



การจำลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลว
แบบมีแกนด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี
Simulations of Dynamic Characteristics of Tuned Liquid Column Damper
Using an Elliptical Flow Path Estimation Method

ปฐวี สังข์น้อย

Pathawee Sangnoy

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การจำลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลว
แบบมีแกนด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี
Simulations of Dynamic Characteristics of Tuned Liquid Column Damper
Using an Elliptical Flow Path Estimation Method

ปฐวี สังข์น้อย

Pathawee Sangnoy

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การจำลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิด
 ของเหลวแบบมีแกนด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี

ผู้เขียน นายปฐวี สังข์น้อย

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

..... ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยโสธร ทรัพย์เสถียร)

..... กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐเมศ ภาณิตพจมาน)

..... กรรมการ
 (ดร.วิชัยรัตน์ แก้วเจือ)

..... กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
 ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างู่งสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายปฐวี สังข์น้อย)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายปฐวี สัจจน้อย)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การจำลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี
ผู้เขียน	นายปฐวี สังข์น้อย
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (Tuned Liquid Column Damper, TLCD) และ ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอนไม่คงที่ (Liquid Column Vibration Absorber, LCVA) เป็นตัวหน่วงทางกลที่ช่วยลดการสั่นไหวและความเสียหายของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว วิธีประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพ (Simplified Effective Length) เป็นวิธีที่สามารถใช้ในการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล (Transition Zone) ขนาดเล็กได้อย่างแม่นยำเมื่อเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า แต่เมื่อพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลมีขนาดใหญ่ขึ้นวิธีนี้จะให้ผลการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่คลาดเคลื่อนไปอย่างมาก งานวิจัยฉบับนี้จึงเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA โดยใช้การประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีในการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA จากผลการศึกษาพบว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีให้ผลการตอบสนองต่อความถี่สำหรับ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดเล็กได้ใกล้เคียงกับวิธีประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพ แต่สามารถให้ผลการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดใหญ่ได้แม่นยำกว่าวิธีประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพทั้งการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA และ แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA เมื่อเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า และในการวิจัยครั้งนี้ได้แนะนำให้อัตราส่วนของความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบของ LCVA ที่มีค่ามากกว่า 0.3 เป็น LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดใหญ่

งานวิจัยฉบับนี้ยังได้ศึกษาประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA โดยใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของของเหลว โครงสร้างตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นโครงเฟรมที่มีระดับขั้นด็กกรีอิสระ (Degree-of-Freedom) เท่ากับ 5 และมีพฤติกรรมแบบอีลาสโตพลาสติก (Elastoplastic Behavior) ซึ่งโมเดลมา

จากโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูงประมาณ 43 ชั้นซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มอาคารสูงที่ตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร และออกแบบ LCVA ให้เหมาะสมกับโครงสร้างตัวอย่างโดยใช้หลักการออกแบบจากการศึกษาของ FAHIM SADEK และคณะ ในปี ค.ศ.1998 โดยสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวจะเป็นแผ่นดินไหวที่แรงแผ่นดินไหวที่ห่างจากจุดกำเนิด (Long-distance earthquake) ที่มีลักษณะของคลื่นความเร่งที่คล้ายฟังก์ชันฮาร์โมนิก (Harmonic - like) และมีคาบเด่นแตกต่างกันออกไปจำนวน 6 เหตุการณ์ จากการศึกษาพบว่า LCVA จะมีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวและความเสียหายของโครงสร้างตัวอย่างได้ดีเมื่อขนาดของสัญญาณแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้างตัวอย่างมีค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด (Peak Ground Acceleration, PGA) ไม่เกิน 98 gal หรือ 0.1g สำหรับสัญญาณแผ่นดินไหวที่มีขนาดรุนแรงมากกว่านี้จากการศึกษาพบว่า LCVA ไม่สามารถช่วยลดการสั่นไหวหรือความเสียหายของโครงสร้างตัวอย่างลงได้อย่างมีนัยสำคัญ

Thesis Title Simulations of Dynamic Characteristics of Tuned Liquid Column Damper Using an Elliptical Flow Path Estimation Method

Author Mr.Pathawee Sangnoy

Major Program Civil Engineering

Academic Year 2018

ABSTRACT

Tuned Liquid Column Damper (TLCDs) and Liquid Column Vibration Absorber (LCVAs) are mechanical dampers for structural vibration control under earthquake excitation. In previous research, simplified effective length method is applied to predict the frequency response of LCVA. This existing method is accurate for LCVA with small transition zone, but it had some discrepancies when the transition zone of LCVA got larger. This research proposes the elliptical flow path estimation method to predict the frequency response of LCVA with large transition zone. According to the comparison between shake table experiment and simulation results, the elliptical flow path estimation method can effectively predict the frequency response for both liquid displacement and interaction force of LCVA with large transition zone, as good as for small transition zone. The researcher recommends that the ratio of corner-to-corner width to the horizontal length of 0.3 should be the initial value of large transition zone.

The effectiveness of LCVA for reducing vibration and damage of 5 degrees of freedom structure was investigated under 6 harmonic-liked long-distance earthquakes. The behavior of structure was assumed as elastic-perfectly plastic. F.Sadek's suggestion for design parameters of LCVA was used to design optimal configuration of LCVA for the structure. For specified earthquakes, LCVA effectively reduces the response and damage of the structure under medium intensity earthquakes that resonate with structure. On the other hand, LCVA is not effective under strong resonance excitations that their peak ground accelerations exceed 98 gal.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้ถ้าปราศจากการสนับสนุนของบุคคลหลาย ๆ ท่าน อันดับแรกอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ ที่ให้คำปรึกษา, ประสิทธิ์ ประสาทความรู้, สนับสนุน และ มีเมตตาต่อข้าพเจ้าตลอดการศึกษาและการทำวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกเป็นเกียรติต่อชีวิตและซาบซึ้งอย่างยิ่งที่ได้เป็นลูกศิษย์และทำวิจัยกับอาจารย์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยโสธร ทรัพย์เสถียร ในฐานะประธานกรรมการ, รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมเมศ ภาณิตพจมาน และ ดร.วิชัยรัตน์ แก้วเจือ ในฐานะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ให้ความกรุณาในการให้คำแนะนำและชี้แนะถึงข้อบกพร่องและวิธีแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวรินทร์ ศรีสุวรรณ ที่ให้คำแนะนำและจุดประกายความคิดในการใช้โปรแกรม MATLAB ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่ระดับปริญญาตรี ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่สนับสนุนทุนศึกษากันกุฎิและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์ ระดับปริญญาโท ปีการศึกษา 2558

ขอขอบพระคุณ คุณจิราพร ยวงใย และ คุณสุพิศ นนทะสร เจ้าหน้าที่สำนักงานประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่อำนวยความสะดวกในการจัดส่งเอกสารต่าง ๆ และให้คำแนะนำเกี่ยวกับเอกสารด้วยความเมตตาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ขอขอบคุณ พี่กัตถัญญ จิตตะกาญจน์, พี่พิทักษ์ แก้วชู, Piyawat Janpeng, เขมิวิชญ์ สุกุลจตุพร (Camp"Cafe-ดอลล่า), กนิษฐา โปรบวรบำรุง, สุทธิชัย เจริญกิจ, ประเมษฐ หอมหวาน, ผองเพื่อนปริญญาตรีวิศวกรรมโยธา รุ่นที่ 45 และ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ปริญญาโทวิศวกรรมโครงสร้าง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเรียนและเป็นกำลังใจที่ดีแก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

ท้ายที่สุดผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา คุณยาย คุณตา และน้องสาว ที่มอบความรัก อบรมสั่งสอนเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้การช่วยเหลือด้านต่าง ๆ อดทน เชื่อมั่นเข้าใจ และรอคอยวันแห่งความสำเร็จในการศึกษาของข้าพเจ้า รวมถึงแมวมัวที่เป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ทำให้การศึกษาและทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ปฐวี สังข์น้อย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	5
กิตติกรรมประกาศ	8
สารบัญ	9
สารบัญรูป	12
สารบัญตาราง	18
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	6
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	7
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	8
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	8
1.6 วิธีดำเนินการทำวิจัย	9
1.7 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตของตัวห้วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (TLCD)	9
1.8 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตของตัวห้วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มี	
พื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอนไม่คงที่ (LCVA)	11
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	13
2.1 สมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว	13
2.2 โครงสร้างระบบอิลาสโตพลาสติก (ELASTOPLASTIC BEHAVIOR)	14
2.3 การหาผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข	16
2.4 ตัวห้วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและ	
แนวนอนไม่คงที่ (LIQUID COLUMN VIBRATION ABSORBER, LCVA)	20
2.5 ระบบตัวแปรอิสระเชิงเดียวที่มีการติดตั้ง LCVA	23
2.6 โครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ที่มีหลายดีกรีอิสระ	26
2.7 สมการพลังงานของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว (SEISMIC ENERGY EQUATION)	29
บทที่ 3 การประมาณการไหลเป็นรูปวงรี (ELLIPTICAL FLOW PATH ESTIMATION	
METHOD)	32
3.1 สมการของการประมาณการไหลเป็นรูปวงรี	32

3.2	แบบจำลองของ LCVA และผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าที่นำมาเปรียบเทียบ	38
3.2.1	การออกแบบและก่อสร้าง LCVA ที่ใช้ในการทดลองบนโต๊ะเขย่า	38
3.2.2	ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	42
3.3	การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดลองบนโต๊ะเขย่า.....	42
3.3.1	การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยวิธีการประมาณเส้นทางการไหล ประสิทธิผลและการทดลองบนโต๊ะเขย่า.....	42
3.3.2	การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยใช้การประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูป วงรีและการทดลองบนโต๊ะเขย่า	49
3.4	สรุปและอภิปรายผลการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณ เส้นทางการไหลประสิทธิผลและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีกับผลการทดลองบนโต๊ะ เขย่า	56
บทที่ 4 การควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA โดยใช้วิธีการประมาณเส้นทางการ ไหลเป็นรูปวงรีในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของของเหลว ภายใต้การกระตุ้นของแรง แผ่นดินไหวที่ห่างจากจุดกำเนิด (LONG-DISTANCE EARTHQUAKES)		58
4.1	ที่มาและความสำคัญของการติดตั้ง LCVA ให้กับโครงสร้าง	58
4.2	โครงสร้างตัวอย่างและคุณสมบัติทางพลศาสตร์	61
4.3	สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา.....	65
4.3.1	สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่เหมาะสมในการออกแบบสำหรับพื้นที่โซน 5 ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 1302 (มยพ. 1302)	65
4.3.2	สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่วัดได้ในประเทศเม็กซิโกเมื่อปี ค.ศ. 1985.	68
4.3.3	สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่วัดได้จริงใต้ตึกไบหยกเมื่อปี ค.ศ.1995	69
4.3.4	สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวโทโฮกุ ค.ศ. 2011	70
4.3.5	สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวจังหวัดเชียงราย วันที่ 5 พฤษภาคม ค.ศ.2014	72
4.4	การออกแบบ LCVA.....	74
4.5	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้ สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว.....	80
4.5.1	ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้ สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3	81
4.5.2	ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้ สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5	84

4.5.3	ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้ สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico.....	87
4.5.4	ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้ สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 1995 Bangkok.....	90
4.5.5	ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้ สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku	94
4.5.6	ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้ สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 2014 Mae Lao	96
4.6	สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้าง ตัวอย่างภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว	99
บทที่ 5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	102
5.1	สรุปผลการศึกษา.....	102
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	105
	บรรณานุกรม.....	106
	ภาคผนวก ก สัญลักษณ์และความหมาย.....	108
	ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพและวิธีการประมาณเส้นทาง การไหลเป็นรูปวงรีกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า.....	113
	ภาคผนวก ค ตัวอย่างของโปรแกรมภาษา MATLAB ที่ใช้วิเคราะห์การสั่นไหวของโครงสร้างที่ ติดตั้ง LCVA สำหรับการวิเคราะห์ในบทที่ 4	117
	ภาคผนวก ง บทความวิจัยที่นำเสนอและได้รับการตีพิมพ์	131
	บทความงานวิจัยเรื่องที่ 1	132
	บทความงานวิจัยเรื่องที่ 2	143
	ประวัติผู้เขียน.....	155

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1-1 ตึก Wall Center.....	3
รูปที่ 1-2 ภาพตัดในแนวราบของตึก Wall Center และ TLCD	4
รูปที่ 1-3 ตึก Random House	5
รูปที่ 1-4 แพลนของชั้นที่มีการติดตั้ง TLCD ของตึก Random House.....	5
รูปที่ 1-5 ภาพตัดของ TLCD ที่วางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตกของตึก Random house.....	6
รูปที่ 1-6 ภาพตัดของ TLCD ที่วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ของตึก Random house	6
รูปที่ 2-1 โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวและสมมูลของแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง.....	13
รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในและการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง.....	14
รูปที่ 2-3 พฤติกรรมของโครงสร้างแบบอิลาสโตพลาสติกภายใต้แรงกระทำเป็นวัฏจักร.....	15
รูปที่ 2-4 แบบจำลองของ LCVA.....	20
รูปที่ 2-5 ระบบ SDOF ที่มีการติดตั้ง LCVA.....	23
รูปที่ 2-6 โมเดลของ โครงสร้าง N ชั้นที่มีการติดตั้ง LCVA.....	26
รูปที่ 3-1 การไหลของของเหลวภายใน LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลขนาด ต่าง ๆ.....	32
รูปที่ 3-2 LCVA กับการประมาณการไหลเป็นรูปวงรี.....	33
รูปที่ 3-3 ส่วนที่ 2 และ 4 ของ LCVA ในพิกัด $r - \theta$	34
รูปที่ 3-4 ระบบตัวแปรอิสระเชิงเดี่ยว (SDOF) ที่มีการติดตั้ง LCVA.....	36
รูปที่ 3-5 ค่า Elliptical portion constant (C) สำหรับ LCVA ที่มีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดระหว่าง ท่อในแนวตั้งและแนวนอน (a/b) ขนาดต่าง ๆ	37
รูปที่ 3-6 ความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่ง (l) และความยาวของท่อในแนวราบ (B)	38
รูปที่ 3-7 LCVA ชนิดที่ 1	39
รูปที่ 3-8 LCVA ชนิดที่ 2	40
รูปที่ 3-9 LCVA ชนิดที่ 3	40
รูปที่ 3-10 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 1 ที่ใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหล ประสิทธิผลในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง	43

รูปที่ 3-22 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการ ประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 กับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า	55
รูปที่ 3-23 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการ ประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสำหรับ LCVA ชนิดที่ 3 กับผลการทดลองบนโต๊ะ	55
รูปที่ 4-1 วัดพระธาตุเจดีย์หลวง เชียงแสน จังหวัดเชียงราย ที่ได้รับความเสียหายจากเหตุแผ่นดินไหว ในสหภาพเมียนมาร์ เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2554	58
รูปที่ 4-2 อาคารในจังหวัดทางภาคเหนือของประเทศไทยที่ได้รับความเสียหายจากเหตุแผ่นดินไหวใน สหภาพเมียนมาร์ เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2554	59
รูปที่ 4-3 อาคารโรงเรียนพานพิทยาคมที่ได้รับความเสียหายในอำเภอแม่ลาวจากเหตุแผ่นดินไหววันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางประมาณ 20 กิโลเมตร	59
รูปที่ 4-4 อาคารที่ได้รับความเสียหายในอำเภอแม่ลาวจากเหตุแผ่นดินไหววันที่ 5 พฤษภาคม 2557	60
รูปที่ 4-5 รูปร่างในแต่ละโหมดของโครงสร้างตัวอย่าง	65
รูปที่ 4-6 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่เหมาะสมในการออกแบบสำหรับพื้นที่โซน 5 ตาม มยผ. 1302 ที่ปรับขนาด PGA ให้เท่ากับ 0.15g	66
รูปที่ 4-7 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3 สำหรับระบบที่มี อัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.02.....	66
รูปที่ 4-8 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่เหมาะสมในการออกแบบสำหรับพื้นที่โซน 5 ตาม มยผ. 1302 ที่มี PGA เท่ากับ 0.078g.....	67
รูปที่ 4-9 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5 สำหรับระบบที่มี อัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.02.....	67
รูปที่ 4-10 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico โดยมี PGA เท่ากับ 0.1g	68
รูปที่ 4-11 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico สำหรับระบบที่มี อัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.02.....	69
รูปที่ 4-12 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 1995 Bangkok โดยมี PGA เท่ากับ 0.1g.....	70
รูปที่ 4-13 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว 1995 Bangkok สำหรับระบบที่มีอัตราส่วน ความหน่วงเท่ากับ 0.02	70

รูปที่ 4-14 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku โดยมี PGA เท่ากับ 0.065g	71
รูปที่ 4-15 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku สำหรับระบบที่มี อัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.02.....	72
รูปที่ 4-16 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 2014 Mae Lao โดยมี PGA เท่ากับ 0.09g.....	73
รูปที่ 4-17 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว 2014 Mae Lao สำหรับระบบที่มีอัตราส่วน ความหน่วงเท่ากับ 0.02	73
รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนความถี่ของ LCVA ต่อโครงสร้าง (Tuning Ratio, f_d) กับการตอบสนองของโครงสร้างในการทดลองของ Sadek et al. (1998).....	76
รูปที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความกว้างของท่อในแนวนอนต่อความยาวทั้งหมดของ LCVA (Tube Width to Liquid Length Ratio, α_d) กับการตอบสนองของโครงสร้างใน การทดลองของ Sadek et al. (1998)	77
รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเฮด (Head Loss Coefficient, δ_d) กับ การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้การกระตุ้นด้วยความเร่งขนาดต่าง ๆ ในการทดลองของ Sadek et al. (1998).....	78
รูปที่ 4-21 หน้าตัดของ LCVA ที่จะใช้ในการศึกษา	80
รูปที่ 4-22 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้ แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.15g	82
รูปที่ 4-23 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้ แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.15g	82
รูปที่ 4-24 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3 ที่ เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.15g	83
รูปที่ 4-25 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้ แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.15g	83
รูปที่ 4-26 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้ แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.078g.....	85

รูปที่ 4-27 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.078g.....	85
รูปที่ 4-28 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.078g.....	86
รูปที่ 4-29 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.078g.....	86
รูปที่ 4-30 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g.....	88
รูปที่ 4-31 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g.....	88
รูปที่ 4-32 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g.....	89
รูปที่ 4-33 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g.....	89
รูปที่ 4-34 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1995 Bangkok ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g.....	91
รูปที่ 4-35 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1995 Bangkok ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g.....	92
รูปที่ 4-36 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1995 Bangkok ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g.....	92
รูปที่ 4-37 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว 1995 Bangkok ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g.....	93
รูปที่ 4-38 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.065g.....	94

รูปที่ 4-39 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.065g.....	95
รูปที่ 4-40 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.065g	95
รูปที่ 4-41 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.065g.....	96
รูปที่ 4-42 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2014 Mae Lao ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.09g	97
รูปที่ 4-43 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2014 Mae Lao ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.09g	98
รูปที่ 4-44 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.09g.....	98
รูปที่ 4-45 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว 2014 Mae Lao ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.09g	99

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของ LCVA แต่ละชนิดที่ใช้ทดลองบนโต๊ะเขย่า.....	41
ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของอาคารตัวอย่าง.....	61
ตารางที่ 4-2 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้ แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3	84
ตารางที่ 4-3 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้ แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5	87
ตารางที่ 4-4 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้ แผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico.....	90
ตารางที่ 4-5 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้ แผ่นดินไหว 1995 Bangkok	93
ตารางที่ 4-6 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้ แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku	96
ตารางที่ 4-7 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้ แผ่นดินไหว 2014 Mae Lao	99
ตารางที่ ก-1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการ ประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสำหรับ LCVA ชนิดที่ 1 กับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า	114
ตารางที่ ก-2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการ ประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 กับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า	115
ตารางที่ ก-3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการ ประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสำหรับ LCVA ชนิดที่ 3 กับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

การควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำตามธรรมชาติเป็นหัวข้อวิจัยที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนามายาวนานกว่า 40 ปี เพื่อเป็นการปรับปรุงหลักการออกแบบโครงสร้างใหม่และเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างที่มีอยู่เดิมให้สามารถรับผลกระทบจากแรงกระทำตามธรรมชาติได้ ปัจจุบันโครงสร้างอาคารสูงเป็นโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นส่งผลให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกไม่สะดวกสบายหรือโครงสร้างได้รับความเสียหายภายใต้แรงแผ่นดินไหวหรือแรงลมที่มีความรุนแรง วิธีการควบคุมการตอบสนองของโครงสร้างจึงมีความสำคัญและได้รับความสนใจจากวิศวกรในการนำไปใช้กับโครงสร้างอาคารสูงเพื่อช่วยลดระดับของการสั่นไหวและความเสียหายต่อโครงสร้าง

โดยทั่วไปวิธีการควบคุมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสามารถแบ่งได้ดังนี้

1). การติดตั้งระบบปรับลดค่า (Input Reduction) เป็นการปรับลดสถานะกระตุ้นหรือพลังงานภายนอกที่จะถ่ายเข้าสู่โครงสร้าง เช่น การติดตั้งระบบตัดแยกฐานรากออกจากตัวอาคาร (Seismic Base Isolation)

2). การเพิ่มความหน่วง (Damping Augmentation) เป็นการเพิ่มความสามารถในการหน่วงให้กับโครงสร้างโดยการติดตั้งตัวหน่วงชนิดต่าง ๆ ให้กับโครงสร้าง ยกตัวอย่างเช่น มวลหน่วง (Tuned Mass Damper, TMD) และ ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (Tuned Liquid Column Damper, TLCD)

3). การดัดแปลงโครงสร้าง (Structural Modification) เป็นการปรับเปลี่ยนรูปร่างของโครงสร้างหรือปรับปรุงส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงสร้างเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้เพียงพอที่จะรับผลกระทบจากการสั่นสะเทือน ตัวอย่างเช่น การติดตั้งโครงแกนแนง (Braced Frame) ให้กับโครงสร้าง, การเสริมความแข็งแรงให้กับเสาโดยใช้วิธีการหุ้มเสาด้วยวัสดุต่าง ๆ เช่น แผ่นเหล็ก (Steel Jacketing), แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP Jacketing), เฟอโรซีเมนต์ (Ferrocement Jacketing) และคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC jacketing)

การแบ่งวิธีการควบคุมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้างที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นสามารถแบ่งออกเป็น ระบบควบคุมแบบพาสซีฟ (Passive Control System) และ ระบบควบคุมแบบแอคทีฟ (Active Control System) ซึ่งทั้งสองระบบมีความแตกต่างกันโดย ระบบควบคุมแบบแอคทีฟจำเป็นต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกจึงจะสามารถทำงานได้ซึ่งตรงกันข้ามกับระบบควบคุมแบบพาสซีฟที่สามารถทำงานได้เลยโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก

Soong (1997) การควบคุมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้างมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับโครงสร้างและสร้างความรู้สึกสะดวกสบายให้กับผู้อาศัยภายใต้สภาวะขีดจำกัดของโครงสร้าง จากการศึกษาพบว่าระบบควบคุมแบบพาสซีฟ เช่น มวลหน่วง (Tuned Mass Damper, TMD) และ ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (Tuned Liquid Column Damper, TLCD) เป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์ในการควบคุมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้างได้ดีในระดับหนึ่ง และระบบควบคุมแบบแอทีฟมีความน่าเชื่อถือด้านประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

อาคารและโครงสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณเขตรอยเลื่อนมีพลัง (Active Fault Zone) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวนั้น โดยส่วนใหญ่อาคารเหล่านี้ถูกสร้างขึ้นก่อนที่มีการใช้มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อด้านแผ่นดินไหวทำให้โครงสร้างเหล่านี้อยู่ในสภาวะไม่ปลอดภัยเมื่อเกิดแผ่นดินไหว โดยทั่วไปมาตรฐานการออกแบบเพื่อด้านแผ่นดินไหวไม่ได้ครอบคลุมถึงอาคารที่สร้างขึ้นก่อนใช้มาตรฐาน แต่ 10 ปีที่ผ่านมาได้เกิดแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ขึ้นทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ เช่น เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ประเทศญี่ปุ่นเมื่อ ปี ค.ศ.2011 และ แผ่นดินไหวที่จังหวัดเชียงรายเมื่อ ปี ค.ศ.2014 ทำให้อาคารและบ้านเรือนเกิดความเสียหายเป็นจำนวนมาก แสดงให้เห็นว่ามีโครงสร้างจำนวนมากจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อให้มีความปลอดภัยมากขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว

การปรับปรุงและเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับอาคารที่สร้างก่อนมีการใช้มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อด้านแผ่นดินไหวนั้นสามารถทำได้หลายวิธี การติดตั้งระบบตัดแยกฐานรากออกจากตัวอาคาร (Seismic Base Isolation) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม แต่ด้วยรายละเอียดจำนวนมากในการทำงานรวมถึงระยะเวลาในการติดตั้งและค่าใช้จ่ายที่สูงทำให้การติดตั้งระบบควบคุมแบบพาสซีฟนั้นมีความเหมาะสมมากกว่า ดังนั้นทำให้การวิจัยเกี่ยวกับระบบควบคุมแบบพาสซีฟมีมากขึ้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ตัวหน่วงแบบพาสซีฟมีหลายชนิดแต่ตัวหน่วงแบบพาสซีฟชนิดของเหลวได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวหน่วงชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีจุดเด่นเฉพาะตัว เช่น ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาต่ำ, การติดตั้งทำได้ง่ายต้องการบำรุงรักษาต่ำ, และไม่เป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับโครงสร้างเนื่องจากน้ำที่บรรจุอยู่ในตัวหน่วงชนิดนี้สามารถใช้ในกรณีเกิดอัคคีภัยได้

ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (Tuned Liquid Column Damper, TLCD) (Sakai et al.1989) เป็นตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวประเภทหนึ่งที่ช่วยลดการสั่นไหวของโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นสูง TLCD เป็นอุปกรณ์ที่มีของเหลวบรรจุอยู่ในคอนเทนเนอร์รูปตัวยูพร้อมกับออริฟิซมีหลักการในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างเหมือนกับมวลหน่วงปรับค่าได้ (Tuned Mass Damper, TMD) ที่ประกอบไปด้วยมวลและระบบสปริง TLCD มีลักษณะเด่นกว่า TMD หลายด้าน เช่น TLCD ไม่มีส่วนประกอบที่เป็นจักรกล, TLCD สามารถติดตั้งไว้บนอาคารโดยประยุกต์ใช้เป็น

ที่เก็บน้ำสำหรับใช้ในกรณีฉุกเฉินได้ ด้วยลักษณะเด่นดังกล่าวทำให้การติดตั้ง TLCD จึงไม่เป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับตัวอาคารและยังสามารถปรับความถี่ธรรมชาติและการหน่วงได้ง่ายอีกด้วย

ตัวอย่างโครงสร้างที่มีการนำตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (TLCD) ไปใช้งาน



ที่มา: <http://perryanderson.ca/quadracapital/portfolio/wall-center>

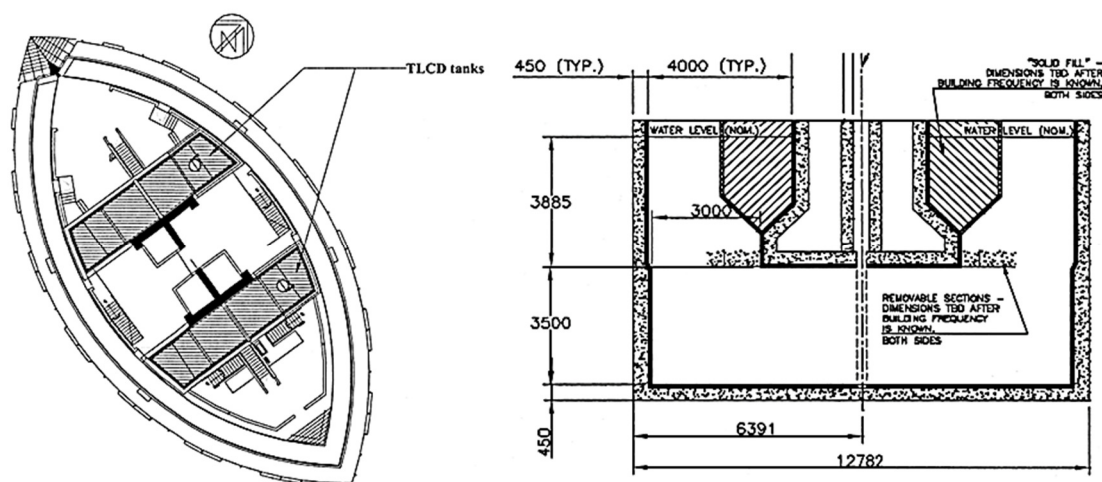
รูปที่ 1-1 ตึก Wall Center

ตึก Wall Center

จากรูปที่ 1-1 แสดงภาพของตึก Wall Center ซึ่งเป็นตึกโรงแรมหรูและคอนโดมิเนียมจำนวน 48 ชั้น ในเมืองแวนคูเวอร์ รัฐบริติชโคลัมเบีย ประเทศแคนาดา จากการทดสอบกับอุโมงค์ลมได้คาดการณ์ความเร่งในอีก 10 ปีข้างหน้าอยู่ในช่วง 28 ถึง 40 mili-g ขึ้นอยู่กับรูปร่างของโครงสร้างในการพิจารณาตอนแรกเริ่มของการออกแบบ เพื่อลดการรับรู้การเคลื่อนไหวของตัวตึกต่อผู้อยู่อาศัยเนื่องด้วยผลจากแรงลม ดังนั้นความเร่งสูงสุดจึงถูกจำกัดไว้ที่ 16 mili-g ตัวหน่วงที่ใช้น้ำในการหน่วงจึงถูกเลือกใช้และติดตั้งไว้ที่ชั้นบนสุดของตึก เนื่องจากสามารถใช้น้ำที่บรรจุอยู่ในตัวหน่วงในกรณีที่เกิดเหตุเพลิงไหม้ได้ ถือเป็นทางเลือกในการติดตั้งปั๊มสูบน้ำและเจเนอเรเตอร์ขนาดใหญ่ไว้กับฐานของตึกซึ่งเป็นข้อเรียกร้องของเจ้าหน้าที่ดับเพลิงสำหรับการก่อสร้างอาคารแห่งนี้ เริ่มต้นในการออกแบบตัวหน่วงชนิดของเหลว (Tuned Liquid Damper, TLD) ได้ถูกเลือกใช้กับตึก Wall Center

แต่เนื่องจาก TLCD สามารถใช้มวลของน้ำทำให้เกิดการหน่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า TLD จึงถูกนำมาใช้กับตึกแห่งนี้

ด้วย TLCD มีน้ำหนักมากถึง 600 ตัน ซึ่งรวมปริมาตรของน้ำอย่างมหาศาลจึงจำเป็นต้องมีพื้นที่ที่เพียงพอสำหรับการก่อสร้าง เนื่องด้วยการเคลื่อนที่ของตึกเป็นการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวจึงทำให้การออกแบบนั้นทำได้ง่ายมากขึ้น รูปที่ 1-2 แสดง TLCD ของตึก Wall Center ซึ่งประกอบด้วยแท็งก์คอนกรีตรูปตัวยูจำนวนสองตัวโดยส่วนที่เป็นท่อในแนวราบจะวางตัวตามแนวด้านกว้างของตึก และส่วนท่อในแนวตั้งจะอยู่ที่ส่วนปลายของแต่ละด้าน รวมปริมาตรน้ำใน TLCD แต่ละตัวประมาณ 50,000 แกลลอน (ประมาณ 189,271 ลิตร) โดยตัวหน่วงจะทำงานโดยให้น้ำไหลกลับไปกลับมาตามท่อตามแนวราบและเคลื่อนที่ขึ้นลงตามท่อในแนวตั้ง



ที่มา: Peter A. Irwin and Brian Breukelman (2001)

รูปที่ 1-2 ภาพตัดในแนวราบของตึก Wall Center และ TLCD

ตึก Random House

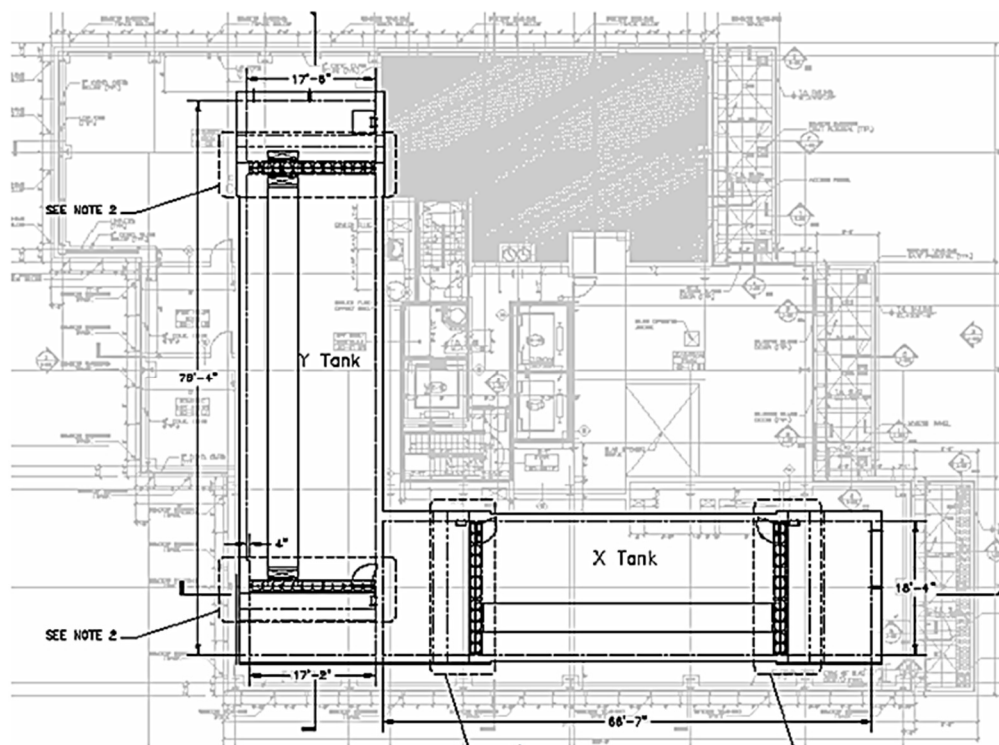
Random House ตั้งอยู่เมืองนิวยอร์กประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นอาคารพักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 25 ชั้นแรก และต่อด้วยอาคารสำนักงานซึ่งเป็นโครงสร้างเหล็กอีก 25 ชั้น มีความสูงอยู่ที่ 675 ฟุตเหนือระดับถนน หน้าตัดในแนวราบของตึกมีขนาดเท่ากับ 840,000 ตารางฟุต ระบบ TLCD ของตึกนี้ถูกติดตั้งไว้บนชั้นที่ 50 จำนวนสองตัวโดยตัวหนึ่งจะวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ อีกตัวหนึ่งจะวางตัวในแนวตะวันตก-ตะวันออก โดยแต่ละตัวมีความกว้างประมาณ 20 ฟุต ยาว 70 ฟุต สูง 12 ฟุต แสดงดังรูปที่ 1-4 ถึง 1-6 โดยน้ำหนักของ TLCD ที่วางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก (X-Tank) มีน้ำหนักอยู่ที่ประมาณ 250 ตัน ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 0.1682 Hz สำหรับ TLCD ที่วางตัวในแนว

เหนือ-ใต้ (Y-Tank) จะมีน้ำหนักอยู่ที่ประมาณ 430 ตัน ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 0.2125 Hz โดยน้ำหนักของน้ำที่เคลื่อนที่ใน TLCD แต่ละตัวอยู่ที่ 550 ตัน ซึ่งคิดเป็น 0.33 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตึก



ที่มา: <http://wirednewyork.com>

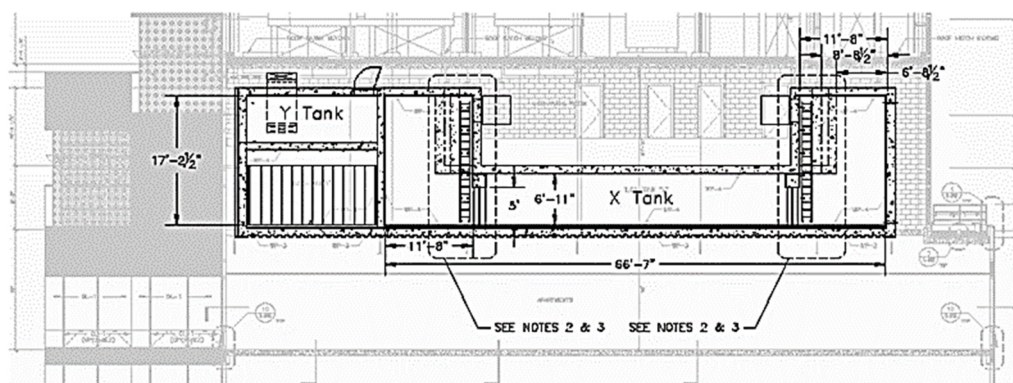
รูปที่ 1-3 ตึก Random House



ที่มา: Akbar Tamboli et al. (2008)

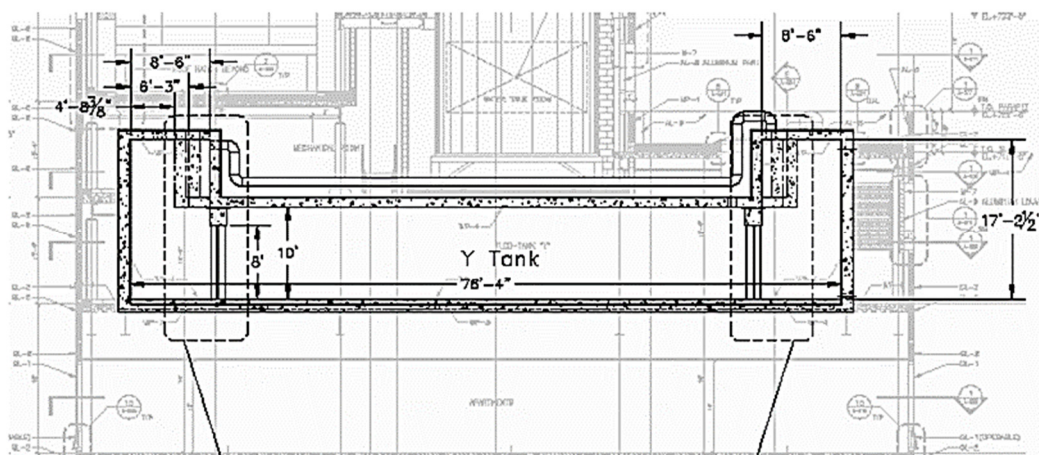
รูปที่ 1-4 แพลนของชั้นที่มีการติดตั้ง TLCD ของตึก Random House

ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง TLCD สำหรับตึก Random House การเคลื่อนที่ของตึกทำให้ผู้คนที่พักอาศัยรู้ถึงการสั่นไหวได้ หลังจากมีการติดตั้ง TLCD พบว่าสามารถจำกัดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของแต่ละชั้น (Interstory Deflection) ให้ไม่เกิน $H/350$ หรือ 0.5 นิ้ว ได้



ที่มา: Akbar Tamboli et al. (2008)

รูปที่ 1-5 ภาพตัดของ TLCD ที่วางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตกของตึก Random house



ที่มา: Akbar Tamboli et al. (2008)

รูปที่ 1-6 ภาพตัดของ TLCD ที่วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ของตึก Random house

1.2 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

TLCD อีกรูปแบบหนึ่งที่มีขนาดของหน้าตัดที่ไม่คงที่ เรียกว่าตัวหน่วงชนิดนี้ว่า ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอนไม่คงที่ (Liquid Column Vibration Absorber, LCVA) จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของ LCVA มากกว่า TLCD โดย

ความถี่ธรรมชาติของ LCVA สามารถปรับเปลี่ยนได้จาก “ความยาวประสิทธิผล” ซึ่งหมายถึงรูปร่างของคอนเทนเนอร์และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอน

จากหลักการสำคัญที่ว่าเมื่อความถี่ของการเคลื่อนที่ของของเหลวถูกปรับให้เท่ากับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างและใช้อัตราการหน่วงของการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมจะทำให้ตัวหน่วงชนิดของเหลวมีประสิทธิภาพมากที่สุด (Warburton 1981, Gao et al. 1997, Sun et al. 2003, Jong-Cheng et al. 2005.) แต่เนื่องจากการหน่วงเป็นผลจากการเคลื่อนที่ที่ของของเหลวทำให้ไม่สามารถทราบค่าอัตราการหน่วงที่เหมาะสมได้หากไม่ทราบค่าแอมพลิจูดของการสั่นไหว แต่อย่างไรก็ตามการวิจัยก่อนหน้าก็สามารถหาประสิทธิภาพที่เหมาะสมของ TLCVD ภายใต้ผลของแรงแผ่นดินไหวต่างกันออกไปไว้ได้ (Won et al. 1996, Sadek et al. 1998, Yu et al. 1998, Chang et al. 1998, Banerji et al. 2000, Aparna et al. 2004) แต่สำหรับ LCVA นั้นการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพที่เหมาะสมยังไม่ได้เป็นที่สนใจในการวิจัยมากนัก ดังนั้นการทำการวิจัยในครั้งนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพการทำนายพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA ที่ใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของของเหลวเพื่อจำลองพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA โดย LCVA ที่ทำการศึกษานี้มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลว (Transition Zone) ขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างของท่อในแนวตั้งและแนวนอน โดย LCVA ลักษณะนี้เหมาะสำหรับนำมาติดตั้งกับอาคารที่มีพื้นที่การใช้งานจำกัด

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของ LCVA ในการตอบสนองต่อการสั่นไหว โดยใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี (Elliptical Flow Path Estimation Method) ในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของของเหลว

2) ศึกษาประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA โดยใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของของเหลว ภายใต้การกระตุ้นของแรงแผ่นดินไหวที่ห่างจากจุดกำเนิด (Long-Distance Earthquakes)

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ในการศึกษาใช้ผลการทดลองของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลว (Transition Zone) จำนวน 3 ขนาด คือ ขนาดเล็ก 1 ขนาด และ ขนาดใหญ่ 2 ขนาด โดยมีอัตราส่วนของความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบเท่ากับ 0.35, 0.52 และ 0.75 ตามลำดับ
- 2) ข้อมูลแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลแผ่นดินไหวที่วัดห่างจากจุดกำเนิด (มีช่วงการสั่นไหวที่แคบและใช้ระยะเวลาในการสั่นไหว) ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยและต่างประเทศ
- 3) โครงสร้างที่ใช้ในการศึกษามีพฤติกรรมเป็นแบบ Elastic-Perfectly Plastic Material
- 4) หลักการออกแบบ LCVA เพื่อติดตั้งกับโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษา อ้างอิงหลักการออกแบบจากบทความ SINGLE-AND MULTIPLE-TUNED LIQUID COLUMN DAMPER FOR SEISMIC APPLICATION ของ FAHIM SADEK, BIJAN MOHRAZ AND H.S.LEW โดยมีที่มาจากวารสาร Earthquake Engineering and Structural Dynamics ปี 1998
- 5) พิจารณาการเคลื่อนที่ของระบบโครงสร้างและโครงสร้างที่มีการติดตั้ง LCVA ในทิศทางเดียวเท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1) สามารถเลือกตัวหน่วงที่ใช้ในการลดการสั่นไหวเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนพื้นที่ที่ไกลจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวหรือแนวรอยเลื่อน
- 2) สามารถป้องกันและแก้ไขปัญหาการสั่นไหวที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างโดยวิธีที่เหมาะสม
- 3) เป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้ LCVA กับโครงสร้างจริงต่อไป

1.6 วิธีดำเนินการทำวิจัย

- 1) ศึกษาผลงานวิจัยในอดีต และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาและทำความเข้าใจหลักการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของของเหลวประกอบด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลอย่างง่าย (Simplified Effective Length) และ วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี (Elliptical Flow Path Estimation Method)
- 3) หาข้อมูลแผ่นไหวที่ห่างจากจุดกำเนิด (ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยและต่างประเทศ)
- 4) ศึกษาวิธีการใช้และคำสั่งพื้นฐานในการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรม MATLAB
- 5) สร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ของ LCVA โดยใช้วิธีตามข้อที่ 2 ในการสร้างสมการอธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA จากนั้นใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA จากคลื่นแผ่นดินไหวในข้อที่ 3
- 6) วิเคราะห์และสรุปผล
- 7) ทำรายงาน

1.7 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตของตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (TLCD)

Tuned Liquid Column Damper (TLCD) ที่ได้ทำการศึกษาอยู่ในปัจจุบันนั้นถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Saoka et al. (1988) การเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน TLCD สามารถประมาณได้ว่าเป็นการเคลื่อนที่ในระบบแกนเดียว (Single Coordinate System) ทำให้สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน TLCD ได้ด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง ซึ่งแตกต่างกับการเคลื่อนที่ของของเหลวแบบสองทิศทางที่เกิดขึ้นภายในตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลว (Tuned Liquid Damper, TLD) Saoka et al. ได้แสดงให้เห็นว่าหลักการทำงานของ TLCD นั้นคล้ายกับระบบมวลหน่วงปรับค่า (TMD) และระดับการหน่วงของ TLCD สามารถปรับได้ด้วยอัตราการเปิดของออริฟิซ (Orifice) โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปิดของออริฟิซและสัมประสิทธิ์การสูญเสียเฮด ได้ถูกศึกษาโดย Blevins (1984) ต่อมา Sakai et al. (1989) ได้นำเสนอหลักการและตัวอย่างการนำไปใช้งานของ TLCD กับทาวเวอร์ของสะพานแขวนก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงกับทาวเวอร์ของสะพานแขวน Higashi-Kobe ประเทศญี่ปุ่น

เพื่อให้ได้มาซึ่ง TLCD ที่มีประสิทธิภาพโดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือค่าความถี่ของการเคลื่อนที่ของของเหลวที่จะถูกเปลี่ยนให้ใกล้เคียงความถี่ธรรมชาติของตึกและอัตราการหน่วงซึ่งจะต้องใช้ค่าที่เหมาะสม ดังนั้น Xu et al. (1992) และ Balendra et al. (1995) ได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่าที่ได้กล่าวมาเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมภายใต้ผลของแรงลมที่มากกระทำต่อโครงสร้างและได้มีการศึกษาต่อมาเพื่อให้ค่าที่แน่นอนมากขึ้นโดย Gao et al. (1997) ต่อมา Chang

et al. (1998) ได้ศึกษาการควบคุมประสิทธิภาพในการทำงานของ TLCD ภายใต้สภาวะการกระตุ้น Gaussian White Noise Excitation โดยในการศึกษาโครงสร้างจะถูกจำลองเป็นระบบที่มีระดับชั้นอิสระของการเคลื่อนที่เท่ากับหนึ่ง (SDOF) ขณะที่คุณสมบัติต่าง ๆ ของ TLCD เช่น ความยาวประสิทธิผลของคอนเทนเนอร์หรือค่าการสูญเสียของเฮด (Head Loss) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของ TLCD บนการจำลองเชิงตัวเลขพบว่าประสิทธิภาพในการทำงานของ TLCD จะเปลี่ยนไปตามขนาดของแอมพลิจูดของสภาวะที่มากกระตุ้นซึ่งมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในเทอมของการหน่วงและโดยทั่วไป TLCD จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่า TMD เพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับในกรณีที่มีมวลเท่ากัน

ประสิทธิภาพการทำงานของ TLCD ภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างได้ถูกศึกษาโดย Won et al. (1996) และ Sadek et al. (1998) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นไหวของ TLCD โดยวิธีการเชิงตัวเลขสำหรับระบบโครงสร้างที่มีระดับชั้นอิสระของการเคลื่อนที่เท่ากับหนึ่ง (Single Degree of Freedom, SDOF) และอาคารสูง 10 ชั้นภายใต้แรงแผ่นดินไหวจำนวน 72 ข้อมูล ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ TLCD นั้นจะสามารถช่วยลดการเคลื่อนที่และความเร่งจากการสั่นไหวของโครงสร้างได้ถึง 47 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ผลการศึกษาชี้ให้เห็นอีกว่าการใช้ Multiple-TLCDs ไม่ได้เหนือกว่าการใช้ TLCD เดี่ยว ๆ เนื่องด้วยต้องพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้าง

จากการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับ TLCD ที่ผ่านมาได้สมมุติให้โครงสร้างเกิดการสั่นไหวอยู่ในช่วงฮิสเทติกเท่านั้นและการลดลงของการเคลื่อนที่ของโครงสร้างถูกใช้เป็นตัวชี้บ่งชี้ประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นไหวของ TLCD ซึ่ง Lukkunaprasit, Wanitkorkul and Pinkeaw (2001) ได้แสดงให้เห็นว่าตัวชี้บ่งชี้ไม่สามารถใช้ได้กับโครงสร้างภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงเนื่องจากการสั่นไหวของโครงสร้างอาจจะอยู่ในช่วงอินฮิสเทติก เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพการควบคุมการสั่นไหวของ TLCD สามารถใช้การลดลงของความเสียหายหรือการลดลงของพลังงานจากการคราก (Hysteretic Energy) ในระบบมาอธิบายได้ดีกว่าการอธิบายด้วยการลดลงของการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง

การศึกษา TLCD ส่วนใหญ่จะศึกษา TLCD ที่ไม่มีการปรับค่าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการหน่วงระหว่างการทำงานของ TLCD โดยทั่วไป TLCD จะถูกออกแบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุดสำหรับแอมพลิจูดช่วงหนึ่งของสภาวะกระตุ้น เพราะฉะนั้น TLCD จะมีประสิทธิภาพในการทำงานลดน้อยลงในช่วงแอมพลิจูดอื่น ๆ เพื่อเป็นการแก้ปัญหานี้ ระบบควบคุมแบบกึ่งแอกทีฟ (Semi-Active System) และ ระบบควบคุมแบบแอกทีฟ (Active System) จึงถูกนำเสนอขึ้นโดย Haroun et al. (1994), Kareem (1995), และ Abe et al. (1996)

ระบบควบคุมเชิงแยกที่พและตัวแปรการหน่วงที่เกี่ยวข้องถูกศึกษาอย่างกว้างขวางในด้าน การควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้าง โดย Haroun (1994) ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของตัวหน่วง ปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนระบบไฮบริด (Hybrid Liquid Column Damper , HLCD) ซึ่งตัว หน่วงชนิดนี้สามารถปรับเปลี่ยนความหน่วงด้วยการปรับขนาดของออริฟิซในขณะที่โครงสร้างหลักรับ แรงกระทำจากแรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว ผลการศึกษา HLCD ด้วยวิธีเชิงตัวเลขนั้นแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของ HLCD เหนือกว่า TLCD สำหรับการทำงานภายใต้การกระตุ้นระยะยาวแต่ ประสิทธิภาพในการทำงานของ HLCD นั้นก็ยังขึ้นกับความพยายามในการควบคุมออริฟิซด้วย ภายใต้ แรงกระทำจากแผ่นดินไหวพบว่า HLCD ที่สามารถควบคุมการเปิดปิดของออริฟิซได้จะมีประสิทธิภาพ ในการทำงานได้ดีจากการเปลี่ยนแปลงการหน่วงได้อย่างรวดเร็ว Yala et al. (2001) ได้ทำการศึกษา ตัวแปรการหน่วงของ TLCD แบบระบบเชิงแยกที่พ สำหรับการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างหลัก โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขภายใต้การกระตุ้นจากแรงลมทั้งการกระตุ้นแบบฮาร์โมนิก (Harmonic Excitation) และการกระตุ้นแบบสุ่ม (Random Excitation) สำหรับการกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกระบบ การควบคุมแบบเชิงแยกที่พมีประสิทธิภาพในการทำงานดีกว่าระบบแพสซีฟประมาณ 25 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกรณีของการกระตุ้นแบบสุ่มระบบการควบคุมแบบเชิงแยกที่พมีประสิทธิภาพใน การทำงานดีกว่าระบบแพสซีฟประมาณ 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์

Multiple Tuned Liquid Column Damper (MTLCD) คือระบบที่ประกอบด้วย TLCD เดี่ยวหลาย ๆ ตัวโดยแต่ละตัวจะมีความถี่ธรรมชาติที่ต่างกันออกไปมาติดกับโครงสร้างหลัก MTLCD ถูกนำมาศึกษาและขยายขอบเขตความสามารถโดย Chang et al. (1998) , Gao et al. (1999) , และ Yala and Kareem (2000) ยกตัวอย่างเช่น การใช้ระบบที่ประกอบด้วย TLCD เดี่ยวขนาดเล็ก หลายตัวมาติดตั้งกับโครงสร้างหลักซึ่งทำให้ง่ายต่อการก่อสร้าง ติดตั้ง และบำรุงรักษา ซึ่งผลจาก การศึกษาของ Bergman et al. (1990) ได้แสดงให้เห็นว่า MTLCD ดังกล่าวสามารถทำงานได้อย่างมี ประสิทธิภาพมากกว่า TLCD เดี่ยวในการลดการเคลื่อนไหวของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำที่มีความ ซับซ้อน

1.8 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตของตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัด ของท่อในแนวตั้งและแนวนอนไม่คงที่ (LCVA)

ปี ค.ศ.1991 Watkin ได้เสนอนำ TLCD อีกรูปแบบหนึ่งที่มีขนาดของหน้าตัดที่ไม่คงที่ เรียก ตัวหน่วงชนิดนี้ว่า ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและ แนวนอนไม่คงที่ (Liquid Column Vibration Absorber, LCVA) ต่อมาในปี ค.ศ.1997 Hitchcock และคณะ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดและรูปร่างของ LCVA ที่ส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติและ อัตราการหน่วงของ LCVA เพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมการสั่นไหว จากการศึกษาของ Hitchcock

พบว่า ความถี่ธรรมชาติของ LCVA ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวนอน ในการออกแบบการปรับความถี่ธรรมชาติของ LCVA แบบหยาบสามารถปรับได้ โดยการปรับค่าความยาวของท่อในแนวนอนและการปรับความถี่ธรรมชาติของ LCVA แบบละเอียดสามารถปรับได้โดยการปรับความยาวของท่อในแนวตั้ง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการหน่วงของ LCVA ขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูดเริ่มต้นของการสั่นไหว, ความหนืดของของเหลวที่บรรจุใน LCVA และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งต่อท่อในแนวนอน

Chang and Hsu (1997) ใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของ LCVA ในการช่วยลดการสั่นไหวของโครงสร้างโดยเปรียบเทียบกับ TLCD และ TMD ผลจากการศึกษาของ Chang and Hsu (1997) พบว่า LCVA มีประสิทธิภาพดีกว่า TLCD แต่ยังคงมีประสิทธิภาพด้อยกว่า TMD และในกรณีที่กำหนดให้ความกว้างของท่อในแนวนอนของ LCVA มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ประสิทธิภาพของ LCVA จะดีมากขึ้นเมื่อพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวนอน

สำหรับอาคารที่มีพื้นที่การใช้งานจำกัดจึงจำเป็นต้องออกแบบ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงการไหลขนาดใหญ่เพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งต่อมา P.Chaiviriyawong (2007) ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการทำนายความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงการไหลขนาดใหญ่ โดยใช้โมเดลของตัวหน่วงจำนวน 3 ตัวประกอบ ด้วย TLCD 1 ตัว และ LCVA ที่มีอัตราส่วนพื้นที่ของท่อในแนวตั้งต่อท่อในแนวนอนเท่ากับ 1.5 และ 2 อย่างละ 1 ตัว จากนั้นใช้วิธี Potential Flow และ วิธีที่นำเสนอโดย Chang และ Hsu ในการทำนายความถี่ของโมเดลทั้งสามเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า ผลปรากฏว่าสำหรับ TLCD นั้นวิธี Potential Flow และ วิธีที่นำเสนอโดย Chang และ Hsu สามารถทำนายความถี่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า และสำหรับ LCVA ทั้งสองตัว วิธี Potential Flow สามารถทำนายความถี่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า ต่างจากวิธีนำเสนอโดย Chang และ Hsu ที่มีความผิดพลาดจากผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าไปเป็นอย่างมาก

บทที่ 2

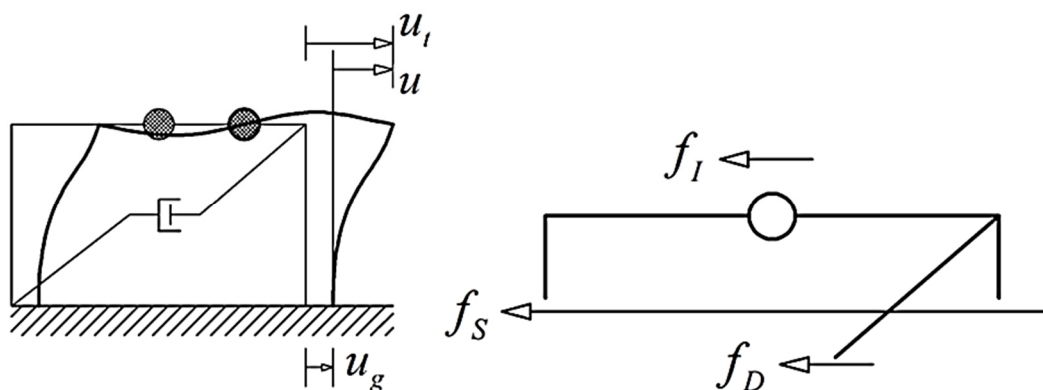
หลักการและทฤษฎี

2.1 สมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ปัญหาทางพลศาสตร์ของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนพื้นที่เสี่ยงต่อแผ่นดินไหวที่วิศวกรให้ความสำคัญ คือ พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้สภาวะความเร่งของแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ฐานของโครงสร้าง กำหนดให้ u_g คือ การเคลื่อนที่ของพื้นดิน, u_i คือ การเคลื่อนที่สัมบูรณ์ของโครงสร้าง และ u คือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างโครงสร้างและพื้นดิน สามารถเขียนความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ทั้งหมดที่เวลา t ใด ๆ ได้ดังนี้

$$u_i(t) = u_g(t) + u(t) \quad (2.1)$$

โดยทั้ง u_i และ u_g มีจุดอ้างอิงจากตำแหน่งเดียวกันและพิจารณาทิศทางที่เป็นบวกไปในทิศเดียวกัน



รูปที่ 2-1 โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวและสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง

สมการการเคลื่อนที่สำหรับโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2-1 ภายใต้แรงแผ่นดินไหวสามารถพิสูจน์โดยใช้สมดุลทางพลศาสตร์ จากแผนภาพอิสระของโครงสร้างสามารถเขียนสมการความสมดุลทางพลศาสตร์ของแรงภายในโครงสร้างได้ดังนี้

$$f_I + f_D + f_s = 0 \quad (2.2)$$

โดยแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงสร้างประกอบด้วย แรงเฉื่อย (Inertia Force, f_I) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร่ง \ddot{u}_i ของโครงสร้างโดย $f_I = m\ddot{u}_i$, แรงหน่วง (Damping Force, $f_D = c\dot{u}$) และแรงสติฟเนส (Stiffness Force, $f_S = ku$) จะสามารถเขียนสมการที่ 2.2 ได้ใหม่ดังนี้

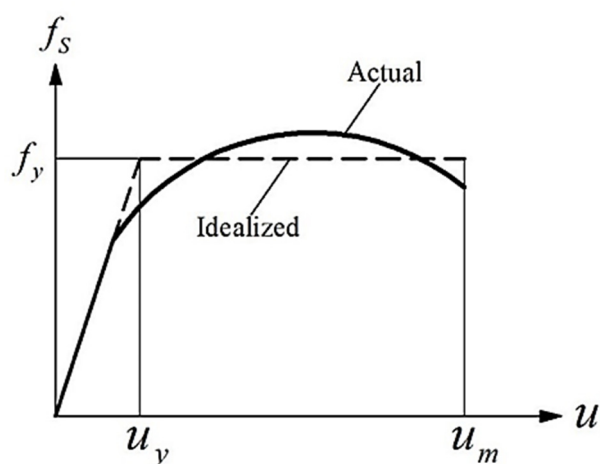
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.3)$$

เมื่อ m, c, k คือ มวล ความหน่วง และค่าสติฟเนสของโครงสร้างตามลำดับ

สมการที่ 2.3 เป็นสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวโดยพฤติกรรมของโครงสร้างอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Linearly Elastic Structure) กล่าวคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงสติฟเนสและการเคลื่อนที่ของโครงสร้างจะเป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's Law) ในกรณีที่พฤติกรรมของโครงสร้างไม่อยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Inelastic) โดยความสัมพันธ์ของแรงสติฟเนสจะขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโครงสร้าง ณ ช่วงเวลาใด ๆ $f_S = f_S(u)$ สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวได้ดังนี้

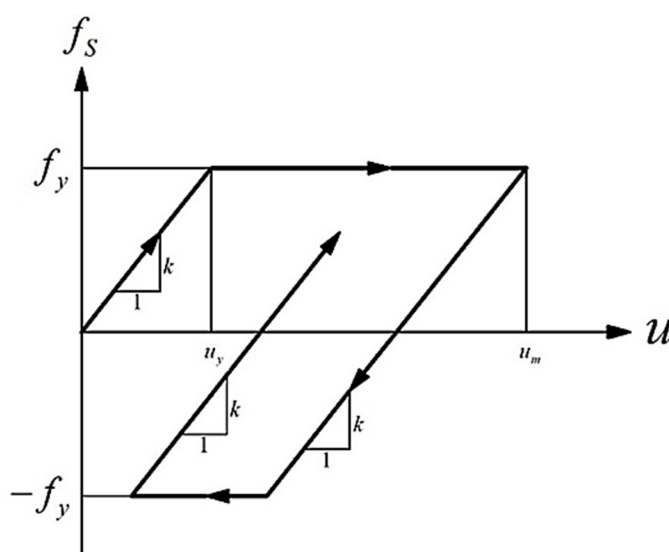
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_S(u) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.4)$$

2.2 โครงสร้างระบบอีลาสโตพลาสติก (Elastoplastic Behavior)



รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในและการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง

พิจารณารูปภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในและการเคลื่อนที่ของโครงสร้างขณะรับแรง ดังรูปที่ 2-2 ซึ่งสามารถจำลองความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ด้วยโครงสร้างระบบ Elastic-Perfectly Plastic หรือที่เรียกสั้น ๆ ว่า อีลาสโตพลาสติก (Elastoplastic) รูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโครงสร้างระบบอีลาสโตพลาสติกจะมีความใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่เกิดกับโครงสร้างจริงดังรูปที่ 2-2 โดยพื้นที่ใต้กราฟทั้งสองเส้นจะมีค่าเท่ากัน ณ ตำแหน่งที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง (u_m) โครงสร้างระบบอีลาสโตพลาสติกเมื่อเริ่มรับแรงโครงสร้างจะมีพฤติกรรมแบบอีลาสติกเชิงเส้นโดยมีความชันของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในและการเคลื่อนที่ของโครงสร้างนั้นเท่ากับค่าสติฟเนส k จนกระทั่งโครงสร้างเริ่มเกิดการครากเมื่อแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเข้าใกล้ f_y (Yield Strength) การเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่ทำให้เกิดการคราก คือ u_y (Yield Deformation) หลังจากเกิดการครากโครงสร้างจะไม่สามารถรับแรงเพิ่มได้อีกโดยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจะเท่ากับ f_y แม้การเคลื่อนที่ของโครงสร้างจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ก็ตามซึ่งหมายถึงค่าสติฟเนสของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 0



รูปที่ 2-3 พฤติกรรมของโครงสร้างแบบอีลาสโตพลาสติกภายใต้แรงกระทำเป็นวัฏจักร

จากรูปที่ 2-3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างที่ทำให้โครงสร้างเกิดการครากจะมีค่าเท่ากันทั้งสองทิศทางของการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง เมื่อเริ่มรับแรง (Loading) โครงสร้างจะมีพฤติกรรมแบบอีลาสติกไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดครากจากนั้นโครงสร้างจะมีพฤติกรรมแบบพลาสติกเมื่อแรงภายในที่เกิดขึ้นเลยจุดครากและจะกลับมามีพฤติกรรมแบบอีลาสติกอีกครั้งเมื่อแรงกระทำไปอีกทางหนึ่ง (Unloading) เมื่อโครงสร้างรับแรงในทิศทางตรงกันข้ามไปเรื่อย ๆ จนเกิดการครากก็จะเกิด

พฤติกรรมแบบพลาสติกอีกครั้งจนกระทั่งมีแรงภายนอกมากระทำกลับทิศ (Reloading) ซึ่งจะเป็นวัฏจักรแบบนี้ไปเรื่อย ๆ พื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ของแรงภายในและการเคลื่อนที่โครงสร้างจะมีค่าเท่ากับพลังงานที่สลายออกไปเมื่อโครงสร้างเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “Hysteresis Loop” สำหรับวัฏจักรของความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านภายในโครงสร้าง (Resisting force) และการเคลื่อนที่ของโครงสร้างมีความสัมพันธ์กันโดยการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ณ เวลาหนึ่ง แรงต้านภายในโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของโครงสร้างก่อนหน้า $f_s = f_s(u)$

2.3 การหาผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข

การหาผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นมีด้วยกันหลายวิธี วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีหนึ่ง คือ วิธีของ N.M.Newmark (1995) โดยเป็นการหาการตอบสนองของโครงสร้างที่ Δt ที่เพิ่มขึ้นโดยส่วนมากจะกำหนดให้ Δt ที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากันและกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ $k(u)$ และ $c(\dot{u})$ มีค่าคงที่ในช่วงเวลานั้น ๆ และจะคำนวณใหม่ทุกครั้งที่ตำแหน่งเริ่มต้นของช่วงเวลาถัดไป ด้วยการคำนวณในลักษณะนี้จะทำให้สามารถประมาณการตอบสนองของโครงสร้างแบบที่มีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นได้ด้วยการคำนวณแบบเชิงเส้นในแต่ละช่วงเวลาต่อไปเรื่อย ๆ โดยวิธีของ N.M.Newmark (1995) พัฒนาอยู่บนสมการดังต่อไปนี้

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1-\gamma)\Delta t]\ddot{u}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{u}_{i+1} \quad (2.5)$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t\dot{u}_i + \left[\left(\frac{1}{2}-\eta\right)\Delta t^2\right]\ddot{u}_i + (\eta\Delta t^2)\ddot{u}_{i+1} \quad (2.6)$$

โดยวิธีการวิเคราะห์ของ N.M.Newmark (1995) แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

- 1) ระเบียบวิธีความเร่งคงที่ (Constant Average Acceleration Method $\gamma = \frac{1}{2}, \eta = \frac{1}{4}$)
- 2) ระเบียบวิธีความเร่งแปรผันเชิงเส้น (Linear Acceleration Method $\gamma = \frac{1}{2}, \eta = \frac{1}{6}$)

ซึ่งสามารถจัดรูปแบบของสมการให้ง่ายต่อการคำนวณได้โดยเริ่มจากสมการสมดุลทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง ณ เวลาเริ่มต้น คือ

$$m\ddot{u}_i + c\dot{u}_i + ku_i = p_i \quad (2.7)$$

และสมดุลทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง ณ ช่วงเวลาถัดไป คือ

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + ku_{i+1} = p_{i+1} \quad (2.8)$$

จากสมการของ N.M.Newmark สมการที่ (2.5)

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1-\gamma)\Delta t]\ddot{u}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{u}_{i+1}$$

สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i = \ddot{u}_i\Delta t - \ddot{u}_i\gamma\Delta t + \gamma\Delta t\ddot{u}_{i+1}$$

$$\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i = \ddot{u}_i\Delta t + (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i)\gamma\Delta t$$

$$\Delta\dot{u}_i = \ddot{u}_i\Delta t + \Delta\ddot{u}_i(\gamma\Delta t) \quad (2.9)$$

จากสมการของ N.M.Newmark สมการที่ (2.6)

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t\dot{u}_i + \left[\left(\frac{1}{2} - \eta \right) \Delta t^2 \right] \ddot{u}_i + (\eta\Delta t^2)\ddot{u}_{i+1}$$

สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$u_{i+1} - u_i = \Delta t\dot{u}_i + \frac{1}{2}\Delta t^2\ddot{u}_i - \eta\Delta t^2\ddot{u}_i + \eta\Delta t^2\ddot{u}_{i+1}$$

$$u_{i+1} - u_i = \Delta t\dot{u}_i + \frac{1}{2}\Delta t^2\ddot{u}_i + (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i)\eta\Delta t^2$$

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

นำสมการ (2.8) - (2.7)

$$m\Delta\ddot{u}_i + c\Delta\dot{u}_i + k\Delta u_i = \Delta p_i \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.10) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\Delta\ddot{u}_i = \frac{1}{\eta\Delta t^2}\Delta u_i - \frac{1}{\eta\Delta t}\dot{u}_i - \frac{1}{2\eta}\ddot{u}_i \quad (2.12)$$

แทนสมการที่ (2.12) ลงในสมการที่ (2.9)

$$\Delta\dot{u}_i = \ddot{u}_i\Delta t + \left(\frac{1}{\eta\Delta t^2}\Delta u_i - \frac{1}{\eta\Delta t}\dot{u}_i - \frac{1}{2\eta}\ddot{u}_i \right) \gamma\Delta t$$

$$\Delta\dot{u}_i = \ddot{u}_i\Delta t + \frac{\gamma}{\eta\Delta t}\Delta u_i - \frac{\gamma}{\eta}\dot{u}_i - \frac{\gamma\Delta t}{2\eta}\ddot{u}_i$$

จะได้ว่า

$$\Delta\dot{u}_i = \frac{\gamma}{\eta\Delta t}\Delta u_i - \frac{\gamma}{\eta}\dot{u}_i + \left(1 - \frac{\gamma}{2\eta} \right) \Delta t \ddot{u}_i \quad (2.13)$$

แทนสมการที่ (2.12), (2.13) ลงในสมการที่ (2.11)

$$\frac{m}{\eta\Delta t^2}\Delta u_i - \frac{m}{\eta\Delta t}\dot{u}_i - \frac{m}{2\eta}\ddot{u}_i + \frac{c\gamma}{\eta\Delta t}\Delta u_i - \frac{c\gamma}{\eta}\dot{u}_i + \left(1 - \frac{\gamma}{2\eta} \right) \Delta t \ddot{u}_i c + k\Delta u_i = \Delta p_i$$

$$\left(\frac{m}{\eta\Delta t^2} + \frac{c\gamma}{\eta\Delta t} + k \right) \Delta u_i = \Delta p_i + \left(\frac{m}{\eta\Delta t} + \frac{c\gamma}{\eta} \right) \dot{u}_i + \left[\frac{m}{2\eta} + \left(\frac{\gamma}{2\eta} - 1 \right) \Delta t c \right] \ddot{u}_i$$

จะได้ว่า

$$\hat{k}\Delta u_i = \Delta \hat{p}_i \quad (2.14)$$

เมื่อ

$$\hat{k} = \left(\frac{m}{\eta\Delta t^2} + \frac{c\gamma}{\eta\Delta t} + k \right)$$

และ
$$\Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + \left(\frac{m}{\eta \Delta t} + \frac{c\gamma}{\eta} \right) \dot{u}_i + \left[\frac{m}{2\eta} + \left(\frac{\gamma}{2\eta} - 1 \right) \Delta t c \right] \ddot{u}_i$$

จากสมการที่ (2.14) สามารถหาการกระจัดที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา ณ เวลา Δt ได้โดย

$$\Delta u_i = \frac{\Delta \hat{p}_i}{\hat{k}} \quad (2.15)$$

และสามารถหาการกระจัดที่เวลา t_{i+1} ได้จาก

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i \quad (2.16)$$

และจากความเร็วที่เปลี่ยนไปในสมการที่ (2.13) จะสามารถหาความเร็วที่เวลา t_{i+1} ได้ดังนี้

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i \quad (2.17)$$

โดยความเร่ง \ddot{u}_{i+1} ณ ตำแหน่งสุดท้ายของช่วงเวลา Δt สามารถหาได้จากสมการ (2.8)

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{p_{i+1} - c\dot{u}_{i+1} - k u_{i+1}}{m} \quad (2.18)$$

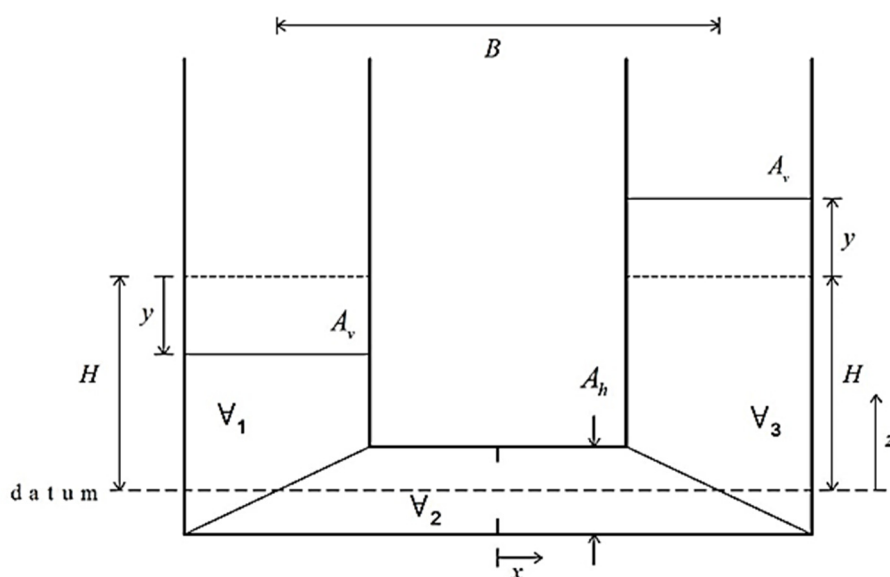
ซึ่งสัมประสิทธิ์ c และ k สามารถคำนวณได้ตอนเริ่มต้นที่ช่วงเวลา t_{i+1}

ดังนั้นเมื่อหาค่าการกระจัด ความเร็ว และความเร่งที่เวลา t_{i+1} ได้ก็ใช้วิธีเดียวกันนี้ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงช่วงเวลาที่ต้องการคำนวณได้

ในระบบการคำนวณโดยวิธีนี้จะมีการสมมุติอยู่ด้วยกัน 2 ตำแหน่ง คือ สมมุติให้ความเร่งมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเส้นตรงในช่วงเวลาใด ๆ ที่เปลี่ยนไป และ สัมประสิทธิ์ c และ k สามารถคำนวณได้ตอนเริ่มต้นของช่วงเวลาและกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดทั้งช่วงเวลา Δt และเพื่อเป็นการลดความผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา การเลือกค่า Δt ควรพิจารณาจาก ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง, อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงที่มากระทำ และความสัมพันธ์ของสติฟเนสและความหน่วง โดยทั่วไป Δt มีค่าไม่เกิน 10% ของคาบการสั่นของโครงสร้าง

2.4 ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและ แนวนอนไม่คงที่ (Liquid Column Vibration Absorber, LCVA)

พิจารณา LCVA ดังรูปที่ 2-4 โดยมีการเคลื่อนที่ฐาน $x(t)$ พื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและท่อในแนวนอนแทนด้วย A_v และ A_h ตามลำดับ จากรูปที่ 2-4 เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ปริมาตรน้ำใน LCVA สามารถแบ่งได้เป็นสามส่วนคือ ส่วนที่เป็นแนวตั้งสองส่วน (V_1 และ V_3) และส่วนที่เป็นแนวนอนหนึ่งส่วน (V_2) สำหรับท่อที่เป็นแนวตั้งสมมุติให้ของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งโดยมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ \dot{y} ความเร็วในการไหลของของเหลวในท่อแนวนอนประมาณให้เป็นการไหลแบบราบเรียบที่มีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ $r\dot{y}$ เมื่อ r คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวนอน $r = A_v/A_h$



รูปที่ 2-4 แบบจำลองของ LCVA

จากหลักการของพลังงานและสมมุติให้พลังงานภายในของการไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลง การไหลเป็นการไหลแบบไม่ราบเรียบและไม่สามารถบีบอัดได้ ทำให้สามารถเขียนสมการของการไหลของของเหลวภายใน LCVA โดยใช้สมการลากรางจ์ได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} = Q \quad (2.19)$$

เมื่อ T และ V คือ พลังงานจลน์ และ พลังงานศักย์ของระบบ ตามลำดับ อธิบายได้ดังนี้

$$T = \int_{\forall_1} \frac{\dot{y}^2}{2} \rho d\forall + \int_{\forall_2} \frac{(r\dot{y} + \dot{x})^2}{2} \rho d\forall + \int_{\forall_3} \frac{\dot{y}^2}{2} \rho d\forall$$

$$T = \rho A_v H \dot{y}^2 + \rho A_h B \frac{(r\dot{y} + \dot{x})^2}{2} \quad (2.20)$$

$$V = \int_{\forall_1} gz \rho d\forall + \int_{\forall_3} gz \rho d\forall = \rho g A_v \int_0^{H-y} z dz + \rho g A_v \int_0^{H+y} z dz$$

$$V = \rho g A_v (H^2 + y^2) \quad (2.21)$$

และ Q คือพลังงานไม่อนุรักษ์ในทิศทางการไหล y ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียพลังงานจากการไหล (head loss)

$$Q = -(\rho g A_h) \left(\frac{\delta |r\dot{y}| |r\dot{y}|}{2g} \right) = -\frac{1}{2} \rho A_v r \delta |y| \dot{y} \quad (2.22)$$

สมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA สามารถหาได้โดยแทนสมการที่ (2.20) – (2.22) ลงในสมการที่ (2.19)

$$\text{โดย} \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} = 2\rho A_v H \dot{y} + \rho A_h B r (r\dot{y} + \dot{x}) \quad \text{เมื่อ} \quad r = \frac{A_v}{A_h}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) = 2\rho A_v H \ddot{y} + \rho A_v B r \ddot{y} + \rho A_v B \ddot{x}$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

และ
$$\frac{\partial V}{\partial y} = 2\rho g A_v y$$

จะได้ว่า
$$(2\rho A_v H \ddot{y} + \rho A_v B r \ddot{y}) + \rho A_v B \ddot{x} + 2\rho g A_v y = -\frac{1}{2} \rho A_v r \delta |\dot{y}| \dot{y}$$

$$\rho A_v (2H + Br) \ddot{y} + \frac{1}{2} \rho A_v r \delta |\dot{y}| \dot{y} + 2\rho g A_v y = -\rho A_v B \ddot{x}$$

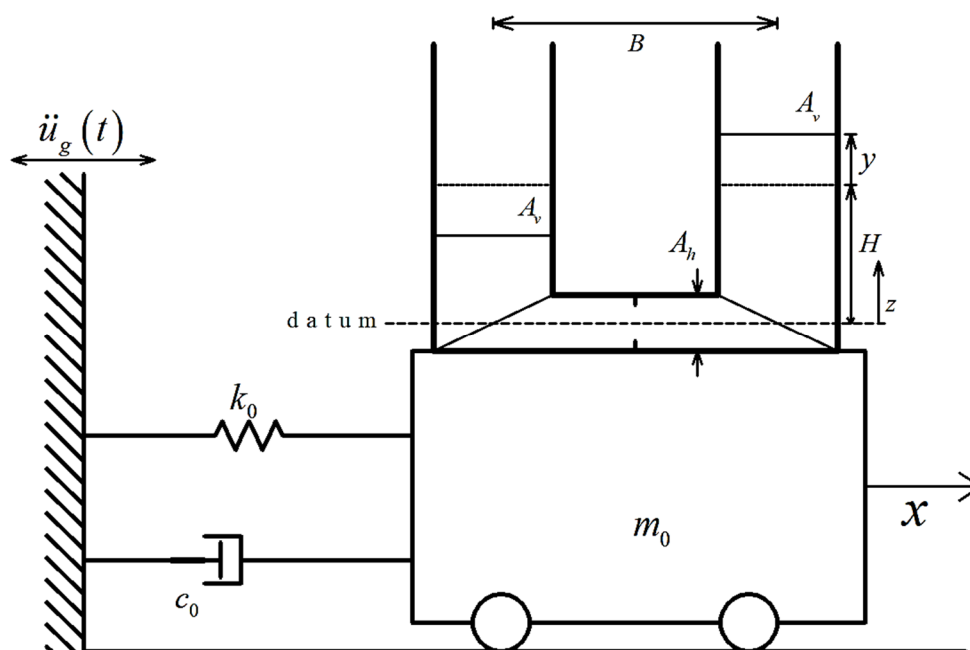
$$\rho A_v L_e \ddot{y} + \frac{1}{2} \rho A_v r \delta |\dot{y}| \dot{y} + 2\rho A_v g y = -\rho A_v B \ddot{x} \quad (2.23)$$

สมการที่ (2.23) เป็นสมการการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA เมื่อ ρ, δ และ g คือ ความหนาแน่นของของเหลว, ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเสียด และ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ตามลำดับ ความยาวประสิทธิผลของ LCVA (L_e) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความยาวในแนวราบ (B) และความสูงของระดับน้ำในแนวตั้ง (H) ของ LCVA ได้ดังนี้

$$L_e = rB + 2H \quad (2.24)$$

ความถี่ธรรมชาติของการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA สามารถหาได้จาก
$$\omega_f = \sqrt{2g/L_e}$$

2.5 ระบบตัวแปรอิสระเชิงเดี่ยวที่มีการติดตั้ง LCVA



รูปที่ 2-5 ระบบ SDOF ที่มีการติดตั้ง LCVA

สำหรับระบบตัวแปรอิสระเชิงเดี่ยว (Single-Degree-of-Freedom, SDOF) ที่มีการติดตั้ง LCVA ดังรูปที่ 2-5 สามารถใช้สมการลากรางจ์ในการหาสมการการเคลื่อนที่ของระบบได้ โดยพลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างและของเหลวภายใน LCVA สามารถอธิบายได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$T = \frac{1}{2} m_0 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \rho A_v (H - z) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \rho A_v (H + z) \dot{x}^2 + \rho A_v B \frac{(r\dot{y} + \dot{x})^2}{2} \quad (2.25)$$

พลังงานศักย์ (V) ซึ่งเกิดจากสติเฟเนสและพลังงานที่สูญเสียไปจากระบบ (Q) เนื่องจากความหน่วงของโครงสร้างหลัก สามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$V = \frac{1}{2} k_0 x^2 \quad (2.26)$$

และ
$$Q = -c_0 \dot{x} \quad (2.27)$$

แทนค่าสมการที่ (2.25) - (2.27) ลงในสมการลากรางจ์

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} = Q$$

เมื่อ
$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = m_0 \dot{x} + 2\rho A_v H \dot{x} + \rho A_v B (r\dot{y} + \dot{x})$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) = m_0 \ddot{x} + 2\rho A_v H \ddot{x} + \rho A_v B \ddot{y} + \rho A_h B \ddot{x}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = k_0 x$$

จะได้ว่า
$$m_0 \ddot{x} + 2\rho A_v H \ddot{x} + \rho A_v B \ddot{y} + \rho A_h B \ddot{x} + k_0 x = -c_0 \dot{x}$$

$$m_0 \ddot{x} + c_0 \dot{x} + k_0 x = -\rho A_v B \ddot{y} - \rho (2A_v H + A_h B) \ddot{x}$$

เมื่อ $r = \frac{A_v}{A_h}$,
$$m_0 \ddot{x} + c_0 \dot{x} + k_0 x = -\rho A_v B \ddot{y} - \rho A_v \left(2H + \frac{B}{r} \right) \ddot{x} \quad (2.28)$$

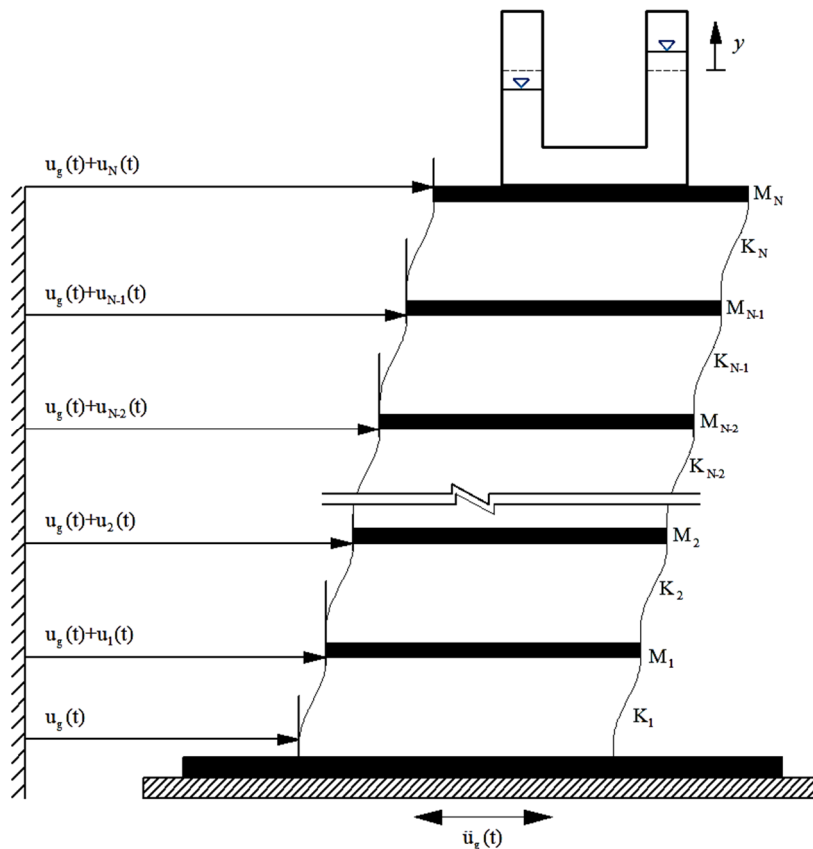
โดย m_0 คือ มวลของระบบโครงสร้าง SDOF ที่มี x เป็นการเคลื่อนที่ของระบบ และ เป็นการเคลื่อนที่ที่ฐานของ LCVA ที่สัมผัสกับพื้นดิน, k_0 เป็นสติเฟเนสของโครงสร้างระบบ SDOF และ c_0 เป็นความหน่วงของระบบโครงสร้าง SDOF มีค่าเท่ากับ $c_0 = 2m_0 \zeta_0 \omega_0$ เมื่อ ζ_0 คือ แฟคเตอร์ตัวหน่วงซึ่งมีค่าเท่ากับ c_0/c_r โดย c_r เป็นความหน่วงวิกฤต ซึ่ง $c_r = 2m_0 \omega_0$ และ ω_0 คือ ความถี่ธรรมชาติของระบบโครงสร้าง SDOF

ในกรณีที่ระบบ SDOF-LCVA อยู่ภายใต้การกระตุ้นของแรงแผ่นดินไหว \ddot{x} ในสมการที่ (2.23) และ (2.28) จะมีค่ากับ $\ddot{x} + \ddot{u}_g(t)$ ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของระบบ SDOF-LCVA ภายใต้แรงแผ่นดินไหวสามารถเขียนได้ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} m_0 + \rho A_v \left(2H + \frac{B}{r} \right) & \rho A_v B \\ \rho A_v B & \rho A_v L_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \rho A_v r \delta |\dot{y}| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_0 & 0 \\ 0 & 2\rho A_v g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_0 + \rho A_v \left(2H + \frac{B}{r} \right) \\ \rho A_v B \end{bmatrix} \ddot{u}_g(t) \quad (2.29)$$

$$\text{ภายใต้เงื่อนไข} \quad |y| \leq H \quad (2.30)$$

2.6 โครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ที่มีหลายดักริอัสระ



รูปที่ 2-6 โมเดลของ โครงสร้าง N ชั้นที่มีการติดตั้ง LCVA

พิจารณาอาคารสูงจำนวน N ชั้นที่มีการติดตั้ง LCVA ไว้บนชั้นสูงสุดของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2-6 โดย $u(t)$ หมายถึง การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ทางด้านข้างของพื้นชั้นใด ๆ เทียบกับฐานของอาคาร และ $u_g(t)$ คือ การเคลื่อนที่ในตัวในแนวราบของพื้นดิน ณ เวลา t ใด ๆ ซึ่งสามารถมองระบบ LCVA ให้เป็นระบบโครงสร้างรอง (Sub-System) ที่ติดตั้งอยู่บนพื้นชั้นบนสุดของโครงสร้างหลักซึ่งจะตอบสนองต่อการสั่นไหวของพื้นชั้นบนสุด $\ddot{u}_N(t) + \ddot{u}_g(t)$ โดยสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของ LCVA ได้ดังนี้

$$\rho A_v L_e \ddot{y} + \frac{1}{2} \rho A_v r \delta |\dot{y}| \dot{y} + 2 \rho A_v g y = -\rho A_v B (\ddot{u}_g(t) + \ddot{u}_N(t)) \quad (2.31)$$

โดยมีแรงปฏิกิริยา $P_N(t)$ คือ แรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA ซึ่งจะส่งต่อไปยังโครงสร้าง

$$P_N(t) = (\rho A_v B) \ddot{y} \quad (2.32)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหลักได้ดังนี้

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{F}_s(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}) = \mathbf{F}_g(t) + \mathbf{P}(t) \quad (2.33)$$

เมื่อ \mathbf{M} และ \mathbf{C} คือ เมทริกซ์มวล และ ความหน่วงของโครงสร้างหลัก $\mathbf{F}_s(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}})$ คือ เวกเตอร์ของแรงต้านทานภายในเสาโดยสมมุติให้มีพฤติกรรมเป็นแบบอิลาสโตพลาสติก และ $\mathbf{F}_g(t)$ คือ แรงประสิทธิผลเนื่องจากการเคลื่อนตัวของพื้นดินซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\mathbf{F}_g(t) = -\mathbf{M}\mathbf{e}_g \ddot{u}_g(t) \quad (2.34)$$

โดย \mathbf{e}_g คือ เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยที่ฐานของโครงสร้าง และ

$$\mathbf{P}(t) = [0, \dots, P_N(t)]^T \quad (2.35)$$

สมการที่ (2.22) - (2.24) เป็นสมการการเคลื่อนที่ของระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ที่มีดิสริอัสระเท่ากับ $N+1$ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบโครงสร้างที่มีหลายดิสริอัสระเพื่อแสดงแรงปฏิกิริยาจากตัวหน่วงที่ติดตั้งบนโครงสร้างและแรงประสิทธิผลจากแผ่นดินไหว

การใช้หลักการระบบโครงสร้างหลักและระบบโครงสร้างรอง (Lukkunaprasit et al. 2001) ที่มีสมการการเคลื่อนไหวเป็นไปตามสมการที่ (2.31) และ (2.33) ซึ่งมีหลักการพื้นฐานเดียวกันกับการหาคำตอบสนองของโครงสร้างโดยใช้วิธีคิดรวมทั้งระบบของ $N+1$ ดิสริอัสระ เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.31) และ (2.33) ณ เวลา t_i และ t_{i+1} ได้ดังนี้

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{u}}_i + \Delta\mathbf{F}_{S_i} = \Delta\mathbf{F}_{g_i} + \Delta\mathbf{P}_i \quad (2.36)$$

$$\rho A_v L_e \Delta\ddot{y} + \frac{1}{2} \rho A_v r \delta |\dot{y}| \Delta\dot{y} + 2\rho A_v g \Delta y = -\rho A_v B (\Delta\ddot{u}_g(t) + \Delta\ddot{u}_N(t)) \quad (2.37)$$

เมื่อ

$$\Delta \mathbf{u}_i = \mathbf{u}(t_{i+1}) - \mathbf{u}(t_i) \quad (2.38)$$

$$\Delta \mathbf{F}_{Si} = \mathbf{F}_S(\mathbf{u}_{i+1}, \dot{\mathbf{u}}_{i+1}) - \mathbf{F}_S(\mathbf{u}_i, \dot{\mathbf{u}}_i) \quad (2.39)$$

$$\Delta \mathbf{F}_{gi} = -\mathbf{M} \mathbf{e}_g (\ddot{u}_g(t_{i+1}) - \ddot{u}_g(t_i)) \quad (2.40)$$

$$\Delta \mathbf{P}_i = [0, \dots, \Delta P_{Ni}]^T \quad (2.41)$$

$$P_{Ni}(t) = (\rho A_v B) \Delta \ddot{y} \quad (2.42)$$

$$\Delta y_i = y(t_{i+1}) - y(t_i) \quad (2.43)$$

$$\Delta \ddot{u}_{gi} = \ddot{u}_g(t_{i+1}) - \ddot{u}_g(t_i) \quad (2.44)$$

$$\Delta \ddot{u}_{Ni} = \ddot{u}_N(t_{i+1}) - \ddot{u}_N(t_i) \quad (2.45)$$

สำหรับช่วงเวลา $t_i - t_{i+1}$ ภายใต้แรงแผ่นดินไหวประสิทธิผล (Effective Seismic Force) ที่กระทำต่อระบบโครงสร้างที่มีการติดตั้ง LCVA ไว้ที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง เมื่อเริ่มรับแรงดังกล่าว โครงสร้างหลักจะถูกสมมติให้ไม่มีการรับแรงปฏิกริยาใด ๆ จาก LCVA แรงแผ่นดินไหวประสิทธิผลทำให้โครงสร้างหลักเกิดการสั่นไหวโดยสามารถหาการตอบสนองของโครงสร้างหลักได้จากสมการที่ (2.27) นั่นคือ การกระจัด ความเร็ว และความเร่งของโครงสร้างหลัก ($\Delta \mathbf{u}_i$, $\Delta \dot{\mathbf{u}}_i$, $\Delta \ddot{\mathbf{u}}_i$) ซึ่งจะไปกระตุ้นให้ LCVA เกิดการสั่นไหวโดยสามารถหาการตอบสนองของ LCVA ได้จากสมการที่ (2.28) LCVA จะส่งแรงปฏิกริยา (Interactive Force) $\Delta P_{Ni}(t)$ กลับคืนมาให้กับโครงสร้าง จากนั้นจะใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ในการแก้สมการที่ (2.27) ที่คิดผลของ $\Delta P_{Ni}(t)$ ซึ่งส่งมาจาก LCVA และสมการที่ (2.28) จนกระทั่งผลการตอบสนองของโครงสร้างหลักและผลการตอบสนองของ LCVA (Δy_i , $\Delta \dot{y}_i$, $\Delta \ddot{y}_i$) ลู่เข้าหากันและมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินที่กำหนดไว้

เนื่องจากพจน์ความหน่วงของ LCVA ในสมการที่ (2.37) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2} \rho A_v r \delta |y|$ มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการคำนวณแต่ละครั้งสามารถ

ประมาณความเร็วของการไหลของของเหลว (\dot{y}) ภายใน LCVA ได้ด้วยสามเทอมแรกของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) ของ \dot{y} ดังนี้ (Sadek et al. 1998)

$$\dot{y}(t) = \frac{5}{2} \dot{y}(t - \Delta t) - 2\dot{y}(t - 2\Delta t) + \frac{1}{2} \dot{y}(t - 3\Delta t) \quad (2.46)$$

ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการหาผลการตอบสนองของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ที่มีหลายดักหรือสวะภายใต้แรงแผ่นดินไหวซึ่งเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป คือ วิธีของ N.M.Newmark (1995) โดยในกรณีที่ดักหรือสวะของโครงสร้างมีจำนวนน้อยมักนิยมใช้ระเบียบวิธีความเร่งแปรผันเชิงเส้น (Linear Acceleration Method) สำหรับช่วงเวลา $t_i - t_{i+1}$ ใด ๆ แนะนำให้กำหนดค่าเท่ากับ 0.551 เท่าของคาบการสั่นไหวของโครงสร้างที่น้อยที่สุดเพื่อให้เกิดเสถียรภาพในการหาผลเฉลยของสมการ (Conditionally Stable Procedure)

2.7 สมการพลังงานของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว (Seismic Energy Equation)

วิธีการออกแบบที่ถูกรับรองเพื่อให้โครงสร้างมีศักยภาพสูงสุดภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว ซึ่งใช้หลักการทั่ว ๆ ไป คือ ต้องการให้โครงสร้างสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ด้วยตัวของโครงสร้างเองผ่านองค์ประกอบของโครงสร้าง คือ กำลังของโครงสร้าง (Strength), ความสามารถในการยืดตัวของโครงสร้าง (Deformability) และ ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโครงสร้าง (Energy Absorption) โครงสร้างโดยทั่วไปมีระดับความหน่วงต่ำทำให้พลังงานที่ถูกดูดซับในช่วงพฤติกรรมอีลาสติกนั้นต่ำด้วย ภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงโครงสร้างจะยืดตัวเกินกว่าช่วงอีลาสติกซึ่งอาจเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างบ้าง (เช่น เกิดรอยร้าว หรือ เหล็กเสริมครากสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก) แต่โครงสร้างยังไม่พังทลายโดยการยืดตัวนั้นยังอยู่ภายใต้ความสามารถในการยืดตัวช่วงอีลาสติก การยืดตัวช่วงอีลาสติกจะทำให้เกิด Plastic Hinge ขึ้นบนหน้าตัดในบางชิ้นส่วนของโครงสร้างซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่นและการสลายพลังงานให้กับโครงสร้าง ดังนั้นพลังงานจากแผ่นดินไหวจำนวนมากจะถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างผ่านความเสียหายในบางตำแหน่งของระบบต้านทานแรงด้านข้างของโครงสร้าง กล่าวคือ การรับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวต่อโครงสร้าง คือ การยอมให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้บ้าง

วิธีการอื่นที่จะช่วยลดผลกระทบจากแผ่นดินไหวต่อโครงสร้าง เริ่มจากพิจารณาการกระจายของพลังงานภายในโครงสร้าง ขณะโครงสร้างอยู่ภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวจะมีพลังงานหนึ่งที่จะเข้าสู่โครงสร้าง พลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) และพลังงานศักย์ (Potential Energy) หรือ Strain Energy ซึ่งจะถูกรูดซับหรือสลายไปในรูปของความ

ร้อน อย่างไรก็ตามจะมีพลังงานจำนวนหนึ่งถูกดูดซับออกไปจากระบบด้วยความหน่วงของโครงสร้าง ทำให้แอมพลิจูดของการสั่นไหวของโครงสร้างลดลงจนกระทั่งโครงสร้างหยุดการสั่นไหว โครงสร้างสามารถมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ถ้าทำให้พลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างลดลง โดยให้พลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างถูกดูดซับโดย “ตัวหน่วง (Damper)”

สำหรับระบบโครงสร้าง MDOF เมื่อ \mathbf{u} คือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างโครงสร้างกับพื้นดิน, \mathbf{M} คือ เมทริกซ์มวลของโครงสร้างซึ่งเป็นเมทริกซ์ทแยงมุม (Diagonal Matrix), \mathbf{C} คือ เมทริกซ์ความหน่วงของโครงสร้าง และ $\mathbf{R}(\mathbf{u})$ คือ เมทริกซ์แรงสติฟเนสของโครงสร้างสำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมไม่อยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Inelastic) แรงสติฟเนสจะมีความสัมพันธ์กับค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโครงสร้าง ณ ช่วงเวลาใด ๆ และสำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) เมทริกซ์แรงสติฟเนสของโครงสร้างจะแปรผันตามการเคลื่อนที่สัมพัทธ์โดยแรงสติฟเนสจะมีค่าเท่ากับ $\mathbf{K}\mathbf{u}$ เมื่อ \mathbf{K} เมทริกซ์สติฟเนสของโครงสร้าง

เมื่อโครงสร้าง MDOF ที่มีพฤติกรรมไม่อยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Inelastic) อยู่ภายใต้ความเร่งของพื้นดิน \ddot{u}_g เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวสามารถเขียนสมการสมดุลพลศาสตร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{R}(\mathbf{u}) = \mathbf{0} \quad (2.47)$$

เมื่อ $\ddot{\mathbf{u}}_t$ คือ การเคลื่อนที่สัมบูรณ์ของโครงสร้าง โดย $\ddot{\mathbf{u}}_t = \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{1}\ddot{u}_g$ สมการ (2.47) สามารถเปลี่ยนเป็นสมการ Seismic Energy ได้ โดยการคูณด้วย Transpose ของ Relative Displacement เวกเตอร์ $\mathbf{d}\mathbf{u}^T = \dot{\mathbf{u}}^T dt$ ทั้งสองข้างของสมการและทำการอินทิเกรตเทียบกับเวลา จะได้ว่า

$$\int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_t dt + \int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}_t dt + \int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{R}(\mathbf{u}) dt = \mathbf{0} \quad (2.48)$$

แทนค่า $\dot{\mathbf{u}}^T$ ในเทอมแรกทางซ้ายมือของสมการ (2.48) ด้วย $\dot{\mathbf{u}}_t^T - \mathbf{1}^T \dot{u}_g$ สามารถเขียนได้ว่า

$$\int_0^t \dot{\mathbf{u}}_t^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_t dt = \int_0^t \dot{\mathbf{u}}_t^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_t dt - \int_0^t \mathbf{1}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_t du_g \quad (2.49)$$

แทนสมการที่ (2.49) ลงในสมการที่ (2.48) จะได้ว่า

$$\int_0^t \dot{\mathbf{u}}_t^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_t dt + \int_0^t \dot{\mathbf{u}}_t^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}_t dt + \int_0^t \dot{\mathbf{u}}_t^T \mathbf{R}(\mathbf{u}) dt = \int_0^t \mathbf{1}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_t d\dot{u}_g \quad (2.50)$$

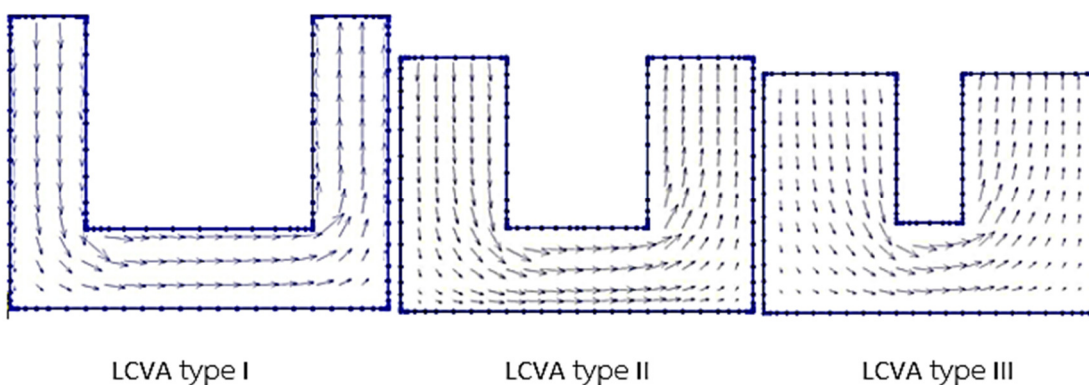
จากสมการที่ (2.50) ทางด้านซ้ายมือ เทอมแรก คือ พลังงานจลน์ (Kinetic Energy), E_k เทอมที่สอง คือ Damping Energy, E_D ซึ่งจะถูกดูดซับด้วยความหน่วงของโครงสร้าง, และเทอมที่สาม คือ ผลรวมของ Elastic Strain Energy, E_S และ Hysteretic Energy, E_H ซึ่งจะถูกดูดซับด้วยระบบของโครงสร้างในช่วงอินอีลาสติกและความเสียหายของโครงสร้าง ทางด้านขวา คือ พลังงานที่เข้ามาสู่โครงสร้างเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว หรือ Input Energy, E_I ดังนั้น สมการ Seismic Energy Equation สามารถเขียนได้ว่า

$$E_I = E_K + E_D + E_H + E_S \quad (2.51)$$

บทที่ 3

การประมาณการไหลเป็นรูปวงรี (Elliptical Flow Path Estimation Method)

จากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการไหลแบบโพเทนเชียลเชิงตัวเลข (Potential-Flow Method) ของ P.Chaiviriyawong (2007) แสดงให้เห็นว่าความเร็วของการไหลของของเหลวภายใน LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลขนาดต่าง ๆ (ส่วนที่ต่อกันระหว่างท่อในแนวนอนและแนวตั้ง) ดังรูปที่ 3-1 ความเร็วของการไหลบริเวณมุมของพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลนั้นมีความเร็วช้าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วบริเวณส่วนอื่น ๆ โดยเฉพาะ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วขนาดใหญ่ (รูปที่ 3-1: LCVA type III) ซึ่งสังเกตได้จากการทดลองบนโต๊ะเขย่า ทำให้ความเร็วของการไหลบริเวณนี้ไม่มีผลต่อมวลและความยาวประสิทธิผลของ LCVA ด้วยเหตุผลนี้จึงสามารถสมมติให้การไหลบริเวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลภายใน LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วขนาดใหญ่นั้นเป็นรูปวงรีได้



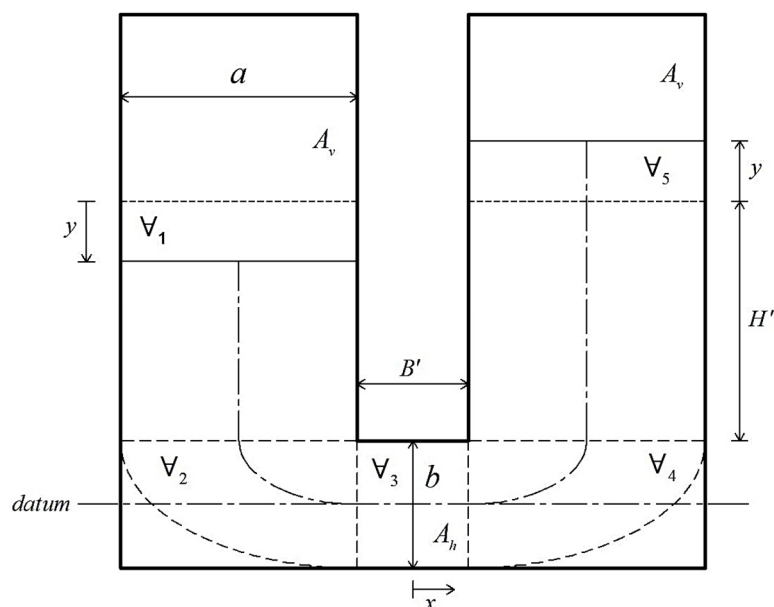
ที่มา: P.Chaiviriyawong (2007)

รูปที่ 3-1 การไหลของของเหลวภายใน LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลขนาดต่าง ๆ

3.1 สมการของการประมาณการไหลเป็นรูปวงรี

จากรูปที่ 3-2 เส้นทางการไหลของของเหลวภายใน LCVA บริเวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลสามารถประมาณให้เป็นการไหลรูปวงรีได้ สมมติให้การไหลของของเหลวในท่อแนวตั้งสามารถไหลได้ในทิศแนวตั้งโดยมีความเร็วเฉลี่ย y จากเงื่อนไขของความต่อเนื่อง การไหลของของเหลวในท่อแนวราบประมาณเป็นการไหลแบบราบเรียบที่มีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ v_y ปริมาตรของน้ำใน LCVA จากรูปที่ 3-1 ถูกแบ่งออกเป็นห้าส่วนประกอบด้วย ส่วนที่เป็นแนวตั้งสอง

ส่วน (∇_1 และ ∇_5) ส่วนที่เป็นวงรีสองส่วน (∇_2 และ ∇_4) และส่วนที่เป็นแนวนอนหนึ่งส่วน (∇_3) ดังนั้นพลังงานจลน์ในสมการที่ (2.19) แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3-2 LCVA กับการประมาณการไหลเป็นรูปวงรี

$$T = \int_{\nabla_1} \frac{\dot{y}^2}{2} \rho d\nabla + \int_{\nabla_2} \frac{1}{2} \rho v_2^2 d\nabla + \int_{\nabla_3} \frac{(ry + x)^2}{2} \rho d\nabla + \int_{\nabla_4} \frac{1}{2} \rho v_4^2 d\nabla + \int_{\nabla_5} \frac{\dot{y}^2}{2} \rho d\nabla \quad (3.1)$$

เมื่อ v_2 และ v_4 คือ ความเร็วการไหลของของเหลวในส่วนที่เป็นวงรีหมายเลข 2 และ หมายเลข 4 ตามลำดับ โดยในส่วนที่ 2 และ 4 นั้น จะถูกนำเสนอในระบบพิกัด $r-\theta$ ความเร็วของการไหลทั้งสองส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับ มุม θ ดังแสดงในรูปที่ 2-6 และ $\theta = \frac{a\dot{y}}{R}$ เมื่อ a คือความกว้างของท่อใน

แนวตั้ง และ รัศมี R ของวงรีซึ่งเปลี่ยนแปลงตามมุม θ , $R = \sqrt{\left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2}\right)^{-1}}$ เมื่อ b คือ

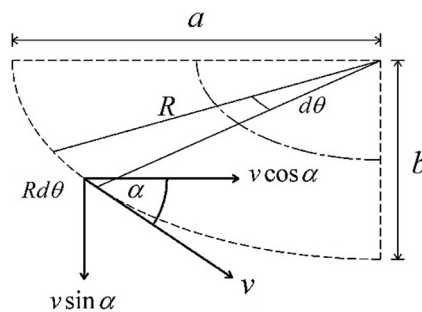
ความกว้างของท่อในแนวราบ จากหลักการดังกล่าวจะทำให้ความเร็วของการไหลบริเวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลมีการเปลี่ยนแปลงจาก \dot{y} ที่ $\theta = 0^\circ$ ถึง $r\dot{y}$ ที่ $\theta = 90^\circ$ เพื่อให้สามารถประมาณความเร็วของการไหลบริเวณพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น จึงกำหนดให้ ความยาวของท่อในแนวราบของ LCVA เท่ากับ B' และความสูงเริ่มต้นของน้ำในท่อแนวตั้งเท่ากับ H' ดังแสดงในรูปที่ 3-1 จากการใช้ออกพิกัดในระบบ $r-\theta$

พลังงานจลน์ในส่วนที่มีการไหลเป็นรูปวงรีหมายเลข 2 (T_2) และหมายเลข 4 (T_4) ในสมการที่ (3.1) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 T_2 &= \int_{V_2} \frac{1}{2} \rho v_2^2 dV = \int_{V_2} \frac{1}{2} \rho [v \cos \alpha + \dot{x}]^2 dV + \int_{V_2} \frac{1}{2} \rho [v \sin \alpha]^2 dV \\
 &= \int_{\pi}^{\frac{3\pi}{2}} \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{a\dot{y}}{R} \right)^2 \cos^2 \alpha + 2 \left(\frac{a\dot{y}}{R} \right) \dot{x} \cos \alpha + \dot{x}^2 \right] \left(\frac{R^2}{2} k d\theta \right) \\
 &\quad + \int_{\pi}^{\frac{3\pi}{2}} \frac{1}{2} \rho \left(\frac{a\dot{y}}{R} \right)^2 \sin^2 \alpha \left(\frac{R^2}{2} k d\theta \right) \\
 &= \int_{\pi}^{\frac{3\pi}{2}} \frac{1}{4} \rho a^2 k \dot{y}^2 d\theta + \int_{\pi}^{\frac{3\pi}{2}} \frac{1}{2} \rho \left[2 \left(\frac{a\dot{y}}{R} \right) \dot{x} \cos \alpha + \dot{x}^2 \right] \left(\frac{R^2}{2} k d\theta \right) \\
 &= \frac{\rho A_v a}{4} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \dot{y}^2 + \frac{\rho k}{4} \int_{\pi}^{\frac{3\pi}{2}} \left[2aR\dot{y}\dot{x} \cos \alpha + R^2 \dot{x}^2 \right] d\theta = T_4 \tag{3.2}
 \end{aligned}$$

เมื่อ k คือ ความหนาของท่อ ($A_v = ka$) และ α มุมแทนเจนของการไหลดังแสดงในรูปที่ 3-3

$$\left(\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{b^2}{a^2} \cot \theta \right) \right)$$



รูปที่ 3-3 ส่วนที่ 2 และ 4 ของ LCVA ในพิกัด $r-\theta$

จากสมการที่ (3.2) พลังงานจลน์ของของเหลวจากสมการที่ (3.1) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} \rho A_v H \dot{y}^2 + \frac{\rho A_v a}{4} \pi \dot{y}^2 + \frac{\rho k}{2} \int_{\pi}^{\frac{3\pi}{2}} [2aR\dot{y}\dot{x} \cos \alpha + R^2 \dot{x}^2] d\theta \\
 &+ \frac{\rho A_h B'}{2} (r\dot{y} + \dot{x})^2 + \frac{1}{2} \rho A_v H \dot{y}^2 \\
 &= \rho A_v H \dot{y}^2 + \frac{\rho A_v \pi a}{4} \dot{y}^2 + \frac{\rho A_v \pi a}{4} \dot{x}^2 + \rho A_v \dot{x} \dot{y} \int_{\pi}^{\frac{3\pi}{2}} R \cos \alpha d\theta \\
 &+ \frac{\rho A_h B'}{2} (r\dot{y} + \dot{x})^2
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

และพลังงานศักย์ของของเหลวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

$$V = \rho g A_v \int_0^{H-y} z dz + \rho g A_v \int_0^{H+y} z dz = \rho g A_v (H^2 + y^2) \tag{3.4}$$

พลังงานการหน่วงจากการเคลื่อนที่ของของเหลวสามารถประมาณได้โดย

$$Q = -(\rho g A_h) \left(\frac{\delta |r\dot{y}| |r\dot{y}|}{2g} \right) = -\frac{1}{2} \rho A_v r \delta |\dot{y}| \dot{y} \tag{3.5}$$

เมื่อนำสมการที่ (3.3) - (3.5) แทนลงในสมการที่ (2.19) จะได้สมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วขนาดใหญ่ดังนี้

$$\begin{aligned}
 &\rho A_v \left(2H' + B'r + \frac{\pi a}{2} \right) \ddot{y} + \frac{1}{2} \rho A_v r \delta |\dot{y}| \dot{y} + 2\rho g A_v y \\
 &= -\rho A_v B' \ddot{x} - \rho A_v \ddot{x} \int_0^{\pi/2} R \cos \alpha d\theta
 \end{aligned}$$

$$= -\rho A_v B' \ddot{x} - 2\rho A_v C \ddot{x} = -\rho A_v (B' + 2C) \ddot{x} \quad (3.6)$$

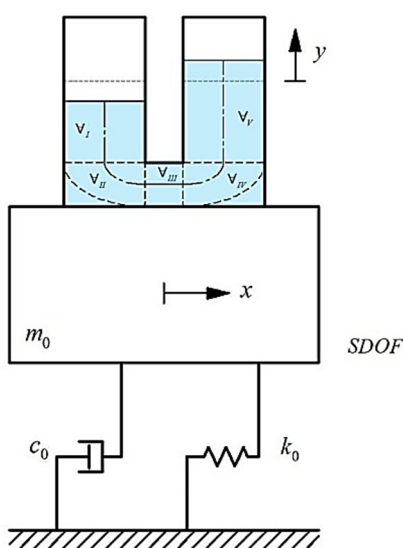
เมื่อ

$$C = \int_0^{\pi/2} R \cos \alpha d\theta = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{\left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2}\right)^{-1}} \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{b^2}{a^2} \cot \theta\right)\right) d\theta$$

คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของส่วนที่เป็นวงรีซึ่งบอกถึงมวลประสิทธิผลของของเหลวภายในส่วนที่เป็นวงรีทั้งสองส่วน (V_2 และ V_4) ส่วนความยาวประสิทธิผล L_e และความถี่ธรรมชาติ ω_f สามารถหาได้ดังนี้

$$L_e = rB' + 2H' + \frac{\pi a}{2}, \quad \omega_f = \sqrt{\frac{2g}{L_e}} = \sqrt{\frac{2g}{rB' + 2H' + \frac{\pi a}{2}}} \quad (3.7)$$

สำหรับระบบตัวแปรอิสระเชิงเดียว (SDOF) ที่มีการติดตั้ง LCVA แสดงดังรูปที่ 3-4 สามารถใช้สมการลากรางจ์ในการหาสมการอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบตัวแปรอิสระเชิงเดียว (SDOF) ที่มีการติดตั้ง LCVA ได้ดังนี้



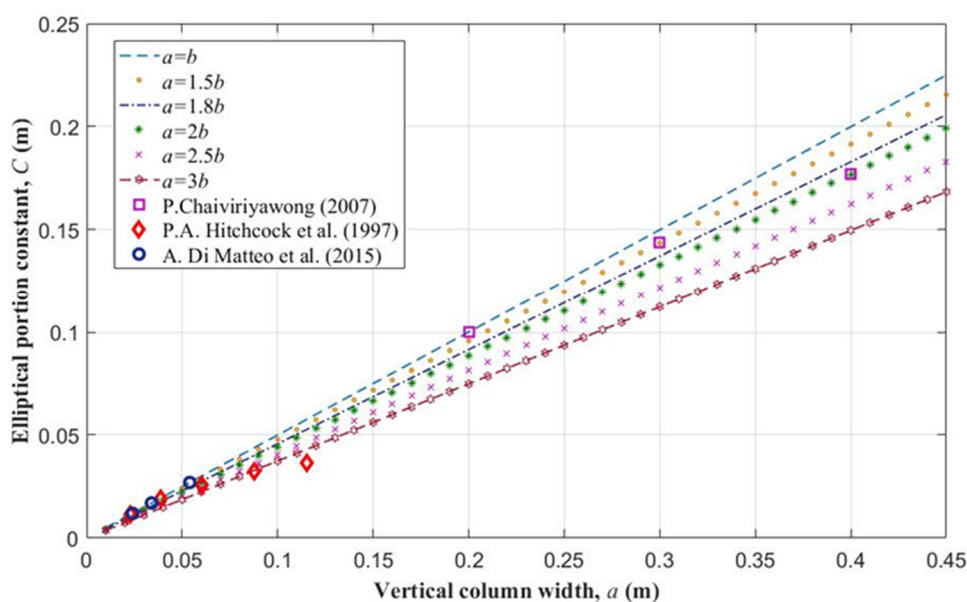
รูปที่ 3-4 ระบบตัวแปรอิสระเชิงเดียว (SDOF) ที่มีการติดตั้ง LCVA

$$m_0\ddot{x} + c_0\dot{x} + k_0x = -\rho A_v(B' + 2C)\ddot{y} - \rho A_v\left(2H' + 2b + \frac{B'}{r}\right)\ddot{x}$$

$$(m_0 + m_d)\ddot{x} + c_0\dot{x} + k_0x = -\rho A_v(B' + 2C)\ddot{y} \quad (3.8)$$

เมื่อ m_0, c_0 และ k_0 คือค่า มวล, ความหน่วง และสติเฟเนสของระบบตัวแปรอิสระเชิงเดี่ยวตามลำดับ และ m_d คือ มวลของของเหลวภายใน LCVA

จากสมการที่ (3.8) มีความแตกต่างจากสมการที่เสนอโดย Gao และ Kwok (1997) หรือ Chang และ Hsu (1998) คือแรงหน่วง (Interaction Force) ที่เกิดจาก LCVA โดยค่าคงที่ C แสดงถึงมวลประสิทธิผล ($\rho A_v C$) ซึ่งเป็นผลจากความกว้างประสิทธิผลในส่วนที่มีการไหลเป็นรูปวงรีทั้งสองส่วนของ LCVA (∇_2 และ ∇_4)



รูปที่ 3-5 ค่า Elliptical portion constant (C) สำหรับ LCVA ที่มีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดระหว่างท่อในแนวตั้งและแนวนอน (a/b) ขนาดต่าง ๆ

จากรูปที่ 3-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elliptical Portion Constant (C) ที่หาโดยการอินทิเกรตสำหรับ LCVA ที่มีค่าอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดระหว่างท่อในแนวตั้งและแนวนอน (a/b) ขนาดต่าง ๆ และ ความกว้างของท่อในแนวตั้ง (a) ซึ่งประกอบด้วย LCVA ที่นำเสนอโดย

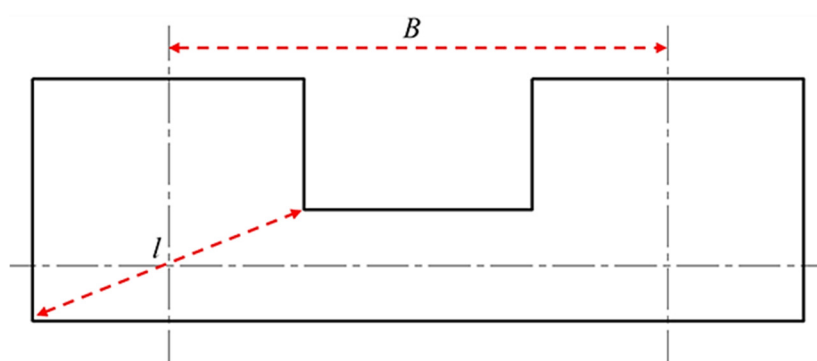
P.Chairiyawong (2007), Hitchcock et al. (1997) และ A.Di Matteo et al. (2015) จากรูปสังเกตได้ว่า ถ้าค่าอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดระหว่างท่อในแนวตั้งและแนวนอน (a/b) มีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ค่าคงที่ C จะเข้าใกล้ค่า $a/2$ นั้นหมายถึงสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA ที่ใช้การประมาณการไหลเป็นรูปวงรีสมการที่ (3.6) จะให้ผลลัพธ์เหมือนกับสมการที่นำเสนอ ก่อนหน้าซึ่งใช้การประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลอย่างง่ายสมการที่ (2.23)

อัตราส่วนความยาวในแนวราบประสิทธิผลต่อความยาวทั้งหมดของ LCVA $(B' + 2C)/(B + 2H)$ เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างของ LCVA เนื่องจาก ยิ่งอัตราส่วนนี้มีค่ามากก็จะทำให้แรงปฏิกิริยาที่ส่งไปให้โครงสร้างหรือ Interaction Force มีค่ามากขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (3.8) เช่นเดียวกับการนำเสนอของ Sadek et al. (1998) ที่แนะนำให้ค่าอัตราส่วนความกว้างของท่อต่อความยาวทั้งหมดของตัวห่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (Tuned Liquid Column Damper, TLCD) ซึ่งเป็น LCVA ชนิดหนึ่งเท่ากับ 0.75 ถึง 0.80 สำหรับ TLCD ที่อยู่ภายใต้สภาวะกระตุ้นจากแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรง

3.2 แบบจำลองของ LCVA และผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าที่นำมาเปรียบเทียบ

เนื่องจากข้อจำกัดของการวิจัยทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบ LCVA บนโต๊ะเขย่า (Shake Table) ได้ ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงได้อ้างอิงและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ LCVA จากการศึกษาทดลอง LCVA บนโต๊ะเขย่าของ P.Chairiyawong (2007) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

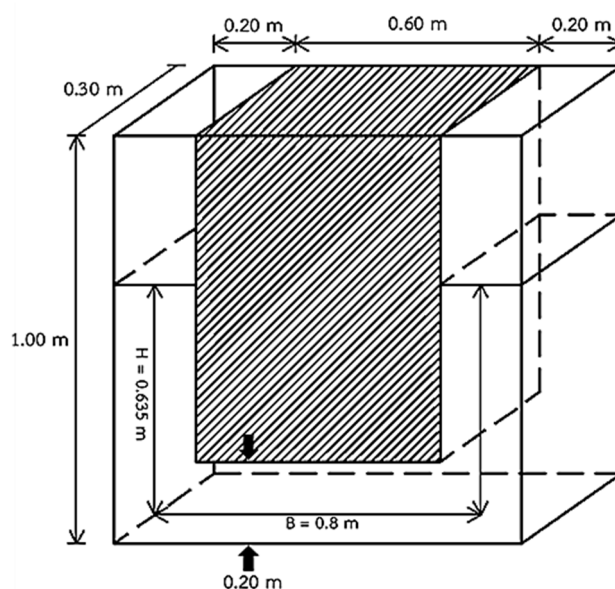
3.2.1 การออกแบบและก่อสร้าง LCVA ที่ใช้ในการทดสอบบนโต๊ะเขย่า



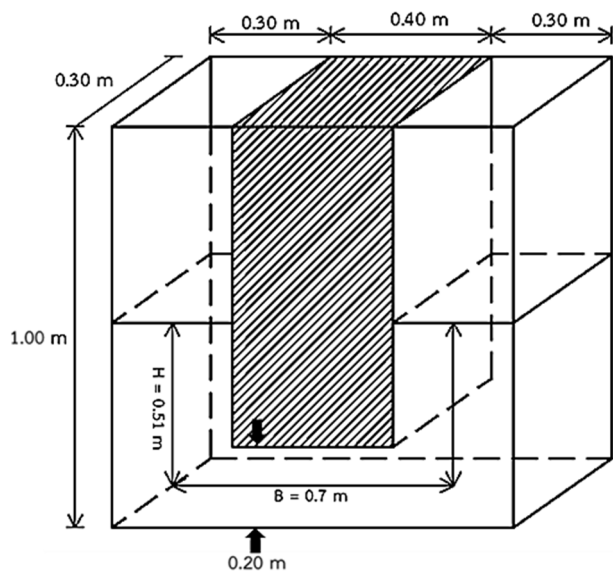
รูปที่ 3-6 ความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่ง (I) และความยาวของท่อในแนวราบ (B)

ในการทดลองบนโต๊ะเขย่าของ P.Chairiyawong (2007) ได้ใช้โมเดลของ LCVA ที่มีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งต่อท่อในแนวนอนต่างกันออกไปจำนวน 3 ตัว ($r = A_v/A_h$ เท่ากับ 1, 1.5 และ 2) โดยมีอัตราส่วนของความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบ (อัตราส่วน l/B ดังแสดงในรูปที่ 3-6) เท่ากับ 0.35, 0.52 และ 0.75 ตามลำดับ ถูกจำลองขึ้นเพื่อใช้ในการหาพฤติกรรมการสั่นไหว โดยโมเดลของ LCVA ทั้งสามตัว (ชนิดที่ 1, 2 และ 3) แสดงดังรูปที่ 3-7, รูปที่ 3-8 และรูปที่ 3-9 ตามลำดับ

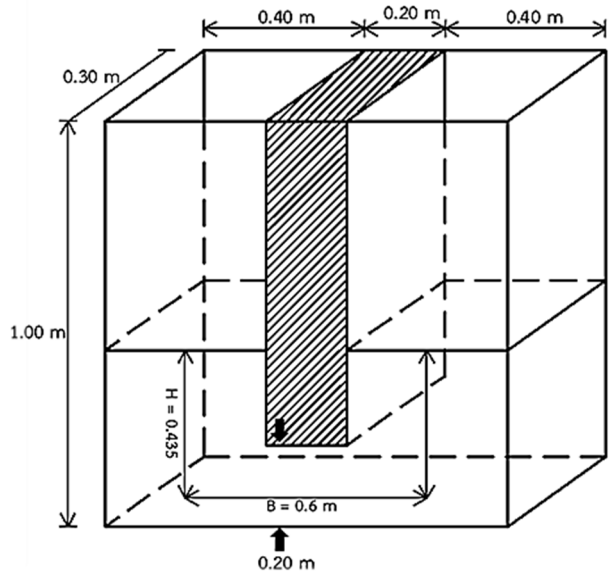
จากการวิจัยก่อนหน้ามีการศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวได้ใช้ TLCD และ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวที่มีขนาดเล็กซึ่งมีอัตราส่วนของความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบอยู่ในช่วง 0.04 ถึง 0.2 (พื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลขนาดเล็ก) แต่สำหรับอาคารที่มีพื้นที่ในการใช้สอยจำกัดเพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่จึงจำเป็นต้องใช้ TLCD และ LCVA ที่มีอัตราส่วนของความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้จะใช้ตัวหน่วงที่มีอัตราส่วนของความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบในช่วง 0.35 ถึง 0.75 (พื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลขนาดใหญ่)



รูปที่ 3-7 LCVA ชนิดที่ 1



รูปที่ 3-8 LCVA ชนิดที่ 2



รูปที่ 3-9 LCVA ชนิดที่ 3

โมเดลของตัวห้วงแต่ละตัวจะประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นแท็งก์อะคริลิก (Acrylic Tank) และส่วนที่เป็นแผ่นโฟมโพลียูรีเทน (Prismatic Polyurethane Close Cell Foam) สำหรับใส่ลงไปในแท็งก์เพื่อให้เกิดโมเดลของ LCVA ที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป จากการที่โมเดลของ LCVA ทั้งสามตัวนั้นถูกคาดหวังให้สามารถนำไปติดกับตึกที่มีความสูงประมาณ 20 ชั้น ที่มีความถี่ธรรมชาติประมาณ 0.5 เฮิรตซ์ ได้ ดังนั้นโมเดลทั้งหมดจึงต้องถูกออกแบบให้มีความยาวประสิทธิผล (L_e) เท่ากับ 2.07 เมตร ตามการศึกษาโดยใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล (Simplified Effective Length) ของ Gao and Kwok (1997) หรือ Chang and Hsu (1998) เพื่อให้โมเดลทั้งสามตัวนั้นมีความถี่ธรรมชาติเท่ากันโดยอยู่ที่ประมาณ 0.49 เฮิรตซ์ โดยคุณสมบัติของ LCVA แต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของ LCVA แต่ละชนิดที่ใช้ทดลองบนโต๊ะเขย่า

คุณสมบัติ	LCVA ชนิดที่ 1	LCVA ชนิดที่ 2	LCVA ชนิดที่ 3
อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งต่อท่อในแนวนอน (r)	1	2	3
อัตราส่วนของความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบ (l/B)	0.35	0.52	0.75
ความยาวของท่อในแนวราบ (B)	0.8 m	0.7 m	0.6 m
ความสูงของระดับน้ำในท่อแนวตั้ง (H)	0.635 m	0.51 m	0.435 m
ความยาวประสิทธิผล (L_e)	2.07 m	2.07 m	2.07 m
ความถี่ธรรมชาติ (f_s)	0.49 Hz	0.51 Hz	0.53 Hz
สัมประสิทธิ์การสูญเสียเสียด (δ)	3.57	2.52	2.32

3.2.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

โมเดลของ LCVA จะถูกติดตั้งอยู่บนโต๊ะเขย่าที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบโดยอาศัยตัวเร่ง (Actuator) ขนาด 10 ตัน ทำให้เกิดการสั่น ซึ่งขอบเขตของการทดลองมีดังนี้

3.2.2.1. การทดสอบการสั่นแบบอิสระ (Free Vibration Test)

การทดสอบการสั่นแบบอิสระมีจุดประสงค์เพื่อหาพฤติกรรมของการสั่นจากการเคลื่อนที่ของของเหลวโดยใช้ระยะเริ่มต้นของโต๊ะเขย่าต่างกันออกไป (อยู่ในช่วง $\pm 3\text{cm}$ ถึง $\pm 10\text{cm}$) ค่าอัตราการหน่วงและความถี่ธรรมชาติของโมเดล LCVA ทั้งสามตัวนั้นจะสามารถหาได้จากการทดลองนี้

3.2.2.2. การทดสอบการตอบสนองสเปกตรัม (Spectral test)

การทดสอบนี้ใช้เพื่อหาค่าการตอบสนองต่อความถี่ของการเคลื่อนที่ของของเหลวในโมเดล LCVA แต่ละตัว โดยใช้การกระตุ้นที่ฐานของ LCVA ด้วยคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ที่มีความถี่ในช่วง 0.30 Hz ถึง 0.65 Hz

ในการทดสอบทั้งหมดจะมีการวัดค่า ความเร่งของโต๊ะเขย่า, แรงหน่วงที่เกิดจาก LCVA, ค่าการสูญเสียพลังงานจากการไหล, เฟสและระยะการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในโมเดล LCVA แต่ละตัว เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

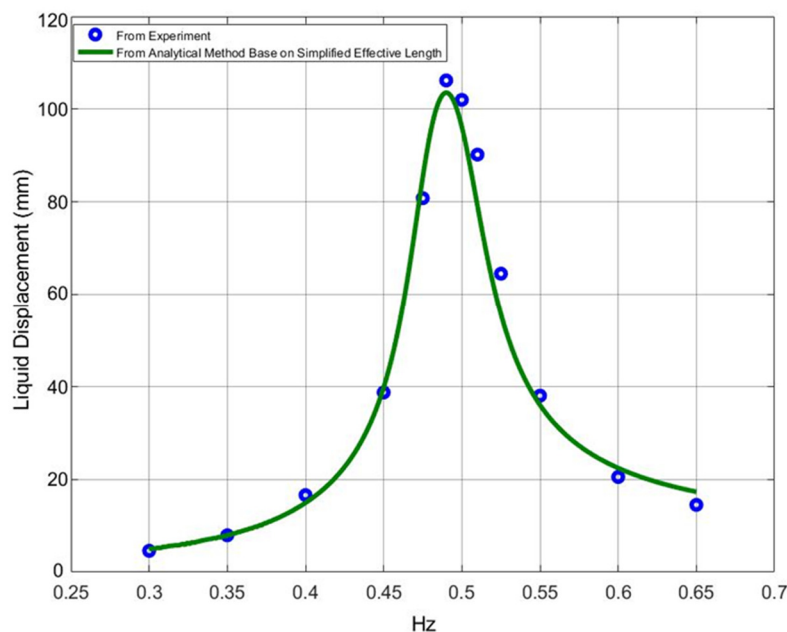
3.3 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดลองบนโต๊ะเขย่า

LCVA ทั้งสามตัวจะถูกจำลองด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB แล้วนำผลการตอบสนองต่อความถี่มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า สำหรับการจำลองด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์นั้นจะใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพของ Gao and Kwok (1997) หรือ Chang and Hsu (1998) และ วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปร่างในการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ทั้งสามตัว

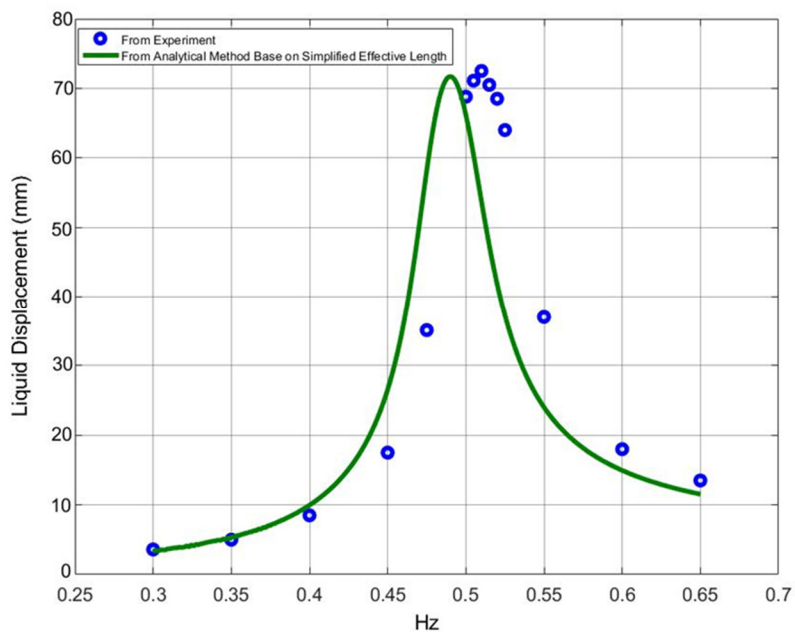
3.3.1 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพและการทดลองบนโต๊ะเขย่า

ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ทั้งสามตัวสามารถหาได้โดยการแก้สมการที่ (2.23) โดยใช้ค่าอัตราการหน่วงที่ได้จากการทดสอบการสั่นแบบอิสระ ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่ใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลการตอบสนองนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการตอบสนองสเปกตรัมบนโต๊ะเขย่าสำหรับ LCVA ทั้งสามตัว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-10, รูปที่ 3-11 และรูปที่ 3-12

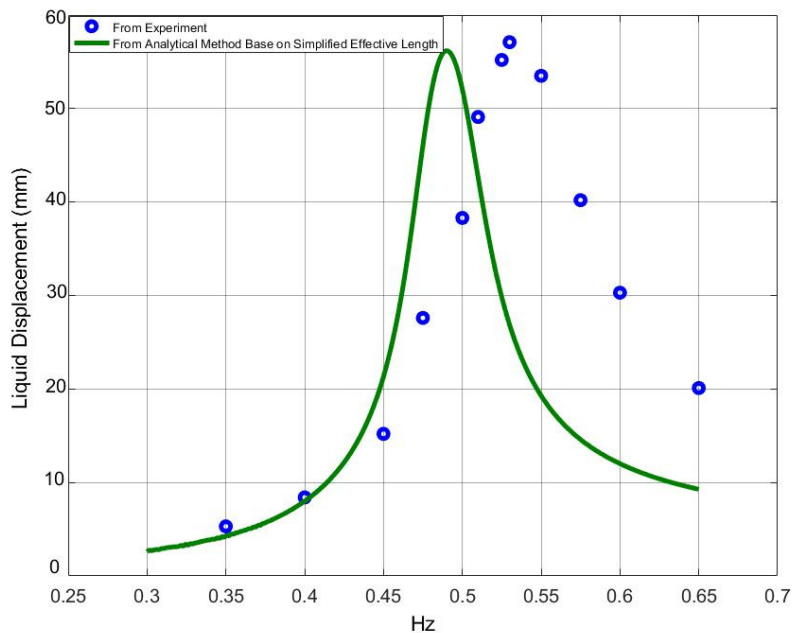
รูปที่ 3-10 แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลนั้นมีความใกล้เคียงกับผลจากการทดลองบนโต๊ะเขย่าสำหรับ LCVA ชนิดที่ 1 แต่สำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 และ 3 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลไม่เป็นที่น่าพอใจโดยมีคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า จากรูปที่ 3-11 และรูปที่ 3-12 เส้นโค้งของการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ทั้งสองตัวนั้นคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าไปทางซ้ายอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลสำหรับ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วขนาดใหญ่ไม่สามารถให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องได้ โดยมีค่าความเคลื่อนของการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA ณ ความถี่ที่เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) อยู่ที่ 1.52% สำหรับ LCVA ชนิดที่ 1, 25.54% สำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 และ 52.95% สำหรับ LCVA ชนิดที่ 3 ค่าความเคลื่อนดังกล่าวบ่งชี้ให้เห็นถึงการหาความถี่ธรรมชาติตามทฤษฎีของ LCVA ที่คลาดเคลื่อนไปเป็นผลให้การทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA นั้นคลาดเคลื่อนไปด้วย



รูปที่ 3-10 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 1 ที่ใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 3-11 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2 ที่ใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหล ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง



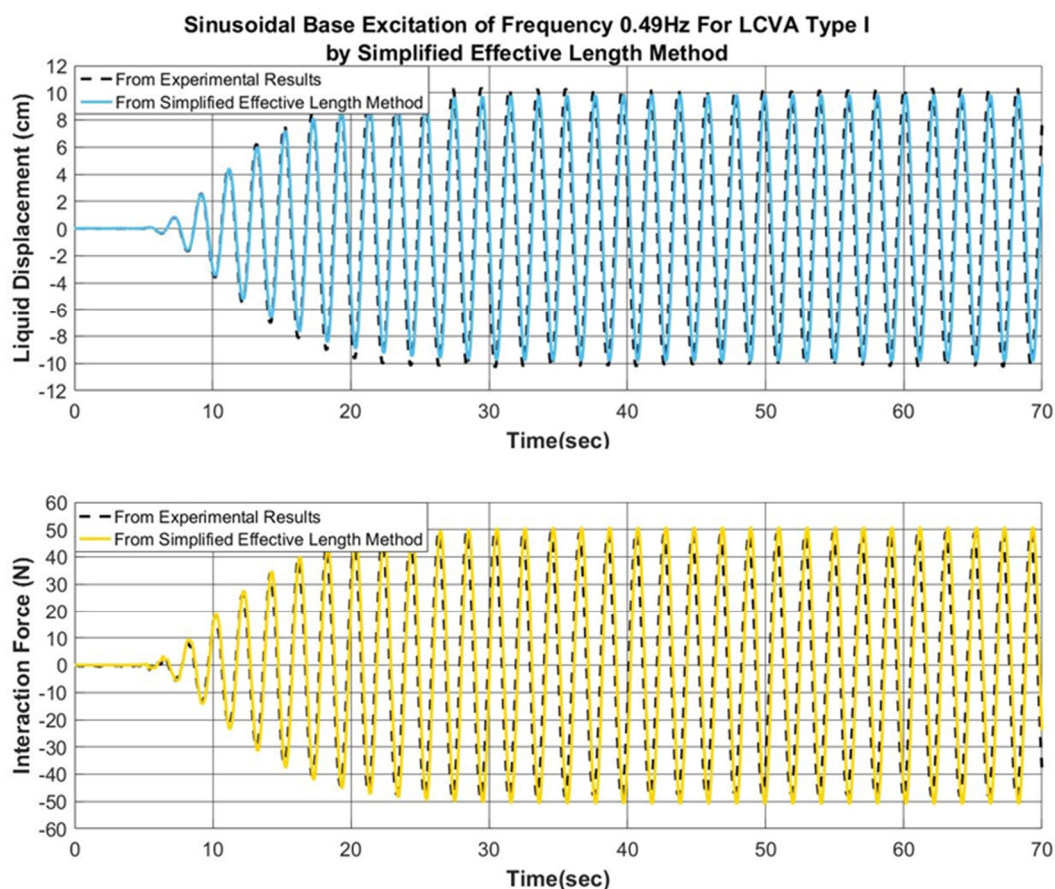
รูปที่ 3-12 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 3 ที่ใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหล ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลยังสามารถแสดงได้ด้วยผลการตอบสนองของคลื่นความถี่ตามช่วงเวลา (Time-History Response) จากการการแก้สมการที่ (2.23) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA และ แรงปฏิกิริยาจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA (Interaction Force) ที่เกิดขึ้นมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการตอบสนองสเปกตรัมบนโต๊ะเขย่า ดังรูปที่ 3-13, รูปที่ 3-14 และรูปที่ 3-15 โดยค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวสามารถคิดได้โดยสมการที่นำเสนอโดย Di Mateo et al. (2015) ดังต่อไปนี้

$$error = \frac{\int_{t_i}^{t_f} [X^{ex}(t) - X^{si}(t)]^2 dt}{\int_{t_i}^{t_f} [X^{ex}(t)]^2 dt} \times 100\% \quad (3.9)$$

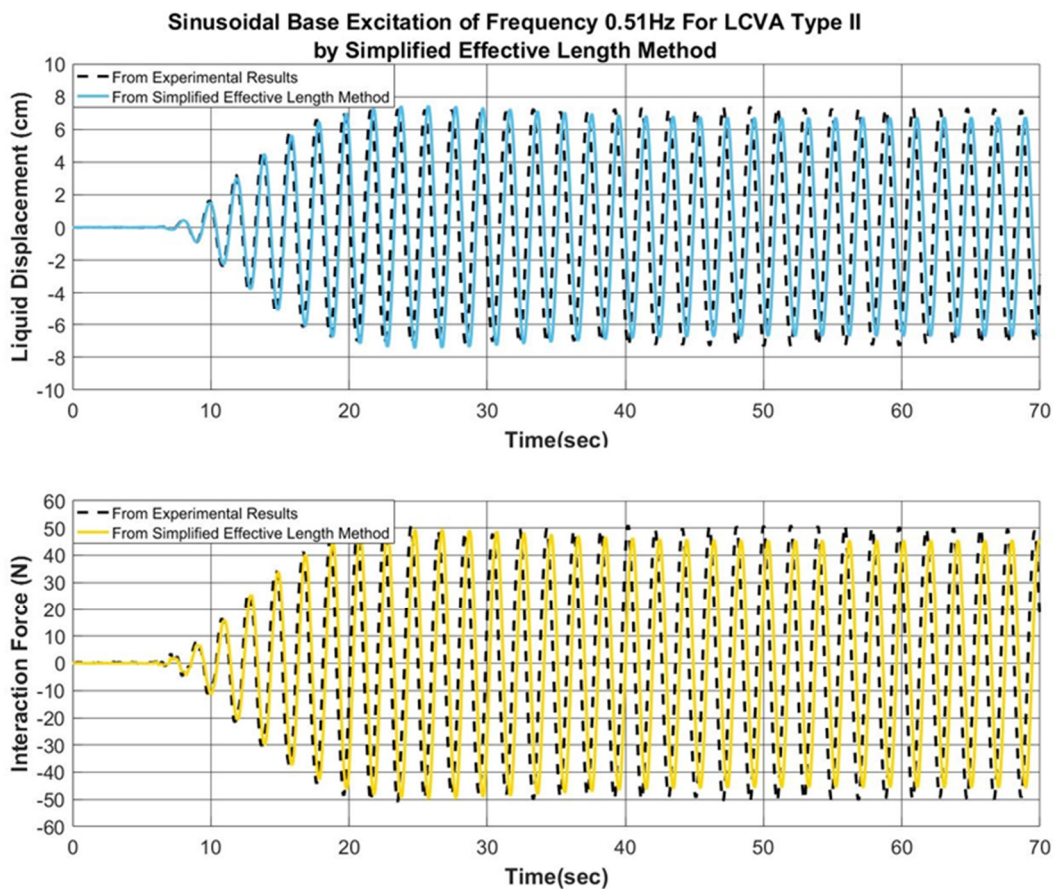
เมื่อ t_i ถึง t_f คือ ระยะเวลาที่ทำการศึกษาของคลื่นความถี่ตามช่วงเวลา (Time-History Response) $X^{ex}(t)$ และ $X^{si}(t)$ คือ ผลจากการทดลองบนโต๊ะเขย่า และ ผลจากการจำลอง ตามลำดับ

จากรูปที่ 3-13 แสดงให้เห็นว่าผลการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลสำหรับ LCVA ชนิดที่ 1 นั้นมีผลการทำนายที่ค่อนข้างดีโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 9.88% สำหรับการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA และ 12.59% สำหรับแรงปฏิกิริยาจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA (Interaction Force)

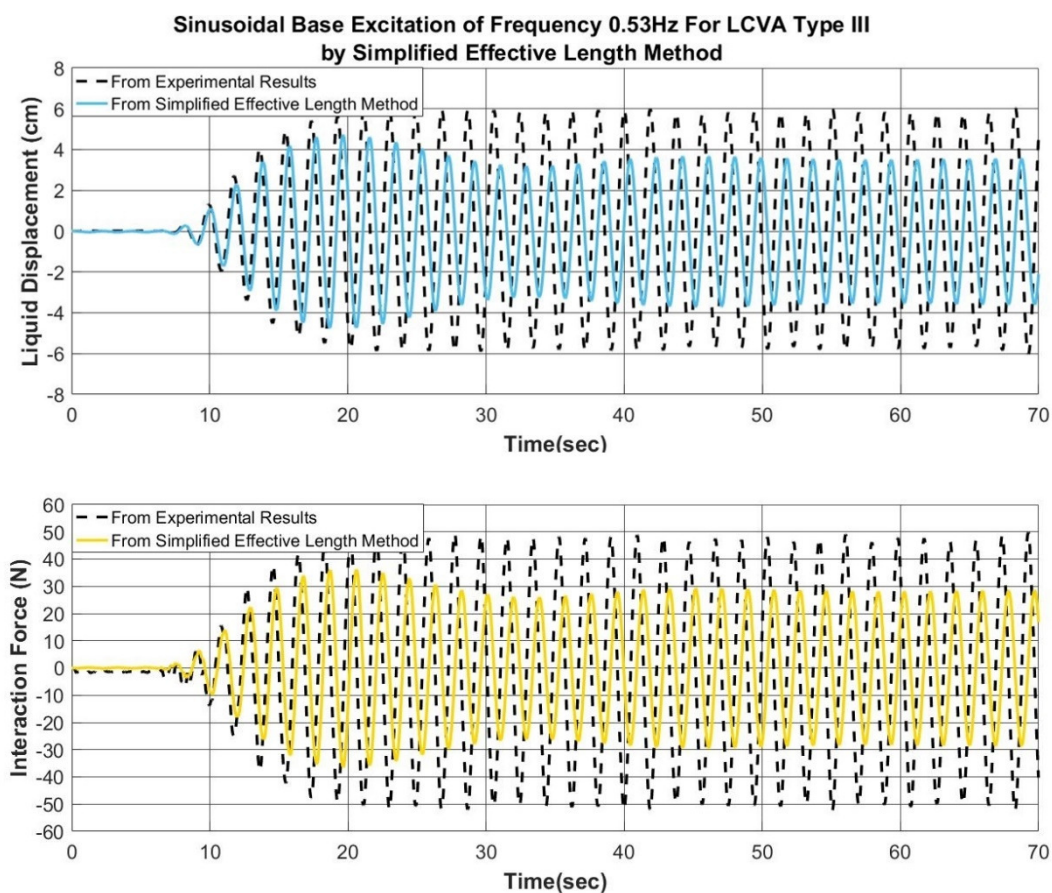


รูปที่ 3-13 การเปรียบเทียบระหว่างการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลกับทดสอบการตอบสนองสเปกตรัมบนโต๊ะเขย่าสำหรับ LCVA ชนิดที่ 1 ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้อง 0.49 Hz

จากรูปที่ 3-14 ผลการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลสำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 ที่ความถี่ 0.51 Hz ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 54.50% สำหรับการเคลื่อนที่ของของเหลว และ 60.04% สำหรับแรงปฏิกิริยาจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA (Interaction Force) และ รูปที่ 3-15 ผลการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลสำหรับ LCVA ชนิดที่ 3 ที่ความถี่ 0.53 Hz ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 155.81% สำหรับการเคลื่อนที่ของของเหลว และ 172.19% สำหรับแรงปฏิกิริยาจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA (Interaction Force)



รูปที่ 3-14 การเปรียบเทียบระหว่างการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลกับทดสอบการตอบสนองสเปกตรัมบนโต๊ะเขย่าสำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้อง 0.51 Hz



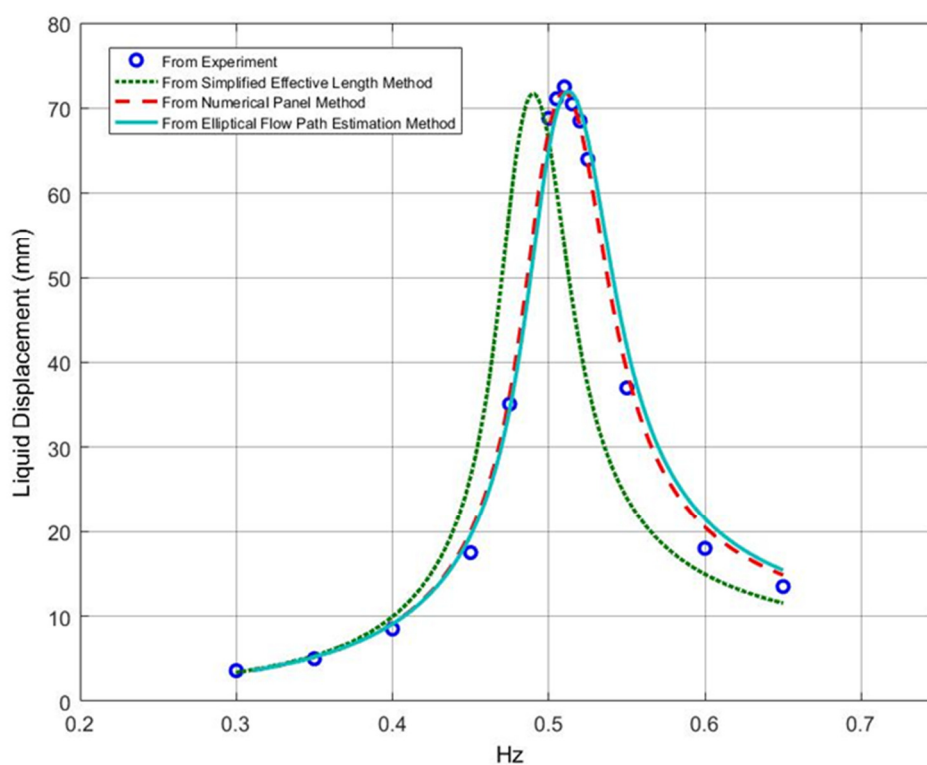
รูปที่ 3-15 การเปรียบเทียบระหว่างการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลกับทดสอบการตอบสนองสเปกตรัมบนโต๊ะเขย่าสำหรับ LCVA ชนิดที่ 3 ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้อง 0.53 Hz

จากรูปที่ 3-13 ถึง รูปที่ 3-15 สามารถสรุปได้ว่าการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลนั้นสามารถให้ผลการตอบสนองที่ค่อนข้างดีสำหรับ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหล (Transition Zone) ขนาดเล็ก (อัตราส่วนของความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบอยู่ในช่วง 0.04 ถึง 0.2) หรือ LCVA ที่มีหน้าตัดของท่อในแนวราบและแนวนอนสม่ำเสมอ (Uniform Cross Section) ดังเช่น LCVA ชนิดที่ 1 แต่เมื่อขนาดของพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือ หน้าตัดของท่อในแนวราบและแนวนอนไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform Cross Section) ดังกรณีของ LCVA ชนิดที่ 2 และ LCVA ชนิดที่ 3 การทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลนั้นจะให้ผลการทำนายที่มีค่าความ

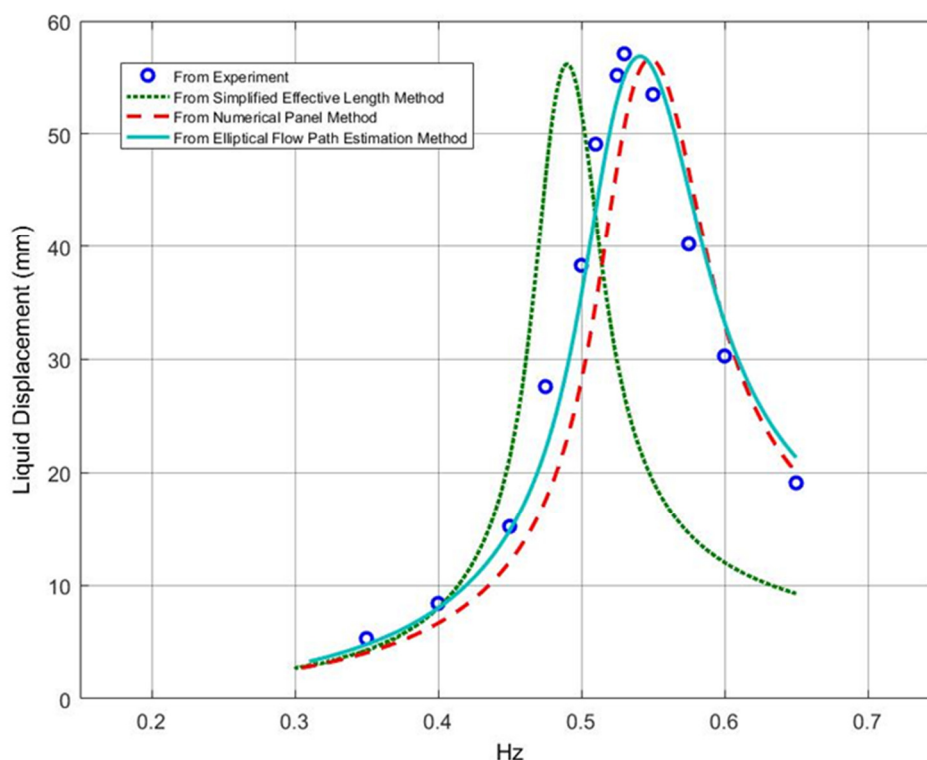
คลาดเคลื่อนมากขึ้นอันเนื่องมาจากวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพมีความผิดพลาดในการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติทางทฤษฎีของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลให้การทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA นั้นมีความผิดพลาดไปด้วย

3.3.2 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยใช้การประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีและการทดลองบนโต๊ะเขย่า

ในหัวข้อนี้จะใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีในการทำนายผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลขนาดใหญ่เปรียบเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า



รูปที่ 3-16 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2 ที่ใช้วิธีต่าง ๆ ในการวิเคราะห์
เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

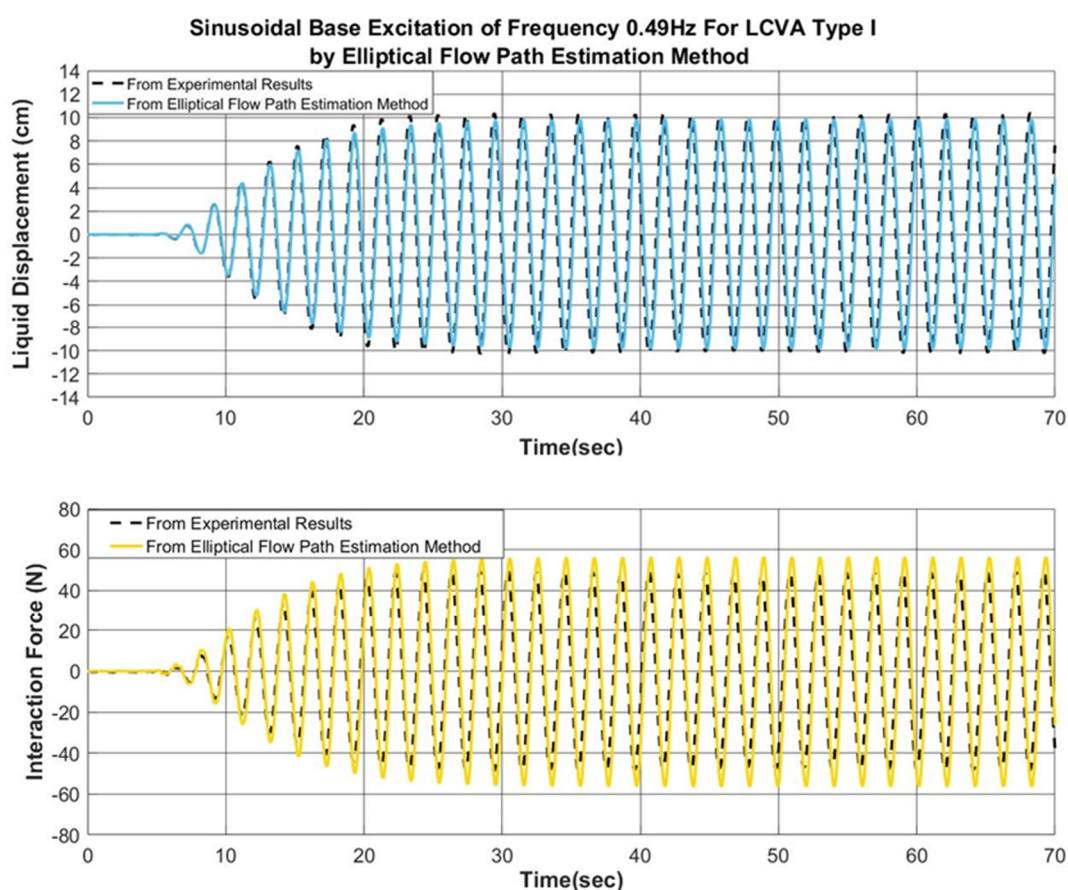


รูปที่ 3-17 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 3 ที่ใช้วิธีต่าง ๆ ในการวิเคราะห์
เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

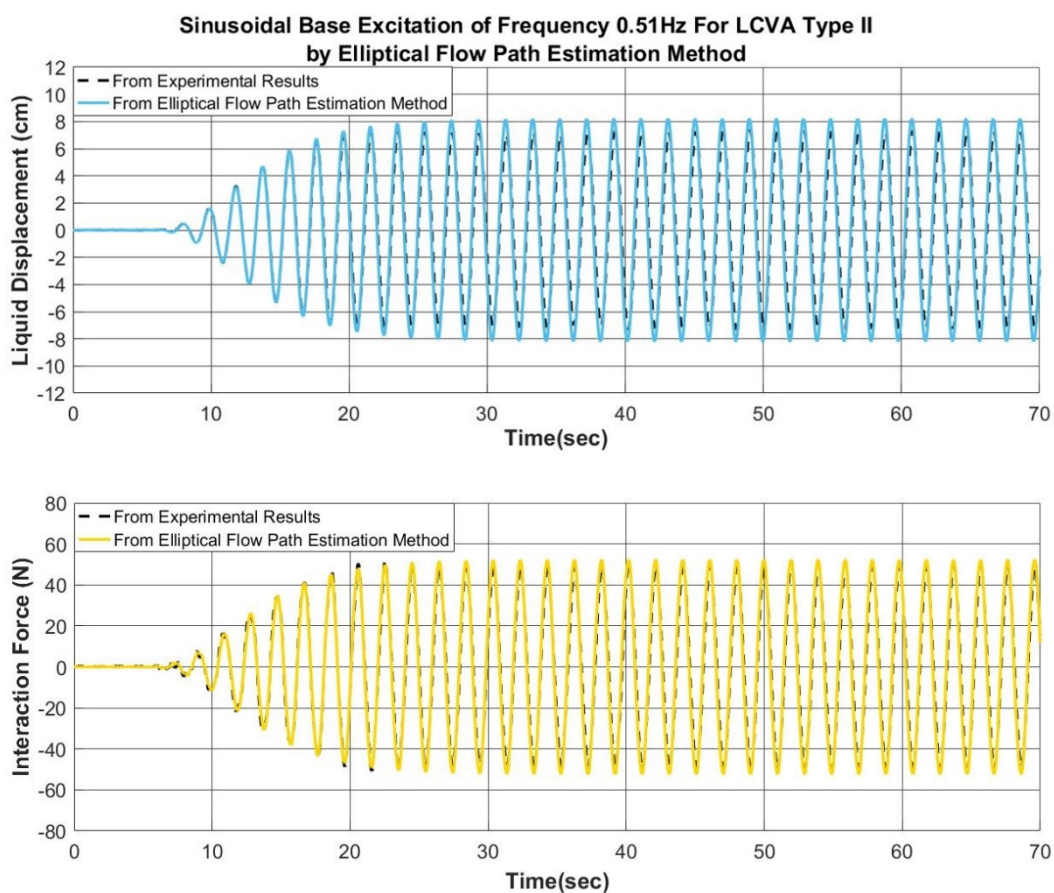
เพื่อเป็นการชี้ชัดให้เห็นว่าการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสำหรับ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลขนาดใหญ่ นั้นสามารถให้ผลการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่ค่อนข้างแม่นยำ รูปที่ 3-16 และรูปที่ 3-17 แสดงผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2 ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี, วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล และวิธีการไหลแบบโพเทนเชียลเชิงตัวเลข (Potential-Flow Method) ของ P.Chaviriyawong (2007) เปรียบเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า

จากเส้นโค้งผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2 ดังรูปที่ 3-16 และ รูปที่ 3-17 แสดงให้เห็นว่าการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีจะให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่ามากกว่าทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล โดยค่าความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA ณ ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องที่วิเคราะห์

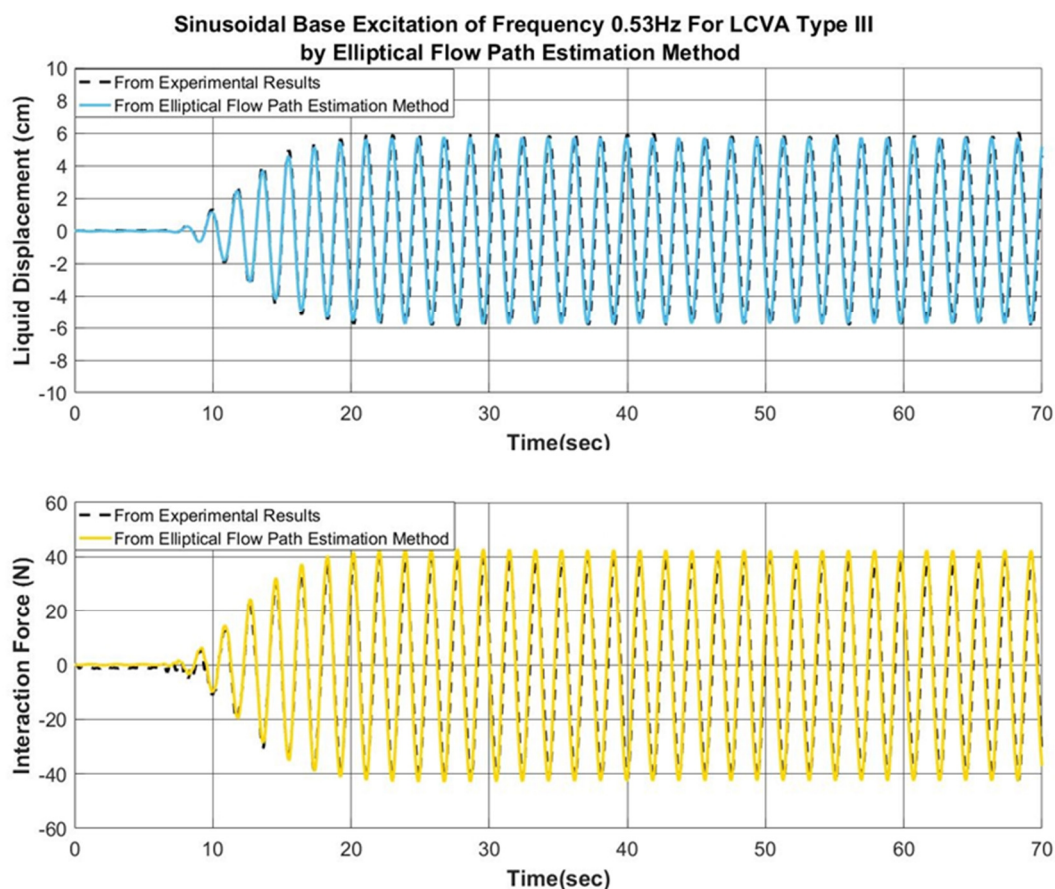
ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีจะน้อยกว่า 3.6% สำหรับ LCVA ทั้งชนิดที่ 2 และ ชนิดที่ 3 เมื่อเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหล ประสิทธิภาพ ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 25.5% และ 53% สำหรับ LCVA ทั้งชนิดที่ 2 และ ชนิดที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าในขณะที่พื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลของ LCVA มีขนาดใหญ่ขึ้นการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีที่มีการนำเสนอมาก่อนหน้าทั้ง วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้น และวิธีการไหลแบบ โพเทเชียลเชิงตัวเลขถึงแม้วิธีนี้จะสามารถทำนายผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การ เปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลขนาดใหญ่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าดังแสดงในรูปที่ 3-16 และ รูปที่ 3-17 แต่ก็ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าวิธีที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณ เส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี



รูปที่ 3-18 การเปรียบเทียบระหว่างการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการ ประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีกับทดสอบการตอบสนองสเปกตรัมบนโต๊ะเขย่าสำหรับ LCVA ชนิดที่ 1 ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้อง 0.49 Hz



รูปที่ 3-19 การเปรียบเทียบระหว่างการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีกับทดสอบการตอบสนองสเปคตรัมบนโต๊ะเขย่าสำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้อง 0.51 Hz

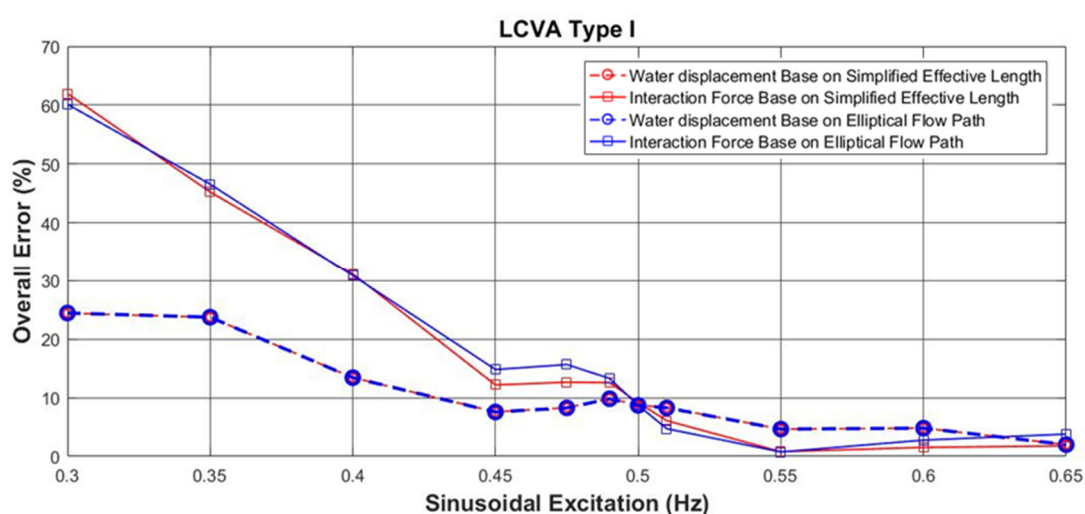


รูปที่ 3-20 การเปรียบเทียบระหว่างการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีกับทดสอบการตอบสนองสเปคตรัมบนโต๊ะเขย่าสำหรับ LCVA ชนิดที่ 3 ที่ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้อง 0.53 Hz

รูปที่ 3-18 ถึง รูปที่ 3-20 ผลการตอบสนองของคลื่นความถี่ตามช่วงเวลา (Time-History Response) ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA และ แรงปฏิกิริยาจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA (Interaction Force) โดยการแก้สมการที่ (3.6) มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการตอบสนองสเปคตรัมบนโต๊ะเขย่า

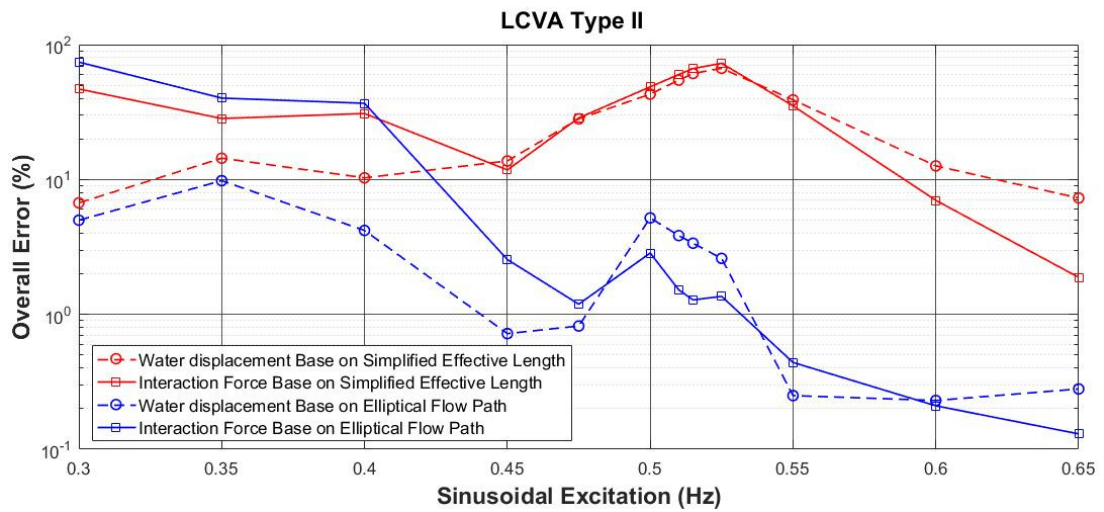
รูปที่ 3-18, รูปที่ 3-19 และรูปที่ 3-20 แสดงการทำนายผลการตอบสนองของคลื่นความถี่ตามช่วงเวลา (Time-History Response) ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีและผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าของ LCVA ชนิดที่ 1, ชนิดที่ 2 และชนิดที่ 3 ซึ่งมีความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องอยู่ที่ 0.49 Hz, 0.51 Hz และ 0.53 Hz ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA และ แรงปฏิกิริยาจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA (Interaction

Force) เมื่อเทียบกับผลการทดลองซึ่งคิดจากสมการที่ (3.9) แสดงได้ดังนี้ LCVA ชนิดที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 9.84% และ 13.30%, LCVA ชนิดที่ 2 มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 3.84% และ 1.52% และ LCVA ชนิดที่ 3 มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 5.52% และ 3.78% สำหรับการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA และ แรงปฏิกิริยาจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำนายผลการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีนั้นให้ผลการตอบสนองที่แม่นยำสำหรับ LCVA ทุกชนิดทั้งเฟสการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA และ แรงปฏิกิริยาจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA



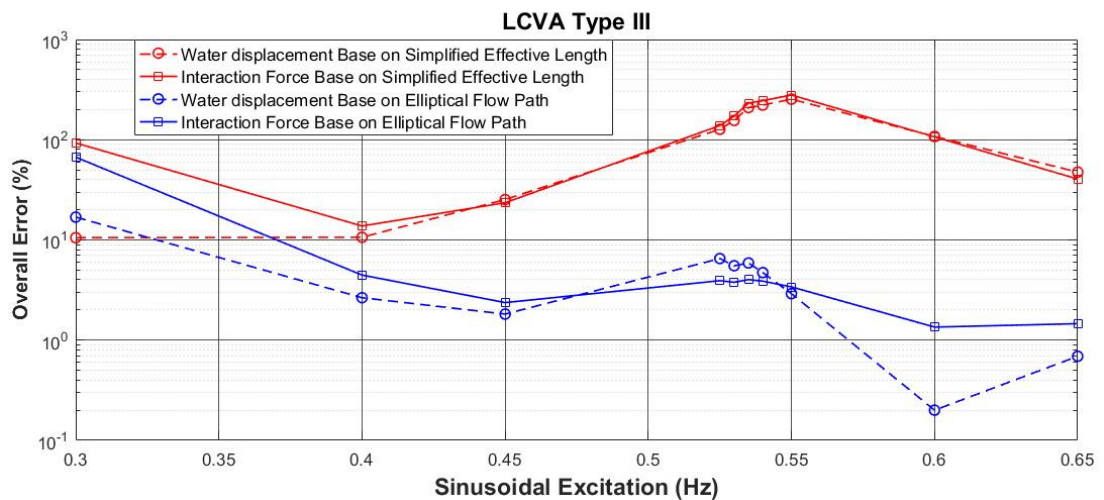
หมายเหตุ : สามารถดูค่าละเอียดได้จาก ตารางที่ ก-1 ใน ภาคผนวก ก

รูปที่ 3-21 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสำหรับ LCVA ชนิดที่ 1 กับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า



หมายเหตุ : สามารถดูค่าละเอียดได้จาก ตารางที่ ก-2 ใน ภาคผนวก ก

รูปที่ 3-22 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 กับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า



หมายเหตุ : สามารถดูค่าละเอียดได้จาก ตารางที่ ก-3 ใน ภาคผนวก ก

รูปที่ 3-23 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสำหรับ LCVA ชนิดที่ 3 กับผลการทดลองบนโต๊ะ

รูปที่ 3-21 ถึง รูปที่ 3-23 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ภายใต้การกระตุ้นด้วยคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ที่มีความถี่ต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสำหรับ LCVA ชนิดที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ กับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า จากรูปที่ 3-21 จะเห็นได้ว่าการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล (Simplified Effective Length Method) และวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี (Elliptical Flow Path Estimation Method) สามารถให้ผลการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าทั้งการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA (Water Displacement) และแรงปฏิกิริยา (Interaction Force) ที่เกิดจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA สำหรับ LCVA ชนิดที่ 1 ซึ่งเป็น LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดเล็ก แต่เมื่อ LCVA มีขนาดพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลใหญ่ขึ้นจะสังเกตเห็นจากรูปที่ 3-22 ได้ว่าการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลจะเริ่มให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2 ที่มีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าซึ่งต่างจากผลการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีที่ยังให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าสำหรับทุก ๆ ความถี่ และ จากรูปที่ 3-23 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลไม่สามารถทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 3 ซึ่งเป็น LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลขนาดใหญ่ได้ แต่วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีที่ยังสามารถทำนายผลการตอบสนองต่อความถี่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า

3.4 สรุปและอภิปรายผลการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า

วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล (Simplified Effective Length) ของ Gao and Kwok (1997) หรือ Chang and Hsu (1998) สามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (Tuned Liquid Column Damper, TLCD) หรือ ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอนไม่คงที่ (Liquid Column Vibration Absorber, LCVA) ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล (Transition Zone) ขนาดเล็ก ได้ดีทั้งค่าความถี่ธรรมชาติและผลการตอบสนองต่อคลื่นความถี่ตามช่วงเวลา (Time-History Response) ซึ่งประกอบด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน

LCVA และ แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA อย่างไรก็ตามผลการทำนาย การตอบสนองต่อความถี่ของวิธีนี้จะแย่งเมื่อพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วการไหลของ LCVA มีขนาด ใหญ่ขึ้น เนื่องมาจากวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลนั้นมีความคลาดเคลื่อนในการจำลอง ความยาวประสิทธิผล (Effective Length, L_e) บริเวณพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วการไหล ส่งผลให้ ความถี่ธรรมชาติของ LCVA และผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA นั้นมีความคลาดเคลื่อนไป ด้วย อันเนื่องมาจากความยาวประสิทธิผล (Effective Length, L_e) เป็นตัวแปรสำคัญในสมการที่ ใช้ในการหาผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ดังสมการที่ (2.23) สำหรับวิธีการไหลแบบโพเท เชียลเชิงตัวเลข (Potential-Flow Method) ที่นำเสนอโดย P.Chairiyawong (2007) นั้นสามารถ ทำนายผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วการไหลขนาดต่าง ๆ ได้ อย่างแม่นยำ แต่มีความซับซ้อนในการสร้างสมการควบคุมการไหลเป็นอย่างมาก

วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปร่างวิธีเป็นวิธีที่นำเสนอขึ้นจากการวิจัยนี้บทนี้ เพื่อเป็น ตัวเลือกในการนำไปทำนายผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็ว การไหลขนาดใหญ่ จากการศึกษาพบว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปร่างวิธีสามารถทำนายผล การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดใหญ่ได้อย่าง แม่นยำ เนื่องจากวิธีนี้สามารถจำลองความยาวประสิทธิผลบริเวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงการไหลได้ ถูกต้องและสอดคล้องกับพฤติกรรมจากการทดสอบบนโต๊ะเขย่า ส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติของ LCVA และผลการตอบสนองต่อความถี่มีความถูกต้องมากขึ้น

เนื่องจากวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลและวิธีการประมาณเส้นทางการไหล เป็นรูปร่างวิธีนั้นมีประสิทธิภาพในการทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่ การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดเล็กได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงแนะนำให้อัตราส่วนความ กว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบของ LCVA ที่มีค่ามากกว่า 0.3 เป็น LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดใหญ่ซึ่งแนะนำให้ใช้วิธีการประมาณเส้นทาง การไหลเป็นรูปร่างวิธีในการทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA อนึ่ง อัตราส่วนความ กว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบของ LCVA สำหรับเป็น LCVA ที่มี พื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดใหญ่ นั้นเป็นแค่ค่าที่ประมาณขึ้น ดังนั้นการศึกษาหา ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อใน แนวราบของ LCVA และ พฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจใน การทำวิจัยในอนาคต

บทที่ 4

การควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA โดยใช้วิธีการประมาณเส้นทาง การไหลเป็นรูปวงรีในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของของเหลว ภายใต้การกระตุ้น ของแรงแผ่นดินไหวที่ห่างจากจุดกำเนิด (Long-Distance Earthquakes)

4.1 ที่มาและความสำคัญของการติดตั้ง LCVA ให้กับโครงสร้าง

กฎกระทรวงฉบับที่ 49 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ซึ่งมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 11 พฤศจิกายน พ.ศ. 2540 เป็นกฎกระทรวงว่าด้วยการรับน้ำหนักของอาคารในพื้นที่ที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว โดยมุ่งเน้นในเรื่องของการคำนวณแรงสั่นสะเทือนที่กระทำกับอาคารประเภทต่าง ๆ เพื่อให้การก่อสร้างอาคารในพื้นที่ที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวมีความมั่นคงแข็งแรงและปลอดภัยยิ่งขึ้น หลังจากการประกาศใช้กฎกระทรวงฉบับนี้ได้มีการศึกษาและค้นคว้าด้านแผ่นดินไหวในประเทศไทยอย่างต่อเนื่อง แต่สำหรับอาคารที่ได้รับใบอนุญาตหรือได้รับใบรับแจ้งการก่อสร้างหรืออาคารที่มีอยู่ก่อนวันที่กฎกระทรวงนี้ใช้บังคับได้รับการยกเว้นไม่ต้องปฏิบัติตามกฎกระทรวงนี้ จึงทำให้มีอาคารที่ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวซึ่งปัจจุบันแผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยนั้นมีความรุนแรงมากขึ้นทำให้เกิดความเสียหายต่ออาคารต่าง ๆ อย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น เหตุแผ่นดินไหวในสหภาพเมียนมาร์ เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2554 ที่ส่งผลกระทบต่อหลายจังหวัดทางภาคเหนือของประเทศไทยทำให้เกิดความเสียหายต่อศาสนสถานและอาคารดังแสดงในรูปที่ 4-1 และ รูปที่ 4-2



ที่มา: A.Ruangrassamee et al. (2012)

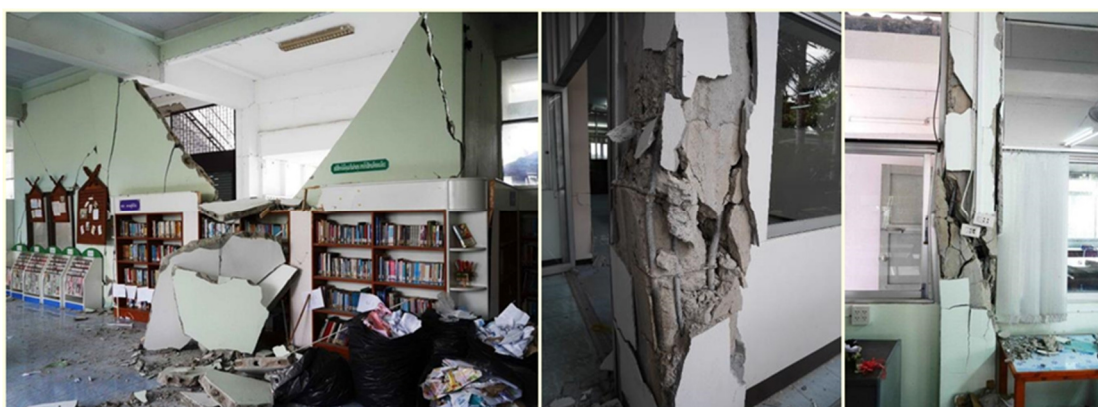
รูปที่ 4-1 วัดพระธาตุเจดีย์หลวง เชียงแสน จังหวัดเชียงราย ที่ได้รับความเสียหายจากเหตุแผ่นดินไหว
ในสหภาพเมียนมาร์ เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2554



ที่มา: A.Ruangrassamee et al. (2012)

รูปที่ 4-2 อาคารในจังหวัดทางภาคเหนือของประเทศไทยที่ได้รับความเสียหายจากเหตุแผ่นดินไหวในสหภาพเมียนมาร์ เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2554

และเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ตามมาตราริกเตอร์ วันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ซึ่งเป็นเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรงครั้งหนึ่งที่เกิดขึ้นในประเทศไทย มีศูนย์กลางแผ่นดินไหวบริเวณ ตำบลดงมะดะอำเภอมะนัง จังหวัดเชียงราย ห่างจากตัวเมืองเชียงรายประมาณ 25 กิโลเมตร และมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวตาม (Aftershocks) จำนวนไม่น้อยกว่า 3000 ครั้งในระยะเวลา 5 เดือน เหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งนี้มีความรุนแรงสูงสุดที่เคยบันทึกไว้ในประเทศไทย มีผู้เสียชีวิต 1 ราย แรงสั่นสะเทือนทำให้ตัวอาคาร บ้านเรือน โรงเรียน และวัดพังเสียหายเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างความเสียหายแสดงดังรูปที่ 4-3 และรูปที่ 4-4



ที่มา: สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ และ เป็นหนึ่ง วานิชชัย, 2014

รูปที่ 4-3 อาคารโรงเรียนพานพิทยาคมที่ได้รับความเสียหายในอำเภอมะนังจากเหตุแผ่นดินไหววันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางประมาณ 20 กิโลเมตร



ที่มา: Anat Ruangrassamee et al. (2014)

รูปที่ 4-4 อาคารที่ได้รับความเสียหายในอำเภอแม่ลาวจากเหตุแผ่นดินไหววันที่ 5 พฤษภาคม 2557

เพื่อเป็นการลดความเสียหายต่ออาคารเนื่องจากผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหว การปรับปรุง (Retrofitting) อาคารที่ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวให้มีความสามารถในการลดผลกระทบต่อตัวอาคารนั้นจึงมีความสำคัญ วิธีการปรับปรุงอาคารเหล่านี้เพื่อลดผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวนั้นมีหลายวิธี การติดตั้งตัวหน่วงประเภทต่าง ๆ เพื่อช่วยลดการสั่นไหวของอาคารเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดตั้งตัวหน่วงประเภทตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอนไม่คงที่ (LCVA) ซึ่งเป็นตัวหน่วงที่มีจุดเด่นในการปรับปรุง (Retrofitting) อาคารที่มีแท็งก์น้ำอยู่ก่อนแล้วดังนี้

กรณีที่เป็นอาคารสูงที่ไม่ได้ออกแบบมาให้สามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้ โดยทั่วไปอาคารสูงจะมีการออกแบบไว้ให้มีแท็งก์สำหรับบรรจุน้ำไว้ใช้ภายในอาคารหรือใช้ในกรณีเกิดเหตุเพลิงไหม้ การติดตั้ง LCVA สามารถทำได้โดยปรับเปลี่ยนรูปแบบของแท็งก์เก็บน้ำให้เป็นรูปแบบ LCVA ตามที่ออกแบบ ซึ่งไม่เป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับโครงสร้างเดิม และรูปร่างของ LCVA ยังเหมาะสมสำหรับอาคารสูงที่ต้องการประหยัดพื้นที่ใช้สอยอีกด้วย

LCVA เป็นตัวหน่วงที่ง่ายต่อการควบคุมค่าความหน่วงซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการสูญเสียเฮด (Head Loss) ของการไหลของของเหลวภายใน LCVA ซึ่งสามารถปรับค่าได้โดยกำหนดอัตราการเปิดของออริฟิซ (Orifice) ของท่อในแนวนอน นอกจากนั้นความถี่ธรรมชาติของ LCVA ยังสามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยการเพิ่มลระดับน้ำที่บรรจุน้ำภายใน LCVA ทั้งนี้กลไกทั้งหมดที่กล่าวมาไม่จำเป็นต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก

ด้านราคาการติดตั้งสำหรับ LCVA จากการศึกษาของ Swaroop K. Yalla (2001) พบว่าการติดตั้ง LCVA จะมีราคาในการดำเนินการอยู่ที่ 10% ของราคาการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าได้ (Tuned Mass Damper, TMD) ที่มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างเท่ากัน

นอกจากนั้น LCVA ต้องการการบำรุงรักษาหลัก ๆ ที่ไม่ซับซ้อน เช่น การตรวจสอบความแข็งแรงของตัว LCVA, ความสะอาดของของเหลวที่บรรจุภายในและประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหว

ด้วยจุดเด่นของ LCVA ที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้ LCVA จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจตัวหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุง (Retrofitting) อาคารที่ไม่ได้ออกแบบมาให้รับแรงแผ่นดินไหวให้มีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบต่อตัวอาคารเองจากแรงแผ่นดินไหวหรือแรงลม โดยประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบในการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวของ LCVA จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไป

4.2 โครงสร้างตัวอย่างและคุณสมบัติทางพลศาสตร์

โครงสร้างตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นตัวแทนของกลุ่มอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครที่มีความสูงประมาณ 43 ชั้น โดยถูกนำมาโมเดลอย่างง่ายด้วยโครงเฟรมที่มีระดับชั้นด็กหรืออิสระ (Degree-of-Freedom) เท่ากับ 5 และมีพฤติกรรมแบบบิอัสโตพลาสติก (Elastoplastic Behavior) โดยค่าสติฟเนส (Stiffness) และ ค่าขีดจำกัดที่จุดคราก (Yield Strength) จะถูกโมเดลให้แปรผันเชิงเส้นตามความสูงของโครงสร้าง คือ ชั้นบนสุดจะมีค่าสติฟเนสและค่าขีดจำกัดที่จุดครากอยู่ที่ 60 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ของชั้นล่างสุดตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของอาคารตัวอย่าง

Storey no.	Storey mass	Stiffness	Yield Strength
	(Mg x 10 ⁴)	(kN/m x 10 ⁵)	(kN x 10 ⁴)
5	0.28	3.70	2.94
4	0.48	4.31	3.67
3	0.53	4.93	4.40
2	0.57	5.55	5.14
1	1.18	6.16	5.87

โดยมี คาบธรรมชาติ (Natural Period) ของตึกเท่ากับ 2 วินาที (ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 0.5 Hz) อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง (Damping Ratio of structure, β) เท่ากับ 2%

เมื่อไม่คิดความหน่วงของระบบโครงสร้าง การสั่นแบบอิสระ (Free Vibration) ของระบบที่ประกอบด้วยระดับความเสรีหลายชั้น (Multi-Degree of Freedom, MDOF) สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (4.1)$$

ระบบการสั่นแบบอิสระในสมการที่ (4.1) จะมีผลการตอบสนองอยู่ในรูปของฟังก์ชันฮาร์มอนิกที่สอดคล้องกับเงื่อนไขเริ่มต้น $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{0})$ และ $\dot{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{u}}(\mathbf{0})$ ดังนี้

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{q}_n(t)\boldsymbol{\phi}_n = \boldsymbol{\phi}_n(A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \quad (4.2)$$

เมื่อ $\boldsymbol{\phi}_n$ ω_n คือ ลักษณะรูปร่าง (Deflected Shape) และ ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของโครงสร้างในโหมดนั้น ๆ ตามลำดับ, $\mathbf{q}_n(t)$ คือ ระยะห่างจากแนวอ้างอิงของโหมดต่าง ๆ ณ เวลาใด ๆ A_n และ B_n คือ ค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากเงื่อนไขเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ เมื่อแทนสมการที่ (4.2) ลงในสมการที่ (4.1) และจัดรูปใหม่จะได้เป็น

$$\left[-\omega_n^2 \mathbf{m}\boldsymbol{\phi}_n + \mathbf{k}\boldsymbol{\phi}_n\right]\mathbf{q}_n(t) = \mathbf{0} \quad (4.3)$$

สมการนี้จะเป็นได้หนึ่งในสองกรณี คือ $\mathbf{q}_n(t) = \mathbf{0}$ ซึ่งทำให้ $\mathbf{u}(t) = \mathbf{0}$ หมายถึง ไม่มีการเคลื่อนไหวของระบบโครงสร้าง (ซึ่งเรียกผลเฉลยแบบนี้ว่า ผลเฉลยซัด หรือ Trivial Solution) หรืออีกกรณีหนึ่งคือ ความถี่ธรรมชาติ ω_n และ โหมด $\boldsymbol{\phi}_n$ ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{k}\boldsymbol{\phi}_n = -\omega_n^2 \mathbf{m}\boldsymbol{\phi}_n \quad (4.4)$$

ซึ่งเป็นสมการที่สำคัญโดยสมการที่ (4.4) เป็นปัญหาเมทริกซ์ไอเกนแวลิว (Matrix Eigenvalue) ที่ทราบค่า \mathbf{m} และ \mathbf{k} โดยต้องแก้สมการเพื่อหาค่าสเกลาร์ (Scalar) ω_n^2 และ เวกเตอร์ (Vector) $\boldsymbol{\phi}_n$ เพื่อหาผลเฉลยของสมการโดยการแก้ปัญหาเมทริกซ์ไอเกนแวลิว (Matrix Eigenvalue) สามารถเขียนสมการ (4.4) ใหม่ได้เป็น

$$\left[\mathbf{k} - \omega_n^2 \mathbf{m}\right]\boldsymbol{\phi}_n = \mathbf{0} \quad (4.5)$$

สมการที่ (4.5) สามารถอธิบายได้ว่า เซตของจำนวนสมการเชิงอนุพันธ์แบบเอกพันธ์จำนวน N สมการ สำหรับระบบที่มี N เอลิเมนต์ (N-DOF) ϕ_j ($j = 1, 2, \dots, N$) โดยระบบสมการนี้จะมีผลเฉลยซัด หรือ Trivial Solution) $\phi_n = \mathbf{0}$ ซึ่งใช้ประโยชน์ไม่ได้เพราะไม่มีการเคลื่อนที่ของระบบโครงสร้าง แต่ สมการ (4.5) จะเป็นสมการที่มีผลเฉลยไม่ซัด (Nontrivial Solution : หมายถึงระบบสมการที่มีผลเฉลยอื่น ๆ ที่มีตัวแปรบางตัวไม่เป็นศูนย์) เมื่อเข้าเงื่อนไขดังนี้

$$\det[\mathbf{k} - \omega_n^2 \mathbf{m}] \phi_n = \mathbf{0} \quad (4.6)$$

สมการที่ (4.6) รู้จักกันในชื่อ สมการ Characteristic Equation หรือ Frequency Equation ระบบสมการนี้จะมีผลเฉลยที่เป็นจำนวนจริงบวก N จำนวนสำหรับ ω_n^2 เพราะ \mathbf{m} และ \mathbf{k} ของโครงสร้าง มีความสมมาตรและมี Eigenvalue ทุกค่าเป็นบวก (Positive Definite Matrix) โดย \mathbf{k} จะมีคุณสมบัติเป็น เมทริกซ์บวกแน่นอน (Positive Definite Matrix) สำหรับทุกโครงสร้างที่ไม่มีการเกิดการเคลื่อนที่ลักษณะคงรูป (Rigid-Body Motion) ตัวอย่างเช่น โครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา (ซึ่งจะแตกต่างออกไปจากค่า \mathbf{k} ของโครงสร้าง ชนิด Unrestrained ตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วนของเครื่องบิน) สำหรับ \mathbf{m} จะมีคุณสมบัติเป็นเมทริกซ์บวกแน่นอนเนื่องจาก \mathbf{m} ที่ได้จากการทำ Static Condensation ซึ่งทำให้ \mathbf{m} ไม่มี 0 ในแนวทแยงมุม (Diagonal)

จากสมการ (4.6) สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติ ω_n ออกมาได้ N ค่า ของการสั่นไหว โดยผลเฉลยจากสมการ Characteristic Equation เรียกว่า Eigenvalue, Characteristic Values หรือ Normal Values เมื่อทราบความถี่ธรรมชาติ ω_n แล้ว สามารถใช้สมการที่ (4.5) ในการหา เวกเตอร์ ϕ_n ได้ โดยความถี่ธรรมชาติ ω_n จำนวน N ค่า ของ N-DOF จะมี ϕ_n จำนวน N เวกเตอร์ เรียกว่า เมทริกซ์รูปร่าง (Natural Mode of Vibration หรือ Natural Mode Shapes of Vibration) โดย ϕ_n แต่ละตัวเรียกว่า Eigenvector, Characteristic Vector หรือ Normal Vector

จากหัวข้อ 4.2 คุณสมบัติของโครงสร้างที่มีระดับความเร็วเท่ากับ 5 และมีคุณสมบัติเป็นพฤติกรรมแบบอีลาสโตพลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} 11758.21 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5651.26 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5320.24 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4815.32 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2756.98 \end{pmatrix} \text{Mg}$$

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} 1170762.18 & -554571.56 & 0 & 0 & 0 \\ -554571.56 & 1047524.06 & -492952.50 & 0 & 0 \\ 0 & -492952.50 & 924285.93 & -431333.43 & 0 \\ 0 & 0 & -431333.43 & 801047.81 & -369714.37 \\ 0 & 0 & 0 & -369714.37 & 369714.37 \end{pmatrix} \text{kN/m}$$

จากสมการที่ (4.6)

$$\det[\mathbf{k} - \omega_n^2 \mathbf{m}] = 0$$

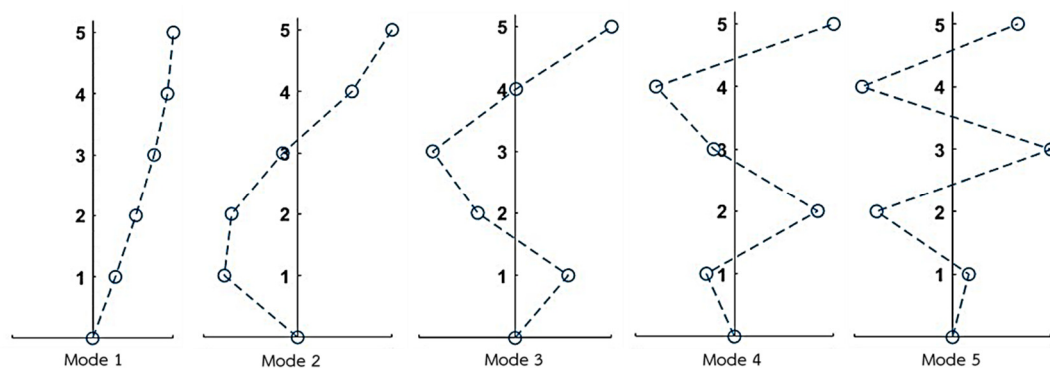
แทนค่า \mathbf{m} และ \mathbf{k} ลงในสมการที่ (4.6) สามารถหาค่า ค่าเจาะจง (Eigenvalue) ซึ่งเป็นค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดได้ทั้งหมด 5 ค่าดังนี้

$$\omega_1 = 3.14 \text{ rad/s}, \omega_2 = 7.55 \text{ rad/s}, \omega_3 = 11.52 \text{ rad/s}, \omega_4 = 15.49 \text{ rad/s}$$

$$\text{และ } \omega_5 = 17.88 \text{ rad/s}$$

และเวกเตอร์เจาะจง (Eigenvector) ซึ่งเป็น เมทริกซ์รูปร่างในแต่ละโหมดได้ทั้งหมด 5 ตัวดังนี้

$$[\phi_1] = \begin{bmatrix} 0.282 \\ 0.536 \\ 0.761 \\ 0.926 \\ 1 \end{bmatrix}, [\phi_2] = \begin{bmatrix} -0.775 \\ -0.699 \\ -0.156 \\ 0.575 \\ 1 \end{bmatrix}, [\phi_3] = \begin{bmatrix} 0.551 \\ -0.387 \\ -0.853 \\ 0.010 \\ 1 \end{bmatrix}, [\phi_4] = \begin{bmatrix} -0.282 \\ 0.840 \\ -0.208 \\ -0.789 \\ 1 \end{bmatrix}, [\phi_5] = \begin{bmatrix} 0.165 \\ -0.771 \\ 1 \\ -0.917 \\ 0.663 \end{bmatrix}$$



รูปที่ 4-5 รูปร่างในแต่ละโหมดของโครงสร้างตัวอย่าง

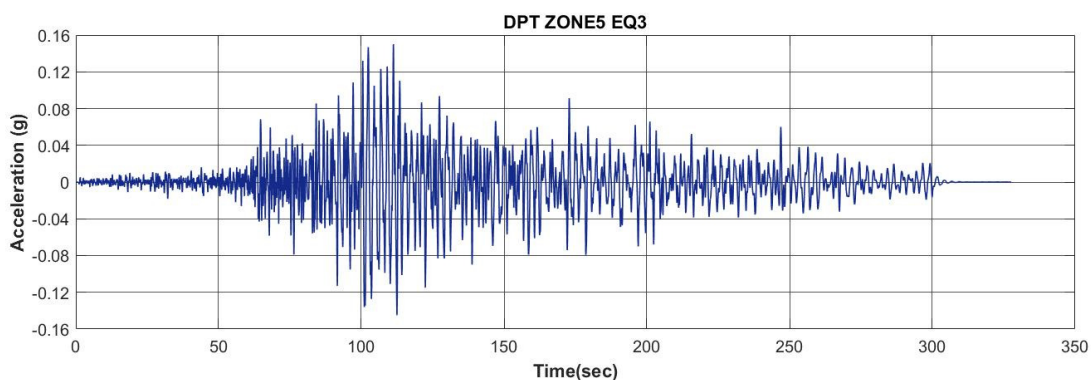
4.3 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา

สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของ LCVA .ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างในที่นี้จะใช้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่ไกลจากจุดกำเนิด (Long-Distance Earthquake) ที่มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณฮาร์โมนิก (Harmonic - Like) ที่มีความถี่เด่นชัด (Predominant Frequency) ใกล้เคียงกับโครงสร้างทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการสั่นพ้องซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างมากขึ้นซึ่งทำให้เห็นผลของการควบคุมการสั่นไหวของ LCVA ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยขนาดของสัญญาณแผ่นดินไหวจะถูกปรับตามความเหมาะสมแต่ยังคงความถี่ไว้เหมือนเดิม สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษานี้มีดังต่อไปนี้

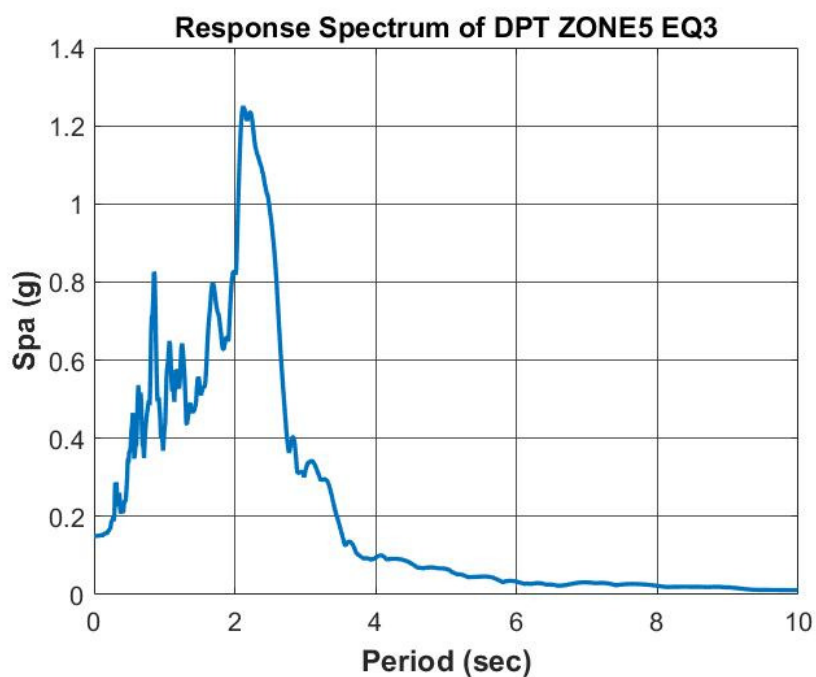
4.3.1 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่เหมาะสมในการออกแบบสำหรับพื้นที่โซน 5 ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 1302 (มยผ. 1302)

สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวนี้เป็นข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่เหมาะสมที่สามารถเลือกนำไปใช้ในการออกแบบอาคารโดยใช้วิธีประวัติเวลา (Time History Analysis) ที่คาบการเกิดแผ่นดินไหวที่ 2,475 ปี ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 1302 สำหรับพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯ (โซน 5) ในการศึกษาจะใช้ข้อมูลสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวนี้จำนวน 2 ชุด ได้แก่

สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวชุดที่หนึ่งในการศึกษานี้จะใช้ชื่อเรียกว่า “DPT ZONE5 EQ3” สัญญาณแผ่นดินไหวนี้ถูกปรับขนาดของสัญญาณให้มีค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด (Peak Ground Acceleration, PGA) เท่ากับ $0.15g$ (g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2) และมีคาบเด่นชัดที่ใกล้เคียง 2.5 วินาที แสดงดังรูปที่ 4-6 และ รูปที่ 4-7

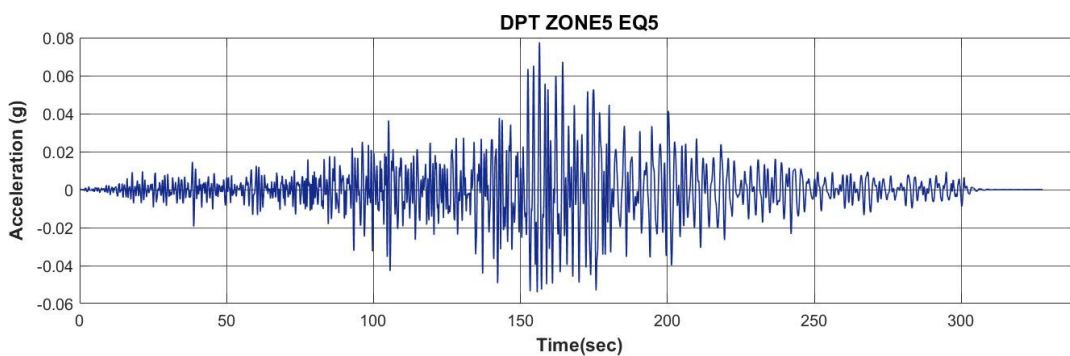


รูปที่ 4-6 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่เหมาะสมในการออกแบบสำหรับพื้นที่โซน 5 ตาม มยผ. 1302 ที่ปรับขนาด PGA ให้เท่ากับ 0.15g

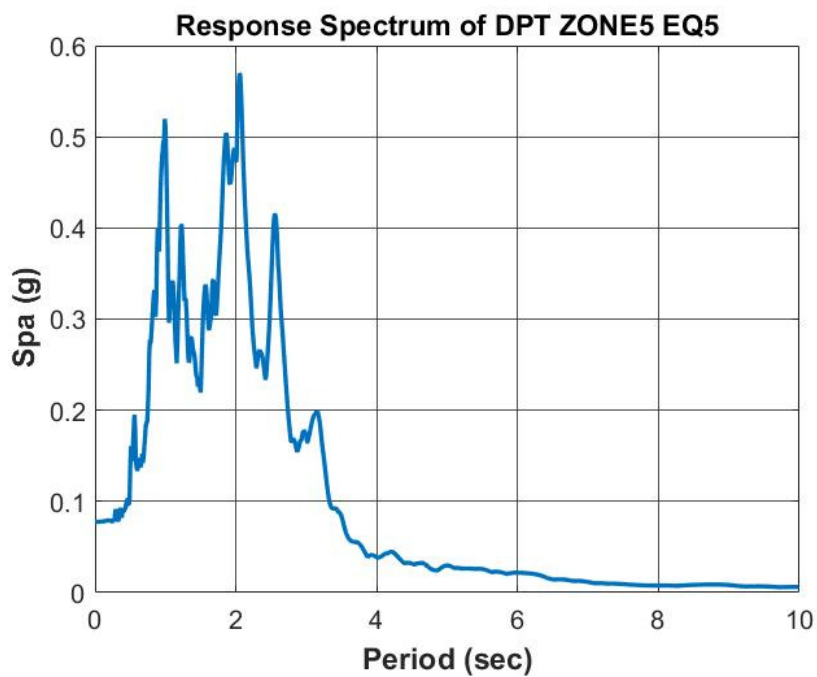


รูปที่ 4-7 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3 สำหรับระบบที่มี อัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.02

สำหรับสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวชุดที่สองในการศึกษานี้จะใช้ชื่อเรียกว่า “DPT ZONE5 EQ5” สัญญาณแผ่นดินไหวนี้มีค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด (Peak Ground Acceleration, PGA) เท่ากับ 0.078g และมีคาบเด่นชัดที่ใกล้เคียง 2 วินาที แสดงดังรูปที่ 4-8 และ รูปที่ 4-9



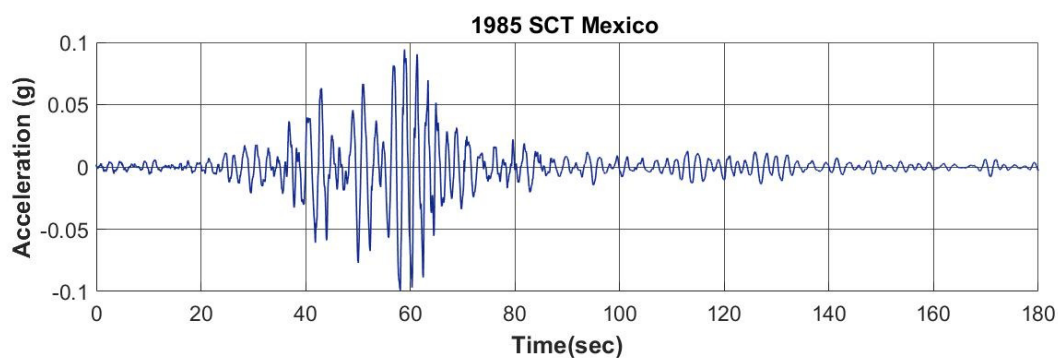
รูปที่ 4-8 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่เหมาะสมในการออกแบบสำหรับพื้นที่โซน 5 ตาม มยผ.
1302 ที่มี PGA เท่ากับ 0.078g



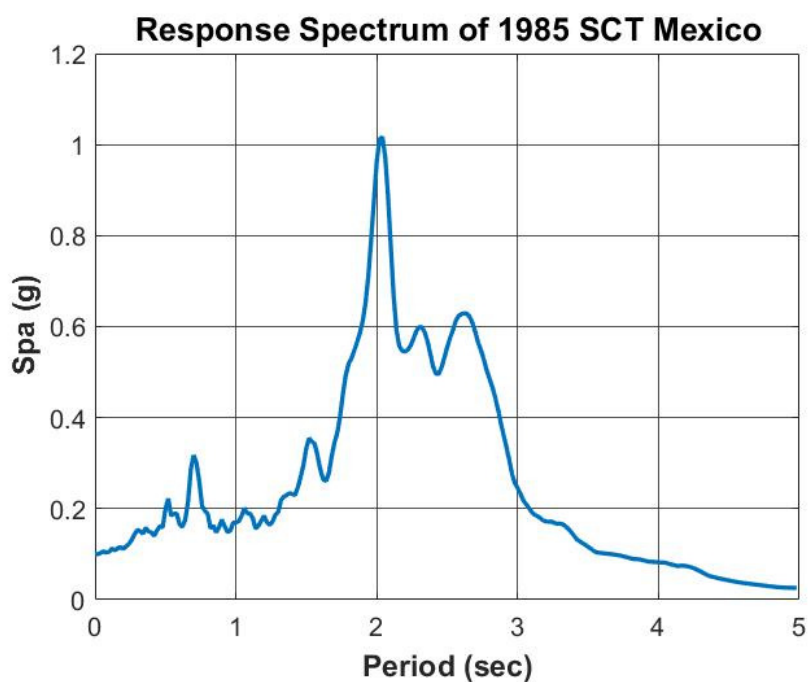
รูปที่ 4-9 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5 สำหรับระบบที่มี
อัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.02

4.3.2 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่วัดได้ในประเทศเม็กซิโกเมื่อปี ค.ศ. 1985

เหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งนี้เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 19 กันยายน ค.ศ. 1985 เวลาประมาณ 7 นาฬิกา โดยมีขนาดความรุนแรง 8.1 แมกนิจูด มีจุดศูนย์กลางห่างจากเมืองเม็กซิโกซิตีทางทิศตะวันตกประมาณ 320 กิโลเมตร หลังจากการสั่นไหวอย่างรุนแรงประมาณ 3 นาที เป็นเหตุให้มีผู้เสียชีวิต 10,000 คน บาดเจ็บอีก 30,000 คน ยังมีอีกหลายพันคนที่ต้องไร้ที่อยู่อาศัย ตึก อาคาร บ้านเรือนในกรุงเม็กซิโกซิตีถล่มลงมาไม่น้อยกว่า 400 หลัง และอีกกว่า 1,000 หลังคาเรือนได้รับความเสียหายอย่างหนัก สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวในครั้งนี้ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทยโดยเฉพาะพื้นที่ในกรุงเทพมหานคร ซึ่งจากคุณสมบัติของชั้นดินในกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นชั้นดินอ่อน (Soft Bangkok clay) และจากการศึกษาพบว่าความหนาของชั้นดินเหนียวมีผลต่อการขยายขนาดของแรงแผ่นดินไหวได้อย่างชัดเจน (อำนาจ และ สุทธิศักดิ์, 2009) พฤติกรรมดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับเหตุการณ์ที่กรุงเม็กซิโกซิตี ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ใช้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่วัดได้ในประเทศเม็กซิโกเมื่อปี ค.ศ. 1985 โดยถูกปรับขนาดของสัญญาณให้มีค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด (Peak Ground Acceleration, PGA) เท่ากับ 0.1g และมีคาบเด่นอยู่ที่ 2 วินาที แสดงดังรูปที่ 4-10 และ รูปที่ 4-11 ในการศึกษานี้จะขอเรียกชื่อสัญญาณแผ่นดินไหวนี้ว่า “1985 SCT Mexico”



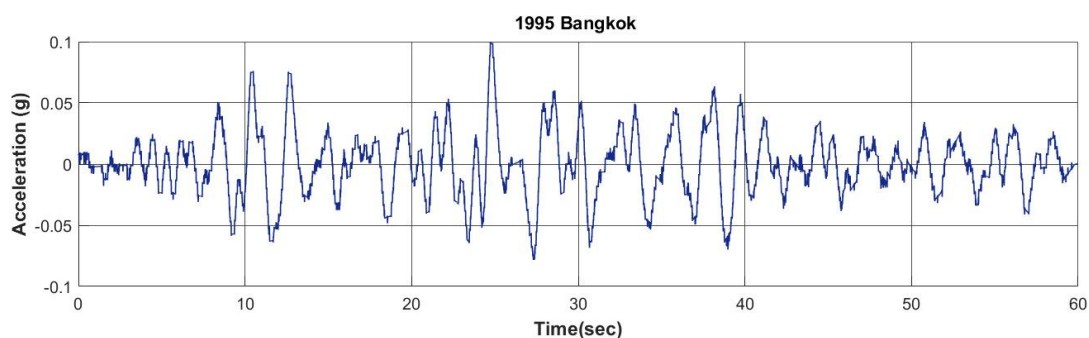
รูปที่ 4-10 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico โดยมี PGA เท่ากับ 0.1g



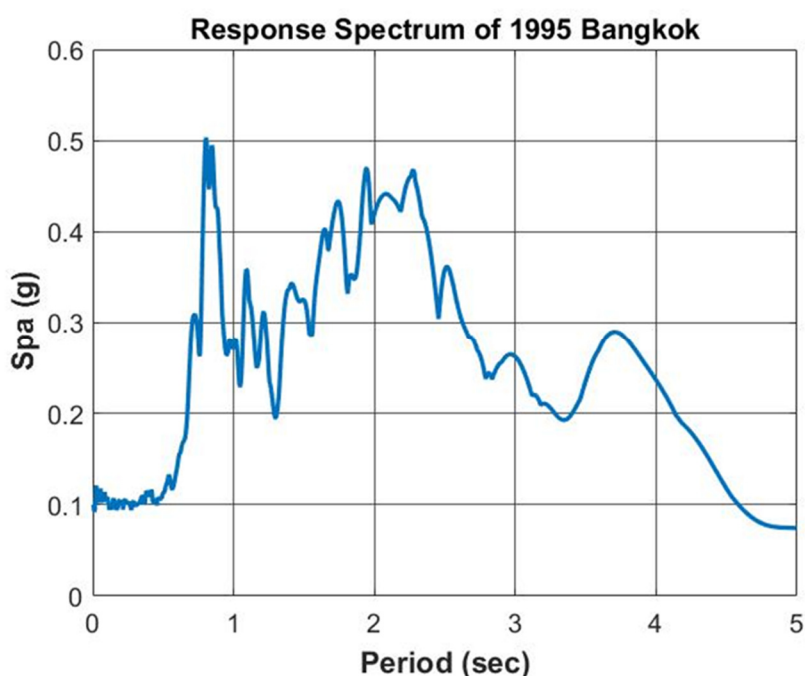
รูปที่ 4-11 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico สำหรับระบบที่มีอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.02

4.3.3 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่วัดได้จริงใต้ตึกใบหยกเมื่อปี ค.ศ.1995

สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวที่วัดได้จริงที่ฐานของตึกใบหยกซึ่งมีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.5 วินาทีเมื่อปี ค.ศ.1995 จุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหวอยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครประมาณ 900 กิโลเมตร สัญญาณความเร่งแผ่นดินไหวที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ถูกปรับขนาดของสัญญาณให้มีค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด (Peak Ground Acceleration ,PGA) เท่ากับ 0.1g และมีคาบเด่นอยู่ที่ 2 วินาที แสดงดังรูปที่ 4-12 และ รูปที่ 4-13 ในการศึกษานี้จะขอเรียกชื่อสัญญาณแผ่นดินไหวนี้ว่า “1995 Bangkok”



รูปที่ 4-12 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 1995 Bangkok โดยมี PGA เท่ากับ 0.1g



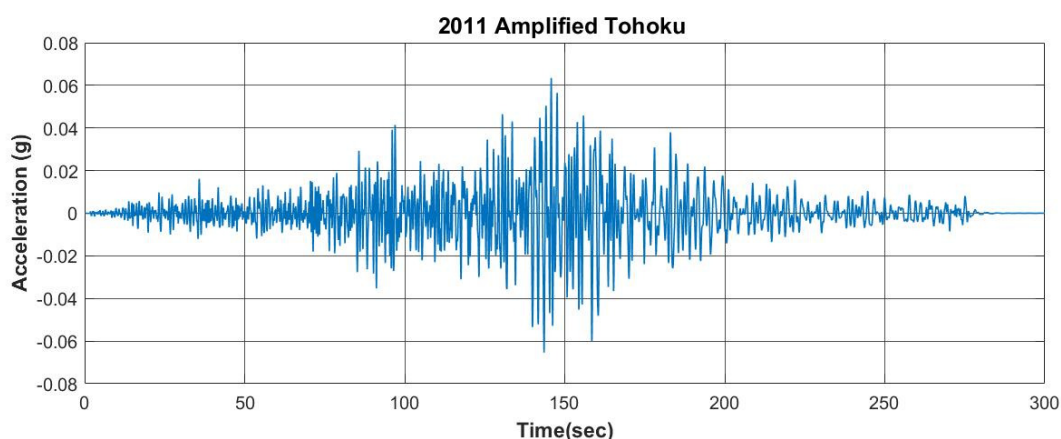
รูปที่ 4-13 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว 1995 Bangkok สำหรับระบบที่มีอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.02

4.3.4 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวโทโฮกุ ค.ศ. 2011

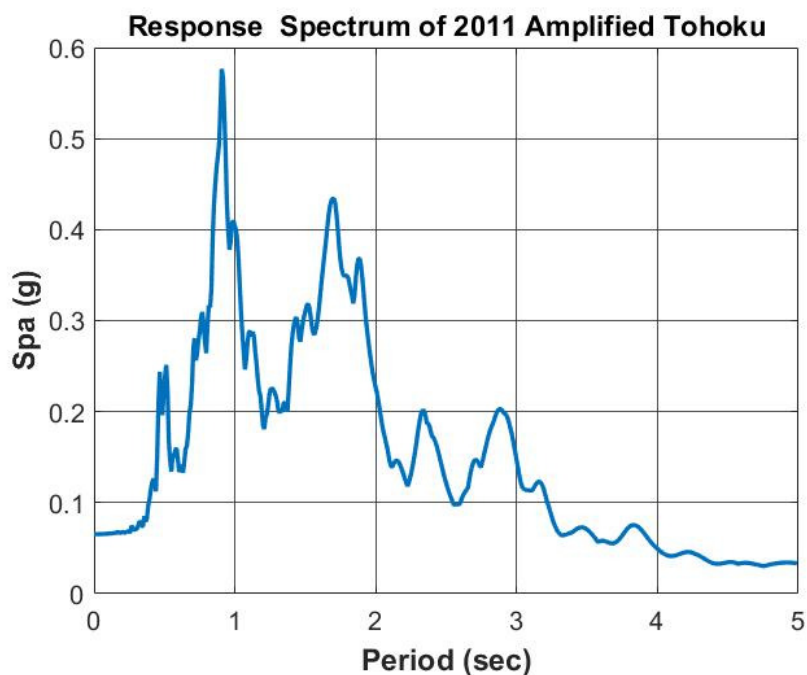
แผ่นดินไหวนอกชายฝั่งแปซิฟิกโทโฮกุ วันที่ 11 มีนาคม ค.ศ.2011 เวลา 14 นาฬิกา 46 นาที ตามเวลามาตรฐานญี่ปุ่นเป็นแผ่นดินไหวเมกะทรัสต์ (Megathrust Earthquake) เกิดใต้ทะเล ขนาด 9.0 แมกนิจูด จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวนอกชายฝั่งญี่ปุ่นห่างจากคาบสมุทรโอซึเกะทางตะวันออกเฉียงใต้ 130 กิโลเมตร อยู่ลึกลงไปใต้พื้นดิน 32 กิโลเมตร เหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งนี้ทำให้เกิดคลื่นสึนามิ

สูงกว่า 9.3 เมตร และอาฟเตอร์ช็อกความรุนแรงกว่าร้อยละครึ่งในสามเดือนหลังจากเหตุการณ์ครั้งนี้ หนึ่งในนั้นมีอาฟเตอร์ช็อกเท่ากับหรือมากกว่า 7.0 แมกนิจูดถึง 5 ครั้งด้วยกัน เหตุการณ์ในครั้งนี้ทำให้มีผู้เสียชีวิต 15,782 คน ทั้งจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว สึนามิ และอาฟเตอร์ช็อก และ 4,086 คน หายสาบสูญ บ้านเรือนกว่า 128,530 หลังคาเรือนพังทลาย และอีก 240,332 ได้รับความเสียหายเกินครึ่งหนึ่งของตัวอาคาร (Motoki Kazama and Toshihiro Noda, 2012) และที่สำคัญเหตุการณ์ครั้งนี้ทำให้เกิดความเสียหายต่อโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะแห่งที่หนึ่ง ทำให้เกิดเหตุระเบิดขนาดใหญ่ขึ้นสามครั้งและการรั่วไหลของกัมมันตภาพรังสี มีผู้ถูกอพยพไปมากกว่า 200,000 คน

สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวโทโฮกุ ค.ศ. 2011 ที่ใช้ในการศึกษานี้ถูกปรับขนาดของสัญญาณให้มีความเหมาะสมกับชั้นดินในกรุงเทพมหานคร โดยมีค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด (Peak Ground Acceleration ,PGA) เท่ากับ 0.065g ดังแสดงในรูปที่ 4-14 และ รูปที่ 4-15 ในการศึกษานี้จะขอเรียกชื่อสัญญาณแผ่นดินไหวนี้ว่า “2011 Amplified Tohoku”



รูปที่ 4-14 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku โดยมี PGA เท่ากับ 0.065g

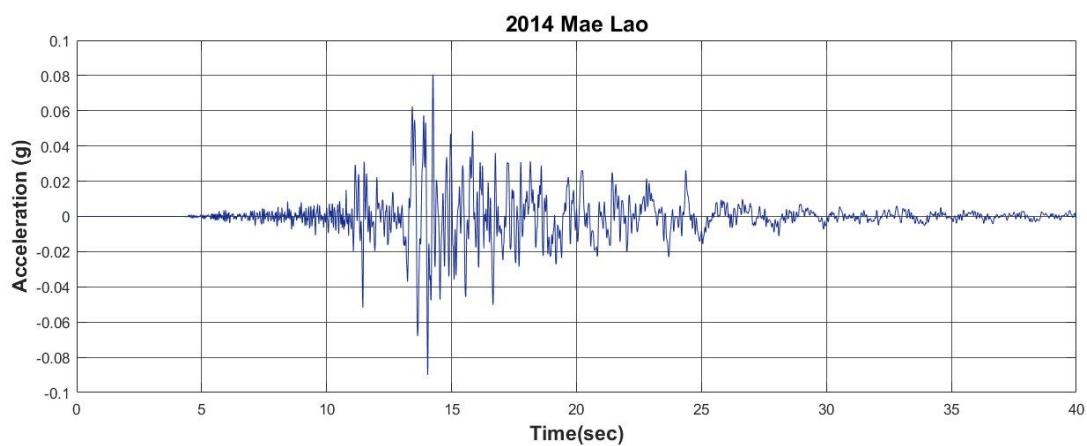


รูปที่ 4-15 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku สำหรับระบบที่มีอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.02

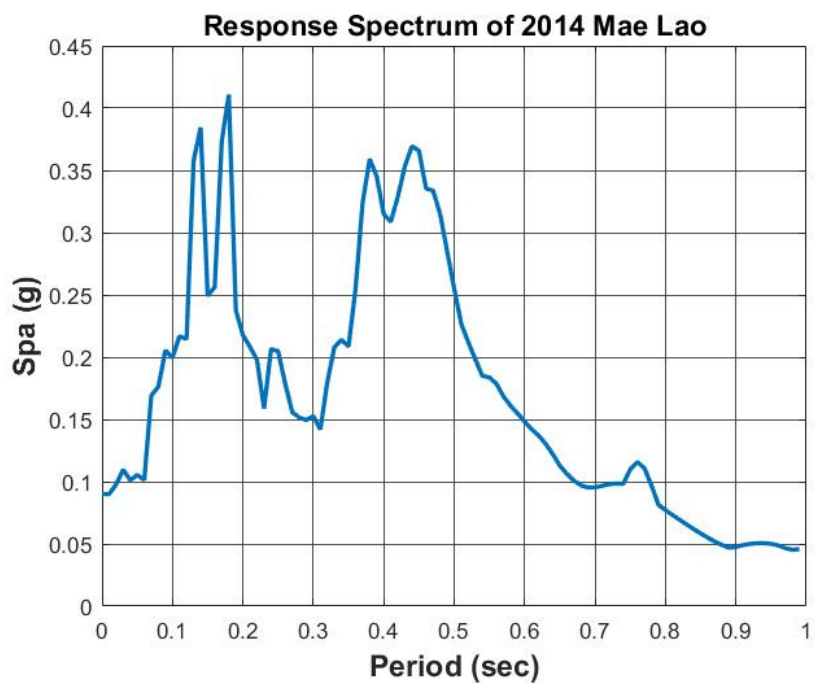
4.3.5 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวจังหวัดเชียงราย วันที่ 5 พฤษภาคม ค.ศ.2014

เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 เวลา 18.08 น. (ตามเวลาประเทศไทย) ได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวมีจุดศูนย์กลางอยู่บริเวณตำบลจอมหมอกแก้ว อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ที่ระดับความลึก 2 กิโลเมตร ขนาดแผ่นดินไหวอยู่ที่ 6.3 ตามหน่วยริกเตอร์ ทำให้เกิดความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือนใน 7 จังหวัดภาคเหนือ ทำให้มีผู้เสียชีวิต 1 ราย และบาดเจ็บ 107 คน ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1

สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวจังหวัดเชียงรายเป็นสัญญาณความเร่งที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดค่าอัตราเร่งพื้นดินของสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา ที่อ่างเก็บน้ำแม่ปืม จังหวัดพะเยา ซึ่งห่างจากจุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหวประมาณ 47 กิโลเมตร สามารถวัดค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด (Peak Ground Acceleration, PGA) ได้เท่ากับ 0.068g แต่ในการในการศึกษาครั้งนี้ได้ปรับขนาดของคลื่นให้มีค่า PGA เท่ากับ 0.09g เพื่อให้ใกล้เคียงกับค่า PGA ของความเร่งสูงสุดที่ชั้นหินที่มีระยะทางจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว 25 กิโลเมตรซึ่งพื้นที่บริเวณนี้มีรายงานความเสียหายของอาคารจำนวนมาก (N.Poovarodom and A.Jirasakjamroonsri, 2014) สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวนี้แสดงในรูปที่ 4-16 และ รูปที่ 4-17 ซึ่งในการศึกษานี้จะเรียกชื่อสัญญาณแผ่นดินไหวนี้ว่า “2014 Mae Lao”



รูปที่ 4-16 สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 2014 Mae Lao โดยมี PGA เท่ากับ 0.09g



รูปที่ 4-17 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว 2014 Mae Lao สำหรับระบบที่มีอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.02

4.4 การออกแบบ LCVA

ในการออกแบบ LCVA ในการศึกษาอ้างอิงหลักการออกแบบจากการศึกษาเรื่อง SINGLE- AND MULTIPLE-TUNED LIQUID COLUMN DAMPER FOR SEISMIC APPLICATION โดย FAHIM SADEK และคณะ ในปี ค.ศ.1998 โดยหลักการออกแบบ LCVA นี้ได้จากการทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรสำคัญที่เหมาะสมในการออกแบบ LCVA ซึ่งประกอบด้วย อัตราส่วนความถี่ของ LCVA ต่อโครงสร้าง (Tuning Ratio, f_d), อัตราส่วนความกว้างของท่อในแนวนอนต่อความยาวทั้งหมดของ LCVA (Tube Width to Liquid Length Ratio, α_d) และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเฮด (Head Loss Coefficient, δ_d) โดยโครงสร้างที่ใช้ในการทดลองจะเป็นโครงสร้างที่มีลำดับชั้นอิสระเท่ากับ 1 (Single Degree of Freedom) มีคาบธรรมชาติเท่ากับ 1 วินาที และค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง (β) เท่ากับ 0.02 และ 0.05 สำหรับอัตราส่วนมวลของ LCVA ต่อโครงสร้าง (μ) จะใช้เท่ากับ 0.005, 0.01, 0.02 และ 0.04 ภายใต้สภาวะการกระตุ้นจากความเร่งแผ่นดินไหวจำนวน 72 สถานการณ์จาก 36 สถานีวัดทางตะวันตกของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีช่วงขนาดของแผ่นดินไหวอยู่ระหว่าง 5.2 ถึง 7.7 แมกนิจูด และค่าความเร่งของพื้นดินสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.044g ถึง 1.172g ในการทดลองจะเปลี่ยนค่าของตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบ LCVA ตัวใดตัวหนึ่งไปเรื่อย ๆ โดยคงที่ตัวแปรอีกสองตัวที่เหลือไว้ เพื่อหาผลของตัวแปรนั้นต่อการตอบสนองของระบบ SDOF-LCVA ภายความเร่งแผ่นดินไหว

จากการทดลองของ Sadek et al. (1998) สามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบ LCVA ได้ดังนี้ โดยค่าอัตราส่วนความถี่ของ LCVA ต่อโครงสร้าง (Tuning Ratio, f_d) จากการทดสอบที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่าค่าอัตราส่วนความถี่ของ LCVA ต่อโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนมวลของ LCVA ต่อโครงสร้าง (μ) โดยที่อัตราส่วนมวลที่มากขึ้นก็จะช่วยลดการตอบสนองของโครงสร้างจากสภาวะการกระตุ้นได้ดียิ่งขึ้น และยิ่งขึ้นอยู่กับค่าการหน่วงของโครงสร้างซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-18 Sadek et al. (1998) ได้เสนอให้ใช้ค่าอัตราส่วนความถี่ของ LCVA ต่อโครงสร้าง (Tuning Ratio, f_d) ในการออกแบบ LCVA ดังสมการที่ (4.6)

$$f_d = \frac{\sqrt{1 - \frac{\mu}{2}}}{1 + \mu} \quad (4.6)$$

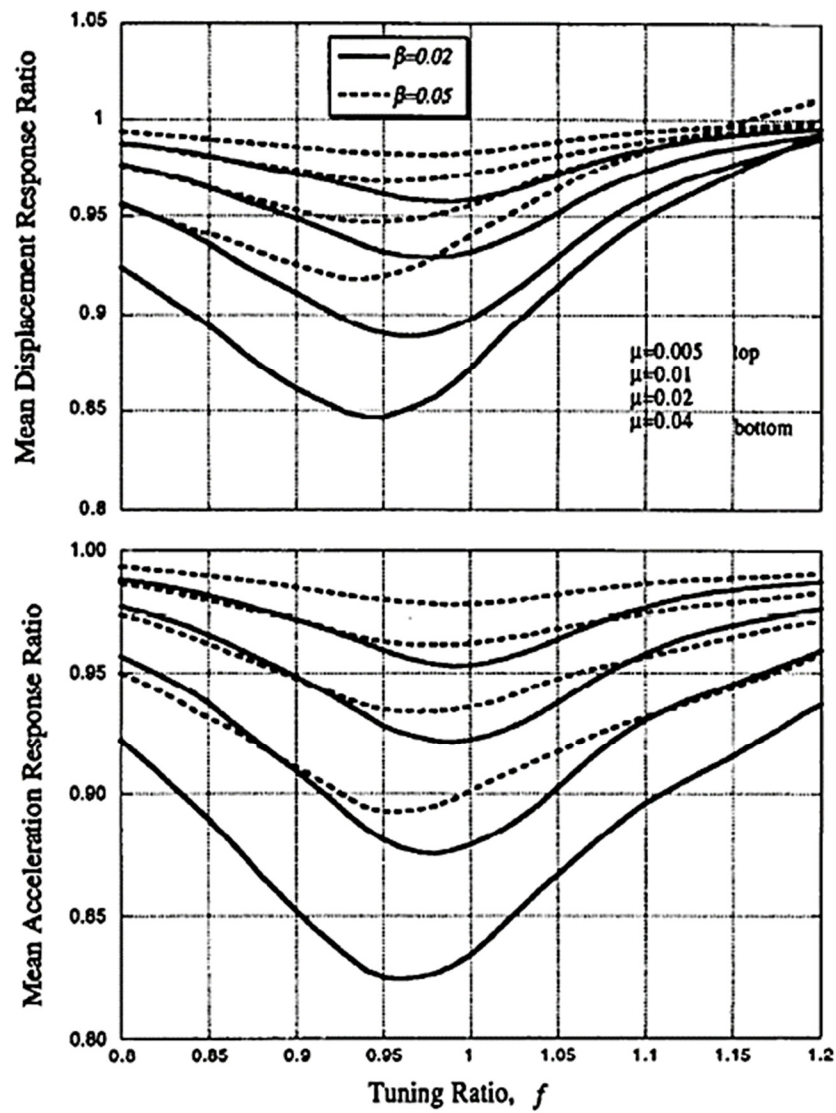
สำหรับการพิจารณาค่า อัตราส่วนความกว้างของท่อในแนวนอนต่อความยาวทั้งหมดของ LCVA (Tube Width to Liquid Length Ratio, α_d) จากการทดลองพบว่ายิ่งค่า α_d มีค่ามากก็จะช่วยลดการตอบสนองของโครงสร้างต่อสภาวะการกระตุ้นได้ดีขึ้นด้วยแสดงดังรูปที่ 4-19 เนื่องจากยิ่งมีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวนอนมากก็จะสามารถทำให้เกิดการดูดซับพลังงานจากโครงสร้างผ่านการ

เคลื่อนที่ของน้ำได้มากในขณะที่ท่อในแนวตั้งทำหน้าที่ในการป้องกันการไหลออกของน้ำที่กำลังเคลื่อนที่ภายใน LCVA โดยจากการทดลอง Sadek et al. (1998) แนะนำค่า α_d ในการออกแบบ LCVA สำหรับโครงสร้างที่รับแรงแผ่นดินไหวที่รุนแรง (ความเร่งพื้นดินสูงสุดที่ประมาณ 0.74g) อยู่ที่ 0.75 ถึง 0.8

สำหรับการเลือกค่า ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเฮด (Head Loss Coefficient, δ_d) ในการออกแบบ LCVA จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเฮด ที่เหมาะสมจะแตกต่างกันไปตามสภาวะการกระตุ้นต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4-20 ซึ่งสามารถหาค่า (Head Loss coefficient, δ_d) ได้โดยใช้สมการที่ (4.7)

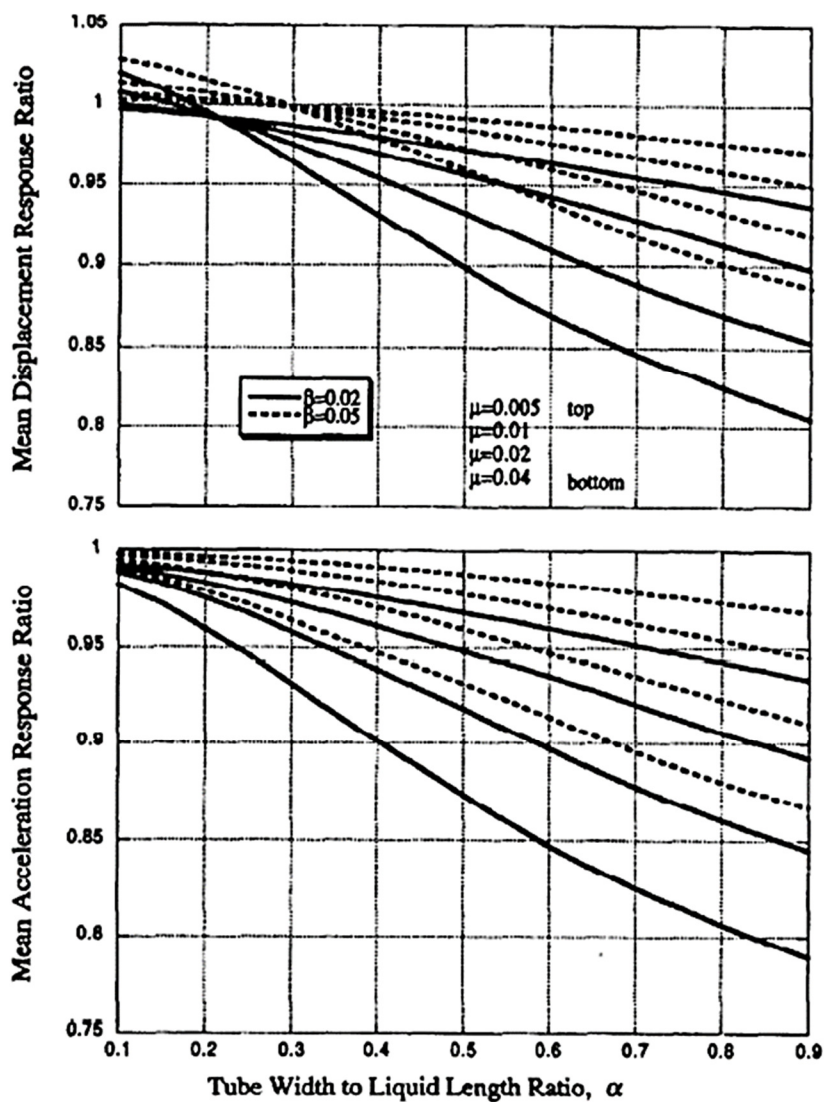
$$\delta_d = \frac{3.58\mu}{a_g/g} \quad (4.7)$$

เมื่อ a_g คือ ค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด หรือ PGA ในหน่วย g



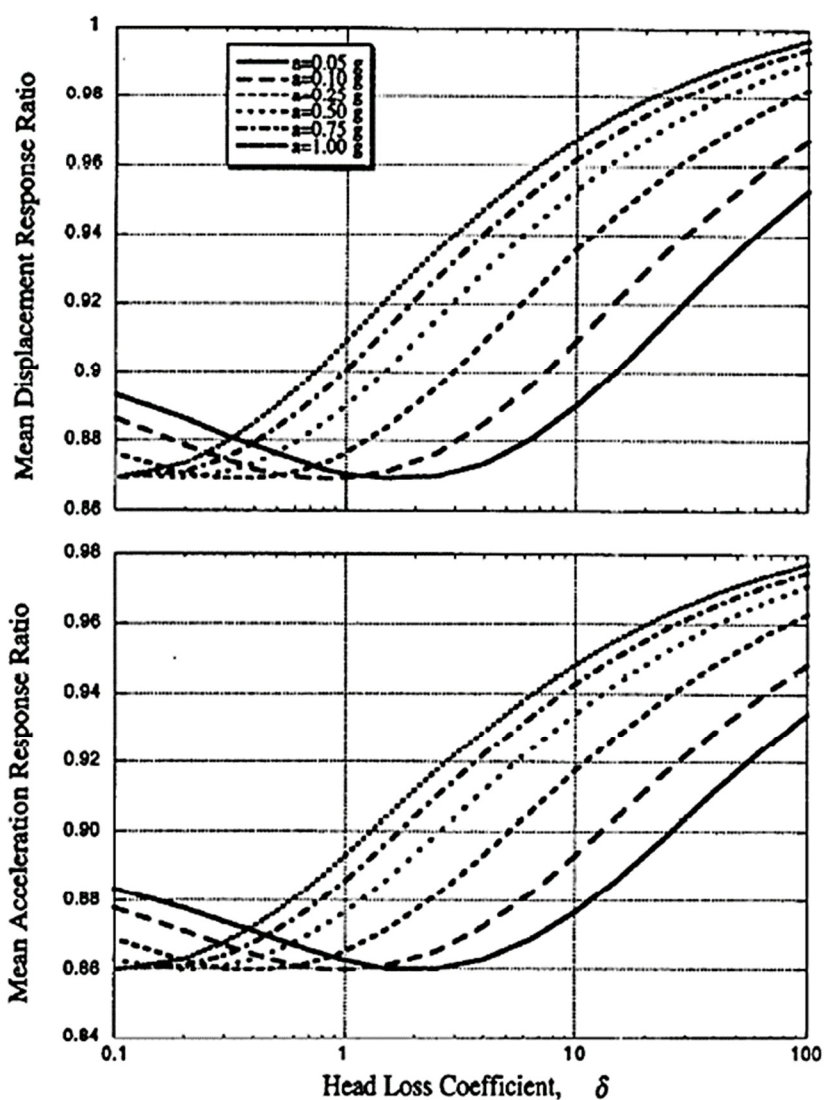
ที่มา: Sadek et al. (1998)

รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนความถี่ของ LCVA ต่อโครงสร้าง (Tuning Ratio, f_d)
กับการตอบสนองของโครงสร้างในการทดลองของ Sadek et al. (1998)



ที่มา: Sadek et al. (1998)

รูปที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความกว้างของท่อในแนวนอนต่อความยาวทั้งหมดของ LCVA (Tube Width to Liquid Length Ratio, α_d) กับการตอบสนองของโครงสร้างในการทดลองของ Sadek et al. (1998)



ที่มา: Sadek et al. (1998)

รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเฮด (Head Loss Coefficient, δ_d) กับการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้การกระตุ้นด้วยความเร่งขนาดต่าง ๆ ในการทดลองของ Sadek et al. (1998)

การออกแบบ LCVA ที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างในหัวข้อที่ 4.2 ภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวในหัวข้อที่ 4.3 จากมวลในโหมดที่หนึ่งของโครงสร้างหลักในหัวข้อ 4.2 (m_{s1}) เท่ากับ 12,533 Mg และ ความเร่งพื้นดินสูงสุดของแผ่นดินไหวในหัวข้อ 4.3 เท่ากับ 0.15g ในการออกแบบนี้จะใช้ค่าอัตราส่วนมวลของ LCVA ต่อโครงสร้าง (μ) เท่ากับ 0.06 ดังนั้นสามารถออกแบบ LCVA ได้ดังนี้

มวลของ LCVA สามารถหาได้จาก

$$m_d = \mu m_{s1} = 0.06 \times 12533 = 751.98 \text{ Mg}$$

ค่าอัตราส่วนความถี่ของ LCVA ต่อโครงสร้าง (Tuning Ratio, f_d) หาได้โดย

$$f_d = \frac{\sqrt{1 - \frac{\mu}{2}}}{1 + \mu} = \frac{\sqrt{1 - \frac{0.06}{2}}}{1 + 0.06} = 0.929$$

และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเฮด (Head Loss Coefficient, δ_d) หาได้จาก

$$\delta_d = \frac{3.58\mu}{\left(\frac{a_g}{g}\right)} = \frac{3.58(0.06)}{\left(\frac{0.15g}{g}\right)} = 1.432$$

จากค่าอัตราส่วนความถี่ของ LCVA ต่อโครงสร้าง จะสามารถหาความยาวทั้งหมดของ LCVA (L) ได้โดย

$$f_d = 0.929 = \frac{\omega_f}{\omega_n} = \frac{\sqrt{\frac{2g}{L}}}{\pi}$$

จะได้

$$L = 2.30 \text{ m}$$

ในการออกแบบจะใช้อัตราส่วนความกว้างของท่อในแนวนอนต่อความยาวทั้งหมดของ LCVA (Tube Width to Liquid Length Ratio, α_d) เท่ากับ 0.8 ดังนั้นสามารถหาค่าความกว้างของท่อในแนวนอนได้ดังนี้

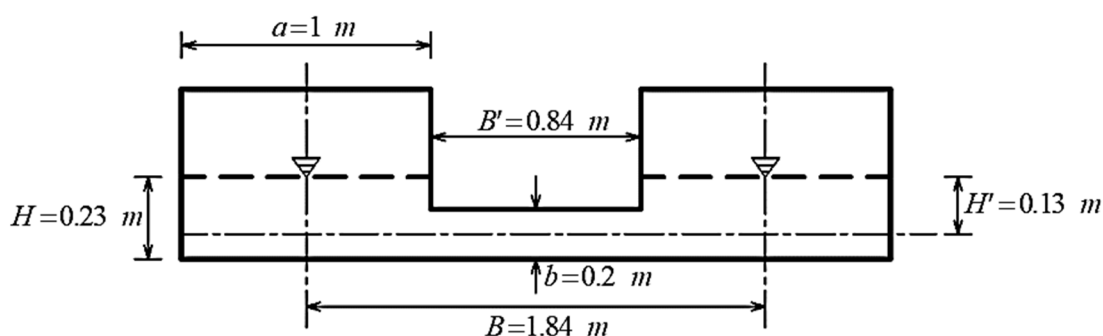
$$B = \alpha \times L = 0.8 \times 2.3 = 1.84 \text{ m}$$

จากนิยามของ Sadek et al. (1988) ความยาวทั้งหมดของ LCVA หาได้จาก $L = B + 2H$ ดังนั้นจะสามารถหาความสูงของน้ำในท่อแนวตั้ง (H) ได้ดังนี้

$$2.3 = 1.84 + 2H$$

$$H = 0.23 \text{ m}$$

จากการออกแบบจะได้ LCVA ที่มีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวราบ (r) เท่ากับ 5 และ อัตราส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบ เท่ากับ 1.02 ซึ่งจัดเป็น LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล (Transition Zone) ขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถแสดงหน้าตัดของ LCVA ได้ดังรูปที่ 4-21



รูปที่ 4-21 หน้าตัดของ LCVA ที่จะใช้ในการศึกษา

4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการตอบสนองของโครงสร้างตัวอย่างในหัวข้อที่ 4.2 ที่ติดตั้ง LCVA ตามที่ได้ออกแบบไว้หัวข้อที่ 4.4 ภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวทั้ง 6 ชุดจากหัวข้อที่ 4.3 โดยผลการตอบสนองสามารถวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้จากผลเฉลยของสมการที่ (2.36) และ (2.37) พร้อมทั้งใช้การประมาณการไหลเป็นรูปวงรีในการอธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์จึงใช้หลักการระบบโครงสร้างหลักและระบบโครงสร้างรอง (Sub-

system) (Lukkunaprasit et al., 2001) ในการเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อหาผลการตอบสนองของระบบ 5DOF – LCVA

เนื่องจากผลการตอบสนองของระบบ 5DOF – LCVA จะอยู่ในรูปของการเคลื่อนที่ในแต่ละชั้น (Floor Displacement) ซึ่งจะแตกต่างกันไป ณ ตำแหน่งเวลาใด ๆ ที่มีความเร่งของแผ่นดินไหวมากกระทำ จึงต้องใช้การวัดทางสถิติสำหรับปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ วิธีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) วิธีนี้เหมาะสำหรับใช้วัดค่าที่มีฟังก์ชันเป็นคาบ (Periodic Function) ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังสองของข้อมูลจำนวน N ตัวที่ประกอบด้วยข้อมูล x_1, x_2, \dots, x_N หาได้ดังสมการที่ (4.8)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \quad (4.8)$$

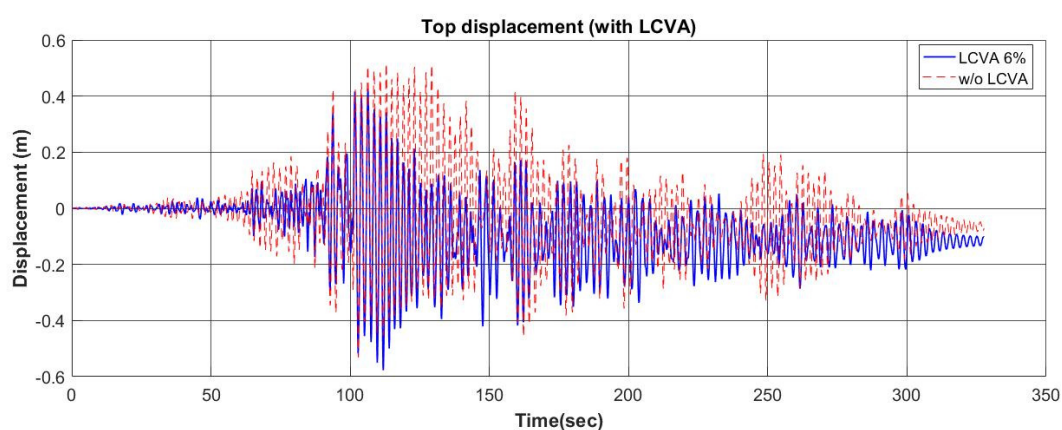
ผลการศึกษาประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวทั้ง 6 ชุดแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.5.1 ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3

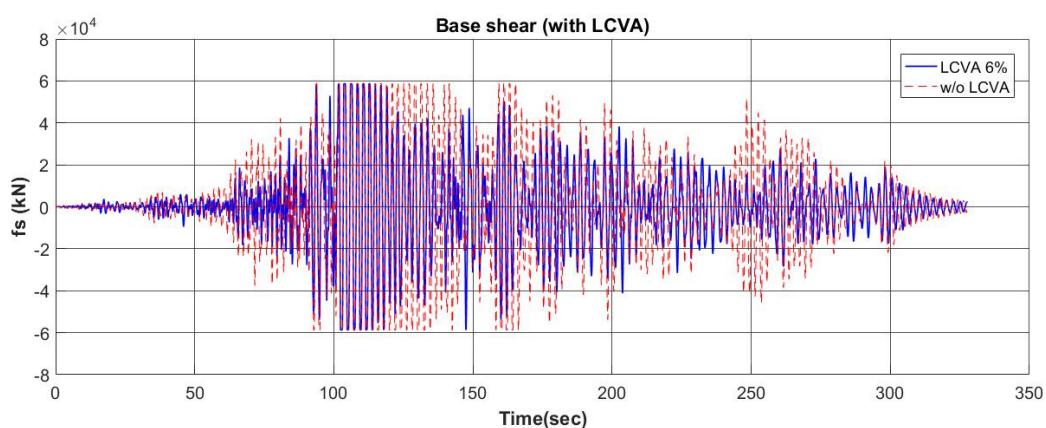
เนื่องจากสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3 มีความรุนแรงมากโดยมีค่า PGA สูงถึง 0.15g และมีความถี่เด่นที่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างตัวอย่างทำให้โครงสร้างเกิดการตอบสนองต่อความเร่งพื้นดินมากขึ้น และเนื่องจากความรุนแรงของการครากจะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณความเร่งแผ่นดินไหวที่ฐานของโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างตัวอย่างที่ไม่ได้ติดตั้ง LCVA มีการกระจัดที่เลยช่วงฮิสตริกทำให้เกิดการครากของเสาชั้นล่างสุดของโครงสร้างทั้งหมด 24 ครั้ง มีการกระจัดถาวรเกิดขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4-22 (ตั้งแต่วินาทีที่ 110 เป็นต้นไป) วัดค่าพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากของโครงสร้างได้ 224,150.47 kN·m (กิโลจูล)

เมื่อติดตั้ง LCVA เข้ากับโครงสร้าง การกระจัดของโครงสร้างมีค่าลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญในบางชั้นดังแสดงในตารางที่ 4-2 ถึงแม้การกระจัดของโครงสร้างจะลดลงแต่ก็ยังทำให้เกิดแรงเฉือนในเสาชั้นล่างดังแสดงในรูปที่ 4-23 ซึ่งเกิดการครากของเสาถึง 8 ครั้ง พลังงานที่สลายจากการครากของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA เหลือเพียง 71,919.15 ซึ่งลดลงถึง 67.91% เมื่อเทียบกับค่าพลังงานที่สลายเนื่องจากการครากของโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้ง LCVA แต่ก็ยังทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายโดยเกิดการกระจัดถาวรขึ้น จากรูปที่ 4-24 แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ถูกดูดซับผ่านแรงปฏิกริยา (Interaction

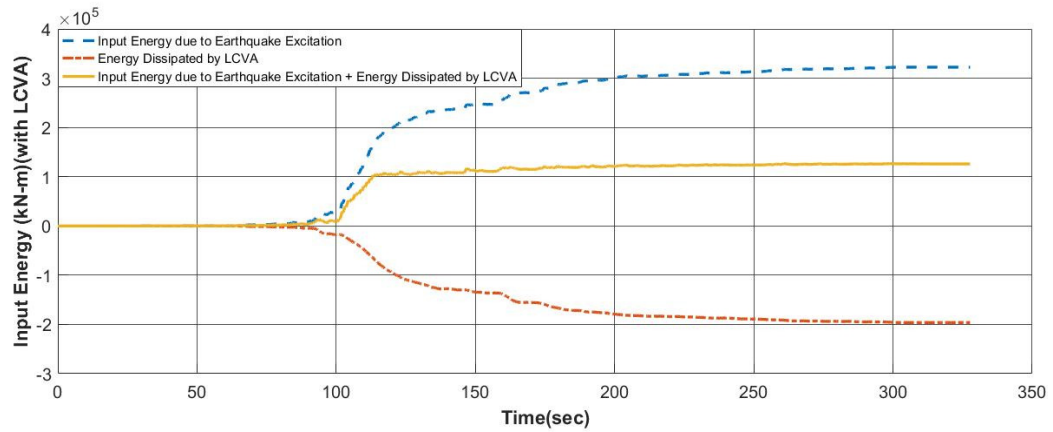
Force) จาก LCVA ดังรูปที่ 4-25 ยังไม่เพียงพอที่จะช่วยลดพลังที่เข้าสู่โครงสร้างอันเนื่องมาจากแรงแผ่นดินไหวเหตุการณ์นี้ ดังนั้นการติดตั้ง LCVA ให้กับโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวเหตุการณ์นี้ยังไม่สามารถลดความเสียหายของโครงสร้างได้ดีเท่าที่ควร



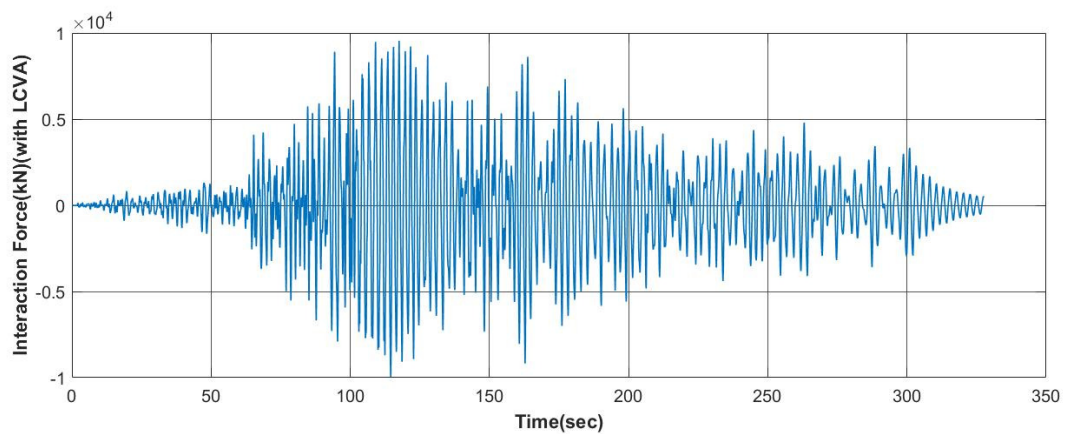
รูปที่ 4-22 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.15g



รูปที่ 4-23 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.15g



รูปที่ 4-24 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.15g



รูปที่ 4-25 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.15g

ตารางที่ 4-2 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3

DPT ZONE5 EQ3	Uncontrolled	With LCVA	% of reduction
Peak Displacement (m)	0.53	0.58	-8.64
No. of Yielding at Ground Floor Column (Times)	24	8	66.67
Dissipated Energy Dissipated in Bottom Storey (kN·m)	191390	50521	73.60
Dissipated Energy Dissipated in 2nd Storey (kN·m)	14625	5997.30	58.99
Dissipated Energy Dissipated in 3rd Storey (kN·m)	17569	14988	14.69
Dissipated Energy Dissipated in 4th Storey (kN·m)	566.47	412.85	27.12
Dissipated Energy Dissipated in 5th Storey (kN·m)	0	0	-
Total Energy Dissipated (kN·m)	224150.47	71919.15	67.91
RMS of Bottom Storey Displacement (m)	0.1445	0.062	57.09
RMS of 2nd Storey Displacement (m)	0.1082	0.0785	27.45
RMS of 3rd Storey Displacement (m)	0.1183	0.1218	-2.96
RMS of 4th Storey Displacement (m)	0.1392	0.1365	1.94
RMS of 5th Storey Displacement (m)	0.1485	0.1442	2.90

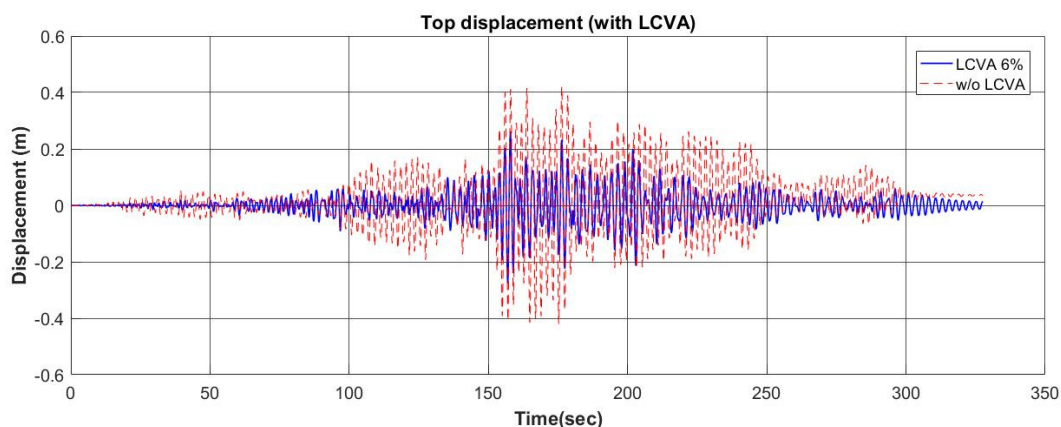
4.5.2 ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5

แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5 เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่า PGA เท่ากับ 0.078g และมีความถี่เด่นที่ 0.5 Hz ซึ่งทำให้เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้างตัวอย่าง ในกรณีที่เกิดการสั่นพ้องจะทำให้โครงสร้างเกิดการสั่นไหวมากขึ้นเนื่องจากแอมพลิจูดของการกระจัดของโครงสร้างจะถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นจากแอมพลิจูดความเร่งที่ฐานของโครงสร้างเมื่ออัตราการหน่วงของโครงสร้างมีค่าน้อย (Lightly Damped System) และเฟสของการกระจัดจะนำหน้าเฟสของความเร่งของการเคลื่อนตัวที่ฐานประมาณ 90 องศา

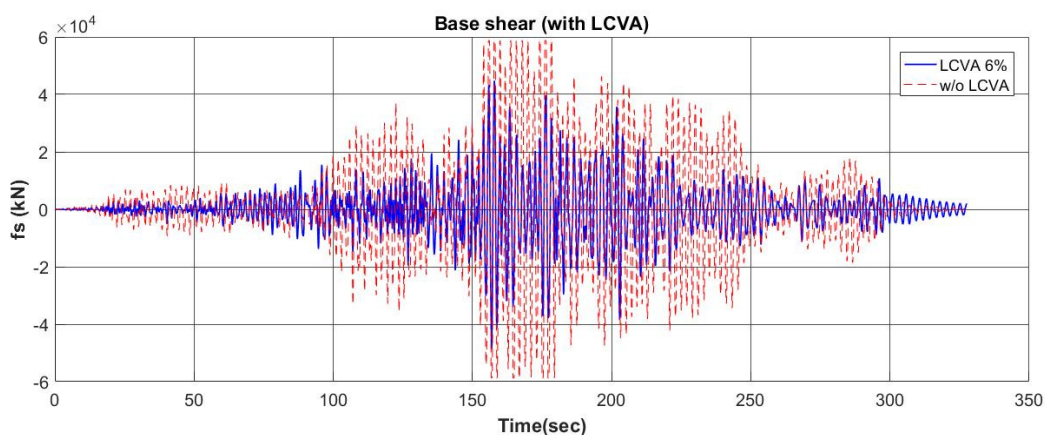
สำหรับโครงสร้างตัวอย่างที่ไม่ได้ติดตั้ง LCVA โครงสร้างจะเกิดการกระจัดสูงสุดสำหรับชั้นบนสุดอยู่ที่ 0.42 เมตร โครงสร้างเกิดความเสียหายมีการกระจัดที่เลยช่วงอิลาสติกตั้งแต่ชั้นล่างจนถึงชั้นที่ 4 และโครงสร้างเกิดการกระจัดถาวร แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาชั้นล่างสุดทำให้เกิดการครากของเสา 9 ครั้ง วัตพลังงานที่ถูกสลายเนื่องจากการครากของโครงสร้างได้ 35,867.82 kN·m

เมื่อติดตั้ง LCVA ให้กับโครงสร้างจะเห็นได้ว่าการกระจัดในแต่ละชั้นของโครงสร้างมีค่าลดลงรวมถึงการกระจัดที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างดังรูปที่ 4-26 สำหรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาชั้นล่างสุด (รูปที่ 4-27) ก็ลดลงอย่างเห็นได้ชัดไม่เกิดการครากขึ้นในโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างสันรอบจุดสมดุล

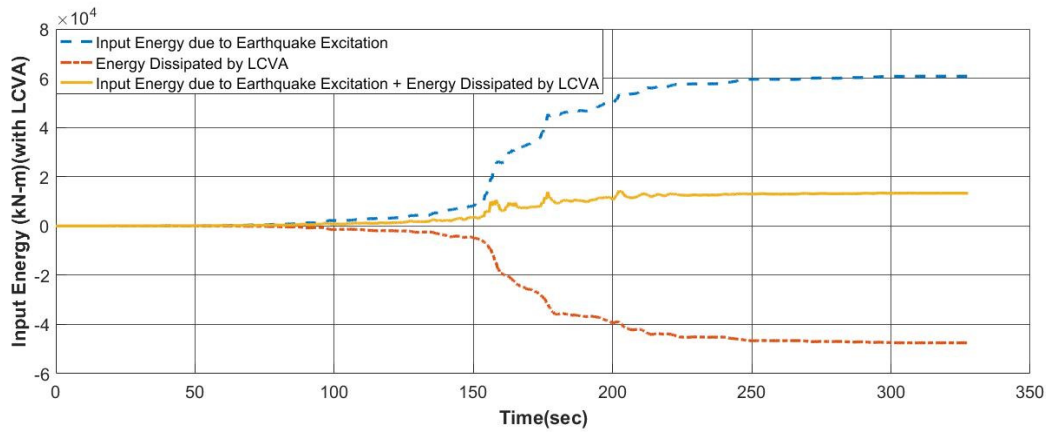
เดิมของโครงสร้าง ซึ่งก็คือจุดที่มีการกระจัดเท่ากับศูนย์ นั้นหมายถึง พลังงานเนื่องจากความเร่งของแผ่นดินไหวที่จะเข้าสู่โครงสร้างดังรูปที่ 4-28 ถูกดูดซับด้วยแรงปฏิกิริยาจาก LCVA ดังรูปที่ 4-29 ทำให้พลังที่เข้าสู่โครงสร้างไม่ทำให้โครงสร้างเกิดการคราก แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการช่วยลดการสั่นไหวและความเสียหายของโครงสร้างด้วย LCVA ได้เป็นอย่างดี



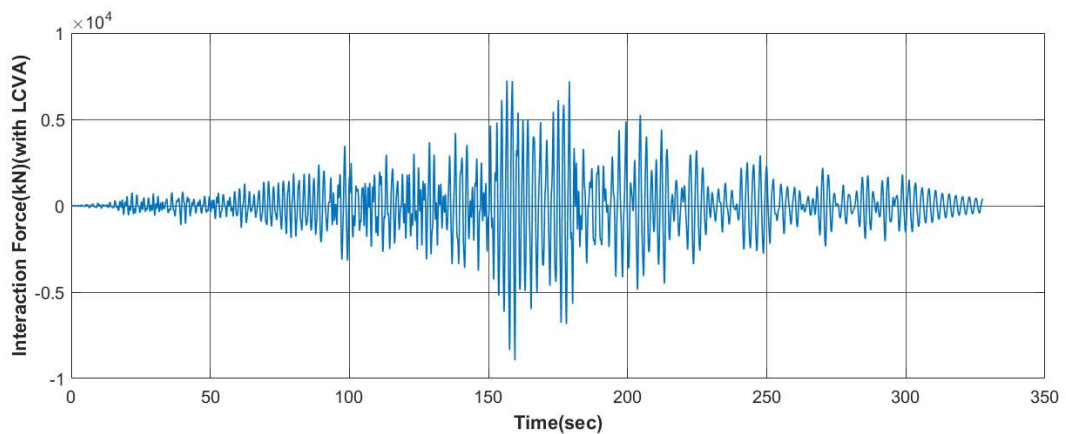
รูปที่ 4-26 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.078g



รูปที่ 4-27 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.078g



รูปที่ 4-28 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.078g



รูปที่ 4-29 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5 ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.078g

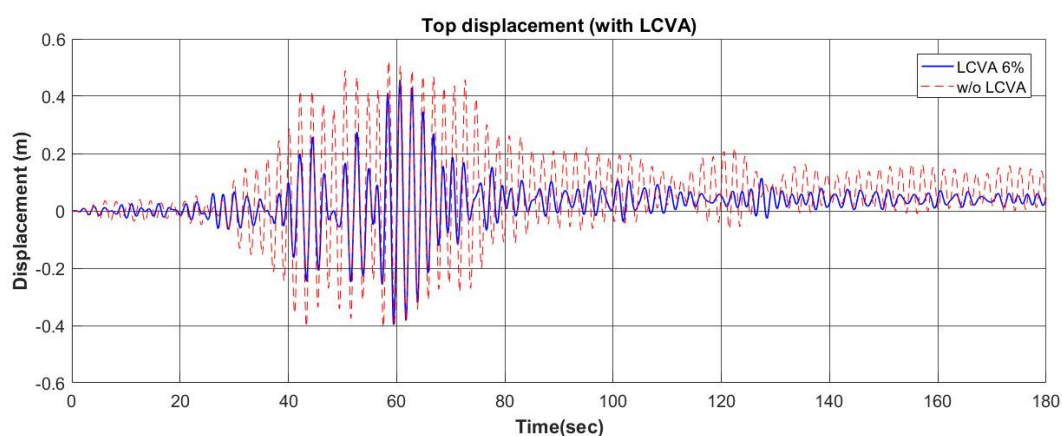
ตารางที่ 4-3 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5

DPT ZONE5 EQ5	Uncontrolled	With LCVA	% of reduction
Peak Displacement (m)	0.42	0.277	34.30
No. of Yielding at Ground Floor Column (Times)	9	0	100
Dissipated Energy Dissipated in Bottom Storey (kN-m)	32282	0	100
Dissipated Energy Dissipated in 2nd Storey (kN-m)	1863.80	0	100
Dissipated Energy Dissipated in 3rd Storey (kN-m)	1695.20	0	100
Dissipated Energy Dissipated in 4th Storey (kN-m)	26.82	0	100
Dissipated Energy Dissipated in 5th Storey (kN-m)	0	0	-
Total Energy Dissipated (kN-m)	35867.82	0	100
RMS of Bottom Storey Displacement (m)	0.0720	0.0147	79.58
RMS of 2nd Storey Displacement (m)	0.0711	0.0271	61.88
RMS of 3rd Storey Displacement (m)	0.0830	0.0382	53.98
RMS of 4th Storey Displacement (m)	0.0990	0.0486	52.73
RMS of 5th Storey Displacement (m)	0.1064	0.0515	51.60

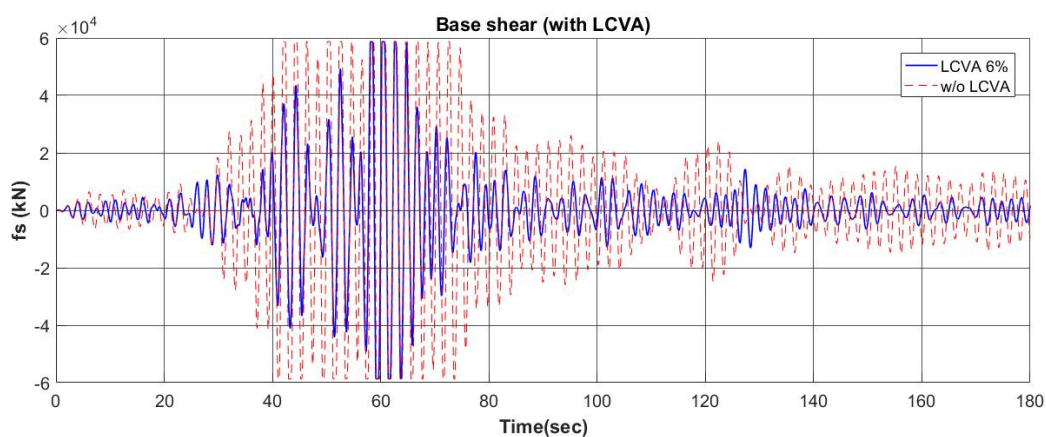
4.5.3 ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico

สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico มีค่า PGA เท่ากับ 0.1g และมีคาบเด่นอยู่ที่ 2 วินาที ทำให้เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้างทำให้โครงสร้างเกิดการสั่นไหวมากขึ้น รูปที่ 4-30 และ รูปที่ 4-31 แสดงให้เห็นการกระจัดของชั้นบนสุดของโครงสร้างและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาชั้นล่างสุดของโครงสร้างจะเห็นได้ว่าการกระจัดสูงสุดที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ลดลง 13.16 % เมื่อเทียบกับโครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้ง LCVA สำหรับโครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้ง LCVA การกระจัดของชั้นล่างสุดของโครงสร้างทำให้เสาชั้นนั้นเข้าสู่สภาพพลาสติกจำนวน 12 รอบ ซึ่งเป็นที่น่าสนใจเมื่อ จำนวนการครากของเสาชั้นล่างสุดจะมีค่าลดลงประมาณ 75% เมื่อติดตั้ง LCVA ให้กับโครงสร้าง แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า LCVA สามารถช่วยลดความเสียหายของโครงสร้างได้ค่อนข้างดีสังเกตได้จากพลังงานที่สลายด้วยการครากของเสาชั้นล่างสุดซึ่งคิดเป็น 80% ของพลังงานทั้งหมดที่สลายด้วยการครากสำหรับโครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้ง LCVA แต่สำหรับโครงสร้างที่มีการติดตั้ง LCVA นั้น พลังงานที่สลายด้วยการครากของเสาชั้นล่างสุดจะเหลือแค่ 20% ของพลังงานจากการครากที่เสาชั้นล่างของโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้ง LCVA สำหรับแผ่นดินไหวเหตุการณ์นี้ถึงแม้ว่าโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA จะเกิดการกระจัดถาวรเกิดขึ้นแต่ก็เกิดห่างจุดสมดุลไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

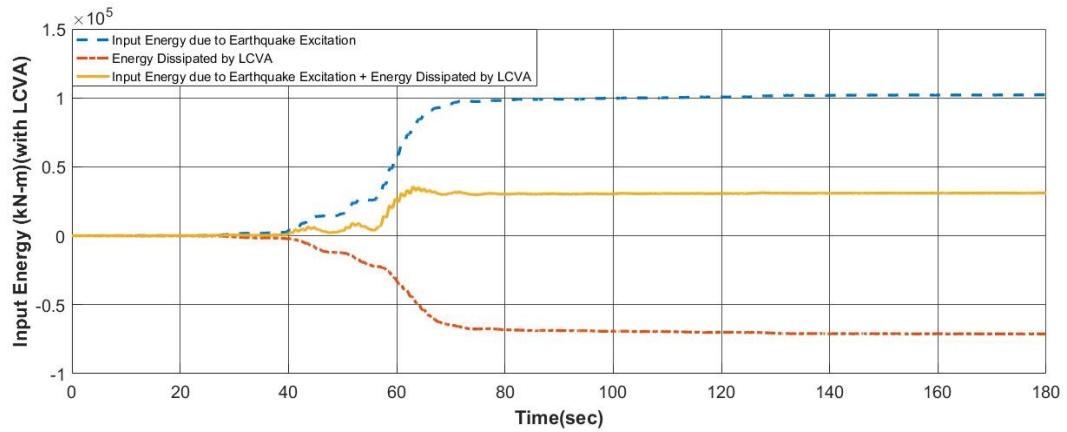
จากพลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างจากรูปที่ 4-32 จะเห็นได้ว่าพลังงานที่ถูกดูดซับผ่านแรงปฏิกิริยาจาก LCVA ดังรูปที่ 4-33 จะทำให้พลังงานที่ต้องสลายด้วยกลไกของโครงสร้างเองมีค่าน้อยลงซึ่งช่วยลดความเสียหายของโครงสร้างลงได้



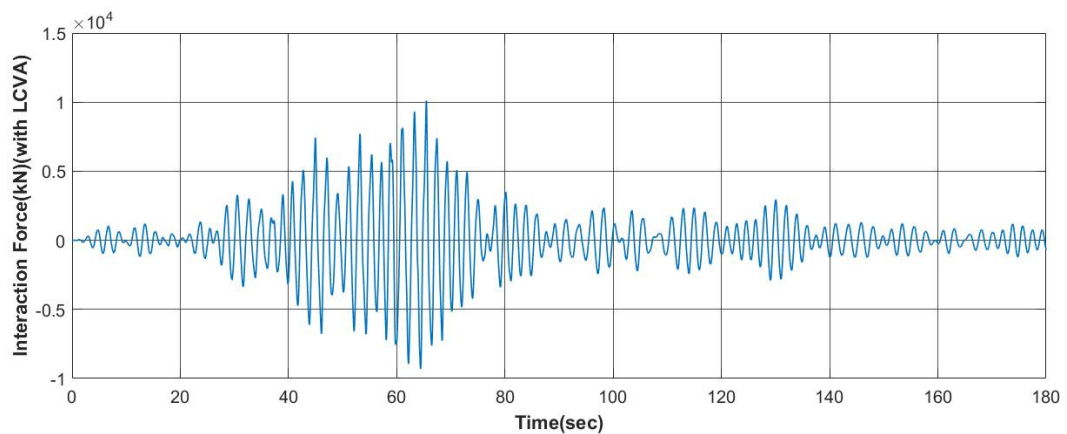
รูปที่ 4-30 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g



รูปที่ 4-31 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g



รูปที่ 4-32 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g



รูปที่ 4-33 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g

ตารางที่ 4-4 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico

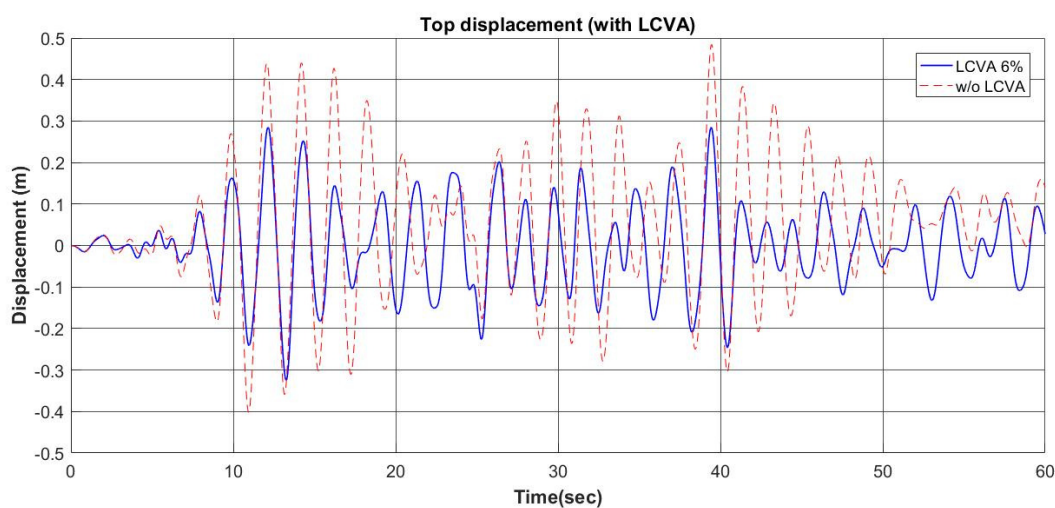
1985 SCT Mexico	Uncontrolled	With LCVA	% of reduction
Peak Displacement (m)	0.53	0.456	13.16
No. of Yielding at Ground Floor Column (Times)	12	3	75
Dissipated Energy Dissipated in Bottom Storey (kN·m)	90066	14320	15.90
Dissipated Energy Dissipated in 2nd Storey (kN·m)	5120.30	244.17	4.77
Dissipated Energy Dissipated in 3rd Storey (kN·m)	5677.30	1086.10	19.13
Dissipated Energy Dissipated in 4th Storey (kN·m)	0	0	-
Dissipated Energy Dissipated in 5th Storey (kN·m)	0	0	-
Total Energy Dissipated (kN·m)	100863.60	15650.27	15.52
RMS of Bottom Storey Displacement (m)	0.083	0.038	54.48
RMS of 2nd Storey Displacement (m)	0.103	0.053	48.25
RMS of 3rd Storey Displacement (m)	0.123	0.067	45.06
RMS of 4th Storey Displacement (m)	0.141	0.079	44.26
RMS of 5th Storey Displacement (m)	0.150	0.085	43.45

4.5.4 ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 1995 Bangkok

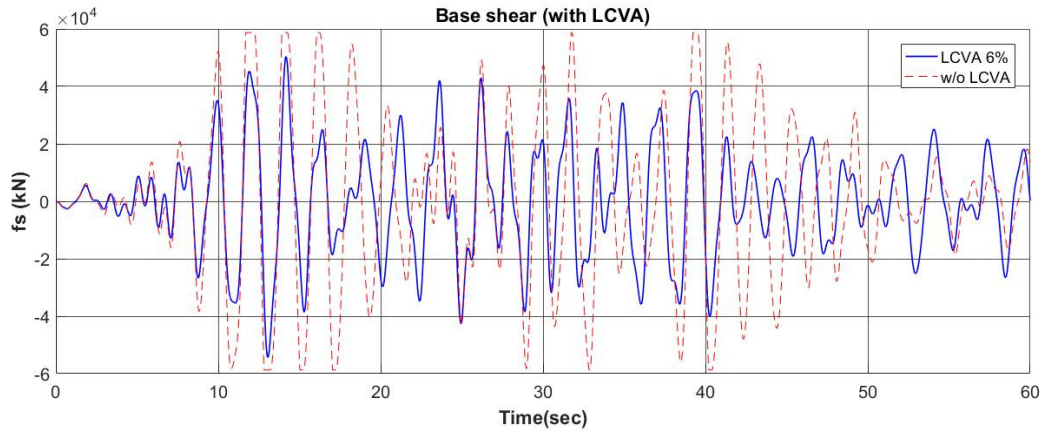
สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 1995 Bangkok มีลักษณะคลื่นคล้ายกับสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico กล่าวคือ เป็นคลื่นที่เกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีจุดกำเนิดอยู่ห่างไกลจากจุดวัด ทำให้มีลักษณะความกว้างของคลื่นที่แคบ (Narrow Band) มีคาบหลักอยู่ที่ 2 วินาที แต่สิ่งที่แตกต่างออกไปนั้นคือ จากสเปกตรัมผลตอบแทนเนื่องจากแผ่นดินไหว 1995 Bangkok ดังรูปที่ 4-13 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear Coefficient) ที่ต่ำกว่าเหตุการณ์แผ่นดินไหว 1985 SCT Mexico นั้นหมายถึง การตอบสนองและความเสียหายของโครงสร้างจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในครั้งนี้จะน้อยกว่าเหตุการณ์ 1985 SCT Mexico

สำหรับโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้ง LCVA ภายใต้การกระตุ้นด้วยสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวเหตุการณ์นี้ จะทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย โครงสร้างมีการกระจัดเลยช่วงอิลาสติกตั้งแต่ชั้นล่างจนถึงชั้นที่สาม โครงสร้างมีการกระจัดถาวรเกิดขึ้นประมาณวินาทีที่ 40 เป็นต้นไป แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาชั้นล่างของโครงสร้าง ทำให้เสาเกิดการครากขึ้น 5 ครั้ง

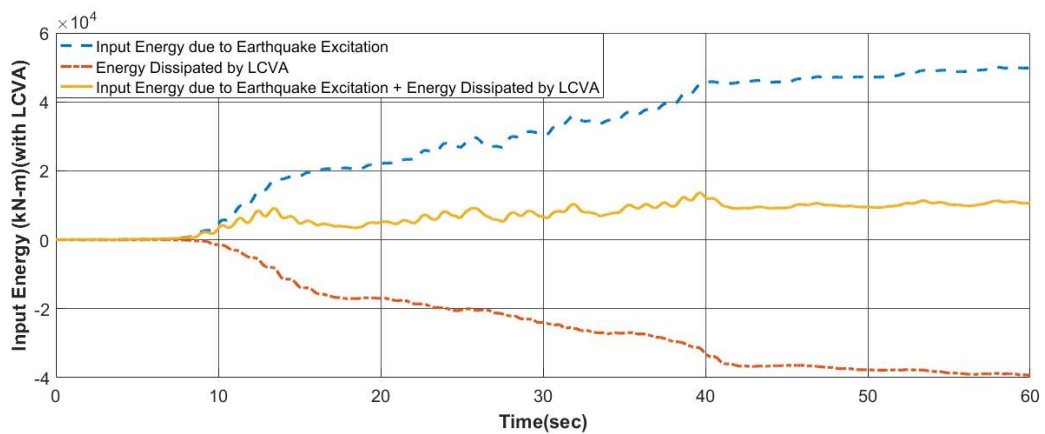
เมื่อติดตั้ง LCVA ให้กับโครงสร้าง จากรูปที่ 4-34 และ ตารางที่ 4-5 จะเห็นว่าค่าการกระจัดสูงสุดของชั้นบนสุดของโครงสร้าง และ ค่าการกระจัดของชั้นอื่น ๆ ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทำให้โครงสร้างไม่เกิดการคราก การสั่นของโครงสร้างยังสั้นรอบสมมูลเดิม (การกระจัดเท่ากับ 0) จากรูปที่ 4-36 พลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างถูกดูดซับด้วยแรงปฏิกิริยาจาก LCVA (รูปที่ 4-37) ทำให้พลังงานที่ต้องสลายด้วยตัวโครงสร้างเหลือน้อยลงทำให้โครงสร้างไม่เกิดความเสียหาย แสดงให้เห็นว่า LCVA มีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างทำให้โครงสร้างไม่เกิดความเสียหายภายใต้การกระตุ้นจากความเร่งพื้นดินของแผ่นดินไหวเหตุการณ์นี้



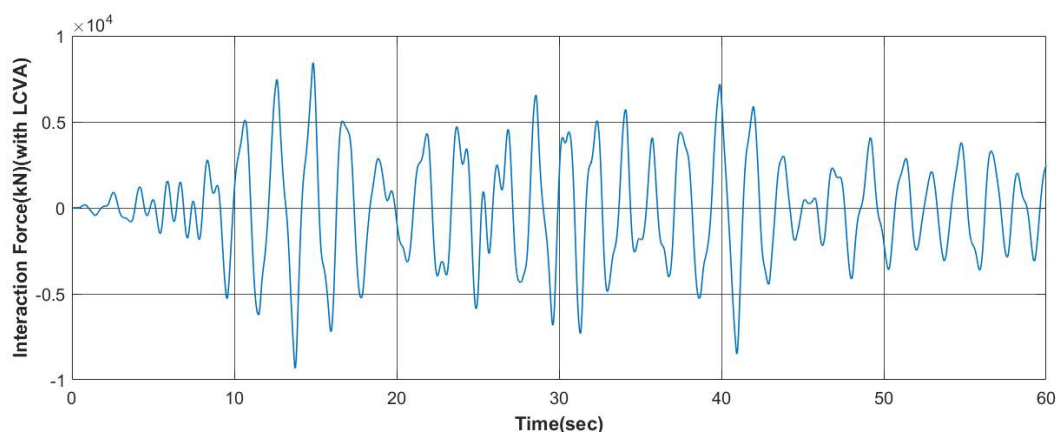
รูปที่ 4-34 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1995 Bangkok ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g



รูปที่ 4-35 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1995 Bangkok ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g



รูปที่ 4-36 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1995 Bangkok ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g



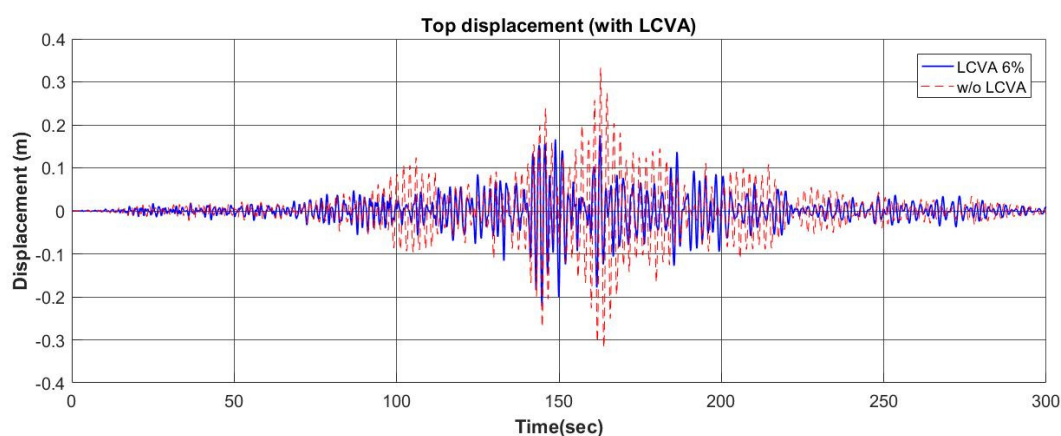
รูปที่ 4-37 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว 1995 Bangkok ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.1g

ตารางที่ 4-5 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 1995 Bangkok

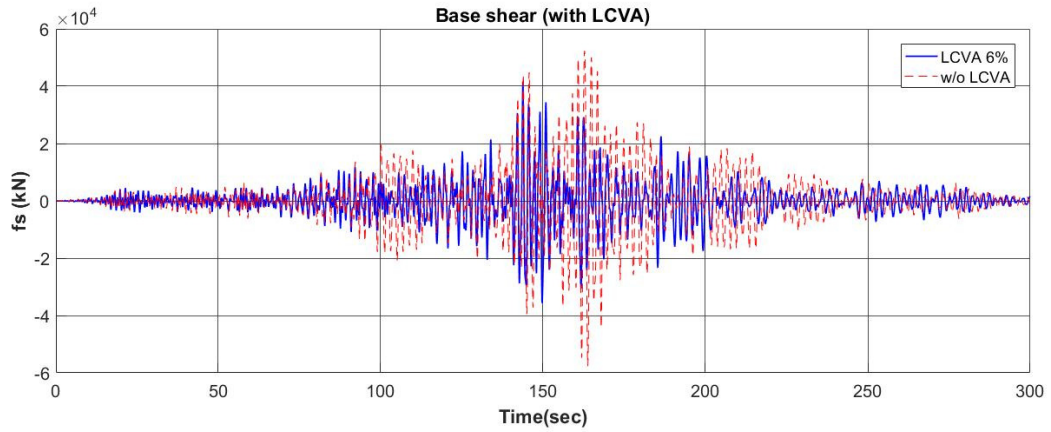
1995 Bangkok	Uncontrolled	With LCVA	% of reduction
Peak Displacement (m)	0.484	0.324	33.33
No. of Yielding at Ground Floor Column (Times)	5	0	100
Dissipated Energy Dissipated in Bottom Storey (kN·m)	16746	0	100
Dissipated Energy Dissipated in 2nd Storey (kN·m)	1679	0	100
Dissipated Energy Dissipated in 3rd Storey (kN·m)	1662.70	0	100
Dissipated Energy Dissipated in 4th Storey (kN·m)	0	0	-
Dissipated Energy Dissipated in 5th Storey (kN·m)	0	0	-
Total Energy Dissipated (kN·m)	20087.7	0	100
RMS of Bottom Storey Displacement (m)	0.087	0.030	65.43
RMS of 2nd Storey Displacement (m)	0.114	0.055	51.72
RMS of 3rd Storey Displacement (m)	0.133	0.077	41.93
RMS of 4th Storey Displacement (m)	0.156	0.094	39.76
RMS of 5th Storey Displacement (m)	0.167	0.103	38.36

4.5.5 ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku

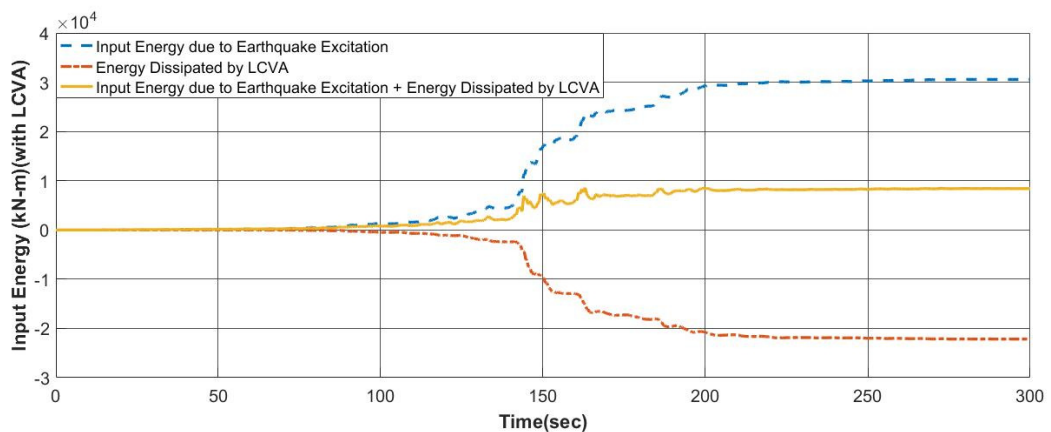
สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวเหตุการณ์นี้มีค่า PGA เท่ากับ 0.065g และมีคาบเด่นใกล้เคียง 1 วินาที ทำให้ไม่เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้าง จะเห็นได้ว่าที่ขนาดของสัญญาณความเร่งแผ่นดินไหวระดับนี้ โครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้ง LCVA การกระจัดในแต่ละชั้นของโครงสร้างไม่เกินช่วงอิลาสติกเลย โครงสร้างสั่นรอบจุดสมดุลเดิมทำให้โครงสร้างไม่เกิดการกระจัดถาวร การกระจัดสูงสุดของชั้นบนสุดของโครงสร้างอยู่ที่ 0.333 เมตร เมื่อติดตั้ง LCVA ให้กับโครงสร้างจากรูปที่ 4-38 และตารางที่ 4-6 จะเห็นได้ว่าการกระจัดสูงสุดของชั้นบนสุดของโครงสร้างลดลง 33.26 % จากโครงสร้างที่ไม่ได้มีการติดตั้ง LCVA และการกระจัดในแต่ละชั้นลดลงอยู่ที่ 30% ถึง 36 % แสดงให้เห็นว่า LCVA สามารถลดการกระจัดของโครงสร้างได้ในระดับหนึ่งสำหรับโครงสร้างที่ไม่เกิดการครากภายใต้การกระตุ้นของความเร่งแผ่นดินไหว พลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างและแรงปฏิกิริยาจาก LCVA แสดงได้ดังรูปที่ 4-40 และ รูปที่ 4-41 ตามลำดับ



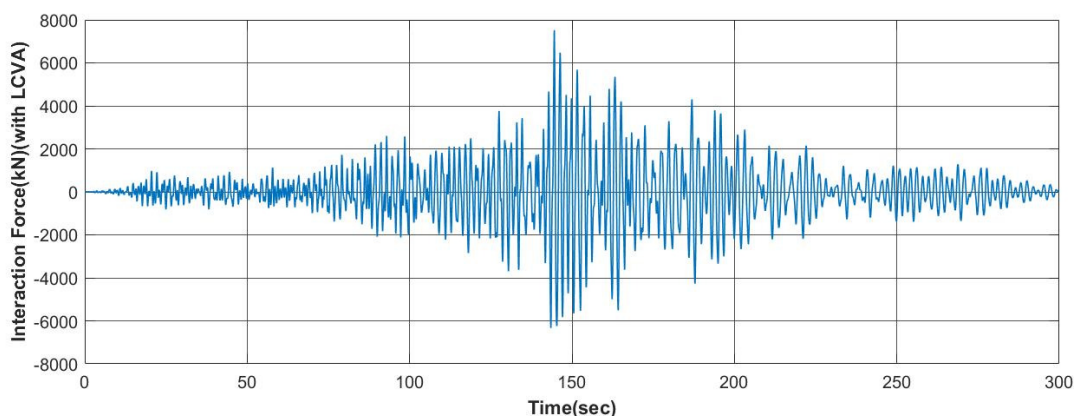
รูปที่ 4-38 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.065g



รูปที่ 4-39 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.065g



รูปที่ 4-40 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.065g



รูปที่ 4-41 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.065g

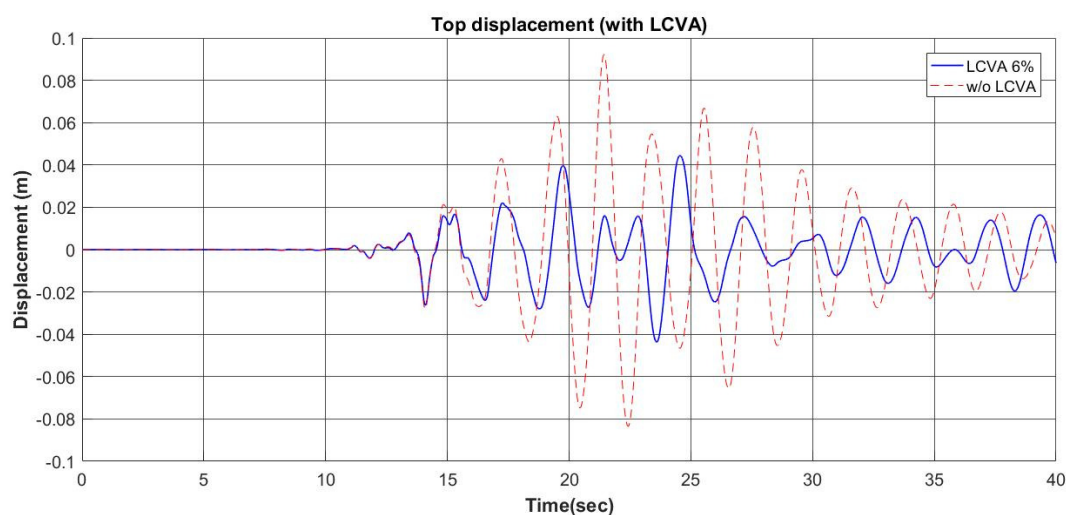
ตารางที่ 4-6 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku

2011 Amplified Tohoku	Uncontrolled	With LCVA	% of reduction
Peak Displacement (m)	0.333	0.222	33.26
No. of Yielding at Ground Floor Column (Times)	0	0	-
RMS of Bottom Storey Displacement (m)	0.016	0.011	31.88
RMS of 2nd Storey Displacement (m)	0.030	0.020	33.78
RMS of 3rd Storey Displacement (m)	0.042	0.028	34.67
RMS of 4th Storey Displacement (m)	0.052	0.034	35.26
RMS of 5th Storey Displacement (m)	0.056	0.036	36.06

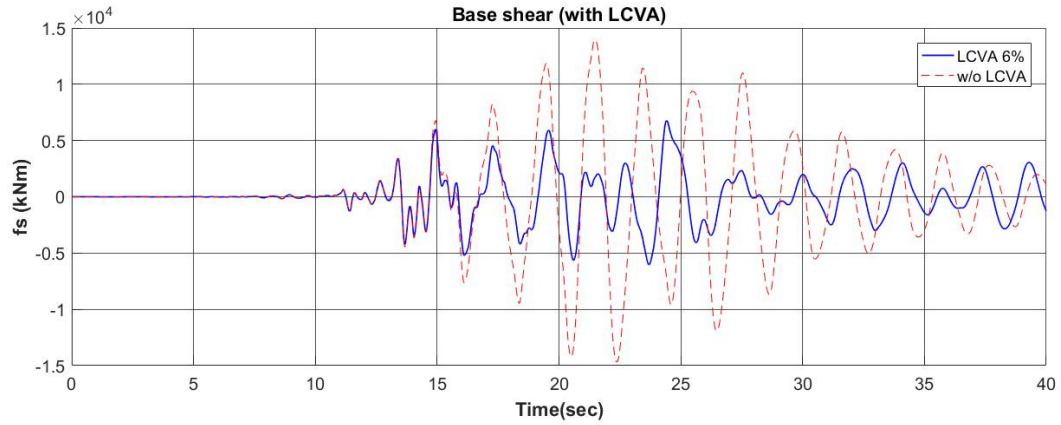
4.5.6 ประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 2014 Mae Lao

สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวแผ่นดินไหว 2014 Mae Lao เป็นสัญญาณที่มีค่า PGA เท่ากับ 0.09g คาบเด่นอยู่ที่ประมาณ 0.18 วินาที ทำให้ไม่เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้างตัวอย่างสำหรับโครงสร้างที่ไม่ติดตั้ง LCVA มีค่าการกระจัดสูงสุดของชั้นบนสุดอยู่ที่ 0.092 เมตร (รูปที่ 4-42) การกระจัดในแต่ละชั้นไม่เกินช่วงฮิสตริกแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาชั้นล่างสุด (รูปที่ 4-43) ไม่ทำให้เกิดการครากเสา ทำให้โครงสร้างไม่เกิดความเสียหาย ไม่มีการกระจัดถาวรเกิดขึ้น

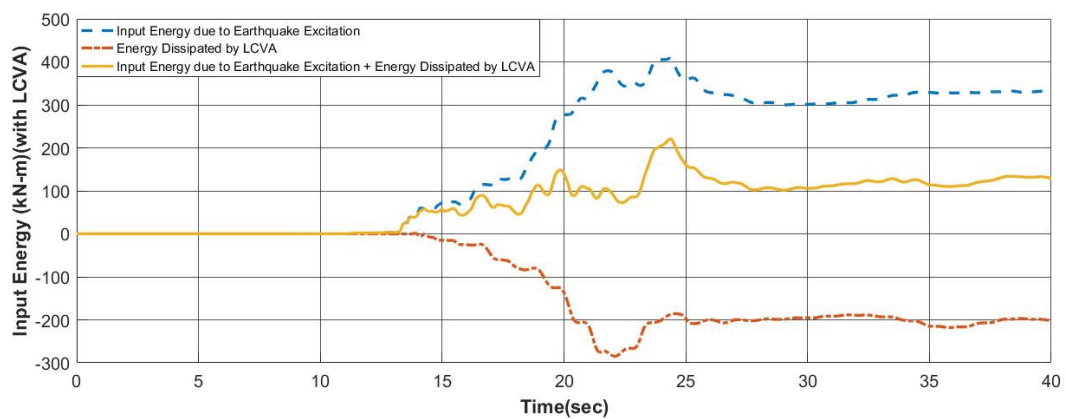
ถึงแม้ว่ากรณีนี้โครงสร้างไม่เกิดความเสียหายแต่การกระจัดของชั้นบนสุดของโครงสร้างยังมีค่าสูง ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกได้ถึงการสั่นสะเทือนทำให้เกิดความรู้สึกไม่ปลอดภัย ดังนั้นการติดตั้ง LCVA เพื่อควบคุมการสั่นไหวจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ สำหรับโครงสร้างตัวอย่างนี้เมื่อติดตั้ง LCVA การตอบสนองของโครงสร้างต่อความเร่งของแผ่นดินไหวเหตุการณ์นี้ลดลงโดยการกระจัดสูงสุดของชั้นบนสุดลดลง 51.79% และการกระจัดในชั้นต่าง ๆ ของโครงสร้างลดลงอยู่ระหว่าง 53 % ถึง 58% จะเห็นได้ว่าพลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างดังรูปที่ 4-44 มีค่าน้อยลงโดยมีแรงปฏิกิริยาจาก LCVA ดังรูปที่ 4-45 ช่วยในการสลายพลังงานทำให้ LCVA สามารถช่วยลดการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้ความเร่งของแผ่นดินไหวเหตุการณ์นี้ได้เป็นอย่างดี



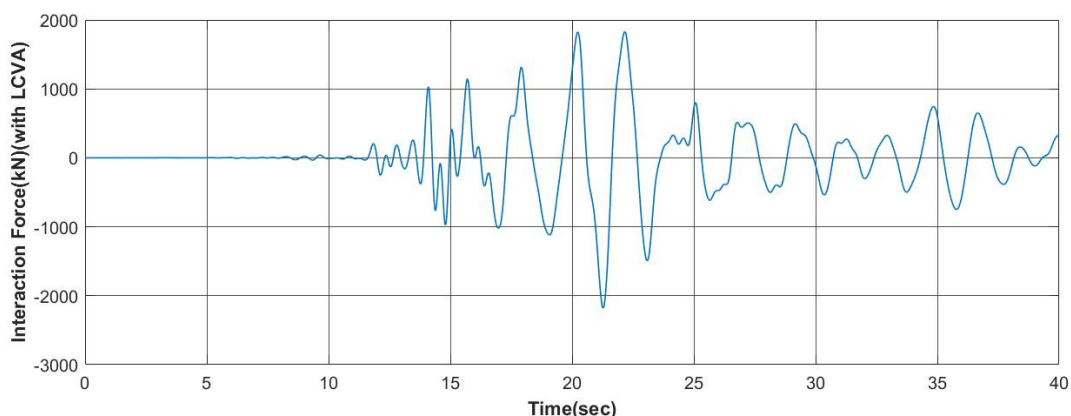
รูปที่ 4-42 กราฟเปรียบเทียบการกระจัดของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2014 Mae Lao ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.09g



รูปที่ 4-43 กราฟเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA และไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2014 Mae Lao ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.09g



รูปที่ 4-44 พลังงานที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.09g



รูปที่ 4-45 แรงปฏิกริยา (Interaction Force) จาก LCVA ที่ติดอยู่บนชั้นบนสุดของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว 2014 Mae Lao ที่เวลาใด ๆ เมื่อ PGA ของสัญญาณแผ่นดินไหวเท่ากับ 0.09g

ตารางที่ 4-7 สรุปผลการจำลองระหว่างโครงสร้างตัวอย่างที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง LCVA ภายใต้แผ่นดินไหว 2014 Mae Lao

2014 Mae Lao	Uncontrolled	With LCVA	% of reduction
Peak Displacement (m)	0.092	0.044	51.79
No. of Yielding at Ground Floor Column (Times)	0	0	-
RMS of Bottom Storey Displacement (m)	0.008	0.003	58.44
RMS of 2nd Storey Displacement (m)	0.014	0.006	58.33
RMS of 3rd Storey Displacement (m)	0.020	0.009	57.35
RMS of 4th Storey Displacement (m)	0.025	0.011	56.45
RMS of 5th Storey Displacement (m)	0.027	0.012	53.93

4.6 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว

โครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว ถึงแม้ว่าโครงสร้างนั้นจะตั้งอยู่ห่างจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวหรือรอยเลื่อนที่มีพลังก็อาจจะทำให้โครงสร้างได้รับความเสียหายจากแรงแผ่นดินไหวได้ โดยแรงแผ่นดินไหวที่ห่างจากจุดกำเนิด (Long-Distance Earthquake) ที่พิจารณาในการศึกษานี้จะมีลักษณะของคลื่นความเร่งที่คล้ายฟังก์ชันฮาร์โมนิก (Harmonic - Like) และมีคาบเด่นแตกต่างกันออกไป

จากการศึกษาสามารถแบ่งขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหวออกแบบ 3 ขนาด คือ แผ่นดินไหวความรุนแรงขนาดเล็ก (แผ่นดินไหวที่มีค่า PGA ตั้งแต่ 40 gal ถึง 70 gal) ประกอบด้วย สัญญาณแผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku, แผ่นดินไหวความรุนแรงขนาดกลาง (แผ่นดินไหวที่มีค่า PGA ตั้งแต่ 70 gal ถึง 100 gal) ประกอบด้วย สัญญาณแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5, 1985 SCT Mexico, 1995 Bangkok และ 2014 Mae Lao, และแผ่นดินไหวความรุนแรงขนาดใหญ่ (แผ่นดินไหวที่มีค่า PGA ตั้งแต่ 100 gal ขึ้นไป) ประกอบด้วย สัญญาณแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3

โครงสร้างตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นตัวแทนของกลุ่มอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครที่มีความสูงประมาณ 43 ชั้น โดยถูกนำมาโมเดลอย่างง่ายด้วยโครงเฟรมที่มีระดับขั้นด็กกรีอิสระ (Degree-of-Freedom) เท่ากับ 5 และมีพฤติกรรมแบบอีลาสโตพลาสติก (Elastoplastic Behavior) โดยมี คาบธรรมชาติ (Natural Period) ของตึกเท่ากับ 2 วินาที (ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 0.5 Hz) อัตราหน่วงของโครงสร้าง (Damping Ratio of Structure, β) เท่ากับ 2%

จากลักษณะพฤติกรรมของโครงสร้างตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงขนาดเล็กและขนาดกลางที่ไม่เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้าง (กรณีสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku และ 2014 Mae Lao) สังเกตได้ว่าโครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้ง LCVA มีการสั่นไหวอยู่ในช่วง อีลาสติก โครงสร้างไม่มีความเสียหาย ไม่มีการครากและการกระจัดถาวรเกิดขึ้น การติดตั้ง LCVA ให้กับโครงสร้างสามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างลงได้ จากการศึกษาพบว่าสามารถลดการสั่นไหวในแต่ละชั้นของโครงสร้างลงได้อยู่ในช่วง 30% ถึง 50% ดังนั้นสำหรับแผ่นดินไหวขนาดเล็กและขนาดกลางที่ไม่ทำให้เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้าง LCVA จะสามารถช่วยลดพลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างและควบคุมการสั่นไหวได้เป็นอย่างดี

สำหรับแผ่นดินไหวขนาดกลางที่มีคาบเด่นใกล้เคียงกับคาบธรรมชาติของโครงสร้างและทำให้เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้าง (กรณีสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5, 1985 SCT Mexico, และ 1995 Bangkok) โครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้ง LCVA มีการสั่นไหวเลยช่วงอีลาสติกในแต่ละชั้น ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายและมีการกระจัดถาวรเกิดขึ้น เมื่อติดตั้ง LCVA .ให้กับโครงสร้างพบว่า สามารถลดการกระจัดในแต่ละชั้นของโครงสร้างลงได้มากกว่า 40% ทำให้โครงสร้างไม่เกิดความเสียหายหรือมีความเสียหายลดลงอย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตาม สำหรับแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงขนาดใหญ่ (กรณีสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3) โครงสร้างทั้งที่ไม่มีการติดตั้ง LCVA และมีติดตั้ง LCVA มีการสั่นไหวที่เลยช่วงอีลาสติกในแต่ละชั้น ทำให้โครงสร้างเกิดการคราก ถึงแม้ LCVA จะช่วยลดจุดซับพลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างได้บ้างแต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะลดความเสียหายของโครงสร้างลงได้ โดยโครงสร้างยังคงเกิด

การกระจัดถาวรเกิดขึ้นซึ่งใกล้เคียงกับกับโครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้ง LCVA ดังนั้น การติดตั้ง LCVA ไม่สามารถช่วยควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงขนาดใหญ่ได้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอนไม่คงที่ (Liquid Column Vibration Absorber, LCVA) ในการตอบสนองต่อการสั่นไหว โดยใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี (Elliptical Flow Path Estimation Method) ในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของของเหลว และ ศึกษาประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA โดยใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของของเหลว ภายใต้การกระตุ้นของแรงแผ่นดินไหวที่ห่างจากจุดกำเนิด (Long-Distance Earthquakes)

ในการศึกษาจะเปรียบเทียบผลการจำลองการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA จำนวน 3 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีขนาดพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล (Transition Zone) แตกต่างกันไปประกอบด้วยขนาดพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่โดยมีอัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบเท่ากับ 0.35, 0.52 และ 0.75 มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 0.49 Hz, 0.51 Hz และ 0.53 Hz ตามลำดับ เปรียบเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าของ LCVA ทั้งสามตัวภายใต้การกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่ต่าง ๆ ของ P.Chaiririyawong (2007) LCVA ทั้งสามตัวจะถูกจำลองด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลของ Gao and Kwok (1997) หรือ Chang and Hsu (1998) และ วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีในการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ทั้งสามตัวด้วยโปรแกรม MATLAB จากการศึกษาพบว่า การทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล สำหรับ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดเล็ก สามารถทำนายได้ดีทั้งค่าความถี่ธรรมชาติและผลการตอบสนองต่อคลื่นความถี่ตามช่วงเวลา (Time-History Response) ผลการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลสำหรับ LCVA ชนิดที่ 1 นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 9.88% สำหรับการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA และ 12.59% สำหรับแรงปฏิกิริยาจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA (Interaction Force) แต่ผลการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของวิธีนี้จะแย่งเมื่อพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วการไหลของ LCVA มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยผลการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลสำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 และ 3 ที่ความถี่ 0.51 Hz และ 0.53 Hz ที่ทำให้เกิดการสั่น

พ้องเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 54.50% และ 155.81% สำหรับการเคลื่อนที่ของของเหลว 60.04% และ 172.19% สำหรับแรงปฏิกิริยาจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA ตามลำดับ สำหรับวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสามารถทำนายผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดเล็กได้ใกล้เคียงกับวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล แต่จะสามารถทำนายผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดกลางและขนาดใหญ่ได้ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าความคลาดเคลื่อนของ LCVA ชนิดที่ 1 อยู่ที่ 9.84% และ 13.30% , LCVA ชนิดที่ 2 มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่อยู่ที่ 3.84% และ 1.52% และ LCVA ชนิดที่ 3 มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 5.52% และ 3.78% สำหรับการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA และ แรงปฏิกิริยาจากการไหลของของเหลวภายใน LCVA ตามลำดับ จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสามารถทำนายผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดใหญ่ได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากวิธีนี้สามารถจำลองความยาวประสิทธิผลบริเวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงการไหลได้ถูกต้องและสอดคล้องกับพฤติกรรมจากการทดสอบบนโต๊ะเขย่ามากกว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล ส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติของ LCVA และผลการตอบสนองต่อความถี่มีความถูกต้องมากขึ้น และเนื่องจากวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีนั้นมีประสิทธิภาพในการทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดเล็กได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงแนะนำให้อัตราส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบของ LCVA ที่มีค่ามากกว่า 0.3 เป็น LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดใหญ่ซึ่งแนะนำให้ใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีในการทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างที่ติดตั้ง LCVA นั้นได้ใช้โครงสร้างตัวอย่างซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูงประมาณ 43 ชั้นที่ตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยถูกนำมาโมเดลอย่างง่ายด้วยโครงเฟรมที่มีระดับชั้นดิกกรีอิสระ (Degree-of-Freedom) เท่ากับ 5 และมีพฤติกรรมแบบอีลาสโตพลาสติก (Elastoplastic Behavior) โดยมี คาบธรรมชาติ (Natural Period) ของตึกเท่ากับ 2 วินาที อัตราหน่วงของโครงสร้าง (Damping Ratio of structure, β) เท่ากับ 2% และออกแบบ LCVA ให้เหมาะสมกับโครงสร้างตัวอย่างโดยใช้หลักการออกแบบจากการศึกษาของ FAHIM SADEK และคณะ ในปี ค.ศ.1998 สำหรับสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวจะใช้สัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหวจริงที่ไกลจากจุดกำเนิด (Long-Distance Earthquake) ที่มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณฮาร์โมนิก (Harmonic - Like) ซึ่งสามารถแบ่งขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหวออกแบบ 3 ขนาด คือ แผ่นดินไหวความรุนแรงขนาด

เล็ก (แผ่นดินไหวที่มีค่า PGA ตั้งแต่ 40 gal ถึง 70 gal) ประกอบด้วย สัญญาณแผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku, แผ่นดินไหวความรุนแรงขนาดกลาง (แผ่นดินไหวที่มีค่า PGA ตั้งแต่ 70 gal ถึง 100 gal) ประกอบด้วย สัญญาณแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5, 1985 SCT Mexico, 1995 Bangkok และ 2014 Mae Lao, และแผ่นดินไหวความรุนแรงขนาดใหญ่ (แผ่นดินไหวที่มีค่า PGA ตั้งแต่ 100 gal ขึ้นไป) ประกอบด้วย สัญญาณแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3

จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวความรุนแรงขนาดเล็กและขนาดกลางที่ไม่เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้าง (กรณีสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว 2011 Amplified Tohoku และ 2014 Mae Lao) พบว่าโครงสร้างที่ไม่ติดตั้ง LCVA ยังคงสั่นไหวอยู่ในช่วงฮิสตอกราฟโครงสร้างไม่มีความเสียหาย การติดตั้ง LCVA ให้กับโครงสร้างสามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างลงได้ จากการศึกษาพบว่าสามารถลดการสั่นไหวในแต่ละชั้นของโครงสร้างลงได้อยู่ในช่วง 30% ถึง 50% ดังนั้นสำหรับแผ่นดินไหวขนาดเล็กและขนาดกลางที่ไม่ทำให้เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้าง LCVA จะสามารถช่วยลดพลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างและควบคุมการสั่นไหวได้เป็นอย่างดี สำหรับแผ่นดินไหวขนาดกลางที่มีคาบเด่นใกล้เคียงกับคาบธรรมชาติของโครงสร้างและทำให้เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้าง (กรณีสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ5, 1985 SCT Mexico, และ 1995 Bangkok) โครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้ง LCVA มีการสั่นไหวเลยช่วงฮิสตอกราฟในแต่ละชั้น ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายและมีการกระจัดถาวรเกิดขึ้น เมื่อติดตั้ง LCVA ให้กับโครงสร้างพบว่าสามารถลดการกระจัดในแต่ละชั้นของโครงสร้างลงได้มากกว่า 40% ทำให้โครงสร้างไม่เกิดความเสียหายหรือมีความเสียหายลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม สำหรับแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงขนาดใหญ่ (กรณีสัญญาณความเร่งของแผ่นดินไหว DPT ZONE5 EQ3) โครงสร้างทั้งที่ไม่มีการติดตั้ง LCVA และติดตั้ง LCVA มีการสั่นไหวที่เลยช่วงฮิสตอกราฟในแต่ละชั้น ทำให้โครงสร้างเกิดการคราก ถึงแม้ LCVA จะช่วยลดค่าพลังงานที่เข้าสู่โครงสร้างได้บ้างแต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะลดความเสียหายของโครงสร้างลงได้ โดยโครงสร้างยังคงเกิดการกระจัดถาวรขึ้นซึ่งใกล้เคียงกับกับโครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้ง LCVA ดังนั้น การติดตั้ง LCVA ไม่สามารถช่วยควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงขนาดใหญ่ได้

สรุปได้ว่า วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสามารถทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดใหญ่ (อัตราส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบของ LCVA ที่มีค่ามากกว่า 0.3) ได้อย่างแม่นยำเนื่องจากสามารถจำลองความยาวประสิทธิผลบริเวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงการไหลได้ถูกต้อง สำหรับประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างตัวอย่างกล่าวคือ เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูงประมาณ 43 ชั้น โดยมี คาบธรรมชาติของตึกเท่ากับ 2 วินาที อัตราหน่วงของโครงสร้างเท่ากับ 2% ที่ติดตั้ง LCVA พบว่า LCVA

สามารถช่วยลดการสั่นไหวและลดทอนความเสียหายของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงขนาดเล็กถึงขนาดกลางที่เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้าง โดยจากการศึกษาพบว่า LCVA จะมีประสิทธิภาพของในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างได้ดีภายใต้แผ่นดินไหวที่เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้างที่มีค่า PGA ไม่เกิน 0.1g

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เนื่องจากอัตราส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบของ LCVA สำหรับเป็น LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลขนาดใหญ่ขึ้นเป็นค่าที่ประมาณขึ้น ดังนั้นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบของ LCVA และ พฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการทำวิจัยในอนาคต

2) การศึกษาประสิทธิภาพของ LCVA ในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างนั้นเป็นการศึกษาเชิงตัวเลขเท่านั้น การจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างจึงยังไม่ละเอียดเท่าที่ควรและพิจารณาการสั่นไหวแค่เพียงแกนเดียวเท่านั้น รวมถึง LCVA ที่ศึกษาเป็นตัวห่วงแบบพาสซีฟเท่านั้น ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพของ LCVA สำหรับโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงมากขึ้นที่ติดตั้ง LCVA แบบแอกทีฟ เป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไป

บรรณานุกรม

- Abe, M., Kimura, S. and Fujino, Y. (1996). Control laws for semi-active tuned liquid column damper with variable orifice opening. 2nd International Workshop on Structural Control. Hong Kong.
- Balendra, T., Wang, C.M. and Cheong, H.F. (1995). Effectiveness of tuned liquid column dampers for vibration control of towers. *Engineering Structures* 17(9): 668-675.
- Saoka, Y., Sakai, F., Takaeda, S. and Tamaki, T. 1988. On the suppression of vibrations by tuned liquid column dampers. Annual Meeting of JSCE, JSCE, Tokyo.
- Bergman, L.A., Mc Farland, D.M., Hall, J.K., Johnson, E.A. and Kareem, A. (1989). Optimal distribution of tuned mass dampers in wind sensitive structures. Proceedings of 5th ICOSSAR. New York.
- Blevins, R.D. 1984. *Applied Fluid Dynamics Handbook*. Van Nostrand Reinhold.
- Chaiviriyawong, P., Webster, W.C., Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P. 2007. Simulation of characteristics of tuned liquid column damper using a potential-flow method, *Engineering Structures* 29 (1): 132-144.
- Chang, C.C. and Hsu, C.T. (1998). Control performance of Liquid column vibration absorber. *Engineering Structures* 20(7): 580-586.
- Chopra, A.K. (1995). *Dynamics of Structures*. Prentice Hall New Jersey.
- Di Matteo, A., Lo Iacono, F., Navarra, G., Pirrotta, A. 2015. Innovative modeling of Tuned Liquid Column Damper Motion. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 23 (1-3): 229-244.
- Gao, H., Kwok, K.C.S. and Samali, B. (1997). Optimization of Tuned Liquid Column Dampers. *Engineering Structures* 19: 476-486.
- Gao, H., Kwok, K.C.S. and Samali, B. (1999). Characteristics of multiple Tuned Liquid Column Dampers in suppressing Structural Vibration. *Engineering Structures* 21: 316-331.
- Haroun, M.A. and Pires J.A. (1994). Active orifice control in Hybrid liquid column dampers. Proceedings of the First World Conference on Wind Engineering. vol. I, Los Angeles.

- Hitchcock, P.A., Kwok, K.C.S., Watkins, R.D. and Samali, B. (1997). Characteristics of Liquid column vibration absorbers (LCVA) -I and II. *Engineering Structures* 19(2).
- Kareem, A. and Kline, S. (1995). Performance of multiple mass dampers under random loading. *Journal of Structural Engineering ASCE* 121(2): 348-361.
- Lukkunaprasit, P., and Wanitkorkul, A. (2001). Inelastic buildings with tuned mass dampers under moderate ground motions from distant earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal*. 30: 537-551.
- Newmark, N.M. 1959. A method of computation for structural dynamics. *Journal Engineering Mechanics Division*. ASCE 85: 67-94.
- Sadek, F., Mohraz, B. and Lew, H.S. (1998). Single- and multiple-tuned liquid column dampers for seismic applications. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 27: 439-463.
- Sakai, F. et al. 1989. Tuned Liquid Column Damper - New Type Device for Suppression of Building Vibrations. *Proceedings International Conference on High Rise Buildings*. Nanjing, China, March 25-27.
- Watkins RD. (1991). Tests on a liquid column vibration absorber for tall structures. In: *Proceedings of the international conference on steel and aluminium structures*.
- Won, A.Y.J., Pires, J.A. and Haroun, M.A. (1996). Stochastic seismic performance evaluation of tuned liquid column dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 25: 1259-1274.
- Xu, Y.L., Samali B. and Kwok, K.C.S. 1992. Control of along-wind response of structures by mass and liquid dampers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 118(1): 20-39.
- Yalla, S.K. and Kareem, A. (2000). Optimum absorber parameters for tuned liquid column dampers. *Journal of Structural Engineering ASCE* 125(8): 906-915.
- Yalla, S.K., Kareem, A. and Kantor, J.C. (2001). Semi-Active Tuned Liquid Column Dampers for vibration control of structures. *Engineering Structures* 23:1469-1479.

ภาคผนวก ก
สัญลักษณ์และความหมาย

สัญลักษณ์	ความหมาย
A_h	พื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวนอนของ LCVA
A_v	พื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งของ LCVA
a	ความกว้างของท่อในแนวตั้งของ LCVA
a_g	ค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด หรือ PGA ในหน่วย g
B	ความยาวของท่อในแนวราบของ LCVA ตามนิยามโดยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล
B'	ความยาวของท่อในแนวราบของ LCVA ตามนิยามโดยวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรี
b	ความกว้างของท่อในแนวราบของ LCVA
C	เมทริกซ์ความหน่วงของโครงสร้าง
C	ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของส่วนที่เป็นวงรีซึ่งบอกถึงมวลประสิทธิผลของของเหลวภายในส่วนที่เป็นวงรีทั้งสองส่วนของ LCVA
c	ความหน่วงโครงสร้าง
c_r	ความหน่วงวิกฤต
c_0	ความหน่วงของระบบ SDOF
E_D	พลังงานเนื่องจากความหน่วง (Damping Energy)
E_H	Hysteretic Energy
E_I	พลังงานที่เข้ามาสู่โครงสร้างเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว หรือ Input Energy
E_K	พลังงานจลน์ (Kinetic Energy)
E_S	Elastic Strain Energy
e_g	เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยที่ฐานของโครงสร้าง
F_g	เวกเตอร์ของแรงประสิทธิผลเนื่องจากการเคลื่อนตัวของพื้นดิน
F_S	เวกเตอร์ของแรงต้านทานภายในแต่ละเสาของโครงสร้าง
f_D	แรงหน่วง (Damping Force)
f_d	อัตราส่วนความถี่ของ LCVA ต่อโครงสร้าง (Tuning Ratio)
f_I	แรงเฉื่อย (Inertia Force)
f_S	แรงสติฟเนส (Stiffness Force)

สัญลักษณ์	ความหมาย
f_y	กำลังที่จุดครากของโครงสร้าง
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
H	ความสูงของน้ำในท่อแนวตั้งของ LCVA ตามนิยามโดยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล
H'	ความสูงของน้ำในท่อแนวตั้งของ LCVA ตามนิยามโดยวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรี
k	ค่าสติฟเนสของโครงสร้าง
k_t	ความหนาของ LCVA
k_0	ค่าสติฟเนสของระบบ SDOF
L_e	ความยาวประสิทธิผลของ LCVA
l	ความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งบริเวณส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล (Transition Zone) ของ LCVA
M	เมทริกซ์มวลของโครงสร้าง
m	มวลของโครงสร้าง
m_d	มวลของ LCVA
m_{s1}	มวลประสิทธิผลในการสั่นไหวในโหมดที่ 1 ของโครงสร้าง
m_0	มวลของระบบ SDOF
P	เมทริกซ์ของแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA ที่ติดตั้งอยู่บนชั้นที่ N ของโครงสร้างซึ่งจะส่งต่อไปยังโครงสร้าง
P_N	แรงปฏิกิริยาที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA ที่ติดตั้งอยู่บนชั้นที่ N ของโครงสร้างซึ่งจะส่งต่อไปยังโครงสร้าง
p	แรงที่กระทำต่อโครงสร้าง
Q	พลังงานไม่อนุรักษ์ในทิศทางการไหล
q	เมทริกซ์ระยะห่างจากแนวอ้างอิงของโหมดต่าง ๆ
R	เมทริกซ์แรงสติฟเนสของโครงสร้าง
R	รัศมีของวงรี
r	อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวราบของ LCVA

สัญลักษณ์	ความหมาย
T	พลังงานจลน์
t	เวลา
u	เมทริกซ์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างโครงสร้างและพื้นดิน
\dot{u}	เมทริกซ์ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง
\ddot{u}	เมทริกซ์ความเร่งในการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง
\ddot{u}_g	เมทริกซ์ความเร่งของการเคลื่อนที่ของพื้นดิน
\ddot{u}_t	เมทริกซ์การเคลื่อนที่สัมบูรณ์ของโครงสร้าง
u	การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างโครงสร้างและพื้นดิน
u_g	การเคลื่อนที่ของพื้นดิน
u_m	การเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง
u_t	การเคลื่อนที่สัมบูรณ์ของโครงสร้าง
u_y	การเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่ทำให้เกิดการคราก
\dot{u}	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง
\ddot{u}	ความเร่งในการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง
\ddot{u}_g	ความเร่งของการเคลื่อนที่ของพื้นดิน
\ddot{u}_N	ความเร่งของการเคลื่อนที่ของพื้นที่ N ของโครงสร้าง
V	พลังงานศักย์
X^{ex}	ผลจากการทดลองบนโต๊ะเขย่า
X^{si}	ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์
x	การเคลื่อนที่ของระบบ SDOF ที่ติดตั้ง LCVA หรือ การเคลื่อนที่ที่ฐานของ LCVA
\dot{x}	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบ SDOF ที่ติดตั้ง LCVA หรือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ฐานของ LCVA
\ddot{x}	ความเร่งในการเคลื่อนที่ของระบบ SDOF ที่ติดตั้ง LCVA หรือ ความเร่งในการเคลื่อนที่ที่ฐานของ LCVA
y	ระยะในการเคลื่อนที่ของของเหลวในท่อแนวตั้งของ LCVA
\dot{y}	ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของของเหลวในท่อแนวตั้งของ LCVA
\ddot{y}	ความเร่งในการเคลื่อนที่ของของเหลวในท่อแนวตั้งของ LCVA

สัญลักษณ์	ความหมาย
z	ทิศทางในแนวตั้งที่วัดจากเส้นอ้างอิง (Datum) ของ LCVA
α	มุมแทนเจนของการไหล
α_d	อัตราส่วนความกว้างของท่อในแนวนอนต่อความยาวทั้งหมดของ LCVA (Tube Width to Liquid Length Ratio)
η	สัมประสิทธิ์ในการอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยวิธี Newmark
β	อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง
γ_n	สัมประสิทธิ์ในการอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยวิธี Newmark
δ	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเสียด
ζ_0	แฟคเตอร์ตัวหน่วง
θ	มุมที่รัศมีของวงรีเปลี่ยนแปลงไปเทียบกับศูนย์กลางของวงรี
μ	อัตราส่วนมวลของ LCVA ต่อโครงสร้าง
ρ	ความหนาแน่นของของเหลวภายใน LCVA
ϕ	เมทริกซ์ลักษณะรูปร่าง (Deflected Shape)
ω_f	ความถี่ธรรมชาติเชิงมุมของ LCVA
ω_n	ความถี่ธรรมชาติเชิงมุมของโครงสร้าง
\forall	ปริมาตรของสัดส่วนต่าง ๆ ของ LCVA

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ
LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลและวิธีการประมาณ
เส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า

ตารางที่ ก-1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปร่างสำหรับ LCVA ชนิดที่ 1 กับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า

LCVA	Sinusoidal Base Excitation	Error (%) Compare with Experimental Results			
		Simplified Effective Length Method		Elliptical Flow Path Estimation Method	
		Water Displacement	Interaction Force	Water Displacement	Interaction Force
Type 1	0.30 Hz	24.43	61.94	24.46	60.13
	0.35 Hz	23.74	45.23	23.75	46.56
	0.40 Hz	13.44	31.17	13.43	30.89
	0.45 Hz	7.60	12.19	7.58	14.82
	0.475 Hz	8.31	12.66	8.28	15.67
	0.49 Hz	9.88	12.59	9.84	13.30
	0.50 Hz	8.75	9.19	8.71	8.72
	0.51 Hz	8.33	6.10	8.29	4.73
	0.55 Hz	4.67	0.81	4.66	0.76
	0.60 Hz	4.83	1.54	4.82	2.78
	0.65 Hz	2.01	1.80	2.01	3.80

ตารางที่ ก-2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 กับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า

LCVA	Sinusoidal Base Excitation	Error (%) Compare with Experimental Results			
		Simplified Effective Length Method		Elliptical Flow Path Estimation Method	
		Water Displacement	Interaction Force	Water Displacement	Interaction Force
Type 2	0.30 Hz	6.71	46.88	4.99	74.18
	0.35 Hz	14.38	28.32	9.80	40.14
	0.40 Hz	10.29	30.84	4.19	36.73
	0.45 Hz	13.72	11.77	0.72	2.55
	0.475 Hz	28.13	28.60	0.82	1.19
	0.50 Hz	42.94	48.60	5.19	2.85
	0.51 Hz	54.50	60.04	3.84	1.52
	0.515 Hz	61.07	66.46	3.37	1.28
	0.525 Hz	66.65	72.68	2.60	1.36
	0.55 Hz	38.95	35.17	0.25	0.44
	0.60 Hz	12.61	7.00	0.23	0.21
	0.65 Hz	7.29	1.88	0.28	0.13

ตารางที่ ก-3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพและวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปร่างสำหรับ LCVA ชนิดที่ 3 กับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า

LCVA	Sinusoidal Base Excitation	Error (%) Compare with Experimental Results			
		Simplified Effective Length Method		Elliptical Flow Path Estimation Method	
		Water Displacement	Interaction Force	Water Displacement	Interaction Force
Type 3	0.30 Hz	10.53	92.83	16.89	66.95
	0.40 Hz	10.62	13.77	2.65	4.46
	0.45 Hz	25.29	23.50	1.82	2.37
	0.525 Hz	127.07	138.35	6.52	3.92
	0.53Hz	155.81	172.19	5.52	3.78
	0.535Hz	209.31	232.02	5.89	4.02
	0.54Hz	221.46	245.33	4.72	3.88
	0.55 Hz	253.84	279.37	2.91	3.40
	0.60 Hz	107.74	106.69	0.20	1.35
	0.65 Hz	47.55	40.50	0.69	1.46

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างของโปรแกรมภาษา MATLAB ที่ใช้วิเคราะห์การสั่นไหวของโครงสร้างที่ติดตั้ง
LCVA สำหรับการวิเคราะห์ในบทที่ 4


```
clear all;
close all;
clc;
```

%Structural properties-----

```
load N90W5200;                                % Get structural data
dof = 5;
k(1) = k1str;
k(2) = k2str;
k(3) = k3str;
k(4) = k4str;
k(5) = k5str;
fy(1) = fy1str;
fy(2) = fy2str;
fy(3) = fy3str;
fy(4) = fy4str;
fy(5) = fy5str;
```

%Earthquake Type-----

```
load SCT_N90W;
dt = 0.02;
tf = 180;
g = 9.81;                                     % gravity acceleration
PGA = 0.1*g;                                  % Peak Ground Acceleration
factor = PGA/max(abs(Ac));                    % factor to adjust PGA
ndat = tf/dt;
t = 0:dt:tf;
n = length(t);
if n <= ndat
    ndat = n;
end
```

```
ag = zeros(n,1);
```

```
vg = zeros(n,1);
```

```
for i = 1:ndat
```

```
    ag(i) = factor*Ac(i);
```

```
end
```

```
%Determine vg for determine energy-----
```

```
for i = 1:ndat-1
```

```
    vg(i+1) = vg(i)+0.5*(ag(i+1)+ag(i))*dt;
```

```
end
```

```
%Incremental of ground acceleration-----
```

```
for i = 1:n-1
```

```
    dag(i) = ag(i+1)-ag(i);
```

```
end
```

```
%Initial conditions-----
```

```
U = zeros(dof,n); dUi=zeros(dof,1);
```

```
V = zeros(dof,n); dVi=zeros(dof,1);
```

```
A = zeros(dof,n);
```

```
Fs = zeros(dof,n);
```

```
fs = zeros(dof,n);
```

```
S1 = zeros(n,1);
```

```
S2 = zeros(n,1);
```

```
S3 = zeros(n,1);
```

```
S4 = zeros(n,1);
```

```
S5 = zeros(n,1);
```

```
z = zeros(n,1); dz =zeros(n,1);
```

```
 vz = zeros(n,1); dvzi=0;
```

```

az = zeros(n,1);
R = zeros(dof,n);
dRi = zeros(dof,1);
cd = zeros(n,1);
Ki = K;

for j = 1:dof
    ki(j) = k(j);
end

dPi = zeros(dof,1);
Eh = zeros(dof,n);           % Dissipated energy in each story
Work = zeros(dof,n);        % Work done by fs in each story
Esh = zeros(n,1);           % strain energy and hysteresis energy
Ek = zeros(n,1);            % kinetic energy
Ed = zeros(n,1);            % damping energy
Ei = zeros(n,1);            % input energy from excitation
Eid = zeros(n,1);           % input energy from tlcd
ey = zeros(n,1);
wd = zeros(n,1);
es = zeros(n,1);
ek = zeros(n,1);
ed = zeros(n,1);
ei = zeros(n,1);
nopy = zeros(dof,n);        % No. of positive yielding
nony = zeros(dof,n);        % No. of negative yielding
errofequistr = zeros(dof,n); errofenergystr=zeros(n,1);
errofequitlcd = zeros(n,1) ; errofenergytlcd=zeros(n,1);

```

%TLCD Properties-----

```

mue = 0.06;                    %mass ratio
mdreal = mue*m1star;
fd = 0.929;                    %Tuning Ratio
Deld = 1.053;                  %Head loss coefficient
S = (2*g)/((fd*wstr)^2);
r = 1/0.2;
H = 0.13;                      %H'
B = 0.84+0.566935984170672;   %B'+EllipCoef
Ro = 1;                        %Density of liquid
Av = mdreal/(Ro*((B/r)+2*H)); %Vertical tube area
kd = 2*Ro*Av*g;                %Stiffness of LCVA column
Alpha = B/S;                   %Length ratio
md = Ro*Av*S;                  %mass of LCVA

```

%To add weight of TLCD to main structure-----

```

Mt = zeros(dof,dof);
Mt(dof,dof) =1;
M = M+(mdreal*Mt);
Minv = inv(M);

```

%Data for iteration-----

```

maxn = 100;                    % Maximum number of iterations for each time step
error = 1e-9;                  % Limit of Error for termination
tempu = zeros(dof,1); tempv=zeros(dof,1); tempa=zeros(dof,1);
tempz = 0; tempvz = 0; tempaz = 0;
num1 = zeros(n,1);            % Iteration cycles in each time step for R
num2 = zeros(n,1);            % Iteration cycles in each time step for vz

```

%Parameters for Newmark's method-----

%Linear acceleration method

gamma = 1/2;

beta = 1/6;

%Solving procedure. (Linear acceleration method)

for i = 1:n-1

%Calculation for main structure

Kbari = Ki+1/(beta*dt^2)*M+gamma/(beta*dt)*C;

for i = 1:maxn

 dPi = -M*ones(dof,1)*dag(i)+dRi;

 dPbari = dPi+M*(1/(beta*dt)*V(:,i)+1/(2*beta)*A(:,i))

 +C*(gamma/beta*V(:,i)+dt*(gamma/(2*beta)-1)*A(:,i));

 dUi = inv(Kbari)*dPbari;

 dVi = gamma/(beta*dt)*dUi-gamma/beta*V(:,i)

 -dt*(gamma/(2*beta)-1)*A(:,i);

 U(:,i+1) = U(:,i)+dUi;

 V(:,i+1) = V(:,i)+dVi;

 fs(1,i+1) = fs(1,i)+ki(1)*dUi(1);

 for j = 2:dof

 fs(j,i+1) = fs(j,i)+ki(j)*(dUi(j)-dUi(j-1));

 end

% Check story shear for each story

for j = 1:dof

 if abs(fs(j,i+1)) >= fy(j)

 if fs(j,i+1) > 0

 fs(j,i+1) = fy(j);

 else

 fs(j,i+1) = -fy(j);

 end

 end

end

for j = 1:dof-1

 Fs(j,i+1) = fs(j,i+1)-fs(j+1,i+1);

end

Fs(dof,i+1) = fs(dof,i+1);

A(:,i+1) = Minv*(-M*ones(dof,1)*ag(i+1)+R(:,i+1)-C*V(:,i+1)-Fs(:,i+1));

%Calculation for TLCD system-----

daNi = A(dof,i+1)-A(dof,i);

if i==1

 vzest = (5/2)*vz(i);

elseif i == 2

 vzest = (5/2)*vz(i)-2*vz(i-1);

else

 vzest = (5/2)*vz(i)-2*vz(i-1)+(1/2)*vz(i-2);

end

for p = 1:20

 cd(i+1) = 0.5*Delld*Av*r*Ro*abs(vzest);

 dpi = -md*Alpha*(dag(i)+daNi);

 dpbari = dpi+md*((1/(beta*dt))*vz(i)+(1/(2*beta))*az(i))+cd(i+1)*

 ((gamma/beta)*vz(i)+dt*((gamma/(2*beta))-1)*az(i));

```

kdbari = kd+(gamma/(beta*dt))*cd(i+1)+(1/(beta*dt*dt))*md;
dz(i) = dpbari/kdbari;
dvzi = (gamma/(beta*dt))*dz(i)-(gamma/beta)*vz(i)
      +dt*(1-(gamma/(2*beta)))*az(i);
z(i+1) = z(i)+dz(i);
vz(i+1) = vz(i)+dvzi;
az(i+1) = (-md*Alpha*(ag(i+1)+A(dof,i+1))-cd(i+1)*vz(i+1)-kd*z(i+1))/md;
dRi(dof,1) = -md*Alpha*(az(i+1)-az(i));
R(dof,i+1) = -md*Alpha*az(i+1);
num2(i) = p;
if abs(((vzest-vz(i+1))/vz(i+1)))<=error
    break
end
vzest = vz(i+1);
end
%End of iteration for vz-----
num1(i) = l;
%Check for stopping an iteration process
if abs((U(5,i+1)-tempu(5))/tempu(5))<=error &
    abs((V(5,i+1)-tempv(5))/tempv(5))<=error &
    abs((A(5,i+1)-tempa(5))/tempa(5))<=error
if abs((U(4,i+1)-tempu(4))/tempu(4))<=error &
    abs((V(4,i+1)-tempv(4))/tempv(4))<=error &
    abs((A(4,i+1)-tempa(4))/tempa(4))<=error
if abs((U(3,i+1)-tempu(3))/tempu(3))<=error
    & abs((V(3,i+1)-tempv(3))/tempv(3))<=error
    & abs((A(3,i+1)-tempa(3))/tempa(3))<=error
if abs((U(2,i+1)-tempu(2))/tempu(2))<=error &
    abs((V(2,i+1)-tempv(2))/tempv(2))<=error &
    abs((A(2,i+1)-tempa(2))/tempa(2))<=error
if abs((U(1,i+1)-tempu(1))/tempu(1))<=error &

```

```

        abs((V(1,i+1)-tempv(1))/tempv(1))<=error &
        abs((A(1,i+1)-tempa(1))/tempa(1))<=error
    if abs((z(i+1)-tempz)/tempz)<=error &
        abs((vz(i+1)-tempvz)/tempvz)<=error &
        abs((az(i+1)-tempaz)/tempaz)<=error
            break
        end
    end
end
end
end
end

tempu = U(:,i+1); tempv=V(:,i+1); tempa=A(:,i+1);
tempz = z(i+1); tempvz=vz(i+1); tempaz=az(i+1);

end

% end of iteration process-----
%Finding no. of +/- yielding in each story-----
for j = 1:dof
    nopy(j,i+1) = nopy(j,i);
    nony(j,i+1) = nony(j,i);
    if fs(j,i)<fy(j) & fs(j,i+1)==fy(j)
        nopy(j,i+1) = nopy(j,i)+1;
    elseif fs(j,i)>-fy(j) & fs(j,i+1)==-fy(j)
        nony(j,i+1) = nony(j,i)+1;
    end
end

end

%Check yielding for each story-----
for j = 1:dof
    if abs(fs(j,i+1)) == fy(j)

```



```

    ki(j) = 0;
end
end

% Check when the velocity changes its direction.-----
if i>1
    % Check for 1st story
    if V(1,i)*V(1,i+1)<0 % velocity changes from + to - or - to +
        ki(1) = k(1);
    elseif V(1,i-1)>0 & V(1,i)>=0 & V(1,i+1)<0
        ki(1) = k(1);
    elseif V(1,i-1)<0 & V(1,i)<=0 & V(1,i+1)>0
        ki(1) = k(1);
    elseif abs(V(1,i+1))<=1e-6
        ki(1) = k(1);
    end

    % Check for 2nd to top story
    for j=2:dof
        if (V(j,i)-V(j-1,i))*(V(j,i+1)-V(j-1,i+1))<0 % (rel.) velocity changes from + to - or - to +
            ki(j) = k(j);
        elseif (V(j,i-1)-V(j-1,i-1))>0 & (V(j,i)-V(j-1,i))>=0 & (V(j,i+1)-V(j-1,i+1))<0
            ki(j) = k(j);
        elseif (V(j,i-1)-V(j-1,i-1))<0 & (V(j,i)-V(j-1,i))<=0 & (V(j,i+1)-V(j-1,i+1))>0
            ki(j) = k(j);
        elseif abs(V(j,i+1)-V(j-1,i+1))<=1e-6
            ki(j) = k(j);
        end
    end
end
end

```

% Generate new Ki for next time step-----

$Ki(1,1) = ki(1)+ki(2); Ki(1,2)=-ki(2);$

for j = 2:dof-1

$Ki(j,j-1) = -ki(j);$

$Ki(j,j) = ki(j)+ki(j+1);$

$Ki(j,j+1) = -ki(j+1);$

end

$Ki(dof,dof-1)=-ki(dof);$

$Ki(dof,dof) = ki(dof);$

%Determine dissipated energy (Hysteresis energy)-----

$Work(1,i+1) = Work(1,i)+0.5*(fs(1,i+1)+fs(1,i))*dUi(1);$

for j=2:dof

$Work(j,i+1) = Work(j,i)+0.5*(fs(j,i+1)+fs(j,i))*(dUi(j)-dUi(j-1));$

end

for j=1:dof

$Eh(j,i+1) = Work(j,i+1)-0.5*fs(j,i+1)^2/k(j);$

end

$wd(i+1) = wd(i)+0.5*(kd*z(i+1)+kd*z(i))*dz(i);$

$ey(i+1) = wd(i+1)-0.5*(kd*z(i+1))^2);$

%Determine the sum of the elastic strain energy and the hysteresis energy

$Esh(i+1) = Esh(i)+(V(:,i))*Fs(:,i)*dt;$

$es(i+1) = 0.5*(kd*z(i+1))^2);$

%Determine kinetic energy-----

$At(:,i) = A(:,i)+ones(dof,1)*ag(i);$

$Vt(:,i) = V(:,i)+ones(dof,1)*vg(i);$

$Ek(i+1) = Ek(i)+(Vt(:,i))*M*At(:,i)*dt;$

$ek(i+1) = ek(i)+0.5*md*(az(i+1)+az(i))*dz(i);$

```

%Determine damping energy-----
Ed(i+1) = Ed(i)+(V(:,i))*C*V(:,i)*dt;
ed(i+1) = ed(i)+0.5*((cd(i+1)*vz(i+1))+cd(i)*vz(i))*dz(i);

%Determine input energy-----
Ei(i+1) = Ei(i)+(ones(dof,1))*M*At(:,i)*vg(i)*dt;
Eid(i+1)= Eid(i)+(V(:,i))*R(dof,i)*[0 0 0 1]*dt;
ei(i+1) = ei(i)+0.5*(-md*Alpha*((ag(i+1)+ag(i))+A(dof,i+1)+A(dof,i))))*dz(i);

%Check dynamic equilibrium-----
errofequistr(:,i+1) = M*A(:,i+1)+C*V(:,i+1)+Fs(:,i+1)
                    +M*ones(dof,1)*ag(i+1)-R(:,i+1);
errofequitlcd(i+1) = md*az(i+1)+cd(i+1)*vz(i+1)+kd*z(i+1)
                    +md*Alpha*(ag(i+1)+A(dof,i+1));

S5(i+1) = S5(i)+(U(dof,i+1)^2);
S4(i+1) = S4(i)+(U(4,i+1)^2);
S3(i+1) = S3(i)+(U(3,i+1)^2);
S2(i+1) = S2(i)+(U(2,i+1)^2);
S1(i+1) = S1(i)+(U(1,i+1)^2);

end % end of numerical procedure-----

vzbar = 0;
sigmareal = 0;
for i =1:n
    vzbar = vzbar + vz(i);
end
vzbar = vzbar/n;
for i=1:n
    sigmareal = sigmareal + ((vz(i)-vzbar)^2);

```

end

sigmareal = sigmareal/n

equivalentlineardamping = $0.5 \cdot \sqrt{2/\pi} \cdot r \cdot \text{Deld} \cdot \text{sigmareal} \cdot \sqrt{2 \cdot g/S} / (2 \cdot g)$

pga = PGA/g

RMS5 = $((\max(S5)/n)^{0.5})$

RMS4 = $((\max(S4)/n)^{0.5})$

RMS3 = $((\max(S3)/n)^{0.5})$

RMS2 = $((\max(S2)/n)^{0.5})$

RMS1 = $((\max(S1)/n)^{0.5})$

SR = $(\text{RMS1} + \text{RMS2} + \text{RMS3} + \text{RMS4} + \text{RMS5})/5$

RS = $((\max(S1) + \max(S2) + \max(S3) + \max(S4) + \max(S5)) / (5 \cdot n))^{0.5}$

Eh1 = Eh(1,n)

Eh2 = Eh(2,n)

Eh3 = Eh(3,n)

Eh4 = Eh(4,n)

Eh5 = Eh(5,n)

Eiend = Ei(n)

Eidend = Eid(n)

U5 = $\max(\text{abs}(U(5,:)))$

erofenergystr = $E_k + E_d + E_{sh} - E_i - E_{id}$;

erofenergytlcd = $e_k + e_d + e_y + e_s - e_i$;

% Plot Figure -----

load Dist_NoTLCD_SCT_N90W.mat

U5_No_TLCD = $\max(\text{abs}(U_NoTLCD(5,:)))$

pic5 = figure(5)

set(pic5,'color','w');

axes5 = axes(pic5,...

'Position',[0.08393 0.17164 0.87893 0.75493]);

```
hold(axes5,'on');
plot(t,U(5:),'LineWidth',1,'LineStyle','-','color','blue')
hold on
plot(t,U_NoTLCD(5:),'LineWidth',0.5,'LineStyle','--','color','red')
xlabel('Time(sec)','FontWeight','bold','FontSize',14)
ylabel('Displacement (m)','FontWeight','bold','FontSize',14)
title('Top displacement (with LCVA)','FontWeight','bold','FontSize',15)
grid
legend('LCVA 6%','w/o LCVA')
set(axes5,'FontSize',12,'GridAlpha',0.8);
```

-----END-----

ภาคผนวก ง
บทความวิจัยที่นำเสนอและได้รับการตีพิมพ์

บทความงานวิจัยเรื่องที่ 1

ได้นำเสนอและตีพิมพ์บทความการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21

การประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21

The 21st National Convention on Civil Engineering

“วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต”
“Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers”

www.ncce21.org

28-30 มิถุนายน 2559
โรงแรม บีพี สมิหลา บีช สงขลา
28 - 30 June 2016
BP Samila Beach Hotel, Songkhla



การจำลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงปรับค่าได้
ชนิดของเหลวแบบมีแกนด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี
Simulations of Control Characteristics of
Tuned Liquid Column Damper Using on Elliptical Flow

ปฐวิ สังข์น้อย^{1*} ภาสกร ชัยวิริยวงค์²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของของเหลวในตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (Tuned Liquid Column Damper, TLCD) และ ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอนไม่คงที่ (Liquid Column Vibration Absorber, LCVA) โดยใช้การประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีในการสร้างสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลว บทความวิจัยนี้พิจารณา LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลว (Transition Zone) ขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างของท่อในแนวตั้งและแนวนอน โดยตัวหน่วงลักษณะนี้เหมาะสำหรับนำมาติดตั้งกับอาคารที่มีพื้นที่การใช้งานจำกัด จากการศึกษาในอดีตพบว่าการทำนายพฤติกรรมการไหลของของเหลวใน TLCD และ LCVA ด้วยวิธีการไหลแบบโพเทนเชียลเชิงตัวเลข (Numerical Potential flow) สามารถทำได้ได้อย่างแม่นยำ แต่เนื่องด้วยวิธีการไหลแบบโพเทนเชียลเชิงตัวเลขนั้นมีความซับซ้อนในกระบวนการสร้างสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวใน LCVA ดังนั้นการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีจึงถูกนำเสนอขึ้น บทความฉบับนี้ได้ทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติของ LCVA ที่ใช้การประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี และ การประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพที่ง่าย (Simplified Effective Length) ในการสร้างสมการที่อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลว มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า (Shake table) ผลปรากฏว่าสำหรับ LCVA ที่มี Transition Zone ขนาดใหญ่ ที่ใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสามารถทำนายค่าความถี่ธรรมชาติได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าที่วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพที่ง่าย แสดงให้เห็นว่าการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีนั้นมีความเหมาะสมสำหรับการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของของเหลวใน LCVA ที่มี Transition Zone ขนาดใหญ่

คำสำคัญ: ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน, การประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี

Abstract

This study presents numerical model of the liquid motion in tuned liquid column dampers (TLCD) and liquid column vibration absorbers (LCVA). In previous studies, a numerical potential-flow method is applied to simulate the vibration

responses of LCVA with various shape. The vibration response of LCVA obtained by numerical potential-flow method is very accurate. However, numerical potential-flow method is complicated. So this study proposes the elliptical flow path estimation method to form governing equation for LCVAs' liquid motion. The LCVAs with large area between the vertically and horizontally tube (Transition Zone) are considered. According to the comparison between experimental and analytical results, it is found that the elliptical flow path estimation method can effectively use to predict frequency response of LCVA with large transition zone.

Keywords: (3-5 keywords must be given) TLCD, LCVA, elliptical flow path estimation method

1. บทนำ

การปรับปรุงอาคารให้มีความปลอดภัยเนื่องจากผลของแรงลมและแรงแผ่นดินไหวนั้นสามารถทำได้หลายวิธี การเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโดยการเพิ่มการยึดตั้งที่ฐานก็เป็นวิธีหนึ่ง แต่มีความซับซ้อนและราคาแพง การนำตัวหน่วงปรับค่าได้มาติดตั้งกับอาคารเพื่อช่วยลดการสั่นไหวจากผลของแรงลมและแรงแผ่นดินไหวจึงถูกนำมาใช้เพราะสามารถทำได้ง่ายและราคาประหยัดกว่า การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำตัวหน่วงปรับค่าได้มาใช้เพื่อช่วยลดการสั่นไหวจากผลของแรงลมและแรงแผ่นดินไหวต่ออาคารจึงเป็นที่สนใจกันอย่างแพร่หลายในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ตัวหน่วงปรับค่าได้มีหลายประเภท โดยตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวเป็นตัวหน่วงปรับค่าได้ประเภทหนึ่งที่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีจุดเด่น คือ ราคาประหยัด, ติดตั้งได้ง่าย, และต้องการการบำรุงรักษาน้อย

ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (Tuned Liquid Column Damper, TLCD) [1] เป็นตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวประเภทหนึ่งที่มีช่วยลดการสั่นไหวของโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นสูง TLCD เป็นอุปกรณ์ที่มีของเหลวบรรจุอยู่ในคอนเทนเนอร์รูปถ้วยพร้อมกับออริฟิซีส์หลักการในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างเหมือนกับมวลหน่วงปรับค่าได้ (Tuned Mass Damper, TMD) ที่ประกอบไปด้วยมวลและระบบสปริง TLCD มีลักษณะเด่นกว่า TMD หลายด้าน เช่น TLCD ไม่มีส่วนประกอบที่เป็นจักรกล, TLCD สามารถติดตั้งไว้บนอาคารโดยประยุกต์ใช้เป็นที่เก็บน้ำสำหรับใช้ในกรณีฉุกเฉินได้ ด้วยลักษณะเด่นดังกล่าวทำให้การติดตั้ง TLCD จึงไม่เป็นการเพิ่ม

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: pathawee.ce@gmail.com

น้ำหนักให้กับตัวอาคารและยังสามารถปรับความถี่ธรรมชาติและการหน่วงได้ง่ายอีกด้วย

หลักการสำคัญที่ว่าเมื่อความถี่ของการเคลื่อนที่ของของเหลวถูกปรับให้เท่ากับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างและใช้อัตราการหน่วงของการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมทำให้ตัวผนังของเหลวมีประสิทธิภาพมากที่สุด [2-5] แต่เนื่องจากการหน่วงเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของของเหลวทำให้ไม่สามารถทราบค่าอัตราการหน่วงที่เหมาะสมได้หากไม่ทราบค่าแอมพลิจูดของการสั่นไหว แต่อย่างไรก็ตามการวิจัยก่อนหน้านี้ก็สามารถหาประสิทธิภาพที่เหมาะสมของ TLCD ภายใต้ผลของแรงแผ่นดินไหวต่างกันออกไปได้ [6-11]

Watkin [12] ได้เสนอ TLCD อีกรูปแบบหนึ่งที่มีขนาดของหน้าตัดที่ไม่คงที่ เขาเรียกตัวผนังชนิดนี้ว่า ตัวผนังปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอนไม่คงที่ (Liquid Column Vibration Absorber, LCVA) จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของ LCVA มากกว่า TLCD [9] โดยความถี่ธรรมชาติของ LCVA สามารถปรับเปลี่ยนได้จาก “ความยาวประสิทธิ์ผล” ซึ่งหมายถึงรูปร่างของคอนเทนเนอร์และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอน [13]

จุดประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อสร้างสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในตัวผนังเพื่อจำลองพฤติกรรมการสั่นของ LCVA เมื่อพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลว (Transition Zone) ระหว่างท่อในแนวตั้งและท่อในแนวนอน (ความกว้างวัดจากมุมถึงมุม) มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวของท่อในแนวราบและความสูงของท่อในแนวตั้ง การศึกษาในอดีตมักพิจารณา LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวที่มีขนาดเล็กซึ่งมีอัตราส่วนของความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบอยู่ในช่วง 0.04-0.2 นักวิจัยหลายท่านได้เสนอนิยามสำหรับความยาวประสิทธิ์ผลของ LCVA ต่างกันออกไปตามลักษณะของการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในและค่าความถี่ธรรมชาติ [3,9,13] สำหรับอาคารที่มีพื้นที่การใช้งานจำกัดมีความจำเป็นอย่างไร้ที่ต่อทำให้ LCVA มีอัตราส่วนอัตราส่วนของความกว้างในแนวนอนจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบขนาดใหญ่ จึงทำให้เกิดข้อจำกัดในงานวิจัยขึ้น ซึ่งรูปร่างของ LCVA ดังกล่าวทำให้ไม่สามารถประมาณความเร็วเฉลี่ยประสิทธิ์ผลของการไหลในแต่ละส่วนได้ เนื่องจากเกิดพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลที่มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นบริเวณนี้ ดังนั้นวิธีการประมาณการไหลของของเหลวเพื่อความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมการสั่นไหวของตัวผนังซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการวิจัยนี้

วิธีการไหลแบบโพเทนเชียลเชิงตัวเลข (Numerical Potential flow) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Numerical panel method ถูกนำมาใช้ในการจำลองความเร็วในการไหลของของเหลวภายในตัวผนัง ผลปรากฏว่าวิธีนี้สามารถทำนายพฤติกรรมของ TLCD และ LCVA ที่มีขนาดต่างๆได้อย่างแม่นยำ [14] แต่เนื่องด้วยวิธีนี้ไม่มีวิธีการหาสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในตัวผนังที่ซับซ้อนและไม่สามารถหาได้โดยตรงจึงไม่ค่อยสะดวกนักที่จะนำมาใช้งาน

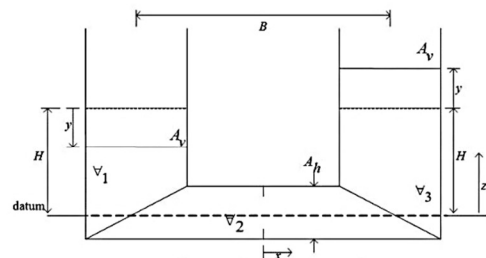
ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองพบว่า ในกรณีที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลมีขนาดใหญ่ความเร็วในการไหลของของเหลวภายในตัวผนังบริเวณที่มุมของพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วการไหลนั้นจะไม่มีผลต่อมวลและความยาวประสิทธิ์ผลของ LCVA จึงทำให้สามารถพิจารณาการไหลบริเวณพื้นที่ดังกล่าวเป็นรูปร่างได้ การประมาณการไหลเป็นรูปร่างจึงจึงถูกนำมาใช้ในการจำลองพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลขนาดใหญ่ โดยการทดลองจะใช้โมเดล LCVA จำนวนสามตัวที่มีอัตราส่วนพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลต่อความยาวของท่อในแนวราบขนาดใหญ่ซึ่งจะถูกทดสอบภายใต้การ

สั่นแบบอิสระและการสั่นแบบสเปคทรัล ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองบนโต๊ะเขย่า

2. สมการ

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ LCVA

พิจารณา LCVA ดังรูปที่ 1 โดยมีการเคลื่อนที่ฐาน $x(t)$ พื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและท่อในแนวราบแทนด้วย A_v และ A_h ตามลำดับ จากรูปที่ 1 เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ปริมาตรน้ำใน LCVA สามารถแบ่งได้เป็นสามส่วนคือ ส่วนที่เป็นแนวตั้งสองส่วน (B_1 และ B_3) และส่วนที่เป็นแนวราบหนึ่งส่วน (B_2) สำหรับท่อที่เป็นแนวตั้งสมมติให้ของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งโดยมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ \dot{y} ความเร็วในการไหลของของเหลวในท่อแนวราบประมาณให้เป็นการไหลแบบราบเรียบที่มีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ $r\dot{y}$ เมื่อ r คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวราบ $r = A_v / A_h$



รูปที่ 1 LCVA

จากหลักการของพลังงานและสมมติให้พลังงานภายในของการไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลง การไหลเป็นการไหลแบบไม่ราบเรียบและไม่สามารถบีบอัดได้ ทำให้สามารถเขียนสมการของการไหลของของเหลวภายใน LCVA โดยใช้สมการลาگرانจ์ได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} = Q \tag{1}$$

เมื่อ T และ V คือ พลังงานจลน์ และ พลังงานศักย์ของระบบตามลำดับ Q คือพลังงานไม่อนุรักษ์ในทิศทางการไหล y ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียพลังงานจากการไหล(head loss)

สมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA สามารถหาได้โดยใช้สมการลาگرانจ์ได้ดังนี้

$$\rho A_v L_e \ddot{y} + \frac{1}{2} \rho A_v r \delta \left| \dot{y} \right| \dot{y} + 2\rho A_v g y = -\rho A_v B \ddot{x} \tag{2}$$

เมื่อ ρ, δ และ g คือ ความหนาแน่นของของเหลว, ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย และความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงตามลำดับ ความยาวประสิทธิ์ผลของ LCVA L_e สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความยาวในแนวราบ (B) และความสูงในแนวตั้ง (H) ของ LCVA ได้ดังนี้

$$L_e = rB + 2H \tag{3}$$

ความถี่ธรรมชาติของการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA สามารถหาได้จาก $\omega_f = \sqrt{2g/L_e}$

2.2 การประมาณการไหลเป็นรูปวงรี

จากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการไหลแบบโพเทเชี่ยลเชิงตัวเลข[14] และผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า แสดงให้เห็นว่าความเร็วของการไหลของของเหลวภายใน LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วขนาดใหญ่ นั้น ความเร็วของการไหลบริเวณมุมของพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลนั้นมีความเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วบริเวณส่วนอื่นๆทำให้ความเร็วของการไหลบริเวณนี้ไม่มีผลต่อมวลและความยาวประสิทธิ์ผลของ LCVA ด้วยเหตุผลนี้จึงสามารถสมมติให้การไหลบริเวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วขนาดใหญ่เป็นรูปวงรีได้

จากรูปที่ 2 เส้นทางการไหลของของเหลวภายใน LCVA บริเวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลสามารถประมาณให้เป็นการไหลรูปวงรีได้ สมมติให้การไหลของของเหลวในท่อแนวตั้งสามารถไหลได้ในทิศแนวตั้งโดยมีความเร็วเฉลี่ย \bar{v} จากเงื่อนไขของความต่อเนื่อง การไหลของของเหลวในท่อแนวราบประมาณเป็นการไหลแบบราบเรียบที่มีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ \bar{v} ปริมาตรของน้ำใน LCVA จากรูปที่ 2 ถูกแบ่งออกเป็นห้าส่วนประกอบด้วย ส่วนที่เป็นแนวตั้งสองส่วน (V_1 และ V_5) ส่วนที่เป็นวงรีสองส่วน (V_2 และ V_4) และส่วนที่เป็นแนวอนหนึ่งส่วน (V_3) ดังนั้นพลังงานจลน์ในสมการที่ (1) แสดงได้ดังนี้

$$T = \int_{V_1} \frac{\bar{v}^2}{2} \rho dv + \int_{V_2} \frac{1}{2} \rho v^2 dv + \int_{V_3} \frac{(r\dot{y} + \dot{x})^2}{2} \rho dv + \int_{V_4} \frac{1}{2} \rho v^2 dv + \int_{V_5} \frac{\bar{v}^2}{2} \rho dv \quad (4)$$

เมื่อ v_2 และ v_4 คือความเร็วการไหลของของเหลวในส่วนที่เป็นวงรีหมายเลข 2 และ หมายเลข 4 ตามลำดับ โดยในส่วนที่ 2 และ 4 นั้น จะถูกนำเสนอในระบบพิกัด $r - \theta$ ความเร็วของการไหลทั้งสองส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับมุม θ ดังแสดงในรูปที่ 3 และ $\theta = \frac{\alpha y}{R}$ เมื่อ a คือความกว้างของท่อในแนวตั้ง และ R รัศมีของวงรีซึ่งเปลี่ยนแปลงตามมุม θ ,

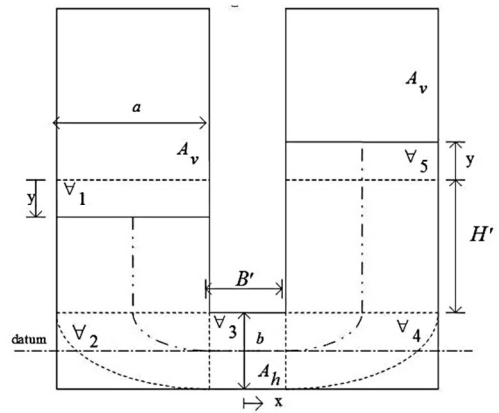
$$R = \sqrt{\left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right)^{-1}} \quad \text{เมื่อ } b \text{ คือ ความสูงของท่อในแนวตั้ง}$$

จากหลักการดังกล่าวจะทำให้ความเร็วของการไหลบริเวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลมีการเปลี่ยนแปลงจาก \bar{v} ที่ $\theta = 0^\circ$ ถึง $r\dot{y}$ ที่ $\theta = 90^\circ$ เพื่อให้สามารถประมาณความเร็วของการไหลบริเวณพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น จึงกำหนดให้ ความกว้างของท่อในแนวราบของ LCVA เท่ากับ B' และความสูงเริ่มต้นของน้ำในท่อแนวตั้งเท่ากับ H' ดังแสดงในรูปที่ 2 จากการใช้การบอกพิกัดในระบบ $r - \theta$ พลังงานจลน์ในส่วนที่มีการไหลเป็นรูปวงรีหมายเลข 2 (T_2) และหมายเลข 4 (T_4) ในสมการที่ (4) สามารถแสดงได้ดังนี้

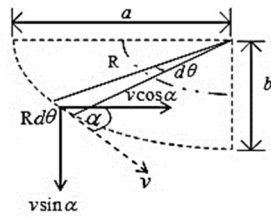
$$\begin{aligned} T_2 &= \int_{V_2} \frac{1}{2} \rho v^2 dv \\ &= \int_{V_2} \frac{1}{2} \rho [v \cos \alpha + \dot{x}]^2 dv + \int_{V_2} \frac{1}{2} \rho [v \sin \alpha]^2 dv \\ &= \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\alpha \dot{y}}{R} \right)^2 \cos^2 \alpha + 2 \left(\frac{\alpha \dot{y}}{R} \right) \dot{x} \cos \alpha + \dot{x}^2 \right] \left(\frac{R^2}{2} k d \theta \right) \\ &\quad + \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\alpha \dot{y}}{R} \right)^2 \sin^2 \alpha \left(\frac{R^2}{2} k d \theta \right) \\ &= \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{4} \rho a^2 k \dot{y}^2 d\theta \\ &\quad + \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \rho \left[2 \left(\frac{\alpha \dot{y}}{R} \right) \dot{x} \cos \alpha + \dot{x}^2 \right] \left(\frac{R^2}{2} k d \theta \right) \\ &= \frac{\rho A_v a}{4} \times \frac{\pi}{2} \times \dot{y}^2 + \frac{\rho k}{4} \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left[2 a R \dot{y} \dot{x} \cos \alpha + R^2 \dot{x}^2 \right] d\theta \\ &= T_4 \end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ $k =$ ความหนาของท่อ ($A_v = ka$) และ $\alpha =$ มุมแทนเจนของการไหล

ดังแสดงในรูปที่ 3 $\left(\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{b^2}{a^2} \cot \theta \right) \right)$



รูปที่ 2 LCVAกับการประมาณการไหลเป็นรูปวงรี



รูปที่ 3 ส่วนที่ 2 และ 4 ในพิกัด r-θ

จากสมการที่ (5) พลังงานจลน์ของของเหลวจากสมการที่ (4) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} \rho A_v H' \dot{y}^2 + \frac{\rho A_v a}{4} \times \pi \times \dot{y}^2 \\
 &+ \frac{3\pi}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[2aR\dot{y}\dot{x} \cos\alpha + R^2 \dot{x}^2 \right] d\theta \\
 &+ \frac{\rho A_h B'}{2} (r\dot{y} + \dot{x})^2 + \frac{1}{2} \rho A_v H' \dot{y}^2 \quad (6) \\
 &= \rho A_v H' \dot{y}^2 + \frac{\rho A_v \pi a}{4} \dot{y}^2 + \frac{\rho A_v \pi a}{4} \dot{x}^2 \\
 &+ \rho A_v \dot{x} \dot{y} \int_0^{\frac{3\pi}{2}} R \cos\alpha d\theta + \frac{\rho A_h B'}{2} (r\dot{y} + \dot{x})^2
 \end{aligned}$$

พลังงานศักย์ของของเหลวสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V &= \rho g A_v \int_0^{H-y} z dz + \rho g A_v \int_0^{H+y} z dz \quad (7) \\
 &= \rho g A_v (H^2 + y^2)
 \end{aligned}$$

พลังงานการหน่วงจากการเคลื่อนที่ของของเหลวสามารถประมาณได้โดย

$$Q = -\left(\frac{1}{2} \rho g A_h\right) \left(\frac{\delta r \dot{y} |r \dot{y}}{2g}\right) = -\frac{1}{2} \rho A_v r \delta | \dot{y} | \dot{y} \quad (8)$$

เมื่อนำสมการที่ (6)-(8) แทนลงในสมการที่ (1) จะได้สมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วขนาดใหญ่ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \rho A_v \left(2H' + B'r + \frac{\pi a}{2} \right) \ddot{y} + \frac{1}{2} \rho A_v r \delta | \dot{y} | \dot{y} + 2\rho g A_v y \\
 = -\rho A_v B' \ddot{x} - \rho A_v \ddot{x} \int_0^{\frac{\pi}{2}} R \cos\alpha d\theta \\
 = -\rho A_v B' \ddot{x} - 2\rho A_v C \ddot{x} \\
 = -\rho A_v (B' + 2C) \ddot{x} \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} R \cos\alpha d\theta \\
 &= \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\frac{\cos^2\theta + \sin^2\theta}{a^2 + b^2} \right]^{-1} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{b^2}{a^2} \cot\theta \right) \right) d\theta
 \end{aligned}$$

เมื่อ C คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของส่วนที่เป็นวงรีซึ่งบอกถึงมวลประสิทธิผลของของเหลวภายในส่วนที่เป็นวงรีทั้งสองส่วน (V₂ และ V₄) ส่วนความยาวประสิทธิผล L_e และความถี่ธรรมชาติ ω_f สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 L_e &= rB' + 2H' + \frac{\pi a}{2} \\
 \omega_f &= \sqrt{\frac{2g}{L_e}} = \sqrt{\frac{2g}{rB' + 2H' + \frac{\pi a}{2}}} \quad (10)
 \end{aligned}$$

สำหรับระบบตัวแปรอิสระเชิงเดียว(SDOF)ที่มีการติดตั้ง LCVA สามารถใช้สมการการวางในการหาสมการอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบตัวแปรอิสระเชิงเดียว(SDOF)ที่มีการติดตั้ง LCVA ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 m_0 \ddot{x} + c_0 \dot{x} + k_0 x \\
 = -\rho A_v (B' + 2C) \ddot{y} - \rho A_v \left(2H' + 2b + \frac{B'}{r} \right) \ddot{x} \quad (11)
 \end{aligned}$$

เมื่อ m₀, c₀ และ k₀ คือค่า มวล, ความหน่วง และสทิเฟนของระบบตัวแปรอิสระเชิงเดียวตามลำดับ จากสมการที่(11)มีความแตกต่างจากสมการที่เสนอโดย Gao และ Kwok [3] หรือ Chang และ Hsu [9] คือแรงหน่วงที่เกิดจาก LCVA ที่อยู่ในพจน์ ρA_vC ซึ่ง เป็นผลจากมวลประสิทธิผลและกว้างประสิทธิผลในส่วนที่มีการไหลเป็นรูปวงรีทั้งสองส่วนของ LCVA

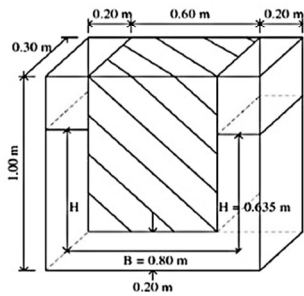
3. การทดลอง

3.1 การออกแบบและจำลองโมเดล

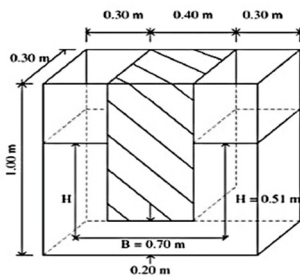
โมเดลของ TLCD ที่มีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งต่อท่อในแนวนอนต่างกันออกไปจำนวน 3 ตัว (r = 1, 1.5 และ 2) ถูกจำลองขึ้นเพื่อใช้ในการหาพฤติกรรมการสั่นไหว โดยโมเดลของ TLCD ทั้งสามตัว (ชนิดที่ 1, 2 และ 3) แสดงดังรูปที่ 4, 5 และ 6

จากการวิจัยก่อนหน้ามีการศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวได้ใช้ TLCD และ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลของของเหลวที่มีขนาดเล็กซึ่งมีอัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบอยู่ในช่วง 0.04-0.2 แต่สำหรับอาคารที่มีพื้นที่ในการใช้สอยจำกัดเพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่จึงจำเป็นต้องใช้ TLCD และ LCVA ที่มีอัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้จะให้ตัวหน่วงที่มีอัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบในช่วง 0.35 ถึง 0.75

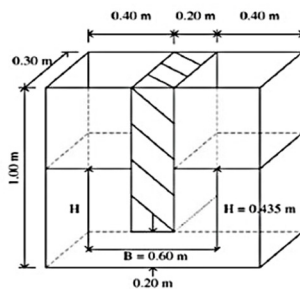
โมเดลของตัวหน่วงแต่ละตัวจะประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นแท่งกึ่งคริลิคและส่วนที่เป็นแผ่นโฟมโพลียูรีเทนสำหรับใส่ลงไปข้างกึ่งเพื่อให้เกิดโมเดลของ TLCD ที่มีขนาดแตกต่างกันออกไปจากการที่โมเดลของ TLCD ทั้งสามตัวนั้นถูกคานคานหามให้สามารถนำไปติดกับตึกที่มีความสูงประมาณ 20 ชั้น ที่มีความถี่ธรรมชาติประมาณ 0.5 เฮิรตซ์ ได้ ดังนั้นโมเดลทั้งหมดจึงต้องถูกออกแบบให้มีความยาวประสิทธิ์ผล $L_e = 2.07m$ ตามการศึกษาโดยใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผลอย่างง่ายของ Gao และ Kwok [3] หรือ Chang และ Hsu [9] เพื่อให้โมเดลทั้งสามตัวนั้นมีความถี่ธรรมชาติเท่ากันโดยอยู่ที่ประมาณ 0.49 เฮิรตซ์



รูปที่ 4 TLCD



รูปที่ 5 LCVA ชนิดที่ 1



รูปที่ 6 LCVA ชนิดที่ 2

3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

โมเดลของ TLCD จะถูกติดตั้งอยู่บนโต๊ะเขย่าที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบโดยอาศัยตัวเร่งทำให้เกิดการสั่น ซึ่งขอบเขตของการทดลองมีดังนี้

3.2.1 การทดสอบการสั่นแบบอิสระ

การทดสอบการสั่นแบบอิสระมีจุดประสงค์เพื่อหาพฤติกรรมสั่นจากการเคลื่อนที่ของของเหลวโดยใช้ระยะเวลาเริ่มต้นของโต๊ะเขย่าต่างกันไป (อยู่ในช่วง $\pm 3cm$ ถึง $\pm 10cm$) ค่าอัตราความหน่วงและความถี่ธรรมชาติของโมเดล TLCD ทั้งสามตัวนั้นจะสามารถหาได้จากทดลองนี้

3.2.2 การทดสอบสเปคตรัล

การทดสอบสเปคตรัลใช้เพื่อหาค่าการตอบสนองต่อความถี่ของการเคลื่อนที่ของของเหลวในโมเดล TLCD แต่ละตัว โดยใช้การกระตุ้นด้วยคลื่น (sinusoidal excitation) ที่มีความถี่ในช่วง 0.30 เฮิรตซ์ ถึง 0.65 เฮิรตซ์

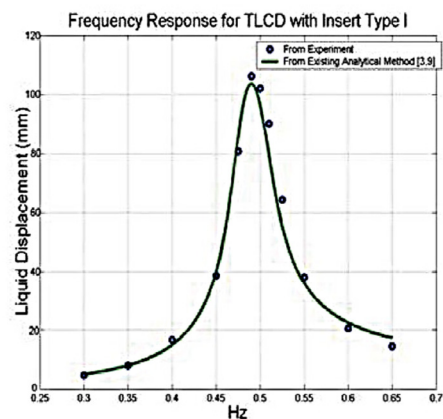
ในการทดสอบทั้งหมดจะมีการวัดค่า ความเร็วของโต๊ะเขย่า, แรงหน่วงที่เกิดจาก TLCD, ค่าการสูญเสียพลังงานจากการไหลม เฟสและระยะการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในโมเดล TLCD แต่ละตัว

4. การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดลองบนโต๊ะเขย่า

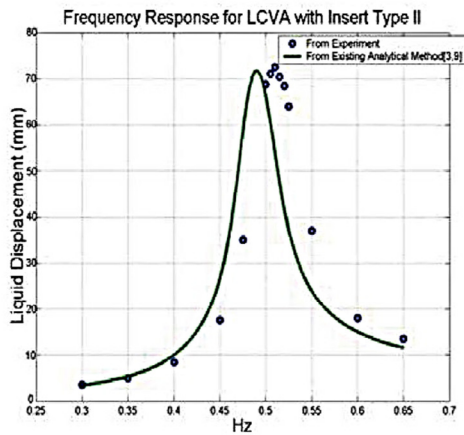
4.1 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผลและการทดลองบนโต๊ะเขย่า

การตอบสนองต่อความถี่ของ TLCD สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการแก้สมการที่(2) โดยใช้ค่าอัตราส่วนการหน่วงที่ได้จากการทดสอบการสั่นแบบอิสระ การวิเคราะห์ที่ใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผลของ Gao และ Kwok [3] หรือ Chang และ Hsu [9] จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบสเปคตรัลของโมเดล TLCD ทั้งสามตัวดังแสดงในรูปที่(5)

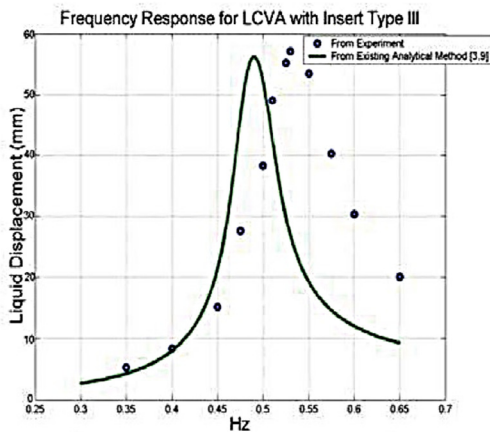
จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองต่อความถี่ของ TLCD ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผลนั้นมีความใกล้เคียงกับผลจากการทดลองบนโต๊ะเขย่าสำหรับ TLCD แต่สำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 และ 3 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผลไม่เป็นที่น่าพอใจโดยคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า จากรูปที่ 7 และ 8 เส้นโค้งของการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ทั้งสองตัวนั้นคลาดเคลื่อนจากเส้นโค้งจากการทดลองบนโต๊ะเขย่าไปทางซ้ายอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการทำนายการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผลไม่สามารถให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องได้



รูปที่ 7 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ TLCD



รูปที่ 8 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2



รูปที่ 9 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 3

4.2 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยใช้การประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีและการทดลองบนโต๊ะเขย่าในกรณี LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวขนาดใหญ่(อัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบมากกว่า0.35)

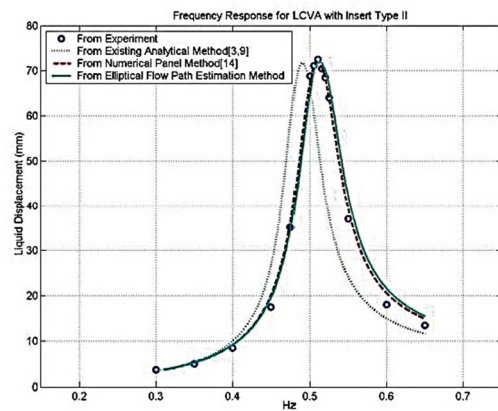
ประสิทธิภาพของวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีในการจำลองพฤติกรรมการสั่นของ LCVA คือ เมื่อนำมาใช้ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลขนาดใหญ่จะสามารถประมาณความเร็วของการไหลบริเวณพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลได้ดีขึ้น เส้นโค้งการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2 และ 3 สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้สมการที่ (9) และจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบโดยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผล, วิธีการไหลแบบโพเทเซียลเชิงตัวเลข และผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าดังแสดงในรูปที่ 10

จากรูปที่10และ11 ผลการทดสอบของ LCVA ทั้งสองชนิดแสดงให้เห็นว่าเส้นโค้งการตอบสนองต่อความถี่จากวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีใกล้เคียงกับเส้นโค้งการตอบสนองต่อความถี่จากผลการทดสอบบนโต๊ะเขย่า

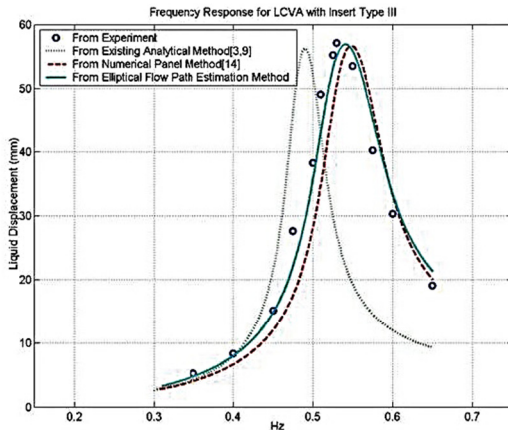
มากกว่าเส้นโค้งการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผล [3,9] และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบของ LCVA ชนิดที่ 3 ณ ความถี่ที่เกิดการสั่นพ้องดังรูปที่ 11 พบว่าวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีให้การตอบสนองที่ผิดพลาดไปแค่ 3.7% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผลที่ให้ความผิดพลาดมากถึง 52.6% สำหรับการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการไหลแบบโพเทเซียลเชิงตัวเลขนั้นให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ที่เป็นที่น่าพอใจเป็นอย่างยิ่งสำหรับ LCVA ชนิดที่ 2เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองบนโต๊ะเขย่าและให้ผลการตอบสนองต่อความถี่เป็นที่ยอมรับได้สำหรับ LCVA ชนิดที่ 3

4.3 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยใช้การประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีและผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าในกรณี LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวขนาดเล็ก(อัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบอยู่ในช่วง0.04-0.2)

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบการจำลองกับผลการทดลองที่ใช้ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวขนาดเล็ก ผลจากการทดลอง LCVA จำนวน 20 ตัว ของ Hitchcock [13] ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้วิธีการไหลแบบโพเทเซียลเชิงตัวเลขและวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรี จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่วัดจากการทดลองและที่คำนวณได้จากการเสนอของ Hitchcock มีความแตกต่างกันอยู่ที่ 1%-7% ในขณะที่ค่าความถี่ธรรมชาติที่วัดจากการทดลองและที่คำนวณได้จากวิธีการไหลแบบโพเทเซียลเชิงตัวเลขนั้นมีความแตกต่างกันอยู่ที่ 0.5%-3%



รูปที่ 10 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2



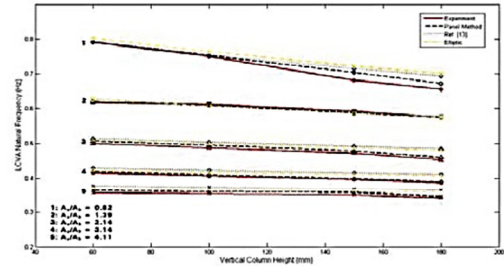
รูปที่ 11 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 3

วิธีการไหลแบบโพเทเชิลเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าสามารถทำนายค่าความถี่ธรรมชาติของการเคลื่อนที่ของของเหลวสำหรับ LCVA ขนาดต่างๆได้ค่อนข้างดี แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือมีความซับซ้อนมากกว่าวิธีอื่นๆ สำหรับค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณจากวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีมีความแตกต่างกับค่าความถี่ธรรมชาติที่วัดได้จากการทดลองอยู่ที่ 1%-7% นั้นหมายถึงเมื่อพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวมีขนาดเล็กการวิเคราะห์โดยวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีจะให้ค่าความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับการวิเคราะห์โดยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผล [3,9,13]

จากตารางที่ 1 LCVA 5 ตัว นับจากซ้ายตารางคือส่วนหนึ่งของการทดลองของ Hitchcock ซึ่ง LCVA ทั้ง 5 ตัว มีความยาวของท่อในแนวราบและความสูงของท่อในแนวตั้งเท่ากันทั้งหมดคือ 820 มิลลิเมตรและ 180 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่จะมีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกันออกไปคือ 0.82, 1.39, 2.14, 3.14 และ 4.11 สำหรับอัตราส่วนของความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบอยู่ในช่วง 0.04-0.13 LCVA ทั้ง 5 ตัว จัดเป็น LCVA มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวขนาดเล็ก ซึ่งจะถูกจำลองด้วยวิธีการไหลแบบโพเทเชิลเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวและค่าความถี่ธรรมชาติถูกคำนวณด้วยวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีโดยใช้สมการที่ (10) ผลการศึกษาแสดงตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าความยาวประสิทธิ์ผลและค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้จากสามวิธีการวิเคราะห์ คือ การวิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผล [3,9 และ 13], การวิเคราะห์ด้วยวิธีโพเทเชิลเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรี มาเปรียบเทียบกับค่าได้จากการทดลองบนโต๊ะเขย่า สำหรับ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวขนาดเล็ก ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เกิดจากการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติโดยใช้วิธีเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผลเปรียบเทียบกับผลการทดลองอยู่ที่ 7.1% ส่วนค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้โดยใช้ค่าความยาวประสิทธิ์ผลจากวิธีโพเทเชิลเชิงตัวเลขจะมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2.4% และการวิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีที่ใช้สมการที่ (10) ในการหาความถี่ธรรมชาติของ LCVA รูปแบบต่างๆ ผลปรากฏว่ามีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าไม่มากกว่า 6.7% ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าสำหรับ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวขนาดเล็กการ

ทำนายพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA ด้วยวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับวิธีการทำนายด้วยวิธีเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผล [3,9,13]



รูปที่ 12 ความถี่ธรรมชาติของ LCVA กับอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดและความสูงท่อในแนวตั้ง

5. บทสรุป

วิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีถูกนำเสนอขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในตัวท่อนงเพื่อพัฒนาการจำลองพฤติกรรมการสั่นไหวของ TLCD และ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวขนาดใหญ่ จากการศึกษาพบว่าการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวขนาดใหญ่โดยใช้วิธีเส้นทางการไหลประสิทธิ์ผลนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนไปมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า ต่างจากการทำนายค่าความถี่ธรรมชาติโดยใช้วิธีโพเทเชิลเชิงตัวเลขซึ่งเป็นวิธีที่สามารถทำนายและวิเคราะห์การสั่นไหวของ LCVA รูปแบบต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากวิธีนี้มีความซับซ้อนในการหาสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในตัวท่อนง ดังนั้น วิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีจึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในการจำลองพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวขนาดใหญ่

กิตติกรรมประกาศ

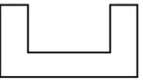
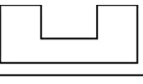

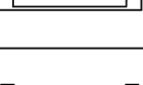
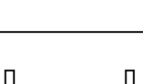
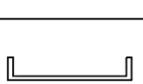
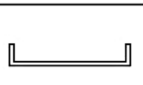

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และ ผศ.ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ ที่ส่งเสริมการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sakai F, Takeda S, Tamaki T, "Tuned liquid column damper- new type device for suppression of building vibrations", Proceedings of the international conference on highrise buildings, 1989, 926-31.
- [2] Warburton GB, "Optimum absorber parameters for minimizing vibration response". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 9, 251-62, 1981.
- [3] Gao H, Kwok KCS, "Optimization of tuned liquid column dampers", Engineering Structures, 19(6), 476-86, 1997.
- [4] Sun LM, Fujino Y, Chaiseri P, Pacheco BM, "The properties of tuned liquid dampers using a TMD analogy". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 967-76, 2003.

- [5] Jong-Cheng W, Ming-Hsiang S, Yuh-Yi L, Ying-Chang S, "Design guidelines for tuned liquid column damper for structures responding to wind". *Engineering Structures*, 27(13), 1893-905, 2005.
- [6] Won AJY, Pires JA, Haroun MA, "Stochastic seismic performance evaluation of tuned liquid column dampers". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1259-74, 1996.
- [7] Sadek F, Mohraz B, Lew HS, "Single- and multiple-tuned liquid column dampers for seismic applications". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 439-63, 1998.
- [8] Yu J, Wakahara T, Reed DA, "A non-linear numerical model of the tuned liquid damper". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 671-686, 1998.
- [9] Chang CC, Hsu CT, "Control performance of liquid column vibration absorbers". *Engineering Structures*, 580-6, 1998.
- [10] Banerji P, Murudi M, Shah AH, Popplewell N, "Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures". *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, 29, 587-602, 2000.
- [11] Aparna G, Biswajit B, "Seismic vibration control of short period structures using the liquid column damper". *Engineering Structures*, 26(13), 1905-13, 2004.
- [12] Watkins RD, "Tests on a liquid column vibration absorber for tall structures", *Proceedings of the international conference on steel and aluminium structures*, 1991.
- [13] Hitchcock PA, Kwok KCS, Watkins RD, Samali B, "Characteristics of liquid column vibration absorbers (LCVA)-I". *Engineering Structures*, 19(2), 135-44, 1997
- [14] Chaiviriyawong, P., Webster, W., C., Pinkaew, T. and Lukkunaprasit, P, "Simulation of characteristics of tuned liquid column damper using a potential-flow method". *Engineering Structures* 29, 132-144, 2007.

ตารางที่ 1 ความยาวประสิทธิ์ผลของตัวหน่วงและค่าความถี่ธรรมชาติที่หาได้จากวิธีต่างๆ

Damper Configuration	Corner-to-corner width to horizontal length ratio	Experiment		Gao and Kwok [3] or Chang and Hsu [9]		Hitchcock [13]		Panel Method		Elliptical Flow Path Estimation Method	
		L_e (m)	f_n (Hz)	L_e (m)	f_n (Hz)	L_e (m)	f_n (Hz)	L_e (m)	f_n (Hz)	L_e (m)	f_n (Hz)
	0.35	2.07	0.490	2.07 (0.0%)	0.490 (0.0%)	2.07 (0.0%)	0.490 (0.0%)	2.07 (0.0%)	0.490 (0.0%)	1.98 (4.1%)	0.500 (2.1%)
	0.52	1.91	0.510	2.07 (8.4%)	0.490 (3.9%)	1.82 (4.7%)	0.523 (2.5%)	1.91 (0.0%)	0.511 (0.2%)	1.89 (0.9%)	0.513 (0.6%)
	0.75	1.77	0.530	2.07 (16.9%)	0.490 (7.5%)	1.47 (16.9%)	0.580 (9.4%)	1.65 (6.8%)	0.548 (3.4%)	1.70 (3.9%)	0.541 (2.1%)
	0.13	4.27	0.341	4.17 (2.3%)	0.345 (1.2%)	3.73 (12.6%)	0.365 (7.0%)	4.17 (2.3%)	0.345 (1.2%)	3.85 (9.8%)	0.359 (5.3%)
	0.10	3.30	0.388	3.19 (3.3%)	0.395 (1.8%)	2.94 (10.9%)	0.411 (5.9%)	3.27 (0.9%)	0.390 (0.5%)	3.02 (8.5%)	0.406 (4.6%)
	0.08	2.42	0.453	2.22 (8.3%)	0.473 (4.4%)	2.12 (12.4%)	0.485 (7.1%)	2.35 (2.9%)	0.460 (1.5%)	2.15 (11.0%)	0.480 (6.0%)
	0.06	1.50	0.575	1.53 (2.0%)	0.570 (0.9%)	1.50 (0.0%)	0.575 (0.0%)	1.51 (0.7%)	0.574 (0.2%)	1.51 (0.7%)	0.574 (0.2%)
	0.04	1.15	0.656	1.02 (11.3%)	0.697 (6.3%)	1.03 (10.4%)	0.693 (5.6%)	1.10 (4.3%)	0.672 (2.4%)	1.01 (11.9%)	0.700 (6.7%)



The 21st National Convention on Civil Engineering

This is to certify that

Pathawee Sangnoy

has successfully participated in the 21st NCCE for the paper titled

*Simulations of Control Characteristics of Tuned Liquid Column Damper Using
on Elliptical Flow*

BP Samila Beach Hotel, Songkhla, Thailand

June 28-30, 2016


Prof. Dr. Suchatvee Suwansawat
President of EIT

Assoc. Prof. Charoon Charoenmatkul
Dean of Engineering Faculty, RMUTSV

Assist. Prof. Pomarai Boonrasi
Chairperson of 21st NCCE Committee

บทความงานวิจัยเรื่องที่ 2

ได้นำเสนอและตีพิมพ์บทความการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 22




**การประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 22 (NCCE22)**


**เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 22**
 Proceedings of the 22nd National Convention on Civil Engineering **NCCE 22**


 ภายใต้หัวข้อการประชุม
เทคโนโลยีเขียวเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน
GREEN TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT

18 - 20 กรกฎาคม 2560
 ณ เดอะกรีนเนอส์ รีสอร์ท เซาท์ทาว์น
 อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

จัดโดย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
 สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 และสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

ISBN : 978 - 616 - 396 - 009 - 2


อินทรี
 ปูนซีเมนต์นครหลวง



การเปรียบเทียบผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าของตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวภายในขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี

Comparison of Shake Table Experiments of Liquid Column Vibration Absorber with Large Transition Zone with an Elliptical Flow Path Estimation Method

ปฐวี สังข์น้อย^{1*} และภาสกร ชัยวิริยวงค์

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

*Corresponding author; E-mail address: pathawee.ce@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของของเหลวในตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (Tuned Liquid Column Damper, TLCD) และ ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอนไม่คงที่ (Liquid Column Vibration Absorber, LCVA) โดยใช้การประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี สำหรับ LCVA ที่ใช้ในการวิจัยนี้จะมีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลว (Transition Zone) ขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างของท่อในแนวตั้งและแนวนอน โดยตัวหน่วงลักษณะนี้เหมาะสำหรับนำมาติดตั้งกับอาคารที่มีพื้นที่ใช้งานจำกัด จากการศึกษาในอดีตวิธีที่ใช้การทำนายพฤติกรรมของการไหลของของเหลวใน TLCD และ LCVA ที่มีรูปร่างขนาดต่างๆพบว่า วิธีการไหลแบบโพเทนเชียลเชิงตัวเลข (Numerical Potential Flow) สามารถทำนายการไหลของของเหลวใน LCVA ได้อย่างแม่นยำ แต่มีความซับซ้อนในกระบวนการสร้างสมการที่อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวจึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์ใช้ สำหรับวิธีประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพอย่างง่าย (Simplified Effective Length) พบว่ามีค่าความผิดพลาดในการจำลองการไหลบริเวณพื้นที่มีการเปลี่ยนความเร็วในการไหลขนาดใหญ่ ด้วยเหตุผลดังกล่าวการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีจึงถูกนำเสนอขึ้น บทความฉบับนี้ได้ทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติและแรงหน่วงที่เกิดขึ้นจาก LCVA ที่ใช้การประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี และการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพอย่างง่าย (Simplified Effective Length) ในการสร้างสมการที่อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลว มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า (Shake Table) ผลปรากฏว่า สำหรับ LCVA ที่มี Transition Zone ขนาดใหญ่ ที่ใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสามารถทำนายค่าความถี่ธรรมชาติและแรงหน่วงที่เกิดขึ้นจาก LCVA ได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพอย่างง่าย แสดงให้

เห็นว่าการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีนี้มีความเหมาะสมสำหรับการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของของเหลวใน LCVA ที่มี Transition Zone ขนาดใหญ่

คำสำคัญ: ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน, การประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี

Abstract

This study presents numerical model of the liquid motion in liquid column vibration absorber (LCVA). In previous studies, a numerical potential-flow method and Simplified Effective Length method are applied to simulate the vibration responses of LCVA with small transition zone. The vibration response of LCVA obtained by the methods are very accurate. However, numerical potential-flow method is complicated, and simplified effective length method has some error in simulation. So this study proposes the elliptical flow path estimation method to form governing equation for LCVAs. The LCVAs with large area between the vertically and horizontally tube (Transition Zone) are considered. According to the comparison between experimental and analytical results, it is found that the elliptical flow path estimation method can effectively use to predict both frequency response and interaction force of LCVA with large transition zone.

Keywords: TLCD, LCVA, elliptical flow path estimation method

1. บทนำ

แนวคิดการออกแบบอาคารสูงสมัยใหม่นิยมให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบาและมีความยืดหยุ่นสูงทำให้โครงสร้างมีค่าความหน่วงต่ำ เมื่อโครงสร้างรับแรงกระทำทางพลศาสตร์ เช่น แรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว

จะทำให้โครงสร้างเกิดการสั่นไหวและการเคลื่อนที่เกินกว่าค่าที่ยอมให้ หรือค่าปลอดภัยตามที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบต่างๆ อาจจะทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายหรือเกิดความไม่สะดวกสบายต่อผู้ที่อยู่อาศัยเนื่องจากรับรู้ได้ถึงการสั่นไหว ปัจจุบันการปรับปรุงอาคารให้มีความปลอดภัยเนื่องจากผลของแรงกระทำทางพลศาสตร์นั้นสามารถทำได้หลายวิธี การเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโดยการเพิ่มการยึดรั้งที่ฐานก็เป็นวิธีหนึ่ง แต่มีความซับซ้อนและราคาแพง ดังนั้นการนำตัวหน่วงปรับค่าได้มาติดตั้งกับอาคารเพื่อช่วยลดการสั่นไหวจากผลของแรงลมและแรงแผ่นดินไหวจึงนิยมมาใช้มากกว่า ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกน (Tuned Liquid Column Damper, TLCD) เป็นตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวประเภทหนึ่งที่มีลักษณะเด่นกว่าตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดอื่น ๆ เช่น ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาต่ำ, ไม่เป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับโครงสร้างเนื่องจากสามารถใช้เป็นที่บรรจุน้ำสำหรับใช้ในการอุปโภคบริโภคภายในอาคาร หรือใช้ในกรณีที่เกิดอัคคีภัย, สามารถใช้ในการปรับปรุงเพื่อลดการสั่นไหวของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบให้สามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้ เป็นต้น

TLCD ถูกนำเสนอโดย Sakai [1] และได้รับความสนใจจากผู้นิยมด้านการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างด้วยระบบตัวหน่วงแบบพาสซีฟ TLCD เป็นอุปกรณ์ที่มีของเหลวบรรจุอยู่ในคอนเทนเนอร์รูปตัวยูมีหลักการในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างเหมือนกับมวลหน่วงปรับค่าได้ (Tuned Mass Damper, TMD) ที่ประกอบไปด้วยมวลและระบบสปริง TLCD ช่วยลดการสั่นไหวของโครงสร้างด้วยการสั่นกันของแรงหน่วงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำกับของเหลวขณะเกิดการเคลื่อนที่และการสูญเสียพลังงานจากการไหล (Hydrodynamic Head Loss)

หลังจาก TLCD ถูกนำเสนอโดย Sakai [1] จากนั้น Watkin [9] ได้เสนอ TLCD อีกรูปแบบหนึ่งที่มีขนาดของหน้าตัดที่ไม่คงที่ เขาเรียกตัวหน่วงชนิดนี้ว่า ตัวหน่วงปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอนไม่คงที่ (Liquid Column Vibration Absorber, LCVA) โดยความถี่ธรรมชาติของ LCVA สามารถปรับเปลี่ยนได้จาก "ความยาวประสิทธิภาพ" ซึ่งหมายถึงรูปร่างของคอนเทนเนอร์และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและแนวนอน หลักการสำคัญที่ว่าเมื่อความถี่ของการเคลื่อนที่ของเหลวถูกปรับให้เท่ากับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างและใช้อัตราการหน่วงของการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมจะทำให้ตัวหน่วงชนิดของเหลวมีประสิทธิภาพมากที่สุด [2-4] แต่เนื่องจากการหน่วงเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของของเหลวทำให้ไม่สามารถทราบค่าอัตราการหน่วงที่เหมาะสมได้หากไม่ทราบค่าแอมพลิจูดของการสั่นไหว แต่อย่างไรก็ตามการวิจัยก่อนหน้าก็สามารถหาประสิทธิภาพที่เหมาะสมของ TLCD ภายใต้ผลของแรงแผ่นดินไหวต่างกันไปไม่ได้ [5-8] จากการศึกษาของนักวิจัยก่อนหน้าส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถออกแบบ LCVA ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดนั้น คือ สามารถทำนายพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด เช่น Hitchcock [10] ได้ศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA โดยใช้สูตรดั้งเดิมของ Sakai [1] พบว่า พฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของ LCVA และการศึกษาของ Gao กับ Kwok [3]

พบว่าประสิทธิภาพของ LCVA มีมากกว่า TLCD ในการช่วยลดการสั่นไหวของโครงสร้าง

จากการศึกษาของนักวิจัยข้างต้นและที่ผ่านมาในอดีตมักพิจารณาเฉพาะ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีอัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบอยู่ในช่วง 0.04-0.2 สำหรับอาคารที่มีพื้นที่การใช้งานจำกัดมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำให้ LCVA มีอัตราส่วนของส่วนความกว้างในแนวนอนจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบขนาดใหญ่ (อัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบอยู่ในช่วง 0.35-0.75) จึงทำให้เกิดข้อจำกัดในงานวิจัยขึ้น ซึ่งรูปร่างของ LCVA ดังกล่าวทำให้วิธีการที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA โดยนักวิจัยก่อนหน้าไม่สามารถทำนายได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากไม่ได้คิดผลจากการเกิดพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลที่มีขนาดใหญ่ซึ่งทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นบริเวณนี้ ส่งผลให้เกิดการไหลของของเหลวภายใน LCVA บริเวณนี้บ่อย [11] ดังนั้น Chaiviriyawong [11] ได้ใช้วิธีการไหลแบบโพเทนเชียลเชิงตัวเลข (Numerical Potential Flow) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Numerical Panel Method ในการจำลองความเร็วในการไหลของของเหลวภายในตัวหน่วง และ Di Matteo, A. [12] ได้เสนอวิธีการทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ด้วยสมการ Fractional Differential ที่คิดผลของการเกิดการเคลื่อนที่แบบคลื่นบริเวณท่อแนวตั้งของ LCVA ผลปรากฏว่าทั้งสองวิธีนี้สามารถทำนายพฤติกรรมของ TLCD และ LCVA ที่มีขนาดต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ แต่เนื่องด้วยวิธีทั้งสองนี้ไม่มีวิธีการหาสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในตัวหน่วงที่ซับซ้อนและไม่สามารถหาได้โดยตรงจึงไม่ค่อยสะดวกนักที่จะนำมาใช้งานและเนื่องจากในกรณีนี้ LCVA มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลมีขนาดใหญ่ความเร็วในการไหลของของเหลวภายในตัวหน่วงบริเวณที่มุมของพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วการไหลนั้นจะไม่มีผลต่อมวลและความยาวประสิทธิภาพของ LCVA จึงทำให้สามารถพิจารณาการไหลบริเวณพื้นที่ดังกล่าวเป็นรูปร่างได้

โดยบทความฉบับนี้จะเสนอผลการเปรียบเทียบการทำนายพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA โดยใช้การประมาณการไหลเป็นรูปร่างมาใช้ในการจำลองพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลขนาดใหญ่ โดยการทดลองจะใช้โมเดล LCVA จำนวนสามตัวที่มีอัตราส่วนพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลต่อความยาวของท่อแนวราบขนาดใหญ่ซึ่งจะถูกทดสอบภายใต้การสั่นด้วยคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองบนโต๊ะเขย่าทั้งการเคลื่อนที่ของน้ำและ Interaction Force

2. สมการ

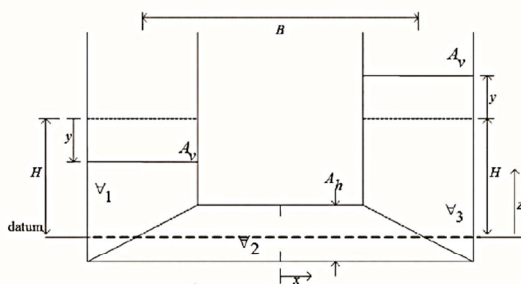
2.1 สมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA (Effective Length)

พิจารณา LCVA ดังรูปที่ 1 โดยมีการเคลื่อนที่ฐาน $x(t)$ พื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งและท่อในแนวราบแทนด้วย A_v และ A_h ตามลำดับ จากรูปที่ 1 เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ปริมาตรน้ำใน LCVA สามารถแบ่งได้

เป็นสามส่วนคือ ส่วนที่เป็นแนวตั้งสองส่วน (v_1 และ v_3) และส่วนที่เป็นแนวราบหนึ่งส่วน (v_2) สำหรับท่อที่เป็นแนวตั้งสมมุติให้ของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งโดยมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ \dot{y} ความเร็วในการไหลของของเหลวในท่อนแนวราบประมาณให้เป็นการไหลแบบราบเรียบที่มีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ \dot{r} เมื่อ r คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวราบ

$$r = A_v / A_h$$

จากหลักการของพลังงานและสมมุติให้พลังงานภายในของการไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลง การไหลเป็นการไหลแบบไม่ราบเรียบและไม่สามารถบีบอัดได้ ทำให้สามารถเขียนสมการของการไหลของของเหลวภายใน LCVA โดยใช้สมการลากรางังได้ดังนี้



รูปที่ 1 LCVA

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial(T-U)}{\partial \dot{y}} \right] - \frac{\partial(T-U)}{\partial y} = Q \tag{1}$$

เมื่อ T คือ พลังงานจลน์สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$T = \int_{v_1} \frac{\dot{y}^2}{2} \rho dV + \int_{v_2} \frac{(r\dot{y} + \dot{x})^2}{2} \rho dV + \int_{v_3} \frac{\dot{y}^2}{2} \rho dV$$

$$= \rho A_v h \dot{y}^2 + \rho A_h b \frac{(r\dot{y} + \dot{x})^2}{2} \tag{2}$$

U คือ พลังงานศักย์ของระบบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$U = \int_{v_1} gz \rho dV + \int_{v_2} gz \rho dV$$

$$= \rho g A_v \int_0^{h-y} z dz + \rho g A_h \int_0^{h+y} z dz = \rho g A_v (h^2 + y^2) \tag{3}$$

และ Q คือ พลังงานไม่อนุรักษ์ในทิศทางการไหล y ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียพลังงานจากการไหล(head loss)

$$Q = -(\rho g A_h) \left(\frac{\delta |r\dot{y}| r\dot{y}}{2g} \right) = -\frac{1}{2} \rho A_v r \delta |\dot{y}| \dot{y} \tag{4}$$

สมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA สามารถหาได้โดยแทนสมการที่ (2) ถึง (4) ลงในสมการที่ (1) จะได้สมการลากรางังดังนี้

$$\rho A_v L_e \ddot{y} + \frac{1}{2} \rho A_v r \delta |\dot{y}| \dot{y} + 2\rho A_v g y = -\rho A_v B \ddot{x} \tag{5}$$

เมื่อ ρ, δ และ g คือ ความหนาแน่นของของเหลว, ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย และความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงตามลำดับ ความยาวประสิทธิผลของ LCVA (L_e) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความยาวในแนวราบ (B) และความสูงในแนวตั้ง (H) ของ LCVA ได้ดังนี้

$$L_e = rB + 2H \tag{6}$$

ความถี่ธรรมชาติของการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA สามารถหาได้จาก $\omega_f = \sqrt{2g/L_e}$

2.2 การประมาณการไหลเป็นรูปวงรี (Elliptical Flow Path Estimation Method)

จากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการไหลแบบโพเทเชี่ยลเชิงตัวเลข [11] และผลการทดลองบนโต๊ะเขย่า แสดงให้เห็นว่าความเร็วของการไหลของของเหลวภายใน LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วขนาดใหญ่ นั้น ความเร็วของการไหลบริเวณมุมของพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลนั้นมีความเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วบริเวณส่วนอื่นๆ ทำให้ความเร็วของการไหลบริเวณนี้ไม่มีผลต่อมวลและความยาวประสิทธิผลของ LCVA ด้วยเหตุผลนี้จึงสามารถสมมุติให้การไหลบริเวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วขนาดใหญ่ นั้นเป็นรูปวงรีได้

จากรูปที่ 2 เส้นทางการไหลของของเหลวภายใน LCVA บริเวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลสามารถประมาณให้เป็นการไหลรูปวงรีได้ สมมุติให้การไหลของของเหลวในท่อนแนวตั้งสามารถไหลได้ในทิศแนวตั้งโดยมีความเร็วเฉลี่ย \dot{y} จากเงื่อนไขของความต่อเนื่องการไหลของของเหลวในท่อนแนวราบประมาณเป็นการไหลแบบราบเรียบที่มีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ \dot{r} ปริมาตรของน้ำใน LCVA จากรูปที่ 2 ถูกแบ่งออกเป็นห้าส่วนประกอบด้วย ส่วนที่เป็นแนวตั้งสองส่วน (v_1 และ v_3) ส่วนที่เป็นวงรีสองส่วน (v_2 และ v_4) และส่วนที่เป็นแนวนอนหนึ่งส่วน (v_5) โดยในส่วนที่ 2 และ 4 นั้น จะถูกนำเสนอในระบบพิกัด $r-\theta$ ความเร็วของการไหลทั้งสองส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับ มุม θ ดังแสดงในรูปที่ 3 และ $\theta = \frac{ay}{R}$ เมื่อ a คือ ความกว้างของท่อในแนวตั้ง และ

$$R \text{ คือ รัศมีที่เปลี่ยนตามมุม } \theta, R = \sqrt{\left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right)^{-1}} \text{ เมื่อ}$$

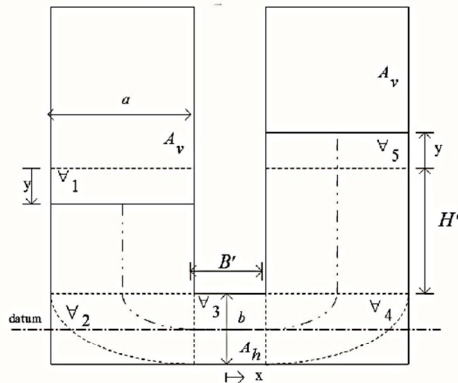
b คือ ความสูงของท่อในแนวตั้ง จากหลักการของงานและพลังงาน ดังนั้นพลังงานจลน์ในสมการที่ (1) แสดงได้ดังนี้ [13]

$$T = \rho A_v H' \dot{y}^2 + \frac{\rho A_v \pi a}{4} \dot{y}^2 + \frac{\rho A_v \pi a}{4} \dot{x}^2 + \rho A_v \dot{y} \int_0^{\frac{3\pi}{2}} R \cos \theta d\theta$$

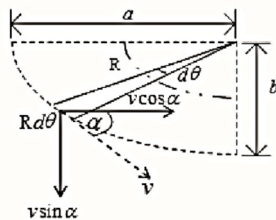
$$+ \frac{\rho A_v B'}{2} (r\dot{y} + \dot{x})^2 \tag{7}$$

พลังงานศักย์ของของเหลวสามารถอธิบายได้ดังนี้ [13]

$$U = \rho g A_v \int_0^{H-y} z dz + \rho g A_v \int_0^{H+y} z dz \tag{8}$$



รูปที่ 2 LCVA กับการประมาณการไหลเป็นรูปวงรี



รูปที่ 3 ส่วนที่ 2 และ 4 ในพิกัด r-θ

พลังงานการหมุนจากการเคลื่อนที่ของของเหลวสามารถประมาณได้โดย [13]

$$Q = -\left(\frac{1}{2}\rho g A_h\right)\left(\frac{\delta r \dot{y} | \dot{y}}{2g}\right) = -\frac{1}{2}\rho A_v r \delta | \dot{y} | \dot{y} \quad (9)$$

เมื่อนำสมการที่ (7) ถึง (9) แทนลงในสมการที่ (1) จะได้สมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายใน LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วขนาดใหญ่ดังนี้ [13]

$$\begin{aligned} &\rho A_v \left(2H' + B'r + \frac{\pi a}{2} \right) \ddot{y} + \frac{1}{2} \rho A_v r \delta | \dot{y} | \dot{y} + 2\rho g A_v y \\ &= -\rho A_v B' \ddot{x} - \rho A_v \ddot{x} \int_0^{\frac{\pi}{2}} R \cos \alpha d\theta \\ &= -\rho A_v (B' + 2C) \ddot{x} \\ &C = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} R \cos \alpha d\theta \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2}\right)^{-1}} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{b^2}{a^2} \cot \theta \right) \right) d\theta \end{aligned} \quad (10)$$

เมื่อ C คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของส่วนที่เป็นวงรีซึ่งบอกถึงมวลประสิทธิผลของของเหลวภายในส่วนที่เป็นวงรีทั้งสองส่วน (v₂ และ

v₄) ส่วนความยาวประสิทธิผล L_e และความถี่ธรรมชาติ ω_f สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} L_e &= rB' + 2H' + \frac{\pi a}{2} \\ \omega_f &= \sqrt{\frac{2g}{L_e}} = \sqrt{\frac{2g}{rB' + 2H' + \frac{\pi a}{2}}} \end{aligned} \quad (11)$$

สำหรับระบบตัวแปรอิสระเชิงเดี่ยว (SDOF) ที่มีการติดตั้ง LCVA สามารถใช้สมการการเคลื่อนที่ในการหาสมการอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบตัวแปรอิสระเชิงเดี่ยว (SDOF) ที่มีการติดตั้ง LCVA ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} &m_0 \ddot{x} + c_0 \dot{x} + k_0 x \\ &= -\rho A_v (B' + 2C) \ddot{y} - \rho A_v \left(2H' + 2b + \frac{B'}{r} \right) \ddot{x} \end{aligned} \quad (12)$$

เมื่อ m₀, c₀ และ k₀ คือค่ามวล, ความหน่วง และสติฟเนสของระบบตัวแปรอิสระเชิงเดี่ยวตามลำดับ จากสมการที่ (12) มีความแตกต่างจากสมการที่เสนอโดย Gao และ Kwok [3] หรือ Chang และ Hsu [8] คือแรงหน่วงที่เกิดจาก LCVA ที่อยู่ในพจน์ ρA_vC ซึ่งเป็นผลจากมวลประสิทธิผลและความกว้างประสิทธิผลในส่วนที่มีการไหลเป็นรูปวงรีทั้งสองส่วนของ LCVA

3. การทดลอง

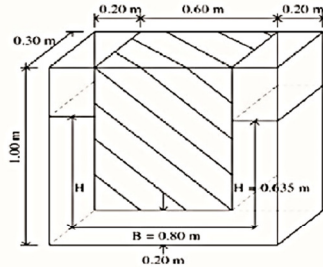
3.1 การออกแบบและจำลองโมเดล

โมเดลของ LCVA ที่มีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อในแนวตั้งต่อท่อในแนวนอนต่างกันออกไปจำนวน 3 ตัว (r = 1, 1.5 และ 2) โดยมีอัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบเท่ากับ 0.35, 0.52 และ 0.75 ตามลำดับถูกจำลองขึ้นเพื่อใช้ในการหาพฤติกรรมการสั่นไหว โดยโมเดลของ LCVA ทั้งสามตัว (ชนิดที่ 1, 2 และ 3) แสดงดังรูปที่ 4, 5 และ 6

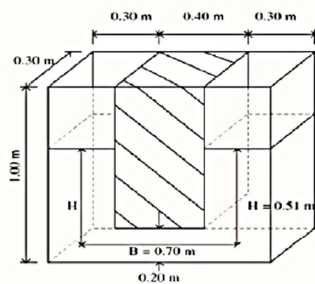
จากการวิจัยก่อนหน้ามีการศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวได้ใช้ TLC D และ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลของของเหลวที่มีขนาดเล็กซึ่งมีอัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบอยู่ในช่วง 0.04-0.2 (Transition Zone ขนาดเล็ก) แต่สำหรับอาคารที่มีพื้นที่ในการใช้สอยจำกัดเพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่จึงจำเป็นต้องใช้ TLC D และ LCVA ที่มีอัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้จะใช้ตัวหน่วงที่มีอัตราของส่วนความกว้างที่วัดจากมุมหนึ่งถึงอีกมุมหนึ่งต่อความยาวของท่อในแนวราบในช่วง 0.35 ถึง 0.75 (Transition Zone ขนาดใหญ่)

โมเดลของตัวหน่วงแต่ละตัวจะประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นแท่งกึ่งครีติกและส่วนที่เป็นแผ่นโฟมโพลียูรีเทนสำหรับใส่ลงไปในแท่งกึ่งเพื่อให้เกิดโมเดลของ LCVA ที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป จากการศึกษาของโมเดลของ LCVA ทั้งสามตัวนั้นถูกคาดหวังให้สามารถนำไปติดกับตึกที่มีความสูงประมาณ 20 ชั้น ที่มีความถี่ธรรมชาติประมาณ 0.5 เฮิรตซ์ ได้ ดังนั้นโมเดลทั้งหมดจึงต้องถูกออกแบบให้มีความยาวประสิทธิผล L_e = 2.07 m ตามการศึกษาโดยใช้วิธีการประมาณ

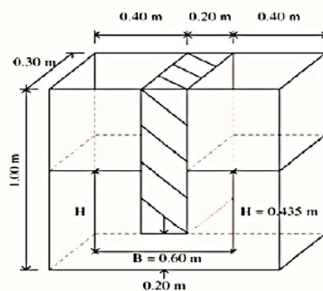
เส้นทางการไหลประสิทธิผลอย่างง่ายของ Gao และ Kwok [3] หรือ Chang และ Hsu [8] เพื่อให้โมเดลทั้งสามตัวนั้นมีความถี่ธรรมชาติเท่ากันโดยอยู่ที่ประมาณ 0.49 เฮิรตซ์



รูปที่ 4 LCVA ชนิดที่ 1



รูปที่ 5 LCVA ชนิดที่ 2



รูปที่ 6 LCVA ชนิดที่ 3

3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

โมเดลของ LCVA จะถูกติดตั้งอยู่บนโต๊ะเขย่าที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบโดยอาศัยตัวเร่งทำให้เกิดการสั่น ซึ่งขอบเขตของการทดลองมีดังนี้

3.2.1 การทดสอบการสั่นแบบอิสระ (Free Vibration Test)

การทดสอบการสั่นแบบอิสระมีจุดประสงค์เพื่อหาพฤติกรรมสั่นจากการเคลื่อนที่ของของเหลวโดยใช้ระยะเริ่มต้นของโต๊ะเขย่าต่างกันออกไป (อยู่ในช่วง $\pm 3\text{cm}$ ถึง $\pm 10\text{cm}$) ค่าอัตราการหน่วงและความถี่ธรรมชาติของโมเดล LCVA ทั้งสามตัวนั้นจะสามารถหาได้จากการทดลองนี้

3.2.2 การทดสอบด้วย Time History และ Sinusoidal Excitation

การทดสอบนี้ใช้เพื่อหาค่าการตอบสนองต่อความถี่ของการเคลื่อนที่ของของเหลวในโมเดล LCVA แต่ละตัว โดยใช้การกระตุ้นพื้นฐานของ LCVA ด้วยการสั่นของพื้นดินที่จำลองขึ้น (Time History No.1) และคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ที่มีความถี่ในช่วงที่ทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) สำหรับ LCVA แต่ละชนิด

ในการทดสอบทั้งหมดจะมีการวัดค่า ความเร่งของโต๊ะเขย่า, แรงหน่วงที่เกิดจาก LCVA, ค่าการสูญเสียพลังงานจากการไหล, เฟสและระยะเวลาเคลื่อนที่ของของเหลวภายในโมเดล LCVA แต่ละตัว เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

4. การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการทดลองบนโต๊ะเขย่า

4.1 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลและการทดลองบนโต๊ะเขย่า

การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการแก๊สมการที่ (5) โดยใช้ค่าอัตราส่วนการหน่วงที่ได้จากการทดสอบการสั่นแบบอิสระ การวิเคราะห์ซึ่งใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลของ Gao และ Kwok [3] หรือ Chang และ Hsu [8] จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าด้วยการสั่นของพื้นดินที่จำลองขึ้น (Time History No.1) และคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ที่มีความถี่ในช่วงเรโซแนนซ์ของโมเดล LCVA ทั้งสามตัว

จากรูปที่ 7 และ 10 แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 1 ซึ่งมี Transition Zone ขนาดเล็ก ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลนั้นมีความใกล้เคียงกับผลจากการทดลองบนโต๊ะเขย่าทั้งการเคลื่อนที่ของน้ำภายใน LCVA และ Interaction Force โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลการทดลองเท่ากับ 3.13% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 7.22% สำหรับ Interaction Force ของการทดสอบด้วยการสั่นของพื้นดินที่จำลองขึ้น (Time History No.1) ดังรูปที่ 7 และ 3.08% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 4.57% สำหรับ Interaction Force ของการทดสอบด้วยคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ดังรูปที่ 10

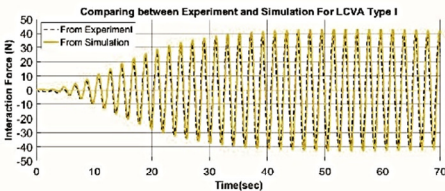
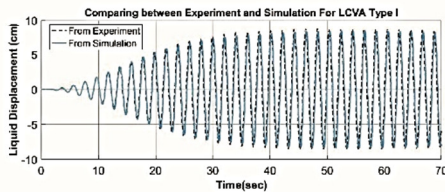
สำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 ซึ่งมี Transition Zone ขนาดกลาง ผลการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลไม่เป็นที่น่าพอใจสำหรับการทดสอบด้วยการสั่นของพื้นดินที่จำลองขึ้น (Time History No.1) โดยมีคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าเท่ากับ 66.07% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 108.92% สำหรับ Interaction Force ดังรูปที่ 8 แต่สำหรับการทดสอบด้วยคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ที่มีความถี่ในช่วงเรโซแนนซ์ของโมเดล LCVA ชนิดที่ 2 (0.51 Hz) ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลให้ผลการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับการทดลองบนโต๊ะเขย่า โดยมีคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าเท่ากับ 7.53% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 9.60% สำหรับ Interaction Force ดังรูปที่ 11

สำหรับ LCVA ชนิดที่ 3 ซึ่งมี Transition Zone ขนาดใหญ่ ผลการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหล

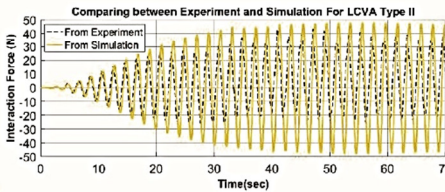
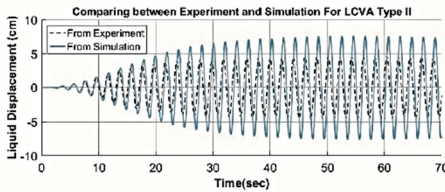


ประสิทธิภาพนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อเทียบกับผลการทดสอบบนโต๊ะเขย่าทั้งการทดสอบด้วยการสั่นของพื้นดินที่จำลองขึ้น (Time History No.1) และคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ที่เรโซแนนซ์ของ LCVA ชนิดที่ 3 (0.53 Hz) ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลการทดลองเท่ากับ 193.03% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 181.02% สำหรับ Interaction Force ของการทดสอบด้วยการสั่นของพื้นดินที่จำลองขึ้น (Time History No.1) ดังรูปที่ 9 และ 44.37% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 44.23% สำหรับ Interaction Force ของการทดสอบด้วยคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ดังรูปที่ 12

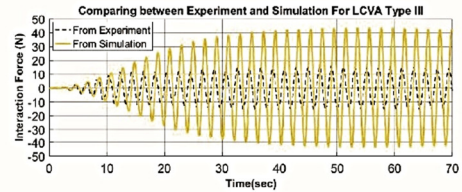
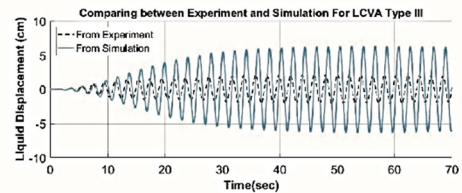
จากการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพและการทดลองบนโต๊ะเขย่าทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิภาพสามารถทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ (ทั้งการเคลื่อนที่ของน้ำและ Interaction Force) ได้ดีสำหรับ LCVA ที่มี Transition Zone ขนาดเล็กและขนาดกลาง นั่นคือ LCVA ชนิดที่ 1 และ LCVA ชนิดที่ 2 (ในกรณีทดสอบด้วยคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ในช่วง Resonance 0.51Hz) แต่ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 3 (Transition Zone ขนาดใหญ่) และ ชนิดที่ 2 (ในกรณีทดสอบด้วยคลื่น Time History No.1) ได้



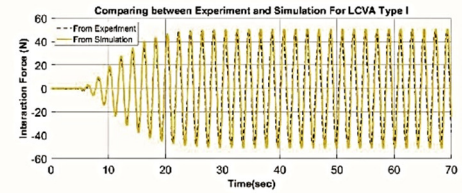
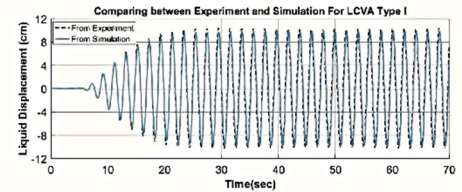
รูปที่ 7 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 1 จำลองโดยวิธี Effective Length ภายใต้การกระตุ้นด้วย Time History No.1



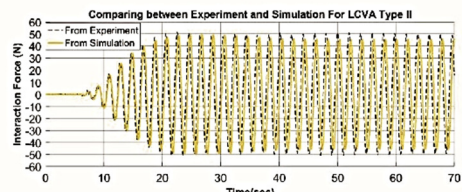
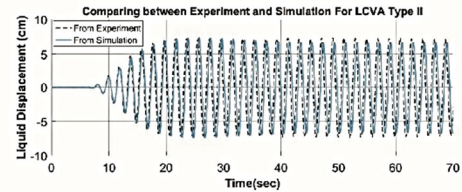
รูปที่ 8 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2 จำลองโดยวิธี Effective Length ภายใต้การกระตุ้นด้วย Time History No.1



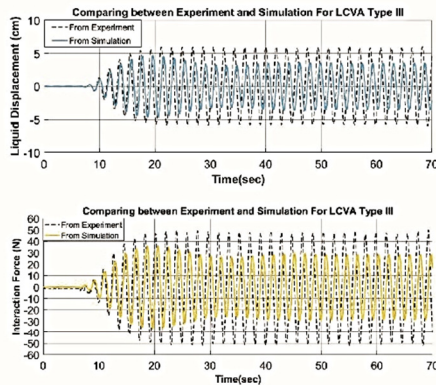
รูปที่ 9 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 3 จำลองโดยวิธี Effective Length ภายใต้การกระตุ้นด้วย Time History No.1



รูปที่ 10 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 1 จำลองโดยวิธี Effective Length ภายใต้การกระตุ้นด้วย sinusoidal 0.49Hz



รูปที่ 11 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2 จำลองโดยวิธี Effective Length ภายใต้การกระตุ้นด้วย sinusoidal 0.51Hz



รูปที่ 12 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 3 จำลองโดยวิธี Effective Length ภายใต้การกระตุ้นด้วย sinusoidal 0.53Hz

ตารางที่ 1 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการจำลองด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล

Acceleration	LCVA	Error (%) เทียบกับผลการทดลอง	
		Effective Length	
		Water Displacement	Interaction Force
Time History No.1	Type 1	3.13	7.22
	Type 2	66.07	108.92
	Type 3	193.03	181.02
Sinusoidal 0.49Hz	Type 1	3.08	4.57
Sinusoidal 0.51Hz	Type 2	7.53	9.60
Sinusoidal 0.53Hz	Type 3	44.37	44.23

4.2 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีและการทดลองบนโต๊ะเขย่า

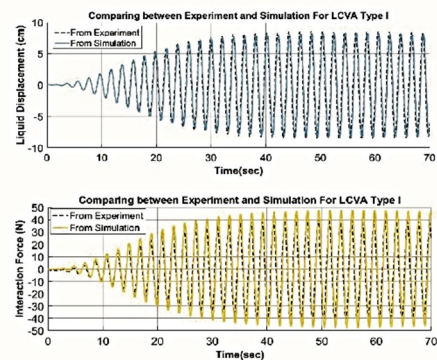
ประสิทธิภาพของวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีในการจำลองพฤติกรรมกรรมสัมพันธ์ของ LCVA คือ เมื่อนำมาใช้ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลขนาดใหญ่จะสามารถประมาณความเร็วของการไหลบริเวณพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลได้ดีขึ้น การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA โดยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้สมการที่ (12) ผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ทั้งสามชนิดด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี

ผลการทดสอบของ LCVA ชนิดที่ 1 ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีมีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกับการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล [3,9] จากหัวข้อ 4.1 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลการทดลองเท่ากับ 3.08% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 18.68% สำหรับ interaction force ของการทดสอบด้วยการสั่นของพื้นดินที่จำลองขึ้น (Time History No.1) ดังรูปที่ 13 และ 3.23% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 15.76% สำหรับ interaction force ของการทดสอบด้วยคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ดังรูปที่ 16

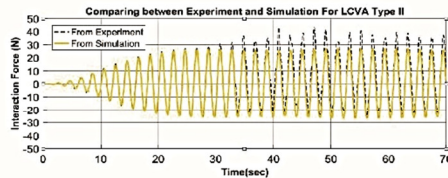
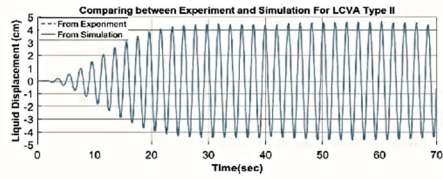
แต่เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของ LCVA ชนิดที่ 2 การทดสอบด้วยการสั่นของพื้นดินที่จำลองขึ้น (Time History No.1) และคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ที่เรโซแนนซ์ของ LCVA ทั้งสองชนิด

พบว่าวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีให้การตอบสนองที่แม่นยำกว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผล [3],[10] สำหรับ LCVA ชนิดที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลการทดลองเท่ากับ 0.65% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 15.77% สำหรับ Interaction Force ของการทดสอบด้วยการสั่นของพื้นดินที่จำลองขึ้น (Time History No.1) ดังรูปที่ 14 และ 2.22% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 3.58% สำหรับ Interaction Force ของการทดสอบด้วยคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ดังรูปที่ 17 และโดยเฉพาะในกรณีของ LCVA ชนิดที่ 3 ซึ่งมี Transition Zone ขนาดใหญ่ ผลการตอบสนองต่อความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลอยู่มาก เมื่อเทียบจากผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าทั้งการทดสอบด้วยการสั่นของพื้นดินที่จำลองขึ้น (Time History No.1) และคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ที่เรโซแนนซ์ของ LCVA ชนิดที่ 3 (0.53 Hz) ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลการทดลองเท่ากับ 9.54% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 18.84% สำหรับ interaction force ของการทดสอบด้วยการสั่นของพื้นดินที่จำลองขึ้น (Time History No.1) ดังรูปที่ 15 และ 2.81% สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ, 9.4% สำหรับ Interaction Force ของการทดสอบด้วยคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Excitation) ดังรูปที่ 18

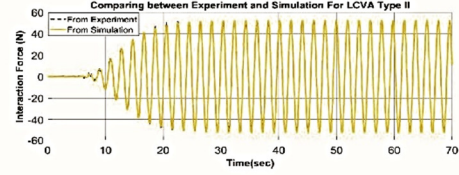
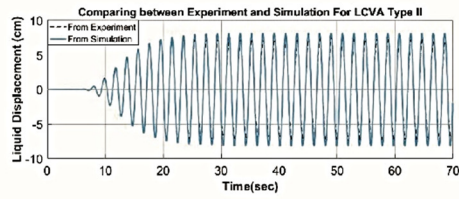
จากการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีและการทดลองบนโต๊ะเขย่าทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสามารถทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ (ทั้งการเคลื่อนที่ของน้ำและ Interaction Force) ได้ดีสำหรับ LCVA ทั้ง 3 ชนิด (ทั้งที่มี Transition Zone ขนาดเล็กและขนาดใหญ่) โดยเฉพาะ LCVA ชนิดที่ 2 และ LCVA ชนิดที่ 3 วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสามารถทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ได้แม่นยำกว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลประสิทธิผลอย่างมาก



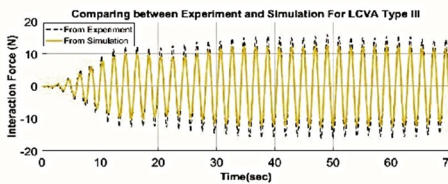
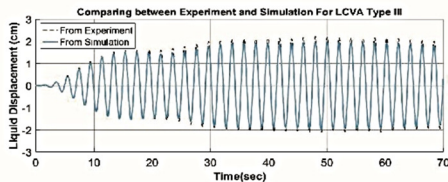
รูปที่ 13 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 1 จำลองโดยวิธี Elliptical Flow ภายใต้การกระตุ้นด้วย Time History No.1



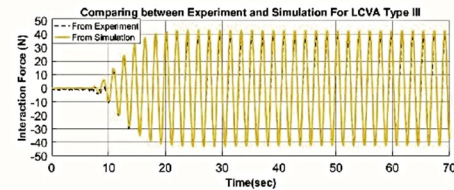
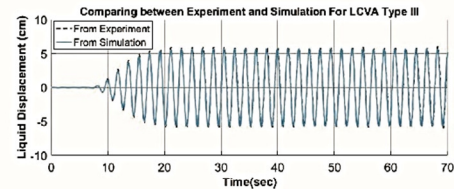
รูปที่ 14 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2 จำลองโดยวิธี Elliptical Flow ภายใต้การกระตุ้นด้วย Time History No.1



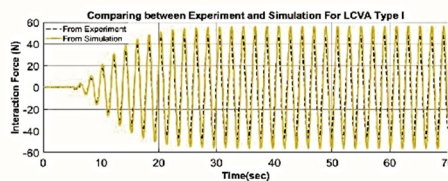
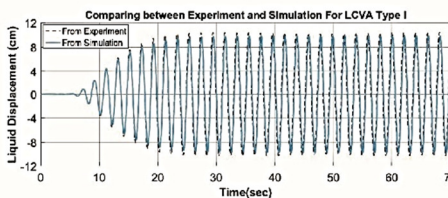
รูปที่ 17 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 2 จำลองโดยวิธี Elliptical Flow ภายใต้การกระตุ้นด้วย sinusoidal 0.51Hz



รูปที่ 15 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 3 จำลองโดยวิธี Elliptical Flow ภายใต้การกระตุ้นด้วย Time History No.1



รูปที่ 18 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 3 จำลองโดยวิธี Elliptical Flow ภายใต้การกระตุ้นด้วย sinusoidal 0.53Hz



รูปที่ 16 การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ชนิดที่ 1 จำลองโดยวิธี Elliptical Flow ภายใต้การกระตุ้นด้วย sinusoidal 0.49Hz

ตารางที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการจำลองด้วยวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรี

Acceleration	LCVA	Error (%) เทียบกับผลการทดลอง	
		Elliptical Flow Path	
		Water Displacement	Interaction Force
Time History No.1	Type 1	3.08	18.68
	Type 2	0.85	15.77
	Type 3	9.54	18.84
Sinusoidal 0.49Hz	Type 1	3.23	15.76
Sinusoidal 0.51Hz	Type 2	2.22	3.58
Sinusoidal 0.53Hz	Type 3	2.81	9.04

ตารางที่ 3 ความยาวประสิทธิผลของตัวหน่วงและค่าความถี่ธรรมชาติที่หาได้จากวิธีต่างๆ

Damper Configuration	Corner-to-corner width to horizontal length ratio	Experiment		Gao and Kwok [3] or Chang and Hsu [8]		Hitchcock[10]		Elliptical Flow Path Estimation Method	
		L_o (m)	f_n (Hz)	L_o (m)	f_n (Hz)	L_o (m)	f_n (Hz)	L_o (m)	f_n (Hz)
	0.35	2.070	0.490	2.070 (0%)	0.490 (0%)	2.070 (0%)	0.490 (0%)	1.984 (4.15%)	0.500 (2.14%)
	0.52	1.910	0.510	2.070 (8.38%)	0.490 (3.92%)	1.820 (4.71%)	0.523 (2.46%)	1.891 (0.98%)	0.513 (0.51%)
	0.75	1.770	0.530	2.070 (16.95%)	0.490 (7.55%)	1.470 (16.95%)	0.581 (9.71%)	1.698 (4.05%)	0.541 (2.07%)
	0.13	4.270	0.341	4.172 (2.29%)	0.345 (1.21%)	3.728 (12.7%)	0.365 (7.07%)	3.852 (9.78%)	0.359 (5.33%)
	0.1	3.300	0.388	3.186 (3.46%)	0.395 (1.8%)	2.937 (11.0%)	0.411 (6.02%)	3.019 (8.5%)	0.406 (4.56%)
	0.08	2.420	0.453	2.218 (8.36%)	0.473 (4.5%)	2.117 (12.51%)	0.485 (6.95%)	2.155 (10.93%)	0.480 (6%)
	0.06	1.500	0.575	1.528 (1.9%)	0.570 (0.83%)	1.502 (0.14%)	0.575 (0.03%)	1.507 (0.49%)	0.574 (0.14%)
	0.04	1.150	0.636	1.024 (10.92%)	0.697 (6.17%)	1.034 (10.12%)	0.693 (5.71%)	1.014 (11.85%)	0.700 (6.74%)
	0.72	0.185	1.905	0.185 (0%)	1.639 (13.96%)	0.185 (0%)	1.639 (13.96%)	0.162 (12.53%)	1.752 (8.01%)
	0.46	0.175	1.880	0.175 (0%)	1.685 (10.36%)	0.175 (0%)	1.685 (10.36%)	0.160 (8.34%)	1.760 (6.37%)
	0.32	0.205	1.681	0.205 (0%)	1.557 (7.38%)	0.205 (0%)	1.557 (7.38%)	0.195 (5.02%)	1.598 (4.96%)

หมายเหตุ : 1) รูปที่ 1-8 ใช้อัตราส่วน 1:30 และ รูปที่ 9-11 ใช้อัตราส่วน 1:5
 2) ตัวเลขใน “()” หมายถึง ค่า error เมื่อเทียบกับ Experiment

5. บทสรุป

จากการศึกษาพบว่าวิธีเส้นทางการไหลประสิทธิภาพจะสามารถทำนายผลการตอบสนองต่อความถี่ได้ใกล้เคียงกับการทดลองบนโต๊ะเขย่าทั้งการเคลื่อนที่ของน้ำ ภายใน LCVA และ Interaction Force เฉพาะ LCVA ที่มี Transition Zone ขนาดเล็ก แต่ไม่สามารถทำนายผลการตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มี Transition Zone ขนาดใหญ่ได้เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นจากการคำนวณความยาวประสิทธิภาพ (L_e) บริเวณ Transition Zone ซึ่งมีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถคำนวณความถี่ธรรมชาติได้อย่างแม่นยำ ดังแสดงใน ตารางที่ 3 ดังนั้นวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีถูกนำเสนอขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในตัวทวนเพื่อพัฒนาการจำลองพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA ที่มี Transition Zone ขนาดใหญ่ จากการศึกษพบว่าวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีสามารถคำนวณความยาวประสิทธิภาพ (L_e) และความถี่ธรรมชาติของ LCVA ที่มี Transition Zone ขนาดใหญ่ได้อย่างแม่นยำ ดังแสดงใน ตารางที่ 3 ทำให้การตอบสนองต่อความถี่ของ LCVA ที่มี Transition Zone ขนาดใหญ่ โดยใช้วิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรีนั้นให้ผลการตอบสนองที่แม่นยำมากกว่าวิธีที่เสนอก่อนหน้าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าทั้งการเคลื่อนที่ของน้ำ ภายใน LCVA และ Interaction Force

ดังนั้นวิธีการประมาณการไหลเป็นรูปวงรีจึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในการจำลองพฤติกรรมการสั่นไหวของ LCVA ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวขนาดใหญ่

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sakai, F., Takeda, S. and Tamaki, T. (1989). Tuned liquid column damper-new type device for suppression of building vibrations, Proceedings of the *international conference on highrise buildings*, pp. 926-931.
- [2] Warburton, G.B. (1981). Optimum absorber parameters for minimizing vibration response. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 9, pp. 251-262.
- [3] Gao, H. and Kwok, K.C.S. (1997). Optimization of tuned liquid column dampers, *Engineering Structures*, 19, pp. 476-86.
- [4] Sun, L.M., Fujino, Y., Chaiseri, P. and Pacheco, B.M., The properties of tuned liquid dampers using a TMD analogy. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp. 967-976.
- [5] Won, A.J.Y., Pires, J.A. and Haroun, M.A. (1996). Stochastic seismic performance evaluation of tuned liquid column dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp. 1259-1274.
- [6] Sadek, F., Mohraz, B. and Lew, H.S. (1998). Single- and multiple-tuned liquid column dampers for seismic applications. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp. 439-63.
- [7] Yu, J., Wakahara, T. and Reed, D.A. (1998). A non-linear numerical model of the tuned liquid damper. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, pp. 671-686.
- [8] Chang, C.C. and Hsu, C.T. (1998). Control performance of liquid column vibration absorbers. *Engineering Structures*, pp. 580-586.
- [9] Watkins, R.D. (1991). Tests on a liquid column vibration absorber for tall structures. Proceedings of the *international conference on steel and aluminium structures*.
- [10] Hitchcock, P.A., Kwok, K.C.S., Watkins, R.D. and Samali, B. (1997). Characteristics of liquid column vibration absorbers (LCVA)-I. *Engineering Structures*, 19, pp. 135-44.
- [11] Chaiviriyawong, P., Webster, W.C., Pinkaew, T. and Lukkunaprasit, P. (2007). Simulation of characteristics of tuned liquid column damper using a potential-flow method. *Engineering Structures*, 29, pp. 132-144.
- [12] Matteo, A.D., Iacono, F.L., Navarra, G. and Pirrotta, A. (2015). Innovative modeling of tuned liquid column damper motion. *Communications in Nonlinear Science Numerical Simulation*, 23, pp. 229-244.
- [13] ปฐวี สังข์น้อย และ ภาสกร ชัยวิริยวงค์ (2559). การจำลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของตัวทวนปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21*, สงขลา, 28-30 มิถุนายน 2559, หน้า 303-309.



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ ๒๒
“เทคโนโลยีเขียวเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน”

ขอขอบเกียรติบัตรฉบับนี้เพื่อแสดงว่า

ปฐวี ลังษ์น้อย และ ภาสกร ชัยวิริยวงค์

ได้เข้าร่วมประชุมและเสนอบทความ

การเปรียบเทียบผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าของตัวหม่วงปรับค่าได้ชนิดของเกลอแบบมีแกน
ที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของของเหลวภายในขนาดใหญ่
ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี

ระหว่างวันที่ ๑๘ - ๒๐ กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๖๐

ณ เดอะกรีนเนอริ รีสอร์ท อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

ได้รับการรับรองจากสภาวิศวกรใหม่จำนวนหน่วยพัฒนา ๑๒ หน่วย รหัสกิจกรรม ๓๐๑-๐๑-๒๐๐๑-๐๐/๖๐๐๗-๐๐๔

วิฑูรย์ ธีระศิริ
 (ดร.ธเนศ วีระศิริ)

นายกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
 ประจำปี พ.ศ. ๒๕๖๐-๒๕๖๒

ธเนศ วีระศิริ

(รองศาสตราจารย์ เอก ศิริพานิชกร)
 ประธานกรรมการกลางจัดประชุมวิชาการ
 วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ ๒๒

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายปฐวี สังข์น้อย	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5810120033	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2558

ทุนการศึกษา

ทุนศิษย์ก้นกุฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2558

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ปฐวี สังข์น้อย. ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์. 2559. "การจำลองเพื่อหาค่าคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของตัว
 ผนังปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูป
 วงรี" การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 22 วันที่ 28 - 30 มิถุนายน
 2559 ณ โรงแรม บีพี สมิหลา บีช สงขลา จ.สงขลา

ปฐวี สังข์น้อย. ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์. 2560. "การเปรียบเทียบผลการทดลองบนโต๊ะเขย่าของตัวผนัง
 ปรับค่าได้ชนิดของเหลวแบบมีแกนที่มีพื้นที่การเปลี่ยนความเร็วในการไหลของ
 ของเหลวภายในขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการประมาณเส้นทางการไหลเป็นรูปวงรี" การ
 ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 22 วันที่ 18 - 20 กรกฎาคม 2560
 ณ เดอะกรีนเนอรี รีสอร์ท เขาใหญ่ จ.นครราชสีมา