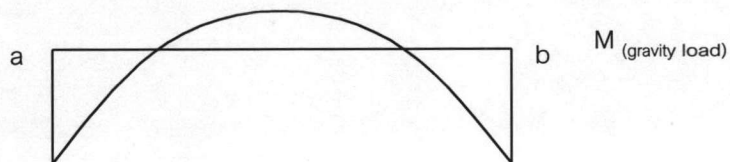


บทที่ 8 อภิปรายและวิเคราะห์ผล

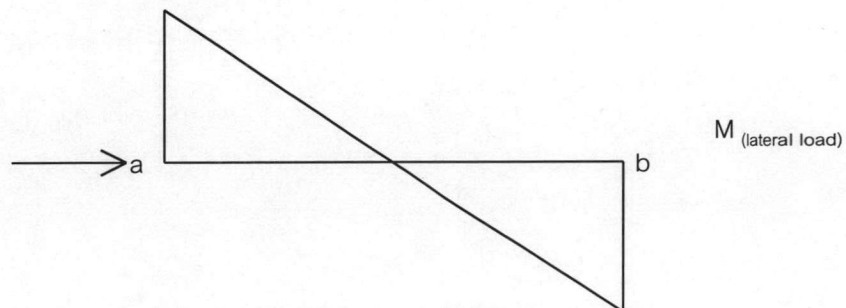
จากบทที่ 6 และบทที่ 7 ที่ได้กล่าวถึงการตอบสนองและความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว ในบทที่ 8 นี้จะได้กล่าวถึงการอภิปรายและวิเคราะห์ผลซึ่งจะกล่าวถึงลักษณะและคุณสมบัติของอาคารตัวอย่าง ลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว ประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหวในการลดการตอบสนองของอาคารตัวอย่าง และประสิทธิภาพในการลดความเสียหายของอาคารตัวอย่าง

8.1 ลักษณะและคุณสมบัติของอาคารตัวอย่าง

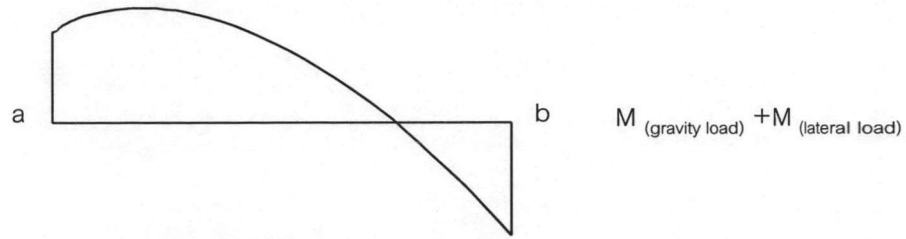
อาคารตัวอย่างเป็นโครงข้อแข็งสูง 10 ชั้น มีความสูงชั้นละ 3 เมตร อาคารกว้าง 3 ช่วงคาน ช่วงคานละ 4 เมตร อาคารยาว 3 ช่วงคาน ช่วงคานละ 5 เมตร ในการวิเคราะห์อาคารดังกล่าวใช้โครงข้อแข็งทางด้านกว้างเนื่องจากโครงข้อแข็งดังกล่าวมีความกว้างของอาคารน้อยกว่า ทำให้ค่าแรงตามแนวแกนและค่าโมเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์แรงทางด้านข้างมีมากกว่าโครงข้อแข็งทางด้านยาว จึงทำให้โครงข้อแข็งทางด้านกว้างมีความวิกฤติกว่าโครงข้อแข็งทางด้านยาวในภายใต้แรงแผ่นดินไหว ในการออกแบบอาคารตัวอย่างจะได้รูปแบบการกระจายโมเมนต์ที่เกิดในชั้นส่วนดังแสดงในรูปที่ 8.1



(ก) โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร



(ข) โมเมนต์เนื่องจากแรงกระทำด้านข้าง



(ค) โมเมนต์เนื่องจากผลรวมของน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรกับแรงด้านข้าง

รูปที่ 8.1 การกระจายโมเมนต์ในชิ้นส่วน

สำหรับอาคารตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ออกแบบเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจรและแรงลม แต่อย่างไรก็ตามค่าแรงลมที่ได้ค่อนข้างต่ำ โมเมนต์ที่ใช้ในการออกแบบจึงถูกควบคุมโดยโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรเป็นหลัก ซึ่งสามารถเขียนการกระจายโมเมนต์ได้ดังรูปที่ 8.1(ก) โดยที่ปลายทั้งสองด้านถูกออกแบบรับโมเมนต์ลบและออกแบบรับโมเมนต์บวกบริเวณกลางชิ้นส่วน ในกรณีมีแรงด้านข้างกระทำโมเมนต์จะมีการกระจายเปลี่ยนไป แสดงในรูปที่ 8.1(ข) จากทิศการกระทำของแรงด้านข้างในรูป จะได้ว่าที่ข้อ a โมเมนต์จะมีทิศเป็นบวก และที่ข้อ b โมเมนต์มีทิศเป็นลบ เมื่อรวมผลของน้ำหนักจากในรูป 8.1(ก) และรูปที่ 8.1(ข) จะได้ว่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่คานภายนอกมีการกระจายดังรูปที่ 8.1 (ค) ที่คานภายนอกเนื่องจากโมเมนต์ที่เกิดจากแรงด้านข้างมีค่าสูงกว่าโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร จึงได้ว่าที่ข้อ a โมเมนต์จะมีทิศเป็นบวก ส่วนที่คานภายในพบว่าโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรมีค่ามากกว่าโมเมนต์ที่เกิดจากแรงด้านข้าง ทำให้ที่ข้อ a โมเมนต์มีทิศเป็นลบที่น้อยกว่าโมเมนต์ที่ข้อ b เนื่องจากที่ข้อ b โมเมนต์ที่เกิดมีลักษณะที่เสริมกัน จากการที่ข้อ a ได้โมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีทิศเป็นบวกแต่มีค่าน้อยในคานภายนอกหรืออาจไม่เกิดโมเมนต์ที่คานภายใน ทำให้การออกแบบอาคารตัวอย่างรับโมเมนต์บวกได้น้อยกว่าโมเมนต์ลบ ดังนั้นที่ข้อ a จึงเกิดความเสียหายขึ้นก่อนข้อ b ซึ่งออกแบบรับโมเมนต์ลบ ดังนั้นคานจึงเกิดความเสียหายแม้ว่าแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย และในกรณีแผ่นดินไหวแรงที่กระทำมีลักษณะเป็นวัฏจักร ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นที่ข้อทั้งสองข้าง

การเลือกเสาแนว A ตัวอย่างเป็นเสาในเนื่องจากเสาในจะเกิดรอยร้าวและการครากขึ้นก่อนเสานอก แม้ว่าในการออกแบบจะพบว่าเสานอกเกิดแรงตามแนวแกนและโมเมนต์จากแรงทางด้านข้างมากกว่า แต่การที่เสาในเกิดความเสียหายก่อนเนื่องจากในการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวได้พิจารณาผลของ $P-\Delta$ ซึ่งพบว่าเสาในรับแรงจาก

น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่มากกว่าเสานอกทำให้ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจาก $P-\Delta$ มีมากกว่าและมากพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายแก่เสาในก่อนเสานอก

อาคารตัวอย่างที่ใช้มีการออกแบบทุกๆ 5 ชั้นจากการวิเคราะห์ด้วยแรงดันทางด้านข้างและการวิเคราะห์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวพบว่าชั้นที่ 6 ที่มีการลดหน้าตัดเสาจะเกิดความเสียหายก่อนและเกิดความเสียหายมากกว่าชั้นอื่นๆ เนื่องจากการลดหน้าตัดเสาโดยลดขนาดเสา ลงทำให้กำลังของเสาที่ชั้นดังกล่าวมีค่าลดลงอย่างมาก ทำให้โมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีค่าถึงค่าโมเมนต์ที่ออกแบบก่อนชั้นอื่นๆ เมื่อเสาชั้นที่ 6 เกิดความเสียหายทำให้กำลังของเสาลดลงทำให้เกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นแม้ว่าจะเกิดโมเมนต์เท่าเดิม

8.2 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยนี้ได้เลือกใช้คลื่นแผ่นดินไหว 3 คลื่นได้แก่ El Centro(1940) ,SCT (1985) และ Northridge(1994) ซึ่งคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 3 คลื่นนี้มีความถี่เด่นชัดใกล้เคียงกับอาคารตัวอย่างซึ่งมีความถี่พื้นฐานเท่ากับ 0.63 เฮิรตซ์ จากการวิเคราะห์ด้วย FFT ในพที่ 5 สามารถแบ่งคลื่นแผ่นดินไหวออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ คลื่นแผ่นดินไหว El Centro และ Northridge เป็นกลุ่มแรก และกลุ่มที่ 2 ได้แก่ คลื่นแผ่นดินไหว SCT

ความแตกต่างระหว่างคลื่นแผ่นดินไหวของ 2 กลุ่มนี้คือ

1. เวลาในการเกิดคลื่นแผ่นดินไหว ในกลุ่มแรกคลื่นแผ่นดินไหวจะเกิดในช่วงสั้นๆ ประมาณ 30 – 60 วินาที ส่วนในกลุ่มที่ 2 คลื่นแผ่นดินไหวจะเกิดในเวลาที่นานประมาณ 180 วินาที
2. เวลาในที่เกิดความเร่งสูงสุดที่พื้นดินนับจากเริ่มเกิดแผ่นดินไหว ในกลุ่มแรกพบว่าการเกิดความเร่งสูงสุดที่จะเกิดขึ้นเร็วประมาณ 3 – 5 วินาทีจากเริ่มเกิดแผ่นดินไหว ส่วนกลุ่มที่ 2 เวลาที่ใช้ในการเกิดความเร่งสูงสุดที่พื้นดินประมาณ 60 – 65 วินาทีจากเริ่มเกิดแผ่นดินไหว
3. การเพิ่มขึ้นของความเร่งที่พื้นดินในการเกิดความเร่งที่พื้นดินสูงสุด ในกลุ่มแรกพบว่ามีการเพิ่มความเร่งที่พื้นดินในอัตราที่เร็ว ส่วนกลุ่มที่ 2 พบว่ามีการเพิ่มความเร่งที่พื้นดินในอัตราที่ช้ากว่า
4. ช่วงเวลาที่เกิดความเร่งที่พื้นดินสูง ในกลุ่มแรกพบว่าช่วงเวลาที่ดินไหวมีความเร่งสูงมีช่วงเวลาประมาณ 5 วินาที ส่วนกลุ่มที่ 2 พบว่ามีช่วงเวลาประมาณ 15 วินาที

5. การกระจายความถี่ของคลื่น จากการวิเคราะห์ด้วย FFT พบว่าในกลุ่มแรก คลื่นแผ่นดินไหวมีการกระจายความถี่ของคลื่นมากกว่าคลื่นแผ่นดินไหวในกลุ่มที่ 2

8.3 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหวในการลดการตอบสนองของอาคาร

จากบทที่ 7 แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหวสามารถลดการตอบสนองของอาคารได้ เปอร์เซ็นต์การลดลงของการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดชั้นที่ 10 เทียบกับอาคารที่ไม่มีระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 8.2 ส่วนรูปที่ 8.3 แสดงการลดลงของค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) รอบแกนการสั่นของชั้นที่ 10 เทียบกับอาคารที่ไม่มีระบบควบคุม

ในการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหวแบบ มวลหน่วงแบบแอกทีฟและมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟได้กำหนดให้แรงกระทำสูงสุดที่กระทำโดยตัวออกแรงมีค่าใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 35 กิโลนิวตัน ในทุกค่าความเร่งสูงสุดที่พื้นดินและในทุกคลื่นแผ่นดินไหว เมื่อคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำมีค่าน้อยคือมีค่าเท่ากับ 0.10 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกในคลื่นแผ่นดินไหว El Centro และ Northridge และมีค่าเท่ากับ 0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกในคลื่น SCT โครงสร้างมีคุณสมบัติใกล้เคียงความเป็นอีลาสติกเนื่องจากเสาของอาคารตัวอย่างยังไม่มีเกิดการครากเกิดขึ้นหรือมีการครากเกิดขึ้นเล็กน้อย พบว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟสามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้น 10 ได้ประมาณ 11 – 17 เปอร์เซ็นต์ ระบบมวลหน่วงแบบแอกทีฟสามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้น 10 ได้ประมาณ 24 – 46 เปอร์เซ็นต์ และระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้น 10 ได้ประมาณ 20 – 27 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเร่งสูงสุดที่พื้นดินเพิ่มขึ้นพบว่าความสามารถในการลดการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุด ลดลงและพบว่าเมื่อความเร่งสูงสุดที่พื้นดินมีค่ามากประมาณ 0.85 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกในคลื่น El Centro และ คลื่น Northridge และเท่ากับ 0.15 เท่าของความเร่งเนื่องจาก แรงโน้มถ่วงของโลกในคลื่น SCT พบว่าโครงสร้างมีความเสียหายอย่างมากและระบบ มวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟเพิ่มการสั่นไหวของอาคารตัวอย่างประมาณ 1–6 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ระบบมวลปรับค่าแบบแอกทีฟและระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟยังคงลดการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดได้

การลดลงของประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหวเนื่องมาจากระบบควบคุมการสั่นไหวได้ถูกกำหนดคุณสมบัติต่างๆ ให้เหมาะสมกับโครงสร้างในช่วงอีลาสติก (โครงสร้างที่ยังไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น) เมื่อโครงสร้างเกิดความเสียหายขึ้นทำให้คุณสมบัติของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปทำให้คุณสมบัติของระบบควบคุมการสั่นไหวที่กำหนดไว้ไม่เหมาะสมกับ

โครงสร้างอีกต่อไป สาเหตุอีกประการหนึ่งในการลดลงของประสิทธิภาพของระบบมวลห้วงแบบ แอททีฟและมวลห้วงปรับค่าแบบแอททีฟ เนื่องจากการกำหนดแรงกระทำสูงสุดของตัวออกแรงมี ค่าคงที่เพราะเมื่อแผ่นดินไหวมีค่าความเร่งสูงสุดที่พื้นดินเพิ่มขึ้น ระบบควบคุมการสั่นไหวดังกล่าว ต้องการแรงกระทำโดยตัวออกแรงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวเท่าเดิม แรง กระทำจากระบบควบคุมการสั่นไหวที่กระทำกับโครงสร้างหลักแสดงดังในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 แรงจากระบบควบคุมการสั่นไหวที่กระทำกับโครงสร้างหลัก

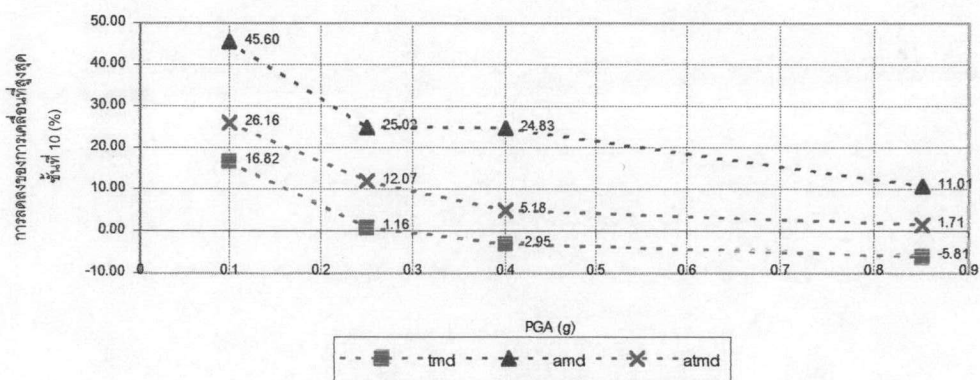
มวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟ (กิโลนิวตัน)	มวลห้วงแบบแอททีฟ (กิโลนิวตัน)	มวลห้วงปรับค่าแบบแอททีฟ (กิโลนิวตัน)
8.6 – 15.9	35.0	21.9 - 48.9

จากรูปที่ 8.2 พบว่าประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของระบบมวลห้วงแบบ แอททีฟมีประสิทธิภาพดีที่สุดใน รองลงมาด้วยระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแอททีฟและมวลห้วง ปรับค่าแบบแพสซีฟตามลำดับ โดยระบบมวลห้วงแบบแอททีฟมีประสิทธิภาพดีกว่าระบบ มวลห้วงปรับค่าแบบแอททีฟประมาณ 2 – 20 เปอร์เซ็นต์ และระบบมวลห้วงปรับค่าแบบ แอททีฟมีประสิทธิภาพดีกว่าระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟประมาณ 1 – 10 เปอร์เซ็นต์ การ ที่ประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหวแบบแอททีฟมีมากกว่าระบบควบคุมการสั่นไหวแบบ แพสซีฟเนื่องมาจากตัวออกแรงที่ใช้ไม่ได้กำหนดระยะการเคลื่อนที่สูงสุดทำให้ออกแรงได้จนถึง ขีดจำกัดโดยไม่ต้องพิจารณาการเคลื่อนที่ของตัวออกแรง นอกจากนั้นระบบควบคุมการ สั่นไหวแบบแอททีฟให้แรงกระทำกับโครงสร้างมากกว่าระบบควบคุมการสั่นไหวแบบแพสซีฟ ดังแสดงในตารางที่ 8.1 และยังพบว่าระบบควบคุมการสั่นไหวแบบแอททีฟสามารถปรับค่าแรงที่ กระทำให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างที่เวลาใดๆได้อีกด้วย การที่ประสิทธิภาพ ของระบบมวลห้วงแบบแอททีฟมีมากกว่าระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแอททีฟ เนื่องมาจากการ ควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างระบบมวลห้วงแบบแอททีฟไม่พิจารณาการเคลื่อนที่ของ มวลห้วงเพราะไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหลัก ในขณะที่ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบ แอททีฟต้องพิจารณาการเคลื่อนที่ของมวลห้วงด้วยเพราะมวลห้วงและโครงสร้างหลักยึดกัน ด้วยสปริงและตัวห้วงทำให้การเคลื่อนที่ของตัวห้วงมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหลัก นอกจาก นั้นยังพบว่า การตอบสนองของระบบมวลห้วงแบบแอททีฟเร็วกว่าระบบมวลห้วงปรับค่า แบบแอททีฟเพราะในการออกแรง แรงที่ออกกระทำกับโครงสร้างโดยตรงในขณะที่ระบบมวลห้วง ปรับค่าแบบแอททีฟต้องให้แรงกระทำกับสปริงและตัวห้วงด้วย

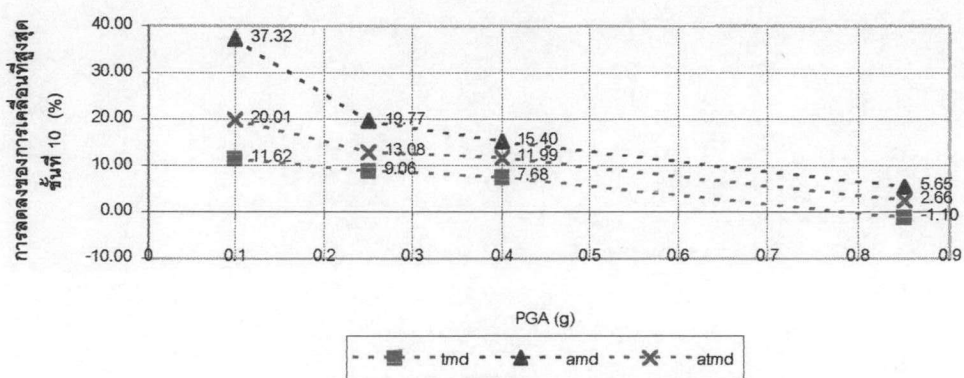
จากรูปที่ 8.2(ค) พบว่าระบบมวลห้วงแบบแอกทีฟมีความสามารถในการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดแผ่นดินไหว SCT ขนาดแรง 0.15 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเนื่องจากภายใต้แรงแผ่นดินไหวดังกล่าวโครงสร้างที่มีการติดตั้งมวลห้วงแบบแอกทีฟเกิดการครากที่ชั้นที่ 6 ดังรูปที่ 7.16(ง) ทำให้การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นบนสุดลดลง

การสั่นของโครงสร้างสามารถเปรียบเทียบด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) ของการเคลื่อนที่ชั้นที่ 10 ดังแสดงในรูปที่ 8.3 ซึ่งพบว่าระบบควบคุมมีแนวโน้มใกล้เคียงกับรูปการลดลงของการเคลื่อนที่สูงสุดชั้นที่ 10 โดยที่ระบบควบคุมการสั่นไหวแบบพาสซีฟสามารถลดการสั่นได้ประมาณ 5 - 15 เปอร์เซ็นต์ ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแอกทีฟลดการสั่นได้ประมาณ 15 - 42 เปอร์เซ็นต์ และระบบมวลห้วงแบบแอกทีฟสามารถลดการสั่นได้ประมาณ 35 - 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแผ่นดินไหวมีความเร่งสูงสุดที่พื้นดินน้อยและโครงสร้างยังมีคุณสมบัติใกล้เคียงความเป็นอีลาสติกและเมื่อแผ่นดินไหวมีความเร่งสูงสุดที่พื้นดินเพิ่มขึ้นพบว่าความสามารถในการลดการสั่นไหวลดลง ถ้าความเร่งสูงสุดที่พื้นดินมีค่ามากพบว่าระบบมวลห้วงปรับค่าแบบพาสซีฟเพิ่มการสั่นประมาณ 3 - 14 เปอร์เซ็นต์ ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแอกทีฟมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่างเพิ่มการสั่นประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ถึงลดการสั่นได้ประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนระบบมวลห้วงแบบแอกทีฟยังสามารถลดการสั่นได้ 4 - 24 เปอร์เซ็นต์

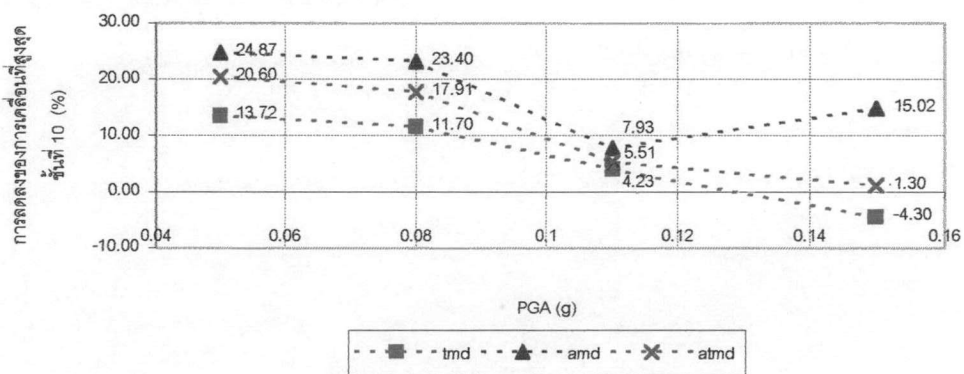
เมื่อพิจารณางานสะสมที่กระทำโดยมวลห้วงในภาคผนวก ค. พบว่าเมื่อคลื่นแผ่นดินไหวมีค่าเร่งที่พื้นดินมีค่าน้อยงานสะสมของมวลห้วงแบบแอกทีฟและมวลห้วงปรับค่าแบบแอกทีฟมีค่าน้อยโดยที่งานสะสมของมวลห้วงแบบแอกทีฟมีค่าน้อยกว่ามวลห้วงปรับค่าแบบแอกทีฟ การที่งานสะสมมีค่าน้อย(มีค่าติดลบมาก)เป็นสิ่งที่ดีที่ระบบควบคุมการสั่นไหวดังกล่าวมีการออกแรงในเฟสที่ดี เมื่อคลื่นแผ่นดินไหวมีความเร่งที่พื้นดินมีค่าเพิ่มขึ้นงานสะสมของมวลห้วงปรับค่าแบบแอกทีฟมีค่าเข้าใกล้มวลห้วงปรับค่าแบบพาสซีฟซึ่งแสดงว่าการออกแรงของระบบควบคุมดังกล่าวมีเฟสของการออกแรงได้ดีลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมวลห้วงแบบแอกทีฟ และยังพบว่าในคลื่นแผ่นดินไหว El Centro และ SCT ค่างานสะสมมีค่าลดลงโดยตลอด ซึ่งบ่งชี้ว่าระบบควบคุมที่ติดตั้งช่วยลดพลังงานการสั่นของโครงสร้างหลักและพยายามลดการสั่นไหว



(n) El Centro



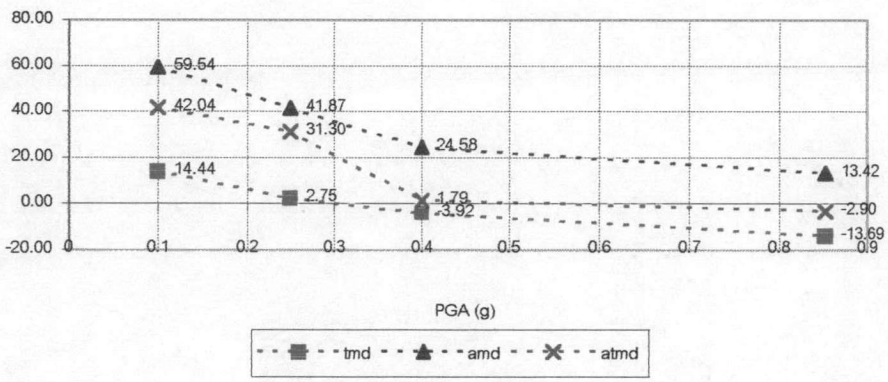
(ข) Northridge



(ค) SCT

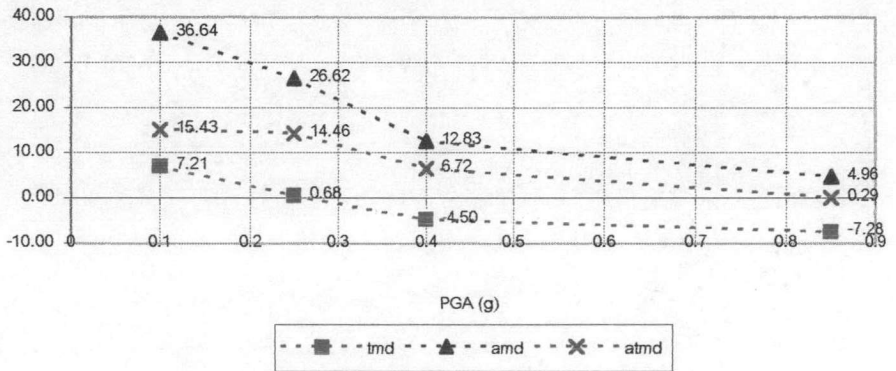
รูปที่ 8.2 การลดลงของการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดชั้นที่ 10 เทียบกับอาคารที่ไม่มีระบบควบคุม

การลดลงของ RMS ของการเปลี่ยนตำแหน่ง



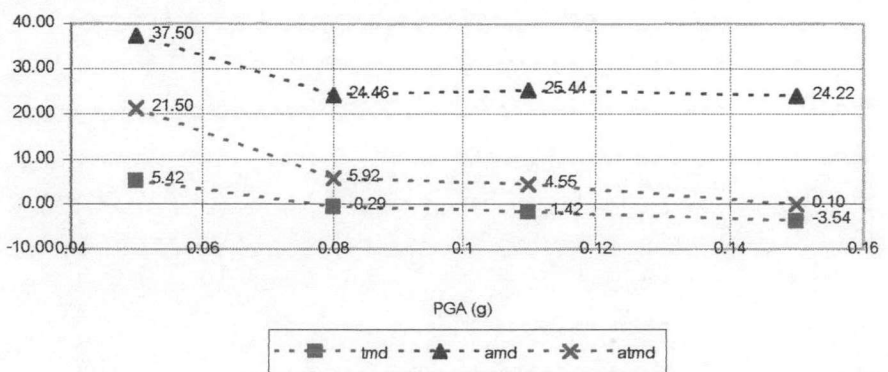
(n) El Centro

การลดลงของ RMS ของการเปลี่ยนตำแหน่งชั้นที่ 10 (%)



(ข) Northridge

การลดลงของ RMS ของการเปลี่ยนตำแหน่งชั้นที่ 10 (%)



(ค) SCT

รูปที่ 8.3 การลดลงของ RMS รอบแกนการสั่นของชั้นที่ 10 เทียบกับอาคารที่ไม่มีระบบควบคุม

ของโครงสร้างหลักโดยตลอด ส่วนในคลื่นแผ่นดินไหว Northridge พบว่าเมื่อค่าความเร่งที่พื้นดินมีค่าตั้งแต่ 0.25 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจะมีค่างานที่กระทำโดยระบบควบคุมเป็นบวกบางช่วง โดยสังเกตได้จากการที่งานสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นบางช่วงโดยระบบควบคุมการสั่นไหวที่ทำให้งานเป็นบวกได้แก่ มวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟ และมวลห้วงปรับค่าแบบแอคทีฟ ซึ่งแสดงว่าระบบควบคุมการสั่นไหวดังกล่าวเพิ่มพลังงานให้แก่โครงสร้างหลักและพยายามเพิ่มการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหลัก ในขณะที่ระบบมวลห้วงแบบแอคทีฟยังคงลดงานสะสมได้โดยตลอด ดังนั้นจึงพบว่าภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Northridge อัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแรงของระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแอคทีฟมีความเหมาะสมลดลง

แม้ว่าการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหวสามารถลดการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดได้ดีแต่พบว่าเมื่ออาคารตัวอย่างเกิดการครากขึ้นในเสาแล้วจะทำให้การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นได้ในบางชั้น เนื่องจากระบบควบคุมการสั่นไหวพยายามลดพลังงานการสั่นรวมของโครงสร้าง จึงเกิดเหตุการณ์เช่นมีบางชั้นเกิดการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นคือมีพลังงานในการสั่นเพิ่มขึ้น ในขณะที่ชั้นอื่นๆลดการเคลื่อนที่ลงจะทำให้พลังงานรวมลดลงได้

8.4 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหวในการลดการความเสียหายของอาคาร

เมื่อพิจารณาโครงสร้างเมื่อติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหวในช่วงที่คลื่นแผ่นดินไหวมีความเร่งสูงสุดที่พื้นดินมีค่าน้อยพบว่าการติดตั้งระบบควบคุมสามารถลดการเคลื่อนที่และความเสียหายได้ดี และเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่พบว่าในช่วงที่ความเร่งสูงสุดที่พื้นดินมีค่าน้อยและโครงสร้างยังไม่เกิดการครากการเปลี่ยนตำแหน่งของอาคารมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเร่งสูงสุดที่พื้นดินที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหวในการรับแรงแผ่นดินไหวก่อนเกิดการครากขึ้นในเสาพบว่าการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหวสามารถทำให้อาคารรับแผ่นดินไหวได้เพิ่มขึ้นพิจารณาจากการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นพบว่าสามารถรับแผ่นดินไหวได้เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 ความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวที่เพิ่มขึ้นก่อนเกิดการครากในเสา

	รับแผ่นดินไหวได้เพิ่มขึ้น (เปอร์เซ็นต์)
มวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟ	5 – 12
มวลห้วงปรับค่าแบบแอคทีฟ	13 – 36
มวลห้วงแบบแอคทีฟ	29 – 55

เมื่อพิจารณาจากภาคผนวก ข. พบว่าความเสียหายขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่เป็นหลัก โดยค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเสาแนว A มากกว่าร้อยละ 90 เกิดจากการเปลี่ยนตำแหน่งของเสา ดังนั้นการพิจารณาค่าความเสียหายระดับชั้นในอาคารตัวอย่างสามารถทำได้โดยการนำการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นคำนวณ ดังสมการที่ 8.1

$$DI_{story} = \frac{\delta_m}{\delta_u} \quad (8.1)$$

โดยที่

- DI_{story} คือ ค่าความเสียหายระดับชั้น
 δ_m คือ การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจริง
 δ_u คือ การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นสูงสุด

การพิจารณาค่าความเสียหายดังกล่าวจะไม่พิจารณาความเสียหายของโครงสร้างในช่วงที่เสายังไม่ถึงจุดคราก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือโครงสร้างจะยังไม่เสียหายถ้าโครงสร้างยังไม่เกิดการคราก การพิจารณาค่าความเสียหายตามสมการดังกล่าวจะต้องทำการวิเคราะห์ด้วยแรงดันทางด้านข้างจนชั้นที่พิจารณาวิบัติ (push-over analysis) มาก่อน การวิเคราะห์ด้วยแรงดันทางด้านข้างจนชั้นที่พิจารณาวิบัติทำได้โดยการยึดให้อาคารชั้นล่างของอาคารอยู่กับที่แล้วให้ชั้นที่พิจารณาเคลื่อนที่ได้ โดยรูปกราฟแสดงการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงดังในรูปที่ 8.4 โดยที่จุดวงกลมบนเส้นกราฟแสดงจุดครากของชั้นที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเสียหาย ส่วนรูปที่แสดงในกราฟเป็นลักษณะความเสียหายของอาคารบริเวณชั้นที่พิจารณาโดยสัญลักษณ์

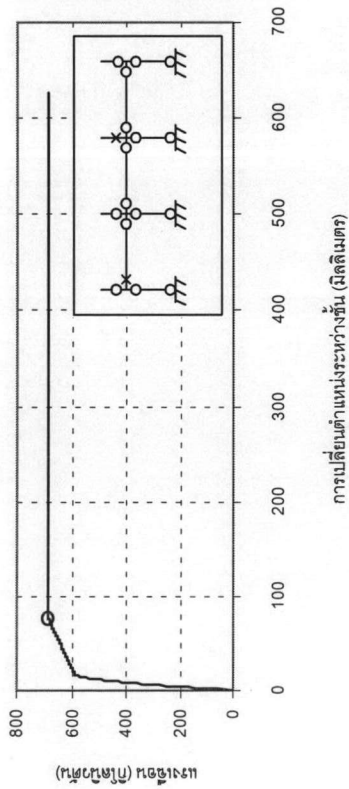
- x แสดงถึง การร้าวในชั้นส่วน
- แสดงถึง การครากในชั้นส่วน

ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดครากของชั้นและค่าการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของชั้นแสดงได้ดังตารางที่ 8.3

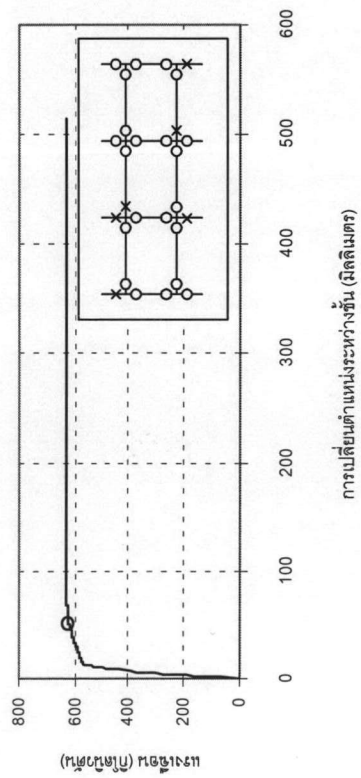
ตารางที่ 8.3 การเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดครากของชั้นและค่าการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของชั้น

ชั้น	การเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดคราก (มิลลิเมตร)	การเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดสูงสุด (มิลลิเมตร)
1	79	627
2	63	533
3	56	514
4	44	509
5	44	447
6	21	558
7	20	573
8	19	488
9	17	302
10	16	255

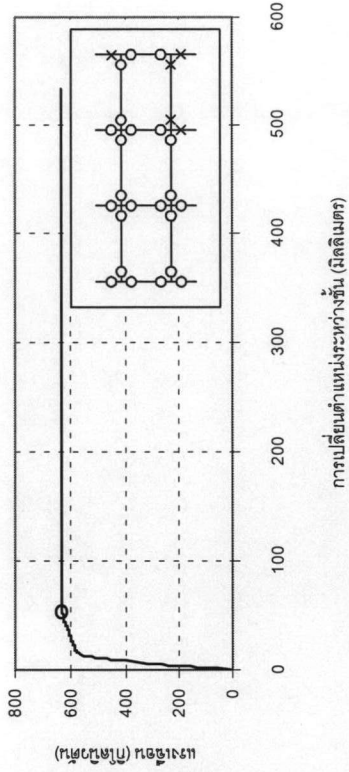
จากนั้นสามารถวิเคราะห์ค่าความเสียหายระดับชั้นได้ โดยนำการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจริงจากการวิเคราะห์อาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหวในบทที่ 7 และการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นสูงสุดจากการวิเคราะห์ด้วยแรงดันทางด้านข้างจนชั้นวิบัติ จากการวิเคราะห์จะได้ค่าความเสียหายระดับชั้นดังแสดงในรูปที่ 8.5 - 8.7 ซึ่งสามารถแสดงค่าความเสียหายสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละคลื่นแผ่นดินไหวดังในรูปที่ 8.8



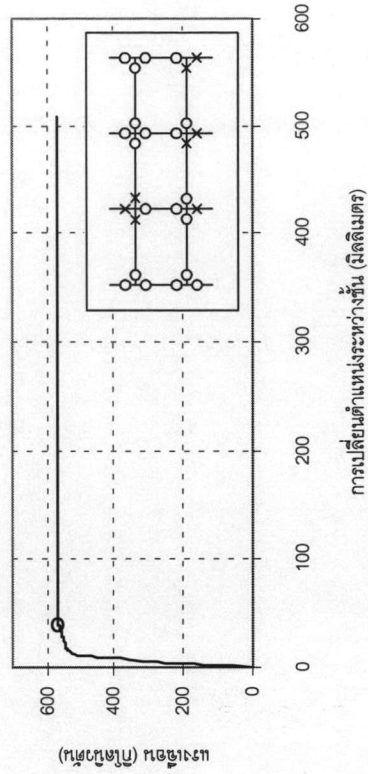
(ก) ชั้นที่ 1



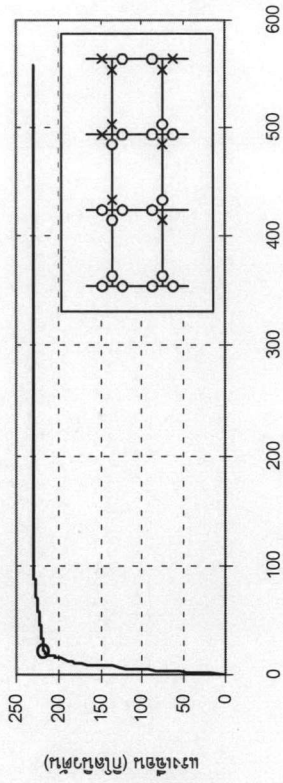
(ค) ชั้นที่ 3



(ข) ชั้นที่ 2

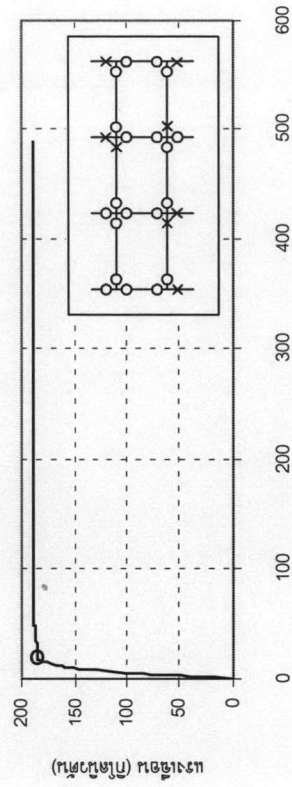


(ง) ชั้นที่ 4



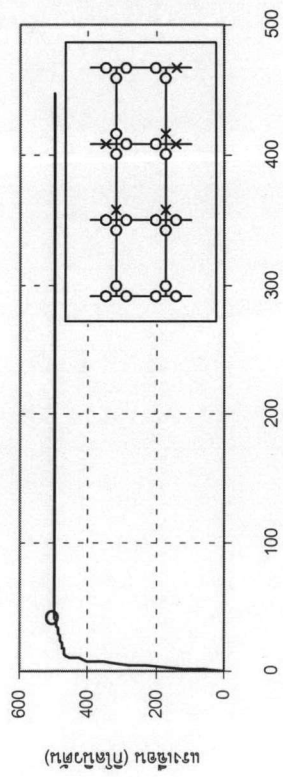
การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระหว่างชั้น (มิลลิเมตร)

(จ) ชั้นที่ 6



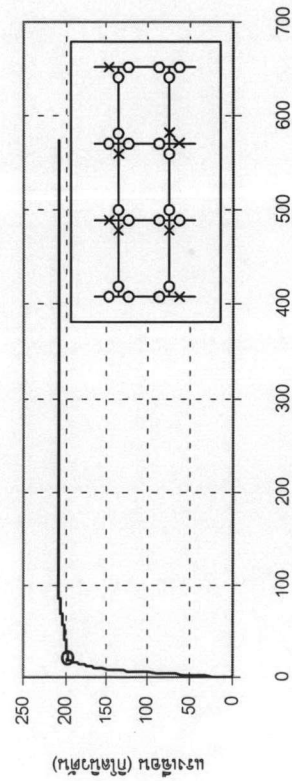
การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระหว่างชั้น (มิลลิเมตร)

(ช) ชั้นที่ 8



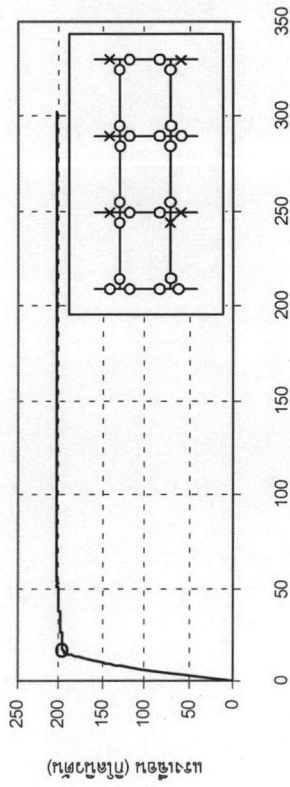
การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระหว่างชั้น (มิลลิเมตร)

(ฉ) ชั้นที่ 5



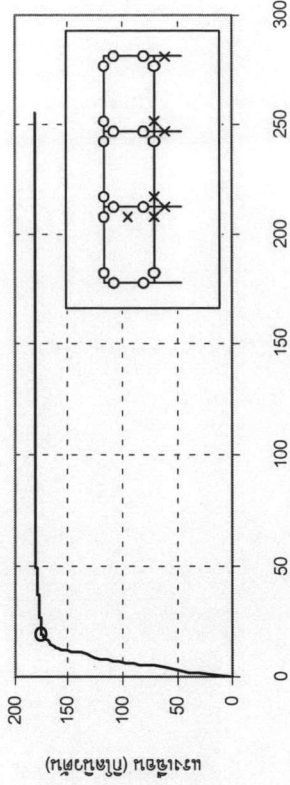
การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระหว่างชั้น (มิลลิเมตร)

(ค) ชั้นที่ 7



การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้น (มิลลิเมตร)

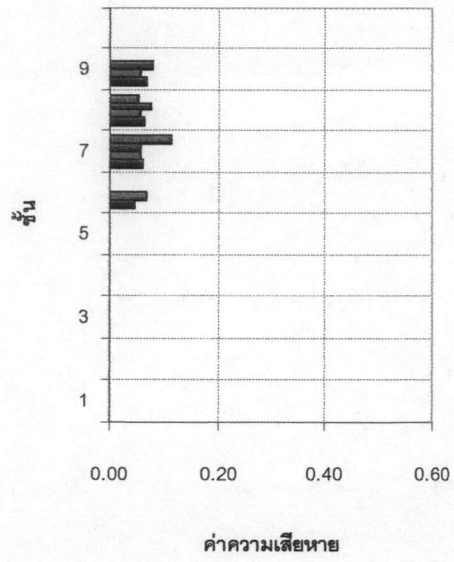
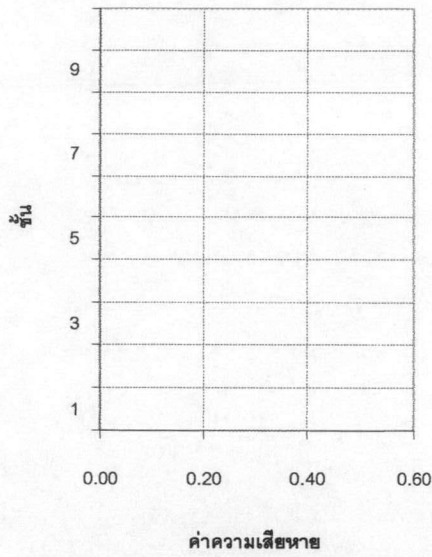
(จ) ชั้นที่ 9



การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้น (มิลลิเมตร)

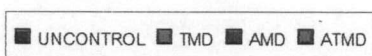
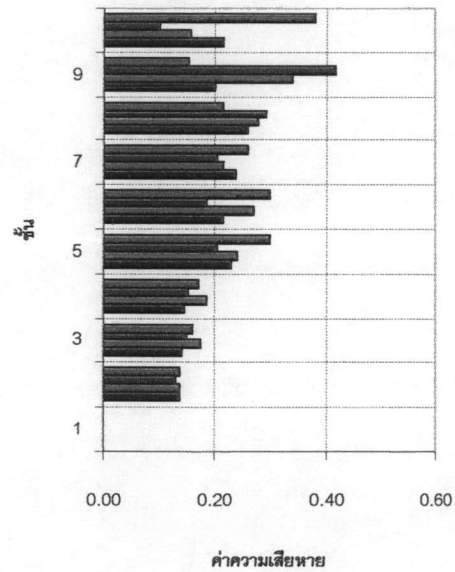
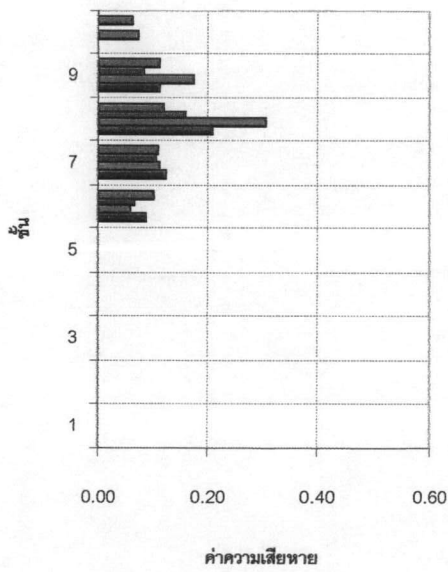
(ญ) ชั้นที่ 10

รูปที่ 8.4 การวิเคราะห์ด้วยแรงดันทางด้านข้างชั้นที่พิจารณาวิถี



(ก) 0.10g

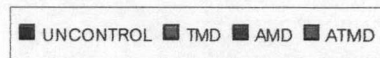
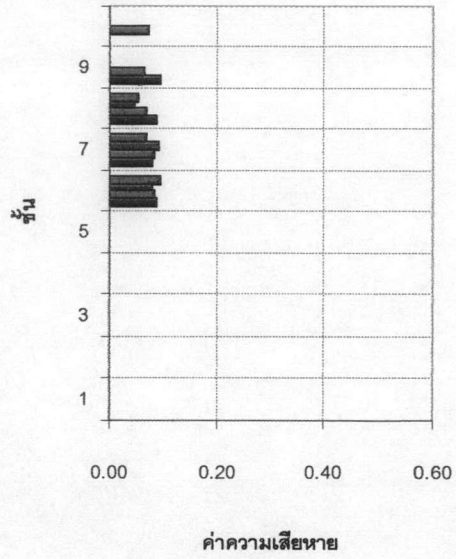
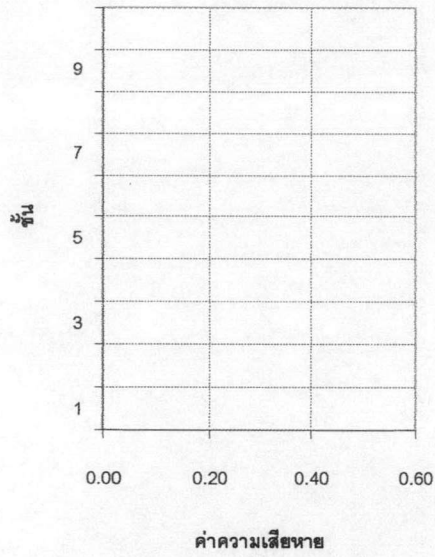
(ข) 0.25g



(ค) 0.40g

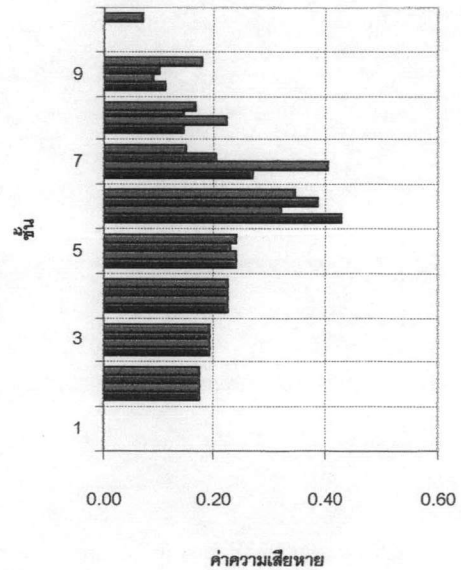
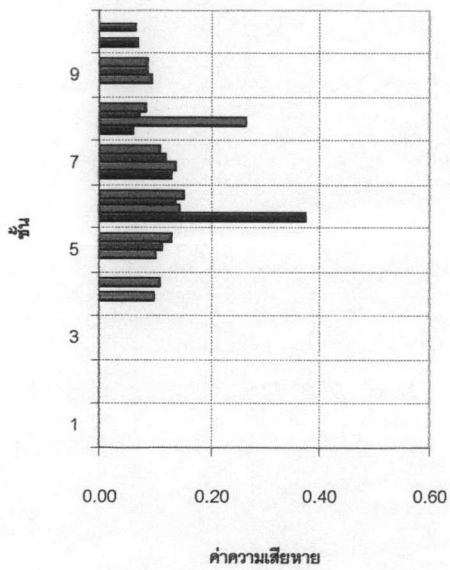
(ง) 0.85g

รูปที่ 8.5 ค่าความเสียหายของอาคารภายใต้คลื่น El Centro



(ก) 0.10g

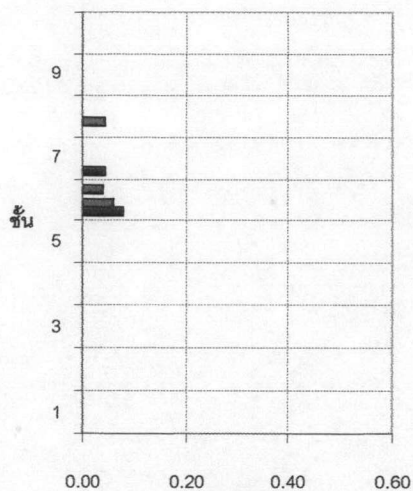
(ข) 0.25g



(ค) 0.40g

(ง) 0.85g

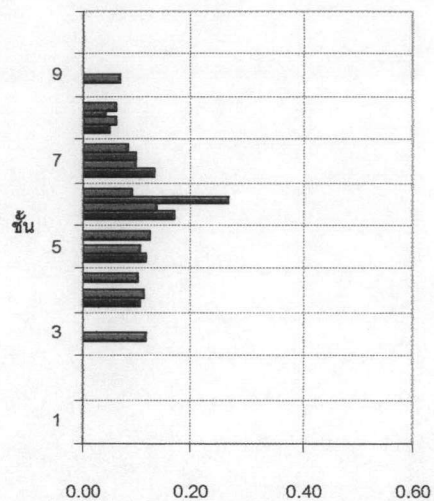
รูปที่ 8.6 ค่าความเสียหายของอาคารภายใต้คลื่น Northridge



ค่าความเสียหาย



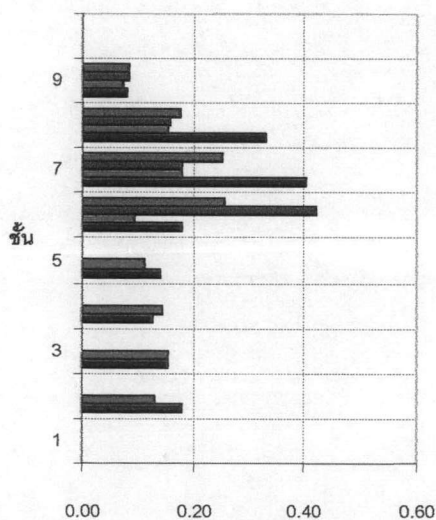
(ก) 0.05g



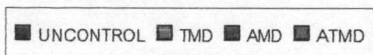
ค่าความเสียหาย



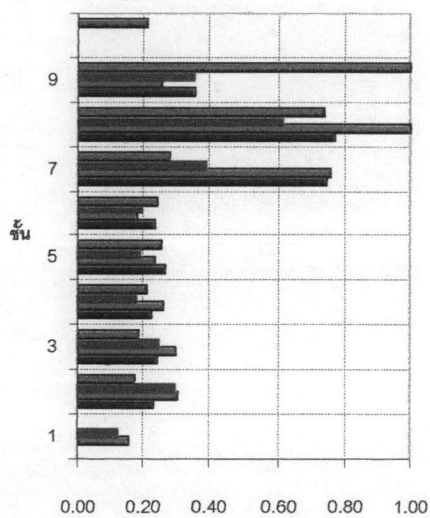
(ข) 0.08g



ค่าความเสียหาย



(ค) 0.11g

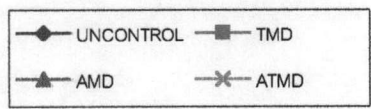
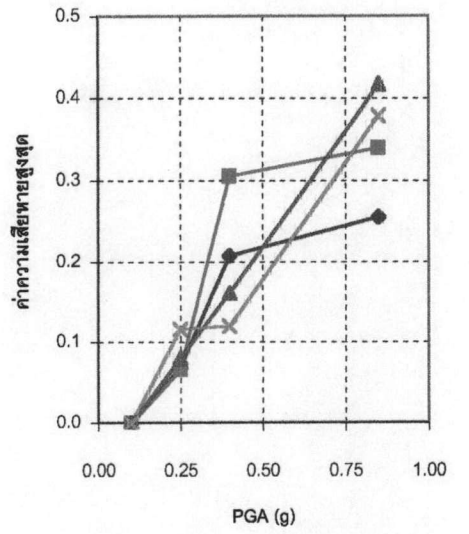


ค่าความเสียหาย

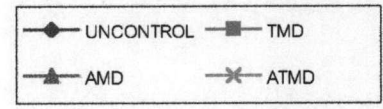
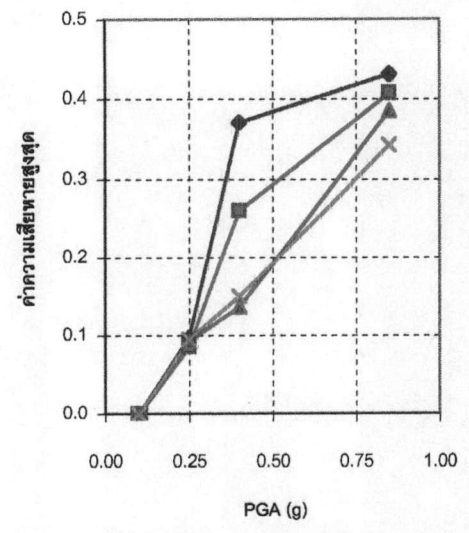


(ง) 0.15g

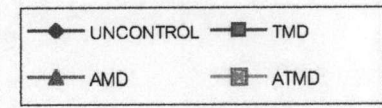
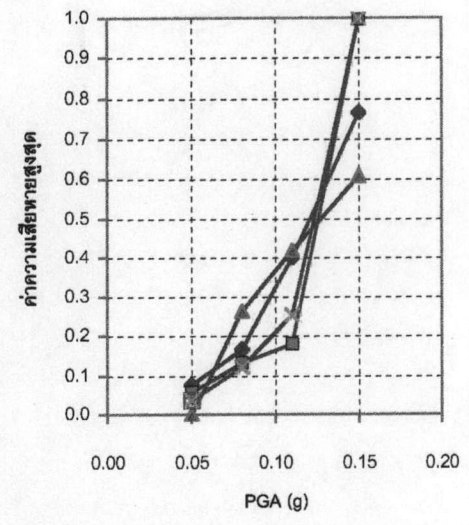
รูปที่ 8.7 ค่าความเสียหายของอาคารภายใต้คลื่น SCT-85



(ก) คลื่น El Centro



(ข) คลื่น Northridge



(ค) คลื่น SCT-85

รูปที่ 8.8 ค่าความเสียหายสูงสุดของอาคารในแต่ละคลื่นแผ่นดินไหว

จากการพิจารณาค่าความเสียหายสูงสุดที่เกิดขึ้นดังในรูปที่ 8.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหวค่าความเสียหายสูงสุดมีแนวโน้มที่จะลดลงในช่วงที่คลื่นแผ่นดินไหวมีความเร่งสูงสุดที่พื้นดินมีค่าน้อย โดยที่ความเร่งดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.40 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกในคลื่นแผ่นดินไหว El Centro และคลื่นแผ่นดินไหว Northridge และมีค่าเท่ากับ 0.11 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกในคลื่นแผ่นดินไหว SCT-85 โดยที่ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งที่พื้นดินสูงสุดดังกล่าวโครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหวมีค่าความเสียหายระดับขั้นสูงสุดประมาณ 0.20 จะมีข้อยกเว้นบ้างเช่นในคลื่นแผ่นดินไหว El Centro พบว่าที่ความเร่งสูงสุดที่พื้นดินมีค่าเท่ากับ 0.25 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ระบบควบคุมการสั่นไหวแบบมวลหน่วงปรับค่าแบบ แอกทีฟจะเพิ่มค่าความเสียหายสูงสุดซึ่งถ้าพิจารณาจากรูปที่ 8.5 พบว่าระบบควบคุมการสั่นไหวแบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟมีจำนวนชั้นที่เกิดความเสียหายน้อยกว่าแต่มีค่าความเสียหายสูงสุดมากกว่า สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Northridge แม้ว่าความเร่งสูงสุดที่พื้นดินจะมีค่ามากกว่า 0.85 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกแล้วก็ตามค่าความเสียหายของอาคารที่มีระบบควบคุมการสั่นไหวก็ยังน้อยกว่าโครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหว แต่ถ้าพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟพบว่าถ้าความเร่งสูงสุดที่พื้นดินมีค่าเพิ่มขึ้นอีกค่าความเสียหายสูงสุดของโครงสร้างที่มีการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหวมีแนวโน้มที่จะมีค่าความเสียหายสูงสุดมากกว่าโครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหว