บทที่ 1
บทนำ

ในช่วง 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาอย่างมากในการควบคุมเพื่อลดขนาดของการสั่นไหวของโครงสร้าง ทั้งนี้เพราะว่าในปัจจุบันมีโครงสร้างทางวิศวกรรมขนาดใหญ่ซึ่งมีความซะลูดเกิดขึ้นมาเป็นจำนวนมากและประสบปัญหาเกี่ยวกับการสั่นไหว ทั้งที่เกิดจากแรงลมและจากแผ่นดินไหว ระบบหรือวิธีการที่ใช้สำหรับลดการสั่นไหวได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องกระทั่งในปัจจุบัน ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟเป็นระบบควบคุมหนึ่งที่มีการนำมาใช้ในอาคารจริง ระบบนี้ประกอบด้วยมวล สปริง ตัวออกแรงกระทำ และอาจจะมีตัวหน่วงด้วย จากการศึกษาพบว่าระบบนี้ลดการสั่นไหวได้มาก แต่ทั้งนี้การออกแรงกระทำต้องมีวิธีการให้ แรงกระทำต่อระบบที่ดีด้วย จึงจะทำให้การสั่นไหวของโครงสร้างลดลงได้มากภายใต้การออกแรงควบคุมที่จำกัด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาการพิจารณาถึงประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟต่อการลดผลตอบสนองของโครงสร้างนั้น พิจารณาโครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติก แต่การสั่นไหวในกรณีที่เกิดแผ่นดินไหวนั้นโครงสร้างอาจได้รับความเสียหายในขณะที่รับแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นจึงควรพิจารณาโครงสร้างดังกล่าวอยู่ในช่วงอินอีลาสติก ในปัจจุบันได้มีโปรแกรมที่ใช้ในการพิจารณาการสั่นไหวของโครงสร้างที่มีดีกรีความอิสระหลายดีกรีในช่วงอินอีลาสติก เช่น IDARC และ DRAIN เป็นต้น แต่ยังไม่มีโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการติดตั้งระบบควบคุมแบบมวลหน่วงในโครงสร้าง

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงทำขึ้นเพื่อปรับปรุงโปรแกรมวิเคราะห์การสั่นไหวของโครงสร้างในช่วงอินอีลาสติก ให้สามารถวิเคราะห์ระบบที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟที่ชั้นบนสุดของอาคารซึ่งเป็นตำแหน่งจริงที่ติดตั้งระบบควบคุม ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างดังกล่าวมีความใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น และทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟที่ชั้นบนสุดของอาคารในช่วงอินอีลาสติกได้

1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเพื่อปรับปรุงโปรแกรมเพื่อการวิเคราะห์อินอีลาสติกไดนามิกที่มีการติดมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ ต้องศึกษาพฤติกรรมของการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างจากงานวิจัยเกี่ยวกับระบบควบคุมต่างๆและงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงการตอบสนองของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหวด้วยมวลหน่วงปรับค่า ดังแสดงต่อไปนี้

1.1.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหวโดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม

Kunnath และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหวของโครงข้อแข็งที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ซึ่งเหล็กเสริมล่างของคานไม่ต่อเนื่อง เหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีน้อย และเหล็กเสริมตามขวางในเสามีน้อย โครงข้อแข็งที่นำมาวิเคราะห์เป็นโครงสร้างที่มีความสูง 3 ชั้น 6 ชั้น และ 9 ชั้น ทดสอบโดยให้รับแรงแผ่นดินไหวต่างๆกัน ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IDARC v. 3.0 (Inelastic damage analysis of reinforced concrete buildings) โดยค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้จากการศึกษาของ Aycardi และคณะ (1994) และ Pessiki และคณะ (1990) ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Nahami (1985), El Centro (1940), Taft (1952) และ คลื่นที่ใช้ออกแบบของ UBC (1988) โดยกำหนดความเร่งของพื้นดินมากที่สุด (Peak ground acceleration ,PGA) ให้มีค่าเท่ากับ 0.2 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ยกเว้นคลื่นแผ่นดินไหวของ UBC ใช้ความเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.15 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม IDARC ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาค่าความเสียหายได้โดยใช้แบบจำลองความเสียหาย (Damage model) ที่เสนอโดย Park, Ang และ Wen พบว่าภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวขนาดแรง (Taft และ El Centro) โครงสร้างเกิดความเสียหายอย่างมากในระดับที่ไม่สามารถซ่อมแซมได้ ($DI \geq 0.5$) ทั้งในชิ้นส่วนคานและชิ้นส่วนเสา สำหรับกรณีที่ใช้คลื่นแผ่นดินไหวขนาดปานกลาง (Nahami และ คลื่นของ UBC) โครงสร้างมีความเสียหายเกิดขึ้นในระดับที่ซ่อมแซมได้ ($0.10 \leq DI \leq 0.30$) และโดยทั่วไปความเสียหายที่เกิดขึ้นในคานจะมากกว่าในเสาเพียงเล็กน้อย แต่สำหรับชั้นล่างของอาคารความสูง 9 ชั้นพบว่าคานมีความเสียหายมากกว่าเสาค่อนข้างมากซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอัตราส่วนความแข็งแรงของเสามากกว่าคานมากในชั้นนี้ จากผลดังกล่าวนี้ทำให้ชี้ชัดได้ว่าคานที่มีความสามารถในการรับโมเมนต์บวก

น้อยและมีความเหนียวน้อยเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการวิบัติของโครงสร้าง มากกว่าสาเหตุอันเนื่องมาจากการวิบัติแบบเฉือนที่จุดต่อหรือการวิบัติอันเนื่องมาจากการเสริมเหล็กตามขวางของเสา อย่างไรก็ตามในส่วนชั้นสูงขึ้นเนื่องจากคานและเสามีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน การวิบัติที่เกิดจากการ ถูกดึงของเหล็กเสริมในคาน (Pullout) การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนที่จุดต่อ (Joints) และการวิบัติเนื่องจากเหล็กเสริมตามขวางของคานและเสาที่มีน้อย ต่างเป็นสาเหตุของการวิบัติทั้งสิ้น

Bracci, Reinhorn และ Mander (1995) ได้ศึกษาพฤติกรรมและการต้านทานแรงด้านข้างของแบบจำลองโครงข้อแข็งขนาด 1/3 ส่วนของอาคารจริง ความสูง 3 ชั้นโดยใช้ Shaking table และวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ IDARC v. 3.0 โดยการดันด้วยแรงด้านข้างแบบสถิตจนโครงสร้างวิบัติ (Pushover or shakedown analysis) และวิธีพลศาสตร์ (Dynamic analysis) โดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบของ Aycardi และคณะ (1994)

จากการศึกษาโดยการดันด้วยแรงด้านข้างจนโครงสร้างวิบัติโดยใช้แรงด้านข้างกระจายเป็นรูปสามเหลี่ยม (Inverted triangular) พบว่าเกิดการวิบัติเนื่องจากโครงสร้างเกิดการครากที่เสาชั้น 1 ทั้งชั้น และได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนที่ฐาน (Base shear coefficient ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับน้ำหนักของโครงสร้าง) มีค่า 15.0 เปอร์เซ็นต์ และจากการทดสอบด้วยโต๊ะการสั่น (Shaking table) พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนที่ฐานมีค่า 15.2 และ 15.3 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแผ่นดินไหวขนาด 0.20 และ 0.30 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกตามลำดับ ดังนั้นการวิเคราะห์โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ IDARC โดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบจึงให้ผลถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้

การวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Taft ที่มีขนาด 0.05, 0.20 และ 0.30 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก พบว่ากรณีแผ่นดินไหวขนาดเล็ก (0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก) ความเสียหายที่เกิดในคานและเสามีน้อย และในกรณีแผ่นดินไหวขนาดปานกลาง (0.20 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก) และขนาดใหญ่ (0.30 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก) เกิดความเสียหายมากขึ้นตามลำดับ โดยบริเวณที่มีความเสียหายมากมักจะเป็นบริเวณเสาที่อยู่ภายใน เนื่องจากต้องรับแรงที่มากนั่นเอง

Wu (1995) ได้ศึกษาอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ตัวอย่างทดสอบใช้อาคารสำนักงานความสูง 3 ชั้น และได้นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ร่วมกับอาคาร 12 ชั้นซึ่งมีผู้ศึกษามาก่อนหน้าแล้ว การวิเคราะห์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ DRAIN–

2DX โดยมีสมมติฐานที่ว่าไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งหรือการหมุนเกิดขึ้นที่ฐานของอาคาร ไม่พิจารณาการเปลี่ยนรูปร่างของพื้นนั่นก็คือเป็นพื้นแข็ง (Rigid floor diaphragms) อาคารที่ศึกษาสมมาตร ไม่คิดผลของการบิด ไม่คิดว่ามีผลของการช่วยรับแรงของผนังก่ออิฐ และจำลองโครงสร้างเป็น 2 มิติ สำหรับความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียด ในคานใช้ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Park และ Kent (1971) และในเสาใช้ความสัมพันธ์ของ Sheikh และ Uzumeri (1982) ความสัมพันธ์ของโมเมนต์กับความโค้งของอาคารเป็นแบบเส้นตรงที่มีความชันต่างกัน 2 เส้น (Bilinear) นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ยังรวมผลของการวิบัติเฉพาะที่ด้วย ได้แก่การหลุดของเหล็กเสริมล่างในคาน (Pullout) การวิบัติเนื่องจากเหล็กปลอกที่น้อย จากการศึกษาพบว่าอาคารความสูง 3 ชั้นค่อนข้างจะมีความเหนียวที่น้อย เมื่อเทียบกับอาคาร 12 ชั้น เนื่องจากเกิดการวิบัติที่ชั้นเดียว (Single story mechanism) แต่ในอาคาร 12 ชั้นที่ออกแบบวิธีหน่วยแรงใช้งานพบว่ามีความเหนียวมากกว่า นอกจากนั้นสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของอาคาร 3 ชั้นยังมีค่ามากกว่าอาคาร 12 ชั้นเนื่องจากอาคาร 12 ชั้นมีผลของโมเมนต์คว่ำ (Overturning moment) จากแรงด้านข้างที่มากกว่า อาคารที่ออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งานมีความแข็งแรงมากกว่าอาคารที่ออกแบบโดยวิธีกำลังเนื่องจากมีหน้าตัดที่ใหญ่กว่า

El–Attar, White และ Gergely (1997) ได้ทำการทดสอบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวโดยอาศัยแบบจำลองขนาด 1/6 ส่วนเป็นอาคารสำนักงาน 2 ชั้น และแบบจำลองขนาด 1/8 ส่วนเป็นอาคารสำนักงาน 3 ชั้น โดยใช้โต๊ะการสั่น (Shaking table) จำลองคลื่นแผ่นดินไหว Taft และได้วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม IDARC v. 3.0 เพื่อศึกษาความเหมาะสมของโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของอาคาร ความสัมพันธ์ของโมเมนต์กับความโค้งคิดเป็นเส้นตรง 3 เส้นที่ความชันต่างกัน (Tri-linear) โดยมีตัวแปรอธิบายคุณสมบัติของหน้าตัดในช่วงไม่ยืดหยุ่นคือ การลดลงของความแข็ง (Stiffness degradation, α) มีค่าเท่ากับ 2.0, การเสื่อมของกำลัง (Strength deterioration, β) มีค่าเท่ากับ 0.05 และ พฤติกรรมการหลุด (Pinching and/or slip behavior, γ) มีค่าเท่ากับ 1.0 และสัมประสิทธิ์ความหน่วง (Damping ratio) มีค่าเท่ากับ 2% นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโต๊ะการสั่น (Shaking table) พบว่าได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

Gupta, Kunnath และ Islam (1997) ได้ทำการศึกษาอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวความสูง 7 ชั้น ที่ผ่านแผ่นดินไหวมาหลายครั้งรวมทั้งแผ่นดินไหว Northridge (1994) การวิเคราะห์อาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IDARC วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อศึกษาว่าการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองและโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถ

ที่จะหาการตอบสนองของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแผ่นดินไหวได้ วิธีที่ใช้วิเคราะห์ในการศึกษานี้ได้แก่ใช้การแรงดันด้านข้างแบบสถิตจนโครงสร้างพัง (Pushover analysis) และการวิเคราะห์ภายใต้แรงแผ่นดินไหว จากการวิเคราะห์พบว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IDARC มีความผิดพลาดจากข้อมูลจริงในระดับที่ยอมรับได้

1.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟ

Den Hartog (1947) ได้เสนอแนวความคิดของการใช้ระบบมวลหน่วงซึ่งประกอบไปด้วยชุดของ มวล ตัวหน่วงและสปริงที่คำนวณค่าไว้อย่างเหมาะสมเพื่อติดตั้งเข้ากับโครงสร้างอาคารในการลดการสั่นไหวของอาคาร โดย Den Hartog เสนอว่าการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟที่เหมาะสม จะมีส่วนในการช่วยเพิ่มความหน่วงหรือความสามารถในการสลายพลังงานให้กับโครงสร้างหลัก และทำให้โครงสร้างหลักมีการสั่นลดลง ทั้งนี้เพราะพลังงานการสั่นของโครงสร้างบางส่วนจะถูกส่งไปยังระบบมวลหน่วงจึงทำให้พลังงานของโครงสร้างลดลง

Lin และคณะ (1994) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟในการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบหลายแบบ พบว่าระบบมวลหน่วงสามารถใช้งานได้ดีโดยเฉพาะกรณีที่ความถี่ของโครงสร้างมีค่าน้อยกว่าความถี่ของแรงที่กระทำเล็กน้อย นอกจากนี้ยังสรุปว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟสามารถใช้ลดการสั่นไหวได้ทั้งที่เกิดจากลมและแผ่นดินไหว โดยกรณีที่เกิดจากลมจะได้ผลดีกว่าที่เกิดจากแผ่นดินไหว

Villaverde (1994) ทำการทดลองและทดสอบเชิงตัวเลข โดยใช้โครงสร้างอาคารรับแรงเฉือน 10 ชั้นวิเคราะห์แบบสองมิติ (2D 10-storey shear building) และ อาคารโครงข้อแข็ง 1 ชั้นวิเคราะห์แบบสามมิติ (3D 1-story frame building) ซึ่งติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟและใช้สัญญาณแผ่นดินไหว 9 สัญญาณ ซึ่งผลที่ได้ปรากฏว่าในบางกรณีที่ศึกษาระบบมวลหน่วงจะสามารถลดการสั่นของโครงสร้างได้เป็นอย่างดี แต่ในบางกรณีได้ผลเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีผลในการลดการสั่นไหวเลย จากข้อมูลที่ได้ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟขึ้นกับลักษณะของแผ่นดินไหวที่กระทำโดยการลดการสั่นของโครงสร้างจะได้ผลดีมากเมื่อคลื่นแผ่นดินไหวมีลักษณะที่ทำให้เกิดการกำทอน (Resonant ground motion) และความสามารถในการลดการสั่นไหวจะลดลง เมื่อความถี่หลักของคลื่นแผ่นดินไหว (Dominant frequency of ground motion) ต่างจากความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมากขึ้น

Sato-brito และ Ruiz (1999) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการตอบสนองของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กความสูง 22 ชั้น ภายใต้แผ่นดินไหวขนาดรุนแรงปานกลาง (SCT-89) และ แผ่นดินไหวขนาดรุนแรงมาก (SCT-85) อาคารตัวอย่างที่นำมาศึกษามีคาบ 2 วินาทีและถูกออกแบบเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวตามข้อกำหนดของเม็กซิโก (Mexico City Seismic Design Regulations, 1993) อัตราส่วนความหน่วงของอาคารมีค่า 5% ของความหน่วงวิกฤติ (Critical damping) จากการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างพบว่าในกรณีแผ่นดินไหวขนาดรุนแรงปานกลางมวลหน่วงปรับค่าสามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นบนสุดได้ดีกว่าแผ่นดินไหวขนาดรุนแรงมาก ในกรณีแรกโครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่น การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นบนสุดกรณีมีมวลหน่วงปรับค่าคิดเป็น 68 เปอร์เซ็นต์ของกรณีไม่มีมวลหน่วงปรับค่า และกรณีที่สองโครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น การเปลี่ยนตำแหน่งลดลงไม่มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของกรณีไม่มีมวลหน่วงปรับค่า นอกจากนั้นยังพบว่าการเพิ่มค่าความหน่วงในมวลหน่วงปรับค่ามีโอกาสที่จะเพิ่มและลดการตอบสนองของโครงสร้าง โดยขึ้นกับอัตราส่วนความถี่ของมวลหน่วงปรับค่ากับโครงสร้างและความรุนแรงของแผ่นดินไหว สำหรับแผ่นดินไหวขนาดรุนแรงปานกลางการเพิ่มค่าความหน่วงในมวลหน่วงปรับค่าเป็นการลดประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่า หากอัตราส่วนความถี่ของมวลหน่วงปรับค่ากับโครงสร้างมีค่าเข้าใกล้ 1 และหากอัตราส่วนความถี่ของมวลหน่วงปรับค่ากับโครงสร้างมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 1.1 การเพิ่มความหน่วงจะเป็นการลดการตอบสนองของอาคารได้ สำหรับแผ่นดินไหวขนาดรุนแรงมาก การเพิ่มความหน่วงให้ผลที่น้อยมาก

ภัทรายุส และทศพล (2000) ได้ศึกษาการใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูง 20 ชั้น ใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม IDARC ซึ่งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้ โดยจำลองมวลหน่วงปรับค่าเป็นโครงพอลทอล (Portal Frame) ที่ตำแหน่งบนสุดของอาคาร คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้คือคลื่นแผ่นดินไหวที่เม็กซิโก(1985)และคลื่นที่บันทึกได้ใต้อาคารใบหยก(1995) ผลการศึกษาพบว่าอาคารดังกล่าวมีพฤติกรรมแบบเสาแข็ง-คานอ่อน เนื่องจากมีการครากของคานทั่วทั้งอาคาร แต่อย่างไรก็ตามก็มีการครากของกำแพงรับแรงเฉือนและเสาที่บริเวณชั้นล่างด้วย สำหรับมวลหน่วงปรับค่านั้นจะมีประสิทธิภาพในการลดการตอบสนองของอาคารได้ดีก็ต่อเมื่อแผ่นดินไหวมีขนาดความเร่งต่ำๆเท่านั้น และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อขนาดความเร่งมีค่าสูงขึ้น อันเป็นผลมาจากการเสียความสอดคล้องทางความถี่และการเพิ่มขึ้นของการสลายพลังงานเนื่องจากฮีสเทอร์เรสีสในส่วนของโครงสร้างที่เกิดความเสียหาย

พงษ์ธร และทศพล (2000) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟในการลดการสั่นไหวและความเสียหายของโครงสร้างที่มีความอิสระดีกรีเดียว และมีพฤติกรรมแบบอิลาสโต-พลาสติกภายใต้การเคลื่อนที่บริเวณฐานรองรับแบบฮาร์โมนิกและใช้สัญญาณแผ่นดินไหวที่วัดได้ในกรุงเทพมหานคร จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟลดลงเมื่อโครงสร้างมีพฤติกรรมอินอีลาสติก ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เหมาะสมของความต่างเฟสระหว่างการสั่นของโครงสร้างและของมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟ นอกจากนี้พลังงานที่สลายไปเนื่องจากการครากของโครงสร้างมีค่ามากกว่าพลังงานที่สลายไปเนื่องจากมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟค่อนข้างมาก ดังนั้นพลังงานเนื่องจากมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟจึงแทบไม่มีนัยสำคัญแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามถึงแม้ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟจะลดลงเมื่อความเร่งที่ฐานเพิ่มขึ้นแต่การติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟก็เป็นการเพิ่มความต้านทานในแง่ของความเสียหายให้กับโครงสร้าง

P. Lukkunaprasit และ A. Wanitkorkul (2001) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟโดยกำหนดให้โครงสร้างมีพฤติกรรมแบบอีลาสโต-พลาสติก จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างดังกล่าวภายใต้แรงแผ่นดินไหว SCT (1985) และ Bangkok (1995) ในการวัดค่าความเสียหายของโครงสร้างจะวัดจากพลังงานฮีสเทอเรติกเพราะเป็นการบอกถึงพลังงานที่สลายไปของโครงสร้าง จากการศึกษาพบว่ามวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟจะมีประสิทธิภาพในการลดพลังงานฮีสเทอเรติกได้ดีถ้าความถี่ธรรมชาติของอาคารมีค่าใกล้เคียงความถี่เด่นชัดของคลื่นแผ่นดินไหวโดยสามารถลดพลังงานฮีสเทอเรติกได้ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับระบบที่มีการออกแบบอย่างดีมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟสามารถช่วยลดความเสียหายของอาคารได้อย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟ และจากกรณีศึกษายังพบอีกว่าถ้ามีการปรับกำลังจุดครากที่ฐานของโครงสร้างอย่างดีสามารถเพิ่มสมรรถนะของอาคารในการรับแรงแผ่นดินไหวได้

1.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ

Chang และคณะ (1995) เสนออัลกอริทึมควบคุมที่ใช้ผลตอบสนองสมบูรณ์แบบวงปิด (Closed-loop complete-feedback control algorithm) สำหรับมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างซึ่งจำลองเป็นระดับขั้นความอิสระเดียว (Single degree of freedom, SDOF) โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการออกแรงควบคุมคำนวณจากการหาอนุพันธ์ของความแปรปรวนของการสั่นไหว (Displacement variance) ของระบบ นอกจากนี้ยัง

ได้พิจารณาการใช้ผลตอบสนองเชิงความเร็ว (Velocity-feedback) และทดสอบประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟนี้ด้วยการทำแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยใช้ตัวอย่างเป็นอาคารโครงข้อแข็ง 10 ชั้น (10-story frame building) ภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหว ผลสรุปว่าเมื่อใช้แรงในการควบคุมเท่าๆกันการใช้ผลตอบสนองสมบูรณ์ (Complete-feedback) สามารถลดขนาดของการสั่นไหวได้ดีกว่าการใช้ผลการตอบสนองเชิงความเร็ว (Velocity-feedback) ทั้งระยะและขนาดความเร่งของการสั่น

Singh และคณะ (1997) ทำการตรวจสอบการใช้งานของวิธีการควบคุมโครงสร้างเพื่อทำให้ขนาดการสั่นของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวลดลง ทั้งวิธีการแบบแอกทีฟและกึ่งแอกทีฟ การวิเคราะห์กระทำในเชิงตัวเลขโดยถือว่าในระบบกึ่งแอกทีฟนั้นโครงสร้างมีความสามารถที่จะปรับค่าสติฟเนสและความหน่วงได้ การวิจัยนี้ได้ใช้ตัวอย่างแบบจำลองของอาคารรับแรงเฉือน 10 ชั้น (10-story shear buildings) ผลการทดสอบปรากฏว่าทั้งวิธีการแอกทีฟและกึ่งแอกทีฟสามารถใช้ลดการสั่นไหวได้ดี โดยวิธีการแบบแอกทีฟจะได้ผลดีมากแต่มีข้อจำกัดในเรื่องของแรงภายนอกซึ่งจะต้องใช้แรงมากจึงทำให้อาจจะใช้กับตึกที่มีขนาดใหญ่ๆไม่ได้ นอกจากนี้ในส่วนของการควบคุมแบบแอกทีฟนี้ยังได้แบ่งการวิจัยเป็นแบบลวดดึงแบบแอกทีฟ (Active tendon) กับมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ ผลปรากฏว่าที่ระดับการลดการสั่นไหวเท่าๆกัน แรงที่ใช้ในแบบระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟจะมีค่าน้อยกว่า สำหรับในส่วนของการควบคุมแบบกึ่งแอกทีฟได้มีการสมมติว่าสามารถเปลี่ยนแปลงค่าสติฟเนสและความหน่วงของโครงสร้างได้ วิธีการควบคุมทำโดยปรับค่าความหน่วงแบบกึ่งแอกทีฟ (Semi-active damping control) ซึ่งคิดว่าความหน่วงของโครงสร้างสามารถควบคุมได้ในลักษณะของการเปิด-ปิด (On-off) พบว่าผลการลดการสั่นไหวได้ดี นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบแบบการควบคุมโดยปรับค่าสติฟเนสแบบกึ่งแอกทีฟ (Semi-active stiffness control) โดยคิดเป็นสติฟเนสส่วนเสริมที่ปรับค่าได้ (Variable additional stiffness) ซึ่งคิดในลักษณะของเปิด-ปิดเช่นกัน ผลปรากฏว่าการควบคุมสติฟเนสส่วนเสริมที่ปรับค่าได้นี้จะได้ผลดีกว่าการเพิ่มสติฟเนสให้กับโครงสร้างโดยตรงแบบแพสสีฟ

Housner และคณะ (1997) ได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้าง พบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้อยู่ 685 รายงาน ในเรื่องที่เกี่ยวกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ ได้มีการปรับปรุงแบบจำลองในการควบคุมการสั่นไหว เช่น ZhoและSkelton (1994) Spencerและคณะ (1996) และ Grigoriiadisและคณะ (1996) เป็นต้น นอกจากนั้นได้มีการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟครั้งแรกในปี 1989 ที่อาคาร Kyobashi (Kobori 1990,1994; Sakamotoและคณะ 1994) พบว่าช่วยลดการสั่นไหวจากลมแรงและแผ่นดินไหว

ระดับปานกลางได้ดี นอกจากนั้นยังให้ความรู้สึกสบายแก่ผู้อยู่อาศัยในอาคาร

เนื่องจากในระบบควบคุมการสั่นไหวแบบแอกทีฟต้องใช้พลังงานมากจึงมีการคิดค้นระบบควบคุมการสั่นไหวแบบไฮบริด (Hybrid Mass Damper) ซึ่งเป็นการนำระบบควบคุมการสั่นไหวแบบแอกทีฟและแพสสีฟมาใช้ร่วมกัน โดยระบบดังกล่าวจะนำระบบควบคุมการสั่นไหวแบบแพสสีฟติดตั้งบนอาคารแล้วจึงนำระบบควบคุมการสั่นไหวแบบแอกทีฟติดตั้งบนระบบแพสสีฟอีกทีหนึ่งซึ่งพบว่าระบบดังกล่าวใช้พลังงานน้อยกว่า ได้มีการติดตั้งระบบนี้จริงเช่นที่ Rainbow Bridge Tower (Tanida และคณะ 1991, Tanida 1994) และที่ Shinjuku Park Tower (Koike และคณะ 1994) เป็นต้น ถึงปี 1997 มีระบบควบคุมการสั่นไหวแบบแอกทีฟ และแบบไฮบริดที่ติดตั้งในอาคารแล้ว 30 อาคาร และติดตั้งบนสะพานแล้ว 10 สะพาน

พิสิฐ และทศพล (2000) ได้เสนอการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟเพื่อควบคุมการสั่นไหวของอาคาร ในการศึกษาได้จำลองโครงสร้างให้มีดีกรีความอิสระดีกรีเดียวโดยการพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ตามวิธีการควบคุมแบบ Linear Quadratic Optimal Control และช่วงการปรับปรุงค่าความหน่วงของตัวหน่วงที่มีต่อประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟกับมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟหนึ่งหน่วยและหลายหน่วย จากการศึกษาพบว่าการออกแบบระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟให้มีประสิทธิภาพสูงได้โดยการเลือกค่าความสามารถในการปรับค่าความหน่วงของตัวหน่วงให้มีช่วงในการปรับที่สูง และพบว่าประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟและมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสสีฟหลายหน่วย

1.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ค่าความเสียหาย

Park and Ang (1985) ได้เสนอค่าดัชนีความเสียหาย (Damage index, DI) ซึ่งอยู่ในรูปผลรวมเชิงเส้นของความเสียหายที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างแบบอินอีลาสติกเนื่องจากได้รับความเค้นที่สูง และความเสียหายสะสมที่เกิดการได้รับแรงกระทำซ้ำกลับไปกลับมาแสดงได้ดังสมการ

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{\delta_u P_y} \int dE_h \qquad (1.1)$$

โดยที่ δ_m เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่มากที่สุดที่เกิดขึ้น, δ_u เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สภาวะวิบัติ, P_y เป็นกำลังครากของชิ้นส่วน, $\int dE_h$ เป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในชิ้นส่วน, β เป็นค่าคงที่ของแบบจำลองที่มีความสัมพันธ์กับการลดลงของกำลัง

โดยถ้าค่าดัชนีความเสียหายระดับโครงสร้างมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่า ความเสียหายอยู่ในสภาพที่สามารถซ่อมแซมได้ (Repairable) ถ้ามีค่าระหว่าง 0.4 ถึง 1 แสดงว่าความเสียหายอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถซ่อมแซมได้ และถ้ามีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าเกิดการวิบัติ อย่างไรก็ตาม ในปี 1987 Park และ Ang ได้แบ่งสถานะความเสียหายใหม่ได้ดังนี้

$DI < 0.1$	ไม่มีความเสียหาย
$0.1 \le DI < 0.25$	มีความเสียหายเล็กน้อย
$0.25 \le DI < 0.4$	มีความเสียหายปานกลาง
$0.4 \le DI < 1.0$	มีความเสียหายรุนแรง
$DI \ge 1.0$	พังทลาย

และในปี 1997 Ang และคณะ ได้เสนอให้ใช้ $DI = 0.8$ เพื่อแทนสถานะพังทลาย (Collapse)

Reinhorn และคณะ (1989) ได้เสนอดัชนีความเสียหายที่ใช้แนวคิดของความเสียหายที่เกิดขึ้น (Consumption damage, D_c) และความสามารถที่จะรับความเสียหาย (Damage potential, D_p) โดยที่ความเสียหายที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ ความเสียหายด้านกำลัง (Strength damage, D_s) และ ความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Deformation damage, D_d) สามารถได้ดังสมการ

$$DI = \frac{D_s + D_d}{D_p} \tag{1.2}$$

จากการคำนวณค่าดัชนีความเสียหายเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาของ Mander และคณะ (1983) สามารถแบ่งสภาพความเสียหาย (Damage state) ได้ดังนี้

$DI < 0.33$	ยังสามารถใช้งานได้
$0.33 \le DI < 0.66$	สามารถซ่อมแซมได้
$0.66 \le DI < 1$	ไม่สามารถซ่อมแซมได้
$DI > 1$	พังทลาย

Chung และคณะ (1989) ได้เสนอค่าดัชนีความเสียหายที่ได้จากการปรับปรุงสูตรคำนวณความล้า (Fatigue formula) ร่วมกับการกำหนดค่ากำลังรับโมเมนต์ที่ลดลงเนื่องจากการรับแรงกระทำซ้ำ, การใช้ Damage modifier, α ที่พิจารณาผลของลำดับของการรับแรงจากค่าสติฟเนสที่เปลี่ยนแปลง และการแยกพิจารณาการตอบสนองของชิ้นส่วนเนื่องจากโมเมนต์บวกและโมเมนต์ลบ สามารถแสดงค่าดัชนีความเสียหายได้ดังนี้

$$DI = \sum_i (\alpha_i^+ \frac{n_i^+}{N_i^+} + \alpha_i^- \frac{n_i^-}{N_i^-}) \qquad (1.3)$$

โดยที่ n_i คือจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำที่ความโค้ง i, N_i คือจำนวนรอบของแรงที่กระทำซ้ำจนกระทั่งเกิดการวิบัติที่ความโค้ง i และเครื่องหมายบวกและลบแสดงถึงทิศทางของแรงที่กระทำ

Ghobarah และคณะ (1999) ได้เสนอการวิธีการคิดค่าดัชนีความเสียหายจากค่าสติฟเนสของโครงสร้างที่ลดลงหลังจากเกิดความเสียหายจากแผ่นดินไหวเช่นเดียวกับวิธี Final softening ของ DiPasquale และ Cakmak (1988) แต่จะวิเคราะห์ค่าสติฟเนสของโครงสร้างก่อนและหลังเกิดแผ่นดินไหวด้วยวิธีใช้แรงดันด้านข้างแบบสถิตจนโครงสร้างวิบัติกับอาคาร แทนที่จะใช้วิธีหาค่าสติฟเนสจากค่าคาบมูลฐาน (Fundamental period) ของโครงสร้างที่มักพบกับปัญหาการเปลี่ยนโหมดมูลฐาน (Fundamental mode) ของโครงสร้างหลังเกิดความเสียหาย สามารถแสดงค่าดัชนีความเสียหายได้ดังนี้

$$DI = 1 - K_{final} / K_{initial} \qquad (1.4)$$

โดยที่ $K_{initial}$ และ K_{final} คือความชันเริ่มต้น (Initial slope) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนที่ฐาน กับการโก่งตัวที่ตำแหน่งบนสุด (Top deflection) ของอาคารที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีใช้แรงดันด้านข้างแบบสถิตจนโครงสร้างเกิดการวิบัติกับอาคาร ก่อนและหลังเกิดแผ่นดินไหวตามลำดับ

และสามารถแบ่งสภาพความเสียหายได้ดังนี้

$DI < 0.15$	เล็กน้อย
$0.15 \le DI < 0.30$	ปานกลาง (ซ่อมแซมได้)
$0.30 \le DI < 0.80$	รุนแรง (ไม่สามารถซ่อมแซมได้)
$DI > 0.8$	พังทลาย

1.2 วัตถุประสงค์

การศึกษาวิจัยเรื่องผลกระทบของการเปลี่ยนรูปแบบอินอีลาสติกต่อสมรรถนะของมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟนี้ ได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อ

1. ปรับปรุงโปรแกรม IDARC เพื่อให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟที่ชั้นบนสุดของอาคารได้
2. ศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวของโครงสร้างในช่วงอินอีลาสติกเมื่อติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ
3. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหวด้วยมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟในการลดความเสียหายของอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหว

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยมีขอบเขตและข้อจำกัดในการศึกษาวิจัยดังต่อไปนี้

1. โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์และทำการปรับปรุงคือ โปรแกรม IDARC v. 5.0
2. พิจารณาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นแบบอินอีลาสติกในการรับแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวโดยพิจารณาเป็นโครงสร้าง 2 มิติ
3. พิจารณาการลดการสั่นไหวเฉพาะในแนวราบเท่านั้น
4. ระบบควบคุมการสั่นไหวที่นำมาใช้พิจารณาคือ ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ
5. ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟจำนวน 1 หน่วยในการลดการสั่นไหวที่ชั้นบนสุดของอาคาร
6. มวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความสามารถในการออกแรงกระทำได้ในช่วงที่จำกัด

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยคาดว่าจะได้รับประโยชน์ดังนี้

1. เพื่อทราบถึงพฤติกรรมและประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหวด้วยมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ ภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวเมื่อโครงสร้างเป็นแบบอินอีลาสติก
2. เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหว