

บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการหาแรงในชิ้นส่วนค้ำยันนอกระนาบของโครงข้อหมุน ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไร้เชิงเส้นทั้งทางวัสดุและทางเรขาคณิต รวมทั้งพิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์ตั้งต้นที่จุดต่อ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างที่พัฒนาขึ้นในการหาคำตอบ อีกทั้งโปรแกรมดังกล่าวยังสามารถคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกวิกฤติแบบเชิงเส้นและไร้เชิงเส้นได้อีกด้วย ซึ่งการคำนวณการลู่เข้าของคำตอบของการวิเคราะห์แบบไร้เชิงเส้นจะใช้วิธีการนิวตัน-ราฟสัน โดยวิธีแบ่งน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำออกเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกส่วนเพิ่ม (Load increment) และตรวจสอบการลู่เข้าจากค่ายูคลีเดียนนอร์มของเวกเตอร์แรงคงค้าง ส่วนการคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกทุกวิกฤติแบบเชิงเส้น จะใช้วิธีการคำนวณหาค่าโอเก้นซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ของน้ำหนักบรรทุกทุกวิกฤติ จากระเบียบวิธีส่วนกลับกำลัง (Inverse power method) ในขณะที่การคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกทุกวิกฤติแบบไร้เชิงเส้นนั้นจะใช้ระเบียบวิธีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอัตโนมัติ (Auto time stepping) ร่วมกับวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection method) จนกระทั่งค่าสถิติเฟนสเมตริกซ์ในแนวทแยงมีค่าเป็นลบ ซึ่งเป็นสถานะที่โครงสร้างไร้เสถียรภาพ

ในการวิเคราะห์กรณีศึกษา ตัวอย่างที่ 1 โครงข้อหมุนทรงโดมและตัวอย่างที่ 2 โครงข้อหมุนทรงพีรามิด ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ทั้งนี้เนื่องจาก โครงสร้างดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นเด่นชัด จากลักษณะทางเรขาคณิตของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพกลไกการวิบัติหรือใกล้กลไกการวิบัติ (Mechanism or Near mechanism) โดยคุณสมบัติวัสดุของตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 เป็นแบบอีลาสโตพลาสติก (Elasto-plastic) และแบบเชิงเส้นคู่ (Bi-linear material) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ 1 เทียบกับงานวิจัยในอดีตของ Greco M. และการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ 2 เทียบกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS พบว่าค่าผลลัพธ์ของการกระจัด แรงภายในชิ้นส่วนและค่าน้ำหนักบรรทุกทุกวิกฤติ มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.2% จึงสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น มีค่าความถูกต้องเป็นที่น่าพอใจ

ตัวอย่างที่ 3 เป็นสะพานลอยโครงข้อหมุนที่มีคุณสมบัติทางวัสดุแบบเชิงเส้นคู่ โดยการวิเคราะห์จะไม่พิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์ตั้งต้น ผลการวิเคราะห์พบว่า ที่สภาวะน้ำหนักบรรทุกใช้งานและที่สภาวะน้ำหนักบรรทุกวิกฤต ค่าแรงในค้ำยันที่ได้จากการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นไว้เชิงเส้นทางเรขาคณิต และไว้เชิงเส้นแบบผสมนั้นมีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากลักษณะทางเรขาคณิตของโครงข้อหมุนสะพานลอยมีความแข็งแกร่งสูง โดยค้ำน้ำหนักบรรทุกวิกฤตที่ได้จากการวิเคราะห์แบบไว้เชิงเส้นผสม มีค่าน้อยสุด เท่ากับ 600,000 นิวตัน ส่วนค้ำน้ำหนักบรรทุกวิกฤตแบบเชิงเส้นและไว้เชิงเส้นมีค่าประมาณ 1.8 ล้านนิวตัน และ 37 ล้านนิวตัน ตามลำดับ

ตัวอย่างที่ 4 เป็นการนำตัวอย่างที่ 3 มาวิเคราะห์แบบพิจารณาความไม่สมบูรณ์ตั้งต้น โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ชนิด คือ วิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไว้เชิงเส้นแบบผสม ที่มีการสุ่มค่าความไม่สมบูรณ์ตั้งต้นจำนวน 20,000 ตัวอย่างแบบกระจายสม่ำเสมอ เพื่อคำนวณหาแรงในค้ำยันที่มากที่สุด ซึ่งจำนวนดังกล่าวเป็นจำนวนที่วิเคราะห์แล้วว่าค่าแรงในค้ำยันเริ่มมีค่าคงที่เมื่อมีการเพิ่มจำนวนการสุ่มตัวอย่าง โดยกำหนดให้ความไม่สมบูรณ์ตั้งต้นเกิดที่จุดต่อต่างๆ ได้ทั้งทิศทาง x, y, z และมีขนาดมากที่สุดไม่เกิน -8 มม. ถึง 8 มม. ($L/500$) ตามมาตรฐาน AISC จากผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์โครงสร้างแบบเชิงเส้นที่พิจารณาผลความไม่สมบูรณ์ตั้งต้นจะให้ค่าแรงดึงและแรงอัดในค้ำยันมากกว่าการวิเคราะห์โครงสร้างที่สมบูรณ์ประมาณ 15% และ 20% ตามลำดับ ในขณะที่การวิเคราะห์แบบไว้เชิงเส้น จะให้ค่าค่าแรงดึงและแรงอัดในค้ำยันมากกว่าประมาณ 14% และ 49% ตามลำดับ ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 การเปรียบเทียบค่าแรงดึงและแรงอัดในค้ำยันจากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ

ชนิดโครงสร้าง	แรงดึงในค้ำยัน (นิวตัน)		แรงอัดในค้ำยัน (นิวตัน)	
	เชิงเส้น	ไว้เชิงเส้นผสม	เชิงเส้น	ไว้เชิงเส้นผสม
โครงสร้างสมบูรณ์	12,656	12,660	8,855	8,856
โครงสร้างที่มีความไม่สมบูรณ์ตั้งต้น	14,492	14,463	10,633	13,206
ความแตกต่าง (%)	15	14	20	49

จากกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้จะสรุปได้ว่า หากโครงสร้างเป็นโครงสร้างสมบูรณ์แล้ว การคำนวณหาแรงในค้ำยันนอกกระนาบ ไม่ว่าจะด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นหรือไว้เชิงเส้นจะให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน แต่จะต่างกันถ้าโครงสร้างเกิดค่าความไม่สมบูรณ์ตั้งต้นขึ้น ดังนั้นการ

พิจารณาค่าความไม่สมบูรณ์ตั้งต้นที่จุดต่อของโครงสร้าง ถือได้ว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวสามารถเพิ่มค่าแรงอัดในค้ำยันได้มากถึง 49% ซึ่งค่าที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้อัตราร่วงปลอดภัยของโครงสร้างลดลง ถึงแม้ความน่าจะเป็นที่แรงในค้ำยันจะมีค่าดังกล่าวมีเพียง 0.0002 หรือคิดเป็น 0.02% เท่านั้น ส่วนค่าแรงดึงในค้ำยันจะมีค่ามากกว่าการวิเคราะห์แบบปกติประมาณ 15% อย่างไรก็ตามค่าความไม่สมบูรณ์ตั้งต้นก็สามารถทำให้แรงในค้ำยันลดลงได้เช่นกันแต่โอกาสเกิดขึ้นน้อยมากประมาณ 1% และผลจากการสุ่มค่าความไม่สมบูรณ์ตั้งต้นยังพบว่าโอกาสที่แรงอัดจะมากกว่าการวิเคราะห์แบบปกติ 0-5% มีมากที่สุด ประมาณ 12600 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 63% ของตัวอย่างทั้งหมด ในขณะที่โอกาสจะแรงดึงในค้ำยันมากกว่าการวิเคราะห์แบบปกติ 10-15% มีถึง 9400 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 47% ของตัวอย่างทั้งหมด

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. การแก้ระบบสมการแบบไร้เชิงเส้นในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการควบคุมน้ำหนักบรรทุก แบบนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งวิธีดังกล่าวไม่สามารถวิเคราะห์คำตอบที่เลยขีดจำกัดหรือพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะของโครงสร้างได้ ดังนั้นจึงควรใช้วิธี Arc-length method ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาดังกล่าว อีกทั้งสามารถช่วยให้การลู่เข้าของคำตอบที่ใกล้สภาวะการโก่งเดาะเป็นไปได้ง่าย
2. ตัวโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์ความไม่เชิงเส้นของวัสดุแบบไบลิเนียร์เท่านั้น ซึ่งควรพัฒนาให้รองรับความไม่เชิงเส้นทางวัสดุในรูปแบบ multilinear ในภาพภาคหน้าเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีค่าความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
3. ควรพิจารณาความไม่สมบูรณ์ตั้งต้นอื่นๆ เช่น ความไม่สมบูรณ์ตั้งต้นทางหน้าตัด ความไม่สมบูรณ์ตั้งต้นทางคุณสมบัติทางวัสดุเช่นค่า ยิงโมดูลัส ซึ่งค่าความไม่สมบูรณ์ดังกล่าวเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถรู้ล่วงหน้าในการออกแบบเช่นกัน และสามารถทำให้แรงที่เกิดขึ้นในค้ำยันผันแปรไปจากการคำนวณได้
4. โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถจำลองชิ้นส่วนโครงข้อแข็งหรือคานซึ่งส่วนใหญ่โครงสร้างประเภท สะพาน หรือ หลังคาจะมีชิ้นส่วนดังกล่าวรวมอยู่ด้วย ดังนั้นการจำลองให้เหมือนกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้าง จึงควรกำหนดชิ้นส่วนคอร์ดบนเป็นคานต่อเนื่อง