การประเมินผลระหว่างการก่อสร้าง ถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) สายแรกของกรมทางหลวง ทล. 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1

โดย

นายจุฑา สุนิตย์สกุล

นายชัยรัตน์ ศุภชวโรจน์

นายศักดิ์ชัย ปราบมะเริง

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ

บทความนี้เป็นความคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น กรมทางหลวงไม่มีส่วนเกี่ยวข้องแต่อย่างใด

การประเมินผลระหว่างการก่อสร้าง ถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) สายแรกของกรมทางหลวง ทล. 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1

นายจุฑา สุนิตย์สกุล
นายชัยรัตน์ ศุภชวโรจน์
นายศักดิ์ชัย ปราบมะเริง
สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ

1. บทนำ

โครงการบูรณะทางหลวงหมายเลข 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1 ระหว่าง กม. 0+500 – กม. 16+110 เป็นส่วนหนึ่งของโครงการบูรณะโครงข่ายสายหลักระหว่างภาค ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของนโยบายของรัฐบาลในการเร่งรัดพัฒนาระบบคมนาคมของประเทศและได้รับงบประมาณในการก่อสร้างในปี พ.ศ. 2558 โดยมีจุดประสงค์ในการบูรณะ เพื่อพัฒนาระบบทางหลวงในปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพ รองรับการจราจรที่เพิ่มสูงขึ้นในอนาคต เป็นการอำนวยความสะดวก รวดเร็ว เพิ่มความปลอดภัยในการเดินทาง และประโยชน์ของประชาชนเป็นหลัก สภาพถนนก่อนการบูรณะ เกิดความเสียหายเป็นรอยแตกร้าว บางส่วนเสียระดับ และมีเศษวัสดุมวลละเอียดทะลักขึ้นมาตามรอยแตกของผิวทาง เมื่อฝนตกผิวทางจะลื่นเป็นเหตุให้เกิดอุบัติเหตุบ่อย และมีการร้องเรียนอยู่เสมอ ตามภาพที่ 1

ผู้ออกแบบแนะนำโครงสร้างชั้นทาง สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ ได้พิจารณาแล้วเห็นว่าการนำถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) มีภาระในการบำรุงรักษาน้อยและมีความเหมาะสมปริมาณการจราจรกับโครงการนี้ ประกอบกับ กรมทางหลวง ได้จัดทำแบบมาตรฐานคอนกรีตแบบไร้รอยต่อแล้วเสร็จ จึงได้พิจารณาออกแบบถนนสายดังกล่าวเป็นถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อเป็นโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่โครงการแรกของกรมทางหลวง ซึ่งกรมทางหลวง ได้ดำเนินการก่อสร้างถนน CRCP ที่ก่อสร้างในพื้นที่หน้าด่านเก็บค่าผ่านทางพานทอง ทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองกรุงเทพ –ชลบุรี ซึ่งนับได้ว่าเป็นโครงการก่อสร้างถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ CRCP สายแรกของกรมทางหลวง

รูปแบบกายภาพถนนของโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 331 สายแยกทางหลวงหมายเลข 7 (บ.เนินผาสุข) – บรรจบทางหลวงหมายเลข 331 (มาบเอียง) ตอน 1 เดิมเป็นแบบ 4 ช่องจราจร กรมทางหลวง จะดำเนินการบูรณะก่อสร้างเป็นมาตรฐานชั้นทางพิเศษ 6 ช่องจราจร 8 ช่องจราจร และ 12 ช่องจราจร ไป-กลับ กว้างช่องจราจรละ 3.50 เมตร ไหล่ทางด้านนอกกว้างด้านละ 2.50 เมตร เกาะกลางเป็นเกาะยกร่อง (Raised Median) และ Concrete Barrier Type II ผิวทางเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไร้รอยต่อ

บทความนี้รวบรวมการควบคุมคุณภาพวัสดุฯ การติดตาม การตรวจวัด การเก็บข้อมูลรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวกับการก่อสร้างผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไร้รอยต่อ ตั้งแต่ก่อนเริ่มก่อสร้าง ระหว่างก่อสร้าง และหลังจากเปิดใช้ผิวทางคอนกรีต เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในช่วงที่ทำการก่อสร้างและหลังการก่อสร้าง เพื่อจะได้เป็นแนวทางในการควบคุมการก่อสร้างผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไร้รอยต่อและใช้ประกอบการพิจารณาการออกแบบแนะนำโครงสร้างชั้นทาง ของสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ ต่อไป

ภาพที่ 1.1 ลักษณะความเสียหายบนทางหลวงหมายเลข 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1 [1]

ภาพที่ 1.2 ลักษณะความเสียหายบนทางหลวงหมายเลข 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1

2. รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง และข้อกำหนดในการก่อสร้าง

2.1 การออกแบบถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP)

ถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) เป็นถนนที่ไม่มีรอยต่อตามขวาง ยกเว้นมีความจำเป็นในการทำรอยต่อก่อสร้างเท่านั้น ซึ่งคอนกรีตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรและมีการยึดรั้ง จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในถนนคอนกรีต ก่อให้เกิดรอยแตกในที่สุด สำหรับถนนคอนกรีตแบบมีรอยต่อ (JRCP) จะทำการตัดรอยต่อเพื่อบังคับรอยแตกให้เกิดรอยแตกขึ้นในจุดที่ทำการตัดรอยต่อ โดยรูปแบบของกรมทางหลวง จะทำการตัดรอยต่อทุกระยะ 10 เมตร

ถนน CRCP จะใช้เหล็กเสริมตามยาวในควบคุมขนาดรอยแตกและระยะระหว่างรอยแตกที่เกิดขึ้น โดยไม่ต้องทำการก่อสร้างรอยต่อเพื่อการหดตัว (Contraction Joint) ซึ่งจะต้องมีการเสริมเหล็กตามแนวยาวให้เพียงพอ เพื่อควบคุมขนาดของรอยแตกให้แคบ สามารถถ่ายแรงจากการจราจรผ่านระหว่างรอยแตกที่เกิดขึ้น โดย Aggregate Interlock ทำให้ถนน CRCP สามารถรับน้ำหนักจราจรได้ ไม่เกิดความเสียหายและรอยแตกที่แคบทำให้น้ำซึมผ่านคอนกรีตมีน้อย ลดการอัดทะลัก ที่จะเกิดขึ้นต่อไป

การออกแบบถนน CRCP แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ (1) การออกแบบความหนาถนนคอนกรีต และ (2) การออกแบบปริมาณเหล็กเสริม โดยขั้นตอนการออกแบบได้นำเสนอในบทความตาม [2] การออกแบบเหล็กเสริมจะมีประเด็นที่ต้องพิจารณาดังนี้

1. ระยะห่างระหว่างรอยแตก

ระยะห่างระหว่างรอยแตกจะต้องมีค่าไม่น้อยเกินไปและไม่มากเกินไป เนื่องจากระยะห่างระหว่างรอยแตกใกล้มากเกินไป จะทำให้ถนน CRCP มีพฤติกรรมเหมือนกับคานซึ่งจะรับแรงดัดก่อให้เกิดรอยแตกตามยาวขึ้น ทำให้เกิดความเสียหายที่เรียกว่า Punchout ในขณะที่ระยะระหว่างรอยแตกที่มากเกินไป จะให้ให้เกิดรอยแตกที่เกิดขึ้นมีขนาดกว้าง ซึ่งจะมีผลต่อการถ่ายแรง น้ำสามารถซึมสู่ชั้นทางด้านล่าง และอาจเกิดผิวหลุดได้ง่าย เพื่อลดความเสียหายทั้งสองแบบที่อาจจะเกิดขึ้น AASHTO-1993 [4] ได้แนะนำให้ควบคุมรอยแตกตามขวางให้อยู่ในช่วงระยะ 1.1 – 2.4 เมตร อย่างไรก็ตามพบว่าหากชั้นดินฐานรากและโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรง ระยะห่างระหว่างรอยแตกที่น้อยกว่า 0.6 เมตร ให้ผลที่น่าพึงพอใจ [3]

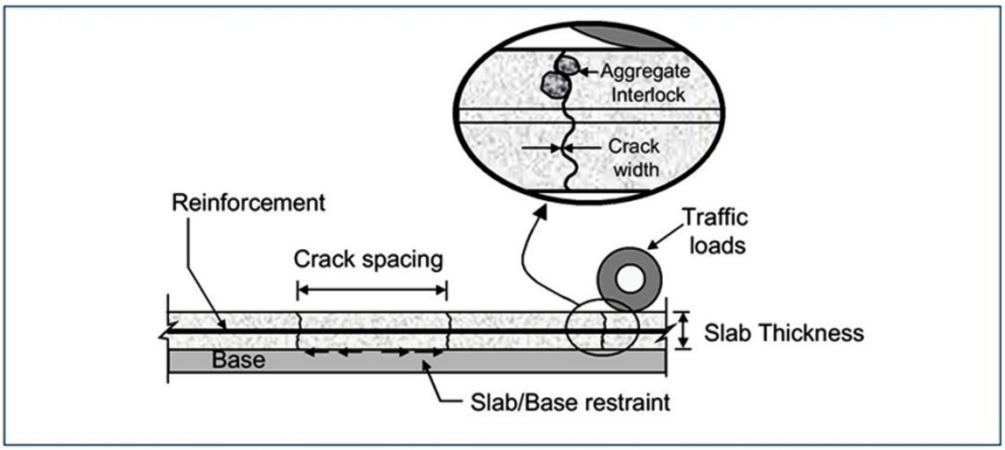
2. ความกว้างของรอยแตก

ความกว้างของรอยแตกเป็นปัจจัยสำคัญ ต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของถนน CRCP เนื่องจากความกว้างรอยแตกที่กว้างเกินไปจะทำให้น้ำซึมผ่านได้ เหล็กเสริมเกิดสนิม และทำให้ชั้นโครงสร้างชั้นทางเกิดการอ่อนตัว การถ่ายน้ำหนักการจราจรทำได้ไม่ดีและอาจเกิดการ Pumping ได้ ก่อให้เกิดโพรงใต้ถนนคอนกรีต และเกิดการแตกร้าวในที่สุด โดย [4] ได้แนะนำให้จำกัดความกว้างรอยแตกไม่ให้มีความกว้างมากกว่า 1.0 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามพบว่าความกว้างของรอยแตกที่จะช่วยให้น้ำไม่ซึม

ผ่านรอยแตกควรมีความกว้างไม่เกิน 0.6 มิลลิเมตร ภาพที่ 2 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ

3. หน่วยแรงในเหล็กเสริม

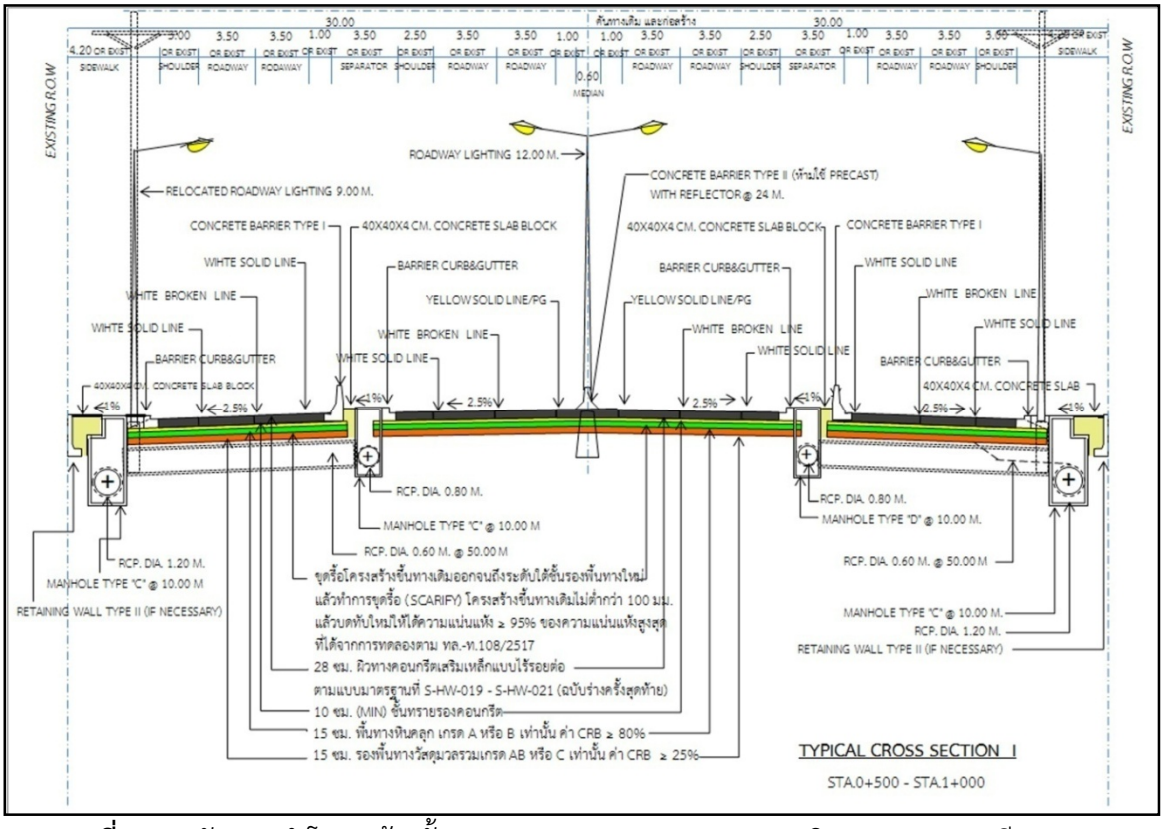
จากผลของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีต เหล็กเสริมจะมีผลต่อประสิทธิภาพของถนนคอนกรีต CRCP ในระยะยาว ช่วยยึดรั้งรอยแตกในคอนกรีตให้แคบ เหล็กเสริมจึงต้องมีกำลังรับแรงดึงที่เพียงพอที่จะรับแรงกระทำดังกล่าว และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะต้องไม่มากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงที่จุดคลาก [4]



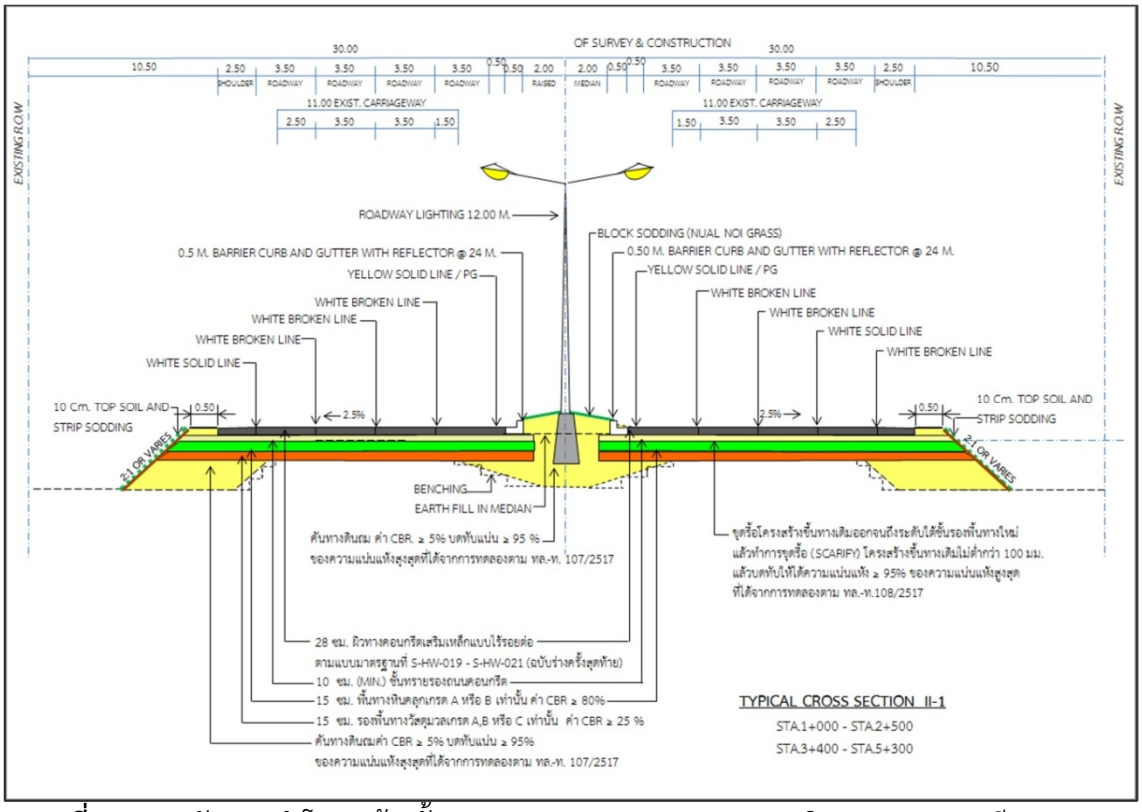
ภาพที่ 2 รูปแสดงปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) [3]

2.2 รูปตัดแนะนำโครงสร้างชั้นทาง

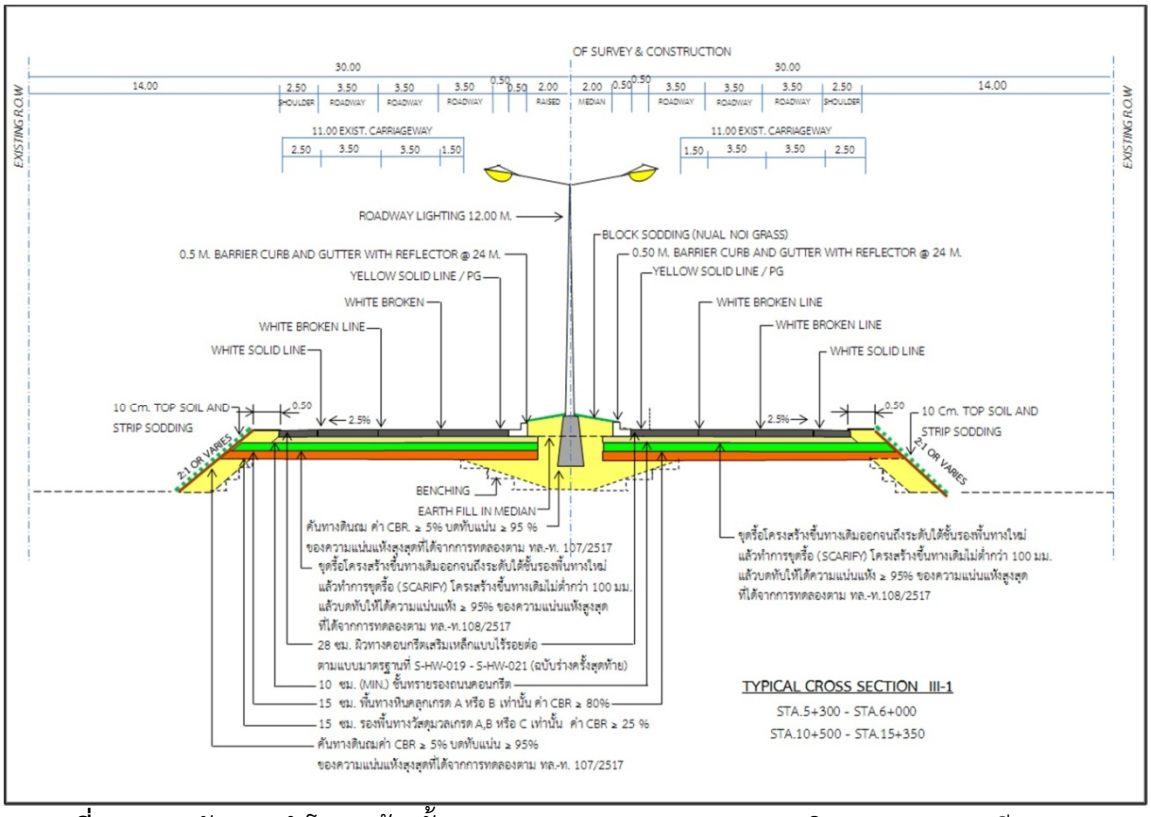
กรมทางหลวงบูรณะ ได้ดำเนินการบูรณะทางหลวงหมายเลข 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1 กม. 0+500 – กม. 16+110 เป็นมาตรฐานชั้นทางพิเศษ 6 ช่องจราจร 8 ช่องจราจร และ 12 ช่องจราจร ไป-กลับ ความกว้างช่องจราจรละ 3.50 เมตร ไหล่ทางด้านนอกกว้างข้างละ 2.50 เมตร เกาะกลางเป็น (Raised Median) และ Concrete Barrier Type II ขึ้นอยู่สภาพพื้นที่ ผิวทางเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไร้รอยต่อ (CRCP) รูปตัดโครงสร้างชั้นทางโครงการบูรณะทางหลวงหมายเลข 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1 แสดงในภาพที่ 3 ถึง ภาพที่ 5



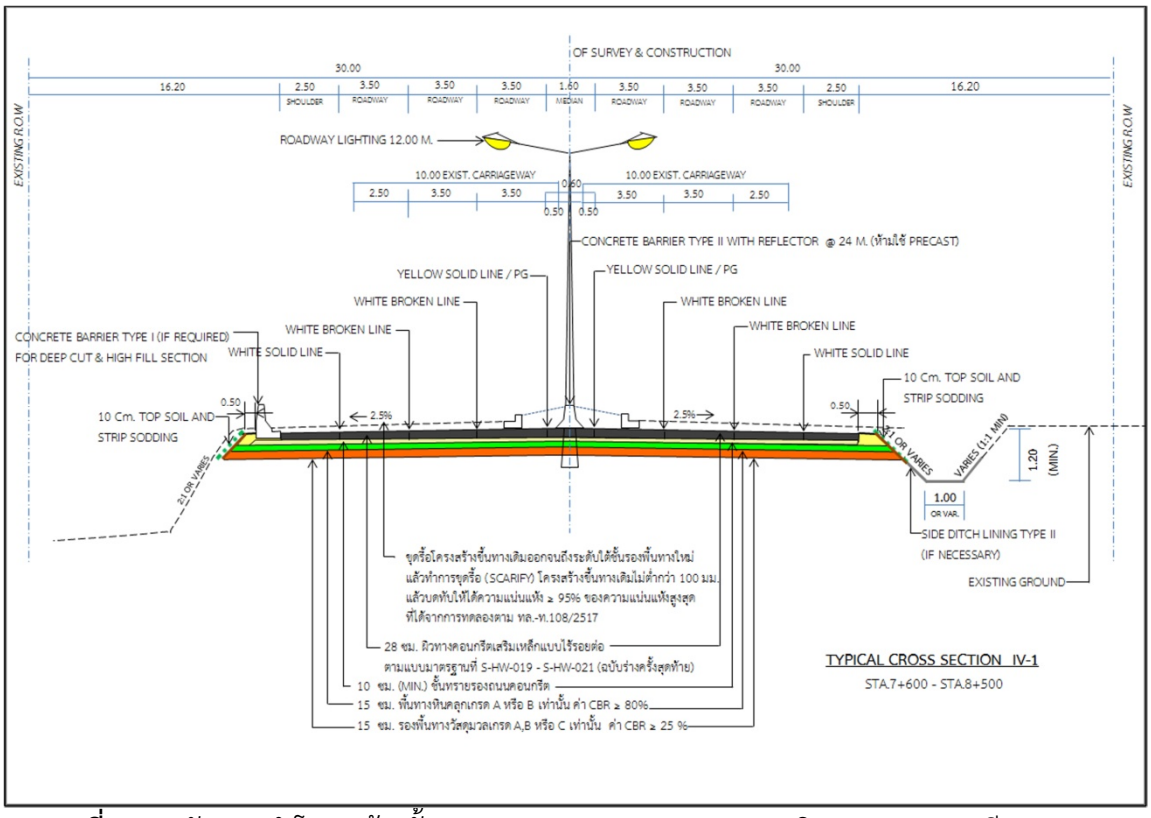
ภาพที่ 3 รูปตัดแนะนำโครงสร้างชั้นทางทางหลวงหมายเลข 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1



ภาพที่ 4.1 รูปตัดแนะนำโครงสร้างชั้นทางทางหลวงหมายเลข 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1



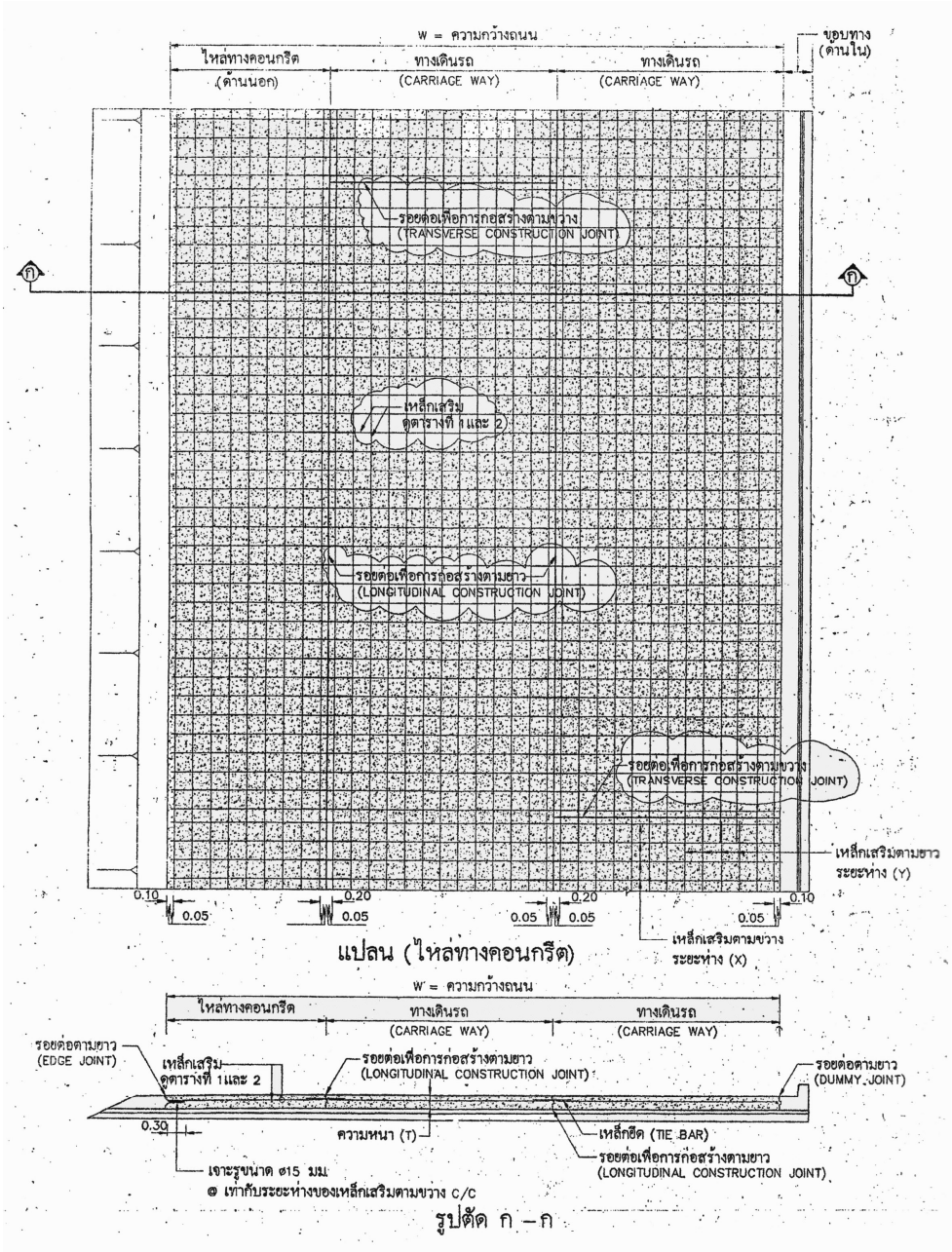
ภาพที่ 4.2 รูปตัดแนะนำโครงสร้างชั้นทางทางหลวงหมายเลข 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1



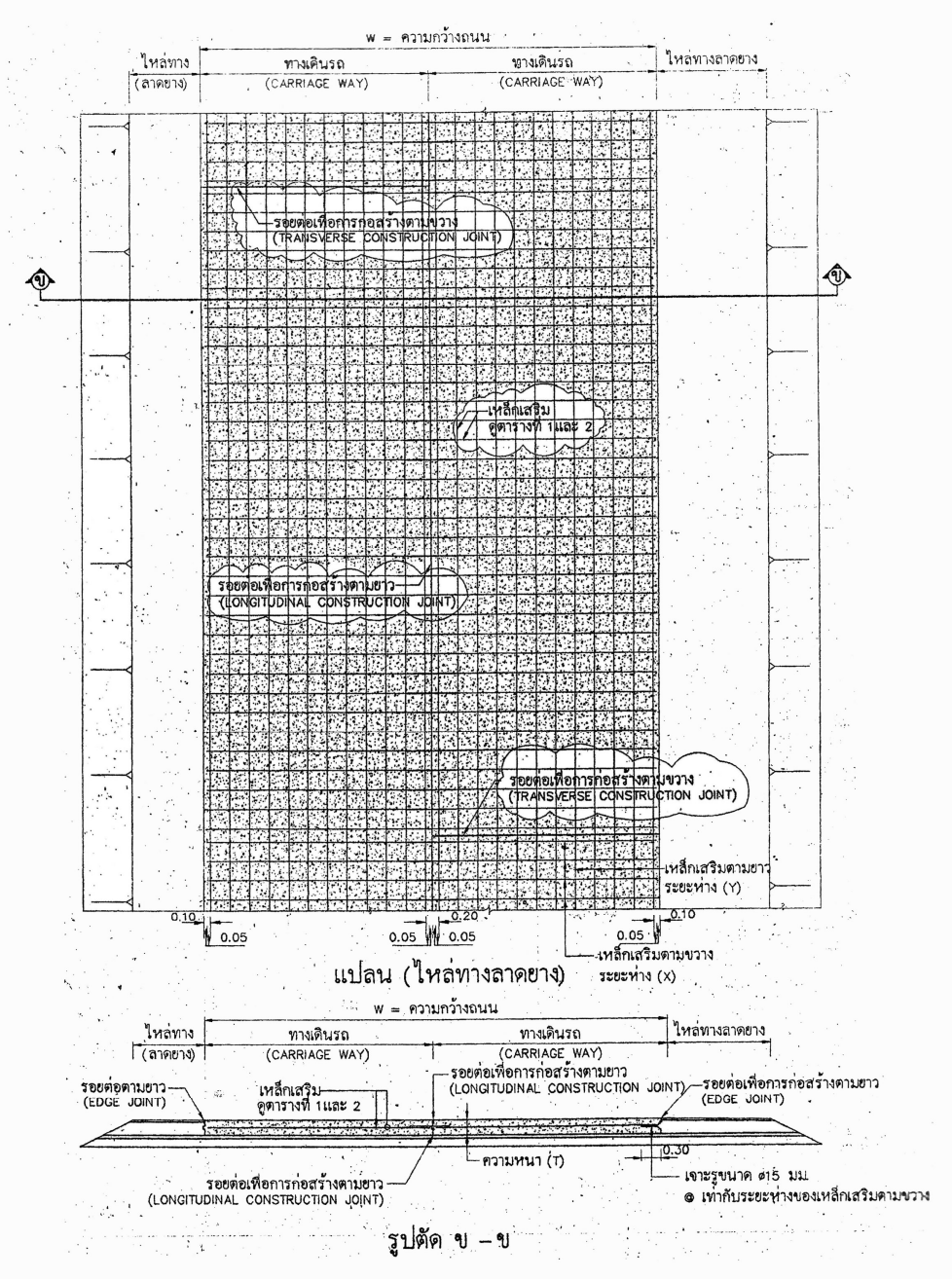
ภาพที่ 5 รูปตัดแนะนำโครงสร้างชั้นทางทางหลวงหมายเลข 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1

2.3 แบบก่อสร้างถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP)

แบบแปลนสำหรับก่อสร้างถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) จะก่อสร้างตามแบบที่ TS-404 ตามภาพที่ 6 – ภาพที่ 7 ผิวทาง CRCP โครงการบูรณะทางหลวงหมายเลข 331 นั้น ใช้ความหนาของผิวทางคอนกรีตหนา 28 เซนติเมตร



ภาพที่ 6 แปลนและรูปตัดแสดงถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) แบบที่ TS-404



ภาพที่ 7 แปลนและรูปตัดแสดงถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) แบบที่ TS-404

2.4 ปริมาณเหล็กเสริม

ปริมาณเหล็กเสริมที่แนะนำในแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง คำนวณตามมาตรฐานที่อ้างอิงจาก [4] โดยตารางที่ 1 แสดงปริมาณเหล็กแสริมตามแนวทิศทางการจราจร และตารางที่ 2 แสดงปริมาณเหล็กตามขวางทิศทางการจราจร เหล็กเสริมเป็นเหล็กข้ออ้อยเกรด SD40 การพิจารณาความกว้างของถนนให้พิจารณาจากความกว้างเต็มรูปแบบ (Ultimate Stage)

ตารางที่ 1 ปริมาณเหล็กเสริมตามยาว (LONGITUDINAL REINFORCEMENT)

ความหนา (T)	ระยะห่างเหล็กเสริมความยาว (Y)	
	DB16	DB20
0.23	0.225	0.30
0.25	0.175	0.25
0.28	0.15	0.20

ตารางที่ 2 ปริมาณเหล็กเสริมตามขวาง (TRANSVERSE REINFORCEMENT)

ชนิดเหล็ก	เหล็กเสริมที่ ความหนา (T) 0.23		เหล็กเสริมที่ ความหนา (T) 0.25		เหล็กเสริมที่ ความหนา (T) 0.28	
	ความกว้างถนนตามขวาง (W)	ระยะห่างเหล็กเสริมตามขวาง (X)	ความกว้างถนนตามขวาง (W)	ระยะห่างเหล็กเสริมตามขวาง (X)	ความกว้างถนนตามขวาง (W)	ระยะห่างเหล็กเสริมตามขวาง (X)
DB12	0 <W≤ 18.60	0.30	0 <W≤ 17.10	0.30	0 <W≤ 15.30	0.30
	18.06 <W≤ 20.30	0.275	17.10 <W≤ 18.60	0.275	15.30 <W≤ 16.60	0.275
	20.30 <W≤ 22.30	0.25	18.60 <W≤ 20.50	0.25	16.60 <W≤ 18.30	0.25
	22.30 <W≤ 24.80	0.225	20.50 <W≤ 23.10	0.225	18.30 <W≤ 20.60	0.225
	24.80 <W≤ 27.90	0.20	23.10 <W≤ 25.60	0.20	20.60 <W≤ 22.90	0.20
	27.90 <W≤ 31.90	0.175	25.60 <W≤ 29.30	0.175	22.90 <W≤ 26.20	0.175
	31.90 <W≤ 37.20	0.15	29.30 <W≤ 34.20	0.15	26.20 <W≤ 30.50	0.15

2.5 การก่อสร้าง

1. การก่อสร้างจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต มาตรฐานที่ ทล.-ม.309/2544 ยกเว้นที่ระบุไว้ในแบบก่อสร้าง โดยก่อสร้างบนชั้นทรายรองถนนคอนกรีตตาม ทล.-ม.211 หรือชั้นหินคลุกรองถนนคอนกรีตตาม ทล.-ม.212

2. คอนกรีตสำหรับก่อสร้างถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- คอนกรีตต้องมีกำลังต้านแรงอัดประลัยไม่น้อยกว่า 35 MPa (350 KSC) สำหรับตัวอย่างแท่งคอนกรีตลูกบาศก์ ขนาด 0.15x0.15x0.15 ม. ที่อายุ 28 วัน โดยคอนกรีตจะต้องมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PORTLAND CEMENT) ไม่น้อยกว่า 350 กก./ลบ.ม. และต้องมีค่า W/C ไม่มากกว่า 0.55 โดยน้ำหนัก และค่ายุบตัวต้องไม่น้อยกว่า 0.03 ม. และไม่มากกว่า 0.07 ม.
- ปูนซีเมนต์ มีคุณสมบัติตาม มอก.15 ประเภท 1 หรือประเภทอื่นที่ได้รับความเห็นชอบ
- วัสดุมวลรวม จะต้องมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดที่ ทล.-ก.201 สำหรับมวลละเอียด และข้อกำหนดที่ ทล.-ก.202 สำหรับมวลหยาบ
- สารเคมีผสมเพิ่ม มีคุณสมบัติตาม มอก.733 จะใช้เมื่อได้รับความเห็นชอบ

3. เหล็กเสริมผิวทางจะใช้ตะแกรงเหล็กเส้น มีคุณสมบัติวัสดุดังนี้

- ตะแกรงเหล็กเส้น มีคุณสมบัติถูกต้องตาม มาตรฐานเลขที่ มอก.24 เกรด SD40 สำหรับเหล็กข้ออ้อย (DEFORMED BAR)

- ระยะหุ้ม (COVERING) จะต้องเป็นไปตามที่ระบุไว้ในแบบ ระยะในการทาบเหล็กเส้นและตะแกรงลวดเหล็กกล้าข้ออ้อยเชื่อมติดเสริมคอนกรีตต้องไม่น้อยกว่า 40 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กและไม่น้อยกว่าระยะห่างของเหล็ก (SPACING) ±0.05 ม.

4. การออกแบบปริมาณเหล็กเสริมตามแนวขวางต้องใช้ความกว้างของถนนที่ระยะ ULTIMATE STAGE โดยความกว้างของถนน (W) วัดจากขอบอิสระถึงขอบอิสระ

5. การเทคอนกรีตต้องใช้เครื่องปูผิวทางคอนกรีต (CONCRETE PAVER) ในกรณีจำเป็นที่จะต้องเทคอนกรีตด้วยแรงงานคน เทได้เฉพาะช่วงที่เว้นไว้ยาวติดต่อไม่เกิน 30 เมตร

6. พิกัดความสามารถเทได้ของคอนกรีต ค่าความยุบตัวของคอนกรีต ไม่น้อยกว่า 0.03 ม. และไม่มากกว่า 0.07 ม. ค่ายุบตัวทดลองตาม ทล.-ท.304 ในกรณีใช้เครื่องปูแบบเลื่อนค่ายุบตัวต้องอยู่ในช่วง ±0.02 ม. จากค่ายุบตัวที่ออกแบบไว้

7. เครื่องปูคอนกรีต จะต้องเป็นเครื่องที่เลื่อนไปมาอัตโนมัติบนแท่นหล่อหรือ บนรางที่ติดตั้งไว้ด้านข้างแบบหล่อ พร้อมติดตั้งเครื่องเกลี่ยคอนกรีตให้แผ่กระจายเต็มผิวหน้าของแบบ

8. เครื่องสั่นสะเทือน จะต้องสั่นสะเทือนได้เต็มความกว้างของแผ่นพื้นที่หล่อ ทั้งชนิดแผ่นสั่นสะเทือนหรือชนิดสั่นสะเทือนภายใน แต่จะต้องไม่กระทบกับแบบหล่อ เหล็กเดือยหรือเหล็กยึด

9. รอยต่อเพื่อการก่อสร้างตามขวาง (TRANSVERSE CONSTRUTION JOINT) และรอยต่อเพื่อการก่อสร้างตามยาว (LONGITUDINAL CONSTRUCTION JOINT) ต้องก่อสร้างโดยใช้เครื่องตัดคอนกรีต (SLOT CUTTING MACHINE) เท่านั้น ห้ามใช้ไม้ โฟม หรือวัสดุต่างๆ ในการคั่นทำรอยต่อ

10. แผ่นพลาสติกรองพื้นทางคอนกรีต (PLASTIC SHEET) ที่ใช้ในการก่อสร้างต้องเป็นไปตามข้อกำหนดตามแบบเลขที่ TS-402

11. ความหนาของผิวทางคอนกรีตแบบต่อเนื่อง กำหนดโดยวิศวกรผู้ออกแบบตามรูปตัดถนนของโครงการ

12. ผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่อง (CRCP) มีการเสริมเหล็กตลอดความยาวของถนนเพื่อช่วยในการถ่ายน้ำหนัก การใช้ผิวทางคอนกรีต CRCP จะสามารถช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้น ในบริเวณรอยต่อต่างๆ ลดความเสียหายที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน

13. การออกแบบความหนาของผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไร้รอยต่อ (CRCP) ใช้หลักการออกแบบเดียวกันกับการออกแบบความหนาของผิวคอนกรีตเสริมเหล็กแบบมีรอยต่อ (JRCP)

14. การออกแบบเหล็กเสริมในผิวทางคอนกรีตเหล็กแบบต่อเนื่อง (CRCP) ใช้หลักการออกแบบ AASHTO 1993

15. แบบรอยต่อก่อสร้างสำหรับผิวทางคอนกรีตแบบต่อเนื่องแสดงในแบบเลขที่ TS-405

16. แบบรอยต่อที่จุดปลายของสำหรับผิวทางคอนกรีตแบบต่อเนื่องแสดงในแบบเลขที่ TS-406

17. ระยะหุ้ม (COVERING) จะต้องเป็นไปตามที่ระบุไว้ในแบบ ระยะในการทาบเหล็กเส้นและตะแกรงลวดเหล็กกล้าข้ออ้อยเชื่อมติดเสริมคอนกรีตต้องไม่น้อยกว่า 40 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กและไม่น้อยกว่าระยะห่างของเหล็ก (SPACING) ±0.05 ม. การทาบเหล็กต้องไม่ทาบเหล็กอยู่ในหน้าตัดเดียวกันทั้งหมด

18. รอยต่อเพื่อการก่อสร้างตามยาว (LONGITUDINAL CONSTRUCTION JOINT) จะต้องก่อสร้างโดยเครื่องตัดคอนกรีต (SLOT CUTTER MACHINE) ลึก 0.05 เมตร รอยต่อเพื่อการหดตัวตามยาว (LONGITUDINAL CONTRACTION JOINT) ความลึกของการตัดเท่ากับ 1/3 ของความหนาแผ่นถนนคอนกรีต (1/3) และแผ่นผิวทางคอนกรีตที่อยู่ติดกันจะต้องยึดด้วยเหล็กยึด (TIE BARS) เพื่อป้องกันการแยกออกจากกันของผิวทางคอนกรีต โดยเหล็กยึดจะต้องมีขนาดและระยะห่างเท่ากันกับเหล็กเสริมตามขวาง รอยต่อเพื่อการก่อสร้างตามยาวไม่ควรห่างกันเกินกว่า 4.50 เมตร เพื่อป้องกันปัญหารอยแตกตามแนวยาวที่อาจเกิดขึ้นได้

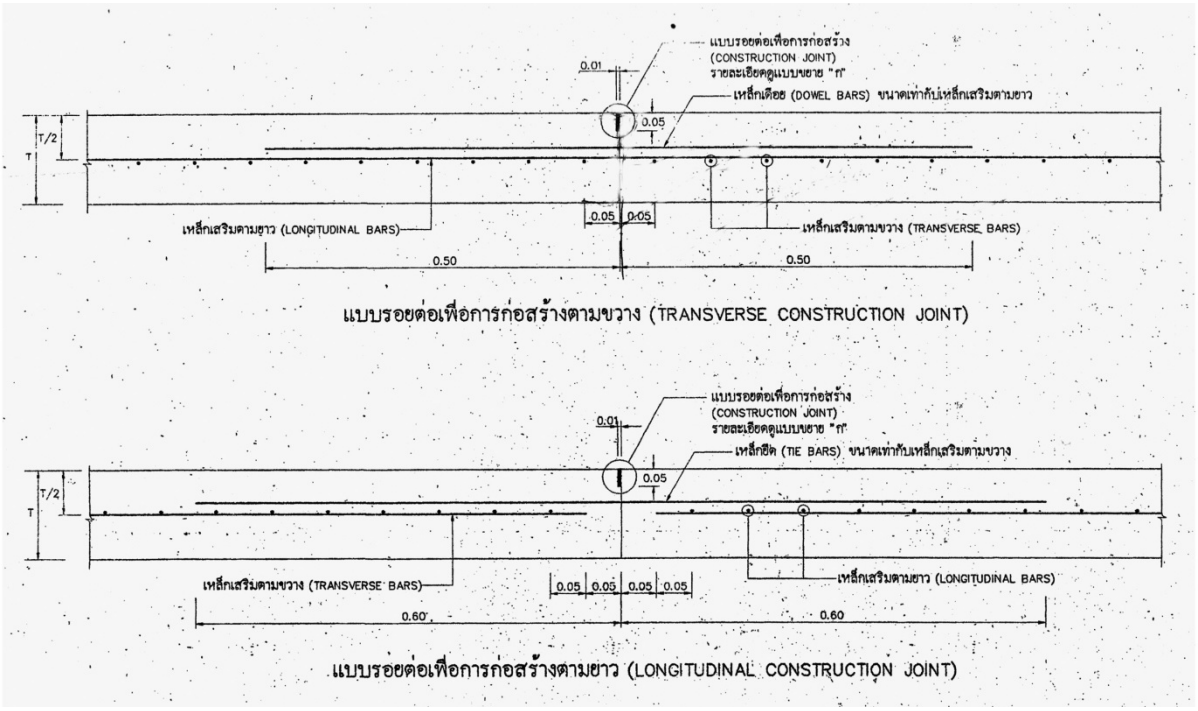
19. รอยต่อก่อสร้างตามขวาง จะต้องก่อสร้างโดยใช้ไม้อัด หรือแบบเหล็ก เจาะเป็นช่อง เพื่อให้วางตัดกับแนวผิวทางคอนกรีต โดยจัดให้เหล็กเสริมตามยาววิ่งผ่านตามรูที่เจาะเป็นช่องไว้ และตรงรอยต่อก่อสร้างตามขวาง จะต้องเสริมด้วยเหล็กเดือย (DOWEL) ที่มีขนาด และระยะห่างเท่ากันกับเหล็กเสริมตามยาว โดยเหล็กเดือยนี้มีความยาวเท่ากับ 1.00 เมตร และไม่ควรมีการต่อทาบเหล็กเสริมยาวในบริเวณ 1.00 เมตร เมื่อหยุดการก่อสร้าง และ 3.00 เมตรในบริเวณที่เริ่มก่อสร้าง

20. กรณีที่มีการหยุดการเทคอนกรีตตามแนวขวาง ในระหว่างการก่อสร้างจะต้องทำรอยต่อเพื่อการก่อสร้างตามขวาง (TRANSVERSE CONCTRUCTION JOINT) และถ้าหากเทคอนกรีตครั้งถัดไปแตกต่างจากผิวคอนกรีตเดิมเกิน 5 วัน ต้องทำการปกคลุมผิวทางคอนกรีตในส่วนที่เทเสร็จก่อนออกไปเป็นระยะ 70 เมตร เพื่อปรับอุณหภูมิคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ให้ใกล้เคียงกัน และช่วยลดหน่วยแรงดึงที่จะเกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่

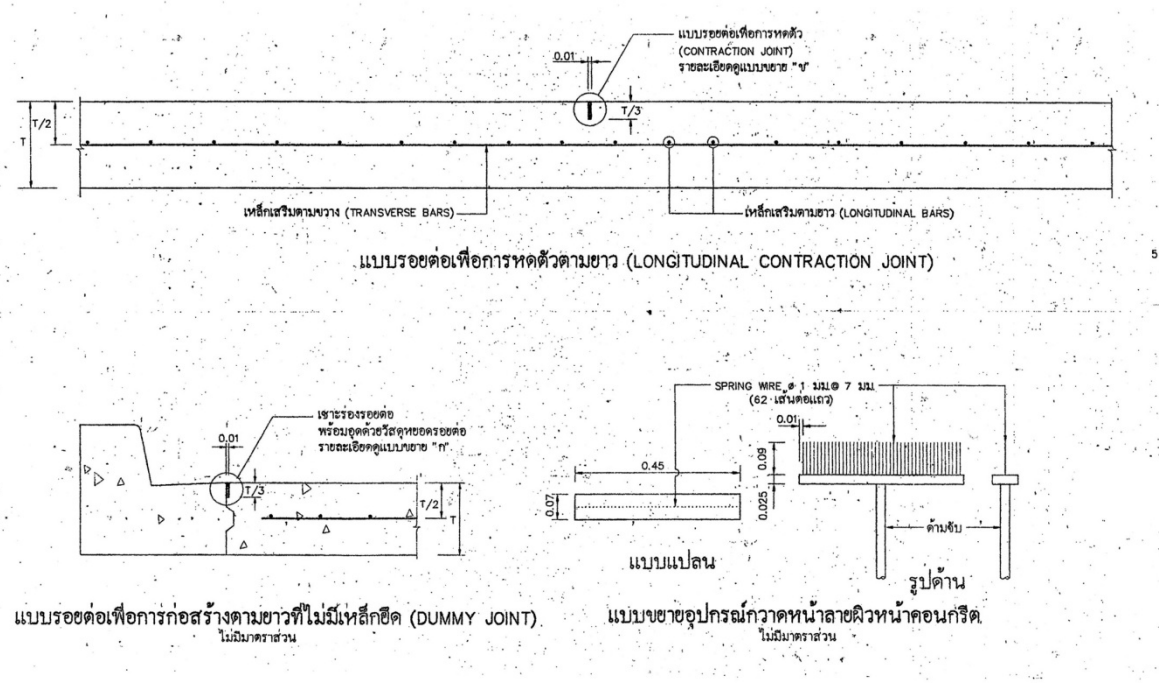
21. รอยต่อที่จุดปลายของ CRCP (TERMINAL JOINT) จะต้องติดตั้งในบริเวณที่เป็นจุดสิ้นสุดของผิวทาง CRCP หรือบริเวณที่เป็นจุดเชื่อมต่อกับโครงสร้างสะพานหรือแผ่นพื้นคอนกรีตบริเวณคอสะพาน (APPROACH SLAB) หรือเชื่อมต่อกับผิวทางคอนกรีตแบบมีรอยต่อ (JRCP) เพื่อควบคุมการเคลื่อนตัวของผิวทาง CRCP ในบริเวณกังกล่าว

22. รายละเอียดเหล็กเสริมตามยาว และเหล็กเสริมตามขวางแสดงในแบบเลขที่ TS-404

23. การแต่งผิวคอนกรีต และการกวาดหน้าลายผิวทางคอนกรีตจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ มาตรฐานที่ ทล.-ม.309/2544 ยกเว้นที่ระบุไว้ในแบบ



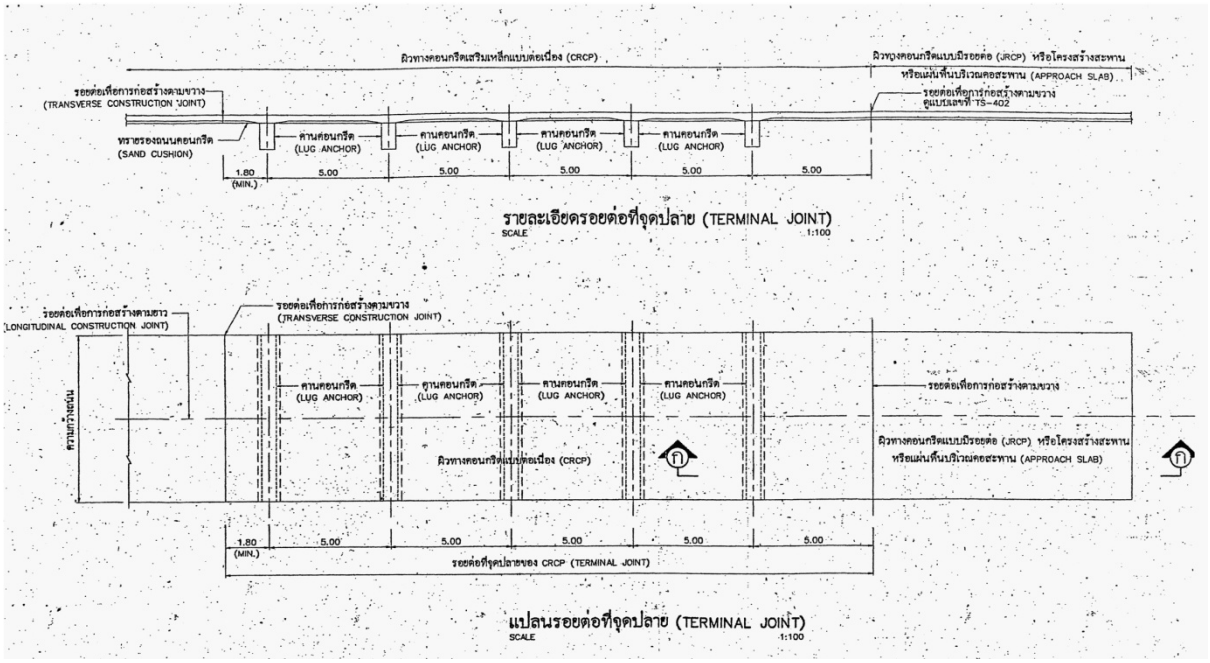
ภาพที่ 8 รอยต่อก่อสร้าง ถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) แบบที่ TS-405



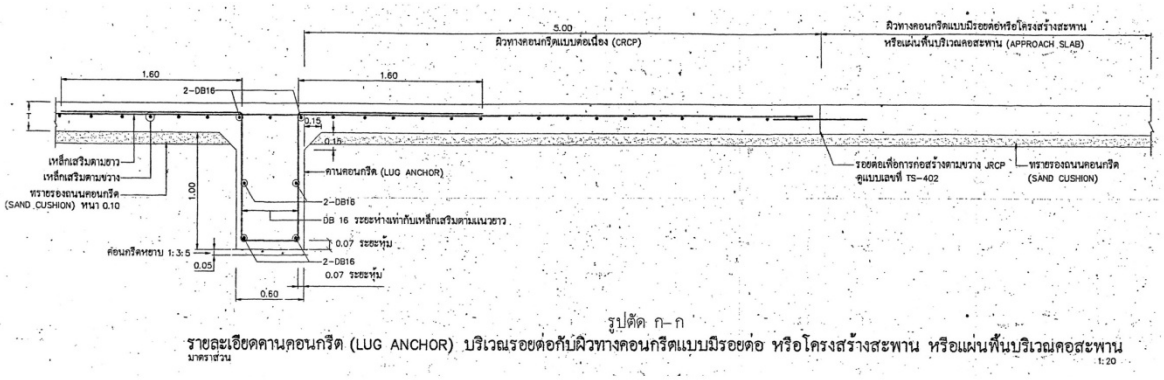
ภาพที่ 9 รอยต่อก่อสร้าง ถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) แบบที่ TS-405

2.6 Terminal Joint

เมื่อดำเนินการก่อสร้างถึงจุดสิ้นสุดของถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) หรือที่จุดเชื่อมต่อกับโครงสร้างสะพาน หรือ Approach Slab หรือที่จุดเชื่อมต่อกับถนนคอนกรีตแบบมีรอยต่อ (JRCP) จะต้องทำการก่อสร้าง Terminal Joint เพื่อควบคุมการเคลื่อนตัวของถนน CRCP รูปแบบของ Terminal Joint ตามภาพที่ 10 และภาพที่ 11



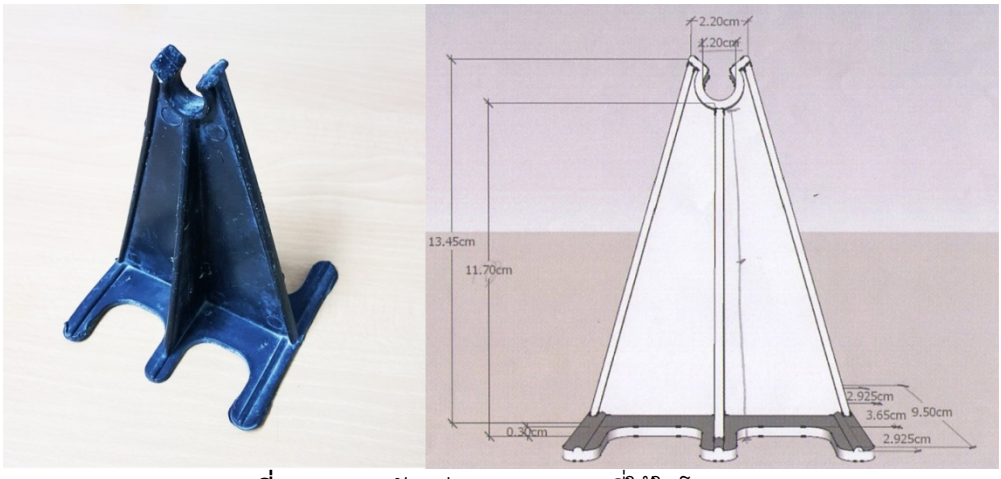
ภาพที่ 10 รูปแบบ Terminal Joint ตามแบบมาตรฐาน TS-406



ภาพที่ 11 รูปแบบ Terminal Joint ตามแบบมาตรฐาน TS-406

2.7 ขาตั้งรองรับเหล็กเสริม (Bar Chair)

วัตถุประสงค์ของ Bar Chair ใช้เพื่อยึดเหล็กให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ โดยจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักของเหล็กเสริม ไม่จมลงไปในชั้นทรายรองถนนคอนกรีต และไม่เกิดการเคลื่อนตัวจากกระบวนการเทคอนกรีต ซึ่ง Bar Chair มีการผลิตเพื่อการจำหน่ายเพิงพานิชย์ ผลิตจากวัสดุพลาสติก และโลหะ ในโครงการฯ ใช้ Bar Chair ที่ผลิตจากวัสดุพลาสติก ในแบบมาตรฐานคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) ไม่ได้แสดงลักษณะของ Bar Chair โดยผู้รับจ้างโครงการฯ ได้นำเสนอ Bar Chair ตามที่แสดงในภาพที่ 12 และภาพที่ 13 แสดงการติดตั้ง Bar Chair ในโครงการฯ



ภาพที่ 12 แสดงตัวอย่าง Bar Chair ที่ใช้ในโครงการฯ

ภาพที่ 13 แสดงตัวอย่างการติดตั้ง Bar Chair ที่ใช้ในโครงการฯ

เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นจากการฝังขาตั้งพลาสติกต่อกำลังรับแรงอัดของตอนกรีต จึงได้ทำการเก็บตัวอย่างแท่งคอนกรีต โดยนำขาตั้งพลาสติกฝังในแบบหล่อลูกบาศก์ (Cube) ตามที่แสดงภาพที่ 14 แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัดเปรียบเทียบกับแท่งตัวอย่างที่ไม่ฝังขาตั้ง ผลการทดลองกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ใส่ขาตั้งและใส่ขาตั้งมีค่าเท่ากับ 450.0 ksc. และ 438.7 ksc. ตามลำดับ ก้อนตัวอย่างฯ แบบใส่ขาตั้งกำลังรับแรงอัดลดลงประมาณร้อยละ 2.5 ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้างฯ

ภาพที่ 14 แสดงตัวอย่างการฝัง Bar Chair ในแท่งคอนกรีตทดสอบกำลังรับแรงอัด

3. การก่อสร้าง

ลักษณะงานโครงสร้างชั้นทางของโครงการฯ เป็นการขยายคันทางเพิ่มช่องจราจรออกทั้งสองข้างในส่วนขยายจะมีการก่อสร้างตั้งแต่ชั้นดินถม ชั้นรองพื้นทาง และชั้นพื้นทางหินคลุก ส่วนคันทางเดิมจะมีการรื้อชั้นผิวทางเดิมที่เสียหายออกจนถึงระดับใต้ชั้นรองพื้นทางใหม่ และจะทำการก่อสร้างชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางหินคลุก จากนั้นจะทำการก่อสร้างถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) ซึ่งจะมีขั้นตอนการก่อสร้างหลายขั้นตอนดังนี้

3.1 เครื่องจักรและเครื่องมือ

เครื่องจักรที่ใช้ก่อสร้างถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) จะใช้เครื่องปูถนนคอนกรีต (Slip form Paver) ยี่ห้อ Wirtgen รุ่น SP 500 ปูผิวทางคอนกรีตความกว้าง 3.50 เมตร ความหนา 0.28 เมตร ปริมาณงานที่ทำได้ต่อวันเฉลี่ยอยู่ในช่วง 300 – 400 เมตร/วัน ต่อ 1 ช่องจราจร สำหรับการเตรียมพื้นที่ทำงานของเครื่องจักร นั้นจะดำเนินการหลังจากการก่อสร้างชั้นพื้นทางแล้วเสร็จและผ่านการตรวจสอบแนว ระดับ และความแน่น

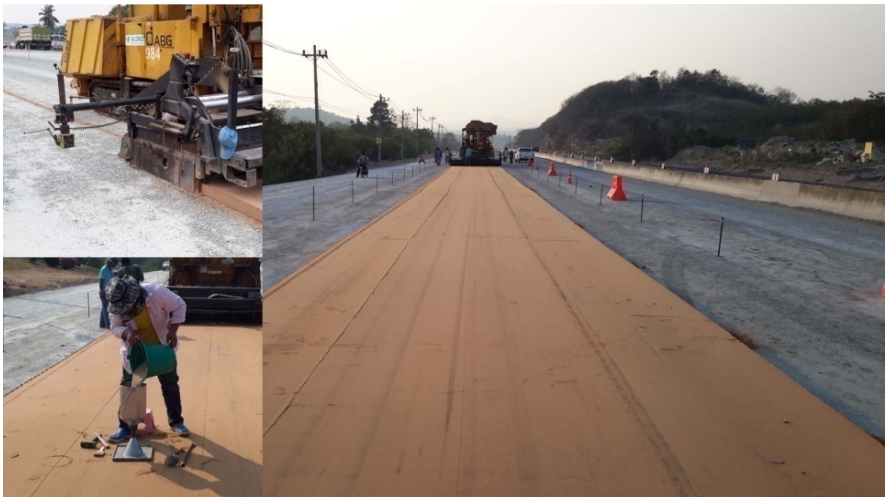
การติดตั้ง Stringline ทั้งสองข้างของเครื่องจักร เพื่อควบคุมแนวทางเดิน (Steering control) และค่าระดับ (Level control) ของเครื่องจักรตามภาพที่ 15 พื้นที่ในการทำงานของเครื่องจักร

ระหว่าง Stringline 2 เส้นมีระยะประมาณ 8 เมตร และจะต้องมีพื้นที่ด้านข้างสำหรับรถขนส่งคอนกรีตที่จะนำมาใช้ก่อสร้าง

ภาพที่ 15 เครื่องปูถนนคอนกรีต (Slip form Paver) ยี่ห้อ Wirtgen รุ่น SP 500

3.2 ทรายรองถนนคอนกรีต (Sand Cushion)

การเตรียมชั้นทรายรองถนนคอนกรีตในโครงการฯ ใช้ Paver ในการปูทรายบนชั้นพื้นทางหินคลุก การควบคุมความหนาของทรายจะใช้ค่าระดับ (Level Control) ของ Stringline ตามภาพที่ 16 จากการทดสอบความแน่นของชั้นทรายด้วย Paver จะได้ค่าความหนาแน่นมากกว่า 1,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด เมื่อเดินผ่านไม่เกิดรอยยุบตัว ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นฐานรองรับขาตั้ง ไม่ทำให้ขาตั้งจมและเหล็กเสริมอยู่ในระดับที่ถูกต้อง



ภาพที่ 16 แสดงการเตรียมชั้นทรายรองถนนคอนกรีต (Sand Cushion)

3.3 การติดตั้งขาตั้งและเหล็กเสริม

การวางเหล็กเสริมจะดำเนินการหลังจากก่อสร้างชั้นทรายรองถนนคอนกรีต (Sand Cushion) แล้วเสร็จ โดยนำขาตั้ง (Bar Chair) สำหรับวางเหล็กทางขวางเป็นบ่ารองรับเหล็กเสริมตามยาว ดังแสดงตามภาพที่ 17 และวางเหล็กเสริมตามยาว (ตามแนวทิศทางการจราจร) ดังแสดงตามภาพที่ 18

ภาพที่ 17 แสดงการติดตั้ง Bar Chair กับเหล็กเสริมตามขวาง

ภาพที่ 18 แสดงการวางเหล็กเสริมตามยาวก่อนเทคอนกรีต

3.4 การเทคอนกรีต

การก่อสร้างถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) โดยใช้เครื่องปูถนนคอนกรีต (Slip form Paver) ดังแสดงในภาพที่ 19 นั้นจะไม่มีการติดตั้งแบบสำหรับเทด้านข้าง คอนกรีตหลังจากผ่านการปูด้วยเครื่องจักรฯ แล้วจะต้องสามารถคงรูป ไม่มีการยุบตัวจนเสียรูป ดังนั้นจึงต้องใช้คอนกรีตที่มีค่ายุบตัว (Slump) ต่ำ เพื่อให้คอนกรีตสามารถพยุงตัวเองได้ ผลจากการทำแปลงทดลองเพื่อหาความเหมาะสมของคอนกรีต ที่จะใช้ปูถนนคอนกรีตโดยใช้เครื่องปูถนนคอนกรีต ค่ายุบตัวสูงสุดของคอนกรีตที่จะไม่เสียรูปหลังจากการปูผิวคอนกรีต จะต้องมีค่ายุบตัวไม่เกิน 0.04 เมตร ทั้งนี้อาจมีการเปลี่ยนขึ้นสัดส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพเครื่องจักรของแต่คัน และสภาพแวดล้อมแต่ละวันก่อสร้างในพื้นที่ก่อสร้าง หลังจากนั้นจึงดำเนินการควบคุณภาพคอนกรีตในขั้นตอนการผลิตคอนกรีตให้อยู่ในช่วงที่ทำงานได้ไม่ยุบตัวเสียรูป

ภาพที่ 19 แสดงการควบคุมคุณภาพคอนกรีตระหว่างก่อสร้าง

3.5 การแต่งผิวหน้าถนนคอนกรีต

เมื่อคอนกรีตผ่านเครื่องปูถนนคอนกรีต จะดำเนินการแต่งผิวหน้าเก็บริ้วรอยที่เกิดจากเครื่องจักรเพื่อให้ผิวถนนคอนกรีตมีความเรียบมากขึ้น เก็บขอบรอยต่อคอนกรีต และเก็บเศษคอนกรีตที่ตกหล่นบนผิวคอนกรีตในช่องจราจรและด้านข้าง ก่อนที่เศษคอนกรีตจะแข็งตัวและยึดติดกับผิวทาง ดังแสดงในภาพที่ 20 การกรีดผิวหน้าถนนคอนกรีต ต้องดำเนินการให้เป็นเส้นก่อนที่คอนกรีตจะเริ่มแข็งตัว ดังแสดงในภาพที่ 21 ซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 1.5 – 2.0 ชั่วโมงหลังจากที่เครื่องจักรปูเสร็จแล้ว หลังจากนั้นจะดำเนินการบ่มผิวคอนกรีตโดยสารเหลวทันทีเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น และป้องกันการแตกร้าวจากการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking)

ภาพที่ 20 การแต่งหน้าผิวถนนคอนกรีต

ภาพที่ 21 การกรีดหน้าลายผิวถนนคอนกรีต

3.6 การบ่มคอนกรีต

การบ่มผิวคอนกรีตตาม ทล-ม. 309/2544 วัสดุที่ใช้ประกอบการบ่มคอนกรีต ระบุไว้ 3 วิธีดังนี้ (1) กระสอบ (น้ำหนักแห้งต้องไม่น้อยกว่า 240 กรัม/ตร.ม.) (2) ทราย และ (3) สารเหลวบ่มคอนกรีต โดยมีคุณสมบัติ มอก. 841 ประเภท 2

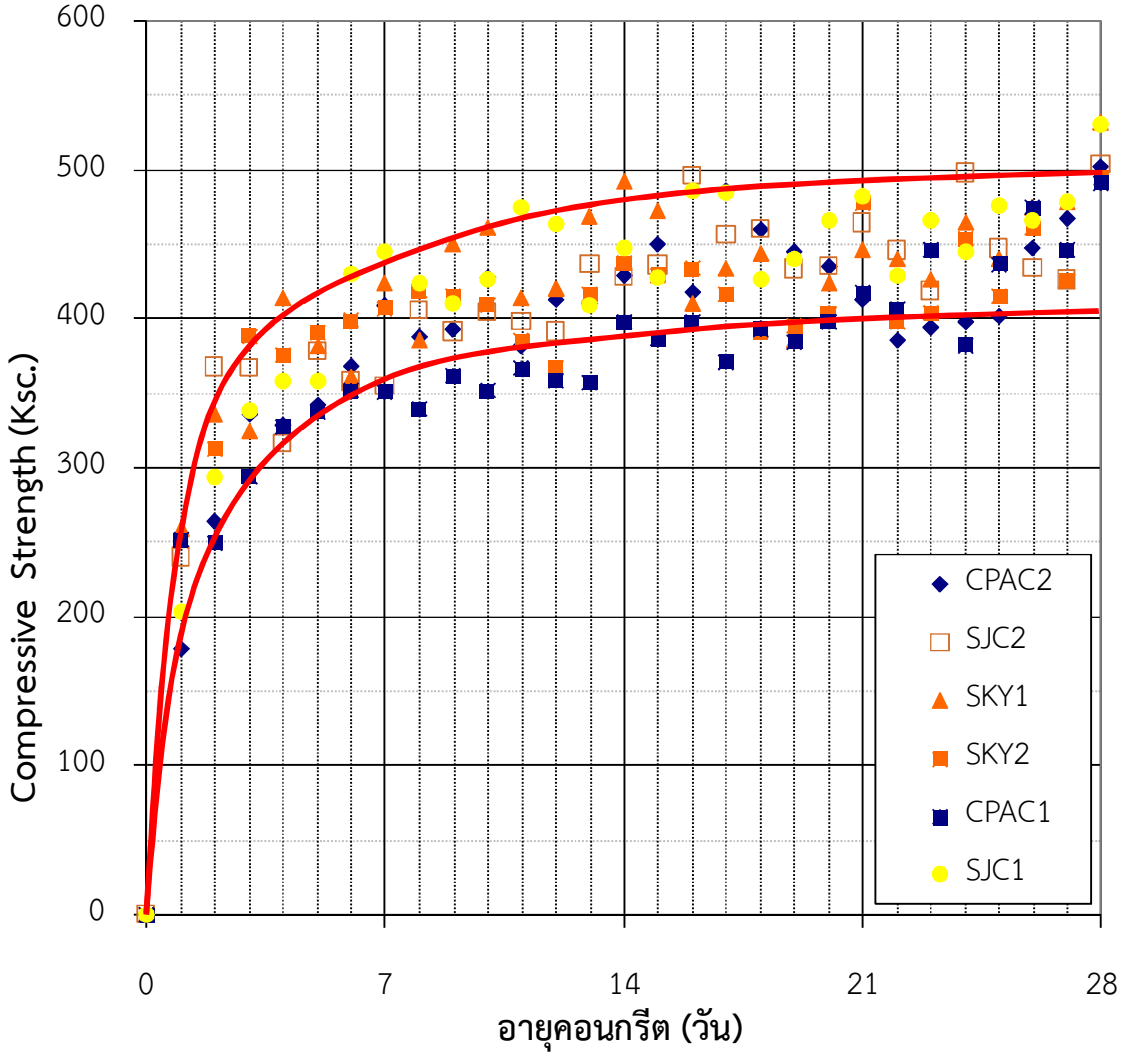
สำหรับโครงการฯ ใช้วิธีการบ่มโดยใช้สารเหลวบ่มคอนกรีตหลังจากการกรีดหน้าเสร็จ เมื่อคอนกรีตแห้ง จึงทำการบ่มโดยใช้กระสอบคลุมผิวคอนกรีตราดน้ำให้ชุ่มอีกครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 22

ภาพที่ 22 แสดงการบ่มผิวทางคอนกรีต

3.7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

จากเก็บตัวอย่างสะสมเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดตามอายุของคอนกรีต ตั้งแต่เริ่มต้นโครงการฯ ถึงช่วงกลางโครงการฯ โดยดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงอัดแท่งคอนกรีตที่มีอายุตั้งแต่ 1 ถึง 28 วัน เพื่อประเมินคุณสมบัติคอนกรีตให้มีคุณภาพตาม Mix Design ที่ออกแบบไว้ โดยผลกำลังรับแรงอัด

ตามอายุของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแสดงในภาพที่ 23 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังของคอนกรีตจะมีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 3 – 4 วันแรก ดังนั้นการบ่มคอนกรีตหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้วในช่วงแรกๆ จึงมีความสำคัญมาก



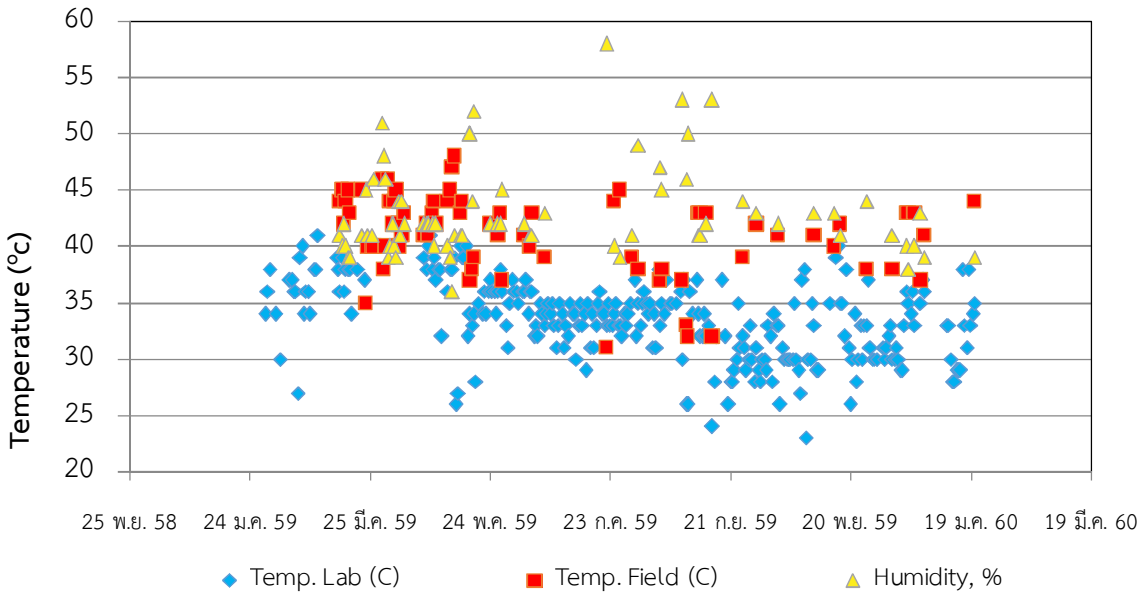
ภาพที่ 23 รูปแสดงกำลังรับแรงอัดแท่งคอนกรีต

4. การตรวจสอบระหว่างการก่อสร้าง

4.1 สภาพแวดล้อมระหว่างก่อสร้าง

จากลักษณะสำคัญของถนน CRCP คือมีการเกิดรอยแตกตามขวาง จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรคอนกรีต การหดตัว และการยึดรั้ง ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกที่มีระยะต่างๆ กันในถนน CRCP ในระหว่างการก่อสร้างจึงได้ดำเนินการบันทึกอุณหภูมิในโครงการฯ อุณหภูมิพื้นที่ก่อสร้างถนน CRCP และความชื้นสัมพัทธ์ ในช่วงเดือนมกราคม 2559 – มกราคม 2560 เวลา 13.00 ถึง 14.00 น ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวัน เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลประกอบการควบคุมคุณภาพคอนกรีต ผลการตรวจแสดง

ในภาพที่ 24 การเทคอนกรีตส่วนใหญ่จะทำในช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม ซึ่งในพื้นที่ก่อสร้างถนนคอนกรีตจะมีอุณหภูมิอากาศในพื้นที่ก่อสร้างไม่ต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณระหว่าง 40% ถึง 45% ซึ่งอุณหภูมิอากาศสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ จะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในระว่างก่อสร้างและภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ

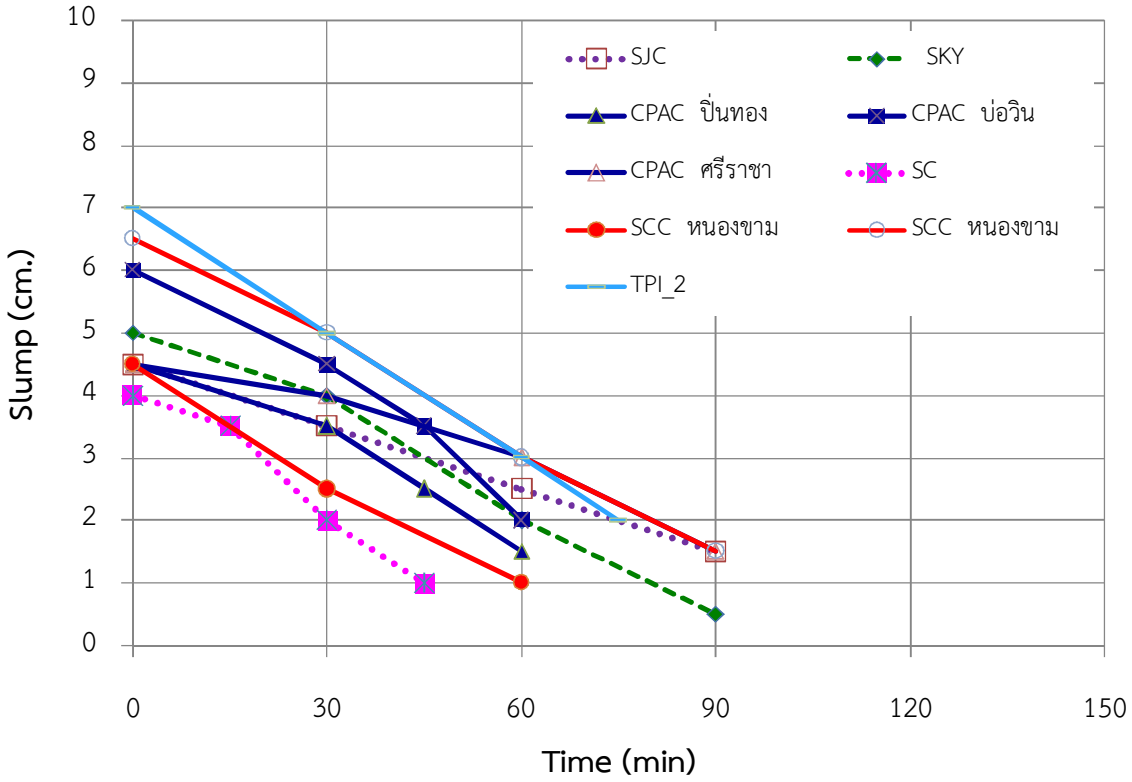


ภาพที่ 24 แสดงอุณหภูมิในระหว่างการก่อสร้างถนน CRCP
โครงการบูรณะทางหลวงหมายเลข 331 บ.เนินผาสุก-มาบเอียง ตอน 1

4.2 ความสามารถเทได้ (Workability)

ความสามารถเทได้ คือผลของพลังงานหรือกำลังงานที่จะเอาชนะแรงเสียดทานในระหว่างอนุภาคของส่วนในเนื้อคอนกรีตสด อันจะก่อให้เกิดการอัดแน่นของคอนกรีตอย่างสมบูรณ์ [5] กำลังอัดของคอนกรีตจะผันแปรหรือได้รับผลกระทบโดยตรงจากช่องว่างที่ปรากฏอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตที่อัดแน่น ดังนั้นควรทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากที่สุด ซึ่งจำเป็นต้องทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถเทได้ที่เพียงพอ เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถอัดแน่นที่ดีและใช้พลังงานที่เหมาะสมภายใต้สภาพที่กำหนด [5] ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถเทได้ เช่นชนิด ขนาดคละ และคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมรวมทั้งส่วนผสมคอนกรีต เวลาหรืออายุของคอนกรีต อุณหภูมิอากาศ ความเร็วลม และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งจากการทดสอบการวัดความสามารถเทได้ที่สูญเสียไปกับเวลาที่ผ่านไป โดยดำเนินการวัดค่าการสูญเสียค่ายุบตัว (Slump Loss) ตาม ASTM C 143 ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 25 จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป ค่ายุบตัวของคอนกรีตลดลง เป็นผลให้ความสามารถเทสูญเสียไป ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการทำให้คอนกรีตอัดแน่นสมบูรณ์ และการแก้ปัญหาที่ผิดคือการผสมน้ำเพิ่มในขณะที่เทคอนกรีตเพื่อให้สามารถทำงานง่ายขึ้น ซึ่งการผสมน้ำ

เพิ่มเติมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตลดลงและไม่สม่ำเสมอ รวมทั้งทำให้ผิวทางคอนกรีตหลุดล่อนหรือแตกร้าวเมื่อเปิดการจราจร ดังนั้นการทำงานผิวทางคอนกรีตจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดความสามารถเทได้ (Workability) ของคอนกรีต ให้สอดคล้องกับการทำงานของเครื่องจักร กำลังคน อัตราการผลิตคอนกรีต เพื่อให้สามารถทำการก่อสร้างผิวทางคอนกรีตให้ทันในช่วงที่สามารถเท อัดแน่น แต่งผิวได้ และเนื้อคอนกรีตมีความสม่ำเสมอ



ภาพที่ 25 แสดงค่าการสูญเสียค่ายุบตัว (Slump Loss)

4.3 เวลาการก่อตัว

การก่อตัว (Setting) และการแข็งตัว (Hardening) เกิดขึ้นจากปูนซีเมนต์ผงทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตจะเป็นกระบวนการเริ่มการแข็งตัวของคอนกรีตสด การก่อตัวแบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือ [5]

ระยะที่ 1 เวลาการเริ่มก่อตัว (Stiffening Time) คือเวลาที่มอร์ต้าสามารถรับแรงเสียดทานจากเครื่องทดสอบได้ 5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (หรือ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ณ เวลานี้คอนกรีตเริ่มแข็งกระด้างหรือเริ่มจับตัวกันแล้ว

ระยะที่ 2 เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) คือเวลาที่มอร์ต้าสามารถรับแรงเสียดทานจากเครื่องทดสอบได้ 35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (หรือ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ณ เวลานี้

คอนกรีตเริ่มแข็งตัวแล้วและถือได้ว่าเป็นเวลาโดยประมาณในการสิ้นสุดการเทและการอัดแน่นคอนกรีต ถ้าเทคอนกรีตสดชั้นใหม่ทับลงไปอีกจะก่อให้เกิด Cold Joint

ระยะที่ 3 เวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) คือ เวลาที่มอร์ต้าสามารถรับแรงเสียดทานจากเครื่องทดสอบได้ 276 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (หรือ 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ณ เวลานี้คอนกรีตแข็งตัวสมบูรณ์แล้วและเริ่มมีการพัฒนากำลังอย่างชัดเจน

การทราบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต จะช่วยให้สามารถวางแผนการทำงานคอนกรีต ได้แก่ การผสม การลำเลียงหรือการขนส่ง การเทและการอัดแน่น การแต่งผิวหน้า การบ่มและการถอดแบบหล่อคอนกรีต ได้อย่างเหมาะสม ค่าแรงเสียดทานดังกล่าวนี้ เป็นค่าที่กำหนดขึ้นโดยการทดสอบเวลาการก่อตัวของคอนกรีตด้วยวิธีการหาความต้านทานต่อการกด (Penetration Resistance) ของมอร์ต้าที่ได้จากการร่อนส่วนผสมคอนกรีตผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM C 403 [9]

4.4 การหดตัวของคอนกรีต

การหดตัวของคอนกรีตเกิดขึ้นในส่วนของซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) เป็นพฤติกรรมของคอนกรีตที่เกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตมีการสูญเสียความชื้นโดยการหดตัวดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุโดยอาจแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

1. การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking) สาเหตุมาจากคอนกรีตหดตัวอย่างเฉียบพลันจากการสูญเสียน้ำที่ผิวหน้าอย่างรวดเร็ว ในช่วงที่ยังอยู่ในสภาพยังไม่แข็งตัว (Pre-hardened Stage) ซึ่งคอนกรีตในช่วงนี้แทบจะไม่มีความสามารถในการรับแรงเค้นที่เกิดจากแรงดึง (Tensile Stress) ซึ่งแรงเค้นเกิดขึ้นขณะที่คอนกรีตมีการหดตัว เมื่อแรงเค้นนี้เกิดมากเกินกว่าที่คอนกรีตสามารถรับได้ ก็จะเกิดการแตกร้าว [7] ลักษณะการแตกจะมีทิศทางไม่แน่นอนและกระจาย

2. การหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายของคอนกรีต รวมกับอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างคะปิลลารี (Capillary Pores) เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ ทำให้เกิด Capillary Suction ขึ้นในช่องว่างคะปิลลารี มีผลให้คอนกรีตหดตัวจากแรง Capillary Suctionนี้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Self-desiccation” การหดตัวแบบออโตจีนัสแตกต่างจากการหดตัวแบบแห้ง ตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตเองการหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ผสมคอนกรีตเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติ จะมีผลต่อปริมาตรหลังจากที่เทคอนกรีตเสร็จแล้ว เนื่องจากการหดตัวในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเท และจะมีผลในทางโครงสร้างหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวแล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต ดังนั้นจึงนิยมวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น การหดตัวแบบออโตจีนัสจะเกิดมากในคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) [8]

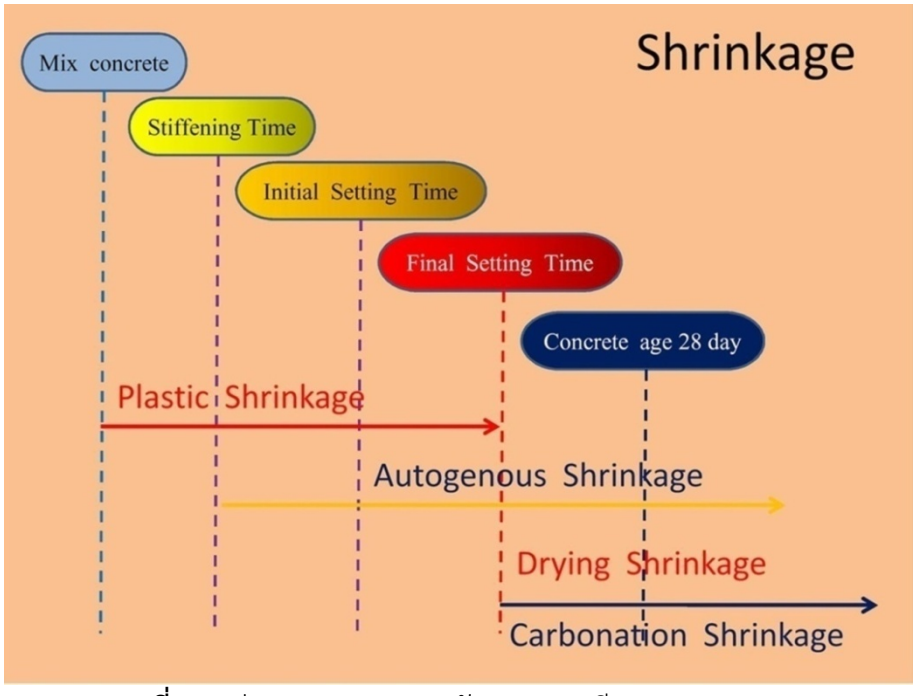
3. การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage Cracking) เกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำ ทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำ และเกิดการหดตัว

โดยที่การหดตัวที่เกิดขึ้นนั้น บางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพที่เดิมได้แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเปียกชื้นขึ้นมาใหม่ การหดตัวแบบแห้งและการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง เกิดขึ้นในคอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศ มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นในช่องว่างคะปิลลารี มาก เนื่องจากสูญเสียน้ำอิสระ ไปสู่อากาศได้ด้วยการระเหย ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างคะปิลลารี ประกอบกับปริมาตรของคอนกรีตลดลง หรือหดตัวลงจากการสูญเสียน้ำ ถ้าการหดตัวนี้ถูกยึดรั้ง ไม่ว่าด้วยโครงสร้างที่อยู่รอบข้าง หรือด้วยเนื้อคอนกรีตภายในที่ไม่มีการสูญเสียความชื้น รอยแตกร้าวก็อาจเกิดขึ้นได้ถ้าการยึดรั้งนี้ก่อให้เกิดหน่วยแรงยึดรั้งที่มีค่าสูงกว่ากาลังแรงดึงของคอนกรีตในขณะนั้น การแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะแตกต่างกับการแตกร้าวแบบพลาสติกตรงที่ช่วงเวลาการเกิด การแตกร้าวแบบพลาสติก จะเกิดในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในช่วงพลาสติก และสามารถแก้ไขได้ง่ายโดยการตกแต่งผิวคอนกรีตก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัว ส่วนการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะเกิดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว ซึ่งไม่สามารถจะตกแต่งผิวใหม่ได้แล้ว [8]

4. การหดตัวเนื่องจากคาร์บอเนชั่นเป็นขบวนการที่เปลี่ยนผลิตผลบางชนิดของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งโดยปกติมักจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอเนต โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อต้องมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลไกการเกิดคาร์บอเนชั่นสามารถอธิบายได้โดย คาร์บอเนชั่นเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท บริเวณผิวหน้าหรือใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ [8]

4.5 การลดปัญหาการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking)

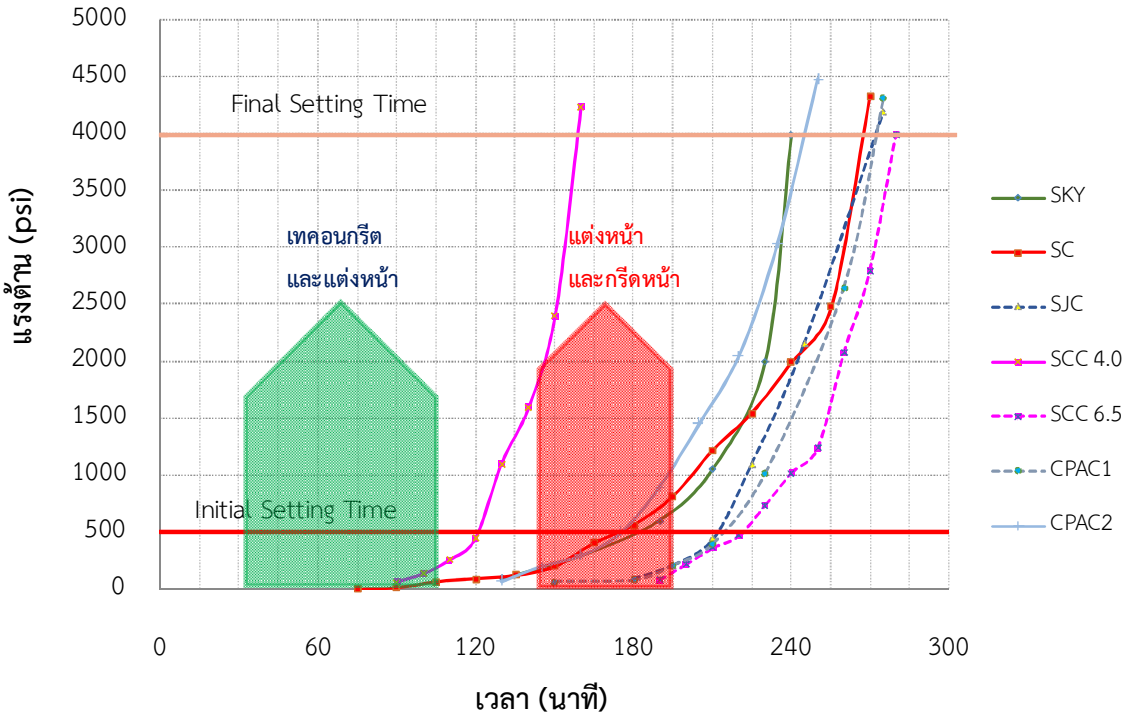
จากสภาพแวดล้อมในพื้นที่ก่อสร้างที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ช่วงระหว่างการก่อสร้างในสนามตามภาพที่ 24 อุณหภูมิอากาศในพื้นที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 40 – 45 % ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติคอนกรีต เนื่องจากงานถนนคอนกรีตก่อสร้างในที่โล่งแจ้ง มีพื้นผิวกว้างเมื่อเทียบกับความหนาและสัมผัสกับสภาพแวดล้อมโดยตรง ทำให้เกิดการสูญเสียความชื้นจากผิวหน้าสูง เป็นสาเหตุให้มีการหดตัวเกิดแรงดึง (Tensile Stress) เมื่อแรงดึงสูงเกินกว่าที่คอนกรีตสามารถรับได้ คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าว จากคุณสมบัติการก่อตัวของคอนกรีต (Setting Time) และช่วงเวลาของการหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage) สามารถเขียนแผนภาพความสัมพันธ์ได้ตามภาพที่ 26 จากสภาพปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตและที่เกิดจากการหดตัวเนื่องจากสูญเสียความชื้นจะมีอยู่ 2 ส่วนที่สำคัญคือการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage Cracking) ถ้าควบคุมการระเหยของน้ำในถนนคอนกรีตภายหลังการเทคอนกรีตแล้วเสร็จเป็นไปอย่างดี ถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) จะมีลักษณะการแตกแบบการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage Cracking)



ภาพที่ 26 ช่วงเวลาของการหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage) [5]

เมื่อการทดสอบหาช่วงเวลาการก่อตัว (Setting) และการแข็งตัว (Hardening) ของคอนกรีตที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้าง สามารถนำมาเปรียบเทียบกับอัตราการทำงานตั้งแต่ขั้นตอน การผสมคอนกรีต ลำเลียงขนส่ง การเท การอัดแน่น การแต่งหน้า การกรีดหน้า จนถึงขั้นตอนการบ่มคอนกรีต ซึ่งความสัมพันธ์ของช่วงเวลาการทำงานและการควบคุมคุณสมบัติการก่อตัวที่เหมาะสมแสดงในภาพที่ 27

เนื่องจากปัญหาการแตกร้าวของการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking) เกิดจากการสูญเสียน้ำที่ผิวหน้าในช่วงที่ยังอยู่ในสภาพยังไม่แข็งตัว (Pre-hardened Stage) คอนกรีตเกิดการหดตัวซึ่งจะเกิดแรงดึง และคอนกรีตไม่สามารถต้านทานแรงดึงได้ จึงทำให้เกิดรอยแตกได้ เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงเค้นที่เกิดจากแรงดึง (Tensile Stress) ลดการระเหยของน้ำ จะต้องให้คอนกรีตมีการก่อตัวพัฒนากำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength Development) ได้ทันกับการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวหน้า [7] ซึ่งจากภาพที่ 27 จะเห็นว่าเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ของคอนกรีตตามเส้นประ จะล่าช้ากว่าขั้นตอนการกรีตหน้าซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนบ่มคอนกรีต ทำให้คอนกรีตไม่สามารถพัฒนากำลังต้านทานแรงดึงได้ทันกับการหดตัวของคอนกรีต ดั้งนั้นจึงปรับควรส่วนผสมคอนกรีตเพื่อลดระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) แต่ต้องไม่กระทบกับเวลาทำงานในช่วงการเท การอัดแน่น และแต่งหน้าคอนกรีต



ภาพที่ 27 แสดงการก่อตัว (Setting) ของคอนกรีตและอัตราการทำงาน

4.6 ตำแหน่งเหล็กเสริมในแผ่นพื้นถนนคอนกรีต

จากแบบก่อสร้างฯ ตำแหน่งเหล็กเสริมตามยาวกำหนดที่ระยะกึ่งกลางความหนาถนนคอนกรีต (T/2) เพื่อให้เหล็กเสริมอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง จึงได้มีการนำ Bar Chair สำหรับใช้ยึดเหล็กตามขวางให้อยู่ในตำแหน่งสำหรับรองรับเหล็กเสริมตามยาว เพื่อให้เหล็กเสริมอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดในแบบก่อสร้างฯ ไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวจากกระบวนการเทคอนกรีตและอัดแต่ง หลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จได้ทำการตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมอยู่ในตำแหน่งเหล็กเสริมด้วยการเจาะแผ่นคอนกรีต (Coring) ตลอดความหนาคอนกรีตดังแสดงตามภาพที่ 28 โดยแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ตามแบบก่อสร้างฯ

ภาพที่ 28 ตำแหน่งเหล็กเสริม

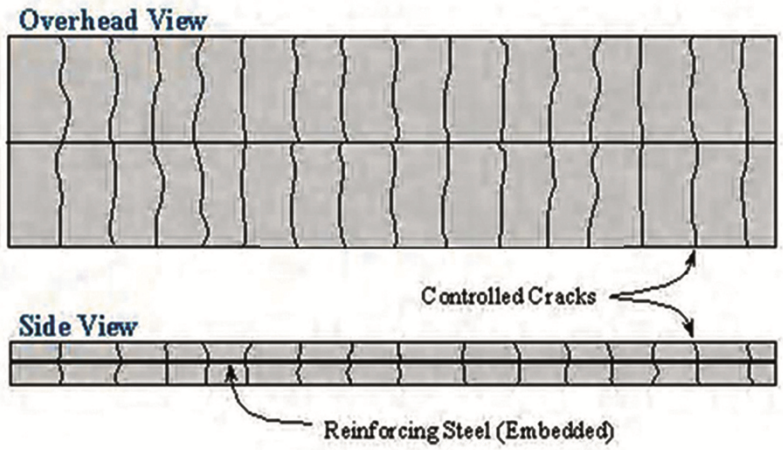
4.7 การตรวจสอบความกว้างและระยะห่างระหว่างรอยแตก

ถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) จะใช้เหล็กเสริมตามยาวในการควบคุมความกว้างรอยแตกและระยะระหว่างรอยแตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรคอนกรีตระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และความชื้น และการยึดรั้งจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในคอนกรีต แล้วทำคอนกรีตเกิดรอยแตก

หลังการก่อสร้างจึงได้ดำเนินการติดตามพฤติกรรมการแตกตามขวาง การตรวจสอบความกว้าง และระยะห่างระหว่างรอยแตก ตั้งแต่ระหว่างก่อสร้าง หลังจากมีการก่อสร้างแล้วเสร็จ และหลังจากการเปิดการจราจร ผลของการตรวจสอบ แบ่งเป็น

1. การแตกตามขวาง

การสำรวจรอยแตกตามขวางในช่วงอายุต้นๆ ของคอนกรีตหลังจากบ่มผิวทางคอนกรีตไม่น้อยกว่า 72 ชั่วโมง ในช่วงอายุประมาณ 7 วัน จะเริ่มมีรอยแตกตามขวางให้เห็นและมีขนาดเล็กชิดกันมาก ระยะห่างรอยแตกประมาณ 20 – 30 เมตรต่อรอย และจะเริ่มแตกแบ่งครึ่ง แล้วแบ่งครึ่งไปในระยะเวลาต่อไป ทำให้ระยะห่างรอยแตกสั้นลง จนอายุคอนกรีตประมาณ 1 เดือน การเพิ่มจำนวนของรอยแตกจะช้าลง สำหรับการแตกตามขวางของผิวคอนกรีตที่ก่อสร้างช่องจราจรด้านข้างที่ก่อสร้างทีหลังส่วนใหญ่การแตกจะต่อจากแนวเดิมหรือใกล้กับแนวเดิมที่แตกก่อนหน้าดังแสดงในภาพที่ 29

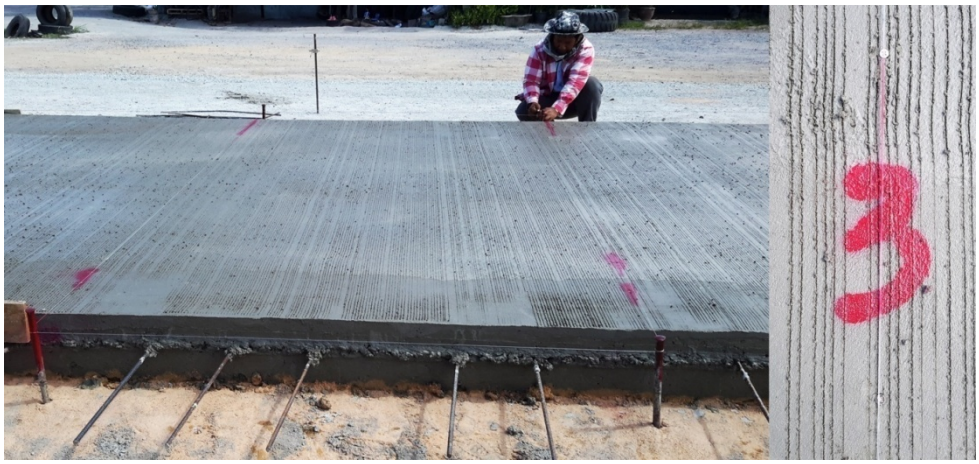


ภาพที่ 29.1 ลักษณะรอยแตก [3]

ภาพที่ 29.2 ลักษณะรอยแตกของถนน CRCP ในระหว่างการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 331 โดยถ่ายภาพภายหลังจากฝนตกเพื่อให้เห็นรอยแตกได้ชัดเจน

ในระหว่างการก่อสร้างกรณีที่การก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง หรือจุดปลายที่จะต้องเชื่อมต่อกับสะพาน และจุดปลายสิ้นสุดการก่อสร้าง ถ้ายังไม่มีการก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Lug Anchor) บริเวณรอยต่อที่จุดปลายถนน CRCP (Terminal Joint) ตามภาพที่ 30 จุดปลายของถนน CRCP มีลักษณะเป็นปลายอิสระปราศจากการยึดรั้ง จะเป็นบริเวณที่เกิดการเคลื่อนตัวถนน CRCP โดยช่วงระยะจากจุดปลายถนน CRCP ประมาณ 40 – 50 เมตร จะไม่เกิดรอยแตกตามขวาง และจะมีการแตกตามขวางเมื่อมีการก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Lug Anchor) จากการตรวจวัดโดยการฝังหมุดที่ผิวคอนกรีตหลังก่อสร้างผิวทางตามภาพที่ 31 - 32 และทำการตรวจวัดที่อายุคอนกรีต 7 และ 14 วัน พบว่าถนน CRCP มีการเคลื่อนหดตัว ระยะ 4 – 5 มม. และ 7 – 8 มม. ที่อายุ 7 วันและ 14 วัน ตามลำดับ

ภาพที่ 30 การก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Lug Anchor) บริเวณจุดปลายถนน CRCP



ภาพที่ 31 การเคลื่อนตัวของ CRCP ที่จุดปลาย

ภาพที่ 32 การเคลื่อนตัวของ CRCP ที่จุดปลาย

2. ระยะห่างระหว่างรอยแตก

การตรวจวัดรอยแตกได้ดำเนินการตรวจวัด 2 ช่วงเวลาดังนี้ ช่วงที่ 1 เริ่มการตรวจวัดหลังจากอายุของคอนกรีตไม่น้อยกว่า 1 เดือน และยังไม่เปิดการจราจร ช่วงที่ 2 การตรวจวัดหลังจากเปิดการจราจรบนถนน CRCP โดยอายุของคอนกรีตประมาณ 1 ปี วิธีตรวจวัดขนาดความกว้างของรอยแตกตามขวางจะใช้แผ่นวัด (CRACK GAUGE) ซึ่งมีขีดระบุความหนาของเส้น ทาบทับบนรอยแตกตามขวางให้ขนาดของเส้นทับรอยแตกพอดี โดยมีหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตรตามภาพที่ 33 ผลการตรวจวัดสรุปได้แสดงในตารางที่ 3 - 5

ภาพที่ 33 การวัดระยะห่างระหว่างรอยแตก ความกว้างของรอยแตก

การตรวจวัดระยะห่างระหว่างรอยแตก จะทำการตรวจวัด 3 ช่วงการตรวจวัด โดยระยะทางประมาณ 1,000 เมตร และตรวจวัดช่วงละ 2 ช่องจราจร โดยช่วงการตรวจวัดได้แก่

- ช่วงการตรวจวัด กม. 2+525 – 3+554 ช่องจราจรการตรวจวัด RT3 และ RT4 โดยผลการตรวจวัดระยะห่างระหว่างรอยแตกสรุปตามตารางที่ 3
- ช่วงการตรวจวัด กม. 7+300 - 8+300 ช่องจราจรการตรวจวัด RT2 และ RT3 โดยผลการตรวจวัดระยะห่างระหว่างรอยแตกสรุปตามตารางที่ 4
- ช่วงการตรวจวัด กม. 11+385 – 12+410 ช่องจราจรการตรวจวัด RT2 และ RT3 โดยผลการตรวจวัดระยะห่างระหว่างรอยแตกสรุปตามตารางที่ 5

ตารางที่ 3 ผลการตรวจวัดระยะห่างระหว่างรอยแตกช่วงการตรวจวัด กม. 2+525 – 3+554 RT

กม.2+525 - 3+554 RT Lane3				
ระยะแตก เมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.00 - 0.50	3	1	3	1
0.50 - 1.00	-	-	2	1
1.00 - 2.00	12	5	28	9
2.00 - 3.00	51	22	103	33
3.00 - 4.00	64	27	104	33
4.00 - 5.00	50	21	51	16
5.00 - 6.00	26	11	19	6
6.00 - 10.00	18	8	4	1
10.00 - >	10	4	-	-
SUM	234	100	314	100

กม.2+525 - 3+554 RT Lane4				
ระยะแตก เมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.00 - 0.50	3	1	5	1
0.50 - 1.00	2	1	6	2
1.00 - 2.00	17	7	49	14
2.00 - 3.00	52	22	118	34
3.00 - 4.00	52	22	101	29
4.00 - 5.00	51	22	55	16
5.00 - 6.00	31	13	10	3
6.00 - 10.00	18	8	-	-
10.00 - >	8	3	-	-
SUM	234	100	344	100

ตารางที่ 4 ผลการตรวจวัดระยะห่างระหว่างรอยแตกช่วงการตรวจวัด กม. 7+300 - 8+300 RT

กม.7+300 - 8+300 RT Lane2				
ระยะแตก เมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.00 - 0.50	6	2	9	3
0.50 - 1.00	3	1	5	1
1.00 - 2.00	16	6	38	11
2.00 - 3.00	71	25	119	35
3.00 - 4.00	97	34	118	35
4.00 - 5.00	61	21	44	13
5.00 - 6.00	26	9	6	2
6.00 - 10.00	7	2	-	-
10.00 - >	-	-	-	-
SUM	287	100	339	100

กม.7+300 - 7+300 RT Lane3				
ระยะแตก เมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.00 - 0.50	2	1	3	1
0.50 - 1.00	3	1	10	3
1.00 - 2.00	11	4	40	12
2.00 - 3.00	66	24	120	36
3.00 - 4.00	91	33	114	34
4.00 - 5.00	61	22	42	13
5.00 - 6.00	31	11	6	2
6.00 - 10.00	7	3	-	-
10.00 - >	-	-	-	-
SUM	272	100	335	100

ตารางที่ 5 ผลการตรวจวัดระยะห่างระหว่างรอยแตกช่วงการตรวจวัด กม. 11+385 – 12+410 RT

กม.11+385 - 12+410 RT Lane2				
ระยะแตก เมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.00 - 0.50	2	1	7	2
0.50 - 1.00	13	5	19	5
1.00 - 2.00	15	6	51	14
2.00 - 3.00	46	18	134	37
3.00 - 4.00	60	24	112	31
4.00 - 5.00	51	20	40	11
5.00 - 6.00	21	8	2	1
6.00 - 10.00	36	14	-	-
10.00 - >	5	2	-	-
SUM	249	100	365	100

กม.11+385 - 12+410 RT Lane3				
ระยะแตก เมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.00 - 0.50	9	4	25	6
0.50 - 1.00	13	5	28	7
1.00 - 2.00	30	12	86	21
2.00 - 3.00	55	22	146	35
3.00 - 4.00	52	20	100	24
4.00 - 5.00	41	16	26	6
5.00 - 6.00	18	7	2	-
6.00 - 10.00	30	12	-	-
10.00 - >	7	3	-	-
SUM	255	100	413	100

ระยะห่างระหว่างรอยแตกจะอยู่ในช่วง 2.00 – 4.00 เมตร โดยปริมาณการแตกตามขวางร้อยละ 60 – 70 จะแตกช่วงอายุคอนกรีตประมาณ 1 เดือนหลังการเทคอนกรีตและยังไม่มีการเปิดการจราจร และรอยแตกจะเพิ่มขึ้น เมื่อเปิดการจราจรในช่วงที่ระยะห่างรอยแตกมาก ทำให้ระยะห่างการแตกสั้นลง

1. การตรวจวัดความกว้างรอยแตก จะตรวจวัดในช่วงเดียวกับการวัดระยะห่างระหว่างรอยแตก ผลการตรวจวัดสรุปได้ตามตารางที่ 6 - 8 จากการตรวจวัดความกว้างรอยแตกระยะแรกหลังเทคอนกรีตและก่อนเปิดการจราจร พบว่ารอยแตกจะมีขนาดเล็ก (แคบ) และเมื่อมีการเปิดการจราจรผ่านไปเป็นระยะเวลา 1 ปี และตรวจวัดพบว่า รอยแตกตามขวางมีปริมาณเพิ่มขึ้น และความกว้างของรอยแตกจะกว้างเพิ่มขึ้นแต่ยังต่ำกว่า 1.0 มิลลิเมตร

ตารางที่ 6 ผลการตรวจวัดความกว้างของรอยแตกช่วงการตรวจวัด กม. 2+525 – 3+554 RT

กม.2+525 - 3+554 RT Lane3				
ความกว้าง มิลลิเมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.08	-	-	-	-
0.10	-	-	-	-
0.15	4	2	-	-
0.20	9	4	-	-
0.25	38	17	3	1
0.30	59	26	4	1
0.35	70	31	16	5
0.40	45	20	50	16
0.50	-	-	140	46
0.60	1	0	73	24
0.80	-	-	21	7
1.00	-	-	-	-
SUM	226	100	307	100

กม.2+525 - 3+554 RT Lane4				
ความกว้าง มิลลิเมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.08	-	-	-	-
0.10	1	0	-	-
0.15	4	1	1	0
0.20	8	3	-	-
0.25	45	17	1	0
0.30	98	36	12	4
0.35	74	27	20	6
0.40	40	15	38	11
0.50	1	0	145	43
0.60	-	-	89	26
0.80	-	-	32	9
1.00	-	-	-	-
SUM	271	100	338	100

ตารางที่ 7 ผลการตรวจวัดความกว้างของรอยแตกช่วงการตรวจวัด กม. 7+300 - 8+300 RT

กม.7+300 - 8+300 RT Lane2				
ความกว้าง มิลลิเมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.08	-	-	-	-
0.10	1	-	1	-
0.15	6	2	2	1
0.20	15	5	9	3
0.25	59	21	23	7
0.30	97	34	43	13
0.35	83	29	72	21
0.40	21	7	105	31
0.50	4	1	64	19
0.60	1	0	12	4
0.80	-	-	6	2
1.00	-	-	-	-
SUM	287	100	337	100

กม.7+300 - 7+300 RT Lane3				
ความกว้าง มิลลิเมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.08	1	-	-	-
0.10	2	1	-	-
0.15	7	3	3	1
0.20	50	18	-	-
0.25	83	31	22	7
0.30	54	20	43	13
0.35	44	16	68	21
0.40	24	9	127	38
0.50	3	1	47	14
0.60	3	1	14	4
0.80	-	-	7	2
1.00	-	-	-	-
SUM	271	100	331	100

ตารางที่ 8 ผลการตรวจวัดความกว้างของรอยแตกช่วงการตรวจวัด กม. 11+385 – 12+410 RT

กม.11+385 - 12+410 RT Lane2				
ความกว้าง มิลลิเมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.08	-	-	-	-
0.10	10	4	2	1
0.15	30	12	17	5
0.20	20	8	36	10
0.25	27	11	70	19
0.30	60	25	105	29
0.35	71	29	79	22
0.40	25	10	40	11
0.50	1	-	9	3
0.60	-	-	-	-
0.80	-	-	-	-
1.00	-	-	-	-
SUM	244	100	360	100

กม.11+385 - 12+410 RT Lane3				
ความกว้าง มิลลิเมตร	ก่อนเปิดจราจร		หลังเปิดจราจร 1 ปี	
	จำนวน	%	จำนวน	%
0.08	-	-	-	-
0.10	10	4	2	0
0.15	17	7	3	1
0.20	26	10	30	7
0.25	41	16	47	12
0.30	53	21	87	21
0.35	80	32	103	25
0.40	23	9	75	18
0.50	-	-	46	11
0.60	-	-	9	2
0.80	-	-	5	1
1.00	-	-	-	-
SUM	250	100	408	100

5. ปัญหาและการแก้ไขปัญหาระหว่างการก่อสร้าง

เมื่อเริ่มการก่อสร้างผิวถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) ในโครงการฯ พบกับอุปสรรคหลากหลายลักษณะ ตั้งแต่ในระหว่างก่อสร้างและภายหลังก่อสร้างแล้วเสร็จ ซึ่งแต่ละปัญหาจะส่งผลต่อความคงทนของถนนคอนกรีตแบบไร้รอย ส่งผลให้อายุการใช้งานสั้นลง ควรที่จะมีการป้องกันไม่ให้เกิดซ้ำอีกสำหรับการก่อสร้างถนนคอนกรีตโครงการฯ อื่นๆ ต่อไป หรือเตรียมความพร้อมเพื่อลดผลกระทบจากปัญหาดังกล่าว ทั้งนี้สามารถสรุปปัญหาสำคัญ ที่พบในระหว่างการดำเนินการก่อสร้างดังนี้

5.1 การก่อสร้างผิวทางคอนกรีตในฤดูฝน

จากลักษณะงานก่อสร้างถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) ของโครงการฯ จะเป็นการก่อสร้างแบบต่อเนื่อง ได้ปริมาณระยะทางในการดำเนินวันละประมาณ 300 ถึง 400 เมตรต่อหนึ่งช่องจราจร และระยะเวลาการก่อสร้างจะเริ่มต้นตั้งแต่ช่วงเช้าจนถึงเย็น ในระหว่างวัน อาจมีฝนตกในระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งจะส่งผลกระทบกับถนนคอนกรีต ที่ยังไม่แข็งตัวเกิดพังทลายเสียหายเนื่องจากน้ำกัดเซาะทรายรองถนนคอนกรีต ทำให้ผิวหน้าคอนกรีตเสียหาย ถ้าฝนตกเป็นเวลานาน คอนกรีตจะแข็งตัวไม่สามารถแต่งผิวได้ และก่อให้เกิดปัญหาการหลุดร่อนของถนนคอนกรีต การแก้ไขควรทำการติดตั้งเต็นท์ป้องกันน้ำฝนตกลงบนผิวหน้าคอนกรีต และสามารถกรีดหน้าถนนคอนกรีตในระหว่างฝนตกได้ ระยะเวลาที่

กรีดหน้าถนนคอนกรีต ต้องดำเนินการก่อนที่คอนกรีตจะก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) เป็นเหตุให้คอนกรีตไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

ภาพที่ 34 การพังทลายเสียหายเนื่องจากน้ำกัดเซาะทรายรองถนนคอนกรีต

ภาพที่ 35 การแต่งผิวหน้าคอนกรีตที่เสียหายจากฝนตก

ภาพที่ 36 ผิวหลุดร่อนเมื่อเปิดใช้งาน และเกิดการแยกตัวของคอนกรีต

เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้น ก่อนเทคอนกรีตหรือในขณะเทคอนกรีต โครงการฯ ควรตรวจการพยากรณ์อากาศ และต้องติดตามดูสภาพอากาศในแต่ละวัน ถ้ามีแนวโน้มว่าฝนจะตก ควรหยุดการเทคอนกรีตและให้มีเวลาเพียงพอที่คอนกรีตจะแข็งตัว หรือหาสิ่งปกคลุมที่กันฝนได้ป้องกันผิวหน้าคอนกรีต

5.2 ความเสียหายจากคุณสมบัติคอนกรีต

ด้วยสภาพภูมิอากาศค่อนข้างร้อนมีอุณหภูมิอากาศสูง ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ประกอบกับการก่อสร้างผิวถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) ทำได้ค่อนข้างเร็วได้พื้นที่มาก และพื้นผิวคอนกรีตต้องสัมผัสกับอากาศเป็นเวลานานก่อนคอนกรีตก่อตัว ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาการเกิดรอยแตกที่ผิวหน้าคอนกรีต จากการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking) ช่วงก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัว การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจะต้องให้คอนกรีตมีการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) อยู่ในช่วงที่เหมาะสมและไม่เร็วเกินไปจนมีผลกระทบกับเวลาการทำงาน และไม่ช้าเกินไปจนทำให้เกิดปัญหารอยแตกจากการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking)

จากปัญหาที่พบการนำคอนกรีตที่มีการผสมไว้นานจนเลยช่วงการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) เนื่องจากฝนตกไม่สามารถทำการเทคอนกรีตหรือปล่อยรถผสมคอนกรีตมารอนานเกินช่วงเวลาที่สามารถเทได้ ความสามารถในการเทลดลง การอัดแน่นคอนกรีตทำได้ยาก ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตให้ต่ำลงอย่างมาก เมื่อเปิดการจราจรทำให้แผ่นคอนกรีตแตกตามภาพที่ 37.1 ซึ่งโครงการฯ จะต้องทุบรื้อและก่อสร้างใหม่ตามภาพที่ 37.2

ภาพที่ 37.1 การแตกของถนน CRCP เนื่องจากใช้คอนกรีตที่พ้นช่วงเวลาการเวลาก่อตัวของคอนกรีต

ภาพที่ 37.2 การซ่อมแซมรอยแตกถนน CRCP โดยการทุบรื้อก่อสร้างใหม่

5.3 การก่อสร้างรอยต่อ

การก่อสร้างผิวถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) ในแต่ละวันจะต้องมีการก่อสร้างรอยต่อ เพื่อการก่อสร้างเฉพาะจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการก่อสร้างแต่ละวันเท่านั้น การก่อสร้างรอยต่อจะต้องมีการควบคุมและใส่ใจในการก่อสร้าง เนื่องจากจะเป็นจุดอ่อนแอและเสียหายง่ายที่สุดกว่าจุดอื่น สำหรับถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) ก่อนสิ้นสุดการก่อสร้างแต่ละวันจะต้องทำรอยต่อตามที่แบบกำหนดมีการเสริมเหล็กตามที่กำหนดและได้ระดับ จะต้องมีการจี้อัดแน่นคอนกรีตให้มีความแน่นสม่ำเสมอเต็มหน้า การต่อกันของแผ่นคอนกรีตจะต้องราบเรียบอยู่ในระดับเดียวกัน ไม่สะดุดเมื่อมีรถวิ่งผ่านรอยต่อ การก่อสร้างรอยต่อแสดงตามภาพที่ 38 - 39

ภาพที่ 38 รอยต่อเพื่อการก่อสร้างจุดเริ่มต้นแต่ละวัน

ภาพที่ 39 รอยต่อเพื่อการก่อสร้างจุดสิ้นสุดแต่ละวัน

5.4 ปัญหาน้ำเซาะทรายรองใต้ผิวคอนกรีต

เนื่องจากสภาพพื้นที่โครงการก่อสร้างฯ เป็นลูกเนินและดินเดิมในพื้นที่ก่อสร้างเป็นดินปนทราย ซึ่งง่ายต่อการชะล้าง เมื่อเกิดฝนตกจะทำให้น้ำกัดเซาะดินคันทางข้างแผ่นพื้นคอนกรีตหายไปรวมทั้งกัดเซาะชั้นทรายรองถนนคอนกรีตดังแสดงตามภาพที่ 40 ถ้าอยู่ในช่วงระหว่างก่อสร้างยังไม่เปิดการจราจร การกัดเซาะยังอาจไม่ลึกมากและถ้าสามารถตรวจพบได้ก่อนเปิดการจราจร ก็อาจจะสามารถแก้ไขโดยการอัดทรายเข้าไปเติมให้แน่น แล้วทำการปิดทับด้านข้างผิวทางคอนกรีตด้วยดินบดอัดให้แน่น และทำการปลูกหญ้า

ส่วนในพื้นที่ที่มีการเปิดการจราจรแล้ว ไหล่ทางได้ถูกปิดทับด้วยดินและมีหญ้าขึ้นแล้ว การกัดเซาะจะมองไม่เห็นถ้าไม่ได้ลงเดินสำรวจ จะปรากฏให้เห็นก็ต่อเมื่อเกิดความเสียหายแล้วจากรถหนักวิ่งผ่านดังแสดงในภาพที่ 41 การป้องกันปัญหาดังกล่าว จะต้องบดอัดดินไหล่ทางให้แน่นป้องกันการกัดเซาะดังแสดงในภาพที่ 42 และ ภาพที่ 43

ภาพที่ 40 การกัดเซาะทรายรองถนนคอนกรีตและการอัดทรายทดแทน

ภาพที่ 41 การแตกของแผ่นพื้นที่ถูกน้ำกัดเซาะและการรื้อสร้างใหม่

ภาพที่ 42 การบดอัดดินไหล่ทางให้แน่นป้องกันการกัดเซาะ

6. การทดสอบถนนคอนกรีต CRCP ด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer

6.1. เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer

เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) เป็นเครื่องมือทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างถนนแบบวิธี Non-destructive Test เครื่องมือทำงานได้รวดเร็ว ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือ และไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อถนน เครื่อง FWD ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นรถลากจูงติดตั้งเครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมเครื่องคำนวณผลแปลงคำสั่งในการควบคุมเครื่องมือทดสอบและเก็บข้อมูล รถพ่วงเป็นชุดเครื่องทดสอบFWD โดยเครื่องทดสอบที่มีหลักการทำงานคล้ายการทดสอบ Plate Loading Test ที่มีลักษณะการให้นำหนักกระทำเป็นแบบ Dynamic เนื่องจากมีการปล่อยน้ำหนักลงกระแทกกับแผ่นรองรับโดยมียางกันกระแทกที่ทำหน้าที่คล้ายสปริง ซึ่งให้เกิดคลื่นแรงสั่นสะเทือนต่อโครงสร้างถนน โดยมีการปรับขนาดของน้ำหนักและความสูงของการยกก้อนน้ำหนักได้ตามที่ต้องการ ทำให้สามารถควบคุมแรงที่กระทำต่อโครงสร้างถนนให้มีปริมาณมากพอ และก่อให้เกิดการทรุดตัว ในโครงสร้างถนน เทียบเท่าผลที่เกิดจากรถบรรทุกเพลามาตรฐานเคลื่อนที่ผ่าน ส่วนประกอบหลักของเครื่องFWD คือตัวตรวจวัด

สัญญาณคลื่นที่เกิดจากการกระแทกของก้อนน้ำหนักผ่านผิวถนน เรียกว่า Geophone จำนวน 9 ตัว เรียงเป็นแถวในระนาบเดียวกันเพื่อให้สามารถแปลงค่าสัญญาณที่วัดได้มาเป็นค่า Deflection

6.2. การประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบแผ่นคอนกรีต

การประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบแผ่นคอนกรีต สามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังนี้

O ปรับการติดตั้ง Geophone วางในระยะตำแหน่ง -30, -20, 0, 45, 60, 90, 120, 150, 180 Cm. ตำแหน่งระยะศูนย์ อยู่ที่ Plate ถ่ายแรงของเครื่อง FWD ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ติดตั้งตัว Load Cell

O น้ำหนักที่ใช้กระทำผ่านแผ่นถ่ายแรงมีขนาดที่ทำให้เกิดหน่วยแรง (Stress) 707 kPa ซึ่งเทียบเท่ากับหน่วยแรงดันของลมยางของล้อรถบรรทุกเพลาเดี่ยวยางคู่ขนาด 10 ตัน กระทำกับผิวทาง เป็นพื้นที่วงกลมมีค่าเท่ากับ 707 kPa

O ในอุปกรณ์ประมวลผล ให้ใช้ File ในการควบคุมน้ำหนักชื่อ Concrete.tsu

O ตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบโดยหนึ่งแผ่นคอนกรีตจะทำการทดสอบ 2 ตำแหน่ง คือตำแหน่งที่หนึ่งบริเวณบริเวณรอย Cracks กลางแผ่นคอนกรีต ตำแหน่งที่สองคือบริเวณรอยต่อ Joint ด้านข้างระหว่างรอยแตกแผ่นคอนกรีตครึ่งหนึ่งของความยาวแผ่นคอนกรีต

O แผ่นคอนกรีตที่ทดสอบจะต้องอยู่ในสภาพความยาวที่สมบูรณ์ เกณฑ์ที่กำหนดเกิดจากแผ่นคอนกรีตที่มีความยาวที่สมบูรณ์ ส่วนแผ่นที่เกิดการเสียหายนั้นไม่จำเป็นต้องทดสอบเนื่องจากเห็นได้ด้วยตาว่ามีความเสียหาย

6.3. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ขั้นตอนการหาค่าโมดูลัสของวัสดุสร้างทางโดยโปรแกรมจะอ่านค่า Deflection ทั้ง9 ค่า และค่าหน่วยแรง (Stress) ที่ได้จากการทดสอบ โปรมแกรมจะให้ป้อนข้อมูลโครงสร้างชั้นทางได้แก่จำนวนชั้นวัสดุ ความหนาของวัสดุแต่ละชั้น เพื่อหาค่าโมดูลัสของกลุ่มวัสดุที่สอดคล้อง นำไปสู่การคำนวณเป็นกลุ่มค่า Deflection ของวัสดุ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า Deflection ที่วัดได้จริงซึ่งต้องมีผลใกล้เคียงหรือสอดคล้องกันจึงยอมรับผลการประมวลผล

6.4. เกณฑ์ที่ใช้ในการตรวจสอบ

เกณฑ์ประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบแผ่นคอนกรีตที่มีสภาพความยาวที่สมบูรณ์โดยไม่มีรอยแตกร้าว

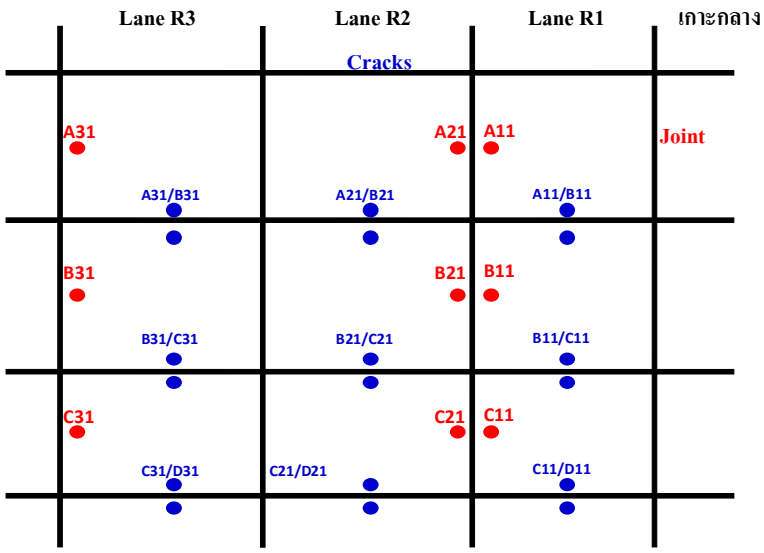
E1 = ค่าโมดูลัสของคอนกรีต

E2 = ค่าโมดูลัสของวัสดุใต้แผ่นคอนกรีต ควรมีค่ามากกว่า 100 MPa

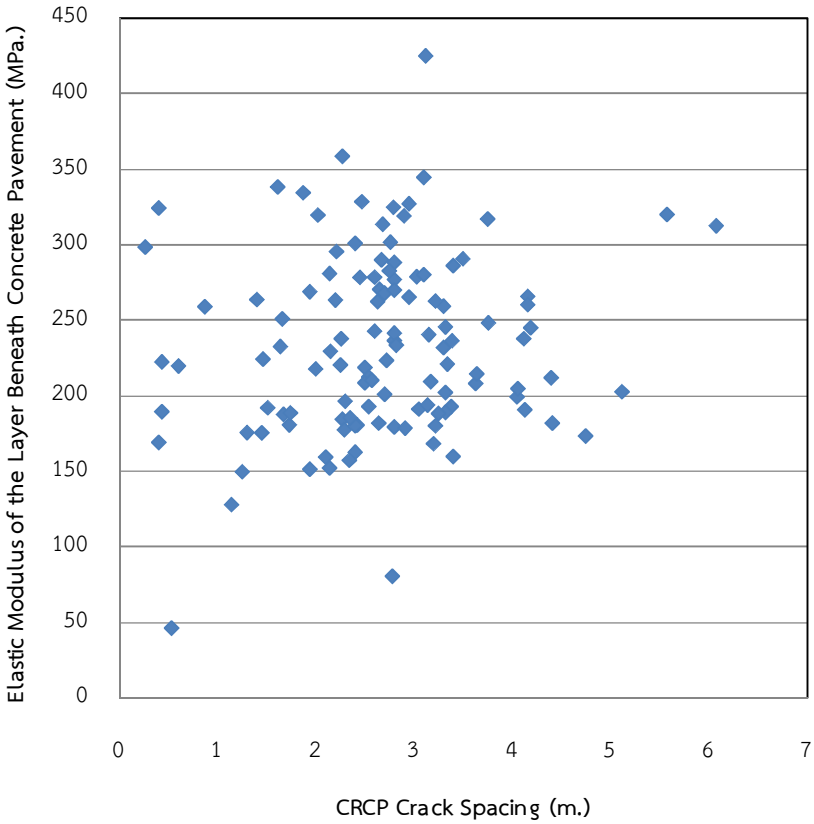
LT% = เปอร์เซ็นต์การส่งถ่ายแรงระหว่างแผ่นคอนกรีต ควรมีค่ามากกว่า 95 % สำหรับ CRCP

ผลการทดสอบแสดงในรายงานผลการประเมินความแข็งแรงโครงสร้างชั้นทาง โดยเครื่องมือ Falling Weight Deflectomter ทางหลวงหมายเลข 331 ตอนเนินผาสุก-มาบเอียง ช่วง กม.

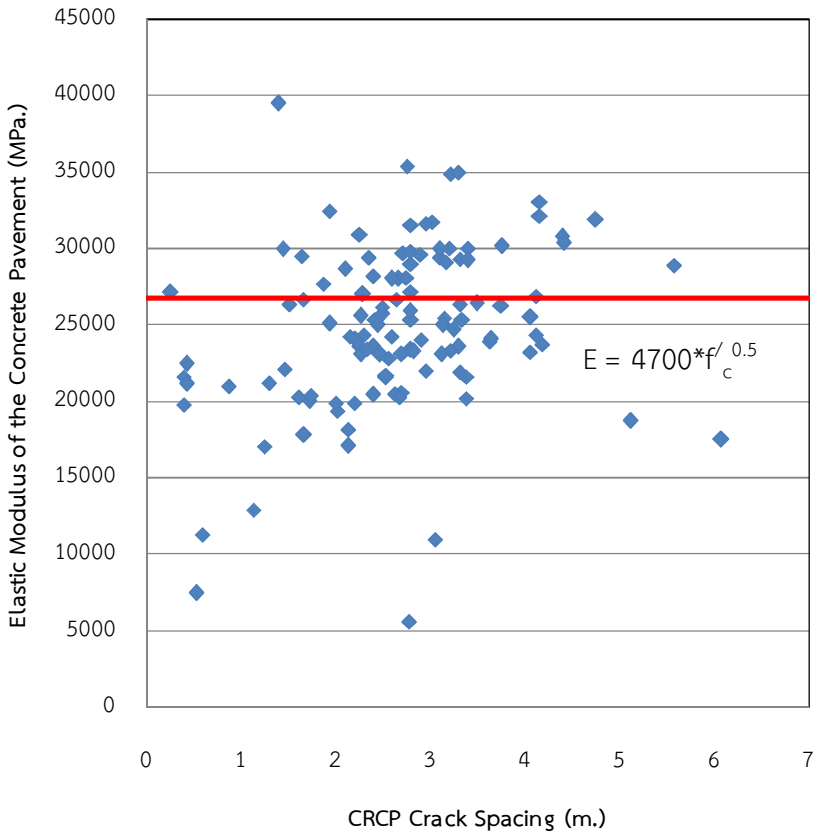
7+300-กม.8+300 RT (ผิวทางคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ CRCP) ทั้งนี้ภาพที่ 43 แสดงผังการทดสอบ FWD ภาพที่ 44 แสดงผลการทดสอบค่าโมดูลัสของวัสดุใต้แผ่นคอนกรีต ภาพที่ 45แสดงผลการทดสอบค่าโมดูลัสของคอนกรีต และภาพที่ 46 แสดงผลการทดสอบ LTE



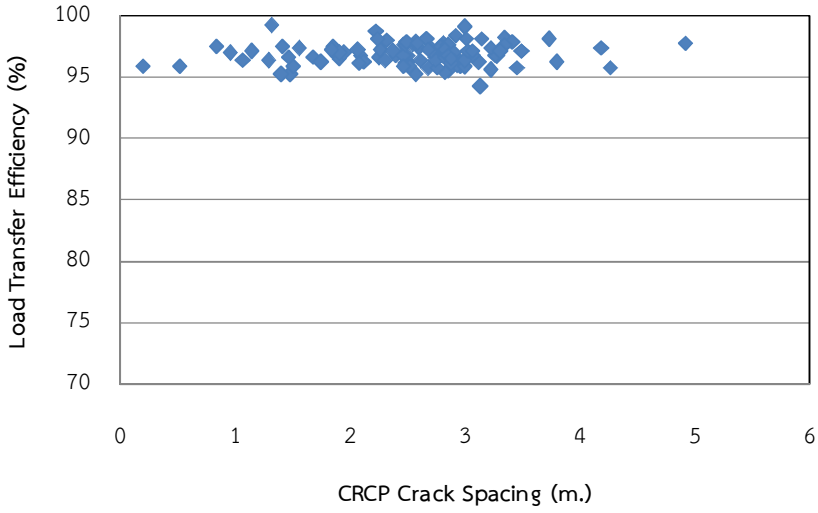
ภาพที่ 43 แสดงผังการทดสอบ FWD



ภาพที่ 44 แสดงผลการทดสอบค่าโมดูลัสของวัสดุใต้แผ่นคอนกรีต และระยะห่างรอยแตก



ภาพที่ 45 แสดงผลการทดสอบค่าโมดูลัสของคอนกรีตและระยะห่างรอยแตก



ภาพที่ 46 แสดงผลการทดสอบ LTE และระยะห่างรอยแตก

7. สรุป

การดำเนินการก่อสร้างถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) ทางหลวงหมายเลข. 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1 กม. 0+500 - 16+110 นั้น ได้ดำเนินงานจนแล้วเสร็จประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ การก่อสร้างผิวถนน CRCP แล้วเสร็จและได้ทำการเปิดการจราจรทั้งสองทิศทางการจราจร

จากการตรวจสอบระหว่างการก่อสร้างพบว่าระยะห่างระหว่างรอยแตกอยู่ในช่วงประมาณ 2.0 ถึง 4.0 เมตร ซึ่งสูงกว่าที่คาดการณ์ไว้ในขั้นตอนการออกแบบปริมาณเหล็กเสริม แต่ความกว้างของรอยแตกตามขวางยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ (น้อยกว่า 1.0 มิลลิเมตร) โดยปริมาณรอยแตกตามขวางมีปริมาณเพิ่มขึ้นภายหลังเปิดจราจรเป็นเวลา 1 ปี ทั้งนี้คาดการว่ารอยแตกจะเกิดเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเปิดการจราจรเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบ Falling Weight Deflectometer แสดงผลประสิทธิภาพในการถ่ายแรงบริเวณรอยแตกอยู่ในระดับที่สูงมากเป็นที่น่าพอใจ แต่ผลค่าโมดูลัสของวัสดุใต้แผ่นคอนกรีตหลายจุดอยู่ในระดับต่ำกว่า 150 MPa.

ในการออกแบบถนน CRCP ในอนาคต ควรพิจารณาเลือกใช้วัสดุชั้นรองถนน CRCP ที่เป็นวัสดุที่ถูกกัดเซาะได้ยาก (Non-Erodible Material) เพื่อป้องกันการเกิด Erosion ของวัสดุชั้นรองถนน CRCP ลดการเกิดการอัดทะลัก และลดปัญหาการกัดเซาะของน้ำ รวมทั้งวัสดุรองถนน CRCP แบบ Non-Erodible Material สามารถควบคุมระยะห่างระหว่างรอยแตกตามขวาง ให้สม่ำเสมอ ลดความกว้างรอยแตก

8. บรรณานุกรม

[1] ชัยรัตน์ ศุภชวโรจน์ และ จุฑา สุนิตย์สกุล แนวคิดในการออกแบบถนนคอนกรีตแบบไร้รอยต่อ (CRCP) แห่งแรกของกรมทางหลวง ทล. 331 บ.เนินผาสุข – มาบเอียง ตอน 1

[2] ยงยุทธ แต้ศิริ และ ธนศักดิ์ วงศ์ธนากิจเจริญ (2551) Continuously Reinforced ConcretePavement (CRCP) “อีกทางเลือกของถนนคอนกรีต”การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบ ประจำปีงบประมาณ 2551 กรมทางหลวง

[3] Rasmussen R.O. Rogers, R., Ferragut, T.R. (2011) Continuously Reinforced Concrete Pavement Design & Construction Guidelines, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.

[4] AASHTO (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

[5] Cement and Applications SCG, บริษัทเอสซีจี ซีเมนต์ จำกัด

[6] ASTM C 143 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete

[7] ป. ปานถาวร, “เทถนนแล้วทาไมแตกร้าว,” ใน วารสารคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

[8] สรัณกร เหมะวิบูลย์ “รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์การศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตที่ถูกยึดรั้งการหดตัวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”, มหาวิทยาลัยนเรศวร

[9] ASTM C403 “Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance”