บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

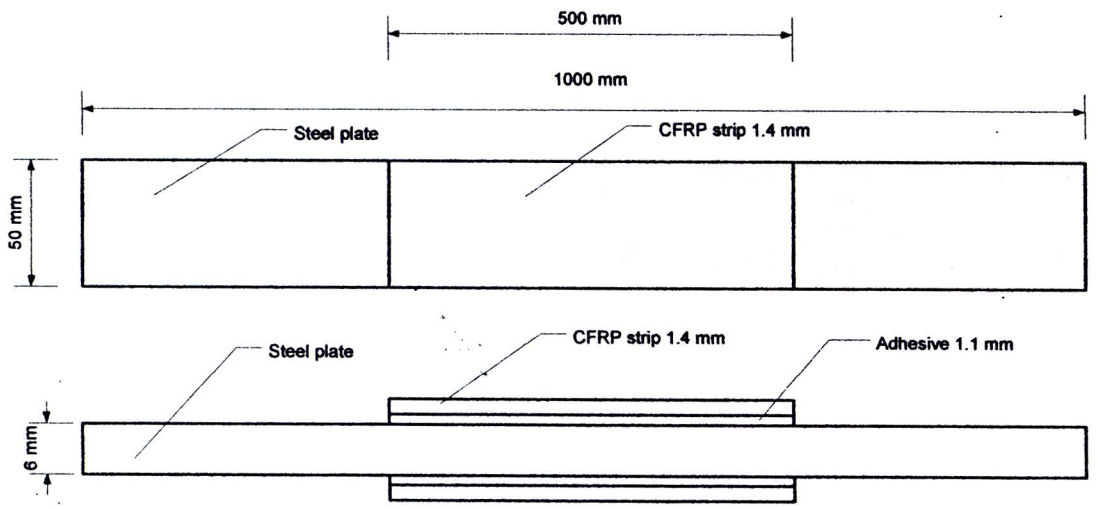
3.1 พฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

ข้อมูลชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้อ้างอิงข้อมูลจากบทความที่มีผลการทดสอบชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP มาแล้วและได้ลงตีพิมพ์ในวิชาการระดับนานาชาติคือ "Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates" โดย Bocciarelli et al. (2009) ซึ่งภายในบทความมีข้อมูลและรูปแบบการวิบัติของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ทำการทดลอง ขนาดของชิ้นส่วน คุณสมบัติของวัสดุ คุณสมบัติของกาวที่ใช้ยึดติดระหว่างแผ่น CFRP กับเหล็ก รวมทั้งความหนา ความยาว พื้นที่หน้าตัดของแผ่น CFRP ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีประโยชน์มากในการสร้างแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนท์ นอกจากนี้ผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาตัวแปรที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP อันได้แก่ ความหนาของชั้นกาว ความหนาของแผ่น CFRP และช่วงหน่วยแรงกระทำ ตามลำดับ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคในการจำลองชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 และที่สำคัญอย่างยิ่งจะอธิบายเทคนิคในการจำลองปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของการยึดติดกันระหว่างแผ่น CFRP และแผ่นเหล็กโดยใช้ Element ชนิดพิเศษที่เรียกว่า Cohesive Element ซึ่งถ้าหากการจำลองการปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงแล้วจะทำให้สามารถทำนายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเหล็กและกาวได้ ซึ่งค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในการจะถูกนำไปใช้ต่อในการทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ต่อไป ภาพที่ 3.1 แสดงถึงขนาดของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

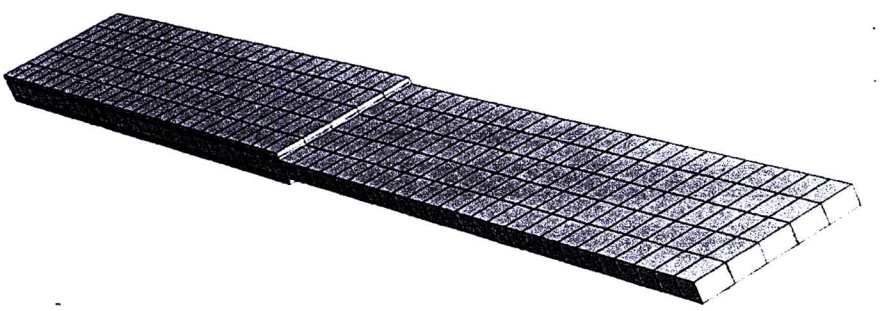
สำหรับการกำหนดเงื่อนไขจุดรองรับ (Boundary Condition) ในแบบจำลองนั้น เนื่องจากการสร้างแบบจำลองของปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นการจำลองเพียงครึ่งเดียวของความชิ้นส่วนทั้งหมดทำให้ต้องกำหนด Boundary Condition ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของทั้งแผ่นเหล็ก กาว และแผ่น CFRP โดยยอมให้มีการเคลื่อนที่เฉพาะแนวดิ่ง (แกน X ไม่เคลื่อนที่) ส่วนที่ตำแหน่งปลายอีกด้านหนึ่งกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง (แกน Y ไม่เคลื่อนที่)

ถ้าหากพิจารณาลักษณะของการสร้างแบบจำลองโดยใช้คุณสมบัติของความสมมาตรในการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนเพียงครึ่งเดียวนั้น มีเหตุผลเพื่อช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณ อนึ่งการวิเคราะห์โครงสร้างที่รับน้ำหนักกระทำแบบซ้ำๆ และมีคุณสมบัติแบบไร้เชิง

เส้นของกาวมาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้จะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นแบบจำลองในการศึกษานี้จะทำการศึกษาแบบ 2 มิติ เป็นหลัก อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองแบบ 2 มิติ ผู้ศึกษาได้สร้างแบบจำลองแบบ 3 มิติ ขึ้นมาแล้วทำการวิเคราะห์ผลและนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบ 2 มิติ ก่อนในเบื้องต้น ภาพที่ 3.2 แสดงแบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็กที่ใช้ในการศึกษา



ภาพที่ 3.1 มิติและขนาดของวัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลอง (ไม่ได้มาตราส่วน)



ก) แบบ 3 มิติ

ข) แบบ 2 มิติ

ภาพที่ 3.2 แบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็กที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 คุณสมบัติของ Element ที่เลือกใช้ในการสร้างแบบจำลอง

Element ชนิด CPE4R ใช้ในการจำลองชิ้นส่วนเหล็กและแผ่น CFRP เนื่องจาก element นี้เป็นแบบ 2 มิติ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะจำลองชิ้นส่วนเหล็กแบบ 2 มิติ และ element ชนิดนี้เป็น plane strain element โดยคำนึงถึงค่าอัตราส่วนปัวส์ซองและค่าความเครียดที่ทำให้ทราบถึงการวิบัติของชิ้นส่วน

Element ชนิด COH2D4 ใช้ในการจำลองกาวที่ยึดระหว่างแผ่น CFRP ซึ่ง COH2D4 เป็นElement ที่เหมาะสมในการจำลองพฤติกรรมการยึดติดกันระหว่างพื้นผิว 2 ชนิด ด้วยชั้นบาง ๆ คล้ายกาว หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อ Element ชนิดนี้ได้รับแรงกระทำแล้วจะสามารถคำนวณหาจุดเริ่มต้นของความเสียหายใน Element การขยายตัวของความเสียหาย (Propagation of Damage) จนกระทั่งเกิดการวิบัติ

ในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุ เทคนิคการจำลองปฏิสัมพันธ์ของการยึดติดกันระหว่างผิวของแผ่น CFRP กับ ผิวของคอนกรีต โดยใช้ Cohesive Element การใส่น้ำหนัก และขั้นตอนนการวิเคราะห์ผลสามารถสรุปได้ดังนี้

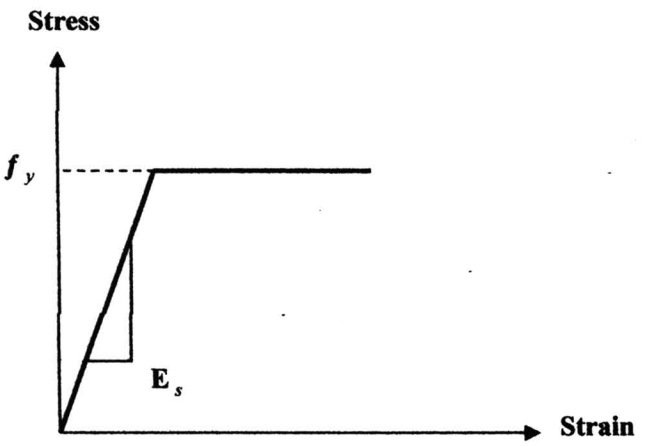
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงชนิดของ Element ที่ใช้ในแบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็ก

Material	Description	Code	Additional information
Steel	Four-noded plain strain	CPE4R	Reduced integration
Adhesion	Four-noded cohesive element	COH2D4	-
FRP	Four-noded plain strain	CPE4R	Reduced integration

3.1.2พฤติกรรมของวัสดุ (Material constitutive behavior)

แบบจำลองชิ้นส่วนเหล็ก (Steel model)

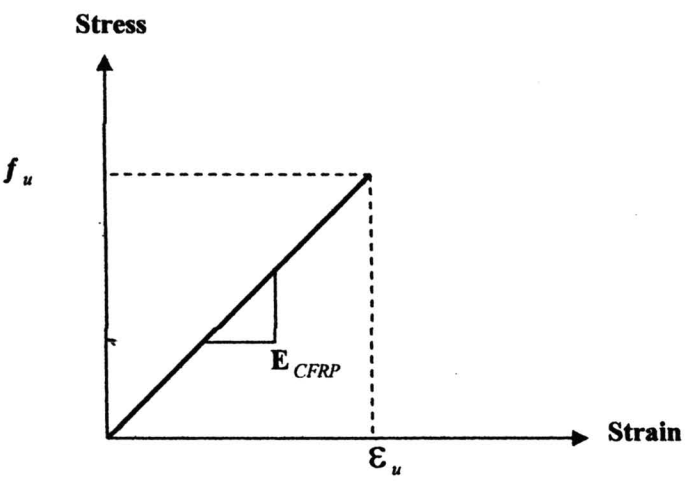
การจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วนเหล็กจะสมมติให้มีพฤติกรรมเป็นแบบ Elastic Perfectly Plastic (ดูภาพที่ 3.3) โดยเหล็กเมื่อได้รับแรงดึงจะมีพฤติกรรมแบบ Elastic จนกระทั่งถึงจุด Yield หลังจากนั้นเหล็กจะเกิดการครากภายใต้แรงกระทำที่คงที่ ซึ่งตัวแปรที่จำเป็นสำหรับแบบจำลอง คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก (E^s), อัตราส่วนปัวส์ซอง (V), และหน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก (f^y)



ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็ก

แบบจำลองแผ่น CFRP (CFRP model)

การจำลองพฤติกรรมของแผ่น CFRP โดยเมื่อแผ่น CFRP ได้รับแรงดึงจะมีพฤติกรรมแบบ elastic จนกระทั่งถึงความเครียดที่จุดประลัย (ε_u) (ดูภาพที่ 3.4) ณ จุดนี้ ที่แผ่น CFRP จะเริ่มฉีกขาด นั่นหมายถึงความสามารถในการรับแรงดึงจะลดลงเป็นศูนย์ซึ่งตัวแปรที่จำเป็นสำหรับ CFRP model คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่น CFRP (E^{CFRP}), อัตราส่วนปัวส์ซอง (V) และความเครียดที่จุดประลัย (ε_u)

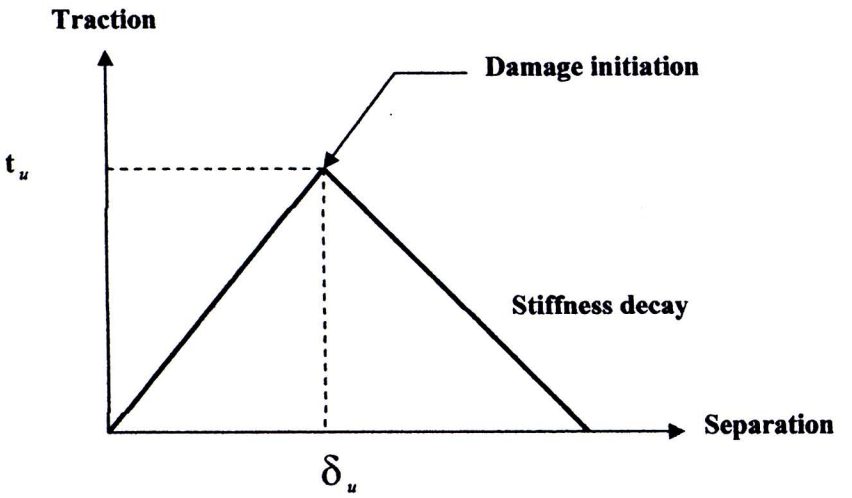


ภาพที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแผ่น CFRP

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

3.1.3 เทคนิคการจำลองปฏิสัมพันธ์ของการยึดติดกันระหว่างแผ่นCFRPและผิวคอนกรีตโดยใช้ cohesive element

Cohesive Element เป็น Element ที่เหมาะสมในการจำลองพฤติกรรมการยึดติดกันระหว่างพื้นผิว 2 ชนิด ด้วยชั้นบาง ๆ คล้ายกาว หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อ Element ชนิดนี้ได้รับแรงกระทำแล้วจะสามารถคำนวณหาจุดเริ่มต้นของความเสียหายใน Element การขยายตัวของความเสียหาย (Propagation of Damage) จนกระทั่งเกิดการวิบัติในบริเวณของ Interface (Failure of the Bonded Interface) โดยพฤติกรรมของ Interface ก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของความเสียหายจะสมมติให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นหลังจากนั้น Element จะมีค่าความเสียหายใน Element จะมีค่าเพิ่มขึ้นในรูปแบบของเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 3.5 พฤติกรรมที่กล่าวมาข้างต้นเรียกว่า Linear Element Traction Separation Behavior จากคุณสมบัติที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่า Cohesive Element สามารถนำมาใช้ในแบบจำลองบริเวณ Interface ระหว่างผิวด้านรับแรงดึงของแผ่นเหล็กกับแผ่น CFRP ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.5 Linear element traction separation behavior ของ cohesive element

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติและขนาดของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง FE

ลำดับ	วัสดุ	ขนาด	Young's modulus	Poisson's ratio	Tensile Strength
1.	แผ่นเหล็ก	หนา 6 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 1000 มิลลิเมตร	21 GPa	0.2	อย่างน้อย 2800 MPa
2.	วัสดุเสริมแรง (CFRP)	หนา 1.4 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร	200 GPa	0.2	อย่างน้อย 2800 MPa
3.	วัสดุเชื่อมประสาน (*Thixotropic* epoxy resin)	หนา 1.1 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร	12.84 GPa	0.3	อย่างน้อย 30.2 MPa

3.2 การศึกษาพฤติกรรมของคานเหล็กที่เสริมกำลังโดยวัสดุโพลิเมอร์

การดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับ ผลของการเสริมกำลังด้วย CFRP ต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิตโดยใช้ไฟไนท์อิลิเมนท์โปรแกรม ABAQUS นั้นจะมีขั้นตอนเริ่มต้น คือ การสร้างแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนท์ของสะพานคอมโพสิตแล้วทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นจากโปรแกรม ABAQUS ก่อน โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจากค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้จากสมการที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 หลังจากนั้นก็จะทำการศึกษาถึงผลของทิศทาง และจำนวนช่องจราจรที่วิ่งผ่านสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ก่อนว่ารูปแบบใดจะส่งผลให้เกิดค่าหน่วยแรงมากที่สุด โดยมีกรณีของน้ำหนักรถบรรทุกวิ่งตามช่องทางจราจรที่ศึกษา ดังนี้

1) รถบรรทุกวิ่ง 1 ช่องจราจร
2) รถบรรทุกวิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทิศทางเดียวกัน)
3) รถบรรทุกวิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทิศทางตรงข้ามกัน)

ภายหลังจากที่ได้ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP แล้ว เราก็จะเลือกใช้เฉพาะลักษณะการวิ่งของรถบรรทุกที่จะก่อให้เกิดค่าหน่วยแรงที่สูงที่สุดในการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย

CFRP ซึ่งรูปแบบการเสริมกำลังที่จะพิจารณาในงานวิจัยนี้มี 2 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังโดยใช้ CFRP ชนิดแผ่น (CFRP Laminate) ติดที่บริเวณปีกของคานรูปตัวไอ ที่ทำหน้าที่รับแรงดึง และการใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีต หลังจากวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์แล้วจะทำให้ได้ค่าหน่วยแรง (stress) ที่เกิดขึ้นในคานรูปตัวไอ ซึ่งค่าหน่วยแรงนี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาช่วงของหน่วยแรง (Stress range) ที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก ซึ่งช่วงของหน่วยแรงที่ได้จะสามารถนำไปใช้คำนวณหาการตอบสนองของความล้า (Fatigue cycle) ที่โครงสร้างสามารถรับได้ต่อไป

ขั้นตอนต่อไปก็จะทำการศึกษาพฤติกรรมของสะพานคอมโพสิตชนิดที่มีความเสียหายเริ่มต้น โดยความเสียหายเริ่มต้นของสะพานที่จะศึกษาได้แก่ การที่สะพานมีรอยร้าวชนิดความลึกเท่ากันตลอดความกว้างคาน (Through thickness crack) 2 ขนาดคือ ความลึก 3 และ 6 มิลลิเมตร ที่บริเวณปีกล่างบริเวณกึ่งกลางของคานเหล็กรูปตัวไอ ของสะพานคอมโพสิตทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และชนิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งกระบวนการศึกษาก็จะทำเช่นเดียวกับสะพานคอมโพสิตที่ไม่มีความเสียหายเริ่มต้นทุกประการ นอกจากนี้ตัวแปรที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมของสะพานเช่น ลักษณะการวิ่งของรถ จำนวนคานเหล็กรูปตัว I และรูปแบบการเสริมกำลังก็จะถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ด้วย ทั้งนี้กรณีศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 กรณีศึกษาที่พิจารณาในงานวิจัยนี้

รูปแบบของสะพาน		ไม่มีรอยร้าวที่คานเหล็ก			มีรอยร้าว 3 มิลลิเมตร ที่คาน			มีรอยร้าว 6 มิลลิเมตร ที่คาน		
		ไม่เสริมกำลัง	CFRP laminate	CFRP deck	ไม่เสริมกำลัง	CFRP laminate	CFRP deck	ไม่เสริมกำลัง	CFRP laminate	CFRP deck
3 irders	1 lane	/								
	2 lanes (ทางเดียว)	/								
	2 lanes (สวนทาง)	/	/	/	/	/	/	/	/	/
5 irders	1 lane	/								
	2 lanes (ทางเดียว)	/								
	2 lanes (สวนทาง)	/	/	/	/	/	/	/	/	/

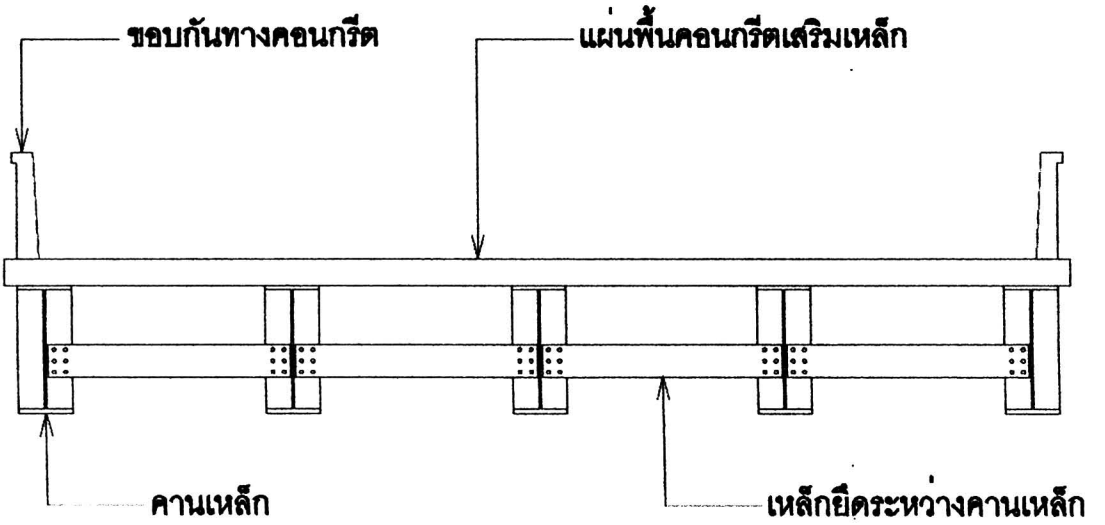
3.2.1 คุณสมบัติของสะพานคอมโพสิตที่ทำการศึกษา

สะพานคอมโพสิตที่นำมาพิจารณาในการศึกษานี้เป็นสะพานต้นแบบที่ถูกออกแบบขึ้นเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกขนาด HS-20 ตามมาตรฐาน ASSHTO โดยที่รายละเอียดการออกแบบแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งสะพานคอมโพสิตนี้ได้ออกแบบเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุก

ของรถบรรทุกที่ 3,000 คันต่อวัน ความยาวของสะพานคอมโพสิต 1 ช่วง ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น มีความยาวระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 18 เมตร มีจุดรองรับเป็นแบบง่าย (Simply support) ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิต มีดังนี้

1) แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforce concrete deck)
2) คานเหล็ก (I-Beam girder)
3) เหล็กยึดระหว่างคานเหล็ก (Diaphragm)
4) ขอบกันทางคอนกรีต (Concrete Barrier)
5) วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP)

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของสะพานคอมโพสิตแบบพื้นคอนกรีตวางบนคานเหล็ก แสดงให้เห็นดังภาพที่ 3.6



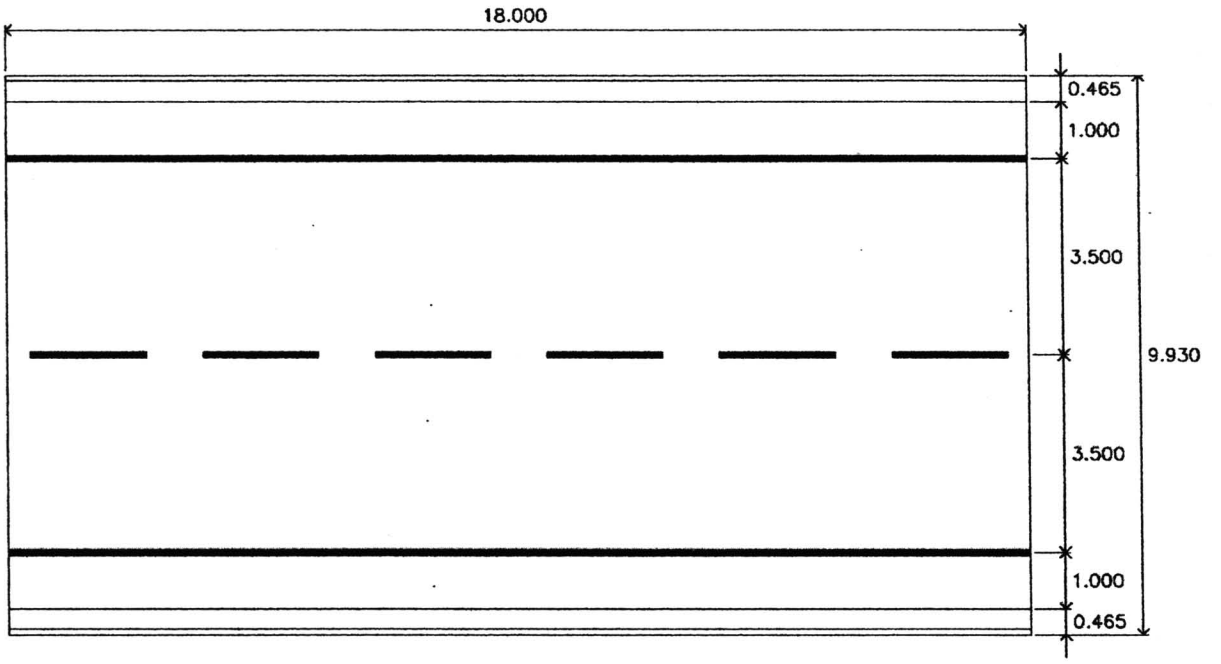
ภาพที่ 3.6 ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิต

โดยที่แต่ละส่วนจะมีคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติของวัสดุแต่ละประเภท ดังนี้

ลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติวัสดุ

- **แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก**

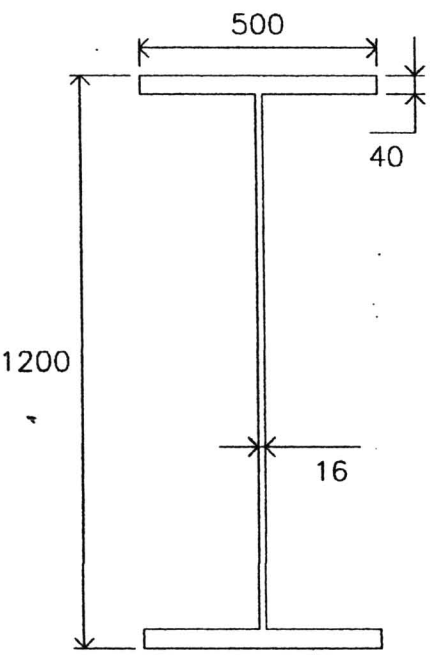
แผ่นพื้นของสะพานคอมโพสิตชนิด steel girder ที่ใช้ในบทความนี้เป็นสะพานคอมโพสิตมีความยาวตลอดช่วงเท่ากับ 18 เมตร และมีพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 25 เซนติเมตร เสริมเหล็กสองชั้น ใช้เหล็ก RB9@0.10 เมตร โดยแบ่งออกเป็น 4 ช่องทางจราจร คือ 2 ช่อง ทางเดินรถยนต์ กว้าง ช่องละ 3.50 เมตร และ 2 ช่องทางเดินรถขนาดเล็ก กว้าง ช่องละ 1.00 เมตร รวมความกว้างทั้งหมดของสะพาน คือ 9.93 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ระยะการแบ่งเลน และความยาวของช่วงสะพาน (หน่วย เมตร)

- **คานเหล็ก**

คานเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเหล็กรูปพรรณชนิดปีกกว้าง (Wide Flange) ประเภท 1200WB455 มาตรฐานออสเตรเลีย มีความกว้างทั้งหมด 0.50 เมตร ลึก 1.2 เมตร ความกว้างของปีก 4 เซนติเมตร และความกว้างของเอว 1.6 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.8

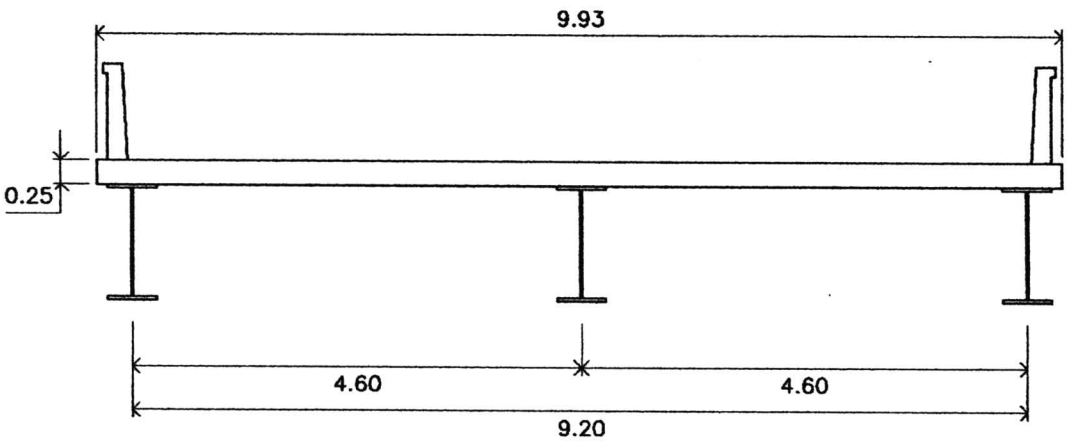


ภาพที่ 3.8 รูปตัดของเหล็กตัว I (1200WB455 cross section.) (หน่วย มิลลิเมตร)

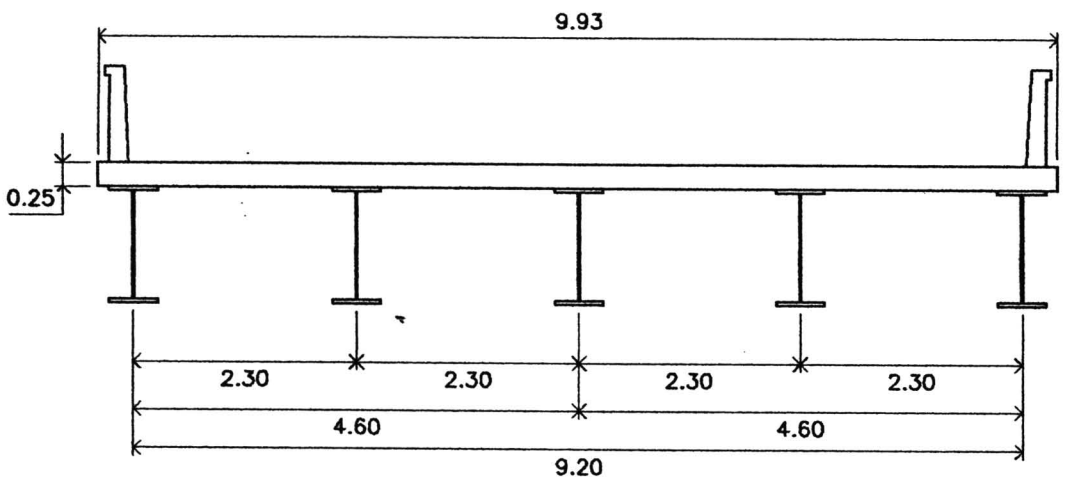
เนื่องจากความยาวของสะพานมากเกินไป หน้าตัดเหล็กรีดร้อนทั่วไปออกแบบไม่ผ่านตามมารฐาน ดังนั้นจึงเลือกหน้าตัดประเภท Build up section ชนิด 1200WB455 ในการออกแบบสะพานเพราะเป็นหน้าตัดที่พอเพียงเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกในการออกแบบ

ในการสร้างแบบจำลองที่พิจารณาจะพิจารณาสะพานคอมโพสิตที่มีจำนวนของคานเหล็กอยู่ 2 กรณี คือ มีคานเหล็ก 3 ตัว และมีคานเหล็ก 5 ตัว โดยที่ระยะห่างของคานเหล็กในแบบจำลองของสะพานเท่ากับ 4.60 และ 2.3 เมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.9

ในการเลือกพิจารณาแบบจำลองสะพานที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว เนื่องจากต้องการทราบถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานที่มีจำนวนคานเหล็กไม่เท่ากัน



(ก) สะพานคอมโพสิต ที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



(ข) สะพานคอมโพสิต ที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 3.9 ระยะห่างของคานเหล็ก (หน่วย เมตร)

- **เหล็กยึดระหว่างคานเหล็ก (Diaphragm)**

สะพานคอมโพสิต จะมีเหล็กเพื่อยึดคานเหล็กไว้ด้วยกัน ซึ่งจะยึดอยู่ที่ด้านข้างทุกตัว โดยจะยึดที่จุดรองรับ และกึ่งกลางของช่วงความยาวสะพาน หรือเท่ากับระยะ 9 เมตร จากจุดรองรับ โดยมีความกว้างเท่ากับ 0.30 เมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร

- **วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP)**

โพลิเมอร์เสริมเส้นใยที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ จะมีอยู่ 2 ประเภท คือ CFRP Laminate และ CFRP composite deck

แบบแผ่นกระดาษโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP Laminate) นั้นจะมีความหนา 1.4 มิลลิเมตร เป็นผลิตภัณฑ์ของซิก้า (Sika) รุ่น Sika CaboDur โดยในแบบจำลองนั้นจะใช้ร่วมกับกาว (Cohesive) ซึ่งจะมีความหนา 3 มิลลิเมตร ตามขั้นตอนการใช้งาน ผลิตภัณฑ์ของซิก้า (Sika) รุ่น SikaDur -30 (Sika, 2003)

แบบพื้นกลวงโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP composite deck) นั้นจะเลือกใช้ CFRP ที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมกลวงขนาดกว้าง ยาว และสูงเท่ากับ 25 เซนติเมตร หนา 1.0 เซนติเมตร มาประกอบกับ CFRP ที่เป็นแบบแผ่นหนา ซึ่งจะอยู่ที่ผิวบน และผิวล่าง โดยทั้งผิวบนและผิวล่าง จะมีความหนาเท่ากัน คือ 1.0 เซนติเมตร โดย CFRP ทั้งหมดที่นำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของสตรองเวล (Strongwell) รุ่น EXTERN (Strongwell, 1998)

- **คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง**

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของสะพาน นั้นจะแบ่งออกเป็น คุณสมบัติของคอนกรีต เหล็ก และวัสดุเสริมพิเศษ โดยคุณสมบัติของวัสดุจะแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของคอนกรีต และเหล็ก

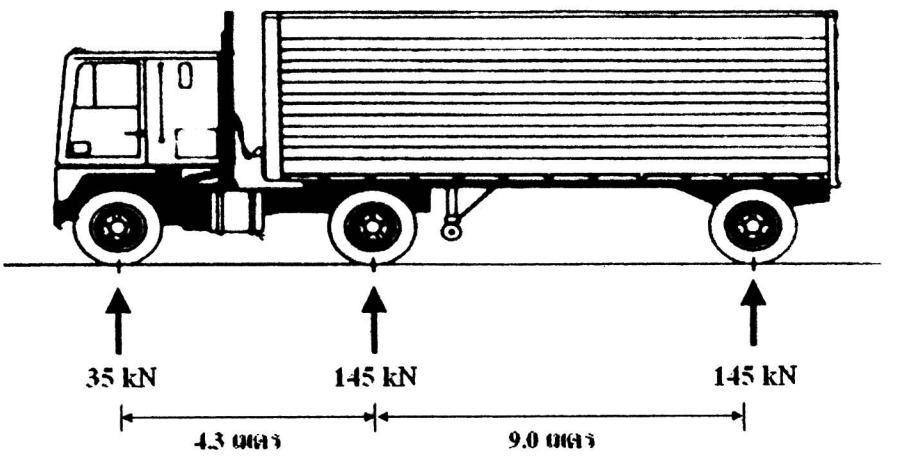
วัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m^3)	โมดูลัสยืดหยุ่น (N/m^2)	Poisson's Ratio
คอนกรีต	2400	2.86×10^{10}	0.20
เหล็ก	7850	20.00×10^{10}	0.30

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย และกาว (Sika, 2003) และ(Strongwell, 1998)

วัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m^3)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	หน่วยแรงดึง (MPa)	หน่วยแรงอัด (MPa)	Poisson's Ratio
CFRP Composite Deck	1800	19.3	207	207	0.33
CFRP Laminate	1500	165	2800	-	0.30
วัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m^3)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	หน่วยแรงดึง (MPa)	Shear Strength (MPa)	-
กาว (Cohesive)	1770	12.8	33	18 - 20	-

3.2.2 น้ำหนักรถบรรทุก และการใส่น้ำหนักรถบรรทุกในโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์

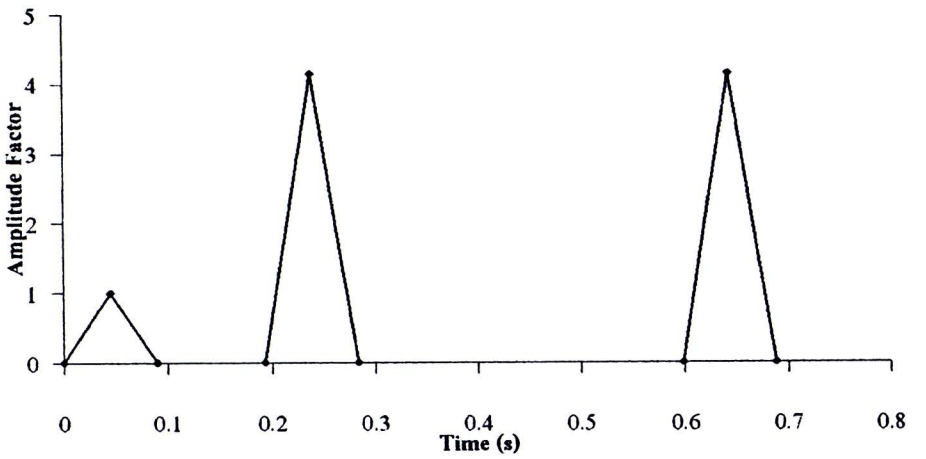
น้ำหนักของรถบรรทุกที่ใช้ในแบบจำลองของสะพานนั้น จะเป็นรถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO (HS-20) ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ซึ่งจะมีแรงกระทำอยู่ 3 เพลา โดยแต่ละเพลาจะมีน้ำหนักแตกต่างกัน เริ่มจากเพลาแรกที่ด้านหน้ารถจะมีน้ำหนักเท่ากับ 8,000 ปอนด์ ซึ่งจะมีค่าประมาณ 35 กิโลกรัมนิวตัน เพลาที่ 2 จะอยู่ห่างจากเพลาแรก 4.3 เมตร โดยมีน้ำหนักของเพลา 32,000 ปอนด์ หรือประมาณ 145 กิโลกรัมนิวตัน และเพลาที่ 3 จะมีระยะห่างจากเพลาที่ 2 เท่ากับ 9.0 เมตร โดยมีน้ำหนักเท่ากับเพลาที่ 2 คือ 145 กิโลกรัมนิวตัน และระยะระหว่างล้อเท่ากับ 1.80 เมตร (AASHTO, 2003)



ภาพที่ 3.10 รถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO ประเภท HS20 (AASHTO, 2003)

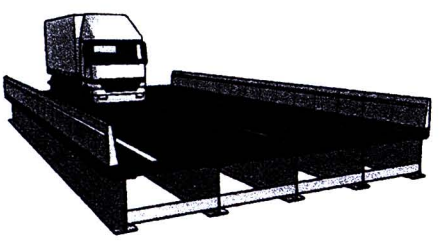
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ในการใส่แรงที่เป็นน้ำหนักรถบรรทุกในโปรแกรมนั้น จะต้องหากราฟ ซึ่งมาจากน้ำหนัก 3 เพลา หรือ 3 แรง ของรถบรรทุก โดยพิจารณา ตั้งแต่เริ่มเข้ามาในสะพานจนกระทั่งน้ำหนักวิ่งออกจากสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 3.11 โดยจะพิจารณาการวิ่ง 1 ช่องจราจร และ 2 ช่องจราจร

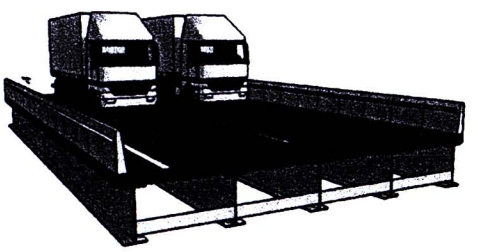


ภาพที่ 3.11 กราฟน้ำหนักของรถบรรทุกที่กระทำกับแบบจำลอง

การวิ่งของรถบรรทุกบนสะพานจะพิจารณาอยู่ 3 กรณี คือ การวิ่งแบบ 1 ช่องจราจร การวิ่งแบบ 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน) และการวิ่งแบบ 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน) โดยแสดงให้เห็นดังภาพที่ 3.12

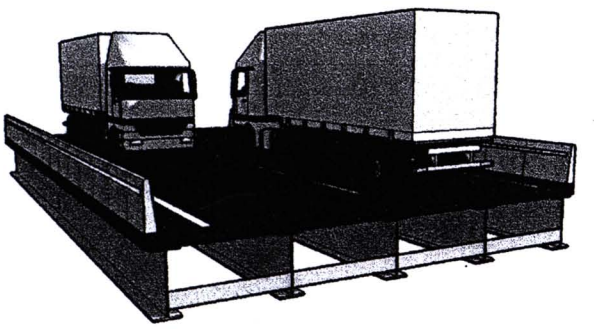


(ก) กรณีการวิ่งแบบ 1 ช่องจราจร



(ข) กรณีการวิ่งแบบ 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน)

ภาพที่ 3.12 กรณีศึกษาของน้ำหนักรถบรรทุก

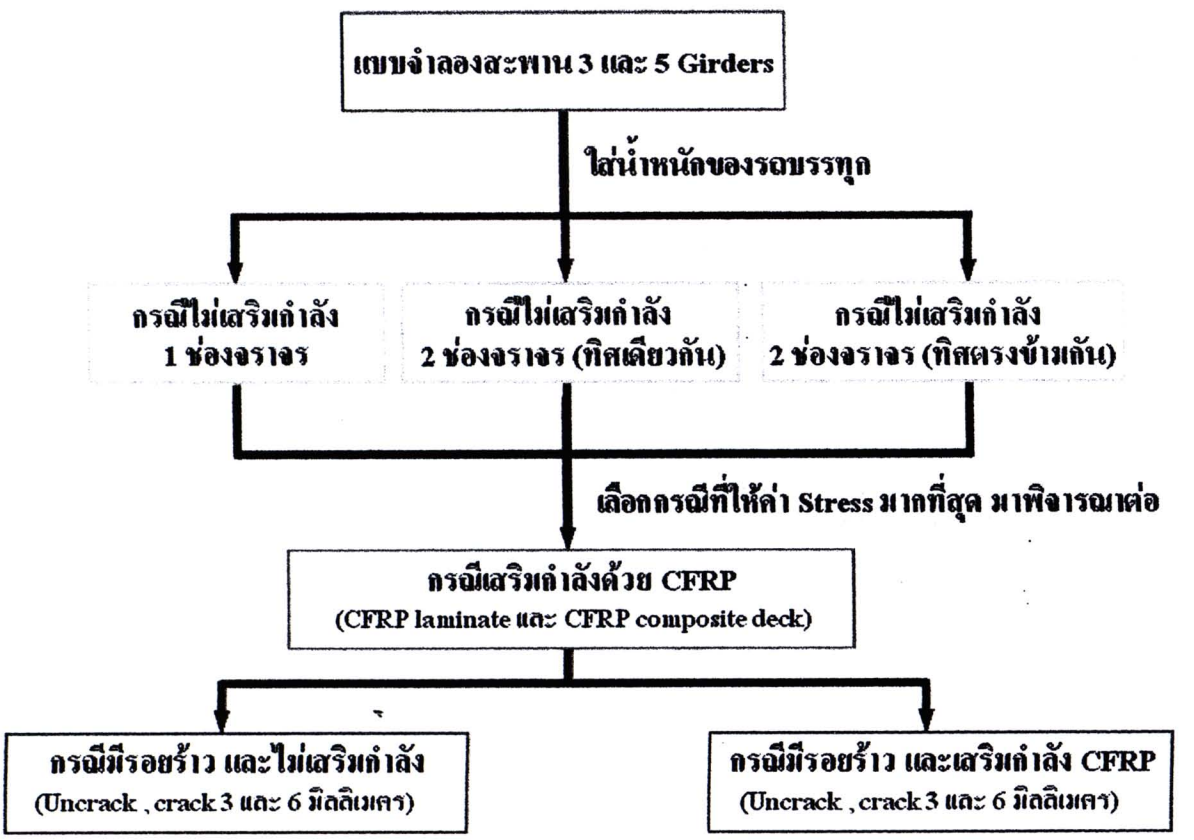


(ค) กรณีการวิ่งแบบ 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน)

ภาพที่ 3.12 กรณีศึกษาของน้ำหนักรถบรรทุก (ต่อ)

3.2.3 กรณีศึกษาของสะพานคอมโพสิต

กรณีศึกษาสะพานคอมโพสิตได้แบ่งออกเป็น ขั้นตอนในการพิจารณา ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 ขั้นตอนในการศึกษาแบบจำลอง

ขั้นตอนดังกล่าวจะแบ่งได้ออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 กรณีศึกษาแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย กรณีที่ 2 จะทำการพิจารณาต่อโดยใช้กรณีของน้ำหนักรถบรรทุกที่ให้ค่าหน่วยแรงมากที่สุด ซึ่งก็คือน้ำหนักรถบรรทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร ซึ่งกระทำกับแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย FRP และในกรณีที่ 3 พิจารณาแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้นเกิดขึ้น โดยมีขนาดของรอยร้าว 3 และ 6 มิลลิเมตร ทั้งกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง และกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP

โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จากทั้ง 3 กรณี จะเป็นผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ และความล้าของสะพานคอมโพสิต ซึ่งผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ คือ ค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าการแอ่นตัวสูงสุด ส่วนผลการตอบสนองความล้า นั้นคือ อายุการใช้งาน หรืออายุความล้า และจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งบนสะพาน

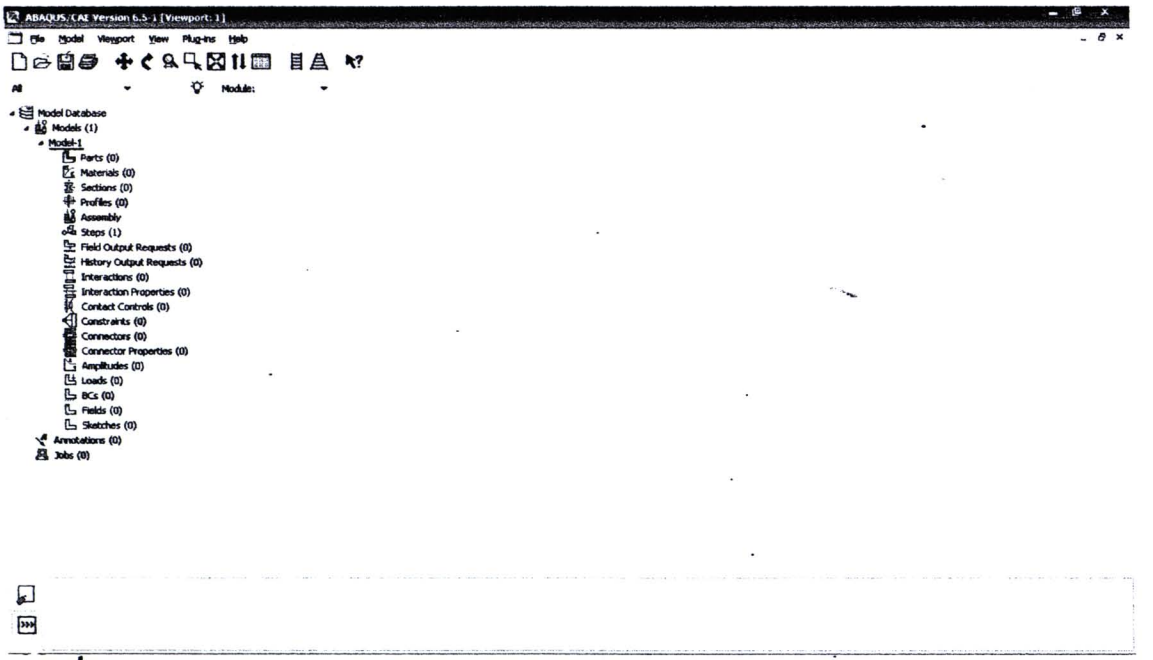
3.2.4 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS

การวิเคราะห์โครงสร้างของสะพานคอมโพสิต จะใช้โปรแกรม ABAQUS ในการสร้างแบบจำลอง โดยจะมีรายละเอียดในการสร้างแบบจำลอง ดังนี้

รูปแบบของโปรแกรม และรายละเอียดการใช้งาน

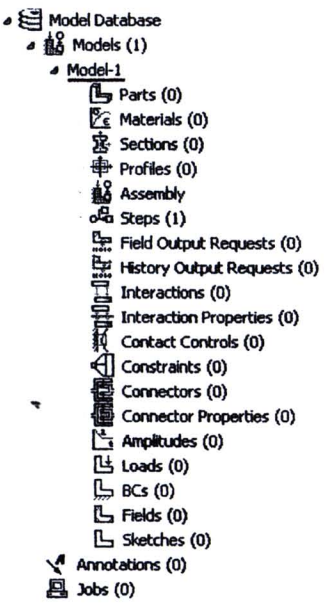
ในตัวโปรแกรมจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง (Create Model Method) ขั้นตอนการดำเนินการวิเคราะห์ (Analysis Method) และขั้นตอนแสดงผลการวิเคราะห์ (Output Method) โดยในแต่ละส่วนจะมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

- **ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง (Create Model Method)** จะเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ใส่คุณสมบัติของวัสดุ ใส่ข้อกำหนด ใส่แรงกระทำ และการสร้างไฟล์ข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ในส่วนของ ขั้นตอนการวิเคราะห์ โดยรูปร่างหน้าตาของตัวโปรแกรมนั้น ดังแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 รูปแบบของส่วนโปรแกรมในการสร้างแบบจำลอง (Create Model Method)

จากภาพที่ 3.14 จะใช้คำสั่งด้านซ้ายมือของรูปในการสร้างแบบจำลอง โดยส่วนประกอบของคำสั่งนั้นจะแสดงดังภาพที่ 3.15 ซึ่งจะมีคำสั่งที่สำคัญดังนี้ Parts , Materials , Sections , Profiles , Assembly , Steps , Field-History Output Requests , Interactions , Contact Controls , Constrains , Connectors , Amplitude , Loads , BCs , Fields , Sketches และ Jobs



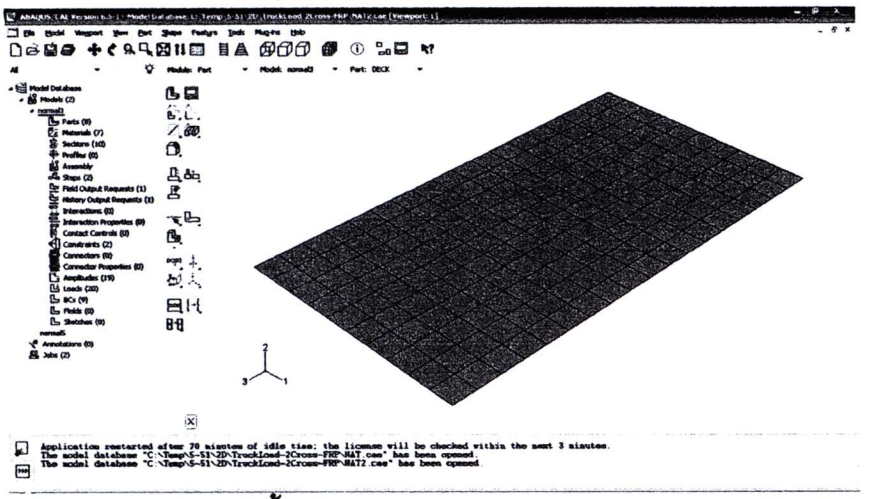
ภาพที่ 3.15 คำสั่งที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

จากภาพที่ 3.15 ในการสร้างแบบจำลองของสะพานนั้น จะมีขั้นตอนการสร้างจากคำสั่งต่าง ๆ ดังนี้

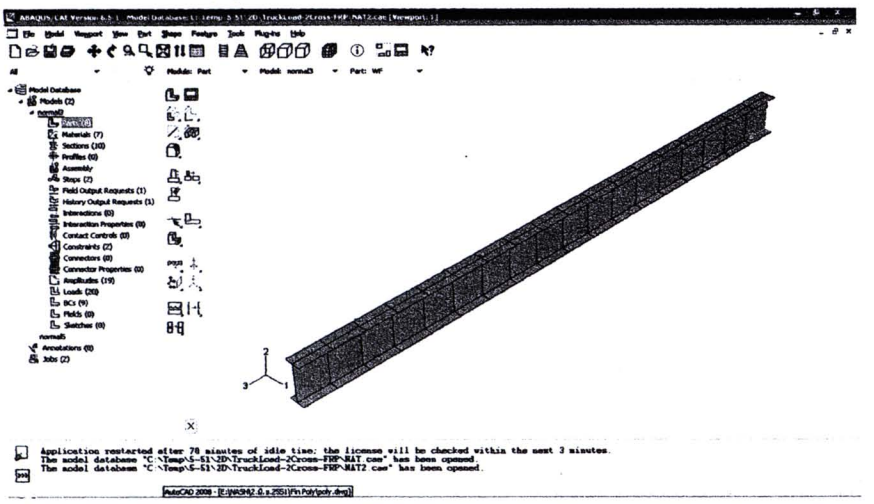
Parts จะเป็นการสร้างส่วนต่าง ๆ ของแบบจำลองขึ้นมา โดยในการสร้างแบบจำลองของสะพานนั้นจะมี Part อยู่ทั้งหมด 6 Parts คือ พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC Slab) คานเหล็ก (Steel girder) เหล็กยึดระหว่างคานเหล็ก (Diaphragm) แผ่นวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP laminate) กาว (Cohesive) และ วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย ชนิดแผ่นพื้นกลวง (CFRP composite deck) โดยในแต่ละ Parts นั้นจะแสดงในภาพที่ 3.16 ในการสร้าง Parts นั้นเราจะต้องเลือกว่าจะให้ Parts มีรูปแบบใด เช่น 2 มิติ หรือ 3 มิติ และใช้รูปแบบการสร้างต่าง ๆ ที่อยู่ในคำสั่ง Parts ในการสร้างแบบจำลองขึ้นมา ซึ่งแต่ละ Part ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตนั้นจะแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 Element type ของแต่ละ Part

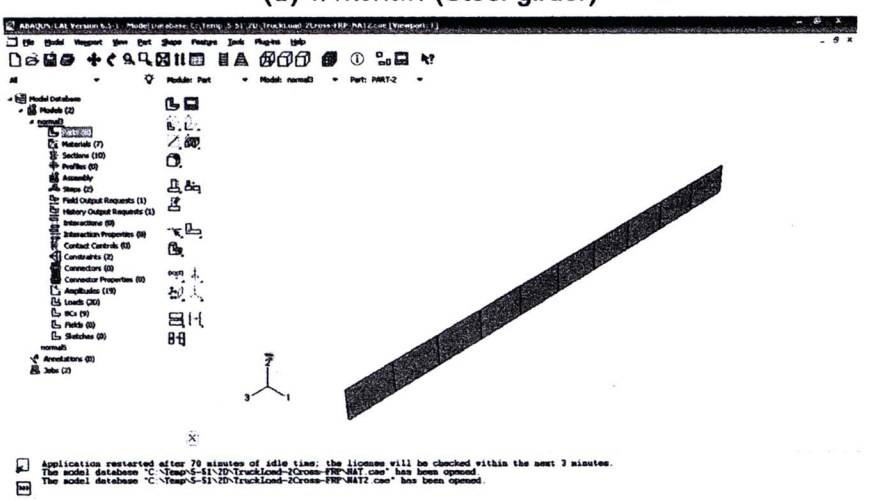
Part	Element type
RC Slab	Shell element (S4R)
Steel girder	Shell element (S4R)
Diaphragm	Shell element (S4R)
CFRP laminate	Solid element (C3D8R)
Cohesive	Cohesive element (COH3D8)
CFRP composite deck	Shell element (S4R)



(ก) พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC Slab)

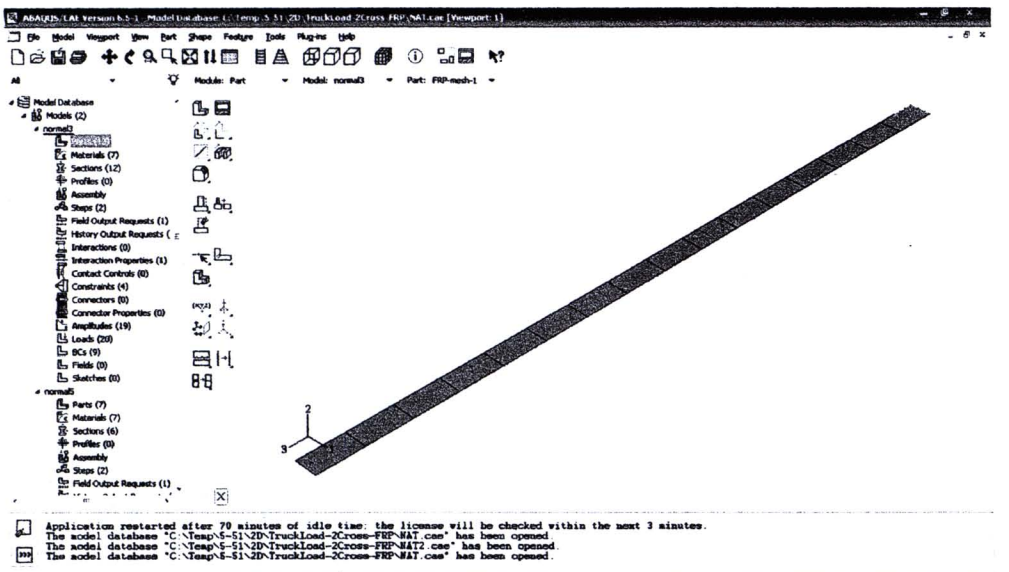


(ข) คานเหล็ก (Steel girder)

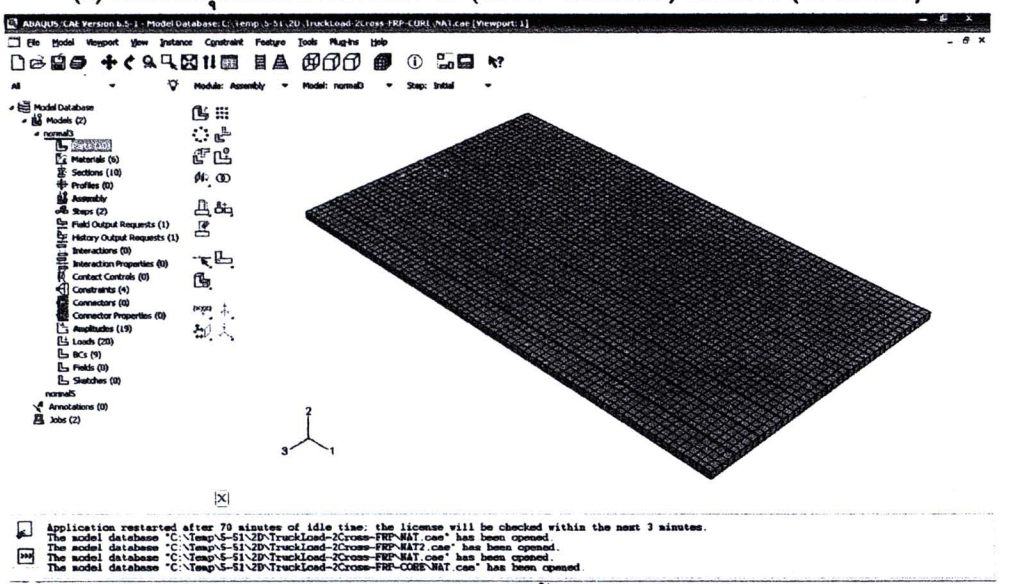


(ค) เหล็กยึดระหว่างคานเหล็ก (Diaphragm)

ภาพที่ 3.16 ส่วนต่าง ๆ ของ Parts ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต



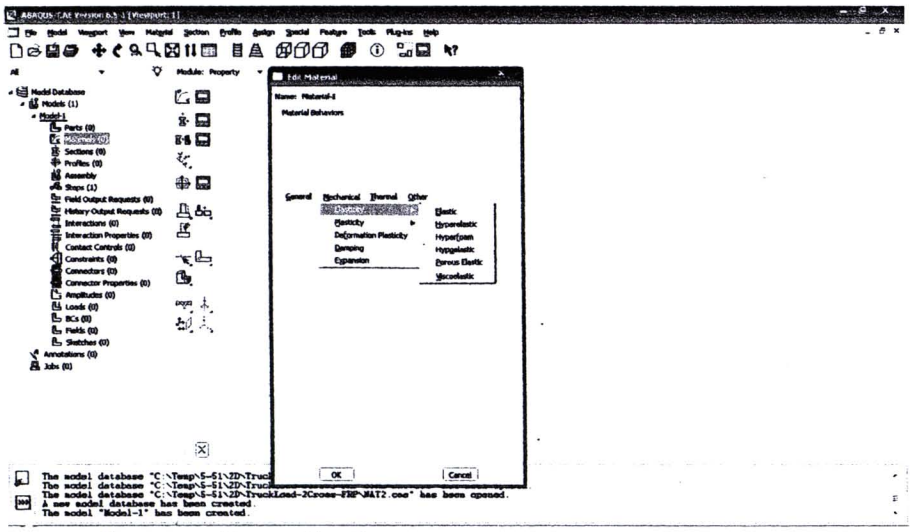
(ง) แผ่นวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP laminate) และกาว (Cohesive)



(จ) วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย ชนิดแผ่นพื้นกลวง (CFRP composite deck)

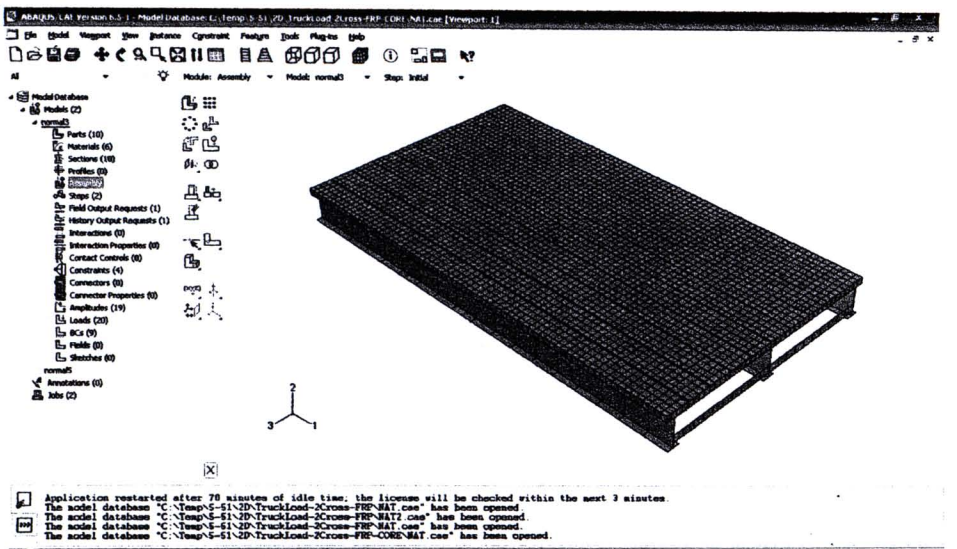
ภาพที่ 3.16 ส่วนต่าง ๆ ของ Parts ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต (ต่อ)

Materials จะเป็นการสร้างคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อที่จะนำไปแทนในส่วนของ Parts โดยรูปแบบของการใส่คุณสมบัติต่าง ๆ นั้นดังแสดง ในภาพที่ 3.17 โดยที่คุณสมบัติต่าง ๆ นั้นดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5



ภาพที่ 3.17 การใส่คุณสมบัติของวัสดุ ในแบบจำลอง

Assembly เป็นการนำ Parts แต่ละชิ้นที่ได้ทำการสร้างไว้ มารวมกันจนเป็นแบบจำลองของโครงสร้าง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะได้รูปแบบของสะพานดังแสดงในภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 แบบจำลองที่นำแต่ละ Parts มารวมกันใน Assembly

Constrains เป็นคำสั่งข้อกำหนดที่ใส่ในแบบจำลอง ยกตัวอย่างเช่น การยึดติดกันของแต่ละ Parts ในแบบจำลอง ก็จะใช้คำสั่ง constrains ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตนั้นการยึดติดกันของแต่ละ part นั้นจะทำการยึดติดกันด้วยการยึดติดแบบยึดแน่น (Tie) ซึ่งจะมีพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยึดกับคานเหล็ก คานเหล็กที่ยึดกับ Diaphragm คานเหล็กที่ยึดกับกาว และกาวที่ยึดกับ CFRP laminate

Loads เป็นคำสั่งในการใส่แรงกระทำในแบบจำลอง ทั้งแรงกระทำแบบคงที่ และแรงกระทำแบบเคลื่อนไหว โดยแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตนี้จะกำหนดแรงกระทำแบบเคลื่อนไหว

BCs เป็นคำสั่งที่ใส่ Boundary condition ในแบบจำลองซึ่งก็คือ จุดรองรับ โดยแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตจะเป็นจุดรองรับแบบง่าย (Simple Support)

Jobs เป็นคำสั่งในการนำ code ของแบบจำลองไปใช้ในขั้นตอนการดำเนินการวิเคราะห์ (Analysis Method) ซึ่งไฟล์จะมีนาสกุลเป็น .inp

- **ข้อกำหนดพื้นฐานที่ใสในแบบจำลอง** ส่วนของข้อกำหนดพื้นฐานที่จะใส่ให้กับแบบจำลอง นั้นมีอยู่ 2 อย่าง คือ

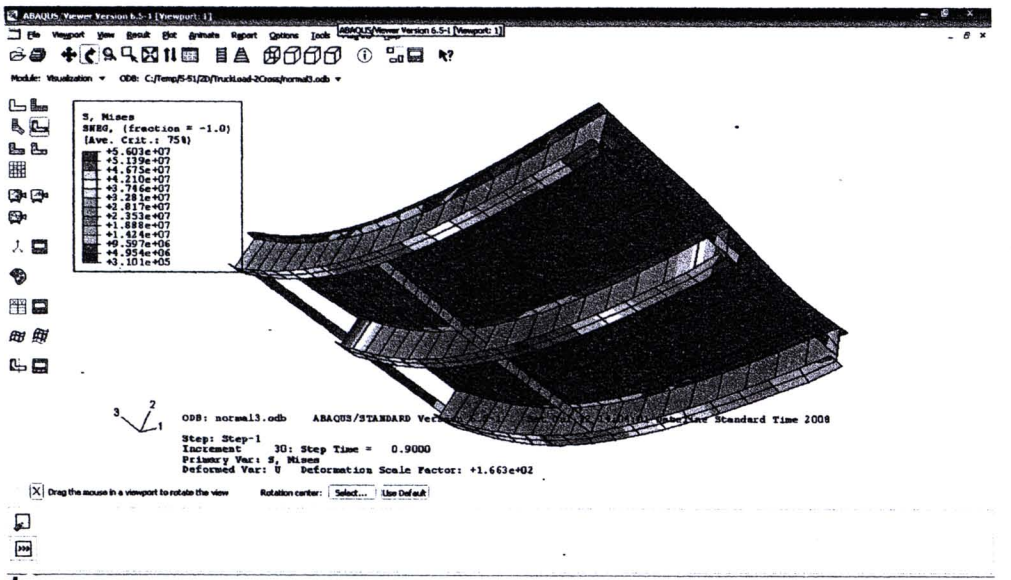
ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ใส่ในแบบจำลองของสะพานนี้จะเป็นข้อมูลที่กำหนดในมาตรฐาน AASHTO โดยค่าอัตราส่วนความหน่วงของสะพานคอมโพสิต ประเภทแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนคานเหล็กนั้นจะใช้ เท่ากับ ร้อยละ 5

ขนาดช่วงเวลาที่แบ่งในแบบจำลอง (Step size) แบบจำลองของสะพานจะเป็นแบบจำลองที่กำหนดให้เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็น 10 วินาที และได้แบ่งขนาดช่วงเวลาออกเป็นช่วงละ 0.05 วินาที เพราะต้องการข้อมูลของผลการวิเคราะห์ที่ละเอียด

- **ขั้นตอนในการสร้างรอยร้าวที่กลางคานเหล็กในแบบจำลอง** ในการสร้างรอยร้าวที่กลางคานเหล็กสามารถทำได้โดยการแบ่งปีกคานเหล็กด้านล่าง ออกเป็น 2 ชั้น โดยที่ชั้นบนกำหนดให้ไม่มีความหนา ในส่วนของชั้นล่างจะทำการแบ่ง mesh ของปีกคานล่างในช่วงกลางคานให้มีความละเอียดมาก ๆ โดยที่บริเวณที่เกิดรอยร้าวจะกำหนดให้มีความหนาลดลงตามกรณีศึกษา และในบริเวณอื่น ๆ ให้กำหนดให้มีความหนาเท่าเดิม

- **ขั้นตอนในการดำเนินการวิเคราะห์ (Analysis Method)** จะเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการสร้างวิเคราะห์แบบจำลอง โดยจะใช้โปรแกรม Abaqus command ในการดำเนินการ ซึ่งรูปแบบของโปรแกรมจะใช้คำสั่งในการวิเคราะห์ ดังนี้ Abaqus j=(ชื่อไฟล์) int

- **ขั้นตอนแสดงผลการวิเคราะห์ (Output Method)** จะเป็นขั้นตอนที่ต่อจากขั้นตอนการวิเคราะห์ ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง ยกตัวอย่างเช่น ค่าหน่วยแรง แรงกิริยา และการแอ่นตัว เป็นต้น โดยรูปแบบของผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 3.19



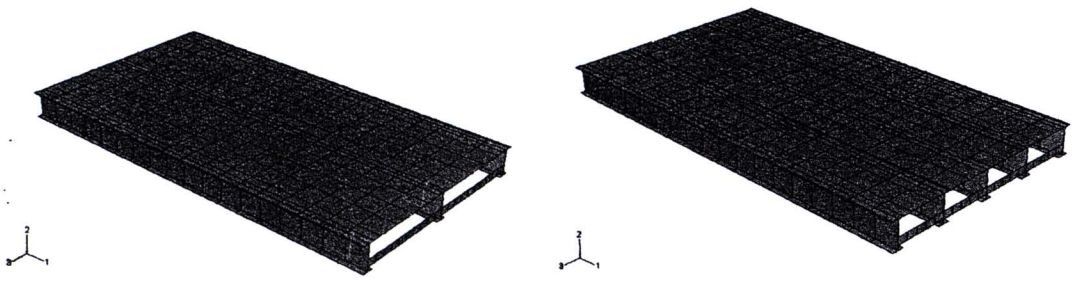
ภาพที่ 3.19 ผลของการวิเคราะห์แบบจำลองจากโปรแกรม ABAQUS

3.2.5 ลำดับขั้นตอนการศึกษา

ในการดำเนินการศึกษาได้ทำการแบ่งงานออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้

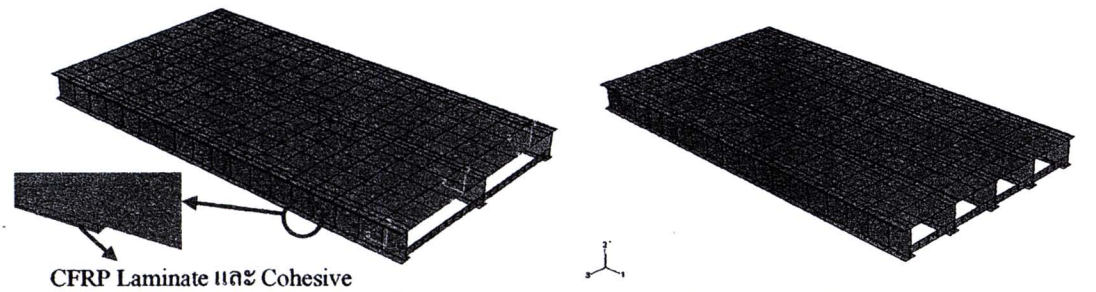
สร้างแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองของสะพานโดยใช้โปรแกรม ABAQUS นั้นจะสร้างสะพานเป็นแบบอิลิเมนท์แบบแผ่น (Shell element) โดยที่ตัวสะพานคอมโพสิตมีความยาวทั้งหมด 18 เมตร โดยที่แบบจำลองของสะพานที่สร้างขึ้นจะเป็นชนิดจุดรองรับแบบง่าย (Simple support) ซึ่งแบบจำลองจะมีอยู่ 3 ประเภท ดังภาพที่ 3.20

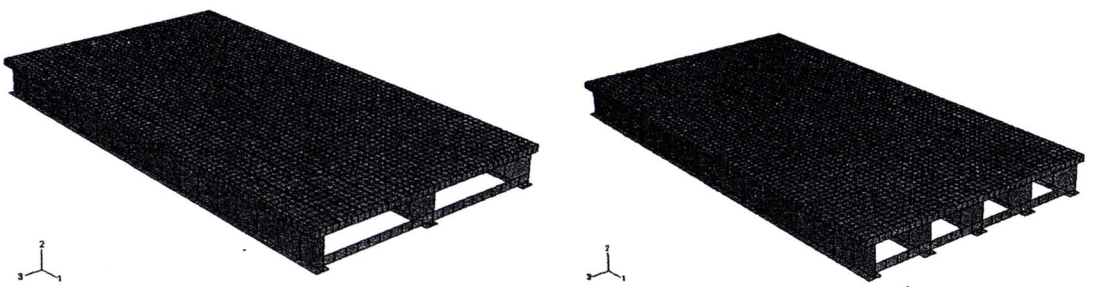


(ก) แบบจำลองสะพานคอมโพสิตที่มี 3 และ 5 คานเหล็ก (Uncrack , crack 3 และ 6 มิลลิเมตร)

ภาพที่ 3.20 แบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่ศึกษา



(ข) แบบจำลองสะพานคอมโพสิตที่มี 3 และ 5 คานเหล็ก พร้อมกับเสริมด้วย CFRP Laminate (Uncrack , crack 3 และ 6 มิลลิเมตร)



(ค) แบบจำลองสะพานคอมโพสิตที่มี 3 และ 5 คานเหล็ก ที่เปลี่ยนแผ่นพื้นเป็น CFRP Composite Deck (Uncrack , crack 3 และ 6 มิลลิเมตร)

ภาพที่ 3.20 แบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่ศึกษา (ต่อ)

ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้น จะใช้การตรวจสอบโดยใช้ค่าความถี่ธรรมชาติ มาใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองของสะพาน ซึ่งจะใช้สมการที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ เปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์จากโปรแกรม โดยจะตรวจสอบสะพานคอมโพสิต ทั้ง 3 และ 5 คานเหล็ก

ศึกษาการตอบสนองทางพลศาสตร์ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต

การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานจะมีอยู่ 2 แบบ คือ ค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าการแอ่นตัวสูงสุด ซึ่งจะพิจารณากรณีสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลัง สะพานที่มีการแสริมกำลัง และสะพานที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น ขนาด 3 และ 6 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักรถบรรทุกรูปแบบต่าง ๆ

ศึกษาความล้าที่เกิดในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต

ในขั้นตอนนี้จะศึกษาผลของความล้าจากแบบจำลองของสะพาน จะศึกษาอยู่ 2 แบบ คือ อายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิต หรือค่าอายุความล้า และจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน โดยพิจารณาสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลัง สะพานที่มีการแสริมกำลัง และสะพานที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น ขนาด 3 และ 6 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักรถบรรทุก 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)