



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาขนาดที่เหมาะสมและจุดต่อของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับผิวทางจราจร
ในประเทศไทย

The Appropriate Size and Construction Joint Studies of Precast Concrete Slab for
Concrete Pavement in Thailand

นามผู้วิจัย นายณัฐพล เสรีเฝ้าวงศ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รongศาสตราจารย์วิชัย กิจวัตรเวทย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์สิริสัญญา ทองชาติ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รongศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษานาตที่เหมาสมและจุดต่อของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับผิวทางจราจรใน
ประเทศไทย

The Appropriate Size and Construction Joint Studies of Precast Concrete Slab for Concrete
Pavement in Thailand

โดย

นายณัฐพล เสรีเฝ้าวงษ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสะดวกแห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
พ.ศ. 2556

ณัฐพล เสรีเผ่าวงษ์ 2556: การศึกษานาฬิกาที่เหมาะสมและจุดต่อของแผ่นพื้นคอนกรีต
สำเร็จรูปสำหรับผิวทางจราจรในประเทศไทย ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ วิชัย กิจวัตรเวทย์, Ph.D. 264 หน้า

ศึกษานาฬิกาที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับการซ่อมแซมถนนคอนกรีต โดย
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม LINGO จากปัจจัยที่มาจากความเกี่ยวข้องต่างๆ
เช่น ปัจจัยทางด้านการขนส่ง การติดตั้งซ่อมแซม เป็นต้น ทำให้ได้ขนาดที่เหมาะสมของแผ่น
คอนกรีตสำเร็จรูปในมิติ กว้างxยาวxหนา คือ 2x3x0.2 เมตร

ศึกษาการออกแบบจุดต่อที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับการซ่อมแซมถนน
คอนกรีต จากการออกแบบสามารถออกแบบจุดต่อที่มีความเป็นไปได้ในการซ่อมแซมและการส่ง
ถ่ายแรงได้ทั้งสิ้น 13 รูปแบบ เพื่อให้การเลือกจุดต่อที่มีความเหมาะสมที่สุดจึงใช้ การเปรียบเทียบ
รูปแบบและความเหมาะสมของการซ่อมถนนคอนกรีตด้วย กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์
AHP (Analysis Hierarchy Process) พบว่า จุดต่อสำหรับการซ่อมแซมเพียงจุดเดียวเป็นจุดต่อที่มี
การฝังเหล็กเคียวไว้ทั้งสองด้าน และจุดต่อสำหรับการซ่อมแซมแบบต่อเนื่องเป็นจุดต่อที่มีการฝัง
เหล็กเคียวไว้ด้านหนึ่งและเจาะช่องไว้สำหรับวางเหล็กเคียวอีกด้านหนึ่ง

ออกแบบและทดลองซ่อมแซมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป พบว่า สามารถซ่อมแซม
ถนนคอนกรีตที่เสียหายให้สามารถเปิดการจราจรได้ภายใน 1 วัน ราคาในการซ่อมแซม 2878 บาท/
ตร.ม. ผลทดสอบประสิทธิภาพรอยต่อของแผ่นคอนกรีตอยู่ในสภาพที่ดีทุกรอยต่อเนื่องจากมีค่า
Load Transfer Efficiency มากกว่า 70% ทุกรอยต่อ การประเมินคุณภาพการขับขี่ถนนโดยวัดค่า
ดัชนีความขรุขระสากล พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และจากการศึกษาการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วย
แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป พบว่าจุดคุ้มทุนในการซ่อมแซมควรทำการซ่อมแซมด้วยแผ่นคอนกรีต
สำเร็จรูปจำนวน 5 แผ่น (30 ตร.ม.) ใน 1 วัน

/ /

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Nattapon Sereephaowong 2013: The Appropriate Size and Construction Joint Studies of Precast Concrete Slab for Concrete Pavement in Thailand. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Wichai Kijawatworawet, Ph.D. 264 pages.

Study appropriate size of precast concrete for repaired concrete pavement by using mathematical modeling with the program LINGO. From factor related to various factors such as transportation, repairing, etc. The size of precast concrete in the appropriate dimensions, Width x Length x Thickness, is 2x3x0.2 meters.

The Design of a concrete joints appropriate of precast concrete for repaired concrete pavement. The Design of a concrete joints can be designed the possibility of repairing and load transfer it has a total of 13 type. For selection joints that for most appropriate to use. Comparison of the model and the appropriateness to repair concrete roads by Analysis Hierarchy Process, AHP. The results from AHP process for single joint is type 6 and continuous joints is type 3.

Experimental design and repair of concrete pavement with precast concrete that can repair of damaged concrete pavement within one day. The cost for the overall is 2878 bath/sq.m. The joint of tested slabs are in good condition joints. The Load Transfer Efficiency more than 70% of all joints on the road driving assessment by the international roughness index is in the good range. The conclusion of this research to repairs concrete pavement in one day should be used 5 precast concrete slabs (30 sq.m.)

Student's signature

Thesis Advisor's signature

/ /

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.วิชัย กิจวัตรเวทย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการศึกษา การวิเคราะห์วิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์
จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. จิรพัฒน์ โชติโกกร ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
และ รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.วิมล ลาวัณย์วิสุทธิ รองประธานกรรมการ บริษัท ไอเอ็มเอ็มเอส
จำกัด ที่ให้คำปรึกษาในการศึกษาวิจัยทดลองซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป
ขอขอบคุณ กรมทางหลวงชนบทที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทดสอบต่างๆ และกราบขอบพระคุณ
อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่าง
ยิ่งในการนำไปประกอบอาชีพในอนาคตต่อไป

ความดีอันเกิดจากการศึกษาค้นคว้าในครั้งนี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่ บิดา มารดา อาจารย์ และ
ผู้มีพระคุณทุกท่าน ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดียิ่งจากทุกท่าน และขอกราบ
ขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ณัฐพล เสรีเผ่าวงษ์

มกราคม 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	125
อุปกรณ์	125
วิธีการ	126
ผลและวิจารณ์	143
ผลการวิจัย	143
สรุปและข้อเสนอแนะ	221
สรุปผลการวิจัย	221
ข้อเสนอแนะ	224
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	225

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก	227
ภาคผนวก ก รูปแบบรอยต่อของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบต่างๆ	228
ภาคผนวก ข รายการคำนวณการออกแบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป	239
ภาคผนวก ค รายละเอียดวิธีการคิดคะแนนโดยกระบวนการ AHP (Analysis Hierarchy Process)	249
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	264

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ชนิดของความเสียหายของผิวทางคอนกรีต	6
2	ประเภทและระดับความเสียหายของถนนคอนกรีตที่สมควรซ่อมด้วยวิธีซ่อมแซมตลอดช่วงความหนา	46
3	ลักษณะความเสียหายที่เหมาะสมกับการซ่อมด้วยวิธี Full Depth Repair ในประเทศไทย	47
4	ผลการออกแบบประเภทของคอนกรีตแข็งตัวเร็วและระยะเวลาการเปิดการจราจร	62
5	สรุปรายละเอียดแปลงทดสอบ	64
6	รายละเอียด Mix Design ของแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ	64
7	Concrete Mix Design สำหรับแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ	77
8	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของการหล่อแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ	78
9	คุณสมบัติของวัสดุ Fiberglass	85
10	แสดงส่วนผสมของแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ	96
11	เปรียบเทียบสภาพความเสียหายที่ตรวจพบระหว่าง Preinstalled dowels กับ Retrofitted dowel bar	97
12	ขนาด ความยาว และระยะห่างของเหล็ก Dowel bar ที่แนะนำโดย PCA	112
13	ความยาวของเหล็กเดือยที่ ACI กำหนดไว้	113
14	การเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การประเมินตามระบบ Hierarchy	131
15	การปรับเกณฑ์ตามคอลัมน์ให้ผลรวมเท่ากับ 1	132

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ค่าระดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆ	133
17	สรุปคะแนนประเมินวิธีการซ่อมแซมถนนคอนกรีตตามระบบ Hierarchy	153
18	ตารางสรุประยะเวลาในการดำเนินการซ่อมแซมถนนคอนกรีต	180
19	การประมาณราคาในการติดตั้งซ่อมแซมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป	181
20	ช่วงถนนของการซ่อมแซมแปลงทดสอบถนนคอนกรีต	182
21	การทดสอบประสิทธิภาพรอยต่อด้วยเครื่องมือ (FWD) แปลงทดสอบ สายทาง สป.1005	192
22	ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซม ช่วง กม. 0+050 – 0+080 LT	199
23	ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซม ช่วง กม. 0+050 – 0+080 LT	200
24	ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซม ช่วง กม. 0+070 – 0+080 RT	202
25	ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซม ช่วง กม. 0+070 – 0+080 RT	202
26	ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซม ช่วง กม. 0+100 – 0+130 LT	204
27	ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซม ช่วง กม. 0+100 – 0+130 LT	205

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
28	ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซม ช่วง กม. 0+140 – 0+150 RT	207
29	ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซม ช่วง กม. 0+140 – 0+150 RT	207
30	ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซม ช่วง กม. 0+890 – 0+970 RT	209
31	ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซม ช่วง กม. 0+890 – 0+970 RT	210
32	สรุประยะเวลาในการซ่อมแซมและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการซ่อมแซม	214
ตารางผนวกที่		
ก1	คะแนนประเมินวิธีการซ่อมแซมถนนคอนกรีตตามระบบ Hierarchy	250
ก2	ตารางเปรียบเทียบค่าความแตกต่างการให้คะแนนเวลาที่ใช้ใน การก่อสร้างจนเปิดใช้งาน ตามระบบ Hierarchy	252
ก3	การให้คะแนนเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน ตามระบบ Hierarchy	253
ก4	สรุปคะแนนเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน ตามระบบ Hierarchy	254
ก5	ตารางเปรียบเทียบค่าความแตกต่างการให้คะแนนเทคนิคการก่อสร้าง ตามระบบ Hierarchy	255

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค6 การให้คะแนนเทคนิคการก่อสร้าง ตามระบบ Hierarchy	256
ค7 สรุปคะแนนเทคนิคการก่อสร้าง ตามระบบ Hierarchy	257
ค8 ตารางเปรียบเทียบค่าความแตกต่างการให้คะแนนงบประมาณที่ใช้ใน การซ่อมแซม ตามระบบ Hierarchy	258
ค9 การให้คะแนนงบประมาณในการซ่อมแซม ตามระบบ Hierarchy	259
ค10 สรุปคะแนนงบประมาณในการซ่อมแซม ตามระบบ Hierarchy	260
ค11 ตารางเปรียบเทียบค่าความแตกต่างการให้คะแนนความสะดวกใน การจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ ตามระบบ Hierarchy	261
ค12 การให้คะแนนความสะดวกในการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ใน การก่อสร้าง ตามระบบ Hierarchy	262
ค13 สรุปคะแนนความสะดวกในการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ใน การก่อสร้าง ตามระบบ Hierarchy	263

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างถนนคอนกรีต	4
2 ภาพรอยแตกตามยาว	8
3 รอยแตกตามขวาง	8
4 รอยแตกบริเวณมุม	9
5 รอยแตกลักษณะแผ่นพื้นถูกแบ่งแยก	10
6 ความเสียหายของวัสดุยาแนวรอยต่อ	11
7 ผิวมวลรวมถูกขัดสีเป็นมัน (Polished Aggregate)	12
8 รอยเลื่อนต่างระดับ	13
9 การทรุดตัวต่างระดับของไหล่ทาง	14
10 การแยกตัวของไหล่ทาง	15
11 การสูญเสียมวลรวมละเอียดของชั้นโครงสร้างทาง	16
12 รอยปะซ่อมผิวคอนกรีตด้วยแอสฟัลต์คอนกรีต	17
13 การตรวจสอบความเสียหายของถนนด้วยตาเปล่า	18
14 แสดงตัวอย่างการกำหนดทิศทางจราจรและการกำหนดตำแหน่งช่วงถนน	21
15 การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างถนนด้วย Falling Weight Deflectometer	24
16 รถคู่ลากจูงและรถลากพ่วง	24
17 ชุดอุปกรณ์ทดสอบของรถลากพ่วง	25
18 หลักการทำงานของ Falling Weight Deflectometer	27
19 การทดสอบความแข็งแรงโครงสร้างถนนด้วยเครื่อง FWD	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	Approach Slab และ Leave Slab	30
21	กราฟแสดงค่าการแอ่นตัวเทียบกับน้ำหนักที่กระทำ	31
22	การทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) บนพื้นทางดินซีเมนต์	32
23	การสำรวจถนนคอนกรีตด้วยเครื่อง GPR	33
24	ภาพผลการสำรวจด้วยเครื่อง GPR มีความผิดปกติลักษณะความเข้มของสัญญาณสูงบริเวณรอยต่อได้แผ่นคอนกรีต	33
25	เกณฑ์ค่า IRI สำหรับถนนในประเทศไทย	34
26	เครื่องมือวัดความขรุขระแบบ Bump Integrator	35
27	เครื่อง Dipstick	36
28	เครื่องวัดระดับแบบเลเซอร์ กล้องบันทึกภาพการเคลื่อนไหว และชุดเครื่องมือระบุพิกัดด้วยดาวเทียม	37
29	เครื่องมือ Walking Profiler และการใช้งาน	38
30	การซ่อมถนนคอนกรีตด้วยวิธีการเปลี่ยนวัสดุรายต่อชนิตเทรื่อน	40
31	การซ่อมถนนคอนกรีตด้วยวิธีถ่าน้ำหนัก	41
32	การซ่อมแซมบางส่วนของความหนา	41
33	การอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต	42
34	การซ่อมแซมแบบหล่อในที่	43
35	ระบบการหล่อแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete Pavement)	44
36	การรื้อถนนคอนกรีตที่เสียหายเพื่อใช้รองรับแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
37	การติดตั้งแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ	45
38	ตัวอย่างการเสริมเหล็กในรอยต่อตามขวางของ Caltrans (2004)	51
39	รูปแบบการยึดเหล็กเดือย	52
40	การกำหนดพื้นที่ของคอนกรีตที่ต้องรื้อออก	56
41	แยกพื้นที่ที่จะทำการซ่อมแซมด้วยวิธีการใช้เหล็ยตัดคอนกรีต	57
42	นำแผ่นพื้นคอนกรีตออกโดยวิธีทุบให้แตกหรือวิธียกออก	57
43	ติดตั้งเหล็กเดือย	59
44	การเสริมเหล็กตะแกรงและเหล็กเดือย และจุกคกในแบบหล่อ	65
45	การหล่อแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จและการแต่งหน้าแผ่นคอนกรีต	65
46	การบ่มแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป	66
47	รายละเอียดการเสริมเหล็กในแผ่น Precast	67
48	ถนนคอนกรีตที่มีความเสียหายเหมาะสมแก่การซ่อมด้วยวิธี Precast	68
49	การตัดและขุดรื้อแผ่นคอนกรีต	69
50	การทำความสะอาดและเตรียมปรับพื้นที่ใต้พื้นคอนกรีต	70
51	เจาะช่องสำหรับวางเหล็กเดือยเพื่อใช้สำหรับเป็นรอยต่อถ่ายแรง	70
52	รูปตัดแสดงรายละเอียดรอยต่อ	71
53	การติดตั้งแผ่น Precast โดยใช้ วัสดุ HDP	72
54	การติดตั้งแผ่น Precast โดยใช้วัสดุ Flowable Fill	74
55	การเกราะที่ช่อง Dowel Slots	75

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
56	แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จที่ติดตั้งเสร็จแล้ว	75
57	แผนภูมิแสดงขั้นตอนและระยะเวลาการก่อสร้างด้วยวิธี Precast โดยใช้วัสดุ Flowable Fill	75
58	รายละเอียดแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ	78
59	แผ่นคอนกรีตที่มีรอยแตกบริเวณมุมแผ่น	79
60	การขุดรื้อแผ่นคอนกรีตที่เสียหาย	80
61	การจัดเตรียมพื้นที่ก่อนวางแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ	81
62	การขนย้ายแผ่นคอนกรีต	82
63	การติดตั้งแผ่นคอนกรีตก่อนอัดฉีดโฟม	83
64	ตัวยึดแบบ Fiberglass	84
65	การติดตั้งตัวยึดแบบ Fiberglass	85
66	แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว	86
67	แสดงเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างวิธี Precast ของ Uretek	87
68	รูปแบบปลอกเหล็กสำหรับยึดรอยต่อ (Kwik Joint Steel Couplers)	88
69	รูปขยายแบบปลอกเหล็กสำหรับยึดรอยต่อ (Kwik Joint Steel Couplers)	89
70	ภาพขยายการสวมยึดรอยต่อ	89
71	โมเดลการเสริมเหล็กและลักษณะรอยต่อ	90
72	ลักษณะการวางแผ่นพื้นแบบต่อเนื่อง	90
73	แนวรอยต่อของแผ่น Kwik Slab ที่เกราท์เสร็จแล้ว	91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
74	แสดงรูปแบบรอยต่อตามขวางของระบบ Super Slab	92
75	แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จระบบ Super Slab ที่รอการขนส่งมาติดตั้งหน้างาน	92
76	เครื่องมือปรับระดับพื้นที่	93
77	การติดตั้งแผ่นพื้น Super Slab โดยใช้เครนติดตั้ง	93
78	การติดตั้งแผ่นคอนกรีต (Tayabji, 2008)	94
79	การอัดฉีดวัสดุเกรทท์เพื่อให้อุดรอยต่อ (Lacoss, 2008)	94
80	การอุดโพรงใต้แผ่นคอนกรีต (Lacoss, 2008)	95
81	ตัวอย่างสภาพความเสียหายของแผ่นคอนกรีตที่ฝั่งเหล็กเคียวไว้ก่อน	98
82	ตัวอย่างสภาพความเสียหายของแผ่นคอนกรีตที่ฝั่งเหล็กเคียวไว้ภายหลัง	98
83	รายละเอียดรอยต่อประเภทต่าง ๆ ของผิวทางคอนกรีต	101
84	ลักษณะรอยต่อตามขวางและรอยต่อตามยาวของถนนคอนกรีต	102
85	รอยต่อตามขวางและเหล็กกลม Dowel bar	103
86	รอยต่อตามยาวและเหล็กข้ออ้อย Tie bar	103
87	ลักษณะการถ่ายแรงของเหล็กเคียวระหว่างรอยต่อ	104
88	ประสิทธิภาพของการถ่ายแรงของเหล็กเคียว	106
89	ตัวอย่างแรงกระทำจากล้อรถที่กระจายผ่าน Dowel Bar แต่ละเส้น	108
90	น้ำหนักลงเพลลาของรถบรรทุกประเภทต่างๆ	109
91	การแอ่นตัวของเหล็กเคียวเนื่องจากน้ำหนักกระทำ	110
92	รูปแบบ Figure Eight	116

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
93	รูปแบบ Vee	117
94	รูปแบบ Double Vee	118
95	รูปแบบ Miniature I-Beam	118
96	รูปแบบ Georgia Split Pipe	119
97	รูปแบบ Freyssinet Connector	120
98	รูปแบบ Dowel Bar Retrofit	122
99	รูปแบบรอยต่อแบบ Concrete Key	122
100	รูปแบบรอยต่อที่ใช้วัสดุอื่น	124
101	แสดงตัวอย่างของแผนภูมิลำดับชั้นหรือแบบจำลองของการตัดสินใจ	128
102	การวิเคราะห์กระบวนการตัดสินใจแบบลำดับชั้น	134
103	ขั้นตอนการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป	137
104	เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ของกรมทางหลวงชนบท	138
105	การปรับตำแหน่ง Geophone เครื่อง FWD กรมทางหลวงชนบท เพื่อทดสอบ LTE ของถนนคอนกรีต	139
106	การตรวจวัด LTE โดยใช้ D300 กับ D400	139
107	ตำแหน่งของ Geophone ในการทดสอบ LTE	140
108	เครื่องมือวัด International Roughness Index (IRI)	141
109	ตำแหน่งที่ดำเนินการทดสอบวัด IRI ด้วยเครื่อง Walking Profiler	142
110	รถบรรทุกติดเครน	144

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
111	รูปตัดแสดงรายละเอียดการติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป	146
112	ตำแหน่งของหุยกสำหรับยกแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป	146
113	ภาพตัดแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป	147
114	กำหนดตัวแปรการตัดสินใจเพื่อสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Lingo	148
115	ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo	148
116	ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo	149
117	ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo	149
118	รูปแบบของรอยต่อสำหรับการซ่อมแซมที่มีการฝังเหล็กเคียวไว้ในแผ่นคอนกรีต	150
119	รูปแบบที่ใช้สำหรับการทดลองซ่อมถนนคอนกรีต	152
120	ขนาดและการเสริมเหล็กของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้ในการซ่อมแซมรูปแบบที่ 3	154
121	ขนาดและการเสริมเหล็กของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้ในการซ่อมแซมรูปแบบที่ 6	155
122	การเตรียมแบบหล่อแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป	156
123	การเทคอนกรีต	156
124	การจี้คอนกรีตและการจัดเหล็กเคียว	157
125	การปาดหน้าผิวคอนกรีต	157
126	การถอดบล็อกเข้าที่	158

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
127	การแต่งผิวคอนกรีตภายหลังการถอดบล็อกเอ้าท์	158
128	การขูดผิวหน้าแผ่นคอนกรีต	159
129	ลักษณะแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป	159
130	การบ่มแผ่นคอนกรีต	160
131	การขนส่งแผ่นคอนกรีตมาที่แปลงทดสอบ	160
132	ติดตั้งป้ายเตือนและปิดการจราจร	161
133	ตัดถนนคอนกรีตเดิมด้วยเครื่องตัดคอนกรีต	162
134	ภายหลังการตัดถนนเดิมจนรอบ	162
135	ตัดร่อง Dowel Bar Slot บนถนนเดิม	163
136	รื้อถนนเดิมออกด้วยรถ Back Hoe	164
137	สกัดร่องเหล็กเดือย	164
138	ขนส่งถนนเดิมไปทิ้ง	165
139	ทำการขุดชั้นรองพื้นทางออก	165
140	บดทรายหยาบด้วยเครื่องตบแบบกระ โคด	166
141	เติมเหล็กค้ำรูปตัวยู	167
142	ตอกเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยู	167
143	ตรวจวัดระดับหลังการตอกเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยู	168
144	เสียบเหล็กยึดตามระยะที่กำหนด	169
145	ติดตั้งเหล็กยึดให้ได้ระยะฝั่งเพียงพอ	169

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
146	ติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป	170
147	เช็กระยะห่างระหว่างแผ่น โดยใช้ไม้หนา 20 มม.	170
148	ภายหลังการติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปเรียบร้อย	171
149	เท Self Leveling Mortar ด้วยรางส่งคอนกรีต	171
150	เท Self Leveling Mortar ด้วยการตักเท	172
151	Self Leveling Mortar เติมเต็มช่องว่างใต้แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป	172
152	ทำความสะอาดรอยต่อด้วยเครื่องเป่าลม	173
153	ผสม Non-Shrink Grout ด้วยการตีผสม	173
154	แต่งผิวหน้าให้เรียบ	174
155	ตัดรอยต่อด้วยเครื่องตัดคอนกรีต	174
156	ปิดรอยต่อด้วย Joint Sealer	175
157	การติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปบนเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยู	175
158	การวัดระดับของเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยู	176
159	การเท Self Leveling Mortar	177
160	สภาพถนนภายหลังการซ่อมแซม	177
161	สภาพถนนภายหลังการซ่อมแซม	178
162	ระยะเวลาในการซ่อมแซมด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป 1 แผ่น	179
163	ระยะเวลาในการซ่อมแซมด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป 5 แผ่นต่อเนื่อง	180
164	Station 0+050 LT (Precast Concrete)	183

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
165	Station 0+060 LT (High Early Strength 72 ชม.)	183
166	Station 0+070 LT (Precast Concrete)	184
167	Station 0+070 RT (Precast Concrete)	184
168	Station 0+100 LT (Precast Concrete)	185
169	Station 0+110 LT (Precast Concrete)	185
170	Station 0+120 LT (Precast Concrete)	186
171	Station 0+148 RT (Precast Concrete)	186
172	Station 0+894 RT (Precast Concrete)	187
173	Station 0+894 RT (Precast Concrete)	187
174	Station 0+920 RT (Precast Concrete)	188
175	Station 0+930 RT (Precast Concrete)	188
176	Station 0+940 RT (Precast Concrete)	189
177	Station 0+950 RT (High Early Strength 24 ชม.)	189
178	Station 0+960 RT (Precast Concrete)	190
179	การทดสอบ LTE แปลงทดสอบถนนคอนกรีตด้วยเครื่องมือ FWD ของ กรมทางหลวงชนบท	191
180	การตรวจวัด IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซม	196
181	การตรวจวัด IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซม	197

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
182	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม Station 0+050-0+080 LT	198
183	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม Station 0+070-0+080 RT	201
184	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม Station 0+100-0+130 LT	203
185	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม Station 0+140-0+150 RT	206
186	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม Station 0+890-0+970 LT	208
187	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม สป.1005	211
188	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับพื้นที่การซ่อมแซมถนน	217
189	ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่กับค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมถนน	218
190	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ในการซ่อมกับระยะเวลาและ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม	219
191	รูปขยายกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ในการซ่อมกับระยะเวลา และค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม	220

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 รูปแบบที่ 1	229
ก2 รูปแบบที่ 2	229
ก3 รูปแบบที่ 3	230
ก4 รูปแบบที่ 4	230
ก5 รูปแบบที่ 5	231
ก6 รูปแบบที่ 6	231
ก7 รูปแบบที่ 7	232
ก8 รูปแบบที่ 8	233
ก9 รูปแบบที่ 9	234
ก10 รูปแบบที่ 10	235
ก11 รูปแบบที่ 11	236
ก12 รูปแบบที่ 12	237
ก13 รูปแบบที่ 13	238

การศึกษาขนาดที่เหมาะสมและจุดต่อของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับผิวทาง
จราจรในประเทศไทย

The Appropriate Size and Construction Joint Studies of Precast Concrete Slab for
Concrete Pavement in Thailand

คำนำ

ถนนเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีความสำคัญในการคมนาคมขนส่ง ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและพัฒนาประเทศ ทำให้การคมนาคมขนส่งทางรถยนต์มีความสะดวก รวดเร็วและปลอดภัย นำความเจริญไปสู่ท้องถิ่นในภูมิภาคต่างๆ ได้อย่างทั่วถึง แต่อย่างไรก็ตาม ถนนจะเสื่อมสภาพลงตามกาลเวลา เนื่องมาจากการใช้งานและอาจเกิดความเสียหายในรูปแบบต่างๆ เมื่อปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นทำให้ถนนเกิดการเกิดความเสียหายและเสื่อมสภาพลงได้เร็วกว่าปกติ จึงทำให้อายุการใช้งานของถนนสั้นลง ดังนั้นจึงต้องมีการสำรวจเพื่อบำรุงรักษา และซ่อมแซมถนนที่เกิดความเสียหายหรือเสื่อมสภาพอย่างสม่ำเสมอ

ปัจจุบันในการซ่อมแซมถนนแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีการปิดการจราจรชั่วคราว ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อการคมนาคมขนส่งและต่อเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก ประเทศไทยนิยมสร้างถนนคอนกรีตมากกว่าถนนลาดยาง แต่อย่างไรก็ตาม ถนนคอนกรีตเมื่อเกิดเสียหายและไม่อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ จำเป็นต้องปิดการจราจรเพื่อซ่อมแซมถนนเป็นเวลานาน ดังนั้นหากสามารถลดระยะเวลาในการซ่อมแซมถนนเพื่อให้สามารถเปิดใช้งานได้เร็วขึ้น จะสามารถลดความสูญเสียด้านเศรษฐกิจ อีกทั้งเป็นการตอบสนองความต้องการของผู้ใช้รถใช้ถนน และประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงได้เป็นอย่างดี

ด้วยเหตุผลดังกล่าวเพื่อลดระยะเวลาในการซ่อมแซมถนนคอนกรีตให้สามารถเปิดใช้งานได้เร็วที่สุด งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิธีการซ่อมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป แทนการซ่อมแซมแบบปกติ ศึกษาวิธีการออกแบบขนาดและจุดต่อของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป ให้มีความเหมาะสม สามารถส่งถ่ายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับงานทางด้านวิศวกรรมในประเทศไทย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการซ่อมถนนคอนกรีตให้สามารถเปิดใช้งานได้เร็ว
2. เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบขนาดที่เหมาะสมและจุดต่อของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้ในการซ่อมถนนคอนกรีต โดยพิจารณาจากการใช้รถบรรทุกติดเครน
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการส่งถ่ายแรงของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้ในการซ่อมถนนคอนกรีต
4. เพื่อร่วมทำการทดลองซ่อมถนนคอนกรีตเพื่อให้สามารถเปิดใช้งานได้เร็วและทำการศึกษเปรียบเทียบด้านวิศวกรรม ด้านเศรษฐศาสตร์

การตรวจเอกสาร

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วยโครงสร้างทั่วไปของถนนคอนกรีต ลักษณะความเสียหายทั่วไปของถนนคอนกรีต วิธีการสำรวจความเสียหายของถนน วิธีการซ่อมถนนคอนกรีตแบบปกติ และวิธีการซ่อมถนนคอนกรีตแบบรวดเร็ว

โครงสร้างทั่วไปของถนนคอนกรีต

1. ถนนคอนกรีต (Rigid Pavement)

ถนนคอนกรีตโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

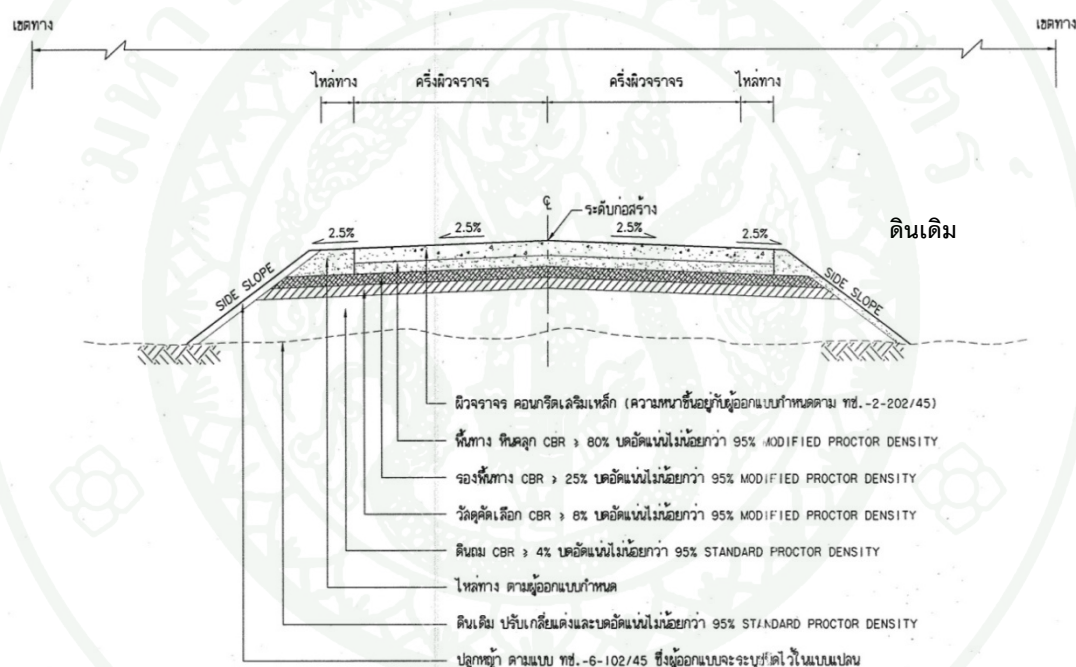
1.1. ถนนคอนกรีตไร้เหล็กเสริมแบบมีรอยต่อ (Joint Plain Concrete Pavement หรือ JPCP) เป็นถนนคอนกรีตที่ไม่มีการใช้เหล็กเสริมแรง จึงมีขนาดของแผ่นคอนกรีตไม่ยาวนานนัก โดยแผ่นคอนกรีตมีระยะห่างระหว่างรอยต่อประมาณ 3.1- 6.7 เมตร

1.2. ถนนคอนกรีตเสริมเหล็กแบบมีรอยต่อ (Joint Reinforced Concrete Pavement หรือ JRCP) เป็นถนนคอนกรีตที่มีการใช้เหล็กเสริมแรง (Temperature Steel) รับการยืดหดตัวของคอนกรีตอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และมีรอยต่อเป็นช่วงโดยแผ่นคอนกรีตมีความยาวไม่เกิน 15 เมตร ซึ่งปกติถนน JRCP ในประเทศไทยจะมีระยะห่างระหว่างรอยต่อประมาณ 10 เมตร

1.3. ถนนคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไร้รอยต่อ (Continuously Reinforced Concrete Pavement หรือ CRCP) เป็นถนนคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเป็นพิเศษ ทำให้สามารถก่อสร้างแผ่นถนนคอนกรีตที่มีความยาวต่อเนื่องได้

ถนนคอนกรีตเสริมเหล็กแบบมีรอยต่อ (JRCP) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในเมืองไทย โดยมีลักษณะผิวทางที่แข็งและไม่ยืดหยุ่น (Rigid) เนื้อถนนคอนกรีตไม่ต่อเนื่องกัน การออกแบบถนนคอนกรีตอย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรมและความคุมการก่อสร้างให้เป็นไปตามมาตรฐานงานทางจะได้ถนนคอนกรีตมีความแข็งแรงทนทาน ใช้งานได้นาน (ถึง 20 ปี) โดยมีค่า

บำรุงรักษาต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับถนนลาดยางแอสฟัลต์ ถ้าพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุ คอนกรีตมีความสามารถรับแรงอัด (Compressive Stresses) ได้ดี แต่สามารถรับแรงดึง (Tensile Stresses) ได้ต่ำมาก นอกจากนี้ คอนกรีตมีการยืดตัว (Thermal Expansion) เมื่อได้รับความร้อนและมีการหดตัว (Thermal Contraction) เมื่ออุณหภูมิเย็นลง ดังนั้นการก่อสร้างจำเป็นต้องมีเหล็กเสริมเพื่อควบคุมการยืดหดตัวและควบคุมมิให้รอยร้าวในแผ่นคอนกรีตขยายตัวมากกว่าระดับปกติ ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านลงไปเป็นอันตรายต่อโครงสร้างชั้นทางด้านล่าง ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างถนนคอนกรีตทั่วไปซึ่งประกอบไปด้วย ชั้นผิวทาง ชั้นทรายกรองน้ำ และชั้นรองพื้นทาง



ภาพที่ 1 โครงสร้างถนนคอนกรีต

ที่มา : แบบมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท

2. ผิวทาง (Surface Course)

ทำหน้าที่รับน้ำหนักจากล้อรถและถ่ายแรงลงสู่วัสดุรองพื้นทางและดินคันทาง คุณสมบัติของหินและทรายที่ใช้ในการก่อสร้างจะต้องมีความแข็งแรง ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ส่วนผสมของคอนกรีตจะต้องออกแบบให้สามารถรับแรงอัดได้สูง เช่น 250 ถึง 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ต้องควบคุมคุณสมบัติของคอนกรีตในระหว่างก่อสร้าง เช่น Water Cement Ratio และ Slump Test ซึ่งมีความจำเป็นและสำคัญยิ่งต่อคุณภาพของถนนที่ทำการก่อสร้าง

3. ทรายรองพื้นทาง (Sand Cushion Course)

วัสดุชั้นนี้เป็นทรายกรองน้ำ ซึ่งวัสดุในชั้นนี้ต้องมีวัสดุมวลละเอียด (Fine Aggregate) หรือวัสดุที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกินร้อยละ 10 เพื่อให้ทำหน้าที่ระบายน้ำได้ดีทั้งนี้เพื่อ

- 3.1. ช่วยป้องกันการชำรุดเสียหายของถนนเนื่องจากการอัดทะลัก (Pumping Action)
- 3.2. ช่วยป้องกัน Frost Action ในประเทศที่ฤดูหนาวมีอุณหภูมิต่ำมาก น้ำกลายเป็นน้ำแข็งที่ได้ผิวทางและทำให้เกิดเป็นโพรงช่องว่างได้เมื่อน้ำแข็งละลายในฤดูร้อน
- 3.3. ช่วยในการระบายน้ำใต้พื้นคอนกรีต

4. รองพื้นทาง (Subbase Course)

วัสดุที่นำมาใช้ควรเป็นดินลูกรังซึ่งมีคุณสมบัติในการรับน้ำหนักทางวิศวกรรมได้ดี โดยปกติแล้วแรงกระทำที่เกิดในถนนคอนกรีตนั้นมาจากน้ำหนักของล้อรถเป็นส่วนใหญ่ ส่วนแรงกระทำในชั้นรองพื้นทางจะมาจากน้ำหนักรถที่แผ่ลงมาจากแผ่นคอนกรีต ผ่านชั้นทรายรองพื้นทาง (Sand Cushion Course)

5. ดินเดิม (Subgrade)

เป็นชั้นดินในบริเวณที่ถนนตัดพาดผ่าน ซึ่งทำหน้าที่รับน้ำหนักจากล้อรถที่ถ่้ายมาจากชั้นโครงสร้างทาง ทั้งนี้ก่อนทำการก่อสร้าง จะต้องไถเปิดหน้าดิน (Clearing and Grubbing) เพื่อกำจัดเศษอินทรีย์วัตถุและวัชพืช แล้วจึงรื้อชั้นดินลงไปอีกอย่างน้อยอีก 15 – 20 เซนติเมตร เพื่อทำการบดอัดให้แน่นตามข้อกำหนด

ลักษณะความเสียหายทั่วไปของถนนคอนกรีต

ความเสียหายของผิวทางคอนกรีตที่พบในประเทศไทยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มและชนิดความเสียหายต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 1 สาเหตุความเสียหายของถนนคอนกรีตเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ปริมาณจราจรและน้ำหนักบรรทุกที่เกินจากที่ออกแบบไว้ คุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน การก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน การเสื่อมสภาพของถนนจากการใช้งานโดยขาดการบำรุงรักษา เป็นต้น

ตารางที่ 1 ชนิดของความเสียหายของผิวทางคอนกรีต

กลุ่มความเสียหาย	ชนิดของความเสียหาย (Distress Type)
รอยแตก (Crack)	รอยแตกตามยาว (Longitudinal Crack)
	รอยแตกตามขวาง (Transverse Crack)
	รอยแตกที่มุม (Corner Crack)
	รอยแตกลักษณะแผ่นพื้นถูกแบ่งแยก (Divided Slab)
	รอยแตกลักษณะทะลุของแผ่นคอนกรีต (Punch Out)
	รอยแตกจากคอนกรีตสูญเสียความทนทาน (Durability Crack)

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ความเสียหายบริเวณ รอยต่อ (Joint Deficiencies)	ความเสียหายของวัสดุยาแนวรอยต่อ (Joint Seal Damage)
	ความเสียหายของการถ่ายน้ำหนักบริเวณรอยต่อ (Joint Load Transfer System Deterioration)
	รอยบิ่นกะเทาะที่มุม (Corner Spall)
	รอยบิ่นกะเทาะที่รอยต่อตามขวาง รอยต่อตามยาว หรือรอยแตก (Transverse Joint Spall Longitudinal Joint Spall or Crack Spall)
รอยตำหนิบนผิวทาง (Surface Defects)	รอยแตกจากการหดตัวของผิวทาง (Shrinkage Crack)
	ผิวแตกกลางทางหรือผิวแตกกว้าง (Map Crack)
	ผิวหลุดลอก (Spalling)
	ผิวมวลรวมถูกขัดสีเป็นมัน (Polished Aggregate)
ความเสียหายอื่นๆ (Miscellaneous Distress)	การโก่งงอ (Blow Up or Buckling)
	การสูญเสียมวลรวมละเอียดของชั้นโครงสร้างทาง (Pumping)
	รอยเลื่อนต่างระดับ (Faulting)
	การทรุดตัวต่างระดับของไหล่ทาง (Lane to Shoulder Drop Off)
	การแยกตัวของไหล่ทาง (Lane to Shoulder Separation)
	รอยปะซ่อมผิวคอนกรีตด้วยแอสฟัลต์คอนกรีต (Concrete Pavement Patching)

ที่มา: คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพถนนคอนกรีต กรมทางหลวงชนบท

1. รอยแตกตามยาว (Longitudinal Crack) เป็นรอยแตกที่เกิดขึ้นขนานกับทิศทางการจราจร



ภาพที่ 2 ภาพรอยแตกตามยาว

สาเหตุ เกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากกาบีคหดตัวของแผ่นคอนกรีตเนื่องจากความกว้างมากเกินไป เกิดจากขั้นตอนการบ่มคอนกรีตระหว่างการก่อสร้าง เกิดจากงานเคลื่อนตัวของคันทาง การสูญเสียกำลังรับน้ำหนักของวัสดุคันทางใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต

2. รอยแตกตามขวาง (Transverse Crack) เป็นรอยแตกที่เกิดขึ้นตั้งฉากกับทิศทางการจราจร



ภาพที่ 3 รอยแตกตามขวาง

สาเหตุ

- 1) น้ำหนักกระทำซ้ำสูง
- 2) การสูญเสียกำลังรับน้ำหนักของชั้นวัสดุฐานราก
- 3) การหดตัวของคอนกรีต
- 4) แผ่นพื้นยาวเกินหรือการตัดรอยต่อตามขวางที่ล่าช้า
- 5) บางกรณีเกิดจากการทรุดตัวของดินคันทางฐานราก

3. รอยแตกบริเวณมุม (Corner Crack) เป็นรอยแตกบริเวณมุมแผ่นคอนกรีต มีลักษณะตัดผ่านรอยต่อ (Joint) แต่ละด้านของแผ่นพื้นคอนกรีต โดยมีระยะห่างจากมุมไม่เกินครึ่งหนึ่งของความกว้างของแผ่นพื้น รอยแตกนี้มีความลึกต่อเนื่องตลอดความหนาของแผ่นพื้น



ภาพที่ 4 รอยแตกบริเวณมุม

สาเหตุ

- 1) น้ำหนักกระทำซ้ำที่สูงมาก
- 2) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้เกิดการบิดตัวของแผ่นคอนกรีต
- 3) กำลังของการรับน้ำหนักของฐานรากไม่เพียงพอ
- 4) เกิดโพรงช่องว่างใต้แผ่นพื้นคอนกรีตเนื่องจากการเกิดการสูญเสียมวลรวมละเอียดไปกับน้ำที่พุ่งออกมาของชั้นโครงสร้างทาง (Pumping)

4. รอยแตกลักษณะแผ่นพื้นถูกแบ่งแยก (Divided Slab/Punch Out) รอยแตกลักษณะของแผ่นพื้นถูกแบ่งแยก โดยรอยแตกมีการแยกขาดออกจากกันของแผ่นคอนกรีตซึ่งเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นเฉพาะแห่งในแผ่นพื้นคอนกรีตโดยไม่มีรูปแบบที่แน่นอน



ภาพที่ 5 รอยแตกลักษณะแผ่นพื้นถูกแบ่งแยก

สาเหตุ เกิดจากรอยแตกของแผ่นคอนกรีตต่อเนื่องและได้รับความเสียหายมากมายจนทำให้แผ่นคอนกรีตเกิดการยุบตัวลงไปจนเกิดเป็นลักษณะของ Punch Out ได้ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำสามารถไหลซึมลงสู่ชั้นโครงสร้างทางใต้แผ่นคอนกรีตตามรอยแตกได้และแผ่นคอนกรีตสามารถเคลื่อนตัวได้ง่ายกว่าปกติเนื่องจากมีรอยแตกโดยรอบ ทำให้เป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียของวัสดุชั้นทางและทำให้เกิดโพรงใต้บริเวณนั้นได้

5. ความเสียหายของวัสดุยาแนวรอยต่อ (Joint Seal Damage) การเกิดความเสียหายบริเวณวัสดุยาแนวรอยต่อ



ภาพที่ 6 ความเสียหายของวัสดุยาแนวรอยต่อ

สาเหตุ

- 1) การแข็งเปราะของวัสดุยาแนวรอยต่อ
- 2) วัสดุยาแนวรอยต่อไม่ยึดเกาะกับขอบของแผ่นพื้น
- 3) การหลุดร่อนของวัสดุยาแนว
- 4) วัสดุยาแนวรอยต่อถูกบีบออกมาจากรอยต่อ
- 5) วัสดุยาแนวรอยต่อไม่เพียงพอหรือหายไป
- 6) การเกิดวัชพืชดันวัสดุยาแนวบริเวณรอยต่อ

6. ผิวมวลรวมถูกขัดสีเป็นมัน (Polished Aggregate) ส่วนผิวคอนกรีตที่ถูกขัดจากปริมาณจราจรจนปรากฏให้เห็นถึงวัสดุมวลรวมที่ถูกขัดจนเรียบมัน ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นคอนกรีต แต่มีผลต่อความเสียดทานของผิวถนน ทำให้ถนนลื่นและไม่ปลอดภัยได้



ภาพที่ 7 ผิวมวลรวมถูกขัดสีเป็นมัน (Polished Aggregate)

สาเหตุ

- 1) เกิดจากวัสดุมวลรวมมีความแกร่งหรือคงทนต่ำ ทำให้ถูกขัดสีจากล้อของยานพาหนะ
- 2) ในบางกรณีอาจเกิดจากการแยกตัวของวัสดุมวลรวมกับซีเมนต์เฟสและเกิดการหลุดร่อนของผิวซีเมนต์จนถึงชั้นวัสดุมวลรวม
- 3) เกิดฝนตกระหว่างก่อสร้างทำให้เกิดการชะล้างของซีเมนต์เฟสบริเวณผิวหน้าของแผ่นคอนกรีต และเกิดการหลุดร่อนหลังเปิดจราจรจนถึงผิววัสดุมวลรวม

7. รอยเลื่อนต่างระดับ (Faulting) เป็นลักษณะความเสียหายที่แผ่นพื้นคอนกรีตเกิดการทรุดตัวจนมีระดับที่ต่างกันตามแนวรอยต่อหรือรอยแตก



ภาพที่ 8 รอยเลื่อนต่างระดับ (คู่มือการสำรวจหาโพรงใต้ฯ, 2552)

สาเหตุ การทรุดตัวของแผ่นคอนกรีตเนื่องจากวัสดุที่อยู่ใต้แผ่นพื้นในบริเวณใกล้เคียงกับรอยต่อหรือรอยแตกมีกำลังรับน้ำหนักไม่เพียงพอหรือการเกิด Pumping ซึ่งเป็นการนำพาวัสดุเม็ดละเอียดที่อยู่ใต้แผ่นพื้นออกมากับน้ำขณะที่มีน้ำหนักบรรทุกจากการจราจรวิ่งผ่านจนเกิดโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต และ การทรุดตัวต่างระดับของชั้นกันทาง

8. การทรุดตัวต่างระดับของไหล่ทาง (Lane to Shoulder Drop Off) การทรุดตัวต่างระดับของไหล่ทางเป็นความเสียหายที่มักเกิดขึ้นในถนนคอนกรีตที่มีไหล่ทางเป็นแอสฟัลต์ โดยเป็นความเสียหายในลักษณะที่ระดับของแผ่นพื้นคอนกรีตและระดับของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีระดับแตกต่างกัน ซึ่งการทรุดตัวต่างระดับมักเกิดขึ้นร่วมกับการแยกตัวของไหล่ทางและเป็นสาเหตุให้น้ำสามารถไหลซึมลงสู่ชั้นโครงสร้างทางตามแนวการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

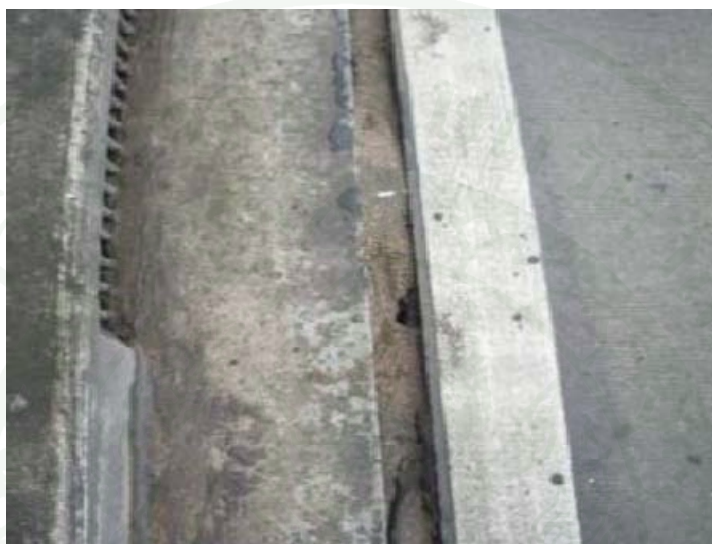


ภาพที่ 9 การทรุดตัวต่างระดับของไหล่ทาง (Stutevant, 2006)

สาเหตุ

- 1) การบดอัดไหล่ทางไม่เพียงพอ การทรุดตัวของวัสดุชั้นทางใต้แผ่นพื้นคอนกรีต
- 2) เกิดจากการ Pumping

9. การแยกตัวของไหล่ทาง (Lane to Shoulder Separation) เป็นความเสียหายในลักษณะที่แผ่นพื้นคอนกรีตและไหล่ทางเกิดการแยกตัวออกจากกันตามแนวรอยต่อ จนทำให้น้ำสามารถไหลซึมลงสู่ชั้นโครงสร้างทางตามแนวแยกที่เกิดขึ้นจากการแยกตัวของไหล่ทาง



ภาพที่ 10 การแยกตัวของไหล่ทาง (คู่มือการสำรวจหาโพรงฯ, 2552)

สาเหตุ

- 1) การเคลื่อนตัวของไหล่ทาง
- 2) การทรุดตัวของวัสดุชั้นทางใต้แผ่นพื้นคอนกรีต
- 3) การยึดหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันของไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตกับ

แผ่นคอนกรีต

10. การสูญเสียมวลรวมละเอียดของชั้นโครงสร้างทาง (Pumping) เป็นการสูญเสียมวลรวมละเอียดไปกับน้ำที่พุ่งออกมาของชั้น โครงสร้างทางใต้แผ่นพื้นคอนกรีต



ภาพที่ 11 การสูญเสียมวลรวมละเอียดของชั้น โครงสร้างทาง (คู่มือการสำรวจหาโพรงฯ, 2552)

สาเหตุ เกิดจากเมื่อมีน้ำไหลเข้าไปใต้พื้นคอนกรีตตามรอยต่อหรือรอยแตกที่เสียหายและเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกจากการจราจรเกิดขึ้นจะทำให้ น้ำที่อยู่ใต้แผ่นพื้นถูกอัดให้พุ่งทะลักขึ้นมาตามรอยต่อหรือรอยแตกพร้อมกับนำพาวัสดุเม็ดละเอียดกระจายอยู่บนพื้นผิวคอนกรีต โดยในบริเวณที่เกิด Pumping หากปล่อยทิ้งไว้โดยไม่แก้ไขอย่างทันท่วงทีจะทำให้วัสดุใต้แผ่นพื้นคอนกรีตค่อยๆ ถูกนำพาออกไปจนเกิดเป็นโพรงใต้แผ่นพื้นจนพัฒนาเป็นความเสียหายอื่นๆ ได้ เช่น การเกิดรอยเลื่อนต่างระดับ รอยแตกในแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น หรือการทรุดตัวที่ต่างระดับ

11. รอยปะซ่อมผิวคอนกรีตด้วยแอสฟัลต์คอนกรีต (Concrete Pavement Patching) เป็นรอยปะซ่อมแซมผิวคอนกรีตโดยใช้วัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน (Hot mix) หรือผสมเย็น (Cold mix)



ภาพที่ 12 รอยปะซ่อมผิวคอนกรีตด้วยแอสฟัลต์คอนกรีต

สาเหตุ รอยปะซ่อมผิวคอนกรีตเป็นบริเวณบนพื้นผิวคอนกรีตที่ได้รับความเสียหายจากหลายๆ สาเหตุ เช่น จากรอยแตกตามยาว จากรอยแตกตามขวาง จากรอยเลื่อนต่างระดับ และรอยแตกลักษณะแผ่นพื้นถูกแบ่งแยก เป็นต้น ซึ่งการปะด้วยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความราบเรียบในการขับขี่และเพื่อเป็นการป้องกันน้ำไหลซึมลงใต้แผ่นคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามการปะซ่อมด้วยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมิได้ซ่อมแซมรอยแตกหรือความเสียหายของเนื้อคอนกรีต ดังนั้นโดยทั่วไปภายในระยะเวลาไม่นานรอยปะแอสฟัลต์คอนกรีตก็จะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความเสียหายด้านล่าง โดยการที่รอยปะซ่อมผิวคอนกรีตจะมีสภาพดีหรือได้รับความเสียหายมากนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพความเสียหายเดิมที่เกิดขึ้นกับผิวทางคอนกรีตด้านล่าง

วิธีการสำรวจความเสียหายของถนน

การเลือกวิธีการซ่อมถนนได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมทั้งด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์งานทางนั้น ขึ้นอยู่กับการประเมินสภาพถนน ซึ่งเป็นผลมาจากการสำรวจความเสียหายของถนน ซึ่งโดยปกติแล้ววิธีการสำรวจความเสียหายของถนนมักแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การสำรวจความเสียหายของถนนด้วยสายตา และการสำรวจความเสียหายด้วยเครื่องมือวัด

1. การสำรวจด้วยสายตา (Visual Inspection)

การสำรวจความเสียหายของถนนด้วยสายตา (Visual Inspection) ปัจจุบันผู้ประเมินมักตรวจสอบและประเมินความเสียหายโดยใช้ความชำนาญส่วนบุคคลในการประเมินว่าถนนเสียหายแบบใด และควรซ่อมด้วยวิธีใด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิจารณ์ญาณและประสบการณ์ของผู้ประเมิน ดังนั้นหากผู้ประเมินมีความรู้และประสบการณ์สูง ก็จะสามารถประเมินการซ่อมแซมที่ดีได้ หากไม่แล้วก็จะทำให้ผลการซ่อมแซมออกมาไม่คุ้มค่ากับงบประมาณที่ใช้ในการบำรุงรักษาดูแลถนน



ภาพที่ 13 การตรวจสอบความเสียหายของถนนด้วยตาเปล่า (ชั้นวินและอภิสิทธิ์, 2553)

1.1. หลักในการตรวจสอบถนน

การตรวจสอบความเสียหายของถนนให้มีประสิทธิภาพและความถูกต้องนั้น มีองค์ประกอบสำคัญอยู่หลายประการ ซึ่งเกี่ยวเนื่องทั้งตัวผู้ตรวจสอบ การวางแผน และเตรียมการสำหรับการตรวจสอบภาคสนาม ขั้นตอนและวิธีการในการตรวจสอบ โดยสามารถแยกออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

1.2. คุณสมบัติของผู้ตรวจสอบ

หน้าที่หลักของผู้ตรวจสอบถนน คือ การบ่งชี้สภาพความเสียหายของโครงสร้าง โดยอ้างอิงหลักเกณฑ์หรือลักษณะความเสียหายที่ได้กำหนดไว้ ผู้ตรวจสอบถนนควรมีคุณสมบัติ ดังนี้

- 1.2.1. มีความชำนาญและประสบการณ์เกี่ยวกับถนน
- 1.2.2. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของถนน
- 1.2.3. ได้รับการฝึกฝนหรืออบรมเกี่ยวกับงานตรวจสอบสภาพถนน
- 1.2.4. มีการวางแผนที่ดี เพื่อให้มีการตรวจสอบที่เป็นระบบและเป็นไปตามขั้นตอน
- 1.2.5. มีความพร้อมก่อนการตรวจสอบ เช่น การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ รวมถึงการศึกษาถนนที่จะทำการตรวจสอบ
- 1.2.6. สามารถดำเนินการตรวจสอบอย่างมีแบบแผน เช่น การทำเครื่องหมายที่ส่วนต่างๆ ของถนน การพัฒนาขั้นตอนในกระบวนการตรวจสอบและปฏิบัติตามกระบวนการตรวจสอบที่เหมาะสม เป็นต้น
- 1.2.7. การจัดเตรียมรายงาน ผู้ตรวจสอบควรให้คำแนะนำต่างๆ ในรายงานการตรวจสอบถนน เพื่อความเข้าใจ และความสมบูรณ์ของงาน

นอกจากหน้าที่ที่ผู้ตรวจสอบจะต้องตรวจสอบสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นในถนนแล้ว ผู้ตรวจสอบต้องมีความรับผิดชอบในการวางแผนงานก่อนการออกตรวจในภาคสนาม การจดบันทึก รวมถึงการจัดทำรายงานสภาพถนนอีกด้วย

1.3. การวางแผน และเตรียมการสำหรับการตรวจสอบภาคสนาม

การวางแผนและการเตรียมการที่ผู้ตรวจสอบควรจะต้องดำเนินการก่อนการตรวจสอบสภาพถนน สามารถจำแนกออกได้เป็น 4 กิจกรรม ได้แก่

1.3.1. การทบทวนข้อมูลของถนน ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกของการเตรียมการตรวจสอบ ซึ่งเป็นการตรวจสอบข้อมูลที่มาจากแหล่งต่างๆ เช่น ตำแหน่งที่ตั้งของสายทาง ปริมาณจราจร สภาพการใช้งาน ข้อมูลการซ่อมและบำรุงรักษา (ถ้ามี)

1.3.2. การกำหนดตำแหน่งของถนน ควรมีการกำหนดรหัสและลำดับหรือตำแหน่ง โดยให้สอดคล้องกับแบบฟอร์มการตรวจสอบเพื่อบ่งชี้ถึงตำแหน่งและประเภทความเสียหายของแต่ละชั้นส่วนถนน

1.3.3. การพัฒนาลำดับขั้นตอนของการตรวจสอบ การตรวจสอบถนนโดยทั่วไปมักจะเริ่มจากตำแหน่ง กม.น้อย ไป กม.มาก แต่อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะถนน สภาพการใช้งานถนน และสภาพโดยรวมของถนน เป็นต้น

1.3.4. การเตรียมการบันทึก แบบฟอร์ม และภาพวาดร่างต่างๆ การร่างลักษณะรูปร่างและส่วนประกอบของถนนจะช่วยแสดงความเสียหายของสะพานให้ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การถ่ายรูปหรือภาพเคลื่อนไหวจะสามารถเพิ่มรายละเอียดของรายงานการตรวจสอบสภาพถนนได้เป็นอย่างดี และเพื่อให้การตรวจสอบในภาคสนามสามารถดำเนินการได้อย่างราบรื่น จึงควรมีการเตรียมงานในส่วนนี้ให้พร้อม

1.4. ขั้นตอนและวิธีการตรวจสอบ ขั้นตอนพื้นฐานสำหรับการตรวจสอบถนนมีขั้นตอน ดังนี้

1.4.1. ขั้นตอนแรกในการตรวจสอบ คือ การกำหนดทิศทาง และแนวการวางตัวของถนน โดยการกำหนดทิศทางนี้ควรจะต้องรวมถึงทิศทางตามเข็มนาฬิกา และทิศทางของเส้นทางที่มีอยู่ ควรจะต้องเขียนตัวเลขหรือตัวอักษรลงบนถนน เพื่อเป็นการระบุชิ้นส่วนและองค์ประกอบ

ต่างๆ ของโครงสร้างถนน ดังภาพที่ 14 จุดประสงค์ของการทำเครื่องหมายเหล่านี้ก็คือ เพื่อช่วยรักษาตำแหน่งที่ตั้งของผู้ตรวจสอบ และยังช่วยป้องกันการหลงลืมที่จะตรวจสอบส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงสร้างถนน

แบบบันทึกความเสียหายของสายทาง (Visual Inspection) แผ่นที่ 1/

รหัสสายทาง สป. 1005	ชื่อสายทาง แยกทางหลวงหมายเลข 3 - บ้านปางมดข่อย
อำเภอ บึงปอ	จังหวัด ฉะเชิงเทรา
สำรวจโดย ปิยะพงษ์ น้อย	วันที่สำรวจ 17 มี.ค. 2555

กม.มาก C RT

0 + 090

☐ ลาดยาง

☒ คอนกรีต

0 + 010

☐ ลาดยาง

☒ คอนกรีต

0 + 080

☐ ลาดยาง

☒ คอนกรีต

0 + 020

☐ ลาดยาง

☒ คอนกรีต

0 + 010

☐ ลาดยาง

☒ คอนกรีต

0 + 000

กม.น้อย

ที่	ลักษณะความเสียหาย	ขนาด (ม.)	หมายเลขรูป
1	รอยล้อไถบนผิว	1 x 5	955
		X	
		X	
		X	
		X	

ที่	ลักษณะความเสียหาย	ขนาด (ม.)	หมายเลขรูป
1	หลุมบ่อขนาดเล็ก	1 x 1	952
		X	
		X	
		X	
		X	

ที่	ลักษณะความเสียหาย	ขนาด (ม.)	หมายเลขรูป
		X	
		X	
		X	
		X	
		X	

ที่	ลักษณะความเสียหาย	ขนาด (ม.)	หมายเลขรูป
1	แนวคันทางฝั่งซ้าย	2 x 1	953-958
		X	
		X	
		X	
		X	

ที่	ลักษณะความเสียหาย	ขนาด (ม.)	หมายเลขรูป
1	แนวคันทางฝั่งขวา	2 x 1	959-962
		X	
		X	
		X	
		X	

หมายเหตุ

- คันทางฝั่งซ้ายของปอ 1

- คันทางฝั่งขวาของปอ ตั้งเป็นคัน 000

ภาพที่ 14 แสดงตัวอย่างการกำหนดทิศทางจราจรและการกำหนดตำแหน่งช่วงถนน

1.4.2. หลังจากที่ได้กำหนดแนวและทิศทางเรียบร้อยแล้ว ผู้ตรวจสอบก็พร้อมที่จะเริ่มทำการตรวจสอบ ผู้ตรวจสอบจะต้องมีความระมัดระวังและให้ความสนใจที่ตนรับผิดชอบ และไม่ควรละเลยส่วนใดส่วนหนึ่งของถนน เพราะส่วนต่างๆ ของถนนที่มีความสำคัญต่อความสมบูรณ์ของโครงสร้างถนน ควรจะต้องได้รับการดูแลอย่างดีเป็นพิเศษ

1.4.3. ในการตรวจสอบจะต้องดำเนินงานด้วยความรอบคอบเพื่อเก็บรายละเอียดของข้อมูลให้ได้มากที่สุด ขณะเดียวกันการบันทึกข้อมูลความเสียหายต้องแสดงรายละเอียดให้สมบูรณ์และชัดเจนมากที่สุดเท่าที่จะกระทำได้ รวมถึงกำหนดสัญลักษณ์แสดงความเสียหายของแต่ละประเภท เพื่อให้มีความเข้าใจตรงกัน

1.5. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบ

ในการที่จะให้การตรวจสอบมีประสิทธิภาพ และสามารถครอบคลุมรายละเอียดได้ครบถ้วนนั้น จะต้องใช้เครื่องมืออย่างเหมาะสม เครื่องมือมาตรฐานที่ผู้ตรวจสอบถนนควรใช้มีดังนี้

- 1.5.1. อุปกรณ์สำหรับการบันทึก เช่น แบบฟอร์มการบันทึก กล้องถ่ายรูป ปากกา และกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหว (VDO)
- 1.5.2. อุปกรณ์สำหรับช่วยวัด เช่น ตลับเมตร ไม้บรรทัด เชือก
- 1.5.3. อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัย เช่น หมวกนิรภัย เสื้อกั๊กสะท้อนแสง
- 1.5.4. อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น เครื่องรับ-ส่งวิทยุคมนาคม (Walkie-Talkies)

2. การสำรวจด้วยเครื่องมือวัด (Equipment Inspection)

การใช้เครื่องมือวัดในการสำรวจและประเมินสภาพของถนนตามคุณลักษณะทางวิศวกรรมงานทาง สามารถทดสอบได้หลายวิธี ขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการวัด ทั้งนี้วิธีที่นิยมมากที่สุดคือ การวัดค่าดัชนีความขรุขระสากล หรือ International Roughness Index (IRI) ซึ่งเป็นวิธีสำหรับการวัดคุณภาพของการขับขี่ (Riding Quality) นอกจากนี้ยังมีการวัดสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ซึ่งสามารถวัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนนโดยรวมทั้งชั้นผิวทางและโครงสร้างชั้นทาง สามารถวัดได้ทั้งถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง ในบางครั้งอาจประยุกต์ใช้เครื่องมือ FWD ในการสำรวจโพรงใต้ถนนคอนกรีตเพื่อวิเคราะห์ความเสียหายของถนนได้ ในขณะที่การวัดสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้ผิวทาง เช่น ชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นดินเดิมสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer ในขณะที่เครื่องมือ Ground Penetration Radar (GPR) โดยปกติแล้วใช้สำหรับตรวจสอบความหนาของโครงสร้างชั้นทางซึ่งใช้ได้ทั้งถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง แต่กรมทางหลวงนำมาประยุกต์ใช้ในการสำรวจโพรงใต้ถนนคอนกรีต การสำรวจและตรวจสอบถนนด้วยเครื่องมือประเภทต่างๆ โดยทั่วไปมีดังนี้

2.1. Falling Weight Deflectometer (FWD)

Falling Weight Deflectometer (FWD) เป็นเครื่องมือทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในประเทศที่พัฒนาแล้วทั่วโลก และสามารถทำการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างถนนได้ทั้งถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและถนนผิวแอสฟัลต์คอนกรีต จุดเด่นของการทดสอบด้วยเครื่องมือชนิดนี้ นอกเหนือจากความเร็วในการทำงานและความถูกต้องของผลการทดสอบแล้ว คือ การทดสอบวิธีนี้สามารถทำการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างถนนได้โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหาย (Non-Destructive Test) ต่อถนนแต่อย่างใด ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างถนนด้วย Falling Weight Deflectometer
(ฉันทวิน และอภิสิทธิ์, 2553)

เครื่องมือทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย

1.1 รถตู้ลากจูงและรถลากพ่วงทดสอบ Falling Weight Deflectometer



ภาพที่ 16 รถตู้ลากจูงและรถลากพ่วง

1.2 ชุดอุปกรณ์ทดสอบของ Falling Weight Deflectometer ได้แก่ แผงวงจรควบคุม, Geophone, แผ่น Plate, ป้อนลม และแผ่นน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 17

ก. แผงวงจรควบคุม ทำหน้าที่ควบคุมระบบไฟฟ้าของเครื่องมือทดสอบ

ข. อุปกรณ์ Geophone ทำหน้าที่วัดการแอ่นตัว (Deflection) ณ ตำแหน่งที่ Geophone ติดตั้งอยู่

ค. แผ่น Plate ทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงกระแทกจากค้อนน้ำหนักสู่พื้น

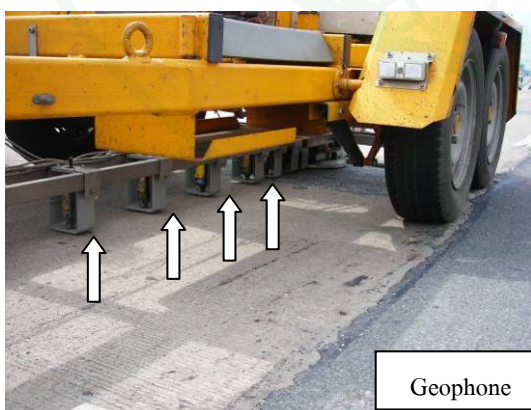
ง. ป้อนลม ทำหน้าที่ควบคุมระบบไฮดรอลิกยกแผ่นน้ำหนัก



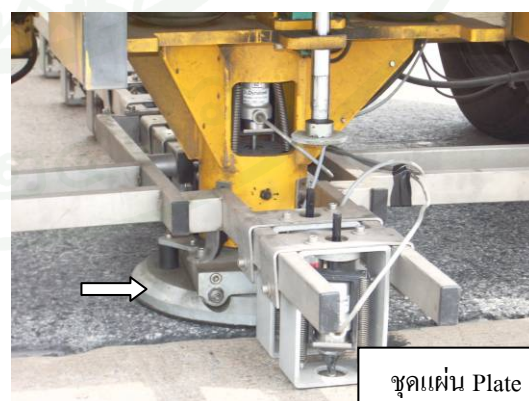
ชุดอุปกรณ์ทดสอบรถลากพ่วง



แผงวงจรควบคุม



Geophone

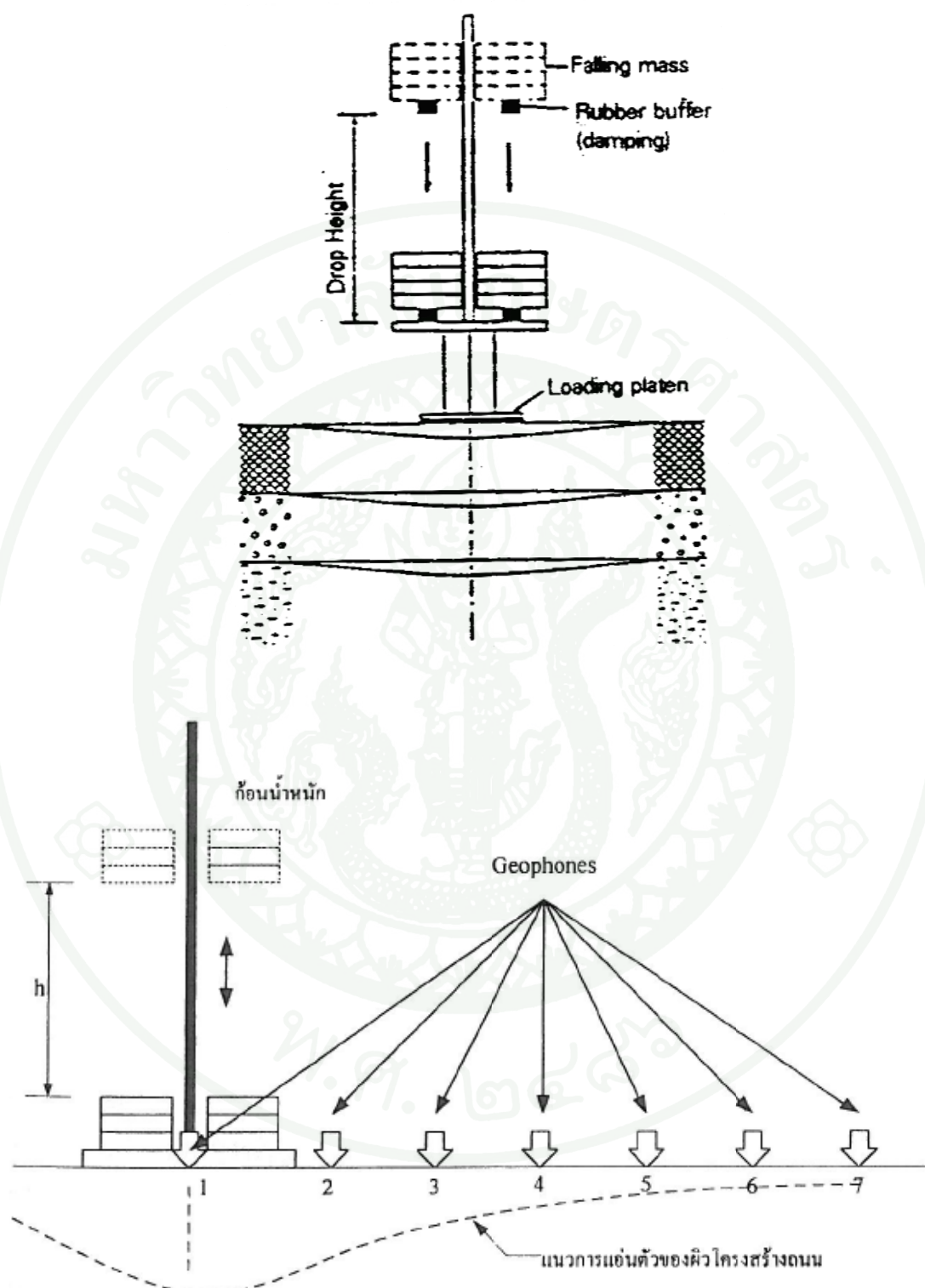


ชุดแผ่น Plate



ภาพที่ 17 ชุดอุปกรณ์ทดสอบของรถลากพ่วง

เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer มีลักษณะเป็นรถพ่วงต่อเข้ากับรถตู้ ซึ่งจะถูกลากไปในขณะปฏิบัติงาน โดยมีชุดอุปกรณ์ทดสอบประกอบไปด้วย ก้อนน้ำหนัก ระบบตรวจวัดแรง (Load Cell) และระบบการตรวจวัดค่าการแอ่นตัว (Deflection Sensor) ที่เป็นผลจากแรงกระทำ โดยที่ก้อนน้ำหนักจะถ่ายแรงลงสู่ถนนผ่านทางแผ่นรอง (Plate) น้ำหนักและระยะยกของก้อนน้ำหนักสามารถควบคุมได้เพื่อให้เกิดแรงกระทำต่อถนนตามต้องการ ระบบตรวจวัดแรงจะทำการตรวจวัดแรงกระทำที่ตั้งฉากกับแผ่นรองน้ำหนักอย่างแม่นยำ เมื่อก้อนน้ำหนักตกกระทบบนโครงสร้างถนน แรงจะกระจายออกไปจากจุดที่ทำการทดสอบ โดยมี Deflection Sensor 1 ตัวในการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนที่ได้จุดที่แรงกระทำ ส่วน Deflection Sensor ที่เหลืออื่นๆจะวัดค่าการแอ่นตัว (Deflection) ที่ตำแหน่งต่างๆดังแสดงในภาพที่ 18 โดยค่าที่วัดทั้งหมดสามารถนำไปคำนวณหาความแข็งแรงของถนน และค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นโครงสร้างถนนได้



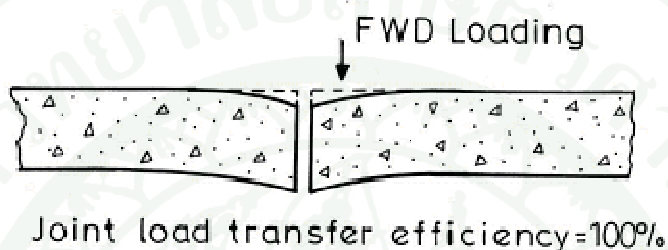
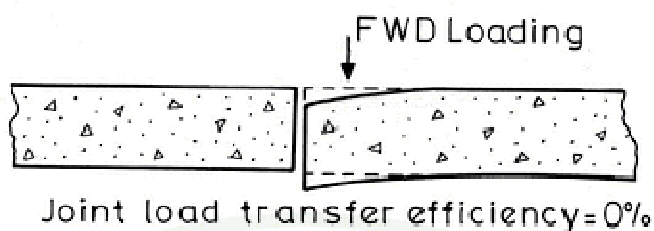
ภาพที่ 18 หลักการทำงานของ Falling Weight Deflectometer

หลักการทำงานของเครื่อง FWD คือการวัดค่าการแอ่นตัวภายใต้แรงที่กระทำแบบ Dynamic เพื่อเลียนแบบการเกิดการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนเมื่อยวดยานพาหนะวิ่งผ่าน ในกรณีของถนนลาดยางหลังจากที่ได้ทำการแอ่นตัวแล้ว ก็จะทำการคำนวณย้อนกลับ โดยใช้ค่าการแอ่นตัวนั้นเพื่อหาค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางแต่ละชั้น ซึ่งค่าโมดูลัสเหล่านี้จะเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในประเมินความแข็งแรงของถนนและวิเคราะห์ถึงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของถนนและใช้ออกแบบความหนาของการเสริมผิว (Overlay) ต่อไป

การวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวในถนนคอนกรีตเพื่อหาประสิทธิภาพในการถ่ายแรงระหว่างรอยต่อ (Load Transfer Efficiency) หรือวิเคราะห์หาโพรงใต้ถนนคอนกรีต (Void) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวในถนนคอนกรีตเพื่อหาประสิทธิภาพในการถ่ายแรงระหว่างรอยต่อ (Load Transfer Efficiency)

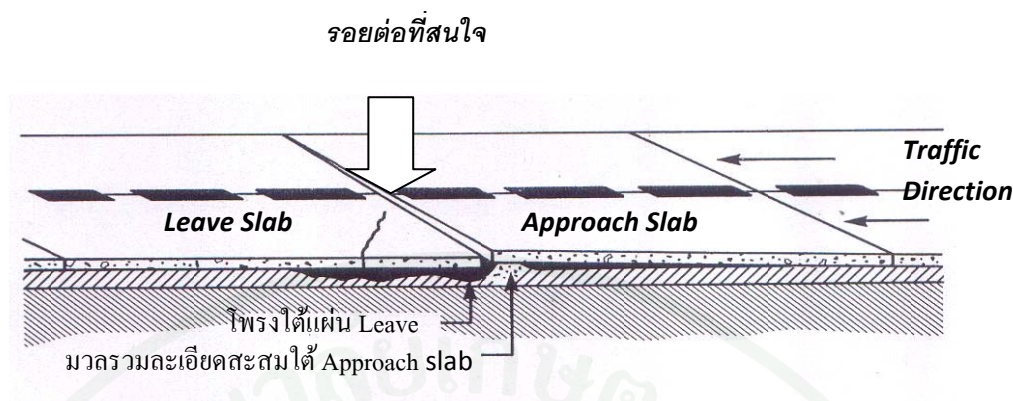
ในการสำรวจความเสียหายด้วยเครื่องมือประเภทนี้สำหรับถนนคอนกรีต จะใช้วิธีวัดค่าการแอ่นตัว (Deflection) ที่จุดบนสองฝั่งของรอยต่อของแผ่นถนนคอนกรีต หากค่าที่วัดได้มีค่าเท่ากันนั้นหมายถึงสภาพการส่งถ่ายน้ำหนักข้ามรอยต่อของแผ่นถนนคอนกรีตดีมาก หรือเพื่อพิสูจน์ความสามารถการส่งถ่ายน้ำหนักข้ามรอยต่อ (Load Transfer) สำหรับวิธีการตรวจสอบความแข็งแรงของถนนคอนกรีตจะใช้วิธีวัดค่าการแอ่นตัว (Deflection) ที่ทั้งสองฝั่งของรอยต่อของแผ่นถนนคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 19 ถ้าฝั่งหนึ่งมีการแอ่นตัวตามแรงที่กด (FWD Loading) โดยที่อีกฝั่งหนึ่งของแผ่นคอนกรีตอยู่นิ่ง แสดงว่าการถ่ายแรงระหว่างแผ่นคอนกรีตเป็นศูนย์ (Joint Load Transfer Efficiency = 0%) แต่ถ้าค่าแอ่นตัวที่วัดได้สองฝั่งมีค่าเท่ากันจะหมายถึงการส่งถ่ายน้ำหนักข้ามรอยต่อของแผ่นถนนคอนกรีต เป็นไปอย่างสมบูรณ์ (Joint Load Transfer Efficiency = 100%) ซึ่งโดยปกติแล้วค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 % ซึ่งโดยปกติแล้วค่าประสิทธิภาพการถ่ายแรงระหว่างแผ่นคอนกรีตนั้นจะมีค่ามากกว่า 0 % และข้อกำหนดค่าประสิทธิภาพการถ่ายแรงระหว่างแผ่นคอนกรีตที่เหมาะสมควรมีค่ามากกว่า 70% หรือ 80% ซึ่งขึ้นกับข้อกำหนดของแต่ละพื้นที่ เช่น ในรัฐเวอร์จิเนียนั้นกำหนดค่าประสิทธิภาพการถ่ายแรงระหว่างแผ่นคอนกรีตที่เหมาะสมควรมีค่าสูงกว่า 70 %



ภาพที่ 19 การทดสอบความแข็งแรงโครงสร้างถนนด้วยเครื่อง FWD

2) วิเคราะห์หาโพรงใต้ถนนคอนกรีต (Void)

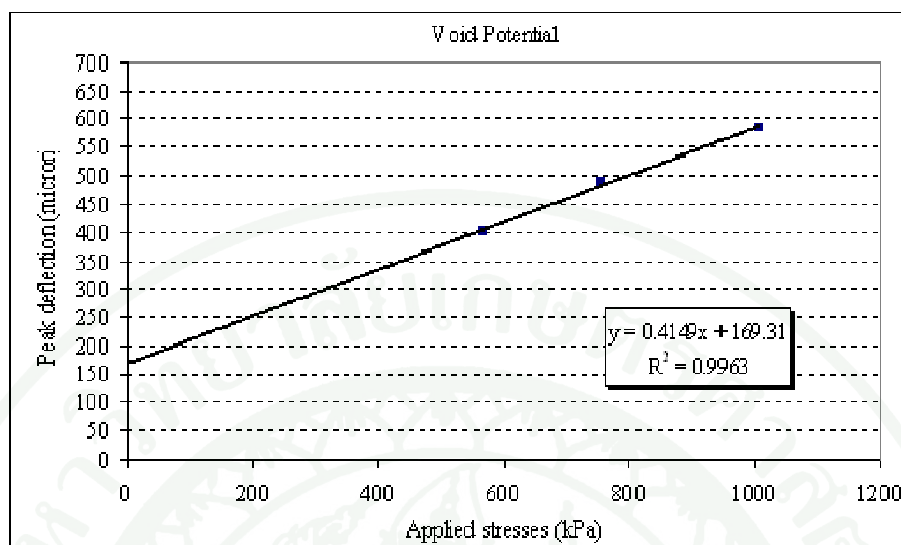
ในการทดสอบที่บริเวณมุมของแผ่นคอนกรีตทั้ง 2 ข้างของรอยต่อตลอดแนวสายทาง โดยการทดสอบทั้งมุมของแผ่นที่การจราจรวิ่งเข้าหา (Approach Slab) และมุมของแผ่นที่การจราจรวิ่งจากไป (Leave Slab) ซึ่งโดยปกติแล้วโพรงที่เกิดขึ้นใต้มุมแผ่นคอนกรีตจะอยู่ใต้ด้าน Leave Slab มากกว่าด้าน Approach Slab ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการเกิด Pumping หรือการสูญเสียมวลรวมละเอียดไปกับน้ำที่พุ่งออกจากรอยต่อคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักกระทำจากการจราจร เนื่องมาจากเมื่อล้อรถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อคอนกรีตด้าน Approach Slab ไปยังด้าน Leave Slab มวลรวมละเอียดจะถูกดันไปอยู่ใต้ Approach Slab ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 Approach Slab และ Leave Slab (คู่มือการสำรวจหาโพรงฯ, 2552)

โดยการตรวจหาโพรงโดยวิธีนี้จะทำการวัดค่าการยุบตัวที่มุมแผ่นคอนกรีต โดยใช้ค่าน้ำหนักที่กระทำจำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 566 kPa (Drop 1, 2 และ 3), 754 kPa (Drop 4, 5 และ 6) และ 1006 kPa (Drop 7, 8 และ 9) จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกระทำกับค่าการยุบตัว (Load-Deflection) ของแต่ละจุดทดสอบ โดยกราฟ Load-Deflection ของตำแหน่งที่ไม่มีโพรงอยู่ข้างใต้จะตัดแกนค่าการยุบตัว (Deflection) ใกล้เคียงกับจุดกำเนิดและในทางตรงกันข้ามกราฟ Load-Deflection ของตำแหน่งที่มีโพรงอยู่ด้านใต้จะตัดแกนค่าการยุบตัว (Deflection) ที่ค่าการยุบตัวมากกว่า 0.050 มิลลิเมตร ซึ่งวิธีการตรวจหาโพรงโดยการเปลี่ยนค่าน้ำหนักกระทำนี้ได้ว่าเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือสูงและมีความสะดวกรวดเร็ว ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่มีการอ้างอิงและใช้งานอย่างแพร่หลาย

ตัวอย่างผลการทดสอบด้วยวิธี Falling Weight Deflectometer (FWD) เพื่อวัดค่าการยุบตัวของแผ่นคอนกรีตดังกล่าวการหาโพรงใต้ถนนคอนกรีต ซึ่งทำได้โดยการพล็อตกราฟระหว่างน้ำหนักที่กดและค่าการแอ่นตัว (Load-Deflection Line) ของแต่ละจุดทดสอบดังแสดงในภาพที่ 21 โดยตำแหน่งถนนที่ไม่มีโพรงข้างล่าง เส้นกราฟจะตัดแกนตั้ง (Y-Intercept) ซึ่งเป็นค่าการแอ่นตัวใกล้เคียงกับจุดกำเนิด (0,0) ในทางตรงกันข้าม เส้นกราฟของตำแหน่งถนนที่มีโพรงข้างล่างจะตัดแกนตั้งที่ระดับการแอ่นตัวมากกว่า 0.050 มม. (0.002 นิ้ว) ในกรณีตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 21 มีค่าการแอ่นตัวประมาณ 0.160 มม. แสดงว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะมีโพรงใต้แผ่นคอนกรีต



ภาพที่ 21 กราฟแสดงค่าการแอ่นตัวเทียบกับน้ำหนักที่กระทำ (ชันวินและอภิลิทธิ์, 2553)

2.2. Dynamic Cone Penetration (DCP)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ประเมินค่า CBR ของดินในสนามอย่างรวดเร็ว โดยวิธีการทดสอบ เริ่มต้นโดยการเลือกจุดที่จะทำการทดสอบ และจัดวางเครื่องมือให้อยู่ในแนวตั้ง จากนั้นทำการยก ค้อนน้ำหนักขึ้นจนได้ระยะ 575 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 22 จากนั้นทำการปล่อยให้ค้อนน้ำหนัก ตกลงอย่างอิสระ กระแทกกับเหล็กยึดแกน ซึ่งจะกดปลายกรวยให้จมลงในดินเล็กน้อยก่อน และ จะทำซ้ำจนได้ระยะที่ต้องการ การทดสอบนี้เป็นการวัดค่าความต้านทานต่อการจมของหัวค้อนเหล็ก (PISTON) ที่เรียกว่า Dynamic Cone Penetration Index (DCPI) โดยมีหน่วยเป็น mm/blow ซึ่ง สามารถใช้ในการแปลงเป็นค่า CBR ได้



ภาพที่ 22 การทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) บนพื้นทางดินซีเมนต์
(เลิศและจุฑา, 2553)

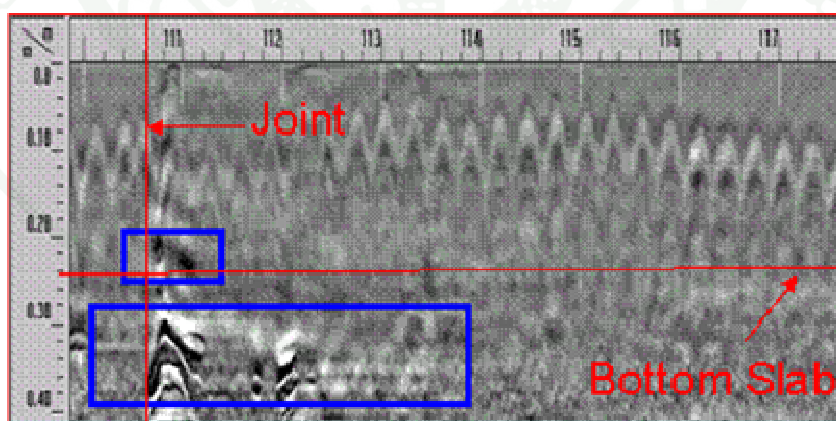
2.3. Ground Penetration Radar (GPR)

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวงได้ทำการสำรวจความเสียหายของถนน ด้วยเครื่องมือ Ground Penetration Radar (GPR) ดังภาพที่ 23 ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบทางด้าน วิศวกรรมธรณีฟิสิกส์ ปกติสามารถใช้สำหรับสำรวจหาโครงขนาดใหญ่ใต้พื้นดินหรือวัตถุที่อยู่ใต้ ดินเช่นท่อประปา ท่อระบายน้ำ หรือสามารถใช้ค้นหาตำแหน่งเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตได้ โดยการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave, EM) ในการตรวจสอบสภาพใต้พื้นดิน โดยการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EM Wave) ในช่วงความถี่สูงประมาณ 10 MHz ถึง 1500 MHz เพื่อเก็บ ข้อมูลใต้พื้นผิว ซึ่งลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกมานี้จะแพร่กระจายจากอุปกรณ์หัวส่ง สัญญาณ (Transmitting Antenna) จากนั้นคลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านไปในตัววัสดุด้วยความเร็วคงที่ค่า หนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุนั้นๆ ในขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ลึกลงไปใน ตัววัสดุนั้น หากพบวัตถุที่ฝังอยู่ด้านใต้หรือพบความเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า ของวัตถุ เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงของชั้นวัสดุจะเกิดการสะท้อนของคลื่นบางส่วนกลับขึ้นมาผิว ดิน ทำให้สามารถแสดงผลความผิดปกติของสัญญาณที่บ่งบอกว่ามีโครงใต้ถนนคอนกรีต



ภาพที่ 23 การสำรวจถนนคอนกรีตด้วยเครื่อง GPR (สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, 2552)

สำหรับผลการทดสอบ GPR ในกรณีที่ข้างล่างของแผ่นคอนกรีตมีโพรงอยู่ จะพบความผิดปกติของสัญญาณ เช่น มีความผิดปกติลักษณะความเข้มของสัญญาณสูง บริเวณใต้รอยต่อของแผ่นคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ภาพผลการสำรวจด้วยเครื่อง GPR มีความผิดปกติลักษณะความเข้มของสัญญาณสูง บริเวณรอยต่อใต้แผ่นคอนกรีต (สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, 2552)

2.4. การสำรวจและประเมินความเสียหายของถนนโดยวัดค่าดัชนีความขรุขระของผิวทางสากล (International Roughness Index, IRI)

ดัชนีที่ใช้บ่งบอกถึงคุณภาพการขับขี่ (Ride Quality) ของถนนที่เป็นมาตรฐานสากลมีหลายรูปแบบ เช่น Present Serviceability Rating (PSR), Present Serviceability Index (PSI) และ International Roughness Index, IRI แต่ดัชนีชี้วัดคุณภาพการขับขี่ของผิวทางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกก็คือ ดัชนีความขรุขระสากล International Roughness Index (IRI)

ความขรุขระ (Roughness) ของผิวทาง คือ ความแปรปรวนของระนาบผิวทางที่ทำให้เกิดความไม่สบายในการขับขี่ อีกทั้งยังมีผลต่อการระบายน้ำบนผิวถนน และการกระจายน้ำหนักบรรทุกของยานยนต์ลงบนผิวทาง ดังนั้นความขรุขระของผิวทางจึงเป็นดัชนีชี้วัดซึ่งสามารถบอกถึงสภาพการให้บริการของผิวทางโดยรวมได้ จากการศึกษาของ FHWA (1991) พบว่าความขรุขระของผิวทางมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทาง โดยมีเกณฑ์ที่แนะนำสำหรับการประเมินความเรียบของถนนตามภาพที่ 25

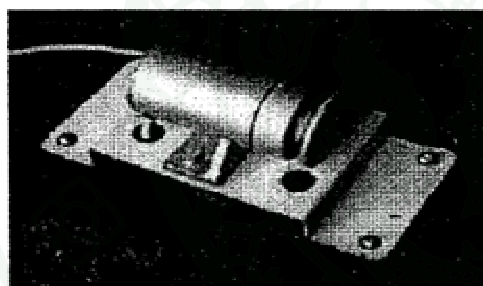
เกณฑ์แนะนำการประเมินความเรียบของถนน	
IRI (m/Km)	สภาพความเรียบ
1.0 – 2.5	ดีมาก
2.5 – 3.5	ดี
3.5 – 4.5	พอใช้
> 4.5	ต้องปรับปรุง

ภาพที่ 25 เกณฑ์ค่า IRI สำหรับถนนในประเทศไทย (ประเสริฐ และคณะ, 2553)

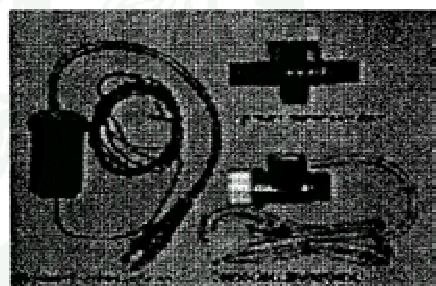
เครื่องมือที่ใช้ในการวัดดัชนีความขรุขระสากลมีหลายวิธี ได้แก่

1. เครื่อง Bump Integrator

เครื่อง Bump Integrator ดังแสดงในภาพที่ 26 เป็นเครื่องมือตรวจวัดสภาพผิวทางซึ่งจัดอยู่ใน Class III ตามมาตรฐาน ASTM (ASTM E 950-94) สามารถติดตั้งในรถยนต์ได้เกือบทุกชนิด มีความคล่องตัวในการทำงานสูง ใช้งานได้กับทุกสภาพอากาศ ใช้เวลาในการปฏิบัติงานน้อย และมีความทนทานสูง สามารถใช้งานติดต่อกันเป็นระยะเวลานานได้ ซึ่งมีความเหมาะสมกับงานประเมินสภาพผิวทางที่มีพื้นที่สำรวจมากและต้องการให้เสร็จภายในระยะเวลาอันสั้น หลักการทำงานของเครื่อง Bump Integrator โดยสังเขป คือ ใช้การวัดการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง แบบสะสมของเพลาลังรถยนต์ เทียบกับตัวถังรถยนต์ซึ่งติดตั้งตัวตรวจวัดการเคลื่อนที่ของเพลาลัง โดยถือว่าไม่มีการเคลื่อนที่ของตัวถังรถยนต์



(ก) เครื่องวัดความเรียบ



(ข) Distance and Speed Sensor

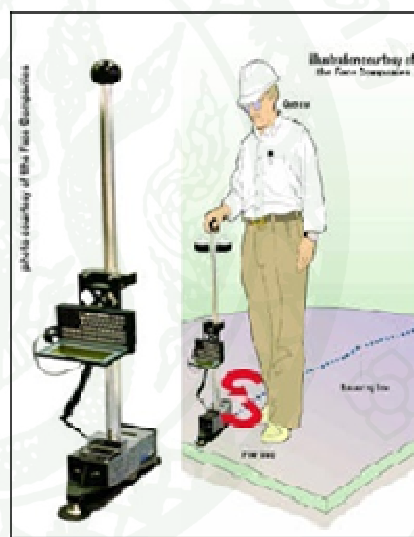


(ค) คอมพิวเตอร์

ภาพที่ 26 เครื่องมือวัดความขรุขระแบบ Bump Integrator (สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท, 2553)

2. เครื่อง Dipstick

เครื่อง Dipstick ภาพที่ 27 ใช้ในการตรวจวัดค่า IRI โดยมีความแม่นยำสูงมาก จัดอยู่ในระดับชั้นที่ 1 (Class I) ตามวิธีการแบ่งชั้นเครื่องมือมาตรฐาน ASTM (ASTM E 950-94) เครื่อง Dipstick ใช้หลักการตรวจวัดค่าความแตกต่างของขาทั้งสองข้างที่อยู่ห่างกัน 0.30 เมตร แม้เครื่องมือชนิดนี้จะให้ความละเอียดในการตรวจวัดสูงมากจัดอยู่ในระดับชั้นเดียวกันกับ Laser Profiler ตามมาตรฐาน ASTM (ASTM E 950-94) แต่ข้อด้อยของเครื่องมือชนิดนี้ คือ ต้องใช้วิธีการเดินตรวจวัดด้วยกำลังคน จึงทำให้ปฏิบัติงานได้ช้า ไม่เหมาะสมกับงานปริมาณมากครอบคลุมพื้นที่ทั่วทั้งประเทศ



ภาพที่ 27 เครื่อง Dipstick

การตรวจวัดค่า IRI ด้วยเครื่อง Dipstick มีประโยชน์อย่างมาก สำหรับงานที่มีพื้นที่น้อยในลักษณะของงานวิจัย หรือการตรวจวัดบริเวณจำกัด พื้นที่แคบเครื่องมือประเภทอื่นไม่สามารถทำงานได้โดยสะดวก ประโยชน์สำคัญอย่างยิ่งของเครื่องมือชนิดนี้คือ ใช้ข้อมูลการตรวจวัดค่า IRI ด้วยเครื่อง Dipstick เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสอบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือชนิดอื่น

3. เครื่องวัดระดับแบบเลเซอร์ (Laser Profiler)

โดยปกติแล้วเครื่องวัดระดับแบบเลเซอร์จะใช้เลเซอร์ในการตรวจวัด Longitudinal Profile และแปลงผลเป็นค่า IRI ปัจจุบันกรมทางหลวงมีการตรวจสอบสภาพทาง (Road Condition) โดยใช้การตรวจสอบสภาพทางด้วยระบบตรวจสอบอัตโนมัติ (Automated Road Monitoring) ซึ่งประกอบด้วยชุดเครื่องวัดระดับแบบเลเซอร์ (Laser Profiler) กล้องบันทึกภาพการเคลื่อนไหว (Video) และชุดเครื่องมือระบุพิกัดด้วยดาวเทียม (Global Positioning System, GPS) ทำการติดตั้งบนรถสำรวจสภาพทาง (Road Condition Vehicle, RCV) ดังแสดงในภาพที่ 28 ทำให้การตรวจสอบสภาพทางเป็นไปอย่างรวดเร็ว ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจเป็นมาตรฐานสากล มีความละเอียดแม่นยำ รวมถึงมีระบบการบันทึกและแสดงผลที่สามารถสืบค้นได้อย่างรวดเร็ว สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการซ่อมบำรุงถนนได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 28 เครื่องวัดระดับแบบเลเซอร์ กล้องบันทึกภาพการเคลื่อนไหวและชุดเครื่องมือระบุพิกัดด้วยดาวเทียม

4. เครื่องมือวัดแบบ Walking Profiler

ตัวอย่าง ARRB Walking Profiler ดังแสดงในภาพที่ 29 เป็นเครื่องมือวัด Profile ในระดับ Class I สามารถวัด Profile ของถนน วัดความชัน (Grade) ของถนน และดัชนีความขรุขระสากล International Roughness Index (IRI) สามารถวิเคราะห์ค่าผลการวัดแบบ real time เป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับตามมาตรฐาน PIARC (2002), FHWA (2000) และ TxDOT (2000) สามารถใช้เครื่องมือดังกล่าวเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความเร็วสูงเช่น Laser Profiler เหมาะสำหรับการตรวจวัดผิวต่างๆ ดังนี้ ผิวถนน ผิวฟุตบอล สนามบิน แผ่นพื้นอาคาร สะพานและโรงจอดรถ



ภาพที่ 29 เครื่องมือ Walking Profiler และการใช้งาน (www.arrb.com.au)

วิธีการซ่อมถนนคอนกรีต

1. วิธีการซ่อมถนนคอนกรีตแบบปกติ

ปัจจุบันมีวิธีการซ่อมแซมถนนคอนกรีตที่เสียหายหลายวิธี เช่น การซ่อมแซมตลอดช่วงความหนา (Full Depth Repair), การซ่อมอุดโพรงด้วยน้ำปูนทราย (Subsealing) หรือการปะซ่อม (Patching) โดยการซ่อมแต่ละวิธีจะเหมาะกับแต่ละประเภทของความเสียหายและระดับความรุนแรง ดังนั้น จึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องประเมินและวางแผนเลือกวิธีการซ่อมถนนคอนกรีตให้สอดคล้องกับสภาพความเสียหายเพื่อให้คุ้มค่ากับงบประมาณที่ต้องลงทุนไป รายละเอียดวิธีการซ่อมแซมแต่ละวิธีมีดังนี้

1.1. วิธีการซ่อมถนนคอนกรีตในกรณีที่เสียหายไม่รุนแรง หากความเสียหายไม่ถึงโครงสร้างได้แผ่นคอนกรีต สามารถดำเนินการซ่อมตามประเภทความเสียหายด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1.1.1. การเปลี่ยนวัสดุรอยต่อชนิดเทร็อน (Joint Resealing) คือ การเปลี่ยนวัสดุยารอยต่อชนิดเทร็อน หมายถึง การอุดเอาวัสดุยารอยต่อเดิมที่หมดสภาพ ตามแนวรอยต่อในผิวทางคอนกรีตออกทิ้ง พร้อมกับดำเนินการยาแนวรอยต่อด้วยวัสดุยารอยต่อชนิดเทร็อนใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการแทรกซึมของน้ำในบริเวณรอยต่อและเพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุไม่พึงประสงค์ไปแทรกในรอยต่อ ซึ่งจะเป็นเหตุให้เกิดความเสียหาย เช่น การแตกกะเทาะที่รอยต่อ (Joint Spalling) และการแตกหักของพื้นถนนคอนกรีตเนื่องจากการโก่งตัว (Blow Up) โดยมีวิธีการซ่อมแซม ดังแสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 30 การซ่อมถนนคอนกรีตด้วยวิธีการเปลี่ยนวัสดุารอยต่อชนิดเทรื่อน (มนัส, 2550)

1.1.2. การอุดซ่อมรอยแตก (Crack Filling) คือ การอุดซ่อมรอยแตกบนผิวคอนกรีตด้วยวัสดุอุดซ่อมรอยแตกชนิดเทรื่อน หมายถึง วิธีการซ่อมบำรุง เพื่อป้องกันความเสียหายของโครงสร้างถนนคอนกรีต โดยวิธีการอุดซ่อมรอยแตกบนผิวทางคอนกรีตด้วยวัสดุอุดซ่อมรอยแตกชนิดเทรื่อน โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านความเสียหายนั้น ลงไปสู่ชั้นโครงสร้างด้านล่างอันจะทำให้ความเสียหายลุกลามเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ใช้ในรูปแบบของการซ่อมชั่วคราว (Temporary Repair) ของถนนที่น้ำซึมผ่านชั้นผิวทางลงไปทำลายความแข็งแรงของวัสดุโครงสร้างทางไปบ้างแล้ว แต่ยังไม่สามารถดำเนินการซ่อมอย่างเต็มรูปแบบในขณะนั้นได้ เป็นการป้องกันไม่ให้ความเสียหายเพิ่มมากขึ้น

1.1.3. การซ่อมแซมระบบถ่ายน้ำหนัก (Load Transfer Restoration) คือ การเปลี่ยนหรือติดตั้งเหล็กเคียวที่ช่วยในการถ่ายน้ำหนักตามแนวรอยต่อตามขวาง หรือ รอยแตกตามขวางในถนนคอนกรีตชนิดมีรอยต่อ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทน้ำหนักตามรอยต่อของถนนคอนกรีต ทำให้รอยต่อถนนคอนกรีตแอ่นตัวน้อยลง ซึ่งทำให้ผลของการ Pumping ลดลง ลดการเสียดระดับบริเวณรอยต่อ/รอยแตก (Faulting) และลดความเสียหายจากการแตกที่มุมของถนนคอนกรีต โดยส่วนใหญ่การซ่อมแซมระบบถ่ายน้ำหนักมักใช้กับถนนคอนกรีตที่ไม่มีการใส่เหล็กเคียวในรอยต่อตามขวาง หรืออาจใช้วิธีนี้กับรอยแตกตามขวางที่เกิดขึ้นในถนนคอนกรีตชนิดมีรอยต่อ ทั้งนี้การซ่อมแซมระบบถ่ายน้ำหนักจะใช้ได้ผลดีกับถนนคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทน้ำหนักผ่านรอยต่อตามขวาง หรือรอยแตกตามขวาง ต่ำกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ (มนัส, 2550) แต่ยังคงมีอายุการใช้งานทางด้านโครงสร้างที่ดีอยู่โดยมีรูปแบบการซ่อมแซม ดังแสดงในภาพที่ 31



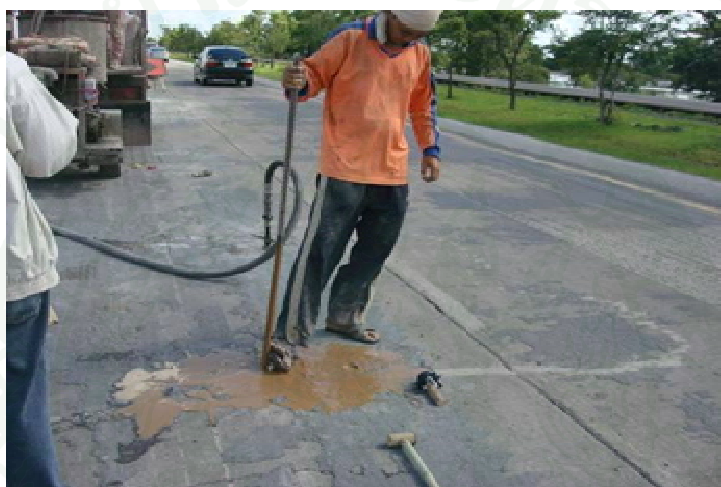
ภาพที่ 31 การซ่อมถนนคอนกรีตด้วยวิธีถ่ายน้ำหนัก (มนัส, 2550)

1.1.4. การซ่อมแซมบางส่วนของความหนา (Partial Depth Repair) คือ การซ่อมแซมความเสียหายของผิวทางคอนกรีต โดยจะซ่อมแซมผิวคอนกรีตที่เสียหายลึกไม่เกิน 1 ใน 3 ของความหนาของแผ่นคอนกรีต การแตกกะเทาะสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบริเวณรอยต่อตามยาวและตามขวาง หรือบริเวณกลางแผ่นคอนกรีต ซึ่งจะมีวิธีการซ่อมที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงขอบรอยต่อแผ่นพื้นคอนกรีตให้เรียบ ไม่เกิดการสะดุดในขณะขับขี่ รวมถึงซ่อมแซมหลุมบ่อบริเวณแผ่นพื้นคอนกรีต ซึ่งถือเป็นการซ่อมแซมเฉพาะจุดที่เสียหายในแผ่นคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 การซ่อมแซมบางส่วนของความหนา (มนัส, 2550)

1.1.5. การอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing) คือ การอุดซ่อมโพรงช่องว่างที่เกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต โดยวิธีการเจาะรูแผ่นพื้นถนนคอนกรีตบริเวณที่มีโพรงอยู่ข้างใต้จนทะลุแผ่นพื้น แล้วอัดฉีดด้วยวัสดุประเภท Slurry Cement Mortar หรือวัสดุอื่นใด ตามรูปแบบและข้อกำหนด โดยใช้แรงดันเพื่อเติมวัสดุดังกล่าวข้างต้นให้เต็มปริมาตรโพรงช่องว่างที่เกิดจากการ Pumping หรือการทรุดตัวของโครงสร้างถนน รวมถึงเป็นการเพิ่มเสถียรภาพให้แก่แผ่นพื้นคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 33



ภาพที่ 33 การอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (ธันวิน และอภิสิทธิ์, 2553)

1.2. วิธีการซ่อมถนนคอนกรีตในกรณีที่เสียหายรุนแรง หากความเสียหายลุกลามถึงโครงสร้างใต้แผ่นคอนกรีต สามารถดำเนินการซ่อมตลอดช่วงความหนา (Full Depth Repair) ด้วยวิธีการดังนี้

1.2.1. การซ่อมแซมแบบหล่อในที่ (Cast-in-Place) คือ การรื้อแผ่นพื้นคอนกรีตในส่วนที่ชำรุดออก โดยพื้นที่ของแผ่นพื้นคอนกรีตที่จะรื้อออกต้องให้เป็นไปตามรูปแบบที่กำหนดไว้หรือตามที่วิศวกรกำหนด ปกติแล้วการซ่อมแซมแบบหล่อในที่สามารถกระทำได้ทั้งแผ่นคอนกรีตหรือเพียงบางส่วนของแผ่นคอนกรีต โดยทำการปรับปรุงแก้ไขโครงสร้างชั้นทางใต้แผ่นพื้นให้มีความมั่นคงแข็งแรง ก่อนที่จะเทคอนกรีตใหม่ลงไปแทนที่ เนื่องจากการเปลี่ยนซ่อมแผ่นพื้นคอนกรีตแบบหล่อในที่นั้นได้ทำการรื้อคอนกรีตส่วนที่เสียหายออกและทำการเปลี่ยนแผ่นพื้นคอนกรีตใหม่ตลอดความลึกของแผ่นพื้นคอนกรีต ดังนั้นการซ่อมแซมด้วยวิธีนี้สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับแผ่นพื้นคอนกรีตได้อย่างหลากหลาย ซึ่งครอบคลุมถนนคอนกรีตที่มีความ

เสียหายที่เด่นชัดและมีปริมาณความเสียหายมากเกินกว่าจะใช้วิธีการซ่อมแบบอื่น ๆ เช่น การเกิดรอยแตกร้าวแบบ Structural Crack หลายรอยในแผ่นเดียวกันและแผ่นพื้นคอนกรีตสูญเสียระดับและความลาดเนื่องจากการทรุดตัวหรือโก่งตัวของแผ่นพื้นคอนกรีต วิธีการนี้เป็นการก่อสร้างผิวทางใหม่บางส่วนบนผิวทางเดิมที่มีสภาพชำรุดทำให้ถนนคอนกรีตสามารถกลับมาใช้งานได้ตามปกติ และป้องกันความเสียหายไม่ให้ขยายตัวมากขึ้นกว่าเดิม รวมถึงเพื่อเป็นชั้นพื้นทางสำหรับการ Overlay โดยมีรูปแบบการซ่อม ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 การซ่อมแซมแบบหล่อในที่ (<http://www.cprcontractors.com>)

1.2.2. การซ่อมแซมโดยใช้ระบบแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete Pavement Panel System) ปัญหาของวิธีการซ่อมถนนคอนกรีตแบบหล่อในที่ คือ ระยะเวลาที่รอให้คอนกรีตแข็งตัว โดยหากใช้คอนกรีตประเภท Fast Setting / High Early Strength ก็อาจเกิดปัญหาการแตกร้าวของแผ่นคอนกรีตที่เทใหม่ได้ การใช้ระบบแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete Pavement Panel System) จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ การซ่อมถนนคอนกรีตโดยการยกแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Pavement Panel System) มาติดตั้งที่หน้างานจึงเป็นทางเลือกการซ่อมถนนคอนกรีตที่เร็วกว่า

โดยขั้นตอนการซ่อมเริ่มจากการเตรียมแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete Pavement System) ในโรงหล่อคอนกรีตพร้อมทั้งติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel) เพื่อใช้สำหรับถ่ายแรง ระหว่างแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปกับพื้นถนน ดังแสดงในภาพที่ 35 ในขั้นตอนการซ่อมที่หน้างานจำเป็นต้องทำการขุดรื้อพื้นคอนกรีตเดิมที่เสียหายออก จากนั้นทำการเซาะร่องเพื่อใช้สำหรับติดตั้งเหล็กเดือยบนแผ่นคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 36 ต่อจากนั้นทำการบดอัดชั้นรองพื้นทางเดิมให้แน่น อาจใช้วัสดุ High Density Polymer (HDP) หรือวัสดุ Flowable Fill เพื่อปรับระดับแผ่นคอนกรีต รองใต้แผ่นคอนกรีต จากนั้นจึงอุดช่องรอยต่อของเหล็กเดือย และดำเนินการติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ดังแสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 35 ระบบการหล่อแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete Pavement) (PCA, 2004)



ภาพที่ 36 การรื้อถนนคอนกรีตที่เสียหายเพื่อใช้รองรับแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PCA, 2004)



ภาพที่ 37 การติดตั้งแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PCA, 2004)

2. วิธีการซ่อมถนนคอนกรีตแบบรวดเร็ว

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้มุ่งเน้นการศึกษาศึกษาการซ่อมแซมถนนในกรณีที่เกิดความเสียหายรุนแรงเป็นหลัก ดังนั้น จะกล่าวถึงวิธีการซ่อมถนนคอนกรีตตลอดช่วงความหนา (Full Depth Repair) รายละเอียดดังนี้

2.1. เกณฑ์ความเสียหายสำหรับการเลือกซ่อมด้วยวิธี Full Depth Repair

2.1.1. เกณฑ์ความเสียหายของถนนคอนกรีตที่เหมาะสมแก่การซ่อมด้วยวิธี Full-Depth Repair ในต่างประเทศ เนื่องจากความเสียหายของถนนคอนกรีตมีหลายรูปแบบ เช่น รอยแตกตามยาว รอยแตกตามขวาง การแตกกะเทาะของรอยต่อ ฯลฯ ดังนั้น (FHWA, 2002) จึงแนะนำรูปแบบและความรุนแรงของความเสียหายของถนนคอนกรีตที่เหมาะสมในการซ่อมด้วยวิธี Full Depth Repair ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ประเภทและระดับความเสียหายของถนนคอนกรีตที่สมควรซ่อมด้วยวิธีซ่อมแซมตลอดช่วงความหนา (FHWA, 2002)

ที่	ลักษณะความเสียหาย	ระดับความรุนแรง
1	รอยแตกตามขวาง (Transverse cracking)	ปานกลาง,สูง
2	รอยแตกตามยาว (Longitudinal cracking)	ปานกลาง,สูง
3	รอยแตกบริเวณมุมแผ่น (Corner breaks)	ต่ำ,ปานกลาง,สูง
4	การแตกกะเทาะบริเวณรอยต่อ (Spalling of joints)	ปานกลาง ¹ ,สูง
5	การแตกออกเป็นชิ้น ² (Blowups)	ต่ำ,ปานกลาง,สูง
6	การแตกกะเทาะจากการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุมวลรวมในคอนกรีต (Reactive aggregate spalling)	ปานกลาง ¹ ,สูง
7	การเสื่อมสภาพบริเวณใกล้เคียงรอยซ่อมเดิม (Deterioration adjacent to existing repairs)	ปานกลาง ¹ ,สูง
8	การเสื่อมสภาพบริเวณรอยซ่อมเดิม (Deterioration of existing repairs)	ปานกลาง ¹ ,สูง

หมายเหตุ :

- 1) ในกรณีที่ความเสียหายลึกจากผิวบนของถนนคอนกรีตไม่เกิน 1 ใน 3 ของความหนาของถนนคอนกรีตสามารถใช้วิธีซ่อมแซมบางส่วนของความหนา (Partial-Depth Repair)
- 2) ในกรณีที่มีความเสียหายอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาของวัสดุมวลรวมในคอนกรีต การแก้ไขด้วยวิธีการซ่อมแซมตลอดช่วงความหนาอาจแก้ปัญหาได้ชั่วคราวเพราะเมื่อวัสดุมวลรวมเกิดการปฏิกิริยาจะทำให้แผ่นคอนกรีตเกิดการกะเทาะเสียหายได้ในภายหลัง

2.1.2. เกณฑ์ความเสียหายของถนนคอนกรีตที่เหมาะสมแก่การซ่อมด้วยวิธี Full-Depth Repair ในประเทศไทย จากคู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง ของสำนักงานบริหารบำรุงทางปี 2550 ได้กำหนดลักษณะความเสียหายของถนนคอนกรีตที่เหมาะสมกับการซ่อม Full Depth Repair ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะความเสียหายที่เหมาะสมกับการซ่อมด้วยวิธี Full Depth Repair ในประเทศไทย

ที่	ลักษณะความเสียหาย	ระดับความรุนแรง/คำอธิบายลักษณะความเสียหาย
1	รอยแตกตามยาว (Longitudinal cracking)	ความรุนแรงระดับสูง - เป็นรอยแตกเป็นเส้นที่มีความกว้างมากกว่า 6 มม. หรือมีรอยบิ่นกะเทาะกว้างมากกว่า 50 มม.
2	รอยแตกตามขวางและรอยแตกตามแนวทแยงมุม (Transverse and Diagonal Cracks)	ความรุนแรงระดับสูง - เป็นรอยแตกเป็นเส้นที่มีความกว้างมากกว่า 6 มม. หรือมีรอยบิ่นกะเทาะกว้างมากกว่า 50 มม. และมีรอยเลื่อนต่างระดับมากกว่า 6 มม. ปรากฏให้เห็น
3	รอยแตกที่มุม (Corner Break)	ความรุนแรงระดับสูง - เป็นรอยแตกที่ทำการอุดซ่อมแล้ว อยู่ในสภาพดี และมีรอยเลื่อนต่างระดับมากกว่า 6 มม. ปรากฏให้เห็น

ตารางที่ 3 (ต่อ)

4	รอยแตกจากคอนกรีตสูญเสียความทนทาน (Durability "D" Crack)	ความรุนแรงระดับปานกลาง - รอยแตกที่เกิดขึ้นเริ่มขยายพื้นที่ ซึ่งส่วน เริ่มเกิดการเคลื่อนตัวและหลุดร่อน ความรุนแรงระดับสูง - รอยแตกขยายพื้นที่มากขึ้น มีชิ้นส่วนหลุด ร่อนหายไปจำนวนมาก และมีบริเวณที่เกิด การหลุดร่อนมากกว่า 0.10 ตร.ม.
5	ผิวหลุดลอก (Scaling)	ความรุนแรงระดับสูง - แผ่นพื้นเกิดการหลุดลอก มากกว่าร้อยละ 15 ของพื้นที่แผ่นพื้นที่พิจารณา
6	การโก่งงอ (Blow-up or Buckling)	ความรุนแรงระดับปานกลาง - ยานพาหนะมีการสั่นสะเทือนปานกลาง ความเร็วถูกลดลงเพื่อความปลอดภัยและ ความสะดวกสบายในการขับขี่ และ/หรือ การ ปูดนูนหรือการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ทำให้ ยานพาหนะสะดุดปานกลาง มีความรู้สึกนั่ง ไม่สบายปานกลาง

ตารางที่ 3 (ต่อ)

6	การ โกงงอ (Blow-up or Buckling)	ความรุนแรงระดับสูง - ยานพาหนะมีการสั่นสะเทือนรุนแรง ความเร็วถูกลดลงอย่างมากเพื่อความ ปลอดภัยและความสะดวกสบายในการขับขี่ และ/หรือ การปูถนนหรือการทรุดตัวที่ เกิดขึ้นทำให้ยานพาหนะสะดุดตัวรุนแรง เป็น ผลให้รู้สึกนั่งไม่สบายเป็นอย่างมาก และ/ หรือ ไม่มีความปลอดภัย และ/หรือ อาจทำให้ ยานพาหนะเกิดความเสียหายได้
7	รอยเลื่อนต่างระดับ (Faulting)	ความรุนแรงระดับสูง - แผ่นพื้นคอนกรีตเกิดรอยเลื่อนต่างระดับ ระหว่างรอยต่อหรือรอยแตกมากกว่า 12 มม.

นอกจากนี้ความเสียหายประเภทแผ่นพื้นถูกแบ่งแยก (Divided Slab) และรอยแตกกระแทก (Punch-out) ในระดับความรุนแรงปานกลาง และความรุนแรงในระดับสูง ซึ่งจำนวนชิ้นส่วนที่ถูกแบ่งแยกหากมีจำนวนชิ้นของรอยแตกตั้งแต่ 4 ชิ้นขึ้นไปหรือรอยแตกที่มีความรุนแรงสูง ซึ่งมีความเสียหายเป็นรอยแตกเป็นเส้นที่มีความกว้างมากกว่า 6 มิลลิเมตร หรือมีรอยบิ่นกะเทาะกว้างมากกว่า 50 มิลลิเมตร และมีรอยเลื่อนต่างระดับมากกว่า 6 มิลลิเมตร ก็ให้ซ่อมด้วยวิธี Full Depth Repair รวมทั้งความเสียหายประเภทรอยบิ่นกะเทาะที่มุม (Corner Spall) ที่มีขนาดรอยแตกลึกกว่า 25 มม. และ/หรือมีขนาดพื้นที่รอยแตกใหญ่กว่า 0.3 ม. X 0.3 ม.ก็ให้ซ่อมด้วยวิธี Full Depth Repair เช่นกัน

2.2. ข้อกำหนดงาน Full Depth Repair ในต่างประเทศ (Caltrans, 2004)

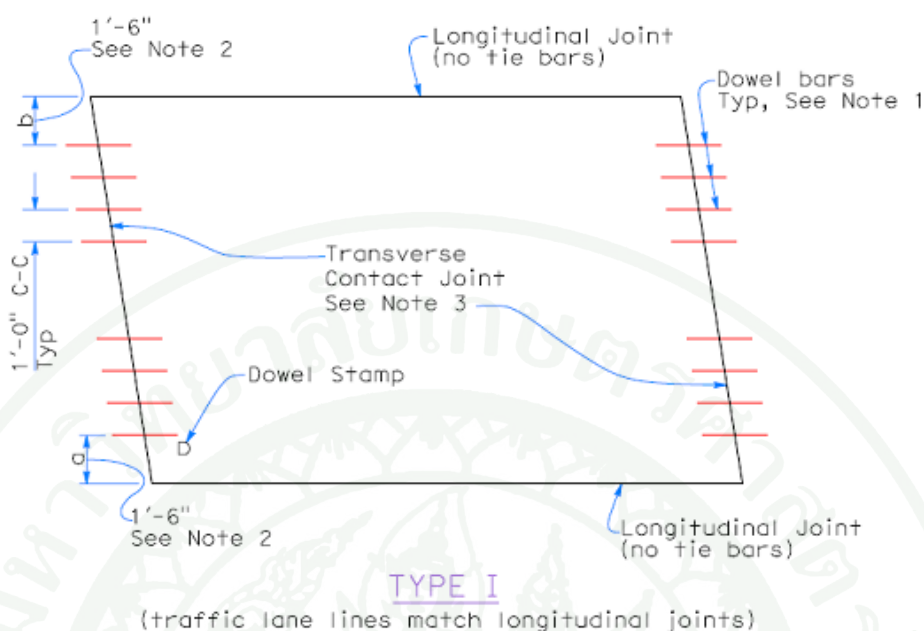
การซ่อมถนนคอนกรีตด้วยวิธีซ่อมแซมตลอดช่วงความหนา (Full Depth Repair) คือ การรื้อคอนกรีตที่เสียหายเดิมออกและทำการหล่อคอนกรีตในที่ (Cast-In-Place) เติมความหนา โดยทั่วไปแล้วความยาวขั้นต่ำของการซ่อมอยู่ที่ประมาณ 1.8 เมตร อย่างไรก็ตาม เมื่อพื้นที่การซ่อม อยู่ใกล้กันมีความเสียหายเป็นพื้นที่กว้างเกือบทั้งช่องจราจรแล้ว ตามข้อกำหนดของ Caltrans ไม่ อนุญาตให้ซ่อมเพียงแค่ช่องจราจรเดียวเพราะจะเกิดความไม่มั่นคง (Instability) กับแผ่นที่ซ่อมใหม่

2.2.1. รอยต่อ (Joints) การออกแบบการถ่ายแรงระหว่างรอยต่อ (Load Transfer Design) สำหรับการซ่อมแซมตลอดช่วงความหนา (Full Depth Repair) มีความจำเป็น (Caltrans, 2004) เพื่อให้เกิดการเคลื่อนตัวที่น้อย ซึ่งการเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีตนี้จะเป็นสาเหตุให้เกิดการ แตกกะเทาะ การ Pumping การทรุดตัวต่างระดับ และการแตกหักของแผ่นคอนกรีตที่อยู่ติดกัน ซึ่ง วิธีการถ่ายแรงขึ้นกับปริมาณจราจรโดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายแรงดังนี้

2.2.2. เหล็กเดือย (Dowel Bar) เป็นเหล็กเส้นกลมผิวเรียบที่ใช้บริเวณรอยต่อตาม ขวาง (Transverse Joint) ซึ่งอนุญาตให้มีการเคลื่อนตัวของแผ่นคอนกรีตตามแนวราบ สำหรับการ ซ่อมแซมตลอดช่วงความหนา (Full Depth Repair) ด้านของรอยต่อที่ติดตั้งต้องสามารถเคลื่อนตัว ตามแนวราบได้ เหล็กเดือยที่ใช้มีความยาว 1.8 ฟุต (54 ซม.) ขนาดของเหล็กเดือยขึ้นกับปริมาณ จราจรและความหนาของแผ่นคอนกรีต โดยถนนทั่วไปใช้เหล็กเดือยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ส่วนถนนที่มีปริมาณจราจรต่ำหรือถนนที่มีความหนาน้อยกว่า 25 ซม. ให้ใช้เหล็กเดือย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30-35 มิลลิเมตร สำหรับการใช้เหล็กเดือยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรสำหรับการซ่อมแซมตลอดช่วงความหนา (Full Depth Repair) ไม่สนับสนุนให้ใช้ เนื่องจากไม่สามารถรับแรงแบกทาน (Bearing Stress) ได้เพียงพอ (ACPA, 1995) ในขณะที่ Caltrans (2004) ได้แนะนำการใช้เหล็กเดือยดังนี้

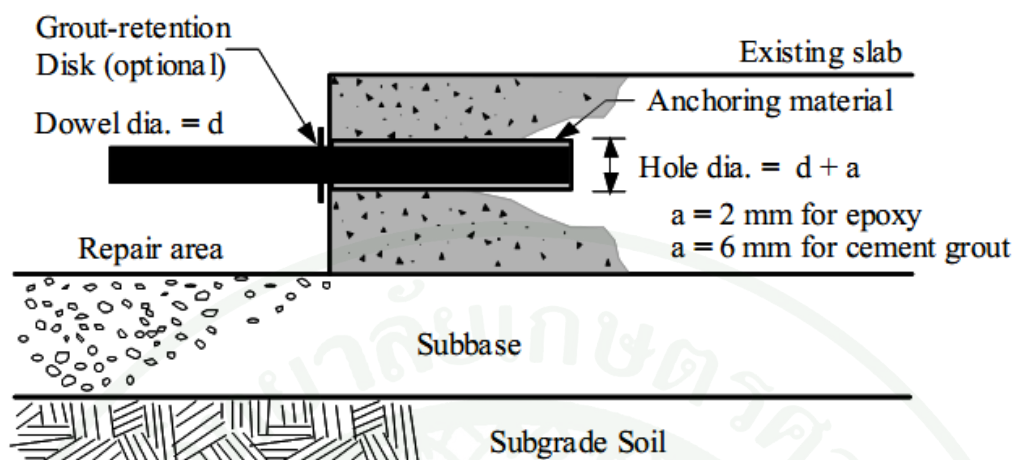
ก. ใช้เหล็กเดือย 3 เส้นระยะห่างระหว่างเส้น 30 ซม. ตามแนวกึ่งกลางในแต่ ละแนวของแนวล้อรถในกรณีที่ไม่ใช่ช่องทางรถบรรทุก

ข. ใช้เหล็กเดือย 4 เส้นระยะห่างระหว่างเส้น 30 ซม. ตามแนวกึ่งกลางในแต่ละ แนวของแนวล้อรถในกรณีที่เป็นช่องทางรถบรรทุก ตัวอย่างแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ตัวอย่างการเสริมเหล็กในรอยต่อตามขวางของ Caltrans (2004)

สำหรับวิธีการยึดเหล็กเดือยเข้ากับแผ่นคอนกรีตเดิม (FHWA, 1995) จะเริ่มจากการเจาะแผ่นคอนกรีตเดิมที่ตำแหน่งกึ่งกลางความลึกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะมีขนาดเท่ากับ $d + a$ ดังแสดงในภาพที่ 39 โดยที่ d คือขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเดือย และ a คือขนาดช่องว่างเพิ่มเติมสำหรับอัดสารเชื่อมประสานซึ่งมีขนาด 6 มิลลิเมตรสำหรับซีเมนต์เกรทท์ และมีขนาด 2 มิลลิเมตรสำหรับอีพ็อกซี่ การอัดฉีดทำได้โดยใช้ท่อยาวฉีดซีเมนต์เกรทท์ หรือใช้หัวฉีด (nozzle) ฉีดสารอีพ็อกซี่ นอกจากนี้ยังสามารถเลือกใช้แผ่นที่มีรูปร่างแบบมีรูเหมือนโดนัท (Grout-retention Disk) ใส่ครอบในเหล็กเดือยเพื่อกันสารเชื่อมประสานไหลออกได้ และเมื่อใส่เหล็กเดือยให้ทำการบิดเพียงเล็กน้อยเพื่อให้มั่นใจว่าการยึดแน่นและมีสารยึดเคลือบโดยรอบ ส่วนปลายที่ยื่นออกมาให้ทาด้วยจาระบี (grease) บางๆ เพื่อให้สามารถเคลื่อนตัวตามแนวราบได้



ภาพที่ 39 รูปแบบการยึดเหล็กเดือย (Caltrans, 2004)

2.2.3. เหล็กยึด (Tie bar) ตาม Caltrans (2004) เป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร อยู่ตลอดแนวของรอยต่อตามยาว (Longitudinal Joint) โดยมีการยึดอยู่กับแผ่นคอนกรีตเดิม โดยห้ามมีการเคลื่อนตัวของรอยต่อ และควรเคลือบด้วยอีพ็อกซี่เพื่อป้องกันไม่ให้ความต้านทานต่อการถูกกัดกร่อน (Corrosion resistance)

2.2.4. การยาแนวรอยต่อ ตาม Caltrans (2004) เป็นวัสดุประเภท Polyethylene มีลักษณะเป็นโฟมที่ยืดหยุ่นและขยายตัวได้มีความหนาประมาณ 6 มิลลิเมตรตามแนวรอยต่อตามขวาง โดยตัดให้ผิวบนของวัสดุยาแนวรอยต่อให้พอดีกับผิวคอนกรีต

2.3. ขอบเขตการซ่อม Full Depth Repair (FHWA, 2001)

2.3.1. สำหรับแผ่นคอนกรีตที่มีเหล็กเดือย (Dowel Bar) หรือ เหล็กยึด (Tie Bar) ขอบเขตการซ่อมด้วยวิธี Full Depth Repair แนะนำให้ซ่อมแซมเต็มความกว้าง และมีความยาวขั้นต่ำไม่น้อยกว่า 1.8 เมตร เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกระดก (Rocking) การอัดทะลัก (Pumping) และการแตกหักของแผ่นคอนกรีต

2.3.2. สำหรับแผ่นคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเดือย (Non-Dowel Bar) หรือ เหล็กยึด (Non-Tie Bar) แนะนำให้ซ่อมแซมเต็มความกว้าง และมีความยาวขั้นต่ำไม่น้อยกว่า 1.8 เมตรสำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ และมีความยาวขั้นต่ำไม่น้อยกว่า 2.4 – 3.0 เมตรสำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรปานกลางถึงสูง

2.3.3. ไม่แนะนำให้ซ่อมไม่เต็มความกว้างเพราะแผ่นคอนกรีตจะขาดเสถียรภาพ

2.3.4. หากซ่อมแผ่นคอนกรีตความยาวเกิน 3 ถึง 4 เมตรต้องมีการเสริมเหล็กหรือต้องมีการทำรอยต่อเพิ่มตรงกลางเพื่อป้องกันรอยแตกกลางแผ่น

2.3.5. หากระยะห่างระหว่างขอบเขตที่จะซ่อมด้วยวิธี Full Depth Repair ใกล้กับรอยแตกตามขวางหรือรอยต่อเกิน 1.8 เมตรให้เพิ่มขอบเขตการซ่อมแซมให้ถึงรอยต่อหรือรอยแตก

2.3.6. รอยแตกที่ห่างเกิน 3 เมตรจากรอยต่อสามารถซ่อมเป็นส่วนตัวได้ หรือหากความเสียหายมีความรุนแรงมากก็ให้ซ่อมเต็มแผ่น

2.4. ข้อกำหนดงาน Full Depth Repair ในประเทศไทย

สำหรับข้อกำหนดการซ่อมแผ่นพื้นคอนกรีตแบบหล่อในที่สำหรับการซ่อมตลอดช่วงความหนาในประเทศไทยตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.ม 326/2554 ปกติจะใช้ปูนซีเมนต์ประเภท 1 หรือจะใช้ปูนซีเมนต์ประเภท 3 ปูนซีเมนต์ที่ใช้จะต้องมีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 350 kg/m^3 ในกรณีพิเศษและต้องได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรของช่างผู้ควบคุมงานเท่านั้น สำหรับกำลังรับแรงอัดปกติคอนกรีตจะต้องมีค่าความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีตลูกทรงลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มิลลิเมตร ที่อายุบ่ม 28 วัน ไม่น้อยกว่า 4,640 psi หรือ 325 ksc. ทั้งนี้จะต้องมีการบ่มอย่างน้อย 72 ชั่วโมงหรือตามแบบกำหนดและในกรณีที่ต้องการเปิดการจราจรตามเวลากำหนดพิเศษคอนกรีตจะต้องมีค่าความต้านแรงอัดของแท่ง ณ เวลาที่เปิดการจราจรไม่น้อยกว่า 3,480 psi หรือ 245 ksc. และจะต้องมีค่าความต้านแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ไม่น้อยกว่า 4,640 psi หรือ 325 ksc. ตามมาตรฐานการก่อสร้างถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ของกรมทางหลวงตาม ทล.ม 309/2554 ได้กำหนดเรื่องการเปิดการจราจรสำหรับการก่อสร้างถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตามปกติว่า ห้ามมีการเปิดการจราจรบนแผ่นพื้นคอนกรีตจนกว่าจะมีอายุครบ 14 วัน เว้นแต่ในกรณีจำเป็น เช่น บริเวณ

ทางแยกและทางเชื่อม เป็นต้น อาจยอมให้เปิดการจราจรได้ถ้าค่ากำลังรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตมีค่าไม่ต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดที่กำหนดไว้ในแบบ ส่วนเกณฑ์การคัดเลือกความเสียหายที่เหมาะสมกับการซ่อมด้วยวิธี Full Depth Repair มีแนวทางการคัดเลือกที่ไม่แตกต่างกัน

2.5. วิธีการซ่อมแผ่นพื้นคอนกรีตแบบ Full Depth Repair (มณัส, 2550)

การกำหนดพื้นที่ที่จะทำการซ่อม ให้ทำเครื่องหมายแสดงขอบเขตไว้บนผิวคอนกรีตให้ชัดเจนก่อนลงมือทำการซ่อม โดยพื้นที่ที่ต้องรื้อออกนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณความเสียหายที่ปรากฏดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 40 โดยมีหลักเกณฑ์พิจารณาดังนี้

2.5.1. กำหนดพื้นที่ที่จะทำการซ่อม ดังนี้

- ก.ต้องซ่อมเต็มความกว้างของแผ่นพื้นคอนกรีตเดิม
- ข.ต้องเป็นรูปสี่เหลี่ยม มีความยาวเปลี่ยนแปลงตามความเสียหาย แต่ต้องยาวไม่น้อยกว่า 2 เมตร
- ค.แนวของรอยตัดซ่อมตามขวางจะต้องขนานกับแนวรอยต่อตามขวาง
- ง.แนวของรอยตัดซ่อมตามขวางจะต้องห่างจากรอยแตกที่เสียหายไม่น้อยกว่า 0.3 เมตร
- จ.กรณีที่แนวตัดซ่อมตามขวางของพื้นที่ที่จะทำการซ่อมที่อยู่ใกล้กัน มีระยะห่างกันน้อยกว่า 2 เมตร ให้รวมเป็นพื้นที่เดียวกัน
- ฉ.กรณีที่แนวตัดซ่อมตามขวางของพื้นที่ที่จะทำการซ่อม มีระยะห่างจากรอยต่อตามขวางน้อยกว่า 2 เมตร ให้ขยายความยาวโดยให้แนวตัดซ่อมตามขวางตรงกับรอยต่อตามขวางนั้นๆ

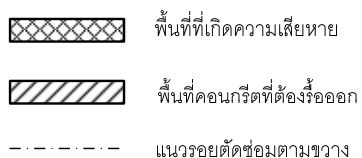
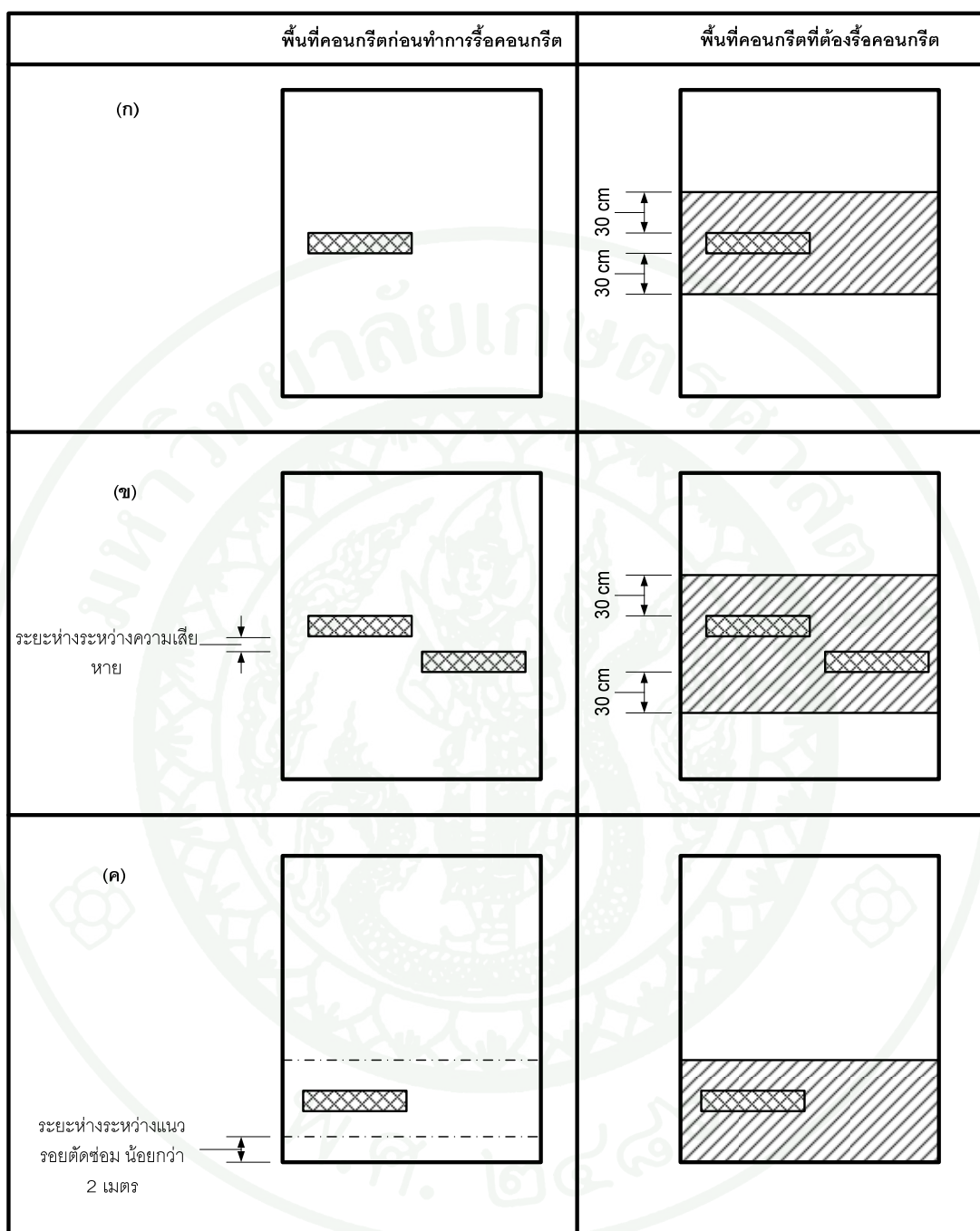
2.5.2. การรื้อคอนกรีตออก

การแยกพื้นที่ที่จะซ่อม ให้ตัดคอนกรีตโดยรอบพื้นที่ที่จะทำการซ่อมโดยใช้เครื่องตัดแผ่นพื้นคอนกรีต ในการตัดคอนกรีตจะต้องตัดให้ขาดตลอดความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีต รวมทั้งตัดเหล็กเดือยและเหล็กยึดให้ขาดจากกัน เพื่อให้เป็นอิสระจากแผ่นพื้นข้างเคียง ดังแสดงในภาพที่ 41 ทั้งนี้ให้พิจารณาถึงเหตุประกอบดังนี้

ก.ถ้าแผ่นพื้นคอนกรีตข้างเคียงด้านรอยต่อตามยาวอยู่ในสภาพดี และสามารถใช้เป็นแบบข้างในการเทและปาดแต่งหน้าคอนกรีตได้ ใช้แนวรอยต่อเป็นแนวการตัดได้

ข.สำหรับรอยต่อตามยาวให้ตรวจสอบทิศทาง Shear Key ก่อน ถ้าพบว่า Shear Key ของแผ่นพื้นคอนกรีตข้างเคียงยื่นเข้ามาในพื้นที่ที่จะทำการซ่อม ให้ร่นระยะแนวรอยตัดจากรอยต่อตามยาวเข้ามาในพื้นที่ที่จะทำการซ่อมประมาณ 50 มิลลิเมตร เพื่อรักษา Shear Key ไว้

ถ้าแผ่นคอนกรีตข้างเคียงด้านรอยต่อตามยาวมีสภาพความเสียหายมากจนไม่สามารถใช้เป็นแบบข้างในการเทคอนกรีตได้ ให้กำหนดแนวรอยตัดล้ำเข้าไปในแผ่นพื้นคอนกรีตข้างเคียงนั้นประมาณ 0.5 เมตร เพื่อเตรียมพื้นที่สำหรับการเข้าแบบข้าง



ภาพที่ 40 การกำหนดพื้นที่ของคอนกรีตที่ต้องรื้อออก



ภาพที่ 41 แยกพื้นที่ที่จะทำการซ่อมแซมด้วยวิธีการใช้เลื่อยตัดคอนกรีต

สำหรับด้านที่ติดกับไหล่ทาง ถ้าไหล่ทางยังคงสภาพดีให้กำหนดแนวการตัดตามรอยต่อระหว่างไหล่ทางกับผิวคอนกรีต ถ้าไหล่ทางเสียหายจนไม่สามารถใช้เป็นแบบข้างได้ ให้กำหนดแนวการตัดล้ำเข้าไปในไหล่ทางประมาณ 0.5 เมตร เพื่อเตรียมพื้นที่สำหรับการเข้าแบบข้าง

การเอาคอนกรีตในพื้นที่ที่จะทำการซ่อมออกจากพื้นที่ อาจทำได้โดยวิธีการทุบให้แตกแล้วรื้อออก (Breakup and Clean-out Method) หรือวิธีการยกแผ่นพื้นคอนกรีตออก (Lift-out Method) ก็ได้ ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวจะต้องไม่ทำให้กระทบกระเทือนเสียหายต่อแผ่นพื้นคอนกรีตข้างเคียงดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 นำแผ่นพื้นคอนกรีตออกโดยวิธีทุบให้แตกหรือวิธียกออก

2.5.3. การปรับปรุงชั้นทางใต้แผ่นพื้นคอนกรีต

ภายหลังจากรื้อเอาคอนกรีตเดิมออกไปแล้ว ต้องทำการปรับปรุงชั้นทางใต้แผ่นพื้นคอนกรีตให้มีสภาพดี โดยให้พิจารณาความเสียหายที่ปรากฏจริงในสนาม ให้ขุดรื้อวัสดุที่ไม่เหมาะสมออกทิ้งไปและเติมวัสดุชั้นทางเข้าไปใหม่ พร้อมทั้งบดอัดแน่นเป็นชั้น ๆ ตามรูปแบบของโครงสร้างชั้นทางเดิม และ ถ้ามิน้ำข้างจะต้องสูบน้ำออกให้หมดก่อน หรือในกรณีที่มีความเร่งด่วนในการเปิดการจราจรสามารถกำหนดให้ใช้ Lean Concrete หรือคอนกรีตมวลเบา เป็นชั้นรองแผ่นพื้นคอนกรีตได้ อัตราส่วนผสมให้ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท 1 ไม่น้อยกว่า 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อให้แข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง ความหนาต้องไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร

2.5.4. การติดตั้ง เหล็กเดือย และเหล็กยึด

ก.ทำการเจาะรูสำหรับฝังเหล็กเดือยและเหล็กยึด กับแผ่นพื้นคอนกรีตเดิมที่อยู่ตรงตำแหน่งที่กำหนด ให้ฝังเหล็กเดือยและเหล็กยึดให้ได้ขนาดและแนวระดับตามรูปแบบกำหนดด้วยเครื่องเจาะรู ดังแสดงในภาพที่ 43

ข.ใช้เครื่องเป่าลม ทำความสะอาดรูเจาะ แล้วทำการนิตสารยึดอีพ็อกซีเรซินสำหรับคอนกรีต ทุกรูสำหรับเหล็กยึดและเหล็กเดือย

ค.ในรอยต่อเพื่อขยาย (Expansion Joint) จะต้องติดตั้งปลอกเหล็กเดือย โดยต้องรักษาระยะห่างระหว่างปลอกเหล็กเดือยกับเหล็กเดือยให้ได้ตามแบบ และการป้องกันไม่ให้น้ำปูนไหลเข้าไปในปลอกเหล็กเดือย ให้ใช้แหวนยาง กระจาดขาว พันหุ้มเหล็กเดือยตรงบริเวณปากปลอกเหล็กเดือยไว้

ง.วางเหล็กเดือย โดยก่อนนำเหล็กเดือยมาใช้งาน ต้องทาครึ่งหนึ่งของความยาวเหล็กเดือยด้วยยางแอสฟัลต์หนึ่งชั้น แล้วทาทับด้วยจารบีอีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้คอนกรีตยึดหน่วงปลายเหล็กเดือยนั้น ซึ่งส่วนของเหล็กเดือยที่ไม่เกิดแรงยึดหน่วงกับคอนกรีตนี้ เรียกว่า Free End ส่วนอีกครึ่งหนึ่งของเหล็กเดือยเรียกว่า Fixed End ในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นเดียวกันให้วางเหล็กเดือยโดยให้ด้านหนึ่งของแผ่นพื้นเป็น Free End และปลายอีกด้านหนึ่งเป็น Fixed End เพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นพื้นคอนกรีตเกิดรอยแตกเนื่องจากการขยายตัวของคอนกรีต



ภาพที่ 43 ติดตั้งเหล็กเคียว

2.5.5. การเทคอนกรีต การตบแต่งผิวหน้า และการบ่มคอนกรีต

ก.เทคอนกรีตและตบแต่งผิวหน้า ให้แล้วเสร็จอย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันความเสียหายและหลีกเลี่ยงปัญหาจากฝนตกและปัญหาการจราจร โดยจะต้องมีผู้ควบคุมงานควบคุมการปฏิบัติงานอย่างใกล้ชิด จนกว่าจะสิ้นสุดการเทคอนกรีต และการตบแต่งผิวหน้า

ข.ภายหลังจากการกวาดและแต่งผิวหน้าเสร็จแล้ว ให้รีบบ่มคอนกรีตทันที การบ่มจะต้องกระทำอย่างต่อเนื่องและใช้เวลาบ่มอย่างน้อย 72 ชั่วโมง หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ

ค.ในกรณีเทคอนกรีตที่มีแผ่นพื้นคอนกรีตมากกว่า 1 แผง ให้ตัดรอยต่อตามขวางตามรูปแบบภายใน 3-6 ชั่วโมง

2.5.6. การอุดวัสดุรอยต่อ

สำหรับวัสดุทารอยต่อ (Joint Primer) ต้องเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการไหลแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของคอนกรีตได้สูง และมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือเป็นวัสดุารอยต่อชนิดเทร้อน (Concrete Joint Sealer, Hot Poured Elastic Type) ต้องมีคุณสมบัติทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิงและน้ำมันเครื่องและเมื่อหยอดลงไป ในรอยต่อ จะต้องไม่เกิดช่องอากาศระหว่างคอนกรีตกับตัว Joint Sealer และต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม “วัสดุารอยต่อคอนกรีตแบบยืดหยุ่นชนิดเทร้อน” มาตรฐานเลขที่ มอก.479 เช่นเดียวกัน โดยมีวิธีการยาแนวรอยต่อดังนี้

ก.ตัดวัสดุรอยต่อที่อยู่ในสภาพแข็งให้เป็นชิ้นเล็กๆก่อน

ข.นำวัสดุรอยต่อที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ บางส่วนใส่ลงไปหลอมละลายในถังต้ม พร้อมทั้งกวนอยู่ตลอดเวลา และในขณะที่กวนก็ค่อยๆ ใส่วัสดุรอยต่อส่วนที่เหลือที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ลงไปในถังต้มทีละน้อยๆ พร้อมกับกวนไปเรื่อยๆ จนวัสดุรอยต่อหลอมละลายทั้งหมดและมีอุณหภูมิสูงจนถึงอุณหภูมิที่จะหยอดได้ (ตามที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ) ต้องระมัดระวังอย่าให้อุณหภูมิของวัสดุรอยต่อสูงเกินกว่าที่กำหนดไว้เพราะจะทำให้วัสดุรอยต่อเสื่อมคุณภาพ

ค.วัสดุรอยต่อที่นำไปหลอมละลายแล้วให้นำไปใช้งานทันที ถ้าใช้งานไม่หมดและปล่อยให้เย็น จนแข็งตัว ห้ามนำเอามาหลอมละลายใหม่เพื่อใช้งานอีก

ง.ให้ทาหรือพ่นวัสดุรอยต่อลงบนผิวหน้ารอยต่อที่สะอาดและแห้ง ปริมาณของวัสดุรอยต่อต้องไม่มากเกินไป จากนั้นทิ้งวัสดุรอยต่อให้แห้ง

จ.หยอดวัสดุรอยต่อไปในรอยต่อ โดยให้ระดับของวัสดุรอยต่อต่ำกว่าขอบของรอยต่อประมาณ 3 มิลลิเมตร

ฉ.ภายหลังจากหยอดวัสดุรอยต่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ป้องกันไม่ให้รถวิ่งผ่านจนกว่าวัสดุรอยต่อแข็งตัวไม่ติดล้อรถในขณะที่แล่นผ่าน ทั้งนี้ระยะเวลาที่ป้องกันให้เป็นไปตามที่ระบุในคุณสมบัติของวัสดุรอยต่อชนิดนั้นๆ

2.5.7. ข้อเสนอแนะ

ก.ต้องทำการตัดขอบของพื้นที่ที่จะซ่อมแซมให้ขาดออกจากการต่อยึดกันโดยเนื้อคอนกรีต เดือยเหล็ก เหล็กยึด และเหล็กตะแกรง ก่อนทำการทุบคอนกรีตที่ต้องการเอาออก

ข.ในการทุบคอนกรีต ให้ระมัดระวังที่จะทำลายต่อแผ่นพื้นข้างเคียง

ค.การซ่อมปรับปรุงชั้นทางด้านล่าง ต้องแก้ไขให้ถึงชั้นทางที่อ่อนตัวด้วย

ง.การบดทับชั้นทางด้านล่าง ให้ทำการก่อสร้างขึ้นมาเป็นชั้นๆตามโครงสร้างชั้นทางเดิม และให้มีความหนาแน่นสม่ำเสมอตามมาตรฐานที่กำหนด

2.6. คอนกรีตแข็งตัวเร็ว (Fast Setting Concrete)

ปกติแล้วการซ่อมถนนคอนกรีตด้วยวิธีหล่อในที่ (Cast-in-Place) จะใช้วัสดุผสมรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement Concrete หรือ PCC) อาจมีการผสมเถ้าลอย หรือสารผสมเพิ่มตามสภาพที่ต้องการใช้งาน ซึ่งในบางกรณีที่ต้องการเร่งเปิดการจราจรได้เร็วภายหลังการซ่อม อาจมีการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ หรือวัสดุเชื่อมประสานชนิดพิเศษ แต่ก็มีราคาการก่อสร้างที่สูงและต้องมีการควบคุมเป็นพิเศษ ตาม Caltrans, 2004 ได้กล่าวว่า การทำให้คอนกรีตแข็งตัวได้เร็วสามารถทำได้โดย การลดอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ลง การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตให้มากขึ้น การเติมสารเคมีเพื่อเร่งปฏิกิริยา หรือการเติมสารลดน้ำ (High-range water reducers)

Caltrans (2004) ได้อนุญาตให้มีการใช้คอนกรีตแข็งตัวเร็ว (Rapid Strength Concrete หรือ RSC) มี 3 ประเภทดังนี้

ก. ส่วนผสมปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ ใช้ในกรณีที่มียุทธศาสตร์การก่อสร้างสั้น ต้องการความแข็งแรงภายในเวลาที่รวดเร็วโดยสามารถให้ความแข็งแรงตามต้องการหลังบ่มภายใน 2 – 4 ชั่วโมงในสภาวะการก่อสร้างปกติ

ข. วัสดุคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท 3 ที่ไม่ใช่ตัวเร่งประเภทคลอไรด์ สามารถให้ความแข็งแรงตามต้องการหลังบ่มภายใน 4 – 6 ชั่วโมงในสภาวะการบ่มภายใต้ข้อกำหนดของการใช้งานปูนซีเมนต์ประเภท 3 ในบางครั้งอาจมีการใช้สารลดน้ำ (High-range water reducers) เพื่อให้อนุภาคของปูนซีเมนต์แพร่กระจายได้ดี สามารถลดการใช้น้ำในระหว่างที่ทำการผสมคอนกรีต ซึ่งทำให้คอนกรีตแข็งตัวได้เร็วขึ้น

ค. วัสดุคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท 3 ที่ไม่ใช่ตัวเร่งประเภทคลอไรด์ สามารถให้ความแข็งแรงตามต้องการหลังบ่มภายใน 24 ชั่วโมงในสภาวะการก่อสร้างปกติ

FHWA (2001) ได้กำหนดประเภทของปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษสำหรับงานซ่อมแซมด้วยวิธี Full Depth Repair ไว้ดังนี้

ก. ปูนซีเมนต์ (Rapid Set Cement/RSC) สามารถให้กำลังภายใน 2 ถึง 6 ชั่วโมง

ข.Regulated Set Portland Cement (RSPC) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีส่วนผสมคล้ายกับปูนซีเมนต์ชนิดปกติ แต่มีสัดส่วนของแคลเซียม ฟลูออโรอะลูมิเนตแทนที่แคลเซียมอะลูมิเนตสูง 20 ถึง 25% สามารถเซ็ตตัวได้เร็วภายใน 2 ถึง 30 นาทีทั้งนี้ขึ้นกับสารหน่วงเวลา

โดยมีรายละเอียดผลการออกแบบคอนกรีตประเภทแข็งตัวเร็ว สัดส่วนการผสม และเวลาการเปิดการจราจรตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบประเภทของคอนกรีตแข็งตัวเร็วและระยะเวลาการเปิดการจราจร (FHWA, 2001)

Mix Component	Type I (GADOT)	Type III (Fast Track I)	Type III (Fast Track II)	RSPC	Rapid Set Cement
Cement,(lb/yd ³)	755	644	745	613	652
Fly ash,(lb/yd ³)	-	73	81	-	-
Course aggregate,(lb/yd ³)	1803	1399	1311	1709	1808
Fine aggregate,(lb/yd ³)	1034	1366	1308	1406	1006
w/cm ratio	0.40	0.40 to 0.48	0.40 to 0.48	0.41	0.45
Water reducer	-	yes	yes	-	-
Air entraining agent	As needed to obtain an air content of 6 ± 2 percent.				
CaCl ₂ % by wt. of cement	1.0	-	-	-	-
Opening time	4 hr	24-72 hr	12-24 hr	4 hr	4-6 hr

1 kg/m³ = 1.69 lb/yd³

จากตารางที่ 4 มีการใช้ปูนซีเมนต์อยู่ระหว่าง 613 – 775 lb/yd³ หรือประมาณ 363 – 459 kg/m³ มีการใช้เถ้าลอยสำหรับปูนซีเมนต์ประเภท 3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประมาณ 0.4 ถึง 0.48 มีการใช้สารกักกระจายฟองอากาศถ้าจำเป็น ระยะเวลาการเปิดการจราจรขึ้นกับอัตราส่วนผสม สำหรับการเปิดการจราจร แผ่นคอนกรีตที่ซ่อมแซมต้องมีกำลังรับน้ำหนักให้เพียงพอก่อนการเปิดการจราจร ตามข้อกำหนด CTM 523 ของ ต้องการ Flexural Strength ไม่น้อยกว่า 400 psi หรือประมาณ 28.2 ksc (Caltrans, 2004) ในขณะที่ FHWA มีข้อกำหนดสำหรับงาน Full Depth Repair ดังนี้

ก.ความแข็งแรงด้านกำลังรับแรงอัด 2,000 psi หรือ ประมาณ 140.9 ksc โมดูลัสของการแตกร้าว (Modulus of Rupture) โดยการให้แรงกระทำบริเวณจุดกึ่งกลาง (Center-point Loading) เท่ากับ 300 psi หรือ ประมาณ 21.1 ksc หรือโมดูลัสของการแตกร้าว (Modulus of Rupture) โดยการให้แรงกระทำแบบสามจุด(Third-point Loading) เท่ากับ 170 psi หรือ ประมาณ 12.0 ksc

ข.สำหรับเวลาขั้นต่ำของการเปิดจราจรขึ้นกับการออกแบบ Mix Design กระบวนการบ่ม อุณหภูมิของอากาศในบริเวณพื้นที่ซ่อม และความหนาของแผ่นคอนกรีต

ทั้งนี้จะเป็นการดีกว่าถ้ามีการทดสอบกำลังรับแรงของแผ่นคอนกรีตจริงก่อนเปิดการจราจร โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าต้องเปิดการจราจรเป็นเวลาอันรวดเร็ว เช่น การเปิดจราจรภายใน 4 ชั่วโมงหรือน้อยกว่า

2.7. วิธีการซ่อมถนนคอนกรีตแบบ Precast Concrete Repair

วิธีการก่อสร้าง/ซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยวิธีแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete Repair) มีหลายรูปแบบ จากการรวบรวมวิธีการก่อสร้าง ซึ่งมีวิธีการก่อสร้างที่มีการศึกษาอยู่ 5 รูปแบบคือ

- 1) รูปแบบการซ่อมวิธีของมิชิแกน /Michigan Method
- 2) รูปแบบการซ่อมวิธีแบบ Uretek (แบบ Fiberglass Joints)
- 3) รูปแบบการซ่อมวิธีแบบ Kwik Slab System
- 4) รูปแบบการซ่อมวิธี Fort Miller Super Slab
- 5) รูปแบบการซ่อมระบบแผ่นพื้น โดยใช้รอยต่อวิธี Dowel Bar Retrofit

โดยมีรายละเอียดวิธีการก่อสร้าง/ซ่อมแซมถนนคอนกรีต ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.7.1. รูปแบบวิธีของมิชิแกน /Michigan Method (FHWA, 2007)

เป็นรูปแบบที่ดำเนินการศึกษาการก่อสร้างของรัฐมิชิแกนในถนนสาย I-675 ในเมือง Zilwaukee และอีกแห่งก่อสร้างในถนนสาย M-25 ของเมือง Port Austin โดยมีรายละเอียดของแปลงทดสอบตามตารางที่ 5 และมีอัตราส่วนผสมของแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จตามตารางที่ 6 โดยคอนกรีตที่หล่อมักมีกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเท่ากับ 30 MPa (4,300 psi หรือประมาณ 303 ksc)

ตารางที่ 5 สรุปรายละเอียดแปลงทดสอบ (FHWA, 2007)

Project	Route Designation	Joint Spacing	Pavement Thickness	Base Type	Annual Average Daily Traffic (Commercial)	No. of Panels Installed
I-675	Principal arterial	21.6 m (71 ft)	225 mm (9 in)	Dense-graded select base	10,400 (5%)	8*
M-25	Minor arterial	30.2 m (99 ft)			900-4,000 (3-11%)	12

*Nine panels were installed; however, panel 1 is a conventional full-depth repair, and panel 2-9 are precast panels.

ตารางที่ 6 รายละเอียด Mix Design ของแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (FHWA, 2007)

Mix Ingredients	Design	
Cement	312 kg/m ³	(526 lb/yd ³)
Water	127 kg/m ³	(212 lb/yd ³)
Fine aggregate	810 kg/m ³	(1,366 lb/yd ³)
Coarse aggregate	10,908 kg/m ³	(1,838 lb/yd ³)
Air-entraining agents	0.59 ml/kg	(0.9 fl oz/cwt)

แผ่นคอนกรีตที่หล่อทั้งหมดยาว 1.8 เมตร กว้าง 3.7 เมตรหนา 25 เซนติเมตร มีเหล็กเดือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มม.ยาว 450 มม.จำนวน 3 เส้น ระยะห่างระหว่างเส้น 30 เซนติเมตรตามแนวของแนวล้อ (Wheel Path) มีเหล็กกรอบเคลือบอีพอกซ์ขนาด 16 มม. จำนวน 4 เส้น ระยะห่าง 12.5 เซนติเมตรเพื่อใช้รับแรงกั้นขณะยกและขนส่ง นอกจากนี้ยังมีเหล็กอุณหภูมิเป็นเหล็กตะแกรงที่มีเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.@ 150 มม.วางในแนวตั้งฉากกับเหล็ก Dowel Bar มีการยึดด้วยเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม.@ 150 มม.เป็นตะแกรง จัดวางตะแกรงเหล็กในระดับตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นคอนกรีตในแนวทางลึก.ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 47 โดยบ่มในผ้ากระสอบเป็นระยะเวลา 7 วัน และมีกระบวนการหล่อแผ่นคอนกรีตสำเร็จตามภาพที่ 44 – ภาพที่ 46



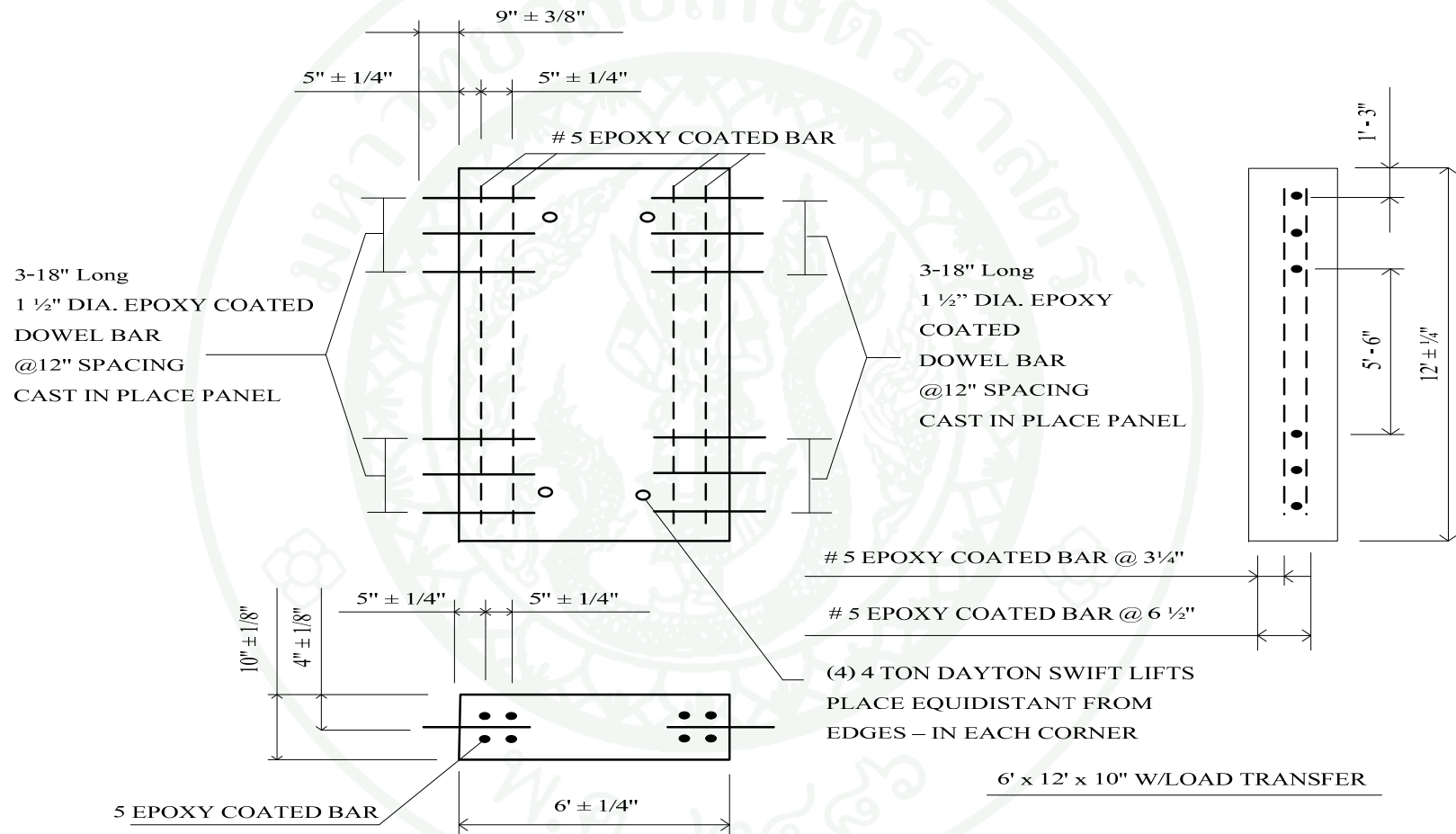
ภาพที่ 44 การเสริมเหล็กตะแกรงและเหล็กเดือ และจุดยกในแบบหล่อ (FHWA, 2007)



ภาพที่ 45 การหล่อแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จและการแต่งหน้าแผ่นคอนกรีต (FHWA, 2007)



ภาพที่ 46 การบ่มแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป (FHWA, 2007)



ภาพที่ 47 รายละเอียดการเสริมเหล็กในแผ่น Precast (FHWA, 2007)

กระบวนการซ่อมแซมตามวิธีของมิชิแกนมีรายละเอียดดังนี้

ก. คัดเลือกถนนคอนกรีตที่มีความเสียหายเหมาะแก่การซ่อมตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 48 กำหนดจุดที่จะดำเนินการซ่อมแซม



ก) รอยต่อเสื่อมสภาพ มีรอยกะเทาะและมีการปะซ่อม



ข) รอยแตกตามขวางขนาดใหญ่

ภาพที่ 48 ถนนคอนกรีตที่มีความเสียหายเหมาะสมแก่การซ่อมด้วยวิธี Precast (FHWA, 2007)

ข.ดำเนินการตัดแผ่นคอนกรีตที่เสียหาย รื้อแผ่นคอนกรีตออกดังภาพที่ 49



ก) การตัดแผ่นคอนกรีต



ข) การรื้อแผ่นคอนกรีต

ภาพที่ 49 การตัดและขูดรื้อแผ่นคอนกรีต (FHWA, 2007)

ค.ขุดวัสดุชั้นทางใต้แผ่นคอนกรีตลงประมาณ 38 – 50 มม.ทำความสะอาดพื้นที่ไม่ให้มีน้ำขังดังแสดงในภาพที่ 50



ภาพที่ 50 การทำความสะอาดและเตรียมปรับพื้นที่ใต้พื้นคอนกรีต (FHWA, 2007)

ง. เจาะช่องสำหรับวางเหล็กเคียวเพื่อใช้สำหรับเป็นรอยต่อถ่ายแรง โดยการตัดเป็นแนวช่องและใช้แจ็กแฮมเมอร์กระแทกจนเป็นร่อง และใช้เครื่องมือ Sandblast ขัดให้เรียบดังแสดงในภาพที่ 51 โดยช่องที่เจาะมีความกว้างประมาณ 100 มม. และลึกประมาณ 133 มม. มีระยะห่างจากขอบไหล่ทางหรือขอบแผ่นคอนกรีตเป็นระยะ 375 มม. โดยมีรูปตัดแสดงรายละเอียดรอยต่อดังแสดงในภาพที่ 52

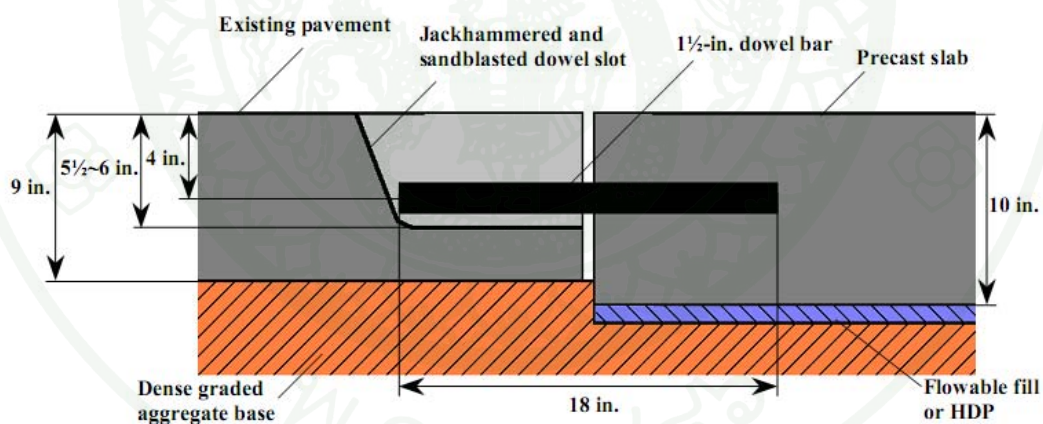


ก) การเจาะช่องสำหรับใช้เป็นรอยต่อถ่ายแรง



ข) การใช้เครื่องมือ Sandblast ขัดช่องสำหรับวางเหล็กเคียว

ภาพที่ 51 เจาะช่องสำหรับวางเหล็กเคียวเพื่อใช้สำหรับเป็นรอยต่อถ่ายแรง (FHWA, 2007)



ภาพที่ 52 รูปตัดแสดงรายละเอียดรอยต่อ (FHWA, 2007)

จ.สำหรับการปรับระดับและการติดตั้งแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จแบ่งเป็น 2 วิธีคือ

1) การปรับระดับโดยใช้วัสดุ High-Density Polyurethane Foam (HDP) มีการเจาะรูสำหรับอัดฉีดโฟมประมาณ 4 – 6 รู โดยที่ Polyurethane Foam ประกอบด้วยสารเคมีเหลวจำนวน 2 ชนิดที่ผสมภายใต้ความร้อนเพื่อให้แข็งตัวโดยเป็นสารที่มีลักษณะเบาคล้ายโฟม สาร 2 ชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากันและเกิดการขยายตัวสามารถอุดช่องว่างได้ คุณสมบัติของโฟมนี้สามารถแข็งตัวภายใน 15 นาที (ความแข็งแรงประมาณร้อยละ 90 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด) เพื่อที่จะสามารถรองรับแผ่นคอนกรีตได้ ทั้งนี้โฟม ดังกล่าวมีความหนาแน่นประมาณ 64 kg/m^3 และมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 414 – 1,000 kPa (60-145 psi หรือ ประมาณ 4 – 10 ksc) โดยมีกระบวนการติดตั้งตามภาพที่ 53



ก) การติดตั้งแผ่น Precast



ข) การอัดโฟม HDP

ภาพที่ 53 การติดตั้งแผ่น Precast โดยใช้วัสดุ HDP (FHWA, 2007)

2) การปรับระดับโดยใช้วัสดุ Flowable Fill วัสดุ Flowable Fill ขนส่งมาโดยใช้รถ Ready Mix โดยเทพปรับระดับให้เท่ากับระดับท้องคอนกรีตให้ผิวบนของแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จเรียบเสมอกับแผ่นคอนกรีตเดิม สำหรับวัสดุ Flowable Fill ประกอบด้วย

- ทราย 1,020 kg
- ปูนซีเมนต์ 56.7 kg
- น้ำ 136.1 kg.
- สารกักกระจายฟองอากาศ (air entraining admixture) 118 ml

สำหรับกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุบ่ม 28 วันประมาณ 150-175 psi ประมาณ 10.55 -12.30 ksc โดยมีกระบวนการติดตั้งตามภาพที่ 54



ก) การเทพปรับระดับด้วยวัสดุ Flowable Fill

ภาพที่ 54 การติดตั้งแผ่น Precast โดยใช้วัสดุ Flowable Fill (FHWA, 2007)

จ. หลังจากปรับระดับและติดตั้งแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จแล้วก็ดำเนินการอุดช่อง (Dowel Slots) ดังภาพที่ 55 และซีลรอยต่อจนเสร็จดังแสดงในภาพที่ 56

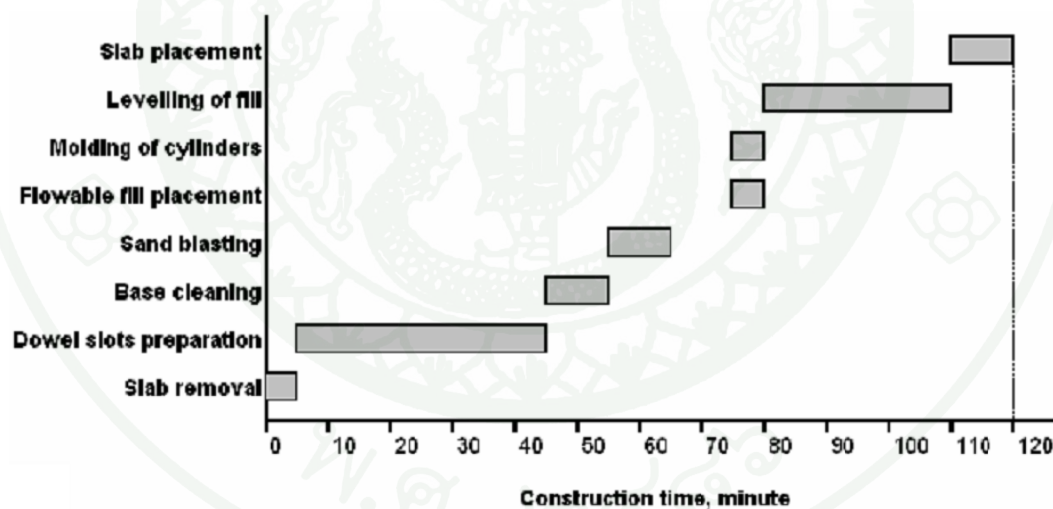


ภาพที่ 55 การเกรทช่อง Dowel Slots (FHWA, 2007)



ภาพที่ 56 แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จที่ติดตั้งเสร็จแล้ว (FHWA, 2007)

ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างของงานซ่อมถนนคอนกรีตด้วยวิธี Precast ของ มิชิแกนในถนนสาย I-675 ดังแสดงในภาพที่ 57



ภาพที่ 57 แผนภูมิแสดงขั้นตอนและระยะเวลาการก่อสร้างด้วยวิธี Precast โดยใช้วัสดุ Flowable Fill (FHWA, 2007)

จากแผนภูมินี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการก่อสร้างใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง โดยเริ่มตั้งแต่การยกแผ่นคอนกรีตที่ตัดแล้วไปทิ้งประมาณ 5 นาที เจาะช่อง Slot สำหรับวาง Dowel

Bar ประมาณ 40 นาทีและทำความสะอาดพื้นได้แผ่นคอนกรีตประมาณ 10 นาที ต่อจากนั้น ใช้เครื่อง Sand Blasting ปรับผิวของช่อง Slot ให้เรียบประมาณ 10 นาที จากนั้นเทวัสดุ Flowable Fill ประมาณ 5 นาที และทำการปรับระดับของวัสดุพื้นที่เท Flowable Fill ให้ได้ระดับและเช็ดตัวประมาณ 30 นาทีแล้วจึงติดตั้งแผ่นคอนกรีต Precast ประมาณ 10 นาที โดยเวลาที่สูญเสียในการก่อสร้างค่อนข้างมาก คือ การเตรียมช่อง Slot สำหรับวาง Dowel Bar และการปรับระดับของวัสดุพื้นที่เท Flowable Fill หากจะก่อสร้างให้เสียเวลาน้อยลงอาจทำได้โดยลดขนาดของช่อง Slot สำหรับวาง Dowel Bar

ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการก่อสร้างด้วยวิธีนี้ คือ

ก.ให้จัดหาปลอกขยายตัว (Expansion Cap) สำหรับการขยายตัวของเหล็ก Dowel Bar จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการป้องกันการบิดของรอยต่อ

ข.จัดหาวัสดุที่ขยายตัวปิดในรอยต่อเพื่อรองรับการขยายตัวและหดตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ค.ให้ใช้เครื่อง Diamond Grinding จัดบริเวณรอยต่อเพื่อเพิ่มความราบเรียบ

ง.การเจาะช่อง Slot สำหรับวาง Dowel Bar สามารถเจาะให้ลึกกลงได้เพื่อลดเวลาในการก่อสร้างและป้องกันการบิดตัวในแนวราบของ Dowel Bar ในการติดตั้ง

จ.การตัดแผ่นพื้นต้องระมัดระวังเรื่องการกำหนดรูปร่างและขนาดของแผ่นพื้นที่จะนำมาติดตั้งเพราะอาจเกิดปัญหาของการขัดตัวของเหล็ก Dowel Bar

ฉ.เพื่อลดระยะเวลาการก่อสร้างในการซ่อมแซมแบบระบบ Precast สามารถก่อสร้างพร้อมกันหลายแผ่นในช่องจราจรที่ปิดซ่อม

2.7.2. รูปแบบการซ่อมวิธีแบบ Uretex (Fiberglass Joints) (FHWA, 2007)

เป็นรูปแบบที่ดำเนินการศึกษาการก่อสร้างของถนนสาย I - 25 ทางเหนือของมลรัฐโคโลราโด เป็นการก่อสร้างโดยกรมการขนส่งของมลรัฐโคโลราโด (Colorado Department of Transportation/CDOT) เนื่องจากเป็นถนนที่มีปริมาณจราจรสูง AADT 45,866 คัน/วัน ดังนั้นการปิดการจราจรหนึ่งช่องจราจรอนุญาตให้ปิดได้แค่ 8 ชั่วโมง คือตั้งแต่เวลา 21:00 น. ถึง 5:00 น. เป็น

การซ่อมถนน I - 25 ในช่วงระหว่างเมือง Mead และเมือง Loveland โดยมีการออกแบบคอนกรีตหล่อสำเร็จตามตารางที่ 7 และมีกำลังรับแรงอัดตามตารางที่ 18 โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุบ่มน้อยกว่า 24 ชั่วโมง มีค่าประมาณ 2,800 – 3,600 psi หรือประมาณ 197 – 254 ksc ในขณะที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าประมาณ 4,100 – 5,500 psi หรือประมาณ 289 – 387 ksc และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าประมาณ 5,100 – 6,700 psi หรือประมาณ 359 – 372 ksc

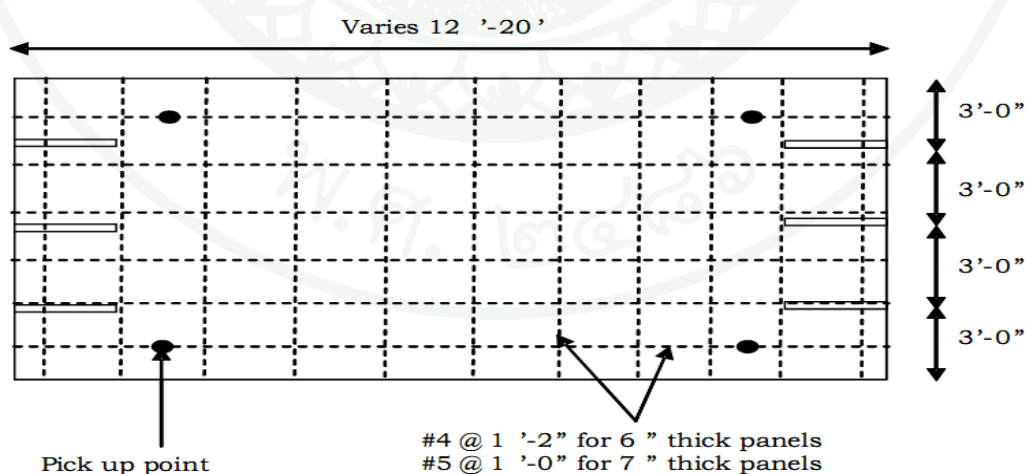
ตารางที่ 7 Concrete Mix Design สำหรับแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (FHWA, 2007)

Mix Ingredients	Design
Cement	390.4 kg/m ³ (658 lb/yd ³)
Water	128.7 kg/m ³ (217 lb/yd ³)
Fine aggregate	811.6 kg/m ³ (1,368 lb/yd ³)
Coarse aggregate	933.8 kg/m ³ (1,574 lb/yd ³)
Air-entraining agents	38.7 ml/m ³ (1.0 fl oz /yd ³)
Water-reducing admixture	8.158 kg/m ³ (220 oz/yd ³)
High-range water reducer	1.854 kg/m ³ (50 oz/yd ³)
Nonchloride accelerator	10,753 kg/m ³ (290 oz/yd ³)

ตารางที่ 8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของการหล่อแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (FHWA, 2007)

Location	Average Compressive Strength Data, MPa (lbf/in ²)					
	<24 hours		7 days		28 days	
1(Loveland)	19.3	(2,805)	28.5	(4,135)	-	-
3(Loveland)	20.4	(2,960)	29.2	(4,240)	35.6	(5,160)
7(Loveland)	18.4	(2,665)	29.4	(4,265)	-	-
1(Mead)	24.7	(3,585)	32.4	(4,705)	37.9	(5,490)
3(Mead)	24.9	(3,615)	29.4	(4,270)	35.2	(5,100)
7(Mead)	21.4	(3,105)	35.1	(5,085)	43.0	(6,240)
9(Mead, slabs 1-3)	20.9	(3,025)	34.2	(4,965)	40.3	(5,840)
9(Mead, slabs 4-6)	23.9	(3,450)	38.2	(5,545)	46.2	(6,700)
9(Mead, slabs 7-9)	23.4	(3,395)	37.6	(5,450)	42.5	(6,170)

และมีรูปแบบรายละเอียดของแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จตามภาพที่ 58 ซึ่งมีช่อง Slot สำหรับใส่เหล็กยึดห่างกัน 0.91 ม.จากตรงกลางของแผ่นคอนกรีตโดยมีการเสริมเหล็กตะแกรง ขนาดของเหล็กเสริมขึ้นกับความหนาของแผ่นคอนกรีตในกรณีที่แผ่นคอนกรีตหนา 15 ซม.



ภาพที่ 58 รายละเอียดแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (FHWA, 2007)

กระบวนการซ่อมแซมตามวิธีของ Uretex มีรายละเอียดดังนี้

1) คัดเลือกถนนคอนกรีตที่มีความเสียหายเหมาะแก่การซ่อม เช่น ความเสียหายประเภทรอยแตกตามขวางกลางแผ่นคอนกรีต ร่วมกับการกะเทาะของผิวคอนกรีต แผ่นคอนกรีตแตกหักเสียหาย รอยแตกตามมุมของแผ่นคอนกรีต ดังภาพที่ 59



ภาพที่ 59 แผ่นคอนกรีตที่มีรอยแตกบริเวณมุมแผ่น (FHWA, 2007)

2) ดำเนินการตัดแผ่นคอนกรีตที่เสียหาย โดยการตัดรอบตำแหน่งแผ่นคอนกรีตที่เสียหาย และตัดตามขวางเพื่อสะดวกในการรื้อแผ่นคอนกรีต ทำการเจาะกระแทกคอนกรีตให้แตก และดำเนินการขุดและขนย้ายคอนกรีตออกดังแสดงในภาพที่ 60



ก.) การใช้เครื่องมือ Jack Hammering ข่อยแผ่นคอนกรีต



ข.) การใช้รถขุดรื้อแผ่นคอนกรีต

ภาพที่ 60 การขุดรื้อแผ่นคอนกรีตที่เสียหาย (FHWA, 2007)

3) ทำความสะอาดพื้นที่เพื่อเตรียมพื้นที่สำหรับวางแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จโดยใช้แอร์คอมเพลสเซอร์เป่า จากนั้นใช้ไฟเป่าฐานและบริเวณขอบรอยต่อเพื่อกำจัดความชื้น อีกทั้งความร้อนจะช่วยให้การบ่มโฟมที่ใช้รองแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จแสดงในภาพที่ 61



ก) การใช้ไฟพ่นบริเวณขอบรอยต่อ



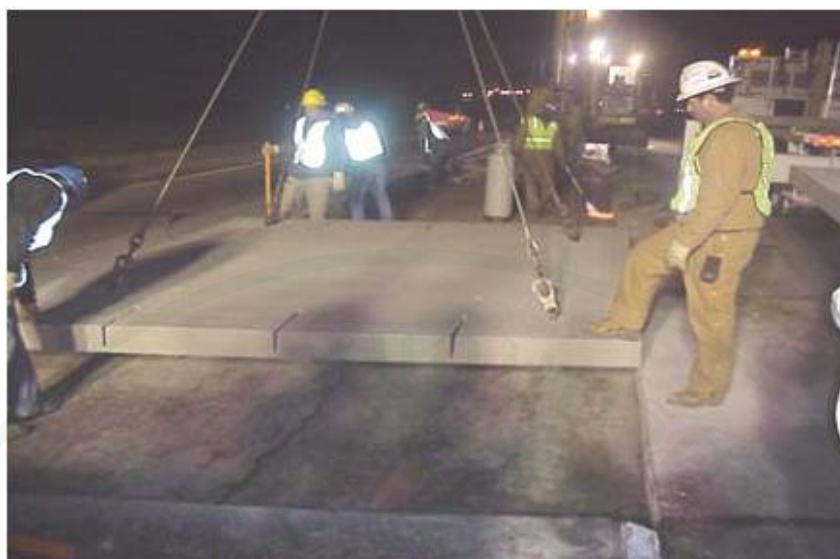
ข) ปรับพื้นที่และเป่าไฟบริเวณพื้นเพื่อเตรียมความพร้อม

ภาพที่ 61 การจัดเตรียมพื้นที่ก่อนวางแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (FHWA, 2007)

4) การขนย้ายแผ่นคอนกรีตจะใช้รถบรรทุกที่ส่วนท้ายราบสำหรับขนแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ และใช้รถเครนยกแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จเพื่อติดตั้งดังแสดงในภาพที่ 62



ก) การขนย้ายแผ่นคอนกรีตโดยใช้รถบรรทุก



ข) การใช้รถเครนยกแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จเพื่อติดตั้ง

ภาพที่ 62 การขนย้ายแผ่นคอนกรีต (FHWA, 2007)

5) สำหรับขั้นตอนการติดตั้งแผ่นคอนกรีตเริ่มจากวางแผ่นพื้นคอนกรีตต่ำกว่าระดับไหล่ทางหรือช่องจราจรเดิมประมาณ 0 – 75 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 63 เพื่อรอการยกระดับแผ่นพื้นให้เสมอช่องจราจรเดิมด้วยการอัดฉีดโพลีเมอร์โฟม (486 Star) โดยโพลีเมอร์โฟมซึ่งประกอบด้วยสารโพลีเมอร์ 2 ชนิดซึ่งผสมกันและอัดฉีดในเวลาเดียวกัน ทำการอัดฉีดผ่านรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตรที่ใช้สำหรับยกแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ โพลีเมอร์โฟมชนิดนี้คือโพลียูรีเทนก่อนขยายตัวมีความหนาแน่นประมาณ $48.1 - 58.3 \text{ kg/m}^3$ จะมีกำลังรับแรงอัด 40 psi หรือโดยกำลังรับแรงอัดจะขึ้นสูงถึงร้อยละ 90 ภายในประมาณ 15 นาที มีเครื่องวัดระดับติดกับผิวของแผ่นคอนกรีตเพื่อตรวจวัดระดับของแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จให้มีระดับเดียวกับผิวถนนคอนกรีตเดิม โดยมีการอัดฉีดให้แผ่นคอนกรีตยกตัวที่สองมุมของแผ่นคอนกรีตด้านหนึ่ง จากนั้นจึงค่อยยกด้านอื่นๆหลังจากที่แผ่นคอนกรีตวางไ้ระดับจะมีการอัดฉีดโฟมให้เต็มช่องว่างเพื่ออายุการใช้งานที่ยาวนาน



ภาพที่ 63 การติดตั้งแผ่นคอนกรีตก่อนอัดฉีดโฟม (FHWA, 2007)

6) การติดตั้งรอยต่อเริ่มจากการทำความสะอาดบริเวณรอยต่อและช่องสำหรับตัวยึดแบบ Fiberglass ให้สะอาดปราศจากเศษโฟมหรือคอนกรีตและฝุ่นเพื่อให้มีการยึดเกาะของตัวยึด Fiberglass กับคอนกรีตอยู่ในสภาพที่ดี โดยใช้เลื่อยตัดทั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จและแผ่นคอนกรีตเดิม และใช้ทรายพ่น (Sandblasting) เพื่อทำความสะอาด จากนั้นจึงพ่นไฟเพื่อไล่ความชื้น สำหรับการตัดนี้ต้องเป็นการตัดแบบแห้งเพื่อไม่ให้มีผลกระทบกับโฟมที่ใช้ยกคอนกรีตและวัสดุที่ใช้ยึดรอยต่อ (Uretek 600) สำหรับตัวยึดแบบ Fiberglass ดังแสดงในภาพที่ 64 มีขนาดความกว้าง 127 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร และมีความยาว 90 เซนติเมตร นั้น จะถูกนำไปใส่ในช่อง Slot ที่มีความกว้าง 19 มิลลิเมตร โดยมีเส้นลวดบังคับระยะห่างให้อยู่ตรงกลางช่องที่ปลายทั้งสองข้าง วัสดุตัวยึด Fiberglass ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 19 คือสามารถรับน้ำหนักสูงสุดประมาณ 9.7 ตัน มีการเคลื่อนตัวของวัสดุขณะรับน้ำหนักสูงสุดประมาณ 4.3 มิลลิเมตร และมีการเคลื่อนตัวประมาณ 2.5 มิลลิเมตรขณะรับน้ำหนักประมาณ 3.6 ตัน สำหรับการยึดรอยต่อจะใช้วัสดุมวลรวมแห้ง (Dried Aggregates) ที่มีขนาด 3 – 6 มิลลิเมตรใส่เข้าไปก่อนจากนั้นจึงฉีดโฟมโพลีเมอร์เพื่อยึดจับกับวัสดุมวลรวม



ภาพที่ 64 ตัวยึดแบบ Fiberglass (FHWA, 2007)



ภาพที่ 65 การติดตั้งตัวยึดแบบ Fiberglass (FHWA, 2007)

ตารางที่ 9 คุณสมบัติของวัสดุ Fiberglass (FHWA, 2007)

Test Property	Measured Data
Ultimate load	9.689 kg (21,360 lb)
Relative joint displacement (at ultimate load)	(0.17 in. [0.01 in. at 8,000 lb])
Load at first softening	5.669 kg (12,500 lb)
Ultimate average stiffness	56,925.842 kg (125,500 lb/in.)

7) จากนั้นทำการอัดฉีดช่องด้วยวัสดุ Nonshrink Grout และทำความสะอาดแผ่นคอนกรีตซึ่งอาจมีวัสดุโพลีเมอร์โฟมติดอยู่ให้สะอาด โดยมีรูปแบบแผ่นคอนกรีตที่ซ่อมเสร็จแล้วดังแสดงในภาพที่ 66



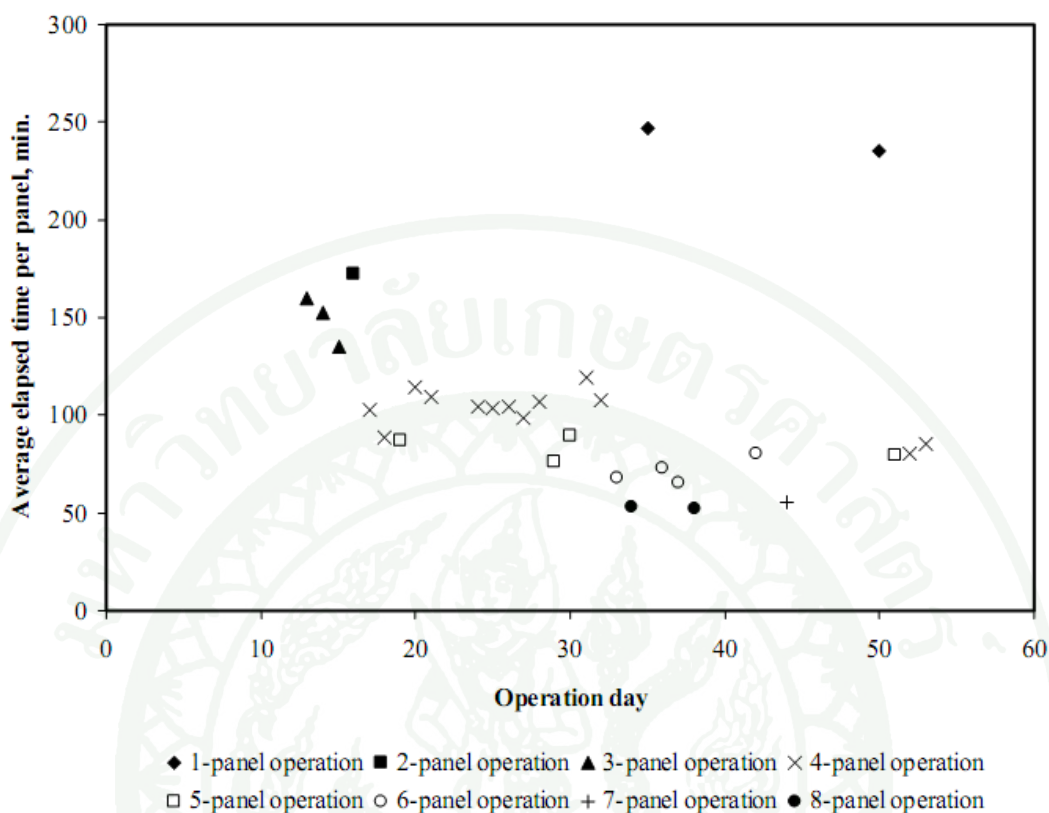
ก) การติดตั้ง Fiberglass เฉพาะรอยต่อตามขวาง



ข) การติดตั้ง Fiberglass ทั้งรอยต่อตามขวาง และรอยต่อตามยาว

ภาพที่ 66 แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว (FHWA, 2007)

ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างของงานซ่อมถนนคอนกรีตด้วยวิธี Precast ของ Uretek ในช่วงแรกของการก่อสร้างระยะเวลาที่ใช้ก่อสร้างของแผ่นคอนกรีตใช้เวลานาน และต่อมาได้มีการปรับกระบวนการที่ใช้ในการทำงาน ซึ่งมีงานหลายอย่างที่ทำต่อเนื่องกันได้ในกรณีที่ทำ การก่อสร้างทีละหลายแผ่นคอนกรีต โดยแบ่งเป็นการก่อสร้างตั้งแต่กลุ่มละ 1 แผ่นถึงกลุ่มละ 8 แผ่นทำให้เวลาการก่อสร้างต่อแผ่นลดลงดังแสดงในภาพที่ 67



ภาพที่ 67 แสดงเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างวิธี Precast ของ Uretek

จากภาพ 67 จะเห็นได้ว่าเมื่อก่อสร้างครั้งละ 1 แผ่นจะใช้เวลาประมาณ 250 นาที เมื่อก่อสร้างครั้งละ 2 แผ่นจะใช้เวลาประมาณ 170 นาที/แผ่น เมื่อก่อสร้างครั้งละ 3 แผ่นจะใช้เวลาประมาณ 140 - 160 นาที/แผ่น เมื่อก่อสร้างครั้งละ 4 – 5 แผ่น จะใช้เวลาประมาณ 80 -120 นาที/แผ่น เมื่อก่อสร้างครั้งละ 6 แผ่นจะใช้เวลาประมาณ 80 -100 นาที/แผ่น เมื่อก่อสร้างครั้งละ 7 แผ่น จะใช้เวลาประมาณ 60 -70 นาที/แผ่น และเมื่อก่อสร้างครั้งละ 8 แผ่นจะใช้เวลาประมาณ 60 นาที/แผ่น

2.7.3. รูปแบบการซ่อมวิธีแบบ Kwik Slab System (www.kwikslab.com)

ระบบของแผ่นพื้นหล่อสำเร็จของกวิกอยู่ภายใต้ลิขสิทธิ์ของสหรัฐอเมริกา No.7,134,805 เป็นกระบวนการที่คำนึงถึงการลดการติดขัดของการจราจรเนื่องจากการก่อสร้าง โดยเป็นการก่อสร้างที่รวดเร็ว การก่อสร้างสามารถลดเวลาในการก่อสร้างจากหลายสัปดาห์เป็นเพียง

ไม่กี่วัน และสามารถก่อสร้างได้ในช่วงเวลากลางคืนซึ่งมีปริมาณจราจรค่อนข้างน้อย ระบบกวิกนี้ประกอบด้วยปลอกเหล็กสำหรับยึดรอยต่อ (Kwik Joint Steel Couplers) ซึ่งจะมีอยู่สองด้าน คือ ด้านที่เป็นปลอกเหล็กสำหรับยึดรอยต่อ และด้านที่เป็นเหล็กน็อตดังแสดงในภาพที่ 68 ซึ่งมีรูปขยายแบบปลอกเหล็กสำหรับยึดรอยต่อดังภาพที่ 69 สำหรับสวมกันได้พอดีตามที่แสดงดังภาพที่ 70 โดยมีลักษณะการเสริมเหล็กและลักษณะรอยต่อดังแสดงในโมเดลดังภาพที่ 71 และมีการต่อเชื่อมโดยการวางแผ่นพื้นแบบต่อเนื่องแบบดังภาพที่ 72 และทำการเกราท์ในรูที่เตรียมไว้และเกราท์บริเวณรอยต่อด้วยวัสดุเกราท์กำลังสูงดังแสดงในภาพที่ 73 สำหรับแผ่นคอนกรีต Kwik Slab ที่ติดกับแผ่นพื้นเดิม นั้นสามารถยึดติดกับแผ่นพื้นคอนกรีตเดิมโดยให้ทำการเจาะช่องในแผ่นคอนกรีตเดิมให้เป็นช่องพอดีกับแกนน็อตและอัดนิตด้วยวัสดุเกราท์กำลังสูง

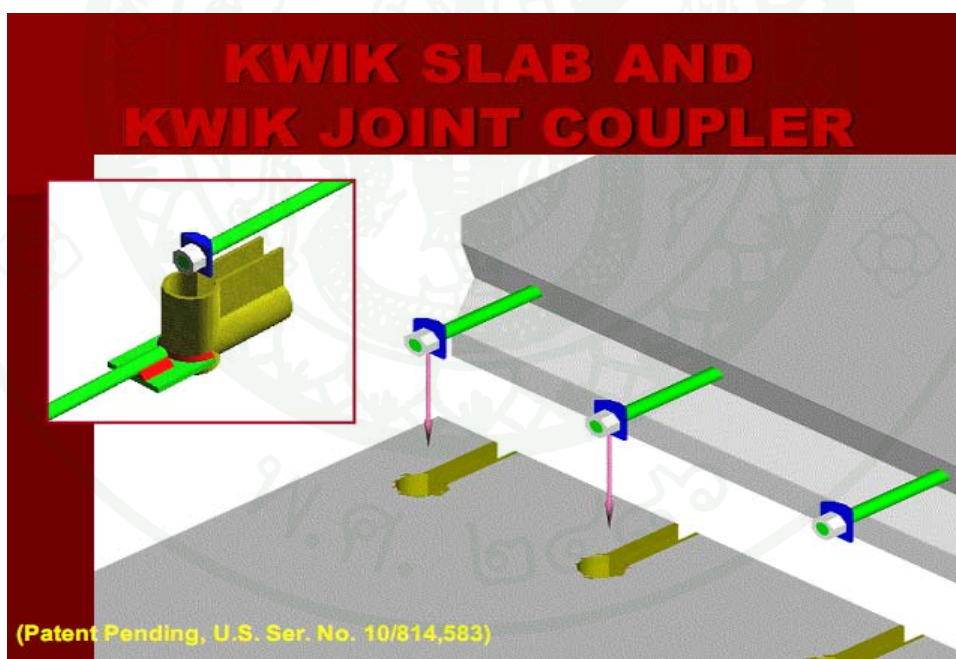


ภาพที่ 68 รูปแบบปลอกเหล็กสำหรับยึดรอยต่อ (Kwik Joint Steel Couplers)

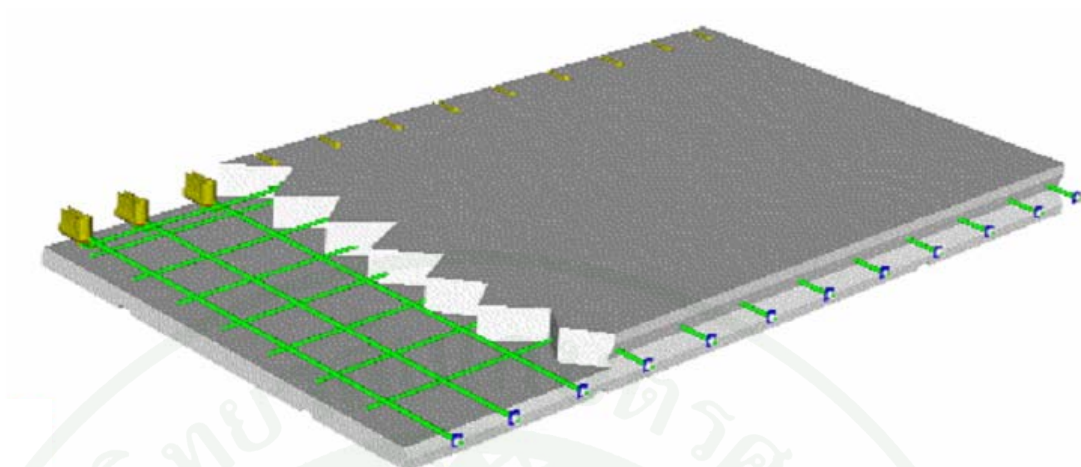
(www.kwikslab.com)



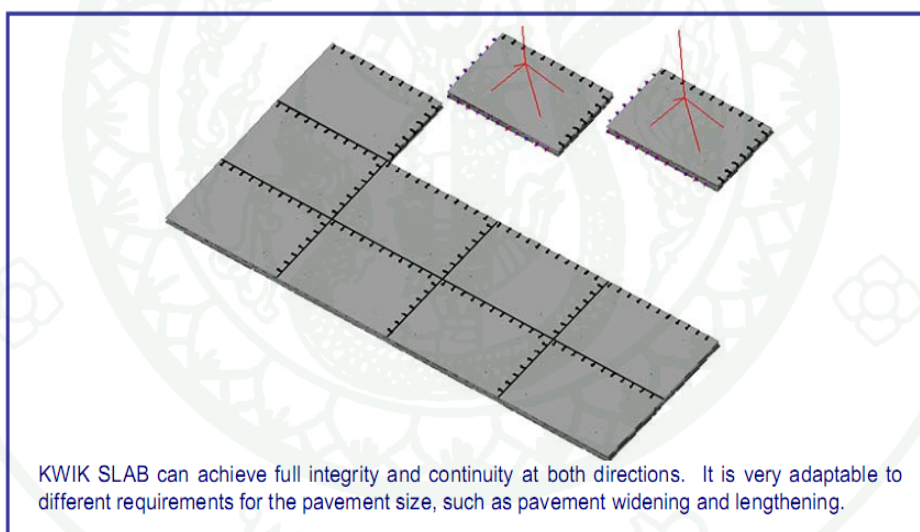
ภาพที่ 69 รูปขยายแบบปลอกเหล็กสำหรับยึดรอยต่อ (Kwik Joint Steel Couplers)
(www.kwikslab.com)



ภาพที่ 70 ภาพขยายการสวมยึดรอยต่อ (www.kwikslab.com)



ภาพที่ 71 โมเดลการเสริมเหล็กและลักษณะรอยต่อ (www.kwikslab.com)



ภาพที่ 72 ลักษณะการวางแผ่นพื้นแบบต่อเนื่อง (www.kwikslab.com)



ภาพที่ 73 แนวรอยต่อของแผ่น Kwik Slab ที่เกรท์เสร็จแล้ว

2.7.4. รูปแบบการซ่อมวิธี Fort Miller Super Slab (Tayabji, 2008)

Super Slab เทคโนโลยีการก่อสร้างงานถนนรูปแบบแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จที่เหมาะสมทั้งการก่อสร้างแบบแผ่นเดี่ยวและแบบต่อเนื่อง มีการก่อสร้างและศึกษาในสนามของ New York State DOT, Minnesota DOT, the Ministry of Transportation ของ Ontario, Canada โดยการใช้วัสดุรองแผ่นพื้นคอนกรีตเป็นวัสดุขนาดละเอียดซึ่งมีขนาดใหญ่มากไม่เกิน 12 มิลลิเมตร มีการออกแบบรอยต่อตามขวางเป็นพิเศษมีรูปแบบช่องบล็อกลูกเต๋าและเหล็กเคียวตามรูปแบบของ Super Slab ดังแสดงในภาพที่ 74 และมีการบดอัดสำหรับอัดฉีดวัสดุเกรทท์



ภาพที่ 74 แสดงรูปแบบรอยต่อตามขวางของระบบ Super Slab (Tayabji, 2008)

ขั้นตอนการก่อสร้าง/ซ่อมแซมด้วยระบบแผ่นหล่อคอนกรีต Super Slab มีรายละเอียดดังนี้

ก.ทำการหล่อแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ โดยมีกำลังรับแรงอัด 4,000 psi หรือประมาณ 282 ksc และทำรอยต่อด้านหนึ่งเป็นเหล็กเดือย อีกด้านหนึ่งเป็นช่องสำหรับเสียบเหล็กเดือย ดังแสดงในภาพที่ 75



ภาพที่ 75 แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จระบบ Super Slab ที่รอการขนส่งมาติดตั้งที่หน้างาน (Lacoss, 2008)

ข.ดำเนินการเตรียมพื้นที่สำหรับการรองรับแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ โดยใช้วัสดุขนาดละเอียดโดยมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 12 มิลลิเมตร และใช้เครื่องจักรบดอัดและมีการตรวจวัดระดับด้วยระบบเลเซอร์เพื่อตรวจสอบระดับก่อนการยกแผ่นพื้นมาติดตั้งดังแสดงในภาพที่



ภาพที่ 76 เครื่องมือปรับระดับพื้นที่ (Lacoss, 2008)

ค.ทำการยกแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จซึ่งทำการติดตั้งโดยใช้เครนดังแสดงใน

ภาพที่ 77



ภาพที่ 77 การติดตั้งแผ่นพื้น Super Slab โดยใช้เครนติดตั้ง (Lacoss, 2008)

ง.สำหรับการติดตั้งกับแผ่นคอนกรีตตามยาวจะมีเหล็กยึดกันตามยาวดังแสดงในภาพที่ 78 โดยแผ่นคอนกรีตจะมีการบล็อกช่องตามรอยต่อตามยาวไว้แล้วดังแสดงในภาพที่ 77



ภาพที่ 78 การติดตั้งแผ่นคอนกรีต (Tayabji, 2008)

จ.ดำเนินการฉีดวัสดุเกรทเพื่ออุดบริเวณรอยต่อดังแสดงในภาพที่ 79



ภาพที่ 79 การอัดฉีดวัสดุเกรทเพื่อให้อุดรอยต่อ (Lacoss, 2008)

จ.ดำเนินการฉีดวัสดุเกรทท์เข้าใต้แผ่นคอนกรีตเพื่ออุดโพรงช่องว่างใต้แผ่นคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ 80



ภาพที่ 80 การอุดโพรงใต้แผ่นคอนกรีต (Lacoss, 2008)

2.7.5. รูปแบบการซ่อมระบบพื้นผิวโดยใช้รอยต่อวิธี Dowel Bar Retrofit

(Hosssain, 2006) สภาวิจัยการคมนาคมขนส่งแห่งมลรัฐเวอร์จิเนีย (Virginia Transportation Research Council) มีโครงการศึกษาการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยวิธีการหล่อคอนกรีตสำเร็จและทำการติดตั้ง โดยมีแปลงทดสอบที่มลรัฐเวอร์จิเนีย โดยใช้วิธีการถ่ายน้ำหนักของรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีต 2 รูปแบบคือ

- ก) รอยต่อแบบที่มีเหล็กเคียวหล่อมาพร้อมกับแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ
- ข) รอยต่อที่ทำการเจาะร่องและวางเหล็กเคียวเพื่อยึดในภายหลัง หรือที่

เรียกว่า Dowel Bar Retrofit

โดยเหล็กเคียวที่ใช้มี 3 เส้นตามแนวรอยล้อรถทั้งซ้ายและขวามือทั้ง 2 ฟัน และมีการศึกษาโดยการซ่อมแซมถนนด้วยทั้ง 2 วิธีการๆ ละ 3 แผ่น รวม 6 แผ่น กระบวนการก่อสร้างและติดตั้งคล้ายกับวิธีการของมิชแกน โดยมีรายละเอียดการก่อสร้างดังนี้

1) ดำเนินการหล่อแผ่นคอนกรีตที่มีความหนา 8.5 นิ้ว (21.6 ซม.) โดยกำลังของคอนกรีตที่หล่อต้องมีกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 3,000 psi หรือประมาณ 211.3 ksc และต้องมีสารกักกระจายฟองอากาศ ซึ่งส่วนผสมของแผ่นคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงส่วนผสมของแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Hosssain, 2006)

Ingredients	Lb/yd ³
Cement	496
Class F fly ash	124
Fine aggregate	1,072
Coarse aggregate	1,851
Water-cementitious material ratio	0.46
Air (fl oz/yd ³)	6.4
Retarder (fl oz/yd ³)	12.5

2) วัสดุเกรทสำหรับอุดรอยต่อต้องเป็นวัสดุกำลังสูงโดยมีกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วันเท่ากับ 4,000 psi หรือประมาณ 281.7 ksc และมีความแข็งแรงของแรงยึดเกาะ (Bond Strength) มากกว่า 1,000 psi หรือ 70.42 ksc

3) ทำการเจาะร่องเฉพาะในแผ่นคอนกรีตเดิมสำหรับวางเหล็กเคียวในกรณีแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จที่ฝังเหล็กเคียว และทำการเจาะร่องทั้งสองฝั่งในกรณีที่แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จไม่ได้ฝังเหล็กเคียว

4) หลังจากทำการขุดรื้อแผ่นคอนกรีตเดิมออก ให้ทำการปรับระดับชั้นรองพื้นทางด้วยกรวด และเทวัสดุ Flowable fill หนาประมาณ 5 ซม.เพื่อใช้ปรับระดับแผ่นพื้นคอนกรีตหล่อสำเร็จ

5) ทำการ Grout ปิดช่องรอยต่อให้เรียบร้อย และปิดทับด้วยซิลิโคนบริเวณรอยต่อ

หลังการก่อสร้างประมาณ 1.5 ปี มีการตรวจสอบสภาพการใช้งาน สังเกตความเสียหายที่เกิดขึ้นพบความเสียหาย เปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จที่ฝังเหล็กเดือย (Preinstalled dowels) กับแผ่นคอนกรีตที่ยึดเหล็กเดือยในภายหลัง (Retrofitted dowel bar) จากแปลงทดสอบทั้ง 6 แผ่นตาม ตารางที่ 11 โดยมีตัวอย่างสภาพความเสียหายของแผ่นคอนกรีตที่ฝังเหล็กเดือยไว้ก่อนดังภาพที่ 81 และตัวอย่างสภาพความเสียหายของแผ่นคอนกรีตที่ฝังเหล็กเดือยไว้ภายหลังดังภาพที่ 82

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบสภาพความเสียหายที่ตรวจพบระหว่าง Preinstalled dowels กับ Retrofitted dowel bar (Hosssain, 2006)

Condition Survey Results				
			Condition of Grouted Area (No. of Dowels of Total 12)	
Patch Type	Patch No.	Condition of Slab	Crack	Spall
Retrofitted dowel bar	1	No distress	9	6
	2	Monor edge break	12	0
	3	No distress	12	9
Preinstalled dowels	4	Crack from dowels	3	2
	5	Crack from dowels and at mid-width	2	1
	6	Crack from dowels and at mid-width	7	1

จากการสำรวจในสนามพบว่าแผ่นคอนกรีตแผ่นที่ 1, 2 และ 3 ที่ซึ่งเป็นแผ่นคอนกรีตที่ฝังเหล็กเดือยไว้ภายหลัง พบว่าสภาพของรอยเกรทที่มีความเสียหายที่รุนแรงและมีรอยแตก รอยกะเทาะมากกว่าแผ่นที่ 4, 5 และ 6 ซึ่งเป็นแผ่นคอนกรีตที่ฝังเหล็กเดือยไว้ก่อน โดยแผ่นที่ ที่ฝังเหล็กเดือยไว้ก่อนมีรอยแตกบริเวณเหล็กเดือยและกลางแผ่นคอนกรีต



ภาพที่ 81 ตัวอย่างสภาพความเสียหายของแผ่นคอนกรีตที่ฝังเหล็กเคียวไว้ก่อน (Hosssain, 2006)



ภาพที่ 82 ตัวอย่างสภาพความเสียหายของแผ่นคอนกรีตที่ฝังเหล็กเคียวไว้ภายหลัง (Hosssain, 2006)

จากความเสียหายที่เกิดขึ้นนำมาสู่ข้อเสนอแนะการก่อสร้างแปลงทดสอบให้ดีกว่าเดิมจึงมีแนวทางดังต่อไปนี้

- 1) รอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตทั้งรอยต่อตามขวางและรอยต่อตามยาว ถือว่ามีความสำคัญที่สุดในการซ่อมแซมถนนคอนกรีตโดยใช้แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ
- 2) เหล็กเสริมในคอนกรีตควรมีระยะห่างจากกึ่งกลางของเหล็กเสริมถึงกึ่งกลางของเหล็กเสริมไม่เกิน 18 นิ้ว
- 3) หลังจากติดตั้งแผ่นคอนกรีตแล้วควรมีการอัดฉีดวัสดุเกราท์เข้าไปอุดช่องว่างของแผ่นคอนกรีต โดยวัสดุเกราท์ควรมีกำลังแข็งแรงภายใน 7 วัน
- 4) วัสดุเกราท์แบบไม่หดตัว (Nonsrink Grout) ควรมีค่า Initial Setting Time น้อยกว่า 4 ชั่วโมง และมีค่าเวลาการไหล (Efflux Time) อยู่ในช่วง 11 ถึง 20 วินาที
- 5) กำลังรับแรงอัดของวัสดุเกราท์ชั้นต่ำควรมีกำลังรับแรงอัดขั้นต่ำ 200 psi หรือ 14.1 ksc ที่อายุบ่ม 24 ชั่วโมง หรือก่อนเปิดการจราจร และ ควรมีการเจาะสำรวจ (Coring) รูเจาะขนาด 6 นิ้วสำหรับวัสดุเกราท์จำนวน 3 ตัวอย่าง

รอยต่อและการถ่ายแรงของถนนคอนกรีต

1. รูปแบบของรอยต่อ

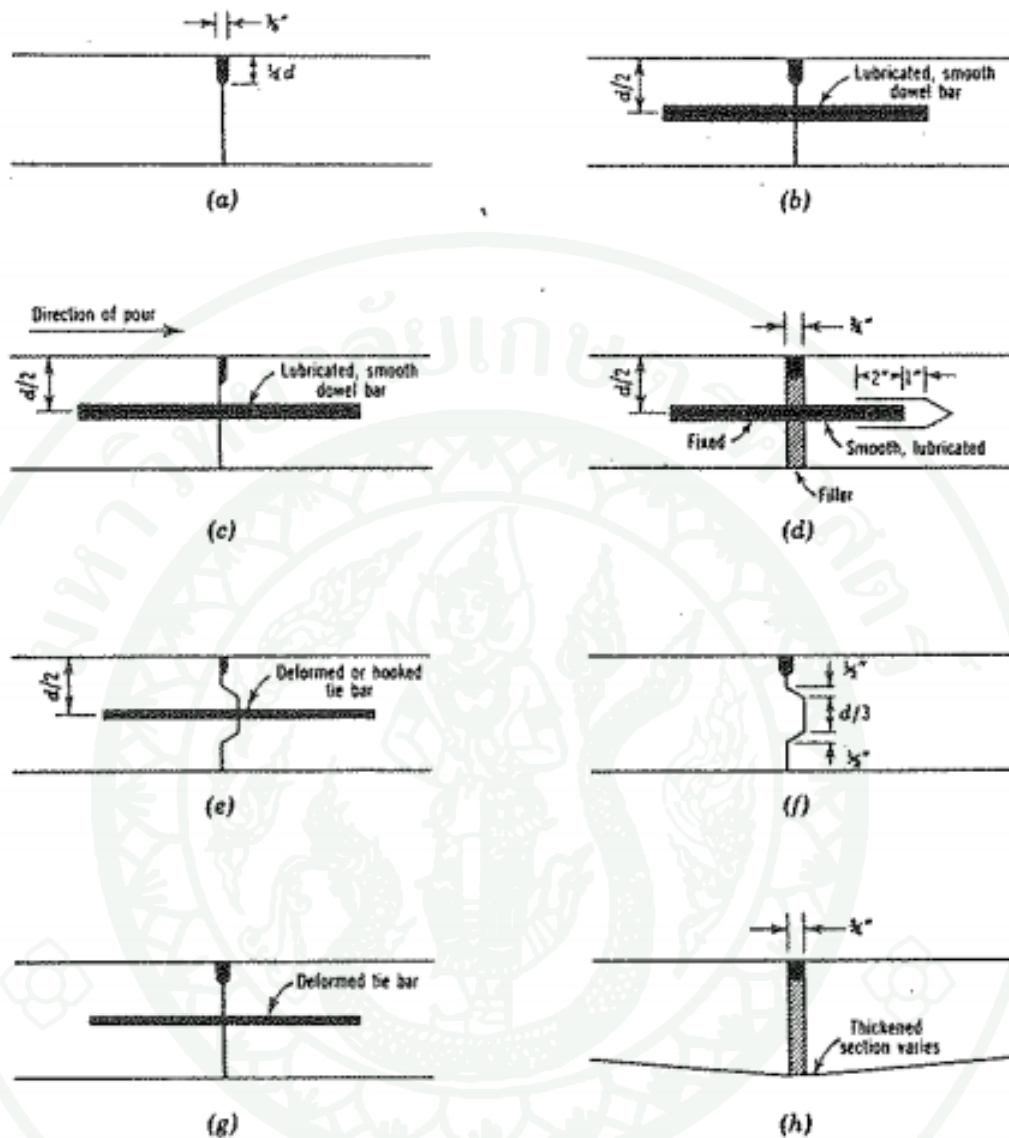
ในการก่อสร้างถนนคอนกรีตจะมีรอยต่อไว้เพื่อควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตในแนวขวางกับทิศทางการจราจร (transverse cracking) และในแนวยาวตามทิศทางการจราจร (longitudinal cracking) อันเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรของคอนกรีต เกิดการต้านทานความโค้งงอรวมกับน้ำหนักล้อรถ นอกจากนี้รอยต่อมีประโยชน์ในการแบ่งคอนกรีตเป็นช่วง ๆ เพื่อสะดวกในการก่อสร้าง ชนิดของรอยต่อ แบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ

ก.รอยต่อเพื่อการหดตัว (Contraction Joint) รอยต่อชนิดนี้ทำไว้เพื่อควบคุมให้แผ่นคอนกรีตแตกร้าวตรงจุดที่ต้องการทั้งนี้เพื่อกันมิให้รอยแตกร้าวเกิดขึ้นทั่วไป รอยต่อแบบนี้อาจจะใส่หรือไม่ใส่เหล็กถ่วงน้ำหนักก็ได้ ทั้งนี้แล้วแต่การยึดเกาะของเนื้อคอนกรีตว่าจะมีการยึดเกาะมากน้อยเพียงใด การก่อสร้างจะใช้เครื่องตัดคอนกรีตภายหลังการเทคอนกรีตแล้ว ใช้ไม้ขนาดเท่ากับ ความกว้างและลึกเท่าที่ต้องการฝังไว้แล้วเอาออกเมื่อคอนกรีตเริ่มจะแข็งตัว ตรงรอยต่อจะต้องอุดยาแนวด้วย Sealing Compound เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำซึมลงไปทำลายโครงสร้างของพื้นทางข้างใต้ และหากรอยต่อนี้มีเหล็กเดือย (Dowel Bar) เหล็กเดือยจะทำหน้าที่ถ่วงน้ำหนักไปให้แผ่นคอนกรีตที่อยู่ติดกันช่วยรับน้ำหนัก เนื่องจากบริเวณรอยต่อจะมีการยึดหดตัวอยู่ตลอดเวลา ครึ่งหนึ่งของเหล็กเดือยทุกเส้นจึงต้องทำด้วยวัสดุที่ไม่มีการทำให้เกิดการยึดเกาะกับเนื้อคอนกรีต เช่น ยางมะตอย หรือ สี เป็นต้น

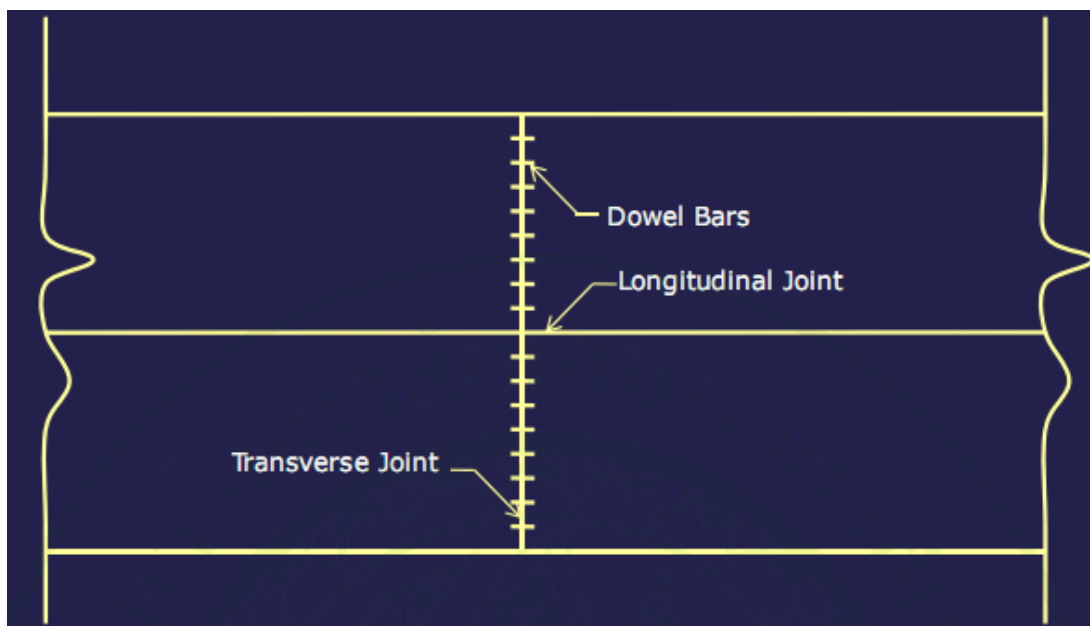
ข.รอยต่อเพื่อการก่อสร้าง (Construction Join) รอยต่อนี้เป็นรอยต่อที่ตัดแผ่นคอนกรีตแยกขาดจากกัน โดยการกันแบบเทคอนกรีต รอยต่อชนิดนี้ทำเพื่อที่จะเทคอนกรีตในวันถัดไป โดยมากเป็นแบบรอยต่อตรง (butt joint) และใส่เหล็กถ่วงน้ำหนัก ในร่องรอยต่อควรจะต้องอุดยาแนวด้วย Sealing Compound

ค.รอยต่อตามยาว เป็นรอยต่อที่สร้างขึ้นเพื่อควบคุมการแตกร้าวในทิศทางของการจราจร ซึ่งอาจจะทำได้ 2 ลักษณะ ขึ้นอยู่กับวิธีการเทคอนกรีต เช่น ถ้าเทคอนกรีตทีละช่องจราจรก็ทำรอยต่อแบบเดือย (key joint) แต่ถ้าเทมากกว่า 1 ช่องจราจรก็ทำแบบรอยต่อเพื่อป้องกันการหดตัว รอยต่อชนิดนี้ต้องใส่เหล็กเพื่อยึดแผ่นคอนกรีตให้เป็นผืนเดียว

ง.รอยต่อเพื่อการขยายตัว (Expansion Joint) เป็นรอยต่อที่ต้องการให้แผ่นคอนกรีตขยายตัว รอยต่อแบบนี้จะตัดขาดตลอดความหนาของแผ่นคอนกรีต และอุดรอยต่อด้วยสารที่อัดตัวได้ ด้านบนของรอยต่อต้องยาแนวให้สนิทไม่มีช่องว่างที่น้ำจะไหลซึมผ่านลงสู่ด้านล่างได้ มิฉะนั้นแล้วเมื่อเปิดการจราจรจะเป็นสาเหตุให้เกิด pumping ภายหลัง รอยต่อนี้จะต้องใส่เหล็กถ่วงน้ำหนักด้วย โดยให้อีกด้านหนึ่งของเหล็กถ่วงน้ำหนักยึดแน่นติดในเนื้อคอนกรีต ส่วนอีกปลายข้างหนึ่งปล่อยไว้เป็นอิสระและทาน้ำมันหล่อลื่นด้วย เพื่อป้องกันให้แผ่นคอนกรีตเคลื่อนตัวได้บ้างเล็กน้อย เมื่อมีการขยายตัวในแผ่นคอนกรีตเข้าใกล้กัน



ภาพที่ 83 รายละเอียดรอยต่อประเภทต่าง ๆ ของผิวทางคอนกรีต : (a) รอยต่อยาแนว; (b) รอยต่อยาแนวมีเหล็กถ่วงน้ำหนัก; (c) รอยต่อตรง; (d) รอยต่อเพื่อการขยายตัว; (e) รอยต่อตามยาวแบบเดือย; (f) รอยต่อแบบเดือยไม่มีเหล็กยึด; (g) รอยต่อตามยาวเพื่อป้องกันขยายตัว (ใช้ในงานสนามบิน); (h) รอยต่อตามยาวเพื่อป้องกันขยายตัว



ภาพที่ 84 ลักษณะรอยต่อตามขวางและรอยต่อตามยาวของถนนคอนกรีต

2. การถ่ายแรง (Load Transfer)

การทำรอยต่อของถนนคอนกรีตเป็นหนึ่งในแนวทางการควบคุมการเกิดรอยแตกร้าวในถนนคอนกรีต หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง การทำรอยต่อก็คือการกำหนดให้เกิดรอยแตกร้าว ณ จุดที่ออกแบบและจัดเตรียมไว้ ซึ่งโดยทั่วไปบริเวณรอยต่อจะได้มีการใส่อุปกรณ์ถ่ายแรง (Load Transfer Devices) ไว้และอาจมีการปูแผ่นพลาสติกหรือแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) เพื่อป้องกันการเกิดการสูญเสียของมวลรวมละเอียดและการเกิดโพรงในบริเวณใต้รอยต่อ การถ่ายแรงจากล้อรถระหว่างแผ่นคอนกรีตจะส่งผ่านแรงในลักษณะของแรงเฉือนตามแนวดิ่งจากแผ่นคอนกรีตที่รับแรงไปยังแผ่นคอนกรีตที่อยู่ถัดไป

กลไกในการถ่ายแรง (Load Transfer Mechanism) ที่รอยต่อหรือรอยแตกใดๆ มีได้ 2 ลักษณะ ได้แก่

- 1) การถ่ายแรงโดยอาศัยอุปกรณ์ถ่ายแรง (Load Transfer Devices) ได้แก่ Dowel Bar ที่รอยต่อตามขวาง และ Tie bar ที่รอยต่อตามยาว ดังแสดงในภาพที่ 85 และ 86 ตามลำดับ

2) การถ่ายแรงโดยอาศัยการขัดกันของหิน (Aggregate Interlock)



ภาพที่ 85 รอยต่อตามขวางและเหล็กกลม Dowel bar

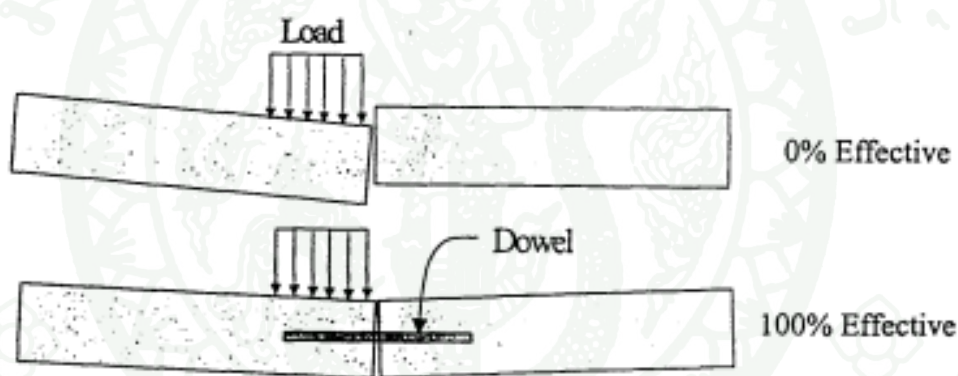


ภาพที่ 86 รอยต่อตามยาวและเหล็กข้ออ้อย Tie bar

ทั้งนี้ ที่รอยแตกหรือรอยต่อที่ไม่ได้ใส่เหล็ก Dowel Bar และ Tie bar ไว้ การถ่ายแรงผ่านรอยแตกและรอยต่อดังกล่าวจะอาศัยเพียงกลไกของ Aggregate interlock เท่านั้น ดังนั้นโดยทั่วไป

ถนนที่มีปริมาณจราจรสูงจึงควรมีการใส่เหล็ก Dowel Bar และ Tie Bar เพื่อเสริมความแข็งแรงของรอยต่อ และรักษาความราบเรียบของถนนในระยะยาว สำหรับถนนที่มีรถบรรทุกหนักและปริมาณจราจรที่น้อย อาจไม่จำเป็นต้องใส่เหล็ก Dowel Bar และ Tie bar

การส่งถ่ายน้ำหนักบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตที่อยู่ติดกันแต่ไม่ได้ต่อเนื่องเป็นแผ่นเดียวกันนี้ คือ การถ่ายแรง ขณะที่น้ำหนักล้อยานพาหนะกระทำที่รอยต่อ ทั้งแผ่นคอนกรีตที่รับน้ำหนักและแผ่นคอนกรีตที่ยังไม่ได้รับน้ำหนักที่ติดกันจะเกิดการแอ่นตัว การแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมดของแผ่นคอนกรีตที่ยังไม่ได้รับน้ำหนักเกี่ยวข้องโดยตรงกับการทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักของรอยต่อ ถ้ารอยต่อสามารถทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งแผ่นคอนกรีตที่รับน้ำหนักและแผ่นคอนกรีตที่ยังไม่ได้รับน้ำหนักจะแอ่นตัวอย่างเท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 87



ภาพที่ 87 ลักษณะการถ่ายแรงของเหล็กเคียวระหว่างรอยต่อ

การวัดประสิทธิภาพของรอยต่อในการส่งผ่านแรง (Load Transfer Efficiency, LTE) สามารถกระทำได้หลายรูปแบบดังนี้ (Ioannides and Korovesis, 1990)

- Deflection Load Transfer Efficiency (LTE_δ) ซึ่งโดยทั่วไปจะเรียกโดยย่อว่า Load Transfer Efficiency (LTE)

$$\text{LTE}_\delta (\text{LTE}) = \frac{4u}{4L} \times 100 \% \quad (1)$$

โดยที่

Δ_L = ค่าการยุบตัว (Deflection) ของแผ่นคอนกรีตด้านที่รับแรงกระทำ

Δ_u = ค่าการยุบตัว (Deflection) ของแผ่นคอนกรีตด้านที่ไม่ได้รับแรงกระทำ

- Joint Effectiveness (Eff)

$$\text{Eff} = \frac{2 \Delta_u}{\Delta_u + \Delta_L} \times 100 \% \quad (2)$$

- Stress Load Transfer Efficiency (LTE_σ)

$$\text{LTE}_\sigma = \frac{\sigma_u}{\sigma_L} \times 100 \% \quad (3)$$

โดยที่

σ_L = ค่าความเค้นจากการแอ่นตัว (Bending Stress) ของแผ่นคอนกรีตด้านที่รับแรงกระทำ

σ_u = ค่าความเค้นจากการแอ่นตัว (Bending Stress) ของแผ่นคอนกรีตด้านที่ไม่ได้รับแรงกระทำ

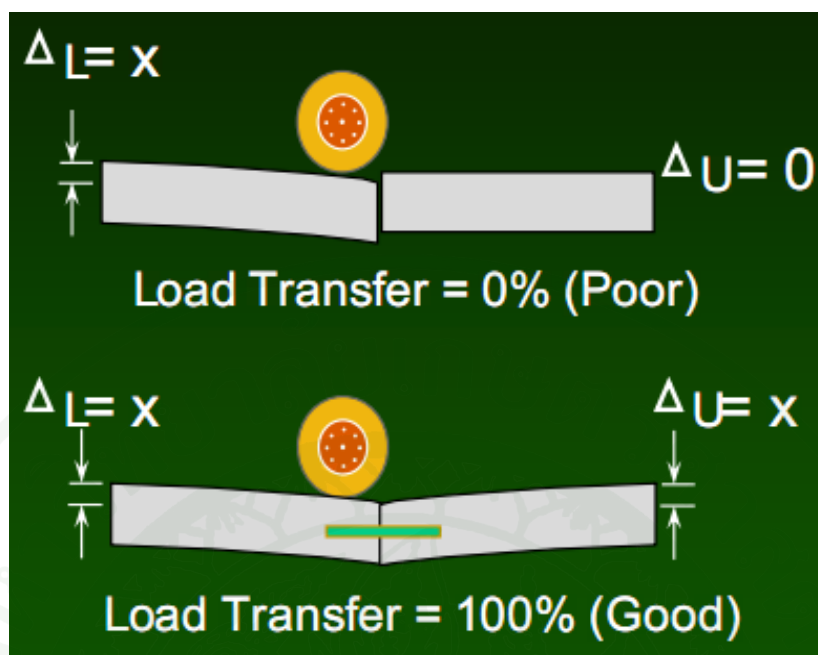
- Transferred Load Efficiency (TLE)

$$\text{TLE} = \frac{P_T}{P} \times 100 \% \quad (4)$$

โดยที่

P = แรงที่กระทำต่อแผ่นคอนกรีต

P_T = แรงกระทำที่ส่งผ่านไปยังอีกด้านหนึ่งของรอยต่อหรือรอยแตก



ภาพที่ 88 ประสิทธิภาพของการถ่ายแรงของเหล็กเดือย

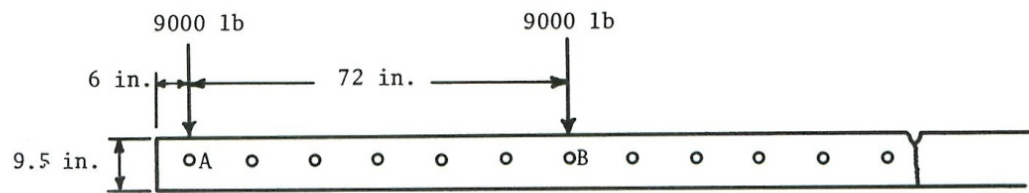
ประสิทธิภาพของการถ่ายแรงนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ ความกว้างของรอยต่อ จำนวนและขนาดของน้ำหนักรถที่มากกระทำฐานรากที่รองรับ ขนาดและรูปร่างของมวลรวม และรูปแบบของความสามารถในการถ่ายแรงทางกลศาสตร์ ปัญหาส่วนใหญ่ของถนนคอนกรีตเป็นผลมาจากรอยต่อทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักได้ไม่ดี การถ่ายน้ำหนักไม่ดีทำให้เกิด Stress สูงในแผ่นคอนกรีต ซึ่งมีส่วนอย่างมากให้เกิดความเสียหาย เช่น เกิดรอยเลื่อน (Faulting) การอัดทะลัก (Pumping) และรอยแตกที่มุม (Corner Breaks) ด้วยเหตุนี้ทำให้การถ่ายน้ำหนักเป็นเรื่องสำคัญของถนนคอนกรีต โดยปกติการถ่ายน้ำหนักผ่านรอยต่อตามขวางทำได้โดยใช้เหล็กเดือย (Dowel Bar)

3. ทฤษฎีของการถ่ายแรงของเหล็กเดือย

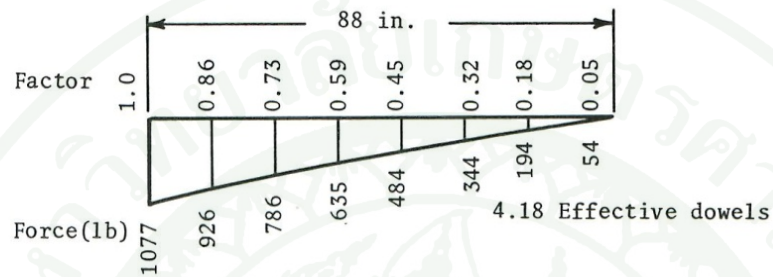
สิ่งที่พิจารณาในการออกแบบ Dowel Bar คือแรงที่กระทำกับเหล็ก Dowel bar และแรงดันแบกทานที่คอนกรีต (Bearing Stress) ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 น้ำหนักที่กระทำกับ Dowel bar

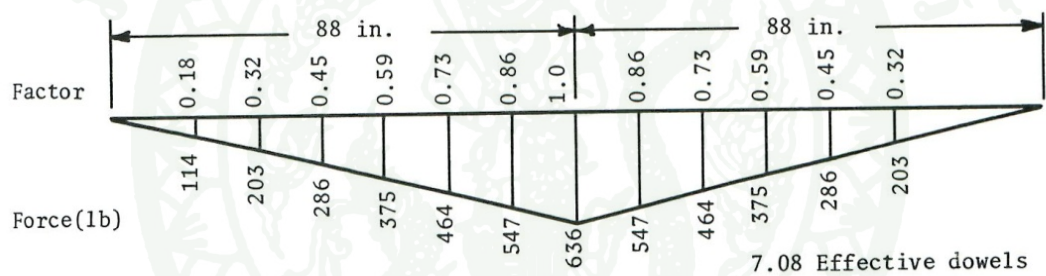
น้ำหนักที่กระทำกับเหล็กเดือยเมื่อน้ำหนักล้อมากระทำ (W) ถ้าแผ่นคอนกรีตที่ติดกันมีประสิทธิภาพการถ่ายแรงบริเวณรอยต่อ 100 % เมื่อน้ำหนักกระทำการยุบตัวของแผ่นคอนกรีตทั้งสองจะเท่ากันและมีการถ่ายแรง ซึ่งหากคิดในกรณีความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นของเหล็กเดือยกลุ่มโดยมีรตเพลามาตรฐานขนาด 18,000 lbs หรือ ประมาณ 8,200 kg ก็จะทำให้เกิดแรงกระทำต่อล้อแต่ละข้างเท่ากับ 9,000 lbs ดังภาพที่ 89 ซึ่งมีค่าแรงกระทำต่อ Dowel Bar สูงสุดประมาณ 1200 lbs หรือ ประมาณ 545 kg พิจารณาความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นกับเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม.ตามสูตร $\frac{W}{(\pi d^2/4)}$ มีค่าเท่ากับ 111 ksc.



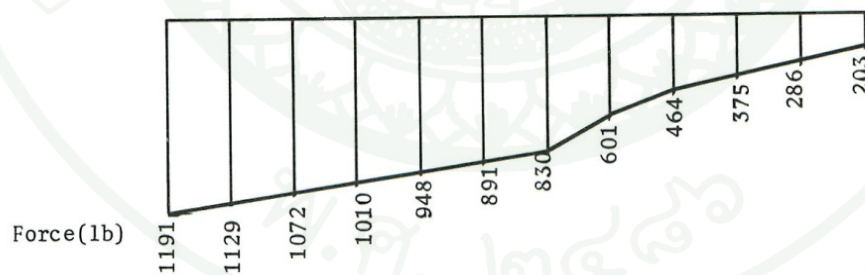
(a) Location of Loads and Dowels



(b) Dowel Forces due to Load at A



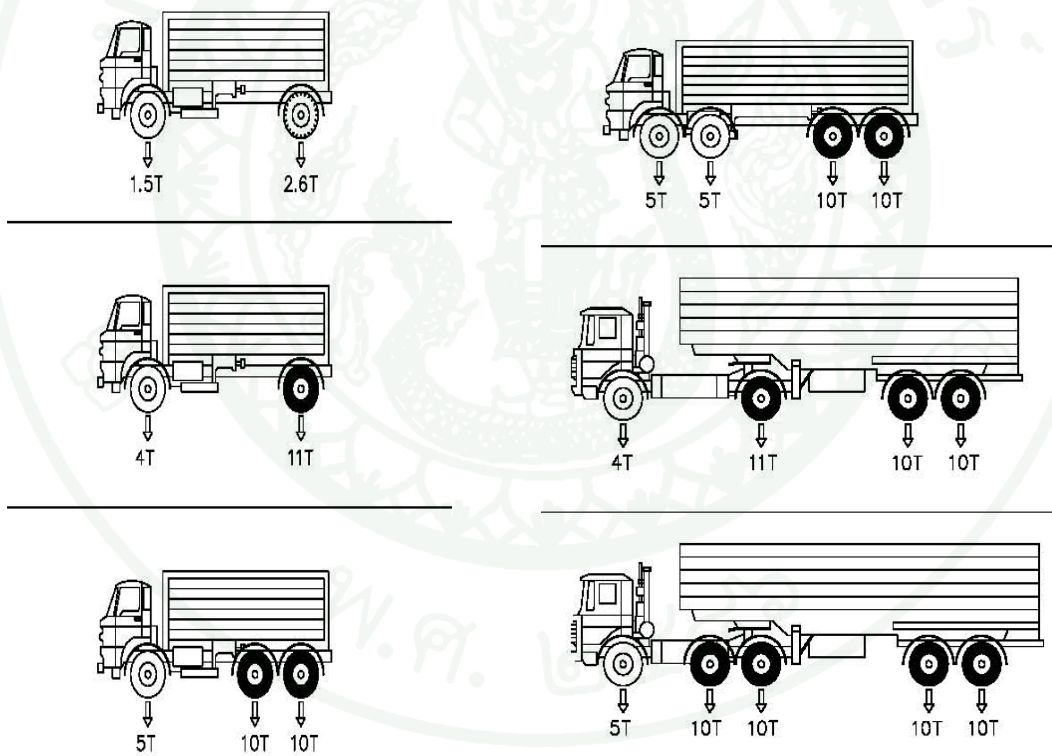
(c) Dowel Forces due to Load at B



(d) Dowel Forces due to Both Loads

ภาพที่ 89 ตัวอย่างแรงกระทำจากล้อรถที่กระจายผ่าน Dowel Bar แต่ละเส้น

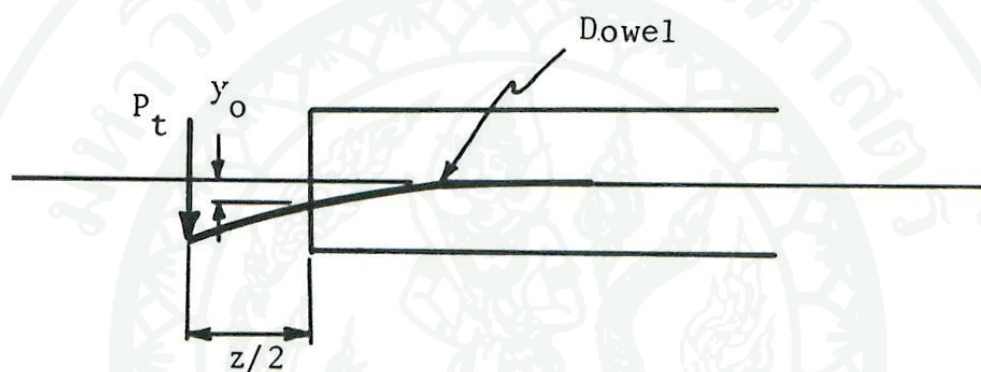
และถ้าพิจารณาค่าน้ำหนักบรรทุกที่กำหนดตามกฎหมายที่อนุญาตให้รถบรรทุกขนาด 10 ล้อ จำกัดน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด (Load limit) ที่ 25 ตัน จะมีน้ำหนักกระทำลงเพลาสูงสุด 10 ตันดังแสดงในภาพที่ 90 หรือน้ำหนักต่อล้อประมาณ 5 ตัน (11,000 lbs) เทียบเป็นน้ำหนักสูงสุดที่กระทำต่อ Dowel Bar ประมาณ 1,460 kg ดังนั้น ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นกับเหล็กเส้นกลมขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ตามสูตร $w/(\pi d^2/4)$ จะมีค่าเท่ากับ 297 ksc ในขณะที่หากพิจารณาแรงเฉือนที่ยอมได้ของเหล็กเส้นกลมอื่น ได้ความเค้นเฉือนที่ยอมให้ของ เหล็กเส้นกลม $f_v = f_s = 1,200$ ksc. จะเห็นได้ว่า ค่าความเค้นเฉือนที่ยอมได้ของเหล็กเดือยมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจริงมาก ดังนั้นที่ส่วนที่พิจารณาเป็นหลักน่าจะเป็นค่าความเค้นแบกทานของคอนกรีตที่จะต้องพิจารณาเป็นพิเศษในการออกแบบ



ภาพที่ 90 น้ำหนักลงเพลาของรถบรรทุกประเภทต่างๆ

3.2 แรงเค้นแบกทานที่เกิดขึ้นในคอนกรีต (Actual Bearing Stress)

การหาแรงเค้นแบกทานสูงสุดที่เกิดขึ้นในคอนกรีต สามารถหาได้โดยสมมติว่าเหล็กเดือยทำหน้าที่เป็นคาน และมีคอนกรีตรองรับตามสมการของ Timoshenko Friberg (1940) นั้นได้คำนวณค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นตามภาพที่ 91 และแสดงค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นหาได้ตามสมการที่ (5)



ภาพที่ 91 การแอ่นตัวของเหล็กเดือยเนื่องจากน้ำหนักกระทำ

$$y_0 = \frac{P_t(2+\beta Z)}{4\beta^3 E_d I_d} \quad (5)$$

โดยที่

y_0 = การแอ่นตัวของเหล็กเดือยที่ผิวหน้าของรอยต่อ

P_t = น้ำหนักที่กระทำบนเหล็กเดือย 1 เส้น

Z = ความกว้างของรอยต่อ (Joint Width)

E_d = ค่ายังก์โมดูลัสของเหล็กเดือย

I_d = ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของเหล็กเดือยมีค่าเท่ากับ $\pi d^4/64$

β = ค่าสติฟเนสสัมพัทธ์ของเหล็กเดือยที่วางในคอนกรีต

มีค่าเท่ากับ
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Kd}{4E_d I_d}} \quad (6)$$

โดยที่ K คือ ค่าโมดูลัสคอนกรีตที่รองรับเหล็กเดือย (Modulus of dowel support) มีค่าประมาณ 300,000 ถึง 1,500,000 pci (81.5 – 409 GN/m³) และ ค่าความเค้นแบกทานมีความสัมพันธ์กับค่าการแอ่นตัวดังสมการที่ (7)

$$\sigma_b = K y_0 = \frac{K P_t (2 + \beta Z)}{4 \beta^3 E_d I_d} \quad (7)$$

3.3 แรงเค้นแบกทานที่ยอมให้ในคอนกรีต (Allowable Bearing stress)

ตามวิธีการออกแบบรอยต่อ Dowel bar (Huang, yang H., 1993) นั้น ในการออกแบบเหล็กเดือยของรอยต่อตามขวางนั้นต้องคำนึงถึงเรื่องความเค้นแบกทานที่สามารถยอมรับได้ในคอนกรีต (Allowable Bearing Stress) โดยใช้สูตรการคำนวณ

$$f_b = \frac{(4-d)}{3} f'_c \quad (8)$$

โดยที่ f_b = ความเค้นแบกทานที่ยอมรับได้ หน่วยเป็น psi

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือความกว้างของเหล็กเดือย หน่วยเป็น นิ้ว

f'_c = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต มีหน่วยเป็น psi

ดังนั้นในการออกแบบรอยต่อนั้น ความเค้นแบกทานที่เกิดขึ้นจริงในคอนกรีต (Actual Bearing Stress) ตามสมการที่ (7) นั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า ความเค้นแบกทานที่ยอมรับได้ (Allowable Bearing Stress) ตามสมการที่ (8)

ทั้งนี้ จากหลักการออกแบบข้างต้น ตามข้อเสนอแนะของ PCA (1975) ข้อเสนอแนะสำหรับรอยต่อ Dowel Bar ตามขนาดความหนาของแผ่นคอนกรีตตามตารางที่ 12 หรืออาจประมาณได้เป็น $1/8$ ของความหนาของแผ่นคอนกรีต ทั้งนี้ตาม PCA (1991) ได้แนะนำว่าควรใช้เหล็ก Dowel Bar เส้นผ่านศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 1.25 นิ้ว สำหรับทางหลวงที่มีความหนาน้อยกว่า 10 นิ้ว และใช้เหล็ก Dowel Bar เส้นผ่านศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 1.5 นิ้ว สำหรับทางหลวงที่มีความหนาเท่ากับหรือมากกว่า 10 นิ้ว เพื่อควบคุมการทรุดตัวต่างระดับ (Faulting) โดยการลดความเค้นแบกทาน (bearing stress) ในคอนกรีต

ตารางที่ 12 ขนาด ความยาว และระยะห่างของเหล็ก Dowel bar ที่แนะนำโดย PCA (1975)

Slab thickness (in.)	Dowel diameter (in.)	Dowel length (in.)
5	5/8	12
6	3/4	14
7	7/8	14
8	1	14
9	$1\frac{1}{8}$	16
10	$1\frac{1}{4}$	18
11	$1\frac{3}{8}$	18
12	$1\frac{1}{2}$	20

Note. All Dowels spaced at 12 in. on centers, 1 in. = 25.4 mm.

Source : After PCA (1975).

3.4 ความสามารถในการถ่ายน้ำหนักของเหล็กเดือย (Load Transfer Across Joints)

ตามทฤษฎีแล้ว ถ้าการก่อสร้างกระทำได้อย่างสมบูรณ์แบบ เหล็กเดือยจะสามารถถ่ายน้ำหนัก 50% ผ่านรอยต่อไปยังคอนกรีตถัดไป และแผ่นพื้นคอนกรีตทั้งสองจะเคลื่อนที่ลงเท่ากัน ดังนั้น ในการออกแบบเหล็กถ่ายน้ำหนักนั้น น้ำหนักที่กระทำควรจะต้องเท่ากับ 50% ของน้ำหนักทั้งหมด แต่ในความเป็นจริง เมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง เหล็กเดือยด้านหนึ่งอาจจะหลวมทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายแรงลดลง 5-10% คำน้ำหนักออกแบบอาจจะใช้เพียง 40-45% ดังนี้

$$P_t = 0.45P_w \quad (9)$$

โดยที่ P_t = น้ำหนักที่ถ่ายแรงระหว่างรอยต่อ

3.5 ความยาวของเหล็กเดือย

ความสามารถในการถ่ายน้ำหนักก็ขึ้นอยู่กับความยาวของเหล็กเดือยที่ฝังยื่นเข้าไปในแผ่นคอนกรีต จากการทดลองเหล็กเดือยขนาด $\varnothing$ 19 มม. ระยะที่ฝังในคอนกรีต (Embedment) ควรจะยาว 8 เท่าของขนาดเหล็ก ซึ่ง ACI ได้กำหนดความยาวของเหล็กเดือยไว้ ดังนี้

ตารางที่ 13 ความยาวของเหล็กเดือยที่ ACI กำหนดไว้

ประเภทของทาง	ขนาด $\varnothing$ (มม.)	ความยาว (ซม.)
ถนน	19 - 25	45

4. รูปแบบเหล็กเคียวสำหรับการถ่ายแรงของงานทาง

การบูรณะถนนคอนกรีตเดิมด้วยการเปลี่ยนหรือใส่เหล็กเคียวใหม่เพื่อให้การถ่ายแรงมีประสิทธิภาพได้เริ่มดำเนินการเป็นครั้งแรกที่ประเทศสหรัฐอเมริกาเมื่อต้นปี 1980 หากการถ่ายแรงสามารถทำได้ดีจะช่วยลดความเค้นดึงและการยุบตัวได้เป็นอย่างดี จะช่วยลดการกะเทาะบริเวณรอยต่อ ลดในเรื่องการ pumping ได้ โดยปกติแล้ว ประสิทธิภาพของการถ่ายแรงที่ดีอยู่ในช่วงระหว่าง 70 – 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อประสิทธิภาพการถ่ายแรงต่ำกว่า 50% มักจะพบถนนดังกล่าวมีปัญหาในเรื่อง faulting, cracking และมีคุณภาพในการขับขี่ต่ำ (AASHTO 1993)

กลไกในการถ่ายแรง (Load Transfer Mechanism) ที่รอยต่อหรือรอยแตกใดๆ สามารถให้มีการถ่ายแรงโดยอาศัยอุปกรณ์ถ่ายแรง (Load Transfer Devices) ได้แก่ (Darter et al., 1987)

- Dowel Bar ที่รอยต่อตามขวาง
- Tie bar ที่รอยต่อตามยาว
- Double-Vee shear devices
- Studded Plates

Popeln et al. 2003 ได้สรุป รูปแบบ Dowel Bar ที่เคยมีการศึกษาสำหรับงานถนนคอนกรีต ได้แก่ standard mild steel epoxy-coated dowel bars รวมถึงการใช้วัสดุอื่นๆ ในการส่งถ่ายแรงซึ่งรวมถึง fiber reinforced polymer (FRP), solid stainless steel dowels, grouted stainless steel dowels, stainless steel clad dowels, และ stainless steel pipe dowels

กระนั้นก็ตาม งานวิจัยต่าง ๆ ได้มีการศึกษาถึงลักษณะหน้าตัดของเหล็กเคียวในรูปทรงอื่นๆ เช่น รูปแบบ I-beam shapes, oval dowels, and various flat plate ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการใช้รูปแบบเหล็กเคียวประเภทอื่นที่มีใช้เหล็กกลม เพราะว่าการเพิ่มพื้นที่แรงแบกทานในขณะที่ยังคงรักษามวลให้เทียบเท่ากับเหล็กกลมที่ออกแบบตามมาตรฐาน ซึ่งเหล็กเคียวที่มีพื้นที่แรงแบกทานมากจะช่วยลดความเค้นเนื่องจากแรงแบกทานในคอนกรีตเมื่อน้ำหนักจากล้อบรรทุกกระทำต่อแผ่นคอนกรีต

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น มีเพียงบางรูปแบบที่ประสบผลสำเร็จ มีความสมบูรณ์ในการใช้งาน และมีอายุการใช้งานที่นาน และเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายต่อมา คือ รูปแบบ Dowel Bar Retrofit

ประเด็นที่มีการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมามีดังนี้

1) เหล็กเดือยังคงเป็นรูปวงกลม และพิจารณาเหล็กเดือเป็นรูปวงรีขนาดกลางและขนาดใหญ่ รวมถึงมีการพิจารณาผลของระยะห่างของเหล็กเดือต่อประสิทธิภาพการถ่ายแรง โดยผลการศึกษาพบว่า ระยะห่างเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ LTE ลดน้อยลง (Fanous and Shannon, 2008) และเมื่อเพิ่มขนาดเหล็กเดือให้ใหญ่ขึ้น (รูปวงรีขนาดใหญ่) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายแรงได้ดีขึ้น

2) เหล็กเดือยังเป็นเหล็กกลม แต่พิจารณาวัสดุประเภทอื่นแทน เช่น Stainless Steel หรือวัสดุประเภท Fiber Glass เพื่อป้องกันในเรื่องของการเกิดสนิมในเหล็ก

5. รอยต่อแบบเหล็ก

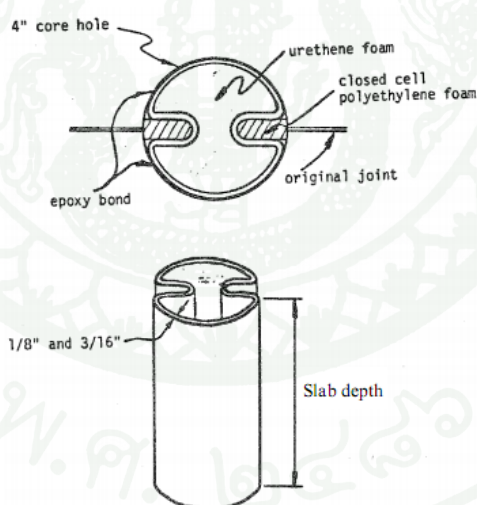
รูปแบบการถ่ายแรงของถนนได้มีการวิจัยและใช้กันมาตั้งแต่ปี 1980 ในต่างประเทศ เพื่อปรับปรุงเหล็กเดือสำหรับการถ่ายแรงของถนนคอนกรีต โดยรูปแบบของรอยต่อที่ใช้มีดังนี้

- รูปแบบ Figure Eight
- รูปแบบ Vee
- รูปแบบ Double Vee (ช่วยถ่ายแรงได้ระยะแรก และพบข้อจำกัดคือ เกิดการ debonding ของ polymer concrete และมักพบความเสียหายภายในระยะเวลา 2 ปี)
- รูปแบบ Miniature I-Beam
- รูปแบบ Georgia Split Pipe
- รูปแบบ Freyssinet Connector

- รูปแบบ Dowel Bar Retrofit (ช่วยให้การถ่ายแรงได้เหมือนปกติ อายุการใช้งานมากกว่า 10 ปี เกิด debonding บริเวณรอยต่ออันเนื่องมาจากการทำความสะอาดของการติดตั้งรอยต่อ)

โดยรายละเอียดของรูปแบบเหล็กเดือยต่าง ๆ มีดังนี้

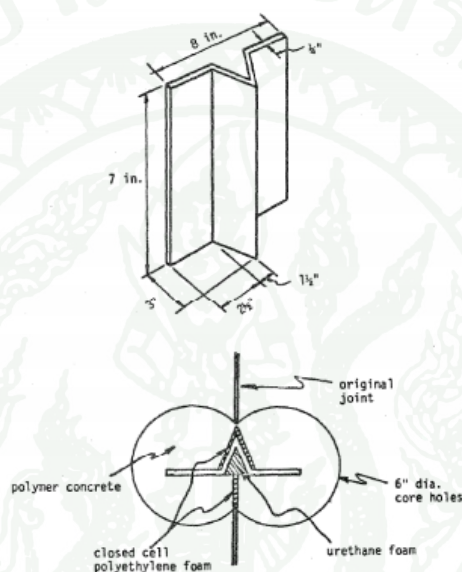
1) รูปแบบ Figure Eight อุปกรณ์การถ่ายแรงแบบ Figure Eight นี้ มีลักษณะเหมือนเลขแปด ประกอบด้วยเหล็กรูปทรงกระบอกโดยเปลือกนอกมีลักษณะรูปร่างคล้ายเลขแปด การติดตั้งจะประกอบด้วย ช่องตรงกลางขนาด 4 นิ้ว (102 มม.) ติดตั้งตรงบริเวณกึ่งกลางของรอยต่อตามขวางหรือรอยแตก อุปกรณ์การถ่ายแรงนี้มีการบรรจุอีพ็อกซีตรงแกนกลาง แต่อย่างไรก็ดี อุปกรณ์ชนิดนี้ไม่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งาน เนื่องจาก มักจะเกิดความเสียหายเนื่องจาก debonding ก่อนเวลาอันควร รวมถึงไม่สามารถถ่ายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (AASHTO 1993, Gulden and Brown 1985)



ภาพที่ 92 รูปแบบ Figure Eight

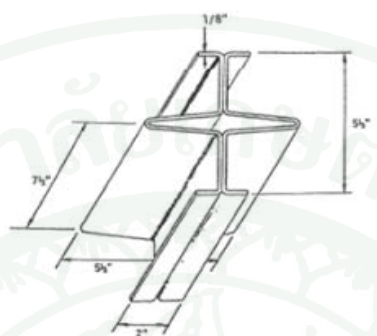
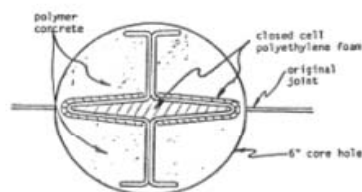
2) รูปแบบ Vee และ Double Vee อุปกรณ์รูปแบบตัววี (Vee) แสดงดังภาพที่ 93 ประกอบด้วยแผ่นเหล็กที่ตัดเป็นรูปตัววี (V Shape) การจะใช้อุปกรณ์รูปแบบตัววีนี้ในการถ่ายแรง จะต้องทำการเจาะรูไว้สองรู (Coring) สำหรับอุปกรณ์การถ่ายแรง 1 ชิ้น โดยจะต้องเสริมอุปกรณ์รูป

ตัววีนี้จำนวน 2 ชุดต่อแนวร่องล้อ 1 แนว โดยอุปกรณ์นี้จะต้องวางที่ตำแหน่งกึ่งกลางรอยต่อตามขวาง บริเวณช่องว่างตรงรูปตัววี จะเกราท์ด้วย Urethane foam และบริเวณโดยรอบอุปกรณ์ถ่ายแรงนี้จะยาแนวโดยรอบด้วย Polyethylene foam ส่วนบริเวณช่องว่างที่ได้เจาะรูไว้จะเกราท์ด้วยโพลีเมอร์คอนกรีต อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ถ่ายแรงแบบรูปตัววีนี้มักจะพบว่าเกิดความเสียหายภายหลังการติดตั้งเมื่อผ่านฤดูหนาวไป โดยความเสียหายเกิดในลักษณะของการยึดเกาะที่ไม่สมบูรณ์ (bond failure) รวมถึงไม่สามารถถ่ายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (AASHTO, 1993)



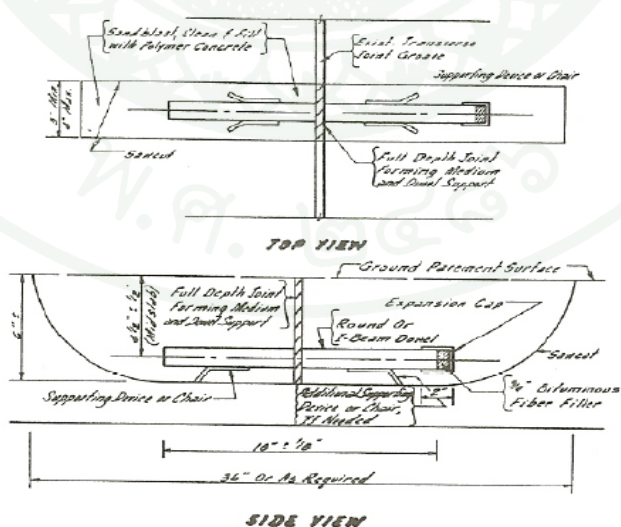
ภาพที่ 93 รูปแบบ Vee

อุปกรณ์ถ่ายแรงรูปแบบตัววีคู่ (Double Vee) ดังแสดงในภาพที่ 94 ประกอบด้วยอุปกรณ์ตัววี 2 ชิ้น ประกอบกัน โดยเอาหน้ากว้างของรูปตัววีประกบกัน และลดขนาดให้พอดีกับรูเจาะขนาด 6 นิ้ว การติดตั้งโดยทั่วไปจะต้องทำการเจาะรู 2 รู ต่อ 1 แนวร่องล้อ จากนั้นวางอุปกรณ์ถ่ายแรงรูปตัววีคู่ตรงกลางรอยต่อ บริเวณช่องว่างระหว่างรูปตัววีที่ประกบกันนั้น จะเกราท์ด้วย Polyethylene foam และทำการเกราท์ช่องว่างของรูเจาะด้วย Polymer concrete รูปแบบของอุปกรณ์ถ่ายแรงแบบรูปตัววีคู่นี้ ได้ถูกนำมาใช้กันในระดับหนึ่งและพบว่าค่อนข้างประสบความสำเร็จ โดยความเสียหายทั่วไปที่มีมักพบ คือ การ debonding และ ปัญหาด้านความแข็งแรงของโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้เป็นวัสดุในการปะซ่อม



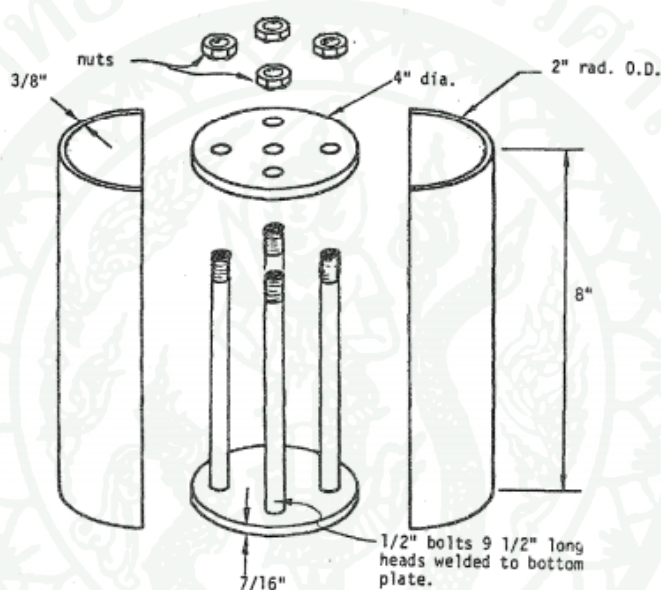
ภาพที่ 94 รูปแบบ Double Vee

3) Miniature I-Beam รูปแบบ Miniature I-Beam แสดงดังภาพที่ 95 ซึ่งจะมีวิธีการติดตั้งเหมือนกับวิธีของ Dowel Bar Retrofit ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป โดยผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า I-Beam ไม่ได้ช่วยในการลด Faulting ของถนน (Moore 1994, Bendana and Yang 1993, Reiter et al. 1988)



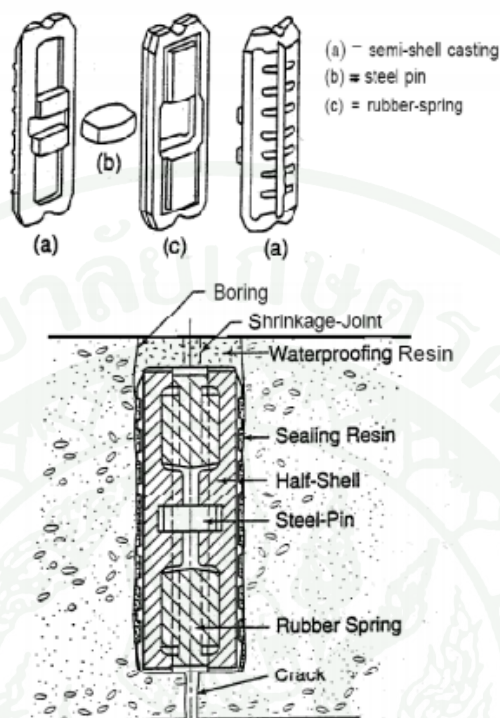
ภาพที่ 95 รูปแบบ Miniature I-Beam

4) Georgia Split Pipe อุปกรณ์ Georgia Split Pipe ประกอบด้วยท่อที่ผ่าแยก 2 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1-18 โดยประกอบติดตั้งด้วยอีพ็อกซี่ในแต่ละด้านและประกอบลงบนขนาด 4 นิ้ว (102 มม.) ตรงแกนกลางจะมีท่อนเหล็กที่สามารถร้อย bolt ได้ จำนวน 4 ตัว โดยรูแกนกลางต้องวางไว้ที่กึ่งกลางของรอยต่อตามขวาง ได้มีการศึกษาโดย AASHTO (1993) ที่ได้ประเมินอุปกรณ์การถ่ายแรงในรูปแบบนี้ พบว่า ค่อนข้างยากในการประกอบ และไม่ค่อยประสบความสำเร็จในการนำมาใช้งานจริง



ภาพที่ 96 รูปแบบ Georgia Split Pipe

5) Freyssinet Connector รูปแบบรอยต่อแบบ Freyssinet Connector ดังแสดงในภาพที่ 97 ได้ถูกพัฒนาภายใต้ความร่วมมือกับห้องปฏิบัติการ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) และ Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) และ Services Techniques de l'Aéroport de Paris และ Freyssinet International โดยรูปแบบรอยต่อแบบนี้ประกอบด้วย เหล็กหล่อ 2 ชั้น ที่สมมาตรที่เป็นรูปคล้ายเปลือกหอยดังรูป โดยทำตัวสลักด้วยเหล็ก (Steel Key) ที่สามารถเลื่อนได้ในตัวชิ้นงานนี้ รูปแบบรอยต่อจำนวน 4 ชั้นจะต้องทำการประกอบกันในแต่ละรอยต่อ รูปแบบรอยต่อนี้ไม่เคยได้รับการศึกษาและได้รับการประเมินถึงสมรรถภาพและประสิทธิภาพของการถ่ายแรงระหว่างรอยต่อ

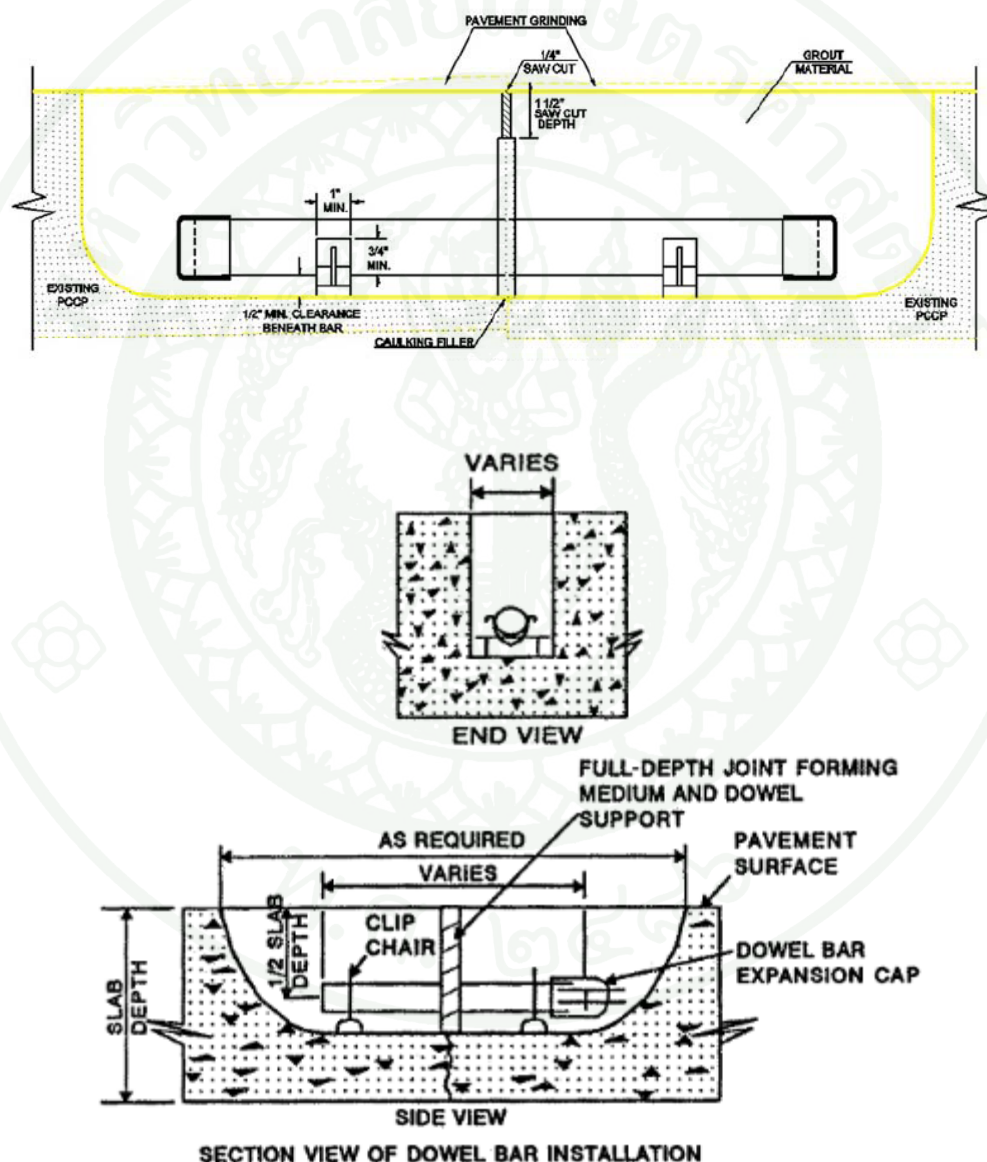


ภาพที่ 97 รูปแบบ Freyssinet Connector

6) Dowel bar retrofit รูปแบบ Dowel bar retrofit ประกอบด้วยการแทนที่ด้วยเหล็กเดือยที่มีลักษณะเป็นเหล็กกลม มีลักษณะราบเรียบ วางตรงบริเวณรอยต่อตามขวางของถนนคอนกรีตไร้เหล็กเสริม หรือวางที่ตำแหน่งรอยต่อตามขวางของถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก Slot หรือตำแหน่งที่ต้องวางเหล็กเดือยจะต้องถูกตัดที่ความกว้างและความยาวที่พอเหมาะในการวางเหล็กเดือยใหม่เพื่อช่วยในการถ่ายแรง โดยวางที่ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นถนนคอนกรีต ก่อนที่จะวางเหล็กเดือยลงไป เหล็กเดือยจะต้องมีการติดตั้งตัวยึดเพื่อให้ตำแหน่งของเหล็กเดือยตามที่ระบุ รวมถึงยังสามารถกราวด์ลงไปในเหล็กเดือยและรอบๆ เหล็กเดือยหรือภายใต้เหล็กเดือยได้ รวมถึงจะต้องมีการหุ้มบริเวณด้านปลายของเหล็กเดือยทั้งสองด้านเพื่อยอมให้เหล็กเดือยสามารถยับได้ขณะที่คอนกรีตเกิดการหดตัวและขยายตัว โดยรูปแบบทั่วไปของ Dowel bar retrofit แสดงดังภาพที่ 98

Pierce (2007) ได้รวบรวมผลการศึกษเกี่ยวกับการซ่อมแซมรอยต่อเพื่อการถ่ายแรง โดยพบว่า มีจำนวนถึง 23 รัฐ ได้มีการเปลี่ยนรอยต่อด้วยวิธี Dowel bar retrofit ไปมากกว่า

5,000,000 ชุด ทั่วประเทศสหรัฐอเมริกา และปัจจุบันพบว่า Dowel bar retrofit เป็นวิธีการซ่อมแซมถนนเพื่อให้สามารถถ่ายแรงได้และเป็นที่นิยมใช้กันมากในสหรัฐอเมริกา แต่อย่างไรก็ดี ในการซ่อมแซมบางแห่งยังพบความเสียหายที่เกิดจากการซ่อมด้วยวิธีด้วยเช่นกัน โดยความเสียหายทั่วไปที่พบ คือ การเข้ากันไม่ได้หรือการรวมตัวกันของวัสดุเก่ากับวัสดุที่แทนที่เข้าไปใหม่บริเวณรอยต่อ การเกิดรอยแตก การเกิด Debonding เป็นต้น

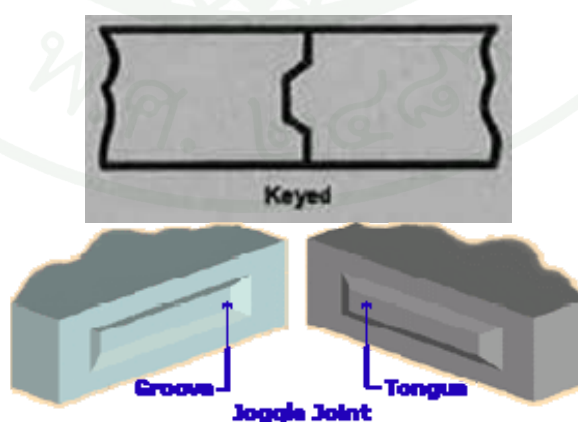




ภาพที่ 98 รูปแบบ Dowel Bar Retrofit

6. รอยต่อแบบคอนกรีต

ลักษณะของรอยต่อแบบนี้ จะใช้เฉพาะคอนกรีต โดยจะหล่อเป็นเบ้าตามแบบหล่อจากโรงหล่อ แล้วนำมาประกบที่หน้างาน โดยลักษณะของรอยต่อแบบ Concrete Key แสดงดังภาพที่ 99 การถ่ายแรงของถนนคอนกรีตด้วยรูปแบบรอยต่อดังกล่าว จะถ่ายแรงแนวตั้งผ่านสลักและ Key ของคอนกรีต ดังนั้น จึงต้องพิจารณาความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนให้เพียงพอสำหรับรอยต่อลักษณะนี้



ภาพที่ 99 รูปแบบรอยต่อแบบ Concrete Key

7. รอยต่อแบบใช้วัสดุอื่น ๆ

ในปัจจุบันได้เริ่มมีการนำวัสดุอื่น ๆ นอกจากเหล็กกลมมาใช้เป็นเหล็กเดือย เช่น การนำวัสดุ Fiber Reinforced Polymer หรือ การนำ Stainless steel หรือ การนำอิพ็อกซี่มาเคลือบเหล็กเพื่อป้องกันสนิม เนื่องจากเหล็กเดือยมักพบปัญหาของการเกิดสนิมเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน ๆ อย่างไรก็ตาม การนำวัสดุต่าง ๆ มาใช้ เป็นเพียงโครงการนำร่อง และยังมีได้นิยมกันอย่างแพร่หลายเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกลม เนื่องจากราคาของวัสดุเหล่านี้มักจะสูงกว่าการใช้เหล็ก

- Epoxy Coated Steel



- Stainless Steel Dowel Bar



- Fiber Reinforced Polymer (FRP) Compositd Dowel Rod



ภาพที่ 100 รูปแบบรอยต่อที่ใช้วัสดุอื่น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการซ่อมแซมถนนคอนกรีต

1.1. รถขุด (Back Hoe Pc200)	1	คัน
1.2. รถ 6 ล้อ ขนส่งวัสดุ	2	คัน
1.3. รถขนส่งแผ่นพื้นหล่อสำเร็จ (รถ HIAB)	1	คัน
1.4. รถขนส่งแผ่นพื้นหล่อสำเร็จ (รถเทรลเลอร์)	5	คัน
1.5. รถกระบะ	2	คัน
1.6. เครื่องตบดินแบบกระโดด	1	เครื่อง
1.7. เครื่องเขย่าคอนกรีต	1	เครื่อง
1.8. เครื่องตัดคอนกรีต	3	เครื่อง
1.9. เครื่องสกัดคอนกรีตไฟฟ้า	2	เครื่อง
1.10. เครื่องตัดเหล็กเส้น	1	เครื่อง
1.11. เครื่องปั่นไฟ	2	เครื่อง
1.12. สว่านไฟฟ้าเพื่อเจาะคอนกรีต	2	เครื่อง
1.13. เครื่องปั้มน้ำ	1	เครื่อง
1.14. Blower ไฟฟ้า (เล็ก)	1	เครื่อง
1.15. ป้ายจราจรชนิดต่าง ๆ พร้อมไฟกระพริบเหลือง เพื่อใช้ในการปิดกั้นช่องจราจร และ อำนวยความสะดวก		

2. อุปกรณ์ในการตรวจสอบทางด้านวิศวกรรม

- 2.1. เครื่อง Falling Weight Deflectometer
- 2.2. เครื่องมือวัด International Roughness Index (IRI)
- 2.3. คอมพิวเตอร์
- 2.4. กล้องถ่ายภาพ

วิธีการ

1. การหาขนาดที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับการซ่อมแซมถนนคอนกรีต

สำหรับขนาดของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่เหมาะสมกับการซ่อมแซมถนนคอนกรีตในประเทศไทยนั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น การผลิตแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป การเคลื่อนย้ายหรือการขนส่ง การติดตั้งที่หน้างาน ความแข็งแรงในการใช้งาน เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ดังนั้นเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้จึงนำโปรแกรมการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เชิงเส้น (Linear programming : LP) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในเรื่องของการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) นั่นคือ โปรแกรม LINGO มาใช้ในการหาขนาดที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

โปรแกรม LINGO เป็นโปรแกรมที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อแก้ปัญหาการตัดสินใจทางธุรกิจ โดยการสร้างแบบจำลองสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การสร้างแบบจำลองด้วยภาษาแบบจำลอง LINGO (LINGO Modeling Language) และการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการทางพีชคณิตพื้นฐาน (Standard Algebraic Approach) สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการทางพีชคณิตพื้นฐานซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและมีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

- 1) กำหนดตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variables)
- 2) กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ได้แก่ ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัดสินใจและวัตถุประสงค์
- 3) กำหนดฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraints) อสมการหรือสมการเชิงเส้น ที่จำกัดทรัพยากรหรือความต้องการ
- 4) กำหนดฟังก์ชันความสามารถ (Capabilities) บอกข้อจำกัดสูงสุดหรือต่ำสุดของข้อจำกัด และตัวแปร
- 5) เขียนแบบจำลองลงบน Model Window ในรูปแบบของสมการพีชคณิตอย่างง่าย
- 6) ใช้คำสั่ง Solver เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด

2. การหารูปแบบรอยต่อที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับการซ่อมแซมถนนคอนกรีต

การออกแบบรูปแบบรอยต่อที่เหมาะสมสำหรับแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่สามารถนำมาซ่อมแซมถนนได้นั้น จากการศึกษารูปแบบการซ่อมด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป พบว่า มีรูปแบบการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปหลายรูปแบบ รวมถึงรูปแบบรอยต่อของระบบขึ้นส่วนสำเร็จรูปต่าง ๆ วัสดุต่าง ๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นหลักเฉื่อย จึงได้นำข้อดีของรูปแบบรอยต่อต่าง ๆ มาใช้ในการออกแบบรอยต่อ ซึ่งจะต้องเป็นรูปแบบรอยต่อที่สามารถถ่ายแรงได้ตามหลักทฤษฎีการถ่ายแรงระหว่างรอยต่อ และเป็นรูปแบบรอยต่อที่สามารถทำการซ่อมแซมได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และมีความปลอดภัย

ด้วยหลักการและแนวคิดดังกล่าว จึงได้ออกแบบรอยต่อในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อที่จะนำมาคัดเลือกเป็นรูปแบบรอยต่อที่สามารถนำมาใช้ในการซ่อมแซมถนนคอนกรีต โดยมีรูปแบบของรอยต่อที่มีความเหมาะสมจำนวน 13 รูปแบบ ดังแสดงในภาคผนวก ก อย่างไรก็ตาม แต่ละรูปแบบที่นำเสนอมีลักษณะวิธีที่เป็นข้อดี และข้อจำกัดในด้านการทำงาน ดังนั้น การเลือกรูปแบบจึงควรพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม เช่น ระยะเวลาที่จะต้องปิดการจราจรเพื่อการซ่อมถนน ความยากง่ายในการทำงาน และราคาก่อสร้าง เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงได้นำกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process : AHP) มาประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจเลือกรูปแบบรอยต่อที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับการใช้ในการซ่อมแซมถนนต่อไป กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์เป็นกระบวนการที่ใช้ในการ “วัดค่าระดับ” ของการตัดสินใจในเรื่องต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และให้ผลการตัดสินใจที่ถูกต้องตรงกับเป้าหมายของการตัดสินใจได้มากที่สุด กระบวนการที่ว่านี้ได้รับการคิดค้นเมื่อปลายทศวรรษที่ 1970 โดยศาสตราจารย์ Thomas Saaty แห่งมหาวิทยาลัยเพนซิลวาเนีย ซึ่งจุดเด่นของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ มีดังนี้

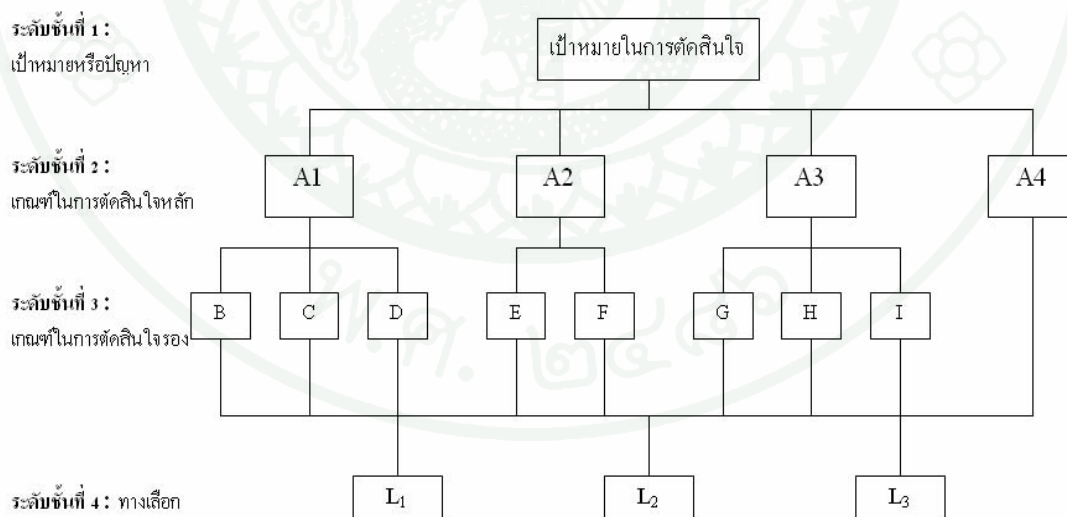
- 1) ให้ผลการสำรวจน่าเชื่อถือกว่าวิธีอื่นๆ เนื่องจากใช้วิธีการเปรียบเทียบเชิงคู่ในการตัดสินใจก่อนที่จะลงมือตอบคำถาม
- 2) มีโครงสร้างที่เป็นแผนภูมิลำดับชั้น เลียนแบบกระบวนการความคิดของมนุษย์ ทำให้ง่ายต่อการใช้และการทำความเข้าใจ

- 3) ผลลัพธ์ที่ได้เป็นปริมาณตัวเลข ทำให้ง่ายต่อการจัดลำดับความสำคัญ และยังสามารถนำผลลัพธ์ดังกล่าวไปเปรียบเทียบ (Benchmarking) กับหน่วยงานอื่นๆ ได้
- 4) สามารถจัดการตัดสินใจแบบมีอคติหรือลำเอียงออกไปได้
- 5) ใช้ได้ทั้งกับการตัดสินใจแบบคนเดียวและแบบที่เป็นกลุ่มหรือหมู่คณะ
- 6) ก่อให้เกิดการประนีประนอมและการสร้างประชาคมดี
- 7) ไม่จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญพิเศษมาคอยควบคุม

2.1 ขั้นตอนการตัดสินใจโดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

AHP (Analysis Hierarchy Process) เป็นกระบวนการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพมาก เริ่มต้นด้วยการเปรียบเทียบ “ความสำคัญ” ของเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจ เพื่อหา “น้ำหนัก” ของแต่ละเกณฑ์ก่อน หลังจากนั้นจึงนำ “ทางเลือก” ที่มีทั้งหมดมาประเมินผ่านเกณฑ์ดังกล่าว เพื่อจัดลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือก โดยมีขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้

2.1.1 สร้างแผนภูมิลำดับชั้นหรือแบบจำลองของการตัดสินใจ โดยมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 101 แสดงตัวอย่างของแผนภูมิลำดับชั้นหรือแบบจำลองของการตัดสินใจ

โครงสร้างของแผนภูมินี้ประกอบไปด้วย “องค์ประกอบ” หรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจต่างๆ แผนภูมินี้มีลักษณะเป็นระดับชั้น จำนวนของลำดับชั้นจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของการตัดสินใจ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

- 1) ระดับชั้นที่ 1 หรือระดับบนสุด แสดงจุดโฟกัสหรือเป้าหมายของการตัดสินใจ
- 2) ระดับชั้นที่ 2 เกณฑ์การตัดสินใจหลัก ที่มีผลต่อเป้าหมายในการตัดสินใจนั้น
- 3) ระดับชั้นที่ 3 ลงมา แสดงถึงเกณฑ์ย่อยของการตัดสินใจ ซึ่งจะมีจำนวนเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับความชัดเจนของเกณฑ์หลัก
- 4) ส่วนระดับชั้นล่างสุด หรือระดับชั้นสุดท้าย คือทางเลือกที่เราจะนำมาพิจารณาผ่านเกณฑ์การตัดสินใจตามที่เรากำหนดไว้

2.1.2 การให้น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การประเมิน

เนื่องจากเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจแต่ละเกณฑ์นั้น มีความสำคัญต่อเป้าหมายในการตัดสินใจไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงจำเป็นที่เราจะต้องหาน้ำหนัก “ความสำคัญ” ของแต่ละเกณฑ์ก่อนที่จะทำการประเมินทางเลือก โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) สร้างตารางเมตริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเป็นคู่ ดังตารางข้างล่างนี้

เกณฑ์ตัดสินใจ		ปัจจัย			
		A1	A2	A3	A4
ปัจจัย	A1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
	A2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}
	A3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}
	A4	a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}

โดยที่ a_{ij} คือ สมาชิกในแถวที่ i หลักที่ j ของเมตริกซ์ หมายถึง ผลการเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างปัจจัย A_i และ A_j

2) กำหนดมาตราส่วนในการวินิจฉัยเปรียบเทียบ เช่น

ถ้า $a_{ij} = 1$ หมายถึง ปัจจัย A_i และ A_j มีความสำคัญเท่ากัน

ถ้า $a_{ij} = 3$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j เล็กน้อย

ถ้า $a_{ij} = 5$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j ปานกลาง

ถ้า $a_{ij} = 7$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j มากที่สุด

ถ้า $a_{ij} = 9$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j อย่างยิ่งยวด

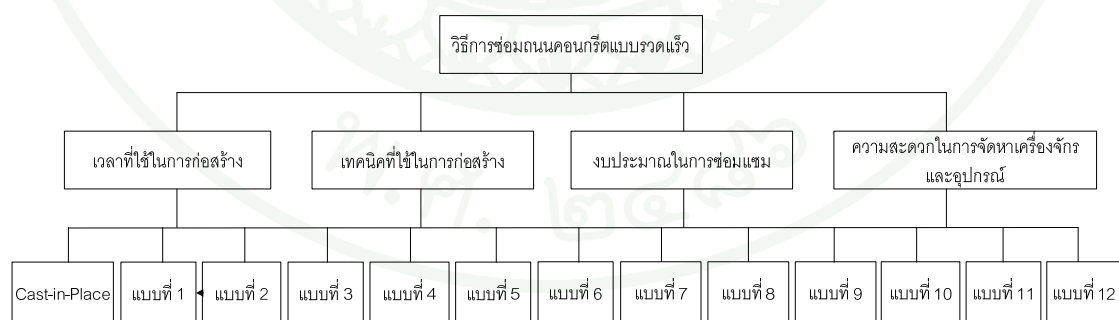
จำนวนระดับของมาตราส่วนในการเปรียบเทียบนี้ ขึ้นอยู่กับตัวผู้ทำการวิเคราะห์เองว่าต้องการรายละเอียดในการเปรียบเทียบมากแค่ไหน

3) คำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การประเมิน

4) วัดค่าอคติของเกณฑ์การประเมิน

ดังนั้นในการพิจารณาเลือกรูปแบบรอยต่อที่เหมาะสม สามารถดำเนินการตัดสินใจตามขั้นตอนดังนี้

1) สร้างแผนภูมิลำดับชั้นหรือแบบจำลองของการตัดสินใจ



2) สร้างตารางเมตริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเป็นคู่ โดยกำหนดมาตราส่วนในการเปรียบเทียบดังนี้

ก. ถ้า $a_{ij} = 1/3$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญน้อยกว่า A_j

ข. ถ้า $a_{ij} = 1$ หมายถึง ปัจจัย A_i และ A_j มีความสำคัญเท่ากัน

ค. ถ้า $a_{ij} = 3$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j

จากการกำหนดมาตราส่วนดังกล่าว จึงสามารถสร้างตารางเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การประเมินตามระบบ Hierarchy

ลำดับ	เกณฑ์การประเมิน	เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน	เทคนิคการก่อสร้าง	งบประมาณในการซ่อมแซม	ความสะดวกในการจัดหาเครื่องจักร วัสดุ อุปกรณ์
1	เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน	1	3	3	3
2	เทคนิคการก่อสร้าง	0.33	1	0.33	1
3	งบประมาณในการซ่อมแซม	1	3	1	3
4	ความสะดวกในการจัดหาเครื่องจักร วัสดุ อุปกรณ์	0.33	1	0.33	1
คะแนนรวม		2.66	8	4.66	8

โดยค่าตัวเลขต่าง ๆ ที่เติมลงไปในตารางมีความหมายดังนี้

ก. แถวที่ 1 ของตารางมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ เนื่องจากการเปรียบเทียบของเกณฑ์ที่เหมือนกัน ทำให้มีความสำคัญเท่ากัน เช่น เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งานกับเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน หรือ เทคนิคการก่อสร้างกับเทคนิคการก่อสร้าง

ข. แถวที่ 2 คอลัมน์ที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.33 หมายความว่า ให้มีความสำคัญกับเทคนิคการก่อสร้าง “น้อยกว่า” เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน

ค. แถวที่ 1 คอลัมน์ที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ให้มีความสำคัญกับเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน “เท่ากับ” เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน

ง. แถวที่ 1 คอลัมน์ที่ 2 มีค่าเท่ากับ 3 หมายความว่า ให้ความสำคัญกับ เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน “มากกว่า” เทคนิคในการก่อสร้าง

ทั้งนี้ เกณฑ์การให้คะแนนดังแสดงในตารางที่ 2 ได้ทำการ สอบถามผู้เชี่ยวชาญทางด้านการก่อสร้าง ผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับงานทาง รวมถึงนักวิจัยที่ทำงาน เกี่ยวข้องกับงานทาง ทั้งนี้ การตอบแบบสอบถาม เพื่อจะได้มาซึ่งเกณฑ์ที่สอดคล้องกับความเป็น จจริง รวมถึงไม่เป็นการลำเอียง อีกทั้งยังสามารถใช้เกณฑ์ในลักษณะดังกล่าวประกอบในการ พิจารณาตัดสินใจได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

3) คำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญเกณฑ์การประเมิน สามารถทำได้โดย การปรับ “ผลรวม” ของแต่ละคอลัมน์ให้เท่ากับ 1 จากนั้นก็คำนวณผลรวมของแต่ละแถว และหาร ผลรวมดังกล่าวด้วย “จำนวน” ของเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจ ซึ่งในกรณีนี้ คือ เวลาที่ใช้ในการ ก่อสร้างจนเปิดใช้งาน เทคนิคการก่อสร้าง งบประมาณในการซ่อมแซม ความสะดวกในการจัดหา เครื่องจักร วัสดุ และอุปกรณ์

ตารางที่ 15 การปรับเกณฑ์ตามคอลัมน์ให้ผลรวมเท่ากับ 1



จากผลการคำนวณสรุปได้ว่า โครงการนี้ ให้ความสำคัญกับ “เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน” มากที่สุด (44.24%) รองลงมา คือ งบประมาณในการ ซ่อมแซม (33.51%) โดยที่เทคนิคการก่อสร้าง และ ความสะดวกในการจัดหาเครื่องจักร วัสดุ อุปกรณ์ มีความสำคัญเท่ากัน (11.12%) ตามลำดับ

4) นำทางเลือกของรูปแบบรอยต่อที่กำหนดไว้ในตอนแรก ซึ่งมี 13 รูปแบบ มาเปรียบเทียบผ่านเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจที่ละเกณฑ์ เพื่อจัดลำดับความสำคัญของทางเลือก นำปัจจัยย่อยมาเปรียบเทียบความสำคัญที่ละคู่ดังค่ามาตรฐานในตารางที่ 16 แล้วนำค่าที่ได้ใส่ลงในตารางเมตริกซ์ แล้วหาผลรวมของแต่ละแถว

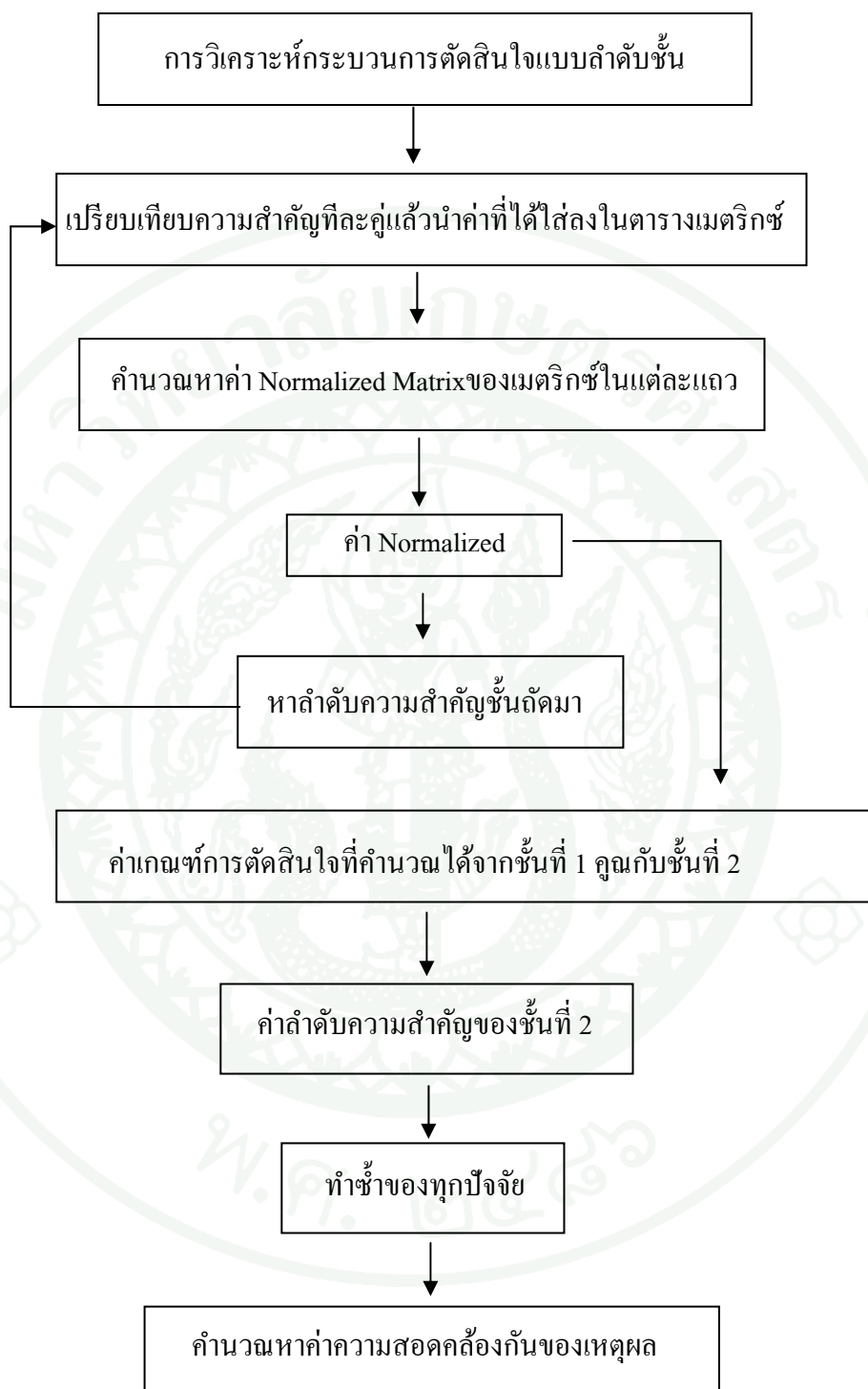
ตารางที่ 16 ค่าระดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆ

ระดับความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 ปัจจัยส่งผลต่อวัตถุประสงค์เท่าๆกัน
3	สำคัญกว่าปานกลาง	ปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งปานกลาง
5	สำคัญกว่ามาก	ความพึงพอใจในปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่ง
7	สำคัญกว่ามากที่สุด	ปัจจัยหนึ่งได้รับความพึงพอใจมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งอย่างเห็นได้ชัด
9	สำคัญกว่าสูงสุด	ปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งในระดับสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ทั้งนี้ เกณฑ์การให้คะแนน 1-5 นั้น คะแนน 1 หมายถึงเหมาะสมน้อยที่สุด และคะแนน 5 หมายถึงเหมาะสมมากที่สุด เมื่อมีการให้คะแนนลำดับ 1-5 แล้ว ต้องนำมาพิจารณาเพื่อประเมินในแต่ละปัจจัยแสดงดังต่อไปนี้ เพื่อทำการสรุปผลของแต่ละปัจจัยต่อไป

ถ้าไม่ต่างกัน	ถือว่ามีความเท่ากัน 1		
ถ้าแตกต่างกัน 1	ถือว่าเล็กน้อย มีค่าเท่ากับ 3	ถ้าแตกต่างกัน -1	ถือว่าเล็กน้อย มีค่าเท่ากับ 1/3
ถ้าแตกต่างกัน 2	ถือว่าปานกลาง มีค่าเท่ากับ 5	ถ้าแตกต่างกัน -2	ถือว่าปานกลาง มีค่าเท่ากับ 1/5
ถ้าแตกต่างกัน 3	ถือว่ามาก มีค่าเท่ากับ 7	ถ้าแตกต่างกัน -3	ถือว่ามาก มีค่าเท่ากับ 1/7
ถ้าแตกต่างกัน 4	ถือว่ายิ่งยวด มีค่าเท่ากับ 9	ถ้าแตกต่างกัน -4	ถือว่ายิ่งยวด มีค่าเท่ากับ 1/9

5) นำปัจจัยต่างๆ เช่น รูปแบบ เวลาที่ใช้ในการก่อสร้าง เทคนิคงบประมาณ และเครื่องจักรอุปกรณ์ มาใช้ในการตัดสินใจด้วยการวิเคราะห์กระบวนการตัดสินใจแบบลำดับชั้น AHP มาใช้ในการหาค่าความสำคัญของปัจจัย แสดงดังภาพที่ 102



ภาพที่ 102 การวิเคราะห์กระบวนการตัดสินใจแบบลำดับชั้น

3. การออกแบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมถนนคอนกรีต

หลังจากที่ได้ขนาดและรูปแบบรอยต่อที่เหมาะสมแล้ว ต้องทำการออกแบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปให้มีความแข็งแรงในการใช้งานทางด้านวิศวกรรม สำหรับรายการคำนวณนั้นได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข ซึ่งสิ่งที่จะต้องพิจารณามีดังนี้

3.1 การออกแบบ Dowel bar และเหล็ก Tie bar ตามแบบมาตรฐาน

3.2 ตรวจสอบหน่วยแรงแบกทานที่เกิดขึ้นจริงกับหน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้ของรูปแบบรอยต่อ

3.3 การออกแบบเหล็กเสริมพิเศษเพื่อให้แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปต้านทานแรงดัดที่เกิดขึ้นจากการชนส่งและการติดตั้ง

4. ร่วมดำเนินการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปกับกรมทางหลวงชนบท

ซึ่งแปลงทดสอบสำหรับการซ่อมแซม คือ สายทาง สป.1005 แยกทางหลวงหมายเลข 3 – บ.บางพลีน้อย อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ จากการศึกษาวิธีการซ่อมแซมจากงานวิจัยต่างๆ มีวิธีที่น่าสนใจและเหมาะสมกับงานวิศวกรรมในประเทศไทยคือ การซ่อมแซมแบบมิซิแกน โดยใช้การปรับระดับด้วยวัสดุ Flowable Fill แต่ในประเทศไทยวัสดุที่นิยมใช้ในการปรับระดับ คือ Self-leveling concrete ดังนั้นจึงเลือกใช้ Self-leveling mortar ในการปรับระดับ เมื่อได้สายทางที่จะทำการซ่อมแซม และรูปแบบของการซ่อมแซมเรียบร้อยแล้ว จึงเขียนแบบก่อสร้างสำหรับการซ่อมแซมดังแสดงในภาคผนวก ค ซึ่งมีรายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม และขั้นตอนการซ่อมแซมดังนี้

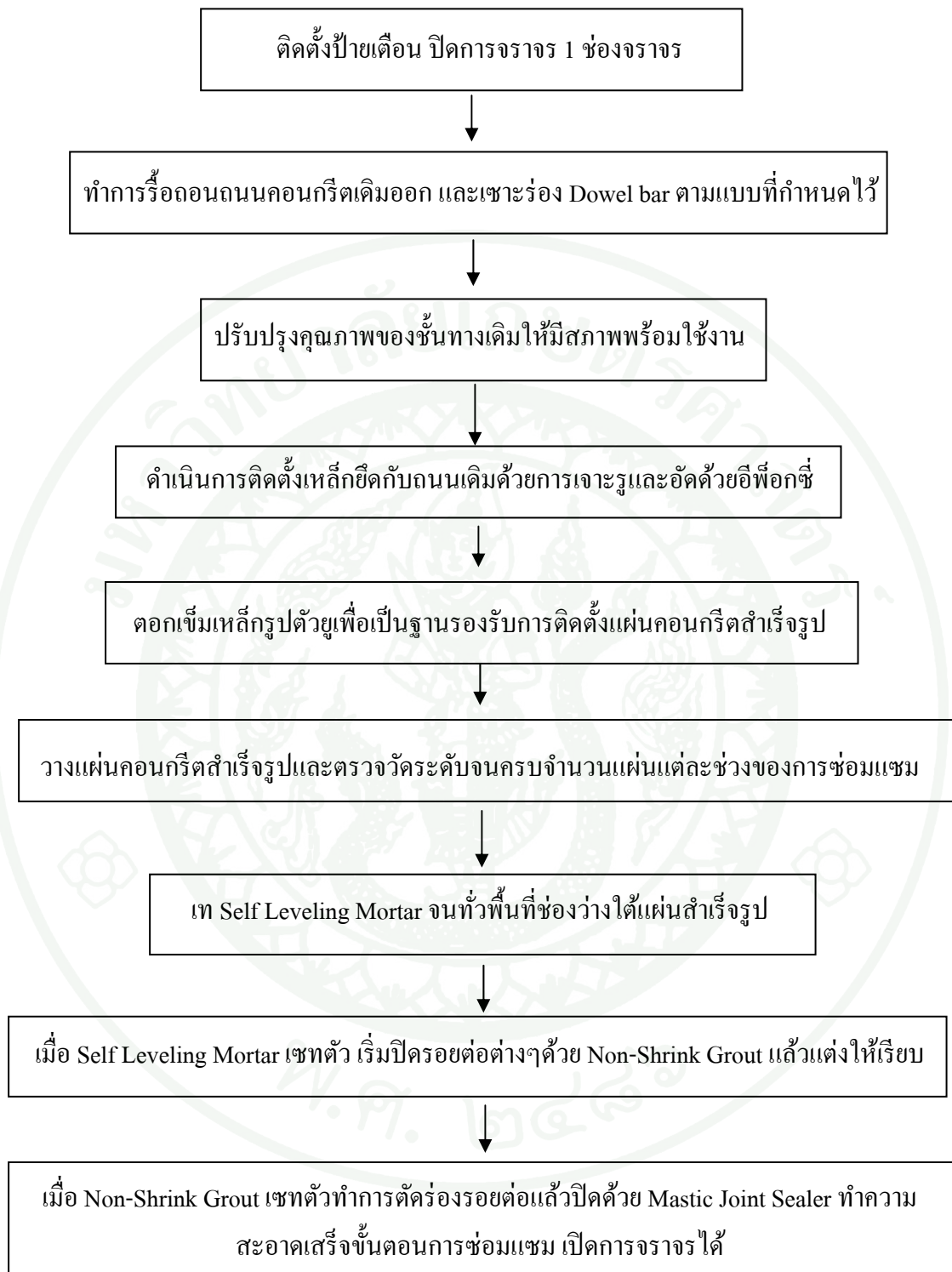
4.1 ข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้สำหรับการซ่อมแซมแบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

- 1) แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ให้ใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยของแท่งคอนกรีตตัวอย่างรูปลูกบาศก์ 15x15x15 ซม. อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 325 กก./ซม.²
- 2) Joint filler ให้ใช้ตาม AASHTO M153-70 หรือ ASTM 1753-67(1973)
- 3) เหล็กเสริม ใช้เหล็กมาตรฐาน มอก.20-2527 และ มอก.24-2527

- 4) วัสดุ Self-leveling ไซของ CPAC หรือเทียบเท่า (โดยมีกำลังรับแรงอัดที่เปิดใช้งานที่ 14 กก./ซม.² ที่อายุ 12 ชั่วโมง)
- 5) วัสดุ Non-Shrink Grout ไซของ CORMIX (Congrout 4000) หรือเทียบเท่า (โดยมีกำลังรับแรงอัดที่เปิดใช้งานที่ 400 กก./ซม.² ที่อายุ 8 ชั่วโมง)
- 6) Epoxy ไซของ Sikadur-31 CF Normal หรือเทียบเท่า
- 7) วัสดุที่ไม่ได้กำหนดในแบบก่อสร้าง ให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท
- 8) แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป จะขนส่งได้เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยของแท่งคอนกรีต ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ 15x15x15 ซม. อายุ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 280 กก./ซม.²
- 9) การทำผิวหน้าหยาบ ให้ทำโดยลากแปลงกวาดจากขอบด้านหนึ่งไปยังขอบอีกด้านหนึ่งอย่างสม่ำเสมอ

4.2 ขั้นตอนการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

การซ่อมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปนั้น จะมีขั้นตอนในการก่อสร้างซ่อมแซมที่ต้องมีการพิจารณาอยู่หลายขั้นตอน อาทิเช่น การหล่อแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป การปรับระดับในการติดตั้งแผ่นคอนกรีต การเกรทที่ปิดรอยต่อ เป็นต้น การหล่อแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปต้องหล่อให้ได้ขนาดตามแบบ ซึ่งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้มีขนาดประมาณ 2x3 ม.หนา 0.20 ซม. ซึ่งในการออกแบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ได้จัดเตรียมหุยกสำหรับการขนส่งแผ่นคอนกรีตจำนวน 4 จุด และได้ออกแบบป้องกันการแตกร้าวของแผ่นคอนกรีตขณะยกหรือขนส่ง โดยได้ออกแบบเสริมเหล็กกันร้าวเพิ่มเติมสำหรับวัสดุประเภทดังกล่าว ซึ่งขั้นตอนในการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปสรุปได้ดังภาพที่ 103



ภาพที่ 103 ขั้นตอนการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

5. ดำเนินการตรวจวัดและประเมินผลถนนคอนกรีตภายหลังทำการซ่อมแซม

สำหรับการตรวจวัดและประเมินผลนั้นใช้วิธีการที่ได้ทำการศึกษามาโดยจะทำการประเมินคุณภาพงานซ่อมด้วยวิธีต่างๆ อันได้แก่

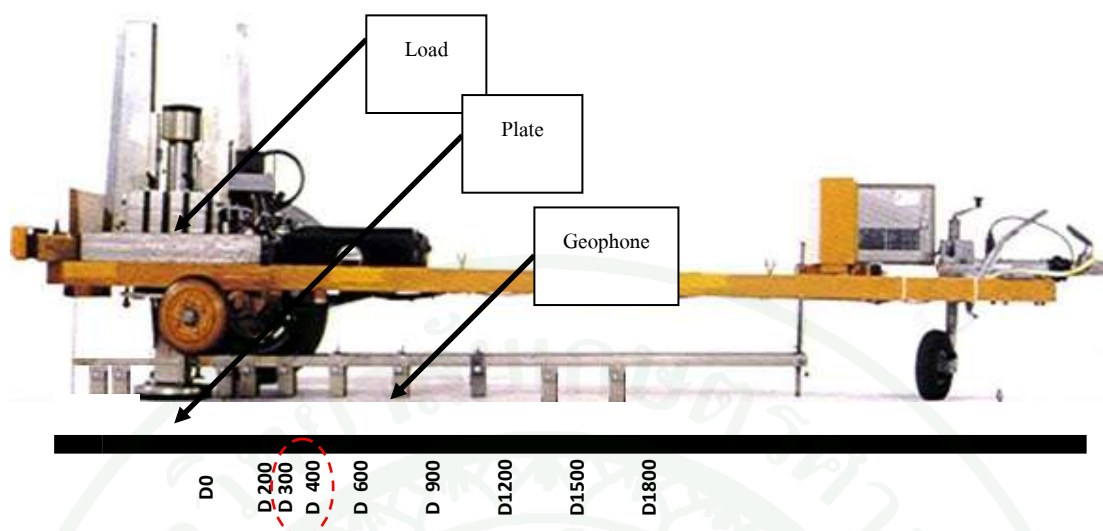
5.1 การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection)

5.2 การตรวจสอบด้วยการวัดความแข็งแรงของถนนด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ของกรมทางหลวงชนบทซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 104



ภาพที่ 104 เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ของกรมทางหลวงชนบท

การกำหนดตำแหน่ง Geophone และวิธีการทดสอบให้เหมาะสมกับเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ของกรมทางหลวงชนบท ซึ่งเป็นเครื่องมือทดสอบรุ่น PRI 2100 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่กรมทางหลวงชนบทใช้ในการกึ่งทดสอบถนนลาดยางของกรมทางหลวงชนบททั่วประเทศในปัจจุบัน



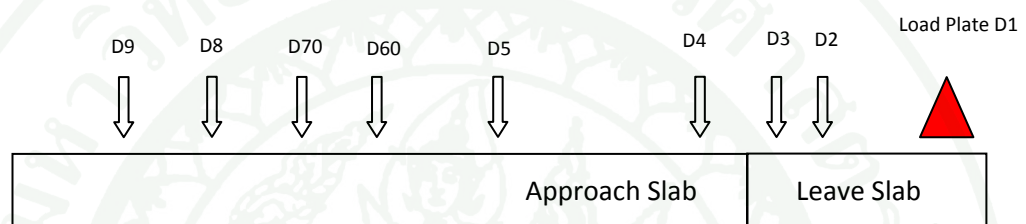
ภาพที่ 105 การปรับตำแหน่ง Geophone เครื่อง FWD กรมทางหลวงชนบท เพื่อทดสอบ LTE ของถนนคอนกรีต

โดยการทดสอบซึ่งปกติการทดสอบหาค่า LTE จะใช้การเปรียบเทียบค่าระหว่าง D200 กับ D300 (D200 หมายถึง ตำแหน่งของ Geophone ที่ห่างจาก Center of Load 200 millimeter) เนื่องจากลักษณะเครื่องมือ FWD ทดสอบรุ่น PRI 2000 ไม่สามารถมองเห็นตำแหน่งของ D200 กับ D300 จากภายนอกดังแสดงในภาพที่ 106



ภาพที่ 106 การตรวจวัด LTE โดยใช้ D300 กับ D400

เนื่องจากตำแหน่ง D200 เข้าไปอยู่ใต้เครื่องทดสอบไม่สามารถมองเห็นได้ ดังนั้น จึงกำหนดการหาค่า LTE โดยใช้ Geophone ตัวที่ D300 (D3) กับ D400 (D4) แทน ดังแสดงตำแหน่งทดสอบในภาพที่ 107 โดยกำหนดให้ Load Plate กระทำที่ตำแหน่งทดสอบที่แผ่น Leave Slab เพียงตำแหน่งเดียวซึ่งเป็นตำแหน่งการทดสอบที่ค่า LTE ค่าที่สุด เนื่องจากการทดสอบจำเป็นต้องปิดช่องจราจร 1 จราจรซึ่งแปลงทดสอบเป็นถนน 2 ช่องจราจรสวนกัน ทำให้เกิดความไม่สะดวกในการสัญจรของผู้ใช้รถใช้ถนน และเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ



ภาพที่ 107 ตำแหน่งของ Geophone ในการทดสอบ LTE

สำหรับรูปแบบน้ำหนักกระทำที่ใช้ทดสอบดังนี้

- 40.0 kN (566 kPa)
- 53.3 kN (754 kPa)
- 71.1 kN (1006 kPa)

โดยมีลำดับการทดสอบของ Load กระทำ 1 ครั้ง จะเรียกว่า 1 Drop โดยชุดการทดสอบต่อ 1 จุดนี้และจะนำผลการวัด Deflection ใน Drop นี้ไปคำนวณ โดยการทดสอบจะทดสอบทั้งหมด 9 Drop ที่เหลือจะมีการให้น้ำหนักกระทำที่ 40.0 kN, 53.3 kN และ 71.1 kN อย่างละ 3 Drop และนำค่า Deflection ของ D3 และ D4 คำนวณหาค่า LTE

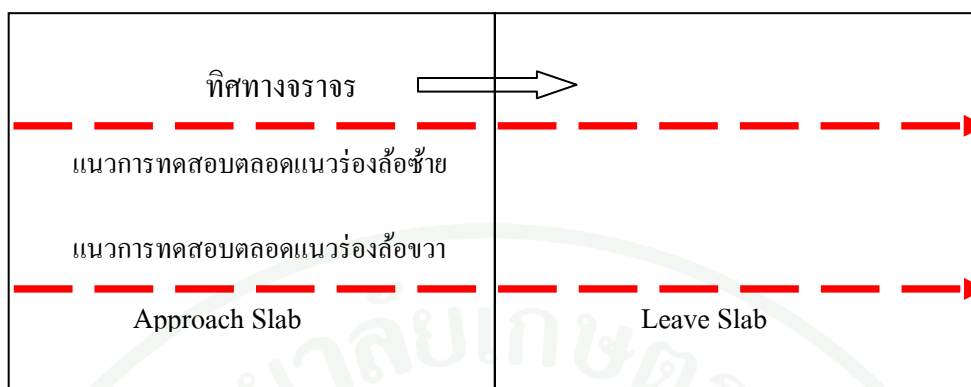
5.3 การสำรวจและประเมินคุณภาพการขับขี่ของถนนโดยวัดค่าดัชนีความขรุขระสากล หรือ International Roughness Index (IRI) เนื่องจากแปลงทดสอบมีขนาดของแผ่นคอนกรีตยาวน้อยที่สุดยาว 2 เมตร ดังนั้น การทดสอบควรใช้เครื่องมือ Walking Profiler ซึ่งมีความละเอียดสูง และทำการทดสอบได้ผลรวดเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 108 โดยทำการตรวจวัดทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซมเพื่อทำการเปรียบเทียบกัน



ภาพที่ 108 เครื่องมือวัด International Roughness Index (IRI)

การกำหนดตำแหน่งและวิธีการทดสอบ IRI ของกรมทางหลวงชนบท

แนวการทดสอบแปลงทดสอบดังแสดงในภาพที่ 109 ทำการทดสอบตามแนวร่องล้อซ้าย และร่องล้อขวา แนวละ 3 ครั้ง เพื่อให้มีค่าเฉลี่ยที่ถูกต้องและเหมาะสม



ภาพที่ 109 ตำแหน่งที่ดำเนินการทดสอบวัด IRI ด้วยเครื่อง Walking Profiler

6. การประเมินผลวิธีการซ่อมแซมในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาเพื่อลดระยะเวลาในการซ่อมแซมถนนให้สามารถเปิดใช้งานได้เร็วที่สุดและสอดคล้องกับงานด้านวิศวกรรมของประเทศ หากมองโครงการในมุมของเศรษฐศาสตร์ สิ่งที่เราจะได้รับหรือผลกำไรจากการซ่อมแซมถนน คือ พื้นที่ที่ทำการซ่อมแซม และสิ่งที่เราต้องลงทุนหรือเสียไป คือ เวลาและเงิน ดังนั้นหากเราสามารถลดระยะเวลาในการซ่อมแซมลงได้ ก็จะทำให้เราได้รับผลกำไรที่มากขึ้นด้วย โดยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของเวลา พื้นที่การซ่อมแซม และค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมจากการซ่อมแซม 3 รูปแบบ คือ การซ่อมแซมถนนแบบหล่อในที่ การซ่อมแซมถนนด้วยคอนกรีตแห้งตัวเร็ว และการซ่อมแซมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

ผลและวิจารณ์

ผลการวิจัย

7. การหาขนาดที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับการซ่อมแซมถนนคอนกรีต

ในการหาขนาดที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปนั้น มีมิติสำหรับการออกแบบขนาดแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปที่เหมาะสม คือ กว้างxยาวxหนา ออกแบบให้ได้ขนาดที่เหมาะสมไม่เล็กหรือใหญ่เกินไป เพื่อให้การซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปมีประสิทธิภาพสูงสุด ต้องใช้แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีมาตรฐานและได้คุณภาพ ไม่มีความเสียหายที่เกิดจากการผลิตหรือขนส่ง ดังนั้นในการพิจารณาออกแบบขนาดที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตจะต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

1.1 การเกิดรอยแตกร้าวในแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป รอยแตกร้าวอาจจะเกิดขึ้นขณะผลิตขนส่งหรือขณะทำการติดตั้งซ่อมแซม ซึ่งสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 สาเหตุ คือ

1.1.1 รอยแตกที่เกิดจากโครงสร้าง (Structural Crack) เกิดจากสาเหตุหลัก 3 ประการ คือ

- ก. การแตกร้าวเนื่องจากการออกแบบไม่ถูกต้อง
- ข. การแตกร้าวเนื่องจากการใช้วัสดุก่อสร้างที่ไม่ได้คุณภาพ
- ค. การแตกร้าวเนื่องจากการก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน

1.1.2 รอยแตกที่ไม่ได้เกิดจากโครงสร้าง (Non Structural Crack) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- ก. การแตกร้าวก่อนคอนกรีตแข็งตัว เกิดจากสาเหตุ
 - 1) คอนกรีตเหลวเกินไป เกิดจากการหดรัดหรือทุบด้วยขณะคอนกรีตกำลังก่อตัว
 - 2) การเคลื่อนไหวยขณะก่อสร้าง เช่น การเคลื่อนตัวของไม้แบบ เป็นต้น
- ข. การแตกร้าวหลังคอนกรีตแข็งตัว แบ่งออกเป็น 4 สาเหตุ

- 1) ภายนอก เช่น การหดตัวเมื่อคอนกรีตแข็งตัว การแตกลายงา เป็นต้น
- 2) ปฏิกิริยาเคมี เช่น การกัดกร่อนของเหล็กเสริม ปฏิกิริยา Carbonation เป็นต้น
- 3) ความร้อน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การขยายตัวจากความร้อนในปฏิกิริยา Hydration เป็นต้น
- 4) โครงสร้าง เช่น การบรรทุกน้ำหนักเกินกว่าที่กำหนด การคืบ (Creep) เป็นต้น

1.2 การขนส่งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ในการขนส่งนั้นหากพิจารณาขนาดทั่วไปของรถบรรทุกจะมีขนาดกว้าง 2.5 เมตร เพื่อความปลอดภัยในการขนส่งจึงไม่ควรบรรทุกสินค้าที่มีขนาดกว้างกว่าตัวรถหรือเกิน 2.5 เมตร

1.3 การติดตั้งซ่อมแซม สำหรับการติดตั้งซ่อมแซมนั้นเพื่อให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงเกินไป จึงไม่เลือกใช้งานรถเครนเคลื่อนที่ แต่จะใช้รถบรรทุกติดเครนในการติดตั้งซ่อมแซมแทน ซึ่งมีขนาดของเครนยกที่ 3 ตัน และ 5 ตัน ดังแสดงในภาพที่ 110 ซึ่งรถบรรทุกติดเครนนั้นมีขนาดกระบะบรรทุกที่ 2.5x6.5 เมตร



ภาพที่ 110 รถบรรทุกติดเครน

1.4 การใช้งานภายหลังการซ่อมแซม หากขนาดของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้มีขนาดเล็กเกินไปก็จะทำให้มีรอยต่อมากซึ่งจะส่งผลต่อความราบเรียบในการใช้ถนน

จากปัจจัยต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น หากมองในเรื่องของการแตกร้าวแล้วนั้น เมื่อแผ่นคอนกรีตได้รับน้ำหนักบรรทุก หากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของแผ่นคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าค่าโมดูลัสของการแตกร้าว (Modulus of Rupture : $f_r = 2.0\sqrt{fc'}$ กก./ชม.²) แผ่นคอนกรีตจะยังไม่เกิดรอยแตกร้าว แต่หากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของแผ่นคอนกรีตมีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสของการแตกร้าว แผ่นคอนกรีตจะเริ่มเกิดรอยแตกร้าว ดังนั้น เมื่อแผ่นคอนกรีตมีการเคลื่อนย้ายหรือนำไปใช้งาน แผ่นคอนกรีตจะต้องสามารถต้านทานค่าโมเมนต์คัตที่ทำให้คอนกรีตเริ่มเกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งโมเมนต์คัตแตกร้าว $M_{cr} = frI_y/y_{bottom} = (2.0\sqrt{fc'}) I_y/y_{bottom}$ กก.-ชม. ดังนั้น ค่าโมดูลัสแตกร้าวจึงเป็นค่าที่มีความสำคัญในการหาขนาดที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่จะใช้ในการซ่อมแซมถนนคอนกรีต ดังนั้น จึงสามารถเปลี่ยนสมการของโมเมนต์คัตแตกร้าว ให้เข้ากับมิติของการออกแบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปได้ ดังนี้

$$M_{cr} = 2.0\sqrt{fc'} \frac{LT^3}{12} / \frac{T}{2} = \sqrt{fc'} \frac{LT^2}{3} \text{ กก.-ชม.}$$

โดยกำหนดให้

L = ความยาวของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป (ชม.)

T = ความหนาของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป (ชม.)

fc' = กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน (กก./ชม.²)

1.5 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo การออกแบบขนาดที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ในมิติของ กว้างxยาวxหนา สามารถกำหนดฟังก์ชันและตัวแปรต่างๆในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo ได้ดังนี้

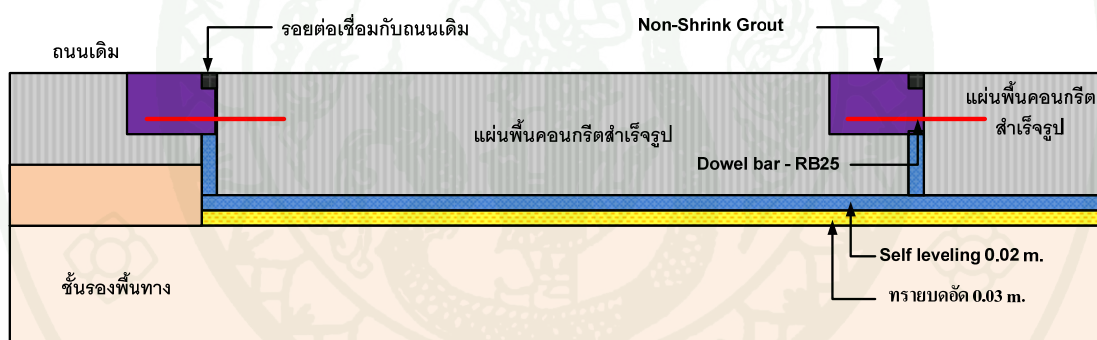
1.5.1 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) คือ $\text{Max} = L$ ให้โปรแกรมหาความยาวที่เหมาะสมที่สุดโดยให้ใช้ค่าที่มากที่สุดของ L เป็นผลลัพธ์

1.5.2 กำหนดฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraints Function) โดยพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้

ก. ความกว้างของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปให้มีค่าเท่ากับความกว้างของช่องจราจรโดยทั่วไปถนนในประเทศไทยจะมีช่องจราจรกว้าง 3 เมตร ดังนั้น จะได้ว่า $B = 3$ เมตร

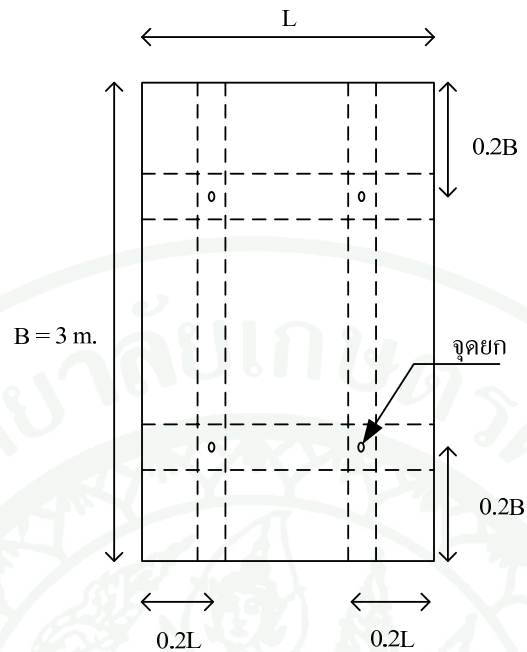
ข. ความยาวของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป FHWA, 2001 มีข้อกำหนดว่าสำหรับแผ่นคอนกรีตที่มีเหล็กเดือย (Dowel Bar) หรือ เหล็กยึด (Tie Bar) ขอบเขตการซ่อมด้วยวิธี Full-Depth Repair แนะนำให้ซ่อมแซมเต็มความกว้าง และมีความยาวขั้นต่ำไม่น้อยกว่า 1.8 เมตร เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกระดก (Rocking), การอัดทะลัก (Pumping) และการแตกหักของแผ่นคอนกรีต ในกรณีที่ใช้แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปเป็นผิวทาง และเมื่อนำมารวมกับปัจจัยในเรื่องของการขนส่ง แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปไม่ควรมีความยาวเกินความกว้างของขนาดรถบรรทุกติดเครนที่ 2.5 เมตร ดังนั้นจะได้ว่า $1.8 < L < 2.5$ เมตร

ค. ความหนาของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป จากการศึกษาพบว่าการซ่อมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปของต่างประเทศนั้นจะต้องมีการเทพรับระดับก่อนการติดตั้งซ่อมแซมดังภาพที่ 111 ดังนั้น เพื่อให้ไม่ต้องขุดชั้นรองพื้นทางออกมากเกินไปจึงออกแบบให้มีชั้นทรายหนา 3 ซม. และมีชั้นของ Selfleveling หนา 2 ซม. และเลือกความหนาที่ $T = 0.2$ เมตร

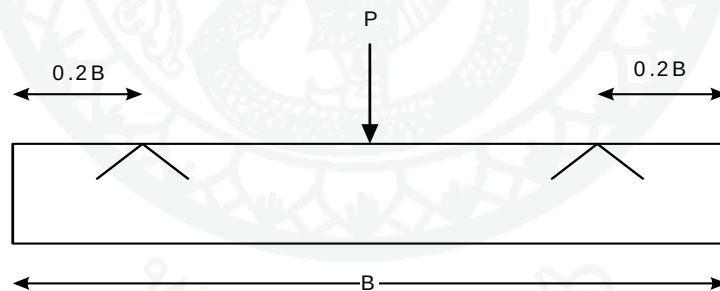


ภาพที่ 111 รูปตัดแสดงรายละเอียดการติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

ง. โมเมนต์ดัดแตกร้าว $M_{cr} = f_t \cdot I_G / y_{bottom}$ กำหนดให้โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในขณะยกแผ่นคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ดัดแตกร้าว โดยออกแบบให้แผ่นคอนกรีตมีหุยกสำหรับยกแผ่นคอนกรีต 4 จุด ดังภาพที่ 112



ภาพที่ 112 ตำแหน่งของหุยกสำหรับยกแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป



ภาพที่ 113 ภาพตัดแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

จากภาพที่ 113 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในขณะยกแผ่นคอนกรีตสามารถหาได้จากสมการ

$$M = P \times 0.3 \times B$$

โดยกำหนดให้

B = ความกว้างของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป (ชม.)

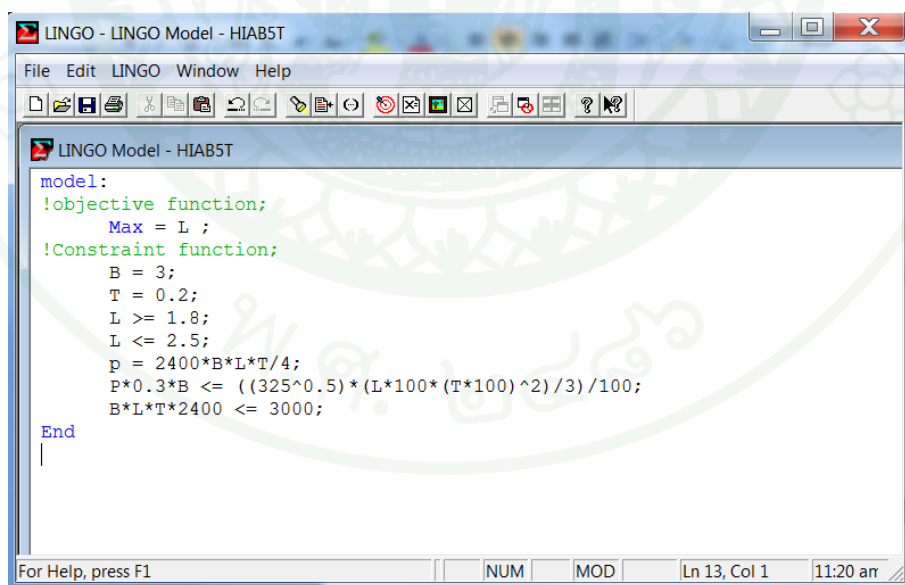
$$\begin{aligned}
 P &= \text{แรงที่เกิดขึ้นเมื่อยกแผ่นคอนกรีต} & (\text{กก.}) \\
 w &= \text{น้ำหนักของแผ่นคอนกรีต/จำนวนจุดยก} \\
 &= B \times L \times T \times 2400 / 4
 \end{aligned}$$

เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป สำหรับการสร้างแบบจำลองนั้นแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่เลือกถาวรทุกตึกคอนกรีตขนาด 3 ตัน และกรณีที่เลือกถาวรทุกตึกคอนกรีตขนาด 5 ตัน ในการติดตั้งซ่อมแซม

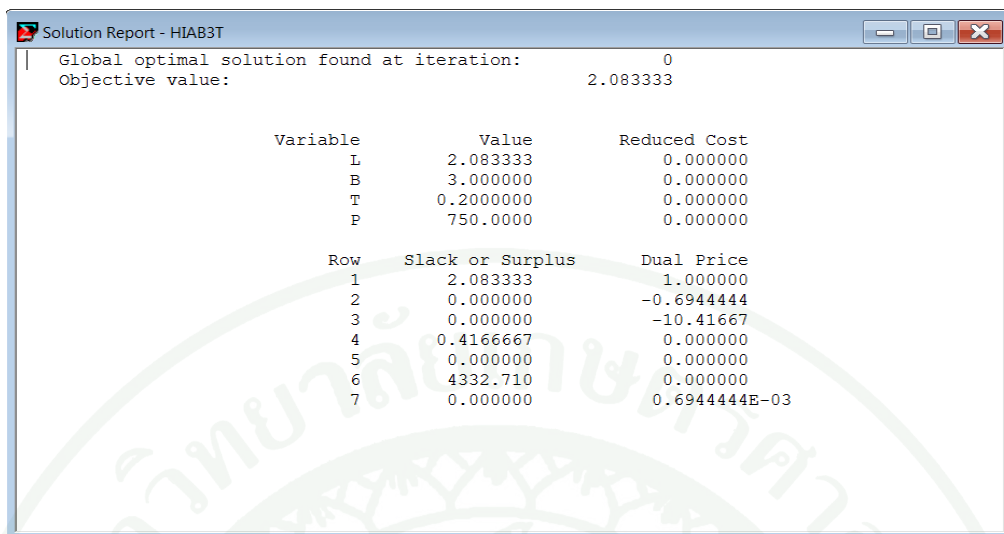
1.6 ผลของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo

1.6.1 กรณีที่เลือกถาวรทุกตึกคอนกรีตขนาด 3 ตัน

ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo ทำให้ทราบขนาดที่เหมาะสมสำหรับแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่จะใช้ในการซ่อมแซม คือ 3 ม. X 2 ม. X 0.2 ม. และมีน้ำหนักประมาณ 3 ตัน ดังแสดงในภาพที่ 114 และภาพที่ 115



ภาพที่ 114 กำหนดตัวแปรการตัดสินใจเพื่อสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Lingo



Solution Report - HIAB3T

Global optimal solution found at iteration: 0
Objective value: 2.083333

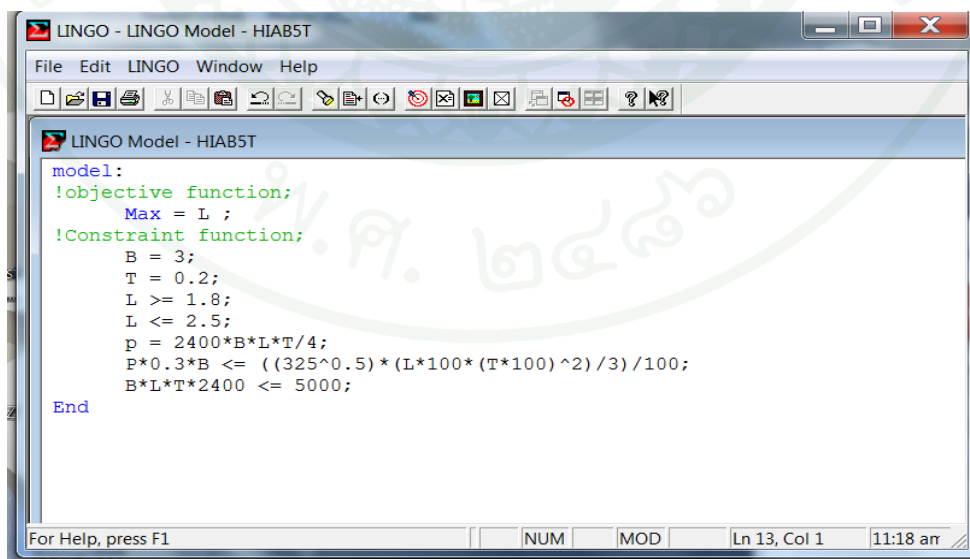
Variable	Value	Reduced Cost
L	2.083333	0.000000
B	3.000000	0.000000
T	0.200000	0.000000
P	750.0000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	2.083333	1.000000
2	0.000000	-0.6944444
3	0.000000	-10.41667
4	0.4166667	0.000000
5	0.000000	0.000000
6	4332.710	0.000000
7	0.000000	0.6944444E-03

ภาพที่ 115 ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo

1.6.2 กรณีที่เลือกถาวรทุก ติดเครนขนาด 5 ตัน

ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo ทำให้ทราบขนาดที่เหมาะสมสำหรับแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่จะใช้ในการซ่อมแซม คือ 3 ม. X 2.5 ม. X 0.2 ม. และมีน้ำหนักประมาณ 3.6 ตัน ดังภาพที่ 116 และภาพที่ 117



```

model:
!objective function;
  Max = L ;
!Constraint function;
  B = 3;
  T = 0.2;
  L >= 1.8;
  L <= 2.5;
  p = 2400*B*L*T/4;
  P*0.3*B <= ((325^0.5)*(L*100*(T*100)^2)/3)/100;
  B*L*T*2400 <= 5000;
End

```

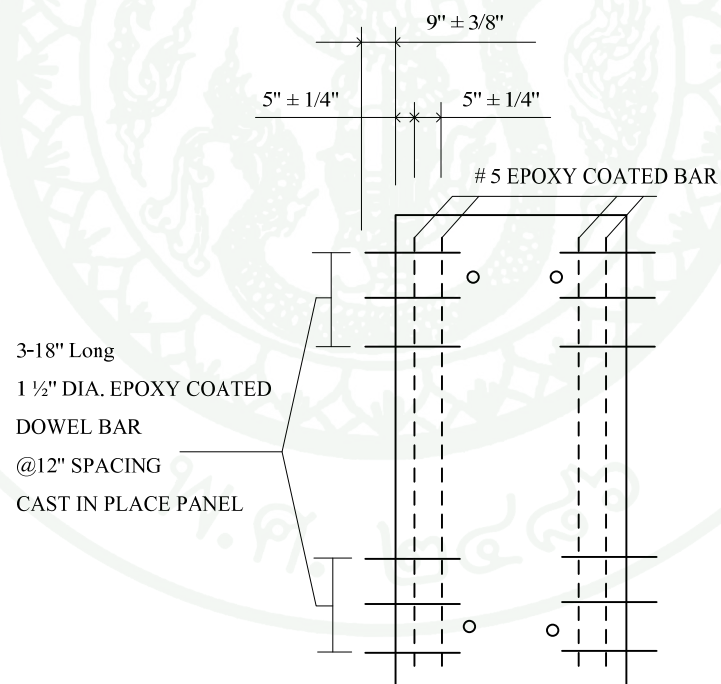
For Help, press F1

NUM MOD Ln 13, Col 1 11:18 am

ภาพที่ 116 ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo

Solution Report - HIAB5T		
Global optimal solution found at iteration: 0		
Objective value: 2.500000		
Variable	Value	Reduced Cost
L	2.500000	0.000000
B	3.000000	0.000000
T	0.200000	0.000000
P	900.0000	0.000000
Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	2.500000	1.000000
2	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000
4	0.000000	1.000000
5	0.000000	0.000000
6	5199.252	0.000000
7	1400.000	0.000000

ภาพที่ 117 ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo



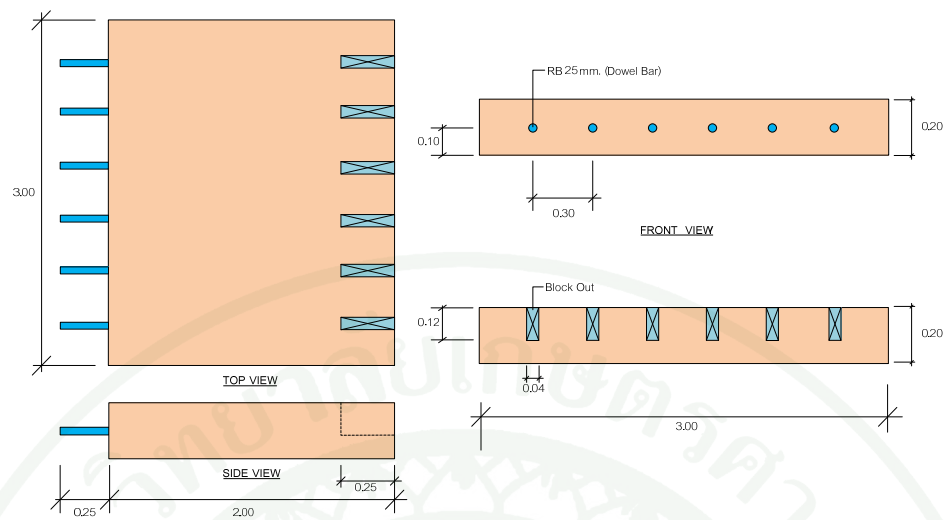
ภาพที่ 118 รูปแบบของรอยต่อสำหรับการซ่อมแซมที่มีการฝังเหล็กเดือยไว้ในแผ่นคอนกรีต

จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo จากการสร้างแบบจำลองทำให้ได้ขนาดของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่แตกต่างกัน ซึ่งหากพิจารณารูปแบบของ

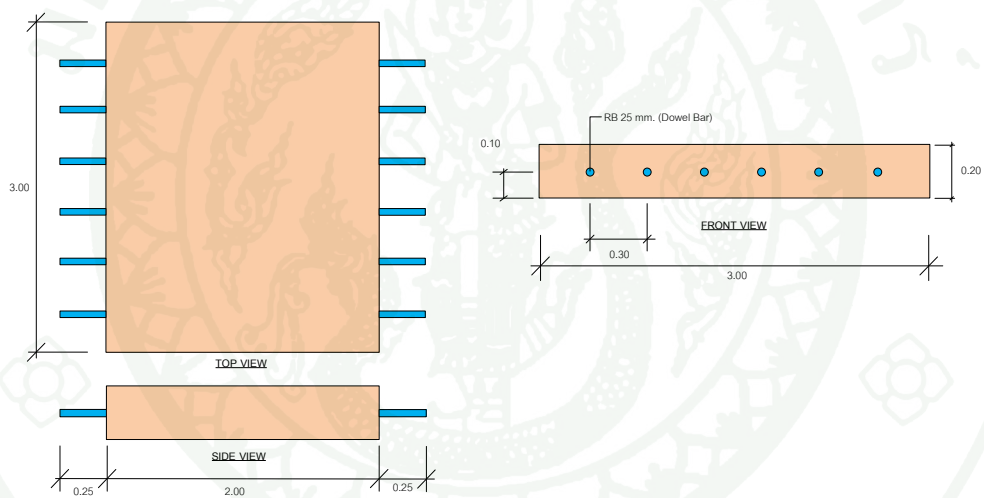
รอยต่อสำหรับการซ่อมแซมที่มีการฝังเหล็กเดือยไว้ในแผ่นคอนกรีตจะทำให้ความยาวของแผ่นคอนกรีตเพิ่มขึ้นอีก ด้านละ 25 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 118 หากพิจารณาเลือกความยาวที่ 2.5 ม. จะทำให้ความยาวรวมเป็น 3 ม. ส่งผลให้ไม่สามารถขนส่งแผ่นคอนกรีตในแนวนอนได้ แต่ก็สามารถขนส่งแผ่นคอนกรีตในแนวตั้งได้ แต่อย่างไรก็ตามในการขนส่งหากวางแผ่นคอนกรีตในแนวนอนจะสามารถขนส่งได้จำนวนที่มากกว่าการวางในแนวตั้ง ช่วยลดค่าใช้จ่ายจากการขนส่ง และการวางในแนวตั้งนั้นทำได้ยาก อาจจะส่งผลกระทบต่อแผ่นคอนกรีตทำให้แผ่นคอนกรีตเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น ขนาดที่เหมาะสมและควรเลือกใช้ คือ 3 ม. X 2 ม. X 0.2 ม. ซึ่งสามารถเลือกใช้รถบรรทุกติดเครนในการขนส่งและติดตั้งได้ทั้ง 2 ขนาด

2. การหารูปแบบรอยต่อที่เหมาะสมของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับการซ่อมแซมถนนคอนกรีต

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและความเหมาะสมของการซ่อมถนนคอนกรีตด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ AHP (Analysis Hierarchy Process) พบว่า รูปแบบที่ได้คะแนนรวมมากที่สุดจะเป็นรูปแบบที่มีความเหมาะสมในการเลือกใช้มากที่สุด คือ วิธี Cast-in-place เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด รองลงมาคือ รูปแบบที่ 3 รูปแบบที่ 6 ส่วนใหญ่รูปแบบที่พิจารณาจะมีคะแนนไม่ต่างกันมาก ดังตารางที่ 17 ทั้งนี้การคำนวณคะแนนและความสำคัญของแต่ละรูปแบบดังแสดงในภาคผนวก จ หากไม่นับรวมการซ่อมแซมแบบ Cast-in-place เพื่อที่จะได้รูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ดังนั้น จึงเลือกรูปแบบการซ่อมที่มีคะแนนความเหมาะสมรองลงมาคือ รูปแบบที่ 3 และรูปแบบที่ 6 เป็นรูปแบบที่ใช้ในการทดลองซ่อมแซมถนนคอนกรีต ดังภาพที่ 119



รูปแบบที่ 3



รูปแบบที่ 6

ภาพที่ 119 รูปแบบที่ใช้สำหรับการทดลองซ่อมถนนคอนกรีต

ตารางที่ 17 สรุปคะแนนประเมินวิธีการซ่อมแซมถนนคอนกรีตตามระบบ Hierarchy

ที่	วิธีการก่อสร้าง	เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน		เทคนิคการก่อสร้าง		งบประมาณในการซ่อมแซม		การจัดหาเครื่องจักรในการก่อสร้าง		คะแนนรวมแต่ละวิธี
		คะแนน	คะแนนถ่วงน้ำหนัก	คะแนน	คะแนนถ่วงน้ำหนัก	คะแนน	คะแนนถ่วงน้ำหนัก	คะแนน	คะแนนถ่วงน้ำหนัก	
1	Cast In place	1.32	0.58	23.05	2.56	27.52	9.22	23.59	2.62	15
2	รูปแบบที่ 1	10.15	4.49	9.25	1.03	5.60	1.88	3.47	0.39	8
3	รูปแบบที่ 3	10.15	4.49	9.25	1.03	14.46	4.85	3.47	0.39	11
4	รูปแบบที่ 5	10.15	4.49	9.25	1.03	5.60	1.88	3.47	0.39	8
5	รูปแบบที่ 6	10.15	4.49	3.48	0.39	14.46	4.85	9.85	1.10	11
6	รูปแบบที่ 7	10.15	4.49	9.25	1.03	5.60	1.88	3.47	0.39	8
7	รูปแบบที่ 8	10.15	4.49	9.25	1.03	5.60	1.88	3.47	0.39	8
8	รูปแบบที่ 9	10.15	4.49	9.25	1.03	5.60	1.88	9.85	1.10	8
9	รูปแบบที่ 10	10.15	4.49	9.25	1.03	2.15	0.72	9.85	1.10	7
10	รูปแบบที่ 11	10.15	4.49	1.78	0.20	5.60	1.88	9.85	1.10	8
11	รูปแบบที่ 12	3.68	1.63	3.48	0.39	2.25	0.75	9.85	1.10	4
12	รูปแบบที่ 13	3.68	1.63	3.48	0.39	5.60	1.88	9.85	1.10	5
										100

4. ดำเนินการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

4.1 การผลิตแผ่น Precast Concrete



ภาพที่ 122 การเตรียมแบบหล่อแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป



ภาพที่ 123 การเทคอนกรีต



ภาพที่ 124 การจี้คอนกรีตและการจัดเหล็กเดือย



ภาพที่ 125 การปาดหน้าผิวคอนกรีต



ภาพที่ 126 การถอดบล็อกเข้าที่



ภาพที่ 127 การแต่งผิวคอนกรีตภายหลังการถอดบล็อกเข้าที่



ภาพที่ 128 การชุบผิวหน้าแผ่นคอนกรีต



ภาพที่ 129 ลักษณะแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป



ภาพที่ 130 การบ่มแผ่นคอนกรีต



ภาพที่ 131 การขนส่งแผ่นคอนกรีตมาที่แปลงทดสอบ

4.2 การดำเนินงานซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

4.2.1 ติดตั้งป้ายเตือนพร้อมสัญญาณไฟกระพริบ ก่อนเริ่มทำงาน และปิดการจราจร 1 ช่องจราจร โดยเปิดไว้ใช้งาน 1 ช่องจราจร



ภาพที่ 132 ติดตั้งป้ายเตือนและปิดการจราจร

4.2.2 ทำการตัดแผ่นคอนกรีตด้วยเครื่องตัด ทำการตัดคอนกรีตโดยรอบพื้นที่ที่จะทำการซ่อมโดยใช้เครื่องตัดแผ่นพื้นคอนกรีตตามแนวรอยต่อที่กำหนดไว้ และในการตัดคอนกรีตจะต้องตัดให้ขาดตลอดความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีต รวมทั้งตัดเหล็กเดือยและเหล็กยึดให้ขาดจากกัน ก่อนจะดำเนินการรื้อแผ่นคอนกรีต เพื่อให้เป็นอิสระจากแผ่นพื้นข้างเคียง เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นพื้นข้างเคียง



ภาพที่ 133 ตัดถนนคอนกรีตเดิมด้วยเครื่องตัดคอนกรีต



ภาพที่ 134 ภายหลังการตัดถนนเดิมจนรอบ

4.2.3 ทำการตัดร่องบริเวณขอบรอยต่อตามขวาง ของจุดเริ่มต้นงานซ่อมและสิ้นสุดงานซ่อม ที่ติดกับถนนเดิม แล้วเจาะร่องให้ลึกประมาณ 10 ซม. ร่องกว้างประมาณ 5 ซม. ระยะตามแบบของ เหล็กเคียว สำหรับวางแผ่นแรก และแผ่นสุดท้ายของงานซ่อม



ภาพที่ 135 ตัดร่อง Dowel Bar Slot บนถนนเดิม

4.2.4 สกัดแผ่นคอนกรีตและร่องเหล็กเคียว แล้วรื้อเศษคอนกรีตเดิมออก ใส่รถเพื่อนำไปทิ้ง



ภาพที่ 136 รื้อถนนเดิมออกด้วยรถ Back Hoe



ภาพที่ 137 สกัดร่องเหล็กเค็ย



ภาพที่ 138 ขนเศษถนนเดิมไปทิ้ง

4.2.5 เมื่อนำเศษคอนกรีตออกหมดแล้ว จึงทำการขุดชั้นรองพื้นทางออกอีกประมาณ 10 ซม หรือให้ได้ความลึกจากผิวด้านบนของถนนเดิมประมาณ 25 ซม



ภาพที่ 139 ทำการขุดชั้นรองพื้นทางออก

4.2.6 หากชั้นรองพื้นทางเสียหาย ให้รื้อออก แล้วทำการบดอัดใหม่ โดยใช้หินคลุกบดอัดที่
 ละชั้นด้วยเครื่องตบแบบกระโดด

4.2.7 ลงทรายหยาบปรับระดับ พรมน้ำ แล้วบดด้วยเครื่องตบแบบกระโดดอีกครั้ง ใช้ระดับ
 ให้ต่ำกว่าระดับผิวจราจรประมาณ 22 ซม.แล้วปรับเกลี่ยให้เรียบ



ภาพที่ 140 บดทรายหยาบด้วยเครื่องตบแบบกระโดด

4.2.8 ตอกเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $2\frac{1}{2}$ -3 นิ้ว ยาว 30 ซม. ระยะของเข็ม
 ห่างจากขอบผิวทางเดิม 50 ซม. ตามแปลน ทำการตอกเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยูด้วยค้อนปอนด์และใช้
 แท่งไม้รองเพื่อเพิ่มการกระจายแรงของเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยูเพื่อลดการทรุดตัวที่อาจเกิดขึ้น จากนั้น
 ตอกเข็มถัดไปด้วยวิธีการเดิมจนครบตามจำนวน



ภาพที่ 141 เชื่อมเหล็กค้ำรูปตัวยู



ภาพที่ 142 ตอกเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยู

4.2.9 เมื่อตอกเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยูจนครบแล้ว ตรวจวัดระดับหัวเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยูให้ได้ระดับต่ำกว่าพื้นผิวทางเดิม 20 ซม.(ตามความหนาของแผ่นสำเสร็จรูป)



ภาพที่ 143 ตรวจวัดระดับหลังการตอกเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยู

4.2.10 ดำเนินการติดตั้งเหล็กยึดโดยทำการเจาะรูสำหรับเหล็กยึด กับแผ่นพื้นคอนกรีตเดิมที่อยู่ตรงตำแหน่งที่กำหนด ให้ฝังเหล็กยึดให้ได้ระยะและแนวระดับตามรูปแบบกำหนดด้วยเครื่องเจาะรู จากนั้นใช้เครื่องเป่าลม ทำความสะอาดรูเจาะ แล้วทำการฉีดสารซีเมนต์ฟ็อกซีเรซินสำหรับคอนกรีต ทุกๆสำหรับเหล็กยึด



ภาพที่ 144 เสียบเหล็กยึดตามระยะที่กำหนด



ภาพที่ 145 ติดตั้งเหล็กยึดให้ได้ระยะฝั่งเพียงพอ

4.2.11 เริ่มงานวางแผ่นที่ละแผ่น ตามแบบกำหนด เมื่อวางเสร็จเช็คระดับหลังแผ่นสำเร็จรูป ให้เสมอผิวทางเดิม ถ้าหากวางแล้วสูงกว่าผิวทางเดิมให้กดแผ่นคอนกรีตลงด้วยแบ็กโฮล หากวาง

แล้วระดับต่ำกว่าผิวทางเดิมให้ยกแผ่นออกแล้วตอกเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยูแซม เช็กระดับจนแผ่นสำเร็จรูปเสมอผิวทางเดิมแล้ว ทำการจัดแผ่นสำเร็จรูปให้ได้ระยะระหว่างแผ่นไม่เกิน 2 ซม.



ภาพที่ 146 ติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป



ภาพที่ 147 เช็กระยะห่างระหว่างแผ่นโดยใช้ไม้หนา 20 มม.



ภาพที่ 148 ภายหลังการติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปเรียบร้อย

4.2.12 เมื่อวางแผ่นสำเร็จรูปได้เต็มตามพื้นที่แล้ว เท Self Leveling Mortar จากช่องเปิดของ หุยก ให้วัสดุ Self Leveling Mortar ไหลจนทั่วพื้นที่ช่องว่างใต้แผ่นสำเร็จรูป โดยสังเกตจากระดับ ของ Self Leveling Mortar ด้านไหล่ทาง และรูปบริเวณหุยก จะต้องมึระดับต่ำกว่าผิวถนน 7 ซม.



ภาพที่ 149 เท Self Leveling Mortar ด้วยรางส่งคอนกรีต



ภาพที่ 150 เท Self Leveling Mortar ด้วยการตักเท



ภาพที่ 151 Self Leveling Mortar เติมเต็มช่องว่างใต้แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

4.2.13 เมื่อวัสดุ Self Leveling Mortar เซตตัว จากนั้น เริ่มปิดรอยต่อระหว่างคอนกรีตเดิมกับแผ่นสำเร็จรูป และระหว่างแผ่นสำเร็จรูปกับแผ่นสำเร็จรูปด้วยวัสดุ Non-Shrink Grout แต่งผิวให้เรียบร้อย



ภาพที่ 152 ทำความสะอาดรอยต่อด้วยเครื่องเป่าลม



ภาพที่ 153 ผสม Non-Shrink Grout ด้วยการตีผสม



ภาพที่ 154 แต่งผิวหน้าให้เรียบ

4.2.14 ทิ้งไว้ 4 ชั่วโมง จากนั้นเริ่มตัดร่องบริเวณรอยต่อด้วยเครื่องตัดคอนกรีตให้ได้ขนาดตามแบบกำหนด แล้วปิดร่องบริเวณรอยต่อด้วยวัสดุ Joint Sealer

4.2.15 เสร็จขึ้นตอนงานซ่อม เปิดการจราจรได้



ภาพที่ 155 ตัดรอยต่อด้วยเครื่องตัดคอนกรีต



ภาพที่ 156 ปัดรอยต่อด้วย Joint Sealer

จากการร่วมดำเนินการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตกับกรมทางหลวงชนบทพบว่า ปัญหาส่วนใหญ่ในการซ่อมแซม คือ การติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปให้มีระดับที่เท่ากันทุกแผ่น ซึ่งอาจทำให้เสียเวลาในการปรับระดับหัวเข็มเหล็กกรุปตัวอยู่หลายครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 157 และภาพที่ 158



ภาพที่ 157 การติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปบนเข็มเหล็กค้ำรูปตัวยู



ภาพที่ 158 การวัดระดับของเข็มเหล็กตัดรูปตัวยู

อีกทั้งการเท Self Leveling Mortar ให้เต็มพื้นที่ช่องว่างใต้แผ่นคอนกรีตให้เรีวนั้น เป็นเรื่องที่ยาก เพราะจะสามารถเทผ่านแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปได้เพียงตรงบริเวณช่องหูของแผ่น พื้นและบริเวณรอยต่อของแผ่นพื้นเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 159 ซึ่งหากมีการเท Self Leveling Mortar เป็นเวลานานจะทำให้ Self Leveling Mortar ในโม้แข็งตัวอาจจะก่อให้เกิดปัญหาตามมาได้ หลังจากดำเนินการซ่อมแซมถนนด้วยคอนกรีตสำเร็จรูปเรียบร้อยแล้วจะได้ถนนที่มีสภาพดังแสดง ในภาพที่ 160 และจากภาพที่ 161 จะสังเกตเห็นว่ายังมีรอยต่อและรอยการเกราที่ปิดรูหูยกปรากฏให้เห็น



ภาพที่ 159 การเท Self Leveling Mortar



ภาพที่ 160 สภาพถนนภายหลังการซ่อมแซม

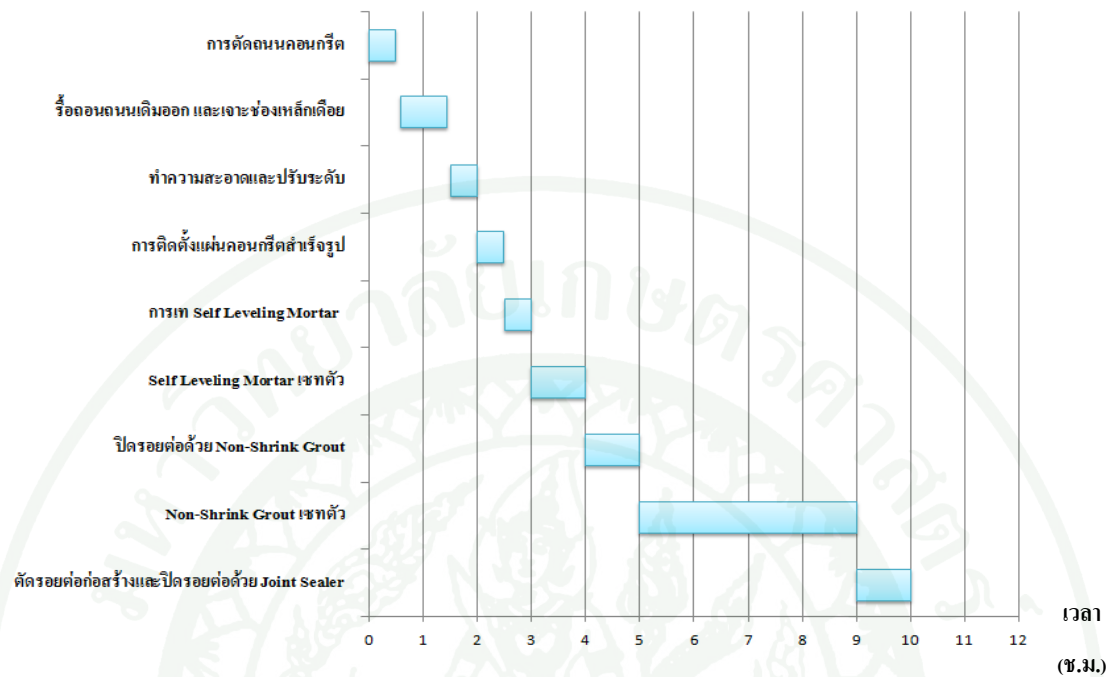


ภาพที่ 161 สภาพรอยต่อถนนภายหลังการซ่อมแซม

4.3 ระยะเวลาในการดำเนินการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

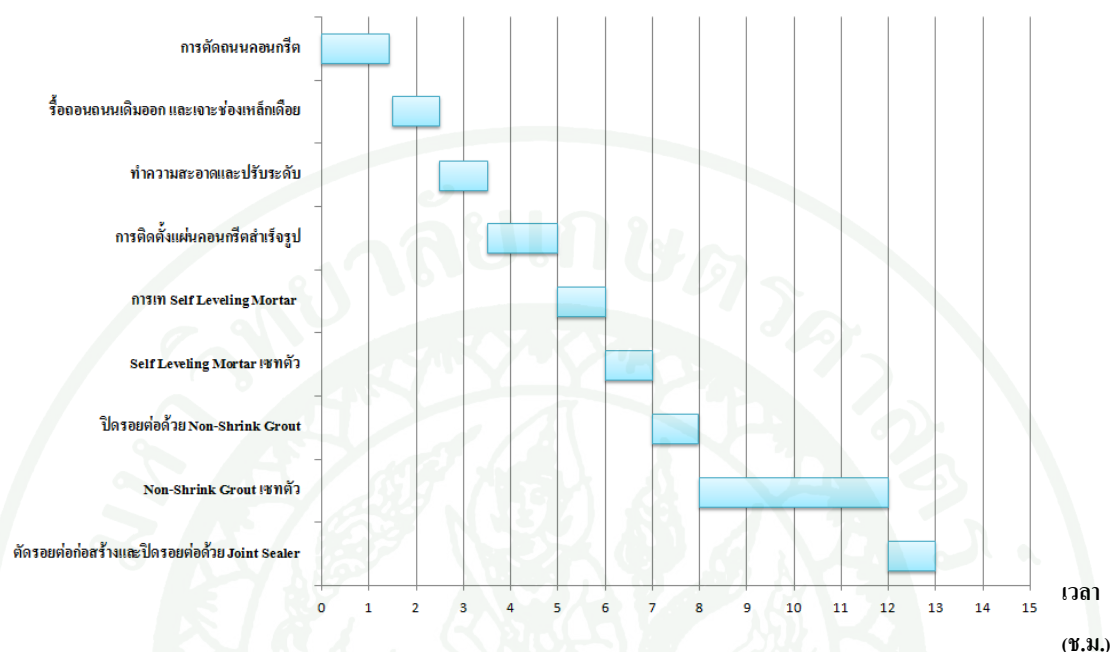
หลังจากดำเนินการซ่อมแซมถนนคอนกรีตแล้วเสร็จ สามารถสรุประยะเวลาในการดำเนินการซ่อมแซมตามขั้นตอนต่างๆ สำหรับระยะเวลาในการซ่อมแซมด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป 1 แผ่นดังแสดงในภาพที่ 162 และการซ่อมแซมด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป 5 แผ่นต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพที่ 163 ซึ่งสามารถสรุประยะเวลาในการซ่อมแซมได้ดังตารางที่ 18 หากมีการบริหารจัดการโครงการให้สามารถใช้เครื่องจักร แรงงาน ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพแล้ว จะสามารถซ่อมแซมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปได้ถึง 60 ตารางเมตรต่อวัน โดยใช้เวลาประมาณ 19 ชั่วโมง ก็สามารถเปิดเพื่อใช้งานตามปกติได้ ทั้งนี้ การคิดเวลาในการทำงานอยู่บนพื้นฐานของความพร้อมทั้งเครื่องจักร คนงาน และอุปกรณ์การก่อสร้างที่สามารถดำเนินงานได้ทันที

ขั้นตอนการซ่อมแซม



ภาพที่ 162 ระยะเวลาในการซ่อมแซมด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป 1 แผ่น

ขั้นตอนการซ่อมแซม



ภาพที่ 163 ระยะเวลาในการซ่อมแซมด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป 5 แผ่นต่อเนื่อง

ตารางที่ 18 ตารางสรุประยะเวลาในการดำเนินการซ่อมแซมถนนคอนกรีต

ลำดับ	ลักษณะการซ่อมแซมถนน	ปริมาณงาน	ระยะเวลาในการซ่อมแซม
1	การซ่อมแซมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป 1 แผ่น	6 ตร.ม.	10 ชม.
2	การซ่อมแซมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป 5 แผ่น ต่อเนื่อง	30 ตร.ม.	13 ชม.

4.4 การประมาณราคาสำหรับการซ่อมแซมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

ตารางที่ 19 การประมาณราคาในการติดตั้งซ่อมแซมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

รายการ	จำนวน	หน่วย	ค่าวัสดุ		ค่าแรงงาน		รวม
			ราคา/หน่วย (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)	ราคา/หน่วย (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)	ค่าวัสดุ + ค่าแรง (บาท)
1 ค่าแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป							
1.1 คอนกรีต	6.00	ลบ.ม.	2,680.00	16080.00	350	2100	18,180.00
1.2 เหล็กเสริม	0.3114	ตัน	23,666.67	7369.80	3,122.17	972.24	8,342.04
1.3 ลวดผูกเหล็ก	8.51	กก.	31.17	265.26	-	-	265.26
1.4 เหล็กเดือย และเหล็ก Tie Bar	0.0289	ตัน	23,666.67	683.97	3,122.17	90.23	774.20
1.5 ไม้แบบ	10.00	ตร.ม.	149.00	1490.00	141.33	1413.3	2,903.30
รวมค่าวัสดุและค่าแรงงาน			รวมราคาค่าวัสดุ	25889.02	รวมราคาค่าแรง	4575.77	30464.80
ราคา/แผ่น							6092.96
ราคาเฉลี่ย/ตร.ม.							1015.49
2 ค่าดำเนินการหน้างาน							
2.1 กำทุบหรือคอนกรีตเดิม	6.00	ลบ.ม.	-	-	1200.00	7200.00	7200.00
2.2 งานตัดคอนกรีต	26.00	ม.	-	-	300.00	7800.00	7800.00
2.3 เจาะเสียบ Epoxy	15.00	จุด	20.00	300.00	15.00	225.00	525.00
2.4 กำสกัดเจาะฝังเหล็กเดือย	20.00	จุด	-	-	80.00	1600.00	1600.00
2.5 ทราย์ปรับพื้น	1.50	ลบ.ม.	1320.00	1980.00	190.00	285.00	2265.00
2.6 วัสดุหอยดรอยต่อ	42.00	ม.	110.00	4620.00	85.00	3570.00	8190.00
2.7 วัสดุปรับระดับ Self Leveling Mortar	0.981	ลบ.ม.	8000.00	7848.00	350.00	343.35	8191.35
2.8 Non-Shink Grout รอยต่อ	13.38	ถุง	450.00	6021.00	80.00	1070.40	7091.40
รวมค่าวัสดุและค่าแรงงาน			รวมราคาค่าวัสดุ	20769.00	รวมราคาค่าแรง	22093.75	42862.75
ราคา/แผ่น							8572.55
ราคาเฉลี่ย/ตร.ม.							1428.76
3 ค่าเครื่องจักร							
							ราคา/แผ่น
3.1 ค่าเครื่องจักรติดตั้ง							2,600.00
3.2 ราคาเฉลี่ย/ตร.ม.							433.33
สรุปราคาเฉลี่ย/ตร.ม. (1+2+3)							2877.58

5. การตรวจวัดประเมินผลการศึกษาจากภาคสนามในเชิงวิศวกรรม

5.1 การตรวจสอบความเสียหายของถนนด้วยสายตา (Visual Inspection)

ถนนแปลงทดสอบเป็นสายทางที่อยู่ในจังหวัดสมุทรปราการ โดยถนนแปลงทดสอบสำหรับการซ่อมแซมถนนคอนกรีต คือ สายทาง สป.1005 ซึ่งช่วงถนนของการซ่อมแซมสายทางสรุปดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ช่วงถนนของการซ่อมแซมแปลงทดสอบถนนคอนกรีต

ที่	ช่วงถนน	ระยะทาง (ม.)	ลักษณะการซ่อมแซม
1	Sta. 0+050 – 0+060 LT	10	Precast Concrete
2	Sta. 0+060 – 0+070 LT	10	High Early Strength 72 ชม.
3	Sta. 0+070 – 0+080 LT	10	Precast Concrete
4	Sta. 0+070 – 0+080 RT	10	Precast Concrete
5	Sta. 0+100 – 0+130 LT	30	Precast Concrete
6	Sta. 0+148 – 0+150 RT	2	Precast Concrete
7	Sta. 0+894 – 0+896 RT	2	Precast Concrete
8	Sta. 0+910 – 0+950 RT	40	Precast Concrete
9	Sta. 0+950 – 0+960 RT	10	High Early Strength 24 ชม.
10	Sta. 0+960 – 0+970 RT	10	Precast Concrete

การตรวจสอบความเสียหายของถนนคอนกรีตด้วยสายตาก่อนและหลังการซ่อมแซมสายทาง สป.1005 ดังแสดงในภาพที่ 164 ถึงภาพที่ 178



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 164 Station 0+050 LT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 165 Station 0+060 LT (High Early Strength 72 ชม.)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 166 Station 0+070 LT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 167 Station 0+070 RT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 168 Station 0+100 LT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 169 Station 0+110 LT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 170 Station 0+120 LT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 171 Station 0+148 RT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 172 Station 0+894 RT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 173 Station 0+894 RT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 174 Station 0+920 RT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 175 Station 0+930 RT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 176 Station 0+940 RT (Precast Concrete)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 177 Station 0+950 RT (High Early Strength 24 ชม.)



สภาพสายทางก่อนการซ่อมแซม

สภาพสายทางหลังการซ่อมแซม

ภาพที่ 178 Station 0+960 RT (Precast Concrete)

5.2 การทดสอบความแข็งแรงของถนนด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)

การทดสอบหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายแรงบริเวณรอยต่อ (LTE) ของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปหลังจากการซ่อมแซมของถนนสาย สป.1005 ซึ่งเป็นการซ่อมถนนคอนกรีตด้วยวิธีใช้แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปและวิธีคอนกรีตแข็งตัวเร็วโดยมีการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer หลังการก่อสร้างถนนคอนกรีตเสร็จประมาณ 2 สัปดาห์มีการทดสอบเมื่อวันที่ 9 – 10 มกราคม 2555 ซึ่งทำการทดสอบโดยบุคลากรผู้เชี่ยวชาญจากกรมทางหลวงชนบทดังแสดงในภาพที่ 179 และเมื่อได้ผลทดสอบจึงนำข้อมูลผลการทดสอบมาคำนวณหา LTE ในแต่ละรอยต่อ โดยมีผลสรุปการทดสอบหาค่า LTE แสดงดังตารางที่ 20



ภาพที่ 179 การทดสอบ LTE แปลงทดสอบถนนคอนกรีตด้วยเครื่องมือ FWD กรมทางหลวงชนบท

การวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวในถนนคอนกรีตเพื่อหาประสิทธิภาพในการถ่ายแรงระหว่างรอยต่อ (Load Transfer Efficiency) สายทาง สป.1005

ตารางที่ 21 การทดสอบประสิทธิภาพรอยต่อด้วยเครื่องมือ (FWD) แปลงทดสอบสายทาง สป.1005

สป.1005		รอยต่อระหว่างคอนกรีต				ประสิทธิภาพรอยต่อแต่ละหน้าหน้ากระทำ				
ลำดับ	กม.	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	กับ	Slab No.	SLAB TYPE	40 kN	53.3 kN	71.1 kN
1	000+048	ซ้ายทาง	แผ่นคอนกรีตเดิม	-	-	1	A1	97.1%	97.0%	96.6%
2	000+050	ซ้ายทาง	1	A1	-	2	B1	95.5%	94.9%	94.5%
3	000+052	ซ้ายทาง	2	B1	-	3	B1	94.88%	94.39%	94.00%
4	000+054	ซ้ายทาง	3	B1	-	4	B1	93.08%	92.33%	91.85%
5	000+056	ซ้ายทาง	4	B1	-	5	C1	95.84%	95.88%	95.39%
6	000+058	ซ้ายทาง	5	C1	- High Early Strength 72 Hr.		RC	93.93%	93.33%	82.00%
7	000+068	ซ้ายทาง	High Early Strength 72 Hr.	RC	-	11	D	90.17%	89.78%	89.44%
8	000+070	ซ้ายทาง	11	D	-	12	D	94.57%	94.02%	93.35%
9	000+072	ซ้ายทาง	12	D	-	13	D	93.99%	93.32%	92.86%
10	000+074	ซ้ายทาง	13	D	-	14	D	93.04%	92.29%	91.91%
11	000+076	ซ้ายทาง	14	D	-	15	E	94.79%	94.09%	93.50%
12	000+078	ซ้ายทาง	15	E	-	แผ่นคอนกรีตเดิม	-	83.72%	83.64%	83.72%
13	000+098	ซ้ายทาง	แผ่นคอนกรีตเดิม	-	-	21	A1	97.88%	97.03%	96.49%
14	000+100	ซ้ายทาง	21	A1	-	22	B1	95.69%	95.08%	94.46%
15	000+102	ซ้ายทาง	22	B1	-	23	B1	92.70%	92.21%	91.69%
16	000+104	ซ้ายทาง	23	B1	-	24	B1	93.53%	92.69%	92.30%

ตารางที่ 21 (ต่อ)

สป.1005			รอยต่อระหว่างคานกรีต				ประสิทธิภาพรอยต่อแต่ละหน้าหน้ากระทำ			
ลำดับ	กม.	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	กับ	Slab No.	SLAB TYPE	40 kN	53.3 kN	71.1 kN
17	000+106	ซ้ายทาง	24	B1	-	25	B1	95.04%	94.20%	93.60%
18	000+108	ซ้ายทาง	25	B1	-	26	B1	93.39%	92.52%	91.92%
19	000+110	ซ้ายทาง	26	B1	-	27	B1	94.86%	94.25%	93.54%
20	000+112	ซ้ายทาง	27	B1	-	28	B1	93.60%	92.85%	92.54%
21	000+114	ซ้ายทาง	28	B1	-	29	B1	93.79%	93.02%	92.22%
22	000+116	ซ้ายทาง	29	B1	-	30	B1	93.85%	92.93%	92.38%
23	000+118	ซ้ายทาง	30	B1	-	31	B1	94.47%	93.39%	92.99%
24	000+120	ซ้ายทาง	31	B1	-	32	B1	94.47%	93.61%	93.19%
25	000+122	ซ้ายทาง	32	B1	-	33	B1	95.79%	95.32%	94.80%
26	000+124	ซ้ายทาง	33	B1	-	34	B1	93.59%	92.98%	92.36%
27	000+126	ซ้ายทาง	34	B1	-	35	C1	94.55%	94.06%	93.68%
28	000+128	ซ้ายทาง	35	C1	-	แผ่นคานกรีตเดิม		81.82%	81.26%	81.18%
29	000+068	ขวาทาง	แผ่นคานกรีตเดิม	-	-	16	A2	89.70%	89.20%	89.01%
30	000+070	ขวาทาง	16	A2	-	17	B2	96.71%	95.95%	95.24%
31	000+072	ขวาทาง	17	B2	-	18	B3	97.31%	97.00%	96.23%
32	000+074	ขวาทาง	18	B3	-	19	B4	98.02%	97.09%	96.69%
33	000+076	ขวาทาง	19	B4	-	20	C2	98.19%	97.33%	96.78%
34	000+078	ขวาทาง	20	C2	-	แผ่นคานกรีตเดิม		98.51%	98.07%	97.63%

ตารางที่ 21 (ต่อ)

สป.1005			รอยต่อระหว่างคอนกรีต				ประสิทธิภาพรอยต่อแต่ละน้ำหนักกระทำ			
ลำดับ	กม.	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	กับ	Slab No.	SLAB TYPE	40 kN	53.3 kN	71.1 kN
35	000+148	ขวาทาง	แผ่นคอนกรีตเดิม	-	-	35	S1	92.04%	91.57%	90.88%
36	000+150	ขวาทาง	35	S1	-	แผ่นคอนกรีตเดิม	-	102.19%	101.66%	101.06%
37	000+896	ขวาทาง	แผ่นคอนกรีตเดิม	-	-	37	S1	95.81%	94.54%	93.66%
38	000+898	ขวาทาง	37	S1	-	แผ่นคอนกรีตเดิม	-	100.68%	99.67%	98.99%
39	000+908	ขวาทาง	แผ่นคอนกรีตเดิม	-	-	38	A2	92.59%	92.05%	91.29%
40	000+910	ขวาทาง	38	A2	-	39	B2	98.44%	97.70%	96.97%
41	000+912	ขวาทาง	39	B2	-	40	B2	97.35%	97.36%	96.91%
42	000+914	ขวาทาง	40	B2	-	41	B2	101.19%	98.79%	96.97%
43	000+916	ขวาทาง	41	B2	-	42	B2	100.26%	98.48%	97.27%
44	000+918	ขวาทาง	42	B2	-	43	B2	99.00%	96.82%	95.53%
45	000+920	ขวาทาง	43	B2	-	44	B2	100.86%	98.97%	97.78%
46	000+922	ขวาทาง	44	B2	-	45	B2	100.00%	98.36%	97.56%
47	000+924	ขวาทาง	45	B2	-	46	B2	96.50%	95.41%	94.55%
48	000+926	ขวาทาง	46	B2	-	47	B2	97.60%	96.61%	95.76%
49	000+928	ขวาทาง	47	B2	-	48	B2	97.06%	96.55%	95.90%
50	000+930	ขวาทาง	48	B2	-	49	B2	96.34%	95.71%	94.96%
51	000+932	ขวาทาง	49	B2	-	50	B2	99.37%	97.30%	96.13%
52	000+934	ขวาทาง	50	B2	-	51	B2	100.63%	97.69%	96.41%

ตารางที่ 21 (ต่อ)

สป.1005			รอยต่อระหว่างคอนกรีต				ประสิทธิภาพรอยต่อแต่ละหน้าหน้ากระทำ				
ลำดับ	กม.	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	กับ	Slab No.	SLAB TYPE	40 kN	53.3 kN	71.1 kN	
53	000+936	ขวาทาง	51	B2	-	52	B2	100.20%	98.17%	96.69%	
54	000+938	ขวาทาง	52	B2	-	53	B2	99.87%	98.15%	96.69%	
55	000+940	ขวาทาง	53	B2	-	54	B2	97.21%	96.33%	95.25%	
56	000+942	ขวาทาง	54	B2	-	55	B2	100.80%	98.49%	96.74%	
57	000+944	ขวาทาง	55	B2	-	56	B2	99.70%	97.04%	95.61%	
58	000+946	ขวาทาง	56	B2	-	57	C2	99.41%	97.73%	97.15%	
59	000+948	ขวาทาง	57	C2	- High Early Strength 24 Hr.	RC	RC	101.52%	99.89%	98.93%	
60	000+958	ขวาทาง	High Early Strength 24 Hr.		RC	-	58	B2	97.54%	95.74%	94.87%
61	000+960	ขวาทาง	58	B2	-	59	B2	102.60%	100.59%	99.13%	
62	000+962	ขวาทาง	59	B2	-	60	B2	103.06%	100.47%	99.29%	
63	000+964	ขวาทาง	60	B2	-	61	B2	102.01%	100.12%	98.54%	
64	000+966	ขวาทาง	61	B2	-	62	C2	100.71%	97.79%	96.53%	
65	000+968	ขวาทาง	62	C2	-	แผ่นคอนกรีตเดิม		-	99.72%	97.62%	96.29%

5.3 การสำรวจและประเมินคุณภาพการขับขี่ของถนนโดยวัดค่าดัชนีความขรุขระสากล หรือ International Roughness Index (IRI)

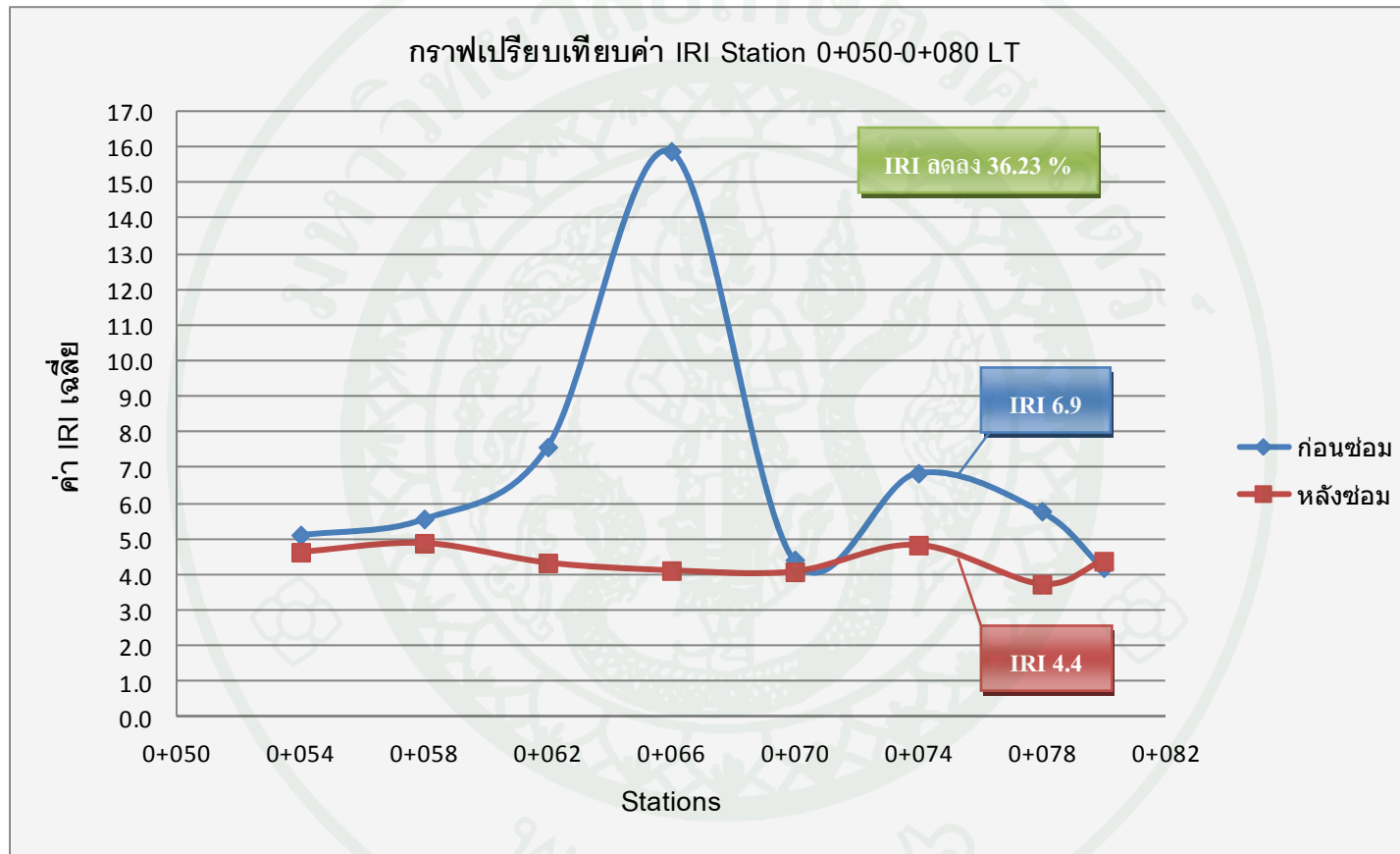
เพื่อการศึกษาประสิทธิภาพของการซ่อมแซมถนนคอนกรีตโดยใช้วิธีแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จโดยดำเนินการตรวจวัดค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI) ของถนนคอนกรีตทั้งก่อนการซ่อมแซมถนนและหลังการซ่อมแซมถนนของสายทาง สป.1005 โดยทดสอบด้วยเครื่องมือ Walking Profiler เพื่อเปรียบเทียบค่า IRI ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการซ่อมด้วยวิธีนี้ สำหรับการทดสอบหาค่า IRI ของถนนก่อนซ่อมแซมดำเนินการเมื่อวันที่ 9 ตุลาคม 2554 ดังแสดงในภาพที่ 180 และการทดสอบหาค่า IRI ของถนนหลังซ่อมแซมดำเนินการเมื่อวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2555 ดังแสดงในภาพที่ 181 ซึ่งผลการตรวจวัดสามารถสรุปเปรียบเทียบค่า IRI ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม ดังแสดงในภาพที่ 182 ถึง ภาพที่ 187 และมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 22 ถึง ตารางที่ 31



ภาพที่ 180 การตรวจวัด IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซม



ภาพที่ 181 การตรวจวัด IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซม



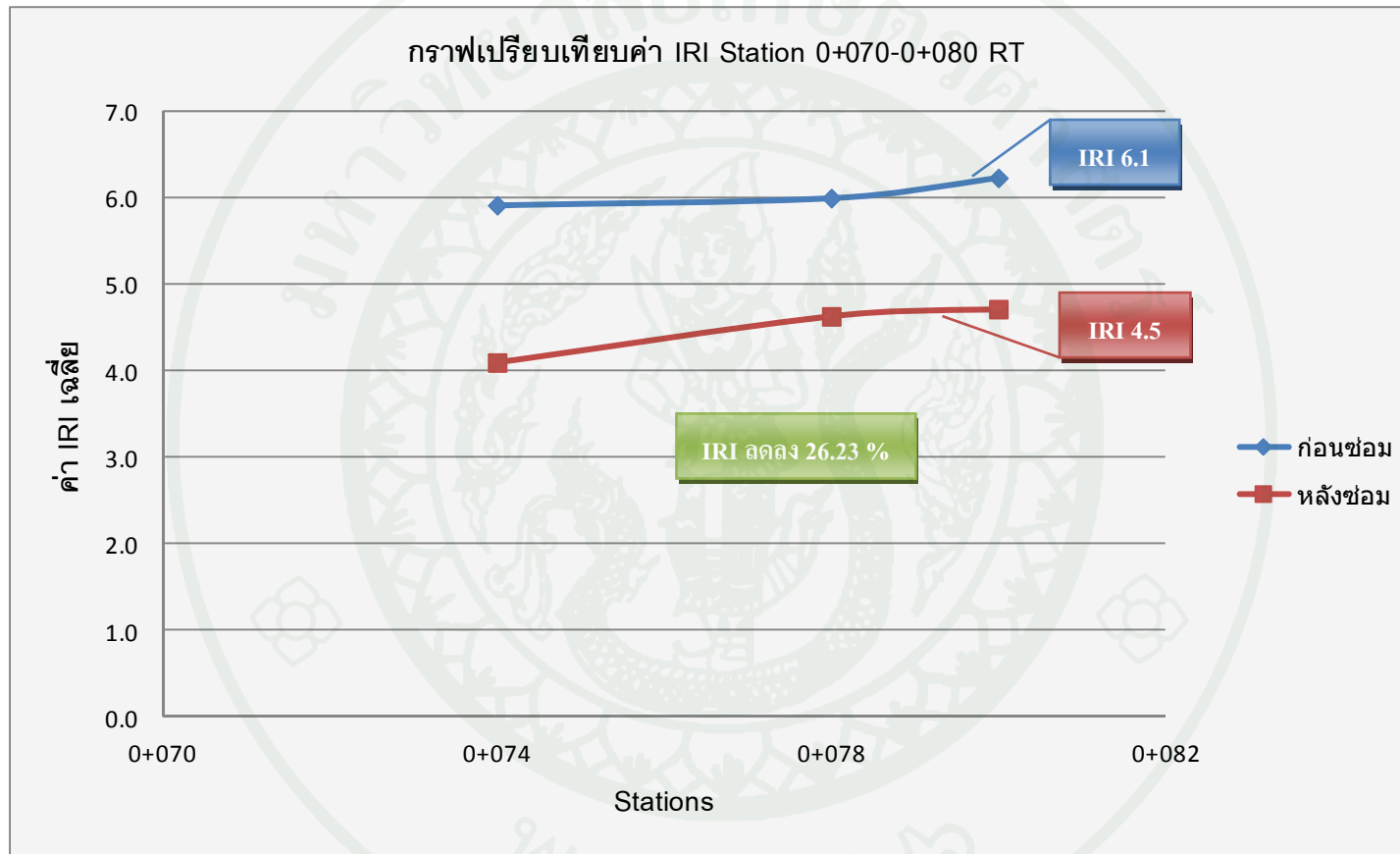
ภาพที่ 182 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม Station 0+050-0+080 LT

ตารางที่ 22 ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซมช่วง กม. 0+050 – 0+080 LT

ลำดับ	กม.	-	กม.	ระยะ (ม.)	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	ค่า IRI ร่องล้อขวา				ค่า IRI ร่องล้อซ้าย				เฉลี่ยรวม 2 แนว
								ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1	000+050	-	000+054	4.0	ซ้ายทาง	1	A1	5.2	4.7	5.2	5.0	5.1	5.1	5.4	5.2	5.1
2	000+054	-	000+058	4.0	ซ้ายทาง	2, 3	B1	5.9	6.1	6.1	6.0	5.0	4.9	5.4	5.1	5.6
3	000+058	-	000+062	4.0	ซ้ายทาง	4, 5	B1	6.4	6.5	6.2	6.4	9.0	8.5	8.9	8.8	7.6
4	000+062	-	000+066	4.0	ซ้ายทาง	-	หล่อในที่	6.8	6.5	6.7	6.7	24.6	21.5	29.2	25.1	15.9
5	000+066	-	000+070	4.0	ซ้ายทาง	-	หล่อในที่	4.8	4.5	4.5	4.6	4.1	3.3	5.3	4.2	4.4
6	000+070	-	000+074	4.0	ซ้ายทาง	11	หล่อในที่, D	5.3	5.3	5.1	5.2	8.4	8.5	8.5	8.5	6.9
7	000+074	-	000+078	4.0	ซ้ายทาง	12, 13	D	4.2	4.9	4.3	4.5	7.0	7.4	6.9	7.1	5.8
8	000+078	-	000+080	2.0	ซ้ายทาง	14, 15	D, E	4.1	4.1	4.3	4.2	4.5	4.1	4.1	4.2	4.2
ระยะทางรวม				30.0		ค่า IRI เฉลี่ย		4.9	4.8	4.9	4.9	6.3	6.2	6.6	6.4	6.9

ตารางที่ 23 ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซมช่วง กม. 0+050 – 0+080 LT

ลำดับ	กม.	-	กม.	ระยะ (ม.)	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	ค่า IRI ร่องล้อขวา				ค่า IRI ร่องล้อซ้าย				เฉลี่ยรวม 2 แนว
								ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1	000+050	-	000+054	4.0	ซ้ายทาง	1	A1	4.9	4.6	4.4	4.6	4.5	4.8	4.6	4.6	4.6
2	000+054	-	000+058	4.0	ซ้ายทาง	2, 3	B1	3.6	4.3	4.1	4.0	6.8	5.1	5.4	5.8	4.9
3	000+058	-	000+062	4.0	ซ้ายทาง	4, 5	B1	4.0	4.4	4.3	4.2	4.7	4.4	4.2	4.4	4.3
4	000+062	-	000+066	4.0	ซ้ายทาง	-	หล่อในที่	3.9	3.4	4.0	3.8	5.0	4.2	4.2	4.5	4.1
5	000+066	-	000+070	4.0	ซ้ายทาง	-	หล่อในที่	4.7	3.7	3.6	4.0	4.0	4.2	4.3	4.2	4.1
6	000+070	-	000+074	4.0	ซ้ายทาง	11	หล่อในที่, D	4.5	4.9	5.1	4.8	4.7	5.1	4.7	4.8	4.8
7	000+074	-	000+078	4.0	ซ้ายทาง	12, 13	D	3.5	3.7	3.3	3.5	4.1	3.8	4.0	4.0	3.7
8	000+078	-	000+080	2.0	ซ้ายทาง	14, 15	D, E	3.8	5.0	4.1	4.3	4.1	4.5	4.8	4.5	4.4
ระยะทางรวม				30.0		ค่า IRI เฉลี่ย		4.1	4.3	4.1	4.2	4.7	4.5	4.5	4.6	4.4



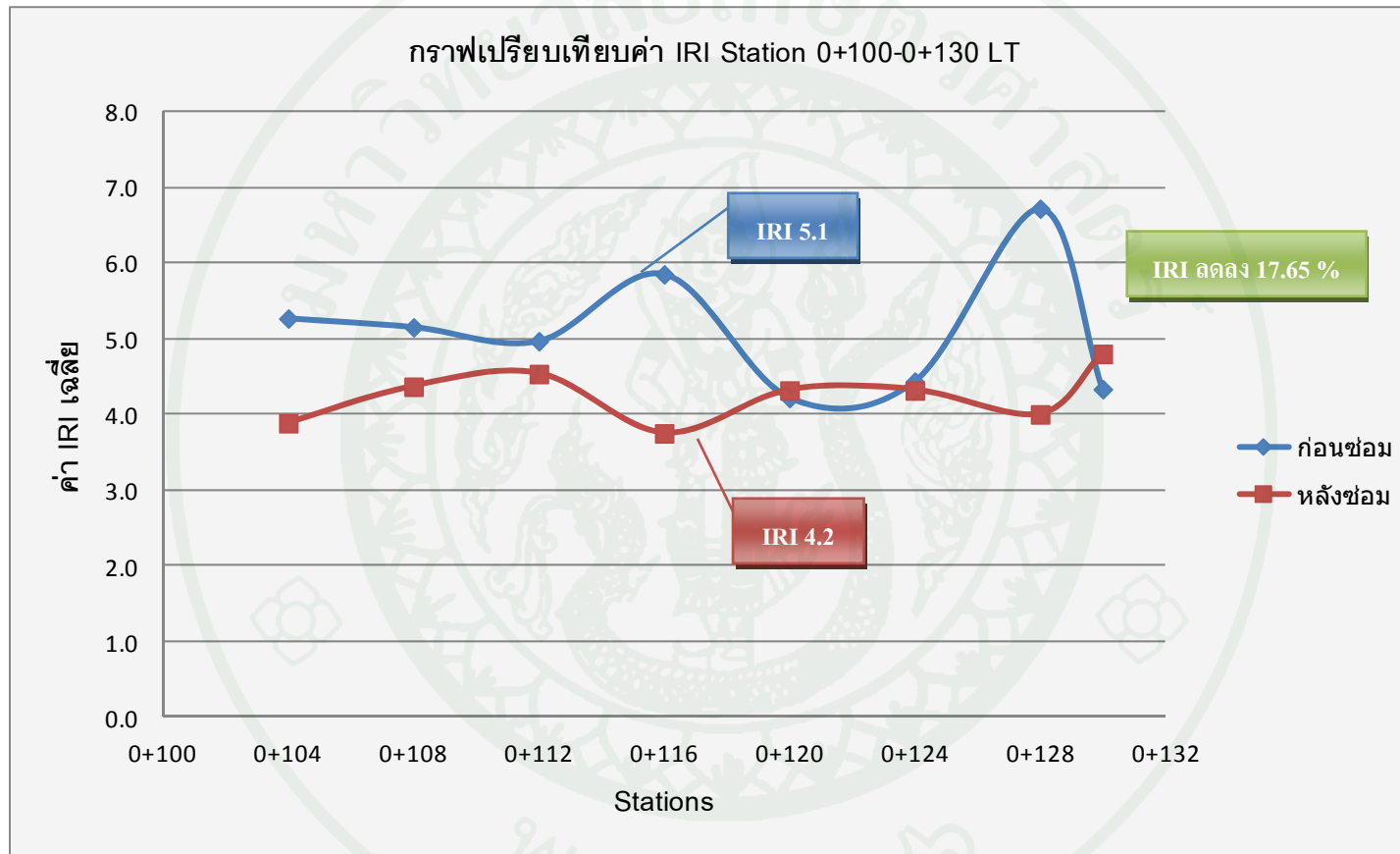
ภาพที่ 183 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม Station 0+070-0+080 RT

ตารางที่ 24 ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซมช่วง กม. 0+070 – 0+080 RT

ลำดับ	กม.	-	กม.	ระยะ (ม.)	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	ค่า IRI ร่องล้อขวา				ค่า IRI ร่องล้อซ้าย				เฉลี่ยรวม 2 แนว
								ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1	000+070	-	000+074	4.0	ขวาทาง	16, 17	A2, B2	7.3	7.7	8.3	7.8	4.2	4.1	3.9	4.1	5.9
2	000+074	-	000+078	4.0	ขวาทาง	18, 19	B2	5.9	5.7	4.7	5.4	7.1	6.3	6.3	6.6	6.0
3	000+078	-	000+080	2.0	ขวาทาง	20	C2	8.0	8.3	7.6	8.0	3.6	5.3	4.6	4.5	6.2
ระยะทางรวม				10.0		ค่า IRI เฉลี่ย		5.8	6.0	5.8	5.9	5.1	5.1	4.7	5.0	6.1

ตารางที่ 25 ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซมช่วง กม. 0+070 – 0+080 RT

ลำดับ	กม.	-	กม.	ระยะ (ม.)	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	ค่า IRI ร่องล้อขวา				ค่า IRI ร่องล้อซ้าย				เฉลี่ยรวม 2 แนว
								ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1	000+070	-	000+074	4.0	ขวาทาง	16, 17	A2, B2	3.7	3.7	4.0	3.8	4.7	4.4	4.1	4.4	4.1
2	000+074	-	000+078	4.0	ขวาทาง	18, 19	B2	4.5	4.6	4.8	4.6	4.8	4.5	4.6	4.6	4.6
3	000+078	-	000+080	2.0	ขวาทาง	20	C2	4.4	4.6	5.0	4.7	4.4	4.8	5.1	4.8	4.7
ระยะทางรวม				10.0		ค่า IRI เฉลี่ย		4.2	4.3	4.6	4.4	4.6	4.6	4.6	4.6	4.5



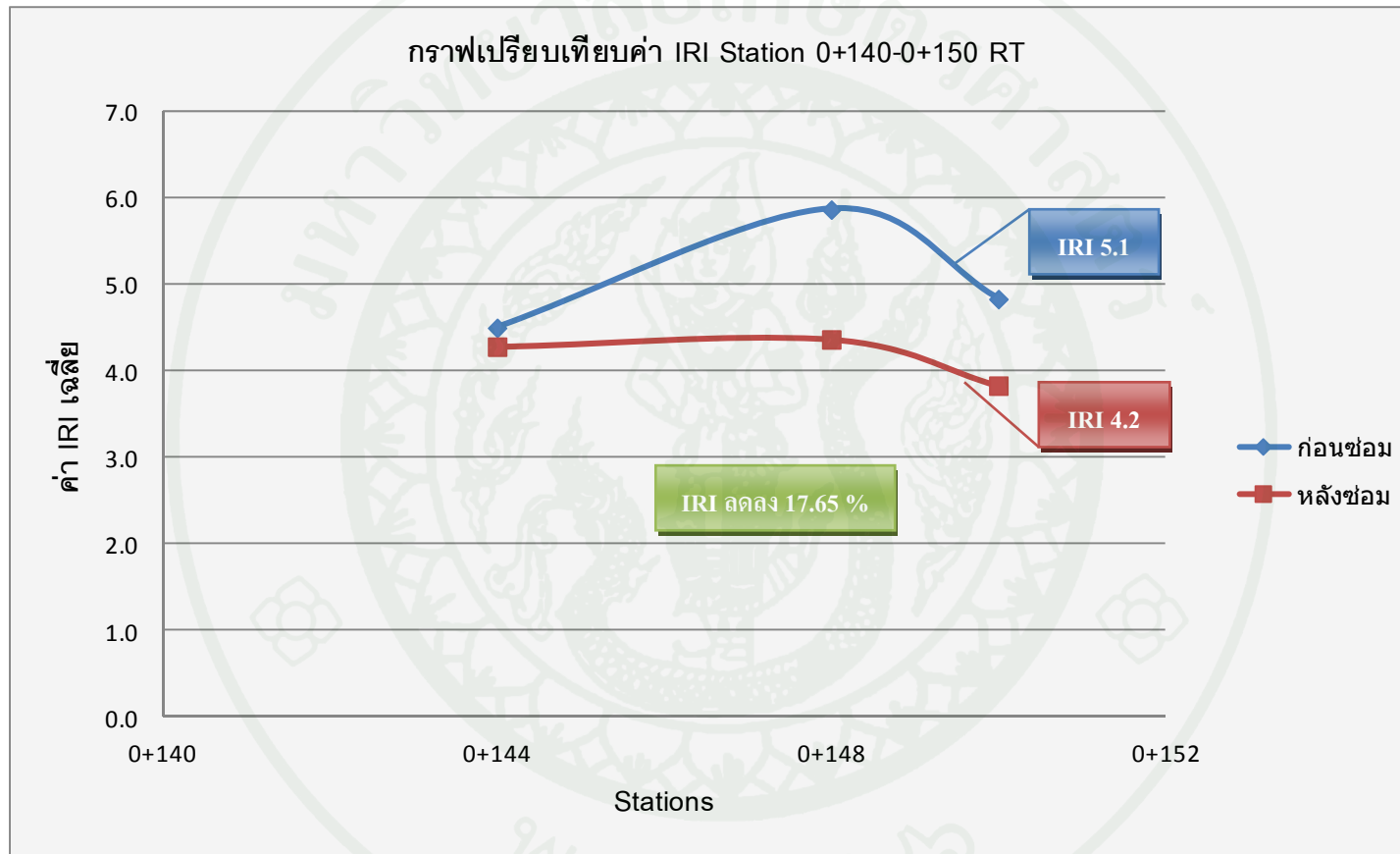
ภาพที่ 184 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม Station 0+100-0+130 LT

ตารางที่ 26 ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซมช่วง กม. 0+100 – 0+130 LT

ลำดับ	กม.	-	กม.	ระยะ (ม.)	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	ค่า IRI ร่องล้อขวา				ค่า IRI ร่องล้อซ้าย				เฉลี่ยรวม 2 แนว
								ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1	000+100	-	000+104	4.0	ซ้ายทาง	21, 22	A1, B1	5.4	5.0	5.0	5.1	5.5	5.0	5.7	5.4	5.3
2	000+104	-	000+108	4.0	ซ้ายทาง	23, 24	B1	5.1	4.8	5.3	5.1	5.2	4.9	5.6	5.2	5.2
3	000+108	-	000+112	4.0	ซ้ายทาง	25, 26	B1	4.9	4.6	5.2	4.9	4.8	5.0	5.3	5.0	5.0
4	000+112	-	000+116	4.0	ซ้ายทาง	27, 28	B1	5.4	5.5	5.5	5.5	6.0	6.4	6.3	6.2	5.9
5	000+116	-	000+120	4.0	ซ้ายทาง	29, 30	B1	4.8	3.9	4.5	4.4	4.1	4.1	3.9	4.0	4.2
6	000+120	-	000+124	4.0	ซ้ายทาง	31, 32	B1	5.8	5.4	5.6	5.6	3.0	3.4	3.4	3.3	4.4
7	000+124	-	000+128	4.0	ซ้ายทาง	33, 34	B1	7.6	7.6	8.0	7.7	5.7	6.0	5.4	5.7	6.7
8	000+128	-	000+130	2.0	ซ้ายทาง	35	C1	3.3	3.2	3.2	3.2	5.6	5.3	5.4	5.4	4.3
ระยะทางรวม				30.0		ค่า IRI เฉลี่ย		4.9	4.8	4.9	4.9	6.3	6.2	6.6	6.4	5.1

ตารางที่ 27 ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซมช่วง กม. 0+100 – 0+130 LT

ลำดับ	กม.	-	กม.	ระยะ (ม.)	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	ค่า IRI ร่องล้อขวา				ค่า IRI ร่องล้อซ้าย				เฉลี่ยรวม 2 แนว
								ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1	000+100	-	000+104	4.0	ซ้ายทาง	21, 22	A1, B1	3.9	3.8	4.0	3.9	3.9	3.7	4.0	3.9	3.9
2	000+104	-	000+108	4.0	ซ้ายทาง	23, 24	B1	4.2	4.5	4.8	4.5	4.0	4.4	4.3	4.2	4.4
3	000+108	-	000+112	4.0	ซ้ายทาง	25, 26	B1	5.0	5.1	4.9	5.0	4.2	3.8	4.2	4.1	4.5
4	000+112	-	000+116	4.0	ซ้ายทาง	27, 28	B1	3.7	3.2	3.5	3.5	4.0	4.2	3.9	4.0	3.8
5	000+116	-	000+120	4.0	ซ้ายทาง	29, 30	B1	4.6	4.9	4.3	4.6	3.8	4.3	4.0	4.0	4.3
6	000+120	-	000+124	4.0	ซ้ายทาง	31, 32	B1	4.3	4.7	4.4	4.5	4.2	4.3	4.0	4.2	4.3
7	000+124	-	000+128	4.0	ซ้ายทาง	33, 34	B1	3.7	4.0	3.6	3.8	4.0	4.3	4.4	4.2	4.0
8	000+128	-	000+130	2.0	ซ้ายทาง	35	C1	5.2	5.3	6.1	5.5	3.6	3.7	4.9	4.1	4.8
ระยะทางรวม				30.0		ค่า IRI เฉลี่ย		4.3	4.4	4.5	4.4	4.0	4.1	4.2	4.1	4.2



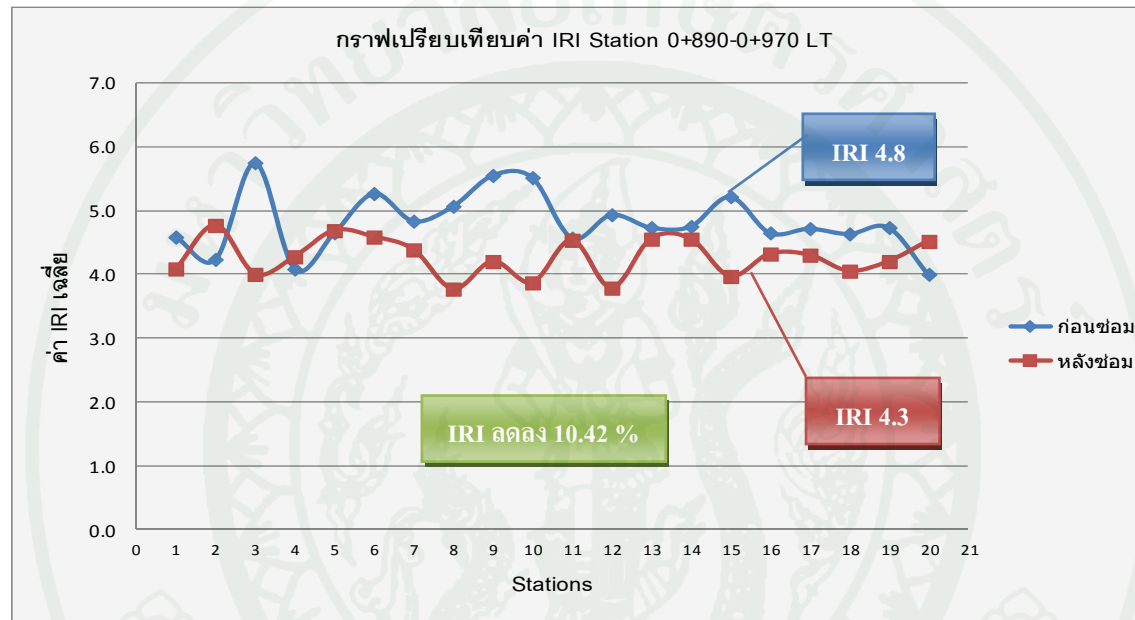
ภาพที่ 185 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม Station 0+140-0+150 RT

ตารางที่ 28 ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซมช่วง กม. 0+140 – 0+150 RT

ลำดับ	กม.	-	กม.	ระยะ (ม.)	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	ค่า IRI ร่องล้อขวา				ค่า IRI ร่องล้อซ้าย				เฉลี่ยรวม 2 แนว
								ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1	000+140	-	000+144	4.0	ขวาทาง	-	-	4.5	4.5	4.2	4.4	4.6	4.7	4.5	4.6	4.5
2	000+144	-	000+148	4.0	ขวาทาง	-	-	6.0	6.1	6.0	6.0	5.5	5.5	6.1	5.7	5.9
3	000+148	-	000+150	2.0	ขวาทาง	S1	36	4.1	4.4	4.2	4.2	5.2	5.4	5.7	5.4	4.8
ระยะทางรวม				10.0		ค่า IRI เฉลี่ย		4.6	4.7	4.5	4.6	4.5	4.4	4.6	4.5	5.1

ตารางที่ 29 ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซมช่วง กม. 0+140 – 0+150 RT

ลำดับ	กม.	-	กม.	ระยะ (ม.)	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	ค่า IRI ร่องล้อขวา				ค่า IRI ร่องล้อซ้าย				เฉลี่ยรวม 2 แนว
								ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1	000+140	-	000+144	4.0	ขวาทาง	-	-	4.6	3.8	4.4	4.3	4.1	4.2	4.6	4.3	4.3
2	000+144	-	000+148	4.0	ขวาทาง	-	-	4.0	4.6	4.7	4.4	4.3	4.3	4.3	4.3	4.4
3	000+148	-	000+150	2.0	ขวาทาง	36	S1	3.8	3.6	4.0	3.8	3.7	3.7	4.2	3.9	3.8
ระยะทางรวม				10.0		ค่า IRI เฉลี่ย		4.1	4.0	4.4	4.2	4.0	4.1	4.4	4.2	4.2



ภาพที่ 186 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม Station 0+890-0+970 LT

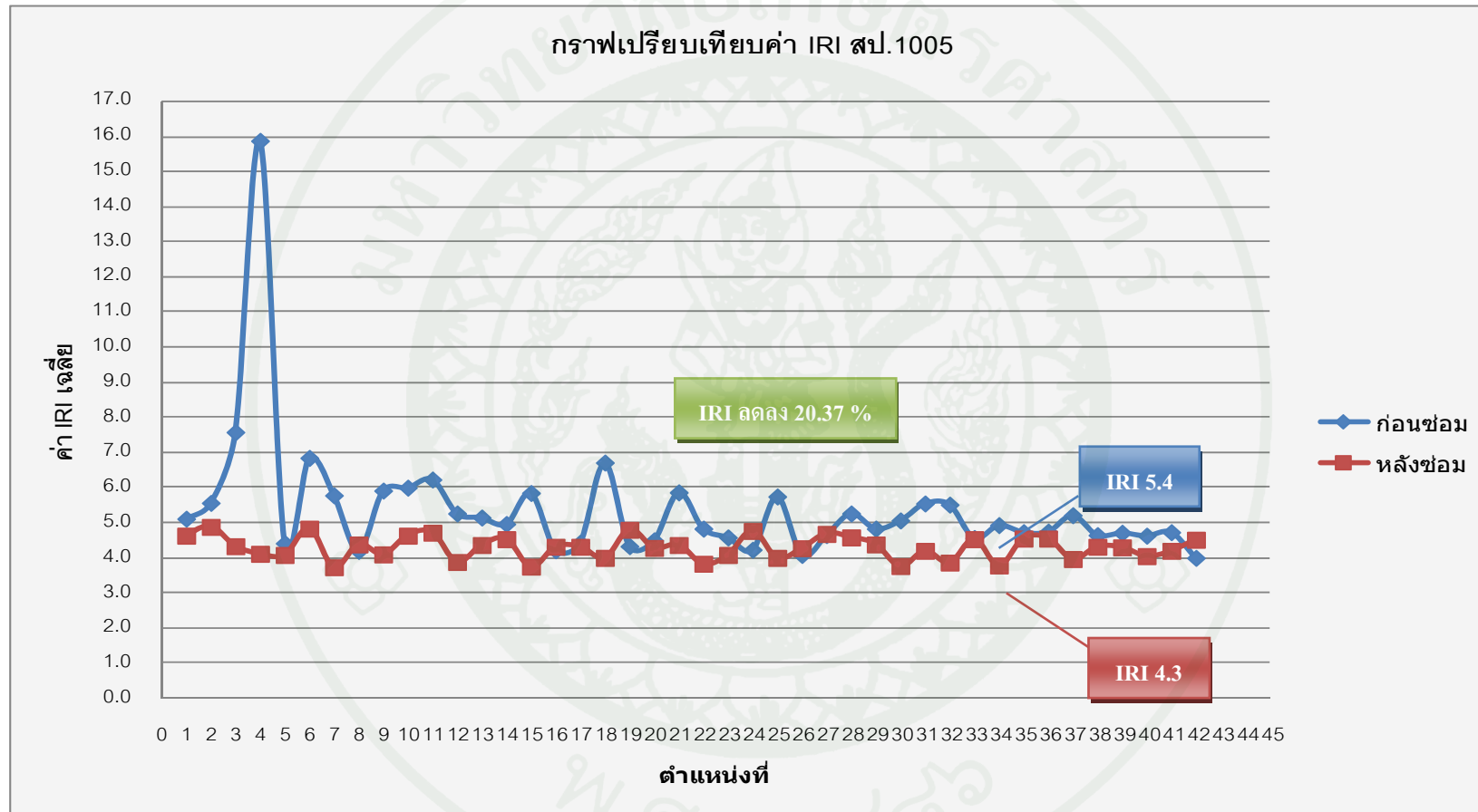
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Stations	0+894	0+898	0+902	0+906	0+910	0+914	0+918	0+922	0+926	0+930	0+934	0+938	0+942	0+946	0+950	0+954	0+958	0+962	0+966	0+970
Line	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT

ตารางที่ 30 ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตก่อนการซ่อมแซมช่วง กม. 0+890 – 0+970 RT

ลำดับ	กม.	-	กม.	ระยะ (ม.)	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	ค่า IRI ร่องล้อขวา				ค่า IRI ร่องล้อซ้าย				เฉลี่ยรวม 2 แนว
								ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1	000+890	-	000+894	4.0	ขวาทาง	-	-	4.9	4.3	4.6	4.6	4.7	4.4	4.6	4.6	4.6
2	000+894	-	000+898	4.0	ขวาทาง	37	S1	4.1	4.2	4.0	4.1	4.2	4.3	4.6	4.4	4.2
3	000+898	-	000+902	4.0	ขวาทาง	-	-	4.4	4.8	5.1	4.8	6.6	6.8	6.8	6.7	5.8
4	000+902	-	000+906	4.0	ขวาทาง	-	-	4.0	3.8	4.2	4.0	4.9	3.8	3.8	4.2	4.1
5	000+906	-	000+910	4.0	ขวาทาง	-	-	4.0	4.3	4.3	4.2	4.8	5.3	5.2	5.1	4.7
6	000+910	-	000+914	4.0	ขวาทาง	38, 39	A2, B2	5.9	5.5	6.0	5.8	4.8	4.8	4.6	4.7	5.3
7	000+914	-	000+918	4.0	ขวาทาง	40, 41	B2	4.4	4.9	4.8	4.7	4.9	5.2	4.8	5.0	4.8
8	000+918	-	000+922	4.0	ขวาทาง	42, 43	B2	4.9	5.2	5.0	5.0	5.4	5.0	4.9	5.1	5.1
9	000+922	-	000+926	4.0	ขวาทาง	44, 45	B2	5.3	5.8	5.5	5.5	5.2	5.9	5.6	5.6	5.6
10	000+926	-	000+930	4.0	ขวาทาง	46, 47	B2	5.5	5.6	5.8	5.6	5.1	5.8	5.3	5.4	5.5
11	000+930	-	000+934	4.0	ขวาทาง	48, 49	B2	3.7	4.0	4.5	4.1	4.8	5.1	5.3	5.1	4.6
12	000+934	-	000+938	4.0	ขวาทาง	50, 51	B2	5.0	5.1	4.8	5.0	4.5	5.1	5.1	4.9	4.9
13	000+938	-	000+942	4.0	ขวาทาง	52, 53	B2	5.3	4.4	6.3	5.3	4.0	4.4	4.0	4.1	4.7
14	000+942	-	000+946	4.0	ขวาทาง	54, 55	B2	4.4	4.8	4.8	4.7	4.9	4.7	4.9	4.8	4.8
15	000+946	-	000+950	4.0	ขวาทาง	56, 57	B2, C2	5.1	4.9	5.2	5.1	5.1	5.6	5.4	5.4	5.2
16	000+950	-	000+954	4.0	ขวาทาง	-	หล่อในที่	3.7	3.3	3.9	3.6	4.7	6.3	6.0	5.7	4.7
17	000+954	-	000+958	4.0	ขวาทาง	-	หล่อในที่	4.6	4.3	4.8	4.6	5.1	4.8	4.7	4.9	4.7
18	000+958	-	000+962	4.0	ขวาทาง	58	หล่อในที่, B2	4.8	4.4	4.7	4.6	4.9	4.5	4.5	4.6	4.6
19	000+962	-	000+966	4.0	ขวาทาง	59, 60	B2	4.6	4.9	5.2	4.9	4.3	4.8	4.6	4.6	4.7
20	000+966	-	000+970	4.0	ขวาทาง	61, 62	B2, C2	4.1	3.6	3.4	3.7	4.4	4.4	4.1	4.3	4.0
ระยะทางรวม				80.0		ค่า IRI เฉลี่ย		3.6	3.6	3.8	3.7	3.9	4.0	3.9	3.9	4.8

ตารางที่ 31 ผลการตรวจวัดค่า IRI แปลงทดสอบถนนคอนกรีตหลังการซ่อมแซมช่วง กม. 0+890 – 0+970 RT

ลำดับ	กม.	-	กม.	ระยะ (ม.)	ด้าน	Slab No.	SLAB TYPE	ค่า IRI ร่องล้อขวา				ค่า IRI ร่องล้อซ้าย				เฉลี่ยรวม 2 แนว
								ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1	000+890	-	000+894	4.0	ขวาทาง	-	-	3.9	4.1	3.8	3.9	4.3	4.2	4.2	4.2	4.1
2	000+894	-	000+898	4.0	ขวาทาง	37	S1	5.0	4.8	4.6	4.8	4.8	4.7	4.7	4.7	4.8
3	000+898	-	000+902	4.0	ขวาทาง	37	S1	3.2	3.9	3.9	3.7	2.4	5.4	5.2	4.3	4.0
4	000+902	-	000+906	4.0	ขวาทาง	-	-	4.0	4.2	4.1	4.2	4.6	4.2	4.4	4.4	4.3
5	000+906	-	000+910	4.0	ขวาทาง	-	-	4.6	4.3	4.7	4.5	4.5	4.9	5.1	4.8	4.7
6	000+910	-	000+914	4.0	ขวาทาง	38, 39	A2, B2	5.1	4.8	5.2	5.0	4.4	3.9	4.1	4.1	4.6
7	000+914	-	000+918	4.0	ขวาทาง	40, 41	B2	4.2	4.8	4.6	4.5	4.3	4.0	4.4	4.2	4.4
8	000+918	-	000+922	4.0	ขวาทาง	42, 43	B2	3.3	3.3	3.1	3.2	2.6	5.1	5.2	4.3	3.8
9	000+922	-	000+926	4.0	ขวาทาง	44, 45	B2	3.8	3.9	4.2	4.0	4.2	4.7	4.4	4.4	4.2
10	000+926	-	000+930	4.0	ขวาทาง	46, 47	B2	3.2	3.4	3.8	3.5	4.2	4.5	4.1	4.3	3.9
11	000+930	-	000+934	4.0	ขวาทาง	48, 49	B2	4.9	4.7	4.3	4.6	4.6	4.2	4.5	4.4	4.5
12	000+934	-	000+938	4.0	ขวาทาง	50, 51	B2	3.7	3.8	3.1	3.5	4.3	3.4	4.4	4.0	3.8
13	000+938	-	000+942	4.0	ขวาทาง	52, 53	B2	4.5	4.3	4.3	4.4	4.8	4.6	4.8	4.7	4.6
14	000+942	-	000+946	4.0	ขวาทาง	54, 55	B2	5.5	5.2	5.3	5.3	5.4	3.0	2.9	3.8	4.6
15	000+946	-	000+950	4.0	ขวาทาง	56, 57	B2, C2	4.0	4.0	3.7	3.9	3.7	4.2	4.2	4.0	4.0
16	000+950	-	000+954	4.0	ขวาทาง	-	หล่อในที่	3.9	4.2	4.3	4.1	4.5	4.2	4.8	4.5	4.3
17	000+954	-	000+958	4.0	ขวาทาง	-	หล่อในที่	4.1	4.7	4.0	4.3	4.0	4.6	4.4	4.3	4.3
18	000+958	-	000+962	4.0	ขวาทาง	58	หล่อในที่, B2	3.9	3.9	4.1	4.0	4.2	4.1	4.1	4.1	4.1
19	000+962	-	000+966	4.0	ขวาทาง	59, 60	B2	4.6	4.0	4.5	4.4	4.2	3.9	4	4.0	4.2
20	000+966	-	000+970	4.0	ขวาทาง	61, 62	B2, C2	4.0	5.0	4.3	4.4	4.3	4.7	4.8	4.6	4.5
ระยะทางรวม				80.0		ค่า IRI เฉลี่ย		4.2	4.3	3.3	3.9	4.2	4.3	4.4	4.3	4.3



ภาพที่ 187 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI ก่อนการซ่อมแซมกับค่า IRI หลังการซ่อมแซม สป.1005

เมื่อ

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Stations	0+054	0+058	0+062	0+066	0+070	0+074	0+078	0+080	0+074	0+078	0+080	0+104	0+108	0+112	0+116	0+120	0+124	0+128	0+130	0+144	0+148
Line	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	RT	RT	RT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	RT	RT

No.	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Stations	0+150	0+894	0+898	0+902	0+906	0+910	0+914	0+918	0+922	0+926	0+930	0+934	0+938	0+942	0+946	0+950	0+954	0+958	0+962	0+966	0+970
Line	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT	RT

6. การประเมินผลวิธีการซ่อมแซมในเชิงเศรษฐศาสตร์

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาเพื่อลดระยะเวลาในการซ่อมแซมถนนให้สามารถเปิดใช้งานได้เร็วที่สุดและสอดคล้องกับงานด้านวิศวกรรมของประเทศ หากมองโครงการในมุมของเศรษฐศาสตร์ สิ่งที่เราจะได้รับหรือผลกำไรจากการซ่อมแซมถนน คือ พื้นที่ที่ทำการซ่อมแซม และสิ่งที่เราต้องลงทุนหรือเสียไป คือ เวลาและเงิน ดังนั้นหากเราสามารถลดระยะเวลาในการซ่อมแซมลงได้ ก็จะทำให้เราได้รับผลกำไรที่มากขึ้นด้วย

จากการดำเนินการศึกษาซ่อมแซมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปและคอนกรีตแข็งตัวเร็ว สามารถสรุประยะเวลาในการซ่อมแซมและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมดังตารางที่ 32 และเมื่อนำพื้นที่ที่ได้จากการซ่อมแซมมาเปรียบเทียบกับระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเพื่อหาความสัมพันธ์และวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการซ่อมแซมแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 188 ถึง ภาพที่ 189

ตารางที่ 32 สรุประยะเวลาในการซ่อมแซมและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการซ่อมแซม

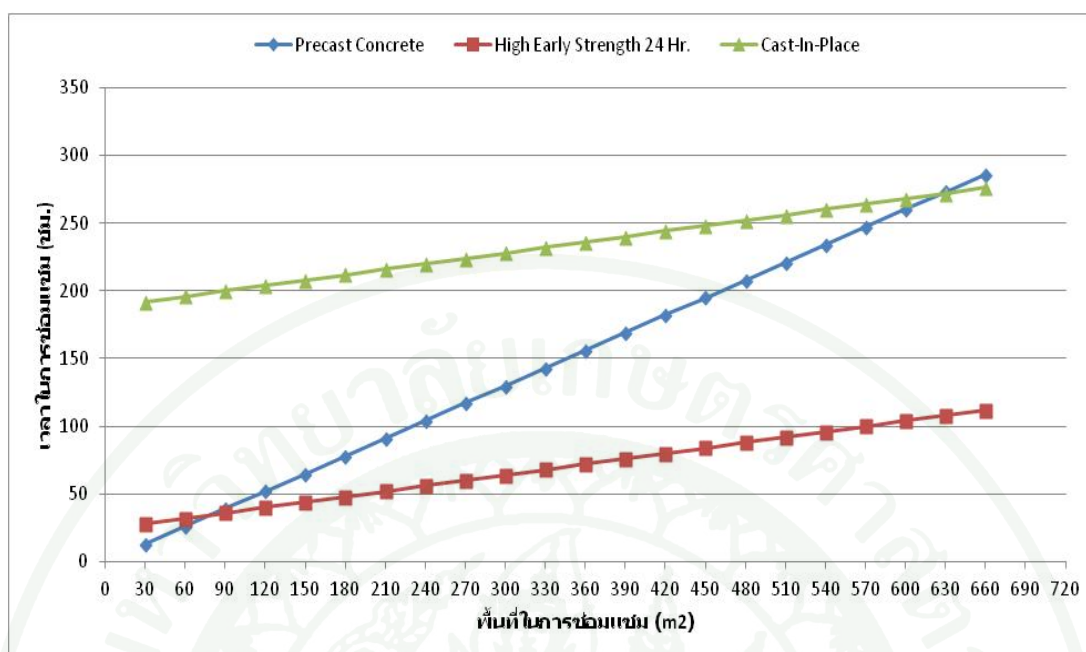
ที่	การ ซ่อมแซม	เวลาในการ ซ่อมแซม (ชม.)	พื้นที่การ ซ่อมแซม (ตร.ม.)	ระยะทาง (ม.)	ค่าใช้จ่าย/ตร.ม. (บาท/ตร.ม.)	ค่าใช้จ่ายใน การซ่อมแซม (บาท)
		0	0	0		0
		13	30	10		86,310
		26	60	20		172,620
		39	90	30		258,930
		52	120	40		345,240
1	Precast Concrete	65	150	50	2,877	431,550
		78	180	60		517,860
		91	210	70		604,170
		104	240	80		690,480
		117	270	90		776,790
		130	300	100		863,100

ตารางที่ 32 (ต่อ)

ที่	การ ซ่อมแซม	เวลาในการ ซ่อมแซม (ชม.)	พื้นที่การ ซ่อมแซม (ตร.ม.)	ระยะทาง (ม.)	ค่าใช้จ่าย/ตร.ม. (บาท/ตร.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการ ซ่อมแซม (บาท)
		0	0	0		0
		28	30	10		53,970
		32	60	20		107,940
		36	90	30		161,910
	High	40	120	40		215,880
2	Early	44	150	50	1,799	269,850
	Strength	48	180	60		323,820
	24 Hr.	52	210	70		377,790
		56	240	80		431,760
		60	270	90		485,730
		64	300	100		539,700

ตารางที่ 32 (ต่อ)

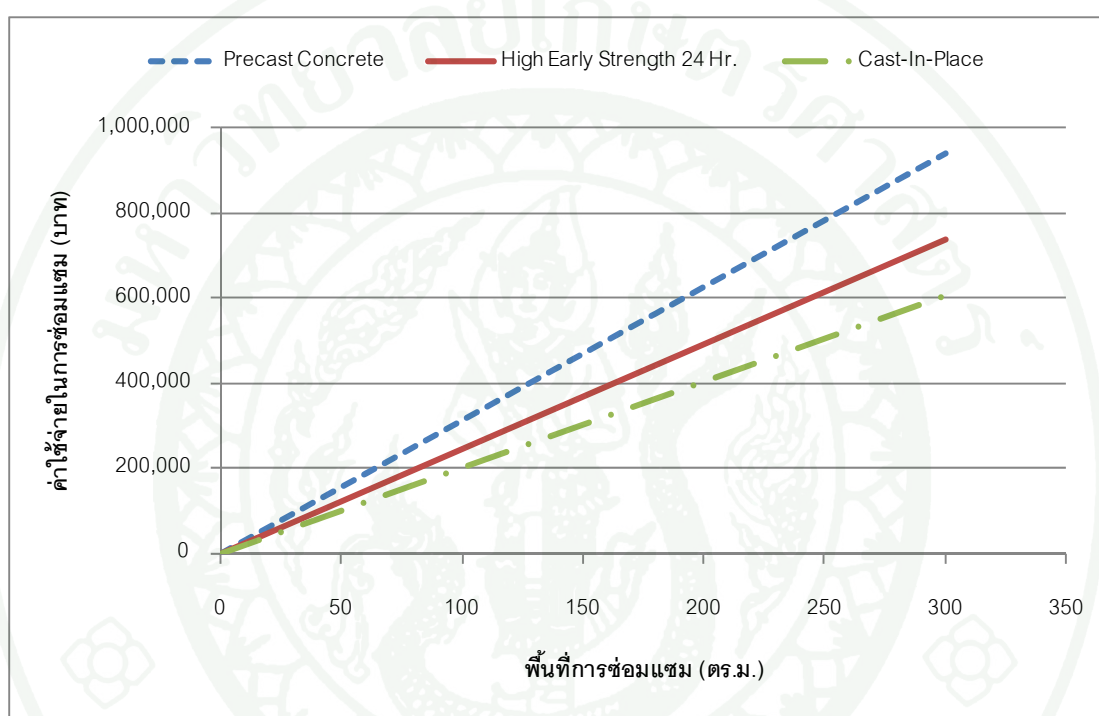
ที่	การ ซ่อมแซม	เวลาในการ ซ่อมแซม (ชม.)	พื้นที่การ ซ่อมแซม (ตร.ม.)	ระยะทาง (ม.)	ค่าใช้จ่าย/ตร.ม. (บาท/ตร.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการ ซ่อมแซม (บาท)
		0	0	0		0
		192	30	10		41,160
		196	60	20		82,320
		200	90	30		123,480
		204	120	40		164,640
3	Cast-In- Place	208	150	50	1,372	205,800
		212	180	60		246,960
		216	210	70		288,120
		220	240	80		329,280
		224	270	90		370,440
		228	300	100		411,600



ภาพที่ 188 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับพื้นที่การซ่อมแซมถนน

จากรูปแบบการซ่อมทั้ง 3 วิธี ดังแสดงในภาพที่ 188 พบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมกับพื้นที่การซ่อมแซม ดังนี้ การซ่อมแซมถนนทั้ง 3 วิธีนั้น เวลาที่ใช้กับพื้นที่ของการซ่อมแซมมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น กล่าวคือ พื้นที่ในการซ่อมแซมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาที่ใช้ การซ่อมด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปนั้น กราฟมีเส้นความชันมากกว่ารูปแบบอื่นๆ และจากกราฟจะเห็นได้ว่า หากพื้นที่การซ่อมน้อยกว่า 75 ตารางเมตร รูปแบบการซ่อมด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป จะใช้เวลาน้อยกว่าการซ่อมด้วยคอนกรีตแข็งตัวเร็ว (ที่ 24 ชั่วโมง) แต่หากพื้นที่การซ่อมมากกว่า 75 ตารางเมตร รูปแบบการซ่อมด้วยคอนกรีตแข็งตัวเร็วจะใช้เวลาน้อยกว่าการซ่อมด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป แต่สำหรับการก่อสร้างคอนกรีตหล่อในที่ จะใช้เวลามากกว่าทั้ง 2 รูปแบบที่กล่าวมาข้างต้นถึงประมาณ 6-7 เท่า โดยลักษณะความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้กับพื้นที่การก่อสร้าง จะเหมือนกับกรณีของคอนกรีตแข็งตัวเร็ว

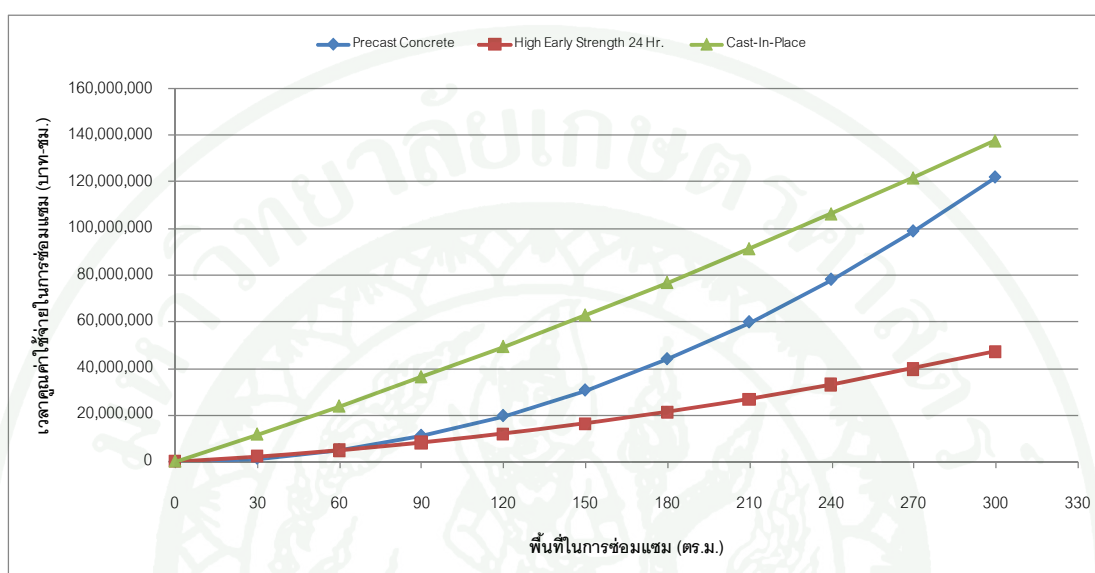
สำหรับพื้นที่ในการซ่อมแซมนั้นมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นกับค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างทั้ง 3 วิธี กล่าวคือ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างมากขึ้นตามพื้นที่การซ่อมแซม โดยที่ค่าก่อสร้างด้วยวิธีแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปจะมีค่าใช้จ่ายที่มากที่สุด รองลงมาคือ รูปแบบการใช้คอนกรีตแข็งตัวเร็ว และการซ่อมแซมแบบคอนกรีตหล่อในที่แบบปกติจะมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 189



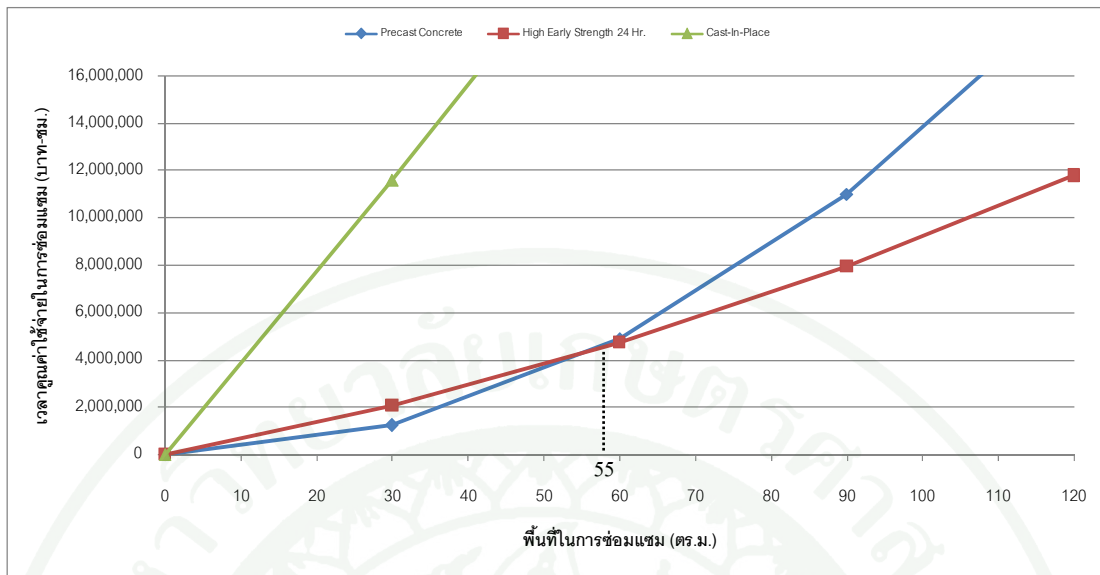
ภาพที่ 189 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่กับค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมถนน

อย่างไรก็ดี หากนำทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายของการซ่อมแซม มาร่วมพิจารณากับพื้นที่ของการซ่อมแซม เพื่อทำการเปรียบเทียบรูปแบบความเหมาะสมของวิธีการซ่อมแซม จึงนำเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างมาคูณกับค่าใช้จ่ายที่ใช้ ซึ่งหมายถึงต้นทุนทั้งทางด้านราคาและเวลาที่รัฐและประชาชนต้องสูญเสียไปในขณะก่อสร้าง โดยพื้นที่ของการซ่อมแซมคือผลกำไรที่ประชาชนจะได้รับภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ ผลการเปรียบเทียบรูปแบบวิธีการซ่อมทั้ง 3 วิธี แสดงดังภาพที่ 190 และภาพที่ 191 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ในการซ่อมกับระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมจะเห็นว่า การซ่อมแซมแบบคอนกรีตหล่อในที่นั้นจะใช้ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมมากกว่าวิธีอื่น ส่วนการซ่อมแซมแบบคอนกรีตแข็งตัวเร็วที่ 24 ชั่วโมง นั้น หากการ

ซ่อมแซมถนนน้อยกว่า 55 ตารางเมตร จะใช้ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมมากกว่าการซ่อมแซมแบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป แต่สำหรับการซ่อมแซมถนนมากกว่า 55 ตารางเมตร จะใช้ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมน้อยกว่าการซ่อมแซมแบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป



ภาพที่ 190 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ในการซ่อมกับระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม



ภาพที่ 191 รูปขยายกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ในการซ่อมกับระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Lingo ดังแสดงในภาพที่ 115 และภาพที่ 117 ทำให้ได้ขนาดที่เหมาะสมสำหรับแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่จะใช้ในการซ่อมแซม 2 ขนาด แต่หากพิจารณาแบบรอยต่อที่มีการฝังเหล็กเดือยดังภาพที่ 118 ทำให้พิจารณาเลือกขนาดที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป คือ $3 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$
2. จากการเปรียบเทียบรูปแบบของรอยต่อแบบต่างๆ และใช้การตัดสินใจเลือกรูปแบบรอยต่อที่จะนำมาใช้ในการซ่อมแซมถนนคอนกรีตที่เหมาะสมกับประเทศไทยนั้น คือ รูปแบบที่ 3 เป็นรูปแบบรอยต่อที่มีการฝังเหล็กเดือยเป็นเหล็กกลมตลอดหน้าตัดหนึ่งด้าน และมีการทำบล็อกรอยต่อสำหรับวางเหล็กเดือยจากแผ่นคอนกรีตอื่นซึ่งรูปแบบที่ 3 นี้เหมาะสำหรับการซ่อมแซมถนนแบบต่อเนื่อง ส่วนรูปแบบที่ 6 นั้นเป็นรูปแบบรอยต่อที่มีการฝังเหล็กเดือยเป็นเหล็กกลมตลอดหน้าตัดทั้งสองด้าน จึงเหมาะสำหรับการซ่อมแซมแบบแผ่นเดียวสำหรับความเสียหายจุดเดียว
3. จากการออกแบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้ในการซ่อมแซมถนนคอนกรีตขนาด $3 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ ทำให้ได้แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีประสิทธิภาพ ง่ายต่อการผลิต ไม่เกิดข้อผิดพลาดขณะนำมาใช้งาน สามารถถ่ายแรงได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ
4. จากการดำเนินการซ่อมแซมถนนด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปสรุปได้ว่า
 - 4.1 จะต้องควบคุมการผลิตในการหล่อแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปให้ได้คุณภาพ เช่น การปาดผิวหน้าคอนกรีตให้ได้ระดับ ตำแหน่งของเหล็กเดือยในแต่ละแผ่นจะต้องมีความแม่นยำและสอดคล้องกับแบบก่อสร้าง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในขณะติดตั้งที่หน้างาน
 - 4.2 การซ่อมแซมด้วยวิธีแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปนั้น จะต้องใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการขนย้ายและติดตั้งแผ่นคอนกรีต ดังนั้น จึงควรจะต้องมีพื้นที่สำหรับการกองเก็บแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปเพื่อใช้งาน และควรจะต้องมีพื้นที่บางส่วนเพื่อให้เครื่องจักรสามารถทำงานได้

4.3 การติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปด้วยเหล็กgrupตัวช่วยในเรื่องของการปรับระดับในการติดตั้งได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ อาจจะมีแนวทางและวิธีการอื่นที่สามารถนำมาปรับใช้เพื่อให้การทำงานมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ซึ่งในต่างประเทศมิได้มีการใช้รูปแบบดังกล่าว จึงทำให้พบปัญหาความคลาดเคลื่อนของระดับระหว่างแผ่นคอนกรีตภายหลังการก่อสร้างค่อนข้างมาก

4.4 หากก่อสร้างด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบแผ่นเดียว ในกรณีซ่อมความเสียหายพื้นที่เล็กๆ อาจจะไม่ต้องเสริมเหล็ก Tie Bar ระหว่างแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปกับถนนคอนกรีตเดิม ซึ่งจะสามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างลงได้

5. สรุปผลการประเมินในเชิงวิศวกรรมภายหลังการซ่อมแซม

5.1 การตรวจสอบสภาพถนนด้วยสายตา

ผลการสำรวจสภาพด้วยตาภายหลังการซ่อมแซมถนน พบว่า สภาพถนนของแปลงทดสอบถนนคอนกรีตในสภาพดี ไม่พบรอยแตกร้าว

5.2 การทดสอบความแข็งแรงของถนนด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer

รูปแบบของรอยต่อสำหรับแปลงทดสอบถนนคอนกรีตนั้น จะมีอยู่ 3 ส่วน โดยผลการตรวจวัด Load Transfer Efficiency, LTE สรุปได้ดังนี้

ก.LTE ระหว่างรอยต่อของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปกับแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป มีค่ามากกว่า 90% ของทุกรอยต่อ เมื่อต้องรับน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 25 ตัน

ข.LTE ระหว่างรอยต่อของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปกับคอนกรีตแข็งตัวเร็ว มีค่ามากกว่า 85% ของทุกรอยต่อ เมื่อต้องรับน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 25 ตัน

ค.LTE ระหว่างรอยต่อของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปกับถนนคอนกรีตเดิม มีค่ามากกว่า 80% ของทุกรอยต่อ เมื่อต้องรับน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 25 ตัน

ค่า Load Transfer Efficiency ระหว่างรอยต่อของแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จกับแผ่นคอนกรีตเดิมบางรอยต่อที่มีค่าอยู่ระหว่าง 80% - 90% อาจเนื่องมาจากสภาพคอนกรีตเก่ากับคอนกรีตใหม่มีคุณสมบัติการยึดเกาะที่ด้อยลงจากอายุการใช้งาน แต่ทั้งนี้ก็ถือว่าผลทดสอบประสิทธิภาพรอยต่อของแผ่นคอนกรีตอยู่ในสภาพที่ดีทุกรอยต่อเนื่องจากมีค่ามากกว่า 70% ทุกรอยต่อ อันเนื่องมาจากการออกแบบให้มีขนาด จำนวน และระยะห่างของเหล็กเดือยที่เหมาะสมและเพียงพอ

5.3 การสำรวจและประเมินคุณภาพการขับขึ้นถนนโดยวัดค่าดัชนีความขรุขระสากล ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ตรวจวัดได้ก่อนการซ่อมแซมแปลงทดสอบถนนคอนกรีต มีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 5.6 และสำหรับภายหลังการซ่อมแซม ค่าดัชนีความขรุขระสากลมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 4.3 ทั้งนี้ ได้ไปตรวจวัดค่าดัชนีความขรุขระสากลของถนนคอนกรีตของกรมทางหลวงชนบท ที่มีสภาพใหม่จำนวน 3 สายทาง พบว่า มีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 4.07 – 4.33 โดยที่ผลการตรวจวัดค่าดัชนีความขรุขระสากลของผิวถนนคอนกรีตของการวิจัยนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 4.2 – 4.3 ถือได้ว่าผลการซ่อมแซมถนนของโครงการอยู่ในระดับที่ดี

6. การประเมินผลวิธีการซ่อมแซมในเชิงเศรษฐศาสตร์

จากการประเมินผลในเชิงเศรษฐศาสตร์ดังแสดงในตารางที่ 31 และภาพที่ 190 การซ่อมแซมแบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปเหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมถนนที่มีพื้นที่การซ่อมแซมน้อยกว่า 60 ตร.ม. และการซ่อมแซมแบบคอนกรีตแข็งตัวเร็ว 24 ชม. เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมถนนที่มีพื้นที่การซ่อมแซมมากกว่า 60 ตร.ม. ขึ้นไป สำหรับจุดคุ้มทุนควรจะทำการซ่อมแซมด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปให้ได้อย่างน้อย 5 แผ่น หรือ 30 ตร.ม ต่อ 1 วันทำการ (8 ชั่วโมง) ส่วนการซ่อมด้วยวิธีหล่อในที่แบบปกดินั้น เป็นวิธีที่ประหยัดที่สุดแต่ต้องแลกกับเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างที่มากกว่า 2 วิธีแรก ประมาณ 4-5 เท่าตัว

ข้อเสนอแนะ

1. การซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยวิธีแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Repair) มีความเหมาะสมทางด้านราคาและทางด้านความรวดเร็วในการเปิดจราจร ในกรณีที่มีพื้นที่ถนนคอนกรีตเสียหายไม่เกิน 60 ตร.ม. และหากมีพื้นที่เสียหายเกิน 60 ตร.ม. สามารถเปลี่ยนมาใช้วิธีซ่อมแบบใช้คอนกรีตแข็งตัวเร็ว (High Early Strength Concrete) จะมีความเหมาะสมมากกว่า
2. วิธีการติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่นำมาใช้ในโครงการนี้ เป็นลักษณะเหล็กรูปตัวยูวางเพื่อรองรับแผ่นคอนกรีตและทำการปรับระดับ ทั้งนี้ แนวทางในการปรับระดับอาจจะมีแนวทางและวิธีการอื่นที่สามารถนำมาปรับใช้เพื่อให้การทำงานมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น
3. การซ่อมแซมถนนคอนกรีตด้วยวิธีแผ่นแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Repair) มีข้อดีในการก่อสร้างและเปิดจราจรได้รวดเร็ว แต่มีข้อด้อยในด้านการราบเรียบเนื่องจากมีรอยต่อมากกว่าการซ่อมแซมด้วยวิธีหล่อในที่จึงมีค่า IRI ที่ค่อนข้างสูงจึงเหมาะสำหรับการซ่อมแซมถนนที่มีปริมาณจราจรสูง ต้องการเปิดการจราจรได้รวดเร็ว และมีพื้นที่ความเสียหายไม่มาก
4. หากต้องการความราบเรียบของถนนหลังจากการซ่อมแซมอาจจะพิจารณาปูผิวหน้าด้วยแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) อีกชั้นหนึ่ง
5. ในการพิจารณาขนาดความกว้างของถนนอาจจะพิจารณาที่ความกว้างของการออกแบบถนนคอนกรีตที่ 3.5 เมตร ส่วนความยาวก็ขึ้นอยู่กับการออกแบบและขั้นตอนในการซ่อมแซม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ สำนักบริหารบำรุงทาง กรมทางหลวง. 2550. **คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง**

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง. 2552. **คู่มือการสำรวจหาโพรงใต้ถนนคอนกรีต**

ธันวิน สวัสดิ์สานต์, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, นวพล พรหมจรรย์ และจตุพร ทิพย์ทอง. 2548. **การตรวจหาโพรงใต้ถนนคอนกรีตด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD).** การสัมมนาประจำปี สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ ประจำปีงบประมาณ 2548

ประเสริฐ บุญรักษา, พิชิต จ้างพิพัฒนกุล, ทินกร โพธิ์ศรี, สุเชษฐ์ เอี่ยมเชย และชยันต์ เจริญพร. 2553. **ดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index, IRI) และเครื่องมือสำรวจความเรียบในงานทาง.** การสัมมนาประจำปี สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ ประจำปีงบประมาณ 2553

ธันวิน สวัสดิ์สานต์และอภิสิทธิ์ กล่ำเหม็ง. 2553. **การสำรวจโพรงใต้ถนนคอนกรีตเพื่อการประเมินวิธีบำรุงรักษาที่เหมาะสม.** บทความสมาคมทางหลวงแห่งประเทศไทย

จิรพัฒน์ โชติโกกร. 2549. **วิศวกรรมงานทาง.** สำนักพิมพ์ฟลิคเซ็นเตอร์

เลิศ พัดฉวีและจุฑา สุนิตย์สกุล. 2553. **การประยุกต์ใช้ Dynamic Cone Penetrometer ในงานก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางวัสดุหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่.** บทความวิชาการสำนักทางหลวงกระบี่ (สุราษฎร์ธานี)

AASHTO TIG on Precast Concrete Paving Systems. 2008. **Precast Concrete Pavement Systems for Rapid Pavement Repair and Replacement: Basic Information and Commentary.**

Caltrans Division of Maintenance. 2008. **Full Depth Concrete Repair.** MTAG Volume II – Rigid Pavement Preservation 2nd Edition., Chapter 8. P 8-1 to P 8-19.

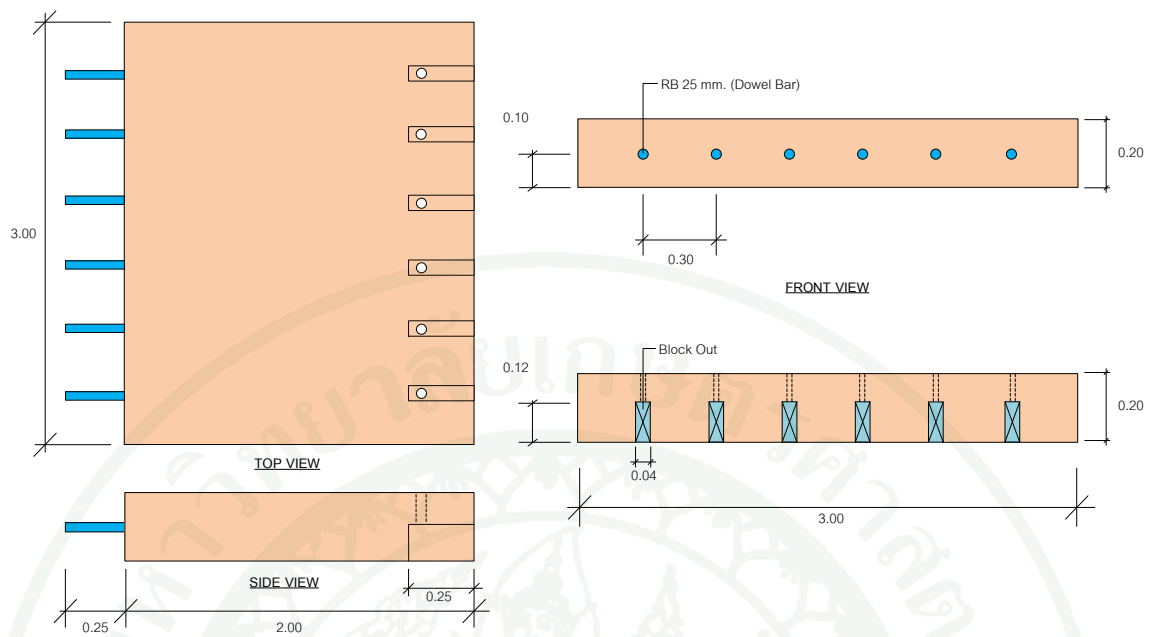
- FHWA. 2001. **PCC Pavement Evaluation and Rehabilitation**. NCI Course 131062. USA.
- FHWA. 2007. **Precast Concrete Panel Systems for Full-Depth Pavement Repairs**. Field Trial.No.FHWA-HIF-07-019, USA.
- FHWA. 2010. **Precast Concrete Panels for Repair and Rehabilitation for Jointed Concrete Pavement**. Tech Brief. Concrete Pavement Technology Programme.USA
- Yang, H. H. 1993. **Pavement analysis and design**. USA : Prentice-Hall, Inc.
- Neeraj, B. 2004. **Full depth Repair of Jointed Concrete Pavements (JCP) using Precast Slabs-an Overview**, 83rd TRB meeting, TRB.
- Neeraj, B. and R. Kowli. 2002. **Precast Concrete Slabs as Full Depth Repairs (FDR)-Michigan Experience**. Department of Civil Engineer. Michigan State University, East Lansing, Michigan. USA.
- Shabbir Hossain and Celik Ozyildirim. 2006. **Evaluation of Concrete Pavement Repair Using Precast Technology in Virginia**. Virginia Transportation Research Council.
- Shiraz, T., B. Neeraj and K. Erwin. 2008. **Precast Concrete Pavement Repair Application**.
- Timothy, J. L. 2009. AASHTO TIG., **Promoting the use of Precast Concrete Pavement Systems**. FHWA – NY Division.
- Kwik, S. LLC. 2006. **Kwik slab Roadway Repair Solutions**. Source: www.kwikslab.com, January 15, 2011.
- U.S. Department of Transport. 2006. **Full Depth Repairs**. Source: www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/full2.cfm#21, April 7, 2011.



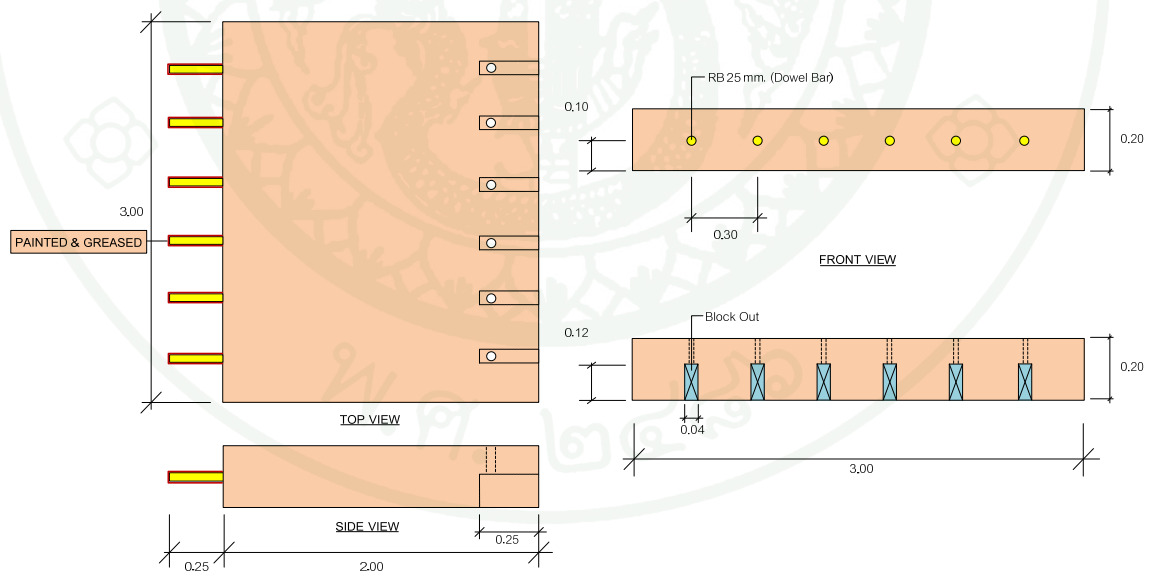


ภาคผนวก ก

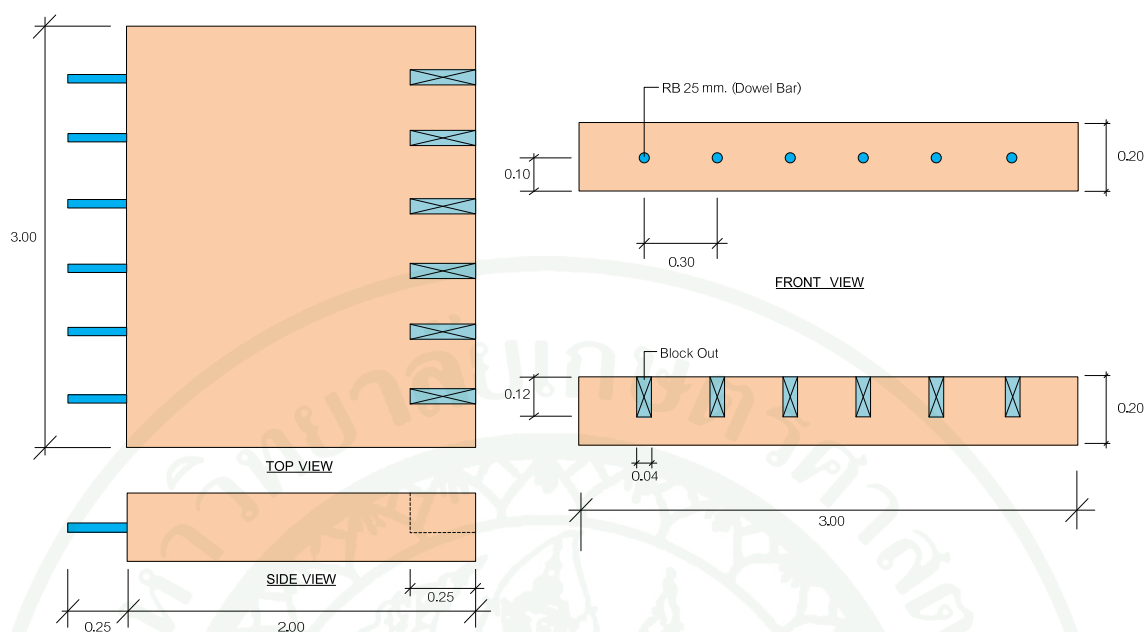
รูปแบบรอยต่อของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบต่างๆ



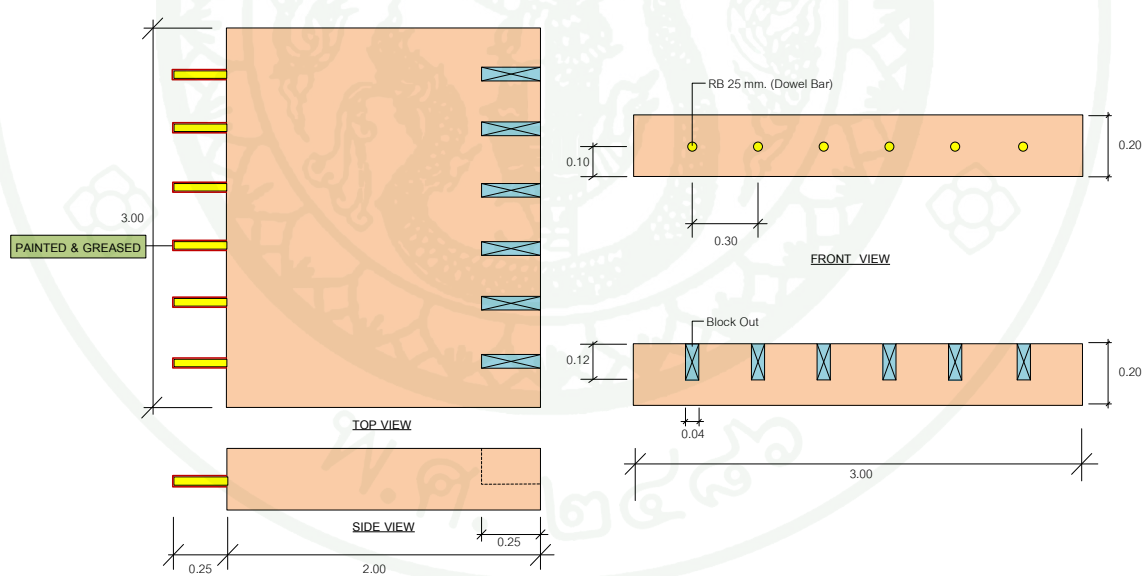
ภาพผนวก ก1 รูปแบบที่ 1



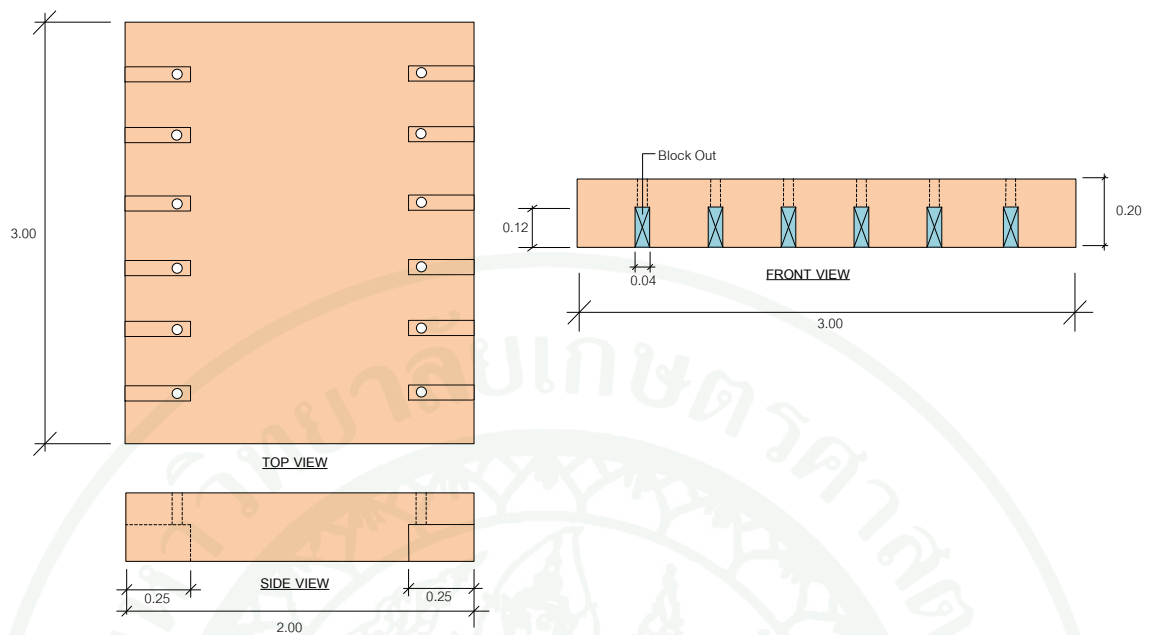
ภาพผนวก ก2 รูปแบบที่ 2



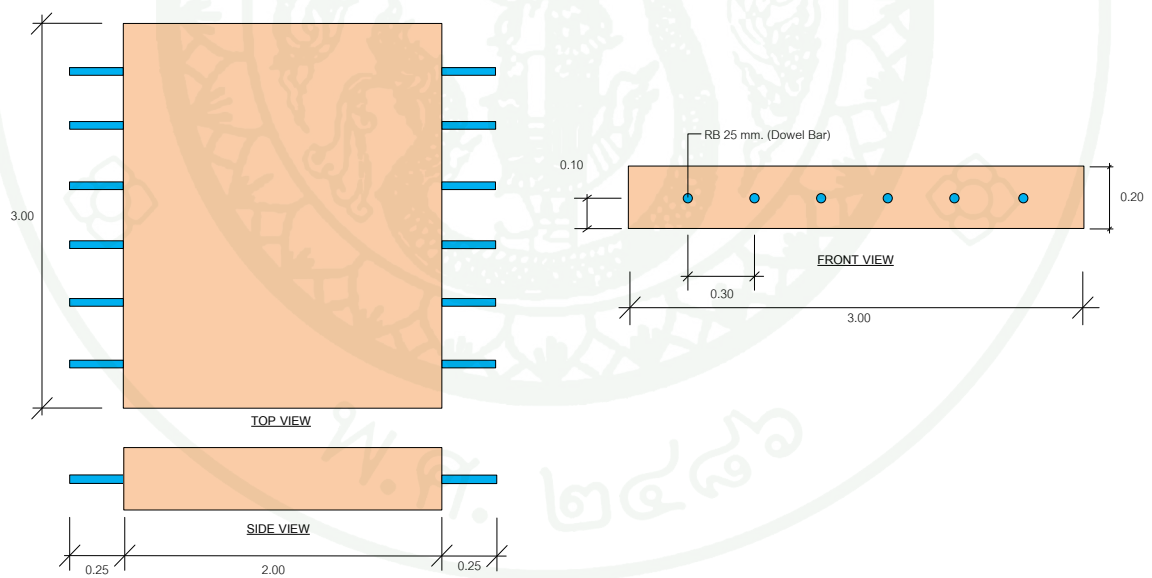
ภาพผนวก ก3 รูปแบบที่ 3



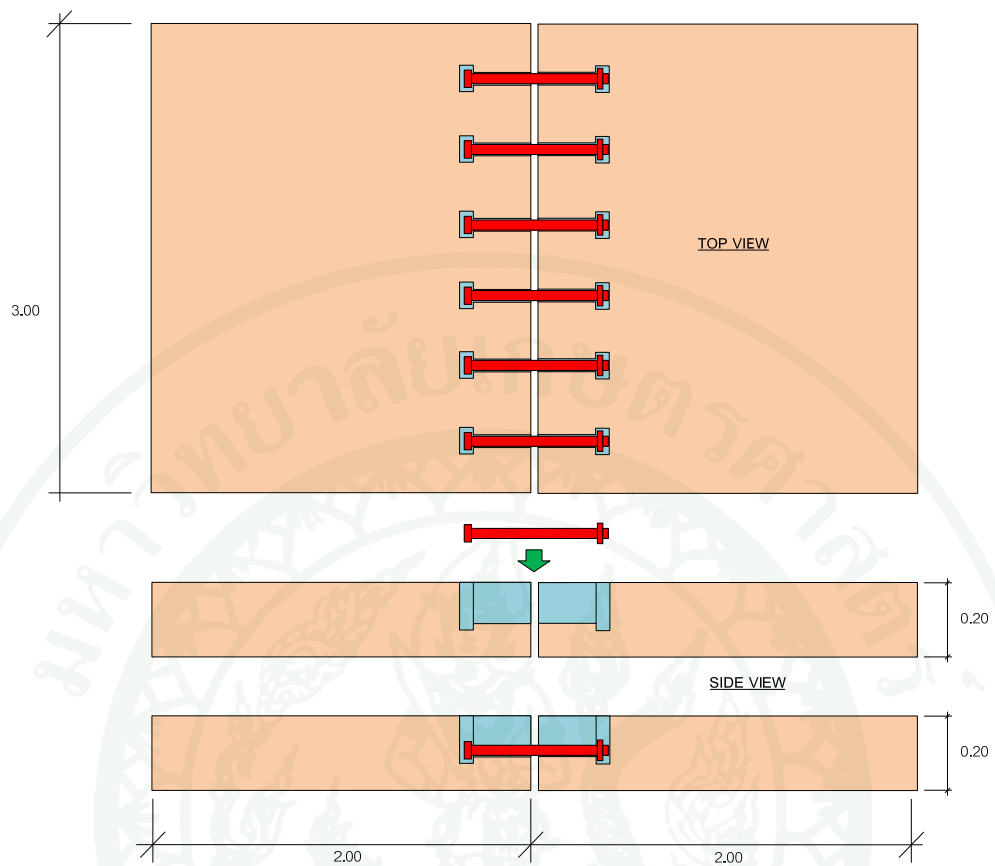
ภาพผนวก ก4 รูปแบบที่ 4



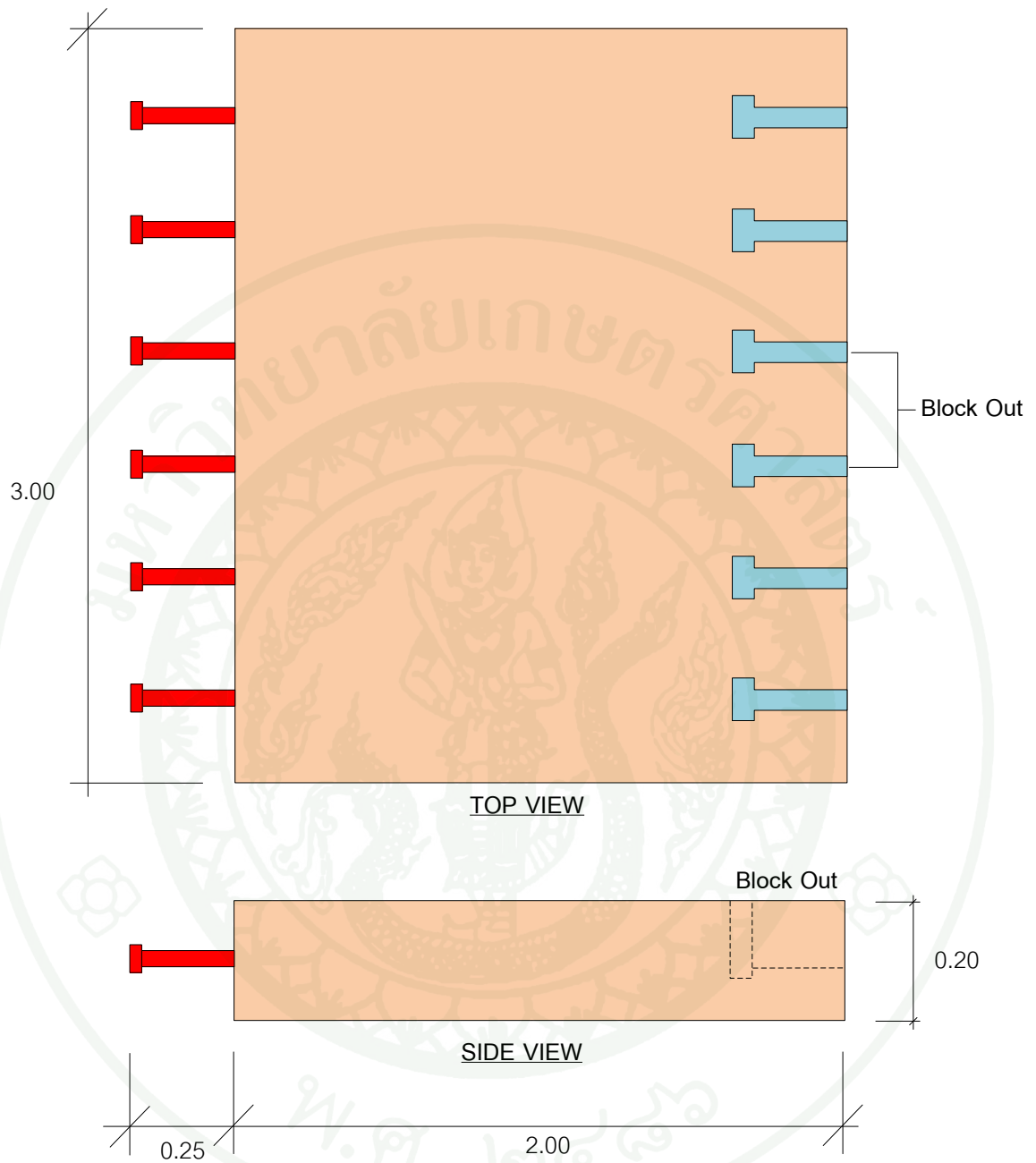
ภาพผนวก ก5 รูปแบบที่ 5



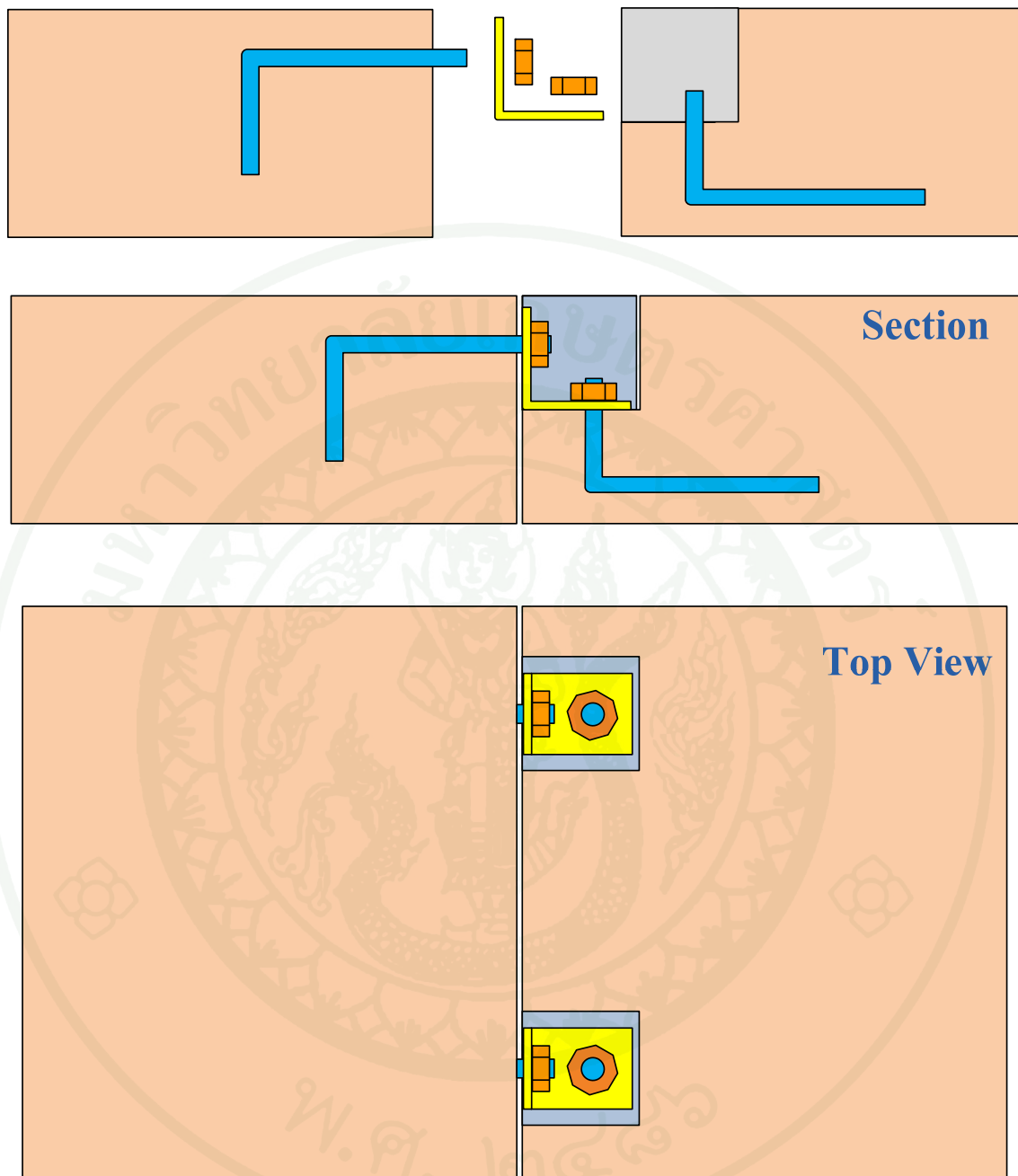
ภาพผนวก ก6 รูปแบบที่ 6



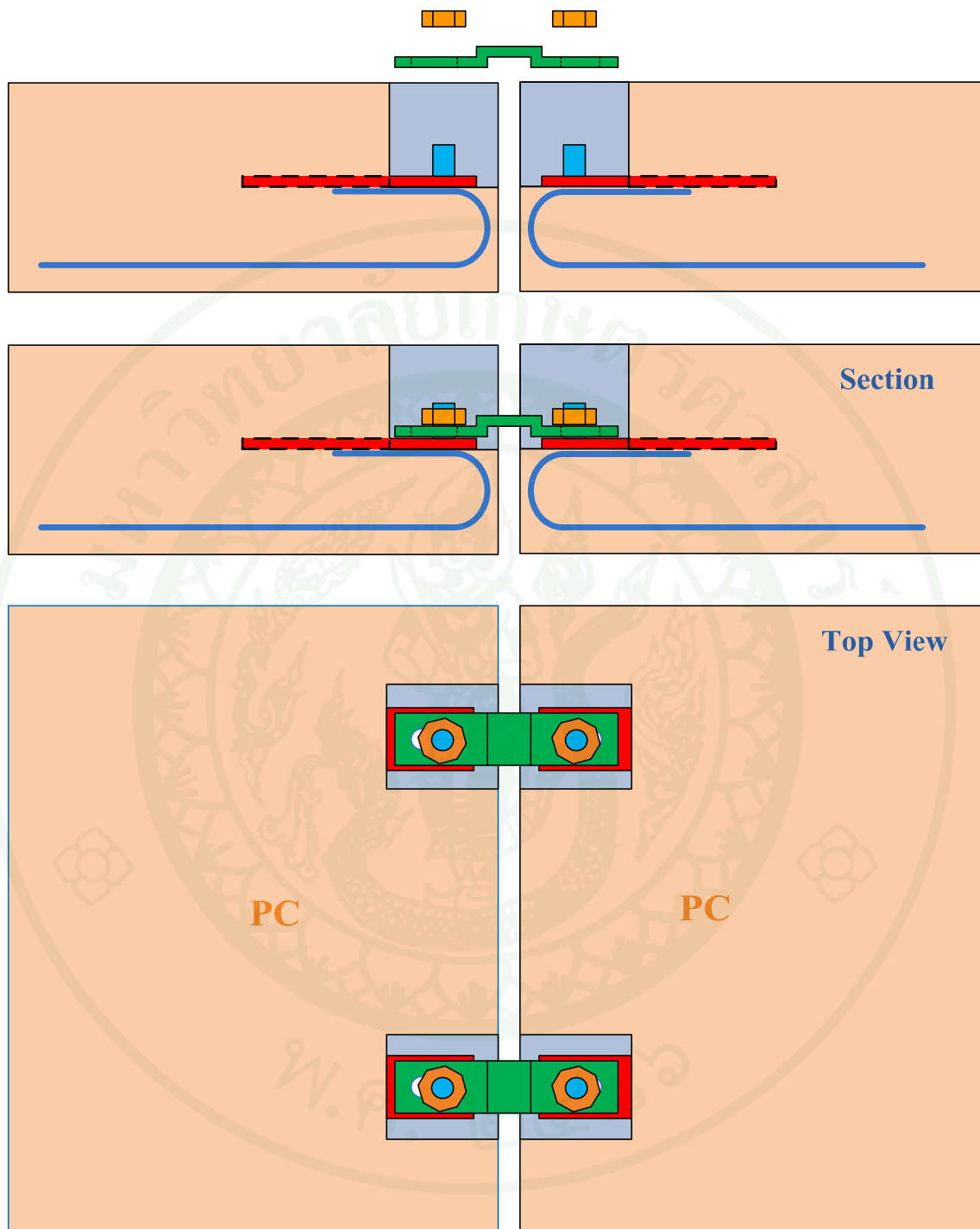
ภาพผนวก ก7 รูปแบบที่ 7



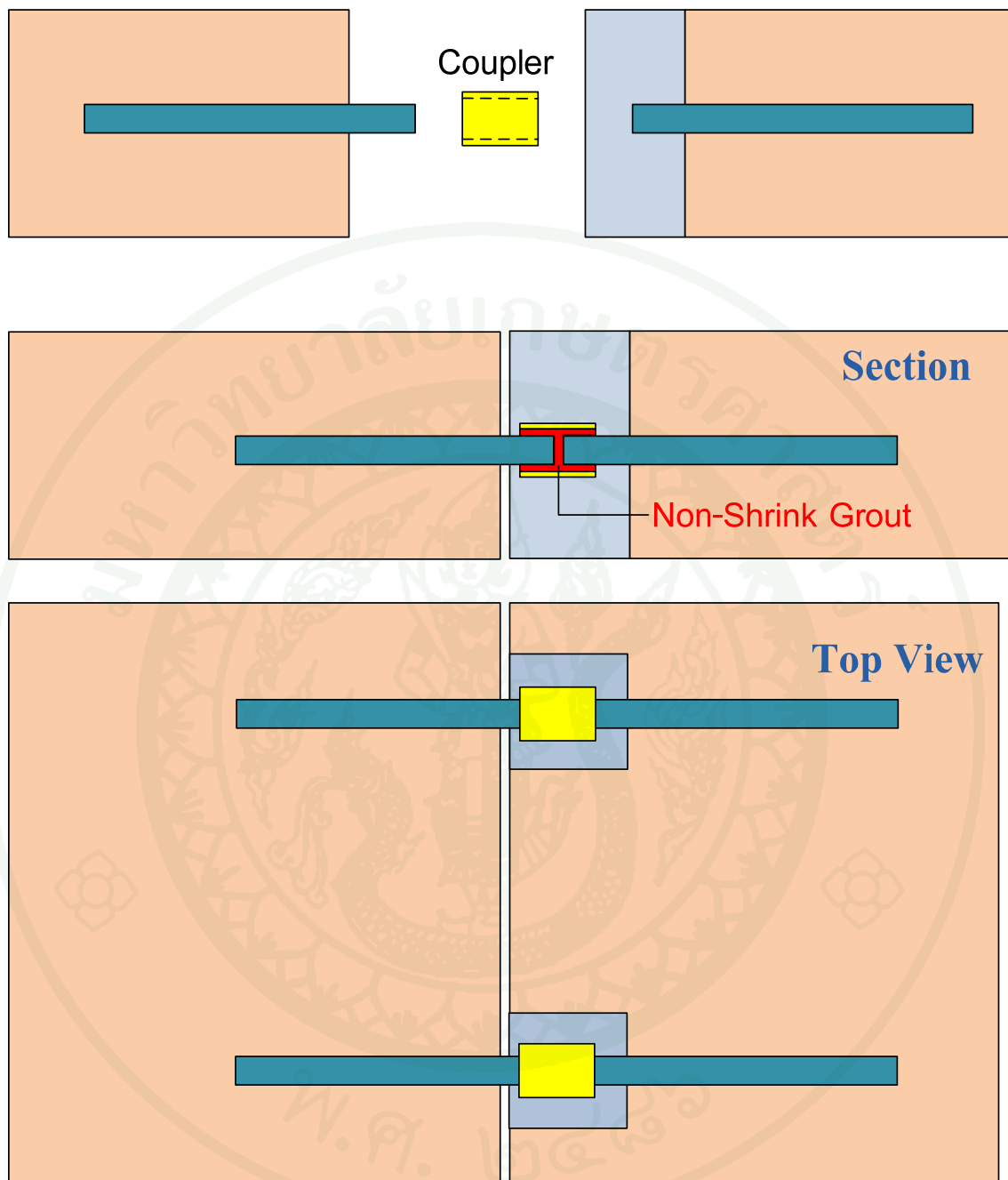
ภาพผนวก ก8 รูปแบบที่ 8



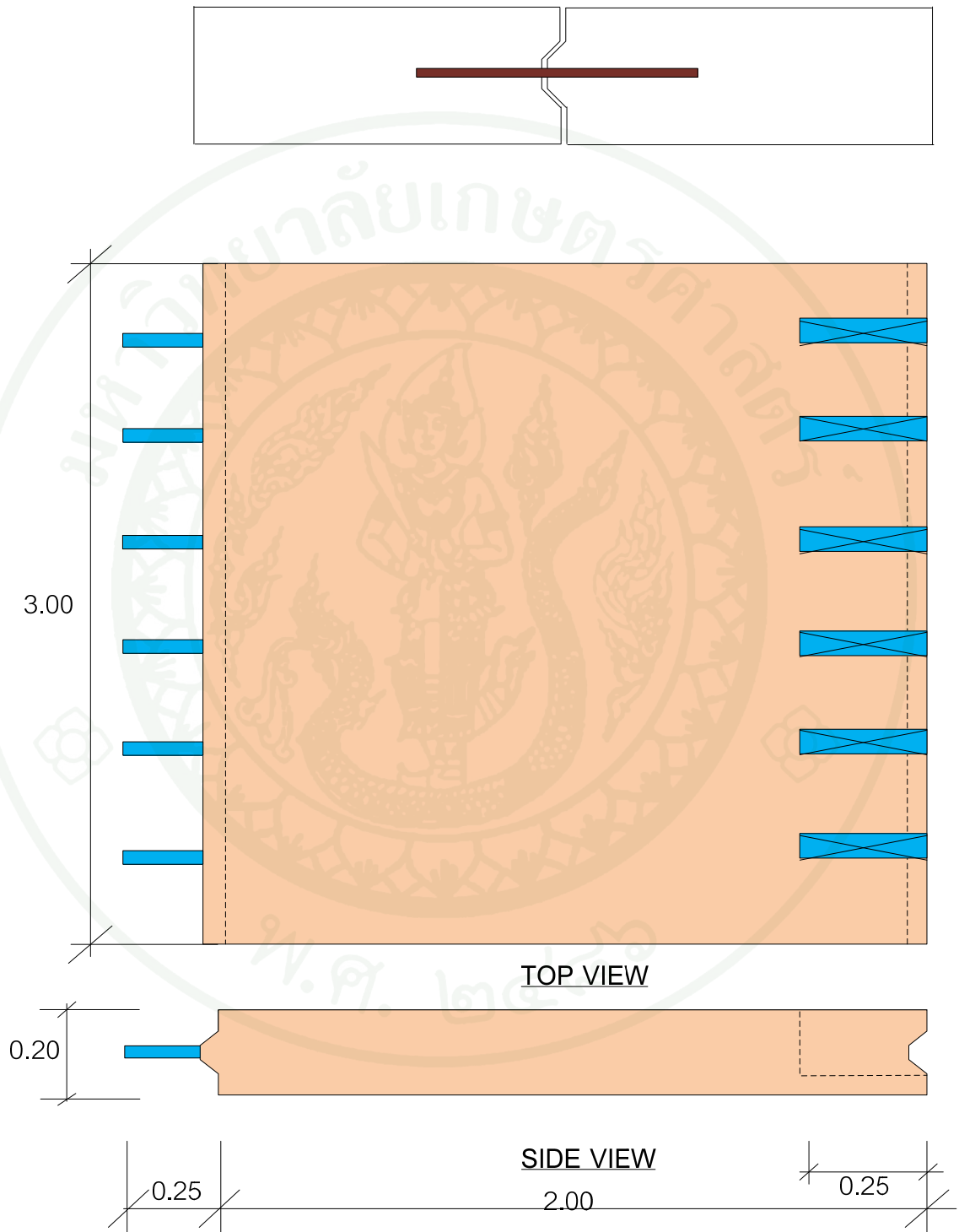
ภาพผนวก ก9 รูปแบบที่ 9



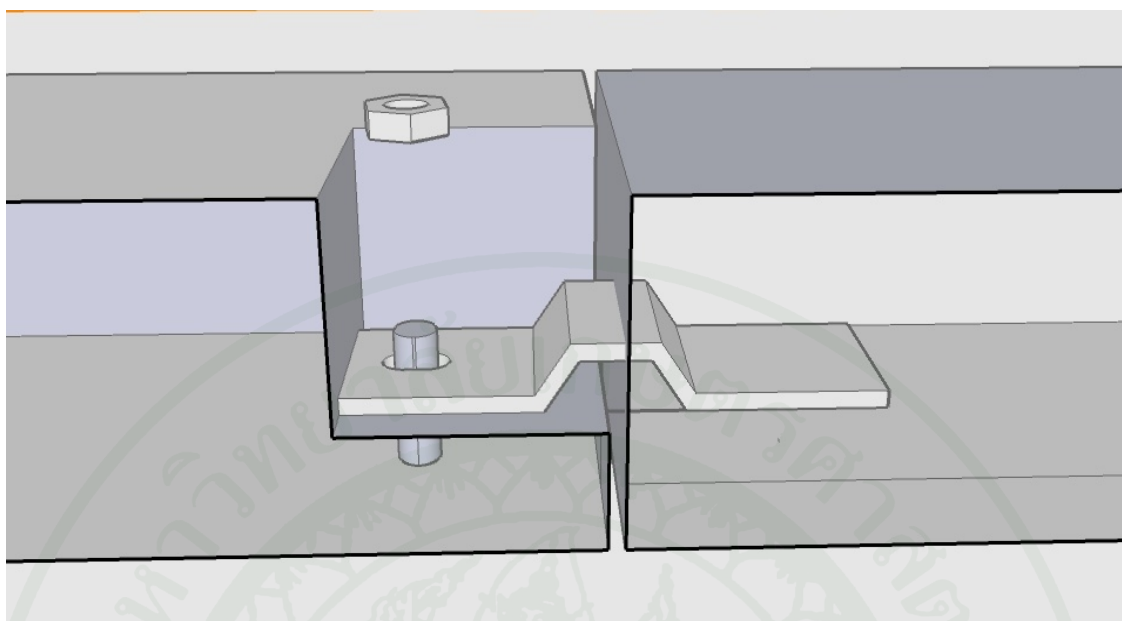
ภาพผนวก ก10 รูปแบบที่ 10



ภาพผนวก ก11 รูปแบบที่ 11



ภาพผนวก ก12 รูปแบบที่ 12



ภาพผนวก ก13 รูปแบบที่ 13



1. ตรวจสอบการออกแบบ Dowel Bar และ Tie Bar ตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท

การออกแบบเสริมเหล็ก Tie bar

$$A_s = \frac{\gamma_c h L' f_a}{f_s}$$

A_s = The area of steel

γ_c = Unit weight of the concrete = 0.0868 pci.

h = Depth of concrete slab = 8 in.

L' = Lane width = 3 m. หรือ 120 in.

f_a = Subgrade friction $f_a = 1.5$

f_c = Allowable stress of tie bar

$f_s = 0.5f_y = 1500 \text{ ksc.} = 21330 \text{ psi.}$ (use steel SD30)

$$A_s = \frac{0.0868 \times 8 \times 120 \times 1.5}{21330} = 5.86 \times 10^{-3} \text{ in}^2/\text{in} = 1.51 \text{ cm}^2/\text{m}$$

เทียบแบบมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทของเหล็ก Tie Bar คือ DB12 ยาว 50 [cm.@0.75 m.](#)

เทียบต่อ 10 m. = $10/0.75 + 1 = 14.33$ เส้น/10 m. = 1.433 เส้น/m.

DB12 $A_s = 1.13 \text{ cm}^2 \therefore A_s/\text{m} = 1.13 \times 1.43 = 1.61 \text{ cm}^2/\text{m} > 1.51 \text{ cm}^2/\text{m}$ OK.

$\therefore A_s = \text{DB12@0.75 m.}$ ตามแบบมาตรฐาน

การหาความยาวของ Tie bar

$$t = \frac{1 (f_s d)}{2 \mu}$$

t = Length of tie bar

μ = Allowable bond stress

d = diameter of tie bar = 12 mm. = 0.47 in.

f_s = Allowable stress of tie bar = 21330 psi.

$$\mu = 3.23 \frac{\sqrt{f_c'}}{D}$$

$$\mu = 3.23 \frac{\sqrt{325}}{1.2} = 48.52 \text{ ksc หรือ } < 35 \text{ ksc.}$$

$$\therefore \text{ใช้ } 35 \text{ ksc} = 498 \text{ psi.}$$

$$t = \frac{1}{2} \times \frac{(21330 \times 0.47)}{498 \text{ psi.}} = 10 \text{ in.} = 25 \text{ cm.}$$

Incase + 3 in for misalignment

t ที่ต้องการ = 10+3 = 13 in. = 33 cm.

t ตามแบบมาตรฐาน = 50 cm. > 33 cm. OK

การคำนวณเหล็กเสริมปกติ

$$A_s = \frac{\gamma_c h L f_a}{2 f_s}$$

A_s = The area of steel

γ_c = Unit weight of the concrete = 0.0868 pci.

h = Depth of concrete slab = 8 in.

L = Length of concrete slab = 3 m. = 120 in. และ 10 m. = 400 in

f_a = Subgrade friction $f_a = 1.5$

f_s = Allowable stress in concrete

$f_s = 0.5 f_y = 1200 \text{ ksc.} = 17064 \text{ psi (Use steel SD24)}$

กรณี L = 3 m.

$$A_s = \frac{0.0868 \times 8 \times 120 \times 1.5}{2 \times 17064} = 3.66 \times 10^{-3} \text{ in}^2/\text{in}$$

$$A_s = 3.66 \times 10^{-3} \text{ in}^2/\text{in} \times \frac{2.54 \times 2.54}{1 \times 1} \text{ cm}^2/\text{in}^2 \times \frac{12 \text{ in}}{30 \text{ cm}} \times 100 \text{ cm}$$

$$A_s = 0.95 \text{ cm}^2$$

กรณี $L = 10 \text{ m}$.

$$A_s = \frac{0.0868 \times 8 \times 400 \times 1.5}{2 \times 17064} = 0.012 \times 10^{-3} \text{ in}^2/\text{in}$$

$$A_s = 0.012 \times 10^{-3} \text{ in}^2/\text{in} \times \frac{2.54 \times 2.54}{1 \times 1} \text{ cm}^2/\text{in}^2 \times \frac{12 \text{ in}}{30 \text{ cm}} \times 100 \text{ cm}$$

$$A_s = 3.15 \text{ cm}^2$$

ตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท

เหล็กเสริมตามยาว [RB9@0.2 m](#). : $A_s = 3.18 \text{ cm}^2 > 3.15 \text{ cm}^2$ OK.

เหล็กเสริมตามขวาง (3 m.) [RB6@0.2 m](#). : $A_s = 1.42 \text{ cm}^2 > 0.95 \text{ cm}^2$ OK.

∴ ตามแบบมาตรฐาน OK

2. ตรวจสอบหน่วยแรงแบกทานของรูปแบบรอยต่อที่พิจารณา

Steel dowel:

diameter, $d = 1 \text{ in}$

length, $L = 10 \text{ in}$

spacing between each dowel, $b = 12 \text{ in}$

Modulus of elasticity, $E_d = 2.04 \times 10^6 \text{ ksc} = 29 \times 10^6 \text{ psi}$

Shear modulus of dowel, $G = 2.85 \times 10^5 \text{ ksc}$

Moment of inertia of the dowel, I_d

$$I_d = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi (1)^4}{64} = 0.049 \text{ in}^4$$

Cross-sectional area of dowel, A

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(1)^2}{4} = 0.785 \text{ in}^2$$

Concrete pavement:

Compressive strength, $f_c' = 325 \text{ ksc} = 4621.5 \text{ psi}$

Modulus of elasticity, $E_c = 57000\sqrt{f_c'} = 57000\sqrt{4621.5} = 3.87 \times 10^6 \text{ psi}$

Pavement thickness, $h = 8 \text{ in}$

Joint width, $z = 0.025 \text{ in}$

Poisson's ratio of concrete, $\nu = 0.2$

Modulus of dowel support, $K_o = 4.152 \times 10^4 \text{ kg/cm}^3 = 1.5 \times 10^6 \text{ pci}$

Base:

Modulus of subgrade reaction, $k = 100 \text{ pci}$

Load:

Design traffic load 25 tons, applied wheel load, $P_w = 5 \text{ tons}$

Design load transfer by joint = 45%

P_t = load transferred across joint

$$P_t = P_w \times 0.45 = 5 \times 0.45 = 2.25 \text{ tons}$$

Calculation for radius of relative stiffness, l_r

$$l_r = \sqrt[4]{\frac{E_c h^3}{12(1 - \nu^2)k}}$$

E = modulus of elasticity of concrete = $3.87 \times 10^6 \text{ psi}$

h = thickness of slab = 8 in

ν = Poisson ratio ; Assume = 0.15

K = modulus of subgrade reaction ; Assume = 100 pci

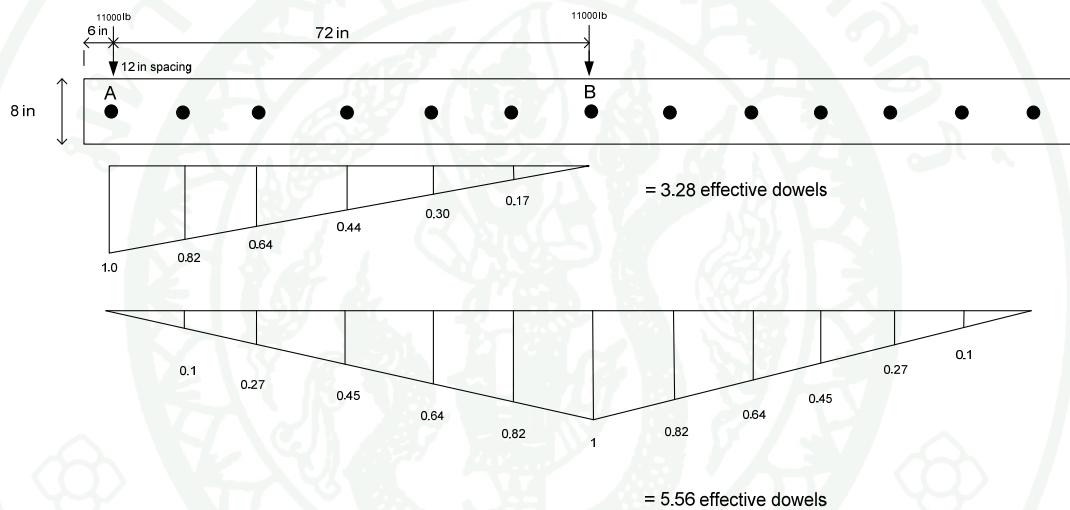
$$l_r = \sqrt[4]{\frac{(3.87 \times 10^6 \times 8^3)}{12(1-0.15^2)(100)}} = 35.87 \text{ in}$$

$$\therefore 1.8l_r = 64.56 \text{ in} \approx 65 \text{ in}$$

Load กระทำ 5 ton $\approx$ 11000 lb

คิดกรณี แผ่นคอนกรีตกว้าง 3 m หรือ 120 in

Dowel size DB25 = 1 in, Spacing 12 in, เว้นระยะขอบ 6 in



$$\therefore 3.28P = \frac{1}{2} \text{ Applied load base on 100 \% joint efficiency}$$

$$\text{น้ำหนักกระทำสูงสุด} = \frac{5500}{3.28} = 1676 \text{ lb}$$

คำนวณ Bearing stress

$$I_d = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi(1)^4}{64} = 0.049 \text{ in}^4$$

Relative stiffness of a dowel bar embbed in concrete

$$\begin{aligned}\beta &= \sqrt[4]{\frac{Kd}{4E_d I_d}} && ; k = 1.5 \times 10^6 \text{ PCI} \\ & && d = 1 \text{ in} \\ &= \sqrt[4]{\frac{1.5 \times 10^6 \times 1}{4 \times 25 \times 10^6 \times 0.049}} && E_d = 25 \times 10^6 \text{ psi} \\ & && z = 0.2 \\ &= 0.716 \text{ in}\end{aligned}$$

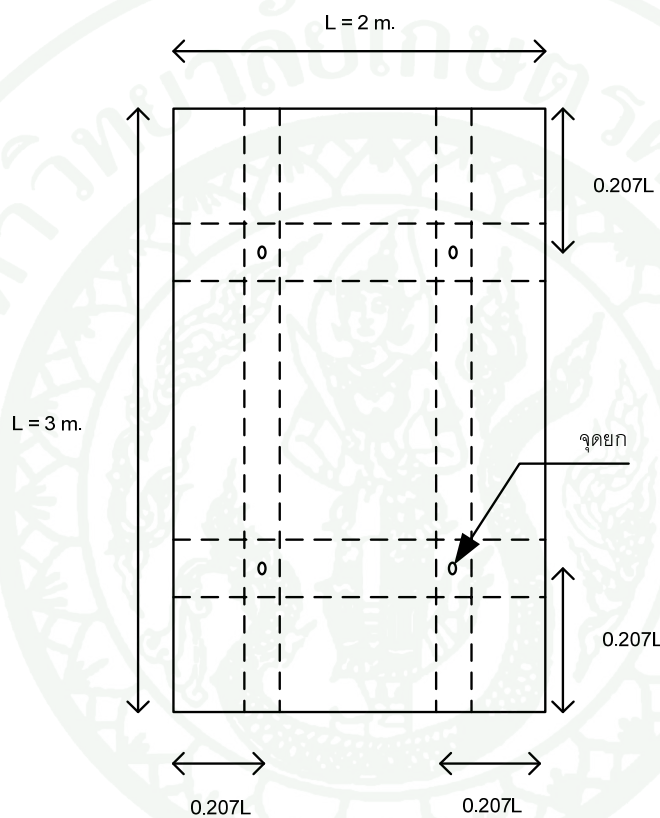
Bearing stress on dowel-concrete interface

$$\begin{aligned}\sigma_b &= \frac{kpt(2+\beta z)}{4\beta^3 E_d I_d} \\ &= \frac{1.5 \times 10^6 \times 1670 \times (2 + 0.716 \times 0.2)}{4 \times 0.716^3 \times 25 \times 10^6 \times 0.049} \\ &= \frac{5.37 \times 10^9}{2.08 \times 10^6} = 2582 \text{ psi หรือ } 181.57 \text{ ksc}\end{aligned}$$

$$\text{Allowable bearing stress} = \frac{(4-d)}{3} f'_c = 4621.5 \text{ psi} > \sigma_b \quad \text{OK}$$

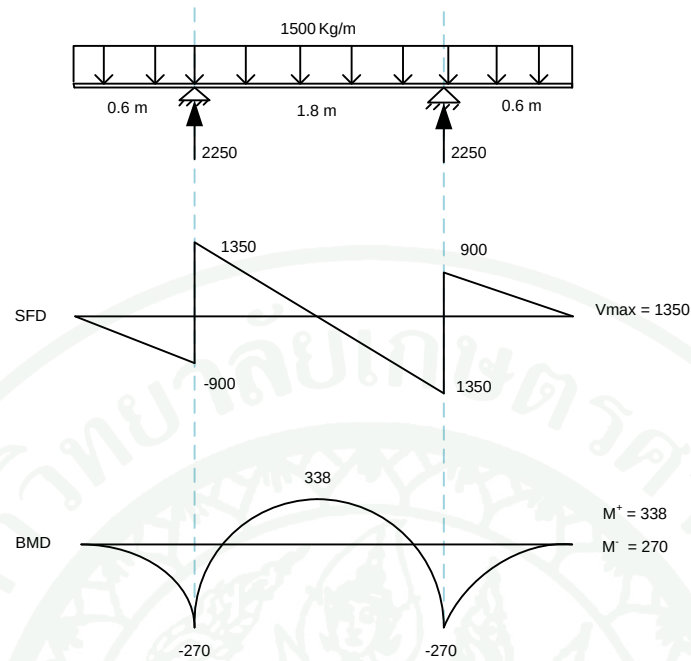
3. การเสริมเหล็กพิเศษในแผ่นพื้น

แผ่นคอนกรีตมีขนาด 3 m.x 2 m.



$$DL = 3 \times 2400 \times 0.2 / 2 = 720 \text{ kg/m.}$$

$$\text{เพื่อ } DL + \text{แรงยก } 100 \% = 720 \times 2 \approx 1500 \text{ kg/m.}$$



ออกแบบเสริมเหล็กเพื่อใช้ยก

$$f'_c = 325 \text{ ksc (cubic)} \approx 275 \text{ ksc (cylinder)}$$

$$f_c = 0.45f'_c \approx 100 \text{ ksc}$$

$$f_s = 0.5f_y = 1500 \text{ ksc (use steel SD30)}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{nf_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1500}{12 \times 100}} = 0.444$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.444}{3} = 0.852$$

$$R = \frac{1}{2}f_cjk = \frac{1}{2} \times 100 \times 0.852 \times 0.444 = 18.91$$

พื้นที่หน้าตัด 20x20 cm : $d = 17.5$ cm

$$M_c = Rbd^2 = 18.91 \times 0.2 \times 17.5^2 = 1158 \text{ kg} \cdot \text{m}.$$

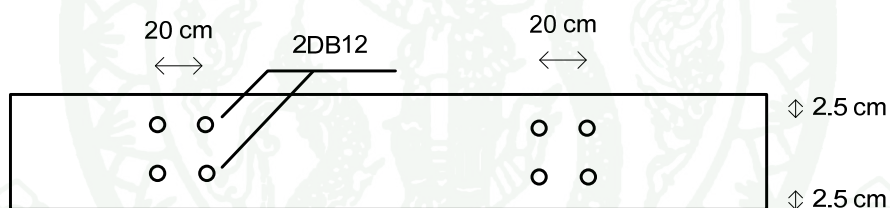
$M_c > M^+$ และ $M^- \therefore$ ไม่ต้องเสริมเหล็กรับแรงอัด

เลือก $M_{\max}$

$$A_s = \frac{M^-}{f_s j d} = \frac{270}{1500 \times 0.852 \times 0.175} = 1.21 \text{ cm}^2$$

$$A_s = \frac{M^+}{f_s j d} = \frac{338}{1500 \times 0.852 \times 0.175} = 1.51 \text{ cm}^2$$

$\therefore$ เลือก 2DB12 $A_s = 2.26 \text{ cm}^2 > A_s^+, A_s^-$ OK ทั้งบนและล่าง





ภาคผนวก ค

รายละเอียดวิธีการคิดคะแนนโดยกระบวนการ AHP (Analysis Hierarchy Process)

ตารางผนวก ค 1 คะแนนประเมินวิธีการซ่อมแซมถนนคอนกรีตตามระบบ Hierarchy

ลำดับ	เกณฑ์การประเมิน	น้ำหนัก ร้อยละ	Cast In place		รูปแบบที่ 1		รูปแบบที่ 3		รูปแบบที่ 5		รูปแบบที่ 6		รูปแบบที่ 7	
			คะแนน 1- 5	ร้อยละ ต้องาน	คะแนน 1- 5	ร้อยละ ต้องาน	คะแนน 1- 5	ร้อยละ ต้องาน	คะแนน 1- 5	ร้อยละต่อ งาน	คะแนน 1- 5	ร้อยละ ต้องาน	คะแนน 1- 5	ร้อยละ ต้องาน
1	เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน	44.24	2	17.70	5	44.24	5	44.24	5	44.24	5	44.24	5	44.24
2	เทคนิคการก่อสร้าง	11.12	5	11.12	4	8.90	4	8.90	4	8.90	3	6.67	4	8.90
3	งบประมาณในการซ่อมแซม	33.51	5	33.51	3	20.11	4	26.81	3	20.11	4	26.81	3	20.11
4	ความสะดวกในการจัดหาเครื่องจักรในการก่อสร้าง	11.12	5	11.12	3	6.67	3	6.67	3	6.67	4	8.90	3	6.67
คะแนนรวม		100	ร้อยละ	73.45	ร้อยละ	79.92	ร้อยละ	86.62	ร้อยละ	79.92	ร้อยละ	86.62	ร้อยละ	79.92

ตารางผนวก ค 1 (ต่อ)

ลำดับ	เกณฑ์การประเมิน	น้ำหนัก ร้อยละ	รูปแบบที่ 8		รูปแบบที่ 9		รูปแบบที่ 10		รูปแบบที่ 11		รูปแบบที่ 12		รูปแบบที่ 13	
			คะแนน 1- 5	ร้อยละ ต่องาน	คะแนน 1- 5	ร้อยละ ต่องาน	คะแนน 1- 5	ร้อยละ ต่องาน	คะแนน 1- 5	ร้อยละ ต่องาน	คะแนน 1- 5	ร้อยละ ต่องาน	คะแนน 1- 5	ร้อยละต่อ งาน
1	เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน	44.24	5	44.24	5	44.24	5	44.24	5	44.24	4	35.39	4	35.39
2	เทคนิคการก่อสร้าง	11.12	4	8.90	4	8.90	4	8.90	2	4.45	3	6.67	3	6.67
3	งบประมาณในการซ่อมแซม	33.51	3	20.11	3	20.11	2	13.41	3	20.11	2	13.41	3	20.11
4	ความสะดวกในการจัดหาเครื่องจักรในการก่อสร้าง	11.12	3	6.67	4	8.90	4	8.90	4	8.90	4	8.90	4	8.90
คะแนนรวม		100	ร้อยละ	79.92	ร้อยละ	82.15	ร้อยละ	75.44	ร้อยละ	77.70	ร้อยละ	64.37	ร้อยละ	71.07

หมายเหตุ เกณฑ์การให้คะแนน 1 - 5 ซึ่ง คะแนน 1 หมายถึงเหมาะสมน้อยที่สุด และคะแนน 5 หมายถึง เหมาะสมมากที่สุด

ตารางผนวก ค 2 ตารางเปรียบเทียบค่าความแตกต่างการให้คะแนนเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน ตามระบบ Hierarchy

เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน		Cast In place	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 5	รูปแบบที่ 6	รูปแบบที่ 7	รูปแบบที่ 8	รูปแบบที่ 9	รูปแบบที่ 10	รูปแบบที่ 11	รูปแบบที่ 12	รูปแบบที่ 13
1	Cast In place	0	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2
2	รูปแบบที่ 1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
3	รูปแบบที่ 3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	รูปแบบที่ 5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
5	รูปแบบที่ 6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
6	รูปแบบที่ 7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
7	รูปแบบที่ 8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
8	รูปแบบที่ 9	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
9	รูปแบบที่ 10	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
10	รูปแบบที่ 11	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
11	รูปแบบที่ 12	2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0
12	รูปแบบที่ 13	2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0

ตารางผนวก ค 3 การให้คะแนนเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน ตามระบบ Hierarchy

เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจน เปิดใช้งาน	Cast In place	รูปแบบ ที่ 1	รูปแบบ ที่ 3	รูปแบบ ที่ 5	รูปแบบ ที่ 6	รูปแบบ ที่ 7	รูปแบบ ที่ 8	รูปแบบ ที่ 9	รูปแบบที่ 10	รูปแบบที่ 11	รูปแบบที่ 12	รูปแบบที่ 13
1 Cast In place	1	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5
2 รูปแบบที่ 1	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
3 รูปแบบที่ 3	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
4 รูปแบบที่ 5	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
5 รูปแบบที่ 6	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
6 รูปแบบที่ 7	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
7 รูปแบบที่ 8	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
8 รูปแบบที่ 9	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
9 รูปแบบที่ 10	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
10 รูปแบบที่ 11	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
11 รูปแบบที่ 12	5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1
12 รูปแบบที่ 13	5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1
รวม	74.00	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	29.20	29.20

ตารางผนวก ค 4 สรุปคะแนนเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างจนเปิดใช้งาน ตามระบบ Hierarchy

เวลาที่ใช้ในการ ก่อสร้างจนเปิดใช้ งาน	Cast In place	รูปแบบ ที่ 1	รูปแบบ ที่ 3	รูปแบบ ที่ 5	รูปแบบ ที่ 6	รูปแบบ ที่ 7	รูปแบบ ที่ 8	รูปแบบ ที่ 9	รูปแบบ ที่ 10	รูปแบบ ที่ 11	รูปแบบ ที่ 12	รูปแบบ ที่ 13	(ผลรวม/จำนวนวิธี x100%)
1 Cast In place	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1
2 รูปแบบที่ 1	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
3 รูปแบบที่ 3	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
4 รูปแบบที่ 5	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
5 รูปแบบที่ 6	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
6 รูปแบบที่ 7	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
7 รูปแบบที่ 8	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
8 รูปแบบที่ 9	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
9 รูปแบบที่ 10	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
10 รูปแบบที่ 11	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
11 รูปแบบที่ 12	0.07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	4
12 รูปแบบที่ 13	0.07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	4
รวม	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	100.00

ตารางผนวก ค 5 ตารางเปรียบเทียบค่าความแตกต่างการให้คะแนนเทคนิคการก่อสร้าง ตามระบบ Hierarchy

เทคนิคการก่อสร้าง		Cast											
		In	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่
		place	1	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Cast In place	0	1	1	1	2	1	1	1	1	3	2	2
2	รูปแบบที่ 1	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	1
3	รูปแบบที่ 3	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	1
4	รูปแบบที่ 5	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	1
5	รูปแบบที่ 6	-2	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	1	0	0
6	รูปแบบที่ 7	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	1
7	รูปแบบที่ 8	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	1
8	รูปแบบที่ 9	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	1
9	รูปแบบที่ 10	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	1
10	รูปแบบที่ 11	-3	-2	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-2	0	-1	-1
11	รูปแบบที่ 12	-2	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	1	0	0
12	รูปแบบที่ 13	-2	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	1	0	0

ตารางผนวก ค 6 การให้คะแนนเทคนิคการก่อสร้าง ตามระบบ Hierarchy

เทคนิคการก่อสร้าง		Cast											
		In	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่	รูปแบบที่
		place	1	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Cast In place	1	3	3	3	5	3	3	3	3	7	5	5
2	รูปแบบที่ 1	1/3	1	1	1	3	1	1	1	1	5	3	3
3	รูปแบบที่ 3	1/3	1	1	1	3	1	1	1	1	5	3	3
4	รูปแบบที่ 5	1/3	1	1	1	3	1	1	1	1	5	3	3
5	รูปแบบที่ 6	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	3	1	1
6	รูปแบบที่ 7	1/3	1	1	1	3	1	1	1	1	5	3	3
7	รูปแบบที่ 8	1/3	1	1	1	3	1	1	1	1	5	3	3
8	รูปแบบที่ 9	1/3	1	1	1	3	1	1	1	1	5	3	3
9	รูปแบบที่ 10	1/3	1	1	1	3	1	1	1	1	5	3	3
10	รูปแบบที่ 11	1/7	1/5	1/5	1/5	1/3	1/5	1/5	1/5	1/5	1	1/3	1/3
11	รูปแบบที่ 12	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	3	1	1
12	รูปแบบที่ 13	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	3	1	1
รวม		4.08	11.20	11.20	11.20	29.33	11.20	11.20	11.20	11.20	52.00	29.33	29.33

ตารางผนวก ค 7 สรุปคะแนนเทคนิคการก่อสร้าง ตามระบบ Hierarchy

เทคนิคการก่อสร้าง		Cast In place	รูปแบบ ที่ 1	รูปแบบ ที่ 3	รูปแบบ ที่ 5	รูปแบบ ที่ 6	รูปแบบ ที่ 7	รูปแบบ ที่ 8	รูปแบบ ที่ 9	รูปแบบ ที่ 10	รูปแบบ ที่ 11	รูปแบบ ที่ 12	รูปแบบ ที่ 13	(ผลรวม/ จำนวน วิธี x100%)
1	Cast In place	0.25	0.27	0.27	0.27	0.17	0.27	0.27	0.27	0.27	0.13	0.17	0.17	23
2	รูปแบบที่ 1	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	9
3	รูปแบบที่ 3	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	9
4	รูปแบบที่ 5	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	9
5	รูปแบบที่ 6	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.03	0.03	3
6	รูปแบบที่ 7	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	9
7	รูปแบบที่ 8	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	9
8	รูปแบบที่ 9	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	9
9	รูปแบบที่ 10	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	9
10	รูปแบบที่ 11	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	2
11	รูปแบบที่ 12	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.03	0.03	3
12	รูปแบบที่ 13	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.03	0.03	3
รวม		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	100.00

ตารางผนวก ค 8 ตารางเปรียบเทียบค่าความแตกต่างการให้คะแนนงบประมาณที่ใช้ในการซ่อมแซม ตามระบบ Hierarchy

งบประมาณในการ ซ่อมแซม	Cast In place	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 5	รูปแบบที่ 6	รูปแบบที่ 7	รูปแบบที่ 8	รูปแบบที่ 9	รูปแบบที่ 10	รูปแบบที่ 11	รูปแบบที่ 12	รูปแบบที่ 13
1 Cast In place	0	2	1	2	1	2	2	2	3	2	3	2
2 รูปแบบที่ 1	-2	0	-1	0	-1	0	0	0	1	0	1	0
3 รูปแบบที่ 3	-1	1	0	1	0	1	1	1	2	1	2	1
4 รูปแบบที่ 5	-2	0	-1	0	-1	0	0	0	1	0	1	0
5 รูปแบบที่ 6	-1	1	0	1	0	1	1	1	2	1	2	1
6 รูปแบบที่ 7	-2	0	-1	0	-1	0	0	0	1	0	1	0
7 รูปแบบที่ 8	-2	0	-1	0	-1	0	0	0	1	0	1	0
8 รูปแบบที่ 9	-2	0	-1	0	-1	0	0	0	1	0	1	0
9 รูปแบบที่ 10	-3	-1	-2	-1	-2	-1		-1	0	-1	0	-1
10 รูปแบบที่ 11	-2	0	-1	0	-1	0	0	0	1	0	1	0
11 รูปแบบที่ 12	-3	-1	-2	-1	-2	-1	-1	-1	0	-1	0	-1
12 รูปแบบที่ 13	-2	0	-1	0	-1	0	0	0	1	0	1	0

ตารางผนวก ค 9 การให้คะแนนงบประมาณในการซ่อมแซม ตามระบบ Hierarchy

งบประมาณในการ ซ่อมแซม	Cast In place	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 5	รูปแบบที่ 6	รูปแบบที่ 7	รูปแบบที่ 8	รูปแบบที่ 9	รูปแบบที่ 10	รูปแบบที่ 11	รูปแบบที่ 12	รูปแบบที่ 13
1 Cast In place	1	5	3	5	3	5	5	5	7	5	7	5
2 รูปแบบที่ 1	1/5	1	1/3	1	1/3	1	1	1	3	1	3	1
3 รูปแบบที่ 3	1/3	3	1	3	1	3	3	3	5	3	5	3
4 รูปแบบที่ 5	1/5	1	1/3	1	1/3	1	1	1	3	1	3	1
5 รูปแบบที่ 6	1/3	3	1	3	1	3	3	3	5	3	5	3
6 รูปแบบที่ 7	1/5	1	1/3	1	1/3	1	1	1	3	1	3	1
7 รูปแบบที่ 8	1/5	1	1/3	1	1/3	1	1	1	3	1	3	1
8 รูปแบบที่ 9	1/5	1	1/3	1	1/3	1	1	1	3	1	3	1
9 รูปแบบที่ 10	1/7	1/3	1/5	1/3	1/5	1/3	1/9	1/3	1	1/3	1	1/3
10 รูปแบบที่ 11	1/5	1	1/3	1	1/3	1	1	1	3	1	3	1
11 รูปแบบที่ 12	1/7	1/3	1/5	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1	1/3
12 รูปแบบที่ 13	1/5	1	1/3	1	1/3	1	1	1	3	1	3	1
รวม	3.35	18.67	7.73	18.67	7.73	18.67	18.44	18.67	40.00	18.67	40.00	18.67

ตารางผนวก ค 10 สรุปคะแนนงบประมาณในการซ่อมแซม ตามระบบ Hierarchy

งบประมาณในการ ซ่อมแซม	Cast In place	รูปแบบ ที่ 1	รูปแบบ ที่ 3	รูปแบบ ที่ 5	รูปแบบ ที่ 6	รูปแบบ ที่ 7	รูปแบบ ที่ 8	รูปแบบ ที่ 9	รูปแบบ ที่ 10	รูปแบบ ที่ 11	รูปแบบ ที่ 12	รูปแบบ ที่ 13	(ผลรวม/ จำนวนวิธี x100%)
1 Cast In place	0.30	0.27	0.39	0.27	0.39	0.27	0.27	0.27	0.18	0.27	0.18	0.27	28
2 รูปแบบที่ 1	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05	0.08	0.05	6
3 รูปแบบที่ 3	0.10	0.16	0.13	0.16	0.13	0.16	0.16	0.16	0.13	0.16	0.13	0.16	14
4 รูปแบบที่ 5	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05	0.08	0.05	6
5 รูปแบบที่ 6	0.10	0.16	0.13	0.16	0.13	0.16	0.16	0.16	0.13	0.16	0.13	0.16	14
6 รูปแบบที่ 7	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05	0.08	0.05	6
7 รูปแบบที่ 8	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05	0.08	0.05	6
8 รูปแบบที่ 9	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05	0.08	0.05	6
9 รูปแบบที่ 10	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	2
10 รูปแบบที่ 11	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05	0.08	0.05	6
11 รูปแบบที่ 12	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	2
12 รูปแบบที่ 13	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05	0.08	0.05	6
รวม	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	100.00

ตารางผนวก ค 11 ตารางเปรียบเทียบค่าความแตกต่างการให้คะแนนความสะดวกในการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ ตามระบบ Hierarchy

ความสะดวกในการ จัดหาวัสดุอุปกรณ์	Cast In place	รูปแบบที่											
		1	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1 Cast In place	0	2	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1
2 รูปแบบที่ 1	-2	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
3 รูปแบบที่ 3	-2	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
4 รูปแบบที่ 5	-2	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
5 รูปแบบที่ 6	-1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
6 รูปแบบที่ 7	-2	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
7 รูปแบบที่ 8	-2	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
8 รูปแบบที่ 9	-1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
9 รูปแบบที่ 10	-1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
10 รูปแบบที่ 11	-1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
11 รูปแบบที่ 12	-1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
12 รูปแบบที่ 13	-1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0

ตารางผนวก ค 12 การให้คะแนนความสะดวกในการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ในการก่อสร้าง ตามระบบ Hierarchy

ความสะดวกในการ จัดหาวัสดุอุปกรณ์		Cast											
		In place	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 5	รูปแบบที่ 6	รูปแบบที่ 7	รูปแบบที่ 8	รูปแบบที่ 9	รูปแบบที่ 10	รูปแบบที่ 11	รูปแบบที่ 12	รูปแบบที่ 13
1	Cast In place	1	5	5	5	3	5	5	3	3	3	3	3
2	รูปแบบที่ 1	1/5	1	1	1	1/3	1	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
3	รูปแบบที่ 3	1/5	1	1	1	1/3	1	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
4	รูปแบบที่ 5	1/5	1	1	1	1/3	1	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
5	รูปแบบที่ 6	1/3	3	3	3	1	3	3	1	1	1	1	1
6	รูปแบบที่ 7	1/5	1	1	1	1/3	1	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
7	รูปแบบที่ 8	1/5	1	1	1	1/3	1	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
8	รูปแบบที่ 9	1/3	3	3	3	1	3	3	1	1	1	1	1
9	รูปแบบที่ 10	1/3	3	3	3	1	3	3	1	1	1	1	1
10	รูปแบบที่ 11	1/3	3	3	3	1	3	3	1	1	1	1	1
11	รูปแบบที่ 12	1/3	3	3	3	1	3	3	1	1	1	1	1
12	รูปแบบที่ 13	1/3	3	3	3	1	3	3	1	1	1	1	1
รวม		4.00	28.00	28.00	28.00	10.67	28.00	28.00	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67

ตารางผนวก ค 13 สรุปคะแนนความสะดวกในการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ในการก่อสร้าง ตามระบบ Hierarchy

ความสะดวกในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์		Cast In place	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 5	รูปแบบที่ 6	รูปแบบที่ 7	รูปแบบที่ 8	รูปแบบที่ 9	รูปแบบที่ 10	รูปแบบที่ 11	รูปแบบที่ 12	รูปแบบที่ 13	(ผลรวม/จำนวนวิธี x100%)
1	Cast In place	0.25	0.18	0.18	0.18	0.28	0.18	0.18	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	24
2	รูปแบบที่ 1	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	3
3	รูปแบบที่ 3	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	3
4	รูปแบบที่ 5	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	3
5	รูปแบบที่ 6	0.08	0.11	0.11	0.11	0.09	0.11	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	10
6	รูปแบบที่ 7	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	3
7	รูปแบบที่ 8	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	3
8	รูปแบบที่ 9	0.08	0.11	0.11	0.11	0.09	0.11	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	10
9	รูปแบบที่ 10	0.08	0.11	0.11	0.11	0.09	0.11	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	10
10	รูปแบบที่ 11	0.08	0.11	0.11	0.11	0.09	0.11	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	10
11	รูปแบบที่ 12	0.08	0.11	0.11	0.11	0.09	0.11	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	10
12	รูปแบบที่ 13	0.08	0.11	0.11	0.11	0.09	0.11	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	10
รวม		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	100.00

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายณัฐพล เสรีเผ่าวงศ์
เกิดวันที่	14 ธันวาคม 2530
สถานที่เกิด	อำเภอคลองขลุง จังหวัดกำแพงเพชร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ตำแหน่งปัจจุบัน	นักศึกษา
สถานศึกษา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน