



ประสิทธิภาพในการต้านทานความล้าของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียด
ขนาดเสมือนจริง

นายศุภณัฐชัย เขียวรอด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ประสิทธิภาพในการต้านทานความล้าของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียด
ขนาดเสมือนจริง



นายศุภณัฐชัย เขียวรอด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิ
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมก่อสร้าง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงงานวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง ประสิทธิภาพในการต้านทานความล้าของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียด
ขนาดเสมือนจริง

โดย นายศุภณัฐชัย เขียวรอด

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทร์วิพัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ ขมหวาน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน)

ชื่อ : นายศุภณัฐชัย เขียวรอด
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : ประสิทธิภาพในการต้านทานความล้าของแผ่นพื้นคอนกรีต
 ผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียดขนาดเสมือนจริง
 สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน
 ปีการศึกษา : 2568

บทคัดย่อภาษาไทย

การแตกร้าวของพื้นสะพานคอนกรีตเป็นปัญหาที่ทำให้ต้องซ่อมแซมสะพานก่อนเวลาอันควร สาเหตุหลักเกิดจากพื้นสะพานรับแรงกระทำซ้ำไปมา ซึ่งทำให้เกิดความล้าและผลของความล้าทำให้พื้นสะพานแตกร้าวจนเกิดความเสียหาย การใช้เม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียดเป็นส่วนผสมในคอนกรีต นั้นได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดการแตกร้าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ แก้ไขปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากความล้าของพื้นสะพานคอนกรีต โดยมีการกำหนดตัวแปรของการ ทดลองให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง และเปรียบเทียบผลการลดย่อยแตกร้าวของพื้นคอนกรีต ขนาด $2.00 \times 8.00 \times 0.20$ เมตร ที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่า บดละเอียดแทนที่ทรายร้อยละ 25 ของปริมาตรทราย โดยนำพื้นสะพานมาทดสอบในรูปแบบการรับ แรงแบบสองทาง (Two Way Slab) จำนวน 8 ตัวอย่าง ตัวอย่างทดสอบแรกของคอนกรีตทั้ง 2 ประเภทถูกนำมาทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของพื้นสะพานเป็นตัวอย่างที่ 1 และ 2 หลังจากนั้นจะทำการทดสอบความล้าโดยการให้แรงกระทำเป็น 40 55 และ 70 เปอร์เซ็นต์ของ กำลังรับแรงสูงสุดเป็นตัวอย่างที่ 3 ถึง 8 ตามลำดับเพื่อหาความสามารถของความต้านทานความล้า ของการผสมเม็ดยางรถยนต์เพื่อลดรอยแตกร้าว การทดสอบจะนำรอยแตกร้าว 40 เปอร์เซ็นต์ของ พื้นที่ เทียบกับจำนวนรอบของแรงกระทำและอัตราส่วนแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้น สะพานเพื่อวิเคราะห์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ในช่วงอัตราส่วนแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้น สะพานที่มีค่าน้อยกว่า 0.5 พื้นสะพาน CRC มีความสามารถในการต้านทานความล้าสูงกว่าพื้นสะพาน NC 93.08% และในช่วงอัตราส่วนแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพานที่มีค่ามากกว่า 0.5 พื้นสะพาน CRC มีค่าใกล้เคียงกับพื้นสะพาน NC

(มีจำนวนทั้งสิ้น 61 หน้า)

คำสำคัญ : ยางรถยนต์เก่าบดละเอียด, ความสามารถในการต้านทานความล้า, การทดสอบความล้า, แผ่น
พื้นคอนกรีต

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก



Name : Mr. Suppanatchai Khieorod
 Thesis Title : Fatigue performance of full-scale crumb rubber concrete slabs.
 Major Field : Construction Engineering Technology
 King Mongkut's University of Technology North
 Bangkok
 Thesis Advisor : Associate Professor Kittipoom Rodsin
 Academic Year : 2025

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

ABSTRACT

Cracking of concrete bridge decks is a significant issue that leads to premature maintenance and repair of bridges. The primary cause of this problem is the repeated loading applied to the bridge decks, which induces fatigue and eventually results in cracking and damage. The use of finely ground recycled rubber particles from waste tires as a concrete additive has been proven to be an effective method for reducing cracking. This research aims to address the problem of fatigue-induced cracking in concrete bridge decks. The experimental variables were designed to closely simulate real-life applications. The study compares the crack reduction performance of concrete bridge decks with dimensions of 2.00 x 8.00 x 0.20 meters, constructed using both conventional concrete and concrete incorporating finely ground recycled rubber particles, replacing 25% of the sand volume. A total of 8 specimens were tested under two-way slab loading conditions. The first specimens of each concrete type were subjected to static loading tests to determine the maximum load-bearing capacity (specimens 1 and 2). Subsequently, fatigue tests were conducted on specimens 3 through 8 by applying loads at 40% 55% and 70% of the maximum load capacity to evaluate the fatigue resistance provided by the rubberized concrete in reducing cracking. The fatigue performance was assessed by measuring the area of cracking equivalent to 40% of the total slab surface, comparing the number of load cycles and

the load ratio relative to the ultimate load capacity of the slabs. The test results indicated that, in the range where the load ratio to the ultimate load capacity was less than 0.5, the CRC slabs exhibited 93.08% higher fatigue resistance compared to the NC slabs. In the range where the load ratio exceeded 0.5, the fatigue performance of CRC slabs was comparable to that of NC slabs.

(Total 61 Pages)

Keywords: Crumb rubber concrete, Fatigue performance, Fatigue Test, Concrete slab

Advisor



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องประสิทธิภาพในการต้านทานความล้าของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมยางรถยนต์
เก่าบดละเอียดขนาดเสมือนจริงได้รับทุนสนับสนุนจาก วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือตามสัญญาเลขที่ CIT-2023-GRAD-26 จึง
ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ศุภณัฐชัย เขียวรอด



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ฅ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 ความหมายของความล้า (Fatigue).....	4
2.1.2 เส้นโค้งความล้า (Fatigue Curve หรือ S-N Curve).....	4
2.1.3 กลไกของการเกิดความล้าในคอนกรีต.....	5
2.1.4 การปรับปรุงคุณสมบัติความล้าด้วย Crumb Rubber Concrete (CRC)	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย	13
3.1 การทดสอบหาชนิดเม็ดยางบดละเอียดที่เหมาะสม	13
3.2 พื้นสะพานจำลอง	17
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด.....	19
3.3.1 LVDT	19

3.3.2	มาตรวัดแรง (Load Cell).....	19
3.3.3	อุปกรณ์แปลงสัญญาณ A to D (Data Logger)	20
3.4	ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด.....	20
3.5	การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพาน	22
3.5.1	วิธีการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานจำลอง	23
3.6	การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานจำลอง.....	24
3.6.1	วิธีการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานจำลอง	26
บทที่ 4	ผลการวิจัย	27
4.1	การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพาน	27
4.1.1	การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานแผ่นที่ 1 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (ST-NC20-1)	27
4.1.2	ผลการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานแผ่นที่ 1 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (ST-NC20-1)	28
4.1.3	การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานแผ่นที่ 2 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (ST-CRC20-1)	30
4.1.4	ผลการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานแผ่นที่ 2 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (ST-CRC20-1)	31
4.1.5	สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรง.....	32
4.2	การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพาน.....	33
4.2.1	การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 3 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (FT-NC20-1)	33
4.2.2	ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 3 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (FT-NC20-1).....	35
4.2.3	การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 4 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (FT-NC20-2)	36

4.2.4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 4 ก่อสร้างด้วยคอนกรีต ปกติ (FT-NC20-2).....	38
4.2.5 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 5 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (FT-NC20-3)	39
4.2.6 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 5 ก่อสร้างด้วยคอนกรีต ปกติ (FT-NC20-3).....	42
4.2.7 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 6 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสม เม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-1)	43
4.2.8 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 6 ก่อสร้างด้วยคอนกรีต ผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-1)	46
4.2.9 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 7 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสม เม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-2)	48
4.2.10 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 7 ก่อสร้างด้วยคอนกรีต ผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-2)	50
4.2.11 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 8 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสม เม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-3)	52
4.2.12 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 8 ก่อสร้างด้วยคอนกรีต ผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-3)	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.1 พฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ	56
5.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานความล้าของพื้นสะพาน	58
5.3 สรุปผลการทดลอง	59
บรรณานุกรม.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	62

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีต	14
ตารางที่ 3.1-2 ส่วนผสมคอนกรีต.....	15
ตารางที่ 3.2-1 รายละเอียดการทดสอบของพื้นสะพาน	19
ตารางที่ 3.4-1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด.....	21
ตารางที่ 3.5-1 รายละเอียดการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพาน	23
ตารางที่ 3.6-1 รายละเอียดการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพาน	25
ตารางที่ 4.1-1 แรงกระทำแบบวัฏจักรที่ใช้ในการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพาน	32
ตารางที่ 5.1-1 ตารางเปรียบเทียบความล้าระหว่าง NC และ CRC.....	56

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1-1 ความเสียหายของพื้นสะพาน	1
รูปที่ 2.1-1 ตัวอย่างการทดสอบความล้า.....	4
รูปที่ 2.1-2 ตัวอย่าง S-N (Stress & Cycle) Curve.....	5
รูปที่ 2.2-1 การทดสอบคอนกรีตผสมเม็ดยาง.....	8
รูปที่ 2.2-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์บดละเอียด	9
รูปที่ 2.2-3 พฤติกรรมการดูดซับพลังงานของคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด	9
รูปที่ 2.2-4 การทดสอบ Fatigue Performance ของคอนกรีตผสมยาง (CRC) สำหรับงานถนน คอนกรีตแข็ง.....	10
รูปที่ 2.2-5 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P/Pu กับจำนวนรอบที่คอนกรีตสามารถทนได้ก่อนเกิด ความเสียหาย	11
รูปที่ 2.2-6 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าจากแรงกระทำซ้ำหลายระดับ	11
รูปที่ 2.2-7 การเปรียบเทียบกำลังต้านทานความล้าของ CRC ในปริมาณเม็ดยางที่แตกต่างกัน	12
รูปที่ 2.2-8 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากความล้า.....	12
รูปที่ 3.1-1 คอนกรีต (Cylinder) ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร.....	13
รูปที่ 3.1-2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีต	13
รูปที่ 3.1-3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด	16
รูปที่ 3.1-4 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Curve).....	16
รูปที่ 3.2-1 แบบการเสริมเหล็ก.....	17
รูปที่ 3.2-2 แบบการเสริมเหล็ก (ต่อ).....	18
รูปที่ 3.2-3 การก่อสร้างพื้นสะพานจำลอง.....	18
รูปที่ 3.3-1 อุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของโครงสร้าง (LVDT)	19
รูปที่ 3.3-2 มาตรวัดแรง (Load Cell).....	20
รูปที่ 3.3-3 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ A to D (Data Logger).....	20
รูปที่ 3.4-1 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง	21
รูปที่ 3.4-2 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (ต่อ).....	21

รูปที่ 3.4-3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (ต่อ).....	22
รูปที่ 3.4-4 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง.....	22
รูปที่ 3.5-1 การทดสอบกำลังรับแรง.....	23
รูปที่ 3.6-1 ตัวอย่างการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การแตกร้าว.....	25
รูปที่ 3.6-2 ตัวอย่างการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การแตกร้าว.....	26
รูปที่ 4.1-1 การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานจำลอง (ST-NC20-1).....	27
รูปที่ 4.1-2 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (ST-NC20-1).....	28
รูปที่ 4.1-3 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นบริเวณ L/2 ของพื้นสะพานจำลอง (ST-NC20-1).....	28
รูปที่ 4.1-4 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นบริเวณ L/4 ของพื้นสะพานจำลอง (ST-NC20-1).....	29
รูปที่ 4.1-5 การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานจำลอง (ST-CRC20-1)	30
รูปที่ 4.1-6 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (ST-CRC20-1).....	30
รูปที่ 4.1-7 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นบริเวณ L/2 ของพื้นสะพานจำลอง (ST-CRC20-1).....	31
รูปที่ 4.1-8 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นบริเวณ L/4 ของพื้นสะพานจำลอง (ST-CRC20-1).....	32
รูปที่ 4.2-1 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-1).....	35
รูปที่ 4.2-2 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-1).....	35
รูปที่ 4.2-3 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-1)	36
รูปที่ 4.2-4 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-2).....	38
รูปที่ 4.2-5 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-2).....	38
รูปที่ 4.2-6 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-2)	39
รูปที่ 4.2-7 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-3).....	41

รูปที่ 4.2-8 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพาน จำลอง (FT-NC20-3).....	42
รูปที่ 4.2-9 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT- NC20-3)	43
รูปที่ 4.2-10 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-1).....	45
รูปที่ 4.2-11 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพาน จำลอง (FT-CRC20-1).....	46
รูปที่ 4.2-12 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT- CRC20-1)	47
รูปที่ 4.2-13 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-2).....	50
รูปที่ 4.2-14 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพาน จำลอง (FT-CRC20-2).....	51
รูปที่ 4.2-15 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT- CRC20-2)	51
รูปที่ 4.2-16 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-3).....	54
รูปที่ 4.2-17 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพาน จำลอง (FT-CRC20-3).....	55
รูปที่ 4.2-18 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT- CRC20-3)	55
รูปที่ 5.1-1 ผลทดสอบพื้นสะพานเมื่อแรงกระทำซ้ำที่ 40%	57
รูปที่ 5.1-2 ผลทดสอบพื้นสะพานเมื่อแรงกระทำซ้ำที่ 55%	57
รูปที่ 5.1-3 ผลทดสอบพื้นสะพานเมื่อแรงกระทำซ้ำที่ 70%	57
รูปที่ 5.2-1 เส้นโค้งความล้า (Fatigue Curve).....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

พื้นสะพานเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อโครงสร้างสะพาน เนื่องจากเป็นส่วนที่รับแรงโดยตรงจากการจราจรทั้งในแนวดิ่งและแรงกระทำซ้ำที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของยานพาหนะอย่างต่อเนื่อง การใช้งานเป็นเวลานานส่งผลให้พื้นสะพานเสื่อมสภาพ เกิดการแตกร้าวสะสมจนกระทบต่อสมรรถนะในการรับแรงของโครงสร้างโดยรวม แม้ว่าแรงที่กระทำต่อพื้นสะพานจะมีค่าต่ำกว่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่ออกแบบไว้ แต่การเกิดซ้ำของแรงดังกล่าวทำให้โครงสร้างเข้าสู่สภาวะความล้า (Fatigue) ซึ่งถือเป็นสาเหตุหลักของการแตกร้าวก่อนเวลาอันควร ปัญหาดังกล่าวไม่เพียงส่งผลต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ทาง แต่ยังสร้างภาระค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่สูงขึ้น ในทางวิศวกรรม



รูปที่ 1.1-1 ความเสียหายของพื้นสะพาน

การป้องกันการแตกร้าวอาจทำได้โดยการเพิ่มความหนาของพื้นสะพานหรือเพิ่มจำนวนคานรองรับ แม้วิธีการเหล่านี้สามารถเพิ่มกำลังโครงสร้างได้ แต่กลับเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่แก่โครงสร้างเดิม จึงอาจไม่ใช่วิธีการที่เหมาะสมต่อทุกกรณี ด้วยเหตุนี้ วัสดุทางเลือกที่ได้รับความสนใจในการแก้ปัญหาความล้าของคอนกรีตคือ คอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (Crumb Rubber Concrete: CRC) โดยมีการแทนที่เม็ดยางรีไซเคิลแทนทรายในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า CRC สามารถเพิ่มคุณสมบัติด้านความเหนียว (Toughness) การดูดซับพลังงาน

(Energy Absorption) ค่าการลดแรงสั่นสะเทือน (Damping Ratio) ความสามารถในการทนต่อแรงกระแทก (Impact Resistance) รวมถึงเพิ่มความต้านทานต่อความล้า (Fatigue Resistance) ได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ คุณสมบัติเหล่านี้เหมาะสมต่อการใช้งานกับโครงสร้างที่ต้องรองรับแรงซ้ำและแรงกระแทก เช่น พื้นกันกระแทก พื้นถนน หรือพื้นสะพาน นอกจากนั้น การนำเศษยางรถยนต์มาช่วยยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดปริมาณขยะที่ย่อยสลายยาก และลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับ CRC ส่วนใหญ่ยังคงเป็นการทดสอบในขนาดเล็กหรือในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจไม่สะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงเมื่อนำไปใช้งานกับโครงสร้างสะพานขนาดใหญ่ที่ต้องรองรับการจราจรจริง ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมและสมรรถนะด้านความทนทานต่อความล้าของพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด ขนาดเสมือนจริง โดยมีการเปรียบเทียบกับพื้นสะพานคอนกรีตปกติ ภายใต้การทดสอบแรงซ้ำในระดับ 40%, 55% และ 70% ของกำลังรับแรงสูงสุด เพื่อประเมินความสามารถในการลดการแตกร้าวและความทนทานต่อความล้า ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะมีความสำคัญต่อการประเมินศักยภาพของ CRC ในการประยุกต์ใช้จริงกับงานสะพาน ช่วยสร้างความเข้าใจเชิงวิศวกรรม และอาจเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างสะพานที่มีความคงทนและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินความสามารถในการลดรอยแตกร้าวของพื้นสะพานคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด
2. เพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานความล้าของพื้นสะพานคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด
3. เพื่อประเมินศักยภาพของ CRC ในการประยุกต์ใช้จริงกับงานสะพาน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาพื้นสะพานคอนกรีตขนาดกว้าง 2.00 เมตร ยาว 8.00 เมตร และหนา 0.20 เมตร จำนวนทั้งสิ้น 8 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็นคอนกรีตปกติ (Normal Concrete: NC) จำนวน 4 ตัวอย่าง และ คอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (Crumb Rubber Concrete: CRC) อีก 4 ตัวอย่าง พื้นสะพานจำลองทั้งหมดจะถูกแบ่งไปทดสอบภายใต้โครงเหล็กทดสอบเพื่อกำกำลังรับแรงจำนวน 2 แผ่นพื้น และทดสอบกำลังต้านทานความล้าจำนวน 6 แผ่นพื้น บันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความสามารถในการลดรอยแตกร้าวของพื้นสะพานคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด
2. ทราบถึงความสามารถในการต้านทานความล้าของพื้นสะพานคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด
3. ทราบถึงศักยภาพของ CRC ในการประยุกต์ใช้จริงกับงานสะพาน



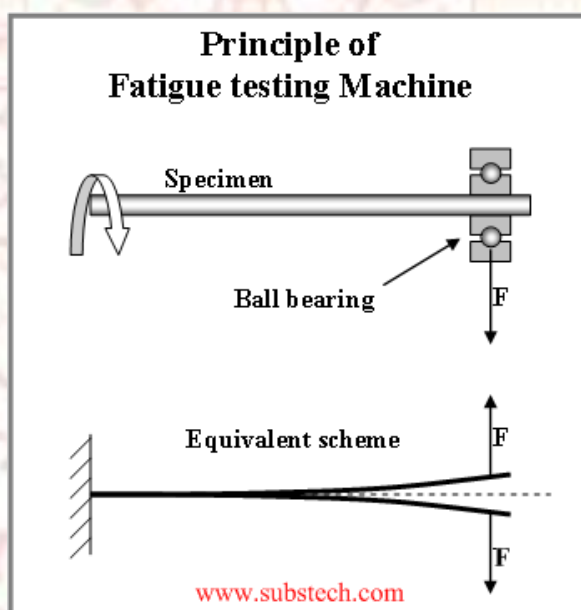
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ความหมายของความล้า (Fatigue)

ความล้า (Fatigue) หมายถึงกระบวนการเสื่อมสภาพของวัสดุหรือโครงสร้างที่เกิดจากการรับแรงซ้ำ (Cyclic Loading) ซ้ำไปซ้ำมาเป็นระยะเวลายาวนาน แม้ว่าแรงที่กระทำในแต่ละครั้งจะมีค่าต่ำกว่ากำลังรับสูงสุดของวัสดุ แต่การสะสมความเสียหายภายในเนื้อวัสดุจะค่อย ๆ ก่อให้เกิดรอยแตกเล็กๆ (Micro-cracks) และพัฒนาเชื่อมต่อกันจนกลายเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ ส่งผลให้โครงสร้างสูญเสียสมรรถนะและวิบัติได้ก่อนเวลาอันควรในโครงสร้างสะพานคอนกรีต พื้นสะพานถือเป็นองค์ประกอบที่รับแรงจากการจราจรโดยตรงตลอดเวลา ทำให้เกิดปรากฏการณ์ความล้าได้บ่อย และเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ต้องซ่อมแซมหรือเสริมกำลังสะพานก่อนถึงอายุการใช้งานจริง



รูปที่ 2.1-1 ตัวอย่างการทดสอบความล้า

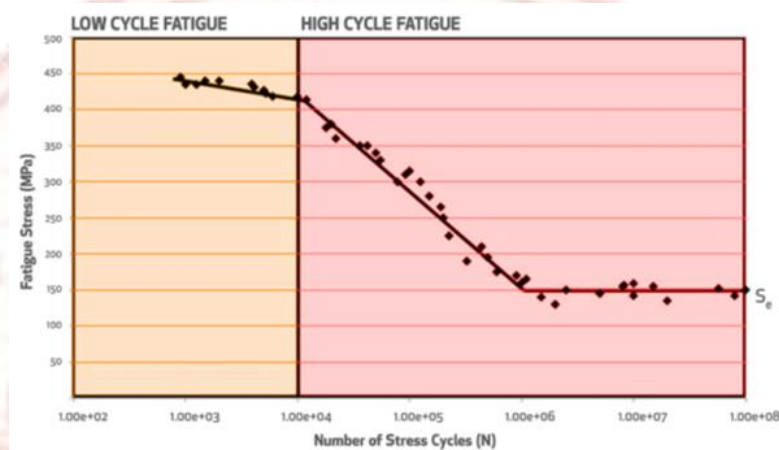
2.1.2 เส้นโค้งความล้า (Fatigue Curve หรือ S-N Curve)

เส้นโค้งความล้า (S-N Curve) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเค้น (Stress) หรือ อัตราส่วนแรงกระทำต่อกำลังรับแรงสูงสุด (P/P_u) กับ จำนวนรอบ (N) ที่ทำให้เกิดความเสียหายหรือ รอยร้าวในระดับที่กำหนด

- เมื่อ แรงต่ำ ($P/P_u < 0.5$) $\rightarrow$ โครงสร้างจะทนต่อแรงซ้ำได้จำนวนรอบมาก

- เมื่อ แรงสูง ($P/P_u > 0.5$) → จำนวนรอบที่โครงสร้างทนได้จะลดลงอย่างรวดเร็ว

กราฟนี้สามารถใช้ประเมินอายุการใช้งาน (Fatigue Life) ของวัสดุและเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุแต่ละชนิดได้ เช่น การเปรียบเทียบคอนกรีตปกติ (NC) และคอนกรีตผสมเมีดยาง (CRC) ลักษณะของเส้นกราฟจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ เมื่อเราได้ข้อมูล S-N Curve เราจะใช้ข้อมูลนี้ไปเป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์ทั้งการวิเคราะห์ด้วยมือ หรือใช้โปรแกรม



รูปที่ 2.1-2 ตัวอย่าง S-N (Stress & Cycle) Curve

2.1.3 กลไกของการเกิดความล้าในคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite Material) ประกอบด้วย เนื้อซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste), มวลรวม (Aggregates) และรอยต่อมวลรวม (Interfacial Transition Zone: ITZ) ซึ่งแต่ละส่วนมีสมบัติทางกลต่างกัน ทำให้เมื่อคอนกรีตรับแรงซ้ำ (Cyclic Load) จะเกิด การสะสมความเสียหายทีละน้อย (Cumulative Damage) จนกระทั่งโครงสร้างวิบัติ ความล้าในคอนกรีตสามารถอธิบายได้ผ่าน 3 ระยะสำคัญ คือ

1. ระยะการก่อรอยร้าว (Crack Initiation)

- ในช่วงแรกของการรับแรงซ้ำ ความเค้นที่เกิดขึ้นมักต่ำกว่าความต้านทานสูงสุดของคอนกรีต แต่จะก่อให้เกิด Micro-cracks ขนาดเล็กบริเวณที่เป็น “จุดอ่อน” ของวัสดุ เช่น
 - บริเวณ Interfacial Transition Zone (ITZ) ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างมวลรวมและเนื้อซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากมี ความพรุนสูง (Porosity) และมีโครงสร้างผลึกที่ไม่หนาแน่น
 - บริเวณรูพรุน (Voids) หรือช่องว่างที่เกิดจากการอัดแน่นไม่สมบูรณ์

- Micro-cracks ที่เกิดขึ้นมักเป็น รอยร้าวแบบปิด (Closed cracks) ซึ่งยังไม่กระจายออกไปมากนัก แต่จะสะสมจำนวนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อรับแรงซ้ำอย่างต่อเนื่อง
- ระยะนี้ถือเป็น “ช่วงแฝง (Incubation Period)” ซึ่งยังไม่เห็นความเสียหายชัดเจนในระดับมหภาค (Macroscopic Level) แต่เป็นการเริ่มต้นของกระบวนการล้า

2. ระยะการขยายรอยร้าว (Crack Propagation)

- เมื่อ micro-cracks มีจำนวนมากขึ้น จะเริ่มเชื่อมต่อกันและ ขยายตัวตามทิศทางของแรงซ้ำ ทำให้เกิดการกระจายของความเค้นในเนื้อคอนกรีต
- ลักษณะสำคัญคือ การรวมตัวของรอยร้าวเล็ก ให้กลายเป็นรอยร้าวใหญ่ โดยจะขยายตามแนวแรงดึง (Tensile Stress Direction)
- พฤติกรรมในระยะนี้สามารถแบ่งเป็น 2 แบบ:
 1. Stable Crack Growth → รอยร้าวขยายช้า ๆ แต่ต่อเนื่อง สามารถรับแรงซ้ำได้จำนวนรอบมาก
 2. Unstable Crack Growth → เมื่อถึงจุดวิกฤติ (Critical Point) รอยร้าวจะขยายอย่างรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างเข้าสู่ภาวะวิบัติในเวลาอันสั้น
- กลไกหลักที่เกิดขึ้นในระยะนี้คือ Stress Concentration บริเวณปลายรอยร้าว (Crack Tip) ซึ่งทำให้ค่าความเค้นเฉพาะที่สูงขึ้น และเร่งการเจริญเติบโตของรอยร้าว

3. ระยะการวิบัติขั้นสุดท้าย (Final Failure)

- เมื่อรอยร้าวที่เชื่อมต่อกันขยายตัวจนมีขนาดใหญ่เพียงพอ จะเกิด รอยแตกหลัก (Macro-crack) ที่พาดผ่านพื้นที่รับแรง
- โครงสร้างเข้าสู่ ภาวะ Plastic Zone บริเวณปลายรอยร้าว ส่งผลให้วัสดุสูญเสียความสามารถในการต้านทานแรง และเกิดการพังทลาย (Collapse)
- ในคอนกรีต ความล้ามักแสดงออกเป็น
 - การแตกร้าวแบบ Flexural Fatigue → เกิดจากแรงดัดซ้ำ ทำให้เกิดรอยร้าวบริเวณใยล่างของคานหรือพื้น
 - การแตกร้าวแบบ Compressive Fatigue → เกิดจากแรงอัดซ้ำ ทำให้เกิดการแตกแยกของเนื้อเพสต์และมวลรวม
- ระยะนี้ถือเป็น ระยะการสูญเสียสมรรถนะโครงสร้างโดยสิ้นเชิง และไม่สามารถฟื้นฟุได้
-

4. ปัจจัยที่มีผลต่อกลไกความล้าในคอนกรีต

1. สัดส่วนผสมคอนกรีต → ปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c ratio) และคุณภาพของมวลรวม ส่งผลโดยตรงต่อ ITZ และการเกิด micro-cracks
2. ระดับของแรงซ้ำ (Load Ratio, P/Pu) →
 - ที่แรงต่ำ ($P/P_u < 0.5$) → ระยะการก่อรอยร้าวและการขยายรอยร้าวค่อนข้างยาวนาน CRC สามารถทนได้ดีกว่า
 - ที่แรงสูง ($P/P_u > 0.5$) → การขยายรอยร้าวเข้าสู่ Final Failure รวดเร็ว ทำให้ความแตกต่างระหว่าง CRC และคอนกรีตปกติมีน้อยลง
3. คุณสมบัติของวัสดุเสริม (เช่น เม็ดยาง) → เม็ดยางช่วยลด Stress Concentration และเพิ่ม Toughness ทำให้รอยร้าวขยายตัวช้าลง

2.1.4 การปรับปรุงคุณสมบัติความล้าด้วย Crumb Rubber Concrete (CRC)

การผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าที่ผ่านการบดละเอียด (Crumb Rubber) ลงในคอนกรีตถือเป็นแนวทางการพัฒนาวัสดุที่มีความสำคัญทั้งในเชิงวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากช่วยแก้ปัญหาการกำจัดขยะยางรถยนต์ และในขณะเดียวกันยังช่วยปรับปรุงสมบัติของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้านความทนทานต่อความล้า (Fatigue Resistance) ซึ่งเป็นปัญหาหลักของโครงสร้างพื้นฐานสะพานที่ต้องรับแรงซ้ำจากการจราจรอยู่ตลอดเวลา

1. การเพิ่มความเหนียว (Toughness) และอัตราการดูดซับพลังงาน (Damping Ratio)

เม็ดยางที่มีความยืดหยุ่นสูงเมื่อถูกผสมลงในคอนกรีตจะทำหน้าที่เป็น ตัวหน่วงพลังงาน (Energy Absorber) ช่วยลดความรุนแรงของแรงกระแทกและแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการรับน้ำหนักซ้ำ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความเหนียว (Toughness) ทำให้คอนกรีตสามารถเปลี่ยนรูปก่อนแตกร้าวได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ สมบัตินี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อโครงสร้างที่ต้องรับแรงซ้ำ เช่น พื้นสะพานหรือพื้นทางเท้า ซึ่งต้องการความทนทานต่อแรงสั่นสะเทือนและแรงล้าตลอดอายุการใช้งาน

2. การลดความเข้มข้นของความเค้นเฉพาะที่ (Stress Concentration)

คอนกรีตปกติเป็นวัสดุที่เปราะ ทำให้มีแนวโน้มเกิด การรวมตัวของ micro-cracks ในจุดอ่อน เช่น บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม (ITZ) อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อมีการผสมเม็ดยางเข้าไป เม็ดยางจะทำหน้าที่เป็น จุดกระจายความเค้น (Stress Distributor) ที่ช่วยลดความเข้มข้น

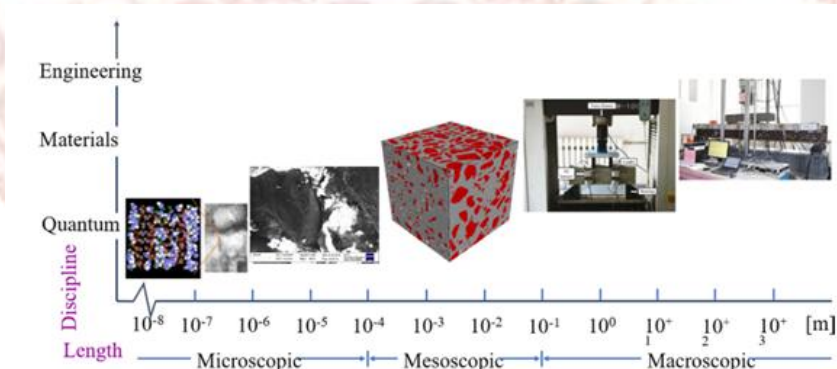
ของความเค้นเฉพาะที่ (Stress Concentration) ส่งผลให้เกิดและการรวมตัวของ micro-cracks เกิดซ้ำลง ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

3. กลไกที่ทำให้ CRC มีความทนทานต่อความล้ามากขึ้น

- การยึดหยุ่นของเม็ดยาง → ช่วยหน่วงแรงและลดความรุนแรงของการกระทำซ้ำต่อเนื้อคอนกรีต
- การกระจายความเค้น → ลดการเกิด Stress Concentration ที่เป็นต้นเหตุของรอยร้าว
- ความเหนียวของวัสดุ (Toughness) → ทำให้คอนกรีตไม่เปราะเกินไป สามารถทนการเปลี่ยนรูปได้ก่อนเกิดการแตกร้าว
- การหน่วงการเชื่อมต่อของ micro-cracks → ทำให้การรวมตัวเป็น macro-crack เกิดช้าลง

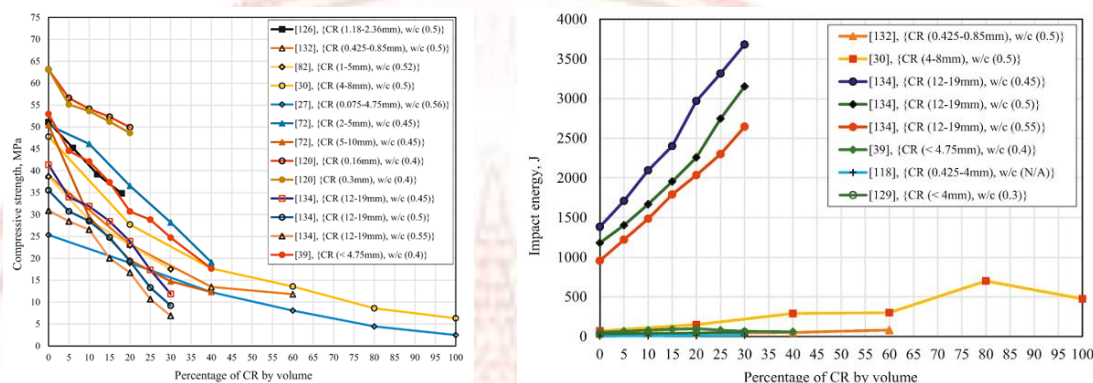
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Xu et al., 2020) ได้ทำการศึกษาแบบหลายระดับ (*multi-scale review*) เกี่ยวกับคอนกรีตผสมเม็ดยาง โดยครอบคลุมทั้งในระดับจุลภาค ระดับวัสดุ และระดับโครงสร้าง พบว่าการแทนที่เม็ดยางเข้าไปในคอนกรีตสามารถช่วยเพิ่มความเหนียว (Toughness) ความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Damping Ratio) ความทนทานต่อความล้า (Fatigue Resistance) และ ความสามารถในการต้านทานแรงกระแทก (Impact Resistance) ของคอนกรีตได้ แต่ก็อาจส่งผลให้กำลังอัดลดลง ทั้งนี้สมบัติด้านความล้ามีแนวโน้มดีขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เม็ดยางในปริมาณที่เหมาะสม



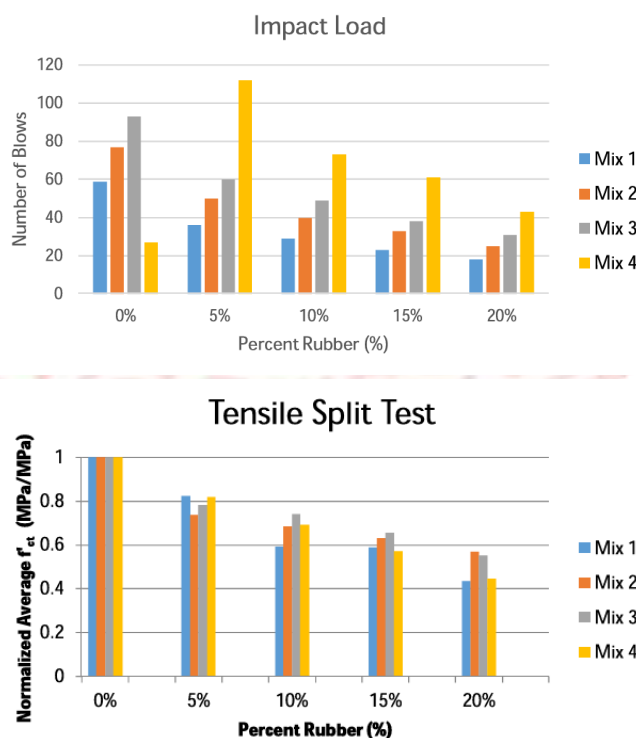
รูปที่ 2.2-1 การทดสอบคอนกรีตผสมเม็ดยาง

(Assaggaf et al., 2021) ได้ทำทบทวนงานวิจัยหลายชิ้นเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเม็ดยาง พบว่าการใช้เม็ดยางช่วยเพิ่มความเหนียวและความสามารถในการเปลี่ยนรูปของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตสามารถต้านทานแรงซ้ำได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ แม้ว่าจะมีการลดลงของกำลังอัด แต่หากใช้วิธีการปรับปรุงเม็ดยาง เช่น การใช้สารเคมีหรือสารเคลือบผิว ก็สามารถแก้ปัญหานี้ได้



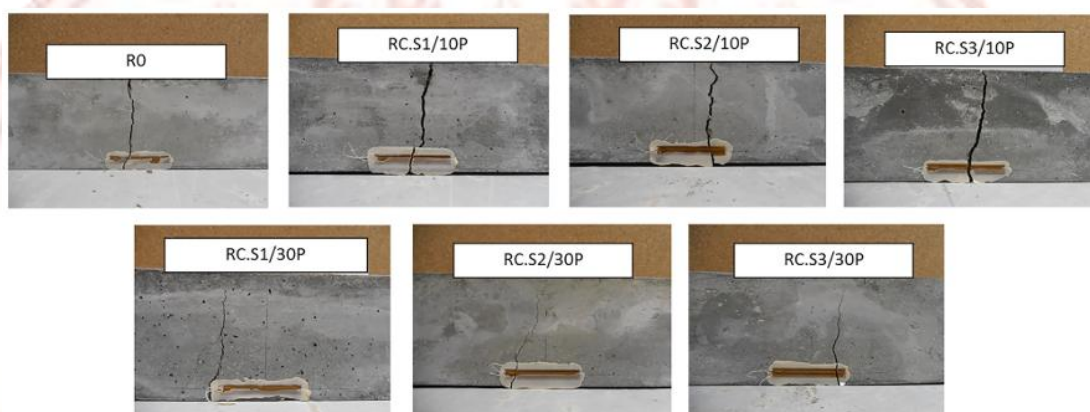
รูปที่ 2.2-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์บดละเอียด

(Gerges et al., 2018) ได้ทำการศึกษาเชิงกรณีเกี่ยวกับสมบัติทางกลและพลศาสตร์ของคอนกรีตผสมยาง พบว่า CRC มีพฤติกรรมการสั่นสะเทือนและการดูดซับพลังงานดีกว่าคอนกรีตปกติ ทำให้เหมาะสำหรับโครงสร้างที่ต้องการการลดแรงสั่นสะเทือนและรับแรงซ้ำ



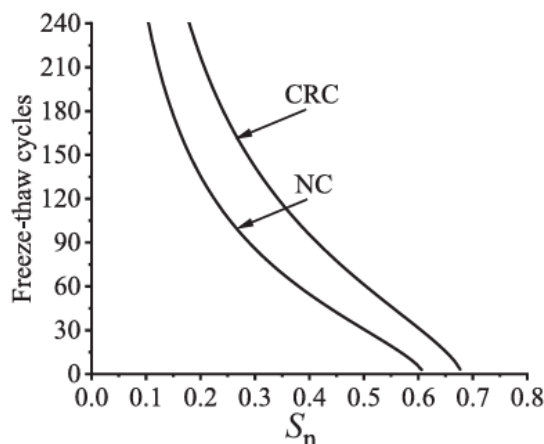
รูปที่ 2.2-3 พฤติกรรมการดูดซับพลังงานของคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์บดละเอียด

(Pacheco-Torres et al., 2018) ได้ทำการศึกษา Fatigue Performance ของคอนกรีตผสมยาง (CRC) สำหรับงานถนนคอนกรีตแข็ง (Rigid Pavements) โดยมุ่งเน้นการประเมินอิทธิพลของ ขนาดและปริมาณเม็ดยางที่แทนที่มวลรวมละเอียด ต่อสมบัติทางกลและความทนทานต่อความล้า งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดสอบใหม่ที่สามารถจำลองสภาวะการรับแรงซ้ำจากการจราจรจริง และทำการวัดความเสียหายที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำแบบรอบ (Cyclic Load) งานวิจัยสรุปว่า การเลือกขนาดและปริมาณเม็ดยางที่ เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานความล้า ลดความเปราะบาง และยืดอายุการใช้งานของถนนคอนกรีตได้จริง ทั้งยังช่วยลดปริมาณยางรถยนต์ใช้แล้วซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมในระดับโลก



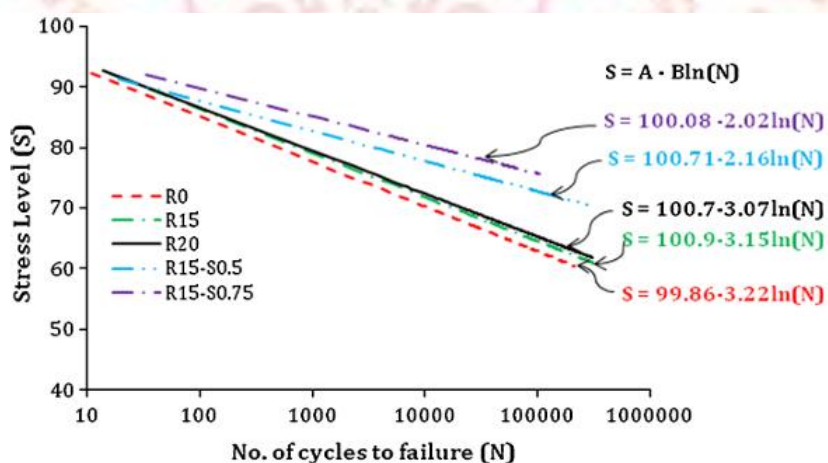
รูปที่ 2.2-4 การทดสอบ Fatigue Performance ของคอนกรีตผสมยาง (CRC) สำหรับงานถนนคอนกรีตแข็ง

(Xue et al., 2023) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะด้านความล้าของ Crumb Rubber Concrete (CRC) ภายใต้สภาวะ Freeze-Thaw Cycles เพื่อสะท้อนพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงในโครงสร้างพื้นสะพานและงานวิศวกรรมในพื้นที่หนาวเย็นงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า CRC มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ในโครงสร้างพื้นสะพาน เนื่องจากสามารถ ลดการแตกร้าว, เพิ่มอายุความล้า, และทนทานต่อสภาพแวดล้อมรุนแรง ได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ แม้ในสภาวะ Freeze-Thaw Cycles และเมื่อแรงกระทำซ้ำเข้าใกล้กำลังสูงสุด ($S_n \geq 0.6$) ความแตกต่างระหว่าง CRC และ NC ลดลงเนื่องจากเกิดความเสียหายรุนแรงตั้งแต่รอบต้น ๆ



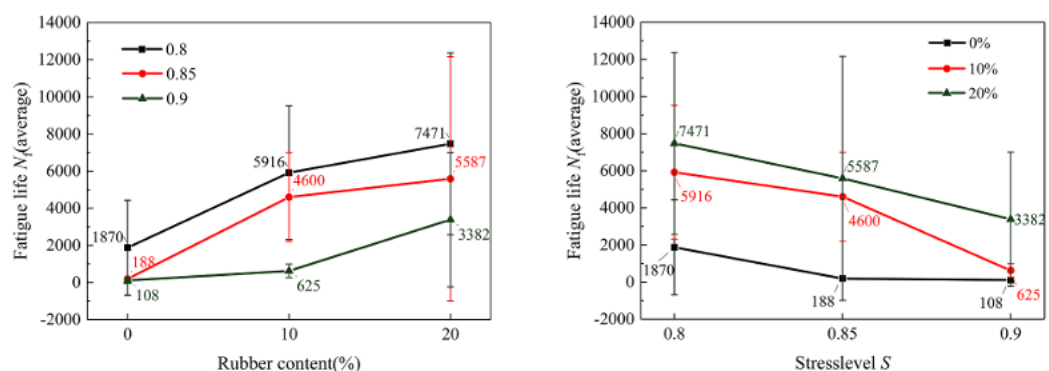
รูปที่ 2.2-5 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P/Pu กับจำนวนรอบที่คอนกรีตสามารถทนได้ก่อนเกิด
ความเสียหาย

(Ganesan et al., 2013) ได้ทำการศึกษา พฤติกรรมความล้าเชิงดัด (*Flexural Fatigue Behavior*) ของ Self-Compacting Rubberized Concrete (SCRC) ภายใต้ระดับแรงซ้ำที่แตกต่าง กัน โดยการทดสอบแบบ สี่จุด (Four-point Bending Fatigue Test) ที่ใช้ค่าสัดส่วนแรงสูงสุดต่อ กำลังรับแรงดัดสถิต (Stress Ratio, S) ที่ 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70 และ 0.60 ของกำลังสูงสุด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงซ้ำ (S) และจำนวนรอบที่สามารถทนได้ก่อนวิบัติ (N) งานวิจัยนี้ ยืนยันว่า กำลังต้านทานความล้าของ CRC จะใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติเมื่ออยู่ที่ ระดับแรงซ้ำสูง (เช่น $S = 0.9-0.85$) แต่จะแสดงศักยภาพที่เหนือกว่าคอนกรีตปกติอย่างชัดเจนเมื่ออยู่ที่ ระดับแรงซ้ำต่ำถึง ปานกลาง ($S = 0.8-0.6$) เนื่องจากเม็ดยางช่วยลดการรวมตัวของความเค้นเฉพาะที่ และช่วยหน่วง การขยายรอยร้าว ทำให้ CRC มีความทนทานต่อแรงซ้ำมากขึ้น



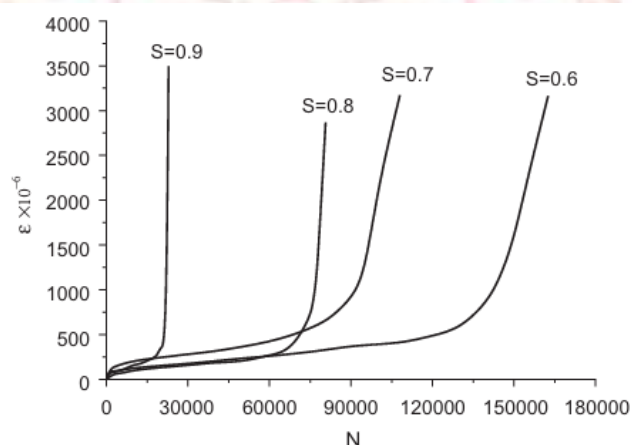
รูปที่ 2.2-6 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าจากแรงกระทำซ้ำหลายระดับ

(Liu et al., 2023) ได้ทำการศึกษา กลไกการเสียหายและการขยายตัวของรอยร้าวจากความล้าใน Rubber Concrete (RC) โดยมุ่งเน้นผลของการแทนที่ทรายด้วยเม็ดยางในปริมาณต่างๆ ต่อสมรรถนะด้านความล้าและพลังงานแตกหัก (Fracture Energy) ของคอนกรีต ภายใต้การรับแรงซ้ำที่ระดับความเค้นต่างๆ ($S = 0.8, 0.85$ และ 0.9) สรุปได้ว่าการเลือกใช้อัตราทดแทนที่เม็ดยางที่ประมาณ 20–25% ของปริมาตรทราย เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่ให้ สมดุลระหว่างการคงกำลังอัด และการเพิ่มความสามารถในการต้านทานความล้าและการแตกร้าว ของคอนกรีตได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 2.2-7 การเปรียบเทียบกำลังต้านทานความล้าของ CRC ในปริมาณเม็ดยางที่แตกต่างกัน

(Liu et al., 2013) ศึกษาความล้าของ rubber concrete และใช้รอยแตกร้าวที่ 40% ของพื้นที่ในการบ่งชี้ถึงการวิบัติจากความล้า เนื่องจากเมื่อตรวจวัดความเสียหายและเปรียบเทียบ รอยแตกร้าวที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆพบว่ารอยแตกร้าวที่ 40% ของพื้นที่จะสะท้อนถึงความได้เปรียบของ CRC ต่อ NC ได้ชัดเจนในช่วงโหลดต่ำ-ปานกลาง ซึ่งเป็นช่วงใช้งานจริงของพื้นสะพานบ่อที่สูงสุดโดยเปรียบเทียบจากค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในคอนกรีต



รูปที่ 2.2-8 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากความล้า

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 การทดสอบหาชนิดเม็ดยางบดละเอียดที่เหมาะสม

การก่อสร้างพื้นสะพานจำลองที่มีส่วนผสมของเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียดนั้นจะต้องมีการคัดเลือกขนาดและปริมาณที่เหมาะสมมาใช้กับพื้นสะพานจำลอง โดยวิธีการคัดเลือกหาปริมาณที่เหมาะสมนั้นจะทำการหล่อคอนกรีต (Cylinder) ขนาด 15 x 30 เซนติเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.1-1 แบบที่ 1 คอนกรีตปกติจำนวน 3 ลูก แบบที่ 2 คอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียดขนาด 2-3 มิลลิเมตร (Coarse Crumb Rubber, CCR) แทนที่ทรายสัดส่วนร้อยละ 25 ของปริมาตรทรายจำนวน 3 ลูก แบบที่ 3 คอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียดขนาด 0.840 - 0.425 มิลลิเมตร (Fine Crumb Rubber, FCR) แทนที่ทรายสัดส่วนร้อยละ 25 ของปริมาตรทรายจำนวน 3 ลูก จากนั้นจะนำมาทดสอบกำลังรับแรงหรือกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งจะสนใจพฤติกรรมการพังทลายของตัวอย่างคอนกรีต กำลังรับแรงอัดสูงสุด เพื่อนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาส่วนผสมที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ก่อสร้างพื้นสะพานจำลอง



รูปที่ 3.1-1 คอนกรีต (Cylinder) ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร



รูปที่ 3.1-2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีต

ตารางที่ 3.1-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีต

No. of Specimens	Test Specimens	Crumb Rubber (percent by volume)	Compressive Strength (ksc)
1	NC	0%	321
2	NC	0%	318
3	NC	0%	308
4	FCR	25%	188
5	FCR	25%	185
6	FCR	25%	187
7	CCR	25%	243
8	CCR	25%	237
9	CCR	25%	247

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้คอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียดขนาด 2-3 มิลลิเมตร (Coarse Crumb Rubber, CCR) ทำให้ได้กำลังรับแรงอัดได้สูงกว่าคอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียดขนาด 0.840 - 0.425 มิลลิเมตร (Fine Crumb Rubber, FCR) ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้คอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียดขนาด 2-3 มิลลิเมตร (Coarse Crumb Rubber, CCR) เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้จริง โดยรายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 3.1-2

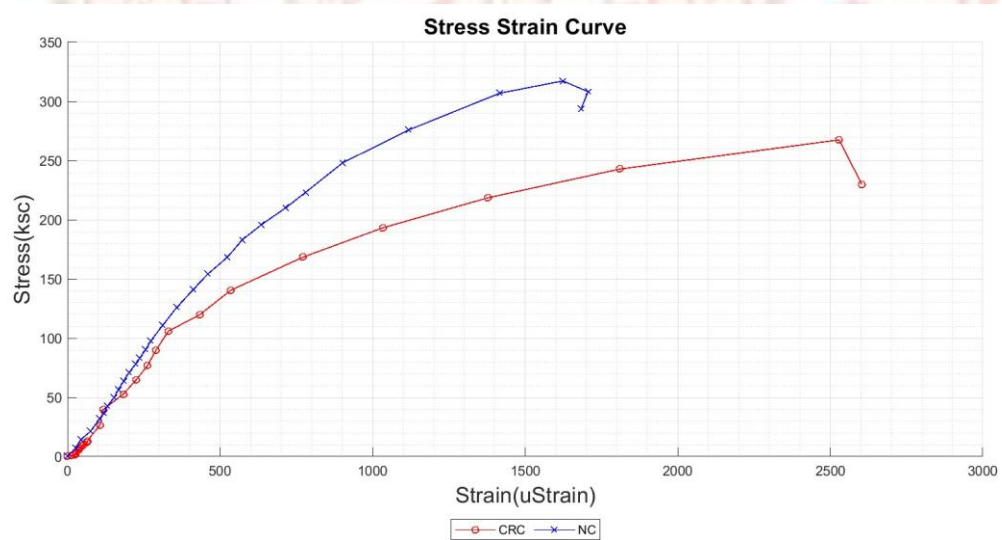
ตารางที่ 3.1-2 ส่วนผสมคอนกรีต

Test Specimens	Material (kg/m ³)					
	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water	Fine Crumb Rubber	Coarse Crumb Rubber
Normal concrete (NC)	457	599	1303	286	-	-
Crumb Rubber Concrete (CRC)	457	450	1303	286	-	42

เมื่อได้ส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมกับการนำไปก่อสร้างพื้นสะพานจำลองแล้ว จะทำการหล่อคอนกรีต (Cylinder) ด้วยคอนกรีตปกติจำนวน 3 ลูก และคอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียดจำนวน 3 ลูก ทำการบ่มเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวคอนกรีตตัวอย่างละ 3 ตัวอย่าง และนำข้อมูลที่ได้มาจัดทำเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Curve) แสดงดังรูปที่ 3.1-4



รูปที่ 3.1-3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

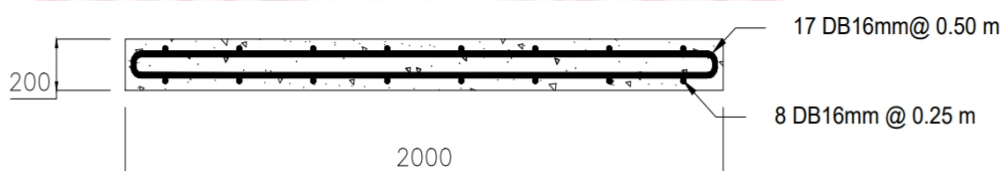


รูปที่ 3.1-4 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Curve)

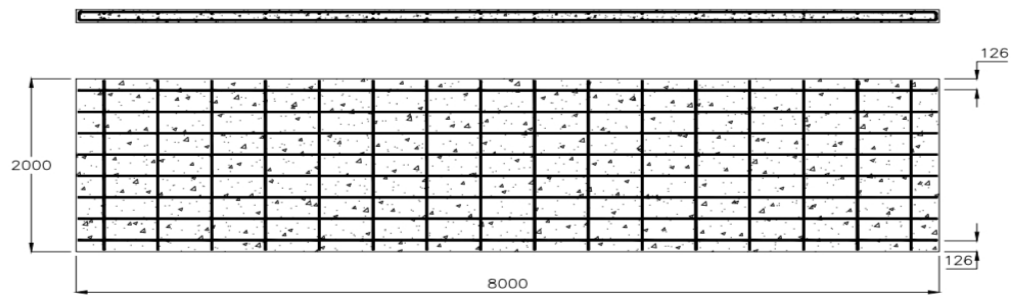
3.2 พื้นสะพานจำลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้จัดเตรียมพื้นสะพานจำลองขนาดกว้าง 2.00 เมตร ยาว 8.00 เมตร และหนา 0.20 เมตร จำนวนทั้งสิ้น 8 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็นคอนกรีตปกติ (Normal Concrete: NC) จำนวน 4 ตัวอย่าง และ คอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (Crumb Rubber Concrete: CRC) อีก 4 ตัวอย่าง พื้นสะพานจำลองทั้งหมดจะถูกแบ่งไปทดสอบเพื่อหากล้างรับแรงจำนวน 2 แผ่นพื้น และทดสอบกำลังต้านทานความล้าจำนวน 6 แผ่นพื้น รายละเอียดการทดสอบพื้นสะพานทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.2-1

โดยในส่วนของ CRC ได้มีการแทนที่มวลรวมละเอียด (ทราย) ด้วยเม็ดยางในอัตราร้อยละ 25 โดยปริมาตรของทราย การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต และ รายละเอียดการเสริมเหล็กเป็นไปตามแบบมาตรฐานของสำนักสำรวจและออกแบบกรมทางหลวง เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงของโครงสร้างจึงได้ทำการเสริมเหล็กข้ออ้อย DB16 ในแนวยาวจำนวน 8 เส้น โดยเว้นระยะห่างเท่ากับ 0.25 เมตร และ เสริมเหล็กในแนวขวางจำนวน 17 เส้นที่ระยะห่าง 0.50 เมตร พร้อมเว้นระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (Covering) เท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ตามมาตรฐานที่ใช้ในงานสะพานคอนกรีตก่อนการหล่อคอนกรีตได้ดำเนินการติดตั้งแบบหล่อ และ วางเหล็กเสริมตามแบบดังแสดงในรูปที่ 3.2-1 และรูปที่ 3.2-2 พร้อมตรวจสอบความมั่นคงของแบบ และ ความถูกต้องของตำแหน่งเหล็กเสริม จากนั้นผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ โดยเฉพาะกลุ่ม CRC ได้มีการเตรียมเม็ดยางขนาด 2 - 3 มิลลิเมตร และ นำมาแทนที่ทรายในอัตราร้อยละ 25 โดยปริมาตรของทราย คอนกรีตที่ผสมแล้วถูกเทลงในแบบหล่อ ใช้เครื่องสั่นเพื่อไล่อากาศออก และ อัดแน่นเนื้อคอนกรีตให้เต็มพื้นที่แบบอย่างสม่ำเสมอ หลังการหล่อคอนกรีตได้คลุมด้วยผ้าใบพลาสติก และ รดน้ำเพื่อบ่มคอนกรีตอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นปล่อยให้คอนกรีตบ่มตัวในสภาวะอากาศปกติจนครบอายุ 28 วัน ก่อนเข้าสู่กระบวนการทดสอบ



รูปที่ 3.2-1 แบบการเสริมเหล็ก



รูปที่ 3.2-2 แบบการเสริมเหล็ก (ต่อ)



รูปที่ 3.2-3 การก่อสร้างพื้นสะพานจำลอง

ตารางที่ 3.2-1 รายละเอียดการทดสอบของพื้นสะพาน

No. of Specimens	Test Specimens	Thickness (m)	Description	Crumb Rubber (percent by volume)	Types of testing
1	ST-NC20-1	0.20	NC	-	Static
2	ST-CRC20-1	0.20	CRC	25%	Static
3	FT-NC20-1	0.20	NC	-	Cyclic
4	FT-NC20-2	0.20	NC	-	Cyclic
5	FT-NC20-3	0.20	NC	-	Cyclic
6	FT-CRC20-1	0.20	CRC	25%	Cyclic
7	FT-CRC20-2	0.20	CRC	25%	Cyclic
8	FT-CRC20-3	0.20	CRC	25%	Cyclic

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

3.3.1 LVDT

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดการเสียรูปของโครงสร้าง โดยตรวจวัดในรูปแบบระยะแอนตัวของโครงสร้าง กำหนดให้เครื่องหมาย - เป็นการแอนตัวลงตามแนวพื้นสะพานเครื่องหมาย + เป็นระยะแอนตัวขึ้นตามแนวพื้นสะพานจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.3-1



รูปที่ 3.3-1 อุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของโครงสร้าง (LVDT)

3.3.2 มาตรวัดแรง (Load Cell)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวโหลดเซลล์เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งเราสามารถนำสัญญาณทางไฟฟ้านี้ไปจ่ายเข้าจอแสดงผล เพื่อแสดงค่าเป็นน้ำหนักหรือแรงที่

กระทำ และ คานถ่ายแรง (Transfer Beam) อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนแรงกระทำแบบจุดเป็นแรงกระจายและกระทำลงบนพื้นสะพานจำลองบนจุดที่กำหนด ดังรูปที่ 3.3-2



รูปที่ 3.3-2 มาตรวัดแรง (Load Cell)

3.3.3 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ A to D (Data Logger)

เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับเก็บข้อมูลและแปลงข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดค่า ซึ่งจะส่งข้อมูลที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดจะเข้ามาในรูปสัญญาณ Analog และทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปสัญญาณ Digital ซึ่งสามารถส่งไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลและประมวลผล Data Logger แสดงดังรูปที่ 3.3-3



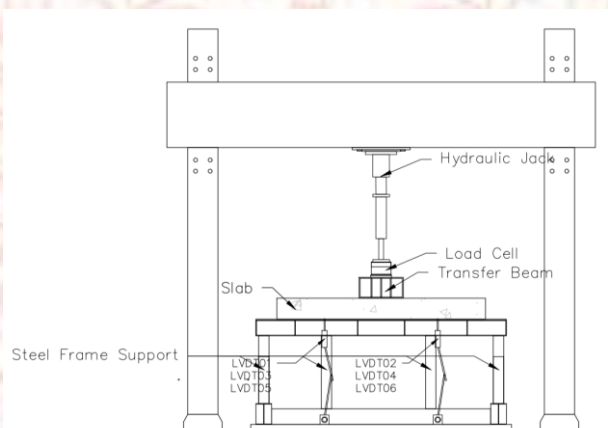
รูปที่ 3.3-3 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ A to D (Data Logger)

3.4 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

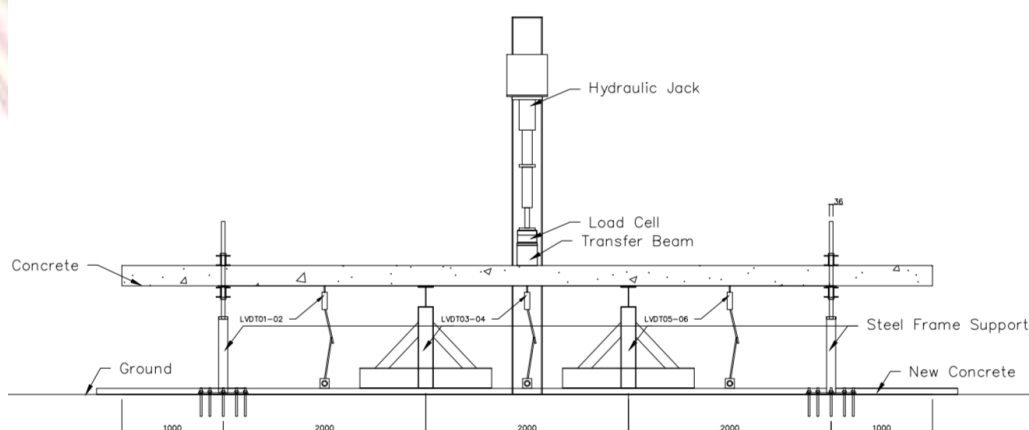
การทดสอบนี้ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของโครงสร้าง (LVDT) จำนวน 6 ตัว เพื่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวของพื้นสะพานขณะรับแรง และได้มีการติดตั้งมาตรวัดแรง (Load cell) และ คานถ่ายแรง (Transfer Beam) ดังแสดงในรูปที่ 3.4-1 และ รูปที่ 3.4-2 โดยตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 3.4-1

ตารางที่ 3.4-1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

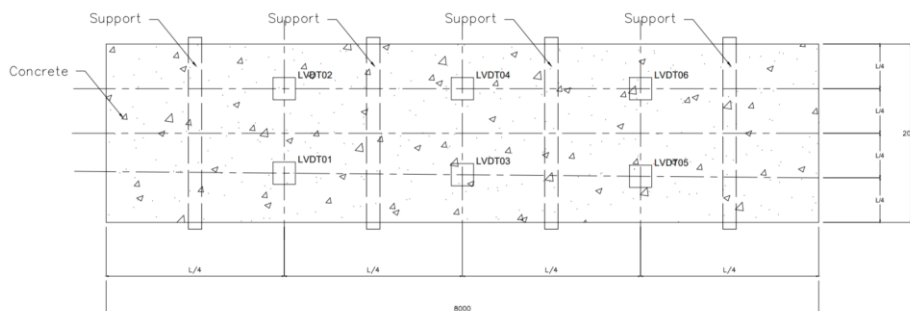
Sensors	Type of sensor	Location (From Left Corner)	Installation details
LVDT01	Transducer	L/4	Outside Concrete Deck
LVDT02	Transducer	L/4	Outside Concrete Deck
LVDT03	Transducer	L/2	Outside Concrete Deck
LVDT04	Transducer	L/2	Outside Concrete Deck
LVDT05	Transducer	3L/4	Outside Concrete Deck
LVDT06	Transducer	3L/4	Outside Concrete Deck



รูปที่ 3.4-1 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง



รูปที่ 3.4-2 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (ต่อ)



รูปที่ 3.4-3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (ต่อ)

การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของโครงสร้างบริเวณพื้นผิวคอนกรีตด้านล่างนั้นจะใช้ อุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูป (Displacement Transducer) โดยการติดตั้งจะต้องทำการจับยึด อุปกรณ์ดังกล่าวเข้ากับจุดอ้างอิง และนำส่วนปลายของอุปกรณ์ตรวจวัดสัมผัสกับตำแหน่งของ โครงสร้างที่ต้องการตรวจวัดการเสียรูป หรือการเคลื่อนที่ของแผ่นพื้น โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด การเสียรูปได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.4-4



รูปที่ 3.4-4 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง

3.5 การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพาน

การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพาน ทดสอบเพื่อต้องการทราบถึงความสามารถในการรับ แรงของพื้นสะพานจำลองเพื่อนำไปวิเคราะห์หา กำลังรับแรงสูงสุด พฤติกรรมการรับแรง การเสียรูป ของพื้นสะพานจำลองขณะรับแรงกระทำ และ รูปแบบการวิบัติของพื้นสะพานจำลอง โดยการทดสอบ ในห้องปฏิบัติการนี้จะใส่แรงกระทำเสมือนจริงเพื่อให้พื้นสะพานจำลองแสดงพฤติกรรมการรับแรงเมื่อ

รับแรงกระทำ ระหว่างการทดสอบได้มีการตรวจวัดและเก็บรวบรวมข้อมูล หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาออกแบบการทดสอบความสามารถในการต้านทานความล้าต่อไป



รูปที่ 3.5-1 การทดสอบกำลังรับแรง

ในการทดสอบกำลังรับแรงของสะพานจำลองจะทำการนำพื้นสะพานจำลองที่ได้ทำการก่อสร้างมาทำการทดสอบทั้งหมด 2 แผ่นพื้น ประกอบไปด้วย พื้นสะพานจำลองก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (NC) 1 แผ่นพื้น และพื้นสะพานจำลองก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (CRC) 1 แผ่นพื้น รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.5-1

ตารางที่ 3.5-1 รายละเอียดการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพาน

No. of Specimens	Test Specimens	Thickness (m)	Description	Crumb Rubber (percent by volume)	Types of testing
1	ST-NC20-1	0.20	NC	-	Static
2	ST-CRC20-1	0.20	CRC	25%	Static

3.5.1 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานจำลอง

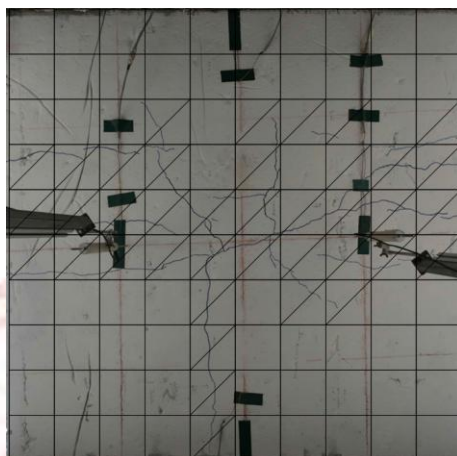
การทดสอบพื้นสะพานจำลองมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ทราบความสามารถในการรับแรงกระทำสูงสุดรวมถึงรูปแบบการวิบัติของพื้นสะพานจำลองที่มีส่วนผสมคอนกรีตที่แตกต่างกัน ดังนั้น การทดสอบพื้นสะพานจำลองจะเน้นหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง โดยขั้นตอนการทดสอบพอสังเขปมีดังนี้

1. ติดตั้งพื้นสะพานจำลองเข้ากับฐานรองรับพื้นสะพานจำลองและโครงเหล็กสำหรับการทดสอบ
2. ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรง (Load Cell) คานเหล็กกระจายแรง และ กระบอกไฮดรอลิกเข้ากับโครงเหล็กทดสอบ
3. ทำการหาสีและสร้างตารางที่พื้นสะพานจำลองเพื่อช่วยให้สามารถสังเกตเห็นรอยแตกร้าวได้ชัดเจนขึ้น
4. ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูป รวมถึงอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งหมด และทำการเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์เก็บรวบรวมข้อมูล (Data Logger)
5. เริ่มการทดสอบในรูปแบบของการควบคุมแรง (Force Controlled Test Scheme) โดยจะทำการใส่แรงทีละน้อย และเพิ่มแรงกระทำขึ้นไปเรื่อย ๆ โดยทุกครั้งที่เพิ่มแรง จะบันทึกภาพ วาดรอยแตกร้าววัดขนาดรอยแตกร้าว และบันทึกข้อมูลจากเครื่องมือตรวจวัดทุกตำแหน่ง ก่อนที่จะเพิ่มแรงในครั้งต่อไป ทำการทดสอบไปจนกว่าพื้นสะพานจำลองจะไม่สามารถรับแรงกระทำได้หรือวิบัติ
6. หลังจากพื้นสะพานจำลองเกิดความเสียหาย จนวิบัติ ให้ทำการบันทึกภาพการวิบัติ และสรุปผลรูปแบบการวิบัติเพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบต่อไป

3.6 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานจำลอง

การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานดำเนินการโดยให้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic) ความถี่ประมาณ 0.67 – 1.70 รอบต่อวินาที (Hz) ที่กึ่งกลางแผ่นพื้นสะพานจำลอง ขนาดของแรงกระทำมี 3 ระดับ ได้แก่ 40% 55% และ 70% ของกำลังรับแรงสูงสุดของแผ่นพื้น (Pu) ซึ่งได้จากการทดสอบกำลังรับแรงสูงสุด

โดยระหว่างการทดสอบได้ทำการบันทึกข้อมูลและภาพถ่ายท้องพื้นสะพานเพื่อนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวด้วยการสร้างตารางจำนวน 100 ช่อง ดังแสดงใน รูปที่ 3.6-1 เทียบกับจำนวนรอบของแรงกระทำ กำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพาน คือ จำนวนรอบของแรงกระทำที่ทำให้พื้นสะพานเกิดความเสียหายตามที่ระบุ เช่น ที่เปอร์เซ็นต์การแตกร้าว 40% ของพื้นที่ท้องพื้นสะพาน ในการศึกษาี้ได้เลือกใช้ เปอร์เซ็นต์รอยแตกร้าว 40% ของพื้นที่ท้องพื้นสะพานเป็นเกณฑ์สำหรับการประเมินพฤติกรรมความล้าของคอนกรีต เนื่องจากเป็นระดับความเสียหายที่ แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพที่มีนัยสำคัญเชิงโครงสร้าง ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวแทนของช่วงเปลี่ยนผ่านจากพฤติกรรมยืดหยุ่น (Elastic) ไปสู่ช่วงเสื่อมสภาพอย่างถาวร (Plastic Failure Tendency) ได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 3.6-1 ตัวอย่างการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การแตกร้าว

ในการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของสะพานจำลองจะทำการนำพื้นสะพานจำลองที่ได้ทำการก่อสร้างมาทำการทดสอบทั้งหมด 6 แผ่นพื้น ประกอบไปด้วย พื้นสะพานจำลองก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (NC) 3 แผ่นพื้น และพื้นสะพานจำลองก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (CRC) 3 แผ่นพื้น โดยแผ่นพื้นจะถูกทดสอบด้วยขนาดของแรงกระทำ 3 ระดับ ได้แก่ 40% 55% และ 70% ของกำลังรับแรงสูงสุดของแผ่นพื้น (P_u) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.6-1

ตารางที่ 3.6-1 รายละเอียดการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพาน

No. of Specimens	Test Specimens	Thickness (m)	Description	Crumb Rubber (percent by volume)	Types of testing	Load ratio (P/P_u)
3	FT-NC20-1	0.20	NC	-	Cyclic	40%
4	FT-NC20-2	0.20	NC	-	Cyclic	55%
5	FT-NC20-3	0.20	NC	-	Cyclic	70%
6	FT-CRC20-1	0.20	CRC	25%	Cyclic	40%
7	FT-CRC20-2	0.20	CRC	25%	Cyclic	55%
8	FT-CRC20-3	0.20	CRC	25%	Cyclic	70%

3.6.1 วิธีการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานจำลอง

การทดสอบกำลังต้านทานความล้า โดยจะทำการให้แรงกระทำซ้ำขนาดเท่าเดิมจนกระทั่งค่าการเสียรูปของพื้นสะพานไม่เพิ่มขึ้นจะถือว่าจุดนั้นเป็นจุดวิบัติ ในทุกๆ 500 รอบจะนำปากกาขีดตามรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของพื้นสะพานจำลองดังรูปที่ 3.6-2 และบันทึกข้อมูลจากเครื่องมือตรวจวัดก่อนที่จะทำการทดสอบต่อไป ทำการทดสอบพื้นสะพานทั้งหมด 6 แผ่นพื้นจนกระทั่งพื้นสะพานที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติจำนวน 3 แผ่นพื้นและคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียดจำนวน 3 แผ่นพื้นเกิดการวิบัติ วัตถุประสงค์หลักเพื่อเปรียบเทียบจำนวนรอบที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ 40% ของพื้นที่ท้องพื้นสะพาน ของพื้นสะพานที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตทั้ง 2 ประเภท



รูปที่ 3.6-2 ตัวอย่างการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การแตกร้าว

บทที่ 4

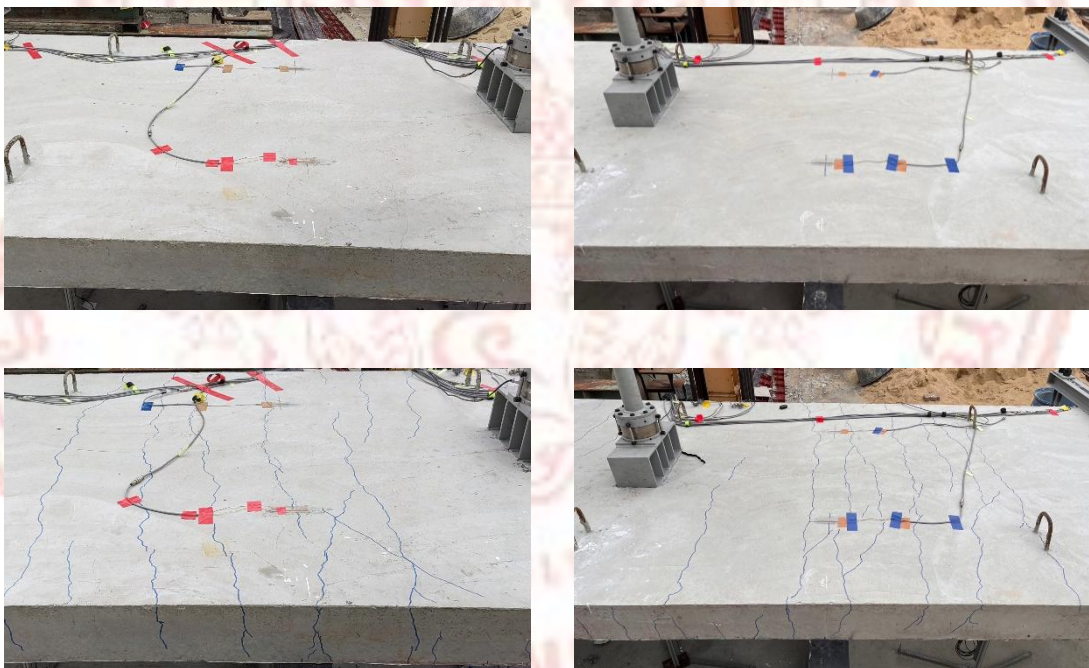
ผลการวิจัย

4.1 การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพาน

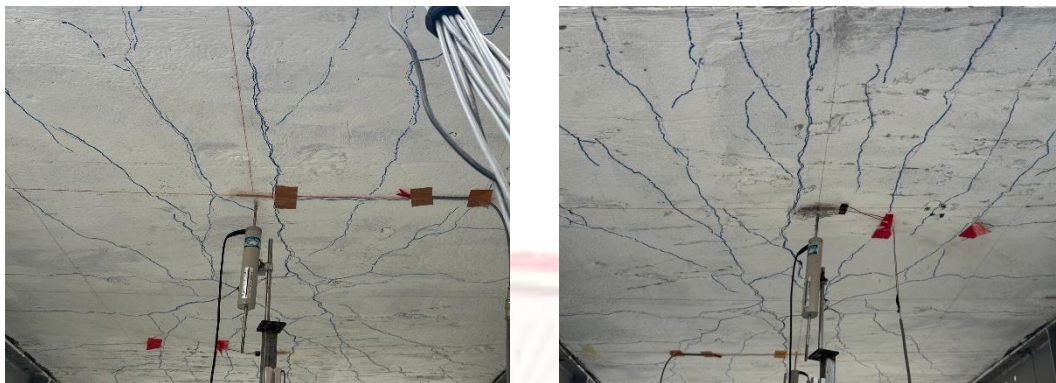
การทดสอบกำลังรับแรงจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาสร้างเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการเสียรูป โดยจะนำผลการทดสอบไปออกแบบการทดสอบกำลังต้านทานความล้า

4.1.1 การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานแผ่นที่ 1 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (ST-NC20-1)

การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานจำลองมีขนาดความกว้าง 2 เมตร ยาว 8 เมตร หนา 0.20 เมตรก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ จำนวน 1 แผ่นพื้น



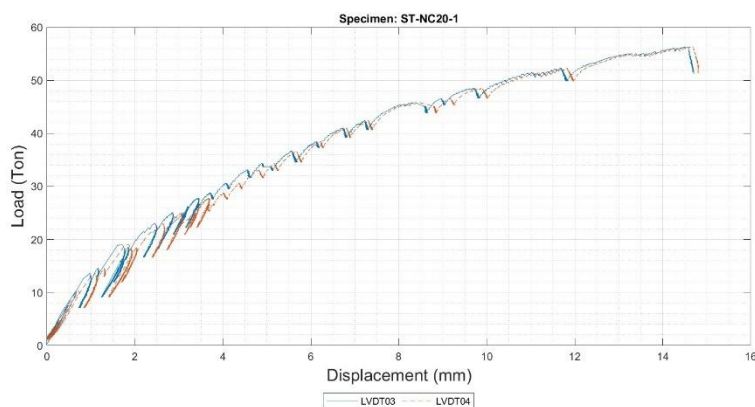
รูปที่ 4.1-1 การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานจำลอง (ST-NC20-1)



รูปที่ 4.1-2 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (ST-NC20-1)

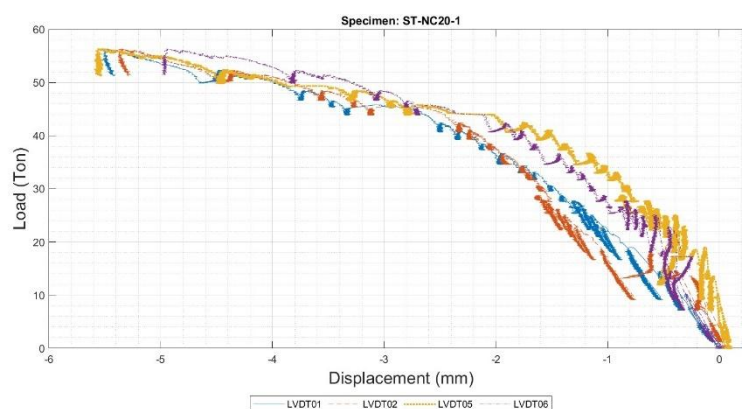
4.1.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานแผ่นที่ 1 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (ST-NC20-1)

จากการทดสอบรูปที่ 4.1-3 พบว่าพฤติกรรมของแผ่นพื้นจำลอง เมื่อเริ่มมีแรงเข้ากระทำสู่แผ่นพื้นสะพานจำลองระดับการแอ่นตัวของพื้นตรงกลางสะพานมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกจะเป็นเส้นตรง และเมื่อเกิดการแตกร้าวของแผ่นพื้นที่ระดับแรงกดประมาณ 14 ตัน ความชันของความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเริ่มลดลงเล็กน้อย และพื้นสะพานจำลองมีจุดครากอยู่ที่แรงกระทำประมาณ 35 ตัน และค่าการเสียรูปอยู่ที่ประมาณ 4.8 มิลลิเมตร โดยระดับค่าการเสียรูปมีค่าสูงสุดที่บริเวณกลางพื้นสะพานเท่ากับ 15.01 มิลลิเมตร และมีค่าแรงกระทำสูงสุดที่แผ่นพื้นรับได้อยู่ที่ 55.62 ตัน และได้หยุดการทดสอบลง เนื่องจากถึงขีดจำกัดของแผ่นพื้นจำลองสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 4.1-3 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นบริเวณ L/2 ของพื้นสะพานจำลอง (ST-NC20-1)

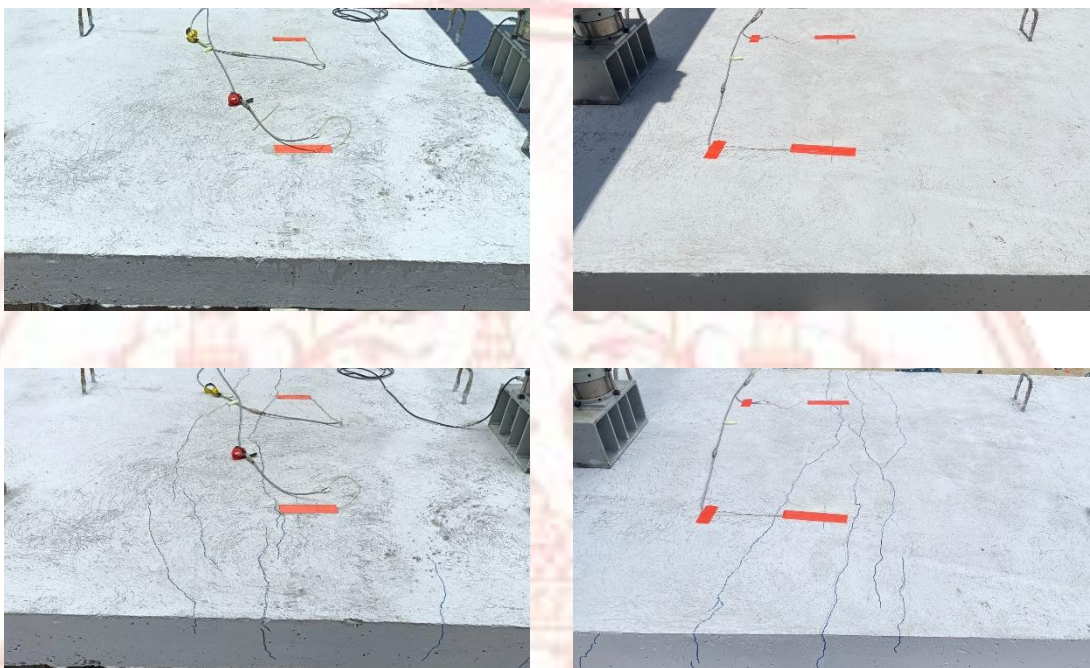
จากผลการทดสอบรูปที่ 4.1-4 พบว่าในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการเสียรูปของแผ่นพื้นสะพานโดยรวมจะมีความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นแบบคงที่ มีค่าการแอ่นตัวไปทางลบซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นพื้นที่ระยะ $L/4$ มีการโก่งตัวขึ้น เมื่อมีแรงกระทำประมาณ 14 ตัน พบว่าความชันของความสัมพันธ์ได้เปลี่ยนไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แผ่นพื้นด้านบนเกิดการแตกร้าวที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มแรงกระทำถึงระดับสูงสุดที่ 55.62 ตัน รอยร้าวมีการขยายขนาดและความกว้างมากขึ้น และแผ่นพื้นเกิดการโก่งตัวได้สูงสุดที่ระยะ 5.78 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1-4 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นบริเวณ $L/4$ ของพื้นสะพานจำลอง (ST-NC20-1)

4.1.3 การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานแผ่นที่ 2 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (ST-CRC20-1)

การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานจำลองมีขนาดความกว้าง 2 เมตร ยาว 8 เมตร หนา 0.20 เมตร ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด จำนวน 1 แผ่นพื้น



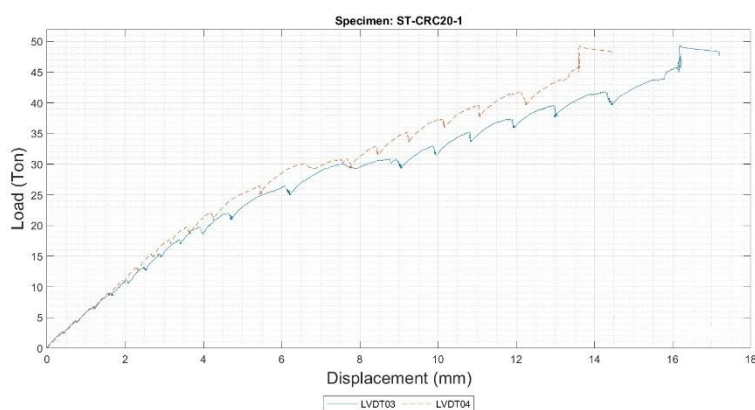
รูปที่ 4.1-5 การทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานจำลอง (ST-CRC20-1)



รูปที่ 4.1-6 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (ST-CRC20-1)

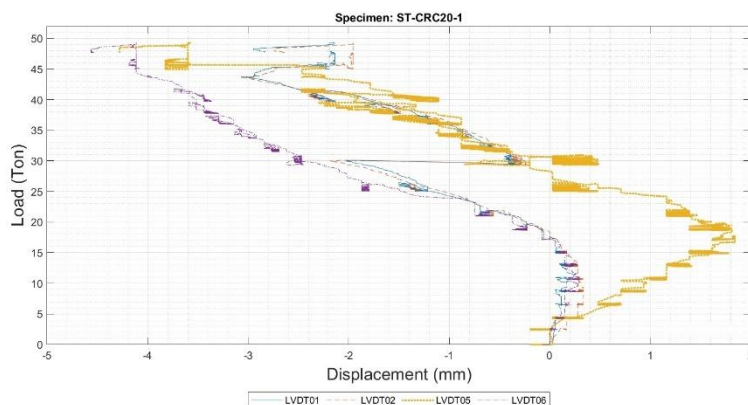
4.1.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานแผ่นที่ 2 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (ST-CRC20-1)

จากการทดสอบรูปที่ 4.1-7 พบว่าพฤติกรรมของแผ่นพื้นจำลอง เมื่อเริ่มมีแรงเข้ากระทำสู่แผ่นพื้นสะพานจำลองระดับการแอ่นตัวของพื้นตรงกลางสะพานมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกจะเป็นเส้นตรง และเมื่อเกิดการแตกร้าวของแผ่นพื้นที่ระดับแรงกดประมาณ 14.03 ตัน ความชันของความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเริ่มลดลงเล็กน้อย และพื้นสะพานจำลองมีจุดครากอยู่ที่แรงกระทำประมาณ 30.00 ตัน และค่าการเสียรูปอยู่ที่ประมาณ 7.75 มิลลิเมตร โดยระดับค่าการเสียรูปมีค่าสูงสุดที่บริเวณกลางพื้นสะพาน (16.22 มิลลิเมตร) และมีค่าแรงกระทำสูงสุดที่แผ่นพื้นรับได้อยู่ที่ 47.60 ตัน และได้หยุดการทดสอบลง เนื่องจากถึงขีดจำกัดของแผ่นพื้นจำลองสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 4.1-7 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นบริเวณ L/2 ของพื้นสะพานจำลอง (ST-CRC20-1)

จากการทดสอบรูปที่ 4.1-8 พบว่าในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการเสียรูปของแผ่นพื้นสะพานโดยรวมจะมีความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นแบบคงที่ มีค่าการแอ่นตัวไปทางลบซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นพื้นที่ระยะ L/4 มีการโก่งตัวขึ้น เมื่อมีแรงกระทำประมาณ 14.03 ตัน พบว่าความชันของความสัมพันธ์ได้เปลี่ยนไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แผ่นพื้นด้านบนเกิดการแตกร้าวที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มแรงกระทำถึงระดับสูงสุดที่ 47.60 ตัน รอยร้าวมีการขยายขนาดและมีความกว้างมากขึ้น และแผ่นพื้นเกิดการโก่งตัวได้สูงสุดที่ระยะ 4.49 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1-8 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นบริเวณ L/4 ของพื้นสะพานจำลอง (ST-CRC20-1)

4.1.5 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรง

จากการทดสอบกำลังรับแรงและนำข้อมูลมาวิเคราะห์ พบว่าพื้นสะพานจำลองทั้งสองชนิดเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือนทะลุ โดยกำลังรับแรงสูงสุดที่ได้จะนำมาใช้ในการออกแบบการทดสอบความล้า ซึ่ง กำลังรับแรงสูงสุดของพื้นสะพานคอนกรีตปกติมีค่าเท่ากับ 55.62 ตัน และ พื้นสะพานคอนกรีตผสมเม็ดยางมีค่ากำลังรับแรงสูงสุดเท่ากับ 47.6 ตัน หลังจากนั้นจะทำการทดสอบความล้าโดยการให้แรงกระทำเป็น 40 55 และ 70 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงสูงสุด แสดงดังตารางที่ 4.1-1

ตารางที่ 4.1-1 แรงกระทำแบบวัฏจักรที่ใช้ในการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพาน

ระดับแรงกระทำ	พื้นสะพาน คอนกรีตปกติ	พื้นสะพาน คอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียด
	หนา 0.20 เมตร	หนา 0.20 เมตร
0.40Pu	22.25 ตัน ความถี่ 1.08 Hz	19.04 ตัน ความถี่ 1.19 Hz
0.55Pu	30.59 ตัน ความถี่ 0.82 Hz	26.18 ตัน ความถี่ 0.93 Hz
0.70Pu	38.93 ตัน ความถี่ 0.70 Hz	33.32 ตัน ความถี่ 0.82 Hz

4.2 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพาน

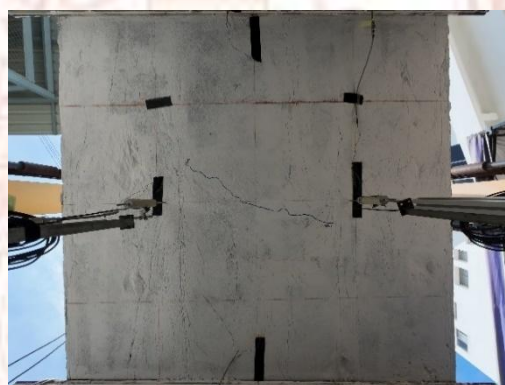
เมื่อได้ออกแบบแรงกระทำแบบวัฏจักรที่ใช้ในการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานจากผลการทดสอบกำลังรับแรงสูงสุดของพื้นแต่ละประเภทจึงเริ่มทำการทดสอบ และบันทึกภาพการขยายตัวของรอยแตก ร้าว ค่าการเสียรูป และจำนวนรอบที่ทำให้เกิดความเสียหายที่ 40% ของพื้นที่ท้องพื้นสะพาน เพื่อนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์หาความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีตแต่ละชนิด

4.2.1 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 3 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (FT-NC20-1)

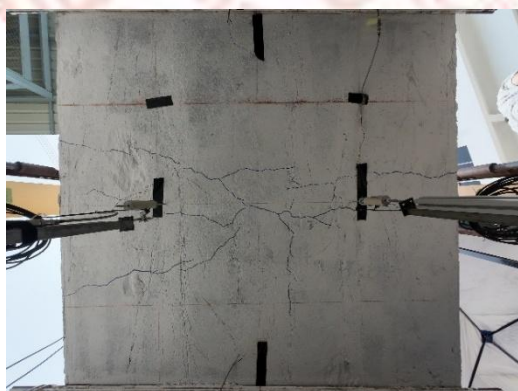
การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานจำลอง FT-NC20-1 ใช้น้ำหนักกระทำเท่ากับ 22.25 ตัน ซึ่งคิดเป็น 40% ของกำลังรับแรงเฉลี่ยสูงสุด ที่พื้นสะพานจำลองที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (ST-NC20) สามารถรับได้



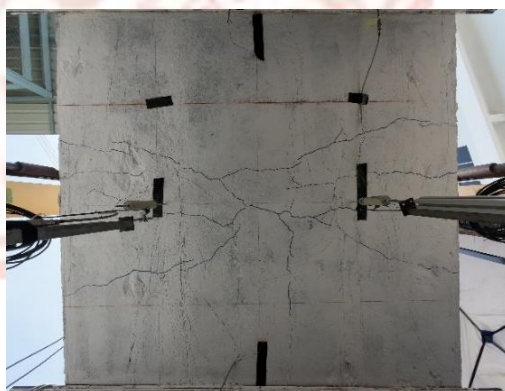
0 Cycles (Crack 0%)



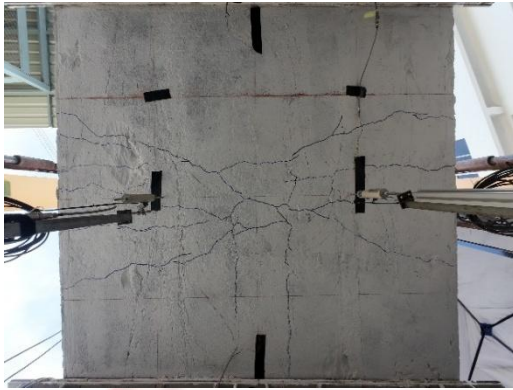
100 Cycles (Crack 5%)



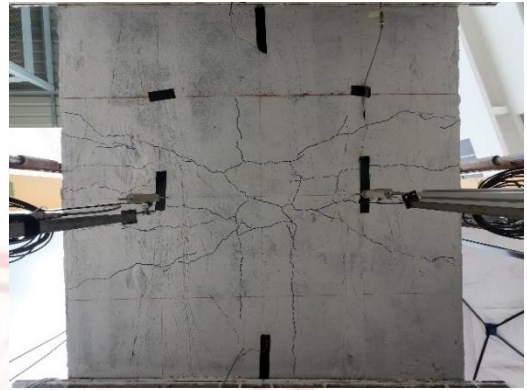
500 Cycles (Crack 29%)



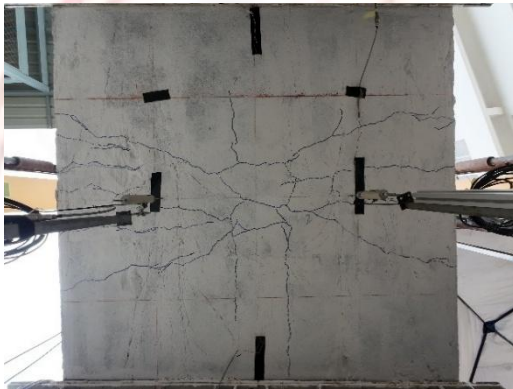
1,738 Cycles (Crack 40%)



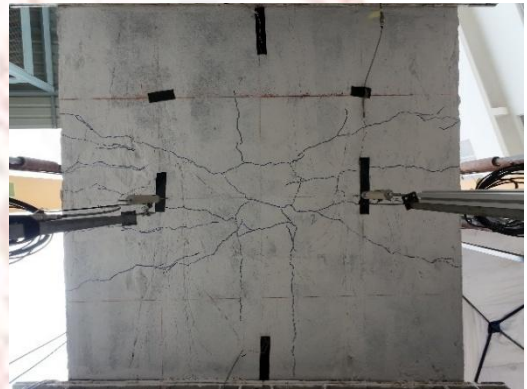
3,000 Cycles (Crack 45%)



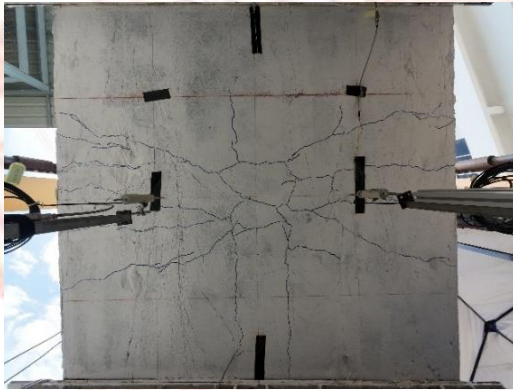
5,000 Cycles (Crack 48%)



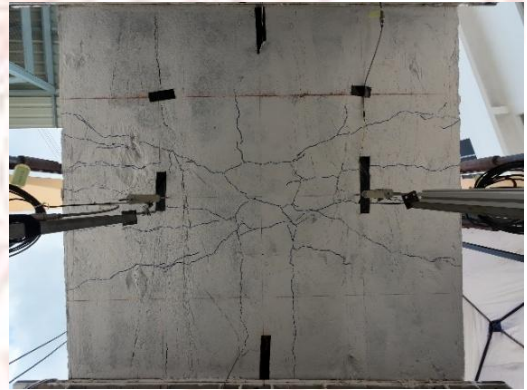
10,000 Cycles (Crack 48%)



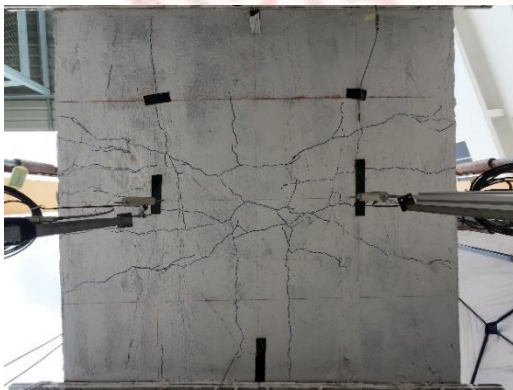
15,000 Cycles (Crack 48%)



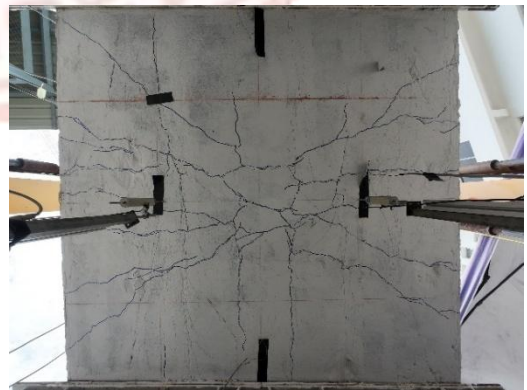
20,000 Cycles (Crack 50%)



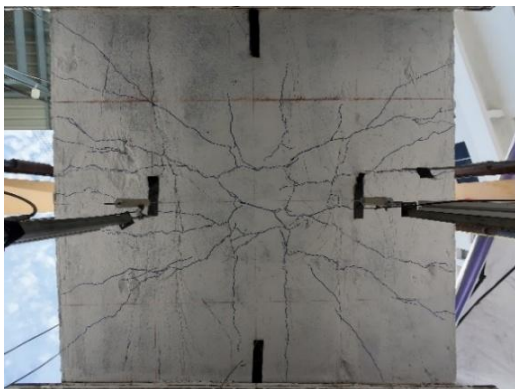
25,000 Cycles (Crack 52%)



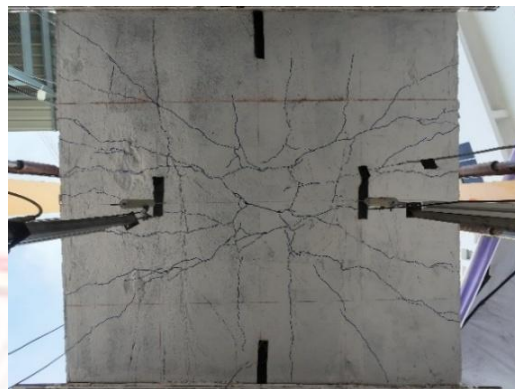
30,000 Cycles (Crack 55%)



40,000 Cycles (Crack 56%)



50,000 Cycles (Crack 59%)

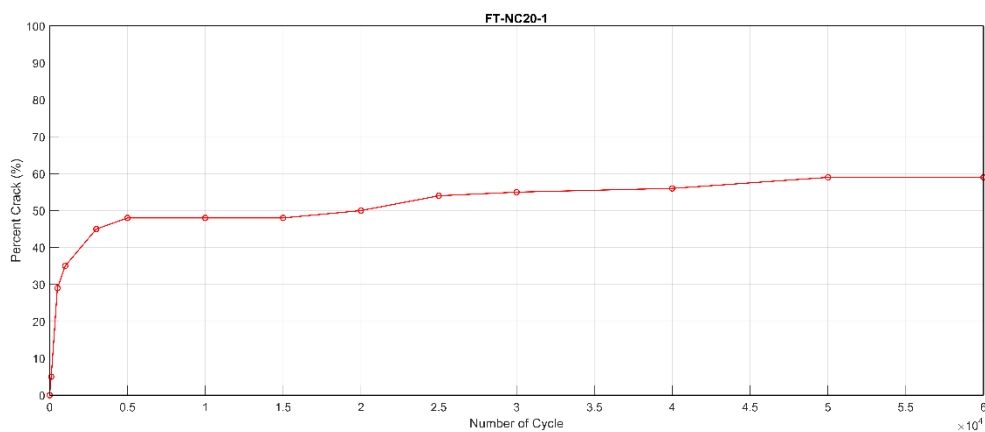


60,000 Cycles (Crack 59%)

รูปที่ 4.2-1 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-1)

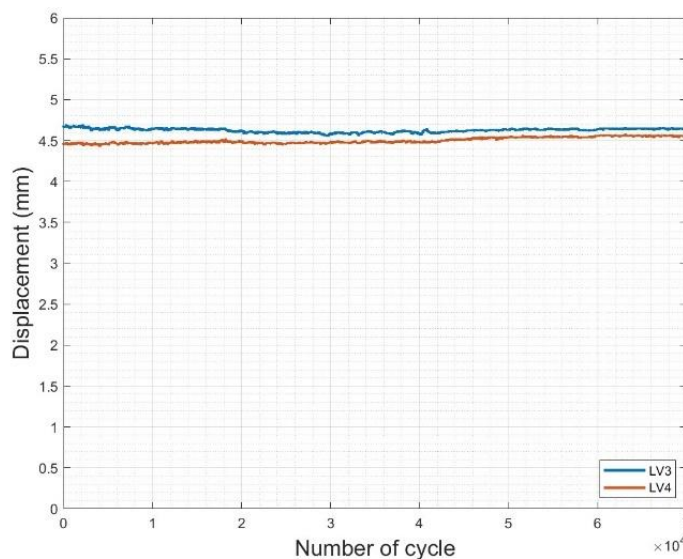
4.2.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 3 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (FT-NC20-1)

จากการทดสอบรูปที่ 4.2-2 พบว่าในช่วงจำนวนรอบของแรงกระทำที่ต่ำกว่า 5,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำมากกว่า 5,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวจะเพิ่มขึ้นน้อยลงเรื่อย ๆ และเมื่อเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวเพิ่มขึ้นถึง 59% ที่จำนวนรอบของแรงกระทำเท่ากับ 60,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวไม่เพิ่มขึ้นจึงหยุดการทดสอบ



รูปที่ 4.2-2 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-1)

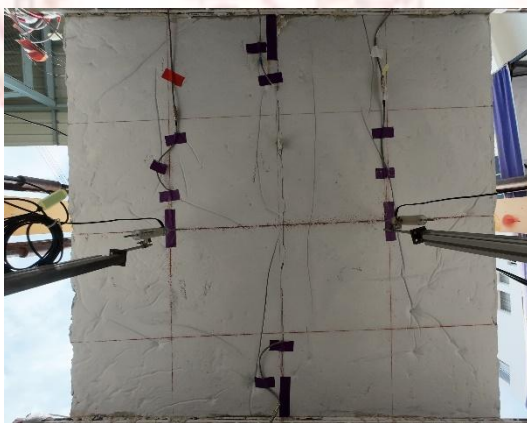
ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-1) แสดงดังรูปที่ 4.2-3 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลองมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงจำนวนรอบของแรงกระทำที่ต่ำกว่า 4,000 รอบ และหลังจากนั้นมีแนวโน้มคงที่ตลอดการทดสอบ



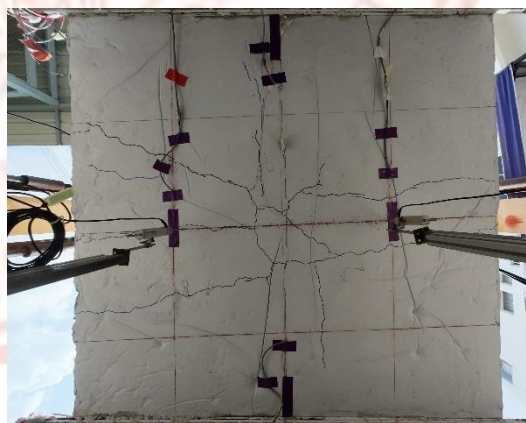
รูปที่ 4.2-3 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-1)

4.2.3 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 4 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (FT-NC20-2)

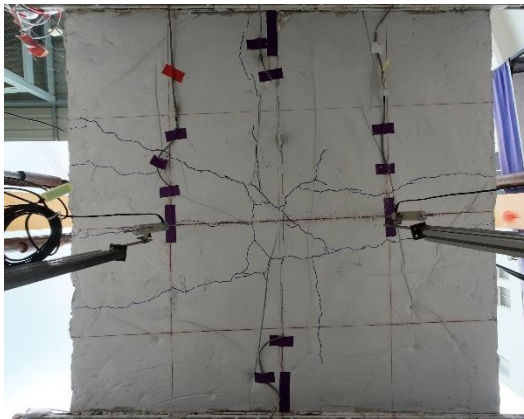
การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานจำลอง FT-NC20-2 ใช้น้ำหนักกระทำเท่ากับ 30.59 ตัน ซึ่งคิดเป็น 55% ของกำลังรับแรงเฉื่อยสูงสุด ที่พื้นสะพานจำลองที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (ST-NC20) สามารถรับได้



0 Cycles (Crack 0%)



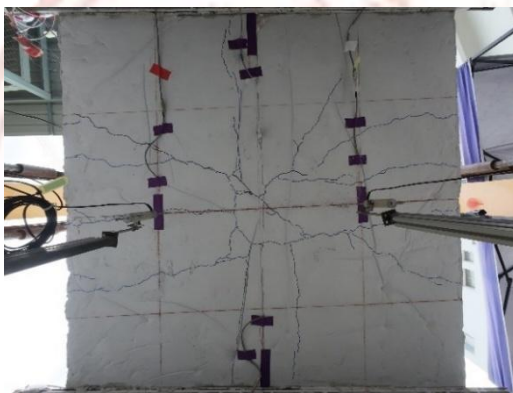
100 Cycles (Crack 38%)



295 Cycles (Crack 40%)



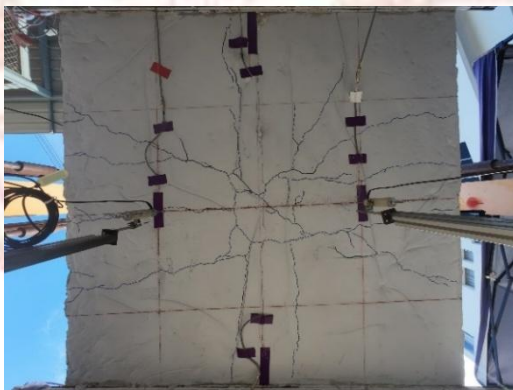
1,000 Cycles (Crack 41%)



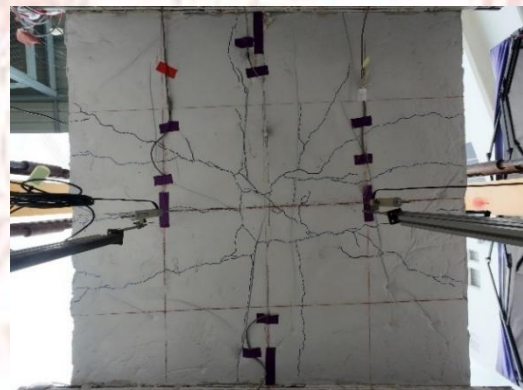
3,000 Cycles (Crack 41%)



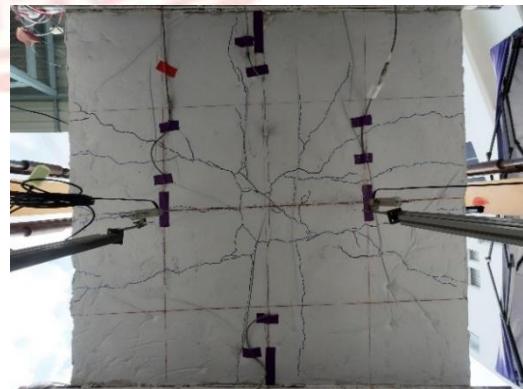
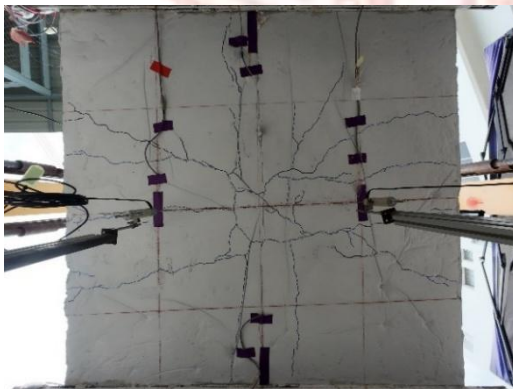
5,000 Cycles (Crack 42%)

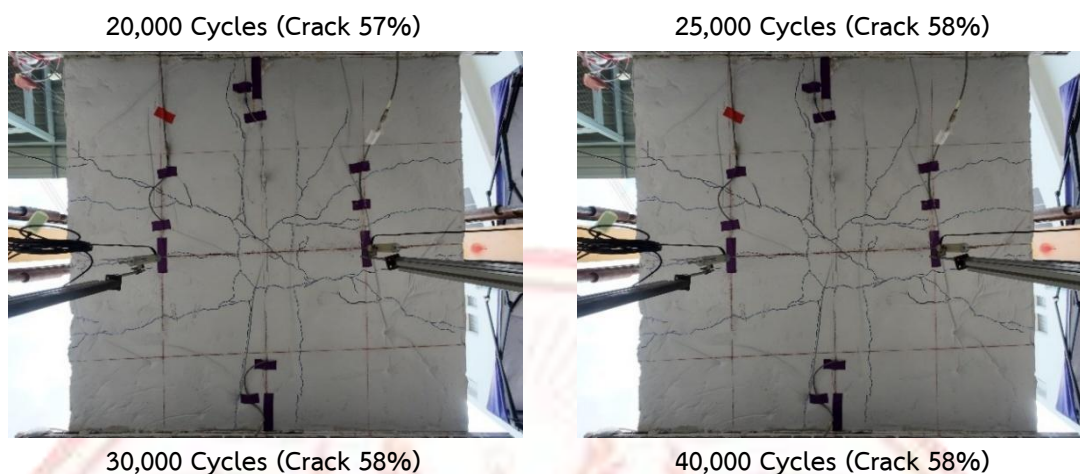


10,000 Cycles (Crack 57%)



15,000 Cycles (Crack 57%)

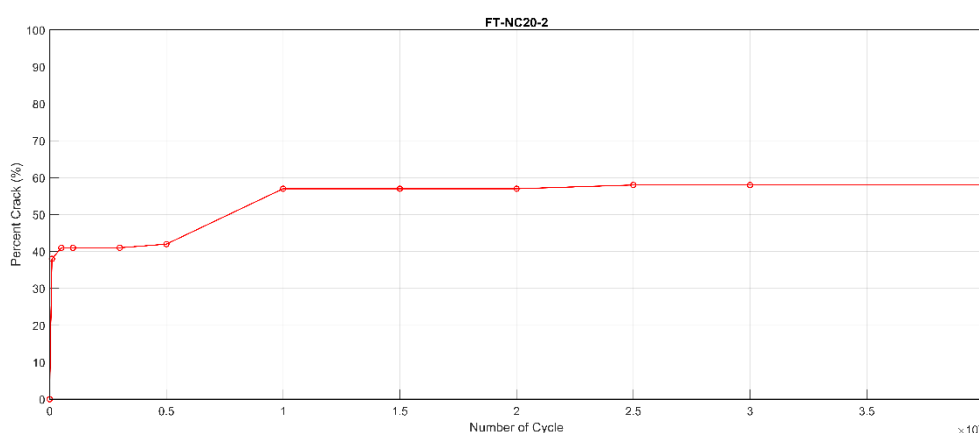




รูปที่ 4.2-4 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-2)

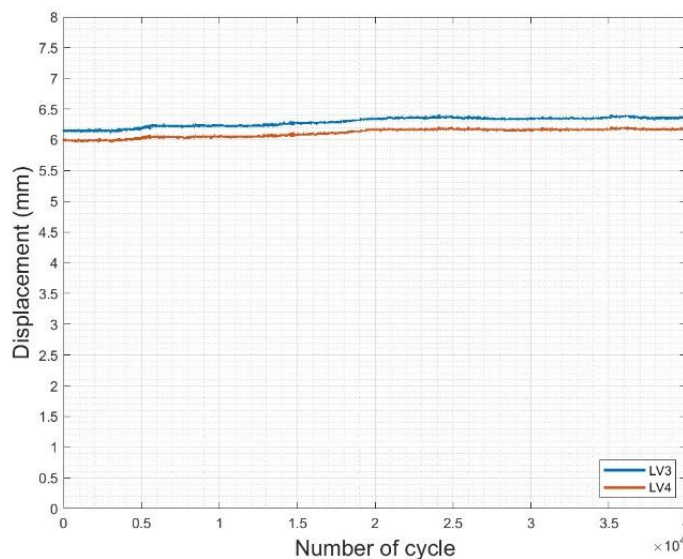
4.2.4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 4 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (FT-NC20-2)

จากการทดสอบรูปที่ 4.2-5 พบว่าในช่วงจำนวนรอบของแรงกระทำที่ต่ำกว่า 1,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำมากกว่า 1,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวจะเพิ่มขึ้นน้อยลง เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวจะเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำสูงกว่า 10,000 รอบ และเมื่อเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวเพิ่มขึ้นถึง 58% ที่จำนวนรอบของแรงกระทำเท่ากับ 40,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวไม่เพิ่มขึ้นจึงหยุดการทดสอบ



รูปที่ 4.2-5 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-2)

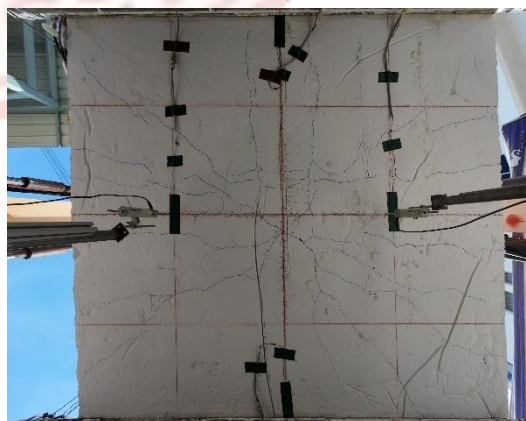
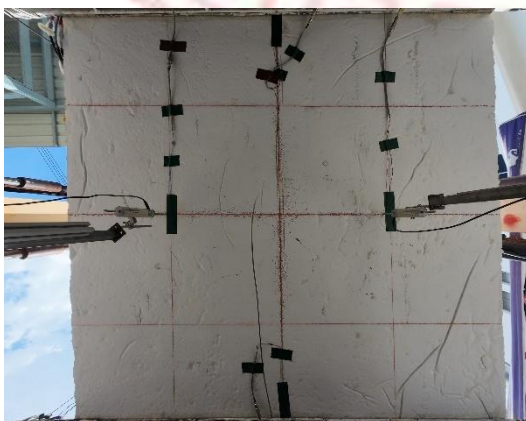
ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-2) แสดงดังรูปที่ 4.2-6 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลองมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงจำนวนรอบของแรงกระทำที่ต่ำกว่า 500 รอบ จากนั้นมีแนวโน้มคงที่ตลอดการทดสอบ



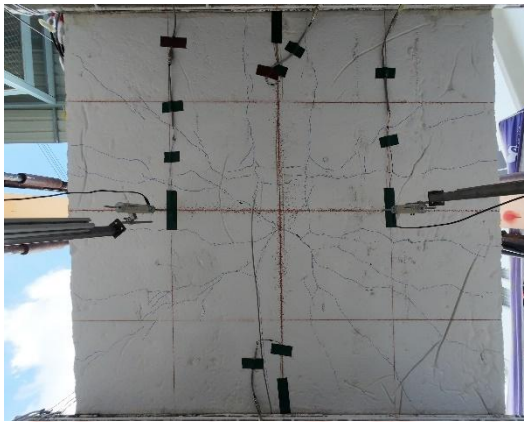
รูปที่ 4.2-6 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-2)

4.2.5 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 5 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (FT-NC20-3)

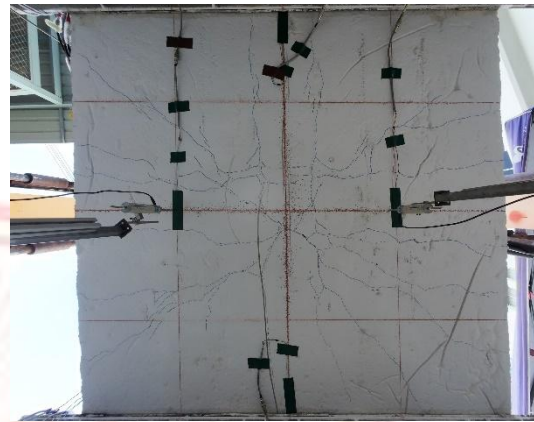
การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานจำลอง FT-NC20-3 ใช้น้ำหนักกระทำเท่ากับ 38.93 ตัน ซึ่งคิดเป็น 70% ของกำลังรับแรงเฉื่อยสูงสุด ที่พื้นสะพานจำลองที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (ST-NC20) สามารถรับได้



0 Cycles (Crack 0%)



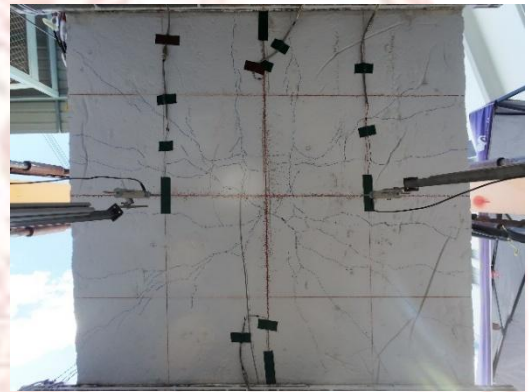
16 Cycles (Crack 40%)



200 Cycles (Crack 87%)



300 Cycles (Crack 87%)



400 Cycles (Crack 87%)



500 Cycles (Crack 88%)



1,000 Cycles (Crack 89%)

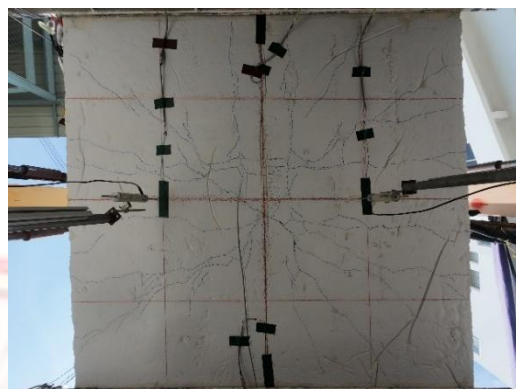


1,500 Cycles (Crack 90%)





2,000 Cycles (Crack 93%)



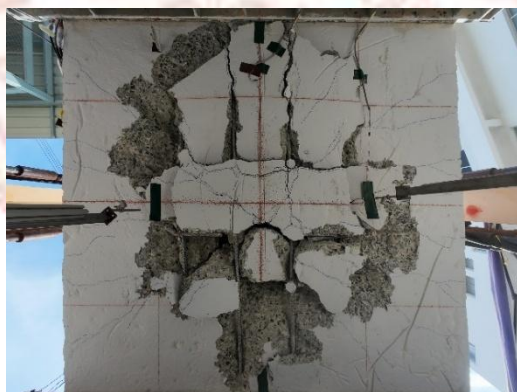
3,000 Cycles (Crack 95%)



4,000 Cycles (Crack 96%)



5,000 Cycles (Crack 96%)

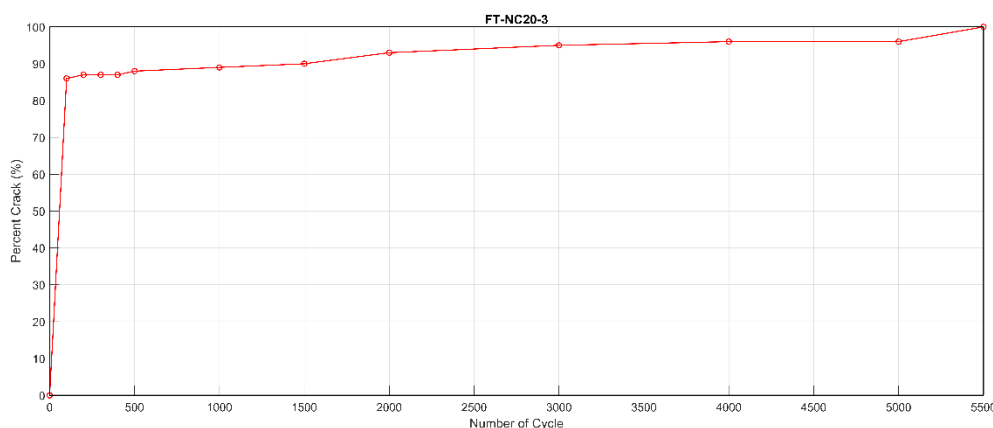


5,500 Cycles (Crack 100%)

รูปที่ 4.2-7 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-3)

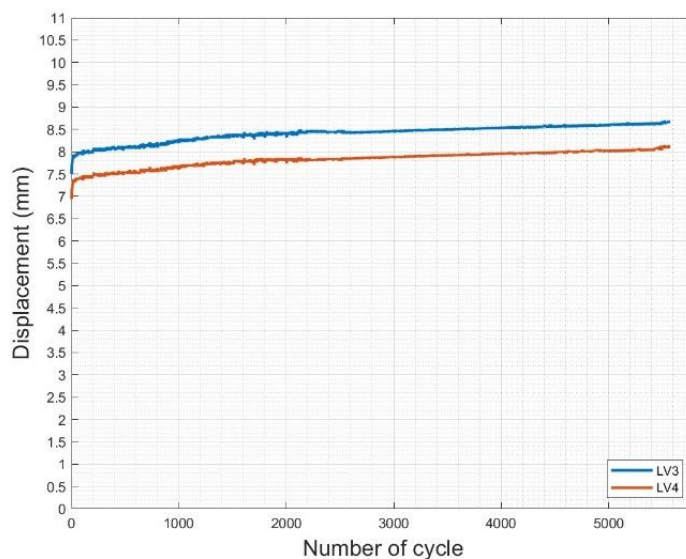
4.2.6 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 5 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (FT-NC20-3)

จากการทดสอบรูปที่ 4.2-8 พบว่าในช่วงเริ่มการทดสอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มจำนวนรอบของแรงกระทำรอยแตกร้าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นค่อนข้างช้า และเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นถึง 5,500 รอบ พื้นสะพานจำลองเกิดการวิบัติจึงหยุดการทดสอบ



รูปที่ 4.2-8 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-3)

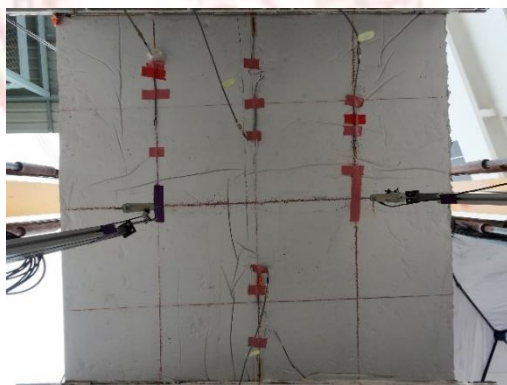
ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-3) แสดงดังรูปที่ 4.2-9 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลองมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงจำนวนรอบของแรงกระทำที่ต่ำกว่า 500 รอบ จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นค่อนข้างช้าตลอดการทดสอบ ภายหลังเมื่อพื้นสะพานจำลองเกิดการวิบัติที่จำนวนรอบของแรงกระทำเท่ากับ 5,500 รอบ จึงทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดไม่สามารถระบุค่าได้



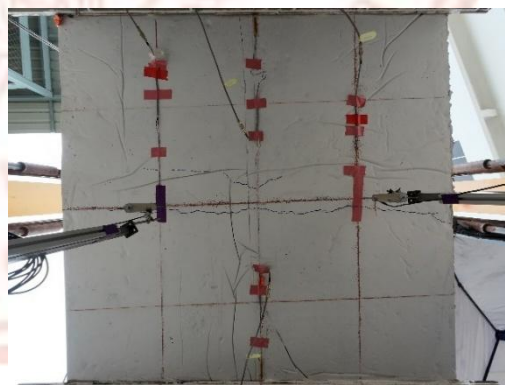
รูปที่ 4.2-9 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-NC20-3)

4.2.7 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 6 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-1)

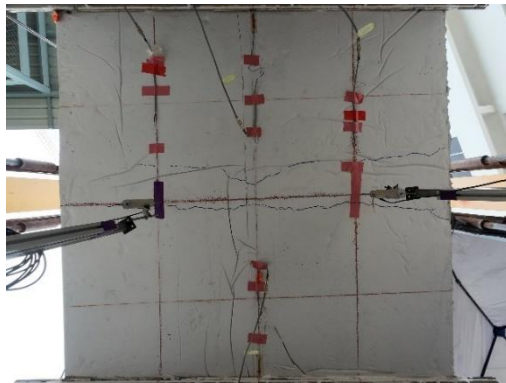
การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานจำลอง FT-CRC20-1 ใช้น้ำหนักกระทำเท่ากับ 19.04 ตัน ซึ่งคิดเป็น 40% ของกำลังรับแรงเฉื่อยสูงสุด ที่พื้นสะพานจำลองที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติ (ST-CRC20) สามารถรับได้



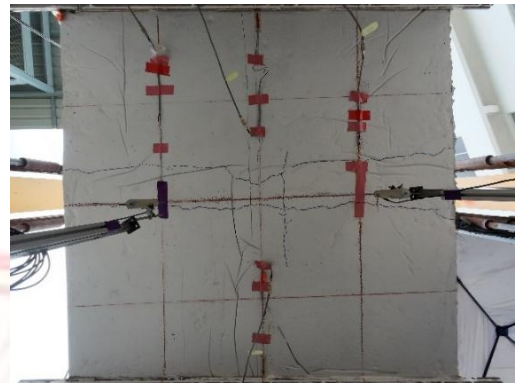
0 Cycles (Crack 0%)



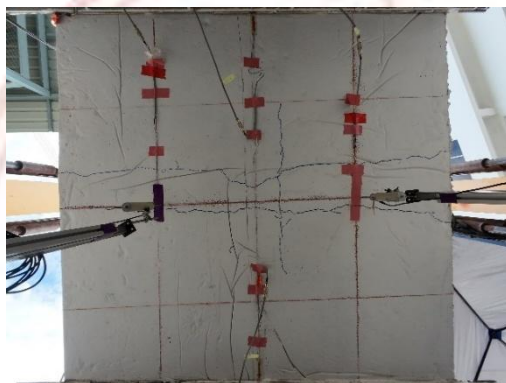
100 Cycles (Crack 14%)



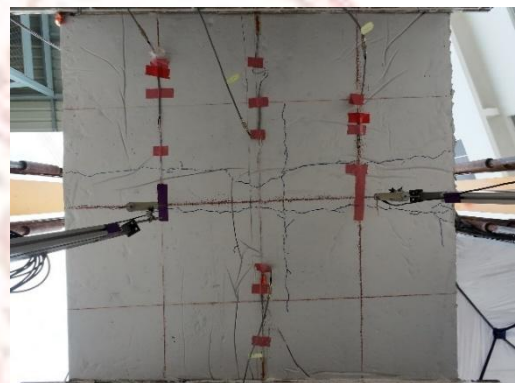
500 Cycles (Crack 19%)



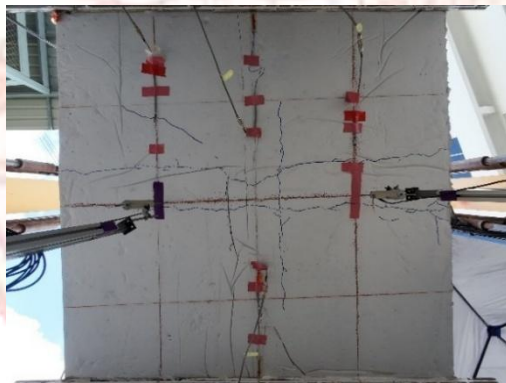
1,000 Cycles (Crack 23%)



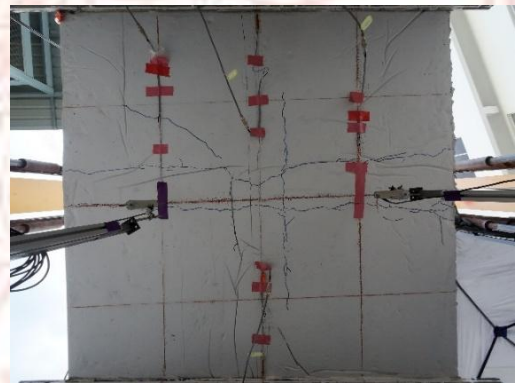
3,000 Cycles (Crack 26%)



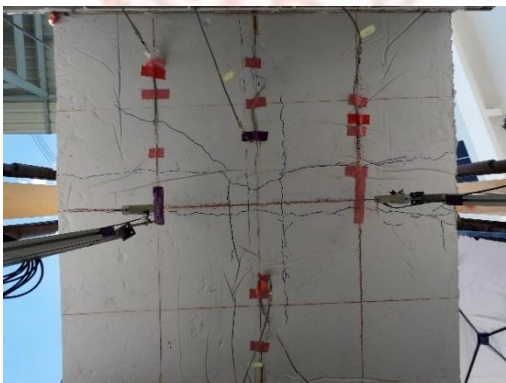
5,000 Cycles (Crack 28%)



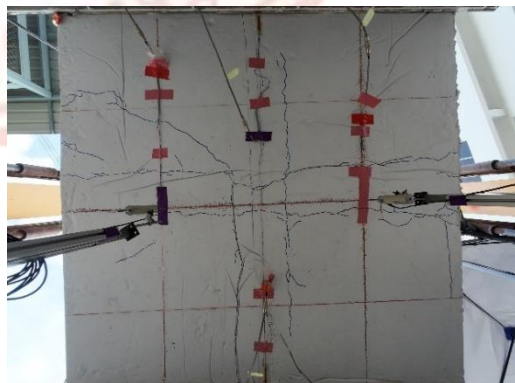
10,000 Cycles (Crack 32%)



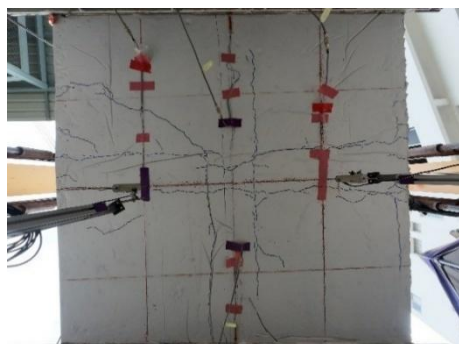
15,000 Cycles (Crack 33%)



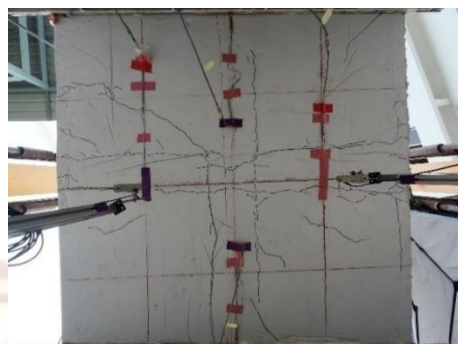
20,000 Cycles (Crack 33%)



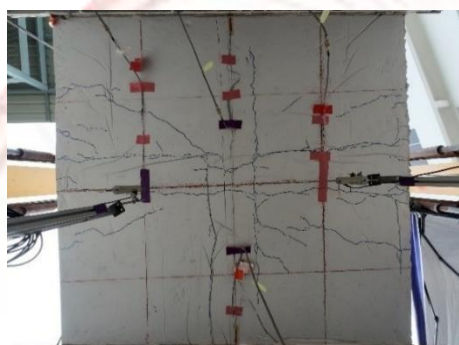
25,119 Cycles (Crack 40%)



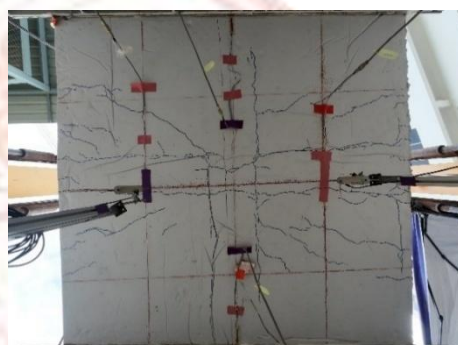
30,000 Cycles (Crack 45%)



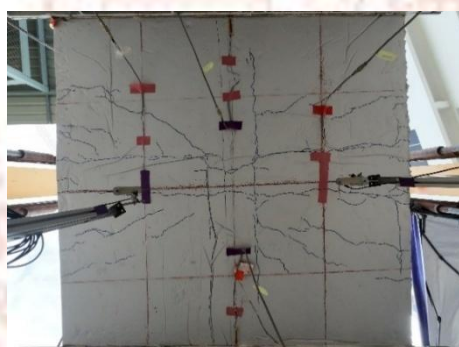
40,000 Cycles (Crack 47%)



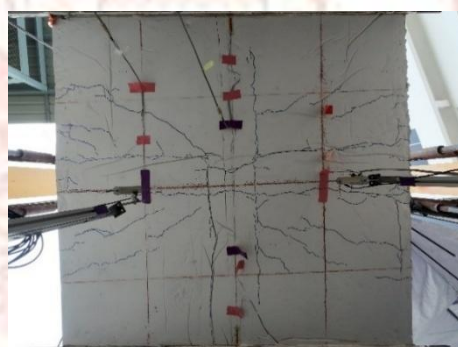
50,000 Cycles (Crack 53%)



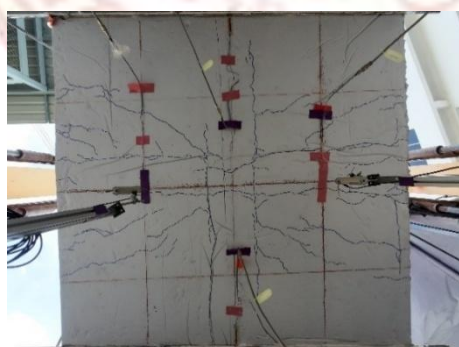
60,000 Cycles (Crack 56%)



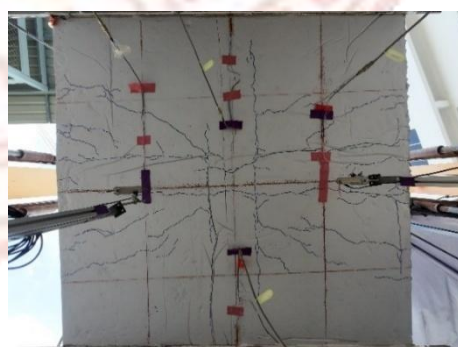
70,000 Cycles (Crack 57%)



80,000 Cycles (Crack 59%)



90,000 Cycles (Crack 59%)

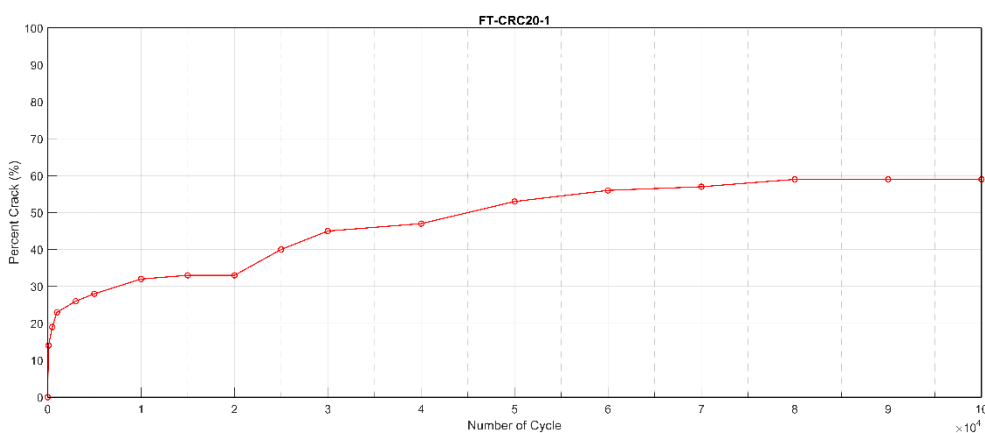


100,000 Cycles (Crack 59%)

รูปที่ 4.2-10 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-1)

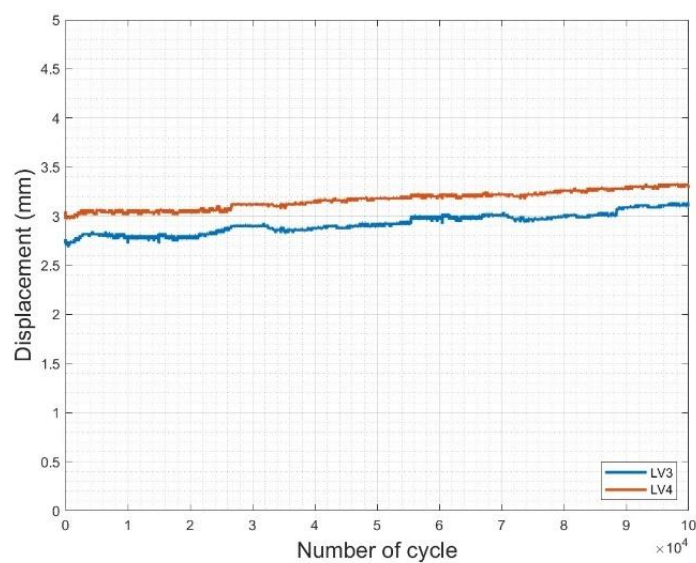
4.2.8 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 6 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-1)

จากการทดสอบรูปที่ 4.2-11 พบว่าในช่วงจำนวนรอบของแรงกระทำที่ต่ำกว่า 30,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำมากกว่า 30,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวจะเพิ่มขึ้นน้อยลง เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวจะเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำสูงกว่า 50,000 รอบ และเมื่อเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวเพิ่มขึ้นถึง 59% ที่จำนวนรอบของแรงกระทำเท่ากับ 100,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวไม่เพิ่มขึ้นจึงหยุดการทดสอบ



รูปที่ 4.2-11 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-1)

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-1) แสดงดังรูปที่ 4.2-12 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลองมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงจำนวนรอบของแรงกระทำที่ต่ำกว่า 5,000 รอบ และหลังจากนั้นมีแนวโน้มคงที่ตลอดการทดสอบ



รูปที่ 4.2-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-1)

4.2.9 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 7 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสม เม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-2)

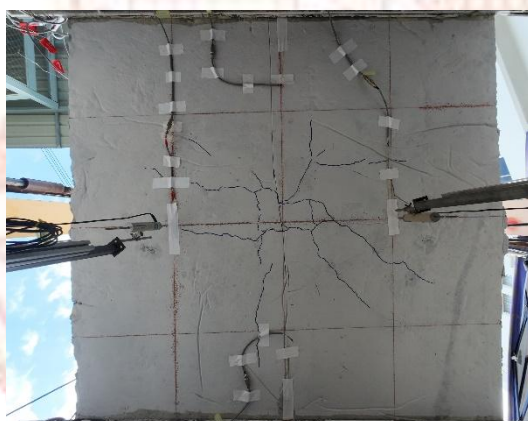
การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานจำลอง FT-CRC20-2 ใช้น้ำหนักกระทำ
เท่ากับ 26.19 ตัน ซึ่งคิดเป็น 55% ของกำลังรับแรงเฉื่อยสูงสุด ที่พื้นสะพานจำลองที่ก่อสร้างด้วย
คอนกรีตปกติ (ST-CRC20) สามารถรับได้



0 Cycles (Crack 0%)



100 Cycles (Crack 12%)



500 Cycles (Crack 26%)



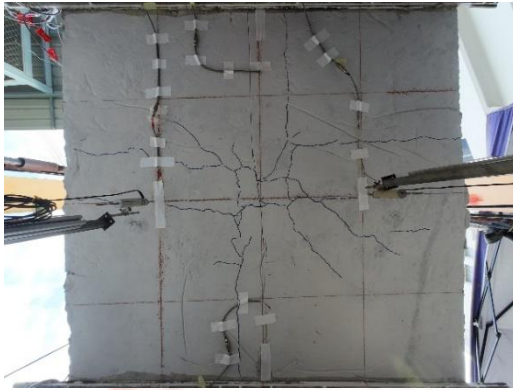
1,000 Cycles (Crack 27%)



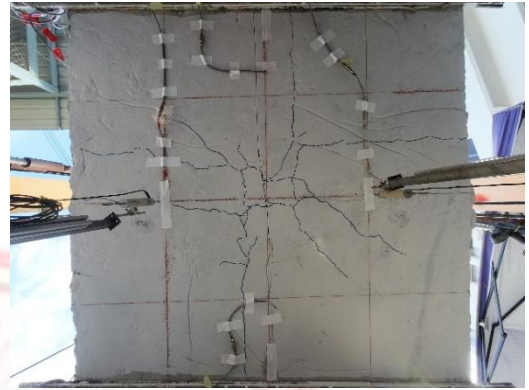
3,000 Cycles (Crack 27%)



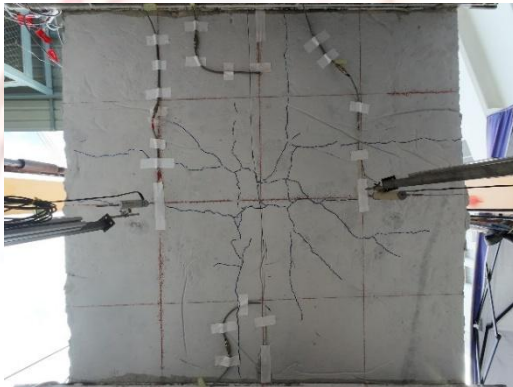
5,000 Cycles (Crack 32%)



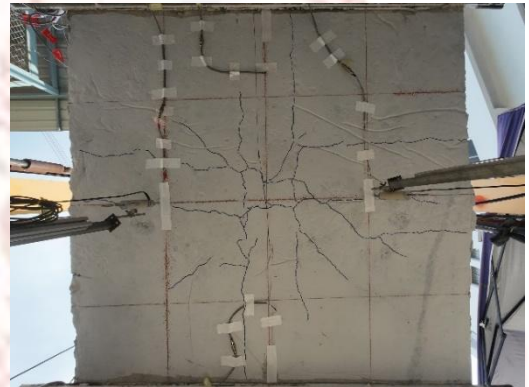
10,000 Cycles (Crack 32%)



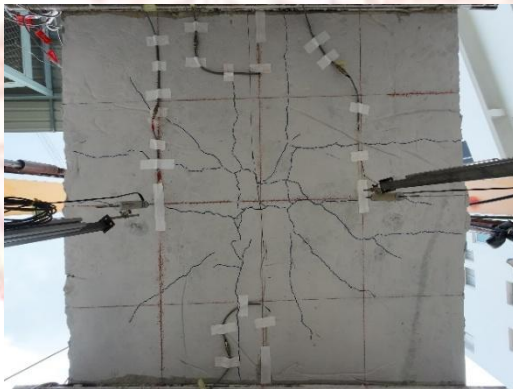
15,000 Cycles (Crack 33%)



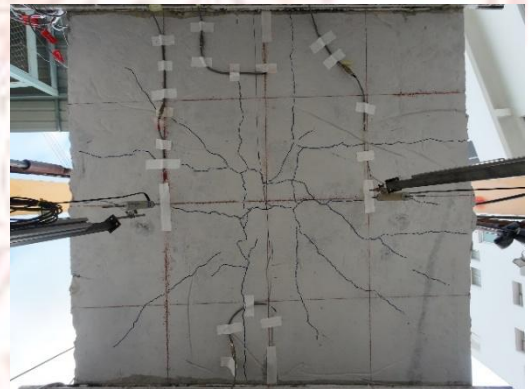
17,783 Cycles (Crack 40%)



25,000 Cycles (Crack 43%)



30,000 Cycles (Crack 45%)



40,000 Cycles (Crack 55%)



50,000 Cycles (Crack 56%)



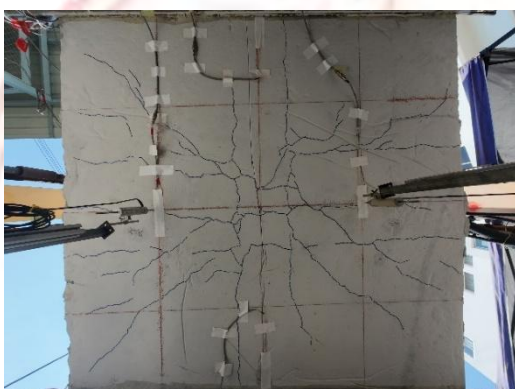
60,000 Cycles (Crack 56%)



70,000 Cycles (Crack 58%)



80,000 Cycles (Crack 58%)

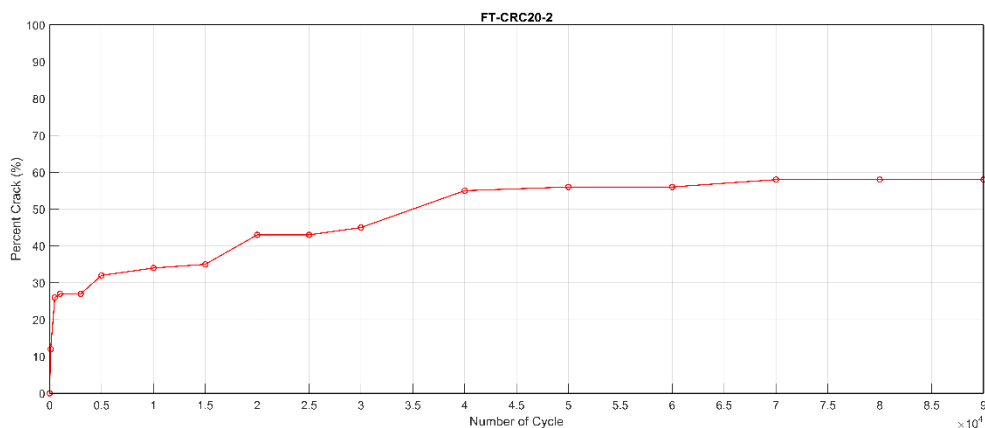


90,000 Cycles (Crack 58%)

รูปที่ 4.2-13 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-2)

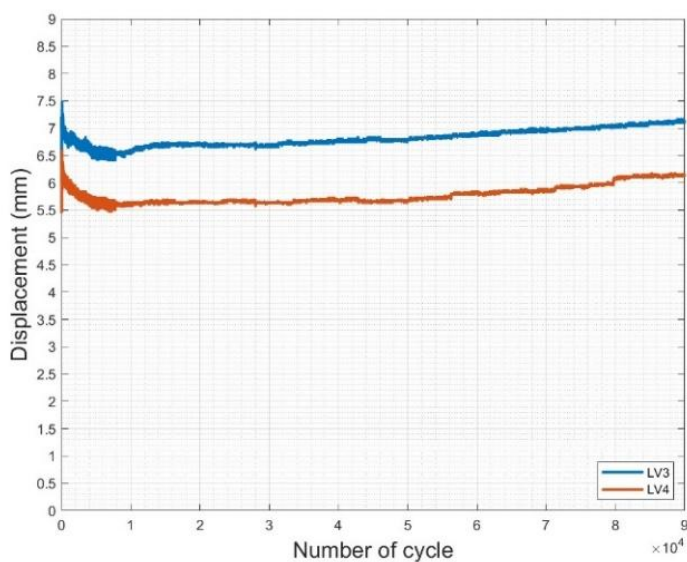
4.2.10 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 7 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-2)

จากการทดสอบรูปที่ 4.2-14 พบว่าในช่วงจำนวนรอบของแรงกระทำที่ต่ำกว่า 5,000 รอบ เพอร์เซ็นต์การแตกร้าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำมากกว่า 5,000 รอบ เพอร์เซ็นต์การแตกร้าวจะเพิ่มขึ้นน้อยลง เพอร์เซ็นต์การแตกร้าวจะเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำสูงกว่า 40,000 รอบ และเมื่อเพอร์เซ็นต์การแตกร้าวเพิ่มขึ้นถึง 58% ที่จำนวนรอบของแรงกระทำเท่ากับ 90,000 รอบ เพอร์เซ็นต์การแตกร้าวไม่เพิ่มขึ้นจึงหยุดการทดสอบ



รูปที่ 4.2-14 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-2)

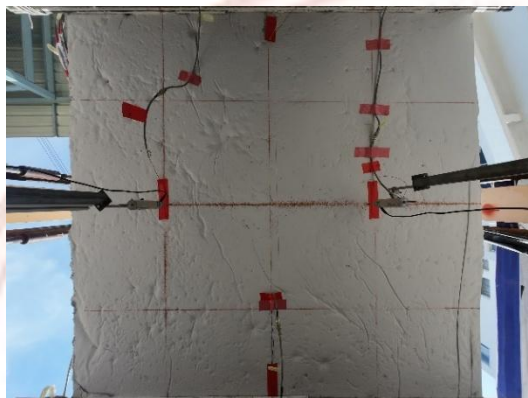
ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-2) แสดงดังรูปที่ 4.2-15 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลองมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงจำนวนรอบของแรงกระทำที่ต่ำกว่า 1,000 รอบ และหลังจากนั้นมีแนวโน้มคงที่ตลอดการทดสอบ



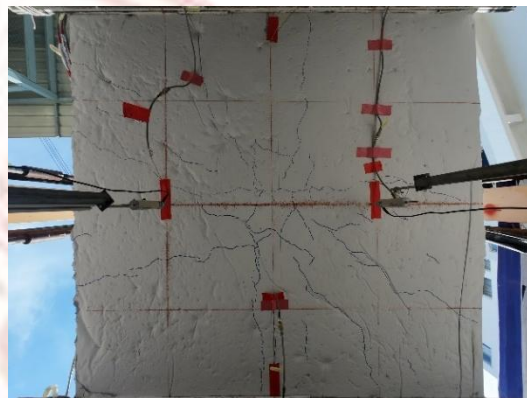
รูปที่ 4.2-15 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-2)

4.2.11 การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 8 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสม
เม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-3)

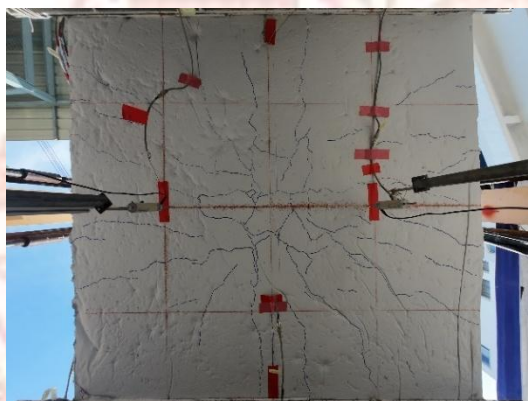
การทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานจำลอง FT-CRC20-3 ใช้น้ำหนักกระทำ
เท่ากับ 33.33 ตัน ซึ่งคิดเป็น 70% ของกำลังรับแรงเฉื่อยสูงสุด ที่พื้นสะพานจำลองที่ก่อสร้างด้วย
คอนกรีตปกติ (ST-CRC20) สามารถรับได้



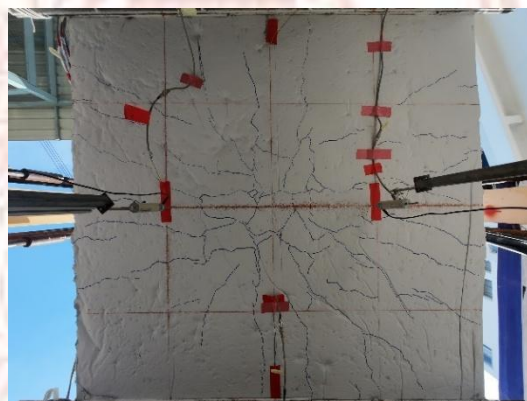
0 Cycles (Crack 0%)



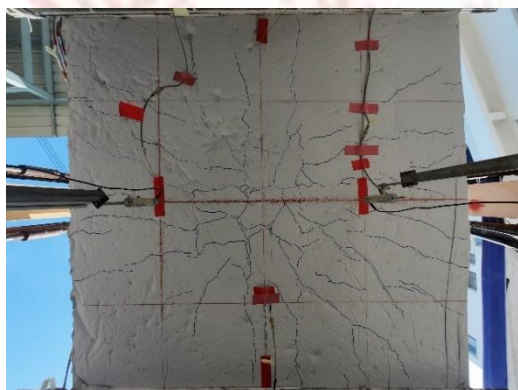
25 Cycles (Crack 40%)



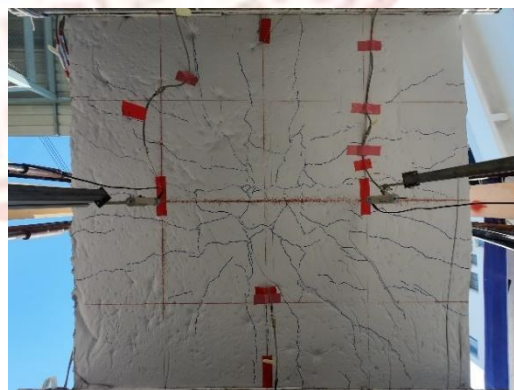
200 Cycles (Crack 72%)



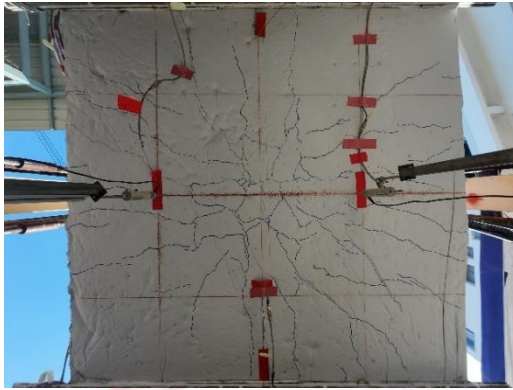
300 Cycles (Crack 76%)



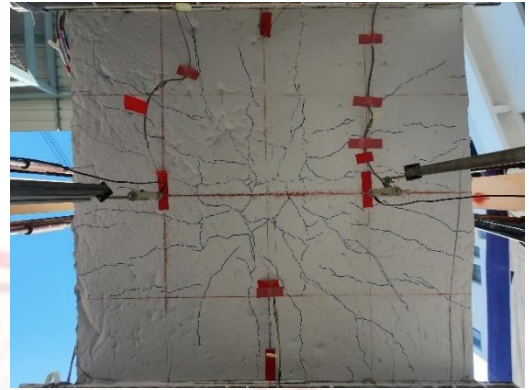
400 Cycles (Crack 77%)



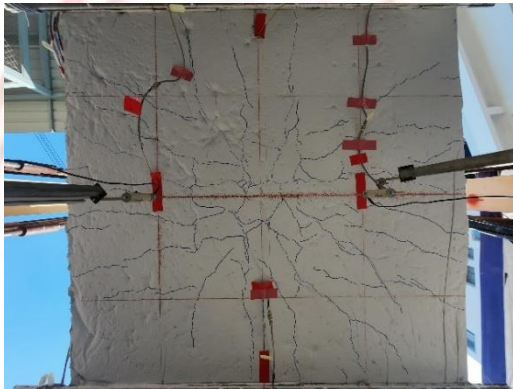
500 Cycles (Crack 78%)



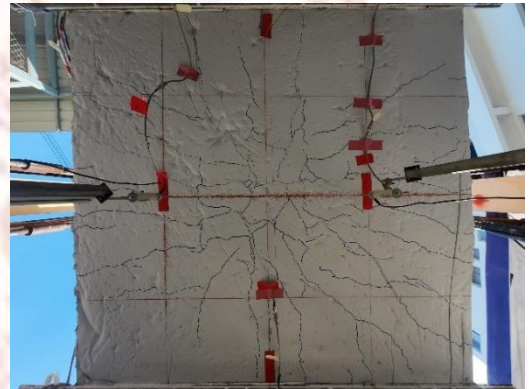
1,000 Cycles (Crack 80%)



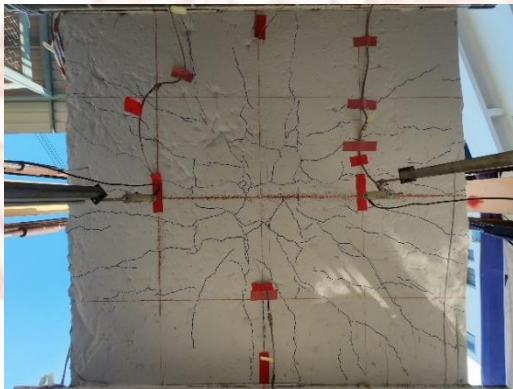
1,500 Cycles (Crack 81%)



2,000 Cycles (Crack 82%)



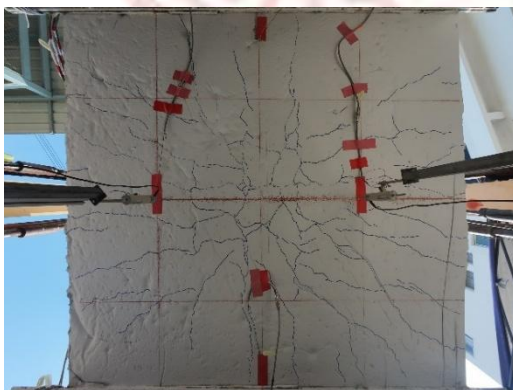
3,000 Cycles (Crack 82%)



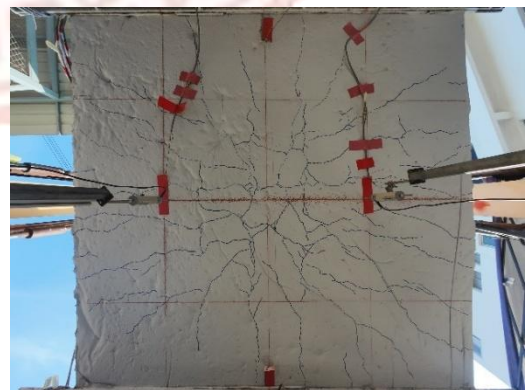
4,000 Cycles (Crack 83%)



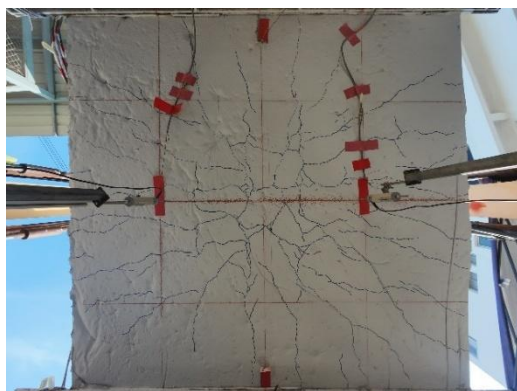
5,000 Cycles (Crack 84%)



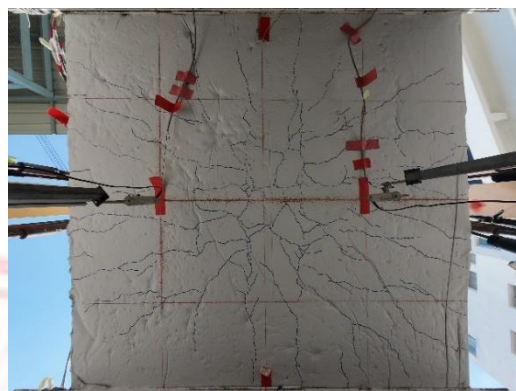
6,000 Cycles (Crack 84%)



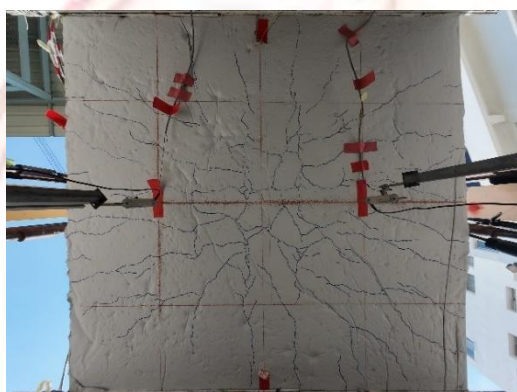
7,000 Cycles (Crack 85%)



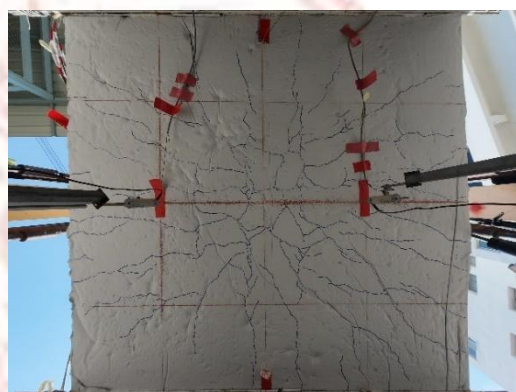
8,000 Cycles (Crack 85%)



9,000 Cycles (Crack 86%)



10,000 Cycles (Crack 86%)

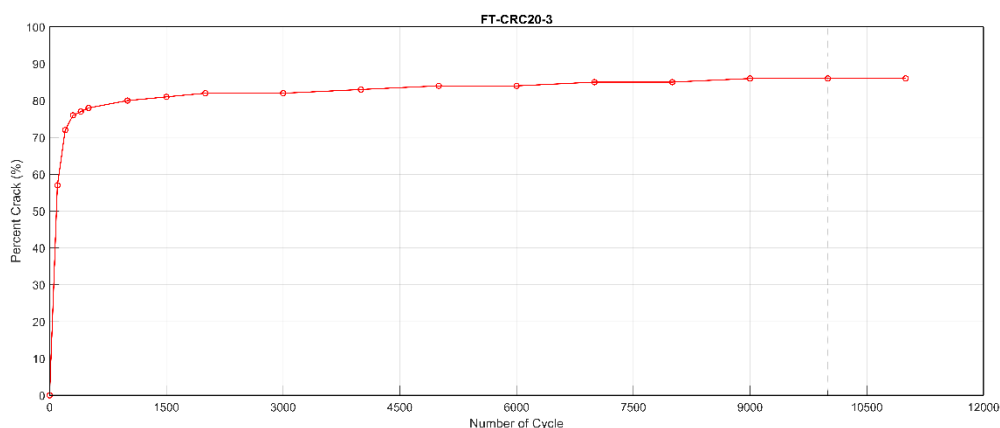


11,000 Cycles (Crack 86%)

รูปที่ 4.2-16 รายละเอียดการแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-3)

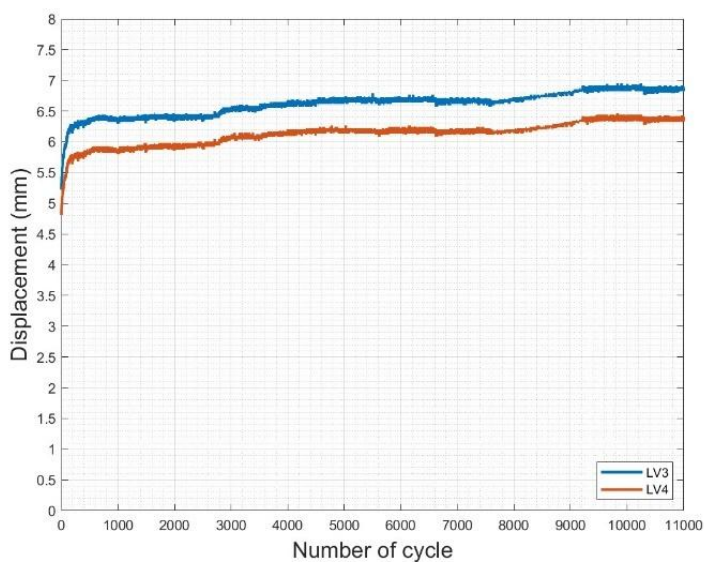
4.2.12 ผลการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานแผ่นที่ 8 ก่อสร้างด้วยคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (FT-CRC20-3)

จากการทดสอบรูปที่ 4.2-17 พบว่าในช่วงจำนวนรอบของแรงกระทำที่ต่ำกว่า 1,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำมากกว่า 1,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวจะเพิ่มขึ้นช้าลง และเมื่อเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวเพิ่มขึ้นถึง 86% ที่จำนวนรอบของแรงกระทำเท่ากับ 11,000 รอบ เปอร์เซ็นต์การแตกร้าวไม่เพิ่มขึ้นจึงหยุดการทดสอบ



รูปที่ 4.2-17 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-3)

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-3) แสดงดังรูปที่ 4.2-18 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลองมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงจำนวนรอบของแรงกระทำที่ต่ำกว่า 1,000 รอบ จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดการทดสอบ



รูปที่ 4.2-18 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบและค่าการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง (FT-CRC20-3)

บทที่ 5

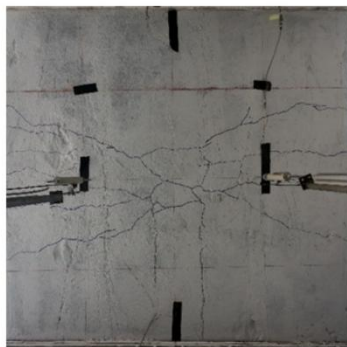
สรุปผลการวิจัย

5.1 พฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

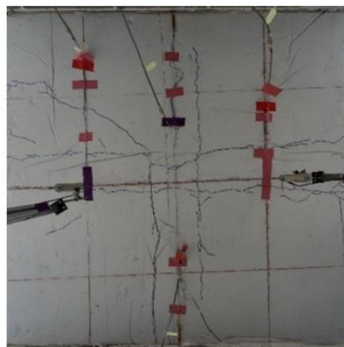
เพื่อนำเสนอผลการทดสอบพฤติกรรมความล้มของพื้นสะพานภายใต้แรงกระทำอย่างชัดเจน ได้จัดทำ ตารางเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 5.1-1 ที่ส่งผลให้เกิดรอยแตกกว้างคิดเป็น 40% ของพื้นที่ ท้องพื้นสะพาน โดยเปรียบเทียบระหว่างพื้นสะพาน NC และ พื้นสะพาน CRC จากผลการทดสอบ พบว่า พื้นสะพานCRC มีค่าต้านทานต่อแรงกระทำในช่วง $P/P_u = 0.4$ สูงกว่าพื้น NC ถึง 13.5 เท่า ($CRC = 25,119$ รอบและ $NC = 1,738$ รอบ) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการต้านทานความล้มที่ยอดเยี่ยมของ CRC ในช่วงแรงกระทำระดับต่ำ ($P/P_u = 0.40-0.55$) โดยสามารถรองรับจำนวนรอบ ได้มากกว่าหลายเท่าตัว ขณะที่ในช่วงแรงกระทำสูง ($P/P_u = 0.70$) พื้น CRC ยังคงแสดง ความสามารถในการต้านทานความล้มได้ดีกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ ได้มีการนำเสนอภาพความเสียหาย ของพื้นสะพาน ที่เกิดจากการทดสอบบริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานจำลอง ขณะที่เกิดรอยแตกกว้าง 40% เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ โดย แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของรอยร้าวในแต่ละระดับ ของแรงกระทำแสดงดังรูปที่ 5.1-1 ถึง รูปที่ 5.1-3 ซึ่งพบว่ารอยแตกกว้างในพื้น CRC กระจายตัว ละเอียด และ ต่อเนื่องมากกว่าใน NC ซึ่งเกิดรอยแตกกว้างที่เร็วกว่าที่จำนวนรอบน้อยกว่า สะท้อนถึง พฤติกรรมเชิงบวกของ CRC ต่อการใช้งานภายใต้สภาวะความล้ม

ตารางที่ 5.1-1 ตารางเปรียบเทียบความล้มระหว่าง NC และ CRC

อัตราส่วนของแรงกระทำ (P/P_u)	พื้นสะพาน NC (รอบ)	พื้นสะพาน CRC (รอบ)
40%	1,738	25,119
55%	295	17,783
70%	16	25

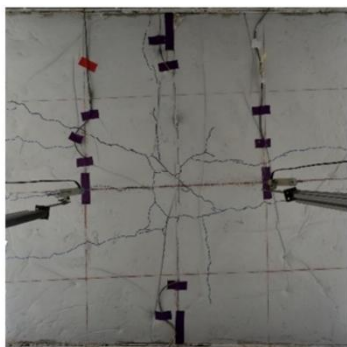
FT-NC20-1

1,738 cycles (Crack 40%)

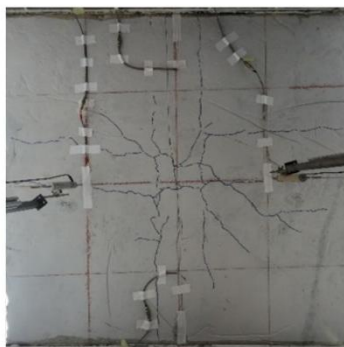
FT-CRC20-1

25,119 cycles (Crack 40%)

รูปที่ 5.1-1 ผลทดสอบพื้นสะพานเมื่อแรงกระทำซ้ำที่ 40%

FT-NC20-2

295 cycles (Crack 40%)

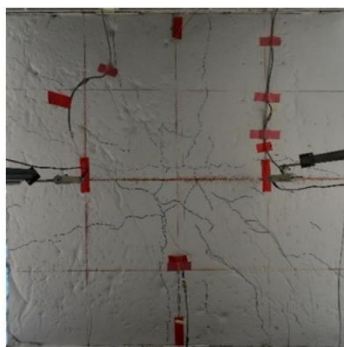
FT-CRC20-2

17,783 cycles (Crack 40%)

รูปที่ 5.1-2 ผลทดสอบพื้นสะพานเมื่อแรงกระทำซ้ำที่ 55%

FT-NC20-3

16 cycles (Crack 40%)

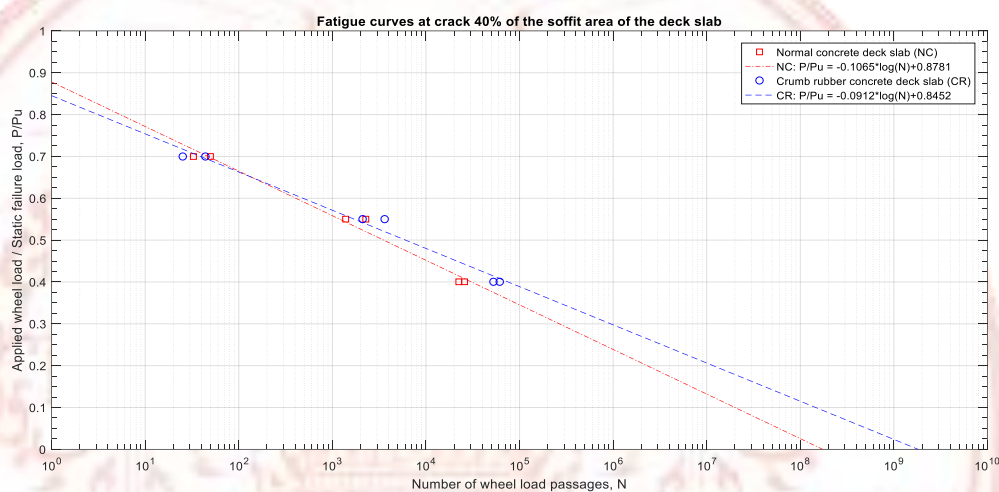
FT-CRC20-3

25 cycles (Crack 40%)

รูปที่ 5.1-3 ผลทดสอบพื้นสะพานเมื่อแรงกระทำซ้ำที่ 70%

5.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานความล้าของพื้นสะพาน

ในการวิเคราะห์ความล้าของโครงสร้างจำเป็นต้องมีเส้นโค้งความล้า (Fatigue Curve) ของโครงสร้าง เส้นโค้งความล้าเป็นเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพาน (P/Pu) กับจำนวนรอบที่ทำให้โครงสร้างเกิดเปอร์เซ็นต์การแตกร้าว 40% ของพื้นที่ท้องพื้นสะพาน (N) ซึ่งเส้นโค้งความล้าสร้างมาจากการทดสอบโครงสร้างภายใต้แรงกระทำซ้ำขนาดคงที่ ที่ระดับแรงกระทำ 40% 55% และ 70% แสดงดังรูปที่ 5.2-1



รูปที่ 5.2-1 เส้นโค้งความล้า (Fatigue Curve)

จากรูปที่ 5.2-1 แสดงให้เห็นถึงเส้นแนวโน้มจำนวนรอบของแรงกระทำกับปริมาณรอยแตกร้าวที่ 40% ของพื้นที่ท้องพื้นสะพาน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานความล้าของพื้นสะพาน CRC โดยเมื่อพื้นสะพานถูกกระทำด้วยอัตราส่วนแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพานที่มีค่าน้อยกว่า 0.5 ($P/P_u < 0.5$) จะทำให้พื้นสะพาน CRC มีความสามารถในการต้านทานความล้าสูงกว่าพื้นสะพาน NC และ เมื่อแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพานมีขนาดสูงขึ้นพื้นสะพาน CRC จะมีกำลังต้านทานความล้าใกล้เคียงกับพื้นสะพาน NC อย่างไรก็ตาม การทดสอบในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับสภาวะการใช้งานจริง เนื่องจากการทดสอบตัวอย่างขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเหมือนจริง จึงไม่สามารถดำเนินการทดสอบในปริมาณมากได้ ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้านความล้าครอบคลุมเฉพาะบางกรณีศึกษาเท่านั้น ทั้งนี้ผลการทดสอบ ยังคงสะท้อนพฤติกรรมของโครงสร้างในภาพรวมได้อย่างเหมาะสมสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์ และ เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรมต่อไป

5.3 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดสอบพบว่าแนวโน้มของเส้นโค้งความล้าที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานความล้าของคอนกรีตผสมเม็ดยางบดละเอียดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการแทนที่เม็ดยางถึง 25% ของปริมาตรทราย ซึ่งสูงกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้เพียง 15% ส่งผลให้พื้นสะพาน CRC มีค่าต้านทานความล้าที่สูงกว่า NC ในบางระดับของแรงกระทำซ้ำ โดยสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1. ช่วงแรงกระทำต่ำ ($P/P_u < 0.5$)

พื้นสะพาน CRC แสดงค่าต้านทานความล้าสูงกว่าพื้น NC อย่างชัดเจน โดยเฉลี่ย มากกว่า 93.08% ของจำนวนรอบที่ทนได้ก่อนเกิดรอยแตกกว้าง 40% เช่น ที่ $P/P_u = 0.4$ NC แตกร้าวที่ 1,738 รอบ CRC แตกร้าวที่ 25,119 รอบ เพิ่มขึ้นกว่า 13.5 เท่า เนื่องจาก CRC มีโครงสร้างที่สามารถดูดซับพลังงาน และ ยึดหยุ่นได้ดีกว่า ทำให้รอยร้าวเกิดขึ้นช้ากว่า

2. ช่วงแรงกระทำสูง ($P/P_u > 0.5$)

พื้น CRC และ NC แสดงค่าความล้าใกล้เคียงกัน เช่น ที่ $P/P_u = 0.7$ NC แตกร้าวที่ 16 รอบ CRC แตกร้าวที่ 25 รอบ เนื่องจากแรงกระทำเริ่มต้นมีค่ามาก ทำให้เกิดรอยร้าวรุนแรงตั้งแต่วรอบแรก ส่งผลให้ CRC ไม่สามารถแสดงคุณสมบัติยึดหยุ่นได้อย่างเต็มที่ในสภาพโหลดสูงแบบทันที (Quasi-static High Stress)

3. ข้อเสนอแนะการใช้งานในภาคสนาม

พื้นสะพาน CRC มีศักยภาพสูงสำหรับการใช้งานในพื้นที่ที่มี โหลดซ้ำจากการจราจรในระดับปานกลางถึงต่ำ เช่น สะพานในพื้นที่ชนบท หรือจุดเชื่อมถนนที่มีการเคลื่อนไหวต่อเนื่อง แต่ไม่ใช่จุดรับน้ำหนักจุดสูงสุด แนะนำให้ใช้งานกับสภาวะโหลดเฉลี่ย ไม่เกิน 50% ของกำลังรับน้ำหนักที่ออกแบบ ($P/P_u \leq 0.5$) เพื่อให้ CRC แสดงประสิทธิภาพสูงสุดด้านความล้า ทั้งนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านของการวิเคราะห์ความหนาของพื้นสะพาน และ จัดทำรายละเอียดการออกแบบเชิงไฟไนต์ เพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้ในงานจริง

บรรณานุกรม

Assaggaf, R. A., Ali, M. R., Al-Dulaijan, S. U., & Maslehuddin, M. (2021). Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber – A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 1753-1798.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.019>

Ganesan, N., Bharati Raj, J., & Shashikala, A. P. (2013). Flexural fatigue behavior of self compacting rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 44, 7-14.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.077>

Gerges, N. N., Issa, C. A., & Fawaz, S. A. (2018). Rubber concrete: Mechanical and dynamical properties. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00184.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00184>

Liu, F., Zheng, W., Li, L., Feng, W., & Ning, G. (2013). Mechanical and fatigue performance of rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 711-719.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.055>

Liu, M., Lu, J., Jiang, W., & Ming, P. (2023). Study on fatigue damage and fatigue crack propagation of rubber concrete. *Journal of Building Engineering*, 65, 105718.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105718>

Pacheco-Torres, R., Cerro-Prada, E., Escolano, F., & Varela, F. (2018). Fatigue performance of waste rubber concrete for rigid road pavements. *Construction and Building Materials*, 176, 539-548.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.030>

Xu, J., Yao, Z., Yang, G., & Han, Q. (2020). Research on crumb rubber concrete: From a multi-scale review. *Construction and Building Materials*, 232, 117282.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117282>

Xue, G., Zhu, H., Xu, S., & Dong, W. (2023). Fatigue performance and fatigue equation of crumb rubber concrete under freeze–thaw cycles. *International Journal of Fatigue*, 168, 107456.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107456>



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ศุภณัฐชัย เขียวรอด
ชื่อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพในการต้านทานความล้าของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมยาง รถยนต์เก่าบดละเอียดขนาดเสมือนจริง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง
ประวัติ	สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุราชประสิทธิ์ จังหวัด นนทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนศรีบุญยา นันท์ จังหวัด นนทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ ไทย-เยอรมัน จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธาและเทคโนโลยี คณะ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าพระนครเหนือ