บทที่ 6
สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ 1) การศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP และ 2) การศึกษาการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งทั้ง 2 ส่วนได้ใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์ ABAQUS 6.5-1 ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผล ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาโดยแยกแต่ละกรณีได้ดังนี้

6.1.1 การศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

การศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์จากบทความที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดสอบที่ได้จากบทความที่เกี่ยวข้องในรูปแบบของการกระจายของหน่วยแรงในชั้นกาว และการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP โดยในเบื้องต้นได้ทำการสอบเทียบความถูกต้องระหว่างแบบจำลองแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อที่จะยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองแบบ 2 มิติ หลังจากนั้นได้ใช้แบบจำลองแบบ 2 มิติ ในการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ ซึ่งค่าตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ช่วงของหน่วยแรงกระทำ (Stress range) ความหนากาว และความหนาของแผ่น CFRP ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

- **การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง 2 มิติ กับ 3 มิติ**
  การสอบเทียบแบบจำลองแบบ 2 มิติ กับ 3 มิติ ภายใต้เงื่อนไขของจุดรองรับเดียวกัน ภายใต้แรงดึงแบบสถิตในระยะเวลา 0.1 วินาที แล้วทำการอ่านค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดในชิ้นส่วนของแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง 2 มิติ สามารถจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วน

เหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ใกล้เคียงพฤติกรรมจริง ทำให้ช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณได้เป็นอย่างมาก

- **พฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP**

ผลการศึกษาพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ พบว่าค่า หน่วยแรงเฉือน และ หน่วยแรงดังฉากของชั้นกาวจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณปลายของแผ่น CFRP นั่นหมายความว่าการหลุดล่อนของแผ่น CFRP จะเริ่มต้นจากจุดนี้นั่นเอง นอกจากนี้ลักษณะการลดลงของหน่วยแรงที่วิเคราะห์ได้จาก FE model นั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วกว่า Analytical model เหตุผลของความแตกต่างนี้ก็คือ ใน Analytical model ได้สมมติให้พฤติกรรมของกาวให้เป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic) แต่ในแบบจำลองได้จำลองพฤติกรรมของ interface ก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของความเสียหายจะสมมติให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเช่นกัน แต่หลังจากนั้น element จะมีค่าความเสียหายสะสมใน element ทำให้ค่า หน่วยแรงเฉือน และ หน่วยแรงดังฉาก ลงลงอย่างรวดเร็ว

ในส่วนของการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆนั้นปริญญานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์วิธีการประมาณอายุการใช้งานของวัสดุคอมโพสิตมาใช้ในการประมาณอายุการใช้งานของชิ้นส่วนคอมโพสิต โดยสมการที่ใช้ในการประมาณอายุการใช้งานคือ

$$N_f = \left[1+\frac{1}{0.004(1-R)}\left(\frac{\overline{f_u}}{S_{max}}-1\right)\right]^{\frac{1}{0.39}} \qquad (6.1)$$

เมื่อ $\overline{f_u}$ = ค่ากำลังของวัสดุตั้งต้น (กาว) (MPa)

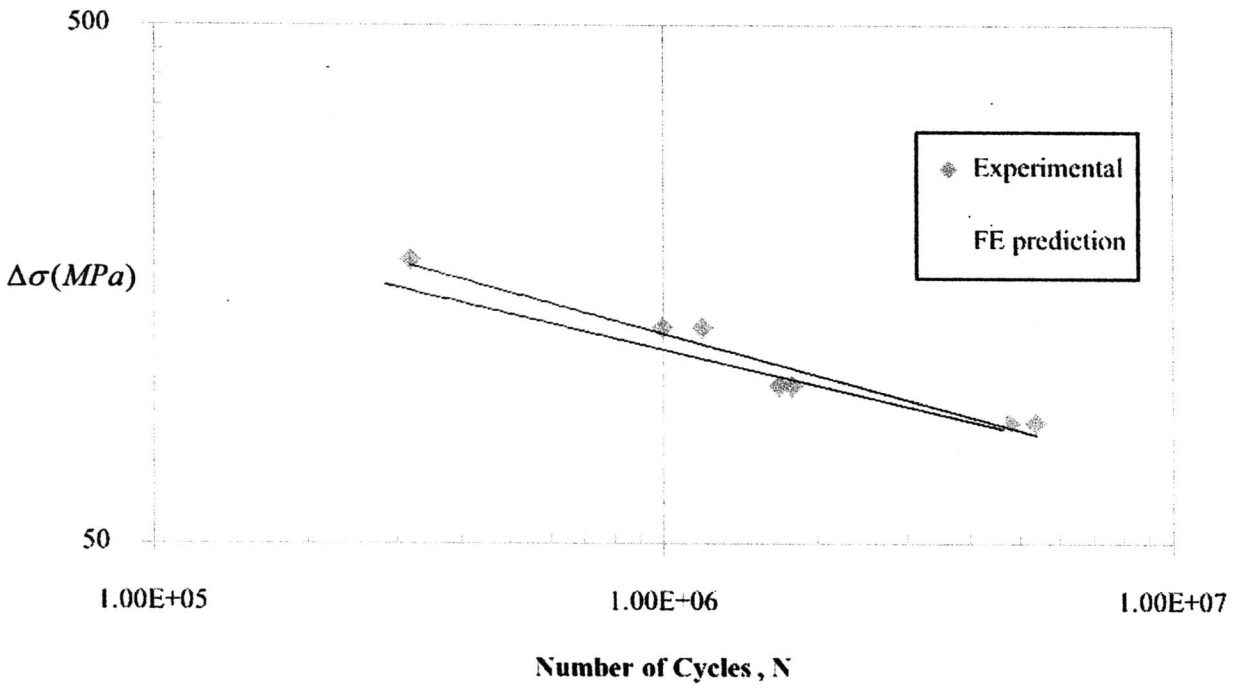
S_{max} = ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดในระหว่างที่ทำการให้น้ำหนักบรรทุกเป็นรอบ (MPa)

R = stress ratio = $\frac{S_{min}}{S_{max}}$ (%)

ซึ่งจากการใช้สมการที่ 6.1 ในการประเมินพฤติกรรมความล้าของแผ่นเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นพบว่าสามารถประมาณค่าอายุการใช้งานได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6.1 และภาพที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

$\Delta\sigma$ [MPa]	Fatigue life (cycles)		%Error
	Experiment	FE prediction	
83	4,800,000	4,642,896	3.27
100	1,800,000	1,953,872	8.55
120	1,000,000	822355	17.76
160	320,000	285,277	10.87



ภาพที่ 6.1 เปรียบเทียบกราฟ S-N ระหว่าง Experiment กับ FE prediction

- **การศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP**

จากการศึกษาถึงผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายของหน่วยแรงบริเวณกาว และอายุการใช้งานของชิ้นส่วน ซึ่งในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษา 2 ตัวแปร ได้แก่ ความหนาของชั้นกาว และความหนาของแผ่น CFRP

- ผลของความหนาของชั้นกาวต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มความหนาของกาว (ความหนาของแผ่น CFRP คงที่) ก็จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนของชั้นกาว ในส่วนของอายุการใช้งานพบว่าการเพิ่มความหนาของชั้นกาวจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชั้นกาวจะช่วยลดค่า หน่วยแรงเฉือน ที่เกิดขึ้นในชั้นกาว อันจะส่งผลให้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

- ผลของความหนาของแผ่น CFRP ต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP จะทำให้ค่า หน่วยแรงเฉือน สูงสุดในบริเวณกาวจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า หน่วยแรงเฉือน นี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนสามารถรับแรงได้มากขึ้นก็จริง อย่างไรก็ตามการเพิ่มเฉพาะความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวโดยไม่เพิ่มความหนาของชั้นกาวทำให้การส่งผ่านแรงไปให้แผ่น CFRP นั้นเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ จุดนี้เองทำให้ชั้นกาวกลายเป็นตัวควบคุมการส่งผ่านของแรงระหว่างแผ่นเหล็กไปยังแผ่น CFRP ในส่วนของอายุการใช้งานพบว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ลดลง อันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรงเฉือน

6.1.2 การศึกษาการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP

งานวิจัยส่วนนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเสริมกำลังด้วย CFRP ต่อพฤติกรรมของสะพานคอมโพสิตทั้งโครงสร้าง ทั้งชนิดที่มีความเสียหายเริ่มต้นและชนิดที่ไม่มีความเสียหายเริ่มต้น ต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิตโดยใช้ไฟไนท์อิลิเมนท์โปรแกรม ABAQUS ในการศึกษา โดยรูปแบบของการเสริมกำลังด้วย CFRP ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มี 2 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังโดยใช้ CFRP ชนิดแผ่น (CFRP Laminate) ติดที่บริเวณปีกของคานรูปตัวไอ (I-Shape) ที่ทำหน้าที่รับแรงดึง และการใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีต ทั้งนี้การตอบสนองทางพลศาสตร์จะพิจารณาที่ค่าหน่วยแรงและค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้น ส่วนการตอบสนองของความล้าจะพิจารณาที่จำนวนรอบสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรับได้ นอกจากนี้ก็จะศึกษาถึงผลของความเสียหายเริ่มต้นในรูปแบบของรอยร้าวเริ่มต้น 2 ขนาดคือ ความลึก 3 และ 6 มิลลิเมตร ที่ปีกล่างของคานรูปตัวไอ ที่มีผลต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิตทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และที่เสริมกำลังด้วย CFRP อนึ่งตัวแปรที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมของสะพานได้แก่ ลักษณะการวิ่งของรถ จำนวนคานเหล็กรูปตัวไอ ก็ได้พิจารณาในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยสามารถสรุปได้เป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

❖ **พฤติกรรมของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลัง**

ผลการศึกษาการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังโดยพิจารณาสะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว สามารถสรุปได้ ดังนี้

- กรณีรถวิ่ง 2 ช่องจราจร ทั้งวิ่งในทิศทางเดียวกัน และวิ่งสวนทางกัน จะให้ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ สูงสุด มากกว่า กรณีรถวิ่ง 1 ช่องจราจร ซึ่งค่าหน่วยแรง และค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 12 และร้อยละ 4 ของสะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว ตามลำดับ เพราะน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์ ของสะพานคอมโพสิต
- การเพิ่มขึ้นของจำนวนคานเหล็ก จากสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว เป็นสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว จะส่งผลโดยตรงต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์ โดยที่ค่าหน่วยแรง และค่าการแอ่นตัวของสะพานจะลดลง เนื่องจากสะพานจะมีค่าสติฟเนสเพิ่มขึ้นทำให้สะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ดีขึ้น

❖ **พฤติกรรมของของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย**

ในกรณีผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP โดยรูปแบบของการเสริมกำลังด้วย CFRP ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มี 2 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังโดยใช้ CFRP ชนิดแผ่น (CFRP Laminate) ติดที่บริเวณปีกของคานรูปตัว I ที่ทำ

หน้าที่รับแรงดึง และการใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีต โดยผลที่ได้จากโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์ที่ทำการศึกษา สามารถสรุปได้ ดังนี้

- ในการเสริมกำลังของสะพานคอมโพสิตโดยใช้วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย จะช่วยลดค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ทั้งค่าการแอ่นตัว และค่าหน่วยแรง ได้มากสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังถึงประมาณร้อยละ 35
- เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ระหว่างการเสริมกำลังของสะพานคอมโพสิตโดยใช้วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยทั้ง 2 วิธี คือ เสริมกำลังด้วย CFRP laminate กับ เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ซึ่งการเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck จะมีประสิทธิภาพในการช่วยลดการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ได้ดีกว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP laminate แต่การเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ก็มีข้อเสียอยู่มาก เนื่องจากในการติดตั้ง CFRP composite deck นั้นจะต้องนำแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมออกเสียก่อน งานทำงานจึงยุ่งยาก ทั้งจะต้องปิดช่องทางจราจร และถ้าผู้ติดตั้งไม่มีความสามารถพอก็อาจจะเกิดอันตรายได้ แต่สำหรับการเสริมกำลังโดยใช้ CFRP laminate ในการติดตั้งจะใช้เวลาติดตั้งน้อยกว่า ไม่กีดขวางการจราจร แต่ก็จำเป็นที่ต้องใช้ผู้ติดตั้งที่มีความชำนาญมากเช่นกัน

❖ **พฤติกรรมของของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น**

ในกรณีผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น เกิดขึ้น จะส่งผลต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานเป็นอย่างมาก โดยผลที่ได้จากโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์ที่ทำการศึกษา สามารถสรุปได้ ดังนี้

- หลังจากที่คานเหล็กของสะพานคอมโพสิตมีรอยร้าวเกิดขึ้น อายุการใช้งานของสะพานหรืออายุความล้า จะลดลงถึง 15 เท่า จากสะพานคอมโพสิตที่ไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้น เนื่องจากสะพานที่มีความเสียหายเกิดขึ้นจะส่งผลต่อค่าหน่วยแรงที่เกิดในคานเหล็กเพิ่มมากขึ้น และอายุการใช้งานก็ลดลงด้วยเช่นกัน เพราะค่าหน่วยแรงเป็นตัวแปรที่สำคัญต่ออายุการใช้งานของสะพาน

❖ **ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย**

สะพานนคอมโพสิตในประเทศไทยปัจจุบันมีอยู่หลายแห่ง ทั้งที่ใช้เพื่อข้ามแม่น้ำ หรือข้ามทางแยกไฟแดง ดังนั้นในการที่จะเสริมกำลังของสะพานคอมโพสิต ให้เกิดประสิทธิภาพ และประโยชน์อย่างเต็มที่ ควรที่จะต้องพิจารณาถึงรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

- ส่วนใหญ่แล้วการปรับปรุงสภาพของสะพานโดยการเสริมกำลังให้แก่สะพานจะเป็นตัวเลือกที่นิยมกันเนื่องจากว่ามีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการก่อสร้างใหม่คือ ค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า สามารถดำเนินการภายในระยะเวลาอัน

สั้น และที่สำคัญคือไม่กระทบหรือกระทบการจราจรบนสะพานเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงกับกรณีอื่น ๆ เช่น การเสริมแผ่นเหล็กที่ปีกคานรับแรงดึง การเสริมกำลังด้วย CFRP นั้นจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า

- วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)) ที่ใช้ในการเสริมกำลังให้แก่โครงสร้าง ข้อดีของวัสดุชนิดนี้คือ มีน้ำหนักเบา สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี
- ข้อเสียของ CFRP ก็คือราคาวัสดุที่ค่อนข้างสูงและต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้ง ดังนั้นสืบเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงในการติดตั้ง ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงผลของการเสริมกำลังด้วย CFRP เป็นอย่างดี
- ในกรณีที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้นที่คานเหล็ก ก่อนที่จะทำการปรับปรุงกำลังของสะพาน จะต้องทำการเชื่อมติดรอยร้าวให้เรียบร้อยก่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วย CFRP laminate ให้ใช้งานได้อย่างเต็มกำลัง
- ตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของสะพาน เช่น ลักษณะการวิ่งของรถ จำนวนคานเหล็กรูปตัว I และรูปแบบการเสริมกำลัง ดังนั้นจำเป็นจะต้องศึกษาพฤติกรรมของสะพานให้ดี เพื่อให้การปรับปรุงความแข็งแรงของสะพานมีประสิทธภาพมากที่สุด
- วิธีการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (สำหรับศึกษาพฤติกรรมของชิ้นส่วนบางชิ้นของโครงสร้างหรือโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก) หรือที่หน้างาน (สำหรับศึกษาพฤติกรรมจริงของโครงสร้างสะพาน) และการจำลองด้วยไฟไนท์อิลิเมนท์โปรแกรม ซึ่งการศึกษาพฤติกรรมจริงของโครงสร้างสะพานที่หน้างานจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมากเมื่อเทียบกับการจำลองด้วยไฟไนท์อิลิเมนท์โปรแกรม รวมทั้งไม่สามารถแปรผันตัวแปรที่จะมีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานได้ง่ายเหมือนกับการจำลองด้วยไฟไนท์อิลิเมนท์โปรแกรม