

การตรวจหาความเสียหายของสะพานโครงข้อหมุนโดยการวิเคราะห์ผลตอบสนองการสั่นไหว



นายอาทิตย์ อ่ำเกตุสกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0365-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DAMAGE DETECTION OF TRUSS BRIDGES BY VIBRATION RESPONSE ANALYSIS

Mr. Artit Amkatesakul

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0365-3

อาทิติย์ อ่ำเกตุสกุล : การตรวจหาความเสียหายของสะพานโครงข้อหมุนโดยการวิเคราะห์ผลตอบสนองการสั่นไหว. (DAMAGE DETECTION OF TRUSS BRIDGES BY VIBRATION RESPONSE ANALYSIS) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 105 หน้า. ISBN 974-13-0365-3.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการตรวจหาความเสียหายในโครงข้อหมุน 2 มิติ จากการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านพลวัตของโครงสร้าง ได้แก่ ความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมด (Mode shape) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองโครงข้อหมุนในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความถี่และรูปร่างโหมด จากนั้นใช้วิธีการต่างๆ ในการตรวจหาความเสียหาย เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละวิธี โดยพิจารณาจากความถูกต้องในการทำนายตำแหน่งและระดับความรุนแรงของความเสียหาย ซึ่งวิธีการที่ศึกษาเปรียบเทียบประกอบด้วยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนสมเมตริกซ์ วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกชิบิลิตีเมตริกซ์ และวิธีเวคเตอร์แรงคงค้ำ นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับปรุงวิธีการที่มีอยู่เพื่อให้ผลการตรวจหาความเสียหายมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ผลจากการเปรียบเทียบวิธีการต่างๆ พบว่าเมื่อชิ้นส่วนที่เสียหายมีเซนซิทิวิตีที่สูง ทั้ง 3 วิธีสามารถตรวจพบความเสียหายได้แม้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยก็ตาม แต่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกชิบิลิตีเมตริกซ์มีความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง และวิธีเวคเตอร์แรงคงค้ำไม่สามารถตรวจพบความเสียหายได้หากความเสียหายที่เกิดขึ้นมีค่ามาก และเมื่อชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายมีเซนซิทิวิตีที่ต่ำวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนสมเมตริกซ์ต้องใช้จำนวนโหมดที่มากขึ้นจึงจะสามารถตรวจพบความเสียหายได้ ส่วนวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกชิบิลิตีเมตริกซ์จะไม่สามารถตรวจพบความเสียหายที่มีค่าน้อยได้ ในขณะที่วิธีเวคเตอร์แรงคงค้ำยังคงสามารถตรวจพบความเสียหายได้อย่างถูกต้องแม้จะใช้เพียงโหมดแรกเท่านั้นในการคำนวณ และเพื่อศึกษาผลของความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือตรวจวัดสัญญาณเมื่อนำไปใช้งานจริงได้สมมติให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในความถี่และรูปร่างโหมดที่ใช้ในการคำนวณ ผลที่ได้พบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนสมเมตริกซ์ตรวจพบตำแหน่งที่เสียหายถูกต้องแต่ความรุนแรงผิดพลาดไป ซึ่งรูปร่างโหมดที่คลาดเคลื่อนจะมีผลต่อความถูกต้องของผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีนี้มากกว่าความถี่ที่คลาดเคลื่อน ในขณะที่วิธีเวคเตอร์แรงคงค้ำตรวจพบความรุนแรงได้ดีกว่า แต่ตรวจพบชิ้นส่วนอื่นที่ไม่เสียหายด้วย

สุดท้ายได้ทำการปรับปรุงวิธีการตรวจสอบโดยใช้วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนสมเมตริกซ์ในการตรวจหาตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย แล้วใช้หลักการของวิธีเวคเตอร์แรงคงค้ำในการตรวจหาความรุนแรงของความเสียหาย ผลที่ได้พบว่าวิธีการที่ปรับปรุงให้ผลการตรวจหาความเสียหายที่มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2543

4270664521 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: DAMAGE DETECTION / TRUSS BRIDGES

MR. ARTIT AMKATESAKUL : THESIS TITLE. (DAMAGE DETECTION OF TRUSS BRIDGES BY VIBRATION RESPONSE ANALYSIS) THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. TOSPOL PINKAEW, 105 pp. ISBN 974-13-0365-3.

This study compares the techniques for damage detection of truss bridges from the analysis of dynamic properties of structures such as natural frequencies and mode shapes. A 2-D truss bridge is modeled in a computer to compute its natural frequencies and mode shapes. Three different techniques, consisting of the Stiffness, Flexibility and Residual Force Vector, are employed to identify the damage status of the bridge. The efficiencies of all techniques are compared by considering the accuracy of the damage location and the damage severity. In addition, this study suggests the modification of the existing methods to improve the detection accuracy.

Based on the obtained results, all 3 methods can detect the damage eventhough it has low severity if the damage is assumed to present in a sensitive member. However, the error from the Flexibility method is significant and the Residual Force Vector method can not detect the damage when the damage has high severity. In the case of an insensitivity member is assumed to be, the Stiffness method requires more information on modes to be able to detect the damage, and the Flexibility method can not detect the damage when the damage has low severity, while the Residual Force Vector can accurately detect the damage using only the first mode information. The signal noise from instrument is considered, so that the natural frequencies and mode shapes of the bridge are assumed to have the error. The result indicates that the Stiffness method can accurately detect the damage location with some error in the damage severity. Using this method, an error of mode shape has more effect on the accuracy of the damage detection than an error of frequency. While the Residual Force Vector can accurately detect the damage severity, although some undamaged members are incorrectly detected.

Finally, the damage detection method is improved by using the Stiffness method to detect the damage location, and subsequently use the Residual Force Vector method to calculate the damage severity.

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

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

Academic year2000.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับความรู้ทางทฤษฎี หลักการ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิจัยเป็นอย่างดี อันเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติรี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนอจันทร์ฉวีไทย เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความกรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและแง่คิดที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาของผู้ทำวิจัยอย่างสุดซึ้ง ที่เป็นกำลังใจให้แกผู้ทำวิจัยเสมอมา ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญยิ่งที่ทำให้ผู้ทำวิจัยสามารถฝ่าฟันปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้อย่างไม่ย่อท้อ

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ใจดีทุกคน ที่เป็นทั้งกำลังใจ ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาต่างๆ ตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณรอยยิ้มและเสียงหัวเราะจากเพื่อนๆ ในสาขาโครงสร้างทุกคน

สุดท้ายนี้ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณเพื่อนสนิทสมัยมัธยมทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจให้แก่ผู้ทำวิจัยด้วยดีตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	9
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	9
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 ความนำ.....	11
2.2 วิธีการตรวจหาความเสียหายที่จะทำการศึกษา.....	12
2.3 การตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงของสตีเฟนเมตริกซ์.....	13
2.4 การตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงของเฟลกชิบิลิตีเมตริกซ์.....	15
2.5 การตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีเวกเตอร์แรงคงค้าง.....	17

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทที่ 3 การตรวจหาความเสียหายในโครงข้อหมุน.....	23
3.1 ความนำ.....	23
3.2 สะพานโครงข้อหมุน.....	23
3.3 การวิเคราะห์เชิงสถิติของชิ้นส่วน.....	26
3.4 การเปรียบเทียบวิธีการตรวจหาความเสียหาย.....	31
3.5 สรุปผลการเปรียบเทียบ.....	69
บทที่ 4 การปรับปรุงวิธีการตรวจหาความเสียหาย.....	74
4.1 วิธีการปรับปรุง.....	74
4.2 การตรวจหาความเสียหาย.....	75
4.3 สรุปผล.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	83
5.1 สรุปผลการเปรียบเทียบวิธีการตรวจหาความเสียหาย.....	83
5.2 สรุปผลการปรับปรุงวิธีการตรวจหาความเสียหาย.....	85
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	90
ประวัติผู้วิจัย.....	105

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 3.1	ความถี่ของโครงสร้างที่ได้จากโปรแกรมกับโปรแกรม STAAD-III (Hz).....	26
ตารางที่ 3.2	แสดงค่าสูงสุดของ $\frac{\partial \omega_r}{\partial k_{ij}}$ ของแต่ละชั้นส่วน ($\times 10^{-7}$) เฉพาะ 10 โหมดแรกดัง.....	29
ตารางที่ 3.3	แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนของโครงข้อหมุน.....	30
ตารางที่ 3.4	แสดงกรณีศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการตรวจหาความเสียหาย.....	32
ตารางที่ 3.5	แสดงค่าความถี่ของโครงสร้างที่เสียหายที่มีความคลาดเคลื่อน สำหรับ 3 โหมดแรก.....	64
ตารางที่ 3.6	แสดงค่าความถี่ของโครงสร้างโหมดที่ 1 เมื่อชั้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหาย.....	69

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 กราฟ SDE ของแต่ละชั้นส่วนในโครงสร้าง.....	6
รูปที่ 2.1 การตรวจวัดผลตอบสนองการสั่นไหว.....	11
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการคำนวณหาความรุนแรงของความเสียหาย.....	22
รูปที่ 3.1 สะพานโครงข้อหมุนที่ใช้ในการตรวจหาความเสียหาย.....	23
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการคำนวณหาข้อมูลที่ใช้ในการตรวจหาความเสียหาย.....	27
รูปที่ 3.3 สะพานโครงข้อหมุนภายใต้แรงกระทำ.....	30
รูปที่ 3.4 แสดงชั้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหายในแต่ละครั้ง ในการศึกษาผล ของความรุนแรงของความเสียหาย.....	32
รูปที่ 3.5 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชั้นส่วนที่ 4.....	33
รูปที่ 3.6 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชั้นส่วนที่ 17.....	37
รูปที่ 3.7 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชั้นส่วนที่ 10.....	41
รูปที่ 3.8 แสดงชั้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหายในแต่ละครั้ง ในการศึกษาผล ของจำนวนโหมดที่ใช้ในการคำนวณ.....	45
รูปที่ 3.9 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหมดที่ใช้ สำหรับชั้นส่วนที่ 4.....	46
รูปที่ 3.10 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหมดที่ใช้ สำหรับชั้นส่วนที่ 17.....	51
รูปที่ 3.11 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหมดที่ใช้ สำหรับชั้นส่วนที่ 10.....	54
รูปที่ 3.12 แสดงชั้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหาย ในการศึกษาผล ของความสมมาตร.....	57
รูปที่ 3.13 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความสมมาตร.....	57
รูปที่ 3.14 แสดงชั้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหาย ในการศึกษาผล ของจำนวนชั้นส่วนที่เกิดความเสียหาย.....	58
รูปที่ 3.15 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนชั้นส่วนที่ เกิดความเสียหาย โดยใช้ 3 โหมดในการคำนวณ.....	59
รูปที่ 3.16 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนชั้นส่วนที่ เกิดความเสียหาย โดยใช้ 5 และ 6 โหมดในการคำนวณ.....	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.17 การสร้างความคลาดเคลื่อนในความถี่และรูปร่างโหมด.....	61
รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการสร้างความถี่ของโครงสร้างที่เสียหายที่มีความคลาดเคลื่อน.....	62
รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการสร้างรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหายที่มีความคลาดเคลื่อน.....	63
รูปที่ 3.20 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนในความถี่และรูปร่างโหมด สำหรับความคลาดเคลื่อนสูงสุดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์.....	67
รูปที่ 3.21 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนในความถี่และรูปร่างโหมด สำหรับความคลาดเคลื่อนสูงสุดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์.....	67
รูปที่ 3.22 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนในความถี่และรูปร่างโหมด สำหรับความคลาดเคลื่อนสูงสุดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์.....	68
รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการที่ปรับปรุงขึ้น.....	75
รูปที่ 4.2 แสดงขึ้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหายในโครงข้อหมุน.....	75
รูปที่ 4.3 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์.....	76
รูปที่ 4.4 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์.....	76
รูปที่ 4.5 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์.....	77
รูปที่ 4.6 แสดงขึ้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหายในโครงข้อหมุน.....	78
รูปที่ 4.7 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ (ขึ้นส่วนที่ 3 เสียหาย 10 เปอร์เซ็นต์, ขึ้นส่วนที่ 12 เสียหาย 20 เปอร์เซ็นต์).....	79
รูปที่ 4.8 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ (ขึ้นส่วนที่ 3 เสียหาย 10 เปอร์เซ็นต์, ขึ้นส่วนที่ 12 เสียหาย 20 เปอร์เซ็นต์).....	79
รูปที่ 4.9 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ (ขึ้นส่วนที่ 3 เสียหาย 10 เปอร์เซ็นต์, ขึ้นส่วนที่ 12 เสียหาย 20 เปอร์เซ็นต์).....	80

สัญลักษณ์

\mathbf{K}	=	สติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้างเดิมที่ยังไม่เสียหาย
\mathbf{K}_D	=	สติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้างที่เสียหาย
$\Delta\mathbf{K}$	=	การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้าง
\mathbf{K}_j	=	สติฟเนสเมตริกซ์ของชั้นส่วนที่ j
\mathbf{F}	=	เฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ของโครงสร้างเดิมที่ยังไม่เสียหาย
\mathbf{F}_D	=	เฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ของโครงสร้างที่เสียหาย
$\Delta\mathbf{F}$	=	การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ของโครงสร้าง
\mathbf{M}	=	เมตริกซ์มวลของโครงสร้าง
ω_i	=	ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ i ของโครงสร้างเดิมที่ยังไม่เสียหาย
ω_{D_i}	=	ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ i ของโครงสร้างที่เสียหาย
ϕ_i	=	รูปร่างโหมด (Mode shape) โหมดที่ i ของโครงสร้างเดิมที่ยังไม่เสียหาย
ϕ_{D_i}	=	รูปร่างโหมด (Mode shape) โหมดที่ i ของโครงสร้างที่เสียหาย
α_j	=	ความเสียหายสัมพัทธ์ (Relative damage) ของชั้นส่วนที่ j
NE	=	จำนวนชั้นส่วนทั้งหมดของโครงสร้าง
N	=	จำนวนโหมดที่ใช้ในการคำนวณ
n	=	ดีกรีความอิสระ (Degree of freedom)
\mathbf{R}_i	=	เวกเตอร์แรงคงค้าง (Residual force vector) สำหรับโหมดที่ i
Λ_D	=	เวกเตอร์ของค่าความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหาย
Λ_0	=	เวกเตอร์ของค่าความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างเดิมที่ยังไม่เสียหาย
r_D	=	เวกเตอร์ของค่าสติฟเนสของแต่ละชั้นส่วนในโครงสร้างที่เสียหาย
r_0	=	เวกเตอร์ของค่าสติฟเนสของแต่ละชั้นส่วนในโครงสร้างเดิมที่ยังไม่เสียหาย
\mathbf{T}	=	เซนซิทิวิตีเมตริกซ์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการวิจัย

เมื่อโครงสร้างได้รับแรงกระทำแบบวัฏจักรต่อเนื่องเป็นเวลานาน เช่น ในโครงสร้างสะพาน อาจทำให้เกิดความเสียหายขึ้นในโครงสร้างเนื่องจากความล้าได้ ซึ่งหากปล่อยทิ้งไว้โดยไม่ได้รับการซ่อมแซม อาจก่อให้เกิดการวิบัติหรือทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสูงขึ้น ดังนั้นการได้ทราบถึงสภาพของโครงสร้างสะพานจึงมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อความปลอดภัยของผู้ใช้สะพานและการจัดสรรงบประมาณเพื่อการดูแลและบูรณะได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันการตรวจสอบความเสียหายของสะพานในประเทศยังไม่มีระบบการตรวจสอบที่แน่ชัด อีกทั้งยังมีจำนวนบุคคลากรและอุปกรณ์ที่จำกัดไม่เพียงพอกับจำนวนสะพานที่มีจำนวนมาก ทำให้การให้คนเป็นผู้ตรวจสอบสิ้นเปลืองทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องค้นคว้าวิธีการในการทำการตรวจสอบสภาพสะพานที่มีอยู่เป็นจำนวนมากนี้ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ทั้งในแง่ค่าใช้จ่ายที่ลดน้อยลงและความถูกต้องแม่นยำที่สูงขึ้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาในต่างประเทศได้มีการพัฒนาวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบความเสียหายโดยอาศัยข้อมูลจากการตรวจวัดผลตอบแทนของโครงสร้างและประเมินด้วยคอมพิวเตอร์ขึ้นมาหลายวิธี ทำให้การตรวจหาความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมีความสะดวกรวดเร็วและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น จึงเกิดแนวความคิดในงานวิจัยนี้จะนำเอาวิธีการต่างๆ มาใช้ในการตรวจหาความเสียหายในโครงสร้างสะพาน โดยได้นำวิธีการต่างๆ ที่มีอยู่มาทำการศึกษาเปรียบเทียบเพื่อให้ทราบถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี ซึ่งจะช่วยให้สามารถเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมในการตรวจหาความเสียหาย นอกจากนี้ยังได้เสนอวิธีการในการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการดังกล่าวให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การตรวจหาความเสียหายของสะพานสามารถทำได้ถูกต้องมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบสะพานแต่ละครั้งลงได้อย่างมากอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการตรวจหาความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ในขั้นต้นของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้มีการเสนอวิธีการตรวจหาความเสียหายของโครงสร้าง โดยสามารถสรุปรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง

Cawley และ Adams (1979) ได้ใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่ในการบอกตำแหน่งของความเสียหาย โดยเสนอว่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของ 2 โหมดที่พิจารณา เป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งของความเสียหาย แต่ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงนั้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงเสนอฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน (Error function) เพื่อใช้ในการบอกตำแหน่งของความเสียหาย

Ju และ Mimovich (1986) ได้ทำนายความเสียหายโดยใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่ โดยทำนายได้อย่างถูกต้องภายใน 3 เปอร์เซนต์ของความยาวคาน และความถูกต้องจะมากขึ้นถึงน้อยกว่า 1 เปอร์เซนต์ของความยาวคาน เมื่อแทนปลายคานด้วยสปริงรับแรงบิด (Torsional spring) การทำนายตำแหน่งของความเสียหายใช้หลักการของจุดต่อฉีกขาด (Fracture hinge concept)

Brownjohn (1988) ได้ใช้หลักการของ Cawley และ Adams ในการทำนายตำแหน่งของความเสียหายในคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานเหล็ก โดย Brownjohn เสนอว่าควรใช้โหมดในการคำนวณอย่างน้อย 9 โหมด ถ้าต้องการให้การบอกตำแหน่งของความเสียหายมีความถูกต้องสูง

Law และคณะ (1990) ได้เสนอวิธีการในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงสติฟเนสของโครงสร้างและการคำนวณหาตำแหน่งของความเสียหาย จากการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่วัดได้ วิธีการนี้จะทำการจำลองโครงสร้างโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดล (Finite element model) และสมมติให้เมตริกซ์มวล (mass matrix) มีความไม่สมมาตร ก็จะสามารถบอกตำแหน่งของความเสียหายได้ ความถูกต้องในการบอกตำแหน่งของความเสียหายจะมากขึ้นถ้าส่วนของโครงสร้างที่เสียหายรวมอยู่ในการคำนวณด้วย ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะทราบก่อนว่าชิ้นส่วนใดมีความเสียหายอยู่ก่อนแล้ว

Stubbs และคณะ (1990) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความถี่กับการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรง, มวล และความหน่วงของโครงสร้าง และได้เสนอให้ใช้เมตริกซ์เซนซิวิตี (Sensitivity matrix) ในการคำนวณหาตำแหน่งและขนาดของความเสียหาย จากนั้นทำการจำลองโครงสร้างคานด้วยไฟไนท์เอลิเมนต์และกำหนดให้มีความเสียหายที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ผลที่ได้พบว่าสามารถทำนายตำแหน่งของความเสียหายได้ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ดียังไม่ได้มีการทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

Zhang และคณะ (1992) เสนอวิธีการในการบอกตำแหน่งของความเสียหายในโครงข้อแข็ง โดยที่ Zhang เสนอว่า อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของโหมด 2 โหมดที่พิจารณาจะเท่ากับอัตราส่วนของกำลังสองของค่าความเครียดที่ตำแหน่งที่มีความเสียหายเกิดขึ้น แต่เนื่องจากอาจมีความคลาดเคลื่อนในการทดลองและวิเคราะห์ จึงได้เสนอพารามิเตอร์ในการควบคุมด้วย ดังนั้นความถูกต้องของวิธีการนี้จึงขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้พารามิเตอร์ในการควบคุมให้เหมาะสม

Uzgider และคณะ (1993) เสนอวิธีในการหาตำแหน่งของความเสียหายโดยนำค่าความถี่ที่วัดได้ไปหาสตีฟเนสพารามิเตอร์ (Stiffness parameter) จากนั้นหาความแตกต่างระหว่างพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดความถี่กับพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ ก็จะสามารถบอกตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ ความถูกต้องของวิธีที่เสนอจึงขึ้นอยู่กับความถูกต้องของพารามิเตอร์ของความแข็งแรงที่ได้จากการวัดความถี่และที่ได้จากการคำนวณ นอกจากนี้วิธีการนี้ยังจำเป็นต้องใช้แบบจำลองโครงสร้างที่เชื่อถือได้ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการนี้

Eggers และ Stubbs (1994) กับ Penny และคณะ (1993) ได้ใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่และการวิเคราะห์เซนซิวิตี (Sensitivity analysis) ในการบอกตำแหน่งของความเสียหาย โดยที่ความถูกต้องของการวิเคราะห์เซนซิวิตี จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณหาเซนซิวิตี วิธีการนี้เป็นประโยชน์มากกับโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครง (Skeletal structures) ซึ่งความเสียหายจะมีผลต่อองค์ประกอบสตีฟเนสที่สำคัญของโครงสร้าง

Salawu (1997) ได้เสนอให้ใช้ดัชนีความเสียหาย (Global integrity index) ในการบอกตำแหน่งความเสียหาย ซึ่งคำนวณจากความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่ได้จากการตรวจวัด และได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการที่เสนอโดยทำการตรวจหาความเสียหายจากโครงสร้างจำลองและสะพานจริง ผลที่ได้พบว่าสามารถตรวจหาตำแหน่งของความเสียหายได้อย่างถูกต้อง

1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้รูปร่างโหมด

Allemang และ Brown (1982) ได้เสนอพารามิเตอร์เรียกว่า Modal Assurance Criterion (MAC) ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง 2 รูปร่างโหมดที่พิจารณา โดยที่ค่า MAC จะมีค่าตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่ง และจะเท่ากับหนึ่งถ้ารูปร่างโหมด 2 โหมดที่พิจารณามีความเหมือนกัน และจะเท่ากับศูนย์ถ้าตั้งฉากกัน วิธีการนี้ถูกนำไปใช้โดย Wolff และ Richardson (1989) และ Biswas และคณะ (1991) แต่วิธีการนี้ Pandey และคณะ (1991) พบว่าให้ผลที่ไม่ค่อยดีนักสำหรับคานยื่นที่ใช้รูปร่างโหมดการเคลื่อนที่ (displacement mode shape) ในการคำนวณหาค่า MAC

Anifantis และคณะ (1983) ได้ทำการตรวจสอบความเสียหายของอาคารโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งได้รับความเสียหายจากแผ่นดินไหว โดยทำการตรวจวัดสัญญาณตอบสนองของอาคารจากแรงกระทำที่ให้ไป แล้วทำการคำนวณหาความถี่และรูปร่างโหมดของอาคารที่เสียหายจากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับความถี่และรูปร่างโหมดของอาคารที่ไม่เสียหายซึ่งคำนวณจากแบบก่อสร้างของอาคาร แล้วทำการซ่อมแซมบริเวณที่มีความเสียหาย

Yuen (1985) ได้เสนอ Displacement และ Rotation Eigenparameter ในการคำนวณหาตำแหน่งของความเสียหายของคานยื่น โดยที่ eigenparameter คือ ความแตกต่างของรูปร่างโหมดการเคลื่อนที่ (Displacement mode shape) และ รูปร่างโหมดของการหมุน (Rotation mode shape) ที่ทำการปรับขนาด (Normalized) ด้วยความถี่ที่โหมดเดียวกัน ซึ่งความแตกต่างจะมากตรงบริเวณที่เกิดความเสียหาย

Lieven และ Ewins (1988) ได้เสนอพารามิเตอร์เรียกว่า Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC) โดยให้หลักการคล้ายกับที่ Allemang และ Brown (1982) ใช้ในการคำนวณหาค่า MAC พารามิเตอร์ COMAC นี้ใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าของรูปร่างโหมดที่ 2 จุดใดๆ ของข้อมูลแต่ละชุด โดยที่ค่า COMAC จะมีค่าตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่งเช่นเดียวกับค่า MAC และจะมีค่าเท่ากับหนึ่ง ถ้าจุดที่พิจารณาในแต่ละชุดข้อมูลมีค่าเท่ากัน

Feng และคณะ (1989) ได้ใช้รูปร่างโหมดความเครียด (Strain mode shape) ในการทำนายตำแหน่งของความเสียหายโดยเสนอว่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของคานที่เสียหายเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของค่ารูปร่างโหมดความเครียด Feng สรุปว่ารูปร่างโหมดความเครียดมีความไว (sensitivity) ต่อความเสียหายของคานมากกว่าความถี่

Qian และคณะ (1990) ได้ปรับปรุงวิธีการของ Yuen (1985) โดยเสนอให้ใช้สถิติพ-เนสเมตริกซ์ใหม่สำหรับชิ้นส่วนที่เสียหาย จากนั้นหา eigenparameter ตามหลักการของ Yuen แล้วทำการทำนายบริเวณที่เกิดความเสียหาย ผลที่ได้พบว่าการทำนายให้ผลที่ตรงกับผลที่ได้จากการทดลอง

Rizos และ Aspragathos (1990) ใช้รูปร่างโหมดการเคลื่อนที่ในการหาตำแหน่งความเสียหายของคานยื่น โดยได้ทำการทดลองโดยให้แรงกับคาน ซึ่งความถี่ของแรงที่ให้ตรงกับความถี่ธรรมชาติของคาน แล้ววัดการเคลื่อนที่ของจุด 2 จุดบนคาน จากนั้นจะสามารถใช้สมการที่เสนอในการบอกตำแหน่งและความลึกของความเสียหายที่ให้ไปได้ แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ ถ้าความเสียหายที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย จะทำนายความเสียหายได้ไม่ถูกต้องนัก

Salane และ Baldwin (1990) ได้ทำการทดสอบความล้า (Fatigue testing) ของสะพานจำลองและสะพานจริง พบว่าความถี่ที่ลดลงแสดงให้เห็นว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงสร้าง และตำแหน่งของความเสียหายสามารถดูได้จากรูปร่างโหมดที่เปลี่ยนแปลงไป

Biswas และคณะ (1991) ทำการทดลองบนสะพานจริง โดยจำลองความเสียหายด้วยการถอดตัวยึด (Bolt) ออก จากนั้นทำการให้แรงกับสะพานแล้ววัดสัญญาณตอบสนองของสะพานทั้งก่อนและหลังจากให้มีความเสียหายเกิดขึ้นในสะพาน ผลที่ได้พบว่าความถี่และรูปร่างโหมดมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

Mazurek และ Dewolf (1990) ทำการทดลองบนสะพานจำลองโดยใช้รถจำลองวิ่งไปบนสะพานเพื่อทำให้เกิดการสั่น และได้ทำการศึกษาผลกระทบต่างๆ ที่มีผลต่อความถี่และรูปร่างโหมด ซึ่งได้แก่ น้ำหนักรถ ความเร็วรถ ความขรุขระของผิวถนน ความเสียหายของฐานรองรับและความเสียหายของคานสะพาน ผลที่ได้พบว่าเมื่อโมเมนต์อินเนอร์เซียของสะพานจำลองลดลงจากเดิม 19 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ลดลงเพียงแค่ 1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และรูปร่างโหมดสามารถใช้บอกตำแหน่งของความเสียหายได้

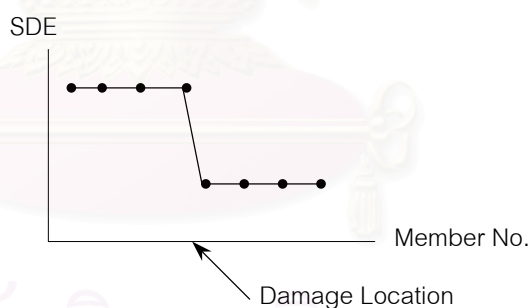
Pandey และคณะ (1991) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างโหมดความโค้ง (curvature mode shape) โดยที่ความโค้งเท่ากับผลรวมของความเครียดด้านรับแรงอัดและความเครียดด้านรับแรงดึงของคาน หาดด้วยความลึกของคาน ผลที่ได้พบว่าเหมือนกันกับการใช้รูปร่างโหมดความเครียด

Yao และคณะ (1992) ใช้รูปร่างโหนดความเครียดในการบอกตำแหน่งความเสียหายในโครงข้อแข็ง Yao สรุปว่ารูปร่างโหนดความเครียดมีความไวต่อความเสียหายมากกว่ารูปร่างโหนดการเคลื่อนที่

Salawu และ Williams (1995) ได้ทำการศึกษาผลของการซ่อมแซมบริเวณที่เสียหายของสะพานผ่านค่า MAC และ COMAC ผลที่ได้จากการทดสอบสะพานทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซมพบว่าค่า MAC มีค่าไม่เท่ากับหนึ่ง ซึ่งแสดงว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นในสะพานแล้ว และค่า COMAC มีค่าต่ำมากตรงบริเวณที่เกิดความเสียหาย จึงได้เสนอว่าจุดที่มีค่า COMAC ต่ำกว่า 0.8 แสดงว่าเป็นจุดที่มีความเสียหายเกิดขึ้น

1.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ Static defect energy

Shih-Shong Tseng (2000) ได้เสนอวิธีการในการทำนายบริเวณที่เกิดความเสียหายในคานและโครงข้อแข็ง 2 มิติ โดยใช้ Static Defect Energy (SDE) ซึ่งพิสูจน์มาจากหลักการของพลังงาน โดยเมื่อทำการวาดกราฟของ SDE ของแต่ละชิ้นส่วนในโครงสร้าง จะพบว่า SDE จะมีค่าคงที่ไปตลอดบริเวณที่ไม่มี ความเสียหาย และจะเปลี่ยนไปคงที่ที่อีกค่าหนึ่งอย่างรวดเร็วตรงบริเวณที่มีความเสียหายเกิดขึ้นดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กราฟ SDE ของแต่ละชิ้นส่วนในโครงสร้าง

ความรุนแรงของความเสียหายขึ้นอยู่กับความชันของกราฟตรงบริเวณที่เกิดความเสียหาย ซึ่งสามารถบอกได้แค่ความรุนแรงมากขึ้นหรือน้อยลงกว่าเดิม แต่ไม่สามารถบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงของมวลและสติฟเนสของโครงสร้างได้

ในการตรวจสอบความถูกต้องของหลักการที่ได้นำเสนอ ได้มีการจำลองลักษณะของโครงสร้างหลายแบบได้แก่ คานต่อเนื่อง คานยื่น และโครงข้อแข็ง และได้กำหนดให้มีความเสียหายที่ตำแหน่งต่างๆ กัน แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite element method) เพื่อหาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการในการคำนวณหา SDE ของแต่ละชิ้นส่วน จากนั้น

คำนวณหา SDE ของแต่ละชั้นส่วนแล้วนำไปวาดกราฟ ผลที่ได้พบว่าหลักการที่เสนอสามารถทำนายบริเวณที่เกิดความเสียหายได้อย่างถูกต้อง และความชันของกราฟ SDE มีค่ามากขึ้นเมื่อความเสียหายที่ให้มากขึ้น

1.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เวกเตอร์แรงคงค้าง (Residual force vector)

Kosmatka และ Ricles (1992) ได้เสนอวิธีการทำนายบริเวณที่เกิดความเสียหายในโครงสร้างโดยใช้ Residual Force Vector (R) โดยที่ค่า R จะเป็นศูนย์เมื่อไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น และจะมีค่ามากบริเวณองศาความอิสระ (Degree of freedom) ของชั้นส่วนที่เกิดความเสียหาย สำหรับความรุนแรงของความเสียหายนั้นได้คำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และรูปร่างโหมด กับมวลและสติเฟนสของโครงสร้างทั้งก่อนและหลังจากเกิดความเสียหาย

จากนั้นได้มีการทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของหลักการที่ได้นำเสนอ โดยได้ใช้โครงข้อหมุน 2 มิติในการทดลอง และในปี 1999 ได้ใช้โครงข้อหมุน 3 มิติในการทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองในทั้งสองงานวิจัยพบว่าสามารถทำนายบริเวณที่เกิดความเสียหายและความรุนแรงของความเสียหายได้อย่างถูกต้อง

1.2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้การเปลี่ยนแปลงของสติเฟนสเมตริกซ์

Topole และ Stubbs (1995) ได้เสนอวิธีการในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงสติเฟนสเมตริกซ์ โดยเสนอให้การเปลี่ยนแปลงสติเฟนสเมตริกซ์ของชั้นส่วนเป็นอัตราส่วนกับสติเฟนสเดิมของชั้นส่วน และใช้หลักการของ modal analysis สร้างชุดสมการในการคำนวณหาอัตราส่วนดังกล่าวของแต่ละชั้นส่วน โดยที่จำนวนสมการที่ได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนโหมดของการสั่นไหวที่พิจารณา

จากนั้นได้มีการจำลองโครงสร้างอาคารรับแรงเฉือน 10 ชั้นวิเคราะห์แบบ 2 มิติ โดยให้มีค่าความเสียหายที่แต่ละชั้นส่วนต่างๆ กัน จากนั้นใช้วิธีการที่เสนอพบว่าสามารถทำนายบริเวณที่เกิดความเสียหายและความรุนแรงของความเสียหายได้ถูกต้อง โดยความถูกต้องจะมากขึ้นหากใช้จำนวนโหมดในการคำนวณมากขึ้น

นอกจากนี้ยังได้มีการทดลองให้มีความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ามวลและสติเฟนสของโครงสร้างด้วย ผลที่ได้พบว่าการทำนายบริเวณที่เกิดความเสียหายและความรุนแรงของความเสียหาย อาจมีความคลาดเคลื่อนบ้างหากใช้จำนวนโหมดในการคำนวณน้อยเกินไป แต่ความคลาดเคลื่อนจะหมดไปหากใช้จำนวนโหมดมากขึ้น

Jeong-Tae Kim และ Stubbs (1995) ได้ทำการศึกษาผลของความไม่แน่นอนของแบบจำลองในการทำนายบริเวณที่เกิดความเสียหาย โดยได้ศึกษาผลของความไม่แน่นอนในการเลือกแบบจำลองของโครงสร้าง ความไม่แน่นอนของความแข็งแรงของโครงสร้าง และความไม่แน่นอนในการคำนวณรูปร่างโหมดจากสัญญาณที่วัดได้ โดยใช้หลักการของ modal analysis สร้างสมการในการหาตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหาย โดยในการหาตำแหน่งของความเสียหายนั้นได้นำหลักการทางสถิติมาช่วย แต่สำหรับความรุนแรงของความเสียหายสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการที่ได้เสนอให้ใช้ ในการตรวจสอบความถูกต้องของหลักการที่เสนอได้นำรูปร่างโหมดที่ได้คำนวณไว้โดย Mazurek และ Dewolf (1990) มาใช้ ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้รถจำลองเคลื่อนที่ไปบนคานจำลองแล้ววัดสัญญาณความเร่งของคาน ผลที่ได้พบว่าการทำนายตำแหน่งของความเสียหายนั้นสามารถทำนายได้ถูกต้อง แต่ความรุนแรงที่ทำนายได้มีค่าเกินกว่าความรุนแรงที่ให้ไปในคานทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนต่างๆ นอกจากนี้ยังได้เสนอหลักการในการประเมินความถูกต้องของผลการทำนายซึ่งสัมพันธ์กับความไม่แน่นอนของแบบจำลอง

Morassi และ Rovere (1997) ได้ทำการศึกษาการทำนายตำแหน่งของความเสียหายในโครงข้อแข็ง โดยใช้หลักการคล้ายๆ กับที่ Topole และ Stubbs (1995) ได้เสนอไว้ ผลที่ได้พบว่าสามารถทำนายบริเวณที่เกิดความเสียหายได้ค่อนข้างดี

1.2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้การเปลี่ยนแปลงของเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์

Pandey และ Biswas (1995) ได้เสนอให้ใช้การเปลี่ยนแปลงของเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ในการตรวจหาความเสียหายในโครงสร้าง จากนั้นได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการที่เสนอโดยทำการตรวจหาความเสียหายในระบบสปริง-มวล 4 องศาอิสระ โครงข้อหมุน 6 ชิ้นส่วน และโครงข้อหมุน 51 ชิ้นส่วน ด้วยคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้พบว่าสามารถทำนายความเสียหายได้อย่างถูกต้องทั้งตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหาย

Zhao และ Dewolf (1999) ได้ศึกษาเซนซิวิตี (Sensitivity) ของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจหาตำแหน่งที่เกิดความเสียหายซึ่งได้แก่ ความถี่และรูปร่างโหมด และเนื่องจากเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นในโครงสร้างจะทำให้สติฟเนสของโครงสร้างเปลี่ยนแปลง ดังนั้น Zhao และ Dewolf จึงได้ศึกษาเซนซิวิตีของพารามิเตอร์ต่างๆ เทียบกับการเปลี่ยนแปลงสติฟเนส นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเซนซิวิตีของเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ด้วย โดยได้ทำการหาเซนซิวิตีของพารามิเตอร์ต่างๆ จากสมการที่เสนอโดยใช้ระบบสปริง-มวล (Spring-mass system) มีดีกรีความ

อิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ 5 ในการคำนวณ ผลที่ได้พบว่าเฟล็กซิบิลิตีมีเซนซิวิตีต่อการเปลี่ยนแปลงของสติฟเนสมากกว่าความถี่และรูปร่างโหมด

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เปรียบเทียบวิธีการในการทำนายความเสียหายในโครงสร้างสะพาน ทั้งในแง่ของระดับความเสียหาย และตำแหน่งของความเสียหาย
2. พัฒนาและปรับปรุงวิธีการทำนายความเสียหายที่มีอยู่ให้เหมาะสมกับโครงสร้างและระบบการตรวจวัดสะพานของประเทศ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. โครงสร้างที่พิจารณาเป็นโครงข้อหมุน 2 มิติ
2. พิจารณาโครงสร้างเป็นแบบ Linear Elastic
3. การจำลองสติฟเนสของโครงสร้างเริ่มต้นก่อนเกิดความเสียหายจากผลตอบสนองการสั่นไหวสามารถทำได้โดยไม่มี ความคลาดเคลื่อน
4. พิจารณาให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีผลทำให้สติฟเนสของชิ้นส่วนในโครงสร้างลดลง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงวิธีการและข้อดีข้อเสีย ในการทำนายตำแหน่งของความเสียหายในโครงสร้างที่มีอยู่ในปัจจุบัน ทำให้สามารถเลือกใช้ได้เหมาะสม
2. วิธีการตรวจหาความเสียหายที่ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงให้มีความถูกต้องมากขึ้น
3. ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบตำแหน่งและระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นของสะพาน
4. ช่วยให้การจัดลำดับความสำคัญและการจัดสรรงบประมาณ ในการบำรุงรักษาสะพาน เป็นไปอย่างเหมาะสม

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาผลงานวิจัยในอดีต และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการทำนายความเสียหาย
2. เขียนโปรแกรมวิเคราะห์การสั่นไหวของโครงข้อหมุนภายใต้แรงกระทำ เพื่อนำผลตอบสนองการสั่นไหวมาใช้ในการทำนายความเสียหาย
3. ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยเปรียบเทียบกับโปรแกรม STAAD-III

4. ศึกษาวิธีการตรวจหาความเสียหายที่จะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบ
5. เขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการทำนายความเสียหาย ตามวิธีการต่างๆ
 - 5.1 โดยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงของสติฟเนสเมตริกซ์ (Stiffness Matrix)
 - 5.2 โดยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงของเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ (Flexibility Matrix)
 - 5.3 โดยวิธีเวกเตอร์แรงคงค้าง (Residual Force Vector)
6. เปรียบเทียบวิธีการทำนายความเสียหายแต่ละวิธีที่มีอยู่ในแง่ต่างๆ
 - 6.1 ในแง่ตำแหน่งของความเสียหาย
 - 6.2 ในแง่ความรุนแรงของความเสียหาย
7. พัฒนาและปรับปรุงวิธีการที่มีอยู่ให้สามารถตรวจหาความเสียหายได้ถูกต้องมากขึ้น
8. วิเคราะห์และสรุปผล
9. ทำรายงาน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

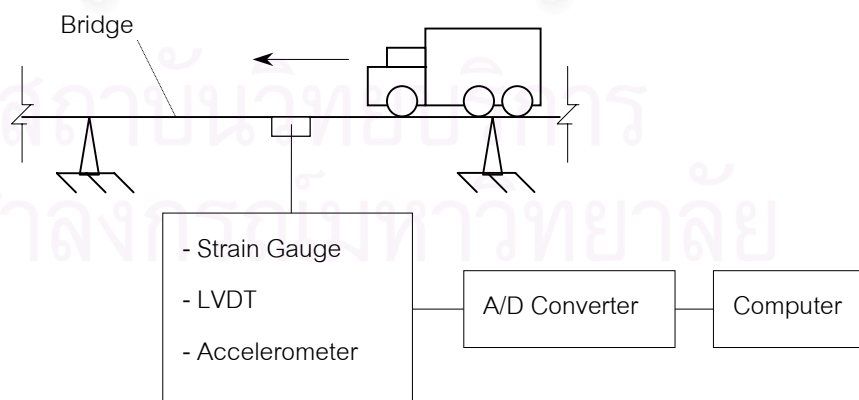
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความนำ

ในการตรวจหาความเสียหายของสะพานนั้นต้องใช้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Dynamic Property) ของสะพานที่ต้องการตรวจสอบ ได้แก่ ความถี่และรูปร่างโหมด ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะได้มาจากการวัดผลตอบสนองการสั่นไหว (Vibration Response) ของสะพาน (รูปที่ 2.1) โดยเครื่องมือที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด ได้แก่

1. Strain Gauge ใช้วัดความเครียดของวัสดุตรงตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเครื่องมือ ซึ่งในการติดตั้งจำเป็นต้องทำความสะอาดผิวของวัสดุให้สะอาด เพื่อให้วัดข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ข้อดีของการใช้ Strain Gauge คือ ตัว Strain Gauge เองมีราคาค่อนข้างต่ำ
2. LVDT ใช้วัดการเคลื่อนที่ของจุดที่ทำการติดตั้งเครื่องมือ แต่เนื่องจากว่าการทำงานของ LVDT ต้องอาศัยการเคลื่อนที่แบบสัมผัส ทำให้ต้องมีการยึดตัวเครื่องมือไว้กับจุดอ้างอิงที่ไม่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งทำได้ยากสำหรับโครงสร้างสะพาน
3. Accelerometer ใช้วัดความเร่งของจุดที่ทำการติดตั้งเครื่องมือ โดยทำการยึด Accelerometer ให้ติดแน่นกับจุดที่ต้องการซึ่งสามารถทำได้ง่ายกว่าการใช้ Strain Gauge แต่ Accelerometer มีราคาค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.1 การตรวจวัดผลตอบสนองการสั่นไหว

อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะใช้อุปกรณ์ใดในการตรวจวัด สัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังชุดแปลงสัญญาณจาก Analog ไปเป็น Digital (A/D Converter) เพื่อให้สัญญาณที่วัดได้อยู่ในลักษณะของสัญญาณ Digital ซึ่งทำให้สามารถบันทึกลงเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ และจากผลการตอบสนองการสั่นไหวที่ได้นี้ก็สามารถนำไปคำนวณหาความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้าง (Ewins, D.J., 1984) เพื่อใช้ในการตรวจหาความเสียหายในโครงสร้างได้

2.2 วิธีการตรวจหาความเสียหายที่จะทำการศึกษา

วิธีการตรวจหาความเสียหายที่มีอยู่ในปัจจุบันมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีการตรวจหาความเสียหายโดยดูจากการเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติซึ่งมีอยู่หลายงานวิจัยที่ใช้หลักการดังกล่าวในการตรวจหาความเสียหาย และได้มีการเสนอวิธีการในการบอกตำแหน่งของความเสียหายจากความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ดีวิธีการนี้ก็ยังไม่สามารถตรวจหาความรุนแรงของความเสียหายได้

จากงานวิจัยที่ใช้การเปลี่ยนแปลงของรูปร่างโหมดในการตรวจหาความเสียหาย จะพบว่าวิธีการนี้สามารถตรวจพบบริเวณที่เกิดความเสียหายในคานได้แต่ก็ยังไม่สามารถระบุความรุนแรงของความเสียหายได้ และในโครงข้อมุมซึ่งมีชิ้นส่วนเป็นจำนวนมากยังไม่เคยมีการนำวิธีการนี้มาใช้ในการตรวจหาความเสียหาย

จะเห็นได้ว่าการตรวจหาความเสียหายโดยใช้ความถี่หรือรูปร่างโหมดที่เปลี่ยนไปนั้นสามารถตรวจหาความเสียหายได้เพียงตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย แต่ไม่สามารถตรวจหาความรุนแรงของความเสียหายได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนสเมตริกซ์ วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกชิบิลิตีเมตริกซ์ และวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง ซึ่งจากงานวิจัยที่ใช้แต่ละวิธีดังกล่าวในการตรวจหาความเสียหาย จะพบว่าสามารถตรวจหาตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย ตลอดจนความรุนแรงของเสียหายได้อย่างถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามยังไม่เคยมีการนำทั้ง 3 วิธีมาทำการศึกษาเปรียบเทียบกัน ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำวิธีการตรวจหาความเสียหายทั้ง 3 วิธีมาเปรียบเทียบกันเพื่อให้ทราบถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี และสามารถพัฒนาและปรับปรุงวิธีการตรวจหาความเสียหายให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยหลักการและวิธีการในการตรวจหาความเสียหายของแต่ละวิธีจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.3 การตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงของสติฟเนสเมตริกซ์

วิธีการนี้เสนอโดย Topole และ Stubbs (1995) โดยเริ่มพิจารณาจากสมการ

$$(\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M}) \phi_i = 0 \quad (2.1)$$

โดยที่ \mathbf{K} และ \mathbf{M} คือ สติฟเนสเมตริกซ์และเมตริกซ์มวลของโครงสร้างที่ยังไม่มีความเสียหาย, ω_i และ ϕ_i คือ ความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างของโหมดที่ i และเมื่อคูณด้วย ϕ_i^T ตลอดสมการที่ (2.1) จะได้ว่า

$$\omega_i^2 = \frac{\phi_i^T \mathbf{K} \phi_i}{\phi_i^T \mathbf{M} \phi_i} = \frac{K_i}{M_i} \quad (2.2)$$

และสำหรับโครงสร้างที่มีความเสียหายเกิดขึ้นจะสามารถเขียนได้เป็น

$$\omega_{D_i}^2 = \frac{K_{D_i}}{M_{D_i}} \quad (2.3)$$

ซึ่งเมื่อทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalized) รูปร่างโหมดเทียบกับ M_{D_i} ($\phi_{D_i}^T \mathbf{M}_D \phi_{D_i} = 1$) จะสามารถเขียน สมการที่ (2.3) ใหม่ได้เป็น

$$\omega_{D_i}^2 = K_{D_i} = \phi_{D_i}^T \mathbf{K}_D \phi_{D_i} \quad (2.4)$$

โดยที่ \mathbf{K}_D คือ สติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้างที่เสียหาย และการเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้างที่เสียหายสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{K}_D = \mathbf{K} + \Delta \mathbf{K} \quad (2.5)$$

โดยที่ $\Delta \mathbf{K}$ คือ การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้าง ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\Delta \mathbf{K} = \sum_{j=1}^{NE} \alpha_j \mathbf{K}_j \quad (2.6)$$

โดยที่ α_j คือ ความเสียหายสัมพัทธ์ (Relative damage) ของชิ้นส่วนที่ j , NE คือ จำนวนชิ้นส่วนทั้งหมดที่มีในโครงสร้าง และ \mathbf{K}_j คือ สติฟเนสเมตริกซ์ของแต่ละชิ้นส่วน ทำการแทนค่าสมการที่ (2.5) และ (2.6) ลงในสมการที่ (2.4) แล้วทำการจัดพจน์ใหม่จะได้

$$\frac{\sum_{j=1}^{NE} \phi_{D_i}^T \mathbf{K}_j \phi_{D_i} \alpha_j}{\phi_{D_i}^T \mathbf{K} \phi_{D_i}} = \frac{\omega_{D_i}^2}{\phi_{D_i}^T \mathbf{K} \phi_{D_i}} - 1 \quad (2.7)$$

เนื่องจากรูปร่างใหม่มีคุณสมบัติออร์โธโกนัล (Orthogonality property) กับ สติเฟเนสมเมตริกซ์ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\phi_{D_k}^T \mathbf{K}_D \phi_{D_l} = 0 \quad , k \neq l \quad (2.8)$$

แทนค่าสมการที่ (2.5) และ (2.6) ลงในสมการที่ (2.8) แล้วทำการจัดพจน์ใหม่จะ
ได้

$$\frac{\sum_{j=1}^{NE} \phi_{D_k}^T \mathbf{K}_j \phi_{D_l} \alpha_j}{\phi_{D_k}^T \mathbf{K} \phi_{D_l}} = -1 \quad , k \neq l \quad (2.9)$$

สมการที่ (2.7) จะสามารถสร้างสมการได้ทั้งหมด N สมการ และสมการที่ (2.9) จะสร้างสมการได้ทั้งหมด $N(N-1)/2$ สมการ ดังนั้นจะมีจำนวนสมการที่ใช้ในการคำนวณได้ทั้งหมดเท่ากับ $N(N+1)/2$ สมการ เมื่อ N คือ จำนวนโหนดที่ใช้ในการคำนวณ และมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ α_j อยู่เท่ากับจำนวนชิ้นส่วนทั้งหมด

ในการคำนวณหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (α_j) จะขึ้นอยู่กับจำนวนสมการที่มี (ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนโหนดที่ใช้) และจำนวนชิ้นส่วนทั้งหมดของโครงสร้าง วิธีการแก้สมการมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธีดังต่อไปนี้

1. กรณีที่จำนวนสมการที่มีอยู่เท่ากับจำนวนชิ้นส่วนทั้งหมด ระบบสมการนี้จะมีคำตอบที่ถูกต้องเพียงคำตอบเดียว และจะใช้วิธี Gauss-Jordan elimination ในการคำนวณ
2. กรณีที่จำนวนสมการที่มีอยู่มากกว่าจำนวนชิ้นส่วนทั้งหมด ระบบสมการนี้อาจจะมีหรือไม่มีคำตอบที่ถูกต้องก็ได้ ในการแก้สมการจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least-square techniques) เพื่อทำให้ความคลาดเคลื่อนมีขนาดน้อยที่สุด
3. กรณีที่จำนวนสมการที่มีอยู่น้อยกว่าจำนวนชิ้นส่วนทั้งหมด ระบบสมการนี้จะมีคำตอบได้หลายคำตอบที่จะทำให้สมการเป็นจริง และจะใช้วิธี Pseudo-inverse techniques (R. Penrose, 1965) เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดออกมา

เมื่อทำการแก้สมการหาค่า α_j ของแต่ละชั้นส่วนได้ ก็จะสามารถทำนายตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้ โดยหากค่า α_j มีค่าเป็นศูนย์แสดงว่าชั้นส่วนนั้นไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น และหากมีค่าเป็น -1 แสดงว่าชั้นส่วนนั้นมีความเสียหาย 100 เปอร์เซ็นต์

2.4 การตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงของเฟลกซ์บิลิตีเมตริกซ์

การตรวจหาความเสียหายโดยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซ์บิลิตีเมตริกซ์ เสนอโดย Pandey และ Biswas (1995) โดยเริ่มพิจารณาจากสมการ

$$(\mathbf{K} - \Omega \mathbf{M})\Phi = 0 \quad (2.10)$$

โดยที่ $\Omega = \text{diag}(\omega_i^2) = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_N^2 \end{bmatrix}$, $\Phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_N]$ และ N คือ

จำนวนโหมดทั้งหมด

จากนั้นคูณด้วย Φ^T ตลอดสมการที่ (2.10) จะได้ว่า

$$\Phi^T \mathbf{K} \Phi - \Omega \Phi^T \mathbf{M} \Phi = 0 \quad (2.11)$$

เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์ (normalize) รูปร่างโหมดให้ $\Phi^T \mathbf{M} \Phi = \mathbf{I}$ โดยที่ \mathbf{I} คือเมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix) จะสามารถเขียนสมการที่ (2.11) ได้ใหม่เป็น

$$\Phi^T \mathbf{K} \Phi = \Omega \quad (2.12)$$

อินเวอร์สสมการที่ (2.12) จะได้

$$\Phi^{-1} \mathbf{K}^{-1} (\Phi^T)^{-1} = \Omega^{-1} \quad (2.13)$$

คูณสมการที่ (2.13) ทางด้านหน้า (Pre-multiply) ด้วย Φ และคูณทางด้านหลัง (Post-multiply) ด้วย Φ^T จะได้

$$\mathbf{K}^{-1} = \mathbf{F} = \Phi \Omega^{-1} \Phi^T \quad (2.14)$$

หรือ

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_i^2} \phi_i \phi_i^T \quad (2.15)$$

สมการที่ (2.15) ใช้ในการหาเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ (\mathbf{F}) จากความถี่และรูปร่างใหม่ โดยหากเป็นเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ของโครงสร้างที่เสียหาย (\mathbf{F}_D) สามารถหาได้โดย

$$\mathbf{F}_D = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{D_i}^2} \phi_{D_i} \phi_{D_i}^T \quad (2.16)$$

เมื่อโครงสร้างเกิดความเสียหายจะทำให้เฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่สติเฟเนสเมตริกซ์จะมีค่าลดลง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์และสติเฟเนสเมตริกซ์สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_D &= \mathbf{F} + \Delta\mathbf{F} \\ \mathbf{K}_D &= \mathbf{K} + \Delta\mathbf{K} \end{aligned} \quad (2.17)$$

เฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ของโครงสร้างที่เสียหายเป็นส่วนกลับของสติเฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้างที่เสียหาย ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\mathbf{K}_D \mathbf{F}_D = \mathbf{I} \quad (2.18)$$

โดยที่ \mathbf{I} คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix)

แทนค่าสมการที่ (2.17) ลงในสมการที่ (2.18) จะได้

$$(\mathbf{K} + \Delta\mathbf{K})(\mathbf{F} + \Delta\mathbf{F}) = \mathbf{I} \quad (2.19)$$

ซึ่งเมื่อทำการจัดพจน์ใหม่จะได้ว่า

$$\mathbf{K}\mathbf{F} + \Delta\mathbf{K}\mathbf{F} + (\mathbf{K} + \Delta\mathbf{K})\Delta\mathbf{F} = \mathbf{I} \quad (2.20)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.17) และ $\mathbf{K}\mathbf{F} = \mathbf{I}$ จะได้ว่า

$$\mathbf{K}_D \Delta\mathbf{F} = -\Delta\mathbf{K}\mathbf{F} \quad (2.21)$$

คูณด้วย \mathbf{F}_D ตลอดสมการที่ (2.21) จะได้

$$\Delta\mathbf{F} = -\mathbf{F}_D \Delta\mathbf{K}\mathbf{F} \quad (2.22)$$

ซึ่งหากกำหนดให้ $\Delta\mathbf{K} = \left(\sum_{j=1}^{NE} \alpha_j \mathbf{K}_j \right)$ จะสามารถเขียนสมการที่ (2.22) ได้เป็น

$$\mathbf{F}_D \left(\sum_{j=1}^{NE} a_j \mathbf{K}_j \right) \mathbf{F} = -\Delta \mathbf{F} \quad (2.23)$$

เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเทอมในเมตริกซ์ จะสามารถเขียนสมการที่ (2.23) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_1 \mathbf{F})_{11} & (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_2 \mathbf{F})_{11} & L & L & (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_{NE} \mathbf{F})_{11} \\ (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_1 \mathbf{F})_{12} & (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_2 \mathbf{F})_{12} & L & L & (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_{NE} \mathbf{F})_{12} \\ M & M & M & M & M \\ (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_1 \mathbf{F})_{1n} & (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_2 \mathbf{F})_{1n} & O & O & (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_{NE} \mathbf{F})_{1n} \\ (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_1 \mathbf{F})_{21} & (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_2 \mathbf{F})_{21} & O & O & (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_{NE} \mathbf{F})_{21} \\ M & M & M & M & M \\ (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_1 \mathbf{F})_{mn} & (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_2 \mathbf{F})_{mn} & L & L & (\mathbf{F}_D \mathbf{K}_{NE} \mathbf{F})_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ M \\ a_{NE} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{F}_{11} \\ \Delta \mathbf{F}_{12} \\ M \\ \Delta \mathbf{F}_{1n} \\ \Delta \mathbf{F}_{21} \\ M \\ \Delta \mathbf{F}_{mn} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

โดยที่ NE คือ จำนวนชิ้นส่วนทั้งหมด, n คือ ดัชนีความอิสระ, $(\mathbf{F}_D \mathbf{K}_{NE} \mathbf{F})_{mn}$ คือ ผลคูณของเมตริกซ์ $\mathbf{F}_D \mathbf{K}_{NE} \mathbf{F}$ ที่ตำแหน่งแถวที่ n หลักที่ m และ $\Delta \mathbf{F}_{mn}$ คือ ผลต่างของเฟล็กซิบิลิตีเมตริกซ์หลังเกิดความเสียหายกับเฟล็กซิบิลิตีเมตริกซ์ก่อนเกิดความเสียหาย (สมการที่ 2.17) ที่ตำแหน่งแถวที่ n หลักที่ m

สมการที่ (2.24) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (2.25)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.24) มีจำนวนสมการมากกว่าจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (α_j) และสามารถแก้สมการโดยใช้ Pseudo-inverse Technique ซึ่งจะได้ว่า

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{b}) \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.26) จะสามารถคำนวณหาค่า α_j ของแต่ละชิ้นส่วนได้ โดยหาค่า α_j มีค่าเป็นศูนย์แสดงว่าชิ้นส่วนนั้นไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น และหากมีค่าเท่ากับ -1 แสดงว่าชิ้นส่วนนั้นเกิดความเสียหาย 100 เปอร์เซ็นต์

2.4 การตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีเวกเตอร์แรงคงค้าง (Residual Force Vector)

การตรวจหาความเสียหายในโครงสร้างด้วยวิธีเวกเตอร์แรงคงค้างนี้เสนอโดย Kosmatka และ Ricles (1992) โดยที่ขั้นตอนในการตรวจหาความเสียหายจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการตรวจหาตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย และขั้นตอนการตรวจหาความรุนแรงของความเสียหาย ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีวิธีการดังต่อไปนี้

2.4.1 ขั้นตอนการตรวจหาตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย

โดยเริ่มพิจารณาจากสมการ

$$(\mathbf{K}_D - \omega_{D_i}^2 \mathbf{M}_D) \phi_{D_i} = 0 \quad (2.27)$$

โดยที่ \mathbf{K}_D และ \mathbf{M}_D คือ สติฟเนสเมตริกซ์และเมตริกซ์มวลของโครงสร้างที่ความเสียหายเกิดขึ้น (ไม่ทราบค่า) ω_{D_i} และ ϕ_{D_i} คือ ความถี่และรูปร่างโหมดที่ i ของโครงสร้างที่

เสียหาย

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์และเมตริกซ์มวลของโครงสร้างสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{K}_D = \mathbf{K} + \Delta\mathbf{K} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{M}_D = \mathbf{M} + \Delta\mathbf{M} \quad (2.29)$$

โดยที่ \mathbf{K} และ \mathbf{M} คือ สติฟเนสเมตริกซ์และเมตริกซ์มวลของโครงสร้างเดิมที่ยังไม่เกิดความเสียหายขึ้น ส่วน $\Delta\mathbf{K}$ และ $\Delta\mathbf{M}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของสติฟเนสเมตริกซ์และเมตริกซ์มวลของโครงสร้างเนื่องจากผลของความเสียหาย (ไม่ทราบค่า)

แทนค่าสมการที่ (2.28) และ (2.29) ลงในสมการที่ (2.27) แล้วทำการจัดพจน์ใหม่ จะได้สมการซึ่งใช้ในการหาค่าของเวกเตอร์แรงคงค้าง \mathbf{R}_i สำหรับโหมดที่ i ดังต่อไปนี้

$$\mathbf{R}_i = (\mathbf{K} - \omega_{D_i}^2 \mathbf{M}) \phi_{D_i} \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.30) จะเห็นได้ว่าข้างขวามือของสมการเป็นค่าที่สามารถหาได้ทั้งหมด และเมื่อทำการแทนค่าต่างๆ ลงไปก็จะสามารถหาค่าของเวกเตอร์แรงคงค้างเพื่อใช้ในการทำนายตำแหน่งของความเสียหายได้ โดยที่ค่าของเวกเตอร์แรงคงค้างจะมีค่าเป็นศูนย์ก็ต่อเมื่อค่าของความถี่และรูปร่างโหมดของโหมดที่ i ของโครงสร้างที่เสียหาย (ω_{D_i} และ ϕ_{D_i}) มีค่าเท่ากับ ความถี่และรูปร่างโหมดของโหมดที่ i ของโครงสร้างที่ยังไม่เกิดความเสียหาย (ω_i และ ϕ_i) ซึ่งหมายความว่า $\Delta\mathbf{K}$ และ $\Delta\mathbf{M}$ มีค่าเป็นศูนย์นั่นเอง

ค่าของเวกเตอร์แรงคงค้างจะมีค่าสูงที่องศาความอิสระ (Degree of freedom) ซึ่งสัมพันธ์กับชิ้นส่วนที่เสียหาย นอกจากนี้ค่าของเวกเตอร์แรงคงค้างควรทำการคำนวณสำหรับ

หลายๆ โหมด เพราะหากชิ้นส่วนที่เสียหายอยู่ใกล้กับ modal node ของโหมดนั้นซึ่งค่า modal displacement จะมีค่าประมาณศูนย์ ทำให้ค่าของเวกเตอร์แรงคงค้างของโหมดนั้นมีค่าน้อย ซึ่งอาจทำให้การใช้เวกเตอร์แรงคงค้างในการทำนายตำแหน่งของความเสียหายมีความผิดพลาดได้

2.4.2 ขั้นตอนการตรวจหาความรุนแรงของความเสียหาย

การตรวจหาความรุนแรงของความเสียหายโดยวิธีเวกเตอร์แรงคงค้างนั้นสามารถคำนวณได้โดยเริ่มพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และรูปร่างโหมดกับสติเฟนสและมวลของโครงสร้าง โดยใช้การกระจายอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่ 1 (First-order Taylor series expansion) จะได้ (Hart และ Collins, 1970)

$$\Lambda_D = \Lambda_0 + \mathbf{T}(r_D - r_0) + \varepsilon \quad (2.31)$$

โดยที่ Λ_D และ Λ_0 คือ เวกเตอร์ของค่าความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหายและที่ยังไม่เสียหาย ตามลำดับ, ε เวกเตอร์ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดที่ได้จากการทดสอบ, r_D และ r_0 คือ ค่าสติเฟนสของแต่ละชิ้นส่วนในโครงสร้างที่เสียหาย (ไม่ทราบค่า) และยังไม่เสียหาย ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Lambda_D = \begin{bmatrix} \omega_{D_1}^2 \\ \mathbf{M} \\ \omega_{D_N}^2 \\ \phi_{D_1} \\ \mathbf{M} \\ \phi_{D_N} \end{bmatrix}, \Lambda_0 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \mathbf{M} \\ \omega_N^2 \\ \phi_1 \\ \mathbf{M} \\ \phi_N \end{bmatrix}, r_D = \begin{bmatrix} \left(\frac{EA}{L}\right)_{D_1} \\ \mathbf{M} \\ \left(\frac{EA}{L}\right)_{D_{NE}} \end{bmatrix}, r_0 = \begin{bmatrix} \left(\frac{EA}{L}\right)_1 \\ \mathbf{M} \\ \left(\frac{EA}{L}\right)_{NE} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

เมตริกซ์ \mathbf{T} คือ เซนซิทิวิตีเมตริกซ์ แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสติเฟนสและมวลของโครงสร้าง กับการเปลี่ยนแปลงของความถี่และรูปร่างโหมด ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega^2}{\partial \mathbf{K}} & \frac{\partial \omega^2}{\partial \mathbf{M}} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{K}} & \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{M}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial r} \\ \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีผลทำให้สติเฟนสของชิ้นส่วนในโครงสร้างมีค่าลดลง ดังนั้นจะเขียนสมการที่ (2.33) ใหม่ได้เป็น

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega^2}{\partial \mathbf{K}} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{K}} \\ \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

แต่ละเมตริกซ์ย่อยในสมการที่ (2.34) สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial \omega^2}{\partial \mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_1^2}{\partial \mathbf{K}_{11}} & \frac{\partial \omega_1^2}{\partial \mathbf{K}_{12}} & \mathbf{L} & \frac{\partial \omega_1^2}{\partial \mathbf{K}_{mn}} \\ \frac{\partial \omega_2^2}{\partial \mathbf{K}_{11}} & \frac{\partial \omega_2^2}{\partial \mathbf{K}_{12}} & \mathbf{L} & \frac{\partial \omega_2^2}{\partial \mathbf{K}_{mn}} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ \frac{\partial \omega_N^2}{\partial \mathbf{K}_{11}} & \frac{\partial \omega_N^2}{\partial \mathbf{K}_{12}} & \mathbf{L} & \frac{\partial \omega_N^2}{\partial \mathbf{K}_{mn}} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_1}{\partial \mathbf{K}_{11}} & \frac{\partial \phi_1}{\partial \mathbf{K}_{12}} & \mathbf{L} & \frac{\partial \phi_1}{\partial \mathbf{K}_{mn}} \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial \mathbf{K}_{11}} & \frac{\partial \phi_2}{\partial \mathbf{K}_{12}} & \mathbf{L} & \frac{\partial \phi_2}{\partial \mathbf{K}_{mn}} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ \frac{\partial \phi_N}{\partial \mathbf{K}_{11}} & \frac{\partial \phi_N}{\partial \mathbf{K}_{12}} & \mathbf{L} & \frac{\partial \phi_N}{\partial \mathbf{K}_{mn}} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial r} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{K}_{11}}{\partial r_1} & \frac{\partial \mathbf{K}_{11}}{\partial r_2} & \mathbf{L} & \frac{\partial \mathbf{K}_{11}}{\partial r_{NE}} \\ \frac{\partial \mathbf{K}_{12}}{\partial r_1} & \frac{\partial \mathbf{K}_{12}}{\partial r_2} & \mathbf{L} & \frac{\partial \mathbf{K}_{12}}{\partial r_{NE}} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ \frac{\partial \mathbf{K}_{mn}}{\partial r_1} & \frac{\partial \mathbf{K}_{mn}}{\partial r_2} & \mathbf{L} & \frac{\partial \mathbf{K}_{mn}}{\partial r_{NE}} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

โดยที่แต่ละเทอมในแต่ละเมตริกซ์ในสมการที่ (2.35) และ (2.36) หาได้ตามสมการที่เสนอโดย Collins และคณะ (1974)

$$\frac{\partial \omega_k^2}{\partial \mathbf{K}_{ij}} = \frac{\phi_{ik} \phi_{jk}}{\phi_k^T \mathbf{M} \phi_k} \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial \phi_{rk}}{\partial \mathbf{K}_{ij}} = \sum_{n=1}^q \left[\frac{\phi_{in} \phi_{jk} \phi_{rn}}{(\omega_k^2 - \omega_n^2) \phi_n^T \mathbf{M} \phi_n} \right] (1 - \delta_{nk}) \quad (2.39)$$

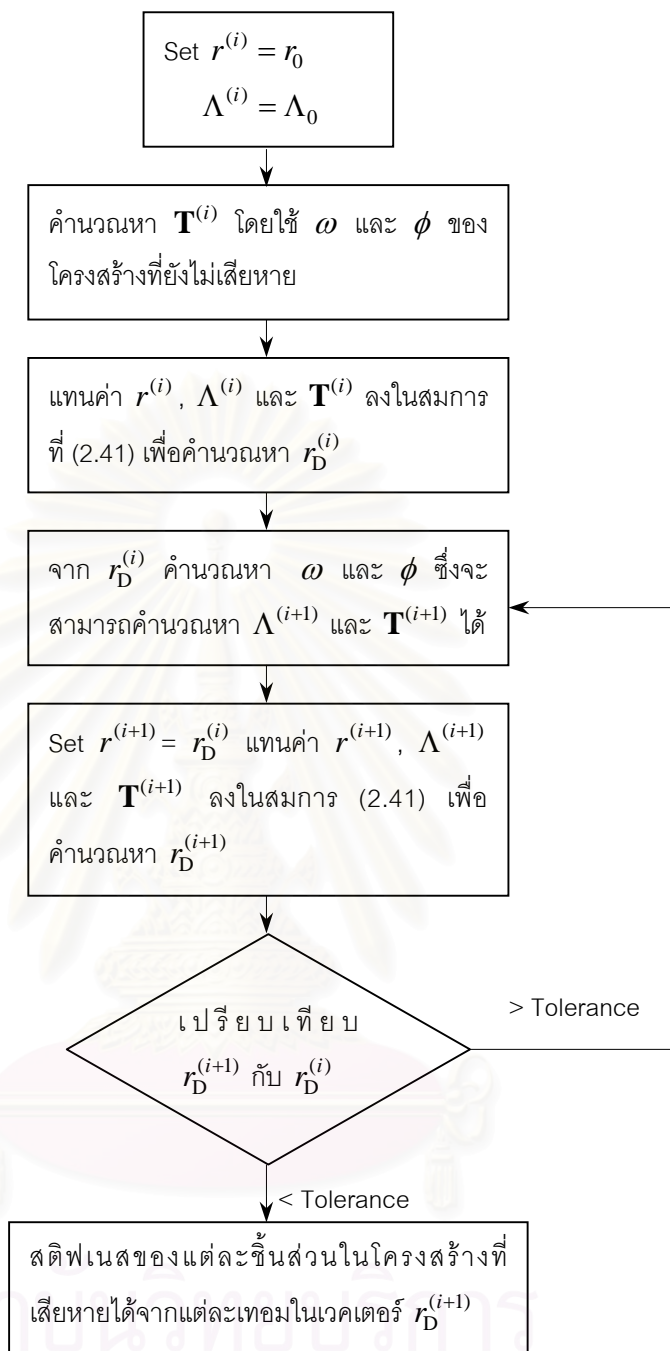
$$\delta_{nk} = \begin{cases} 1, & n = k \\ 0, & n \neq k \end{cases} \quad (2.40)$$

ค่าสถิติเฟนสของแต่ละชั้นส่วนในโครงสร้างที่เสียหาย ซึ่งได้แก่ แต่ละเทอมของเวกเตอร์ r_D (ไม่ทราบค่า) สามารถหาได้โดยวิธีที่เสนอโดย Collins และคณะ (1974) โดยพิจารณาให้ผลต่างของเวกเตอร์ r_D และ r_0 มีการกระจายแบบปกติ ด้วยค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และการแปรผัน (Covariance) เป็น S_{rr} และให้ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และการแปรผันเป็น $S_{\varepsilon\varepsilon}$ ซึ่งจะทำให้ได้สมการที่ใช้ในการคำนวณหา r_D ดังนี้

$$r_D^{(i)} = r^{(i)} + S_{rr} \mathbf{T}^{(i)T} (\mathbf{T}^{(i)} S_{rr} \mathbf{T}^{(i)T} + S_{\varepsilon\varepsilon})^{-1} (\Lambda_D - \Lambda^{(i)}) \quad (2.41)$$

โดยที่แต่ละเทอมในแนวทแยง (Diagonal) ของเมตริกซ์ S_{rr} (ซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนชั้นส่วนทั้งหมด) จะมีค่าเป็นศูนย์ ยกเว้นตำแหน่งชั้นส่วนที่เสียหายซึ่งได้จากการคำนวณในขั้นตอนการหาตำแหน่งจะมีค่าไม่เป็นศูนย์ และทุกเทอมที่อยู่นอกแนวทแยงมีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด ส่วนเมตริกซ์ $S_{\varepsilon\varepsilon}$ ก็จะมีค่าไม่เป็นศูนย์เฉพาะในแนวทแยงเท่านั้น โดย Kosmatka และ Ricles (1992) ได้เสนอให้ใช้เท่ากับ 2 เบอร์เชินต์ของค่าความถี่และค่ารูปร่างโหมดที่สูงที่สุดที่ใช้ในการคำนวณ ในการคำนวณหา r_D จะต้องทำการคำนวณซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าใน $r_D^{(i)}$ จะมีค่าเข้าสู่ค่า r_D ในรอบก่อนหน้า ซึ่งหมายความว่าความถี่และรูปร่างโหมดในเวกเตอร์ $\Lambda^{(i)}$ มีค่าเท่ากับความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหาย (Λ_D) ดังนั้นหลักการของการตรวจหาความรุนแรงของความเสียหายด้วยวิธีการนี้คือจะพยายามหาสถิติเฟนสของแต่ละชั้นส่วน ($r_D^{(i)}$) ที่ทำให้ความถี่และรูปร่างโหมดตรงกับโครงสร้างที่เสียหาย ซึ่งขั้นตอนในการคำนวณสามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการคำนวณหาความรุนแรงของความเสียหาย

โดยสรุปแล้วการทํานายความเสียหายด้วยวิธีเวกเตอร์แรงคางนั้นแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การตรวจหาชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายซึ่งสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (2.30) จากนั้นกำหนดตำแหน่งที่ตรวจพบลงในเมตริกซ์ \mathbf{S}_{rr} แล้วทำการตรวจหาความรุนแรงของชิ้นส่วนที่เสียหายสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (2.41) โดยต้องทำการคำนวณซ้ำไปเรื่อยๆ ตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 2.2

บทที่ 3

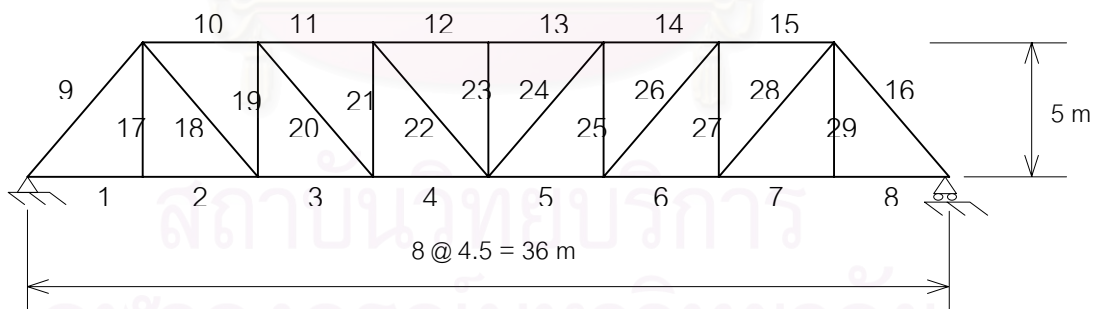
การตรวจหาความเสียหายในโครงข้อมุม

3.1 ความนำ

วิธีการตรวจหาความเสียหายในโครงข้อมุม ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 นั้น มีข้อมูลที่สำคัญที่จำเป็นต้องใช้ในการตรวจหาความเสียหายของโครงสร้าง ได้แก่ ความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหายและยังไม่เสียหาย สติฟเนสของแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างที่ยังไม่เสียหาย และมวลของโครงสร้าง ในงานวิจัยนี้จึงได้จำลองโครงข้อมุมขึ้นในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการตรวจหาความเสียหาย จากนั้นจะได้ใช้วิธีการต่างๆ มาทำการตรวจหาความเสียหายในโครงข้อมุมที่จำลองขึ้น เพื่อศึกษาถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี ซึ่งจะทำได้วิธีการตรวจหาความเสียหายที่ดีที่สุด และยังสามารถระบุข้อจำกัดของแต่ละวิธีเพื่อการพัฒนาปรับปรุงวิธีการดังกล่าวให้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้ตรวจหาความเสียหายในโครงสร้างจริงได้โดยมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

3.2 สะพานโครงข้อมุม

สะพานโครงข้อมุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 ประกอบไปด้วยชั้นส่วนทั้งหมด 29 ชั้นส่วน โดยที่ทุกๆ ชั้นส่วนมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) เท่ากับ 2×10^{10} N/m² มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.1 m² และความหนาแน่นเท่ากับ 7860 kg/m³



รูปที่ 3.1 สะพานโครงข้อมุมที่ใช้ในการตรวจหาความเสียหาย

โดยที่ค่าของสติฟเนสเมตริกซ์และเมตริกซ์มวลของโครงสร้างสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

จากนั้นทำการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมที่พัฒนาด้วย MATLAB เวอร์ชัน 5.3 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความถี่และรูปร่างโหมด ซึ่งได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยเปรียบเทียบกับโปรแกรม STAAD-III โดยในตารางที่ 3.1 แสดงค่าความถี่ของ 3 โหมดแรกของโครงสร้างที่จำลองขึ้น

ตารางที่ 3.1 ความถี่ของโครงสร้างที่ได้จากโปรแกรมกับโปรแกรม STAAD-III (Hz)

โหมด	โปรแกรมที่เขียนขึ้น	STAAD-III	Error (%)
1	2.677	2.677	0.0
2	6.042	6.043	0.02
3	8.794	8.796	0.02

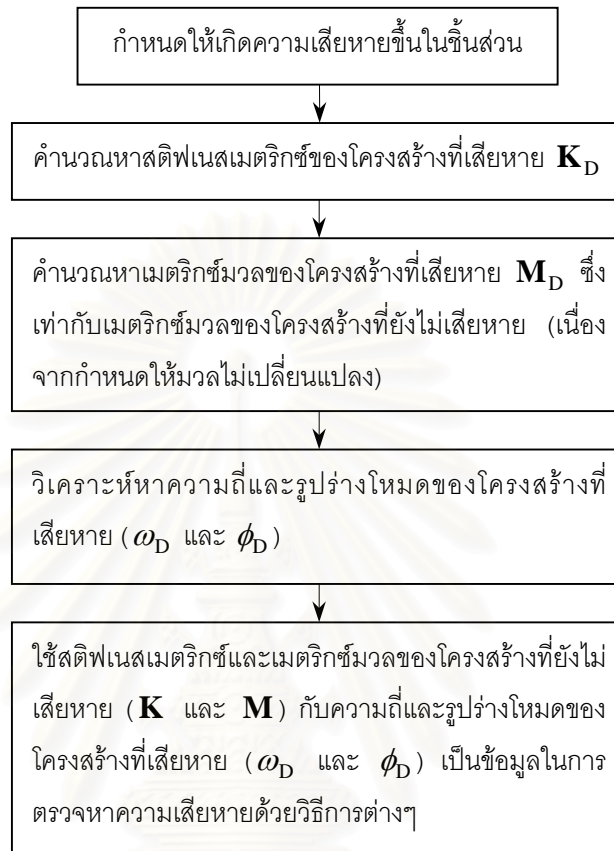
จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าความถี่ของโครงสร้างที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับความถี่ของโครงสร้างที่ได้จากโปรแกรม STAAD-III มีค่าใกล้เคียงกันมาก ทำให้กล่าวได้ว่าโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการจำลองโครงข้อมุมมีความถูกต้อง ที่จะใช้ในการวิเคราะห์หาความถี่และรูปร่างโหมด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ ดังจะได้อีกต่อไป

3.3 การวิเคราะห์เชิงชีวิตของชิ้นส่วน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ นั้น ต้องใช้ข้อมูลที่สำคัญคือ ความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหายและยังไม่เสียหาย กับสตีฟเนสและมวลของโครงสร้างที่ยังไม่เสียหาย ดังนั้นในการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีนั้น จะเริ่มด้วยการให้มีความเสียหายเกิดขึ้นในชิ้นส่วน จากนั้นคำนวณหาสตีฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้างที่เสียหายและเมตริกซ์มวลของโครงสร้างที่เสียหาย (ซึ่งสมมติให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง) ก็จะสามารถวิเคราะห์หาความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหาย (ω_D และ ϕ_D) ได้

จากนั้นใช้ความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหาย กับสตีฟเนสและมวลของโครงสร้างที่ยังไม่เสียหาย เป็นข้อมูลในการคำนวณหาความเสียหายที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหายขึ้นในตอนแรก เพื่อศึกษาว่าแต่ละวิธีจะสามารถตรวจหาตำแหน่งและ

ความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนดังกล่าวได้ถูกต้องหรือไม่ โดยที่ขั้นตอนทั้งหมดสามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการคำนวณหาข้อมูลที่ใช้ในการตรวจหาความเสียหาย

จะเห็นได้ว่าการเลือกชิ้นส่วนที่จะให้เกิดความเสียหายขึ้นนั้นมีความสำคัญมาก เพราะชิ้นส่วนที่ต่างกันจะมีผลทำให้ ความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหายต่างกัน เมื่อบางชิ้นส่วนที่มีเซนซิทิวิตี (Sensitivity) สูงเกิดความเสียหาย อาจทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงไปมากกว่าชิ้นส่วนอื่น ซึ่งอาจทำให้สามารถตรวจพบความเสียหายได้ง่าย ดังนั้นเพื่อให้สามารถสรุปได้ว่าวิธีใดดีกว่า ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเซนซิทิวิตีของชิ้นส่วนเพื่อให้เป็นข้อมูลในการเลือกชิ้นส่วนให้เกิดความเสียหาย เพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี

การวิเคราะห์เซนซิทิวิตีของชิ้นส่วนเสนอโดย Zhao และ Dewolf (1999) โดยเริ่มพิจารณาจากสมการที่ (3.1)

$$(\mathbf{K} - \omega_r^2 \mathbf{M}) \phi_r = 0 \quad (3.1)$$

จากนั้นทำการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (3.1) เทียบกับ k_{ij} จะได้

$$\left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial k_{ij}} - 2\omega_r \frac{\partial \omega_r}{\partial k_{ij}} \mathbf{M} - \omega_r^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial k_{ij}}\right) \phi_r + (\mathbf{K} - \omega_r^2 \mathbf{M}) \frac{\partial \phi_r}{\partial k_{ij}} = 0 \quad (0.1)$$

จากที่กำหนดให้มวลของโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลง ($\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial k_{ij}} = 0$) แล้วคูณด้วย ϕ_r^T

ตลอดสมการที่ (3.2) จะได้

$$\phi_r^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial k_{ij}} \phi_r - 2\omega_r \frac{\partial \omega_r}{\partial k_{ij}} \phi_r^T \mathbf{M} \phi_r + \phi_r^T (\mathbf{K} - \omega_r^2 \mathbf{M}) \frac{\partial \phi_r}{\partial k_{ij}} = 0 \quad (0.2)$$

โดยที่ $\phi_r^T (\mathbf{K} - \omega_r^2 \mathbf{M}) = 0$ และหากทำการนอร์มอลไลซ์ (normalize) รูปข้าง
ใหม่ให้ $\phi_r^T \mathbf{M} \phi_r = 1$ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความถี่เทียบกับการเปลี่ยนแปลงสติเฟนสจะ
สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial \omega_r}{\partial k_{ij}} = \frac{1}{2\omega_r} \phi_r^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial k_{ij}} \phi_r \quad (0.3)$$

$$\text{โดยที่ } \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial k_{ij}} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}, i \neq j \quad (0.4)$$

$$\text{และ } \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial k_{ij}} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}, i = j \quad (0.5)$$

ดังนั้นจะสามารถเขียนการเปลี่ยนแปลงความถี่เทียบกับการเปลี่ยนแปลง
สติเฟนสในสมการที่ (3.4) ได้ใหม่เป็น

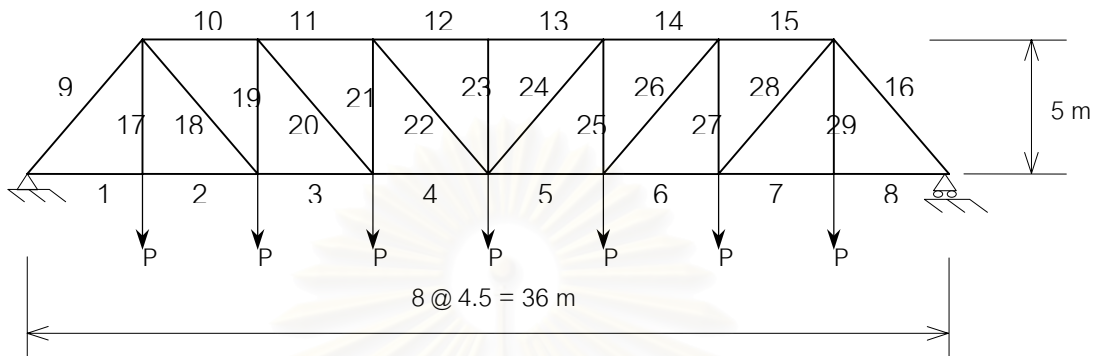
$$\frac{\partial \omega_r}{\partial k_{ij}} = \begin{cases} \frac{1}{\omega_r} \phi_{ir} \phi_{jr}, & i \neq j \\ \frac{1}{2\omega_r} \phi_{ir}^2, & i = j \end{cases} \quad (0.6)$$

การเปลี่ยนแปลงความถี่เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของสตีเฟนส์ในสมการที่ (3.7) คือ เชนซิวิตีของชั้นส่วน โดยที่ค่าเชนซิวิตีที่สูงกว่าแสดงว่าชั้นส่วนนั้นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสตีเฟนส์มากกว่า ในตารางที่ 3.2 แสดงค่าสูงสุดของ $\frac{\partial \omega_r}{\partial k_{ij}}$ ของแต่ละชั้นส่วน โดยแสดงเฉพาะชั้นส่วนที่อยู่ครึ่งซ้ายของโครงข้อหมุน (เนื่องจากความสมมาตร) โดยที่ตัวเลขที่มีเครื่องหมายดอกจัน (*) แสดงว่า มีเชนซิวิตีสูงสุดสำหรับโหมดนั้น

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าสูงสุดของ $\frac{\partial \omega_r}{\partial k_{ij}}$ ของแต่ละชั้นส่วน ($\times 10^{-7}$) เฉพาะ 10 โหมดแรก

ชั้นส่วน	โหมด									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.1081	0.2101	0.0200	0.2398	0.2709	0.1325	0.0447	0.0964	0.0109	0.0789
2	0.4557	0.5188*	0.1489	0.3938	0.2709	0.1325	0.1618	0.0964	0.0611	0.1145
3	1.2951	0.4474	0.1909	0.1617	0.1288	0.0987	0.1618	0.0506	0.1009	0.1662
4	2.0802	0.2881	0.1909	0.1902	0.1288	0.0937	0.0425	0.0279	0.1009	0.1679*
9	0.1063	0.1915	0.0583	0.1689	0.1330	0.0602	0.0172	0.1453	0.0186	0.0082
10	0.4985	0.4825	0.2537	0.2731	0.1330	0.1020	0.0736	0.2405*	0.0816	0.0731
11	1.3788	0.3724	0.3641*	0.1104	0.1141	0.1020	0.1067	0.1229	0.0816	0.0795
12	2.1352	0.1144	0.5003	0.2702	0.1141	0.2063	0.1381	0.0546	0.2369*	0.0945
17	0.2143	0.4011	0.0683	0.4026	0.3797*	0.1785	0.0447	0.2368	0.0236	0.0789
18	0.4557	0.4952	0.1489	0.3305	0.1330	0.0865	0.1618	0.1453	0.0656	0.0607
19	0.9533	0.6240	0.2537	0.2672	0.0263	0.1252	0.2029*	0.0995	0.1049	0.0731
20	1.3546	0.4359	0.2537	0.1104	0.1288	0.1242	0.0736	0.1054	0.1009	0.1519
21	1.8732	0.2670	0.3178	0.0395	0.2425	0.0732	0.1089	0.0650	0.1787	0.1519
22	2.1174	0.1964	0.3057	0.1903	0.1141	0.0937	0.1067	0.0546	0.0792	0.0619
23	2.3712*	0.2005	0.2749	0.4535*	0.0393	0.2781*	0.0457	0.0046	0.2369	0.0651

นอกจากการวิเคราะห์เชิงทวิวิธีเพื่อใช้ในการเลือกชิ้นส่วนที่เสียหายแล้ว ในงานวิจัยนี้ยังได้คำนึงถึงโอกาสที่แต่ละชิ้นส่วนจะเสียหายด้วย โดยได้ทำการวิเคราะห์โครงข้อหมุนภายใต้แรงกระทำดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สะพานโครงข้อหมุนภายใต้แรงกระทำ

เมื่อทำการวิเคราะห์หาความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำดังรูปที่ 3.3 แล้วทำการปรับขนาดให้ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดเป็น 1 จะได้ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนของโครงข้อหมุน

ชิ้นส่วน	ความเค้น
1	0.4375
2	0.4375
3	0.75
4	0.9375
9	0.654
10	0.75
11	0.9375
12	1.0
17	0.1389
18	0.4671
19	0.2083
20	0.2803
21	0.0694
22	0.0934
23	0.0

ชั้นส่วนที่มีความเค้นสูงทำให้มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้มากกว่า นอกจากนี้บริเวณชั้นส่วนด้านล่างของโครงข้อหมุน (Lower cord) ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงดึง ทำให้มีโอกาสที่จะเสียหายเนื่องจากผลของความล้า (Fatigue) ได้มากกว่า

จากการวิเคราะห์เซนซิวิตีในตารางที่ 3.2 และการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.3 จะใช้เป็นข้อมูลร่วมกันในการเลือกชั้นส่วนที่จะกำหนดให้เกิดความเสียหาย โดยชั้นส่วนที่เลือกมีดังนี้

1) เลือกชั้นส่วนที่ 4

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าชั้นส่วนที่ 23 มีเซนซิวิตีสูงที่สุด (พิจารณาที่โหมดที่ 1) ทำให้มีโอกาสที่จะตรวจพบความเสียหายได้ง่ายที่สุด แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับความเค้นที่เกิดขึ้นในตารางที่ 3.3 จะพบว่าเมื่อมีแรงกระทำเต็มช่วงโครงข้อหมุน ชั้นส่วนที่ 23 จะไม่รับแรงเลย ทำให้โอกาสที่จะเสียหายมีน้อย และเมื่อพิจารณาชั้นส่วนที่ 12 ซึ่งมีเซนซิวิตีที่ค่อนข้างสูง และความเค้นที่เกิดขึ้นก็สูงที่สุดอีกด้วย แต่แรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงอัดทำให้โอกาสที่จะเกิดความเสียหายเนื่องจากผลของความล้ามีน้อยเมื่อเทียบกับชั้นส่วนที่ 4 ซึ่งมีเซนซิวิตีที่ค่อนข้างสูงเช่นกัน อีกทั้งความเค้นที่เกิดขึ้นยังมีค่าสูงและเป็นแรงดึงทำให้โอกาสที่จะเกิดความเสียหายมีได้มากที่สุด

2) เลือกชั้นส่วนที่ 17

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าชั้นส่วนที่ 17 มีเซนซิวิตีที่ค่อนข้างต่ำมาก (พิจารณาที่โหมดที่ 1) ทำให้ตรวจพบความเสียหายได้ค่อนข้างยาก อีกทั้งความเค้นที่เกิดขึ้นยังมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้โอกาสที่จะเกิดความเสียหายมีน้อยอีกด้วย

3) เลือกชั้นส่วนที่ 10

เพื่อพิจารณาถึงผลของโหมดที่เป็นเลขคู่ จึงได้เลือกชั้นส่วนที่ 10 ซึ่งมีเซนซิวิตีที่ค่อนข้างสูง (ในโหมดที่ 2) อีกทั้งความเค้นที่เกิดขึ้นยังมีค่าที่สูงอีกด้วย

3.4 การเปรียบเทียบวิธีการตรวจหาความเสียหาย

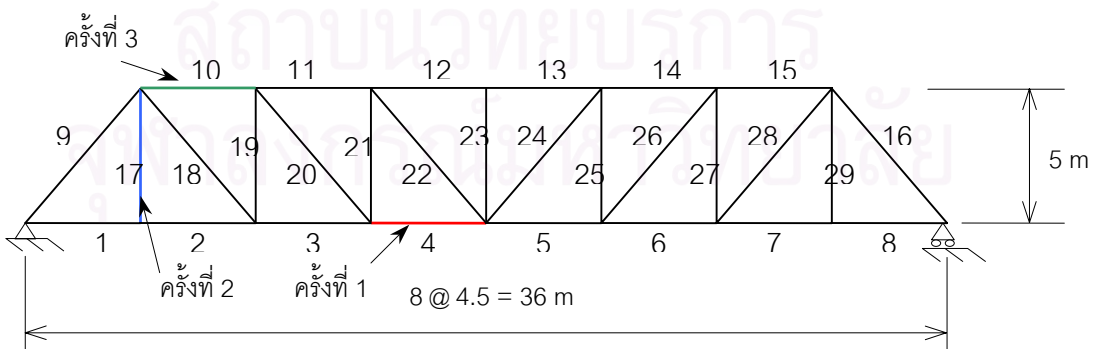
ในการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการต่างๆ นั้น มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจหาความเสียหาย โดยที่ปัจจัยที่งานวิจัยนี้นำมาพิจารณาแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงกรณีศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการตรวจหาความเสียหาย

ปัจจัยที่พิจารณา	ชั้นส่วนที่เสียหาย	เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย	จำนวนโหนดที่ใช้
3.4.1 ศึกษาผลของความรุนแรงของความเสียหาย	4,17,10	5 → 70	10
3.4.2 ศึกษาผลของจำนวนโหนดที่ใช้ในการคำนวณ	4,17,10	10	10 → 1
3.4.3 ศึกษาผลของความเสียหายที่มีความสมมาตร	5	10	3
3.4.4 ศึกษาผลของจำนวนชั้นส่วนที่เกิดความเสียหาย	1,2,9	10,15,20	3
3.4.5 ศึกษาผลของความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมด	4	10	1

3.4.1 ศึกษาผลของความรุนแรงของความเสียหาย

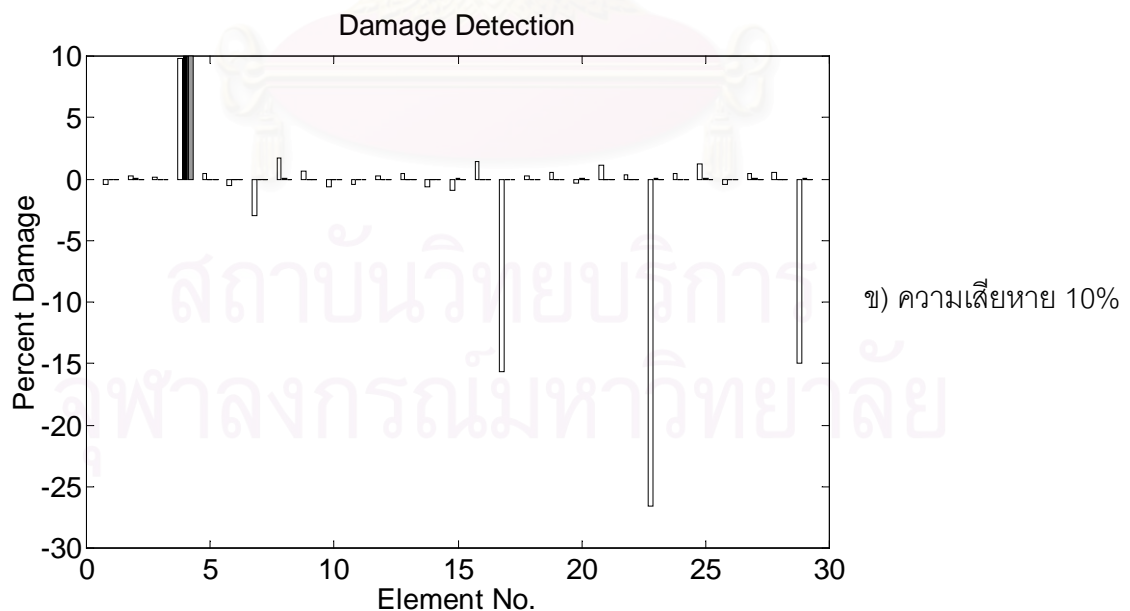
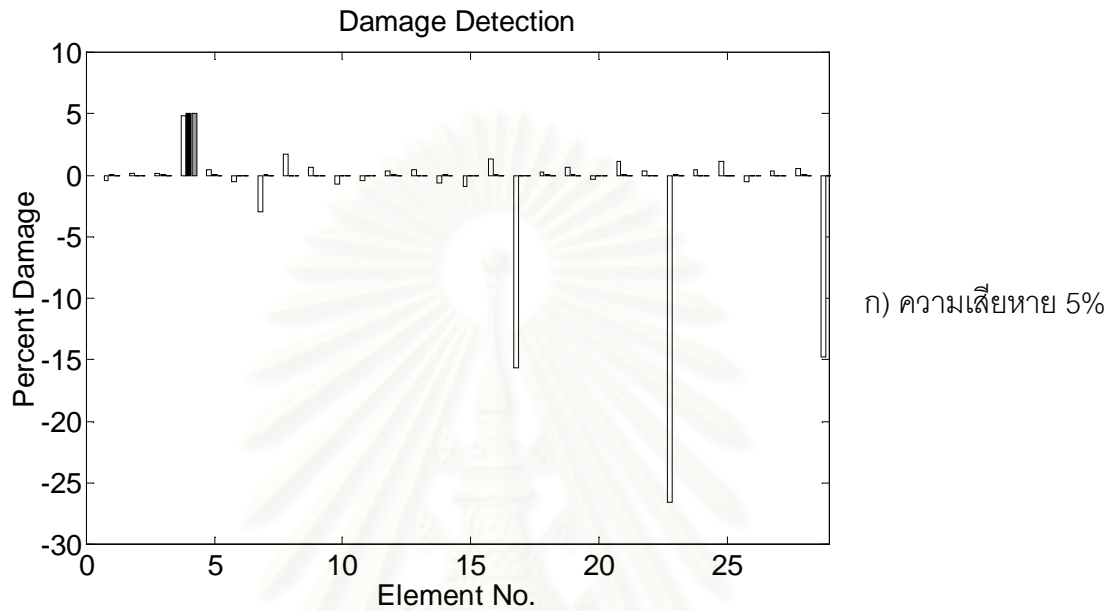
เพื่อศึกษาผลของความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้น ว่าต้องมีความรุนแรงมากเท่าใด จึงจะสามารถตรวจพบได้ ซึ่งชั้นส่วนที่จะกำหนดความเสียหายในครั้งแรก ได้แก่ ชั้นส่วนที่ 4 โดยจะกำหนดให้มีความเสียหายตั้งแต่ 5 เปอร์เซ็นต์แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้น เป็น 10, 15, 20, 30, 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ และใช้จำนวนโหนดในการคำนวณคงที่ คือ 10 โหนด จากนั้นเปลี่ยนเป็นใช้ชั้นส่วนที่ 17 และชั้นส่วนที่ 10 แล้วทำเหมือนเดิมอีกครั้ง



รูปที่ 3.4 แสดงชั้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหายในแต่ละครั้ง ในการศึกษาผลของความรุนแรงของความเสียหาย

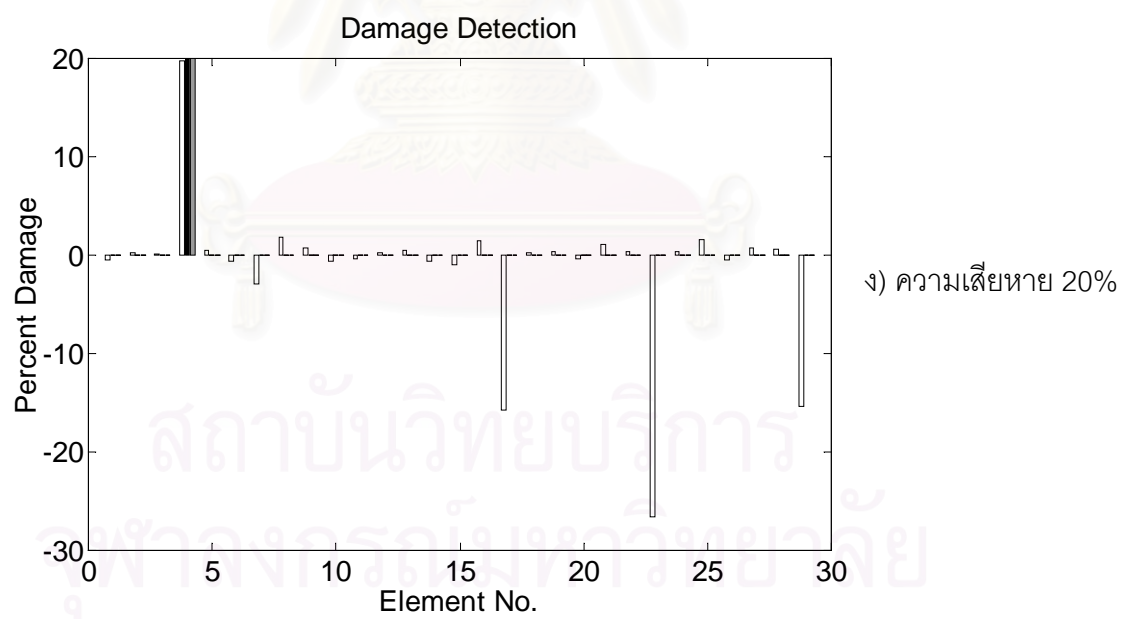
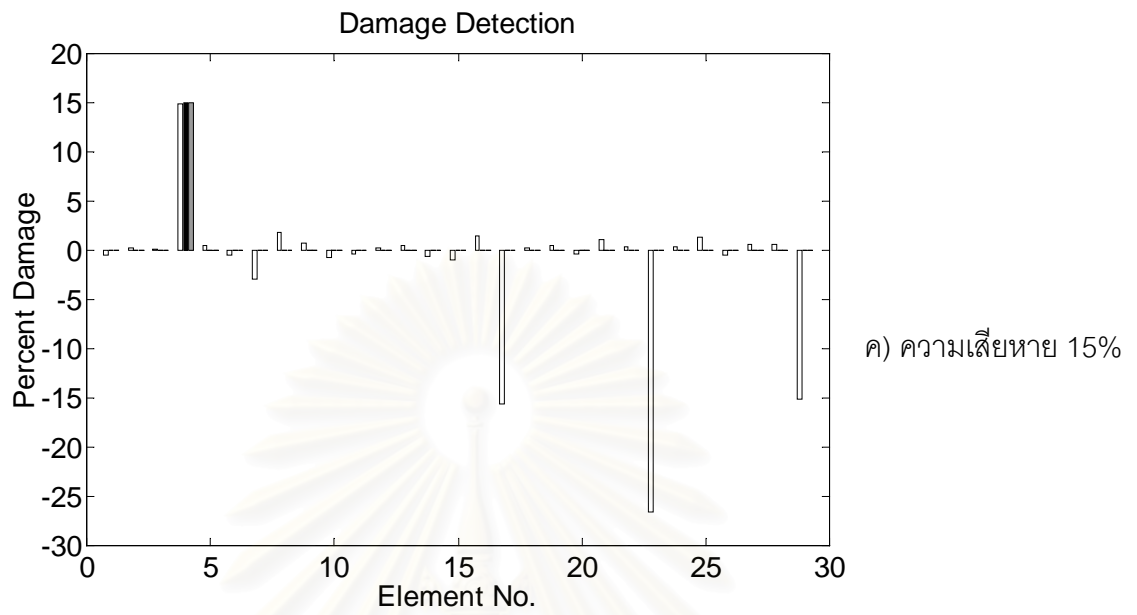
a) ความเสียหายเกิดขึ้นในชั้นส่วนที่ 4

ผลการตรวจหาความเสียหายจากวิธีการต่างๆ ที่ได้ เมื่อให้ชั้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหายแสดงในรูปที่ 3.5



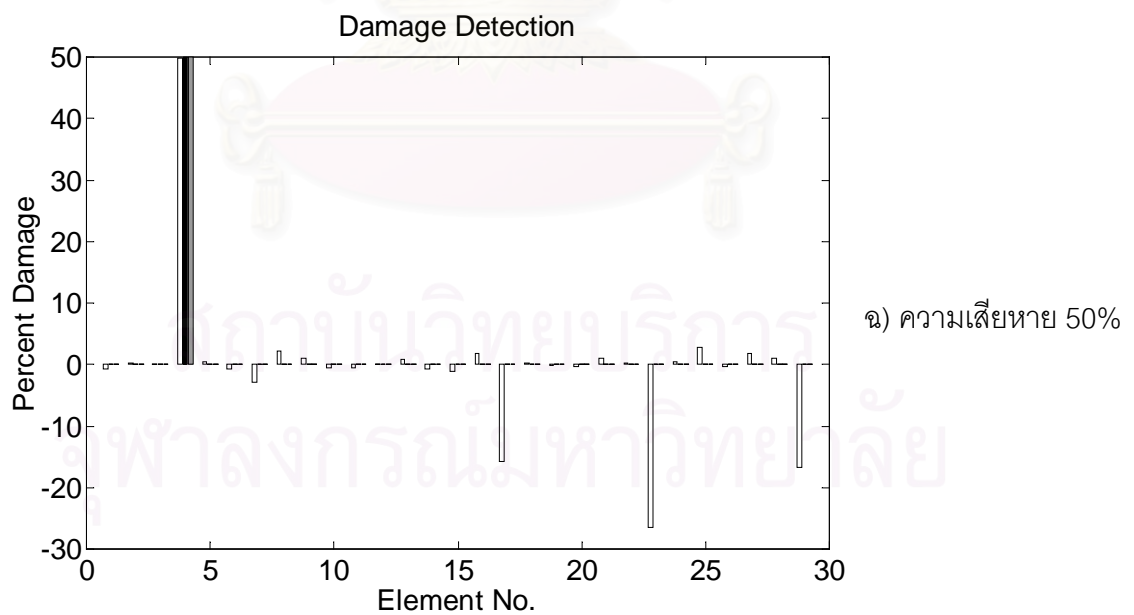
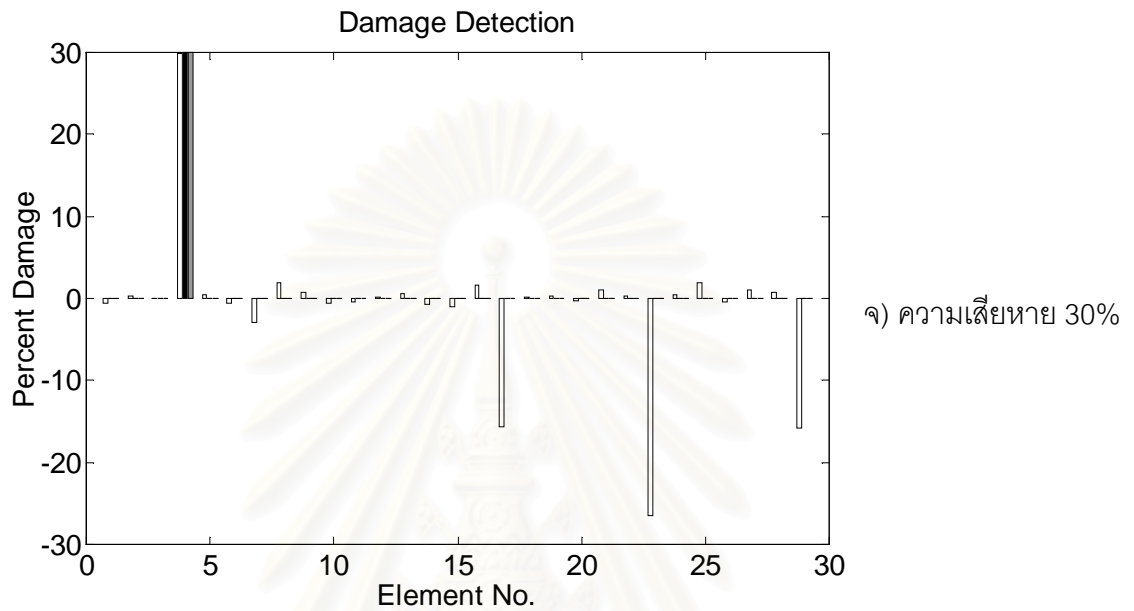
รูปที่ 3.5 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชั้นส่วนที่ 4

(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี้ ■ โดยวิธีสติฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



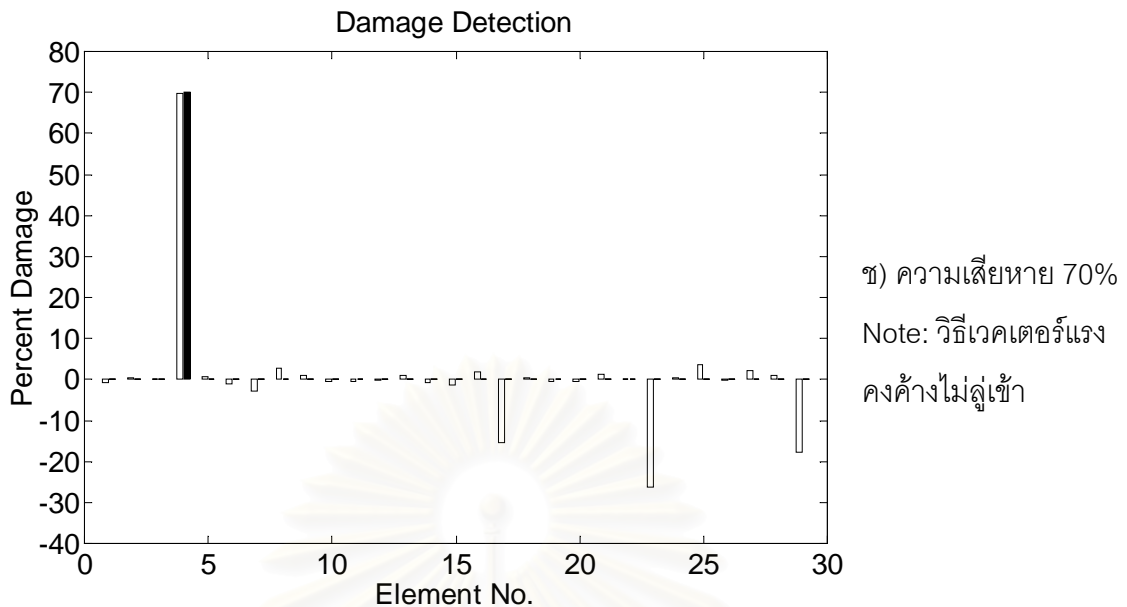
รูปที่ 3.5 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชิ้นส่วนที่ 4

(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี้ ■ โดยวิธีสติฟเนส ▒ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.5 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชิ้นส่วนที่ 4

(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี ■ โดยวิธีสตีฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.5 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชิ้นส่วนที่ 4
(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี ■ โดยวิธีสตีฟเนส ▣ โดยวิธีเวกเตอร์แรงคงค้าง)

จากรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงค่าความเสียหายในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีการต่างๆ จะเห็นว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงของสตีฟเนสเมตริกซ์นั้นสามารถตรวจหาตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนที่ 4 ได้อย่างถูกต้องแม้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยก็ตาม

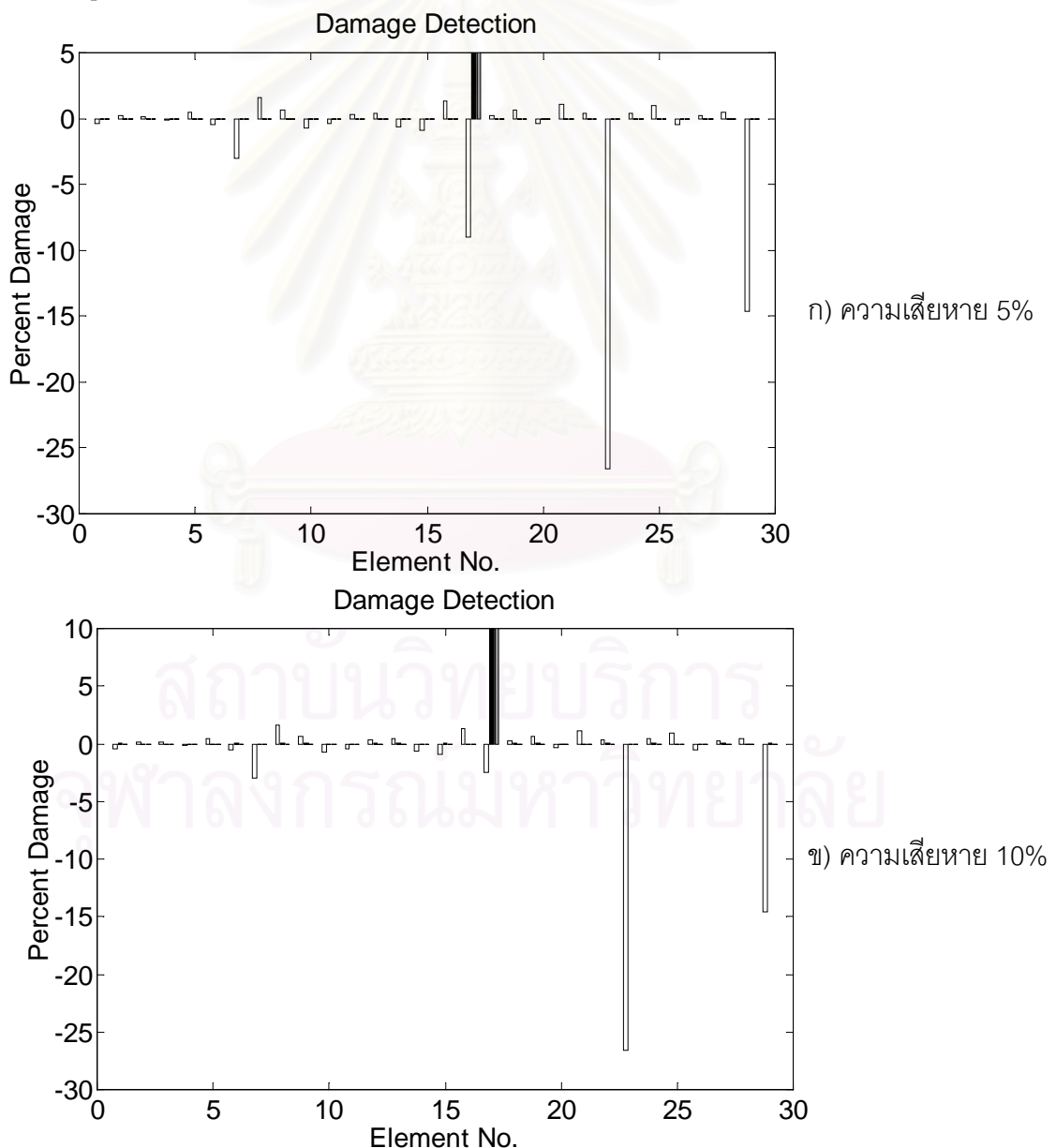
ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงของเฟล็กซิบิลิตีเมตริกซ์นั้นก็สามารถตรวจหาตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ถูกต้องเช่นกัน แต่ตรวจพบความรุนแรงของความเสียหายคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย นอกจากนี้วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟล็กซิบิลิตีเมตริกซ์ยังเกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณเนื่องจากผลของจำนวนโหมดที่ใช้น้อยเกินไป โดยตรวจพบชิ้นส่วนอื่นเกิดความเสียหายด้วย (แต่น้อยมาก) และตรวจพบว่าบางชิ้นส่วนมีค่าสตีฟเนสที่เพิ่มขึ้น (ความเสียหายติดลบ) ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการใช้จำนวนโหมดที่น้อยเกินไปทำให้การแก้สมการที่ (2.24) ด้วยวิธี Pseudo-inverse technique มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

วิธีเวกเตอร์แรงคงค้างนั้น ก็สามารถตรวจหาตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้อย่างถูกต้องเช่นเดียวกัน แต่เมื่อความรุนแรงของความเสียหายมีค่าเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ วิธีเวกเตอร์แรงคงค้างสามารถตรวจหาได้เพียงตำแหน่งที่เกิดความเสียหายเท่านั้น ไม่สามารถตรวจหาความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อโครงสร้างมีความเสียหายมากขึ้นจะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และรูปร่างโหมดกับสตีฟเนสของชิ้นส่วนในโครงสร้าง

ในสมการที่ (2.31) มีความไร้เชิงเส้น (Non-linear) มากขึ้นจึงเป็นผลให้ไม่สามารถหาสถิติเฟนสของ
 ชั้นส่วน ($r_D^{(i)}$ ในสมการ 2.41) ที่ทำให้ความถี่และรูปร่างโหมด ($\Lambda^{(i)}$) ตรงกับความถี่และรูปร่าง
 โหมดของโครงสร้างที่เสียหาย (Λ_D) ได้ (ทำให้เวกเตอร์ $r_D^{(i)}$ ไม่รู้เข้า)

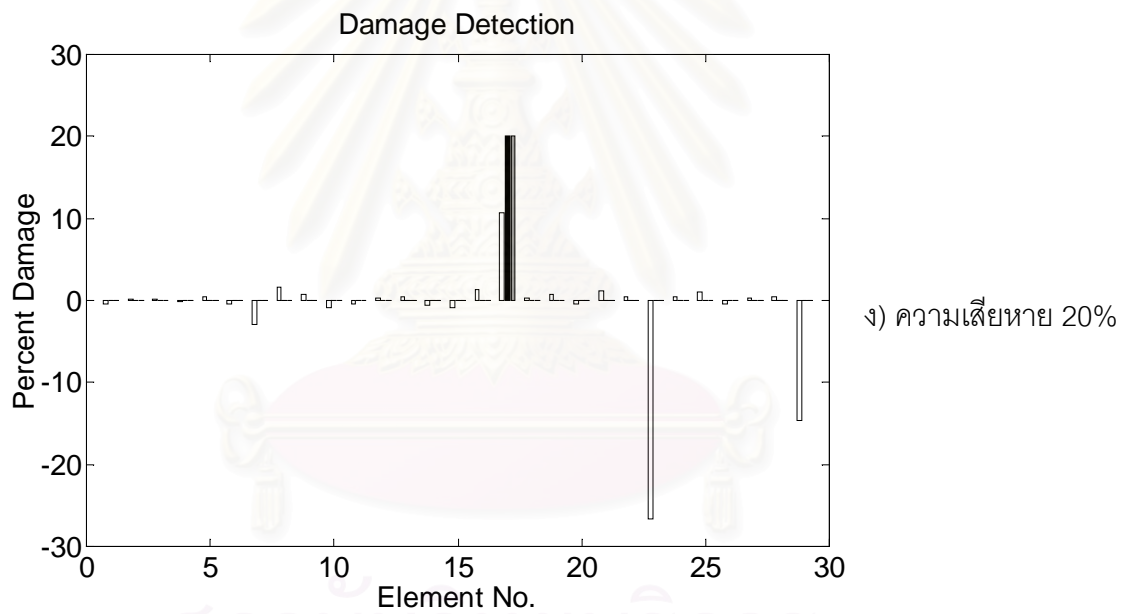
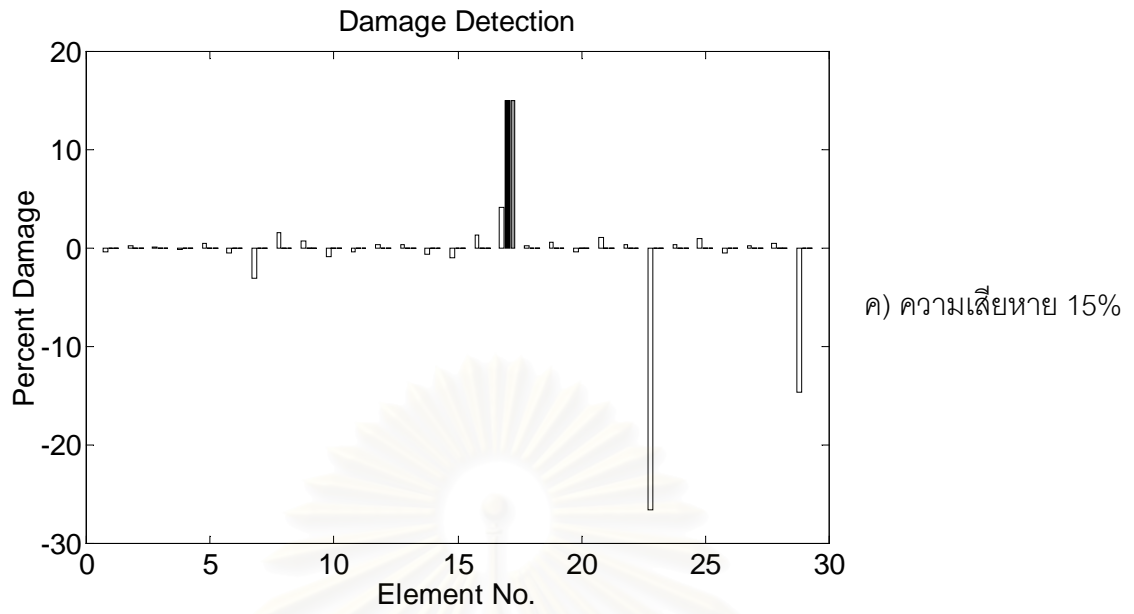
b) ความเสียหายเกิดขึ้นในชั้นส่วนที่ 17

ชั้นส่วนที่ 4 เป็นชั้นส่วนที่มีเซนซิวิตีที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงสามารถตรวจพบได้
 ง่าย ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.5 ว่าทุกวิธีสามารถตรวจหาความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องแม้
 ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยก็ตาม ต่อไปจึงเปลี่ยนไปกำหนดให้ชั้นส่วนที่ 17 ซึ่งเป็นชั้นส่วน
 ที่มีเซนซิวิตีที่ค่อนข้างต่ำเกิดความเสียหาย โดยผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ
 แสดงในรูปที่ 3.6



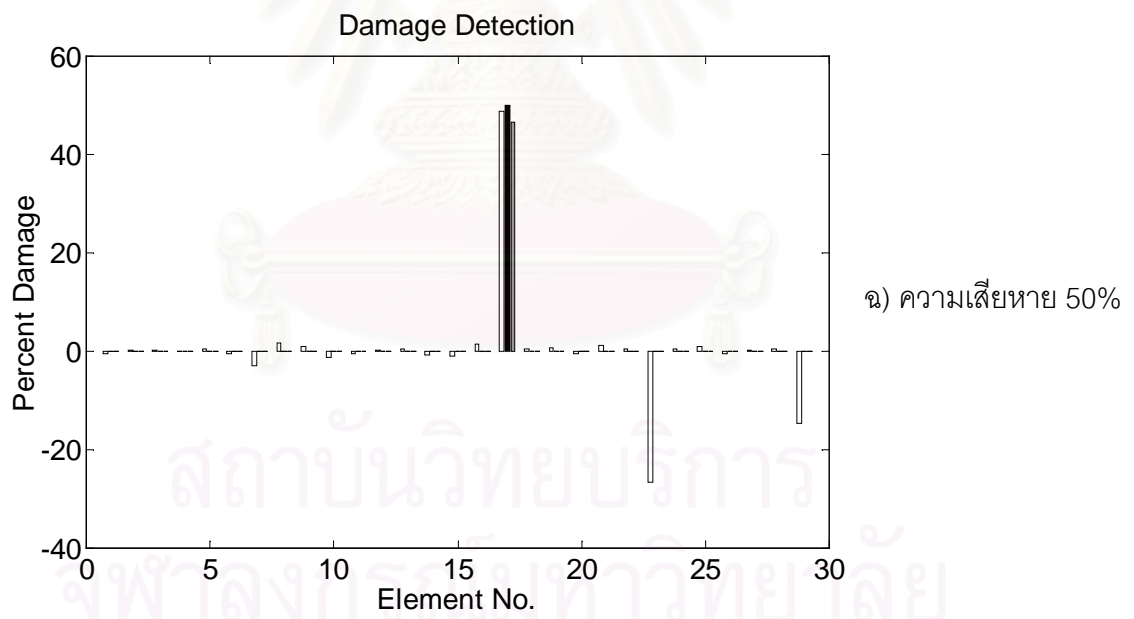
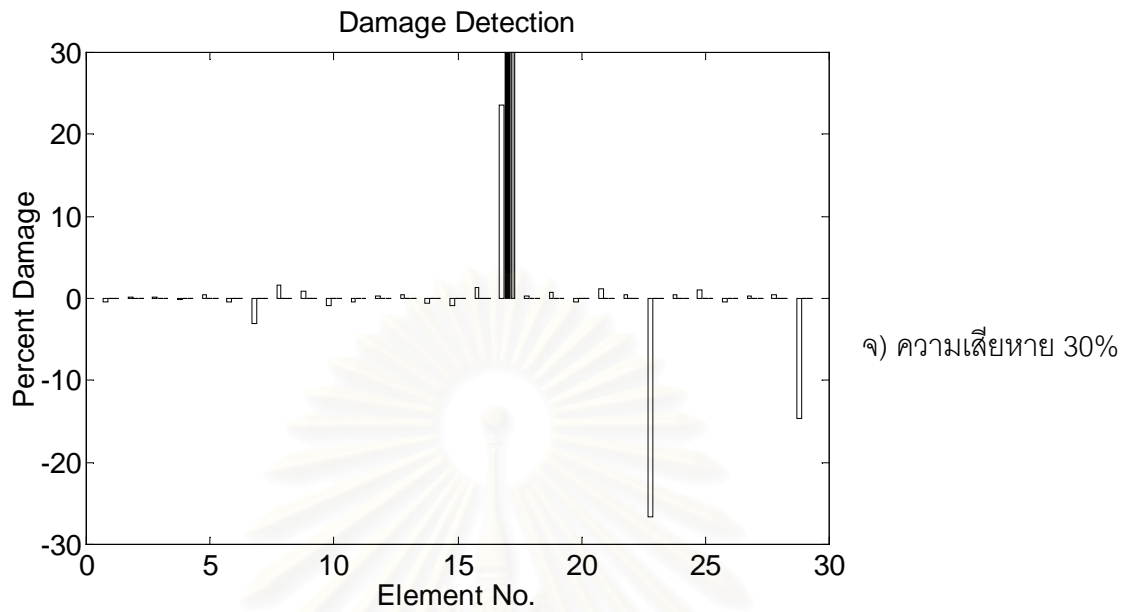
รูปที่ 3.6 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชั้นส่วนที่ 17

(□ โดยวิธีเฟลคชิบิลิตี ■ โดยวิธีสตีเฟนส ■ โดยวิธีเวกเตอร์แรงค้ำ)



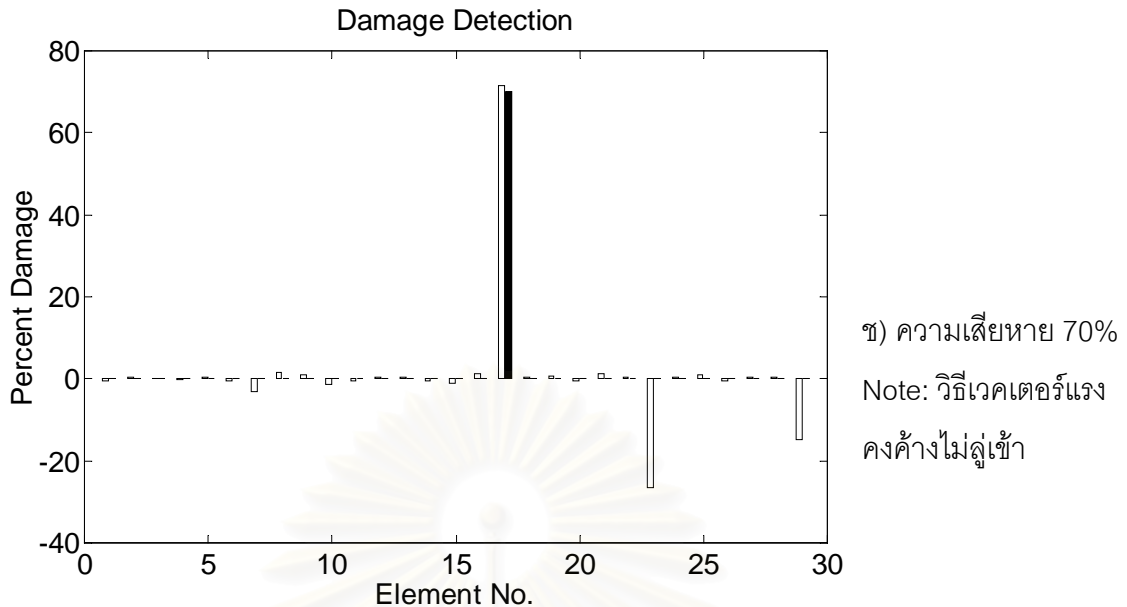
รูปที่ 3.6 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชิ้นส่วนที่ 17

(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี ■ โดยวิธีสติฟเนส ▒ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.6 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชิ้นส่วนที่ 17

(□ โดยวิธีเฟลกซิบิลิตี้ ■ โดยวิธีสติฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.6 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชิ้นส่วนที่ 17
(□ โดยวิธีเฟล็กชิบิลิตี ■ โดยวิธีสตีฟเนส ■ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้ำง)

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีฟเนสเมตริกซ์นั้นสามารถตรวจหาตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้อย่างถูกต้อง ในทุกๆ ความเสียหายที่ให้ไป แม้ว่าชิ้นส่วนที่ 17 นี้จะมีเซนซิติวิตีที่ค่อนข้างต่ำก็ตาม

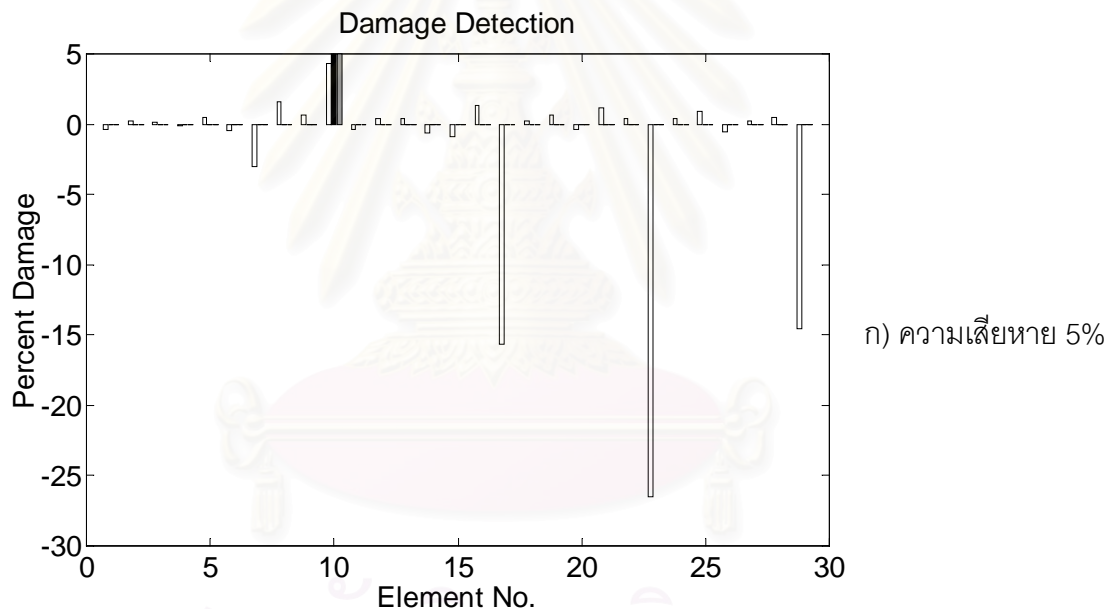
ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟล็กชิบิลิตีนั้น เมื่อความเสียหายที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยๆ (5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์) วิธีนี้ไม่สามารถที่จะตรวจพบความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อความเสียหายเพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ จึงจะเริ่มตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย แต่ความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบมีความคลาดเคลื่อนไปจากที่กำหนดให้พอสมควร จนเมื่อความเสียหายเพิ่มสูงมากขึ้น วิธีนี้จึงตรวจพบตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้วิธีการนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณเช่นเดียวกับในกรณีที่ให้ชิ้นส่วนที่ 4 เสียหาย โดยตรวจพบชิ้นส่วนอื่นมีความเสียหายด้วย (แต่น้อยมาก) และบางชิ้นส่วนมีค่าสตีฟเนสสูงขึ้น (ความเสียหายติดลบ)

ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้ำงให้ผลเช่นเดียวกับในกรณีที่ชิ้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหาย โดยสามารถตรวจหาตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้อย่างถูกต้อง แต่เมื่อความเสียหายมากขึ้น (70 เปอร์เซ็นต์) วิธีนี้สามารถตรวจพบแต่ตำแหน่งที่เกิดความเสียหายขึ้นเท่านั้น เนื่องจากค่า $r_D^{(i)}$ ไม่ลู่เข้า เช่นเดียวกับในกรณีที่ชิ้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหาย

ชิ้นส่วนที่ 17 เป็นชิ้นส่วนที่มีเซนซิวิตีที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้สามารถถูกตรวจพบได้ยาก แต่อย่างไรก็ดีวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสถิติเฟสเมตริกซ์และวิธีเวกเตอร์แรงคงค้ำก็ยังสามารถตรวจหาความเสียหายได้อย่างถูกต้องทั้งตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายแม้ว่าความเสียหายจะมีค่าน้อยก็ตาม ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์นั้นเมื่อชิ้นส่วนที่ 17 มีความเสียหายน้อยๆ จะไม่สามารถตรวจพบความเสียหายได้

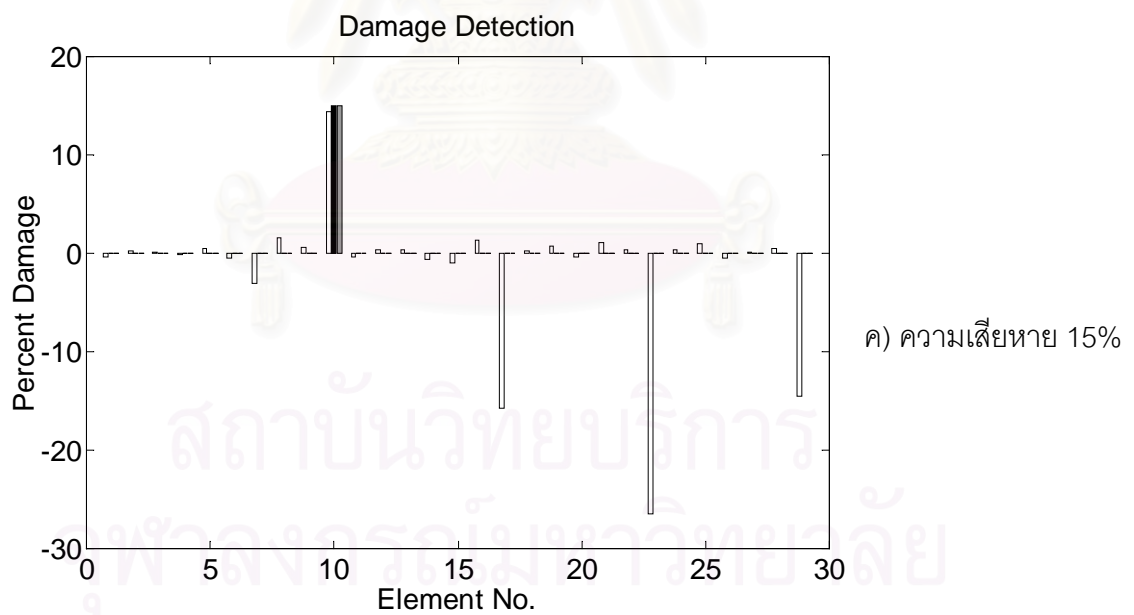
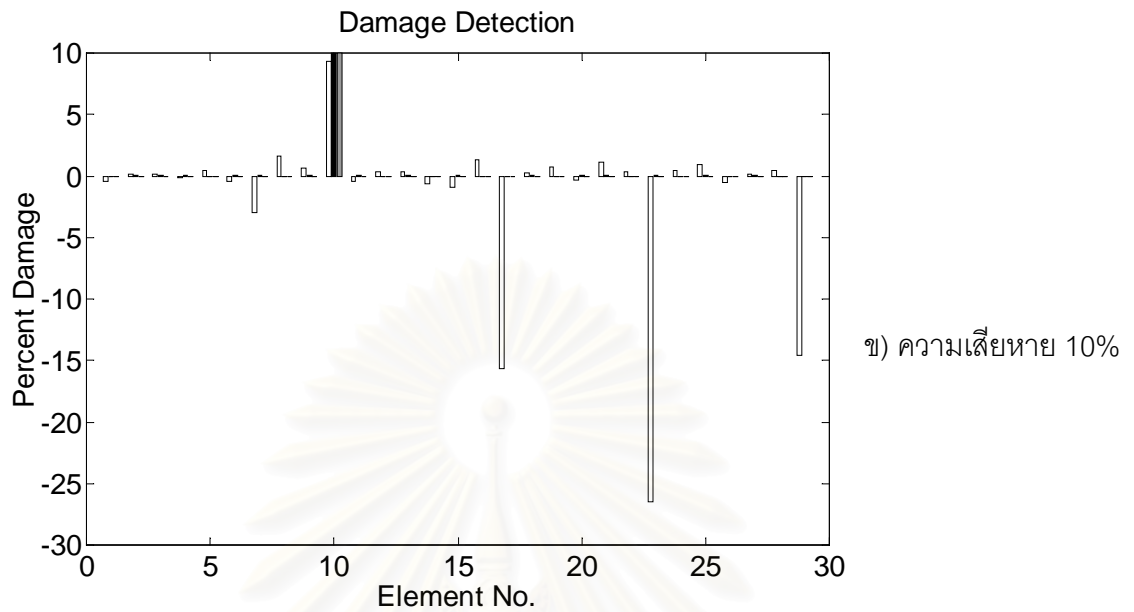
c) ความเสียหายเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 10

นอกจากใช้ชิ้นส่วนที่ 4 และ 17 ในการกำหนดให้เป็นชิ้นส่วนที่มีความเสียหายเกิดขึ้นแล้ว ยังได้กำหนดให้ชิ้นส่วนที่ 10 เกิดความเสียหายด้วย โดยผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.7



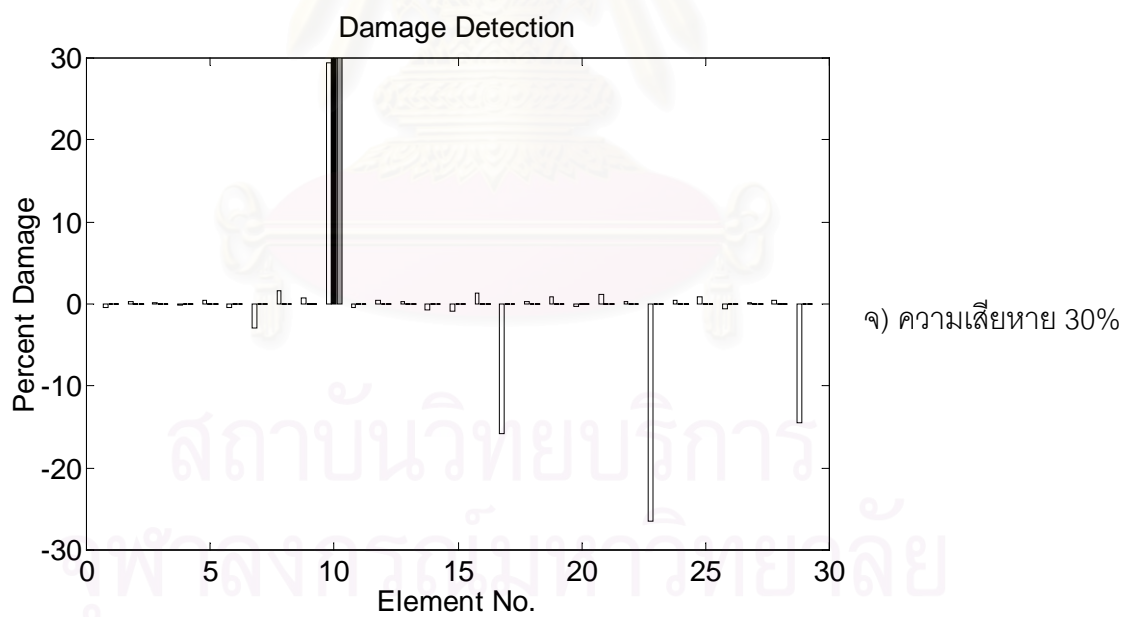
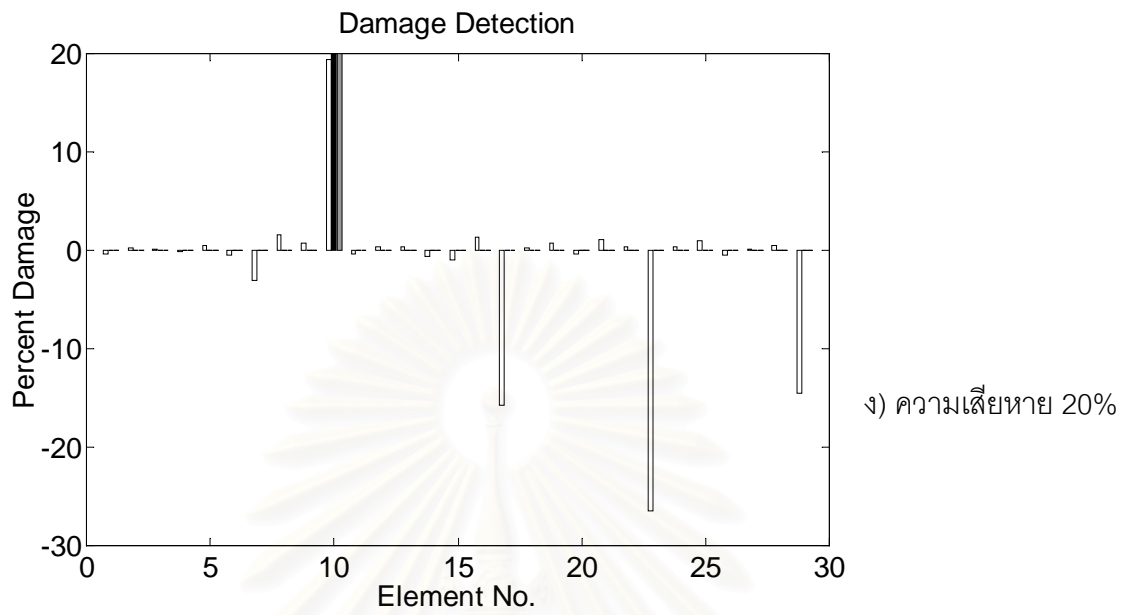
รูปที่ 3.7 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชิ้นส่วนที่ 10

(□ โดยวิธีเฟลกซิบิลิตี ■ โดยวิธีสถิติเฟส ■ โดยวิธีเวกเตอร์แรงคงค้ำ)

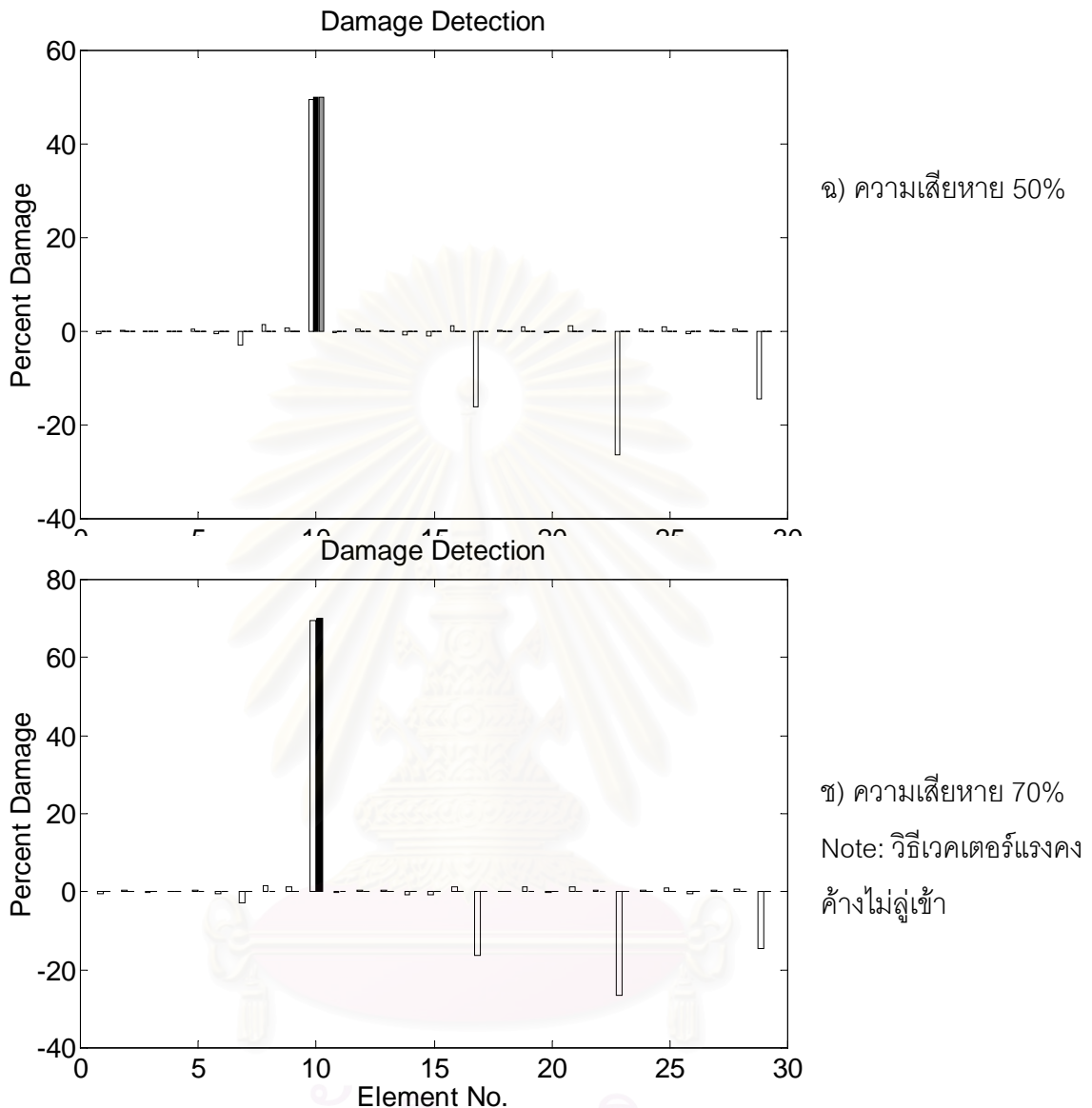


รูปที่ 3.7 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชิ้นส่วนที่ 10

(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี้ ■ โดยวิธีสติฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.7 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชิ้นส่วนที่ 10
 (□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี้ ■ โดยวิธีสติฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.7 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความรุนแรง สำหรับชิ้นส่วนที่ 10

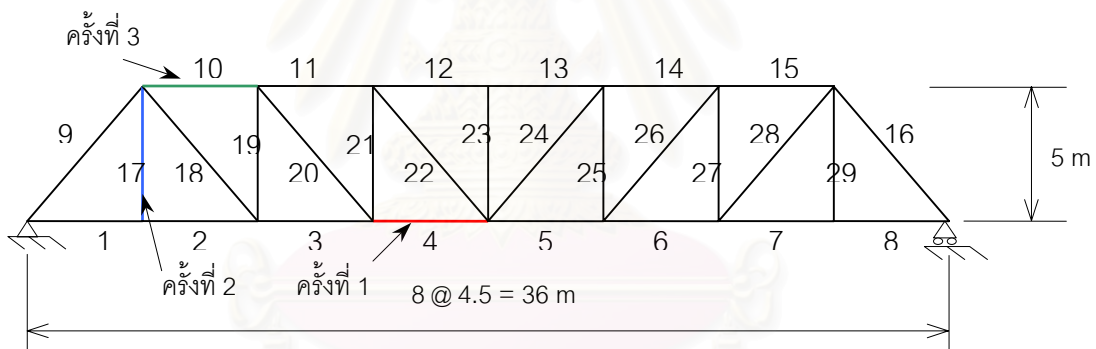
(□ โดยวิธีเฟลคซิบิลิตี ■ โดยวิธีสตีฟเนส ▣ โดยวิธีเวกเตอร์แรงคงค้ำ)

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าทั้งสามวิธีสามารถตรวจพบความเสียหายได้อย่างถูกต้อง เช่นเดียวกับเมื่อชิ้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหาย โดยที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีฟเนสสามารถตรวจพบตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลคซิบิลิตีเมตริกซ์มีความคลาดเคลื่อนในการตรวจหาความเสียหายบ้าง โดยตรวจพบความเสียหายในชิ้นส่วนอื่นและบางชิ้นส่วนมีค่าสตีฟเนสเพิ่มขึ้น (ความเสียหายติดลบ) ส่วนวิธีเวกเตอร์แรงคงค้ำนั้นก็ยังสามารถตรวจพบความเสียหายได้อย่างถูกต้องทั้งตำแหน่งและความ

รุนแรงของความเสียหาย แต่เมื่อความเสียหายมีค่ามากขึ้น (70 เปอร์เซนต์) จะสามารถตรวจพบได้แค่ตำแหน่งที่เกิดความเสียหายขึ้นเท่านั้น ไม่สามารถตรวจหาความรุนแรงของความเสียหายได้ เนื่องจากค่า $r_D^{(i)}$ ไม่ลู่เข้า เช่นเดียวกับในกรณีที่ขึ้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหาย

3.4.2 ศึกษาผลของจำนวนโหมดที่ใช้ในการคำนวณ

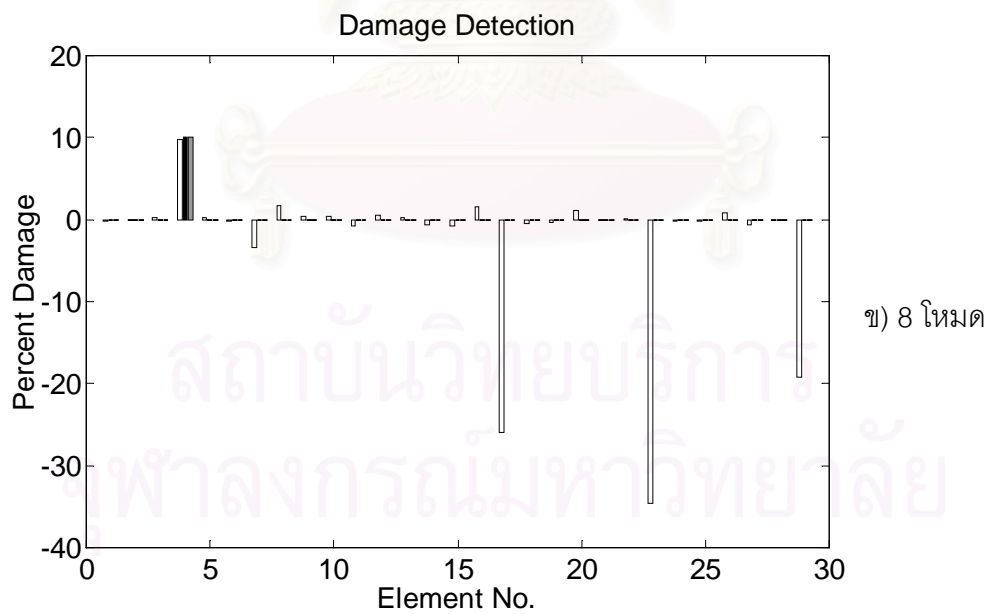
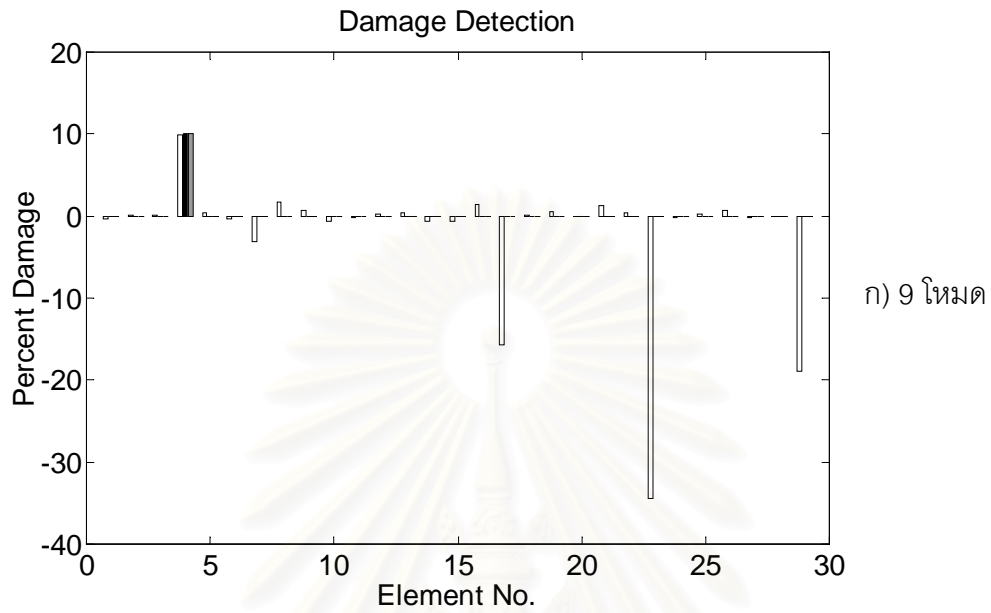
ในการตรวจหาตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ นั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ทุกโหมดในการคำนวณ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้ศึกษาถึงผลของจำนวนโหมดที่ต้องใช้โดยดูว่าหากลดจำนวนโหมดที่ใช้ลงเรื่อยๆ วิธีการตรวจหาความเสียหายต่างๆ ยังจะสามารถตรวจพบความเสียหายได้หรือไม่ โดยในครั้งแรกจะกำหนดให้ขึ้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหายคงที่ 10 เปอร์เซนต์ ซึ่งหากให้โหมดในการคำนวณ 10 โหมด ก็จะสามารถตรวจพบความเสียหายได้ (ดังรูปที่ 3.5) ดังนั้นจึงเริ่มใช้โหมดในการคำนวณตั้งแต่ 9 โหมด แล้วลดจำนวนโหมดลงเรื่อยๆ จนเหลือเพียงโหมดเดียว จากนั้นเปลี่ยนจากขึ้นส่วนที่ 4 มาเป็นขึ้นส่วนที่ 17 และ 10 แล้วทำเหมือนเดิมอีกครั้ง



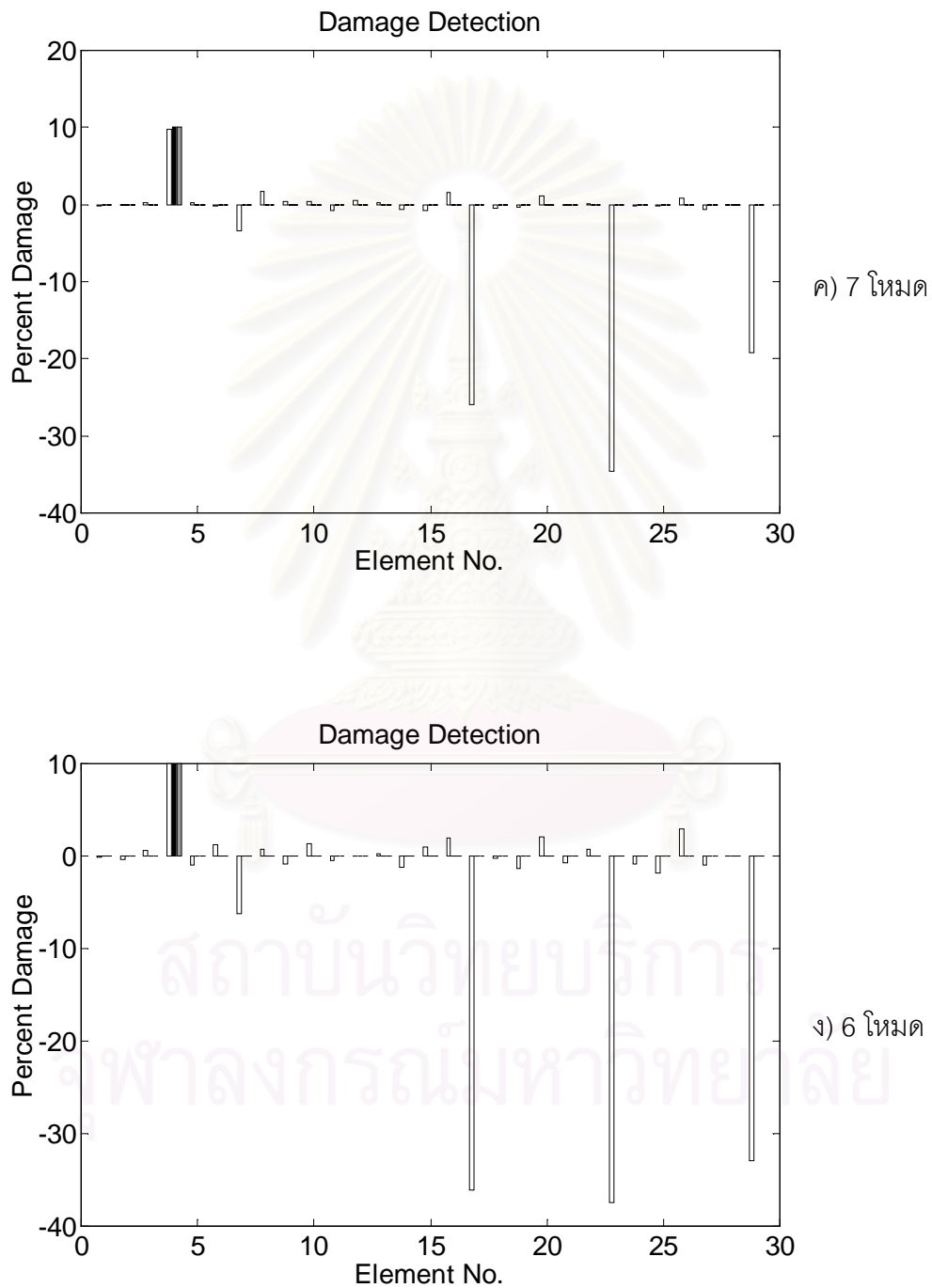
รูปที่ 3.8 แสดงขึ้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหายในแต่ละครั้ง ในการศึกษาผลของจำนวนโหมดที่ใช้ในการคำนวณ

a) ความเสียหายเกิดขึ้นในขึ้นส่วนที่ 4 (10 เปอร์เซนต์)

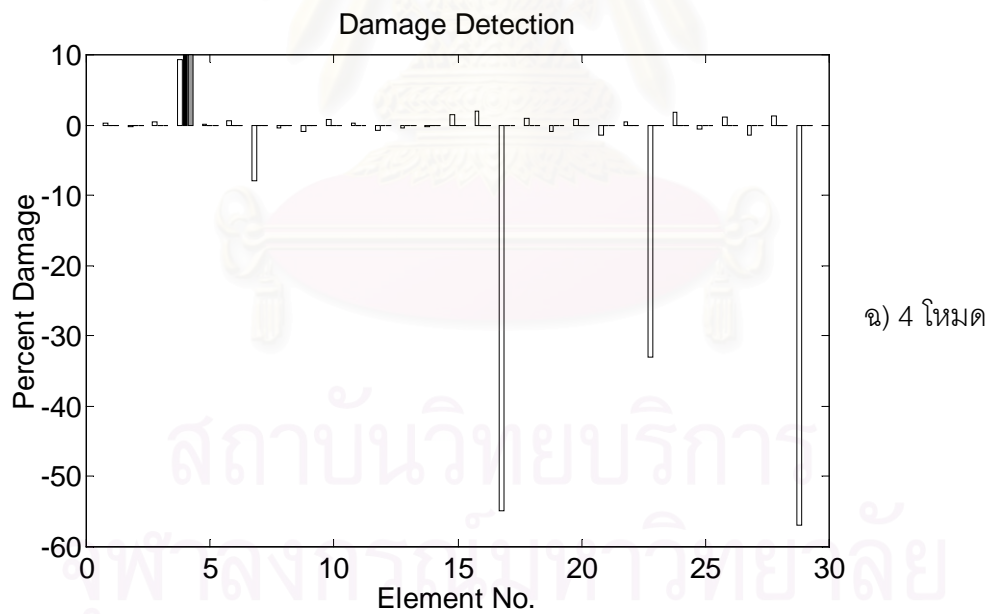
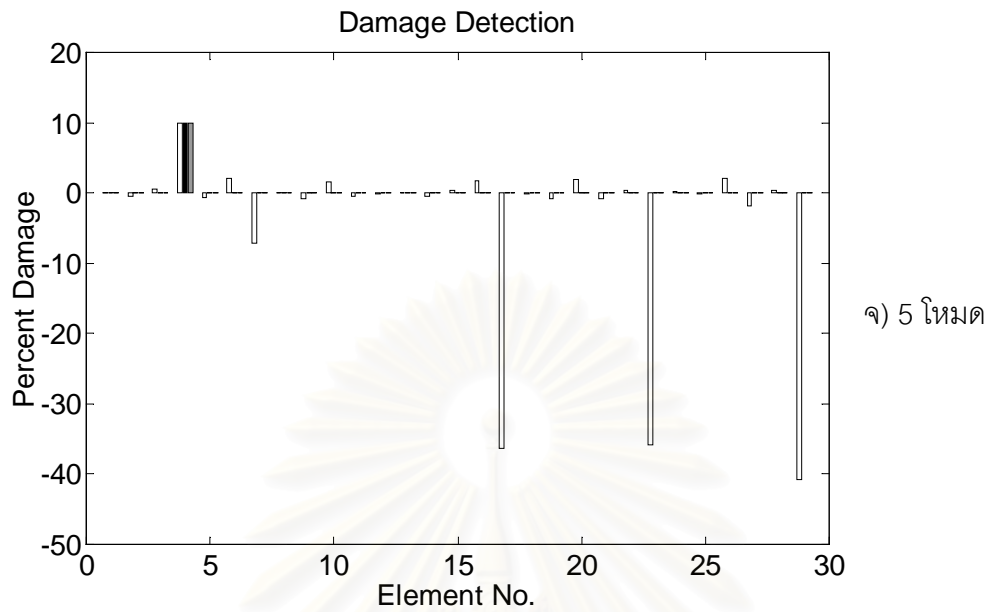
ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อให้ขึ้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหายแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหมดที่ใช้ สำหรับชิ้นส่วนที่ 4
 (□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี้ ■ โดยวิธีสตีฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)

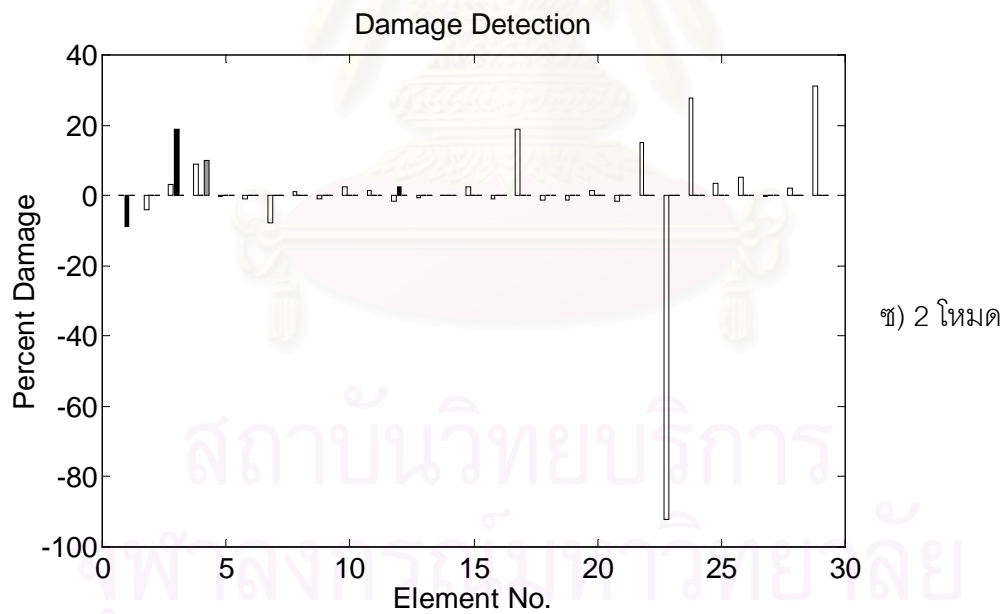
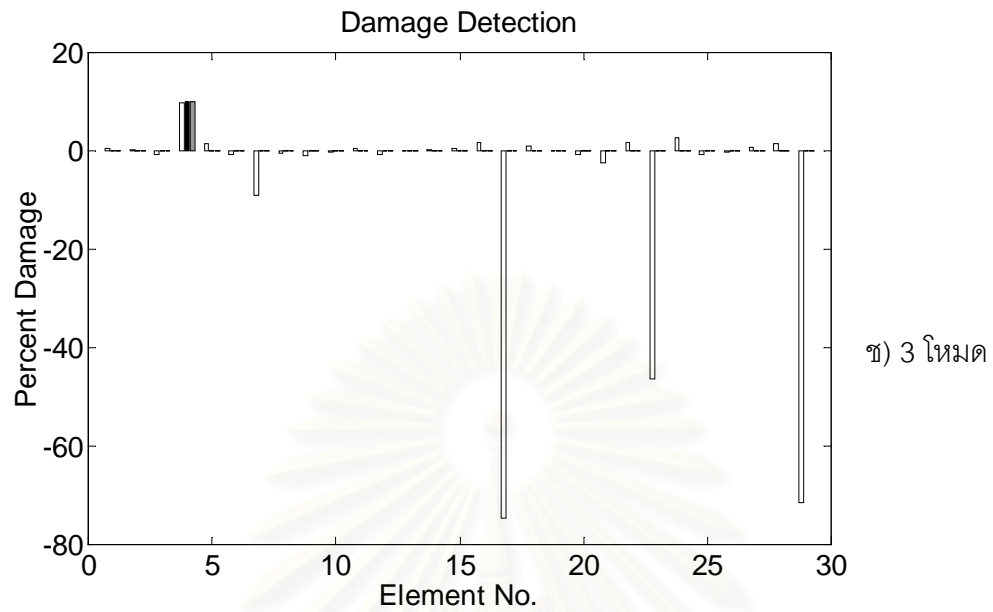


รูปที่ 3.9 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหนดที่ใช้ สำหรับชิ้นส่วนที่ 4
 (□ โดยวิธีฟลักซ์บิลิตี ■ โดยวิธีสติฟเนส ▒ โดยวิธีเวคเตอร์แรงค้ำง)



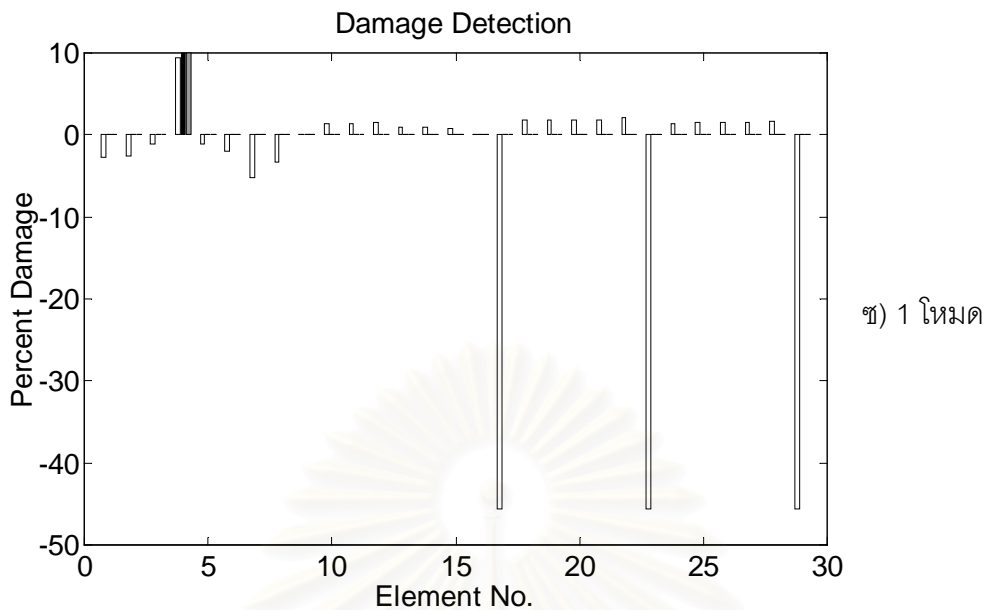
รูปที่ 3.9 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนใหม่ที่ใช้ สำหรับชิ้นส่วนที่ 4

(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี้ ■ โดยวิธีสติฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.9 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหนดที่ใช้ สำหรับชั้นส่วนที่ 4

(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี้ ■ โดยวิธีสติฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.9 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหมดที่ใช้ สำหรับชิ้นส่วนที่ 4
(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี ■ โดยวิธีสติฟเนส ▒ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้ำ)

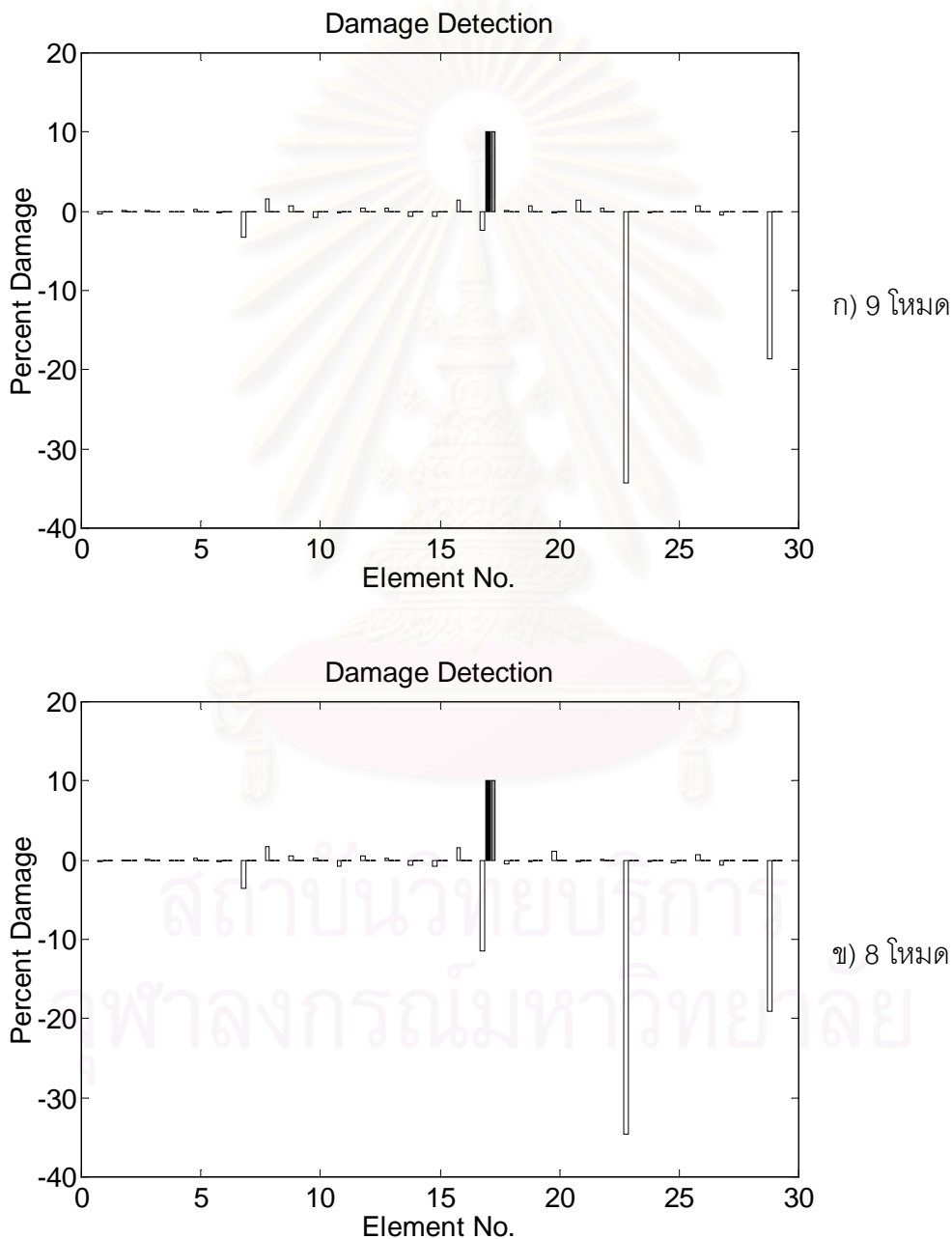
จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อลดจำนวนโหมดที่ใช้ในการคำนวณลงมาเรื่อยๆ จนเหลือเพียง 3 โหมด วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ยังสามารถตรวจพบความเสียหายได้อย่างถูกต้องทั้งตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหาย แต่เมื่อใช้ 2 โหมดในการคำนวณจะพบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์จะไม่สามารถตรวจพบความเสียหายที่ให้ไปได้ แต่กลับไปตรวจพบความเสียหายที่ชิ้นส่วนอื่นแทน ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายได้หากนำไปใช้ในการตรวจหาความเสียหายในโครงสร้างจริง เนื่องจากชิ้นส่วนที่เสียหายไม่ได้ถูกตรวจพบ

วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟล็กซิบิลิตีเมตริกซ์สามารถตรวจพบความเสียหายได้ถูกต้องเมื่อใช้จำนวนโหมดในการคำนวณเพียง 3 โหมด เช่นเดียวกับวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ และเมื่อใช้ 2 โหมดในการคำนวณจะพบว่ายังสามารถตรวจพบความเสียหายที่ให้ไปได้ถูกต้อง แต่มีการตรวจพบชิ้นส่วนอื่นที่ไม่เสียหายและตรวจพบว่าบางชิ้นส่วนมีสติฟเนสสูงขึ้น (ความเสียหายติดลบ) อีกด้วย ซึ่งหากมีการนำไปใช้ในการตรวจหาความเสียหายในโครงสร้างจริง ก็อาจไม่ก่อให้เกิดอันตรายมากนักแม้ว่าจะตรวจพบชิ้นส่วนที่ไม่เสียหายด้วยก็ตาม ทั้งนี้เพราะชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายก็ถูกตรวจพบเช่นกัน

ในขณะที่วิธีเวคเตอร์แรงคงค้ำสามารถตรวจพบความเสียหายได้อย่างถูกต้องทั้งตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหาย แม้จะใช้เพียงโหมดที่ 1 โหมดเดียวเท่านั้นในการคำนวณ

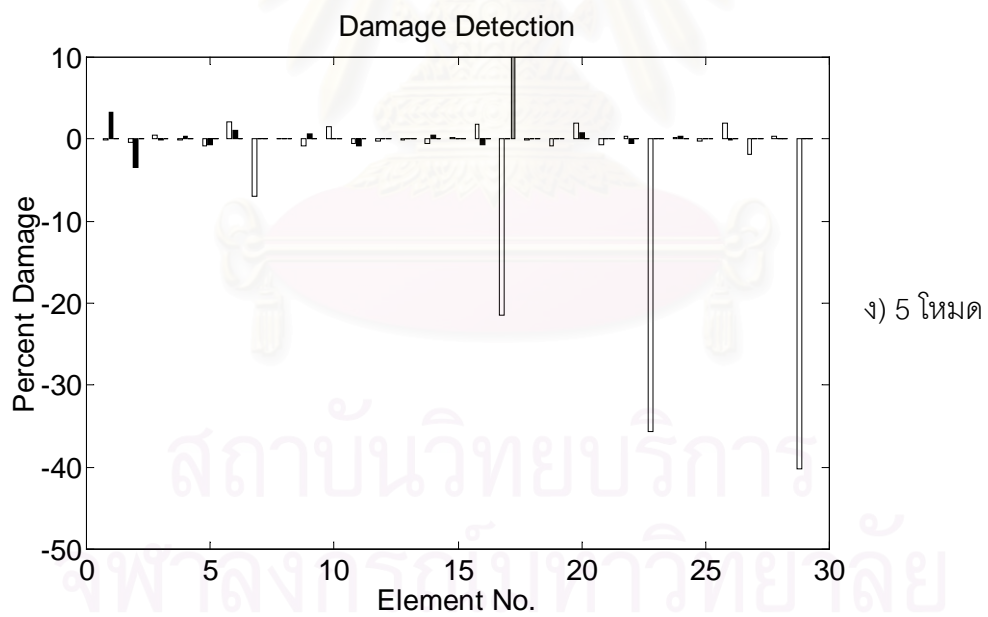
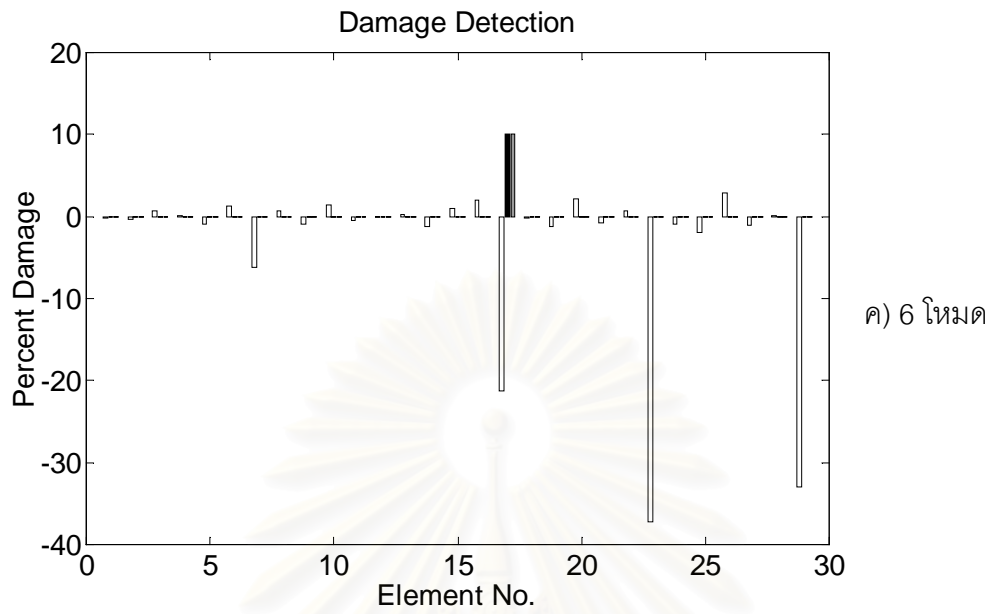
b) ความเสียหายเกิดขึ้นในชั้นส่วนที่ 17 (10 เปอร์เซ็นต์)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าชั้นส่วนที่ 4 เป็นชั้นส่วนที่มีเซนซิวิตีค่อนข้างสูง จึงทำให้ใช้จำนวนโหนดไม่มากก็สามารถตรวจพบความเสียหายได้ ต่อไปจึงจะได้เปลี่ยนให้ชั้นส่วนที่ 17 มีความเสียหาย เพื่อศึกษาว่าวิธีการต่างๆ ยังจะสามารถตรวจหาความเสียหายได้หรือไม่ โดยผลการตรวจหาความเสียหายแสดงในรูปที่ 3.10



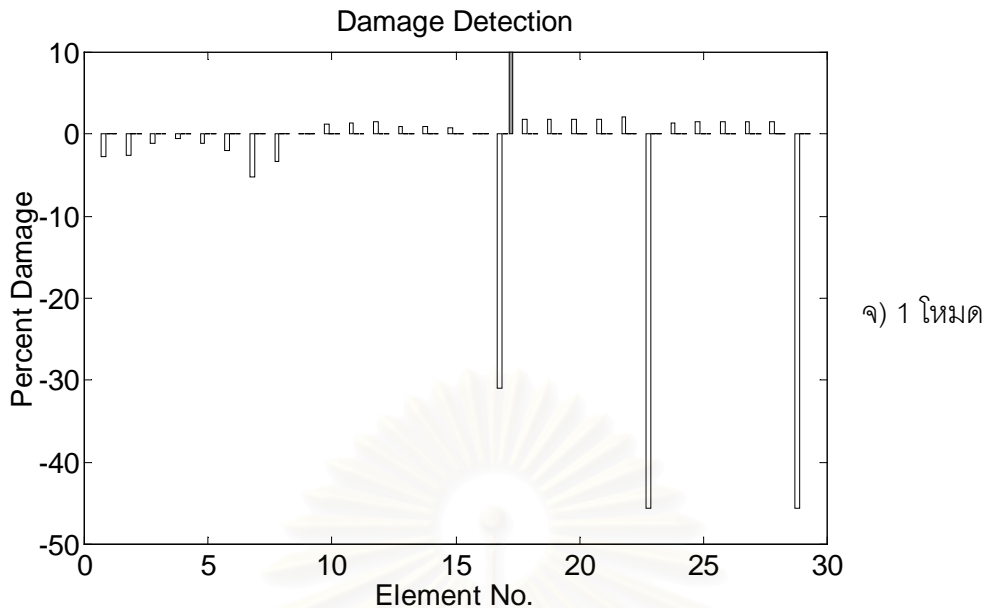
รูปที่ 3.10 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหนดที่ใช้ สำหรับชั้นส่วนที่ 17

(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี ■ โดยวิธีสติฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.10 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนใหม่ที่ใช้ สำหรับชิ้นส่วนที่ 17

(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี้ ■ โดยวิธีสติฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.10 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหมดที่ใช้ สำหรับชิ้นส่วนที่ 17
(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี ■ โดยวิธีสตีเฟนส ■ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)

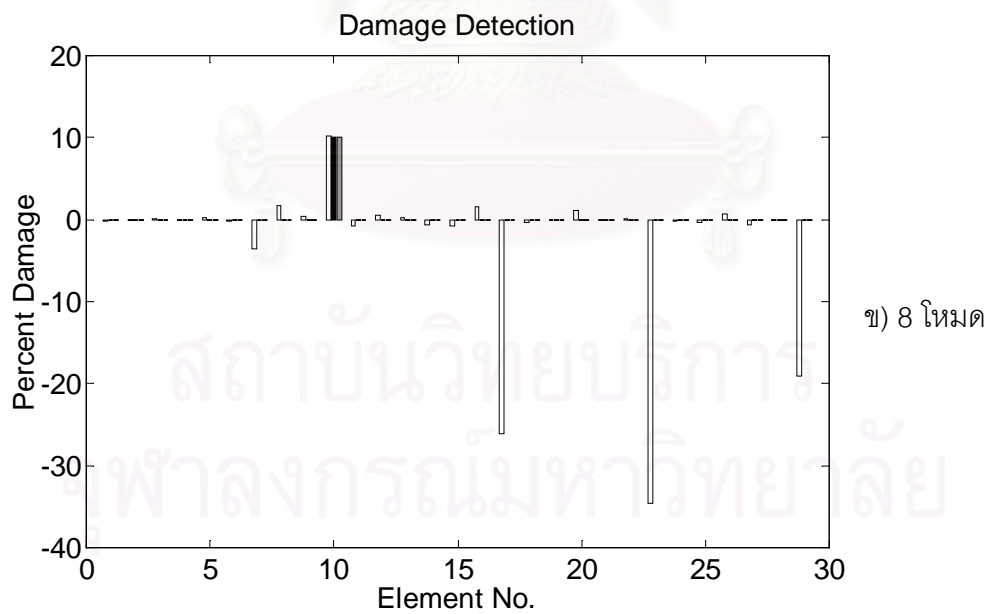
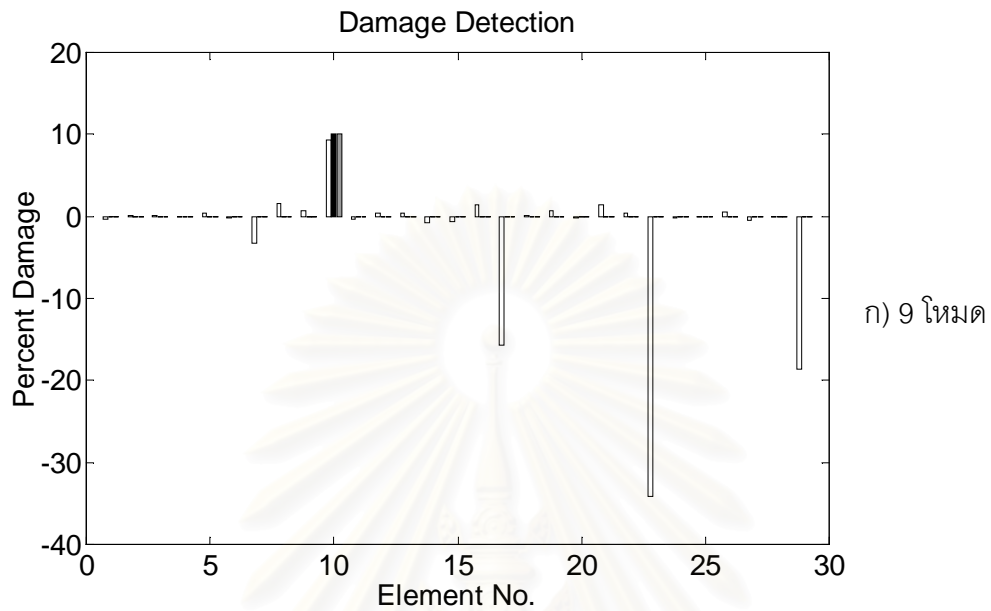
จากรูปที่ 3.10 จะพบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนสเมตริกซ์จะสามารถตรวจพบความเสียหายได้ถูกต้องเมื่อใช้จำนวนโหมดในการคำนวณ 6 โหมด แต่หากใช้เพียง 5 โหมดจะไม่สามารถตรวจพบความเสียหายได้ ซึ่งเป็นเพราะชิ้นส่วนที่ 17 มีเซนซิวิตีที่ต่ำ ดังนั้นจึงต้องใช้จำนวนโหมดมากขึ้นในการคำนวณ จึงจะสามารถตรวจหาความเสียหายได้ถูกต้อง

วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟล็กซิบิลิตีเมตริกซ์นั้นไม่สามารถตรวจพบความเสียหายได้เลย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อชิ้นส่วนที่ 17 (ซึ่งมีเซนซิวิตีต่ำ) เกิดความเสียหายนั้นต้องมีความรุนแรงที่มากพอสมควร วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟล็กซิบิลิตีเมตริกซ์จึงจะสามารถใช้ตรวจพบความเสียหายได้ (ดังรูปที่ 3.7)

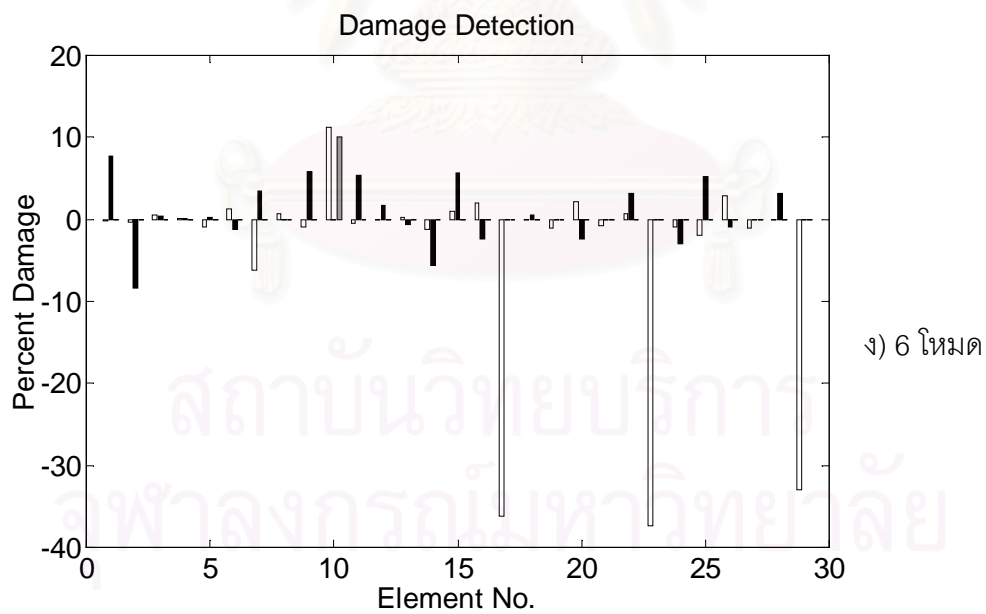
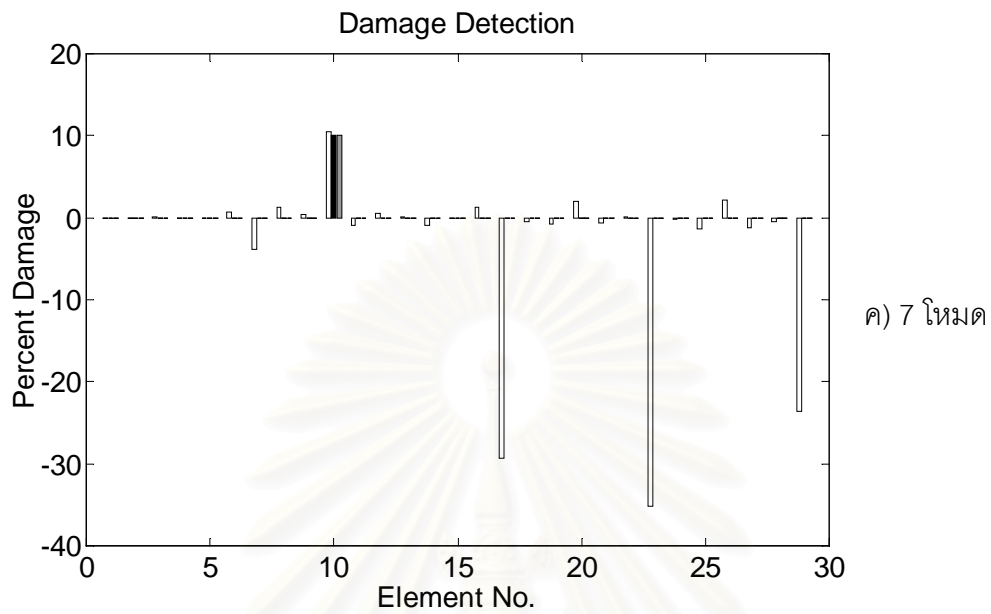
แต่จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าวิธีเวคเตอร์แรงคงค้างยังคงสามารถตรวจพบความเสียหายได้อย่างถูกต้องทั้งตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหาย แม้จะใช้เพียงโหมดแรก โหมดเดียวเท่านั้นในการคำนวณ

c) ความเสียหายเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 10 (10 เปอร์เซ็นต์)

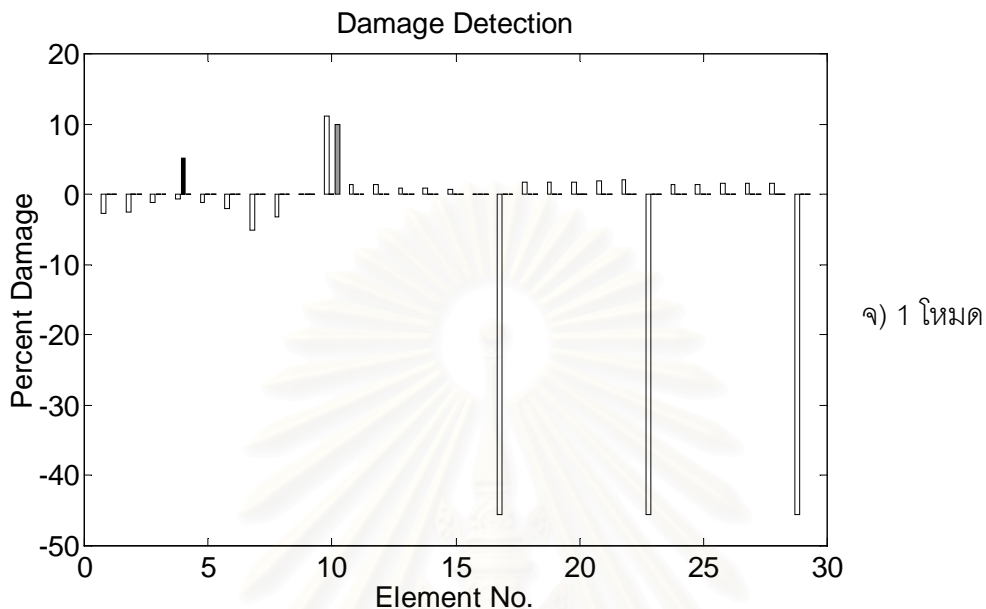
ต่อไปเปลี่ยนเป็นกำหนดให้ชิ้นส่วนที่ 10 เกิดความเสียหาย โดยผลการตรวจหาความเสียหายแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหมดที่ใช้ สำหรับชิ้นส่วนที่ 10
 (□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี้ ■ โดยวิธีสตีเฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.11 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหมดที่ใช้ สำหรับชิ้นส่วนที่ 10
 (□ โดยวิธีเฟลกชิบิลิตี้ ■ โดยวิธีสตีฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)



รูปที่ 3.11 (ต่อ) การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนโหมดที่ใช้ สำหรับชิ้นส่วนที่ 10
(□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี ■ โดยวิธีสตีเฟเนส ▣ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)

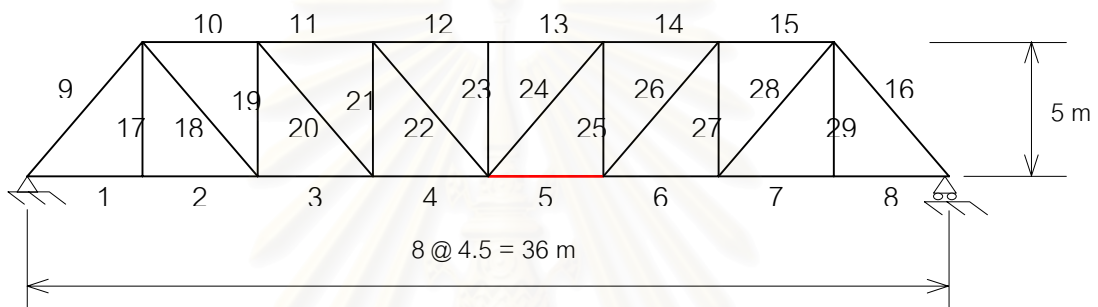
จากรูปที่ 3.11 จะเห็นว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟเนสเมตริกซ์นั้นจะสามารถตรวจพบความเสียหายได้อย่างถูกต้องเมื่อใช้ 7 โหมดในการคำนวณ แต่หากใช้ 6 โหมดในการคำนวณ นอกจากจะไม่สามารถตรวจพบความเสียหายที่หายไปได้แล้ว ยังตรวจพบชิ้นส่วนอื่นที่ไม่ได้เกิดความเสียหายด้วย ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้หากนำไปใช้ในการตรวจหาความเสียหายในโครงสร้างจริง เพราะชิ้นส่วนเสียหายที่ไม่ได้ถูกตรวจพบ

วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟล็กซิบิลิตีเมตริกซ์นั้น สามารถใช้จำนวนโหมดในการคำนวณเพียงโหมดเดียวก็สามารถตรวจพบความเสียหายได้อย่างถูกต้อง แต่ก็ยังมีบางชิ้นส่วนที่ไม่ได้เกิดความเสียหายถูกตรวจพบด้วย และยังมีบางชิ้นส่วนถูกตรวจพบว่ามีสตีเฟเนสสูงขึ้น (ความเสียหายติดลบ)

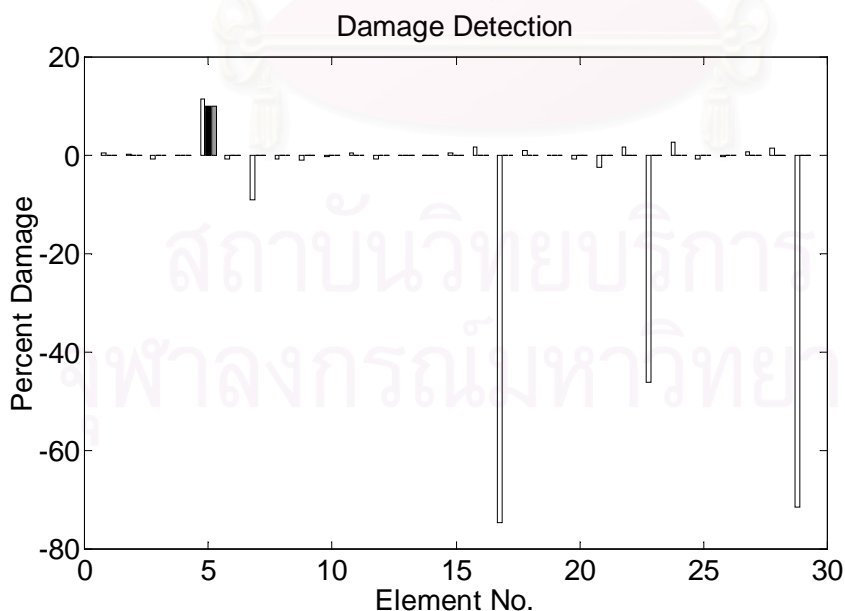
อย่างไรก็ตาม วิธีเวคเตอร์แรงคงค้างก็ยังคงสามารถตรวจพบความเสียหายได้อย่างถูกต้องทั้งตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหาย แม้จะใช้จำนวนโหมดในการคำนวณเพียงโหมดเดียวเท่านั้น

3.4.3 ศึกษาผลของความเสียหายที่มีความสมมาตร

เนื่องจากโครงข้อหมุนที่ใช้มีความสมมาตร ซึ่งหากชิ้นส่วนที่เสียหายมีความสมมาตรกัน จะทำให้ความถี่ของโครงสร้างที่เสียหายมีค่าเหมือนกัน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาว่าวิธีการตรวจหาความเสียหายต่างๆ จะสามารถตรวจพบความเสียหายได้หรือไม่ โดยจะกำหนดให้ชิ้นส่วนที่ 5 ซึ่งมีความสมมาตรกับชิ้นส่วนที่ 4 (ดังรูปที่ 3.12) มีความเสียหายเกิดขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ และใช้ 3 โหมดแรกในการคำนวณ ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 แสดงชิ้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหาย ในการศึกษาผลของความสมมาตร



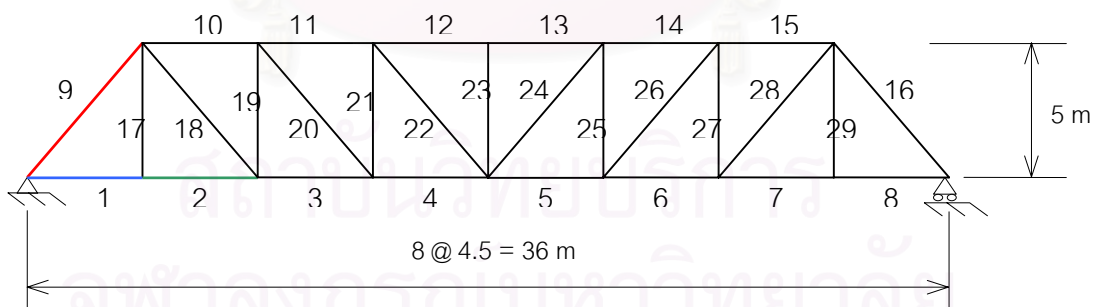
รูปที่ 3.13 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความสมมาตร (ใช้ 3 โหมดในการคำนวณ)

(□ โดยวิธีฟลักซ์บิลิตี ■ โดยวิธีสตีเฟนส์ ▒ โดยวิธีเวกเตอร์แรงคงค้าง)

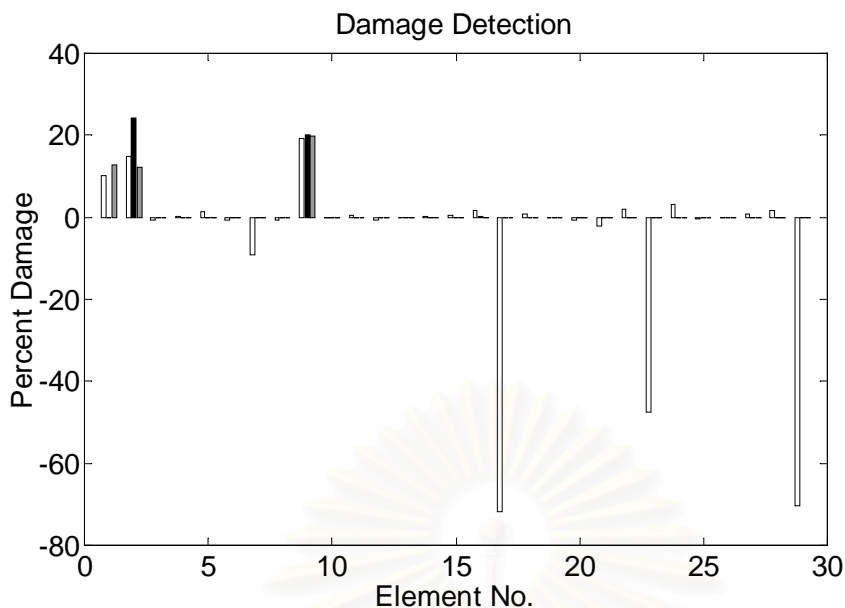
จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนและวิธีเวกเตอร์แรงคง ค้างสามารถตรวจพบความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องทั้งตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหาย ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีนั้นก็สามารถตรวจพบความเสียหายได้เช่นเดียวกัน แต่ก็มีมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นด้วยโดยตรวจพบว่าบางชิ้นส่วนมีสตีเฟนสูงขึ้น (ความเสียหายติดลบ)

3.4.4 ศึกษาผลของจำนวนชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย

ในโครงสร้างจริง ความเสียหายที่เกิดขึ้นอาจเกิดขึ้นพร้อมกันในหลายชิ้นส่วน อีกทั้งความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนก็อาจไม่เท่ากันด้วย ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของจำนวนชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย เพื่อดูว่าวิธีการตรวจหาความเสียหายต่างๆ จะสามารถตรวจหาความเสียหายได้ถูกต้องหรือไม่ และจากหัวข้อที่ 3.4.1 ถึง 3.4.3 จะเห็นว่าหากจะกำหนดให้ชิ้นส่วนที่ 4, 17 และ 10 เสียหายพร้อมกัน วิธีการต่างๆ ก็น่าจะสามารถตรวจพบความเสียหายได้ ดังนั้นจึงจะทำการเปลี่ยนชิ้นส่วนที่จะกำหนดให้เกิดความเสียหาย โดยพิจารณาจากการวิเคราะห์ เซนซิวิตีในตารางที่ 3.2 จะเห็นว่า ชิ้นส่วนที่ 1, 2 และ 9 (ดูรูปที่ 3.14) มีเซนซิวิตีที่ค่อนข้างต่ำ อีกทั้งหากดูการกระจายความเค้นดังแสดงในตารางที่ 3.3 จะพบว่าชิ้นส่วนทั้งสามมีความเค้นที่เกิดขึ้นค่อนข้างสูง ทำให้โอกาสที่จะเกิดความเสียหายมีมาก ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้กำหนดให้ ชิ้นส่วนที่ 1, 2 และ 9 เกิดความเสียหายขึ้น 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และใช้โหมดในการคำนวณ 3 โหมด ผลที่ได้จากการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.15



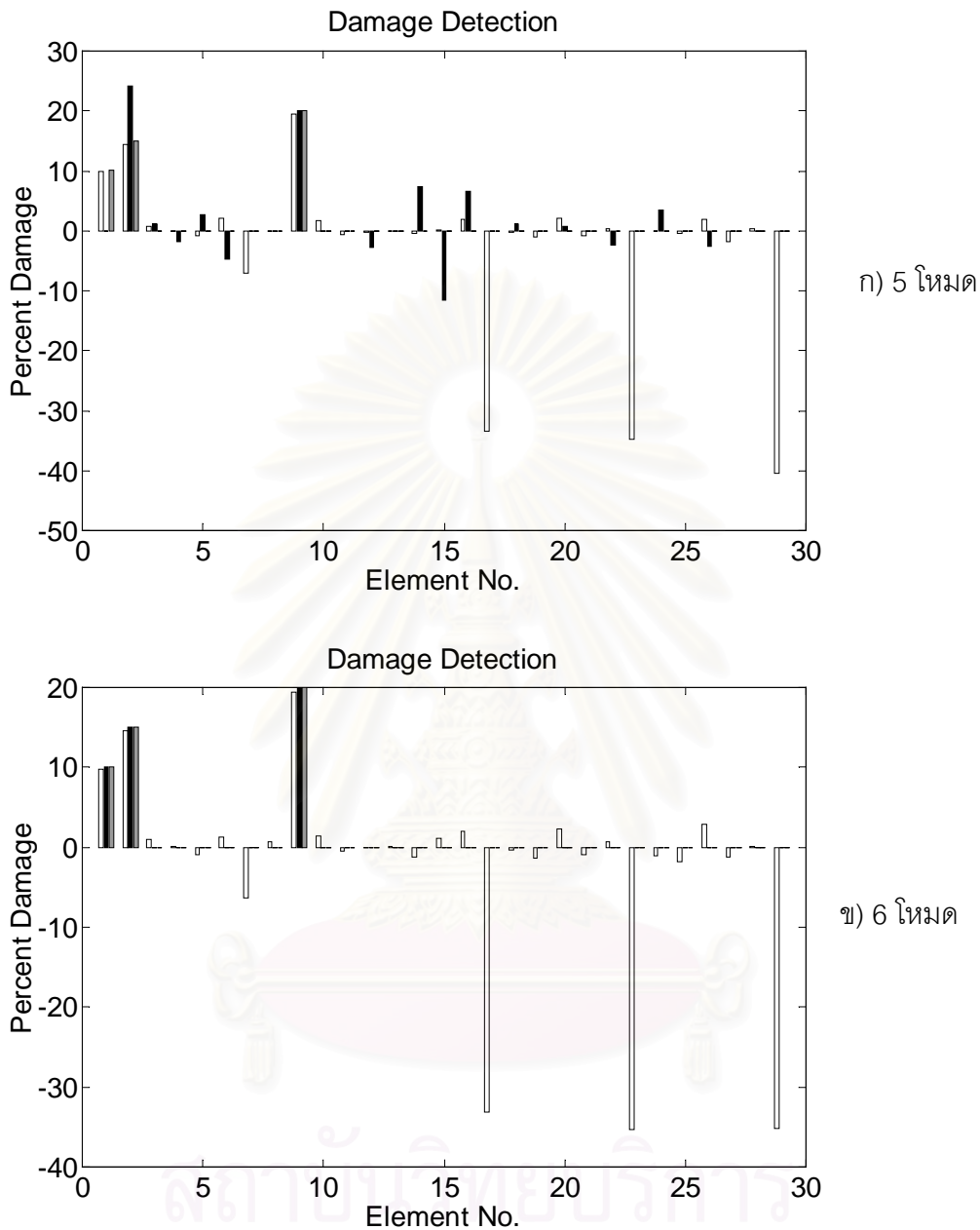
รูปที่ 3.14 แสดงชิ้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหาย ในการศึกษาผลของจำนวนชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 3.15 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย โดยใช้ 3 โหมดในการคำนวณ (□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี ■ โดยวิธีสติฟเนส ▒ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)

จากรูปที่ 3.15 จะเห็นได้ว่ามีเพียงวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟล็กซิบิลิตีเมตริกซ์เท่านั้นที่สามารถตรวจพบความเสียหายได้ถูกต้องทั้งตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหาย ในขณะที่วิธีเวคเตอร์แรงคงค้างนั้นสามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ถูกต้อง แต่ตรวจพบความรุนแรงของความเสียหายผิดพลาดไปเล็กน้อย และวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ไม่สามารถตรวจพบความเสียหายที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 1 ได้ โดยตรวจพบความเสียหายในชิ้นส่วนที่ 2 และ 9 เท่านั้น และความเสียหายที่เกิดขึ้นก็มีความคลาดเคลื่อนไปค่อนข้างมากด้วย

เมื่อจำนวนชิ้นส่วนที่เสียหายมีมากขึ้น ทำให้ต้องใช้จำนวนโหมดในการคำนวณ (ซึ่งเป็นเหมือนข้อมูลให้กับวิธีการต่างๆ) มากขึ้น ดังจะเห็นได้ว่าหากใช้เพียง 3 โหมดแรกในการคำนวณนั้น วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์และวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง ยังไม่สามารถตรวจพบความเสียหายได้อย่างถูกต้องนัก ดังนั้นจึงจะทำการเพิ่มจำนวนโหมดที่ใช้ เพื่อศึกษาว่าควรใช้จำนวนโหมดเท่าใด ทั้งสองวิธีจึงจะตรวจหาความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.16

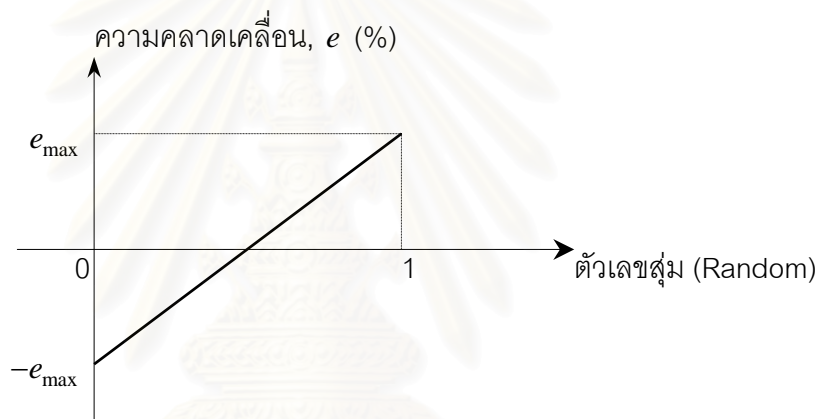


รูปที่ 3.16 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของจำนวนชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย โดยใช้ 5 และ 6 โหนดในการคำนวณ (□ โดยวิธีเฟล็กซิบิลิตี ■ โดยวิธีสตีฟเนส ■ โดยวิธีเวคเตอร์แรงคงค้าง)

จากรูปที่ 3.16(ก) จะเห็นได้ว่าวิธีเวคเตอร์แรงคงค้างสามารถตรวจพบความเสียหายได้ถูกต้องทั้งตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหาย เมื่อใช้ 5 โหนดในการคำนวณ ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีฟเนสเมตริกซ์ต้องใช้ 6 โหนดในการคำนวณ (รูปที่ 3.16(ข)) เพื่อให้สามารถตรวจพบความเสียหายได้อย่างถูกต้อง

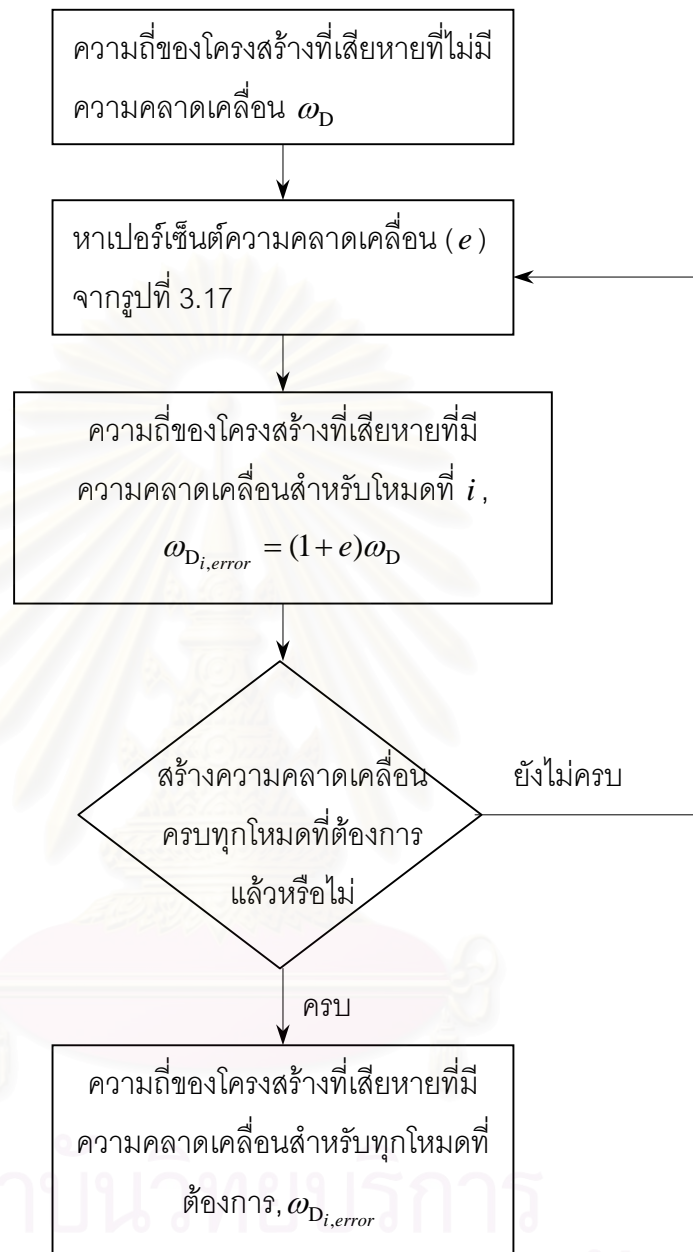
3.4.5 ศึกษาผลของความคลาดเคลื่อนในค่าและความถี่และรูปร่างโหมด

ในการตรวจหาความเสียหายในโครงสร้างจริง จะต้องทำการวัดสัญญาณการสั่นไหวของโครงสร้างซึ่งอาจมีสัญญาณรบกวนปนเข้ามาด้วย โดยที่สัญญาณรบกวนดังกล่าวอาจมาจากเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณ ทำให้เมื่อนำมาทำการวิเคราะห์หาความถี่และรูปร่างโหมด อาจทำให้ความถี่และรูปร่างโหมดที่ได้ มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ถูกต้อง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของความคลาดเคลื่อนในค่าและความถี่และรูปร่างโหมด เพื่อดูว่าวิธีการตรวจหาความเสียหายต่างๆ ยังจะสามารถตรวจพบความเสียหายได้หรือไม่ โดยความคลาดเคลื่อนที่จะกำหนดให้เกิดขึ้นในความถี่และรูปร่างโหมด สามารถทำได้โดย เริ่มพิจารณาจากรูปที่ 3.17

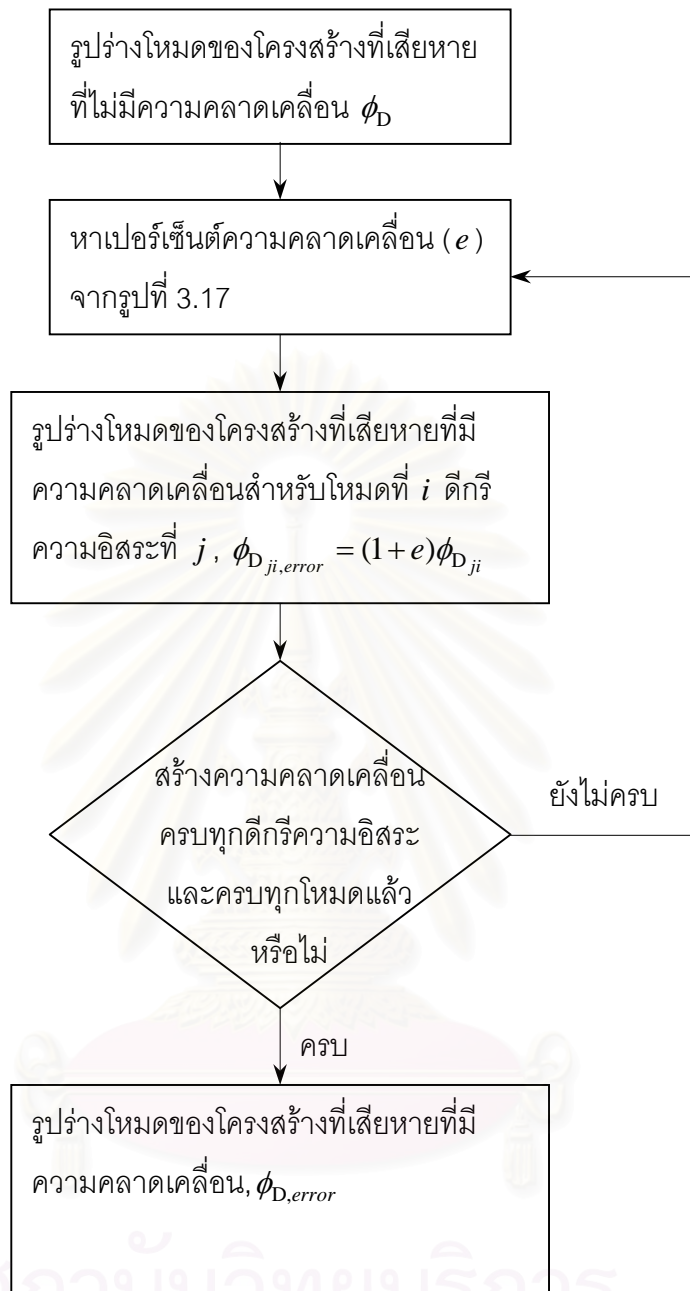


รูปที่ 3.17 การสร้างความคลาดเคลื่อนในค่าและความถี่และรูปร่างโหมด

ทำการสุ่มตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ให้มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 แล้วทำการคำนวณหาความคลาดเคลื่อนที่จะใช้จากรูปที่ 3.17 โดยที่ e_{\max} คือ ความคลาดเคลื่อนสูงสุด โดยในการศึกษานี้จะทำการศึกษาที่ความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้จากเครื่องมือที่ใช้กันอยู่ทั่วไป จากนั้นจะสามารถสร้างความถี่และรูปร่างโหมดที่มีความคลาดเคลื่อนได้ตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการสร้างความถี่ของโครงสร้างที่เสียหายที่มีความคลาดเคลื่อน



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการสร้างรูปร่างใหม่ดของโครงสร้างที่เสียหายที่มีความคลาดเคลื่อน

จากนั้นทำการตรวจหาความเสียหายของโครงสร้างโดยกำหนดให้ชิ้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหาย 10 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการวิเคราะห์หาความถี่และรูปร่างใหม่ดของโครงสร้างที่เสียหายที่ไม่มีความคลาดเคลื่อน (ω_D และ ϕ_D) จากนั้นสร้างความคลาดเคลื่อนให้กับความถี่และรูปร่างใหม่ดตามขั้นตอนในรูปที่ 3.18 และ 3.19 โดยที่ความถี่ที่มีความคลาดเคลื่อนสำหรับ 3 โหมดแรกแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าความถี่ของโครงสร้างที่เสียหายที่มีความคลาดเคลื่อนสำหรับ 3 โหมดแรก

โหมด	0 เปอร์เซ็นต์	1 เปอร์เซ็นต์	2 เปอร์เซ็นต์	5 เปอร์เซ็นต์
1	2.662	2.659	2.649	2.628
2	6.020	5.978	5.953	5.746
3	8.792	8.757	8.643	8.422

สำหรับรูปร่างโหมดที่ 1 ที่มีความคลาดเคลื่อนมีค่าดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \phi_{D_1} = & \begin{pmatrix} 0.0123 \\ -0.1316 \\ 0.1209 \\ -0.1311 \\ 0.1065 \\ -0.2433 \\ 0.0246 \\ -0.2368 \\ 0.0432 \\ -0.3126 \\ 0.0874 \\ -0.3159 \\ 0.0666 \\ -0.3383 \\ 0.0681 \\ -0.3370 \\ 0.0893 \\ -0.3069 \\ 0.0456 \\ -0.3110 \\ 0.0262 \\ -0.2359 \\ 0.1054 \\ -0.2287 \\ 0.1141 \\ -0.1239 \\ 0.0115 \\ -0.1235 \\ 0.1223 \end{pmatrix}, \phi_{D_{1,1\%}} = & \begin{pmatrix} 0.0123 \\ -0.1329 \\ 0.1218 \\ -0.1302 \\ 0.1068 \\ -0.2415 \\ 0.0247 \\ -0.2353 \\ 0.0429 \\ -0.3107 \\ 0.0869 \\ -0.3137 \\ 0.0669 \\ -0.3369 \\ 0.0686 \\ -0.3360 \\ 0.0902 \\ -0.3082 \\ 0.0457 \\ -0.3141 \\ 0.0260 \\ -0.2381 \\ 0.1056 \\ -0.2293 \\ 0.1151 \\ -0.1231 \\ 0.0114 \\ -0.1244 \\ 0.1235 \end{pmatrix}, \phi_{D_{1,2\%}} = & \begin{pmatrix} 0.0126 \\ -0.1290 \\ 0.1195 \\ -0.1319 \\ 0.1075 \\ -0.2442 \\ 0.0251 \\ -0.2372 \\ 0.0425 \\ -0.3088 \\ 0.0885 \\ -0.3215 \\ 0.0658 \\ -0.3407 \\ 0.0687 \\ -0.3366 \\ 0.0900 \\ -0.3045 \\ 0.0452 \\ -0.3088 \\ 0.0258 \\ -0.2333 \\ 0.1041 \\ -0.2285 \\ 0.1146 \\ -0.1244 \\ 0.0115 \\ -0.1240 \\ 0.1199 \end{pmatrix}, \phi_{D_{1,5\%}} = & \begin{pmatrix} 0.0129 \\ -0.1284 \\ 0.1258 \\ -0.1277 \\ 0.1072 \\ -0.2507 \\ 0.0237 \\ -0.2389 \\ 0.0428 \\ -0.3197 \\ 0.0849 \\ -0.3059 \\ 0.0646 \\ -0.3539 \\ 0.0690 \\ -0.3312 \\ 0.0857 \\ -0.2993 \\ 0.0444 \\ -0.3005 \\ 0.0251 \\ -0.2340 \\ 0.1041 \\ -0.2260 \\ 0.1105 \\ -0.1188 \\ 0.0116 \\ -0.1179 \\ 0.1212 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

และสำหรับรูปร่างโหมดที่ 2 ที่มีความคลาดเคลื่อนมีค่าดังต่อไปนี้

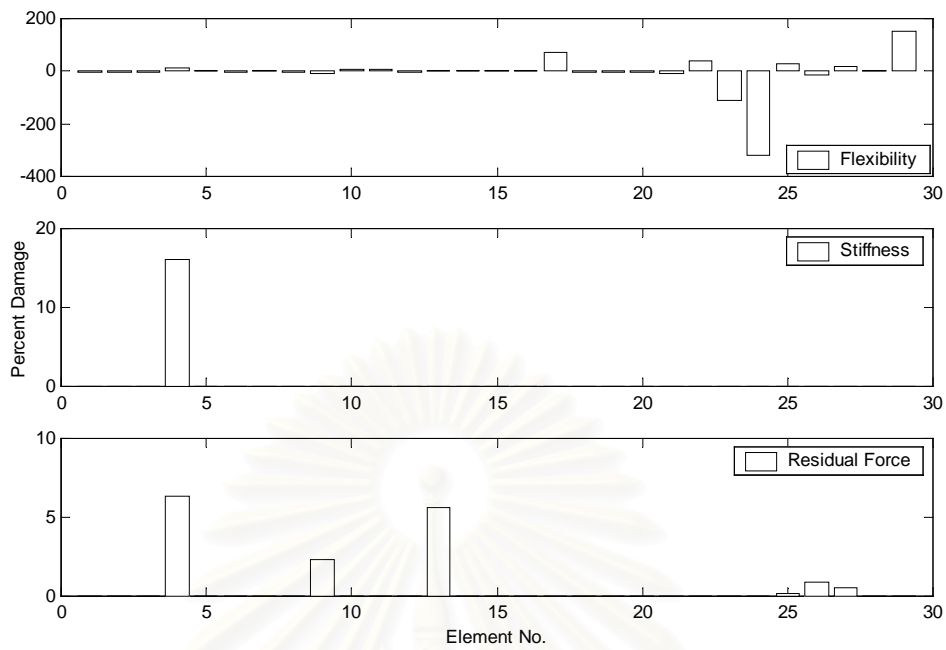
$$\phi_{D_2} = \begin{pmatrix} 0.0777 \\ -0.1243 \\ 0.1571 \\ -0.1218 \\ 0.1708 \\ -0.0726 \\ 0.1540 \\ -0.0896 \\ 0.2145 \\ 0.0134 \\ 0.1954 \\ 0.0322 \\ 0.2294 \\ 0.1349 \\ 0.2583 \\ 0.1322 \\ 0.2662 \\ 0.1614 \\ 0.2593 \\ 0.1559 \\ 0.2905 \\ 0.1415 \\ 0.2665 \\ 0.1382 \\ 0.2657 \\ 0.0784 \\ 0.3148 \\ 0.0768 \\ 0.2602 \end{pmatrix}, \phi_{D_{2,1\%}} = \begin{pmatrix} 0.0783 \\ -0.1235 \\ 0.1564 \\ -0.1213 \\ 0.1692 \\ -0.0722 \\ 0.1530 \\ -0.0896 \\ 0.2163 \\ 0.0135 \\ 0.1950 \\ 0.0324 \\ 0.2316 \\ 0.1362 \\ 0.2559 \\ 0.1314 \\ 0.2664 \\ 0.1612 \\ 0.2567 \\ 0.1563 \\ 0.2894 \\ 0.1407 \\ 0.2664 \\ 0.1385 \\ 0.2680 \\ 0.0778 \\ 0.3129 \\ 0.0770 \\ 0.2599 \end{pmatrix}, \phi_{D_{2,2\%}} = \begin{pmatrix} 0.0780 \\ -0.1250 \\ 0.1567 \\ -0.1227 \\ 0.1694 \\ -0.0715 \\ 0.1553 \\ -0.0891 \\ 0.2172 \\ 0.0133 \\ 0.1940 \\ 0.0327 \\ 0.2339 \\ 0.1325 \\ 0.2617 \\ 0.1324 \\ 0.2631 \\ 0.1607 \\ 0.2601 \\ 0.1581 \\ 0.2938 \\ 0.1404 \\ 0.2710 \\ 0.1368 \\ 0.2684 \\ 0.0790 \\ 0.3104 \\ 0.0782 \\ 0.2630 \end{pmatrix}, \phi_{D_{2,5\%}} = \begin{pmatrix} 0.0748 \\ -0.1303 \\ 0.1605 \\ -0.1191 \\ 0.1763 \\ -0.0733 \\ 0.1497 \\ -0.0871 \\ 0.2042 \\ 0.0129 \\ 0.1944 \\ 0.0315 \\ 0.2212 \\ 0.1367 \\ 0.2579 \\ 0.1300 \\ 0.2543 \\ 0.1613 \\ 0.2570 \\ 0.1553 \\ 0.3023 \\ 0.1474 \\ 0.2798 \\ 0.1409 \\ 0.2756 \\ 0.0775 \\ 0.3098 \\ 0.0736 \\ 0.2571 \end{pmatrix}$$

และสำหรับรูปร่างโหมดที่ 3 ที่มีความคลาดเคลื่อนมีค่าดังต่อไปนี้

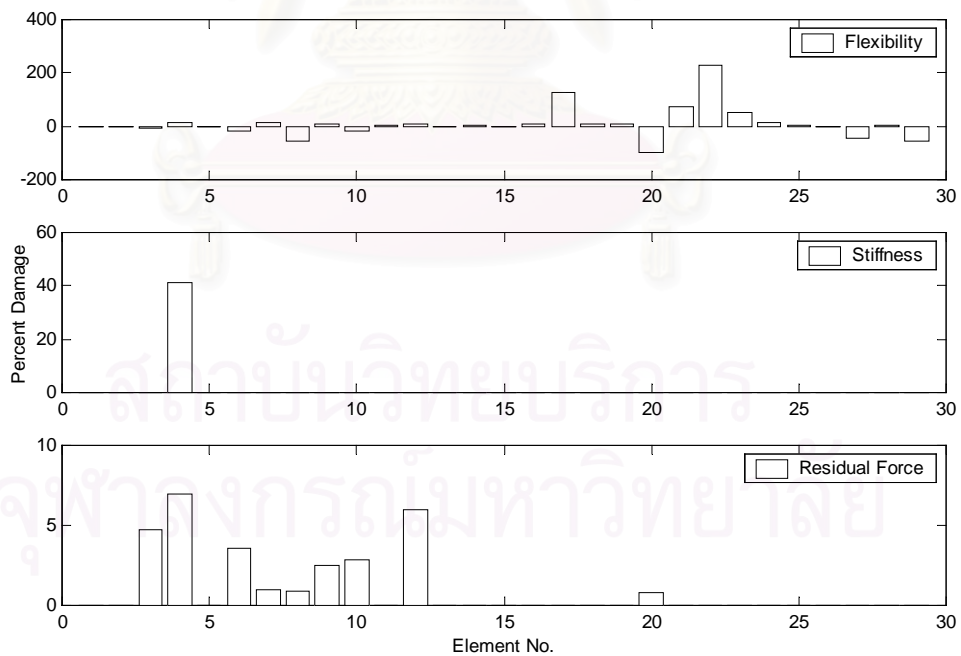
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\begin{aligned}
\phi_{D_3} = & \begin{bmatrix} -0.0119 \\ -0.1681 \\ 0.0410 \\ -0.1610 \\ -0.0294 \\ -0.3131 \\ -0.0234 \\ -0.2989 \\ -0.0069 \\ -0.2802 \\ -0.0940 \\ -0.2576 \\ -0.1220 \\ -0.0757 \\ 0.0071 \\ -0.0726 \\ -0.0508 \\ 0.2175 \\ -0.1454 \\ 0.1810 \\ -0.1219 \\ 0.3376 \\ -0.1245 \\ 0.3396 \\ -0.1758 \\ 0.2576 \\ -0.0730 \\ 0.2468 \\ -0.2204 \end{bmatrix}, \phi_{D_{3,1\%}} = & \begin{bmatrix} -0.0120 \\ -0.1667 \\ 0.0409 \\ -0.1619 \\ -0.0296 \\ -0.3142 \\ -0.0234 \\ -0.2983 \\ -0.0070 \\ -0.2811 \\ -0.0941 \\ -0.2564 \\ -0.1220 \\ -0.0758 \\ 0.0071 \\ -0.0729 \\ -0.0508 \\ 0.2196 \\ -0.1461 \\ 0.1800 \\ -0.1223 \\ 0.3373 \\ -0.1245 \\ 0.3392 \\ -0.1757 \\ 0.2574 \\ -0.0728 \\ 0.2472 \\ -0.2213 \end{bmatrix}, \phi_{D_{3,2\%}} = & \begin{bmatrix} -0.0121 \\ -0.1700 \\ 0.0404 \\ -0.1581 \\ -0.0291 \\ -0.3135 \\ -0.0233 \\ -0.2989 \\ -0.0068 \\ -0.2828 \\ -0.0956 \\ -0.2606 \\ -0.1204 \\ -0.0748 \\ 0.0070 \\ -0.0712 \\ -0.0516 \\ 0.2203 \\ -0.1436 \\ 0.1785 \\ -0.1210 \\ 0.3393 \\ -0.1223 \\ 0.3373 \\ -0.1758 \\ 0.2534 \\ -0.0729 \\ 0.2450 \\ -0.2192 \end{bmatrix}, \phi_{D_{3,5\%}} = & \begin{bmatrix} -0.0120 \\ -0.1693 \\ 0.0420 \\ -0.1558 \\ -0.0295 \\ -0.3195 \\ -0.0237 \\ -0.2940 \\ -0.0066 \\ -0.2789 \\ -0.0973 \\ -0.2670 \\ -0.1168 \\ -0.0733 \\ 0.0070 \\ -0.0696 \\ -0.0509 \\ 0.2074 \\ -0.1492 \\ 0.1803 \\ -0.1208 \\ 0.3366 \\ -0.1186 \\ 0.3467 \\ -0.1671 \\ 0.2544 \\ -0.0749 \\ 0.2487 \\ -0.2287 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

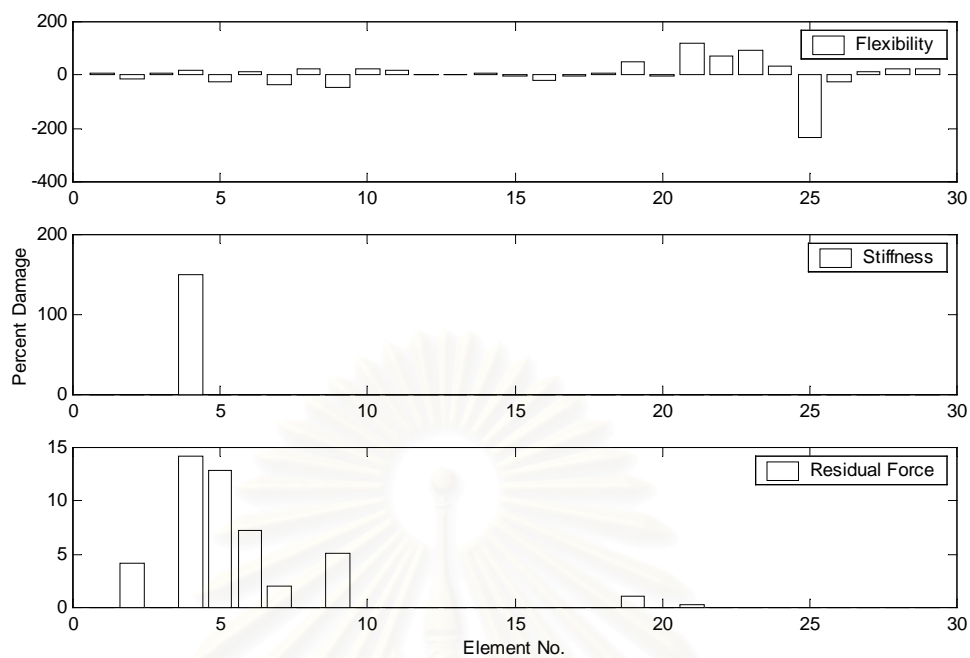
จากนั้นใช้ความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหายที่มีความคลาดเคลื่อน ($\omega_{D,error}$ และ $\phi_{D,error}$) สติเฟเนสและมวลของโครงสร้างที่ยังไม่เสียหาย (ไม่มีความคลาดเคลื่อน) ในการตรวจหาความเสียหาย และใช้โหมดแรกโหมดเดียวในการคำนวณ โดยผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ สำหรับกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเป็น 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ แสดงในรูปที่ 3.20, 3.21 และ 3.22 ตามลำดับ



รูปที่ 3.20 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนในความถี่และรูปร่างโหมด สำหรับความคลาดเคลื่อนสูงสุดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.21 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนในความถี่และรูปร่างโหมด สำหรับความคลาดเคลื่อนสูงสุดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.22 การตรวจหาความเสียหายเนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนในความถี่และรูปร่างโหมด สำหรับความคลาดเคลื่อนสูงสุดเป็น 5 เปอร์เซนต์

เมื่อมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดในความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 1 เปอร์เซนต์ (รูปที่ 3.20) จะพบว่า วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ไม่สามารถตรวจพบความเสียหายได้ ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์สามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ถูกต้อง แต่ตรวจพบความรุนแรงผิดพลาดไปเล็กน้อย โดยตรวจพบความเสียหายประมาณ 16.1 เปอร์เซนต์ และวิธีเวคเตอร์แรงค้ำตรวจพบความเสียหายผิดพลาดไปบ้าง โดยตรวจพบตำแหน่งอื่นที่ไม่เกิดความเสียหายด้วย แต่ความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนที่ 4 สามารถตรวจพบได้ค่อนข้างถูกต้อง ในขณะที่ชิ้นส่วนอื่นตรวจพบความเสียหายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

และเมื่อความคลาดเคลื่อนสูงสุดในความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 2 เปอร์เซนต์ (รูปที่ 3.21) จะพบว่า วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ยังคงตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ถูกต้อง แต่ความรุนแรงที่ตรวจพบมีความผิดพลาดมากขึ้น ในขณะที่วิธีเวคเตอร์แรงค้ำตรวจพบความเสียหายผิดพลาดไปค่อนข้างมาก

เมื่อเพิ่มความคลาดเคลื่อนให้สูงขึ้นอีกเป็น 5 เปอร์เซนต์ (รูปที่ 3.22) จะพบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ยังคงตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ แต่ความรุนแรง

ของความเสียหายที่ตรวจพบมีความผิดพลาดสูงมาก โดยตรวจพบความเสียหายมีค่าเป็น 150.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่น่าจะเกิดขึ้นได้ในทางปฏิบัติ

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าความถี่ของโครงสร้างโหมดที่ 1 เมื่อขึ้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหาย

Percent Damage	ความถี่ของโครงสร้าง (Hz)
0%	2.677
5%	2.670
10%	2.662
15%	2.653
20%	2.644
30%	2.621
50%	2.550
70%	2.401

เมื่อพิจารณาความถี่ของโครงสร้างที่เสียหายซึ่งไม่มีความคลาดเคลื่อนในตารางที่ 3.6 จะพบว่าเมื่อขึ้นส่วนที่ 4 เสียหาย 70 เปอร์เซ็นต์นั้นความถี่มีค่าลดลงเหลือเพียง 2.401 Hz วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนเมตริกซ์ก็ยังคงสามารถตรวจหาความเสียหายได้อย่างถูกต้อง (ดังรูปที่ 3.5) แต่เมื่อใช้ความถี่ที่มีความคลาดเคลื่อน 5 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่า 2.628 Hz (ตารางที่ 3.5) ซึ่งสูงกว่าเมื่อความเสียหายเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ แต่กลับทำให้วิธีการนี้ตรวจพบความเสียหายเป็น 150.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่น่าเป็นไปได้

แต่อย่างไรก็ดี จากผลการคำนวณหาค่าความเสียหายสัมพัทธ์ของขึ้นส่วนที่ 4 (α_4) ในภาคผนวก ก. กรณีที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น (ตาราง ก.1) เมื่อความเสียหายเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าแม้ความถี่จะลดลงมาก แต่ผลของรูปร่างโหมด ทำให้พจน์ $B (= \phi_{D1}^T K \phi_{D1})$ และ $C (= \phi_{D1}^T K_4 \phi_{D1})$ มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยจึงทำให้คำนวณหาค่า α_4 ได้อย่างถูกต้อง แต่เมื่อพิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนในตาราง ก.2 (ภาคผนวก) จะเห็นว่าความถี่ที่มีความคลาดเคลื่อน 5 เปอร์เซ็นต์ (2.628 Hz) ควรจะคำนวณหาความเสียหายอยู่ในช่วง

20-30 เปอร์เซ็นต์ (ดูตารางที่ 3.6) แต่ผลของความคลาดเคลื่อนของรูปร่างใหม่ (ซึ่งกำหนดให้เกิดขึ้นแบบสุ่ม) ก็ทำให้พจน์ $B (= \phi_{D_1}^T K \phi_{D_1})$ มีค่าอยู่ในช่วงความเสียหาย 50-70 เปอร์เซ็นต์ แต่พจน์ $C (= \phi_{D_1}^T K_4 \phi_{D_1})$ ซึ่งเป็นตัวหารในสมการ (ก.3) กลับมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น (มีค่าอยู่ในช่วง 15-20 เปอร์เซ็นต์) จึงทำให้ค่า α_4 ที่คำนวณได้มีค่าสูงถึง 150.6 เปอร์เซ็นต์ดังกล่าว

3.5 สรุปผลการเปรียบเทียบ

1) ผลของความรุนแรงของความเสียหาย

เมื่อพิจารณาผลของความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นจะพบว่า เมื่อความเสียหายเกิดขึ้นในชั้นส่วนที่ 4 ซึ่งเป็นชั้นส่วนที่มีเซนซิวิตีที่ค่อนข้างสูง จะพบว่าทั้ง 3 วิธีสามารถตรวจพบตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องแม้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย (5 เปอร์เซ็นต์) ก็ตาม แต่อย่างไรก็ดี วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์มีความผิดพลาดค่อนข้างสูงโดยตรวจพบความเสียหายในบางชั้นส่วนมีค่าติดลบ ซึ่งหมายความว่าชั้นส่วนดังกล่าวมีสติฟเนสที่สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการใช้จำนวนโหมดที่น้อยเกินไปทำให้ในการแก้สมการด้วยวิธี Pseudo-inverse technique มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น และเมื่อความเสียหายมีค่าสูง (70 เปอร์เซ็นต์) วิธีเวกเตอร์แรงค้ำงไม่สามารถตรวจพบความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากเวกเตอร์ $r_D^{(i)}$ ในขั้นตอนของการตรวจหาความเสียหายไม่ลู่เข้า (ดูหัวข้อ 3.4.1)

และเมื่อความเสียหายเกิดขึ้นในชั้นส่วนที่ 17 ซึ่งเป็นชั้นส่วนที่มีเซนซิวิตีที่ต่ำ จะพบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ไม่สามารถตรวจพบความเสียหายได้หากความเสียหายที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย โดยจะเริ่มตรวจพบความรุนแรงของความเสียหายได้ถูกต้องเมื่อความเสียหายเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป และนอกจากนี้วิธีนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนด้วย โดยตรวจพบว่าบางชั้นส่วนมีสติฟเนสที่สูงขึ้นเช่นเดียวกับในกรณีที่กำหนดให้ชั้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหาย ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์และวิธีเวกเตอร์แรงค้ำงยังคงสามารถตรวจพบความเสียหายได้ถูกต้อง แม้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยก็ตาม แต่วิธีเวกเตอร์แรงค้ำงก็ยังคงไม่สามารถตรวจพบความรุนแรงของความเสียหายได้เมื่อความเสียหายมีค่าสูง เช่นเดียวกับในกรณีชั้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหาย

2) ผลของจำนวนโหมดที่ใช้

เมื่อชั้นส่วนที่ 4 ซึ่งเป็นชั้นส่วนที่มีเซนซิวิตีสูงในโหมดที่ 1 เกิดความเสียหาย พบว่าวิธีเวกเตอร์แรงค้ำงสามารถตรวจพบความเสียหายได้ถูกต้องแม้จะใช้โหมดที่ 1 เพียงโหมด

เดียวเท่านั้นในการคำนวณ ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์และวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติเฟนสเมตริกซ์นั้นสามารถตรวจพบความเสียหายได้เมื่อใช้ 3 โหมดแรกในการคำนวณ แต่เมื่อใช้ 2 โหมดแรกในการคำนวณจะพบว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้น (รูปที่ 3.9) และเมื่อลดจำนวนโหมดที่ใช้ลง โดยใช้เพียงโหมดที่ 1 โหมดเดียวในการคำนวณจะพบว่าทั้งสองวิธีสามารถตรวจพบความเสียหายได้ถูกต้องอีกครั้ง ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อขึ้นส่วนที่ 4 เสียหายจะทำให้รูปร่างโหมดในโหมดที่ 1 เปลี่ยนแปลงมากทำให้แม้จะใช้เพียงโหมดที่ 1 โหมดเดียวในการคำนวณก็ยังสามารถตรวจพบความเสียหายได้ ในขณะที่โหมดที่ 2 นั้นเมื่อขึ้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหายค่าของรูปร่างโหมดบริเวณดีกรีความอิสระ (Degree of freedom) ของขึ้นส่วนที่ 4 เกือบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงเลยเนื่องจากเป็นจุด modal node ทำให้เมื่อใช้โหมดที่ 2 รวมเข้าไปในการคำนวณจะทำให้เหมือนกับว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นที่ขึ้นส่วนอื่นแทน จึงทำให้ผลการตรวจหาความเสียหายที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

และเมื่อกำหนดให้ขึ้นส่วนที่ 17 เกิดความเสียหายจะพบว่าวิธีเวคเตอร์แรงคงค้างยังคงสามารถตรวจพบตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้ถูกต้องแม้จะใช้เพียงโหมดที่ 1 เพียงโหมดเดียวเท่านั้นในการคำนวณ ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติเฟนสเมตริกซ์ต้องใช้ 6 โหมดในการคำนวณจึงจะสามารถตรวจพบตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ แต่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์นั้นไม่สามารถตรวจพบความเสียหายได้เลย ทั้งนี้เนื่องจากขึ้นส่วนที่ 17 เป็นขึ้นส่วนที่มีเซนซิวิตีค่อนข้างต่ำทำให้ต้องมีความรุนแรงของความเสียหายที่มากพอสมควรวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์จึงจะสามารถตรวจพบความเสียหายได้

3) ผลของความเสียหายที่มีความสมมาตร

เนื่องจากโครงสร้างมีความสมมาตรทำให้หากขึ้นส่วนที่เสียหายมีความสมมาตรกันก็จะทำให้ความถี่ของโครงสร้างมีค่าเท่ากัน ซึ่งอาจเป็นผลให้วิธีการต่างๆ ตรวจพบความเสียหายที่ผิดพลาดไป แต่จากผลการตรวจหาความเสียหายในรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าทั้ง 3 วิธีสามารถตรวจพบความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ แม้ว่าความเสียหายจะเกิดขึ้นในขึ้นส่วนที่ 5 ซึ่งมีความสมมาตรกับขึ้นส่วนที่ 4 ก็ตาม

4) ผลของจำนวนขึ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย

เมื่อจำนวนขึ้นส่วนที่เสียหายมีมากขึ้น ทำให้ต้องใช้จำนวนโหมดในการคำนวณ (ซึ่งเป็นเหมือนข้อมูลให้กับวิธีการต่างๆ) มากขึ้น ดังจะเห็นได้ว่าหากใช้เพียง 3 โหมดแรกในการ

คำนวณนั้นจะมีเพียงวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์เท่านั้นที่สามารถตรวจพบตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้ค่อนข้างถูกต้อง แต่ก็ยังคงมีการตรวจพบบางชิ้นส่วนมีสติเฟเนสที่สูงขึ้นเช่นเดิม

วิธีเวคเตอร์แรงค้ำสามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ถูกต้อง แต่ความรุนแรงที่พบยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง และความรุนแรงที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจพบอย่างถูกต้องเมื่อใช้ 5 โหมดในการคำนวณ ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติเฟเนสเมตริกซ์นั้นต้องใช้ถึง 6 โหมดในการคำนวณจึงจะสามารถตรวจพบตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้ถูกต้อง

5) ผลของความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมด

จากการศึกษาผลของความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในการนำวิธีการต่างๆ ไปใช้ในการตรวจหาความเสียหายในโครงสร้างจริง โดยอาจเกิดจากเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณการสั่นไหว ผลที่ได้พบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ไม่สามารถตรวจพบความเสียหายที่เกิดขึ้นได้เลย ไม่ว่าจะความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดจะมีค่าเป็นเท่าใด

เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดมีค่า 1 เปอร์เซ็นต์ พบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติเฟเนสสามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ถูกต้องแต่ความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบมีความผิดพลาดไปเล็กน้อย ในขณะที่วิธีเวคเตอร์แรงค้ำตรวจพบความเสียหายที่ผิดพลาดไปบ้าง โดยตรวจพบชิ้นส่วนอื่นที่ไม่เกิดความเสียหายด้วย

และเมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดมีค่าสูงขึ้นเป็น 2 เปอร์เซ็นต์จะเห็นได้ว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติเฟเนสเมตริกซ์ยังคงตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ถูกต้อง แต่ความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบมีความผิดพลาดมากขึ้น และวิธีเวคเตอร์แรงค้ำมีความผิดพลาดมากขึ้น โดยตรวจพบชิ้นส่วนอื่นที่ไม่ได้เกิดความเสียหายมากขึ้น

เมื่อเพิ่มความคลาดเคลื่อนให้กับความถี่และรูปร่างโหมดให้มีค่าสูงขึ้นอีกเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติเฟเนสมีตรวจพบความรุนแรงของความเสียหายผิดพลาดมากไปค่อนข้างมาก โดยตรวจพบความเสียหายเกิดขึ้นเกิน 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่น่าจะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ แต่วิธีนี้ก็ยังคงสามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ถูกต้องอยู่ ในขณะที่วิธีเวคเตอร์แรงค้ำยังคงไม่สามารถตรวจพบความเสียหายได้ถูกต้องนัก

ซึ่งจากการพิจารณาผลของความถี่และรูปร่างโหมดที่มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณหาค่า α_4 ในภาคผนวก ก. พบว่าความคลาดเคลื่อนของรูปร่างโหมดมีผลต่อความถูกต้องของผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสถิติเฟเนสเมตริกซ์มากกว่าความถี่ที่คลาดเคลื่อน ดังจะเห็นได้จากตาราง ก.1 และตาราง ก.2 ในภาคผนวก ก. ว่าแม้ความถี่ที่มีความคลาดเคลื่อน 5 เปอร์เซ็นต์จะมีค่าเพียง 2.628 Hz ซึ่งหากรูปร่างโหมดไม่มีความคลาดเคลื่อนก็ควรจะตรวจหาความเสียหายอยู่ในช่วง 20-30 เปอร์เซ็นต์ แต่ผลของความคลาดเคลื่อนของรูปร่างโหมดก็ทำให้ผลการตรวจหาความเสียหายที่ได้มีค่าผิดไปค่อนข้างมาก ดังรูปที่ 3.22 (หัวข้อ 3.4.5)

โดยสรุปแล้ว ผลของความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดมีผลทำให้วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสถิติเฟเนสเมตริกซ์ตรวจพบความรุนแรงของความเสียหายผิดพลาดไป เนื่องจากผลของรูปร่างโหมดที่คลาดเคลื่อนมากกว่าผลของความถี่ที่คลาดเคลื่อน แต่วิธีนี้ก็ยังคงสามารถตรวจหาตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ค่อนข้างถูกต้อง ในขณะที่ผลของความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดจะทำให้วิธีเวคเตอร์แรงค้ำงตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายผิดพลาดไป ทำให้ความรุนแรงที่ตรวจพบมีความผิดพลาดตามไปด้วย แต่ก็ยังถูกต้องกว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสถิติเฟเนสเมตริกซ์

บทที่ 4

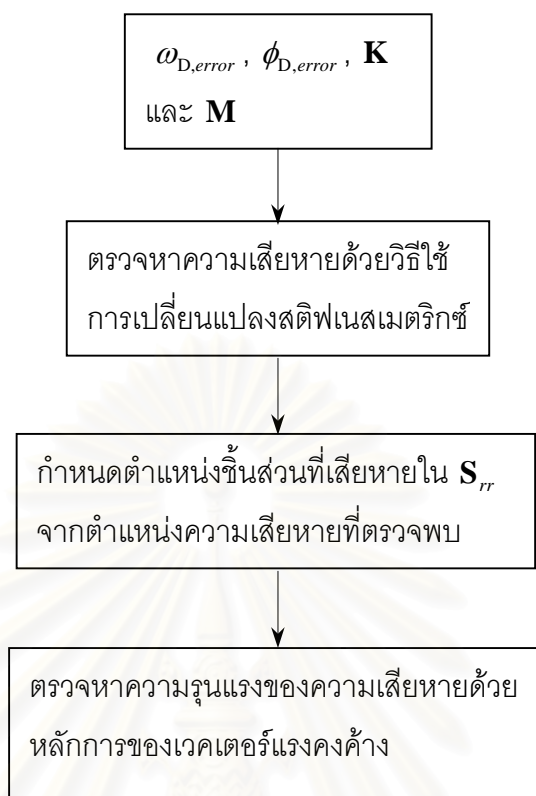
การปรับปรุงวิธีการตรวจหาความเสียหาย

4.1 วิธีการปรับปรุง

จากผลการศึกษาค้นคว้าต่างๆ ที่มีผลต่อการตรวจหาความเสียหายในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่า แต่ละวิธียังมีความผิดพลาดในการตรวจหาความเสียหายอยู่บ้าง โดยเฉพาะไม่มีผลของความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมด (หัวข้อ 3.4.1 - 3.4.4) จะพบว่าผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์มีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร ซึ่งจะเห็นได้ว่าการตรวจพบบางชิ้นส่วนมีสตีเฟนเนสเพิ่มขึ้น ในขณะที่วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนเนสเมตริกซ์และวิธีเวกเตอร์แรงค้ำมีผลการตรวจหาความเสียหายที่ถูกต้องแม่นยำมากกว่า

ในการตรวจหาความเสียหายในโครงสร้างจริง จะต้องทำการตรวจวัดสัญญาณการสั่นไหวของโครงสร้างที่จะทำการตรวจสอบ ซึ่งอาจมีสัญญาณรบกวนจากเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณการสั่นไหวปนเข้ามาด้วย ทำให้ความถี่และรูปร่างโหมดที่วิเคราะห์ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ถูกต้อง ซึ่งจากผลการศึกษาค้นคว้าของความคลาดเคลื่อนในความถี่และรูปร่างโหมด (หัวข้อ 3.4.5) จะพบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนเนสเมตริกซ์มีข้อดี คือสามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ค่อนข้างถูกต้อง แต่ความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบมีความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูงตามเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้น และวิธีเวกเตอร์แรงค้ำสามารถตรวจพบความรุนแรงของความเสียหายได้ถูกต้องมากกว่า แต่ตรวจพบชิ้นส่วนอื่นที่ไม่เกิดความเสียหายด้วย

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ว่า การตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีเวกเตอร์แรงค้ำนั้นแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกจะเป็นขั้นตอนในการตรวจหาตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย โดยใช้สมการที่ (2.30) จากนั้นทำการกำหนดตำแหน่งที่เกิดความเสียหายที่ตรวจพบลงในเมตริกซ์ S_{rr} แล้วทำการคำนวณหาความรุนแรงของความเสียหายตามขั้นตอนในรูปที่ 2.2 ซึ่งหากมีความคลาดเคลื่อนในความถี่และรูปร่างโหมดจะทำให้ตำแหน่งที่ตรวจพบมีความผิดพลาดไป ทำให้ความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบมีความผิดพลาดไปด้วย แต่จากข้อดีของวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนเนสเมตริกซ์ที่สามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ค่อนข้างถูกต้อง จึงจะทำการพัฒนาปรับปรุงวิธีการตรวจหาความเสียหาย โดยจะทำการตรวจหาตำแหน่งที่เกิดความเสียหายด้วยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนเนสเมตริกซ์ จากนั้นกำหนดตำแหน่งที่ตรวจพบลงในเมตริกซ์ S_{rr} แล้วทำการตรวจหาความรุนแรงของความเสียหายด้วยหลักการของวิธีเวกเตอร์แรงค้ำ ซึ่งขั้นตอนการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการที่ปรับปรุงขึ้นแสดงในรูปที่ 4.1

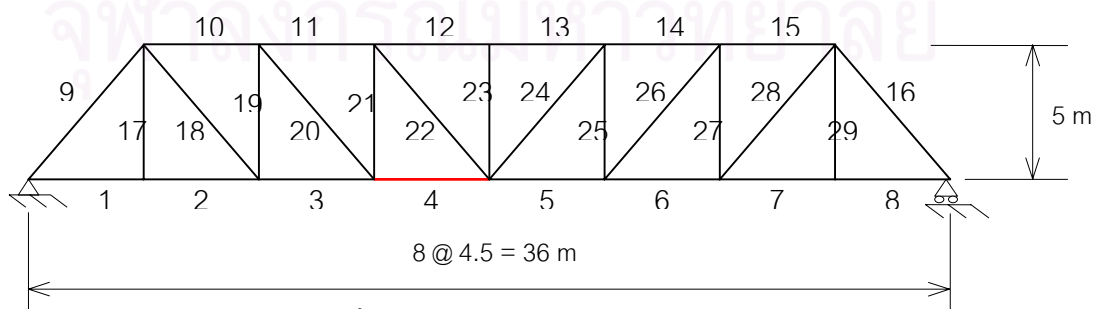


รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการที่ปรับปรุงขึ้น

4.2 การตรวจหาความเสียหาย

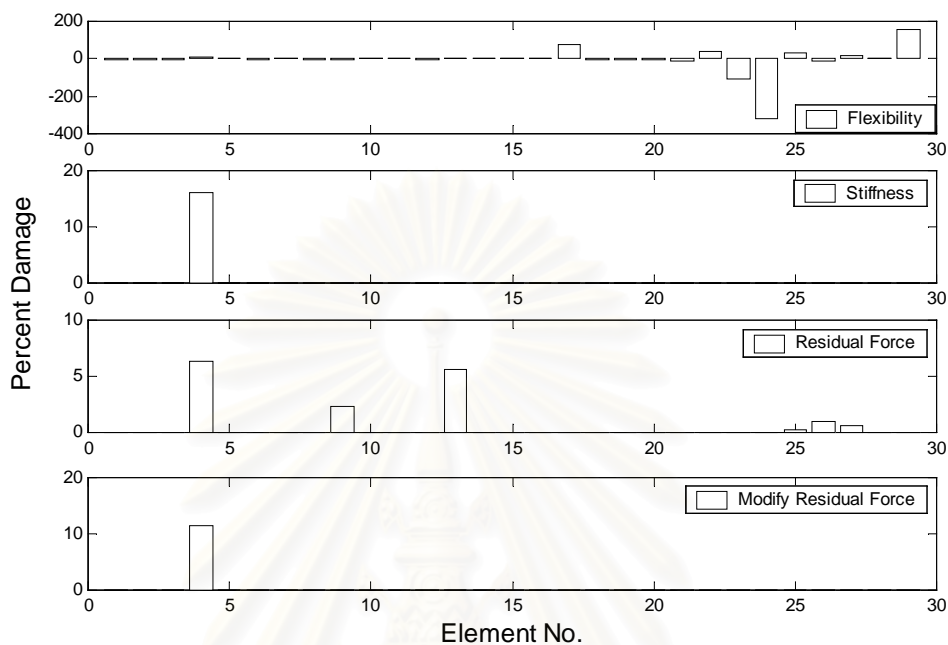
a) ความเสียหายเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 4

เพื่อศึกษาความถูกต้องของผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้น จึงได้ทำการตรวจหาความเสียหายในโครงข้อหมุน (รูปที่ 4.2) โดยกำหนดให้ชิ้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหายขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ และใช้ความถี่และรูปร่างโหมดที่มีความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.4.5

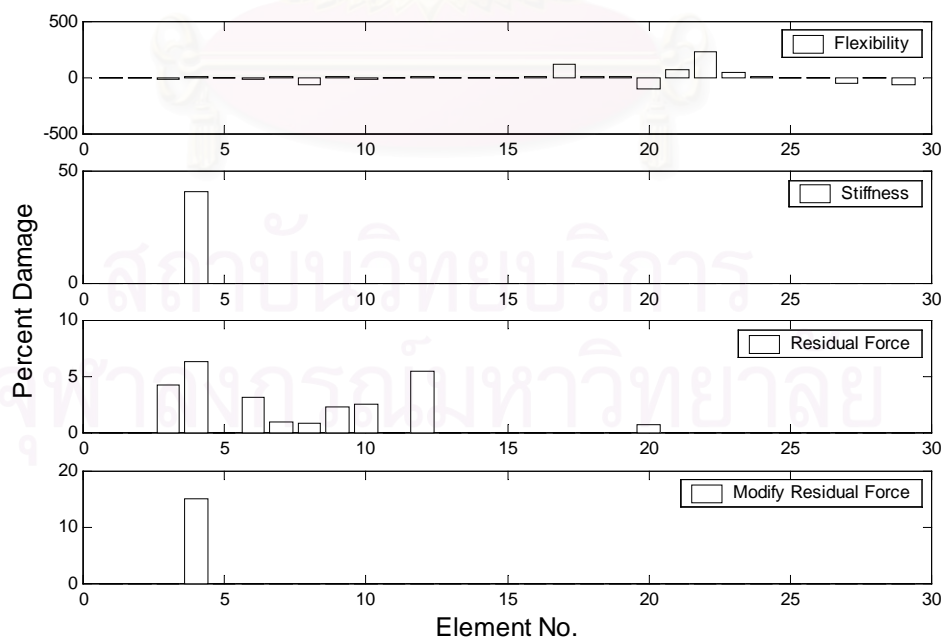


รูปที่ 4.2 แสดงชิ้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหายในโครงข้อหมุน

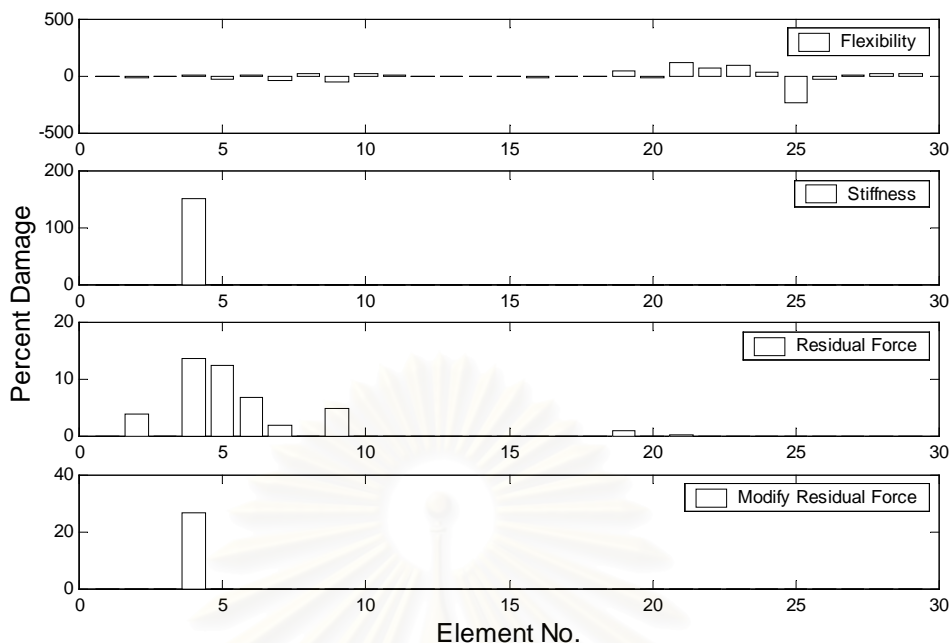
ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ และวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้น โดยใช้
โหมดที่ 1 เพียงโหมดเดียวในการคำนวณแสดงในรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 สำหรับความ
คลาดเคลื่อน 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และ
รูปร่างโหมดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.4 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และ
รูปร่างโหมดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.5 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์

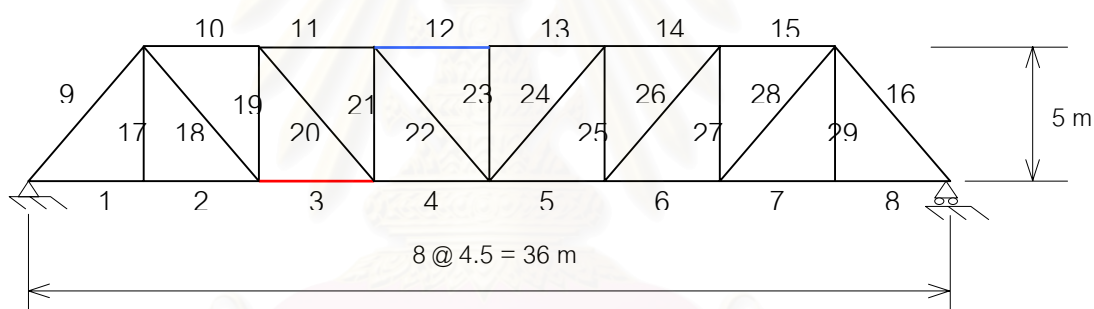
จากผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ และวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้น ในรูปที่ 4.3 - 4.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.3) วิธีการที่ปรับปรุงขึ้นสามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ดีกว่าวิธีเวกเตอร์แรงคงค้าง ทั้งนี้เนื่องจากได้กำหนดให้ชิ้นส่วนที่เสียหายมีเพียงชิ้นส่วนที่ 4 เพียงชิ้นส่วนเดียว โดยดูตำแหน่งชิ้นส่วนที่เสียหายจากวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ไม่ได้ใช้หลักการของวิธีเวกเตอร์แรงคงค้างในสมการที่ (2.30) และเมื่อกำหนดตำแหน่งชิ้นส่วนที่เสียหายเป็นชิ้นส่วนที่ 4 ลงในเมตริกซ์ S_{rr} แล้วตรวจหาความรุนแรงของความเสียหายด้วยวิธีเวกเตอร์แรงคงค้าง จะพบว่าความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบมีความถูกต้องใกล้เคียงกับความเสียหายที่กำหนดให้กับชิ้นส่วนที่ 4 (10 เปอร์เซ็นต์) มากกว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์

การตรวจหาความเสียหายเมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้ (รูปที่ 4.4) พบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ยังสามารถตรวจพบตำแหน่งชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายขึ้นได้ แต่ความรุนแรงของความเสียหายมีความผิดพลาดค่อนข้างสูงมาก และวิธีเวกเตอร์แรงคงค้างตรวจพบชิ้นส่วนอื่นที่ไม่ได้เกิดความเสียหายหลายชิ้นส่วนด้วยกัน แต่วิธีที่ปรับปรุงขึ้นสามารถตรวจพบตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้ถูกต้องใกล้เคียงกับความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ดีกว่าทั้งวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์และวิธีเวกเตอร์คงค้าง

เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.5) จะพบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนเมตริกซ์ยังคงสามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ แต่ความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบนั้นมีความผิดพลาดสูงมากโดยตรวจพบความเสียหายสูงเกินกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่น่าจะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้วิธีการที่ปรับปรุงขึ้นในการตรวจหาความเสียหายจะพบว่าตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

b) ความเสียหายเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 3 และ 12

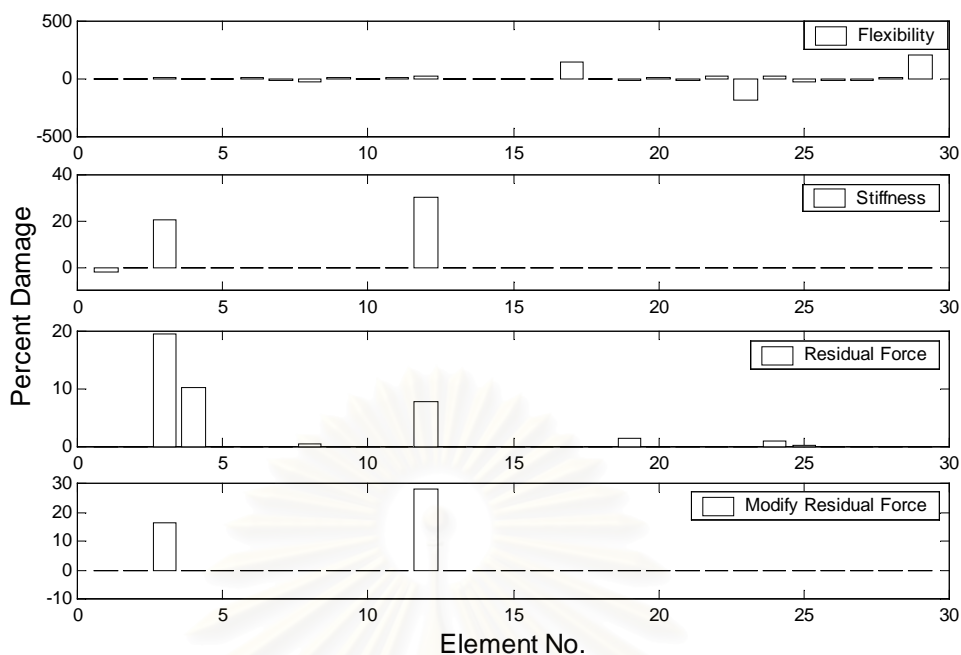
นอกจากจะกำหนดให้ชิ้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหายแล้ว ยังจะทำการเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย โดยกำหนดให้ชิ้นส่วนที่ 3 และ 12 (รูปที่ 4.6) มีความเสียหายเกิดขึ้น 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เพื่อศึกษาความถูกต้องของการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้น



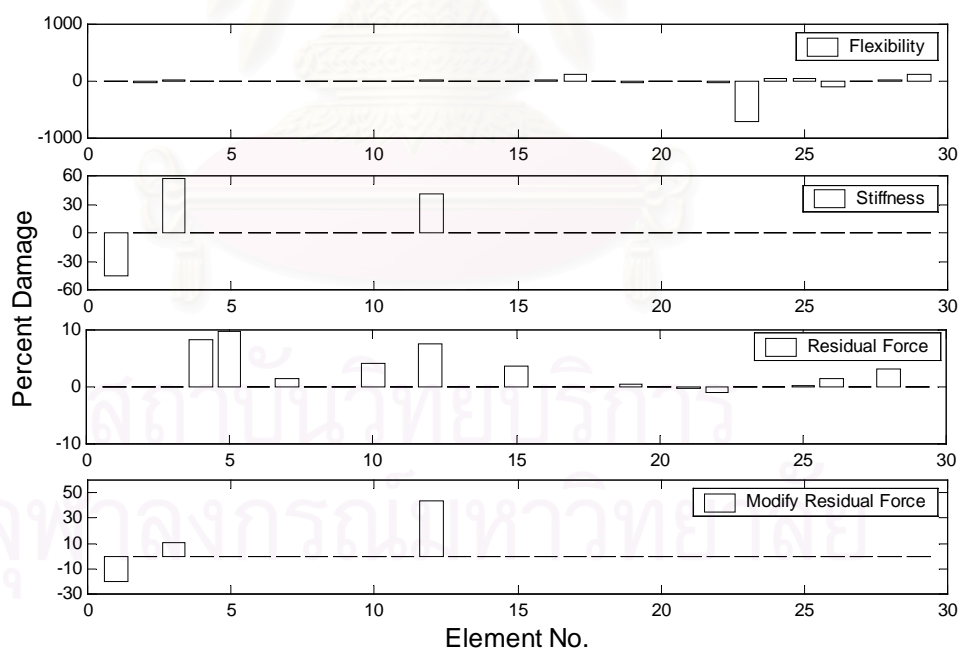
รูปที่ 4.6 แสดงชิ้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหายในโครงข้อหมุน

จากนั้นทำการสร้างความคลาดเคลื่อนให้กับความถี่และรูปร่างโหมดขึ้นใหม่ แล้วใช้ความถี่และรูปร่างโหมดที่มีความคลาดเคลื่อนที่สร้างขึ้นนี้ในการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ และวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้นอีกครั้ง

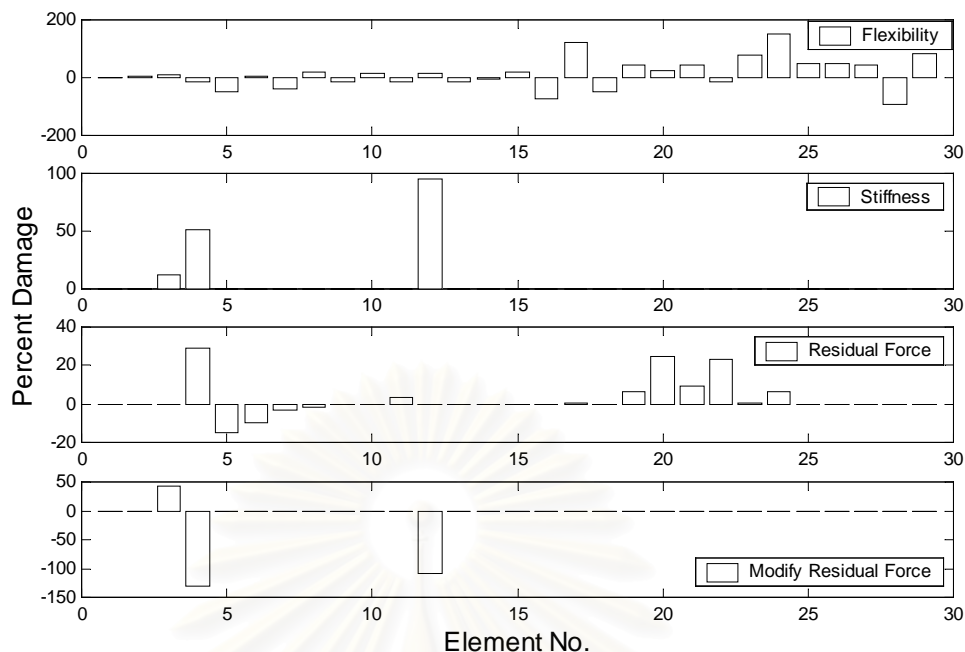
ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ และวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้น โดยใช้ 2 โหมดในการคำนวณ แสดงในรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 สำหรับความคลาดเคลื่อน 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ (ชิ้นส่วนที่ 3 เสียหาย 10 เปอร์เซ็นต์, ชิ้นส่วนที่ 12 เสียหาย 20 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 4.8 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ (ชิ้นส่วนที่ 3 เสียหาย 10 เปอร์เซ็นต์, ชิ้นส่วนที่ 12 เสียหาย 20 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 4.9 ผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ (ชิ้นส่วนที่ 3 เสียหาย 10 เปอร์เซ็นต์, ชิ้นส่วนที่ 12 เสียหาย 20 เปอร์เซ็นต์)

จากผลการตรวจหาความเสียหายที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 3 (10 เปอร์เซ็นต์) และชิ้นส่วนที่ 12 (20 เปอร์เซ็นต์) เมื่อความคลาดเคลื่อนสูงสุดของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.7) นั้นจะพบว่าวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้นนั้นยังคงสามารถตรวจพบความเสียหายได้ดีกว่าทั้งวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ และวิธีเวคเตอร์คังคัง โดยจะเห็นว่าวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้นสามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ดีกว่าวิธีเวคเตอร์แรงคังคัง และความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบก็มีความถูกต้องใกล้เคียงกับความเสียหายที่กำหนดให้มากกว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ผลการตรวจหาความเสียหายที่ได้ (รูปที่ 4.8 และ 4.9) พบว่าวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้น ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ถูกต้องอยู่พอสมควร โดยเมื่อความคลาดเคลื่อนเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ วิธีการปรับปรุงขึ้นตรวจพบว่าชิ้นส่วนที่ 1 มีความเสียหายติดลบด้วย แต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่ 3 และ 12 ก็ยังคงสามารถตรวจพบความเสียหายที่มีความถูกต้องมากกว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสเมตริกซ์ แต่เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าวิธีการที่ปรับปรุงขึ้นตรวจพบความเสียหายที่มีความผิดพลาดค่อนข้างสูงมาก โดยตรวจพบความเสียหายที่มีค่าติดลบในชิ้นส่วนที่ 4 และ 12 ด้วย

สาเหตุที่ทำให้วิธีการที่ปรับปรุงขึ้นตรวจพบความรุนแรงของความเสียหายที่ผิดพลาดไปค่อนข้างมากนั้นก็เพราะในขั้นตอนการตรวจหาความเสียหายด้วยหลักการของวิธีเวคเตอร์แรงคงค่านั้น จะทำการคำนวณสถิติเฟสเมตริกซ์ของแต่ละชิ้นส่วนขึ้นมาใหม่ไปเรื่อยๆ (ในแต่ละรอบของการคำนวณ) จนกระทั่งทำให้ความถี่และรูปร่างโหมดที่คำนวณจากสถิติเฟสเมตริกซ์ที่คำนวณใหม่มีค่าตรงกับความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหาย ซึ่งถ้ายังไม่ตรงก็จะต้องทำการคำนวณซ้ำไปเรื่อยๆ ดังนั้นผลของความคลาดเคลื่อนที่กำหนดให้เกิดขึ้นกับความถี่และรูปร่างโหมดจึงเป็นสาเหตุทำให้ตรวจพบความเสียหายที่ผิดพลาดไป

เมื่อชิ้นส่วนที่ 3 และ 12 เกิดความเสียหาย 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความถี่ของโครงสร้าง 2 โหมดแรกมีค่าเป็น 2.638 Hz และ 5.959 Hz และความถี่ของโครงสร้างที่เสียหายที่มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ 2 โหมดแรก มีค่าเป็น 2.743 Hz และ 5.887 Hz ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถี่โหมดที่ 1 มีค่าสูงกว่าความถี่ของโครงสร้างที่ไม่เสียหายจึงทำให้ตรวจพบความเสียหายที่เกิดขึ้นมีค่าติดลบ โดยตรวจพบความเสียหายในชิ้นส่วนที่ 3, 4 และ 12 เป็น 43.7, -130.4 และ -107.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และหากกำหนดให้ชิ้นส่วนดังกล่าวมีสถิติเฟสเป็นตามที่ตรวจพบ แล้วทำการคำนวณความถี่ออกมา จะพบว่าความถี่ของโครงสร้าง 2 โหมดแรกมีค่าเป็น 2.742 Hz และ 5.887 Hz ซึ่งมีค่าที่ตรงกับความถี่ของโครงสร้างที่มีกำหนดให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น 5 เปอร์เซ็นต์ จึงเป็นสาเหตุให้ความเสียหายที่ตรวจพบมีความผิดพลาดไป

4.3 สรุปผล

การตรวจหาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่ 4 ด้วยวิธีการต่างๆ และวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้น จะพบว่าวิธีการที่ปรับปรุงขึ้นสามารถตรวจพบความเสียหายได้ดีขึ้นกว่าทั้งวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสถิติเฟสและวิธีเวคเตอร์แรงคงค่าง โดยเมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมด เป็น 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ วิธีการที่ปรับปรุงขึ้นสามารถตรวจพบตำแหน่งความเสียหายได้ดีกว่าวิธีเวคเตอร์แรงคงค่าง และความรุนแรงที่ตรวจพบก็ถูกต้องกว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสถิติเฟสเมตริกซ์ แต่ความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบก็จะมีค่าผิดพลาดมากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดที่สูงขึ้น

เมื่อกำหนดให้ชิ้นส่วนที่ 3 และ 12 มีความเสียหายเป็น 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะพบว่าเมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดเป็น 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ วิธีการที่ปรับปรุงขึ้นสามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ดีกว่าวิธีเวคเตอร์แรงคงค่าง และความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบมีความผิดพลาดไปบ้างแต่ก็ยังคงมีค่าถูกต้องใกล้เคียง

เคียงกับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงมากกว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสถิติเฟเนสมเมตริกซ์ แต่เมื่อความคลาดเคลื่อนเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ วิธีการที่ปรับปรุงขึ้นมีความผิดพลาดค่อนข้างมาก โดยตรวจพบขึ้นส่วนที่มีความเสียหายติดลบ

วิธีการที่ปรับปรุงขึ้นนั้นใช้หลักการของวิธีเวคเตอร์แรงคงค้างในการตรวจหาความรุนแรงของความเสียหาย ซึ่งจะทำการคำนวณสถิติเฟเนสมเมตริกซ์ที่ทำให้ความถี่และรูปร่างโหมดตรงกับความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหาย โดยจะทำการคำนวณเฉพาะในชั้นส่วนที่กำหนดลงในเมตริกซ์ S_{rr} เท่านั้น ดังนั้นเมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดมีค่าน้อยวิธีการที่ปรับปรุงขึ้นจึงยังคงสามารถตรวจพบความรุนแรงของความเสียหายได้ค่อนข้างถูกต้อง แต่ความผิดพลาดจะสูงขึ้นตามความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดที่สูงขึ้น ดังกล่าว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการเปรียบเทียบวิธีการตรวจหาความเสียหาย

วิธีการตรวจหาความเสียหายที่ได้ทำการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงสถิติพหุเมตริกซ์ วิธีการใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซ์บิลิตีเมตริกซ์ และวิธีเวกเตอร์แรงค้ำ จากการศึกษาวิจัยที่ใช้แต่ละวิธีในการตรวจหาความเสียหายจะเห็นได้ว่าสามารถตรวจหาตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้อย่างถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามยังไม่ได้มีการนำทั้ง 3 วิธีมาศึกษาเปรียบเทียบกัน ทำให้ไม่สามารถบอกได้ถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้กับโครงข้อมุมุน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำทั้ง 3 วิธีนี้มาใช้ในการตรวจหาความเสียหายในโครงข้อมุมุน เพื่อให้ทราบถึงข้อจำกัดของแต่ละวิธี ซึ่งจะช่วยให้สามารถพัฒนาและปรับปรุงวิธีการตรวจหาความเสียหายให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจหาความเสียหาย โดยปัจจัยที่พิจารณาได้แก่ ความรุนแรงของความเสียหาย จำนวนโหมดที่ใช้ในการคำนวณ ผลของความเสียหายที่มีความสมมาตร จำนวนชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย และผลของความคลาดเคลื่อนในค่าและรูปร่างโหมด โดยผลที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

จากการศึกษาผลของความรุนแรงของความเสียหาย โดยกำหนดให้จำนวนโหมดที่ใช้คงที่ จะพบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซ์บิลิตีเมตริกซ์นั้นจะสามารถตรวจพบความเสียหายที่มีค่าน้อยๆ ได้เมื่อชิ้นส่วนนั้นเป็นชิ้นส่วนที่มีเซนซิวิตีที่ค่อนข้างสูง แต่ถ้าชิ้นส่วนที่เสียหายมีเซนซิวิตีที่ค่อนข้างต่ำจะต้องมีความเสียหายที่มากพอสมควรจึงจะสามารถตรวจพบได้ นอกจากนี้ยังตรวจพบว่าบางชิ้นส่วนมีความเสียหายติดลบซึ่งหมายความว่าชิ้นส่วนดังกล่าวมีสถิติพหุเมตริกซ์สูง ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้จำนวนโหมดในการคำนวณที่น้อยเกินไปทำให้เมื่อแก้สมการด้วยวิธี Pseudo-inverse technique จึงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสถิติพหุเมตริกซ์สามารถตรวจพบความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องแม้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย และไม่ว่าชิ้นส่วนที่เสียหายจะมีเซนซิวิตีที่สูงหรือต่ำก็ตาม ในขณะที่วิธีเวกเตอร์แรงค้ำก็สามารถตรวจพบความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ถูกต้องแม้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยๆ ก็ตาม แต่เมื่อความเสียหายมีค่าสูงมากๆ วิธีนี้ไม่สามารถตรวจพบความเสียหายได้เนื่องจาก เวกเตอร์ $r_D^{(i)}$ ในขั้นตอนของการตรวจหาความเสียหาย

หายไม่ลู่เข้า แต่อย่างไรก็ดีในโครงสร้างจริงความเสี่ยงจะค่อยๆ เกิดขึ้นทำให้สามารถตรวจพบได้ก่อนที่ความเสี่ยงจะมีค่าสูงเกินไป

เมื่อลดจำนวนโหมดที่ใช้ในการคำนวณลงเรื่อยๆ จะพบว่าทั้ง 3 วิธียังสามารถตรวจพบความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนที่มีเซนซิวิตีสูงได้ แม้จะใช้เพียงโหมดที่ 1 โหมดเดียวในการคำนวณ แต่เมื่อชั้นส่วนที่เสียหามีเซนซิวิตีที่ต่ำจะพบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสถิติพเนสมetriks์และวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกชิบิลิตีเมตริกส์ต้องใช้จำนวนโหมดมากขึ้นในการคำนวณจึงจะสามารถตรวจพบความเสี่ยงได้ถูกต้อง ในขณะที่วิธีเวคเตอร์แรงค้งค้งนั้นยังคงสามารถตรวจหาความเสี่ยงที่เกิดขึ้นได้แม้จะใช้เพียงโหมดที่ 1 โหมดเดียวเท่านั้นในการคำนวณและไม่ว่าชั้นส่วนที่เสียหามีเซนซิวิตีที่สูงหรือต่ำก็ตาม

จากการศึกษาผลของความเสี่ยงที่มีความสมมาตรพบว่า ไม่มีผลต่อการตรวจหาความเสี่ยงของแต่ละวิธี โดยที่ทั้ง 3 วิธียังคงตรวจหาความเสี่ยงที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องแม้ว่าจะกำหนดให้ชั้นส่วนที่เสียหามีความสมมาตรกันก็ตาม

จำนวนชั้นส่วนที่เสียหายที่มากขึ้นทำให้แต่ละวิธีต้องใช้จำนวนโหมดที่มากขึ้นในการคำนวณ จึงจะสามารถตรวจพบความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในทุกชั้นส่วนที่เสียหายได้อย่างถูกต้อง

ปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดทำการศึกษาโดยใช้ความถี่และรูปร่างโหมดที่ไม่มี ความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในการตรวจหาความเสี่ยง แต่ในการตรวจหาความเสี่ยงในโครงสร้างจริงนั้นจะต้องทำการตรวจวัดสัญญาณการสั่นไหวของโครงสร้างที่จะทำการตรวจสอบ แล้วนำมาวิเคราะห์หาความถี่และรูปร่างโหมด ซึ่งสัญญาณการสั่นไหวที่วัดได้อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณการสั่นไหวปนเข้ามา ทำให้ความถี่และรูปร่างโหมดที่วิเคราะห์ได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งจากการศึกษาผลของความคลาดเคลื่อนในความถี่และรูปร่างโหมดที่ทำในงานวิจัยนี้พบว่า วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกชิบิลิตีเมตริกส์ไม่สามารถตรวจพบความเสี่ยงที่เกิดขึ้นได้เลยไม่ว่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเป็นเท่าใดก็ตาม

วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสถิติพเนสมetriks์สามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสี่ยงได้อย่างถูกต้อง แต่ความรุนแรงของความเสี่ยงที่ตรวจพบมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ถูกต้องและมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นตามความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดที่สูงขึ้น ในขณะที่วิธีเวคเตอร์แรงค้งค้งมีความคลาดเคลื่อนพอสมควรโดยตรวจพบชั้นส่วนอื่นที่ไม่ได้เกิดความเสี่ยงด้วย แต่ความรุนแรงที่ตรวจพบมีค่าที่ค่อนข้างถูกต้อง

ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลของความถี่และรูปร่างโหมดที่มีความคลาดเคลื่อนต่อการคำนวณหาค่าความเสียหายสัมพัทธ์ของชิ้นส่วนที่ 4 ในภาคผนวก ก. พบว่ารูปร่างโหมดที่มีความคลาดเคลื่อนจะมีผลต่อความถูกต้องของผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนสมเมตริกซ์มากกว่าผลของความถี่ที่คลาดเคลื่อน

5.2 สรุปผลการปรับปรุงวิธีการตรวจหาความเสียหาย

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการต่างๆ จะเห็นได้ว่า เมื่อมีความคลาดเคลื่อนในความถี่และรูปร่างโหมด วิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนสมเมตริกซ์มีข้อดีคือ สามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้ถูกต้องแต่ความรุนแรงของความเสียหายมีความผิดพลาดไป ขณะที่วิธีเวกเตอร์แรงคงค้ำซึ่งสามารถคำนวณหาความรุนแรงของความเสียหายได้ค่อนข้างถูกต้องกว่า จึงได้ทำการปรับปรุงวิธีการตรวจหาความเสียหายโดยจะทำการตรวจหาความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างด้วยวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนสมเมตริกซ์ จากนั้นทำการกำหนดตำแหน่งที่ตรวจพบลงในเมตริกซ์ S_{rr} แล้วทำการตรวจหาระดับความรุนแรงของความเสียหายโดยใช้หลักการของวิธีเวกเตอร์แรงคงค้ำ

จากนั้นทำการตรวจหาความเสียหายที่เกิดขึ้นอีกครั้ง ซึ่งจากผลการตรวจหาความเสียหายด้วยวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้นพบว่า เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดมีน้อย วิธีการที่ปรับปรุงขึ้นสามารถตรวจหาความเสียหายได้ถูกต้องมากกว่าทั้งวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสตีเฟนสมเมตริกซ์และวิธีเวกเตอร์แรงคงค้ำ แต่เมื่อความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงขึ้นวิธีการที่ปรับปรุงขึ้นก็ตรวจพบความรุนแรงของความเสียหายที่ค่อนข้างผิดพลาด ทั้งนี้เนื่องมาจากในขั้นตอนของการตรวจหาความรุนแรงของความเสียหายซึ่งใช้หลักการของวิธีเวกเตอร์แรงคงค้ำนั้น จะทำการคำนวณสตีเฟนสมเมตริกซ์ที่ทำให้ความถี่และรูปร่างโหมดมีค่าตรงกับความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหาย ดังนั้นเมื่อความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหายมีความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างมากจึงทำให้ความเสียหายที่ตรวจพบมีความผิดพลาดค่อนข้างมาก แต่หากความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีค่าน้อย ความรุนแรงของความเสียหายที่ตรวจพบก็มีความผิดพลาดเล็กน้อยด้วย

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการตรวจหาความเสียหายในโครงข้อหมุนจากสัญญาณการสั่นไหว ซึ่งได้ทำการจำลองโครงข้อหมุนขึ้นในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาความถี่และรูปร่างโหมดของทั้งโครงสร้างจริงและโครงสร้างที่เสียหาย โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่น่าจะมีผลต่อความถูกต้องของผลการตรวจหาความเสียหาย อีกทั้งยังได้พยายามเลือกชิ้นส่วนที่ใช้ในการศึกษาให้มีความครอบคลุมชิ้นส่วนทั้งหมด เพื่อให้ข้อสรุปที่ได้ยังคงเป็นจริงแม้ชิ้นส่วนที่เสียหายจะไม่ตรงกับชิ้นส่วนที่กำหนดให้เกิดความเสียหายขึ้นในการศึกษาครั้งนี้

อย่างไรก็ดี น่าจะได้มีการนำเอาวิธีการตรวจหาความเสียหายต่างๆ รวมทั้งวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้นไปใช้ในการตรวจหาความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจริง โดยอาจจะต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณการสั่นไหวให้มีจำนวนที่เพียงพอ และควรจะได้มีการตรวจวัดหลายๆ ครั้งจนสัญญาณที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์หาความถี่และรูปร่างโหมดจะทำให้ได้ความถี่และรูปร่างโหมดที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดด้วย โดยจากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า หากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยๆ แล้ว วิธีการที่ปรับปรุงขึ้นจะสามารถตรวจพบตำแหน่งและความรุนแรงของความเสียหายได้ค่อนข้างถูกต้อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- Allemang R.J. and Brown D.L. 1982. A correlation coefficient for modal vector analysis. Proceedings of the 1st IMAC, Orlando.
- Anifantis N., Aspragathos N. and Dimarogonas A. 1983. Diagnosis of cracks due to earthquakes by vibration response analysis. Proceeding of the 3rd Symp. of the IMEKO Technical Committee on Technical Diagnostics, Technical Committee 10, Int. Measurement Confederation, Budapest, Hungary : 457-459.
- Biswas M., Pandey A.K. and Samman M.M. 1991. Diagnostic experimental spectral/modal analysis of a highway bridge. Int. J. Analy. And Exp. Modal Analysis 5(1) : 33-42.
- Brownjohn J.M.W. 1988. Assessment of structural integrity by dynamic measurements. Ph.D thesis, Department of Civil Engineering, University of Bristol, Bristol.
- Cawley P. and Adams R.D. 1979. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. Journal of Strain Analysis 4(2) : 49-57.
- Collins J.D., Hart G.C., Hasselman T.K. and Kennedy B. 1974. Statistical Identification of Structures. AIAA Journal 12(2) : 185-190.
- Eggers D.W. and Stubbs N. 1994. Structural assessment using modal analysis techniques. Proceedings of the 12th IMAC, Honolulu, Hawaii 2 : 1595-1601.
- Feng W.Q., Zhang K.Y. and Wu X.Y. 1989. Research on the change of modal parameters of a beam resulted from a slot. Proceeding of the 7th IMAC, Las Vegas.
- Ju F.D., and Mimovich M. 1986. Modal frequency method in diagnosis of fracture damage in structures. Proceeding of the 4th IMAC, Los Angeles 2 : 1169-1174.
- Kim J.T. and Stubbs N. 1995. Model-Uncertainty impact and damage-detection accuracy in plate girder. Journal of Structural Engineering, ASCE 121(10) : 1409-1417.
- Kosmatka J.B. and Ricles J.M. 1999. Damage detection in structures by modal vibration characterization. Journal of Structural Engineering, ASCE 125(12) : 1384-1392.

- Law S.S., Xun L. and Ward K.S. 1990. A vibrational technique for structural stiffness identification. in Proceedings, International Conference on Vibration Problems in Engineering, Wuhan-Chungqing 1 : 683-698.
- Lieven N.A.J. and Ewins D.J. 1988. Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC). Proceedings of the 6th IMAC.
- Marassi A. and Rovere N. 1997. Localizing a notch in a steel frame from frequency measurements. Journal of Engineering Mechanics, ASCE 123(5) : 422-432.
- Mazurek D.F. and DeWolf J.T. 1990. Experimental study of bridge monitoring technique. Journal of Structural Engineering, ASCE 116(9) : 2532-2549.
- Pandey A.K., Biswas M. and Samman M.M. 1991. Damage detection from changes in curvature mode shapes. Journal of Sound and Vibration 145(2) : 321-332.
- Pandey A.K. and Biswas M. 1995. Damage Diagnosis of Truss Structures by Estimation of Flexibility Change. Modal Analysis: the International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis 10(2) : 104-117.
- Penny J.E.T., Wilson D.A.L. and Friswell M.I. 1993. Damage detection in structures using vibration data. Proceeding of the 11th IMAC, Kissimmee, Florida 2 : 861-867.
- Qain G.L., Gu S.N. and Jiang J.S. 1990. The dynamic behavior and crack detection of a beam with crack. Journal of Sound and Vibration 138(2) : 233-243.
- Ricles J.M. and Kosmatka J.B. 1992. Damage Detection in Elastic Structures Using Vibratory Residual Forces and Weighted Sensitivity. AIAA Journal 30(9) : 2310-2316.
- Rizos P.F. and Aspragathos N. 1990. Identification of crack location and magnitude in cantilever beam from the vibration modes. Journal of Sound and Vibration 138(3) : 381-388.
- Salane H.J. and Baldwin J.W. 1990. Identification of modal properties of bridges. Journal of Structural Engineering, ASCE 116(7) : 2008-2021.
- Salawu O.S. 1997. An integrity index method for structural assessment of engineering structures using modal testing. Insight: the Journal of the British Institute of Non-Destructive Testing 39(1).
- Salawu O.S. and Williams C. 1995. Bridge assessment using forced-vibration testing. Journal of Structural Engineering, ASCE 121(2) : 161-173.

- Stubbs N. and Osegueda R. 1990. Global non- destructive damage evaluation in solids. Int. J. Analytical and Exp. Modal Analysis 5(2) : 67-80.
- Topole K.G. and Stubbs, N. 1995. Non-destructive damage evaluation of a structure from limited modal parameters. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics 24 : 1427-1436.
- Tseng S.S. 2000. Damage assessment of linear structures by a static approach, I: Theory and formulation. Journal of Structural Engineering and Mechanics 9(2) : 181-193.
- Tseng S.S. 2000. Damage assessment of linear structures by a static approach, II: Numerical simulation studies. Journal of Structural Engineering and Mechanics 9 (2) : 195-208.
- Uzgider Z., Sanli A.K., Piroglu F. and Caglayan D.B. 1993. Identification of railway bridges using locomotive-induced vibrations. in Bridge Management 2 (edited J.E. Harding, G.A.R. Parke and M.J. Ryall), Thomal Telford, London 833-841.
- Wolff T. and Richardson M. 1989. Fault detection in structures from change in their modal parameters. Proceeding of the 7th IMAC, Las Vegas 1 : 87-94.
- Yao G.C., Chang K.C. and Lee G.C. 1992. Damage dianosis of steel frames using vibrational signature analysis. Journal of Engineering Mechnics, ASCE 118(9) : 1949-1961.
- Yuen M.M.F. 1985. A numerical study of the eigenparameter of a damaged cantilever. Journal of Sound and Vibration 103(3) : 301-310.
- Zhang K.Y., Gu A.J. and Li J.W. 1992. Diagnosis of a slot fault on a frame structure. Proceeding of the 10th IMAC, San Diego, California 1 : 549-553.
- Zhao J. and DeWolf J.T. 1999. Sensitivity study for vibration parameters used in damage detection. Journal of Structural Engineering, ASCE 125(4) : 410-416.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ในการศึกษาผลของความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมด เมื่อความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมดมีค่าเป็น 5 เปอร์เซ็นต์นั้น ผลที่ได้จากการศึกษา (รูปที่ 3.22) พบว่าวิธีใช้การเปลี่ยนแปลงสถิติเฟสเมตริกซ์ ตรวจสอบความรุนแรงของความเสียหายผิดพลาดไปค่อนข้างมาก โดยตรวจสอบความเสียหายที่ชิ้นส่วนที่ 4 มีค่าถึง 150.6 เปอร์เซ็นต์ซึ่งในทางปฏิบัติไม่น่าจะเกิดขึ้นได้ ทั้งๆ ที่ความคลาดเคลื่อนมีค่าเพียง 5 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.7) ซึ่งนำมาเขียนอีกครั้งในสมการที่ (ก.1)

$$\frac{\sum_{j=1}^{NE} \phi_{D_i}^T \mathbf{K}_j \phi_{D_i} \alpha_j}{\phi_{D_i}^T \mathbf{K} \phi_{D_i}} = \frac{\omega_{D_i}^2}{\phi_{D_i}^T \mathbf{K} \phi_{D_i}} - 1 \quad (\text{ก.1})$$

สมการที่ (ก.1) เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความเสียหายสัมพัทธ์ (α_j) ซึ่งจากผลการตรวจหาความเสียหายที่ได้จะสังเกตว่าค่าความเสียหายสัมพัทธ์ที่ชิ้นส่วนที่ 4 (α_4) เท่านั้นที่มีค่า ส่วนชิ้นส่วนอื่นมีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด และเมื่อใช้เพียงโหมดที่ 1 เท่านั้นในการคำนวณ จะสามารถเขียนสมการ (ก.1) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{\phi_{D_1}^T \mathbf{K}_4 \phi_{D_1}}{\phi_{D_1}^T \mathbf{K} \phi_{D_1}} \alpha_4 = \frac{\omega_{D_1}^2}{\phi_{D_1}^T \mathbf{K} \phi_{D_1}} - 1 \quad (\text{ก.2})$$

โดยที่ ω_{D_1} และ ϕ_{D_1} คือ ความถี่และรูปร่างโหมดของโหมดที่ 1 ของโครงสร้างที่เสียหาย ตามลำดับ, \mathbf{K}_4 คือ สถิติเฟสเมตริกซ์ของชิ้นส่วนที่ 4 ซึ่งยังไม่เสียหาย และ \mathbf{K} คือ สถิติเฟสเมตริกซ์ของโครงสร้างเดิมที่ยังไม่เสียหาย

จากสมการ (ก.2) จะสามารถคำนวณหาค่า α_4 ได้ดังนี้

$$\alpha_4 = \frac{A-B}{C} \quad (\text{ก.3})$$

โดยที่ $A = \omega_{D_1}^2$, $B = \phi_{D_1}^T \mathbf{K} \phi_{D_1}$ และ $C = \phi_{D_1}^T \mathbf{K}_4 \phi_{D_1}$

ผลการคำนวณหาค่าความเสียหายสัมพัทธ์ของชิ้นส่วนที่ 4 สำหรับในกรณีที่ไม่มีความคลาดเคลื่อน แสดงในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ผลการคำนวณหาค่าความเสียหายสัมพัทธ์ของชั้นส่วนที่ 4 สำหรับในกรณีที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมด

Percent Damage	A	B	C	$\alpha_4 = \frac{A-B}{C}$
5	281.39	282.95	31.17	-0.05
10	279.75	283.19	34.41	-0.10
15	277.94	283.67	38.18	-0.15
20	275.92	284.44	42.61	-0.20
30	271.12	287.35	54.10	-0.30
50	256.64	305.06	96.85	-0.50
70	227.50	380.53	218.60	-0.70

ในการศึกษาผลของความคลาดเคลื่อนของความถี่และรูปร่างโหมด ได้กำหนดให้ชั้นส่วนที่ 4 เกิดความเสียหายขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นคำนวณหาความถี่และรูปร่างโหมดของโครงสร้างที่เสียหาย (ω_D และ ϕ_D) แล้วทำการกำหนดให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ซึ่งทำให้ผลการคำนวณหา α_4 มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น โดยผลการคำนวณแสดงในตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ผลการคำนวณหาค่าความเสียหายสัมพัทธ์ของชั้นส่วนที่ 4 (เสียหาย 10%) เมื่อมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในความถี่และรูปร่างโหมด

Error	A	B	C	$\alpha_4 = \frac{A-B}{C}$
0%	279.75	283.19	34.41	-0.10
1%	279.06	284.97	36.63	-0.161
2%	277.11	292.82	38.24	-0.411
5%	272.56	330.90	38.74	-1.506

ภาคผนวก ข

ซอร์สโค้ดโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 5.3 ที่ใช้ในการตรวจหาความเสียหาย

1. Main Program

```

clear;close all;

tic;

%-----
%%% Control Input %%%%
%-----

nel=29;    % number of elements
nnel=2;    % number of nodes per element
ndof=2;    % number of dofs per node
nnode=16;  % total number of nodes in system
s dof=nnode*ndof; % total system dofs
%-----
%%% Nodal Coordinate %%%%
%-----
gcoord(1,1)=0;  gcoord(1,2)=0;
gcoord(2,1)=4.5; gcoord(2,2)=0;
gcoord(3,1)=4.5; gcoord(3,2)=5;
gcoord(4,1)=9;  gcoord(4,2)=5;
gcoord(5,1)=9;  gcoord(5,2)=0;
gcoord(6,1)=13.5; gcoord(6,2)=0;
gcoord(7,1)=13.5; gcoord(7,2)=5;
gcoord(8,1)=18;  gcoord(8,2)=5;
gcoord(9,1)=18;  gcoord(9,2)=0;
gcoord(10,1)=22.5; gcoord(10,2)=0;
gcoord(11,1)=22.5; gcoord(11,2)=5;
gcoord(12,1)=27;  gcoord(12,2)=5;
gcoord(13,1)=27;  gcoord(13,2)=0;
gcoord(14,1)=31.5; gcoord(14,2)=0;
gcoord(15,1)=31.5; gcoord(15,2)=5;
gcoord(16,1)=36;  gcoord(16,2)=0;
%-----
%%% Material Properties %%%%
%-----
prop(1)=2e10;  % elastic modulus
prop(2)=0.1;  % cross-sectional area
prop(3)=7860; % density
%-----
%%% Nodal Connectivity %%%%
%-----
nodes(1,1)=1; nodes(1,2)=2;
nodes(2,1)=2; nodes(2,2)=5;
nodes(3,1)=5; nodes(3,2)=6;
nodes(4,1)=6; nodes(4,2)=9;
nodes(5,1)=9; nodes(5,2)=10;
nodes(6,1)=10; nodes(6,2)=13;

```

```

nodes(7,1)=13; nodes(7,2)=14;
nodes(8,1)=14; nodes(8,2)=16;
nodes(9,1)=1; nodes(9,2)=3;
nodes(10,1)=3; nodes(10,2)=4;
nodes(11,1)=4; nodes(11,2)=7;
nodes(12,1)=7; nodes(12,2)=8;
nodes(13,1)=8; nodes(13,2)=11;
nodes(14,1)=11; nodes(14,2)=12;
nodes(15,1)=12; nodes(15,2)=15;
nodes(16,1)=15; nodes(16,2)=16;
nodes(17,1)=2; nodes(17,2)=3;
nodes(18,1)=3; nodes(18,2)=5;
nodes(19,1)=4; nodes(19,2)=5;
nodes(20,1)=4; nodes(20,2)=6;
nodes(21,1)=6; nodes(21,2)=7;
nodes(22,1)=7; nodes(22,2)=9;
nodes(23,1)=8; nodes(23,2)=9;
nodes(24,1)=9; nodes(24,2)=11;
nodes(25,1)=10; nodes(25,2)=11;
nodes(26,1)=10; nodes(26,2)=12;
nodes(27,1)=12; nodes(27,2)=13;
nodes(28,1)=13; nodes(28,2)=15;
nodes(29,1)=14; nodes(29,2)=15;
%-----
%%% Boundary Condition %%%%
%-----
bcdof=[1 2 32]; %lock direction
%-----
%%% Initialization to zero
%-----
kk=zeros(s dof,s dof); % system stiffness matrix
mm=zeros(s dof,s dof); % system mass matrix
index=zeros(nnel*n dof,1); % index vector
ElemK=[];
%-----
%%% Loop for elements %%%%
%-----
for iel=1:nel % loop for the total number of elements
nd(1)=nodes(iel,1); % 1st connected node for the (iel)-th element
nd(2)=nodes(iel,2); % 2nd connected node for the (iel)-th element
x1=gcoord(nd(1),1); y1=gcoord(nd(1),2); % coordinate of 1st node
x2=gcoord(nd(2),1); y2=gcoord(nd(2),2); % coordinate of 2nd node
leng=sqrt((x2-x1)^2+(y2-y1)^2); % element length
if (x2-x1)==0;
beta=2*atan(1); % angle between local and global axes
else
beta=atan((y2-y1)/(x2-x1));
end
el=prop(1); % extract elastic modulus
area=prop(2); % extract cross-sectional area

```

```

rho=prop(3);                % extract mass density
index=ElemDof(nd,nnel,ndof); % extract system dofs for the element
[k,m]=Truss2D(el,leng,area,rho,beta); % compute element matrix
[ElemK]=ElemStiff(ElemK,k,index,sdof,bcdof); %extract element stiffness matrix
kk=Assembly(kk,k,index);    % assemble system stiffness matrix
mm=Assembly(mm,m,index);    % assemble system mass matrix
end
%-----
% apply constraints and solve the matrix
%-----
[kk,mm]=applyconstrain(kk,mm,bcdof); % apply the boundary conditions
%-----
%%% Solve for eigenvalue & eigenvector %%%
%-----
[phi,lamda]=eig(kk,mm);     % find eigenvalue and eigenvector
phi=real(phi);
lamda=real(lamda);
for i=1:length(lamda)
    temp(i)=sqrt(lamda(i,i)); %find natural frequency,w
end
[w,mode]=sort(temp');
phi=phi(:,mode);
%-----
%%% Inflicted Damage
%-----
%%% Initialization to zero
%-----
kkD=zeros(sdof,sdof);      % system stiffness matrix
mmD=zeros(sdof,sdof);      % system mass matrix
index=zeros(nnel*ndof,1); % index vector
ElemKD=[];
%-----
%%% Loop for elements %%%
%-----
for iel=1:nel % loop for the total number of elements
    nd(1)=nodes(iel,1); % 1st connected node for the (iel)-th element
    nd(2)=nodes(iel,2); % 2nd connected node for the (iel)-th element
    x1=gcoord(nd(1),1); y1=gcoord(nd(1),2); % coordinate of 1st node
    x2=gcoord(nd(2),1); y2=gcoord(nd(2),2); % coordinate of 2nd node
    leng=sqrt((x2-x1)^2+(y2-y1)^2); % element length
    if (x2-x1)==0;
        beta=2*atan(1); % angle between local and global axes
    else
        beta=atan((y2-y1)/(x2-x1));
    end
    if iel==4
        el=0.9*prop(1);
    else
        % extract elastic modulus
        el=prop(1);
    end
end

```

```

end
area=prop(2);      % extract cross-sectional area
rho=prop(3);      % extract mass density
index=ElemDof(nd,nnel,ndof); % extract system dofs for the element
[kD,mD]=Truss2D(el,leng,area,rho,beta); % compute element matrix
[ElemKD]=ElemStiff(ElemKD,kD,index,sdof,bcdof); %extract element stiffness matrix
kkD=Assembly(kkD,kD,index); % assemble system stiffness matrix
mmD=Assembly(mmD,mD,index); % assemble system mass matrix
end
%-----
% apply constraints and solve the matrix
%-----
[kkD,mmD]=applyconstrain(kkD,mmD,bcdof); % apply the boundary conditions
[phiD,lamdaD]=eig(kkD,mmD); % find eigenvalue and eigenvector
phiD=real(phiD);
lamdaD=real(lamdaD);
for i=1:length(lamdaD)
    temp2(i)=sqrt(lamdaD(i,i)); %find natural frequency,w
end
[wD,mode]=sort(temp2');
phiD=phiD(:,mode);
disp('Natural Frequency (Hz)')
disp('Intact    Damaged')
[w/2/pi wD/2/pi]
% _____
% Damage Detection by ResForVec
% _____
K=kk;
M=mm;
r0=[];
for i=1:nel
    r0=[r0;prop(1)];
end
r_j=r0;
tmprd=r0;
phi_i=phi;
w_i=w;
r_j=r0;
ElemK_i=ElemK;
usemode=10;
[R]=ResForVec(K,M,wD,phiD); %calculate damage location
s=[4]; %suspected element
cov=5e14 %covariant Srr
tic;
tol=1;
l=1;
while (tol>0.01)&(l<5)
    l
    tmprd(s,:);
    [rd,r_i]=DamageRes(K,M,phi_i,phiD,w_i,wD,r_i,r0,ElemK_i,usemode,s,cov);

```

```

    tmprd=[tmprd r_i];
%-----
%% Initialization to zero
%-----
kk_i=zeros(sdof,sdof); % system stiffness matrix
mm_i=zeros(sdof,sdof); % system mass matrix
index=zeros(nnel*ndof,1); % index vector
ElemK_i=[];
%-----
%% Loop for elements %%%
%-----
for iel=1:nel % loop for the total number of elements
    nd(1)=nodes(iel,1); % 1st connected node for the (iel)-th element
    nd(2)=nodes(iel,2); % 2nd connected node for the (iel)-th element
    x1=gcoord(nd(1),1); y1=gcoord(nd(1),2); % coordinate of 1st node
    x2=gcoord(nd(2),1); y2=gcoord(nd(2),2); % coordinate of 2nd node
    leng=sqrt((x2-x1)^2+(y2-y1)^2); % element length
    if (x2-x1)==0;
        beta=2*atan(1); % angle between local and global axes
    else
        beta=atan((y2-y1)/(x2-x1));
    end
    el=r_i(iel); % extract elastic modulus
    area=prop(2); % extract cross-sectional area
    rho=prop(3); % extract mass density
    index=ElemDof(nd,nnel,ndof); % extract system dofs for the element
    [k_i,m_i]=Truss2D(el,leng,area,rho,beta); % compute element matrix
    [ElemK_i]=ElemStiff(ElemK_i,k_i,index,sdof,bcdof);
    kk_i=Assembly(kk_i,k_i,index); % assemble system stiffness matrix
    mm_i=Assembly(mm_i,m_i,index); % assemble system mass matrix
end
%-----
% apply constraints and solve the matrix
%-----
[kk_i,mm_i]=applyconstrain(kk_i,mm_i,bcdof); % apply the boundary conditions
%-----
%% Solve for eigenvalue & eigenvector %%%
%-----
[phi_i,lamda_i]=eig(kk_i,mm_i); % find eigenvalue and eigenvector
phi_i=real(phi_i);
lamda_i=real(lamda_i);
for i=1:length(lamda_i)
    temp_i(i)=sqrt(lamda_i(i)); %find natural frequency,w
end
[w_i,mode_i]=sort(temp_i);
phi_i=phi_i(:,mode_i);
M=mm_i;
tmptol=[];
for m=1:length(s)
    tmptol1=(tmprd(s(m),i+1)-tmprd(s(m),i))/tmprd(s(m),i+1)*100;

```

```

    tmptol=[tmptol tmptol1];
end
tol=max(abs(tmptol));
l=l+1;
end
[PercentDamage]=severity(tmprd,s,r0)
t_res=toc;
% _____
% Damage Detection by Flexibility
% _____
tic;
[X]=Flexibility(K,ElemK,M,phi,phiD,w,wD,nel,usemode);
figure(2),bar(X),
title('Flexibility Approach')
xlabel('Element No. '),ylabel('Percent Damage')
t_flex=toc;
% _____
% Damage Detection by Stiffness
% _____
tic;
[alpha]=Stiffness(ElemK,K,M,wD,phiD,nel,usemode);
figure(3),bar(alpha)
title('Stiffness Approach')
xlabel('Element No. '),ylabel('Percent Damage')
t_stif=toc;

```



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. Subprogram

2.1 function ElemDof

```
function [index]=ElemDof(nd,nnel,ndof)
% Purpose: Compute system dofs associated with each element
edof = nnel*ndof;
k=0;
for i=1:nnel
    start = (nd(i)-1)*ndof;
    for j=1:ndof
        k=k+1;
        index(k)=start+j;
    end
end
end
```

2.2 function Truss2D

```
function [k,m]=Truss2d(el,leng,area,rho,beta)
% Purpose: Stiffness and mass matrices for the 2-d truss element nodal dof {u_1 v_1 u_2 v_2}
% Element stiffness matrix
c=cos(beta); s=sin(beta);
k= (area*el/leng)*[ c*c   c*s  -c*c  -c*s;...
                   c*s   s*s  -c*s  -s*s;...
                   -c*c  -c*s   c*c   c*s;...
                   -c*s  -s*s   c*s   s*s];
% Element mass matrix
m=(rho*area*leng/2)*[ c*c+s*s  0  0  0;...
                     0  c*c+s*s  0  0;...
                     0  0  c*c+s*s  0;...
                     0  0  0  c*c+s*s];
```

2.3 function ElemStiff

```
function [ElemK]=ElemStiff(ElemK,k,index,sdof,bcdof)
% Purpose: compute element stiffness matrix
edof=length(index);
tmpElemK=zeros(sdof,sdof);
for i=1:edof
    ii=index(i);
    for j=1:edof
        jj=index(j);
        tmpElemK(ii,jj)=k(i,j);
    end
end
end
n=length(bcdof);
tempfr=sdof-n;
for i=1:tempfr
```

```

for j=1:tempfr
    tmpElemK2(i,j)=tmpElemK(i+2,j+2);
end
end
ElemK=[ElemK tmpElemK2];

```

2.4 function Assembly

```

function [kk]=Assmby(kk,k,index)
% Purpose: Assembly of element matrices into the system matrix
edof = length(index);
for i=1:edof
    ii=index(i);
    for j=1:edof
        jj=index(j);
        kk(ii,jj)=kk(ii,jj)+k(i,j);
    end
end
end

```

2.5 function applyconstrain

```

function [kk,mm]=applyconstrain(kk,mm,bcdof)
% Purpose: Apply constraints to matrix equation [kk]{x}={ff}
n=length(bcdof);
sdof=size(kk);
for i=1:n
    c=bcdof(i);
    for j=1:sdof
        kk(c,j)=0;
        kk(j,c)=0;
        mm(c,j)=0;
        mm(j,c)=0;
    end
    mm(c,c)=1;
end
end
temp=sdof-n;
for i=1:temp
    for j=1:temp
        tempkk(i,j)=kk(i+2,j+2);
        tempmm(i,j)=mm(i+2,j+2);
    end
end
kk=tempkk;
mm=tempmm;

```

2.6 function ResForVec

```

function [R]=ResForVec(K,M,wD,phiD)
% Propose: Damage Location by Residual Force Method
% Synopsis: [R]=ResForVec(K,M,wD,phiD)
[a,b]=size(K);
R=[];

```



```

for i=1:a
    R=[R (K-wD(i)^2*M)*phiD(:,i)];
end

```

2.7 function DamageRes

```

function [rd,r_i]=DamageRes(K,M,phi_i,phiD,w_i,wD,r_i,r0,ElemK_i,usemode,s,cov)
% Propose: Damage Severity by Residual Force Method
[a,b]=size(K);
nel=length(r0);
nsus=length(s);
    B1=[];
    B2=[];
    for k=1:usemode
        tmp1=[];
        for i=1:a
            for j=1:b
                tmp2=(phi_i(i,k)*phi_i(j,k))/(phi_i(:,k)*M*phi_i(:,k));
                tmp1=[tmp1 tmp2];
            end
        end
        B1=[B1;tmp1];
        end
        for r=1:a
            for k=1:usemode
                tmpB2=[];
                for i=1:a
                    for j=1:b
                        sum=0;
                        tmp3=0;
                        for n=1:usemode
                            if n~=k
                                tmp3=sum+(phi_i(i,n)*phi_i(j,k)*phi_i(r,n))/(w_i(k)^2-w_i(n)^2)*(phi_i(:,n)*M*phi_i(:,n));
                            end
                        end
                        tmpB2=[tmpB2 tmp3];
                    end
                end
                B2=[B2;tmpB2];
            end
        end
        B_res=[B1;B2];
        A_res=[];
        for j=1:nel
            index=a*(j-1)+1;
            tempK=ElemK_i(:,[index:index+a-1]);
            tmp4=[];
            for i=1:a
                tmp4=[tmp4;tempK(i,:)];
            end
        end

```

```

    A_res=[A_res tmp4];
    end
for i=1:nel
    A_res(:,i)=A_res(:,i)/r0(i);
    end
T=B_res*A_res;
Srr=zeros(nel);
See=zeros(nel,nel);
for i=1:nsus
    sus_el=s(i);
    Srr(sus_el,sus_el)=cov;
end
    See=zeros(nel,nel);
dimSee=a*usemode+usemode;
for i=1:dimSee
    See(i,i)=0.2;
end
    GAMMA_D=[];GAMMA_i=[];
tmppiD=[];tmppi_i=[];
tmpwD=wD(1:usemode);
tmpw_i=w_i(1:usemode);
for i=1:usemode
    tmppiD=[tmppiD;phiD(:,i)];
    tmppi_i=[tmppi_i;phi_i(:,i)];
end
    GAMMA_D=[tmpwD.^2;tmppiD];
    GAMMA_i=[tmpw_i.^2;tmppi_i];
rd=r_i+Srr*T*inv(T*Srr*T'+See)*(GAMMA_D-GAMMA_i);
r_j=rd;

```

2.8 function severity

```

function [PercentDamage]=severity(tmprd,s,r0)
% Propose: Compute percent damage
PercentDamage=[];
[d,i]=size(tmprd);
nsus=length(s);
for i=1:nsus
    tmpPercentDamage=[];
    for j=1:i
        tmp=100*(r0(s(i))-tmprd(s(i),j))/r0(s(i));
        tmpPercentDamage=[tmpPercentDamage tmp];
    end
    PercentDamage=[PercentDamage;tmpPercentDamage];
end
i=[1:i];
for j=1:length(s)
    plot(i,PercentDamage(j,:))
    hold on
end
end

```

```
title('Residual Force Vector')
xlabel('No. of Iteration'),ylabel('Percent Damage')
```

2.9 function Flexibility

```
function [X]=Flexibility(K,ElemK,M,phi,phiD,w,wD,nel,usemode)
%Propose: Damage Detection by Flexibility Approach
[a,b]=size(M);
tmpw=w(1:usemode);
tmpwD=wD(1:usemode);
tmpphi=phi(:,1:usemode);
tmpphiD=phiD(:,1:usemode);
%% Flexibility of Intact Structure
[phi_norm_M]=normalized(tmpphi,M);
F=inv(K);
%% Flexibility of Damaged Structure
[phi_norm_M_D]=normalized(tmpphiD,M);
F_D=phi_norm_M_D*inv(diag(tmpwD.^2))*phi_norm_M_D';
DELTA_F=F_D-F;
Bflex=[];
tmp1=0;
for i=1:a
    tmp1=DELTA_F(i,:);
    Bflex=[Bflex;tmp1'];
end
tempFKF=[];
for j=1:nel
    index=a*(j-1)+1;
    tempK=ElemK(:,[index:index+a-1]);
    tempFKF=[tempFKF F_D*tempK*F];
end
end
Aflex=[];
FKF=[];
for j=1:nel
    tmp2=[];
    for i=1:a
        index=a*(j-1)+1;
        FKF=tempFKF(i,[index:index+a-1]);
        tmp2=[tmp2;FKF'];
    end
    Aflex=[Aflex tmp2];
end
end
X=inv(Aflex*Aflex)*(Aflex*Bflex);
X=X*100;
```

2.10 function Stiffness

```
function [alpha]=Stiffness(ElemK,K,M,wD,phiD,nel,usemode)
%Propose: Damage Detection by Stiffness Approach
```

```

[a,b]=size(K);
tmpphiD=phiD(:,1:usemode);
[phi_norm_M_D]=normalized(tmpphiD,M);
for i=1:usemode
    for j=1:nel
        index=a*(j-1)+1;
        tempK=ElemK(:,[index:index+a-1]);
        Fstif1(i,j)=phi_norm_M_D(:,i)*tempK*phi_norm_M_D(:,i)/(phi_norm_M_D(:,i)*K*phi_norm_M_D(:,i));
    end
end
Fstif2=[];
for k=1:usemode
    for l=1:usemode
        tmpF=[];
        if (k~=l)&(k<l)
            for j=1:nel
                index=a*(j-1)+1;
                tempK=ElemK(:,[index:index+a-1]);
                tempf=phi_norm_M_D(:,k)*tempK*phi_norm_M_D(:,l)/(phi_norm_M_D(:,k)*K*phi_norm_M_D(:,l));
                tmpF=[tmpF tempf];
            end
        end
        Fstif2=[Fstif2;tmpF];
    end
end
Fstif=[Fstif1;Fstif2];
Z1=zeros(usemode,1);
for i=1:usemode
    Z1(i)=wD(i)^2/(phi_norm_M_D(:,i)*K*phi_norm_M_D(:,i))-1;
end
noeq=usemode*(usemode-1)/2;
Z2=zeros(noeq,1);
for i=1:noeq
    Z2(i)=-1;
end
Z=[Z1;Z2];
alpha=Fstif\Z;
alpha=-100*alpha;

```

2.11 function normalized

```

function [phi_norm_M]=normalized(phi,M)
% Proposed: normalized mode shape with mass matrix
Divider=diag(phi*M*phi);
phi_norm_M=phi*inv(sqrt(diag(Divider)));

```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อาทิตย์ อ่ำเกตุสกุล เกิดเมื่อวันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และได้เข้ารับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนประตูลี้ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527 ถึง พ.ศ. 2533 จากนั้นได้เข้ามาศึกษาต่อในระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนมัธยมสาธิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร) กรุงเทพมหานคร ต่อมาได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรีที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2538 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย