

การวิเคราะห์หน่วยแรงในรางเชื่อมยาวโดยคำนึงถึงพฤติกรรมแบบปฏิสัมพันธ์กัน
ระหว่างสะพานและทางวิ่ง

Stress Analysis of Continuous Welded Rail Considering Track-bridge
Interaction Phenomena

นายเชาวฤทธิ์	หาสินปี	รหัส 54361251
นายณัฐวุฒิ	สำราญใจ	รหัส 54361275
นายสุรชาติ	ลีตระกูล	รหัส 54365020
นายปวีณ	ต้นสาโรจน์วนิช	รหัส 54364740

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2557

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
ได้รับ..... 3.0/ก.ย 2558
ขอสงวน..... 1690984X
เลขเรียกหนังสือ..... 16
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๑๑/๔

2557



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การวิเคราะห์หน่วยแรงในรางเชื่อมยาวโดยคำนึงถึงพฤติกรรมแบบปฏิสัมพันธ์กันระหว่างสะพานและทางวิ่ง

ผู้ดำเนินโครงการ	นายเชาวฤทธิ์	หาสินปี	รหัส	54361251
	นายณัฐวุฒิ	สำราญใจ	รหัส	54361275
	นายสุรชาติ	ลี้ตระกูล	รหัส	54365020
	นายปวีณ	ตันสาโรจน์วนิช	รหัส	54364740
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.ทรงศักดิ์	สุธาสุประดิษฐ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา			
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา			
ปีการศึกษา	2557			

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร.ทรงศักดิ์ สุธาสุประดิษฐ์)

.....กรรมการ
(ดร.วิฑูรย์ ปรินาตปรีชา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิเศษเจริญ)

ชื่อหัวข้อโครงการ การวิเคราะห์การวิเคราะห์หน่วยแรงในรางเชื่อมยาวโดยคำนึงถึงพฤติกรรมแบบปฏิสัมพันธ์กันระหว่างสะพานและทางวิ่ง

ผู้ดำเนินโครงการ นายเชาวฤทธิ์ หาสินปี รหัส 54361251
 นายณัฐวุฒิ สำราญใจ รหัส 54361275
 นายสุรชาติ สัตระกุล รหัส 54365020
 นายปวีณ ดันสาโรจน์วิช รหัส 54364740

ที่ปรึกษาโครงการ ดร.ทรงศักดิ์ สุทธาสุประดิษฐ์
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับหน่วยแรงในรางเชื่อมยาวโดยคำนึงถึงพฤติกรรมแบบปฏิสัมพันธ์กันระหว่างสะพานและทางวิ่ง ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือหน่วยแรงในรางรถไฟที่เปลี่ยนแปลงไปประกอบไปด้วย อุณหภูมิ แรงเบรก และการแอ่นตัวของสะพาน โดยสะพานกำหนดความยาวคงที่ที่ระยะ 60 เมตร จากผลการศึกษาพบว่า หน่วยแรงในรางรถไฟขึ้นอยู่กับปัจจัยทุกตัวที่ศึกษา การวิเคราะห์จะใช้โปรแกรม CSI SAP2000 ศึกษาความแตกต่างระหว่างการติดตั้งวัสดุยึดราง (Fastener) แบบธรรมดาและการติดตั้งที่ยอมให้รางเคลื่อนที่ได้ตามแนวยาวหรือที่เรียกว่า Zero Longitudinal Restraint (ZLR) ว่าจะสามารถลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิ แรงเบรก และการแอ่นตัวของสะพานได้มากน้อยเพียงใด เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานหรือไม่ ตัวแปรที่จะใช้ในการศึกษาค้นนี้จะคำนึงถึงรูปแบบของสะพานที่ต่างกัน มีการแบ่งช่วงความยาวของสะพานเป็น 1, 2 และ 3 ช่วงใน ระยะที่เท่ากันทั้งในสะพานช่วงเดียว(Simple Beam)และสะพานต่อเนื่อง(Continuous Beam)

Project title	(Stress Analysis of Continuous Welded Rail Considering Track-bridge Interaction Phenomena)			
Name	Mr. Chaowarith	Hasinpee	ID.	54361251
	Mr. Nuttawut	Sumranjai	ID.	54361275
	Mr. Surachart	Leetrakul	ID.	54365020
	Mr. Paween	Tunsarojwanich	ID.	54364740
Project advisor	Dr. Songsak	Suthasupradit		
Major	Civil Engineering			
Department	Civil Engineering			
Academic year	2015			

Abstract

The purpose of this research was to study a longitudinal stress by considering to interaction between bridge and runways. There are three factors to study variation of longitudinal stress consist of temperature, brake force, and bridge deflection which fixed the length in 60 meter. The study was found that longitudinal stress is depends on every factor that we have study. Moreover, the analysis will use CSI SAP2000 program to study distinction between normal fastener and Zero Longitudinal Restraint (ZLR) that how it can decrease a longitudinal stress which came from temperature, brake force, and bridge deflection and it appropriate to use or not. In addition, the variant that use to study is regard to the different form of the bridge that divide the length into three range with equal distance in both of simple beam and continuous beam

กิตติกรรมประกาศ

รายงานโครงการโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด ซึ่งผู้มีพระคุณท่านแรกที่คุณศึกษาใคร่ขอกราบพระคุณคือ ท่านอาจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ สุธาสุประดิษฐ์ ผู้สอนที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้การเขียน รายงานโครงการโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด ท่านที่สอง คือท่านอาจารย์ ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา และท่านที่สาม ท่านอาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิชเชริญ ที่ให้คำแนะนำตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เทคนิคการนำเสนอรายงานปากเปล่า ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณคณะอาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์สาขาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ฝึกสอน ได้คำแนะนำในการจัดทำรายงานโครงการโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างฉบับนี้ที่ไม่ได้กล่าวนาม

คณะผู้จัดทำ

นายเชาวฤทธิ์ หาสนปี

นายณัฐวุฒิ สำราญใจ

นายสุรชาติ ลีตระกูล

นายปวีณ ดันสาโรจน์วนิช



สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ.	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 แผนการดำเนินงาน	4
1.7 งบประมาณ	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	5
2.1 โครงสร้างทางรถไฟ	5
2.2 โครงสร้างทางรถไฟ Ballast-track	6
2.3 การวิเคราะห์การโก่งงอของรางเชื่อมยาว	14
2.4 แบบจำลองการโก่งงอของทางรถไฟและปัจจัยที่มีผล	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ	21
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานและทางเดินรถไฟ	21
3.2 ปัจจัยที่มีผลให้เกิดหน่วยแรงในทางรถไฟ	24
3.3 วิธีการเปลี่ยนแปลงวัสดุยึดรางแบบธรรมดาให้เป็นวัสดุยึดรางมียอมให้เคลื่อนที่ได้ตามแนวยาว (Zero Longitudinal Restraint)	27
3.4 แบบจำลองโครงสร้างสะพานและทางเดินรถไฟ	28
3.5 รูปแบบของสะพานที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	32
4.1 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้น กรณีไม่ติดตั้งวัสดุยึดรางแบบปกติ	32
4.2 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้น กรณีติดตั้งวัสดุยึดรางแบบ ZLR	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก ก	50
ภาคผนวก ข	82



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.6 แผนการดำเนินงาน	4
2.1 ตารางแสดงขนาดและคุณสมบัติราง (ตัวอย่างราง 80 A และ 100 A)	8
2.2 ตารางแสดงขนาด (Gradation) ของหินโรยทาง	14
3.1 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจริง ณ ช่วงเวลาต่างๆ	25



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หน้าตัดราง	6
2.2 วัสดุยึดรางสำหรับหมอนไม้	9
2.3 สลักเกลียวป้อย	9
2.4 Elastic Rail spike	10
2.5 ขนาดของหมอนไม้รถไฟไทย	12
2.6 การโค้งของทางรถไฟ	15
2.7 มุมมองด้านบนของทางรถไฟ	16
2.8 มุมมองแนวตั้ง	16
2.9 ข้อมูลการทดสอบแรงบิดของหมุดยึดราง 4 ชนิด	17
2.10 การเสียรูปในแนวตั้งอันเนื่องมาจากแรงในแนวแกนที่กระทำบนคานที่มีฐานรากวงเคลอร์ (Winkler foundation).	18
2.11 การต้านทานการเคลื่อนที่ตามแนวยาวของหินโรยทาง	18
2.12 การต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้างของหินโรยทาง	19
2.13 องค์ประกอบการต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้างของหินโรยทาง	19
2.14 อิทธิพลของแรงในแนวตั้งที่กระทำต่อการต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้างของหินโรยทาง	20
3.1 หน้าตัดสะพานแบบ Box Girder	21
3.2 หน้าตัดราง UIC 60	22
3.3 จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support)	23
3.4 จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)	24
3.5 แสดงแบบจำลองโครงสร้างสะพานความยาว 60 เมตร ที่อุณหภูมิปกติ	25
3.6 แสดงแบบจำลองโครงสร้างสะพานความยาว 60 เมตร เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 30°C	25
3.7 แสดงแบบจำลองโครงสร้างสะพานความยาว 60 เมตร ที่สภาพปกติ	26
3.8 แสดงแบบจำลองโครงสร้างสะพานความยาว 60 เมตร เมื่อรับน้ำหนักจากรถไฟ	26
3.9 แสดงภาพรวมของแบบจำลองโครงสร้างสะพานและทางรถไฟ	28
3.10 แสดงแบบขยายสะพานความยาว 60 เมตร	29
3.11 สะพานแบบคานช่วงเดียว	30
3.12 สะพานแบบคานช่วงเดียว 2 ช่วงความยาว	30
3.13 สะพานแบบคานต่อเนื่อง 2 ช่วงความยาว	30
3.14 สะพานแบบคานช่วงเดียว 3 ช่วงความยาว	30
3.15 สะพานแบบคานต่อเนื่อง 3 ช่วงความยาว	31

สารบัญรูป (ต่อ)

4.1 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในคานช่วงเดียว	32
4.2 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรคในคานช่วงเดียว	33
4.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานช่วงเดียว	34
4.4 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในคานต่อเนื่อง	34
4.5 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรคในคานต่อเนื่อง	35
4.6 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานต่อเนื่อง	36
4.7 กราฟแสดงผลรวมหน่วยแรงที่เกิดจากอุณหภูมิ แรงเบรคและการแอ่นตัว สะพานช่วงเดียว	36
4.8 กราฟแสดงผลรวมหน่วยแรงที่เกิดจากอุณหภูมิ แรงเบรคและการแอ่นตัว สะพานต่อเนื่อง	37
4.9 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในคานช่วงเดียว	38
4.10 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรคในคานช่วงเดียว	39
4.11 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานช่วงเดียว	40
4.12 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในคานต่อเนื่อง	40
4.13 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรคในคานต่อเนื่อง	41
4.14 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานต่อเนื่อง	42
4.15 กราฟแสดงผลรวมหน่วยแรงที่เกิดจากอุณหภูมิ แรงเบรคและการแอ่นตัว สะพานช่วงเดียว	42
4.16 กราฟแสดงผลรวมหน่วยแรงที่เกิดจากอุณหภูมิ แรงเบรคและการแอ่นตัว สะพานต่อเนื่อง	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

รางเชื่อมยาวเป็นที่นิยมใช้มากกว่ารางธรรมดา เพราะจำนวนจุดต่อของรางมีน้อย ทำให้รถไฟสามารถวิ่งได้เรียบขึ้นและการกระแทกน้อยลง แต่เมื่อนำมาเชื่อมต่อกันมากขึ้น จะเกิดการยืดหดตัวสูง มีผลให้เกิดการดุ้งในราง (Bucking) เนื่องจากหน่วยแรงมีมากเกินไป ปัจจัยที่มีผลให้เกิดหน่วยแรงในรางเมื่อศึกษาสามารถแบ่งได้เป็น อุณหภูมิ แรงเบรกและน้ำหนักของรถไฟ ในปัจจุบันได้มีการออกแบบวัสดุยึดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ตามยาวหรือ Zero Longitudinal Restraint (ZLR) เป็นระบบที่สามารถลดหน่วยแรงในราง โดยจะให้วัสดุยึดรางยอมให้ตัวรางเคลื่อนที่ไปตามแนวยาว ซึ่งในปัจจุบันเริ่มมีการประยุกต์ใช้วัสดุยึดรางแบบ ZLR เพื่อช่วยในการลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในราง ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาถึงผลที่ติดตั้ง ZLR ว่ามีประสิทธิภาพในการลดหน่วยแรงได้มากน้อยเพียงใด

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของหน่วยแรงในรางรถไฟที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจาก อุณหภูมิ แรงเบรก และการแอ่นตัวของสะพาน
2. ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางรถไฟจากรูปแบบสะพานที่แตกต่างกัน
3. ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของหน่วยแรงในรางรถไฟที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อทำการติดตั้ง ZLR และไม่ติดตั้ง ZLR

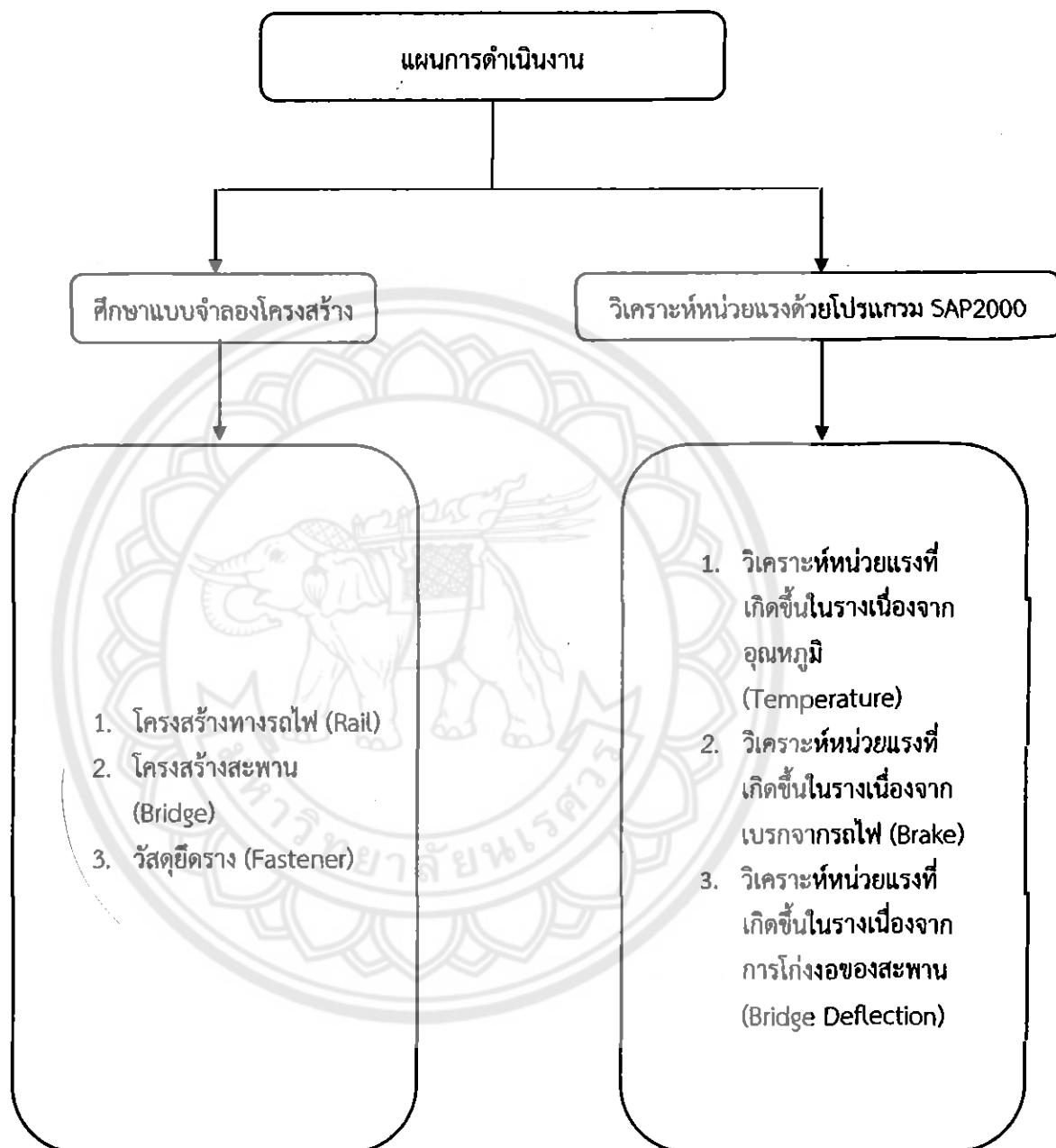
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 2.1 ทราบพฤติกรรมของหน่วยแรงในรางรถไฟที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจาก อุณหภูมิ แรงเบรก และการแอ่นตัวของสะพาน
- 2.2 ทราบถึงพฤติกรรมของหน่วยแรงในรางรถไฟที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อทำการติดตั้ง ZLR และไม่ติดตั้ง ZLR

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- ลักษณะของสะพานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง (Model)
 - สะพานแบบช่วงเดียว (Simple Beam)
 - ✓ สะพาน 1 ช่วง ยาวช่วงละ 60 เมตร
 - ✓ สะพาน 2 ช่วง ยาวช่วงละ 30 เมตร
 - ✓ สะพาน 3 ช่วง ยาวช่วงละ 20 เมตร
 - สะพานแบบต่อเนื่อง (Continuous Beam)
 - ✓ สะพาน 1 ช่วง ยาวช่วงละ 60 เมตร
 - ✓ สะพาน 2 ช่วง ยาวช่วงละ 30 เมตร
 - ✓ สะพาน 3 ช่วง ยาวช่วงละ 20 เมตร
- อุณหภูมิ 30° องศาเซลเซียส [1]
- แรงเบรก +20000 นิวตัน/เมตร [1]
- ความยาวราง 260 เมตร
- ความเค้นดึงวิกฤติที่ทำให้เกิดการฉีกขาด (ultimate tensile strength) 92×10^6 นิวตัน/ตารางเมตร
- ความเค้นอัดวิกฤติที่ทำให้เกิดการดุ้ง (ultimate compressive strength) -72×10^6 นิวตัน/ตารางเมตร
- วัสดุยึดราง แบบปกติและ Zero Longitudinal Restraint (ZLR)
- รางรถไฟ UIC60

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน



1.6 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	เดือน				
	มกราคม	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม	มิถุนายน
	สัปดาห์ที่ 1 2 3 4	สัปดาห์ที่ 1 2 3 4	สัปดาห์ที่ 1 2 3 4	สัปดาห์ที่ 1 2 3 4	สัปดาห์ที่ 1 2 3 4
การ นำเสนอ โครงการ	→				
ศึกษา รูปแบบ โปรแกรม	→				
เลือกพื้นที่		→			
สำรวจ พื้นที่และ โครงสร้าง สะพาน			→		
วิเคราะห์ โครงสร้าง ด้วย โปรแกรม			→		
วิเคราะห์ ผล				→	
เขียน โครงการ					→

1.7 งบประมาณ

-ค่าวัสดุสำนักงาน	500	บาท
-ค่าถ่ายเอกสาร	500	บาท

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 โครงสร้างทางรถไฟ

การออกแบบโครงสร้างทางรถไฟ เพื่อรองรับน้ำหนักจากล้อรถไฟนั้น ได้มีการออกแบบและพัฒนาหลายรูปแบบจนถึงปัจจุบัน เป็นที่ยอมรับที่ใช้งานมี 2 รูปแบบ คือ

1. โครงสร้างทางแบบมีหินโรยทาง (Ballast Track)
2. โครงสร้างทางแบบไม่ได้ใช้หินโรยทาง Slab – Track (Ballastless Track)

โครงสร้างทางแบบมีหินโรยทาง (Ballast Track) เป็นที่นิยมแพร่หลาย (Conventional Track) เนื่องจากค่าก่อสร้างไม่สูงเป็นที่รับได้ในทางเทคนิค และเป็นโครงสร้างที่สามารถใช้กับรถไฟธรรมดาไปจนถึงรถไฟความเร็วสูง เช่น รถไฟความเร็วสูง (TGV) ของการรถไฟฝรั่งเศส เป็นต้น โครงสร้างทางแบบนี้จะประกอบไปด้วยราง เครื่องยึดเหนี่ยวราง หมอนรองราง และหินโรยทาง ประกอบเป็นโครงสร้างทางรถไฟเพื่อใช้งานรองรับน้ำหนักจากล้อรถไฟได้ดีด้วยคุณสมบัติ ความยืดหยุ่น เหมาะสมกับการรับน้ำหนักกระแทก (Impact) จากล้อเหล็กทางรถไฟได้ดีกว่ารูปแบบอื่น ๆ เท่าที่เคยเข้ามาในอดีตตลอดจนการบำรุงรักษาทางไม่ยุ่งยาก

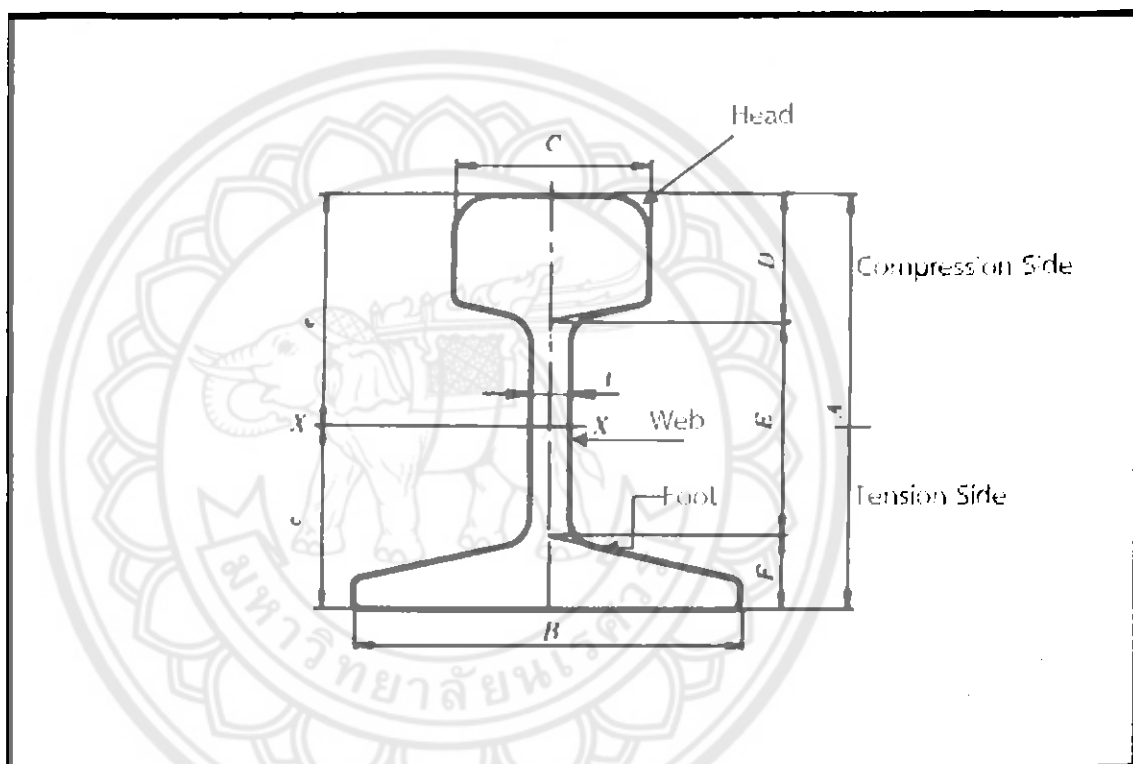
เนื่องจากโครงสร้างทางรถไฟแบบไม่ได้ใช้หินโรยทาง (Ballastless Track) จะมีรูปแบบเทคนิคอีกด้านอื่น โดยออกแบบให้รางวางอยู่บนคอนกรีต มีแผ่นยางรองรับในแต่ละส่วนเพื่อช่วยดูดซับออกแบบโครงสร้างเป็นรูปแบบการใช้งานแบบถาวร นิยมออกแบบใช้กับโครงสร้างทางพิเศษ สำหรับรถไฟความเร็วสูง หรือโครงสร้างทางรถไฟที่ไม่ต้องการให้มีงานสำหรับดูแลและซ่อมบำรุงทางมาก เหมือนดังเช่นกับโครงสร้างแบบมีหินโรยทาง (Ballast Track) รวมถึงเส้นรถไฟที่มีขบวนหนาแน่น มีช่วงเวลาสำหรับการบำรุงรักษาทางน้อย รวมถึงเส้นทางที่คับแคบไม่สะดวกต่องานบำรุงรักษาทาง เช่นรถไฟฟ้าใต้ดิน รถไฟขนส่งมวลชน หรือรถไฟฟ้าความเร็วสูง เป็นต้น แต่ค่าก่อสร้างเริ่มแรกสูง เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างทางแบบมีหินโรยทาง (Ballast Track) มาก แต่ให้ความมั่นใจ ความปลอดภัยในการเดินรถสูงกว่า เนื่องจากวัสดุต่าง ๆ ที่นำมาใช้งานจะคงทนถาวร มีอายุการใช้งานยาวนาน

ในประเทศไทย มีทางรถไฟแบบไม่ได้ใช้หินโรยทาง (Ballastless Track) ใช้งานอยู่หลายเส้นทาง

2.2 โครงสร้างทางรถไฟ Ballast Track จะประกอบไปด้วยวัสดุทางที่สำคัญ คือ

2.1 ราง (Rail)

รูปแบบของรางรถไฟ จะมีหน้าตัดคล้ายกับเหล็กรูปพรรณตัวไอ (I) เป็นรูปแบบที่ได้รับการยอมรับการใช้งานด้านเทคนิคและเป็นหน้าตัดรางที่ประหยัด (Economic) ให้ความแข็งแรง (Stiffness) และมีความคงทนต่อการใช้งาน (Durability) รูปโปรไฟล์ (Profile) ของรางจะประกอบด้วยส่วนของหัวราง (Head) เอรราง (Web) และฐานราง (Foot) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หน้าตัดราง

มาตรฐานขนาดราง จะมีมาตรฐานที่แตกต่างกัน ตามข้อกำหนดการใช้งานของการรถไฟในแต่ละประเทศ เช่น

- UIC. มาตรฐานราง International Union of Railway
- BS. มาตรฐานรางของการรถไฟอังกฤษ
- SNCF. มาตรฐานรางของการรถไฟฝรั่งเศส
- JNR มาตรฐานรางของการรถไฟญี่ปุ่น
- AREA. มาตรฐานรางของการรถไฟอเมริกา

และ SRT, RSR, รฟท. มาตรฐานรางของการรถไฟแห่งประเทศไทย

2.1.1 ขนาดของราง ขนาดรางที่ใช้งานจะกำหนดเป็นน้ำหนักของรางต่อความยาวราง เช่น น้ำหนักรางเป็นกิโลกรัมต่อเมตรหรือน้ำหนักเป็นปอนด์ต่อหลา เช่น ราง

ขนาด 100 A ปอนด์ คือหน้าตัดรางตามมาตรฐาน BS. มีน้ำหนัก 100 ปอนด์ต่อหลา หรือ รางขนาด 50 นิวตัน คือหน้าตัดรางตามมาตรฐานญี่ปุ่น (JIS) มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัมต่อเมตร เป็นต้น

ขนาดน้ำหนักของหน้าตัดรางที่แตกต่างกัน จะให้คุณสมบัติความแข็งแรงรับน้ำหนักได้ไม่เท่ากันจำเป็นต้องออกแบบคำนวณหาขนาดของรางที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้งานได้เต็มที่มาตรฐานกำหนด

การรถไฟไทยกำหนดขนาดรางใช้กับทางประธานรับน้ำหนักเพลลา 20 ตัน ความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ขนาด 100 ปอนด์ A คือ ราง 100 ปอนด์ A ตามโปรไฟล์ของ BS. คุณสมบัติของเนื้อวัสดุรางตามมาตรฐาน “UCI 860 Grade 900 A”

คุณสมบัติกำลังของวัสดุราง อยู่ในชั้นเหล็กกล้า โดยทั่วไปคุณสมบัติของรางที่ใช้งานจะมีค่าความเค้นดึงวิกฤติที่ทำให้เกิดการฉีกขาด (Ultimate Tensile Strength) ระหว่าง 7,000 – 13,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

วัสดุรางจะกำหนดเกรด เป็นชนิด A หรือ B เช่น

ราง 100 A

รางชนิดนี้ค่าความเค้นดึง (Tensile Strength) จะขึ้นอยู่กับค่าส่วนผสมของ คาร์บอน (C) ในเนื้อโลหะเป็นตัวแปรหลัก รางชนิด A จะมีคุณสมบัติเชื่อมต่อกันได้ง่ายเหมาะสำหรับไปใช้ในรางเชื่อมยาว

ราง 100 B

รางชนิดนี้ค่าความเค้นดึง จะขึ้นอยู่กับค่าส่วนผสมของ แมงกานีส (Mn) ในเนื้อโลหะเป็นตัวแปรหลัก รางชนิด B จะมีคุณสมบัติเชื่อมยากไม่เหมาะนำมาใช้งานเชื่อมต่อกัน แต่ให้ความเหนียวแข็ง (Toughness) สูงกว่ารางชนิด A เหมาะสำหรับใช้เป็นรางสั้น ชนิดที่มีหัวต่อรางที่ใช้งานจะมีค่าความแข็ง (Hardness) สูงกว่า 260 HB ขึ้นไป

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงขนาดและคุณสมบัติราง(ตัวอย่างราง 80 A และ 100 A)

มาตรฐานอังกฤษ "A" ออกแบบหน้าตัดราง		
	80 A	100 A
ความสูงของราง A (มิลลิเมตร)	133.35	152.40
ความกว้างฐานราง B (มิลลิเมตร)	117.47	133.35
ความกว้างส่วนของหัวราง (มิลลิเมตร)	63.50	96.85
ความหนาของเอวรางที่น้อยที่สุด D	13.10	15.08
พื้นที่หน้าตัดหัวราง (ตารางมิลลิเมตร)	2270	2856
พื้นที่หน้าตัดเอวราง (ตารางมิลลิเมตร)	1007	1350
พื้นที่หน้าตัดฐานราง (ตารางมิลลิเมตร)	1789	2187
พื้นที่หน้าตัดรวม (ตารางมิลลิเมตร)	5065	6393
หน้าตัดน้ำหนัก กิโลกรัมต่อเมตร	39.76	50.18
โมเมนต์ความเฉื่อย I_{xx} เซนติเมตร ⁴	1205	1961
โมเมนต์ความเฉื่อย I_{yy} เซนติเมตร ⁴	220	340
ระยะเส้นแกนกลางจากหัวราง บนสุด (มิลลิเมตร)	67.89	77.69
Section Modulus Z_{xx} ลูกบาศก์เซนติเมตร	117	252
Section Modulus Z_{yy} ลูกบาศก์เซนติเมตร	37	51

2.1.2 การผลิตราง การผลิตรางใน

ปัจจุบันส่วนใหญ่ผลิตโดยวิธี เตาโอเพนฮาร์ท

Openhearth จากกรรมวิธีอื่น ๆ อีกหลายวิธี ดังเช่น

Openhearth	=	OH
Openhearth, Basic	=	OB
Bessemer, Acid	=	BA
Bessemer, Basic	=	BB
Electric	=	E
Oxygen Blo	=	O

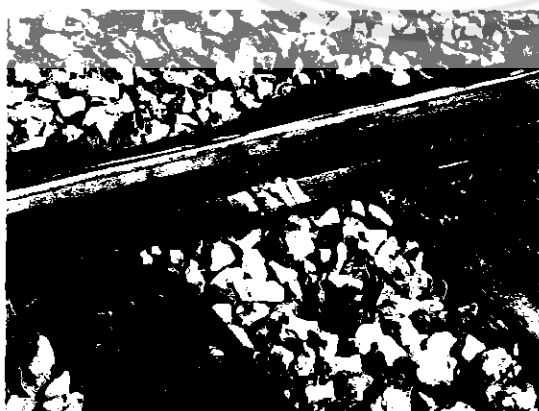
2.1.3 การรีดราง (Rolling of Rails) กรรมวิธีในการผลิตราง จะมีการจัดทำ

Casting Process เหล็กที่หลอมละลายแล้วจะถูกเทจากเตาหลอม (Furnace) มาที่ Ladle หนึ่งจะหนักประมาณ 60-70 ตัน และสามารถเทลงใน Ingot ได้ 12 – 17 Ingots ภายหลังที่ปล่อยไว้ให้เย็นประมาณ 30 นาที แล้วจึงนำแบบออกนำ ingot ที่ได้ เป็น วัตถุดิบ (แท่งเหล็ก) เพื่อนำไปเข้ากระบวนการรีดเหล็ก (Rail Rolling) ตามขั้นตอนต่าง ๆ ให้ได้ขนาดหน้าตัดของรางที่ต้องการ

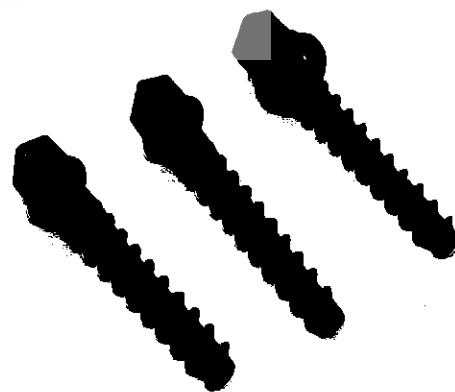
2.2 วัสดุยึดราง (Fastener)

วัสดุยึดรางถือเป็นวัสดุทางที่ใช้สำหรับตรึงยึดรางให้ติดกับหมอนรองรางเพื่อให้ได้ ระยะห่างระหว่างรางได้ขนาดเท่ากัน (Gauge) ตามที่ต้องการ

2.2.1 วัสดุยึดรางสำหรับหมอนไม้ วัสดุยึดรางสำหรับหมอนไม้ที่นิยมจะเป็น ตะปูรางสลักเกลียวป้อย ด้วยมีราคาไม่แพง หรือเรียกว่า แบบยึดติด เครื่องยึด เหนียวแบบนี้จะช่วยให้รางไม่พลิกตัวหรือฐานรางขยับตัว แต่มีแรงอัดย้า (Spring) บน ฐานรางได้น้อยหรือไม่มีเลยจึงไม่สามารถป้องกันรางเคลื่อนตัวในแนวยาว (รางเดิน) จากการขยายตัวของรางอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือการเคลื่อนตัวของรางอัน เนื่องจากการเบรคของล้อ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 วัสดุยึดรางสำหรับหมอนไม้



รูปที่ 2.3 สลักเกลียวป้อย

วัสดุยึดรางชนิดหนึ่ง หรือเรียกว่าสปริงไทป์ (Spring Types) ใช้สำหรับหมอนไม้ วัสดุยึดรางแบบนี้นอกจากจะป้องกันไม่ให้รางพลิกตัว หรือฐานรางขยับตัว (รางฟอก) แล้วป้องกันรางเดินได้อีกด้วย ซึ่งจะเหมาะสมที่จะใช้กับรางเชื่อมยาวด้วยมีรูปแบบสปริงให้เกิดแรงอัดที่ฐานราง ป้องกันไม่ให้รางขยับตัว หรือเคลื่อนตัวโดยง่าย หรือเรียกว่า Elastic Rail Spike มีหลายรูปแบบที่บริษัทต่าง ๆ ผลิตออกมา เพื่อใช้งานทางรถไฟ



รูปที่ 2.4 Elastic Rail spike

2.2.2 วัสดุยึดรางสำหรับหมอนคอนกรีต วัสดุยึดรางสำหรับหมอนคอนกรีตจะออกแบบเป็นแบบสปริง เพื่อให้มีคุณสมบัติครอบคลุมในการยึดฐานรางและป้องกันรางเดิน เนื่องจากหมอนคอนกรีตมีคุณสมบัติที่เหมาะสมใช้กับรางเชื่อมยาว เครื่องยึดเหนี่ยวที่ใช้จึงจำเป็นต้องใช้แบบตัวยึดแบบสปริง (Spring Clip) ปัจจุบันมีหลายบริษัทผลิตขึ้นเพื่อใช้งานหลายรูปแบบ

คุณสมบัติที่เหมาะสมทางเทคนิคของเครื่องยึดเหนี่ยวราง

- 1) มีคุณสมบัติรักษาระยะขนาดทาง (Gauge) ได้ดี
- 2) ให้แรงอัดฐานรางได้ดี ตลอดการใช้งานการเดินรถ
- 3) มีคุณสมบัติรับแรงสั่นสะเทือนได้ดี (Vibration) ไม่เกิดการล้าตัวตลอดอายุการใช้งาน
- 4) มีการคงรูปได้ดี ไม่มีผลกระทบต่องานบำรุงรักษาทาง
- 5) มีแรงอัดสูงเพียงพอที่ต่อต้านการเดินของรางได้ดี
- 6) ควรจะเป็นรูปแบบเมื่อติดตั้งแล้วคงอยู่ได้ถาวรไม่หลุดหรือคลายตัวได้ง่าย (Fit and Forget)
- 7) ควรีคุณสมบัติ เมื่อถอดออกมาแล้ว สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ดีเหมือนเดิม
- 8) ควรีรูปแบบน้อยชิ้น เพื่อง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษา
- 9) ควรีลักษณะป้องกันการขโมยได้ดี

10) ควรเป็นชนิดที่นิยมใช้งานโดยทั่วไปเพื่อสะดวกต่อการรักษา และการสำรองอะไหล่ในอนาคต

11) ควรมีราคาถูก และมีอายุการใช้งานยาวนาน เช่นเดียวกับอายุการใช้งานเหมือนคอนกรีต

2.3 จานรองราง (Base Plate)

จานรองราง เป็นวัสดุที่ใช้วางใต้รางกับหมอนไม้ เพื่อช่วยดูดซับกระจายแรง จากฐานรางลงบนผิวหมอนไม้ให้น้อยลง ช่วยให้หมอนไม้มีอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น โดยเฉพาะหากใช้หมอนไม้ชนิดแข็งปานกลาง สำหรับในทางโค้งมีความจำเป็นต้องติดตั้ง จานรองรางทุกท่อนหมอน เนื่องจากในทางโค้งจะเกิดแรงเหวี่ยงด้านข้างของตัวรถสูง มี ผลให้เนื้อไม้เสียหายได้มากกว่าในส่วนของทางตรง จานรองรางมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับ ความเหมาะสมและมีช่องสำหรับจำนวนของตะปูรางที่จะใช้งาน จานรองรางที่ใช้กับทาง โค้ง จะใช้จำนวนตะปูรางมากกว่าทางตรง ในทางตรงทั่วไปจะใช้ตะปูราง 2-3 ตัวต่อหนึ่ง ฐานรางแต่สำหรับในทางโค้งจะใช้ตะปูรางมากถึง 4 ตัว ต่อฐานราง เป็นต้น

2.4 หมอนรองราง

หมอนรองรางถือเป็นวัสดุที่ใช้งานรองรับน้ำหนักจากฐานหรือจานรองราง ลงสู่ผิวหน้าหมอนเพื่อช่วยกระจายแรงผ่านหมอน ลงไปยังชั้นหินโรยทาง ปัจจุบันหมอนรอง รางมีใช้งานอยู่ 3 ชนิด คือ

- 1) หมอนไม้ (Timber Sleeper)
- 2) หมอนคอนกรีต (Concrete Sleeper)
- 3) หมอนเหล็ก (Steel Sleeper)

- หมอนไม้ (Timber Sleeper) ไม้ที่นำมาใช้เป็นหมอนทาง จะกำหนดเป็น ไม้เนื้อแข็ง เพื่อให้ความแข็งแรง อายุการใช้งานได้นาน แต่หากเป็นไม้เนื้อ แข็งปานกลางแล้วจะกำหนดให้อาบน้ำยา (Treatment) เพื่อให้เนื้อไม้มี ความคงทน อายุการใช้งานได้ยาวนาน

ข้อดีของการใช้หมอนไม้

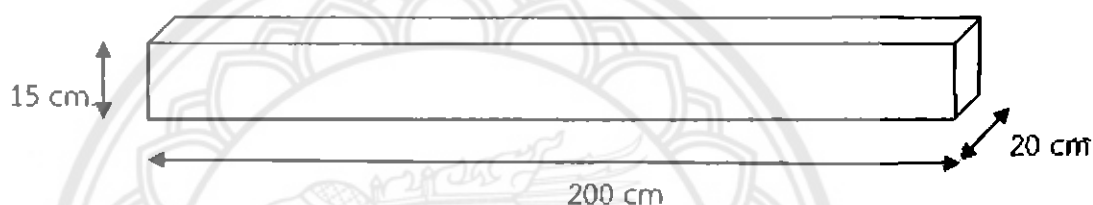
- 1) ราคาไม่แพง (ในบางประเทศ) ง่ายต่อการผลิต
- 2) ช่วยดูดซับ (Absorbs) แรงกระแทก (Impact) ได้ดี
- 3) ง่ายต่อการขนส่งและบรรทุก
- 4) ง่ายต่อการซ่อมบำรุงในการวางและปรับแก้ระยะห่างของรางและระยะ หมอนได้ง่าย
- 5) สามารถใช้งานร่วมกับหินโรยทางได้ดี

6) สามารถใช้เป็นไม้หมอนบนสะพานได้

7) เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

ข้อเสียของหมอนไม้

- 1) อายุใช้งานไม่ยาวนาน เสื่อมสภาพตามอากาศ
- 2) เมื่อเสื่อมสภาพ เช่น หมอนยุบ หรือแตก ยากต่อการบำรุงรักษา สภาพทางให้ได้ดีเหมือนเดิม
- 3) ติดไฟได้ง่าย
- 4) หมอนไม้ที่ใช้กับทางรถไฟไทย เป็นหมอนไม้เนื้อแข็ง ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร หนา 15 เซนติเมตร



รูปที่ 2.5 ขนาดของหมอนไม้รถไฟไทย

- หมอนคอนกรีต (Concrete Sleeper) หมอนคอนกรีตยังเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายด้วยปัญหาไม้ขาดแคลน เช่น ในประเทศไทย รัฐบาลได้กำหนดนโยบายปิดป่า จำเป็นต้องจัดหาหมอนไม้จากต่างประเทศ ทำให้มีราคาแพง เพราะคุณภาพไม้ไม่ดีพอ เมื่อเทคโนโลยีคอนกรีตพัฒนาขึ้นมาก ทำให้สามารถออกแบบและผลิตหมอนคอนกรีตมาใช้งานทดแทน ค่าใช้จ่ายโดยรวมจะไม่แพง เมื่อเปรียบเทียบกับราคาหมอนไม้ในปัจจุบัน หมอนคอนกรีตที่ใช้งานมี 2 แบบคือ แบบคอนกรีตอัดแรง (Prestress Concrete) และแบบคอนกรีตรับแรงดึง (Post Tension Concrete) ตามความต้องการใช้งานในแต่ละประเทศ

ข้อดีของหมอนคอนกรีต

- 1) มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักของหมอนมีส่วนช่วยต่อต้านการเคลื่อนตัวของรางเชื่อมยาวได้ดี
- 2) อุปกรณ์เครื่องยึดเหนี่ยวหมอนคอนกรีตมีคุณภาพสูง โดยกำหนดเลือกใช้แบบสปริง
- 3) สามารถเป็นฉนวนป้องกันกระแสไฟฟ้าได้ดี
- 4) มีอายุการใช้งานยาวนานโดยทั่วไปกำหนดไว้ 50 ปี
- 5) สามารถผลิตได้ครั้งละจำนวนมาก ๆ

ข้อเสียของหมอนคอนกรีต

- 1) การขนส่งและการบรรทุกยุ่งยากกว่าหมอนไม้ เนื่องจากหมอนมี น้ำหนักมากต้องใช้เครื่องมือ เครื่องจักรกลช่วย
- 2) การบำรุงรักษา การอัดหินต้องใช้เครื่องมือกลหนัก เช่น รถอัดหิน เป็นต้น
- 3) หมอนจะแตกชำรุดมาก หากเกิดเหตุรถตกราง และการซ่อมเปลี่ยนหมอนใหม่ยากกว่าหมอนไม้

หมอนคอนกรีตที่ใช้กับการรถไฟไทย เป็นหมอนคอนกรีตแบบคอนกรีตอัดแรง (Prestress Concrete) มีขนาดความกว้างประมาณ 25 เซนติเมตร หนาประมาณ 22 เซนติเมตร ความยาว 200 เซนติเมตร

2.5 หินโรยทาง (Ballast)

หินโรยทางที่ใช้จะเป็นหินย่อยขนาดใหญ่จากโรงโม่ ใช้หินประเภทหินปูน (Lime Stone) หรือหินแกรนิต (Granite) สำหรับหมอนคอนกรีตแล้วนิยมใช้หินแกรนิตเป็นหินโรยทาง เนื่องจากมีความแข็งแรง ไม่ถูกย่อยหรือเสียหายจากแรงอัดทับของหมอนคอนกรีตที่มีกำลังสูงได้ดีกว่าหินปูน ขนาดมวลรวมคละของหินโรยทางจะมีขนาดใหญ่คือตั้งแต่ 50 มิลลิเมตร 25 มิลลิเมตร ลงไป ต้องปราศจากมวลขนาดเล็ก หรือฝุ่นที่จะทำให้เกิดฝุ่นโคลนหรือความสกปรกในชั้นหินโรยทางได้

คุณสมบัติของหินโรยทาง

- 1) ช่วยกระจายน้ำหนักจากใต้หมอนแผ่กระจายลงยังผิวคันทางให้สม่ำเสมอ
- 2) ให้ความต้านทานของการเคลื่อนตัวของทางทั้งแนวยาวและด้านข้างได้ดี
- 3) มีการระบายน้ำได้ดี
- 4) มีความหนาแน่น และอัดตัวกันได้ดี เมื่อได้รับอัดหินแล้ว
- 5) มีความยืดหยุ่นตัวในการรับน้ำหนักกระแทก (Impacted load) ได้ดี

คุณสมบัติของวัสดุหินโรยทาง

- 1) ควรจะมีราคาถูก
- 2) มีความแข็ง (Hard) คงทน (durable) ทนต่อการสึกหรอ (Tough and wear Resistance) ได้ดี
- 3) มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมคม (Cubical size , Sharp Edges)
- 4) มีโครงสร้างที่เกาะยึดกันแล้วมีโพรงเพื่อการระบายน้ำได้ดี

ขนาดมวลรวมคละ (Gradation) ของหินโรยทางในแต่ละการรถไฟจะกำหนด Gradation ของหินโรยทางไม่เหมือนกันแต่จะใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลการใช้งานศึกษา และบำรุงรักษาทางในแต่ละประเทศนั้นๆ ที่ได้ใช้กันมาจนเป็นที่พอใจ

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงขนาด (Gradation) ของหินโรยทาง

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	76	60	50	40	25	20
เปอร์เซ็นต์ผ่าน ตะแกรง	100	80- 100	25- 70	0-20	0-55	0-5

2.3 การวิเคราะห์การโค้งงอของรางเชื่อมยาว

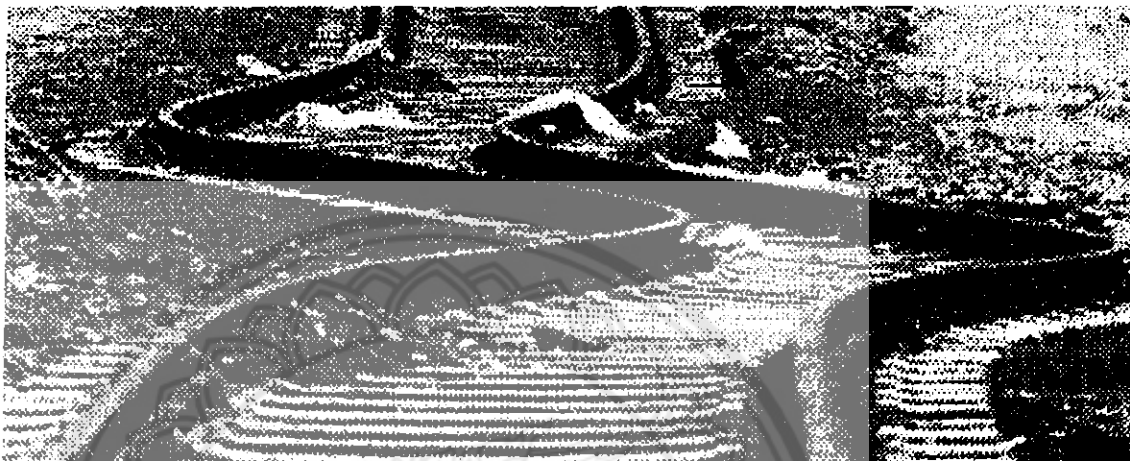
รางเชื่อมยาวเมื่อเปรียบเทียบกับรางแบบรอยต่อไม่ใช่เพียงแค่ลดค่าบำรุงรักษา แต่ยังเพิ่มอายุการใช้งานขององค์ประกอบต่างๆในทางรถไฟและเพิ่มความสะดวกปลอดภัยแก่ผู้โดยสาร เนื่องเพราะรางเชื่อมยาวจะเกิดการขยายตัวของรางยาวที่จะคาดเดา การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีผลให้เกิดหน่วยแรงอัดและการโค้งงออาจอุบัติเหตุเพราะฉะนั้นจึงได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจะคำนึงถึงเสถียรภาพของรางเชื่อมยาวในทางรถไฟบนพื้นราบและบนสะพาน โดยที่สามารถจำลองและคำนวณเป็นรูปแบบสามมิติได้ เป็นเครื่องมือเพื่อหาแนวทางปลอดภัยใหม่ๆ ซึ่งแนวคิดนี้จะส่งเสริมเพื่อใช้สำหรับการปรับปรุง Leaflet 720R(มาตรฐานกำหนดการติดตั้งและซ่อมบำรุงทางรถไฟแบบเชื่อมยาว)

ในเอกสารแบบจำลองเสถียรภาพของทางรถไฟนี้จะเป็นรูปแบบของการตรวจสอบ โดยจะแสดงว่ามีปัจจัยใดบ้างของแบบจำลองทางรถไฟที่สามารถหาได้จากการตรวจวัด การวิเคราะห์การตอบสนองเป็นการทำเพื่อหาปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อเสถียรภาพ สรุปได้ว่าความโค้ง ความแข็งแรงของหินโรยทางในแนวนอนและการเอียงศูนย์เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการโค้งงอ มีเพียงวัสดุยึดราง (fasteners) ที่แข็งแรงเท่านั้นที่จะปรับปรุงเสถียรภาพทางรถไฟให้ดีขึ้นได้ ส่วนวัสดุยึดรางที่มีความแข็งแรงน้อยและความหนาตามยาวและทางด้านข้างของหินโรยทางจะไม่สำคัญ

เมื่อ 20 ปีที่แล้วรางแบบรอยต่อมีมากในประเทศเนเธอร์แลนด์และเกือบจะทุกที่ในแถบประเทศตะวันตกจากนั้นถูกแทนที่ด้วยรางแบบเชื่อมยาว รางจะถูกเชื่อมในโรงงาน ในหนึ่งช่วงรางจะมีความยาวถึง 360 เมตรและหลังจากติดตั้งในทางรถไฟในแต่ละช่วงก็จะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน กระบวนการนี้จะได้รางยาวที่ป้องกันการขยายตัวได้ โดยมักจะเกิดขึ้นบ่อยบริเวณสะพานและจุดต่อขยายตัว เพราะความซับซ้อนของความเค้นและการเสียรูปถ้าใช้ที่บริเวณดังกล่าว ถ้าความเค้นและการเสียรูปเหล่านี้สามารถคาดการณ์ได้อย่างถูกต้อง จะทำให้หลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่สูงและความไม่สะดวกได้

ทางรถไฟจะติดตั้งขณะที่หน่วยแรงในรางเท่ากับศูนย์ที่อุณหภูมิทั่วไปประมาณ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ลดลงที่ -20 องศาเซลเซียส บริเวณส่วนบนของหน้าตัดรางจะเกิดหน่วยแรงดึง ถ้าอุณหภูมิต่างๆจะทำให้รางเปราะจนทำให้เกิดรอยแตก โดยขนาดของรอยแตกต้องไม่เกินค่าที่ยอม

ให้เพื่อป้องกันไม่ให้รถไฟตกราง ที่อุณหภูมิสูงๆถึง 70 องศาเซลเซียส หน่วยแรงอัดจะเกิดขึ้นในราง ถ้าอุณหภูมิในรางสูงมากจะเกิดอันตรายเป็นอย่างมากเนื่องจากการโค้งอาจอุบัติขึ้นได้ โดยในความยาวประมาณ 20 เมตร ทางรถไฟสามารถเลื่อนออกทางข้างได้ถึง 1 เมตร การเสียรูปส่วนใหญ่จะเกิดมุมของรูปราง ในช่วงฤดูร้อนทางรถไฟอาจเกิดการโค้งงอนับร้อยในทั่วโลก[4]



รูปที่ 2.6 การโค้งของทางรถไฟ

ในปี 1993 ได้มีการเริ่มต้นวิจัยโปรแกรมเพื่อแนะนำเสถียรภาพของรางรถไฟเชื่อมยาว ได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยคำนึงถึงเสถียรภาพของรางเชื่อมยาวบนพื้นราบและบนสะพาน สามารถทำเป็นแบบจำลองและคำนวณในรูป 3 มิติได้[5] และยังใช้งานกับคอมพิวเตอร์ส่วนตัวใน user-friendly การคำนวณเคอร์เนล(Kernel (linear algebra)) เป็นพื้นฐานที่แยกมาจากโปรแกรมวิธีการวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง(discrete element program) จะใช้โปรแกรมเพื่อหาแนวทางปลอดภัยใหม่ๆ แนวคิดนี้จะส่งเสริมเพื่อใช้สำหรับการปรับปรุง Leaflet 720R (มาตรฐานกำหนดการติดตั้งและซ่อมบำรุงทางรถไฟแบบเชื่อมยาว)

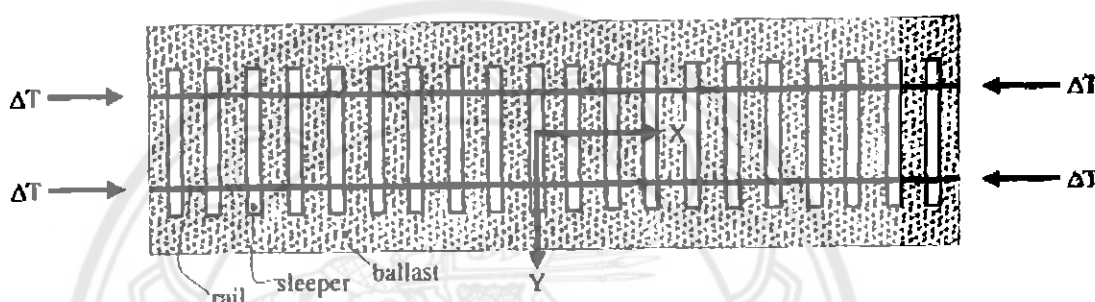
เอกสารนี้เป็นแบบจำลองการโค้งของทางรถไฟจะสามารถหาคำตอบได้ แล้วจะทราบประเด็นสำคัญที่เป็นปัจจัยโดยวิธีทดลองทางวิทยาศาสตร์และผลการทดลองบางอย่างจากบทความจากนั้นการวิเคราะห์การตอบสนองของการโค้งของทางโค้งรางรถไฟโดยมีปัจจัย ดังนี้

- รัศมีความโค้ง
- ค่าความต้านทานสูงสุดและต่ำสุดของหินโรยทางต่อความคงทนด้านข้าง
- ค่าการเสียรูปสูงสุดและต่ำสุดของหินโรยทางต่อความคงทนด้านข้าง
- ความต้านทานตามยาวของหินโรยทาง
- ค่าความคงทนต่อแรงบิดของวัสดุยึดราง
- ความยาวคลื่นทั้งหมดและครึ่งหนึ่งของการเยื้องศูนย์

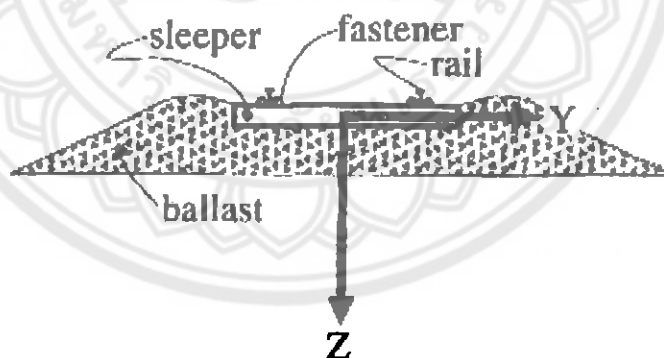
2.4 แบบจำลองการโค้งงอของทางรถไฟและปัจจัยที่มีผล

ในส่วนนี้จะอธิบายปัจจัยแบบจำลองการโค้งงอของทางรถไฟให้ทราบค่าของแรงบิดของตัวยึดรางรวมถึงพฤติกรรมของหินโรยทางตามยาวและด้านข้าง

การโค้งงอที่เกิดขึ้นในทางรถไฟส่วนมากจะเกินในระนาบแนวนอน การโค้งงอทางแนวตั้งจะสังเกตได้จากอดีต การโค้งงอเกิดจากหน่วยแรงจากอุณหภูมิ(Thermal load) และหรือน้ำหนักจากเครื่องยนต์ทำให้เกิดแรงอัดสูง ถ้าทางรถไฟมีความทนทานที่ดี ไม่โค้งงอ เยื้องศูนย์เล็กน้อย อุณหภูมิ น้ำหนักเครื่องยนต์และการเยื้องศูนย์จะมีผลต่อทิศทางแรงด้านข้าง แรงนี้จะต่อต้านโดยแรงต้านทานด้านข้างของหมอนรองรางที่อยู่ในหินโรยทาง

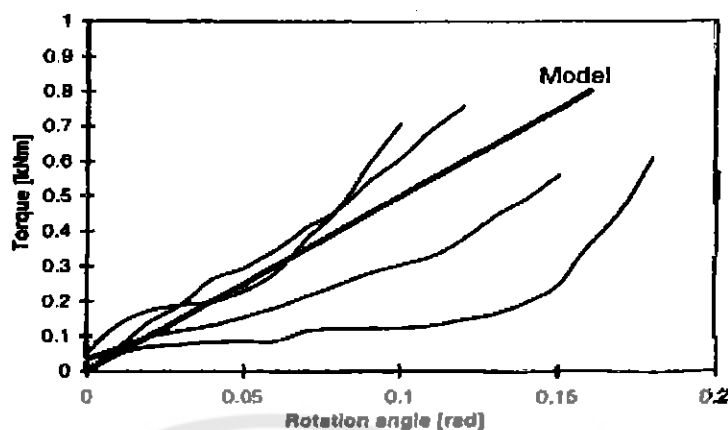


รูปที่ 2.7 มุมมองด้านบนของทางรถไฟ



รูปที่ 2.8 มุมมองแนวตั้งของทางรถไฟ

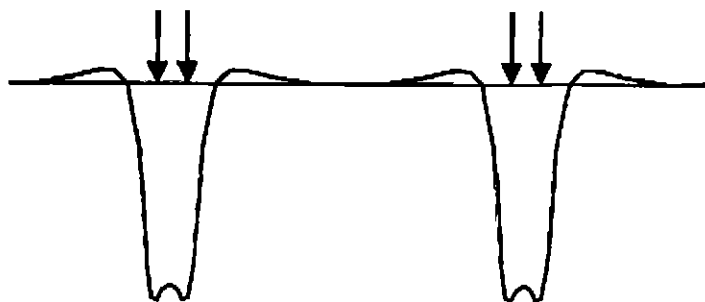
รูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นการเสียรูปหลังการโค้งงอ จึงเป็นสิ่งสำคัญในการเลือกแบบจำลองคานทางเรขาคณิตไม่เชิงเส้น(non-linear) สำหรับรางคู่ แรงที่เกิดขึ้นจริงสามารถคำนวณการเสียรูปได้จาก พื้นที่หน้าตัด ยังโมดูลัส โมเมนต์อินเนอร์เซีย และค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิในรางเป็นปัจจัยที่สำคัญ ปัจจัยเหล่านี้จะทราบได้จากโปรไฟล์ของราง(rail profile) กล่าวคือ ระยะระหว่างรางคู่จะมากหรือน้อยและการเคลื่อนตัวที่ไม่เท่ากันของรางในวัสดุยึดรางตามแนวยาว(X) จะโดนต้าน รางทั้งสองสามารถออกแบบโดยคานเดียว



รูปที่ 2.9 ข้อมูลการทดสอบแรงบิดของหมุดยึดราง 4 ชนิด

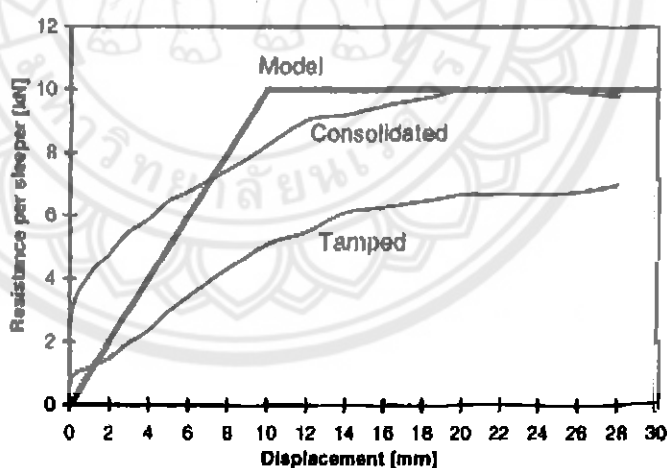
วัสดุยึดราง(Fasteners) ที่ด้านการหมุนและการดัดของรางในแนวยาวจะสัมพันธ์กับไม้หมอนรถไฟ จากการทดสอบสามารถหาค่าโมเมนต์แรงบิดในตัวยึดที่กระทำกับมุมของการหมุน จากการทดสอบดังกล่าวพบว่า รางถูกยึดโดยวัสดุยึดราง(Fasteners) วางบนไม้หมอนรถไฟที่ยึดแน่น และมีแรงกระทำเนื่องจากโมเมนต์จากการการบิดดังรูป รูปที่ 2.9 แสดงข้อมูลจากการวัด[6] ในที่นี้ วัสดุยึดราง(Fasteners) เป็นการจำลองเชิงเส้น(linear) ในช่วงอีลาสติก (elastic) จะเป็นการคำนวณผลลัพธ์ของจุดสูงสุดที่รับได้เท่านั้นของค่าความแข็ง (stiffness) ในวัสดุยึดราง(Fasteners)

ถ้าน้ำหนักที่กระทำของเพลตามแนวแกนในแนวดิ่งถูกนำมาใช้ในรางและไม้หมอนรถไฟ จะทำให้มีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งในหินโรยทาง(ballast) วิธีที่ง่ายที่สุดในการจำลองคือใช้สปริงแบบเชิงเส้น(linear) ในช่วงอีลาสติก (elastic) รู้ได้จากฐานรากยึดหุ่นแบบวิงเคิลอร์ (Winkler foundation) แรงสถิตยในแนวดิ่งเนื่องจากการเสียรูปจากน้ำหนักที่กระทำ 4 เปลาที่กระทำบนฐานรากยึดหุ่นแบบวิงเคิลอร์ (Winkler foundation) ที่แสดงในรูป รูปที่ 2.12 การเสียรูปในแนวดิ่งของรางมีข้อจำกัดในการเลียงการเกิดความล้าของราง ซึ่งจุดประสงค์ของผลลัพธ์ในค่าความแข็ง (stiffness) ในแนวดิ่งของชั้นฐานรากใต้ทางรถไฟ โดยค่าทั่วไปค่าความแข็ง (stiffness) ในสปริงเท่ากับ 100 กิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร ต่อ ความยาวทางรถไฟ 1 เมตร



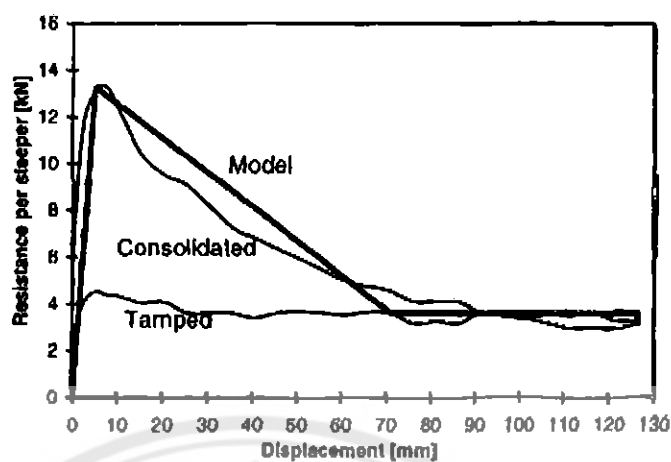
รูปที่ 2.10 การเสียรูปในแนวตั้งอันเนื่องมาจากแรงในแนวแกนที่กระทำบนคานที่มีฐานรากวิงเคิลอร์(Winkler foundation).

การต้านทานการเคลื่อนที่ในแนวยาวของหินโรยทาง(ballast) สามารถวัดได้จากการดึงหรือการดันของไม้หมอนแบบเดี่ยว หรือส่วนของทางรถไฟในทิศทางตามแนวยาว การเสียรูปตามแนวยาวจากการทดสอบได้จากแผงหน้าปัดและเครื่องตรวจสอบแรงกระทำ ตัวอย่างของการทดสอบ tamped และ consolidated track ดังรูป รูปที่ 2.11 จากรูปได้แสดงผล consolidation เนื่องมาจากการสั่นสะเทือนเมื่อรถไฟวิ่งผ่าน จุดครากตามยาวจะเพิ่มขึ้น พฤติกรรมของไม้หมอนรถไฟและหินโรยทาง (ballast) ในแนวตามยาวเป็นแบบจำลองแบบพลาสติกดังที่แสดงเป็นเส้นหนาใน รูปที่ 2.11

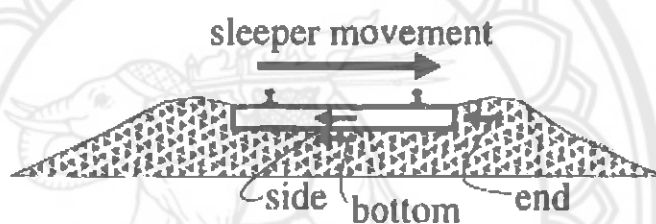


รูปที่ 2.11 การต้านทานการเคลื่อนที่ตามแนวยาวของหินโรยทาง

พฤติกรรมด้านข้างของทางรถไฟสามารถวัดได้จากการอัดหรือดึง ได้จากผลของความสัมพันธ์ของทางรถไฟหรือไม้หมอนในแนวต้านข้าง ผลของการทดสอบการอัดไม้หมอนแบบเดี่ยวใน consolidated และ tamped track ดังแสดงในรูป รูปที่ 2.12 เนื่องมาจากการสั่นสะเทือนทำให้เม็ดกรวดเกิดการอัดกันและหินโรยทาง(ballast) มีการต้านกันเพิ่มขึ้น หลังจากที่มีการเคลื่อนที่ ความหนาแน่นของเม็ดกรวดที่อัดกันจะลดลงในช่วงแรกและการต้านจะมีค่าลดลง

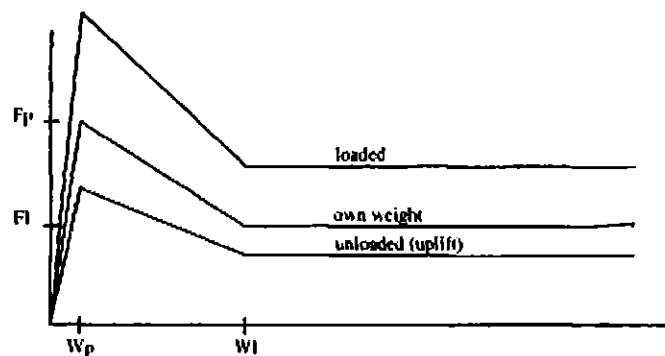


รูปที่ 2.12 การต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้างของหินโรยทาง



รูปที่ 2.13 องค์ประกอบการต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้างของหินโรยทาง

แรงต้านด้านข้างของไม้หมอน ดังรูป รูปที่ 2.12 คือการรวมกันของแรงต้านของไม้หมอน รถไฟด้านข้าง ด้านบน และด้านปลาย ดังรูป รูปที่ 2.13 การขัดพุดกันจะประมาณได้จาก $1/3$ ของผลรวมของแรงต้าน(กล่าวคือ ไม่มีน้ำหนักลงเพลลา) ความเค้นในแนวตั้งระหว่างไม้หมอนรถไฟ กับหินโรยทาง(ballast) ที่เป็นผลลัพธ์ของน้ำหนักลงเพลลาตามแนวแกนในแนวตั้งเป็นการเพิ่มหรือ ลดลงของแรงต้านด้านข้างของหินโรยทาง (ballast) ที่ด้านบนของไม้หมอนรถไฟ การตรวจวัด ยืนยันได้จาก ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวตั้งและแรงต้านด้านข้างโดยสมมติเป็นแบบเชิง เส้น(linear) แบบจำลองของหินโรยทาง(ballast) ในด้านข้าง ซึ่งจะใช้แรงในแนวตั้งที่ต่างกันดังรูป รูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 อิทธิพลของแรงในแนวดิ่งที่ทำการต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้างของหินโรยทาง

สำหรับการเสียรูปเนื่องจากแรงที่กระทำแรกของทางรถไฟ ดังรูปที่ รูปที่ 12. ที่ได้จากการคำนวณ การคูณการเสียรูปกับผลลัพธ์ของค่าความแข็ง (stiffness) ของหินโรยทาง (ballast) ในแรงกระจายในแนวดิ่ง R_v ระหว่างไม้หมอนรถไฟและหินโรยทาง(ballast) สำหรับไม้หมอนแต่ละอัน ขนาดของแรงในช่วงวิกฤติในแนวด้านข้าง F_p คำนวณได้จากสมการ

$$F_p = F_{p0} + \mu_t R_v$$

ปริมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของไม้หมอนรถไฟและหินโรยทาง(ballast) μ_t เท่ากับ 0.86 และเป็นค่าเฉลี่ยของ ความสัมพันธ์ของคอนกรีต[6] ถ้าขนาดของ R_v เป็นบวก จะอยู่ในกรณีที่ทางรถไฟยกขึ้น ค่าต่ำสุดของ R_v คือ 0 ถึง ติดลบ จากน้ำหนักตัวมันเองของทางรถไฟ

ขนาดสูงสุดของแรงเสียดทานด้านข้าง F_1 ขึ้นอยู่กับค่า R_v กับอัตราส่วนที่ซ้ำกัน เช่น F_p ดังสมการ

$$F_1 = F_{10} \cdot \frac{F_p}{F_{p0}}$$

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

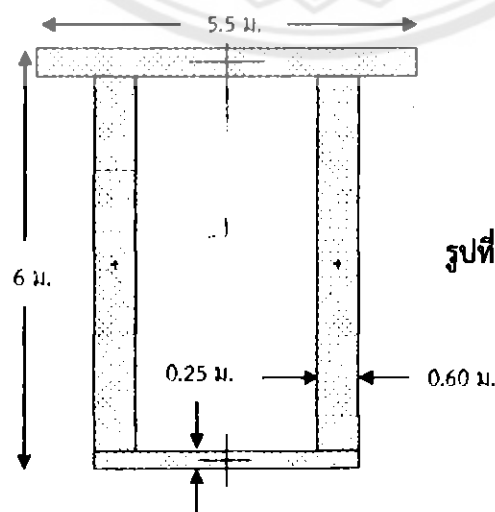
ในบทที่สามนี้จะอธิบายถึงข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานและทางรถไฟ ปัจจัยที่มีผลให้เกิดหน่วยแรงในราง การใส่วัสดุยึดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ตามยาว (ZLR) แบบจำลองโครงสร้างและรูปแบบสะพานที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม CSI SAP2000 เพื่อศึกษาว่าข้อมูลดังกล่าวมีรูปแบบ องค์ประกอบและภาพรวมในการวิเคราะห์อย่างไร

3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานและทางเดินรถไฟ

3.1.1 โครงสร้างสะพาน (Bridge Structure)

สะพานมีความยาว 60 เมตร หน้าตัดสะพานเป็นแบบ Box Girder ดังรูปที่ 3.1 ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุออกแบบ มีคุณสมบัติ ดังนี้

- Weight per Unit Volume	23563.122	N/m ³
- Modulus of Elasticity	3.400×10^{10}	N/m ²
- Poisson's Ratio	0.2	
- Coefficient of Thermal Expansion	9.900×10^{-6}	
- Shear Modulus	1.417×10^{10}	N/m ²
- Specified Concrete Compressive Str.	28000000	N/m ²



รูปที่ 3.1 หน้าตัดสะพานแบบ Box Girder

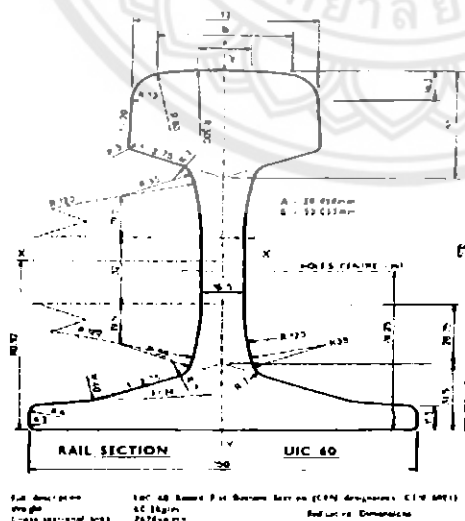
ลักษณะโครงสร้างสะพานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเป็นแบบคานช่วงเดียว(Simple Beam) และคานต่อเนื่อง(Continuous Beam) แบ่งเป็น

- สะพาน 1 ช่วง ยาวช่วงละ 60 เมตร
- สะพาน 2 ช่วง ยาวช่วงละ 30 เมตร
- สะพาน 3 ช่วง ยาวช่วงละ 20 เมตร

3.1.2 ทางเดินรถไฟ (Railway)

ทางเดินรถไฟมีความยาวทั้งสิ้น 260 เมตร ตลอดช่วงความยาว ใช้รางขนาด UIC 60 หรือรางหนัก 60 กิโลกรัม/เมตร ในการออกแบบมีคุณสมบัติ ดังนี้

- Weight per Unit Volume 76972.86 N/m^3
- Modulus of Elasticity $2.100 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
- Poisson's Ratio 0.3
- Coefficient of Thermal Expansion 1.170×10^{-5}
- Shear Modulus $8.077 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
- Minimum Yield Stress $3.447 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
- Minimum Tensile Stress $4.482 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
- Effective Yield Stress $3.792 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
- Effective Tensile Stress $4.930 \times 10^8 \text{ N/m}^2$



รูปที่ 3.2 หน้าตัดราง UIC 60

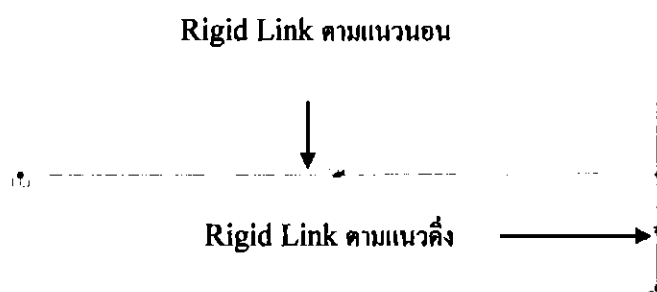
3.2.2 ชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link)

การศึกษานี้ได้จำลองแบบจำลองสปริงหลายชิ้นเป็นโครงข้อแข็งเพื่อเชื่อมต่อกับวัสดุโครงสร้างให้ยึดติดกัน แบ่งตามค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูป(Stiffness) ได้ ดังนี้

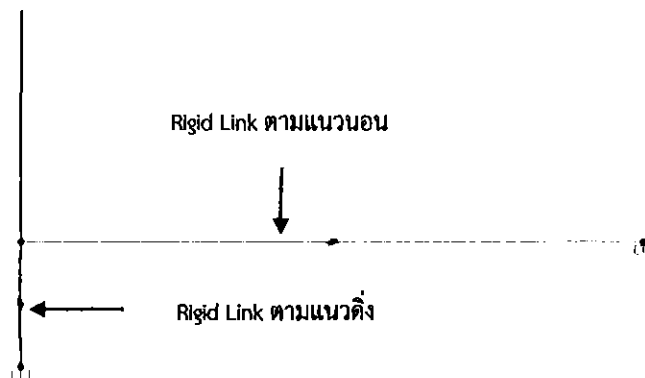
- ชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อระหว่างหินโรยทางกับรางรถไฟมีค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูป $U1 = 6.0 \times 10^8$ $U2 = 3.0 \times 10^7$
- ชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างสะพานและหินโรยทางกับรางรถไฟมีค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูป $U1 = 7.2 \times 10^9$ $U2 = 7.2 \times 10^6$
- ชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อยึดรางรถไฟที่ปลายทั้งสองด้านมีค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูป $U1 = 4.402 \times 10^8$
- ชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) ใช้แทนโครงสร้างสะพานเชื่อมต่อระหว่างรางกับฐานรองรับมีค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูป $U1 = 1.1 \times 10^{11}$ $U2 = 1.1 \times 10^{11}$ $U3 = 1.1 \times 10^{11}$
- ชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อจุดรองรับยึดหมุน(Hinge Support)ตามแนวนอนและแนวตั้งมีค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูป $U1 = 6.0 \times 10^8$ และ $U1 = 1.0 \times 10^{11}$ ตามลำดับ
- ชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อจุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่(Roller Support)ตามแนวนอนและแนวตั้งมีค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูป $U1, U2 = 0$ และ $U1 = 1.0 \times 10^{11}$ ตามลำดับ

3.2.3 จุดรองรับ (Support)

ประกอบด้วยจุดรองรับยึดหมุน(Hinge Support) และจุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่(Roller Support) ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.3 จุดรองรับยึดหมุน(Hinge Support)



รูปที่ 3.4 จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่(Rotler Support)

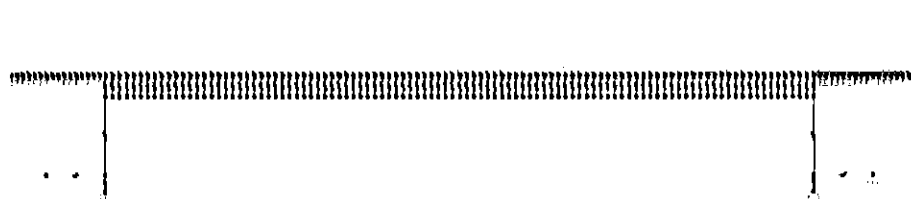
3.2 ปัจจัยที่มีผลให้เกิดหน่วยแรงในรางรถไฟ

3.2.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่สูงขึ้นในรางรถไฟจะทำให้เกิดหน่วยแรงมากขึ้น ในที่นี้จะตั้งค่าให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 30 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาหน่วยแรงและพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไป

จาก	Coefficient of Thermal Expansion	9.900×10^{-6} [1]
	ช่วงความยาวสะพาน	60 เมตร
	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง	30 องศาเซลเซียส
จะได้ว่า	ระยะยืดของสะพาน	$= 9.900 \times 10^{-6} \times 60 \times 30$
		$= 0.01782$ เมตร

เมื่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป 30 องศาเซลเซียส มีผลให้สะพานขยายตัวออกไปประมาณ 1.782 เซนติเมตร



รูปที่ 3.5 แสดงแบบจำลองโครงสร้างสะพานความยาว 60 เมตร ที่อุณหภูมิปกติ



รูปที่ 3.6 แสดงแบบจำลองโครงสร้างสะพานความยาว 60 เมตร เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 30°C

International Union of Railways (UIC) คือมาตรฐานของสถาบันรถไฟยุโรปที่คณะผู้จัดทำนำมาใช้ในการอ้างอิง แต่เนื่องจากสภาพอากาศในประเทศไทยแตกต่างจากประเทศในแถบยุโรป เพราะฉะนั้นผู้จัดทำจึงได้ทำการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจริง จากนั้นจะนำมาวิเคราะห์ต่อไป

ตาราง 3.1 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจริง ณ ช่วงเวลาต่างๆ

เวลา	อุณหภูมิราง (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)
09.00 น.	42	36
13.00 น.	55.6	40
17.00 น.	49	38
21.00 น.	38	33

3.2.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรก

แรงเบรกที่เกิดขึ้นจากรถไฟมีผลให้รางเกิดแรงเสียดทานและการกระชากในรางรถไฟทั้งแรงดึงและแรงอัด

มาตรฐาน UIC 774-3 ได้กำหนด หน่วยแรงเบรกต่อระยะทางเท่ากับ 20000 N/m
ความเร่งในการลดความเร็วของรถไฟเท่ากับ 0.8g

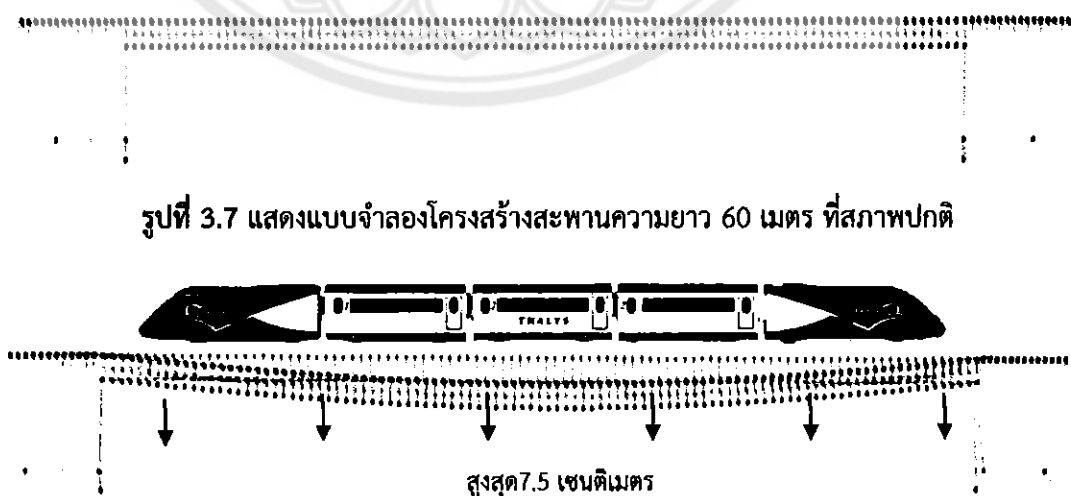
จาก ช่วงความยาวสะพาน	60 เมตร	
แรงเบรก	20000 นิวตัน/เมตร	[1]
ความเร่งในการลดความเร็ว	0.8g เมตร/วินาที ²	[2]
จะได้ว่า แรงเบรกในราง	= 60 x 20000	
	= 1200000	นิวตัน
ความเร่งในการลดความเร็ว	= 0.8 x 9.806	
	= 7.845	เมตร/วินาที ²

รางรถไฟความยาว 60 เมตร จะทำให้แรงเบรกจากรถไฟมีค่าเท่ากับ 120 ตัน และต้องใช้ความเร่งในการลดความเร็วเท่ากับ 7.845 เมตร/วินาที²

3.2.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัว

น้ำหนักของรถไฟมีผลต่อการแอ่นตัวของโครงสร้างสะพาน มาตรฐาน UIC ได้กำหนดการแอ่นตัวแนวตั้งบนสะพานห้ามเกิน $L/800$ [3]

จาก ช่วงความยาวสะพาน	60 เมตร
การแอ่นตัวบนสะพานที่ยอมให้	$L/800$ [3]
จะได้ว่า การแอ่นตัวบนสะพานที่ยอมให้	= 60/800
	= 0.075 เมตร
สะพานยาว 60 เมตร สามารถแอ่นตัวได้สูงสุดที่ 0.075 เมตร	



รูปที่ 3.8 แสดงแบบจำลองโครงสร้างสะพานความยาว 60 เมตร เมื่อรับน้ำหนักจากรถไฟ

จากรูปที่ 3.7 และ 3.8 จะสังเกตได้ว่าเมื่อสะพานรับน้ำหนักจากรถไฟแล้วจะเกิดการแอ่นตัวสูงสุดที่บริเวณกลางสะพาน บริเวณจุดรองรับทั้งสองฝั่งมีโอกาสเกิดแรงดึง ส่วนบริเวณกลางสะพานจะเกิดแรงอัดเข้าหากัน

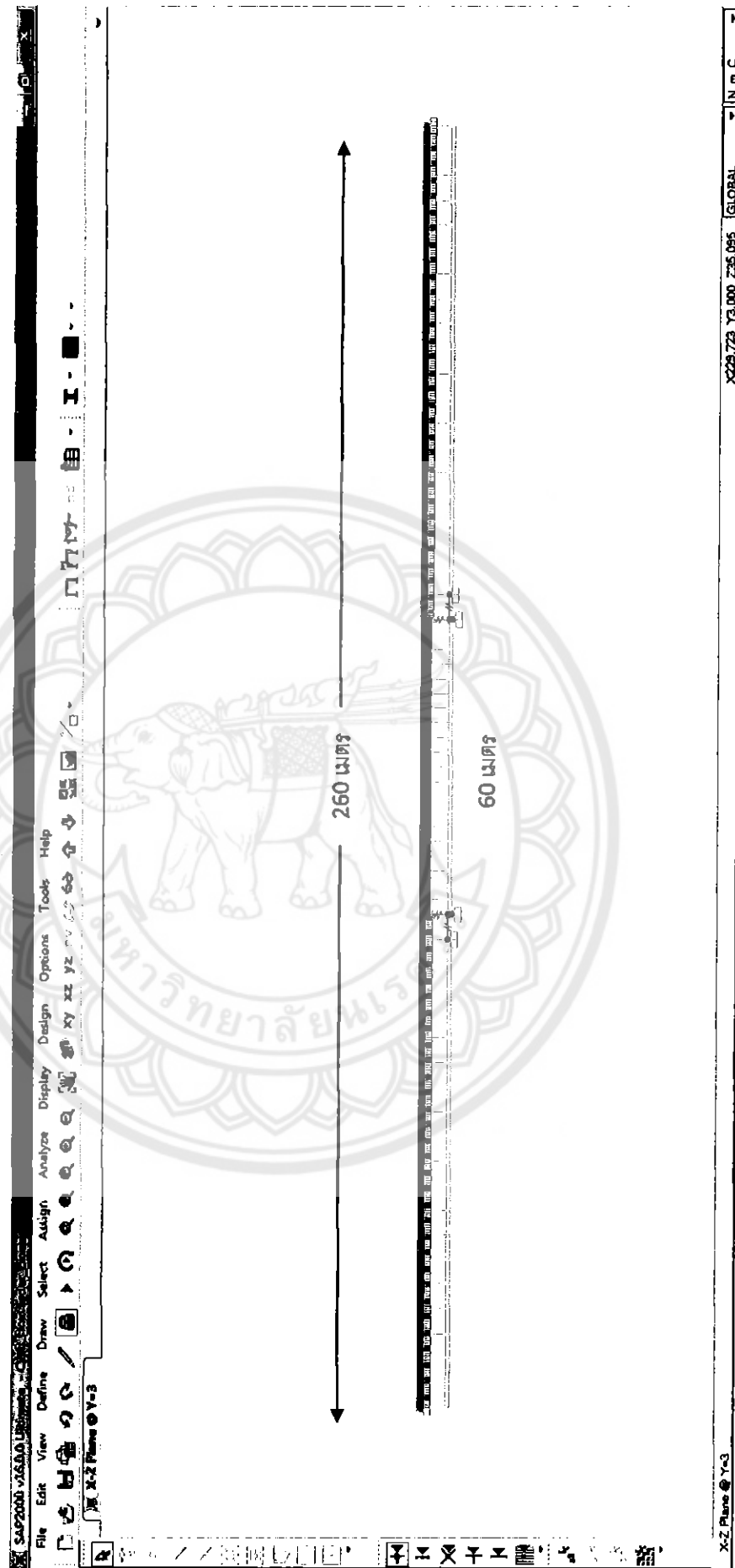
3.3 วิธีการเปลี่ยนวัสดุยึดรางแบบธรรมดาเป็นวัสดุยึดรางที่ยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามแนวยาว (Zero Longitudinal Restraint)

การเปลี่ยนรูปแบบของวัสดุยึดรางมาเป็นวัสดุยึดรางที่ยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาวนั้น สามารถทำได้โดยการปรับค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูป (Stiffness) ให้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในวัสดุยึดรางแบบปกติ ชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างสะพานและหินโรยทางกับรางรถไฟนั้นจะมีค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูป $U1 = 7.2 \times 10^9$ $U2 = 7.2 \times 10^6$ เมื่อต้องการเปลี่ยนรูปแบบวัสดุให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว สามารถกระทำได้โดยปรับค่า $U2$ ให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อไม่ให้มีค่าความต้านทานของวัสดุตามแนวยาว ดังนั้น รางจะสามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวยาว

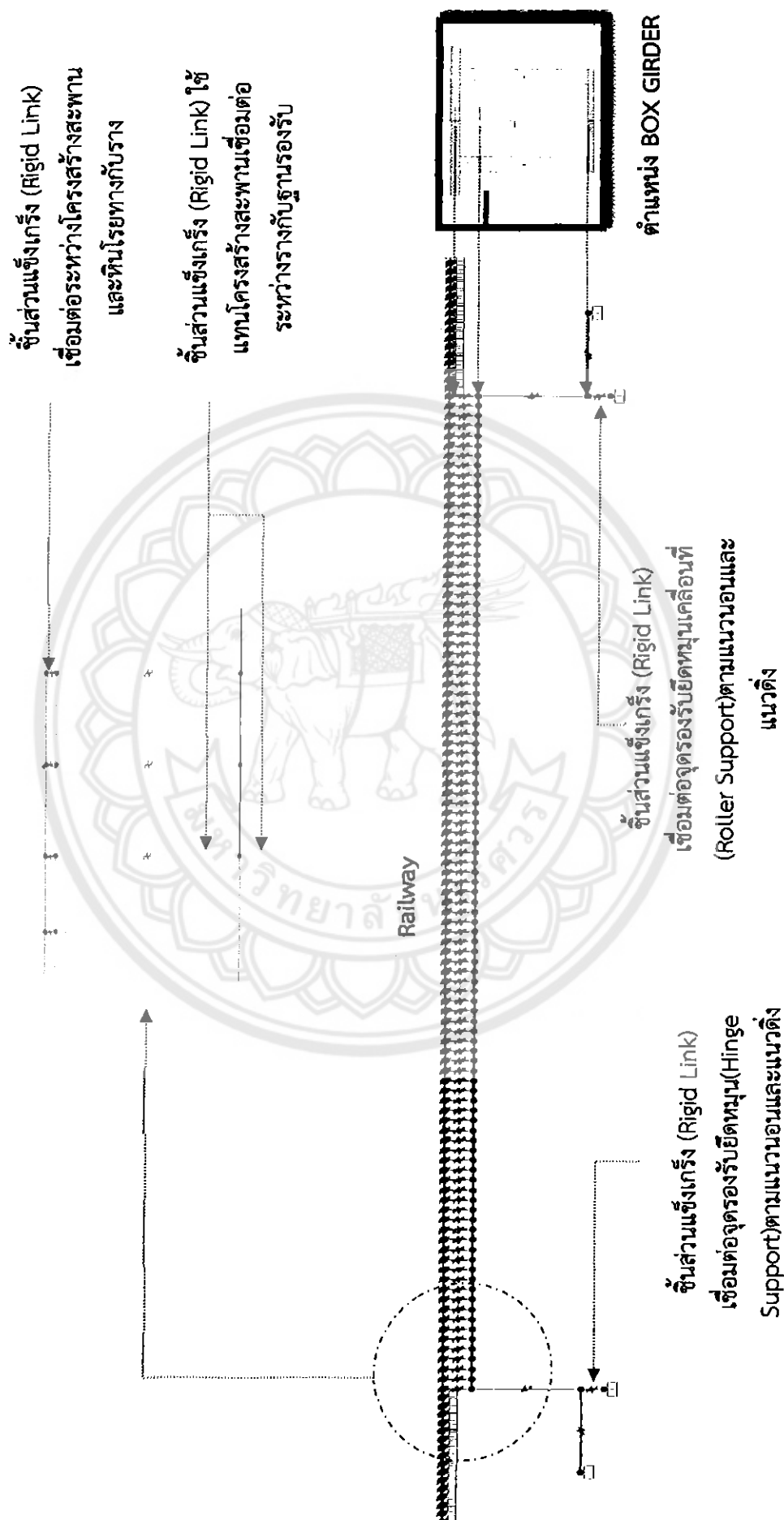


3.4 แบบจำลองโครงสร้างสะพานและทางเดินรถไฟ

จากหัวข้อ 3.1 และ 3.2 เมื่อนำข้อมูลมาใช้ในการจำลองแบบโครงสร้างสะพานและทางรถไฟสามารถวิเคราะห์ออกมาได้ดังรูป



รูปที่ 3.9 แสดงภาพรวมของแบบจำลองโครงสร้างสะพานและทางรถไฟ



รูปที่ 3.10 แสดงแบบขยายสะพานความยาว 60 เมตร

3.5 รูปแบบของสะพานที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ลักษณะโครงสร้างสะพานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเป็นแบบคานช่วงเดียว(Simple Beam) และคานต่อเนื่อง(Continuous Beam) แบ่งเป็น

3.5.1 สะพาน 1 ช่วง ยาวช่วงละ 60 เมตร



รูปที่ 3.11 สะพานแบบคานช่วงเดียว

3.5.2 สะพาน 2 ช่วง ยาวช่วงละ 30 เมตร

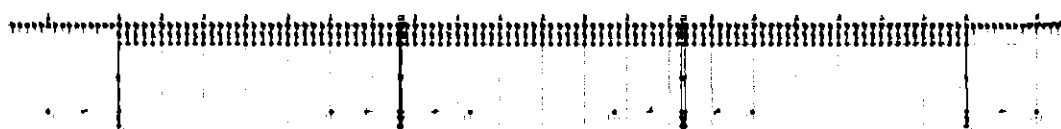


รูปที่ 3.12 สะพานแบบคานช่วงเดียว 2 ช่วงความยาว



รูปที่ 3.13 สะพานแบบคานต่อเนื่อง 2 ช่วงความยาว

3.5.3 สะพาน 3 ช่วง ยาวช่วงละ 20 เมตร



รูปที่ 3.14 สะพานแบบคานช่วงเดียว 3 ช่วงความยาว



รูปที่ 3.15 สะพานแบบคานต่อเนื่อง 3 ช่วงความยาว

หมายเหตุ ความยาวสะพานคงไว้ที่ระยะ 60 เมตร



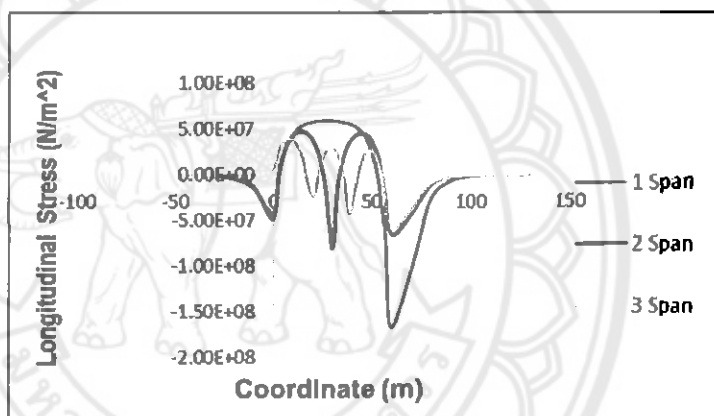
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลการต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในรางเชื่อมยาว ได้แก่ ช่วงความยาวสะพาน รูปแบบสะพาน อุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว โดยส่วนแรกจะเป็นผลการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นกรณีใช้วัสดุยึดรางแบบปกติ และติดตั้ง Zero Longitudinal Restraint (ZLR)

4.1 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้น กรณีติดตั้งวัสดุยึดรางแบบปกติ

1. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในคานช่วงเดียว (Simple Beam)



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในคานช่วงเดียว

1.1 หน่วยแรงสูงสุดในรางที่สะพานช่วงเดียว (Simple Beam) 1 ช่วงความยาว แบ่งเป็น

- หน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดบริเวณกลางสะพานมีค่าเท่ากับ 0.646 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
- หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดบริเวณกลางสะพานมีค่าเท่ากับ 2.306 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

1.2 พฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางเริ่มจากหน่วยแรงอัดที่จุดรองรับยึดหมุน

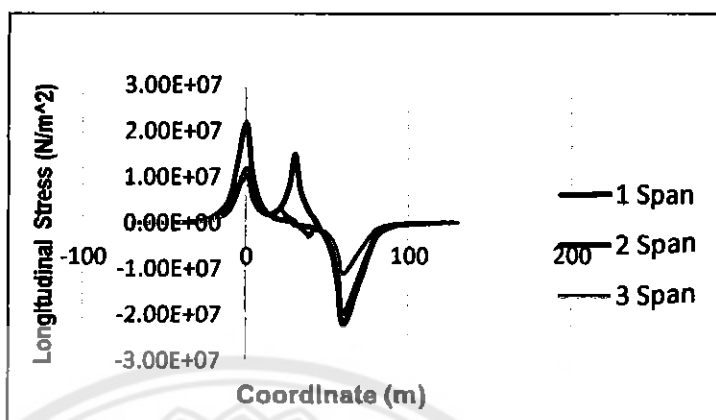
(Hinge Support) จากนั้นขึ้นไปเป็นหน่วยแรงดึงสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของช่วงสะพานแล้วลง

มาเกิดเป็นหน่วยแรงอัดสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

1.3 จำนวนช่วงความยาวของสะพานที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในราง

1.4 เมื่อเพิ่มจำนวนช่วงความยาวของสะพานจาก 1 ช่วงความยาว เป็น 2 และ 3 ช่วงความยาว มีผลให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางลดลง

2. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในคานช่วงเดียว (Simple Beam)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในคานช่วงเดียว

2.1 เกิดหน่วยแรงสูงสุดในรางที่สะพานช่วงเดียว (Simple Beam) 1 และ 2 ช่วงความยาว แบ่งเป็น

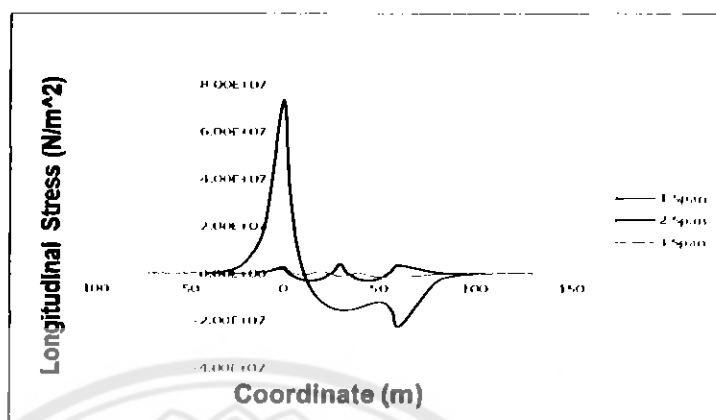
- หน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) มีค่าเท่ากับ 0.234 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ในสะพาน 1 ช่วงความยาว
- หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support) มีค่าเท่ากับ 0.308 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในสะพาน 2 ช่วงความยาว

2.2 พฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางเริ่มจากหน่วยแรงดึงสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) จากนั้นลงไปเป็นหน่วยแรงอัดสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

2.3 ระยะของสะพานที่เพิ่มขึ้นมีผลให้สะพานช่วงเดียว 2 ช่วงความยาว เกิดหน่วยแรงดึงค่อนข้างสูงที่บริเวณกลางสะพาน

2.4 เมื่อเพิ่มจำนวนช่วงความยาวของสะพานจาก 1 ช่วงความยาว เป็น 2 และ 3 ช่วงความยาว มีผลให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางลดลง

3. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานช่วงเดียว (Simple Beam)



รูปที่ 4.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานช่วงเดียว

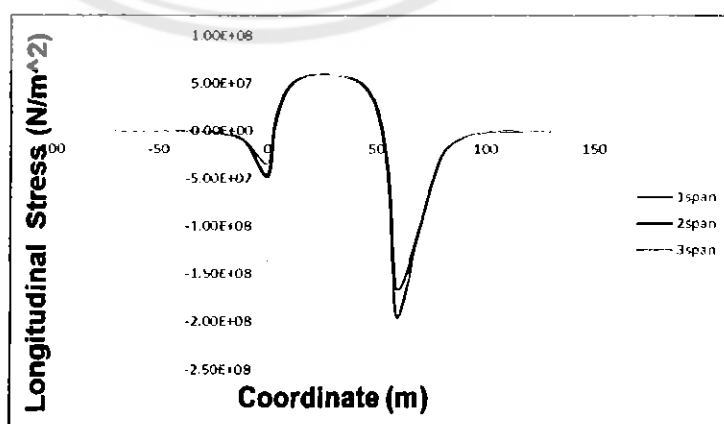
3.1 เกิดหน่วยแรงสูงสุดในรางที่สะพานช่วงเดียว (Simple Beam) 1 ช่วงความยาว แบ่งเป็น

- หน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) มีค่าเท่ากับ 0.796 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
- หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support) มีค่าเท่ากับ 0.314 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

3.2 พฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางเริ่มจากหน่วยแรงดึงที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) จากนั้นลดลงเป็นหน่วยแรงอัดสูงสุดจุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

3.3 เมื่อเพิ่มช่วงความยาวของสะพานจาก 1 ช่วงความยาว เป็น 2 และ 3 ช่วงความยาว มีผลให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางลดลงเป็นอย่างมากเกือบเข้าใกล้ศูนย์

4. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในคานต่อเนื่อง (Continuous Beam)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในคานต่อเนื่อง

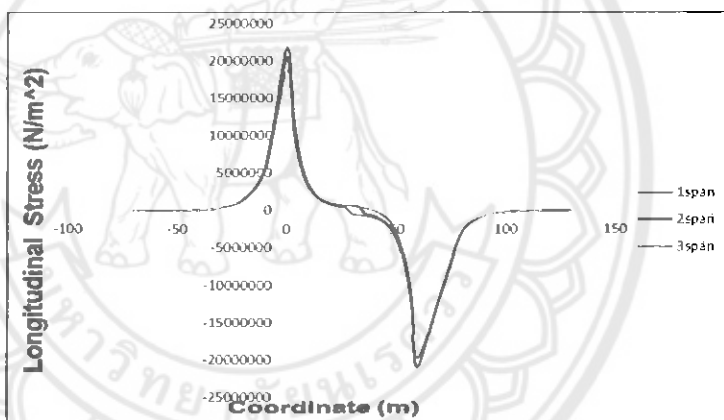
4.1 เกิดหน่วยแรงสูงสุดในรางที่สะพานต่อเนื่อง (Continuous Beam) 1, 2 และ 3 ช่วงความยาว แบ่งเป็น

- หน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดบริเวณกึ่งกลางของช่วงสะพาน มีค่าเท่ากับ 0.607 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
- หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support) มีค่าเท่ากับ 2.708 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

4.2 พฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางเริ่มจากหน่วยแรงดึงสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) จากนั้นลงไปเป็นหน่วยแรงอัดสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

4.3 จำนวนช่วงความยาวของสะพานที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในราง

5. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในคันต่อเนื่อง (Continuous Beam)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในคันต่อเนื่อง

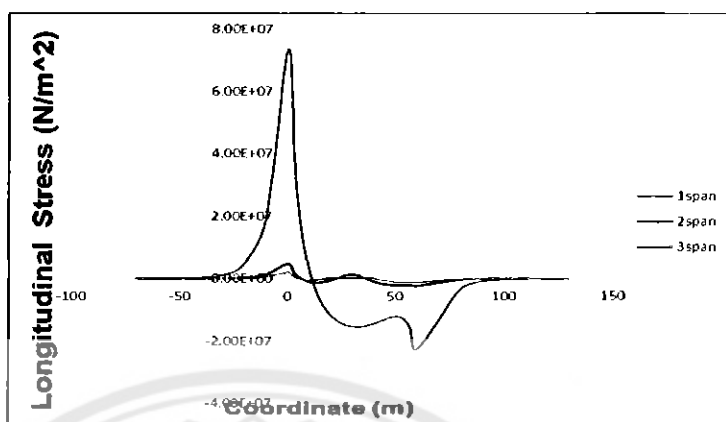
5.1 เกิดหน่วยแรงสูงสุดในรางที่สะพานต่อเนื่อง (Continuous Beam) 1, 2 และ 3 ช่วงความยาว แบ่งเป็น

- หน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) มีค่าเท่ากับ 0.337 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
- หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support) มีค่าเท่ากับ 0.288 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

5.2 พฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางเริ่มจากหน่วยแรงดึงสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) จากนั้นลงไปเป็นหน่วยแรงอัดสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

5.3 จำนวนช่วงความยาวของสะพานที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในราง

6. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานต่อเนื่อง (Continuous Beam)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานต่อเนื่อง

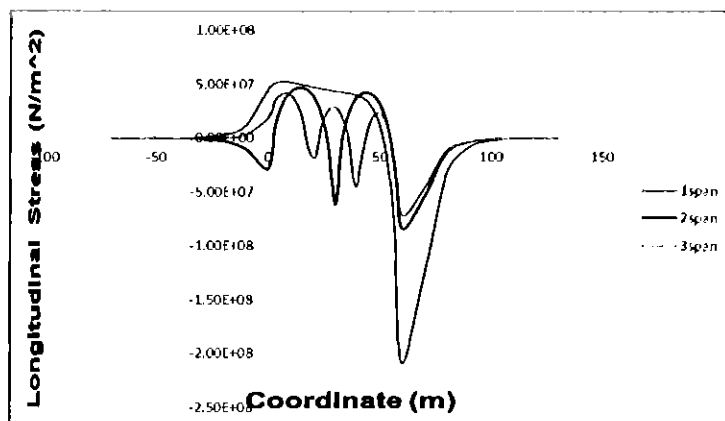
6.1 เกิดหน่วยแรงสูงสุดในรางที่สะพานต่อเนื่อง (Continuous Beam) 1 ช่วงความยาว แบ่งเป็น

- หน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) มีค่าเท่ากับ 0.796 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
- หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support) มีค่าเท่ากับ 0.314 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

6.2 พฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางเริ่มจากหน่วยแรงดึงที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) จากนั้นลดลงเป็นหน่วยแรงอัดสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

6.3 เมื่อเพิ่มจำนวนช่วงความยาวของสะพานจาก 1 ช่วงความยาวเป็น 2 และ 3 ช่วงความยาว มีผลให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางลดลงเป็นอย่างมากเกือบเข้าใกล้ศูนย์

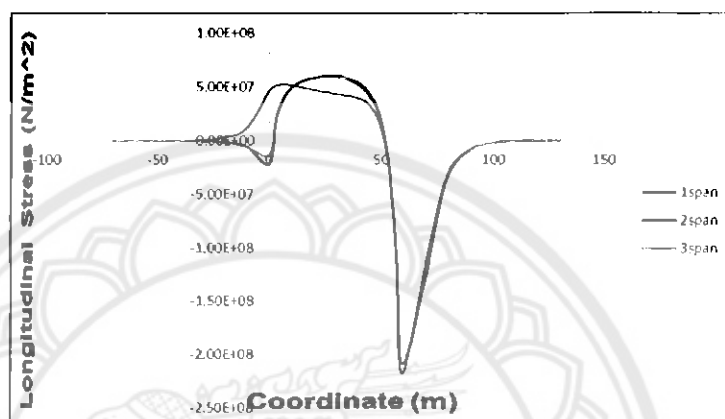
7. ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวในสะพานช่วงเดียว (Simple Beam)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว สะพานช่วงเดียว

สะพานช่วงเดียว 1 ช่วงความยาวเกิดหน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว โดยที่ หน่วยแรงดึงสูงสุดเป็น 0.572 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ และหน่วยแรงอัดสูงสุดเป็น 2.778 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

8. ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวในสะพานต่อเนื่อง (Continuous Beam)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลรวมหน่วยแรงที่เกิดจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว สะพานต่อเนื่อง

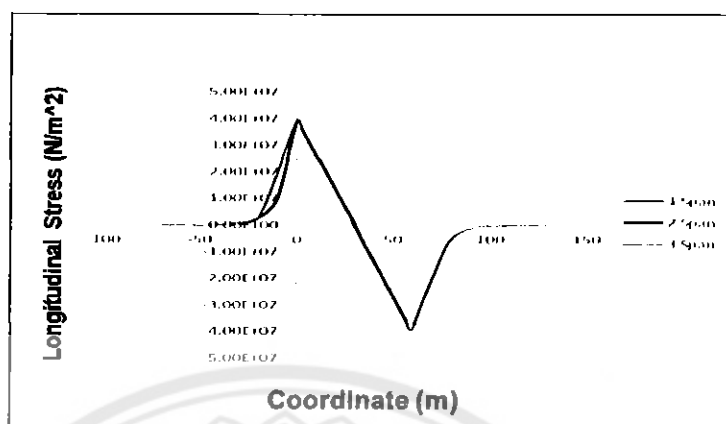
สะพานต่อเนื่อง 1, 2 และ 3 ช่วงความยาวเกิดหน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรก และการแอ่นตัวใกล้เคียงกัน โดยที่หน่วยแรงดึงสูงสุดเป็น 0.646 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ และ หน่วยแรงอัดสูงสุดเป็น 3.014 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

หมายเหตุ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นมากกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ จำเป็นต้องติดตั้ง Expansion Joint เพื่อป้องกันการขยายตัวบริเวณจุดต่อ

สรุปผลการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นกรณีไม่ติดตั้ง Zero Longitudinal Restraint

1. จำนวนช่วงความยาวที่เพิ่มมากขึ้นในสะพานช่วงเดียว (Simple Beam) มีผลให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางลดลงโดยเฉพาะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัว จำนวนช่วงความยาวที่เพิ่มขึ้นทำให้หน่วยแรงในรางลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์
2. จำนวนช่วงความยาวที่เพิ่มมากขึ้นในสะพานต่อเนื่อง (Continuous Beam) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางไม่เปลี่ยนแปลง ยกเว้นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัว ช่วงความยาวที่เพิ่มขึ้นทำให้หน่วยแรงในรางลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์
3. ตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดในสะพานช่วงเดียว (Simple Beam)
 - ที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัว (Bridge Deflection) มีค่าสูงสุดที่ 7.320E07 นิวตัน/ตร.ม

2. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในคานช่วงเดียว (Simple Beam)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในคานช่วงเดียว

2.1 เกิดหน่วยแรงสูงสุดในรางที่สะพานช่วงเดียว (Simple Beam) 1, 2 และ 3 ช่วงความยาว แบ่งเป็น

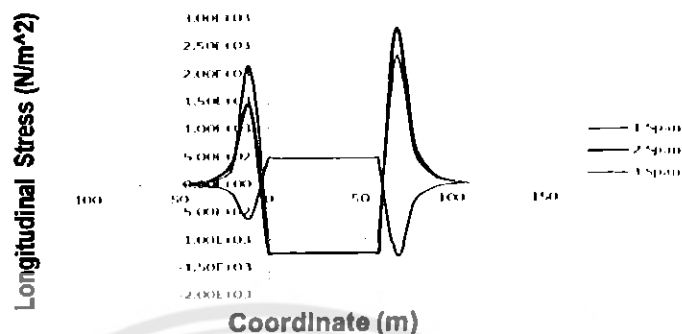
- หน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) มีค่าเท่ากับ 0.424 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
- หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support) มีค่าเท่ากับ 0.542 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

2.2 พฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางเริ่มจากเกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) จากนั้นลงมากลายเป็นหน่วยแรงอัดสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

2.3 จำนวนช่วงความยาวของสะพานที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในราง

2.4 เมื่อเพิ่มจำนวนช่วงความยาวของสะพานจาก 1 ช่วงความยาว เป็น 2 และ 3 ช่วงความยาว ไม่ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

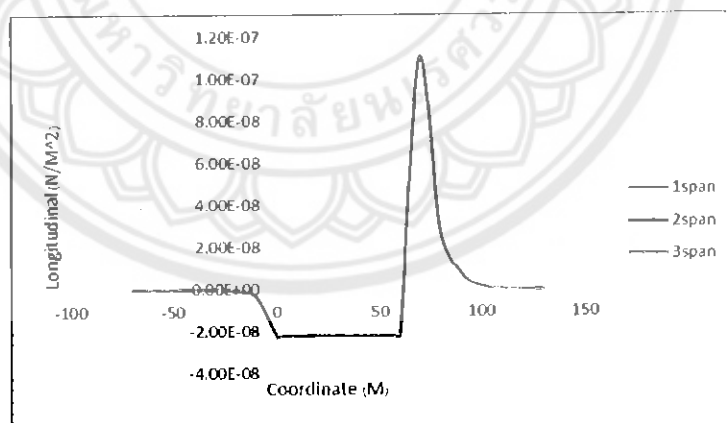
3. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานช่วงเดียว (Simple Beam)



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานช่วงเดียว

- 3.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานช่วงเดียวทั้ง 1, 2 และ 3 ช่วงความยาว มีค่าใกล้เคียงศูนย์
 3.2 จำนวนช่วงความยาวของสะพานที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในราง คือ สะพาน 2 และ 3 ช่วงความยาวจะเกิดหน่วยแรงอัดบริเวณกลางสะพาน แต่สะพาน 1 ช่วงความยาว บริเวณกลางสะพานจะเกิดหน่วยแรงดึงแทน

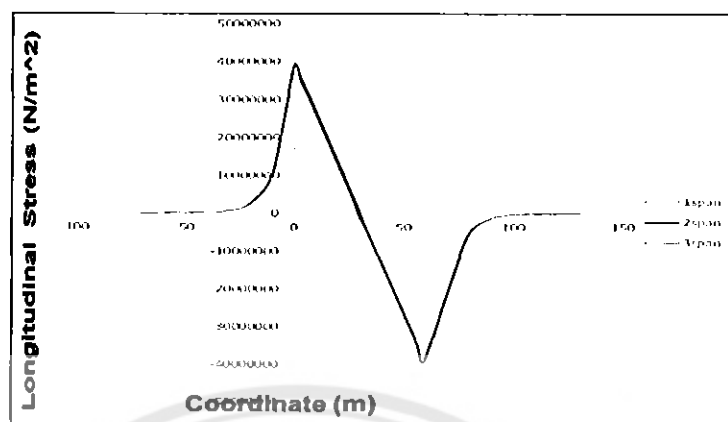
4. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในคานต่อเนื่อง (Continuous Beam)



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในคานต่อเนื่อง

- 4.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานช่วงเดียวทั้ง 1, 2 และ 3 ช่วงความยาว มีค่าใกล้เคียงศูนย์
 4.2 จำนวนช่วงความยาวของสะพานที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในราง

5. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในคานต่อเนื่อง (Continuous Beam)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในคานต่อเนื่อง

5.1 เกิดหน่วยแรงสูงสุดในรางที่สะพานช่วงเดียว (Continuous Beam) 1, 2 และ 3 ช่วงความยาว แบ่งเป็น

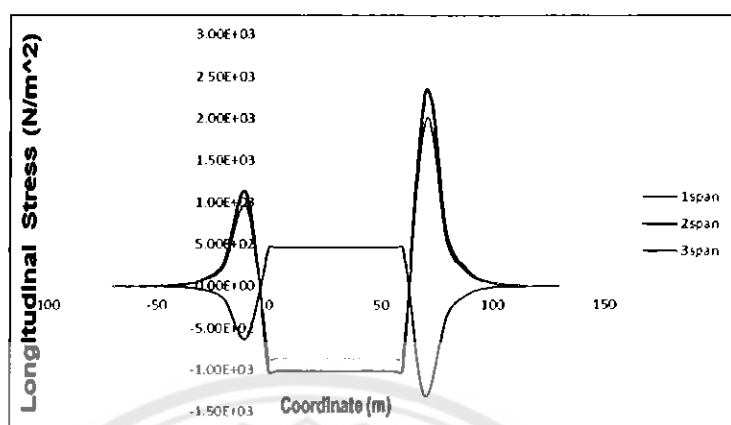
- หน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) มีค่าเท่ากับ 0.424 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
- หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support) มีค่าเท่ากับ 0.542 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

5.2 พฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางเริ่มจากเกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) จากนั้นลงมากเกิดเป็นหน่วยแรงอัดสูงสุดที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

5.3 จำนวนช่วงความยาวของสะพานที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในราง

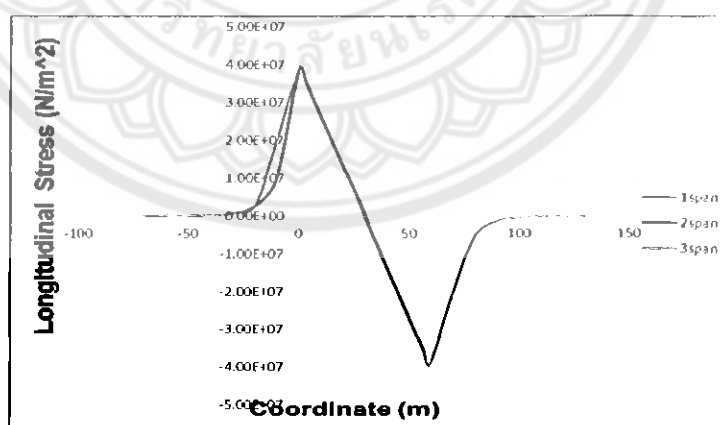
5.4 เมื่อเพิ่มจำนวนช่วงความยาวของสะพานจาก 1 ช่วงความยาว เป็น 2 และ 3 ช่วงความยาว ไม่ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

6. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานต่อเนื่อง (Continuous Beam)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในคานต่อเนื่อง

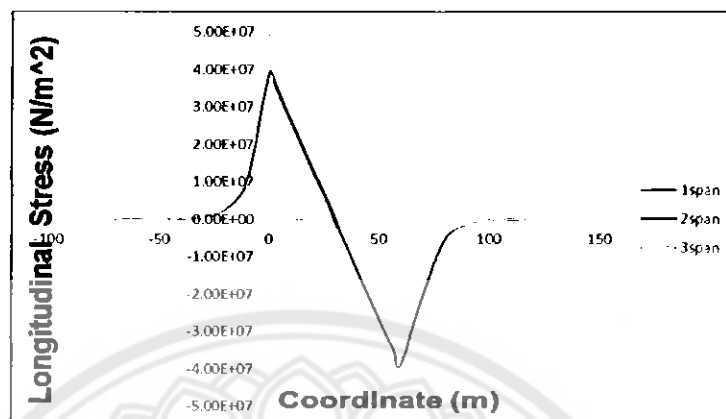
- 6.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานช่วงเดียวทั้ง 1, 2 และ 3 ช่วงความยาว มีค่าใกล้เคียงศูนย์
 6.2 จำนวนช่วงความยาวของสะพานที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในราง คือ สะพาน 2 และ 3 ช่วงความยาวจะเกิดหน่วยแรงอัดบริเวณกลางสะพาน แต่สะพาน 1 ช่วงความยาว บริเวณกลางสะพานจะเกิดหน่วยแรงดึงแทน
7. ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวในสะพานช่วงเดียว (Simple Beam)



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลรวมหน่วยแรงที่เกิดจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวสะพานช่วงเดียว

สะพานช่วงเดียว 1, 2 และ 3 ช่วงความยาวเกิดหน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรก และการแอ่นตัว โดยที่ หน่วยแรงดึงสูงสุดเป็น 0.424 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ และหน่วยแรงอัดสูงสุดเป็น 0.542 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

8. ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวในสะพานต่อเนื่อง (Continuous Beam)



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวสะพานต่อเนื่อง

สะพานช่วงเดียว 1, 2 และ 3 ช่วงความยาวเกิดหน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรก และการแอ่นตัว โดยที่ หน่วยแรงดึงสูงสุดเป็น 0.424 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ และหน่วยแรงอัดสูงสุดเป็น 0.542 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

สรุปผลการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นกรณีติดตั้ง Zero Longitudinal Restraint (ZLR)

- จำนวนช่วงความยาวที่เพิ่มมากขึ้นในสะพานช่วงเดียว (Simple Beam) และสะพานต่อเนื่อง (Continuous Beam) ไม่มีผลให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางเปลี่ยนแปลง
- ตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดในสะพานช่วงเดียว (Simple Beam)
 - ที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกมีค่าสูงสุดที่ 3.900×10^7 นิวตัน/ตร.ม
 - บริเวณกลางสะพาน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวที่เปลี่ยนแปลงมีค่าสูงสุดที่ 4.630×10^2 นิวตัน/ตร.ม
 - ที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกที่เปลี่ยนแปลงมีค่าสูงสุดที่ 3.900×10^7 นิวตัน/ตร.ม
- ตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดในสะพานต่อเนื่อง (Continuous Beam)
 - ที่จุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกมีค่าสูงสุดที่ 3.900×10^7 นิวตัน/ตร.ม
 - บริเวณกลางสะพาน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวที่เปลี่ยนแปลงมีค่าสูงสุดที่ 4.630×10^2 นิวตัน/ตร.ม
 - ที่จุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกที่เปลี่ยนแปลงมีค่าสูงสุดที่ 3.900×10^7 นิวตัน/ตร.ม

4. สะพานแบบช่วงเดียวและสะพานแบบต่อเนื่องเมื่อเพิ่มจำนวนช่วงความยาวมากขึ้นไม่สามารถทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวเปลี่ยนแปลงไป แต่ยังทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกมีค่ามากกว่ากรณีไม่ติดตั้ง ZLR ประมาณสองเท่า ส่วนหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิและการแอ่นตัวมีค่าน้อยมากจนเข้าใกล้ศูนย์



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

โครงการการศึกษานี้มุ่งเน้นศึกษาและเปรียบเทียบปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดหน่วยแรงในรางรถไฟเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรก การแอ่นตัว ประเภทของสะพาน จำนวนช่วงความยาวของสะพาน และหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงไปหลังติดตั้งหมุดยึดรางประเภท ZLR ซึ่งผลการวิเคราะห์ได้สรุปความสัมพันธ์ดังนี้

5.1.สรุปผลการวิเคราะห์

5.1.1.อุณหภูมิ (Temperature)

กรณีติดตั้งวัสดุยึดรางแบบปกติ เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของช่วงความยาวสะพานและเกิดหน่วยแรงอัดสูงสุด บริเวณจุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

กรณีติดตั้งวัสดุยึดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดตลอดช่วงความยาวสะพานและเกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดบริเวณจุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่(Roller Support)

5.1.2. แรงเบรก (Braking)

กรณีติดตั้งวัสดุยึดรางแบบปกติ เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดบริเวณจุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) และเกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดบริเวณจุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

กรณีติดตั้งวัสดุยึดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดบริเวณจุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) และเกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดบริเวณจุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

5.1.3 การแอ่นตัวของสะพาน (Bridge Deflection)

กรณีติดตั้งวัสดุยึดรางแบบปกติ เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดบริเวณจุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) และเกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดบริเวณจุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

กรณีติดตั้งวัสดุยึดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดบริเวณจุดรองรับยึดหมุน (Hinge Support) และเกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดบริเวณจุดรองรับยึดหมุนเคลื่อนที่ (Roller Support)

5.1.4 ประเภทของสะพาน

5.1.4.1 สะพานแบบคานช่วงเดียว (Simple Beam)

กรณีติดตั้งวัสดุปิดรางแบบปกติ

หน่วยแรงดึงสูงสุดเป็น 0.572 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
หน่วยแรงอัดสูงสุดเป็น 2.778 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

กรณีติดตั้งวัสดุปิดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว

หน่วยแรงดึงสูงสุดเป็น 0.424 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
หน่วยแรงอัดสูงสุดเป็น 0.542 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

5.1.4.2 สะพานแบบคานต่อเนื่อง (Continuous Beam)

กรณีติดตั้งวัสดุปิดรางแบบปกติ

หน่วยแรงดึงสูงสุดเป็น 0.646 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
หน่วยแรงอัดสูงสุดเป็น 3.014 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

กรณีติดตั้งวัสดุปิดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว

หน่วยแรงดึงสูงสุดเป็น 0.424 เท่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้
หน่วยแรงอัดสูงสุดเป็น 0.542 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

สะพานแบบคานช่วงเดียว (Simple Beam) เกิดหน่วยแรงในรางน้อยกว่าสะพานแบบคานต่อเนื่อง (Continuous Beam)

5.1.4 จำนวนช่วงความยาวสะพาน

กรณีติดตั้งวัสดุปิดรางแบบปกติ

เกิดหน่วยแรงสูงสุดในสะพานแบบคานต่อเนื่อง 3 ช่วงความยาว
เกิดหน่วยแรงต่ำสุดในสะพานแบบคานช่วงเดียว 3 ช่วงความยาว

กรณีติดตั้งวัสดุปิดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว

เกิดหน่วยแรงมากที่สุดไม่แตกต่างกันของทุกจำนวนช่วงความยาวของ สะพาน
เกิดหน่วยแรงน้อยสุดไม่แตกต่างกันของทุกจำนวนช่วงความยาวของสะพาน

การมีจำนวนช่วงความยาวของสะพานมากขึ้นสามารถช่วยลดหน่วยแรงในรางที่เกิดขึ้นลงได้

5.1.5. วัสดุึตรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

กรณีติดตั้งวัสดุึตรางแบบปกติ

สะพานแบบคานต่อเนื่อง (Continuous Beam) 3 ช่วงความยาว เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดเป็น 3.014 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

กรณีติดตั้งวัสดุึตรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว

สะพานแบบคานต่อเนื่อง (Continuous Beam) 3 ช่วงความยาว เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดเป็น 0.542 เท่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

สรุป

1. การติดตั้ง ZLR ทำให้หน่วยแรงในรางเชื่อมยาวลดลง
2. การติดตั้ง ZLR ทำให้ผลกระทบของจำนวนช่วงความยาวของสะพานหายไปและทำให้สะพานและรางเป็นอิสระจากกัน
3. การติดตั้ง ZLR ทำให้พฤติกรรมของสะพาน Simple Beam กับ Continuous Beam ไม่แตกต่างกัน

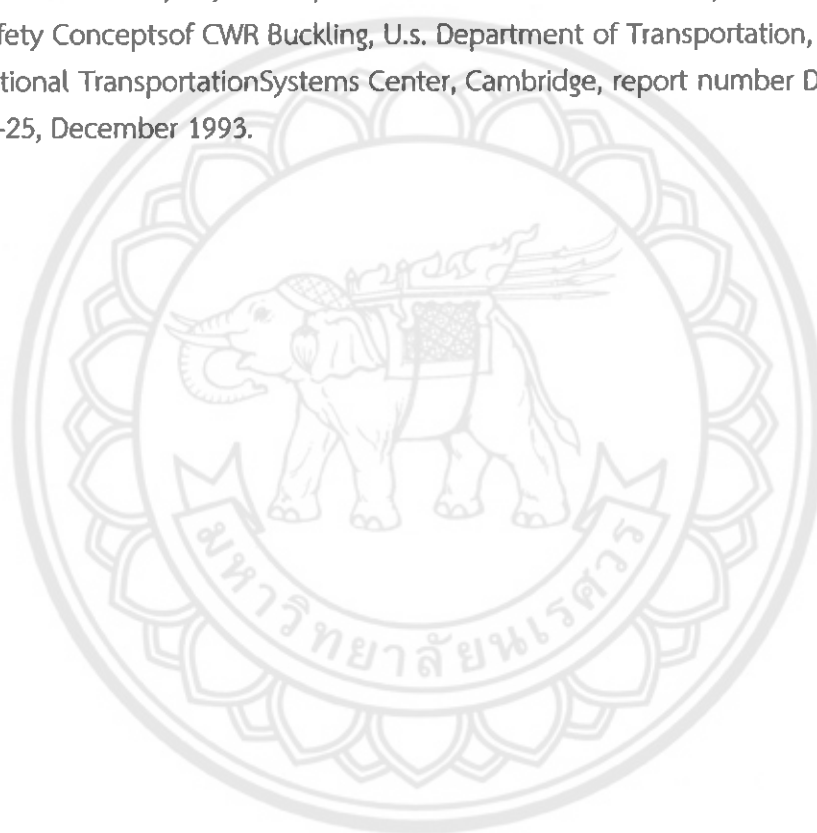
5.2. ข้อเสนอแนะ

ตำแหน่งที่เสี่ยงต่อการเกิดอันตรายบนรางรถไฟแบบรางเชื่อมยาว คือ ตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดและหน่วยแรงอัดสูงสุด เพราะตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงดึงสูงจะเป็นเหตุให้เกิดการขาดของรอยเชื่อมบริเวณจุดต่อราง ส่วนตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดจะเป็นเหตุให้มีโอกาสเกิดการแอ่นตัวของราง

เนื่องจากการติดตั้ง ZLR ทำให้รางและสะพานเป็นอิสระจากกัน จึงสามารถช่วยลดหน่วยแรงในรางเชื่อมยาวลงได้ ซึ่งจะลดโอกาสการเกิดความเสียหายของรางเชื่อมยาว ทำให้เพิ่มความปลอดภัยเนื่องจากการแอ่นตัวของรางและการขาดของรอยเชื่อมรางได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] UIC 774-3
- [2] UIC 776-2R
- [3] UIC 776-2R
- [4] DAVIDS, G.A., Federal Viewpoint, AREA Bulletin no. 683, 1981.
- [5] DIETERMAN, H.A. and M.A. VAN, Dynamic stability of CWR-track, Description of the CWERRI program, TU Delft, September 1993.
- [6] SAMAVEDAM, G. , A. KISH, A. PURPLE and J. SCHOENGART, Parametric Analysis and Safety Concepts of CWR Buckling, U.S. Department of Transportation, John A. Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, report number DOT-VNTSC-FRA-93-25, December 1993.





ภาคผนวก ก หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในราง

ตาราง ก.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว
กรณีใช้วัสดุยึดรางแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากอุณหภูมิ (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	-3.53E+03	-3.96E+03	-9.03E+01
-60	-1.38E+04	-1.55E+04	-3.52E+02
-50	-5.37E+04	-6.04E+04	-1.38E+03
-40	-2.10E+05	-2.36E+05	-5.68E+02
-30	-8.18E+05	-9.19E+05	-2.10E+04
-20	-3.19E+06	-3.59E+06	-8.18E+05
-10	-1.25E+07	-1.40E+07	-3.19E+05
0	-4.86E+07	-4.21E+07	5.16E+06
3	-2.96E+05	2.94E+06	2.72E+07
6	2.67E+07	2.77E+07	3.74E+07
9	4.18E+07	4.08E+07	3.92E+07
12	5.02E+07	4.68E+07	3.34E+07
15	5.48E+07	4.78E+07	1.79E+07
18	5.73E+07	4.41E+07	-1.24E+07
21	5.86E+07	3.45E+07	-2.18E+07
24	5.92E+07	1.56E+07	1.07E+07
27	5.94E+07	-1.89E+07	2.60E+07
30	5.92E+07	-8.03E+07	2.91E+07
33	5.87E+07	-1.07E+07	2.14E+07
36	5.77E+07	1.96E+07	3.53E+04
39	5.59E+07	3.59E+07	-4.23E+07
42	5.27E+07	4.37E+07	-1.44E+07
45	4.72E+07	4.58E+07	1.37E+07
48	3.73E+07	4.28E+07	2.55E+07
51	1.98E+07	3.36E+07	2.51E+07
54	-1.14E+07	1.52E+07	1.25E+07

ตาราง ก.1(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว กรณีใช้วัสดุยึดโยงแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากอุณหภูมิ (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-6.70E+07	-1.88E+07	-1.68E+07
60	-1.66E+08	-6.50E+07	-5.87E+07
70	-1.05E+08	-4.35E+07	-3.94E+07
80	-2.69E+07	-1.11E+07	-1.01E+07
90	-6.90E+06	-2.86E+06	-2.59E+06
100	-1.77E+06	-7.32E+05	-6.63E+05
110	-4.53E+05	-1.88E+05	-1.70E+04
120	-1.16E+05	-4.81E+04	-4.36E+04
130	-2.97E+04	-1.23E+04	-1.12E+04

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง
กรณีใช้วัสดุคานแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากอุณหภูมิ (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	-3.53E+03	-3.39E+03	-3.32E+03
-60	-1.38E+04	-1.32E+04	-1.30E+04
-50	-5.37E+04	-5.16E+04	-5.06E+04
-40	-2.10E+05	-2.02E+05	-1.98E+05
-30	-8.18E+05	-7.87E+05	-7.71E+05
-20	-3.19E+06	-3.07E+06	-3.01E+06
-10	-1.25E+07	-1.20E+07	-1.17E+07
0	-4.86E+07	-4.67E+07	-3.42E+07
3	-2.96E+05	7.32E+06	7.68E+06
6	2.67E+07	3.09E+07	3.10E+07
9	4.18E+07	4.40E+07	4.39E+07
12	5.02E+07	5.13E+07	5.10E+07
15	5.48E+07	5.52E+07	5.49E+07
18	5.73E+07	5.73E+07	5.69E+07
21	5.86E+07	5.84E+07	5.80E+07
24	5.92E+07	5.89E+07	5.86E+07
27	5.94E+07	5.89E+07	5.88E+07
30	5.92E+07	5.87E+07	5.87E+07
33	5.87E+07	5.81E+07	5.82E+07
36	5.77E+07	5.70E+07	5.73E+07
39	5.59E+07	5.50E+07	5.53E+07
42	5.27E+07	5.15E+07	5.18E+07
45	4.72E+07	4.53E+07	4.56E+07
48	3.73E+07	3.43E+07	3.45E+07
51	1.98E+07	1.46E+07	1.47E+07
54	-1.14E+07	-2.04E+07	-2.05E+07

ตาราง ก.2(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง
กรณีใช้วัสดุยึดรางแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากอุณหภูมิ (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-6.70E+07	-8.29E+07	-8.33E+07
60	-1.66E+08	-1.94E+08	-1.95E+08
70	-1.05E+08	-1.05E+08	-1.06E+08
80	-2.69E+07	-2.70E+07	-2.71E+07
90	-6.90E+06	-6.92E+06	-6.95E+06
100	-1.77E+06	-1.77E+06	-1.78E+06
110	-4.53E+05	-4.54E+05	-4.56E+05
120	-1.16E+05	-1.16E+05	-1.17E+05
130	-2.97E+04	-2.98E+04	-2.99E+04

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว
กรณีใช้วัสดุโครงสร้างแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากแรงเบรก (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	1.57E+03	8.90E+02	8.13E+02
-60	6.11E+03	3.47E+03	3.17E+03
-50	2.39E+04	1.36E+04	1.24E+04
-40	9.31E+04	5.29E+04	4.83E+04
-30	3.63E+05	2.07E+05	1.89E+05
-20	1.42E+06	8.06E+05	7.36E+05
-10	5.53E+06	3.15E+06	2.87E+06
0	2.16E+07	1.17E+07	1.07E+07
3	1.27E+07	6.83E+06	6.26E+06
6	7.34E+06	4.15E+06	3.79E+06
9	4.30E+06	2.74E+06	2.48E+06
12	2.59E+06	2.09E+06	1.87E+06
15	1.62E+06	1.97E+06	1.75E+06
18	1.07E+06	2.34E+06	2.09E+06
21	7.45E+05	3.31E+06	3.12E+06
24	5.50E+05	5.20E+06	1.80E+06
27	4.22E+05	8.67E+06	9.91E+05
30	-4.57E+05	1.49E+07	4.01E+05
33	-5.53E+05	7.97E+06	-9.52E+05
36	-6.71E+05	4.48E+06	-1.71E+06
39	-8.46E+05	2.38E+06	-2.90E+06
42	-1.13E+06	9.56E+05	-1.61E+06
45	-1.62E+06	-1.05E+06	-1.58E+06
48	-2.46E+06	-2.48E+06	-1.92E+06
51	-3.95E+06	-4.58E+06	-2.74E+06
54	-6.60E+06	-8.08E+06	-4.32E+06

ตาราง ก.3(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว กรณีใช้วัสดุยึดรูปแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากแรงเบรก (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-1.13E+07	-1.42E+07	-7.22E+06
60	-1.97E+07	-2.22E+07	-1.11E+07
70	-1.15E+07	-1.31E+07	-6.31E+06
80	-2.96E+06	-3.35E+06	-1.62E+06
90	-7.57E+05	-8.58E+05	-4.14E+05
100	-1.94E+05	-2.20E+05	-1.06E+05
110	-4.97E+04	-5.64E+04	-2.72E+04
120	-1.27E+04	-1.44E+04	-6.97E+03
130	-3.26E+03	-3.70E+03	-1.79E+03

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
 ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
 ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในโครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง
กรณีใช้วัสดุยี่ตรงแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากแรงเบรก (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	1.57E+03	1.48E+03	1.46E+03
-60	6.11E+03	5.76E+03	5.71E+03
-50	2.39E+04	2.25E+04	2.23E+04
-40	9.31E+04	8.78E+04	8.69E+04
-30	3.63E+05	3.43E+05	3.39E+05
-20	1.42E+06	1.34E+06	1.32E+06
-10	5.53E+06	5.22E+06	5.17E+06
0	2.16E+07	2.04E+07	1.87E+07
3	1.27E+07	1.08E+07	1.07E+07
6	7.34E+06	6.30E+06	6.29E+06
9	4.30E+06	3.78E+06	3.81E+06
12	2.59E+06	2.38E+06	2.43E+06
15	1.62E+06	1.60E+06	1.67E+06
18	1.07E+06	1.16E+06	1.24E+06
21	7.45E+05	9.22E+05	9.96E+05
24	5.50E+05	7.82E+05	8.28E+05
27	4.22E+05	6.90E+05	7.01E+05
30	-4.57E+05	6.06E+05	5.87E+05
33	-5.53E+05	5.01E+05	4.67E+05
36	-6.71E+05	-4.25E+05	3.16E+05
39	-8.46E+05	-6.41E+05	1.00E+05
42	-1.13E+06	-9.83E+05	-2.36E+05
45	-1.62E+06	-1.55E+06	-7.92E+05
48	-2.46E+06	-2.51E+06	-1.74E+06
51	-3.95E+06	-4.19E+06	-3.40E+06
54	-6.60E+06	-7.14E+06	-6.33E+06

ตาราง ก.4(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในโครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง
กรณีใช้สื่อยึดรางแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากแรงเบรก (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-1.13E+07	-1.24E+07	-1.15E+07
60	-1.97E+07	-2.09E+07	-2.07E+07
70	-1.15E+07	-1.13E+07	-1.12E+07
80	-2.96E+06	-2.90E+06	-2.88E+06
90	-7.57E+05	-7.43E+05	-7.38E+05
100	-1.94E+05	-1.90E+05	-1.89E+05
110	-4.97E+04	-4.88E+04	-4.84E+04
120	-1.27E+04	-1.25E+04	-1.24E+04
130	-3.26E+03	-3.20E+03	-3.18E+03

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.5 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว
กรณีใช้วัสดุคานแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	5.31E+03	1.99E+02	2.60E+02
-60	2.07E+04	7.76E+02	1.01E+03
-50	8.09E+04	3.03E+03	3.96E+03
-40	3.16E+05	1.18E+04	1.55E+04
-30	1.23E+06	4.61E+04	6.03E+04
-20	4.81E+06	1.80E+05	2.35E+05
-10	1.88E+07	7.03E+05	9.19E+05
0	7.32E+07	2.25E+06	3.09E+06
3	3.89E+07	2.10E+05	1.23E+06
6	1.86E+07	-1.24E+06	1.24E+05
9	6.16E+06	-2.20E+06	-3.91E+05
12	-1.62E+06	-2.72E+06	-4.15E+05
15	-6.66E+06	-2.84E+06	1.33E+04
18	-1.00E+07	-2.53E+06	8.94E+05
21	-1.23E+07	-1.78E+06	1.07E+06
24	-1.38E+07	-5.17E+05	3.13E+04
27	-1.47E+07	1.40E+06	-5.83E+05
30	-1.52E+07	4.19E+06	-8.17E+05
33	-1.53E+07	9.08E+05	-7.04E+05
36	-1.51E+07	-8.79E+05	-2.73E+05
39	-1.46E+07	-2.03E+06	4.38E+05
42	-1.39E+07	-2.68E+06	-8.43E+04
45	-1.30E+07	-2.86E+06	-7.51E+05
48	-1.23E+07	-2.59E+06	-1.18E+06
51	-1.20E+07	-1.86E+06	-1.40E+06
54	-1.27E+07	-5.97E+05	-1.47E+06

ตาราง ก.5(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว กรณีใช้วัสดุโครงสร้างแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-1.56E+07	1.34E+06	-1.51E+06
60	-2.26E+07	3.54E+06	-1.68E+06
70	-1.35E+07	2.28E+06	-9.52E+05
80	-3.47E+06	5.83E+05	-2.44E+05
90	-8.88E+05	1.49E+05	-6.25E+04
100	-2.28E+05	3.83E+04	-1.60E+04
110	-5.83E+04	9.81E+03	-4.10E+03
120	-1.49E+04	2.51E+03	-1.05E+03
130	-3.83E+03	6.44E+02	-2.69E+02

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
 ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
 ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.6 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในโครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง
กรณีใช้วัสดุโครงแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	5.31E+03	3.95E+02	1.72E+02
-60	2.07E+04	1.54E+03	6.70E+02
-50	8.09E+04	6.02E+03	2.61E+03
-40	3.16E+05	2.35E+04	1.02E+04
-30	1.23E+06	9.16E+04	3.98E+04
-20	4.81E+06	3.58E+05	1.55E+05
-10	1.88E+07	1.40E+06	6.07E+05
0	7.32E+07	4.72E+06	2.02E+06
3	3.89E+07	1.94E+06	6.97E+05
6	1.86E+07	2.21E+05	-8.98E+04
9	6.16E+06	-7.60E+05	-4.57E+05
12	-1.62E+06	-1.20E+06	-4.92E+05
15	-6.66E+06	-1.20E+06	-2.82E+05
18	-1.00E+07	-8.73E+05	5.14E+04
21	-1.23E+07	-2.89E+05	3.07E+05
24	-1.38E+07	4.32E+05	2.63E+05
27	-1.47E+07	1.10E+06	1.56E+05
30	-1.52E+07	1.40E+06	1.13E+05
33	-1.53E+07	9.41E+05	1.63E+05
36	-1.51E+07	1.88E+05	2.54E+05
39	-1.46E+07	-5.92E+05	2.23E+05
42	-1.39E+07	-1.25E+06	-1.28E+05
45	-1.30E+07	-1.72E+06	-5.41E+05
48	-1.23E+07	-1.98E+06	-8.67E+05
51	-1.20E+07	-2.04E+06	-1.05E+06
54	-1.27E+07	-2.00E+06	-1.08E+06

ตาราง ก.6(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในโครงสร้างสะพานแบบคาน
ต่อเนื่อง กรณีใช้วัสดุยึดรางแบบปกติ

DISP.(m)	หน่วยแรงเนื่องจากการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-1.56E+07	-1.99E+06	-1.05E+06
60	-2.26E+07	-2.29E+06	-1.12E+06
70	-1.35E+07	-1.24E+06	-6.04E+05
80	-3.47E+06	-3.18E+05	-1.55E+05
90	-8.88E+05	-8.15E+04	-3.96E+04
100	-2.28E+05	-2.09E+04	-1.02E+04
110	-5.83E+04	-5.35E+03	-2.60E+03
120	-1.49E+04	-1.37E+03	-6.67E+02
130	-3.83E+03	-3.51E+02	-1.71E+02

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.7 ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวใน
โครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว กรณีใช้วัสดุีตราบแบบปกติ

DISP.(m)	ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	3.35E+03	-2.87E+03	9.83E+02
-60	1.31E+04	-1.12E+04	3.84E+03
-50	5.10E+04	-4.38E+04	1.50E+04
-40	1.99E+05	-1.71E+05	6.32E+04
-30	7.77E+05	-6.67E+05	2.28E+05
-20	3.03E+06	-2.60E+06	1.54E+05
-10	1.18E+07	-1.02E+07	3.47E+06
0	4.62E+07	-2.81E+07	1.90E+07
3	5.14E+07	9.98E+06	3.47E+07
6	5.26E+07	3.06E+07	4.13E+07
9	5.22E+07	4.14E+07	4.13E+07
12	5.11E+07	4.62E+07	3.48E+07
15	4.97E+07	4.69E+07	1.97E+07
18	4.83E+07	4.39E+07	-9.43E+06
21	4.71E+07	3.60E+07	-1.76E+07
24	4.60E+07	2.03E+07	1.26E+07
27	4.50E+07	-8.86E+06	2.64E+07
30	4.35E+07	-6.12E+07	2.87E+07
33	4.28E+07	-1.87E+06	1.97E+07
36	4.19E+07	2.33E+07	-1.94E+06
39	4.05E+07	3.63E+07	-4.48E+07
42	3.77E+07	4.20E+07	-1.61E+07
45	3.25E+07	4.19E+07	1.13E+07
48	2.26E+07	3.77E+07	2.24E+07
51	3.86E+06	2.72E+07	2.10E+07
54	-3.07E+07	6.54E+06	6.69E+06

ตาราง ก.7(ต่อ) ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวใน
โครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว กรณีใช้วัสดุยึดรางแบบปกติ

DISP.(m)	ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-9.39E+07	-3.17E+07	-2.55E+07
60	-2.09E+08	-8.37E+07	-7.15E+07
70	-1.30E+08	-5.43E+07	-4.67E+07
80	-3.33E+07	-1.39E+07	-1.20E+07
90	-8.54E+06	-3.57E+06	-3.07E+06
100	-2.19E+06	-9.14E+05	-7.86E+05
110	-5.61E+05	-2.34E+05	-4.83E+04
120	-1.44E+05	-6.00E+04	-5.16E+04
130	-3.68E+04	-1.54E+04	-1.32E+04

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.8 ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวใน
โครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง กรณีใช้วัสดุยึดรางแบบปกติ

DISP.(m)	ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	3.35E+03	-1.52E+03	-1.69E+03
-60	1.31E+04	-5.92E+03	-6.59E+03
-50	5.10E+04	-2.31E+04	-2.57E+04
-40	1.99E+05	-9.02E+04	-1.00E+05
-30	7.77E+05	-3.52E+05	-3.92E+05
-20	3.03E+06	-1.37E+06	-1.53E+06
-10	1.18E+07	-5.36E+06	-5.97E+06
0	4.62E+07	-2.17E+07	-1.34E+07
3	5.14E+07	2.01E+07	1.91E+07
6	5.26E+07	3.74E+07	3.72E+07
9	5.22E+07	4.70E+07	4.72E+07
12	5.11E+07	5.25E+07	5.29E+07
15	4.97E+07	5.56E+07	5.62E+07
18	4.83E+07	5.76E+07	5.82E+07
21	4.71E+07	5.90E+07	5.93E+07
24	4.60E+07	6.01E+07	5.97E+07
27	4.50E+07	6.07E+07	5.96E+07
30	4.35E+07	6.07E+07	5.94E+07
33	4.28E+07	5.95E+07	5.89E+07
36	4.19E+07	5.67E+07	5.78E+07
39	4.05E+07	5.38E+07	5.57E+07
42	3.77E+07	4.93E+07	5.15E+07
45	3.25E+07	4.20E+07	4.43E+07
48	2.26E+07	2.98E+07	3.19E+07
51	3.86E+06	8.40E+06	1.03E+07
54	-3.07E+07	-2.95E+07	-2.79E+07

ตาราง ก.8(ต่อ) ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวใน
โครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง กรณีใช้วัสดุยึดรางแบบปกติ

DISP.(m)	ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-9.39E+07	-9.73E+07	-9.59E+07
60	-2.09E+08	-2.18E+08	-2.17E+08
70	-1.30E+08	-1.18E+08	-1.18E+08
80	-3.33E+07	-3.02E+07	-3.01E+07
90	-8.54E+06	-7.74E+06	-7.72E+06
100	-2.19E+06	-1.98E+06	-1.98E+06
110	-5.61E+05	-5.08E+05	-5.07E+05
120	-1.44E+05	-1.30E+05	-1.30E+05
130	-3.68E+04	-3.34E+04	-3.33E+04

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.9 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว
กรณีใช้วัสดุคานแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	-9.97E-13	-2.54E-13	-2.45E-13
-60	-3.89E-12	-9.90E-13	-9.56E-13
-50	-1.52E-11	-3.87E-12	-3.70E-12
-40	-5.93E-11	-1.51E-11	-1.46E-11
-30	-2.31E-10	-5.89E-11	-5.68E-11
-20	-9.03E-10	-2.30E-10	-2.22E-10
-10	-3.52E-09	-8.97E-10	-1.71E-09
0	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
3	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
6	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
9	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
12	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
15	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
18	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
21	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
24	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
27	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
30	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
33	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
36	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
39	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
42	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
45	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
48	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
51	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
54	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09

ตาราง ก.9(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว กรณีใช้วัสดุยึดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
60	-2.18E-08	-1.08E-08	-7.09E-09
70	1.11E-07	5.31E-08	3.54E-08
80	2.83E-08	1.36E-08	9.06E-09
90	7.26E-09	3.49E-09	2.32E-09
100	1.32E-09	8.93E-10	5.95E-10
110	4.76E-10	2.29E-10	1.53E-10
120	1.22E-10	5.87E-11	3.91E-11
130	3.13E-11	1.50E-11	1.00E-11

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
 ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
 ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.10 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง
กรณีใช้วัสดุคานแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	-9.97E-13	-8.74E-13	-9.29E-13
-60	-3.89E-12	-3.41E-12	-3.62E-12
-50	-1.52E-11	-1.33E-11	-1.41E-11
-40	-5.93E-11	-5.20E-11	-5.52E-11
-30	-2.31E-10	2.03E-10	-2.15E-10
-20	-9.03E-10	-7.91E-10	-8.41E-10
-10	-3.52E-09	-3.09E-09	-3.28E-09
0	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
3	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
6	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
9	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
12	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
15	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
18	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
21	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
24	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
27	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
30	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
33	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
36	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
39	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
42	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
45	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
48	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
51	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
54	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08

ตาราง ก.10(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างสะพานแบบคาน
ต่อเนื่อง กรณีใช้วัสดุคานแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
60	-2.18E-08	-2.18E-08	-2.17E-08
70	1.11E-07	1.10E-07	1.10E-07
80	2.83E-08	2.81E-08	2.81E-08
90	7.26E-09	7.20E-09	7.19E-09
100	1.32E-09	1.85E-09	1.84E-09
110	4.76E-10	4.73E-10	4.72E-10
120	1.22E-10	1.21E-10	1.21E-10
130	3.13E-11	3.10E-11	3.10E-11

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.11 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว
กรณีใช้วัสดุคานแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรก (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	2.83E+03	2.83E+03	2.83E+03
-60	1.10E+04	1.10E+04	1.10E+04
-50	4.31E+04	4.31E+04	4.31E+04
-40	1.68E+05	1.68E+05	1.68E+05
-30	6.56E+05	6.56E+05	6.56E+05
-20	2.56E+06	2.56E+06	2.56E+06
-10	1.00E+07	1.00E+07	1.98E+07
0	3.90E+07	3.90E+07	3.90E+07
3	3.59E+07	3.51E+07	3.51E+07
6	3.20E+07	3.12E+07	3.12E+07
9	2.81E+07	2.73E+07	2.73E+07
12	2.42E+07	2.34E+07	2.34E+07
15	2.03E+07	1.95E+07	1.95E+07
18	1.64E+07	1.56E+07	1.56E+07
21	1.25E+07	1.17E+07	1.17E+07
24	8.58E+06	7.80E+06	7.80E+06
27	4.68E+06	3.90E+06	3.90E+06
30	7.80E+05	-7.80E+05	-7.80E+05
33	-3.90E+06	-4.68E+06	-4.68E+06
36	-7.80E+06	-8.58E+06	-8.58E+06
39	-1.17E+07	-1.25E+07	-1.25E+07
42	-1.56E+07	-1.64E+07	-1.64E+07
45	-1.95E+07	-2.03E+07	-2.03E+07
48	-2.34E+07	-2.42E+07	-2.42E+07
51	-2.73E+07	-2.81E+07	-2.81E+07
54	-3.12E+07	-3.20E+07	-3.20E+07

ตาราง ก.11(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว กรณีใช้วัสดุโครงสร้างแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรก (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-3.51E+07	-3.59E+07	-3.59E+07
60	-3.90E+07	-3.90E+07	-3.90E+07
70	-2.11E+07	-2.11E+07	-2.11E+07
80	-5.42E+06	-5.42E+06	-5.42E+06
90	-1.39E+06	-1.39E+06	-1.39E+06
100	-2.53E+05	-3.56E+05	-3.56E+05
110	-9.11E+04	-9.11E+04	-9.11E+04
120	-2.34E+04	-2.34E+04	-2.34E+04
130	-5.98E+03	-5.98E+03	-5.98E+03

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
 ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
 ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.12 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในโครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง
กรณีใช้สคูปี้ดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรก (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	2.83E+03	2.83E+03	2.83E+03
-60	1.10E+04	1.10E+04	1.10E+04
-50	4.31E+04	4.31E+04	4.31E+04
-40	1.68E+05	1.68E+05	1.68E+05
-30	6.56E+05	6.56E+05	6.56E+05
-20	2.56E+06	2.56E+06	2.56E+06
-10	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
0	3.90E+07	3.90E+07	3.90E+07
3	3.59E+07	3.51E+07	3.51E+07
6	3.20E+07	3.12E+07	3.12E+07
9	2.81E+07	2.73E+07	2.73E+07
12	2.42E+07	2.34E+07	2.34E+07
15	2.03E+07	1.95E+07	1.95E+07
18	1.64E+07	1.56E+07	1.56E+07
21	1.25E+07	1.17E+07	1.17E+07
24	8.58E+06	7.80E+06	7.80E+06
27	4.68E+06	3.90E+06	3.90E+06
30	7.80E+05	-7.80E+05	-7.80E+05
33	-3.90E+06	-3.90E+06	-3.90E+06
36	-7.80E+06	-7.80E+06	-7.80E+06
39	-1.17E+07	-1.17E+07	-1.17E+07
42	-1.56E+07	-1.56E+07	-1.56E+07
45	-1.95E+07	-1.95E+07	-1.95E+07
48	-2.34E+07	-2.34E+07	-2.34E+07
51	-2.73E+07	-2.73E+07	-2.73E+07
54	-3.12E+07	-3.12E+07	-3.12E+07

ตาราง ก.12(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรกในโครงสร้างสะพานแบบคาน
ต่อเนื่อง กรณีใช้วัสดุคานแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเบรก (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-3.51E+07	-3.51E+07	-3.51E+07
60	-3.90E+07	-3.90E+07	-3.90E+07
70	-2.11E+07	-2.11E+07	-2.11E+07
80	-5.42E+06	-5.42E+06	-5.42E+06
90	-1.39E+06	-1.39E+06	-1.39E+06
100	-2.53E+05	-3.56E+05	-3.56E+05
110	-9.11E+04	-9.11E+04	-9.11E+04
120	-2.34E+04	-2.34E+04	-2.34E+04
130	-5.98E+03	-5.98E+03	-5.98E+03

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.13 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว
กรณีใช้วัสดุยึดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	-1.70E-01	3.90E-01	3.00E-01
-60	-6.80E-01	1.54E+00	1.19E+00
-50	-2.65E+00	6.01E+00	4.63E+00
-40	-1.04E+01	2.35E+01	1.81E+01
-30	-4.04E+01	9.16E+01	7.06E+01
-20	-1.58E+02	3.57E+02	2.57E+02
-10	-6.16E+02	1.40E+03	2.12E+03
0	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
3	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
6	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
9	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
12	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
15	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
18	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
21	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
24	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
27	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
30	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
33	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
36	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
39	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
42	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
45	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
48	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
51	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
54	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02

ตาราง ก.13(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวในโครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว กรณีใช้วัสดุยึดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
60	4.63E+02	-1.25E+03	-9.89E+02
70	-1.30E+03	2.77E+03	2.27E+03
80	-3.34E+02	7.09E+02	5.83E+02
90	-8.55E+01	1.82E+02	1.49E+02
100	-1.56E+01	4.65E+01	3.83E+01
110	-5.61E+00	1.19E+01	9.80E+00
120	-1.44E+00	3.05E+00	2.51E+00
130	-3.70E-01	7.80E-01	6.40E-01

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
 ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
 ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.14 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอมตัวในโครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง
กรณีใช้วัสดุยี่ดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอมตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	-1.70E-01	3.10E-01	2.70E-01
-60	-6.80E-01	1.22E+00	1.04E+00
-50	-2.65E+00	4.74E+00	4.06E+00
-40	-1.04E+01	1.85E+01	1.58E+01
-30	-4.04E+01	7.23E+01	6.18E+01
-20	-1.58E+02	2.82E+02	2.41E+02
-10	-6.16E+02	1.10E+03	9.41E+02
0	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
3	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
6	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
9	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
12	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
15	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
18	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
21	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
24	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
27	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
30	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
33	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
36	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
39	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
42	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
45	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
48	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
51	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
54	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02

ตาราง ก.14(ต่อ) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอมตัวในโครงสร้างสะพานแบบคาน
ต่อเนื่อง กรณีใช้วัสดุคานแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอมตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
60	4.63E+02	-1.02E+03	-8.66E+02
70	-1.30E+03	2.33E+03	1.99E+03
80	-3.34E+02	5.96E+02	5.10E+02
90	-8.55E+01	1.53E+02	1.31E+02
100	-1.56E+01	3.92E+01	3.35E+01
110	-5.61E+00	1.00E+01	8.58E+00
120	-1.44E+00	2.57E+00	2.20E+00
130	-3.70E-01	6.60E-01	5.60E-01

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.15 ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวใน
โครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว กรณีใช้วัสดุยึดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero
Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	2.83E+03	2.83E+03	2.83E+03
-60	1.10E+04	1.10E+04	1.10E+04
-50	4.31E+04	4.31E+04	4.31E+04
-40	1.68E+05	1.68E+05	1.68E+05
-30	6.56E+05	6.57E+05	6.57E+05
-20	2.56E+06	2.56E+06	2.56E+06
-10	1.00E+07	1.00E+07	1.98E+07
0	3.90E+07	3.90E+07	3.90E+07
3	3.59E+07	3.51E+07	3.51E+07
6	3.20E+07	3.12E+07	3.12E+07
9	2.81E+07	2.73E+07	2.73E+07
12	2.42E+07	2.34E+07	2.34E+07
15	2.03E+07	1.95E+07	1.95E+07
18	1.64E+07	1.56E+07	1.56E+07
21	1.25E+07	1.17E+07	1.17E+07
24	8.59E+06	7.80E+06	7.80E+06
27	4.68E+06	3.90E+06	3.90E+06
30	7.81E+05	-7.82E+05	-7.81E+05
33	-3.90E+06	-4.68E+06	-4.68E+06
36	-7.80E+06	-8.59E+06	-8.59E+06
39	-1.17E+07	-1.25E+07	-1.25E+07
42	-1.56E+07	-1.64E+07	-1.64E+07
45	-1.95E+07	-2.03E+07	-2.03E+07
48	-2.34E+07	-2.42E+07	-2.42E+07
51	-2.73E+07	-2.81E+07	-2.81E+07
54	-3.12E+07	-3.20E+07	-3.20E+07

ตาราง ก.15(ต่อ) ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวใน
โครงสร้างสะพานแบบคานช่วงเดียว กรณีใช้วัสดุยึตรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero
Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-3.51E+07	-3.59E+07	-3.59E+07
60	-3.90E+07	-3.90E+07	-3.90E+07
70	-2.11E+07	-2.11E+07	-2.11E+07
80	-5.42E+06	-5.42E+06	-5.42E+06
90	-1.39E+06	-1.39E+06	-1.39E+06
100	-2.53E+05	-3.56E+05	-3.56E+05
110	-9.11E+04	-9.11E+04	-9.11E+04
120	-2.34E+04	-2.33E+04	-2.34E+04
130	-5.98E+03	-5.98E+03	-5.98E+03

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

ตาราง ก.16 ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวใน
โครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง กรณีใช้วัสดุคานแบบขอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero
Longitudinal Restraint)

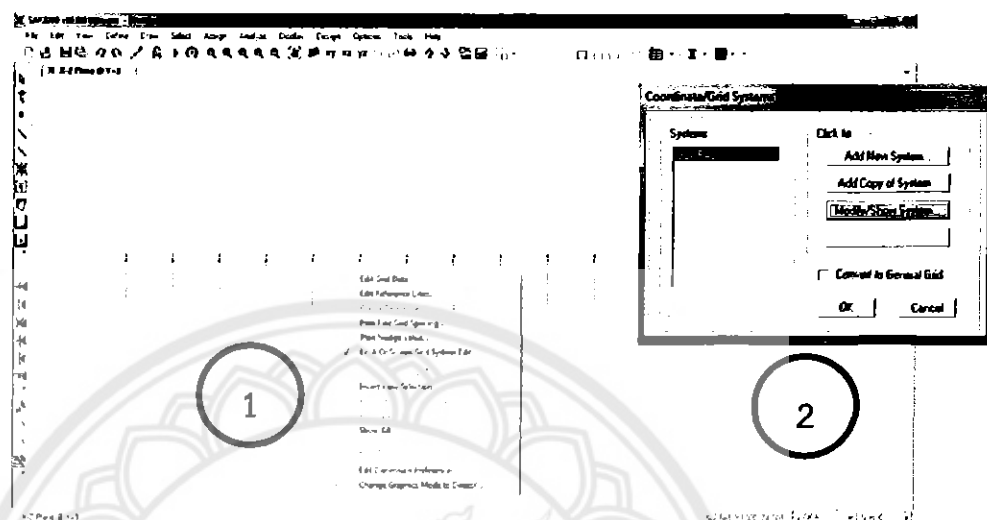
DISP. (m.)	ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว (N/m ²)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
-70	2.83E+03	2.83E+03	2.83E+03
-60	1.10E+04	1.10E+04	1.10E+04
-50	4.31E+04	4.31E+04	4.31E+04
-40	1.68E+05	1.68E+05	1.68E+05
-30	6.56E+05	6.57E+05	6.57E+05
-20	2.56E+06	2.56E+06	2.56E+06
-10	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
0	3.90E+07	3.90E+07	3.90E+07
3	3.59E+07	3.51E+07	3.51E+07
6	3.20E+07	3.12E+07	3.12E+07
9	2.81E+07	2.73E+07	2.73E+07
12	2.42E+07	2.34E+07	2.34E+07
15	2.03E+07	1.95E+07	1.95E+07
18	1.64E+07	1.56E+07	1.56E+07
21	1.25E+07	1.17E+07	1.17E+07
24	8.59E+06	7.80E+06	7.80E+06
27	4.68E+06	3.90E+06	3.90E+06
30	7.81E+05	-7.81E+05	-7.81E+05
33	-3.90E+06	-3.90E+06	-3.90E+06
36	-7.80E+06	-7.81E+06	-7.81E+06
39	-1.17E+07	-1.17E+07	-1.17E+07
42	-1.56E+07	-1.56E+07	-1.56E+07
45	-1.95E+07	-1.95E+07	-1.95E+07
48	-2.34E+07	-2.34E+07	-2.34E+07
51	-2.73E+07	-2.73E+07	-2.73E+07
54	-3.12E+07	-3.12E+07	-3.12E+07

ตาราง ก.16(ต่อ) ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวใน
โครงสร้างสะพานแบบคานต่อเนื่อง กรณีใช้วัสดุยึดรางแบบยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว (Zero
Longitudinal Restraint)

DISP. (m.)	ผลรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัว (N/m^2)		
	1 ช่วงความยาว	2 ช่วงความยาว	3 ช่วงความยาว
57	-3.51E+07	-3.51E+07	-3.51E+07
60	-3.90E+07	-3.90E+07	-3.90E+07
70	-2.11E+07	-2.11E+07	-2.11E+07
80	-5.42E+06	-5.42E+06	-5.42E+06
90	-1.39E+06	-1.39E+06	-1.39E+06
100	-2.53E+05	-3.56E+05	-3.56E+05
110	-9.11E+04	-9.11E+04	-9.11E+04
120	-2.34E+04	-2.34E+04	-2.34E+04
130	-5.98E+03	-5.98E+03	-5.98E+03

หมายเหตุ ระยะ DISP. ที่ 0 เมตร คือ ระยะเข้าสะพาน
ค่าบวก หมายถึง เกิดหน่วยแรงดึง
ค่าลบ หมายถึง เกิดหน่วยแรงอัด

3. จะปรากฏ Grid Line ดังรูป 3.ข จากนั้นคลิกขวาที่ตำแหน่งใดก็ได้ คลิก Edit Grid Data → Modify/Show System.. จะปรากฏ หน้าต่าง Define Grid System Data ดังรูป 4.ข



รูปที่ 3.ข แสดง Grid Line และขั้นตอนการปรับแก้

Define Grid System Data

Edit Format

System Name: GENERAL Units: H, m, C Grid Lines: Quick Start

X Grid Data

	Grid ID	Coordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	A1	0	Primary	Show	End	
2	A2	0.1	Primary	Show	End	
3	A3	5.1	Primary	Show	End	
4	A4	10.1	Primary	Show	End	
5	A5	15.1	Primary	Show	End	
6	A6	20.1	Primary	Show	End	
7	A7	25.1	Primary	Show	End	
8	A8	30.1	Primary	Show	End	

Y Grid Data

	Grid ID	Coordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	1	0	Primary	Show	Start	
2	2	1	Primary	Show	Start	
3	3	2	Primary	Show	Start	
4	4	3	Primary	Show	Start	
5						
6						
7						
8						

Z Grid Data

	Grid ID	Coordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	Z1	-5.79	Primary	Show	End	
2	Z2	-4.79	Primary	Show	End	
3	Z3	0	Primary	Show	End	
4	Z4	1.21	Primary	Show	End	
5	Z5	1.28	Primary	Show	End	
6						
7						
8						

Display Grids as: ☒ Ordinates ☐ Spacing

☐ Hide All Grid Lines

☐ Give to Grid Lines

Bubble Size: 0.25

Reset to Default Color

Records Ordinate

OK Cancel

รูปที่ 4.ข แสดง Grid Line ในแกน X Y และ Z

4. ปรับแก้ Grid ID และ Coordinate จากรูป 4.ข ให้ได้ดังรูป 5.ข

Define Grid System Data

Edit Format

System Name: Units:

Grid Lines:

X Grid Data

	Grid ID	Coordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	A1	0	Primary	Show	End	
2	A2	0.1	Primary	Show	End	
3	A3	5.1	Primary	Show	End	
4	A4	10.1	Primary	Show	End	
5	A5	15.1	Primary	Show	End	
6	A6	20.1	Primary	Show	End	
7	A7	25.1	Primary	Show	End	
8	A8	30.1	Primary	Show	End	

Y Grid Data

	Grid ID	Coordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	1	0	Primary	Show	Start	
2	2	1	Primary	Show	Start	
3	3	2	Primary	Show	Start	
4	4	3	Primary	Show	Start	
5						
6						
7						
8						

Z Grid Data

	Grid ID	Coordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.
1	Z1	-5.73	Primary	Show	End
2	Z2	-4.73	Primary	Show	End
3	Z3	0	Primary	Show	End
4	Z4	1.21	Primary	Show	End
5	Z5	1.28	Primary	Show	End
6					
7					
8					

Display Grids as:

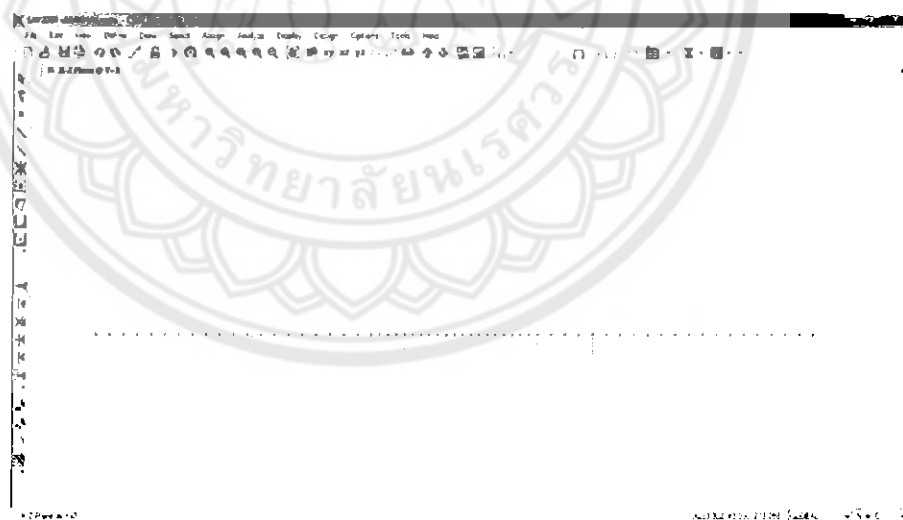
☒ Ordinate ☐ Spacing

☐ Hide All Grid Lines

☐ Glue to Grid Lines

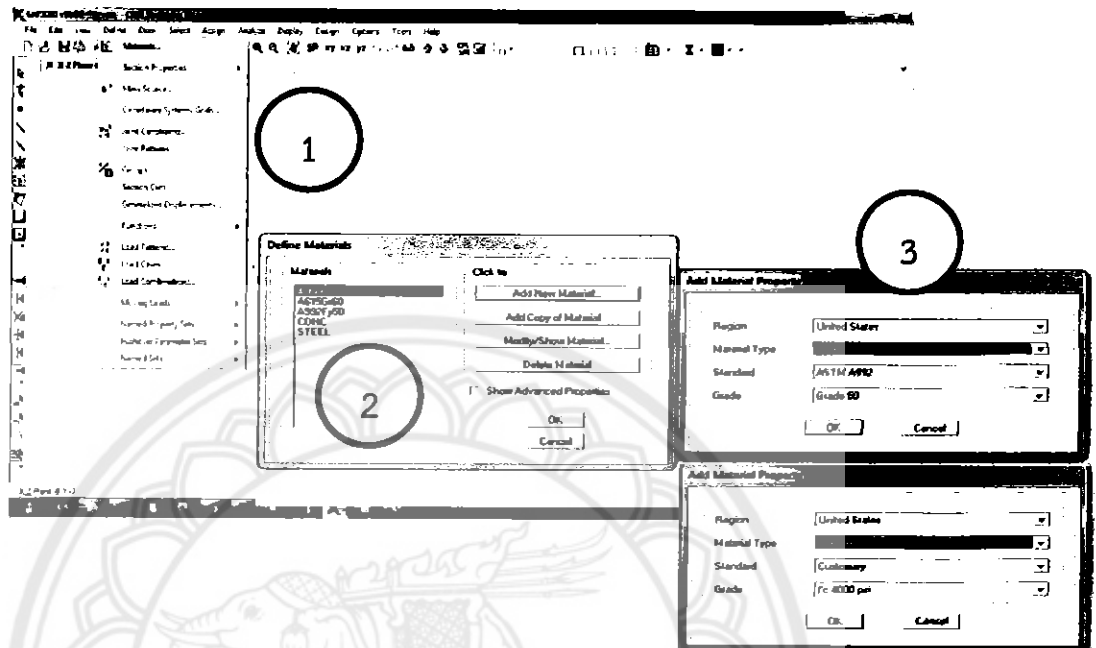
Bubble Size:

รูปที่ 5.ข หน้าต่าง Define Grid System Data หลังปรับแก้ค่า

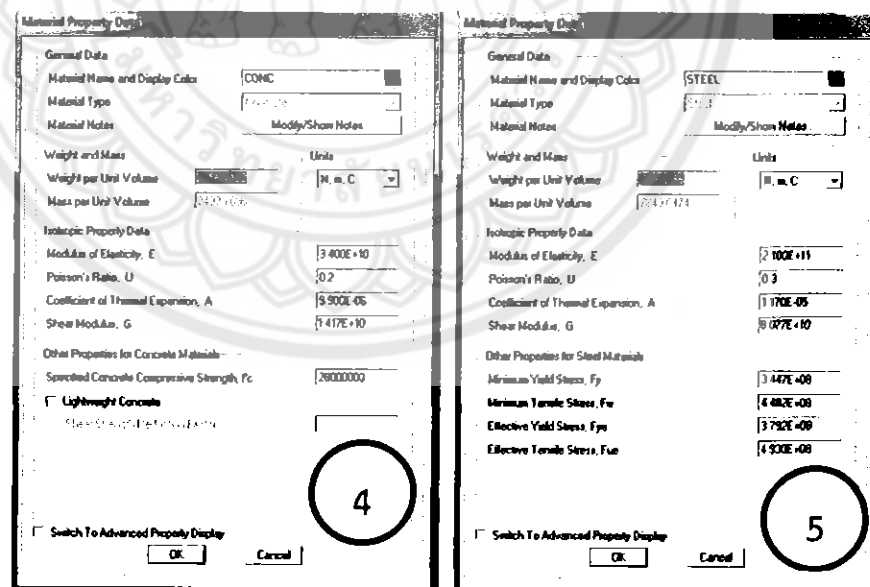


รูปที่ 6.ข หน้าต่างโปรแกรมแสดง Grid Line

5. กำหนดแบบจำลองวัสดุที่ใช้โดยคลิก Define → Materials → Add New Materials
เลือกเป็น Steel และ Concrete

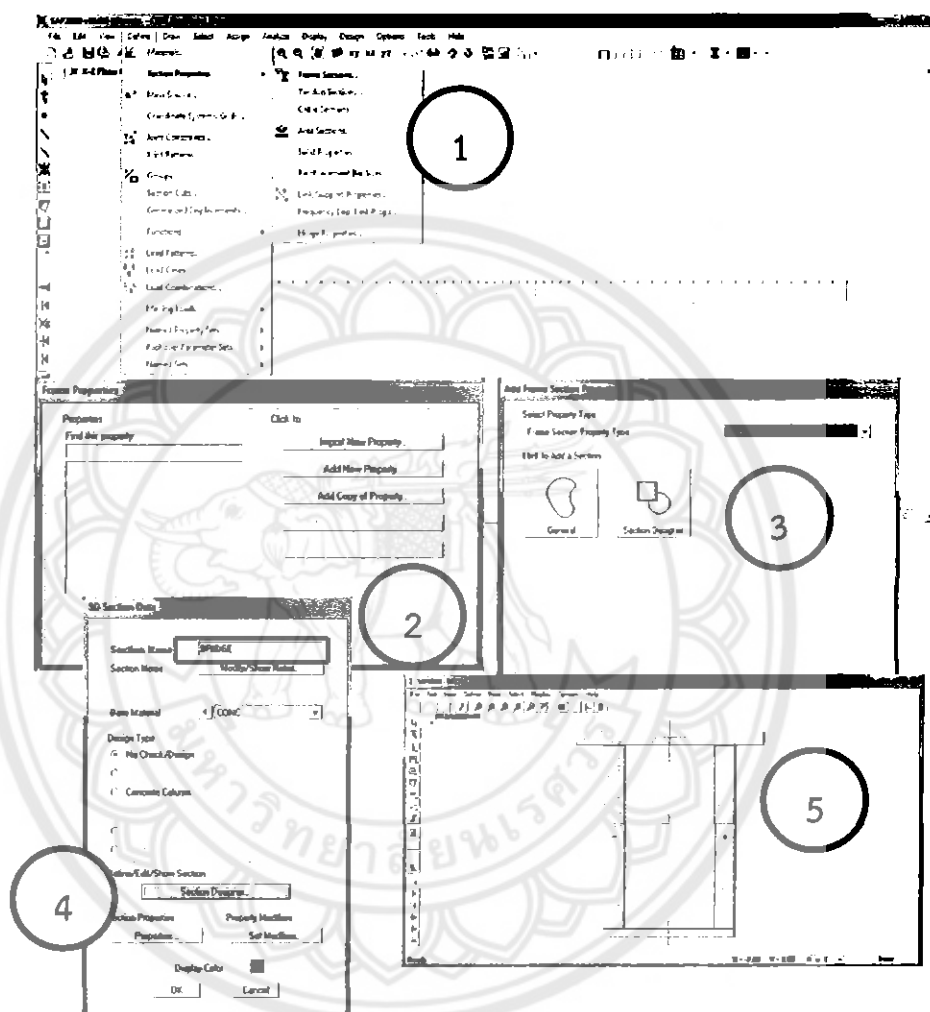


รูปที่ 7.ข กำหนดแบบจำลองวัสดุ



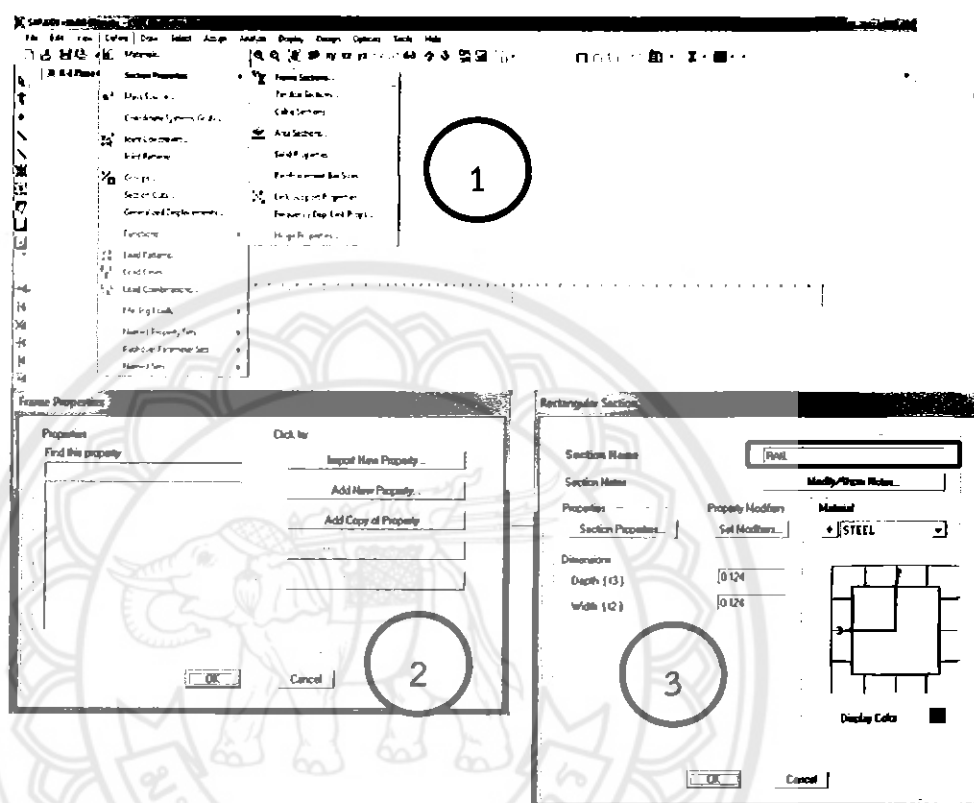
รูปที่ 8.ข แสดงคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตและเหล็ก

6. กำหนดหน้าตัดวัสดุสำหรับสะพานคอนกรีต คลิกที่ Define → Section Properties → Frame Sections → Add New Properties กำหนด Frame Section Property Type เป็น Other → Section Designer จะปรากฏหน้าต่าง SD Section Data เปลี่ยนชื่อเป็น Bridge จากนั้นคลิก Section Designer → ออกแบบหน้าตัดสะพาน ดังรูป 9.ข



รูปที่ 9.ข กำหนดหน้าตัดวัสดุสำหรับสะพานคอนกรีต

7. กำหนดหน้าตัดวัสดุสำหรับรางเหล็ก คลิกที่ Define → Section Properties
 → Frame Sections → Add New Properties เปลี่ยนชื่อเป็น Rail จากนั้นกำหนด
 Frame Section Property Type เป็น Steel ตามขั้นตอนที่ 3 ดังรูป 10.ข

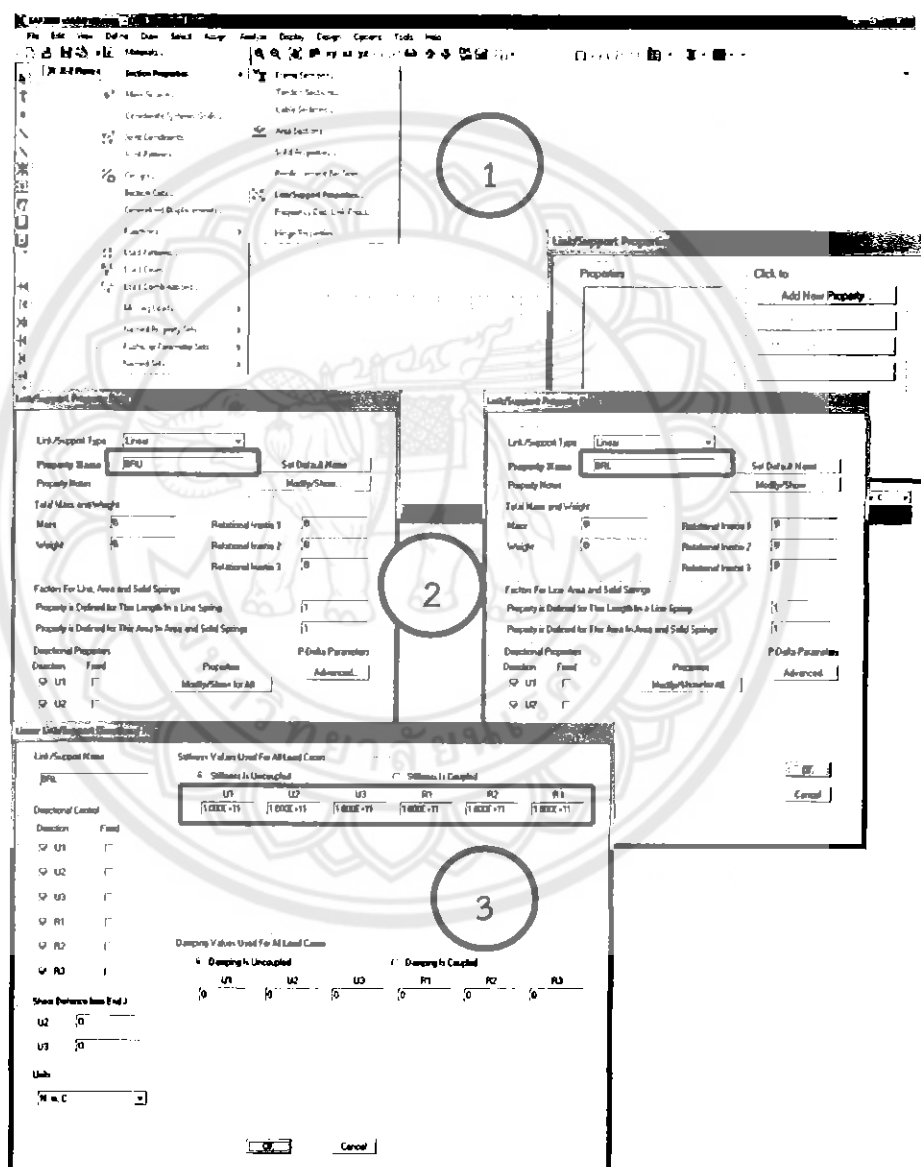


รูปที่ 10.ข กำหนดหน้าตัดวัสดุสำหรับรางเหล็ก

8. กำหนดจุดเชื่อมชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) สำหรับเชื่อมต่อวัสดุ

8.1 คลิก Define → Section Properties → Link/Support Properties → Add New Property กำหนด ชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) ใช้แทนโครงสร้างสะพานเชื่อมต่อระหว่างรางกับฐานรองรับ

กำหนดชื่อเป็น BRU และ BRL จากนั้นคลิก Modify/Show for All.. → กำหนดค่า Stiffness (U)
 $U_1 = 1.1 \times 10^{11}$ $U_2 = 1.1 \times 10^{11}$ $U_3 = 1.1 \times 10^{11}$ ตามขั้นตอนที่ 3 ดังรูป 11.ข



รูปที่ 11.ข กำหนด ชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) ใช้แทนโครงสร้างสะพานเชื่อมต่อระหว่างรางกับฐานรองรับ

8.2 คลิก Define → Section Properties → Link/Support Properties → Add New Property กำหนดชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างสะพานและหินโรยทางกับรางรถไฟ

กำหนดชื่อเป็น Rail_BR คลิก Modify/Show for All.. → กำหนดค่า Stiffness (U)
 $U1 = 7.2 \times 10^9$ $U2 = 7.2 \times 10^6$ ดังรูป 12.ข

The left screenshot shows the 'Link/Support Properties' dialog box. The 'Link/Support Type' is set to 'Link'. The 'Property Name' is 'Rail_BR'. The 'Property Status' is 'Modify/Show'. The 'Total Mass and Weight' section has 'Mass' set to 0 and 'Weight' set to 0. The 'Factors For Line Area and Solid Springs' section has 'Property is Defined for This Length in a Line Spring' set to 1. The 'Directional Properties' section has 'Direction' set to 'Fixed' and 'U1' set to 1. The 'P-Data Parameters' section has 'Modify/Show for All' button. The right screenshot shows the 'Stiffness Values Used For All Load Cases' table. The 'Stiffness is Uncoupled' checkbox is checked. The table has columns for U1, U2, U3, R1, R2, and R3. The values are: U1 = 7.200E+09, U2 = 7.200E+06, U3 = 0, R1 = 0, R2 = 0, R3 = 0. The 'Damping Values Used For All Load Cases' section has 'Damping is Uncoupled' checked. The 'Show Distance from End J' section has 'U2' set to 0. The 'Units' section has 'In. x C' selected. The 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

รูปที่ 12.ข กำหนดชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างสะพานและหินโรยทางกับรางรถไฟ

8.3 คลิก Define → Section Properties → Link/Support Properties → Add New Property กำหนดชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อยึดรางรถไฟที่ปลายทั้งสองด้าน กำหนดชื่อ RAILL และ RAILR คลิก Modify/Show for All.. → กำหนดค่า Stiffness (U)
 $U1 = 4.402 \times 10^8$

The left screenshot shows the 'Link/Support Properties' dialog box. The 'Link/Support Type' is set to 'Link'. The 'Property Name' is 'RAILL'. The 'Property Status' is 'Modify/Show'. The 'Total Mass and Weight' section has 'Mass' set to 0 and 'Weight' set to 0. The 'Factors For Line Area and Solid Springs' section has 'Property is Defined for This Length in a Line Spring' set to 1. The 'Directional Properties' section has 'Direction' set to 'Fixed' and 'U1' set to 1. The 'P-Data Parameters' section has 'Modify/Show for All' button. The right screenshot shows the 'Link/Support Properties' dialog box. The 'Link/Support Type' is set to 'Link'. The 'Property Name' is 'RAILR'. The 'Property Status' is 'Modify/Show'. The 'Total Mass and Weight' section has 'Mass' set to 0 and 'Weight' set to 0. The 'Factors For Line Area and Solid Springs' section has 'Property is Defined for This Length in a Line Spring' set to 1. The 'Directional Properties' section has 'Direction' set to 'Fixed' and 'U1' set to 1. The 'P-Data Parameters' section has 'Modify/Show for All' button.

รูปที่ 13.ข กำหนดชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อยึดตารางรถไฟที่ปลายทั้งสองด้าน

8.4 คลิก Define → Section Properties → Link/Support Properties → Add New Property กำหนดชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อระหว่างหินโรยทางกับตารางรถไฟ กำหนดชื่อ SOIL คลิก Modify/Show for All.. → กำหนดค่า Stiffness (U) $U1 = 6.0 \times 10^8$ $U2 = 3.0 \times 10^7$ ดังรูป 14.ข

รูปที่ 14.ข กำหนดชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) เชื่อมต่อระหว่างหินโรยทางกับตารางรถไฟ

8.5 คลิก Define → Section Properties → Link/Support Properties → Add New Property กำหนด Rigid Link สำหรับเชื่อมต่อ Hinge Support ตามแนวนอน กำหนดชื่อ SUPPLH คลิก Modify/Show for All.. → กำหนดค่า Stiffness (U) $U1 = 6.0 \times 10^8$ ดังรูป 15.ข

The left screenshot shows the 'Link/Support Properties' dialog box. The 'Link/Support Type' is set to 'Linear'. The 'Property Name' is 'SUPPLH'. The 'Stiffness Values' are set to 'U1 = 6.00E+08'. The 'Damping Values' are set to 'U1 = 0.00E+00'. The 'Units' are set to 'N, m, C'.

The right screenshot shows the 'Linear Link/Support Properties' dialog box. The 'Stiffness Values' are set to 'U1 = 6.00E+08'. The 'Damping Values' are set to 'U1 = 0.00E+00'. The 'Units' are set to 'N, m, C'.

รูปที่ 15.ข กำหนด Rigid Link สำหรับเชื่อมต่อ Hinge Support ตามแนวนอน

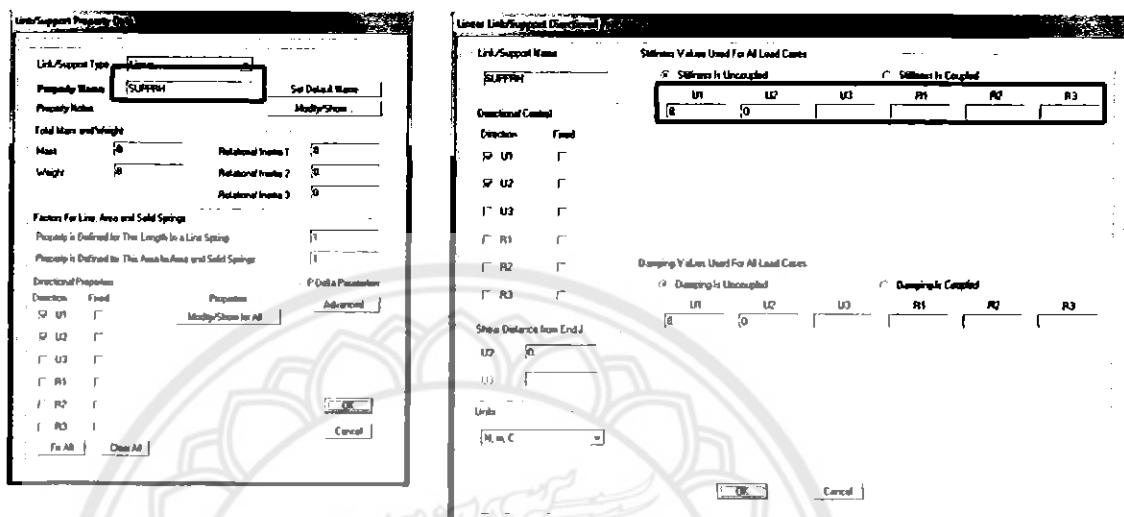
8.6 คลิก Define → Section Properties → Link/Support Properties → Add New Property กำหนด Rigid Link สำหรับเชื่อมต่อ Hinge Support ตามแนวตั้ง กำหนดชื่อ SUPPLV คลิก Modify/Show for All.. → กำหนดค่า Stiffness (U) $U1 = 1.0 \times 10^{11}$ ดังรูป 16.ข

The left screenshot shows the 'Link/Support Properties' dialog box. The 'Link/Support Type' is set to 'Linear'. The 'Property Name' is 'SUPPLV'. The 'Stiffness Values' are set to 'U1 = 1.00E+11'. The 'Damping Values' are set to 'U1 = 0.00E+00'. The 'Units' are set to 'N, m, C'.

The right screenshot shows the 'Linear Link/Support Properties' dialog box. The 'Stiffness Values' are set to 'U1 = 1.00E+11'. The 'Damping Values' are set to 'U1 = 0.00E+00'. The 'Units' are set to 'N, m, C'.

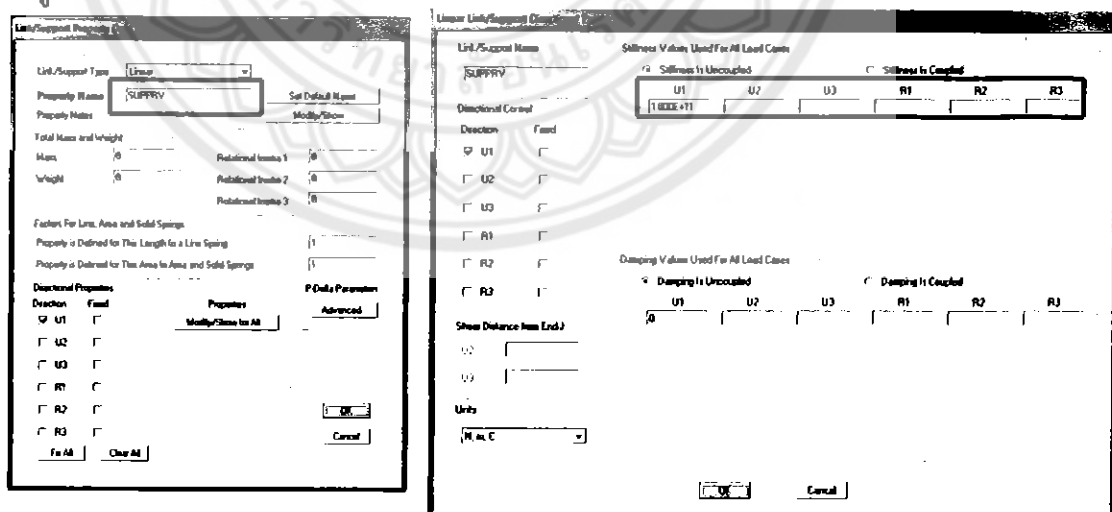
รูปที่ 16.ข กำหนด Rigid Link สำหรับเชื่อมต่อ Hinge Support ตามแนวตั้ง

8.7 คลิก Define → Section Properties → Link/Support Properties → Add New Property กำหนด Rigid Link สำหรับเชื่อมต่อ Roller Support ตามแนวนอน กำหนดชื่อ SUPPRH คลิก Modify/Show for All.. → กำหนดค่า Stiffness (U) $U_1=0, U_2=0$ ดังรูป 17.ข



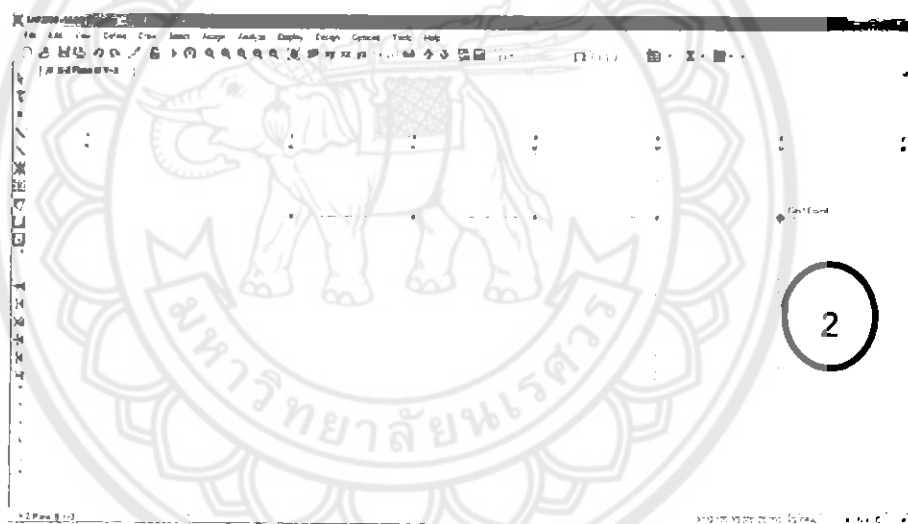
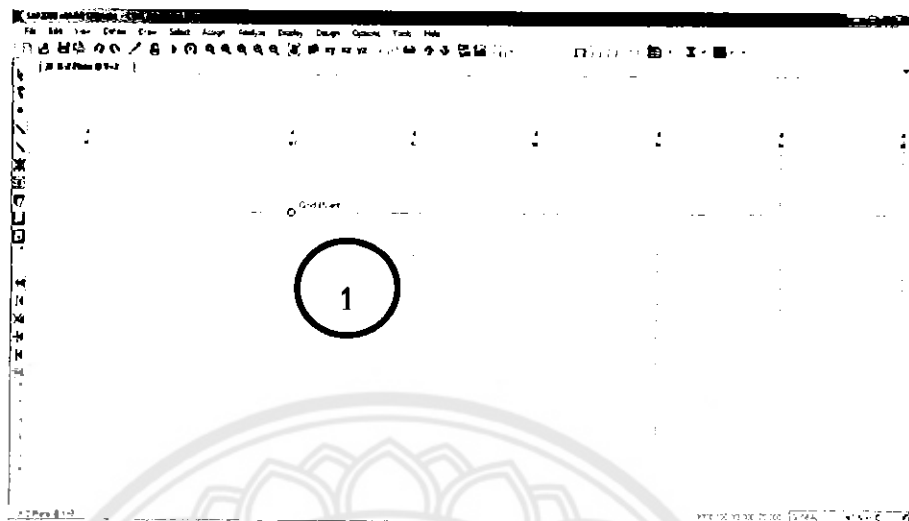
รูปที่ 17.ข กำหนด Rigid Link สำหรับเชื่อมต่อ Roller Support ตามแนวนอน

8.8 คลิก Define → Section Properties → Link/Support Properties → Add New Property กำหนด Rigid Link สำหรับเชื่อมต่อ Roller Support ตามแนวตั้ง กำหนดชื่อ SUPPRV คลิก Modify/Show for All.. → กำหนดค่า Stiffness (U) $U_1=1.0 \times 10^{11}$ ดังรูป 18.ข



รูปที่ 18.ข กำหนด Rigid Link สำหรับเชื่อมต่อ Roller Support ตามแนวตั้ง

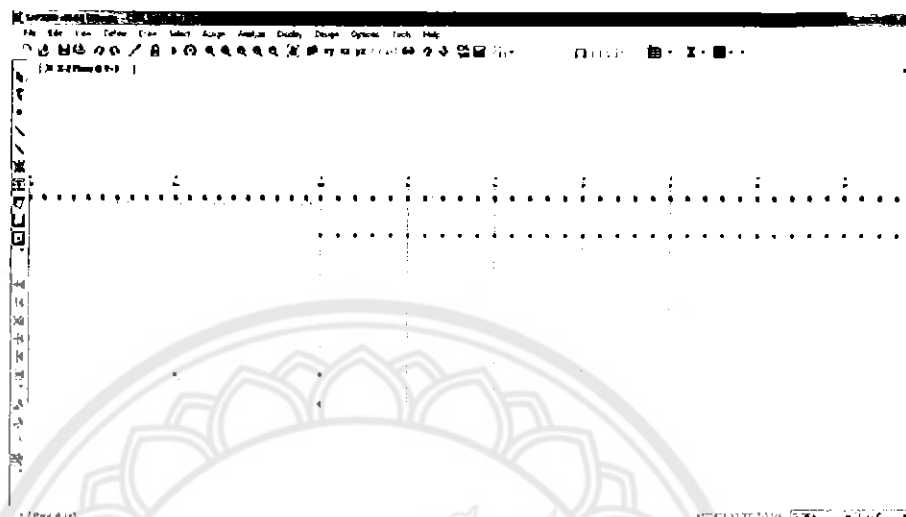
9.3 ลากเส้นตำแหน่งที่เป็นโครงสร้างสะพานและรางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดต่อไปดังรูป 20.ข



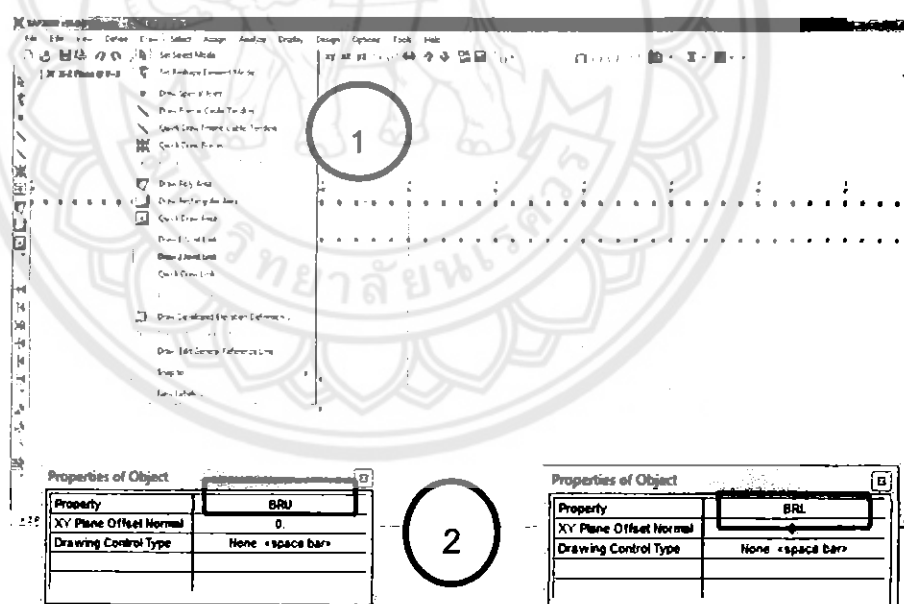
รูปที่ 20.ข การลากเส้นตำแหน่งที่เป็นโครงสร้างสะพานและรางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดต่อไป

10. ลากเส้นแบบจำลองชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) หลังจากลากเส้นแบบจำลองสะพานและรางเสร็จเรียบร้อยแล้ว

10.1 ขยายหน้าจอไปตำแหน่งที่ต้องการลากเส้นวัตถุลงใน Grid Line

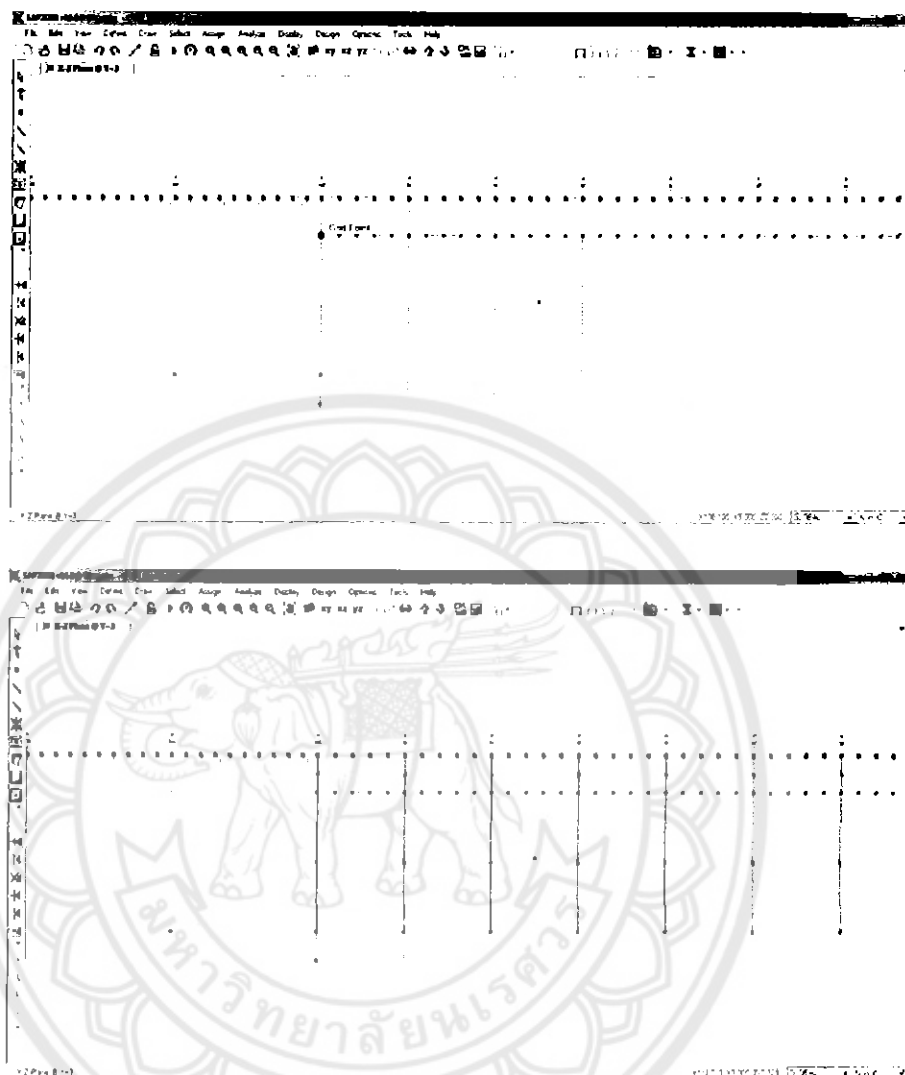


10.2 คลิก Draw → Draw 2 Joint Link → เลือก X Y Plane offset Normal เป็นค่าชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) ที่ต้องการ



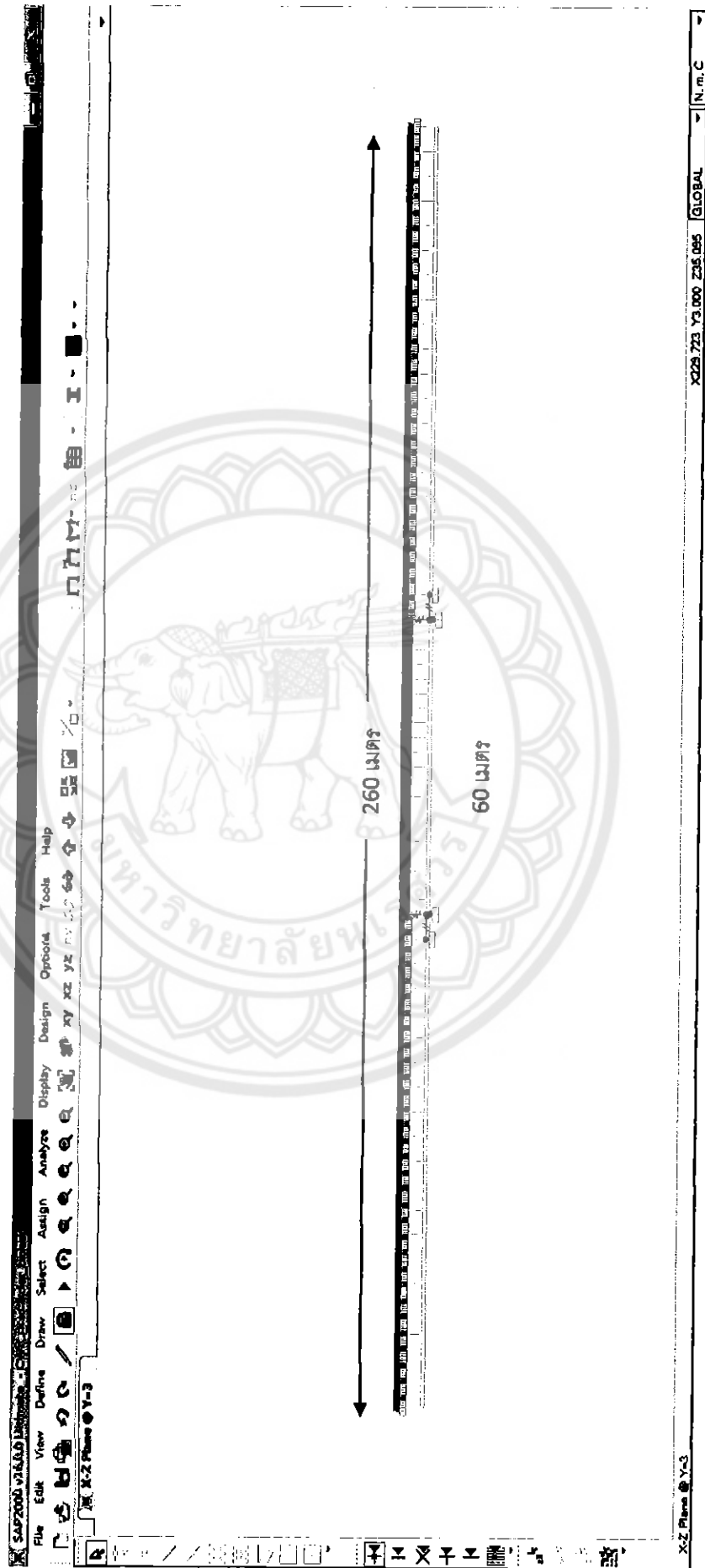
รูปที่ 21.ข กำหนดรูปแบบชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) ที่ต้องการ

10.3 ลากเส้นตำแหน่งที่เป็นแบบจำลองชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link) ดังรูป 22.ข

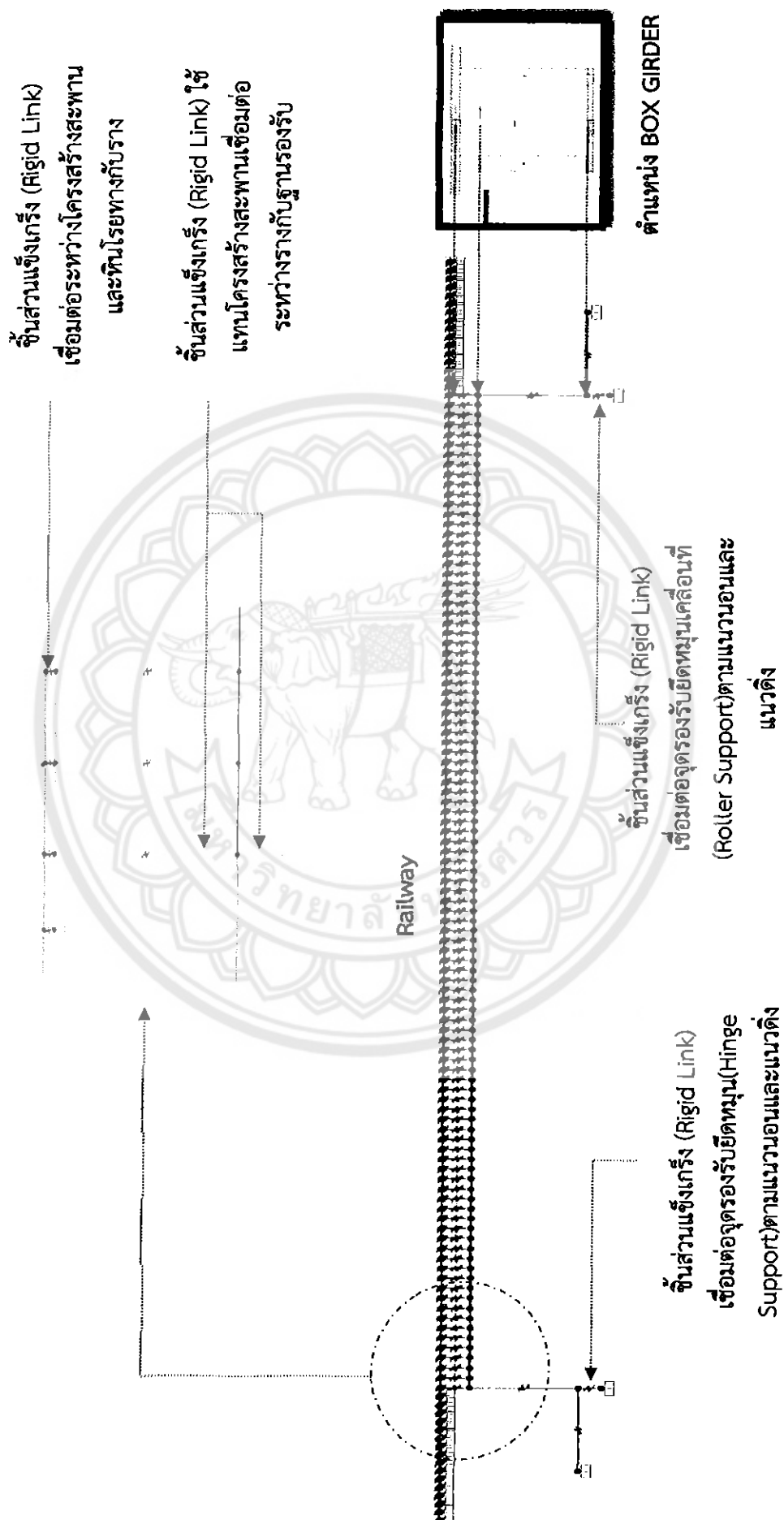


รูปที่ 22.ข การลากเส้นตำแหน่งที่เป็นแบบจำลองชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid Link)

11. เมื่อวาดแบบจำลองครบทุกส่วนจะได้โครงสร้างสะพานและทางเดินรถไฟ ดังรูป 23.ข



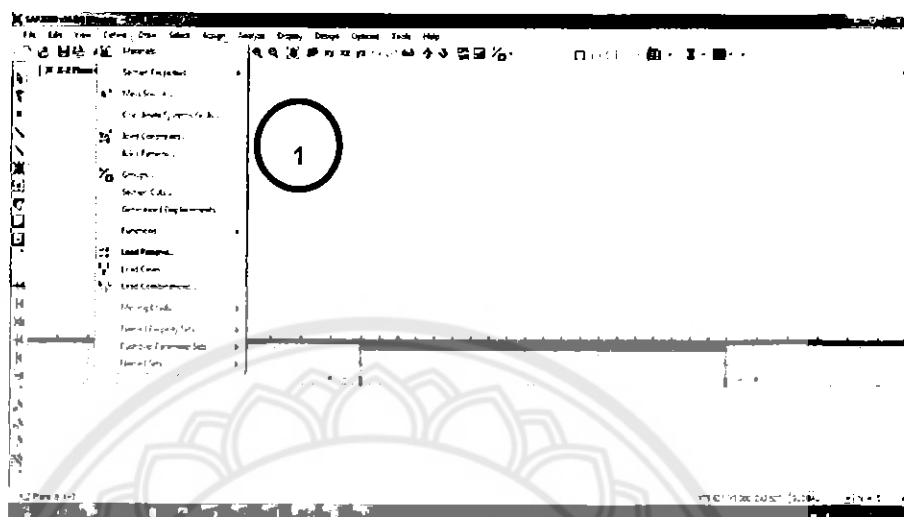
รูปที่ 23.ข แสดงภาพรวมของแบบจำลองโครงสร้างสะพาน ทางรถไฟและชิ้นส่วนแข็งแรง (Rigid Link)



รูปที่ 24ข. แสดงแบบขยายสะพานความยาว 60 เมตร

12. การสร้างแบบจำลองอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวของสะพาน

12.1 คลิก Define → Load Pattern



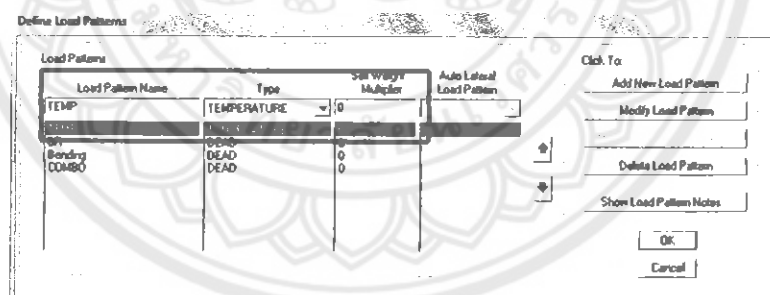
อุณหภูมิ ใช้ชื่อ TEMP เลือก Type เป็น TEMPERATURE

แรงเบรก ใช้ชื่อ BR เลือก Type เป็น DEAD

การแอ่นตัว ใช้ชื่อ Bending เลือก Type เป็น DEAD

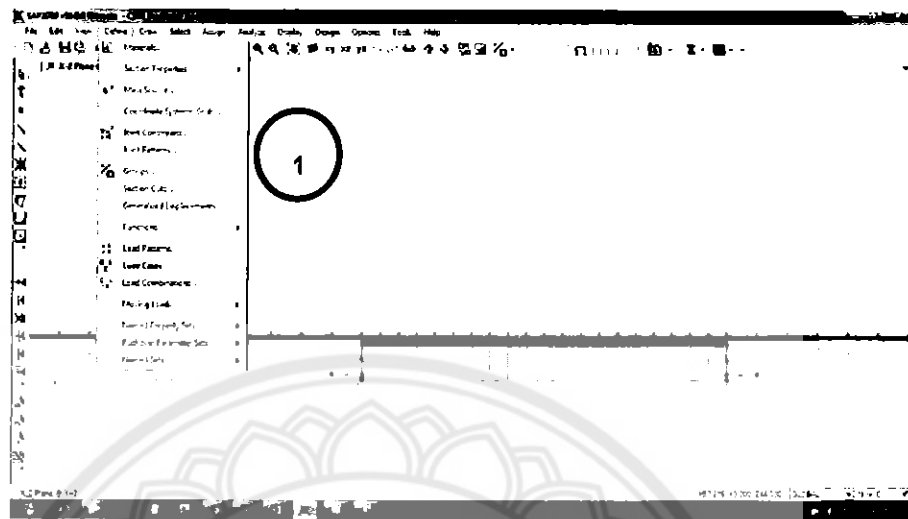
ผลรวมจาก อุณหภูมิ แรงเบรก การแอ่นตัว ใช้ชื่อ COMBO เลือก Type เป็น DEAD

จากนั้น Add New Load Pattern



รูปที่ 25.ข การสร้างแบบจำลองอุณหภูมิ แรงเบรกและการแอ่นตัวของสะพาน

12.2 คลิก Define → Load Cases → Add New Load Cases จากนั้นตั้งค่า Load Case สำหรับ อุณหภูมิ แรงเบรก การแอ่นตัวและผลรวมทั้งหมด ดังรูป 26.ข



Load Case Data - Linear Static

Load Case Name: Set Def Name

Notes:

Load Case Type: Design...

Stiffness to Use:

☒ Zero Initial Conditions - Unstressed State

☐ Initial Conditions - Stressed State

Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case.

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	TEMP	1
Load System	TEMP	1

Mass Source:

2

Load Case Data - Linear Static

Load Case Name: Set Def Name

Notes:

Load Case Type: Design...

Stiffness to Use:

☒ Zero Initial Conditions - Unstressed State

☐ Initial Conditions - Stressed State

Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case.

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	BR	1
Load System	BR	1

Mass Source:

Load Case Data - Linear Static

Load Case Name: Bending Set Def Name Notes: Modify/Show...

Load Case Type: Static Design...

Stiffness to Use:
☒ Zero Initial Conditions - Unstressed State
☐ ...
 Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case.

Analysis Type:
☒ Linear
☐ Nonlinear
☐ Nonlinear Staged Construction

Mass Source: MSSSRCT

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	Bending	1
Load Pattern	Bending	1

Add Modify Delete

OK Cancel

Load Case Data - Linear Static

Load Case Name: COMBINE Set Def Name Notes: Modify/Show...

Load Case Type: Static Design...

Stiffness to Use:
☒ Zero Initial Conditions - Unstressed State
☐ ...
 Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case.

Analysis Type:
☒ Linear
☐ Nonlinear
☐ Nonlinear Staged Construction

Mass Source: MSSSRCT

Loads Applied:

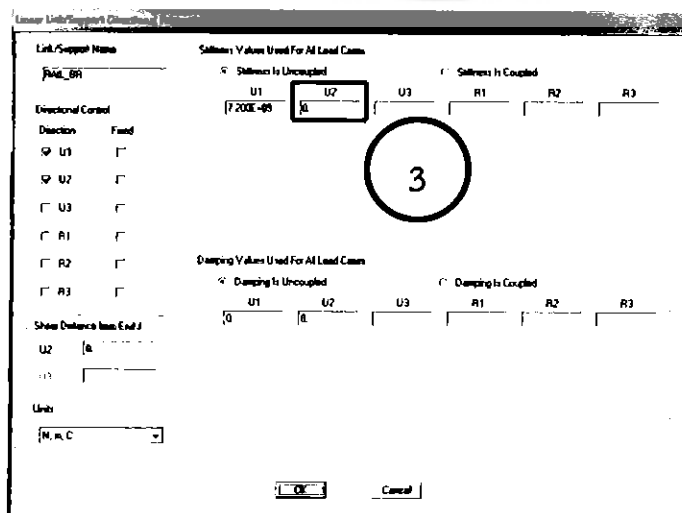
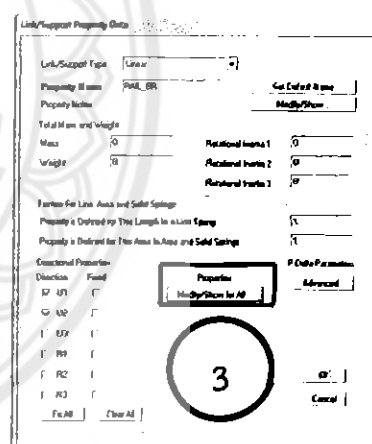
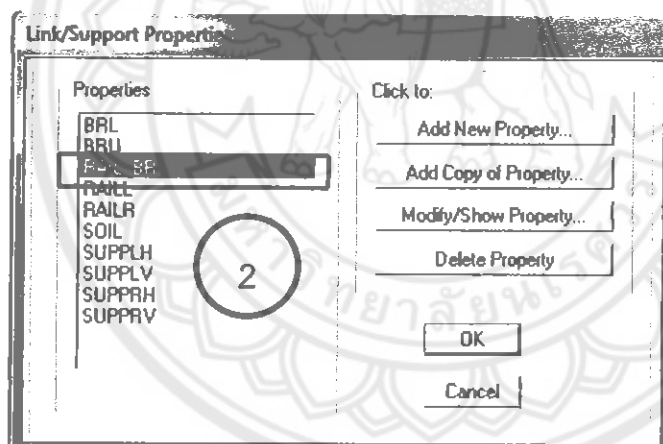
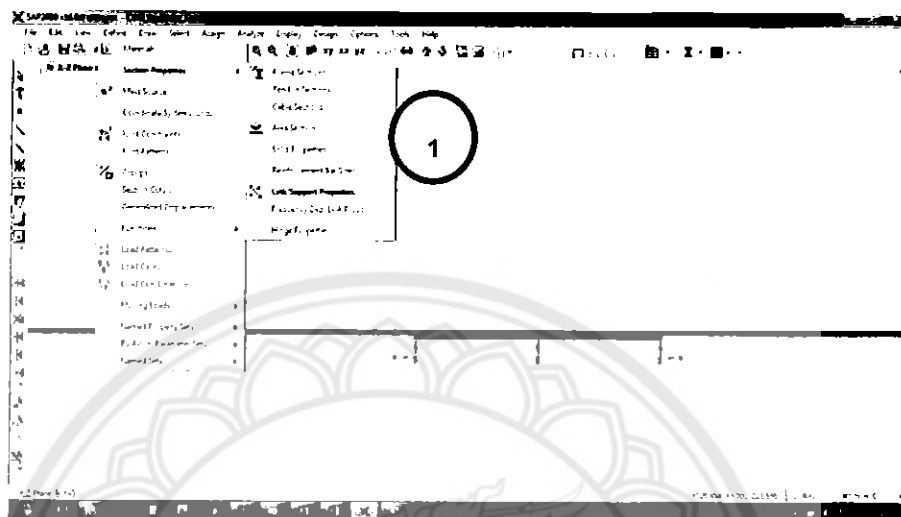
Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	TEMP	1
Load Pattern	BR	1
Load Pattern	Bending	1

Add Modify Delete

OK Cancel

รูปที่ 26.ข การตั้งค่า Load Case สำหรับ อูณหภูมิ แรงเบรก การแอ่นตัวและผลรวมทั้งหมด

13. กรณีที่ใช้วัสดุยึดรางที่ยอมให้เคลื่อนที่ตามแนวยาวได้ (Zero Longitudinal Restraint)
 คลิก Define → Section Properties → Link/Support Properties →
 เลือก RAIL_BR → Modify/Show Property → Modify/Show for All → เปลี่ยนค่า
 Stiffness U2 เป็น 0 → OK



รูปที่ 27.ข การเปลี่ยนรูปแบบ
วัสดุยึดรางแบบปกติเป็นวัสดุที่
ยอมให้เคลื่อนที่ได้ตามยาว
(ZLR)

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ

1. ชื่อ : นายเชาวฤทธิ์ ทาสินปี
 ที่อยู่ : บ้านเลขที่ 289 หมู่ 5 ตำบลสลกบาตร อำเภอขามเฒ่าลักษ์บุรี จังหวัด
 กำแพงเพชร
 การศึกษา : จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน
 : กำลังศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4

2. ชื่อ : นายณัฐวุฒิ สำราญใจ
 ที่อยู่ : บ้านเลขที่ 104 หมู่ 2 ตำบลเขาหิน อำเภอเก้าเลี้ยว จังหวัดนครสวรรค์
 การศึกษา : จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนนวมินทราชูทิศ มัชฌิม
 : กำลังศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4

3. ชื่อ : นายสุรชาติ ลีตระกูล
 ที่อยู่ : บ้านเลขที่ 56 ตำบลชุมแสง อำเภอชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์
 การศึกษา : จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนชุมแสงชนูทิศ
 : กำลังศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4

4. ชื่อ : นายปวิณ ดันสาโรจน์วิช
 ที่อยู่ : 564/62 หมู่ 7 ตำบลหนองหลิ่ง อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์
 การศึกษา : จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนนวมินทราชูทิศ มัชฌิม
 : กำลังศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4