต้สัญญาณความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่พ้องกับความถี่ของโครงสร้าง ดังที่กล่าวข้างต้น ยังได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวจริงที่ค่อนข้างมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณฮาร์โมนิก (Harmonic-liked) มีความถี่เด่นชัด (Predominant Frequency) ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการสั่นพ้องขึ้นได้เหมือนกับสัญญาณฮาร์โมนิกที่ได้ศึกษาข้างต้น ดังนั้นจึงทำการศึกษาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวจริงโดยมีรายละเอียดดังนี้

โครงสร้างที่ใช้ในการศึกษายังคงเป็นระบบโครงสร้างและระบบมวลหน่วงปรับค่าเดิมที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้สัญญาณความเร่งที่ฐานแบบฮาร์โมนิกที่ได้กล่าวไปข้างต้น ทั้งนี้การศึกษาในส่วนนี้เปลี่ยนแปลงเฉพาะสัญญาณความเร่งที่ฐานของโครงสร้างโดยใช้สัญญาณแผ่นดินไหวจริงที่วัดได้ที่ใต้ตึกโบหยกเมื่อปี ค.ศ.1995 และสัญญาณแผ่นดินไหวที่วัดได้ในประเทศเม็กซิโกเมื่อปี ค.ศ.1985 ดังแสดงในรูปที่ 6.30 โดยขนาดของสัญญาณแผ่นดินไหวได้ทำการปรับให้มีค่าความเร่งสูงสุดเป็นค่าต่างๆตามที่ต้องการ แต่ยังคงรักษารูปแบบและความถี่ของสัญญาณไว้ดังเดิมเพื่อให้เกิดการสั่นพ้องกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง



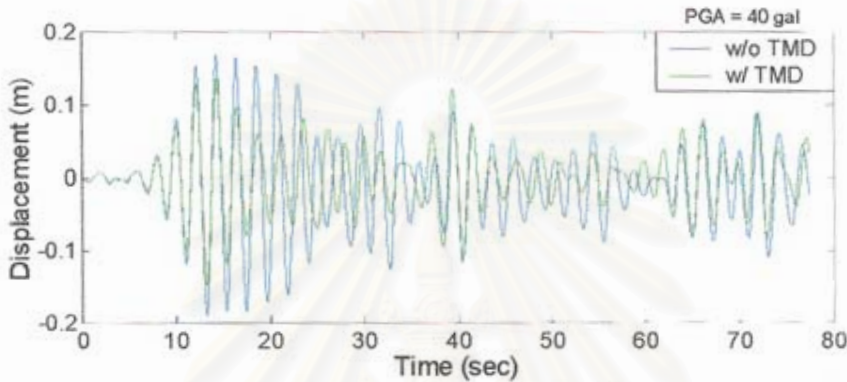
รูปที่ 6.30 : สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวจริงที่วัดได้ที่ใต้ตึกโบหยก 1 เมื่อปี 1995

#### 6.3.1. การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีขนาด $PGA = 40$ gal

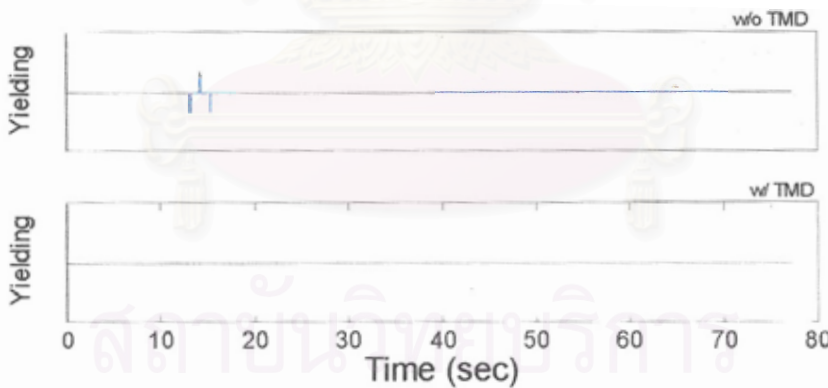
จากกราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า ดังแสดงในรูปที่ 6.31 และกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งและระยะเวลาของการครากที่เกิดขึ้นที่เวลาใดๆ ในรูปที่ 6.32 เห็นได้ว่าที่ขนาดของสัญญาณแผ่นดินไหวระดับนี้ โครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะมีการกระจัดเฉยช่วงอิลาสติกไปบ้าง แต่ไม่เกิดการกระจัดถาวรขึ้นภายหลังที่

สัญญาณแผ่นดินไหวผ่านไป โครงสร้างเกิดความเสียหายเล็กน้อยซึ่งสามารถวัดค่าพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากของโครงสร้างได้

แต่เมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับโครงสร้าง การกระจัดของโครงสร้างจะมีค่าลดลงน้อยกว่าการกระจัดที่จุดคราก ทำให้โครงสร้างยังคงสั่นไหวอยู่ในช่วงอีลาสติก การกระจัดถาวรของโครงสร้างมีค่าเท่ากับศูนย์ ไม่เกิดความเสียหายขึ้นภายในโครงสร้าง ค่าพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากของโครงสร้างและจำนวนครั้งที่เกิดการครากมีค่าเท่ากับศูนย์



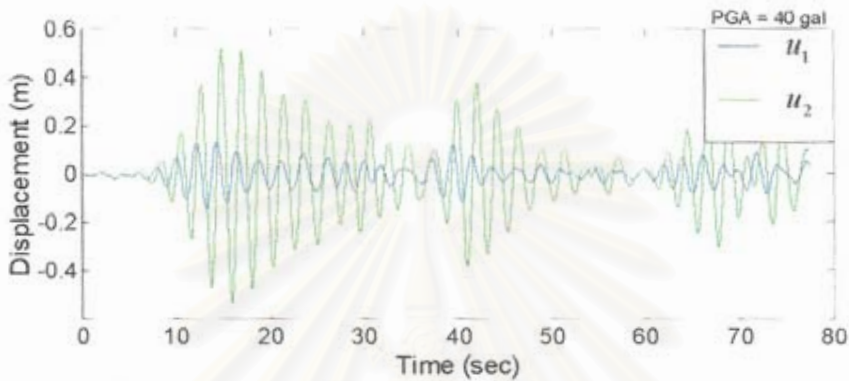
รูปที่ 6.31 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า 3% ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ ที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 40 gal



รูปที่ 6.32 : กราฟเปรียบเทียบตำแหน่ง ระยะเวลาและจำนวนครั้งของการครากที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 40 gal

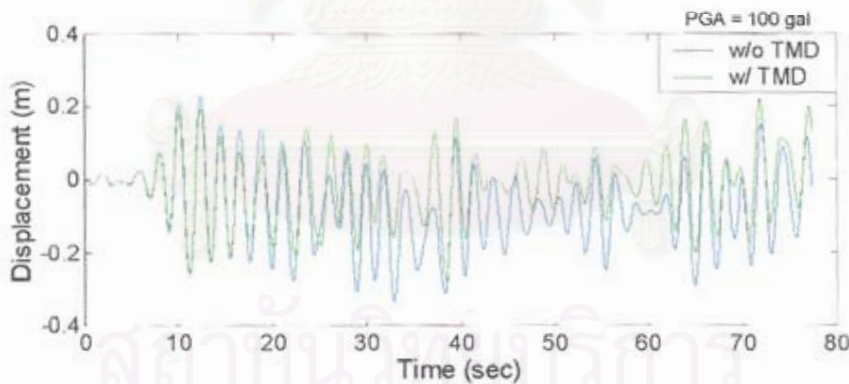
จากกราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าที่เกิดขึ้นดังในรูปที่ 6.33 พบว่าการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าโดยส่วนใหญ่มีขนาดมากกว่าการกระจัดของโครงสร้าง ทั้งนี้การกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าจะขึ้นกับขนาดของความเร่งสัมบูรณ์ที่ยอดของโครงสร้าง โดยในกรณีที่โครงสร้างยังสั่นในช่วงอีลาสติก ค่าอัตราส่วนระหว่างการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้างจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง

ของมวลหน่วงปรับค่า (กรณีอัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่าเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ ค่าอัตราส่วนการกระจัดมีค่าประมาณ 5) ดังลักษณะที่กล่าวในกรณีที่ความถี่ของการเคลื่อนตัวที่ฐานแบบฮาร์โมนิก นอกจากนี้เนื่องจากการตอบสนองของโครงสร้างไม่ได้คงที่โดยตลอด ทำให้มวลหน่วงปรับค่าต้องอาศัยช่วงระยะเวลาหนึ่งในการปรับตัวให้สอดคล้องกับการสั่นของโครงสร้างที่ปรับเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงมีบางเวลาที่มีการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าไม่ได้มีขนาดที่มากกว่าการกระจัดของโครงสร้าง



รูปที่ 6.33 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความถี่สูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 40 gal

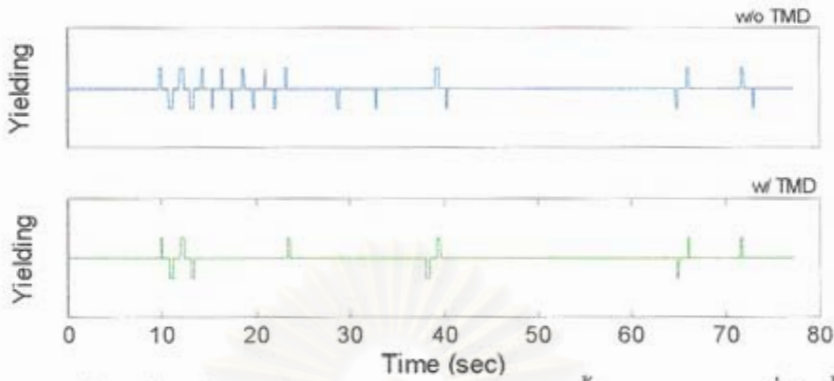
### 6.3.2. การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีขนาด PGA = 100 gal



รูปที่ 6.34 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า 3% ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ ที่เวลาใดๆ เมื่อความถี่สูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal

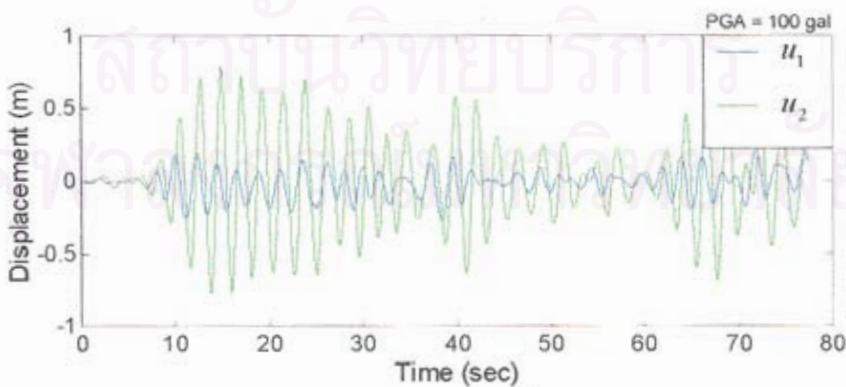
จากกราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า ดังแสดงในรูปที่ 6.34 และกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งและระยะเวลาที่เกิดการครากที่เวลาใดๆ ในรูปที่ 6.35 เห็นได้ว่าที่ขนาดของสัญญาณแผ่นดินไหวระดับนี้ โครงสร้างที่ไม่ได้ติดมวลหน่วงปรับค่าจะมีการกระจัดเลยช่วงอิลาสติก โครงสร้างเกิดความเสียหาย มีการกระจัดถาวรเกิดขึ้น เกิดการครากทั้งหมด 21 ครั้ง สามารถวัดค่าพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากของโครงสร้างได้  $2.47 \times 10^7$

จูลน์ และมีค่าอัตราส่วนระหว่างการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างต่อการกระจัดของโครงสร้าง อีลาสติกที่สมมูลกันเป็น 0.68



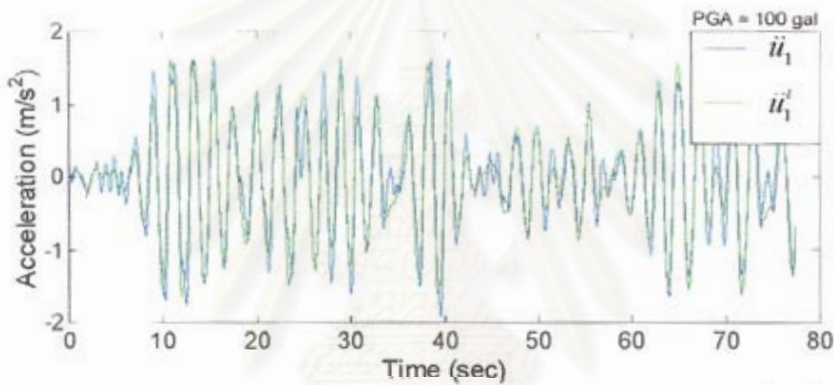
รูปที่ 6.35 : กราฟเปรียบเทียบตำแหน่ง ระยะเวลาและจำนวนครั้งของการครากที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal

เมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับโครงสร้าง การกระจัดของโครงสร้างมีค่าลดลง แต่ยังคงมีค่ามากกว่าการกระจัดที่จุดครากของโครงสร้าง นั่นคือโครงสร้างสั้นไหวเลยช่วงอีลาสติก ทั้งที่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับโครงสร้างแล้วก็ตาม อัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างเทียบกับโครงสร้างอีลาสติกได้เท่ากับ 0.56 ซึ่งมีค่าลดลงจากกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า แต่ค่าที่ลดลงมีขนาดที่น้อยกว่าในกรณีแผ่นดินไหวระดับต่ำ นอกจากนี้การกระจัดถาวรของโครงสร้างก็แตกต่างกันไป เมื่อพิจารณาความเสียหายของโครงสร้างจะเห็นได้ว่าจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากในแต่ละครั้งมีค่าลดลงเหลือเพียง 10 ครั้งและพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากของโครงสร้างจึงมีค่าลดลงเหลือ  $1.48 \times 10^7$  จูลน์ หรือคิดเป็น 0.6 เท่าของพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากของโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า



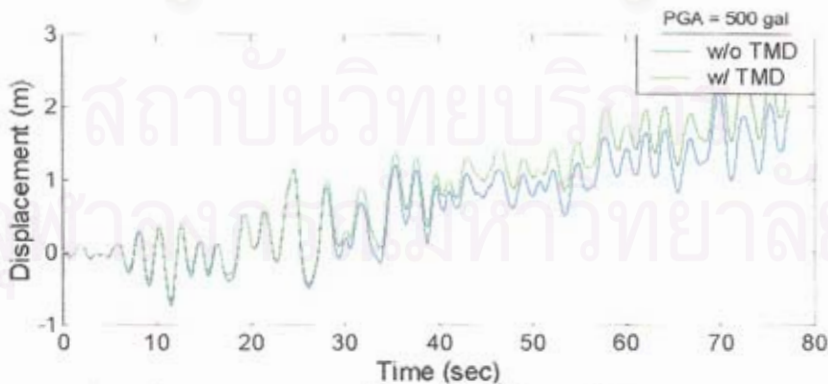
รูปที่ 6.36 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal

จากกราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.36 พบว่าการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่ายังคงมีค่ามากกว่าการกระจัดของโครงสร้าง แต่อัตราส่วนระหว่างการกระจัดจะมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดของกรณีที่มีระดับความรุนแรงต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างไปจากความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้าง ทำให้การกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าที่ขึ้นกับความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างมีขนาดลดลงบ้างเมื่อเทียบกับความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้าง เหมือนดังที่ได้กล่าวในกรณีที่ความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานแบบฮาร์โมนิก สำหรับความรุนแรงระดับนี้ ความแตกต่างระหว่างความเร่งสัมบูรณ์และความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างไม่มากนัก ดังนั้นมวลหน่วงปรับค่ายังคงมีประสิทธิภาพในการลดความเสียหายของโครงสร้างได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 6.37 : กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งสัมพัทธ์และความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal

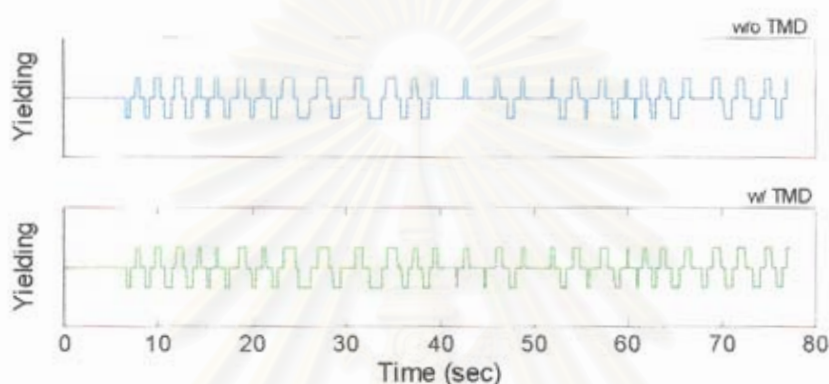
### 3. การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวขนาด PGA = 500 gal



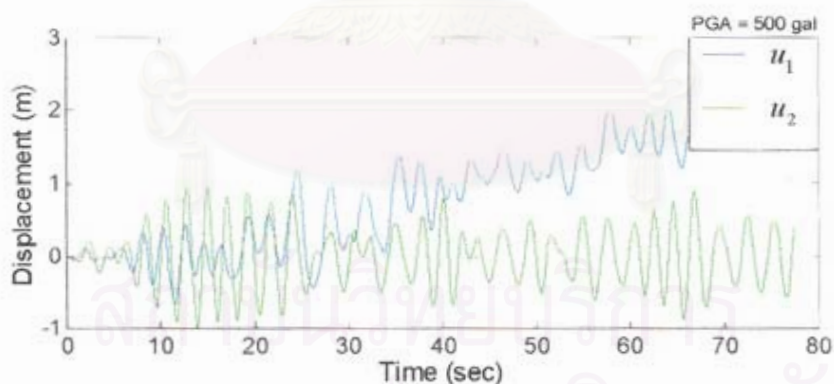
รูปที่ 6.38 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า 3% ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ ที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal



ถึงแม้ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับโครงสร้างแล้วก็ตาม แต่การกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ายังคงมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เพียงแต่มีขนาดลดลงบ้างเล็กน้อยดังในรูปที่ 6.38 โดยค่าอัตราส่วนของการกระจัดสูงสุดก็ใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เมื่อพิจารณาความเสียหายของโครงสร้างพบว่า จำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากในรูปที่ 6.39 ก็มีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ส่วนค่าพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากของโครงสร้างมีค่าเป็น 0.97 เท่าของกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า



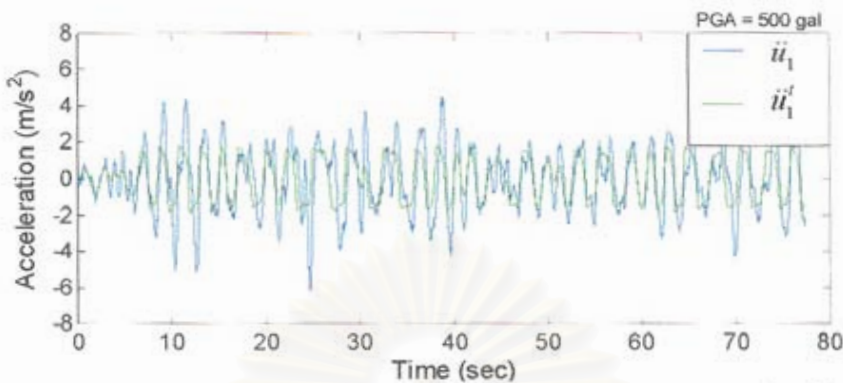
รูปที่ 6.39 : กราฟเปรียบเทียบตำแหน่ง ระยะเวลาและจำนวนครั้งของการครากที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal



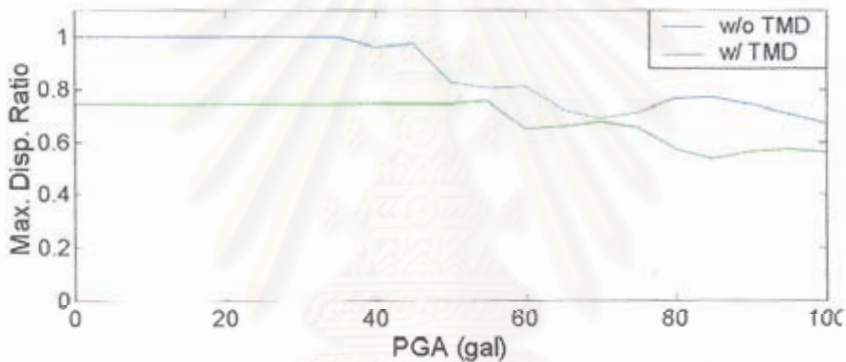
รูปที่ 6.40 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal

จากกราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าดังแสดงในรูปที่ 6.40 พบการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่ามีขนาดมากกว่าการกระจัดของโครงสร้างไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างที่มีผลต่อการสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าลดลงเมื่อเทียบกับความเร่งสัมพัทธ์ของโครงสร้างดังรูปที่ 6.41 ดังนั้นค่าอัตราส่วนระหว่างการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้างจึงมีค่าลดลงเมื่อเทียบ

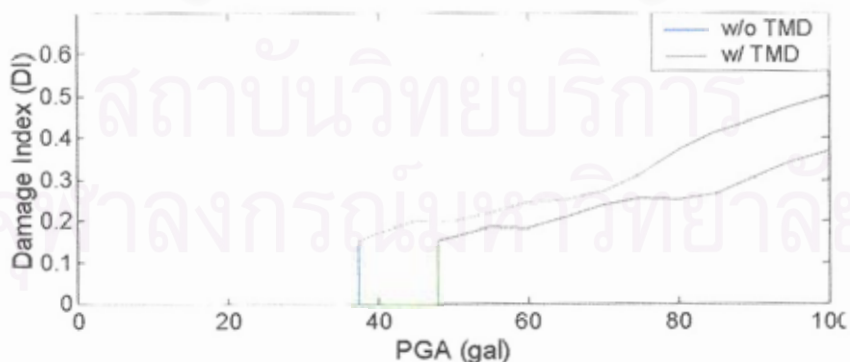
กับกรณีอีลาสติก ซึ่งย่อมมีผลต่อประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวและความเสียหายของโครงสร้าง



รูปที่ 6.41 : กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งสัมพัทธ์และความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal



รูปที่ 6.42 : กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่าใดๆ



รูปที่ 6.43: กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่าใดๆ

จากลักษณะพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่วัดได้ในกรุงเทพฯ ทั้ง 3 กรณีข้างต้น สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 6.42 ซึ่งแสดงค่าอัตราส่วนของค่าการกระจัด

สูงสุดของโครงสร้างระหว่างกรณีที่ดินและไม้ติตมวลงปรับค่าต่อการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างอิลาสติกที่สมมูลกัน และรูปที่ 6.43 ที่แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ดินและไม้ติตมวลงปรับค่า จากรูปที่ 6.42 สังเกตได้ว่าเมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่าต่ำ โครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งมวลงปรับค่ายังคงสั่นไหวอยู่ในช่วงอิลาสติกนั้น การติตมวลงปรับค่าสามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างลง ในที่นี้สามารถลดการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างได้ 25 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ในกรณีที่โครงสร้างที่ไม่ได้ติตมวลงปรับค่ามีความเสียหายเพียงเล็กน้อยนั้น การติตมวลงปรับค่าจะมีผลให้การกระจัดของโครงสร้างลดลงจนมีขนาดน้อยกว่าการกระจัดที่จุดคราก ทำให้โครงสร้างไม่เกิดความเสียหายแต่อย่างใด

เมื่อขนาดของความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีระดับความรุนแรงปานกลาง ทั้งระบบที่ดินและไม้ติตมวลงปรับค่าสั่นไหวเลยช่วงอิลาสติก เกิดความเสียหายขึ้นภายในโครงสร้าง แต่ถึงแม้โครงสร้างที่ดินและไม้ติตมวลงปรับค่าจะมีการกระจัดสูงสุดน้อยกว่ากรณีที่ไม่ติตมวลงปรับค่าเพียงเล็กน้อย แต่การติดตั้งมวลงปรับค่ามีผลทำให้ความเสียหายของโครงสร้างลดลงอย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดของความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีระดับความรุนแรงมาก โครงสร้างทั้งสองระบบมีความเสียหายค่อนข้างมาก การติตมวลงปรับค่านอกจากจะไม่ช่วยลดการสั่นไหวของโครงสร้างแล้ว ยังไม่สามารถลดความเสียหายของโครงสร้างได้อย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก (SCT\_S00E-1985) ได้แสดงในภาคผนวก ค ซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ในลักษณะเดียวกับกรณีของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯที่นำเสนอข้างต้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 7

### การปรับปรุงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่า

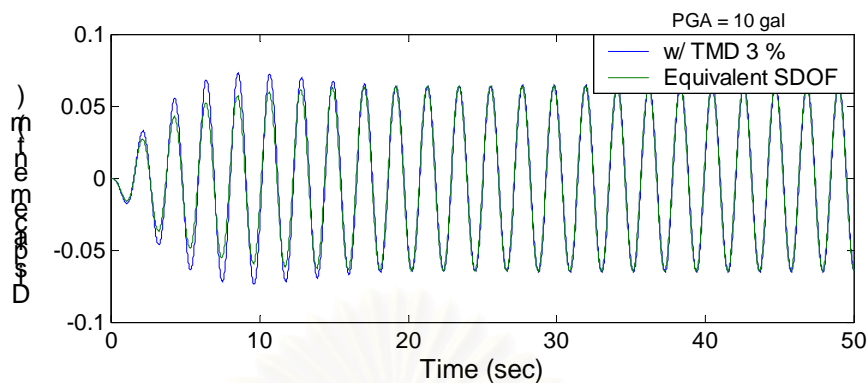
ดังที่ได้เสนอไปข้างต้น ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าลดลงเมื่อโครงสร้างมีความเสียหายมากขึ้นเนื่องจากเฟสการสั่นระหว่างโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าไม่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นและอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดสัมพัทธ์ของโครงสร้างมีค่าลดลง ส่งผลต่อพลังงานที่สลายออกจากโครงสร้างโดยมวลหน่วงปรับค่ามีค่าลดลง หรืออีกนัยหนึ่งคือค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าลดลง ทำให้ลดการสั่นไหวของโครงสร้างด้วยประสิทธิภาพที่ลดลง ดังนั้นเพื่อหาทางปรับปรุงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าให้มีค่าสูงขึ้นจึงได้ทำการศึกษาโดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 7.1. ปรับเฟสและการสั่นของมวลหน่วงปรับค่า

จากพฤติกรรมของมวลหน่วงปรับค่าที่สามารถพิจารณาเสมือนเป็นการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างให้มีค่ามากขึ้น โดยหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าที่เกิดขึ้นของโครงสร้างได้จากการตอบสนองของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวในช่วงฮิสตอรีคซึ่งเป็นตำแหน่งที่มวลหน่วงปรับค่ามีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด โดยค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่านี้จะเป็นค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการติดตามมวลหน่วงปรับค่า ทั้งนี้ขึ้นกับพารามิเตอร์ของมวลหน่วงปรับค่าเป็นสำคัญ (ค่าอัตราส่วนมวล ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงและความถี่ของมวลหน่วงปรับค่า) ดังนั้นหากปรับค่าเฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าให้มีค่าที่เหมาะสมกับเฟสการสั่นของโครงสร้างโดยตลอดและกำหนดให้ค่าอัตราส่วนการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าต่อการกระจัดของโครงสร้างให้มีค่าเท่ากับค่าอัตราส่วนของการกระจัดที่เกิดขึ้นในกรณีฮิสตอรีค จะเปรียบเสมือนการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างให้มีค่ามากขึ้นตั้งแต่โครงสร้างเริ่มสั่น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าของโครงสร้างที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะมีค่าเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

ระบบดังกล่าวข้างต้นสามารถวิเคราะห์โดยใช้ระบบโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแทนได้ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### ก. กรณีระดับความรุนแรงความเร่งที่ฐาน $PGA = 10 \text{ gal}$



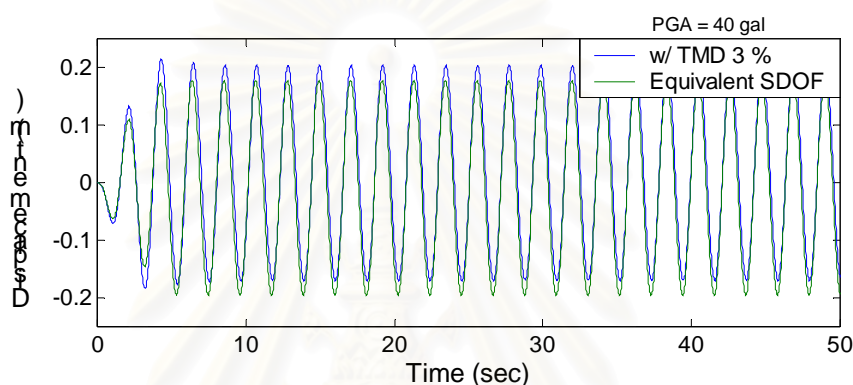
รูปที่ 7.1 : เปรียบเทียบระหว่างการกระตุ้นของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและการกระตุ้นของโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอิลาสติกที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 10 gal

ในรูปที่ 7.1 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการกระตุ้นของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและการกระตุ้นของโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอิลาสติกที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ พบว่าการกระตุ้นของโครงสร้างทั้งสองระบบยังคงอยู่ในช่วงอิลาสติก การตอบสนองของระบบทั้งสองจะต่างกันในช่วงแรกและมีค่าเท่ากันเมื่อทั้งสองระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว อธิบายได้ว่ามวลหน่วงปรับค่าต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวเพื่อให้มีเฟสและแอมพลิจูดของการสั่นที่เหมาะสมกับเฟสและแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้าง ดังนั้นการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าในระยะเวลาดังกล่าวยังไม่สมบูรณ์เต็มที่ ทำให้ไม่สามารถลดการสั่นไหวหรือเพิ่มสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ในทันที การตอบสนองของระบบที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจึงมีค่ามากกว่าในระบบที่เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงอยู่เล็กน้อย ส่วนการตอบสนองที่สภาวะคงตัวจะมีค่าเท่ากันทั้งสองระบบ ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความสามารถในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้กับโครงสร้างโดยมวลหน่วงปรับค่า เนื่องจากมวลหน่วงปรับค่าจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อโครงสร้างยังคงอยู่ในสภาพอิลาสติก

### ข. กรณีระดับความรุนแรงความเร่งที่ฐาน $PGA = 40 \text{ gal}$

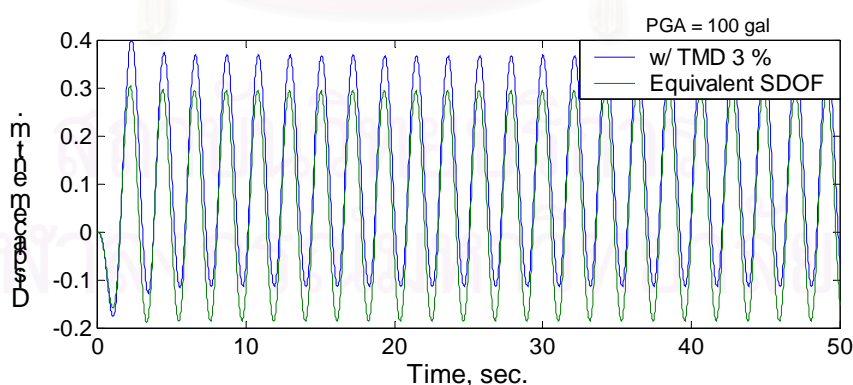
เมื่อขนาดความเร่งสูงสุดที่ฐานของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 40 gal การตอบสนองของโครงสร้างทั้งสองระบบมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันเนื่องจากทั้งสองระบบมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอินอิลาสติก การกระตุ้นของโครงสร้างในระบบ SDOF ที่มีสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้าง

เท่ากับสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าจะมีค่าต่ำกว่าการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าอยู่เล็กน้อย ค่าการกระจัดถาวรจะมีค่าลดลงทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้กับโครงสร้างในระบบ SDOF มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่เพิ่มขึ้นในระบบที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เนื่องจากในระบบที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุดในช่วงอิลาสติกจะมีค่าลดลงเมื่อโครงสร้างเกิดการครากเนื่องจากการสูญเสียความสอดคล้องของเฟสการสั่นระหว่างโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่า รวมไปถึงค่าแอมพลิจูดการสั่นที่เปรียบเทียบระหว่างการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าและการสั่นสัมพัทธ์ของโครงสร้างที่มีค่าลดลงดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 6



รูปที่ 7.2 : เปรียบเทียบระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอิลาสติกที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal

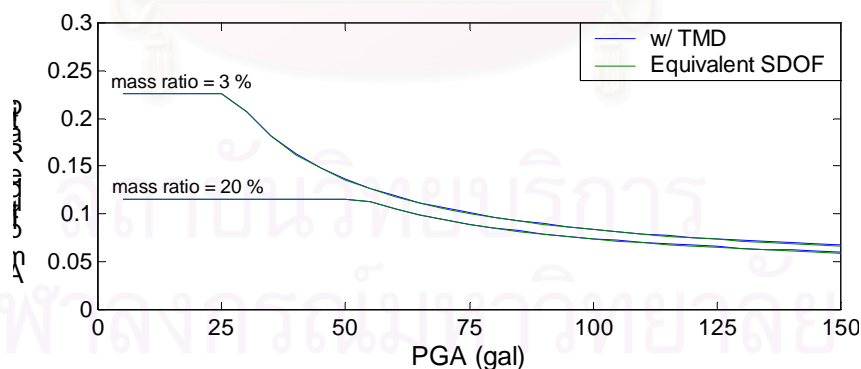
ค. กรณีระดับความรุนแรงความเร่งที่ฐาน  $PGA = 100 \text{ gal}$



รูปที่ 7.3 : เปรียบเทียบระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอิลาสติกที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal

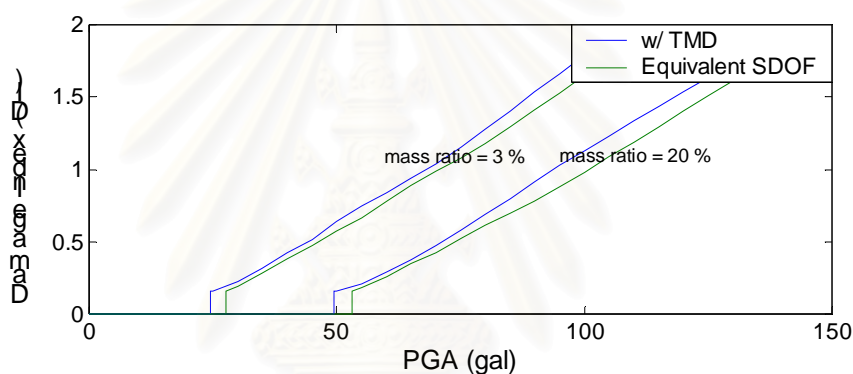
ในรูปที่ 7.3 เมื่อค่าความเร่งพื้นฐานของโครงสร้างมีระดับความรุนแรงสูง ความต่างของเฟสการสั่นระหว่างโครงสร้างและมวลห้วงปรับค่าจะมีค่ามากขึ้นและอัตราส่วนแอมพลิจูดระหว่างการสั่นของมวลห้วงปรับค่าต่อการสั่นสัมพันธ์ของโครงสร้างมีค่าลดลงเนื่องจากโครงสร้างมีความเสียหายมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเนื่องจากการติดตั้งมวลห้วงปรับค่าจะมีผลค่าลดลง ดังนั้นการตอบสนองของโครงสร้างทั้งสองระบบก็จะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น

จากลักษณะพฤติกรรมของทั้ง 3 กรณีข้างต้น สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 7.4 ซึ่งแสดงอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าและแอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลห้วงปรับค่าต่อแอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอีลาสติกที่แอมพลิจูดของความเร่งพื้นฐานค่าต่างๆ จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของทั้งสองระบบจะมีค่าเท่ากันในช่วงที่ความเร่งพื้นฐานมีค่าต่ำซึ่งมีพฤติกรรมแบบอีลาสติกและเริ่มมีค่าต่างกันเมื่อแอมพลิจูดของความเร่งพื้นฐานเพิ่มขึ้นทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากความสามารถในการสลายพลังงานของมวลห้วงปรับค่าจะมีค่าลดลงเมื่อโครงสร้างเกิดความเสียหายดังที่ได้อธิบายข้างต้น ทำให้พลังงานที่สลายออกไปในระบบที่ติดตั้งมวลห้วงปรับค่าจะมีค่าน้อยกว่าในระบบ SDOF ที่กำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่า ทำให้การตอบสนองของระบบที่ติดตั้งมวลห้วงปรับค่ามีค่ามากกว่าและอัตราส่วนการกระจัดของกรณีติดตั้งมวลห้วงปรับค่าจึงมีค่ามากกว่า



รูปที่ 7.4 : กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลห้วงปรับค่าที่มีอัตราส่วนมวล 3 และ 20 เปอร์เซ็นต์ และโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าต่อการกระจัดของโครงสร้างอีลาสติก เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวพื้นฐานค่าต่างๆ

เช่นเดียวกับกราฟอัตราส่วนการกระจัด ผลที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่เปรียบเทียบระหว่างกรณีโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและกรณีโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่าในรูปที่ 7.5 แสดงว่าค่าความเสียหายของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่ามากกว่าค่าความเสียหายของโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่า ทั้งนี้โครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ามีค่าการกระจัดสูงสุดมากกว่าเนื่องจากมวลหน่วงปรับค่ายังคงทำงานได้ไม่ดีในช่วงแรกของการสั่นและพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากของโครงสร้างมากกว่า เพราะเฟสและแอมพลิจูดการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าไม่เหมาะสม ซึ่งความไม่เหมาะสมจะมากขึ้นเมื่อแอมพลิจูดของความเร่งที่ฐานเพิ่มขึ้น ดังนั้นความต่างระหว่างค่าความเสียหายจะมากขึ้น



รูปที่ 7.5 : กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีอัตราส่วนมวล 3 และ 20 เปอร์เซ็นต์ และโครงสร้าง SDOF ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่า เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานค่าต่างๆ

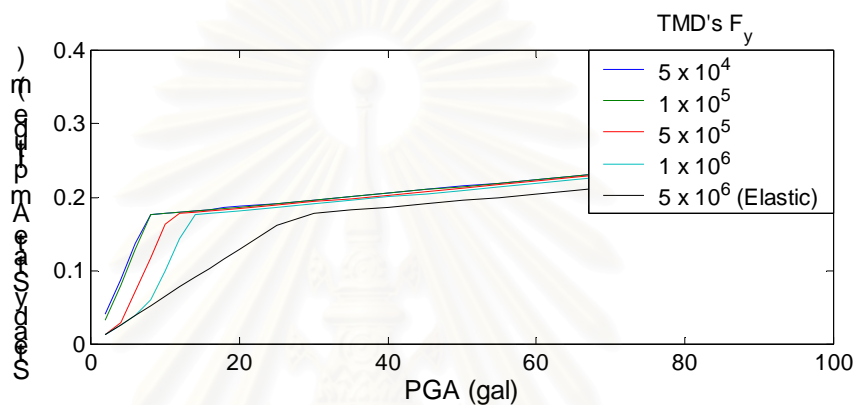
อย่างไรก็ตาม การกระจัดและค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ลดลงมีค่าน้อยมาก เนื่องจากผลของการสูญเสียความสอดคล้องของเฟสและอัตราส่วนแอมพลิจูดของมวลหน่วงปรับค่าที่ลดลงมีค่าไม่มากนักและแรงเนื่องจากมวลหน่วงปรับค่าที่กระทำต่อโครงสร้างมีค่าน้อย ดังนั้นถึงแม้จะได้ปรับให้เงื่อนไขทั้งสองสมบูรณ์แล้ว พลังงานที่สลายเนื่องจากมวลหน่วงปรับค่าที่เพิ่มขึ้นยังคงมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากของโครงสร้าง เพราะฉะนั้นการกระจัดของโครงสร้างจึงถูกควบคุมโดยการครากของโครงสร้างเป็นหลัก

ดังนั้น การปรับปรุงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าด้วยการทำให้เฟสและแอมพลิจูดการสั่นของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าที่สอดคล้องกับการสั่นของโครงสร้างสามารถลดการสั่นและค่าความเสียหายของโครงสร้างได้ดีกว่ากรณีที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า แต่ไม่มีนัยสำคัญมากนัก

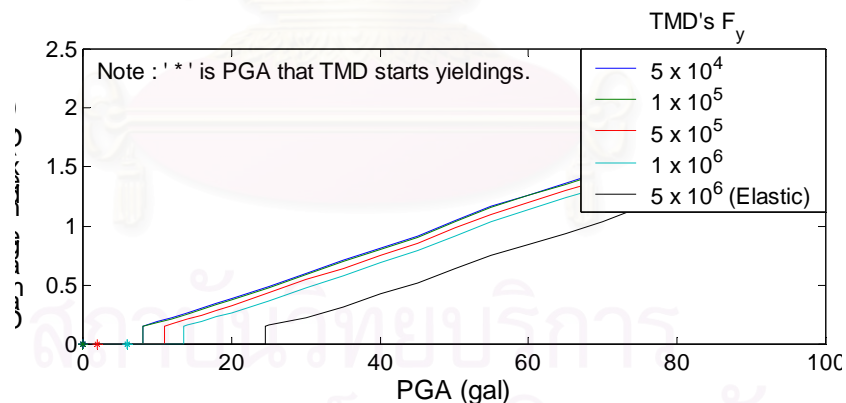


### 7.1.1 พฤติกรรมของมวลหน่วงปรับค่าแบบอิลาสโตพลาสติก

เพื่อศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในกรณีที่มีพฤติกรรมแบบอิลาสติกและในกรณีที่มีพฤติกรรมแบบอินอิลาสติกในการลดการสั่นไหวและลดค่าความเสียหายของโครงสร้าง ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบแอมพลิจูดของการตอบสนองที่สภาวะคงตัวและค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า โดยมวลหน่วงปรับค่าที่มีพฤติกรรมแบบอิลาสโตพลาสติกที่มีกำลังที่จุดครากเป็นค่าต่างๆ โดยผลที่ได้จะเป็นดังในรูปที่ 7.6 และ 7.7 ตามลำดับ



รูปที่ 7.6 : กราฟแสดงค่าแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีกำลังที่จุดครากเป็นค่าต่างๆเมื่อค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวพื้นฐานเป็นค่าใดๆ



รูปที่ 7.7 : กราฟแสดงค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีกำลังที่จุดครากเป็นค่าต่างๆเมื่อค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวพื้นฐานเป็นค่าใดๆ

จากกราฟในรูปที่ 7.6 ซึ่งแสดงค่าแอมพลิจูดของการตอบสนองที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีกำลังที่จุดครากเป็นค่าต่างๆ เมื่อค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวพื้นฐานเป็นค่าใดๆ พบว่าในกรณีที่มวลหน่วงปรับค่ายังคงมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติกเนื่องจากมีกำลังที่จุดครากสูงนั้น จะทำให้แอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับค่าแอมพลิจูดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีค่า

กำลังที่จุดครากต่ำลงมา โดยค่าแอมพลิจูดการสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างจะแปรผกผันกับค่ากำลังที่จุดครากของมวลห้วงปรับค่าที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง ทั้งนี้อธิบายได้ว่า แรงเนื่องจากมวลห้วงปรับค่าที่กระทำต่อโครงสร้างจะถูกจำกัดโดยค่ากำลังที่จุดครากของมวลห้วงปรับค่า ดังนั้น การที่กำลังที่จุดครากของมวลห้วงปรับค่ามีค่าน้อย แรงต้านการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างโดยมวลห้วงปรับค่าจะมีค่าน้อย ทำให้แอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้างมีค่ามาก

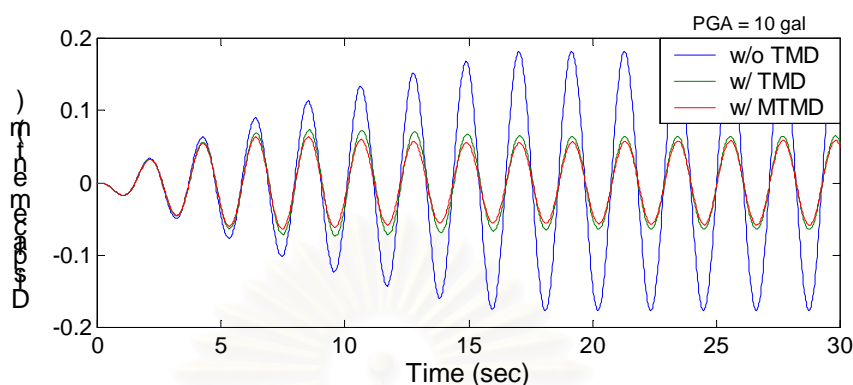
นอกจากนี้ หากพิจารณาถึงค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างเมื่อค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าต่างๆ ก็ให้ผลในลักษณะเดียวกันคือ ในกรณีที่มวลห้วงปรับค่ายังคงมีการสั่นไหวอยู่ในช่วงฮิสเทติก จะทำให้ค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลห้วงปรับค่าที่มีกำลังที่จุดครากต่ำลงมา ซึ่งก็สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกับกรณีข้างต้น

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า เพื่อให้มวลห้วงปรับค่ามีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวและลดค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างให้ได้สูงที่สุดนั้น จะต้องออกแบบให้มวลห้วงปรับค่ามีพฤติกรรมอยู่ในช่วงฮิสเทติกเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อไม่ให้แรงต้านการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่เกิดจากมวลห้วงปรับค่าถูกจำกัดโดยกำลังที่จุดครากของมวลห้วงปรับค่าเอง

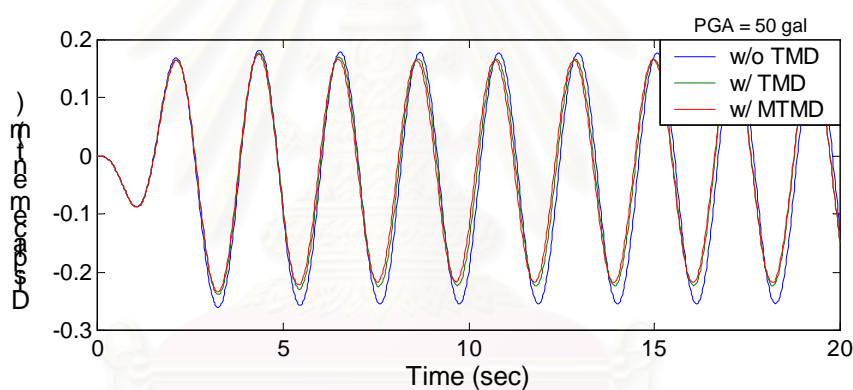
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 7.2 เปรียบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วย (MTMD)

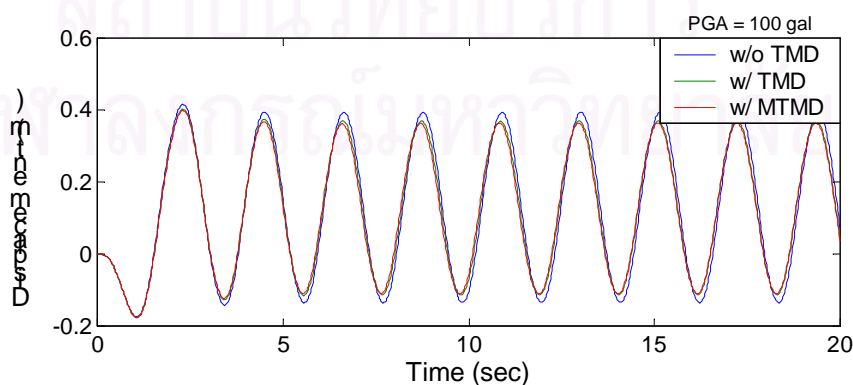
### 7.2.1 ภายใต้อิทธิพลของความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานแบบฮาร์โมนิก



รูปที่ 7.8 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดหลายมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 10 gal



รูปที่ 7.9 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดหลายมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 50 gal



รูปที่ 7.10 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal

จากกราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตามหน่วยปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตามหลายมวลหน่วยปรับค่าที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ทั้ง 3 กรณีดังแสดงในรูปที่ 7.8, 7.9 และ 7.10 พบว่าการกระจัดของทั้งสองระบบให้ค่าใกล้เคียงกัน โดยการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตามหลายมวลหน่วยปรับค่ามีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ รูปแบบการกระจัดของโครงสร้างทั้งสองระบบก็มีลักษณะเดียวกัน

#### ก. ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐาน PGA = 10 gal

การกระจัดของโครงสร้างระบบที่ติดตามมวลหน่วยปรับค่าแบบหลายหน่วยจะมีค่าใกล้เคียงกับการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุมในช่วงเวลาแรก เนื่องจากระบบมวลหน่วยปรับค่าแบบหลายหน่วยต้องการระยะเวลาช่วงหนึ่งในการปรับตัวเช่นเดียวกับระบบมวลหน่วยปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้างจะมีค่าลดลงเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ดังที่เคยกล่าวแล้วว่าผลของระบบมวลหน่วยปรับค่าเสมือนทำให้โครงสร้างมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเพิ่มขึ้น ระบบมวลหน่วยปรับค่าแบบหลายหน่วยก็มีผลในลักษณะเดียวกัน ในกรณีนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเดิมของโครงสร้างมีค่าน้อย ฉะนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างเพียงเล็กน้อยก็สามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้มาก เนื่องจากการกระจัดของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างดังรูปที่ 6.20 ในบทที่ 6

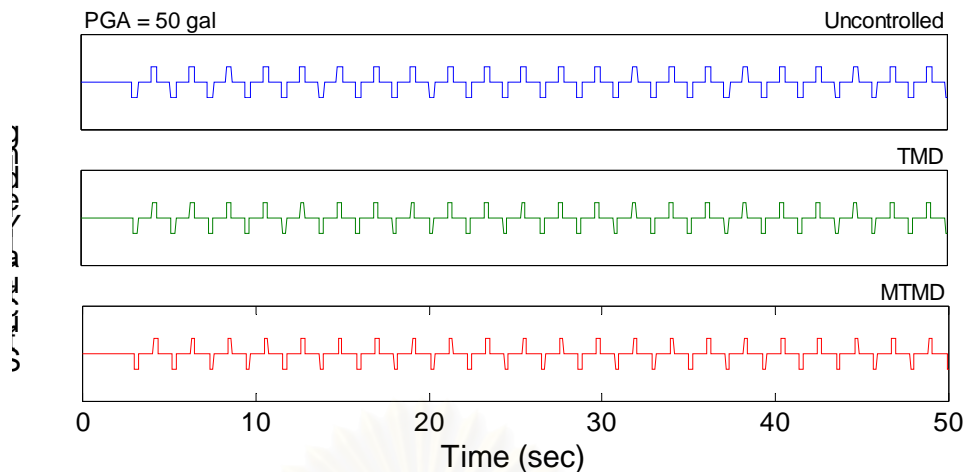
#### ข. ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐาน PGA = 50 gal

เมื่อขนาดความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานอยู่ในระดับปานกลาง โครงสร้างเกิดความเสียหายทุกรอบของการสั่น ดังนั้นการครากของโครงสร้างเป็นตัวควบคุมแอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้าง ถึงแม้การติระบบมวลหน่วยปรับค่าและระบบมวลหน่วยปรับค่าแบบหลายหน่วยมีผลทำให้การสั่นไหวลดลงเล็กน้อย แต่ก็สามารถทำให้ค่าความเสียหายของโครงสร้างลดลงเนื่องจากทำให้พลังงานที่สลายเมื่อเกิดการครากลดลง

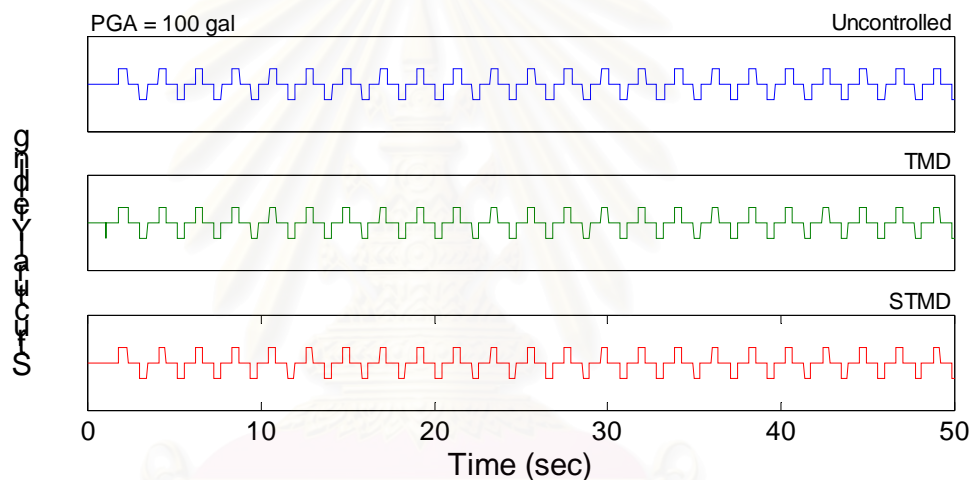
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างจำนวนครั้งและระยะเวลาของการครากที่เกิดขึ้น พบว่าทั้งสองระบบเกิดจำนวนครั้งการครากเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 7.11

#### ค. ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐาน PGA = 100 gal

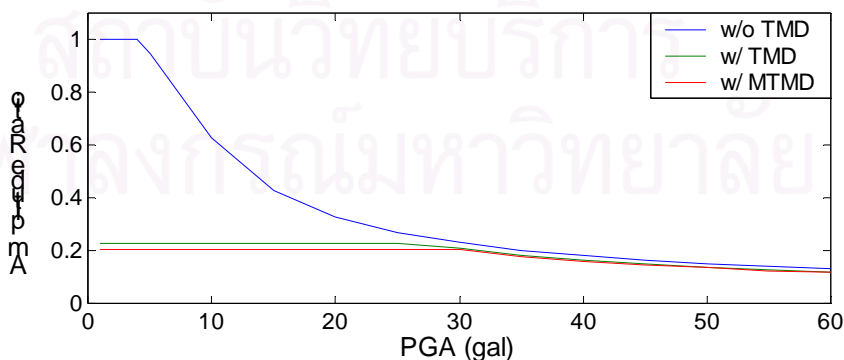
แรงเนื่องจากมวลหน่วยปรับค่าทั้งสองระบบมีผลต้านทานการสั่นของโครงสร้างน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากการครากของโครงสร้างเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดการกระจัดและความเสียหายของโครงสร้าง



รูปที่ 7.11 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการร้าวของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 50 gal

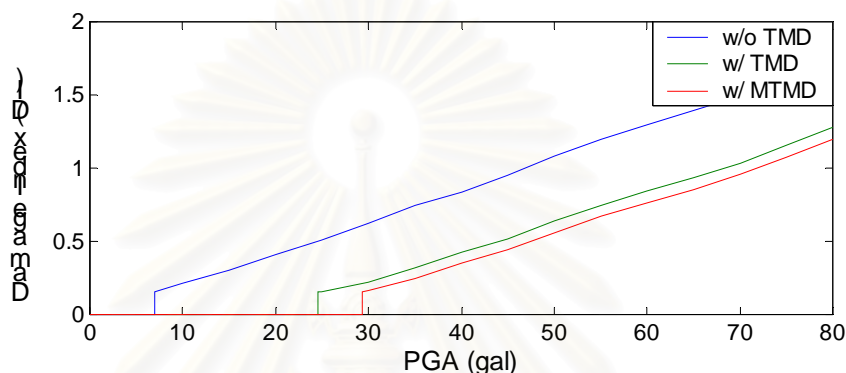


รูปที่ 7.12 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการร้าวของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal



รูปที่ 7.13 : กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้าง 3 ระบบต่อการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอิลาสติกเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ

จากลักษณะทั้ง 3 กรณีข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้างของระบบมวลหน่วงปรับค่าและของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยต่อการกระจัดของโครงสร้างอิลาสติก เมื่อขนาดความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเป็นค่าต่างๆดังในรูปที่ 7.13 และกราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างดังในรูปที่ 7.14 พบว่าประสิทธิภาพของทั้งสองระบบมีค่าใกล้เคียงกันโดยระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยมีความสามารถดีกว่าเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 7.14 : กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ

สามารถสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวและลดค่าความเสียหายของโครงสร้างของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยดีกว่าประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสองระบบมีพฤติกรรมการทำงานที่ใกล้เคียงกันสามารถสร้างแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในขนาดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นการตอบสนองของโครงสร้างจึงมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

## 7.2.2 ภายใต้อิทธิพลแผ่นดินไหว

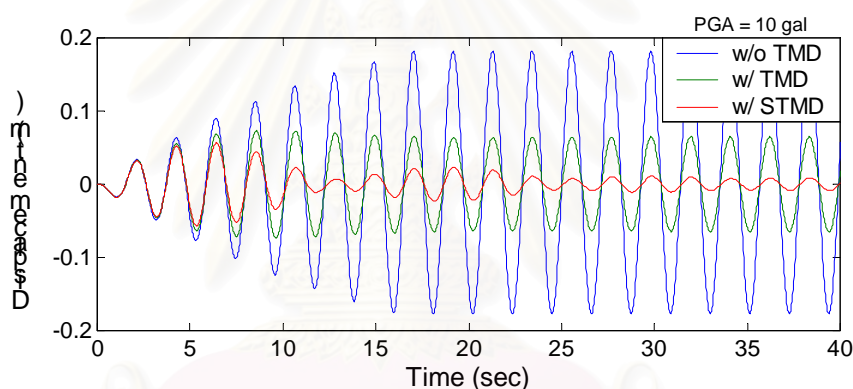
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้อิทธิพลแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ (byk-1995) และอิทธิพลแผ่นดินไหวเม็กซิโก (SCT\_S00E-1985) ได้แสดงในภาคผนวก ค ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้ก็มีลักษณะเดียวกับในกรณีของโครงสร้างภายใต้อิทธิพลการเคลื่อนตัวที่ฐานแบบฮาร์โมนิก กล่าวคือ ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบมวลหน่วงปรับค่าที่มีค่าอัตราส่วนมวลเท่ากัน

### 7.3 เปรียบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ

#### 7.3.1 ภายใต้สัญญาณความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานแบบฮาร์โมนิก

##### ก. ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐาน $PGA = 10 \text{ gal}$

จากกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้าง 3 ระบบได้แก่ โครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า 3 เปอร์เซ็นต์ และโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ ที่เวลาใดๆภายใต้สัญญาณความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ  $10 \text{ gal}$  ดังแสดงในรูปที่ 7.15 เห็นได้ว่าการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟสามารถลดการสั่นไหวที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างได้สูงที่สุด ทำให้โครงสร้างสั่นเพียง  $0.03$  เท่าของกรณีที่ไม่ได้ควบคุม ในขณะที่การติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าสามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้  $78$  เปอร์เซ็นต์

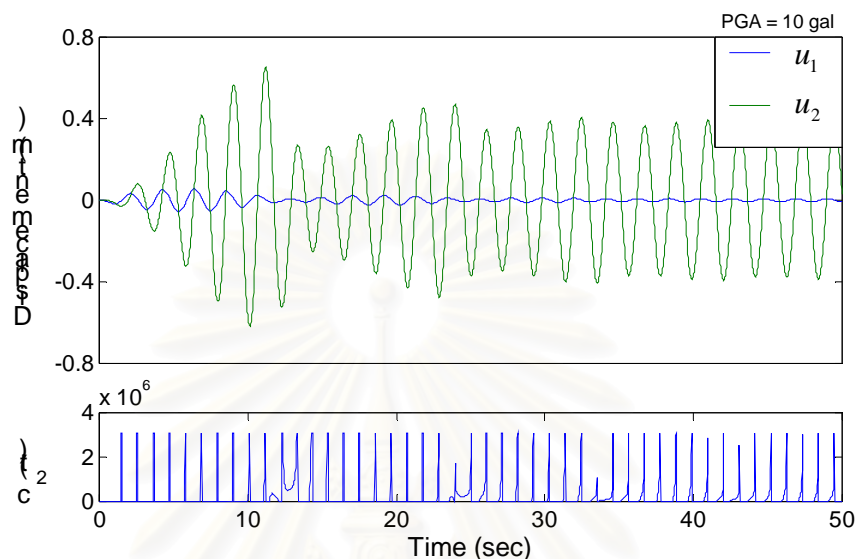


รูปที่ 7.15 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า และโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ  $10 \text{ gal}$

ทั้งนี้เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆดังแสดงในรูปที่ 7.16 พบว่าค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดระหว่างการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟและการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่สภาวะคงตัวมากกว่าค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดระหว่างการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าดังที่เคยกล่าวในหัวข้อ 5.2

ดังที่เคยกล่าวไปแล้วข้างต้นว่า แอมพลิจูดการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าขึ้นกับความหน่วง(ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง)ของมวลหน่วงปรับค่า โดยการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าจะ

มีค่ามากเมื่อความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าน้อย ในทางกลับกันการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่าน้อยเมื่อความหน่วงของโครงสร้างมีค่ามาก ซึ่งจากกราฟที่แสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟในรูปที่ 7.16 ชี้ให้เห็นว่าระบบปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟให้มิต่ำน้อยที่สุดเกือบตลอดระยะเวลาทั้งหมดที่เกิดการสั่น



รูปที่ 7.16 : (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 10 gal  
(ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟที่เวลาใดๆ

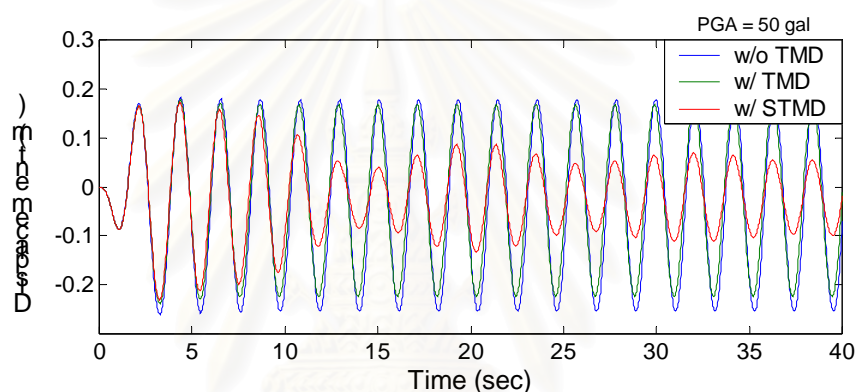
ในกรณีนี้ได้กำหนดให้ค่าความหน่วงต่ำสุดของระบบกึ่งแอดทีฟมีค่าน้อยกว่าค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า ดังนั้นการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟจึงมีค่ามากกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่า ซึ่งย่อมมีผลต่อแรงที่กระทำต่อโครงสร้างที่มีขนาดในการต้านทานการเคลื่อนที่มากกว่า ในขณะที่เฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟก็มีความเหมาะสมกับเฟสการสั่นของโครงสร้างเช่นเดียวกับกรณีของมวลหน่วงปรับค่า ดังนั้นระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟจึงสามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้มากกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่า

ภายใต้สัญญาณความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างในระดับนี้ โครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุมเกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อย การติดตามมวลหน่วงปรับค่าและการติดตามมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟสามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างจนมีขนาดน้อยกว่าการกระจัดที่จุดคราก ทำให้โครงสร้างไม่เกิดความเสียหาย

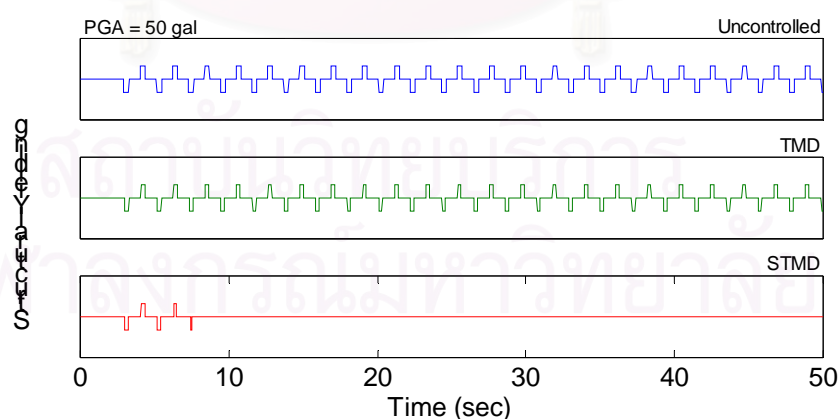


### ข. ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐาน $PGA = 50 \text{ gal}$

จากกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้าง 3 ระบบที่เวลาใดๆภายใต้สัญญาณความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ  $50 \text{ gal}$  ดังแสดงในรูปที่ 7.17 ซึ่งก็มีลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานระดับความรุนแรงต่ำคือการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟมีค่าน้อยที่สุด โดยที่ระดับความรุนแรงของสัญญาณความเร่งที่ฐานค่านี้นี้ การสั่นที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟจะยังคงสั้นอยู่ในช่วงฮิสตริก ในขณะที่ยังคงสั้นอยู่ในช่วงฮิสตริก ในขณะที่การสั่นของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุมและการสั่นของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่ามีค่าสูงกว่าการกระจัดที่จุดครากดังแสดงในรูปที่ 7.18 (เปรียบเทียบการครากของโครงสร้าง 3 ระบบ)



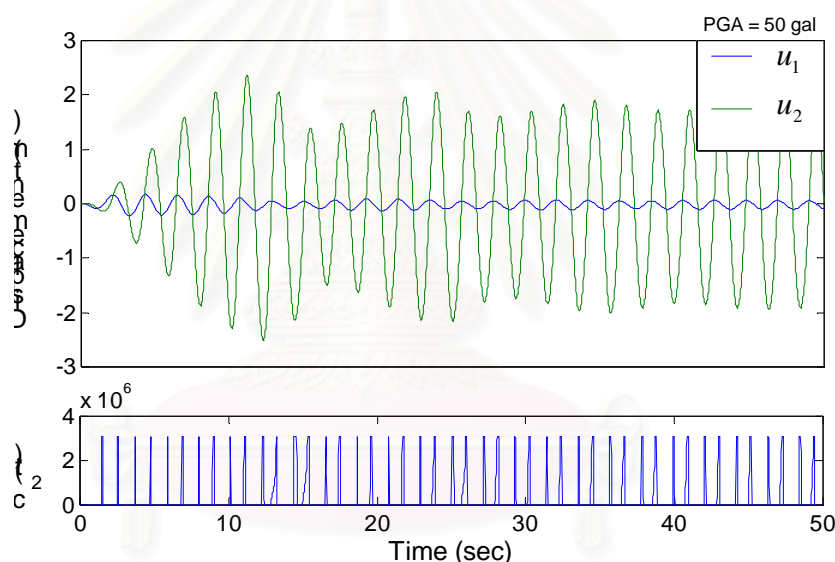
รูปที่ 7.17 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่า และโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ  $50 \text{ gal}$



รูปที่ 7.18 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ  $50 \text{ gal}$

เป็นที่น่าสังเกตว่า ที่ระดับของความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างระดับนี้ การสั่นของโครงสร้างที่ติดตามวงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟจะต้องใช้ระยะเวลามากขึ้นกว่าในกรณีที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานต่ำก่อนที่จะเข้าสู่การสั่นที่สภาวะคงตัว

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟที่เวลาใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.19(ก) พบว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟและการกระจัดของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 29 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตามวงปรับค่าเช่นเคย นอกจากนี้ความต่างเฟสระหว่างเฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟยังเหมาะสมกับเฟสการสั่นของโครงสร้างมากกว่า ดังนั้นจึงสามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้เป็นอันมาก

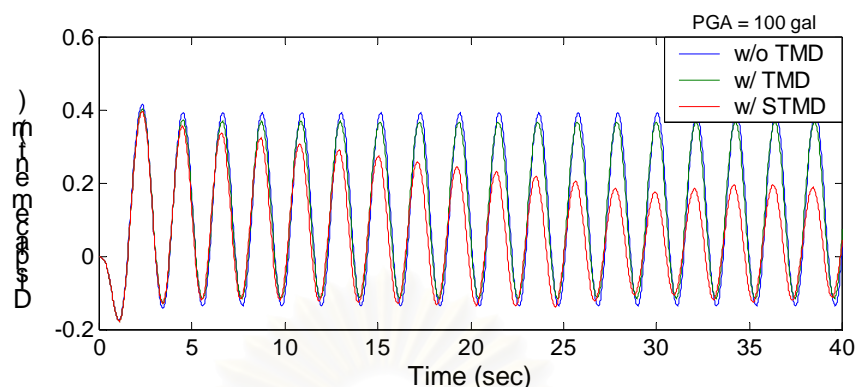


รูปที่ 7.19 : (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 50 gal

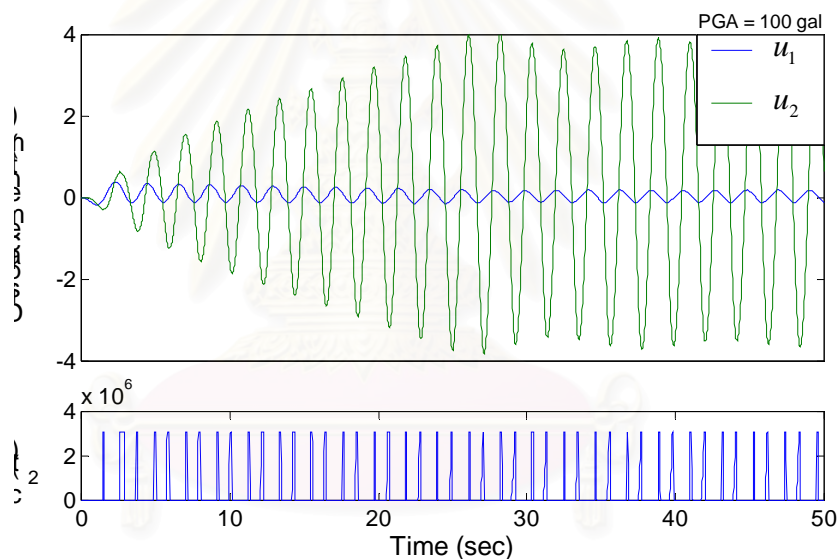
(ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟที่เวลาใดๆ

สำหรับการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟเป็นดังแสดงในรูปที่ 7.19(ข) ค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟถูกปรับให้มีค่าต่ำสุดที่กำหนดไว้โดยระยะเวลาส่วนใหญ่ ทำให้การกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟมีค่ามาก

ค. ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐาน PGA = 100 gal



รูปที่ 7.20 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า และโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 100 gal



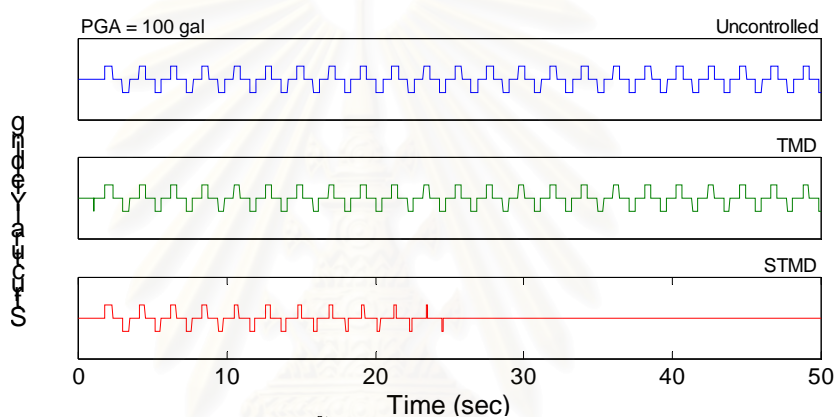
รูปที่ 7.21 : (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างเท่ากับ 100 gal

(ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆ

การกระจัดที่สภาวะของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟยังคงมีค่าน้อยกว่าการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าดังแสดงในรูปที่ 7.20 โดยในช่วงแรกของการสั่น ทั้งสามระบบจะมีการกระจัดใกล้เคียงกันเนื่องจากมวลหน่วงปรับค่าต้องอาศัยระยะเวลาหนึ่งเพื่อปรับตัว แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปการกระจัดของโครงสร้างระบบที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟจะมีค่าลดลงจนมีค่าคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ในขณะที่การกระจัดของระบบที่

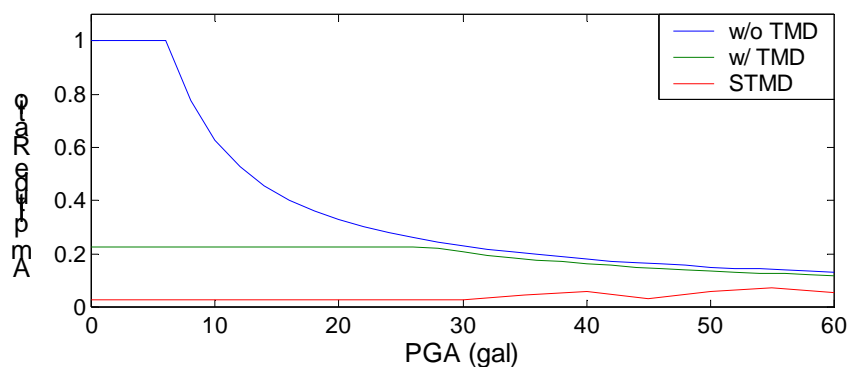
ติดตามมวลหน่วยปรับค่ามีค่าใกล้เคียงกับการกระจัดของระบบที่ไม่ได้ควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากแรงที่เกิดจากมวลหน่วยปรับค่าที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของโครงสร้างมีค่าน้อย ทำให้การครากของโครงสร้างเป็นปัจจัยที่กำหนดการกระจัดของโครงสร้าง แต่ในระบบกึ่งแอกทีฟแรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่มีค่ามากเนื่องจากระบบปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วยให้มิต่างน้อย ทำให้การกระจัดของมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟมีค่ามากดังแสดงในรูปที่ 7.21

นอกเหนือจากการกระจัดของโครงสร้างที่ลดลงแล้ว การกระจัดถาวรของโครงสร้างที่ติดตามมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ รวมถึงระยะเวลาและจำนวนครั้งที่เกิดการครากของโครงสร้างจะมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 7.22 ดังนั้นค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างจะมีค่าลดลงเช่นกัน



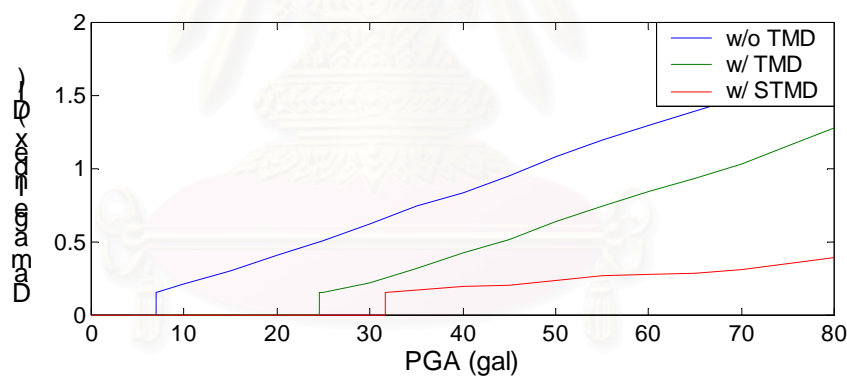
รูปที่ 7.22 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal

จากพฤติกรรมของโครงสร้างทั้ง 3 กรณีข้างต้น เมื่อพิจารณาการตอบสนองของโครงสร้างที่ค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานค่าต่างๆ ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดระหว่างการกระจัดของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบเทียบกับการกระจัดของโครงสร้างอิลาสติกที่สภาวะคงตัวดังในรูปที่ 7.23 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตามมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟมีค่าคงที่เท่ากับ 0.03 ซึ่งเป็นช่วงที่โครงสร้างยังคงสั่นไหวอยู่ในช่วงอิลาสติก แต่เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าสูงขึ้น ค่าอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้างจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงโดยไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แต่ก็มีค่าที่สูงกว่าค่าคงที่ในช่วงอิลาสติก ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างเกิดการครากทำให้แอมพลิจูดการสั่นของโครงสร้างที่สภาวะคงตัวไม่ได้แปรผันตรงกับขนาดของความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนการกระจัดของระบบมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดของระบบมวลหน่วยปรับค่า ซึ่งย่อมแสดงถึงประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของระบบมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่มีมากกว่าระบบมวลหน่วยปรับค่า



รูปที่ 7.23 : กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้าง 3 ระบบต่อการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอิลาสติก เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ

สอดคล้องกับกราฟอัตราส่วนแอมพลิจูด กราฟแสดงค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบที่ขนาดของความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.24 จะเห็นได้ว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟสามารถลดความเสียหายของโครงสร้างลงได้มาก ค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลจากการลดลงของค่าพลังงานที่สลายเมื่อเกิดการครากของโครงสร้างเป็นสำคัญ เนื่องจากระยะเวลาและจำนวนครั้งที่เกิดการครากลดลงอย่างชัดเจน

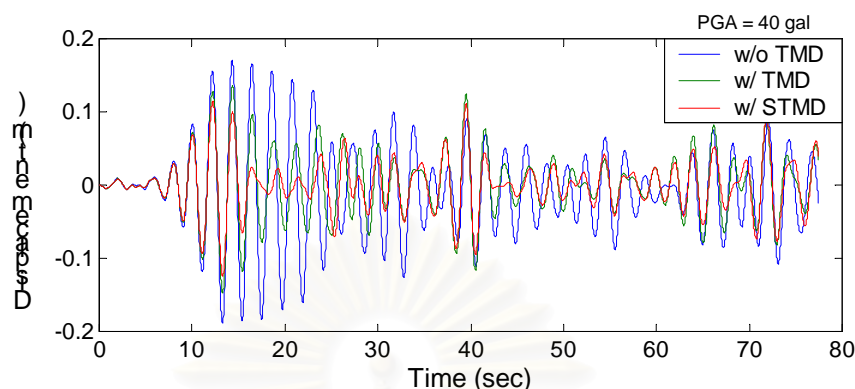


รูปที่ 7.24 : กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ

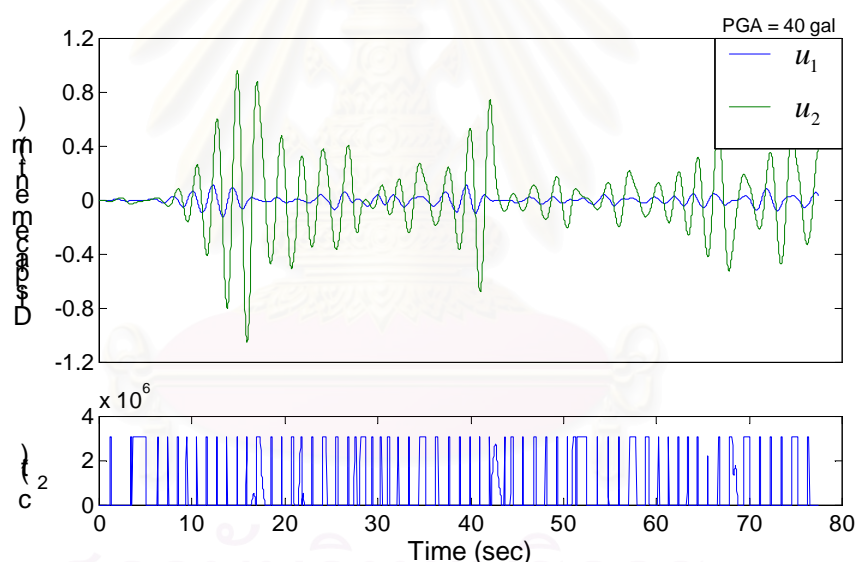
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 7.3.2 ภายใต้อิทธิพลแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ

#### ก. ความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวที่ PGA = 40 gal



รูปที่ 7.25 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาต่างๆภายใต้อิทธิพลแผ่นดินไหวกรุงเทพฯที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal



รูปที่ 7.26 : (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆภายใต้อิทธิพลแผ่นดินไหวกรุงเทพฯที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal

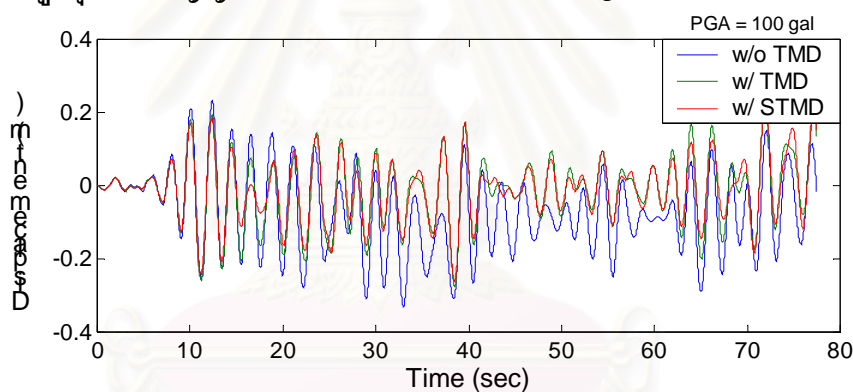
(ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆ

จากกราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟและการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า 3 เปรอร์เซ็นต์ที่เวลาใดๆภายใต้อิทธิพลแผ่นดินไหวกรุงเทพฯที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal ดังในรูปที่ 7.25 พบว่าการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟมีค่าน้อยกว่าการกระจัด

ของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ทั้งนี้เนื่องจากแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในกรณีมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟมีค่ามากกว่าในกรณีมวลหน่วงปรับค่า ซึ่งเป็นผลจากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟมีความสามารถในการปรับค่าความหน่วงให้มีค่าสูงและต่ำกว่ากรณีของมวลหน่วงปรับค่า ทำให้อัตราส่วนการกระจัดระหว่างการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่ง-แอคทีฟและการกระจัดของโครงสร้างมีค่ามากกว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดของระบบมวลหน่วงปรับค่าดังแสดงในรูปที่ 7.26

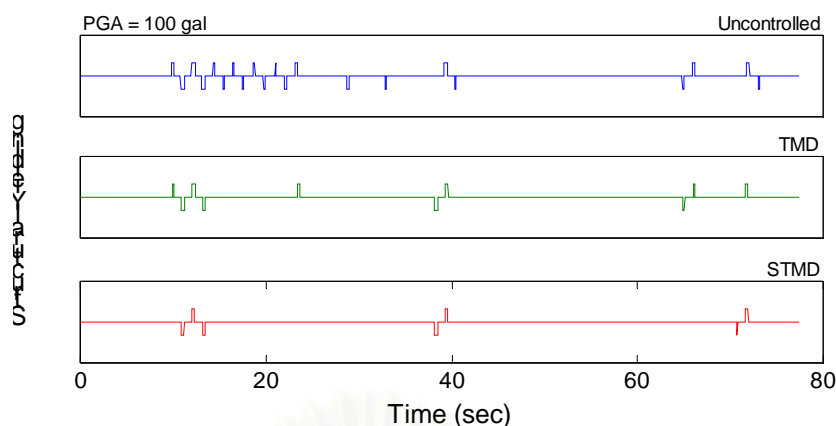
เช่นเดียวกับกรณีของสัญญาณความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานแบบฮาร์โมนิกที่ระดับความรุนแรงต่ำ ในกรณีที่โครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุมเกิดความเสียหายไม่มากนัก การติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟสามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้าง ทำให้การกระจัดของโครงสร้างน้อยกว่าการกระจัดที่จุดคราก ไม่เกิดความเสียหายขึ้นภายในชิ้นส่วนของโครงสร้างแต่อย่างใด

#### ข. ความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวที่ $PGA = 100 \text{ gal}$

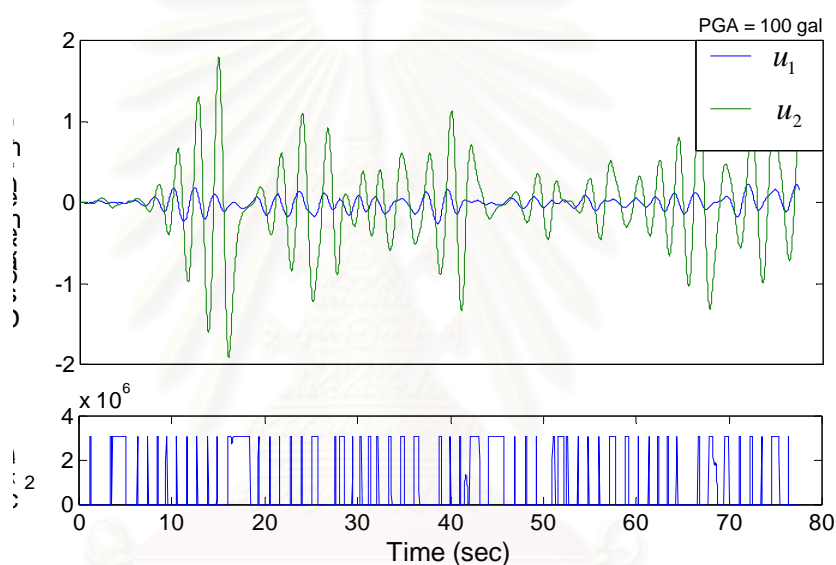


รูปที่ 7.27 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาต่างๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal

จากกราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่ง-แอคทีฟและการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal ดังแสดงในรูปที่ 7.27 พบว่าการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟโดยทั่วไปยังคงมีค่าน้อยกว่าการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า โดยทั้งสองระบบมีการสั่นไหวเลยช่วงอิลาสติกไปบ้าง แต่จำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างในระบบติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟจะมีค่าน้อยกว่าดังแสดงในรูปที่ 7.28



รูปที่ 7.28 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal



รูปที่ 7.29 : (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟที่เวลาใดๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal

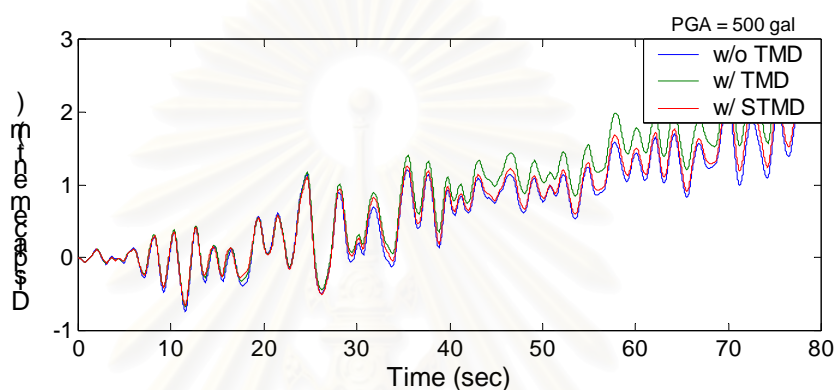
(ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟที่เวลาใดๆ

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟที่เวลาใดๆในรูปที่ 7.29(ก) พบว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟและการกระจัดของโครงสร้างยังคงมีค่ามากกว่าค่าของระบบมวลหน่วงปรับค่า ดังจะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 7.29(ข) ที่แสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดทีฟที่ปรับตัวให้เป็นค่าต่ำสุดตามที่กำหนดไว้โดยส่วนใหญ่ของระยะเวลาที่เกิดการสั่นทั้งหมด ดังนั้นจึงสามารถลดการสั่นไหวและความเสียหายของโครงสร้างได้มากกว่าในกรณีของมวลหน่วงปรับค่า

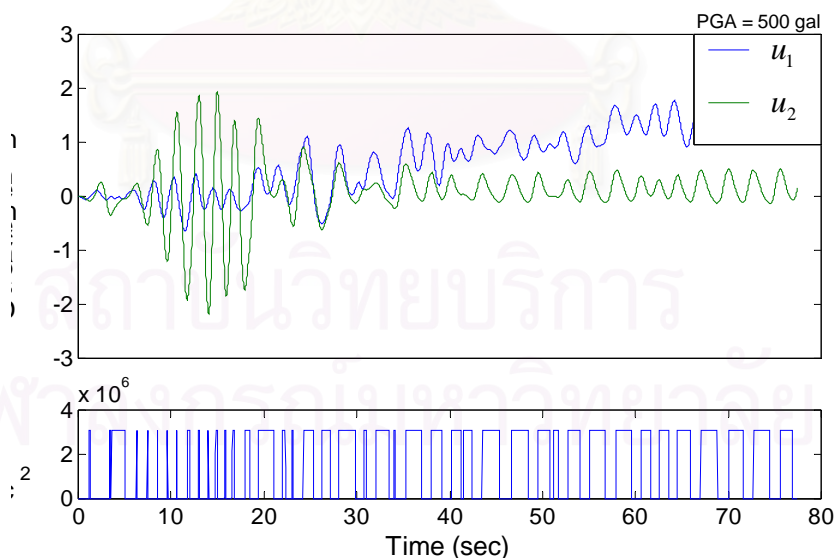


### ค. ความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวที่ $PGA = 500 \text{ gal}$

จากกราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่ง-แอคทีฟและการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ ที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ  $100 \text{ gal}$  ดังแสดงในรูปที่ 7.30 พบว่าการครากของโครงสร้างเป็นตัวกำหนดการกระจัดของโครงสร้างเป็นสำคัญ ดังนั้นการกระจัดของโครงสร้างระบบที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟและการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่ามีค่าเท่ากับการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม



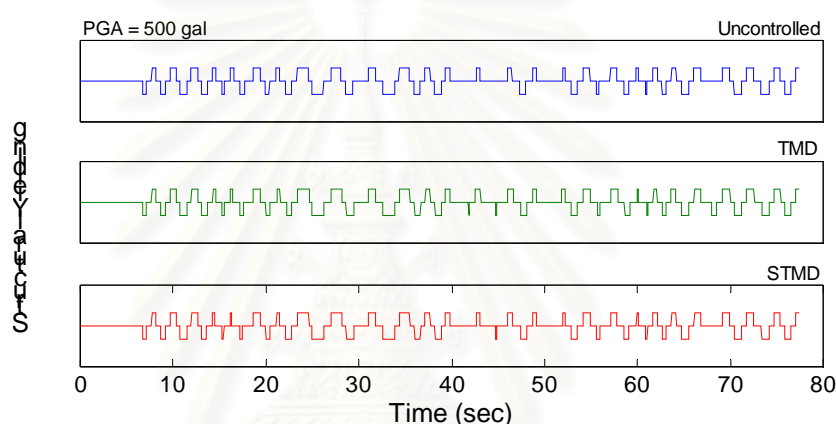
รูปที่ 7.30 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาต่างๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ ที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ  $500 \text{ gal}$



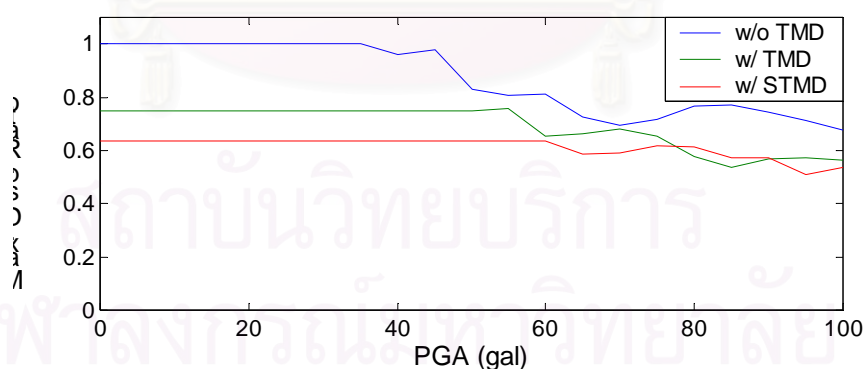
รูปที่ 7.31 : (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ ที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ  $500 \text{ gal}$

(ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆ

ในช่วงเวลา 20 วินาทีแรก โครงสร้างเกิดการครากโดยตลอดทำให้สามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้เพียงเล็กน้อยถึงแม้การกระจัดของมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟจะมีค่ามากก็ตาม นอกจากนี้เนื่องจากระบบมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟได้ปรับค่าความหน่วงของระบบมีค่าสูงสุดตามที่ได้จำกัดไว้ในช่วงเวลาถัดมาดังแสดงในรูปที่ 7.31(ก) ทำให้การสั่นของมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟมีค่าน้อยดังในรูปที่ 7.31(ข) ดังนั้นการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟจึงมีค่าเท่ากับการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม ในขณะที่การกระจัดถาวรของโครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่ามีค่ามากกว่าการกระจัดถาวรของกรณีที่ไม่ได้ควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากระบบมีเฟสการสั่นที่ไม่สอดคล้องกับเฟสการสั่นของโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายมากขึ้นในบางช่วงเวลาดังแสดงในรูปที่ 7.32



รูปที่ 7.32 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 500 gal

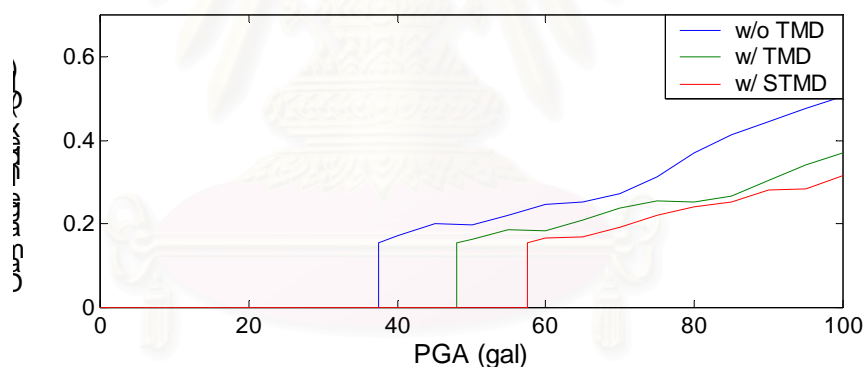


รูปที่ 7.33 : กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบต่อการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างอิลาสติกเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ

จากพฤติกรรมของโครงสร้างทั้ง 3 กรณีข้างต้น เมื่อพิจารณาการตอบสนองของโครงสร้างที่ค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าต่างๆ ค่าอัตราส่วนระหว่างการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบและการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างอิลาสติกเป็นดังแสดงในรูปที่

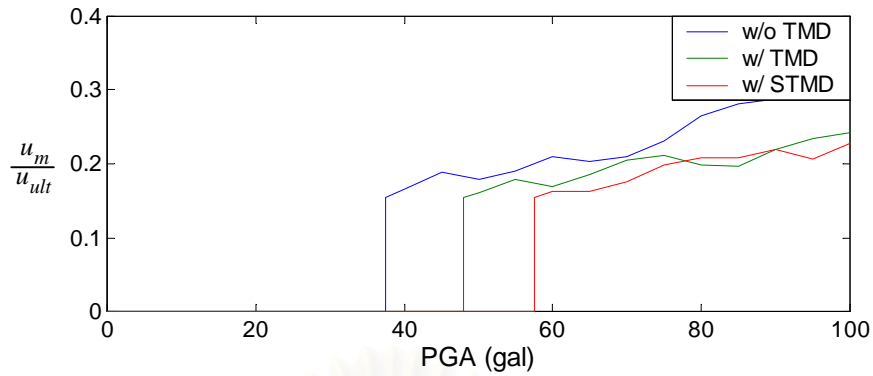
7.33 พบว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของระบบที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 0.64 ในขณะที่ค่าอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของระบบที่ติดมวลหน่วงปรับค่ามีค่าเท่ากับ 0.75 ในช่วงที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าต่ำ นั่นคือระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟสามารถลดการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างได้มากกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าเมื่อโครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติก นอกจากนี้ความต้านทานของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟมีค่ามากขึ้น ดังเห็นได้จากค่าอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดมีค่าคงที่จนถึงค่าความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานสูงกว่ากรณีที่ติดมวลหน่วงปรับค่า

เมื่อขนาดความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งโครงสร้างทั้งสองระบบมีพฤติกรรมเลยช่วงอิลาสติก ค่าอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของระบบโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟยังคงมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของระบบโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่า แสดงว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟมีความสามารถในการลดการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างได้ดีกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่า แต่ที่ความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานบางช่วง ค่าอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการกระจัดถาวรของโครงสร้างที่เวลาใดๆเป็นสำคัญ

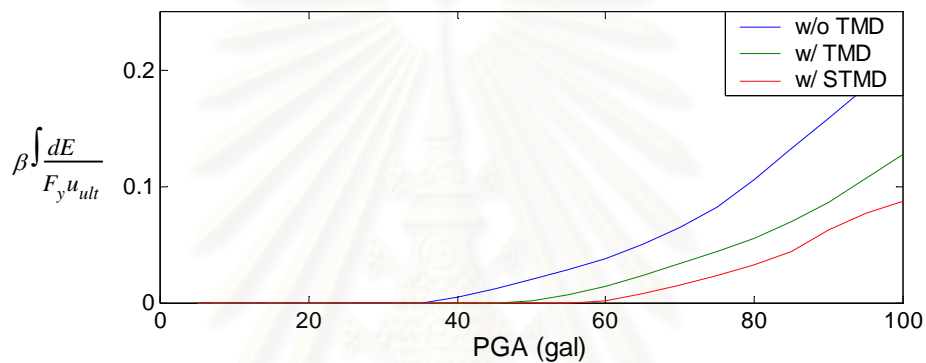


รูปที่ 7.34 : กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าต่างๆ

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณากราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างของทั้ง 3 ระบบเมื่อขนาดความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.34 พบว่าค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างระบบที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟมีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟมีความสามารถในการลดความเสียหายของโครงสร้างได้มากกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่า ทั้งนี้เป็นผลของการลดลงของพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากของโครงสร้างเป็นสำคัญดังแสดงในรูปที่ 7.35 และ 7.36



รูปที่ 7.35 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างทอมแรกของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อขนาดความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ



รูปที่ 7.36 : กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างทอมหลังของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อขนาดความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ

สรุปได้ว่า ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดกทีฟมีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวและค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างดีกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่า ทั้งนี้เนื่องจากระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดกทีฟมีความสามารถในการสร้างแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่มีค่ามากกว่าและเป็นจังหวะที่เหมาะสมกับเฟสการสั่นของโครงสร้างมากกว่าที่ระบบมวลหน่วงปรับค่าทำได้

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก (SCT\_S00E-1985) ได้แสดงในภาคผนวก ค ซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ในลักษณะเดียวกับกรณีของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ ดังที่ได้เสนอข้างต้น

## บทที่ 8 สรุปผลการวิจัย

ภายใต้สัญญาณการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างแบบฮาร์โมนิกที่มีความถี่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟในการลดการสั่นไหวและค่าเสียหายของโครงสร้างจะมีค่าลดลงเมื่อโครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอินอีลาสติก เนื่องจากการครากของโครงสร้างทำให้คุณสมบัติการสลายพลังงานของโครงสร้างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แอมพลิจูดของการกระจัดของโครงสร้างลดลง แรงที่เกิดจากมวลหน่วงปรับค่าที่กระทำต่อโครงสร้างมีค่าน้อยลง ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าจึงลดต่ำลง

จากสมการการเคลื่อนที่ การสั่นของมวลหน่วงปรับค่าจะขึ้นกับความเร่งสัมบูรณ์ที่ยอดของโครงสร้าง ซึ่งในโครงสร้างอินอีลาสติก ถึงแม้สัญญาณการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างจะมีลักษณะเป็นฮาร์โมนิกไซน์ แต่การครากของโครงสร้างทำให้สัญญาณความเร่งสัมพัทธ์และความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างไม่เป็นฟังก์ชันฮาร์โมนิกไซน์ที่สมบูรณ์ ซึ่งแตกต่างจากในกรณีของโครงสร้างที่อยู่ในช่วงอีลาสติก ซึ่งอาจส่งผลต่อการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าได้ ดังนั้นได้ทำการวัดการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าโดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนระหว่างความเร่งของมวลหน่วงปรับค่าต่อความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างที่สภาวะคงตัว และความต่างระหว่างเฟสการสั่นของโครงสร้างและเฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่า พบว่าค่าอัตราส่วนความเร่งและความต่างเฟสที่วัดได้ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในกรณีของโครงสร้างอีลาสติก ดังนั้นการทำงานของมวลหน่วงปรับค่ายังคงมีสภาวะที่เหมาะสมถึงแม้โครงสร้างจะมีสภาพอินอีลาสติกก็ตาม นอกจากนี้พบว่าไม่เกิดผลของการสูญเสียความสอดคล้องทางความถี่ (Detuning Effect) ระหว่างมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้าง ดังจะเห็นได้จากคาบการสั่นของโครงสร้างและคาบการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าที่สภาวะคงตัวยังคงมีค่าเท่ากัน

อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างมีค่ามากขึ้น ความไม่เหมาะสมระหว่างเฟสการสั่นของโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าจะมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ค่าอัตราส่วนความเร่งยังคงมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าอัตราส่วนความเร่งในกรณีของโครงสร้างอีลาสติก ซึ่งแสดงว่าเมื่อโครงสร้างมีการครากมากขึ้น การทำงานของมวลหน่วงปรับค่าก็จะมีสภาพที่ไม่เหมาะสมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลของการลดการสั่นไหวและค่าความเสียหายของโครงสร้างที่แต่เดิมมีค่าน้อยก็จะมีค่าน้อยลงไปอีกจนไม่มีผลต่อการตอบสนองของโครงสร้างแต่อย่างใด

เมื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าต่อโครงสร้างอินทิลาสติกภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ ที่วัดได้เมื่อปี 2538 ที่สัญญาณมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณฮาร์โมนิก ก็ได้ผลทำนองเดียวกันคือความสามารถในการลดการสั่นไหวและค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างมีค่าลดลงเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการครากและปริมาณพลังงานที่สลายโดยมวลหน่วงปรับค่าเป็นสำคัญ การติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะทำให้พลังงานที่สลายเนื่องจากการครากมีค่าลดลง เนื่องจากจำนวนครั้งและระยะเวลาในแต่ละครั้งของการครากที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง ส่วนผลในการลดค่าการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างมีค่าน้อย เพราะมวลหน่วงปรับค่าต้องการระยะเวลาช่วงหนึ่งในการสร้างขนาดและเฟสของการสั่นให้เหมาะสม ซึ่งก็ขึ้นกับลักษณะการสั่นของโครงสร้างเป็นสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่ากับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยและระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ จะได้ว่าประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยมีประสิทธิภาพดีกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากสามารถสลายพลังงานออกจากโครงสร้างได้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เพราะมีอัตราส่วนระหว่างการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากถูกจำกัดโดยค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าเอง ในขณะที่ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟมีประสิทธิภาพดีกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่า เนื่องจากความสามารถในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าได้ ทำให้ค่าอัตราส่วนการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าต่อการกระจัดของโครงสร้างมีค่าสูงกว่าและเฟสการสั่นของโครงสร้างเทียบกับเฟสการสั่นของมวลหน่วงปรับค่ามีความเหมาะสมมากกว่า ซึ่งสามารถลดพลังงานของโครงสร้างให้มีค่าน้อยกว่าพลังงานของโครงสร้างในระบบมวลหน่วงปรับค่าและระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วย

หากเพิ่มขนาดมวลของมวลหน่วงปรับค่าทั้ง 3 ระบบให้มีค่ามากขึ้น ประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวก็จะมีค่ามากขึ้น แต่ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างมีค่ามากขึ้น ประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างโดยใช้มวลหน่วงปรับค่าทั้ง 3 ระบบก็จะมีค่าลดลง

สรุปได้ว่า ระบบมวลหน่วงปรับค่ามีความสามารถในการลดการสั่นไหวและค่าความเสียหายของโครงสร้างอินทิลาสติกได้น้อย เนื่องการครากของโครงสร้างเป็นสำคัญ นอกจากนี้ ปริมาณพลังงานที่สลายออกโดยมวลหน่วงปรับค่ามีค่าน้อย เพราะค่าอัตราส่วนการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของโครงสร้างมีค่าจำกัดโดยค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าเอง ดังนั้นระบบมวลหน่วงปรับค่าจึงเหมาะสำหรับการเพิ่มความสามารถใช้งานหรือ

ลดทอนระดับความเสียหายให้แก่อาคารภายใต้แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงต่ำถึงปานกลาง แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความต้านทานแผ่นดินไหวให้กับอาคารอย่างมีนัยสำคัญ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- Abe M.. 1996. Tuned Mass Dampers for Structures with Bilinear Hysteresis. **Journal of Engineering Mechanics**. ASCE 122(8) : 797-800.
- Boswell, L.F. and D'Mello, C.. 1993. **The Dynamics of Structural Systems**. Oxford : Blackwel Scientific Publications.
- Chopra A.K..1995. **Dynamics of Structures : Theory and Application to Earthquake Engineering**. New Jersey : Prentice Hall.
- Chowdhury A.H. and Iwuchukwu M.D.. 1985. The Past and Future of Seismic Effectiveness of Tuned Mass Dampers. **Structural Control : Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Structural Control** : Waterloo, Ontario, Canada. : 105-127.
- Clough R.W. and Penzien J.. 1993. **Dynamics of Structures**. 2<sup>nd</sup> Edition. Singapore : McGraw Hill, Inc,
- Jagadish K.S., Raghu Prasad B.K. and Vasudeva Rao P.. 1979 The Inelastic Vibration Absorber Subjected to Earthquake Ground Motions. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics** 7 : 317-326.
- Jara J.M. and Aguiniga F.. 1996. Parametric Study of A Two Degree of Freedom System with Resonant Masses. **Eleventh World Conference on Earthquake Engineering**. Paper No. 1340.
- Kaynia A.M., Veneziano D.and Biggs J.M.. 1981. Seismic Effectiveness of Tuned Mass Dampers. **Journal of Structural Division**. ASCE107(ST8) : 1465-1484.
- Seneviratna G.D.P.K. and Krawinler H.. 1997. Evaluation of Inelastic MDOF Effects for Seismic Design. **The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering**, Stanford University, Stanford, CA.
- Sladek J.R. and Klingner R.E..1983. Effect of Tuned-Mass Dampers on Seismic Response. **Journal of Structural Engineering**. ASCE 109(8) : 2004-2009.
- Soong T.T. and Dargush G.F.. 1997. **Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering**. Chichester : John Wiley & Sons.



Soto-brito R. and Ruiz S.E.. 1999. Influence of Ground Motion Intensity on the Effectiveness of Tuned Mass Dampers. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics** 28 : 1255-1271.

Valles R.E., Reinhorn A.M., Kunnath S.K., Li C. and Madan A.. 1996. IDARC2D version 4.0 : A computer program for the inelastic damage analysis of buildings. Report No. NCEER-96-0010, **National Center for Earthquake Engineering Research**, State University of New York at Buffalo.

Williams M.S. and Sexsmith R.G.. 1995. Seismic Damage Indices for Concrete Structures : A State-of-the-Art Review. **Earthquake Spectra** 11(2) : 319-349.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

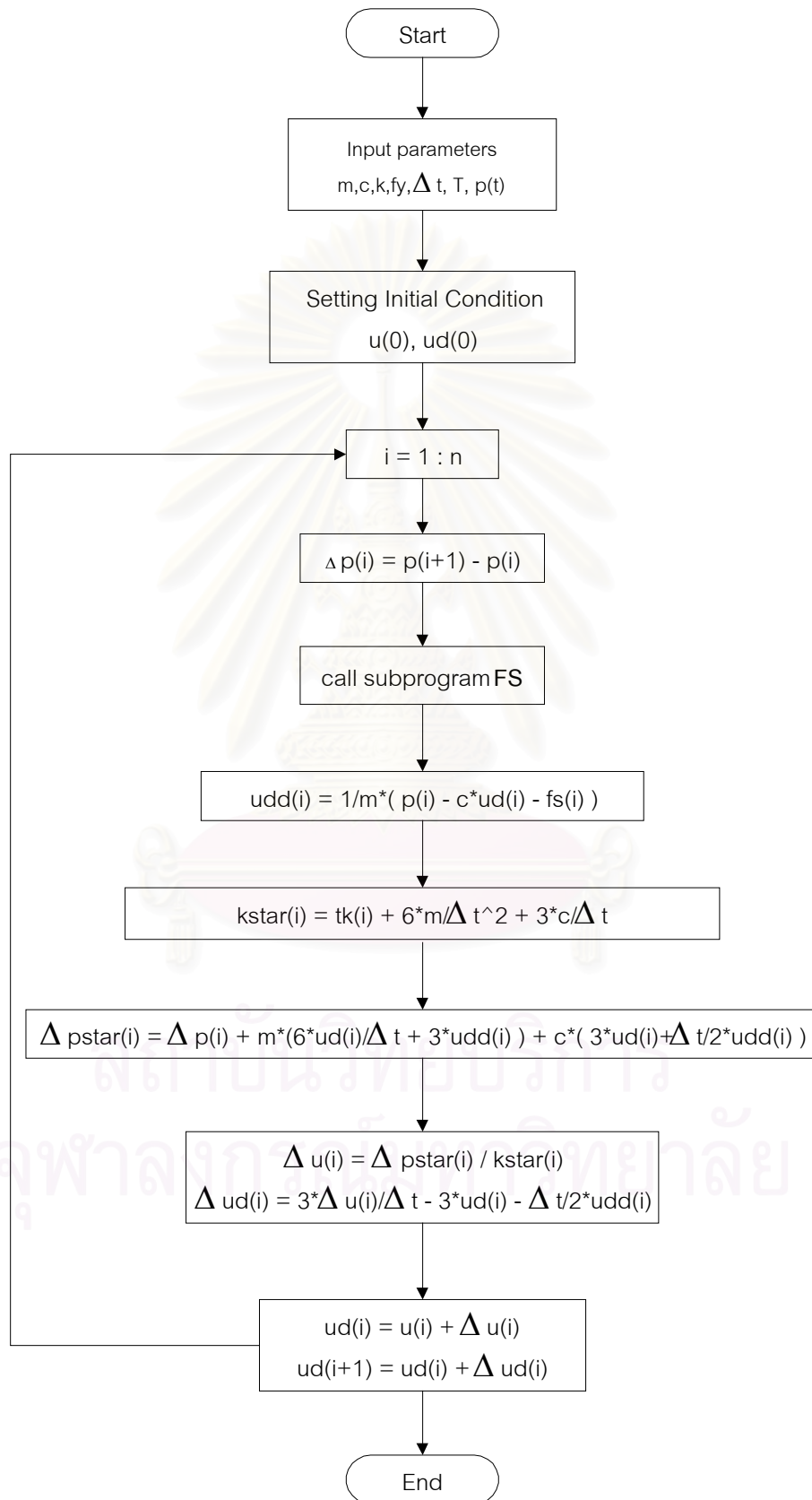


ภาคผนวก

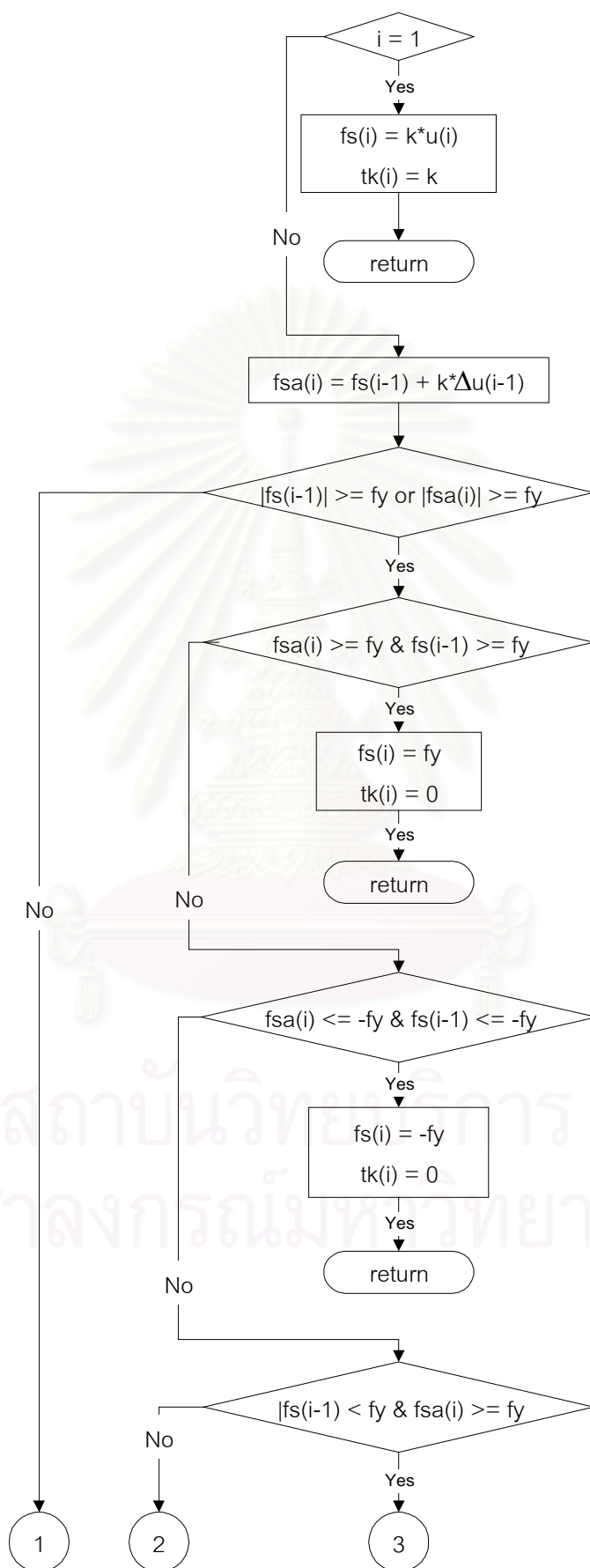
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

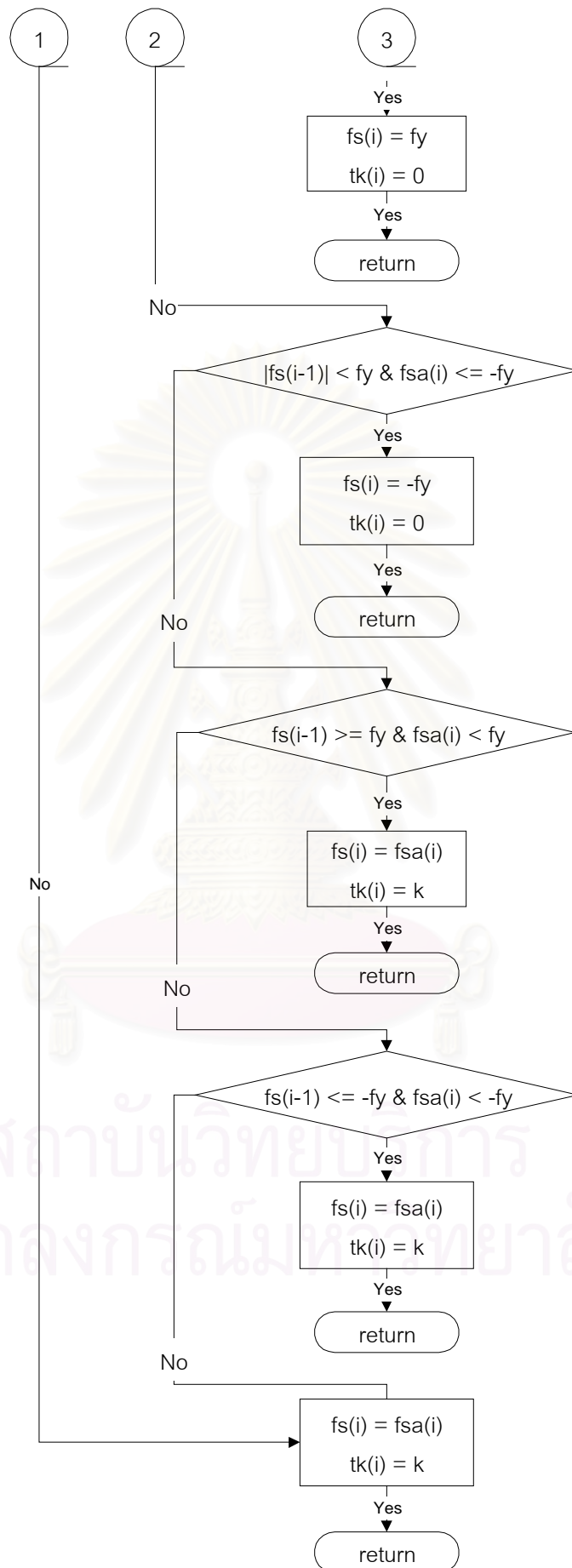
ภาคผนวก ก

Algorithm for Step-by-Step solution for elasto-plastic SDOF system

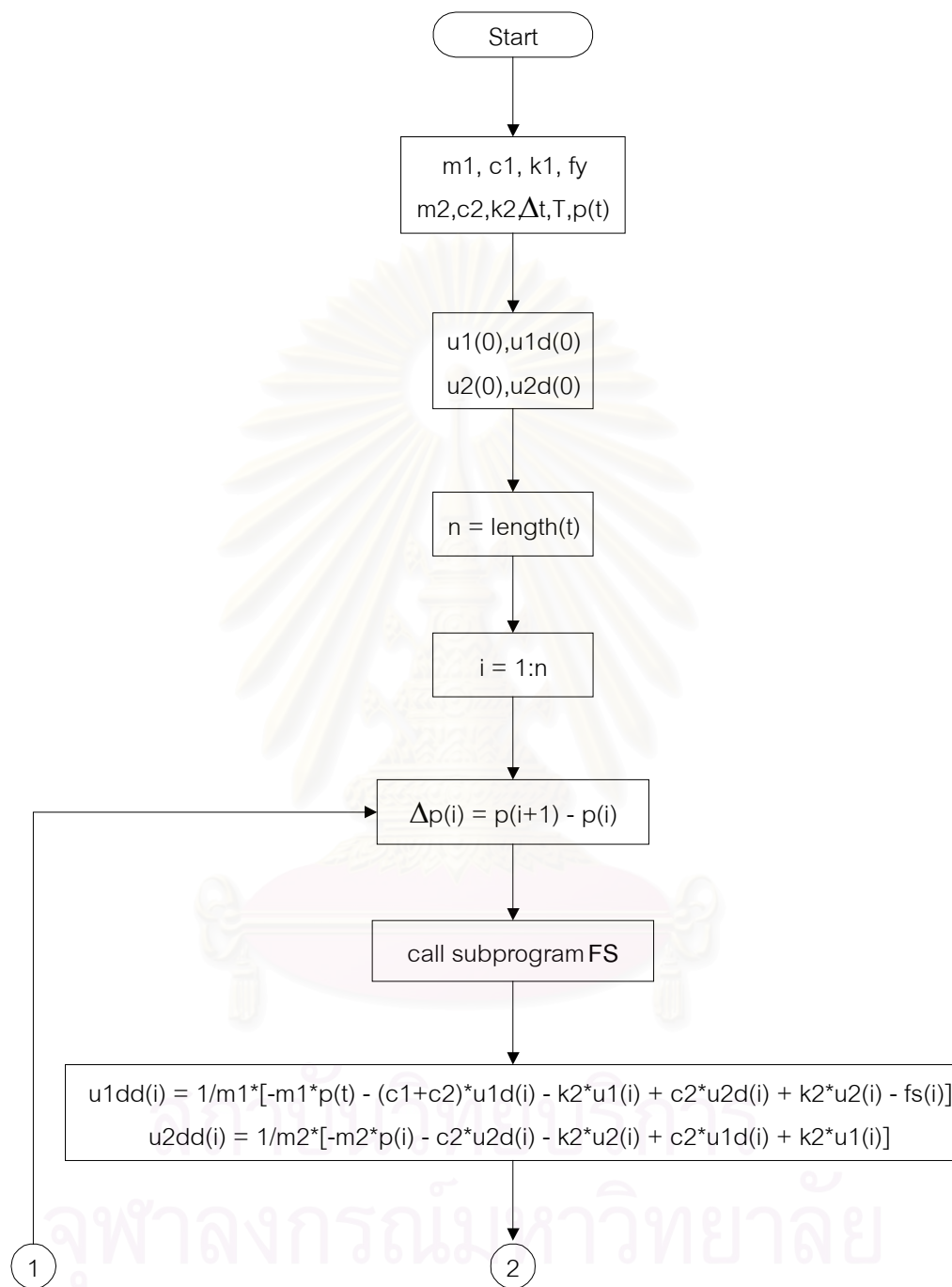


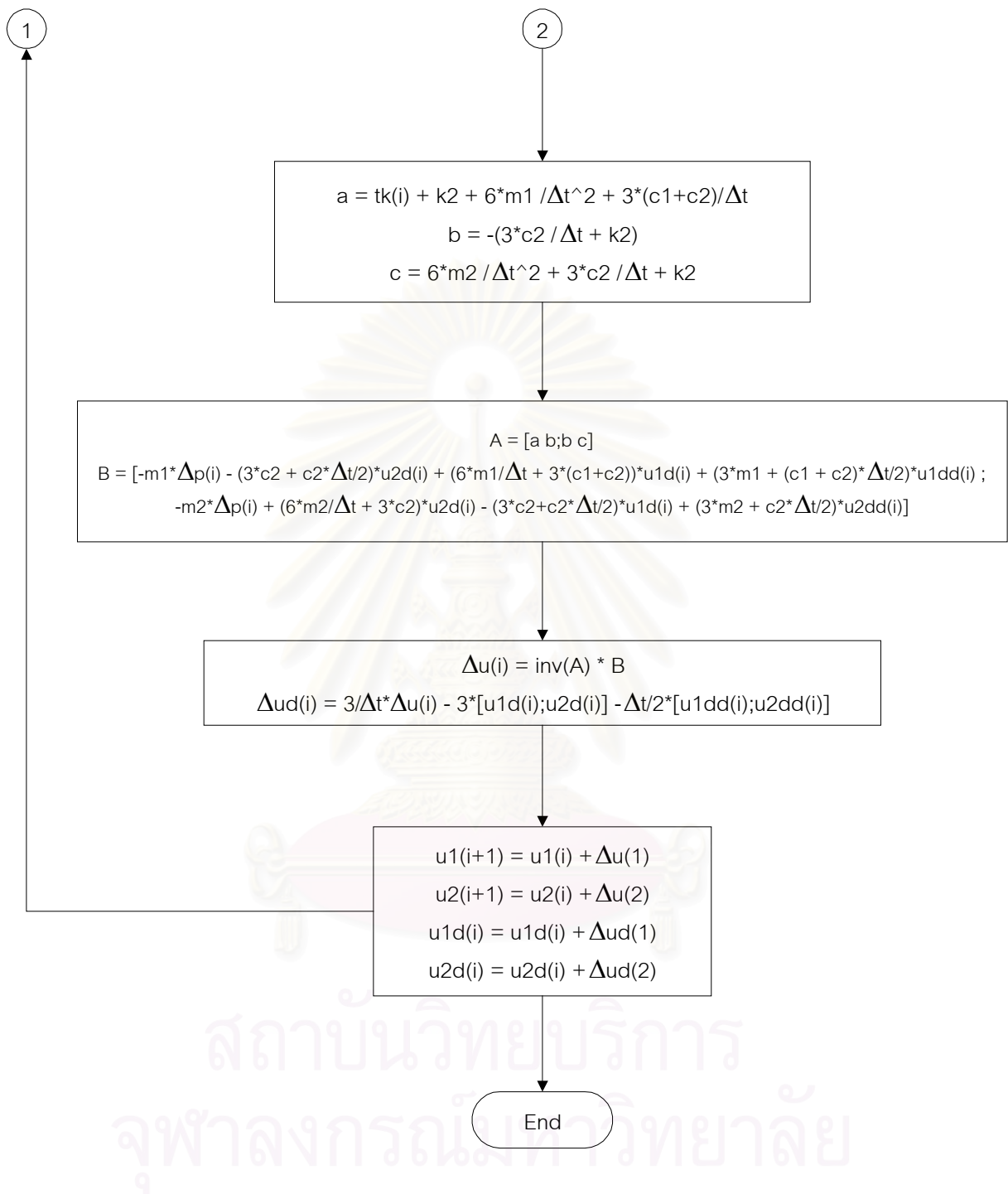
### Subprogram FS





### Algorithm for Step-by-Step solution for elasto-plastic SDOF/TMD system





**ภาคผนวก ข**  
**พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้าง**

โครงสร้างหลัก :

$$m_1 = 1.79 \times 10^7 \text{ kg} \quad k_1 = 1.56 \times 10^8 \text{ N/m} \quad c_1 = 2.11 \times 10^6 \text{ N/(m/s)} \quad \omega_1 = 2.95 \text{ rad/s}$$

ตารางที่ ผ.ข. 1 : แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบมวลหนึ่งวงปรับค่า

มวลหนึ่งวงปรับค่า :

$$m_2 = 5.37 \times 10^5 \text{ kg} \quad k_2 = 4.41 \times 10^6 \text{ N/m} \quad c_2 = 3.22 \times 10^5 \text{ N/(m/s)} \quad \omega_2 = 2.87 \text{ rad/s}$$

ตารางที่ ผ.ข. 2 : แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบมวลหนึ่งวงปรับค่าแบบหลายหน่วย

มวลหนึ่งวงปรับค่า :

หน่วยที่ 1 :

$$m_{2,1} = 1.07 \times 10^5 \text{ kg.} \quad k_{2,1} = 6.92 \times 10^5 \text{ N/m} \quad c_{2,1} = 1.64 \times 10^4 \text{ N/(m/s)} \quad \omega_{2,1} = 2.54 \text{ rad/s}$$

หน่วยที่ 2 :

$$m_{2,2} = 1.07 \times 10^5 \text{ kg.} \quad k_{2,2} = 7.75 \times 10^5 \text{ N/m} \quad c_{2,2} = 1.73 \times 10^4 \text{ N/(m/s)} \quad \omega_{2,2} = 2.69 \text{ rad/s}$$

หน่วยที่ 3 :

$$m_{2,3} = 1.07 \times 10^5 \text{ kg.} \quad k_{2,3} = 8.63 \times 10^5 \text{ N/m} \quad c_{2,3} = 1.83 \times 10^4 \text{ N/(m/s)} \quad \omega_{2,3} = 2.84 \text{ rad/s}$$

หน่วยที่ 4 :

$$m_{2,4} = 1.07 \times 10^5 \text{ kg.} \quad k_{2,4} = 9.55 \times 10^5 \text{ N/m} \quad c_{2,4} = 1.92 \times 10^4 \text{ N/(m/s)} \quad \omega_{2,4} = 2.98 \text{ rad/s}$$

หน่วยที่ 5 :

$$m_{2,5} = 1.07 \times 10^5 \text{ kg.} \quad k_{2,5} = 1.05 \times 10^6 \text{ N/m} \quad c_{2,5} = 2.02 \times 10^4 \text{ N/(m/s)} \quad \omega_{2,5} = 3.13 \text{ rad/s}$$

ตารางที่ ผ.ข. 3 : แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบมวลหนึ่งวงปรับค่าแบบกึ่งแอดคทีฟ

มวลหนึ่งวงปรับค่า :

$$m_2 = 5.37 \times 10^5 \text{ kg.} \quad k_2 = 4.41 \times 10^6 \text{ N/m} \quad \omega_2 = 2.87 \text{ rad/s}$$

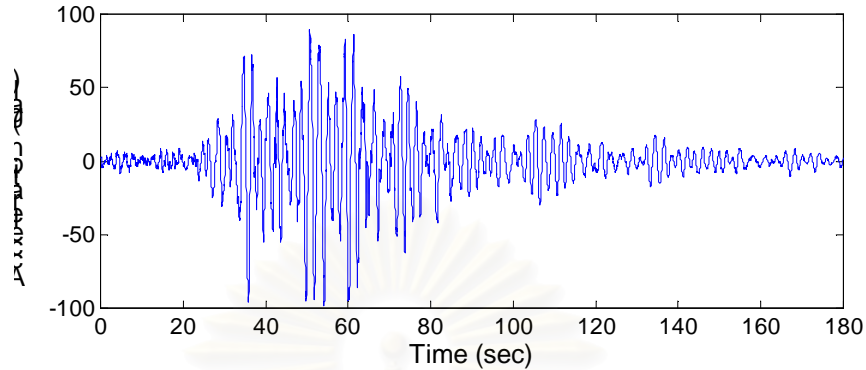
$$c_{2,\min} = 50 \text{ N/(m/s)} \quad c_{2,\max} = 3.08 \times 10^6 \text{ N/(m/s)} \quad (\text{damping ratio} = 0.0 - 1.0)$$

$$Q = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = 1 \times 10^{-9.10} \text{ m/N}$$



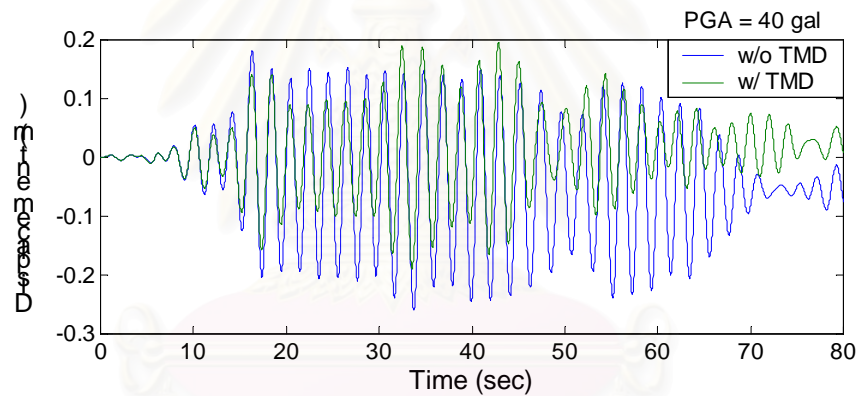
### ภาคผนวก ค

### ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก (SCT\_S00E — 1985)

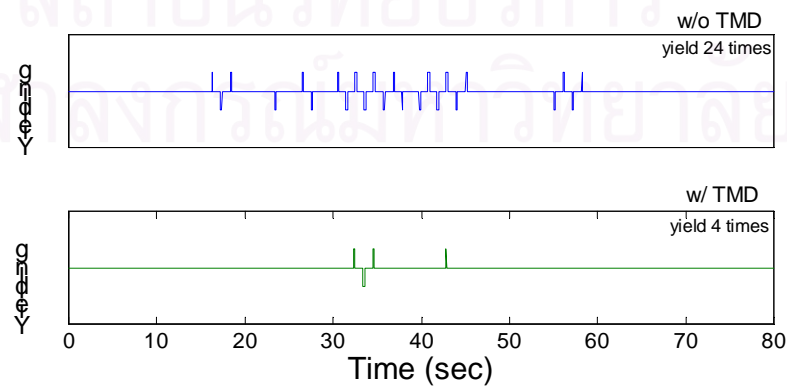


รูปที่ ผ.ค.1 : สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวจริงที่วัดได้ในประเทศเม็กซิโก เมื่อปี 1985 โดยใช้สัญญาณในช่วงเวลาตั้งแต่ 20 - 100 วินาทีในการวิเคราะห์

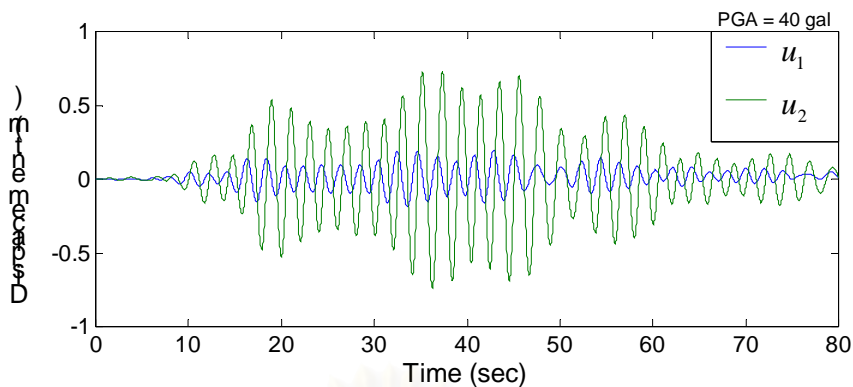
#### 1. การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีขนาด PGA = 40 gal



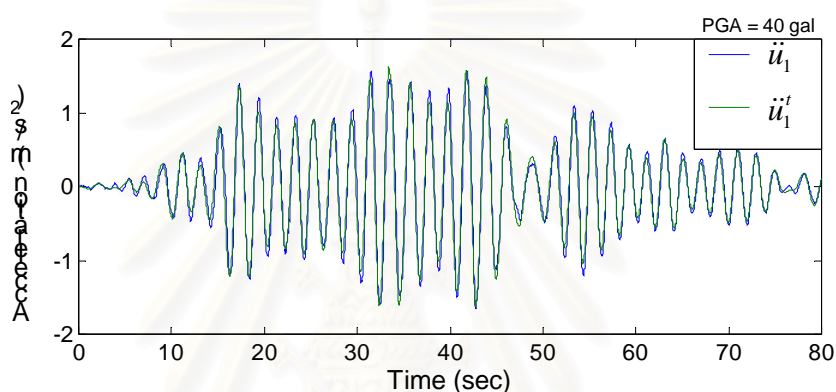
รูปที่ ผ.ค.2 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า 3% ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโกที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 40 gal



รูปที่ ผ.ค.3 : กราฟเปรียบเทียบตำแหน่ง ระยะเวลาและจำนวนครั้งของการครากที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 40 gal

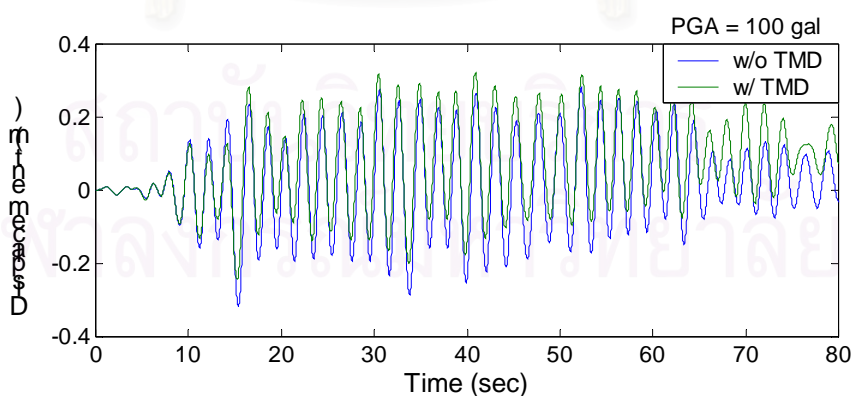


รูปที่ ผ.ค.4 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 40 gal

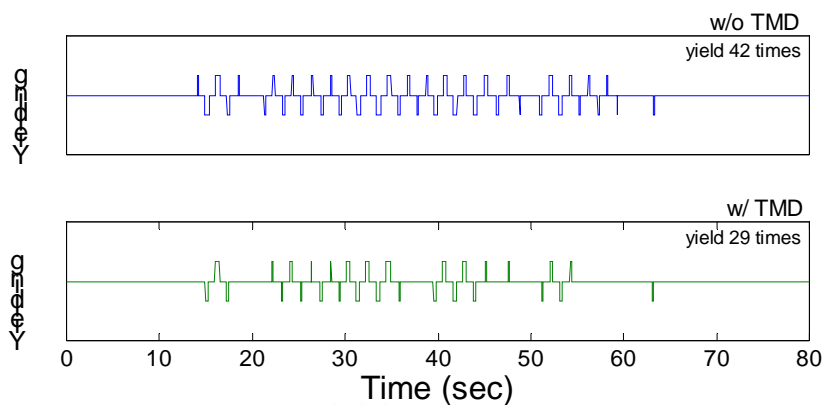


รูปที่ ผ.ค.5 : กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งสัมพัทธ์และความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 40 gal

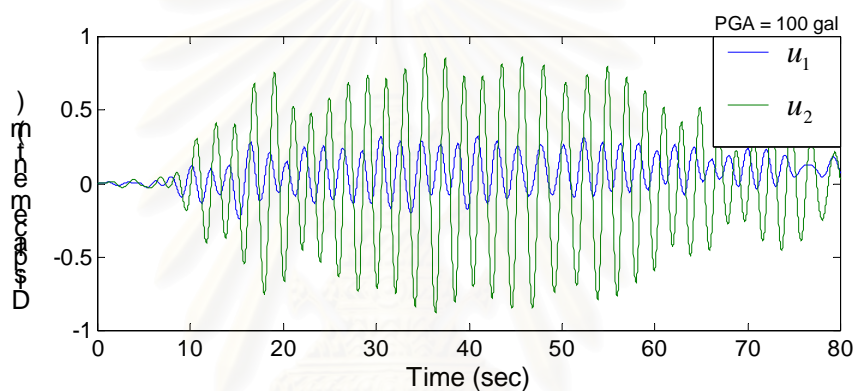
## 2. การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีขนาด PGA = 100 gal



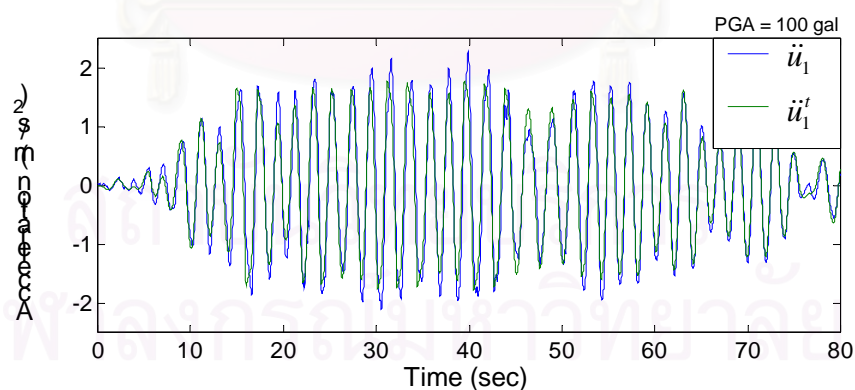
รูปที่ ผ.ค.6 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า 3% ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเมกซิโกที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal



รูปที่ ผ.ค.7 : กราฟเปรียบเทียบตำแหน่ง ระยะเวลาและจำนวนครั้งของการครากที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal

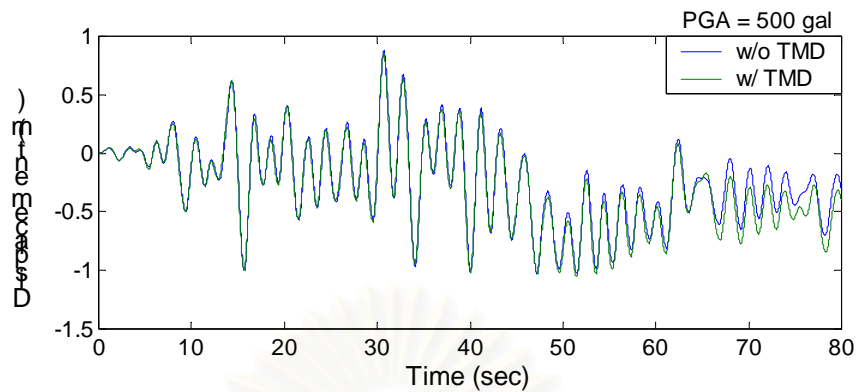


รูปที่ ผ.ค.8 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal

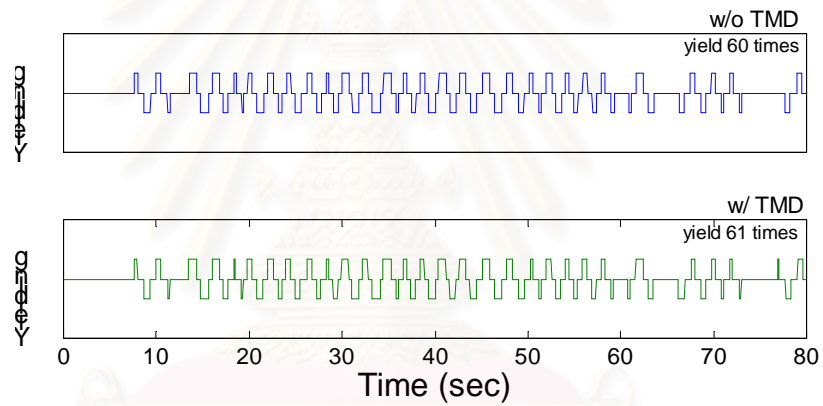


รูปที่ ผ.ค.9 : กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งสัมพัทธ์และความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 100 gal

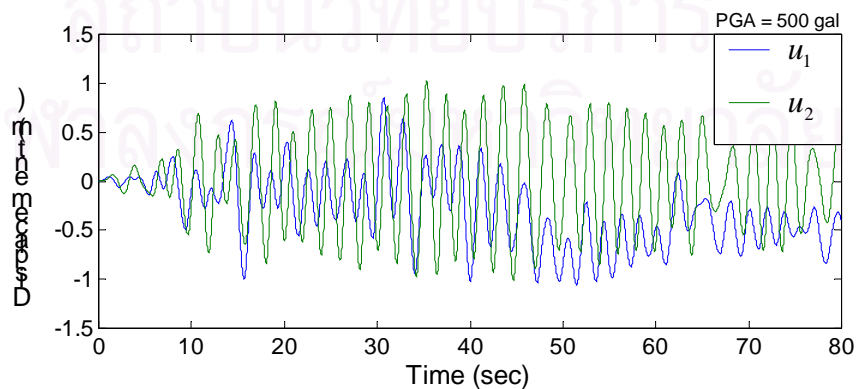
### 3. การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีขนาด PGA = 500 gal



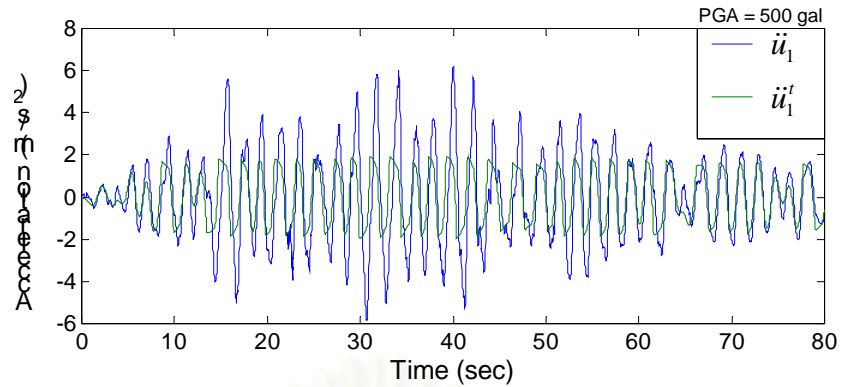
รูปที่ ผ.ค.10 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า 3% ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโกที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal



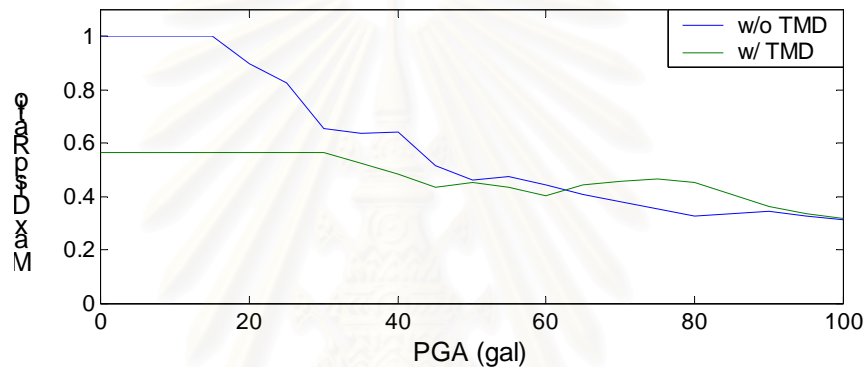
รูปที่ ผ.ค.11 : กราฟเปรียบเทียบตำแหน่ง ระยะเวลาและจำนวนครั้งของการครากที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal



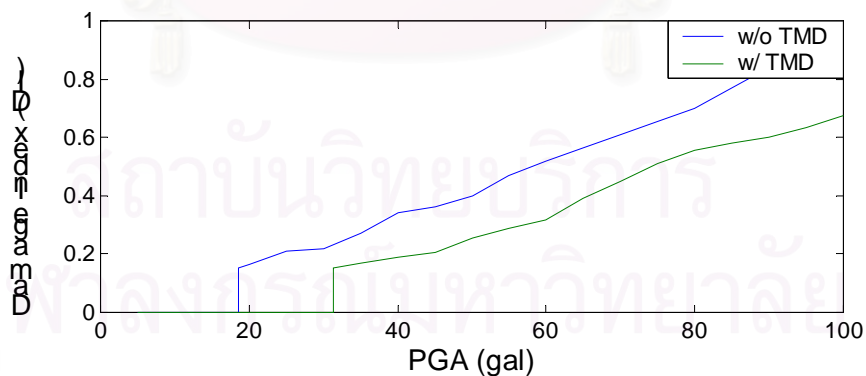
รูปที่ ผ.ค.12 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal



รูปที่ ผ.ค.13 : กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งสัมพัทธ์และความเร่งสัมบูรณ์ของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาใดๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 500 gal



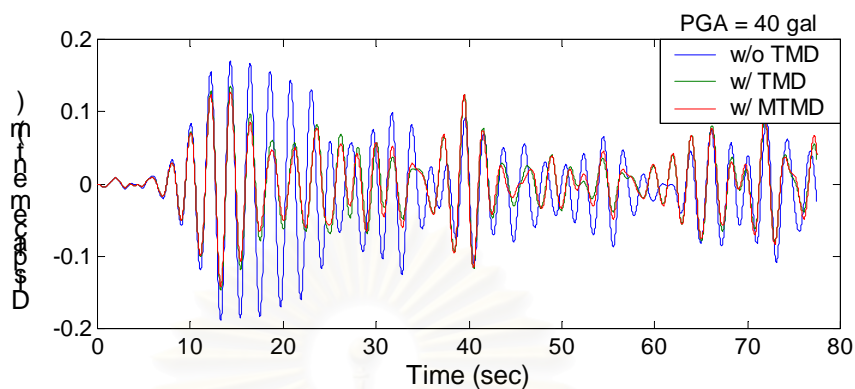
รูปที่ ผ.ค.14 : กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่าใดๆ



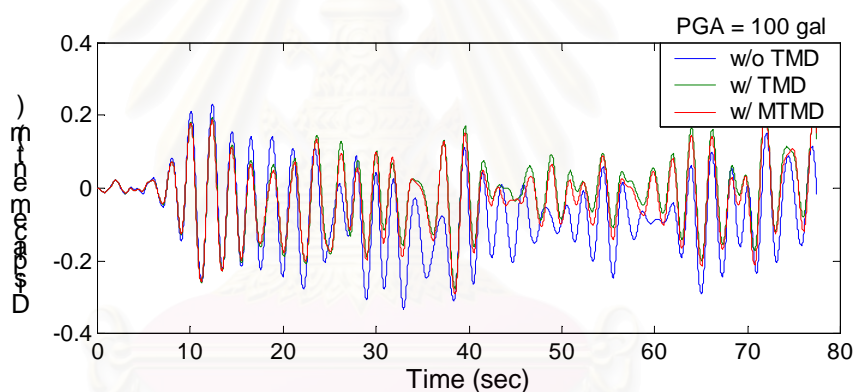
รูปที่ ผ.ค.15 : กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก เมื่อความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่าใดๆ

## เปรียบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วย (MTMD)

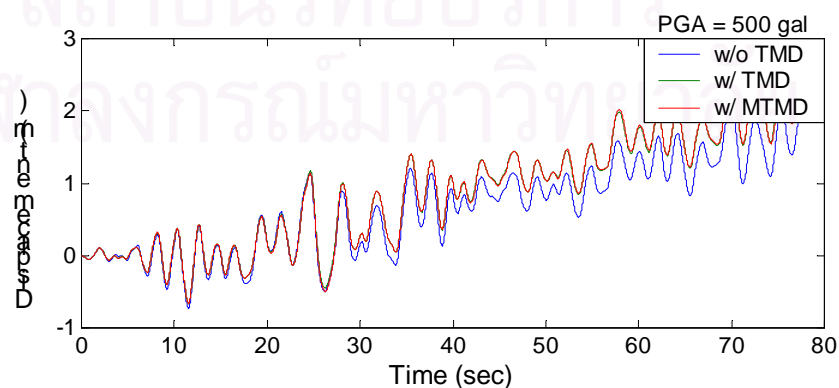
### 1. ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวกรุงเทพฯ



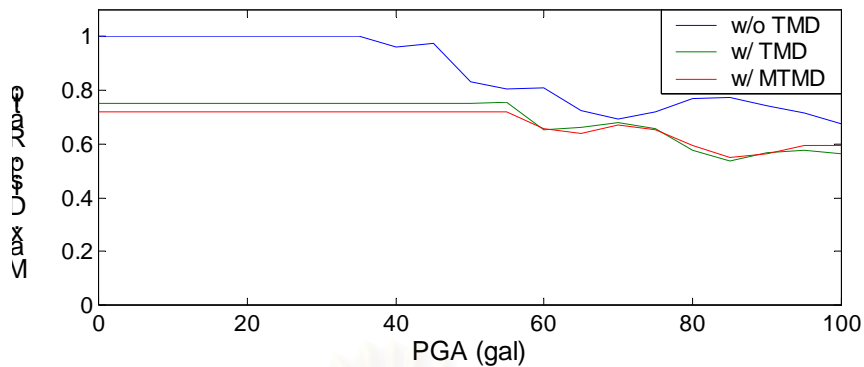
รูปที่ ผ.ค.16 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดหลายมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal



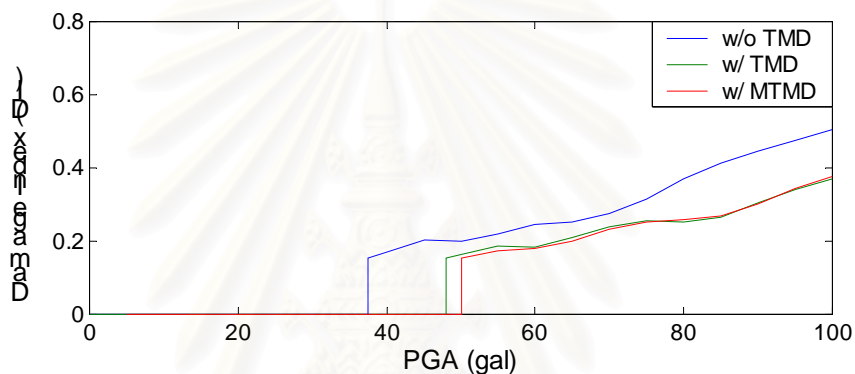
รูปที่ ผ.ค.17 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดหลายมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal



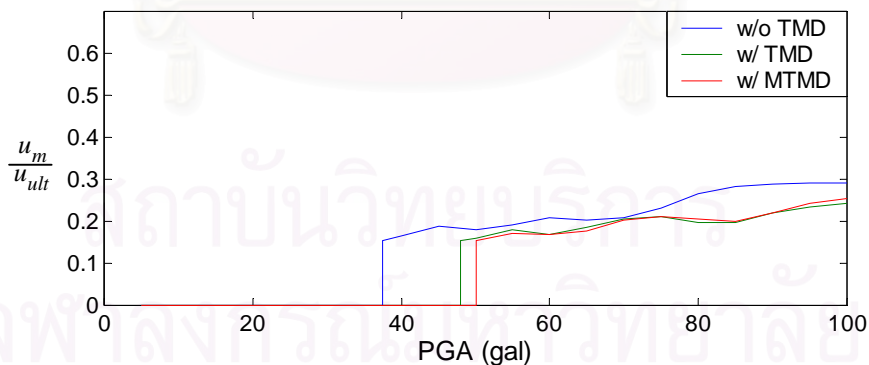
รูปที่ ผ.ค.18 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 500 gal



รูปที่ ผ.ค.19 : กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้าง 3 ระบบต่อการกระจัดที่สภาวะคงตัวของโครงสร้างอิลาสติกเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ

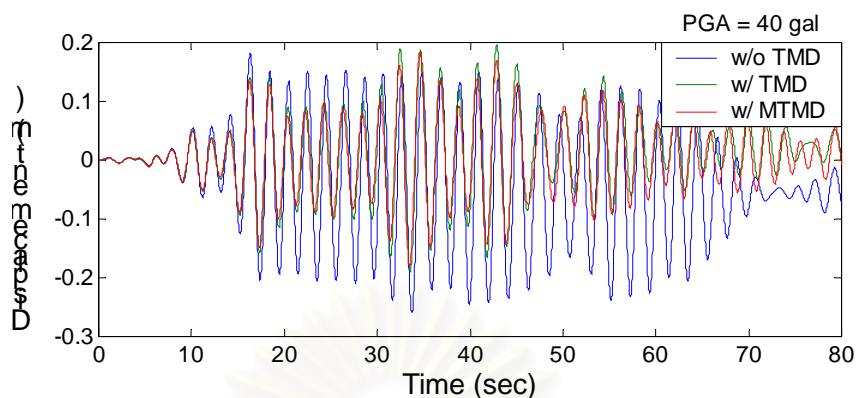


รูปที่ ผ.ค.20 : กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ

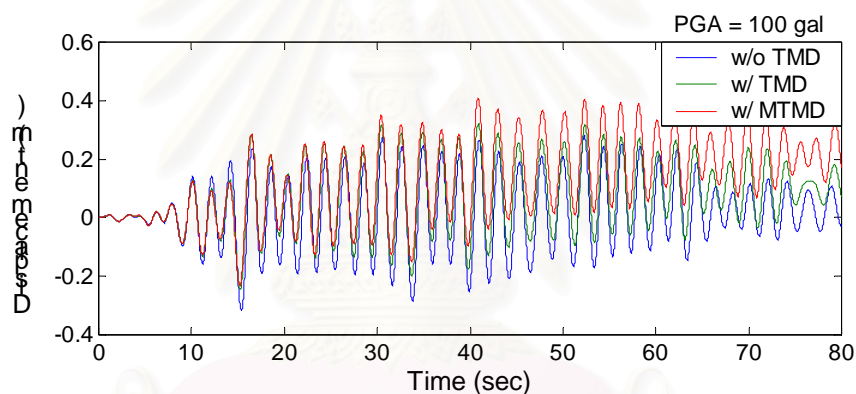


รูปที่ ผ.ค.21 : กราฟเปรียบเทียบเทอมแรกของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ

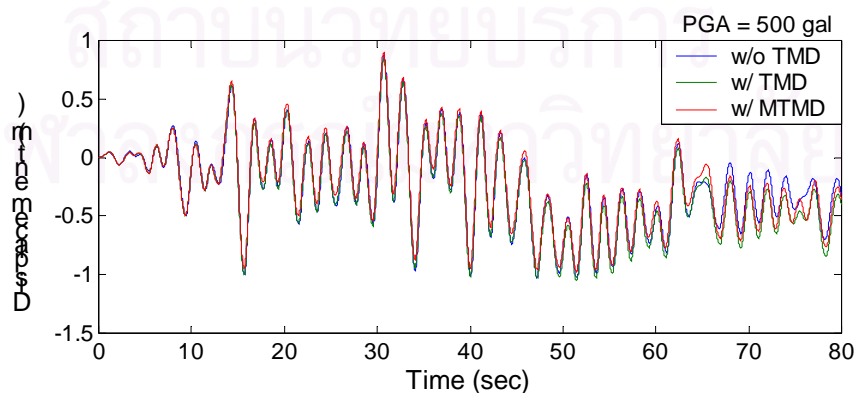
## 2. ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก



รูปที่ ผ.ค.22 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวล-  
หน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดหลายมวลหน่วงปรับค่าที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุดของการ  
เคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal

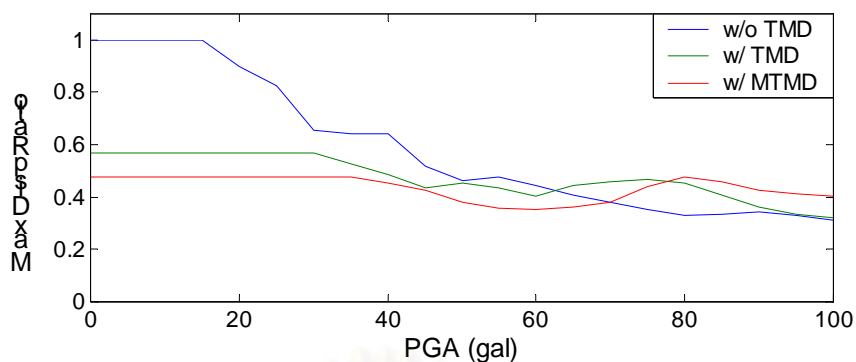


รูปที่ ผ.ค.23 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวล-  
หน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายหน่วยที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร่งสูงสุด  
ของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal

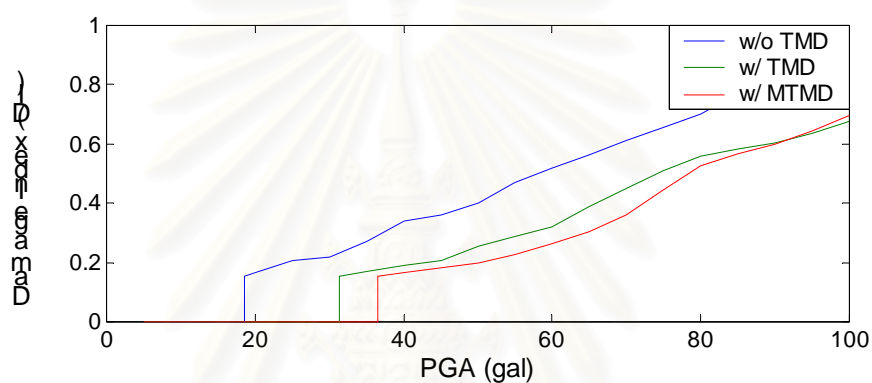


รูปที่ ผ.ค.24 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3  
ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 500 gal

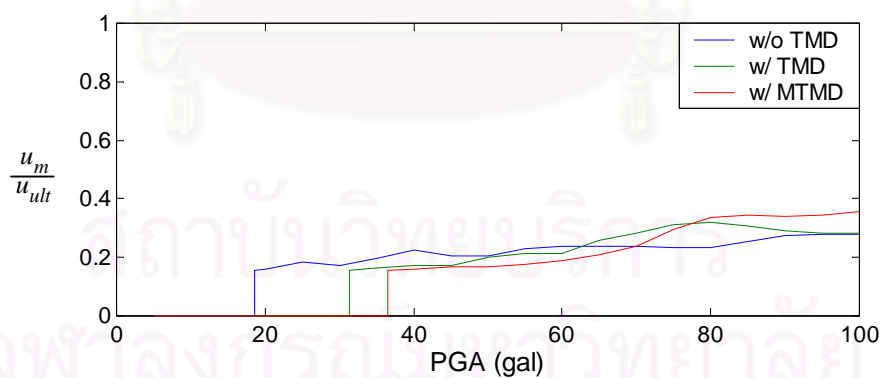




รูปที่ ผ.ค.25 : กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้าง 3 ระบบต่อการกระจัดที่สถานะคงตัวของโครงสร้างอิลาสติกเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ



รูปที่ ผ.ค.26 : กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ

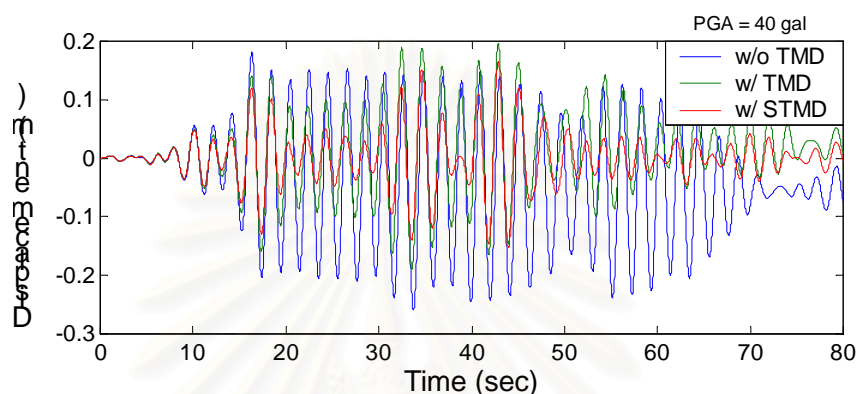


รูปที่ ผ.ค.27 : กราฟเปรียบเทียบเทอมแรกของค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบ เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานมีค่าใดๆ

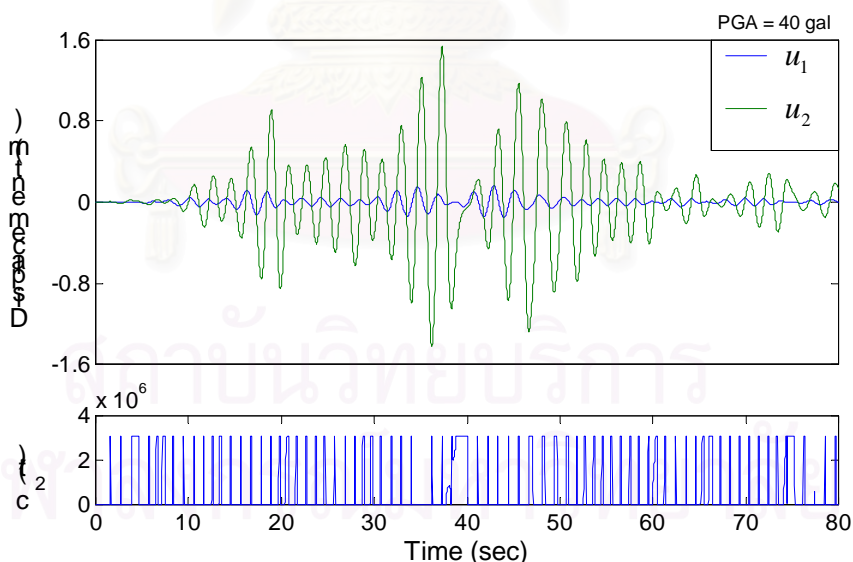
## เปรียบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟ (STMD)

ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก (SCT\_S00E - 1985)

ก. ความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวที่  $PGA = 40 \text{ gal}$

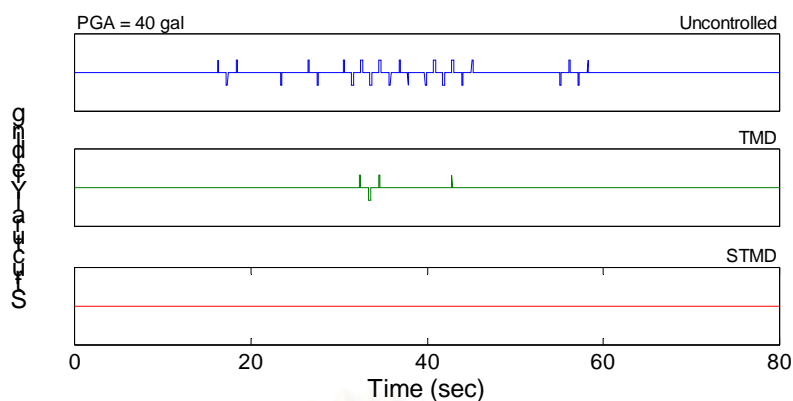


รูปที่ ผ.ค. 28 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาต่างๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก SCT\_S00E-1985 ที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal



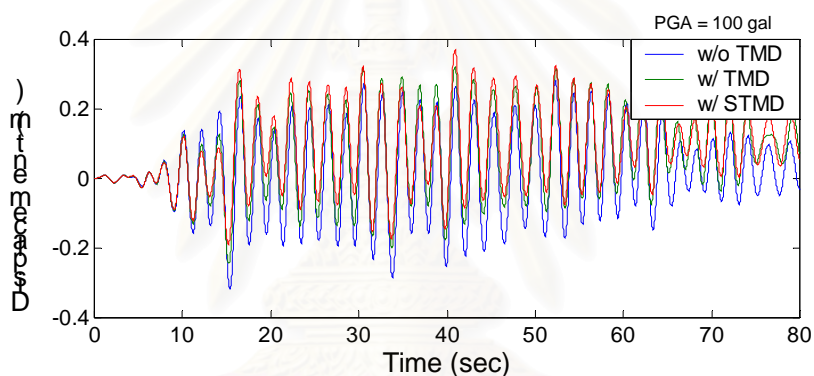
รูปที่ ผ.ค. 29 : (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก SCT\_S00E-1985 ที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal

(ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆ

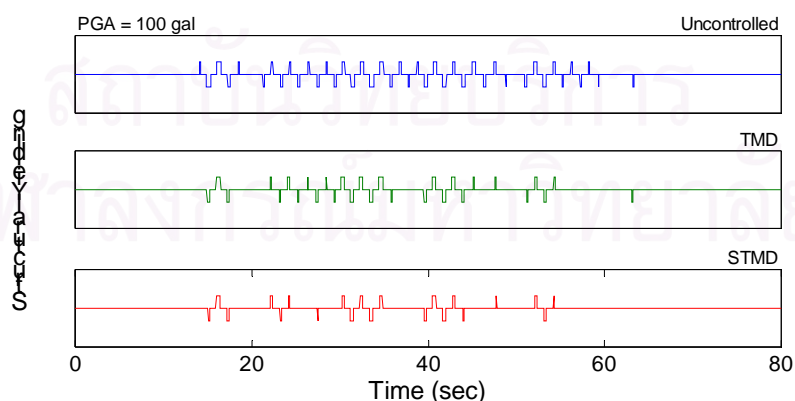


รูปที่ ผ.ค. 30 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก SCT\_S00E-1985 เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 40 gal

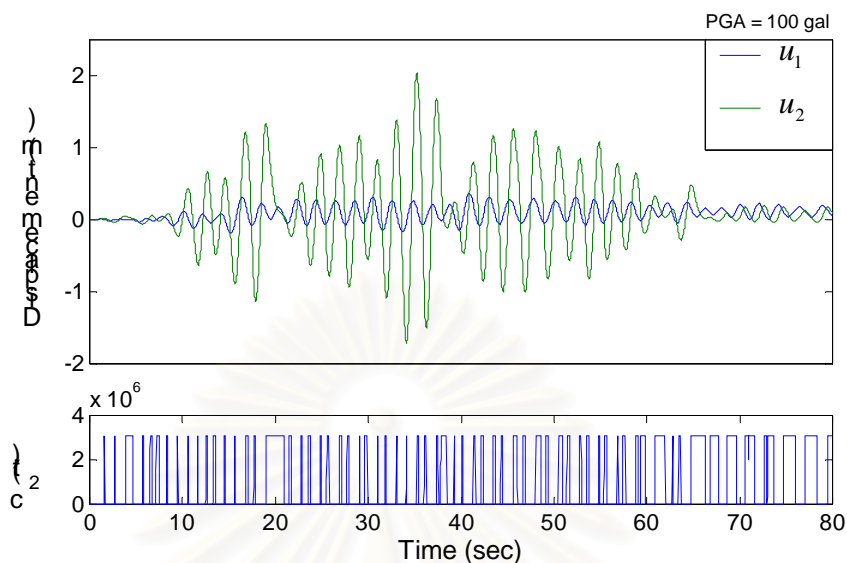
#### ข. ความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวที่ PGA = 100 gal



รูปที่ ผ.ค. 31 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดตั้งมวล-หน่วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอดคทีฟที่เวลาต่างๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก SCT\_S00E-1985 ที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal



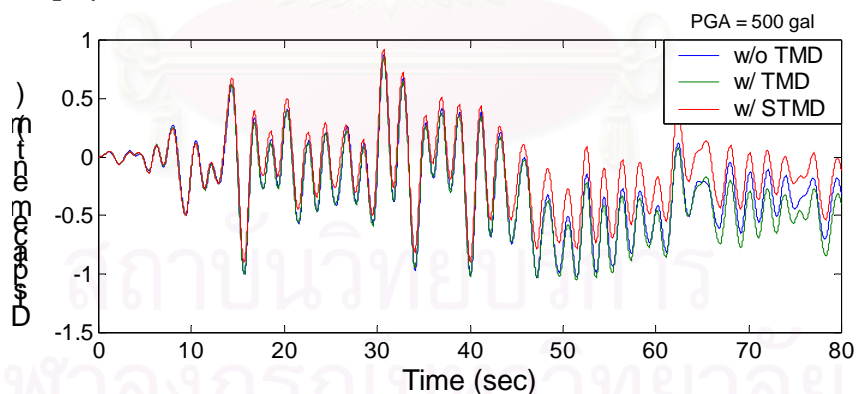
รูปที่ ผ.ค. 32 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก SCT\_S00E-1985 เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal



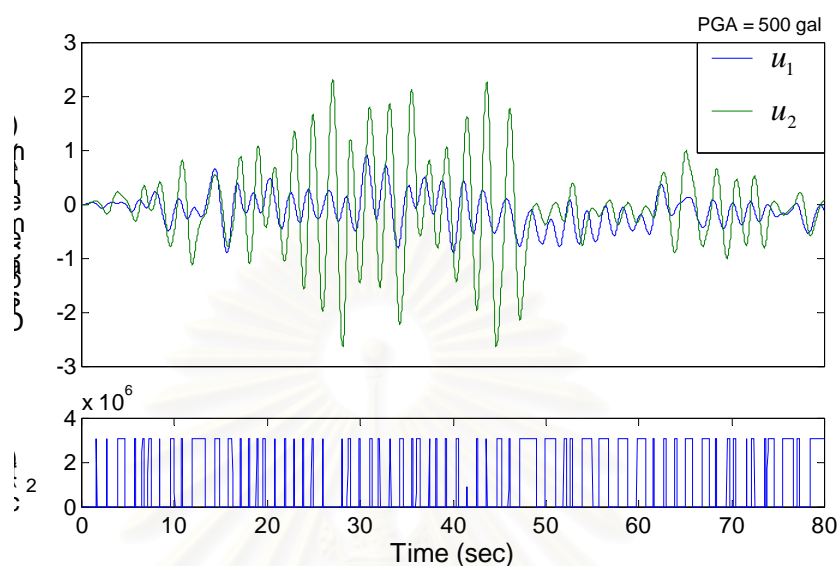
รูปที่ ผ.ค. 33 : (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลห้วงปรับ-  
ค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก SCT\_S00E-1985 ที่มีความเร่ง  
สูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 100 gal

(ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาใดๆ

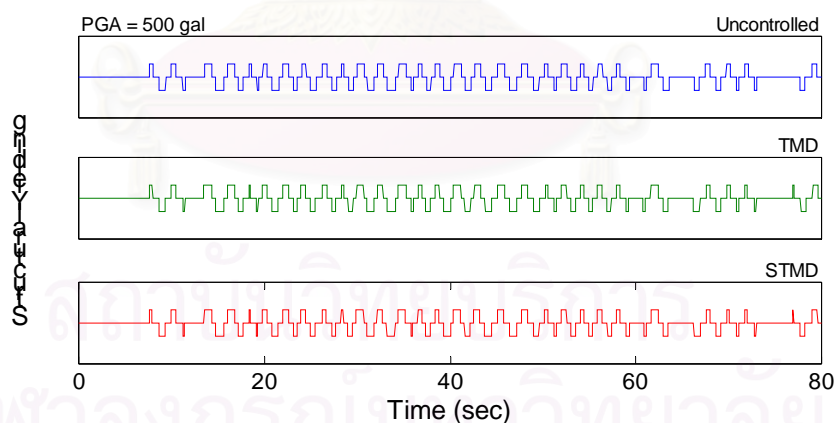
### ค. ความเร่งสูงสุดของสัญญาณแผ่นดินไหวที่ PGA = 500 gal



รูปที่ ผ.ค. 34 : กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ไม่ได้ควบคุม โครงสร้างที่ติดมวล-  
ห้วงปรับค่าและโครงสร้างที่ติดมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอคทีฟที่เวลาต่างๆภายใต้สัญญาณ  
แผ่นดินไหวเม็กซิโก SCT\_S00E-1985 ที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 500 gal

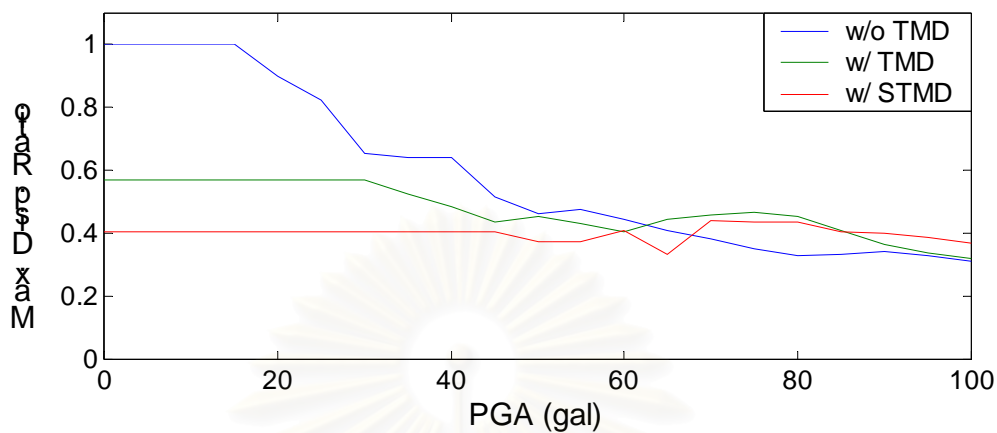


รูปที่ ผ.ค. 35 : (ก) กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างและการกระจัดของมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่เวลาใดๆภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก SCT\_S00E-1985 ที่มีความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 500 gal

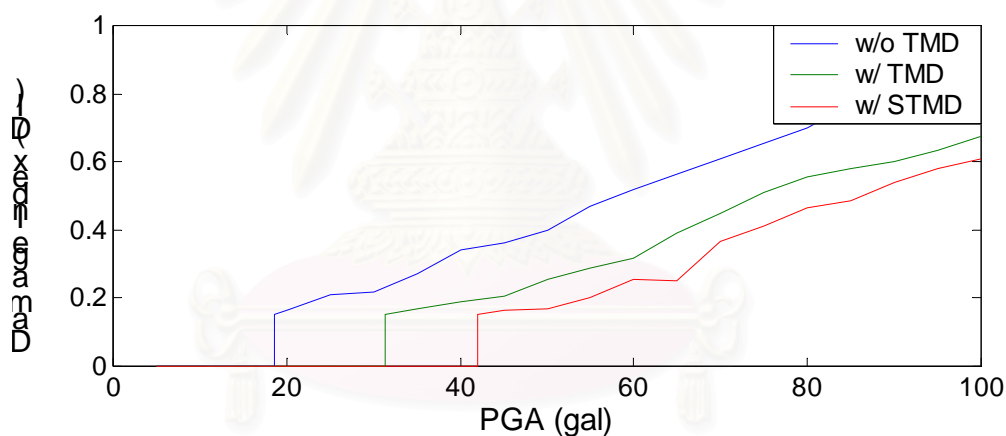


(ข) กราฟแสดงการปรับค่าความหน่วงของมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่เวลาใดๆ

รูปที่ ผ.ค. 36 : กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งและระยะเวลาที่เกิดการครากของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวเม็กซิโก SCT\_S00E-1985 เมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ฐานเท่ากับ 500 gal



รูปที่ ผ.ค. 37 : กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบต่อการกระจัดสูงสุดของโครงสร้างอิลาสติกเมื่อความเร่งสูงสุดของคลื่นตัวพื้นฐานมีค่าใดๆ



รูปที่ ผ.ค. 38 : กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีความเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 ระบบเมื่อความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนตัวพื้นฐานมีค่าต่างๆ

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพงษ์ธร จาญญจน์ เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2519 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย