



การประเมินค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สำหรับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์
เสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**Evaluation of Dynamic Load Allowance for FRP Bridge Decks
Using Finite Element Method**

อรรถพล แสงแก้ว

Attpon Sangkaew

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การประเมินค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สำหรับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์
เสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**Evaluation of Dynamic Load Allowance for FRP Bridge Decks
Using Finite Element Method**

อรรถพล แสงแก้ว

Attpon Sangkaew

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประเมินค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สำหรับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์
เสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผู้เขียน นายอรรถพล แสงแก้ว

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกตัญญู)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นาย อรรถพล แสงแก้ว)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นาย อรรถพล แสงแก้ว)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประเมินค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สำหรับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ผู้เขียน	นายอรรถพล แสงแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือการประเมินค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สำหรับระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการศึกษาช่วงแรกจะเป็นการสร้างแบบจำลองแผ่นพื้น Prodeck 4 และ Prodeck 8 เพื่อวิเคราะห์หาค่าความถี่และรูปแบบการสั่นเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบภาคสนาม พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดสอบ ส่วนการศึกษาในช่วงหลังจะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแบบจำลองระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก ซึ่งจะถูกตรวจสอบภายใต้เงื่อนไขต่างๆจากน้ำหนักของรถบรรทุก (AASHTO HS25) โดยใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานช่วงเดียว เพื่อดำเนินการศึกษาตัวแปรที่จะตรวจสอบปัจจัยหลายประการที่ส่งผลกระทบต่อค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ ซึ่งมี 6 ตัวแปรหลัก คือ ชนิดของแผ่นพื้นสะพาน ช่วงความยาวของสะพาน จำนวนคานที่รองรับ จำนวนรถบรรทุก ตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุก และ ความเร็วรถบรรทุก ผลของค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองระบบสะพานประเภทนี้จะถูกนำเสนอและเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบภาคสนาม และข้อกำหนดตามมาตรฐานทั่วไป พบว่าค่าขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่มีความเหมาะสมกับระบบสะพานประเภทนี้ คือ $0.914(L) + 27.178 \%$ และ $0.914(L) + 10.328 \%$ ตามลำดับ

คำหลัก : แผ่นพื้นสะพาน, สะพาน, พอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย, ไฟไนต์เอลิเมนต์, ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์

Thesis Title Evaluation of Dynamic Load Allowance for FRP Bridge Decks Using Finite Element Method

Author Mr. Atpon Sangkaew

Major Program Civil Engineering (Structural Engineering)

Academic Year 2013

ABSTRACT

The research objective is to evaluate the dynamic load allowance factor for steel stringer-FRP deck bridge system using finite element analysis. The frequency and mode shapes of FRP Prodeck4 and Prodeck8 modules are simulated and compared with data from laboratory and field test. It was found that the analytical results of the FE models were in good agreement with the experimental results. The dynamic behavior of the steel stringer-FRP deck bridge models was investigated under various truck loading (AASHTO HS25) conditions. The FE bridge models of a single span were used to conduct a parametric study to investigate the effects of several factors affect on the dynamic load allowance. There are six main parameters as: FRP deck types, length of bridge span, numbers of steel stringers, numbers of trucks, truck positions and truck velocities. The dynamic load allowance factor results were proposed and compared with those obtained from laboratory results, field tests and standard codes. The results showed that the upper and lower bound of the dynamic load allowance for the FRP deck bridge system were $0.914(L) + 27.178\%$ and $0.914(L) + 10.328\%$, respectively.

Keywords : Deck, Bridge, Fiber Reinforced Polymer (FRP), Finite Element, Dynamic Load Allowance (DLA)

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจที่สำคัญมาโดยตลอด พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือและเป็นแรงผลักดันจนทำให้ข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากการให้คำปรึกษาในกระบวนการวิจัยอย่างสม่ำเสมอของ รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตถัญญู ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงรองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยชิ้นนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.ปฐมเมศ ผาณิตพจมาน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อชี้แนะการใช้งานโปรแกรม ANSYS

ขอขอบคุณ นางสาวสุพิศ นนทะสร และ นางสาวกมลวรรณ สองนาม ชูรการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยดำเนินเรื่องการส่งเอกสารต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

ขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่คอยให้กำลังใจและช่วยให้การสนับสนุนมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา ซึ่งได้แก่ ทุนศิษย์ก้นกุฏิและทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์

อรรถพล แสงแก้ว

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(14)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 กระบวนการทำวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 วรรณกรรมปริทัศน์	
2.1 จุดเริ่มต้นของงานวิจัย	5
2.2 การพัฒนา การสร้างแบบจำลอง และการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นสะพาน พอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย	5
2.3 การศึกษาทางด้านพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลัง ด้วยเส้นใย	11
2.4 สรุป	14
3 แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย	
3.1 วัสดุประกอบประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย	15
3.2 แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่นำมาใช้ในงานวิจัย	16
3.2.1 แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP) ประเภท Prodeck 4	17
3.2.2 แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP) ประเภท Prodeck 8	21
3.3 สรุป	25
4 วิธีการวิจัย	
4.1 บทนำ	26
4.2 โปรแกรม ANSYS 9.0	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์	29
4.4 แบบจำลองระดับชิ้นส่วน	29
4.5 แบบจำลองระดับระบบ	32
4.6 การเชื่อมต่อของแบบจำลองระดับระบบระหว่างแผ่นพื้นสะพานกับคานที่รองรับ	33
4.6.1 แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์	33
4.6.2 แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบบางส่วน	34
4.7 การศึกษาแบบพารามทริกซ์	35
4.8 กรณีศึกษาของแบบจำลอง	36
4.9 ตำแหน่งของน้ำหนักรถบรรทุกบนแบบจำลอง	39
4.9.1 สำหรับหน้าตัดสะพานที่รองรับด้วยคานเหล็ก 4 ตัว	39
4.9.2 สำหรับหน้าตัดสะพานที่รองรับด้วยคานเหล็ก 5 ตัว	40
4.9.3 สำหรับหน้าตัดสะพานที่รองรับด้วยคานเหล็ก 7 ตัว	40
4.10 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้บนแบบจำลอง	41
4.11 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านแบบจำลองระบบสะพาน	42
4.12 สรุป	44
5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	
5.1 บทนำ	47
5.2 การวิเคราะห์แบบจำลองระดับชิ้นส่วน	47
5.2.1 แบบจำลองระดับชิ้นส่วนของแผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 4	47
5.2.2 แบบจำลองระดับชิ้นส่วนของแผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 8	52
5.3 การวิเคราะห์แบบจำลองระดับระบบ	55
5.3.1 ประเภทของแบบจำลอง	55
5.3.2 เงื่อนไขของจุดต่อระหว่างแผ่นพื้นกับคานเหล็กที่รองรับของแบบจำลอง	59
5.3.3 ตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลบนแบบจำลองระดับระบบ	60
5.4 ผลการศึกษาแบบอิงตัวแปรเสริมของแบบจำลองระดับระบบ	60
5.4.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางสถิติศาสตร์	61
5.4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์	72
5.5 อิทธิพลของตัวแปรเสริมที่มีผลต่อค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์	74
5.5.1 อิทธิพลของจำนวนรอบบรรทุกและตำแหน่งน้ำหนักกระทำที่มีผลต่อค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์	74
5.5.2 อิทธิพลของความเร็วของรอบบรรทุกที่มีผลต่อค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์	75
5.5.3 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างคานเหล็กที่รองรับที่มีผลต่อค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์	78
5.5.4 อิทธิพลของช่วงความยาวของสะพานที่มีผลต่อค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์	81
5.5.5 สรุปค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองทั้งหมด	82
5.5.6 เปรียบเทียบความแตกต่างของตัวแปรเสริมที่มีอิทธิพลต่อค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์	83
5.6 สรุปผล	84
6 เปรียบเทียบผลการวิจัย	
6.1 บทนำ	85
6.2 ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์จากงานวิจัยในอดีต	85
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์กับช่วงความยาวของสะพาน	87
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์กับตัวแปรเสริม (ความเร็ว ช่วงความยาวของสะพาน และความถี่ของสะพาน)	88
6.5 สรุป	90
7 สรุปผลการวิจัย	
7.1 บทนำ	91
7.2 สรุปผลการศึกษาแบบจำลองระดับชิ้นส่วน	91
7.3 สรุปผลการศึกษาแบบจำลองระดับชิ้นส่วน	92
7.4 ข้อเสนอแนะ	93
บรรณานุกรม	95
ภาคผนวก	98

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ก. ตารางแสดงค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก	99
ข. ผลการวิเคราะห์การตอบสนองสูงสุด (การโก่งตัวและความเครียด) ของแบบจำลองทางสถิตศาสตร์	104
ค. ผลการวิเคราะห์การตอบสนองสูงสุด (การโก่งตัวและความเครียด) ของแบบจำลองทางพลศาสตร์	127
ง. ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของตัวแปรเสริมที่มีอิทธิพลต่อค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก	159
การเผยแพร่วิทยานิพนธ์	168
ประวัติผู้เขียน	183

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 รูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางของเส้นใยในชั้นลามิเนต สำหรับ Prodeck 4	18
3.2 คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นบางชนิด CDBM3415 และDDBM4015 สำหรับ Prodeck 4	19
3.3 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตของแผ่นตั้ง (Web) ชนิด Prodeck 4	20
3.4 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตของแผ่นปีก (Flange) ชนิด Prodeck 4	20
3.5 รูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางของเส้นใยในชั้นลามิเนต สำหรับ Prodeck 8	22
3.6 คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นบางชนิด CDBM 3415 และ CDB 400 สำหรับ Prodeck 8	23
3.7 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตของแผ่นตั้ง (Web) ชนิด Prodeck 8	24
3.8 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตของแผ่นแนวทะแยง (Diagonal) ชนิด Prodeck 8	24
3.9 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตของแผ่นปีก (Flange) ชนิด Prodeck 8	25
4.1 คุณสมบัติและขนาดของคานเหล็ก W36×150	36
4.2 กรณีศึกษาภายใต้การเปลี่ยนตัวแปรที่ทำการศึกษาของแผ่นพื้นชนิด Prodeck 4	37
4.3 กรณีศึกษาภายใต้การเปลี่ยนตัวแปรที่ทำการศึกษาของแผ่นพื้นชนิด Prodeck 8	38
4.4 สรุปค่าตัวแปรและจำนวนแบบจำลองในระดับต่างๆ	45
5.1 ค่าความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองระดับชิ้นส่วน Prodeck 4 และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Aluri, 2006)	50
5.2 ค่าความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองระดับชิ้นส่วน Prodeck 8 และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Jinka, 2003)	53
5.3 รายละเอียดของแบบจำลองระบบสะพานแบ่งตามลักษณะของหน้าตัดแบบจำลอง	56
5.4 ผลการตอบสนองสูงสุดทางสถิติศาสตร์ของแบบจำลอง P4 G4 L12-A	61
5.5 ผลการตอบสนองสูงสุดทางสถิติศาสตร์ของแบบจำลอง P4 G4 L12-B	62
5.6 ผลการตอบสนองสูงสุดทางสถิติศาสตร์ของแบบจำลอง P4 G4 L12-C	63
5.7 ค่าการโก่งตัวสูงสุดทางพลศาสตร์ของแบบจำลอง P4 G4 L12-A1	71
5.8 ค่าความเครียดสูงสุดทางพลศาสตร์ของแบบจำลอง P4 G4 L12-A1	71
5.9 การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแบบจำลองชนิด P4 G4 L12-A	72
5.10 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์เมื่อจำนวนคานเหล็กที่รองรับมีการเปลี่ยนแปลง (แบบจำลองสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 4)	78

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.11 เปรียบเทียบค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์เมื่อจำนวนคานเหล็กที่รองรับมีการเปลี่ยนแปลง (แบบจำลองสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 8)	79
5.12 สรุปค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์สูงสุดของแบบจำลองหลักทั้งหมด 6 หน้าตัด	83
6.1 ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์จากงานวิจัยในอดีต	86
6.2 ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์จากข้อกำหนดการออกแบบ	87
6.3 ตัวแปรและค่าคงที่จากสมการที่ 6.1 และ 6.2	89

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 รูปหน้าตัดของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย	6
2.2 รูปหน้าตัดของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย	7
3.1 ประเภทของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย	16
3.2 ขนาดหน้าตัดของแผ่นพื้น FRP ชนิด Prodeck 4	17
3.3 ขนาดหน้าตัดของแผ่นพื้น FRP ชนิด Prodeck 8	21
4.1 โปรแกรม ANSYS 9.0 (ANSYS, Inc.)	27
4.2 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรม ANSYS 9.0 (ANSYS, Inc.)	27
4.3 กระบวนการทำงานเบื้องต้นของโปรแกรม ANSYS 9.0	28
4.4 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 4 (Aluri, 2006)	30
4.5 แบบจำลองแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 4 ด้วยโปรแกรม ANSYS	30
4.6 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 8 (Jinka, 2003)	31
4.7 แบบจำลองแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 8 ด้วยโปรแกรม ANSYS	31
4.8 แบบจำลองระดับระบบสะพานที่รองรับด้วยคานเหล็ก	32
4.9 การเชื่อมต่อ Node แบบ Fully Composite	33
4.10 การเชื่อมต่อ Node แบบ Partial Composite	34
4.11 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับหน้าตัดตามขวางของแบบจำลองระบบสะพาน	36
4.12 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับหน้าตัดตามยาวของแบบจำลองระบบสะพาน	37
4.13 ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกของระบบสะพานมีคานรองรับ 4 คาน	39
4.14 ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกของระบบสะพานมีคานรองรับ 5 คาน	40
4.15 ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกของระบบสะพานมีคานรองรับ 7 คาน	40
4.16 แรงกระทำจากรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HS-25	41
4.17 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกในช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป	42
5.1 แบบจำลองแผ่นพื้น Prodeck 4 จำนวน 6 แผ่นพื้น	48
5.2 แบบจำลองแผ่นพื้น Prodeck 4 จำนวน 6 แผ่นพื้น (ตัดปีกส่วนเกิน)	48
5.3 ขนาดแบบจำลองระดับชิ้นส่วนชนิด Prodeck 4	48
5.4 แบบจำลองแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 4 จากโปรแกรม ANSYS	49
5.5 การเปรียบเทียบค่าความถี่ในแต่ละรูปแบบการสั่นของแบบจำลอง Prodeck 4	50

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 รูปแบบการสั้นของแบบจำลอง Prodeck 4 (Mode 1 - 5)	51
5.7 ขนาดแบบจำลองระดับชิ้นส่วนชนิด Prodeck 8	52
5.8 แบบจำลองแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 8 จากโปรแกรม ANSYS	53
5.9 การเปรียบเทียบค่าความถี่ในแต่ละรูปแบบการสั้นของแบบจำลอง Prodeck 8	54
5.10 รูปแบบการสั้นเฉพาะการดัดของแบบจำลอง Prodeck 8 (Bending Mode 1 - 3)	54
5.11 รายละเอียดของแบบจำลองระบบสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 4 ที่รองรับด้วย คานเหล็ก	57
5.12 รายละเอียดของแบบจำลองระบบสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 8 ที่รองรับด้วย คานเหล็ก	58
5.13 ตัวอย่างหน้าตัดของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ	59
5.14 ส่วนขยายจุดเชื่อมต่อ Couples link และ การใส่เงื่อนไขที่รองรับของแบบจำลอง	59
5.15 ตำแหน่งบันทึกข้อมูลค่าการตอบสนองสูงสุดของแบบจำลองระดับระบบ	60
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับระยะห่างจากขอบสะพาน (P4 G4 L12-A)	62
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะห่างจากขอบสะพาน (P4 G4 L12-A)	62
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับระยะห่างจากขอบสะพาน (P4 G4 L12-B)	63
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะห่างจากขอบสะพาน (P4 G4 L12-B)	63
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับระยะห่างจากขอบสะพาน (P4 G4 L12-C)	64
5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะห่างจากขอบสะพาน (P4 G4 L12-C)	64
5.22 ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ (P4 G4 L12-A1, V20)	65
5.23 ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ (P4 G4 L12-A1, V40)	66
5.24 ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ (P4 G4 L12-A1, V60)	67
5.25 ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ (P4 G4 L12-A1, V80)	68
5.26 ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ (P4 G4 L12-A1, V100)	69
5.27 จำนวนและตำแหน่งของรถบรรทุกที่ส่งผลให้เกิดค่า DLA สูงสุด	75
5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับความเร็วรถบรรทุก (Prodeck 4, L=12 เมตร)	75
5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับความเร็วรถบรรทุก (Prodeck 4, L=18 เมตร)	76
5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับความเร็วรถบรรทุก (Prodeck 8, L=12 เมตร)	76

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับความเร็วรถบรรทุก (Prodeck 8, L=18 เมตร)	77
5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับความเร็วรถบรรทุก (FHWA, 1995)	77
5.33 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับระยะห่างของคานที่รองรับ (Prodeck4)	80
5.34 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับระยะห่างของคานที่รองรับ (Prodeck8)	80
5.35 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับช่วงความยาวของสะพาน (Prodeck4)	81
5.36 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับช่วงความยาวของสะพาน (Prodeck8)	82
5.37 เปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อค่า DLA	84
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์กับช่วงความยาวของสะพาน	87
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับช่วงความยาวของสะพาน (Paultre, 1992)	90
7.1 ตำแหน่งของรถบรรทุกที่ส่งผลให้เกิดค่า DLA สูงสุด	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันแผ่นพื้นสะพานที่พบเห็นโดยส่วนใหญ่แล้วนั้นได้รับการออกแบบและก่อสร้างด้วยวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิม (Conventional Engineering Materials) เช่น คอนกรีต เหล็ก ไม้ เป็นต้น ต่อมาภายหลังการก่อสร้างและใช้งานไปได้ระยะเวลาหนึ่งวัสดุเหล่านี้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุตามกาลเวลาและภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานในขณะนั้นๆ ทำให้แผ่นพื้นสะพานเกิดความเสียหายทางด้านโครงสร้าง ซึ่งส่งผลให้สะพานรับน้ำหนักจากยานพาหนะได้น้อยลง ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าสะพานส่วนใหญ่เป็นสะพานเก่าที่ได้รับการออกแบบและก่อสร้างให้ใช้งานผ่านมานานหลายปีแล้ว โดยการออกแบบแผ่นพื้นสะพานในอดีตนั้นได้ออกแบบมาเพื่อให้รองรับการจราจรของยานพาหนะที่มีความเร็วไม่มาก และมีปริมาณการใช้งานที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจุบัน เนื่องจากการจราจรในอดีตยังไม่แออัดมากนัก ซึ่งน้ำหนักที่แผ่นพื้นสะพานรับได้นั้น วิศวกรผู้ออกแบบสะพานได้อ้างอิงจากยานพาหนะในยุคสมัยนั้น เมื่อยุคสมัยเปลี่ยนไปจนกระทั่งปัจจุบัน ปริมาณการจราจรที่เพิ่มสูงขึ้น ตลอดจนยานพาหนะที่มีกำลังบรรทุกเพิ่มมากขึ้น มีความเร็วและความถี่ของการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะเพิ่มสูงขึ้นตามเทคโนโลยีในปัจจุบัน ส่งผลให้สะพานเก่าๆเหล่านั้นไม่สามารถรองรับการจราจรได้อย่างเหมาะสมอีกต่อไป จึงมีความจำเป็นในการบูรณะซ่อมแซม หรือทำการก่อสร้างใหม่เพื่อให้ยังคงมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการใช้งาน ซึ่งส่งผลให้ต้องใช้งบประมาณในการซ่อมแซมหรือก่อสร้างใหม่ที่สูง

ดังนั้นเพื่อที่จะบรรเทาปัญหาการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นกับสะพานที่ก่อสร้างมาจากวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิมนั้น การเลือกใช้วัสดุชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิมตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวให้เบาบางลงได้ ดังนั้นจึงมีการใช้วัสดุประเภทวัสดุประกอบชนิดพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Composite Materials หรือมีชื่อย่อว่า FRP) โดยในด้านของงานสะพานได้มีการประยุกต์ใช้เป็นส่วนหนึ่งของแผ่นพื้นสะพาน (FRP Bridge Deck) เพื่อทดแทนการใช้แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหรือแผ่นพื้นเหล็กเหมือนในอดีตที่ผ่านมา

สำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาประสิทธิภาพของแผ่นพื้นสะพานชนิดพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP Bridge Deck) ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกทางพลศาสตร์ เพื่อให้เกิดความเหมาะสมและคงทนตลอดอายุการใช้งานของสะพานภายใต้สภาวะการใช้งานจริงและยังก่อให้เกิดประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้คือสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP Bridge Deck) ให้มีความเหมาะสมทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยในครั้งนี้เพื่อทำการศึกษาประเมินประสิทธิภาพและพฤติกรรมของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วภายใต้แรงกระทำทางพลศาสตร์ โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพาณิชย์ (ANSYS 9.0) โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลในลักษณะการศึกษาแบบอิงตัวแปรเสริม (Parametric study) เพื่อหาข้อสรุปสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบในขั้นต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้แบ่งวัตถุประสงค์ออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแผ่นพื้นในระดับชิ้นส่วน

1) เพื่อประเมินค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการสั่น (Mode Shape) ของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยในระดับชิ้นส่วนเปรียบเทียบกับค่าจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ส่วนที่ 2 ทำการศึกษาแบบจำลองระดับระบบภายใต้สภาวะการใช้งานต่างๆ

2) เพื่อประเมินค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance, DLA) ของแผ่นพื้นสะพานชนิดพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้สภาวะการใช้งานต่างๆ

3) เพื่อเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ ของแผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 4 และ Prodeck 8 กับ แผ่นพื้นสะพานชนิดคอนกรีตเสริมเหล็ก

4) เพื่อทำการรวบรวมและประมวลผลข้อมูลของค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์และนำเสนอในรูปแบบมาตรฐานการออกแบบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Method) โดยทำการสร้างแบบจำลองสะพานชนิดแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยผ่านโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งใช้โปรแกรม ANSYS เวอร์ชัน 9.0 เป็นโปรแกรมหลักที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและประมวลผล ซึ่งแผ่นพื้นสะพานที่ใช้ในการทำการทดลองครั้งนี้มีอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน นั่นคือ แผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 4 (Low-Profile Cross Section) และ Prodeck 8 (High-Profile Cross Section) สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกเป็นไปตามข้อกำหนดน้ำหนักบรรทุกทุกมาตรฐาน AASHTO HS25 โดยรายละเอียดของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จะถูกกล่าวไว้ในบทที่ 4

1.4 กระบวนการทำวิจัย

ขั้นตอนการทำวิจัยที่จะกล่าวภายในหัวข้อนี้เป็นกระบวนการวิจัยโดยย่อ เพื่อแสดงภาพรวมทั้งหมดของงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ทำการเก็บรวบรวมและศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัย ตลอดจนใช้เป็นข้อมูลเพื่ออ้างอิงทั้งทางทฤษฎีและการปฏิบัติ

2) การศึกษาหลักการและการใช้งานโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้คือ ANSYS 9.0

3) การสร้างแบบจำลองระดับชิ้นส่วน คือการสร้างแบบจำลองเฉพาะแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทั้งชนิด Prodeck 4 และ Prodeck 8 เพื่อทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ทั้งด้านคุณสมบัติทางวัสดุ และรูปแบบของแบบจำลอง โดยทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการสั่น (Mode Shape) ของแผ่นพื้นทั้งสองชนิดตลอดจนนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

4) การศึกษาของแบบจำลองระบบสะพานภายใต้ปัจจัยที่มีผลในการศึกษาต่างๆ โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ ชนิดของแผ่นพื้นสะพาน ความยาวของสะพาน จำนวนคานที่รองรับตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก ความเร็วของรถบรรทุก โดยสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามกรณีศึกษาที่ได้กำหนดไว้

5) ทำการวิเคราะห์แบบจำลองทั้งหมด และทำการเก็บข้อมูลค่าการตอบสนองในแต่ละแบบจำลองภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิตศาสตร์ (Static) และทางพลศาสตร์ (Dynamic) ในกรณีต่างๆ

- 6) ทำการประเมินค่าตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance, DLA) และทำการเปรียบเทียบกับผลการวิจัยอื่นๆที่ได้เก็บรวบรวมไว้ตลอดจนใช้เสนอความสัมพันธ์ของตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่มีต่อตัวแปรต่างๆ เป็นรูปแบบตามมาตรฐานการออกแบบ
- 7) สรุปผลการศึกษางานวิจัยพร้อมทั้งเผยแพร่ผลงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมรูปแบบการสั่นที่เกิดขึ้นกับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้แรงกระทำทางพลศาสตร์
- 2) ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance) ที่เหมาะสมสำหรับไปใช้ในการออกแบบสะพานชนิดแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
- 3) ส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเพื่อนำมาใช้งานแทนแผ่นพื้นสะพานชนิดคอนกรีตเสริมเหล็ก ตลอดจนนำไปสู่การลดค่าซ่อมบำรุงสะพาน เนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของแผ่นพื้นสะพานได้

บทที่ 2

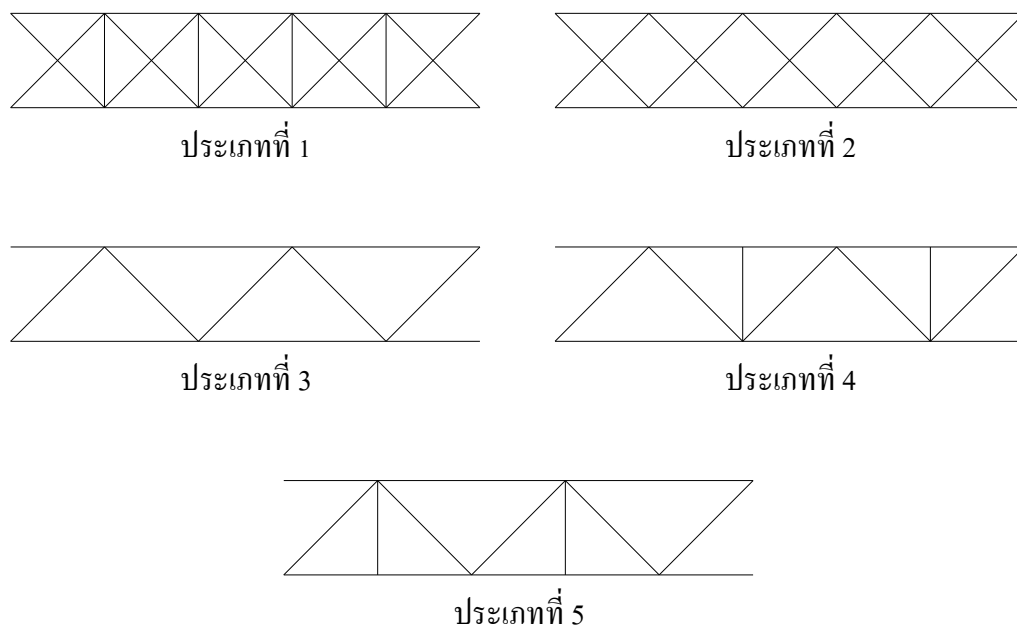
วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 จุดเริ่มต้นของงานวิจัย

เมื่อย้อนกลับไปในปี ค.ศ.1983 กรมทางหลวงแห่งสหรัฐอเมริกา (The US Department of Transportation) ได้ทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยทางด้านโครงสร้างของสะพาน โดยมุ่งเน้นที่จะนำเอาวัสดุประกอบเข้ามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างของระบบสะพาน ภายใต้ชื่อโครงการว่า “Transfer of Composite Technology to Design and Construction of Bridges” ซึ่งโครงการดังกล่าวนับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาและทำการวิจัยแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Deck, FRP Deck) โดยการศึกษาในยุคสมัยนั้นยังเป็นเพียงการทดสอบและวิเคราะห์ระบบสะพานขนาดเล็กภายในห้องปฏิบัติการเป็นส่วนใหญ่ เพราะเนื่องมาจากขาดแคลนงบประมาณตลอดจนเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบระบบสะพานขนาดใหญ่ ซึ่งข้อจำกัดนี้ส่งผลให้นักวิจัยไม่สามารถทำการศึกษาในสภาวะการใช้งานตามสภาพแวดล้อมจริงได้ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยก็ยังคงดำเนินการต่อไปในสภาพที่มีข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งเห็นได้จากในระยะเวลาต่อมางานวิจัยด้านแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว ได้รับความสนใจจากนักวิจัยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยตลอดจนถึงปัจจุบัน

2.2 การพัฒนา การสร้างแบบจำลอง และการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

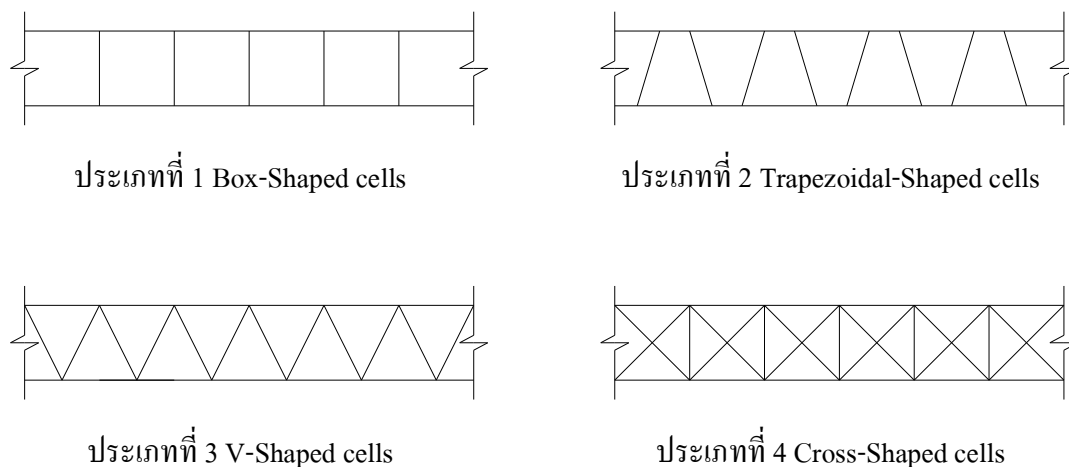
McGhee และคณะ (1991) ได้ทำการศึกษาแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในการศึกษาใช้แผ่นพื้นสะพานที่มีหน้าตัดหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลจากห้องปฏิบัติการ (Henry, 1985) และ (Ahmad, 1989) ได้ข้อสรุปว่าแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภทที่ 3 (จากรูปที่ 2.1) มีประสิทธิภาพมากที่สุด



รูปที่ 2.1 รูปหน้าตัดของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

Mongi และคณะ (1991) ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ โดยวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าการโก่งตัว (Deflection) ของระบบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ที่มีขนาดของแผ่นพื้น จุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นพื้นและเงื่อนไขของแรงที่มากระทำที่แตกต่างกัน โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีเชิงตัวเลข พบว่ามีความสอดคล้องกันดี และยังพบอีกว่าแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ที่มีชนิดหน้าตัดแบบกล่องแบบสองเซลล์ (Two Cellular Box Sections) ที่ทำการเชื่อมต่อหรือติดตั้งกับคานชนิดหน้าตัดรูปตัวไอ (I-Beam) จะเป็นระบบสะพานที่ดีที่สุด

Zureick และคณะ (1997) ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองผ่านวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่วางอยู่บนคานที่รองรับสองตัว ซึ่งเป็นแบบที่รองรับอย่างง่าย ภายใต้แรงกระทำแบบกระจายลักษณะสี่เหลี่ยม (Patch Load) โดยการทดลองครั้งนี้ใช้แผ่นพื้น FRP ที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน 4 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 2.2 ทำการวิเคราะห์หาค่าการโก่งตัว ซึ่งพบว่า แผ่นพื้นสะพานที่มีหน้าตัดรูปเซลล์สี่เหลี่ยมประเภทที่ 1 และหน้าตัดรูปตัววีประเภทที่ 3 มีการโก่งตัวที่น้อยกว่าหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมูประเภทที่ 2 และหน้าตัดรูปกากบาทประเภทที่ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 รูปหน้าตัดของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

Brown และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิดหน้าตัดรูปกล่องเซลล์สี่เหลี่ยม (Cellular Box Decks) ที่วางอยู่บนที่รองรับคานรูปตัวไอ โดยในการทดสอบประกอบไปด้วยแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่มีขนาดที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบคือ แบบที่ 1 ประกอบไปด้วย แผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ขนาด $152.4 \times 152.4 \times 12.7$ เซนติเมตร ($60 \times 60 \times 5$ นิ้ว) ประกอบเข้ากับคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด $12.7 \times 12.7 \times 0.9$ เซนติเมตร ($5 \times 5 \times 3/8$ นิ้ว) แบบที่ 2 ประกอบไปด้วยแผ่นพื้นขนาด $304.8 \times 304.8 \times 20.3$ เซนติเมตร ($120 \times 120 \times 8$ นิ้ว) ประกอบเข้ากับคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด $10.2 \times 20.3 \times 0.6$ เซนติเมตร ($4 \times 8 \times 1/4$ นิ้ว) ซึ่งแบบจำลองทั้งสองนี้จะถูกวางไว้บนคานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยรูปตัวไอ (FRP Wide Flange I-Beam) ขนาด $30.5 \times 30.5 \times 1.3$ เซนติเมตร ($12 \times 12 \times 1/2$ นิ้ว) ทำการทดสอบสะพานทั้งระบบ ผลการศึกษาได้นำเสนอสมการการออกแบบอย่างง่ายภายใต้ผลของการคัดของระบบสะพาน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าสมการการออกแบบอย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีความสอดคล้องกันดีกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Shekar และคณะ (2000) ได้ดำเนินการทดสอบการคัดภายใต้แรงกระทำสามจุดของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ประเภทหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal FRP bridge decks) และหน้าตัดรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal FRP bridge decks) โดยแผ่นพื้นมีขนาดหน้าตัด 30.5×20.3 เซนติเมตร (12×8 นิ้ว) และมีความยาวของช่วงความยาวของ

แผ่นพื้น 274.3 เซนติเมตร (108 นิ้ว) ผลการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแกร่งของการค้ำตัวเทียบเท่า (Equivalent flexural rigidity) มีค่า 2.42×10^5 กิโลกรัม-ตารางเมตร (8.28×10^8 ปอนด์-ตารางนิ้ว) และค่ากำลังประลัย (Ultimate bending strength) เท่ากับ 47,740 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (30.8×10^3 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ทั้งนี้ยังพบอีกว่ารูปแบบการพิบัติที่เกิดขึ้นมีลักษณะเกิดรอยแยกระหว่างแผ่นปีก (Web) และแผ่นตั้ง (Flange) ของแผ่นพื้นสะพาน นอกจากนี้ยังมีการใช้ทฤษฎีคำนวณหาค่าความต้านทานต่อการเสียรูปหรือค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) และ ค่าแรงค้ำตัวประลัยเพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ

Chandrashekhara และ Nanni (2000) ได้ทำการศึกษาและทดสอบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทั้งในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานของแผ่นพื้น โดยใช้คุณสมบัติบางประการที่ทราบค่าในการสร้างแบบจำลองได้แก่ ค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) และรูปแบบการพิบัติ (Failure modes) โดยทดสอบใช้แผ่นพื้นสะพานประเภทหน้าตัดเซลล์สี่เหลี่ยม (Square box cells) จากการศึกษาพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกันดี โดยมีผลสรุปได้ว่าแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วหรือเส้นใยคาร์บอนนั้นสามารถนำไปใช้ทดแทนแผ่นพื้นสะพานที่ทำจากวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิมของสะพานที่มีช่วงความยาวไม่มากนัก

Howard (2000) ได้ดำเนินการทดสอบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วที่มีชื่อทางการค้าว่า Prodeck 8 โดยแผ่นพื้นชนิดนี้ประกอบไปด้วยเส้นใยแก้วโดยประมาณ 54 เปอร์เซ็นต์ การทดสอบทั้งหมดจะอยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกตามข้อกำหนดของ AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) ประเภทน้ำหนักบรรทุกทุก HS25 แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ที่นำมาทดสอบนั้นมีส่วนประกอบที่สำคัญคือเส้นใยแก้วประเภท E โดยมีพอลิเมอร์ซึ่งแตกต่างกันสองชนิดคือ แผ่นพื้นชนิดแรกใช้พอลิเอสเตอร์ (Polyester resin) ส่วนแผ่นพื้นชนิดที่สองใช้ไวนิลเอสเตอร์ (Vinyl ester resin) แผ่นพื้นทั้งสองประเภทได้ทำการออกแบบและทดสอบการตอบสนองรวมทั้งหาค่าความยืดหยุ่นและรูปแบบการพิบัติ โดยมีข้อสรุปว่า กลุ่มตัวอย่างของแผ่นพื้นที่ใช้ไวนิลเอสเตอร์มีประสิทธิภาพทางโครงสร้างดีกว่า กลุ่มตัวอย่างของแผ่นพื้นที่ใช้พอลิเอสเตอร์ ไม่ว่าจะเป็นในด้านารรับแรงที่มากระทำรูปแบบการพิบัติ การค้ำ และการเลื่อนของแผ่นพื้น

Punyamurthula (2004) ได้ทำการทดสอบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว โดยหน้าตัดของแผ่นพื้นมีความลึก 10.2 เซนติเมตร (4 นิ้ว) และความกว้าง 61 เซนติเมตร (24 นิ้ว) แผ่นพื้นสะพานผลิตโดยใช้เส้นใยแก้วประเภท E ในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และมีไวนิลเอสเตอร์ (Vinyl ester resin) เป็นวัสดุผสม การดำเนินการทดสอบจะอยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO HS25 โดยทำการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังสูงสุดที่ทำให้เกิดการพิบัติของแผ่นพื้นสะพานมีค่าเท่ากับ 21.7×10^6 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (31×10^3 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) มีค่าสตีเฟนส์เท่ากับ $2,672 \times 10^6$ กิโลกรัมต่อตารางเมตร (3.8×10^6 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) นำผลการทดสอบไปเทียบกับผลการประมาณทางทฤษฎีแผ่นบางดั้งเดิม (Approximate classical lamination theory) หลังจากนั้นทำการศึกษาพฤติกรรมทางสถิติศาสตร์และความล้มของระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก ที่แตกต่างกันสองแบบจำลอง โดยแบบจำลองชนิดแรกมีการยึดแผ่นพื้นด้วยหมุด และแบบจำลองชนิดที่สองมีการยึดแผ่นพื้นด้วยกาว (PLIOGRIP) พบว่าแบบจำลองชนิดแผ่นพื้นยึดด้วยหมุดมีความล้ม 1.5 ล้ารอบ และแบบจำลองชนิดแผ่นพื้นยึดด้วยกาวมีการพิบัติหลังจากผ่านการใช้งาน 495,000 รอบ สรุปได้ว่าสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วประเภทนี้สามารถต้านทานน้ำหนักจากรถบรรทุกภายใต้ข้อกำหนด AASHTO HS25 ได้ โดยแผ่นพื้นสะพานจะต้องมีที่รองรับห่างห่างกันไม่เกิน 122 เซนติเมตร (48 นิ้ว)

Feng และคณะ (2006) ได้คิดค้นและพัฒนาารูปแบบของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย โดยทำการนำแผ่นของเส้นใยเสริมกำลังมาติดและพันรอบแผ่นพื้นสะพานด้วยวิธี Filament Winding โดยนำผลการทดสอบการรับน้ำหนักที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแผ่นพื้นสะพานชนิดอื่นๆ พบว่าสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้น

Prachasaree และคณะ (2006) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP) เพื่อทำความเข้าใจการตอบสนองการบิดของแผ่นพื้น FRP โดยใช้ทฤษฎีแผ่นบางดั้งเดิมอย่างง่าย (Simplified classical lamination theory, SCLT) ทำการทำนายค่าความแข็งแรงต่อการบิด โมดูลัสเฉือนในระนาบ (In-plane shear) และความเครียดเฉือนในระนาบ (In-plane shear strain) ข้อมูลความแข็งแรงการบิดและโมดูลัสการเฉือนในระนาบที่ได้จากการทดสอบมีความสัมพันธ์กันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ SCLT และไฟไนต์เอลิเมนต์ และแบบจำลองแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ซึ่งจำลองโดยมีลักษณะ โครงสร้างแบบ

แผ่น (Plate action) จะมีค่าความแข็งเกร็งการบิดสูงกว่า 20 % เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองโครงสร้างแบบคาน

Prachasaree และคณะ (2007) ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันมาก (120 องศาฟาเรนไฮต์) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวด้านบนและผิวด้านล่างของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย มีสาเหตุมาจากค่าการนำความร้อนที่ต่ำของวัสดุประเภทเส้นใยแก้ว และหน้าตัดของแผ่นพื้นสะพานมีลักษณะเป็นแบบช่องกลางจึงทำให้มวลของความร้อนต่ำเช่นกัน โดยทำการทดสอบแผ่นพื้นสะพานชนิดนี้ในห้องปฏิบัติการภายใต้การไล่ระดับของอุณหภูมิต่ำ ทฤษฎีคานถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก และใช้ทฤษฎีแผ่นคัตเพื่อหาผลเฉลยรูปแบบปิด (ด้วยวิธี Macro และ Navier - Levy) นอกจากนี้การประเมินความเครียดจากอุณหภูมิของข้อมูลการทดสอบภาคสนาม ได้รับการประเมินโดยใช้แบบจำลองทางทฤษฎีที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่าแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยจะโก่งตัวเมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิที่ติดลบ หากอุณหภูมิผิวบนของแผ่นพื้นมากกว่าอุณหภูมิผิวล่างของแผ่นพื้น จะทำให้แผ่นพื้นโก่งตัวขึ้น และหากอุณหภูมิผิวบนของแผ่นพื้นต่ำกว่าอุณหภูมิผิวล่างของแผ่นพื้น จะทำให้แผ่นพื้นโก่งตัวลง

Sookmanee (2011) ได้ทำการศึกษาสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิดน้ำหนักเบา หรือมีชื่อทางการค้าว่าแผ่นพื้น Prodeck 4 และ Prodeck 8 และมีที่รองรับเป็นคานเหล็ก โดยทำการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม MSC Patran ภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิตศาสตร์ เพื่อหาค่าการตอบสนอง ค่าการโก่งตัว ค่าความแข็งเกร็งของการคัต และค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ ได้นำเสนอสมการหาค่า LDF อย่างง่ายระหว่างความสัมพันธ์กับค่าระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ ซึ่งเป็นสมการขอบเขตบนและขอบล่าง คือ $0.1331S+0.3116$ และ $0.1331S+0.0116$ ตามลำดับ

2.3 การศึกษาทางด้านพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

Wang และคณะ (1992) ได้ทำการออกแบบสะพานที่ประกอบไปด้วยระบบคานขนาดใหญ่หลายๆคาน (multi-girder) เพื่อที่จะทำการศึกษาพฤติกรรมแบบพลศาสตร์ (Dynamic) เนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะที่มีความเร็วต่างกัน โดยมีการสร้างแบบจำลองของยานพาหนะโดยกำหนดให้น้ำหนักบรรทุกทุกอยู่ภายใต้ข้อกำหนด HS20-44 ทำการจำลองให้ผิวของถนนมีความขรุขระด้วยการใช้ค่าพลังงานความหนาแน่นของสเปกตรัมเป็นตัวกำหนด ซึ่งอยู่บนพื้นฐานข้อกำหนดตามมาตรฐาน นำไปสู่ข้อสรุปว่า

- ค่าตัวประกอบการกระทบ (Impact Factor) ของสะพาน เมื่อรับน้ำหนักของรถบรรทุก 2 คันที่วางอยู่ชิดกัน จะมีค่าน้อยกว่าการรับน้ำหนักของรถบรรทุกเพียง 1 คัน
- เมื่อทำการใส่ น้ำหนักบรรทุกตรงกลางของสะพานพบว่า คานตัวนอกของสะพานจะรับผลของการกระทบมากกว่าคานของสะพานตัวด้านใน
- พื้นผิวของถนนมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าการกระทบของสะพาน ซึ่งพบว่าค่าการกระทบจะมีค่าได้สูงสุดถึง 60 % เมื่อพื้นผิวถนนของสะพานไม่ดี

Chatterjee และคณะ (1993) ได้นำเสนอวิธีการเพื่อทำให้เกิดการสั่นสะเทือนตามแนวขวางอย่างต่อเนื่องของสะพาน เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกทุกจากยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านได้ข้อสรุปว่า

- ชนิดของสะพาน (การรับน้ำหนัก จำนวนของแผ่นพื้น ช่วงของความยาวและชิ้นส่วนที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน) จะมีอิทธิพลสำคัญต่อค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance, DLA)
- การเปลี่ยนตัวแปรความเร็วของยานพาหนะ จากความเร็วน้อยไปหาความเร็วมาก ส่งผลให้ค่า DLA มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยมีการเพิ่มขึ้นของค่า DLA ไปจนถึงระดับความเร็วหนึ่ง หลังจากนั้นค่า DLA จะมีค่าลดลงในขณะที่ความเร็วของยานพาหนะยังคงเพิ่มสูงขึ้น
- สะพานที่มีช่วงความยาวหลายๆช่วงต่อเนื่องกัน จะมีค่า DLA สูงกว่าสะพานที่มีช่วงความยาวหลายๆช่วงที่ไม่ต่อเนื่องกันบนที่รองรับ

Humar และ Kasif (1995) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองของสะพาน ในอุดมคติ โดยให้แผ่นพื้นมีคุณสมบัติเป็นแบบไอโซทรอปิกและออร์โธทรอปิก โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกจากยานพาหนะเคลื่อนที่ไปตามแนวขวางของสะพาน ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ

วิธีการเชิงตัวเลข โดยพบว่า ค่า DLA ของการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะหลายๆคันจะมีค่าน้อยกว่า การเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะเพียงคันเดียว

Zhu และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกแบบพลศาสตร์ (Dynamic) บนสะพานแบบต่อเนื่องที่มีหลายช่องทาง (multi-lane) เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของยานพาหนะที่มีความเร็วคงที่ โดยมีการจำลองสะพานเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมแบบออร์โทโทรปิก มีที่รองรับตรงกลางของช่วงความยาวหลายๆช่วงตามเงื่อนไข โดยมีการจำลองโมเดลของยานพาหนะเป็นแบบไม่เชิงเส้น (non-linear) ได้ผลสรุปว่า การวางตำแหน่งของยานพาหนะมีผลต่อค่าการกระทบ (impact factor) และปัจจัยด้านความขรุขระของผิวถนนจะมีผลต่อค่าการกระทบมากกว่าปัจจัยของความเร็วของยานพาหนะ

Jinka (2003) ได้ทำการศึกษาผลการตอบสนองแบบพลศาสตร์ (Dynamic) ของสะพานที่มีแผ่นพื้นประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP) ได้ทำการทดสอบภาคสนามโดยมีสะพานที่ใช้ทดสอบ 3 สะพานคือ Katy Truss Bridge , Market Street Bridge และ Laurel Lick Bridge ที่มลรัฐเวสต์เวอร์จิเนีย เพื่อทำการวัดค่า ความเครียดสูงสุดทางสถิตศาสตร์ (ϵ_{stat}) และความเครียดสูงสุดทางพลศาสตร์ (ϵ_{dyn}) โดยกำหนดให้ค่าความเครียดสูงสุดทางสถิตศาสตร์ (ϵ_{stat}) หาได้จากการวิ่งผ่านของรถบรรทุกที่มีความเร็ว 3.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ ความเครียดสูงสุดทางพลศาสตร์ (ϵ_{dyn}) หาได้จากการวิ่งผ่านของรถบรรทุกที่มีความเร็ว 8.05 , 16.1 32.2 และ 48.3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นต้น และค่า Dynamic Load Allowance ได้ข้อสรุปว่า ความเร่งของสะพาน Katy Truss และ Market Street มีค่าสูงเกินข้อกำหนดของ OHBDC (1983) และ ค่า DLA ที่ได้จากภาคสนามส่วนใหญ่จะอยู่ภายในข้อกำหนดของ AASHTO LRFD (1998)

Daly และ Cuninghame (2005) ได้ทำการทดสอบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมเส้นกำลังด้วยใยแก้ว (FRP) อย่างเต็มรูปแบบ ภายใต้การกระทำของน้ำหนักล้อนิ่งและน้ำหนักของล้อรถที่มีการเคลื่อนไหวในห้องปฏิบัติการ พวกเขาพบว่า แผ่นพื้นสะพาน FRP สามารถต้านทานแรงจากล้อรถยานพาหนะได้เป็นเวลาอย่างน้อย 30 – 40 ปี โดยไม่มีความเสียหายต่อโครงสร้าง แต่ก็ควรมีการป้องกันความเสียหายที่มาจากกระทำในรูปแบบอื่นๆไว้ด้วย เช่น บริเวณส่วนเอว ส่วนปีก หรือที่รองรับของสะพาน

Aluri (2006) ได้ทำทดสอบและพัฒนาแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วชนิด Prodeck4 โดยทำการทดสอบและวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการเปลี่ยนรูปเนื่องจากการสั่น (Mode Shape) ที่เกิดขึ้นกับแผ่นพื้นสะพานเมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือนทางพลศาสตร์

Zhang และ Cai (2006) ได้ศึกษาการกระจายน้ำหนักและการตอบสนองแบบพลศาสตร์ (Dynamic) ของสะพานชนิดหลายคานที่มีประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP) และแผ่นพื้นเป็นคอนกรีตขึ้นอยู่กับรูปแบบของสะพาน พวกเขาพบว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) และการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน FRP มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับสะพานคอนกรีต และเปรียบเทียบระหว่างสะพานที่มีส่วนประกอบเป็น FRP ทั้งหมด กับสะพานที่มีส่วนประกอบเป็น FRP เพียงบางส่วน พบว่าสะพานที่มีส่วนประกอบเป็น FRP เพียงบางส่วนสามารถรับการกระจายน้ำหนักได้ดีกว่า และยังมีการโก่งตัวที่น้อยกว่าอีกด้วย นอกจากนี้พวกเขาก็ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับปัจจัยความขรุขระของผิวถนนและความเร็วของยานพาหนะ พบว่าปัจจัยทั้งสองนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการตอบสนองทางพลศาสตร์ (Dynamic)

Chiewanichakorn และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาผลการตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ (Dynamic) และความล้าของสะพานแบบโครงข้อหมุน โดยมีแผ่นพื้นสะพานแบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ได้สร้างแบบจำลองของสะพาน Bentley ที่ตั้งอยู่เมือง Chemung ในนิวเจอร์ซีย์ ใช้การวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม MSC PATRAN กับ ABAQUS โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกภายใต้ข้อกำหนดของ AASHTO-LRFD bridge specifications สรุปว่า จากการสมมุติให้ค่า Damping ของสะพานมีค่า 5% สามารถหาความล้าของสะพานและนำมาคำนวณอายุการใช้งานของสะพานได้ 354 ปี และพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนพื้นสะพานจากคอนกรีตมาเป็นพื้นสะพานแบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ทำให้ค่าความล้าดีขึ้นเกือบสองเท่า

Albers และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ (Dynamic) ของสะพาน Bentley ที่มีแผ่นพื้นสะพานแบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (FRP) เช่นกัน โดยได้ทำแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิเคราะห์เพื่อ 1) หาค่าความเค้นเปรียบเทียบกับ การทดสอบจริง 2) หาค่าความถี่เปรียบเทียบระหว่างแผ่นพื้นแบบคอนกรีตกับแผ่นพื้นชนิดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และ 3) หาค่าการคดของสะพาน ซึ่งจากผลของการวิเคราะห์พบว่า

- การโก่งตัวของสะพานจะเพิ่มขึ้น 45% เมื่อทำการเปลี่ยนจากแผ่นพื้นคอนกรีตมาเป็นแผ่นพื้นชนิดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว
- เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพื้นสะพานจากคอนกรีตมาเป็นพื้นสะพานชนิดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว พบว่าโหมคของการค้ำจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไป

Song (2010) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของสะพานบอยเซอร์ในรัฐเพนซิลวาเนีย ที่มีแผ่นพื้นชนิดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (FRP) ทำการทดสอบโดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ (ABAQUS) และจำลองน้ำหนักจากรถบรรทุกวิ่งผ่านเพื่อจะวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน หาค่าระยะการโก่งตัวและความเครียดของคานที่อยู่ช่วงตรงกลางของสะพานเพื่อเปรียบเทียบกับค่าทางสถิติศาสตร์ และยังสามารถอธิบายผลกระทบจากแรงเฉือนที่เกิดจากการตอบสนองทางพลศาสตร์

2.4 สรุป

จากการศึกษาบทความงานวิจัยในช่วงต้นที่กล่าวมานั้นแสดงให้เห็นถึงลำดับและเหตุการณ์ของการค้นคว้าและพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ตั้งแต่อดีตตลอดจนถึงปัจจุบัน โดยวิธีการศึกษาของนักวิจัยแบ่งย่อยออกเป็นสามวิธีหลักๆ นั้นคือวิธีแรกเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ วิธีที่สองเป็นการทดสอบภาคสนามและวิธีสุดท้ายเป็นการศึกษาผ่านแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้มีการนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลงานวิจัยที่มีมาก่อน

อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าการศึกษาทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยยังมีจำนวนจำกัดและข้อมูลที่มีอยู่มีจำนวนน้อย นอกจากนี้ยังคงขาดความเข้าใจในพฤติกรรมอย่างชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มความเข้าใจในพฤติกรรมและประสิทธิภาพทางโครงสร้างของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยในการประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างสะพาน ซึ่งจะทำให้วิศวกรสามารถนำความรู้ในส่วนนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการใช้งานอย่างเหมาะสมที่สุดต่อไป

บทที่ 3

แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

3.1 วัสดุประกอบประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

การใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยในงานวิศวกรรมนั้น มีการริเริ่มใช้งานครั้งแรกประมาณ 70 กว่าปีที่แล้วคือ ราวปี ค.ศ.1940 ซึ่งในยุคนั้นเป็นการใช้งานในสาขาอากาศยานและอวกาศ โดยที่เทคโนโลยีที่ก้าวหน้าทางวัสดุศาสตร์ดังกล่าว ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในสาขาต่างๆอย่างมากมาย เช่น ทางทหาร อุตสาหกรรมยานยนต์ อุปกรณ์กีฬา สำหรับในสาขาโยธาและโครงสร้างพื้นฐานมีการใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเพื่อซ่อมแซมหรือเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต เช่นเสริมกำลังของโครงสร้างคาน เสา เป็นต้น

วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุประกอบ (Composite Materials) ประเภทหนึ่งซึ่งมีองค์ประกอบหลักสองส่วนคือ ส่วนรับแรงกระทำหลัก (ส่วนของเส้นใย) และส่วนของพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุหล่อหุ้ม (ส่วนของเมทริกซ์) โดยทั่วไปแล้ววัสดุทางวิศวกรรมชนิดนี้ มักนิยมเรียกชื่อย่อตามอักษรตัวนำของชื่อเต็ม (Fiber Reinforced Polymer) ในภาษาอังกฤษว่า เอฟอาร์พี (FRP) ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยนี้มีข้อดีที่เหนือกว่าวัสดุดั้งเดิมอยู่หลายประการ เช่น

- 1) มีค่าอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักสูง (Strength to Weight)
- 2) ค่าอัตราส่วนสติฟเนสต่อน้ำหนักสูง (Stiffness to Weight)
- 3) ทนทานต่อสภาพแวดล้อม ไม่เกิดการกัดกร่อน (Non-Corrosiveness)
- 4) เป็นวัสดุที่มีค่าดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) ที่ดี
- 5) การต้านทานความล้าที่ดี (Fatigue)
- 6) สามารถผลิตเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปได้และมีน้ำหนักเบา
- 7) สะดวกต่อการขนย้ายและการติดตั้งในงานภาคสนาม

สำหรับการประยุกต์ใช้งานวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทางด้านวิศวกรรมโยธานอกจากจะใช้เป็นการเสริมกำลังของโครงสร้างแล้ว ยังสามารถประยุกต์ใช้โดยการขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างเช่น คานรูปหน้าตัดต่างๆ เสา เสาเข็ม และแผ่นพื้นของสะพาน ซึ่งได้รับความสนใจจากนักวิจัยและวิศวกรเพิ่มมากขึ้นอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

3.2 แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่นำมาใช้ในงานวิจัย

แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP Bridge Deck) ที่ได้นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้มีชื่อทางการค้าว่า Prodeck 4 (Low Profile) และ Prodeck 8 (High Profile) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยแผ่นพื้นสะพานทั้ง 2 ชนิดนี้ถูกผลิตขึ้นโดยกระบวนการ Pultrusion ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติ ส่งผลให้แผ่นพื้นสะพานที่ผลิตขึ้นมีคุณสมบัติเชิงกลได้ตามที่ต้องการ ข้อดีอีกประการของกระบวนการผลิตประเภทนี้คือใช้ต้นทุนในกระบวนการผลิตที่ต่ำ มีปริมาณเศษวัสดุเหลือทิ้งน้อยและผลิตได้ในอัตราที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตชนิดอื่นๆ โดยรายละเอียดและส่วนประกอบของแผ่นพื้นสะพานจะกล่าวในหัวข้อถัดไปดังนี้



แผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 4 (Punyamurthula, 2004)

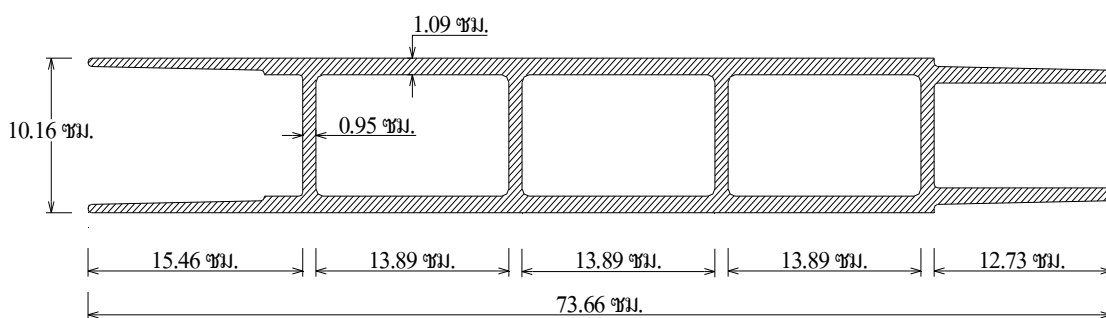


แผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 8 (Jinka, 2003)

รูปที่ 3.1 ประเภทของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP) ประเภท Prodeck 4

แผ่นพื้นสะพาน Prodeck 4 ประกอบไปด้วยเซลล์สี่เหลี่ยม 3 เซลล์ โดยมี ส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือแผ่นตั้ง (Web) มีขนาดความหนา 0.95 เซนติเมตร และปีก (Flange) มีขนาดความหนา 1.09 เซนติเมตร ซึ่งความกว้างและความสูงโดยรวมของหน้าตัดแผ่นพื้นสะพานหนึ่งชิ้นเท่ากับ 73.66 เซนติเมตร และ 10.16 เซนติเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.2 แผ่นพื้นชนิดนี้ถูกผลิตขึ้นโดยมีอัตราส่วนปริมาตรของเส้นใยแก้วประเภทอี (E-glass Fiber) ประมาณ 50% มีการจัดเรียงตัวกันของเส้นใยในแบบสามแกน (Triaxial Fabrics)



รูปที่ 3.2 ขนาดหน้าตัดของแผ่นพื้น FRP ชนิด Prodeck 4

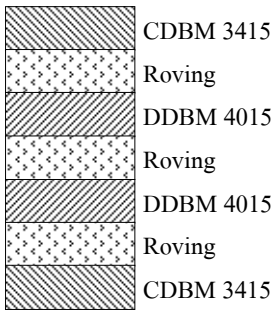
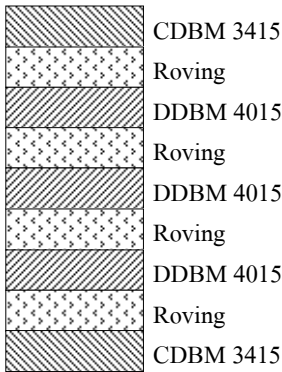
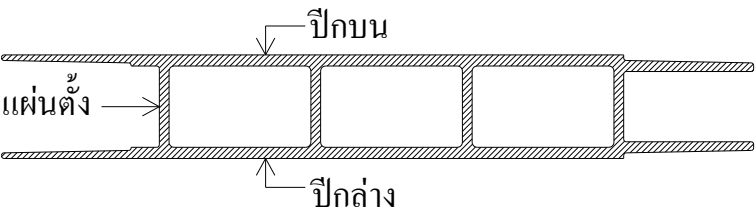
สำหรับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิด Prodeck 4 จะมีการ ถักทอของแผ่นบางๆซ้อนทับกันเป็นชั้นๆซึ่งเรียกว่าชั้นลามิเนต (Laminate) ซึ่งประกอบไปด้วยการ ซ้อนทับกันของแผ่นบางชนิด CDBM 3415 และ DDBM 4015 โดยมี Yield Roving ทำหน้าที่ใน การยึดประสานเข้าด้วยกัน ซึ่งแผ่นบางในแต่ละชนิดจะมีมุมของการเรียงตัวของเส้นใยแก้วในสาม ทิศทางที่แตกต่างกัน นั่นคือ แผ่นบางชนิด CDBM 3415 มีการเรียงตัวของเส้นใยในทิศทาง 0° , $+45^{\circ}$, -45° , CSM และ แผ่นบางชนิด DDBM 4015 มีการเรียงตัวของเส้นใยในทิศทาง $+45^{\circ}$, 90° , -45° , CSM ตามลำดับ

ทั้งนี้การเรียงตัวทางสถาปัตยกรรมของแผ่นบาง CDBM 3415 DDBM 4015 และ Yield Roving ที่ซ้อนทับกันเป็นชั้นๆก่อให้เกิดแผ่นบางที่มีความหนาขึ้นโดย แผ่นตั้ง (Web) ที่มื ความหนา 0.95 เซนติเมตร จะประกอบไปด้วยลามิเนตซ้อนทับกันทั้งหมด 7 ชั้น โดยรูปแบบของ การซ้อนทับกันจะมีลักษณะแบบสมมาตรกันคือ ชั้นที่ 1 และ 7 (ชั้นนอกสุด) เป็นแผ่นบาง CDBM 3415 และชั้นที่ 2 ถึง ชั้นที่ 6 (ชั้นใน) จะเป็นการเรียงตัว Yield Roving สลับกับแผ่นบางชนิด

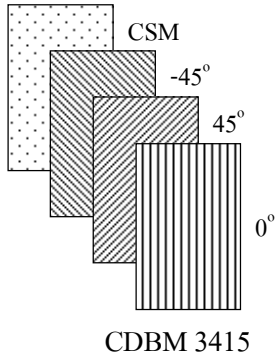
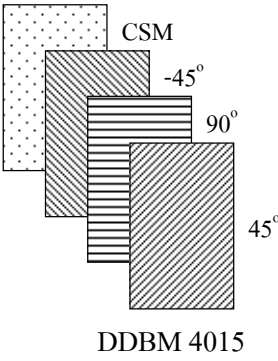
DDBM 4015 ตามลำดับ ส่วนแผ่นปีก (Flange) ที่มีความหนา 1.09 เซนติเมตร เกิดจากการซ้อนทับกันของแผ่นบางทั้งหมด 9 ชั้น โดยรูปแบบของการซ้อนทับกันจะมีลักษณะแบบสมมาตรเช่นกัน คือ ชั้นที่ 1 และ 9 (ชั้นนอกสุด) เป็นแผ่นบาง CDBM 3415 และชั้นที่ 2 ถึง ชั้นที่ 8 (ชั้นใน) จะเป็นการเรียงตัว Yield Roving สลับกับแผ่นบางชนิด DDBM 4015 ตามลำดับเช่นเดียวกันกับแผ่นตั้ง นอกจากนี้ชั้นลามิเนตที่ประกอบขึ้นมาเป็นแผ่นตั้งและแผ่นปีกของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ยังมีคุณสมบัติเชิงกลเป็นแบบออร์โททรอปิก (Orthotropic) กล่าวคือ มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ที่แตกต่างกันในแต่ละทิศทาง เช่นทิศทางตามแนวยาว (E_{11}) ทิศทางตามแนวขวาง (E_{22}) และทิศทางแนวตั้งฉาก (G_{12})

เพื่อให้มองเห็นภาพได้อย่างชัดเจน จึงขอสรุปรูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางของการเรียงตัวของชั้นลามิเนตของพื้นสะพานชนิด Prodeck 4 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และคุณสมบัติเชิงกลบางประการของแผ่นบาง CDBM 3415 DDBM 4015 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ถึง ตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 รูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางของเส้นใยในชั้นลามิเนต สำหรับ Prodeck 4

ประเภทแผ่นพื้น	หน้าตัดของชั้นลามิเนต	
	แผ่นตั้ง (Web)	ปีกบน-ล่าง (Flange)
Prodeck 4		
		

ตารางที่ 3.1 รูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางของเส้นใยในชั้นลามิเนตสำหรับ Prodeck 4 (ต่อ)

ประเภทแผ่นพื้น	ทิศทางกรเรียงตัวของเส้นใยในชั้นลามิเนต	
Prodeck 4	 <p>CDBM 3415</p>	 <p>DDBM 4015</p>

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นบางชนิด CDBM 3415 และ DDBM 4015 สำหรับ Prodeck 4

ทิศทางเส้นใย	น้ำหนัก (กรัม/ตารางเมตร)		ความหนา (มิลลิเมตร)		ปริมาตร $\times 10^3$ (มิลลิเมตร ³)	
	CDBM 3415	DDBM 4015	CDBM 3415	DDBM 4015	CDBM 3415	DDBM 4015
0°	532.663	-	0.508	-	40.116	-
+45°	306.510	387.885	0.252	0.330	23.361	30.677
-45°	306.510	387.885	0.252	0.330	23.361	30.677
90°	-	585.896	-	0.483	-	44.835
Mat (CSM)	457.731	457.731	0.356	0.356	33.036	33.036
รวม	1603.414	1819.397	1.366	1.499	119.874	139.225

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตของแผ่นตั้ง (Web) ชนิด Prodeck 4

ชั้นที่	ประเภทแผ่นบาง	ความหนา (ซม.)	E_{11} (ksc) $\times 10^6$	E_{22} (ksc) $\times 10^6$	G_{12} (ksc) $\times 10^6$	อัตราส่วนยาวของ
1	CDBM	0.179	0.384	0.094	0.047	0.27
2	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
3	DDBM	0.145	0.388	0.095	0.046	0.28
4	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
5	DDBM	0.145	0.388	0.095	0.046	0.28
6	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
7	CDBM	0.179	0.384	0.094	0.047	0.27
รวม		0.954				

หมายเหตุ E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น และ G คือ ค่าโมดูลัสการเฉือน

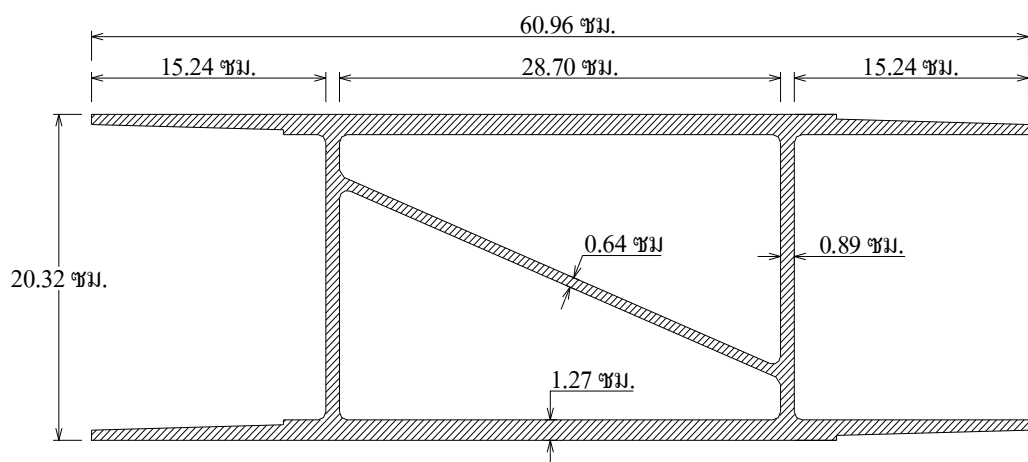
E และ G มีหน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตของแผ่นปีก (Flange) ชนิด Prodeck 4

ชั้นที่	ประเภทแผ่นบาง	ความหนา (ซม.)	E_{11} (ksc) $\times 10^6$	E_{22} (ksc) $\times 10^6$	G_{12} (ksc) $\times 10^6$	อัตราส่วนยาวของ
1	CDBM	0.128	0.384	0.094	0.047	0.27
2	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
3	DDBM	0.145	0.388	0.095	0.046	0.28
4	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
5	DDBM	0.145	0.388	0.095	0.046	0.28
6	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
7	DDBM	0.145	0.388	0.095	0.046	0.28
8	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
9	CDBM	0.128	0.384	0.094	0.047	0.27
รวม		1.098				

3.2.2 แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP) ประเภท Prodeck 8

สำหรับแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 8 มีส่วน ประกอบหลัก 3 ส่วน คือแผ่นตั้ง (web) มีขนาดความหนา 0.89 เซนติเมตร ปีก (Flange) มีขนาดความหนา 1.27 เซนติเมตร และแผ่นแนวทแยง (Diagonal) มีขนาดความหนา 0.64 เซนติเมตร ความกว้างและความสูงโดยรวมของหน้าตัดแผ่นพื้นเท่ากับ 60.96 เซนติเมตร และ 20.32 เซนติเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.3 ถูกผลิตขึ้นโดยมีอัตราส่วนปริมาตรของเส้นใยแก้วประเภทอี (E-glass Fiber) ประมาณ 54% มีการจัดเรียงตัวกันของเส้นใยทั้งสองและสามแกน



รูปที่ 3.3 ขนาดหน้าตัดของแผ่นพื้น FRP ชนิด Prodeck 8

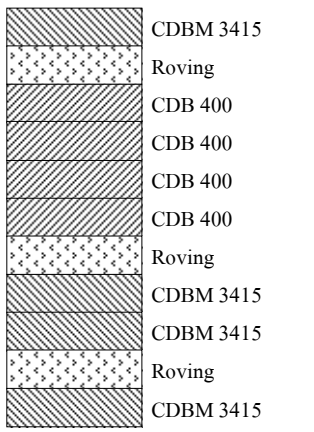
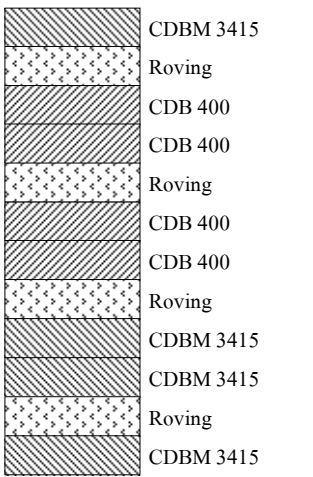
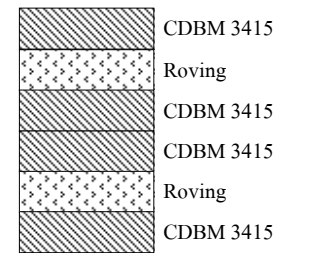
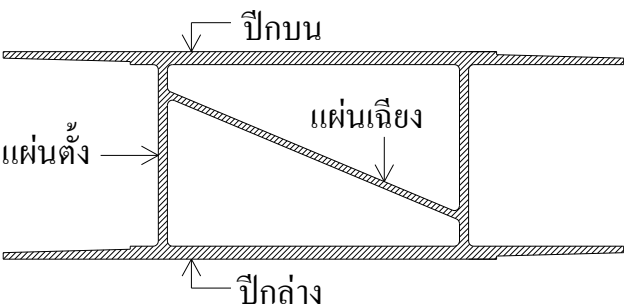
สำหรับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิด Prodeck 8 จะมีชั้นลามิเนต (Laminate) ซึ่งประกอบไปด้วยการซ้อนทับกันของแผ่นบางชนิด CDBM 3415 และ CDB 400 โดยมี Yield Roving ทำหน้าที่ในการยึดประสานเข้าด้วยกันเช่นเดียวกับแผ่นพื้นชนิด Prodeck 4 ซึ่งแผ่นบางในแต่ละชนิดจะมีมุมของการเรียงตัวของเส้นใยแก้วในสามทิศทางที่แตกต่างกัน นั่นคือ แผ่นบางชนิด CDBM 3415 มีการเรียงตัวของเส้นใยในสามทิศทางคือ 0° , $+45^{\circ}$, -45° , CSM และ แผ่นบางชนิด CDB 400 มีการเรียงตัวของเส้นใยในสองทิศทาง $+45^{\circ}$, -45° ตามลำดับ

การเรียงตัวของสถาปัตยกรรมของแผ่นบาง CDBM 3415 CDB 400 และ Yield Roving ที่ซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ ก่อให้เกิดแผ่นบางที่มีความหนาขึ้น โดยแผ่นตั้ง (Web) ที่มีความหนา 0.89 เซนติเมตรดังที่กล่าวมาในข้างต้น จะประกอบไปด้วยลามิเนตซ้อนทับกันทั้งหมด 11 ชั้น

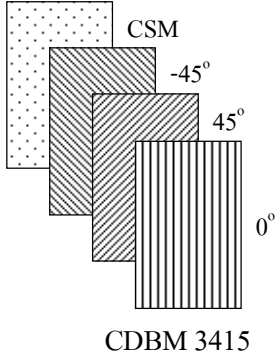
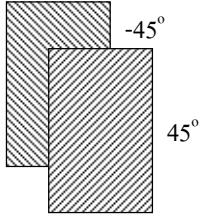
แผ่นปีก (Flange) จะมีความหนา 1.27 เซนติเมตร เกิดจากการซ้อนทับกันของแผ่นบางทั้งหมด 12 ชั้น และแผ่นแนวทะแยง (Diagonal) จะมีความหนา 0.64 เซนติเมตร เกิดจากการซ้อนทับกันของแผ่นบางทั้งหมด 6 ชั้น ซึ่งการเรียงตัวของเส้นใยที่มีหลายทิศทางนั้นส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของชั้นลามิเนตเป็นแบบออร์โททรอปิก (Orthotropic) เช่นเดียวกับแผ่นพื้นชนิด Prodeck 4 ที่กล่าวมาข้างต้น

เพื่อให้มองเห็นภาพได้อย่างชัดเจน จึงขอสรุปรูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางของการเรียงตัวของชั้นลามิเนตของพื้นสะพานชนิด Prodeck 8 ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และคุณสมบัติเชิงกลบางประการของแผ่นบาง CDBM 3415 CDB 400 ดังแสดงในตารางที่ 3.6 ถึงตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.5 รูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางของเส้นใยในชั้นลามิเนต สำหรับ Prodeck 8

ประเภทแผ่นพื้น	หน้าตัดของชั้นลามิเนต		
	แผ่นตั้ง (Web)	ปีกบน-ล่าง (Flange)	แผ่นแนวทะแยง (Diagonal)
Prodeck 8			
			

ตารางที่ 3.5 รูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางของเส้นใยในชั้นลามิเนตสำหรับProdeck 8 (ต่อ)

ประเภทแผ่นพื้น	ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยในชั้นลามิเนต	
Prodeck 8	 <p>CDBM 3415</p>	 <p>CDB 400</p>

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นบางชนิด CDBM 3415 และ CDB 400 สำหรับ Prodeck 8

ทิศทางเส้นใย	น้ำหนัก (กรัม/ตารางเมตร)		ความหนา (มิลลิเมตร)		ปริมาตร $\times 10^3$ (มิลลิเมตร ³)	
	CDBM 3415	CDB 400	CDBM 3415	CDB 400	CDBM 3415	CDB 400
0°	532.663	562.161	0.467	0.495	43.426	46.048
+45°	306.510	413.314	0.269	0.366	25.072	33.921
-45°	306.510	413.314	0.269	0.366	25.072	33.921
Mat (CSM)	457.731	-	0.404	-	37.526	-
รวม	1603.414	1388.789	1.410	1.227	130.933	113.890

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตของแผ่นตั้ง (Web) ชนิด Prodeck 8

ชั้นที่	ประเภทแผ่นบาง	ความหนา (ซม.)	E_{11} (ksc) $\times 10^6$	E_{22} (ksc) $\times 10^6$	G_{12} (ksc) $\times 10^6$	อัตราส่วน ปัวซอง
1	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
2	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
3	CDB	0.042	0.359	0.061	0.029	0.26
4	CDB	0.042	0.359	0.061	0.029	0.26
5	CDB	0.042	0.359	0.061	0.029	0.26
6	CDB	0.042	0.359	0.061	0.029	0.26
7	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
8	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
9	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
10	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
11	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
รวม		0.894				

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตของแผ่นแนวทะแยง (Diagonal) ชนิด Prodeck 8

ชั้นที่	ประเภทแผ่นบาง	ความหนา (ซม.)	E_{11} (ksc) $\times 10^6$	E_{22} (ksc) $\times 10^6$	G_{12} (ksc) $\times 10^6$	อัตราส่วน ปัวซอง
1	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
2	Roving	0.037	0.345	0.060	0.024	0.26
3	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
4	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
5	Roving	0.037	0.345	0.060	0.024	0.26
6	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
รวม		0.638				

ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตของแผ่นปีก (Flange) ชนิด Prodeck 8

ชั้นที่	ประเภทแผ่นบาง	ความหนา (ซม.)	E_{11} (ksc) $\times 10^6$	E_{22} (ksc) $\times 10^6$	G_{12} (ksc) $\times 10^6$	อัตราส่วนยาวของ
1	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
2	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
3	CDB	0.123	0.359	0.061	0.029	0.26
4	CDB	0.123	0.359	0.061	0.029	0.26
5	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
6	CDB	0.141	0.359	0.061	0.029	0.26
7	CDB	0.103	0.359	0.061	0.029	0.26
8	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
9	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
10	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
11	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
12	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
รวม		1.270				

3.3 สรุป

ในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่มีหน้าตัดที่แตกต่างกันสองชนิด คือ ชนิด Prodeck 4 และ ชนิด Prodeck 8 โดยมีรายละเอียดดังที่กล่าวมาข้างต้นในบทนี้ ซึ่งคุณสมบัติเด่นประการหนึ่งคือ คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นแบบออร์ทोटโรปิก (Orthotropic) ที่เกิดจากการเรียงตัวในทิศทางที่แตกต่างกันในส่วนของเส้นใยแก้ว ส่งผลให้วัสดุประกอบประเภทนี้ถูกออกแบบให้เกิดผลตอบสนองในรูปแบบที่ต้องการภายใต้แรงกระทำที่สภาวะต่างๆ ได้ดีกว่าวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิม (คอนกรีต เหล็ก ไม้) รวมทั้งเมื่อเปรียบกำลังต่อหน่วยน้ำหนักหรือค่าอัตราส่วนตติพเนตต่อน้ำหนักจะมีค่าที่สูงกว่าวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิม สำหรับคุณสมบัติเชิงกลของหน้าตัดแผ่นพื้นสะพานทั้งสองชนิดสามารถศึกษาเพิ่มเติมจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Howard, 2002) และ (Punyamurthula, 2004)

บทที่ 4

วิธีการวิจัย

4.1 บทนำ

การศึกษาวิจัยนี้ เป็นการดำเนินการผ่านการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์ผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้เป็นโปรแกรมในเชิงพาณิชย์ที่มีชื่อว่า ANSYS 9.0 แบบจำลองจะถูกแบ่งออกเป็นสองระดับที่สำคัญคือ 1) แบบจำลองระดับชิ้นส่วน (Component Level) และ 2) แบบจำลองระดับระบบ (System Level) เพื่อทำการทดสอบและวิเคราะห์ให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยเนื้อหาภายในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์รวมถึงไปถึงรายละเอียดของการสร้างแบบจำลองและทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance, DLA)

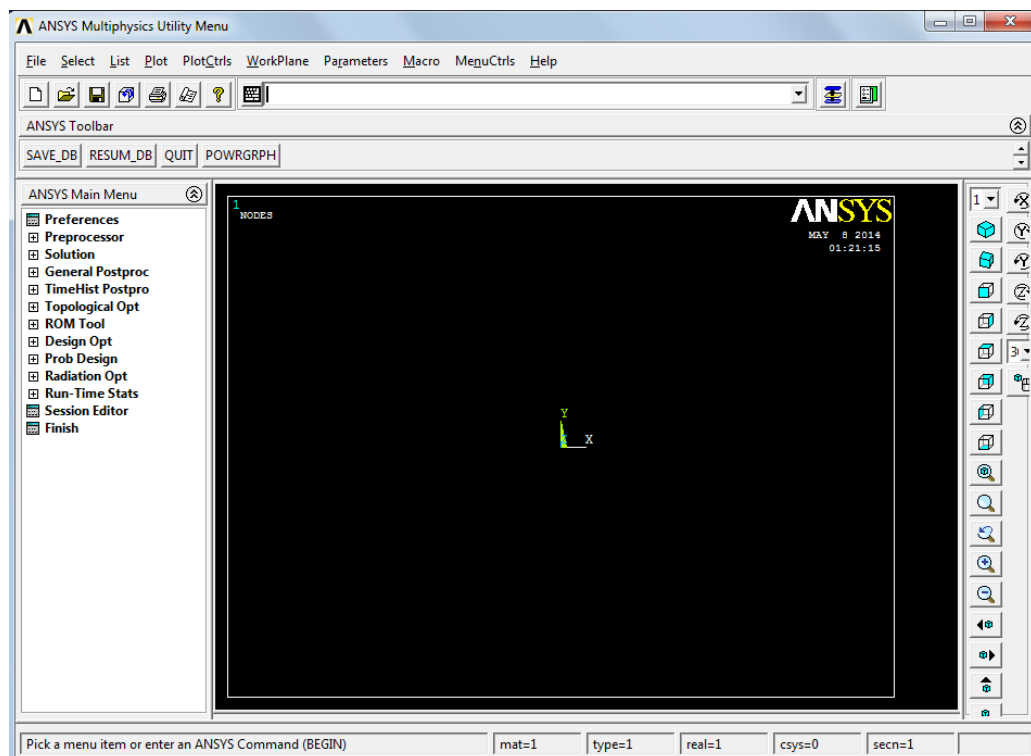
4.2 โปรแกรม ANSYS 9.0

โปรแกรม ANSYS เป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์โปรแกรมหนึ่งทางด้านการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เพราะเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรมที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลายาวนานกว่า 40 ปี มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือ ซึ่งข้อดีของโปรแกรมประเภทนี้คือ สามารถช่วยลดต้นทุนจากการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการทดสอบประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ เพราะโปรแกรมสามารถแสดงผลการทดสอบเสมือนจริงได้ตามความต้องการของผู้ใช้ ซึ่งเหตุผลอีกประการที่ทำให้โปรแกรม ANSYS ได้รับความนิยมทางด้านวิศวกรรมนั้นคือ สามารถวิเคราะห์ได้ทุกศาสตร์ของทางวิศวกรรม ทั้งกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) พลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) อุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics) ตลอดจนการพัฒนาให้โปรแกรม ANSYS สามารถวิเคราะห์ทุกศาสตร์ร่วมกันได้อย่างไม่มีข้อจำกัด (Multi-Physics) แต่การทำงานของโปรแกรมนั้นจะต้องใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมและความชำนาญของผู้ใช้งานเป็นอย่างมาก ควรพึงระลึกเสมอว่าโปรแกรมที่ใช้อยู่เป็นเพียงเครื่องคิดคำนวณเท่านั้น ผลลัพธ์ที่ได้อาจจะมีการผิดพลาดและผิดตามข้อมูลที่ผู้ใช้งานป้อนค่าลงไป จึงจำเป็นต้องมีการ

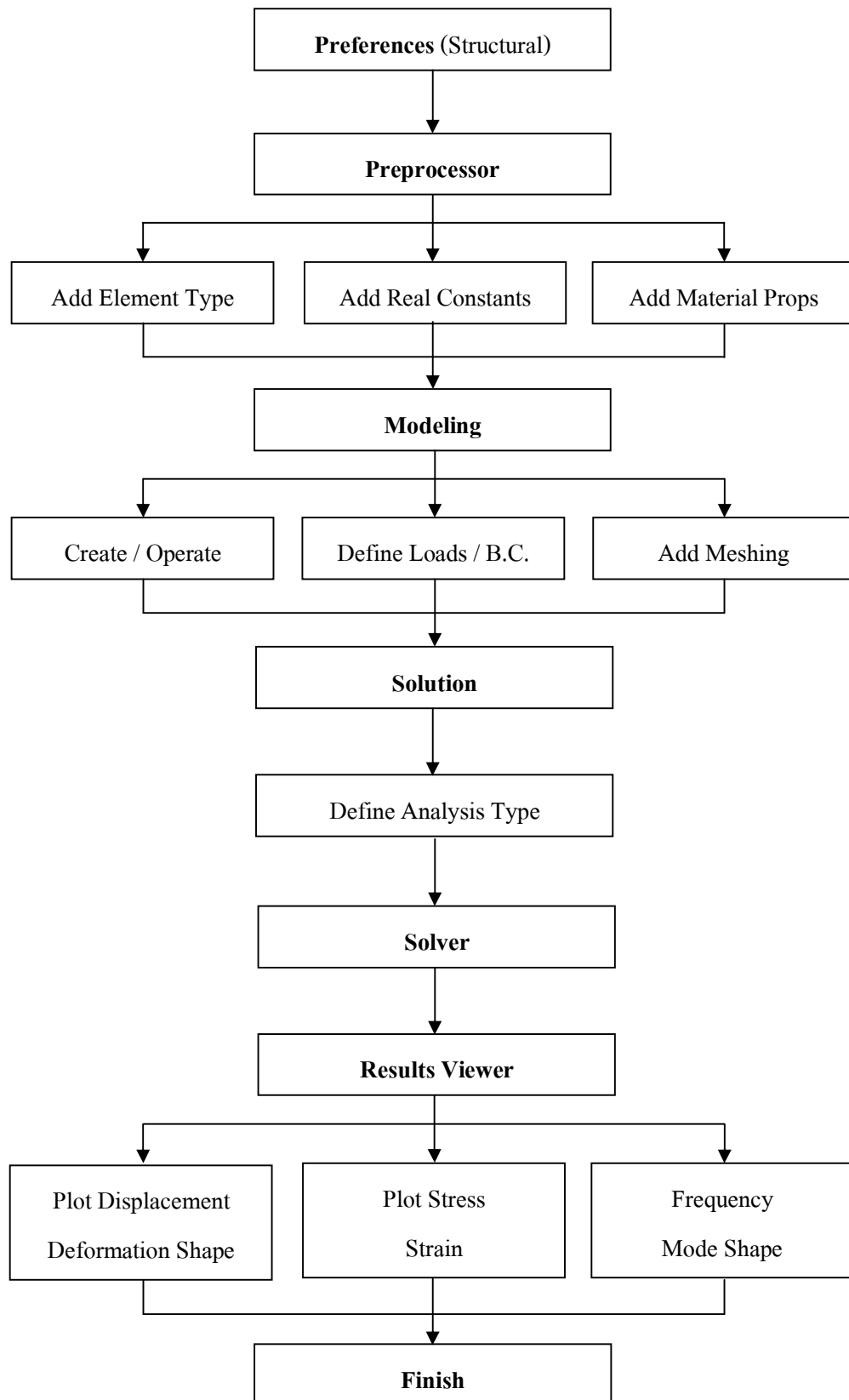
เปรียบเทียบค่าของแบบจำลอง (Calibrate Models) กับทฤษฎีหรือผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ ทุกครั้งเพื่อความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งส่วนประกอบต่างๆของ โปรแกรม ANSYS 9.0 ดังแสดง ในรูปที่ 4.1 - 4.2 และกระบวนการทำงานเบื้องต้นของ โปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 โปรแกรม ANSYS 9.0 (ANSYS, Inc.)



รูปที่ 4.2 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรม ANSYS 9.0 (ANSYS, Inc.)



รูปที่ 4.3 กระบวนการทำงานเบื้องต้นของโปรแกรม ANSYS 9.0

4.3 ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์

ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance, DLA) เป็นค่าที่ใช้คูณเพื่อขยายผลการตอบสนองพฤติกรรมทางพลศาสตร์ โดยมีการรวมผลจากการสั่นไหวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากแรงที่กระทำมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือทิศทางตามเวลา อีกทั้งมีลักษณะเป็นแรงกระแทก (Impact force) ซึ่งเกิดจากการกระทำของแรงต่อโครงสร้างสามารถคำนวณได้จากผลของการตอบสนองสูงสุดของค่าการโก่งตัว (Deflection) หรือค่าความเครียด (Strain) ดังสมการที่ 4.1 และ สมการที่ 4.2 (Bakht & Pinjarkar, 1989) ตามลำดับ

$$DLA = \left(\frac{\delta_{dyn} - \delta_{stat}}{\delta_{stat}} \right) \quad (4.1)$$

$$DLA = \left(\frac{\varepsilon_{dyn} - \varepsilon_{stat}}{\varepsilon_{stat}} \right) \quad (4.2)$$

เมื่อ δ_{dyn} คือ การโก่งตัวสูงสุดทางพลศาสตร์ของคานที่รองรับ

δ_{stat} คือ การโก่งตัวสูงสุดทางสถิตศาสตร์ของคานที่รองรับ

ε_{dyn} คือ ความเครียดสูงสุดทางพลศาสตร์ของคานที่รองรับ

ε_{stat} คือ ความเครียดสูงสุดทางสถิตศาสตร์ของคานที่รองรับ

ซึ่งในปี 1983 Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC, 1983) ได้กำหนดค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DLA) ที่อยู่บนพื้นฐานความถี่การดัดของสะพานในมาตรฐานออกใช้เป็นครั้งแรกโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.4 หรือคิดเป็น 20 – 40 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาในปี 1989 The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1989) ได้กำหนดให้ค่า DLA ของระบบสะพานทั่วไปมีค่า 33 เปอร์เซ็นต์

4.4 แบบจำลองระดับชิ้นส่วน

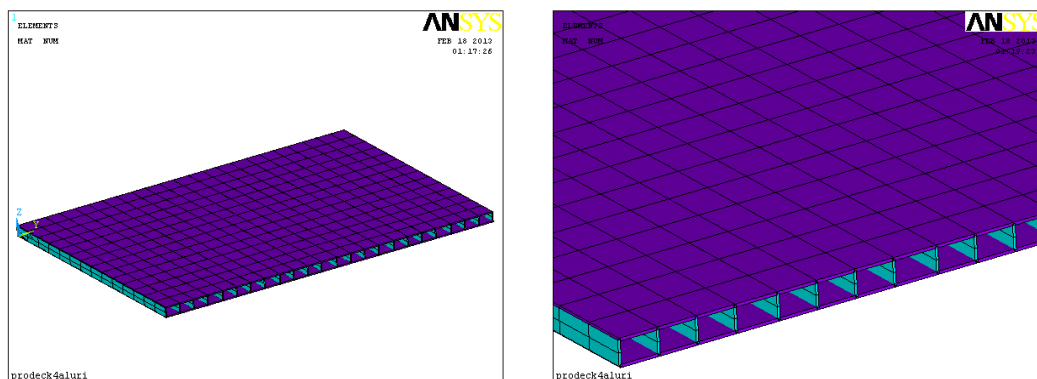
แบบจำลองระดับชิ้นส่วน (Component Level) จะประกอบไปด้วยแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วเพียงอย่างเดียว โดยแบบจำลองประเภทนี้ทำ

การวิเคราะห์เพื่อใช้ในการตรวจสอบและปรับแก้ความถูกต้องของแบบจำลองและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง (Calibrate Models) โดยนำผลวิเคราะห์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบภาคสนามของงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

สำหรับแบบจำลองระดับชิ้นส่วนของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วชนิด Prodeck 4 นั้นจะถูกจำลองให้สอดคล้องกับแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ (Aluri, 2006) โดยใช้พื้นสะพาน Prodeck 4 จำนวน 6 ชั้นมาต่อกันเป็นแผ่นพื้นใหญ่ขนาดกว้าง 350 เซนติเมตร ยาว 250 เซนติเมตร แขนงด้วยเชือกติดกับคานเหล็กดังแสดงในรูป 4.4 และทำการสร้างแบบจำลองโดยแบ่ง Mesh เป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 4.5 เพื่อวิเคราะห์หาค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการสั่น (Mode Shape) ที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนแบบจำลอง

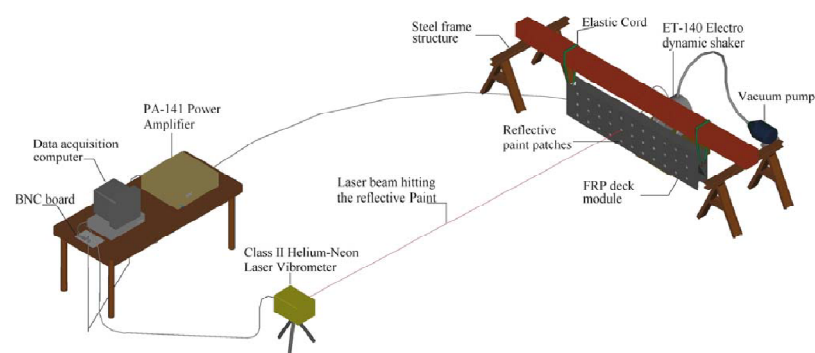


รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 4 (Aluri, 2006)

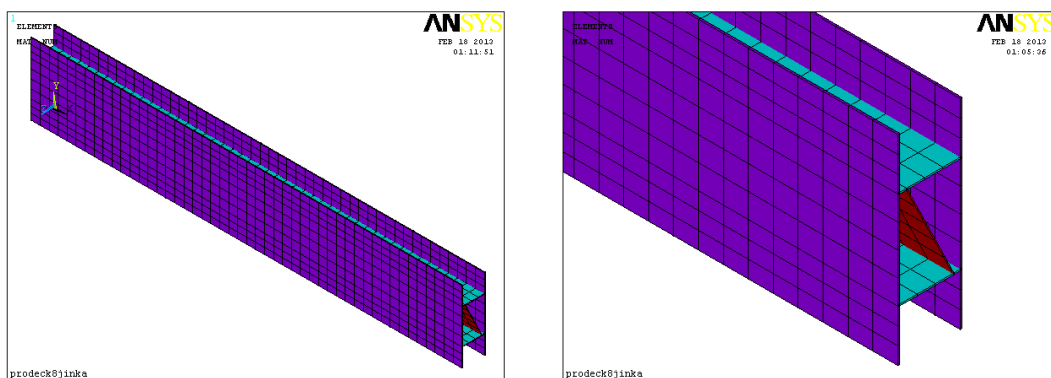


รูปที่ 4.5 แบบจำลองแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 4 ด้วยโปรแกรม ANSYS

สำหรับแบบจำลองระดับชิ้นส่วนพื้นสะพานชนิด Prodeck 8 จะถูกจำลองให้สอดคล้องกับแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ (Jinka, 2003) โดยใช้พื้นสะพาน Prodeck 8 จำนวน 1 ชิ้นมีความยาว 366 เซนติเมตร ยึดปลายทั้งสองด้านด้วยท่อเหล็กและแขวนติดกับคานเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.6 และทำการสร้างแบบจำลองโดยแบ่ง Mesh เป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 4.7 เพื่อวิเคราะห์หาค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการสั่น (Mode Shape) ที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนแบบจำลอง



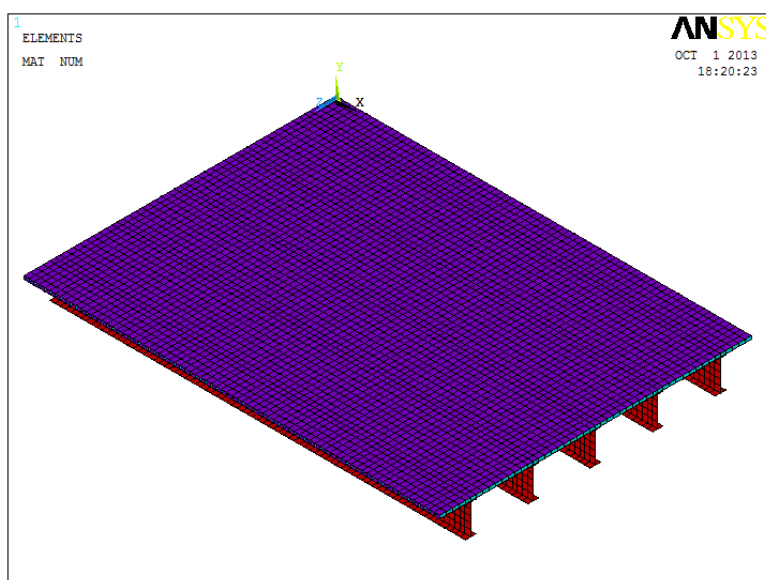
รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 8 (Jinka, 2003)



รูปที่ 4.7 แบบจำลองแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 8 ด้วยโปรแกรม ANSYS

4.5 แบบจำลองระดับระบบ

แบบจำลองระดับระบบ (System Level) จะประกอบไปด้วยแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Prodeck 4 และ Prodeck 8) และแบบจำลองของคานรองรับ (Girders) มาประกอบเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 4.8 ทำการวิเคราะห์ภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกประเภทรถบรรทุก HS-25 ในกรณีต่างๆ เพื่อหาค่าการโก่งตัวสูงสุด (Deflection) และ ค่าความเครียดสูงสุด (Strain) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance, DLA) ตามสมการที่ 4.1 และ สมการที่ 4.2 ที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.8 แบบจำลองระดับระบบสะพานที่รองรับด้วยคานเหล็ก

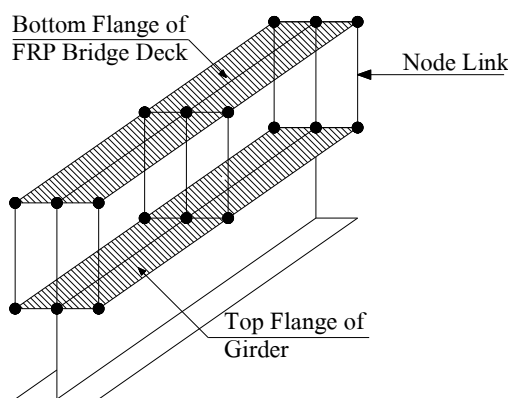
เนื่องจากแบบจำลองระดับระบบของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วชนิด Prodeck 4 และ Prodeck 8 เป็นงานวิจัยที่ศึกษาต่อจาก (Sookmanee, 2011) จึงเลือกใช้ขนาดสะพานมีความกว้าง 9.14 เมตร (2 ช่องจราจร) และความยาวของสะพานจะถูกแบบย่อยออกเป็น 2 กรณีคือ 12 เมตร และ 18 เมตร โดยมีคานที่รองรับเป็นคานเหล็กรูปตัวเอช หรือ Wide flange (W36 x 150) ซึ่งจะแบ่งจำนวนคานที่รองรับออกเป็น 4, 5 และ 7 คานตามลำดับ โดยแบบจำลองเหล่านี้จะอยู่ภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุก HS-25 ทั้งแบบสถิตศาสตร์ (Static) และพลศาสตร์ (Dynamic) ในตำแหน่งและความเร็วของการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกในกรณีต่างๆซึ่งรายละเอียดแบบจำลองทั้งหมดถูกกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.9 ต่อไป

4.6 การเชื่อมต่อของแบบจำลองระดับระบบระหว่างแผ่นพื้นสะพานกับคานที่รองรับ

ในขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองของระบบสะพานนั้นจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญอยู่สองส่วนที่ต้องมีการเชื่อมติดกันคือ แผ่นพื้นสะพานกับคานที่รองรับเพื่อทำการส่งถ่ายแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของรถบรรทุกที่มากกระทำกับระบบ โดยการส่งต่อแรงผ่านแบบจำลองจากส่วนประกอบชิ้นบนสุดที่รับแรงจากรถบรรทุกโดยตรงนั่นคือปีกบนของแผ่นพื้นสะพาน ส่งถ่ายแรงลงสู่ส่วนประกอบชิ้นล่างสุดของคานเหล็กที่รองรับนั่นคือปีกล่างของคานเหล็กรูปตัวเอช และท้ายสุดแรงจะถูกส่งถ่ายสู่ที่รองรับทั้งสองข้างของคานเหล็กในแต่ละตัว ทั้งนี้การจะส่งถ่ายแรงได้นั้นจำเป็นจะต้องทำการเชื่อมต่อกันของแบบจำลองระหว่าง ปีกล่างของแผ่นพื้นและปีกบนของคานเหล็กรูปตัวเอช โดยการเชื่อมต่อนั้นแบ่งออกเป็นสองประเภทดังนี้

4.6.1 แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์

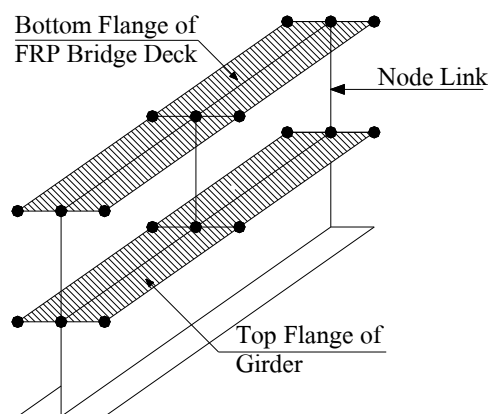
แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite) เป็นการเชื่อมต่อกันระหว่างแบบจำลองของแผ่นพื้นและแบบจำลองของคานเหล็กเพื่อให้เกิดการส่งถ่ายแรงและ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดของระบบลงสู่ที่รองรับหรือคิดเป็น 100% (ระบบในอุดมคติ) กล่าวคือ จุดต่อ (Node) ในเอลิเมนต์ของปีกล่างของแผ่นพื้นสะพาน (Bottom Flange of FRP Bridge Deck) และปีกบนของคานเหล็กรูปตัวไอ (Top Flange of Girder) มีการเชื่อมต่อกันทุกๆจุด แบบจุดต่อจุด (Node by Node) ระหว่างผิวสัมผัส ดังรูปที่ 4.9 โดยที่จุดเชื่อมต่อที่ซ้อนทับกัน มีระดับชั้นความเสรีเทียบเท่ากันทุกประการ (Zhang, 2006)



รูปที่ 4.9 การเชื่อมต่อ Node แบบ Fully Composite

4.6.2 แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบบางส่วน

แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบบางส่วน (Partial Composite) เป็นการเชื่อมต่อกันระหว่างแบบจำลองของแผ่นพื้นและแบบจำลองของคานเหล็ก เพื่อให้เกิดการส่งถ่ายแรงระหว่างกันเพียงบางส่วน ซึ่งจะคล้ายคลึงกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้นกับระบบสะพานที่ใช้งานกันทั่วไปในปัจจุบัน กล่าวคือจะเกิดการถ่ายแรงระหว่างปีกกลางของแผ่นพื้นสะพานลงสู่ปีกบนของคานเหล็กเพียงบางตำแหน่งของแบบจำลอง นั่นก็จะเชื่อมต่อกันเพียงบางจุดต่อ (Node) เท่านั้น โดยการสร้างแบบจำลองส่วนใหญ่จะสร้างให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างจุดต่อของปีกกลางแผ่นพื้นสะพานที่อยู่ตรงกับแนวกึ่งกลางของคานที่รองรับแต่ละตัวเพียงแนวเดียว ซึ่งจะคิดเป็นประมาณ 30 % ของจำนวนจุดต่อทั้งหมดที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัส ดังรูปที่ 4.10 โดยที่จุดเชื่อมต่อที่ซ้อนทับกันมีระดับชั้นความเสรีไม่เท่ากัน (Zhang, 2006)



รูปที่ 4.10 การเชื่อมต่อ Node แบบ Partial Composite

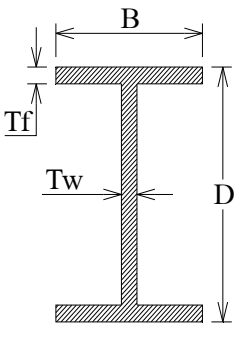
ซึ่งในการสร้างแบบจำลองของระบบสะพานในงานวิจัยนี้ เลือการทำการศึกษาเฉพาะพฤติกรรมการเชื่อมต่อของแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบบางส่วน (Partial Composite) เท่านั้น

4.7 การศึกษาแบบพาราเมตริกซ์

การศึกษาของงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อจะวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance) ของระบบสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย แบบจำลองของสะพานทั้งระบบจะถูกสร้างขึ้นโดยการวางตัวในแนวราบ ไม่ทำให้เกิดมุมเอียง (Non-Skew Angle) เป็นสะพานช่วงเดียว (Single Span) มีที่รองรับแบบอย่างง่าย (Simply Support) ประกอบไปด้วยระบบแผ่นพื้นและคานเหล็ก โดยมีตัวแปรหลักที่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ 1) ช่วงความยาวของสะพาน (L) จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงความยาวคือ 12 เมตร และ 18 เมตร 2) ความกว้างของหน้าตัดสะพาน (W) มีความกว้างช่วงเดียว คือ 9.14 เมตรหรือสองช่องจราจร 3) ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (S) แบ่งออกเป็น 2.24 เมตร (4 คานเหล็ก) 1.83 เมตร (5 คานเหล็ก) และ 1.22 เมตร (7 คานเหล็ก) 4) จำนวนรถบรรทุก (NT) แบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีแรกให้รถบรรทุกหนึ่งคันวิ่งทิศทางเดียว (\uparrow) กรณีที่สองให้รถบรรทุกสองคันวิ่งขนานกันไปทิศทางเดียว ($\uparrow\uparrow$) กรณีที่สามให้รถบรรทุกสองคันวิ่งสวนทิศทางกัน ($\uparrow\downarrow$) และ 5) ความเร็วของรถบรรทุก (V) แบ่งออกเป็นสองกรณีคือ กรณีแรกรถบรรทุกจอดนิ่งอยู่กับที่ เพื่อหาค่าการโก่งตัวสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุด ทางสถิติศาสตร์ของระบบสะพาน และกรณีที่สองรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 20 40 60 80 และ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อหาค่าการโก่งตัวสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุดทางพลศาสตร์ของระบบสะพาน เนื่องจากความเร็วของรถบรรทุกที่เลือกใช้ในข้างต้นดังที่กล่าวมา เพื่อทำการไปเปรียบเทียบกับผลการวิจัยในอดีต แต่อย่างไรก็ตาม สามารถหาความเร็วรถบรรทุกที่แท้จริงที่ทำให้ระบบโครงสร้างสะพานเกิดผลการตอบสนองสูงสุด ซึ่งศึกษาเพิ่มเติมได้จาก (Museros, 2005) และ (Xia, 2006) นอกจากนี้ที่กล่าวมานี้ยังมีข้อสมมุติฐานบางประการของแบบจำลองที่สำคัญดังต่อไปนี้

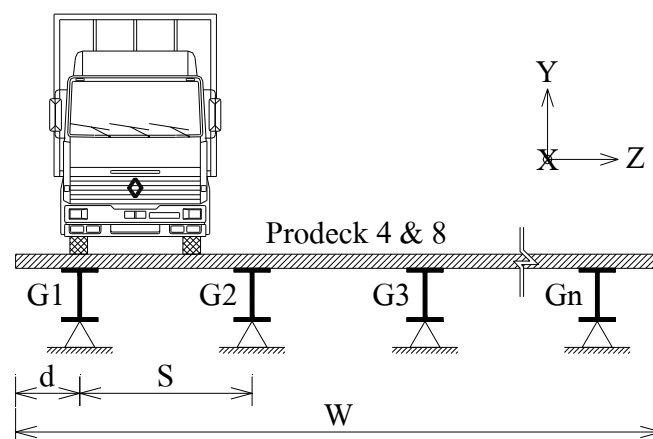
- 1) แบบจำลองระบบแผ่นพื้น สะพาน พอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยและแบบจำลองระบบคานที่รองรับจะมีเนื้อวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ (Homogeneous material)
- 2) ไม่คิดผลเนื่องมาจากรอยต่อระหว่างแผ่นพื้นด้วยกัน เปรียบเสมือนแผ่นพื้นที่ทั้งหมดไร้รอยต่อ
- 3) น้ำหนักรถบรรทุกที่กระทำต่อแบบจำลองใช้มาตรฐานเดียวกันคือ HS-25
- 4) คานเหล็กที่รองรับมีขนาดเดียวกันคือ W36 x 150 ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1
- 5) ตำแหน่งของแรงกระทำกำหนดไว้เป็นกรณีต่างๆอย่างชัดเจนในหัวข้อที่ 4.9

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติและขนาดของคานเหล็ก W36×150

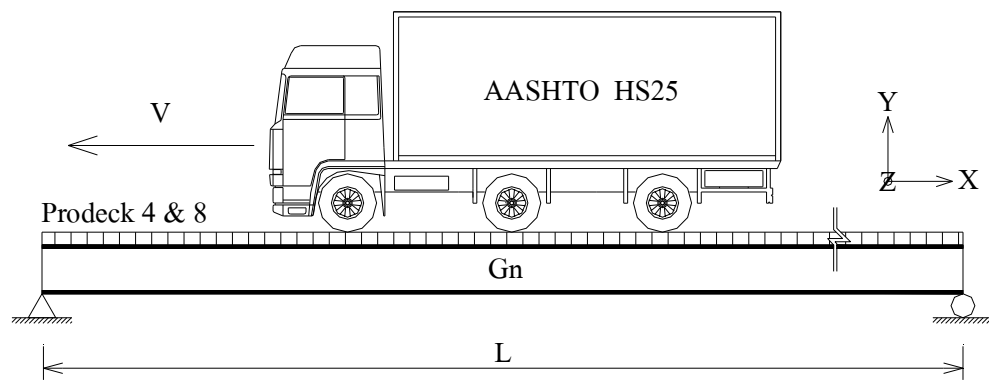
	D (เซนติเมตร)	91.03
	B (เซนติเมตร)	30.40
	Tf (เซนติเมตร)	2.39
	Tw (เซนติเมตร)	1.59
	E (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	2.04×10^6
	ρ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	7850
W36×150	V (อัตราส่วนปัวซอง)	0.3

4.8 กรณีศึกษาของแบบจำลอง

จากหัวข้อที่ 4.7 เมื่อนำตัวแปรที่สนใจมาจัดแบ่งแบบจำลอง จะได้แบบจำลองที่มีหน้าตัดหลักๆ ออกเป็น 6 หน้าตัด โดยแต่ละหน้าตัดจะมีความยาวของช่วงสะพานแบ่งย่อยอีก 2 ความยาว ดังนั้นเพื่อความเข้าใจมากขึ้นจึงขอสรุปตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.12 และตารางที่ 4.2 - 4.3



รูปที่ 4.11 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับหน้าตัดตามขวางของแบบจำลองระบบสะพาน



รูปที่ 4.12 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับหน้าตัดตามยาวของแบบจำลองระบบสะพาน

ตารางที่ 4.2 กรณีศึกษาภายใต้การเปลี่ยนตัวแปรที่ทำการศึกษาของแผ่นพื้นชนิด Prodeck 4

สัญลักษณ์	W	L	Gn	S	d	จำนวนรถ	ความเร็ว V
	เมตร	เมตร		เมตร	เมตร	(NT)	กม./ชม.
P4 G4 L12-A						1 คัน ↑	
P4 G4 L12-B	9.14	12	4	2.24	1.21	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P4 G4 L12-C						2 คัน ↓	
P4 G5 L12-A						1 คัน ↑	
P4 G5 L12-B	9.14	12	5	1.83	0.91	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P4 G5 L12-C						2 คัน ↓	
P4 G7 L12-A						1 คัน ↑	
P4 G7 L12-B	9.14	12	7	1.22	0.91	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P4 G7 L12-C						2 คัน ↓	
P4 G4 L18-A						1 คัน ↑	
P4 G4 L18-B	9.14	18	4	2.24	1.21	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P4 G4 L18-C						2 คัน ↓	
P4 G5 L18-A						1 คัน ↑	
P4 G5 L18-B	9.14	18	5	1.83	0.91	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P4 G5 L18-C						2 คัน ↓	
P4 G7 L18-A						1 คัน ↑	
P4 G7 L18-B	9.14	18	7	1.22	0.91	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P4 G7 L18-C						2 คัน ↓	

ข้อสังเกตเกี่ยวกับสัญลักษณ์ที่ปรากฏในตาราง

P4, P8 คือ ใช้แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิด Prodeck 4, Prodeck 8

G4, G5, G7 คือ จำนวนคานที่ใช้รองรับแผ่นพื้นสะพาน 4 ตัว 5 ตัว 7 ตัว ตามลำดับ

L12 คือ ความยาวของสะพานเท่ากับ 12 เมตร / L18 คือ ความยาวของสะพานเท่ากับ 18 เมตร

A ↑ คือ กรณีรถ 1 คัน วิ่งทิศทางเดียว

B ↑↑ คือ กรณีรถ 2 คัน วิ่งทิศทางเดียว

C ↑↓ คือ กรณีรถ 2 คัน วิ่งทิศทางสวนกัน

ตารางที่ 4.3 กรณีศึกษาภายใต้การเปลี่ยนตัวแปรที่ทำการศึกษาของแผ่นพื้นชนิด Prodeck 8

สัญลักษณ์	W เมตร	L เมตร	Gn	S เมตร	d เมตร	จำนวนรถ (NT)	ความเร็ว V กม./ชม.
P8 G4 L12-A						1 คัน ↑	
P8 G4 L12-B	9.14	12	4	2.24	1.21	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P8 G4 L12-C						2 คัน ⇄	
P8 G5 L12-A						1 คัน ↑	
P8 G5 L12-B	9.14	12	5	1.83	0.91	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P8 G5 L12-C						2 คัน ⇄	
P8 G7 L12-A						1 คัน ↑	
P8 G7 L12-B	9.14	12	7	1.22	0.91	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P8 G7 L12-C						2 คัน ⇄	
P8 G4 L18-A						1 คัน ↑	
P8 G4 L18-B	9.14	18	4	2.24	1.21	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P8 G4 L18-C						2 คัน ⇄	
P8 G5 L18-A						1 คัน ↑	
P8 G5 L18-B	9.14	18	5	1.83	0.91	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P8 G5 L18-C						2 คัน ⇄	
P8 G7 L18-A						1 คัน ↑	
P8 G7 L18-B	9.14	18	7	1.22	0.91	2 คัน ↑↑	Static, 20, 40, 60, 80, 100
P8 G7 L18-C						2 คัน ⇄	

4.9 ตำแหน่งของน้ำหนักรถบรรทุกบนแบบจำลอง

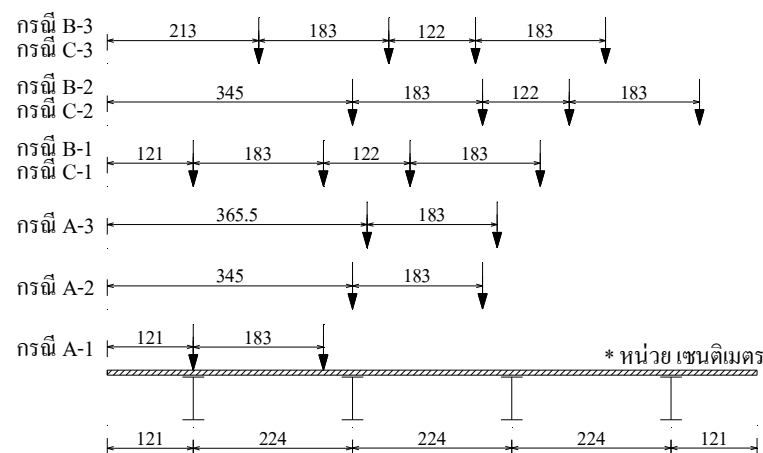
ตำแหน่งของการวางน้ำหนักรถบรรทุกในงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 9 กรณีที่แตกต่างกัน ทั้งการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ (Static) และพลศาสตร์ (Dynamic) โดยแบ่งออกเป็นกรณีดังนี้

- กรณีที่ 1 (A-1) รถบรรทุก 1 คันกระทำตรงกับคานเหล็กที่รองรับตัวนอกสุด (ตัวที่ 1)
- กรณีที่ 2 (A-2) รถบรรทุก 1 คันกระทำตรงกับคานเหล็กที่รองรับตัวที่ 2
- กรณีที่ 3 (A-3) รถบรรทุก 1 คันกระทำตรงกึ่งกลางของหน้าตัดตามขวางสะพาน
- กรณีที่ 4 (B-1) รถบรรทุก 2 คันกระทำตรงกับคานเหล็กที่รองรับตัวนอกสุด (ตัวที่ 1)
- กรณีที่ 5 (B-2) รถบรรทุก 2 คันกระทำตรงกับคานเหล็กที่รองรับตัวที่ 2
- กรณีที่ 6 (B-3) รถบรรทุก 2 คันกระทำตรงกึ่งกลางของหน้าตัดตามขวางสะพาน
- กรณีที่ 7-9 (C-1 - C3) เหมือนกับกรณีที่ 4-6 แต่ทิศทางการวิ่งของรถบรรทุกสวนทิศกัน

แต่เนื่องจากระยะห่างของคานเหล็กที่รองรับของแบบจำลองทั้ง 6 หน้าตัดหลักมีค่าที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ระยะการจัดวางตำแหน่งน้ำหนักของรถบรรทุกแตกต่างกันด้วย ซึ่งระยะที่วัดจากขอบของสะพานจะแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยดังนี้

4.9.1 สำหรับหน้าตัดสะพานที่รองรับด้วยคานเหล็ก 4 ตัว

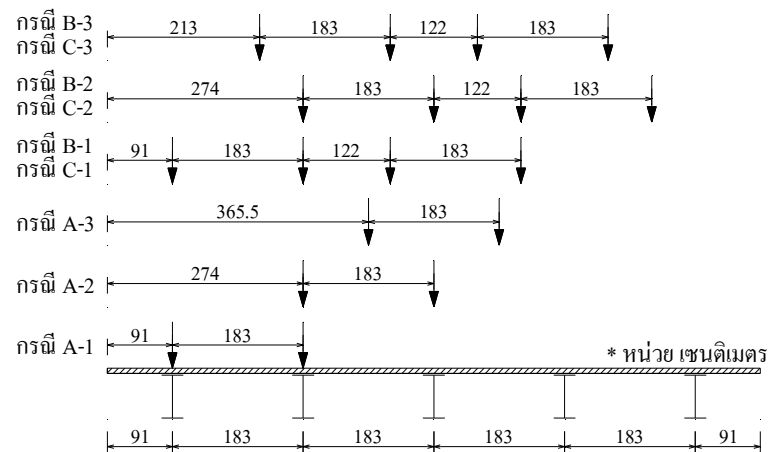
ซึ่งจะมีสัญลักษณ์แบบจำลอง P4G4L12, P4G4L18, P8G4L12, P8G4L18 มีตำแหน่งของน้ำหนักรถบรรทุกดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกของระบบสะพานมีคานรองรับ 4 คาน

4.9.2 สำหรับหน้าตัดสะพานที่รองรับด้วยคานเหล็ก 5 ตัว

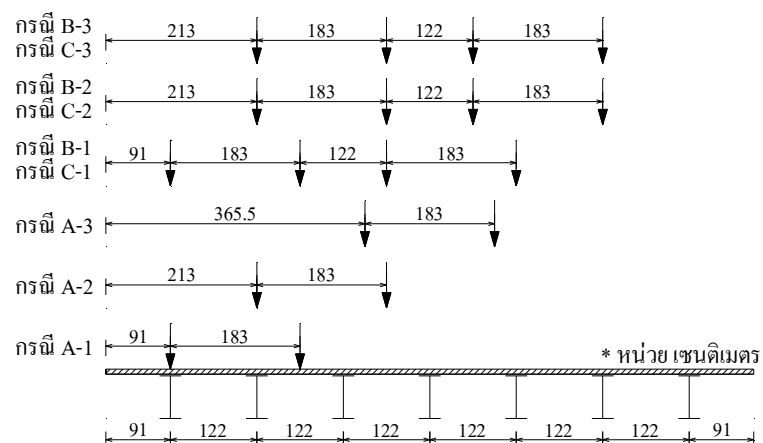
ซึ่งจะมีสัญลักษณ์แบบจำลอง P4G5L12, P4G5L18, P8G5L12, P8G5L18 มีตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกทุกดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกของระบบสะพานมีคานรองรับ 5 คาน

4.9.3 สำหรับหน้าตัดสะพานที่รองรับด้วยคานเหล็ก 7 ตัว

ซึ่งจะมีสัญลักษณ์แบบจำลอง P4G7L12, P4G7L18, P8G7L12, P8G7L18 มีตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกทุกดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกของระบบสะพานมีคานรองรับ 7 คาน

คำอธิบายสำหรับสัญลักษณ์ที่ปรากฏในรูปภาพ

กรณี A คือ รถบรรทุกหนึ่งคันวิ่งทิศทางเดียว ↑

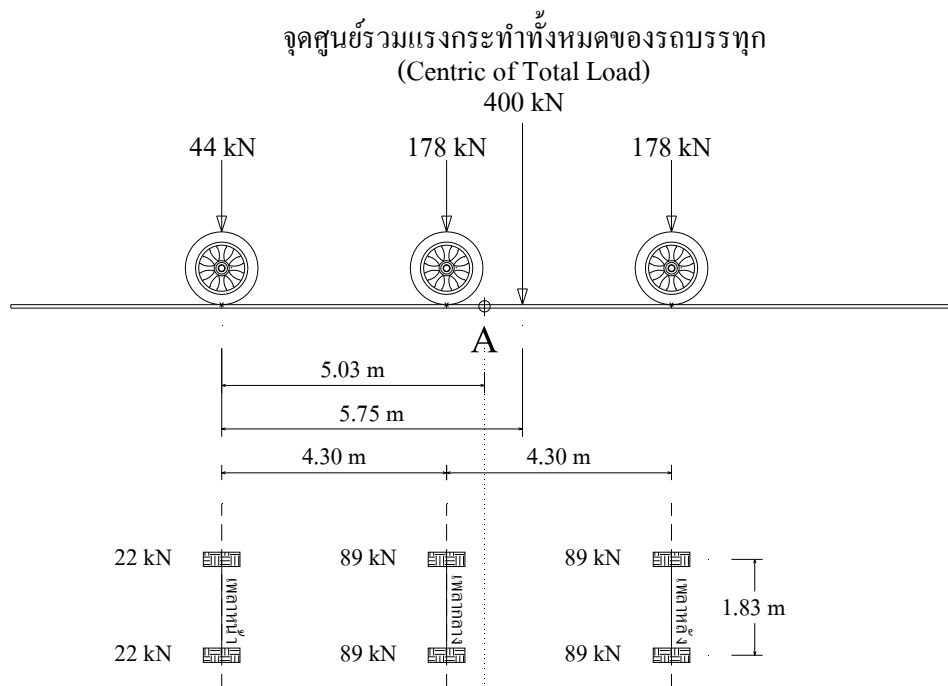
กรณี B คือ รถบรรทุกสองคันวิ่งทิศทางเดียวกันไป ↑↑

กรณี C คือ รถบรรทุกสองคันวิ่งสวนทิศทางกัน ↑↓

- 1 คือ น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำตรงคันตัวแรก
- 2 คือ น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำตรงคันตัวที่สอง
- 3 คือ น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำตรงกึ่งกลางของสะพาน

4.10 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้บนแบบจำลอง

น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์กับแบบจำลองระบบสะพานในงานวิจัยนี้ เป็นน้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน AASHTO HS25 โดยรถบรรทุกชนิดนี้ประกอบไปด้วยเพลาหลัก 3 เพลา โดยแต่ละเพลามีความยาว 1.83 เมตรและห่างห่างกันเป็นระยะ 4.30 เมตร เมื่อคิคน้ำหนักบรรทุกของแต่ละล้อบนเพลานั้น พบว่า เพลาหน้ามีน้ำหนักบรรทุก 44 กิโลนิวตัน ถัดมาเพลากลางและเพลาหลังมีน้ำหนักบรรทุก 178 กิโลนิวตัน ดังรูปที่ 4.16



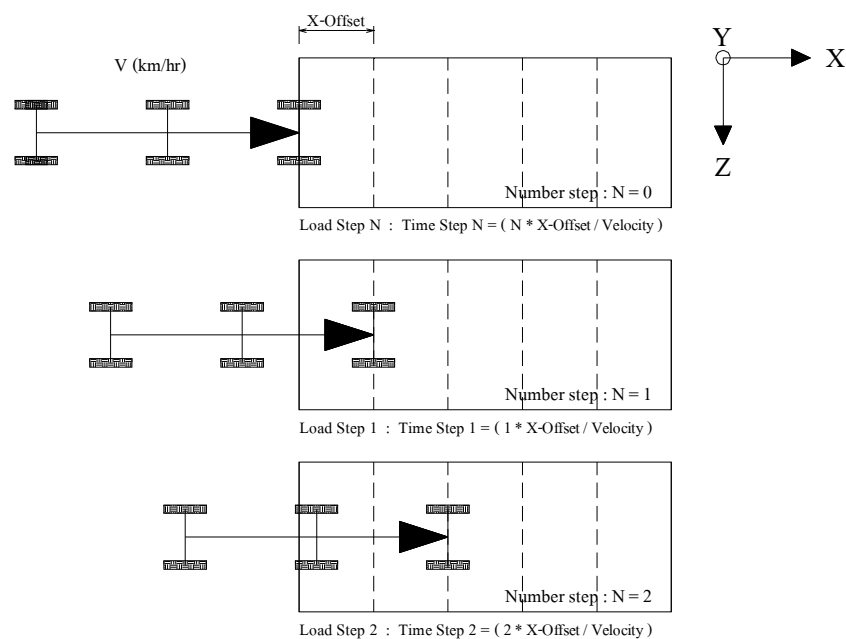
รูปที่ 4.16 แรงกระทำจากรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HS-25

จากรูปที่ 4.16 จุด A คือจุดที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดโดยอาศัยหลักการของเส้นอิทธิพล (Influence Line) โดยจุดๆนี้จะอยู่กึ่งกลางระหว่างจุดศูนย์ถ่วงของแรงกระทำทั้งหมดกับเพลาของรถบรรทุกที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงแรงทั้งหมดมากที่สุด ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเพลากลางของรถบรรทุกอยู่ใกล้กับตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงแรงทั้งหมดมากที่สุดนั่นเอง

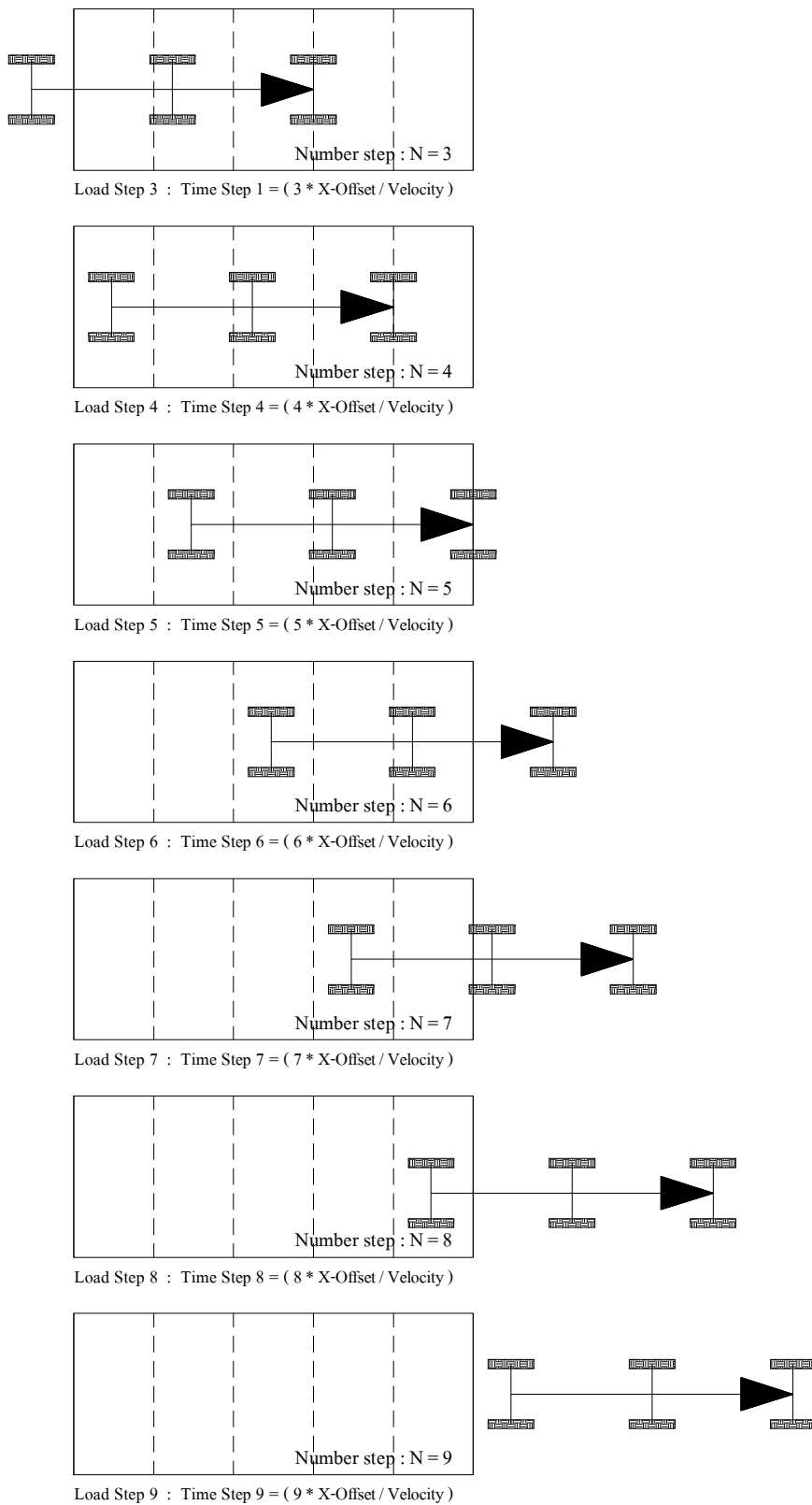
ในการหาผลตอบสนองสูงสุดทางสถิตศาสตร์ (Static) จำเป็นจะต้องวางน้ำหนักรถบรรทุกจากตำแหน่งจุด A (ในรูปที่ 4.16) ให้ตรงกับแนวกึ่งกลางของช่วงความยาวของแบบจำลองสะพาน ส่วนการวางน้ำหนักรถบรรทุกในตำแหน่งตามแนวขวางของแบบจำลองสะพานให้อ้างอิงระยะจากหัวข้อที่ 4.9

4.11 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านแบบจำลองระบบสะพาน

ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในลักษณะที่มีแรงกระทำแบบการเคลื่อนที่ไปบนแบบจำลอง โปรแกรม ANSYS 9.0 นั้นยังไม่มีฟังก์ชันหรือคำสั่งโดยตรงให้สามารถใส่ค่าข้อมูลลงไปได้อย่างง่าย จึงจำเป็นต้องมีการเขียนคำสั่งการใส่แรงในลักษณะนี้ขึ้นมาใช้งาน โดยใช้วิธีการใส่แรงแบบ Load Step ซึ่งคำสั่งนี้เป็นคำสั่งพื้นฐานของโปรแกรม โดยการวิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์นั้น จะกำหนดให้ตำแหน่งของแรงที่มากระทำบนแบบจำลองเปลี่ยนไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้น (Transient) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 (ต่อ)



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกในช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกในช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป (ต่อ)

จากรูปที่ 4.17 กำหนดให้ระยะที่รถเคลื่อนที่ผ่านไป (X-Offset) ในแต่ละช่วงมีระยะคงที่เสมอ แต่สิ่งที่เปลี่ยนไปคือช่วงของเวลา (Time Step) ซึ่งหลักการนี้ทำให้สามารถกำหนดความเร็วของการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกได้ และจำนวน Load Step จะขึ้นอยู่กับช่วงความยาวของสะพาน ดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$Time\ Step = \frac{(N_{Step} \times X_{Offset})}{V} \quad (4.3)$$

เมื่อ $Time\ Step$ คือ ช่วงของเวลาที่รถบรรทุกใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านไปเป็นระยะทาง 1 Step (วินาที)
 N_{Step} คือ จำนวนของ Step ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก
 X_{Offset} คือ ระยะทางคงที่ของการเคลื่อนที่ผ่านไป 1 Step ของรถบรรทุก (เมตร)
 V คือ ความเร็วของรถบรรทุก (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

4.12 สรุป

แบบจำลองทั้งหมดที่สร้างขึ้นทั้งหมดนั้นเป็นการสร้างและวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม ANSYS 9.0 ซึ่งแบบจำลองระดับชิ้นส่วนสร้างขึ้นเพื่อทำการตรวจสอบและปรับแก้ความถูกต้องของรูปแบบและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ตลอดจนหาค่าความถี่และรูปแบบการสั่น โดยนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากห้องปฏิบัติการ (Aluri, 2006) และ (Jinka, 2003) ดังที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อแบบจำลองระดับชิ้นส่วนมีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ จึงนำเอาแบบดังกล่าวมาทำการประกอบเป็นแบบจำลองระดับระบบ และทำการวิเคราะห์หาค่าการโก่งตัวสูงสุดและ ค่าความเครียดสูงสุด ตามเงื่อนไขสภาพน้ำหนักบรรทุกต่างๆ เพื่อนำค่าการตอบสนองที่ได้มาทำการคำนวณตามสมการที่ 4.1 และสมการที่ 4.2 เพื่อหาค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต่อไป ซึ่งแบบจำลองทั้งหมดที่ได้สร้างขึ้นสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สรุปค่าตัวแปรและจำนวนแบบจำลองในระดับต่างๆ

ประเภท แบบจำลอง	สัญลักษณ์	ความกว้างแผ่น พื้น (เมตร)	ความยาวแผ่น พื้น (เมตร)	จำนวนคานที่ รองรับ	จำนวนแบบจำลอง		รวม
					สถิตศาสตร์	พลศาสตร์	
ระดับชั้นส่วน	P4(Aluri)	3.5	2.5	-	-	1	1
	P8(Jinka)	0.61	3.66	-	-	1	1
ระดับระบบ	P4 G4 L12-A	9.14	12	4	3	15	18
	P4 G4 L12-B	9.14	12	4	3	15	18
	P4 G4 L12-C	9.14	12	4	3	15	18
	P4 G5 L12-A	9.14	12	5	3	15	18
	P4 G5 L12-B	9.14	12	5	3	15	18
	P4 G5 L12-C	9.14	12	5	3	15	18
	P4 G7 L12-A	9.14	12	7	3	15	18
	P4 G7 L12-B	9.14	12	7	3	15	18
	P4 G7 L12-C	9.14	12	7	3	15	18
	P4 G4 L18-A	9.14	18	4	3	15	18
	P4 G4 L18-B	9.14	18	4	3	15	18
	P4 G4 L18-C	9.14	18	4	3	15	18
	P4 G5 L18-A	9.14	18	5	3	15	18
	P4 G5 L18-B	9.14	18	5	3	15	18
	P4 G5 L18-C	9.14	18	5	3	15	18
	P4 G7 L18-A	9.14	18	7	3	15	18
	P4 G7 L18-B	9.14	18	7	3	15	18
	P4 G7 L18-C	9.14	18	7	3	15	18
	P8 G4 L12-A	9.14	12	4	3	15	18
	P8 G4 L12-B	9.14	12	4	3	15	18
	P8 G4 L12-C	9.14	12	4	3	15	18
	P8 G5 L12-A	9.14	12	5	3	15	18
	P8 G5 L12-B	9.14	12	5	3	15	18
	P8 G5 L12-C	9.14	12	5	3	15	18
	P8 G7 L12-A	9.14	12	7	3	15	18
	P8 G7 L12-B	9.14	12	7	3	15	18
	P8 G7 L12-C	9.14	12	7	3	15	18
	P8 G4 L18-A	9.14	18	4	3	15	18

ประเภท แบบจำลอง	สัญลักษณ์	ความกว้างแผ่น พื้น (เมตร)	ความยาวแผ่น พื้น (เมตร)	จำนวนคานที่ รองรับ	จำนวนแบบจำลอง		รวม
					สถิตศาสตร์	พลศาสตร์	
ระดับระบบ	P8 G4 L18-B	9.14	18	4	3	15	18
	P8 G4 L18-C	9.14	18	4	3	15	18
	P8 G5 L18-A	9.14	18	5	3	15	18
	P8 G5 L18-B	9.14	18	5	3	15	18
	P8 G5 L18-C	9.14	18	5	3	15	18
	P8 G7 L18-A	9.14	18	7	3	15	18
	P8 G7 L18-B	9.14	18	7	3	15	18
	P8 G7 L18-C	9.14	18	7	3	15	18
รวมแบบจำลองทั้งหมด							650

ข้อสังเกตเกี่ยวกับสัญลักษณ์ที่ปรากฏในตาราง

P4, P8 คือ ใช้แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิด Prodeck 4, Prodeck 8

G4, G5, G7 คือ จำนวนคานที่ใช้รองรับแผ่นพื้นสะพาน 4 ตัว 5 ตัว 7 ตัว ตามลำดับ

L12 คือ ความยาวของสะพานเท่ากับ 12 เมตร / L18 คือ ความยาวของสะพานเท่ากับ 18 เมตร

A ↑ คือ กรณีรถ 1 คัน วิ่งทิศทางเดียว

B ↑↑ คือ กรณีรถ 2 คัน วิ่งทิศทางเดียว

C ↑↓ คือ กรณีรถ 2 คัน วิ่งทิศทางสวนกัน

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP bridge deck) ซึ่งผลการวิเคราะห์ในส่วนแรกจะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์แบบจำลองในระดับชิ้นส่วน (Component Level) เพื่อหาค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการสั่น (Mode Shape) นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และส่วนหลังจะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์แบบจำลองระดับระบบ (System Level) ซึ่งเป็นการศึกษาแบบอิงตัวแปรเสริม เพื่อหาค่าการโก่งตัวสูงสุด (Deflection) และค่าความเครียดสูงสุด (Strain) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance)

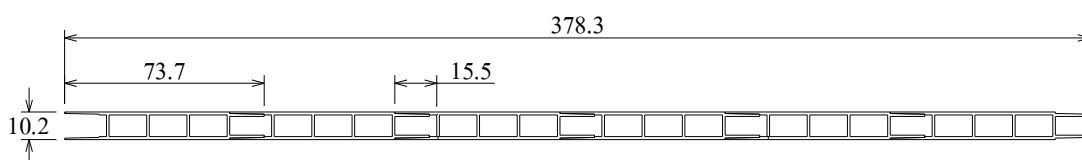
5.2 การวิเคราะห์แบบจำลองระดับชิ้นส่วน

แบบจำลองระดับชิ้นส่วน (Component Level) ของงานวิจัยในเล่มนี้ ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการตรวจสอบและปรับแก้ความถูกต้องในการสร้างแบบจำลอง โดยทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การตอบสนองทางโครงสร้างให้มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

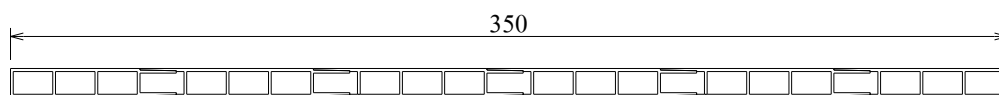
5.2.1 แบบจำลองระดับชิ้นส่วนของแผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 4

แบบจำลองระดับชิ้นส่วนของแผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 4 ถูกจำลองให้สอดคล้องกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Aluri, 2006) โดยขนาดแบบจำลองประกอบด้วยแผ่นพื้น Prodeck 4 ทำการเชื่อมกันจำนวน 6 แผ่นพื้น ซึ่งแผ่นพื้นแต่ละแผ่นจะมีความกว้าง 73.7 เซนติเมตร และระยะซ้อนทับระหว่างแผ่นพื้นสองชิ้นเท่ากับ 15.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.1 หลังจากนั้นทำการตัดแผ่นปีกส่วนที่ยื่นออกมาของแผ่นพื้นตัวริมออกทั้งสองออกไปดังแสดงในรูป

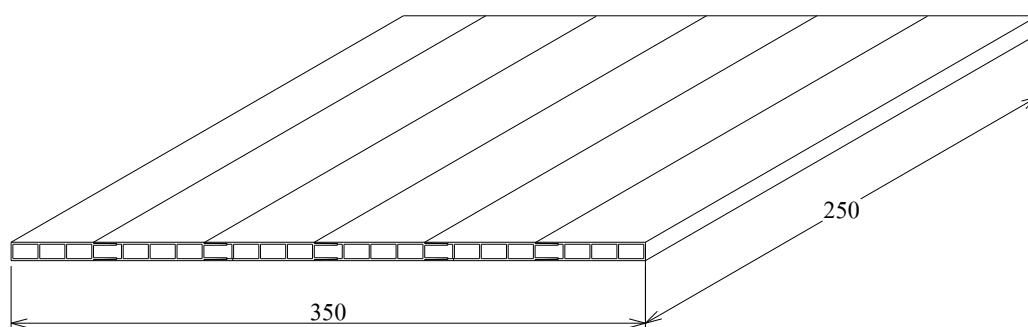
ที่ 5.2 จะได้แผ่นพื้นประกอบที่มีขนาดความกว้างของหน้าตัดโดยประมาณ 350 เซนติเมตร ส่วนความยาวของแผ่นพื้นเท่ากับ 250 เซนติเมตรดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 แบบจำลองแผ่นพื้น Prodeck 4 จำนวน 6 แผ่นพื้น

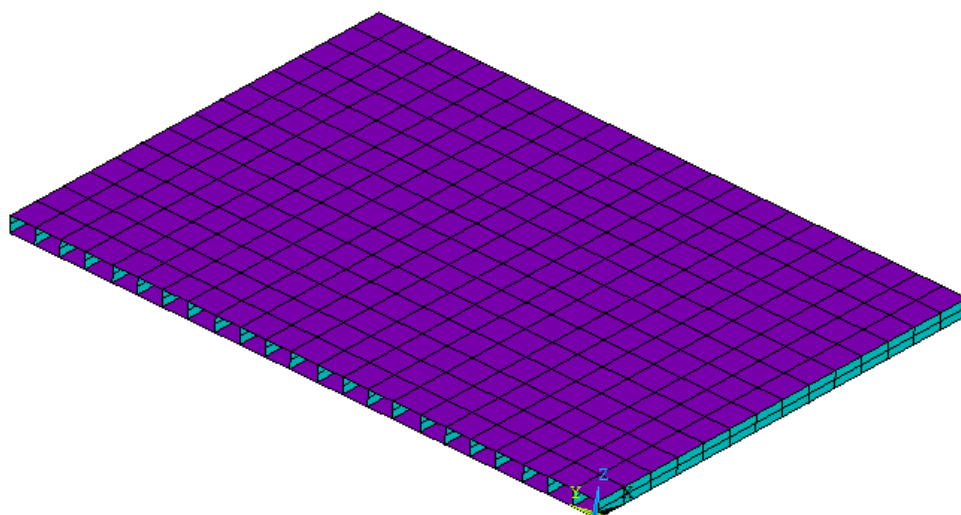


รูปที่ 5.2 แบบจำลองแผ่นพื้น Prodeck 4 จำนวน 6 แผ่นพื้น (ตัดปีกส่วนเกิน)



รูปที่ 5.3 ขนาดแบบจำลองระดับชิ้นส่วนชนิด Prodeck 4

ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นส่วนแบบจำลองชนิดแผ่นพื้น Prodeck 4 โดยใช้โปรแกรม ANSYS เป็นการวิเคราะห์ปัญหาในเชิงโครงสร้าง (Preferences -> Structural) โดยใช้เอลิเมนต์ชนิด SHELL 93 (Element Type -> SHELL 8Node93) เนื่องจากเอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างชนิดแผ่นบางหรือแผ่นลามิเนตโดยเฉพาะ เอลิเมนต์ Shell 93 เป็นเอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม จะประกอบไปด้วย 8 จุดต่อ (Node) แต่ละจุดต่อมี 6 ระดับขั้นความอิสระ (Degrees of freedom, DOF) สามารถกำหนดความหนาที่แต่ละด้านของแต่ละเอลิเมนต์ได้ (Real Constants -> Shell thickness) เอลิเมนต์มีคุณสมบัติเป็นแบบออร์โททรอปิก (Material Props -> Orthotropic) และสามารถส่งถ่ายแรงเฉือนตามแนวขวางที่มีค่าคงที่ตลอดความหนาของเอลิเมนต์ได้ หลังจากกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS เสร็จสิ้นแล้ว จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองและแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Mesh -> Quad) จำนวน 1,316 เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 จากนั้นเลือกการวิเคราะห์แบบ Modal Analysis โดยเลือกใช้วิธี Block Lanczos เพื่อหาค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการสั่น (Mode Shape) ที่เกิดขึ้น

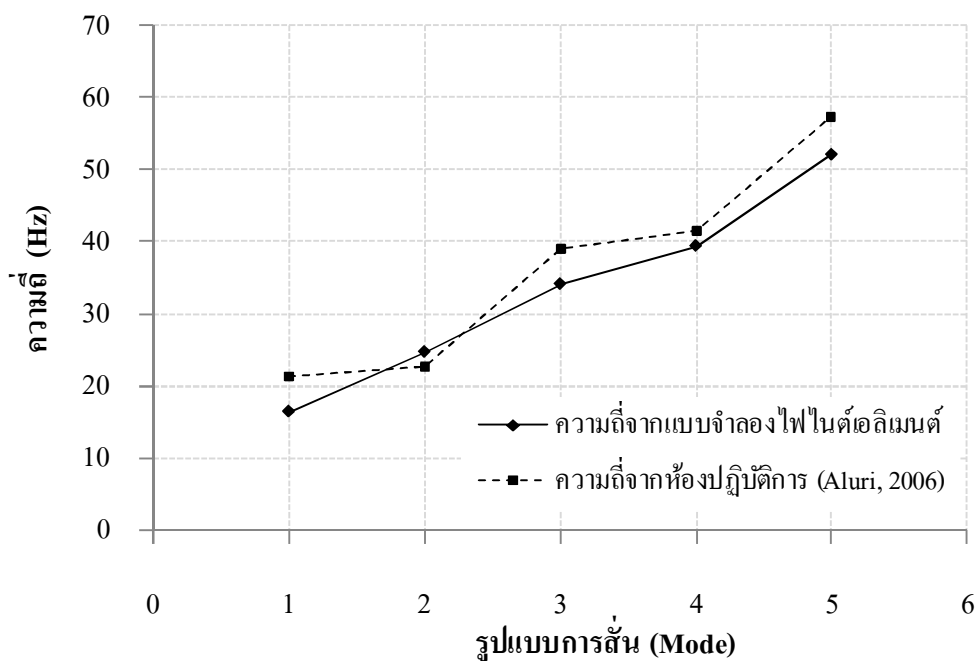


รูปที่ 5.4 แบบจำลองแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 4 จากโปรแกรม ANSYS

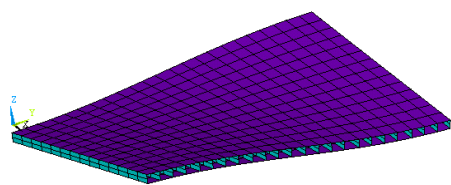
ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่และรูปแบบการสั่นที่ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการของ Aluri ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.5 – 5.6

ตารางที่ 5.1 ค่าความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองระดับชิ้นส่วน Prodeck 4 และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของ Aluri

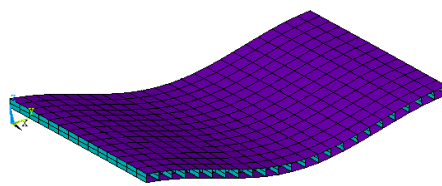
รูปแบบ (Mode)	ค่าความถี่จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Hz)	ค่าความถี่จากห้องปฏิบัติการ (Aluri, 2006) (Hz)
1	16.3	21.4
2	24.6	22.8
3	34.1	38.9
4	39.3	41.5
5	51.9	57.2



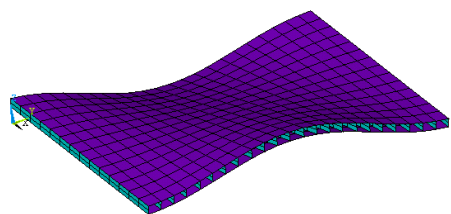
รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่าความถี่ในแต่ละรูปแบบการสั่นของแบบจำลอง Prodeck 4



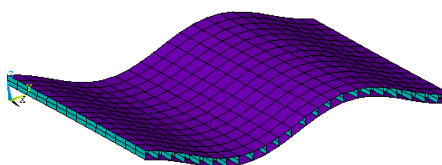
Mode 1



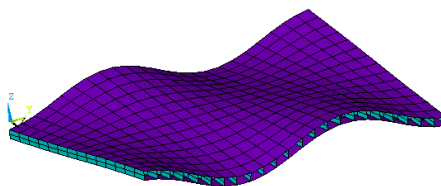
Mode 2



Mode 3



Mode 4



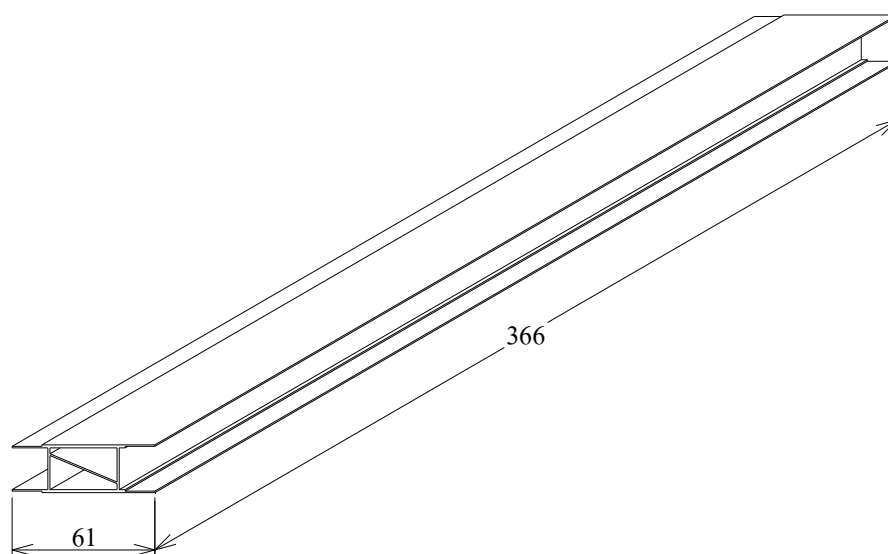
Mode 5

รูปที่ 5.6 รูปแบบการสั่นของแบบจำลอง Prodeck 4 (Mode 1 - 5)

จากผลที่แสดงในตารางที่ 5.1 พบว่าค่าความถี่ในแต่ละโหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่จะให้ค่าความถี่ที่ต่ำกว่าผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Aluri, 2006) ส่วนรูปแบบการสั่นที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยผลจากการดัด (Bending) และการบิด (Torsion) ของแผ่นพื้นดังแสดงในรูปที่ 5.6 ที่ผ่านมา

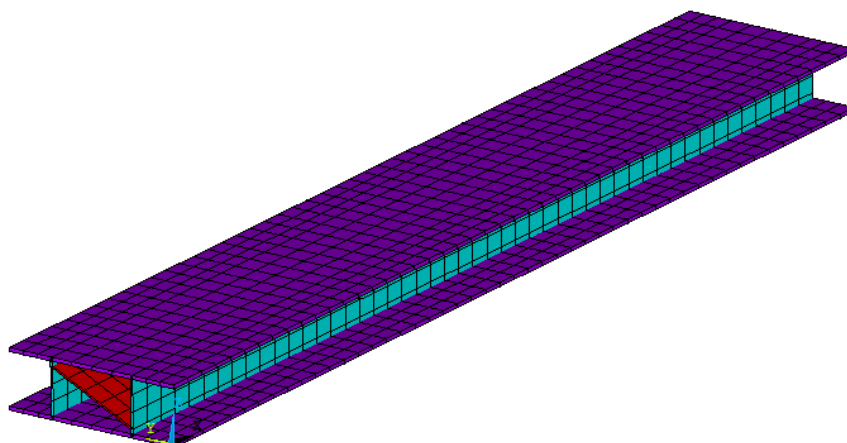
5.2.2 แบบจำลองระดับชิ้นส่วนของแผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 8

แบบจำลองระดับชิ้นส่วนของแผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 8 ถูกจำลองให้สอดคล้องกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Jinka, 2003) โดยขนาดแบบจำลองประกอบด้วยแผ่นพื้น Prodeck 8 จำนวน 1 แผ่นจะมีความกว้างของหน้าตัด 61 เซนติเมตร ส่วนความยาวของแผ่นพื้นเท่ากับ 366 เซนติเมตรดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ขนาดแบบจำลองระดับชิ้นส่วนชนิด Prodeck 8

ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นส่วนแบบจำลองชนิดแผ่นพื้น Prodeck 8 มีรูปแบบเดียวกันกับแบบจำลอง Prodeck 4 โดยเป็นการวิเคราะห์ปัญหาในเชิงโครงสร้าง (Preferences -> Structural) ซึ่งใช้เอลิเมนต์ชนิด SHELL 93 (Element Type -> SHELL 8Node93) จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองและแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Mesh -> Quad) จำนวน 1,584 เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 จากนั้นทำการวิเคราะห์แบบ Modal Analysis โดยเลือกใช้วิธี Block Lanczos เพื่อหาค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการสั่น (Mode Shape) ที่เกิดขึ้น

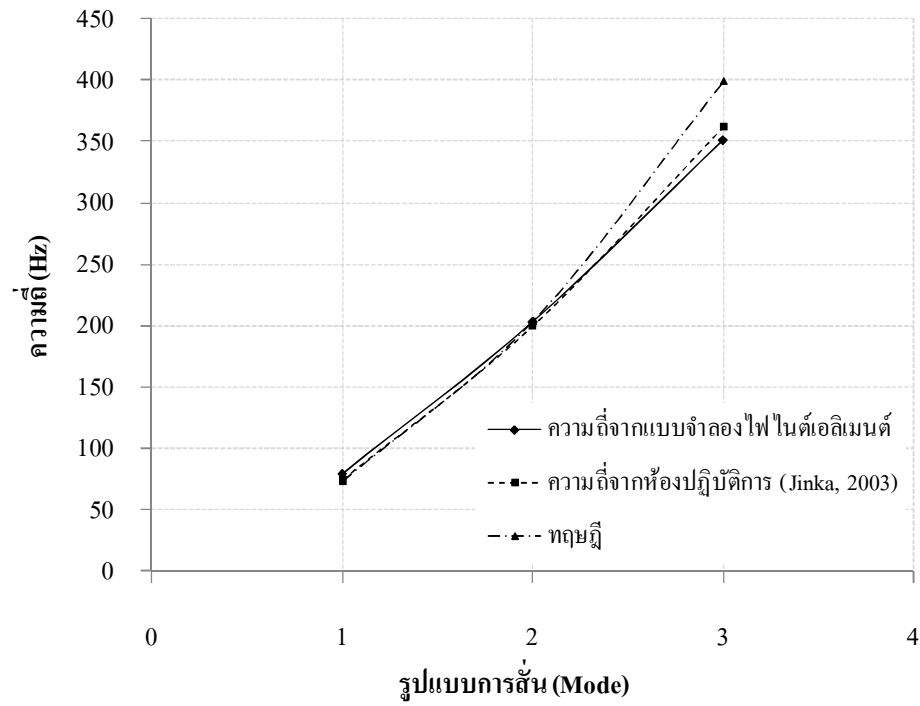


รูปที่ 5.8 แบบจำลองแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 8 จากโปรแกรม ANSYS

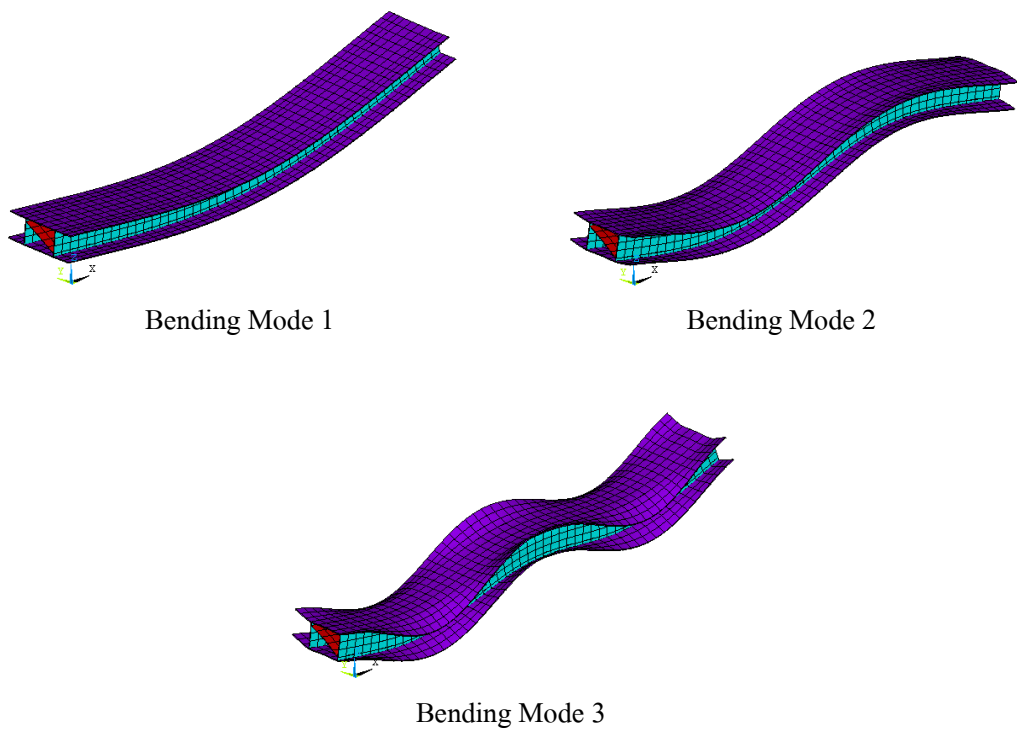
ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่และรูปแบบการสั่น ทำการพิจารณาเฉพาะค่าความถี่ที่ทำให้แบบจำลองแผ่นพื้นสะพาน Prodeck 8 เกิดรูปแบบการสั่นในรูปแบบการคด (Bending Mode) เพียงอย่างเดียว เพื่อให้ผลการทดสอบมีความสอดคล้องเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Jinka, 2003) แสดงในตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.9 - 5.10

ตารางที่ 5.2 ค่าความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองระดับชิ้นส่วน Prodeck 8 และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของ Jinka

รูปแบบการสั่น (Bending Mode)	ค่าความถี่จากแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Hz)	ค่าความถี่จากห้องปฏิบัติการ (Jinka, 2003) (Hz)	ทฤษฎี (Jinka, 2003) (Hz)
1	78.9	74.3	73.2
2	203	199.5	203.7
3	351.3	361.5	399



รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบค่าความถี่ในแต่ละรูปแบบการสั่นของแบบจำลอง Prodeck 8



รูปที่ 5.10 รูปแบบการสั่นเฉพาะการค้ำของแบบจำลอง Prodeck 8 (Bending Mode 1 - 3)

จากผลที่แสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าค่าความถี่ในแต่ละโหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Jinka, 2003) และทางทฤษฎี ส่วนรูปแบบการสั่นที่เกิดขึ้นจะพิจารณาเฉพาะรูปแบบการค้ำของแผ่นพื้นเพียงอย่างเดียวดังแสดงในรูปที่ 5.10 ที่ผ่านมา

เมื่อผลการวิเคราะห์แผ่นพื้นในระดับชิ้นส่วนทั้งแผ่นพื้นชนิด Prodeck 4 และแผ่นพื้นชนิด Prodeck 8 มีความถูกต้องในการขึ้นรูปแบบจำลอง จึงนำไปสู่การสร้างแบบจำลองในระดับระบบสะพานที่ประกอบไปด้วยแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย โดยมีที่รองรับด้วยคานเหล็ก ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองจะกล่าวในหัวข้อ 5.3

5.3 การวิเคราะห์แบบจำลองระดับระบบ

แบบจำลองระดับระบบ (System Level) เป็นแบบจำลองสะพานที่ประกอบไปด้วยแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก (Steel Stringer-FRP Deck Bridge System) โดยแบบจำลองชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการศึกษาแบบอิงตัวแปรเสริม (Parametric study) ของตัวแปรที่สนใจ ดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 4 (ในหัวข้อที่ 4.7) ทำการหาค่าการโก่งตัวสูงสุด (Deflection) และค่าความเครียดสูงสุด (Strain) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบ สถิติศาสตร์และพลศาสตร์ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance) ตามจุดประสงค์หลักที่วางไว้

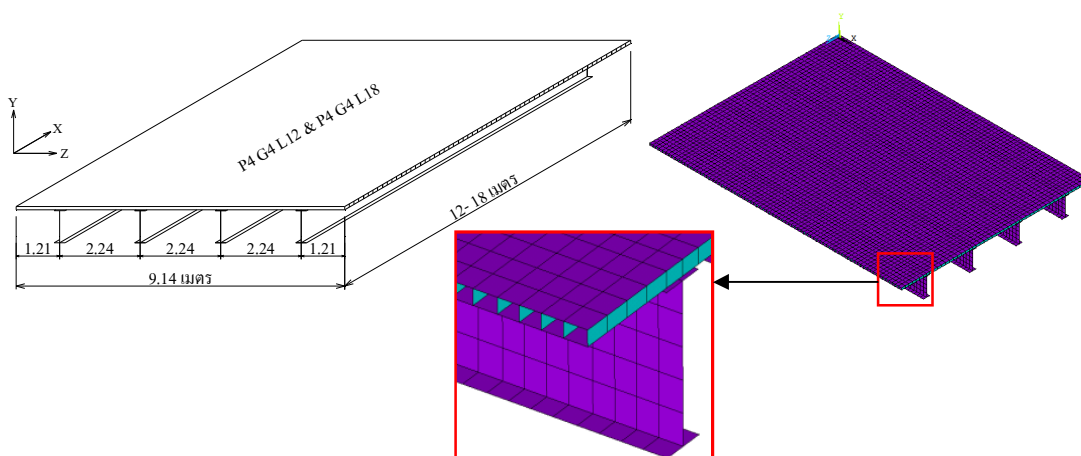
5.3.1 ประเภทของแบบจำลอง

แบบจำลองระบบสะพานที่มีแผ่นพื้นชนิดพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็กสำหรับใช้ศึกษาแบบอิงตัวแปรเสริม นั้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีขนาดและรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป โดยจะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ทำการพิจารณาประกอบไปด้วย ประเภทของแผ่นพื้น ช่วงความยาวของสะพาน จำนวนคานที่รองรับ ตำแหน่งการวางน้ำหนักบรรทุก และความเร็วของรถบรรทุก อย่างไรก็ตามสามารถแบ่งแบบจำลองออกเป็นสองรูปแบบหลักๆ คือ

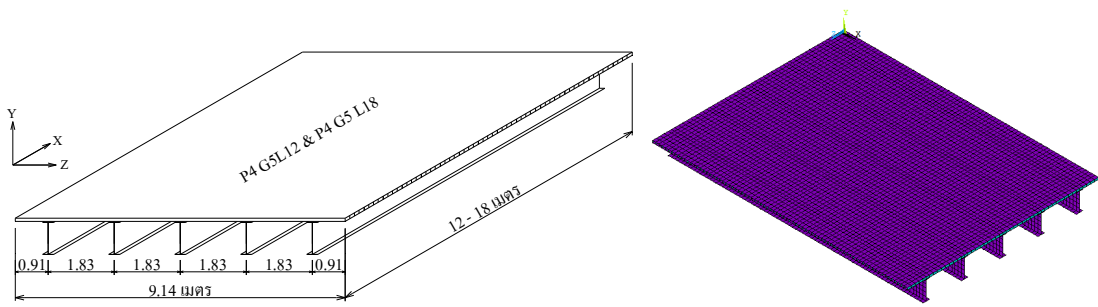
- 1) แบ่งประเภทของแบบจำลองตามหน้าตัดของระบบสะพาน (Cross Section) ซึ่งมีหน้าตัดที่แตกต่างกัน 6 แบบจำลอง โดยใช้ชนิดของแผ่นพื้นสะพาน (Prodeck 4, Prodeck 8) และจำนวนคานเหล็กที่รองรับ (ขนาด W36 x 150 เป็นจำนวน 4, 5, 7 ตัว) เป็นเกณฑ์ในการแบ่ง ดังแสดงในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.11 และ 5.12

ตารางที่ 5.3 รายละเอียดของแบบจำลองระบบสะพานแบ่งตามลักษณะของหน้าตัดแบบจำลอง

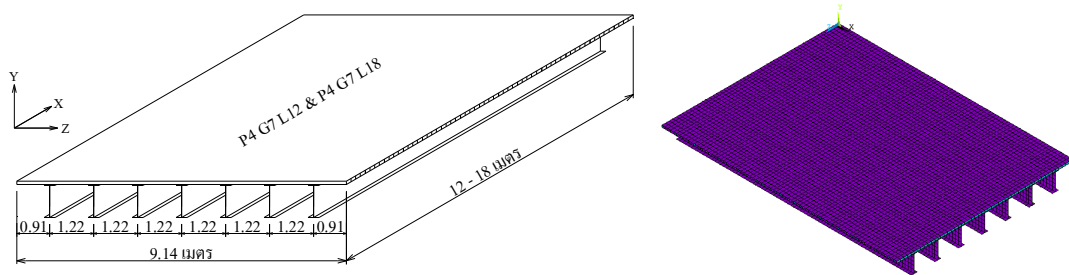
หน้าตัดที่	สัญลักษณ์	ประเภท แผ่นพื้น	ความกว้าง (เมตร)	ความยาว (เมตร)	จำนวนคานที่ รองรับ
1	P4 G4 L12	Prodeck 4	9.14	12	4
	P4 G4 L18			18	
2	P4 G5 L12	Prodeck 4	9.14	12	5
	P4 G5 L18			18	
3	P4 G7 L12	Prodeck 4	9.14	12	7
	P4 G7 L18			18	
4	P8 G4 L12	Prodeck 8	9.14	12	4
	P8 G4 L18			18	
5	P8 G5 L12	Prodeck 8	9.14	12	5
	P8 G5 L18			18	
6	P8 G7 L12	Prodeck 8	9.14	12	7
	P8 G7 L18			18	



(a) แบบจำลองระบบสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 4 ที่รองรับด้วยคานหลัก 4 ตัว

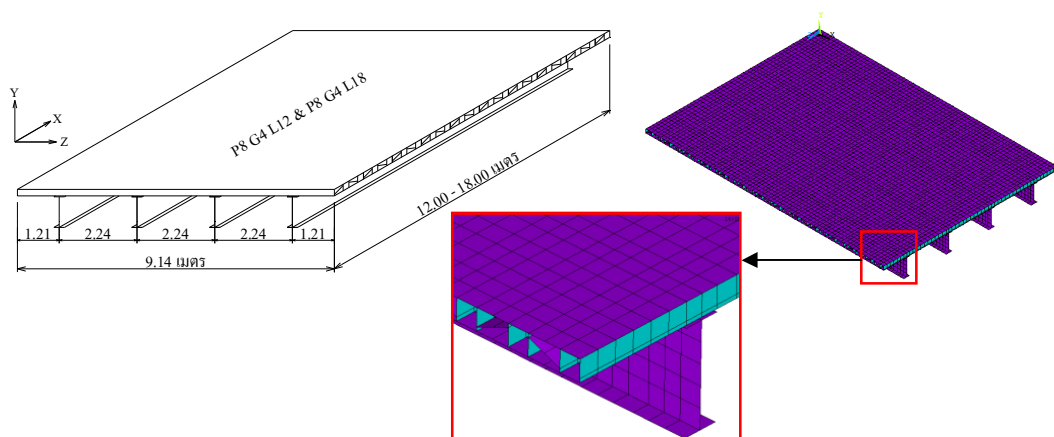


(b) แบบจำลองระบบสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 4 ที่รองรับด้วยคานเหล็ก 5 ตัว

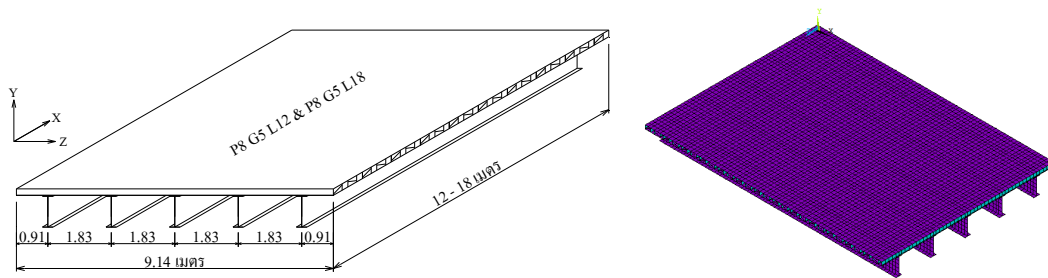


(c) แบบจำลองระบบสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 4 ที่รองรับด้วยคานเหล็ก 7 ตัว

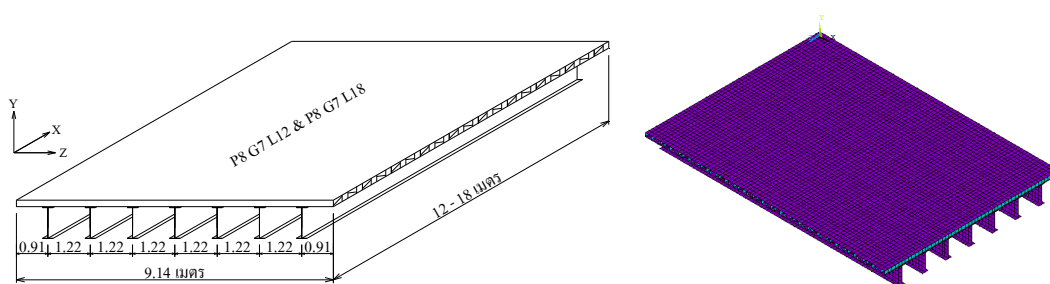
รูปที่ 5.11 รายละเอียดของแบบจำลองระบบสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 4 ที่รองรับด้วยคานเหล็ก



(a) แบบจำลองระบบสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 8 ที่รองรับด้วยคานเหล็ก 4 ตัว



(b) แบบจำลองระบบสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 8 ที่รองรับด้วยคานเหล็ก 5 ตัว



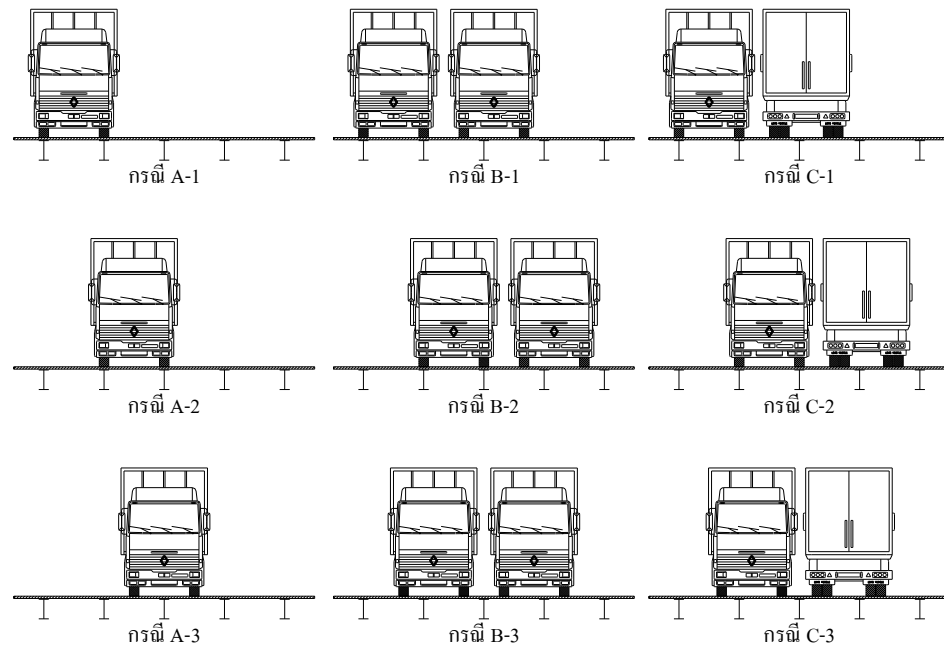
(c) แบบจำลองระบบสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 8 ที่รองรับด้วยคานเหล็ก 7 ตัว

รูปที่ 5.12 รายละเอียดของแบบจำลองระบบสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 8 ที่รองรับด้วยคานเหล็ก

2) แบ่งประเภทแบบจำลองตามจำนวนของรถบรรทุกและตำแหน่งของน้ำหนักจากรถบรรทุกที่มากกระทำบนแบบจำลอง ซึ่งแบ่งย่อยออกเป็น 9 กรณี (ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.9) ดังนี้

- กรณีที่ A-1 รถบรรทุก 1 คันกระทำตรงกับคานเหล็กที่รองรับตัวนอกสุด (ตัวที่ 1)
- กรณีที่ A-2 รถบรรทุก 1 คันกระทำตรงกับคานเหล็กที่รองรับตัวที่ 2
- กรณีที่ A-3 รถบรรทุก 1 คันกระทำตรงกึ่งกลางของหน้าตัดตามขวางสะพาน
- กรณีที่ B-1 รถบรรทุก 2 คันกระทำตรงกับคานเหล็กที่รองรับตัวนอกสุด (ตัวที่ 1)
- กรณีที่ B-2 รถบรรทุก 2 คันกระทำตรงกับคานเหล็กที่รองรับตัวที่ 2
- กรณีที่ B-3 รถบรรทุก 2 คันกระทำตรงกึ่งกลางของหน้าตัดตามขวางสะพาน
- กรณีที่ C-1 ถึง C-3 เหมือนกับกรณีที่ B-1 ถึง B-3 แต่ทิศทางการวิ่งของรถบรรทุกสวนทิศกัน

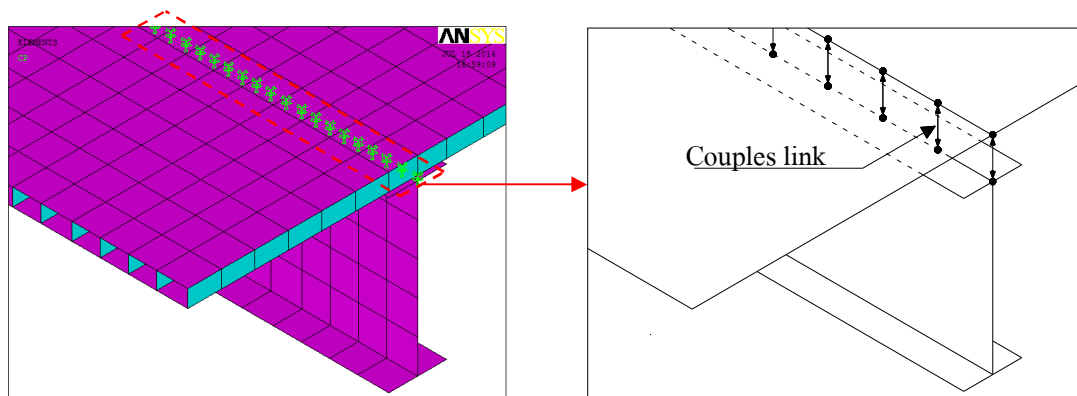
เพื่อให้มองเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงขอสรุปในเชิงรูปแบบภาพ ยกตัวอย่างของกรณีระบบสะพานหน้าตัดที่รองรับด้วยคานเหล็ก 5 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ตัวอย่างหน้าตัดของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ

5.3.2 เงื่อนไขของจุดต่อระหว่างแผ่นพื้นกับคานเหล็กที่รองรับของแบบจำลอง

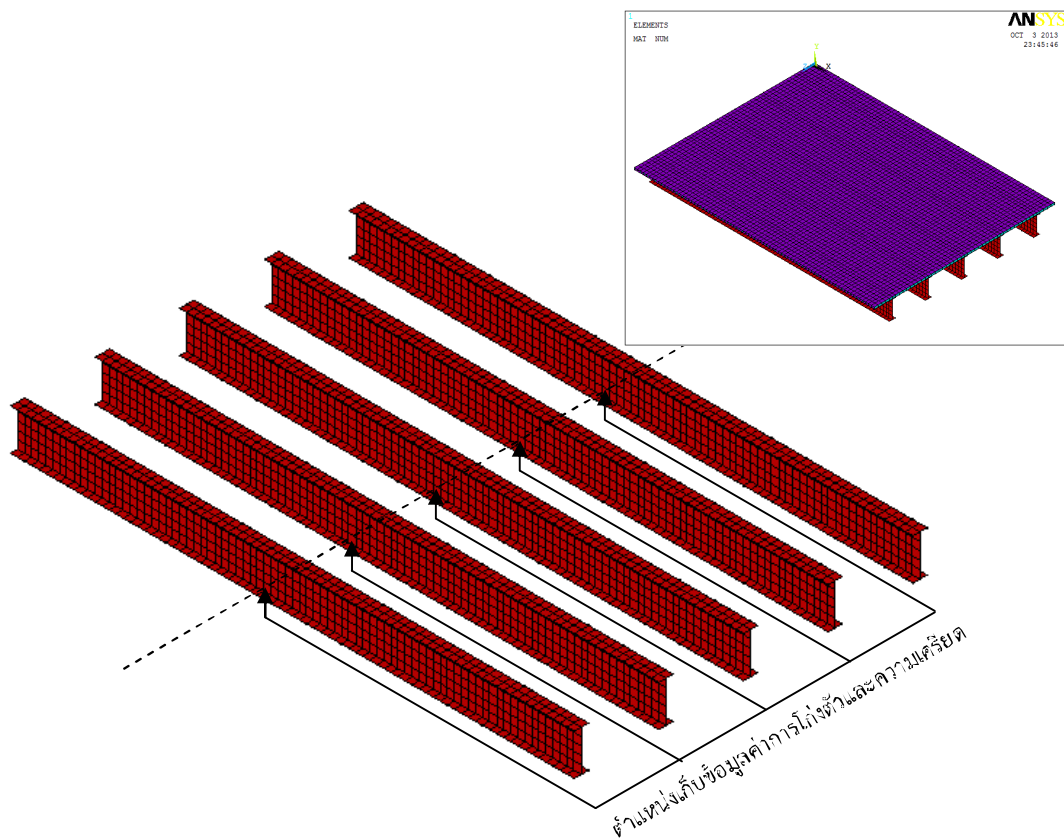
แบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมประกอบบางส่วน (Partial Composite) มีรูปแบบการเชื่อมต่อ DOFs (U_x , U_y , U_z , Rot_x , Rot_y , Rot_z) ระหว่างแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยกับคานเหล็กที่รองรับเข้าด้วยกัน โดยสร้างจุดเชื่อมแบบ Couples link ระหว่างจุดต่อที่อยู่ตรงกันกับแนวกึ่งกลางของคานเหล็กกับแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ส่วนขยายจุดเชื่อมต่อ Couples link

5.3.3 ตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลบนแบบจำลองระดับระบบ

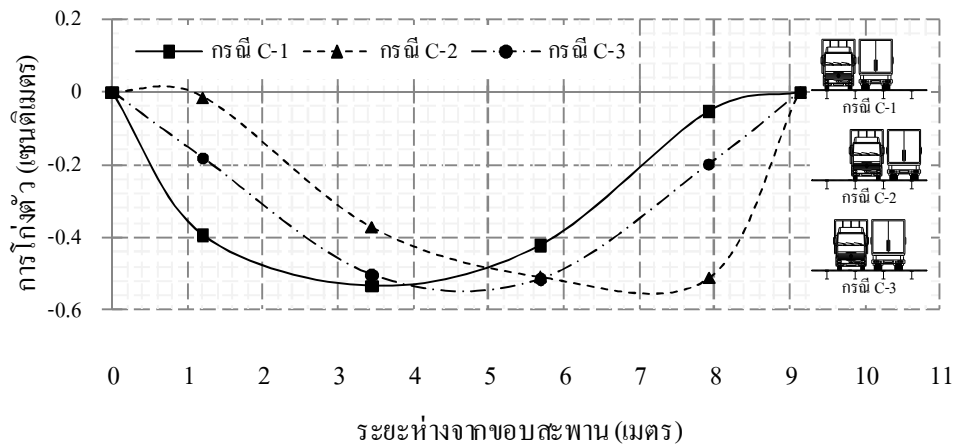
สำหรับตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลผลการตอบสนองสูงสุด (ค่าการโก่งตัว และค่าความเครียด) ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์แบบจำลองระดับระบบทั้งทางสถิตศาสตร์และพลศาสตร์ คือบริเวณแนวกึ่งกลางของคานเหล็กที่รองรับในแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.15



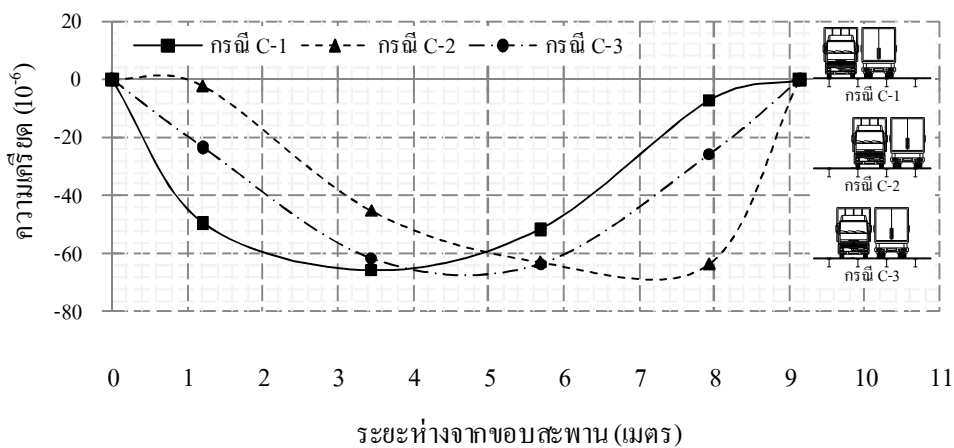
รูปที่ 5.15 ตำแหน่งบันทึกข้อมูลค่าการตอบสนองสูงสุดของแบบจำลองระดับระบบ

5.4 ผลการศึกษาแบบอิงตัวแปรเสริมของแบบจำลองระดับระบบ

การศึกษาแบบจำลองแบบอิงตัวแปรเสริมนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อวิเคราะห์หาค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance) ภายใต้วแปรที่ได้ทำการศึกษา โดยมีกรณีศึกษาของแบบจำลองทั้งหมด 648 แบบจำลอง ประกอบไปด้วยแบบจำลองระบบสะพานที่มีแผ่นพื้นชนิด Prodeck 4 และ Prodeck 8 อย่างละ 324 แบบจำลอง (ข้อมูลจากการวิเคราะห์ค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองทั้งหมดจะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก)



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับระยะห่างจากขอบสะพาน (P4 G4 L12-C)

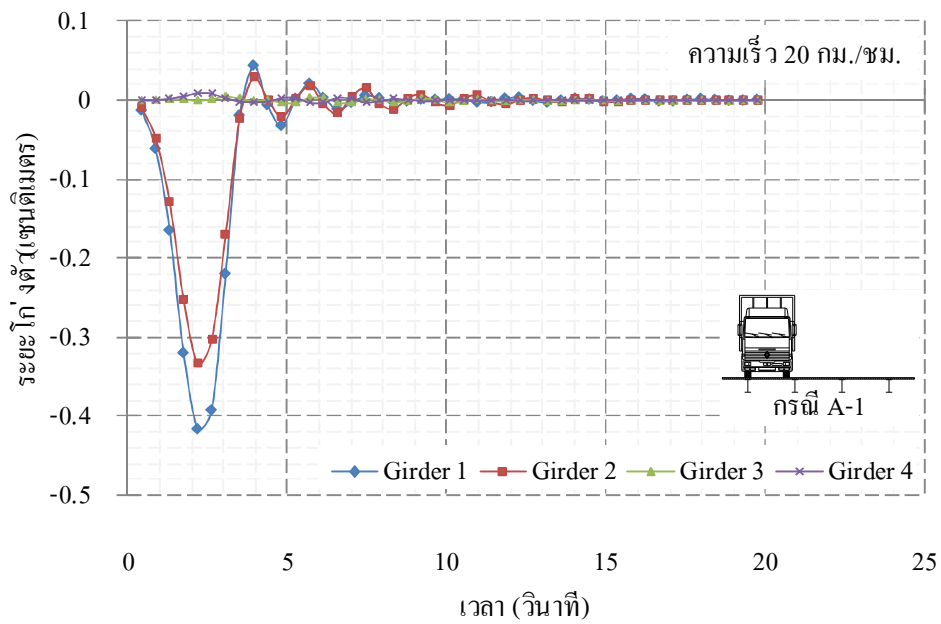


รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเคียวกับระยะห่างจากขอบสะพาน (P4 G4 L12-C)

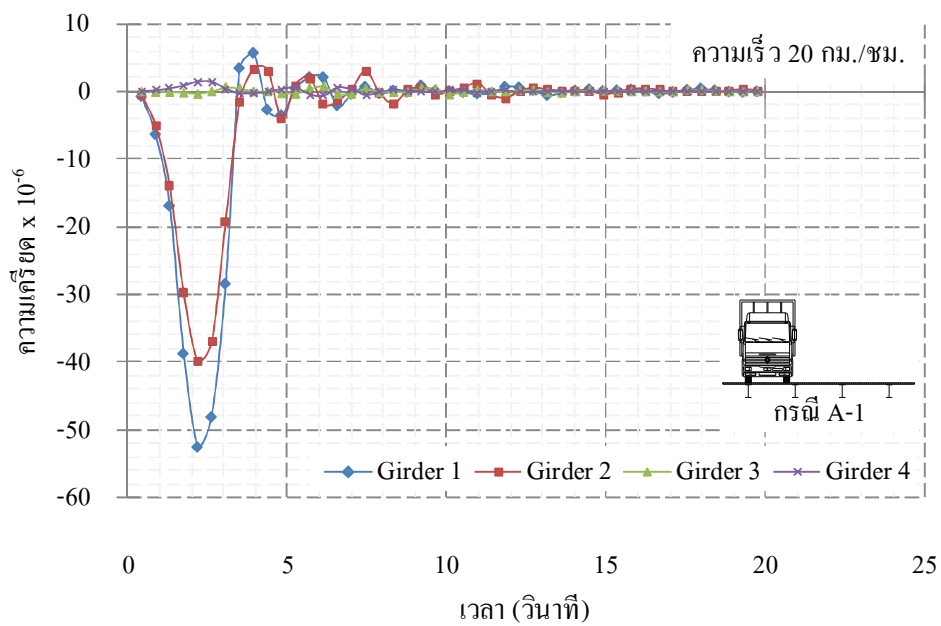
5.4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองสูงสุด (การโก่งตัวและความเคียว) ที่ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบชั่วขณะ (Transient Analysis) ซึ่งจะถูกบันทึกผลในรูปแบบประวัติเวลา (Time History) โดยกำหนดให้โครงสร้างระบบสะพานมีค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์

จากตัวอย่างกรณีแบบจำลอง P4 G4 L12 ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกในกรณี A1 ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 40 60 80 และ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.22 - 5.26 และตารางที่ 5.7 - 5.8 (กรณีอื่น จะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค)

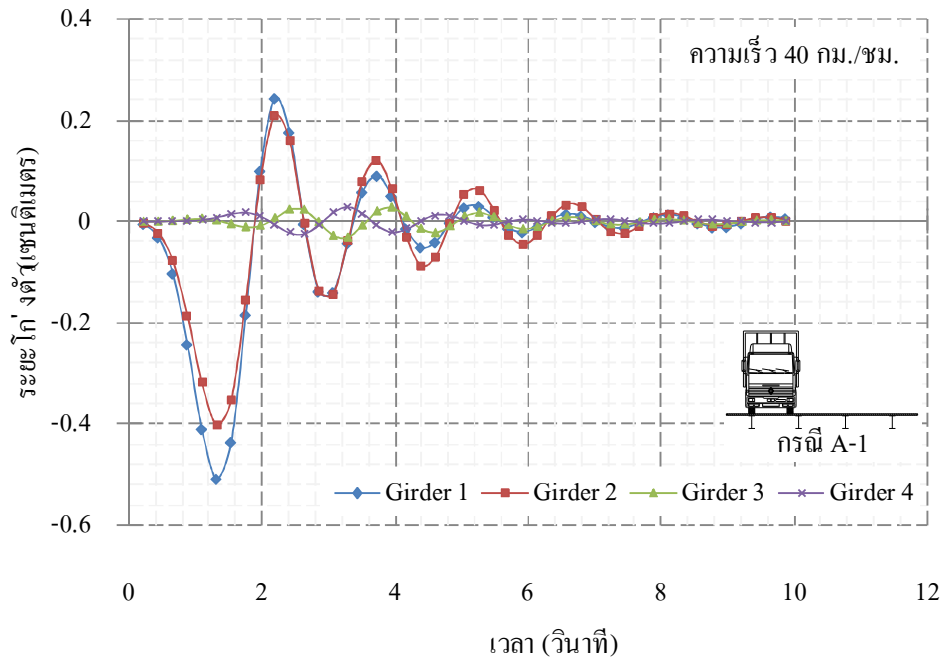


(a) ระยะการโก่งตัวของคานเหล็กภายใต้เวลาที่เปลี่ยนไป

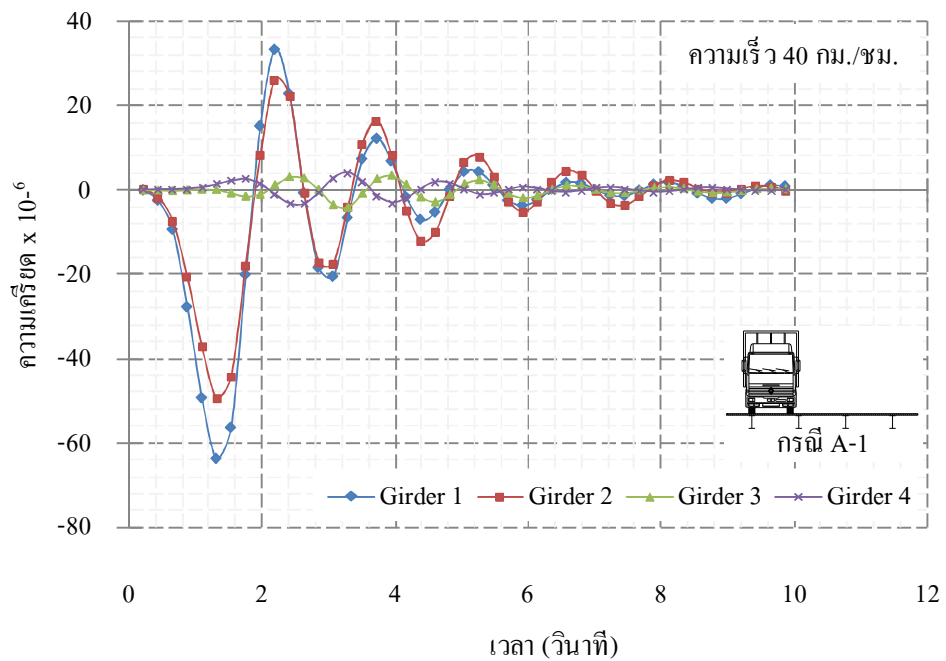


(b) ความเครียดของคานเหล็กภายใต้เวลาที่เปลี่ยนไป

รูปที่ 5.22 ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ (P4 G4 L12-A1, V20)

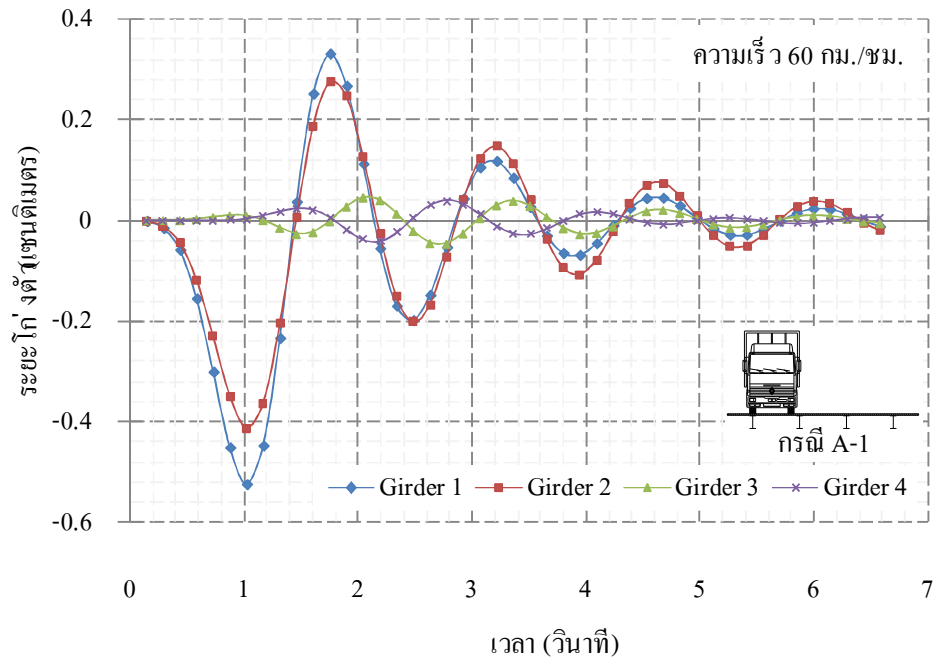


(a) ระยะการโก่งตัวของคานเหล็กภายใต้เวลาที่เปลี่ยนไป

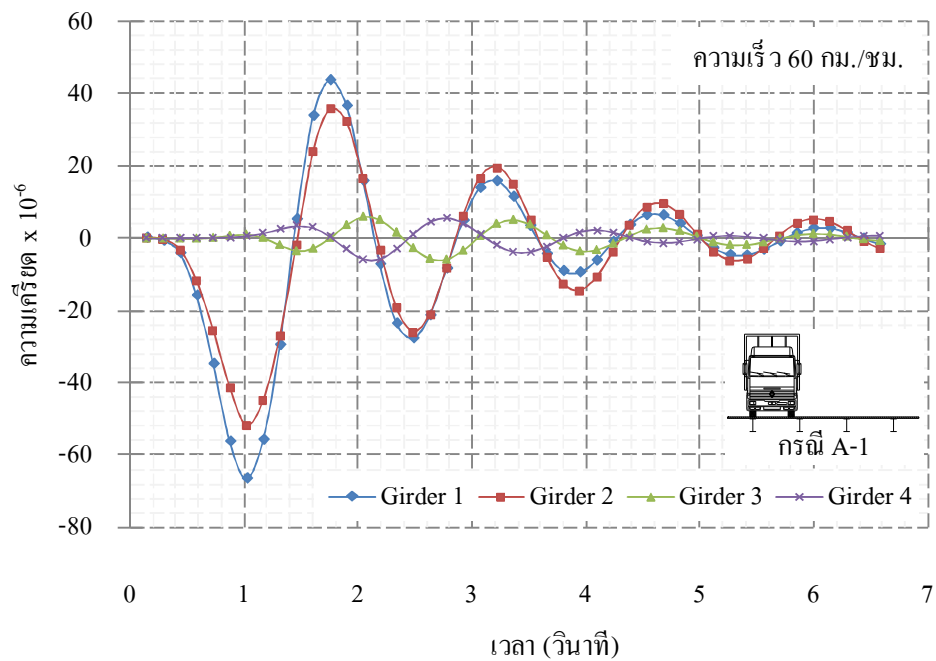


(b) ความเค้นของคานเหล็กภายใต้เวลาที่เปลี่ยนไป

รูปที่ 5.23 ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ (P4 G4 L12-A1, V40)

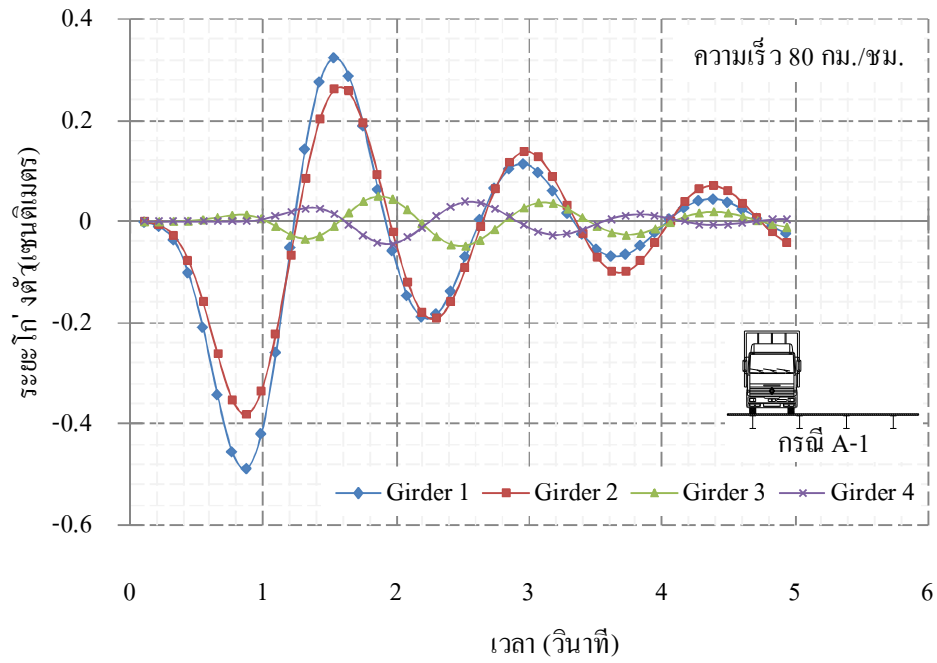


(a) ระยะเวลาโก่งตัวของคานเหล็กภายใต้เวลาที่เปลี่ยนไป

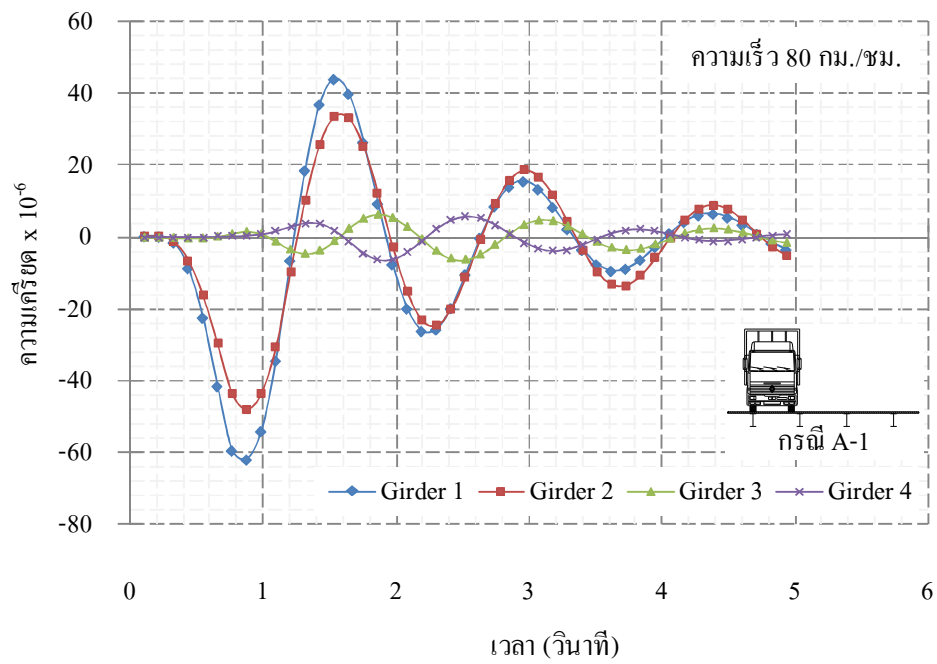


(b) ความเครียดของคานเหล็กภายใต้เวลาที่เปลี่ยนไป

รูปที่ 5.24 ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ (P4 G4 L12-A1, V60)

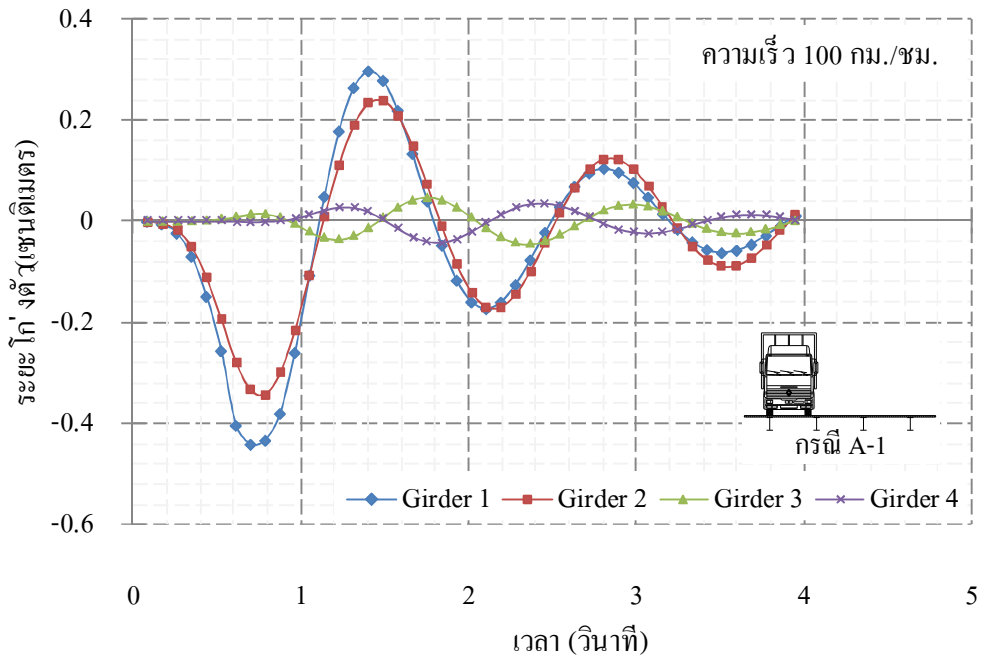


(a) ระยะการโก่งตัวของคานเหล็กภายใต้เวลาที่เปลี่ยนไป

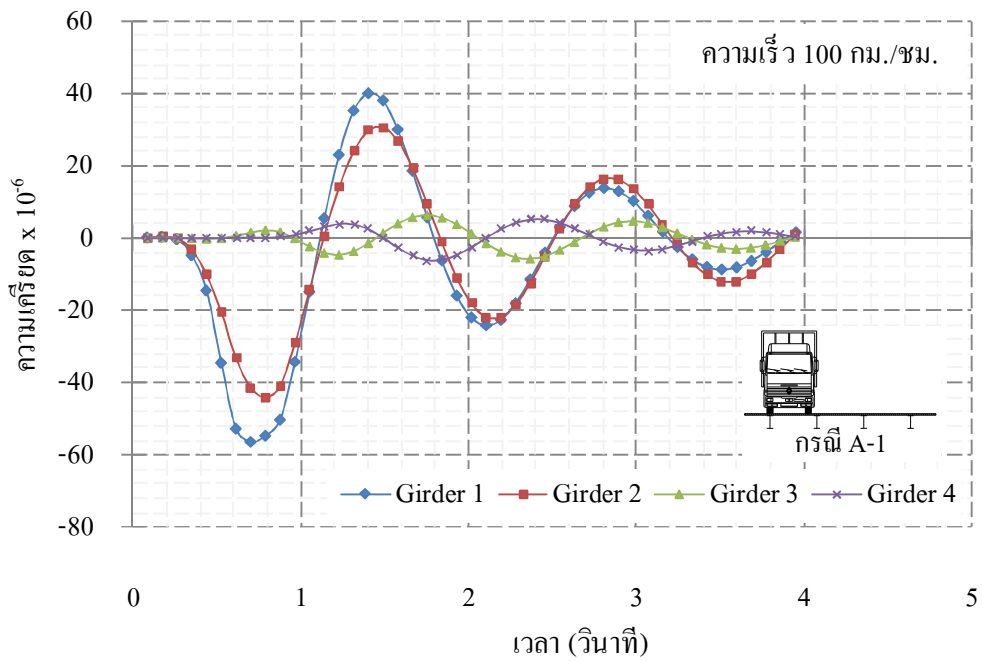


(b) ความเค้นของคานเหล็กภายใต้เวลาที่เปลี่ยนไป

รูปที่ 5.25 ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ (P4 G4 L12-A1, V80)



(a) ระยะการโก่งตัวของคานเหล็กภายใต้เวลาที่เปลี่ยนไป



(b) ความเค้นของคานเหล็กภายใต้เวลาที่เปลี่ยนไป

รูปที่ 5.26 ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ (P4 G4 L12-A1, V100)

จะเห็นว่าผลการตอบสนองสูงสุดที่ได้จากข้อมูลประวัติเวลา (Time History) ในรูปที่ 5.22 ถึง 5.26 ไม่ได้เกิดขึ้นตรงกับตำแหน่งเวลาที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านตรงกับตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน แต่จะเกิดขึ้นล่าช้าลงไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งสามารถคำนวณหาเวลาที่จะเกิดผลการตอบสนองสูงสุดเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านออกไปจากแบบจำลองได้ดังสมการที่ 5.1

$$T_{Max Response} = \frac{(L_{Bridge} + L_{Truck})}{V} \quad (5.1)$$

เมื่อ $T_{Max Response}$	คือ เวลาที่ทำให้เกิดผลการตอบสนองสูงสุด (วินาที)
L_{Bridge}	คือ ช่วงความยาวของสะพาน (เมตร)
L_{Truck}	คือ ช่วงความยาวของรถบรรทุก วัดระยะจากเพลาล้อหน้าถึงเพลาล้อหลัง (เมตร)
V	คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

• ตัวอย่างของกรณี P4 G4 L12-A1 ความเร็วรถบรรทุก 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
 ดังแสดงในรูปที่ 5.25

$$T_{Max Response} = \frac{(12 + 8.6)}{\left(\frac{80 \times 1000}{3600}\right)}$$

$$= 0.93 \text{ วินาที}$$

• ตัวอย่างของกรณี P4 G4 L12-A1 ความเร็วรถบรรทุก 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
 ดังแสดงในรูปที่ 5.26

$$T_{Max Response} = \frac{(12 + 8.6)}{\left(\frac{100 \times 1000}{3600}\right)}$$

$$= 0.74 \text{ วินาที}$$

จากข้อมูลประวัติเวลา (Time History) รูปที่ 5.22 ถึง 5.26 ของแบบจำลอง P4 G4 L12-A1 สามารถสรุปค่าการตอบสนองสูงสุด (การโก่งตัวและความเครียด) ดังแสดงในตารางที่ 5.8 และ 5.9 สำหรับแบบจำลองกรณีอื่นๆซึ่งมีได้ได้แสดงไว้ก็สามารถหาค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ได้ด้วยวิธีเดียวกันดังที่กล่าวมาในข้างต้น

ตารางที่ 5.7 ค่าการโก่งตัวสูงสุดทางพลศาสตร์ของแบบจำลอง P4 G4 L12-A1

กาน ตัวที่	ระยะห่าง จากขอบ	การโก่งตัว (เซนติเมตร)				
		ความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)				
		20 กม./ชม.	40 กม./ชม.	60 กม./ชม.	80 กม./ชม.	100 กม./ชม.
-	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	1.21	-0.4165	-0.5084	-0.5251	-0.4902	-0.4410
2	3.45	-0.3336	-0.4022	-0.4121	-0.3829	-0.3419
3	5.69	-0.0028	-0.0304	-0.0460	-0.0482	-0.0452
4	7.93	-0.0031	-0.0241	-0.0405	-0.0441	-0.0424
-	9.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.8 ค่าความเครียดสูงสุดทางพลศาสตร์ของแบบจำลอง P4 G4 L12-A1

กาน ตัวที่	ระยะห่าง จากขอบ	ค่าความเครียด x 10 ⁻⁶				
		ความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)				
		20 กม./ชม.	40 กม./ชม.	60 กม./ชม.	80 กม./ชม.	100 กม./ชม.
-	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	1.21	-52.4617	-63.5641	-66.4172	-61.8045	-56.2056
2	3.45	-39.8301	-49.4084	-51.9814	-47.9478	-44.0718
3	5.69	-0.4937	-4.0985	-5.9148	-6.2450	-5.8512
4	7.93	-0.6214	-3.4574	-5.7690	-6.3571	-6.1215
-	9.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

5.4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์

ในการคำนวณและเปรียบเทียบผลของคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ จะทำการคำนวณตามสมการที่ 4.1 ซึ่งคำนวณจากค่าการโค้งตัวสูงสุด และสมการที่ 4.2 ซึ่งคำนวณจากค่าความเครียดสูงสุดที่ได้รับจากการวิเคราะห์แบบจำลองระบบสะพานทางสถิติศาสตร์และพลศาสตร์ (สมการจากบทที่ 4 ในหัวข้อที่ 4.3) โดยทำการพิจารณาแบบจำลองสะพานกรณีตัวอย่างแผ่นพื้นประเภท Prodeck 4 ที่รองรับด้วยคานเหล็ก 4 ตัวและมีช่วงความยาวของสะพาน 12 เมตร (P4 G4 L12) ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 การเปรียบเทียบค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ ของแบบจำลองชนิด P4 G4 L12-A

สัญลักษณ์แบบจำลอง		วิธีคำนวณค่า DLA	ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DLA) %				
			ความเร็วของรถบรรทุก (กม./ชม.)				
			20	40	60	80	100
P4 G4 L12-A	P4 G4 L12-A1	เนื่องจากค่าการ โค้งตัว	9.37	33.48	37.87	28.72	15.78
		เนื่องจากค่าความเครียด	10.07	33.37	39.35	29.68	17.93
	P4 G4 L12-A2	เนื่องจากค่าการ โค้งตัว	10.45	33.66	38.02	28.73	15.64
		เนื่องจากค่าความเครียด	10.88	33.86	39.74	29.69	17.70
	P4 G4 L12-A3	เนื่องจากค่าการ โค้งตัว	10.68	33.95	40.30	32.78	21.05
		เนื่องจากค่าความเครียด	11.66	32.79	41.18	36.10	26.25

ข้อสังเกตเกี่ยวกับสัญลักษณ์ที่ปรากฏในตาราง

P4 คือ ใช้แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิด Prodeck 4

G4 คือ จำนวนคานที่ใช้รองรับแผ่นพื้นสะพาน 4 ตัว

L12 คือ ความยาวของสะพานเท่ากับ 12 เมตร

-A1 คือ รถบรรทุก 1 คันกระทำตรงกับคานเหล็กที่รองรับตัวนอกสุด (ตัวที่ 1)

-A2 คือ รถบรรทุก 1 คันกระทำตรงกับคานเหล็กที่รองรับตัวที่ 2

-A3 คือ รถบรรทุก 1 คันกระทำตรงกึ่งกลางของหน้าตัดตามขวางสะพาน

ตัวอย่าง การคำนวณค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (DLA) ที่ปรากฏอยู่ในตารางที่ 5.9

- วิธีคำนวณเนื่องมาจากค่าการโก่งตัวสูงสุด

กรณีความเร็วรถบรรทุก 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งค่าการโก่งตัวสูงสุดทางสถิติศาสตร์ของแบบจำลอง P4 G4 L12-A1 จากตารางที่ 5.4 มีค่าเท่ากับ 0.3808 เซนติเมตร และค่าการโก่งตัวสูงสุดทางพลศาสตร์ของแบบจำลองเดียวกัน จากตารางที่ 5.7 มีค่าเท่ากับ 0.4165 เซนติเมตร

$$\text{จากสมการ 4.1} \quad DLA = \left(\frac{\delta_{dyn} - \delta_{stat}}{\delta_{stat}} \right) \times 100$$

$$DLA = \left(\frac{0.4165 - 0.3808}{0.3808} \right) \times 100$$

$$DLA = 9.37\%$$

- วิธีคำนวณเนื่องมาจากค่าความเครียดสูงสุด

กรณีความเร็วรถบรรทุก 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งค่าความเครียดสูงสุดทางสถิติศาสตร์ของแบบจำลอง P4 G4 L12-A1 จากตารางที่ 5.4 มีค่าเท่ากับ 47.6608 และค่าความเครียดตัวสูงสุดทางพลศาสตร์ของแบบจำลองเดียวกัน จากตารางที่ 5.8 มีค่าเท่ากับ 52.4617

$$\text{จากสมการ 4.2} \quad DLA = \left(\frac{\varepsilon_{dyn} - \varepsilon_{stat}}{\varepsilon_{stat}} \right) \times 100$$

$$DLA = \left(\frac{52.4617 - 47.6608}{47.6608} \right) \times 100$$

$$DLA = 10.07\%$$

เมื่อพิจารณาตารางที่ 5.9 พบว่าค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DLA) ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ 4.2 (ค่าความเครียดสูงสุด) โดยส่วนใหญ่จะมีค่าสูงกว่าค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ 4.1 (ค่าการโก่งตัว) เพราะฉะนั้นผลการวิเคราะห์ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่จะนำเสนอต่อไป จะพิจารณาเฉพาะผลที่ได้จากการคำนวณบนพื้นฐานของค่าความเครียดสูงสุด (สมการที่ 4.2) เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Jinka, 2003) นอกจากนี้ผลการคำนวณค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองทั้งหมดของงานวิจัยถูกแสดงอยู่ในส่วนของ ภาคผนวก ก

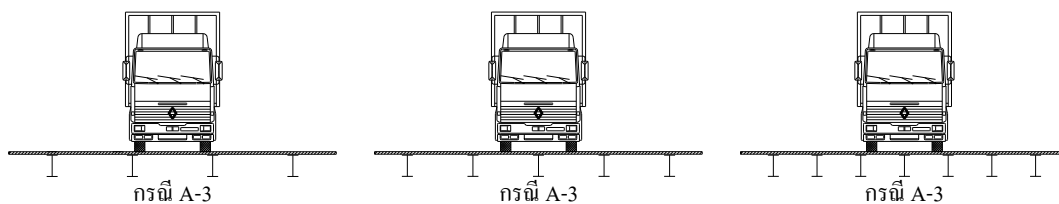
5.5 อิทธิพลของตัวแปรเสริมที่มีผลต่อค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์

เนื่องจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็กของงานวิจัยนี้ มีตัวแปรเสริมที่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัวแปรดังที่กล่าวมาในบทที่ 4 ผลของอิทธิพลจากตัวแปรเสริมต่างๆจะได้กล่าวดังต่อไปนี้

5.5.1 อิทธิพลของจำนวนรอบบรรทุกและตำแหน่งน้ำหนักกระทำที่มีผลต่อค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองทั้งหมด (ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก) เมื่อพิจารณาถึงจำนวนของรอบบรรทุก พบว่าค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DLA) ของกรณีการเคลื่อนที่ผ่านบนแบบจำลองสะพานของรอบบรรทุก 1 คัน (กรณี A) มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเคลื่อนที่ผ่านบนแบบจำลองสะพานของรอบบรรทุก 2 คัน (กรณี B และ C) เพราะว่า เมื่อพิจารณาสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ (สมการที่ 4.1 และ 4.2) จะเห็นได้ว่า หากผลการตอบสนองทางสถิติศาสตร์เกิดขึ้นมีค่ามาก จะส่งผลให้ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์มีค่าลดลง ซึ่งจากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า น้ำหนักจากรอบบรรทุก 2 คันทำให้ผลการตอบสนองทางสถิติศาสตร์เกิดขึ้นสูงกว่าน้ำหนักจากรอบบรรทุก 1 คัน และสอดคล้องกับผลการศึกษาระบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Humar & Kasif, 1995)

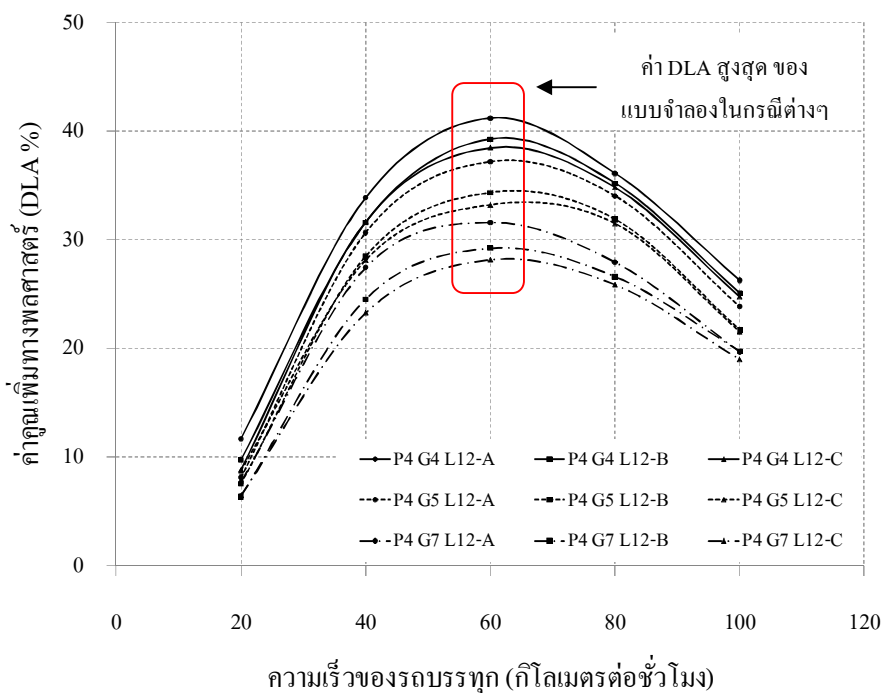
เมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรอบบรรทุกตามแนวขวางของหน้าตัดแบบจำลองสะพานพบว่า ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ของกรณีตำแหน่งรอบบรรทุกที่กระทำตรงกึ่งกลางของหน้าตัดตามขวางสะพาน (กรณี -3) จะมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีตำแหน่งรอบบรรทุกที่กระทำตรงกับคานเหล็กที่รองรับตัวริมนอกสุดและตัวในถัดมา (กรณี -1 และ -2) ดังแสดงในรูปที่ 5.27



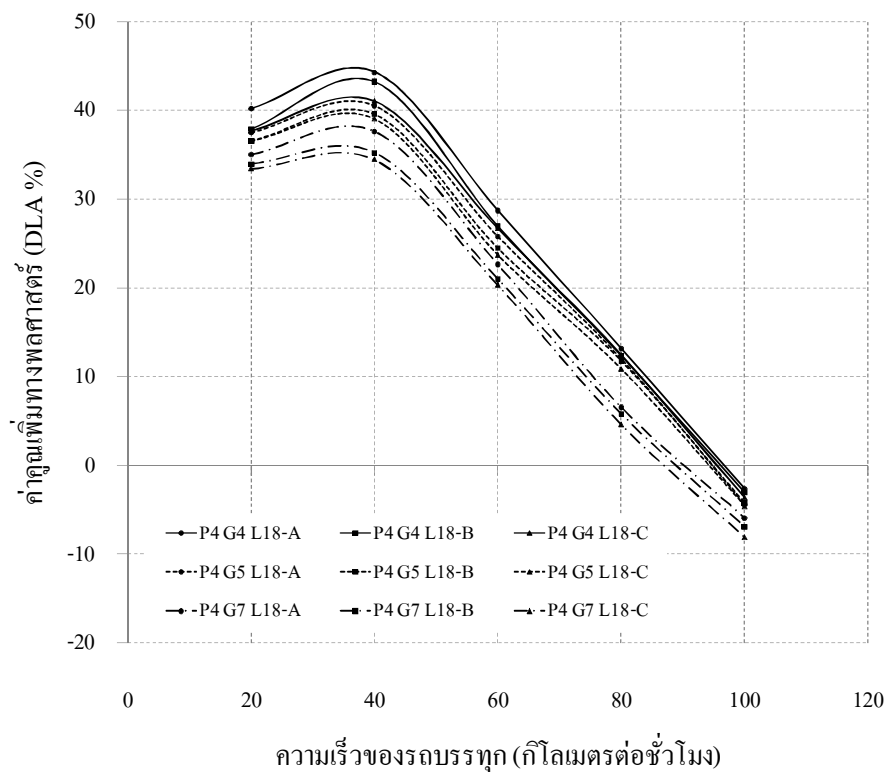
รูปที่ 5.27 จำนวนและตำแหน่งของรถบรรทุกที่ส่งผลให้เกิดค่า DLA สูงสุด

5.5.2 อิทธิพลของความเร็วของรถบรรทุกที่มีผลต่อค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์

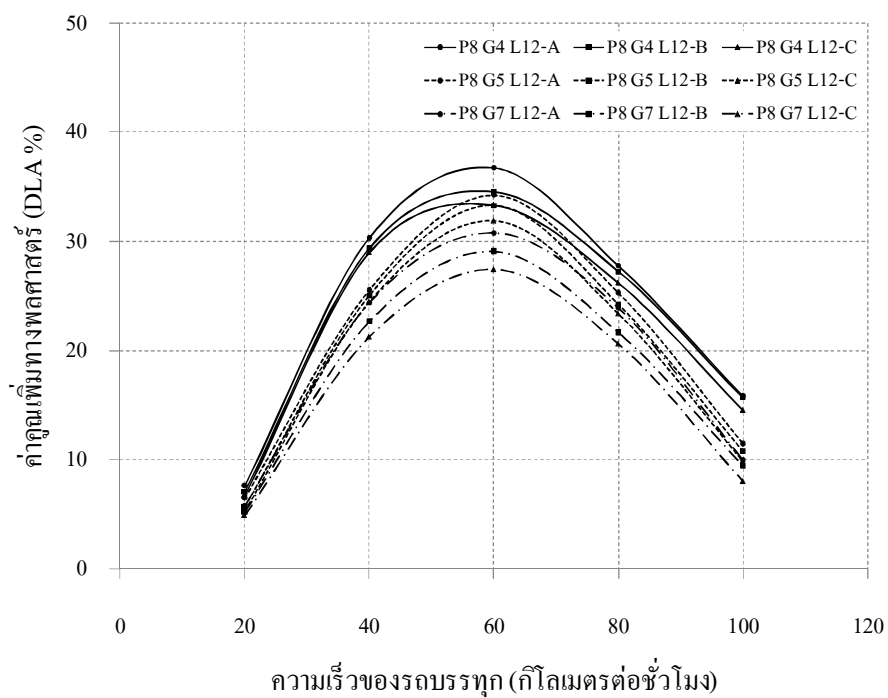
จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองทั้งหมด (ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก) เมื่อนำค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สูงสุดที่ได้จากแบบจำลองในแต่ละกรณี มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์และความเร็วของรถบรรทุกดังแสดงในรูปที่ 5.28-5.31 พบว่า สำหรับแบบจำลองระบบสะพานที่มีช่วงความยาว 12 เมตร ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่านโดยใช้ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และสำหรับแบบจำลองระบบสะพานที่มีช่วงความยาว 18 เมตร ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่านโดยใช้ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (FHWA, 1995) พบว่า แนวโน้มของค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์มีทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.32



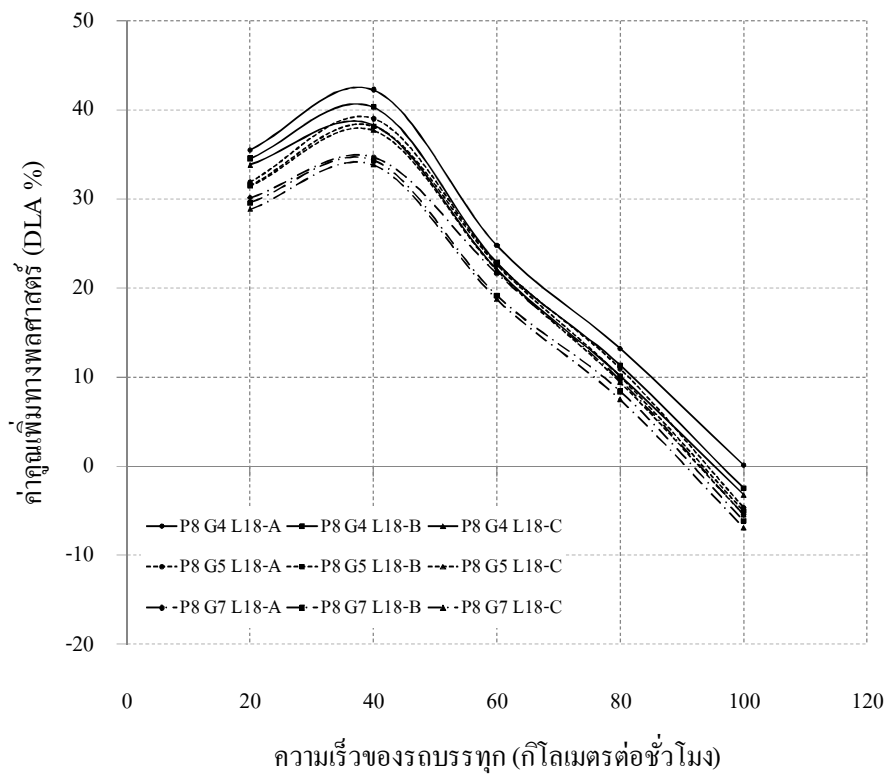
รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับความเร็วรถบรรทุก (Prodeck 4, L=12 เมตร)



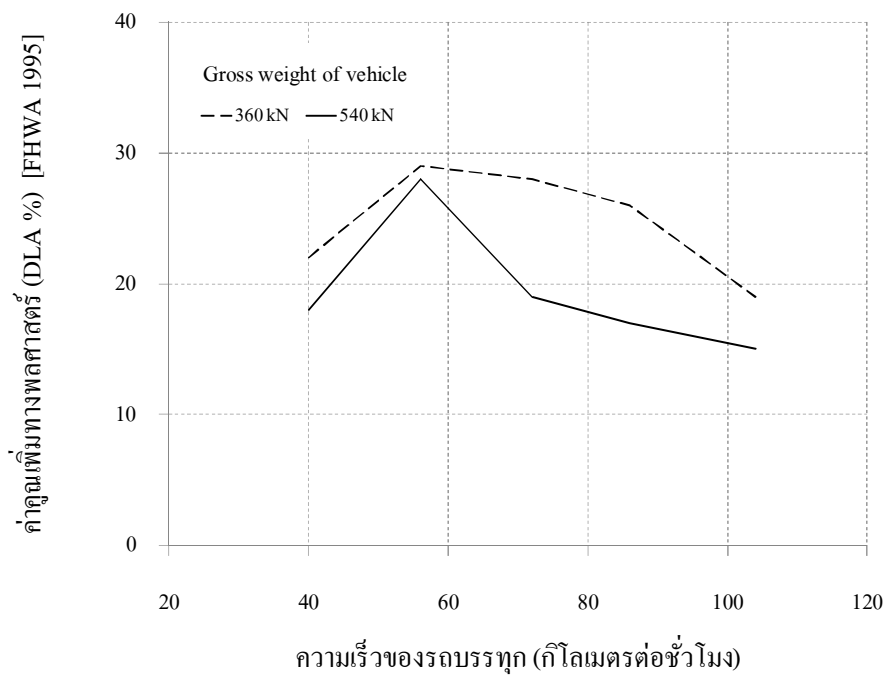
รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับความเร็วรถบรรทุก (Prodeck 4, L=18 เมตร)



รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับความเร็วรถบรรทุก (Prodeck 8, L=12 เมตร)



รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับความเร็วรถบรรทุก (Prodeck 8, L=18 เมตร)



รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับความเร็วรถบรรทุก (FHWA, 1995)

5.5.3 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างคานหลักที่รองรับที่มีผลต่อค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์

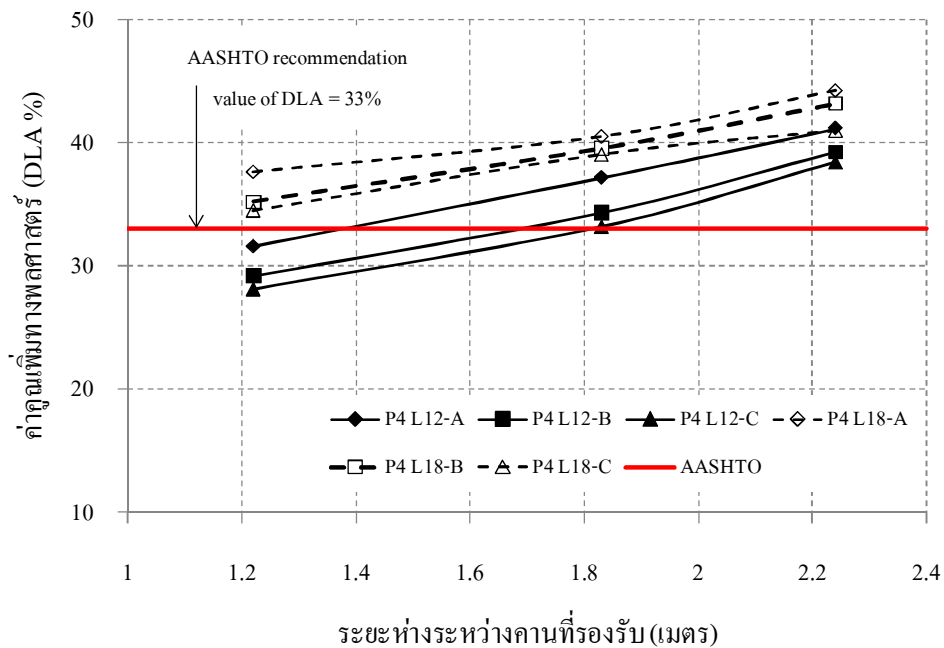
จากความสัมพันธ์รูปที่ 5.28 - 5.31 ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สูงสุดของแต่ละแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 5.10 - 5.11 ได้นำมาทำการเปรียบเทียบโดยแสดงในรูปที่ 5.33 และ 5.34

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์เมื่อจำนวนคานหลักที่รองรับมีการเปลี่ยนแปลง (แบบจำลองสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 4)

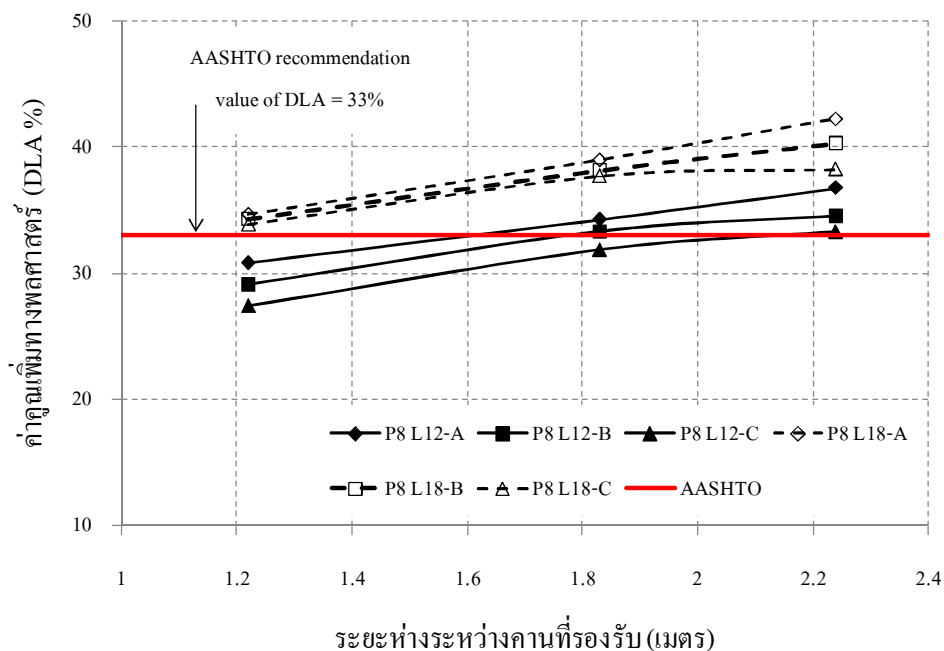
สัญลักษณ์แบบจำลอง	จำนวนคานหลักที่รองรับ	ระยะห่างระหว่างคานหลัก	ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สูงสุด (%)
P4 L12-A	7	1.22	31.60
	5	1.83	37.18
	4	2.24	41.18
P4 L12-B	7	1.22	29.20
	5	1.83	34.33
	4	2.24	39.25
P4 L12-C	7	1.22	28.14
	5	1.83	33.22
	4	2.24	38.47
P4 L18-A	7	1.22	37.62
	5	1.83	40.53
	4	2.24	44.30
P4 L18-B	7	1.22	35.22
	5	1.83	39.57
	4	2.24	43.22
P4 L18-C	7	1.22	34.47
	5	1.83	39.08
	4	2.24	41.05

ตารางที่ 5.11 เปรียบเทียบค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์เมื่อจำนวนคานเหล็กที่รองรับมีการเปลี่ยนแปลง (แบบจำลองสะพานชนิดแผ่นพื้น Prodeck 8)

สัญลักษณ์แบบจำลอง	จำนวนคานเหล็กที่รองรับ	ระยะห่างระหว่างคานเหล็ก	ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์สูงสุด (%)
P8 L12-A	7	1.22	30.78
	5	1.83	34.24
	4	2.24	36.74
P8 L12-B	7	1.22	29.10
	5	1.83	33.29
	4	2.24	34.52
P8 L12-C	7	1.22	27.40
	5	1.83	31.89
	4	2.24	33.33
P8 L18-A	7	1.22	34.67
	5	1.83	38.99
	4	2.24	42.25
P8 L18-B	7	1.22	34.28
	5	1.83	38.14
	4	2.24	40.30
P8 L18-C	7	1.22	33.83
	5	1.83	37.69
	4	2.24	38.23



รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับระยะห่างของคานที่รองรับ (Prodeck 4)

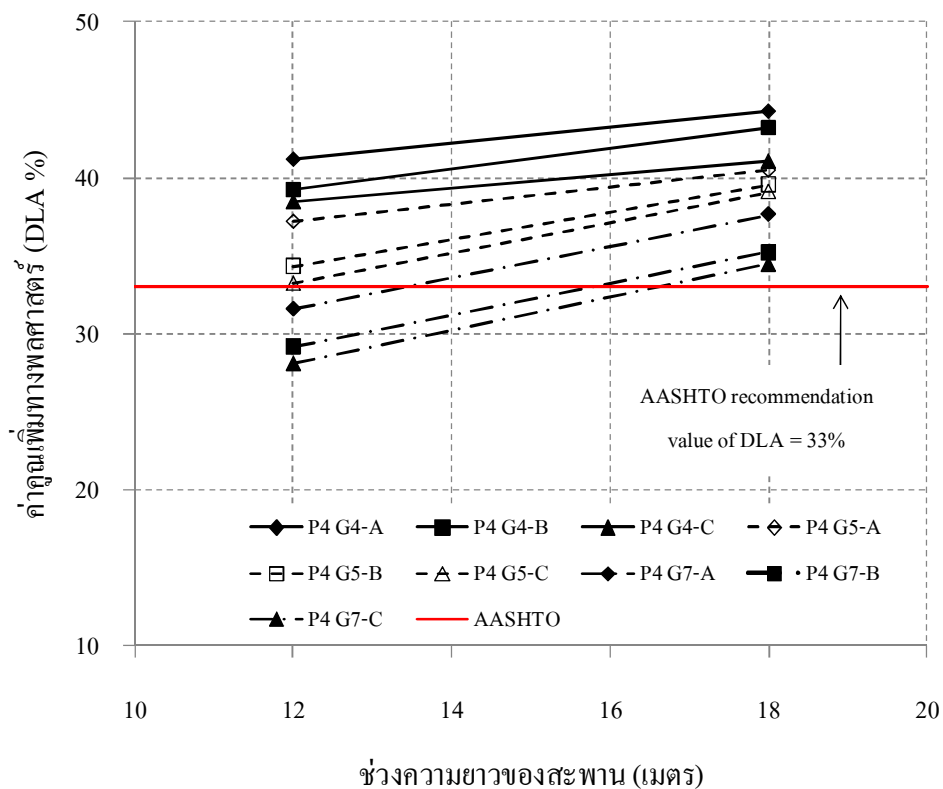


รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับระยะห่างของคานที่รองรับ (Prodeck 8)

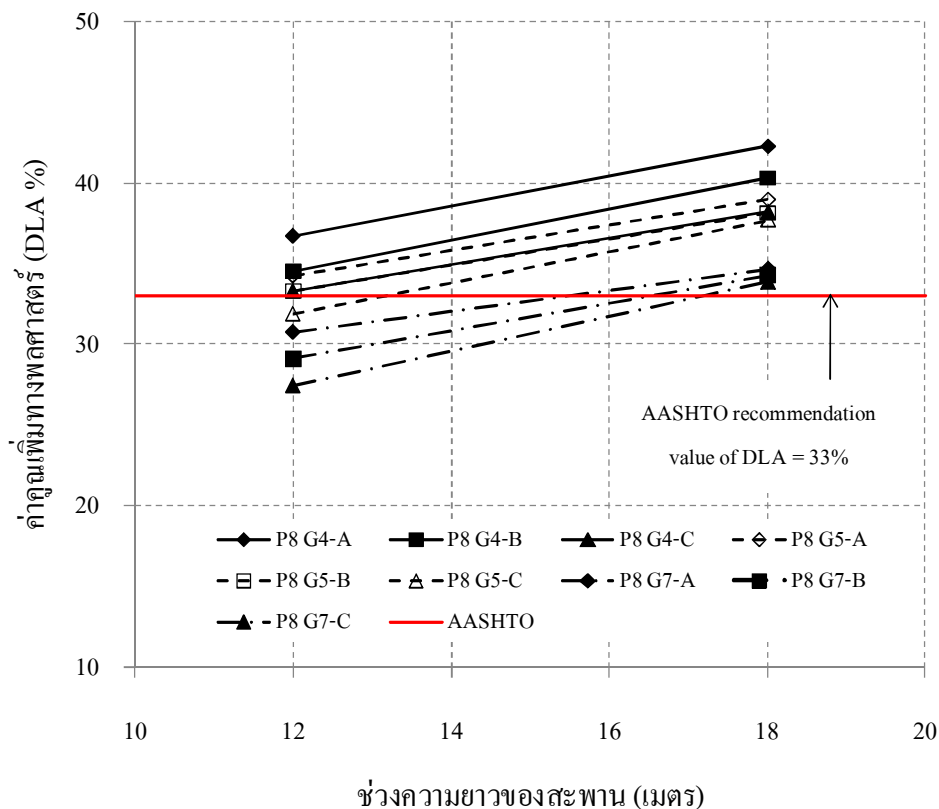
จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.32 และ 5.33 พบว่าค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบสะพานที่มีแผ่นพื้นชนิด Prodeck 4 และ Prodeck 8 ทั้งสองประเภท มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างคานเหล็กที่รองรับเพิ่มขึ้น นั่นคือ แบบจำลองระบบสะพานที่มีคานเหล็กที่รองรับ 4 ตัว จะมีค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์สูงกว่าแบบจำลองระบบสะพานที่มีคานเหล็กที่รองรับ 5 ตัว และ 7 ตัวตามลำดับ

5.5.4 อิทธิพลของช่วงความยาวของสะพานที่มีผลต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์

จากตารางที่ 5.10 และ 5.11 ทำการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์เมื่อช่วงความยาวสะพานมีการเปลี่ยนแปลงจาก 12 เมตร เป็น 18 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.35 และ 5.36



รูปที่ 5.35 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับช่วงความยาวของสะพาน (Prodeck 4)



รูปที่ 5.36 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA กับช่วงความยาวของสะพาน (Prodeck 8)

จากรูปที่ 5.35 และ 5.36 พบว่าค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของระบบสะพานที่มีแผ่นพื้นชนิด Prodeck 4 และ Prodeck 8 ทั้งสองประเภท มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อช่วงความยาวของสะพานมีค่าเพิ่มขึ้นจากระยะ 12 เมตร เปลี่ยนไปเป็น 18 เมตร

5.5.5 สรุปค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองทั้งหมด

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ห่อหุ้มพลของตัวแปรเสริมที่ได้จากหัวข้อ 5.5.1 - 5.5.4 มาพิจารณารวมกันจึงได้ข้อสรุปค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สูงสุดที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองทั้ง 6 หน้าตัดหลัก ดังแสดงในตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 สรุปค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์สูงสุดของแบบจำลองหลักทั้งหมด 6 หน้าตัด

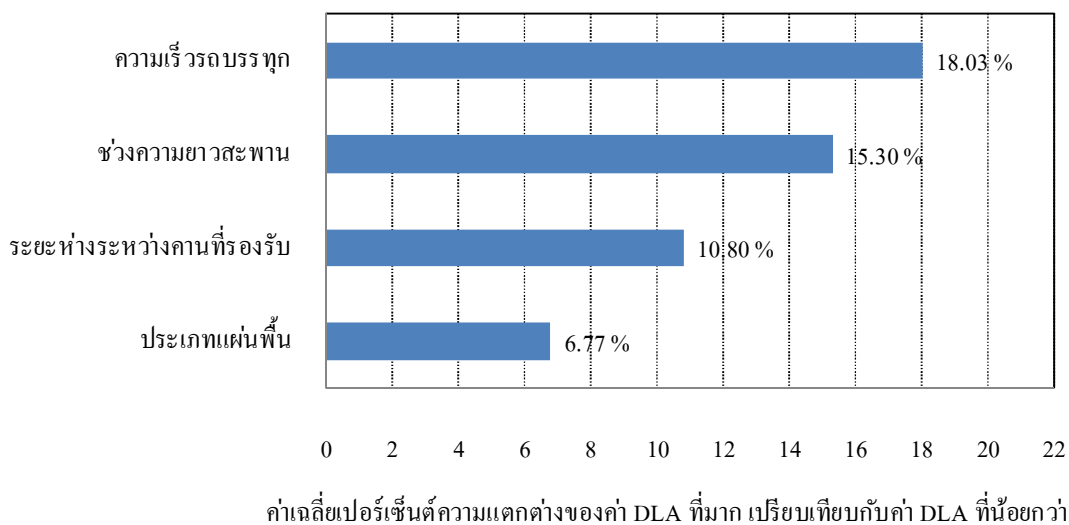
ประเภทแผ่นพื้น	จำนวนคานที่รองรับ	สัญลักษณ์	ค่า DLA สูงสุด (%)	
			ช่วงความยาวสะพาน (เมตร)	
			L12	L18
Prodeck 4	4	P4 G4	41.18	44.30
	5	P4 G5	37.18	40.53
	7	P4 G7	31.60	37.62
Prodeck 8	4	P8 G4	36.74	42.25
	5	P8 G5	34.24	38.99
	7	P8 G7	30.78	34.67

จากตารางที่ 5.13 พบว่าแบบจำลองระบบสะพานที่มีแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิด Prodeck 4 จะมีค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์สูงกว่า แบบจำลองระบบสะพานที่มีแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิด Prodeck 8

5.5.6 เปรียบเทียบความแตกต่างของตัวแปรเสริมที่มีอิทธิพลต่อค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์

จากการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรเสริมที่มีผลต่อค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DLA) ในหัวข้อที่ 5.5.1 - 5.5.5 เมื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า DLA ที่มีค่ามากเปรียบเทียบกับค่า DLA ที่มีค่าน้อยกว่า ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเสริมดังกล่าว (นำเสนอไว้ใน ภาคผนวก ง) พบว่าอิทธิพลที่มีผลมากไปสู่น้อยเรียงตามลำดับดังแสดงในสรุปและรูปที่ 5.37 ต่อไปนี้

- 1) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก
- 2) ช่วงความยาวของสะพาน
- 3) ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ
- 4) ประเภทของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย



รูปที่ 5.37 เปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อค่า DLA

5.6 สรุปผล

จากการวิเคราะห์แบบจำลองในระดับชิ้นส่วนพบว่าผลการวิเคราะห์ค่าความถี่และรูปแบบการสั่นของแผ่นพื้นชนิด Prodeck 4 และ Prodeck 8 มีความสอดคล้องกับผลจากห้องปฏิบัติการ (Aluri, 2006) และ (Jinka, 2003) ส่วนผลการวิเคราะห์แบบจำลองในระดับระบบเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (DLA) พบว่า จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5.12 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน (OHBD, 1983) ซึ่งกำหนดค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์จะอยู่ในช่วง 20 - 40 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้ข้อกำหนด OHBD แต่เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน (AASHTO, 1988) ซึ่งกำหนดค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบสะพานทั่วไปมีค่า 33 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏว่า ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของ AASHTO และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของตัวแปรเสริมพบว่าอิทธิพลของความเร็วยานพาหนะส่งผลให้ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์มีการเปลี่ยนแปลงสูงที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประมาณ 18.03 เปอร์เซ็นต์ และอิทธิพลของตัวแปรประเภทแผ่นพื้นสะพานส่งผลให้ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์มีการเปลี่ยนแปลงค่าที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประมาณ 6.77 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทนี้ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่น ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดจะถูกกล่าวไว้ในบทที่ 6 ถัดไป

บทที่ 6

เปรียบเทียบผลการวิจัย

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบสะพานแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก (จากบทที่ 5) กับผลการศึกษาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของนักวิจัยท่านอื่นที่มีรูปแบบการศึกษาใกล้เคียงกันของการศึกษาในห้องปฏิบัติการ การทดสอบภาคสนาม การวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และข้อกำหนดการออกแบบของค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่มีในอดีตตลอดจนถึงปัจจุบัน

6.2 ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์จากงานวิจัยในอดีต

ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์จากงานวิจัยในอดีต Jinka (2003), Zhang (2006), Jerry (2011), Jung (2013) ดังแสดงในตารางที่ 6.1 และค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์จากข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์มีดังต่อไปนี้

- 1) Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC)
- 2) American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)
- 3) British Standard (BS 5400)
- 4) Japan Road Association's Specifications (JRAS)
- 5) Korea Bridge Design Specifications (KBDS)

ตารางที่ 6.1 ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์จากงานวิจัยในอดีต

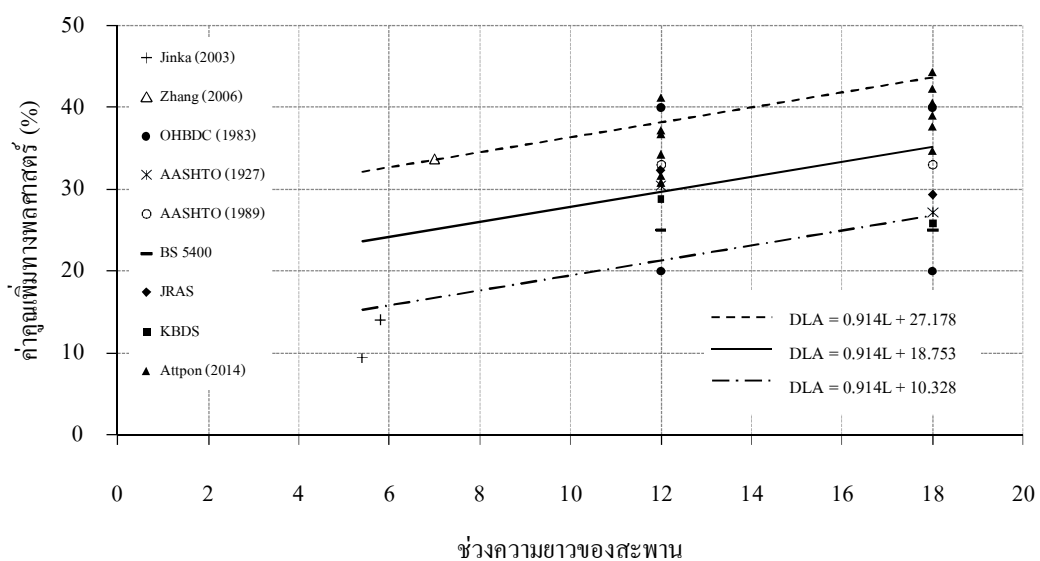
ผู้วิจัย / วิธีวิจัย	ประเภทแผ่นพื้น (ข้อสะพาน)	ช่วงความ ยาว (เมตร)	ความกว้าง (เมตร)	จำนวน คาน	DLA (%)
Jinka (2003) ภาคสนาม	FRP deck - Truss (Katy Truss Bridge)	5.4	4.3	3	9.4
Jinka (2003) ภาคสนาม	FRP deck - FRP Stringer (Laurel Lick Bridge)	5.8	4.5	6	14
Jinka (2003) ภาคสนาม	FRP deck- Steel Plate Girders (Market Street Bridge)	54	17	7	52
Zhang (2006) ไฟไนต์เอลิเมนต์	FRP deck (Creek Bridge)	7	8.5	NA	33.7
Zhang (2006) ไฟไนต์เอลิเมนต์	Concrete Deck	7	8.5	NA	33.8
Jerry (2011) ไฟไนต์เอลิเมนต์	RC Deck - Prestressed girder (Chattahoochee)	21	13.1	6	35.4
Jung (2013) ข้อมูลภาคสนาม	Prestressed Concrete I-girder	25.2	NA	5	37
Jung (2013) ข้อมูลภาคสนาม	Steel Box Girder	50	NA	4	40

ตารางที่ 6.2 ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์จากข้อกำหนดการออกแบบ

ข้อกำหนดในการ ออกแบบ	DLA	ประเทศ	DLA (%)	
			L=12 เมตร	L=18 เมตร
OHBC (1983)	-	แคนาดา	20-40	20-40
AASHTO (1927)	$DLA = \frac{50}{125+L}$, L (ฟุต)	สหรัฐอเมริกา	30.4	27.2
AASHTO (1989)	-	สหรัฐอเมริกา	33	33
BS 5400 (1978)	-	อังกฤษ	25	25
JRAS (1996)	$DLA = \frac{20}{50+L}$, L (เมตร)	ญี่ปุ่น	32.3	29.4
KBDS (2005)	$DLA = \frac{15}{40+L}$, L (เมตร)	เกาหลี	28.8	25.8

6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์กับช่วงความยาวของสะพาน

จากผลการวิเคราะห์ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 5 และการเก็บรวบรวมค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของงานวิจัยในอดีต (ตารางที่ 6.1 เฉพาะสะพานที่ใช้แผ่นพื้น FRP และ ตารางที่ 6.2) สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์กับช่วงความยาวของสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์กับช่วงความยาวของสะพาน

จากรูปที่ 6.1 พบว่าชุดข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์กับช่วงความยาวของสะพานมีการกระจายตัวของข้อมูลมาก เมื่อหาความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นจะได้สมการ $DLA = 0.914L + 18.753$ แต่เพื่อให้ครอบคลุมชุดข้อมูลทั้งหมดของค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ ดังนั้นจึงสร้างสมการขอบเขตบนและขอบเขตล่าง (Upper, Lower bound) โดยการเลื่อนเส้นแนวโน้มที่ได้จากการประมาณแบบเชิงเส้นดังที่กล่าวมาในข้างต้น ขึ้นและลงตามแนวแกนค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ เป็นระยะทางเท่ากับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.425 จะได้สมการขอบเขตบน คือ $DLA = 0.914L + 27.178$ และสมการขอบเขตล่าง คือ $DLA = 0.914L + 10.328$ โดยมีเงื่อนไขในการใช้งานสมการดังกล่าว ดังนี้

- 1) ระบบสะพานต้องใช้แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภท Hollow core section หรือ Sandwich deck
- 2) ระดับความขรุขระของแผ่นพื้นอยู่ในเกณฑ์ ราบเรียบ
- 3) คานที่รองรับเป็นคานเหล็ก
- 4) มีระยะห่างระหว่างคานเหล็กที่รองรับตั้งแต่ 1.20 ถึง 2.25 เมตร หรือมีจำนวนคานเหล็กที่รองรับไม่น้อยกว่า 4 คาน
- 5) เป็นสะพานช่วงเดียว โดยมีช่วงความยาวไม่เกิน 20 เมตร
- 6) เป็นสะพานที่มีสองช่องจราจร

6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์กับตัวแปรเสริม (ความเร็ว ช่วงความยาวของสะพาน และความถี่ของสะพาน)

AASHTO (1962) ทำการทดสอบสะพานทั้งหมด 18 สะพาน โดยสะพานมีช่วงความยาว 15 เมตร วางบนที่รองรับอย่างง่าย ภายใต้แรงกระทำจากรถบรรทุกประเภทสองเพลาและสามเพลา ซึ่งในการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรความเร็วรถบรรทุก จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ได้นำเสนอสมการหาค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DLA) ที่มีผลจากตัวแปรความเร็วของยานพาหนะ ตามสมการที่ 6.1 และ 6.2

$$DLA = \alpha + \beta \quad (6.1)$$

$$\alpha = \frac{V}{2Lf} \quad (6.2)$$

เมื่อ α คือ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความเร็ว

β คือ ค่าคงที่หรือค่าความปลอดภัยจากการสั่นเมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่านบนสะพาน

V คือ ความเร็วของรถบรรทุก (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

L คือ ช่วงความของสะพาน (เมตร)

f คือ ความถี่ของรูปแบบการสั่นแรกของสะพาน (เฮิรตซ์)

จากการทดสอบของ AASHTO ในข้างต้นพบว่าค่า β ของสะพานมีค่า 0.15 ตามสมการที่ 6.3

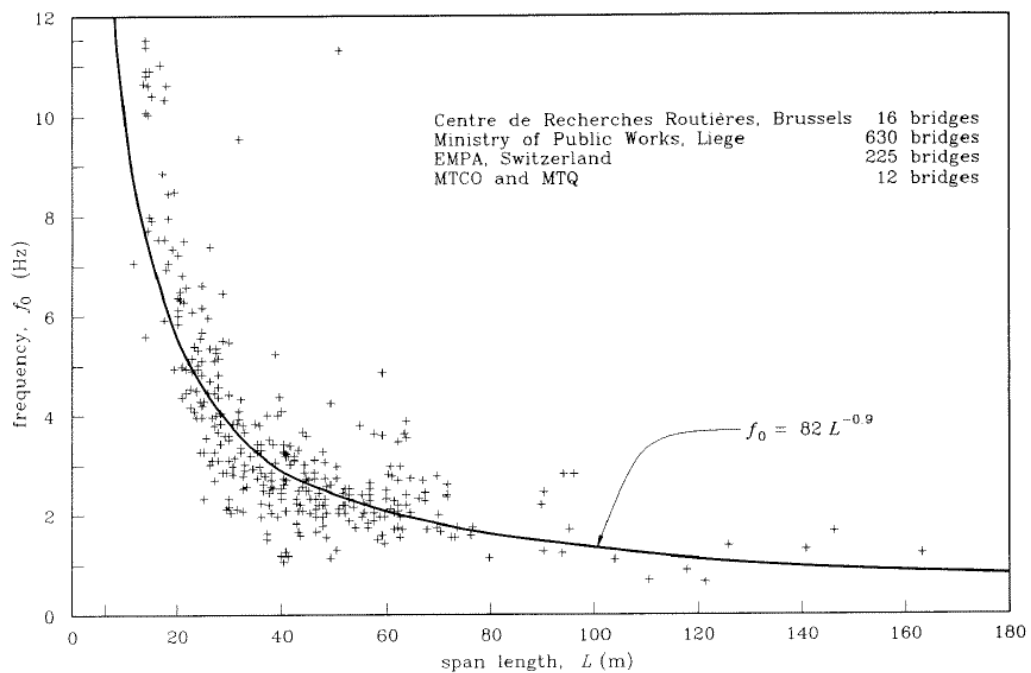
$$DLA = \alpha + 0.15 \quad (6.3)$$

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบสะพานในบทที่ 5 ทำให้ทราบถึงข้อมูล ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ ความเร็วของรถบรรทุก ช่วงความยาวของสะพาน และค่าความถี่ของสะพานในแต่ละแบบจำลอง เมื่อนำค่าทั้งหมดที่ทราบแทนค่าในสมการที่ 6.1 และ 6.2 สามารถหาค่าคงที่ (β) ได้ ดังแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ตัวแปรและค่าคงที่จากสมการที่ 6.1 และ 6.2

แบบจำลอง	DLA (%)	L (m)	V (km/hr)	f (Hz)	β
P4 G4 L12	41.18	12.00	60.00	11.05	0.19
P4 G5 L12	37.18	12.00	60.00	12.03	0.16
P4 G7 L12	31.60	12.00	60.00	13.49	0.13
P4 G4 L18	44.30	18.00	40.00	4.25	0.18
P4 G5 L18	40.53	18.00	40.00	4.32	0.15
P4 G7 L18	37.62	18.00	40.00	4.40	0.12
P8 G4 L12	36.74	12.00	60.00	13.16	0.18
P8 G5 L12	34.24	12.00	60.00	14.01	0.16
P8 G7 L12	30.78	12.00	60.00	15.20	0.14
P8 G4 L18	42.25	18.00	40.00	4.27	0.16
P8 G5 L18	38.99	18.00	40.00	4.34	0.13
P8 G7 L18	34.67	18.00	40.00	4.44	0.10

หมายเหตุ ค่าความถี่ของระบบสะพาน ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Modal Analysis โดยเลือกใช้วิธี Block Lanczos มีค่าใกล้เคียงกับผลการวิจัย (Paultre, 1992) ซึ่งเป็นการรวบรวมข้อมูลค่าความถี่ของสะพานหลายชนิดมาวิเคราะห์เชิงสถิติ ดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับช่วงความยาวของสะพาน (Paultre, 1992)

จากตารางที่ 6.3 เมื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ (β) ของแบบจำลองที่มีช่วงความยาว 12 เมตรจะได้ $\beta = 0.16$ และแบบจำลองที่มีช่วงความยาว 18 เมตรจะได้ $\beta = 0.14$ ซึ่งเปรียบเทียบกับค่า β ในสมการที่ 6.3 (AASHTO, 1962) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

6.5 สรุป

ผลการศึกษานำเสนอในบทนี้ เป็นการสร้างสมการอย่างง่ายเพื่อประมาณค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ของระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก ซึ่งสมการอย่างง่ายในประมาณค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่ได้คือ $DLA = 0.914L + 18.753$ โดยขอบเขตของค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์จะอยู่ระหว่างช่วงของสมการขอบเขตบน คือ $DLA = 0.914L + 27.178$ และสมการขอบเขตล่าง คือ $DLA = 0.914L + 10.328$

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย

7.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปของงานวิจัยการประเมินค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สำหรับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Prodeck 4 และ Prodeck8) ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยบทสรุปจะแบ่งออกเป็นสองส่วนที่สำคัญคือ 1) สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองในระดับชิ้นส่วนเฉพาะแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย และ 2) สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองในระดับระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก ดังวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ตลอดจนข้อเสนอแนะเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาในลำดับต่อไป

7.2 สรุปผลการศึกษาแบบจำลองระดับชิ้นส่วน

แบบจำลองระดับชิ้นส่วน (Component Level) ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการตรวจสอบและปรับแก้ความถูกต้องในการสร้างแบบจำลองแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Prodeck 4 และ Prodeck8) โดยทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การตอบสนองทางโครงสร้าง (ค่าความถี่และรูปแบบการสั่น) กับผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ สามารถสรุปได้ดังนี้

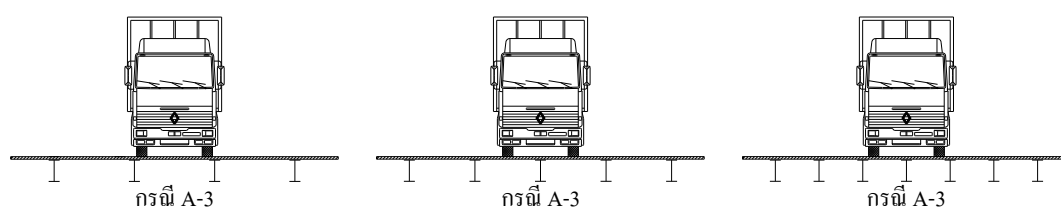
1) ผลการตอบสนอง (ค่าความถี่และรูปแบบการสั่น) ของแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิด Prodeck 4 ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่จะให้ค่าความถี่ที่ต่ำกว่าผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Aluri, 2006) ซึ่งผลจากความแตกต่างนี้อาจจะส่งผลมาจากคุณสมบัติเชิงกลที่มีการเปลี่ยนแปลงตรงบริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นพื้นสะพานเข้าด้วยกัน เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบพื้นสะพานชนิด Prodeck 4 นี้ประกอบไปด้วยพื้นสะพาน Prodeck 4 จำนวน 6 ชิ้นมาต่อกันเป็นแผ่นพื้นขนาดใหญ่ ส่วนรูปแบบการสั่นที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยผลจากการดัด (Bending Mode) และการบิด (Torsion Mode) ของแผ่นพื้น

2) ผลการตอบสนอง (ค่าความถี่และรูปแบบการสั่น) ของแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิด Prodeck 8 ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าใกล้เคียงผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Jimka, 2003) และทางทฤษฎี ส่วนรูปแบบการสั่นที่เกิดขึ้นจะพิจารณาเฉพาะรูปแบบการคดของแผ่นพื้นเพียงอย่างเดียว (Bending Mode)

7.3 สรุปผลการศึกษาแบบจำลองระดับระบบ

แบบจำลองระดับระบบ (System Level) เป็นแบบจำลองสะพานที่ประกอบไปด้วยแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก โดยแบบจำลองชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการศึกษาแบบอิงตัวแปรเสริม (Parametric study) ทำการหาค่าการตอบสนองสูงสุดทางโครงสร้าง (ค่าการโก่งตัว และค่าความเครียด) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิตศาสตร์และพลศาสตร์ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance, DLA) สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่คำนวณบนพื้นฐานค่าความเครียดสูงสุด (Strain) จะมีค่าสูงกว่าการคำนวณบนพื้นฐานค่าการโก่งตัวสูงสุด (Deflection)
- 2) ค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุก 1 คันมีค่าสูงกว่าการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุก 2 คัน
- 3) ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของกรณีตำแหน่งรถบรรทุกที่กระทำตรงกึ่งกลางของหน้าตัดตามขวางสะพานจะมีค่าสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ตำแหน่งของรถบรรทุกที่ส่งผลให้เกิดค่า DLA สูงสุด

- 4) สะพานที่มีช่วงความยาว 12 เมตร ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่านโดยใช้ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และสะพานที่มีช่วงความยาว 18 เมตร ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่านโดยใช้ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (FHWA, 1995) พบว่า แนวโน้มของค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ มีทิศทางเดียวกัน

5) ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์จะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างคานเหล็กที่รองรับ (หรือเพิ่มจำนวนคานเหล็กที่รองรับ)

6) สำหรับสะพานที่มีหน้าตัดเหมือนกัน พบว่าค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับสะพานที่มีช่วงความยาว 18 เมตรจะมีค่าสูงกว่าสะพานที่มีช่วงความยาว 12 เมตร

7) ค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ของสะพานที่ใช้แผ่นพื้นชนิด Prodeck 4 มีค่าสูงกว่าสะพานที่ใช้แผ่นพื้นชนิด Prodeck 8

8) อิทธิพลจากตัวแปรความเร็วของรถบรรทุกจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการคุณเพิ่มทางพลศาสตร์มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรช่วงความยาวของสะพาน ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ และประเภทของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ตามลำดับ แต่เนื่องจากแปรความเร็วของรถบรรทุก ไม่สามารถควบคุมได้ในเชิงการออกแบบสะพาน จึงได้ทำการพิจารณาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลถัดมา นั่นคือ ตัวแปรช่วงความยาวของสะพาน เพื่อสร้างสมการการออกแบบอย่างง่าย ดังแสดงในบทที่ 6

7.4 ข้อเสนอแนะ

1) ผลการศึกษาระบบสะพานแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็กทั้งหมด เป็นการศึกษาผ่านแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลการศึกษาที่ได้มีค่าแตกต่างกับการทดสอบจริงในภาคสนามหรือห้องปฏิบัติการ เนื่องจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีการจำลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้เท่านั้น เมื่อเทียบกับระบบสะพานจริง โดยขาดการคำนึงถึงปัญหาสภาพแวดล้อมจริง เช่น สภาพความขรุขระของผิวแผ่นพื้นสะพาน การเชื่อมต่อกันระหว่างแผ่นพื้นสะพาน ปัญหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รวมไปถึงความพร้อมของผู้ทำการทดสอบ เป็นต้น

2) หากมีการศึกษาต่อ ควรศึกษาแบบจำลองสะพานที่มีหลายๆช่วงความยาวเพิ่มเติม เช่น สะพานที่มีสองช่วงความยาวต่อเนื่องกันบนที่รองรับเดียวกัน เพื่อให้ครอบคลุมถึงรูปแบบสะพานจริงที่ใช้งานในปัจจุบัน

3) ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาความล้า (Fatigue) ของระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้แรงกระทำซ้ำๆ เพื่อหาอายุการใช้งานของระบบสะพานประเภทนี้

4) ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับเกณฑ์การพิบัติ (Failure criteria) และ ค่าความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยและคานเหล็กที่รองรับ ภายใต้สภาวะการใช้งาน เพื่อศึกษาการพิบัติของระบบโครงสร้างสะพาน

บรรณานุกรม

- Ahmad, S.H., Plecnik, J.M., (1989). "Transfer of Composite Technology to Design and Construction of Bridges," U.S. DOT Report, September.
- Albers, W.F., Hag-Elsafi, O., Alampalli, S., (2007). "Dynamic Analysis of the Bentley Creek Bridge with FRP Deck," Special Report 150, Transportation Research and Development Bureau.
- Aluri, S., (2006). "Updating Low-Profile FRP Deck model using Experimental modal Analysis," Thesis submitted to the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (1989). "Standards specifications for highway bridges," Washington, DC.
- ANSYS, Inc., (2004), "ANSYS theory reference manual," Version 9.
- Bakht, B., Pinjarkar, S.G. (1989). "Review of Dynamic Testing of Highway Bridges," Transportation Research Record, No.1223 :93-100.
- Brown, B.J., (1998). "Design Analysis of Single-Span Advanced Composite Deck-and-Stringer Bridge Systems," Master's Thesis, West Virginia University, Morgantown, WV.
- British Standard (BS5400), (1978). "Concrete and composite bridge, Specification for loads," British Standards Institution, London, United Kingdom.
- Chandrashekhara, K., Nanni, A., (2000). "Experimental Testing and Modeling of a FRP Bridge," Final Report, Missouri Department of Transportation, Research, Development and Technology.
- Chatterjee, P.K., Datta, T.K., Surana. C. S., (1993). "Dynamic Response of Trussed Bridges for Moving Loads," Computers and Structures, Vol.46, No.6 :1085-1093.
- Chiewanichakorn, M., Amjad, J.A., Alampalli, S., (2007). "Dynamic and fatigue response of a truss bridge with fiber reinforced polymer deck," Journal of Fatigue, Vol.29, No.8 :1475-1489.
- Daly, A.F., Cuninghame, J.R., (2005). "Performance of a fibre-reinforced polymer bridge deck under dynamic wheel loading," Composites: Part A, Vol.37, No.8 :1180-1188.

- Federal Highway Administration (FHWA), (1995). "Load and Resistance Factor Design for Highway Bridges," Washington, DC.
- Feng, P., Ye, L., Li, T., Ma, Q., (2006). "Outside Filament-wound Reinforcement : A Novel Configuration for FRP bridge Decks," The Ninth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts, August 18-21 Fuzhou and Xiamen, China.
- Henry, J.A., (1985). "Deck Girders System for Highway Bridges Using Fiber Reinforced Plastics," Master.s Thesis, North Carolina State University, NC.
- Howard, I., (2002). "Development of Lightweight FRP Bridge Deck Designs and Evaluations," Maser's Thesis, West Virginia University, Morgantown, WV.
- Humar, J.L., Kashif, A.H., (1995). "Dynamic Response Analysis of Slab-Type Bridges," Journal of Structural Engineering, Vol.121, No.1 :48-62.
- Japan Road Association's Specifications (JRAS), (1996). "Common specifications for highway bridges," Japan Road Association (JRA), Japan.
- Jinka, C.S., (2003). "Dynamic Response Evaluation of Fiber Reinforced Composite Bridge Decks and Bridges," Thesis submitted to the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University
- Jung, H., Kim, G., Park, C., (2013). "Impact Factors of Bridges based on Natural Frequency for Various Superstructure Types," KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.17, No.2 :458-464.
- Korea Bridge Design Specifications (KBDS), (2005). "Roadway standard specification codes," Korea Roadway Transportation Association (KRTA), Korea.
- McGhee, K.K., Barton, F.W and Mckeel, W.T., (1991). "Optimum Design of Composite Bridge Deck Panels," Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Proceedings of the Specialty Conference, A.S.C.E., Las Vegas, Nevada
- Mongi, A.N.K., (1991). "Theoretical and Experimental Behavior of FRP Floor System," Master's Thesis, West Virginia University, Morgantown, WV.
- Ontario highway bridges design code (OHBDC), (1983). Ministry of Transportation and Communications, Highway Engineering Division, Ontario.

- Paultre, P., Chaallal, O., Proulx, J., (1992). "Bridge dynamics and dynamic amplification factors - a review of analytical and experimental findings," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.19, No.2 :260-278.
- Prachasaree, W., GangaRao, H., Shekar, V. (2006). "Performance Evaluation of FRP Bridge Deck Component under Torsion." *Journal of Bridge Engineering*, Vol.11, No.4 :430-442.
- Prachasaree, W., GangaRao, H., Laosiriphong, K., Shekar, V. (2007). "Theoretical and experimental analysis of FRP bridge deck under cold temperatures," *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol.28, No.1/2 :103-121.
- Punyamurthula, D., (2004). "Structural Performance of Low-Profile FRP Composite Cellular Modules," Master's Thesis, West Virginia University, Morgantown, WV.
- Shekar, V., (2000). "Advancement in FRP Composites Using 3D Stitched Fabrics and Enhancement in FRP Bridge Deck Component Properties," Master's Thesis, West Virginia University, Morgantown, WV.
- Song, J., (2010). "Dynamic characteristics of an FRP deck bridge," Master's Thesis, University of Tennessee, Knoxville, UT.
- Sookmanee, P., (2011). "Finite Element Analysis of Light Weight FRP Bridge Deck Composite," Master's Thesis, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla.
- Wang, T.L., Huang, D., Shahawy, M., (1992). "Dynamic Response of Multi-girder Bridges," *Journal of Structural Engineering*, Vol.118, No.8 :2222-2238.
- Zhang, Y., Cai, C. (2006). "Load distribution and dynamic response of multi-girder bridges with FRP decks," *Engineering Structures*, Vol.29, No.8 :1676-1689
- Zhu, X. Q., Law, S.S., (2002). "Dynamic Load on Continuous Multi-Lane Bridge Deck from Moving Vehicles," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.251, No.4 :697-716.
- Zureick, A., (1997). "Fiber-Reinforced Polymeric Bridge Decks," *Proceedings of the National seminar on Advanced Composite Material Bridges*, FHWA.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance) ของแบบจำลองระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก

ตารางที่ ก-1 ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ ของแบบจำลองแผ่นพื้น Prodeck 4 ที่มีความยาวสะพาน 12

เมตร

Models		Dynamic Load Allowance on Deflection (%)					Dynamic Load Allowance on Strain (%)				
		Velocity of Truck Load (km/hr)					Velocity of Truck Load (km/hr)				
		20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
P4 G4 L12-A	P4 G4 L12-A1	9.36	33.48	37.87	28.72	15.78	10.07	33.37	39.35	29.68	17.93
	P4 G4 L12-A2	10.45	33.66	38.02	28.73	15.64	10.88	33.86	39.74	29.69	17.70
	P4 G4 L12-A3	10.68	33.95	40.30	32.78	21.05	11.66	32.79	41.18	36.10	26.25
	max	10.68	33.95	40.30	32.78	21.05	11.66	33.86	41.18	36.10	26.25
P4 G4 L12-B	P4 G4 L12-B1	7.43	30.05	34.77	26.71	14.10	8.11	28.01	36.64	29.70	16.59
	P4 G4 L12-B2	8.25	31.34	34.97	27.80	15.53	9.13	31.60	37.99	30.52	17.86
	P4 G4 L12-B3	8.92	32.38	38.18	31.84	20.27	9.70	30.94	39.25	35.19	25.06
	max	8.92	32.38	38.18	31.84	20.27	9.70	31.60	39.25	35.19	25.06
P4 G4 L12-C	P4 G4 L12-C1	7.35	29.77	34.35	26.20	13.57	7.78	30.09	37.86	29.47	16.53
	P4 G4 L12-C2	7.80	30.51	34.00	26.83	14.63	8.10	31.64	37.16	29.89	17.50
	P4 G4 L12-C3	8.15	31.87	37.17	30.51	19.40	8.82	29.82	38.47	34.82	24.74
	max	8.15	31.87	37.17	30.51	19.40	8.82	31.64	38.47	34.82	24.74
P4 G5 L12-A	P4 G5 L12-A1	6.58	26.84	28.92	18.41	13.29	7.64	28.56	36.23	19.82	16.38
	P4 G5 L12-A2	5.59	25.35	28.49	18.33	16.24	7.24	28.03	36.57	23.76	19.16
	P4 G5 L12-A3	6.39	29.08	35.80	29.23	18.04	8.11	30.65	37.18	34.03	23.84
	max	6.58	29.08	35.80	29.23	18.04	8.11	30.65	37.18	34.03	23.84
P4 G5 L12-B	P4 G5 L12-B1	6.44	27.32	31.28	22.29	10.18	7.16	28.46	33.17	24.83	13.13
	P4 G5 L12-B2	6.36	27.32	31.83	26.69	15.99	7.49	27.39	33.44	31.87	21.69
	P4 G5 L12-B3	6.77	27.88	32.19	23.39	11.72	6.78	28.45	34.33	27.83	16.64
	max	6.77	27.88	32.19	26.69	15.99	7.49	28.46	34.33	31.87	21.69
P4 G5 L12-C	P4 G5 L12-C1	6.45	27.29	31.16	22.13	9.82	7.14	27.61	31.93	25.33	12.80
	P4 G5 L12-C2	6.39	27.28	31.42	24.81	15.49	7.67	27.66	33.20	31.50	21.53
	P4 G5 L12-C3	6.68	27.47	31.51	25.24	10.97	8.73	28.12	33.22	27.39	16.01
	max	6.68	27.47	31.51	25.24	15.49	8.73	28.12	33.22	31.50	21.53
P4 G7 L12-A	P4 G7 L12-A1	6.08	26.15	28.04	17.09	8.42	6.37	26.56	29.79	18.49	10.87
	P4 G7 L12-A2	6.26	22.75	25.64	17.86	9.39	6.41	27.35	30.11	19.77	13.74
	P4 G7 L12-A3	6.81	26.42	29.88	21.34	14.52	7.64	27.42	31.60	27.93	19.66
	max	6.81	26.42	29.88	21.34	14.52	7.64	27.42	31.60	27.93	19.66
P4 G7 L12-B	P4 G7 L12-B1	5.23	24.04	28.07	19.85	13.15	6.33	23.65	28.32	26.57	19.71
	P4 G7 L12-B2	5.20	24.02	27.96	19.76	13.02	6.28	24.52	29.20	26.59	19.70
	P4 G7 L12-B3	5.20	24.02	27.96	19.76	13.02	6.28	24.52	29.20	26.59	19.70
	max	5.23	24.04	28.07	19.85	13.15	6.33	24.52	29.20	26.59	19.71
P4 G7 L12-C	P4 G7 L12-C1	5.16	23.69	27.41	19.32	12.43	6.48	23.26	27.87	25.84	18.97
	P4 G7 L12-C2	5.13	23.66	27.29	19.22	12.29	6.43	23.15	28.14	25.85	18.95
	P4 G7 L12-C3	5.13	23.66	27.29	19.22	12.29	6.43	23.15	28.14	25.85	18.95
	max	5.16	23.69	27.41	19.32	12.43	6.48	23.26	28.14	25.85	18.97

ตารางที่ ก-2 ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองแผ่นพื้น Prodeck 4 ที่มีความยาวสะพาน 18

เมตร

Models		Dynamic Load Allowance on Deflection (%)					Dynamic Load Allowance on Strain (%)				
		Velocity of Truck Load (km/hr)					Velocity of Truck Load (km/hr)				
		20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
P4 G4 L18-A	P4 G4 L18-A1	32.10	40.81	18.60	-1.68	-17.77	39.21	40.18	18.54	4.13	-9.54
	P4 G4 L18-A2	32.20	41.59	22.94	5.01	-12.30	39.70	41.90	22.62	9.65	-5.79
	P4 G4 L18-A3	33.05	42.02	24.01	4.49	-11.25	40.18	44.30	28.71	13.15	-2.69
	max	33.05	42.02	24.01	5.01	-11.25	40.18	44.30	28.71	13.15	-2.69
P4 G4 L18-B	P4 G4 L18-B1	28.36	38.41	19.39	0.47	-15.07	37.09	38.81	21.29	9.77	-5.55
	P4 G4 L18-B2	28.37	40.33	20.27	-0.20	-16.78	37.15	42.87	25.60	7.35	-8.37
	P4 G4 L18-B3	28.96	40.57	22.22	2.64	-12.63	37.88	43.22	26.94	12.32	-3.08
	max	28.96	40.57	22.22	2.64	-12.63	37.88	43.22	26.94	12.32	-3.08
P4 G4 L18-C	P4 G4 L18-C1	28.14	38.27	19.10	0.13	-15.35	37.70	38.66	21.43	9.83	-5.52
	P4 G4 L18-C2	28.43	38.51	18.45	-1.60	-17.85	37.28	41.05	24.31	6.82	-8.87
	P4 G4 L18-C3	28.73	40.37	22.20	2.07	-12.93	37.28	40.97	26.70	12.45	-3.65
	max	28.73	40.37	22.20	2.07	-12.93	37.70	41.05	26.70	12.45	-3.65
P4 G5 L18-A	P4 G5 L18-A1	28.77	37.59	18.76	-0.98	-16.49	37.37	39.51	24.10	8.41	-7.51
	P4 G5 L18-A2	29.02	38.85	18.57	1.51	-13.36	37.48	39.89	21.95	8.98	-4.44
	P4 G5 L18-A3	29.55	39.25	20.94	3.34	-12.79	37.50	40.53	25.80	12.03	-4.95
	max	29.55	39.25	20.94	3.34	-12.79	37.50	40.53	25.80	12.03	-4.44
P4 G5 L18-B	P4 G5 L18-B1	27.66	37.58	18.34	-0.47	-16.38	35.90	37.47	22.77	11.25	-4.51
	P4 G5 L18-B2	27.33	38.54	20.25	1.68	-14.31	36.25	38.85	23.90	11.79	-4.38
	P4 G5 L18-B3	27.33	39.09	20.85	2.07	-13.90	36.56	39.57	24.48	11.75	-4.21
	max	27.66	39.09	20.85	2.07	-13.90	36.56	39.57	24.48	11.79	-4.21
P4 G5 L18-C	P4 G5 L18-C1	26.99	38.06	18.90	-0.34	-16.12	35.11	38.47	22.40	9.89	-4.72
	P4 G5 L18-C2	27.04	38.35	20.83	1.83	-14.02	36.59	38.66	22.87	10.73	-4.60
	P4 G5 L18-C3	27.33	38.69	20.36	1.58	-14.26	36.14	39.08	23.71	10.87	-4.60
	max	27.33	38.69	20.83	1.83	-14.02	36.59	39.08	23.71	10.87	-4.60
P4 G7 L18-A	P4 G7 L18-A1	25.63	35.59	18.17	-0.53	-16.53	34.22	35.58	20.91	5.00	-9.68
	P4 G7 L18-A2	26.05	36.23	20.01	1.49	-15.96	34.87	36.16	22.24	5.76	-6.97
	P4 G7 L18-A3	26.18	36.33	20.17	1.51	-15.87	35.01	37.62	22.63	6.52	-5.95
	max	26.18	36.33	20.17	1.51	-15.87	35.01	37.62	22.63	6.52	-5.95
P4 G7 L18-B	P4 G7 L18-B1	24.53	33.21	16.99	-4.90	-18.06	32.55	34.41	20.94	3.41	-11.58
	P4 G7 L18-B2	24.65	34.15	17.77	-3.60	-16.64	33.95	35.22	21.01	5.81	-6.92
	P4 G7 L18-B3	24.65	34.15	17.77	-3.60	-16.64	33.95	35.22	21.01	5.81	-6.92
	max	24.65	34.15	17.77	-3.60	-16.64	33.95	35.22	21.01	5.81	-6.92
P4 G7 L18-C	P4 G7 L18-C1	23.42	32.72	16.87	-6.59	-17.92	33.23	33.76	18.45	3.61	-11.40
	P4 G7 L18-C2	24.42	32.81	17.13	-5.13	-18.78	33.45	34.47	20.33	4.61	-8.10
	P4 G7 L18-C3	24.42	32.81	17.13	-5.13	-18.78	33.45	34.47	20.33	4.61	-8.10
	max	24.42	32.81	17.13	-5.13	-17.92	33.45	34.47	20.33	4.61	-8.10

ตารางที่ ก-3 ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ ของแบบจำลองแผ่นพื้น Prodeck 8 ที่มีความยาวสะพาน 12

เมตร

Models		Dynamic Load Allowance on Deflection (%)					Dynamic Load Allowance on Strain (%)				
		Velocity of Truck Load (km/hr)					Velocity of Truck Load (km/hr)				
		20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
P8 G4 L12-A	P8 G4 L12-A1	6.85	30.45	31.19	21.49	8.87	7.07	30.04	30.92	20.33	8.11
	P8 G4 L12-A2	7.23	30.70	34.31	26.69	13.87	7.37	28.94	32.31	26.83	14.19
	P8 G4 L12-A3	7.54	30.85	35.31	27.05	14.27	7.64	30.33	36.74	27.76	15.83
	max	7.54	30.85	35.31	27.05	14.27	7.64	30.33	36.74	27.76	15.83
P8 G4 L12-B	P8 G4 L12-B1	5.88	27.88	31.19	23.17	11.12	6.67	25.92	31.92	23.62	11.03
	P8 G4 L12-B2	6.82	28.15	33.01	25.19	13.06	7.05	28.67	33.01	20.17	13.19
	P8 G4 L12-B3	6.89	29.52	33.36	26.06	14.73	7.08	29.34	34.52	27.22	15.69
	max	6.89	29.52	33.36	26.06	14.73	7.08	29.34	34.52	27.22	15.69
P8 G4 L12-C	P8 G4 L12-C1	5.75	27.53	30.75	22.73	10.70	6.15	25.47	31.03	23.09	10.82
	P8 G4 L12-C2	6.47	27.81	32.31	22.76	11.08	6.56	27.73	32.67	24.46	12.05
	P8 G4 L12-C3	6.56	28.87	32.57	25.30	13.96	6.75	28.98	33.33	26.20	14.54
	max	6.56	28.87	32.57	25.30	13.96	6.75	28.98	33.33	26.20	14.54
P8 G5 L12-A	P8 G5 L12-A1	5.95	26.25	28.47	19.34	7.01	6.22	25.19	30.35	19.72	7.60
	P8 G5 L12-A2	6.07	25.74	29.82	21.19	8.60	6.37	25.31	33.67	23.27	10.64
	P8 G5 L12-A3	6.36	28.77	33.69	24.45	11.11	6.48	25.55	34.24	25.30	11.47
	max	6.36	28.77	33.69	24.45	11.11	6.48	25.55	34.24	25.30	11.47
P8 G5 L12-B	P8 G5 L12-B1	4.98	26.52	29.52	20.58	7.90	5.12	23.60	31.20	21.27	7.98
	P8 G5 L12-B2	4.90	27.04	30.51	21.79	9.21	5.37	24.24	32.35	22.63	10.79
	P8 G5 L12-B3	5.39	27.97	31.78	23.36	10.62	5.69	25.04	33.29	24.22	10.17
	max	5.39	27.97	31.78	23.36	10.62	5.69	25.04	33.29	24.22	10.79
P8 G5 L12-C	P8 G5 L12-C1	4.06	26.38	29.29	20.33	7.65	4.27	23.72	31.15	21.41	8.31
	P8 G5 L12-C2	4.43	26.89	30.27	21.53	8.95	5.12	24.12	31.35	22.78	9.79
	P8 G5 L12-C3	5.15	27.51	31.22	22.82	10.07	5.29	24.44	31.89	23.37	9.86
	max	5.15	27.51	31.22	22.82	10.07	5.29	24.44	31.89	23.37	9.86
P8 G7 L12-A	P8 G7 L12-A1	4.61	25.90	27.47	19.46	7.01	5.18	22.92	30.23	20.55	8.40
	P8 G7 L12-A2	4.96	26.25	27.61	19.21	8.92	5.42	23.18	30.37	23.24	9.32
	P8 G7 L12-A3	5.03	26.40	29.48	20.41	8.97	5.77	24.39	30.78	23.91	9.98
	max	5.03	26.40	29.48	20.41	8.97	5.77	24.39	30.78	23.91	9.98
P8 G7 L12-B	P8 G7 L12-B1	4.41	25.59	26.76	18.47	5.84	4.73	22.38	28.50	19.56	7.19
	P8 G7 L12-B2	4.76	25.16	27.25	19.76	6.99	5.17	22.67	29.10	21.67	9.41
	P8 G7 L12-B3	4.76	25.16	27.25	19.76	6.99	5.17	22.67	29.10	21.67	9.41
	max	4.76	25.59	27.25	19.76	6.99	5.17	22.67	29.10	21.67	9.41
P8 G7 L12-C	P8 G7 L12-C1	4.40	23.82	25.86	18.45	5.80	4.52	20.98	26.40	19.75	7.40
	P8 G7 L12-C2	4.44	24.72	26.16	19.35	6.45	4.85	21.21	27.40	20.59	7.98
	P8 G7 L12-C3	4.44	24.72	26.16	19.35	6.45	4.85	21.21	27.40	20.59	7.98
	max	4.44	24.72	26.16	19.35	6.45	4.85	21.21	27.40	20.59	7.98

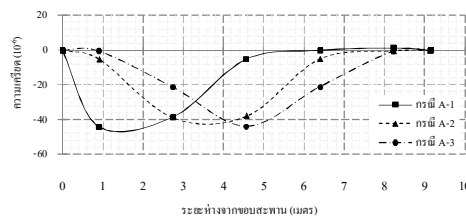
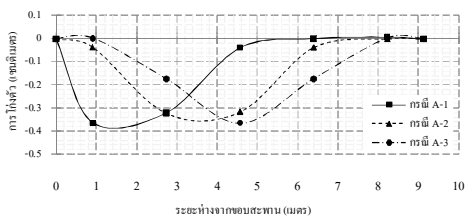
ตารางที่ ก-4 ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองแผ่นพื้น Prodeck 8 ที่มีความยาวสะพาน 18

เมตร

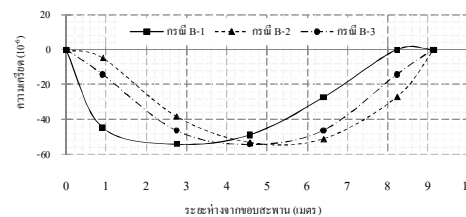
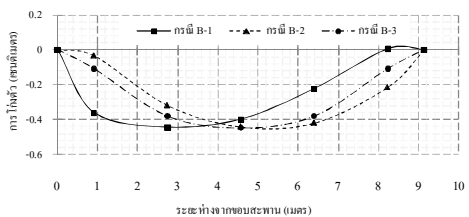
Models		Dynamic Load Allowance on Deflection (%)					Dynamic Load Allowance on Strain (%)				
		Velocity of Truck Load (km/hr)					Velocity of Truck Load (km/hr)				
		20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
P8 G4 L18-A	P8 G4 L18-A1	29.97	39.06	17.83	-2.69	-19.21	33.21	41.45	22.61	7.11	-9.27
	P8 G4 L18-A2	30.75	39.87	20.54	2.54	-13.28	34.45	42.04	22.98	10.81	-3.13
	P8 G4 L18-A3	31.81	40.42	24.98	6.83	-8.23	35.50	42.25	24.78	13.17	0.08
	max	31.81	40.42	24.98	6.83	-8.23	35.50	42.25	24.78	13.17	0.08
P8 G4 L18-B	P8 G4 L18-B1	27.82	36.59	17.42	-0.94	-15.58	32.09	38.75	22.06	9.35	-6.47
	P8 G4 L18-B2	27.95	36.62	17.72	1.26	-15.50	33.68	38.64	22.86	10.09	-6.62
	P8 G4 L18-B3	28.31	38.66	20.75	1.48	-13.19	34.53	40.30	22.59	11.33	-2.46
	max	28.31	38.66	20.75	1.48	-13.19	34.53	40.30	22.86	11.33	-2.46
P8 G4 L18-C	P8 G4 L18-C1	27.03	33.15	17.28	-1.15	-15.86	31.94	36.63	21.89	9.55	-6.21
	P8 G4 L18-C2	27.88	35.48	17.46	0.69	-15.68	33.45	37.00	21.71	9.91	-6.19
	P8 G4 L18-C3	28.23	37.17	20.90	1.67	-13.33	33.79	38.23	22.04	10.08	-3.21
	max	28.23	37.17	20.90	1.67	-13.33	33.79	38.23	22.04	10.08	-3.21
P8 G5 L18-A	P8 G5 L18-A1	26.75	36.28	20.34	2.29	-13.55	31.19	37.76	22.31	9.35	-7.01
	P8 G5 L18-A2	27.68	37.24	20.79	4.31	-10.52	31.87	38.19	22.63	9.62	-5.28
	P8 G5 L18-A3	27.91	37.50	22.72	1.90	-12.36	31.85	38.99	22.75	10.91	-4.69
	max	27.91	37.50	22.72	4.31	-10.52	31.87	38.99	22.75	10.91	-4.69
P8 G5 L18-B	P8 G5 L18-B1	26.98	35.87	17.64	-1.71	-16.26	31.26	35.28	19.71	8.42	-6.44
	P8 G5 L18-B2	25.87	36.65	20.34	1.54	-13.20	31.37	37.21	21.71	9.30	-5.91
	P8 G5 L18-B3	25.97	36.74	21.32	2.51	-12.16	31.48	38.14	22.57	10.05	-5.04
	max	26.98	36.74	21.32	2.51	-12.16	31.48	38.14	22.57	10.05	-5.04
P8 G5 L18-C	P8 G5 L18-C1	25.77	35.09	17.82	-1.70	-16.19	31.26	35.83	20.02	8.99	-5.91
	P8 G5 L18-C2	25.89	35.76	20.45	1.53	-13.14	31.42	37.69	20.75	9.20	-5.65
	P8 G5 L18-C3	25.83	36.09	20.89	2.13	-12.50	30.87	37.56	21.98	9.40	-5.45
	max	25.89	36.09	20.89	2.13	-12.50	31.42	37.69	21.98	9.40	-5.45
P8 G7 L18-A	P8 G7 L18-A1	26.10	34.48	18.36	-1.34	-16.08	29.54	32.44	18.86	7.25	-9.72
	P8 G7 L18-A2	26.37	34.49	20.89	3.41	-12.86	29.61	33.01	20.44	8.78	-5.44
	P8 G7 L18-A3	26.84	34.51	20.90	3.47	-12.69	30.09	34.67	21.63	9.65	-5.53
	max	26.84	34.51	20.90	3.47	-12.69	30.09	34.67	21.63	9.65	-5.44
P8 G7 L18-B	P8 G7 L18-B1	23.31	31.90	16.35	-3.61	-18.43	29.07	33.93	17.51	4.36	-12.78
	P8 G7 L18-B2	24.17	33.40	19.12	0.98	-14.25	29.53	34.28	19.11	8.38	-6.15
	P8 G7 L18-B3	24.17	33.40	19.12	0.98	-14.25	29.53	34.28	19.11	8.38	-6.15
	max	24.17	33.40	19.12	0.98	-14.25	29.53	34.28	19.11	8.38	-6.15
P8 G7 L18-C	P8 G7 L18-C1	23.92	30.93	16.43	-3.38	-18.42	27.66	31.92	18.22	3.19	-12.37
	P8 G7 L18-C2	24.09	31.90	18.94	0.76	-14.34	28.84	33.83	18.75	7.50	-6.89
	P8 G7 L18-C3	24.09	31.90	18.94	0.76	-14.34	28.84	33.83	18.75	7.50	-6.89
	max	24.09	31.90	18.94	0.76	-14.34	28.84	33.83	18.75	7.50	-6.89

ภาคผนวก ข

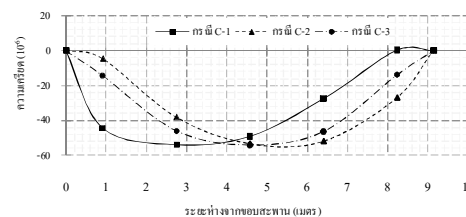
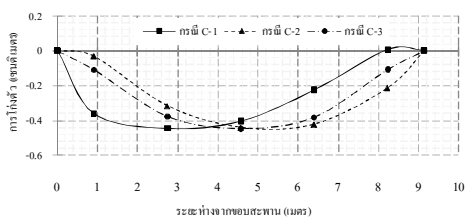
ผลการวิเคราะห์การตอบสนองสูงสุด (การ โกงตัวและความเครียด)
ของแบบจำลองทางสถิติศาสตร์



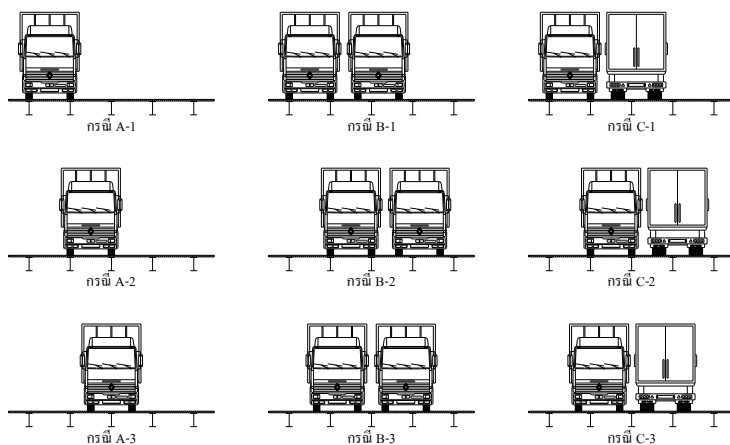
รูปที่ ข-1 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G5 L12-A)



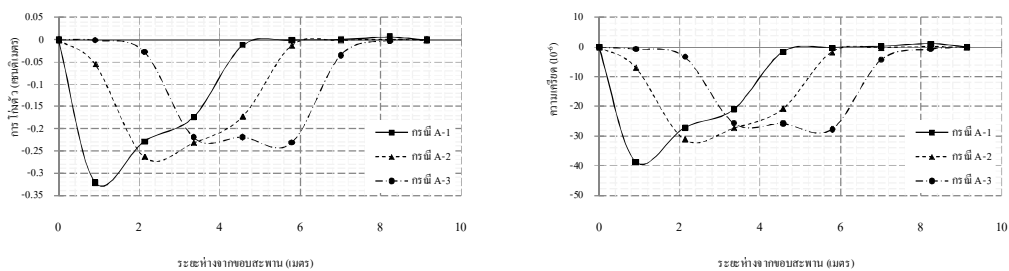
รูปที่ ข-2 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G5 L12-B)



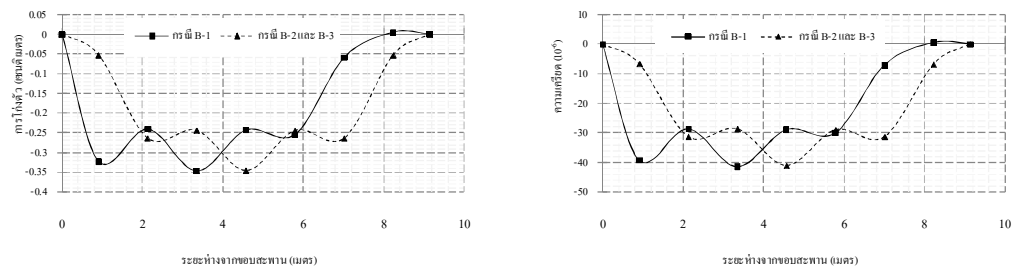
รูปที่ ข-3 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G5 L12-C)



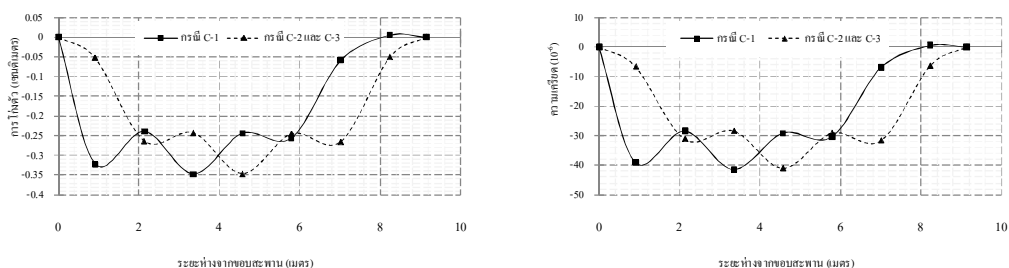
รูปที่ ข-4 หน้าตัดของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ (P4 G5 L12)



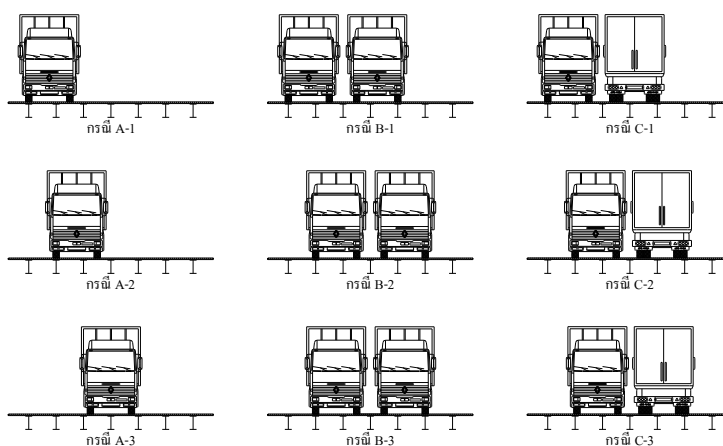
รูปที่ ข-5 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G7 L12-A)



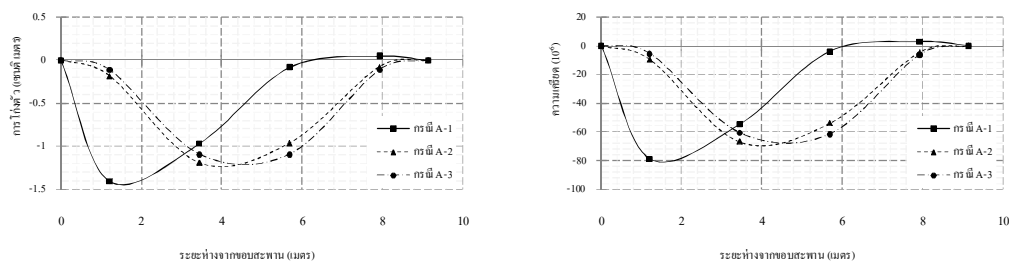
รูปที่ ข-6 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G7 L12-B)



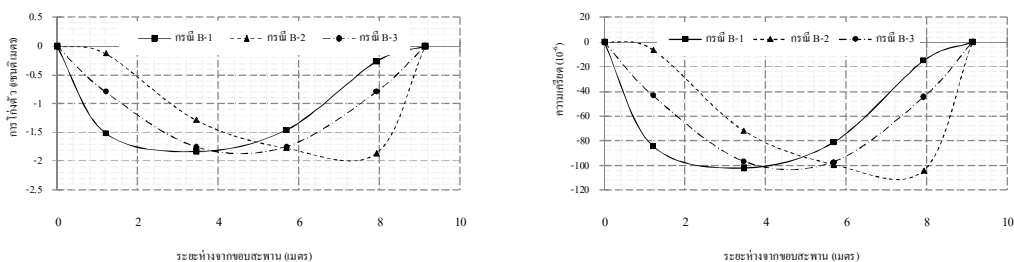
รูปที่ ข-7 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G7 L12-C)



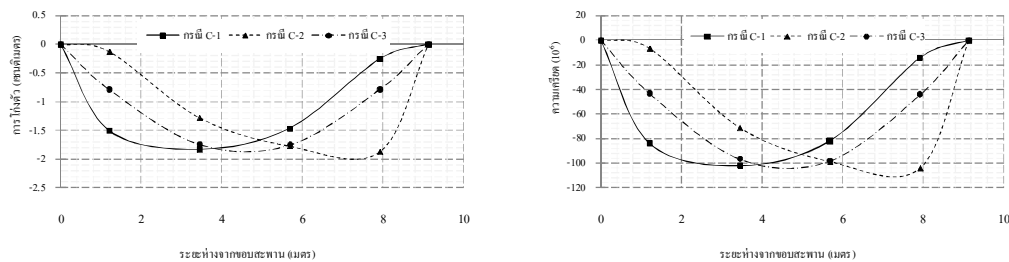
รูปที่ ข-8 หน้าที่คของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ (P4 G7 L12)



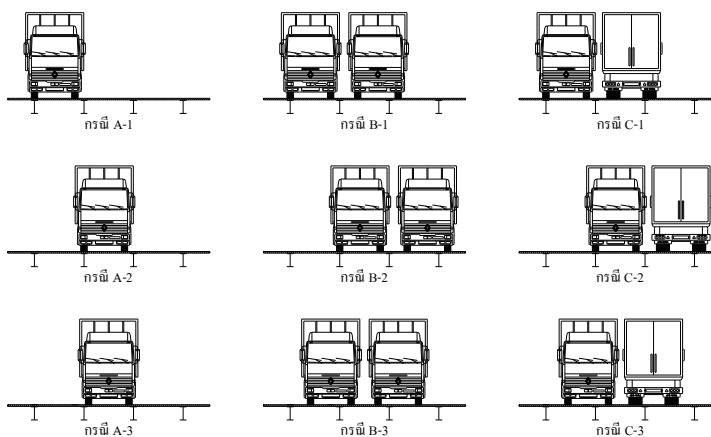
รูปที่ ข-9 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G4 L18-A)



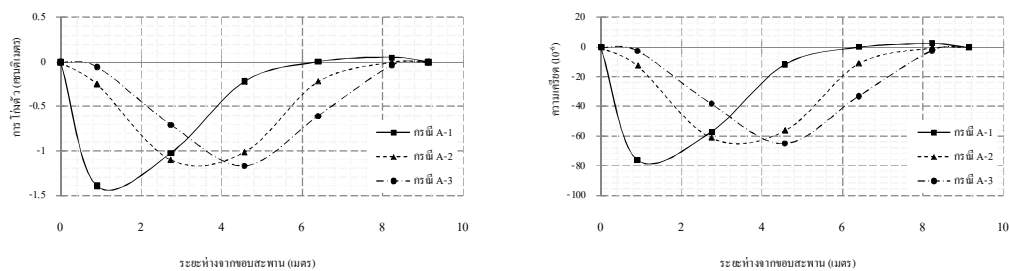
รูปที่ ข-10 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G4 L18-B)



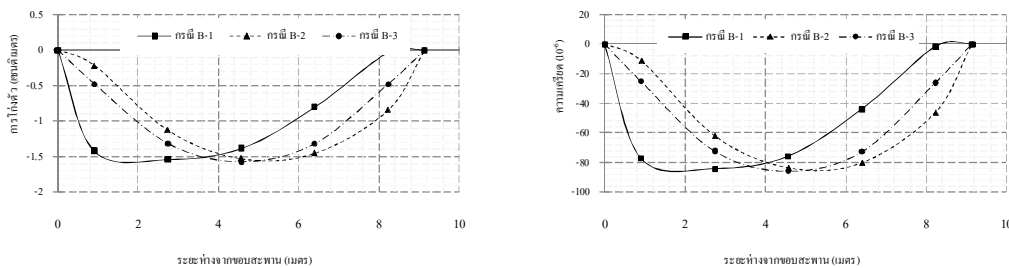
รูปที่ ข-11 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G4 L18-C)



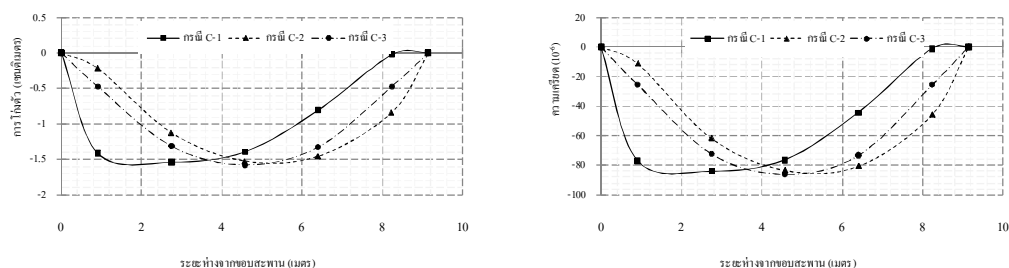
รูปที่ ข-12 หน้าตัดของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ (P4 G4 L18)



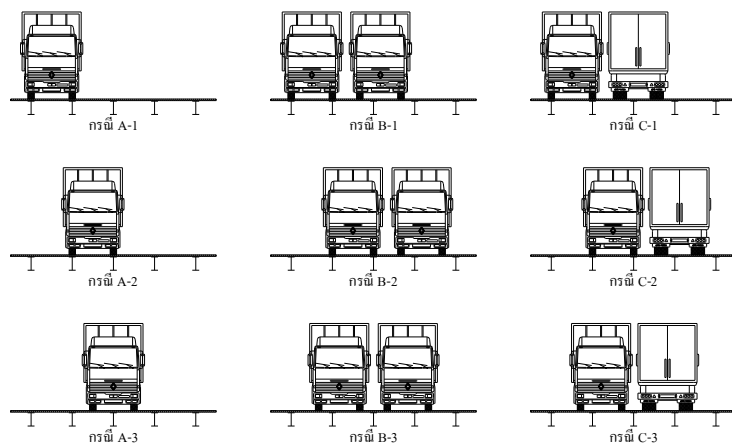
รูปที่ ข-13 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G5 L18-A)



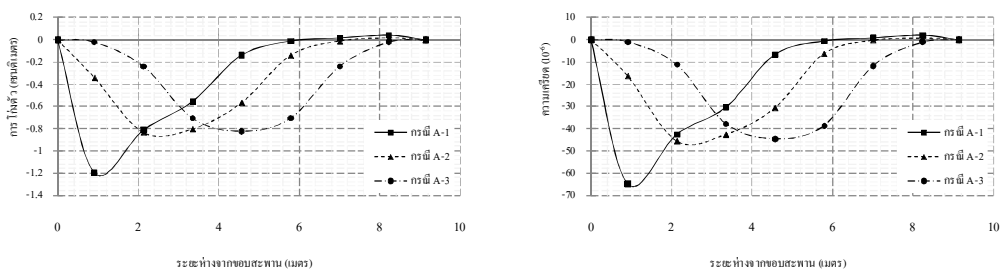
รูปที่ ข-14 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G5 L18-B)



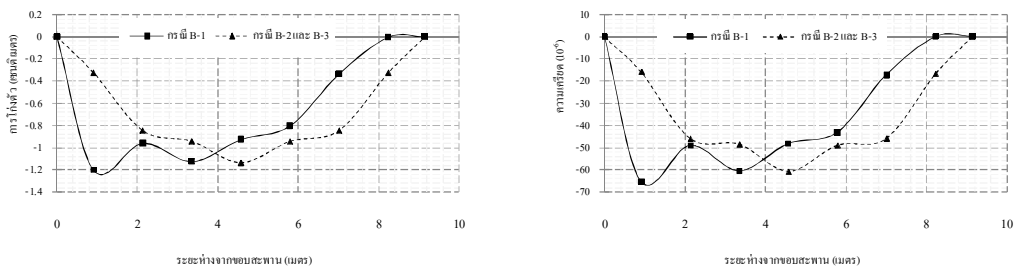
รูปที่ ข-15 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G5 L18-C)



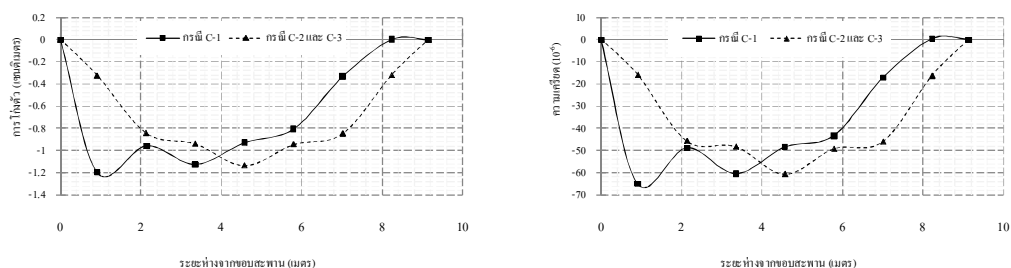
รูปที่ ข-16 หน้าที่ัดของระบบสะพานภายใต้หน้าหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ (P4 G5 L18)



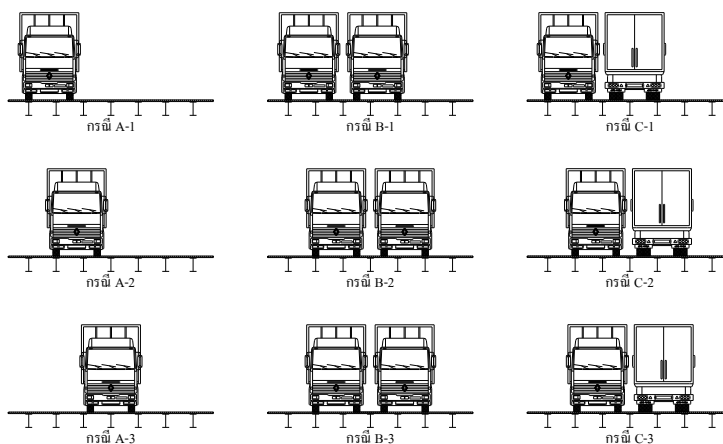
รูปที่ ข-17 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G7 L18-A)



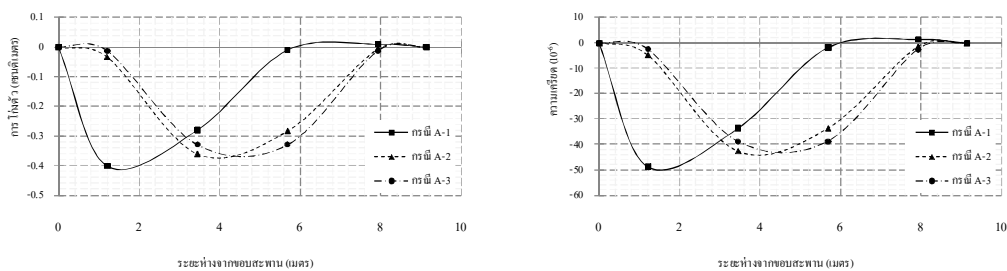
รูปที่ ข-18 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G7 L18-B)



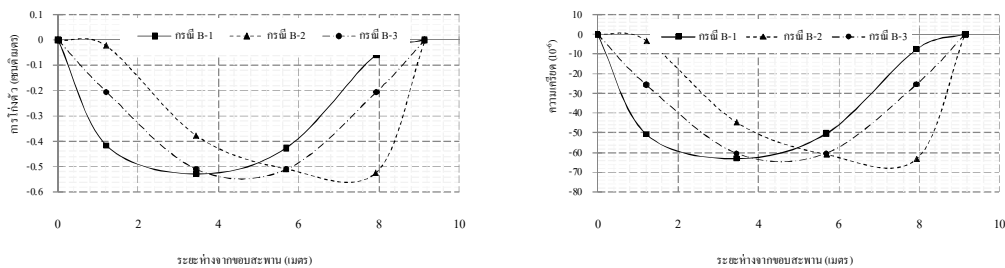
รูปที่ ข-19 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P4 G7 L18-C)



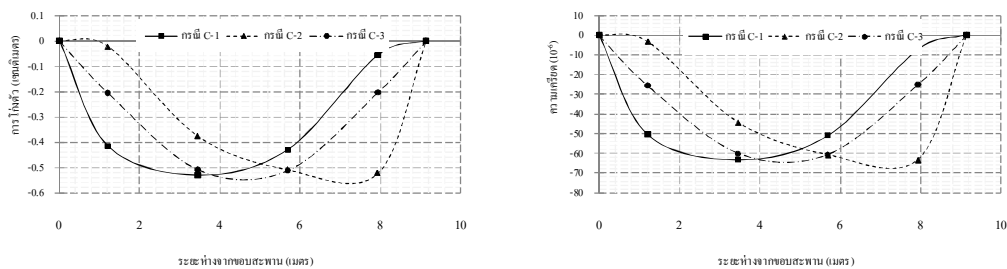
รูปที่ ข-20 หน้าตัดของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ (P4 G7 L18)



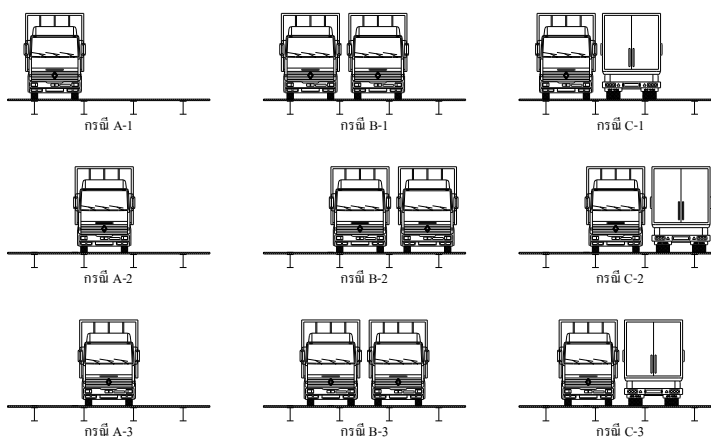
รูปที่ ข-21 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P8 G4 L12-A)



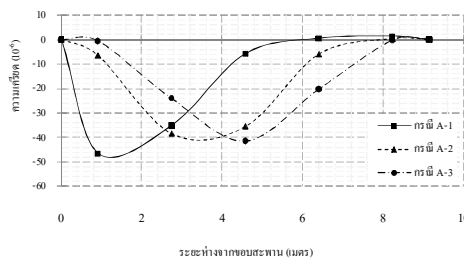
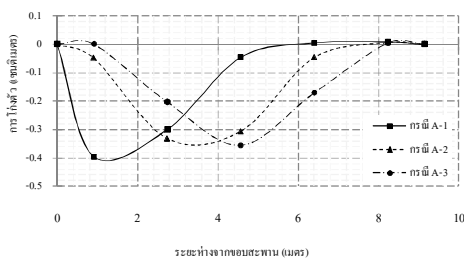
รูปที่ ข-22 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P8 G4 L12-B)



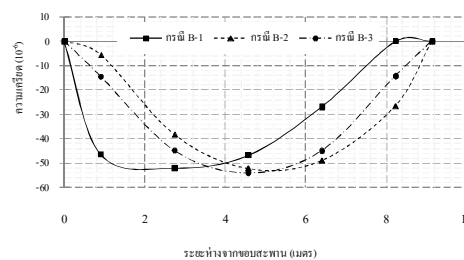
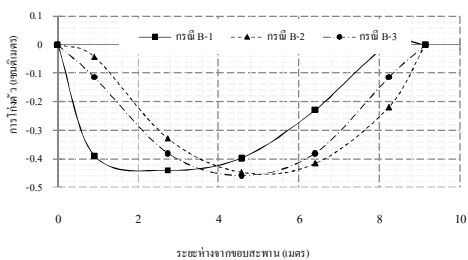
รูปที่ ข-23 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P8 G4 L12-C)



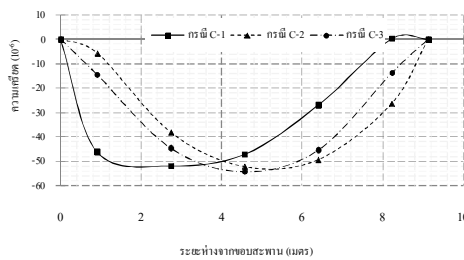
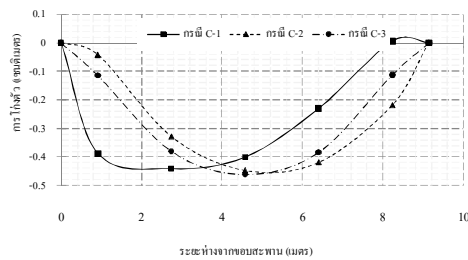
รูปที่ ข-24 หน้าที่ัดของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ (P8 G4 L12)



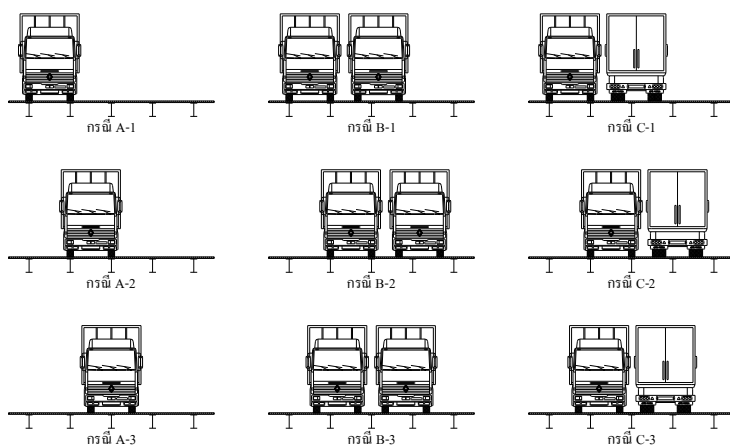
รูปที่ ข-25 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P8 G5 L12-A)



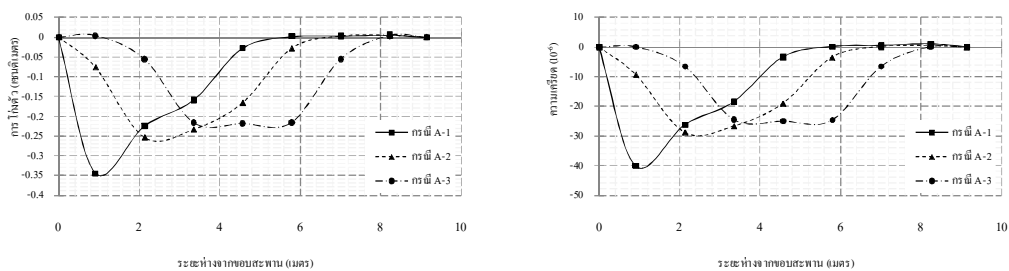
รูปที่ ข-26 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P8 G5 L12-B)



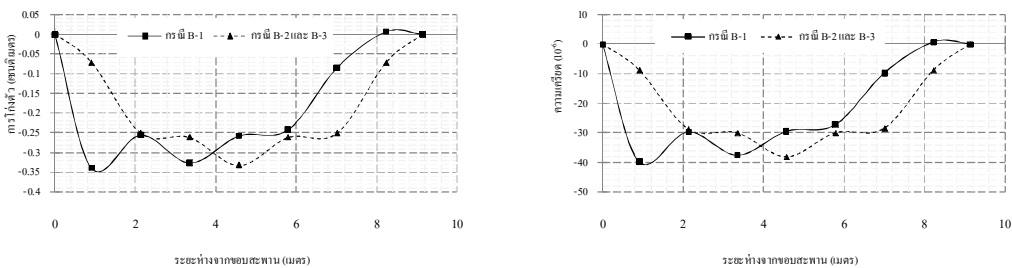
รูปที่ ข-27 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P8 G5 L12-C)



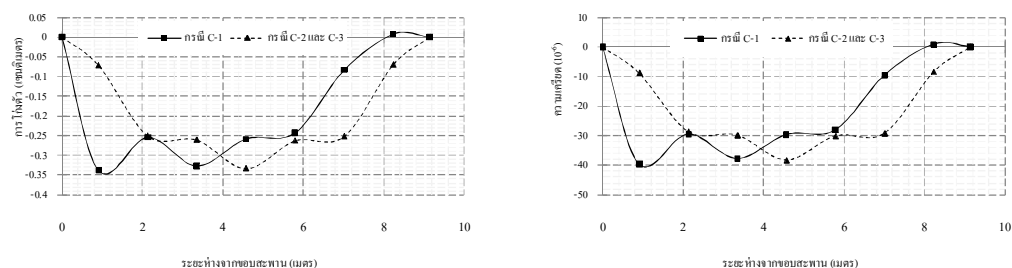
รูปที่ ข-28 หน้าตัดของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ (P8 G5 L12)



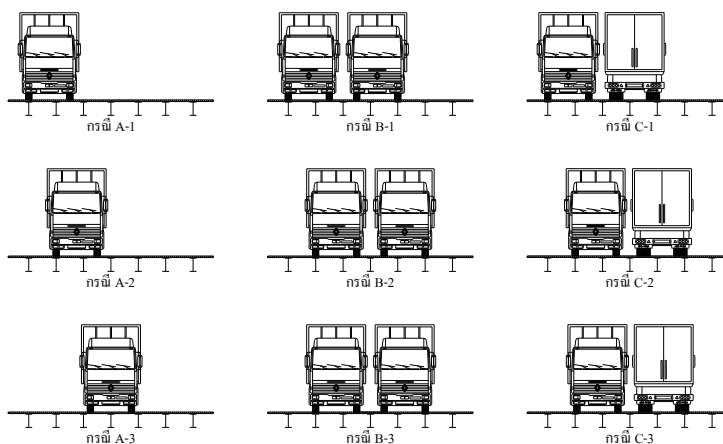
รูปที่ ข-29 ผลการตอบสนองทางสถิติศาสตร์ (P8 G7 L12-A)



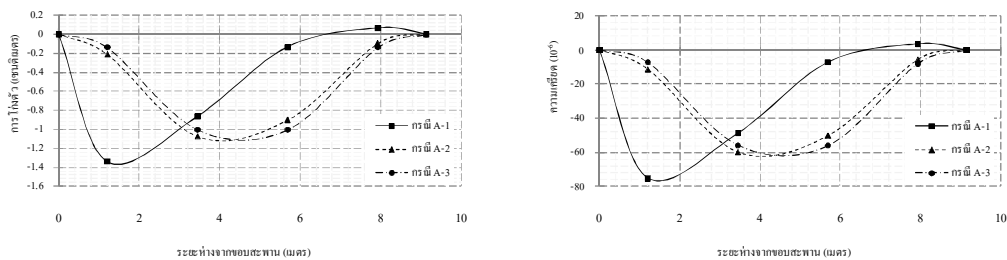
รูปที่ ข-30 ผลการตอบสนองทางสถิติศาสตร์ (P8 G7 L12-B)



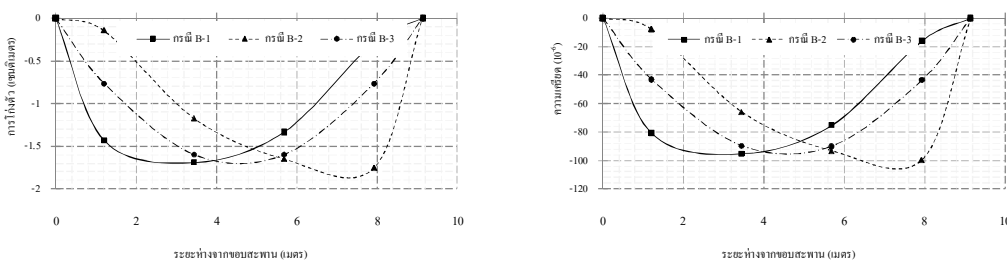
รูปที่ ข-31 ผลการตอบสนองทางสถิติศาสตร์ (P8 G7 L12-C)



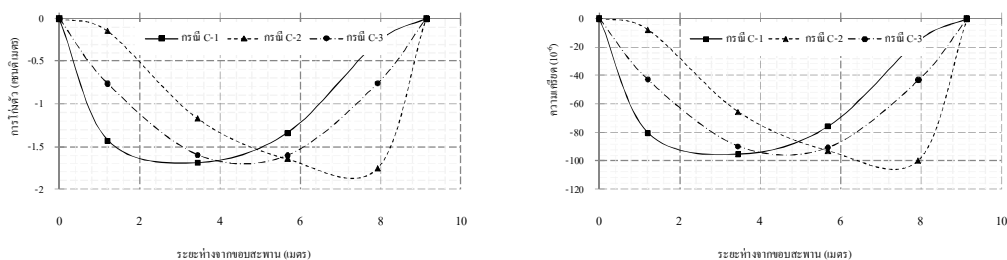
รูปที่ ข-32 หน้าตัดของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ (P8 G7 L12)



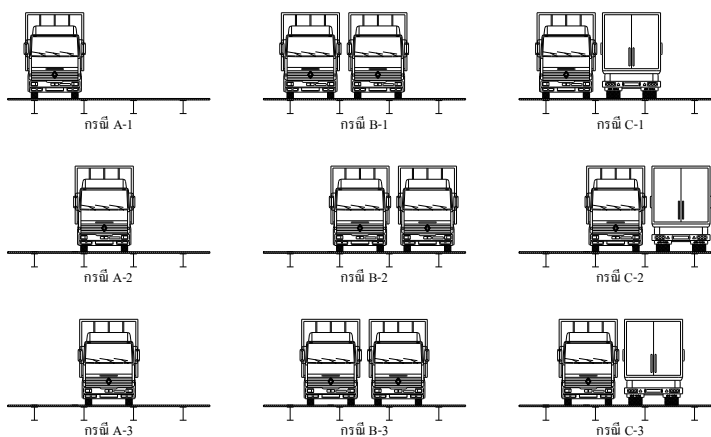
รูปที่ ข-33 ผลการตอบสนองทางสถิติศาสตร์ (P8 G4 L18-A)



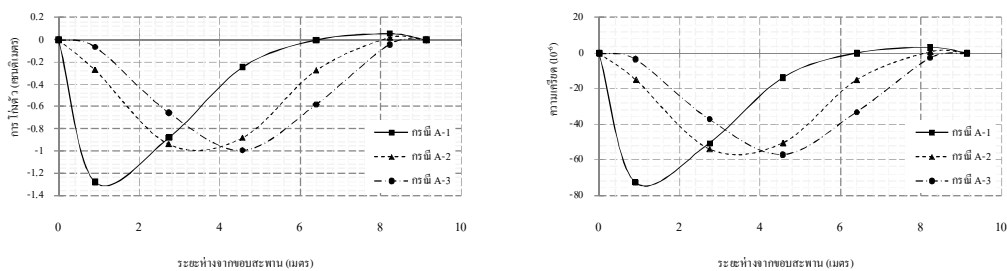
รูปที่ ข-34 ผลการตอบสนองทางสถิติศาสตร์ (P8 G4 L18-B)



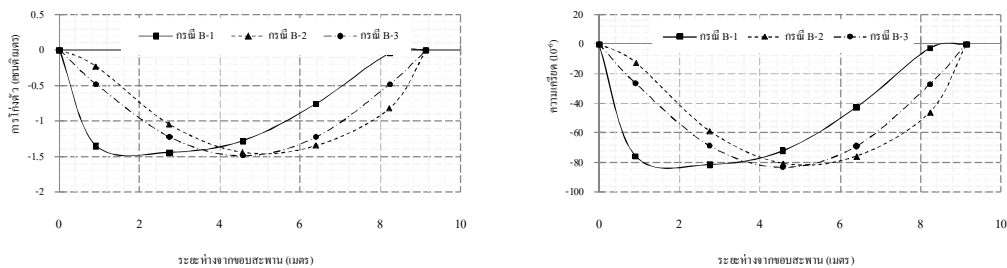
รูปที่ ข-35 ผลการตอบสนองทางสถิติศาสตร์ (P8 G4 L18-C)



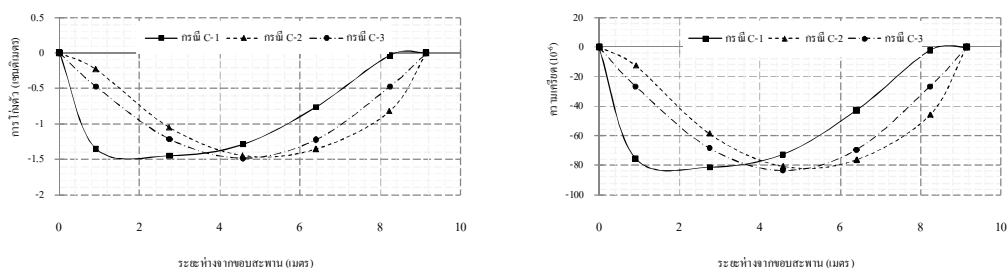
รูปที่ ข-36 หน้าตัดของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ (P8 G4 L18)



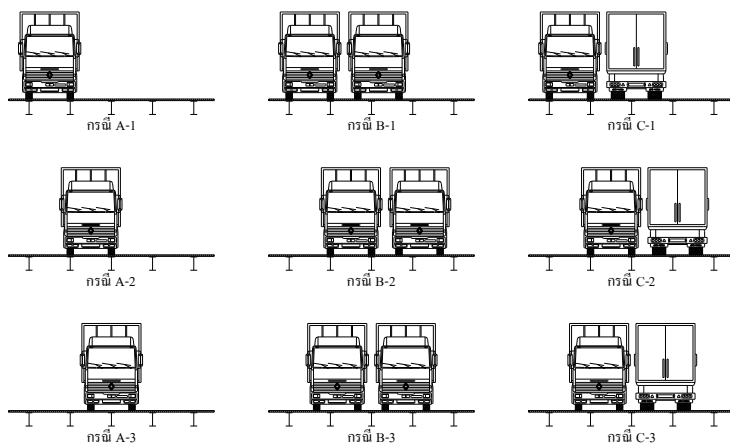
รูปที่ ข-37 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P8 G5 L18-A)



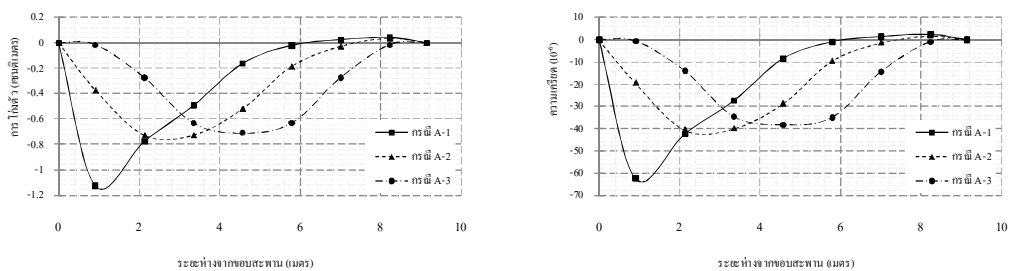
รูปที่ ข-38 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P8 G5 L18-B)



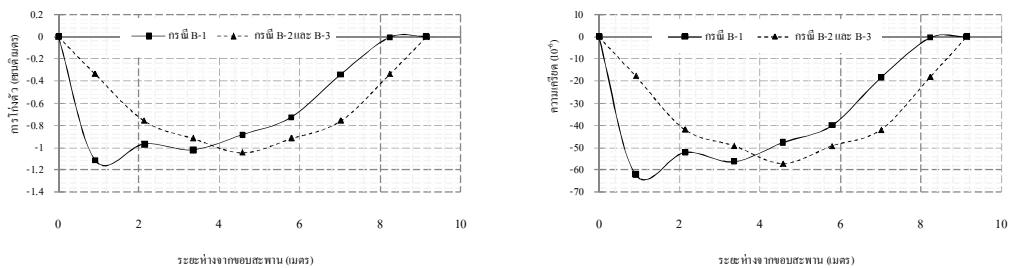
รูปที่ ข-39 ผลการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ (P8 G5 L18-C)



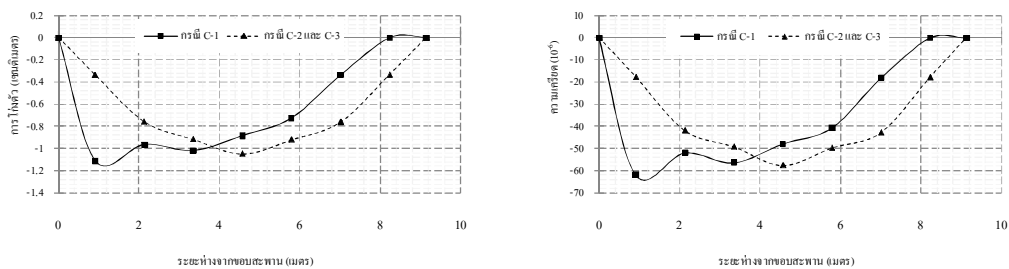
รูปที่ ข-40 หน้าตัดของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ (P8 G5 L18)



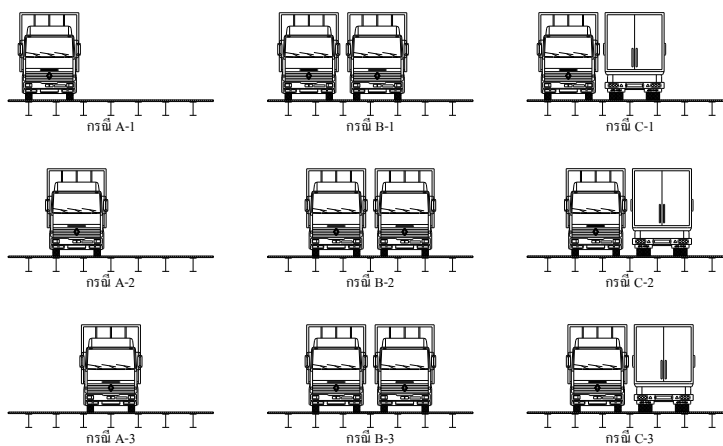
รูปที่ ข-41 ผลการตอบสนองทางสถิติศาสตร์ (P8 G7 L18-A)



รูปที่ ข-42 ผลการตอบสนองทางสถิติศาสตร์ (P8 G7 L18-B)



รูปที่ ข-43 ผลการตอบสนองทางสถิติศาสตร์ (P8 G7 L18-C)



รูปที่ ข-44 หน้าตัดของระบบสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ (P8 G7 L18)

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์การตอบสนองสูงสุด (การ โกงตัวและความเครียด)
ของแบบจำลองทางพลศาสตร์

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของตัวแปรเสริมที่มีอิทธิพลต่อค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์
(Dynamic Load Allowance) ของแบบจำลองระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์
เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก

ตารางที่ ง-1 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่า DLA กับตัวแปรความเร็วของรถบรรทุก (Prodeck 4)

Models	Maximum Dynamic Load Allowance on Strain (%)					Percent Difference
	Velocity of Truck Load (km/hr)					
	V20	V40	V60	V80	V100	
P4 G4 L12-A	11.66	33.86	41.18	36.10	26.25	21.63
P4 G4 L12-B	9.70	31.60	39.25	35.19	25.06	24.21
P4 G4 L12-C	8.82	31.64	38.47	34.82	24.74	21.56
P4 G5 L12-A	8.11	30.65	37.18	34.03	23.84	21.32
P4 G5 L12-B	7.49	28.46	34.33	31.87	21.69	20.62
P4 G5 L12-C	8.73	28.12	33.22	31.50	21.53	18.12
P4 G7 L12-A	7.64	27.42	31.60	27.93	19.66	15.23
P4 G7 L12-B	6.33	24.52	29.20	26.59	19.71	19.09
P4 G7 L12-C	6.48	23.26	28.14	25.85	18.97	20.97
P4 G4 L18-A	40.18	44.30	28.71	13.15	-2.69	10.27
P4 G4 L18-B	37.88	43.22	26.94	12.32	-3.08	14.10
P4 G4 L18-C	37.70	41.05	26.70	12.45	-3.65	8.88
P4 G5 L18-A	37.50	40.53	25.80	12.03	-4.44	8.06
P4 G5 L18-B	36.56	39.57	24.48	11.79	-4.21	8.22
P4 G5 L18-C	36.59	39.08	23.71	10.87	-4.60	6.79
P4 G7 L18-A	35.01	37.62	22.63	6.52	-5.95	7.46
P4 G7 L18-B	33.95	35.22	21.01	5.81	-6.92	3.75
P4 G7 L18-C	33.45	34.47	20.33	4.61	-8.10	3.06

ตารางที่ ง-2 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่า DLA กับตัวแปรความเร็วของรถบรรทุก (Prodeck 8)

Models	Maximum Dynamic Load Allowance on Strain (%)					Percent Difference
	Velocity of Truck Load (km/hr)					
	20	V40	V60	V80	V100	
P8 G4 L12-A	7.64	30.33	36.74	27.76	15.83	21.14
P8 G4 L12-B	7.08	29.34	34.52	27.22	15.69	17.64
P8 G4 L12-C	6.75	28.98	33.33	26.20	14.54	15.02
P8 G5 L12-A	6.48	25.55	34.24	25.30	11.47	34.01
P8 G5 L12-B	5.69	25.04	33.29	24.22	10.79	32.97
P8 G5 L12-C	5.29	24.44	31.89	23.37	9.86	30.44
P8 G7 L12-A	5.77	24.39	30.78	23.91	9.98	26.20
P8 G7 L12-B	5.17	22.67	29.10	21.67	9.41	28.36
P8 G7 L12-C	4.85	21.21	27.40	20.59	7.98	29.19
P8 G4 L18-A	35.50	42.25	24.78	13.17	0.08	18.99
P8 G4 L18-B	34.53	40.30	22.86	11.33	-2.46	16.70
P8 G4 L18-C	33.79	38.23	22.04	10.08	-3.21	13.12
P8 G5 L18-A	31.87	38.99	22.75	10.91	-4.69	22.35
P8 G5 L18-B	31.48	38.14	22.57	10.05	-5.04	21.16
P8 G5 L18-C	31.42	37.69	21.98	9.40	-5.45	19.95
P8 G7 L18-A	30.09	34.67	21.63	9.65	-5.44	15.22
P8 G7 L18-B	29.53	34.28	19.11	8.38	-6.15	16.07
P8 G7 L18-C	28.84	33.83	18.75	7.50	-6.89	17.31

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่แสดงในตาราง ง-1 และ ง-2 คำนวณโดยนำค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่มากที่สุดเปรียบเทียบกับค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่ต่ำกว่าในช่วงของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของรถบรรทุกเพียงหนึ่งช่วง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้

- ในกรณีของแบบจำลองที่มีช่วงความยาวของสะพาน 12 เมตรมีค่า DLA มากที่สุดตรงกับความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจะคำนวณจากช่วงของการเปลี่ยนแปลงความเร็วจาก 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็น 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (เช่น จากตารางที่ ง-1 เมื่อความเร็วของรถบรรทุกเพิ่มจาก 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็น 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในกรณีแบบจำลอง P4 G4 L12-A ทำให้ค่า DLA เพิ่มจาก 33.86 เป็น 41.18 หรือมีการเพิ่มขึ้น 21.63 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่า DLA 33.86)

- ในกรณีของแบบจำลองที่มีช่วงความยาวของสะพาน 18 เมตรมีค่า DLA มากที่สุดตรงกับความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจะคำนวณจากช่วงของการเปลี่ยนแปลงความเร็วจาก 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็น 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (เช่น จากตารางที่ ง-2 เมื่อความเร็วของรถบรรทุกเพิ่มจาก 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็น 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในกรณีแบบจำลอง P4 G4 L18-A ทำให้ค่า DLA เพิ่มจาก 40.18 เป็น 44.30 หรือมีการเพิ่มขึ้น 10.27 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่า DLA 40.18)

เพราะฉะนั้นค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของค่า DLA อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของรถบรรทุก จากแบบจำลองทั้งหมดมีค่าประมาณ **18.03 เปอร์เซ็นต์**

ตารางที่ ง-3 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่า DLA กับตัวแปรระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ
(Prodeck 4)

Models	No. of Stringer	Stringer spacing (m)	Maximum Dynamic Load Allowance on Strain (%)	Percent Difference
P4 L12-A	7	1.22	31.60	-
	5	1.83	37.18	17.67
	4	2.24	41.18	10.76
P4 L12-B	7	1.22	29.20	-
	5	1.83	34.33	17.56
	4	2.24	39.25	14.33
P4 L12-C	7	1.22	28.14	-
	5	1.83	33.22	18.03
	4	2.24	38.47	15.80
P4 L18-A	7	1.22	37.62	-
	5	1.83	40.53	7.72
	4	2.24	44.30	9.32
P4 L18-B	7	1.22	35.22	-
	5	1.83	39.57	12.35
	4	2.24	43.22	9.23
P4 L18-C	7	1.22	34.47	-
	5	1.83	39.08	13.36
	4	2.24	41.05	5.04

ตารางที่ ง-4 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า DLA กับตัวแปรระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (Prodeck 8)

Models	No. of Stringer	Stringer spacing (m)	Maximum Dynamic Load Allowance on Strain (%)	Percent Difference
P8 L12-A	7	1.22	30.78	-
	5	1.83	34.24	11.24
	4	2.24	36.74	7.30
P8 L12-B	7	1.22	29.10	-
	5	1.83	33.29	14.42
	4	2.24	34.52	3.68
P8 L12-C	7	1.22	27.40	-
	5	1.83	31.89	16.37
	4	2.24	33.33	4.53
P8 L18-A	7	1.22	34.67	-
	5	1.83	38.99	12.47
	4	2.24	42.25	8.35
P8 L18-B	7	1.22	34.28	-
	5	1.83	38.14	11.26
	4	2.24	40.30	5.65
P8 L18-C	7	1.22	33.83	-
	5	1.83	37.69	11.39
	4	2.24	38.23	1.43

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่แสดงในตาราง ง-3 และ ง-4 คำนวณ โดยนำค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองที่มีระยะห่างของคานที่รองรับมากเทียบกับค่าคุณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองที่มีระยะห่างของคานที่รองรับน้อยกว่า (เช่น จากตารางที่ ง-3 เมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเพิ่มจาก 1.22 เมตร เป็น 1.83 เมตร ในกรณีแบบจำลอง P4 L12-A ทำให้ค่า DLA เพิ่มจาก 31.60 เป็น 37.18 หรือมีการเพิ่มขึ้น 17.67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่า DLA 31.60) เพราะฉะนั้นค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของค่า DLA อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของคานที่รองรับจากแบบจำลองทั้งหมดมีค่าประมาณ **10.80 เปอร์เซ็นต์**

ตารางที่ ง-5 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่า DLA กับตัวแปรช่วงความยาวของสะพาน (Prodeck 4)

Models	Bridge Span (m)	Maximum Dynamic Load Allowance on Strain (%)	Percent Difference
P4 G4-A	12	41.18	-
	18	44.30	7.58
P4 G4-B	12	39.25	-
	18	43.22	10.12
P4 G4-C	12	38.47	-
	18	41.05	6.71
P4 G5-A	12	37.18	-
	18	40.53	9.00
P4 G5-B	12	34.33	-
	18	39.57	15.26
P4 G5-C	12	33.22	-
	18	39.08	17.65
P4 G7-A	12	31.60	-
	18	37.62	19.07
P4 G7-B	12	29.20	-
	18	35.22	20.61
P4 G7-C	12	28.14	-
	18	34.47	22.50

ตารางที่ ง-6 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า DLA กับตัวแปรช่วงความยาวของสะพาน (Prodeck 8)

Models	Bridge Span (m)	Maximum Dynamic Load Allowance on Strain (%)	Percent Difference
P8 G4-A	12	36.74	-
	18	42.25	14.99
P8 G4-B	12	34.52	-
	18	40.30	16.74
P8 G4-C	12	33.33	-
	18	38.23	14.68
P8 G5-A	12	34.24	-
	18	38.99	13.88
P8 G5-B	12	33.29	-
	18	38.14	14.56
P8 G5-C	12	31.89	-
	18	37.69	18.19
P8 G7-A	12	30.78	-
	18	34.67	12.63
P8 G7-B	12	29.10	-
	18	34.28	17.81
P8 G7-C	12	27.40	-
	18	33.83	23.47

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่แสดงในตาราง ง-5 และ ง-6 คำนวณ โดยนำค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองที่มีช่วงความยาวของสะพานมากเทียบกับค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองที่มีช่วงความยาวของสะพานน้อยกว่า (เช่น จากตารางที่ ง-5 เมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเพิ่มจาก 12 เมตร เป็น 18 เมตร ในกรณีแบบจำลอง P4 G4-A ทำให้ค่า DLA เพิ่มจาก 41.18 เป็น 44.30 หรือมีการเพิ่มขึ้น 7.58 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่า DLA 41.18) เพราะฉะนั้นค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของค่า DLA อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงช่วงความยาวของสะพานจากแบบจำลองทั้งหมดมีค่าประมาณ **15.30 เปอร์เซ็นต์**

ตารางที่ ง-7 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า DLA กับตัวแปรชนิดของแผ่นพื้นสะพาน (L=12 ม.)

Deck Type	No. of Stringer	Bridge Span (m)	Maximum Dynamic Load Allowance on Strain (%)	Percent Difference
Prodeck 4	4	12	41.18	12.08
	5	12	37.18	8.59
	7	12	31.60	2.66
Prodeck 8	4	12	36.74	-
	5	12	34.24	-
	7	12	30.78	-

ตารางที่ ง-8 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า DLA กับตัวแปรชนิดของแผ่นพื้นสะพาน (L=18 ม.)

Deck Type	No. of Stringer	Bridge Span (m)	Maximum Dynamic Load Allowance on Strain (%)	Percent Difference
Prodeck 4	4	18	44.30	4.85
	5	18	40.53	3.95
	7	18	37.62	8.51
Prodeck 8	4	18	42.25	-
	5	18	38.99	-
	7	18	34.67	-

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่แสดงในตาราง ง-7 และ ง-8 คำนวณโดยนำค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของแบบจำลองสะพานชนิด Prodeck 4 ที่ให้ค่า DLA สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองสะพานชนิด Prodeck 8 (เช่น จากตารางที่ ง-7 เมื่อเปลี่ยนแผ่นพื้นจากชนิด Prodeck 8 เป็น Prodeck 4 ในกรณีแบบจำลองที่มีคานเหล็กรองรับ 4 คาน และมีช่วงความยาวสะพาน 12 เมตร ทำให้ค่า DLA เพิ่มจาก 36.74 เป็น 41.18 หรือมีการเพิ่มขึ้น 12.08 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่า DLA 36.74) เพราะฉะนั้นค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของค่า DLA อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงชนิดของแผ่นพื้นสะพานจากแบบจำลองทั้งหมดมีค่าประมาณ **6.77 เปอร์เซ็นต์**

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์ ก

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18
(18th National Convention on Civil Engineering , NCCE18)
ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่ 8-10 พฤษภาคม 2556

พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Dynamic Response of FRP Bridge Deck using Finite Element Method

อรุณพล แสงแก้ว^{1*} วรพจน์ ประชาเสรี² และ สุชาติ ลีมกตัญญู³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

E-mail: ¹attpon_sangkaew@hotmail.com, ²pworaphot@eng.psu.ac.th, ³suchart.l@psu.ac.th

บทคัดย่อ

พื้นสะพานประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย กำลังได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในงานสะพานทางหลวงและการประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมโยธา เนื่องจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีข้อดีหลายอย่างที่เหนือกว่าวัสดุทั่วไป เช่น อัตราส่วนของกำลังต้านทานต่อหน่วยน้ำหนักที่สูง ปราศจากการผุกร่อน รวมถึงสามารถทำเป็นชิ้นส่วนได้ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้งานแผ่นพื้นสะพานประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย คือ มีน้ำหนักเบาและผลในการตอบสนองจากการสั่นสะเทือนจะมีความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทั่วไป ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือนำเสนอผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ชนิด ProDeck 4 และ ProDeck 8 ผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม

คำสำคัญ: แผ่นพื้นสะพาน, พอลิเมอร์, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Fiber Reinforced Polymer (FRP) bridge deck are gaining more popular in highway bridges and civil engineering applications. Since, FRP composite materials have many advantages over conventional materials such as high strength to weight ratio, non-corrosiveness and modularization. However, the significant limit for using FRP deck applications is relative light weight and resulting difference in vibration response. Then, the main objectives of this effort is to present dynamic response of FRP bridge decks using finite element method. FE Models of FRP ProDeck4 and ProDeck8 are simulated and compared with data from laboratory and field test.

Keywords: Fiber Reinforced Polymer, FRP, Bridge Deck, Finite Element, ProDeck 4, ProDeck 8

1. คำนำ

วัสดุประกอบประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP) กำลังได้รับความนิยมเพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมต่างๆ ได้มากมาย แต่สำหรับงานสะพานทางด้านวิศวกรรมโยธา วัสดุประกอบประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยนี้ได้เป็นวัสดุทางเลือกหนึ่งสำหรับผลิตเป็นแผ่นพื้นสะพาน (ProDeck 4 ProDeck 8)

เพื่อใช้ทดแทนแผ่นพื้นสะพานชนิดคอนกรีตเสริมเหล็กดั้งเดิม สืบเนื่องมาจากวัสดุดังกล่าวมีข้อดีที่เหนือกว่าวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิมอยู่หลายประการ เช่น 1) อัตราส่วนของกำลังต้านทานต่อหน่วยน้ำหนักที่สูง 2) ทนการผุกร่อนได้ดี 3) สามารถผลิตแยกเป็นชิ้นส่วนได้ 4) น้ำหนักเบา ง่ายต่อการขนย้ายและการติดตั้ง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า นักวิจัยได้ให้ความสนใจและทำการศึกษเกี่ยวกับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ เสริมกำลังด้วยเส้นใย โดยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาโดยทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลในห้องปฏิบัติการ รวมไปถึงการออกไปทดสอบภาคสนามกับตัวสะพานจริงเพื่อวิเคราะห์หาพฤติกรรมของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยนี้ ในปี ค.ศ.2003 Chandrashekar Jinka [2] ได้ทำการศึกษาผลการตอบสนองของแผ่นพื้นสะพานชนิดพอลิเมอร์ เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการเปลี่ยนรูปที่เกิดจากการสั่น (Mode Shape) ของแผ่นพื้นสะพานชนิด ProDeck 8 ในห้องปฏิบัติการทดลอง และในปีเดียวกันนั้น Chandrashekar Jinka ทำการทดสอบภาคสนามโดยมีสะพานที่ใช้ทดสอบ 3 สะพานคือ Katy Truss Bridge , Market Street Bridge และ Laurel Lick Bridge ที่ เวสต์เวอร์จิเนีย เพื่อทำการวัดค่าความเครียดสูงสุดทางสถิตศาสตร์ (ϵ_{stat}) และความเครียดสูงสุดทางพลศาสตร์ (ϵ_{dyn}) โดยใช้รถบรรทุกวิ่งผ่านบนสะพานนำค่าความเครียดที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่าตัวคูณประกอบกำลังทางพลศาสตร์ตามทฤษฎี ถัดมาอีกสองปี (ค.ศ.2005) Daly และ Cuninghame [3] ได้ทำการทดสอบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (FRP) อย่างเต็มรูปแบบ ภายใต้การกระทำของน้ำหนักล้อแบบสถิตย์และน้ำหนักของล้อรถที่มีการเคลื่อนที่ผ่านบนแผ่นพื้นสะพาน ในห้องปฏิบัติการ พวกเขาพบว่า แผ่นพื้นสะพาน FRP สามารถต้านทานแรงจากล้อรถยานพาหนะได้เป็นเวลาอย่างน้อย 30 - 40 ปี โดยไม่มีความเสียหายต่อโครงสร้าง แต่ก็ควรมีการป้องกันความเสียหายที่มาจากกระทำในรูปแบบอื่นๆ ไปด้วย เช่น บริเวณส่วน เหว ส่วนปีก หรือที่รองรับของสะพาน ถัดมาในปี ค.ศ. 2006 Srinivas Aluri [4] ได้ทำทดลองและพัฒนาแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วชนิด ProDeck4 โดยทำการทดสอบและวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการเปลี่ยนรูปเนื่องจากการสั่น (Mode Shape) ที่เกิดขึ้นกับแผ่นพื้นสะพานเมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือนทางพลศาสตร์ ในปีถัดมา ค.ศ. 2007 Zhang และ Cai [5] ได้ศึกษาการกระจายน้ำหนักและการตอบสนองแบบ พลศาสตร์ (Dynamic) ของสะพานชนิดหลายคานที่มีประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (FRP) และแผ่นพื้นแบบคอนกรีต พวกเขาพบว่า ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) และการตอบสนองทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นสะพาน FRP มีค่ามากกว่าเมื่อ

เทียบกับแผ่นพื้นสะพานคอนกรีต ต่อมาในปี ค.ศ.2009 Pongsak Sookmanee [6] ได้ทำการวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้งชนิด ProDeck 4 และ ProDeck 8 เพื่อหาค่าพิกัดทางสถิตศาสตร์และได้นำเสนอค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) เพื่อใช้ในการออกแบบสะพาน และในปี ค.ศ.2010 Jing Song [7] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของสะพานบอยเยอร์ในรัฐเพนซิลวาเนีย ที่มีแผ่นพื้นชนิดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (FRP) ใช้การทดสอบโดยการทำให้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ (ABAQUS) และใช้น้ำหนักจากรถบรรทุกวิ่งผ่านเพื่อจะวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน หาค่าระยะการโก่งตัวและความเครียดของคานที่อยู่ช่วงตรงกลางของสะพานเพื่อเปรียบเทียบกับค่าทางสถิตศาสตร์ และยังได้อธิบายผลกระทบจากแรงเฉือนที่เกิดจากการตอบสนองทางพลศาสตร์

จะเห็นได้ว่าการศึกษาโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขยังมีไม่มากเมื่อเทียบกับการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการและในงานภาคสนาม ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เพื่อทำการศึกษานำเสนอพฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิด ProDeck 4 และ ProDeck 8 โดยทำการวิเคราะห์ผ่านกระบวนการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการสั่น (Mode Shape) ที่เกิดขึ้นกับแผ่นพื้นสะพานทั้งสองชนิด

3. แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

แผ่นพื้นสะพานที่ได้นำมาศึกษาชื่อทางการค้าว่า ProDeck 4 (low profile) และ ProDeck 8 (high profile) ทั้ง 2 ชนิดนี้จะถูกผลิตโดยกระบวนการ Pultrusion ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติส่งผลให้แผ่นพื้นสะพานที่ผลิตขึ้นมีคุณสมบัติเชิงกลได้ตามที่ต้องการ

รายละเอียดโดยทั่วไปสำหรับแผ่นพื้นสะพาน ProDeck 4 ประกอบด้วยเซลล์สี่เหลี่ยม 3 เซลล์ โดยมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือแผ่นตั้ง (web) และปีก (Flange) ถูกผลิตขึ้นโดยมีอัตราส่วนปริมาตรของเส้นใยแก้วประเภทอี (E-glass Fiber) ประมาณ 50% มีการจัดเรียงตัวกันของเส้นใยในแบบสามทิศทาง มีการถักทอของชั้นลามิเนต CDBM 3415 และ DDBM 4015 โดยมี Yield Roving ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานเข้าด้วยกัน

สำหรับแผ่นพื้นสะพาน ProDeck 8 มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือแผ่นตั้ง (web) , ปีก (Flange) และแผ่นเฉียง (Diagonal) ถูกผลิตขึ้นโดยมีอัตราส่วนปริมาตรของเส้นใยแก้วประเภทอี (E-glass Fiber) ประมาณ 54% มีการจัดเรียงตัวกันของเส้นใยทั้งสองและสามทิศทาง มีการถักทอของชั้นลามิเนต CDBM 3415 และ CDB 400 โดยมี Yield Roving ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานเช่นกัน ซึ่งรูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางของการเรียงตัวของชั้นลามิเนตของพื้นสะพานทั้งสองชนิดดังแสดงในตารางที่ 2

4. คุณสมบัติของวัสดุ

ในการสร้างแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่สำคัญไม่ได้คือคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำแบบจำลอง นั่นคือคุณสมบัติของเส้นใยที่ถักทอเป็นชั้นๆของแผ่นลามิเนต โดยคุณสมบัติดังกล่าวได้คำนวณโดยใช้กฎของการผสม (Rule of Mixture) ซึ่งประกอบไปด้วย โมดูลัสยืดหยุ่น (E_{11} และ E_{22}) โมดูลัสของการเฉือนในระนาบ (G_{12}) และอัตราส่วนปัวซอง (ν_{12}) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนต

FRP Deck	Laminate	E_{11}	E_{22}	G_{12}	ν_{12}
ProDeck 4	CDBM 3415	0.384	0.094	0.047	0.27
	DDBM 4015	0.388	0.095	0.046	0.28
	Roving	0.424	0.104	0.025	0.28
ProDeck 8	CDBM 3415	0.338	0.058	0.024	0.26
	CDB 400	0.359	0.061	0.029	0.26
	Roving	0.345	0.059	0.024	0.26

* หมายเหตุ : E_{11} E_{22} G_{12} มีหน่วยเป็น $\times 10^6$ ksc

5. การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

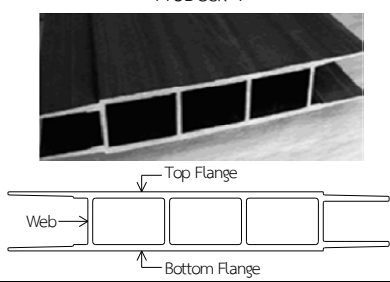
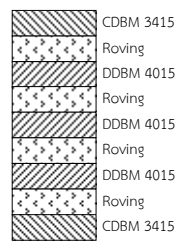
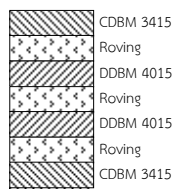

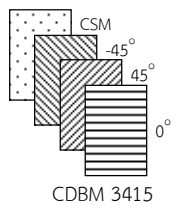
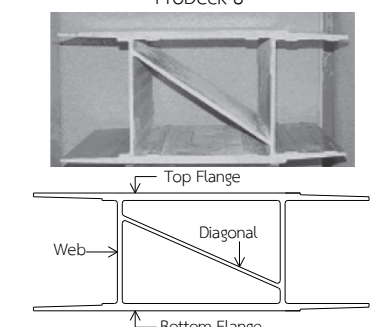
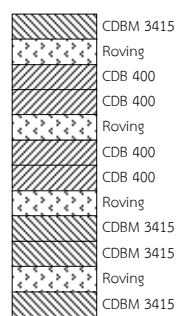
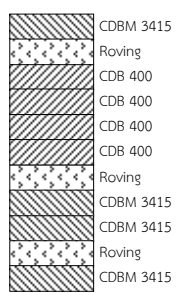
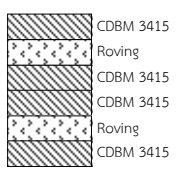
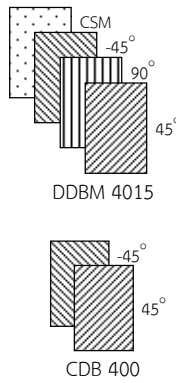
การสร้างแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (FRP Deck) จะใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์เลือกใช้อิเลเมนต์ชนิด SHELL93 เพราะในแต่ละอิเลเมนต์จะประกอบไปด้วย 8 Node และสามารถใส่ความหนาที่ Node ทั้ง 4 มุมของแต่ละอิเลเมนต์ได้ คุณสมบัติของอิเลเมนต์เป็นแบบอโรทอปิกและแรงเฉือนตามขวางมีค่าคงที่ตามความหนาของชั้นลามิเนต การสร้างแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานทั้ง ProDeck 4 และ ProDeck 8 เพื่อหาค่าความถี่และรูปแบบการเปลี่ยนรูปเนื่องจากการสั่นทางพลศาสตร์ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ

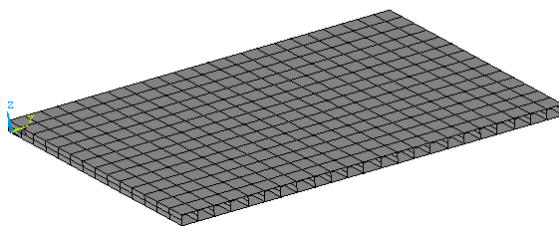
สำหรับแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพานชนิด ProDeck 4 นั้นจะถูกจำลองให้สอดคล้องกับแบบจำลองในห้องปฏิบัติการของ Aluri (2006) [4] โดยใช้พื้นสะพาน ProDeck 4 จำนวน 6 ชิ้นมาต่อกันเป็นแผ่นพื้นใหญ่ขนาด กว้าง 350 cm ยาว 250 cm ขวานด้วยเชือกติดกับคานเหล็กดังแสดงในรูป 1 และทำการสร้างแบบจำลองโดยแบ่ง Mesh เป็นอิเลเมนต์สี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2



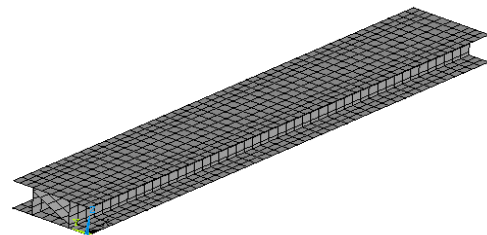
รูปที่ 1 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแผ่นพื้นสะพาน ProDeck 4 (Aluri , 2006) [4]

ตารางที่ 2 รูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางการวางชั้นลามิเนต

FRP Deck	Laminate			Stacking Sequence
	Flange	Web	Diagonal	
<p>ProDeck 4</p> 				
<p>ProDeck 8</p> 				

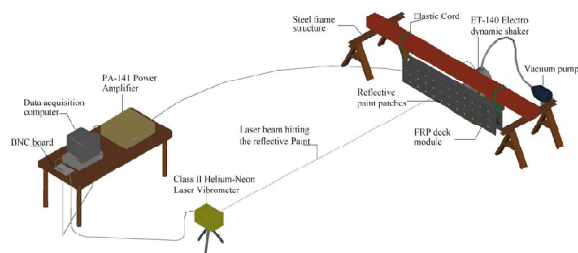


รูปที่ 2 แบบจำลองแผ่นพื้นสะพาน ProDeck 4 ด้วยโปรแกรม ANSYS



รูปที่ 4 แบบจำลองแผ่นพื้นสะพาน ProDeck 8 ด้วยโปรแกรม ANSYS

สำหรับแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพานชนิด ProDeck 8 จะถูกจำลองให้สอดคล้องกับแบบจำลองในห้องปฏิบัติการของ Jinka (2003) [2] โดยใช้พื้นสะพาน ProDeck 8 จำนวน 1 ชั้นมีความยาว 366 cm ยึดปลายทั้งสองด้านด้วยท่อเหล็กและแขวนติดกับคานเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3 และทำการสร้างแบบจำลองโดยแบ่ง Mesh เป็นอิลิเมนต์สี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือการทดสอบแผ่นพื้นสะพาน ProDeck 8 (Jinka , 2003) [2]

6. ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Prodeck4 & Prodeck8

จากการวิเคราะห์แบบ Modal Analysis โดยเลือกใช้วิธี block Lanczos method เพื่อหาค่าความถี่ (Frequency) และรูปแบบการสั่น (Mode Shape) ที่เกิดขึ้นกับแผ่นพื้นสะพานทั้งสองชนิด

6.1 ค่าความถี่ (Frequency)

ตารางที่ 3 ค่าความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง ProDeck 4 และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

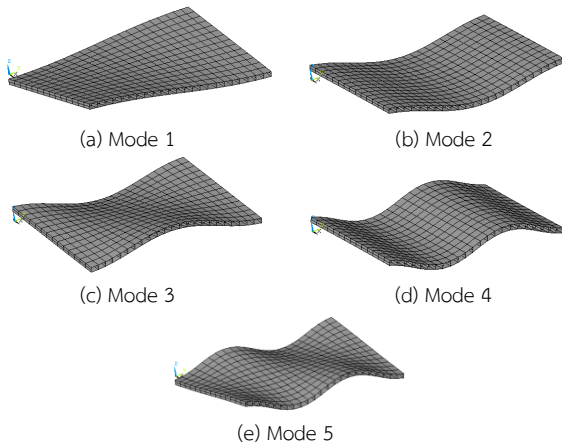
Mode	FE Model Freq (Hz)	Exp Freq (Hz) (Aluri , 2003)
1	16.35	21.37
2	24.64	22.79
3	34.03	38.96
4	39.32	41.54
5	51.98	57.16

ตารางที่ 4 ค่าความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง ProDeck 8 และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

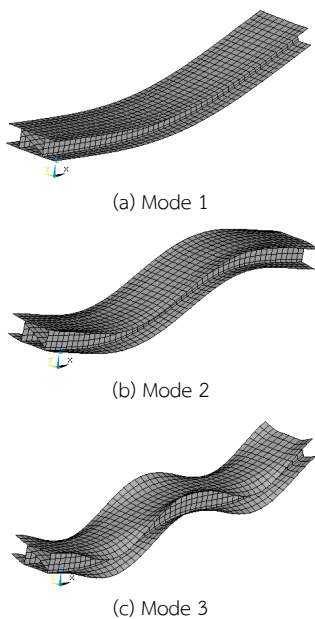
Bending Mode	FE Model Freq (Hz)	Exp Freq (Hz) (Jinka , 2003)	Theory Freq (Hz)
1	78.93	74.29	73.21
2	202.96	199.50	203.74
3	351.33	361.50	399.03

6.2 รูปแบบการสั่น (Mode Shape)

รูปแบบการสั่นของแผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 4 ที่เกิดขึ้นทั้ง 5 รูปแบบนั้น มีผลเนื่องมาจากการดัด (Bending) และการบิด (Torsion) ดังแสดงในรูปที่ 5a-5e แต่สำหรับรูปแบบการสั่นของแผ่นพื้นสะพานชนิด Prodeck 8 ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 รูปแบบนั้น จะมีผลเนื่องมาจากการดัด (Bending) เพียงอย่างเดียวดังแสดงในรูปที่ 6a-6c



รูปที่ 5 รูปแบบการสั่นใน Mode ที่ 1-5 ของแผ่นพื้นสะพานชนิด ProDeck 4



รูปที่ 6 รูปแบบการสั่นเนื่องจากผลของ Bending Mode ที่ 1 - 3 ของแผ่นพื้นสะพานชนิด ProDeck 8

จากผลการวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานทั้งสองกรณีพบว่า ในกรณีของแผ่นพื้นสะพานชนิด ProDeck 4 ค่าความถี่ในแต่ละโหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มต่ำกว่าผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลจากความแตกต่างนี้อาจจะส่งผลมาจากคุณสมบัติเชิงกลที่มีการเปลี่ยนแปลงตรงบริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นพื้นสะพาน ProDeck4 ด้วยกัน เพราะแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบพื้นสะพานชนิด ProDeck 4 นี้ประกอบไปด้วยพื้นสะพาน ProDeck 4 จำนวน 6 ชิ้นมาต่อกันเป็นแผ่นพื้นขนาดใหญ่ สำหรับกรณีของแผ่นพื้นสะพานชนิด ProDeck 8 ที่มีแบบจำลองเพียงชิ้นเดียว จึงทำให้ค่าความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าออกมาใกล้เคียงกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและทฤษฎี

7. สรุป

จากผลการวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทั้งชนิด ProDeck 4 และ ProDeck 8 เพื่อหาค่าความถี่และรูปแบบการสั่นของแผ่นพื้นสะพาน พบว่าพฤติกรรมและการตอบสนองทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นสะพานมีค่าสอดคล้องกันดีกับผลการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการทดลองและทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องจากอยู่ในช่วงแรกของงานวิจัย การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้ได้ความแม่นยำและดำเนินการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ตัวคูณประกอบกำลังทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance , DLC) ซึ่งจะถูกนำเสนอในลำดับถัดไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Howard, I., (2002), "Development of Lightweight FRP Bridge Deck Designs and Evaluations," Master's Thesis, Department of Civil Engineering, West Virginia University, Morgantown.
- [2] Jinka, C.S., (2003). "Dynamic Response Evaluation of Fiber Reinforced Composite Bridge Decks and Bridges". Thesis submitted to the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University
- [3] Daly, A.F., Cuninghame, J.R., (2005). "Performance of a fibre-reinforced polymer bridge deck under dynamic wheel loading". Composites: Part A; 37:1180-1188.
- [4] Aluri, S., (2006). "Updating Low-Profile FRP Deck model using Experimental modal Analysis". Thesis submitted to the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University
- [5] Zhang, Y., Cai, C., (2007). "Load distribution and dynamic response of multi-girder bridges with FRP decks". Engineering Structures; 29:1676
- [6] Sookmanee, P., Prachasaree, W., (2009). "Finite Element Analysis of Light weight FRP bridge deck composites", The 14th national convention on civil engineering
- [7] Song, J., (2010). "Dynamic characteristics of an FRP deck bridge", Master's Thesis, University of Tennessee

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์ ข

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19
(19th National Convention on Civil Engineering , NCCE19)
ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออรัลคิด 14-16 พฤษภาคม 2557



การประเมินค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สำหรับระบบสะพานประเภท
แผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก

Evaluation of Dynamic Load Allowance
for Steel Stringer-FRP Deck Bridge System

อรรถพล แสงแก้ว^{1*} วรพจน์ ประชาเสรี² และ สุชาติ ลิ้มกัตัญญ์³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือการประเมินค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์สำหรับระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็กโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแบบจำลองสะพานประเภทนี้จะถูกตรวจสอบภายใต้เงื่อนไขต่างๆจากน้ำหนักของรถบรรทุก ซึ่งในการศึกษานี้มี 4 ตัวแปรหลักที่สนใจ คือ ช่วงความยาวของสะพาน จำนวนคานเหล็กที่รองรับแผ่นพื้นสะพาน จำนวนรถบรรทุก และความเร็วของรถบรรทุก ผลของค่าการคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองระบบสะพานประเภทนี้จะถูกนำเสนอและเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากการทดสอบภาคสนาม และข้อกำหนดตามมาตรฐานทั่วไป

คำสำคัญ: แผ่นพื้นสะพาน, พอลิเมอร์, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

The aim of the research is to evaluate the dynamic load allowance for steel stringer-FRP deck bridge system using finite element analysis. The dynamic behavior of the steel stringer-FRP deck bridge models were investigated under various truck loading conditions. In this study, there are four main parameters as: bridge span, numbers of steel stringers, numbers of trucks and truck velocities. The dynamic load allowance results were proposed and compared with those obtained from field tests and standard codes.

Keywords: Bridge Deck, Fiber Reinforced Polymer, Finite Element

1. คำนำ

ในปัจจุบันวัสดุประกอบประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Composite Materials, FRP) เป็นที่ได้รับความนิยมเพิ่มสูงขึ้นจากผู้ใช้งานด้านการออกแบบทางวิศวกรรม สืบเนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีคุณสมบัติหลายประการที่ดีกว่าวัสดุดั้งเดิมทางวิศวกรรม (Conventional Engineering Materials) เช่น 1) อัตราส่วนของกำลังต้านทานต่อหน่วยน้ำหนักที่สูง 2) ทนการผุกร่อนได้ดี 3) สามารถผลิตแยกเป็นชิ้นส่วนได้ และ 4) น้ำหนักเบาซึ่งต่อการขนย้ายและการติดตั้ง สำหรับงานสะพานทางด้านการโยธา วัสดุประกอบประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยนี้เป็นวัสดุทางเลือกชนิดหนึ่งเพื่อใช้ผลิตเป็นแผ่นพื้นของสะพาน (Prodeck 4)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีนักวิจัยให้ความสนใจและทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบสะพานที่มีแผ่นพื้นประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย โดยเริ่มต้นในปี ค.ศ.1983 กรมทางหลวงแห่งสหรัฐอเมริกา (The US Department of Transportation) ได้มีการศึกษาค้นคว้างานวิจัยทางด้านโครงสร้างของสะพาน ภายใต้ชื่อโครงการว่า “Transfer of Composite Technology to Design and Construction of Bridges” ซึ่งโครงการดังกล่าว นับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาและทำการวิจัยแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย โดยการศึกษาในยุคสมัยนั้นยังเป็นเพียงการทดสอบและวิเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งข้อจำกัดนี้ส่งผลให้นักวิจัยไม่สามารถทำการศึกษาในสภาวะการใช้งานตามสภาพแวดล้อมจริงได้ ต่อมาในปี ค.ศ.2003 Jimka [1] ทำการทดสอบภาคสนามโดยมีสะพานที่ใช้ทดสอบ 3 สะพานคือ Katy Truss Bridge , Market Street Bridge และ Laurel Lick Bridge ที่เวสต์เวอร์จิเนีย เพื่อทำการวัดค่า ความเครียดสูงสุดทางสถิตศาสตร์ (\mathcal{E}_{stat}) และความเครียดสูงสุดทางพลศาสตร์ (\mathcal{E}_{dyn}) โดยใช้รถบรรทุกวิ่งผ่านบนสะพานนำค่า

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: attpon_sangkaew@hotmail.com

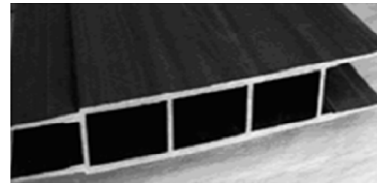
ความเครียดที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่าตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance, DLA) ตามทฤษฎี ในปี ค.ศ. 2006 Zhang และ Cai [2] ได้ศึกษาการกระจายน้ำหนักและการตอบสนองแบบพลศาสตร์ ของสะพานชนิดหลายคานที่มีประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP) และแผ่นพื้นเป็นคอนกรีตขึ้นอยู่กับรูปแบบของสะพาน พวกเขาพบว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) และการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน FRP มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับสะพานคอนกรีต และเปรียบเทียบระหว่างสะพานที่มีส่วนประกอบเป็น FRP ทั้งหมด กับสะพานที่มีส่วนประกอบเป็น FRP เพียงบางส่วน พบว่าสะพานที่มีส่วนประกอบเป็น FRP เพียงบางส่วนสามารถรับการกระจายน้ำหนักได้ดีกว่า และยังมีภาระที่น้อยกว่าอีกด้วย นอกจากนี้พวกเขาก็ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับปัจจัยความขรุขระของผิวถนนและความเร็วของยานพาหนะ พบว่าปัจจัยทั้งสองนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการตอบสนองทางพลศาสตร์ ในปีถัดมา ค.ศ.2007 Albers และคณะ [3] ก็ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ ของสะพาน Bentley ที่มีแผ่นพื้นสะพานแบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (FRP) เช่นกัน โดยได้ทำแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิเคราะห์หาค่า ความเค้น เพื่อเปรียบเทียบกับทดสอบจริง หาค่าความถี่เปรียบเทียบระหว่างแผ่นพื้นแบบคอนกรีต กับแผ่นพื้นชนิดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และหาค่า การโก่งตัวของสะพาน ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า การโก่งตัวของสะพาน จะเพิ่มขึ้น 45% เมื่อทำการเปลี่ยนจากแผ่นพื้นคอนกรีตมาเป็นแผ่นพื้นชนิดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว แต่ไม่ส่งผลต่อรูปแบบของการคดตัวของสะพาน

จะเห็นได้ว่าการศึกษาโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขยังมีไม่มากเมื่อเทียบกับการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการและในงานภาคสนาม ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ของระบบสะพานที่มีแผ่นพื้นประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยรองรับด้วยคานเหล็ก โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

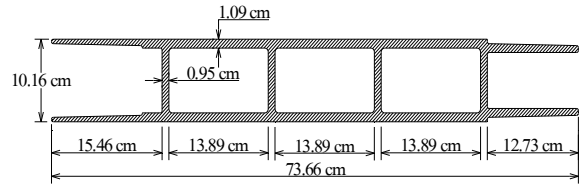
2. แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

แผ่นพื้นสะพานที่ได้นำมาศึกษามีชื่อทางการค้าว่า ProDeck 4 (low profile) จะถูกผลิตโดยกระบวนการ Pultrusion ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติ ส่งผลให้แผ่นพื้นสะพานที่ผลิตขึ้นมีคุณสมบัติเชิงกลได้ตามที่ต้องการ

รายละเอียดโดยทั่วไปสำหรับแผ่นพื้นสะพาน ProDeck 4 ประกอบด้วยเซลล์สี่เหลี่ยม 3 เซลล์ โดยมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือแผ่นตั้ง (Web) และแผ่นนอน (Flange) ความกว้างและความสูงของหน้าตัดแผ่นพื้นเท่ากับ 73.66 เซนติเมตร และ 10.16 เซนติเมตรตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 แผ่นพื้นชนิดนี้ถูกผลิตขึ้นโดยมีอัตราส่วนปริมาตรของเส้นใยแก้วประเภทอี (E-glass Fiber) ประมาณ 50% มีการจัดเรียงตัวกันของเส้นใยในแบบสามทิศทาง มีการถักทอของชั้นลามิเนต CDBM 3415 และ DDBM 4015 โดยมี Yield Roving ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานเข้าด้วยกัน ซึ่งรูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางของการเรียงตัวของชั้นลามิเนตของแผ่นพื้นสะพานชนิด ProDeck 4 นี้แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 แผ่นพื้นสะพานชนิด ProDeck 4 จำนวน 1 ชั้น (Prachasree, 2004) [4]



รูปที่ 2 รายละเอียดหน้าตัดของแผ่นพื้นสะพานชนิด ProDeck 4

ตารางที่ 1 รูปแบบทางสถาปัตยกรรมและทิศทางของชั้นลามิเนต

ชั้นลามิเนต	
แผ่นนอน (Flange)	แผ่นตั้ง (Web)
CDBM 3415	CDBM 3415
Roving	Roving
DDBM 4015	DDBM 4015
Roving	Roving
DDBM 4015	DDBM 4015
Roving	Roving
DDBM 4015	CDBM 3415
Roving	
CDBM 3415	
ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยในชั้นลามิเนต	
CDBM 3415	DDBM 4015

3. คุณสมบัติของวัสดุ

ในการสร้างแบบจำลองของสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่เราไม่ได้คือคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำแบบจำลอง

3.1 คุณสมบัติเชิงกลของชั้นลามิเนต

คุณสมบัติเชิงกลของชั้นลามิเนตที่กล่าวถึงนั้นคือคุณสมบัติของเส้นใยแก้วที่ถักทอเป็นชั้นๆ อยู่ในแผ่นลามิเนต โดยคุณสมบัติดังกล่าวได้คำนวณโดยใช้กฎของการผสม (Rule of Mixture) ซึ่งประกอบไปด้วย โมดูลัสยืดหยุ่น (E_{11} และ E_{22}) โมดูลัสของการเฉือนในระนาบ (G_{12}) และอัตราส่วนปริมาตร (V_{12}) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงกลของลามิเนต

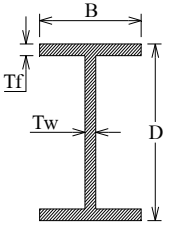
แผ่นพื้น	ลามิเนต	E_{11}	E_{22}	G_{12}	ν_{12}
	CDBM 3415	0.384	0.094	0.047	0.27
Prodeck 4	DDBM 4015	0.388	0.095	0.046	0.28
	Roving	0.424	0.104	0.025	0.28

*หมายเหตุ : E_{11} E_{22} G_{12} มีหน่วยเป็น $\times 10^6$ ksc

3.2 คุณสมบัติเชิงกลของคานที่รองรับ

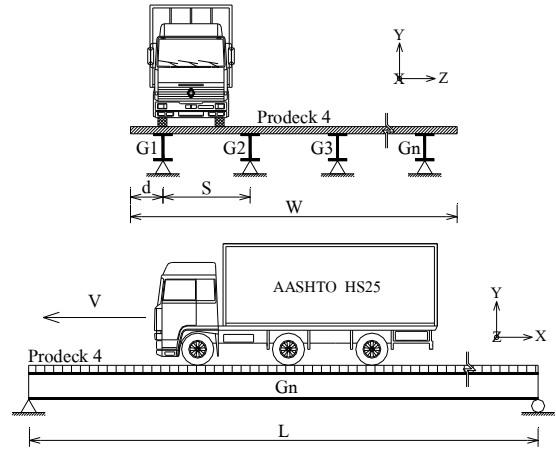
สำหรับแบบจำลองของคานเหล็กที่รองรับแผ่นพื้นสะพาน เลือกใช้คานเหล็ก (H-beam) ชนิด W36×150 ซึ่งประกอบไปด้วย ความสูง (D) ความกว้าง (B) ความหนาของปีก (Tf) ความหนาของเอว (Tw) โมดูลัสยืดหยุ่น (E) ความหนาแน่น (ρ) และอัตราส่วนปัวซอง (ν) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติเชิงกลของคานเหล็กชนิด W36×150

	D (cm)	91.03
	B (cm)	30.40
	Tf (cm)	2.39
	Tw (cm)	1.59
	E (ksc)	2.04×10^6
	ρ (kg/m ³)	7850
W36 × 150	ν	0.3

4. ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง

แบบจำลองของสะพานทั้งระบบจะถูกสร้างขึ้นโดยการวางตัวในแนวราบ ไม่ทำให้เกิดมุมเอียง (Non-Skew Angle) เป็นสะพานช่วงเดียว (Single Span) มีจุดรองรับแบบง่าย (Simply support) ที่ประกอบไปด้วยระบบแผ่นพื้นและคานเหล็ก ซึ่งมีตัวแปรหลักที่ได้ทำการศึกษาเพื่อหาค่าตัวคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ได้แก่ 1) ช่วงความยาวของสะพาน (L) จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงความยาวคือ 12 เมตร และ 18 เมตร 2) ความกว้างของหน้าตัดสะพาน (W) มีความกว้างช่วงเดียว คือ 9.14 เมตร หรือสองช่องจราจร 3) ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ(S) แบ่งออกเป็น 2.24 เมตร (4 คานเหล็ก) 1.83 เมตร (5 คานเหล็ก) และ 1.22 เมตร (7 คานเหล็ก) 4) จำนวนรถบรรทุก (NT) แบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีแรกให้รถบรรทุกหนึ่งคันวิ่งทิศทางเดียว (↑) กรณีที่สองให้รถบรรทุกสองคันวิ่งขนานกันไปทิศทางเดียว (↑↑) กรณีที่สามให้รถบรรทุกสองคันวิ่งสวนทิศทางกัน (↑↓) และ 5) ความเร็วของรถบรรทุก (V) แบ่งออกเป็นสองกรณีคือ กรณีแรกรถบรรทุกจอดนิ่งอยู่กับที่ เพื่อหาค่าการโก่งตัวสูงสุด (Deflection) และค่าความเครียดสูงสุด (Strain) ทางสถิตศาสตร์ของระบบสะพาน และกรณีที่สองรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 40 60 80 และ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (ความเร็วเป็นศูนย์) เพื่อหาค่าการโก่งตัวสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุดทางพลศาสตร์ของระบบสะพาน เพื่อความเข้าใจมากขึ้นจึงขอสรุปตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดไว้ดังแสดงในรูปที่ 3 และตารางที่ 4



รูปที่ 3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับหน้าตัดของแบบจำลองระบบสะพาน

ตารางที่ 4 กรณีศึกษาภายใต้การเปลี่ยนตัวแปรที่ทำการศึกษา

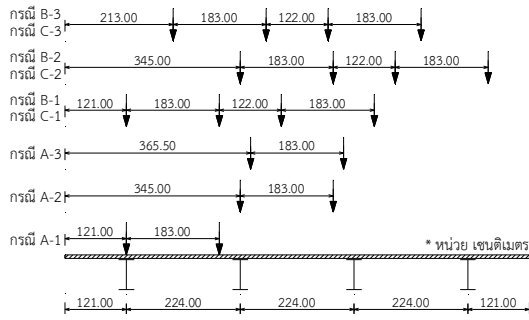
สัญลักษณ์	W	L	Gn	S	d	จำนวน
	เมตร	เมตร		เมตร	เมตร	รถ (NT)
P4 G4 L12-A						1 คัน ↑
P4 G4 L12-B	9.14	12	4	2.24	1.21	2 คัน ↑↑
P4 G4 L12-C						2 คัน ↑↓
P4 G5 L12-A						1 คัน ↑
P4 G5 L12-B	9.14	12	5	1.83	0.91	2 คัน ↑↑
P4 G5 L12-C						2 คัน ↑↓
P4 G7 L12-A						1 คัน ↑
P4 G7 L12-B	9.14	12	7	1.22	0.91	2 คัน ↑↑
P4 G7 L12-C						2 คัน ↑↓
P4 G4 L18-A						1 คัน ↑
P4 G4 L18-B	9.14	18	4	2.24	1.21	2 คัน ↑↑
P4 G4 L18-C						2 คัน ↑↓
P4 G5 L18-A						1 คัน ↑
P4 G5 L18-B	9.14	18	5	1.83	0.91	2 คัน ↑↑
P4 G5 L18-C						2 คัน ↑↓
P4 G7 L18-A						1 คัน ↑
P4 G7 L18-B	9.14	18	7	1.22	0.91	2 คัน ↑↑
P4 G7 L18-C						2 คัน ↑↓

5. ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกบนแบบจำลอง

แบบจำลองระบบสะพานที่นำเสนอในบทความนี้มีหน้าตัดของแบบจำลองแตกต่างกัน 6 แบบจำลอง เนื่องจากแต่ละแบบจำลองมีจำนวนคานเหล็กที่รองรับต่างกัน ไป ซึ่งแบ่งกลุ่มของแบบจำลองออกได้ดังนี้

5.1 สำหรับหน้าตัดสะพานที่รองรับด้วยคานเหล็ก 4 ตัว

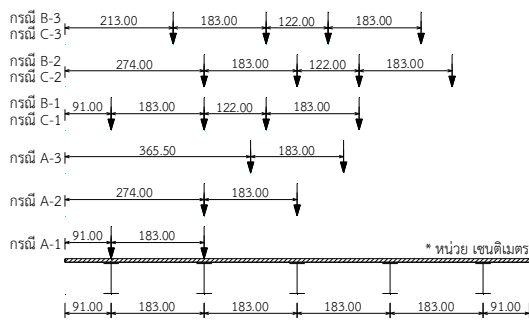
สัญลักษณ์แบบจำลอง P4 G4 L12 และ P4 G4 L18 มีตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกของระบบสะพานมีคานรองรับ 4 ตัว

5.2 สำหรับหน้าตัดสะพานที่รองรับด้วยคานเหล็ก 5 ตัว

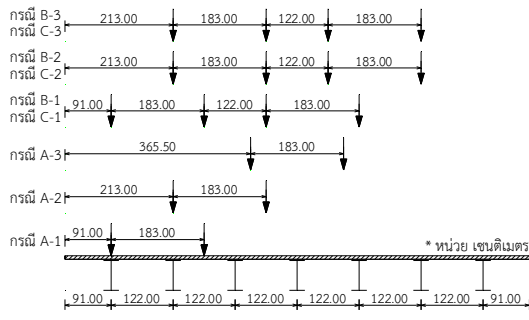
สัญลักษณ์แบบจำลอง P4 G5 L12 และ P4 G5 L18 มีตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกของระบบสะพานมีคานรองรับ 5 ตัว

5.3 สำหรับหน้าตัดสะพานที่รองรับด้วยคานเหล็ก 7 ตัว

สัญลักษณ์แบบจำลอง P4 G7 L12 และ P4 G7 L18 มีตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกของระบบสะพานมีคานรองรับ 7 ตัว

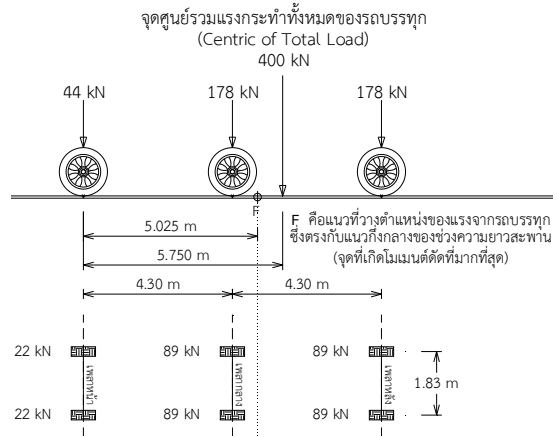
* คำอธิบายสำหรับสัญลักษณ์

- กรณี A คือ รถบรรทุกหนึ่งคันวิ่งทิศทางเดียว ↑
- กรณี B คือ รถบรรทุกสองคันวิ่งทิศทางเดียวกันไป ↑↑
- กรณี C คือ รถบรรทุกสองคันวิ่งสวนทิศทางกัน ↑↓

- 1 คือ น้ำหนักบรรทุกกระทำตรงคานตัวแรก
- 2 คือ น้ำหนักบรรทุกกระทำตรงคานตัวที่สอง
- 3 คือ น้ำหนักบรรทุกกระทำตรงกึ่งกลางของสะพาน

6. น้ำหนักบรรทุกที่ใช้บนแบบจำลอง

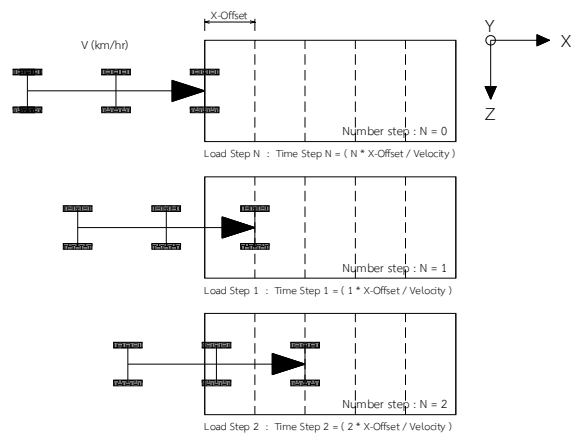
น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์กับแบบจำลองระบบสะพานในงานวิจัยนี้ เป็นน้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน AASHTO HS25 โดยรถบรรทุกชนิดนี้ประกอบไปด้วยเพลาลูก 3 เพลอ แต่ละเพลามีระยะห่างกัน 4.30 เมตร และทุกเพลามีความยาว 1.83 เมตรเท่ากัน เมื่อคาน้ำหนักบรรทุกของแต่ละล้อบนเพลอ พบว่า เพลอน้ำหนักบรรทุกรวมเท่ากับ 44 กิโลนิวตัน ถัดมาเพลากลางและเพลาลังมีน้ำหนักบรรทุกรวมในแต่ละเพลอเท่ากับ 178 กิโลนิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 7



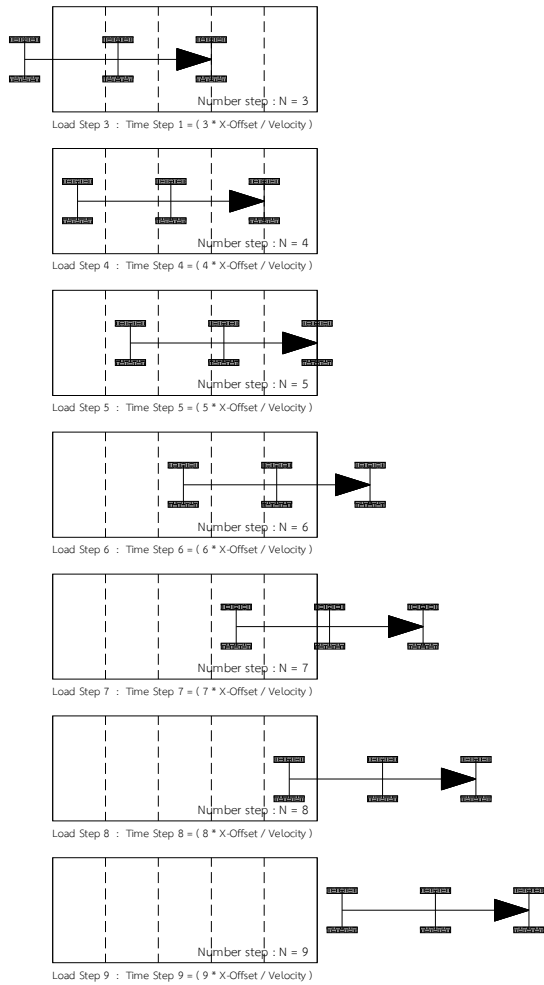
รูปที่ 7 แรงกระทำจากรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HS25

7. ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านบนแบบจำลองระบบสะพาน

การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในลักษณะที่มีแรงกระทำแบบการเคลื่อนที่ไปบนแบบจำลองของโปรแกรม ANSYS 9.0 นั้น ยังไม่มีฟังก์ชันหรือคำสั่งโดยตรงให้สามารถใส่ค่าข้อมูลลงไปได้อย่างง่าย จึงจำเป็นต้องมีการเขียนคำสั่งการใส่แรงในลักษณะนี้ขึ้นมาซึ่งงานเอง โดยใช้วิธีการใส่แรงแบบ Load Step ซึ่งคำสั่งนี้เป็นคำสั่งพื้นฐานของโปรแกรม โดยการวิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์นั้น จะกำหนดให้ตำแหน่งของแรงที่มากกระทำบนแบบจำลองเปลี่ยนไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้น (Transient) ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 (ต่อ)



รูปที่ 8 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกในช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 9 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกในช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป (ต่อ)

จากรูปที่ 8 และ รูปที่ 9 กำหนดให้ระยะที่รถเคลื่อนที่ผ่านไป (X-Offset) ในแต่ละช่วงของเวลามีระยะคงที่เสมอ แต่สิ่งที่ยื่นออกไปคือ ช่วงของเวลา ซึ่งหลักการนี้ทำให้สามารถกำหนดความเร็วของการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกได้ และจำนวน Load Step จะขึ้นอยู่กับช่วงความยาวของสะพาน

8. ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์

ค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Allowance , DLA) เป็นค่าที่ใช้คูณเพื่อขยายผลการตอบสนองพฤติกรรมทางพลศาสตร์ โดยมีการรวมผลจากการสั่นไหวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากแรงที่กระทำมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือทิศทางตามเวลา อีกทั้งมีลักษณะเป็นแรงกระแทก (Impact force) ซึ่งเกิดจากการกระทำของแรงต่อโครงสร้างสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 และ สมการที่ 2 นำเสนอโดย Bakht และ Pinjarkar [5]

$$DLA = \left(\frac{\delta_{dyn} - \delta_{stat}}{\delta_{stat}} \right) \quad (1)$$

เมื่อ δ_{dyn} คือ การโก่งตัวสูงสุดทางพลศาสตร์ของคานที่รองรับ

δ_{stat} คือ การโก่งตัวสูงสุดทางสถิตศาสตร์ของคานที่รองรับ

$$DLA = \left(\frac{\varepsilon_{dyn} - \varepsilon_{stat}}{\varepsilon_{stat}} \right) \quad (2)$$

เมื่อ ε_{dyn} คือ ความเครียดสูงสุดทางพลศาสตร์ของคานที่รองรับ

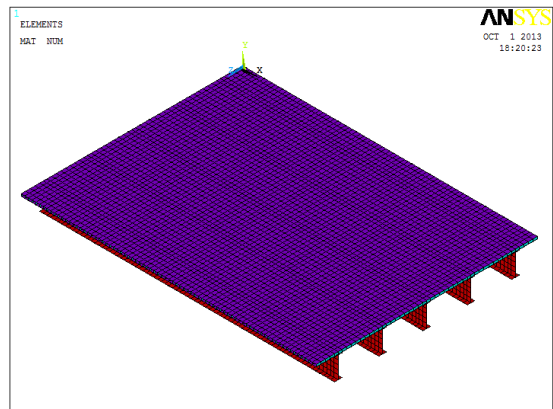
ε_{stat} คือ ความเครียดสูงสุดทางสถิตศาสตร์ของคานที่รองรับ

ซึ่งในปี 1983 Ontario Highway Bridge Design Code (OHBD 1983) [6] ได้มีข้อกำหนดให้กับค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DLA) ที่อยู่บนพื้นฐานความถี่การตัดตัวครั้งแรกของสะพาน จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 – 0.4 หรือคิดเป็น 20 – 40 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาในปี 1989 The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) [7] ได้กำหนดให้ค่า DLA ของระบบสะพานทั่วไปมีค่า 33 เปอร์เซ็นต์

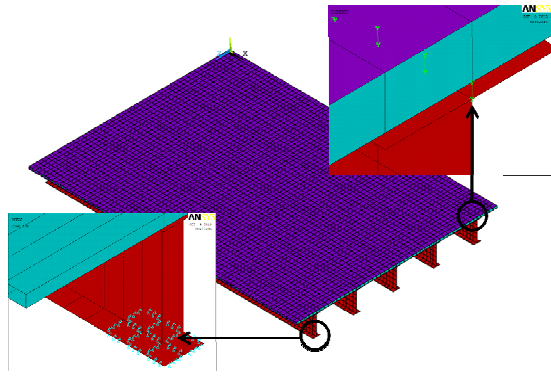
9. แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็ก

การสร้างแบบจำลองของระบบสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยและคานเหล็กเป็นที่ยอมรับ (Stringer-FRP Deck Bridge System) จะใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ โดยเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด SHELL93 เพราะในแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบไปด้วย 8 Node และสามารถใส่ความหนาที่ Node ทั้ง 4 มุมของแต่ละเอลิเมนต์ได้ ซึ่งเหมาะแก่วัสดุประกอบประเภทแผ่นบางหรือชนิดแผ่นลามิเนต โดยคุณสมบัติของเอลิเมนต์เป็นแบบออร์โทโทปิกและแรงเฉือนตามขวางมีค่าคงที่ตามความหนาของชั้นลามิเนต

แบบจำลองระดับระบบจะประกอบไปด้วยแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP Deck) และแบบจำลองของคานเหล็กรองรับ (Stringer) มาประกอบเข้าด้วยกัน เป็นแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบบางส่วน (Partial Composite) ดังแสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11 นำมาวิเคราะห์โดยทำการรับแรงจากน้ำหนักบรรทุก HS25 ในกรณีต่างๆตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา เพื่อวิเคราะห์หาค่าการโก่งตัวสูงสุด (Deflection) และ ค่าความเครียดสูงสุด (Strain) ที่เกิดขึ้นระหว่างกึ่งกลางคานที่รองรับในแต่ละตัว เพื่อนำมาคำนวณหาค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DLA) ตามสมการที่ 1 และสมการที่ 2



รูปที่ 10 ตัวอย่างแบบจำลองระดับระบบสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยรองรับด้วยคานเหล็ก 5 ตัว



รูปที่ 11 แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบบางส่วน (Partial Composite)

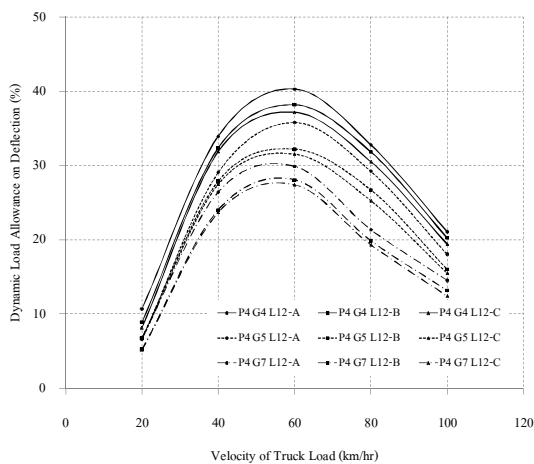
10. การประเมินค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์จากผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

10.1 อิทธิพลของจำนวนรถบรรทุกและตำแหน่งน้ำหนักกระทำที่มีผลต่อค่า DLA

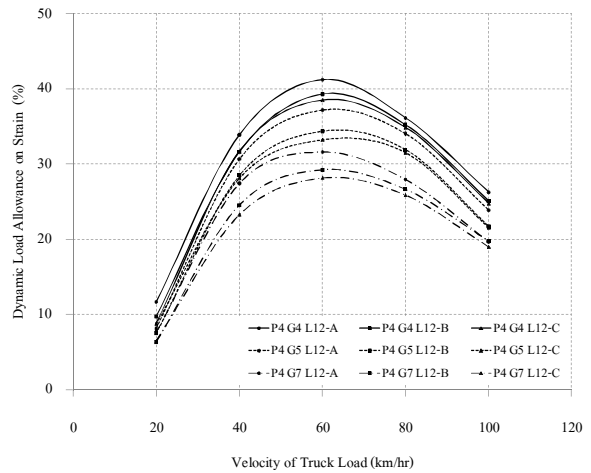
จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (DLA) จากการคำนวณบนพื้นฐานของการโค้งตัวมากที่สุดตั้งสมการที่ 1 และบนพื้นฐานของค่าความเครียดสูงสุดตั้งสมการที่ 2 จะมีค่ามากที่สุดเกิดขึ้นกับกรณีรถบรรทุกหนึ่งคันวิ่งตรงกับตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัดสะพาน ทุกแบบจำลอง (P4 G4 L12-A3, P4 G4 L18-A3, P4 G5 L12-A3, P4 G5 L18-A3, P4 G7 L12-A3, P4 G7 L18-A3)

10.2 อิทธิพลของความเร็วของรถบรรทุกที่มีผลต่อค่า DLA

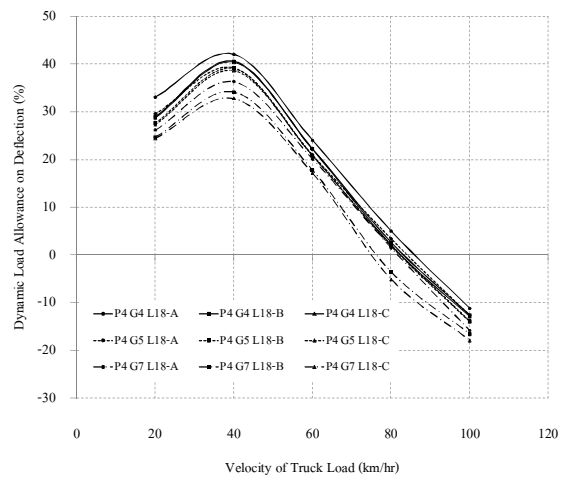
จากการวิเคราะห์พบว่า สำหรับแบบจำลองระบบสะพานที่มีช่วงความยาว 12 เมตรค่า DLA จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่านโดยใช้ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และสำหรับแบบจำลองระบบสะพานที่มีช่วงความยาว 18 เมตรค่า DLA จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่านโดยใช้ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ FHWA (1995) มีแนวโน้มไปทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 12, 13, 14, 15 และ 16



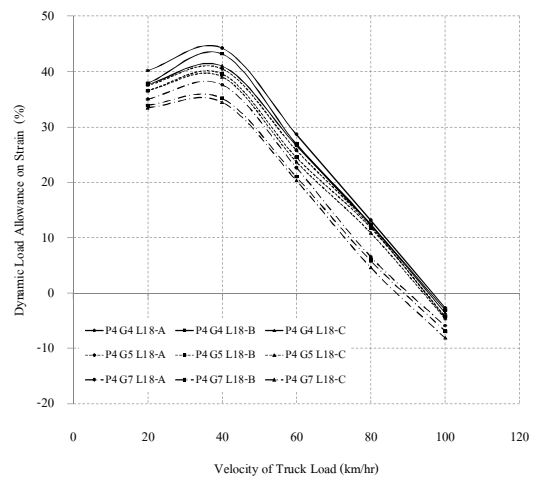
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA บนพื้นฐานของค่าการโค้งตัวที่มีผลต่อความเร็วของรถบรรทุก (ช่วงความยาวสะพาน 12 เมตร)



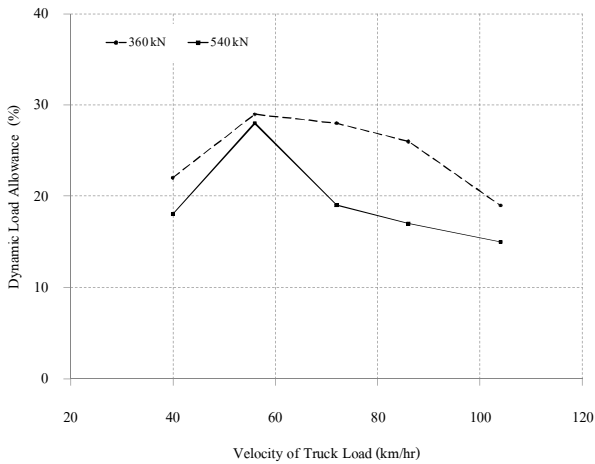
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA บนพื้นฐานของค่าความเครียดที่มีผลต่อความเร็วของรถบรรทุก (ช่วงความยาวสะพาน 12 เมตร)



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA บนพื้นฐานของค่าการโค้งตัวที่มีผลต่อความเร็วของรถบรรทุก (ช่วงความยาวสะพาน 18 เมตร)



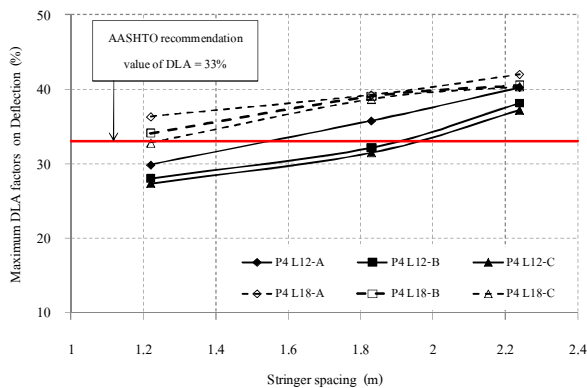
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA บนพื้นฐานของค่าความเครียดที่มีผลต่อความเร็วของรถบรรทุก (ช่วงความยาวสะพาน 18 เมตร)



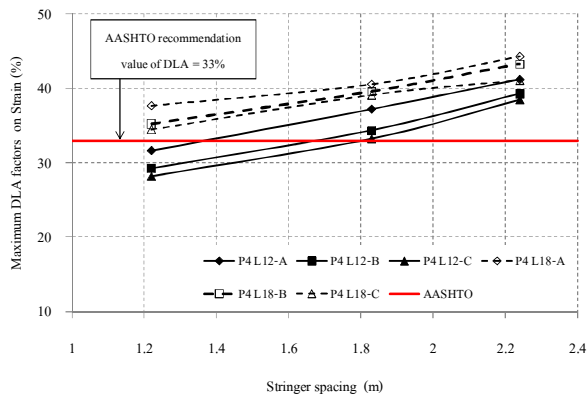
รูปที่ 16 แนวโน้มของค่า DLA จาก FHWA (1995) [8]

10.3 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างคานเหล็กที่รองรับที่มีผลต่อค่า DLA

จากการนำค่า DLA สูงที่สุดที่ได้จากหัวข้อ 10.2 มาวิเคราะห์พบว่า ค่า DLA มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างคานเหล็กที่รองรับลดลง นั่นคือ ระบบสะพานที่มีคานเหล็กที่รองรับ 4 ตัว จะมีค่า DLA สูงกว่า ระบบที่มีคานเหล็กที่รองรับ 5 ตัว และ 7 ตัวตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 17 และ 18



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA บนพื้นฐานของค่าการโก่งตัวที่มีผลต่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DLA บนพื้นฐานของค่าความเครียดที่มีผลต่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ

10.4 อิทธิพลของช่วงความยาวของระบบสะพานที่มีผลต่อค่า DLA

จากกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 17 และ 18 จะเห็นได้ว่าค่า DLA ที่คำนวณจากพื้นฐานค่าการโก่งตัวสูงสุดและความเครียดสูงสุดของคานเหล็กที่มีช่วงความยาว 18 เมตร มีค่าสูงกว่าค่า DLA ของคานเหล็กที่มีช่วงความยาว 12 เมตร

10.5 สรุปค่า DLA ที่ได้จากการวิเคราะห์

ค่า DLA ที่จะนำเสนอในหัวข้อนี้ เป็นค่าที่ได้จากค่า DLA สูงสุดในแต่ละกรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สรุปค่า DLA ที่ได้จากการวิเคราะห์

ประเภทสะพาน	ค่า DLA สูงสุด (%)	
	คำนวณจากค่าการโก่งตัว	คำนวณจากค่าความเครียด
P = Prodeck4		
G = จำนวนคาน		
L = ความยาวสะพาน		
P4 G4 L12	40.30	41.18
P4 G5 L12	35.80	37.18
P4 G7 L12	29.88	31.60
P4 G4 L18	42.02	44.30
P4 G5 L18	39.25	40.53
P4 G7 L18	36.33	37.62

10.6 เปรียบเทียบค่า DLA กับงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

สำหรับงานวิจัยการหาค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DLA) ของระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับด้วยคานเหล็กยังมีน้อยมาก ส่งผลให้ผลงานวิจัยที่ได้ออกมาในครั้งนี้นี้มีกลุ่มตัวอย่างให้ทำการเปรียบเทียบน้อย ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าดังแสดงในตารางที่ 6

11. สรุปผล

จากผลการวิเคราะห์ระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (ProDeck 4) ที่รองรับด้วยคานเหล็ก เพื่อประเมินหาค่าคูณเพิ่มทางพลศาสตร์ (DLA) จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า DLA มากที่สุดคือ ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก

เมื่อพิจารณาค่า DLA สูงสุดของแบบจำลองในแต่ละหน้าตัด จากตารางที่ 5 พบว่า ค่า DLA ที่ได้จากการคำนวณจากค่าการโก่งตัวสูงสุด จะอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของ OHBDC (1983) ซึ่งมีช่วงค่า DLA ตั้งแต่ 20-40% แต่เมื่อเทียบกับข้อกำหนดของทาง AASHTO (1989) จะมีค่าสูงกว่าข้อกำหนด ซึ่งกำหนดค่า DLA ไว้ที่ 33% เช่นเดียวกันกับค่า DLA ที่ได้จากการคำนวณจากค่าความเครียดสูงสุด ส่วนใหญ่จะมีค่าสูงกว่าข้อกำหนด AASHTO (1989) ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความสมบูรณ์หรือแข็งแกร่งเกินไป อาจจะไม่ได้รับรู้อิทธิพลอื่นๆที่

เกี่ยวข้องกับเข้ามาวิเคราะห์ด้วย เช่น สภาพแวดล้อม รอยเชื่อมระหว่างชิ้นส่วนในสภาวะการใช้งานจริง หรือความผิดพลาดทั้งทางเครื่องมือและผู้ทำวิจัย

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่า DLA กับงานวิจัยก่อนหน้าในอดีต

ผู้วิจัย วิธีวิจัย	ประเภทแผ่นพื้น (ข้อสะพาน)	ช่วงความ ยาว(เมตร)	จำนวน คานที่ รองรับ	DLA (%)
Jinka (2003) ภาคสนาม	FRP deck on Truss (Katy Truss Bridge)	5.4	3	9.4
Jinka (2003) ภาคสนาม	FRP deck and FRP Stringer (Laurel Lick Bridge)	5.8	6	14
Jinka (2003) ภาคสนาม	FRP deck on Steel Plate Girders (Market Street Bridge)	54	7	52
Jerry (2011) ไฟไนต์ เอลิเมนต์ [9]	RC Deck on Prestressing girder (Chattahoochee)	21.0	6	35.4
OHBDC (1983)	standard codes	-	-	20-40
AASHTO (1989)	standard codes	-	-	33

- [7] The American Association of State Highway and Transportation Officials, (AASHTO) (1998), LRFD Bridge Design Specification, Washington, D.C.
- [8] National Cooperative Highway Research Program Synthesis 266 (1998), "Dynamic Impact Factors for Bridges," National Academy Press, Washington D.C.
- [9] Jerry, W., Eduardo, E., (2011). "Dynamic Load Allowance For Reinforced Concrete Bridges". COMPDYN 2011., III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering., 25–28 May 2011.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jinka, C.S., (2003). "Dynamic Response Evaluation of Fiber Reinforced Composite Bridge Decks and Bridges". Thesis submitted to the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University
- [2] Zhang, Y., Cai, C., (2007). "Load distribution and dynamic response of multi-girder bridges with FRP decks". Engineering Structures; 29:1676
- [3] Albers, W.F., Hag-Elsafi, O., Alampalli, S., (2007). "Dynamic Analysis of the Bentley Creek Bridge with FRP Deck," Special Report 150: Transportation Research and Development Bureau.
- [4] Prachasaree, W., Shekar, V. (2008). "Experimental evaluation and field implementation of FRP bridge deck modules," Songklanakarin J. Sci. Technol., 30 (4), 501-508, Jul. - Aug.
- [5] Bakht, B., Pinjarkar, S.G. (1989). "Review of Dynamic Testing of Highway Bridges," Transportation Research Record, No.1223, 1989, p93-100.
- [6] Ontario Highway Bridge Design Cod (OHBDC) (1983), Second Edition, Ontario Ministry of Transportation and Communications.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายอรรถพล แสงแก้ว
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5510120047
 วุฒิกการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา

ทุนศึกษยก้นกุฎิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2555-2556
 ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ینگประมาณ 2556

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อรรถพล แสงแก้ว, วรพจน์ ประชาเสรี, สุชาติ ลิมกัตัญญ, (2556). “พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของ
 พื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์,” การประชุมวิชาการ
 วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556, เชียงใหม่, STR :148 -151

อรรถพล แสงแก้ว, วรพจน์ ประชาเสรี, สุชาติ ลิมกัตัญญ, (2557). “การประเมินค่าคุณสมบัติเพิ่มทาง
 พลศาสตร์สำหรับระบบสะพานประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่รองรับ
 ด้วยคานเหล็ก,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 19, 14-16 พฤษภาคม
 2557, ขอนแก่น, STR :151 - 158