

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการเสริมความแข็งแรงของสะพานข้ามคลองขนาดเล็กในพื้นที่เขต
กรุงเทพมหานคร

A STUDY OF METHOD FOR STRENGTHENING BRIDGES ACROSS THE CANAL IN
BANGKOK



T117577



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**117577**
วันเดือนปี.....**9 ต.ค. 2554**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF METHOD FOR STRENGTHENING BRIDGES ACROSS THE CANAL IN
BANGKOK**



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2010



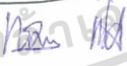

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการเสริมความแข็งแรงของสะพานข้ามคลองขนาดเล็ก
ในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานคร

A STUDY OF METHOD FOR STRENGTHENING BRIDGES ACROSS
THE CANAL IN BANGKOK

นักศึกษา นายกฤตธี กถินนุช รหัสประจำตัว 50010036
นายเกียรติศักดิ์ ภัคมาตร์ รหัสประจำตัว 50010150
นายนที พนมโชคไพศาล รหัสประจำตัว 50010728
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.อำนวยการ พานิชกุลพงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.แหลมทอง เหล่าคงอาว
ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.อำนวยการ พานิชกุลพงศ์	
ผศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	
อ.ทรงกลด แซ่ฮึ้ง	
ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร	

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.นันทวัฒน์ จรัสโรจนเดช)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 6 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการเสริมความแข็งแรงของสะพานข้ามคลองขนาดเล็กในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานคร	
นักศึกษา	นายกฤตธี	กลินนุช
	นายเกียรติศักดิ์	ภักมาตร์
	นายนที	พนมโชคไพศาล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.อำนวยการ	พานิชกุลพงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.แหลมทอง	เหล่าคงถาวร
	ดร.อาทิตย์	เพชรศิริธร
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์	
ปีการศึกษา	2553	

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาถึงการเสริมกำลังของสะพานข้ามคลองขนาดเล็กในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยทำการเปรียบเทียบวิธีการเสริมกำลังของสะพาน 2 วิธี คือ การเสริมกำลังโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) และการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็กประกบ (Steel Plate) โดยจะเปรียบเทียบในเรื่องของราคา, ความแข็งแรงคงทน และความสะดวกในการติดตั้ง

สำหรับวิธีการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) จะใช้ Epoxy ในการเชื่อมประสานเพื่อติดตั้งได้ส่วนท้องของสะพาน ส่วนวิธีการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็กประกบ (Steel Plate) จะใช้พุกที่สามารถรับแรงเฉือนได้สูงเป็นตัวยึดแผ่นเหล็กประกบ โดยที่จะศึกษาสะพานข้ามคลองในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ที่ได้รับการทดสอบโครงสร้างสะพานโดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่จะต้องดำเนินการซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง จำนวน 28 สะพาน โดยจะเลือกสะพานเพื่อเป็นกรณีศึกษา 6 สะพาน ซึ่งจะเป็นสะพานประเภท RC Slab จำนวน 6 สะพาน ที่มีค่า Rating Factor (RF) น้อยกว่า 1 เป็นหลักเกณฑ์ในการพิจารณาสะพาน เพื่อใช้ข้อมูลนำไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้ในแต่ละวิธี ว่าสามารถให้ประโยชน์ใช้งานได้มากน้อยเพียงใด อันจะเป็นแนวทางที่ดีในการตัดสินใจเพื่อการดำเนินการ

Project Title A STUDY OF METHOD FOR STRENGTHENING BRIDGES ACROSS
THE CANAL IN BANGKOK

Student MR. KRITTEE KLINNUCH
MR. KIATISAK PAKKAMART
MR. NATEE PANOMCHOKPISAL

Project Adviser Assoc.Prof. AMNOUY PANITKULPONG

Project Co – Adviser Asst.Prof. LAEMTHONG LAOKHONGTHAVON
DR.ARTHIT PETCHSASITHON

Level of Study BACHELOR OF ENGINEERING

Department CIVIL ENGINEERING

Faculty ENGINEERING

Year 2010

ABSTRACT

This study is about reinforcement of small bridges over the canal in Bangkok by comparing the strength of the bridge in two ways. They are to enhance the bridges by using carbon fibers (CFRP) and to reinforce them with steel plates. Our group compared two methods in terms of price, durability, and convenience of installation.

First, to enhance the bridges by using carbon fibers (CFRP), we used Epoxy to interface for set up under the belly of the bridges. Second, to reinforce with steel plates was used by bolt that can support highly shear force as placeholder steels. For these both ways, this study was under King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang's control. It is the consultant that repair and reinforce 28 bridges. Consequently, our group decided to choose 6 bridges, which are RC slab bridges with Rating Factor (RF) is less than 1 criterion, as the case study. After that, the information was analyzed and compared each method for getting the best decision that the most benefit and useful in operation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำปริญญาบัตรครั้งนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ.อำนาจ พานิชกุลพงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ได้ให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนประสิทธิประสาทความรู้ อันเป็นประโยชน์อย่างมาก ในการทำปริญญาบัตรจนสำเร็จเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณ ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร และศส.แหลมทอง เหล่าคองถาวร และอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา รวมถึง Staff ผู้มีหน้าที่ช่วยและประสานงานในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่ให้คำแนะนำต่างๆ และผลการทดลองต่างๆ ในระหว่างขั้นตอนการทำงานอย่างดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญาบัตรทุกท่าน ที่ได้กรุณาตรวจและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญที่ทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ รศ.สิริวัฒน์ ไชยชนะ และทุกคนที่ช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจที่ไม่ได้กล่าวชื่อ

ความดีหรือประโยชน์อันพึงได้รับจากปริญญาบัตรฉบับนี้ ขอมอบให้แก่ บิดา มารดา ผู้อุปการะ และครูอาจารย์ทุกท่าน เพื่อน้อมรำลึกถึงพระคุณที่ได้ให้การอบรมศึกษา แก่ผู้เขียนจนได้รับความสำเร็จขั้นต้นในชีวิตทุกวันนี้

นายกฤตธิ์ กลิ่นนุช

นายเกียรติศักดิ์ ภัคมาตร์

นายนที พนมโชคไพศาล

ผู้ประพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอนุมัติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ฌ
	สารบัญรูป	ฎ
	สัญลักษณ์	ฒ
1	บทนำ	
	1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์	1
	1.3 ขอบเขตของ โครงการวิจัย	2
	1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
	1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
2	วรรณกรรมปริทัศน์	
	2.1 ความเหนียว	3
	2.2 วัสดุประกบ	4
	2.2.1 การเสริมกำลัง โดยการประกบด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Plate)	4
	2.2.2 การเสริมกำลัง โดยการประกบด้วย CFRP	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	เรื่อง	หน้า
	2.2.3 รูปแบบผลิตภัณฑ์และการใช้งานของคาร์บอนไฟเบอร์	8
	2.2.3.1 แบบเส้นใย (Fiber sheet)	8
	2.2.3.2 แบบแผ่นแข็ง (Laminate)	9
	2.2.3.3 แบบเส้น (Rod)	9
	2.3 การวิบัติของโครงสร้างที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคาร์บอนไฟเบอร์	9
3	ขั้นตอนการดำเนินงาน	
	3.1 บทนำ	11
	3.2 ทฤษฎีหักโดยทั่วไปของการรับกำลังของสะพาน	11
	3.3 น้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบ (Loading Design)	11
	3.3.1 น้ำหนักบรรทุกใช้งานคงที่ (Dead Load)	11
	3.3.2 น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)	11
	3.3.2.1 แรงกระแทกของน้ำหนักบรรทุกจร (Impact Load)	11
	3.3.2.2 แรงลม (Wind Load)	11
	3.3.2.3 แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force)	12
	3.3.2.4 แรงดันดิน (Earth Pressure)	12
	3.3.2.5 แรงลอยตัว (Buoyancy Force)	12
	3.4 การจัดชั้นของแรง (Class of Loading)	12
	3.4.1 LL. Of Highway Loading	12
	3.4.1.1 H – Loading	12
	3.4.1.2 HS – Loading	12
	3.4.1.3 Lane Loading	13
	3.5 การหา Bending Moment on Slab	13
	3.5.1 เสริมเหล็กตั้งฉากกับทิศทางจราจร	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	เรื่อง	หน้า
	3.5.2 เสริมเหล็กขนานกับทิศทางจราจร	14
	3.6 รูปแบบสะพาน	15
	3.6.1 แบบคาน (Beam Bridge)	15
	3.6.2 Simple Span ช่วงเดียวหรือหลายช่วง	15
	3.6.3 Continuous Span	15
	3.7 การหาค่าดัชนีความปลอดภัย (Rating Factor)	17
	3.7.1 ค่าตัวแปรของน้ำหนัก Load Factor Rating	17
	3.7.2 การตรวจสอบความปลอดภัยโดยใช้ค่า Rating Factor ในการเปรียบเทียบ	17
	3.8 การเสริมกำลังด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์	18
	3.8.1 การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กและ Chemical Bolt	18
4	การคำนวณและการออกแบบ	
	4.1 ทฤษฎีการคำนวณและออกแบบของโครงสร้างคานโดยทั่วไป	20
	4.1.1 การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของหน้าตัด	20
	4.1.2 การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกจร	20
	4.1.3 การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามหลักการของ LRFR	21
	4.2 การคำนวณหาปริมาณการเสริมกำลังโดยการเสริมแผ่นเหล็ก (Steel Plate)	22
	4.3 การคำนวณหาปริมาณการเสริมกำลังโดยการเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	24
5	บันทึกผลการคำนวณ	
	5.1 สะพานข้ามคลองกะจะ ถนน รามคำแหง 24 แยก 20	31
	5.2 สะพานข้ามคลองกะจะ ถนน รามคำแหง 24 แยก 28	46
	5.3 สะพานข้ามคลองกะจะ	61
	5.4 สะพานข้ามคลองเจ๊ก	76
	5.5 สะพานข้ามคลองบางจาก	91

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	เรื่อง	หน้า
	5.6 สะพานข้ามคลองพระโขนง 17	106
6	สรุปผล ปัญหา ข้อเสนอแนะ	121
	บรรณานุกรม	124
	ภาคผนวก	126



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน^๑เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
ตาราง 2.1	แสดงข้อแตกต่างของวิธีการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุประกบ (Plate Bonding) เปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ	7
ตาราง 2.2	ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติ Fiber ชนิดต่างๆ	8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
รูป 2.1	วิธีการเสริมกำลังโดยการประกบด้วยแผ่นเหล็ก(Steel Plate)	4
รูป 2.2	ลักษณะการเสริมกำลัง โดยการประกบด้วยแผ่นเหล็ก(Steel Plate)	5
รูป 2.3	การเสริมกำลังด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์	6
รูป 2.4	วิธีการเสริมกำลังด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์	6
รูป 2.5	ลักษณะของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์	6
รูป 2.6	การวิบัติของคานที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์	10
รูป 3.1	แสดงการถ่ายน้ำหนักของชั้นของแรงชนิด H-Loading	12
รูป 3.2	แสดงการถ่ายน้ำหนักของชั้นของแรงชนิด HS-Loading	12
รูป 3.3	แสดงการถ่ายน้ำหนักของชั้นของแรงชนิด Lane Loading	13
รูป 3.4	ลักษณะของการเสริมเหล็กตั้งฉากกับทิศทางการจราจร	13
รูป 3.5	ลักษณะของการเสริมเหล็กขนานกับทิศทางการจราจร	14
รูป 3.6	รูปตัดสะพานแบบคาน	15
รูป 3.7	ลักษณะของสะพาน Simple Span	15
รูป 3.8	ลักษณะของสะพาน Continuous Span	15
รูป 3.9	ลักษณะของสะพาน Slab Type	16
รูป 3.10	ลักษณะของสะพาน Girder Type	16
รูป 3.11	ลักษณะของสะพาน Box Girder Type	16
รูป 3.12	แสดงแบบจำลองในการหาค่า Rating Factor	17
รูป 3.13	แสดงการติดตั้ง Chemical Bolt สำหรับการยึดแผ่นเหล็กด้านใต้และข้างคาน	18
รูป 3.14	แสดงการติดตั้ง Chemical Bolt สำหรับการยึดแผ่นเหล็กที่ปลายสุด	19
รูป 4.1	ค่าความเครียดและหน่วยแรงในหน้าตัด	22
รูป 4.2	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
รูป 4.3	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	26
รูป 4.4	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	28
รูป 5.1.1	หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กความยาวช่วงพาด 8 เมตร	34
รูป 5.1.2	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	35
รูป 5.1.3	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	39
รูป 5.1.4	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	40
รูป 5.1.5	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	42
รูป 5.2.1	หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กความยาวช่วงพาด 8 เมตร	49
รูป 5.2.2	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	50
รูป 5.2.3	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	54
รูป 5.2.4	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	55
รูป 5.2.5	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	57
รูป 5.3.1	หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กความยาวช่วงพาด 8 เมตร	64
รูป 5.3.2	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	65
รูป 5.3.3	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	69
รูป 5.3.4	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	70
รูป 5.3.5	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	72
รูป 5.4.1	หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กความยาวช่วงพาด 8 เมตร	79
รูป 5.4.2	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	80
รูป 5.4.3	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	84
รูป 5.4.4	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	85
รูป 5.4.5	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	87
รูป 5.5.1	หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กความยาวช่วงพาด 8 เมตร	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
รูป 5.5.2	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	95
รูป 5.5.3	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	99
รูป 5.5.4	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	100
รูป 5.5.5	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	102
รูป 5.6.1	หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กความยาวช่วงพาด 8 เมตร	109
รูป 5.6.2	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	110
รูป 5.6.3	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	114
รูป 5.6.4	ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด	115
รูป 5.6.5	แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	117

สัญลักษณ์

A_s	=	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง
A_s'	=	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด
A_{sb}	=	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กรับแรงดึงที่สมดุล
A_{sp}	=	พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเหล็กประกบรับแรงดึง
$A_{s,lr}$	=	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเมื่อแปลงหน้าตัดแล้ว
A_f	=	พื้นที่หน้าตัดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์รับแรงดึง
b	=	ความกว้างของหน้าตัดคาน ค.ส.ล.
C_c	=	แรงอัดภายในของคอนกรีต
C_s	=	แรงอัดภายในของเหล็กเสริม
C_E	=	ค่าสัมประสิทธิ์ปรับลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
c	=	ความลึกของหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่บริเวณหน้าตัดของคาน ค.ส.ล.
DL	=	น้ำหนักบรรทุกคงที่
d	=	ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดคาน ค.ส.ล.
d'	=	ระยะ Covering ที่ผิวบนของคาน ค.ส.ล.
E_c	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
E_s	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม
f_c	=	กำลังอัดของคอนกรีต
f_c'	=	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต
f_s	=	กำลังดึงของเหล็กเสริมรับแรงดึง
f_s'	=	กำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมรับแรงดึง
f_{sp}	=	กำลังดึงของแผ่นเหล็กประกบ

$f_{s,s}$	=	กำลังดึงของเหล็กเสริมเมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แล้วที่สภาวะใช้งาน
$f_{f,s}$	=	กำลังดึงของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แล้วที่สภาวะใช้งาน
f_{fu}	=	กำลังดึงของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
f_{fu}^*	=	กำลังดึงประลัยของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
h	=	ความสูงของคาน ค.ศ.ล.
I	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดรอบแกนสะเทิน
I_c	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทิน
I_s	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กหน้าตัดแปลง
I_{cr}	=	โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัดแปลง
K_m	=	ค่าพารามิเตอร์ในการยึดเกาะของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
k	=	ค่าพารามิเตอร์ซึ่งแปลงหน้าตัดของพื้นที่รับแรงอัดจริงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
LL	=	น้ำหนักบรรทุกทุกจร
L	=	ความยาวของวัสดุ
M_n	=	โมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด
M_{DL}	=	โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่
M_{LL}	=	โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร
$M_{u(Require)}$	=	โมเมนต์ดัดที่ต้องการหลังจากการเสริมกำลังแล้ว
n	=	จำนวนแผ่นเหล็กประกบ
n_{bolt}	=	จำนวน Bolt รับแรงเฉือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เสริมแผ่นเหล็กประกบ
n_f	=	Modulus Ratio จากการแปลงหน้าตัดของคาร์บอนไฟเบอร์
n_s	=	Modulus Ratio จากการแปลงหน้าตัดของเหล็กประกบ
t_p	=	ความหนาของแผ่นเหล็กประกบ
t_f	=	ความหนาของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
w_p	=	ความกว้างของแผ่นเหล็กประกบ
w_f	=	ความกว้างของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵ	=	ความเครียด
ϵ_c	=	ความเครียดของคอนกรีต
ϵ_s	=	ความเครียดของเหล็กเสริม
ϵ_{cu}	=	ความเครียดสูงสุดของคอนกรีตโดยทั่วไปเท่ากับ 0.003
ϵ_{sp}	=	ความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่นเหล็กประกบ
ϵ_{fc}	=	ความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
ϵ_{fu}	=	ความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
ϵ_{fu}^*	=	ความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
ϵ_{bi}	=	ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่
σ	=	ความเค้น
σ_b	=	ความเค้นที่ผิวล่างของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่
β_1	=	ค่าคงที่สำหรับการปรับแก้



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สะพานเป็นโครงสร้างที่ไม่เพียงแต่จะต้องรับน้ำหนักการจราจรที่กำหนดไว้เท่านั้น ยังต้องต่อสู้กับแรงภายในและแรงภายนอกอีกมากมายที่มากระทำ ทั้งที่คาดหมายไว้แล้วและที่คาดไม่ถึง ดังนั้นการดูแลบำรุงรักษาและการซ่อมแซมอย่างมีระบบจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานจำเป็นที่จะต้องอาศัยความรู้และความชำนาญในด้านวิศวกรรมโครงสร้าง และวิศวกรรมการก่อสร้างสะพาน ดังนั้น การดูแลบำรุงรักษาสะพานจึงควรกำหนดหรือมอบหมายให้มีผู้รับผิดชอบในการปฏิบัติงานอย่างชัดเจน

กองควบคุมการก่อสร้าง สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร ควรได้รับมอบหมายให้รับผิดชอบในการสำรวจสภาพสะพานโดยทั่วไป และการซ่อมแซมซึ่งไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้าง (Regular inspection and general maintenance)

ส่วนการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพาน และการซ่อมใหญ่ (Structural inspection and major repair) ควรมอบหมายให้หน่วยงานมีความเหมาะสมเช่น ศูนย์ก่อสร้างและบูรณะสะพาน หรือหน่วยงานของสำนักทางหลวงที่พร้อมในด้านการบูรณะสะพานเป็นผู้รับผิดชอบในการดำเนินงานก็จะเป็นการสมควร

หลักการในการกำหนดความรับผิดชอบในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงสะพานที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น อาศัยหลักการปฏิบัติที่ใช้กับคนทั่วไปในการดูแลรักษาสุขภาพของตนเอง คือดูแลตัวเองในระดับหนึ่งและต้องพึ่งแพทย์เพื่อเยียวยารักษาแก้ไขเมื่อร่างกายป่วยไข้หรือบาดเจ็บในระดับรุนแรงกว่าปกติ ซึ่งก็น่าจะเป็นการถูกต้องและเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีที่เหมาะสมในการเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานที่ชำรุดเสียหาย โดยใช้ Carbon Fiber ในงานซ่อมบำรุงสะพาน เปรียบเทียบกับการซ่อมแซมด้วย Steel Plate ว่ามีผลต่องานซ่อมแซมสะพานในด้านกำลัง, ค่าใช้จ่าย, วิธีการปฏิบัติงาน, ปัญหาและความเหมาะสมหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ศึกษาสะพานข้ามคลองในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานคร ที่ได้รับการทดสอบตัวโครงสร้างสะพาน โดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และจะต้องดำเนินการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังจำนวน 28 สะพาน โดยเลือกสะพานเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาจำนวน 6 สะพาน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทราบถึงวิธีการที่เหมาะสมในการเสริมความแข็งแรงของสะพานข้ามคลองขนาดเล็กในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานคร และจากนั้นสามารถนำผลที่ได้จากโครงการวิจัยเพื่อนำไปพัฒนางานซ่อมแซมสะพานให้ดีขึ้น

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาถึงวิธีการซ่อมบำรุงสะพาน โดยใช้ Carbon Fiber และ Steel Plate
2. รวบรวมข้อมูลการทดสอบ, รายละเอียดในการจัดซ่อมจำนวน 28 สะพาน
3. นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์กำลังของสะพานโดยโปรแกรม SAP2000 มาออกแบบการเสริมกำลังความแข็งแรงของสะพาน
4. เปรียบเทียบค่าใช้จ่าย, เวลา, ความแข็งแรงคงทน, ความสะดวกในการติดตั้ง ระหว่างการเสริมกำลังด้วย Carbon Fiber กับ Steel Plate

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงคำนิยามและคำจำกัดความที่เกี่ยวข้องในการศึกษาวิธีการเสริมกำลังให้กับสะพาน โดยวิธีการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็ก และวิธีการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ได้มีการรวบรวมข้อมูล แนวความคิด ทฤษฎี งานวิจัยที่มีผู้ศึกษามาก่อนแล้ว เพื่อให้ได้รับความเข้าใจในเนื้อหาที่ง่ายขึ้น

2.1 ความเหนียว (Ductility)

โครงสร้างคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริมจะเกิดการแตกและวิบัติในขณะที่ยังรับน้ำหนักไม่มาก โดยการวิบัติในเกือบทุกกรณีจะเป็นแบบทันทีทันใด (Suddenly) และแบบเปราะ (Brittle) ความเหนียวคือความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างที่รับน้ำหนักเกินค่าสูงสุด โดยทั่วไปความเหนียวแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ความเหนียวของวัสดุและความเหนียวของโครงสร้าง เหล็กเส้นที่มีระยะฝังยึดน้อยจะทำให้โครงสร้างมีการวิบัติแบบเปราะถึงแม้จะใช้เหล็กที่มีความเหนียว นอกจากนี้แล้ว FRP (Fiber Reinforced Polymer) สามารถเพิ่มพฤติกรรมความเหนียวให้กับโครงสร้าง เช่น การเสริมกำลังรับแรงเฉือนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากแรงเฉือน ไปเป็นแรงดัด

การปรับปรุงความเหนียวของโครงสร้างต้องพิจารณาถึง

- ความเหนียวของโครงสร้างเดิม (Ductility of the original structure)
- สภาพของโครงสร้างเดิม เช่น ความทนทาน ความเสื่อมสภาพ เป็นต้น
- การเลือกวิธีการเสริมกำลังและวัสดุที่ใช้
- ปริมาณการเสริมกำลัง (Amount of strengthening)
- การออกแบบการเสริมกำลัง (Design of strengthening)
- ประสิทธิภาพในการทำงาน (Quality of the work)

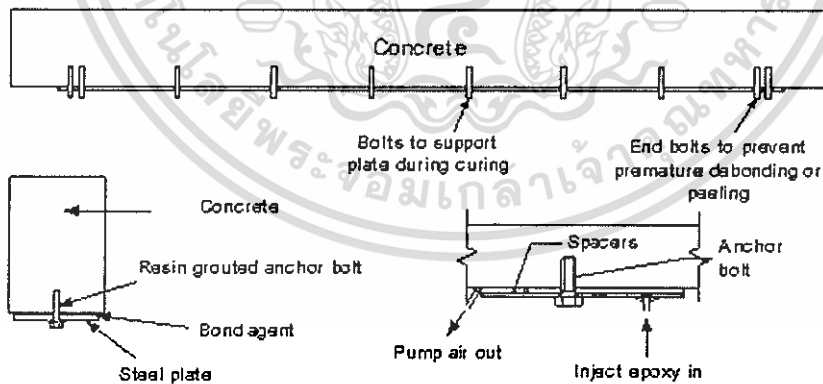
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วัสดุประกบ (Plate Bonding)

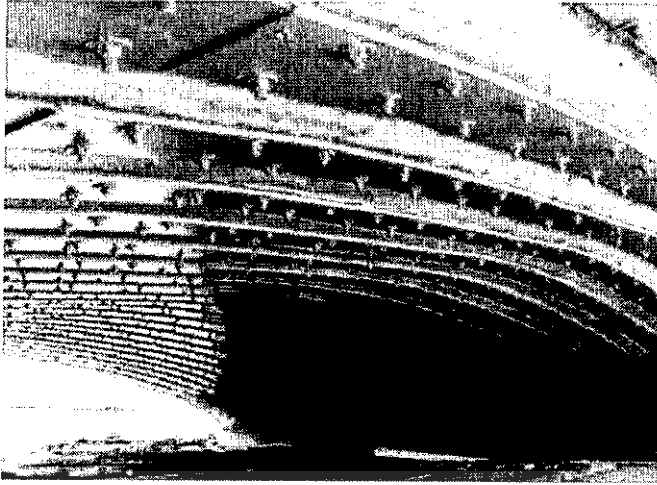
โดยปกติการหาค่าลึงต้านทาน โครงสร้างคอนกรีตจะพิจารณาจากปริมาณของเหล็กเสริม เพราะในความเป็นจริงแล้วคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดึงได้ต่ำ ดังนั้นถ้าหาวัสดุที่มีความสามารถรับแรงดึงได้สูงไปติดในบริเวณที่รับแรงดึงในโครงสร้าง จะทำให้เหมือนมีการเพิ่มเหล็กเสริมเข้าไปบริเวณผิวโครงสร้างที่นำมาติด วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนให้กับโครงสร้าง ซึ่งจะสามารถแบ่งลักษณะของการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุประกบได้ 2 ประเภท คือ การเสริมกำลังโดยการประกบด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Plate) และการเสริมกำลังโดยการประกบด้วย CFRP หรือแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber)

2.2.1 การเสริมกำลังโดยการประกบด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Plate)

การเสริมกำลังด้วยวิธีนี้เป็นลักษณะของ Externally Bonded Reinforced Reinforcement ที่ช่วยเพิ่มหน้าตัดของเหล็กเสริมในการรับแรงคดและแรงเฉือน ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรมากขึ้น วิธีนี้เริ่มมีใช้ในการเสริมกำลังในปี 1967 ที่ฝรั่งเศส และหลังจากนั้นก็เริ่มมีใช้แพร่หลายทั่วโลก ข้อดีของการเสริมกำลังวิธีนี้คือ สามารถเปิดการจราจรได้บ้างขณะที่ทำการเสริมกำลังสะพาน ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานนอกจากนี้พื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้งแผ่นเหล็กน้อย ทำให้ไม่ไปกีดขวางหรือทำให้ความสวยงามลดลง ข้อเสียของวิธีนี้คือ แผ่นเหล็กมีน้ำหนักมากทำให้ติดตั้งได้ยาก อีกทั้งยังมีปัญหาการเกิดสนิมของแผ่นเหล็กด้วย แต่สำหรับปัญหาการเกิดสนิมสามารถป้องกันได้โดยการทาสีป้องกันสนิม



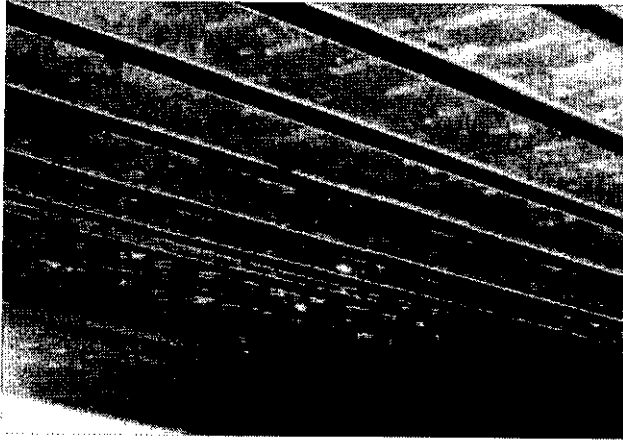
รูปที่ 2.1 วิธีการเสริมกำลังโดยการประกบด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Plate)



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเสริมกำลัง โดยการประกบด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Plate)

2.2.2 การเสริมกำลังโดยการประกบด้วย CFRP

ในช่วง 30 ปีนี้การเสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP ได้เข้ามามีบทบาทในการเสริมกำลังโครงสร้าง เนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีน้ำหนักเบา ไม่ทำให้รูปร่างและความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานเปลี่ยนไป วัสดุประเภท CFRP นี้มีหลายชนิด เช่น Carbon, Aramid และ Glass แต่ในงานวิศวกรรมโยธาถือว่า CFRP มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากสามารถทนต่อความล้า การกัดกร่อน และไม่มีการถ่ายเทประจุไฟฟ้า วิธีการเสริมกำลังด้วย CFRP นี้เหมาะที่จะใช้เสริมกำลังรับแรงดัดของสะพาน เนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีความสามารถในการรับแรงดึงได้สูง กล่าวคือสามารถรับแรงดึงได้มากกว่าเหล็กถึง 10 เท่า อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบา จึงทำให้ติดตั้งได้รวดเร็ว นอกจากนี้ในระหว่างการเสริมกำลังได้แผ่นพื้นสะพานยังสามารถเปิดการจราจรด้านบนสะพานได้ ซึ่งถือว่าไม่รบกวนการจราจรมากนัก ดังนั้นสะพานที่มีการจราจรหนาแน่นและไม่สามารถจะใช้ทางเบี่ยงได้จึงเหมาะที่จะใช้วิธีการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้ และหลังจากที่เสริมกำลังแล้ววิธีนี้ยังไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องของสนิม และเรื่องของการรับน้ำหนักบรรทุกต่อเนื่องยาวนานอีกด้วย



รูปที่ 2.3 การเสริมกำลังด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 2.4 วิธีการเสริมกำลังด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 2.5 ลักษณะของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน⁶เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีและข้อเสียของการใช้วัสดุประกบ (Plate Bonding) ในการเสริมกำลัง

- ข้อดี

- ไม่ต้องปิดการจราจร
- มีความสามารถทนต่อความล้าได้ดี
- น้ำหนักเบา ติดตั้งได้ง่าย
- ไม่เปลี่ยนรูปทรงของโครงสร้าง
- ติดตั้งได้รวดเร็ว

- ข้อเสีย

- ไม่สามารถป้องกันเหล็กเสริมจากไฟและแรงกระแทก
- ต้องใช้ผู้ออกแบบและควบคุมที่มีความรู้และประสบการณ์

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อแตกต่างของวิธีการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุประกบ (Plate Bonding) เปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ

เกณฑ์	Plate Bonding	Adding material	Post-tensioning
- ต้องการความชำนาญ	+	++	++
- ทนต่อสภาวะแวดล้อม	+	0	+
- ความแข็งแรงทนทาน	+	++	-
- ความรวดเร็วในการทำงาน	++	+	0
- ประสิทธิภาพ	+	+	++

หมายเหตุ ++ ดีมาก, + ดี, 0 ธรรมดา และ - ไม่ดี

จากการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีโดยรวม (Overall Comparison) ตามเกณฑ์ ความต้องการความชำนาญ การทนต่อสภาวะแวดล้อม ความแข็งแรงทนทาน ความรวดเร็วในการทำงาน และประสิทธิภาพ พบว่า วิธี Plate Bonding เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการเสริมกำลัง (สะพาน แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ ช่วง 5-10 ม.) ซึ่งการเสริมกำลังสะพานด้วยวิธี Plate Bonding นี้ โดยทั่วไปจะใช้วัสดุประเภท Steel Plate กับ CFRP ในการเสริมกำลัง ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึง เลือกสองวิธีนี้มาทำการเสริมกำลังสะพาน

2.2.3 รูปแบบผลิตภัณฑ์และการใช้งาน

ในตลาดวัสดุ Composite สำหรับการเสริมสร้างกำลังคอนกรีต จะมีรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่ นิยมใช้งานอยู่ 3 ประเภท คือ แบบเส้นใย (Fiber sheet) แบบแผ่นแข็ง (Laminate) และแบบเส้น (Rod) นอกจากนี้ยังมีรูปแบบอื่นๆที่ใช้งานเฉพาะ เช่น การใช้เครื่องดึงเส้นใย หมุนวนพันรอบโครงสร้างและ แบบ Casing ห่อหุ้มโครงสร้าง เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติ Fiber ชนิดต่างๆ

ชนิดของ Fiber	Carbon Fiber	Aramid Fiber	Glass Fiber
Elastic modulus	290-400 GPa	62-142 GPa	72-87 GPa
Tensile strength	2400-5700 MPa	2410-3150 MPa	3300-4500 MPa
Ultimate elongation	0.3-1.8%	1.5-4.4%	4.8-5.0%
Other	- Low CTE - Low impact resistance - Excellent moisture and chemical resistance	- Creep slightly higher than that of pc steel - Non linear, ductile in compression	- Low cost - Relatively low resistance to sustained and cyclic load

2.2.3.1 แบบเส้นใย (Fiber sheet)

มีลักษณะเป็นเส้นใย Fiber จัดเรียงตัวในทิศทางแนวเดียวกัน (Unidirectional) หรือจัดเรียงแบบ 2 ทิศทาง (Bidirectional) เส้นใย Fiber ที่นิยมใช้ ได้แก่ carbon, aramid และ glass การใช้งานคือใช้วิธีการ Way lay up คือใช้ resin ทาบนผิวคอนกรีตและติดตั้งแผ่น fiber ลงไปแล้วทา resin ทับ จากนั้นรีดฟองอากาศโดยใช้ลูกกลิ้งหรือไล่ resin ที่ใช้อาจจะเป็น epoxy หรือ polyester หรือ phenolic ตามความเหมาะสม ในการออกแบบมักใช้หน้าตัดสุทธิของ Fiber ในทิศทางรับแรงดึงและหน่วยแรงประลัยของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใย Fiber เพื่อคำนวณหาความสามารถในการรับแรงดึง ลักษณะของแผ่นเส้นใยก่อนการใช้งานจะมีลักษณะเป็นม้วน มีความกว้างตั้งแต่ 10-120 ซม. และมีปริมาณเส้นใยตั้งแต่ 200-1,200 กรัม/ตารางเมตร แต่ละชนิดจะมี Tensile strength และ Tensile modulus ต่างกัน โดยที่ Carbon Fiber จะมี Tensile strength สูงกว่า 30,000 กก./ตร.ซม. และ Tensile modulus สูงกว่า 2,000,000 กก./ตร.ซม. ในขณะที่ Glass fiber จะมี Tensile modulus ที่ต่ำกว่ามาก

2.2.3.2 แบบแผ่นแข็ง (Laminate)

เป็นแผ่น FRP สำเร็จรูปด้วย Fiber จัดเรียงแบบทิศทางเดียวและ resin ที่ทำปฏิกิริยาสมบูรณ์แล้วการติดตั้งลงบนผิวคอนกรีตจะใช้วัสดุประเภท epoxy putter ซึ่งมีลักษณะหนืดในการออกแบบจะใช้ค่า tensile strength ของแผ่น Laminate ซึ่งมักจะมี Fiber content ตั้งแต่ร้อยละ 70 ขึ้นไปส่วนใหญ่เส้นใยที่ใช้มักเป็น Carbon Fiber ขนาดของแผ่น Laminate ในตลาดจะกว้างประมาณ 5-15 ซม. และหนาประมาณ 1.2-1.5 มม. และจะมี Tensile strength สูงกว่า 20,000 กก./ตร.ซม.

2.2.3.3 แบบเส้น (Rod)

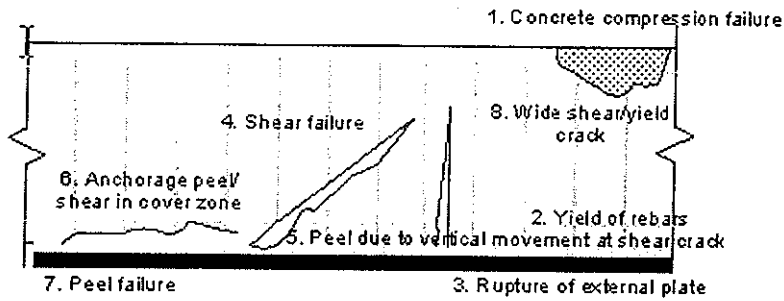
มีลักษณะคล้ายเหล็กเส้นและมีหลายขนาดเป็น Composite ของเส้นใย fiber และ resin โดยมีปริมาณ Fiber content ตั้งแต่ร้อยละ 70 ชนิดที่ผลิตจาก Glass มักใช้ในการเสริมโครงสร้างคอนกรีตใหม่ในบริเวณที่มีการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมสูง สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานเสริมกำลังโครงสร้างที่มีอยู่แล้วมักผลิตจาก Carbon fiber และ Aramid fiber เนื่องจากมี Tensile strength สูง การใช้งานนำโดยตัดคอนกรีตเป็นร่องแนวตรงกว้างลึกประมาณ 1.5-2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางและฝัง Rod โดยยึดด้วย Epoxy putter จนเต็มตลอดแนว มักมี Tensile strength สูงกว่า 20,000 กก./ตร.ซม. ผู้ผลิตบางรายยังมีผลิตภัณฑ์รูปแบบตะแกรงอีกด้วย

2.3 การวิบัติของโครงสร้างที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคาร์บอนไฟเบอร์

การวิบัติของโครงสร้างรับแรงคดที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคาร์บอนไฟเบอร์สามารถแบ่งออกได้เป็นสามแบบใหญ่ๆ คือ

1. วิบัติด้วยแรงคด (Flexural Failure) หมายถึง การวิบัติที่เกิดจากการแตกของคอนกรีตด้านที่รับแรงอัด (หมายเลข 1 ในรูปที่ 2.6), การ yield ของเหล็กเสริม (หมายเลข 2 ในรูปที่ 2.6), การขาดของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ (หมายเลข 3 ในรูปที่ 2.6)
2. วิบัติที่เกิดจากแรงเฉือน (หมายเลข 4, 5 ในรูปที่ 2.6)

3. การหลุดร่อนออกของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ติดอยู่ภายนอก (หมายเลข 6, 7 ในรูปที่ 2.6) การหลุดร่อนออกอาจเกิดมาจากวัสดุประสานที่ใช้ไม่ได้คุณภาพ หรือการแตกออกของคอนกรีต



รูปที่ 2.6 การวิบัติของคานที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

การวิบัติทั้งแปดแบบที่กล่าวมาข้างต้นนั้น มีเพียงแบบเดียวที่เป็นการวิบัติโดยปลอดภัยคือแบบที่สอง การวิบัติที่เกิดจากการ yield ของเหล็กเสริม การวิบัติแบบอื่นเป็นการวิบัติแบบทันที และอันตราย

ผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานควรทำการตรวจสอบที่จุดต่อไปนี้สำหรับงานเสริมกำลังด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์

1. ตรวจสอบว่าหลังจากเสริมกำลังแล้ว โครงสร้าง ไม่อยู่ในสภาพที่มีการเสริมกำลังมากเกินไป (over-reinforced) โดยตรวจสอบว่าเหล็กเสริมที่อยู่ภายในโครงสร้างเดิม มีการ yield หรือไม่เมื่อโครงสร้างวิบัติ
2. ตรวจสอบ strain ที่เกิดขึ้นในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ให้ไม่มากเกินไป จนใกล้กับ strain ที่จุดวิบัติของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ โดยทั่วไปไม่ควรให้ strain ที่เกิดขึ้นเกิน 50% ของ ultimate strain
3. โครงสร้างมีการเสริมกำลังให้รับแรงเฉือนได้เพียงพอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างที่จะต้องรับแรงมากขึ้นหลังจากเสริมกำลัง
4. คาร์บอนไฟเบอร์ต้องมีความยาวที่ติดเพียงพอ
5. วัสดุประสาน Epoxy ที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม สามารถประสานวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์และคอนกรีตได้อย่างดี เมื่อทำการทดสอบการดึงออก (pull out test) การวิบัติจะต้องเกิดขึ้นที่เนื้อคอนกรีต

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการเสริมกำลังของสะพานใน 2 ลักษณะ คือ การเสริมกำลังโดยใช้วัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ และการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็ก (Steel Plate) และทฤษฎีหลักๆ โดยทั่วไปของการรับกำลังของสะพาน

3.2 ทฤษฎีหลักโดยทั่วไปของการรับกำลังของสะพาน

ในการออกแบบ นอกจากข้อมูลที่ได้แล้ว ยังมีความจำเป็นอย่างอื่นอีกดังนี้

- ความกว้างของรถ
- จำนวนเลนส์
- ความกว้างทางเท้า เช่น ย่านชุมชน กว้าง 1.00 – 1.50 เมตร
ชนบท กว้าง 0.50 เมตรหรือไม่มี
- เลือกขนาด และชนิดสะพาน

3.3 น้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบ (Loading Design)

3.3.1 น้ำหนักบรรทุกใช้งานคงที่ (Dead Load) คือ น้ำหนักทั้งหมดของโครงสร้าง เช่น พื้น, คาน, ราว, ทางเท้า ฯลฯ

3.3.2 น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ประกอบด้วยน้ำหนักของรถที่วิ่งบนโครงสร้าง, คนเดินเท้า, น้ำหนักส่วนเพิ่ม (Surcharge) และอื่นๆ

น้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้ออกแบบ

3.3.2.1 แรงกระแทกของน้ำหนักบรรทุกจร (Impact Load) เกิดเนื่องจากรถวิ่งแรงตะกุกของล้อที่ทำให้เกิดหน่วยแรง (Stress)

3.3.2.2 แรงลม (Wind Load) ลมอาจพัดปะทะสะพาน หรือรถวิ่ง เข้าสะพานถูกลมพัดทำให้เกิด Effect กับสะพาน (ตอม่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.3 แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) รถวิ่งเข้าทางโค้งจะเกิดแรงเหวี่ยง ทำให้เกิด

Stress กับสะพาน

3.3.2.4 แรงดันดิน (Earth Pressure) การคำนวณแรงดันดินใช้สูตรของ Rankine อย่างไรก็ดี ตามแรงดันที่กระทำต่อโครงสร้างต้องไม่น้อยกว่าแรงดันของเหลวที่มีมวลเท่ากับ 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

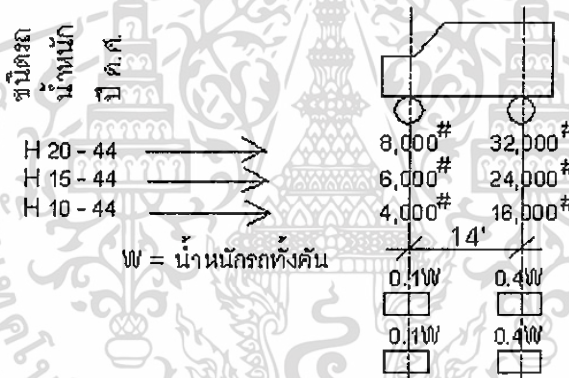
ในกรณีที่มีรถยนต์แล่นใกล้ส่วนบนของโครงสร้าง ในระยะทางน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความสูงของโครงสร้างให้เพิ่ม Surcharge Load อีกไม่น้อยกว่าน้ำหนักดินถมสูง 0.60 เมตร

3.3.2.5 แรงลอยตัว (Buoyancy Force) เป็นแรงที่น้ำยกตอม่อให้ลอย

3.4 การจัดชั้นของแรง (Class of Loading) สามารถแบ่งชั้นของแรงได้ดังนี้

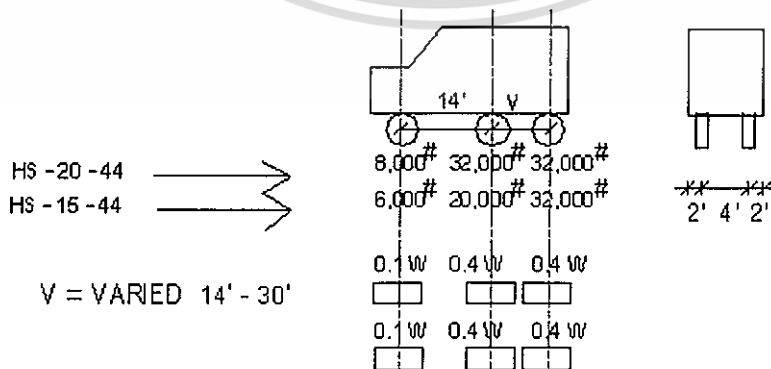
3.4.1 LL. Of Highway Loading

3.4.1.1 H - Loading



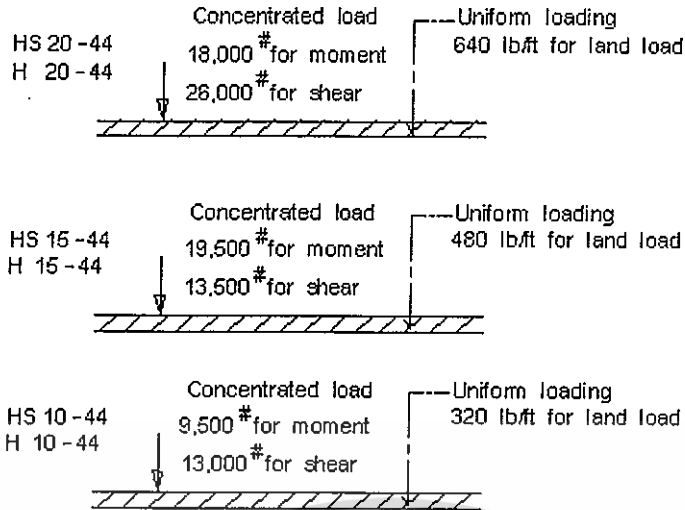
รูปที่ 3.1 แสดงการถ่ายน้ำหนักของชั้นของแรงชนิด H-Loading

3.4.1.2 HS -- Loading



รูปที่ 3.2 แสดงการถ่ายน้ำหนักของชั้นของแรงชนิด HS-Loading

3.4.1.3 Lane Loading



รูปที่ 3.3 แสดงการถ่ายน้ำหนักของชั้นของแรงชนิด Lane Loading

การพิจารณาว่าเมื่อใดจะใช้ Load ชนิดใดมีแนวทางดังนี้

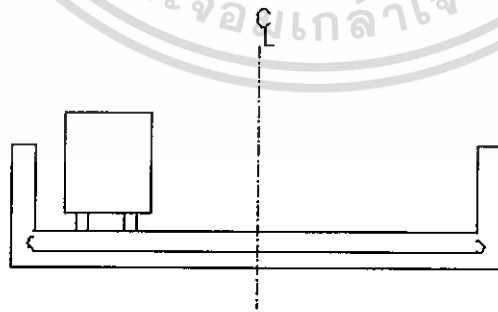
- H – Loading
- HS – Loading
- Lane Loading เป็นตัว Check เปรียบเทียบ

เช่น Primary Highway ซึ่งกำหนดครดหนัก 32 ตัน อาจใช้ HS – Loading เวลาออกแบบใช้

Lane Loading เปรียบเทียบกับ H, HS – Load ชนิดใดมากกว่า ใช้เป็นตัว Control

3.5 การหา Bending Moment on Slab ตามข้อกำหนด AASHTO ให้เสริมเหล็กใน 2 ทิศทาง

3.5.1 เสริมเหล็กตั้งฉากกับทิศทางจราจร: CASE 1



รูปที่ 3.4 ลักษณะของการเสริมเหล็กตั้งฉากกับทิศทางจราจร

CASE 1 เหล็กเสริมหลักตั้งฉากกับทิศทางการจราจร

LL. Moment for Simple Span สำหรับ HS-20 Loading

$$= ((S+2)/2)P_{20} \quad \text{ft - pound/ft of width of slab}$$

เมื่อ $P_{20} = 16,000$

$S = \text{Span Length (feet)}$

LL. Moment for Simple Span สำหรับ HS-15 Loading

$$= ((S+2)/32)P_{15} \quad \text{ft - pound/ft of width of slab}$$

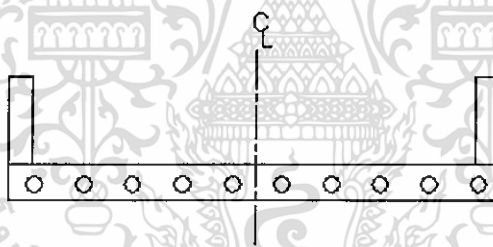
เมื่อ $P_{15} = 16,000$

$S = \text{Span Length (feet)}$

ASSHTO แนะนำในกรณีที่เป็น Continuous Span มากกว่า 3 Support ให้ใช้ continuity 0.8

(คำนวณ Moment จาก Simple Span แล้วคูณด้วย 0.8)

3.5.2 เสริมเหล็กขนานกับทิศทางการจราจร: CASE 2



รูปที่ 3.5 ลักษณะของการเสริมเหล็กขนานกับทิศทางการจราจร

CASE 2 เหล็กเสริมหลักขนานกับทิศทางการจราจร

LL. Moment for Simple Span สำหรับ HS-20 Loading สำหรับ Span 0' - 50'

$$= 900S \quad \text{ft-pound/ft of width of slab}$$

LL. Moment for Simple Span สำหรับ HS-20 Loading สำหรับ Span 50' - 100'

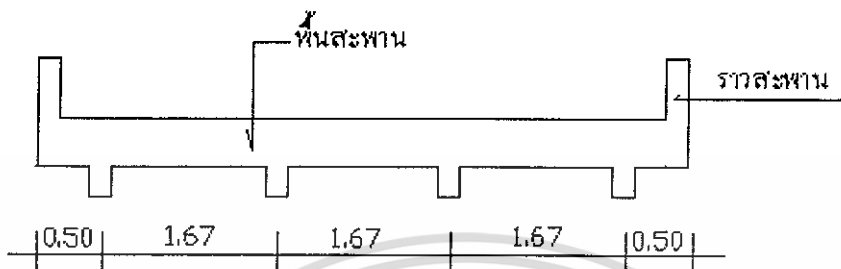
$$= 1000(1.3S-20) \quad \text{ft-pound/ft of width of slab}$$

เมื่อ $S = \text{Span Length of Slab (feet)}$

3.6 รูปแบบสะพาน สามารถแบ่งออกได้โดยทั่วไป ดังนี้

3.6.1 แบบคาน (Beam Bridge)

โครงสร้างหลักของสะพานแบบนี้ คือ ตัวคาน ซึ่งอาศัยคุณสมบัติการรับแรงคดของวัสดุ เป็นแรงต้านทานในการรับน้ำหนักพื้นสะพานจะถ่ายแรงสู่คานก่อนแล้วจึงถ่ายลงตอม่อ

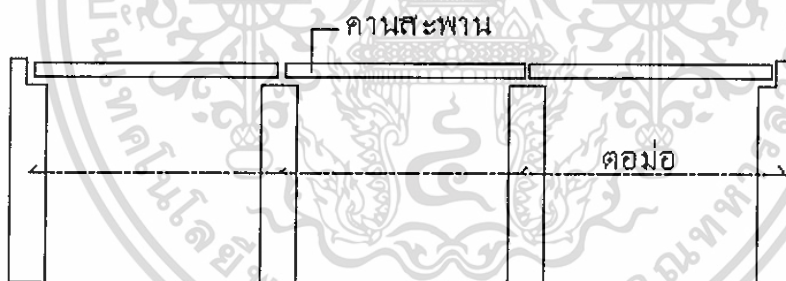


รูปที่ 3.6 รูปคัดสะพานแบบคาน

สะพานแบบคานนี้อาจแบ่งตามพฤติกรรมของ โครงสร้าง ได้อีกดังนี้

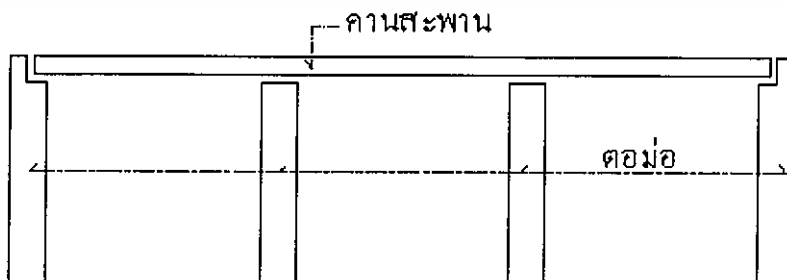
3.6.2 Simple Span ช่วงเดียวหรือหลายช่วง

ในกรณีสะพานที่เป็น Simple Span หลายช่วง คานรับพื้นสะพาน จะแยกขาดออกจากกัน และคานในแต่ละช่วงจะไม่ถ่ายหน่วยแรง (Stress) ผ่านกันและกัน



รูปที่ 3.7 ลักษณะของสะพาน Simple Span

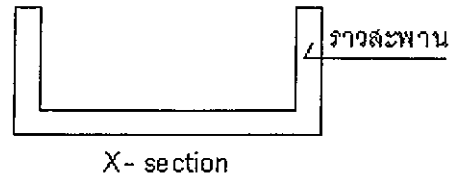
3.6.3 Continuous Span คานในแต่ละช่วงจะยึดติดกัน และถ่ายหน่วยแรง (Stress) ผ่านกันและกัน



รูปที่ 3.8 ลักษณะของสะพาน Continuous Span

เป็นทางเลือกซึ่งมาจากประสบการณ์ออกแบบ (Experimental) ของกรมทางหลวง ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ ดังนี้

- Span ช่วง 5-10 เมตร มักใช้เป็น แบบพื้นที่รองรับ (Slab Type)



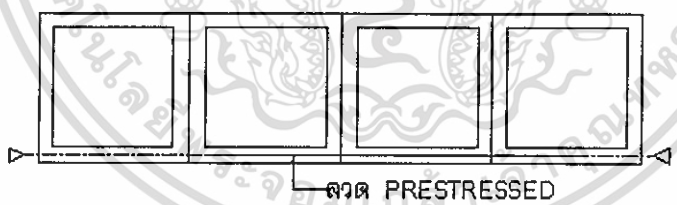
รูปที่ 3.9 ลักษณะของสะพาน Slab Type

- Span ช่วง 10-15 เมตร มักใช้เป็น แบบคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา (Girder Type)



รูปที่ 3.10 ลักษณะของสะพาน Girder Type

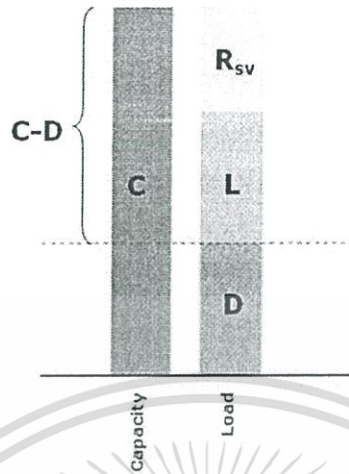
- Span ช่วง 15-20 เมตร มักใช้เป็น แบบคอนกรีตอัดแรง (Box Girder Type) ถ้าใช้คอนกรีตเสริมเหล็กจะทำให้โครงสร้างใหญ่ ไม่ประหยัด



รูปที่ 3.11 ลักษณะของสะพาน Box Girder Type

3.7 การหาค่าดัชนีความปลอดภัย (Rating Factor)

Evaluation: Remaining Safety



รูปที่ 3.12 แสดงแบบจำลองในการหาค่า Rating Factor

AASHTO Bridge Rating

$$RF = \frac{C - A_1 D}{A_2 L (1 + I)}$$

3.7.1 ค่าตัวแปรของน้ำหนัก Load Factor Rating

$A_1 = 1.3, A_2 = 2.17$ สำหรับ Inventory Level

$A_1 = 1.3, A_2 = 1.3$ สำหรับ Operation Level

3.7.2 การตรวจสอบความปลอดภัยโดยใช้ค่า Rating Factor ในการเปรียบเทียบ จะมีมาตรฐานใน

การเปรียบเทียบดังนี้

$RF_{(inv)} < 1$ สะพานไม่ปลอดภัยในระยะยาว

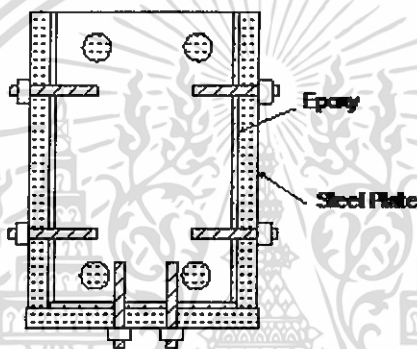
$RF_{(opr)} < 1$ สะพานไม่ปลอดภัยเมื่อรถวิ่งผ่าน

117577

3.8 การเสริมกำลังด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ ให้ปฏิบัติตามมาตรฐานการติดตั้งเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย มยพ.1508-51

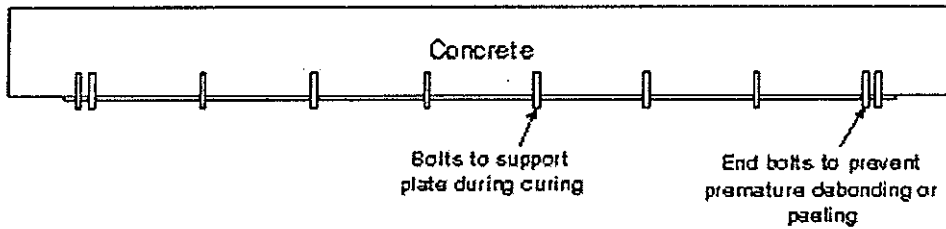
3.8.1 การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กและ Chemical Bolt

1. การเตรียมผิวคอนกรีต โดยการทำความสะอาดและขัดให้ผิวเรียบ บางครั้งอาจจะต้องมีการกะเทาะเอาผิวส่วนที่เสื่อมและเสียหายออก เพื่อให้เหลือเฉพาะเนื้อคอนกรีตที่รับแรงโดยตรง และบริเวณที่จะเสริมกำลัง คอนกรีตควรมีกำลังรับแรงดึง ไม่น้อยกว่า 20 กก./ตร.ซม. ถ้าหากผิวมีรอยแตกหรือรูโหว่ต้องทำการอัด(Grout) ด้วยอีพ็อกซีมอร์ตาร์ก่อน จากนั้นจึงดำเนินการเจาะรูเพื่อติดตั้ง Chemical Bolt โดยให้ความลึกอยู่ที่ระดับอย่างน้อยเท่ากับตำแหน่งของเหล็กเสริมรับแรงด้านล่าง ในกรณีที่ติดได้ท้องถิ่นสำหรับการติดตั้งด้านข้างคานจะเจาะจนถึงตำแหน่งของเหล็กปลอก



รูปที่ 3.13 แสดงการติดตั้ง Chemical Bolt สำหรับการยึดแผ่นเหล็กด้านใต้และข้างคาน

2. การเตรียมแผ่นเหล็ก ต้องมีการเตรียมผิวแผ่นเหล็กให้สะอาด ปราศจากวัสดุไขมัน หรือน้ำมันหรือสี หากสามารถขัดผิวเหล็กหรือทำให้ผิวหยาบขึ้นได้ก็จะทำให้การยึดและการถ่ายแรงดีขึ้น ก่อนติดตั้งแผ่นเหล็กให้ใช้อีพ็อกซีทาที่แผ่นเหล็กก่อนติดตั้งเข้ากับผิวคอนกรีตในตำแหน่งที่เตรียมไว้ ความหนาของอีพ็อกซีควรประมาณ 1-3 มม. และใช้ Chemical Bolt ร่วมกับอีพ็อกซีเพื่อให้การถ่ายแรงเนียนได้ดีมาก ขึ้น เมื่อดำเนินการติดตั้งเสร็จแล้ว ต้องทำการป้องกันผิวของแผ่นเหล็ก โดยการทาสีป้องกันสนิม และสีป้องกันความชื้น หรือเทคอนกรีตหุ้มแล้วแต่กรณี



รูปที่ 3.14 แสดงการติดตั้ง Chemical Bolt สำหรับการยึดแผ่นเหล็กที่ปลายสุด

3. การเตรียมสลักเกลียวแบบ Chemical Bolt ควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 16 มม. และมีกำลังรับแรงเฉือนไม่ต่ำกว่า 24 กิโลนิวตัน และวางในแนวขวางแผ่นเหล็กอย่างน้อย 2 ตัวต่อแถว ระยะห่างของแต่ละตัว แต่ละแถว และระยะขอบให้เป็นไปตามมาตรฐานการติดตั้งสลักเกลียว

4. การตรวจสอบภายหลังการติดตั้ง อย่างน้อยภายใน 5-7 วันหลังติดตั้งแผ่นเหล็กกับผิวคานเสร็จเรียบร้อยตามขั้นตอนที่ระบุแล้ว ให้ทำการเคาะตลอดผิวแผ่นเหล็ก เพื่อตรวจสอบว่ามีโพรงระหว่างผิวของแผ่นเหล็กกับผิวคอนกรีตเกิดขึ้นหรือไม่ หากพบให้ดำเนินการอัดด้วยอิพ็อกซี่ให้เต็มโพรงนั้น

5. แผ่นเหล็กสำหรับการติดตั้ง ควรมีความยาวเพียงพอต่อการเชื่อมแซมตลอดช่วงหนึ่งๆ แต่ถ้ามีความจำเป็น ต้องต่อ เนื่องจากความยาวไม่พอ ให้ต่อแผ่นเหล็กโดยวิธีชนและใช้แผ่นประกบช่วยเสริมให้มีการถ่ายแรงได้ต่อเนื่อง การติดตั้งแผ่นประกบให้เป็นไปตามหลักการที่ถูกต้องตามวิชาการ

บทที่ 4

การคำนวณและการออกแบบ

4.1 ทฤษฎีการคำนวณและออกแบบของโครงสร้างคานโดยทั่วไป

4.1.1 การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของหน้าตัด

การหาความต้านทานการดัด(Flexural Strength)

$$c = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c \beta_1 b}$$
$$M_n = A_s f_y \left(d_s - \frac{c}{2} \right)$$

การหาความต้านทานแรงเฉือน(Shear Strength)

$$V_c = 0.53 \sqrt{f_c} b d$$

4.1.2 การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกจร

พิจารณาความกว้างของแถบเทียบเท่าสำหรับการกระจายน้ำหนักของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก โดยเลือกค่าน้อย ซึ่งได้จากพิจารณารูปแบบการกระทำของน้ำหนักบรรทุก 2 แบบ

A) น้ำหนักบรรทุกกระทำเลนเดียว

$$E = 250 + 0.42 \sqrt{L_1 W_1}$$

เมื่อ E = ความกว้างของแถบเทียบเท่าสำหรับการกระจายน้ำหนัก

L_1 = ความยาวช่วงพาดของสะพานมีค่าไม่เกิน 18,000 มิลลิเมตร

W_1 = ความกว้างของสะพานมีค่าไม่เกิน 9,000 มิลลิเมตร

B) น้ำหนักบรรทุกกระทำมากกว่า 1 เลนส์

$$E = 2,100 + 0.12 \sqrt{L_1 W_1} \leq \frac{W}{N_L}$$

เมื่อ E = ความกว้างของแถบเทียบเท่าสำหรับการกระจายน้ำหนัก

L_1 = ความยาวช่วงพาดของสะพานมีค่าไม่เกิน 18,000 มิลลิเมตร

W_1 = ความกว้างของสะพานมีค่าไม่เกิน 9,000 มิลลิเมตร

W = ความกว้างของสะพานไม่รวมทางเดินเท้า (Clearance)

N_L = จำนวนเลนเทียบเท่าที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกตามหลักการของ LRFR

MOMENT RATING FACTOR ที่ตำแหน่งกลางสะพาน

$$RF = \frac{C - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_p)(P)}{(\gamma_L)(LL + IM)}$$

เมื่อ $C = (\varphi_c)(\varphi_s)(\varphi R_n)$

ตัวคูณปรับค่า (for Strength Limit States)

a) Resistance Factor φ

$\varphi = 0.90$ สำหรับโมเมนต์ดัด

b) Condition Factor φ_c

$\varphi_c = 0.95$ สำหรับ Condition Rating เท่ากับ 5

c) System Factor φ_s

$\varphi_s = 1.00$ สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

DESIGN LOAD RATING

Strength I Limit States

$$RF = \frac{(\varphi_c)(\varphi_s)(\varphi)R_n - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL + IM)}$$

LOAD	INVENTORY	OPERATING
DC, DW	1.25	1.25
LL + IM	1.75	1.35

Shear rating factor

ตัวคูณปรับค่า (for Strength Limit States)

d) Resistance Factor φ

$$\varphi = 0.85 \quad \text{สำหรับ โมเมนต์ค้ด}$$

e) Condition Factor φ_c

$$\varphi_c = 0.95 \quad \text{สำหรับ Condition Rating เท่ากับ 5}$$

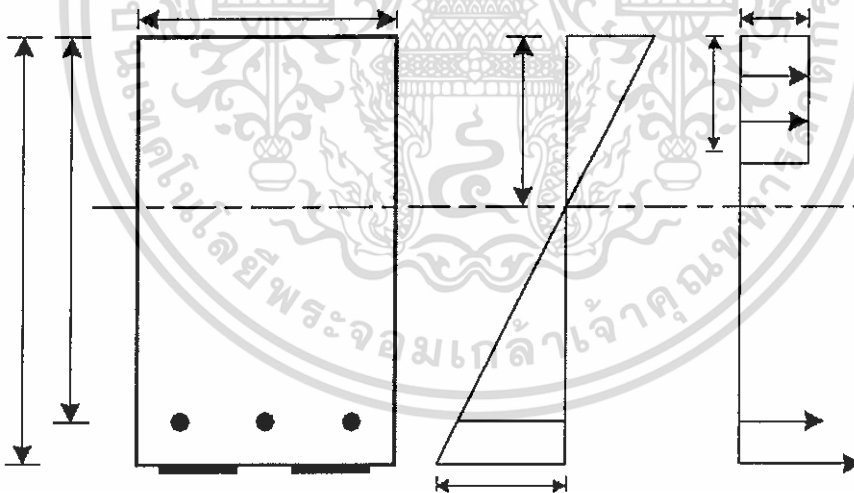
f) System Factor φ_s

$$\varphi_s = 1.00 \quad \text{สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก}$$

4.2 การคำนวณหาปริมาณการเสริมกำลังโดยการเสริมแผ่นเหล็ก (Steel Plate)

ขั้นตอนที่ 1

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์ค้ดของหน้าค้ดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าค้ด โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าความเครียดและหน่วยแรงในหน้าค้ด

ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นในแผ่น Steel Plates ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right)$$

โดยให้ค่า c มีค่าประมาณ $0.2d$

เมื่อ d คือ ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด

หน่วยแรงดึงที่สอดคล้องกับหน่วยความเครียดที่เกิดขึ้น คือ

$$f_{sp} = \varepsilon_{sp} E_s$$

พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงได้ดังนี้

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right)$$

$$f_s = \varepsilon_s E_s$$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_{sp} f_{sp}}{0.85 f'_c \beta_1 b}$$

จากที่คำนวณได้ จะพบว่าค่า c ที่ได้ ถ้าหากมีค่าที่แตกต่างจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้น ($c = 0.2d$) ดังนั้นจะต้องทำการคำนวณใหม่โดยนำค่า c ที่ได้ไปดำเนินการคำนวณใหม่ โดยให้ค่า c เท่ากับค่าที่คำนวณสุดท้ายได้ จนค่า c มีค่าเท่ากับที่สมมติได้ จึงจะนำค่า c สุดท้ายไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัยโดย สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A_{sp} f_{sp} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์กับคานของสะพานนี้ได้ด้วยค่า ϕM_n ได้ โดยที่ $\phi = 0.90$ สำหรับโมเมนต์ ซึ่งจะได้ว่า ถ้าหาก $\phi M_n > M_{u(Require)}$ จะได้ว่าสะพานนี้สามารถรับโมเมนต์คดประลัยที่เกิดขึ้น

4.3 การคำนวณหาปริมาณการเสริมกำลังโดยการเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ขั้นตอนที่ 1

ตรวจสอบว่าโครงสร้างสามารถเสริมกำลังได้หรือไม่ เนื่องจากการเสริมกำลังเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น มากเกินไป หากเกิดกรณีที่แผ่น CFRP เกิดความเสียหายหรือไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ โครงสร้างจะได้อิทธิพลที่เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ค่าดังต่อไปนี้ มีค่าไม่เกิน ϕM_n ของหน้าตัดเดิม

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP เพื่อใช้ในการคำนวณ ในการนำค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP มาใช้ในการคำนวณจะต้องมีการปรับลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ตามคำแนะนำของ ACI ซึ่งในกรณีนี้ กำหนดให้เท่ากับ 0.85 หรือ $C_E = 0.85$ จะได้ว่า

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

$$E_{fu} = C_E E_{fu}^*$$

ในการเสริมกำลังโดยใช้ CFRP จำเป็นต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูก (trial & error) โดยเริ่มต้น จะสมมติจำนวนและขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ต้องใช้ในการเสริมกำลัง

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณค่าความเครียดที่ผิวล่างของพื้นสะพาน ขณะที่ติดตั้งแผ่น CFRP เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่กำหนดให้หน้าตัดเป็นแบบ Crack Section โดยใช้หลักการแปลงหน้าตัด เพื่อหาหน่วยแรงค้ำที่ผิวล่างค่าโมดูลัสการยึดหยุ่นของคอนกรีตหาได้ดังนี้

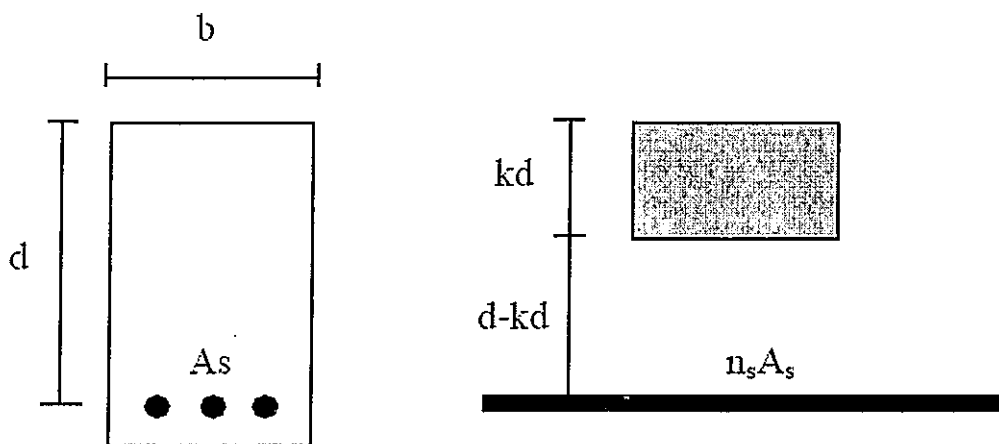
$$E_c = 15,200 \sqrt{f'_c}$$

แปลงหน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงค้ำเป็นคอนกรีตโดยใช้ค่า Modular Ratio

$$n_s = E_s / E_c$$

ดังนั้น พื้นที่ของเหล็กเมื่อแปลงหน้าตัดแล้วจะเท่ากับ

$$A_{s-tr} = n_s A_s$$



รูปที่ 4.2 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณารูปที่ 4.2 เพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$(b \times kd) \frac{kd}{2} = n_s A_s (d - kd)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้

$$kd = \frac{-n_s A_s \pm \sqrt{(n_s A_s)^2 + 2bdn_s A_s}}{b}$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{12} b (kd)^3 + b(kd) \left(\frac{kd}{2}\right)^2$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กหน้าตัดแปลง

$$I_s = n A_s (d - kd)^2$$

ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัดแปลง

$$I_{cr} = I_c + I_s$$

คำนวณหน่วยแรงดัดที่ผิวล่างของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

$$\sigma_b = \frac{MD_L(h - kd)}{I_{cr}}$$

จากหน่วยแรงดัดที่คำนวณได้สามารถนำไปหาค่าความเครียดได้ ดังนี้

$$\varepsilon_{bi} = \sigma_b / E_c$$

ขั้นตอนที่ 4

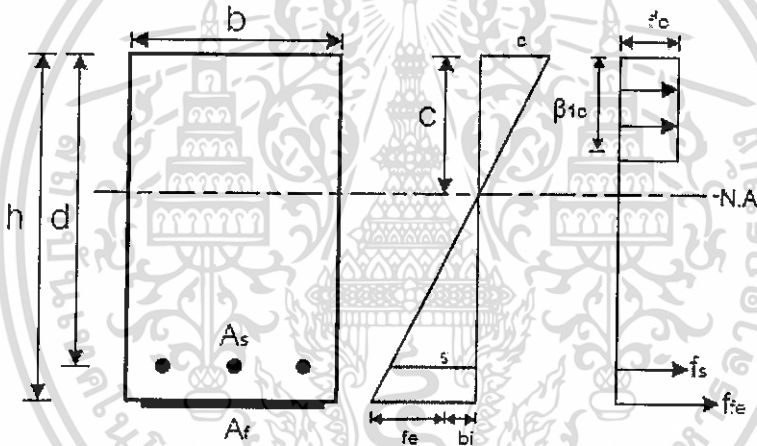
คำนวณหาค่า Factor ในการยึดเกาะของแผ่น CFRP โดย ACI ได้ให้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360,000}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f \leq 180,000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90,000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f > 180,000 \end{cases}$$

สำหรับค่า n จะหมายถึงจำนวนชั้นที่ทำการติดแผ่น CFRP ซึ่งในที่นี้จะมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากติดเพียง 1 ชั้น นอกจากนี้หน่วยที่ใช้สำหรับค่า E_f มีหน่วยเป็น N/mm^2

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า c ไว้ก่อนโดยทั่วไปจะประมาณเท่ากับ $0.2d$ เมื่อ d คือ ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด ซึ่งจะได้ว่า $c = 0.2d$ พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq k_m \varepsilon_{fu}$$

สำหรับค่า ϵ_{cu} หมายถึง ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีต โดยทั่วไปเท่ากับ 0.003 และหากพิจารณาจากสมการดังกล่าวแล้วพบว่าค่า ϵ_{fs} จะต้องไม่เกินค่า $K_m \epsilon_{fu}$ เนื่องจากป้องกันการหลุดร่อนของแผ่น CFRP กับโครงสร้าง

ซึ่งจากค่าความเครียดที่ได้สามารถนำไปหาค่าหน่วยแรงที่สอดคล้องกับความเครียดที่คำนวณได้ดังนี้

$$f_{fs} = E_f \epsilon_{fs}$$

จากนั้นสามารถนำค่าความเครียดประสิทธิผลใน CFRP ที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงโดยอาศัยสามเหลี่ยมคล้าย ได้ดังนี้

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fs} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right)$$

ซึ่งจากค่าที่ได้สามารถเปลี่ยนเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดึงได้ดังนี้

$$f_s = E_s \epsilon_s$$

ซึ่งถ้า f_s มีค่ามากกว่า 3,000 ksc. ให้ค่า f_s มีค่าเท่ากับ 3,000 ksc. เนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมากกว่าหน่วยแรงดึงที่จุดคานของเหล็กเสริม

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$C = \frac{A_s f_s + A_f f_{fs}}{0.85 f'_c \beta_1 b}$$

จากที่คำนวณได้ จะพบว่าค่า c ที่ได้ ถ้าหากมีค่าที่แตกต่างจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้น ($c = 0.2d$) ดังนั้นจะต้องทำการคำนวณใหม่โดยนำค่า c ที่ได้ไปดำเนินการคำนวณใหม่ โดยให้ค่า c เท่ากับค่าที่คำนวณสุดท้ายได้ จนค่า c มีค่าเท่ากับที่สมมติได้ จึงจะนำค่า c สุดท้ายไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 6

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัย โดย สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fs} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

โดยที่ Ψ_f คือ ตัวคูณลดกำลัง โดย ACI กำหนดให้เท่ากับ 0.85

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ต่อไป อย่งไรก็ตาม จำเป็นต้องหาค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับ โมเมนต์ก่อน โดย ACI ได้แนะนำสูตรสำหรับหาค่าดังกล่าวไว้ดังนี้

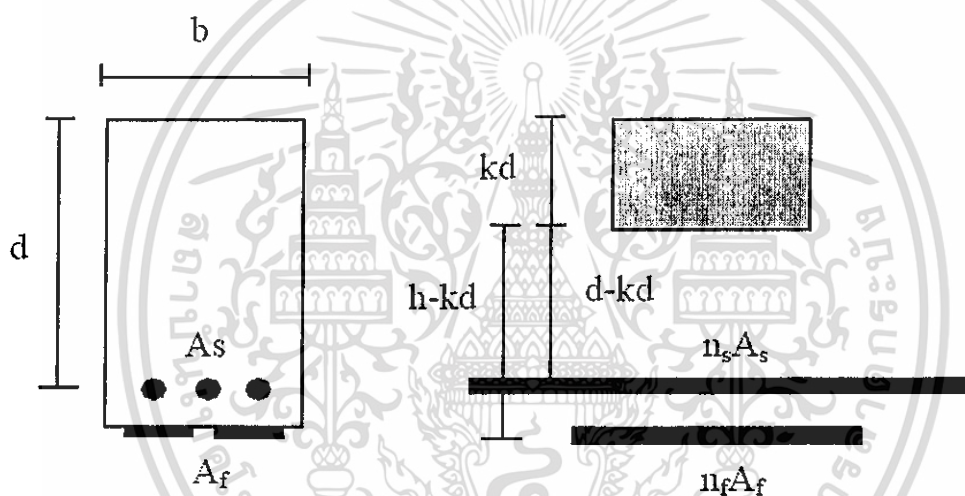
$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{for } \epsilon_s \geq 0.005 \\ 0.70 + \frac{0.20(\epsilon_s - \epsilon_{sy})}{0.005 - \epsilon_{sy}} & \text{for } \epsilon_{sy} < \epsilon_s < 0.005 \\ 0.70 & \text{for } \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} \end{cases}$$

จะได้ว่า ถ้าค่า $\phi M_n > M_{u(\text{requires})}$ แสดงว่าคานของสะพานนี้สามารถรับ โมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดขึ้นกับคานนี้ได้

ขั้นตอนที่ 7

ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงและแผ่น CFRP ในสถานะใช้งาน โดยการพิจารณา

หน้าตัดเป็นแบบ Crack Section



รูปที่ 4.4 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ทำการแปลงพื้นที่หน้าตัดของ CFRP ให้เป็นคอนกรีตโดยการหาค่า Modular Ratio ซึ่งจะได้ว่า

$$n_f = E_f / E_c$$

หาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$(b \times kd) \frac{kd}{2} = n_s A_s (d - kd) + n_f A_f (h - kd)$$

ซึ่งจากสมการดังกล่าวข้างต้นจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$kd = \frac{-BB \pm \sqrt{BB^2 - 4 \cdot AA \cdot CC}}{2 \cdot AA}$$

$$\text{โดยที่ } AA = \frac{b}{2}$$

$$BB = n_s A_s + n_f A_f$$

$$CC = -(n_s A_s d + n_f A_f h)$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{3} b(kd)^3$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กรับแรงดึง

$$I_s = n_s A_s (d - kd)^2$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่น CFRP

$$I_f = n_f A_f (h - kd)^2$$

โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัด $I_{total} = I_c + I_s + I_f$

โมเมนต์คดที่กระทำต่อโครงสร้างในสภาวะใช้งาน $M_s = M_{DL} + M_{LL}$

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึง

$$f_{s,s} = n_s \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) (h - kd)}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{s,s} < 0.80 f_y$

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ที่สภาวะใช้งาน

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{h - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{f,s} < 0.55 f_{fu}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 หมายเลขสะพาน-ชื่อ ที่ตั้ง (Bridge ID. , Name and Location)

สปท.4840 : G209 - RC (คลองกะจะ ถนนรามคำแหง 24 แยก 20)

ชนิดสะพาน (Bridge Type)

ชนิดผิวทาง (Type of surface)	Concrete Slab
จำนวนช่องจราจร (Nos. of traffic lanes)	2 ช่อง
จำนวนทางเท้า (Nos. of walkway)	2 ด้าน

รูปแบบโครงสร้างสะพาน/วัสดุ

โครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure)	Box Girder
โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (Substructure)	PC. PIER
โครงสร้างคอสสะพาน (Abutment Structure)	RC. Concrete

ขนาดของสะพาน

Bridge ID. , Name and Location	Nos.of span	Maximum span length	Structural length	Bridge width excluding walkway
สปท.4840 : G209 - RC คลองกะจะ ถนน รามคำแหง 24 แยก 20	3	8	24	8

Rating Factor ก่อนการออกแบบ

01 คอลัมน์กระ
 girder pier $\phi_{cr} = 0.8$ $f_c' = 210$ ksc $f_y = 3000$ ksc
 slab $\phi_{cr} = 0.8$ $f_c' = 210$ ksc $f_y = 3000$ ksc

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	43.96	11.09	6.00	1.02	32.583	1.70	54.388
AASHTO lane load	43.96	11.09	6.00	1.02		1.70	
Thai Trucks(25 T)	43.96	11.09	6.48	0.94	23.57	1.57	39.343
1.3xHS20-44	43.96	11.09	7.80	0.78	32.583	1.31	54.388

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	30.15	5.56	3.40	1.38	44.286	2.31	73.924
AASHTO lane load	30.15	5.56	2.63	1.79		2.99	
Thai Trucks(25 T)	30.15	5.56	3.23	1.46	36.42	2.43	60.793
1.3xHS20-44	30.15	5.56	4.42	1.06	44.286	1.78	73.924

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	48.91	13.02	5.29	1.23	39.218	2.05	65.464
AASHTO lane load	48.91	13.02	4.16	1.56		2.60	
Thai Trucks(25 T)	48.91	13.02	4.80	1.35	33.767	2.25	56.365
1.3xHS20-44	48.91	13.02	6.88	0.94	39.218	1.57	65.464

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	45.90	16.82	9.20	0.36	11.524	0.60	19.235
AASHTO lane load	45.90	16.82	7.09	0.47		0.78	
Thai Trucks(25 T)	45.90	16.82	8.34	0.40	9.9311	0.66	16.577
1.3xHS20-44	45.90	16.82	11.96	0.28	11.524	0.46	19.235

ค่า Rating Factor for Typical Pier Column

Case categories	Axial			Rating Factor			
	Capacity Pn(ton)	DL Pn(ton)	LL Pn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	570.3	44.89	18.27	5.06	162.06	8.45	270.51
AASHTO lane load	570.3	44.89	13.95	6.63		11.07	
Thai Trucks(25 T)	570.3	44.89	16.55	5.59	139.76	9.33	233.3
1.3xHS20-44	570.3	44.89	23.75	3.90	162.06	6.50	270.51

Rating Factor ที่คาดว่าจะได้หลังการออกแบบ

01 คลองกระจะ

girder pier $\phi_{cr} = 0.8$ $f_c' = 210$ ksc $f_y = 3000$ ksc
 slab $\phi_{cr} = 0.8$ $f_c' = 210$ ksc $f_y = 3000$ ksc

ค่าRating Factor for Typical Slab

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	51.00	11.09	6.00	1.32	42.166	2.20	70.384
AASHTO lane load	51.00	11.09	6.00	1.32		2.20	
Thai Trucks(25 T)	51.00	11.09	6.48	1.22	30.502	2.04	50.915
1.3xHS20-44	51.00	11.09	7.80	1.01	42.166	1.69	70.384

ค่าRating Factor for Typical Slab

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	30.15	5.56	3.40	1.38	44.286	2.31	73.924
AASHTO lane load	30.15	5.56	2.63	1.79		2.99	
Thai Trucks(25 T)	30.15	5.56	3.23	1.46	36.42	2.43	60.793
1.3xHS20-44	30.15	5.56	4.42	1.06	44.286	1.78	73.924

ค่าRating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	48.91	13.02	5.29	1.23	39.218	2.05	65.464
AASHTO lane load	48.91	13.02	4.16	1.56		2.60	
Thai Trucks(25 T)	48.91	13.02	4.80	1.35	33.767	2.25	56.365
1.3xHS20-44	48.91	13.02	6.88	0.94	39.218	1.57	65.464

ค่าRating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	45.90	16.82	9.20	0.36	11.524	0.60	19.235
AASHTO lane load	45.90	16.82	7.09	0.47		0.78	
Thai Trucks(25 T)	45.90	16.82	8.34	0.40	9.9311	0.66	16.577
1.3xHS20-44	45.90	16.82	11.96	0.28	11.524	0.46	19.235

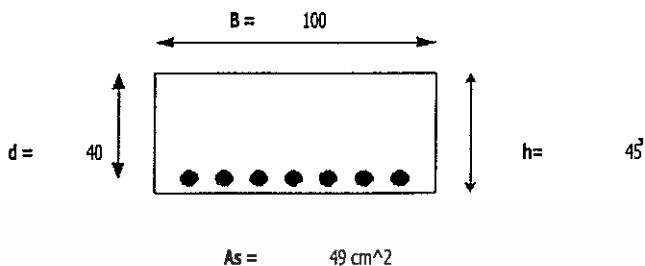
ค่าRating Factor for Typical Pier Column

Case categories	Axial			Rating Factor			
	Capacity Pn(ton)	DL Pn(ton)	LL Pn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	570.3	44.89	18.27	5.06	162.06	8.45	270.51
AASHTO lane load	570.3	44.89	13.95	6.63		11.07	
Thai Trucks(25 T)	570.3	44.89	16.55	5.59	139.76	9.33	233.3
1.3xHS20-44	570.3	44.89	23.75	3.90	162.06	6.50	270.51

Design

Steel Plate

การคำนวณการเสริมกำลังด้วย Steel Plates ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC. SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์มีขนาดและคุณสมบัติตามนี้



รูปที่ 5.1.1 หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 350	ksc.
ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัด	= 40	cm.

คุณสมบัติของ Steel Plates

กำลังดึงที่จุดคราก	= 2,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 2,040,000	ksc.

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 11,090	kg-m
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 7,800	kg-m
ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการหลังเสริมกำลัง	= 51,000	kg-m

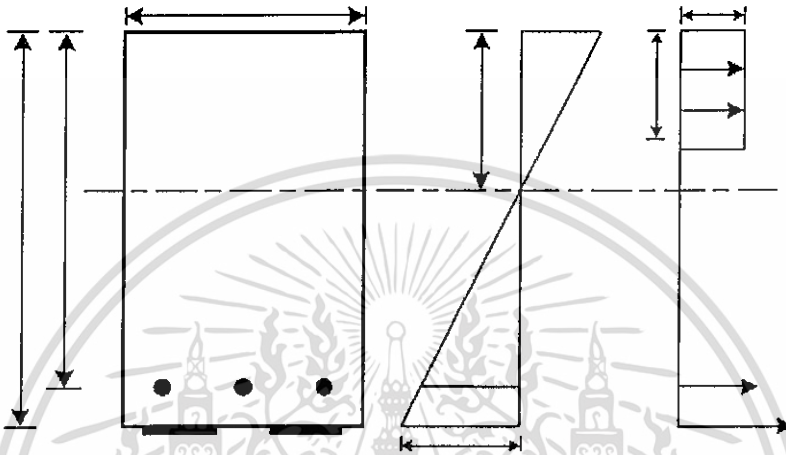
สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด โดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.1 2 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $A_s = 1.5 \text{ cm}^2$

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 5.96 \text{ cm}$. สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่น Steel Plates

ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) = 0.019651$$

หน่วยแรงดึงที่สอดคล้องกับหน่วยความเครียดที่เกิดขึ้น คือ

$$f_{sp} = \varepsilon_{sp} E_s = 40,088.05 \text{ ksc.} > f_{sp,y} = 2,500 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_{sp} = 2,500 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงได้ดังนี้

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right) = 0.017134$$

$$f_s = \varepsilon_s E_s = 34,953.83 \text{ ksc.} > f_y = 3,000 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_s = 3,000 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_{sp} f_{sp}}{0.85 f'_c \beta_2 b} = 5.961443 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณได้พบว่าค่า c ที่ได้เหมือนจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้น คือ $c = 5.96 \text{ cm}$.

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัย โดย สามารถคำนวณได้จาก

สูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A_{sp} f_{sp} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 56,668.08 \text{ kg-m.}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ โดยที่ $\phi = 0.90$ สำหรับ

โมเมนต์ ซึ่งจะได้ว่า $\phi M_n = 51,001.27 \text{ kg-m.} > M_{u(\text{requires})} = 51,000 \text{ kg-m.}$



Design

Carbon Fiber

การเสริมกำลังด้วย CFRP ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC. SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 350	ksc.
ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด	= 40	cm.

คุณสมบัติของ CFRP

กำลังดึงสูงสุด	= 23,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 1,650,000	ksc.
ความเครียดที่กำลังดึงสูงสุด	= 0.015	

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 11,090	kg-m.
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 7,800	kg-m.
ความสามารถในการรับโมเมนต์คัตที่ต้อการหลังเสริมกำลัง	= 51,000	kg-m.

สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

ตรวจสอบว่าโครงสร้างสามารถเสริมกำลังได้หรือไม่ เนื่องจากการเสริมกำลังเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นมากเกินไป หากเกิดกรณีที่แผ่น CFRP เกิดความเสียหายหรือไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ โครงสร้างจะได้ไม่พังลงทันทีเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ค่าดังต่อไปนี้ มีค่าไม่เกิน ϕM_n ของหน้าตัดเดิม

$$1.2 M_{DL} + 0.85 M_{LL} = 19,938 \leq \phi M_n = 51,000 \text{ kg-m. ใช้ได้}$$

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP เพื่อใช้ในการคำนวณ ในการนำค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP มาใช้ในการคำนวณจะต้องมีการปรับลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ตามคำแนะนำของ ACI ซึ่งในกรณีนี้ กำหนดให้เท่ากับ 0.85 หรือ $C_E = 0.85$ จะได้ว่า

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^k = 19,975 \text{ ksc.}$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^k = 0.01275$$

ในการเสริมกำลังโดยใช้ CFRP จำเป็นต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial & error) โดยเริ่มต้น จะสมมติจำนวนและขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ต้องใช้ในการเสริมกำลัง ในที่นี้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$\text{ดังนั้นพื้นที่ของ CFRP ทั้งหมด } A_f = n t_f w_f = 0.3 \text{ cm.}^2$$

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณค่าความเครียดที่ผิวล่างของพื้นสะพาน ขณะที่ติดตั้งแผ่น CFRP เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่กำหนดให้หน้าตัดเป็นแบบ Crack Section โดยใช้หลักการแปลงหน้าตัด เพื่อหาหน่วยแรงค้ำที่ผิวล่าง ค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นของคอนกรีตหาได้ดังนี้

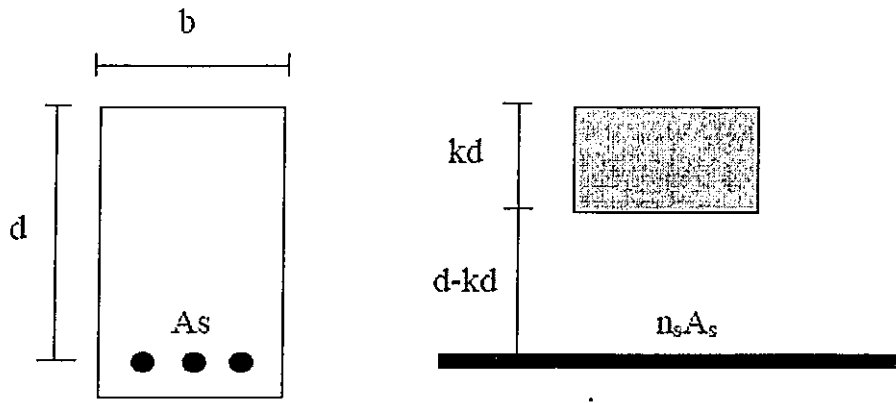
$$E_c = 15,200 \sqrt{f_c'} = 284,365.96 \text{ ksc.}$$

แปลงหน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงค้ำเป็นคอนกรีต โดยใช้ค่า Modular Ratio

$$n_s = E_s / E_c = 9.49$$

ดังนั้นพื้นที่ของเหล็กเมื่อแปลงหน้าตัดแล้วจะเท่ากับ

$$A_{s_{cr}} = n_s A_s = 465.02 \text{ cm.}^2$$



รูปที่ 5.1.3 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-n_s A_s \pm \sqrt{(n_s A_s)^2 + 2bdn_s A_s}}{b}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้

$$kd = 15.19$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{12} b (kd)^3 + b(kd) \left(\frac{kd}{2}\right)^2 = \frac{1}{3} b (kd)^3 = 116,829.38 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กหน้าตัดแปลง

$$I_s = n A_s (d - kd)^2 = 286,234.60 \text{ cm}^4$$

ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัดแปลง

$$I_{cr} = I_c + I_s = 403,063.97 \text{ cm}^4$$

คำนวณหน่วยแรงดัดที่ผิวล่างของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

$$\sigma_b = \frac{MDL(h - kd)}{I_{cr}} = 82.02 \text{ ksc.}$$

จากหน่วยแรงดัดที่คำนวณได้สามารถนำไปหาค่าความเครียดได้ ดังนี้

$$\epsilon_{bi} = \sigma_b / E_c = 0.000381559$$

ขั้นตอนที่ 4

คำนวณหาค่า Factor ในการยึดเกาะของแผ่น CFRP โดย ACI ได้ให้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360,000}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f \leq 180,000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90,000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f > 180,000 \end{cases}$$

สำหรับค่า n จะหมายถึงจำนวนชั้นที่ทำการติดแผ่น CFRP ซึ่งในที่นี้จะมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากติดเพียง 1 ชั้น นอกจากนี้หน่วยที่ใช้สำหรับค่า E_f มีหน่วยเป็น N/mm^2 ดังนั้น เริ่มต้นจะคำนวณค่าของ $nE_f t_f$ ก่อนโดยแทนค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้ $n = 2$, $E_f = 152,000 \text{ N/mm}^2$ และ $t_f = 0.48$ จะได้ว่า

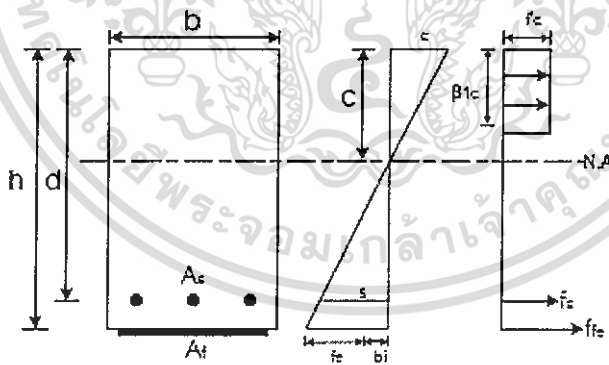
$$nE_f t_f = 145,920 < 180,000 \text{ N/mm}^2$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$K_m = 0.777342$$

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับ โมเมนต์คัตของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด โดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.1.4 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 5.99 \text{ cm}$. พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq K_m \varepsilon_{fu}$$

สำหรับค่า ε_{cu} หมายถึง ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตโดยทั่วไปเท่ากับ 0.003 และหากพิจารณาจากสมการดังกล่าวแล้วพบว่าค่า ε_{fs} จะต้องไม่เกินค่า $K_m \varepsilon_{fe}$ เนื่องจากป้องกันการหลุดร่อนของแผ่น CFRP กับโครงสร้าง เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการแล้วจะได้ว่า

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} = 0.019537563$$

ดังนั้นจะได้ว่า ε_{fs} ซึ่งจากค่าความเครียดที่ได้สามารถนำไปหาค่าหน่วยแรงที่สอดคล้องกับความเครียดที่คำนวณได้ดังนี้

$$f_{fs} = E_f \varepsilon_{fs} = 15,064.88889 \text{ ksc.}$$

จากนั้นสามารถนำค่าความเครียดประสิทธิผลใน CFRP ที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึง โดยอาศัยสามเหลี่ยมคล้าย ได้ดังนี้

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fs} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right) = 0.008973435$$

ซึ่งจากค่าที่ได้สามารถเปลี่ยนเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดึงได้ดังนี้

$$f_s = E_s \varepsilon_s = 18,305.81 > 3,000 \text{ ksc.}$$

แสดงว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมากกว่าหน่วยแรงดึงที่จุดกลางของเหล็กเสริม ดังนั้น $f_s = 3,000 \text{ ksc.}$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fs}}{0.85 f'_c \beta_1 b} = 5.99 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณได้พบว่าค่า c ที่ได้ตรงจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้นคือ $c = 5.99 \text{ cm.}$

ขั้นตอนที่ 6

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัย โดย สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fs} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

โดยที่ ψ_f คือ ตัวคูณลดกำลัง โดย ACI กำหนดให้เท่ากับ 0.85 ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 56,687.45 \text{ kg-m.}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ต่อไป อย่างไรก็ตาม

จำเป็นต้องหาค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับ โมเมนต์ดัดก่อน โดย ACI ได้แนะนำสูตรสำหรับหาค่าดังกล่าวไว้ดังนี้

$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{for } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.70 + \frac{0.20(\varepsilon_s - \varepsilon_{sv})}{0.005 - \varepsilon_{sv}} & \text{for } \varepsilon_{sv} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.70 & \text{for } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sv} \end{cases}$$

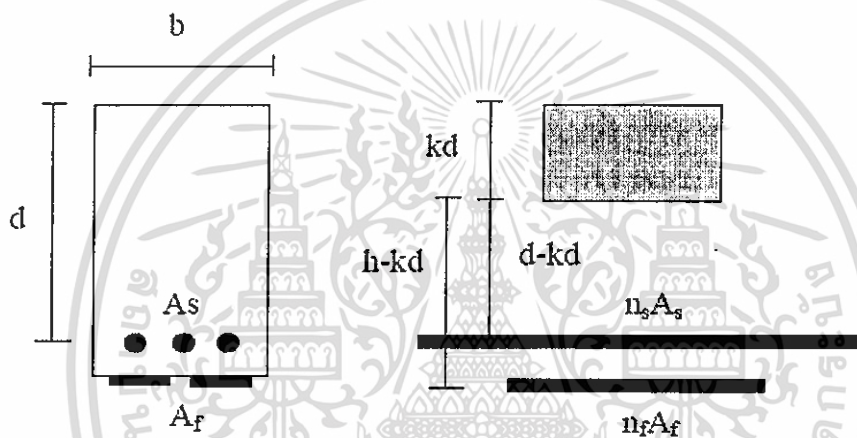
เมื่อพิจารณาจากค่า $\varepsilon_s = 0.0089$ ที่คำนวณได้พบว่ามามีค่ามากกว่า 0.005 ดังนั้นค่า $\phi = 0.90$ ซึ่งจะได้ว่า

$$\phi M_n = 51,018.70 > M_{u(\text{requires})} = 51,000 \text{ kg-m.}$$

ขั้นตอนที่ 7

ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงและแผ่น CFRP ในสภาวะใช้งาน โดยการพิจารณา

หน้าตัดเป็นแบบ Crack Section



รูปที่ 5.1.5 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ทำการแปลงพื้นที่หน้าตัดของ CFRP ให้เป็นคอนกรีตโดยการหาค่า Modular Ratio ซึ่งจะได้ว่า

$$n_f = E_f / E_c = 7.07$$

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-BB \pm \sqrt{BB^2 - 4 \cdot AA \cdot CC}}{2 \cdot AA}$$

โดยที่ $AA = b/2$

$$BB = n_s A_s + n_f A_f$$

$$CC = -(n_s A_s d + n_f A_f h)$$

$$kd = 15.22 \text{ cm.}$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{3} b (kd)^3 = 117,522.95 \text{ cm.}^4$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กรับแรงดึง

$$I_s = n_s A_s (d - kd)^2 = 285,542.79 \text{ cm}^4$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่น CFRP

$$I_f = n_f A_f (h - kd)^2 = 1,881.29 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัด

$$I_{total} = I_c + I_s + I_f = 404,947.04 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ดัดที่กระทำต่อโครงสร้างในสถานะใช้งาน

$$M_s = M_{DL} + M_{LL} = 18,890 \text{ kg-m.}$$

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึง

$$f_{s,s} = n_s \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) (h - kd)} = 88.0742 \text{ ksc}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{s,s} < 0.80 f_y$ จะได้ว่า $0.80 f_y = 2,400 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{s,s} < 0.80 f_y$ ใช้ได้

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ที่สถานะใช้งาน

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{h - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f = 7,306.552 \text{ ksc.}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{f,s} < 0.55 f_u$ จะได้ว่า $0.55 f_u = 12,925 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{f,s} < 0.55 f_u$ ใช้ได้

COST

STEEL PLATE

Size		Weight (Kg)	Cost/Weight(Bath/Kg)	Cost/Page(Bath/Page)	As steel(cm2)	As Require(cm2)	H(Page)	H Use (page)	Total Cost(Bath)	As Steel Plate Use(cm ²)	Min Design(Kg-m)	Tsp(Kg)	Bolt(N)	Cost Bolt(Bath)		
Thick(cm)	Width(cm)															
0.12	120	227.2	26	5,907.47	14.4	1.5	0.10	1	5,907.47	14.40	51,500.00	36,000.00	16.00	96.00		
0.15	120	284.0	26	7,384.34	18	1.5	0.08	1	7,384.34	18.00	51,500.00	45,000.00	19.00	114.00		
0.2	120	378.7	26	9,845.78	24	1.5	0.06	1	9,845.78	24.00	51,500.00	60,000.00	26.00	156.00		
0.25	120	473.4	26	12,307.23	30	1.5	0.05	1	12,307.23	30.00	51,500.00	75,000.00	32.00	192.00		
0.3	120	568.0	26	14,768.68	36	1.5	0.04	1	14,768.68	36.00	51,500.00	90,000.00	38.00	238.00		
0.4	120	757.4	26	19,691.57	48	1.5	0.03	1	19,691.57	48.00	51,500.00	120,000.00	51.00	306.00		
0.45	120	852.0	26	22,153.01	54	1.5	0.03	1	22,153.01	54.00	51,500.00	135,000.00	57.00	342.00		
0.5	120	946.7	26	24,614.46	60	1.5	0.03	1	24,614.46	60.00	51,500.00	150,000.00	63.00	378.00		
0.6	120	1136.1	26	29,537.35	72	1.5	0.02	1	29,537.35	72.00	51,500.00	180,000.00	76.00	456.00		
0.8	120	1514.7	26	39,383.14	96	1.5	0.02	1	39,383.14	96.00	51,500.00	240,000.00	101.00	606.00		
0.9	120	1704.1	26	44,306.03	108	1.5	0.01	1	44,306.03	108.00	51,500.00	270,000.00	113.00	678.00		
1.2	120	2272.1	26	59,074.70	144	1.5	0.01	1	59,074.70	144.00	51,500.00	360,000.00	151.00	906.00		
1.6	120	3079.5	26	78,766.27	192	1.5	0.01	1	78,766.27	192.00	51,500.00	480,000.00	201.00	1,206.00		
1.9	120	3597.5	26	93,534.95	228	1.5	0.01	1	93,534.95	228.00	51,500.00	570,000.00	236.00	1,428.00		
2.5	120	4733.6	26	123,072.30	300	1.5	0.01	1	123,072.30	300.00	51,500.00	750,000.00	313.00	1,878.00		
0.3	150	710.0	26	18,460.85	45	1.5	0.03	1	18,460.85	45.00	51,500.00	112,500.00	47.00	282.00		
0.4	150	946.7	26	24,614.46	60	1.5	0.03	1	24,614.46	60.00	51,500.00	150,000.00	63.00	378.00		
0.45	150	1065.0	26	27,691.27	67.5	1.5	0.02	1	27,691.27	67.50	51,500.00	168,750.00	71.00	426.00		
0.6	150	1420.1	26	36,921.69	90	1.5	0.02	1	36,921.69	90.00	51,500.00	225,000.00	94.00	564.00		
0.8	150	1893.4	26	49,228.92	120	1.5	0.01	1	49,228.92	120.00	51,500.00	300,000.00	126.00	756.00		
0.9	150	2130.1	26	55,382.54	135	1.5	0.01	1	55,382.54	135.00	51,500.00	337,500.00	141.00	846.00		
1.2	150	2840.1	26	73,843.38	180	1.5	0.01	1	73,843.38	180.00	51,500.00	450,000.00	188.00	1,128.00		
1.5	150	3550.2	26	92,304.23	225	1.5	0.01	1	92,304.23	225.00	51,500.00	562,500.00	235.00	1,410.00		
1.9	150	4496.9	26	116,918.69	285	1.5	0.01	1	116,918.69	285.00	51,500.00	712,500.00	297.00	1,782.00		
2.5	150	5916.9	26	153,840.38	375	1.5	0.00	1	153,840.38	375.00	51,500.00	937,500.00	391.00	2,346.00		
										MAX =	153,840.38			Total Cost	1,335,642	
										Min =	5,907.47			Include Vat 7%	8666.99	69,336

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่เว้นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CABON FIBER

SPEC	Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total (m ²)	Cost/Area (Bath/m ²)	Cost TFC (Bath)	Cost Epoxy (Bath)	Total Cost (Bath)
0.05	4.00	0.19	0.30	0.30	1.56	2.00	20.10	0.80	1.61	2,250.00	3,618.00	578.88	33,575.04
0.05	7.50	0.36	0.30	0.30	0.83	1.00	20.10	1.51	1.51	2,250.00	3,391.88	542.70	31,476.60
0.05	15.00	0.72	0.30	0.30	0.42	1.00	20.10	3.02	3.02	2,250.00	6,783.75	1,085.40	62,953.20
0.05	30.00	1.44	0.30	0.30	0.31	1.00	20.10	4.02	4.02	2,250.00	9,045.00	1,447.20	83,937.60
0.05	30.00	1.44	0.30	0.30	0.21	1.00	20.10	6.03	6.03	2,250.00	13,567.50	2,170.80	125,906.40
											MAX = 125,906.40	BATH	
											MIN = 31,476.60	BATH	

SPEC	Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total (m ²)	Cost/Area (Bath/m ²)	Cost CFRP (Bath)	Cost Epoxy (Bath)	Total Cost (Bath)
0.12	5.0	0.60	0.30	0.30	0.50	1.00	20.10	1.01	1.01	3,000.00	3,015.00	351.75	26,934.00
0.12	6.0	0.72	0.30	0.30	0.42	1.00	20.10	1.21	1.21	3,000.00	3,618.00	422.10	32,320.90
0.12	8.0	0.96	0.30	0.30	0.31	1.00	20.10	1.61	1.61	3,000.00	4,824.00	562.80	43,094.40
0.12	10.0	1.20	0.30	0.30	0.25	1.00	20.10	2.01	2.01	3,000.00	6,030.00	703.50	53,868.00
0.12	12.0	1.44	0.30	0.30	0.21	1.00	20.10	2.41	2.41	3,000.00	7,236.00	844.20	64,641.60
0.12	15.0	1.80	0.30	0.30	0.17	1.00	20.10	3.02	3.02	3,000.00	9,045.00	1,055.25	80,802.00
0.14	6.0	0.84	0.30	0.30	0.36	1.00	20.10	1.21	1.21	3,000.00	3,618.00	422.10	32,320.90
0.14	9.0	1.26	0.30	0.30	0.24	1.00	20.10	1.81	1.81	3,000.00	5,427.00	633.15	49,481.20
0.14	12.0	1.68	0.30	0.30	0.18	1.00	20.10	2.41	2.41	3,000.00	7,236.00	844.20	64,641.60
											MAX = 80,802.00	BATH	
											MIN = 26,934.00	BATH	

****REMARK

As Cabon (cm²) x Width
 As Require (cm²) Input
 Layer (N) As Require/As Cabon
 Span Input
 Area/1Span Width x Span
 Area Total Area/1Span x Layer
 Cost/Area (Bath/m²) Input
 Total Cost Cost/Area x Area Total

DIFFERENT COST TFC AND CFRP	
MIN	TFC 31,476.60
MIN	CFRP SIKA 26,934.00
	DIFF 1.17

Summary

Steel	Bridgh	As (cm ²)	Remark	Cost (Bath)	Remark	Installation	Remark
	คดลงกะาะ	1.5	20.00%	69,335.95	0.39		
Cabon Fiber		0.30		26,934.00			

5.2 หมายเลขสะพาน-ชื่อ ที่ตั้ง (Bridge ID. , Name and Location)

สป.4842 : G211 - RC (คลองกะจะ ถนน รามคำแหง 24 แยก 28)

ชนิดสะพาน (Bridge Type)

ชนิดผิวทาง (Type of surface)	Concrete Slab
จำนวนช่องจราจร (Nos. of traffic lanes)	4 ช่อง
จำนวนทางเท้า (Nos. of walkway)	2 ด้าน

รูปแบบโครงสร้างสะพาน/วัสดุ

โครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure)	Box Girder
โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (Substructure)	PC. PIER
โครงสร้างคอสสะพาน (Abutment Structure)	RC. Concrete

ขนาดของสะพาน

Bridge ID. , Name and Location	Nos.of span	Maximum span length	Structural length	Bridge width excluding walkway
สป.4842 : G211 - RC คลองกะจะ ถนน รามคำแหง 24 แยก 28	3	8	24	8

Rating Factor ก่อนการออกแบบ

girder pier $\phi_{cr} = 0.85$ $f_c' = 240$ ksc $f_y = 3000$ ksc
 slab $\phi_{cr} = 0.8$ $f_c' = 210$ ksc $f_y = 3000$ ksc

ค่าRating Factor for Typical Slab

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	43.97	11.13	6.12	1.00	31.861	1.66	53.183
AASHTO lane load	43.97	11.13	6.12	1.00		1.66	
Thai Trucks(25 T)	43.97	11.13	6.61	0.92	23.046	1.54	38.469
1.3xHS20-44	43.97	11.13	7.96	0.77	31.861	1.28	53.183

ค่าRating Factor for Typical Slab

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	30.14	5.58	3.46	1.36	43.411	2.26	72.463
AASHTO lane load	30.14	5.58	2.69	1.74		2.91	
Thai Trucks(25 T)	30.14	5.58	3.30	1.42	35.559	2.37	59.356
1.3xHS20-44	30.14	5.58	4.50	1.04	43.411	1.74	72.463

ค่าRating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	49.71	14.01	5.77	1.22	38.955	2.03	65.026
AASHTO lane load	49.71	14.01	4.54	1.55		2.58	
Thai Trucks(25 T)	49.71	14.01	5.23	1.34	33.576	2.24	56.047
1.3xHS20-44	49.71	14.01	7.50	0.94	38.955	1.56	65.026

ค่าRating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	48.29	16.78	9.33	0.50	15.897	0.83	26.536
AASHTO lane load	48.29	16.78	7.19	0.64		1.08	
Thai Trucks(25 T)	48.29	16.78	8.45	0.55	13.713	0.92	22.891
1.3xHS20-44	48.29	16.78	12.13	0.38	15.897	0.64	26.536

ค่าRating Factor for Typical Pier Column

Case categories	Axial			Rating Factor			
	Capacity Pn(ton)	DL Pn(ton)	LL Pn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	639.2	44.90	18.50	6.17	197.41	10.30	329.52
AASHTO lane load	639.2	44.90	14.16	8.06		13.45	
Thai Trucks(25 T)	639.2	44.90	16.75	6.81	170.34	11.37	284.34
1.3xHS20-44	639.2	44.90	24.05	4.75	197.41	7.92	329.52

Rating Factor ที่คาดว่าจะได้หลังการออกแบบ

01 **คัลองกัระ**
 girder pier $\phi_{cr} = 0.85$ $f_c' = 240$ ksc $f_y = 3000$ ksc
 slab $\phi_{cr} = 0.8$ $f_c' = 210$ ksc $f_y = 3000$ ksc

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	51.50	11.13	6.12	1.31	41.91	2.19	69.957
AASHTO lane load	51.50	11.13	6.12	1.31		2.19	
Thai Trucks(25 T)	51.50	11.13	6.61	1.21	30.315	2.02	50.602
1.3xHS20-44	51.50	11.13	7.96	1.01	41.91	1.68	69.957

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	30.14	5.58	3.46	1.36	43.411	2.26	72.463
AASHTO lane load	30.14	5.58	2.69	1.74		2.91	
Thai Trucks(25 T)	30.14	5.58	3.30	1.42	35.559	2.37	59.356
1.3xHS20-44	30.14	5.58	4.50	1.04	43.411	1.74	72.463

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	49.71	14.01	5.77	1.22	38.955	2.03	65.026
AASHTO lane load	49.71	14.01	4.54	1.55		2.58	
Thai Trucks(25 T)	49.71	14.01	5.23	1.34	33.576	2.24	56.047
1.3xHS20-44	49.71	14.01	7.50	0.94	38.955	1.56	65.026

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	48.29	16.78	9.33	0.50	15.897	0.83	26.536
AASHTO lane load	48.29	16.78	7.19	0.64		1.08	
Thai Trucks(25 T)	48.29	16.78	8.45	0.55	13.713	0.92	22.891
1.3xHS20-44	48.29	16.78	12.13	0.38	15.897	0.64	26.536

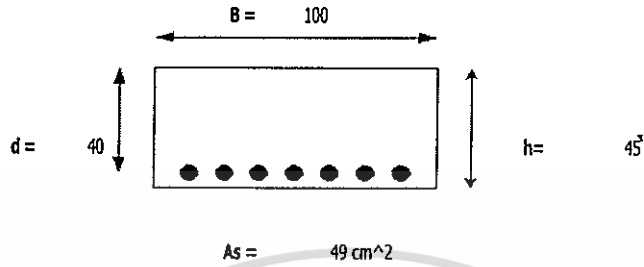
ค่า Rating Factor for Typical Pier Column

Case categories	Axial			Rating Factor			
	Capacity Pn(ton)	DL Pn(ton)	LL Pn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	639.2	44.90	18.50	6.17	197.41	10.30	329.52
AASHTO lane load	639.2	44.90	14.16	8.06		13.45	
Thai Trucks(25 T)	639.2	44.90	16.75	6.81	170.34	11.37	284.34
1.3xHS20-44	639.2	44.90	24.05	4.75	197.41	7.92	329.52

Design

Steel Plate

การคำนวณการเสริมกำลังด้วย Steel Plates ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์มีขนาดและคุณสมบัติตามนี้



รูปที่ 5.2.1 หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 210	ksc.
ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด	= 40	cm.

คุณสมบัติของ Steel Plates

กำลังดึงที่จุดคราก	= 2,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 2,040,000	ksc.

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 11,130	kg-m
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 7,960	kg-m
ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการหลังเสริมกำลัง	= 51,500	kg-m

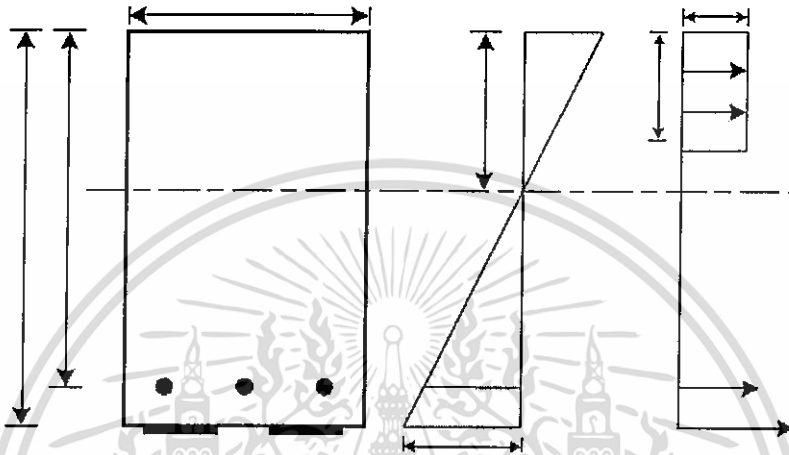
สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดโดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.2.2 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $A_s = 5 \text{ cm}^2$

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 10.51 \text{ cm}$. สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่น Steel

Plates ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) = 0.009845$$

หน่วยแรงดึงที่สอดคล้องกับหน่วยความเครียดที่เกิดขึ้น คือ

$$f_{sp} = \varepsilon_{sp} E_s = 20083.62 \text{ ksc.} > f_{sp,y} = 2,500 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_{sp} = 2,500 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงได้ดังนี้

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right) = 0.008418$$

$$f_s = \varepsilon_s E_s = 17,172.1 \text{ ksc.} > f_y = 3,000 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_s = 3,000 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_{sp} f_{sp}}{0.85 f'_c \beta_2 b} = 10.51 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณได้พบว่าค่า c ที่ได้เหมือนจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้น คือ $c = 10.51 \text{ cm}$.

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัย โดย สามารถคำนวณได้จาก

สูตร

$$M_n = A_s f_x \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A_{sp} f_{sp} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 57,298.88 \text{ kg-m.}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ โดยที่ $\phi = 0.90$ สำหรับ

โมเมนต์ ซึ่งจะได้ว่า $\phi M_n = 51,568.99 \text{ kg-m.} > M_{u(\text{require})} = 51,500 \text{ kg-m.}$



Design

Carbon Fiber

การเสริมกำลังด้วย CFRP ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC. SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 210	ksc.
ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด	= 40	cm.

คุณสมบัติของ CFRP

กำลังดึงสูงสุด	= 23,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 1,650,000	ksc.
ความเครียดที่กำลังดึงสูงสุด	= 0.015	

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 11,130	kg-m.
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 7,960	kg-m.
ความสามารถในการรับโมเมนต์คดที่ต้องการหลังเสริมกำลัง	= 51,500	kg-m.

สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

ตรวจสอบว่าโครงสร้างสามารถเสริมกำลังได้หรือไม่ เนื่องจากการเสริมกำลังเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นมากเกินไป หากเกิดกรณีที่แผ่น CFRP เกิดความเสียหายหรือไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้โครงสร้างจะได้อิทธิพลที่เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ค่าดังต่อไปนี้ มีค่าไม่เกิน ϕM_n ของหน้าตัดเดิม

$$1.2 M_{DL} + 0.85 M_{LL} = 20,122 \leq \phi M_n = 51,500 \text{ kg-m.} \quad \text{ใช้ได้}$$

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP เพื่อใช้ในการคำนวณ ในการนำค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP มาใช้ในการคำนวณจะต้องมีการปรับลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ตามคำแนะนำของ ACI ซึ่งในกรณีนี้ กำหนดให้เท่ากับ 0.85 หรือ $C_E = 0.85$ จะได้ว่า

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 19,975 \text{ ksc.}$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* = 0.01275$$

ในการเสริมกำลังโดยใช้ CFRP จำเป็นต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial & error) โดยเริ่มต้น จะสมมติจำนวนและขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ต้องใช้ในการเสริมกำลัง ในที่นี้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$\text{ดังนั้นพื้นที่ของ CFRP ทั้งหมด} \quad A_f = n t_f w_f = 1.5 \text{ cm.}^2$$

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณค่าความเครียดที่ผิวล่างของพื้นสะพาน ขณะที่ติดตั้งแผ่น CFRP เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่กำหนดให้หน้าตัดเป็นแบบ Crack Section โดยใช้หลักการแปลงหน้าตัด เพื่อหาหน่วยแรงค้ำที่ผิวล่าง ค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นของคอนกรีตหาได้ดังนี้

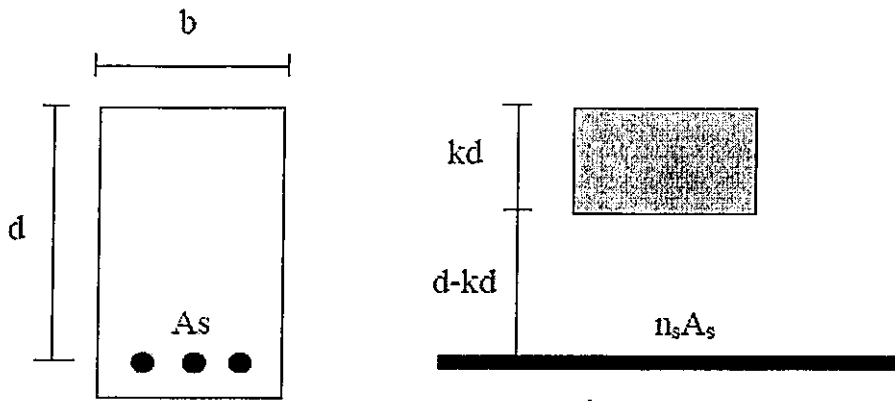
$$E_c = 15,200 \sqrt{f'_c} = 220,268.93 \text{ ksc.}$$

แปลงหน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงค้ำเป็นคอนกรีต โดยใช้ค่า Modular Ratio

$$n_s = E_s / E_c = 9.49$$

ดังนั้นพื้นที่ของเหล็กเมื่อแปลงหน้าตัดแล้วจะเท่ากับ

$$A_{s_{tr}} = n_s A_s = 465.02 \text{ cm.}^2$$



รูปที่ 5.2.3 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-n_s A_s \pm \sqrt{(n_s A_s)^2 + 2bdn_s A_s}}{b}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้

$$kd = 15.19$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{12} b (kd)^3 + b(kd) \left(\frac{kd}{2}\right)^2 = \frac{1}{3} b (kd)^3 = 116,829.38 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กหน้าตัดแปลง

$$I_s = n A_s (d - kd)^2 = 286,234.60 \text{ cm}^4$$

ดังนั้นโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัดแปลง

$$I_{cr} = I_c + I_s = 403,063.97 \text{ cm}^4$$

คำนวณหน่วยแรงดัดที่ผิวล่างของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

$$\sigma_b = \frac{M_{DL} (h - kd)}{I_{cr}} = 82.32 \text{ ksc.}$$

จากหน่วยแรงดัดที่คำนวณได้สามารถนำไปหาค่าความเครียดได้ ดังนี้

$$\epsilon_{bi} = \sigma_b / E_c = 0.000382935$$

ขั้นตอนที่ 4

คำนวณหาค่า Factor ในการยึดเกาะของแผ่น CFRP โดย ACI ได้ให้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$K_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360,000}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f \leq 180,000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90,000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f > 180,000 \end{cases}$$

สำหรับค่า n จะหมายถึงจำนวนชั้นที่ทำการติดแผ่น CFRP ซึ่งในที่นี้จะมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากติดเพียง 1 ชั้น นอกจากนี้หน่วยที่ใช้สำหรับค่า E_f มีหน่วยเป็น N/mm^2 ดังนั้น เริ่มต้นจะคำนวณค่าของ $nE_f t_f$ ก่อน โดยแทนค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้ $n = 3$, $E_f = 152,000 \text{ N/mm}^2$ และ $t_f = 0.48$ จะได้ว่า

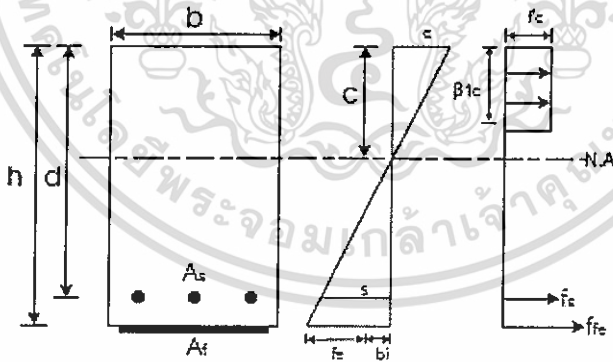
$$nE_f t_f = 151,200 < 180,000 \text{ N/mm}^2$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$K_m = 0.75817$$

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์คดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด โดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.2.4 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 10.69 \text{ cm}$. พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq K_m \varepsilon_{fu}$$

สำหรับค่า ϵ_{cu} หมายถึง ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตโดยทั่วไปเท่ากับ 0.003 และหากพิจารณาจากสมการดังกล่าวแล้วพบว่าค่า ϵ_{fs} จะต้องไม่เกินค่า $K_m \epsilon_{fs}$ เนื่องจากป้องกันการหลุดร่อนของแผ่น CFRP กับโครงสร้าง เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการแล้วจะได้ว่า

$$\epsilon_{fs} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \epsilon_{bi} = 0.0096286$$

ดังนั้นจะได้ว่า ϵ_{fs} ซึ่งจากค่าความเครียดที่ได้สามารถนำไปหาค่าหน่วยแรงที่สอดคล้องกับความเครียดที่คำนวณได้ดังนี้

$$f_{fs} = E_f \epsilon_{fs} = 10,110.05613 \text{ ksc.}$$

จากนั้นสามารถนำค่าความเครียดประสิทธิผลใน CFRP ที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงโดยอาศัยสามเหลี่ยมคล้าย ได้ดังนี้

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fs} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right) = 0.008552575$$

ซึ่งจากค่าที่ได้สามารถเปลี่ยนเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดึงได้ดังนี้

$$f_s = E_s \epsilon_s = 17,447.25 > 3,000 \text{ ksc.}$$

แสดงว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมากกว่าหน่วยแรงดึงที่จุดคานงของเหล็กเสริม ดังนั้น $f_s = 3,000 \text{ ksc.}$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fs}}{0.85 f'_c \beta_1 b} = 10.69 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณได้พบว่าค่า c ที่ได้ตรงจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้นคือ $c = 10.69 \text{ cm.}$

ขั้นตอนที่ 6

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัย โดย สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fs} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

โดยที่ Ψ_f คือ ตัวคูณลดกำลัง โดย ACI กำหนดให้เท่ากับ 0.85 ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 57,337.72 \text{ kg-m.}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ต่อไป อย่างไรก็ตาม

จำเป็นต้องหาค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับ โมเมนต์ก่อน โดย ACI ได้แนะนำสูตรสำหรับหาค่าดังกล่าวไว้ดังนี้

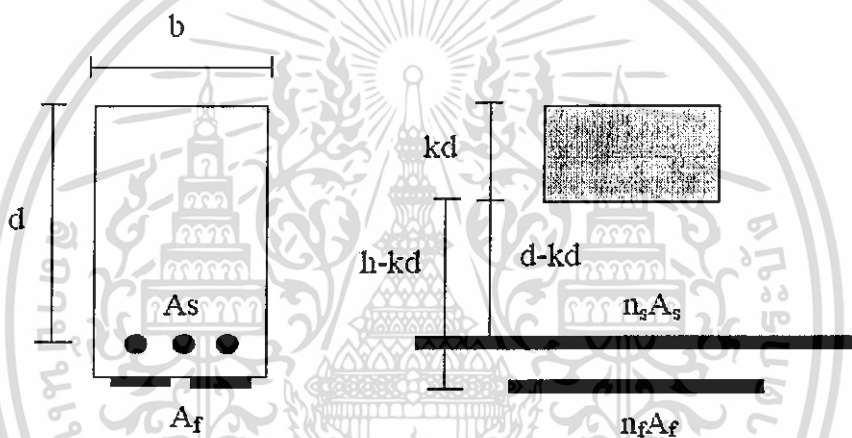
$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{for } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.70 + \frac{0.20(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{for } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.70 & \text{for } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

เมื่อพิจารณาจากค่า $\varepsilon_s = 0.0089$ ที่คำนวณได้พบว่ามีความมากกว่า 0.005 ดังนั้นค่า $\phi = 0.90$ ซึ่งจะได้ว่า

$$\phi M_n = 51,603.95 > M_{u(\text{require})} = 51,000 \text{ kg-m.}$$

ขั้นตอนที่ 7

ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงและแผ่น CFRP ในสถานะใช้งาน โดยการพิจารณาหน้าตัดเป็นแบบ Crack Section



รูปที่ 5.2.5 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ทำการแปลงพื้นที่หน้าตัดของ CFRP ให้เป็นคอนกรีตโดยการหาค่า Modular Ratio ซึ่งจะได้ว่า

$$n_f = E_f / E_c = 4.88$$

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-BB \pm \sqrt{BB^2 - 4 \cdot AA \cdot CC}}{2 \cdot AA}$$

$$\text{โดยที่ } AA = b/2$$

$$BB = n_s A_s + n_f A_f$$

$$CC = -(n_s A_s d + n_f A_f h)$$

$$kd = 15.33 \text{ cm.}$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{3} b(kd)^3 = 119,385.90 \text{ cm.}^4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กรับแรงดึง

$$I_s = n_s A_s (d - kd)^2 = 283,702.07 \text{ cm}^4$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่น CFRP

$$I_f = n_f A_f (h - kd)^2 = 6463.02 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัด

$$I_{total} = I_c + I_s + I_f = 409,550.99 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ดัดที่กระทำต่อโครงสร้างในสภาวะใช้งาน

$$M_s = M_{DL} + M_{LL} = 19,090 \text{ kg-m.}$$

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึง

$$f_{s,s} = n_s \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) (h - kd)} = 75.64242 \text{ ksc}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{s,s} < 0.80 f_y$ จะได้ว่า $0.80 f_y = 2,400 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{s,s} < 0.80 f_y$ ใช้ได้

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ที่สภาวะใช้งาน

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{h - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f = 4,279.407 \text{ ksc.}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{f,s} < 0.55 f_u$ จะได้ว่า $0.55 f_u = 12,925 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{f,s} < 0.55 f_u$ ใช้ได้

COST

STEEL PLATE

Size			Weight (Kg)	Cost/Weight(Bath/Kg)	Cost/Page(Bath/Page)	As steel(cm2)	As Require(cm2)	N(Page)	N Use (page)	Total Cost(Bath)	As Steel Plate Use(cm^2)	Mn Design(Kg-m)	Tsp(Kg)	Bolt(N)	Cost Bolt(Bath)
Thin(cm)	Width(cm)	Long(cm)													
0.12	120	2010	227.2	26	5,907.47	14.4	5	0.35	1	5,907.47	14.40	51,500.00	36,000.00	16.00	96.00
0.15	120	2010	284.0	26	7,384.34	18	5	0.28	1	7,384.34	18.00	51,500.00	45,000.00	19.00	114.00
0.2	120	2010	378.7	26	9,845.78	24	5	0.21	1	9,845.78	24.00	51,500.00	60,000.00	26.00	156.00
0.25	120	2010	473.4	26	12,307.23	30	5	0.17	1	12,307.23	30.00	51,500.00	75,000.00	32.00	192.00
0.3	120	2010	568.0	26	14,768.68	36	5	0.14	1	14,768.68	36.00	51,500.00	90,000.00	38.00	228.00
0.4	120	2010	757.4	26	19,691.57	48	5	0.10	1	19,691.57	48.00	51,500.00	120,000.00	51.00	306.00
0.45	120	2010	852.0	26	22,153.01	54	5	0.09	1	22,153.01	54.00	51,500.00	135,000.00	57.00	342.00
0.5	120	2010	946.7	26	24,614.46	60	5	0.08	1	24,614.46	60.00	51,500.00	150,000.00	63.00	378.00
0.6	120	2010	1136.1	26	29,537.35	72	5	0.07	1	29,537.35	72.00	51,500.00	180,000.00	76.00	456.00
0.8	120	2010	1514.7	26	39,383.14	96	5	0.05	1	39,383.14	96.00	51,500.00	240,000.00	101.00	606.00
0.9	120	2010	1704.1	26	44,306.03	108	5	0.05	1	44,306.03	108.00	51,500.00	270,000.00	113.00	678.00
1.2	120	2010	2272.1	26	59,074.70	144	5	0.03	1	59,074.70	144.00	51,500.00	360,000.00	151.00	906.00
1.6	120	2010	3029.5	26	78,766.27	192	5	0.03	1	78,766.27	192.00	51,500.00	480,000.00	201.00	1,206.00
1.9	120	2010	3597.5	26	93,534.95	228	5	0.02	1	93,534.95	228.00	51,500.00	570,000.00	238.00	1,428.00
2.5	120	2010	4733.6	26	123,072.30	300	5	0.02	1	123,072.30	300.00	51,500.00	750,000.00	313.00	1,878.00
0.3	150	2010	710.0	26	18,460.85	45	5	0.11	1	18,460.85	45.00	51,500.00	112,500.00	47.00	282.00
0.4	150	2010	946.7	26	24,614.46	60	5	0.08	1	24,614.46	60.00	51,500.00	150,000.00	63.00	378.00
0.45	150	2010	1065.0	26	27,691.27	67.5	5	0.07	1	27,691.27	67.50	51,500.00	168,750.00	71.00	426.00
0.6	150	2010	1420.1	26	36,921.69	90	5	0.06	1	36,921.69	90.00	51,500.00	225,000.00	94.00	564.00
0.8	150	2010	1893.4	26	49,228.92	120	5	0.04	1	49,228.92	120.00	51,500.00	300,000.00	126.00	756.00
0.9	150	2010	2130.1	26	55,382.54	135	5	0.04	1	55,382.54	135.00	51,500.00	337,500.00	141.00	846.00
1.2	150	2010	2840.1	26	73,843.38	180	5	0.03	1	73,843.38	180.00	51,500.00	450,000.00	188.00	1,128.00
1.5	150	2010	3550.2	26	92,304.23	225	5	0.02	1	92,304.23	225.00	51,500.00	562,500.00	235.00	1,410.00
1.9	150	2010	4496.9	26	116,918.69	285	5	0.02	1	116,918.69	285.00	51,500.00	712,500.00	297.00	1,782.00
2.5	150	2010	5916.9	26	153,840.38	375	5	0.01	1	153,840.38	375.00	51,500.00	937,500.00	391.00	2,346.00
												Include Vat 7%		Total Cost	
MAX =												153,840.38	166955.20	1,335,642	
Min =												5,907.47	8666.99	69,336	

CABON FIBER

SPEC												
Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total(m ²)	Cost/Area(Bath/m ²)	Cost TFC(Bath)	Cost Epoxy(Bath)	Total Cost(Bath)
0.05	4.00	0.19	1.50	7.81	8.00	20.10	0.80	6.43	2,250.00	14,472.00	2,315.52	134,300.16
0.05	7.50	0.36	1.50	4.17	5.00	20.10	1.51	7.54	2,250.00	16,959.38	2,713.50	157,383.00
0.05	15.00	0.72	1.50	2.08	3.00	20.10	3.02	9.05	2,250.00	20,351.25	3,256.20	188,859.60
0.05	20.00	0.96	1.50	1.56	2.00	20.10	4.02	8.04	2,250.00	18,090.00	2,894.40	167,875.20
0.05	30.00	1.44	1.50	1.04	2.00	20.10	6.03	12.06	2,250.00	27,135.00	4,341.60	251,812.80

MAX = 251,812.80 BATH
MIN = 134,300.16 BATH

SPEC												
Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total(m ²)	Cost/Area(Bath/m ²)	Cost CFRP(Bath)	Cost Epoxy(Bath)	Total Cost(Bath)
0.12	5.0	0.60	1.50	2.50	3.00	20.10	1.01	3.02	3,000.00	9,045.00	1,055.25	80,802.00
0.12	6.0	0.72	1.50	2.08	3.00	20.10	1.21	3.62	3,000.00	10,854.00	1,266.30	96,962.40
0.12	8.0	0.96	1.50	1.56	2.00	20.10	1.61	3.22	3,000.00	9,648.00	1,125.60	86,188.80
0.12	10.0	1.20	1.50	1.25	2.00	20.10	2.01	4.02	3,000.00	12,060.00	1,407.00	107,736.00
0.12	12.0	1.44	1.50	1.04	2.00	20.10	2.41	4.82	3,000.00	14,472.00	1,688.40	129,283.20
0.12	15.0	1.80	1.50	0.83	1.00	20.10	3.02	3.02	3,000.00	9,045.00	1,055.25	80,802.00
0.14	6.0	0.84	1.50	1.79	2.00	20.10	1.21	2.41	3,000.00	7,236.00	844.20	64,641.60
0.14	9.0	1.26	1.50	1.19	2.00	20.10	1.81	3.62	3,000.00	10,854.00	1,266.30	96,962.40
0.14	12.0	1.68	1.50	0.89	1.00	20.10	2.41	2.41	3,000.00	7,236.00	844.20	64,641.60

MAX = 129,283.20 BATH
MIN = 64,641.60 BATH

******REMARK**

As Cabon (cm²) x Width
As Require (cm²) Input
Layer (N) As Require/As Cabon
Span Input
Area/1Span Width x Span
Area Total Area/1Span x Layer
Cost/Area(Bath/m²) Input
Total Cost Cost/Area x Area Total

DIFFERENT COST TFC AND CFRP			
MIN	TFC	134,300.16	
MIN	CFRP SIKKA	64,641.60	
	DIFF	2.08	

Summary

	Bridgh	As (cm ²)	Remark	Cost (Bath)	Remark	Installation	Remark
Steel	คลองกะจะ	5	30.00%	69,335.95	0.93		
Cabon Fiber		1.50		64,641.60			

5.3 หมายเลขสะพาน-ชื่อ ที่ตั้ง (Bridge ID. , Name and Location)

สป.4843:G212 - RC (คลองกะจะ)

ชนิดสะพาน (Bridge Type)

ชนิดผิวทาง (Type of surface)	Concrete Slab
จำนวนช่องจราจร (Nos. of traffic lanes)	2 ช่อง
จำนวนทางเท้า (Nos. of walkway)	2 ด้าน

รูปแบบโครงสร้างสะพาน/วัสดุ

โครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure)	RC.
โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (Substructure)	PC. PIER
โครงสร้างคอสสะพาน (Abutment Structure)	RC. Concrete

ขนาดของสะพาน

Bridge ID. , Name and Location	Nos.of span	Maximum span length	Structural length	Bridge width excluding walkway
สป.4843:G212 - RC คลองกะจะ	3	8	24	8

Rating Factor ก่อนการออกแบบ

01 **คัลลิ่งทาบ**
 $\phi_{cr} = 0.85$ $f_c' = 180 \text{ ksc}$ $f_y = 3000 \text{ ksc}$
 $\phi_{cr} = 0.8$ $f_c' = 210 \text{ ksc}$ $f_y = 3000 \text{ ksc}$

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	43.97	10.96	5.57	1.11	35.457	1.85	59.186
AASHTO lane load	43.97	10.96	5.57	1.11		1.85	
Thai Trucks(25 T)	43.97	10.96	6.01	1.03	25.673	1.71	42.854
1.3xHS20-44	43.97	10.96	7.24	0.85	35.457	1.42	59.186

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	30.14	5.50	3.15	1.50	48.058	2.51	80.219
AASHTO lane load	30.14	5.50	2.44	1.94		3.24	
Thai Trucks(25 T)	30.14	5.50	3.00	1.58	39.422	2.63	65.805
1.3xHS20-44	30.14	5.50	4.10	1.16	48.058	1.93	80.219

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	48.08	14.27	5.47	1.18	37.805	1.97	63.106
AASHTO lane load	48.08	14.27	4.31	1.50		2.50	
Thai Trucks(25 T)	48.08	14.27	4.97	1.30	32.507	2.17	54.261
1.3xHS20-44	48.08	14.27	7.11	0.91	37.805	1.52	63.106

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	43.34	18.07	9.18	0.30	9.6656	0.50	16.134
AASHTO lane load	43.34	18.07	7.09	0.39		0.65	
Thai Trucks(25 T)	43.34	18.07	8.33	0.33	8.3218	0.56	13.891
1.3xHS20-44	43.34	18.07	11.93	0.23	9.6656	0.39	16.134

ค่า Rating Factor for Typical Pier Column

Case categories	Axial			Rating Factor			
	Capacity Pn(ton)	DL Pn(ton)	LL Pn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	501.5	47.24	18.21	4.61	147.62	7.70	246.41
AASHTO lane load	501.5	47.24	13.94	6.03		10.06	
Thai Trucks(25 T)	501.5	47.24	16.50	5.09	127.28	8.50	212.46
1.3xHS20-44	501.5	47.24	23.67	3.55	147.62	5.92	246.41

Rating Factor ที่คาดว่าจะได้หลังการออกแบบ

01 คลองน้ำ

Øcr = 0.85 fc' = 180 ksc fy = 3000 ksc
 Øcr = 0.8 fc' = 210 ksc fy = 3000 ksc

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	48.50	10.96	5.57	1.32	42.099	2.20	70.273
AASHTO lane load	48.50	10.96	5.57	1.32		2.20	
Thai Trucks(25 T)	48.50	10.96	6.01	1.22	30.482	2.04	50.882
1.3xHS20-44	48.50	10.96	7.24	1.01	42.099	1.69	70.273

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	30.14	5.50	3.15	1.50	48.058	2.51	80.219
AASHTO lane load	30.14	5.50	2.44	1.94		3.24	
Thai Trucks(25 T)	30.14	5.50	3.00	1.58	39.422	2.63	65.805
1.3xHS20-44	30.14	5.50	4.10	1.16	48.058	1.93	80.219

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	48.08	14.27	5.47	1.18	37.805	1.97	63.106
AASHTO lane load	48.08	14.27	4.31	1.50		2.50	
Thai Trucks(25 T)	48.08	14.27	4.97	1.30	32.507	2.17	54.261
1.3xHS20-44	48.08	14.27	7.11	0.91	37.805	1.52	63.106

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	43.34	18.07	9.18	0.30	9.6656	0.50	16.134
AASHTO lane load	43.34	18.07	7.09	0.39		0.65	
Thai Trucks(25 T)	43.34	18.07	8.33	0.33	8.3218	0.56	13.891
1.3xHS20-44	43.34	18.07	11.93	0.23	9.6656	0.39	16.134

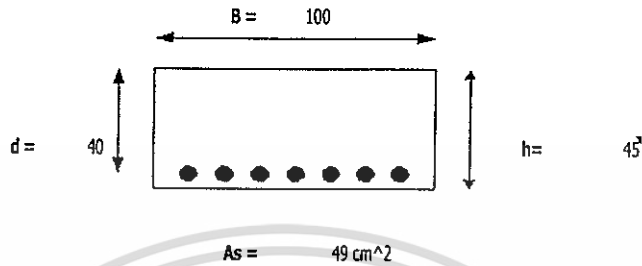
ค่า Rating Factor for Typical Pier Column

Case categories	Axial			Rating Factor			
	Capacity Pn(ton)	DL Pn(ton)	LL Pn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	501.5	47.24	18.21	4.61	147.62	7.70	246.41
AASHTO lane load	501.5	47.24	13.94	6.03		10.06	
Thai Trucks(25 T)	501.5	47.24	16.50	5.09	127.28	8.50	212.46
1.3xHS20-44	501.5	47.24	23.67	3.55	147.62	5.92	246.41

Design

Steel Plate

การคำนวณการเสริมกำลังด้วย Steel Plates ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC. SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์มีขนาดและคุณสมบัติตามนี้



รูปที่ 5.3.1 หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 240	ksc.
ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัด	= 40	cm.

คุณสมบัติของ Steel Plates

กำลังดึงที่จุดคราก	= 2,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 2,040,000	ksc.

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 10,960	kg-m
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 7,240	kg-m
ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการหลังเสริมกำลัง	= 48,500	kg-m

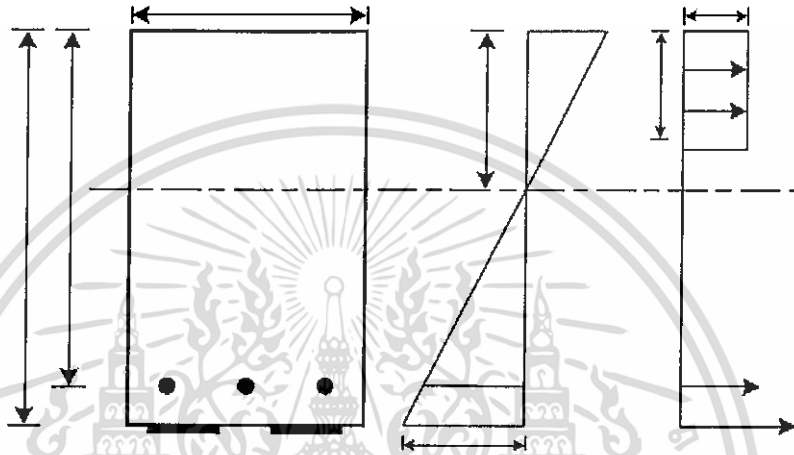
สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณ ไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดโดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.3.2 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $A_s = 0.5 \text{ cm}^2$

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 8.55 \text{ cm}$. สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่น Steel Plates

ได้ดังนี้

$$\epsilon_{sp} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) = 0.012789$$

หน่วยแรงดึงที่สอดคล้องกับหน่วยความเครียดที่เกิดขึ้น คือ

$$f_{sp} = \epsilon_{sp} E_s = 26,090.53 \text{ ksc.} > f_{sp,y} = 2,500 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_{sp} = 2,500 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงได้ดังนี้

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right) = 0.011035$$

$$f_s = \epsilon_s E_s = 22,511.58 \text{ ksc.} > f_y = 3,000 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_s = 3,000 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_{sp} f_{sp}}{0.85 f'_c \beta_1 b} = 8.55 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณได้พบว่าค่า c ที่ได้เหมือนจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้น คือ $c = 8.55 \text{ cm}$.

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัย โดย สามารถคำนวณได้จาก

สูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A_{sp} f_{sp} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 53,975.72 \text{ kg-m.}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ โดยที่ $\phi = 0.90$ สำหรับ โมเมนต์ ซึ่งจะได้ว่า $\phi M_n = 48,578.15 \text{ kg-m.} > M_{u(\text{require})} = 51,000 \text{ kg-m.}$



Design

Carbon Fiber

การเสริมกำลังด้วย CFRP ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC. SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 240	ksc.
ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด	= 40	cm.

คุณสมบัติของ CFRP

กำลังดึงสูงสุด	= 23,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 1,650,000	ksc.
ความเครียดที่กำลังดึงสูงสุด	= 0.015	

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 10,960	kg-m.
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 7,240	kg-m.
ความสามารถในการรับ โมเมนต์คดที่ต้องการหลังเสริมกำลัง	= 48,500	kg-m.

สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

ตรวจสอบว่าโครงสร้างสามารถเสริมกำลังได้หรือไม่ เนื่องจากการเสริมกำลังเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นมากเกินไป หากเกิดกรณีที่แผ่น CFRP เกิดความเสียหายหรือไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ โครงสร้างจะได้ไม่พังลงทันทีเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ค่าดังต่อไปนี้ มีค่าไม่เกิน ϕM_n ของหน้าตัดเดิม

$$1.2 M_{DL} + 0.85 M_{LL} = 19,306 \leq \phi M_n = 48,500 \text{ kg-m.} \quad \text{ใช้ได้}$$

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP เพื่อใช้ในการคำนวณ ในการนำค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP มาใช้ในการคำนวณจะต้องมีการปรับลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ตามคำแนะนำของ ACI ซึ่งในกรณีนี้ กำหนดให้เท่ากับ 0.85 หรือ $C_E = 0.85$ จะได้ว่า

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 19,975 \text{ ksc.}$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* = 0.01275$$

ในการเสริมกำลังโดยใช้ CFRP จำเป็นต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial & error) โดยเริ่มต้น จะสมมติจำนวนและขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ต้องใช้ในการเสริมกำลัง ในที่นี้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$\text{ดังนั้นพื้นที่ของ CFRP ทั้งหมด} \quad A_f = n t_f w_f = 0.15 \text{ cm.}^2$$

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณค่าความเครียดที่ผิวล่างของพื้นสะพาน ขณะที่ติดตั้งแผ่น CFRP เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่กำหนดให้หน้าตัดเป็นแบบ Crack Section โดยใช้หลักการแปลงหน้าตัด เพื่อหาหน่วยแรงดัดที่ผิวล่างค่าโมดูลัสการยึดหยุ่นของคอนกรีตหาได้ดังนี้

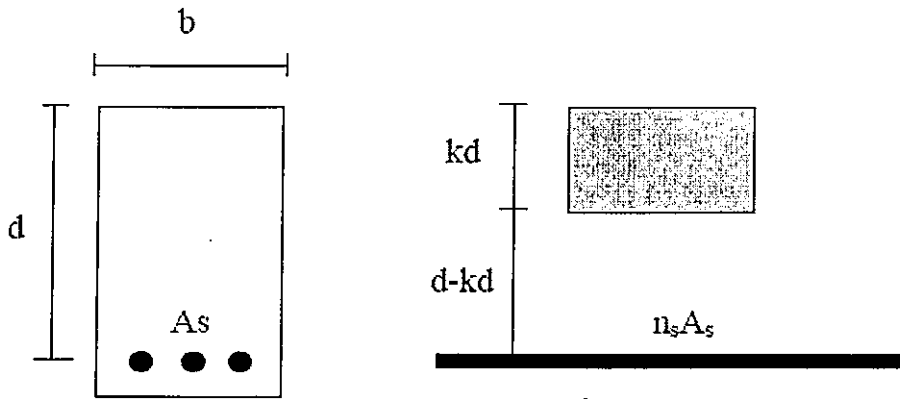
$$E_c = 15,200 \sqrt{f'_c} = 235,477.39 \text{ ksc.}$$

แปลงหน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดัดเป็นคอนกรีตโดยใช้ค่า Modular Ratio

$$n_s = E_s / E_c = 9.49$$

ดังนั้นพื้นที่ของเหล็กเมื่อแปลงหน้าตัดแล้วจะเท่ากับ

$$A_{s \pm n} = n_s A_s = 465.02 \text{ cm.}^2$$



รูปที่ 5.3.3 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-n_s A_s \pm \sqrt{(n_s A_s)^2 + 2bdn_s A_s}}{b}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้

$$kd = 15.19$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{12} b (kd)^3 + b(kd) \left(\frac{kd}{2}\right)^2 = \frac{1}{8} b (kd)^3 = 116,829.39 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กหน้าตัดแปลง

$$I_s = n A_s (d - kd)^2 = 286,234.60 \text{ cm}^4$$

ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัดแปลง

$$I_{cr} = I_c + I_s = 403,063.97 \text{ cm}^4$$

คำนวณหน่วยแรงดัดที่ผิวล่างของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

$$\sigma_b = \frac{MD_L (h - kd)}{I_{cr}} = 81.06 \text{ ksc.}$$

จากหน่วยแรงดัดที่คำนวณได้สามารถนำไปหาค่าความเครียดได้ ดังนี้

$$\epsilon_{bi} = \sigma_b / E_c = 0.000377086$$

ขั้นตอนที่ 4

คำนวณหาค่า Factor ในการยึดเกาะของแผ่น CFRP โดย ACI ได้ให้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$K_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360,000}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f \leq 180,000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90,000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f > 180,000 \end{cases}$$

สำหรับค่า n จะหมายถึงจำนวนชั้นที่ทำการติดแผ่น CFRP ซึ่งในที่นี้จะมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากติดเพียง 1 ชั้น นอกจากนี้หน่วยที่ใช้สำหรับค่า E_f มีหน่วยเป็น N/mm^2 ดังนั้น เริ่มต้นจะคำนวณค่าของ $nE_f t_f$ ก่อน โดยแทนค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้ $n = 3$, $E_f = 152,000 \text{ N/mm}^2$ และ $t_f = 0.48$ จะได้ว่า

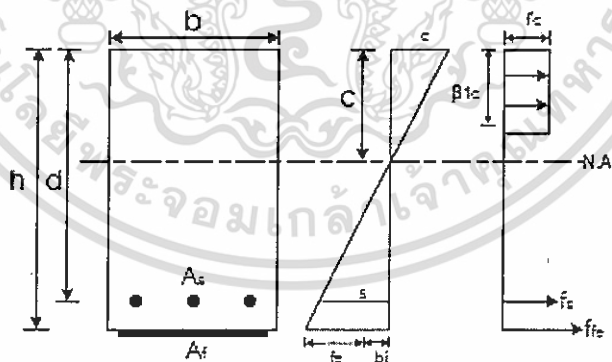
$$nE_f t_f = 151,200 < 180,000 \text{ N/mm}^2$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$K_m = 0.75817$$

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับ โมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด โดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.3.4 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 8.57 \text{ cm}$. พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq K_m \varepsilon_{fu}$$

สำหรับค่า ϵ_{cu} หมายถึง ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตโดยทั่วไปเท่ากับ 0.003 และหากพิจารณาจากสมการดังกล่าวแล้วพบว่าค่า ϵ_{fs} จะต้องไม่เกินค่า $K_m \epsilon_{fs}$ เนื่องจากป้องกันการหลุดร่อนของแผ่น CFRP กับโครงสร้าง เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการแล้วจะได้ว่า

$$\epsilon_{fs} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \epsilon_{bi} = 0.012752625$$

ดังนั้นจะได้ว่า ϵ_{fs} ซึ่งจากค่าความเครียดที่ได้สามารถนำไปหาค่าหน่วยแรงที่สอดคล้องกับความเครียดที่คำนวณได้ดังนี้

$$f_{fs} = E_f \epsilon_{fs} = 10,150 \text{ ksc.}$$

จากนั้นสามารถนำค่าความเครียดประสิทธิผลใน CFRP ที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงโดยอาศัยสามเหลี่ยมคล้าย ได้ดังนี้

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fs} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right) = 0.008665253$$

ซึ่งจากค่าที่ได้สามารถเปลี่ยนเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดึงได้ดังนี้

$$f_s = E_s \epsilon_s = 17,677.12 > 3,000 \text{ ksc.}$$

แสดงว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมากกว่าหน่วยแรงดึงที่จุดกลางของเหล็กเสริม ดังนั้น $f_s = 3,000 \text{ ksc.}$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fs}}{0.85 f'_c \beta_1 b} = 8.57 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณได้พบว่าค่า c ที่ได้ตรงจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้นคือ $c = 8.57 \text{ cm.}$

ขั้นตอนที่ 6

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัยโดย สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fs} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

โดยที่ Ψ_f คือ ตัวคูณลดกำลังโดย ACI กำหนดให้เท่ากับ 0.85 ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 53,984.07 \text{ kg-m.}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ต่อไป อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องหาค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับ โมเมนต์ก่อน โดย ACI ได้แนะนำสูตรสำหรับหาค่าดังกล่าวไว้ดังนี้

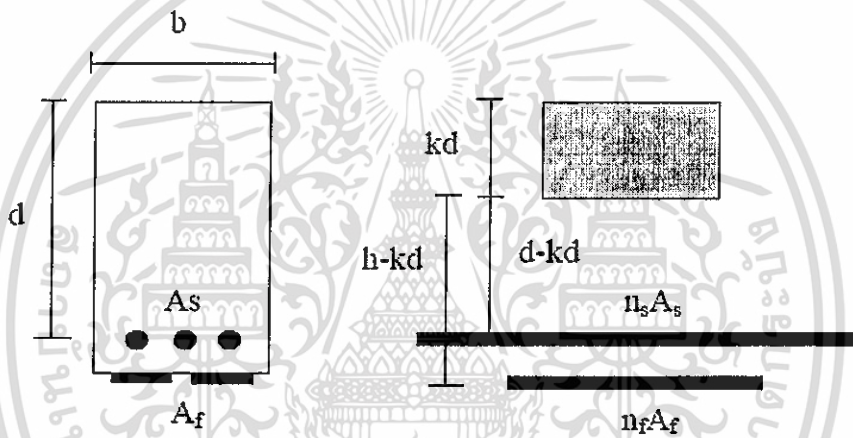
$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{for } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.70 + \frac{0.20(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{for } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.70 & \text{for } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

เมื่อพิจารณาจากค่า $\varepsilon_s = 0.0086$ ที่คำนวณได้พบว่ามามีค่ามากกว่า 0.005 ดังนั้นค่า $\phi = 0.90$ ซึ่งจะได้ว่า

$$\phi M_n = 48,585.66 > M_{u(\text{requires})} = 48,500 \text{ kg-m.}$$

ขั้นตอนที่ 7

ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงและแผ่น CFRP ในสภาวะใช้งาน โดยการพิจารณาหน้าตัดเป็นแบบ Crack Section



รูปที่ 5.3.5 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ทำการแปลงพื้นที่หน้าตัดของ CFRP ให้เป็นคอนกรีตโดยการหาค่า Modular Ratio ซึ่งจะได้ว่า

$$n_f = E_f / E_c = 4.88$$

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-BB \pm \sqrt{BB^2 - 4 \cdot AA \cdot CC}}{2 \cdot AA}$$

โดยที่ $AA = b/2$

$$BB = n_s A_s + n_f A_f$$

$$CC = -(n_s A_s d + n_f A_f h)$$

$$kd = 15.20 \text{ cm.}$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{3} b(kd)^3 = 117,060.27 \text{ cm}^4$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กรับแรงดึง

$$I_s = n_s A_s (d - kd)^2 = 286,003.90 \text{ cm}^4$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่น CFRP

$$I_f = n_f A_f (h - kd)^2 = 650.66 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัด

$$I_{total} = I_c + I_s + I_f = 403,714.83 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ดัดที่กระทำต่อโครงสร้างในสภาวะใช้งาน

$$M_s = M_{DL} + M_{LL} = 18,200 \text{ kg-m.}$$

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึง

$$f_{s,s} = n_s \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) (h - kd)} = 93.76045 \text{ ksc}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{s,s} < 0.80 f_y$ จะได้ว่า $0.80 f_y = 2,400 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{s,s} < 0.80 f_y$ ใช้ได้

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ที่สภาวะใช้งาน

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{h - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f = 5,402.93 \text{ ksc.}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{f,s} < 0.55 f_{tu}$ จะได้ว่า $0.55 f_{tu} = 12,925 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{f,s} < 0.55 f_{tu}$ ใช้ได้

COST

STEEL PLATE

Size			Weight (Kg)	Cost/Weight(Bath/Kg)	Cost/Page(Bath/Page)	As steel(cm2)	As Require(cm2)	N(Page)	N Use (page)	Total Cost(Bath)	As Steel Plate Use(cm^2)	Mn Design(Kg-m)	Tsp(Kg)	Bolt(N)	Cost Bolt(Bath)
Thin(cm)	Width(cm)	Long(cm)													
0.12	120	2010	227.2	26	5,907.47	14.4	0.5	0.03	1	5,907.47	14.40	48,500.00	36,000.00	16.00	96.00
0.15	120	2010	284.0	26	7,384.34	18	0.5	0.03	1	7,384.34	18.00	48,500.00	45,000.00	19.00	114.00
0.2	120	2010	378.7	26	9,845.78	24	0.5	0.02	1	9,845.78	24.00	48,500.00	60,000.00	26.00	156.00
0.25	120	2010	473.4	26	12,307.23	30	0.5	0.02	1	12,307.23	30.00	48,500.00	75,000.00	32.00	192.00
0.3	120	2010	568.0	26	14,768.68	36	0.5	0.01	1	14,768.68	36.00	48,500.00	90,000.00	38.00	228.00
0.4	120	2010	757.4	26	19,691.57	48	0.5	0.01	1	19,691.57	48.00	48,500.00	120,000.00	51.00	306.00
0.45	120	2010	852.0	26	22,153.01	54	0.5	0.01	1	22,153.01	54.00	48,500.00	135,000.00	57.00	342.00
0.5	120	2010	946.7	26	24,614.46	60	0.5	0.01	1	24,614.46	60.00	48,500.00	150,000.00	63.00	378.00
0.6	120	2010	1136.1	26	29,537.35	72	0.5	0.01	1	29,537.35	72.00	48,500.00	180,000.00	76.00	456.00
0.8	120	2010	1514.7	26	39,383.14	96	0.5	0.01	1	39,383.14	96.00	48,500.00	240,000.00	101.00	606.00
0.9	120	2010	1704.1	26	44,306.03	108	0.5	0.00	1	44,306.03	108.00	48,500.00	270,000.00	113.00	678.00
1.2	120	2010	2272.1	26	59,074.70	144	0.5	0.00	1	59,074.70	144.00	48,500.00	360,000.00	151.00	906.00
1.6	120	2010	3029.5	26	78,766.27	192	0.5	0.00	1	78,766.27	192.00	48,500.00	480,000.00	201.00	1,206.00
1.9	120	2010	3597.5	26	93,534.95	228	0.5	0.00	1	93,534.95	228.00	48,500.00	570,000.00	238.00	1,428.00
2.5	120	2010	4733.6	26	123,072.30	300	0.5	0.00	1	123,072.30	300.00	48,500.00	750,000.00	313.00	1,878.00
0.3	150	2010	710.0	26	18,460.85	45	0.5	0.01	1	18,460.85	45.00	48,500.00	112,500.00	47.00	282.00
0.4	150	2010	946.7	26	24,614.46	60	0.5	0.01	1	24,614.46	60.00	48,500.00	150,000.00	63.00	378.00
0.45	150	2010	1065.0	26	27,691.27	67.5	0.5	0.01	1	27,691.27	67.50	48,500.00	168,750.00	71.00	426.00
0.6	150	2010	1420.1	26	36,921.69	90	0.5	0.01	1	36,921.69	90.00	48,500.00	225,000.00	94.00	564.00
0.8	150	2010	1893.4	26	49,228.92	120	0.5	0.00	1	49,228.92	120.00	48,500.00	300,000.00	126.00	756.00
0.9	150	2010	2130.1	26	55,382.54	135	0.5	0.00	1	55,382.54	135.00	48,500.00	337,500.00	141.00	846.00
1.2	150	2010	2840.1	26	73,843.38	180	0.5	0.00	1	73,843.38	180.00	48,500.00	450,000.00	188.00	1,128.00
1.5	150	2010	3550.2	26	92,304.23	225	0.5	0.00	1	92,304.23	225.00	48,500.00	562,500.00	235.00	1,410.00
1.9	150	2010	4496.9	26	116,918.69	285	0.5	0.00	1	116,918.69	285.00	48,500.00	712,500.00	297.00	1,782.00
2.5	150	2010	5916.9	26	153,840.38	375	0.5	0.00	1	153,840.38	375.00	48,500.00	937,500.00	391.00	2,346.00
												Include Vat 7%		Total Cost	
MAX =												153,840.38	166955.20	1,335,642	
Min =												5,907.47	8666.99	69,336	

CABON FIBER

SPEC	Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total (m ²)	Cost/Area (Bath/m ²)	Cost TFC (Bath)	Cost Epoxy (Bath)	Total Cost (Bath)
0.05	4.00		0.19	0.15	0.78	1.00	20.10	0.80	0.80	2,250.00	1,899.00	289.44	16,787.52
0.05	7.50		0.36	0.15	0.42	1.00	20.10	1.51	1.51	2,250.00	3,391.88	542.70	31,476.60
0.05	15.00		0.72	0.15	0.21	1.00	20.10	3.02	3.02	2,250.00	6,783.75	1,085.40	62,953.20
0.05	30.00		1.44	0.15	0.10	1.00	20.10	6.03	6.03	2,250.00	9,045.00	1,447.20	83,937.60

MAX = 125,906.40 BATH
MIN = 16,787.52 BATH

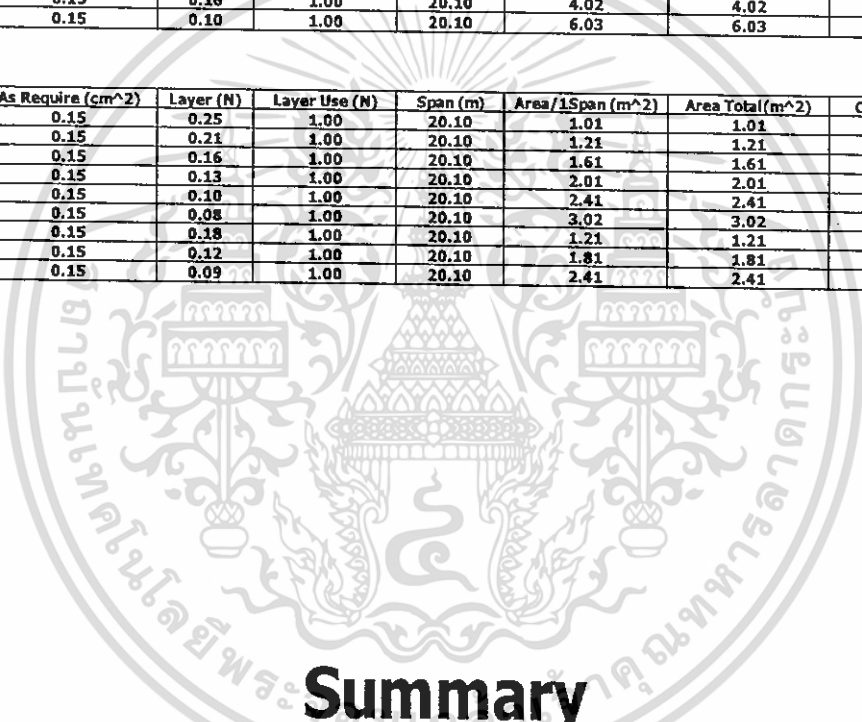
SPEC	Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total (m ²)	Cost/Area (Bath/m ²)	Cost CFRP (Bath)	Cost Epoxy (Bath)	Total Cost (Bath)
0.12	5.0		0.60	0.15	0.25	1.00	20.10	1.01	1.01	3,000.00	3,015.00	351.75	26,934.00
0.12	6.0		0.72	0.15	0.21	1.00	20.10	1.21	1.21	3,000.00	3,618.00	422.10	32,320.80
0.12	8.0		0.96	0.15	0.16	1.00	20.10	1.61	1.61	3,000.00	4,824.00	562.80	43,094.40
0.12	10.0		1.20	0.15	0.13	1.00	20.10	2.01	2.01	3,000.00	6,030.00	703.50	53,868.00
0.12	12.0		1.44	0.15	0.10	1.00	20.10	2.41	2.41	3,000.00	7,236.00	844.20	64,641.60
0.12	15.0		1.80	0.15	0.08	1.00	20.10	3.02	3.02	3,000.00	9,045.00	1,055.25	80,802.00
0.14	6.0		0.84	0.15	0.18	1.00	20.10	1.21	1.21	3,000.00	3,618.00	422.10	32,320.80
0.14	9.0		1.26	0.15	0.12	1.00	20.10	1.81	1.81	3,000.00	5,427.00	633.15	48,481.20
0.14	12.0		1.68	0.15	0.09	1.00	20.10	2.41	2.41	3,000.00	7,236.00	844.20	64,641.60

MAX = 80,802.00 BATH
MIN = 26,934.00 BATH

DIFFERENT COST TFC AND CFRP			
MIN	TFC	16,787.52	
MIN	CFRP SIKA	26,934.00	
	DIFF	0.62	

******REMARK**

As Cabon (cm²) x Width
As Require (cm²) Input
Layer (N) As Require/As Cabon
Span Input
Area/1Span Width x Span
Area Total Area/1Span x Layer
Cost/Area (Bath/m²) Input
Total Cost Cost/Area x Area Total



Summary

	Bridgh	As (cm ²)	Remark	Cost (Bath)	Remark	Installation	Remark
Steel	คลองกะทะ	0.5	30.00%	69,335.95	0.39		
Cabon Fiber		0.15		26,934.00			

5.4 หมายเลขสะพาน-ชื่อ ที่ตั้ง (Bridge ID. , Name and Location)

สป.4844:G213 - RC (คลองเจ๊ก)

ชนิดสะพาน (Bridge Type)

ชนิดผิวทาง (Type of surface)	Concrete Slab
จำนวนช่องจราจร (Nos. of traffic lanes)	2 ช่อง
จำนวนทางเท้า (Nos. of walkway)	2 ด้าน

รูปแบบโครงสร้างสะพาน/วัสดุ

โครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure)	RC.
โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (Substructure)	PC. PIER
โครงสร้างคอสสะพาน (Abutment Structure)	RC.Concrete

ขนาดของสะพาน

Bridge ID. , Name and Location	Nos.of span	Maximum span length	Structural length	Bridge width excluding walkway
สป.4844:G213 - RC คลองเจ๊ก	3	5	15	7

Rating Factor ก่อนการออกแบบ

01 คสลจก

girder pier $\phi_{cr} = 0.85$ $f_c = 210$ ksc $f_y = 3000$ ksc
 slab $\phi_{cr} = 0.8$ $f_c = 337.5$ ksc $f_y = 3000$ ksc

ค่าRating Factor for Typical Slab

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	22.68	4.09	4.32	0.90	28.917	1.51	48.269
AASHTO lane load	22.68	4.09	4.22	0.93		1.54	
Thai Trucks(25 T)	22.68	4.09	4.49	0.87	21.734	1.45	36.279
1.3xHS20-44	22.68	4.09	5.62	0.70	28.917	1.16	48.269

ค่าRating Factor for Typical Slab

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	25.56	3.30	3.95	1.17	37.594	1.96	62.753
AASHTO lane load	25.56	3.30	3.43	1.35		2.26	
Thai Trucks(25 T)	25.56	3.30	4.16	1.12	27.914	1.86	46.595
1.3xHS20-44	25.56	3.30	5.14	0.90	37.594	1.51	62.753

ค่าRating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	32.03	4.47	3.66	1.81	57.932	3.02	96.702
AASHTO lane load	32.03	4.47	3.05	2.17		3.63	
Thai Trucks(25 T)	32.03	4.47	3.86	1.72	42.898	2.86	71.607
1.3xHS20-44	32.03	4.47	4.76	1.39	57.932	2.32	96.702

ค่าRating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	34.79	1.66	11.56	0.70	22.547	1.18	37.637
AASHTO lane load	34.79	1.66	9.60	0.85		1.42	
Thai Trucks(25 T)	34.79	1.66	9.01	0.90	22.594	1.51	37.714
1.3xHS20-44	34.79	1.66	15.03	0.54	22.547	0.90	37.637

ค่าRating Factor for Typical Pier Column

Case categories	Axial			Rating Factor			
	Capacity Pn(ton)	DL Pn(ton)	LL Pn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	344.5	17.59	10.11	6.39	204.33	10.66	341.07
AASHTO lane load	344.5	17.59	8.96	7.20		12.03	
Thai Trucks(25 T)	344.5	17.59	10.81	5.97	149.27	9.97	249.16
1.3xHS20-44	344.5	17.59	13.14	4.91	204.33	8.20	341.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ 77 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rating Factor ที่คาดว่าจะได้หลังการออกแบบ

01 คลองรถไฟ
 girder pier $\phi_{cr} = 0.85$ $f_c = 210$ ksc $f_y = 3000$ ksc
 slab $\phi_{cr} = 0.8$ $f_c = 337.5$ ksc $f_y = 3000$ ksc

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	29.45	4.09	4.32	1.30	41.716	2.18	69.634
AASHTO lane load	29.45	4.09	4.22	1.33		2.23	
Thai Trucks(25 T)	29.45	4.09	4.49	1.25	31.354	2.09	52.337
1.3xHS20-44	29.45	4.09	5.62	1.00	41.716	1.67	69.634

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	25.56	3.30	3.95	1.17	37.594	1.96	62.753
AASHTO lane load	25.56	3.30	3.43	1.35		2.26	
Thai Trucks(25 T)	25.56	3.30	4.16	1.12	27.914	1.86	46.595
1.3xHS20-44	25.56	3.30	5.14	0.90	37.594	1.51	62.753

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	32.03	4.47	3.66	1.81	57.932	3.02	96.702
AASHTO lane load	32.03	4.47	3.05	2.17		3.63	
Thai Trucks(25 T)	32.03	4.47	3.86	1.72	42.898	2.86	71.607
1.3xHS20-44	32.03	4.47	4.76	1.39	57.932	2.32	96.702

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	34.79	1.66	11.56	0.70	22.547	1.18	37.637
AASHTO lane load	34.79	1.66	9.60	0.85		1.42	
Thai Trucks(25 T)	34.79	1.66	9.01	0.90	22.594	1.51	37.714
1.3xHS20-44	34.79	1.66	15.03	0.54	22.547	0.90	37.637

ค่า Rating Factor for Typical Pier Column

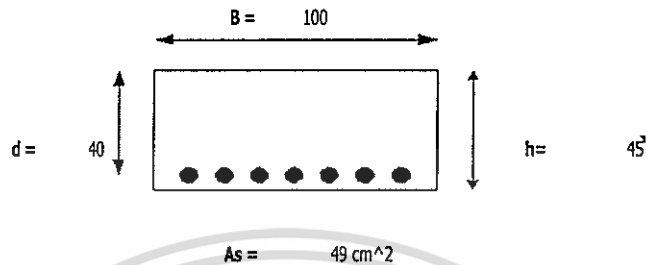
Case categories	Axial			Rating Factor			
	Capacity Pn(ton)	DL Pn(ton)	LL Pn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	344.5	17.59	10.11	6.39	204.33	10.66	341.07
AASHTO lane load	344.5	17.59	8.96	7.20		12.03	
Thai Trucks(25 T)	344.5	17.59	10.81	5.97	149.27	9.97	249.16
1.3xHS20-44	344.5	17.59	13.14	4.91	204.33	8.20	341.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design

Steel Plate

การคำนวณการเสริมกำลังด้วย Steel Plates ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC. SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์มีขนาดและคุณสมบัติตามนี้



รูปที่ 5.4.1 หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 340	ksc.
ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัด	= 29	cm.

คุณสมบัติของ Steel Plates

กำลังดึงที่จุดคราก	= 2,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 2,040,000	ksc.

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 4,090	kg-m.
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 5,620	kg-m.
ความสามารถในการรับโมเมนต์คัดที่ต้องการหลังเสริมกำลัง	= 29,450	kg-m.

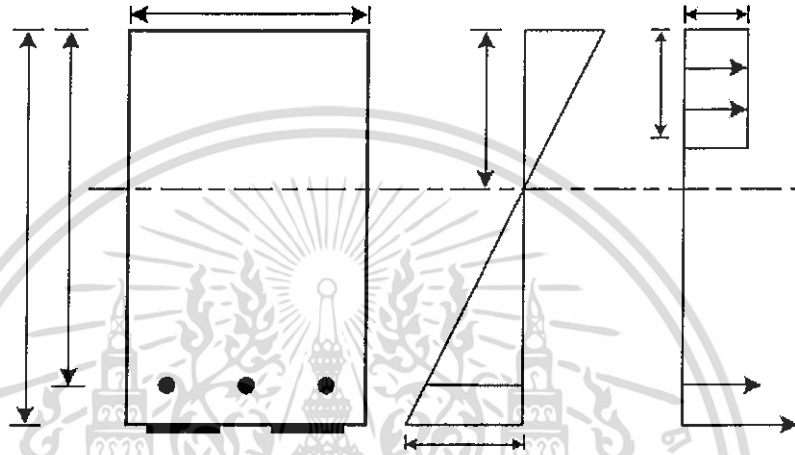
สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์คดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด โดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.4.2 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $A_s = 6.3 \text{ cm}^2$

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 4.83 \text{ cm}$. สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่น Steel Plates

ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) = 0.018118$$

หน่วยแรงดึงที่สอดคล้องกับหน่วยความเครียดที่เกิดขึ้น คือ

$$f_{sp} = \varepsilon_{sp} E_s = 36,960.75 \text{ ksc.} > f_{sp,y} = 2,500 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_{sp} = 2,500 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงได้ดังนี้

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right) = 0.015012$$

$$f_s = \varepsilon_s E_s = 30,625.34 \text{ ksc.} > f_y = 3,000 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_s = 3,000 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_{sp} f_{sp}}{0.85 f'_c \beta_2 b} = 4.83 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณได้พบว่าค่า c ที่ได้เหมือนจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้น คือ $c = 4.83 \text{ cm}$.

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัย โดย สามารถคำนวณได้จาก

สูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) + A_{sp} f_{sp} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2}\right)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 32,760.39 \text{ kg-m.}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ โดยที่ $\phi = 0.90$ สำหรับ โมเมนต์ ซึ่งจะได้ว่า $\phi M_n = 29,484.35 \text{ kg-m.} > M_{u(\text{require})} = 29,450 \text{ kg-m.}$



Design

Carbon Fiber

การเสริมกำลังด้วย CFRP ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC. SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 340	ksc.
ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด	= 29	cm.

คุณสมบัติของ CFRP

กำลังดึงสูงสุด	= 23,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 1,650,000	ksc.
ความเครียดที่กำลังดึงสูงสุด	= 0.015	

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 4,090	kg-m.
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 5,620	kg-m.
ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการหลังเสริมกำลัง	= 29,450	kg-m.

สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

ตรวจสอบว่าโครงสร้างสามารถเสริมกำลังได้หรือไม่ เนื่องจากการเสริมกำลังเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นมากเกินไป หากเกิดกรณีที่แผ่น CFRP เกิดความเสียหายหรือไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ โครงสร้างจะได้ไม่พังลงทันทีเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ค่าดังต่อไปนี้ มีค่าไม่เกิน ϕM_n ของหน้าตัดเดิม

$$1.2 M_{DL} + 0.85 M_{LL} = 9,685 \leq \phi M_n = 29,450 \text{ kg-m. ใช้ได้}$$

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP เพื่อใช้ในการคำนวณ ในการนำค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP มาใช้ในการคำนวณจะต้องมีการปรับลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ตามคำแนะนำของ ACI ซึ่งในกรณีนี้ กำหนดให้เท่ากับ 0.85 หรือ $C_E = 0.85$ จะได้ว่า

$$f_{fu} = C_E f_u^* = 19,975 \text{ ksc.}$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* = 0.01275$$

ในการเสริมกำลังโดยใช้ CFRP จำเป็นต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial & error) โดยเริ่มต้น จะสมมติจำนวนและขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ต้องใช้ในการเสริมกำลัง ในที่นี้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$\text{ดังนั้นพื้นที่ของ CFRP ทั้งหมด } A_f = n t_f w_f = 1.9 \text{ cm.}^2$$

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณค่าความเครียดที่ผิวล่างของพื้นสะพาน ขณะที่ติดตั้งแผ่น CFRP เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่กำหนดให้หน้าตัดเป็นแบบ Crack Section โดยใช้หลักการแปลงหน้าตัด เพื่อหาหน่วยแรงดัดที่ผิวล่าง ค่าโมดูลัสการยึดหยุ่นของคอนกรีตหาได้ดังนี้

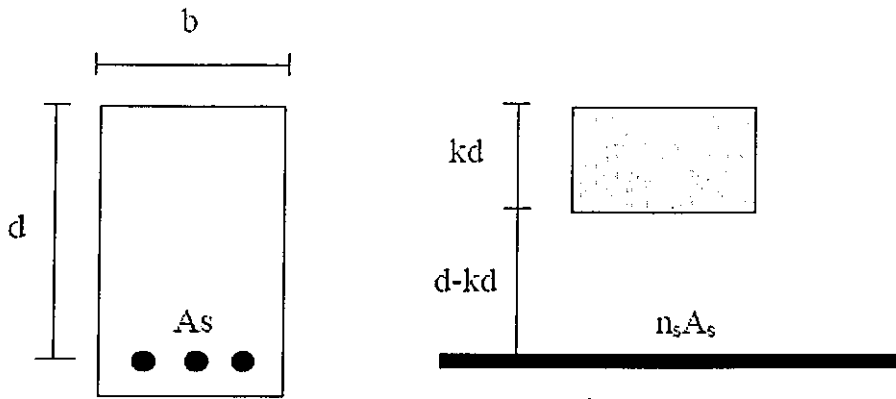
$$E_c = 15,200 \sqrt{f_c'} = 280,274.15 \text{ ksc.}$$

แปลงหน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดัดเป็นคอนกรีต โดยใช้ค่า Modular Ratio

$$n_s = E_s / E_c = 9.49$$

ดังนั้นพื้นที่ของเหล็กเมื่อแปลงหน้าตัดแล้วจะเท่ากับ

$$A_{s_{tr}} = n_s A_s = 325.51 \text{ cm.}^2$$



รูปที่ 5.4.3 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-n_s A_s \pm \sqrt{(n_s A_s)^2 + 2bdn_s A_s}}{b}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้

$$kd = 10.87$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{12} b (kd)^3 + b(kd) \left(\frac{kd}{2}\right)^2 = \frac{1}{3} b (kd)^3 = 42,812.18 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กหน้าตัดแปลง

$$I_s = n A_s (d - K_d)^2 = 106,994.69 \text{ cm}^4$$

ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัดแปลง

$$I_{cr} = I_c + I_s = 149,806.88 \text{ cm}^4$$

คำนวณหน่วยแรงดัดที่ผิวล่างของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

$$\sigma_b = \frac{MDL (h - kd)}{I_{cr}} = 63.15 \text{ ksc.}$$

จากหน่วยแรงดัดที่คำนวณได้สามารถนำไปหาค่าความเครียดได้ ดังนี้

$$\epsilon_{bt} = \sigma_b / E_c = 0.000293771$$

ขั้นตอนที่ 4

คำนวณค่า Factor ในการยึดเกาะของแผ่น CFRP โดย ACI ได้ให้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$K_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360,000}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f \leq 180,000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90,000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f > 180,000 \end{cases}$$

สำหรับค่า n จะหมายถึงจำนวนชั้นที่ทำการติดแผ่น CFRP ซึ่งในที่นี้จะมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากติดเพียง 1 ชั้น นอกจากนี้หน่วยที่ใช้สำหรับค่า E_f มีหน่วยเป็น $N/mm.^2$ ดังนั้น เริ่มต้นจะคำนวณค่าของ $nE_f t_f$ ก่อนโดยแทนค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้ $n = 3, E_f = 152,000 N/mm.^2$ และ $t_f = 0.48$ จะได้ว่า

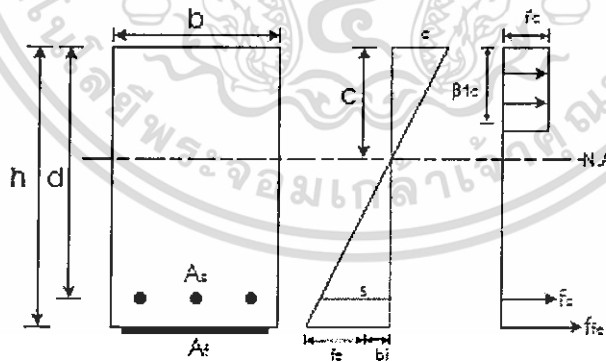
$$nE_f t_f = 151,200 < 180,000 \text{ N/mm.}^2$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$K_m = 0.75817$$

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับ โมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด โดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.4.4 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 4.97 \text{ cm}$. พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประลัยที่ผลที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq K_m \varepsilon_{fu}$$

สำหรับค่า ϵ_{cu} หมายถึง ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีต โดยทั่วไปเท่ากับ 0.003 และหากพิจารณาจากสมการดังกล่าวแล้วพบว่าค่า ϵ_{fs} จะต้องไม่เกินค่า $K_m \epsilon_{fs}$ เนื่องจากป้องกันการหลุดร่อนของแผ่น CFRP กับโครงสร้าง เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการแล้วจะได้ว่า

$$\epsilon_{fs} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \epsilon_{bi} = 0.0175231$$

ดังนั้นจะได้ว่า ϵ_{fs} ซึ่งจากค่าความเครียดที่ได้สามารถนำไปหาค่าหน่วยแรงที่สอดคล้องกับความเครียดที่คำนวณได้ดังนี้

$$f_{fs} = E_f \epsilon_{fs} = 10,150 \text{ ksc.}$$

จากนั้นสามารถนำค่าความเครียดประสิทธิผลใน CFRP ที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงโดยอาศัยสามเหลี่ยมคล้าย ได้ดังนี้

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fs} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right) = 0.008244896$$

ซึ่งจากค่าที่ได้สามารถเปลี่ยนเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดึงได้ดังนี้

$$f_s = E_s \epsilon_s = 16,819.59 > 3,000 \text{ ksc.}$$

แสดงว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมากกว่าหน่วยแรงดึงที่จุดกลางของเหล็กเสริม ดังนั้น $f_s = 3,000 \text{ ksc.}$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fs}}{0.85 f'_c \beta_1 b} = 4.97 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณได้พบว่าค่า c ที่ได้ตรงจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้นคือ $c = 4.97 \text{ cm.}$

ขั้นตอนที่ 6

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัย โดย สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fs} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

โดยที่ Ψ_f คือ ตัวคูณลดกำลัง โดย ACI กำหนดให้เท่ากับ 0.85 ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 32,892.61 \text{ kg-m}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ต่อไป อย่างไรก็ตาม

จำเป็นต้องหาค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับ โมเมนต์ก่อน โดย ACI ได้แนะนำสูตรสำหรับหาค่าดังกล่าวไว้ดังนี้

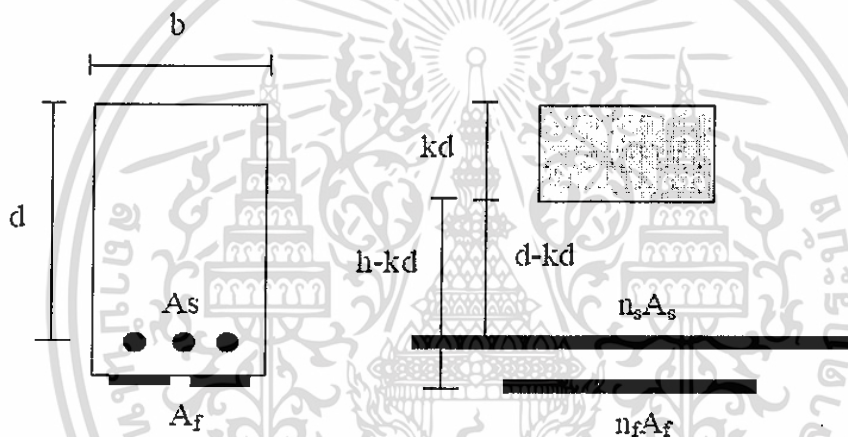
$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{for } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.70 + \frac{0.20(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{for } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.70 & \text{for } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

เมื่อพิจารณาจากค่า $\varepsilon_s = 0.00824$ ที่คำนวณได้พบว่ามีความมากกว่า 0.005 ดังนั้นค่า $\phi = 0.90$ ซึ่งจะได้ว่า

$$\phi M_n = 29,603.35 > M_u(\text{requires}) = 29,450 \text{ kg-m.}$$

ขั้นตอนที่ 7

ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงและแผ่น CFRP ในสภาวะใช้งาน โดยการพิจารณาหน้าตัดเป็นแบบ Crack Section



รูปที่ 5.4.5 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ทำการแปลงพื้นที่หน้าตัดของ CFRP ให้เป็นคอนกรีตโดยการหาค่า Modular Ratio ซึ่งจะได้ว่า

$$n_f = E_f / E_c = 4.88$$

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-BB \pm \sqrt{BB^2 - 4 \cdot AA \cdot CC}}{2 \cdot AA}$$

โดยที่ $AA = b/2$

$$BB = n_s A_s + n_f A_f$$

$$CC = -(n_s A_s d + n_f A_f h)$$

$$kd = 11.02 \text{ cm.}$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{3} b (kd)^3 = 44,609.11 \text{ cm}^4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กรับแรงดึง

$$I_s = n_s A_s (d - kd)^2 = 105,231.56 \text{ cm}^4$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่น CFRP

$$I_f = n_f A_f (h - kd)^2 = 4,901.01 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัด

$$I_{total} = I_c + I_s + I_f = 154,741.67 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ดัดที่กระทำต่อโครงสร้างในสภาวะใช้งาน

$$M_s = M_{DL} + M_{LL} = 9,710 \text{ kg-m.}$$

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึง

$$f_{s,s} = n_s \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) (h - kd)} = 55.9802 \text{ ksc}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{s,s} < 0.80 f_y$ จะได้ว่า $0.80 f_y = 2,400 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{s,s} < 0.80 f_y$ ใช้ได้

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ที่สภาวะใช้งาน

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{h - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f = 3,374.135 \text{ ksc.}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{f,s} < 0.55 f_u$ จะได้ว่า $0.55 f_u = 12,925 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{f,s} < 0.55 f_u$ ใช้ได้

COST

STEEL PLATE

Size			Weight (Kg)	Cost/Weight(Bath/Kg)	Cost/Page(Bath/Page)	As steel(cm2)	As Require(cm2)	N(Page)	N Use (page)	Totol Cost(Bath)	As Steel Plate Use(cm^2)	Mn Design(Kg-m)	Tsp(Kg)	Bolt(N)	Cost Bolt(Bath)
Thin(cm)	Width(cm)	Long(cm)													
0.12	120	1260	142.4	26	3,703.19	14.4	6.3	0.44	1	3,703.19	14.40	29,486.00	36,000.00	16.00	96.00
0.15	120	1260	178.0	26	4,628.99	18	6.3	0.35	1	4,628.99	18.00	29,486.00	45,000.00	19.00	114.00
0.2	120	1260	237.4	26	6,171.98	24	6.3	0.26	1	6,171.98	24.00	29,486.00	60,000.00	26.00	156.00
0.25	120	1260	296.7	26	7,714.98	30	6.3	0.21	1	7,714.98	30.00	29,486.00	75,000.00	32.00	192.00
0.3	120	1260	356.1	26	9,257.98	36	6.3	0.18	1	9,257.98	36.00	29,486.00	90,000.00	38.00	228.00
0.4	120	1260	474.8	26	12,343.97	48	6.3	0.13	1	12,343.97	48.00	29,486.00	120,000.00	51.00	306.00
0.45	120	1260	534.1	26	13,886.96	54	6.3	0.12	1	13,886.96	54.00	29,486.00	135,000.00	57.00	342.00
0.5	120	1260	593.5	26	15,429.96	60	6.3	0.11	1	15,429.96	60.00	29,486.00	150,000.00	63.00	378.00
0.6	120	1260	712.2	26	18,515.95	72	6.3	0.09	1	18,515.95	72.00	29,486.00	180,000.00	76.00	456.00
0.8	120	1260	949.5	26	24,687.94	96	6.3	0.07	1	24,687.94	96.00	29,486.00	240,000.00	101.00	606.00
0.9	120	1260	1068.2	26	27,773.93	108	6.3	0.06	1	27,773.93	108.00	29,486.00	270,000.00	113.00	678.00
1.2	120	1260	1424.3	26	37,031.90	144	6.3	0.04	1	37,031.90	144.00	29,486.00	360,000.00	151.00	906.00
1.6	120	1260	1899.1	26	49,375.87	192	6.3	0.03	1	49,375.87	192.00	29,486.00	480,000.00	201.00	1,206.00
1.9	120	1260	2255.1	26	58,633.85	228	6.3	0.03	1	58,633.85	228.00	29,486.00	570,000.00	238.00	1,428.00
2.5	120	1260	2967.3	26	77,149.80	300	6.3	0.02	1	77,149.80	300.00	29,486.00	750,000.00	313.00	1,878.00
0.3	150	1260	445.1	26	11,572.47	45	6.3	0.14	1	11,572.47	45.00	29,486.00	112,500.00	47.00	282.00
0.4	150	1260	593.5	26	15,429.96	60	6.3	0.11	1	15,429.96	60.00	29,486.00	150,000.00	63.00	378.00
0.45	150	1260	667.6	26	17,358.71	67.5	6.3	0.09	1	17,358.71	67.50	29,486.00	168,750.00	71.00	426.00
0.6	150	1260	890.2	26	23,144.94	90	6.3	0.07	1	23,144.94	90.00	29,486.00	225,000.00	94.00	564.00
0.8	150	1260	1186.9	26	30,859.92	120	6.3	0.05	1	30,859.92	120.00	29,486.00	300,000.00	126.00	756.00
0.9	150	1260	1335.3	26	34,717.41	135	6.3	0.05	1	34,717.41	135.00	29,486.00	337,500.00	141.00	846.00
1.2	150	1260	1780.4	26	46,289.88	180	6.3	0.04	1	46,289.88	180.00	29,486.00	450,000.00	188.00	1,128.00
1.5	150	1260	2225.5	26	57,862.35	225	6.3	0.03	1	57,862.35	225.00	29,486.00	562,500.00	235.00	1,410.00
1.9	150	1260	2818.9	26	73,292.31	285	6.3	0.02	1	73,292.31	285.00	29,486.00	712,500.00	297.00	1,782.00
2.5	150	1260	3709.1	26	96,437.25	375	6.3	0.02	1	96,437.25	375.00	29,486.00	937,500.00	391.00	2,346.00
													Include Vat 7%		Total Cost
MAX =													96,437.25	105533.86	738,737
Min =													3,703.19	6308.41	44,159

SPEC	Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total(m ²)	Cost/Area(Bath/m ²)	Cost TFC(Bath)	Cost Epoxy(Bath)	Total Cost(Bath)
0.05	4.00	0.19	1.90	9.90	10.00	12.60	0.50	5.04	2,250.00	11,340.00	1,814.40	92,080.80	
0.05	7.50	0.36	1.90	5.28	6.00	12.60	0.95	5.67	2,250.00	12,757.50	2,041.20	103,590.90	
0.05	15.00	0.72	1.90	2.64	3.00	12.60	1.89	5.67	2,250.00	12,757.50	2,041.20	103,590.90	
0.05	20.00	0.96	1.90	1.98	2.00	12.60	2.52	5.04	2,250.00	11,340.00	1,814.40	92,080.80	
0.05	30.00	1.44	1.90	1.32	2.00	12.60	3.78	7.56	2,250.00	17,010.00	2,721.60	138,121.20	

MAX = 138,121.20 BATH
MIN = 92,080.80 BATH

SPEC	Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total(m ²)	Cost/Area(Bath/m ²)	Cost CFRP(Bath)	Cost Epoxy(Bath)	Total Cost(Bath)
0.12	5.0	0.60	1.90	3.17	4.00	12.60	0.63	2.52	3,000.00	7,560.00	882.00	59,094.00	
0.12	6.0	0.72	1.90	2.64	3.00	12.60	0.76	2.27	3,000.00	6,804.00	793.80	53,184.60	
0.12	8.0	0.96	1.90	1.98	2.00	12.60	1.01	2.02	3,000.00	6,048.00	705.60	47,275.20	
0.12	10.0	1.20	1.90	1.58	2.00	12.60	1.26	2.52	3,000.00	7,560.00	882.00	59,094.00	
0.12	12.0	1.44	1.90	1.32	2.00	12.60	1.51	3.02	3,000.00	9,072.00	1,058.40	70,912.80	
0.12	15.0	1.80	1.90	1.06	2.00	12.60	1.89	3.78	3,000.00	11,340.00	1,323.00	88,641.00	
0.14	6.0	0.84	1.90	2.26	3.00	12.60	0.76	2.27	3,000.00	6,804.00	793.80	53,184.60	
0.14	9.0	1.26	1.90	1.51	2.00	12.60	1.13	2.27	3,000.00	6,804.00	793.80	53,184.60	
0.14	12.0	1.68	1.90	1.13	2.00	12.60	1.51	3.02	3,000.00	9,072.00	1,058.40	70,912.80	

MAX = 88,641.00 BATH
MIN = 47,275.20 BATH

****REMARK

- As Cabon (cm²) x Width
- As Require (cm²) Input
- Layer (N) As Require/As Cabon
- Span Input
- Area/1Span Width x Span
- Area Total Area/1Span x Layer
- Cost/Area(Bath/m²) Input
- Total Cost Cost/Area x Area Total

DIFFERENT COST TFC AND CFRP		
MIN	TFC	92,080.80
MIN	CFRP SIKA	47,275.20
DIFF		1.95

Summary

	Bridgh	As (cm ²)	Remark	Cost (Bath)	Remark	Installation	Remark
Steel	คลองเจ๊ก	6.3	30.16%	44,158.90	1.07		
Cabon Fiber		1.90		47,275.20			

5.5 หมายเลขสะพาน-ชื่อ ที่ตั้ง (Bridge ID. , Name and Location)

สป.4845:G214 - RC (คลองบางจาก)

ชนิดสะพาน (Bridge Type)

ชนิดผิวทาง (Type of surface)	Concrete Slab
จำนวนช่องจราจร (Nos. of traffic lanes)	2 ช่อง
จำนวนทางเท้า (Nos. of walkway)	2 ด้าน

รูปแบบโครงสร้างสะพาน/วัสดุ

โครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure)	RC.
โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (Substructure)	PC. PIER
โครงสร้างคอสสะพาน (Abutment Structure)	RC. Concrete

ขนาดของสะพาน

Bridge ID. , Name and Location	Nos.of span	Maximum	Structural length	Bridge width excluding walkway
		span length		
สป.4845:G214 - RC คลองบางจาก	3	5	15	8

Rating Factor ก่อนการออกแบบ

01 คอลัมน์กลาง

girder pier $\phi_{cr} = 0.95$ $f_c' = 240$ ksc $f_y = 3000$ ksc
 slab $\phi_{cr} = 0.8$ $f_c' = 337.5$ ksc $f_y = 3000$ ksc

ค่าRating Factor for Typical Slab

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	25.46	4.30	3.78	1.19	38.235	1.99	63.824
AASHTO lane load	25.46	4.30	3.69	1.22		2.04	
Thai Trucks(25 T)	25.46	4.30	3.93	1.15	28.731	1.92	47.959
1.3xHS20-44	25.46	4.30	4.91	0.92	38.235	1.53	63.824

ค่าRating Factor for Typical Slab

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	28.48	3.46	3.46	1.52	48.746	2.54	81.368
AASHTO lane load	28.48	3.46	3.00	1.76		2.93	
Thai Trucks(25 T)	28.48	3.46	3.63	1.45	36.299	2.42	60.591
1.3xHS20-44	28.48	3.46	4.50	1.17	48.746	1.96	81.368

ค่าRating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	32.61	2.56	1.33	6.54	209.42	10.92	349.56
AASHTO lane load	32.61	2.56	1.18	7.38		12.31	
Thai Trucks(25 T)	32.61	2.56	1.43	6.09	152.17	10.16	254
1.3xHS20-44	32.61	2.56	1.73	5.03	209.42	8.40	349.56

ค่าRating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	36.51	5.29	6.26	1.28	40.961	2.14	68.374
AASHTO lane load	36.51	5.29	5.64	1.42		2.37	
Thai Trucks(25 T)	36.51	5.29	6.71	1.19	29.855	1.99	49.835
1.3xHS20-44	36.51	5.29	8.14	0.98	40.961	1.64	68.374

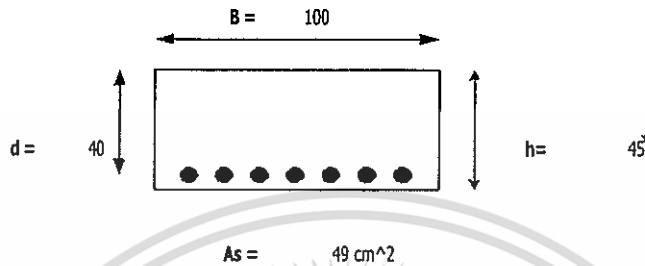
ค่าRating Factor for Typical Pier Column

Case categories	Axial			Rating Factor			
	Capacity Pn(ton)	DL Pn(ton)	LL Pn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	385.3	19.09	9.20	8.92	285.32	14.88	476.27
AASHTO lane load	385.3	19.09	8.25	9.94		16.60	
Thai Trucks(25 T)	385.3	19.09	9.85	8.33	208.2	13.90	347.53
1.3xHS20-44	385.3	19.09	11.96	6.86	285.32	11.45	476.27

Design

Steel Plate

การคำนวณการเสริมกำลังด้วย Steel Plates ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC. SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์มีขนาดและคุณสมบัติตามนี้



รูปที่ 5.5.1 หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริม

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 330	ksc.
ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัด	= 26	cm.

คุณสมบัติของ Steel Plates

กำลังดึงที่จุดคราก	= 2,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 2,040,000	ksc.

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 4,300	kg-m.
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 4,910	kg-m.
ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการหลังเสริมกำลัง	= 27,000	kg-m.

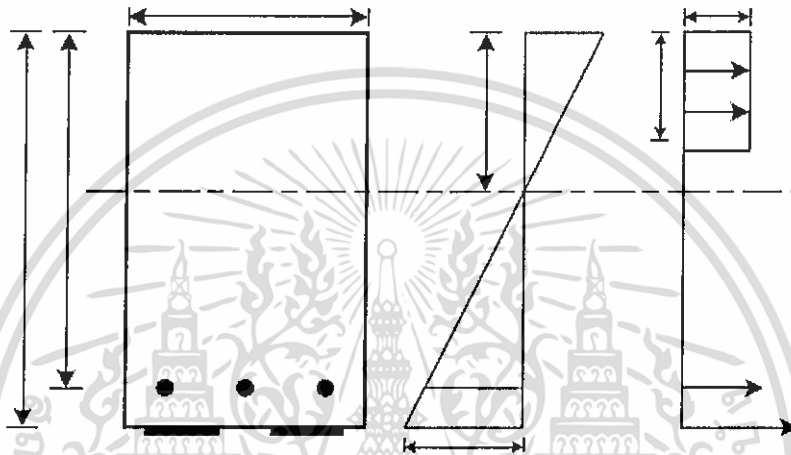
สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดโดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.5.2 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $A_s = 17.2 \text{ cm}^2$

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 4.89 \text{ cm}$. สามารถหาค่าความเครียดประลัยที่ผลที่เกิดขึ้นในแผ่น Steel Plates ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) = 0.016018$$

หน่วยแรงดึงที่สอดคล้องกับหน่วยความเครียดที่เกิดขึ้น คือ

$$f_{sp} = \varepsilon_{sp} E_s = 32,677.55 \text{ ksc.} > f_{sp,y} = 2,500 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_{sp} = 2,500 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประลัยที่ผลที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงได้ดังนี้

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right) = 0.012951$$

$$f_s = \varepsilon_s E_s = 26,419.88 \text{ ksc.} > f_y = 3,000 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_s = 3,000 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_{sp} f_{sp}}{0.85 f'_c \beta_1 b} = 4.89 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณได้พบว่าค่า c ที่ได้เหมือนจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้น คือ $c = 4.89 \text{ cm}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 95 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัยโดย สามารถคำนวณได้จาก

สูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A_{sp} f_{sp} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 30,020.7 \text{ kg-m.}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ โดยที่ $\phi = 0.90$ สำหรับ โมเมนต์ ซึ่งจะได้ว่า $\phi M_n = 27,018.63 \text{ kg-m.} > M_u(\text{required}) = 27,000 \text{ kg-m.}$



Design

Carbon Fiber

การเสริมกำลังด้วย CFRP ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC. SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 330	ksc.
ความลึกประสิทธิภาพผลของหน้าตัด	= 26	cm.

คุณสมบัติของ CFRP

กำลังดึงสูงสุด	= 23,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 1,650,000	ksc.
ความเครียดที่กำลังดึงสูงสุด	= 0.015	

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 4,300	kg-m.
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 4,910	kg-m.
ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการหลังเสริมกำลัง	= 27,000	kg-m.

สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

ตรวจสอบว่าโครงสร้างสามารถเสริมกำลังได้หรือไม่ เนื่องจากการเสริมกำลังเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นมากเกินไป หากเกิดกรณีที่แผ่น CFRP เกิดความเสียหายหรือไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้โครงสร้างจะได้ไม่พังลงทันทีเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ค่าดังต่อไปนี้ มีค่าไม่เกิน ϕM_n ของหน้าตัดเดิม

$$1.2 M_{DL} + 0.85 M_{LL} = 9,333.5 \leq \phi M_n = 27,000 \text{ kg-m.} \quad \text{ใช้ได้}$$

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP เพื่อใช้ในการคำนวณ ในการนำค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP มาใช้ในการคำนวณจะต้องมีการปรับลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ตามคำแนะนำของ ACI ซึ่งในกรณีนี้ กำหนดให้เท่ากับ 0.85 หรือ $C_E = 0.85$ จะได้ว่า

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 19,975 \text{ ksc.}$$

$$E_{fu} = C_E E_{fu}^* = 0.01275$$

ในการเสริมกำลังโดยใช้ CFRP จำเป็นต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial & error) โดยเริ่มต้น จะสมมติจำนวนและขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ต้องใช้ในการเสริมกำลัง ในที่นี้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$\text{ดังนั้นพื้นที่ของ CFRP ทั้งหมด} \quad A_f = n t_f w_f = 5.1 \text{ cm.}^2$$

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณค่าความเครียดที่ผิวล่างของพื้นสะพาน ขณะที่ติดตั้งแผ่น CFRP เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่กำหนดให้หน้าตัดเป็นแบบ Crack Section โดยใช้หลักการแปลงหน้าตัด เพื่อหาหน่วยแรงค้ำที่ผิวล่าง ค่าโมดูลัสการยึดหยุ่นของคอนกรีตหาได้ดังนี้

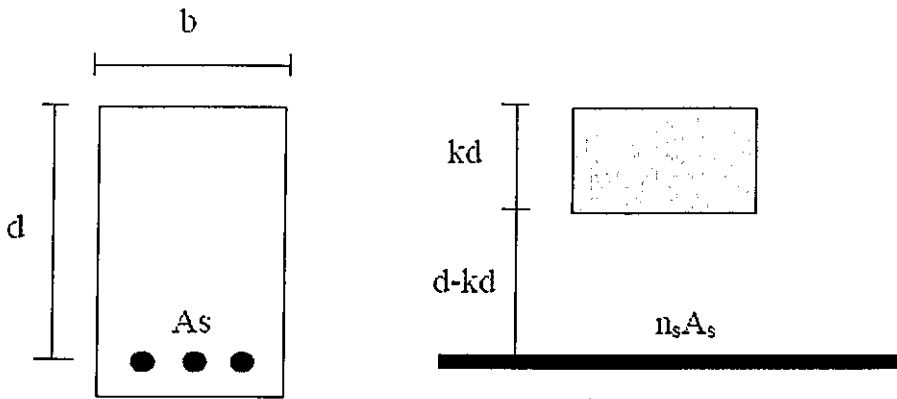
$$E_c = 15,200 \sqrt{f_c'} = 276,121.71 \text{ ksc.}$$

แปลงหน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงค้ำเป็นคอนกรีต โดยใช้ค่า Modular Ratio

$$n_s = E_s / E_c = 9.49$$

ดังนั้นพื้นที่ของเหล็กเมื่อแปลงหน้าตัดแล้วจะเท่ากับ

$$A_{s_{cr}} = n_s A_s = 232.51 \text{ cm.}^2$$



รูปที่ 5.5.3 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้คอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-n_s A_s \pm \sqrt{(n_s A_s)^2 + 2bdn_s A_s}}{b}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้

$$kd = 8.91$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{12} b (kd)^3 + b(kd) \left(\frac{kd}{2}\right)^2 = \frac{1}{3} b(kd)^3 = 23,578.27 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กหน้าตัดแปลง

$$I_s = n A_s (d - kd)^2 = 67,908.28 \text{ cm}^4$$

ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัดแปลง

$$I_{cr} = I_c + I_s = 91,486.54 \text{ cm}^4$$

คำนวณหน่วยแรงดัดที่ผิวล่างของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

$$\sigma_b = \frac{M_{DL} (h - kd)}{I_{cr}} = 103.83 \text{ ksc.}$$

จากหน่วยแรงดัดที่คำนวณได้สามารถนำไปหาค่าความเครียดได้ ดังนี้

$$\varepsilon_{bi} = \sigma_b / E_c = 0.000483002$$

ขั้นตอนที่ 4

คำนวณหาค่า Factor ในการยึดเกาะของแผ่น CFRP โดย ACI ได้ให้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$K_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360.000}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f \leq 180.000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90.000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f > 180.000 \end{cases}$$

สำหรับค่า n จะหมายถึงจำนวนชั้นที่ทำการติดแผ่น CFRP ซึ่งในที่นี้จะมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากติดเพียง 1 ชั้น

นอกจากนี้หน่วยที่ใช้สำหรับค่า E_f มีหน่วยเป็น N/mm^2 ดังนั้น เริ่มต้นจะคำนวณค่าของ $nE_f t_f$ ก่อนโดย

แทนค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้ $n = 3$, $E_f = 152,000 N/mm^2$ และ $t_f = 0.48$ จะได้ว่า

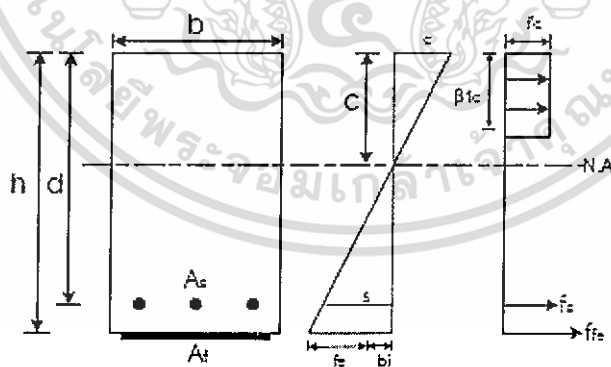
$$nE_f t_f = 151,200 < 180,000 \quad N/mm^2$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$K_m = 0.75817$$

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด โดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.5.4 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 5.25$ cm. พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียด

ประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq K_m \varepsilon_{fu}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 100 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่า ε_{cu} หมายถึง ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตโดยทั่วไปเท่ากับ 0.003 และหากพิจารณาจากสมการดังกล่าวแล้วพบว่าค่า ε_{fs} จะต้องไม่เกินค่า $K_m \varepsilon_{fs}$ เนื่องจากป้องกันการหลุดร่อนของแผ่น CFRP กับโครงสร้าง เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการแล้วจะได้ว่า

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} = 0.014714286$$

ดังนั้นจะได้ว่า ε_{fs} ซึ่งจากค่าความเครียดที่ได้สามารถนำไปหาค่าหน่วยแรงที่สอดคล้องกับความเครียดที่คำนวณได้ดังนี้

$$f_{fs} = E_f \varepsilon_{fs} = 10,150 \text{ ksc.}$$

จากนั้นสามารถนำค่าความเครียดประสิทธิผลใน CFRP ที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงโดยอาศัยสามเหลี่ยมคล้าย ได้ดังนี้

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fs} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right) = 0.00817886$$

ซึ่งจากค่าที่ได้สามารถเปลี่ยนเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดึงได้ดังนี้

$$f_s = E_s \varepsilon_s = 16,684.87 > 3,000 \text{ ksc.}$$

แสดงว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมากกว่าหน่วยแรงดึงที่จุดกลางของเหล็กเสริม ดังนั้น $f_s = 3,000 \text{ ksc.}$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{0.85 f'_c \beta_1 b} = 5.25 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณได้พบว่าค่า c ที่ได้ตรงจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้นคือ $c = 5.25 \text{ cm.}$

ขั้นตอนที่ 6

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัย โดย สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

โดยที่ Ψ_f คือ ตัวคูณลดกำลัง โดย ACI กำหนดให้เท่ากับ 0.85 ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 30,126.43 \text{ kg-m.}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ต่อไป อย่างไรก็ตาม

จำเป็นต้องหาค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับโมเมนต์ก่อน โดย ACI ได้แนะนำสูตรสำหรับหาค่าดังกล่าวไว้ดังนี้

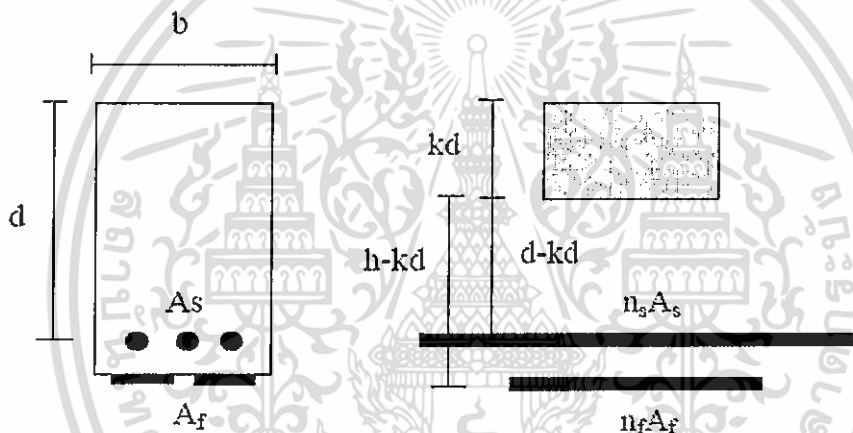
$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{for } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.70 + \frac{0.20(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{for } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.70 & \text{for } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

เมื่อพิจารณาจากค่า $\varepsilon_s = 0.008178$ ที่คำนวณได้พบว่ามีความมากกว่า 0.005 ดังนั้นค่า $\phi = 0.90$ ซึ่งจะได้ว่า

$$\phi M_n = 27,113.79 > M_{u(\text{required})} = 27,000 \text{ kg-m.}$$

ขั้นตอนที่ 7

ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงและแผ่น CFRP ในสภาวะใช้งาน โดยการพิจารณาหน้าตัดเป็นแบบ Crack Section



รูปที่ 5.5.5 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ทำการแปลงพื้นที่หน้าตัดของ CFRP ให้เป็นคอนกรีตโดยการหาค่า Modular Ratio ซึ่งจะได้ว่า

$$n_f = E_f / E_c = 4.88$$

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-BB \pm \sqrt{BB^2 - 4 \cdot AA \cdot CC}}{2 \cdot AA}$$

$$\text{โดยที่ } AA = b/2$$

$$BB = n_s A_s + n_f A_f$$

$$CC = -(n_s A_s d + n_f A_f h)$$

$$kd = 9.38 \text{ cm.}$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{3} b (kd)^3 = 27,509.79 \text{ cm}^4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 102 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กรับแรงดึง

$$I_s = n_s A_s (d - kd)^2 = 64,224.49 \text{ cm}^4$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่น CFRP

$$I_f = n_f A_f (h - kd)^2 = 11,644.30 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัด

$$I_{total} = I_c + I_s + I_f = 103,378.57 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ดัดที่กระทำต่อโครงสร้างในสภาวะใช้งาน

$$M_s = M_{DL} + M_{LL} = 9,210 \text{ kg-m.}$$

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึง

$$f_{s,s} = n_s \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) (h - kd)} = 76.55867 \text{ ksc}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{s,s} < 0.80 f_y$ จะได้ว่า $0.80 f_y = 2,400 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{s,s} < 0.80 f_y$ ใช้ได้

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ที่สภาวะใช้งาน

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{h - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f = 4,618.842 \text{ ksc.}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{f,s} < 0.55 f_u$ จะได้ว่า $0.55 f_u = 12,925 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{f,s} < 0.55 f_u$ ใช้ได้

COST

STEEL PLATE

Size			Weight (Kg)	Cost/Weight(Bath/Kg)	Cost/Page(Bath/ Page)	As steel(cm2)	As Require(cm2)	N(Page)	N Use (page)	Totol Cost(Bath)	As Steel Plate Use(cm^2)	Mn Design(Kg-m)	Tsp(Kg)	Bolt(N)	Cost Bolt(Bath)
Thin(cm)	Width(cm)	Long(cm)													
0.12	120	1260	142.4	26	3,703.19	14.4	17.2	1.19	2	7,406.38	28.80	27,000.00	72,000.00	31.00	186.00
0.15	120	1260	178.0	26	4,628.99	18	17.2	0.96	1	4,628.99	18.00	27,000.00	45,000.00	19.00	114.00
0.2	120	1260	237.4	26	6,171.98	24	17.2	0.72	1	6,171.98	24.00	27,000.00	60,000.00	26.00	156.00
0.25	120	1260	296.7	26	7,714.98	30	17.2	0.57	1	7,714.98	30.00	27,000.00	75,000.00	32.00	192.00
0.3	120	1260	356.1	26	9,257.98	36	17.2	0.48	1	9,257.98	36.00	27,000.00	90,000.00	38.00	228.00
0.4	120	1260	474.8	26	12,343.97	48	17.2	0.36	1	12,343.97	48.00	27,000.00	120,000.00	51.00	306.00
0.45	120	1260	534.1	26	13,886.96	54	17.2	0.32	1	13,886.96	54.00	27,000.00	135,000.00	57.00	342.00
0.5	120	1260	593.5	26	15,429.96	60	17.2	0.29	1	15,429.96	60.00	27,000.00	150,000.00	63.00	378.00
0.6	120	1260	712.2	26	18,515.95	72	17.2	0.24	1	18,515.95	72.00	27,000.00	180,000.00	76.00	456.00
0.8	120	1260	949.5	26	24,687.94	96	17.2	0.18	1	24,687.94	96.00	27,000.00	240,000.00	101.00	606.00
0.9	120	1260	1068.2	26	27,773.93	108	17.2	0.16	1	27,773.93	108.00	27,000.00	270,000.00	113.00	678.00
1.2	120	1260	1424.3	26	37,031.90	144	17.2	0.12	1	37,031.90	144.00	27,000.00	360,000.00	151.00	906.00
1.6	120	1260	1899.1	26	49,375.87	192	17.2	0.09	1	49,375.87	192.00	27,000.00	480,000.00	201.00	1,206.00
1.9	120	1260	2255.1	26	58,633.85	228	17.2	0.08	1	58,633.85	228.00	27,000.00	570,000.00	238.00	1,428.00
2.5	120	1260	2967.3	26	77,149.80	300	17.2	0.06	1	77,149.80	300.00	27,000.00	750,000.00	313.00	1,878.00
0.3	150	1260	445.1	26	11,572.47	45	17.2	0.38	1	11,572.47	45.00	27,000.00	112,500.00	47.00	282.00
0.4	150	1260	593.5	26	15,429.96	60	17.2	0.29	1	15,429.96	60.00	27,000.00	150,000.00	63.00	378.00
0.45	150	1260	667.6	26	17,358.71	67.5	17.2	0.25	1	17,358.71	67.50	27,000.00	168,750.00	71.00	426.00
0.6	150	1260	890.2	26	23,144.94	90	17.2	0.19	1	23,144.94	90.00	27,000.00	225,000.00	94.00	564.00
0.8	150	1260	1186.9	26	30,859.92	120	17.2	0.14	1	30,859.92	120.00	27,000.00	300,000.00	126.00	756.00
0.9	150	1260	1335.3	26	34,717.41	135	17.2	0.13	1	34,717.41	135.00	27,000.00	337,500.00	141.00	846.00
1.2	150	1260	1780.4	26	46,289.88	180	17.2	0.10	1	46,289.88	180.00	27,000.00	450,000.00	188.00	1,128.00
1.5	150	1260	2225.5	26	57,862.35	225	17.2	0.08	1	57,862.35	225.00	27,000.00	562,500.00	235.00	1,410.00
1.9	150	1260	2818.9	26	73,292.31	285	17.2	0.06	1	73,292.31	285.00	27,000.00	717,500.00	297.00	1,782.00
2.5	150	1260	3709.1	26	96,437.25	375	17.2	0.05	1	96,437.25	375.00	27,000.00	937,500.00	391.00	2,346.00
												Include Vat 7%		Total Cost	
MAX =			96,437.25			105533.86			844,271						
Min =			4,628.99			7299.02			58,392						

CABON FIBER

SPEC	Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total(m ²)	Cost/Area(Bath/m ²)	Cost TFC(Bath)	Cost Epoxy(Bath)	Total Cost(Bath)
0.05	4.00	0.19	5.10	26.56	27.00	12.60	0.50	13.61	2,250.00	30,618.00	4,898.88	284,135.04	
0.05	7.50	0.36	5.10	14.17	15.00	12.60	0.95	14.18	2,250.00	31,893.75	5,103.00	295,974.00	
0.05	15.00	0.72	5.10	7.08	8.00	12.60	1.89	15.12	2,250.00	34,020.00	5,443.20	315,705.60	
0.05	20.00	0.96	5.10	5.31	6.00	12.60	2.52	15.12	2,250.00	34,020.00	5,443.20	315,705.60	
0.05	30.00	1.44	5.10	3.54	4.00	12.60	3.78	15.12	2,250.00	34,020.00	5,443.20	315,705.60	

MAX = 315,705.60 BATH
MIN = 284,135.04 BATH

SPEC	Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total(m ²)	Cost/Area(Bath/m ²)	Cost CFRP(Bath)	Cost Epoxy(Bath)	Total Cost(Bath)
0.12	5.0	0.60	5.10	8.50	9.00	12.60	0.63	5.67	3,000.00	17,010.00	1,984.50	151,956.00	
0.12	6.0	0.72	5.10	7.08	8.00	12.60	0.76	6.05	3,000.00	18,144.00	2,116.80	162,086.40	
0.12	8.0	0.96	5.10	5.31	6.00	12.60	1.01	6.05	3,000.00	18,144.00	2,116.80	162,086.40	
0.12	10.0	1.20	5.10	4.25	5.00	12.60	1.26	6.30	3,000.00	18,900.00	2,205.00	168,840.00	
0.12	12.0	1.44	5.10	3.54	4.00	12.60	1.51	6.05	3,000.00	18,144.00	2,116.80	162,086.40	
0.12	15.0	1.80	5.10	2.83	3.00	12.60	1.89	5.67	3,000.00	17,010.00	1,984.50	151,956.00	
0.14	6.0	0.84	5.10	6.07	7.00	12.60	0.76	5.29	3,000.00	15,876.00	1,852.20	141,825.60	
0.14	9.0	1.26	5.10	4.05	5.00	12.60	1.13	5.67	3,000.00	17,010.00	1,984.50	151,956.00	
0.14	12.0	1.68	5.10	3.04	4.00	12.60	1.51	6.05	3,000.00	18,144.00	2,116.80	162,086.40	

MAX = 168,840.00 BATH
MIN = 141,825.60 BATH

******REMARK**

As Cabon (cm²) x Width
As Require (cm²) Input
Layer (N) As Require/As Cabon
Span Input
Area/1Span Width x Span
Area Total Area/1Span x Layer
Cost/Area(Bath/m²) Input
Total Cost Cost/Area x Area Total

DIFFERENT COST TFC AND CFRP			
MIN	TFC	284,135.04	
MIN	CFRP SIKA	141,825.60	
	DIFF	2.00	

Summary

	Bridgh	As (cm ²)	Remark	Cost (Bath)	Remark	Installation	Remark
Steel	คลองบางจาก	17.2	29.65%	58,392.14	2.43		
Cabon Fiber		5.10		141,825.60			

5.6 หมายเลขสะพาน-ชื่อ ที่ตั้ง (Bridge ID. , Name and Location)

สปท.4839:G208 - RC (คลองพระโขนง 17)

ชนิดสะพาน (Bridge Type)

ชนิดผิวทาง (Type of surface)	Concrete Slab
จำนวนช่องจราจร (Nos. of traffic lanes)	2 ช่อง
จำนวนทางเท้า (Nos. of walkway)	2 ด้าน

รูปแบบโครงสร้างสะพาน/วัสดุ

โครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure)	RC.
โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (Substructure)	PC. PIER
โครงสร้างคอสสะพาน (Abutment Structure)	RC. Concrete

ขนาดของสะพาน

Bridge ID. , Name and Location	Nos.of span	Maximum span length	Structural length	Bridge width excluding walkway
สปท.4839:G208 - RC คลองพระโขนง 17	9	8.2	72.4	7

Rating Factor ก่อนการออกแบบ

01 คลองพระโขนง

girder pier $\phi_{cr} = 0.85$ $f_c' = 210$ ksc $f_y = 3000$ ksc
 slab $\phi_{cr} = 0.8$ $f_c' = 337.5$ ksc $f_y = 3000$ ksc

ค่าRating Factor for Typical Slab

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	45.46	10.92	7.15	0.92	29.406	1.53	49.086
AASHTO lane load	45.46	10.92	7.05	0.93		1.56	
Thai Trucks(25 T)	45.46	10.92	7.75	0.85	21.195	1.42	35.379
1.3xHS20-44	45.46	10.92	9.30	0.71	29.406	1.18	49.086

ค่าRating Factor for Typical Slab

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	38.21	5.40	4.33	1.55	49.678	2.59	82.924
AASHTO lane load	38.21	5.40	3.31	2.03		3.39	
Thai Trucks(25 T)	38.21	5.40	4.09	1.64	41.088	2.74	68.586
1.3xHS20-44	38.21	5.40	5.63	1.19	49.678	1.99	82.924

ค่าRating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	32.03	3.83	2.91	2.38	76.106	3.97	127.04
AASHTO lane load	32.03	3.83	2.1	3.30		5.50	
Thai Trucks(25 T)	32.03	3.83	2.62	2.64	66.039	4.41	110.24
1.3xHS20-44	32.03	3.83	3.78	1.83	76.106	3.05	127.04

ค่าRating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	34.79	5.65	7.47	0.84	27.016	1.41	45.096
AASHTO lane load	34.79	5.65	5.43	1.16		1.94	
Thai Trucks(25 T)	34.79	5.65	6.73	0.94	23.427	1.56	39.105
1.3xHS20-44	34.79	5.65	9.71	0.65	27.016	1.08	45.096

ค่าRating Factor for Typical Pier Column

Case categories	Axial			Rating Factor			
	Capacity Pn(ton)	DL Pn(ton)	LL Pn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	N/A	N/A	N/A	#VALUE!	#####	#VALUE!	#####
AASHTO lane load	N/A	N/A	N/A	#VALUE!		#VALUE!	
Thai Trucks(25 T)	N/A	N/A	N/A	#VALUE!	#####	#VALUE!	#####
1.3xHS20-44	N/A	N/A	N/A	#VALUE!	#####	#VALUE!	#####

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 107 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rating Factor ที่คาดว่าจะได้หลังการออกแบบ

girder pier ϕ_{cr} = 0.85 f_c' = 210 ksc f_y = 3000 ksc
 slab ϕ_{cr} = 0.8 f_c' = 337.5 ksc f_y = 3000 ksc

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	56.00	10.92	7.15	1.30	41.4458	2.16	69.1826
AASHTO lane 1	56.00	10.92	7.05	1.31		2.19	
Thai Trucks(25	56.00	10.92	7.75	1.19	29.87273	1.99	49.86448
1.3xHS20-	56.00	10.92	9.30	1.00	41.4458	1.66	69.1826

ค่า Rating Factor for Typical Slab

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	38.21	5.40	4.33	1.55	49.6777	2.59	82.92354
AASHTO lane 1	38.21	5.40	3.31	2.03		3.39	
Thai Trucks(25	38.21	5.40	4.09	1.64	41.0881	2.74	68.58552
1.3xHS20-	38.21	5.40	5.63	1.19	49.6777	1.99	82.92354

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Moment			Rating Factor			
	Capacity Mn(ton-m.)	DL Mn(ton-m.)	LL Mn(ton-m.)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	32.03	3.83	2.91	2.38	76.10647	3.97	127.0393
AASHTO lane 1	32.03	3.83	2.1	3.30		5.50	
Thai Trucks(25	32.03	3.83	2.62	2.64	66.03943	4.41	110.235
1.3xHS20-	32.03	3.83	3.78	1.83	76.10647	3.05	127.0393

ค่า Rating Factor for Typical Main Girder

Case categories	Shear			Rating Factor			
	Capacity Vn(ton)	DL Vn(ton)	LL Vn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	34.79	5.65	7.47	0.84	27.01601	1.41	45.09595
AASHTO lane 1	34.79	5.65	5.43	1.16		1.94	
Thai Trucks(25	34.79	5.65	6.73	0.94	23.427	1.56	39.10507
1.3xHS20-	34.79	5.65	9.71	0.65	27.01601	1.08	45.09595

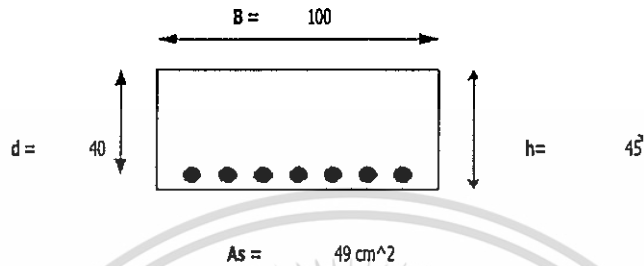
ค่า Rating Factor for Typical Pier Column

Case categories	Axial			Rating Factor			
	Capacity Pn(ton)	DL Pn(ton)	LL Pn(ton)	Inventory	Tons	Operating	Tons
HS20-44	N/A	N/A	N/A	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
AASHTO lane 1	N/A	N/A	N/A	#VALUE!		#VALUE!	
Thai Trucks(25	N/A	N/A	N/A	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
1.3xHS20-	N/A	N/A	N/A	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!

Design

Steel Plate

การคำนวณการเสริมกำลังด้วย Steel Plates ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC. SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์มีขนาดและคุณสมบัติตามนี้



รูปที่ 5.6.1 หน้าตัดของสะพานประเภทพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 210	ksc.
ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด	= 45	cm.

คุณสมบัติของ Steel Plates

กำลังดึงที่จุดคราก	= 2,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 2,040,000	ksc.

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 10,920	kg-m.
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 9,300	kg-m.
ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการหลังเสริมกำลัง	= 56,000	kg-m.

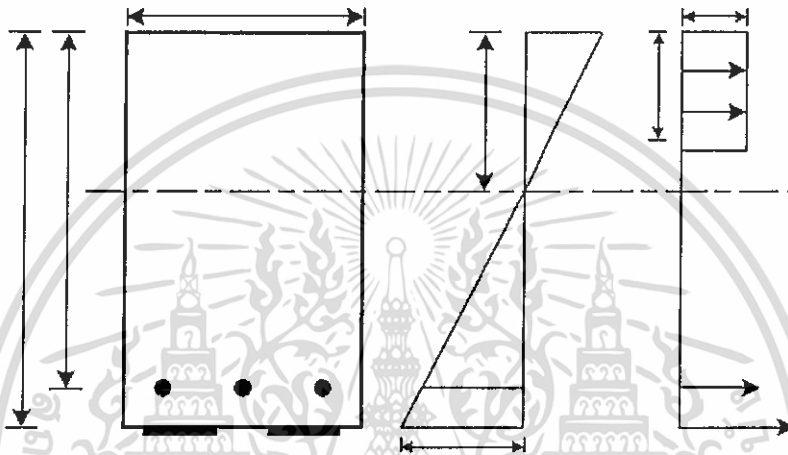
สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดโดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.5.2 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $A_s = 31.1 \text{ cm}^2$

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 9.33 \text{ cm}$. สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่น Steel Plates ได้ดังนี้

$$\epsilon_{sp} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) = 0.013077$$

หน่วยแรงดึงที่สอดคล้องกับหน่วยความเครียดที่เกิดขึ้น คือ

$$f_{sp} = \epsilon_{sp} E_s = 26677.43 \text{ ksc.} > f_{sp,y} = 2,500 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_{sp} = 2,500 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงได้ดังนี้

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \left(\frac{c}{c} \right) = 0.011469$$

$$f_s = \epsilon_s E_s = 23,397.68 \text{ ksc.} > f_y = 3,000 \text{ ksc.} \text{ ดังนั้น } f_s = 3,000 \text{ ksc.}$$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_{sp} f_{sp}}{0.85 f'_c \beta_2 b} = 9.33 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณได้พบว่าค่า c ที่ได้เหมือนจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้น คือ $c = 9.33 \text{ cm}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อ 110 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัยโดย สามารถคำนวณได้จาก

สูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A_{sp} f_{sp} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 62,222.56 \text{ kg-m.}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ โดยที่ $\phi = 0.90$ สำหรับ โมเมนต์ ซึ่งจะได้ว่า $\phi M_n = 56,000.31 \text{ kg-m.} > M_{u(\text{required})} = 56,000 \text{ kg-m.}$



Design

Carbon Fiber

การเสริมกำลังด้วย CFRP ของหน้าตัดของสะพานซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC. SLAB) สะพานที่ใช้วิเคราะห์

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ RB	= 2,400	ksc.
กำลังดึงที่จุดครากสำหรับเหล็กเสริมแบบ DB	= 3,000	ksc.
โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็ก	= 2,040,000	ksc.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	= 210	ksc.
ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด	= 45	cm.

คุณสมบัติของ CFRP

กำลังดึงสูงสุด	= 23,500	ksc.
โมดูลัสความยืดหยุ่น	= 1,650,000	ksc.
ความเครียดที่กำลังดึงสูงสุด	= 0.015	

น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกคงที่หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 10,920	kg-m.
น้ำหนักบรรทุกจรรวมหลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้ว	= 9,300	kg-m.
ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการหลังเสริมกำลัง	= 56,000	kg-m.

สมมติฐานเบื้องต้น

ในการคำนวณไม่คิดผลของเหล็กเสริมรับแรงอัดเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

ตรวจสอบว่าโครงสร้างสามารถเสริมกำลังได้หรือไม่ เนื่องจากการเสริมกำลังเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นมากเกินไป หากเกิดกรณีที่แผ่น CFRP เกิดความเสียหายหรือไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้โครงสร้างจะได้ออกแบบหรือไม่พังลงทันทีเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ค่าดังต่อไปนี้ มีค่าไม่เกิน ϕM_n ของหน้าตัดเดิม

$$1.2 M_{DL} + 0.85 M_{LL} = 21,009 \leq \phi M_n = 56,000 \text{ kg-m. ใช้ได้}$$

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP เพื่อใช้ในการคำนวณ ในการนำค่าคุณสมบัติของวัสดุ CFRP มาใช้ในการคำนวณจะต้องมีการปรับลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ตามคำแนะนำของ ACI ซึ่งในกรณีนี้ กำหนดให้เท่ากับ 0.85 หรือ $C_E = 0.85$ จะได้ว่า

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 19,975 \text{ ksc.}$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* = 0.01275$$

ในการเสริมกำลังโดยใช้ CFRP จำเป็นต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูก (trial & error) โดยเริ่มต้น จะสมมติจำนวนและขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ต้องใช้ในการเสริมกำลัง ในที่นี้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$\text{ดังนั้นพื้นที่ของ CFRP ทั้งหมด } A_f = n t_f w_f = 9.8 \text{ cm.}^2$$

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณค่าความเครียดที่ผิวล่างของพื้นสะพาน ขณะที่ติดตั้งแผ่น CFRP เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่กำหนดให้หน้าตัดเป็นแบบ Crack Section โดยใช้หลักการแปลงหน้าตัด เพื่อหาหน่วยแรงค้ำที่ผิวล่างค่าโมดูลัสการยึดหยุ่นของคอนกรีตหาได้ดังนี้

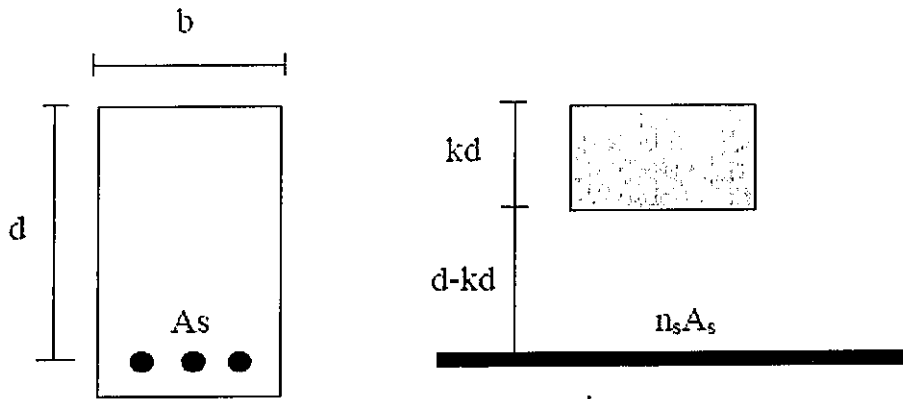
$$E_c = 15,200 \sqrt{f_c'} = 220,268.93 \text{ ksc.}$$

แปลงหน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงค้ำเป็นคอนกรีตโดยใช้ค่า Modular Ratio

$$n_s = E_s / E_c = 9.49$$

ดังนั้นพื้นที่ของเหล็กเมื่อแปลงหน้าตัดแล้วจะเท่ากับ

$$A_{s_{cr}} = n_s A_s = 186.01 \text{ cm.}^2$$



รูปที่ 5.6.3 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-n_s A_s \pm \sqrt{(n_s A_s)^2 + 2bdn_s A_s}}{b}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้

$$kd = 11.21$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{12} b (kd)^3 + b(kd) \left(\frac{kd}{2}\right)^2 = \frac{1}{3} b(kd)^3 = 46,956.49 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กหน้าตัดแปลง

$$I_s = nA_s(d - kd)^2 = 212,375.77 \text{ cm}^4$$

ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัดแปลง

$$I_{cr} = I_c + I_s = 259,332.26 \text{ cm}^4$$

คำนวณหน่วยแรงดัดที่ผิวล่างของพื้นสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

$$\sigma_b = \frac{MDL(h - kd)}{I_{cr}} = 163.34 \text{ ksc.}$$

จากหน่วยแรงดัดที่คำนวณได้สามารถนำไปหาค่าความเครียดได้ ดังนี้

$$\varepsilon_{bt} = \sigma_b / E_c = 0.000759851$$

ขั้นตอนที่ 4

คำนวณหาค่า Factor ในการยึดเกาะของแผ่น CFRP โดย ACI ได้ให้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$K_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360,000}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f \leq 180,000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90,000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f > 180,000 \end{cases}$$

สำหรับค่า n จะหมายถึงจำนวนชั้นที่ทำการติดแผ่น CFRP ซึ่งในที่นี้จะมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากติดเพียง 1 ชั้น นอกจากนี้หน่วยที่ใช้สำหรับค่า E_f มีหน่วยเป็น N/mm^2 ดังนั้น เริ่มต้นจะคำนวณค่าของ $nE_f t_f$ ก่อนโดยแทนค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้ $n = 3$, $E_f = 152,000 \text{ N/mm}^2$ และ $t_f = 0.48$ จะได้ว่า

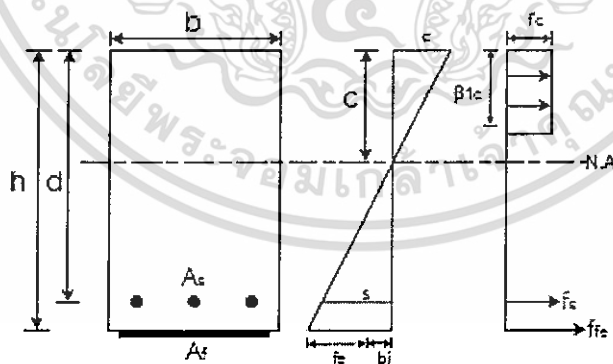
$$nE_f t_f = 151,200 < 180,000 \text{ N/mm}^2$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$K_m = 0.75817$$

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณหาค่าความลึกของแกนสะเทินที่สภาวะประลัยเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่พิจารณา ในการพิจารณาจะอาศัยความสัมพันธ์ของ Strain Compatibility และสมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด โดยพิจารณาจากรูป



รูปที่ 5.6.4 ค่าความเครียดและหน่วยแรงที่ขึ้นในหน้าตัด

เริ่มต้นจะสมมติค่า $c = 10.43 \text{ cm}$. พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมคล้าย สามารถหาค่าความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq K_m \varepsilon_{fu}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 1155 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่า ϵ_{cu} หมายถึง ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตโดยทั่วไปเท่ากับ 0.003 และหากพิจารณาจากสมการดังกล่าวแล้วพบว่าค่า ϵ_{fs} จะต้องไม่เกินค่า $K_m \epsilon_{fs}$ เนื่องจากป้องกันการหลุดร่อนของแผ่น CFRP กับโครงสร้าง เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการแล้วจะได้ว่า

$$\epsilon_{fs} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \epsilon_{bi} = 0.011381592$$

ดังนั้นจะได้ว่า ϵ_{fs} ซึ่งจากค่าความเครียดที่ได้สามารถนำไปหาค่าหน่วยแรงที่สอดคล้องกับความเครียดที่คำนวณได้ดังนี้

$$f_{fs} = E_f \epsilon_{fs} = 10,150 \text{ ksc.}$$

จากนั้นสามารถนำค่าความเครียดประสิทธิผลใน CFRP ที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงโดยอาศัยสามเหลี่ยมคล้าย ได้ดังนี้

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fs} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right) = 0.00910904$$

ซึ่งจากค่าที่ได้สามารถเปลี่ยนเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดึงได้ดังนี้

$$f_s = E_s \epsilon_s = 18,582.44 > 3,000 \text{ ksc.}$$

แสดงว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมากกว่าหน่วยแรงดึงที่จุดกลางของเหล็กเสริม ดังนั้น $f_s = 3,000 \text{ ksc.}$

พิจารณาจากสมการสมดุลในหน้าตัดระหว่างแรงอัดกับแรงดึงจะได้ว่า

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fs}}{0.85 f'_c \beta_1 b} = 10.43 \text{ cm.}$$

ซึ่งจากที่คำนวณ ได้พบว่าค่า c ที่ได้ตรงจากค่าที่สมมติในตอนเริ่มต้นคือ $c = 10.43 \text{ cm.}$

ขั้นตอนที่ 6

คำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดที่สภาวะประลัยโดย สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fs} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

โดยที่ Ψ_f คือ ตัวคูณลดกำลังโดย ACI กำหนดให้เท่ากับ 0.85 ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$M_n = 62,379.59 \text{ kg-m.}$$

ซึ่งจากค่า M_n ที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปหาค่า โมเมนต์ดัดประลัย ϕM_n ได้ต่อไป อย่างไรก็ตาม

จำเป็นต้องหาค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับ โมเมนต์ก่อน โดย ACI ได้แนะนำสูตรสำหรับหาค่าดังกล่าวไว้ดังนี้

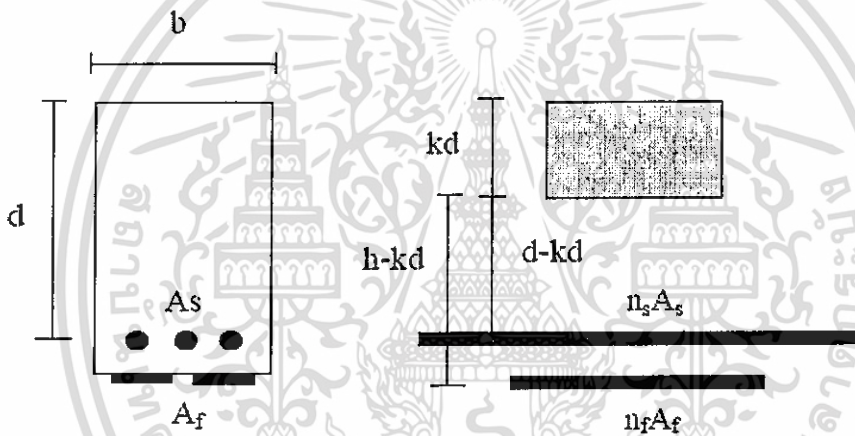
$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{for } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.70 + \frac{0.20(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{for } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.70 & \text{for } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

เมื่อพิจารณาจากค่า $\varepsilon_s = 0.008178$ ที่คำนวณได้พบว่ามีค่ามากกว่า 0.005 ดังนั้นค่า $\phi = 0.90$ ซึ่งจะได้ว่า

$$\phi M_n = 56,141.63 > M_{u(\text{requires})} = 56,000 \text{ kg-m.}$$

ขั้นตอนที่ 7

ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึงและแผ่น CFRP ในสถานะใช้งาน โดยการพิจารณาหน้าตัดเป็นแบบ Crack Section



รูปที่ 5.6.5 แสดงหน้าตัดแปลง Crack Section ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ทำการแปลงพื้นที่หน้าตัดของ CFRP ให้เป็นคอนกรีตโดยการหาค่า Modular Ratio ซึ่งจะได้ว่า

$$n_f = E_f / E_c = 4.88$$

พิจารณารูปเพื่อหาระยะเกินสะเทิน (Neutral Axis) โดยการพิจารณา First Moment จะได้ว่า

$$kd = \frac{-BB \pm \sqrt{BB^2 - 4 \cdot AA \cdot CC}}{2 \cdot AA}$$

$$\text{โดยที่ } AA = b/2$$

$$BB = n_s A_s + n_f A_f$$

$$CC = -(n_s A_s d + n_f A_f h)$$

$$kd = 12.52 \text{ cm.}$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินได้เท่ากับ

$$I_c = \frac{1}{3} b (kd)^3 = 65,417.17 \text{ cm}^4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 117 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กรับแรงดึง

$$I_s = n_s A_s (d - kd)^2 = 196,227.84 \text{ cm}^4$$

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่น CFRP

$$I_f = n_f A_f (h - kd)^2 = 67,244.52 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัด

$$I_{total} = I_c + I_s + I_f = 328,889.53 \text{ cm}^4$$

โมเมนต์ดัดที่กระทำต่อโครงสร้างในสภาวะใช้งาน

$$M_s = M_{DL} + M_{LL} = 20,220 \text{ kg-m.}$$

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กรับแรงดึง

$$f_{s,s} = n_s \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) (h - kd)} = 130.753 \text{ ksc}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{s,s} < 0.80 f_y$ จะได้ว่า $0.80 f_y = 2,400 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{s,s} < 0.80 f_y$ ใช้ได้

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP ที่สภาวะใช้งาน

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{h - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f = 6,968.101 \text{ ksc.}$$

ตามคำแนะนำของ ACI กำหนดให้ $f_{f,s} < 0.55 f_u$ จะได้ว่า $0.55 f_u = 12,925 \text{ ksc}$. ดังนั้น $f_{f,s} < 0.55 f_u$ ใช้ได้

COST

STEEL PLATE

Size			Weight (Kg)	Cost/Weight(Bath/Kg)	Cost/Page(Bath/Page)	As steel(cm2)	As Require(cm^2)	N(Page)	N Use (page)	Total Cost(Bath)	As Steel Plate Use(cm^2)	Mn Design(Kg-m)	Tsp(Kg)	Bolt(N)	Cost Bolt(Bath)
Thin(cm)	Width(cm)	Long(cm)													
0.12	120	6030	681.6	26	17,722.41	14.4	33.1	2.30	3	53,167.23	43.20	56,000.00	108,000.00	46.00	276.00
0.15	120	6030	852.0	26	22,153.01	18	33.1	1.84	2	44,306.03	36.00	56,000.00	90,000.00	38.00	228.00
0.2	120	6030	1136.1	26	29,537.35	24	33.1	1.38	2	59,074.70	48.00	56,000.00	120,000.00	51.00	306.00
0.25	120	6030	1420.1	26	36,921.69	30	33.1	1.10	2	73,843.38	60.00	56,000.00	150,000.00	63.00	378.00
0.3	120	6030	1704.1	26	44,306.03	36	33.1	0.92	1	44,306.03	36.00	56,000.00	90,000.00	38.00	228.00
0.4	120	6030	2272.1	26	59,074.70	48	33.1	0.69	1	59,074.70	48.00	56,000.00	120,000.00	51.00	306.00
0.45	120	6030	2556.1	26	66,459.04	54	33.1	0.61	1	66,459.04	54.00	56,000.00	135,000.00	57.00	342.00
0.5	120	6030	2840.1	26	73,843.38	60	33.1	0.55	1	73,843.38	60.00	56,000.00	150,000.00	63.00	378.00
0.6	120	6030	3408.2	26	88,612.06	72	33.1	0.46	1	88,612.06	72.00	56,000.00	180,000.00	76.00	456.00
0.8	120	6030	4544.2	26	118,149.41	96	33.1	0.34	1	118,149.41	96.00	56,000.00	240,000.00	101.00	606.00
0.9	120	6030	5112.2	26	132,918.08	108	33.1	0.31	1	132,918.08	108.00	56,000.00	270,000.00	113.00	678.00
1.2	120	6030	6816.3	26	177,224.11	144	33.1	0.23	1	177,224.11	144.00	56,000.00	360,000.00	151.00	906.00
1.6	120	6030	9088.4	26	236,298.82	192	33.1	0.17	1	236,298.82	192.00	56,000.00	480,000.00	201.00	1,206.00
1.9	120	6030	10792.5	26	280,604.84	228	33.1	0.15	1	280,604.84	228.00	56,000.00	570,000.00	238.00	1,428.00
2.5	120	6030	14200.7	26	369,216.90	300	33.1	0.11	1	369,216.90	300.00	56,000.00	750,000.00	313.00	1,878.00
0.3	150	6030	2130.1	26	55,382.54	45	33.1	0.74	1	55,382.54	45.00	56,000.00	112,500.00	47.00	282.00
0.4	150	6030	2840.1	26	73,843.38	60	33.1	0.55	1	73,843.38	60.00	56,000.00	150,000.00	63.00	378.00
0.45	150	6030	3195.1	26	83,073.80	67.5	33.1	0.49	1	83,073.80	67.50	56,000.00	168,750.00	71.00	426.00
0.6	150	6030	4260.2	26	110,765.07	90	33.1	0.37	1	110,765.07	90.00	56,000.00	225,000.00	94.00	564.00
0.8	150	6030	5680.3	26	147,686.76	120	33.1	0.28	1	147,686.76	120.00	56,000.00	300,000.00	126.00	756.00
0.9	150	6030	6390.3	26	166,147.61	135	33.1	0.25	1	166,147.61	135.00	56,000.00	337,500.00	141.00	846.00
1.2	150	6030	8520.4	26	221,530.14	180	33.1	0.18	1	221,530.14	180.00	56,000.00	450,000.00	188.00	1,128.00
1.5	150	6030	10650.5	26	276,912.68	225	33.1	0.15	1	276,912.68	225.00	56,000.00	562,500.00	235.00	1,410.00
1.9	150	6030	13490.6	26	350,756.06	285	33.1	0.12	1	350,756.06	285.00	56,000.00	712,500.00	297.00	1,782.00
2.5	150	6030	17750.8	26	461,521.13	375	33.1	0.09	1	461,521.13	375.00	56,000.00	937,500.00	391.00	2,346.00
												Include Vat 7%		Total Cost	
MAX =												461,521.13	496173.60	3,473,215	
Min =												44,306.03	49753.45	348,274	

CABON FIBER

SPEC													
Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total(m ²)	Cost/Area(Bath/m ²)	Cost TFC(Bath)	Cost Epoxy(Bath)	Total Cost(Bath)	
0.05	4.00	0.19	9.80	51.04	52.00	60.30	2.41	125.42	2,250.00	282,204.00	45,152.64	2,291,496.48	
0.05	7.50	0.36	9.80	27.22	28.00	60.30	4.52	126.63	2,250.00	284,917.50	45,586.80	2,313,530.10	
0.05	15.00	0.72	9.80	13.61	14.00	60.30	9.05	126.63	2,250.00	284,917.50	45,586.80	2,313,530.10	
0.05	20.00	0.96	9.80	10.21	11.00	60.30	12.06	132.66	2,250.00	298,485.00	47,757.60	2,423,698.20	
0.05	30.00	1.44	9.80	6.81	7.00	60.30	18.09	126.63	2,250.00	284,917.50	45,586.80	2,313,530.10	
MAX =											2,423,698.20	BATH	
MIN =											2,291,496.48	BATH	

SPEC													
Thin (cm)	Width (cm)	As Cabon (cm ²)	As Require (cm ²)	Layer (N)	Layer Use (N)	Span (m)	Area/1Span (m ²)	Area Total(m ²)	Cost/Area(Bath/m ²)	Cost CFRP(Bath)	Cost Epoxy(Bath)	Total Cost(Bath)	
0.12	5.0	0.60	9.80	16.33	17.00	60.30	3.02	51.26	3,000.00	153,765.00	17,939.25	1,201,929.75	
0.12	6.0	0.72	9.80	13.61	14.00	60.30	3.62	50.65	3,000.00	151,956.00	17,728.20	1,187,789.40	
0.12	8.0	0.96	9.80	10.21	11.00	60.30	4.82	53.06	3,000.00	159,192.00	18,572.40	1,244,350.80	
0.12	10.0	1.20	9.80	8.17	9.00	60.30	6.03	54.27	3,000.00	162,810.00	18,994.50	1,272,631.50	
0.12	12.0	1.44	9.80	6.81	7.00	60.30	7.24	50.65	3,000.00	151,956.00	17,728.20	1,187,789.40	
0.12	15.0	1.80	9.80	5.44	6.00	60.30	9.05	54.27	3,000.00	162,810.00	18,994.50	1,272,631.50	
0.14	6.0	0.84	9.80	11.67	12.00	60.30	3.62	43.42	3,000.00	130,248.00	15,195.60	1,018,105.20	
0.14	9.0	1.26	9.80	7.78	8.00	60.30	5.43	43.42	3,000.00	130,248.00	15,195.60	1,018,105.20	
0.14	12.0	1.68	9.80	5.83	6.00	60.30	7.24	43.42	3,000.00	130,248.00	15,195.60	1,018,105.20	
MAX =											1,272,631.50	BATH	
MIN =											1,018,105.20	BATH	

******REMARK**

As Cabon (cm ²)	Thin x Width
As Require (cm ²)	Input
Layer (N)	As Require/As Cabon
Span	Input
Area/1Span	Width x Span
Area Total	Area/1Span x Layer
Cost/Area(Bath/m ²)	Input
Total Cost	Cost/Area x Area Total

DIFFERENT COST TFC AND CFRP			
MIN	TFC		2,291,496.48
MIN	CFRP SIKKA		1,018,105.20
	DIFF		2.25

Summary

	Bridgh	As (cm ²)	Remark	Cost (Bath)	Remark	Installation	Remark
Steel	คลองพระโขนง	33.1	29.61%	348,274.15	2.92		
Cabon Fiber		9.80		1,018,105.20			

บทที่ 6

สรุปผล ปัญหา ข้อเสนอแนะ

จากผลที่ได้จากการศึกษาการเสริมความแข็งแรงของสะพานจำนวน 6 สะพาน สามารถสรุปได้ดังนี้

- สะพานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) จะมีราคาสูงกว่าสะพานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบ อยู่ประมาณ 3 เท่า

- จากการศึกษาการเสริมความแข็งแรงของสะพานในกรณีที่ ค่าความต่างระหว่างราคาของเหล็ก และคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) อันเนื่องมาจาก

1. แผ่นเหล็กประกบมีราคาสูงกว่าแผ่น (CFRP) เพราะสะพานนั้นมีความต้องการการเสริมกำลังที่น้อย ทำให้ใช้เหล็กเสริมเกินความจำเป็น

2. แผ่น (CFRP) มีราคาสูงกว่าแผ่นเหล็กประกบ เพราะสะพานนั้นมีความต้องการการเสริมกำลังที่พอดีกับน้ำหนักของเหล็ก (เต็มประสิทธิภาพของแผ่นเสริมกำลัง) จึงทำให้ความแตกต่างของราคาเป็นไปตามที่ได้ศึกษาไว้

3. แผ่น (CFRP) มีราคาใกล้เคียงกับแผ่นเหล็กประกบ อันเนื่องมาจากการใช้ปริมาณของแผ่น (CFRP) ที่น้อยกว่าแผ่นเหล็กประกบอยู่ 1 ใน 3 แต่มีอัตราส่วนของราคาใกล้เคียงกัน

- สะพานที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ จะใช้หน้าตัดเพียงแค่ประมาณ 35% ของแผ่นเหล็กประกบในกรณีที่ต้องการกำลังที่เท่ากัน

- จากการศึกษาการเสริมความแข็งแรงของสะพานทำให้ทราบถึงระยะเวลาการติดตั้งซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีพร้อมรับกำลังใช้งาน

2. กรณีติดตั้งแล้วเสร็จ

ซึ่งถ้าเป็นการติดตั้งหน้างานแล้ว แผ่นเหล็กประกบอาจใช้เวลาการติดตั้งพร้อมใช้งานซึ่งสามารถรับกำลัง ได้เลย ซึ่งรวดเร็วกว่าแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) เพราะแผ่น CFRP ต้องรอกำลังของ Epoxy ทำให้เกิดแรงประสานแล้วให้กำลังสูงสุดในการใช้งาน ซึ่งระยะเวลานี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของ Epoxy แต่ละชนิด

Summary Cost

Bridge ID. , Name and Location	Nos.of span	Maximum span length	Structural length	Bridge width excluding walkway	Cost (Bath)	
					Steel	CFRP
					Cost Use	Cost Use
สปท.4840 : G209 - RC คลองกะจะ ถนน รามคำแหง 24 แยก 20	3	8	24	8	69,336	26,934
สปท.4842 : G211 - RC คลองกะจะ ถนน รามคำแหง 24 แยก 28	3	8	24	8	69,336	64,642
สปท.4843:G212 - RC คลองกะจะ	3	8	24	8	69,336	26,934
สปท.4844:G213 - RC คลองเจ๊ก	3	5	15	7	44,159	47,275
สปท.4845:G214 - RC คลองบางจาก	3	5	15	8	58,392	141,825
สปท.4839:G208 - RC คลองพระโขนง 17	9	8.2	72.4	7	348,274	1,018,105

Cost Use			
Bridge ID. , Name and Location	TYPE	COST	DIFF CFRP > STEEL
สถานี 4840 : G209 - RC คลองกระจะ ถนน รพช.สายเทพ 24 เลก 20	CFRP	26,934	0.39
	Steel	69,336	
สถานี 4843:G210 - RC คลองกระจะ	CFRP	26,934	0.39
	Steel	69,336	
สถานี 4842 : G111 - RC คลองกระจะ ถนน รพช.สายเทพ 24 เลก 26	CFRP	64,642	0.93
	Steel	69,336	
สถานี 4844:G213 - RC คลองห้วย	CFRP	47,273	1.07
	Steel	44,159	
สถานี 4845:G214 - RC คลองบางพร 16	CFRP	141,825	1.43
	Steel	58,392	
สถานี 4839:G208 - RC คลองพระ โขนง 17	CFRP	1,018,105	2.92
	Steel	348,274	

บรรณานุกรม

คู่มือวิธีการปฏิบัติงานบูรณะและปรับปรุงสะพานและท่อเหลี่ยม 2549 สำนักก่อสร้างสะพาน กรม
ทางหลวง (Instruction for bridge and box culvert construction)

มนัส คอวนิส. แนวทางพัฒนางานบำรุงรักษาทางหลวง กรุงเทพมหานคร : สำนักวิเคราะห์และ
ตรวจสอบ กรมทางหลวง 2550

โครงการจัดซ่อมและเสริมกำลังสะพานข้ามคลองในเขตกรุงเทพมหานคร สำนักงานก่อสร้างและ
บูรณะสำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร

ส่งเสริมและบริการวิชาการพระจอมเกล้าลาดกระบัง (Bureau of Academic Support and Services)

มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย มยพ.1508-
51 กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ.2551

มาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต มยพ.1901-51 กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย พ.ศ.2551

FREYSSINET THAILAND

บริษัทอิตาเลียนไทย ดีเวลอปเม้นต์ จำกัด (มหาชน)

Carbon Fiber Post-Strengthening of Concrete Structures an Alternative to Steel Retrofits: Andy
Hundley, P.E., and Don McLaughlin, P.E.

Low Cost Carbon Fiber Overview 9 June 2010 C. David (Dave) Warren Field Technical Manager
Transportation Materials Research

LOW-COST CARBON-FIBER Project Contact: F. S. Baker, N. C. Gallego, A. K. Naskar Oak
Ridge National Laboratory (ORNL)

Repair and Strengthening of Highway Bridges with FRP M.M. Dawood, O.A. Rosenboom &
S.H. Rizkalla Constructed Facilities Laboratory, North Carolina State University

บรรณานุกรม (ต่อ)

Repair of Corrosion Damaged Concrete Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites M. P. Kutarba, The Haskell Company J. R. Brown, Hope College H. R. Hamilton, University of Florida

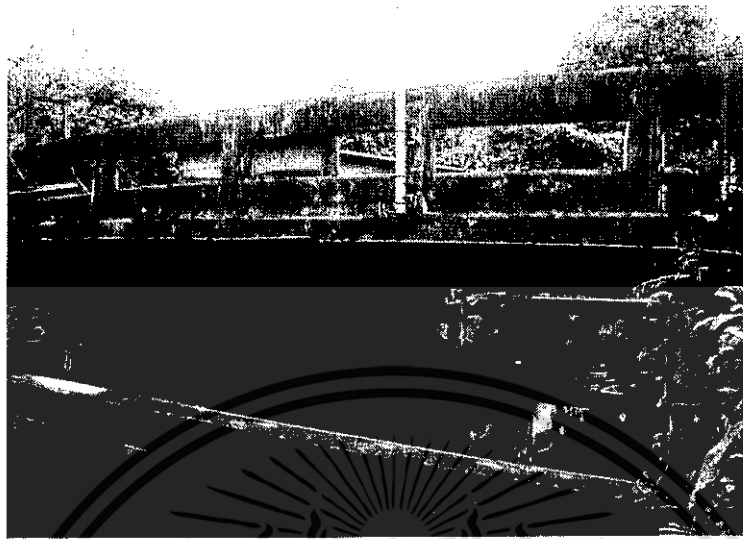
REVIEW ON CARBON-FIBRE ADVANCED COMPOSITES FOR STRENGTHENING METALLIC MEMBERS ALEXANDRU MOLDOVEANU, doctoral student, Technical University of Civil Engineering

Strength and Ductility of Concrete Beams Reinforced with Carbon FRP and Steel Dat Duthinh Monica Starnes U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE Technology Administration Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards Gaithersburg, MD 20899 and Technology

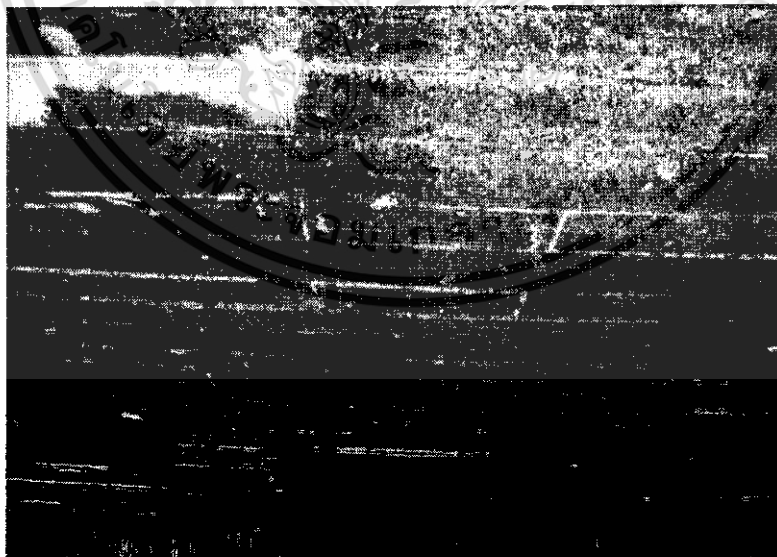
Concrete Beams Using Energy Variation Method: Meisam Safari Gorji: School of Civil Engineering College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran



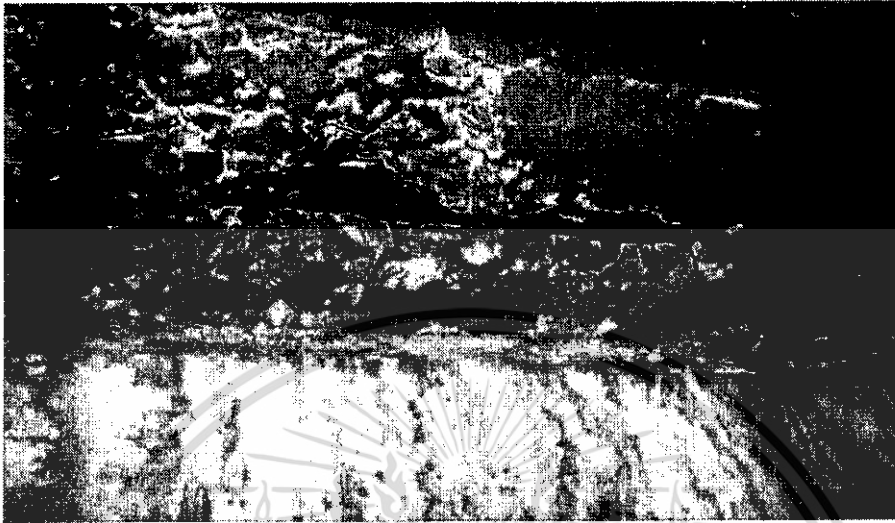
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



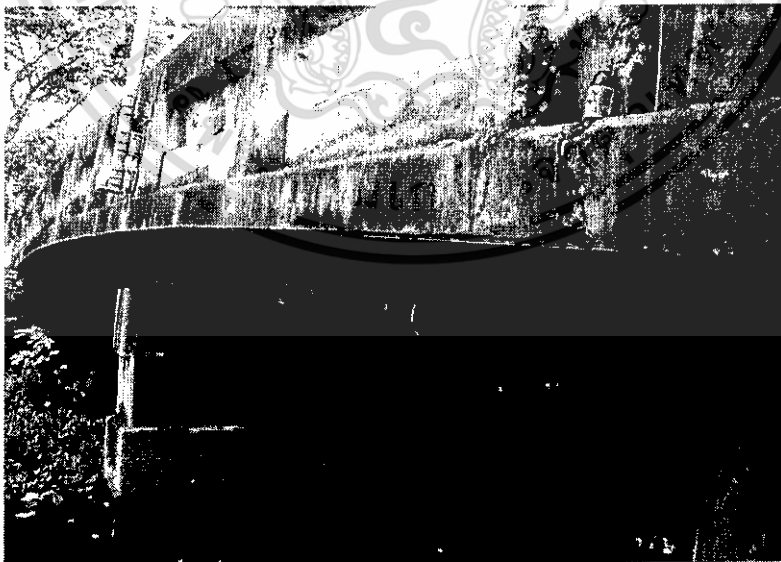
รูปที่ 1 แสดงภาพสะพานข้ามคลองกะจะ ถนนรามคำแหง 24 แยก 20 ก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 2 แสดงภาพพื้นสะพาน (Deck) ซึ่งเป็นพื้น RC Slab ของสะพานข้ามคลองกะจะ ถนนรามคำแหง 24 แยก 20

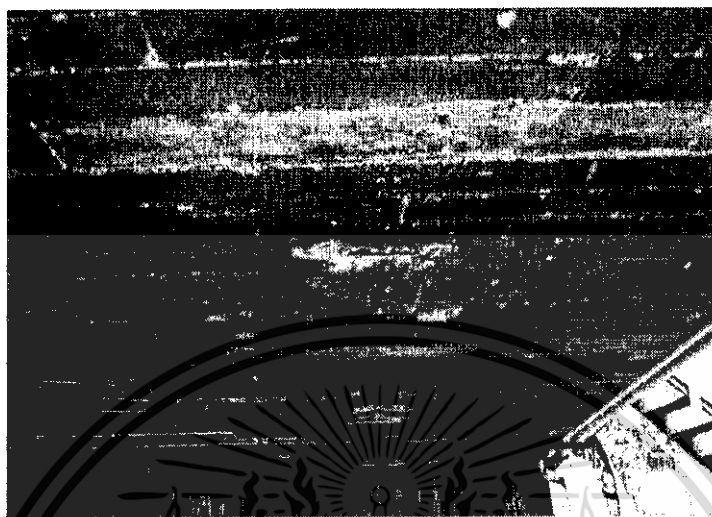


รูปที่ 3 แสดงภาพลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานข้ามคลองกะจะ ถนนรามคำแหง 24 แยก 20

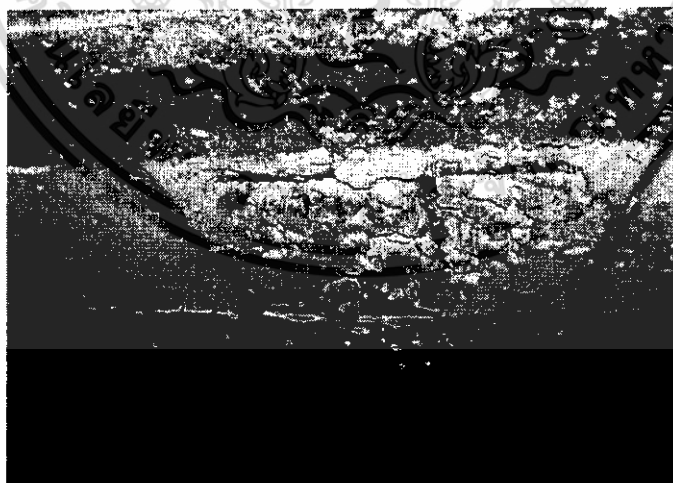


รูปที่ 4 แสดงภาพสะพานข้ามคลองกะจะ ถนนรามคำแหง 24 แยก 28 ก่อนการปรับปรุง

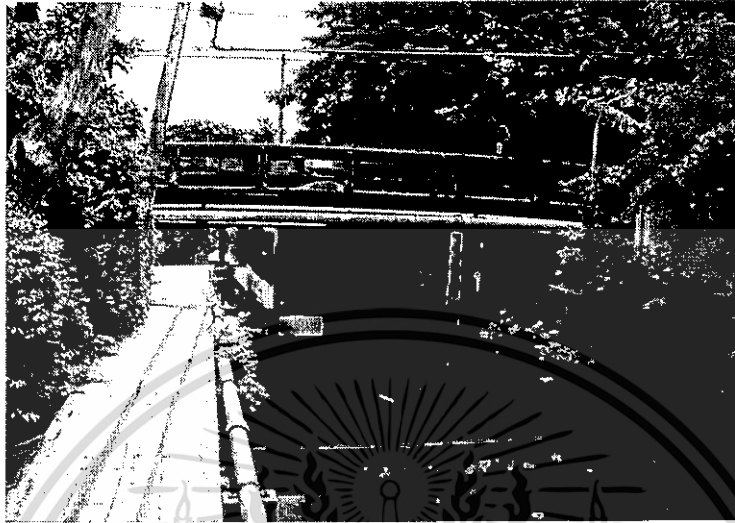
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



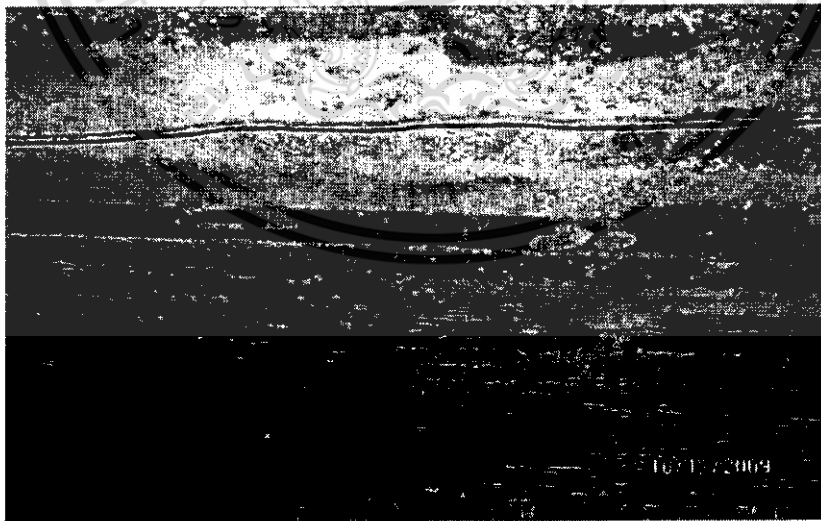
รูปที่ 5 แสดงภาพพื้นสะพาน (Deck) ซึ่งเป็นพื้น RC Slab ของสะพานคลองกะจะ ถนนรามคำแหง 24 แยก 28



รูปที่ 6 แสดงภาพลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานของคลองกะจะ ถนนรามคำแหง 24 แยก 28

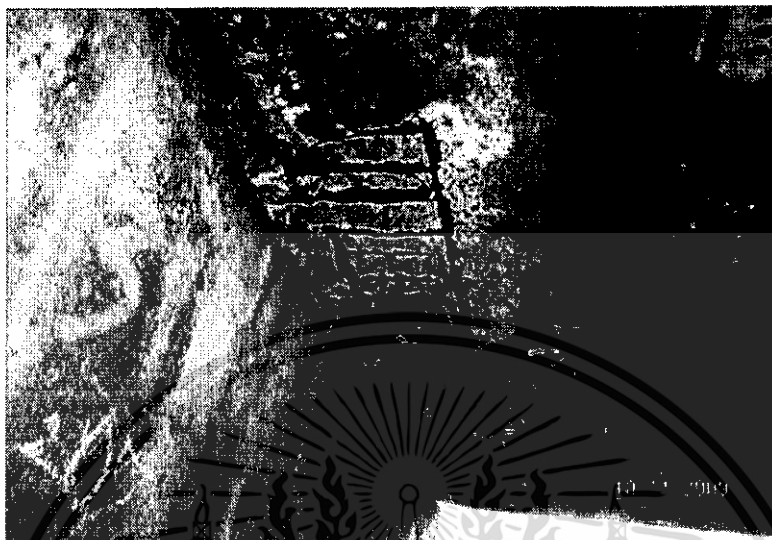


รูปที่ 7 แสดงภาพสะพานข้ามคลองกะจะ ก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 8 แสดงภาพพื้นสะพาน (Deck) ซึ่งเป็นพื้น RC. Slab ของสะพานข้ามคลองกะจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

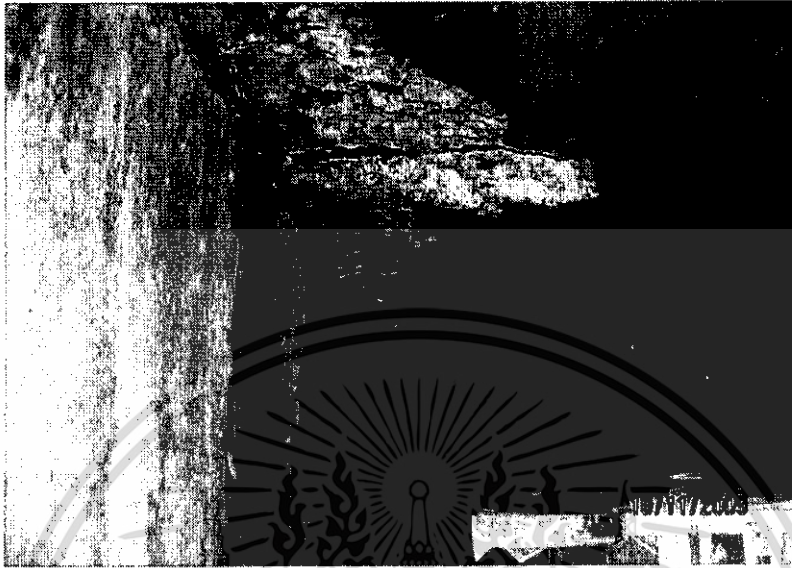


รูปที่ 9 แสดงภาพลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างบริเวณพื้น (Deck) ของสะพานข้ามคลองกะจะ

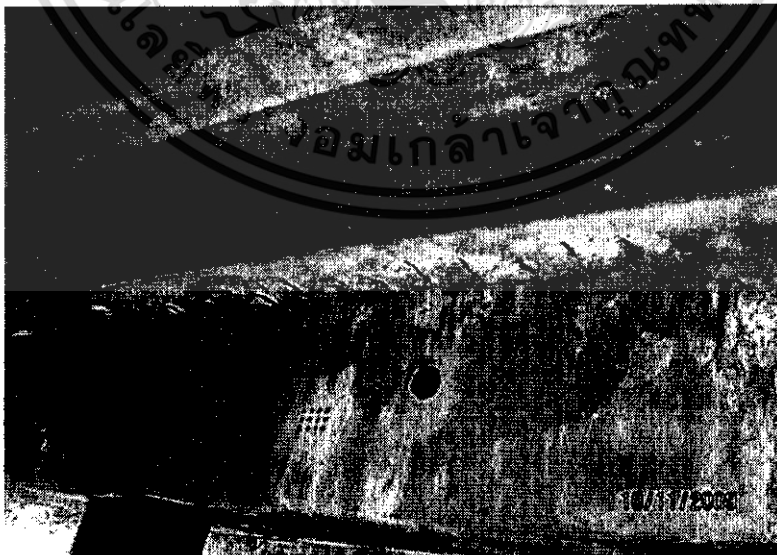


รูปที่ 10 แสดงภาพสะพานข้ามคลองเจ๊ก ก่อนการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

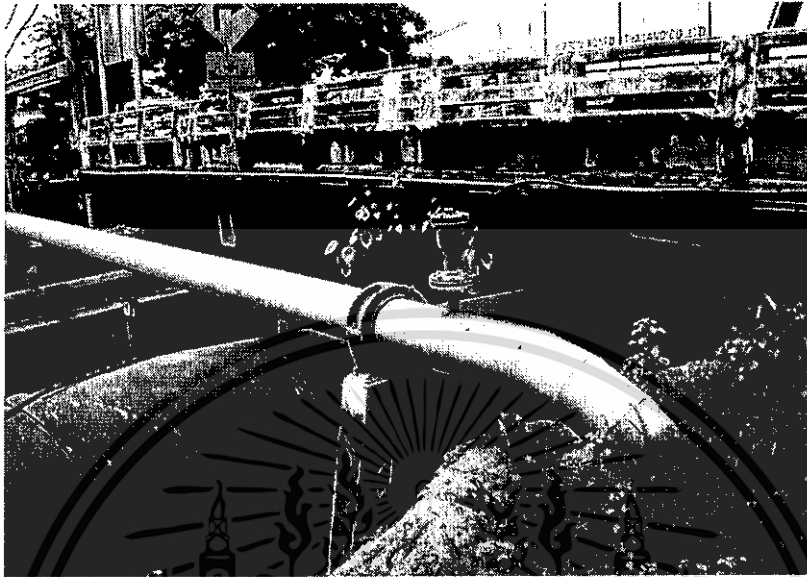


รูปที่ 11 แสดงภาพลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างบริเวณพื้น (Deck) ของสะพานข้ามคลองเจ๊ก



รูปที่ 12 แสดงภาพลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างบริเวณ Cap Beam ของสะพานข้ามคลองเจ๊ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

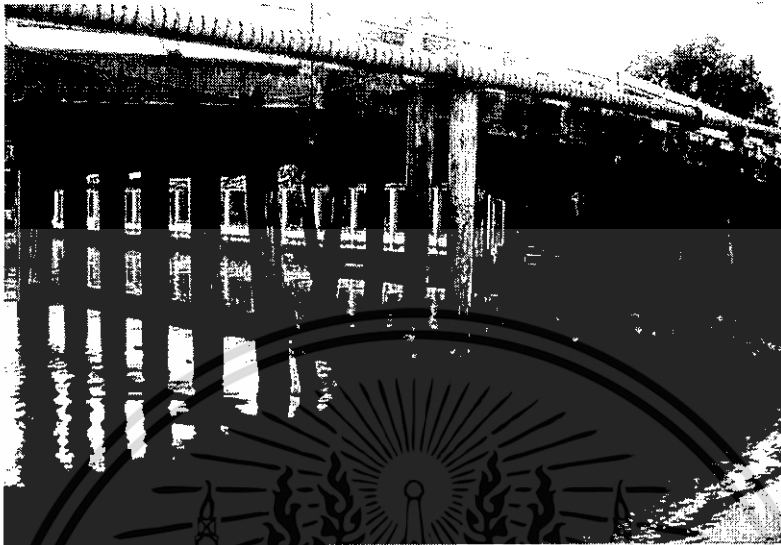


รูปที่ 13 แสดงภาพสะพานข้ามคลองบางจาก ก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 14 แสดงภาพพื้นสะพาน (Deck) ซึ่งเป็นพื้น RC Slab ของสะพานข้ามคลองบางจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

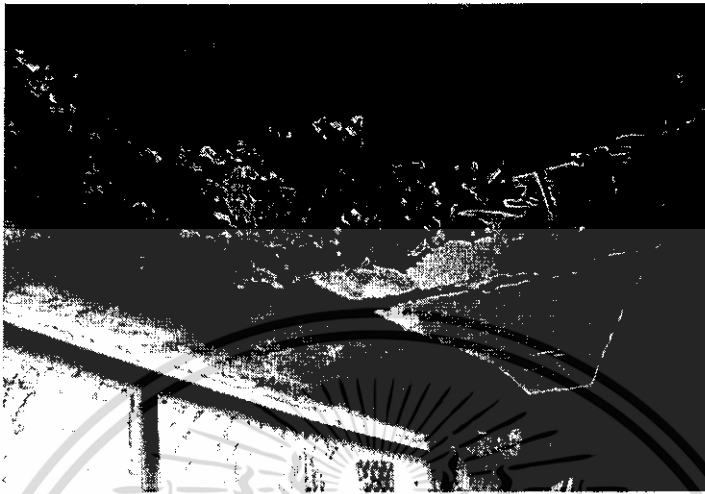


รูปที่ 15 แสดงภาพสะพานข้ามคลองพระ โขนง 17 ก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 16 แสดงภาพความยาวช่วงสะพาน และพื้นสะพาน (Deck) ซึ่งเป็นพื้น RC Slab ของสะพานข้ามคลองพระ โขนง 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 แสดงภาพความเสียหายของโครงสร้างสะพานข้ามคลองพระโขนง 17



รูปที่ 18 แสดงภาพความเสียหายของโครงสร้างสะพานข้ามคลองพระโขนง 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้