

การศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิของแอสฟัลติกคอนกรีต
AC40/50 AC60/70 และ AC80/100



นาย วีรยุทธ โกมลวิลาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

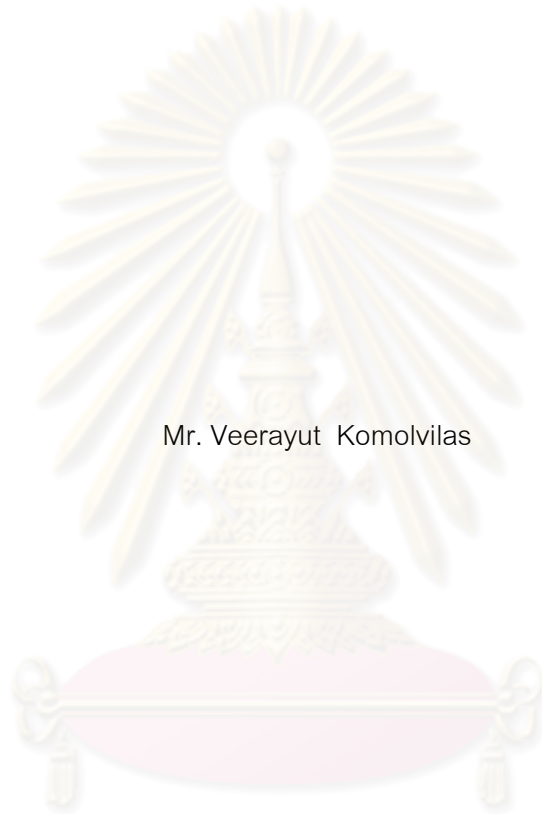
ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 2 7 0 6 3 6 2 2 1

A STUDY OF TIME-TEMPERATURE DEPENDENT BEHAVIORS OF ASPHALTIC
CONCRETE AC40/50 AC60/70 AND AC80/100



Mr. Veerayut Komolvilas

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

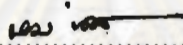
Chulalongkorn University

Academic Year 2010

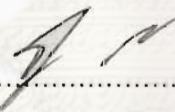
Copyright of Chulalongkorn University

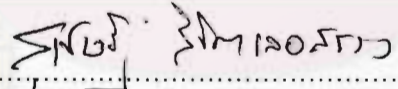
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิของแอสฟัลติก
คอนกรีต AC40/50 AC60/70 และ AC80/100
โดย นาย วีรยุทธ โกมลวิลาศ
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง

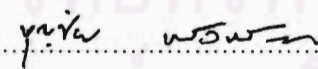
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

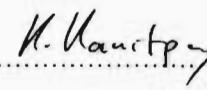

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวิตร บุญญะฐิติ)


..... อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. บุญชัย แสงเพชรงาม)

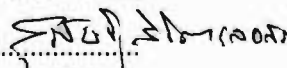

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัญวีร์ กนิษฐพงศ์)

วีรยุทธ โภมลวิลาศ : การศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิของแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 (A STUDY OF TIME-TEMPERATURE DEPENDENT BEHAVIORS OF ASPHALTIC CONCRETE AC40/50, AC60/70 AND AC80/100) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง, 212 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิของแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตผสมร้อนประเภทแน่นถูกเตรียมด้วยวิธีมาร์แชล เลือกใช้หินปูนขนาดเรียกใช้ 12.5 มิลลิเมตรเป็นวัสดุมวลรวมและแอสฟัลตซีเมนต์เกรดการเจาะลึกชนิด AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน จากนั้นนำมาบดอัดเพื่อขึ้นรูปตัวอย่างด้วยเครื่องบดอัดโรตารีแบบซูปเปอร์เพฟ ดำเนินการทดสอบแรงดึงทางอ้อมและแรงอัดแกนเดี่ยวทั้งแบบสถิตและพลวัต โดยระหว่างการทดสอบมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 10°C 25°C 40°C และ 55°C ตามลำดับ รวมถึงมีการควบคุมอัตราความเครียดที่ระดับ 5 15 50 และ 150 มิลลิเมตรต่อนาทีตามลำดับเมื่อทดสอบแบบสถิต ผลการทดสอบนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับความเครียด กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวแบบถาวรกับจำนวนรอบการให้แรงกระทำ สามารถคำนวณหาค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต และยังสามารถนำไปสร้างความสัมพันธ์เชิงประสพการณ์สำหรับประมาณค่าการยุบตัวแบบถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต โดยนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....
ปีการศึกษา.....2553.....

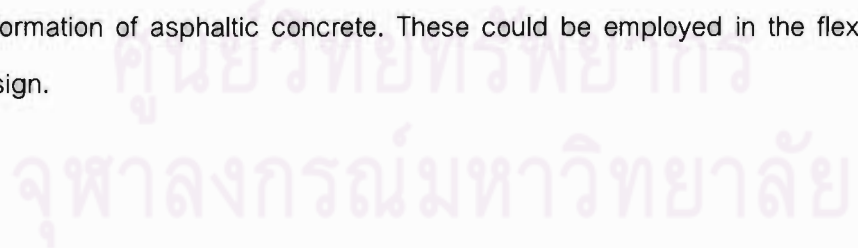
ลายมือชื่อนิสิต.....วีรยุทธ โภมลวิลาศ.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5270636221: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: DENSE GRADE HOT MIXED ASPHALT / TEMPERATURE / STRAIN RATE / PENETRATION GRADE / INDIRECT TENSILE TEST / UNIAXIAL COMPRESSION TEST

VEERAYUT KOMOLVILAS : A STUDY OF TIME-TEMPERATURE DEPENDENT BEHAVIORS OF ASPHALTIC CONCRETE AC40/50, AC60/70 AND AC80/100
ADVISOR : ASSOC.PROF. SUCHED LIKITLURSUANG, Ph.D., 212 pp.

This paper presents a study of time-temperature dependent behaviors of asphaltic concrete AC40/50, AC60/70 and AC80/100. The samples of dense grade hot-mixed asphalt were mixed according Marshall Method. Limestone with the nominal size of 12.5 mm and asphalt cement penetration grade of AC40/50, AC60/70 and AC80/100 were employed in this study for aggregate and asphalt binder respectively. All specimens were prepared using the Superpave gyratory compactor and tested according to the static indirect tensile test, the dynamic indirect tensile test, the static uniaxial compression test and the dynamic uniaxial compression test known as the Dynamic Creep test. During test, the temperatures were controlled at 10°C, 25°C, 40°C and 55°C respectively and the strain rates were controlled at 5, 15, 50 and 150 mm/minute respectively for static modes. The results can be used to construct the relationships between stress and strain, elastic modulus and strain and permanent deformation and numbers of cycles. Moreover, the results can be used to find resilient modulus and simplified as the empirical equations for approximated permanent deformation of asphaltic concrete. These could be employed in the flexible pavement design.



Department : Civil Engineering
Field of Study : Civil Engineering
Academic Year : 2010

Student's Signature วิษณุทศ ไกพลวิลาส
Advisor's Signature Suched Likitlursuang

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ ธิขิตเลอสรวง อาจารย์ที่
ปรีชาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยในครั้งนี้
รวมทั้งช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอกราบ
ขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัตถ์ บุญญะฐิติ อาจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม และผู้ช่วย
ศาสตราจารย์ ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยแนะนำ ตรวจสอบ
แก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอขอบคุณอย่างสุดซึ้งต่อ รุ่งพี เพื่อน และรุ่นน้องที่คอยให้ความช่วยเหลือในการ
ทำงานวิจัยและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ท้ายที่สุดผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการ
ทำงานเป็นอย่างดี ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอน อบรม และให้ความรู้ในสาขาวิชาต่างๆ
พระคุณของท่านเหล่านี้ ผู้เขียนจะขอระลึกถึงจนกว่าชีวิตจะหาไม่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.6 ปัญหาและอุปสรรค.....	6
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	6
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ผิวทางแบบยืดหยุ่น.....	7
2.2 ความเสียหายของผิวทางแบบยืดหยุ่น.....	8
2.3 ความเค้นและความเครียดวิกฤตของผิวทางแบบยืดหยุ่น.....	12
2.4 ลักษณะเฉพาะของแอสฟัลติกคอนกรีต.....	15
2.5 แอสฟัลต์ซีเมนต์.....	18
2.6 คุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	19
2.7 ข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	21
2.8 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	22
2.9 แอสฟัลต์เชื่อมประสานเกรดสมรรถนะ.....	28
2.10 การทดสอบแอสฟัลต์เชื่อมประสานเกรดสมรรถนะ.....	29
2.11 การเปรียบเทียบความสอดคล้องของข้อกำหนดแอสฟัลต์เกรดต่างๆ.....	30

บทที่	หน้า
2.12 มวลรวม.....	31
2.13 แอสฟัลต์ผสมร้อน.....	35
2.14 การออกแบบแอสฟัลต์ผสมร้อนด้วยวิธีมาร์แชล.....	39
2.15 การออกแบบแอสฟัลต์ผสมร้อนด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ.....	41
2.16 การทดสอบสมรรถนะของแอสฟัลต์ผสมร้อน.....	43
2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	73
3.1 ขั้นตอนการทดสอบวัสดุพื้นฐาน.....	73
3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง.....	77
3.3 การทดสอบเชิงกลของแอสฟัลต์ผสมร้อน.....	79
3.4 ผลของอัตราการใช้แรงและอุณหภูมิ.....	88
3.5 เครื่องมือทดสอบและความละเอียดในการวัด.....	89
3.6 จำนวนตัวอย่างและเวลาในการทดสอบ.....	92
4. ผลการวิจัย.....	93
4.1 ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต.....	93
4.2 ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต.....	104
4.3 ผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต.....	104
4.4 ผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัต.....	114
5. สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	119
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	119
5.2 อภิปรายผลการทดลอง.....	146
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	151
รายการอ้างอิง.....	153
ภาคผนวก.....	155
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	212

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 อัตราความเครียดและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงทางอ้อม.....	3
ตารางที่ 1.2 อัตราความเครียดและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง.....	4
ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดการทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	23
ตารางที่ 2.2 ค่าการเจาะลึกของแอสฟัลต์ซีเมนต์แต่ละข้อกำหนด.....	30
ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การออกแบบด้วยวิธีมาร์แชล (อ้างอิงจาก Asphalt Institute, 2007)....	40
ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การออกแบบด้วยวิธีมาร์แชล (อ้างอิงจาก Asphalt Institute, 1979)....	40
ตารางที่ 2.5 ค่าโมดูลัสคืนตัวภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	56
ตารางที่ 2.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติและสมรรถนะของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต.....	72
ตารางที่ 3.1 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของหิน.....	73
ตารางที่ 3.2 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	74
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	75
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวม.....	75
ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีมาร์แชล.....	78
ตารางที่ 3.6 โปรแกรมการทดสอบแรงดึงทางอ้อม.....	84
ตารางที่ 3.7 โปรแกรมการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง.....	87
ตารางที่ 3.8 จำนวนตัวอย่างและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ.....	81
ตารางที่ 4.1 สรุปค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50.....	94
ตารางที่ 4.2 สรุปค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70.....	95
ตารางที่ 4.3 สรุปค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100.....	96
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต.....	104
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิติของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50.....	105
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิติของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70.....	106
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิติของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100.....	107

ตารางที่ 4.8	สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนรอบของแรงกระทำ.....	118
ตารางที่ 5.1	เปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคีนตัว.....	131
ตารางที่ 5.2	ค่าพารามิเตอร์ในสมการทำนายการยุบตัวแบบถาวรกับอุณหภูมิ.....	146
ตารางที่ 5.3	ผลการทดสอบการให้แรงแบบสถิตที่อัตราความเครียด 50 มิลลิเมตรต่อวินาที..	150
ตารางที่ 5.4	ผลการทดสอบแบบพลวัต.....	151



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	ภาพตัดขวางผิวทางแบบยึดหยุ่น.....	7
รูปที่ 2.2	รูปแบบความเสียหายและความเครียดวิกฤตในผิวทางแบบยึดหยุ่น (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement design).....	9
รูปที่ 2.3	รอยแตกร้าวเนื่องจากความล้า (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement design).....	10
รูปที่ 2.4	รอยแตกร้าวตามแนวยาว (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement design).....	10
รูปที่ 2.5	รอยแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement design).....	11
รูปที่ 2.6	รอยร่องล้อเนื่องจากส่วนผสม (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement design).....	12
รูปที่ 2.7	รอยร่องล้อเนื่องจากชั้นดินเดิม (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement design).....	12
รูปที่ 2.8	ความเค้นและความเครียดวิกฤตของผิวทางแบบยึดหยุ่น (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement design).....	14
รูปที่ 2.9	นิยามของโมดูลัสการคืนตัว.....	15
รูปที่ 2.10	ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยโมดูลัสคืนตัวจากภาคต่างๆของประเทศไทย (Phromsorn <i>et al.</i> , 2003).....	17
รูปที่ 2.11	(a) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรสะสมกับจำนวนรอบของแรงกระทำ (b) ค่าคงที่การเสื่อมถอย a และ b (Regression constants <i>a</i> and <i>b</i>).....	18
รูปที่ 2.12	แอสฟัลต์ซีเมนต์ (http://cm.intelsteps.com).....	19
รูปที่ 2.13	เครื่องมือการทดสอบความเหน็ด (a)แบบสถาบันแอสฟัลต์ (b)แบบแคนนอนแมนนิ่ง (http://www.humboldtmg.com).....	24
รูปที่ 2.14	เครื่องมือการทดสอบความเหน็ดแบบไซท์ฟุคส์แซนไซว์ (http://www.humboldtmg.com)	25

รูปที่ 2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดไคเนมาติกกับอุณหภูมิ (http://www.wearcheck.com).....	26
รูปที่ 2.16	เครื่องมือการทดสอบค่าการเจาะลึก (http://www.jazzar.com).....	27
รูปที่ 2.17	โรเทชันนอลวิสโคมิเตอร์.....	29
รูปที่ 2.18	ไดนามิกเชียรริโอมิเตอร์ (http://www.asphaltinstitute.org).....	30
รูปที่ 2.19	มวลรวม (http://www.anchsand.com).....	31
รูปที่ 2.20	แอสฟัลต์ผสมร้อนประเภทแน่น (http://www.asphaltwa.com).....	35
รูปที่ 2.21	เครื่องบดอัดไจราทอรีแบบซูเปอร์เพฟ.....	42
รูปที่ 2.22	ลักษณะการบดอัดตัวอย่างแอสฟัลต์ผสมร้อนด้วยเครื่องบดอัดไจราทอรีแบบ ซูเปอร์เพฟ (วาดใหม่ Asphalt Institute, 1996).....	43
รูปที่ 2.23	ลักษณะการพังทลายของตัวอย่าง (SP Technical Research Institute of Sweden, www.sp.se).....	45
รูปที่ 2.24	พฤติกรรมความเค้นและความเครียดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและ อัตราความเครียด (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C.....	53
รูปที่ 2.25	ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{sec} และอุณหภูมิ.....	54
รูปที่ 2.26	ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{max} และอุณหภูมิ.....	54
รูปที่ 2.27	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสคั้นตัวและอุณหภูมิ.....	56
รูปที่ 2.28	ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของการทดสอบแรงดึงทางอ้อม สำหรับโมดูลัสคั้นตัว (รอบสุดท้าย).....	57
รูปที่ 2.29	พฤติกรรมความเค้นและความเครียดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและ อัตราความเครียด (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C.....	60
รูปที่ 2.30	ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{max} และอุณหภูมิ.....	61
รูปที่ 2.31	ความสัมพันธ์ระหว่าง E^{50} และอุณหภูมิ.....	61
รูปที่ 2.32	ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_{peak} และอุณหภูมิ.....	62
รูปที่ 2.33	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่ลดลง.....	62
รูปที่ 2.34	ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันอุณหภูมิเคลื่อนและอุณหภูมิ.....	63
รูปที่ 2.35	ผลการทดสอบการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต ณ อุณหภูมิ 25°C.....	66

รูปที่ 2.36	ผลการทดสอบการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต ณ อุณหภูมิ 40°C.....	67
รูปที่ 2.37	ผลการทดสอบการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต ณ อุณหภูมิ 55°C.....	68
รูปที่ 2.38	ความสัมพันธ์ลึกระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรงเพื่อสร้างสมการการยุบตัวถาวรอย่างง่าย.....	69
รูปที่ 2.39	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ a และอุณหภูมิ.....	70
รูปที่ 2.40	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ b และอุณหภูมิ.....	70
รูปที่ 3.1	ค่าความเหนียวของแอสฟัลต์ซีเมนต์แต่ละประเภท.....	76
รูปที่ 3.2	ขนาดคละของมวลรวม.....	77
รูปที่ 3.3	เครื่องมือทดสอบ Universal Testing Machine (Instron UTM-1.2MN).....	81
รูปที่ 3.4	รูปแบบการทดสอบแรงดึงทางอ้อมและการติดตั้งเกจวัดความเครียด.....	81
รูปที่ 3.5	เครื่องมือทดสอบ Universal Testing Machine (Controls UTM-14 kN).....	83
รูปที่ 3.6	รูปแบบการติดตั้งตัวอย่างสำหรับทดสอบโมดูลัสคืนตัว.....	83
รูปที่ 3.7	รูปร่างและเงื่อนไขของแรงกระทำ.....	84
รูปที่ 3.8	รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ แรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต.....	86
รูปที่ 3.9	รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ แรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัต.....	87
รูปที่ 3.10	Instron UTM-1.2MN.....	90
รูปที่ 3.11	เกจวัดความเครียด (Strain gage).....	91
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆ (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C.....	98
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆ (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C.....	100

รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆ (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C.....	102
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 จากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆกัน 4 ค่า (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C.....	109
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 จากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆกัน 4 ค่า (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C.....	111
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 จากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆกัน 4 ค่า (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C.....	113
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนรอบของแรงกระทำที่อุณหภูมิต่างๆ (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C.....	116
รูปที่ 4.8	ตัวอย่างความสัมพันธ์ลึกระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนรอบของแรงกระทำของตัวอย่าง AC80/100 ที่อุณหภูมิการทดสอบ 40°C และ 55°C ตามลำดับ.....	117
รูปที่ 5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับอุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติก คอนกรีต จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตที่อัตราความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100.....	121
รูปที่ 5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดกับ อุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ที่อัตราความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100.....	123
รูปที่ 5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับอุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติก คอนกรีต จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ณ อัตราความเครียดต่างๆ (a) 0.0008 ต่อวินาที (b) 0.0025 ต่อวินาที (c) 0.0083 ต่อวินาที (d) 0.0250 ต่อวินาที.....	125

รูปที่ 5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดกับ คุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ณ อัตราความเครียดต่างๆ (a) 0.0008 ต่อวินาที (b) 0.0025 ต่อวินาที (c) 0.0083 ต่อวินาที (d) 0.0250 ต่อวินาที.....	127
รูปที่ 5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียด ณ ความเค้นสูงสุดกับคุณสมบัติของวัสดุ แอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตที่อัตรา ความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100.....	129
รูปที่ 5.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคั่นตัวกับคุณสมบัติ.....	131
รูปที่ 5.7	ตัวอย่างความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของการทดสอบหาค่า โมดูลัสคั่นตัว.....	133
รูปที่ 5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลติก คอนกรีต จากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตที่อัตรา ความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100.....	135
รูปที่ 5.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดกับ คุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจาก แรงดันด้านข้างแบบสถิตที่อัตราความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100.....	137
รูปที่ 5.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลติก คอนกรีต จากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต ณ อัตรา ความเครียดต่างๆ (a) 0.0006/s (b) 0.0017/s (c) 0.0056/s (d) 0.0167/s.....	139
รูปที่ 5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดกับ คุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจาก แรงดันด้านข้างแบบสถิต ณ อัตราความเครียดต่างๆ (a) 0.0006/s (b) 0.0017/s (c) 0.0056/s (d) 0.0167/s.....	141
รูปที่ 5.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียด ณ ความเค้นสูงสุดกับคุณสมบัติของวัสดุ แอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบ สถิตที่อัตราความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100.....	143

	หน้า
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนรอบของแรงกระทำ.....	145
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ b กับ อุณหภูมิ.....	145
รูปที่ 5.15 Digital Thermometer.....	152



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผิวทางในประเทศไทยแบ่งออกเป็น ผิวทางแบบแข็งเกร็ง (Rigid pavement) และผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible pavement) โดยส่วนใหญ่ของประเทศเป็นผิวทางแบบยืดหยุ่น วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่นจะใช้วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมในประเทศ และแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทเกรดการเจาะลึก ในอดีตผิวทางแบบยืดหยุ่นใช้ AC80/100 เป็นตัวเชื่อมประสานในการผลิต ต่อมาพบว่าผิวทางแบบยืดหยุ่นเกิดความเสียหายในรูปแบบต่างๆมากขึ้น เช่น การแตกร้าว การเสียวรูปอย่างถาวร เป็นต้น จึงมีการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ทำให้เกิดความเสียหาย ปัจจัยหลักที่พบ คือ กำลังของผิวทางมีค่าเสถียรภาพค่อนข้างต่ำไม่สามารถรองรับอุณหภูมิผิวทาง ปริมาณการจราจร และน้ำหนักของยานพาหนะที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก AC80/100 ที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานมีความแข็งแรงน้อยเกินไป จึงมีการนำเสนอให้เปลี่ยนตัวเชื่อมประสานเป็น AC60/70 ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน หลังจากมีการเปลี่ยนตัวเชื่อมประสานเป็น AC60/70 ปัจจุบันก็ยังพบว่าผิวถนนมีความเสียหายในรูปแบบต่างๆเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมไปถึงผลกระทบจากภาวะโลกร้อนที่มีความรุนแรงขึ้นทุกวัน ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะเปลี่ยนตัวเชื่อมประสานจาก AC60/70 มาเป็น AC40/50 ที่มีความแข็งแรงมากกว่าสำหรับการก่อสร้างผิวทางในอนาคต แต่มีข้อสังเกตว่าประเทศเพื่อนบ้าน เช่น มาเลเซีย ที่มีภูมิประเทศอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตร ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าประเทศไทยและมีปริมาณการจราจรใกล้เคียงกับประเทศไทยนั้นยังใช้ตัวเชื่อมประสาน AC 80/100 ในการก่อสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบเพื่อหาพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต ที่ใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 ในการผสม โดยทำการทดสอบ ณ อุณหภูมิต่างๆที่มักเกิดขึ้นบนผิวทางในประเทศ และทำการทดสอบที่อัตราความเครียดแตกต่างกัน รูปแบบการทดสอบจะใช้การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile test) แบบสถิตและพลวัต ร่วมกับการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined compression test) แบบสถิตและพลวัต ซึ่งสามารถหาความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบรูปแบบต่างๆได้ รวมไปถึงสามารถหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus) และการยุบตัวแบบถาวร (Permanent deformation) ที่ใช้ในการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นในปัจจุบัน ได้

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่เกิดจากผลกระทบของอุณหภูมิ อัตราความเครียดและประเภทของแอสฟัลต์ แล้วนำไปหาความสัมพันธ์กับรูปแบบความเสียหายที่พบบ่อยในประเทศไทย ได้แก่ การแตกร้าว (Cracking) และการเสียรูปร่างถาวร (Permanent deformation) หรือการเสียหายแบบร่องล้อ (Rutting)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางกลศาสตร์ (Mechanistic) ของส่วนผสมแอสฟัลต์ผสมร้อนประเภทแน่น (Hot Mixed Asphalt, HMA) โดยใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมและใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภท AC40/50 AC60/70 AC80/100 เป็นตัวเชื่อมประสาน ในการทดสอบเพื่อศึกษาคูณสมบัติทางกลศาสตร์จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดแตกต่างกัน สามารถแบ่งวัตถุประสงค์หลักที่ต้องการศึกษาได้ดังนี้

1. ทำการศึกษาพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต ด้วยการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตและพลวัต (Static and Dynamic Indirect tensile test, S-IDT and D-IDT) และการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตและพลวัต (Static and Dynamic Unconfined compression test, S-UC and D-UC)
2. เปรียบเทียบพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตระหว่างตัวเชื่อมประสาน AC40/50 AC60/70 AC80/100
3. วิเคราะห์หาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต
4. วิเคราะห์หาค่าการยุบตัวแบบถาวร (Permanent Deformation) ของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดสอบคูณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ด้วยการทดสอบค่าการเจาะลึก และค่าความหนืดเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ รวมถึงค่าความถ่วงจำเพาะเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสม

2. ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมรวมที่จำเป็นต่อการออกแบบส่วนผสม และเพื่อตรวจสอบคุณภาพของมวลรวม คือ ค่าความถ่วงจำเพาะรวมและการขีดสีแบบลอสแอนเจลิส

3. ออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์ผสมร้อนประเภทแน่นด้วยวิธีมาร์แชล (Marshall method)

4. เตรียมตัวอย่างโดยการบดอัดส่วนผสมด้วยเครื่องบดอัดโรตารีแบบซูเปอร์เพฟ (Superpave Gyrotory Compactor, SGC)

5. ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของ HMA ด้วยการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตและพลวัต (Static and Dynamic Indirect tensile test, S-IDT and D-IDT) ตามมาตรฐาน ASTM D 4867 และ ASTM D 4123 ตามลำดับ โดยการทดสอบจะทดสอบด้วยอัตราความเครียดและอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 1.1

6. ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของ HMA ด้วยการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตและพลวัต (Static and Dynamic Unconfined compression test, S-UC and D-UC) ซึ่ง D-UC จะทดสอบตามรายงานของ The National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) ฉบับที่ 465 ส่วน S-UC จะทำการทดสอบโดยใช้รูปแบบเดียวกับมาตรฐาน ASTM D 4867 และทั้งสองการทดสอบจะทดสอบด้วยอัตราความเครียดและอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 อัตราความเครียดและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงทางอ้อม

อัตราความเครียด (Strain rate) (ต่อวินาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	10	25	40	55
0.0250	x	x	x	x
0.0083	x	x	x	x
0.0025	x	x	x	x
0.0008	x	x	x	x
1 Hz Load frequencies and 1:9 Load duration	x	x	x	x

ตารางที่ 1.2 อัตราความเครียดและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง

อัตราความเครียด (Strain rate) (ต่อวินาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	10	25	40	55
0.0006	x	x	x	x
0.0017	x	x	x	x
0.0056	x	x	x	x
0.0167	x	x	x	x
1 Hz Load frequencies and 1:9 Load duration	x	x	x	x

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับงานวิจัยการศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิของแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 มีแนวทางในการศึกษาและดำเนินงานเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้แก่

- 1 ค้นคว้า และทำการศึกษาเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น ชนิดและลักษณะของผิวทาง การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของแอสฟัลต์ซีเมนต์ การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชล การทดสอบพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุผิวทางแบบยึดหยุ่น เป็นต้น
- 2 กำหนดโครงร่างของเนื้อหา (Framework) วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย เพื่อจัดทำเป็นข้อเสนอโครงการ (Project proposal)
- 3 ทำการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลและเตรียมตัวอย่างด้วยเครื่องบดอัดไจราทอรีแบบซูเปอร์เพฟ (Superpave Gyrotory Compactor, SGC) จากนั้นทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ผสมร้อนประเภทแน่น (HMA)
- 4 วิเคราะห์ และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ

1.6 ปัญหาและอุปสรรค

1. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบมีผู้ใช้เป็นจำนวนมากทำให้ต้องรอเวลาในการขอใช้เครื่องมือการทดสอบ ทำให้แผนการดำเนินงานที่วางไว้ต้องล่าช้าออกไป
2. เกิดความล่าช้าในการจัดซื้อและจัดส่งגעבודความเครียด ทำให้แผนการดำเนินงานที่วางไว้ต้องล่าช้าออกไป
3. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบมักเกิดการชำรุดเสียหาย เนื่องจากเครื่องมือมีอายุการใช้งานมาเป็นเวลานาน ทำให้ต้องรอเวลาในการซ่อมแซมเครื่องมือเป็นเวลานาน

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

จากขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยต่างๆ เช่น การรวบรวมองค์ความรู้ การทดสอบวัสดุเบื้องต้น การออกแบบส่วนผสม การทดสอบพฤติกรรมทางด้านกำลัง และการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบ ประโยชน์ที่ได้รับจากการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

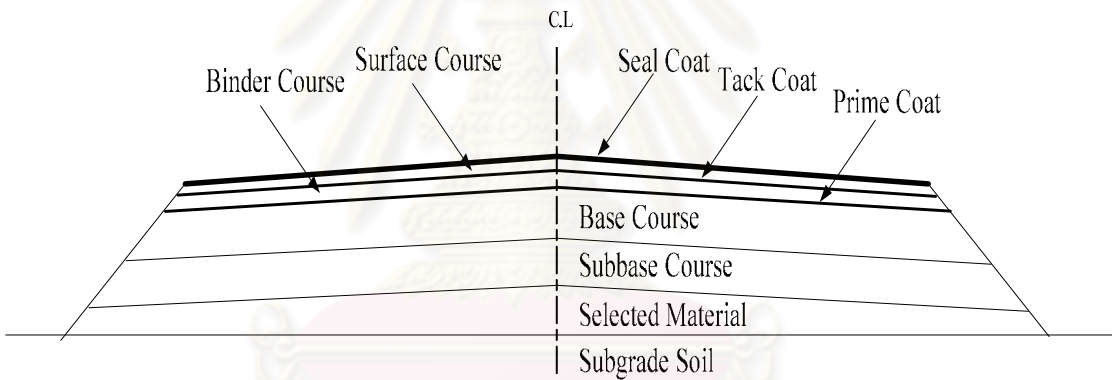
1. สามารถนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ป็นองค์ประกอบในการตัดสินใจเปลี่ยนชนิดของตัวเชื่อมประสาน ประเภท AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 สำหรับการผสมแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่นได้
2. สามารถนำผลการทดสอบไปใช้ในการวิเคราะห์ด้านวิศวกรรมผิวทาง โดยเข้าใจถึงพฤติกรรมเชิงกลของผิวทางแอสฟัลต์ผสมร้อนประเภทแน่น (HMA) ที่ใช้ตัวเชื่อมประสานแตกต่างกันในการผสม และถูกแรงกระทำที่ระดับต่างๆ ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตสามารถนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์การเกิดรอยแตกร้าว (Cracking) ของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้เป็นวัสดุผิวทาง ส่วนการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัตทำให้ทราบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการออกแบบโครงสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่น และการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตและพลวัตสามารถนำผลการทดสอบไปใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้เป็นวัสดุผิวทาง คือ การยุบตัวแบบถาวรหรือการเกิดร่องล้อ (Permanent deformation or Rutting)
3. เข้าใจถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย เช่น การรวบรวมองค์ความรู้ การวางแผนงาน และการแก้ปัญหา เป็นต้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavements)

รูปแบบของผิวทางแบบยืดหยุ่นเป็นระบบที่แบ่งออกเป็นชั้น (Layered system) โดยวัสดุที่มีคุณภาพดีกว่าจะอยู่ทางด้านบน เนื่องจากมีความเข้มข้นของความเค้นเกิดขึ้นที่ด้านบนมากกว่า และใช้วัสดุที่มีคุณภาพด้อยกว่าในส่วนด้านล่างของผิวทางที่มีความเข้มข้นของความเค้นน้อยกว่า ตามหลักเกณฑ์ในการออกแบบนี้จึงสามารถใช้วัสดุท้องถิ่นร่วมกับการใช้วัสดุที่มีคุณภาพดีได้ ทำให้สามารถออกแบบผิวทางได้อย่างประหยัด เพราะวัสดุท้องถิ่นมักมีราคาถูกและหาง่ายกว่า



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางผิวทางแบบยืดหยุ่น

ส่วนประกอบของผิวทางแบบยืดหยุ่นนั้นสามารถแบ่งออกเป็นชั้นดังแสดงในรูปที่ 2.1 ได้ดังนี้

ชั้นผิวทาง (Surface course) จะอยู่ด้านบนสุดของผิวทางแบบยืดหยุ่น ส่วนมากชั้นผิวทางจะก่อสร้างด้วยแอสฟัลต์ผสมร้อน (Hot Mix Asphalt or HMA) ที่มีความหนาแน่นมาก ในส่วนสมบัติของผิวทางนั้นต้องมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากการจราจรที่เกิดขึ้น รวมไปถึงต้องมีความราบเรียบและความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid resistance) นอกจากนี้ชั้นผิวทางต้องมีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำ เพื่อป้องกันโครงสร้างผิวทางไม่ให้ถูกผลกระทบที่จะเกิดจากน้ำที่ซึมผ่านเข้ามา

ชั้นพื้นทางแอสฟัลต์ (Binder course or Asphalt base course) เป็นชั้นที่อยู่ด้านล่างของชั้นผิวทาง มีเหตุผลหลักสองประการที่จำเป็นต้องใส่ชั้นทางนี้ไว้ ประการแรกคือแอสฟัลต์ผสมร้อน

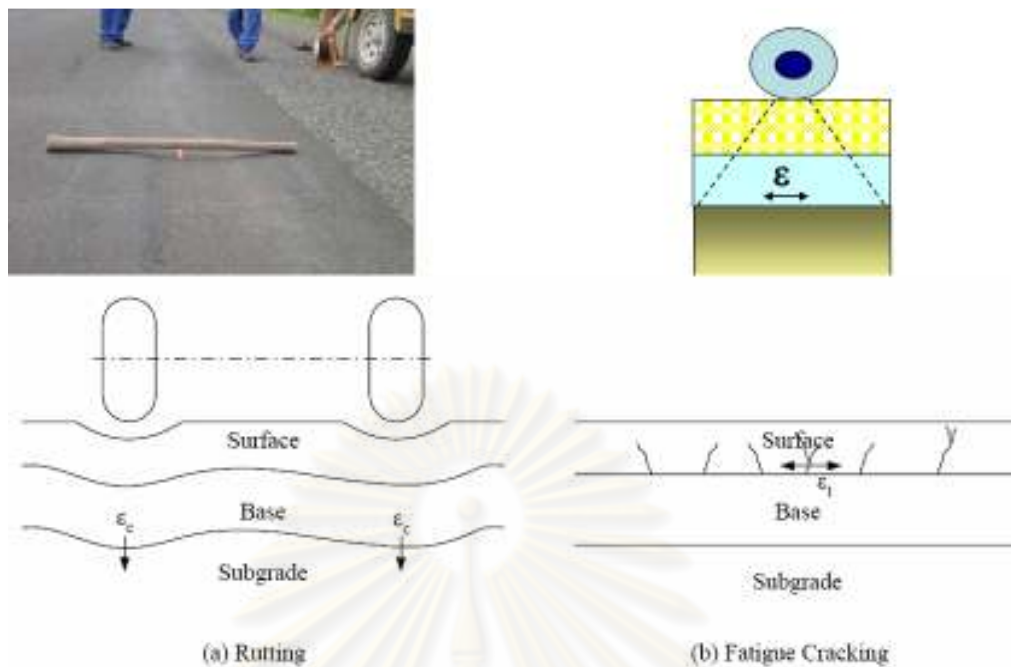
นั้นมีความหนาเกินไปที่จะถูกบดอัดให้แน่นภายในครั้งเดียว จึงจำเป็นต้องทำให้เป็นสองชั้น ประการที่สองคือในชั้นพื้นทางแอสฟัลต์นี้ประกอบไปด้วยมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีปริมาณแอสฟัลต์ที่น้อยกว่า รวมถึงไม่ต้องการคุณสมบัติที่เท่าชั้นผิวทางจึงสามารถใช้ชั้นพื้นทางแอสฟัลต์นี้แทนชั้นผิวทางได้บางส่วน เพื่อให้การออกแบบนั้นมีความประหยัดมากขึ้น แต่ถ้าชั้นพื้นทางแอสฟัลต์มีความหนาเกินกว่า 7.5 เซนติเมตรแล้ว จำเป็นที่จะต้องแบ่งชั้นพื้นทางแอสฟัลต์นี้ออกเป็นอีกสองชั้นย่อย

ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง (Base course and Subbase course) ชั้นพื้นทางเป็นชั้นของวัสดุที่อยู่ต่ำกว่าชั้นผิวทางหรือชั้นพื้นทางแอสฟัลต์ ชั้นพื้นทางประกอบไปด้วยหินหรือกากโลหะที่ถูกทำให้แตกละเอียดหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีความแข็งแรงคงทน ในส่วนของชั้นรองพื้นทางจะอยู่ใต้ชั้นพื้นทาง ซึ่งเหตุผลในการใช้วัสดุที่แตกต่างกันสองชนิดนี้ก็เพื่อความคุ้มค่า แทนที่จะใช้วัสดุที่มีราคาแพงในการทำชั้นพื้นทาง เราสามารถใช้วัสดุท้องถิ่นที่หาได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าในการทำชั้นรองพื้นทางที่อยู่ด้านบนชั้นดินเดิม

ชั้นดินเดิม (Subgrade course) ส่วนบนสุดของชั้นดินเดิมซึ่งมีความหนาประมาณ 15 เซนติเมตรนั้น ควรที่จะมีการบดอัดให้แน่นเสียก่อน เพื่อให้ได้ความหนาแน่นของดินที่ใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นสูงสุดที่เป็นไปได้เนื่องจากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ โดยชั้นดินเดิมที่ถูกบดอัดนี้อาจเป็นชั้นของดินที่มีอยู่แล้วหรืออาจเป็นชั้นของวัสดุคัดเลือกก็ได้

2.2 ความเสียหายของผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement Distress)

ในปัจจุบันการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นเพื่อรองรับปริมาณการจราจรที่คาดว่าจะมาใช้งานในอนาคตนั้น ได้มีการออกแบบโดยสนใจพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุและความหนาของแต่ละชั้นทางเป็นหลัก ซึ่งมีแนวความคิดว่าผิวทางที่ออกแบบจะไม่เกิดความเสียหายเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในช่วงอายุการใช้งาน ความเสียหายในผิวทางแบบยืดหยุ่นมีปัจจัยหลักมาจากปริมาณการจราจร สภาพแวดล้อม และคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต โดยความเสียหายที่พบบ่อยในผิวทางแบบยืดหยุ่น ได้แก่ การแตกร้าว (Cracking) และการเสียรูปอย่างถาวร (Permanent deformation)



รูปที่ 2.2 รูปแบบความเสียหายและความเครียดวิกฤตในผิวทางแบบยืดหยุ่น (Failure modes and critical strains in flexible pavement) (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement Design)

2.2.1 การแตกร้าว (Cracking)

การแตกร้าวที่เกิดขึ้นในผิวทางแบบยืดหยุ่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. การแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) คือ รอยแตกร้าวลักษณะเหมือนหนังจระเข้ (Alligator cracking) มีสาเหตุมาจากความเสียหายแบบการล้าของผิวแอสฟัลติกคอนกรีตที่อยู่ภายใต้น้ำหนักจราจรแบบซ้ำซาก (Repeated traffic loading) ซึ่งจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้น ณ ตำแหน่งผิวล่างของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีต ดังนั้นรอยแตกร้าวจะเริ่มจากผิวล่างของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีตไล่ขึ้นมาที่ผิวบน (bottom-up cracking)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 รอยแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement Design)

2. การแตกร้าวตามแนวยาว (Longitudinal cracking) คือ รอยแตกร้าวที่ขนานกับแนวทางเดินรถของถนน มีสาเหตุมาจากหน่วยแรงดึงบริเวณดอกยางของล้อรถที่กระทำต่อผิวบนของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีต ทำให้ความเสียหายลักษณะนี้จะเกิดรอยแตกร้าวจากผิวบนลงไปหาผิวล่างของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีต (top-down cracking)



รูปที่ 2.4 รอยแตกร้าวตามแนวยาว (Longitudinal cracking) (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement Design)

3. การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal cracking) หรือการแตกร้าวตามแนวขวาง (Transverse cracking) มีสาเหตุจากการที่อุณหภูมิลดต่ำลงส่งผลให้ผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต

หดตัว ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในชั้นแอสฟัลติกคอนกรีต เมื่อกำลังรับแรงดึงของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดรอยแตกกว้างบริเวณที่มีการหดตัว



รูปที่ 2.5 รอยแตกกว้างเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal cracking) (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement Design)

2.2.2 การเสียรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation)

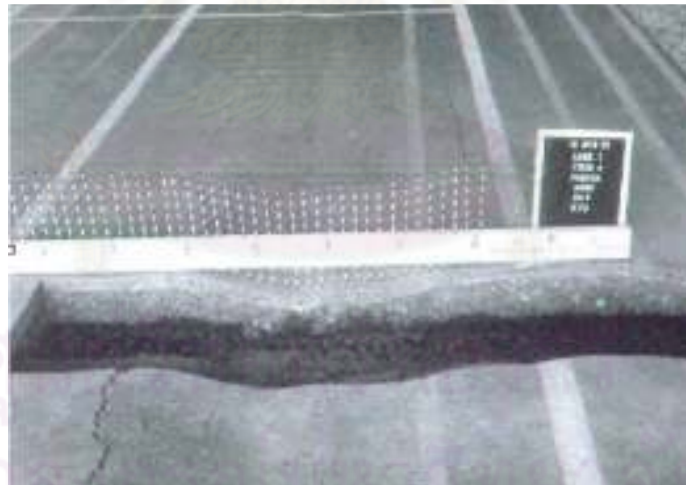
การเสียรูปอย่างถาวรของผิวทางแบบยึดหยุ่นมักพบเป็นลักษณะรอยร่องล้อ (Rutting) คือ ผิวทางจะมีการยกตัวขึ้นทางด้านข้างตลอดแนวของรอยร่องล้อ มีสาเหตุมาจากกำลังรับแรงอัดของวัสดุที่ใช้ทำเป็นชั้นทางมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงอัดจากน้ำหนักจากรถ โดยรอยร่องล้อที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. รอยร่องล้อเนื่องจากส่วนผสม (Mix rutting) มีสาเหตุมาจากการออกแบบส่วนผสมหรือขั้นตอนการบดอัดผิวถนนมีความผิดพลาด เมื่อมีน้ำหนักจากรถมากกระทำผิวถนนจึงเกิดการยุบตัวตามแนวของล้อรถที่กระทำ โดยที่ชั้นดินด้านล่างไม่ได้เกิดการยุบตัวตามไปด้วย รอยร่องล้อแบบนี้จะแคบขนาดประมาณล้อรถที่มากกระทำและมีลักษณะเป็นลูกคลื่นโดยท้องคลื่นคือบริเวณที่ตรงกับล้อรถพอดี



รูปที่ 2.6 รอยร่องล้อเนื่องจากส่วนผสม (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement Design)

2. รอยร่องล้อเนื่องจากชั้นดินเดิม (Subgrade rutting) มีสาเหตุมาจากชั้นทางใต้ชั้นผิวทางเกิดการยุบตัวทำให้ชั้นผิวทางเกิดการทรุดตัวลงไปร่องของชั้นทางด้านล่าง รอยร่องล้อแบบนี้จะมีลักษณะเป็นแอ่งบริเวณกว้าง



รูปที่ 2.7 รอยร่องล้อเนื่องจากชั้นดินเดิม (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement Design)

2.3 ความเค้นและความเครียดวิกฤตของผิวทางแบบยืดหยุ่น (Critical stress and strain of flexible pavement)

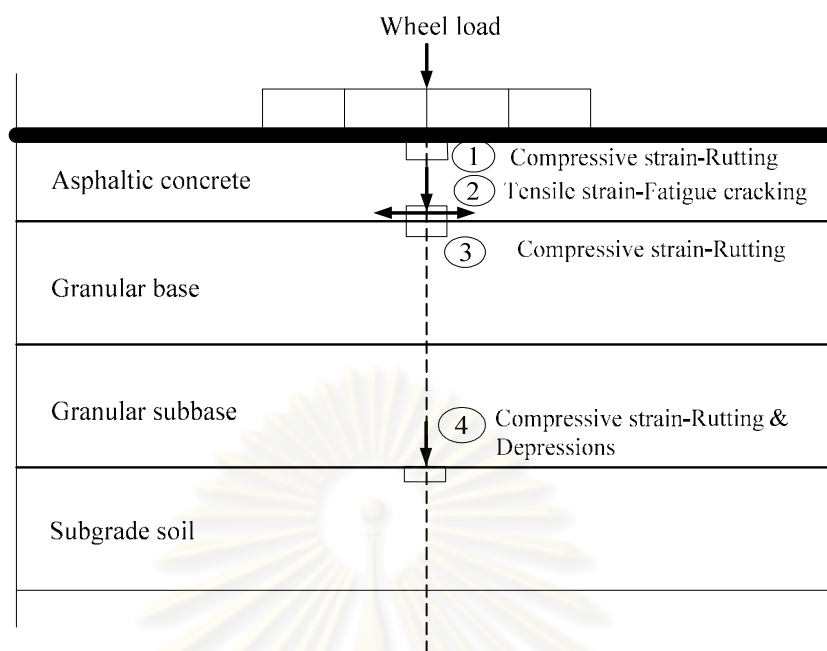
โครงสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่นประกอบด้วยชั้นทางหลายชั้น แต่ละชั้นทางใช้วัสดุที่แตกต่างกันในการก่อสร้าง ดังนั้นเมื่อมีแรงภายนอกจากล้อรถมากระทำจึงทำให้เกิดความเค้นหรือ

ความเครียดวิกฤตแตกต่างกันในแต่ละชั้นทาง ชั้นทางที่ก่อสร้างด้วยวัสดุที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Bound material) เช่น แอสฟัลต์ผสมร้อน (Hot mixed asphalt) ความเครียดวิกฤตที่เกิดขึ้นมักจะเป็นความเครียดดึงบริเวณขอบล่างของชั้นทาง ส่วนชั้นทางที่ก่อสร้างด้วยวัสดุที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Unbound material) เช่น หินคลุก (Crushed rock) ความเครียดวิกฤตที่เกิดขึ้นมักจะเป็นความเครียดอัดบริเวณขอบบนของชั้นทาง

วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่นมักมีความทนทานต่อความเค้นได้ดีกว่าความเครียด และเมื่อวัสดุเกิดความเสียหายพบว่าความเสียหายเนื่องจากความเครียดมีความแปรผันต่ำกว่าความเค้น ดังนั้นในการออกแบบผิวทางแบบยึดหยุ่นด้วยวิธีออกแบบเชิงวิเคราะห์จึงใช้ความเครียดเป็นตัวชี้วัดความเสียหายในแต่ละชั้นทาง ถ้าความเครียดมีค่ามากกว่าขีดจำกัดของวัสดุจะส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้น โดยรูปแบบความเสียหายขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของความเครียดที่เกิดขึ้น ซึ่งการแตกร้าวเนื่องจากความล้าเป็นผลจากความเครียดดึงและรอยร่องล้าเป็นผลจากความเครียดอัด ดังนั้นในการออกแบบผิวทางแบบยึดหยุ่นจึงใช้ความเครียดดึงและความเครียดอัดเป็นเกณฑ์ในการกำหนดความเสียหาย

ความเค้นหรือความเครียดในโครงสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่นที่เกิดจากน้ำหนักของล้อรถที่มากดทับสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ รูปแบบที่หนึ่งคือความเค้นหรือความเครียดในแนวตั้งที่กดลงบนแต่ละระดับของชั้นทางจะส่งผลให้ชั้นทางมีความหนาแน่นมากขึ้นและเกิดรอยร่องล้า รูปแบบที่สองคือความเค้นหรือความเครียดในแนวตั้งที่ทำให้โครงสร้างผิวทางเกิดความไม่เสถียรโดยเฉพะอย่างยิ่งเมื่อน้ำหนักจากล้อรถมีค่าสูง รูปแบบสุดท้ายคือความเค้นหรือความเครียดในแนวรัศมีที่เกิดจากการแอนตัวของผิวถนนบริเวณขอบล่างของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีต ความเค้นหรือความเครียดในแนวรัศมีนี้จะทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นจากผิวล่างของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีตไล่ขึ้นไปหาผิวบน รูปที่ 2.8 แสดงตำแหน่งของความเค้นหรือความเครียดวิกฤตในโครงสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่นเมื่อมีแรงจากล้อรถมากระทำ (FHWA, 1987)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 ความเค้นและความเครียดวิกฤตของผิวทางแบบยืดหยุ่น (Critical stress and strain of flexible pavement) (เอกสารประกอบรายวิชา Pavement Design)

ตำแหน่งที่ 1 แสดงความเครียดอัดในแนวตั้งบริเวณผิวบนของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีต ซึ่งรับน้ำหนักจากล้อรถโดยตรง แต่ผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตมีความแข็งแรงสูงจึงดูดซับความเค้นที่เกิดขึ้นไว้ส่วนใหญ่ แต่ถ้าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงกว่ากำลังของวัสดุก็จะทำให้เกิดความเครียดอัดส่งผลให้วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตเกิดการยุบตัว ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรหรือรอยร่องล้อ

ตำแหน่งที่ 2 แสดงความเครียดดึงในแนวรัศมีบริเวณขอบล่างของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีตที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นผิวทางและชั้นพื้นทาง ความเครียดดึงที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการที่ผิวทางเกิดการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักรถที่มากกระทำ หลังจากที่ผิวทางถูกน้ำหนักรถกระทำเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการสะสมความเครียดดึงขึ้นจนกระทั่งแอสฟัลติกคอนกรีตไม่สามารถรองรับได้ แล้วเกิดเป็นรอยแตกร้าวเนื่องจากความล้า

ตำแหน่งที่ 3 แสดงความเครียดอัดในแนวตั้งบริเวณขอบบนของชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง ความเครียดอัดที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการถ่ายน้ำหนักของล้อรถผ่านชั้นผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตลงมาทำให้ค่าความเค้นมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่ 1 แต่วัสดุที่ใช้ก่อสร้างชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทางมีคุณภาพต่ำกว่าวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต ดังนั้นความเครียดอัดที่เกิดขึ้นจึงอาจเกินกำลังของวัสดุทำให้สามารถเกิดการเสียรูปอย่างถาวรได้

ตำแหน่งที่ 4 แสดงความเครียดอัดในแนวตั้งบริเวณขอบบนของชั้นดินเดิม ซึ่งชั้นดินเดิมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำมากเมื่อเทียบกับชั้นทางอื่น ดังนั้นความเครียดอัดในแนวตั้งที่เกิดขึ้นจึงอาจ

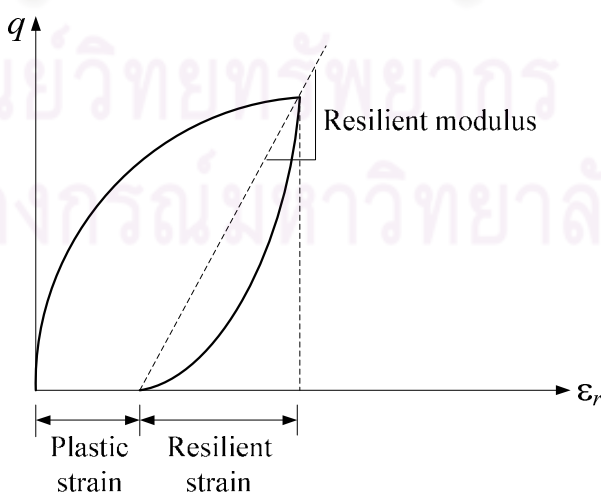
ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรซึ่งจะนำไปสู่การเกิดรอยร่องล้อบริเวณผิวบนของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีตหรือที่เรียกว่ารอยร่องล้อเนื่องจากชั้นดินเดิม (Subgrade rutting)

2.4 ลักษณะเฉพาะของแอสฟัลติกคอนกรีต (Characteristics of asphaltic concrete)

ลักษณะเฉพาะของแอสฟัลติกคอนกรีตที่สำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่น มีสองลักษณะคือ โมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus, M_R) ซึ่งบอกถึงความแข็งแรงของแอสฟัลติกคอนกรีต และการเสียรูปอย่างถาวรหรือรอยร่องล้อ ซึ่งวิธีสถาบันแอสฟัลต์ (Asphalt Institute Method) ใช้ลักษณะเฉพาะทั้งสองนี้เป็นเกณฑ์ความเสียหาย (Failure criteria)

2.4.1 โมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus, M_R)

ในงานวิศวกรรมทางโมดูลัสคืนตัวเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ สำหรับใช้ในการออกแบบผิวทางหรือใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุ เนื่องจากในช่วงเวลาสั้น ๆ ความเค้นที่เกิดขึ้นในผิวทางมักมีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับกำลังของวัสดุผิวทาง วัสดุจึงสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้มากหลังจากถูกแรงกระทำ ถึงแม้ปฏิกิริยาวัสดุการทางจะมีพฤติกรรมอีลาสติกที่ไม่สมบูรณ์ เพราะมักมีความเครียดถาวร (Permanent strain) หรือความเครียดแบบพลาสติก (Plastic strain) เกิดขึ้นหลังจากถูกแรงกระทำก็ตาม ซึ่งโมดูลัสคืนตัวเป็นโมดูลัสยืดหยุ่นประเภทหนึ่งที่เป็นค่าโมดูลัสในส่วนที่วัสดุคืนตัว (Resilient strain) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 นิยามของโมดูลัสการคืนตัว (Definition of resilient modulus)

จากรูปที่ 2.9 ค่าโมดูลัสคืนตัวเป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress, q) กับความเครียดคืนตัว (Resilient strain, ϵ_r) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

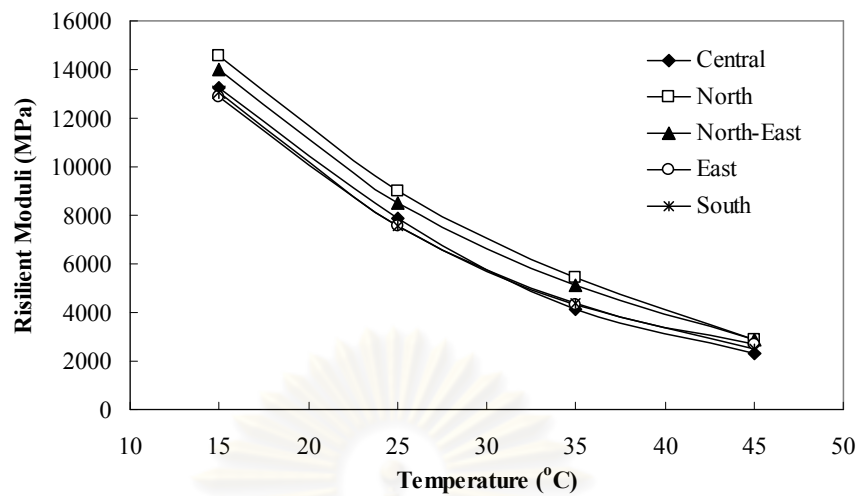
$$M_R = \frac{q}{\epsilon_r} \quad (2.1)$$

มาตรฐาน ASTM D 4123 ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ทำการพัฒนามาจากสมการที่ 2.1 ซึ่งสามารถใช้คำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวด้วยผลจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile test) ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$M_R = \frac{P(\nu + 0.2734)}{\delta t} \quad (2.2)$$

เมื่อ P คือ แรงกระทำแบบพลศาสตร์ (Dynamic load) ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) โดยทั่วไปสมมติให้มีค่าประมาณ 0.35 (ASTM D 4123) δ คือ การเสียรูปแบบคืนตัวทั้งหมด (Total recoverable deformation) และ t คือ ความหนาของตัวอย่าง (Specimen thickness)

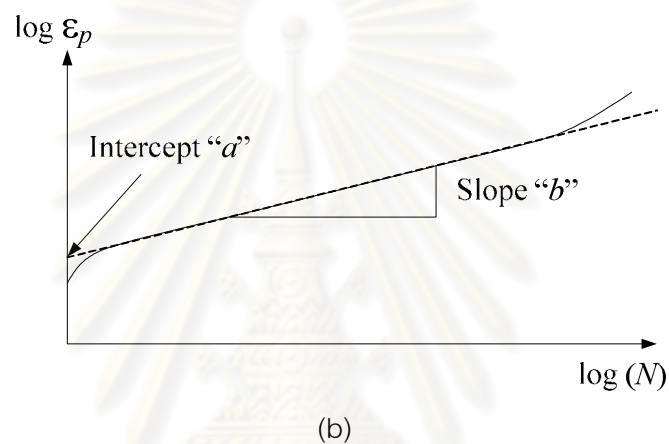
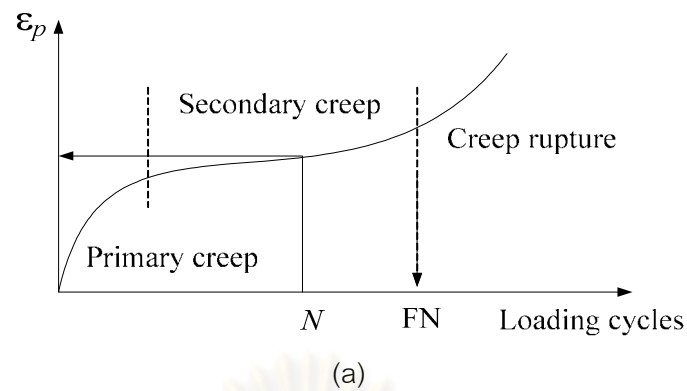
ในปีพ.ศ.2546 พรหมศรและคณะได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงดึงทางอ้อมและโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตในประเทศไทย ด้วยการเก็บตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตมาจากภาคต่างๆของประเทศ ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคใต้ แล้วทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 4 อุณหภูมิ ได้แก่ 15 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต ณ อุณหภูมิต่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยโมดูลัสคืนตัวจากภาคต่างๆของประเทศไทย (Result of the average of resilient modulus: five regions in Thailand) (Phromsorn *et al.*, 2003)

2.4.2 การเสียรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation)

วัสดุชั้นทางเมื่อถูกกระทำจากแรงภายนอกจะเกิดความเครียดอัดขึ้นค่าหนึ่ง และเมื่อถูกแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาจะเกิดการสะสมความเครียดจนกลายเป็นการเสียรูปอย่างถาวรหรือรอยร่องลือคือ ผิวทางจะมีการยกตัวขึ้นทางด้านข้างตลอดแนวของรอยร่องลือ โดยทั่วไปรอยร่องลือจะเกิดในทิศทางขนานกับแนวทางเดินรถ การเสียรูปอย่างถาวรสามารถอธิบายด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรสะสม (Cumulative permanent strain) หรือความเครียดพลาสติก (Plastic Strain, ϵ_p) กับจำนวนรอบของแรงกระทำ (Number of loading cycles, N) ดังแสดงในรูปที่ 2.11(a) จากลักษณะของกราฟสามารถวิเคราะห์ได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการคืบเริ่มต้น (Primary creep) เป็นช่วงที่ผิวทางเกิดความเครียดถาวรมากในขณะที่จำนวนรอบของแรงกระทำยังมีค่าน้อย การคืบช่วงที่สอง (Secondary creep) เป็นช่วงที่ความเครียดถาวรที่เกิดขึ้นค่อนข้างแปรผันตรงกับจำนวนรอบของแรงกระทำที่มากขึ้น จนกระทั่งการคืบช่วงที่สาม (Creep rupture) เป็นช่วงที่แสดงว่าผิวทางเริ่มเกิดความเสียหาย โดยจุดเปลี่ยนความชันระหว่างช่วงที่สองและสามแสดงถึงค่าจำนวนการไหล (Flow number, FN) ซึ่งถ้าค่า FN มีค่ามากแสดงว่าผิวทางสามารถทนต่อจำนวนรอบของแรงที่มากกระทำได้สูง ในส่วนการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะใช้สมการที่ 2.3 ซึ่งพิสูจน์จากสมการเลขยกกำลัง (Power function) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดพลาสติกกับจำนวนรอบของแรงกระทำที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.11 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรสะสมกับจำนวนรอบของแรงกระทำ (Typical relationship between total cumulative permanent strain and loading cycles)
(b) ค่าคงที่สมการถดถอย a และ b (Regression constants a and b)

$$\varepsilon_p = aN^b \quad (2.3)$$

โดยที่ a และ b คือ ค่าคงที่ ซึ่งถ้าค่า b มีค่าน้อยแสดงว่าความชันของกราฟในรูปที่ 2.11(b) มีค่าต่ำ นั่นคือ ผิวทางจะสามารถทนต่อจำนวนรอบที่มากกระทำได้มาก

2.5 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement)

แอสฟัลต์จะเป็นของเหลวหนืดหรือของแข็งยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับสภาวะไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นจึงสามารถละลายได้ในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) แอสฟัลต์เปลี่ยนรูปได้ยากเมื่ออยู่ในอุณหภูมิต่ำและสามารถเปลี่ยนรูปได้อย่างช้าๆเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จึงกล่าวได้ว่า

แอสฟัลต์มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเหนียวยืดหยุ่น (Visco-Elastic material) คือ ที่อุณหภูมิต่ำเป็นของแข็งยืดหยุ่น ส่วนที่อุณหภูมิสูงเป็นของเหลวหนืด และที่อุณหภูมิห้องมีลักษณะเป็นกึ่งของแข็ง

แอสฟัลต์ที่นำมาใช้ในการก่อสร้างผิวทางนั้นแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cements) แอสฟัลต์อิมัลชัน (Emulsified asphalts) และคัทแบคแอสฟัลต์ (Cutback asphalts)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) เป็นวัสดุประสานสีน้ำตาลแก่ถึงดำ มีบิทูเมน (Bitumen) เป็นองค์ประกอบหลัก สามารถผลิตได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมดิบหรือพบได้จากการทับถมกันของแอสฟัลต์ในธรรมชาติ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้งานส่วนมากมาจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมดิบ ซึ่งเป็นกากที่ได้จากการกลั่นแล้วนำไปผลิตเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทต่างๆ

แอสฟัลต์ซีเมนต์ถูกนำมาใช้ในการผลิตแอสฟัลต์ผสมร้อน (Hot mix asphalt) เป็นส่วนใหญ่เพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้างถนน แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาใช้ในการผลิตแอสฟัลต์ผสมร้อนนั้น มีอยู่หลายเกรด ซึ่งแบ่งเกรดตามลักษณะความข้นเหลวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ระบบการจัดเกรดของแอสฟัลต์ซีเมนต์มีอยู่ 3 ระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ระบบเกรดการเจาะลึก (Penetration Grading System) ระบบเกรดความหนืด (Viscosity Grading System) และระบบซูเปอร์เพฟ (Superpave Grading System)



รูปที่ 2.12 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) (<http://cm.intelsteps.com>)

2.6 คุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์

สำหรับวัตถุประสงค์ทางวิศวกรรมและการก่อสร้าง คุณสมบัติหรือลักษณะเฉพาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นสิ่งสำคัญ ได้แก่ ความข้นเหลว ความบริสุทธิ์ และความปลอดภัย

2.6.1 ความชื้นเหลว (Consistency)

แอสฟัลต์เป็นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic materials) คือ มีลักษณะเหลวเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นและแข็งเมื่อถูกทำให้เย็นลง ความชื้นเหลวเป็นค่าที่ใช้อธิบายความหนืดหรือระดับความเป็นของไหล (Degree of fluidity) ของแอสฟัลต์ที่แต่ละอุณหภูมิ ความชื้นเหลวของแอสฟัลต์แปรผันตามอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อต้องการเปรียบเทียบลักษณะความชื้นเหลวของแอสฟัลต์แต่ละชนิดจึงจำเป็นต้องมีการระบุว่า จะเปรียบเทียบโดยการใช้อุณหภูมิที่เท่ากันหรือใช้ความชื้นเหลวที่เท่ากัน บางข้อกำหนดที่ใช้ในการจัดเกรดแอสฟัลต์จะอ้างอิงจากความชื้นเหลวที่อุณหภูมิมาตรฐาน และในบางข้อกำหนดการจัดเกรดแอสฟัลต์จะอ้างอิงจากอุณหภูมิที่ต้องใช้เพื่อจะทำให้แอสฟัลต์มีความชื้นเหลวตามมาตรฐานที่กำหนด

เมื่อแอสฟัลต์ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆสัมผัสกับอากาศ ณ ระดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสมร้อนของมวลรวมกับแอสฟัลต์จะทำให้แอสฟัลต์เสื่อมสภาพโดยมีลักษณะแข็ง หมายความว่า ความชื้นเหลวหรือความหนืดของแอสฟัลต์จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความแข็ง (Stiffness) เพิ่มมากขึ้นเกินกว่าขีดจำกัดที่ยอมรับได้จะส่งผลให้เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความแข็งตัวของแอสฟัลต์ ดังนั้นในกระบวนการผสมร้อนจึงต้องระมัดระวังในการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการผสม ความแข็งตัวของแอสฟัลต์ที่มากเกินไปจะเป็นสาเหตุให้ผิวทางแอสฟัลต์เกิดรอยแตกร้าวก่อนเวลาอันควร ซึ่งจะทำให้ผิวทางแอสฟัลต์ที่ก่อสร้างเสร็จแล้วมีอายุการใช้งานสั้นลง

2.6.2 ความบริสุทธิ์ (Purity)

แอสฟัลต์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมดิบมีปิทูเมนเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถละลายได้ในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) มากกว่าร้อยละ 99.5 ส่วนที่เหลือซึ่งเป็นส่วนน้อยมักจะเป็นสารอนินทรีย์และสารที่ไม่บริสุทธิ์เมื่อนำไปละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์จะไม่สามารถละลายได้ ถ้าแอสฟัลต์ที่นำมาใช้งานมีความไม่บริสุทธิ์จะส่งผลต่ออายุการใช้งานของถนน เช่น ทำให้เกิดการหลุดร่อน (Ravelling) เร็วกว่าปกติหรือทำให้วัสดุมวลรวมเกิดการแยกตัวจากแอสฟัลต์ตกไปด้านล่าง (Segregation) เป็นต้น

2.6.3 ความปลอดภัย (Safety)

แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิสูงมากจะเดือดเป็นฟองซึ่งเป็นอันตราย จึงมีข้อกำหนดว่าถ้าอุณหภูมิสูงไม่เกิน 175 องศาเซลเซียส แอสฟัลต์ต้องไม่เดือดเป็นฟอง ปกติแอสฟัลต์ที่ผลิตจากการกลั่นจะปราศจากความชื้นหรือน้ำ อย่างไรก็ตามถึงบรรจุที่ใช้ในการขนส่งแอสฟัลต์อาจมีความชื้นอยู่ เมื่อทำการบรรจุแอสฟัลต์ที่มีอุณหภูมิสูงลงไปจะทำให้ น้ำที่มีอยู่กลายเป็นไอซึ่งไอน้ำจะทำให้แอสฟัลต์เดือดเป็นฟอง

แอสฟัลต์เมื่อถูกให้ความร้อนสูงถึงอุณหภูมิหนึ่งจะทำให้เกิดไอระเหยของแอสฟัลต์ ถ้าไอระเหยสัมผัสกับประกายไฟจะส่งผลให้เกิดไฟลุกวามขึ้นเหนือผิวของแอสฟัลต์ อุณหภูมิที่สามารถทำให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวเรียกว่าจุดวามไฟ (Flash point) ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยจุดวามไฟต้องมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการผสม

2.7 ข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement Specification)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาใช้งานมักไม่ได้มาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน เช่น ได้จากแอสฟัลต์ตามธรรมชาติ หินแอสฟัลต์ ทะเลสาบแอสฟัลต์ และแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากการกลั่น ดังนั้นแอสฟัลต์ซีเมนต์จึงมีองค์ประกอบทั้งสารอินทรีย์และสารอินทรีย์แตกต่างกัน ส่งผลให้มีคุณภาพแตกต่างกันตามไปด้วย ดังนั้นข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์จึงถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้ควบคุมคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ สามารถแบ่งข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ข้อกำหนดเกรดการเจาะลึก ข้อกำหนดเกรดความหนืด และข้อกำหนดแอสฟัลต์เชื่อมประสานเกรดสมรรถนะ

2.7.1 ข้อกำหนดเกรดการเจาะลึก (Penetration-Graded Specification) (ASTM D 946, AASHTO M 20)

ข้อกำหนดเกรดการเจาะลึกถูกคิดขึ้นในปี ค.ศ. 1947 เพื่อใช้ควบคุมคุณภาพของแอสฟัลต์ และตั้งแต่ค่าการเจาะลึกถูกนำมาเป็นปัจจัยในการจัดเกรดของแอสฟัลต์ ข้อกำหนดนี้จึงเป็นที่รู้จักกันในชื่อว่าข้อกำหนดเกรดการเจาะลึก (Penetration Grading Specification)

ระบบการจัดเกรดด้วยค่าการเจาะลึกจะใช้ค่าการเจาะลึกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสในการจัดเกรดของแอสฟัลต์ โดยจะใช้แอสฟัลต์ที่ยังไม่ได้ผ่านการเร่งอายุมาก่อน ตัวอย่างเช่น เกรด 85/100 คือ แอสฟัลต์ที่มีค่าการเจาะลึกอยู่ระหว่าง 8.5 ถึง 10 มิลลิเมตรเป็นต้น เกรดการเจาะลึก

ที่นุ่มกว่า เช่น เกรด 200/300 เมื่อเอานิ้วกดที่อุณหภูมิก่อนจะเกิดรอยบุ๋มที่ผิวหน้าของแอสฟัลต์ และเกรดการเจาะลึกที่แข็งกว่า เช่น เกรด 40/50 เมื่อเอานิ้วกดที่อุณหภูมิก่อนจะเกิดเพียงรอยนิ้วมือที่ผิวหน้าของแอสฟัลต์เท่านั้น

ข้อดีและจุดอ่อนของข้อกำหนดเกรดการเจาะลึก

แม้ว่าข้อกำหนดเกรดการเจาะลึกจะให้ความหมายในการประมาณความแข็ง (Stiffness) ของแอสฟัลต์ได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่บางประการ ประการแรกคือค่าการเจาะลึกเป็นการทดสอบเชิงประสบการณ์ที่ใช้ในการวัดการรวมตัวกันของพฤติกรรมความเหนียวและความยืดหยุ่นของแอสฟัลต์ ผลที่ได้จากการทดสอบเชิงประสบการณ์จะต้องนำไปหาความสัมพันธ์กับสมรรถนะของผิวทางเพื่อที่จะเข้าใจค่าที่ได้จากผลการทดสอบ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบกับสมรรถนะของผิวทางอาจจะไม่ครบถ้วน ขึ้นอยู่กับคุณภาพและปริมาณของข้อมูลที่นำมาใช้ในการหาความสัมพันธ์

ประการที่สองคือข้อกำหนดเกรดการเจาะลึกวัดค่าความแข็งของแอสฟัลต์เฉพาะที่อุณหภูมิปานกลาง โดยที่ค่าความแข็งที่อุณหภูมิสูงและที่อุณหภูมิต่ำจะได้รับการอ้างอิงค่าการเจาะลึกที่อุณหภูมิปานกลางเท่านั้น เป็นสาเหตุให้สมรรถนะของผิวทางที่เกิดขึ้นจริงอาจมีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญสำหรับแอสฟัลต์ที่อยู่ในเกรดเดียวกัน แต่ก่อสร้างในสถานที่ที่มีอุณหภูมิต่างกัน

ประการสุดท้ายคือแอสฟัลต์ที่ผ่านการเร่งอายุด้วยวิธีการอบเหี่ยวบางมาก่อนแล้วนำมาทดสอบค่าการเจาะลึก ค่าการเจาะลึกที่ได้จะเป็นค่าการเจาะลึกในรูปที่เร่งอายุแอสฟัลต์เพื่อเลียนแบบช่วงเวลาการผสมและการก่อสร้างเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงไม่มีกระบวนการเร่งอายุแอสฟัลต์ในช่วงเวลาหลังจากที่ผิวทางแอสฟัลต์ได้ทำการเปิดใช้งานเป็นระยะเวลาหลายปี

2.8 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์

เพื่อพิสูจน์ว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์มีลักษณะเฉพาะ เช่น ความชื้นเหลว ความบริสุทธิ์ และความปลอดภัยตามที่ต้องการ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการพัฒนาวิธีการทดสอบและข้อกำหนดที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.8.1 การทดสอบความหนืด (Viscosity test)

การทดสอบความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute viscosity test) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องวัดความหนืดแบบหลอดรูเล็กมีอยู่ 2 ชนิดที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ แบบของสถาบันแอสฟัลต์ และแบบของแคนนอน-แมนนิง เครื่องวัดความหนืดแต่ละชนิดจะถูกทำการสอบเทียบให้ตรงกับมาตรฐานโดยการใช้น้ำมันมาตรฐานที่ทราบความหนืดในการสอบเทียบ ค่าคงที่ในการสอบเทียบจะถูกพัฒนาสำหรับแต่ละเครื่องวัดความหนืดโดยผู้ผลิตเครื่องทดสอบและค่าคงที่ในการสอบเทียบจะถูกเตรียมไว้สำหรับแต่ละเครื่อง

เครื่องทดสอบความหนืดจะถูกควบคุมอุณหภูมิโดยการใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ ปกติจะใช้น้ำเป็นของเหลวตัวกลางในการควบคุมอุณหภูมิ เพราะว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แอสฟัลต์จะมีความหนืดมากเกินไปในการไหลผ่านหลอดรูเล็กของเครื่องวัดความหนืดได้อย่างทันที ดังนั้นการทดสอบความหนืดสัมบูรณ์จะต้องใช้สุญญากาศบางส่วนช่วย ทำให้ต้องติดปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ในฝั่งหลอดที่มีขนาดเล็ก เพื่อช่วยให้แอสฟัลต์เกิดการไหลได้

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดการทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์

การทดสอบ	ตามมาตรฐาน	
	AASHTO	ASTM
ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity)	T202	D2171
ความหนืดไคนเนมาติก (Kinematics Viscosity)	T201	D2170
การเจาะลึก (Penetration)	T49	D5
จุดวาบไฟ (Flash point)	T48	D92
การทดสอบการอบเยื่อบาง (Thin Film Oven Test)	T719	D1754
การทดสอบการอบเยื่อบางแบบกลิ้ง (Rolling Thin Film Oven Test)	T240	D2872
การยืดตัว (Ductility)	T51	D113
การละลายในไตรคลอโรเอทิลีน (Solubility in Trichloroethylene)	T44	D2042
การทดสอบจุด (Spot Test)	T102	-



(a) The Asphalt Institute vacuum viscometer



(b) Cannon-Manning vacuum Viscometer

รูปที่ 2.13 เครื่องมือการทดสอบความหนืด (a)แบบสถาบันแอสฟัลต์ (b)แบบแคนนอนแมนนิง
(<http://www.humboldtmg.com>)

เมื่อแอสฟัลต์เริ่มไหลเวลาที่แอสฟัลต์ใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านจุดสองจุดซึ่งมีลักษณะเป็นกระเปาะ(Bulb) ที่กำหนดไว้จะถูกวัดในหน่วยวินาที ผลคูณของเวลาที่วัดได้กับค่าคงที่ในการสอบเทียบสำหรับแต่ละกระเปาะของเครื่องทดสอบความหนืดจะให้ค่าความหนืดในหน่วย พอยซ์ (Poises) ซึ่งเป็นหน่วยมาตรฐานสำหรับการวัดค่าความหนืดของแอสฟัลต์

นอกจากการทดสอบความหนืดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสแล้ว ยังต้องทำการทดสอบโดยการให้แอสฟัลต์ไหลผ่านหลอดรูเล็กที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ภายใต้แรงโน้มถ่วงเพียง

อย่างเดียวกัน ชนิดของความหนืดที่วัดด้วยวิธีนี้เรียกว่า ความหนืดไคเนมาติก (Kinematic viscosity) การทดสอบหาความหนืดไคเนมาติกไม่ต้องใช้สูญญากาศช่วยในการทดสอบ แต่ต้องใช้เครื่องมือในการทดสอบที่แตกต่างจากการทดสอบความหนืดสัมบูรณ์ เรียกว่า เครื่องมือการทดสอบความหนืดแบบไซท์ฟุคส์แขนไขว้ (Zeitfuchs cross-arm viscosity) เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความหนืดแบบไคเนมาติกจะถูกทำการสอบเทียบด้วยวิธีการเดียวกับความหนืดสัมบูรณ์



รูปที่ 2.14 เครื่องมือการทดสอบความหนืดแบบไซท์ฟุคส์แขนไขว้ (Zeitfuchs cross-arm viscosity) (<http://www.humboldtmsg.com>)

การทดสอบความหนืดไคเนมาติกจะใช้น้ำมันบริสุทธิ์ในการควบคุมอุณหภูมิในอ่างควบคุม โดยให้ความดันเพียงเล็กน้อยเพื่อช่วยให้แอสฟัลต์เริ่มต้นไหลด้วยแรงโน้มถ่วง จากนั้นจับเวลาที่แอสฟัลต์ไหลผ่านจุดสองจุดที่กำหนดไว้ตรงกระเปาะ นำเวลาที่วัดได้คูณกับแฟกเตอร์ค่าสอบเทียบจะได้ค่าความหนืดไคเนมาติกในหน่วยเซนติสโตค (Centistokes)

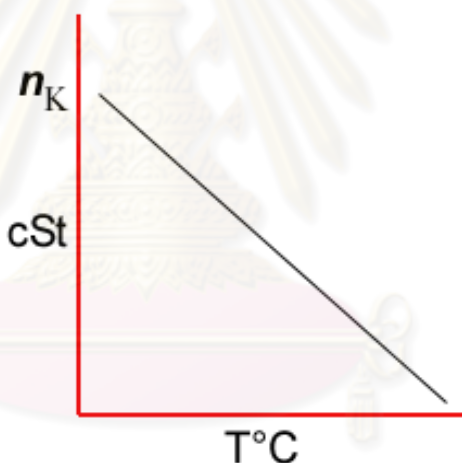
ในการทดสอบความหนืดไคเนมาติกจะใช้แรงโน้มถ่วงเป็นตัวทำให้เกิดการไหล ซึ่งความหนาแน่นของแอสฟัลต์จะส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของแอสฟัลต์ผ่านหลอดรูเล็ก และในการทดสอบความหนืดสัมบูรณ์จะใช้สูญญากาศเป็นตัวทำให้แอสฟัลต์สามารถไหลผ่านหลอดรูเล็กไปได้โดยที่ไม่ต้องคำนึงถึงผลของแรงโน้มถ่วง ดังนั้นหน่วยที่ได้จากการทดสอบความหนืดทั้งสองแบบ คือ หน่วยเซนติสโตคและหน่วยพอยซ์ สามารถหาความสัมพันธ์ได้ด้วยการใช้ความหนาแน่นของแอสฟัลต์ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.4)$$

โดย v คือ ความหนืดไคเนมาติก และ μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์

ความหนืดที่วัดได้ ณ อุณหภูมิทั้งสองจะนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนืด ความชันของเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่างจุดทั้งสองจะเป็นตัวบ่งชี้ความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิของแอสฟัลต์ เส้นที่มีความชันมากกว่าแอสฟัลต์จะมีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิมากกว่า คือ มีลักษณะเหลวที่อุณหภูมิสูงและจะแข็งที่อุณหภูมิต่ำ

นอกจากนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดของแอสฟัลต์มีความสำคัญมากในการนำมาคำนวณช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผสมและการบดอัดส่วนผสมแอสฟัลต์ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดไคเนมาติกกับอุณหภูมิ
(<http://www.wearcheck.com>)

2.8.2 การทดสอบค่าการเจาะลึก (Penetration test)

การทดสอบค่าการเจาะลึกคือหนึ่งในการทดสอบที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนาน เป็นการทดสอบเชิงประสบการณ์สำหรับการวัดความชันเหลวของแอสฟัลต์

การดำเนินการทดสอบค่าการเจาะลึกเริ่มจากนำตัวอย่างแอสฟัลต์ไปอุ่นให้ร้อนแล้วเทลงในถ้วยมาตรฐานขนาด 88 มิลลิลิตร สำหรับทำการทดสอบ หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิจนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสตามมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

นำตัวอย่างที่มีอุณหภูมิคงที่แล้วไปใส่ในเครื่องทดสอบค่าการเจาะลึก นำเข็มมาตรฐานน้ำหนัก 100 กรัมมาแขวนในแนวตั้งบนผิวแอสฟัลต์จากนั้นปล่อยให้จมลงไปในเนื้อแอสฟัลต์เป็นเวลา 5 วินาที วัดระยะที่เข็มจมลงไปในแอสฟัลต์แล้วรายงานผลเป็นค่าการเจาะลึกในหน่วยเพน (Pen) ซึ่ง มีค่าเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร

ที่อุณหภูมิมาตรฐานแอสฟัลต์ที่มีค่าการเจาะลึกมากกว่าจะมีความชันเหลวน้อย คือ มีความหนืดน้อยกว่า และแอสฟัลต์ที่มีค่าการเจาะลึกน้อยกว่าจะมีความชันเหลวมาก คือ มีความหนืดมากกว่า



รูปที่ 2.16 เครื่องมือการทดสอบค่าการเจาะลึก (<http://www.jazzar.com>)

2.8.3 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

ค่าความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ นำไปใช้ในการเปลี่ยนค่าไปมาระหว่างมวลกับปริมาตร ถ้าทราบค่าความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์จะทำให้คำนวณมวลของแอสฟัลต์ในถังบรรจุแอสฟัลต์ได้เมื่อทราบปริมาตรของถังบรรจุ นอกจากนี้ค่าความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ยังถูกใช้ในการคำนวณคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์อีกด้วย

การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะจะดำเนินการโดยเทแอสฟัลต์ลงในแก้ววัดความหนาแน่น (Glass pycnometer) ที่ได้ทำการชั่งน้ำหนักและทำการสอบเทียบกับค่ามาตรฐานมาก่อนแล้ว จากนั้นเติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์ลงไปตามขีดที่กำหนด แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เสร็จแล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก และนำไปคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์

2.9 แอสฟัลต์เชื่อมประสานเกรดสมรรถนะ (Performance Graded Asphalt Binder)

จากข้อบกพร่องของเกรดความเหนียวและเกรดการเจาะลึก จึงได้มีการพัฒนาการทดสอบที่มีความสัมพันธ์กับสมรรถนะจริง เพื่อวัดคุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์เชื่อมประสาน และได้มีข้อกำหนดใหม่สำหรับการจัดเกรดของแอสฟัลต์ เรียกว่า ข้อกำหนดแอสฟัลต์เชื่อมประสานเกรดสมรรถนะ ซึ่งข้อกำหนดนี้สามารถใช้ได้ทั้งแอสฟัลต์ธรรมดาและโมดิฟายด์แอสฟัลต์ นอกจากนี้ในปีพุทธศักราช 2530 ได้มีการใช้คำว่าแอสฟัลต์เชื่อมประสานแทนแอสฟัลต์ซีเมนต์

2.9.1 ข้อกำหนดแอสฟัลต์เชื่อมประสานเกรดสมรรถนะ (PG Asphalt Binder Specification)

ใจความสำคัญของข้อกำหนดแอสฟัลต์เชื่อมประสานเกรดสมรรถนะ คือ การทดสอบแอสฟัลต์เชื่อมประสานที่มีความสัมพันธ์กับสมรรถนะในการใช้งานจริงที่เกิดขึ้น โดยการทดสอบจะจำลองขั้นตอนวิกฤตที่แอสฟัลต์เชื่อมประสานต้องประสบ เช่น ขั้นตอนการผสม ขั้นตอนการปูผิวทาง เป็นต้น

การดำเนินการทดสอบแอสฟัลต์เชื่อมประสานที่ไม่ได้ผ่านการเร่งอายุเป็นการจำลองขั้นตอนวิกฤตแรก คือ การขนส่งและการเก็บรักษา ขั้นตอนวิกฤตที่สอง คือ ช่วงการผสมร้อนและการก่อสร้าง จะทำการทดสอบจำลองขั้นตอนนี้ด้วยการทดสอบแอสฟัลต์เชื่อมประสานที่ผ่านการอบเยื่อบางและการอบเยื่อบางแบบกลิ้งมาก่อน ขั้นตอนวิกฤตสุดท้าย คือ ช่วงอายุของแอสฟัลต์ที่เป็นส่วนหนึ่งของผิวทางแอสฟัลต์หลังจากทำการเปิดให้บริการมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน จะทำการทดสอบจำลองขั้นตอนนี้ด้วยการทดสอบแอสฟัลต์เชื่อมประสานที่ผ่านการใช้หม้อความดันเร่งอายุ (Pressure aging vessel) มาแล้ว หม้อความดันเร่งอายุเป็นกระบวนการที่ทำให้แอสฟัลต์เชื่อมประสานสัมผัสกับความร้อนและความดันเพื่อจำลองการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานจริงหลังการเปิดให้บริการถนนมาเป็นเวลานาน

ข้อกำหนดแอสฟัลต์เชื่อมประสานเกรดสมรรถนะและวิธีการทดสอบที่ใช้ในการจัดประเภทของแอสฟัลต์เชื่อมประสาน ได้แสดงไว้ใน AASHTO M 320

2.10 การทดสอบแอสฟัลต์เชื่อมประสานเกรดสมรรถนะ (PG Asphalt Binder Tests)

2.10.1 โรเทชันนอลวิสโคมิเตอร์ (Rotational Viscometer)

การทดสอบความหนืดแบบหมุนดังแสดงในรูปที่ 2.17 ใช้ในการหาลักษณะการไหลของแอสฟัลต์เชื่อมประสานที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้สามารถทราบว่แอสฟัลต์เชื่อมประสานจะสามารถสูบและนำไปใช้งานได้ โดย AASHTO T 316 บรรยายไว้ว่าการทดสอบโรเทชันนอลวิสโคมิเตอร์มีความจำเป็นมากในการประเมินชนิดที่หลากหลายของแอสฟัลต์เชื่อมประสาน



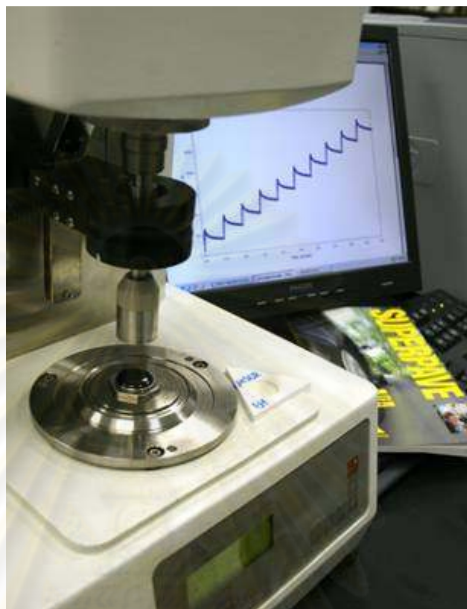
รูปที่ 2.17 โรเทชันนอลวิสโคมิเตอร์

โรเทชันนอลวิสโคมิเตอร์จะใช้ในการหาความหนืดโดยหาจากการวัดแรงบิดที่ใช้ในการหมุนแกนทรงกระบอกที่จมอยู่ในแอสฟัลต์เชื่อมประสานให้มีความเร็วคงที่ ณ อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งแรงบิดนี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนืดของแอสฟัลต์เชื่อมประสาน

2.10.2 การทดสอบการเฉือนแบบพลวัตด้วยรีโอมิเตอร์ (Dynamic Shear Rheometer)

การทดสอบการเฉือนแบบพลวัตด้วยรีโอมิเตอร์ใช้ในการทดสอบแอสฟัลต์เชื่อมประสานและวัดคุณสมบัติด้านการไหล รวมถึงค่าโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อน (G^*) และค่ามุมเฟส (δ) ที่อุณหภูมิปานกลางถึงอุณหภูมิสูง ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถใช้ได้กับทั้งพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นและแบบหนืดของแอสฟัลต์เชื่อมประสาน โดยค่าโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อนคือการวัดค่าของแรง

ด้านทานต่อการเสียรูปทั้งหมดของวัสดุเมื่อถูกความเค้นเฉือนกระทำ ส่วนค่ามูมเฟสจะใช้เป็นตัววัดความสัมพันธ์ด้านปริมาณขององค์ประกอบที่เป็นส่วนหนืดกับส่วนยืดหยุ่นของแอสฟัลต์เชื่อมประสาน



รูปที่ 2.18 ไดนามิกชีयरรีโอมิเตอร์ (<http://www.asphaltinstitute.org>)

2.11 การเปรียบเทียบความสอดคล้องของข้อกำหนดแอสฟัลต์เกรดต่างๆ

จากการเปรียบเทียบข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทเกรดความหนืดและเกรดการเจาะลึกพบว่าข้อกำหนดทั้งสองประเภทได้กำหนดให้ทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยวิธีต่างๆที่คล้ายคลึงกันหลายการทดสอบ หนึ่งใน การทดสอบที่กำหนดให้ทดสอบเหมือนกัน คือ การทดสอบค่าการเจาะลึก เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการเจาะลึกในข้อกำหนดทั้งสองจะได้อ้างอิงที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าการเจาะลึกของแอสฟัลต์ซีเมนต์แต่ละข้อกำหนด

ประเภทแอสฟัลต์ ซีเมนต์	ค่าการเจาะลึก (เพน)				
	40-50	60-70	85-100	120-150	200-300
เกรดการเจาะลึก (Penetration Graded)	AC 40-50	AC 60-70	AC 85- 100	AC 120- 150	AC 200- 300
เกรดความหนืด (Viscosity Graded)	AC-40	AC-20	AC-10	AC-5	AC-2.5

ส่วนข้อกำหนดแอสฟัลต์เชื่อมประสานเกรดสมรรถนะนั้นใช้วิธีในการทดสอบที่แตกต่างออกไปจากข้อกำหนดเกรดความเหนียวและเกรดการเจาะลึกจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์กันได้ ดังนั้นหากต้องการทำการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดเกรดการเจาะลึก ข้อกำหนดเกรดความเหนียว และข้อกำหนดเกรดสมรรถนะต้องทำการทดสอบโดยควบคุมให้มีการทดสอบที่เหมือนกัน เช่น การทดสอบความเหนียว เป็นต้น

2.12 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวม หมายถึง วัสดุที่แข็งและเฉื่อย ใช้สำหรับผสมมีลักษณะเป็นก้อนหรือชิ้นเล็กๆ โดย ASTM D 8 นิยามว่ามวลรวม คือ วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวกันของแร่ธาตุ เช่น ทราย (Sand) กรวด (Gravel) หินย่อย (Crushed Rock) กากถลุงหรือตะกรันเหล็ก (slag) ซึ่งมวลรวมเป็นวัสดุหลักในการก่อสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่นและผิวทางแบบแข็งเกร็ง วัสดุผสมแอสฟัลต์ที่ใช้ก่อสร้างถนนผิวทางแบบยึดหยุ่น โดยทั่วไปประกอบด้วยมวลรวมร้อยละ 90 ถึงร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก หรือ ร้อยละ 75 ถึงร้อยละ 85 โดยปริมาตร ซึ่งมวลรวมมีหน้าที่สำคัญในการรองรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างถนน และมีอิทธิพลโดยตรงต่อสมรรถนะของส่วนผสมแอสฟัลต์ผสมร้อน



รูปที่ 2.19 มวลรวม (<http://www.anchsand.com>)

มวลรวมมีต้นกำเนิดจากหิน โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ หินชั้น (Sedimentary rock) เกิดจากการรวมตัวของตะกอนที่ทับถมกัน ซึ่งเคลื่อนที่จากการถูกพัดพาโดยน้ำลม ได้แก่ หินปูน (Limestone) และหินทราย (Sandstone) เป็นต้น หินอัคนี (Igneous rock) เกิดจากการเย็นตัวและแข็งตัวของวัสดุหลอมเหลวที่เรียกว่า แมกมา (Magma) ซึ่งอัดตัวอยู่ภายใต้

เปลือกโลกแล้วปะทุขึ้นมาตามรอยแตกของผิวโลก เช่น หินแกรนิต (Granite) เป็นต้น หินแปร (Metamorphic rock) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของหินอัคนีและหินชั้น โดยอาศัยความกดดันสูงจากการเคลื่อนตัวอย่างรุนแรงของโลก มีความร้อนเป็นปัจจัยในการแปรสภาพ เช่น หินอ่อน (Marble) ซึ่งแปรสภาพมาจากหินปูน และหินควอตไซต์ (Quartzite) ที่แปรสภาพมาจากหินทราย เป็นต้น

มวลรวมที่ใช้ในปัจจุบันมาจากหลายแหล่ง ได้แก่ มวลรวมธรรมชาติ เรียกว่า มวลรวมจากบ่อ (Pit or Bank-Run materials) เช่น กรวด ทราย ที่ได้จากการกัดเซาะและพัดพาของน้ำหรือลม มวลรวมที่ได้จากการผลิต (Processed aggregates) คือ มวลรวมที่ได้มาจากการระเบิดหินภูเขา และนำมาบดให้ได้ขนาดต่างๆ และมวลรวมสังเคราะห์ (Artificial aggregates) คือ มวลรวมที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี เช่น การถลุงแร่จะได้ผลพลอยได้เป็น ตะกรัน นำมาบดย่อยใช้แทนหินได้

มวลรวมสามารถแบ่งด้วยขนาดของอนุภาคออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) คือ วัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร (ค่าอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) ได้แก่ กรวด หินย่อยหรือหินไม่ เป็นต้น
2. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) คือ วัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ค่าอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200) ได้แก่ ทราย ฝุ่น เป็นต้น

2.12.1 คุณสมบัติของมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์ผสมร้อน

จากหนังสือ “The Aggregate Handbook” ได้กล่าวถึงความเกี่ยวข้องของมวลรวมที่มีต่อแอสฟัลต์ผสมร้อนไว้ว่า มวลรวมในอุดมคติต้องมีขนาดอนุภาคและขนาดคละที่เหมาะสม มีความแข็งแรง ทนทานรวมถึงต้องประกอบด้วยอนุภาคลักษณะใกล้เคียงรูปลูกบาศก์ที่มีความพรุนค่อนข้างต่ำ ผิวของมวลรวมต้องสะอาด ขรุขระ และยึดติดแอสฟัลต์ได้ดีกว่าน้ำ อย่างไรก็ตามมวลรวมที่มีคุณภาพดีหรือมีคุณสมบัติที่เหมาะสมจะถูกเลือกมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมทำผิวทางแอสฟัลต์ แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับการใช้งานและต้นทุนของวัสดุสำหรับชนิดของการก่อสร้างอีกด้วย

ความเหมาะสมของมวลรวมสำหรับการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์ โดยทั่วไปจะตัดสินใจจากการประเมินวัสดุตามลักษณะต่างๆดังต่อไปนี้

1. ขนาดและการคละขนาด (Size and Grading) เป็นสองคุณสมบัติที่สำคัญของมวลรวม ASTM D 8 ได้นิยามขนาดโตสุด (Maximum size) ไว้ว่าเป็นตะแกรงขนาดเล็กที่สุดที่มวลรวม

ทั้งหมดสามารถผ่านไปได้ ส่วนขนาดเรียกใช้ (Nominal maximum size) AASHTO MP 323 ได้ให้คำนิยามว่าเป็นขนาดตะแกรงที่ใหญ่กว่าตะแกรงที่มีวัสดุค้างมากกว่าร้อยละ 10 ครั้งแรก 1 เบอร์สำหรับการทำผิวทางให้มีผลสัมฤทธิ์ความหนาของชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อน (HMA) ควรจะหนาอย่างน้อย 2 ถึง 2.5 เท่าของขนาดโตสุดในการผสม หรือ อย่างน้อย 3 ถึง 4 เท่าของขนาดเรียกใช้

การคละขนาด (Grading) เป็นการกระจายของขนาดอนุภาคหลากหลายขนาด การคละขนาดโดยทั่วไปจะทำโดยการวิเคราะห์ตะแกรงแบบเปียก (Washed sieve analysis) และการวิเคราะห์ตะแกรงแบบแห้ง (Dry sieve analysis) ตามมาตรฐานของ ASTM C 136 (AASHTO T 27) ตัวอย่างชื่อของขนาดคละแบบต่างๆ ได้แก่ ขนาดคละแน่น (Dense-Graded) ขนาดคละโปร่ง (Open-Graded) และเรียงข้ามขนาดคละ (Gap-Graded) เป็นต้น

2. ความต้านทานต่อแรงกระแทกและแรงขัดสี (Impact and abrasion) ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทกและการขัดสีของมวลรวม เป็นคุณสมบัติที่สามารถใช้เป็นตัวชี้บ่งถึงคุณภาพของมวลรวม และมีความสำคัญมากสำหรับมวลรวมที่ใช้ผลิตผิวทางแอสฟัลต์ที่ต้องรับแรงกระแทกหรือการขัดสี เช่น พื้นถนน และพื้นสนามบิน เป็นต้น ดังนั้น ดังนั้นมวลรวมจะต้องมีความทนทานต่อการขัดสีได้ ซึ่งมวลรวมที่สัมผัสกับล้อรถโดยตรงจะต้องมีความทนทานสูงกว่าส่วนที่ไม่ได้สัมผัสกับล้อรถโดยตรง การทดสอบความต้านทานต่อแรงขัดสีของมวลรวม ได้แก่ การทดสอบความสึกหรอของมวลรวม (Los Angeles Abrasion Test) ตามมาตรฐาน AASHTO T 96 (ASTM C 131)

3. รูปร่างและลักษณะผิว (Particle shape and surface texture) รูปร่างของมวลรวมมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ ดังนั้นการเลือกใช้มวลรวมทำแอสฟัลต์คอนกรีตควรเลือกมวลรวมที่มีเหลี่ยมมุมผสมกับมวลรวมที่มีลักษณะกลม เพราะมวลรวมที่มีเหลี่ยมมุมจะทำหน้าที่รับแรง ส่วนมวลรวมที่มีลักษณะกลมจะเป็นตัวประสานที่ดี ทำให้ผิวทางสามารถรับแรงได้ดีและมีความคงทน ส่วนลักษณะผิวจะส่งผลต่อด้านกำลัง โดยทั่วไปการเลือกวัสดุมวลรวมเป็นส่วนผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีต จะให้ความสำคัญต่อลักษณะผิวหน้ามากกว่ารูปร่างของมวลรวม เพราะแอสฟัลต์จะเกาะยึดแน่นกับมวลรวมผิวขรุขระได้ดีกว่ามวลรวมผิวเรียบ

4. โครงสร้างช่องว่าง ความพรุนและการดูดซึม (Pore structure, Porosity, Absorption) โครงสร้างช่องว่างของมวลรวม คือ ลักษณะและรูปร่างภายนอกของช่องว่างในอนุภาคมวลรวม ซึ่งช่องว่างที่ติดต่อกันและเปิดสู่อากาศของอนุภาคจะส่งผลให้มวลรวมมีความสามารถในการซึมผ่านได้สูง ในทางกลับกันช่องว่างที่แยกออกจากกันหรือไม่ต่อเนื่องกันจะมีความสามารถในการซึมผ่านได้ต่ำ

ความพรุน คือ ปริมาตรทั้งหมดของช่องว่างในอนุภาคมวลรวม อนุภาคที่มีความพรุนสูงกว่าจะมีกำลัง ความหนาแน่น และความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า การดูดซึมน้ำ คือ การดูดซึมน้ำของเหลวเข้าไปในช่องว่างของมวลรวม แต่ไม่ได้หมายความว่ามวลรวมที่มีความพรุนสูงจะมีการดูดซึมน้ำมากตามไปด้วยถ้าช่องว่างส่วนมากมีความสามารถในการซึมผ่านได้ต่ำ อย่างไรก็ตามมวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำสูงแสดงได้ว่ามีปริมาตรของช่องว่างที่สามารถซึมผ่านได้ใหญ่

การทดสอบหาการดูดซึมน้ำแอสฟัลต์ของมวลรวมหยาบจะทำตามมาตรฐาน AASHTO T 85 (ASTM C 127) ส่วนการทดสอบหาการดูดซึมน้ำแอสฟัลต์ของมวลรวมละเอียดจะทำตามมาตรฐาน AASHTO T 84 (ASTM C 128) ในการทดสอบนี้จะแสดงผลการดูดซึมน้ำในรูปปริมาณน้ำที่ซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างเป็นร้อยละของน้ำหนักทั้งหมดของมวลรวมแห้ง ไม่คิดปริมาณน้ำที่ผิวของมวลรวม

5. ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของมวลรวมต่อความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส คุณสมบัตินี้ถูกใช้ในการคำนวณปริมาตรช่องว่างเป็นตัวแรก รวมไปถึงความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity) จะถูกใช้ในการคำนวณปรับแก้ปริมาณของมวลรวมที่เป็นองค์ประกอบในแอสฟัลต์ผสมร้อน ความถ่วงจำเพาะที่ยอมรับกันทั่วไปของมวลรวมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity) ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity) และความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพ (Effective specific gravity) ซึ่งความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของมวลรวม และรูพรุนภายในอนุภาคมวลรวม

อุปกรณ์และกระบวนการในการหาความถ่วงจำเพาะรวมและความถ่วงจำเพาะปรากฏของมวลรวมหยาบจะทำตามมาตรฐาน AASHTO T 85 (ASTM C 127) ส่วนของมวลรวมละเอียดจะเป็นไปตามมาตรฐาน AASHTO T 84 (ASTM C 128) ส่วนการหาความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพของมวลรวมจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการหาความถ่วงจำเพาะสูงสุดของส่วนผสมแอสฟัลต์ตามมาตรฐาน (ASTM D 2041)

6. ความต้านต่อสภาพอากาศ (Weathering resistance) ความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ เป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับความพรุนและอำนาจการดูดซึมน้ำของมวลรวม มวลรวมจะต้องมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโดยไม่แตกตัวออกจากกัน คือ มวลรวมต้องมีรูพรุนพอที่จะดูดซึมน้ำและมีช่องว่างพอที่จะให้น้ำขยายตัวได้ในอากาศหนาว เพราะการขยายตัวของน้ำจะทำให้ผิวทางแอสฟัลต์เกิดการแตกร้าวได้ การทดสอบความต้านทานต่อสภาพอากาศจะใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การละลาย

หายไปของมวลรวมแต่ละขนาดโดยเทียบกับน้ำหนักก่อนการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T 104 (ASTM C 88)

2.13 แอสฟัลต์ผสมร้อน (Hot Mix Asphalt, HMA)

แอสฟัลต์ผสมร้อนประกอบด้วยการรวมกันของมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งมวลรวมต้องแห้งและแอสฟัลต์ซีเมนต์ต้องมีความเหลวเพียงพอสำหรับการผสมและการใช้งาน เพราะฉะนั้นต้องให้ความร้อนแก่มวลรวมและแอสฟัลต์ก่อนที่จะนำมาผสม จึงเรียกว่าการผสมร้อน การออกแบบแอสฟัลต์ผสมร้อนประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเลือกชนิดและขนาดคละของมวลรวม การเลือกชนิดและเกรดของแอสฟัลต์เชื่อมประสาน การเลือกปริมาณของแอสฟัลต์เชื่อมประสานที่ใช้ในการผสมเพื่อให้ผ่านข้อกำหนด

มวลรวมที่ใช้เป็นวัสดุในการผลิตแอสฟัลต์ผสมร้อนนั้นมีขนาดคละเป็นช่วงกว้าง ทำให้แต่ขนาดคละที่เลือกใช้มีลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมกับข้อกำหนดในการออกแบบและการก่อสร้างแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งแอสฟัลต์ผสมร้อนตามขนาดคละของมวลรวมที่เลือกใช้ได้ 3 ประเภท

1. แอสฟัลต์ผสมร้อนประเภทแน่น (Dense-Graded HMA) แอสฟัลต์ติกคอนกรีตเป็นหนึ่งในชนิดของการผสมร้อนที่มีข้อกำหนดที่เข้มงวด ซึ่งแอสฟัลต์ติกคอนกรีตต้องมีคุณภาพสูง จึงต้องควบคุมการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์กับมวลรวมที่มีขนาดคละดีและคุณภาพสูงอย่างระมัดระวัง ตลอดจนแอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่ได้หลังการบดอัดต้องมีความหนาแน่นสูงสม่ำเสมอตลอดทั้งก้อน



รูปที่ 2.20 แอสฟัลต์ผสมร้อนประเภทแน่น (Dense-graded hot mix asphalt)

(<http://www.asphaltwa.com>)

2. แอสฟัลต์ผสมร้อนแบบเกรดเปิด (Open-Graded HMA) ชั้นทางเกรดเปิดเป็นส่วนผสมของแอสฟัลต์ผสมร้อนที่ออกแบบให้มีปริมาตรช่องว่างอากาศขนาดใหญ่ ดังนั้นน้ำจะสามารถระบายผ่านชั้นทางนี้ได้ ซึ่งจะถูกใช้เป็นส่วนผิวทางรับแรงเสียดทานเกรดเปิดเพื่อที่จะให้ผิวทางมีความต้านทานต่อการขัดสีและใช้เป็นชั้นพื้นทางพูนสำหรับการระบายน้ำโดยจะอยู่ต่ำกว่าชั้นผิวทางที่เป็นแอสฟัลต์ผสมร้อนหรือคอนกรีต

3. Stone Matrix Asphalt (SMA) เป็นแอสฟัลต์ผสมร้อนที่มีปริมาณมวลรวมหยาบ ปริมาณแอสฟัลต์ และปริมาณแร่เติมเต็มสูง ผลลัพธ์ที่ได้จากการผสมคือ หินแต่ละก้อนสามารถสัมผัสกันและสามารถต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดี

2.13.1 การพิจารณาคุณสมบัติที่ต้องการสำหรับการออกแบบส่วนผสม

การที่จะสร้างผิวทางแอสฟัลต์ผสมร้อนที่ดี ต้องมีการออกแบบ ผลิตและก่อสร้างให้ได้ คุณสมบัติที่แน่นอนตามที่ต้องการ ซึ่งคุณสมบัติของผิวทางที่ต้องการ ได้แก่ ความต้านทานต่อการเสียดรูปแบบถาวร ความต้านทานต่อการล้า ความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ ความต้านทานต่อความชื้น ความทนทาน ความต้านทานต่อการขัดสีและความสามารถในการใช้งาน

เป้าหมายที่สำคัญที่สุดในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์ผสมร้อนคือ การเลือกปริมาณแอสฟัลต์ที่จะทำให้ได้รับความสมดุลระหว่างคุณสมบัติทั้งหลายที่กล่าวมาข้างต้น เพราะไม่มีปริมาณแอสฟัลต์ใดที่สามารถทำให้ได้คุณสมบัติที่ดีที่สุดทุกประการ ดังนั้นปริมาณแอสฟัลต์ที่เลือกใช้ในการผสมจะต้องเลือกโดยอยู่บนพื้นฐานของคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับข้อกำหนดในแต่ละสภาวะการณ์

2.13.2 พฤติกรรมของส่วนผสมแอสฟัลต์ผสมร้อน

ตัวอย่างส่วนผสมผิวทางที่ถูกเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการสามารถนำมาวิเคราะห์หาสมรรถนะที่น่าจะเป็นไปได้เมื่อนำไปใช้เป็นโครงสร้างผิวทาง โดยการวิเคราะห์จะเน้นที่ลักษณะเฉพาะของส่วนผสม 5 ประการ ได้แก่ ความหนาแน่นของส่วนผสม (Mix density) ช่องว่างอากาศ (Air-voids) ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Voids in the mineral aggregate) ช่องว่างที่ถูกเติมเต็มด้วยแอสฟัลต์ (Voids fill with asphalt) และปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt content) นอกจากนั้นการวิเคราะห์จะเน้นไปที่อิทธิพลของลักษณะเฉพาะเหล่านี้ที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมของส่วนผสม

ความหนาแน่นของส่วนผสม (Mix density)

ความหนาแน่นของส่วนผสมที่ถูกบดอัด คือ หน่วยน้ำหนักของส่วนผสมที่ถูกบดอัดหรือน้ำหนักของปริมาตรจำเพาะของส่วนผสม หน่วยน้ำหนักที่มีค่าต่ำมักจะมีเกี่ยวเนื่องกับมวลรวมที่มีคุณภาพต่ำซึ่งจะนำไปสู่ปัญหาทางด้านสมรรถนะของผิวทางที่อาจเกิดขึ้น

ในการทดสอบและการวิเคราะห์การออกแบบส่วนผสม ความหนาแน่นของตัวอย่างที่ถูกบดอัดแล้วจะแสดงในหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ซึ่งคำนวณจากผลคูณระหว่างความถ่วงจำเพาะรวมของส่วนผสมกับความหนาแน่นของน้ำ

ช่องว่างอากาศ (Air-voids)

ช่องว่างอากาศ คือ ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคมวลรวมที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์ในแอสฟัลต์ผสมร้อนที่บดอัดเรียบร้อยแล้ว ช่องว่างอากาศนั้นมีความจำเป็นสำหรับแอสฟัลต์ผสมร้อนที่นำไปใช้งานเพื่อรองรับน้ำหนักจากการจราจรที่ไม่สูงมากและรองรับการขยายตัวของแอสฟัลต์เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยทั่วไประดับของช่องว่างอากาศที่ถูกใช้สำหรับการออกแบบแอสฟัลต์ผสมร้อนคือร้อยละ 4

ความทนทานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตยังขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่างอากาศของผิวทางแอสฟัลต์ผสมร้อนในอีกด้วย ปริมาณช่องว่างอากาศที่มากเกินไปน้ำและอากาศจะสามารถเข้าไปสร้างความเสียหายได้ง่าย ส่วนปริมาณช่องว่างอากาศที่น้อยเกินไปจะนำไปสู่การไหลพุ่งหรือการเยิ้มตัวของแอสฟัลต์ในส่วนผสม

ความหนาแน่นกับปริมาณช่องว่างอากาศจะมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผกผัน คือ ถ้าความหนาแน่นมีค่าสูงปริมาณช่องว่างอากาศก็จะมีค่าต่ำ

ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Voids in the mineral aggregate)

ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมเป็นช่องว่างที่อยู่ระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่อยู่ติดกันในส่วนผสมผิวทางที่ถูกบดอัดแล้ว โดยช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมจะประกอบไปด้วยช่องว่างอากาศและช่องว่างที่ถูกเติมเต็มด้วยแอสฟัลต์ ซึ่งเป็นการวัดเชิงปริมาตรแสดงเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมดของส่วนผสมที่บดอัดแล้ว

ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมแสดงถึงช่องว่างที่สามารถบรรจุปริมาตรประสิทธิผลของแอสฟัลต์และปริมาตรของช่องว่างอากาศที่จำเป็นในส่วนผสม ถ้าช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมมีค่ามากก็จะมีพื้นผิวให้แอสฟัลต์เคลือบตัวได้มาก จะทำให้ความทนทานของส่วนผสมมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นข้อกำหนดจำเพาะขั้นต่ำของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมจะถูก

แนะนำและกำหนดเป็นฟังก์ชันกับขนาดของมวลรวม เพื่อให้มีพื้นที่สำหรับแอสฟัลต์ในการเคลือบมวลรวมมากเพียงพอ

ช่องว่างที่ถูกเติมเต็มด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with asphalt)

เป็นส่วนสำคัญของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่บรรจุแอสฟัลต์ไว้ ซึ่งจะนำมาใช้ในการรับรองความหนาของแอสฟัลต์ที่เคลือบมวลรวมในส่วนผสม ถ้ามีค่าน้อยเกินไปส่วนผสมจะมีความทนทานต่ำ แต่ถ้ามีค่ามากเกินไปส่วนผสมก็จะขาดเสถียรภาพ ปริมาณการจราจรสูงจะต้องการช่องว่างที่ถูกเติมเต็มด้วยแอสฟัลต์ต่ำเพราะกำลังและเสถียรภาพของส่วนผสมจะมีค่ามาก ส่วนปริมาณการจราจรต่ำจะต้องการช่องว่างที่ถูกเติมเต็มด้วยแอสฟัลต์สูงเพื่อเพิ่มความทนทานให้แก่แอสฟัลต์ผสมร้อน

ปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt content)

ปริมาณแอสฟัลต์เป็นค่าที่สำคัญที่สุดในส่วนผสม จึงต้องคำนวณอย่างถูกต้องในห้องปฏิบัติการและต้องมีการควบคุมอย่างแม่นยำเมื่อนำไปใช้งานจริง ปริมาณแอสฟัลต์สำหรับแต่ละส่วนผสมจะถูกกำหนดด้วยเกณฑ์เฉพาะสำหรับแต่ละวิธีการออกแบบ

ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดของส่วนผสมจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของมวลรวม เช่น ขนาดคละและการดูดซึม เป็นต้น โดยขนาดคละของส่วนผสมที่ละเอียดกว่าจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าทำให้ต้องการปริมาณแอสฟัลต์ในการเคลือบมวลรวมมากกว่า ส่วนการดูดซึมของมวลรวมเป็นค่าวิกฤตในการหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสม เพราะปริมาณแอสฟัลต์ในการผสมนอกจากจะต้องคำนวณจากปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ในการเคลือบมวลรวมแล้ว ยังต้องเผื่อไว้สำหรับปริมาณแอสฟัลต์ที่จะถูกมวลรวมดูดซึมเข้าไปอีกด้วย

ในเทคโนโลยีแอสฟัลต์ผสมร้อนมีค่าที่ใช้ในการแสดงปริมาณของแอสฟัลต์อยู่ 2 ค่า ได้แก่ ปริมาณแอสฟัลต์ทั้งหมด (Total asphalt content) คือ ปริมาณแอสฟัลต์ที่ต้องใช้ในการผลิตส่วนผสมเพื่อให้ได้คุณภาพตามที่ปรารถนา และปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (Effective asphalt content) ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของแอสฟัลต์ที่ไม่ได้ถูกดูดซึมโดยมวลรวม ซึ่งจะคำนวณจากปริมาณแอสฟัลต์ทั้งหมดลบด้วยปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึม

2.14 การออกแบบแอสฟัลต์ผสมร้อนด้วยวิธีมาร์แชล (Marshall HMA Mix Design System)

การออกแบบด้วยวิธีมาร์แชลโดยทั่วไปจะใช้ในการผลิตส่วนผสมผิวทางแอสฟัลต์ผสมร้อนประเภทแน่น (Dense-graded HMA paving mixture) โดยการใช้แอสฟัลต์ผสมกับมวลรวมที่มีขนาดโตสุด 25 มิลลิเมตรหรือเล็กกว่า วิธีมาร์แชลถูกใช้ทั้งการออกแบบในห้องปฏิบัติการและการควบคุมคุณภาพของผิวทางแอสฟัลต์ผสมร้อน

วิธีมาร์แชลจะใช้ตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มิลลิเมตรสูง 64 มิลลิเมตร การเตรียมตัวอย่างจะเป็นไปตามกระบวนการที่กำหนด ได้แก่ การให้ความร้อน การผสม และการบดอัดส่วนผสม ซึ่งตัวอย่างจะถูกบดอัดด้วยค้อนบดอัดแบบมาร์แชล จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเสถียรภาพ (Stability) และการไหล (Flow) แบบมาร์แชล ลักษณะเด่นสองประการของวิธีมาร์แชลในการออกแบบส่วนผสม คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นกับช่องว่าง และการทดสอบเสถียรภาพกับการไหลของตัวอย่างที่ถูกบดอัด

เสถียรภาพของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ คือ ความต้านทานต่อแรงกระทำสูงสุดของตัวอย่างในการทดสอบมาตรฐานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ส่วนค่าการไหล คือ การเคลื่อนตัวหรือความเครียดทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวอย่างระหว่างไม่มีแรงกระทำและมีแรงกระทำสูงสุดในช่วงการทดสอบเสถียรภาพ

กระบวนการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1. การเลือกมวลรวม ผู้ออกแบบต้องรับรองว่ามวลรวมผ่านข้อกำหนดทางกายภาพ จากนั้นนำมวลรวมไปผสมโดยต้องผ่านข้อกำหนดขนาดคละและขนาดของมวลรวม
2. การเลือกแอสฟัลต์เชื่อมประสาน ผู้ออกแบบต้องเลือกแอสฟัลต์ที่ใช้ในการผสมบนพื้นฐานกระบวนการที่กล่าวในเรื่องแอสฟัลต์ข้างต้น
3. การผลิตตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบด้วยส่วนผสมเฉพาะหรือขนาดคละของมวลรวม ตัวอย่างจะถูกเตรียมด้วยปริมาณแอสฟัลต์ที่แตกต่างกันประมาณร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักรวม ซึ่งทำให้ได้กราฟโค้งความสัมพันธ์ทำให้ทราบปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดในการผสมตัวอย่าง

การออกแบบโดยทั่วไปจะคำนวณหาปริมาณแอสฟัลต์ที่ทำให้ได้ช่องว่างอากาศประมาณร้อยละ 4 จากนั้นจะนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าสำหรับวิธีมาร์แชล คือ ค่าเสถียรภาพ ค่าการไหล ค่าช่องว่างระหว่างมวลรวม และค่าช่องว่างที่ถูกเติมเต็มด้วยแอสฟัลต์ ค่าต่างๆเหล่านี้ต้องผ่านเกณฑ์การออกแบบส่วนผสมตามวิธีมาร์แชล ซึ่งการออกแบบส่วนผสมไม่ควรจะออกแบบเน้นไปที่คุณสมบัติเพียงอย่างเดียวควรจะออกแบบให้ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดทุกคุณสมบัติและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงที่สุด

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การออกแบบด้วยวิธีมาร์แชล (อ้างอิงจาก Asphalt Institute, 2007)

Mix Criteria	Light Traffic ($< 10^4$ ESALs)		Medium Traffic ($10^4 - 10^6$ ESALs)		Heavy Traffic ($> 10^6$ ESALs)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Compaction (number of blows on each end of specimen)	-	35	-	50	-	75
Stability	3336 N	-	5338 N	-	8006 N	-
Flow (0.25 mm (0.01 inch))	8	18	8	16	8	14
Percent Air Voids	3	5	3	5	3	5
Percent Voids Filled With Asphalt (VFA)	70	80	65	78	65	76
Percent Voids In Mineral Aggregate (VMA)	ดูตารางที่ 2.3					

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การออกแบบด้วยวิธีมาร์แชล (อ้างอิงจาก Asphalt Institute, 1979)

Nominal Maximum Particle Size		Minimum VMA (percent)
(mm)	(U.S.)	
63	2.5 inch	11
50	2.0 inch	11.5
37.5	1.5 inch	12
25.0	1.0 inch	13
19.0	0.75 inch	14
12.5	0.5 inch	15
9.5	0.375 inch	16
4.75	No. 4 sieve	18
2.36	No. 8 sieve	21
1.18	No. 16 sieve	23.5

2.15 การออกแบบแอสฟัลต์ผสมร้อนด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ (Superpave HMA Mix Design System)

การออกแบบแอสฟัลต์ผสมร้อนด้วยวิธีซูเปอร์เพฟถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นคู่มือของวิศวกรและผู้รับเหมาในการปรับปรุงสมรรถนะของผิวทางแอสฟัลต์ผสมร้อนที่ต้องใช้ในการรองรับปริมาณจราจรและอุณหภูมิที่สูงขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งการออกแบบด้วยระบบซูเปอร์เพฟนี้ได้ทำการปรับปรุงการออกแบบแบบเดิม 2 องค์ประกอบที่สัมพันธ์กัน ได้แก่ ข้อกำหนดแอสฟัลต์เชื่อมประสาน และระบบการวิเคราะห์และการออกแบบส่วนผสม โดยขั้นตอนที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมด้วยระบบซูเปอร์เพฟมีดังต่อไปนี้

1. การเลือกวัสดุที่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดการออกแบบ ได้แก่ แอสฟัลต์ และมวลรวม
2. การพัฒนาทดลองผสมมวลรวมหลายชนิดให้ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดขนาดคละระบบซูเปอร์เพฟ
3. การผสมแอสฟัลต์เชื่อมประสานกับมวลรวมในขั้นตอนที่ 2 และการเร่งอายุระยะสั้นของส่วนผสมด้วยการอบ (Short-term oven aging)
4. ทำการบดอัดตัวอย่างด้วยเครื่องไจราทอรี (Gyratory Compacter)
5. วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงปริมาตรของส่วนผสม
6. เลือกมวลรวมที่ผสมดีที่สุดโดยใช้หลักข้อกำหนดสมรรถนะที่ปรารถนาของส่วนผสมมาเป็นโครงสร้างมวลรวมออกแบบ

2.15.1 การเลือกวัสดุ (Material Selection)

แอสฟัลต์เชื่อมประสาน (Asphalt Binder)

แอสฟัลต์เชื่อมประสานที่จะใช้ในการผสมต้องเลือกจากสภาพแวดล้อมและแรงกระทำจากการจราจร โดยการใช้กระบวนการที่กล่าวไว้ในเรื่องแอสฟัลต์เชื่อมประสาน

มวลรวม (Aggregate)

ลักษณะเฉพาะของมวลรวมเป็นตัวแปรวิกฤตที่จะส่งผลต่อสมรรถนะของผิวทางแอสฟัลต์ผสมร้อน ซึ่งลักษณะเฉพาะนี้แบ่งออกเป็น คุณสมบัติความสอดคล้อง และคุณสมบัติแหล่งกำเนิด โดยคุณสมบัติความสอดคล้องที่ใช้ในกระบวนการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีซูเปอร์เพฟได้แก่ รูปร่างของมวลรวมหยาบ (Coarse aggregate angularity) รูปร่างของมวลรวมละเอียด (Fine aggregate angularity) ความแบนและความยาวของอนุภาค (Flat and Elongated particles) และปริมาณดินเหนียว (Clay content) ซึ่งเกณฑ์ในการกำหนดคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับระดับ

ปริมาณการจราจรและตำแหน่งของโครงสร้างผิวทาง วัสดุที่อยู่ใกล้ผิวทางจะมีความเค้นที่มากระทำมากกว่าจึงต้องเลือกวัสดุที่มีคุณภาพดีกว่า โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดควรจะขึ้นอยู่กับมวลรวมที่ผสมแล้วมากกว่าองค์ประกอบของมวลรวมแต่ละชนิดที่มาผสม ส่วนคุณสมบัติแหล่งกำเนิดที่ใช้ในกระบวนการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีซูเปอร์เพฟได้แก่ ความทนทานหรือการสึกกร่อนลอสมแอนเจลีส์ (Toughness or Los Angeles Abrasion) ความคงทนต่อโซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียมซัลเฟต (Sodium or Magnesium Sulfate Soundness) และวัสดุที่เป็นอันตราย (Deleterious materials) โดยข้อกำหนดสำหรับค่าสูงสุดที่เสียไปสำหรับการสึกกร่อนลอสมแอนเจลีส์อยู่ในช่วงร้อยละ 35 ถึง 45

2.15.2 เครื่องบดอัดไจราทอรีแบบซูเปอร์เพฟ (Superpave Gyrotory Compactor, SGC)

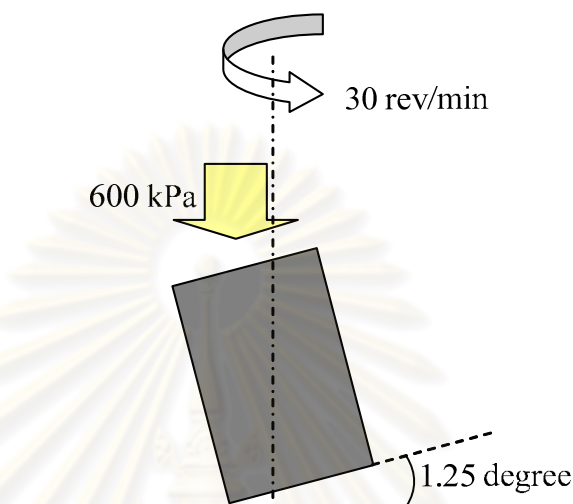
การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีซูเปอร์เพฟจะใช้เครื่องไจราทอรีในการบดอัดตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งเครื่องไจราทอรีพัฒนามาจากความต้องที่จะหาวิธีในการบดอัดตัวอย่างให้ได้ความหนาแน่นเหมือนสภาพจริงในการจราจร



รูปที่ 2.21 เครื่องบดอัดไจราทอรีแบบซูเปอร์เพฟ

กลไกการให้แรงกระทำจะให้แรงกระทำส่งผ่านแขนบดอัด (Loading ram or actuator) ไปยังตัวอย่างด้วยความดัน 600 ± 18 กิโลปาสคาล ส่วนแบบหล่อ (Mold) ที่ใช้บรรจุส่วนผสมแอสฟัลต์ผสมร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 มิลลิเมตรขึ้นอยู่กับรูปแบบการทดสอบ มีแผ่นฐาน (Base plate) ที่รองใต้แบบหล่อเพื่อกันไม่ให้ตัวอย่างหลุดออกไปตลอดช่วงระยะเวลาการบดอัด

เครื่องบดอัดไจราทอรีจะหมุนด้วยอัตราคงที่ 30 รอบต่อนาที ซึ่งฐานจะเอียงตัว 1.25 ± 0.02 องศาจากแนวระนาบ โดยลักษณะและรูปแบบการบดอัดตัวอย่างแอสฟัลต์ผสมร้อนด้วยเครื่องบดอัดไจราทอรีแบบซูเปอร์เพฟแสดงไว้ในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ลักษณะการบดอัดตัวอย่างแอสฟัลต์ผสมร้อนด้วยเครื่องบดอัดไจราทอรีแบบซูเปอร์เพฟ (วาดใหม่ Asphalt Institute, 1996)

การวัดความสูงของตัวอย่างเป็นฟังก์ชันสำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องบดอัดไจราทอรี ค่าความสูงจะถูกวัดโดยการบันทึกตำแหน่งของแท่นกดตลอดระยะเวลาการทดสอบ จากนั้นจะประมาณค่าความหนาแน่น (Density) ซึ่งคำนวณจากการหารมวลด้วยปริมาตรของตัวอย่าง โดยการใช้มวลของวัสดุที่อยู่ในแบบหล่อ เส้นผ่านศูนย์กลางของแบบหล่อและความสูงของตัวอย่างซึ่งสามารถวัดได้ตลอดระยะเวลาใช้ในกระบวนการบดอัด ภายหลังจากการบดอัดตัวอย่างแอสฟัลต์ผสมร้อนที่ได้จะต้องมีคุณลักษณะและคุณสมบัติตามที่ออกแบบไว้ โดยที่การบดอัดตัวอย่างด้วยเครื่องบดอัดไจราทอรีจะต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและสั่งงาน

2.16 การทดสอบสมรรถนะของแอสฟัลต์ผสมร้อน (Performance Testing of HMA)

การทดสอบสมรรถนะของส่วนผสมแอสฟัลต์ผสมร้อนจะถูกใช้ในการทำนายสมรรถนะของแอสฟัลต์ผสมร้อนก่อนที่จะนำไปใช้งานทางด้านการจราจรและยังใช้ในการประเมินวัสดุหรือเครื่องมือในการออกแบบใหม่ๆ เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของผิวทางแอสฟัลต์ผสมร้อนให้ดีขึ้น ซึ่งการทดสอบสมรรถนะของแอสฟัลต์ผสมร้อนในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบโดยอ้างอิงจากความเค้นหรือ

ความเครียดวิกฤตที่เกิดขึ้นจริงในชั้นผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 คือ ทดสอบพฤติกรรมด้านกำลังรับแรงดึงเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการต้านทานต่อความเค้นดึงที่เกิดขึ้นบริเวณผิวบนของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีตและเพื่อวิเคราะห์ค่าโมดูลัสคืนตัวสำหรับใช้ในการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่น ทดสอบพฤติกรรมด้านกำลังรับแรงอัดเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการต้านทานต่อความเค้นอัดที่เกิดขึ้นบริเวณขอบล่างของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีต

2.16.1 การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test)

ในการออกแบบโครงสร้างถนนคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเป็นปัจจัยที่สำคัญ หนึ่งในคุณสมบัติดังกล่าว คือ กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) ดังนั้นจึงมีการออกแบบวิธีการทดสอบมากมายเพื่อหาวิธีการทดสอบที่มีประสิทธิภาพในการทดสอบได้อย่างถูกต้อง สะดวก และมีความแปรปรวนต่ำ แต่การหาค่ากำลังรับแรงดึงของวัสดุโดยตรงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากเครื่องมือทดสอบที่จะใช้จับวัสดุเพื่อทำการทดสอบยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการทดสอบทางอ้อมในการหาค่ากำลังรับแรงดึง

การทดสอบแรงดึงทางอ้อมเริ่มจากให้แรงกระทำแบบอัด (Compression load) อาจเป็นแบบสถิตหรือพลวัตก็ได้ขึ้นอยู่กับผลที่ต้องการจากการทดสอบ โดยให้แรงกระทำผ่านแท่งกدنน้ำหนักในแนวขนานตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางแนวตั้งของวัสดุทดสอบ ซึ่งแท่งกدنน้ำหนักรับน้ำหนักสัมผัสกับผิววัสดุเป็นส่วนโค้งที่มีรัศมีเท่ากับรัศมีของวัสดุ เพื่อให้น้ำหนักกระจายและรักษาพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำให้คงที่ จากการให้แรงกระทำในลักษณะนี้จะทำให้เกิดความเค้นดึง (Tensile Stress) ค่อนข้างสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้ง ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้พบว่า ความเค้นอัด (Compressive Stress) ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งมีค่าประมาณ 3 เท่าของความเค้นดึงที่เกิดในแนวราบ

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ แบ่งออกเป็น 2 การทดสอบได้แก่ การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต (Static Indirect Tensile Test) กับแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต (Dynamic Indirect Tensile Test)

การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต (Static Indirect Tensile Test) ASTM D 4867

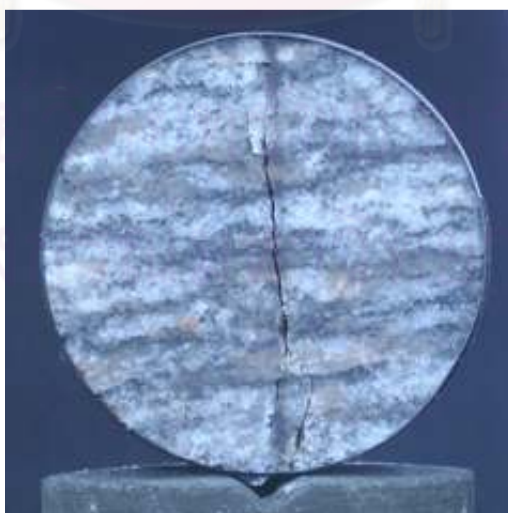
ในการออกแบบโครงสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่นคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญ หนึ่งในคุณสมบัติดังกล่าว คือ กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งแอสฟัลติกคอนกรีต

(Asphaltic concrete) เป็นวัสดุที่สำคัญสำหรับการก่อสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่น ดังนั้นการพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุจึงใช้พารามิเตอร์กำลังรับแรงดึงในการพิจารณา

ในปี พ.ศ.2530 มีรายงานว่าบริเวณชั้นผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตจะเกิดความเค้นและความเครียดวิกฤติ (Critical stress-strain) แบบแรงดึง (อ้างอิงจาก Federal Highway Administration, FHWA) ทำให้มีการนำเสน่วิธีการทดสอบหาลำดับรับแรงดึงอย่างง่าย โดยการใช้แรงอัดกระทำผ่านแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ (อ้างอิงจาก ASTM)

สำหรับปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของแอสฟัลติกคอนกรีต คือ อุณหภูมิ (Temperature) และอัตราการความเครียด (Strain rate) ในปี พ.ศ.2545 Schwartz และคณะ ได้ศึกษาพฤติกรรมรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined uniaxial behaviour) ของแอสฟัลติกคอนกรีตภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาในการให้แรงกระทำ ซึ่งบางส่วนของงานวิจัยนี้สรุปว่าเวลาและอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักสำหรับอธิบายพฤติกรรมด้านกำลังของแอสฟัลติกคอนกรีต ต่อมาปี พ.ศ.2550 Li และคณะ ได้ศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) ของแอสฟัลติกคอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราการให้แรง ซึ่งสรุปว่ากำลังรับแรง (Strength) และความแข็งแรง (Stiffness) ของแอสฟัลติกคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราการให้แรง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ อัตราความเครียดและประเภทของแอสฟัลต์ ที่มีต่อพฤติกรรมความเค้น ความเครียด และกำลัง (Stress-strain-strength behaviour) ของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้วัสดุภายในประเทศไทยในการทดสอบ



รูปที่ 2.23 ลักษณะการพังทลายของตัวอย่าง (SP Technical Research Institute of Sweden, www.sp.se)

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่ประมาณได้จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบสถิต (Static Modulus of Elasticity, E) และค่ากำลังรับแรงดึง (Tensile Strength, S_t) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$S_t = \frac{P_{FAIL}}{tD_1} \quad (2.7)$$

$$E = \frac{S_H}{t(0.27 + \nu)} \quad (2.8)$$

โดยที่ P_{FAIL} คือ แรงวิบัติ (Failure load) t คือ ความหนาของตัวอย่าง D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง H_D คือ การเคลื่อนตัวแนวราบ S_H คือ โมดูลัสเส้นสัมผัสแนวราบ (horizontal tangent modulus, $\Delta P / \Delta H_D$) ซึ่งเป็นความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระทำการเคลื่อนตัวในแนวราบ ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ทั่วไปสมมุติค่าประมาณ 0.35 (ASTM D 4123)

การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต (Dynamic Indirect Tensile Test) ASTM D 4123

ในปัจจุบันการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นใช้การออกแบบเชิงวิเคราะห์ (Analytical design) ที่ต้องใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุในการออกแบบ หนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญต่อการออกแบบเชิงวิเคราะห์ คือ ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus value, M_R) เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้การออกแบบเชิงวิเคราะห์สามารถทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างและวัสดุชั้นทางต่างๆ ได้ อย่างถูกต้อง แตกต่างจากวิธีในอดีต คือ การออกแบบเชิงประสบการณ์ (Empirical design) ที่อาศัยความสัมพันธ์จากการทดสอบวัสดุไปใช้ในการออกแบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการออกแบบเชิงประสบการณ์ไม่ได้ใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่แท้จริงในการออกแบบ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิ อัตราการให้แรงและประเภทของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต ด้วยการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต (Indirect tensile test for resilient modulus of asphaltic concrete) ตามมาตรฐาน ASTM D 4123

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่ประมาณได้จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต คือ ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus, M_R) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$M_R = \frac{P(\nu + 0.2734)}{\delta t} \quad (2.9)$$

โดยที่ P คือ แรงกระทำแบบพลศาสตร์ (Dynamic load) ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ทัวไปสมมุติค่าประมาณ 0.35 (ASTM D 4123) δ คือ การเสียรูปแบบคืนตัวทั้งหมด (Total recoverable deformation) t คือ ความหนาของตัวอย่าง (Specimen thickness)

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่ได้จากการทดสอบทั้งสองวิธีสามารถนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์ และสามารถนำไปประมาณหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หรือออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์ได้ ซึ่งการทดสอบนี้ยังสามารถนำมาใช้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิและอัตราการให้แรงกระทำ นอกจากนี้ยังสามารถนำผลการทดสอบไปอธิบายรูปแบบความเสียหายของถนนได้ เช่น การแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) เป็นต้น

2.16.2 การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined compression test)

ในการออกแบบโครงสร้างถนนคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเป็นปัจจัยที่สำคัญ หนึ่งในคุณสมบัติดังกล่าว คือ กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) เนื่องจากเมื่อผิวทางมีน้ำหนักจากล้อรถมากระทำจะเกิดความเค้นอัดขึ้นที่บริเวณขอบบนของชั้นแอสฟัลติกคอนกรีตที่เป็นชั้นผิวทาง เมื่อหน่วยแรงอัดที่มากกระทำมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุจะทำให้เกิดความเสียหายแบบการยุบตัวแบบถาวร หรือ รอยร่องล้นขึ้น ดังนั้นจึงทำการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของวัสดุ ด้วยการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตและพลวัต

การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต (Static Unconfined compression test)

การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต คือ การให้แรงกระทำตามแนวแกนของตัวอย่างด้วยอัตราคงที่ จากนั้นวัดค่าแรงกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นแล้วนำมาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่ประมาณได้จากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต คือ ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength, S_c) ดังแสดงในสมการที่ 2.10 และค่าโมดูลัสของยัง ที่ 50% ของความเค้นสูงสุด (Secant Young's modulus at 50% of maximum stress, E^{50})

$$S_c = \frac{P_{\max}}{A} \quad (2.10)$$

โดยที่ S_c คือ กำลังรับแรงอัด P_{\max} คือ แรงกระทำแบบสถิตสูงสุด (maximum static load) และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัต (Dynamic Unconfined compression test) NCHRP ฉบับที่ 465

ในการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นนั้น ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งาน ความเสียหายที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ การยุบตัวแบบถาวร (Permanent Deformation) หรือการเกิดร่องล้อ (Rutting) ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่จะนำมาใช้ทำผิวทาง เพื่อศึกษาลักษณะการยุบตัวแบบถาวร ซึ่งสามารถทดสอบได้ด้วยการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัต โดยรูปแบบการทดสอบจะมีสภาพใกล้เคียงสภาพจริงที่เกิดขึ้น

การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัตจะทำการทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์การยุบตัวแบบถาวรของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต โดยทั่วไปมักจะมีการแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวแบบถาวรกับจำนวนรอบที่มีแรงกระทำ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นในสมการที่ 2.3

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.17.1 เสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้ยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 และ 80/100 (รายงานฉบับที่ วว. 119 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง โดย อเนก เปี้ยลัดดา, 2532)

ในช่วงปี พ.ศ. 2532 ผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 80/100 เป็นวัสดุผสม ซึ่งกรมทางหลวงได้ประสบปัญหาอย่างมากในด้านการบำรุงรักษาผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตที่เสียหาย เนื่องจากกำลังของผิวทางมีค่าเสถียรภาพค่อนข้างต่ำจึงไม่สามารถต้านทานต่อน้ำหนักบรรทุกและปริมาณการจราจรที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาของผิวทางที่เสียหายเนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์มีค่าเพเนตรชันค่อนข้างอ่อนและเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตให้มากยิ่งขึ้น กรมทางหลวงจึงได้ทำการศึกษาวิจัยคุณสมบัติของ

เสถียรภาพแอสฟัลติกคอนกรีตตามวิธีการทดลองของมาร์แชล โดยใช้ AC60/70 ที่มีค่าเพเนเตรชัน แข็งกว่า AC80/100 ทำการทดลองกับหินจากแหล่งต่างๆ รวม 4 แหล่ง ใช้หิน 3 ชนิด คือ หินปูน หินแกรนิต และหินบะซอลต์ โดยจัดให้มีการเรียงขนาดเป็น 2 แบบ ตามขนาดของหินก้อนโตสุด ตามมาตรฐานของ Asphalt Institute (The Asphalt Institute, 1980) เพื่อทำการทดสอบ คุณสมบัติต่างๆ แล้วนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน อันจะเป็นแนวทางไปสู่การ กำหนดขีดจำกัดของคุณสมบัติของ AC60/70 ในการใช้งานต่อไป

จุดประสงค์ของการค้นคว้าวิจัย เพื่อหาผลที่เกิดจากเพเนเตรชัน (Penetration) ของ แอสฟัลต์ที่มีต่อค่าเสถียรภาพ (Stability) ของวัสดุผสมแอสฟัลติกคอนกรีต ซึ่งเป็นเสถียรภาพแบบ มาร์แชล (Marshall Stability) โดยวัดที่อุณหภูมิและอัตราที่แรงกระทำเท่ากัน รวมถึงคุณสมบัติ อื่นๆของแอสฟัลติกคอนกรีตด้วย

รายงานผลการศึกษาของ อเนก (2532) พบว่าแอสฟัลติกคอนกรีตจะมีค่าความหนาแน่น เพิ่มขึ้นตามปริมาณแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้น แอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ให้ความหนาแน่นต่ำกว่าที่ใช้ AC80/100 ทำให้ปริมาณช่องว่างมีมากกว่าที่ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากัน และค่าเสถียรภาพ ของแอสฟัลติกคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่น ตัวอย่างที่ใช้ AC60/70 จะให้ค่าเสถียรภาพ สูงกว่า ในขณะที่ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าเมื่อมีปริมาณแอสฟัลต์เท่ากัน ส่วนค่าการยุบตัว (Flows) ไม่แน่นอน แต่มีแนวโน้มว่าค่าการยุบตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้ AC60/70 จะน้อยกว่าที่ใช้ AC80/100 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า AC60/70 เป็นวัสดุประสานที่ทำให้แอสฟัลติกคอนกรีตมี ค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ทำให้ผิวทางสามารถต้านทานต่อน้ำหนักบรรทุก และปริมาณการจราจรที่ เพิ่มขึ้นได้ดีกว่าการใช้ AC80/100 เป็นวัสดุประสาน

2.17.2 ผลของอัตราการให้แรงและอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติก คอนกรีต (Rate of Loading and Temperature Effects on the Indirect Tensile Strength of Asphaltic Concrete) (ธนกร ชมภูรัตน์, 2551)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลของอัตราการให้แรงและอุณหภูมิต่อกำลังรับแรง ดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต ตัวอย่างการทดสอบจะถูกให้แรงในลักษณะควบคุม ความเครียดจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการเสียหายในคราวเดียว โดยที่ตัวอย่างทดสอบมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 65 มิลลิเมตร ถูกเตรียมขึ้นจากการใช้เครื่องบดอัดแบบไจรา ทอรี ซึ่งมีการควบคุมความหนาแน่นและขนาดคละของมวลรวมให้คงที่ในแต่ละตัวอย่างทดสอบ โปรแกรมการทดสอบกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 10°C 25°C 40°C และ 55°C ตามลำดับ และมีการควบคุมอัตราการให้แรงแบบควบคุมความเครียดที่แตกต่างกันคือ 0.0250

0.0083 0.0025 และ 0.0008 ต่อวินาที ตามลำดับ ดังนั้นตัวอย่างการทดสอบมีจำนวนทั้งสิ้น 16 ตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมและความแข็งของตัวอย่าง ณ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราการให้แรงที่ค่าต่าง ๆ ดังกล่าวเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงประจักษ์

ตัวอย่างวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่นำมาใช้ทดสอบนั้นออกแบบด้วยวิธีมาร์แชล (Marshall method) ส่วนผสมของวัสดุดังกล่าวประกอบด้วย AC 60/70 และวัสดุมวลรวมขนาดเรียกใช้โตสุด (Nominal maximum size of aggregate) 12.5 มิลลิเมตร จากการออกแบบด้วยวิธีข้างต้น ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 ที่ใช้ผสมมีค่าเท่ากับ 5.5% ของปริมาณมวลรวมทั้งหมด หลังจากผสมตัวอย่างเข้าด้วยกันแล้วส่วนผสมทั้งหมดจะถูกนำมาบดอัดด้วยเครื่องบดอัดโรตารีแบบซูเปอร์เพฟ (Superpave gyratory compactor, SGC)

ภายหลังจากการบดอัดแล้ว ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ได้ต้องมีคุณลักษณะและคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร สูง 65 มิลลิเมตร ความหนาแน่น (Density) อยู่ที่ 2,400-2450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และปริมาณช่องว่างของอากาศ (Air void, AV) เป็น 3-4% โดยการบดอัดตัวอย่างด้วยเครื่องบดอัดโรตารีแบบซูเปอร์เพฟต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและสั่งงาน

เมื่อเตรียมตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตได้ตามเงื่อนไขที่ระบุ นำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบหาพฤติกรรมรับแรงดึงด้วยการทดสอบแบบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม โดยการใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมจะเพิ่มแรงอัดกับตัวอย่างในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยค่าความเครียดแนวรัศมี (Radial strain) ของตัวอย่างจะสามารถตรวจวัดได้จากการติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gage) จำนวน 2 ตัว โดยติดตั้ง ณ ตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ด้าน สำหรับการวัดค่าความเครียดนั้นเกจวัดความเครียดที่เลือกใช้ให้ความแม่นยำระดับ 30 $\mu\epsilon$ ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ ด้วยระดับความแม่นยำดังกล่าวทำให้ความคลาดเคลื่อนในการวัดความเครียดอยู่ในระดับ 0.1% ซึ่งยอมรับได้

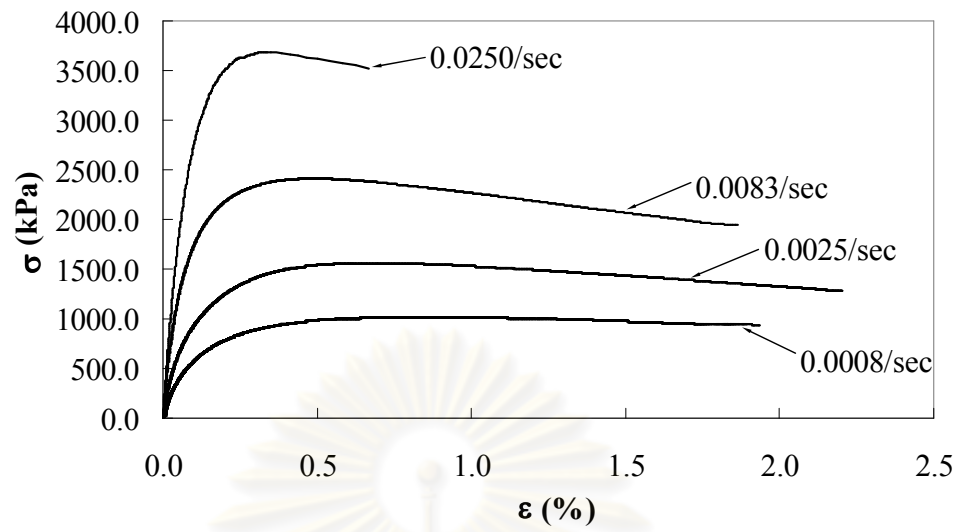
ผลการทดสอบพฤติกรรมรับแรงดึงของแอสฟัลติกคอนกรีตภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้ง 4 ค่า แสดงในรูปที่ 2.24 สำหรับอุณหภูมิที่ 10°C พบว่าวัสดุผสมแอสฟัลต์นั้นมีค่าความเค้นและกำลังสูงสุด และจากรูปที่ 2.24(a) พบว่าพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Constitutive behavior) มีแนวโน้มแสดงพฤติกรรมเป็นแบบแรงดึงสมบูรณ์ (Perfectly tensile behavior) อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมินี้จะสังเกตเห็นได้ว่าค่ากำลังหลังจากจุดความเค้นสูงสุด (Peak stress) จะลดลงอย่างรวดเร็วหรือบางที่ก็ไม่สามารถสังเกตเห็นได้เลย

เนื่องจากที่อุณหภูมิต่างๆ นั้นแอสฟัลติกคอนกรีตจะแสดงพฤติกรรมเป็นแบบวัสดุเปราะ (Brittle material) โดยเฉพาะที่อัตราความเครียดสูงสุด (0.0250 ต่อ วินาที) สำหรับอุณหภูมิมาตรฐาน (25°C) วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตสามารถแสดงพฤติกรรมแบบแรงดึงทางอ้อมได้ในบางอัตราความเครียด เช่นเดียวกับที่ 10°C ดังแสดงในรูปที่ 2.24(b) แต่สำหรับที่อัตราความเครียดต่ำสุด (0.0008 ต่อ วินาที) นั้นพบว่าพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด มีแนวโน้มแสดงในรูปแบบแรงดึงและรูปแบบแรงอัด ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นได้จากความแข็งแรงเริ่มแรก (Initial stiffness) หรือความชันเริ่มต้นนั้นมีค่าสูงมาก และพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดหลังจากจุดสูงสุดมีแนวโน้มย้อนกลับ (rebound) ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่หรือขอบเขตที่เกิดแรงดึงนั้นมีบริเวณน้อยกว่าพื้นที่การเกิดแรงอัด ณ จุดสัมผัสบนและล่าง (Top and bottom cap)

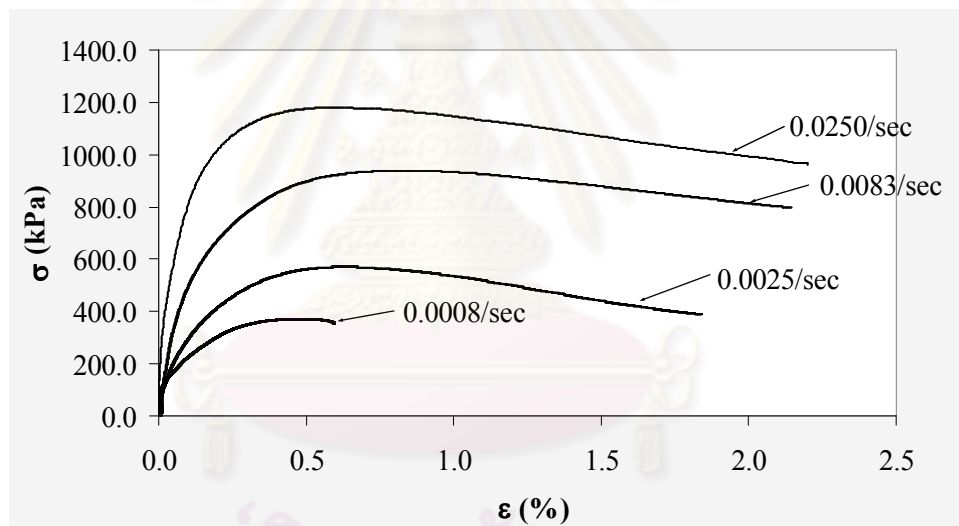
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ณ อุณหภูมิ 40°C นั้นค่อนข้างเหมือนกันกับที่อุณหภูมิ 25°C อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 2.24(c) จะสังเกตเห็นได้ว่าพื้นที่การเกิดแรงอัดมีค่าค่อนข้างมากบริเวณจุดสัมผัสบนและล่าง โดยเฉพาะที่อัตราความเครียดต่ำที่สุด (0.0008 ต่อ วินาที) ซึ่งที่อัตราความเครียดนี้ไม่สามารถแสดงพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้

ลำดับสุดท้าย ณ อุณหภูมิสูงสุด (55°C) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถอธิบายได้ที่อัตราความเครียดสูงสุดเท่านั้น ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวจะเห็นได้ว่าไม่ได้แสดงพฤติกรรมแบบแรงดึงเพียงอย่างเดียว

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าปัจจัยของอัตราความเครียดและอุณหภูมิมีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกล (Mechanical behavior) ของวัสดุผสมแอสฟัลต์ จากรูปที่ 2.25 และรูปที่ 2.26 สามารถเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสของยัง ที่ 50% ของความเค้นสูงสุด (Secant Young's modulus at 50% of maximum stress, E^{50}) และความสัมพันธ์ของค่าความเครียดสูงสุด (σ_{\max}) ที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราความเครียดและอุณหภูมิ โดยทั้งสองนั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราความเครียดและอุณหภูมิ

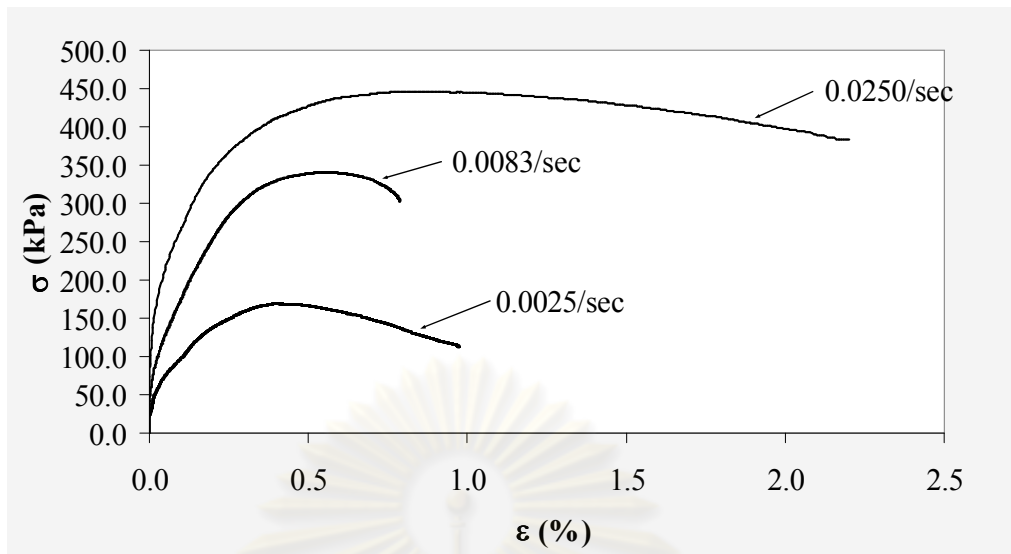


(a)

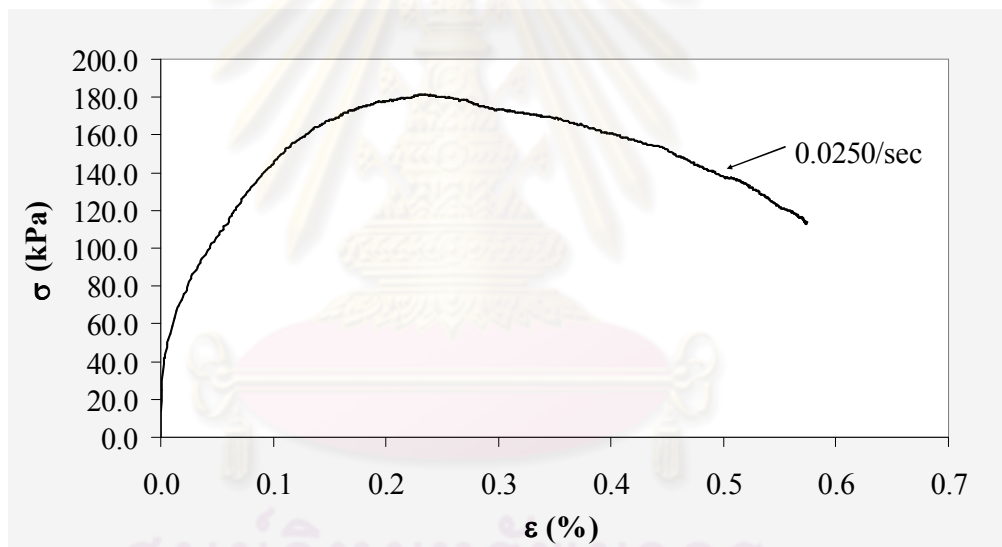


(b)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(c)

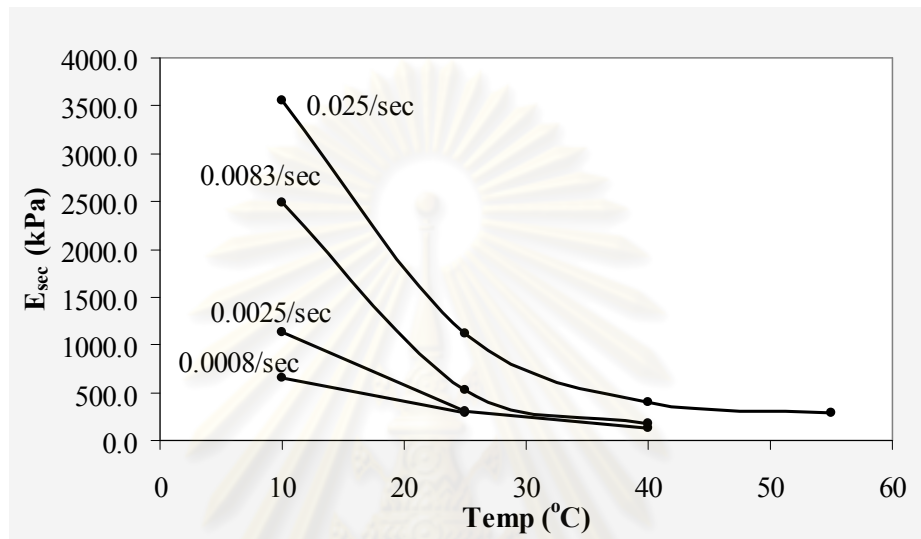


(d)

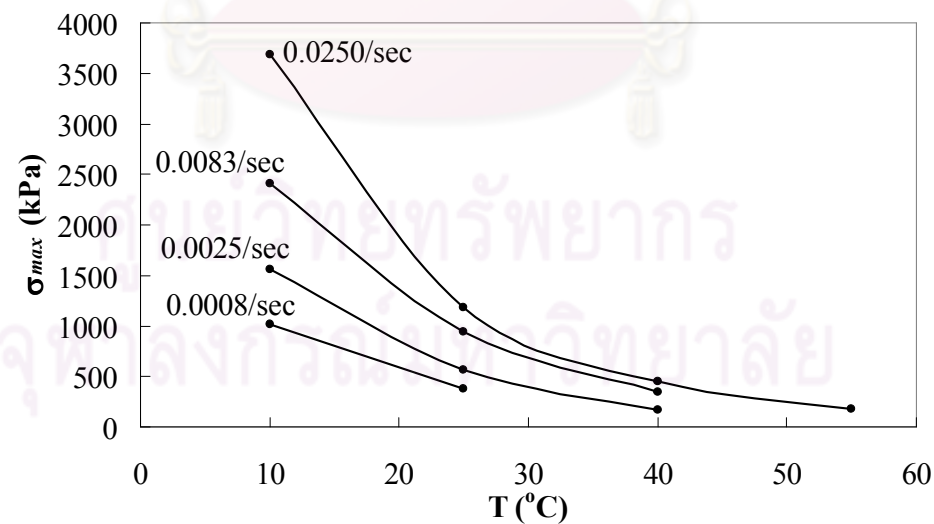
รูปที่ 2.24 พฤติกรรมความเค้นและความเครียดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราความเครียด (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C

นอกจากนี้การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตรา นั้นยังสามารถสรุปใจความสำคัญได้อีกว่า อัตราความเครียดนั้นมีผลกระทบต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังอย่างมาก ณ อุณหภูมิต่ำๆ เนื่องจากแอสฟัลติกคอนกรีตมีพฤติกรรมเป็นแบบวัสดุเปราะ และสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิสูงๆ (55 °C) นั้น ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตมิได้แสดง

พฤติกรรมด้านแรงดึงเพียงอย่างเดียว โดยจะมีการแสดงพฤติกรรมทางด้านแรงอัดด้วย ทั้งนี้เพราะตัวอย่างวัสดุดังกล่าวมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นวัสดุเปราะ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยด้านอัตราความเครียดและอุณหภูมินั้นมีผลกระทบต่อค่ากำลัง และความแข็งแรงของแอสฟัลติกคอนกรีต



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{sec} และอุณหภูมิ



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{max} และอุณหภูมิ

2.17.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าโมดูลัสคืบตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต (Temperature Effect on Resilient Modulus of Asphaltic Concrete) (ธนกร ชมภูรัตน์, 2551)

งานวิจัยฉบับนี้ได้เสนอการประมาณค่าโมดูลัสคืบตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 10°C 25°C 40°C และ 55°C ตามลำดับ อีกทั้งในงานวิจัยนี้ได้เสนอความสัมพันธ์เชิงประจักษ์สำหรับประมาณค่าโมดูลัสคืบตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตเพื่อใช้ในการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่าง ๆ

การทดสอบเริ่มจากเตรียมตัวอย่างวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต โดยออกแบบด้วยวิธีมาร์แชล (Marshall method) ส่วนผสมของวัสดุดังกล่าวประกอบด้วย แอสฟัลตซีเมนต์ (Asphalt cement) AC 60/70 และวัสดุผสมรวมขนาดเรียกใช้โตสุด (Nominal maximum size of aggregate) 12.5 มิลลิเมตร จากการออกแบบด้วยวิธีข้างต้นปริมาณยางแอสฟัลตซีเมนต์ AC 60/70 ที่ใช้ผสม มีค่าเท่ากับ 5.5% ของปริมาณมวลรวมทั้งหมด หลังจากผสมตัวอย่างเข้าด้วยกันแล้วส่วนผสมทั้งหมด จะถูกนำมาบดอัดด้วยเครื่องบดอัดโรตารีแบบซูเปอร์เพฟ (Superpave gyratory compactor, SGC)

ภายหลังจากการบดอัดตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ได้ต้องมีคุณลักษณะและคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 65 มิลลิเมตร ความหนาแน่น (Density) 2,400-2450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และปริมาณช่องว่างของอากาศ (Air void, AV) เท่ากับ 3-4% โดยที่การบดอัดตัวอย่างด้วยเครื่องบดโรตารีแบบซูเปอร์เพฟต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและสั่งงาน

เมื่อเตรียมตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตได้ตามเงื่อนไขที่ระบุ นำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบหาค่าโมดูลัสคืบตัว ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 14 ตัน โดยการติดตั้งตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบโมดูลัสคืบตัว สำหรับการประมาณค่าโมดูลัสคืบตัวต้องติดตั้งอุปกรณ์ LVDT (Linear Variable Differential Transducer) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้าง

ในส่วนการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืบตัวนั้นทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 10°C 25°C 40°C และ 55°C โดยค่าแรงที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละอุณหภูมิมียุทธศาสตร์ค่าเท่ากับ 2.48 0.97 0.35 และ 0.14 กิโลนิวตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงสูงสุด (อ้างอิง บทความ HM 01: ธนกร และคณะ, 2551) การให้แรงดังกล่าวจะให้แรงกดในลักษณะกระทำซ้ำ (Repeated load) จำนวน 155 รอบ ประกอบไปด้วย 150 รอบแรก สำหรับแรงกระทำก่อน (Preload) และ 5 รอบสุดท้ายเพื่อประเมินค่าโมดูลัสคืบตัว โดยแรงกดดังกล่าวจะกระทำที่ความถี่ 1 เฮิรท์ (Hz) นั่นคือ มีสัดส่วนช่วงการให้

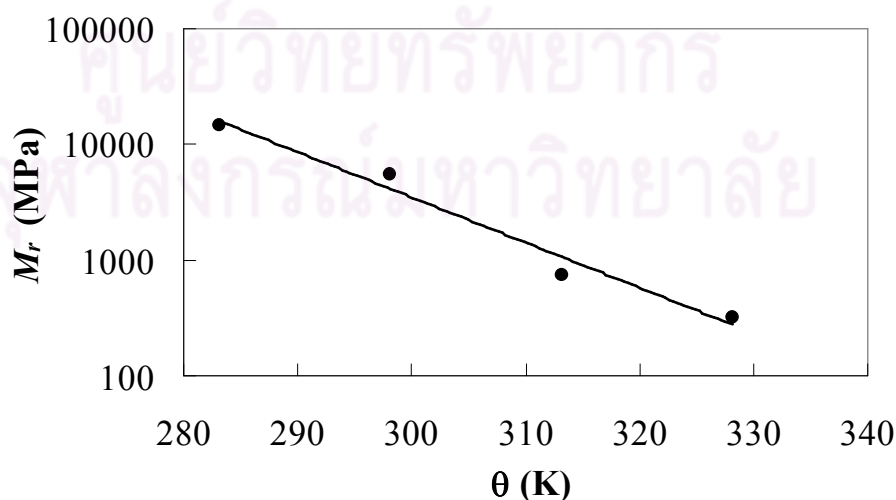
แรง (Load) ต่อช่วงเวลาการปล่อยแรง (Unload) เท่ากับ 1 ต่อ 9 หรือก็คือในแต่ละชุดของแรงกระทำ 1 วินาที มีช่วงเวลาการให้แรง 0.1 วินาที สำหรับรูปร่างของการให้แรงกำหนดให้มีลักษณะเป็น ครึ่งวงของฟังก์ชันไซน์ (Haversine function)

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัวและการเสียรูปแบบคืบตัวภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 4 ค่า ได้แสดงในตารางที่ 2.5 ค่าโมดูลัสคืบตัวจะมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น และจากผลของค่าดังกล่าวยังสามารถสังเกตเห็นได้ว่า ค่าโมดูลัสคืบตัวจะมีค่าลดลงเป็นแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ดังแสดงด้วยกราฟกึ่งล็อกในรูปที่ 2.27 จากกราฟดังกล่าวสามารถสร้างสมการเพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าโมดูลัสคืบตัว ณ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างๆ ได้ ดังแสดงในสมการที่ 3 โดยที่ θ อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (Absolute zero temperature) ประมาณ 0 K หรือ -273°C ค่าโมดูลัสคืบตัวจะมีค่าเท่ากับ 2.00×10^{15} MPa

$$M_r = 2.00 \times 10^{15} e^{-0.09T} \quad (2.11)$$

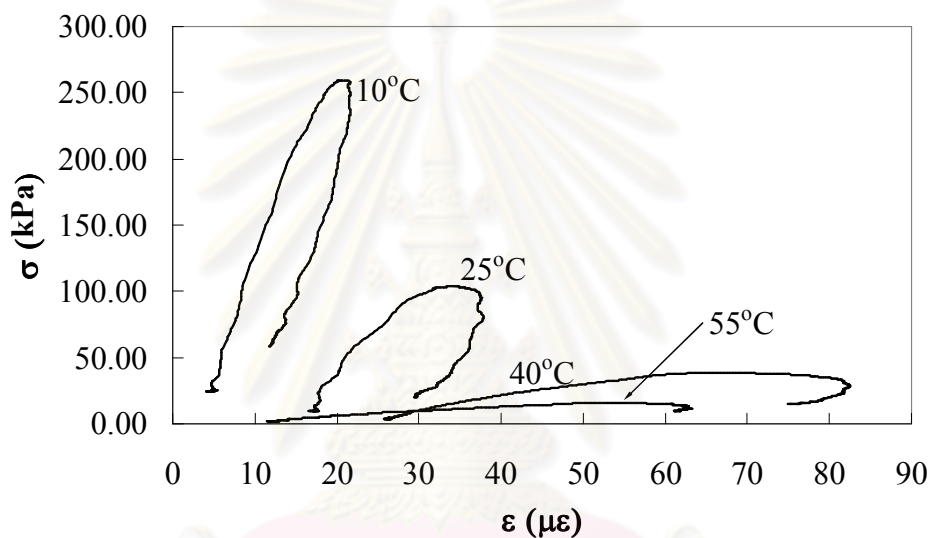
ตารางที่ 2.5 ค่าโมดูลัสคืบตัวภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ชนิด	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)			
	10 (283 K)	25 (298 K)	40 (313 K)	55 (328 K)
โมดูลัสคืบตัว (MPa)	14,765	5,479	745	319



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสคืบตัวและอุณหภูมิ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยของอุณหภูมิมีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสคืบตัวและพฤติกรรมของความเค้นและความเครียด สำหรับค่าโมดูลัสคืบตัวจะมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนั้นเมื่อนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในรอบสุดท้ายมาพิจารณานั้นจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแอสฟัลติกคอนกรีตจะแสดงพฤติกรรมแบบพลาสติก (Plastic behavior) มากขึ้น โดยสังเกตได้จากในช่วงการถอนแรงนั้น แอสฟัลติกคอนกรีตจะไม่แสดงพฤติกรรมคืบตัวได้เลย ดังเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 2.28 ที่อุณหภูมิ 40 และ 55 °C ไม่สามารถบันทึกค่าความเครียดหลังจากการถอนแรงได้เลย



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของการทดสอบแรงดึงทางอ้อมสำหรับโมดูลัสคืบตัว (รอบสุดท้าย)

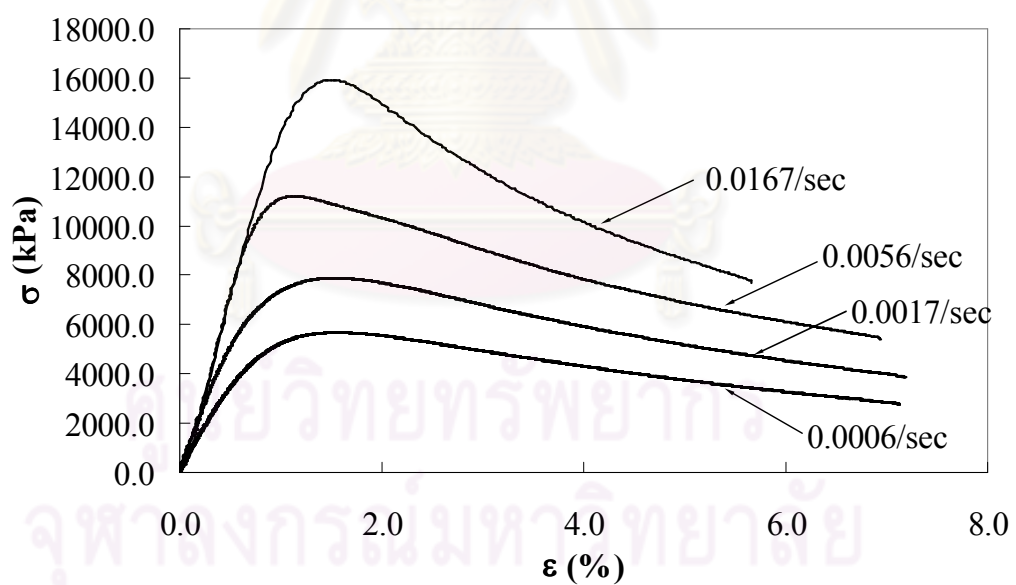
2.17.4 การซ้อนทับระหว่างเวลา กับอุณหภูมิสำหรับการทดสอบแรงอัดแกนเดียวของแอสฟัลติกคอนกรีต (Time-Temperature Superposition for Uniaxial compression test of asphaltic concrete) (ธนกร ชมภูรัตน์, 2552)

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอหลักการซ้อนทับกันระหว่างเวลา กับอุณหภูมิที่สามารถนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมของแอสฟัลติกคอนกรีต ในการศึกษาในอค์ยการทดสอบแรงอัดแกนเดียว โดยโปรแกรมการทดสอบกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 10°C 25°C 40°C และ 55°C ตามลำดับ และมีการควบคุมอัตราการให้แรงแบบควบคุมความเครียดที่แตกต่างกัน คือ 0.0167 0.0056 0.0017 และ 0.0006 ต่อวินาที ตามลำดับ ในตอนท้ายงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ

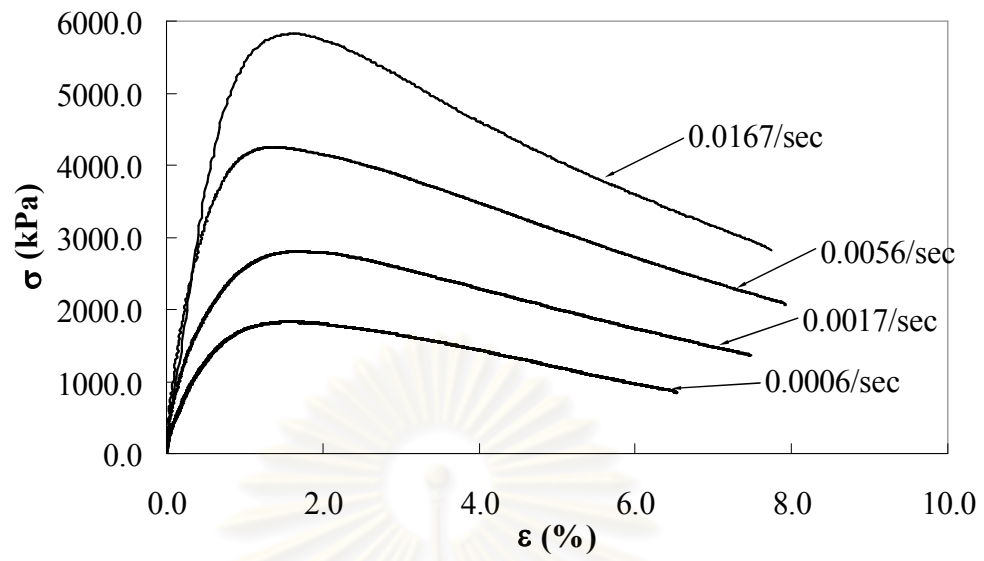
ฟังก์ชันอนุกรมเคลื่อนที่ จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบไว้ด้วย

ตัวอย่างวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่นำมาใช้ทดสอบถูกออกแบบด้วยวิธีมาร์แชล (Marshall method) โดยส่วนผสมของวัสดุประกอบด้วย AC 60/70 และวัสดุมวลรวมขนาดใหญ่สุด (Nominal maximum size of aggregate) 12.5 มิลลิเมตร จากการออกแบบด้วยวิธีข้างต้น ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 ที่ใช้ผสมมีค่าเท่ากับ 5.5% ของปริมาณมวลรวมทั้งหมด หลังจากผสมตัวอย่างเข้าด้วยกันแล้ว ส่วนผสมทั้งหมดจะถูก นำมาบดอัดด้วยเครื่องบดอัดจราจรหรือแบบซูเปอร์เพฟ (Superpave gyratory compactor, SGC)

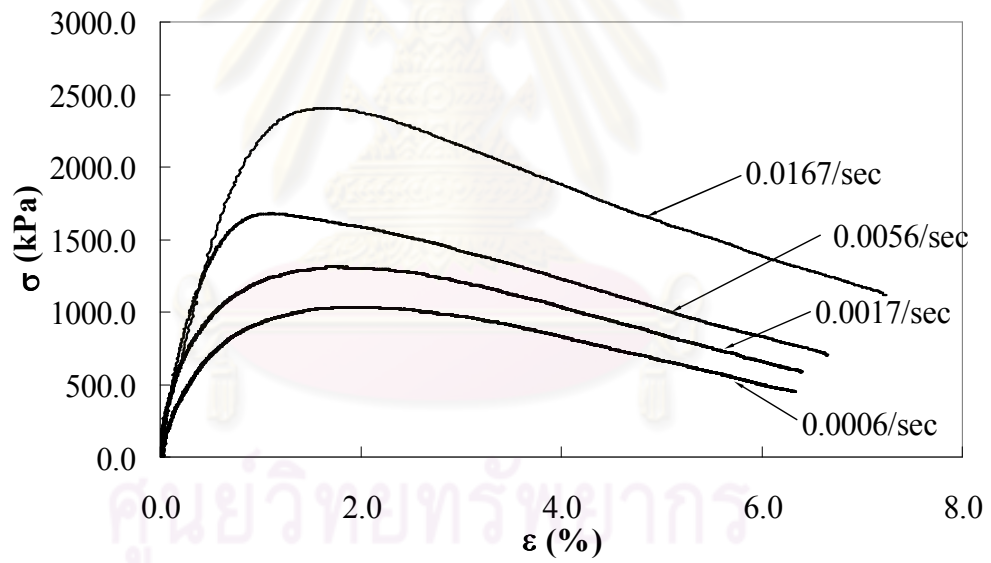
ภายหลังจากการบดอัด ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตต้องมีคุณลักษณะและคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตร ความหนาแน่น (Density) อยู่ที่ 2,400-2450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและปริมาณช่องว่างของอากาศ (Air void, AV) ประมาณ 3-5% โดยการบดอัดตัวอย่างด้วยเครื่องบดอัดจราจรหรือแบบซูเปอร์เพฟต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและสั่งงาน



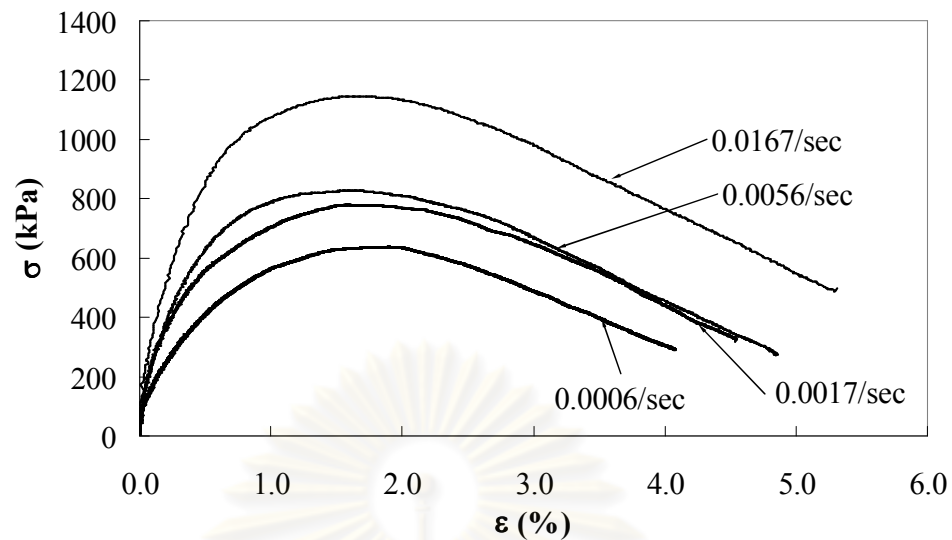
(a)



(b)



(c)



(d)

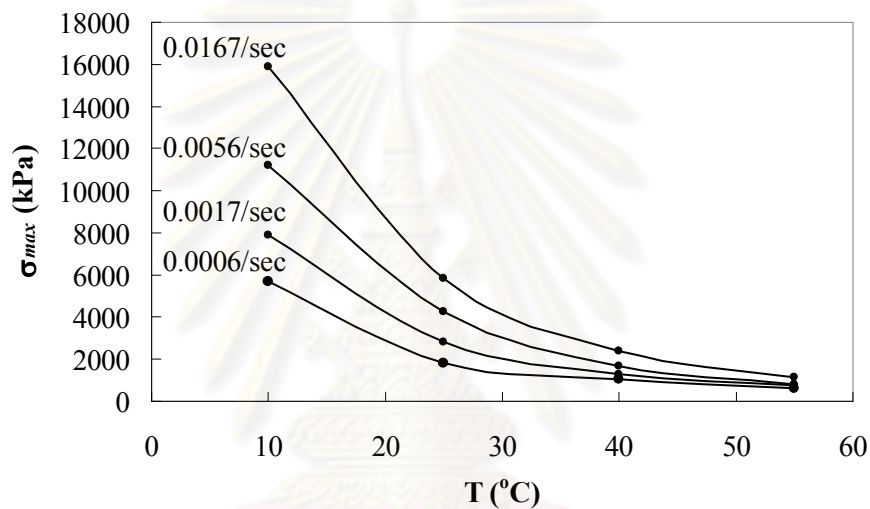
รูปที่ 2.29 พฤติกรรมความเค้นและความเครียดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราความเครียด (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C

รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ณ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างๆ สำหรับอุณหภูมิที่ 10°C ค่าความเค้นสูงสุด (Maximum stress) จะเกิดขึ้นที่ค่าความเครียดประมาณ 1.5% โดยค่าความเค้นสูงสุดจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราความเครียด และในส่วนขอความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่อุณหภูมิ 25°C 40°C และ 55°C นั้นจากการศึกษาพบว่ามีคล้ายคลึงกับผลการทดสอบที่ 10°C อย่างไรก็ตามผลการทดสอบดังกล่าวอาจจะสังเกตได้ว่าเส้นโค้งที่อุณหภูมิ 40°C และ 55°C ณ อัตราความเครียด 0.0056 ต่อ วินาที อาจจะแตกต่างไปจากแนวโน้มในภาพรวม กล่าวคือ เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดนั้นค่อนข้างแบนราบและค่าความเค้นสูงสุดมีค่าน้อยกว่าที่คาดการณ์ไว้

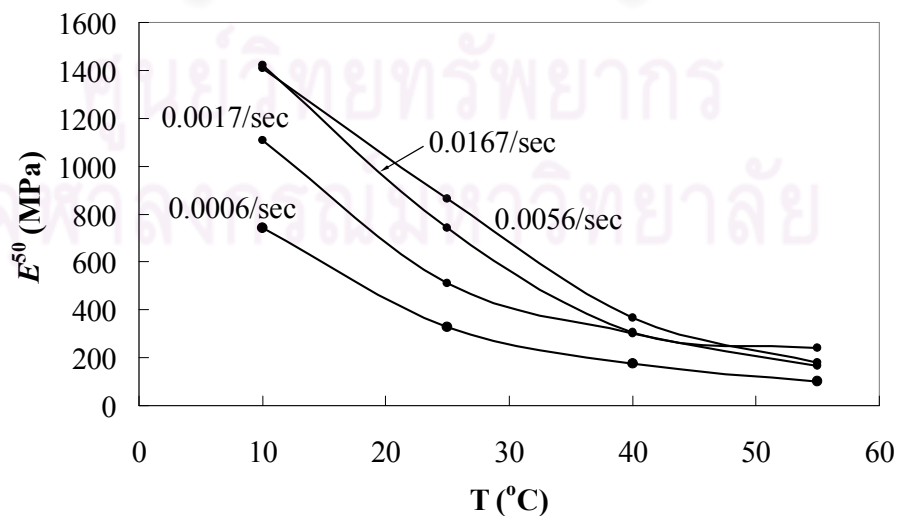
ผลการวิเคราะห์การทดสอบของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ผลการวิเคราะห์กำลัง (Strength) และความแข็งแรง (Stiffness) และผลการวิเคราะห์การซ้อนทับระหว่างเวลากับอุณหภูมิพร้อมด้วยความเสียหาย สำหรับส่วนแรกนั้นผลการวิเคราะห์จะเน้นศึกษาถึงพฤติกรรมทางด้านกำลังและความแข็งของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตในรูปแบบของแรงอัด

รูปที่ 2.30 และ 2.31 แสดงผลกระทบบของ σ_{\max} และ E^{50} ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จากภาพสรุปได้ว่าค่า σ_{\max} และ E^{50} มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและอัตราความเครียด อย่างไรก็ตามผลการทดสอบดังกล่าวอาจสังเกตความไม่สม่ำเสมอของข้อมูลได้ที่อัตราความเครียด 0.0167 และ 0.0056 ต่อ วินาที ณ อุณหภูมิ 25°C และ 40°C ดังแสดงในรูปที่ 2.31

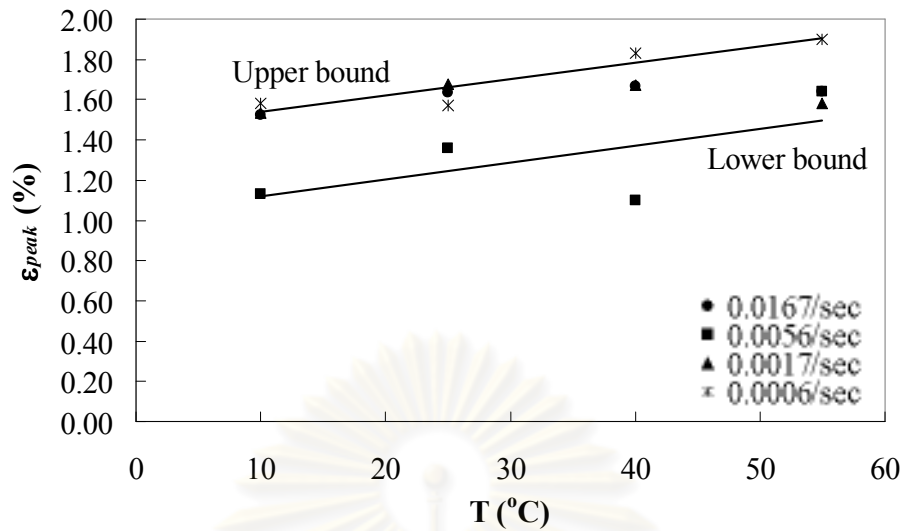
ทั้งนี้อาจเกิดจากแรงที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสระหว่างแผ่นกด (Loading plate) กับตัวอย่างทดสอบ ณ สัมผัสแรก สำหรับความเครียด ณ จุดความเค้นสูงสุด (Strain at peak, ϵ_{peak}) ของการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.32 ช่วงของค่าความเครียดดังกล่าวมีค่ากระจายอยู่ในบริเวณขอบบนและขอบล่าง (Upper and lower bound) ประมาณ 1.1 – 1.9% (เฉลี่ย 1.5%) โดยค่าความเครียด ณ จุดความเค้นสูงสุดของแอสฟัลติกคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าความเครียด ณ จุดความเค้นสูงสุดของคอนกรีต (ค่าความเครียด ณ จุดความเค้นสูงสุด ภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงอัดมีค่าประมาณ 3%)



รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{max} และอุณหภูมิ

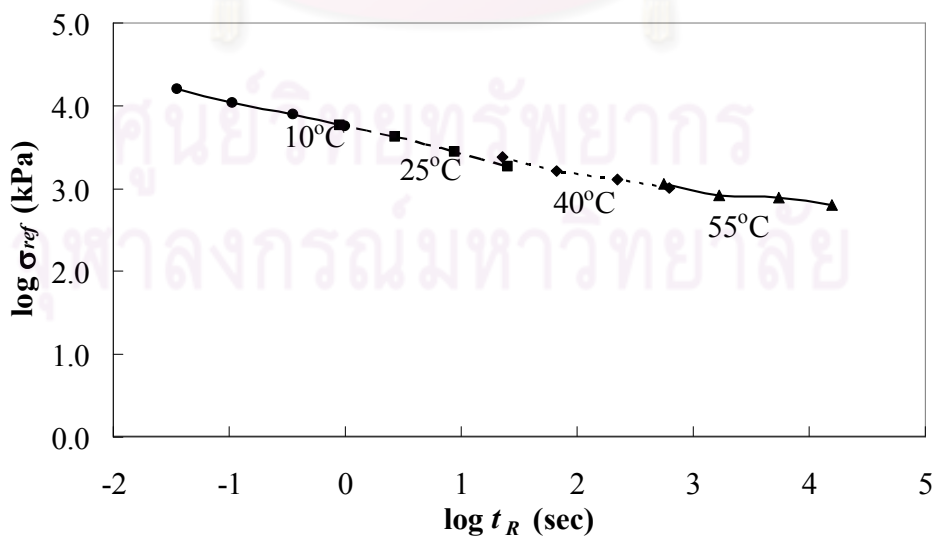


รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง E^{50} และอุณหภูมิ



รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_{peak} และอุณหภูมิ

ผลการวิเคราะห์ในส่วนที่ 2 คือ การซ้อนทับระหว่างเวลากับอุณหภูมิพร้อมด้วยความเสียหาย ภายใต้การทดสอบแรงอัดแบบปราคาจากแรงดันด้านข้าง ในการวิเคราะห์นี้ความเครียดอ้างอิงที่เลือกใช้มีค่าเท่ากับ 1.5% ซึ่งค่าดังกล่าวนั้นคือความเครียดเฉลี่ยที่จุดความเค้นสูงสุด จากข้อมูลข้างต้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ณ ความเครียดอ้างอิง (Stress at the reference strain, σ_{ref}) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถประมาณได้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear relationship) ดังแสดงในรูปที่ 2.33

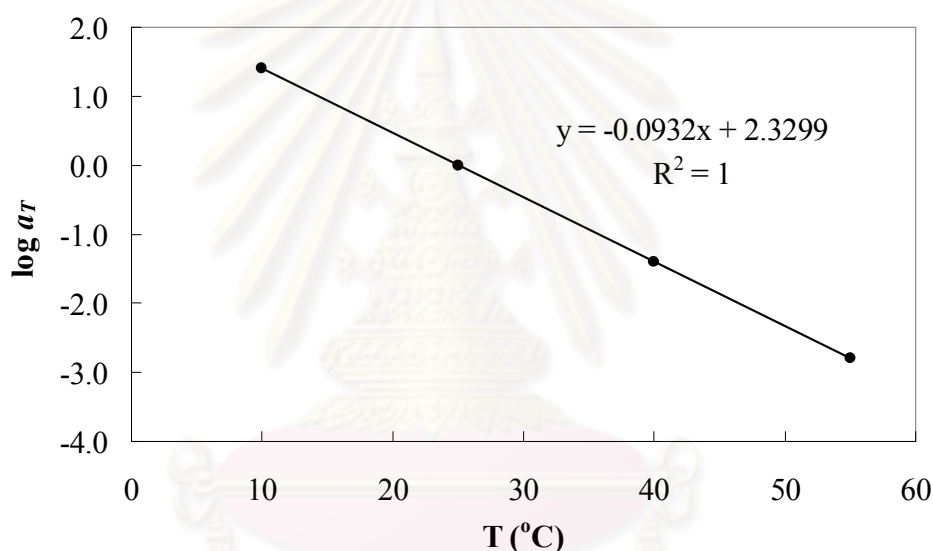


รูปที่ 2.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลาที่ลดลง

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันอุณหภูมิเคลื่อนและอุณหภูมิสามารถสรุปได้ดังสมการที่ 2.12 โดยที่เราจะใช้ฟังก์ชันอุณหภูมิเคลื่อนที่นี้ใช้สำหรับการแปลงผลการทดสอบที่อุณหภูมิอื่นๆมาที่อุณหภูมิมาตรฐาน (25°C)

$$\log a_T = -0.0932T + 2.3299 \quad (2.12)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) การวิเคราะห์เส้นแนวโน้ม (Regression analysis) ของสมการที่ 2.12 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $R^2 = 1$ แสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันอุณหภูมิเคลื่อนและอุณหภูมิ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแอสฟัลติกคอนกรีตภายใต้ช่วงกว้างของอุณหภูมิและอัตราความเครียดจากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง นอกจากนี้ยังได้นำเอาหลักการของการซ้อนทับระหว่างเวลา กับอุณหภูมิพร้อมด้วยความเสียหายที่เพิ่มขึ้นมาอธิบายผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่มีผลต่อพฤติกรรมของแอสฟัลติกคอนกรีตไว้ด้วย จากผลวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติสำหรับงานวิศวกรรมผิวทางในประเทศไทยหรือประเทศเขตร้อน อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ข้างต้นจำกัดสำหรับวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตชนิดแน่น (Dense grade) ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ศึกษาอยู่ระหว่าง 10°C กับ 55°C และผลการวิเคราะห์อ้างอิงจากการทดสอบที่ความเครียดระดับสูง (Large strain)

2.17.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต (Temperature effect on Permanent Deformation of asphaltic concrete) (ธนกร ชมภูรัตน์, 2552)

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์การยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นกับแอสฟัลติกคอนกรีตภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 4 ค่า คือ 10°C 25°C 40°C และ 55°C ตามลำดับ ทำยสุดนั้นงานวิจัยนี้ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ในการประมาณเอนโทรปีของความเสียหายของแอสฟัลติกคอนกรีตเพื่อใช้ในการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่น ณ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่าง ๆ

ตัวอย่างวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่นำมาใช้ทดสอบนั้นออกแบบด้วยวิธีมาร์แชล (Marshall method) โดยส่วนผสมของวัสดุดังกล่าวประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) AC 60/70 และวัสดุมวลรวมขนาดใหญ่สุด (Nominal maximum size of aggregate) 12.5 มิลลิเมตร จากการออกแบบด้วยวิธีข้างต้นปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 ที่ใช้ผสม มีค่าเท่ากับ 5.5% ของปริมาณมวลรวมทั้งหมด หลังจากผสมตัวอย่างเข้าด้วยกันแล้วส่วนผสมทั้งหมดถูกนำมาบดอัดด้วยเครื่องบดอัดไจราทอรีแบบซูเปอร์เพฟ (Superpave gyratory compactor, SGC)

ภายหลังการบดอัดตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ได้ต้องมีคุณลักษณะและคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตร ความหนาแน่น (Density) 2,400-2450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และปริมาณช่องว่างของอากาศ (Air void, AV) เท่ากับ 3-5% โดยที่การบดอัดตัวอย่างด้วยเครื่องบดอัดไจราทอรีแบบซูเปอร์เพฟต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและสั่งงาน

เมื่อเตรียมตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตได้ตามเงื่อนไขที่ระบุข้างต้นแล้ว นำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบหาค่าโมดูลัสคืบตัว ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 14 กิโลนิวตัน สำหรับการประมาณค่าโมดูลัสคืบตัวจำเป็นที่จะต้องติดตั้งอุปกรณ์ LVDT (Linear Variable Differential Transducer) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

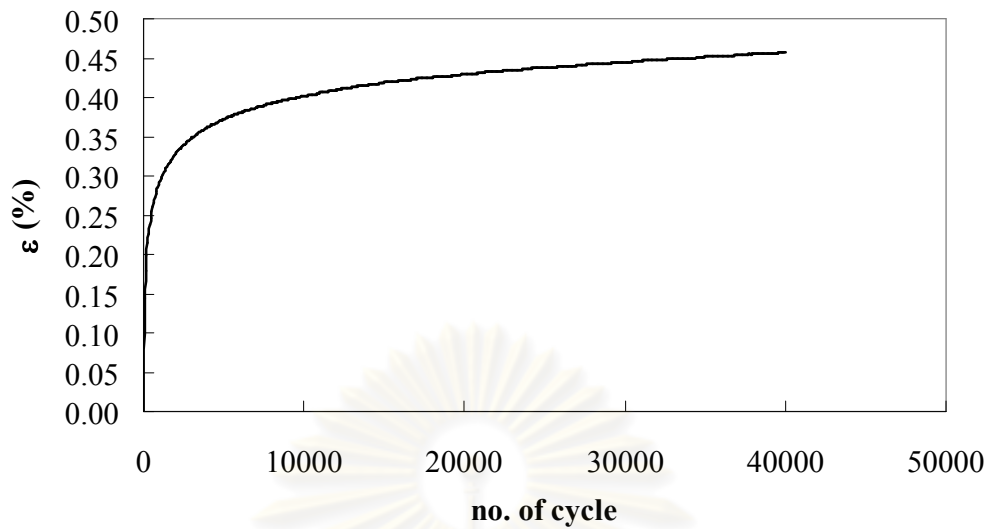
ในส่วนการทดสอบแรงกระทำซ้ำแบบปราศจากแรงดันด้านข้างทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 10°C 25°C 40°C และ 55°C โดยค่าระดับความเค้น (Stress level) ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 207 กิโลปาสกาล (NCHRP report 465, 2002) การให้ความเค้นดังกล่าวจะให้แรงกดในลักษณะกระทำซ้ำ (Repeated load) จำนวน 40,000 รอบ หรือจนกว่าตัวอย่างจะเสียหาย โดยแรงกดดังกล่าวจะกระทำที่ความถี่ 1 เฮิรท์ (Hz) นั่นคือ มีสัดส่วนช่วงการให้แรง (Load) ต่อช่วงเวลาการปล่อยแรง (Unload) เท่ากับ 1 ต่อ 9 หรือก็คือในแต่ละชุดของแรงกระทำ 1 วินาที มีช่วงเวลาการให้แรง 0.1 วินาที

เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นของการทดสอบการยุบตัวถาวรจากแรงกระทำซ้ำและจากการให้แรงแบบสถิตนั้น จะมีรูปแบบความเสียหายซึ่งสามารถอธิบายได้ในแนวทางเดียวกันกล่าวคือ รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบความคืบ แต่การพิจารณาการเกิดรูปแบบความเสียหายมีข้อแตกต่างกันเล็กน้อย คือเมื่อพิจารณาความเครียดพลาสติกจากการให้แรงกระทำซ้ำ มักจะอธิบายด้วยจำนวนครั้งของแรงกระทำ (ดังรูปที่ 2.11(a)) แต่ในกรณีของการให้แรงแบบสถิตจะอธิบายด้วยเวลาที่แรงกระทำ (\log of time)

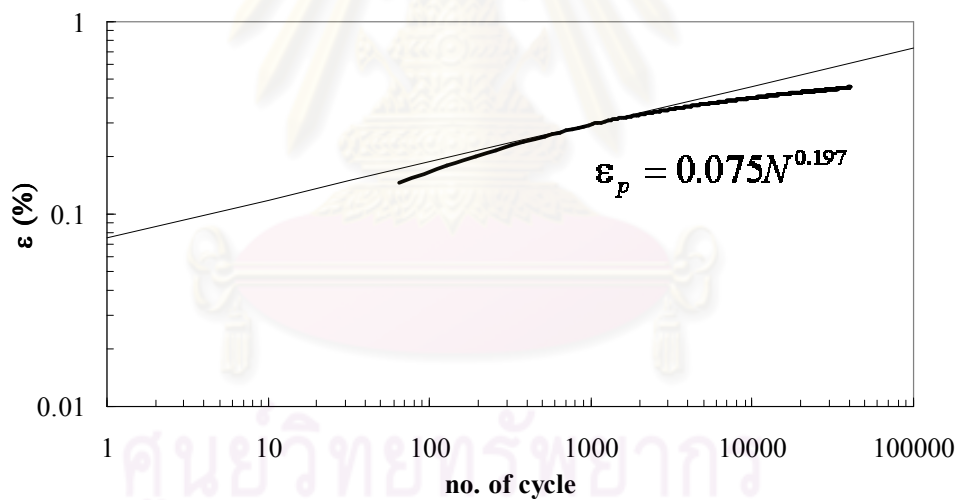
ผลของการยุบตัวถาวรภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 4 ค่า ดังแสดงในรูปที่ 2.35 ถึง 2.37 สำหรับอุณหภูมิที่ 10°C พบว่าวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตไม่แสดงพฤติกรรมของการยุบตัวถาวร ทั้งนี้เพราะที่อุณหภูมิต่ำๆ นั้นแอสฟัลติกคอนกรีตจะแสดงพฤติกรรมเป็นแบบอิลาสติกสมบูรณ์ (Perfectly elastic) หรือกล่าวในอีกนัยหนึ่งคือวัสดุสามารถคืนตัวได้อย่างสมบูรณ์หลังจากถอนแรงกระทำ สำหรับอุณหภูมิมাত্রฐาน (25°C) (รูปที่ 2.35) วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตเกิดการยุบตัวถาวร โดยความเครียดที่เกิดขึ้นเกิดอยู่ในช่วงเริ่มแรก และสิ้นสุดในช่วงที่ 2 ซึ่งความเครียดถาวรที่เกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 0.45% โดยไม่พบความเสียหายเกิดขึ้นในช่วง 40,000 รอบของแรงกระทำ (รูปที่ 2.35(a)) จากผลของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรงสามารถนำไปสร้างสมการการยุบตัวถาวรได้ดังแสดงในรูปที่ 2.35(b)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรง ณ อุณหภูมิ 40°C (รูปที่ 2.36) พบว่าวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตเกิดการยุบตัวถาวร ซึ่งความเครียดที่เกิดขึ้นเกิดอยู่ในช่วงเริ่มแรก และสิ้นสุดในช่วงที่ 3 โดยค่าของแรงกระทำที่จุดเสียรูปซึ่งมีค่าประมาณ 11,000 – 11,500 รอบ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถประมาณค่าคงที่จากการทดสอบ a และ b มีค่าเท่ากับ 0.032 และ 0.456 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.36(b)

ลำดับสุดท้าย ณ อุณหภูมิสูงสุด (55°C) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรงนั้นค่อนข้างเหมือนกันกับที่อุณหภูมิ 40°C นั่นคือ ความเครียดที่เกิดขึ้นเกิดอยู่ในช่วงเริ่มแรก และสิ้นสุดในช่วงที่ 3 อย่างไรก็ตามค่าของแรงกระทำที่จุดเสียรูปมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 40°C นั่นคือมีค่าเท่ากับ 3000 รอบ และในส่วนของค่าค่าคงที่จากการทดสอบ a และ b มีค่าเท่ากับ 0.036 และ 0.518 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.37(b)

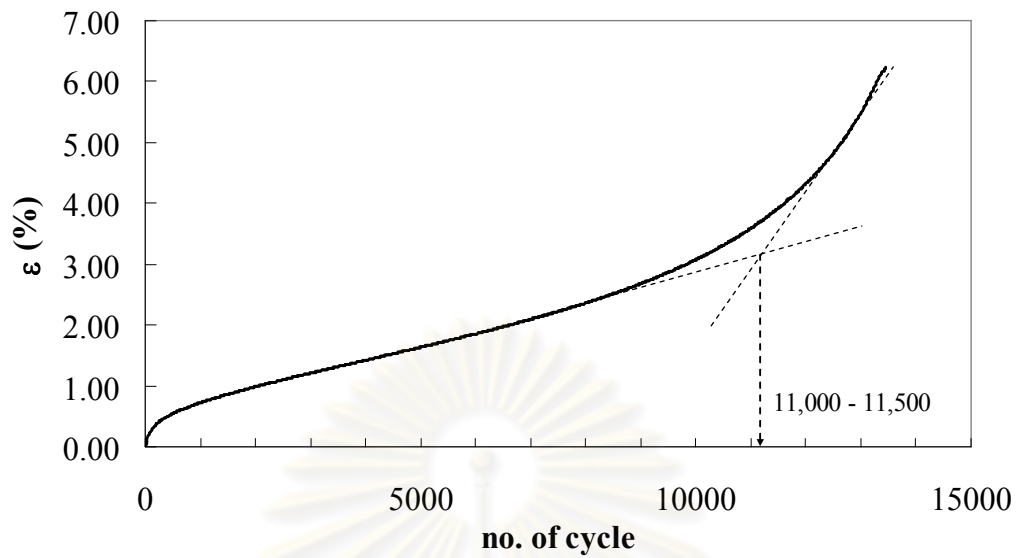


(a) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรงเพื่อยืดจำนวนของแรงกระทำที่ทำให้ตัวอย่างเกิดความเสียหาย

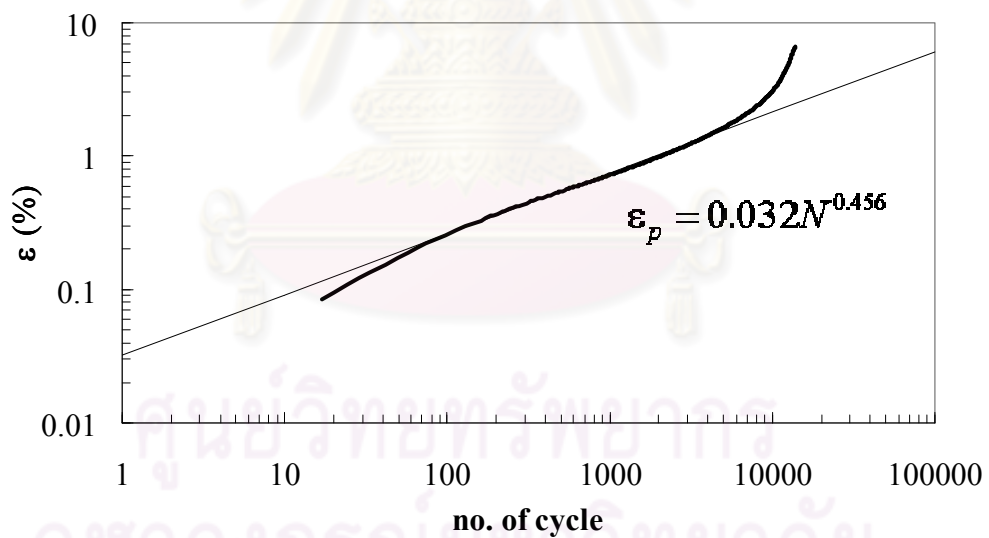


(b) ความสัมพันธ์ลอการิทึมระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรงเพื่อสร้างสมการการยุบตัวถาวรอย่างง่าย

รูปที่ 2.35 ผลการทดสอบการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต ณ อุณหภูมิ 25°C

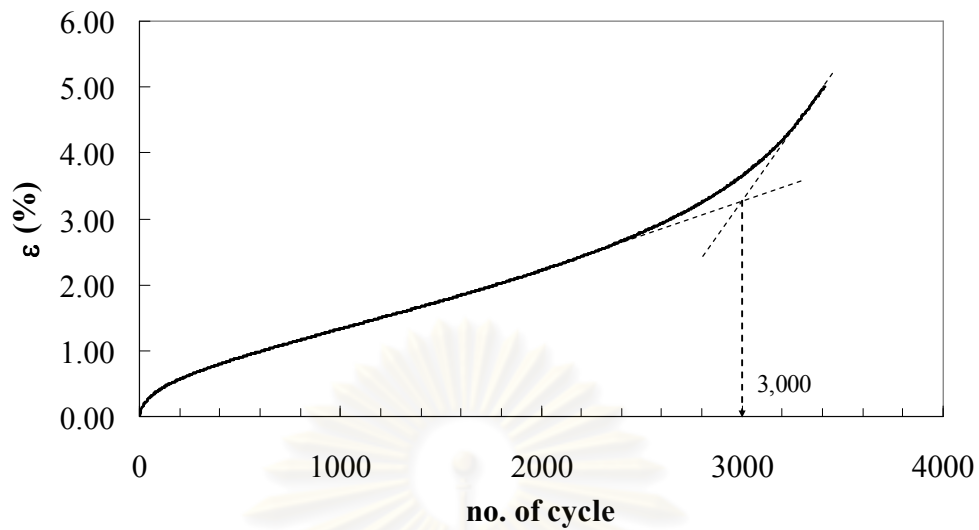


(a) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรงเพื่อยืนยันจำนวนของแรงกระทำที่ทำให้ตัวอย่างเกิดความเสียหาย

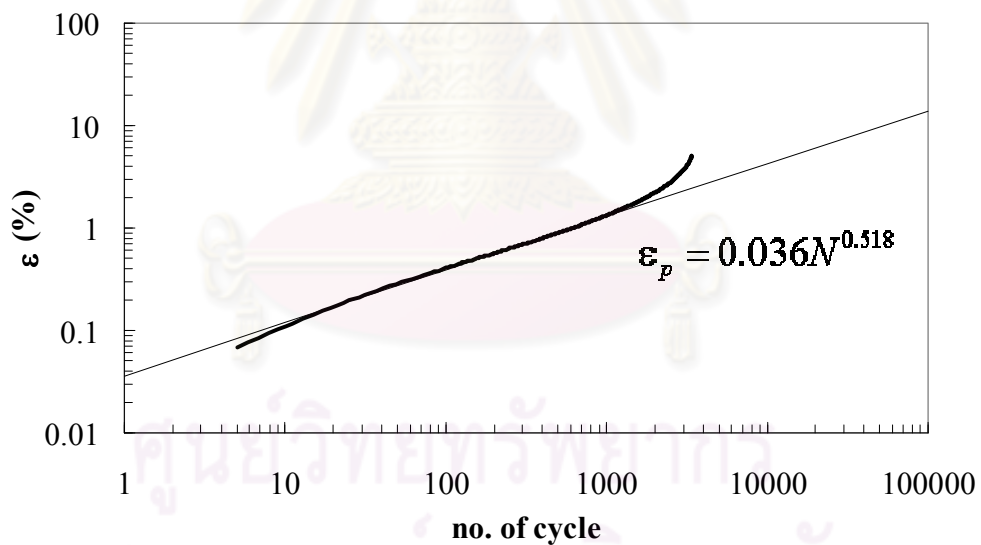


(b) ความสัมพันธ์ลอการิทึมระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรงเพื่อสร้างสมการการยุบตัวถาวรอย่างง่าย

รูปที่ 2.36 ผลการทดสอบการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต ณ อุณหภูมิ 40°C



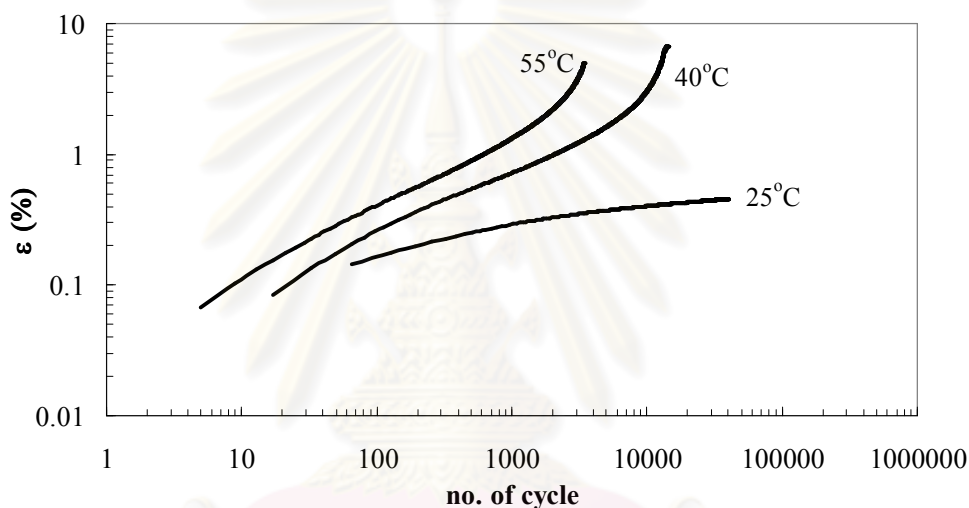
(a) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรงเพื่อยืนยันจำนวนของแรงกระทำที่ทำให้ตัวอย่างเกิดความเสียหาย



(b) ความสัมพันธ์ลอการิทึมระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรงเพื่อสร้างสมการการยุบตัวถาวรอย่างง่าย

รูปที่ 2.37 ผลการทดสอบการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต ณ อุณหภูมิ 55°C

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยของอุณหภูมิมีผลกระทบบ่อยมากต่อค่าการยุบตัวถาวร โดยค่าของแรงกระทำที่จุดเสีรูปจะมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.38 อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิต่ำ (10°C) นั้นไม่สามารถประมาณค่าการยุบตัวถาวรได้ภายในรอบของแรงกระทำที่กำหนด ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุแสดงพฤติกรรมแบบอีลาสติกสมบูร์น สำหรับที่ 25° นั้นพฤติกรรมของแอสฟัลติกคอนกรีตไม่แสดงพฤติกรรมความเสียหายในช่วงที่ 3 สุดท้าย ณ อุณหภูมิ 40°C และ 55°C เกิดความเสียหายที่จำนวนครั้งของการให้แรง ณ จุดเสีรูปประมาณ 11,000-11,500 และ 3,000 รอบ ตามลำดับ

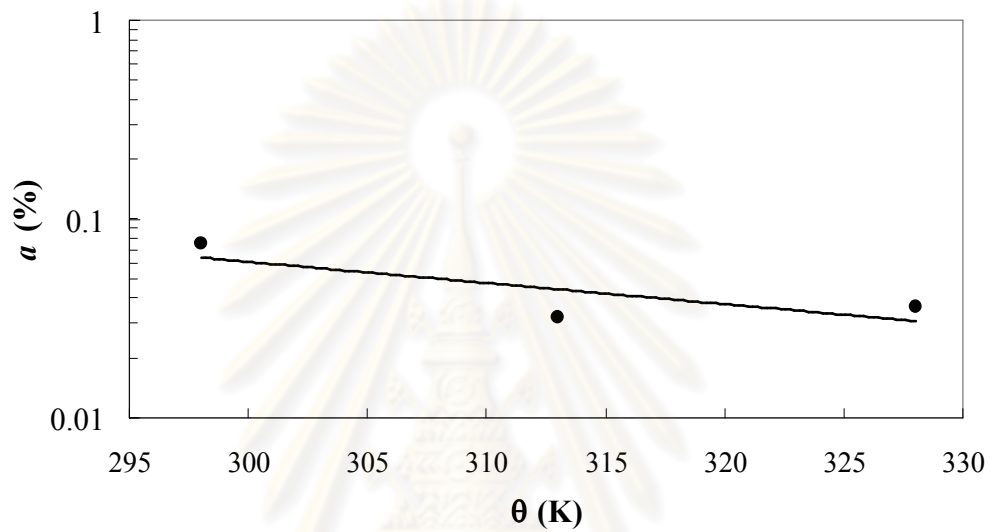


รูปที่ 2.38 ความสัมพันธ์ลึกระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรงเพื่อสร้างสมการการยุบตัวถาวรอย่างง่าย

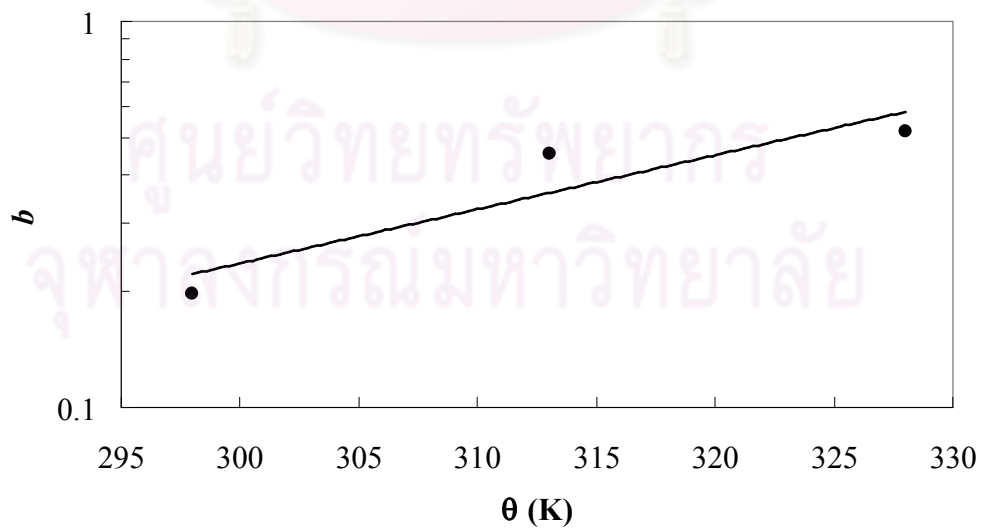
สุดท้ายจากผลทดสอบสามารถสร้างสมการอย่างง่ายเพื่อใช้สำหรับการประมาณค่าการยุบตัวถาวรที่ได้จากวัสดุผสมแอสฟัลติกคอนกรีตภายในประเทศ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ a และ b มีค่าเพิ่มขึ้น และลดลงเป็นแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ตามลำดับ ดังแสดงด้วยกราฟกึ่งล็อกในรูปที่ 2.39 และ 2.40 จากกราฟดังกล่าวสามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) เพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าคงที่ a และ b ณ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างๆ ได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.13 และ 2.14 โดยที่ θ อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (Absolute zero temperature) ประมาณ 0 K หรือ -273°C ค่าคงที่ a และ b จะมีค่าเท่ากับ 93.6 และ 1.0×10^{-5} ตามลำดับ

$$a = 93.6 \exp(-0.0245\theta); R^2 = 0.632 \quad (2.13)$$

$$b = 10^{-5} \exp(-0.0322\theta); R^2 = 0.847 \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ a และอุณหภูมิ



รูปที่ 2.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ b และอุณหภูมิ

จากการวิเคราะห์ข้างต้นงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในประเมินคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลติกคอนกรีตแบบแน่นที่นำมาใช้ก่อสร้างถนนลาดยางจริง อาทิเช่น ณ อุณหภูมิถนน 25°C สามารถประมาณค่าการยุบตัวถาวรได้จากสมการ (2.12) พร้อมกับใช้ค่าคงที่ a และ b จากสมการที่ (2.13) และ (2.14) นอกจากนี้จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าส่วนผสมของแอสฟัลติกคอนกรีตนี้ไม่เหมาะสมจะนำไปใช้ในถนนที่จะทำให้แอสฟัลติกคอนกรีตมีอุณหภูมิประมาณ 55°C เนื่องจากแอสฟัลติกคอนกรีตเกิดความเสียหายจากแรงกระทำซ้ำก่อน 10,000 รอบ

2.17.6 แนวทางการเลือกใช้อย่างแอสฟัลต์และการออกแบบส่วนผสมวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพการจราจรในประเทศไทย (ธันวิน, 2552)

ในช่วงปีพ.ศ. 2552 กรมทางหลวงของประเทศไทยได้ทำการศึกษาวิจัยการเลือกใช้แอสฟัลต์และการออกแบบส่วนผสมวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต โดยได้ทำการออกแบบส่วนผสมวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตด้วยวิธี SUPERPAVE ซึ่งใช้หินแกรนิต หินบะซอลต์ และหินปูนเป็นวัสดุมวลรวมและใช้แอสฟัลต์ประเภท AC40/50 AC60/70 และ PMA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบเสถียรภาพแบบมาร์แชล (Marshall Stability) การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม การทดสอบความต้านทานการเสียหายจากความชื้น การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว และการทดสอบหาค่าการต้านทานการเกิดร่องล้อด้วยการทดสอบ SPT Flow

รายงานผลการศึกษาของธันวินและคณะ (2552) พบว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 40°C วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ AC40/50 และ PMA มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน ในขณะที่วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ AC60/70 มีความแข็งแรงน้อยที่สุด สำหรับช่วงอุณหภูมิใช้งานสูงประมาณ 60°C วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ PMA มีความแข็งแรงสูงที่สุด

ตารางที่ 2.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติและสมรรถนะของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต (ฉันทิณ, 2552)

Type		Limestone		
		40-50	60-70	PMA
Indirect tensile strength (MPa)	@ 20°C	1.70	1.27	1.63
	@ 35°C	0.43	0.36	0.44
Resilient modulus (MPa)	@ 20°C	8,310	5,267	5,737
	@ 35°C	1,566	872	1,488



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการทดสอบวัสดุพื้นฐาน (Methodology of basic material test)

ก่อนจะทำการทดสอบพฤติกรรมทางด้านกำลังของแอสฟัลติกคอนกรีต มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทดสอบวัสดุที่จะนำมาใช้ในการเตรียมตัวอย่าง เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่เป็นไปตามมาตรฐานสำหรับการก่อสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่นในประเทศไทย โดยวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง ได้แก่ หินปูนและแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทเกรดการเจาะลึก

3.1.1 การทดสอบสมบัติหิน (Rock properties test)

เป็นการทดสอบเพื่อตรวจวัดคุณภาพของหินที่นำมาใช้เป็นวัสดุผสมรวมในการเตรียมตัวอย่าง โดยหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ หินปูน ที่มีขนาดเรียกใช้ (Nominal size) 12.5 มิลลิเมตร มีแหล่งกำเนิดอยู่ที่จังหวัดสระบุรี สาเหตุที่เลือกใช้หินปูนเนื่องจากเป็นวัสดุผสมรวมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและผลิตได้ในประเทศไทย สมบัติของหินที่ทำการทดสอบได้แก่ ขนาดคละ (Gradation) ค่าความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity) และการขัดสีแบบลอสแอนเจลีส (LA abrasion) ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.12.1 คุณสมบัติของมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์ผสมร้อน

ตารางที่ 3.1 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของหิน

สมบัติ	วิธีการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง
1. ขนาดคละ	Sieve Analysis	ASTM C136
2. ค่าความถ่วงจำเพาะรวมของมวลรวม หยาบ	Bulk specific gravity Test	ASTM C 127
3. ค่าความถ่วงจำเพาะรวมของมวลรวม ละเอียด	Bulk specific gravity Test	ASTM C 128
4. การขัดสีแบบลอสแอนเจลีส	Los Angeles Abrasion Test	ASTM C 131

3.1.2 การทดสอบสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement properties test)

เป็นการทดสอบเพื่อตรวจวัดคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการเตรียมตัวอย่าง โดยแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ AC 40/50 AC 60/70 และ AC 80/100 ซึ่งเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรดการเจาะลึก (Penetration Grade) ที่ใช้ในการก่อสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่นในประเทศไทย สมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำการทดสอบได้แก่ ค่าการเจาะลึก (Penetration) ความหนืดไคเนมาติก และความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.8 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์

ตารางที่ 3.2 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของแอสฟัลต์ซีเมนต์

สมบัติ	วิธีการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง
1. ค่าการเจาะลึก	Penetration Test	ASTM D5
2. ความหนืดไคเนมาติก	Rotational Viscometer (Brookefield)	ASTM D 4402
	Viscometer	ASTM D7175-08
3. ความถ่วงจำเพาะ	Specific gravity test	ASTM D 70

3.1.3 คุณสมบัติของวัสดุ (Material properties)

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวข้างต้น ได้แก่ AC40/50 มีค่าการเจาะลึก 44 เพน ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.026 ส่วน AC60/70 มีค่าการเจาะลึก 69 เพน ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.024 และ AC80/100 มีค่าการเจาะลึก 95 เพน ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.03 ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ส่วนค่าความหนืดที่ได้จาก viscometer ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งสามชนิดได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของหินปูนที่ได้จากการทดสอบ คือ ความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.617 และการขีดสีแบบลอสแอนเจลิสเท่ากับร้อยละ 22.88 ดังแสดงในตารางที่ 3.4 นอกจากนั้นขนาดคละของมวลรวมที่เลือกใช้ในการออกแบบส่วนผสมได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นขนาดคละตามเกณฑ์ข้อกำหนดการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์ผสมร้อนประเภทแน่น (Design criteria of Dense-graded hot mix asphalt mixtures)

วัสดุทั้งหมดที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเป็นไปตามมาตรฐานการก่อสร้างและมาตรฐานสำหรับวัสดุของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (The standards for highway construction (DH.-S) and the standards for materials (DH.-SP) of Department of Highway, Thailand)

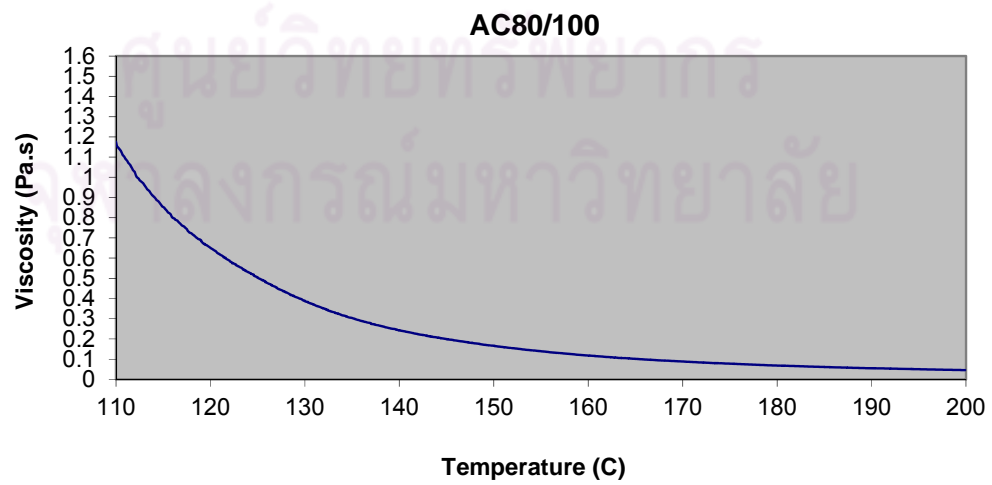
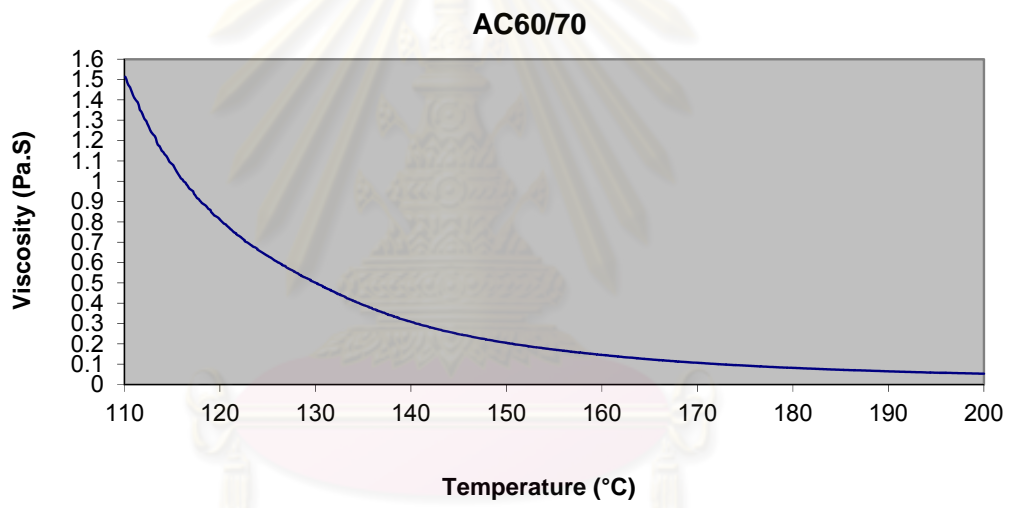
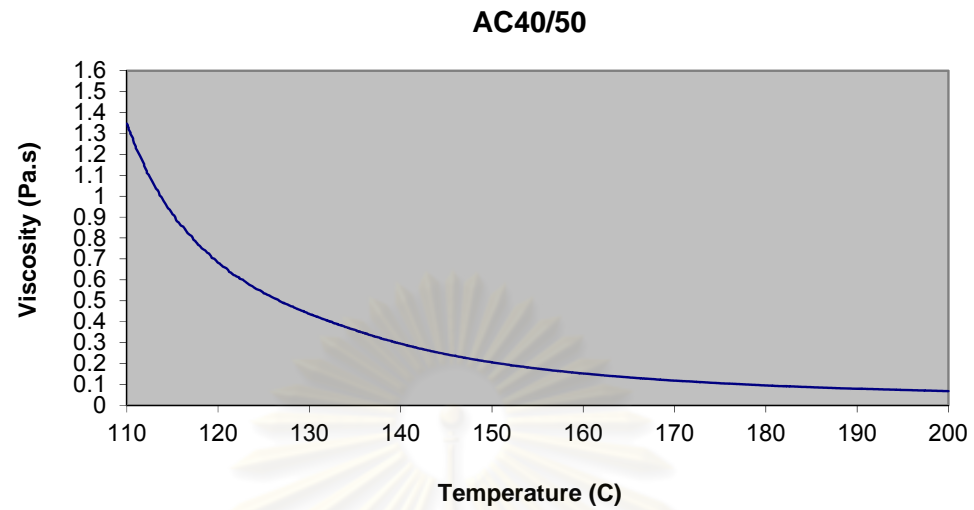
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์

วัสดุ	ค่าการเจาะลึก (Pen)	ความ ถ่วงจำเพาะ (g/cm ³)	ความหนืดไคเนมาติก ที่ 135°C (Pa·s)	ความหนืดไคเนมาติก ที่ 150°C (Pa·s)
AC40/50	44	1.026	0.6325	0.3075
AC60/70	69	1.024	0.3275	0.1700
AC80/100	95	1.03	0.3750	0.1925

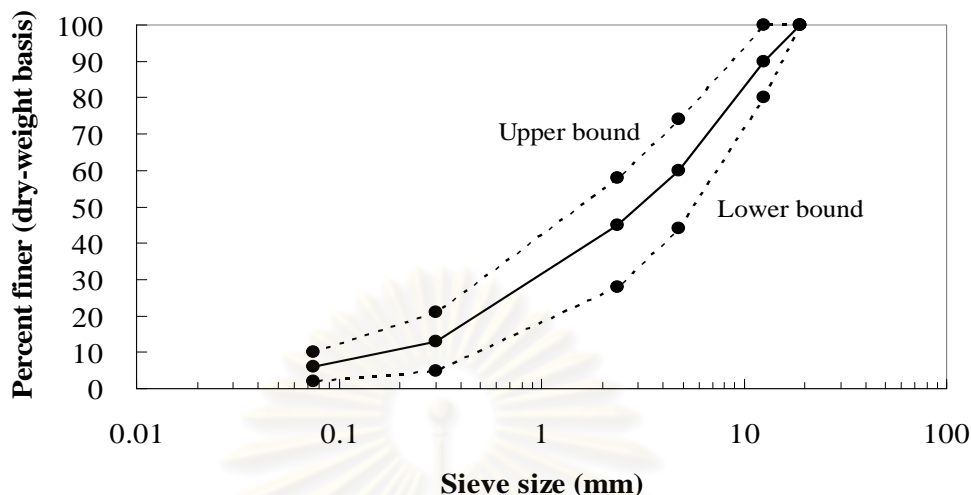
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวม

วัสดุ	ค่าความถ่วงจำเพาะรวม (g/cm ³)	การซัดสีแบบลอสแอนเจลีส
หินปูน	2.617	22.88 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ค่าความหนืดของแอสฟัลต์ซีเมนต์แต่ละประเภท



รูปที่ 3.2 ขนาดคละของมวลรวม

3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (Methodology of Sample Preparations)

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเป็นขั้นตอนสำคัญ เนื่องจากต้องเตรียมตัวอย่างให้มีคุณสมบัติเหมือนกันเพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบ เริ่มจากการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชล จากนั้นเตรียมตัวอย่างด้วยเครื่องบดอัดโรตารีแบบซูเปอร์เพอร์เพฟ (Superpave gyratory compactor) ซึ่งแบ่งตัวอย่างออกได้เป็น 2 ประเภทตามรูปแบบการทดสอบ โดยจะบรรยายอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.2.1 ศึกษาทฤษฎีการออกแบบส่วนผสม (Studying of Mix design theory)

งานวิจัยนี้ศึกษาทฤษฎีการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์ผสมร้อนประเภทแน่น (HMA) ด้วยวิธีมาร์แชล (Marshall method) ดังกล่าวในบทที่ 2 ซึ่งใช้ในการออกแบบส่วนผสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาพฤติกรรมทางด้านกำลังของแอสฟัลต์ผสมร้อนประเภทแน่น โดยใช้จำนวนครั้งในการบดอัด 75 ครั้ง เปรียบเสมือนปริมาณการจราจรหนาแน่น

จากการออกแบบด้วยวิธีมาร์แชล พบว่าส่วนผสมที่ต้องใช้ในการเตรียมตัวอย่าง คือ หินปูนปริมาณ 1,200 กรัม ที่ทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ สำหรับการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile test) และสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined compression test) ใช้หินปูนปริมาณ 2,673 กรัม ที่ทำการร่อนผ่าน

ตะแกรงเบอร์ต่างๆ ซึ่งในการผสมตัวอย่างทั้งสองการทดสอบใช้ AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์และปริมาณของหินปูนที่ใช้ในการผสมได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีมาร์แชล

Sieve size	Indirect tensile test	Unconfined compression test
	weight retain (g)	weight retain (g)
19.00 (3/4)	0	0
12.5 (1/2)	120	267.3
4.75 (No.4)	360	801.9
2.36 (No.8)	180	400.95
0.3 (No.50)	384	855.36
0.075 (No.200)	84	187.11
Pan	72	160.38
Total	1200	2673
ปริมาณ AC40/50	ร้อยละ 4.9 โดยน้ำหนักของมวลรวม	ร้อยละ 4.9 โดยน้ำหนักของมวลรวม
ปริมาณ AC60/70	ร้อยละ 4.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม	ร้อยละ 4.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม
ปริมาณ AC80/100	ร้อยละ 4.9 โดยน้ำหนักของมวลรวม	ร้อยละ 4.9 โดยน้ำหนักของมวลรวม

3.2.2 การเตรียมตัวอย่าง (Sample Preparation)

ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะถูกบดอัดด้วยเครื่องบดอัดไจราทอรีแบบซูเปอร์เพฟ (Superpave gyratory compactor) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เครื่องบดอัดไจราทอรีแบบซูเปอร์เพฟ ถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เริ่มต้นทำการติดตั้งแบบหล่อที่บรรจุส่วนผสมเข้าไปในเครื่องบดอัดไจราทอรีแบบซูเปอร์เพฟ จากนั้นทำการสั่งงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ การบดอัดตัวอย่างนั้นแบบหล่อ (Mould) ที่ใช้บรรจุตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจะถูกจัดวางอยู่บนฐานที่เอียงตัว 1.25 ± 0.02 องศา จากแนวระนาบ ซึ่งเมื่อเริ่มทำการบดอัดฐานรองรับแบบหล่อจะหมุนด้วยอัตรา

30 รอบต่อนาที และในระหว่างที่ใช้แบบหล่อหมุนอยู่นั้นตัวอย่างจะถูกบดอัด โดยใช้แขนบดอัด (Loading ram or actuator) ที่แรง 600 ± 18 กิโลปาสคาล ลักษณะและรูปแบบการบดอัดตัวอย่าง แอสฟัลติกคอนกรีตด้วยเครื่องบดอัดโรตารีแบบซูปเปอร์เพฟได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.22

ภายหลังจากการบดอัดแล้ว ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ได้ต้องมีลักษณะและคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร สูง 65 มิลลิเมตรสำหรับการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile test) เป็นจำนวน 120 ตัวอย่าง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตรสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined compression test) เป็นจำนวน 120 ตัวอย่าง ความหนาแน่น (Density) มีค่าประมาณ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และปริมาณช่องว่างอากาศ (Air void, AV) ร้อยละ 4 ถึง 8

3.3 การทดสอบเชิงกลของแอสฟัลต์ผสมร้อน (Mechanical testing for HMA)

การทดสอบเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของแอสฟัลต์ผสมร้อนในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile test, IDT) และการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined compression test, UC) ทั้งในสภาวะแบบสถิต (Static) และแบบพลวัต (Dynamic) ซึ่งการทดสอบทั้งหมดจะใช้ปัจจัยต่างๆที่แตกต่างกัน คือ อัตราความเครียด (Strain rate) อุณหภูมิ (Temperature) และชนิดของแอสฟัลต์ (Asphalt type)

3.3.1 การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตและพลวัต (Static and Dynamic Indirect tensile test, S-IDT and D-IDT)

ในการศึกษาพฤติกรรมแรงดึงแบบสถิตทำการทดสอบตามข้อกำหนดที่อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D 4867 ซึ่งกำหนดอุณหภูมิและอัตราความเครียดไว้ที่ 25°C และ 0.0083 s^{-1} ตามลำดับ แต่เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดและอุณหภูมิ รวมถึงประเภทของแอสฟัลต์ที่มีต่อพฤติกรรมของแอสฟัลติกคอนกรีต ดังนั้นจึงได้ทำการเลือกใช้ปัจจัยต่างๆที่แตกต่างกันได้แก่ อัตราการความเครียดที่ 0.0250 0.0083 0.0025 และ 0.0008 s^{-1} อัตราความเครียดที่เพิ่มเติมจากมาตรฐานอีก 3 ค่าขึ้นอยู่กับช่วงของความสามารถของเครื่องทดสอบ การเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดดังกล่าวทำเพื่อสังเกตการพัฒนาความเสียหาย ณ อุณหภูมิต่างๆ ในระดับจุลภาค (micro-cracking) จนกระทั่งตัวอย่างแอส

ฟลิตติกคอนกรีตฟังกหลาย ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ คือ 10°C 25°C 40°C และ 55°C เพราะเป็นช่วงอุณหภูมิที่มักเกิดขึ้นบนชั้นผิวทางในประเทศไทยและอยู่ในช่วงที่เครื่องทดสอบสามารถควบคุมได้ สุดท้ายคือประเภทของแอสฟัลต์ซีเมนต์เลือกใช้ AC 40/50 AC 60/70 และ AC 80/100 เนื่องจาก AC 60/70 เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ก่อสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่นในประเทศไทยในปัจจุบัน ส่วน AC 80/100 นั้นใช้ก่อสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่นในอดีต และสุดท้ายคือ AC 40/50 อนาคตคาดว่าจะนำมาใช้งานสำหรับการก่อสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่นในประเทศไทย

การทดสอบเริ่มจากเตรียมตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตตามเงื่อนไขที่ระบุในหัวข้อที่ 3.2 จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบด้วยเครื่อง Instron UTM-1.2MN ดังแสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับการทดสอบแรงดึงทางอ้อมนั้นจะเพิ่มแรงอัดกับตัวอย่างในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีความสูง 100 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มิลลิเมตร โดยค่าความเครียดแนวรัศมี (Radial strain) ของตัวอย่างสามารถตรวจวัดได้จากการติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gage) จำนวน 2 ตัว โดยติดตั้ง ณ ตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับการวัดค่าความเครียดนั้นเกจวัดความเครียดที่เลือกใช้ให้ความแม่นยำระดับ 30 $\mu\epsilon$ ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ ด้วยระดับความแม่นยำดังกล่าวทำให้ความคลาดเคลื่อนในการวัดความเครียดอยู่ในระดับ 0.1% ซึ่งยอมรับได้ ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของการทดสอบนี้คือ เครื่องมือทดสอบ Instron UTM-1.2MN นั้นไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ดังนั้นในการเตรียมตัวอย่างจะทำการบ่มขึ้นตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ถึง 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำการทดสอบโดยอาศัยกล่องควบคุมอุณหภูมิระหว่างการขนย้าย เนื่องจากการทดสอบนี้เป็นการทดสอบอย่างรวดเร็ว (Quick test) ใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 30 วินาทีต่อหนึ่งตัวอย่าง ซึ่งรวมขั้นตอนในการติดตั้งอีกประมาณ 1 - 2 นาที ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเนื่องจากสิ่งแวดล้อมไม่น่าจะมีผลมากนักต่อผลการทดสอบ

ตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบถูกควบคุมและบันทึกผลการทดสอบด้วยระบบคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.6 ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวจะถูกใช้กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวข้างต้น



รูปที่ 3.3 เครื่องมือทดสอบ Universal Testing Machine (Instron UTM-1.2MN)



รูปที่ 3.4 รูปแบบการทดสอบแรงดึงทางอ้อมและการติดตั้งเกจวัดความเครียด

ส่วนการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัตนั้น ข้อกำหนดที่ใช้ในการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 4123 ประกอบด้วยการทดสอบแรงดึงทางอ้อมสำหรับโมดูล์สกินตัว

(Resilient Modulus) โดยมาตรฐาน ASTM D 4123 กำหนดให้ใช้ค่าแรงดึงทางอ้อม ณ อุณหภูมิ 25°C ในการทำนายค่าโมดูลัสคืนตัวของทุกอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์วิธีการทดสอบบางส่วนจากมาตรฐานให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงที่เกิดขึ้นของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้เป็นชั้นผิวทาง นั่นคือ เปลี่ยนการให้แรงกระทำกับตัวอย่าง ซึ่งแต่เดิมจะใช้ค่าแรงดึงทางอ้อมที่ 25°C (Indirect tensile load at 25°C) ในการทำนายค่าโมดูลัสคืนตัวของอุณหภูมิต่างๆ เป็นการให้แรงดึงทางอ้อมของแต่ละอุณหภูมิที่ 10°C 25°C 40°C และ 55°C ในการทำนายค่าโมดูลัสคืนตัวที่ 10°C 25°C 40°C และ 55°C ตามลำดับ

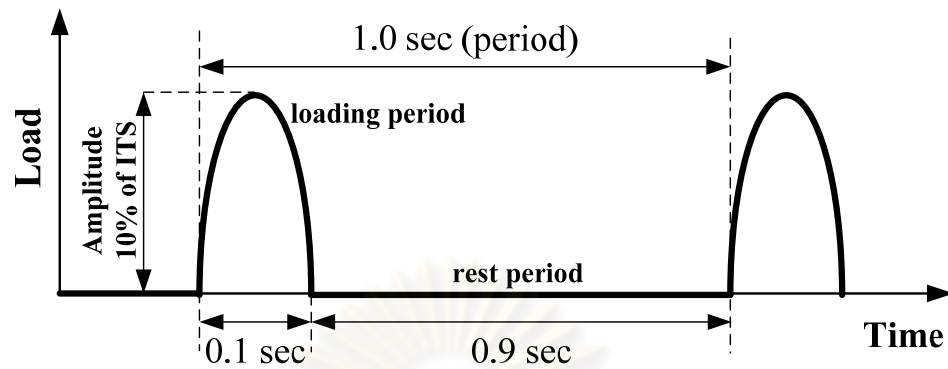
เมื่อเตรียมตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตตามเงื่อนไขที่ระบุในหัวข้อ 3.2.2 แล้ว จึงนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว ด้วยเครื่อง Controls UTM-14 kN ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยการติดตั้งตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบโมดูลัสคืนตัวแสดงในรูปที่ 3.6 สำหรับการประมาณค่าโมดูลัสคืนตัวจำเป็นที่จะต้องติดตั้งอุปกรณ์ LVDT (Linear Variable Differential Transducer) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้าง ในส่วนการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวนั้นทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 10°C 25°C 40°C และ 55°C โดยค่าแรงกระทำที่ใช้ในการทดสอบแต่ละอุณหภูมิใช้ค่าเท่ากับร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแบบสถิต (อ้างอิง บทความ HM 01: ธนกร และคณะ, 2551) การให้แรงดังกล่าวจะให้แรงกดในลักษณะกระทำซ้ำ (Repeated load) จำนวน 155 รอบ ประกอบไปด้วย 150 รอบแรก สำหรับแรงกระทำก่อน (Preload) และ 5 รอบสุดท้ายเพื่อประเมินค่าโมดูลัสคืนตัว โดยแรงกดดังกล่าวกระทำที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ (Hz) นั่นคือในแต่ละชุดของแรงกระทำ 1 วินาที มีช่วงเวลากการให้แรง 0.1 วินาที และช่วงการถอนแรง 0.9 วินาที สำหรับรูปร่างของการให้แรงกำหนดให้มีลักษณะเป็นครึ่งวงของฟังก์ชันไซน์ (Haversine function) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยความเค้นคงค้าง (seating stress) ประมาณร้อยละ 10 ของความเค้นสูงสุดจะถูกกระทำค้างไว้ระหว่างห้วงเวลาที่สัมผัสกับตัวอย่างตลอดช่วงระยะเวลาที่ให้แรงกระทำแต่ละรอบ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะถูกบันทึกและแสดงผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ในตารางที่ 3.6 แสดงโปรแกรมการทดสอบแรงดึงทางอ้อมสำหรับโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 3.5 เครื่องมือทดสอบ Universal Testing Machine (Controls UTM-14 kN)



รูปที่ 3.6 รูปแบบการติดตั้งตัวอย่างสำหรับทดสอบโมดูลัสคืนตัว



รูปที่ 3.7 รูปร่างและเงื่อนไขของแรงกระทำ

ตารางที่ 3.6 โปรแกรมการทดสอบแรงดึงทางอ้อม

การทดสอบ	เงื่อนไข	อัตราความเครียด (Strain rate) (ต่อวินาที)	อุณหภูมิ (°C)			
			10	25	40	55
แรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile test)	สถิต (Static)	0.0250	×	×	×	×
		0.0083	×	×	×	×
		0.0025	×	×	×	×
		0.0008	×	×	×	×
	พลวัต (Dynamic)	1 Hz Load frequencies and 1:9 Load duration	×	×	×	×

หมายเหตุ ใช้โปรแกรมเดียวกันสำหรับแอสฟัลต์ทุกชนิดที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.2 การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตและพลวัต (Static and Dynamic Unconfined compression test, S-UC and D-UC)

สำหรับการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต (S-UC) นั้นได้ทำการประยุกต์ข้อกำหนดของมาตรฐานการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตมาใช้ในการทดสอบ โดยขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตรตามวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยที่ต้องการศึกษาอิทธิพลของอัตราความเครียดและอุณหภูมิ รวมถึงประเภทของแอสฟัลต์ที่มีต่อพฤติกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต ดังนั้นจึงได้ทำการเลือกใช้ปัจจัยต่างๆที่แตกต่างกันได้แก่ อัตราการความเครียดที่ 0.0006 0.0017 0.0056 และ 0.0167 s⁻¹ การ

เปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดดังกล่าวเพื่อสังเกตการพัฒนาความเสียหาย ณ อุณหภูมิต่างๆ ในระดับจุลภาค (micro-cracking) จนกระทั่งตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตพังทลาย ส่วนอุณหภูมิเลือกใช้ที่ 10°C 25°C 40°C และ 55°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่มักเกิดขึ้นบนชั้นผิวทางในประเทศไทยและอยู่ในช่วงที่เครื่องทดสอบสามารถควบคุมได้ สุดท้ายคือประเภทของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เลือกใช้ AC 40/50 AC 60/70 และ AC 80/100 เนื่องจาก AC 60/70 เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ก่อสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่นของประเทศไทยในปัจจุบัน ส่วน AC 80/100 นั้นใช้ก่อสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่นในอดีต และสุดท้ายคือ AC 40/50 อนาคตคาดว่าจะนำมาใช้งานสำหรับการก่อสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่นในประเทศไทย

ในการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ถูกให้แรงกระทำตามแนวความสูงของตัวอย่าง ความเครียดในแนวดิ่งที่เกิดขึ้นถูกวัดด้วยเกจวัดความเครียดสองตัวและเกจวัดการเคลื่อนตัวของ Instron UTM-1.2MN การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อการทดสอบนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดในการทดสอบถูกทดสอบด้วยเครื่อง Instron UTM-1.2MN และมีขั้นตอนในการทดสอบเหมือนกับการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ดังแสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างให้เป็นไปตามที่กำหนดใช้วิธีการเดียวกับการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ซึ่งโปรแกรมการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.7

ในส่วนการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัต (D-UC) ข้อกำหนดที่ใช้ในการทดสอบอ้างอิงตามรายงานของ The National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) ฉบับที่ 465 รายงานฉบับนี้ประกอบด้วยวิธีการทดสอบสำหรับการทดสอบแรงกระทำแบบซ้ำซาก (repeated load) ของส่วนผสมแอสฟัลติกคอนกรีตในรูปแบบแรงอัดแกนเดียว (Uniaxial Compression) การทดสอบ D-UC นี้คล้ายกับการทดสอบแรงดึงแบบพลวัตโดยการทดสอบจะถูกควบคุมเครื่อง Controls UTM-14kN ดังแสดงในรูปที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อการทดสอบนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.9

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะถูกให้แรงกระทำที่ระดับความเค้น 207 kPa ซึ่งเป็นระดับความเค้นที่เกิดขึ้นของยานพาหนะบนชั้นผิวทาง โดยตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตร เมื่อติดตั้งตัวอย่างที่เตรียมตามข้อกำหนดในหัวข้อ 3.2.2 แล้วทำการให้แรงกระทำที่มีลักษณะเป็นครึ่งวงของฟังก์ชันไซน์ (Haversine function) ตัวอย่างจะถูกให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ 1 Hz นั่นคือในแต่ละชุดของแรงกระทำ 1 วินาที มีช่วงเวลากการให้แรง 0.1 วินาทีและช่วงการถอนแรง 0.9 วินาที เป็นจำนวน 40,000 รอบ หรือ จนกระทั่งตัวอย่างพังทลาย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยความเค้นคงค้าง (seating stress) ประมาณร้อยละ 10 ของ

ความเค้นสูงสุดจะถูกกระทำค้างไว้ระหว่างห้วงเวลาที่สัมผัสกับตัวอย่างตลอดช่วงระยะเวลาที่ให้แรงกระทำแต่ละรอบ โดย LVDT ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลการเสียรูปในแนวดิ่งถูกติดตั้งเพื่อประมาณการเสียรูปแบบถาวรที่เกิดขึ้น อุณหภูมิที่เลือกใช้ในการทดสอบสำหรับการทดสอบนี้ได้เลือกใช้ อุณหภูมิที่ 10°C 25°C 40°C และ 55°C ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ถูกบันทึกและแสดงผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัตได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.8 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ แรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ แรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัต

ตารางที่ 3.7 โปรแกรมการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง

การทดสอบ	เงื่อนไข	อัตราความเครียด (Strain rate) (ต่อวินาที)	อุณหภูมิ (°C)			
			10	25	40	55
แรงอัดแบบ ปราศจากแรงดัน ด้านข้าง (Unconfined compression test)	สถิต (Static)	0.0006	x	x	x	x
		0.0017	x	x	x	x
		0.0056	x	x	x	x
		0.0167	x	x	x	x
	พลวัต (Cyclic)	1 Hz Load frequencies and 1:9 Load duration	x	x	x	x

หมายเหตุ ใช้โปรแกรมเดียวกันสำหรับแอสฟัลต์ทุกชนิดที่ใช้ในการทดสอบ

3.4 ผลของอัตราการให้แรงและอุณหภูมิ

3.4.1 อัตราการให้แรง (Rate of loading)

อัตราการให้แรงกระทำแก่วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการตอบสนองของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุจะมีค่าแปรผันตามอัตราการให้แรงกระทำ ซึ่งเป็นพฤติกรรมของวัสดุหนืดยืดหยุ่น (viscoelastic material) ยกตัวอย่างเช่น การให้แรงกระทำแก่สปริง ถ้าอัตราการให้แรงกระทำมีค่าสูง สปริงจะสามารถยุบตัวได้ง่าย แต่ถ้าอัตราการให้แรงกระทำมีค่าต่ำ สปริงจะมีลักษณะแข็งตัวขึ้น ทำให้ยุบตัวน้อยลง

3.4.2 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต เช่น ค่าแอนตัวของถนน (Pavement Deflection) เป็นต้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้คุณสมบัติทางด้านเคมีและฟิสิกส์ของแอสฟัลติกคอนกรีต เช่น ค่าความหนืด (Viscosity) ค่าการเจาะลึก (Penetration) ค่ากำลัง (Stiffness) เปลี่ยนไปด้วย ซึ่งส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของแอสฟัลติกคอนกรีต

จากการศึกษาอุณหภูมิเฉลี่ยของถนนของกรมทางหลวง พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของทั้ง 4 ภาคในประเทศไทยอยู่ที่ 38°C ส่วนระดับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยหรือความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของถนนนั้นมีความมากที่สุดที่ภาคเหนือคือ 9.8°C และน้อยสุดที่ภาคกลางคือ 6.1°C สำหรับค่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature) หรือค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของถนนที่วัดได้คือ 56°C และ 14°C ตามลำดับ

ดังนั้นอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้คือ 10°C 25°C 40°C และ 55°C ซึ่งเป็นช่วงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงบนผิวถนนภายในประเทศไทย และเป็นช่วงของอุณหภูมิที่เครื่องทดสอบ Controls UTM-14 kN สามารถควบคุมได้

3.5 เครื่องมือทดสอบและความละเอียดในการวัด

3.5.1 เครื่องทดสอบ Instron UTM-1.2 MN

งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Instron UTM-1.2 MN ทำการทดสอบการให้แรงกระทำแบบสถิต เนื่องจากเครื่อง Controls UTM-14 kN มีกำลังไม่มากพอสำหรับการให้แรงกระทำแบบสถิต โดยเครื่อง Instron UTM-1.2 MN ที่ใช้สำหรับศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลติกคอนกรีตแสดงในรูปที่ 3.10

เครื่อง Instron UTM-1.2 MN สามารถใช้ทำการทดสอบได้ทั้งในกรณีแบบสถิตและพลวัต อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับทดสอบในกรณีแบบสถิตเท่านั้น เครื่อง Instron UTM-1.2 MN สามารถควบคุมการทดสอบได้ทั้งแบบควบคุมอัตราความเค้นและอัตราความเครียด โดยแรงกระทำถูกส่งผ่านทางหัวกดที่เป็นแบบไฮดรอลิก (hydraulic actuator) ที่ถูกควบคุมโดยใช้ระบบลม (electronic pneumatic servo-valve) กำลังสูงสุดของเครื่อง Instron UTM-1.2 MN อยู่ที่ 1.2 เมกะนิวตัน และจะใช้ระบบ IST Systems FastTrack and Labtronic 8800 Test Control Systems ในการควบคุมเครื่อง Instron UTM-1.2 MN ระบบที่ใช้ในการควบคุมดังกล่าวถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์ แล้วใช้ซอฟต์แวร์ชื่อ “Merlin” ในการสั่งงานผ่านระบบคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องทดสอบ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบผ่านเครื่อง Instron UTM-1.2 MN ถูกบันทึกด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ข้อจำกัดของเครื่อง Instron UTM-1.2 MN คือ ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ระหว่างการทดสอบ ทำให้ต้องนำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบไปบ่มไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิก่อนแล้วนำไปใส่กล่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมอุณหภูมิเวลาขนย้ายมายังเครื่อง Instron UTM-1.2 MN

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 Instron UTM-1.2MN

3.5.2 เครื่องทดสอบ Controls UTM-14 kN

งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Controls UTM-14 kN ทำการทดสอบการให้แรงกระทำแบบพลวัต โดยเครื่อง Controls UTM-14 kN ที่ใช้สำหรับศึกษาคุณสมบัติเกี่ยวกับอุณหภูมิของแอสฟัลติกคอนกรีตแสดงในรูปที่ 3.5

ประสิทธิภาพของเครื่อง Controls UTM-14 kN ที่สำคัญ คือ วิธีการให้แรงกระทำและลักษณะของแรงกระทำแบบคลื่น เครื่อง Controls UTM-14 kN สามารถให้ลักษณะของแรงกระทำได้หลายรูปร่างเช่น คลื่นครึ่งวงของฟังก์ชันไซน์ (Haversine wave) หรือ คลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) ผ่านทางหัวกด (Pneumatic actuator) ของเครื่องทดสอบ ซึ่งเครื่อง Controls UTM-14 kN สามารถให้แรงกระทำสูงสุด 14 kN ด้วยความถี่ 0 ถึง 70 Hz

เครื่อง Controls UTM-14 kN ประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือโครงเฟรมให้แรงกระทำ (Reaction load frame) ที่ถูกออกแบบให้รองรับตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ทั้งแรงดึงทางอ้อมและแรงตามแนวแกน โดยอุปกรณ์ให้แรงกระทำ (Actuator) ถูกควบคุมโดยใช้ระบบลม (electronic pneumatic servo-valve) ส่วนที่สองคือตู้ควบคุมอุณหภูมิที่สามารถควบคุมอุณหภูมิสำหรับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 0°C ถึง 60°C ส่วนที่สามารถระบบการควบคุมและบันทึกข้อมูล (Control and Data Acquisition System, CDAS) ถูกใช้

ในการควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ ซึ่งถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์ รวมไปถึง LVDT ซึ่งสามารถวัดระยะได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตรและระบบบันทึกข้อมูลการให้แรงกระทำ ส่วนสุดท้ายคือซอฟต์แวร์ (Software) ถูกใช้ในการเชื่อมโยงระหว่างระบบการสั่งงานกับเครื่องทดสอบผ่านทาง CDAS

3.5.3 เกจวัดความเครียด (Strain gage)

การวัดความเครียดสามารถวัดได้หลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้ความเครียดที่เกิดขึ้นมักมีค่าน้อย ไม่สามารถวัดได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถวัดความเครียดที่ระดับต่ำๆ ได้ นั่นคือ เกจวัดความเครียด (Strain gage) โดยติดตั้ง Strain gage ไว้ที่พื้นผิวของตัวอย่างที่มีลักษณะเรียบ เมื่อตัวอย่างได้รับแรงกระทำก็จะพยายามด้านการขยายตัวหรือหดตัวที่เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานทางไฟฟ้า (electric resistance) ของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป และจากการที่ Strain gage มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับความเครียด จึงทำให้สามารถวัดความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปแล้วแปลงเป็นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นได้ โดย Strain gage ที่ใช้ในการทดลองนี้ผลิตโดยบริษัท KYOWA ชนิด KFG-20-120-C1-11L1M2R มีความยาว 20 มิลลิเมตร ค่า Gage factor เท่ากับ $2.07 \pm 1.0\%$ ค่าความต้านทานเท่ากับ $120.4 \pm 0.4 \Omega$ และมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถแก้ไขความคลาดเคลื่อนในการวัดความเครียดที่เกิดจากผลกระทบทางด้านอุณหภูมิได้ โดยมีค่า Temperature coefficient เท่ากับ $+0.008\%/^{\circ}\text{C}$ ตัวอย่างของ Strain gage ที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เกจวัดความเครียด (Strain gage)

3.6. จำนวนตัวอย่างและเวลาในการทดสอบ

ช่วงเวลาในการทดสอบของแต่ละการทดสอบขึ้นอยู่กับลำดับของการทดสอบ ลำดับแรกต้องทำการทดสอบในสภาวะแบบสถิต (Static) ก่อนแล้วจึงนำผลการทดสอบที่ได้มาใช้ในการทดสอบสภาวะแบบพลวัต (Dynamic) ต่อไปดังที่ได้กล่าวไว้ใน การทดสอบสภาวะแบบพลวัต โดยลำดับขั้นในการทดสอบนี้ใช้ทั้งการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile test) และการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression test)

ตารางที่ 3.8 จำนวนตัวอย่างและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

ชื่อการทดสอบ	จำนวนตัวอย่าง	ประมาณเวลาที่ใช้ทดสอบ (ต่อหนึ่งตัวอย่าง)
Static Indirect tensile test	96	2 นาที
Dynamic Indirect tensile test	24	15 นาที
Static Unconfined Compression test	96	2 นาที
Dynamic Unconfined compression test	24	6-8 ชั่วโมง

บทที่ 4

ผลการวิจัย

บทนี้แสดงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยมีการนำเสนอพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตและการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต ได้แก่ ค่าความเค้นสูงสุด ค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุด ค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุด ค่าโมดูลัสคั้นตัวที่ได้จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต และค่าการยุบตัวแบบถาวรสมการการยุบตัวแบบถาวรอย่างง่ายที่ได้จากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัต

4.1 ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต (Static Indirect tensile test, S-IDT)

ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่มากกระทำ ได้แก่ ค่าความเค้นสูงสุด (σ_{max}) ค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุด (Peak strain) และค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุด (Secant Young's modulus at 50% of maximum stress, E^{50}) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.3 และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Constitutive behavior) ของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ค่าการทดสอบรับแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50

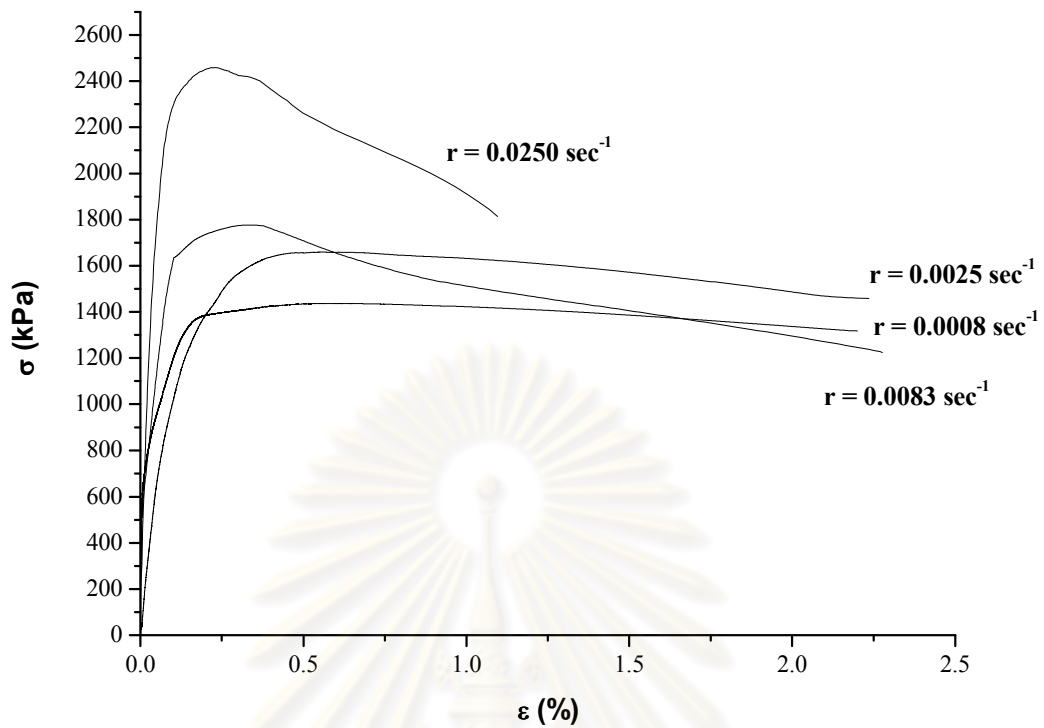
Temperature (°C)	Strain rate (sec ⁻¹)	Strain at peak (%)	Maximum stress (kPa)	Secant Young's modulus at 50% of maximum stress (MPa)
10	0.0008	0.37	1493.26	1095.07
	0.0025	0.63	1698.61	1175.22
	0.0083	0.27	1791.20	3620.41
	0.0250	0.23	2485.85	4455.84
25	0.0008	1.10	399.97	98.44
	0.0025	0.73	568.51	306.44
	0.0083	0.68	787.68	655.22
	0.0250	0.33	1523.40	1606.51
40	0.0008	N/A	N/A	N/A
	0.0025	N/A	N/A	N/A
	0.0083	0.22	355.02	364.41
	0.0250	0.12	419.6	600.23
55	0.0008	N/A	N/A	N/A
	0.0025	N/A	N/A	N/A
	0.0083	0.30	147.29	41.14
	0.0250	0.41	256.81	135.57

ตารางที่ 4.2 ค่าการทดสอบรับแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70

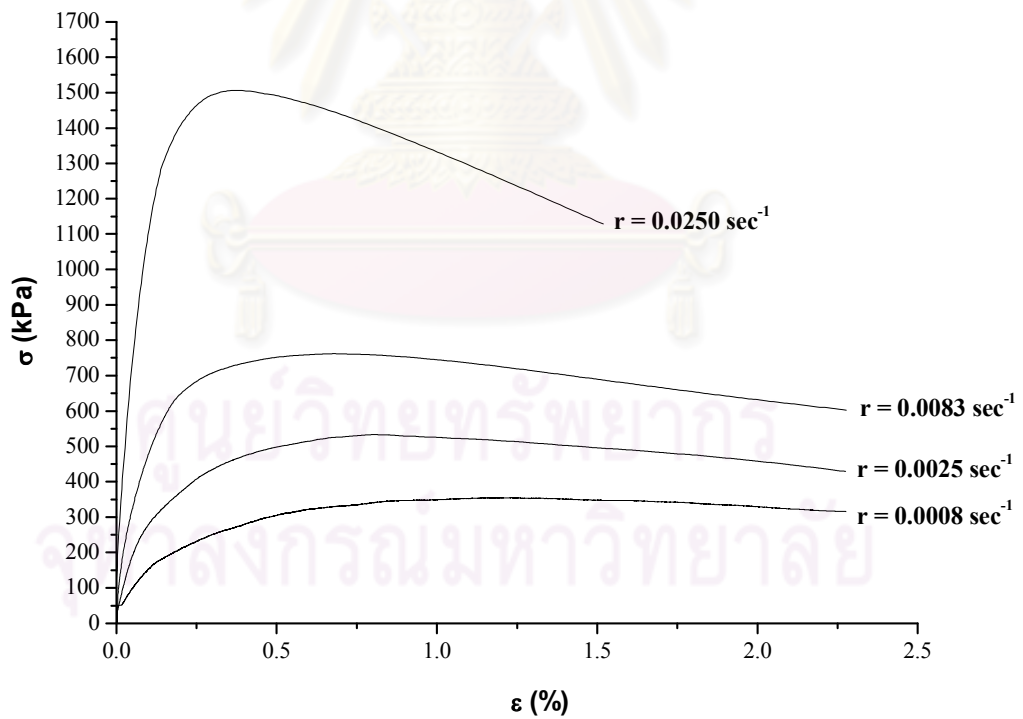
Temperature (°C)	Strain rate (sec ⁻¹)	Strain at peak (%)	Maximum stress (kPa)	Secant Young's modulus at 50% of maximum stress (MPa)
10	0.0008	0.26	1022.40	1455.71
	0.0025	0.31	1371.55	1805.24
	0.0083	0.32	2295.76	2470.41
	0.0250	0.18	2681.05	3497.60
25	0.0008	0.59	372.74	181.36
	0.0025	0.67	578.40	454.88
	0.0083	0.37	1015.24	1106.25
	0.0250	0.28	1079.68	1137.85
40	0.0008	N/A	N/A	N/A
	0.0025	N/A	N/A	N/A
	0.0083	0.11	344.64	285.61
	0.0250	0.39	399.90	310.19
55	0.0008	N/A	N/A	N/A
	0.0025	N/A	N/A	N/A
	0.0083	N/A	N/A	N/A
	0.0250	0.31	183.92	36.04

ตารางที่ 4.3 ค่าการทดสอบรับแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100

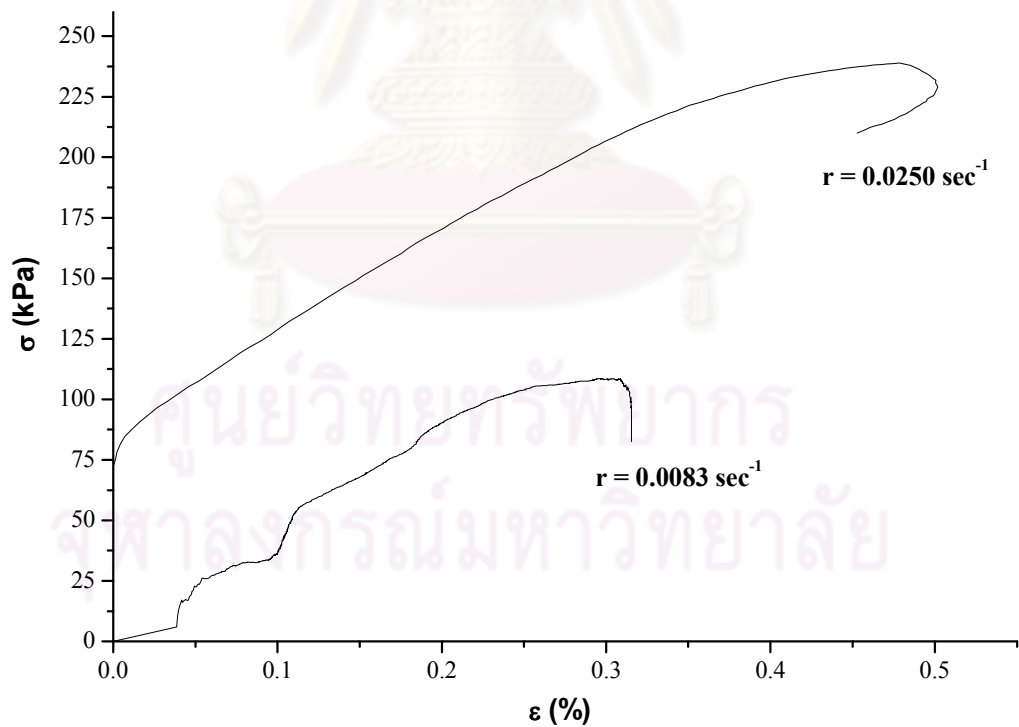
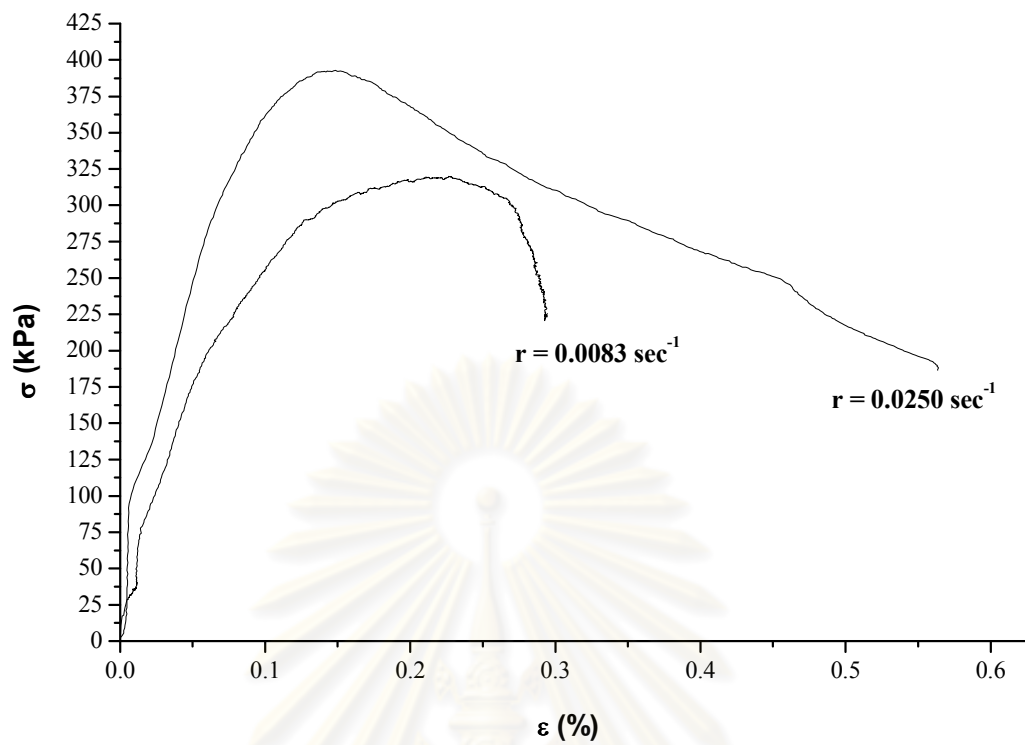
Temperature (°C)	Strain rate (sec ⁻¹)	Strain at peak (%)	Maximum stress (kPa)	Secant Young's modulus at 50% of maximum stress (MPa)
10	0.0008	0.46	1001.30	903.14
	0.0025	0.33	1733.20	1374.70
	0.0083	0.47	2066.86	1602.98
	0.0250	0.30	3055.68	2795.68
25	0.0008	0.87	350.84	124.77
	0.0025	0.77	579.06	262.30
	0.0083	0.37	934.56	729.24
	0.0250	0.65	1184.23	1817.82
40	0.0008	N/A	N/A	N/A
	0.0025	N/A	N/A	N/A
	0.0083	0.26	408.92	498.99
	0.0250	0.52	336.46	326.34
55	0.0008	N/A	N/A	N/A
	0.0025	N/A	N/A	N/A
	0.0083	0.25	199.31	118.47
	0.0250	0.32	276.20	147.86



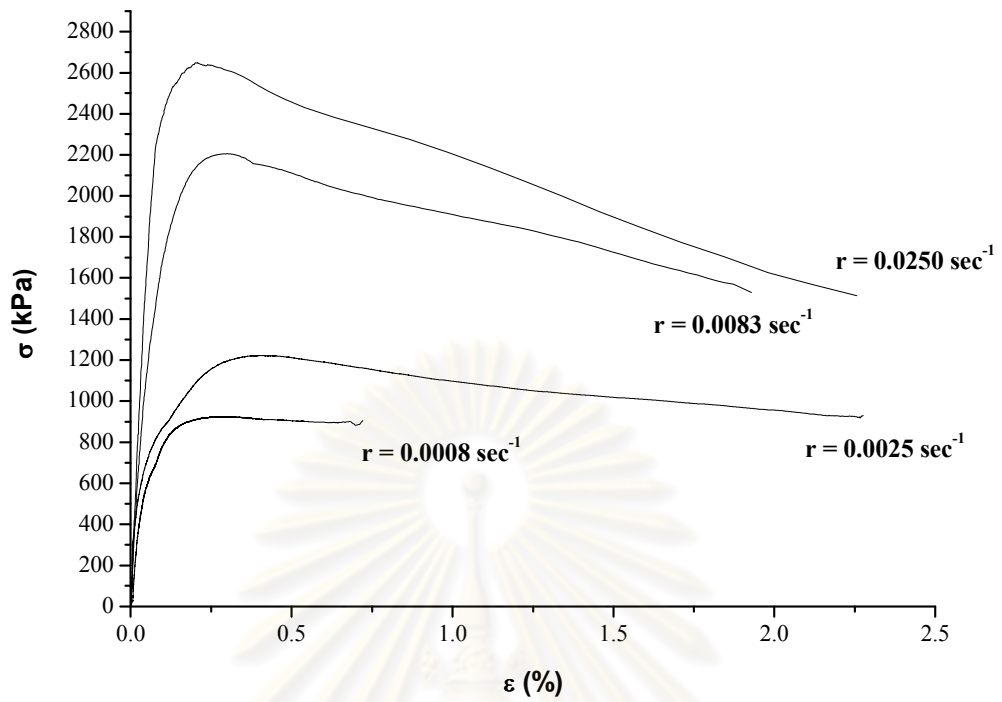
(a)



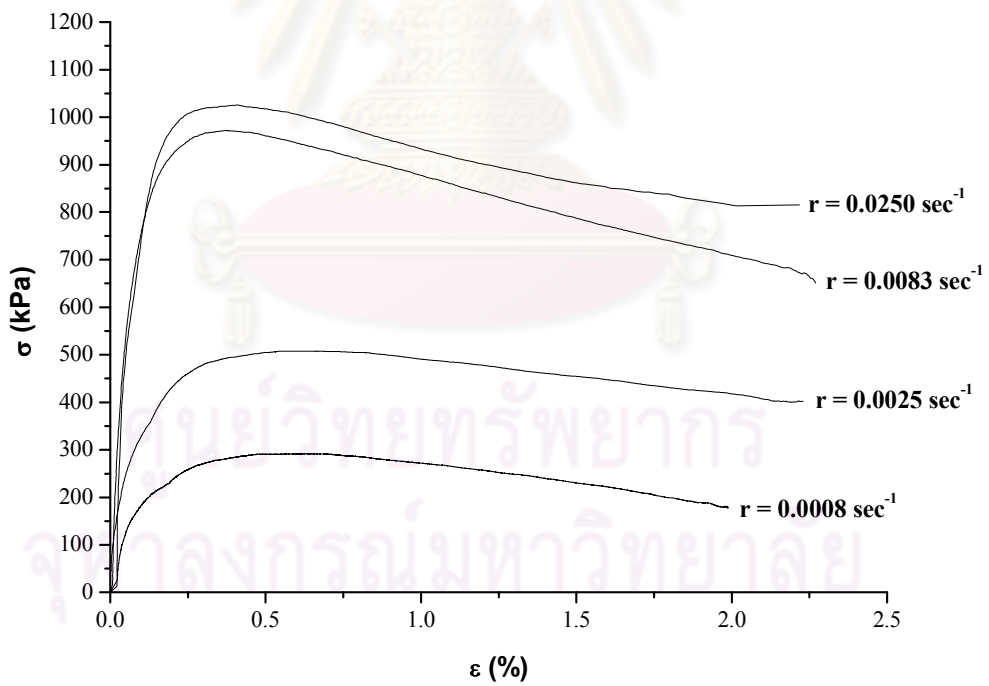
(b)



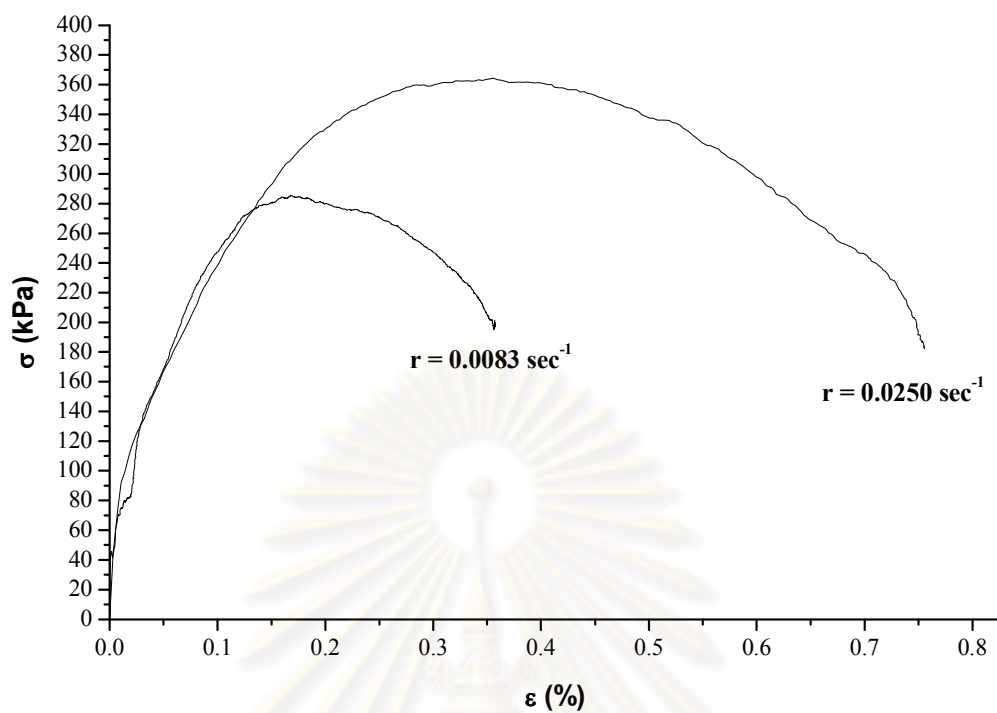
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆ (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C



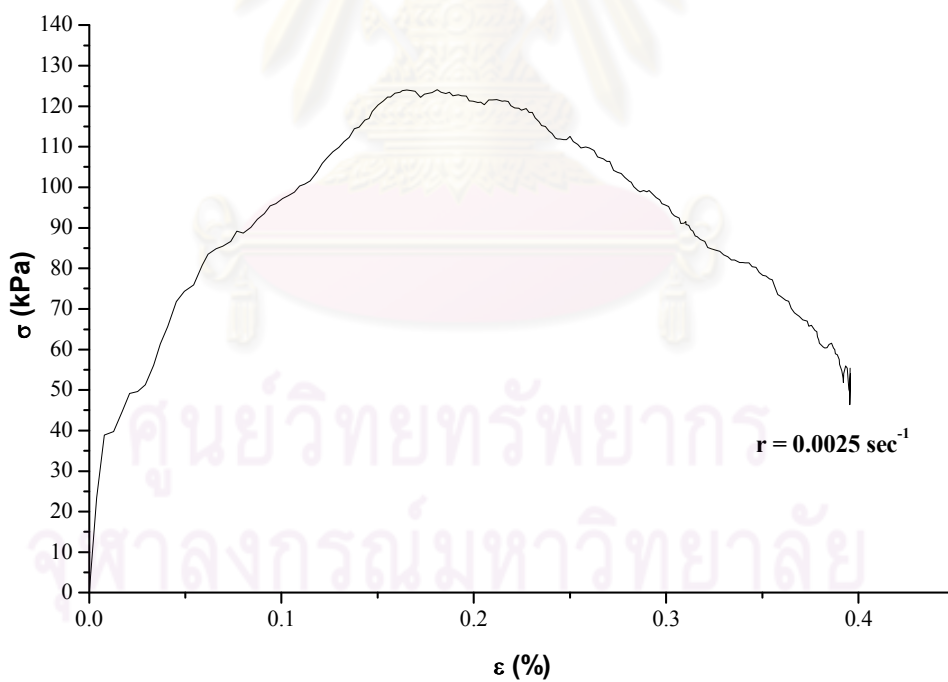
(a)



(b)

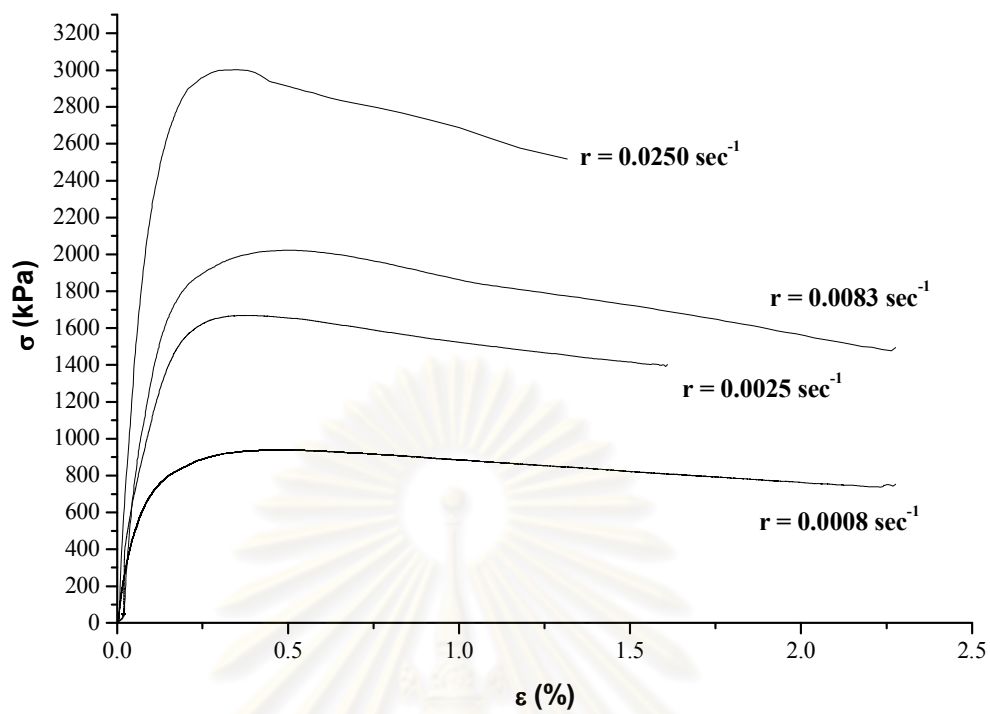


(c)

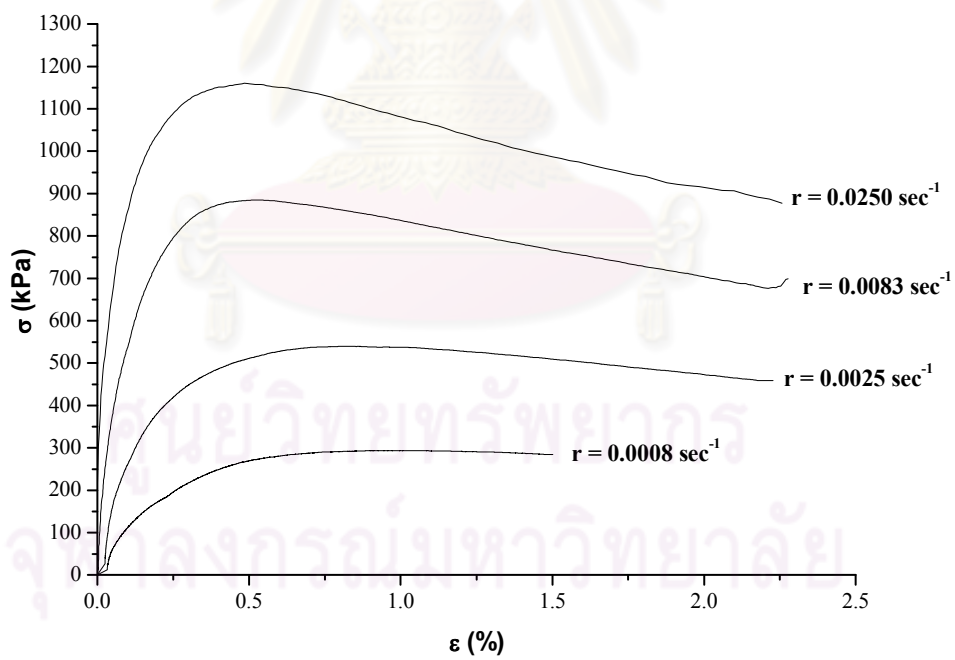


(d)

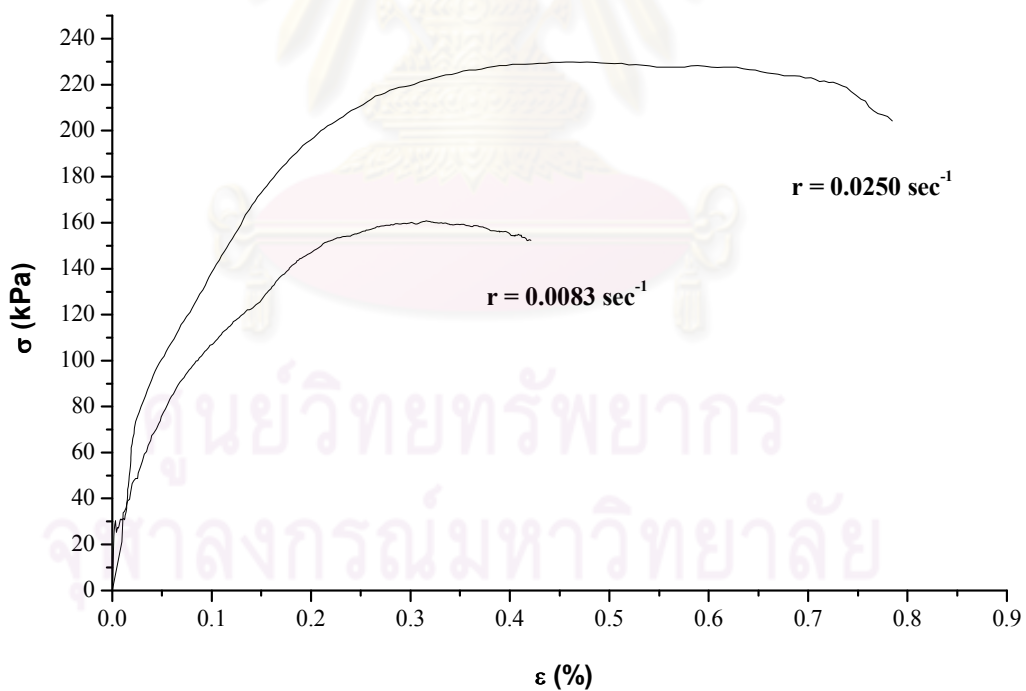
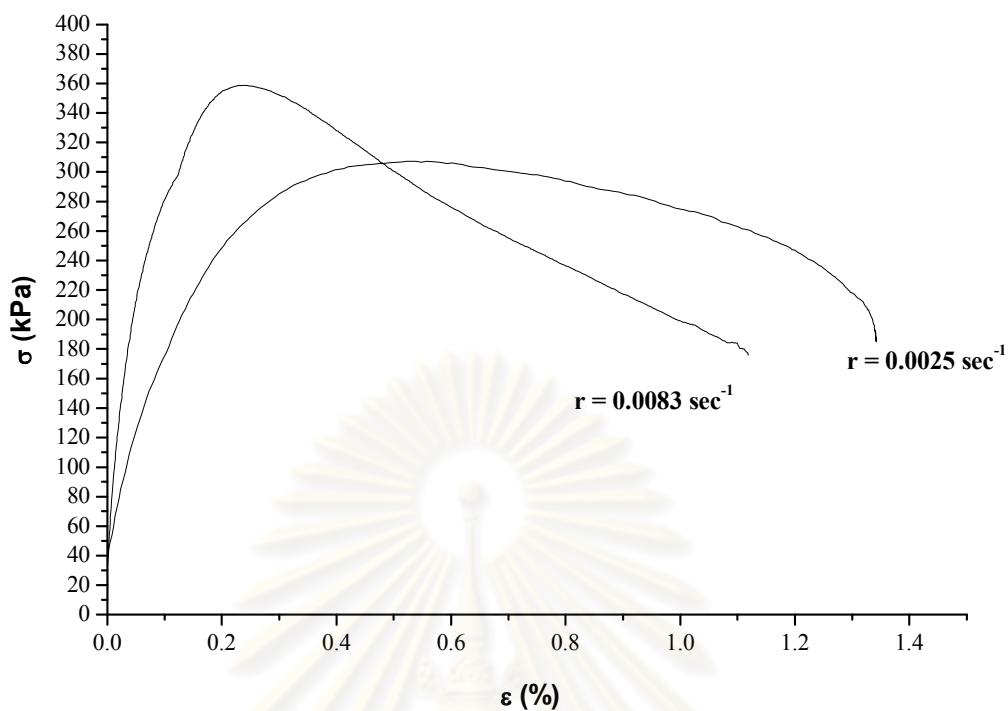
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆ (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C



(a)



(b)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆ (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C

จากผลการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิ 10°C วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งสามชนิดมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดมากที่สุดและมีพฤติกรรมแรงดึงแบบสมบูรณ์ (Perfectly tensile behavior) ดังแสดงในรูปที่ 4.4(a) จากรูปที่ 4.1(a) รูปที่ 4.2(a) และ รูปที่ 4.3(a) พบว่าหลังจากที่ความเค้นมีค่าถึงจุดสูงสุด (maximum stress) กำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจะตกลงอย่างรวดเร็วหรือบางตัวอย่างไม่สามารถสังเกตเห็นความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดได้ สาเหตุเกิดจากวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจะแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุเปราะ (Brittle material) ที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีอัตราความเครียดที่มีค่าสูงมากกระทำ เช่น ในกรณีของตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 ที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิ 10°C และมีอัตราความเครียด 0.0250 ต่อวินาทีมากกระทำ ดังแสดงในรูปที่ 4.1(a)

สำหรับที่อุณหภูมิ 25°C วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีพฤติกรรมคล้ายกับที่อุณหภูมิ 10°C คือมีพฤติกรรมแรงดึงแบบสมบูรณ์ แต่มีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดน้อยกว่าในกรณีอุณหภูมิ 10°C และกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตหลังจากค่าความเค้นถึงจุดสูงสุดมีค่าลดลงในอัตราที่ช้ากว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.1(b) รูปที่ 4.2(b) และ รูปที่ 4.3(b)

ส่วนที่อุณหภูมิ 40°C วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 10°C และ 25°C และเมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.1(c) รูปที่ 4.2(c) และ รูปที่ 4.3(c) พบว่าวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตแสดงพฤติกรรมเป็นลักษณะการวิบัติด้วยแรงดึงน้อยมาก โดยสามารถพบพฤติกรรมแบบแรงดึงได้ที่อัตราความเครียดมีค่าสูง (0.0083 และ 0.0250 ต่อวินาที) ส่วนที่อัตราความเครียดต่ำพบว่าวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตแสดงพฤติกรรมในรูปแบบแรงดึงและรูปแบบแรงอัด สังเกตได้จากพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดหลังจากจุดสูงสุดมีแนวโน้มย้อนกลับ (rebound) เนื่องจากพื้นที่หรือขอบเขตที่เกิดแรงดึงมีบริเวณน้อยกว่าพื้นที่การเกิดแรงอัด ณ จุดสัมผัสบนและล่าง (Top and bottom cap) โดยเฉพาะที่อัตราความเครียดต่ำ (0.0008 และ 0.0025 ต่อวินาที) ซึ่งที่อัตราความเครียดนี้ไม่สามารถแสดงพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้

สุดท้ายที่อุณหภูมิ 55°C วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดต่ำที่สุด ซึ่งกลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นไม่ใช่ความเสียหายเนื่องมาจากหน่วยแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (b) โดยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตได้ที่อัตราความเครียดสูงเท่านั้น (0.0083 และ 0.0250 ต่อวินาที)

ส่วนค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ทั้งสามชนิดเมื่อทดสอบภายใต้อุณหภูมิและอัตราความเครียดต่างๆมีค่าไม่แน่นอน ไม่สามารถหาแนวโน้มของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นได้

4.2 ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต (Dynamic Indirect tensile test, D-IDT)

จากผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัตพบว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีเกรดการเจาะลึกแตกต่างกัน ให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวไม่เท่ากันและวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีความแข็งมากกว่าไม่ได้ทำให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวสูงกว่าวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ที่อ่อนกว่า โดยพบว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสานจะให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวสูงที่สุด รองลงมาคือวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC80/100 และ AC40/50 เป็นวัสดุเชื่อมประสานตามลำดับ ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ทั้งสามชนิดเป็นวัสดุเชื่อมประสานได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต

วัสดุเชื่อมประสาน	ค่าโมดูลัสคั้นตัว (MPa)			
	10°C	25°C	40°C	55°C
AC 40/50	13,942	4,964	967	442
AC 60/70	14,832	6,911	1,143	532
AC 80/100	14,721	5,261	1,139	498

4.3 ผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต (Static Unconfined compression test, S-UC)

ผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่มากกระทำ ได้แก่ ค่าความเค้นสูงสุด (σ_{max}) ค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุด (Peak strain) และค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุด (Secant

Young's modulus at 50% of maximum stress, E^{50}) แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ถึงตารางที่ 4.7 และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงอัดแบบปราคาจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50

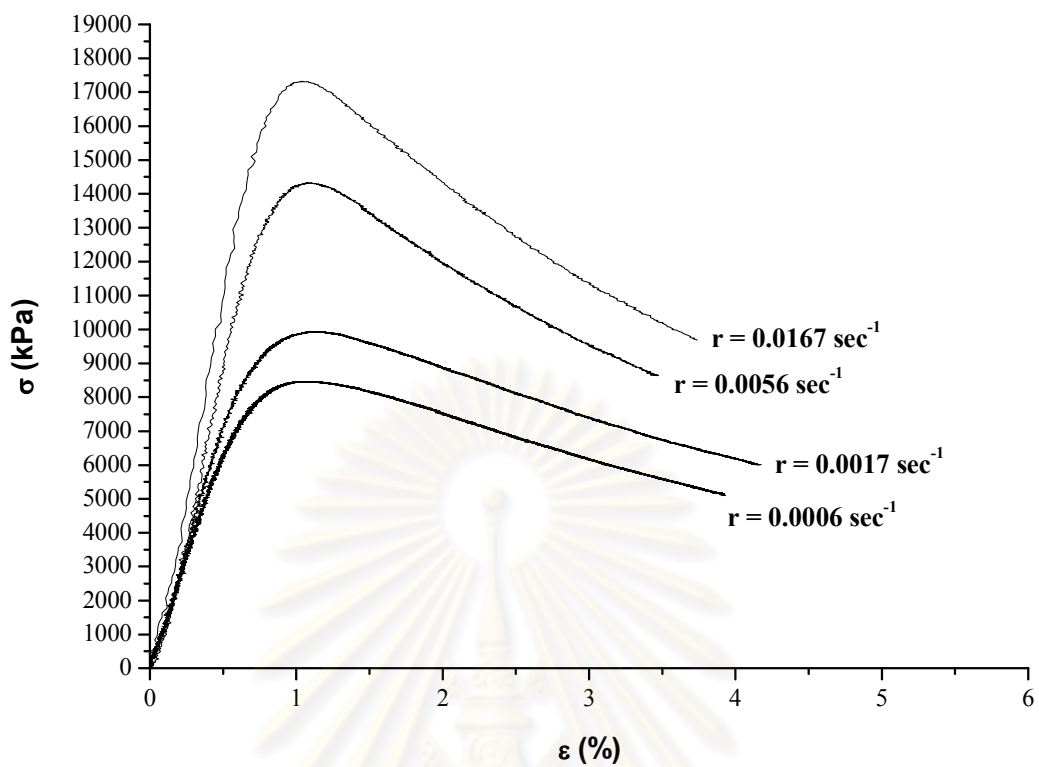
Temperature (°C)	Strain rate (sec ⁻¹)	Strain at peak (%)	Maximum stress (kPa)	Secant Young's modulus at 50% of maximum stress (MPa)
10	0.0006	1.06	8530.28	1352.58
	0.0017	1.10	9994.83	1465.30
	0.0056	1.11	14419.77	1693.93
	0.0167	1.07	17390.32	2203.26
25	0.0006	1.62	3323.05	351.71
	0.0017	1.6	4060.25	489.40
	0.0056	1.43	5598.25	860.00
	0.0167	1.36	7956.77	1307.65
40	0.0006	1.99	1582.20	195.10
	0.0017	1.77	1789.10	196.06
	0.0056	2.21	2726.25	270.66
	0.0167	1.86	3124.90	343.87
55	0.0006	2.64	971.19	84.65
	0.0017	2.55	1274.38	110.6767
	0.0056	1.98	1391.04	152.6076
	0.0167	1.19	1670.09	398.612

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแรงอัดแบบปราคาจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70

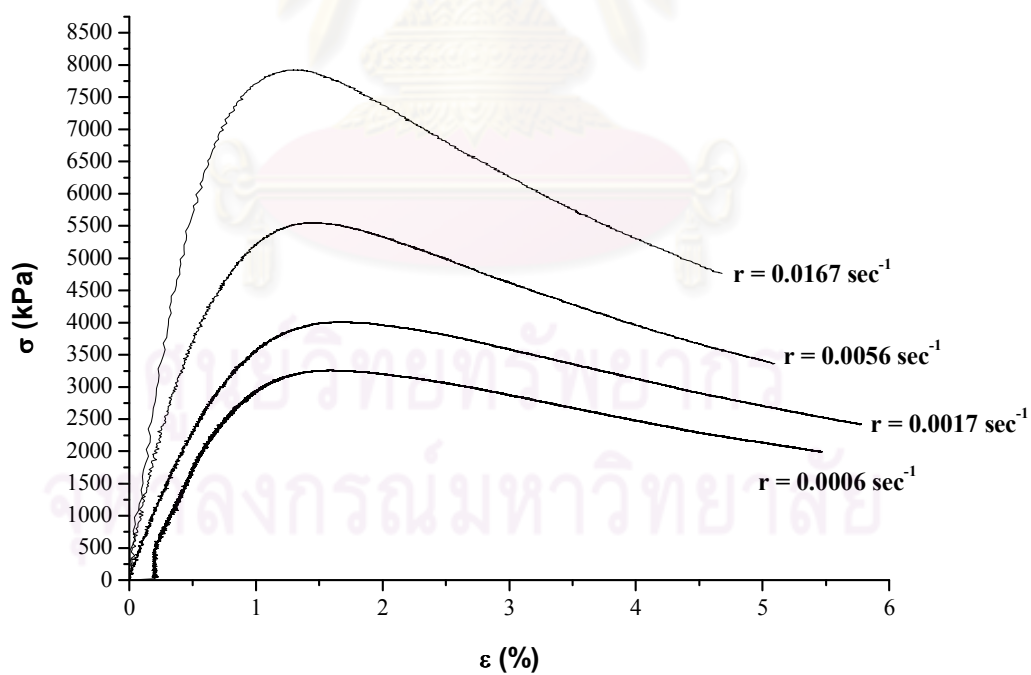
Temperature (°C)	Strain rate (sec ⁻¹)	Strain at peak (%)	Maximum stress (kPa)	Secant Young's modulus at 50% of maximum stress (MPa)
10	0.0006	1.23	8598.83	1037.20
	0.0017	0.98	11035.99	1688.13
	0.0056	1.00	14200.12	1798.78
	0.0167	0.88	18078.33	2457.35
25	0.0006	1.69	3017.74	352.13
	0.0017	1.72	4162.49	465.92
	0.0056	1.46	5756.71	955.52
	0.0167	1.25	7108.48	1173.81
40	0.0006	1.92	1366.05	184.47
	0.0017	2.45	1722.34	193.57
	0.0056	1.89	1990.26	210.18
	0.0167	1.64	2977.67	369.28
55	0.0006	2.40	881.71	74.18
	0.0017	2.10	979.17	79.39
	0.0056	1.54	997.27	225.15
	0.0167	2.11	1364.68	177.46

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแรงอัดแบบปราคาจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100

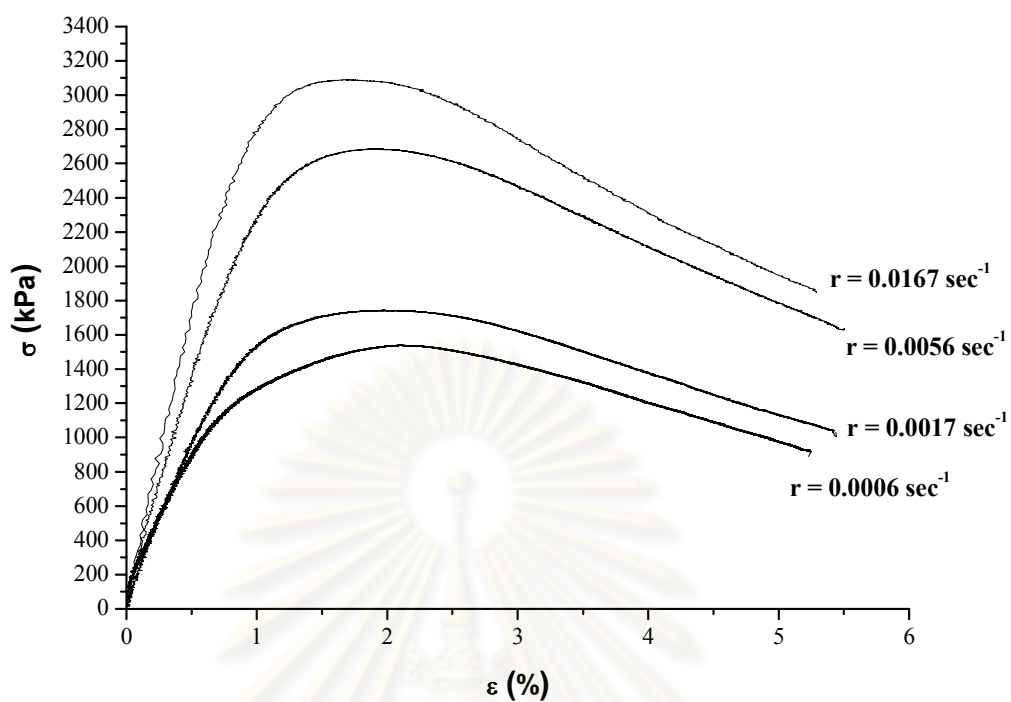
Temperature (°C)	Strain rate (sec ⁻¹)	Strain at peak (%)	Maximum stress (kPa)	Secant Young's modulus at 50% of maximum stress (MPa)
10	0.0006	1.45	6544.33	812.02
	0.0017	1.44	8508.93	1033.93
	0.0056	1.37	12739.87	1584.90
	0.0167	1.68	16243.55	1971.63
25	0.0006	2.00	2120.86	208.36
	0.0017	1.51	2823.52	289.61
	0.0056	1.47	4380.77	752.65
	0.0167	2.08	5520.13	638.54
40	0.0006	2.63	965.39	82.45
	0.0017	2.09	1261.38	124.26
	0.0056	2.28	1458.07	143.77
	0.0167	1.65	1981.70	229.13
55	0.0006	1.76	676.60	68.75
	0.0017	2.03	771.58	88.51
	0.0056	2.44	956.86	90.21
	0.0167	2.75	1267.71	115.22



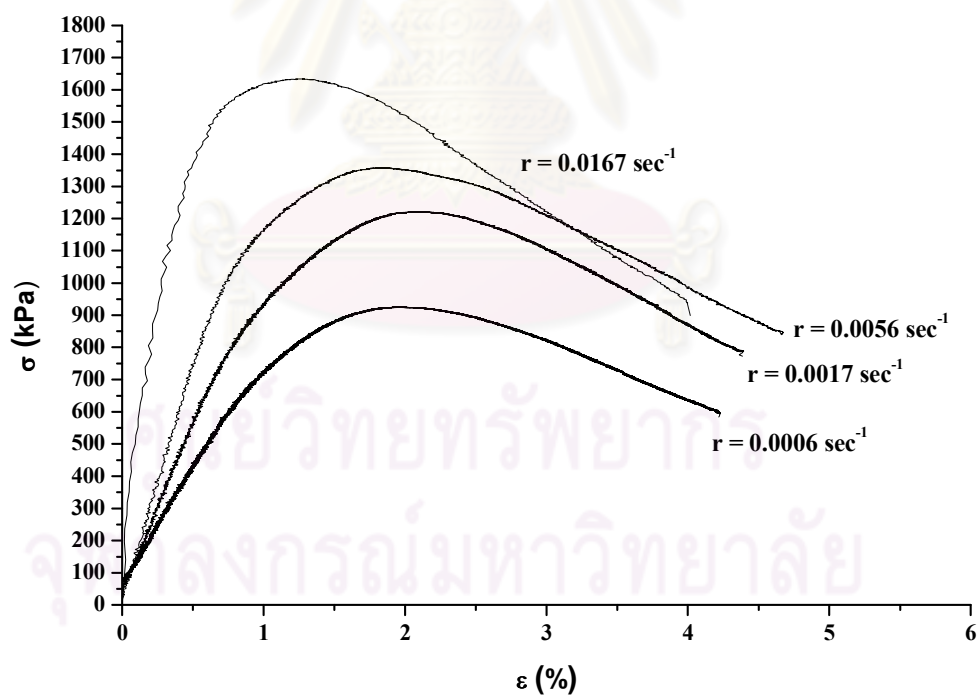
(a)



(b)

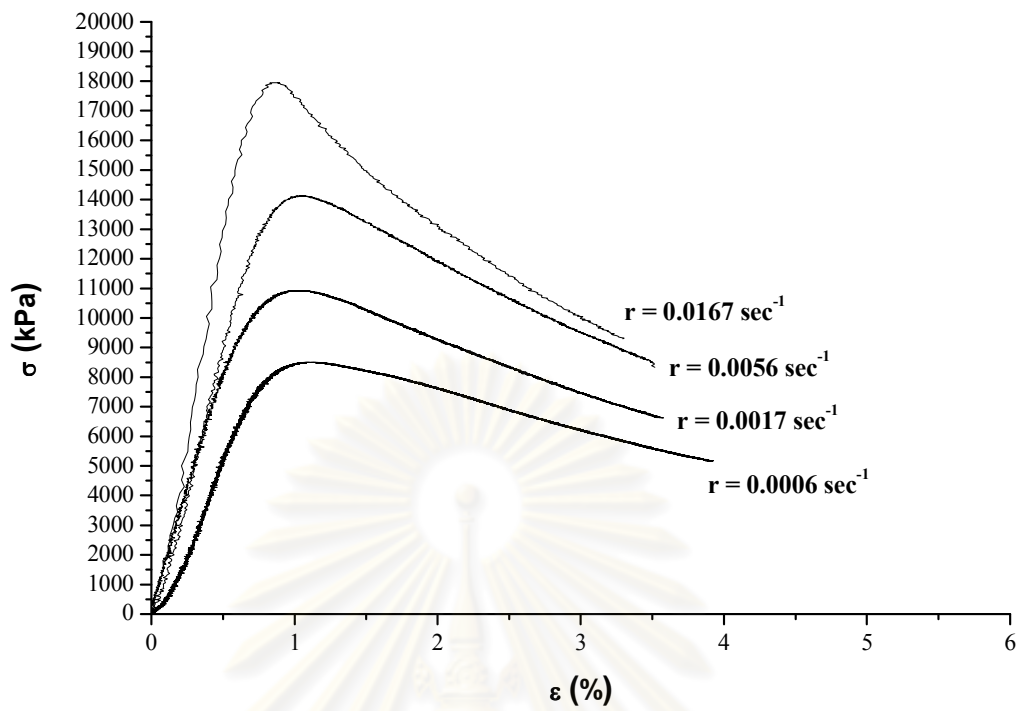


(c)

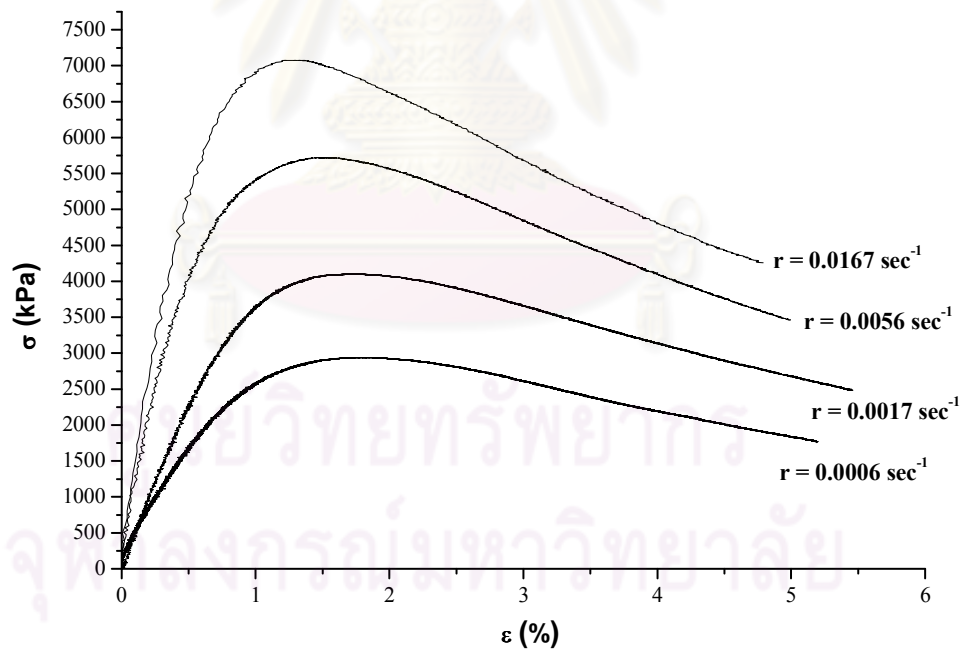


(d)

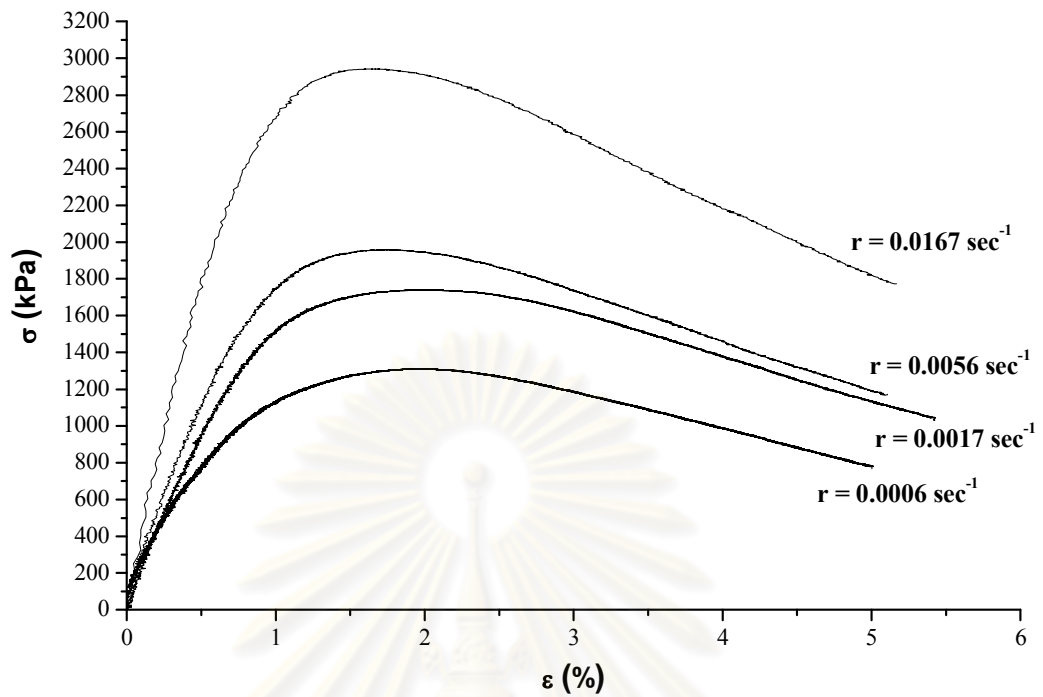
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 จากการทดสอบแรงอัดแบบปราคาจกแรงดันด้านข้างแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆกัน 4 ค่า (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C



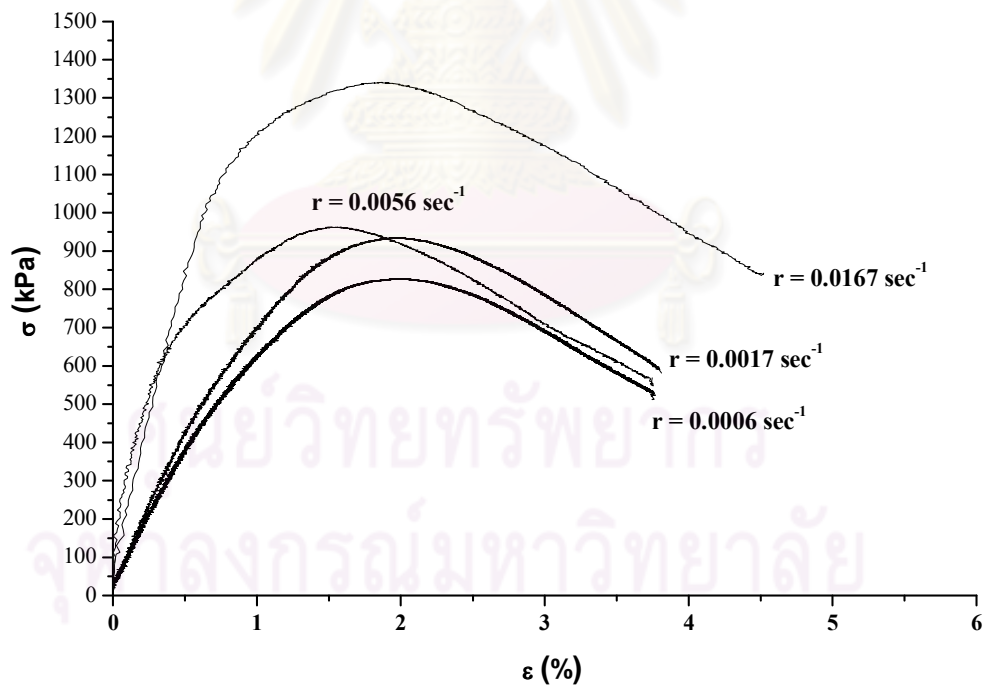
(a)



(b)

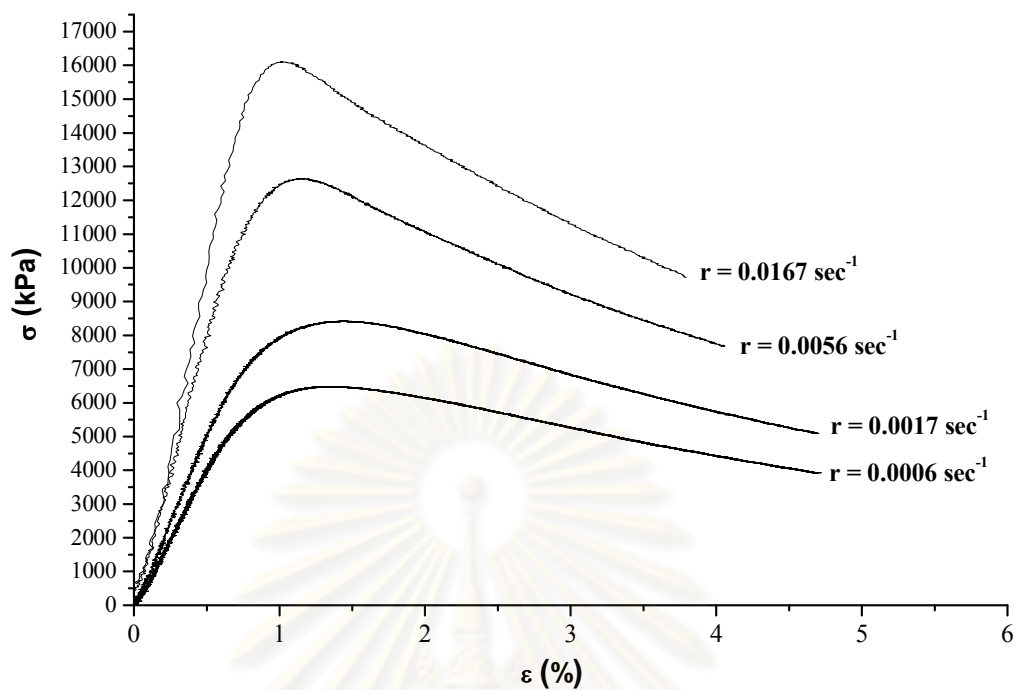


(c)

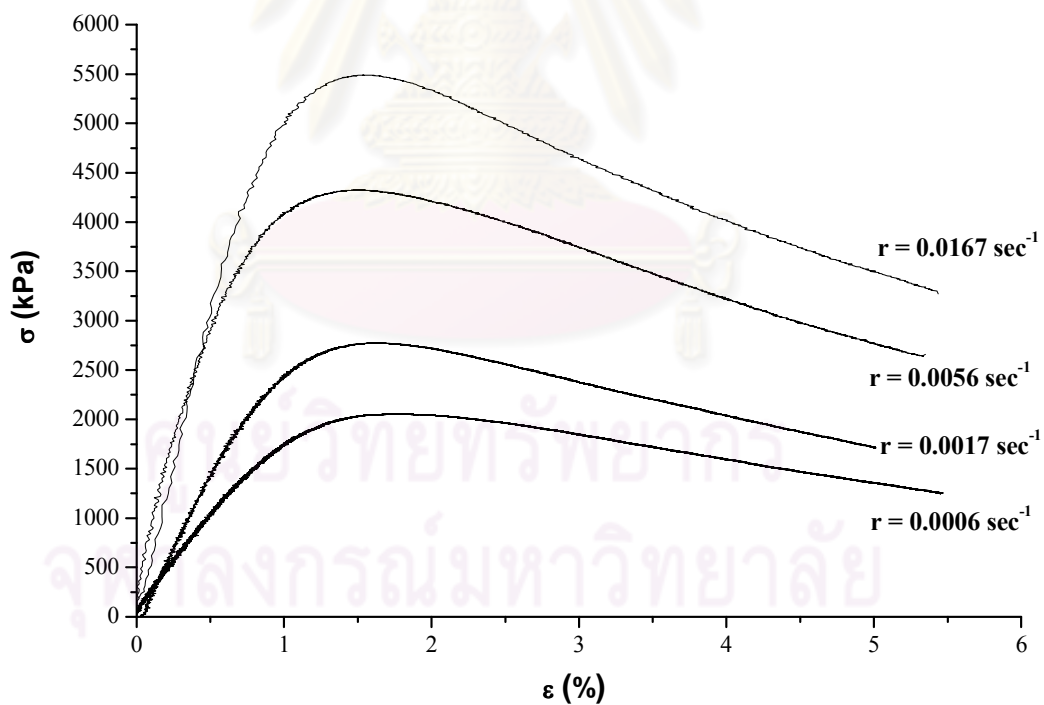


(d)

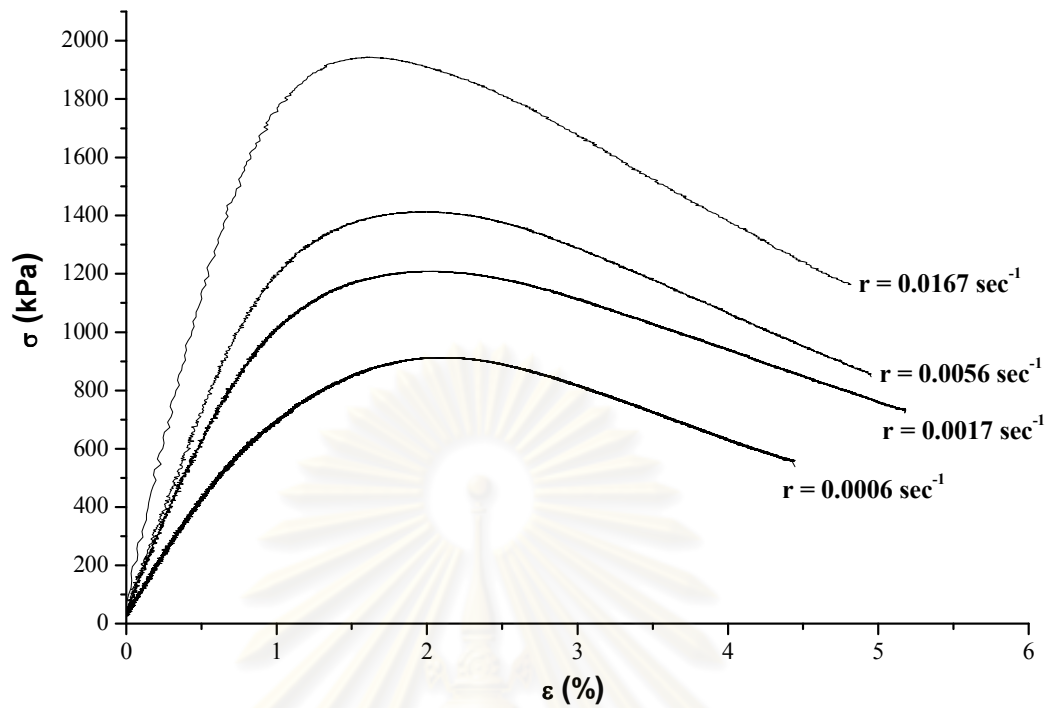
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 จากการทดสอบแรงอัดแบบปราคาจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆกัน 4 ค่า (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C



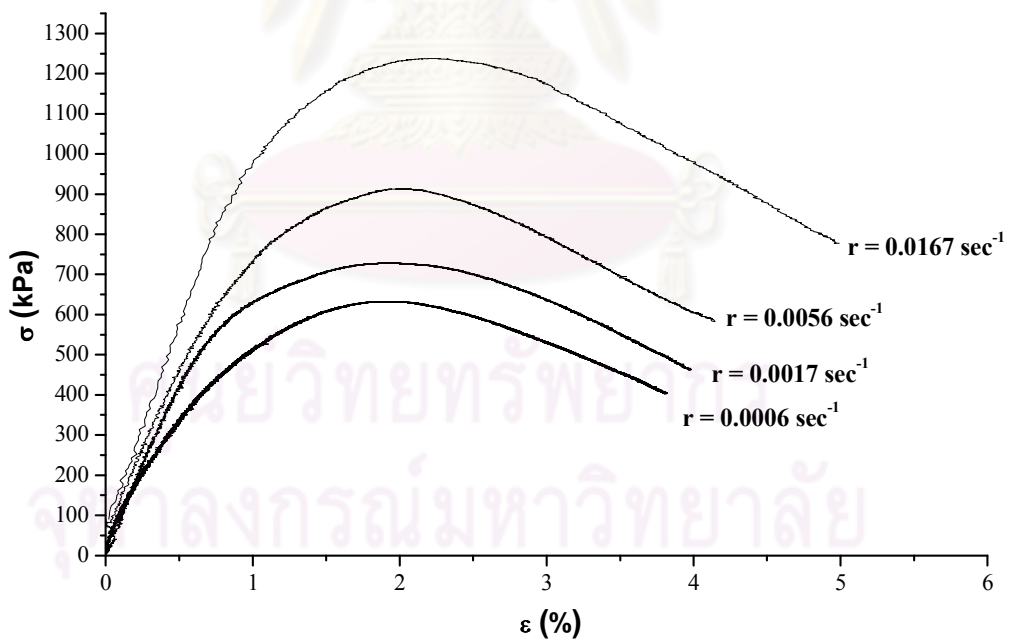
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 จากการทดสอบแรงอัดแบบปราคาจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต ณ อุณหภูมิต่างๆกัน 4 ค่า (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C

จากผลการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิ 10°C วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งสามชนิดมีค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดมากที่สุด รองลงมา คือ ที่อุณหภูมิ 25°C 40°C และ 55°C ตามลำดับ

ส่วนค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ทั้งสามชนิดเมื่อทดสอบภายใต้อุณหภูมิและอัตราความเครียดต่างๆมีค่าไม่แน่นอน ไม่สามารถหาแนวโน้มของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นได้

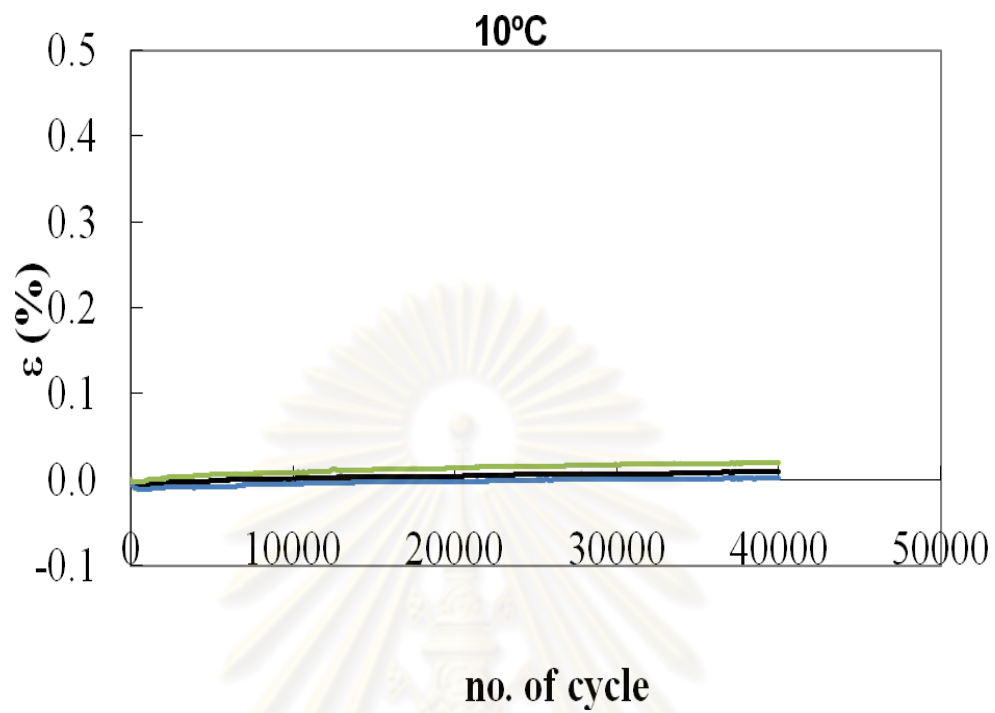
4.4 ผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัต (Dynamic Unconfined compression test, D-UC)

ผลทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิ 10°C ตัวอย่างที่ผสมจากแอสฟัลต์ทั้งสามชนิดมีค่าการยุบตัวแบบถาวรต่ำมากในจำนวนรอบที่ทำการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.7(a) อาจกล่าวได้ว่าวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตไม่แสดงพฤติกรรมการยุบตัวแบบถาวร เพราะที่อุณหภูมิต่ำๆแอสฟัลติกคอนกรีตจะมีพฤติกรรมอีลาสติกแบบสมบูรณ์ (Perfectly elastic) จึงไม่สามารถสังเกตพฤติกรรมพลาสติกได้

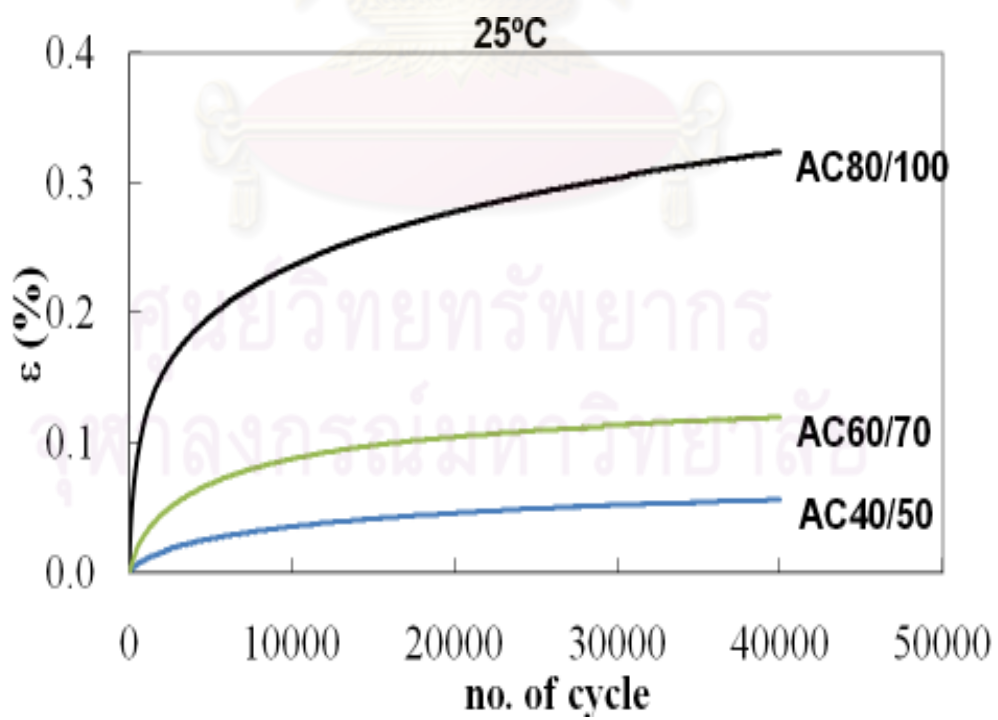
สำหรับอุณหภูมิ 25°C ตัวอย่างที่ผสมจากแอสฟัลต์ทั้งสามชนิดเริ่มแสดงพฤติกรรมการยุบตัวแบบถาวรแต่ยังมีค่าอยู่ในระดับต่ำ โดยอยู่ในช่วง “Secondary creep” คือ ยังไม่พบความเสียหายเกิดขึ้นในจำนวนรอบที่ทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.7(b) โดยตัวอย่างที่ผสมจาก AC80/100 เกิดการยุบตัวแบบถาวรมากกว่า AC60/70 และ AC40/50 ตามลำดับ

ส่วนอุณหภูมิ 40°C พบว่าตัวอย่างเริ่มเกิดความเสียหายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.7(c) โดยตัวอย่างที่ผสมด้วย AC80/100 เริ่มเกิดความเสียหายเร็วที่สุดคือ มีค่าที่จุดเสียรูป (FN) 10,250 รอบ ส่วนตัวอย่างที่ผสมด้วย AC60/70 เริ่มเกิดความเสียหายช้ากว่า AC80/100 คือ มีค่า FN 17,850 รอบ และสุดท้ายตัวอย่างที่ผสมด้วย AC40/50 เริ่มเกิดความเสียหายช้าที่สุด คือ มีค่า FN 33,800 รอบ

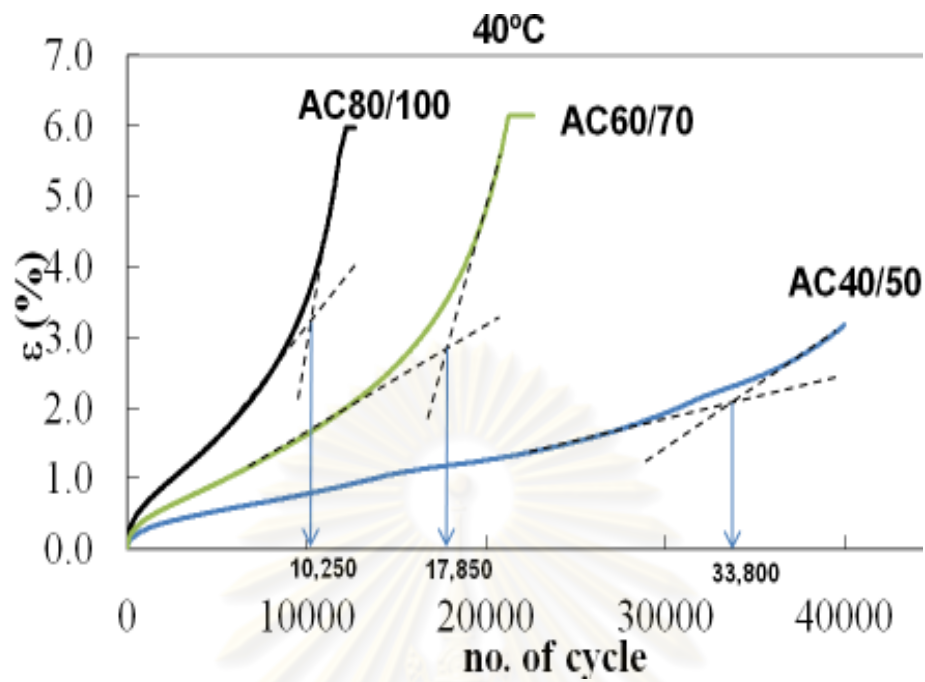
สำหรับอุณหภูมิ 55°C มีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดถาวรกับจำนวนรอบการให้แรงเหมือนกับอุณหภูมิ 40°C ดังแสดงในรูปที่ 4.7(d) โดยตัวอย่างที่ผสมด้วย AC40/50 เริ่มเกิดความเสียหายช้าที่สุด คือ มีค่าที่จุดเสียรูป (FN) 5,095 รอบ ส่วนตัวอย่างที่ผสมด้วย AC60/70 เริ่มเกิดความเสียหายเร็วกว่า AC40/50 คือ มีค่า FN 4,340 รอบ และสุดท้ายตัวอย่างที่ผสมด้วย AC80/100 เริ่มเกิดความเสียหายเร็วที่สุด คือ มีค่า FN 2,080 รอบ โดยที่ค่า FN สามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.8



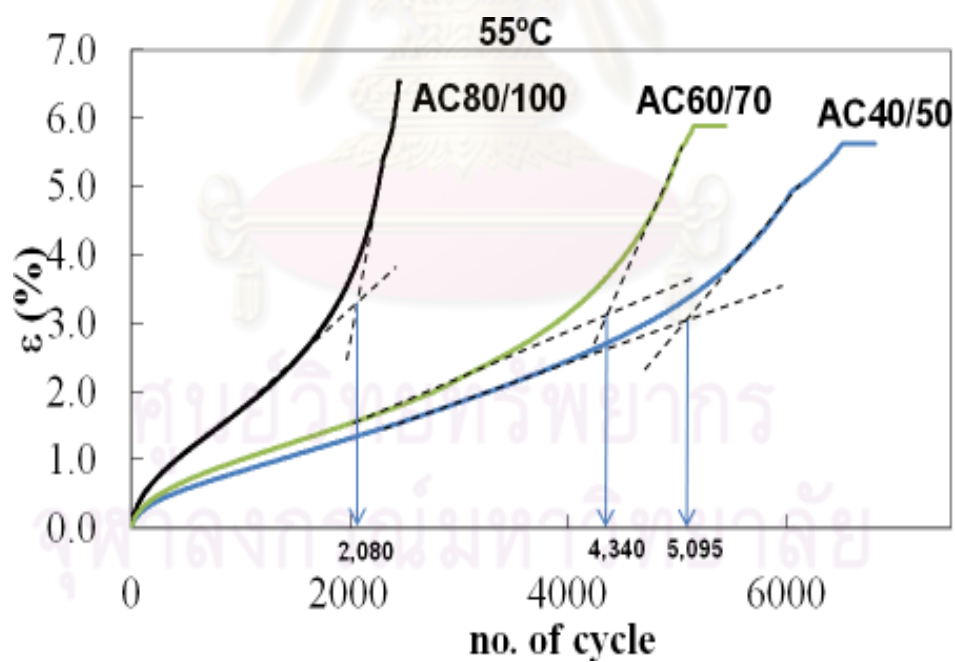
(a)



(b)



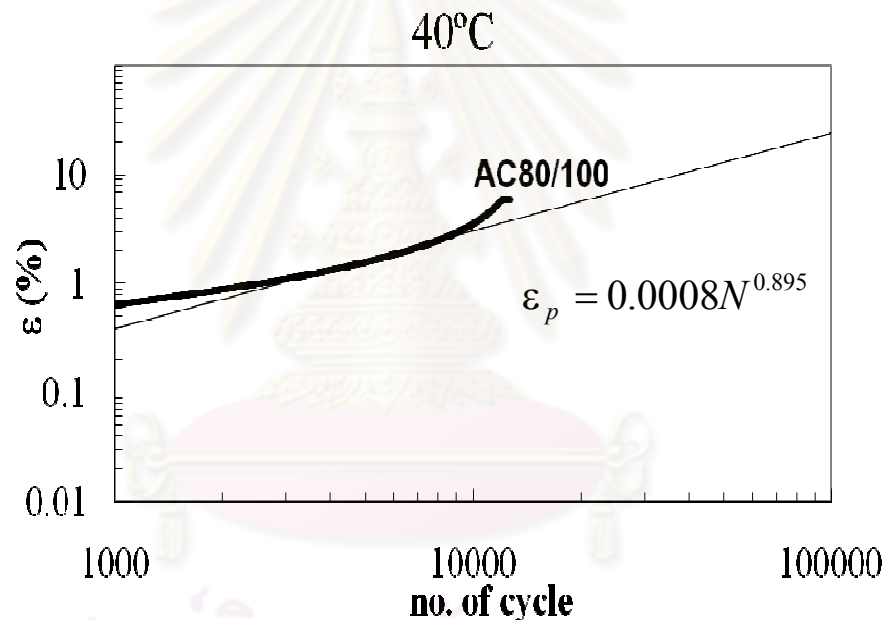
(c)



(d)

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนรอบของแรงกระทำที่อุณหภูมิต่างๆ (a) 10°C (b) 25°C (c) 40°C (d) 55°C

จากผลของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนรอบของแรงกระทำของตัวอย่างที่ผสมจากแอสฟัลต์ทั้งสามชนิด ณ อุณหภูมิต่างๆ สามารถนำไปสร้างสมการการยุบตัวแบบถาวรอย่างง่ายได้ดังแสดงในตารางที่ 4.8 โดยรูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ ล็อกระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนรอบของตัวอย่าง AC80/100 ที่อุณหภูมิการทดสอบ 40°C และ 55°C ตามลำดับ โดยระยะตัดแกน y จะเป็นค่า a ส่วนความชันกราฟเป็นค่า b และสำหรับค่า a และ b ของตัวอย่าง AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 ที่อุณหภูมิการทดสอบ 25°C 40°C และ 55°C สามารถสรุปไว้ในตารางที่ 4.8 พบว่าค่า b มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อตัวอย่างผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีค่าเพเนตรชันสูงขึ้น นอกจากนั้นค่า b จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นถ้าตัวอย่างมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างความสัมพันธ์ล็อกระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนรอบของแรงกระทำของตัวอย่าง AC80/100 ที่อุณหภูมิการทดสอบ 40°C

ตารางที่ 4.8 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

ชนิด แอสฟัลต์	อุณหภูมิ	FN	สมการการยุบตัวแบบ ถาวร	a	b
AC 40/50	25°C	NA*	$\epsilon_p = 0.0047 N^{0.232}$	0.0047	0.232
AC 60/70			$\epsilon_p = 0.0027 N^{0.363}$	0.0027	0.363
AC 80/100			$\epsilon_p = 0.0051 N^{0.399}$	0.0051	0.399
AC 40/50	40°C	33,800	$\epsilon_p = 0.0014 N^{0.689}$	0.0014	0.689
AC 60/70		17,850	$\epsilon_p = 0.00084 N^{0.822}$	0.00084	0.822
AC 80/100		10,250	$\epsilon_p = 0.0008 N^{0.895}$	0.0008	0.895
AC 40/50	55°C	5,095	$\epsilon_p = 0.0034 N^{0.785}$	0.0034	0.785
AC 60/70		4,340	$\epsilon_p = 0.0021 N^{0.875}$	0.0021	0.875
AC 80/100		2,080	$\epsilon_p = 0.0035 N^{0.901}$	0.0035	0.901

* N/A (not available) ไม่สามารถหาค่าได้

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

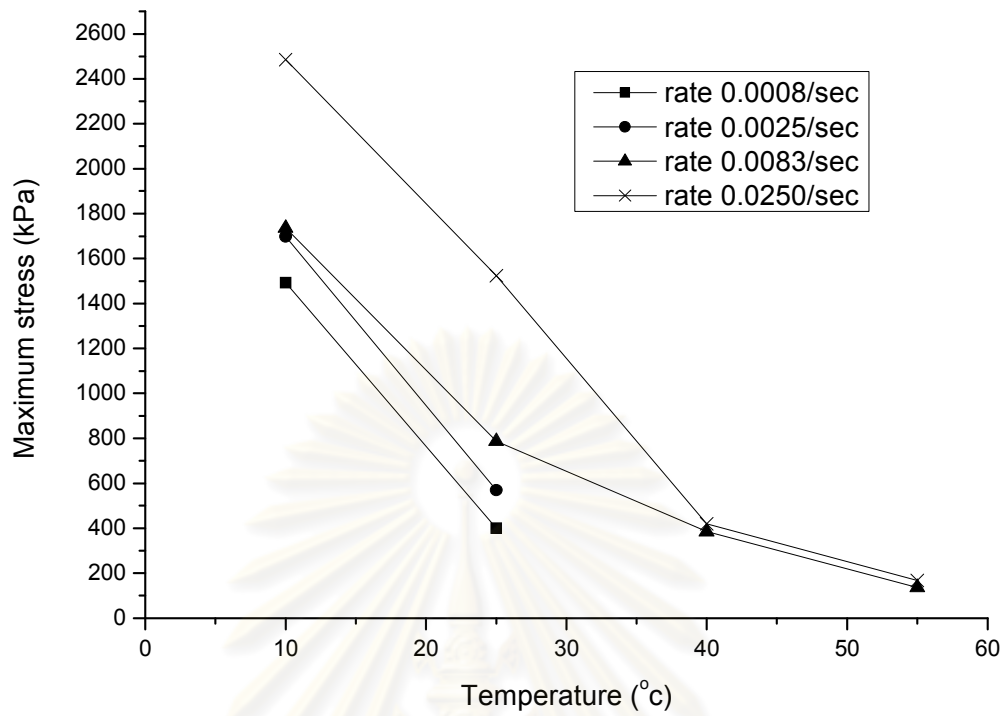
บทนี้นำเสนอผลสรุปของการดำเนินงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ได้แก่ ผลสรุปของการทดสอบแรงดึงทางอ้อมและการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างทั้งแบบสถิตและพลวัตของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 รวมทั้งได้มีการอภิปรายผลการทดลองและนำเสนอข้อเสนอนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในอนาคต

5.1 สรุปผลการทดลอง

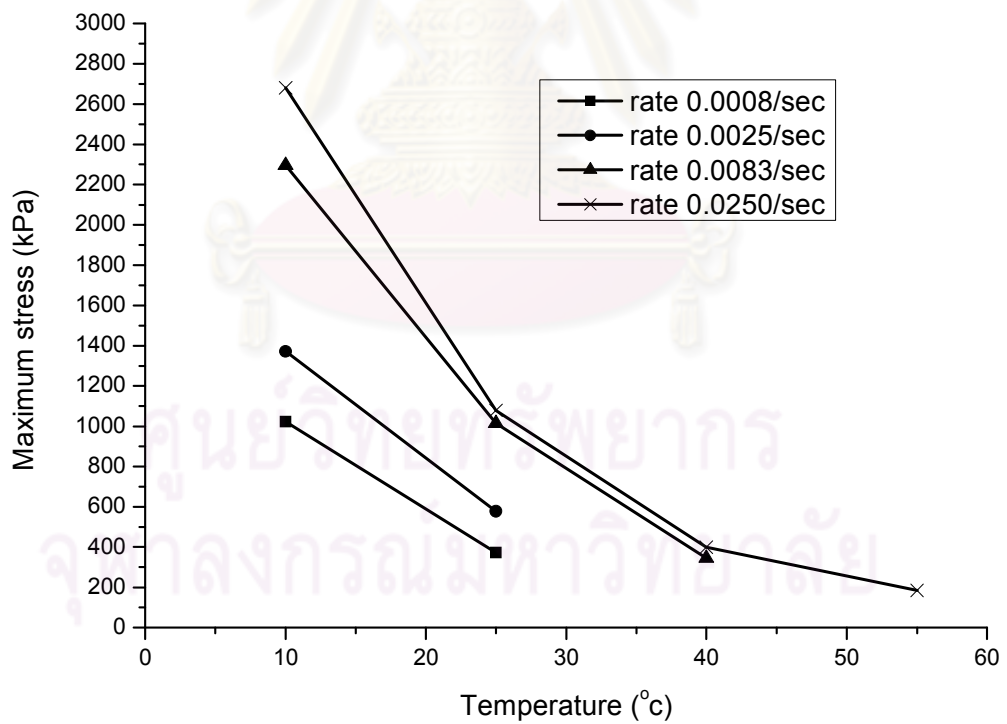
5.1.1 สรุปผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต (Static Indirect tensile test, S-IDT)

จากผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตสรุปได้ว่าอุณหภูมิและอัตราความเครียดมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตเป็นอย่างมาก วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์เกรดการเจาะลึกแตกต่างกันทั้งสามชนิดที่มีความหนาแน่นเท่ากัน มีแนวโน้มของค่าความเค้นสูงสุดและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดไปในทางเดียวกัน คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความเค้นสูงสุดและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดจะมีค่าลดลง และเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้นค่าความเค้นสูงสุดและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.2

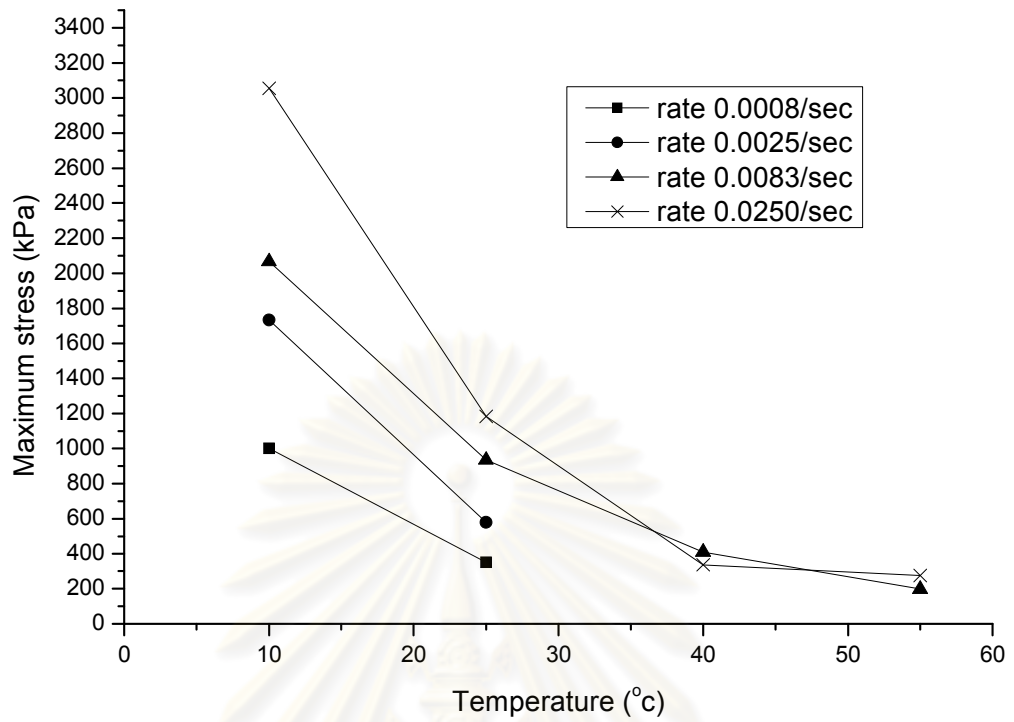
ส่วนเกรดการเจาะลึกของแอสฟัลต์มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตน้อยมากเมื่อเทียบกับอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราความเครียด โดยพบว่าค่าความเค้นสูงสุดและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทดสอบด้วยแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมจากแอสฟัลต์ทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกันและไม่สามารถหาแนวโน้มความสัมพันธ์ของค่าความเค้นสูงสุดและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดกับเกรดการเจาะลึกของแอสฟัลต์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.4



(a)

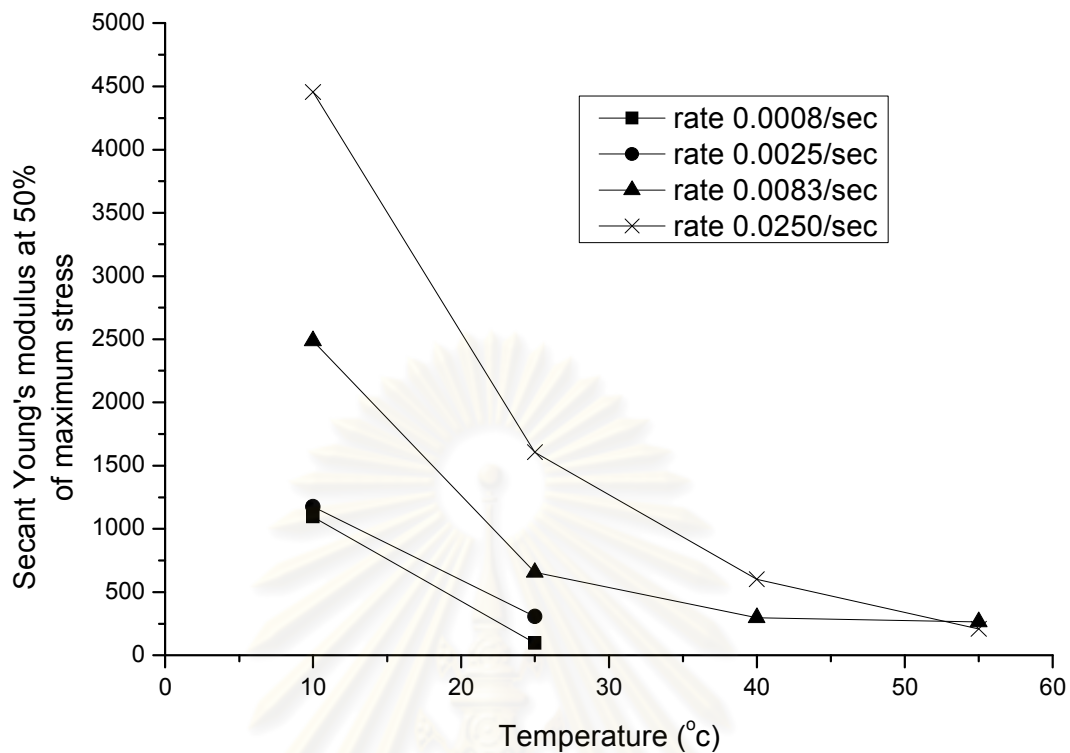


(b)

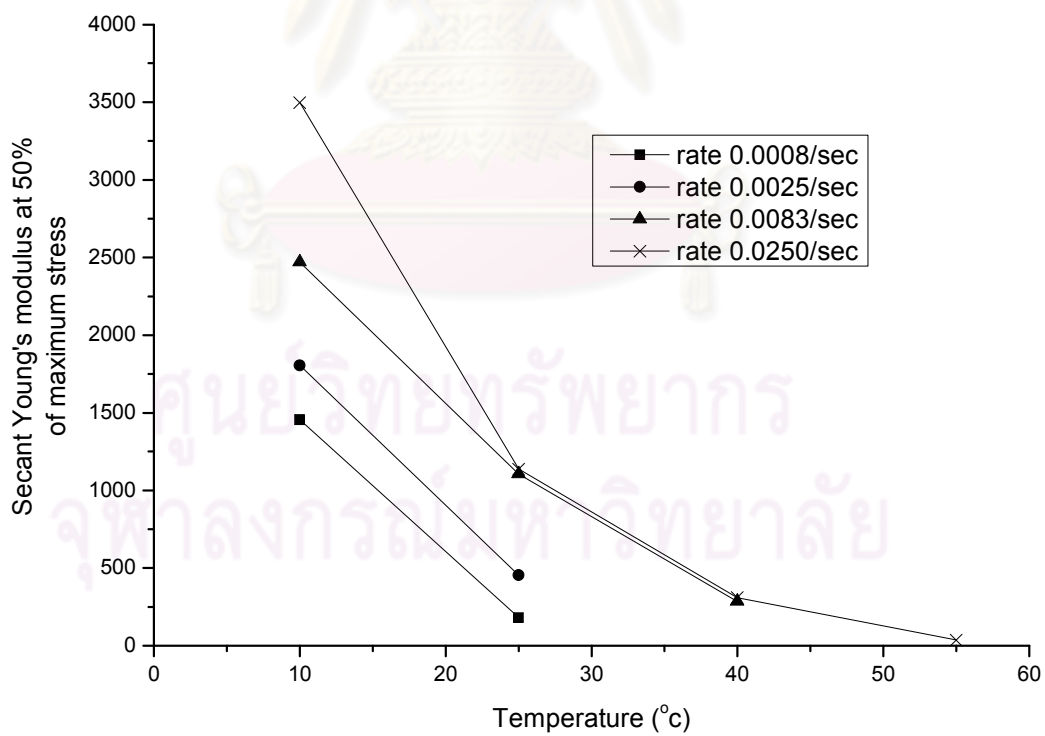


(c)

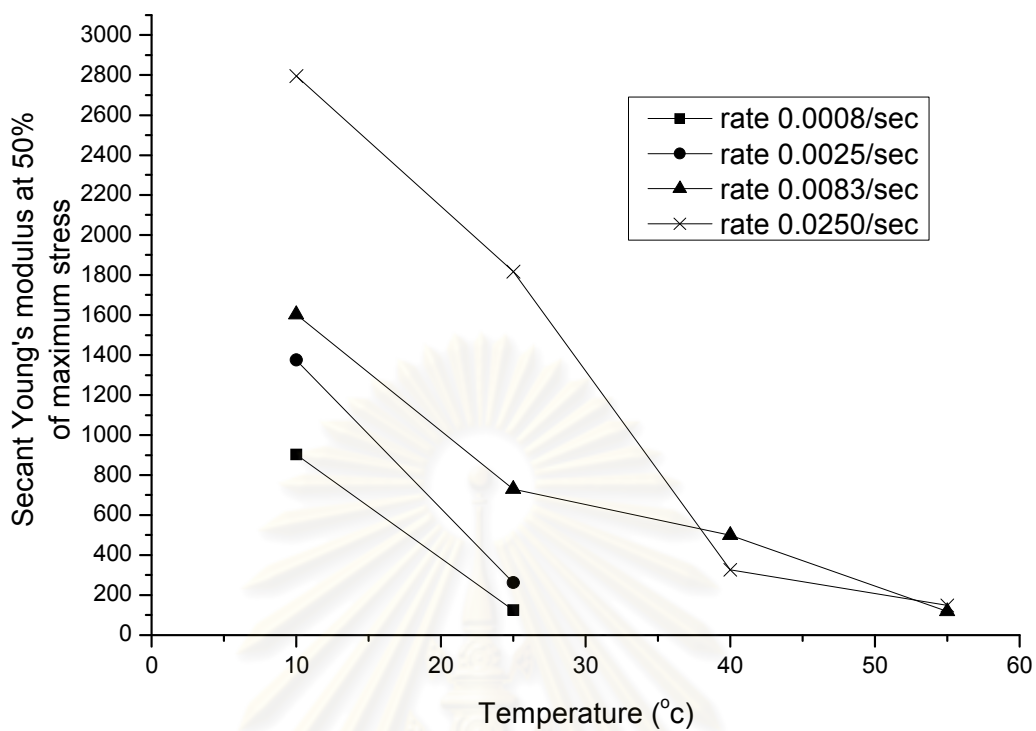
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับอุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตที่อัตราความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100



(a)



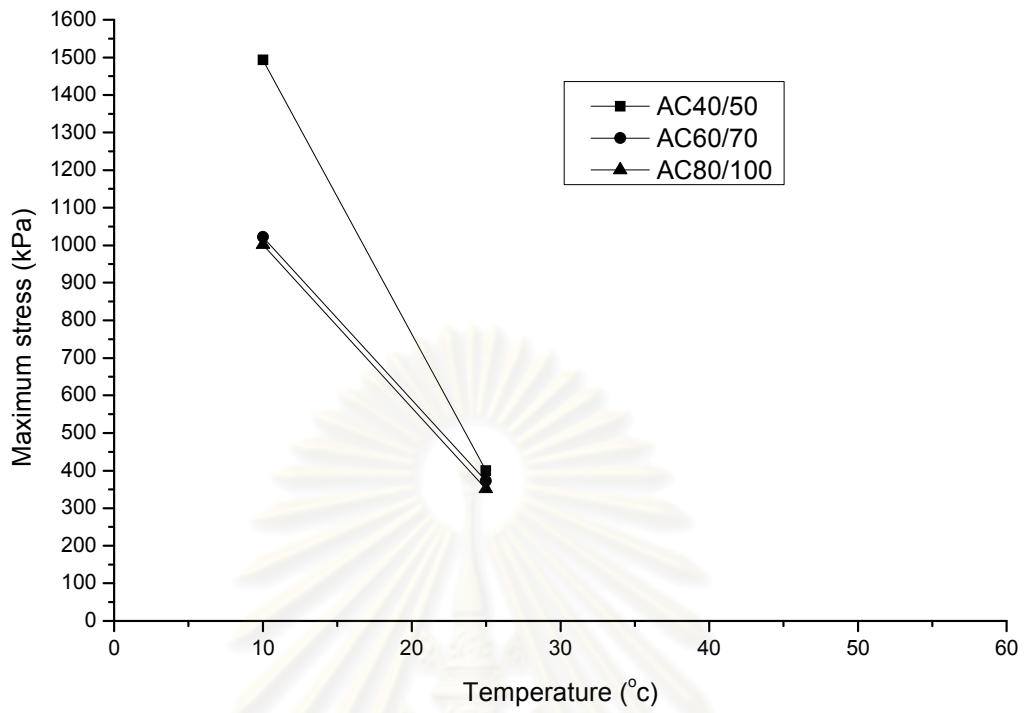
(b)



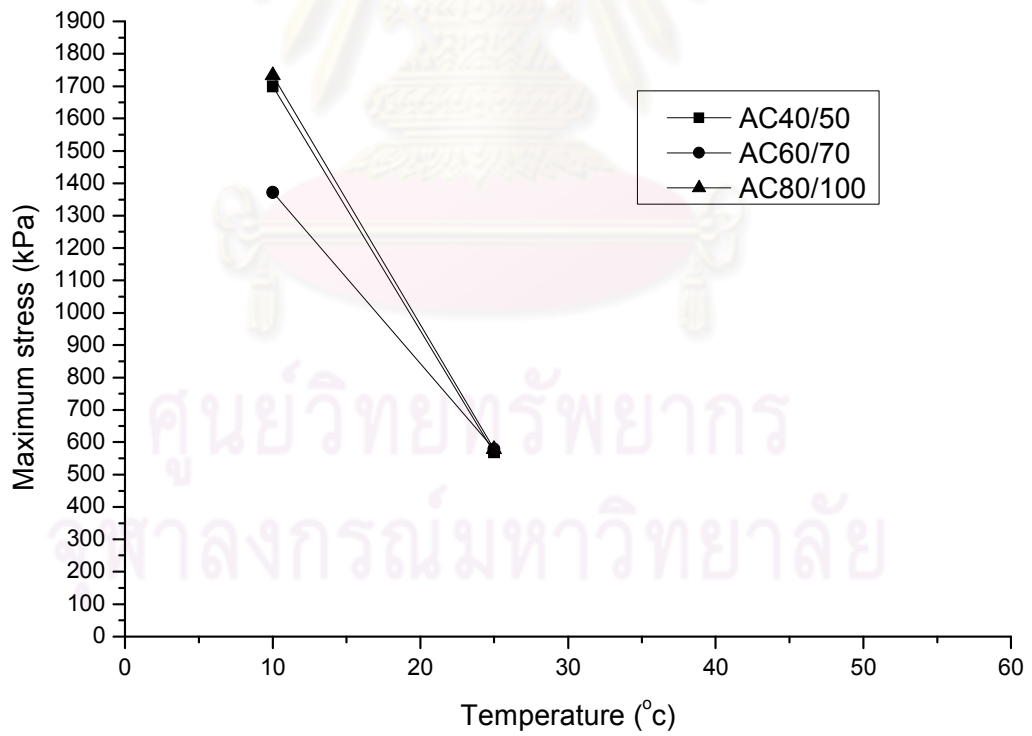
(c)

รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดกับอุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตที่อัตราความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100

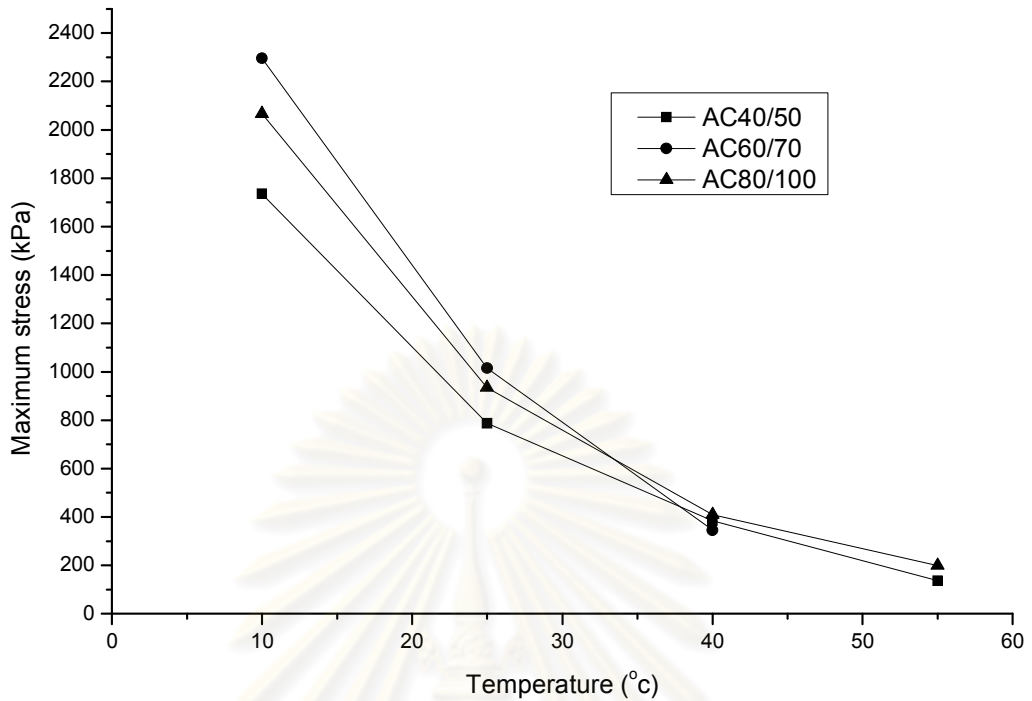
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



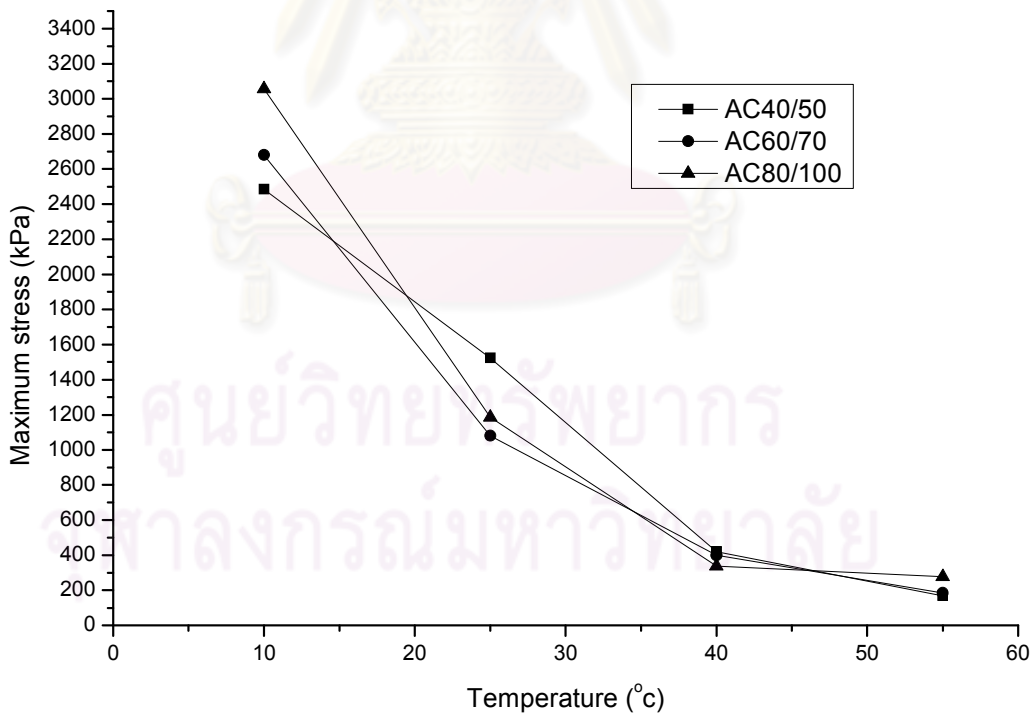
(a)



(b)

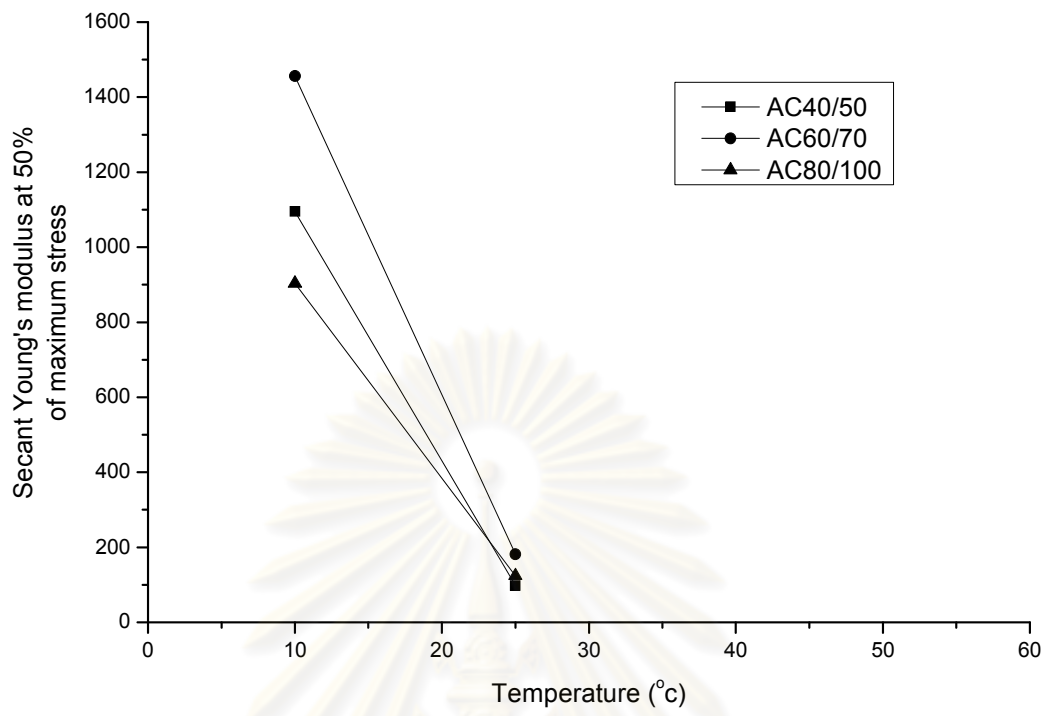


(c)

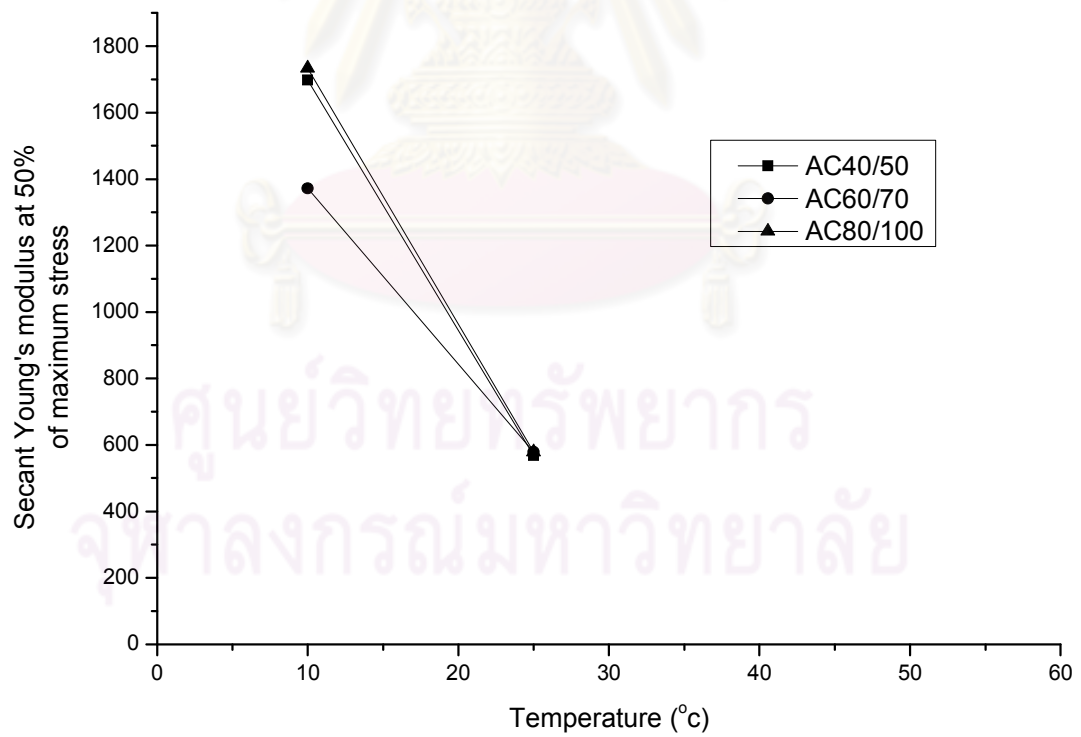


(d)

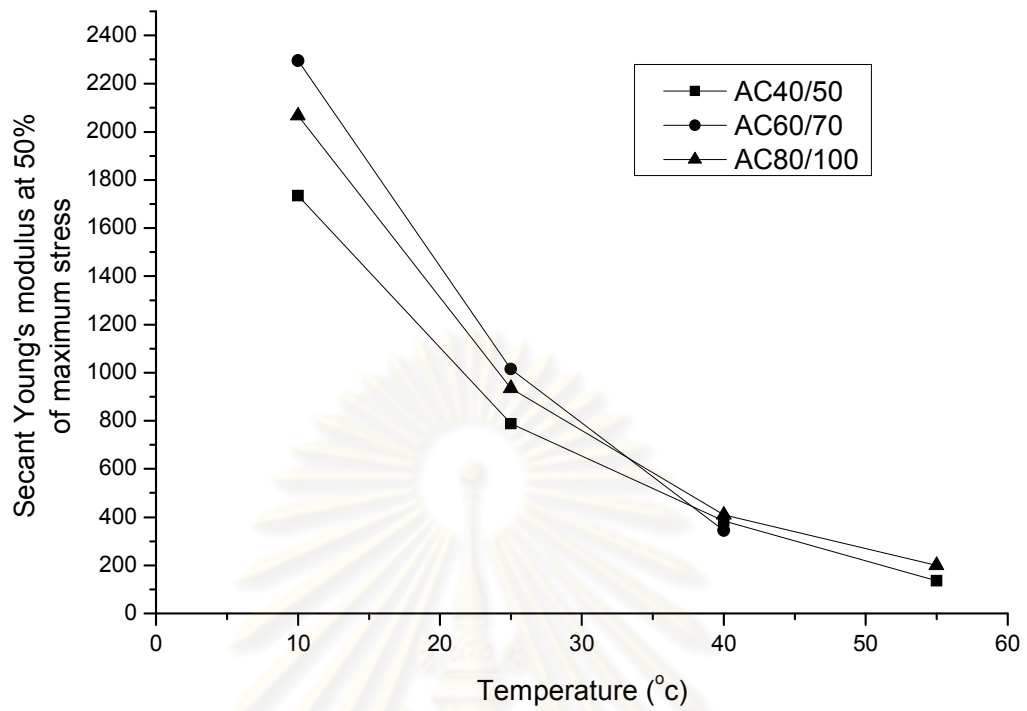
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับอุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ณ อัตราความเครียดต่างๆ (a) 0.0008 ต่อวินาที (b) 0.0025 ต่อวินาที (c) 0.0083 ต่อวินาที (d) 0.0250 ต่อวินาที



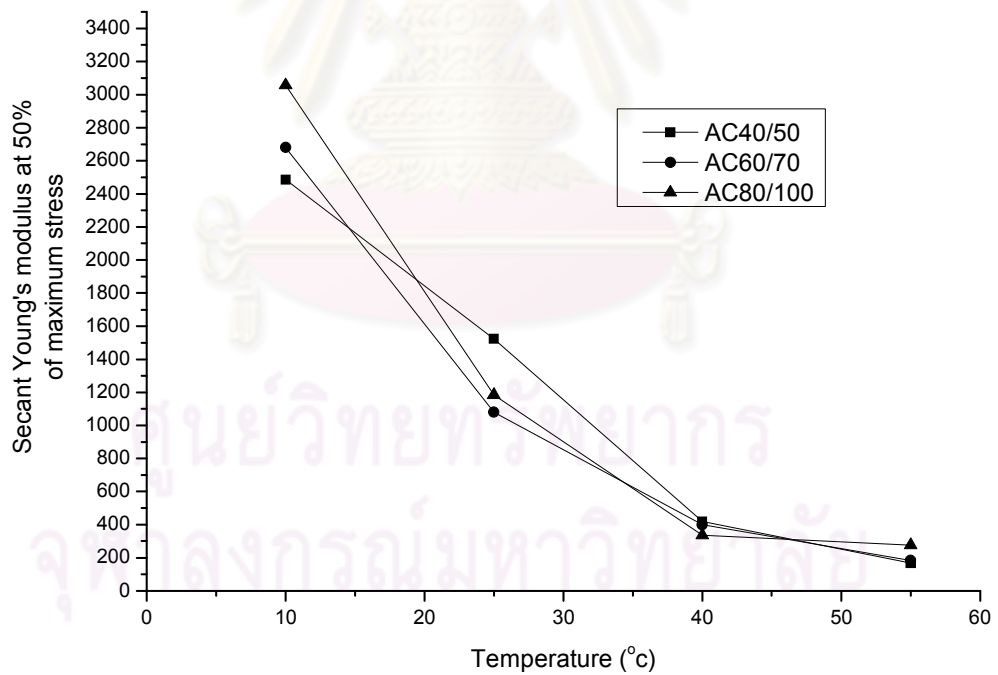
(a)



(b)



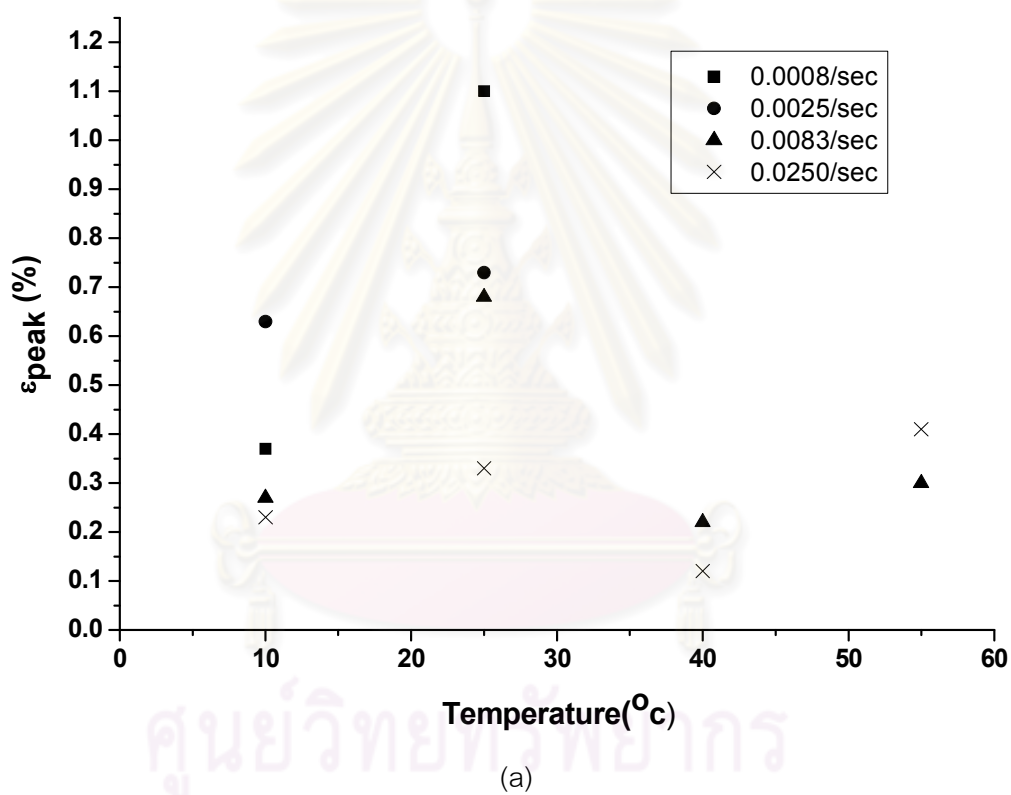
(c)

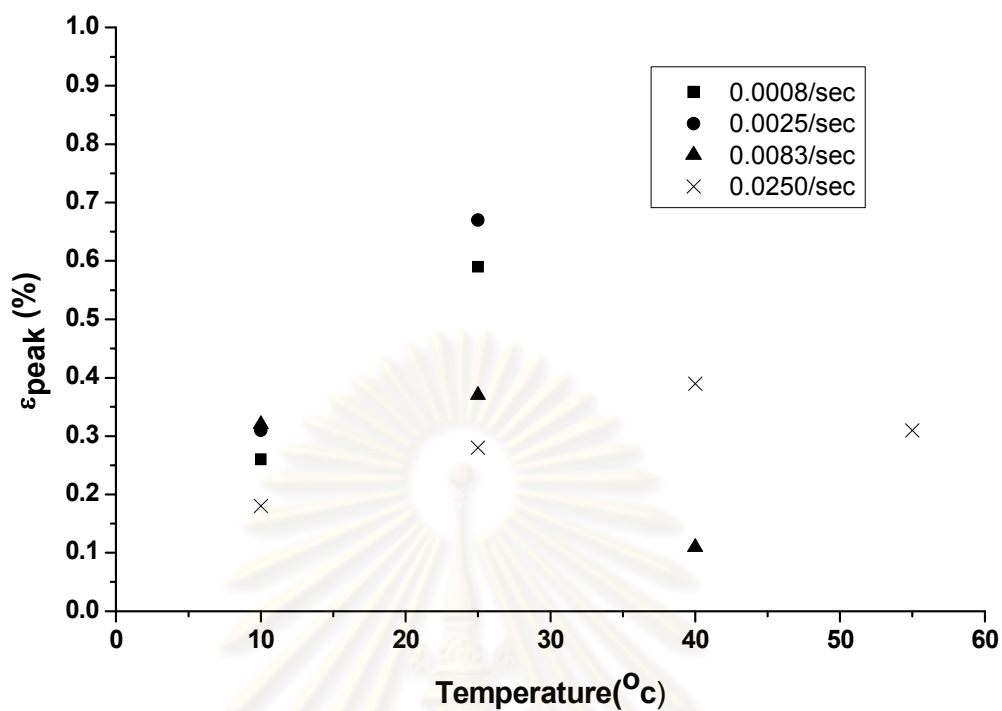


(d)

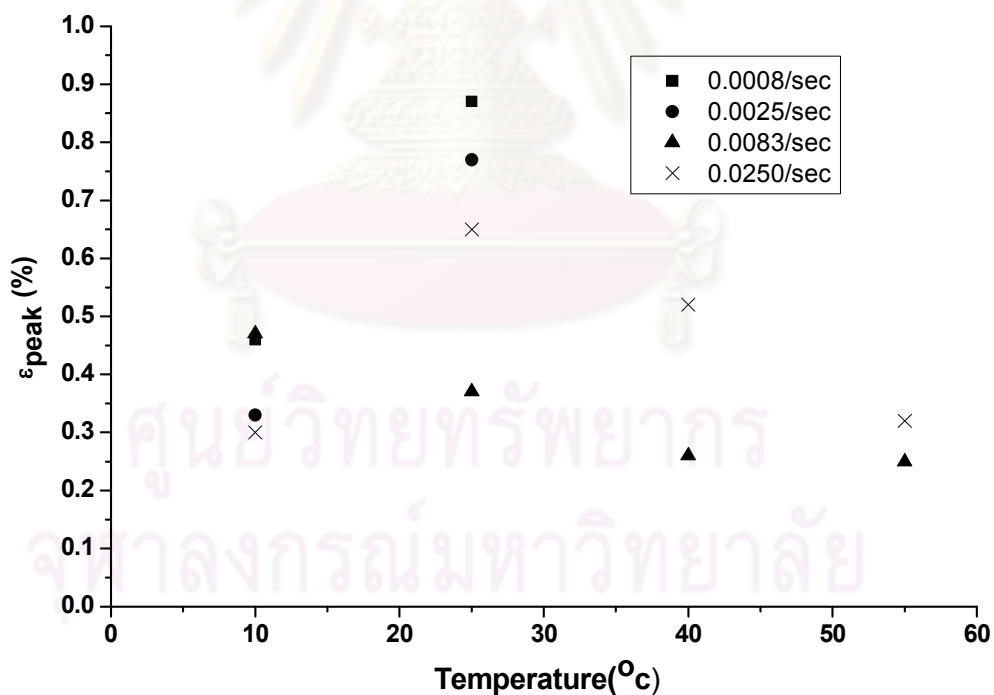
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดกับอุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต ณ อัตราความเครียดต่างๆ (a) 0.0008 ต่อวินาที (b) 0.0025 ต่อวินาที (c) 0.0083 ต่อวินาที (d) 0.0250 ต่อวินาที

ส่วนค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตมีค่ากระจาย กระจาย ไม่สามารถสรุปแนวโน้มของผลการทดสอบที่เกิดขึ้นได้ โดยค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทดสอบอยู่ในช่วง 0.11% ถึง 1.10% ดังแสดงในรูปที่ 5.5 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีค่าความเครียดดึงในช่วงก่อนที่วัสดุจะเกิดความเสียหาย คือ 0.8% ถึง 1.0% พบว่าค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเครียดดึงที่พบได้ทั่วไปของคอนกรีต





(b)



(c)

รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียด ณ ความเค้นสูงสุดกับอุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติก คอนกรีตจากการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตที่อัตราความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100

จากผลสรุปที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปรวมได้ว่าอัตราความเครียดและอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต ส่วนเกรดการเจาะลึกของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการผลิตวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีผลต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราความเครียดและอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังของวัสดุจะตกลงอย่างรวดเร็วหลังจากจุดที่มีค่าความเค้นสูงสุดเมื่อวัสดุอยู่ภายใต้อุณหภูมิต่ำ (10°C) เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีพฤติกรรมเป็นแบบวัสดุเปราะ และที่อุณหภูมิสูง (40°C และ 55°C) เมื่อทดสอบวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตด้วยการทดสอบแรงดึงทางอ้อมพบว่าวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตไม่ได้แสดงพฤติกรรมด้านแรงดึงเพียงอย่างเดียว โดยมีพฤติกรรมด้านแรงอัดเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตจึงไม่เหมาะกับการทดสอบที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 25°C)

5.1.2 สรุปผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต (Dynamic Indirect tensile test, D-IDT)

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าเกรดการเจาะลึกของแอสฟัลต์ทำให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีความแปรปรวน วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์เกรดการเจาะลึกแตกต่างกันทั้งสามชนิดแต่มีค่าความหนาแน่นเท่ากันให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 5.1 อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมจากแอสฟัลต์ทั้งสามชนิดมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักในแต่ละอุณหภูมิใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสคั้นตัว สังเกตได้จากรูปที่ 5.6 เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมาพิจารณาพบว่าที่อุณหภูมิสูงๆ เช่น 40°C และ 55°C วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีความสามารถในการคั้นตัวได้น้อยมาก เป็นเพราะที่อุณหภูมิสูงๆ วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีพฤติกรรมเป็นแบบพลาสติก (Plastic behavior) ดังแสดงจากกราฟในรูปที่ 5.7

เมื่อนำผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัวไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของธนกรพบว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวมีค่าใกล้เคียงกัน เป็นเพราะใช้วิธีมาร์แชลในการออกแบบและใช้วัสดุในการเตรียมตัวอย่างเหมือนกัน และเมื่อนำผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัวไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของธันวิน และคณะ (2552) พบว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างสูงน่าจะเป็น

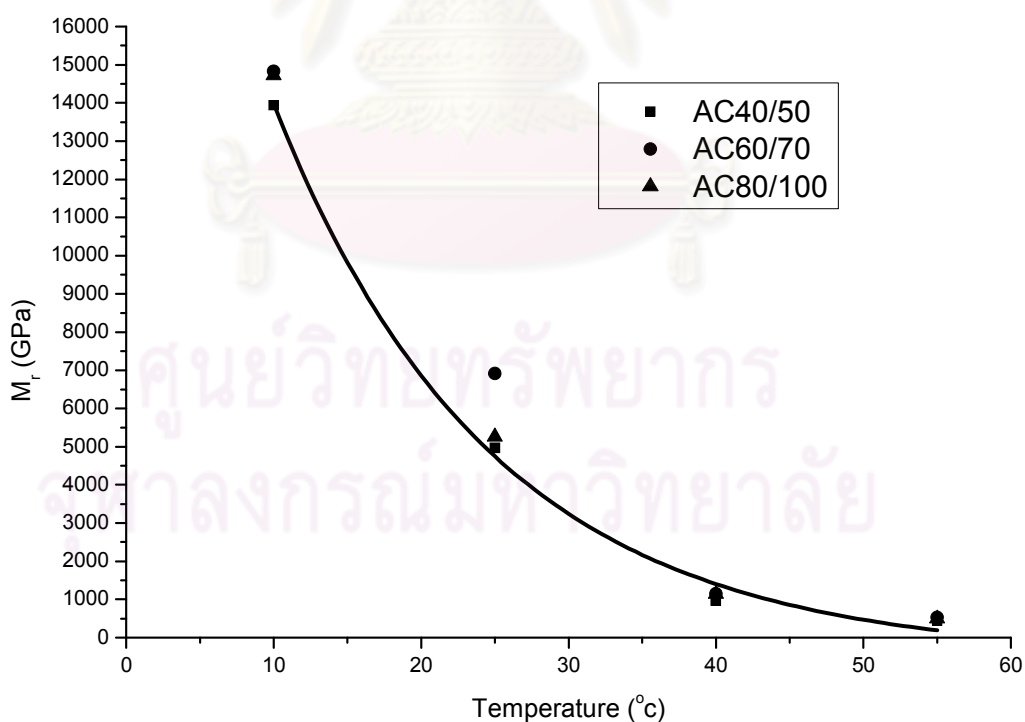
เพราะใช้คุณสมบัติทดสอบและวิธีในการเตรียมตัวอย่างแตกต่างกัน โดยอินวิน และคณะ (2552) ใช้วิธี SUPERPAVE ในการออกแบบและเตรียมตัวอย่าง แต่จากผลการทดสอบทั้งหมดพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

วัสดุเชื่อม ประสาน	ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)					
	10°C	20°C	25°C	35°C	40°C	55°C
AC 40/50	13,942	8,310**	4,964	1,566**	967	442
AC 60/70	14,832	5,267**	6,911	872**	1,143	532
	14,765*	-	5,479*	-	745*	319*
AC 80/100	14,721	-	5,261	-	1,139	498

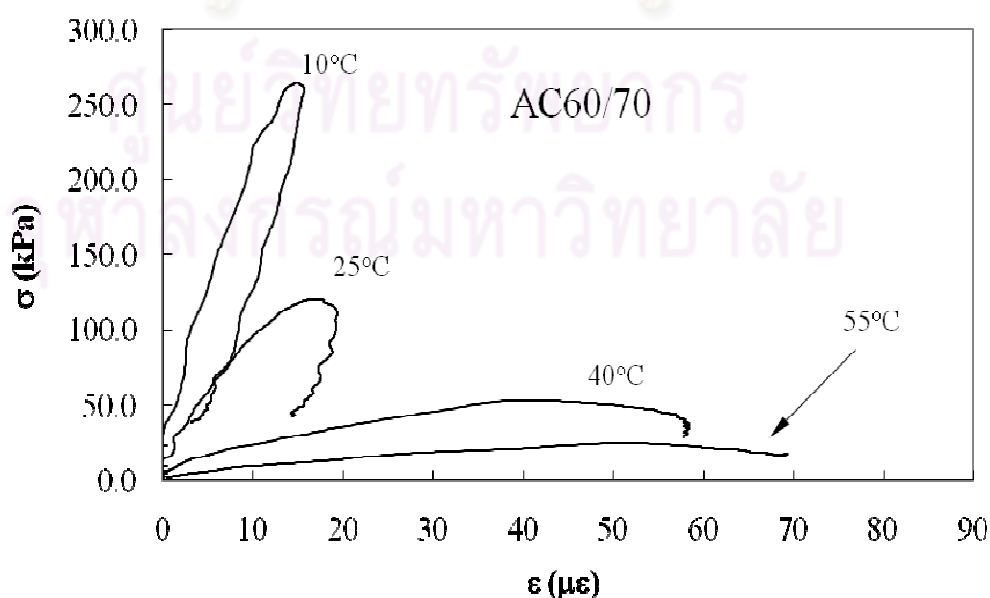
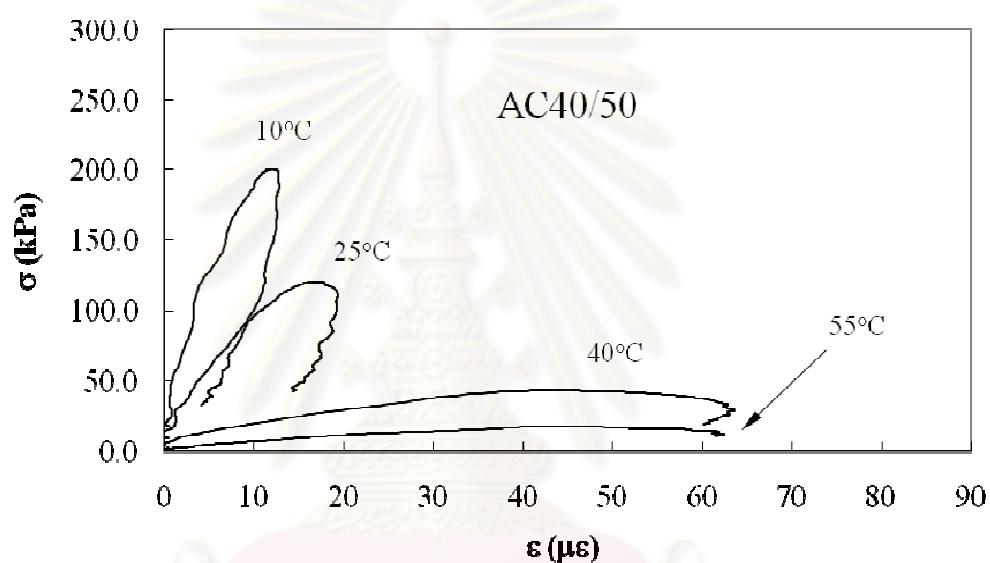
หมายเหตุ *ผลการทดสอบของธนกร และคณะ (2552)

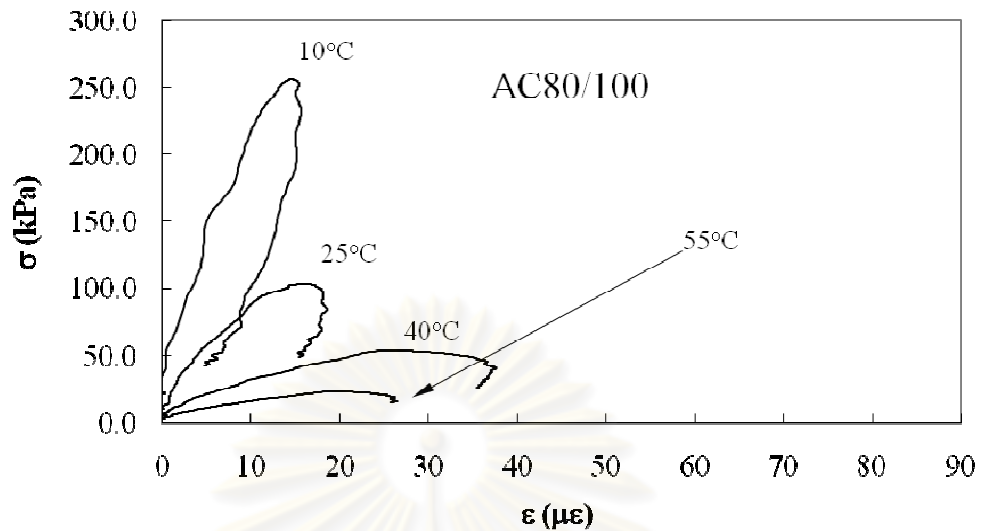
**ผลการทดสอบของอินวิน และคณะ (2552)



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับอุณหภูมิ

ท้ายที่สุดงานวิจัยนี้จึงนำเสนอว่าเมื่อนำค่าโมดูลัสคืบตัวไปใช้ในการออกแบบผิวทาง หรือใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมการทาง ควรจะระวังผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่า โมดูลัสคืบตัวของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต เพราะที่อุณหภูมิสูง (40°C ขึ้นไป) วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีพฤติกรรมแบบพลาสติก ทำให้มีความสามารถในการคืบตัวได้น้อยมากส่งผลให้ค่าโมดูลัส คืบตัวลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว จึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์และการออกแบบ ได้

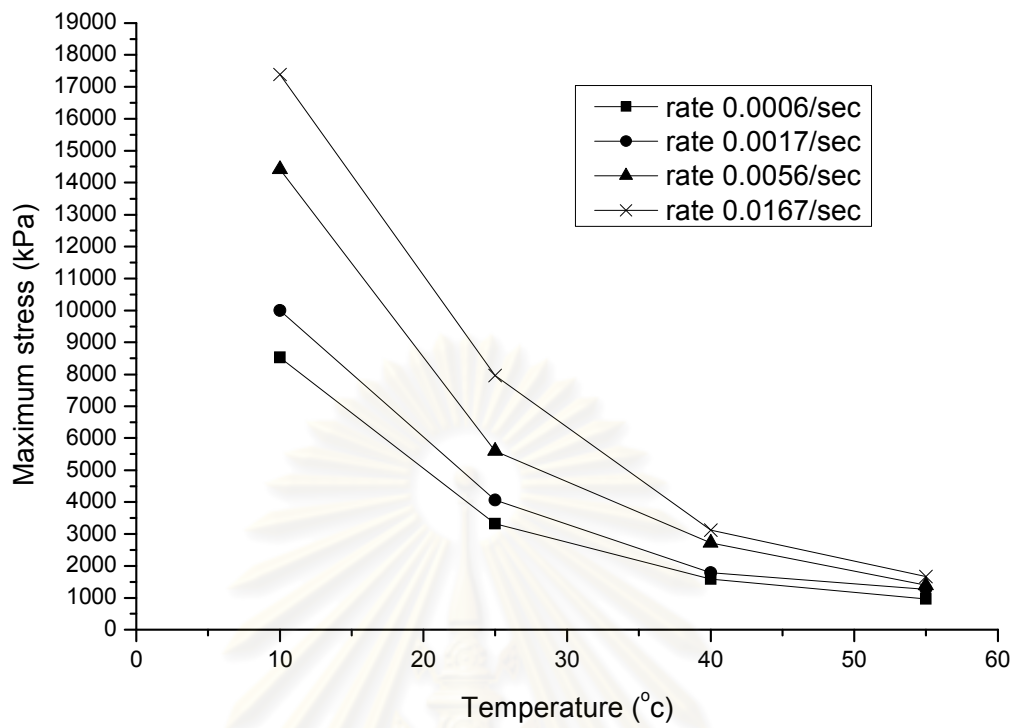




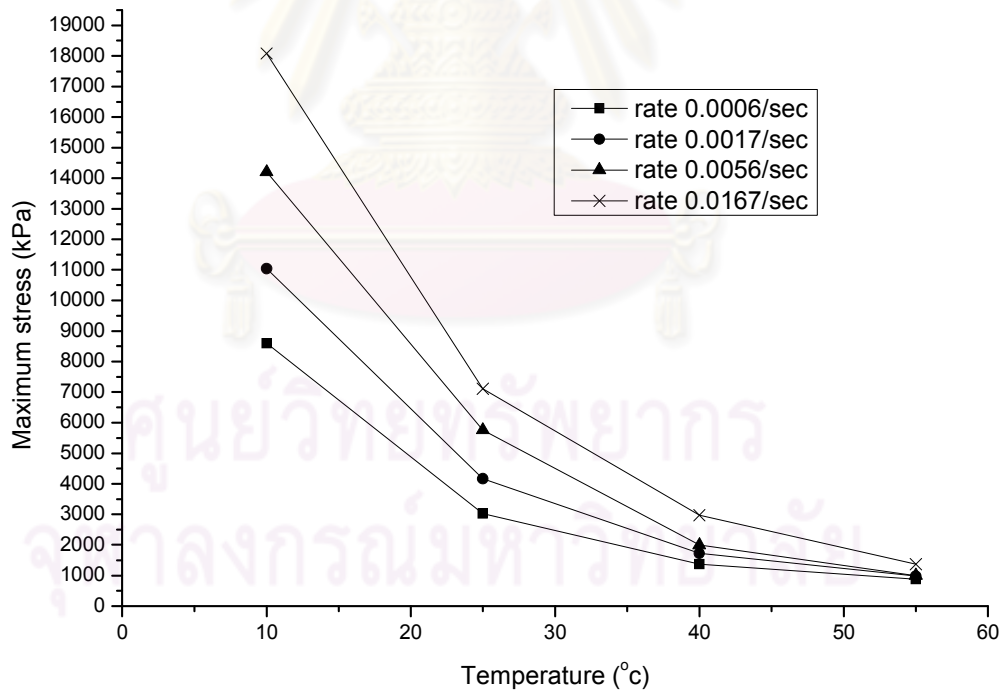
รูปที่ 5.7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของการทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัว

5.1.3 สรุปผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต (Static Unconfined compression test, S-UC)

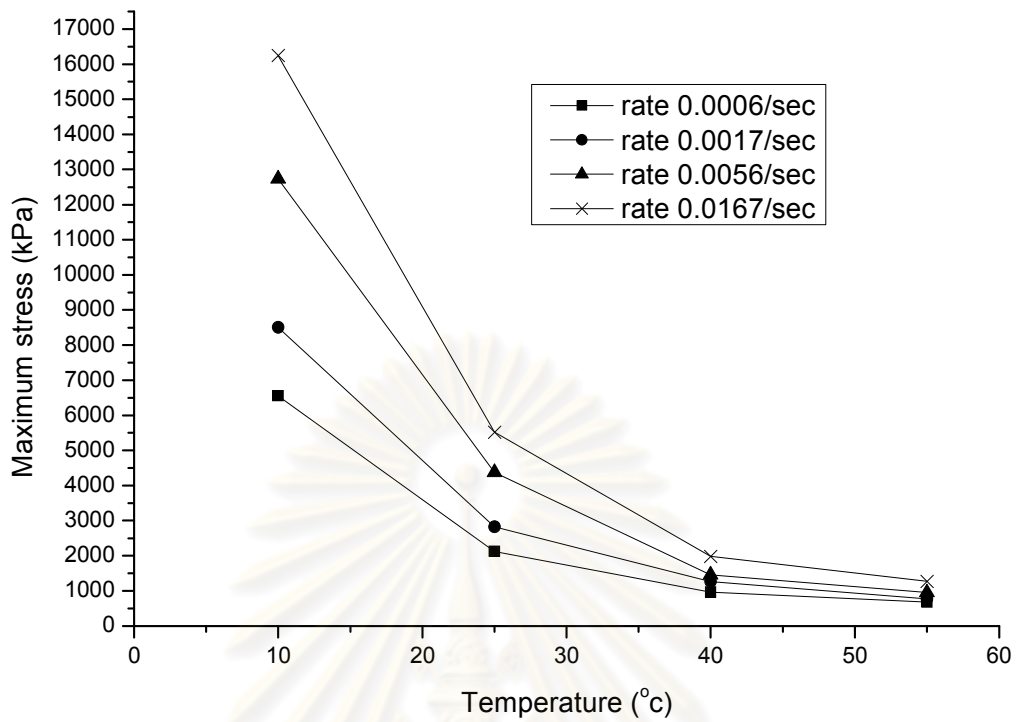
จากผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิและอัตราการความเครียดมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตเป็นอย่างมาก วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์เกรดการเจาะลึกแตกต่างกันทั้งสามชนิดที่มีความหนาแน่นเท่ากัน มีแนวโน้มของค่าความเค้นสูงสุดและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดไปในทางเดียวกัน คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความเค้นสูงสุดและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดจะมีค่าลดลง และเมื่ออัตราการความเครียดเพิ่มขึ้นค่าความเค้นสูงสุดและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.9



(a)

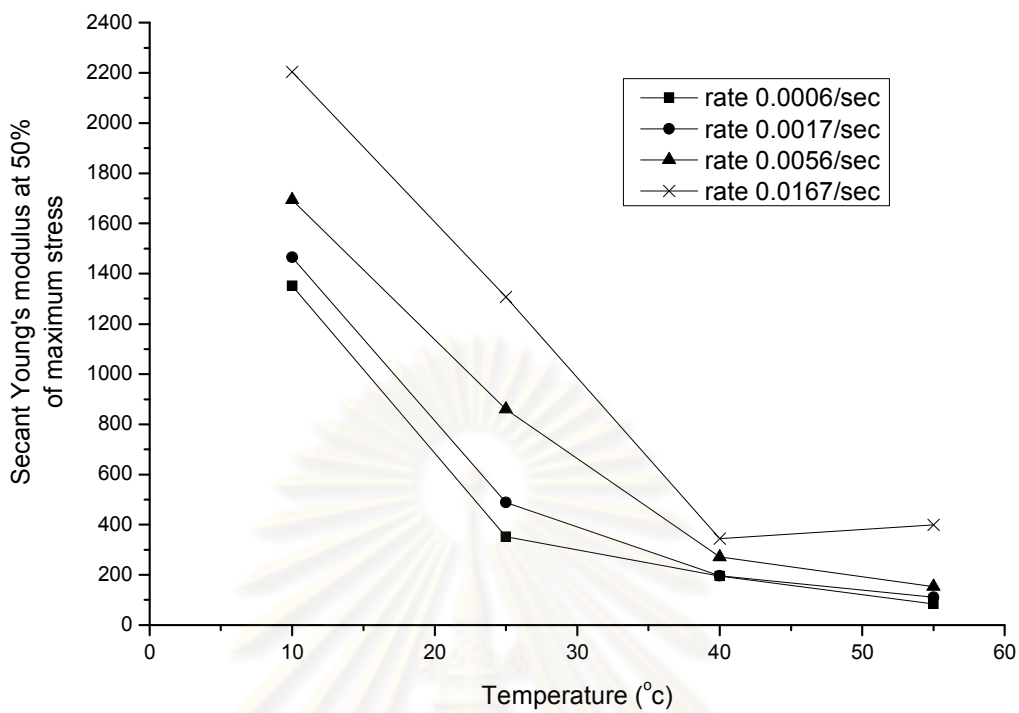


(b)

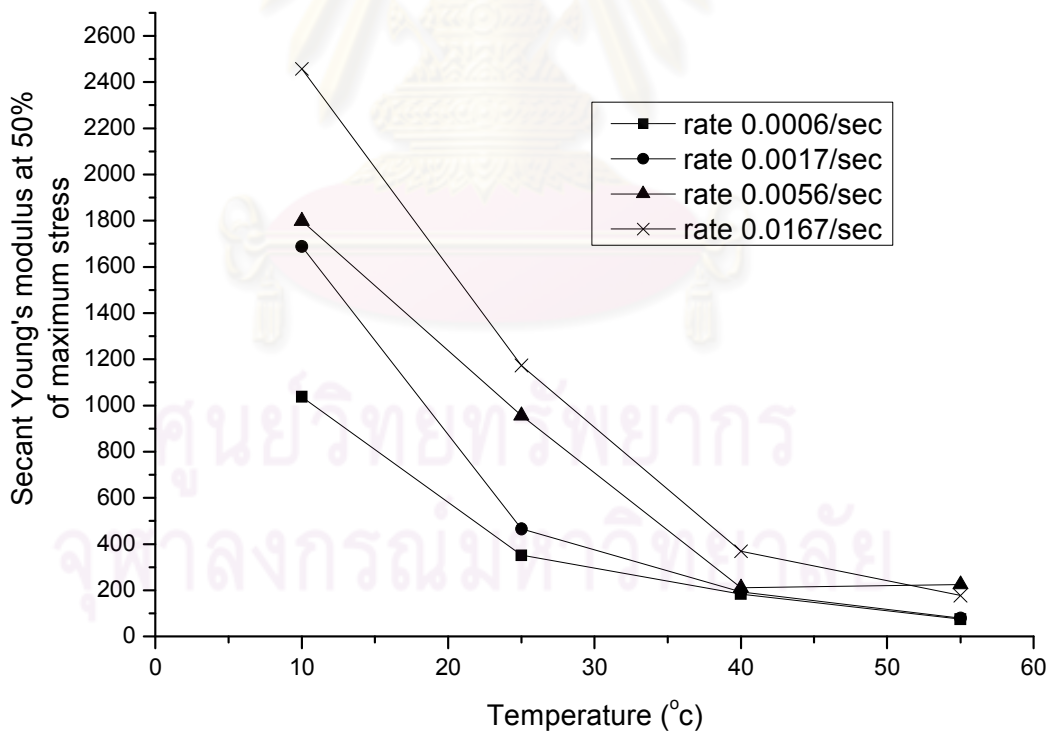


(c)

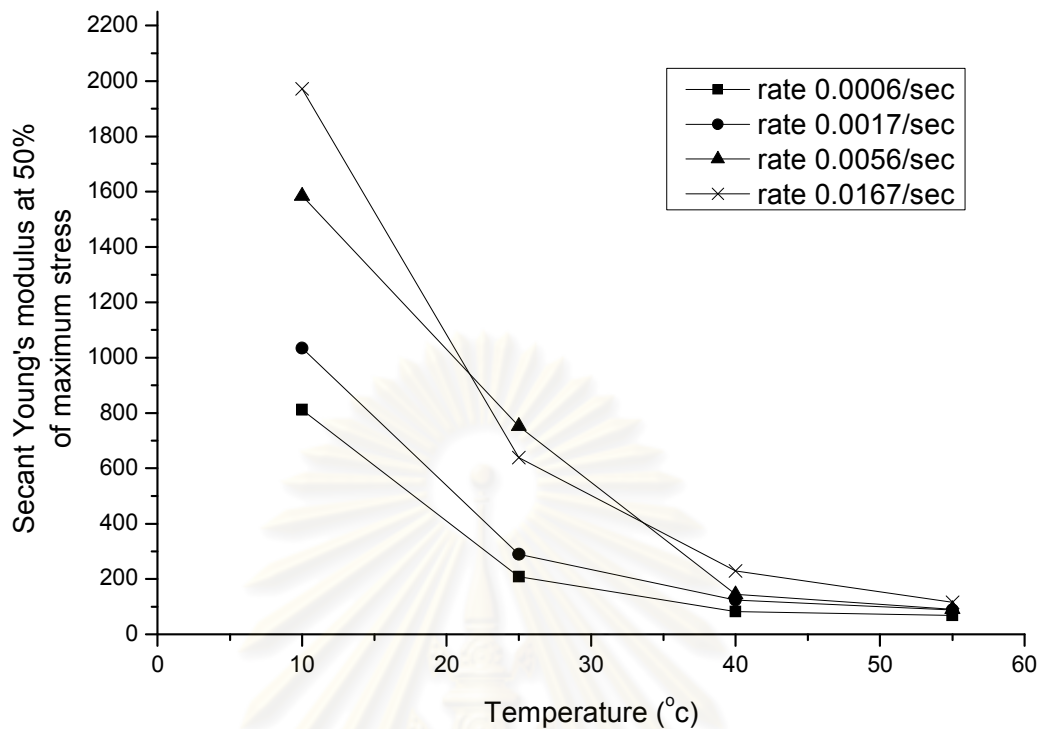
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับอุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตที่อัตราความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100



(a)



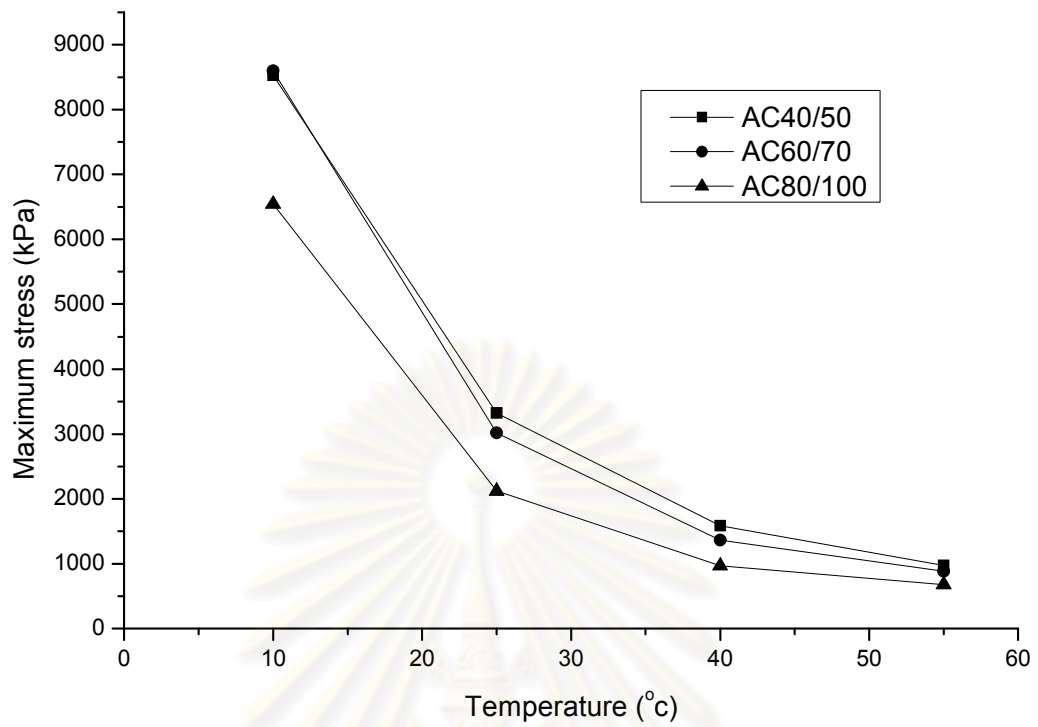
(b)



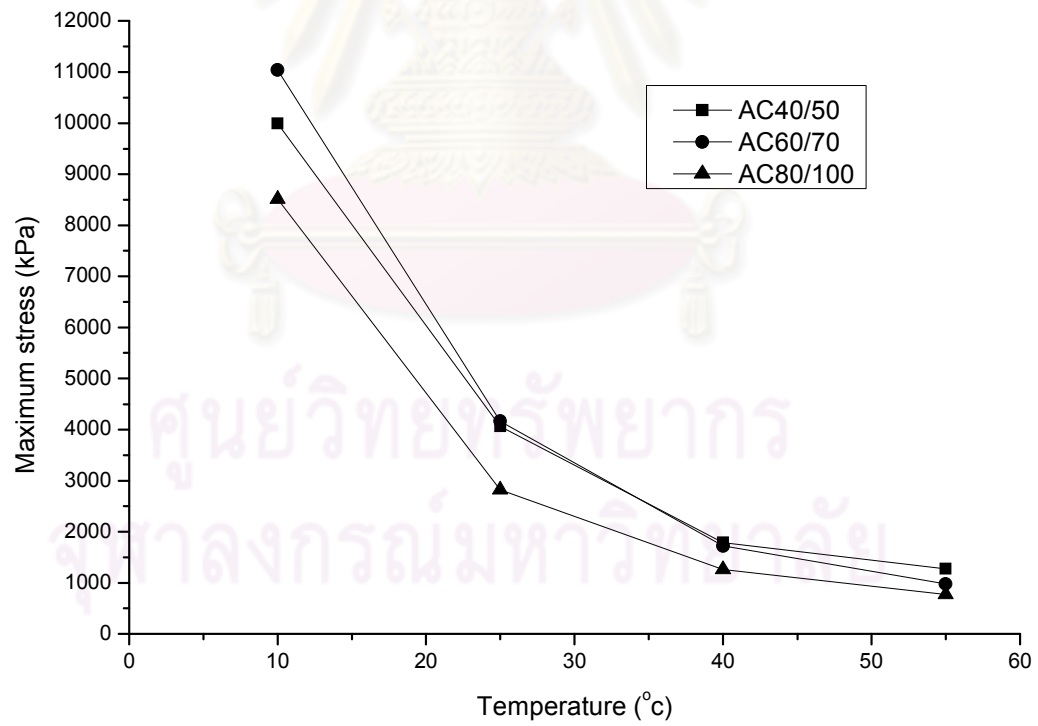
(c)

รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดกับอุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงอัดแบบปราคาจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตที่อัตราความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100

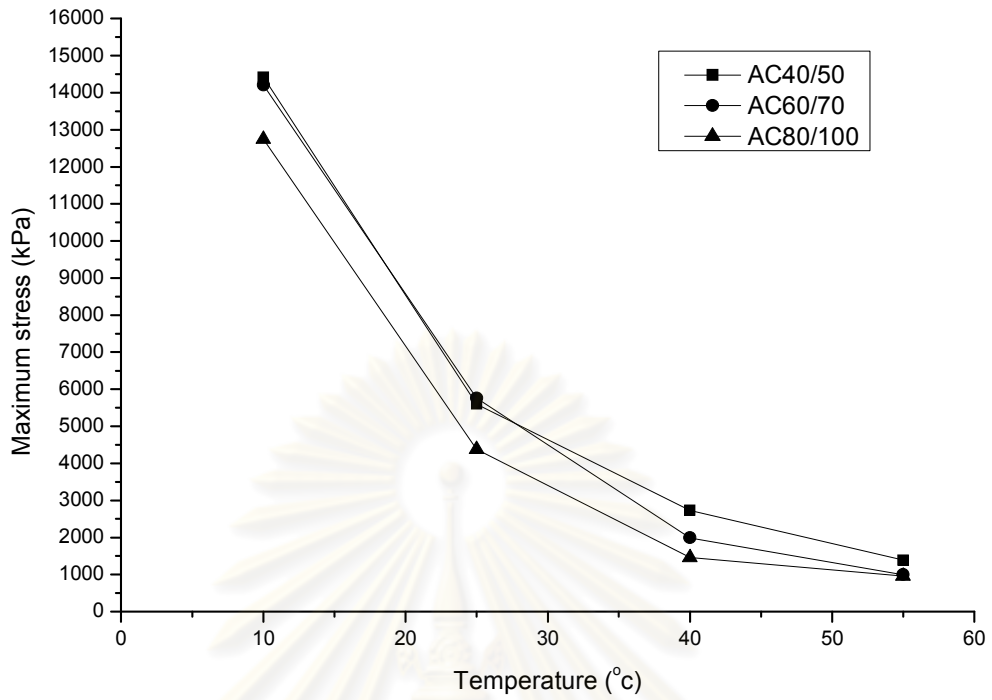
ส่วนเกรดการเจาะลึกของแอสฟัลต์มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตน้อยมากเมื่อเทียบกับอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราความเครียด โดยพบว่าค่าความเค้นสูงสุดและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทดสอบด้วยแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมจากแอสฟัลต์ทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกันและไม่สามารถหาแนวโน้มความสัมพันธ์ของค่าความเค้นสูงสุดและค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดกับเกรดการเจาะลึกของแอสฟัลต์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.11



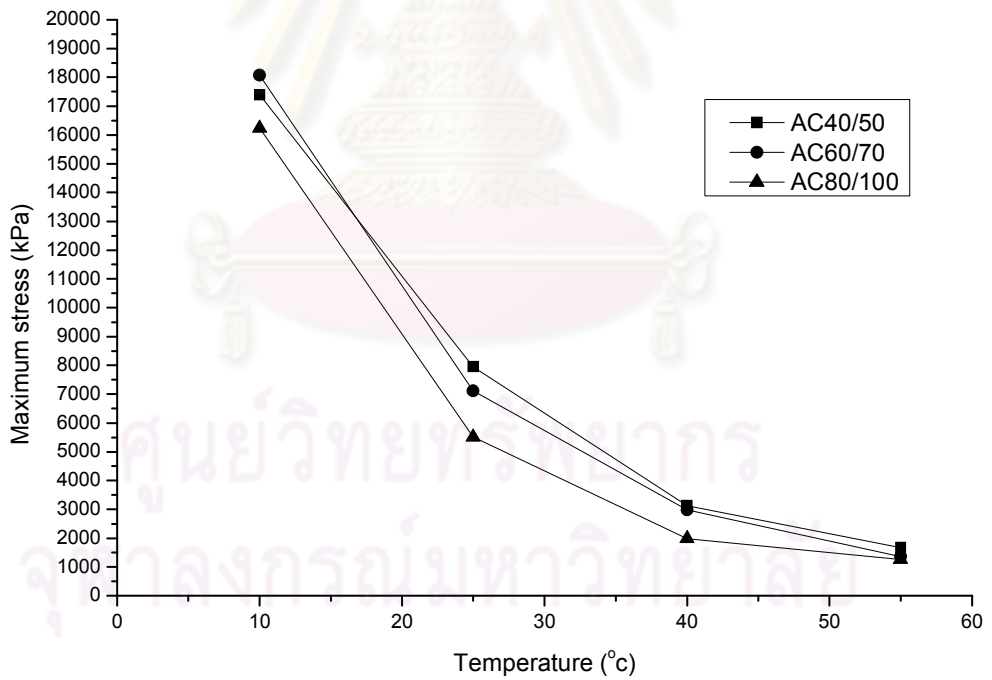
(a)



(b)

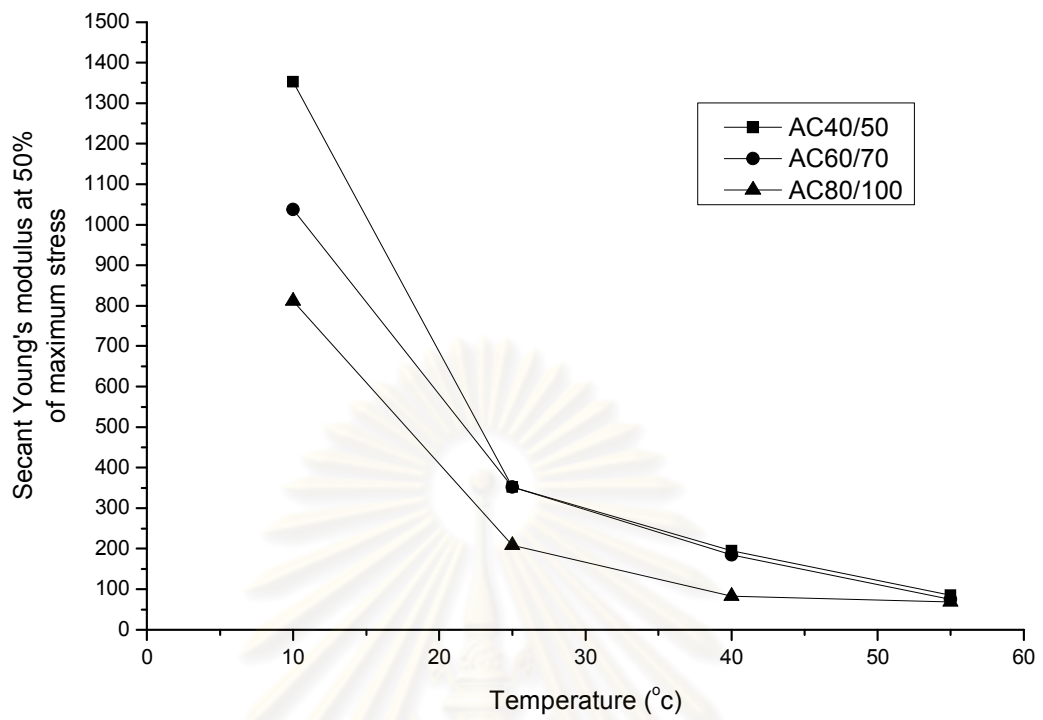


(c)

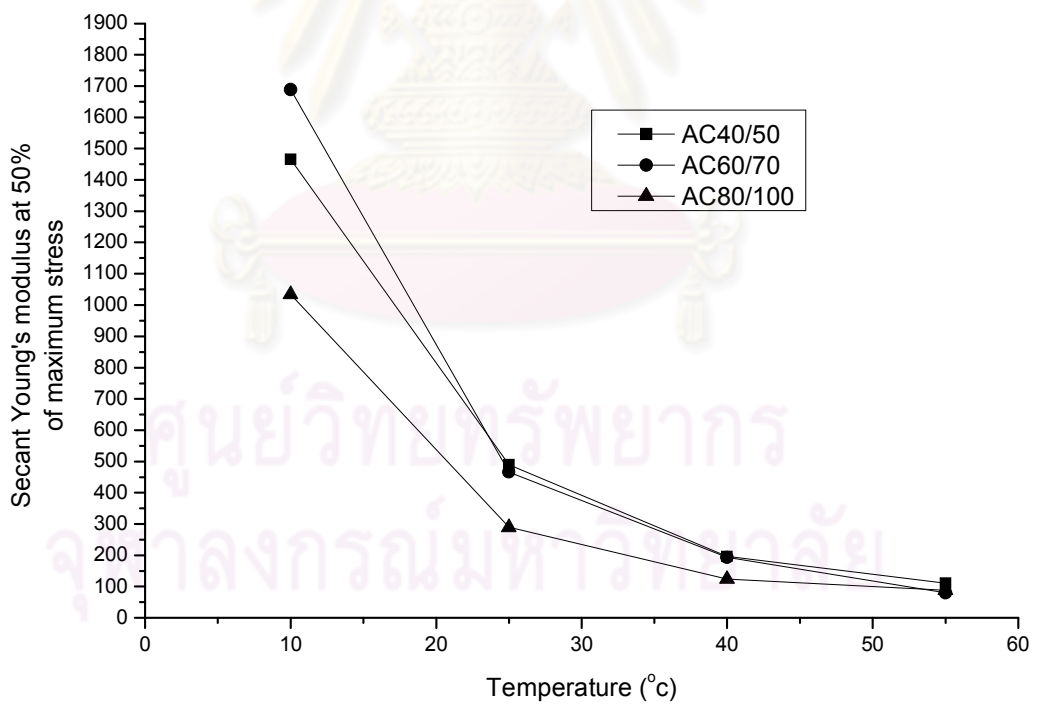


(d)

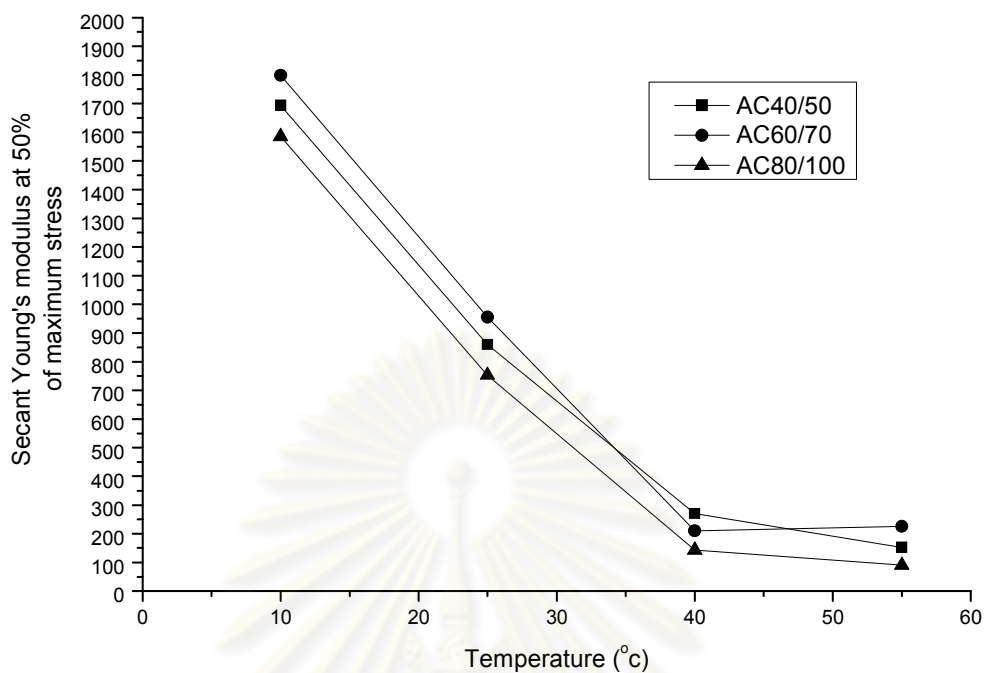
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับอุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงอัดแบบปราคาจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต ณ อัตราความเครียดต่างๆ (a) 0.0006/s (b) 0.0017/s (c) 0.0056/s (d) 0.0167/s



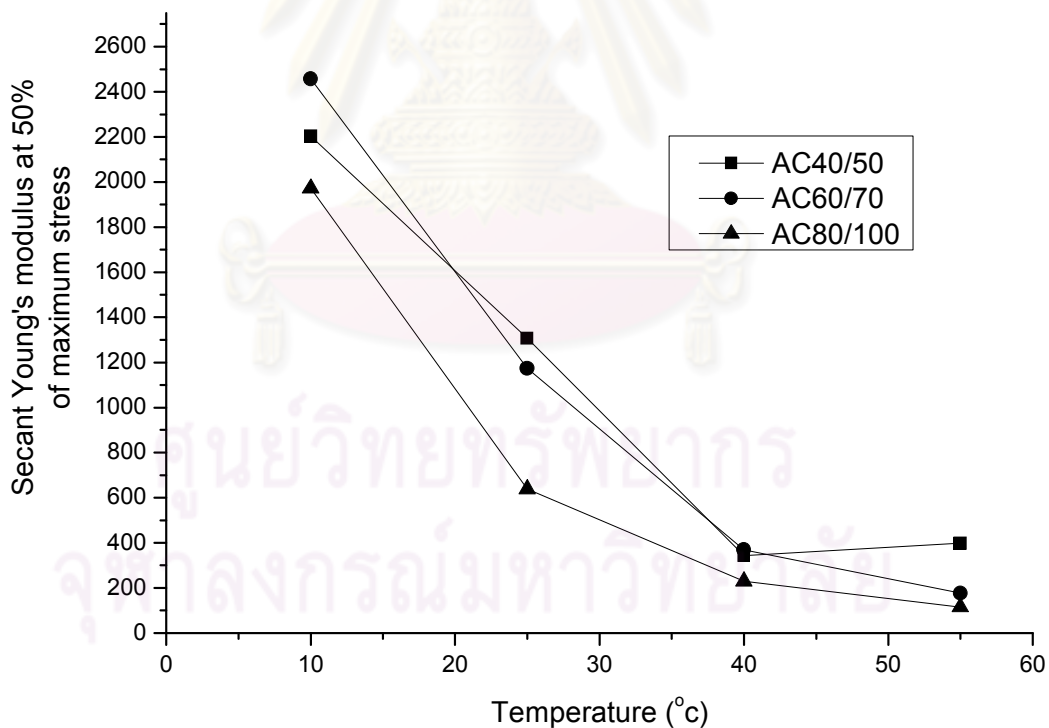
(a)



(b)



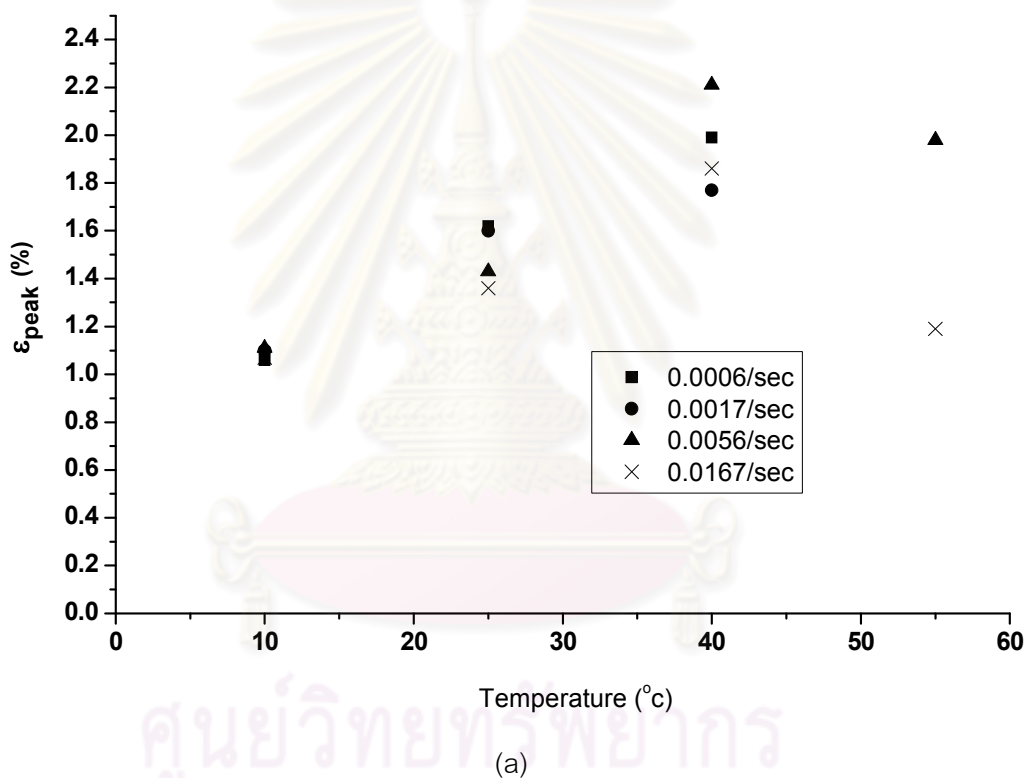
(c)



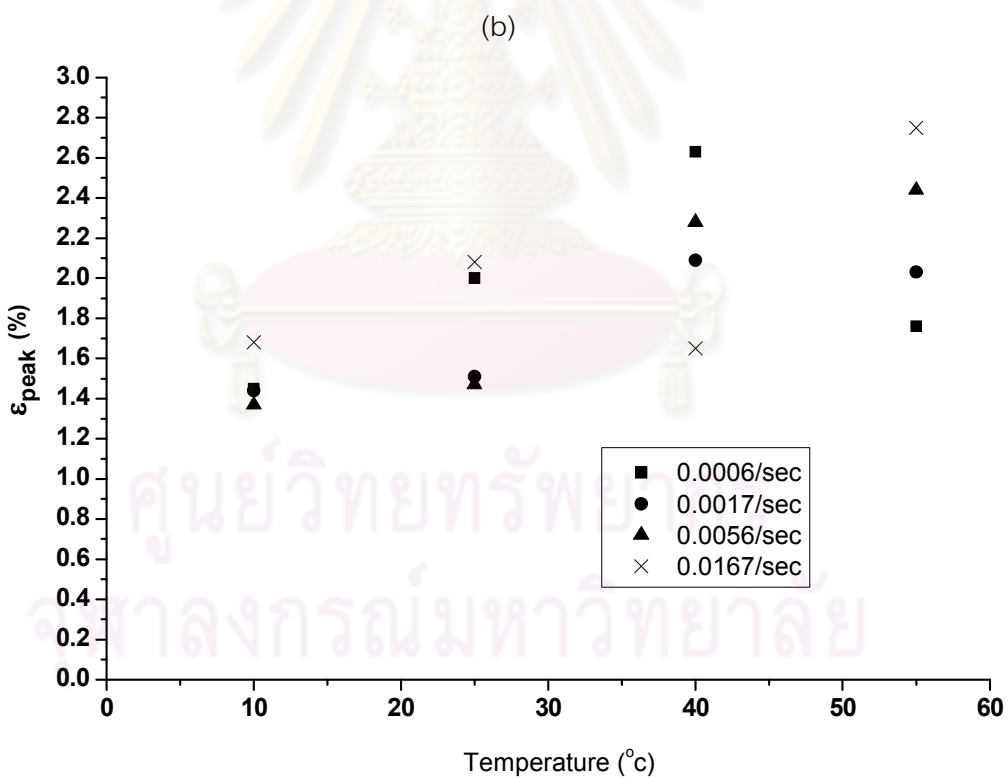
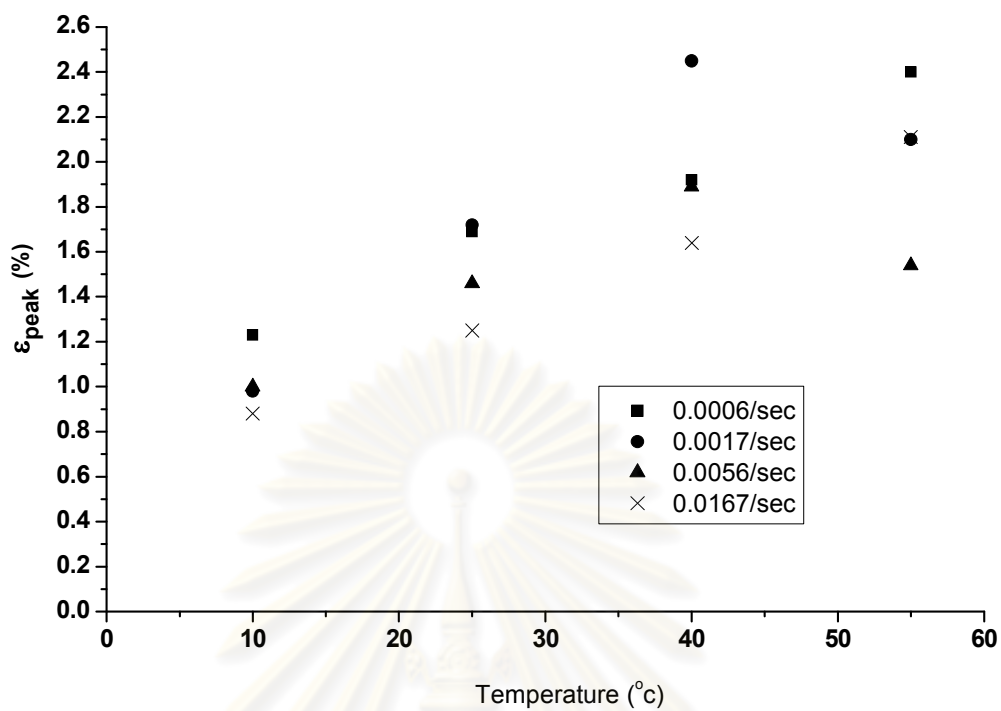
(d)

รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของค่าความเค้นสูงสุดกับอุณหภูมิของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจากการทดสอบแรงอัดแบบปราคาจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต ณ อัตราความเครียดต่างๆ (a) 0.0006/s (b) 0.0017/s (c) 0.0056/s (d) 0.0167/s

ส่วนค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง แบบสถิติมีค่ากระจายกระจาย ไม่สามารถสรุปแนวโน้มของผลการทดสอบที่เกิดขึ้นได้ โดยค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทดสอบอยู่ในช่วง 0.88% ถึง 2.75% ดังแสดงในรูปที่ 5.12 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีค่าความเครียดอัด ณ จุดที่เกิดความเสียหายเท่ากับ 3.0% พบว่าค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดอัด ณ จุดที่เกิดความเสียหายที่พบได้ทั่วไปของคอนกรีต



ศูนย์วิทยพักร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



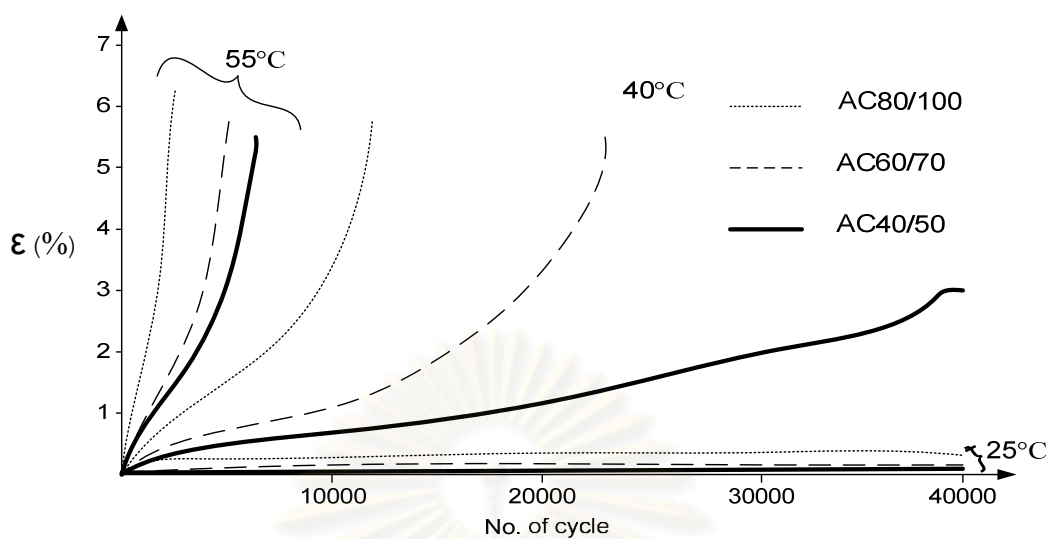
(c)

รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียด ณ ความเค้นสูงสุดกับคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลติก คอนกรีตจากการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตที่อัตราความเครียดต่างๆ (a) AC40/50 (b) AC60/70 (c) AC80/100

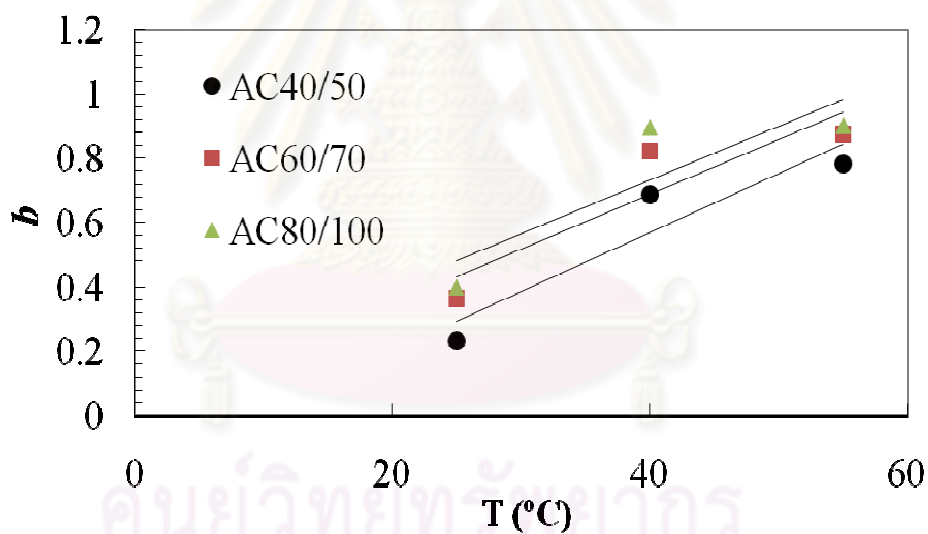
จากผลสรุปที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปรวมได้ว่าอัตราความเครียดและอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต ส่วนเกรดการเจาะลึกของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการผลิตวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีผลต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราความเครียดและอุณหภูมิ

5.1.4 สรุปผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัต (Dynamic Unconfined compression test, D-UC)

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าอิทธิพลของเกรดแอสฟัลต์มีผลต่อการยุบตัวแบบถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต ซึ่งตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วย AC40/50 สามารถต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวรได้มากที่สุดรองลงมาคือตัวอย่างที่ผสมด้วย AC60/70 และ AC80/100 ตามลำดับ โดยสังเกตจากค่า FN ของตัวอย่างที่ผสมด้วย AC40/50 จะมีค่าสูงที่สุดและสำหรับค่าความชันของการคืบ (b) ของตัวอย่างที่ผสมด้วย AC80/100 จะมีค่าสูงที่สุดรองลงมาคือตัวอย่างที่ผสมด้วย AC60/70 และ AC40/50 ตามลำดับ ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีค่าเพเนตรชันต่ำกว่าจะสามารถต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวรได้มากกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีค่าเพเนตรชันสูงกว่าเมื่อถูกแรงกระทำในระดับที่เท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่เมื่อวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยุบตัวแบบถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีตพบว่า อิทธิพลของอุณหภูมิส่งผลต่อการยุบตัวแบบถาวรมากกว่า โดยวิเคราะห์ได้จากรูปที่ 5.13 ซึ่งรวบรวมผลการทดสอบของแอสฟัลต์ชนิดต่าง ๆ ณ อุณหภูมิต่างๆ เข้าไว้ด้วยกัน สังเกตได้ว่าเมื่อตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตถูกแรงกระทำที่อุณหภูมิสูงมากขึ้นจะทำให้เกิดความเสียหายมากขึ้นอย่างรวดเร็ว และถ้านำค่า b มาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่า b จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.14 นั้นหมายความว่าอัตราการยุบตัวเกิดเร็วขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้โอกาสที่จะเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรก็จะเร็วขึ้นด้วย



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ b กับ อุณหภูมิ

ท้ายที่สุดนี้งานวิจัยได้นำเสนอค่า a และ b เพื่อใช้ในการหาสมการสำหรับประมาณค่าการยุบตัวแบบถาวรอย่างง่ายของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 เพื่อใช้ในการประเมินคุณสมบัติทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตและใช้ในการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นในประเทศไทยได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ในสมการทำนายการยุบตัวแบบถาวรกับอุณหภูมิ

ชนิด แอสฟัลต์	a	b
AC 40/50	0.0032	$b = 0.018T - 0.168; R^2 = 0.875$
AC 60/70	0.0019	$b = 0.017T + 0.004; R^2 = 0.826$
AC 80/100	0.0031	$b = 0.016T + 0.062; R^2 = 0.759$

หมายเหตุ T คือ อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส

5.2 อภิปรายผลการทดลอง

5.2.1 อภิปรายผลการทดสอบ

5.2.1.1 การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต (Static Indirect tensile test, S-IDT)

การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4867 เพื่อใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตและที่สำคัญเพื่อนำผลการทดสอบที่ได้ไปหาแอมพลิจูด (Amplitude) ของการให้แรงกระทำที่มีลักษณะเป็นครึ่งวงของฟังก์ชันไซน์ สำหรับใช้ในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวของ การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต ซึ่งการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตนี้มีข้อเสียคือหน่วยแรงดึงที่กระทำกับวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีความไม่สม่ำเสมอดังกล่าวในบทที่ 2 ทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีผลจากความเค้นอัดเข้ามารวมอยู่ด้วย โดยแนวคิดของการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต คือ สมมติว่าวัสดุอยู่ในช่วงอิลาสติก แต่ในความเป็นจริงเมื่อวัสดุเกิดความเสียหายนั้นพฤติกรรมของวัสดุได้เลยสภาพที่เป็นอิลาสติกไปแล้ว ดังนั้นค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่ได้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตในการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่น

5.2.1.2 การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต (Dynamic Indirect tensile test, D-IDT)

การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัตเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4123 เพื่อใช้ในการหาค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต ค่าโมดูลัสคั้นตัวเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่น นอกจากนั้นค่าโมดูลัสคั้นตัวยังบ่งบอกถึงกำลังรับแรงดึงของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตได้ด้วย โดยวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่มีค่าโมดูลัสคั้นตัวมากกว่าจะมีความสามารถในการต้านทานต่อความเสียหายเนื่องจากหน่วยแรงดึงได้มากกว่า

5.2.1.3 การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต (Static Unconfined compression test, S-UC)

การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตนั้นไม่มีมาตรฐานในการทดสอบ ดังนั้นจึงใช้โปรแกรมในการทดสอบเดียวกับการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงแบบสถิตของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตในรูปแบบแรงดึงและแรงอัด ซึ่งข้อเสียของการทดสอบนี้คือ ไม่มีมาตรฐานในการทดสอบและพฤติกรรมการให้แรงก็ไม่ตรงกับสภาพการใช้งานจริงในการรับแรงจากจราจร แต่ข้อดีของการทดสอบนี้คือ หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในวัสดุมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งก้อนตัวอย่าง ทำให้กำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบเป็นกำลังที่แท้จริงของวัสดุ ดังนั้นจึงสามารถนำผลการทดลองไปใช้ในการกำหนดค่าแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตได้ในอนาคต

5.2.1.4 การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัต (Dynamic Unconfined compression test, D-UC)

การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัตเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน NCHRP ฉบับที่ 465 เพื่อหาค่าการยุบตัวแบบถาวรของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่น โดยวัสดุที่มีค่า FN และ b ต่ำกว่าจะมีความสามารถในการต้านทานการยุบตัวแบบถาวรได้มากกว่า ซึ่งการทดสอบนี้เปรียบเสมือนกับสภาพการจราจรจริงที่เกิดขึ้นและหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในวัสดุมีความสม่ำเสมอ

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือสำหรับใช้ในการทำนายพฤติกรรมของวัสดุเมื่อนำไปใช้ในการก่อสร้างผิวทางแบบยืดหยุ่น โดยผลการทดสอบได้มีการนำเสนอสมการสำหรับใช้ในการทำนายการยุบตัวแบบถาวรของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วย AC40/50 AC60/70 และ AC80/100 ที่อุณหภูมิต่างๆไว้อีกด้วย

5.2.2 ผลกระทบของอัตราความเครียดและอุณหภูมิ

ในการทดสอบต่างๆมีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 10°C 25°C 40°C และ 55°C ซึ่งเป็นช่วงของอุณหภูมิผิวทางที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทยและอยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่เครื่องทดสอบสามารถควบคุมได้ สาเหตุที่มีการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆนอกเหนือจากที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ เพราะต้องการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต ส่วนอัตราความเครียดที่ใช้ในการทดสอบแบบสถิต คือ 5 15 50 และ 150 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งมาตรฐานได้มีการกำหนดการทดสอบไว้ที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที แต่ที่มีการทดสอบที่อัตราความเครียดอื่นๆ เนื่องจากต้องการศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดที่มีต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต

จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงอัดของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจะมีค่าลดลง ทำให้วัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายได้เร็วมากขึ้น และจากผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมพบว่า การทดสอบแรงดึงทางอ้อมเหมาะสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆเท่านั้น เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงผลการทดสอบที่ได้ไม่ใช่ผลจากความเค้นดึงเพียงอย่างเดียวแต่มีผลจากความเค้นอัดเข้ามาผสมอยู่ด้วย เพราะการทดสอบแรงดึงทางอ้อมความเค้นดึงที่กระจายในวัสดุมีความไม่สม่ำเสมอดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

ส่วนอัตราความเครียดที่มากกระทำกับวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตสามารถอธิบายผลได้จากการทดลองแบบสถิต พบว่าเมื่ออัตราความเครียดที่มากกระทำมีค่ามากขึ้นวัสดุจะมีกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น สาเหตุเพราะวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตเป็นวัสดุเหนียวยืดหยุ่น (Visco-Elastic material) ดังนั้นพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับเวลาของหน่วยแรงที่มากกระทำ

5.2.3 ผลกระทบของชนิดแอสฟัลต์

งานวิจัยนี้ใช้แอสฟัลต์ชนิดเกรดการเจาะลึกเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัททิปโก้แอสฟัลต์ โดย AC60/70 และ AC80/100 เป็นแอสฟัลต์ที่ทางบริษัทได้ผลิตเพื่อจัดจำหน่ายในประเทศไทยและต่างประเทศอยู่แล้ว ส่วน AC40/50 ปกติไม่ได้ทำการผลิต ดังนั้นทางบริษัททิปโก้แอสฟัลต์จึงได้นำ AC60/70 ไปผ่านกระบวนการเป่าในอากาศเพื่อเร่งอายุ (Aging) ของแอสฟัลต์ให้มีความแข็งมากขึ้นจนได้ค่าเพเนเตรชันอยู่ในช่วงของเกณฑ์ AC40/50

จากผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมและการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตพบว่าผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตไม่สามารถหาแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับชนิดของแอสฟัลต์ได้ เป็นเพราะการทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิตนั้นหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีความไม่สม่ำเสมอและมักมีผลจากหน่วยแรงอื่นเข้ามารวมอยู่ด้วย เช่น หน่วยแรงอัด ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปผลกระทบของชนิดแอสฟัลต์ที่มีต่อกำลังของวัสดุจากการทดสอบนี้ได้ ส่วนผลการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิตซึ่งหน่วยแรงอัดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตมีความสม่ำเสมอทั้งก่อนตัวอย่าง อภิปรายผลได้ว่าชนิดของแอสฟัลต์มีผลต่อกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต โดยวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีค่าเพเนเตรชันต่ำกว่ามีกำลังมากกว่าวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีค่าเพเนเตรชันสูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 5.3

จากผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวและผลการทดสอบหาค่าการยุบตัวแบบถาวรของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตซึ่งเป็นการทดสอบที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของผิวทางแบบยืดหยุ่น ดังแสดงในตารางที่ 5.4 พบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วย AC60/70 มีค่าสูงที่สุดรองลงมาคือ AC80/100 และ AC40/50 ตามลำดับ ส่วนค่า FN และ b ที่ได้จากการทดสอบหาค่าการยุบตัวแบบถาวร แอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วย AC80/100 มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ AC60/70 และ AC40/50 ตามลำดับ จากค่าโมดูลัสคืนตัวที่พบว่า AC40/50 มีค่าต่ำที่สุดจึงดูเหมือนจะมีกำลังรับแรงดึงต่ำที่สุดเป็นเพราะ AC40/50 ที่ใช้ในการทดสอบได้ใช้ AC60/70 ผ่านกระบวนการเร่งอายุเพื่อให้ได้ค่าความแข็งตามต้องการ ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงส่งผลให้ค่าโมดูลัสการคืนตัวซึ่งเป็นโมดูลัสยืดหยุ่นประเภทหนึ่งลดตามไปด้วย แต่ในการทดสอบการยุบตัวแบบถาวรนั้นความเสียหายแบบการยุบตัวแบบถาวรจะแปรผกผันกับความแข็งของวัสดุ เพราะฉะนั้นการที่ AC40/50 มีความแข็งมากที่สุดจึงสามารถต้านการยุบตัวแบบถาวรได้มากที่สุด ดังนั้นถ้าใช้ AC40/50 ที่ได้จากการผลิตตามเกณฑ์มาตรฐานไม่ได้ผ่านกระบวนการเร่งอายุ ค่า

โมดูลัสคั้นตัวของ AC40/50 ควรจะมีค่าสูงที่สุดและสามารถต้านการยุบตัวแบบถาวรได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับ AC60/70 และ AC80/100

จากที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าชนิดของแอสฟัลต์ส่งผลต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต โดยวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีค่าเพเนตรชันต่ำกว่าจะมีกำลังสูงกว่าแอสฟัลติกคอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ที่มีค่าเพเนตรชันสูงกว่า

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบการให้แรงแบบสถิตที่อัตราความเครียด 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

Temperature (°C)	ชนิดของแอสฟัลต์	S - IDT	S - UC
		Maximum stress (kPa)	Maximum stress (kPa)
10	AC 40/50	1791.20	14419.77
	AC 60/70	2295.76	14200.12
	AC 80/100	2066.86	12739.87
25	AC 40/50	787.68	5598.25
	AC 60/70	1015.24	5756.71
	AC 80/100	1184.23	4380.77
40	AC 40/50	355.02	2726.25
	AC 60/70	344.64	1990.26
	AC 80/100	408.92	1458.07
55	AC 40/50	147.29	1391.04
	AC 60/70	N/A	997.27
	AC 80/100	199.31	956.86

* N/A (not available) ไม่สามารถหาค่าได้

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบแบบพลวัต

วัสดุเชื่อมประสาน	อุณหภูมิ	M_r (MPa)	FN	b
AC 40/50	10°C	13,942	NA*	NA*
AC 60/70		14,832		
AC 80/100		14,721		
AC 40/50	25°C	4,964	NA*	0.232
AC 60/70		6,911		0.363
AC 80/100		5,261		0.399
AC 40/50	40°C	967	33,800	0.689
AC 60/70		1,143	17,850	0.822
AC 80/100		1,139	10,250	0.895
AC 40/50	55°C	442	5,095	0.785
AC 60/70		532	4,340	0.875
AC 80/100		498	2,080	0.901

* N/A (not available) ไม่สามารถหาค่าได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมด้านกลศาสตร์ของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตควรมีการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการทดสอบให้มีค่าคงที่ ในงานวิจัยนี้ได้มีการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ใน อุณหภูมิที่ต้องการเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปทดสอบ โดยก่อนการทดสอบได้มีการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล ดังแสดงในรูปที่ 5.15 พบว่าก่อนทำการทดสอบตัวอย่างมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง ± 1 °C ของอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบและหลังจากทำการทดสอบตัวอย่างมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง ± 5 °C ของอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิจึงควรทำการศึกษาเรื่องสมบัติความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ

5.3.2 ควรทำการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับความล้า (Fatigue) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ แอสฟัลติกคอนกรีต เพราะรอยแตกเนื่องจากความล้า (fatigue cracking) เป็นรูปแบบความเสียหายจากหน่วยแรงดึงที่พบได้บ่อยบริเวณขอบล่างของชั้นผิวทางแอสฟัลต์ ซึ่งความล้ามักมีความสัมพันธ์กับความเครียดดึงและค่าโมดูลัสของส่วนผสมแอสฟัลต์ โดยสามารถหาความต้านทานต่อความล้าของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตได้จากการทดสอบคานดัด (Flexural bending beam test) จากนั้นควรนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์ร่วมกับผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดึงแบบพลวัตของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต

5.3.3 ควรทำการศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่ส่งผลต่อความเสียหายของแอสฟัลติกคอนกรีต (Moisture Damage) โดยทำการทดลองรูปแบบเดียวกันกับงานวิจัยนี้แต่ให้นำตัวอย่างไปแช่น้ำไว้ 24 ชั่วโมงก่อนเพื่อให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพชื้นแล้วจึงนำมาทำการทดสอบ ผลการทดสอบที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของความชื้นจะช่วยเติมเต็มองค์ความรู้พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีตทั้งที่อยู่ในสภาวะแห้งและสภาวะเปียก โดยการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นนี้ยังไม่มีมาตรฐานการทดสอบ แต่สามารถศึกษาวิธีการทดสอบได้จากงานวิจัยการตรวจสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้นของแอสฟัลติกคอนกรีตด้วยการทดสอบการคืบแบบพลวัต (Kanitpong, et. al., 2010)



รูปที่ 5.15 Digital Thermometer

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ธนกร ชมภูรัตน์ สุเชษฐัฐ ลิขิตเลอสรวง และ เนื่อง เหล็กขนาย. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์ค้อนกรีต. 2552. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ธนกร ชมภูรัตน์ สุเชษฐัฐ ลิขิตเลอสรวง และกฤษฎา ภูมิ. การซ้อนทับระหว่างเวลากับอุณหภูมิสำหรับการทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยวของแอสฟัลต์ค้อนกรีต. 2552. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ธนกร ชมภูรัตน์ สุเชษฐัฐ ลิขิตเลอสรวง และกฤษฎา ภูมิ. ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลต์ค้อนกรีต. 2551. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ธนกร ชมภูรัตน์ สุเชษฐัฐ ลิขิตเลอสรวง และเนื่อง เหล็กขนาย. ผลของอัตราการใช้แอสฟัลต์และอุณหภูมิต่อการรับแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์ค้อนกรีต. 2551. การประชุมวิชาการการขนส่งแห่งชาติครั้งที่ 5

ธันวิน สวัสดิศานต์ และธัญรดี ก่อตั้งสัมพันธ์. แนวทางการเลือกใช้อย่างแอสฟัลต์และการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์ค้อนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานในประเทศไทย. 2552. สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

อเนก เปี้ยัดดา. เสถียรภาพของแอสฟัลต์ค้อนกรีตโดยใช้อย่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 และ 80/100. 2532. รายงานฉบับที่ วว. 119 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง

ภาษาอังกฤษ

Annual Book of ASTM Standards. 1995. 1st ed. Vol 04.03. Detroit: American Society for Testing and Materials.

Asphalt Institute. 1995. Superpave level 1 mix design. Superpave series No. 2 (SP-1). Kentucky.

Chompoorat, T., and Likitlersuang, S. 2009. Temperature shift function of asphaltic

concrete for pavement design in tropical countries. The IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering Vol. 2 No. 3: 246-254.

Chompoorat, T. and Likitlersuang, S. 2008. Effects of strain rate and temperature in the indirect tensile test of asphaltic concrete. Proceeding of KKCNN Symposium on Civil Engineering 21st. Singapore.

Huang, Y.H. 2004. Pavement analysis and design. 2nd ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall.

Kanitpong, K., Charoentham, N. and Likitlersuang, S. 2010. Investigation of moisture damage in warm-mix asphalt using dynamic creep test.

Meor, O.H. and Teoh, C.Y. 2008. Effects of temperature on resilient modulus of dense asphalt mixtures incorporating steel slag subjected to short term oven ageing. Proceedings of world academy of science, engineering and technology Vol. 36: 221-225.

Witczak, M.W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-basyouny, M., Tempe, A.Z., and Von quintus, H. 2002. Simple performance test for superpave mix design (NCHRP report 465). Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).

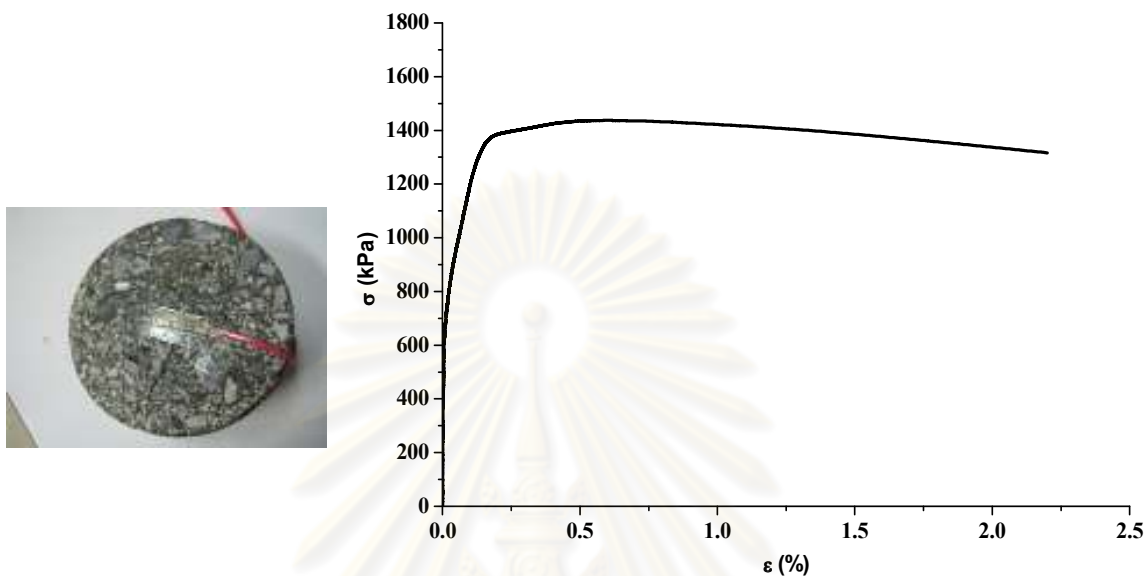


ภาคผนวก

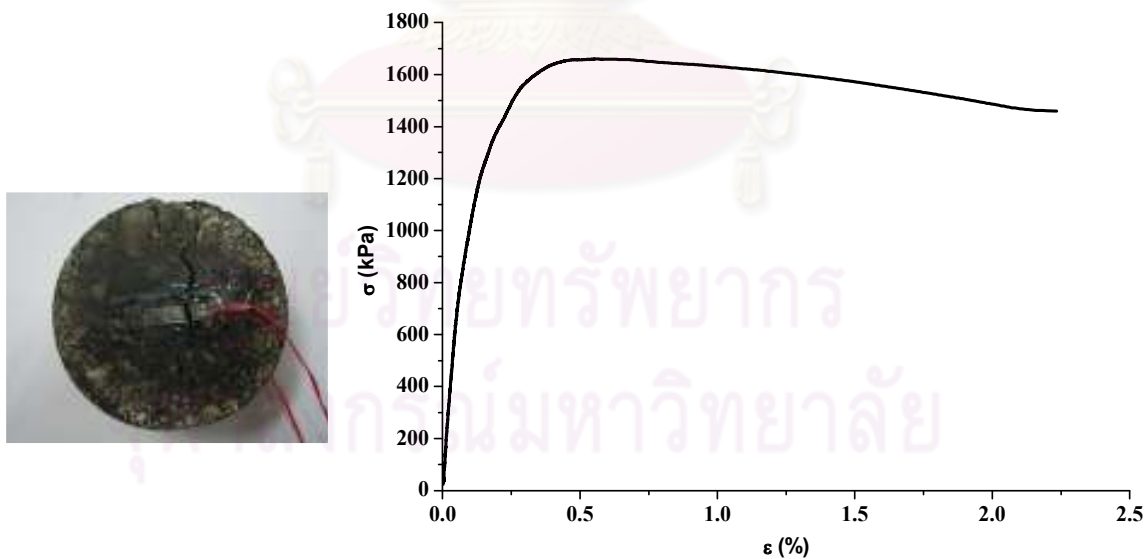
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่างและผลการทดสอบ

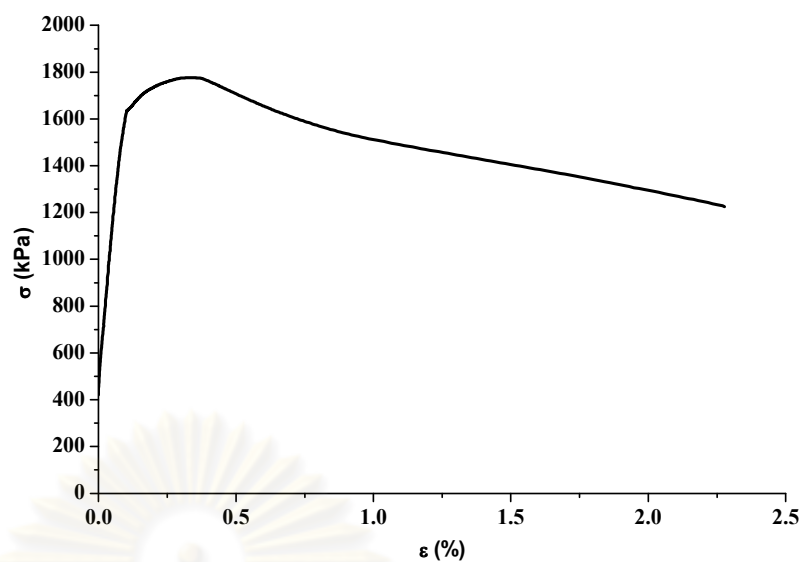
1. การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบสถิต



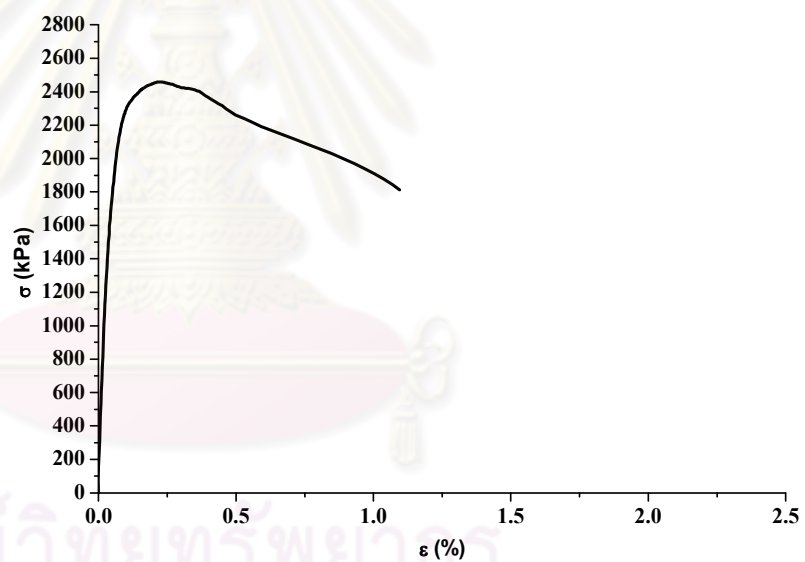
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที



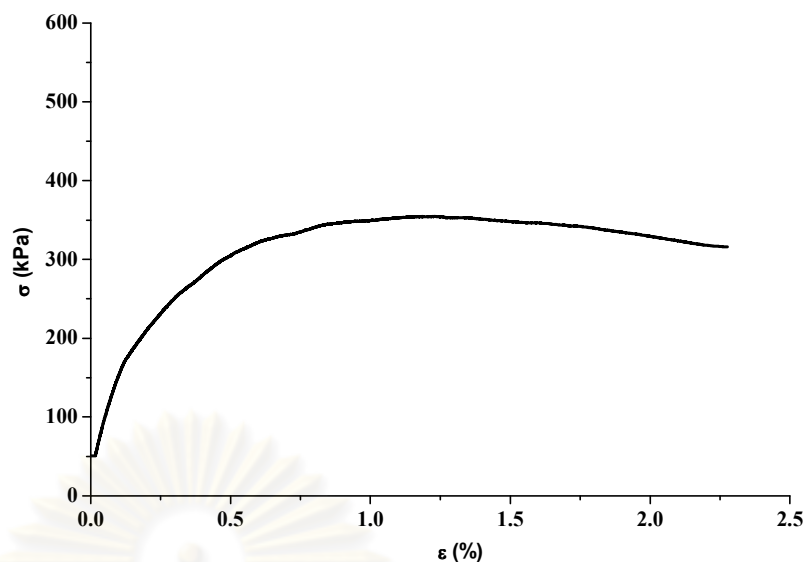
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที



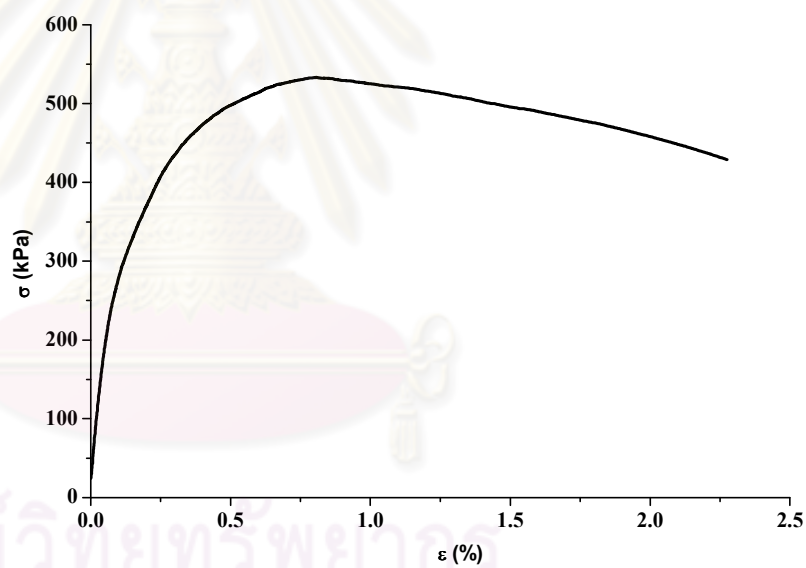
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที



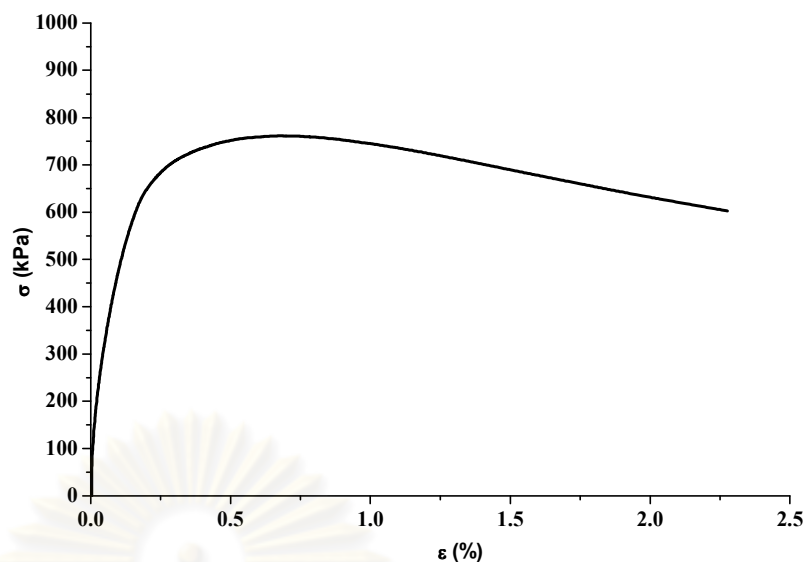
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที



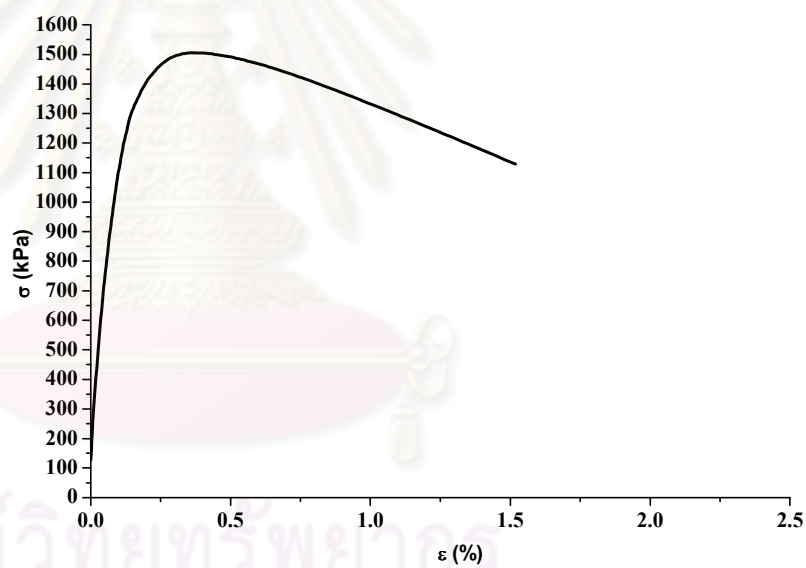
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที



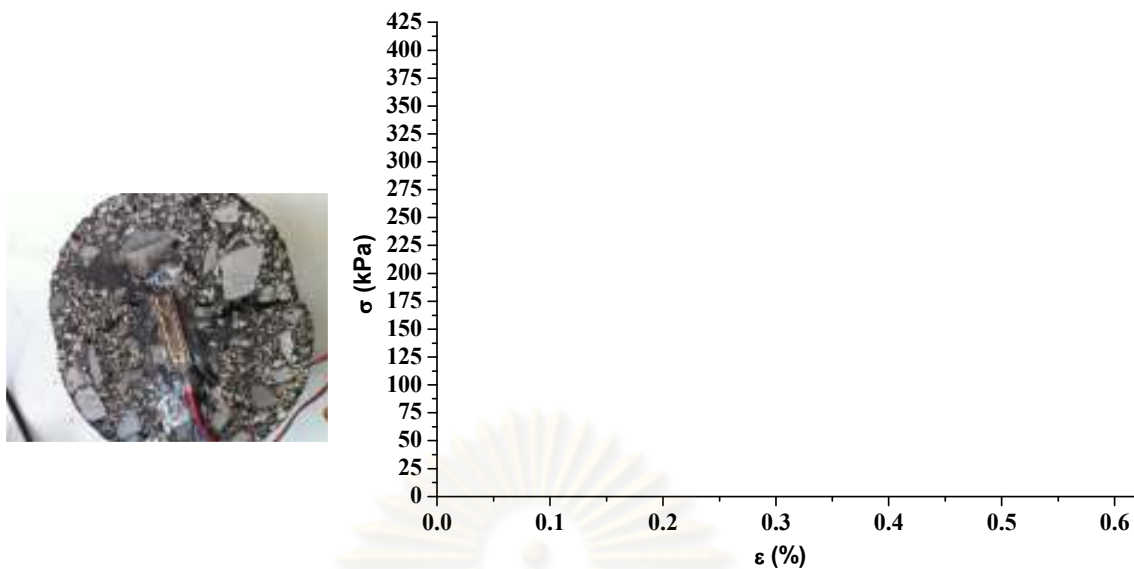
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที



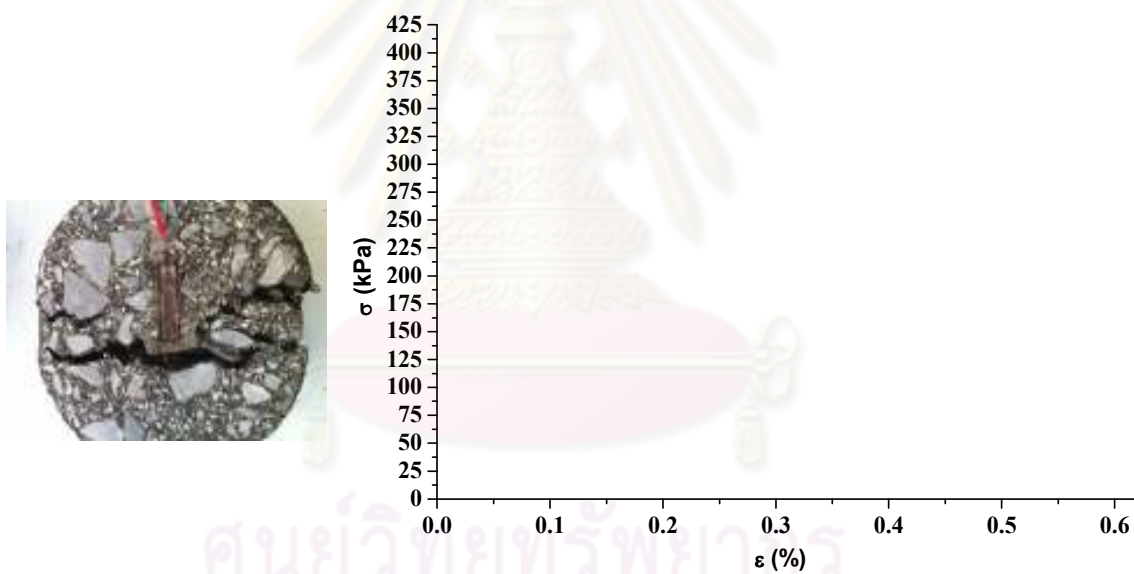
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที



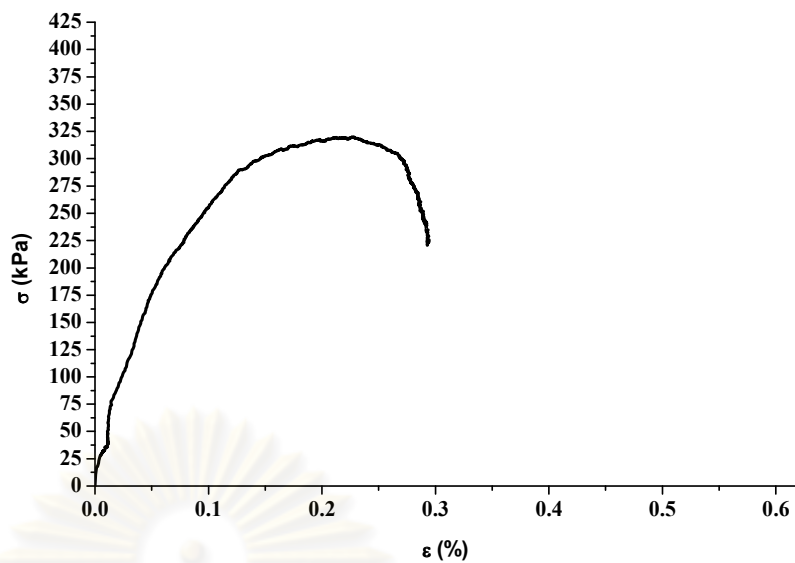
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที



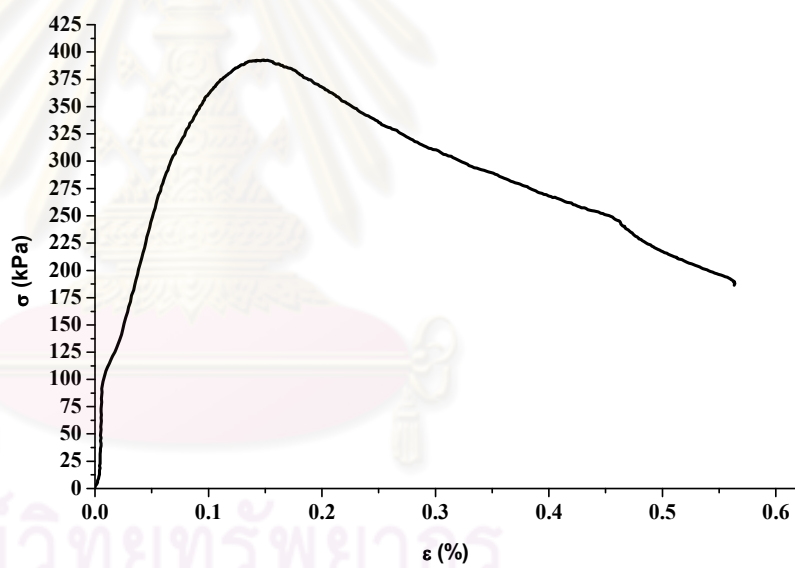
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที



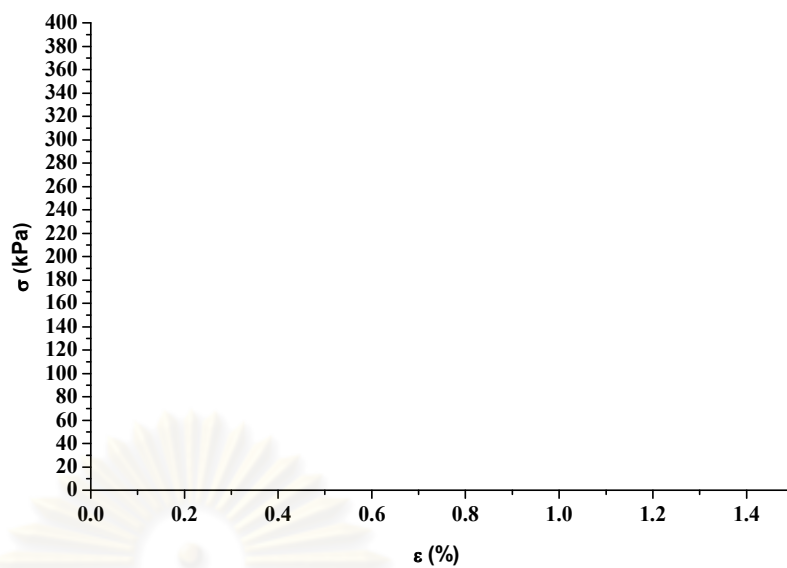
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที



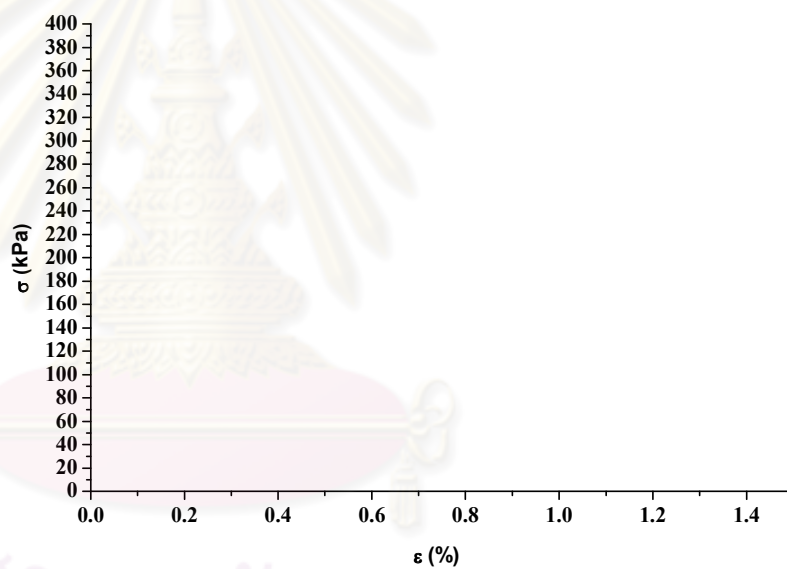
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที

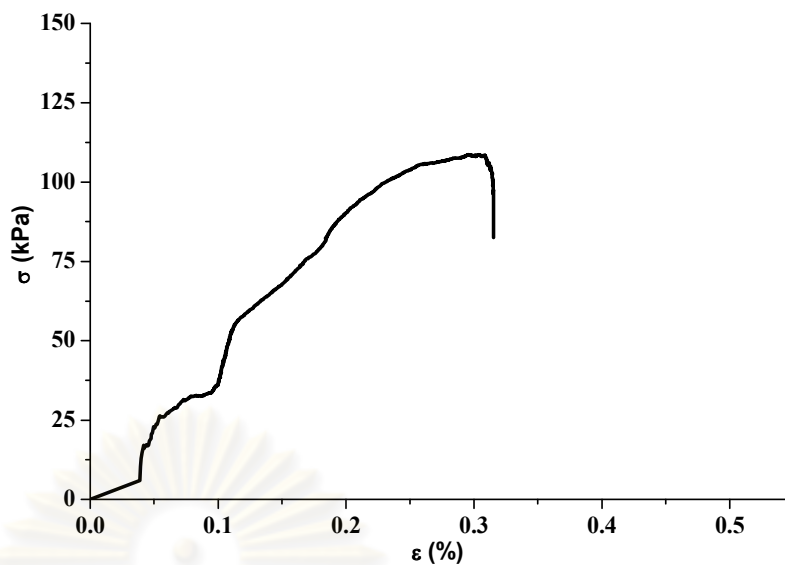


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที

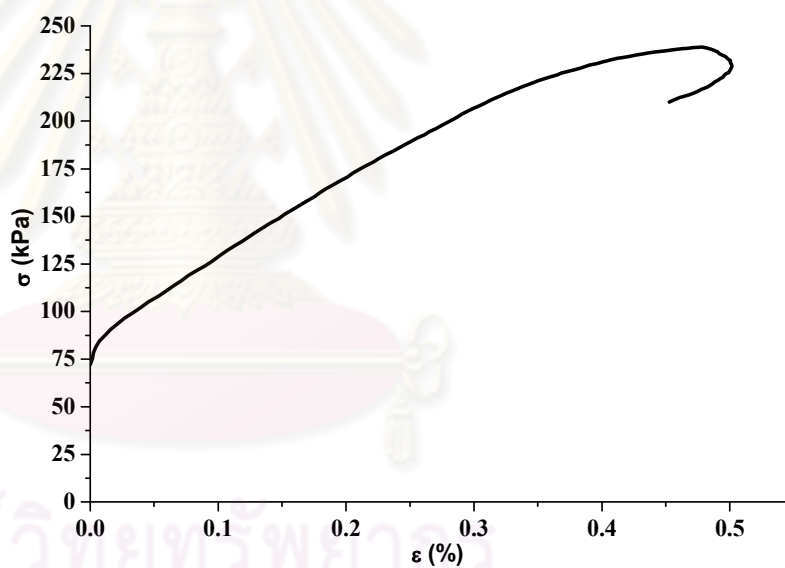


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที

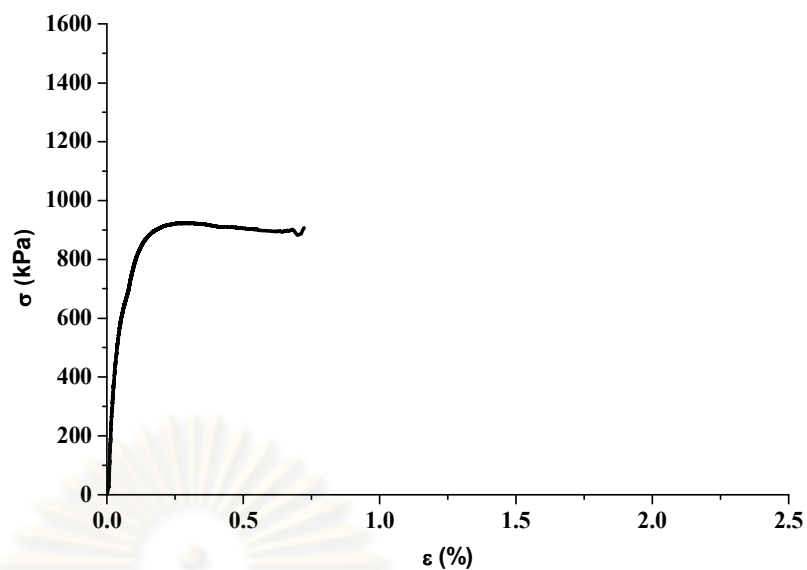
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



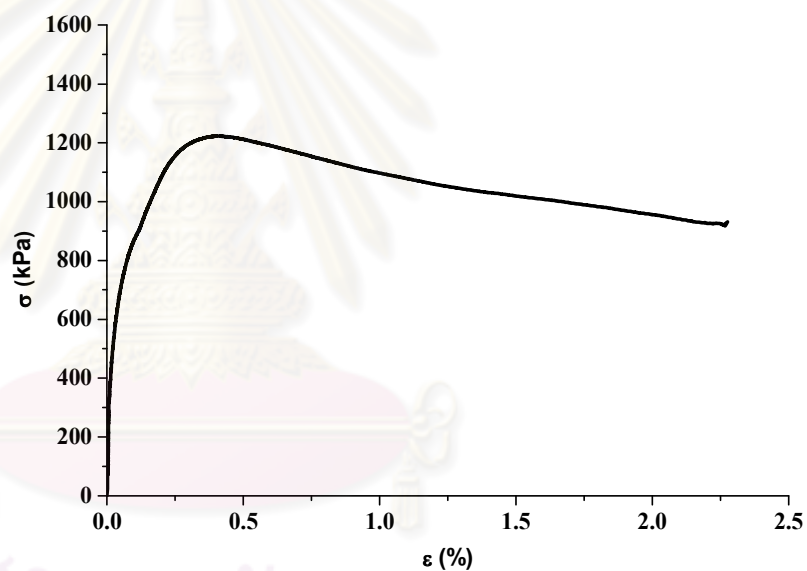
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที

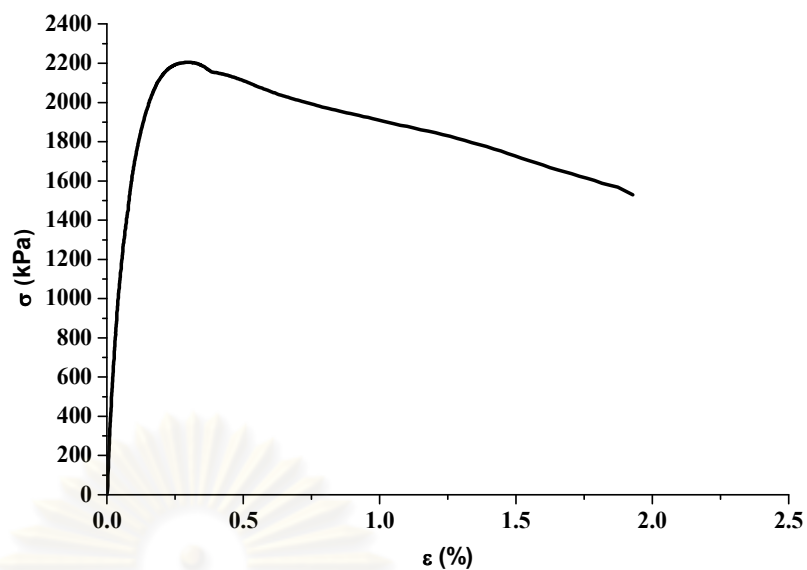


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที

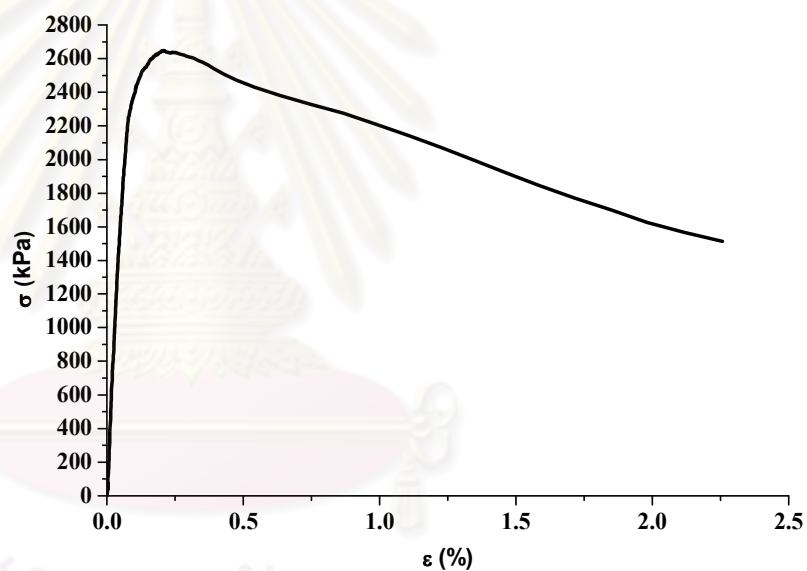


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

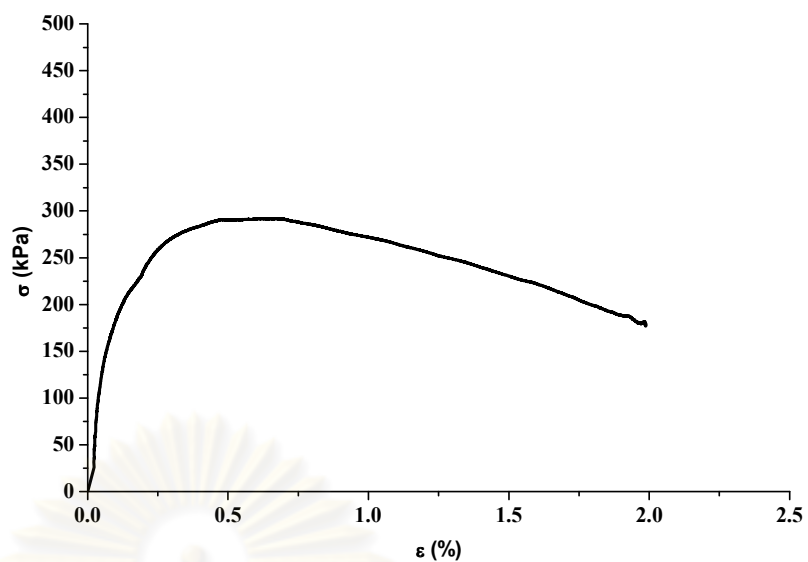


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที

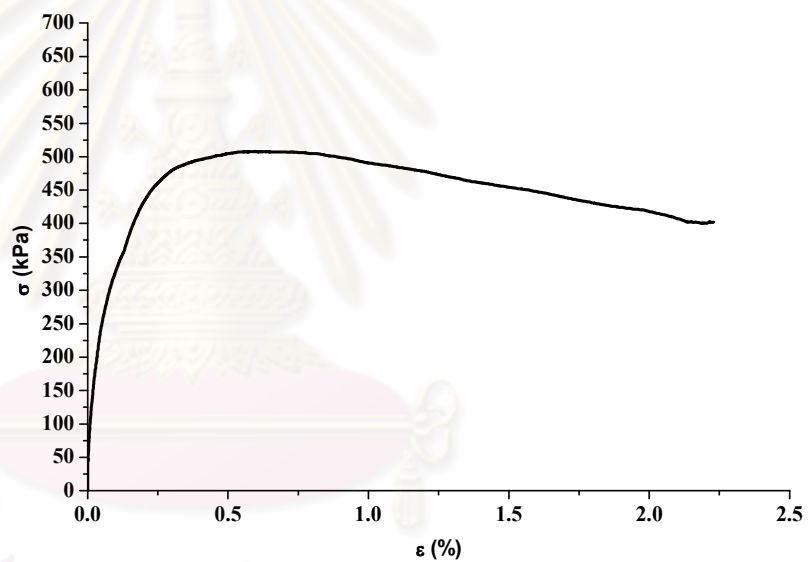


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

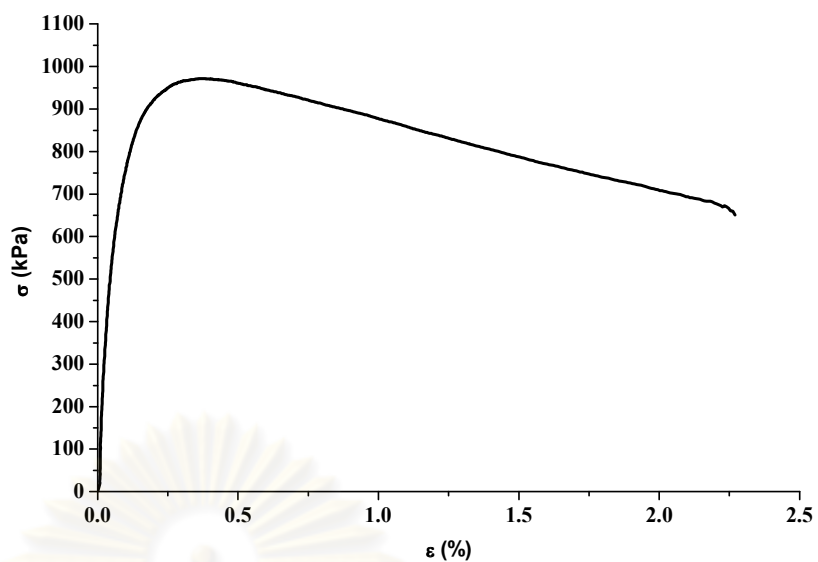


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที

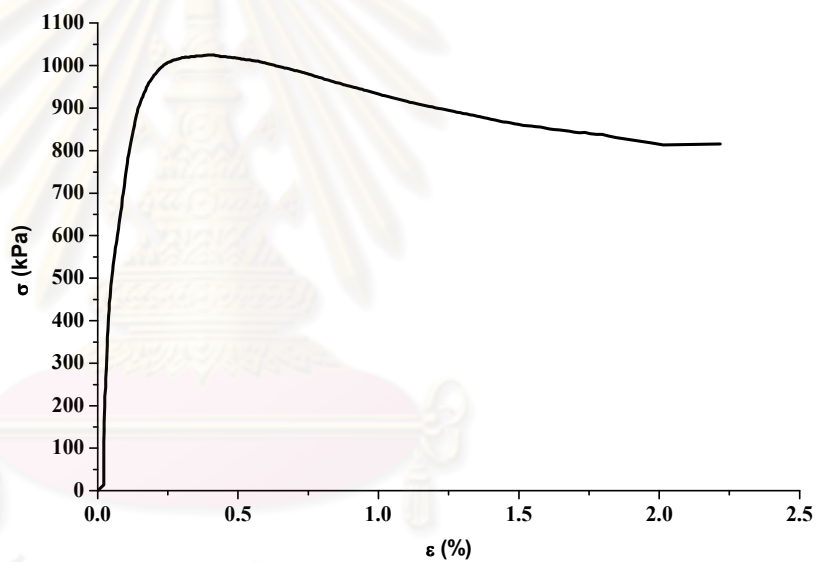


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

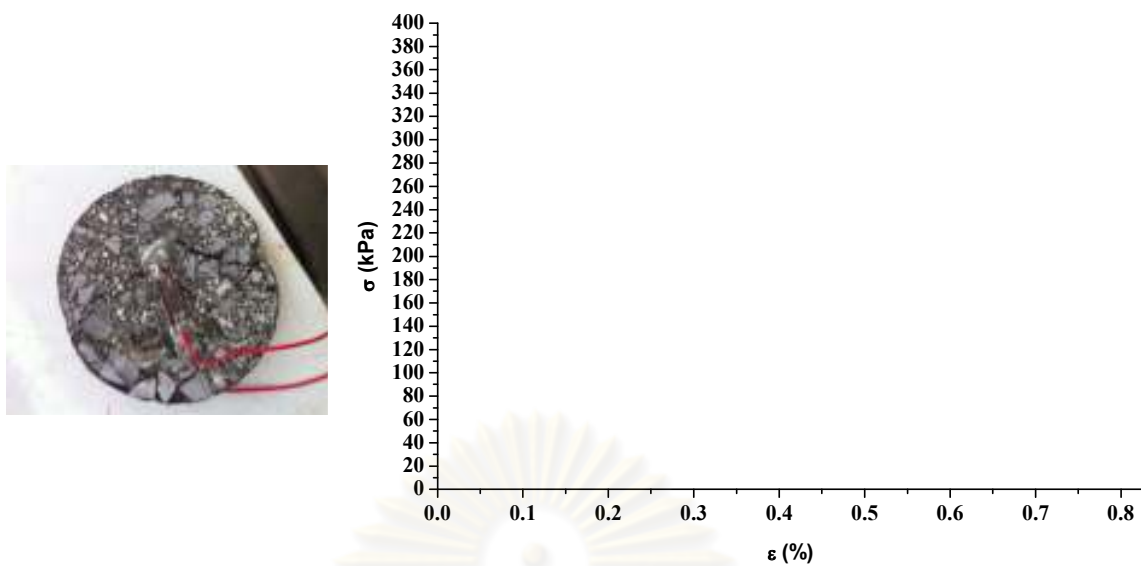


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที

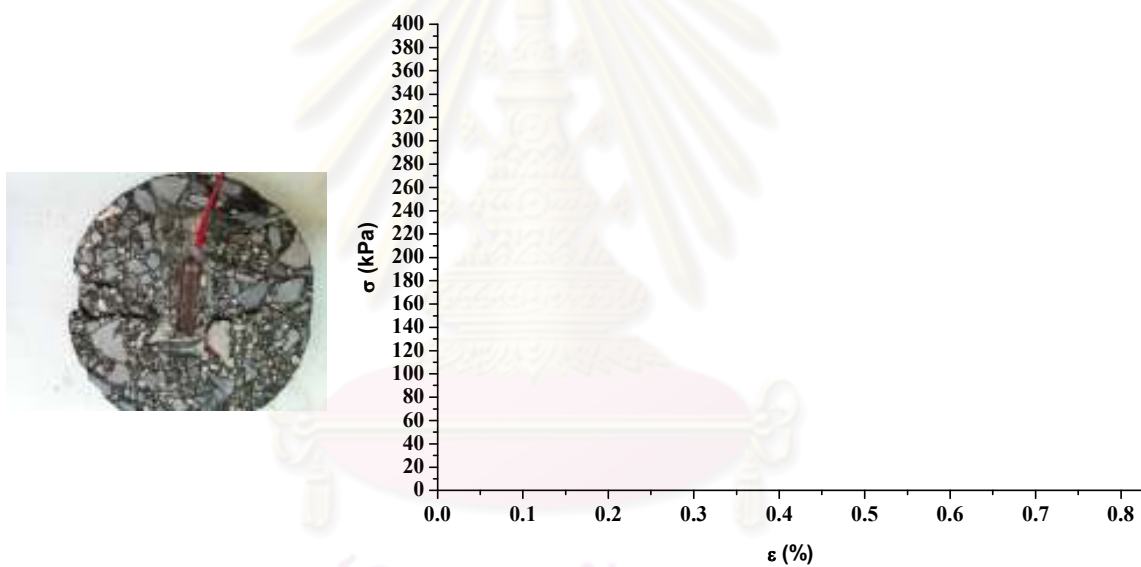


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

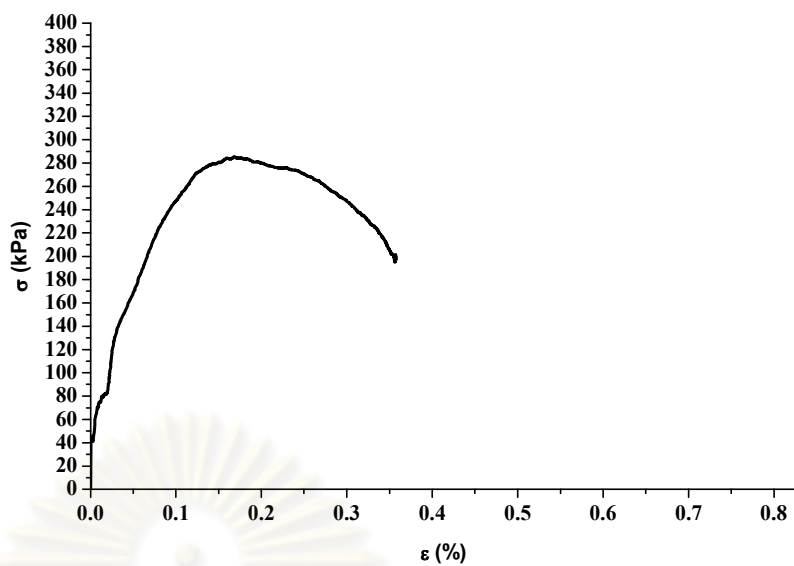


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที

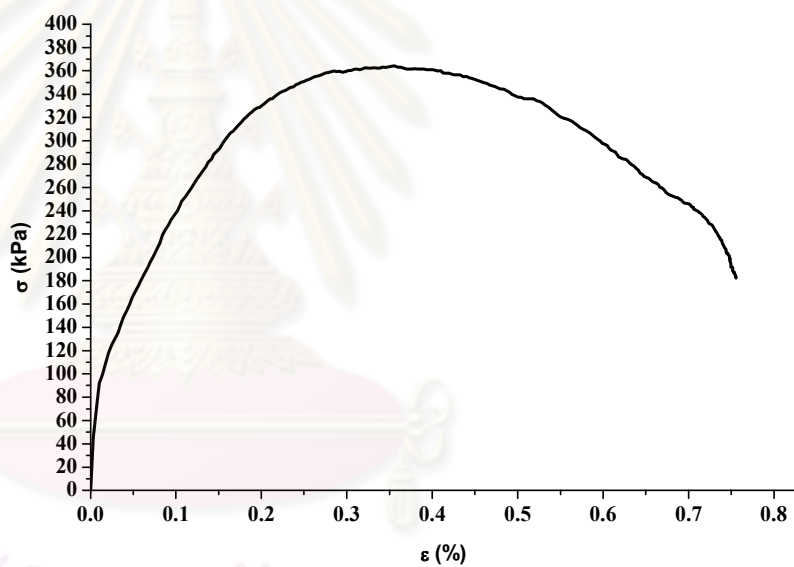


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

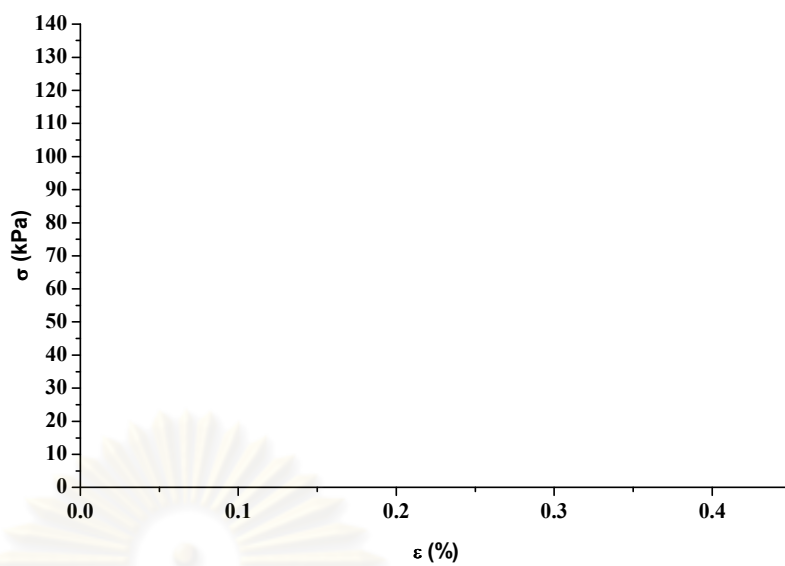


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที

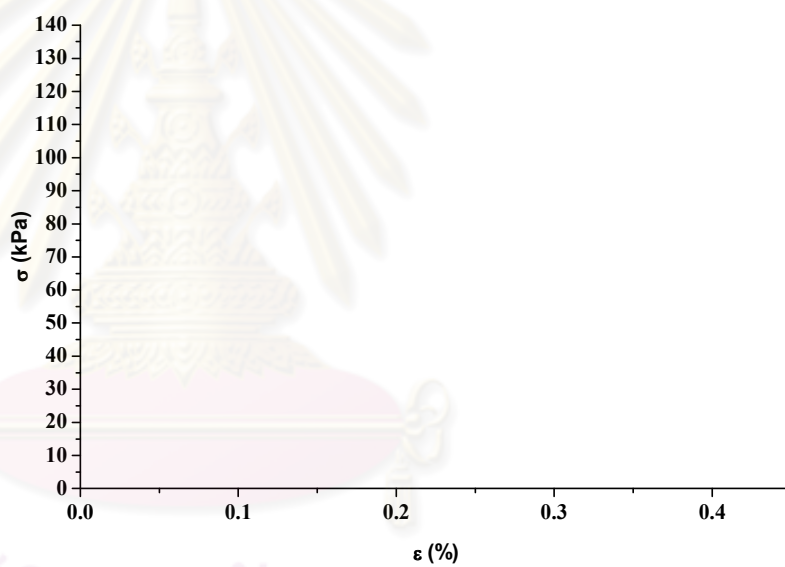


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

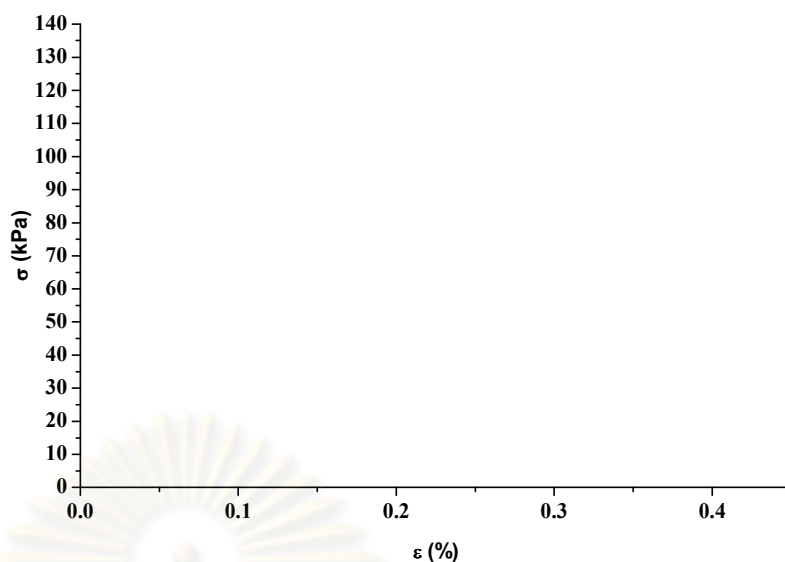


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที

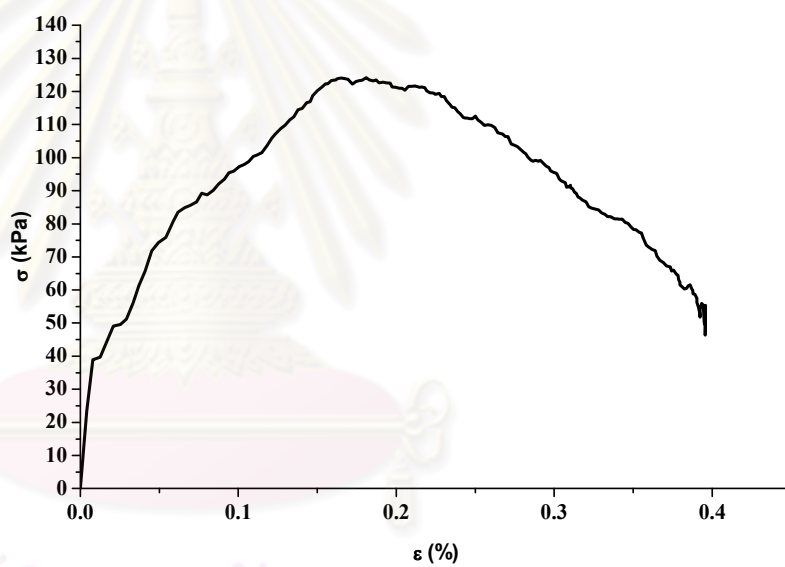


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

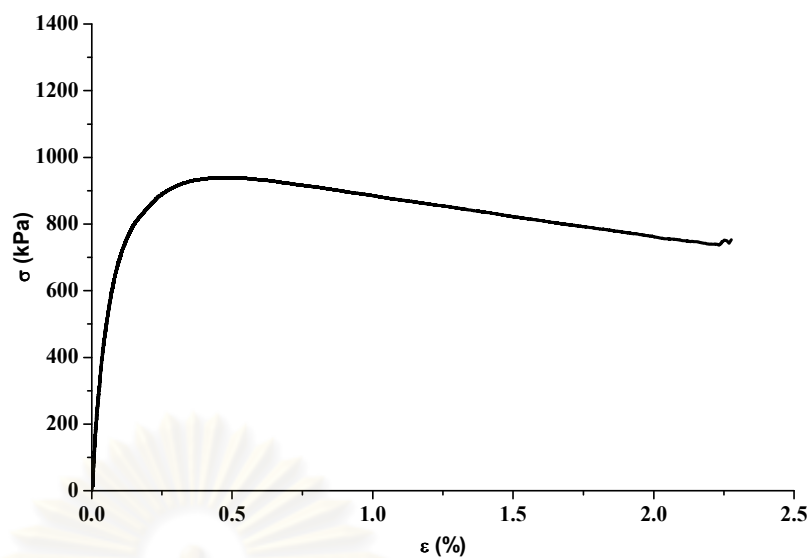


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที

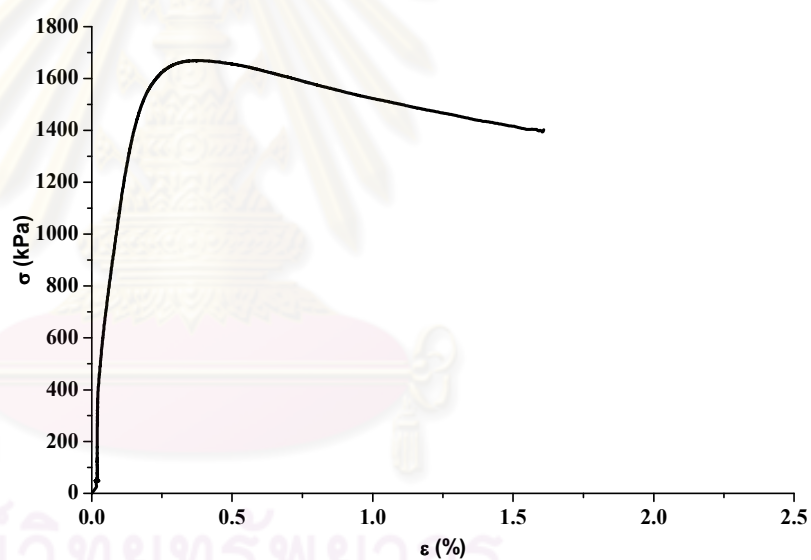


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที

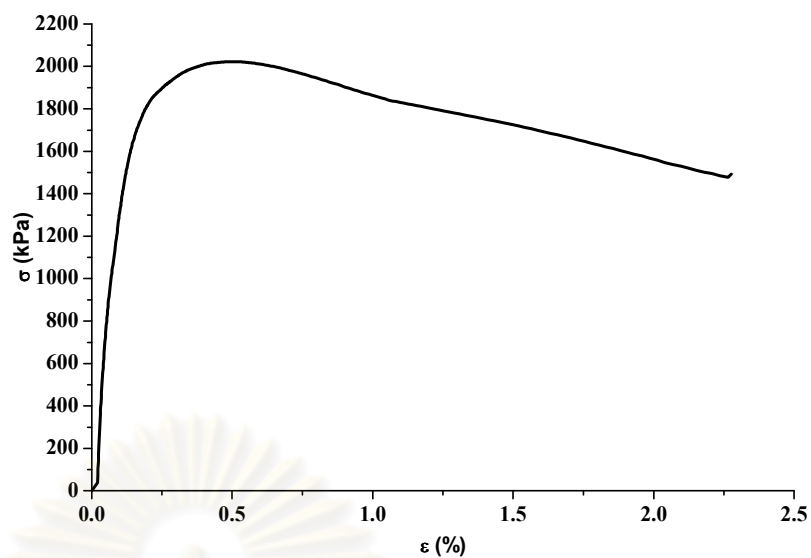
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



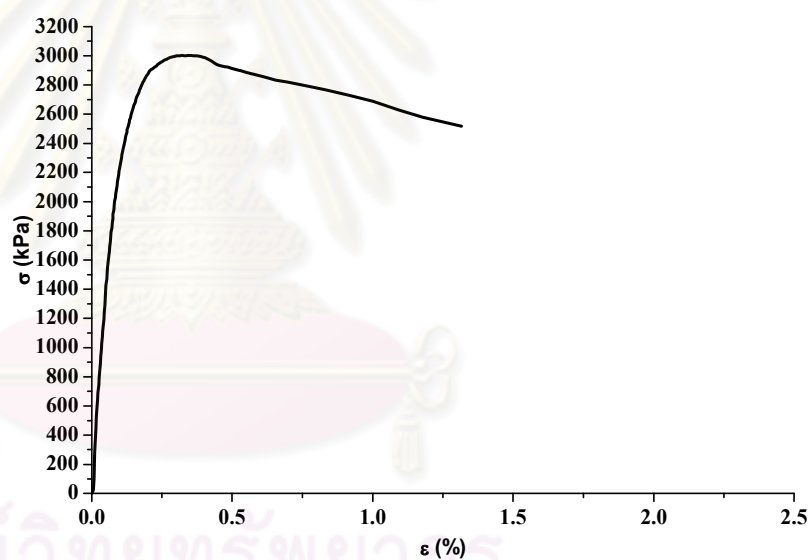
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที



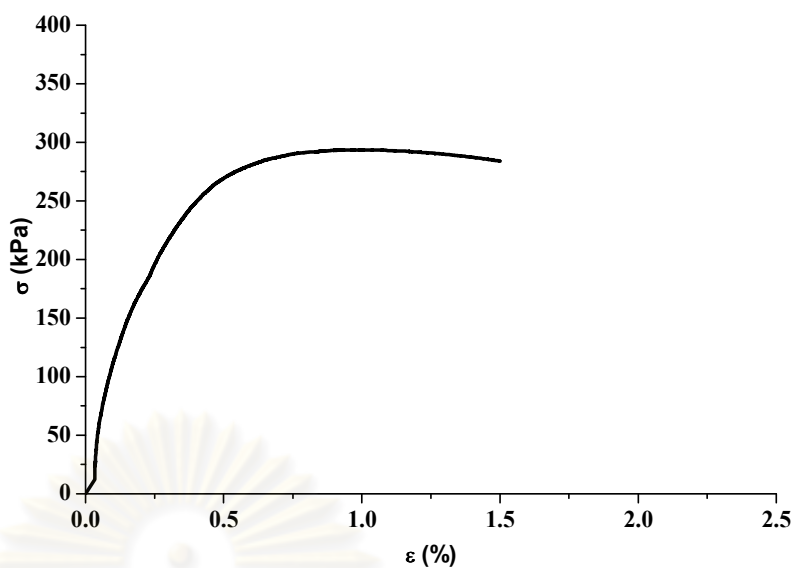
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที



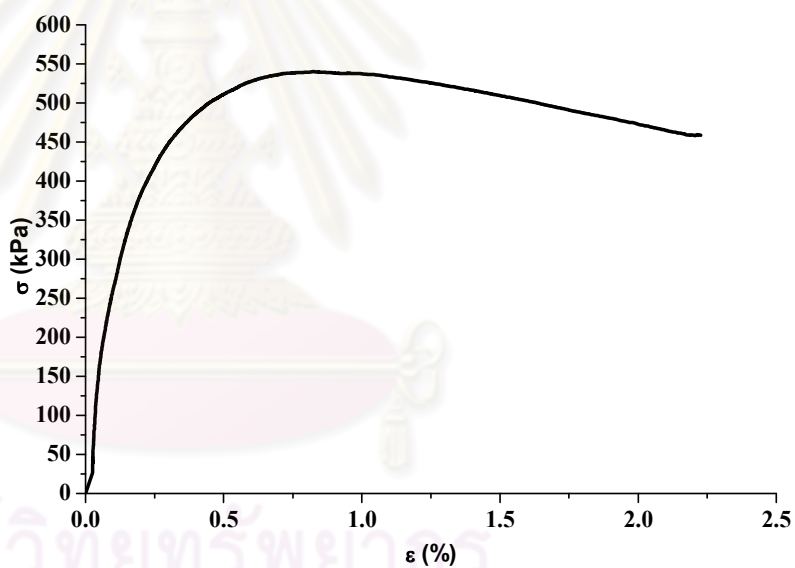
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที



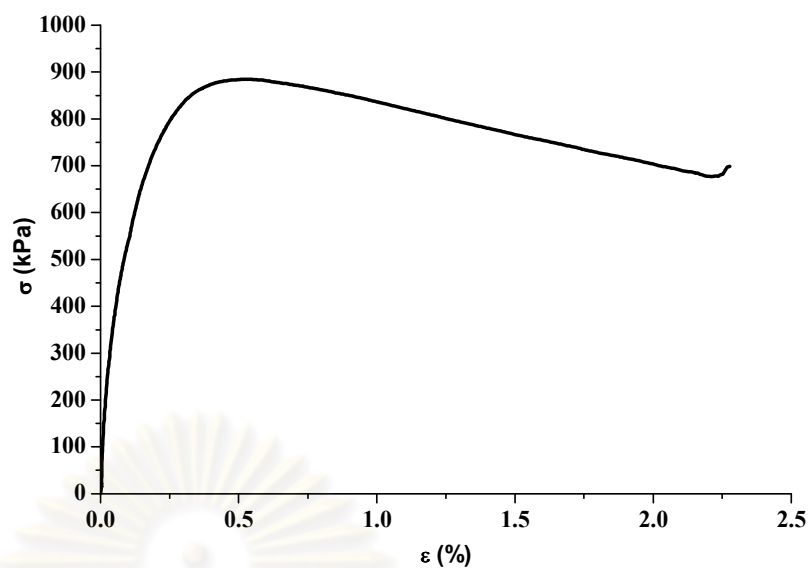
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที



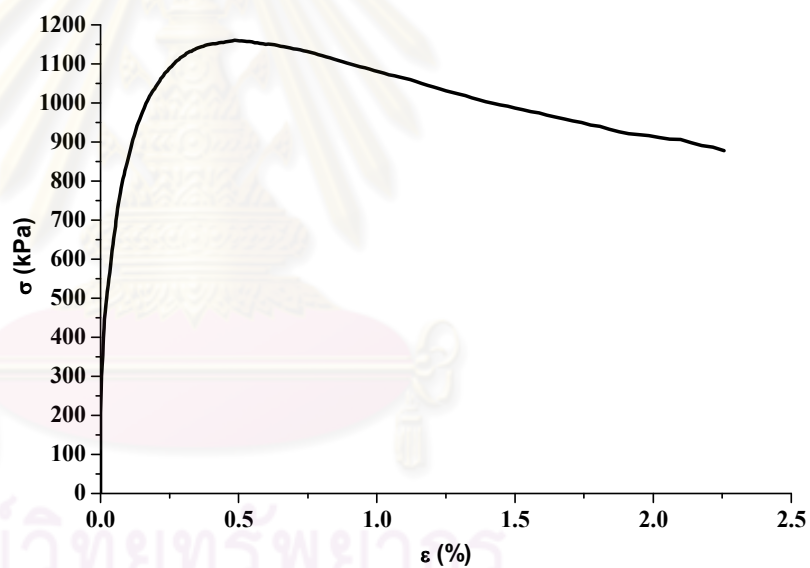
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที



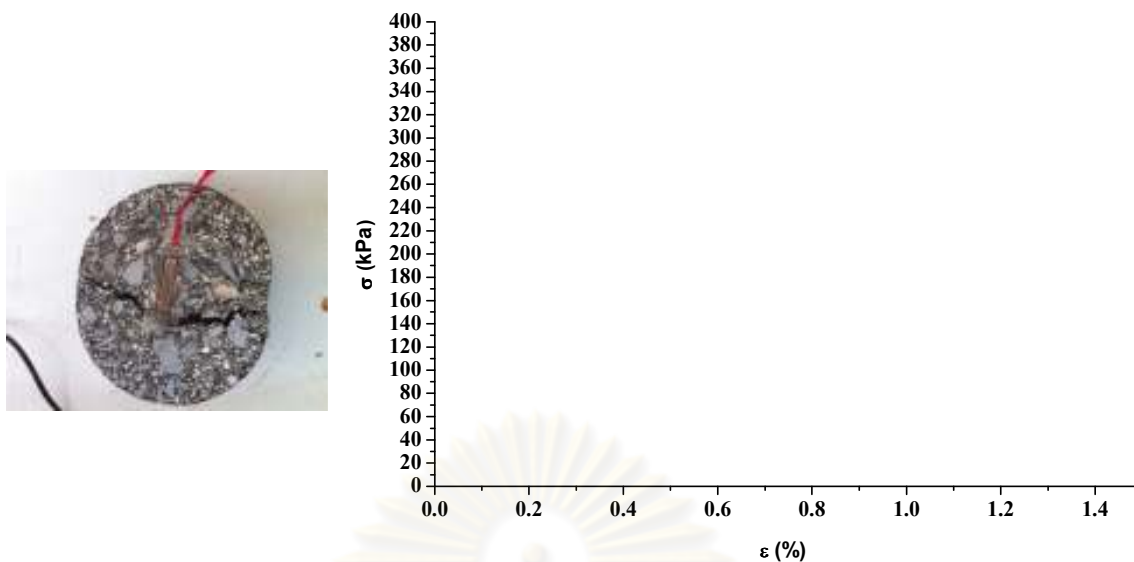
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที



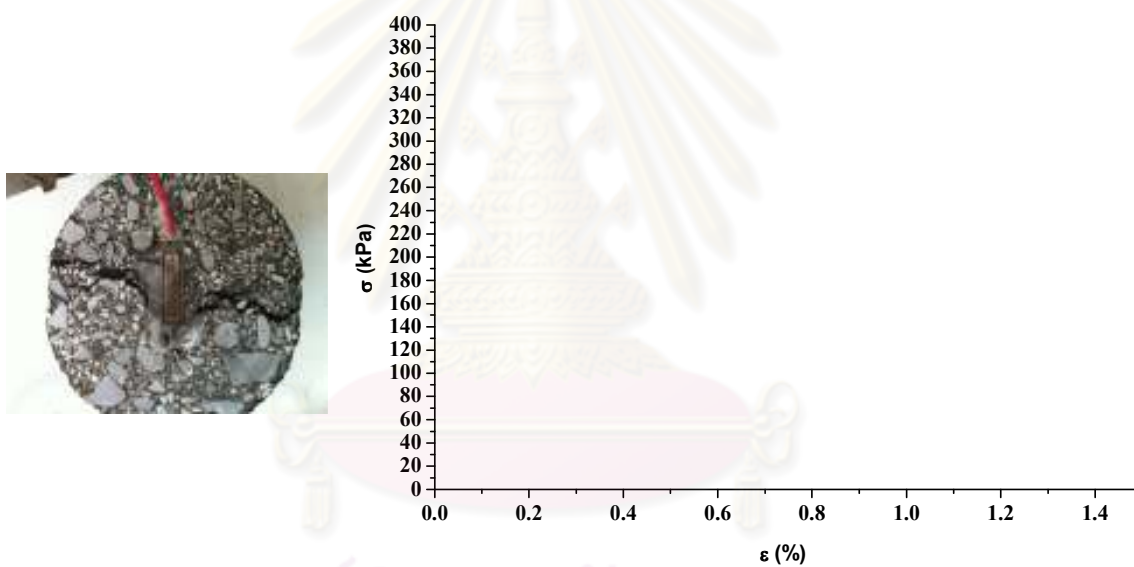
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที

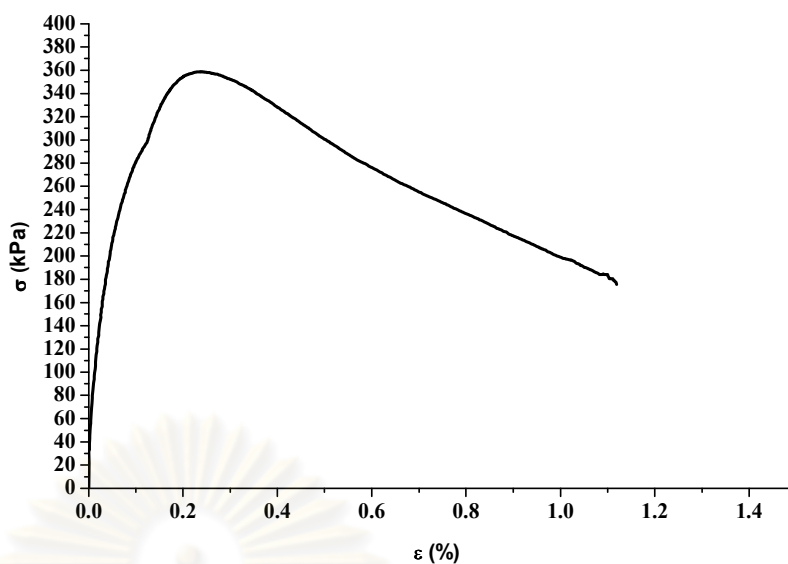


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที

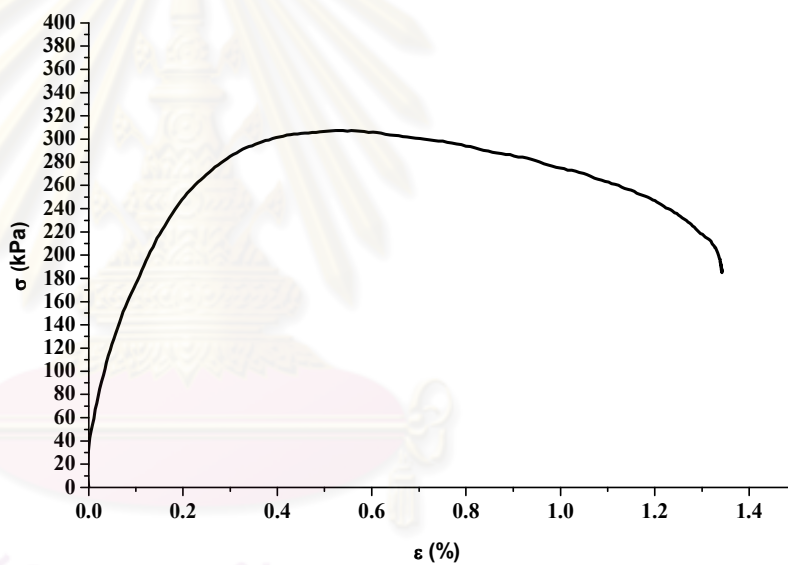


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

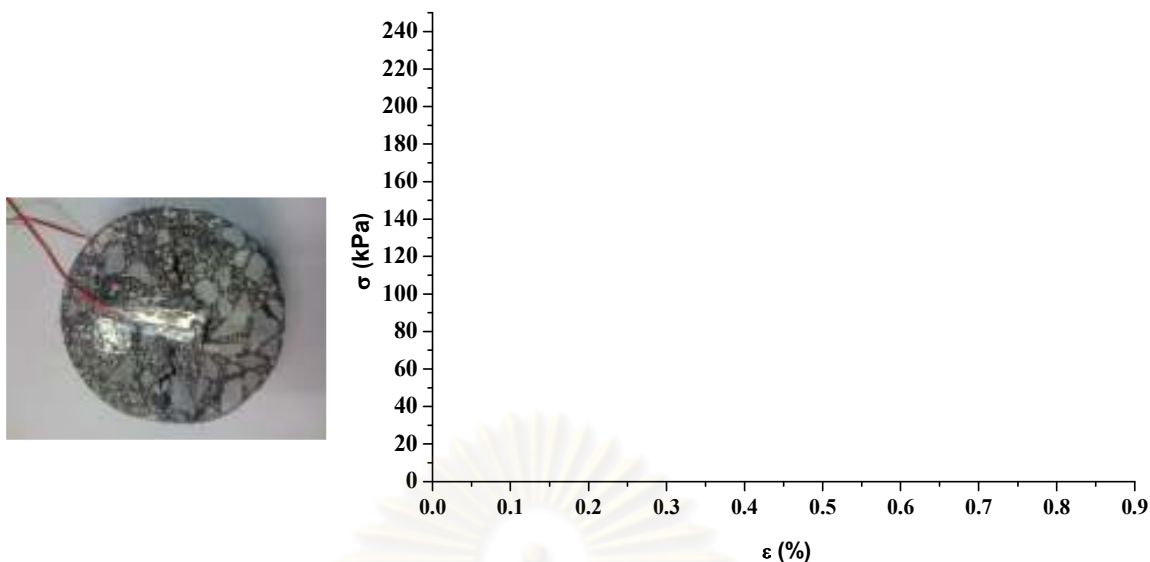


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที

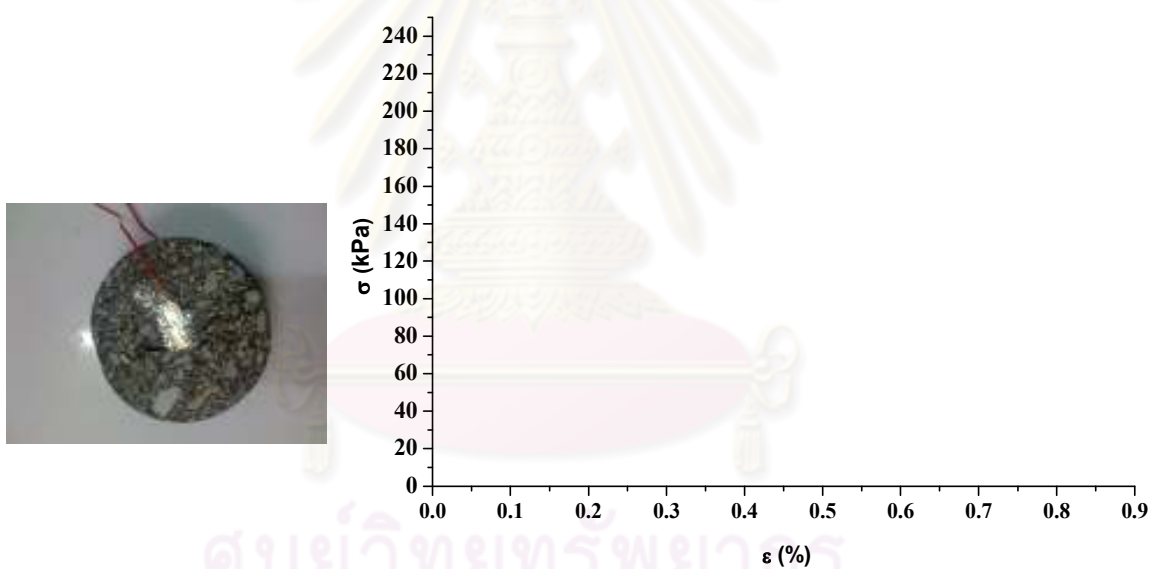


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที

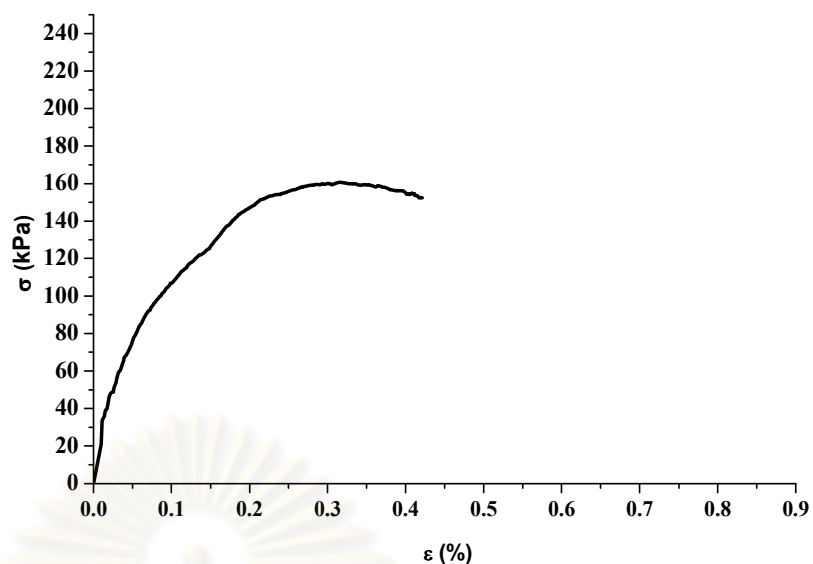
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



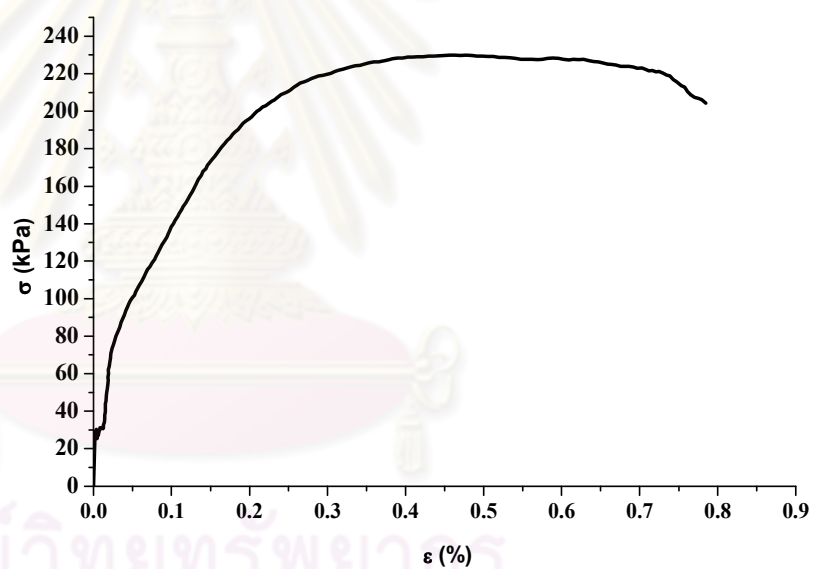
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0008 ต่อวินาที



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0025 ต่อวินาที

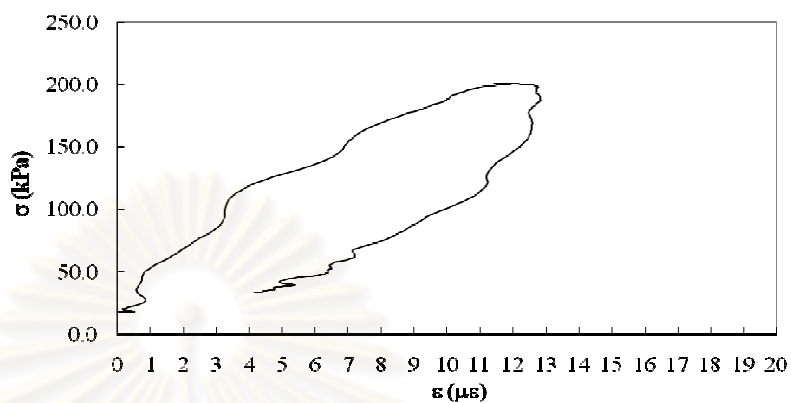


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0083 ต่อวินาที

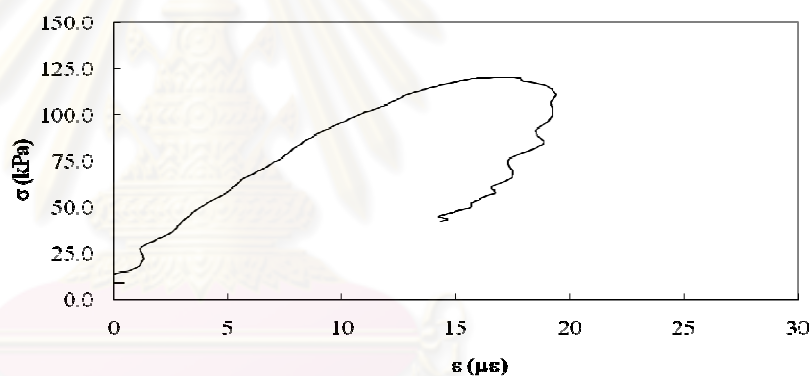


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0250 ต่อวินาที

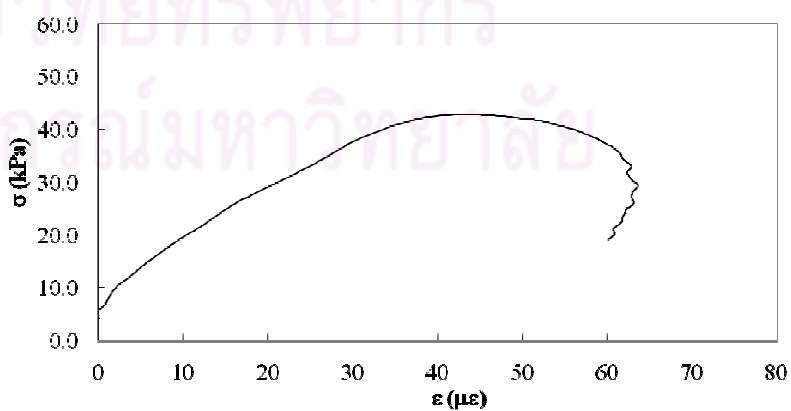
2. การทดสอบแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต



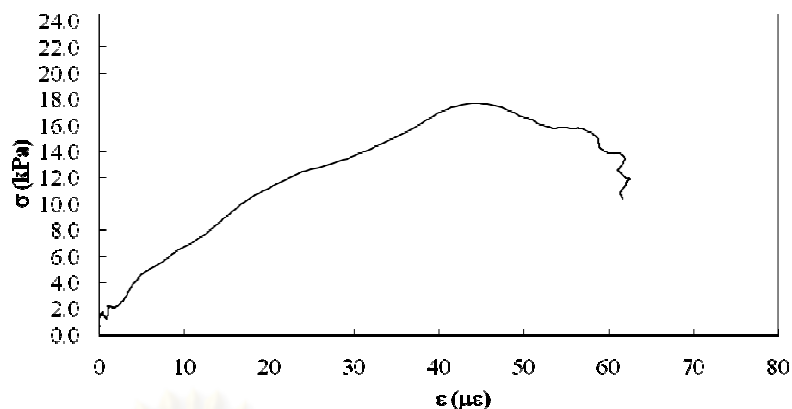
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 10°C



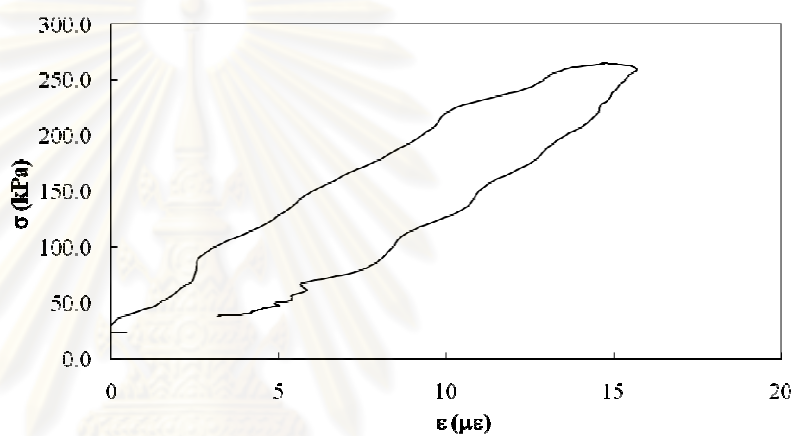
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 25°C



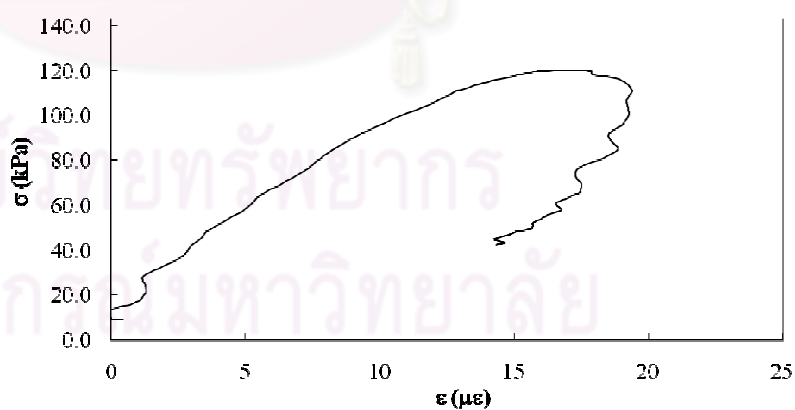
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 40°C



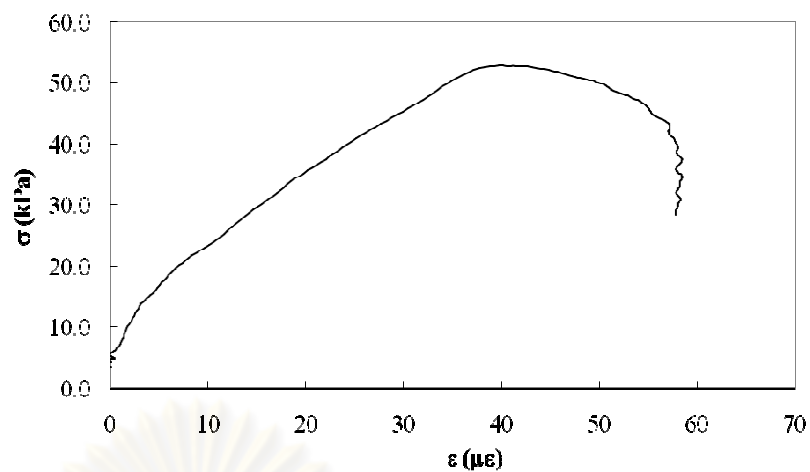
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 55°C



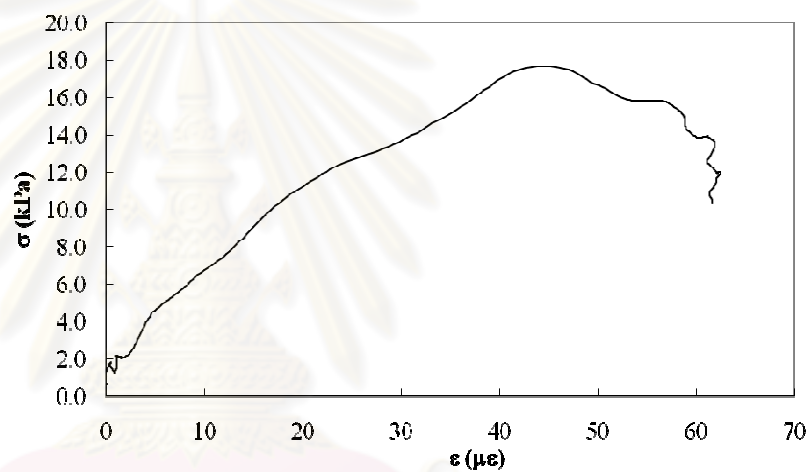
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 10°C



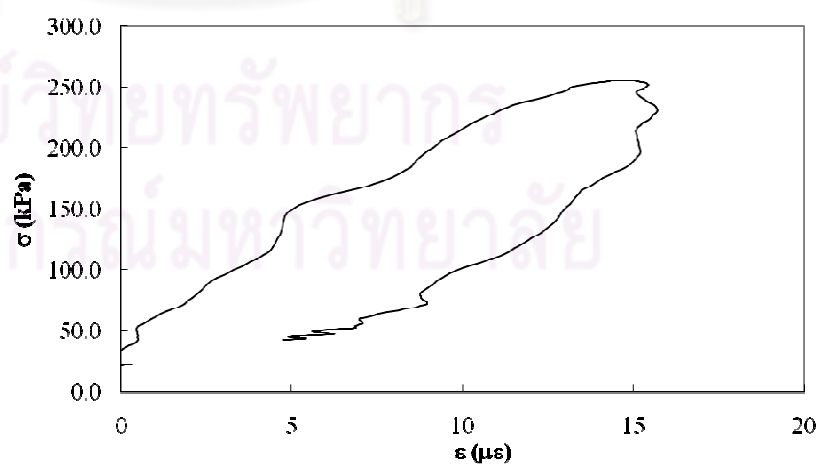
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 25°C



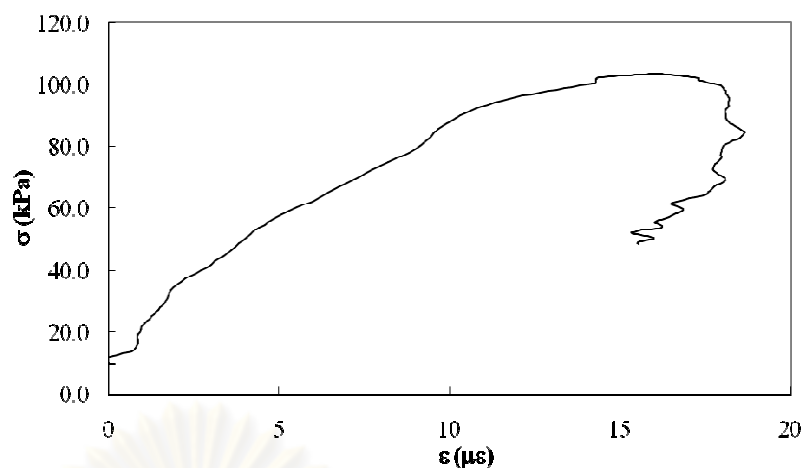
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 40°C



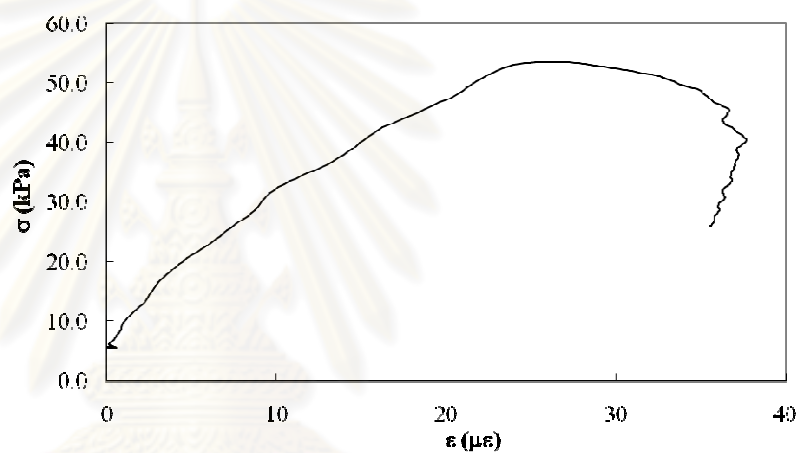
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 55°C



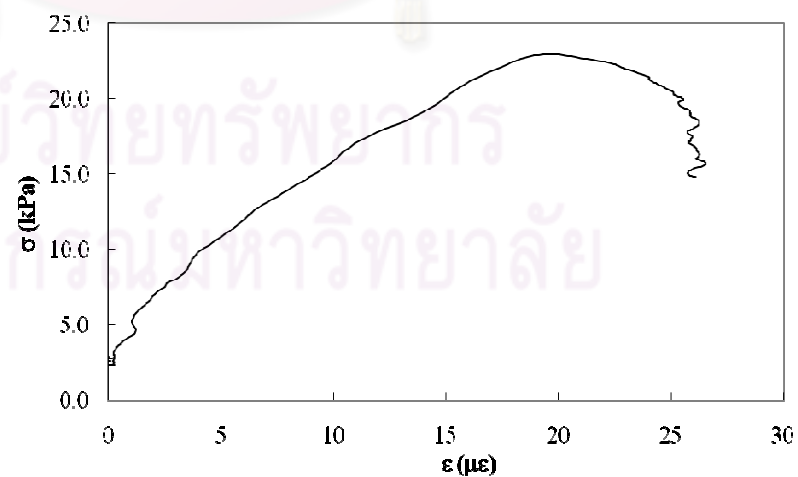
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 10°C



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 25°C

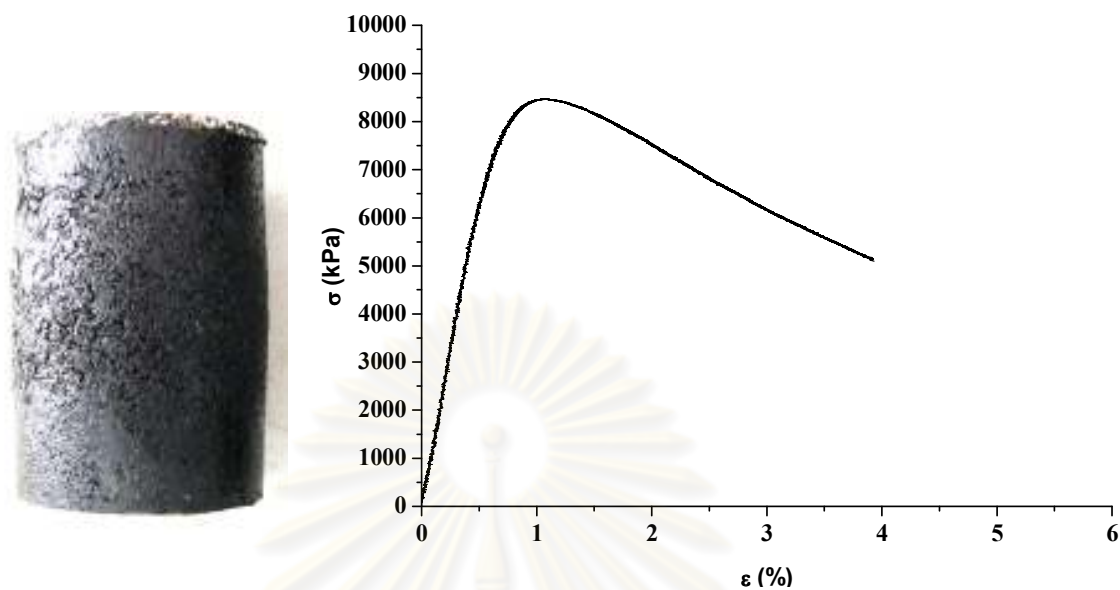


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 40°C

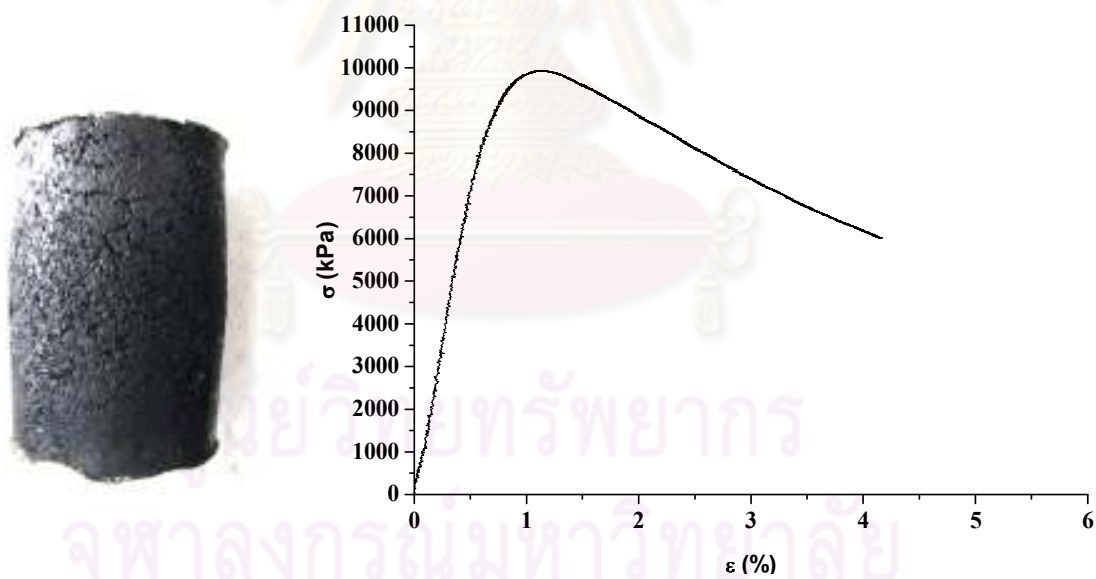


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 55°C

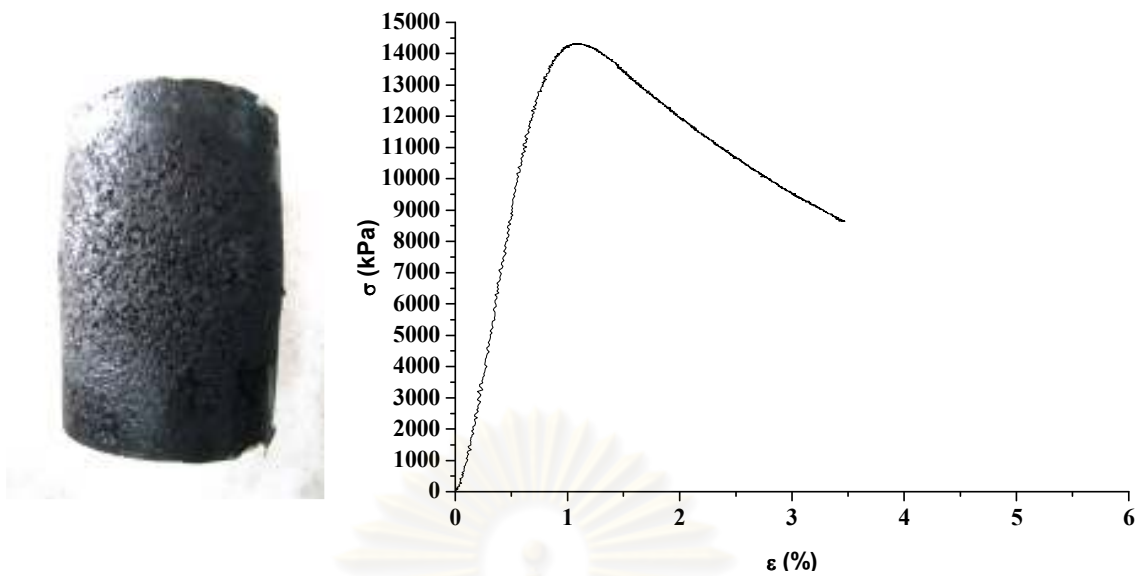
3. การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบสถิต



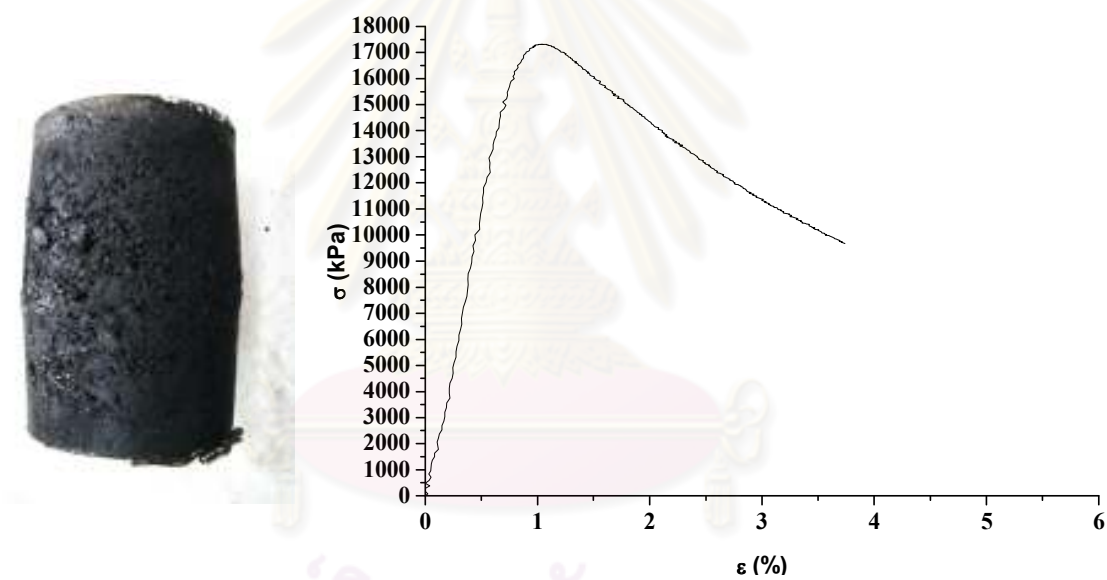
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที

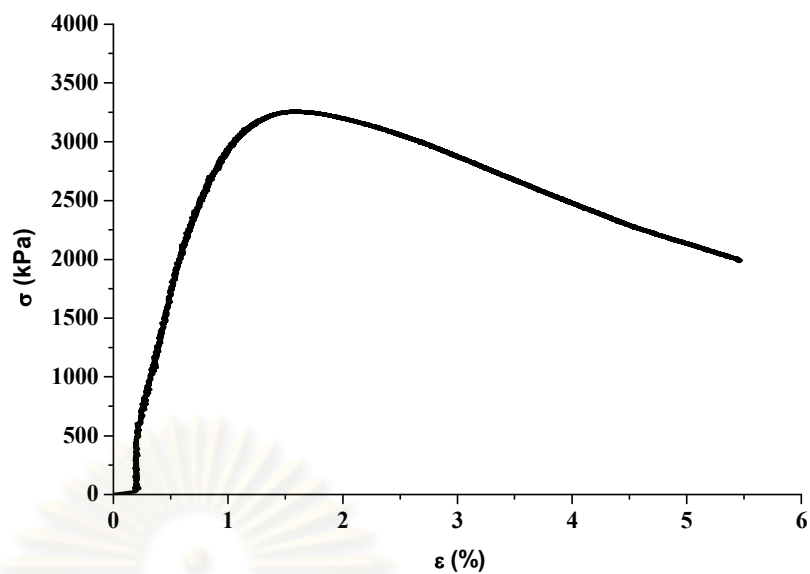


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที

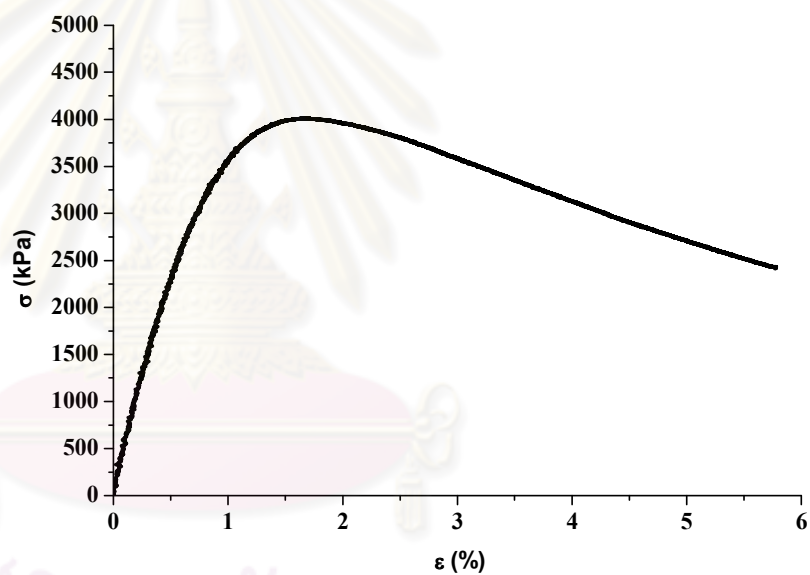


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

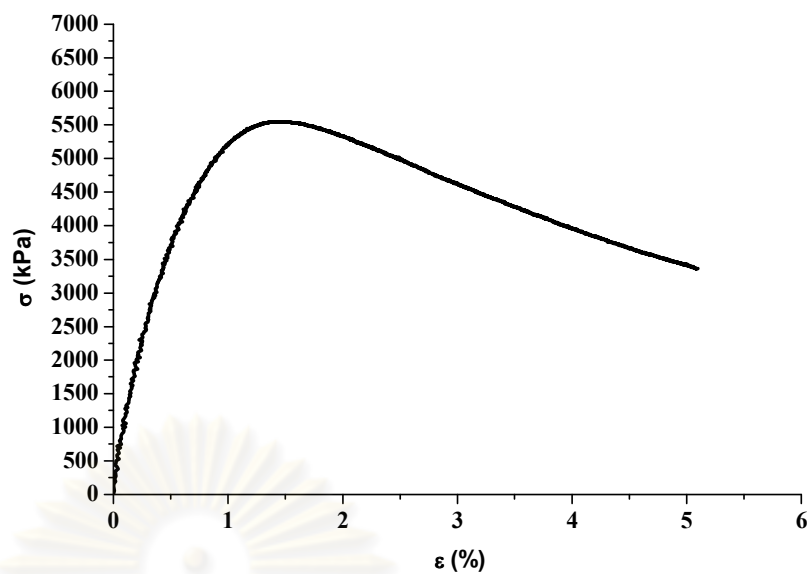


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที

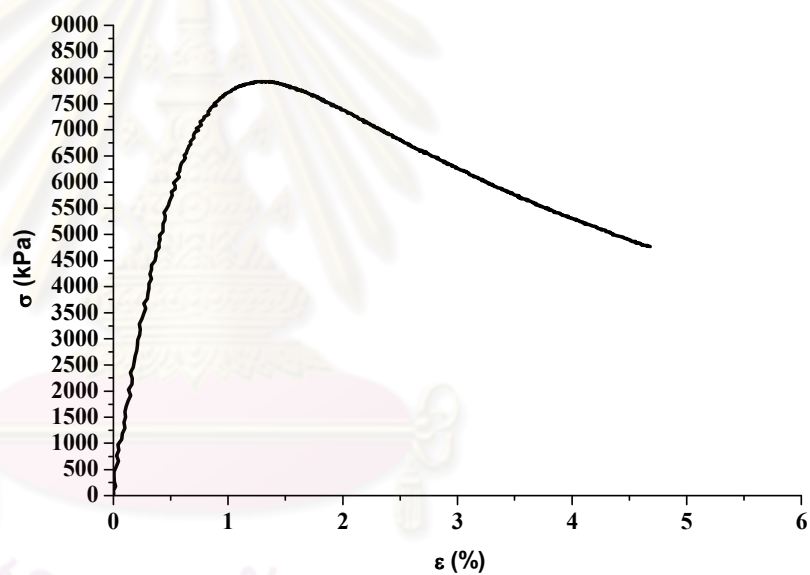


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

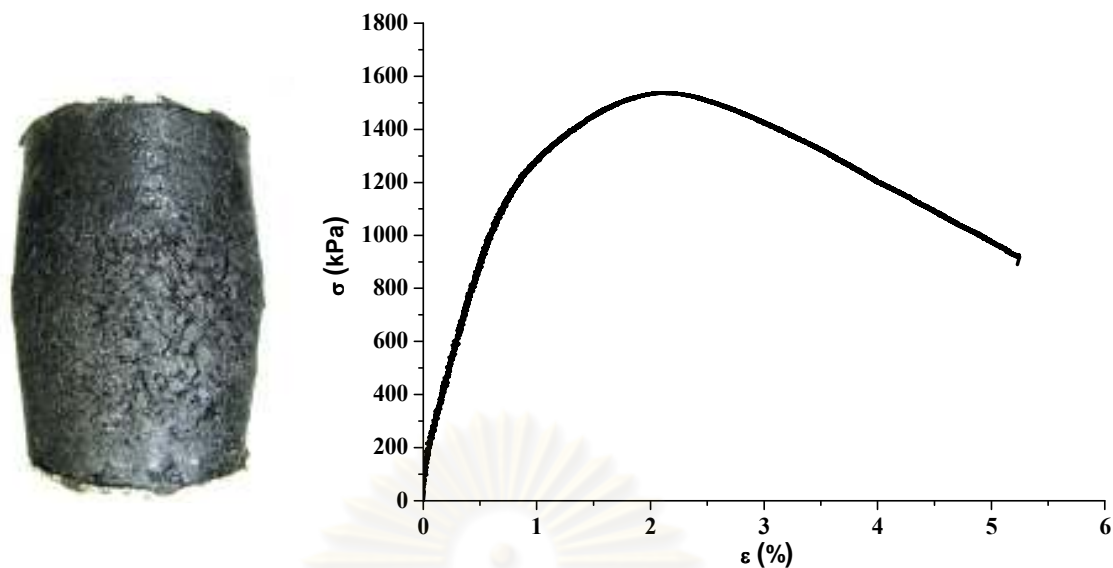


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที

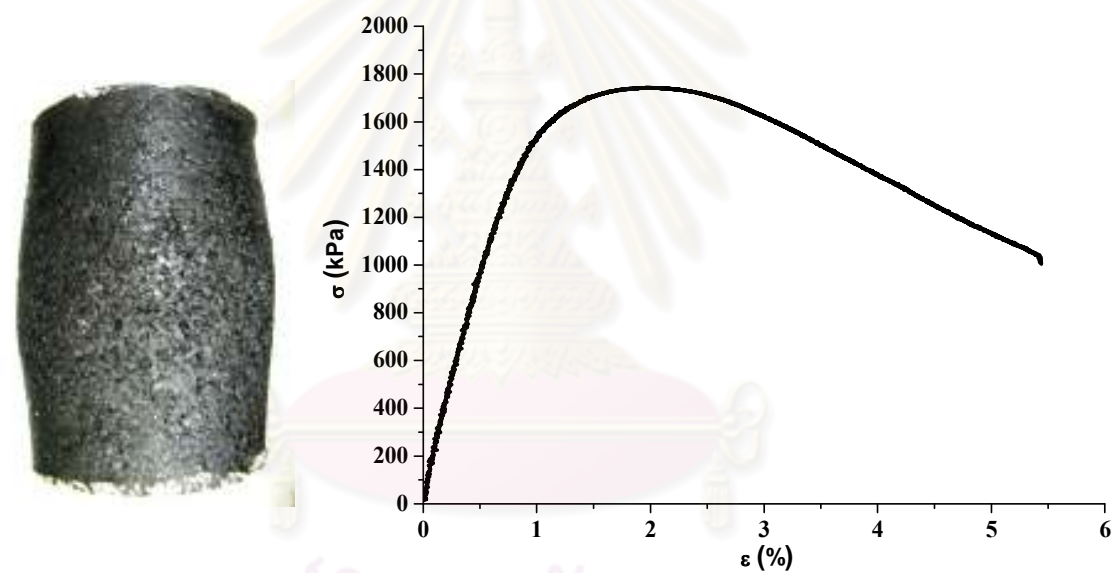


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

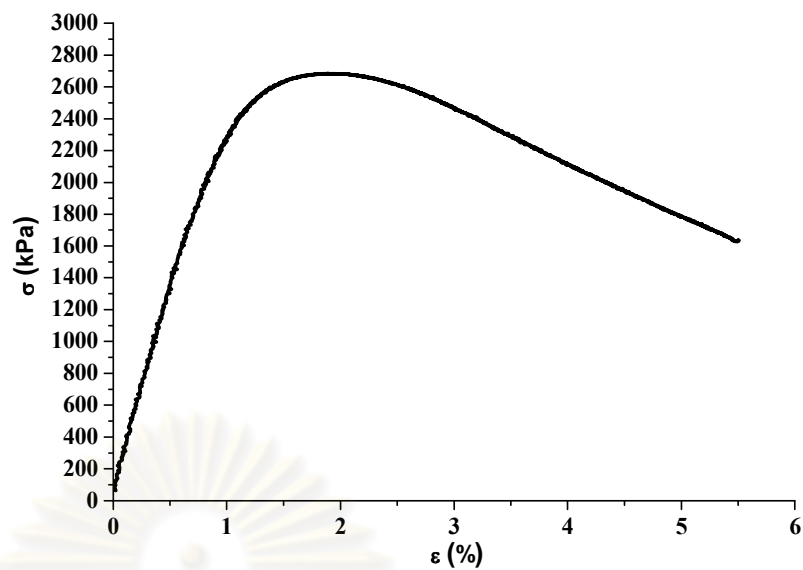


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที

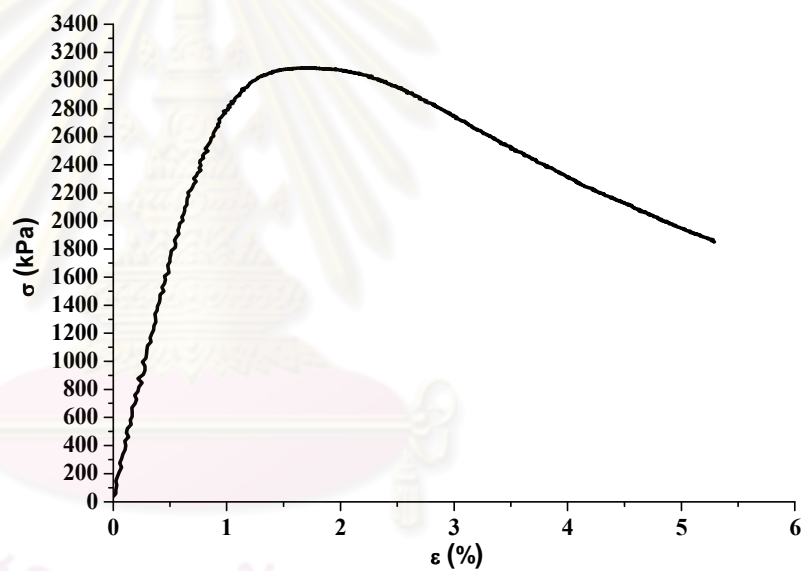


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

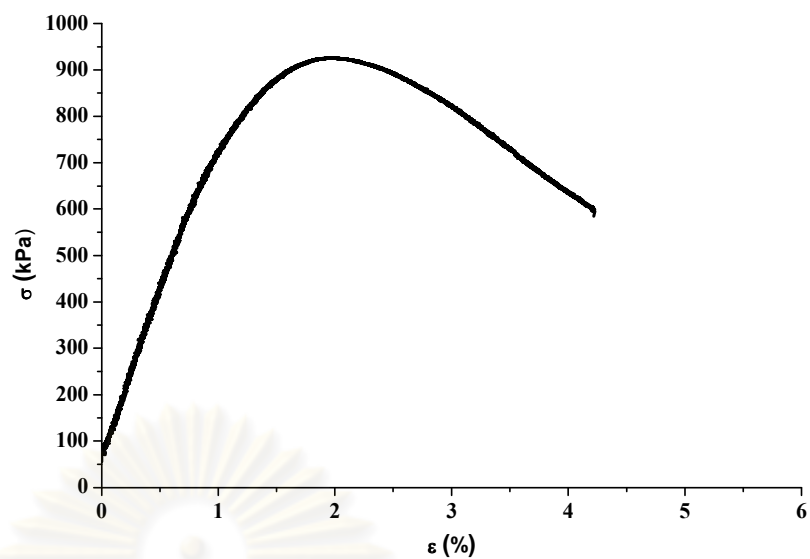


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที

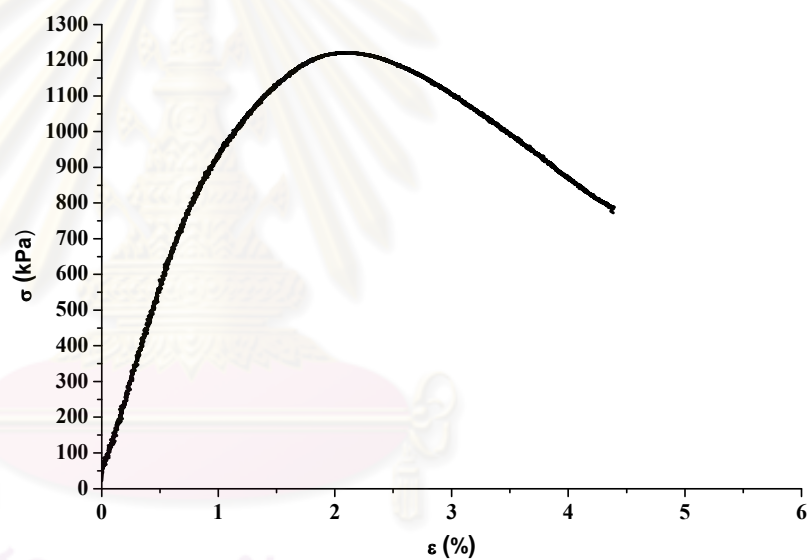


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

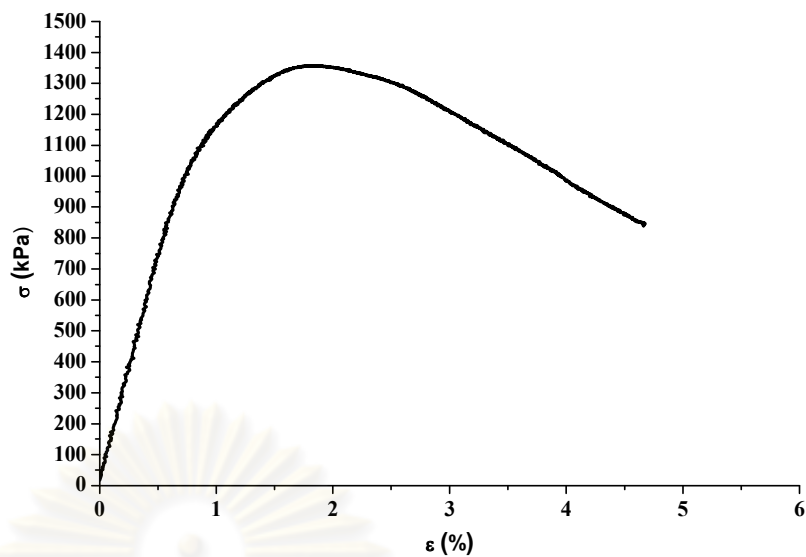


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที

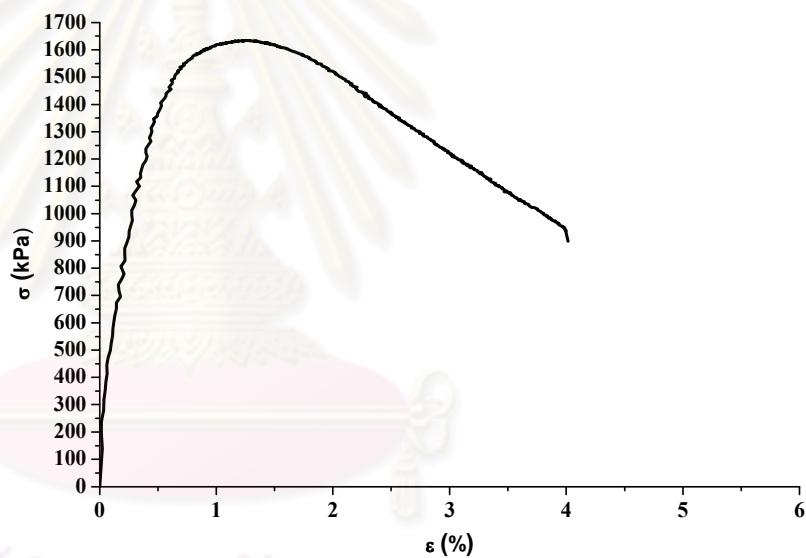


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

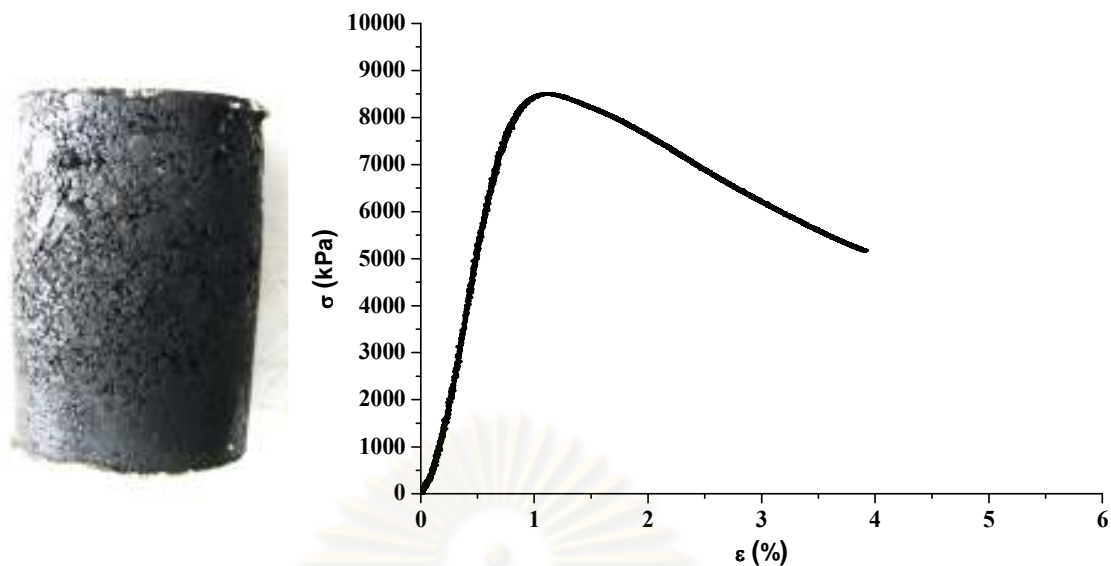


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที

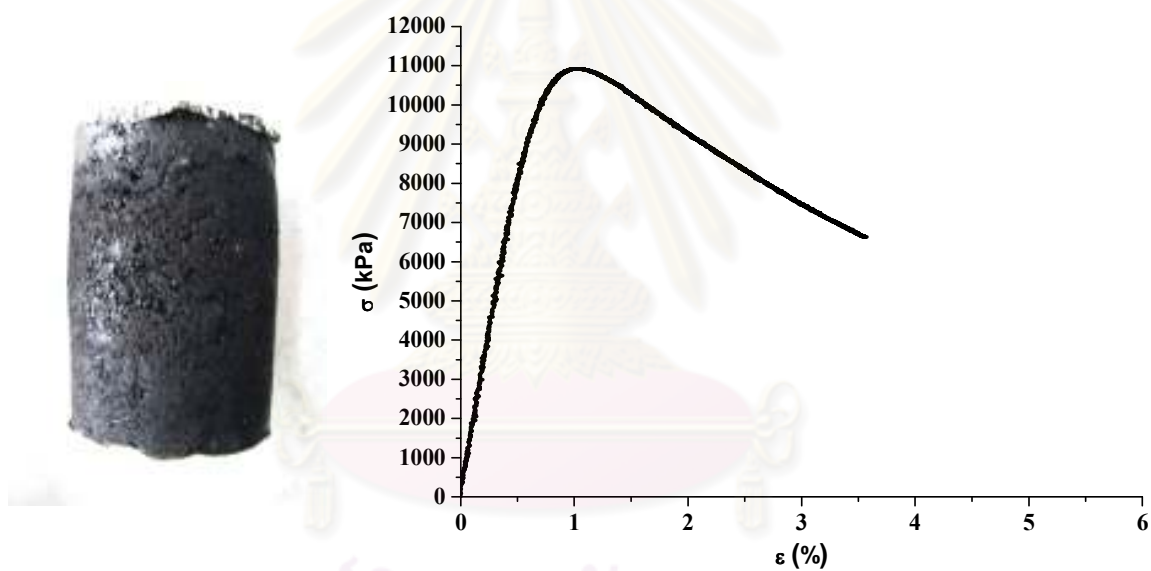


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

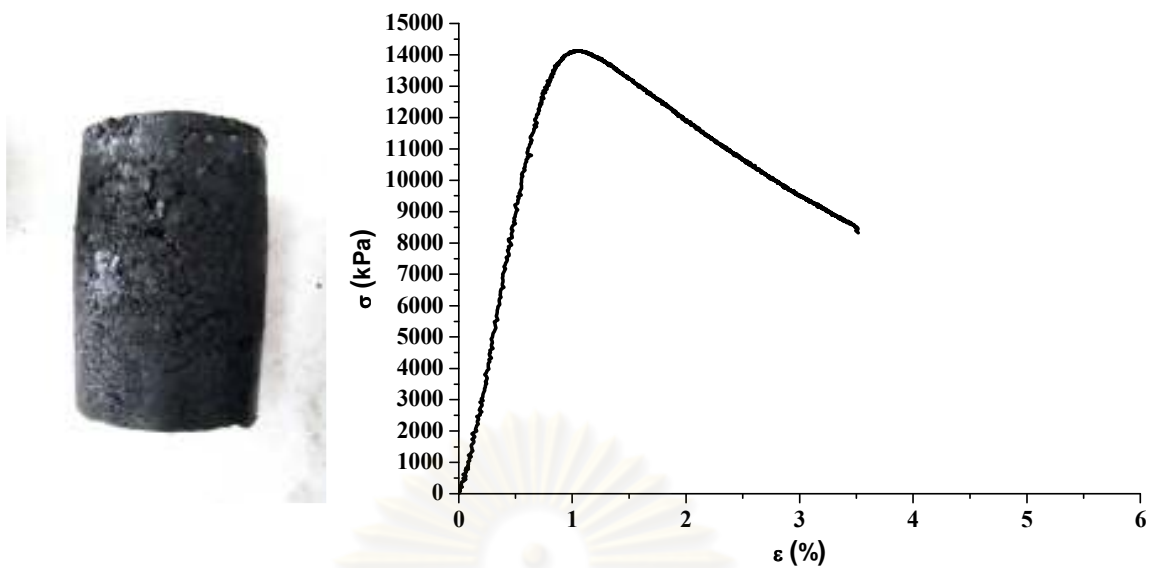


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที

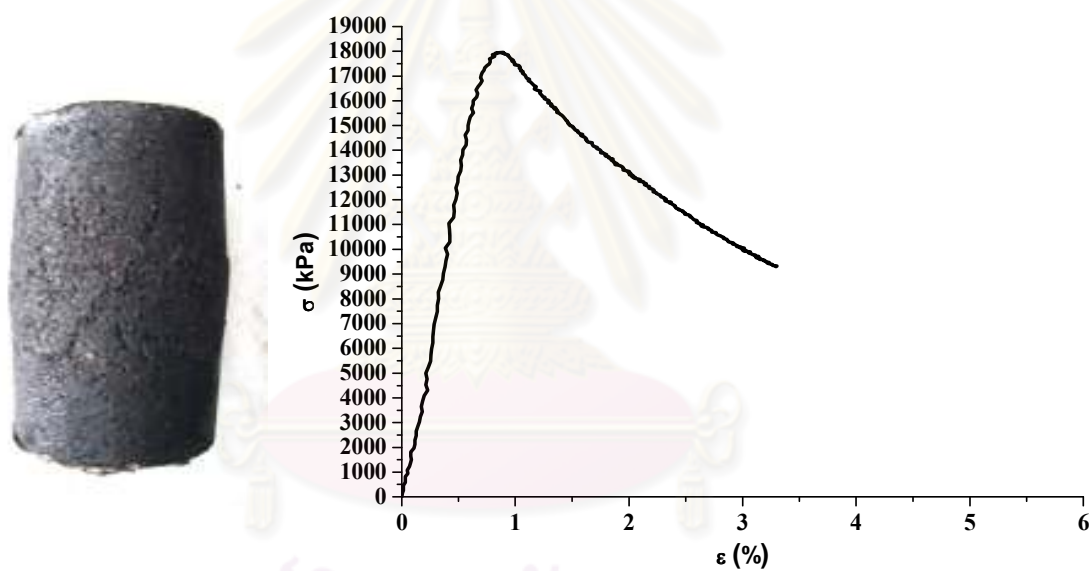


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

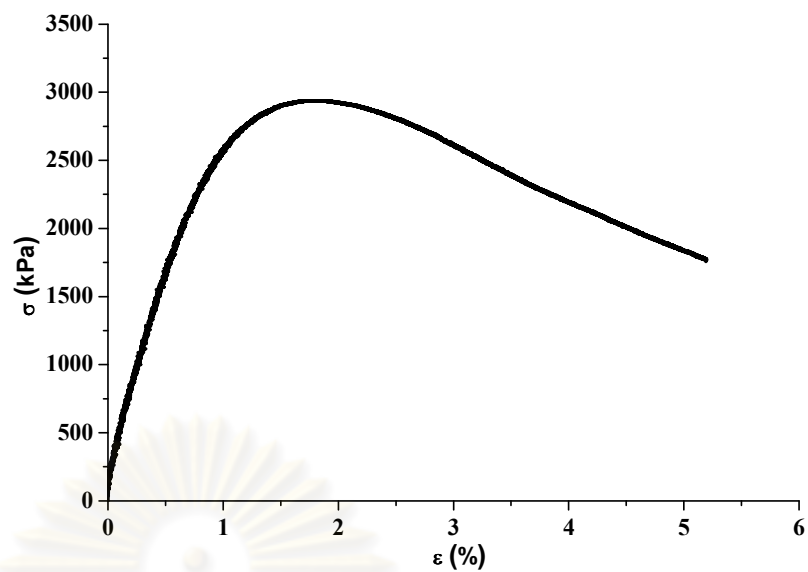


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที

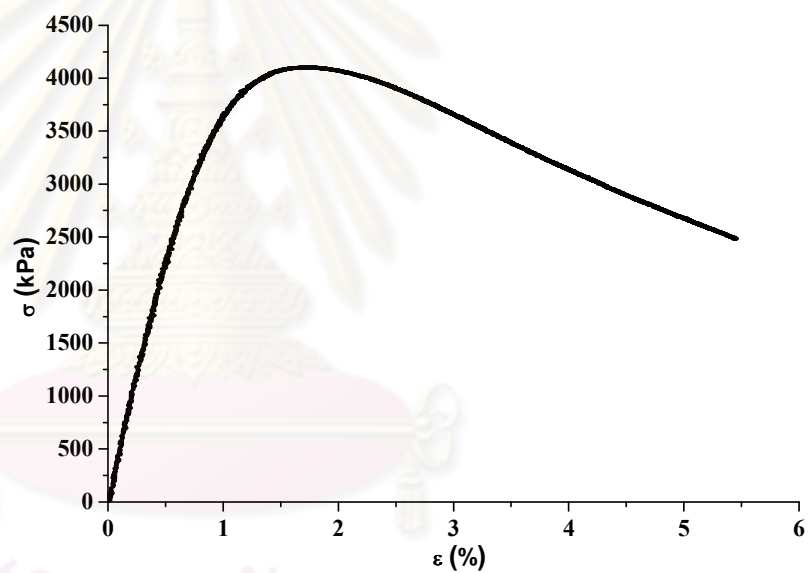


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

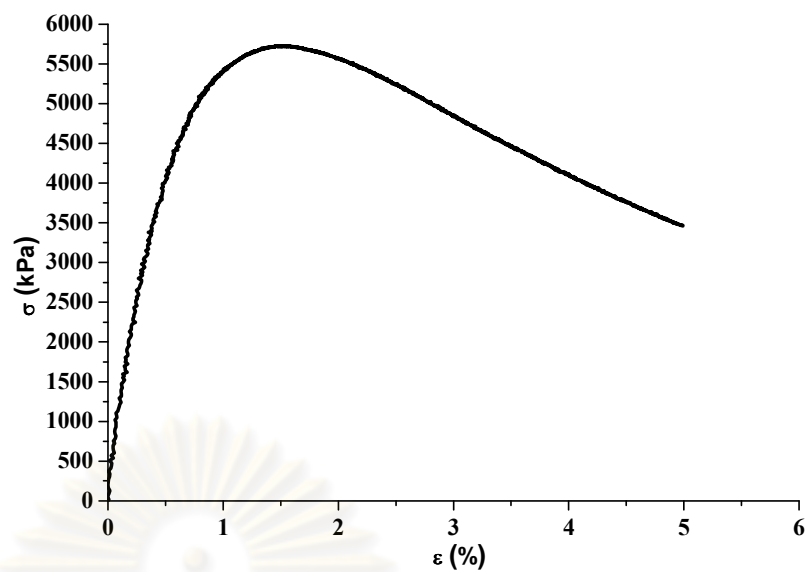


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที

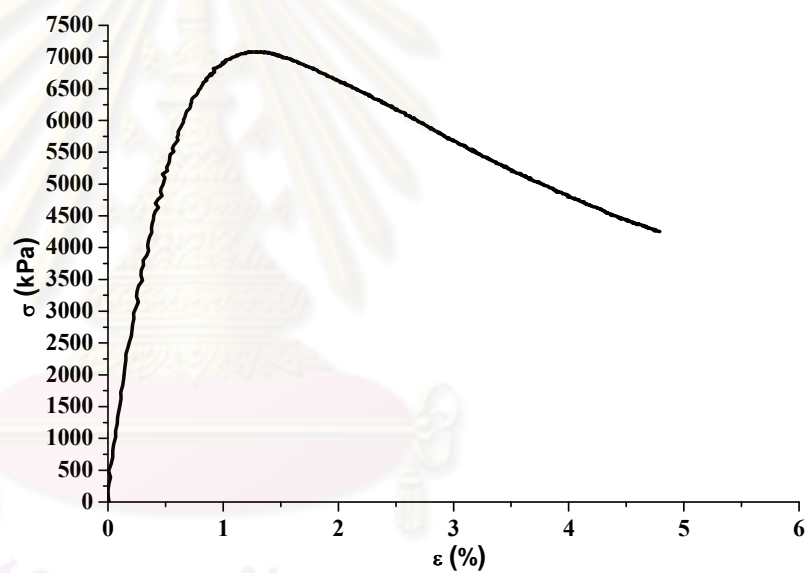


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

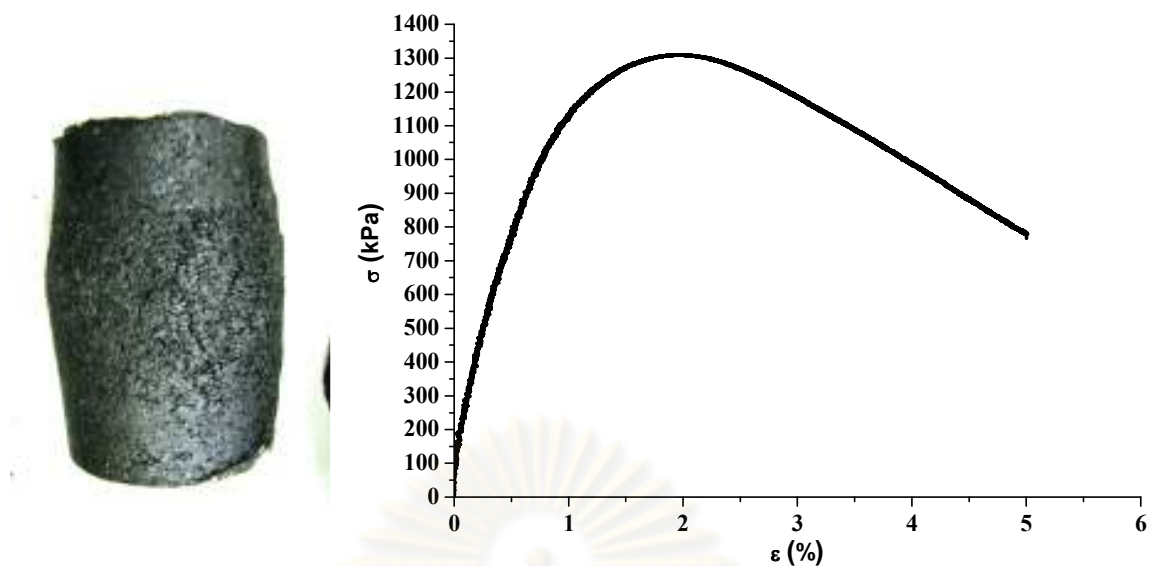


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที

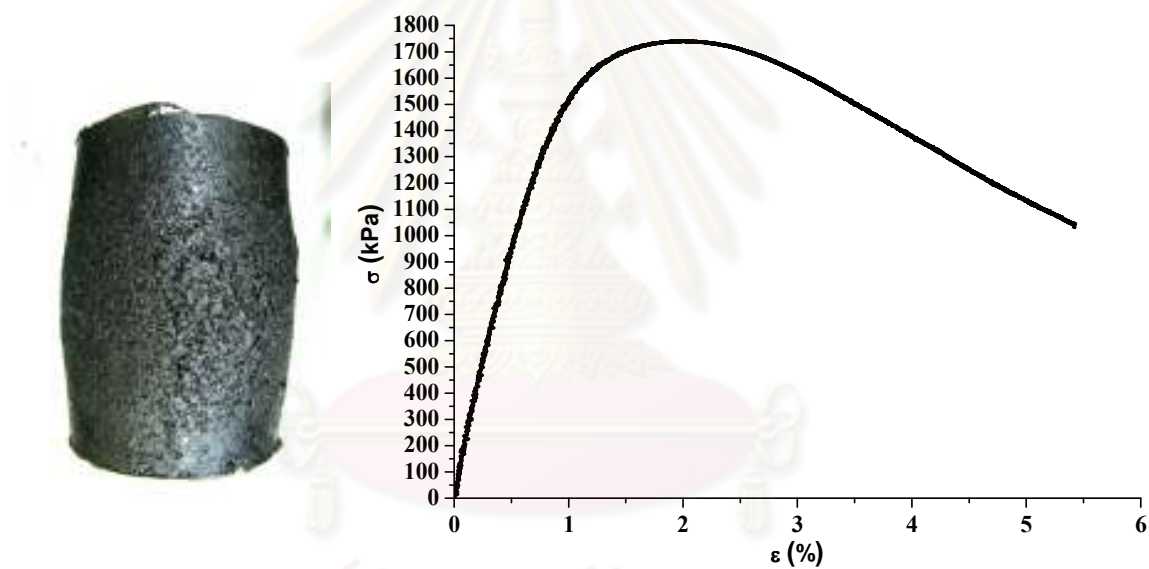


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

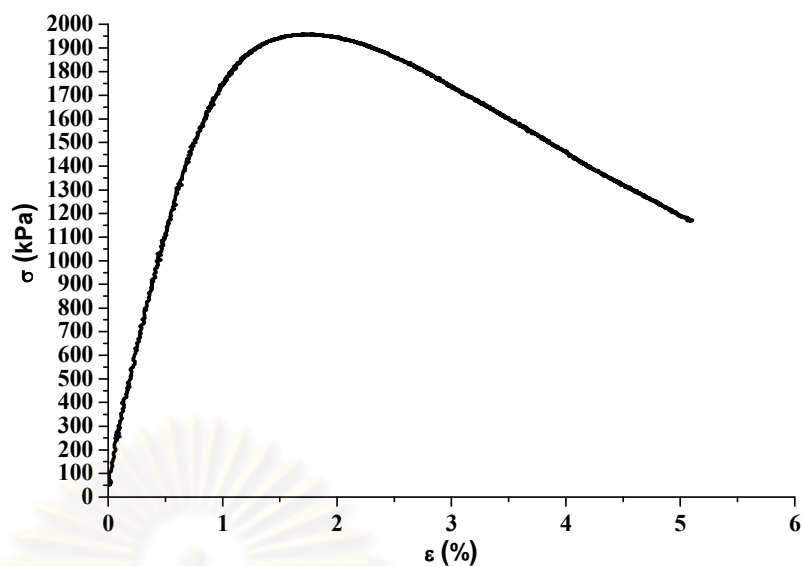


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

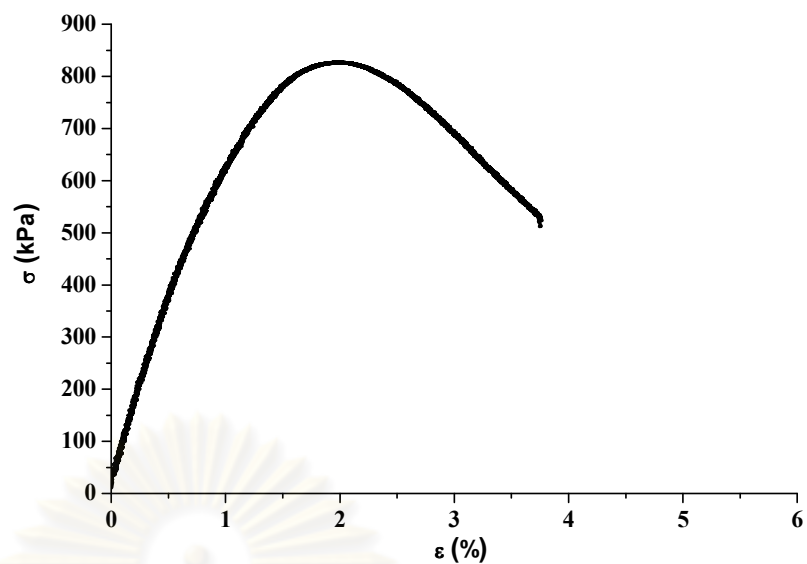


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที

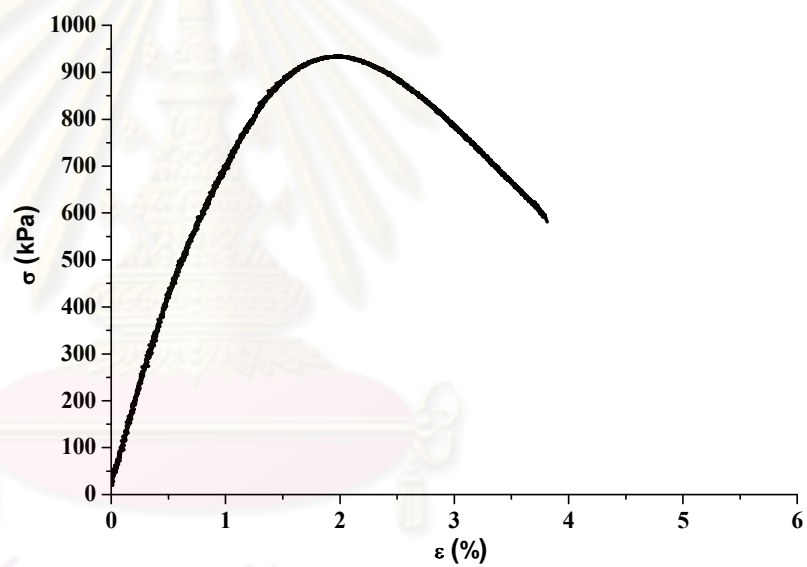


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

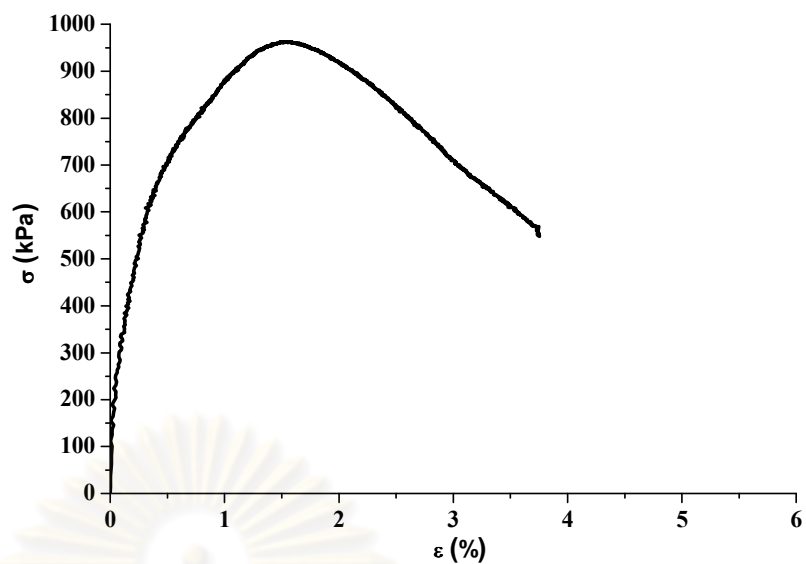


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที

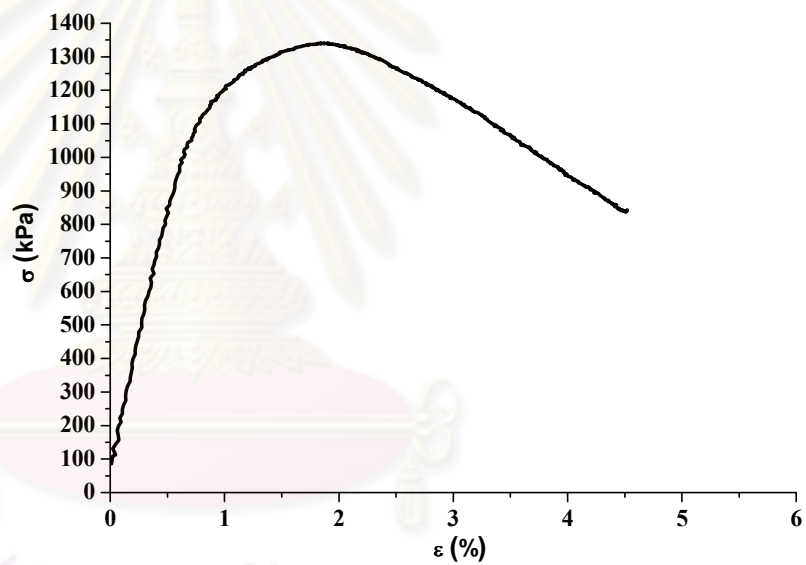


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

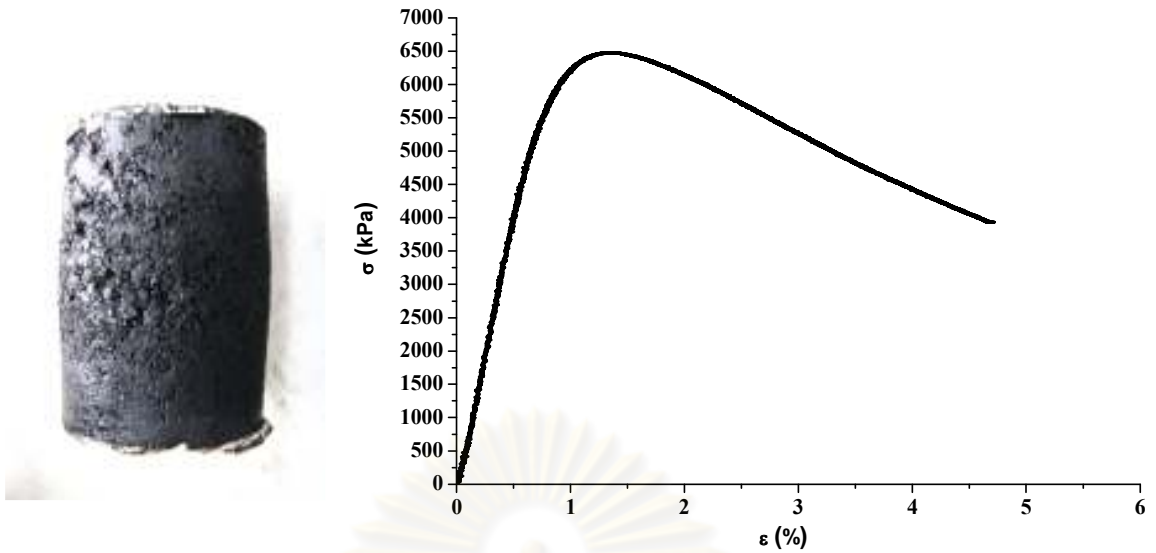


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที

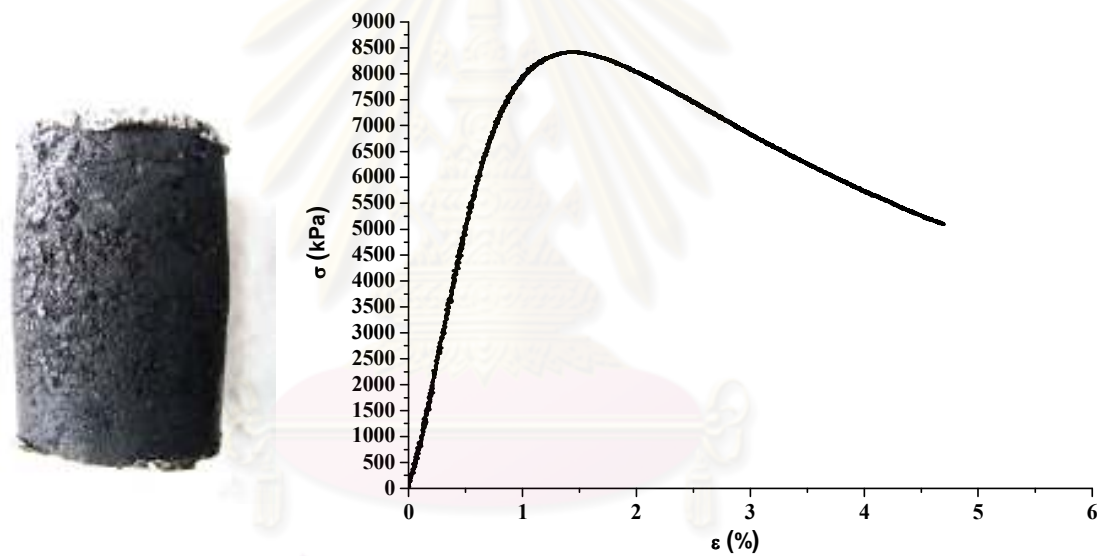


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

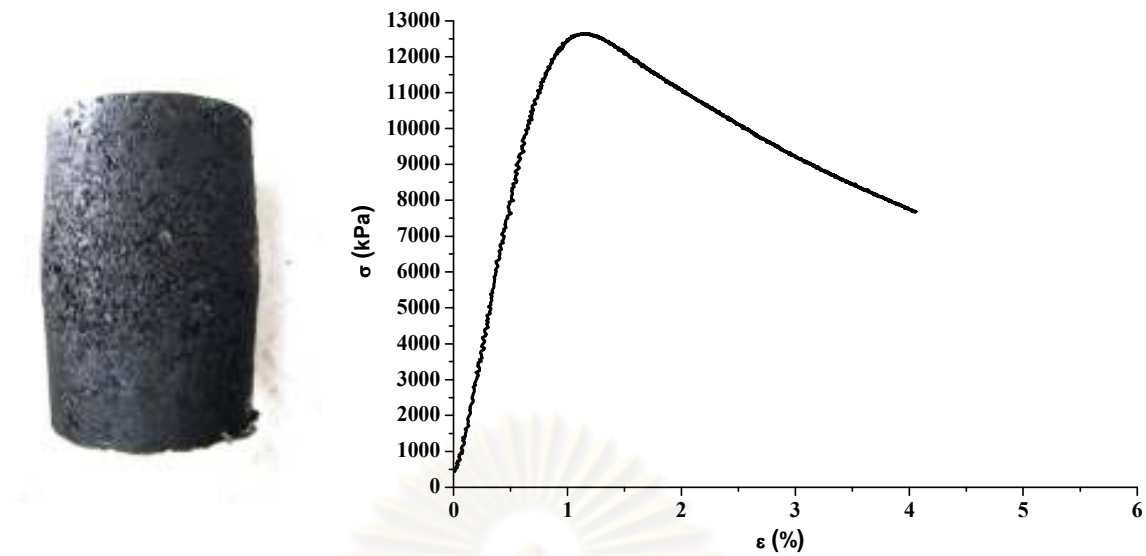


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที

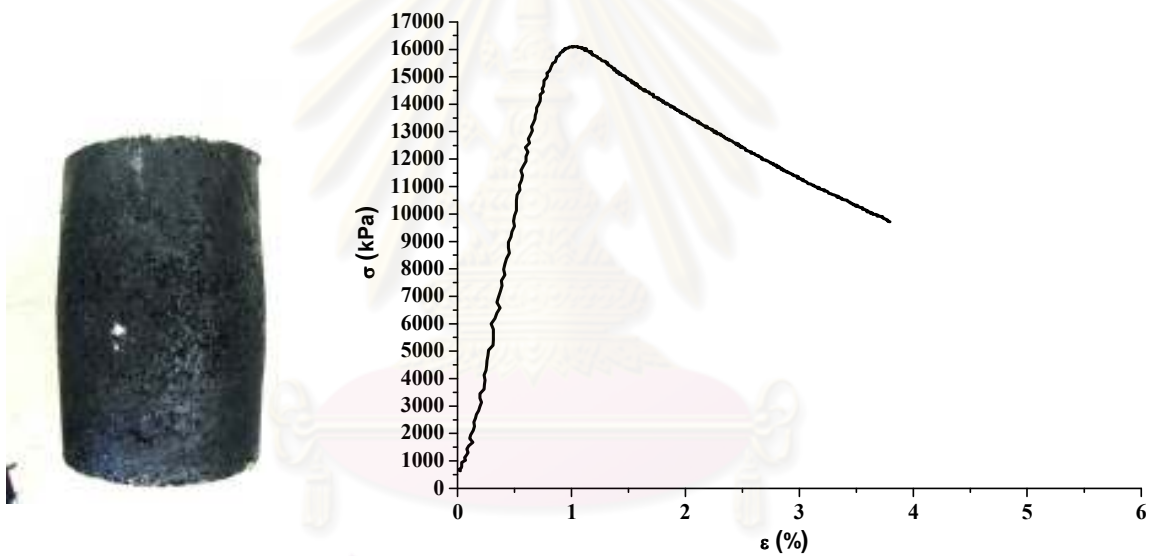


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

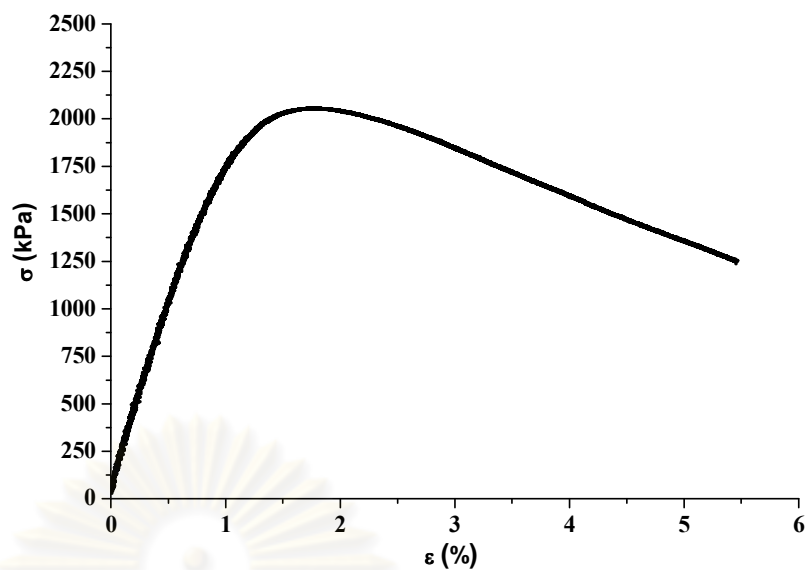


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที

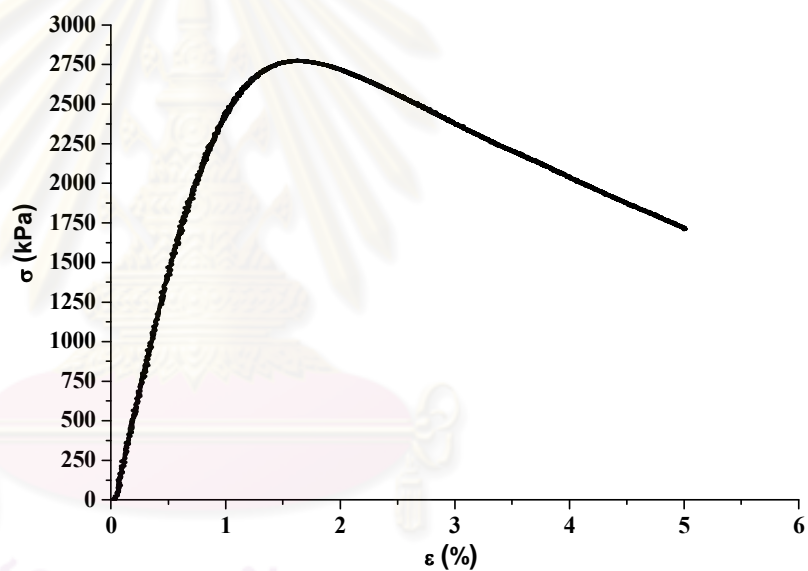


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 10°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

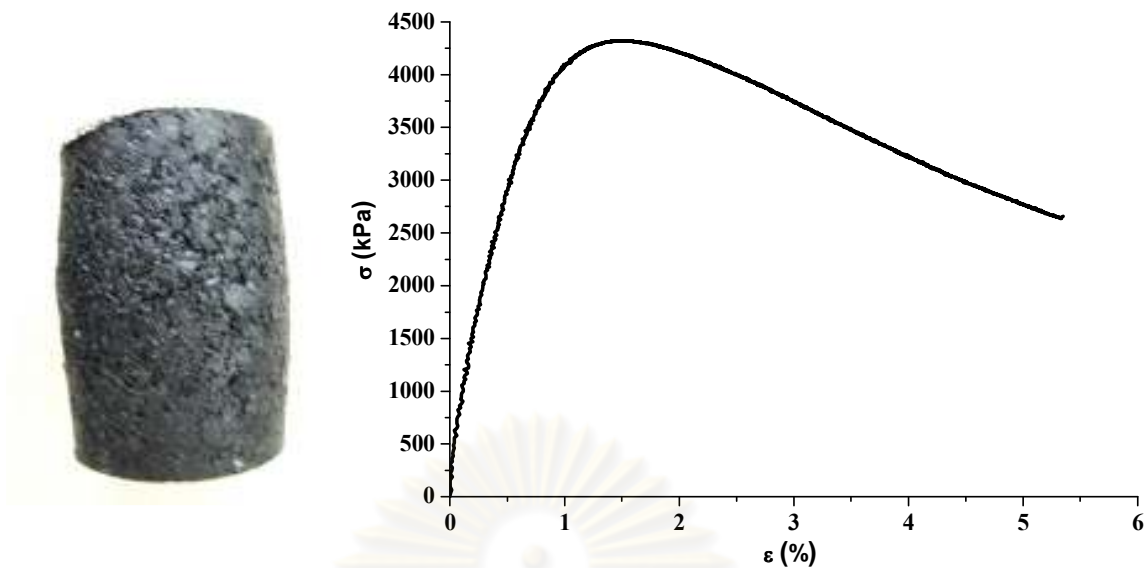
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



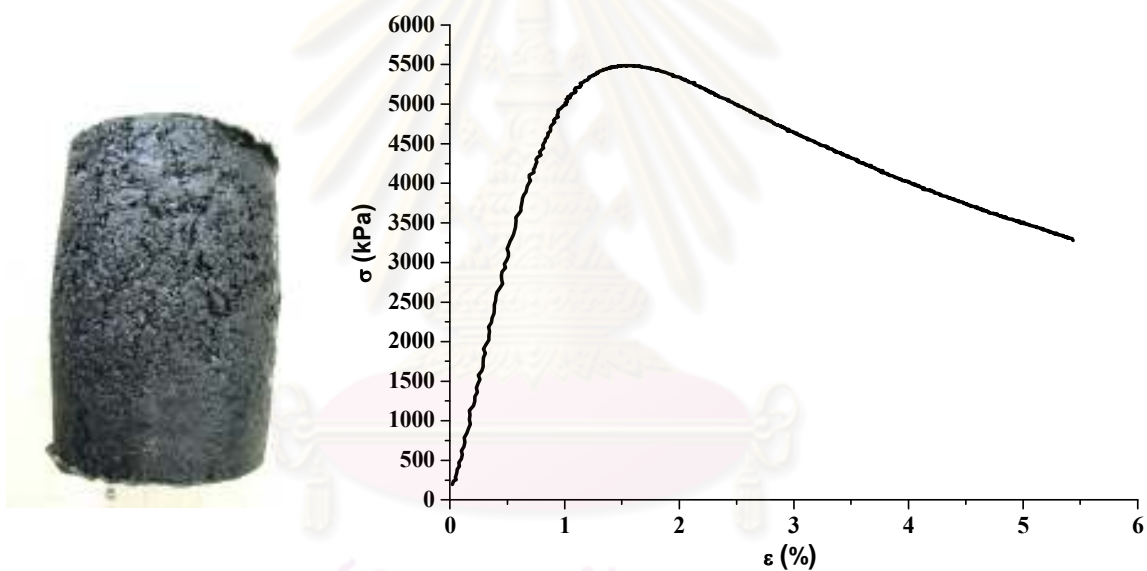
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที

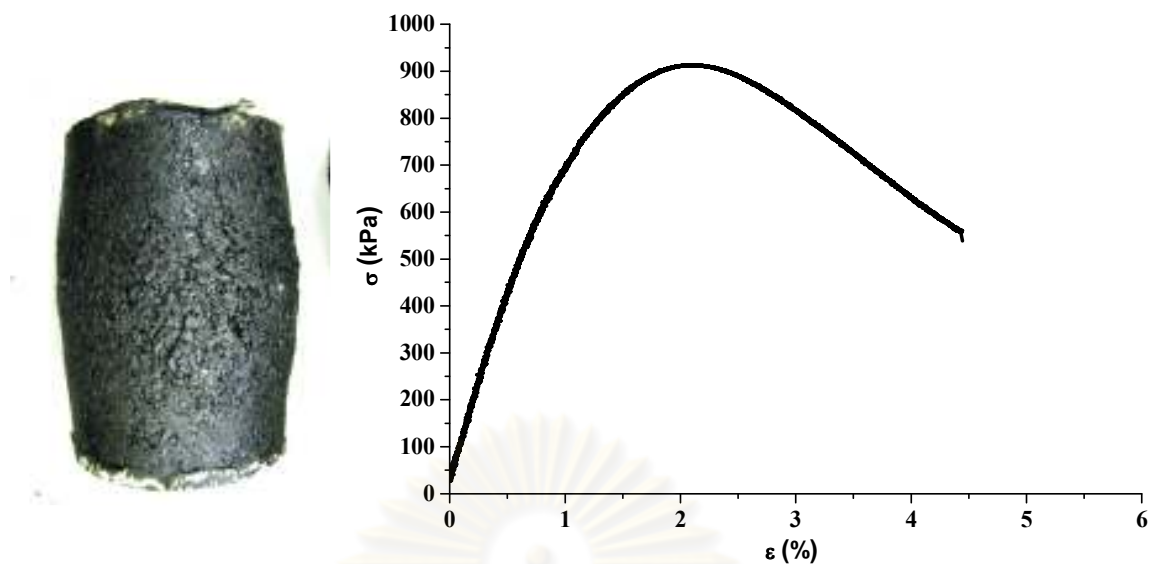


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที

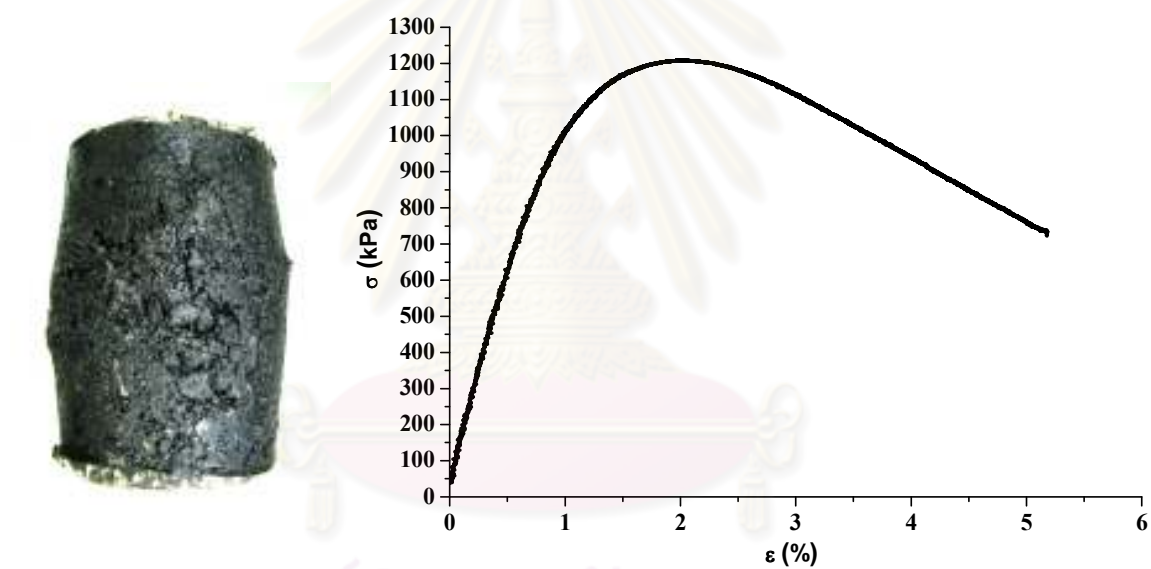


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 25°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

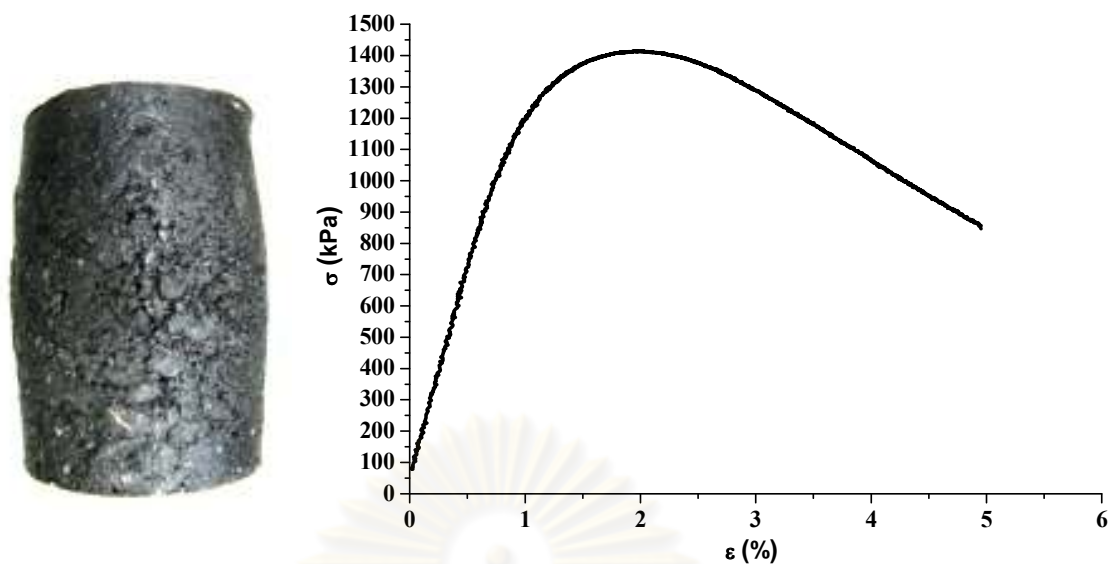


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที

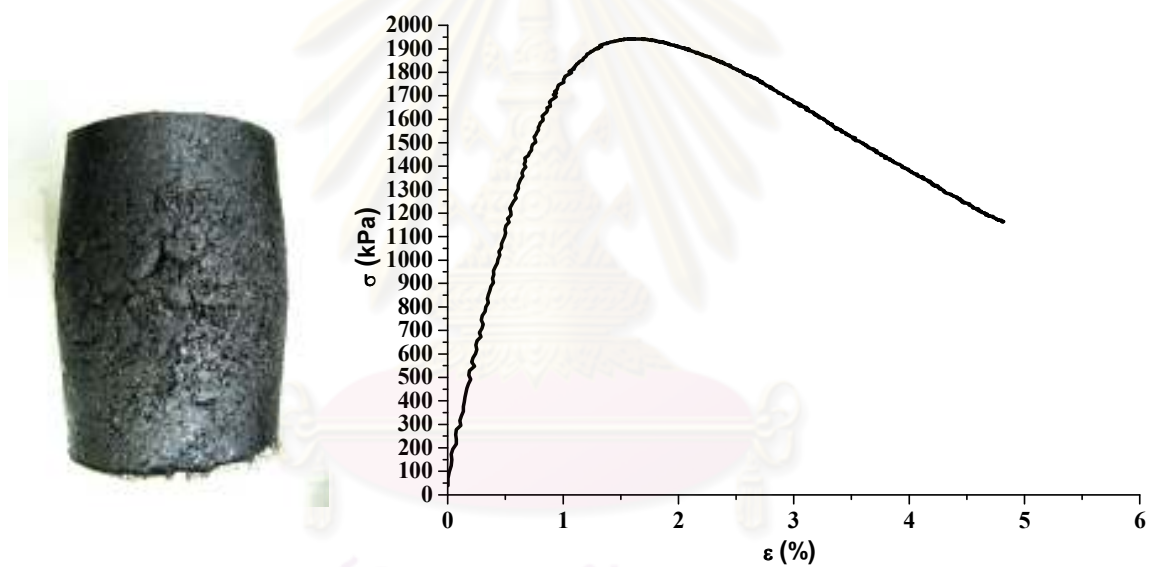


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

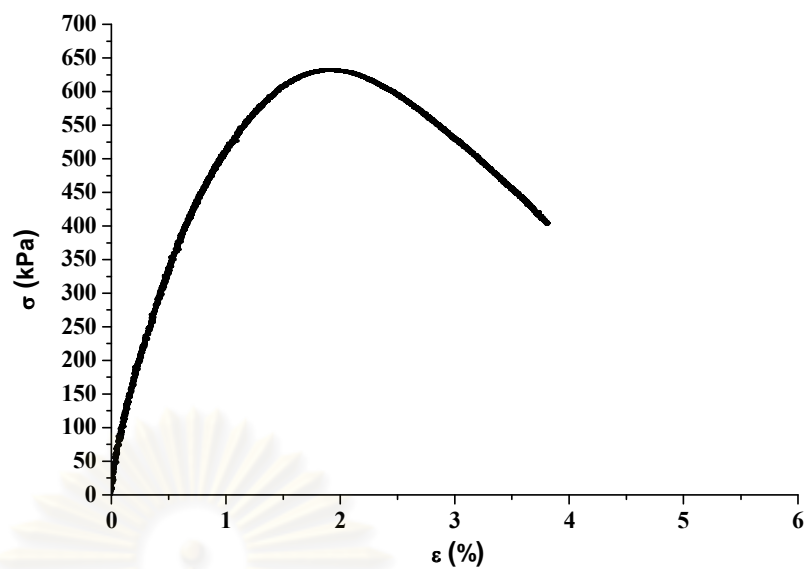


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที

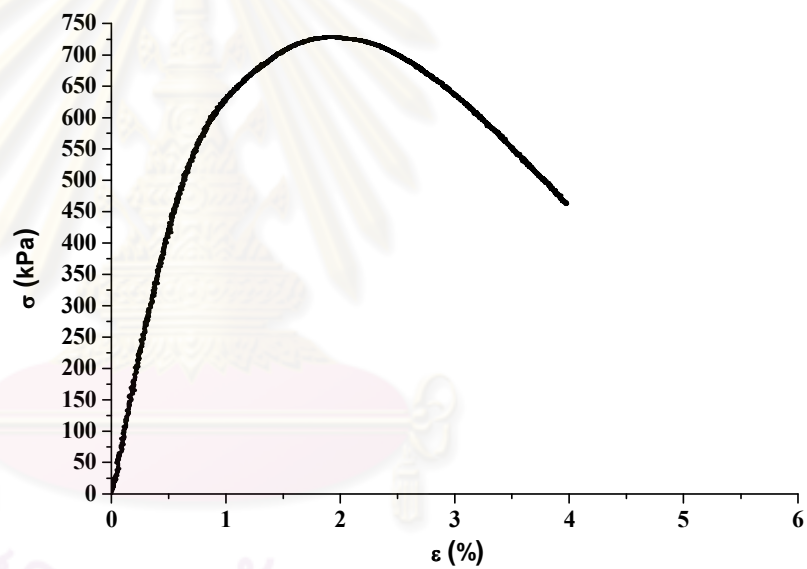


ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 40°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

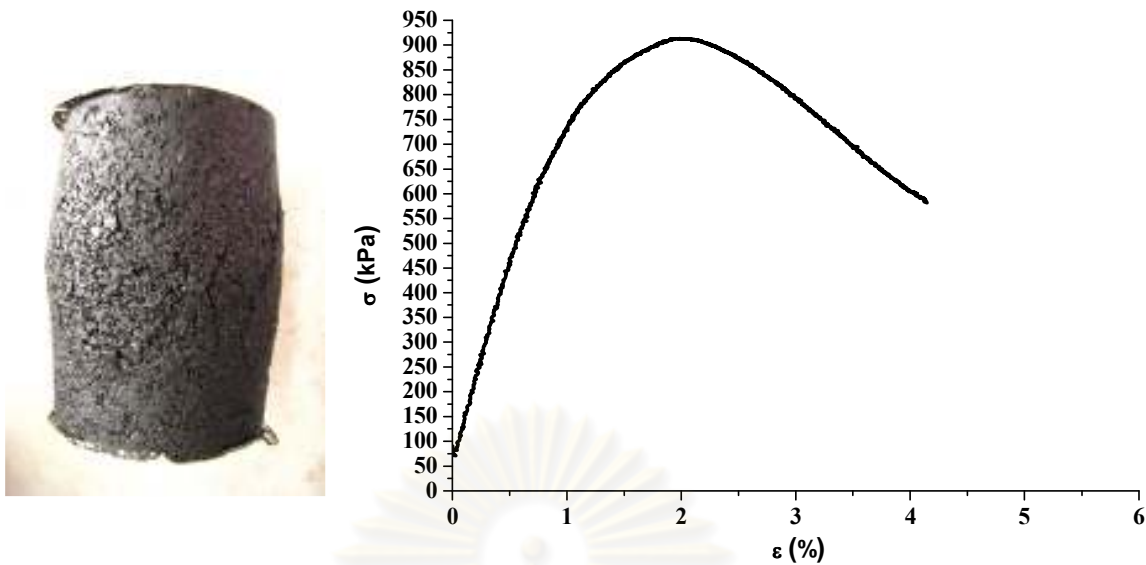
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



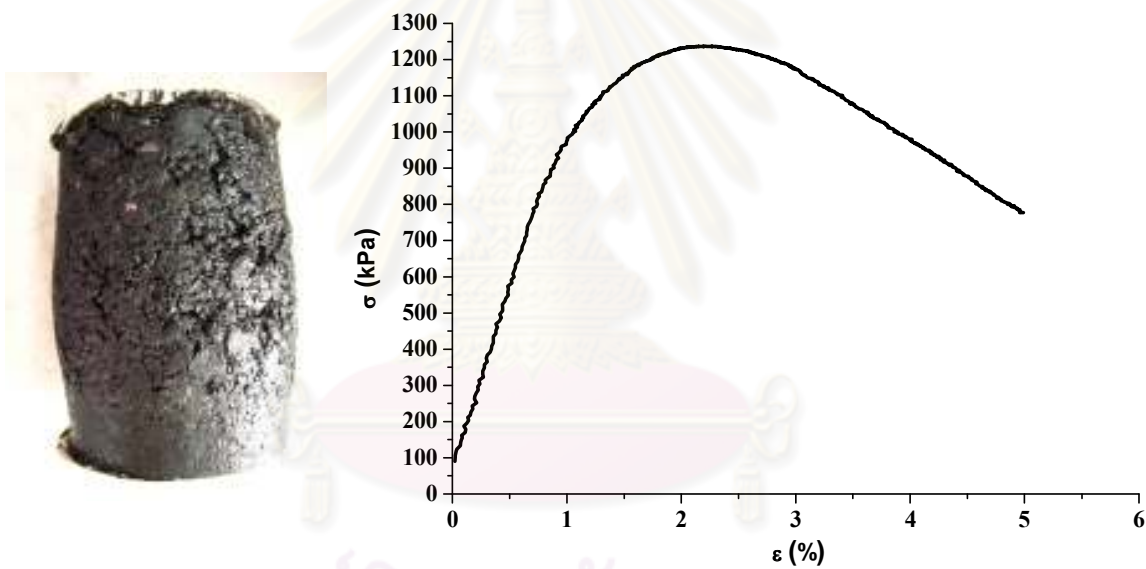
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0006 ต่อวินาที



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0017 ต่อวินาที



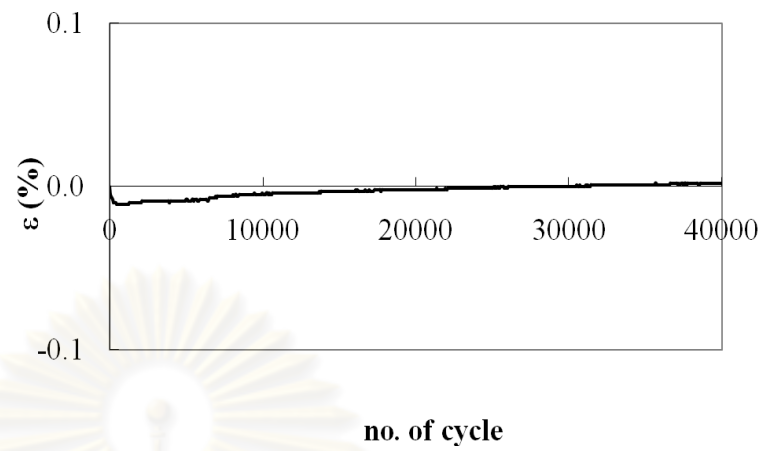
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0056 ต่อวินาที



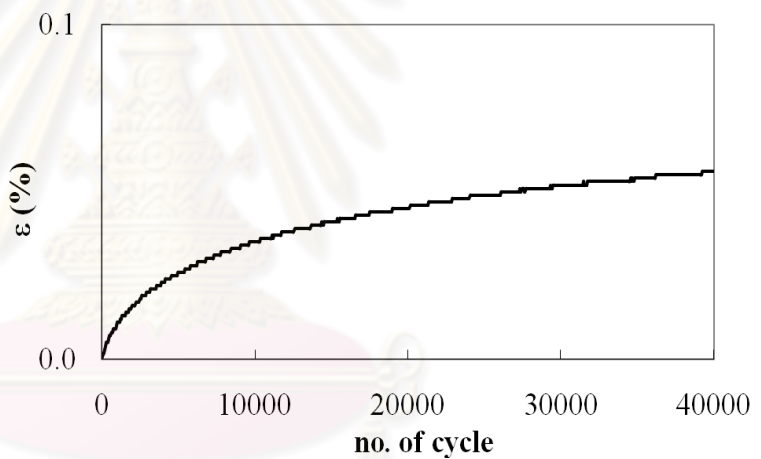
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 55°C อัตราความเครียด = 0.0167 ต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

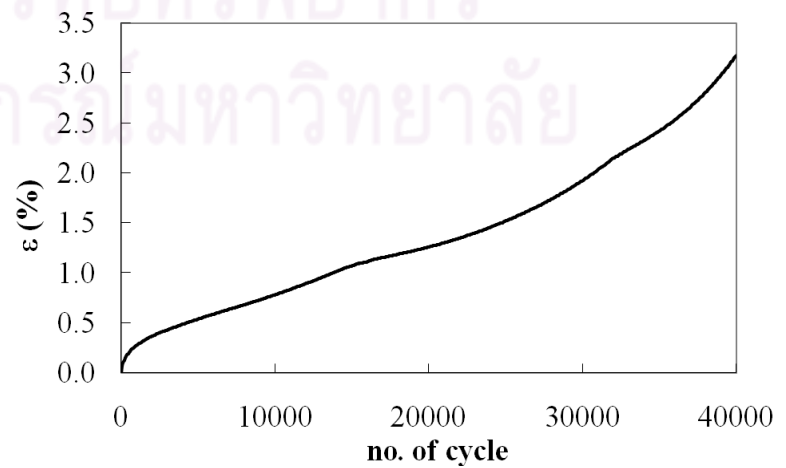
4. การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้างแบบพลวัต



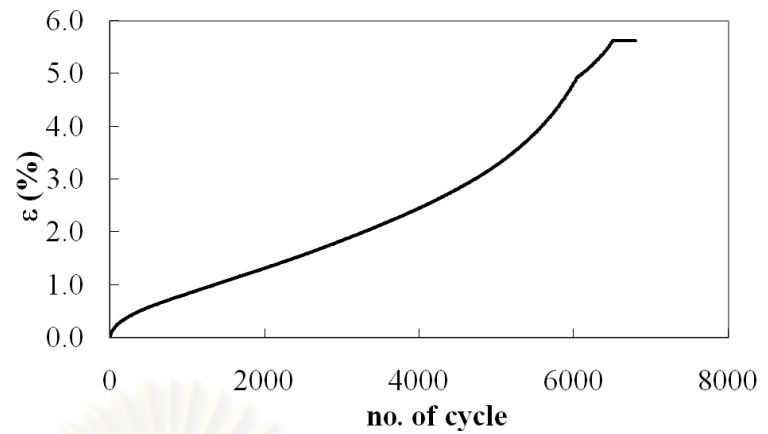
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 10°C



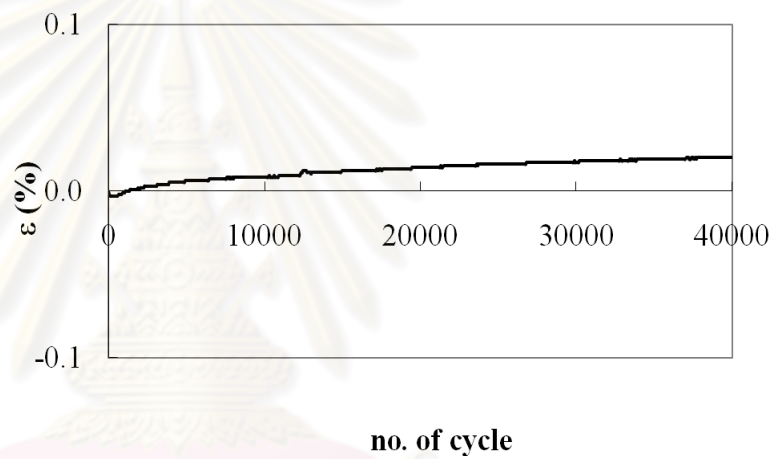
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 25°C



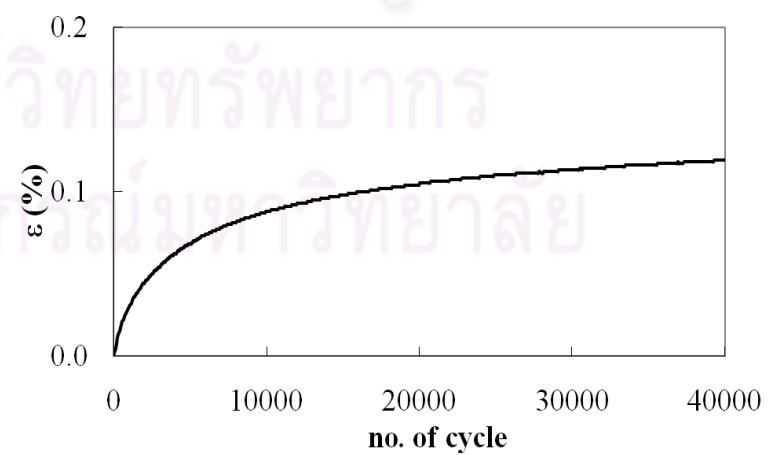
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 40°C



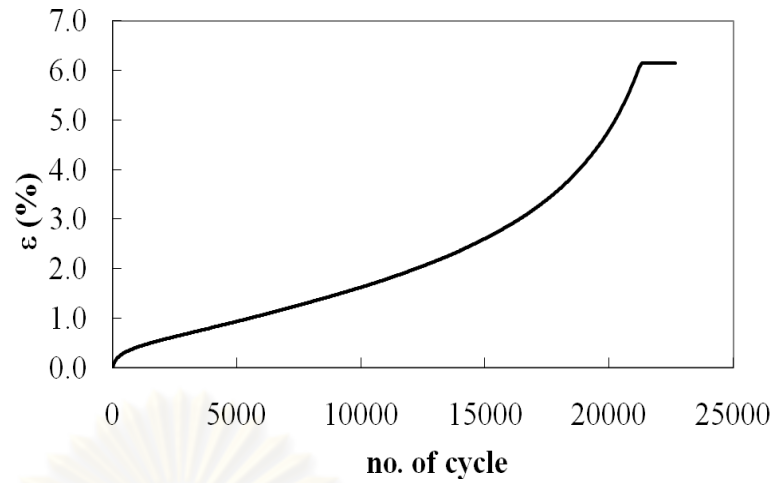
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC40/50 อุณหภูมิ 55°C



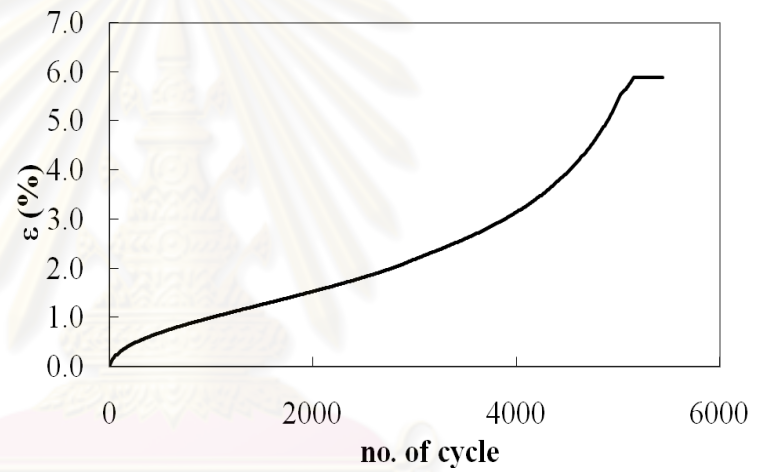
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 10°C



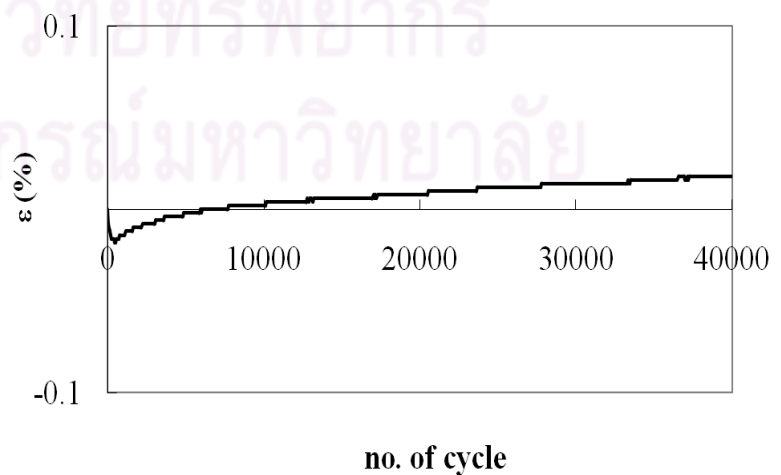
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 25°C



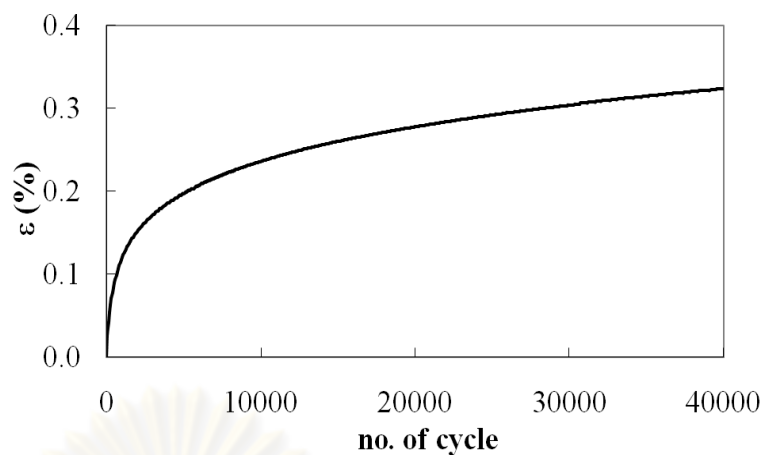
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 40°C



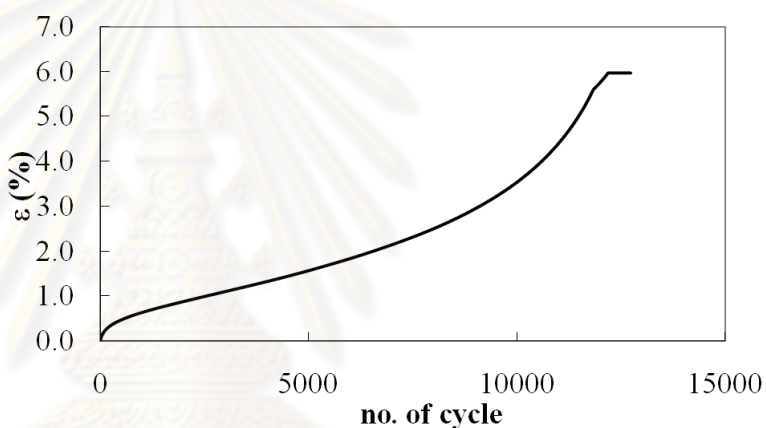
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC60/70 อุณหภูมิ 55°C



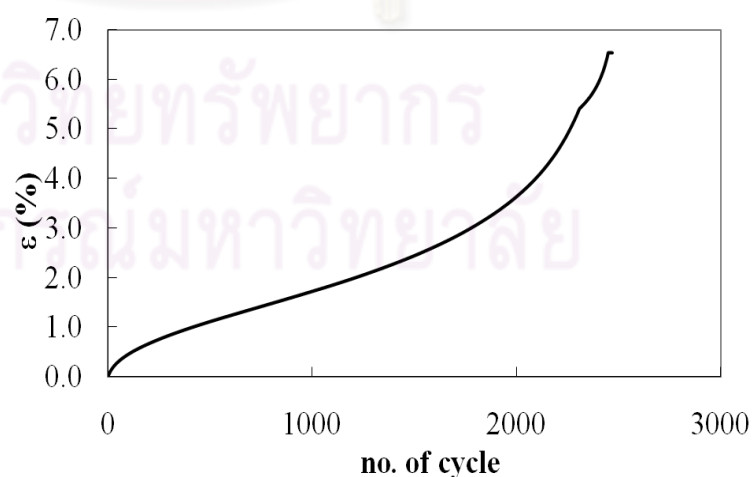
ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 10°C



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 25°C



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 40°C



ตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีต AC80/100 อุณหภูมิ 55°C

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวีรยุทธ โกมลวิลาศ เกิดวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2552



ศูนย์วิทยพักร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย