

แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซีดีด้วยพารามิเตอร์ความเสี่ยงสำหรับคอนกรีต



นายธนกร ชมภูรัตน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

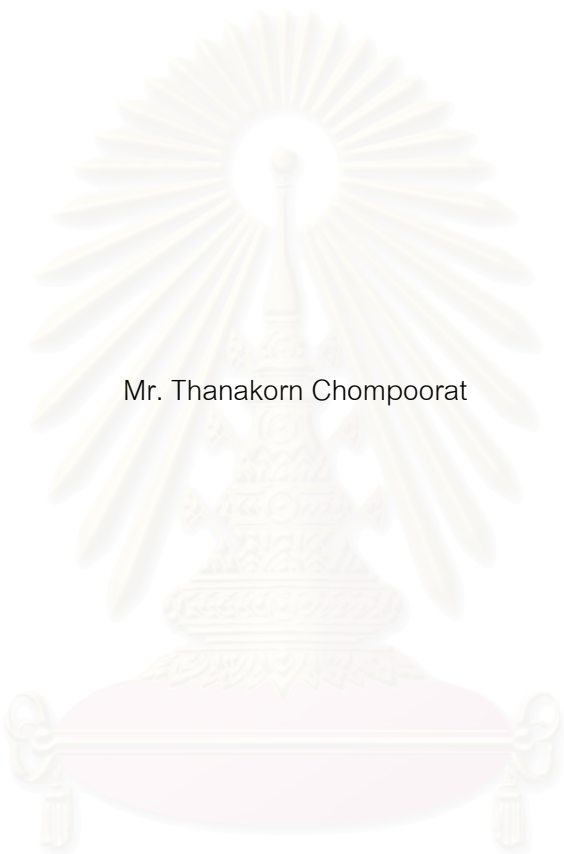
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4075-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYPERPLASTICITY MODEL WITH DAMAGE PARAMETER FOR CONCRETE



Mr. Thanakorn Chompoorat

สถาบันวิทยบริการ  
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 2005

ISBN 974-17-4075-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีด้วยพารามิเตอร์ความเสียหายสำหรับ  
คอนกรีต

โดย

นายธนกร ชมภูรัตน์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

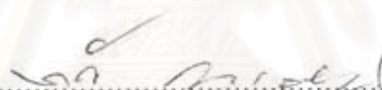
อาจารย์ที่ปรึกษา


อาจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

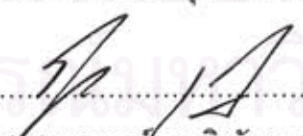
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวี ธนะเจริญกิจ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรวัดร์ บุญญะฐิติ)

ธนกร ชมภูรัตน์ : แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีด้วยพารามิเตอร์ความเสียหายสำหรับคอนกรีต.  
 (HYPERPLASTICITY MODEL WITH DAMAGE PARAMETER FOR CONCRETE) อ. ที่ปรึกษา  
 : อ.ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง จำนวนหน้า 61 หน้า. ISBN 974-17-4075-1

เมื่อกล่าวถึงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ของงานทางด้านวัสดุศาสตร์ โดยทั่วไปนั้นจะยึดเอาแนวทางของทฤษฎีของพลาสติกซิตีมาใช้พิจารณาในการสร้างแบบจำลองสมการของความเค้นและความเครียด (Constitutive model) จากแนวทางดังกล่าวงานวิจัยนี้จะได้นำเสนอแบบจำลองพลาสติกซิตีแนวทางใหม่มาประยุกต์ใช้ในงานด้านคอนกรีต โดยอาศัยทฤษฎีทางด้านไฮเปอร์พลาสติกซิตี (Hyperplasticity) ที่มาจากการนำหลักการทางอุณหพลศาสตร์มาพัฒนาแบบจำลองด้านพลาสติก ซึ่งแบบจำลองแนวทางใหม่นี้สามารถหาความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดได้จากฟังก์ชัน 2 ชนิด นั่นคือ ฟังก์ชันพลังงาน (Energy function) และฟังก์ชันคราก (Yield function) รวมถึงในแบบจำลองนี้ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีกลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่อง (Continuum damage mechanics) ที่แสดงอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ความเสียหาย (Damage parameter) และฟังก์ชันครากของความเสียหาย นอกจากนี้ยังได้นำเอาหลักการไคเนติกฮาร์ดเด้นนิ่ง (Kinematic hardening) เข้ามาใช้ ซึ่งในที่นี้จะใช้พารามิเตอร์ฮาร์ดเด้นนิ่งไม่เชิงเส้น (Non-linear hardening parameter) ทั้งหมดนี้จากที่ได้ใช้หลักการต่าง ๆ ข้างต้นมาพิจารณาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Universal testing machines (UTM) ภายใต้การรับแรงอัดและการรับแรงวัฏจักรแบบ 1 มิติ โดยที่ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบดังกล่าวในงานวิจัยฉบับนี้ จะได้ชี้ให้เห็นว่าสามารถนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีนี้ไปใช้ทำนายพฤติกรรมของกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงวัฏจักรโดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา.....2548.....

*(Handwritten signature and name)*  
 สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง

# # 467 03200 21: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: Constitutive Law / Hyperplasticity / Kinematic hardening / Damage mechanics

THANAKORN CHOMPOORAT : HYPERPLASTICITY MODEL WITH DAMAGE  
PARAMETER FOR CONCRETE. THESIS ADVISOR : SUCHED LIKITLERSUANG, 61 pp.  
ISBN 974-17-4075-1

To model the stress-strain behavior of engineering materials, the plasticity theory is usually employed to define the constitutive law. This research introduces a new plasticity theory for applying to concrete material. This model focuses on the use of hyperplasticity based on the laws of thermodynamic. The constitutive equations can be derived from two scalar potentials functions: an energy function and a yield function. In addition, the continuum damage mechanics which is defined in terms of damage parameter and yield function is applied to this model. Furthermore, the kinematic hardening mechanism is included. A non-linear hardening parameter is selected. The entire principles as mentioned above are used to express the stress-strain relation. As a result, comparisons the model with the result tested by Universal testing machine (UTM) under the compressive strength and the cyclic strength of one dimension are considered. Finally, the model can be used to predict the compressive strength and the cyclic strength behavior. This can also be applied to numerical analysis in the future.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Civil Engineering.....Student's signature.....*T. Chompoerat.*  
Field of study.....Civil Engineering.....Advisor's signature.....*Suched L.*  
Academic year...2005.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ อ. ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้โดยสมบูรณ์ โดยให้คำปรึกษาและแนะนำข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยอย่างยิ่ง อีกทั้งขอขอบพระคุณ อาจารย์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ น.ส. โรจน์ย์ มั่นวงศ์โรจน์ และพี่ขวัญ สุขคง รวมถึง พี่ ๆ เพื่อน ๆ ที่ช่วยสนับสนุนการเรียนและงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ครู และอาจารย์ ที่ได้อบรมและสั่งสอนให้ผู้เขียนสำเร็จการศึกษาจนถึงปัจจุบันนี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.1.1 กระบวนการแตกראว.....	4
2.1.2 คอนกรีต.....	4
2.1.3 ผลกระทบจากปฏิกิริยาคอนกรีตโดยวิธีของ ACI.....	6
2.1.4 ผลกระทบขนาดโตสุดของหิน.....	6
2.1.5 ผลกระทบความชื้นและการดูดซึ่ม.....	6
2.1.6 ผลกระทบอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์.....	7
2.1.7 ผลกระทบความถี่ง้ำ.....	8
2.1.8 ผลกระทบหน่วยน้ำหนักและช่องว่าง.....	8
2.1.9 ผลกระทบโมดูลัสความละเอียด.....	8
2.1.10 ผลกระทบการบ่มคอนกรีต.....	9

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

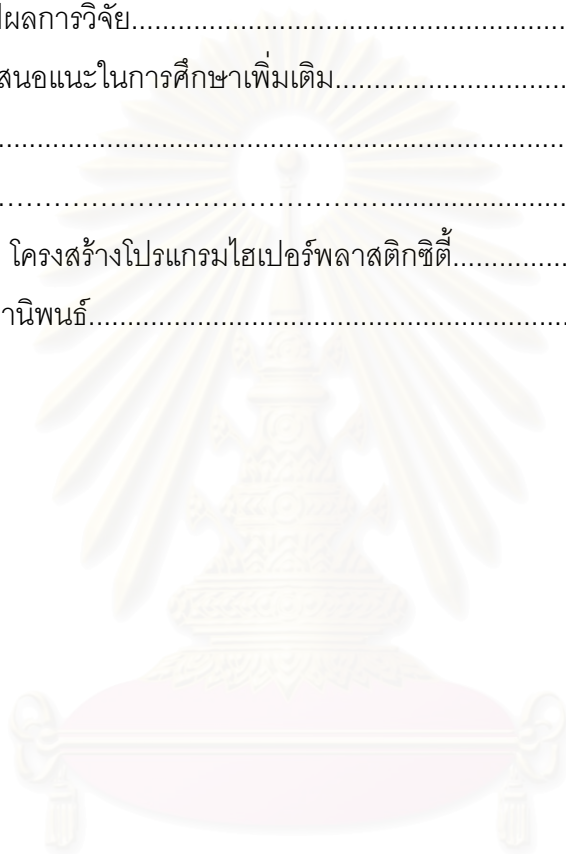
2.1.11 ผลกระทบขนาดและรูปร่างของชิ้นตัวอย่าง.....	10
2.1.12 คุณสมบัติยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	10
2.1.13 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	11
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.2.1 พฤติกรรมแนวแกน.....	13
2.2.2 ไฮเปอร์พลาสติคซี้ตี้.....	15
2.2.3 กลศาสตร์ความเสียหาย.....	17
2.2.4 แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติคซี้ตี้ต่อเนื่องด้วยพารามิเตอร์ความเสียหาย 1 มิติ.....	20
2.2.5 การดำเนินการเชิงตัวเลข.....	22
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	24
3.1.1 ชั้นเตรียมตัวอย่าง.....	24
3.1.2 ชั้นทดสอบกำลัง.....	25
3.2 วิธีทดสอบ.....	26
3.2.1 ขั้นตอนการทดสอบ.....	28
3.2.2 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม.....	28
3.2.3 ขั้นตอนการคำนวณพารามิเตอร์แบบจำลอง.....	29
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	
4.1 ผลการวิเคราะห์.....	31
4.1.1 การหาคุณสมบัติของคอนกรีตทางด้านกายภาพ คุณสมบัติทางด้าน วิศวกรรมเบื้องต้น และการออกแบบปฏิภาคส่วนผสม.....	31
4.1.2 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติคซี้ตี้.....	32
4.1.3 การศึกษาพฤติกรรมความเค้นและความเครียดภายใต้กำลังรับแรงอัด.....	33
4.1.4 การศึกษาพฤติกรรมความเค้นและความเครียดภายใต้กำลังรับแรงรั้งจักร.....	36



สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม.....	50
รายการอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก.....	53
ภาคผนวก ก. โครงสร้างโปรแกรมไฮเปอร์พลาสติคซีดี.....	54
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	61



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ผลของอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทดสอบที่มีต่อกำลังอัด..	10
ตารางที่ 2.2	สูตรพื้นฐานของทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติกซิตี.....	16
ตารางที่ 2.3	ตัวอย่างการเปรียบเทียบสูตรระหว่างผิวครากเชิงซ้อนกับไฮเปอร์พลาสติกซิตี ต่อเนื่อง.....	16
ตารางที่ 2.4	พารามิเตอร์แบบจำลอง ( $E, k_0, k_1, a, b, R, \alpha_\infty$ ) .....	21
ตารางที่ 3.1	โปรแกรมการทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงวัฏจักร.....	26
ตารางที่ 4.1	คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเบื้องต้น.....	31
ตารางที่ 4.2	ตารางสรุปค่าการณัปฏิบัติภาคส่วนผสม.....	32
ตารางที่ 4.3	ตารางสรุปผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี.....	32
ตารางที่ 4.4	ข้อมูลพื้นฐานของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีภายใต้กำลังรับแรงอัด.....	34
ตารางที่ 4.5	ข้อมูลพื้นฐานของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีภายใต้กำลังรับแรงวัฏจักร.....	38

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานยืดหยุ่นเกี่ยวกับระยะทางการแยกตัว.....	5
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว	
ภาพที่ 2.2 กราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดของอะตอม.....	5
ภาพที่ 2.3 ผลกระทบต่อขนาดโตสุดของหินกับค่ากำลังอัดที่ 28 วัน.....	7
ภาพที่ 2.4 สภาพความชื้นของมวลรวม.....	7
ภาพที่ 2.5 ผลกระทบอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์.....	8
ภาพที่ 2.6 ผลกระทบของการบ่มที่มีต่อกำลังอัดคอนกรีต.....	9
ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับคอนกรีต ณ ความเครียดคงที่.....	11
ภาพที่ 2.8 รูปแบบแผนผังความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับคอนกรีต.....	12
ภาพที่ 2.9 พฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้กำลังรับแรงอัด.....	13
ภาพที่ 2.10 พฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้กำลังรับแรงดึง.....	14
ภาพที่ 2.11 แบบจำลองพื้นฐานของโคไนเมติกฮาร์ดเด็นนิ่ง 1 มิติ.....	17
ภาพที่ 2.12 ความหมายของชิ้นส่วนเชิงปริมาตร (Representative volume element (RVE))	18
ภาพที่ 2.13 พฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของแบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....	20
ภาพที่ 3.1 เครื่อง Universal testing machine (UTM).....	27
ภาพที่ 3.2 สมการเชิงตัวเลขของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี.....	30
ภาพที่ 3.3 แผนผัง Flow chat แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี.....	30
ภาพที่ 4.1 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 ภายหลังจากทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	34
ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงอัดกลุ่ม 1.....	35
ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงอัดกลุ่ม 2.....	35
ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงอัดกลุ่ม 3.....	36
ภาพที่ 4.5 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 กลุ่มที่ 1 ภายหลังจากทดสอบกำลังรับแรงวัฏจักร.....	38
ภาพที่ 4.6 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 กลุ่มที่ 2 ภายหลังจากทดสอบกำลังรับแรงวัฏจักร.....	39
ภาพที่ 4.7 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 กลุ่มที่ 3 ภายหลังจากทดสอบกำลังรับแรงวัฏจักร.....	39

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 1 กลุ่ม 1.....	40
ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 2 กลุ่ม 1.....	41
ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 3 กลุ่ม 1.....	42
ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 1 กลุ่ม 2.....	43
ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 2 กลุ่ม 2.....	44
ภาพที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 3 กลุ่ม 2.....	45
ภาพที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 1 กลุ่ม 3.....	46
ภาพที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 2 กลุ่ม 3.....	47
ภาพที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 3 กลุ่ม 3.....	48

## สัญลักษณ์

$a, b$	พารามิเตอร์ฮาร์ดเด้นิ่งไม่เชิงเส้น (Non-linear hardening parameter)
$d$	ฟังก์ชันการสูญเสียพลังงาน (Dissipative function)
$E$	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (Initial Young's modulus)
$E_c$	Secant Young's Modulus
$f$	พลังงานอิสระ Helmholtz (Helmholtz free energy)
$f'_c$	กำลังรับแรงอัดประลัย (Compressive strength)
$f'_t$	กำลังรับแรงดึงประลัย (Tensile strength)
$f'_\infty$	กำลังรับแรงคงค้าง (Residual strength)
$g$	พลังงานอิสระ Gibbs (Gibbs free energy)
$\hat{H}$	ฟังก์ชันฮาร์ดเด้นิ่ง (Hardening function)
$i^{th}$	ผิวครากลำดับที่ $i$ ( $i^{th}$ yield surface)
$k_0$	ขอบเขตการแปรผันตรง (Proportional limit)
$k_1$	กำลังรับแรงประลัย หรือความเค้นมากที่สุด (Final yield stress)
$N$	จำนวนผิวครากทั้งหมด (Number of final yield surface)
$R$	พารามิเตอร์ความเสียหายลำดับที่ 1 ( $1^{st}$ damage parameter)
$S, S_d$	พื้นที่หน้าตัดรวมของวัสดุ และพื้นที่หน้าตัดรวมของรอยร้าว
$y$	ฟังก์ชันคราก (Yield function)
$y_d$	ฟังก์ชันครากของความเสียหาย (Yield function of damage)
$\sigma$	ความเค้น (Stress)
$\chi$	ความเค้นสูญเสียทั่วไป (Dissipative generalised stress)
$\bar{\chi}$	ความเค้นทั่วไป (Generalised stress)
$\varepsilon$	ความเครียด (Strain)
$\alpha$	พารามิเตอร์พลาสติก (Plastic parameter)
$\alpha_d$	พารามิเตอร์ความเสียหายของวัสดุ (Damage parameter)
$\alpha_\infty$	พารามิเตอร์ความเสียหายลำดับที่ 2 ( $2^{nd}$ damage parameter) หรือขีดจำกัดของพารามิเตอร์ความเสียหาย
$\eta$	พิกัดภายใน (Internal coordinate)

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการทดสอบคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในประเทศไทยเพื่อใช้ในการก่อสร้างขนาดเล็ก หรือขนาดใหญ่ ทั่วไปจะเป็นการทดสอบในรูปแบบของกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีต และเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตได้เป็นอย่างดี เพราะค่ากำลังต้านทานหรือรับแรงแบบอื่น ๆ เช่น กำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) กำลังต้านทานแรงดัด (Flexural Strength) ฯลฯ สามารถประมาณได้จากกำลังรับแรงอัด นั่นคือ ถ้าคอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงอัดได้สูง กำลังต้านทานแรงอย่างอื่นจะสูงไปด้วย ดังนั้น ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปจะพิจารณาคอนกรีตให้รับเฉพาะแรงอัดประลัยในแนวแกนเพียงอย่างเดียว

การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมนั้น สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์หรือออกแบบขั้นต้น โดยใช้ข้อมูลมาตรฐานต่าง ๆ เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหา วิธีการออกแบบขั้นต้นนี้ช่วยให้วิศวกรสามารถออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ได้อย่างคร่าว ๆ เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นประกอบกับความซับซ้อนของงานวิศวกรรมที่เพิ่มมากขึ้น ได้มีการอาศัยการคำนวณออกแบบขั้นสูง ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งที่ใช้ในระเบียบวิธีการคำนวณต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้น คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุ (Material model) ที่กำลังพิจารณาภายใต้แรงกระทำของปัจจัยภายนอกต่าง ๆ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการใช้แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี (Hyperplasticity model) อาศัยหลักการทางอุณหพลศาสตร์นำไปใช้อธิบายพฤติกรรมของวัสดุประเภทที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงวัฏจักร (Cyclic Strength) จะทำการทดสอบกำลังรับแรงดังกล่าวจากการให้แรง จนแท่งคอนกรีตเกิดการชำรุดแตกหัก และกำลังรับแรงวัฏจักรโดยการเพิ่มแรง (Loaded) ในแนวแกนให้กับวัสดุจนวัสดุมีค่าหน่วยแรงร้อยละ 25, 50 และ 75 ของกำลังรับแรงอัดประลัย แล้วจึงถ่ายแรง (Unloaded) ออกจากวัสดุ หลังจากนั้นจึงให้

แรงกับวัสดุอีกครั้ง (Reloaded) จนเกิดการเสียหาย โดยใช้แท่งคอนกรีตทรงกระบอก เพื่อวิเคราะห์ การเพิ่มขึ้น หรือลดลงของกำลังรับแรง ดึงล่อว ของคอนกรีตได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งทำให้สามารถ เข้าถึงพฤติกรรมของคอนกรีตอย่างแท้จริง การทดสอบนี้อาศัย เครื่องมือ Universal Testing Machines ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1 เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติในกระบวนการแตกร้าวของคอนกรีตระหว่างการให้วัฏจักรแรงดัน, การถอนแรงดัน และการให้แรงดันกลับ
- 2 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางด้านวัสดุให้สามารถใช้ประโยชน์ได้กับกระบวนการแตกร้าวในงานคอนกรีต

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1 ศึกษาผลกระทบจากความต้านทานแรงอัด และความต้านทานแรงวัฏจักรของคอนกรีตทรงกระบอกขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ณ ภูมิภาค ส่วนผสมของคอนกรีต
- 2 ประมวลผลแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นบนโปรแกรม MATLAB
- 3 ทำนายผลการทดสอบด้วยแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
- 4 สรุปสมการของแบบจำลองและพารามิเตอร์ของสมการเพื่อประโยชน์ในงานด้านวัสดุคอนกรีต

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1 เพื่อแสดงว่าแบบจำลองของกระบวนการแตกร้าวนั้นสามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานด้านวิศวกรรมปฐพีได้ เช่น หินเปราะ (Soft rock)

2 สามารถนำผลการทดสอบการรับแรงอัด และกำลังรับแรงวัฏจักร ของคอนกรีตมาเปรียบเทียบพฤติกรรมด้วยการประยุกต์ใช้แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี

3 สามารถนำไปโปรแกรมของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีมาเป็นทางเลือกในการประยุกต์ใช้กับไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element)

4 ก่อให้เกิดความสนใจระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข และเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมทางด้านการประยุกต์ใช้ แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี กับวัสดุอื่น ๆ ในประเทศไทยมากขึ้น อีกทั้งเป็นแนวทางการศึกษา และประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

#### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1 ศึกษา และทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุผสมคอนกรีตทางด้านกายภาพ และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเบื้องต้น

2 ศึกษาการทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงวัฏจักร ด้วยเครื่องมือ Universal Testing Machines ของคอนกรีตทรงกระบอกขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ณ ปฏิภาศส่วนผสมของคอนกรีตแต่ละค่ากำลัง

3 พัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีเพื่อนำมาใช้กับวัสดุคอนกรีต

4 ประมวลผลแบบจำลองโดยการประยุกต์ใช้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5 เปรียบเทียบและสรุปผลที่ได้จากแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีกับผลที่ได้จากการทดสอบ



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

##### 2.1.1 กระบวนการแตกร้าว (Fracture Mechanics)

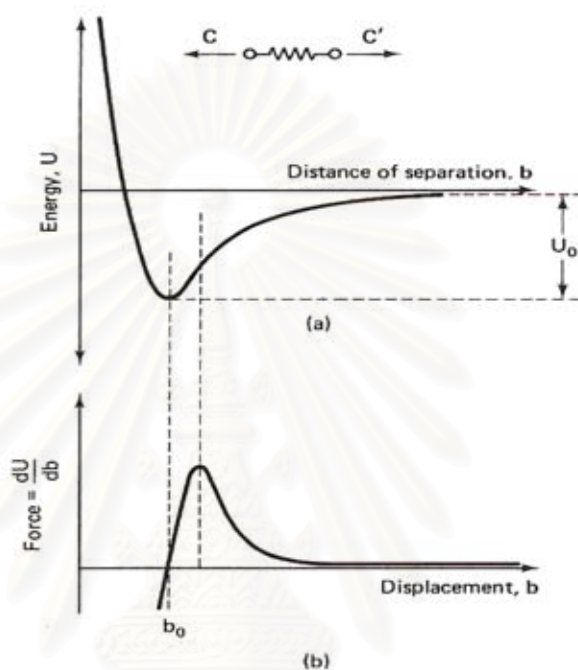
กระบวนการแตกร้าวสามารถอธิบายในรูปของความเค้น และการเคลื่อนตัวในบริเวณรอยแตกที่ปลายของวัสดุ ในรูปของคุณสมบัติอิลาสติก, คุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) และคุณสมบัติทางกายภาพเหมือนกัน (Isotropic) โดยแนวทางของกระบวนการแตกร้าวสามารถประยุกต์ใช้กับ วัสดุเปราะ เช่น คอนกรีต เป็นต้น ซึ่งยึดตามทฤษฎี แรงดึงดูความเค้น (Theoretical cohesive stress) และกำลังของ ๆ แข็งขึ้นอยู่กับกำลังของแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม ดังนั้นจะพิจารณามาได้จากการประมาณกำลังการแตกร้าวที่น้อยที่สุด

การพิจารณาแรงกระทำภายในระหว่างอะตอมสองอะตอม ดังภาพที่ 2.1 (a) จะแสดงชนิดของกราฟพลังงานของแรงกระทำภายในที่ต้องการแยกอะตอมสองอะตอมออกจากกัน โดยช่วงพลังงานที่น้อยที่สุดของสมดุอะตอม และพลังงานรวมที่ต้องการแยกอะตอมออกจากกัน ถ้าจะแยกแยะถึงความแตกต่างระหว่างกราฟพลังงานกับระยะทาง (Energy-Distance curve) ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว (Force-Displacement Curve) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (b) โดยในทางปฏิบัติกราฟแรงกับการเคลื่อนตัวสามารถเปลี่ยนแสดงในรูปของกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียด มีลักษณะเป็น sine curve ดังแสดงในในภาพที่ 2.2 และพื้นที่ใต้กราฟจะแสดงถึงพลังงานการแตกร้าว (Energy fracture) โดยค่าความชันคือ Young's Modulus

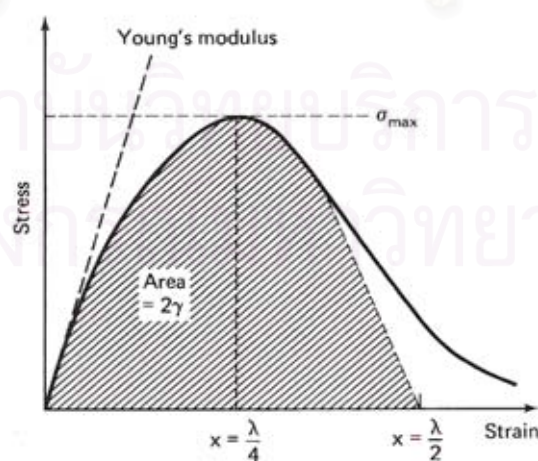
##### 2.1.2 คอนกรีต (Concrete)

วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคา และคุณสมบัติต่าง ๆ คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วนคือ วัสดุประสาน อันได้แก่ ปูนซีเมนต์ (Cement) กับน้ำ (Water) เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ผสมกับวัสดุผสม (Aggregates) อันได้แก่ วัสดุผสมละเอียด (Fine aggregates) ซึ่งได้แก่ ทราย (Sand) กับ

วัสดุผสมหยาบ (Coarse aggregates) ซึ่งได้แก่ หินหรือกรวด (Rock or Gravel) เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพกลายเป็นของแข็งจะมีความแข็งแรง และสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.1 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานยืดเหี่ยวกับระยะทางการแยกตัว (b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว



ภาพที่ 2.2 กราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดของอะตอม

### 2.1.3 ผลกระทบจากปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตโดยวิธีของ ACI (Mix Design)

การคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสมสำหรับงานคอนกรีตทั่วไปซึ่งหล่อในที่อาจดำเนินเป็นขั้น ๆ ตามวิธีการเสนอโดยสถาบันคอนกรีตของอเมริกา ซึ่งให้ผลค่อนข้างที่แน่นอน ไม่เปลี่ยนแปลงมากและถูกต้อง ขั้นตอนแสดงดังนี้

1. เลือกค่าการยุบตัวจากการออกแบบตามสภาพงาน
2. เลือกขนาดโตสุดของหินหรือกรวด
3. ประมาณปริมาณน้ำและฟองอากาศที่จะเกิดขึ้นในหนึ่งลูกบาศก์เมตร
4. เลือกอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์
5. คำนวณปริมาณปูนซีเมนต์ เท่ากับ ปริมาณน้ำหารอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์
6. คำนวณปริมาณของหิน เท่ากับ ปริมาณหินในสภาพแห้งและอัดแน่นคูณหน่วยน้ำหนักของหิน (แห้งและอัดแน่น)
7. คำนวณปริมาณของทราย ประมาณจากปริมาตรเนื้อแท้ของวัสดุ
8. ปรับสัดส่วนผสมตามสภาพความชื้นของทรายและหินหรือกรวด
9. ทำการทดสอบผสมปรับสัดส่วนผสมจากการทดลองผสม และ ตรวจสอบความสามารถและกำลังอัด

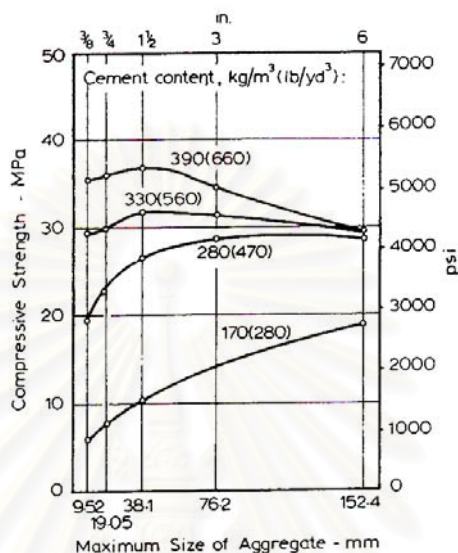
### 2.1.4 ผลกระทบขนาดโตสุดของหิน (Effect of Maximum Size of Aggregate)

พิจารณาจากการทำการหาส่วนคละของมวลรวมแล้วดูเปอร์เซ็นต์ที่ค้ำตะแกรงร่อนใหญ่ (หยาบ) ที่สุดอันใดมีเปอร์เซ็นต์มวลรวมที่ค้ำมากกว่าหรือเท่ากับ 15% ให้นำขนาดตะแกรงอันที่ใหญ่กว่านั้นไปอีกหนึ่งชั้น เพราะฉะนั้นการใช้หินขนาดโตในปริมาณที่พอเหมาะเพียงใด ช่องว่างระหว่างหินก็จะยิ่งน้อยลง ทำให้ต้องการทรายในส่วนผสมน้อยลง ฉะนั้นทำให้ใช้ปูนซีเมนต์และน้ำน้อยลง คอนกรีตจึงมีราคาถูกลง และมีคุณภาพดี ดังภาพที่ 2.3

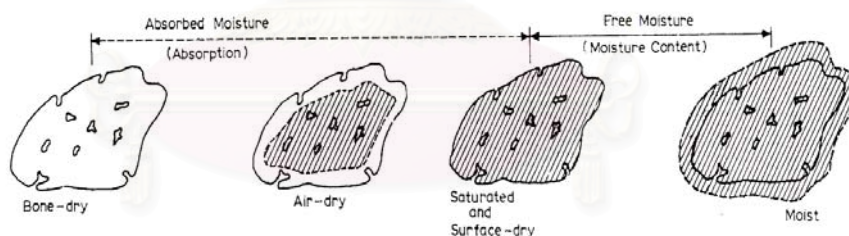
### 2.1.5 ผลกระทบความชื้นและการดูดซึม (Effect of Moisture and Absorption)

มวลรวมมีรูพรุนภายในบางส่วนที่ติดต่อกับผิวนอก ดังนั้นมวลรวมจึงสามารถดูดความชื้น นอกจากนี้บางส่วนยังสามารถเกาะบริเวณผิวของมวลรวม ดังนั้นมวลรวมที่เก็บอยู่ในสภาพธรรมชาติ จึงมีความชื้นต่าง ๆ กันไป เช่น อบแห้ง (Oven-Dry, OD), แห้งในอากาศ (Air-

Dry, AD), อิมตัวผิวแห้ง (Saturated-Surface-Dry, SSD), และเปียก (Wet, W) ดังภาพที่ 2.4 สภาพความชื้นนี้มีผลต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต



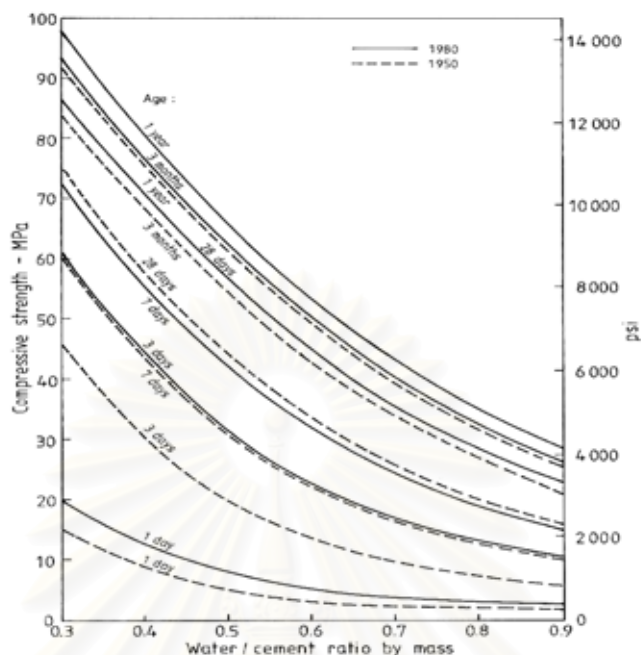
ภาพที่ 2.3 ผลกระทบต่อขนาดโตสุดของหินกับค่ากำลังอัดที่ 28 วัน



ภาพที่ 2.4 สภาพความชื้นของมวลรวม

2.1.6 ผลกระทบอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Effect of Water-Cement Ratio)

อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ มีผลกระทบต่อกำลังต้านทานแรงอัดและความทนทานของคอนกรีตมาก ถ้าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่ามากกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าต่ำ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยลงกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตก็จะสูงขึ้น ดังนั้นการผสมคอนกรีตควรรักษาอัตราส่วนนี้ให้คงที่ ถึงแม้ส่วนผสมอื่น ๆ จะเปลี่ยนแปลงไปบ้าง กำลังของคอนกรีตจะไม่เปลี่ยนแปลงไปมาก



ภาพที่ 2.5 ผลกระทบอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์

### 2.1.7 ผลกระทบความถ่วงจำเพาะ (Effect of Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของมวลรวมต่อความหนาแน่นของน้ำ ความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแร่ธาตุที่เป็นส่วนผสม และรูปทรงของก้อนวัสดุ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยจะมีความถ่วงจำเพาะอยู่ประมาณ 2.7 และ 2.65 ตามลำดับ

### 2.1.8 ผลกระทบหน่วยน้ำหนักและช่องว่าง (Effect of Unit Weight and Void)

หน่วยน้ำหนัก คือ น้ำหนักของมวลรวมในขนาดคละที่ต้องการต่อหน่วยปริมาตร หน่วยน้ำหนักจะบอกถึงปริมาตรและช่องว่างระหว่างมวลรวม ที่มวลรวมน้ำหนักหนึ่ง ๆ จะบรรจุลงได้ โดยหน่วยน้ำหนักของมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในประเทศไทยมีค่า 1400-1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

### 2.1.9 ผลกระทบโมดูลัสความละเอียด (Effect of Fineness Modulus)

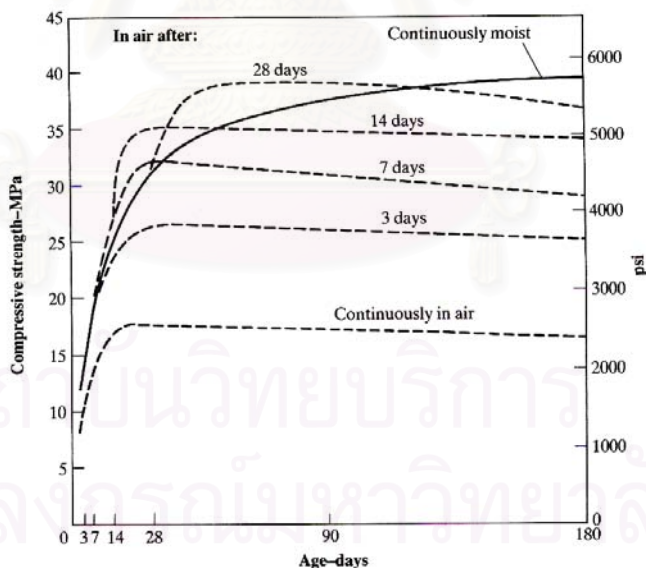
เป็นตัวเลขดัชนีที่แสดงถึงความละเอียด หรือความหยาบของวัสดุผสม วัสดุผสมยิ่งหยาบค่าโมดูลัสความละเอียดก็ยิ่งมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ ค่าโมดูลัสความละเอียดยังเป็น

ปฏิกิริยาโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุ โดยทรายที่สำหรับผสมทำคอนกรีตควรมีค่า  
โมดูลัสความละเอียดตั้งแต่ 2.3-3.2

#### 2.1.10 ผลกระทบการบ่มคอนกรีต (Effect of Curing)

การบ่มคอนกรีตเป็นการควบคุม และป้องกันมิให้น้ำที่เหลือในคอนกรีตระเหย  
ออกมาหลังจากทำการเทลงแบบหล่อ และแข็งตัวแล้ว เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรง  
และความทนทานตามที่ต้องการ ช่วงระยะเวลาที่ป้องกัน และรักษาความชื้นนี้ไว้ภายหลังจากการ  
เทคอนกรีตลงแบบหล่อแล้ว เรียกว่า ระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต (Curing period)

ระยะเวลาการบ่มคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ขนาดและ  
รูปร่างของโครงสร้างคอนกรีต ระยะเวลาในการบ่มให้นับจากวันที่หล่อคอนกรีตเสร็จแล้ว 24  
ชั่วโมง กำลังของคอนกรีตจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทรายเท่าที่ซึ่งมีความชื้นให้ กำลังของคอนกรีต  
จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก และค่อย ๆ ช้าลงในเวลาต่อมาดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.6 ผลกระทบของการบ่มที่มีต่อกำลังอัดคอนกรีต

### 2.1.11 ผลกระทบขนาดและรูปร่างของชิ้นตัวอย่าง (Effect of Height / Dimension Ratio on Strength of Cylinders)

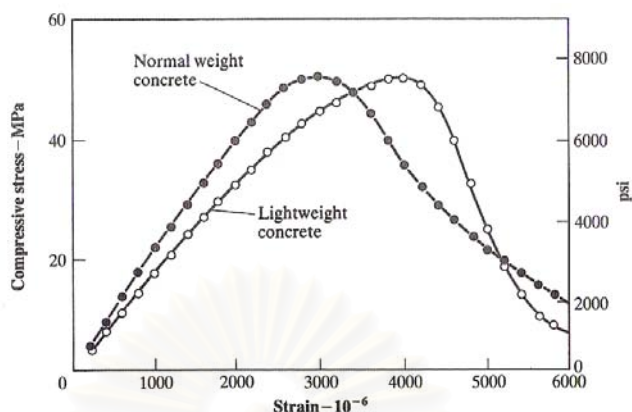
คอนกรีตชนิดเดียวกัน เมื่อทดสอบหาค่ากำลังอัดโดยใช้แท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่มีรูปร่างเหมือนกัน แต่ต่างขนาดกัน อัตราส่วนความสูง ( $h$ ) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ( $d$ ) ของแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดของอัตราส่วนดังกล่าวยิ่งมากจะมีผลทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าต่ำลง ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลของอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทดสอบที่มีต่อกำลังอัด

อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง ( $h/d$ ) ของแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก	แฟคเตอร์สำหรับแก้ค่ากำลังอัด	
	ASTM C 42-90	BS 1881
2.00	1.00	1.00
1.75	0.98	0.97
1.50	0.96	0.92
1.25	0.93	0.87
1.00	0.87	0.80

### 2.1.12 คุณสมบัติยืดหยุ่นของคอนกรีต (Elastic Properties of Concrete)

คุณสมบัติยืดหยุ่นของคอนกรีต มีความสำคัญต่อการเสียรูป (Deformation) ของโครงสร้างคอนกรีตภายใต้น้ำหนัก หรือแรงกระทำ เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่ยืดหยุ่น (Non-elastic material) เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก กล่าวคือ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตในช่วงน้ำหนักใช้งาน (Working range) จะเป็นเส้นโค้ง โดยในทางปฏิบัติเมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักอยู่ในช่วงใช้งานและในระยะเวลาสั้น ๆ จึงสมมุติว่าคอนกรีตมีหน่วยการหดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ (ไม่คิดการหดตัวแบบพลาสติก) โดยจะมีค่าการหดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 0.003-0.004



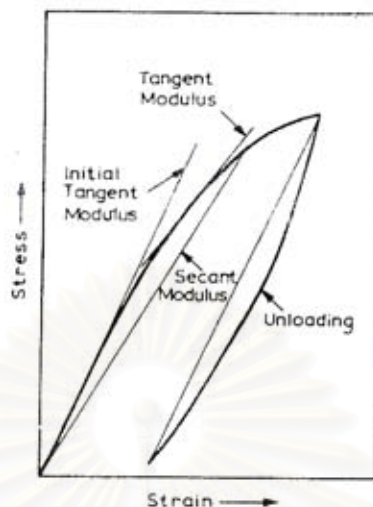
ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับคอนกรีต ๓ ความเครียดคงที่

### 2.1.13 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of Elasticity)

โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นตัวบ่งถึงความต้านทานต่อการเสียรูปของวัสดุ โดยหาจากอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียด ซึ่งเกิดจากการกระทำของความเค้นนั้น โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต หาได้จากเส้นสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต เมื่อทำการทดสอบหากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตโดยทั่วไปเส้นสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็นรูปโค้งพาราโบลา ดังภาพที่ 2.7

- Initial Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัส ซึ่งได้จากการลากเส้นจากจุดเริ่มต้นให้สัมผัสเส้นโค้งพาราโบลา ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธีนี้เปรียบเสมือนคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น
- Secant Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นใด ๆ ที่ต้องการหา บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธีนี้ในทางปฏิบัติถือว่าเป็นค่าโมดูลัสที่แท้จริงของคอนกรีตซึ่งรับน้ำหนักในช่วงการใช้งาน
- Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัสกับจุดใด ๆ บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด





ภาพที่ 2.8 รูปแบบแผนผังความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับคอนกรีต

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

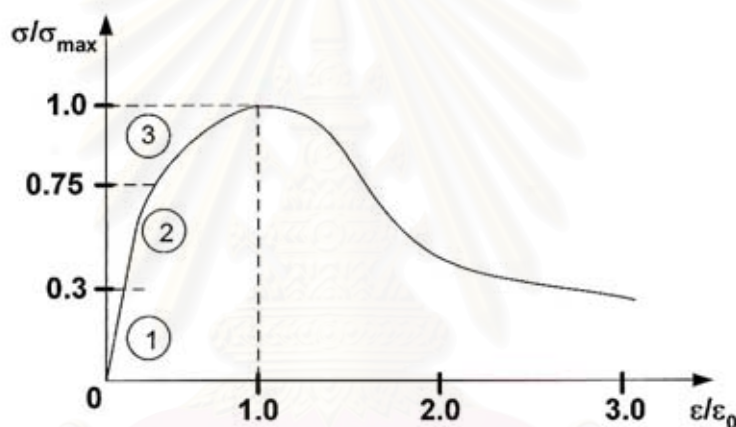
พฤติกรรมของความเค้นและ ความเครียดของคอนกรีตนั้นมีความซับซ้อนมากทำให้แบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Constitutive model) ของคอนกรีตที่หลากหลายและซับซ้อนแตกต่างกันไปรวมทั้งประโยชน์การใช้งานโดยแบบจำลองดังกล่าวได้รับการนำเสนอเมื่อไม่นานมานี้ ในการอธิบายถึงพฤติกรรมที่แท้จริงของคอนกรีตนี้จะแบ่งแบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ออกเป็น 2 ระดับด้วยกันคือ มหาภาค (Macroscopic) และ จุลภาค (Microscopic) เมื่อพูดถึงระดับมหภาค ในที่นี้จุดมุ่งเน้นคือ ทฤษฎีต่อเนื่อง (Continuum theories) เช่น ทฤษฎีพลาสติกซิตี (Plasticity theory) และ กลศาสตร์ความเสียหายแบบต่อเนื่อง (Continuum damage mechanics) อย่างไรก็ตามรูปแบบจุลภาคในพฤติกรรมของคอนกรีตซึ่งสัมพันธ์กับกระบวนการทางเคมีของซีเมนต์, รูปร่าง และขนาดของมวลรวมหยาบ รวมถึงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะไม่กล่าวถึงในวิจัยฉบับนี้

ทฤษฎีพลาสติกซิตีมีจุดมุ่งหมายที่เน้นถึงการใช้น้ำหนักของอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) เพื่อการพัฒนาแนวทางใหม่ให้เข้าถึงแบบจำลองพลาสติกซิตีที่เรียกว่า ไฮเปอร์พลาสติกซิตี (Hyperplasticity) (Houlsby และ Puzrin, 2001) รูปแบบที่สำคัญที่สุดของแนวทางใหม่นั้น คือ พฤติกรรมสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ทั้งหมดได้มาจาก 2 ฟังก์ชัน ฉะนั้นแล้วทฤษฎีนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้ได้กับพฤติกรรมความเค้นและ

ความเครียดของวัสดุในเชิงวิศวกรรมได้มากมาย อาทิเช่น การพัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติก ซิตีในภาวะต่อเนื่องสำหรับงานทางปฐพีกลศาสตร์ (Likitlersuang และ Houlsby, 2004)

### 2.2.1 พฤติกรรมแนวแกน (Uniaxial behavior)

พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของคอนกรีตนั้นมีความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) สูงซึ่งเป็นทั้งแรงดึงและแรงอัด กล่าวถึง แรงอัดแนวแกน (Uniaxial compression) นั้นสามารถสังเกตและจัดประเภทได้ 3 ระดับ ตามความแตกต่างของขั้นตอนการเปลี่ยนรูปร่าง ดัง ภาพที่ 2.9

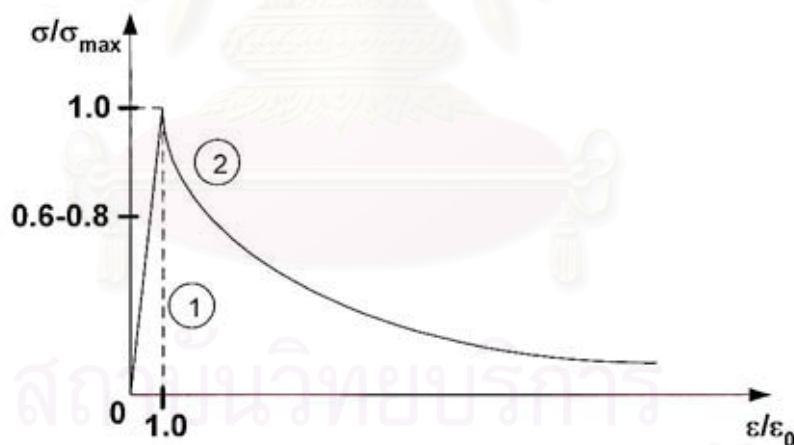


ภาพที่ 2.9 พฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้กำลังรับแรงอัด

ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งถึงระดับประมาณร้อยละ 30 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด ( $f'_c$ ) พฤติกรรมแรงอัดแนวแกน ของคอนกรีตนั้นพิจารณาได้เหมือนกับ อิลาสติกเชิงเส้น (Linear elasticity) โดยทั่วไปเรียกว่า ขอบเขตการแปรผันตรง (Proportional limit) ในขั้นนี้การแตกร้าวแบบจุลภาคของวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นน้อยมาก ส่วนในระดับที่ 2 นั้นอยู่ระหว่าง ร้อยละ 30 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด ( $0.3f'_c$ ) และ ร้อยละ 75 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด ( $0.75f'_c$ ) ซึ่งการแตกร้าวจะปรากฏชัดเจนขึ้นเนื่องจากรอยแตกของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างส่วนประกอบต่างๆ และเกิดการแตกร้าวใกล้กับผิวหน้าของหิน อย่างไรก็ตามการถ่ายทอดของการแตกร้าวจะยังคงมีอยู่จนเมื่อความเค้นอยู่ประมาณร้อยละ 75 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด ซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึงระยะเริ่มต้นของการถ่ายทอดกระบวนการแตกร้าวแบบไม่คงที่ ถ้าระดับความเค้นมากไปกว่านี้แล้ว รอยแตกจะเกิดบริเวณผิวหน้าของมวลรวมหยาบ และก่อให้เกิดเขตการแตกร้าวขึ้น นอกจากนี้การ

เปลี่ยนรูปร่างอาจเป็นแหล่งกำเนิดและทำให้เกิดการแตกตัวส่วนหลักขนานไปตามทิศทางของการเพิ่มแรงซึ่งส่งผลต่อการพังทลาย

ในทางกลับกันข้ออ้างอิงทางการทดลองแรงดึงแนวแกน (Uniaxial tension) นั้นแตกต่างอย่างมากจากกรณีของแรงอัด ซึ่งกำลังรับแรงดึง ( $f_t'$ ) ของคอนกรีตมีค่าน้อย เพราะเป็นส่วนเชื่อมระหว่างมวลรวมหยาบกับซีเมนต์ จุดเชื่อมต่อนี้ทราบกันดีว่าเป็นจุดอ่อนที่สุดของวัสดุประกอบ (Composite material) เป็นเพราะรอยร้าวมักเกิดขึ้นที่บริเวณจุดเชื่อมต่อนั้นเอง การแตกร้าวจุลภาคที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากภายใต้ความเค้นที่น้อยกว่าร้อยละ 60 ถึง ร้อยละ 80 ของกำลังรับแรงดึงประลัย (Ultimate tensile strength) ภายใต้ความเค้นระดับนี้นับว่าเป็นขอบเขตอิลาสติกของรูปแบบแรงดึง ดังภาพที่ 2.10 แม้กระนั้นก็ตามพฤติกรรมความเค้นและความเครียดแรงดึงนี้เกือบจะเป็นเส้นตรง จนกว่าจะถึงกำลังสูงสุด (Peak strength) ดังนั้นกำลังรับแรงดึงแนวแกน (Uniaxial tensile strength) ของคอนกรีตจึงได้รับการยอมรับว่าเป็นพฤติกรรมอิลาสติกเชิงเส้นสำหรับแบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



ภาพที่ 2.10 พฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้กำลังรับแรงดึง

ได้มีกรณีศึกษาจากการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับกำลังรับแรงดึง ดังนี้

$$f_t' = 0.3(f_c')^{2/3} \text{ (หน่วย MPa) โดย Raphael} \quad (1)$$

$$f_t' = 0.2(f_c')^{0.7} \text{ (หน่วย MPa) โดย Oluokun (Neville, 1995)} \quad (2)$$

ด้วยเหตุนี้กำลังรับแรงดึงสามารถประมาณได้ร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัด นอกจากนี้ยังมีการแสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่สัมพันธ์กันของอิลาสติกของคอนกรีต ( $E_c$ ) ซึ่งใช้ได้กับคอนกรีตทั่วไป ได้รับการแนะนำโดย ACI 318-89 (ปรับปรุง 1992) นั่นก็คือ

$$E_c = w^{1.5} 4270 \sqrt{f_c'} \quad (\text{หน่วย ksc}) \quad (3)$$

ข้อเด่นชัดของการทดสอบยังชี้ให้เห็นอีกว่าการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรนั้นเป็นพฤติกรรมพลาสติกทั้งในรูปแบบแรงอัดและแรงดึง ซึ่งระดับมหภาคนี้จะสนใจในเรื่องของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร โดยสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นผลจากการครากที่เกิดขึ้นในวัสดุ ภายใต้การเพิ่มน้ำหนักต่อเนื่อง เป็นที่ทราบกันดีว่าเหล็กนั้นสามารถแสดงพฤติกรรมทางพลาสติกได้ดี ต่างกันกับกรณีของคอนกรีต ซึ่งการกระจายพลังงานของคอนกรีตเกิดจากแรงเสียดทานในการแยกตัวออกของวัสดุผสมตรงรอยเลื่อนที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างมอร์ตาร์ (Mortar) กับวัสดุผสม ในขณะที่รอยร้าวมหภาคก่อตัวขึ้นรวมถึงการการแตกละเอียดของมอร์ตาร์ด้วย ทั้งหมดนี้เป็นสาเหตุหลักของการความเครียดที่คืนสภาพไม่ได้ (Irreversible strain) ในคอนกรีต ด้วยเหตุนี้แบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เหมาะสมของคอนกรีตนั้นจึงจำเป็นต้องมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีพลาสติกเพื่อที่จะอธิบายถึงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรโดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้แรงแบบวัฏจักร

## 2.2.2 ไฮเปอร์พลาสติกซิตี (Hyperplasticity approach)

ปัจจุบันนี้มีหลากหลายวิธีการที่จะจำลองแบบพฤติกรรมของวัสดุพลาสติก หนึ่งในวิธีที่มีความเป็นไปได้นั้น คือ ไฮเปอร์พลาสติกซิตี ซึ่งอ้างอิงตามกฎของอุณหพลศาสตร์ซึ่งใช้ดำเนินการและขยายขอบเขตการศึกษาไฮเปอร์พลาสติกซิตี (Hyperplasticity framework) (Puzrin และ Houlsby, 2001) ในส่วนนี้ได้สรุปโดยย่อถึงหลักการสำคัญและลักษณะที่แสดงออกในแนวทางของไฮเปอร์พลาสติกซิตี (Puzrin และ Houlsby, 2001)

ทางด้านไฮเปอร์พลาสติกซิตีนี้ แบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทั้งหมดจำแนกได้จากการใช้งาน 2 ฟังก์ชัน ได้แก่ ฟังก์ชันพลังงาน (Energy function) และฟังก์ชันคราก (Yield function) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 จะเป็นการสรุปสูตรที่ชี้แจงถึงกฎสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวทางของ พลังงานอิสระ Gibbs ( $g$ ) และ พลังงานอิสระ Helmholtz ( $f$ )

ตารางที่ 2.2 สูตรพื้นฐานของทฤษฎีไฮเปอร์พลาสติกซิตี

	พลังงานอิสระ Gibbs	พลังงานอิสระ Helmholtz
ฟังก์ชันพลังงาน	$g = g(\sigma_{ij}, \alpha_{ij})$	$f = f(\varepsilon_{ij}, \alpha_{ij})$
ฟังก์ชันการสูญเสียพลังงาน	$d = d^g(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}, \dot{\alpha}_{ij}) \geq 0$	$d = d^f(\varepsilon_{ij}, \alpha_{ij}, \dot{\alpha}_{ij}) \geq 0$
ความเค้นทั่วไป	$\bar{\chi}_{ij} = -\frac{\partial g}{\partial \alpha_{ij}}$	$\bar{\chi}_{ij} = -\frac{\partial f}{\partial \alpha_{ij}}$
สูตรของความเค้นและความเครียด	$\varepsilon_{ij} = -\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$	$\sigma_{ij} = -\frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{ij}}$
ความเค้นสูญเสียทั่วไป	$\chi_{ij} = -\frac{\partial d^g}{\partial \alpha_{ij}}$	$\chi_{ij} = -\frac{\partial d^f}{\partial \alpha_{ij}}$
ฟังก์ชันคราก	$y = y^g(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}, \chi_{ij}) = 0$	$y = y^f(\varepsilon_{ij}, \alpha_{ij}, \chi_{ij}) = 0$
กฎการไหล	$\dot{\alpha}_{ij} = \Lambda \frac{\partial y^g}{\partial \chi_{ij}}$	$\dot{\alpha}_{ij} = \Lambda \frac{\partial y^f}{\partial \chi_{ij}}$

แบบจำลองที่มีความเหมาะสมควรมีการเปลี่ยนแปลงที่ราบรื่นระหว่างพฤติกรรมอีลาสติก และอีลาสติกพลาสติก ซึ่งควรจะคำนึงถึงพัฒนาจากการใช้ผิวครากเดี่ยว (Single yield surface) ไปจนถึงการใช้โครงสร้างไฮเปอร์พลาสติกซิตี ที่ต่อเนื่องด้วย จำนวนที่จำกัดของผิวครากที่เหมาะสมจะแสดงในรูปพิกัดภายใน ( $\eta$ ) แม้กระนั้นในทางปฏิบัติแล้วจำนวนที่ไม่สิ้นสุดของผิวครากจะถูกแทนด้วยจำนวนจำกัดของผิวคราก คือ  $N$  ตามตารางที่ 2.3 ได้แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบสูตรระหว่างผิวครากเชิงซ้อน (Multiple yield surface) กับไฮเปอร์พลาสติกซิตีต่อเนื่อง (Continuous hyperplasticity) หรือผิวครากอนันต์ ซึ่งอธิบายถึงกฎสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวทางของ พลังงานอิสระ Gibbs ( $g$ )

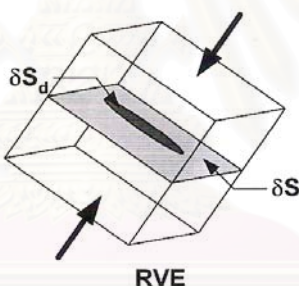
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบสูตรระหว่างผิวครากเชิงซ้อนกับไฮเปอร์พลาสติกซิตีต่อเนื่อง

	ผิวครากเชิงซ้อน	ผิวครากต่อเนื่อง
ตัวแปร	$\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \alpha_{ij}^{(n)}, \chi_{ij}^{(n)}$	$\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \hat{\alpha}_{ij}(\eta), \hat{\chi}_{ij}(\eta)$
แบบฟังก์ชันพลังงาน	$g(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}^{(1)}, \dots, \alpha_{ij}^{(N)})$	$\int_Y \hat{g}(\sigma_{ij}, \hat{\alpha}_{ij}(\eta), \eta) d\eta$
แบบฟังก์ชันการสูญเสียพลังงาน	$d^g(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}^{(1)}, \dots, \alpha_{ij}^{(N)}, \dot{\alpha}_{ij}^{(1)}, \dots, \dot{\alpha}_{ij}^{(N)})$	$d^g = \int_Y \hat{d}^g(\sigma_{ij}, \hat{\alpha}_{ij}(\eta), \dot{\hat{\alpha}}_{ij}(\eta), \eta) d\eta$



ทางกลศาสตร์จุลภาค ได้มีการเสนอกกลศาสตร์ความเสียหายแบบต่อเนื่องเอาไว้มากมายในแบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุทั่ว ๆ ไปและสำหรับคอนกรีตโดยเฉพาะ (Jirasek และ Bazant, 2002)

ปริมาณเชิงกลศาสตร์ต่อเนื่อง เช่น ความเค้นและความเครียดได้ชี้แจงไว้ในเชิงคณิตศาสตร์ ส่วนความหมายทางกายภาพอาจแสดงในรูปคุณสมบัติค่าเฉลี่ยเชิงปริมาตร เรียกว่า ชิ้นส่วนที่แสดงในเชิงปริมาตร (Representative volume element (RVE)) ซึ่งขนาดจะขึ้นอยู่กับวัสดุ ในทำนองเดียวกันเพื่อเป็นการอธิบายถึงความเสียหายของวัสดุ (Damage material) ในเชิงคณิตศาสตร์จึงจะขอกล่าวนำถึง พารามิเตอร์ความเสียหาย (Damage parameter ( $\alpha_d$ )) ซึ่งมีบทบาทเหมือนกับปริมาตรความเสียหาย (Damage volume) ดังแสดงในภาพที่ 2.12 พารามิเตอร์ความเสียหายอธิบายได้ดังนี้



ภาพที่ 2.12 ความหมายของชิ้นส่วนที่แสดงในเชิงปริมาตร (Representative volume element (RVE))

$$\alpha_d = \frac{\delta S_d}{\delta S} \quad (5)$$

$\delta S_d$  คือ พื้นที่ประสิทธิผลของจุดเชื่อมต่อของรอยร้าวจุลภาคทั้งหมดซึ่งอยู่ในพื้นที่ที่เชื่อมต่อกับระนาบหลักของ RVE ( $\delta S$ )

แนวคิดเรื่องความเค้นประสิทธิผล (Effective stress ( $\bar{\sigma}$ )) (ซึ่งมีความหมายแตกต่างในเชิงวิศวกรรมปฐพี) ได้รับมาโดยตรงจากส่วนพารามิเตอร์ความเสียหาย ( $\alpha_d$ ) ขอให้พิจารณาในกรณีของแรงแนวแกนดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.12 เป็นเพราะความเสียหายของพื้นที่อยู่ในแนวตัดทำให้พื้นที่ที่เป็นสาเหตุตามแนวตัดนี้จะลดลงเป็น  $S - S_d$  เมื่อ  $S$  คือ พื้นที่ในแนวหน้า

ตัดทั้งหมด และ  $S_d$  เป็นพื้นที่ทั้งหมดที่เกิดรอยร้าวจุลภาค ดังนั้นความเค้นประสิทธิผลจึงแสดงได้ดังสมการ (6)

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{S - S_d} = \frac{\sigma}{(1 - \alpha_d)} \geq \sigma \quad (6)$$

ตามหลักการของสมภาวะการเทียบเท่าของความเครียด (Equivalence strain) (Lemaitre, 1992) ได้กล่าวไว้ว่าความเครียดในสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับวัสดุที่สามารถแตกร้าวนี้ได้มาจากแนวทางเดียวกับสมการของวัสดุเริ่มต้น (Virgin material) เว้นเสียแต่ว่าความเค้นที่ปกตินั้นถูกแทนค่าด้วยความเค้นประสิทธิผล เมื่อประยุกต์สมมติฐานนี้เข้ากับวัสดุที่สามารถแตกร้าวนั้น และวัสดุอุลติมาติกจะได้ว่าความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในกรณีแนวแกน (Uniaxial) สามารถเขียนได้เป็น  $\sigma = (1 - \alpha_d) E \varepsilon$  ความจริงแล้วแนวคิดนี้สามารถสังเกตได้จากการทดลอง ยังโมดูลัสประสิทธิผล (Effective young modulus  $\bar{E}$ ) ที่อาศัยการวัดปริมาณความเสียหาย

$$\bar{E} = (1 - \alpha_d) E \quad (7)$$

ในส่วนของขอบเขตความเสียหายนี้แสดงได้เป็น

$$y_d(\sigma, \alpha_d) = \sigma - D(\alpha_d) = 0 \quad \text{หรือ} \quad y_d(\varepsilon, \alpha_d) = \varepsilon - D(\alpha_d) = 0 \quad (8)$$

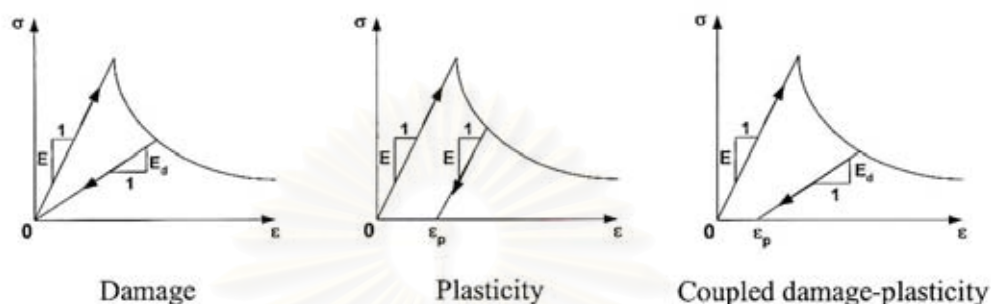
$D(\alpha_d)$  แทนฟังก์ชันความเสียหายซึ่งเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ความเสียหาย  $\alpha_d$  พื้นที่ใต้กราฟของความเค้นและความเครียดแนวแกนแสดงพลังงานกระบวนการแตกร้าวน (Fracture energy) และตัวอย่างของการพัฒนาความเสียหายแสดงไว้โดย (Jirasek และ Bazant, 2002) ดังนี้

$$D(\alpha_d) = \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha_d < \varepsilon_0 \\ \frac{\varepsilon_0}{\alpha_d} \exp\left(-\frac{\alpha_d - \varepsilon_0}{\varepsilon_f - \varepsilon_0}\right) & \text{if } \alpha_d > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (9)$$

จากลักษณะของแบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแล้วจะใช้ตัวแปรความเสียหาย (Damage variable) เพียงอย่างเดียวไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของคอนกรีตได้โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงความแข็ง (Stiffness) ฉะนั้นแล้ว



แนวคิดทั้งความเสียหายและพลาสติกซิตี อาจเป็นแนวทางการแก้ไขเพิ่มเติมที่ถูกต้องดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.13 พฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของแบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

2.2.4 แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีต่อเนื่องด้วยพารามิเตอร์ความเสียหาย มิติ (One-dimensional continuous hyperplasticity model with damage parameter)

สุเชษฐ์ (2548) ได้อธิบายถึงการพัฒนาแบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับงานคอนกรีตโดยยึดแนวทางของไฮเปอร์พลาสติกซิตี จุดมุ่งหมายสำคัญของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาแบบจำลองคอนกรีต ซึ่งจะกล่าวถึงจุดอ่อนบางอย่างของอิลาสโตพลาสติก หรือแบบจำลองความเสียหาย ว่าไม่สามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงความแข็ง ในวงรอบวัฏจักร (Hysteresis loop) ได้ และเพื่อการพิสูจน์ถึงแบบจำลองที่ทดสอบในแบบแนวแกน จะขอกล่าวถึงแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีต่อเนื่องแบบมิติเดียวกับพารามิเตอร์ความเสียหายไว้ในที่นี้ด้วย แบบจำลองนี้จะแสดงอยู่ในรูปของ พลังงานอิสระ Gibbs ( $g$ ), ผิวคราก (yield surface) ( $\hat{y}_p$ ) และผิวของความเสียหาย (Damage surface) ( $y_d$ )

ฟังก์ชัน พลังงานอิสระ Gibbs

$$g = -\frac{\sigma^2}{2(1-\alpha_d)E} - \sigma \int_0^1 \hat{\alpha}_p d\eta + \frac{(1-\alpha_d)}{2} \int_0^1 \hat{H}(\eta) \hat{\alpha}_p^2 d\eta \quad (10)$$

เมื่อ  $\hat{H}(\eta) = \frac{E(1-\eta)^b}{2a}$  คือฟังก์ชันฮาร์ดเด้นิ่งไม่เชิงเส้น (Non-linear hardening function)

ผิวครากเชิงซ้อน (Multiple yield surface)

$$\hat{y}_p = |\hat{\chi}_p| - \hat{k}(\eta) = 0 \quad (11)$$

เมื่อ  $\hat{k}(\eta) = k_0 + (k_1 - k_0)\eta$  คือ ขอบเขตยอมให้เชิงซ้อน (Multiple yield criteria)

ขอบเขตความเสียหาย (Damage criteria)

$$y_d = \chi_d - D(\alpha_d) \quad (12)$$

เมื่อ  $D(\alpha_d) = \frac{R\alpha_\infty}{1-\alpha_d}$  คือ ฟังก์ชันความเสียหาย

พารามิเตอร์แบบจำลองก็เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่มีความสำคัญต่อแบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในบางแบบจำลองนั้นยึดหลักจากสมมติฐานเฉพาะบางข้อและสามารถทำนายลักษณะที่ตรงกับความเป็นจริง ได้อย่างแม่นยำแต่ก็จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่ใช้เฉพาะเพื่อการสังเกตพารามิเตอร์แบบจำลองทั้งหลาย โดยที่ไม่รวมเอาความหมายของทางกายภาพเข้ามาเกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังต้องการปฏิบัติการในเชิงคณิตศาสตร์ในการดำเนินการอีกด้วย ดังนั้นในกลุ่มของแบบจำลองเหล่านี้จึงไม่เป็นที่ยอมรับในเชิงปฏิบัติของงานวิศวกรรม ในทางกลับกันในแง่ของแบบจำลองที่ดีนั้นพารามิเตอร์แบบจำลองควรที่จะสัมพันธ์กับบางจุดประสงค์ในด้านกายภาพและยังต้องสามารถใช้ในการประเมินค่าซึ่งใช้การทดลองแบบมาตรฐานได้ด้วย ด้วยเหตุดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้อธิบายถึง กฎสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดซึ่งใช้แนวคิดทั้งเรื่องของความเสียหาย และไฮเปอร์พลาสติกซิตีต่อเนื่องตารางที่ 2.4 แสดงความหมายทางกายภาพของพารามิเตอร์แบบจำลอง และการประเมินแนวคิดในการประเมินค่าของพารามิเตอร์แบบจำลอง

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์แบบจำลอง  $(E, k_0, k_1, a, b, R, \alpha_\infty)$

พารามิเตอร์แบบจำลอง	ความหมายทางกายภาพ	วิธีการประเมินค่า
$E$	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น	สามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์เส้นโค้งของความเค้นและความเครียด
$k_0$	ขอบเขตการแปรผันตรง	สามารถสังเกตได้จากความสัมพันธ์เส้นโค้งของความเค้นและความเครียด $k_0 = f_{p.L} = \begin{cases} (0.3 - 0.5) f'_c \\ (0.6 - 0.8) f'_t \end{cases}$

		สำหรับแรงอัดและแรงดึง
$k_1$	กำลังประลัย (ความเค้นสูงสุด)	$f'_c =$ กำลังรับแรงอัดประลัย $f'_t =$ กำลังรับแรงดึงประลัย
$a$ และ $b$	พารามิเตอร์ฮาร์ดเด้นนิ่ง	สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์เส้นโค้งของความเค้นและความเครียด (โดย การลองผิดลองถูก (Trial and error), ศึกษาขอบเขตความเหมาะสม (Optimisation) และ เทคนิคความเหมาะสมกับส่วนโค้ง (Curve fitting techniques))
$R$	พารามิเตอร์ความเสียหายลำดับที่ 1	สัมพันธ์กับกำลังความเสียหาย (ตัวอย่าง แรงอัด $R = \frac{f'_c{}^2}{2E\alpha_\infty}$ )
$\alpha_\infty$	พารามิเตอร์ความเสียหายลำดับที่ 2	สัมพันธ์กับกำลังรับแรงคงค้าง ( $f_\infty$ ) (ตัวอย่าง แรงอัด $\alpha_\infty = 1 - \left(\frac{f'_{c,\infty}}{f'_c}\right)^2$ )

### 2.2.5 การดำเนินการเชิงตัวเลข (Numerical implementation)

แบบจำลองที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นนั้นคือ แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกที่ต่อเนื่องซึ่งใช้ตัวเลขที่ไม่จำกัดของผิวคราก (infinite yield surface) และแสดงในรูปของพิกัดภายใน ( $\eta$ ) แม้กระนั้นในเชิงปฏิบัติแล้วตัวเลขไม่จำกัดของผิวจะต้องแทนที่ด้วยตัวเลขที่จำกัด ( $N$ ) ของผิว โดยที่ในแต่ละผิวนั้น  $i$  จะถูกกำหนด ( $1 \leq i \leq N$ ) และค่าพิกัด  $\frac{i}{N}$  มีค่าเท่ากับ  $\eta$  ในส่วนของแบบจำลองที่กำลังจะกล่าวถึงนี้ได้แสดงผิวครากเป็นตัวเลขที่จำกัด ทำให้ต้องอาศัยคณิตศาสตร์ที่ให้ความผิดพลาดน้อยกว่า และยังนำไปสู่การปฏิบัติการได้โดยตรงมากกว่า

ฟังก์ชันพลังงานอิสระ Gibbs

$$g = -\frac{\sigma^2}{2(1-\alpha_d)E} - \frac{\sigma}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{p,i} + \frac{(1-\alpha_d)}{2N} \sum_{i=1}^N H_i \alpha_{p,i}^2 \quad (13)$$

เมื่อ  $H_i = \frac{E \left(1 - \frac{i}{N}\right)^b}{2a}$  คือ ฟังก์ชันฮาร์ดเด้นนิ่งไม่เชิงเส้น (Non-linear hardening function)

ผิวครากเชิงซ้อน (Multiple yield surface)

$$y_{p,i} = |\chi_{p,i}| - k_i = 0, \text{ สำหรับ } 1 \leq i \leq N \quad (14)$$

เมื่อ  $k_i = k_0 + (k_1 - k_0) \frac{i}{N}$  คือ ขอบเขตผิวครากเชิงซ้อน (Multiple yield criteria) และ  $N$  คือ จำนวนของผิวคราก

ขอบเขตความเสียหาย (Damage criteria)

ใช้สมการเดียวกับ (12)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 ขั้นตอนเตรียมตัวอย่าง

- 1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด
  - ขวดทดลองรูปชมพู่ (Volumetric Flask) ขนาดความจุ 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร
  - เครื่องชั่งทราย
  - ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส
  - เทอร์โมมิเตอร์
- 2 การทดสอบการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด
  - กรวยตัดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในด้านบน  $40 \pm 3$  มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่ฐาน  $90 \pm 3$  มิลลิเมตร สูง  $75 \pm 3$  มิลลิเมตร
  - ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส
- 3 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ
  - ตะกร้าสำหรับชั่งหินในน้ำ
  - ถังใส่น้ำ
  - เครื่องชั่งหิน
  - ตะแกรงเบอร์ 4
- 4 การทดสอบการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ
  - ตะแกรงเบอร์ 4
  - ผ้าสะอาด
  - เครื่องชั่งหินที่อ่านได้ละเอียด 0.5 กรัม
- 5 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ
  - ถังเหล็กทรงกระบอก

- เหล็กต๋าลักษณะเป็นท่อนเหล็กกลม
- เหล็กปาด ช้อนตัก และเทอร์โมมิเตอร์

6 การทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมละเอียดและการทดสอบหาขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ

- ตะแกรงร่อนมาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM
- เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Mechanical Sieve Shaker) ต้องมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งหรือในแนวราบและดิ่งปนกัน เพื่อที่จะให้อนุภาคกระแทกและกลิ้งไปมาบนผิวตะแกรงอย่างทั่วถึง

- เครื่องชั่งหิน และทราย

#### 7 การทดสอบค่าการยุบตัว

- โคน (Slump Mold) รูปกรวยทรงตัดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบน 10 เซนติเมตร และด้านล่าง 20 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร มีหูจับและแผ่นเหล็กยื่นออกมาให้เท้าเหยียบทั้ง 2 ข้าง

- เหล็กต๋า (Tamping Rod)
- แผ่นเหล็กสำหรับรองมีลักษณะเรียบเป็นระนาบ
- ช้อนตัก เกียงเหล็ก และตลับเมตร

### 3.1.2 ชั้นทดสอบกำลัง

#### 1 กำลังรับแรงอัด

- เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal Testing Machines)
- แบบหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

#### 2 กำลังรับแรงวัฏจักร

- เครื่องทดสอบกำลังอัด
- แบบหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

### 3.2 วิธีการทดสอบ

จะทำการทดสอบด้วยเครื่องมือ Universal Testing Machines ดังภาพที่ 3.1 วิธีการทดสอบแรงอัดจะทดสอบโดยการให้แรง หรือความดันกับวัสดุที่อัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ต่อวินาที โดยการควบคุมการให้แรงจนเกิดการแตกร้าว และวิธีการทดสอบแรงวัฏจักร โดยทำการเพิ่มแรงในแนวแกน ณ อัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ต่อวินาที กับตัวอย่างคอนกรีตที่ 25, 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงอัดประลัย แล้วจึงถอนแรงออกจากวัสดุ หลังจากนั้นจึงให้แรงกลับคืนกับวัสดุอีกครั้ง โดยใช้การควบคุมการเคลื่อนตัวที่อัตรา 1 มิลลิเมตร ต่อวินาที สำหรับตัวอย่างคอนกรีต 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม 1, กลุ่ม 2 และ กลุ่ม 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยที่ค่าการรบกวนการออกแบบปฏิกิริยาส่วนผสมเท่ากับ 150, 240 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยใช้แท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.1 โปรแกรมการทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงวัฏจักร

รูปแบบการทดสอบ	กลุ่มตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์ (%)	จำนวน (ก้อน)
กำลังรับแรงอัด	กลุ่ม 1	-	3
	กลุ่ม 2	-	3
	กลุ่ม 3	-	3
กำลังรับแรงวัฏจักร	กลุ่ม 1	25	3
		50	
		75	
	กลุ่ม 2	25	3
		50	
		75	
กลุ่ม 3	25	3	
	50		
	75		



ภาพที่ 3.1 เครื่อง Universal testing machine (UTM)



### 3.2.1 ขั้นตอนการทดสอบ

1 การหาคุณสมบัติของคอนกรีตทางด้านกายภาพและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเบื้องต้น

- การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และความชื้นที่ผิวของมวลรวม (Specific Gravity, Absorption, and Surface Moisture of Aggregate)
- หน่วยน้ำหนักของวัสดุผสม (Unit Weight of Gradations)
- การทดสอบหาขนาดคละ และค่าโมดูลัสความละเอียด (Sieve Analysis and Fineness Modulus)
- การทดสอบความสามารถเทได้ (Workability)

2 ทำการเตรียมตัวอย่างการทดสอบและการทดสอบ

- ทำการผสมคอนกรีต ณ การคาดการณ์ปริมาตรส่วนผสม 150, 240 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- ทำการเทคอนกรีตใส่แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น เท่า ๆ กันแต่ละชั้นต๋ำด้วยเหล็กต๋ำ 25 ครั้ง
- ทำการถอดแบบคอนกรีต หลังจากตัวอย่างคอนกรีตแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ทำการบ่มตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน
- ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงวัฏจักร

### 3.2.2 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม

- ทำการสร้างสมการเชิงตัวเลข (Numerical calculation) ดังภาพที่ 3.2 ของแบบจำลอง
- ประมวลผลและเขียนรหัสโปรแกรมของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซีดีจาก Flow chart ดังแสดงในภาพที่ 3.3 สำหรับกระบวนการแตกร้าวของคอนกรีตลงในโปรแกรม MATLAB

- ทำการตรวจสอบแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซีดีกับผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือทดสอบ
- ศึกษาพารามิเตอร์
- วิเคราะห์และสรุปผลจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซีดีสำหรับงานทางด้านวัสดุคอนกรีต

### 3.2.3 ขั้นตอนการคำนวณพารามิเตอร์แบบจำลอง

$E$  (ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น) สามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์เส้นโค้งของความเค้นและความเครียด

$k_0$  (ขอบเขตการแปรผันตรง) ประมาณค่าจุดสุดท้ายของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด หรือ  $k_0 = f_{P.L} = \begin{cases} (0.3-0.5) f_c' \\ (0.6-0.8) f_t' \end{cases}$  (15)

$k_t$  (กำลังรับแรงประลัย หรือความเค้นมากที่สุด)

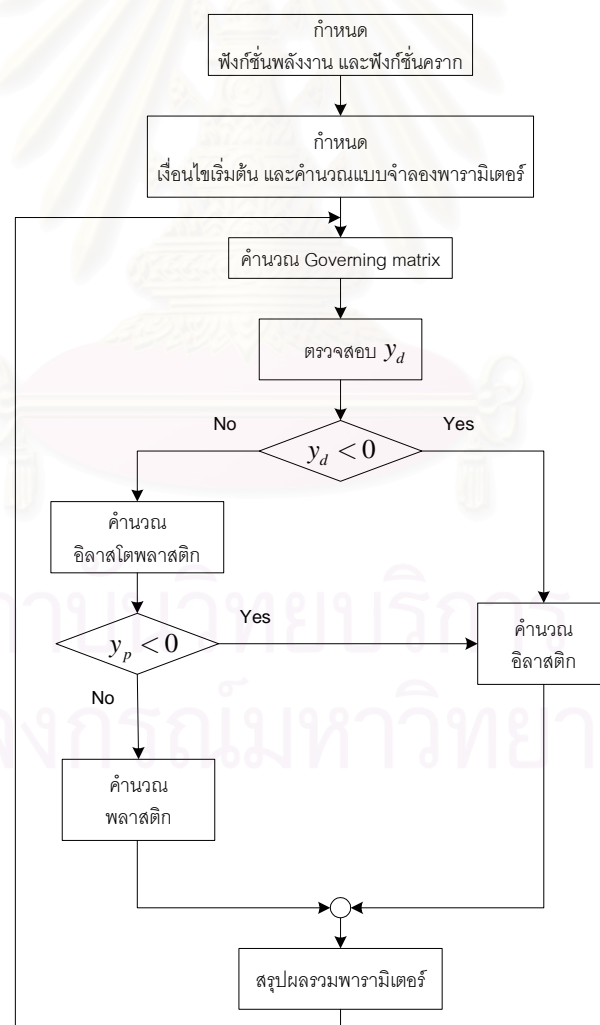
$a$  และ  $b$  (พารามิเตอร์ฮาร์ดเด้นนิ่งไม่เชิงเส้น) สามารถพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ได้จากความสัมพันธ์เส้นโค้งของความเค้นและความเครียด โดยการลองผิดลองถูก, ศึกษาขอบเขต และเทคนิคความเหมาะสมกับส่วนโค้ง

$$R \text{ (พารามิเตอร์ความเสียหายลำดับที่ 1)} \quad R = \frac{f_c'^2}{2E\alpha_\infty} \quad (16)$$

$$\alpha_\infty \text{ (พารามิเตอร์ความเสียหายลำดับที่ 2)} \quad \alpha_\infty = 1 - \left( \frac{f_{c,\infty}'}{f_c'} \right)^2 \quad (17)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma, \Delta\varepsilon \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial^2 g}{\partial \sigma^2} & -1 & \frac{\partial^2 g}{\partial \sigma \partial \alpha_d} & \int_0^1 \frac{\partial^2 g}{\partial \sigma \partial \hat{\alpha}_p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & \frac{\partial y_d}{\partial \chi_d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial \hat{\chi}_p} \\ \frac{\partial y_d}{\partial \sigma} & 0 & \frac{\partial y_d}{\partial \alpha_d} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial \sigma} & 0 & \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial \alpha_d} & \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial \hat{\alpha}_p} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma \\ d\varepsilon \\ d\alpha_d \\ d\alpha_p \\ \Lambda_d \\ \Lambda_p \end{Bmatrix}$$

ภาพที่ 3.2 สมการเชิงตัวเลขของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี



ภาพที่ 3.3 แผนผัง Flow chat แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตี

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์

4.1.1 การหาคุณสมบัติของคอนกรีตทางด้านกายภาพ      คุณสมบัติทางด้าน  
วิศวกรรมเบื้องต้น และการออกแบบปฏิภาคส่วนผสม

ตัวอย่างคอนกรีตก่อนนำมาทำการทดสอบจะหาค่าคุณสมบัติทางด้านกายภาพ และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเบื้องต้นและจากนำผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น นำมาทำการออกแบบปฏิภาคส่วนผสม ซึ่งผลการทดสอบทั้งหมดจะถูกรวบรวมและแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเบื้องต้น

คุณสมบัติ	ผลการทดสอบ	หน่วย
ความถ่วงจำเพาะ (ซีเมนต์ Type 1)	3.15	-
ความถ่วงจำเพาะ (ทราย)	2.54	-
ความถ่วงจำเพาะ (หิน)	2.71	-
หน่วยน้ำหนัก (หิน)	1594.34	kg/m <sup>3</sup>
ขนาดโตที่สุดของหิน	20	mm.
โมดูลัสความละเอียด	2.97	-
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (ทราย)	1	%
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (หิน)	0.59	%

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปค่าการณัฏฐภาคส่วนผสม

กำลังรับแรงอัด (ksc)	ซีเมนต์ (Type 1) (kg/m <sup>3</sup> )	ทราย (kg/m <sup>3</sup> )	หิน (เบอร์ 2) (kg/m <sup>3</sup> )	น้ำ (kg/m <sup>3</sup> )
กลุ่ม 1	244	822	1041	195
กลุ่ม 2	307	771	1041	195
กลุ่ม 3	374	717	1041	195

หมายเหตุ ข้อมูลค่าการณัฏฐภาคส่วนผสม ยังมิได้ปรับแก้ความชื้น

#### 4.1.2 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกที่ดี

จากการทดสอบการหาค่ากำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงวัฏจักรจากกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ โดยการใช้เครื่องมือ Universal testing machine หาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต 2 ชนิดของการทดสอบ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกที่ดี โดยที่จำแนกการคิดพารามิเตอร์แบบจำลองออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์เส้นโค้งของความเค้นและความเครียดได้โดยตรง, หาได้จากการคำนวณ และส่วนสุดท้ายทำการลองผิดลองถูกในการหาค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b$  เพื่อนำผลมาทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของภายใต้การรับแรงแนวแกน โดยผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์สรุปดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกที่ดี

ชนิดการทดสอบ	กลุ่มตัวอย่าง	ตัวอย่าง	พารามิเตอร์แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกที่ดี						
			$E$ (ksc)	$k_0$ (ksc)	$k_1$ (ksc)	$a$	$b$	$R$	$\alpha_\infty$
กำลังรับแรงอัด	1	-	170,800	60.00	150	0.03	0.03	4.9565	0.0133
	2	-	387,000	92.00	230	0.04	0.04	7.8769	0.0087
	3	-	412,100	112.00	280	0.05	0.05	13.3410	0.0071
	1	1	586,500	63.20	158	0.10	0.10	1.6866	0.0126
		2	172,500	65.20	163	0.02	0.02	6.2958	0.0122
		3	261,800	67.20	168	0.03	0.03	4.5414	0.0119

กำลังรับ แรงฉีก	2	1	462,700	118.00	295	0.04	0.04	13.8950	0.0068
		2	401,000	114.40	286	0.04	0.04	14.6100	0.0070
		3	450,000	123.20	308	0.06	0.06	16.2590	0.0065
	3	1	250,600	134.40	336	0.02	0.02	37.8990	0.0059
		2	334,200	96.80	242	0.02	0.02	10.6240	0.0082
		3	367,600	90.80	227	0.03	0.03	7.9726	0.0088

#### 4.1.3 การศึกษาพฤติกรรมความเค้นและความเครียดภายใต้กำลังรับแรงอัด

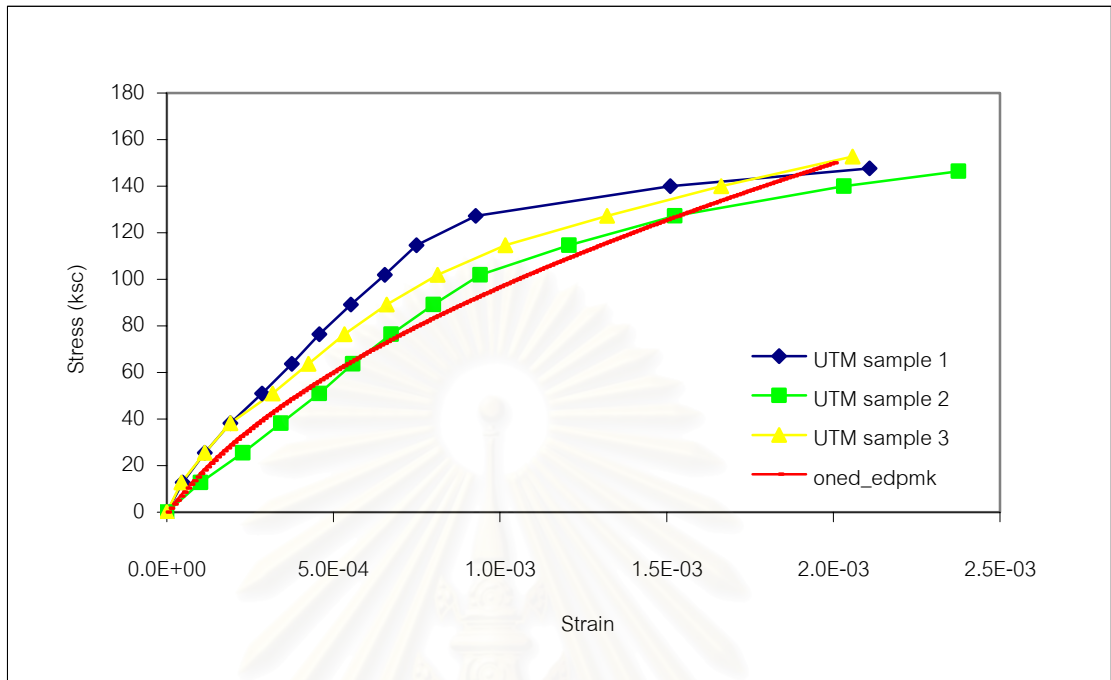
การศึกษาพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดของกำลังรับแรงอัดโดยการศึกษาร่วมกันระหว่างแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซีดีที่ใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.3 กับการทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine พบว่า จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากแบบจำลองนั้น ขึ้นอยู่กับข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ ซึ่งแสดงผลที่ได้ตามตารางที่ 4.4 และยังขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b$  ที่อยู่ในช่วง 0.03 – 0.05 นั้นเป็นเพราะตัวอย่างคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงของการแข็งตัวที่ต่างกัน หากเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบกับที่ได้จากแบบจำลอง ตามภาพที่ 4.2 – 4.4 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียดของตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม ผลที่ได้จากแบบจำลองมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความเค้นใกล้เคียงกับผลของการทดสอบ แต่จะพบว่าข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองจะถึงขอบเขตการแปรผันตรงก่อน และค่าความเครียดสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าจากการทดสอบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 ภายหลังจากการทดสอบมีการเสียรูปแบบที่ 6 (ASTM C39) คือ การแตกร้าวบริเวณจุดปลาย ดังแสดงในภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลพื้นฐานของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซีดีภายใต้กำลังรับแรงอัด

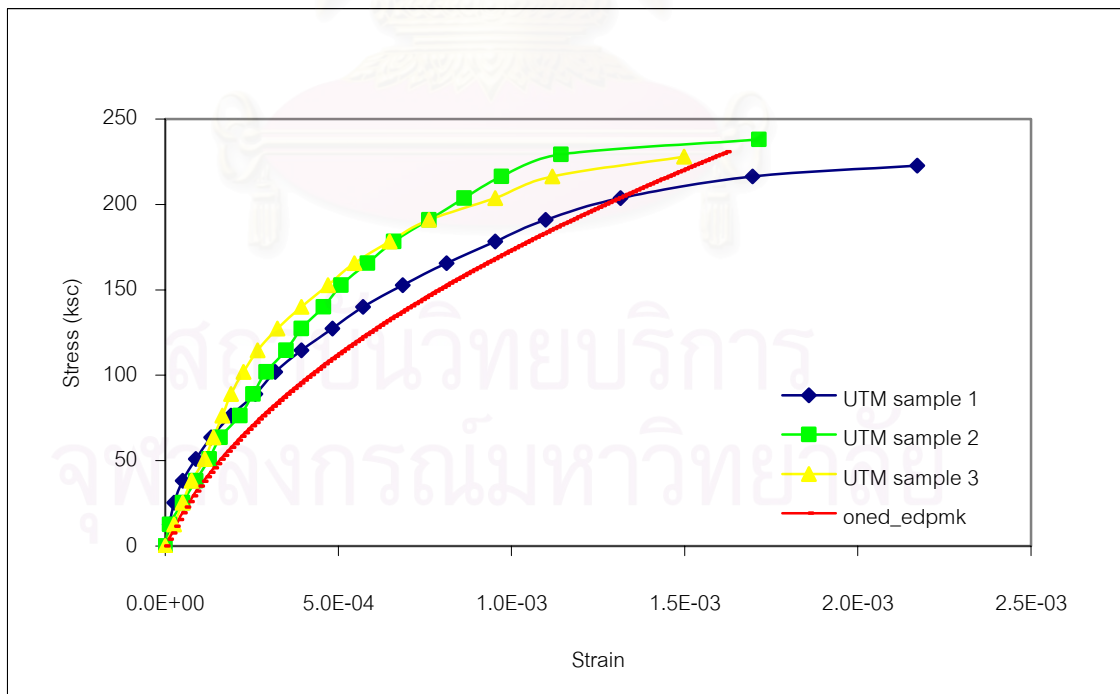
กลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลพื้นฐานแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซีดี	
	$f'_c$ (ksc)	$E$ (ksc)
กลุ่มที่ 1	150	170,800
กลุ่มที่ 2	230	387,000
กลุ่มที่ 3	280	412,100



ภาพที่ 4.1 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 ภายหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด

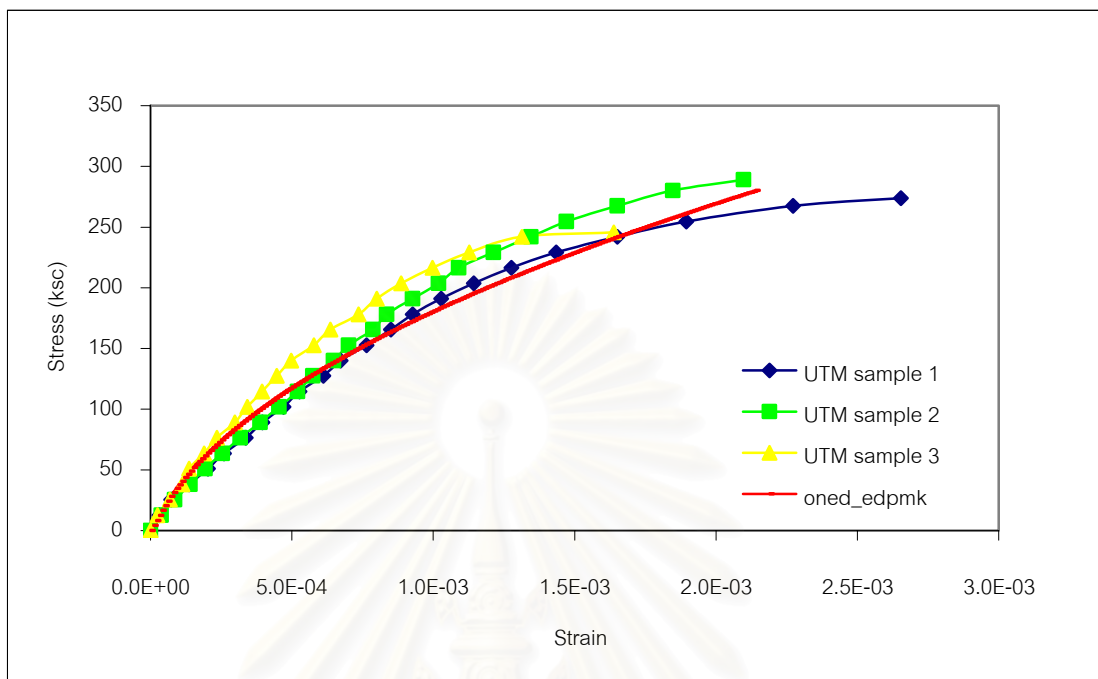


ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงอัด กลุ่ม 1



ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงอัด กลุ่ม 2





ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงอัด กลุ่ม 3

#### 4.1.4 การศึกษาพฤติกรรมความเค้นและความเครียดภายใต้กำลังรับแรงวัฏจักร

ดังที่ได้ศึกษาพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดของกำลังรับแรงวัฏจักร จากการศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีที่ใช้พารามิเตอร์ ดังตารางที่ 4.3 กับการทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยใช้ค่าความเค้นที่ร้อยละ 25, 50 และ 75 ของกำลังรับแรงอัดประลัย จะได้ว่า

กลุ่มที่ 1 จากผลที่ได้จากแบบจำลองพบว่าไม่สามารถควบคุมความเค้น ณ จุดเปลี่ยนวัฏจักรได้ ซึ่งค่าดังกล่าวจะคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เป็นเพราะค่าความเค้นที่ได้จากสมการแบบจำลองไม่สามารถกำหนดค่าความเค้น ณ ตำแหน่งดังกล่าวได้ อีกทั้งไม่สามารถควบคุมค่าความแข็งตัวเริ่มต้นที่ให้กับแบบจำลองในวัฏจักรที่ 2 และ 3 ได้ อาทิเช่น ตัวอย่างที่ 1 ผลการทดสอบจะมีค่าความแข็งตัวมากกว่าความเป็นจริง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากในขณะบดอัดคอนกรีตในแบบหล่อมีการเรียงตัวของมวลรวมหยาบเกิดขึ้นมากบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ทำให้ค่าการแข็งตัวช่วงแรกมีค่าสูงมากและจะน้อยลงเรื่อย ๆ ซึ่งการแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 ภายหลังจากการทดสอบมีการเสียรูปแบบที่ 3 โดยที่มีการแตกร้าวแนวตั้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.5 แต่เมื่อป้อนข้อมูลค่าความแข็งตัวที่มีค่าสูง ณ วัฏจักรแรกให้กับแบบจำลองจะส่งผลให้ค่าความแข็งตัวที่ได้จากแบบจำลองไม่เป็นไปตามพฤติกรรมการรับแรงวัฏจักร นอกจากนี้ยังพบว่าค่า

ความเครียดสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง เนื่องมาจากแบบจำลองถูกควบคุมด้วยการรอบของคำสั่งในโปรแกรม MATLAB และพารามิเตอร์ฮาร์ดแวร์หนึ่ง

กลุ่มที่ 2 นี้ผลที่เกิดขึ้นนั้นเป็นไปทำนองเดียวกันกับกลุ่มที่ 1 นั่นคือ ไม่สามารถควบคุมความเค้น ณ จุดเปลี่ยนวัฏจักรได้ รวมถึงเมื่อสังเกตผลการทดสอบของตัวอย่างที่ 3 จะมีความแข็งตัวในระยะแรกที่ยาวกว่าช่วงถัดไปที่วัฏจักรเดียวกัน เนื่องด้วยคอนกรีตอาจมีการเข้ารูปที่ดี แต่เมื่อได้พัฒนาแรงต่อไปเป็นไปได้อาจเกิดการแตกร้าวภายในคอนกรีตอย่างรวดเร็วทำให้ค่าความแข็งตัวของคอนกรีตลดลง โดยที่ตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 ภายหลังจากการทดสอบมีการเสียรูปแบบที่ 4 คือ มีการแตกร้าวเป็นเส้นทแยงมุม ในภาพที่ 4.6 ซึ่งหลังจากที่ได้แทนค่าความแข็งตัวเริ่มต้นลงในแบบจำลองเป็นผลทำให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้มีความแตกต่างกัน และเช่นเดียวกับกลุ่มที่ 1 คือ ค่าความเครียดสูงสุดจากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าการทดสอบ

กลุ่มที่ 3 ในกลุ่มนี้ค่าการแข็งตัวเริ่มต้นของแบบจำลองจะไม่สามารถควบคุมได้เหมือนดังเช่นในกลุ่มที่ 2 และ 3 รวมทั้งในส่วนของคุณค่าความเครียด ณ จุดถอนแรงที่ได้จากแบบจำลองนี้จะมีค่ามากกว่าการทดสอบจริง ทั้งนี้อาจสืบเนื่องมาจากการที่ไม่สามารถควบคุมค่าการแข็งตัวของแบบจำลองในวัฏจักรที่ 2 และ 3 ได้ อีกทั้งเป็นไปได้อาจเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ฮาร์ดแวร์หนึ่งไม่เหมาะสมกับการพัฒนาแรงในช่วงการรับแรงวัฏจักร โดยการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 ภายหลังจากการทดสอบมีการเสียรูปแบบที่ 4 ซึ่งมีการแตกร้าวเป็นแนวทแยงมุม ดังภาพที่ 4.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลพื้นฐานของแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซีดีภายใต้กำลังรับแรงวัฏจักร

กลุ่มตัวอย่าง	ตัวอย่าง	ข้อมูลพื้นฐานแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซีดี	
		$f'_c$ (ksc)	$E$ (ksc)
กลุ่มที่ 1	1	158	586,500
	2	163	172,500
	3	168	261,800
กลุ่มที่ 2	1	295	462,700
	2	286	401,000
	3	308	450,000
กลุ่มที่ 3	1	336	250,600
	2	242	334,200
	3	227	367,600



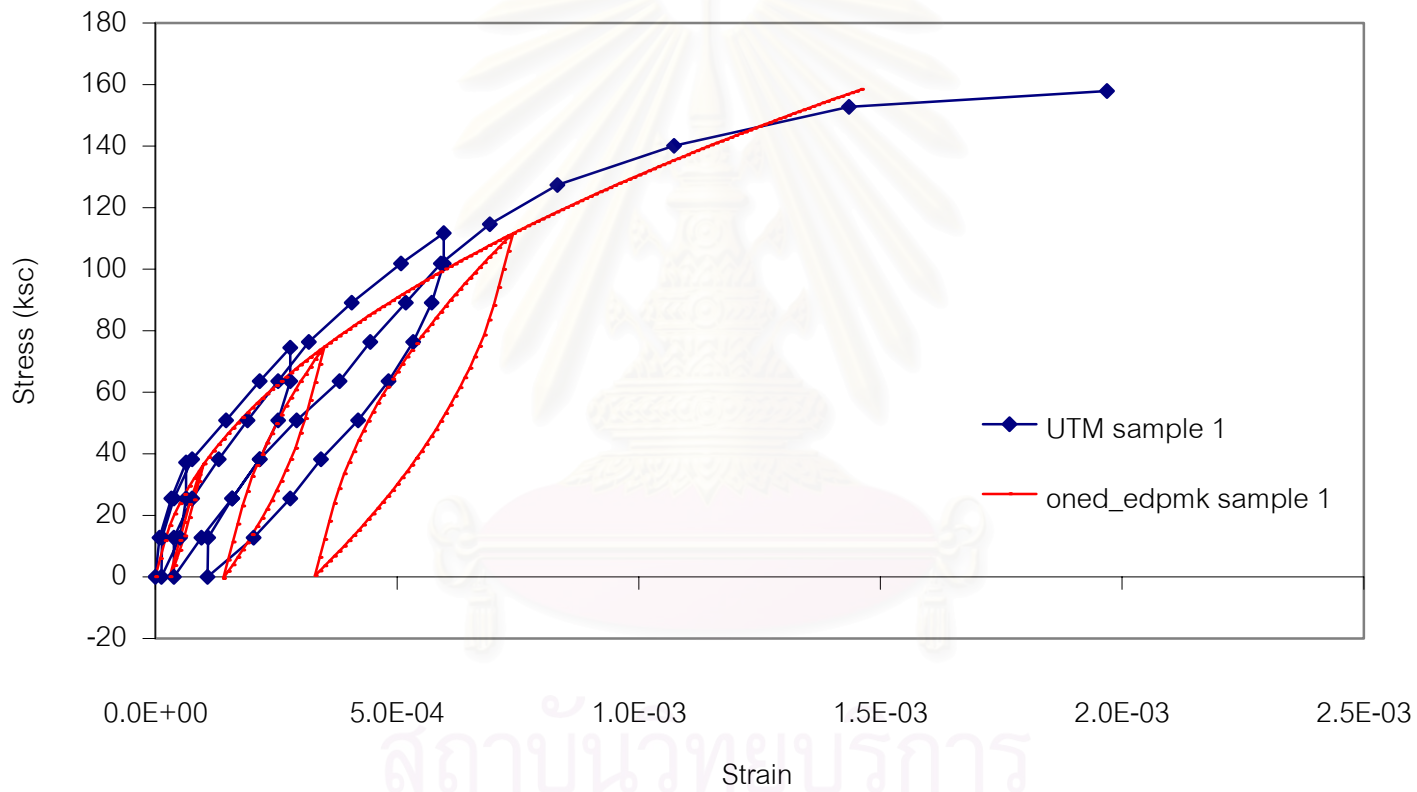
ภาพที่ 4.5 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 กลุ่มที่ 1 ภายหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงวัฏจักร



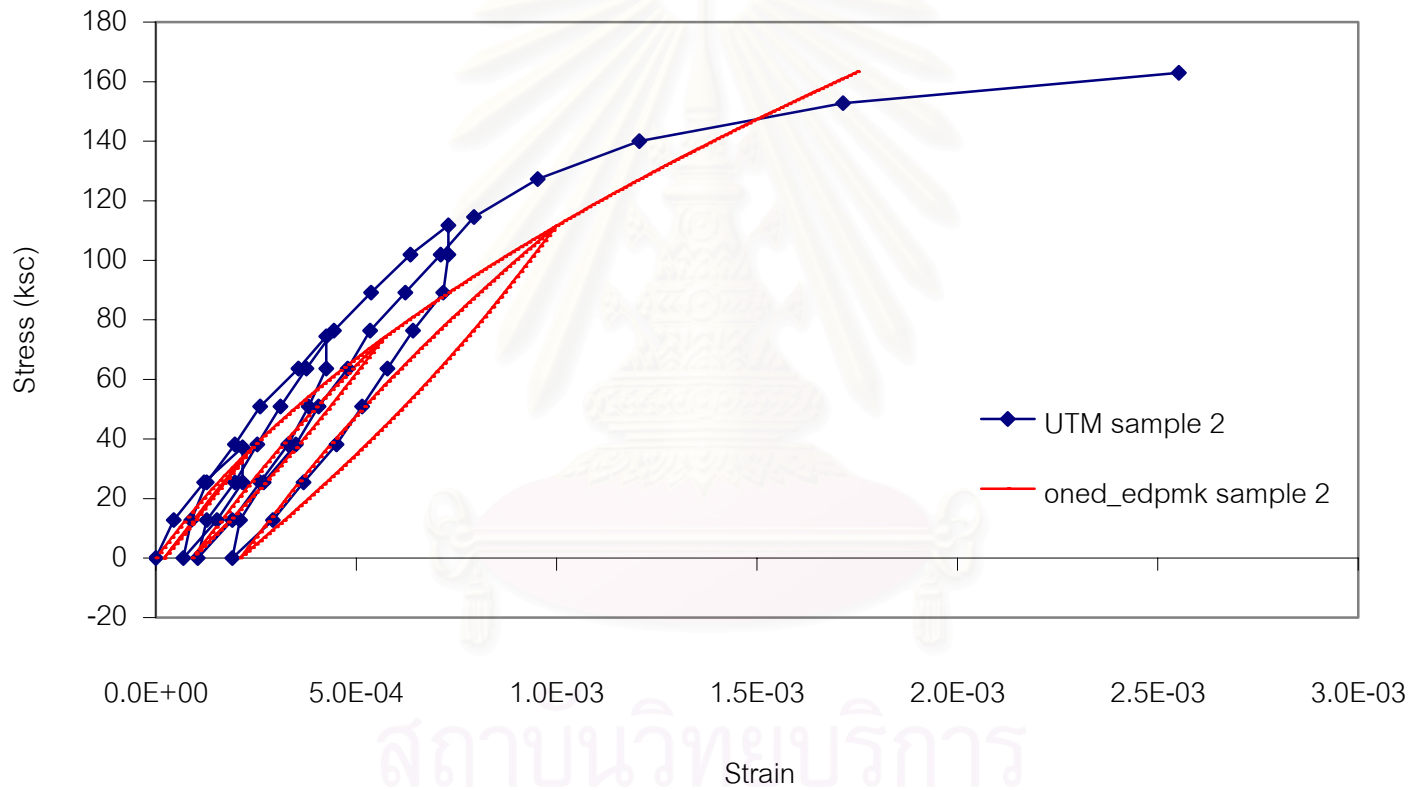
ภาพที่ 4.6 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 กลุ่มที่ 2 ภายหลังจากทดสอบกำลังรับแรงอัด



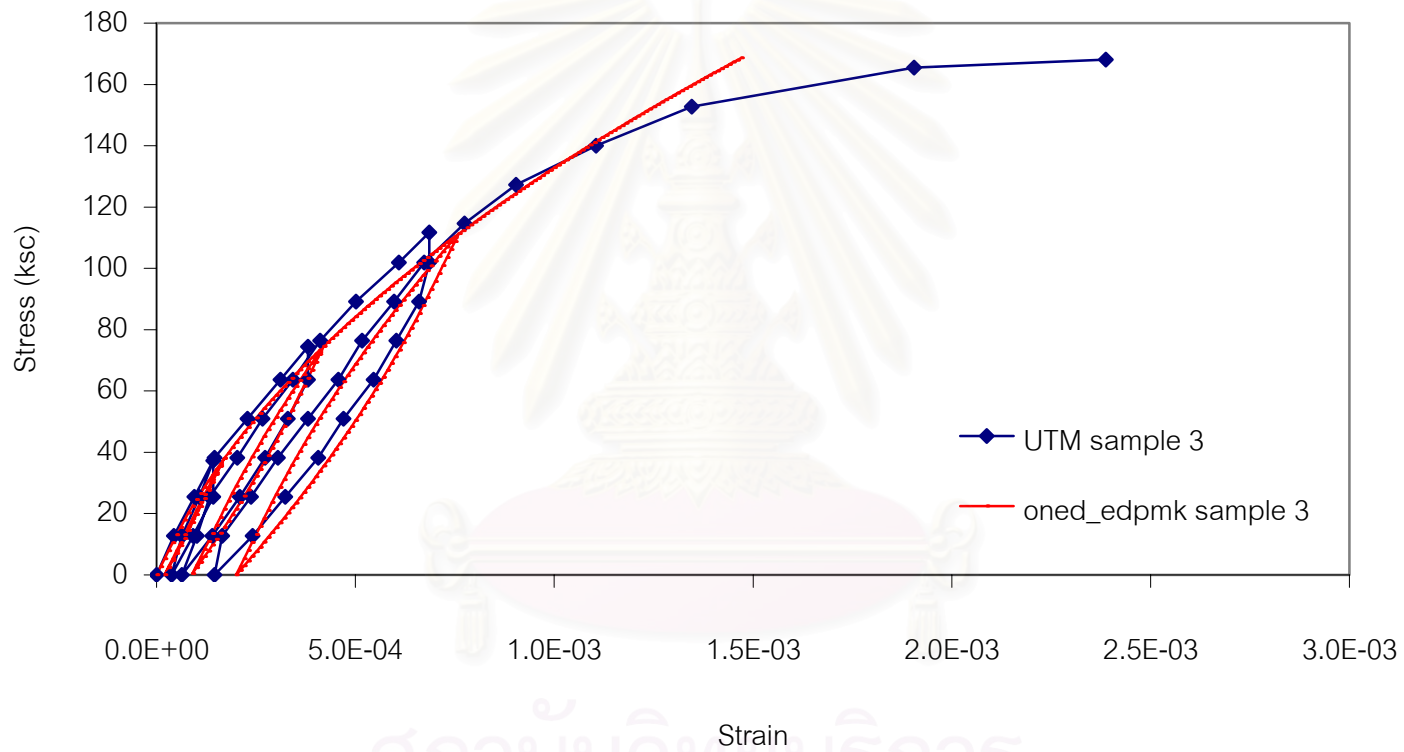
ภาพที่ 4.7 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 กลุ่มที่ 3 ภายหลังจากทดสอบกำลังรับแรงอัด



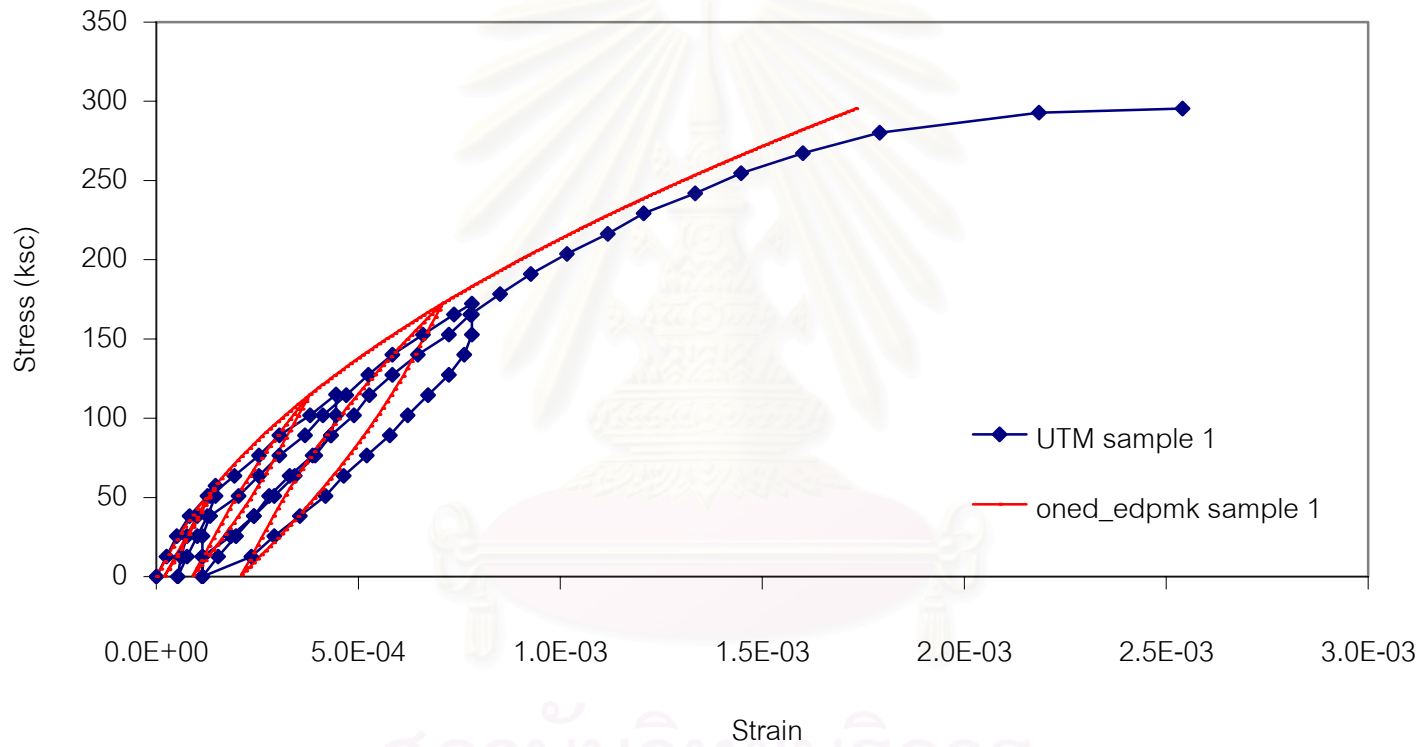
ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 1 (กลุ่ม 1)



ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 2 (กลุ่ม 1)

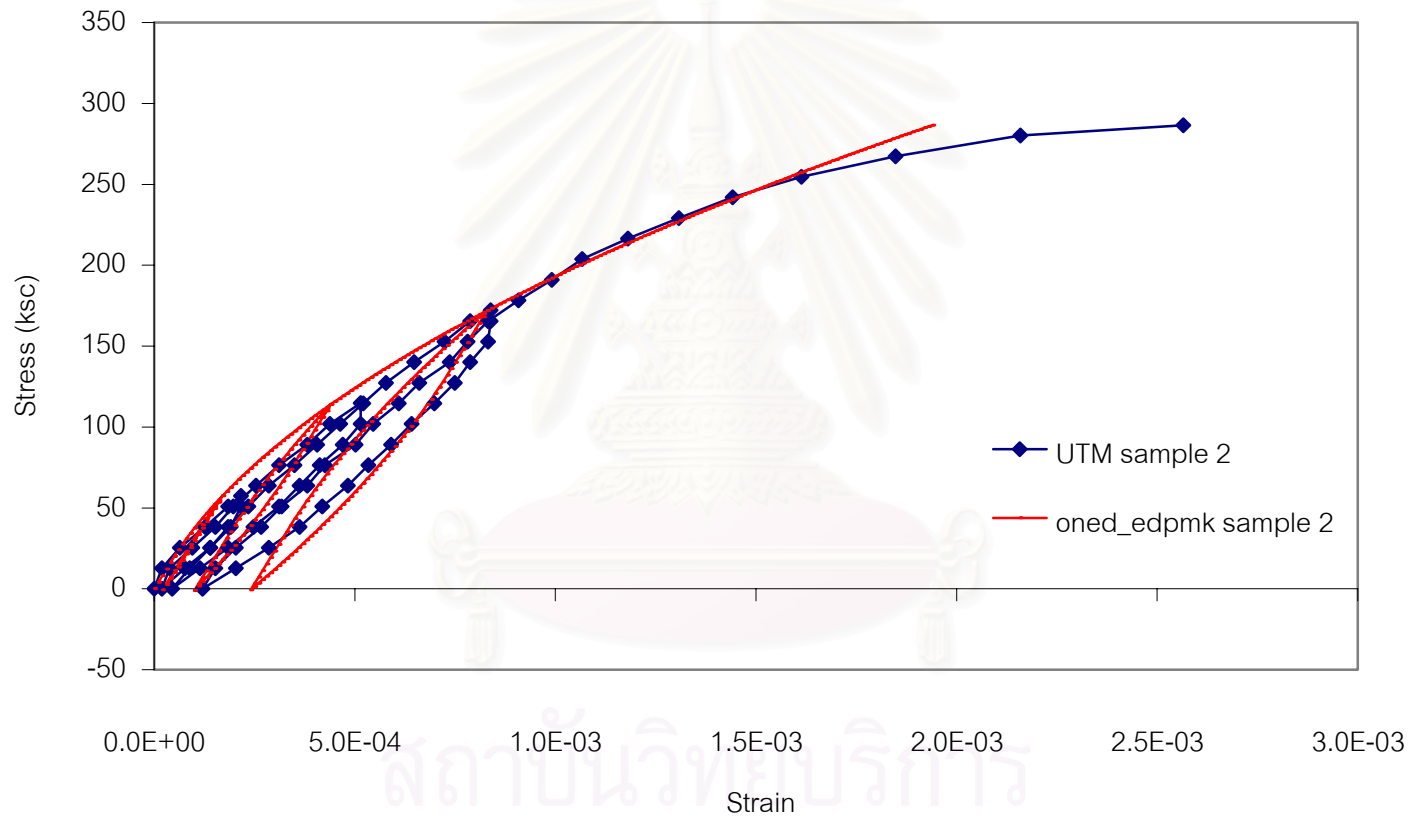


ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 3 (กลุ่ม 1)

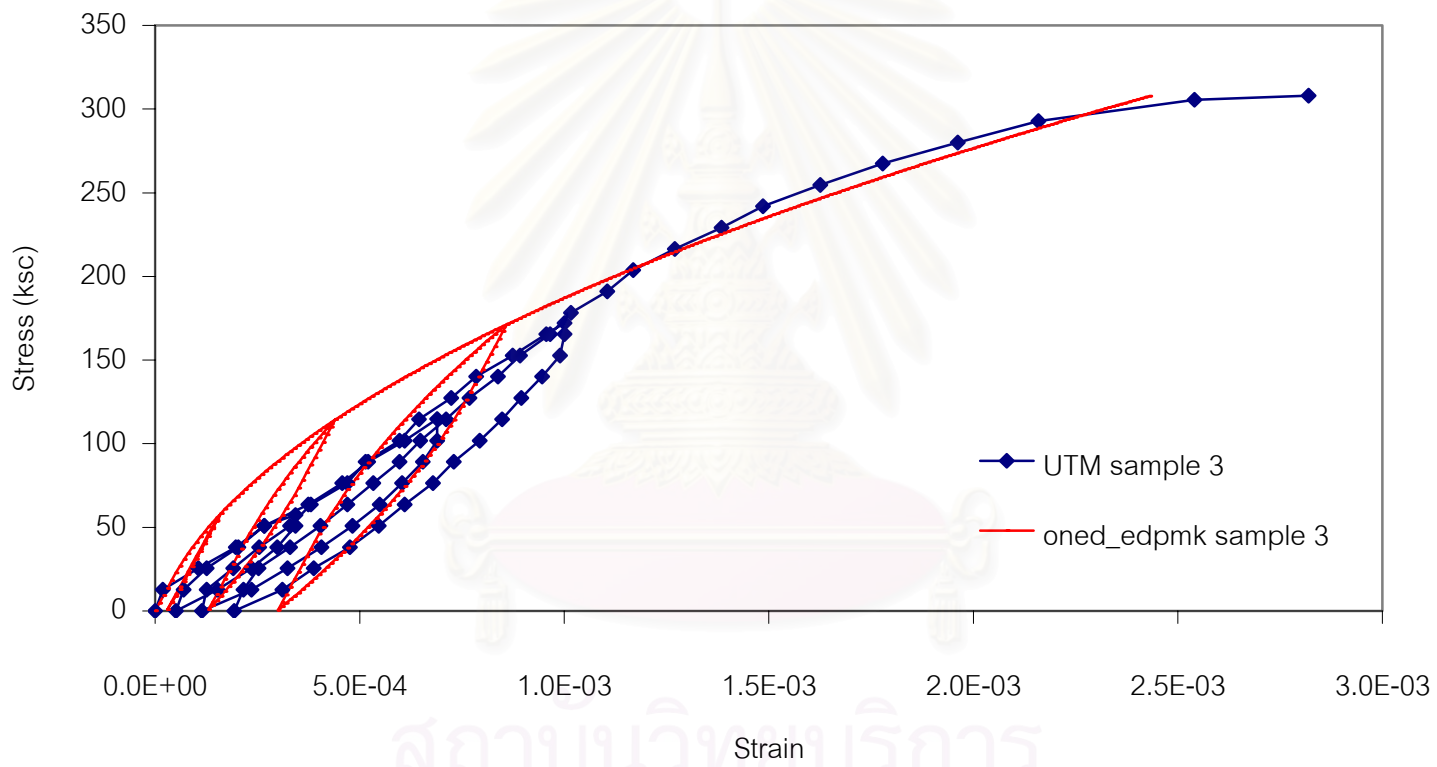


ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 1 (กลุ่ม 2)



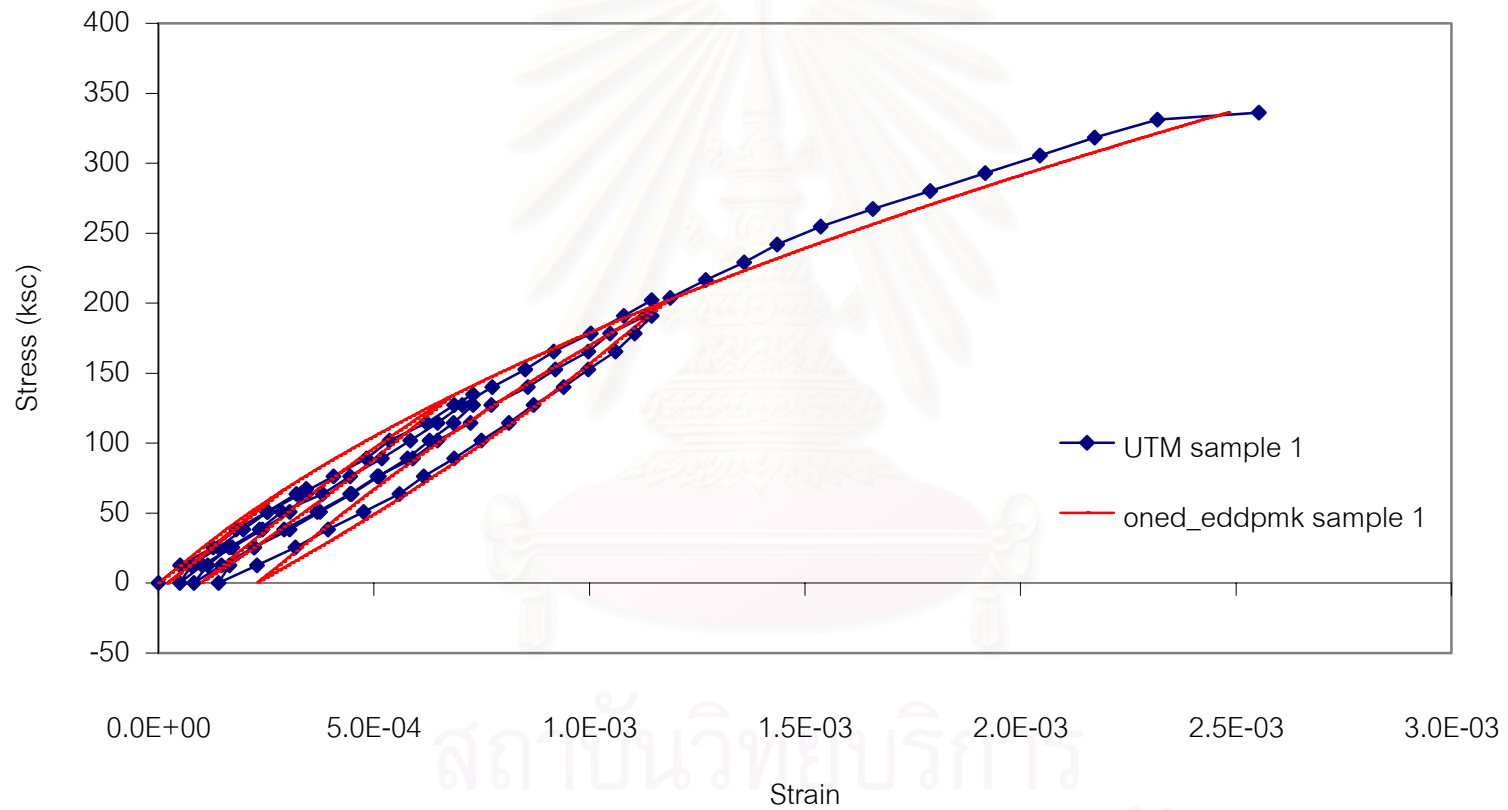


ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 2 (กลุ่ม 2)

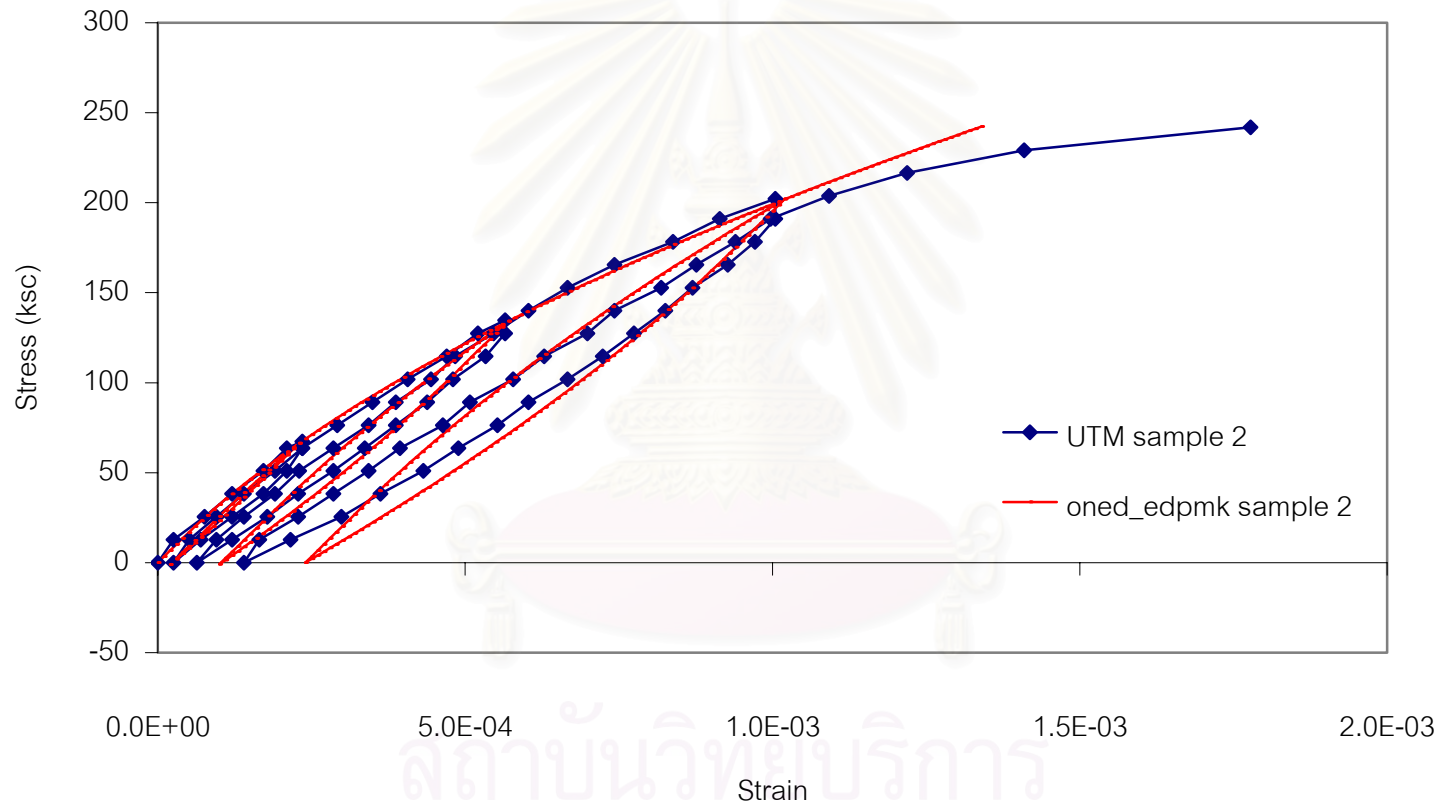


ภาพที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 3 (กลุ่ม 2)

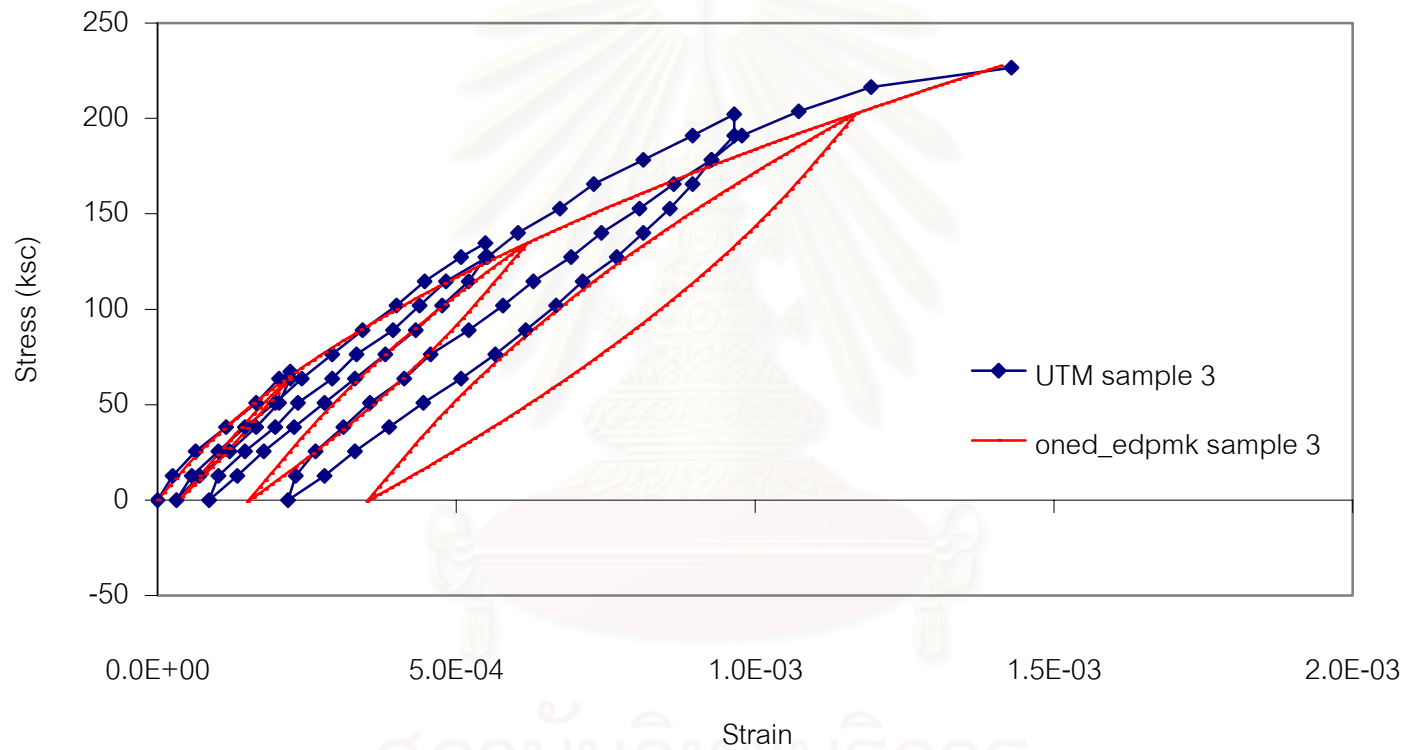
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 1 (กลุ่ม 3)



ภาพที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 2 (กลุ่ม 3)



ภาพที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสภาพรับแรงวัฏจักร ตัวอย่าง 3 (กลุ่ม 3)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายในการหาความสัมพันธ์ของแบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองคอนกรีต โดยที่ได้นำหลักการทางด้านอุณหพลศาสตร์มาพัฒนาแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในเรื่องของแบบจำลองพลาสติกที่เรียกว่า ไฮเปอร์พลาสติกซิตี (Hyperplasticity) เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของตัวอย่างคอนกรีตภายใต้การรับแรงอัด และการรับแรงวัฏจักรได้ใกล้เคียงกับการทดสอบ โดยการเปรียบเทียบวิธีการเชิงตัวเลขมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของความเค้นและความเครียดในช่วงพลาสติกของวัสดุที่ไม่ขึ้นกับอัตรา (Rate-independent material)

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ตามที่ได้ทำงานวิจัยทำให้ค้นพบแนวทางใหม่อีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาแบบจำลองทางด้านพลาสติกที่เรียกว่า ไฮเปอร์พลาสติกซิตี ควบคู่ไปกับการใช้ทฤษฎีความเสียหายแบบต่อเนื่อง โดยการนำไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตในระดับมหภาค

5.1.2 ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในการรับแรงอัดเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบแล้ว พบว่ามีอัตราของความเค้นใกล้เคียงกัน ในขณะที่ข้อมูลจากแบบจำลองจะถึงขอบเขตการแปรผันตรงก่อนการทดสอบ ส่วนความเครียดสูงสุดจากแบบจำลองนี้จะมีค่าน้อยกว่าแต่ก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เมื่อประเมินจากผลโดยรวมจากการเปรียบเทียบดังกล่าวจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้นั้นใกล้เคียงกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสามารถทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้กำลังรับแรงอัดด้วยแบบจำลองนี้ได้

5.1.3 จากการเปรียบเทียบการใช้แบบจำลองและระเบียบวิธีการคิดเชิงตัวเลขกับผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองซึ่งพัฒนามาประยุกต์ใช้กับการรับแรงวัฏจักรที่ความเค้นร้อยละ 25, 50 และ 75 นี้ไม่สามารถควบคุมค่าความเค้น ณ จุดเปลี่ยนวัฏจักรได้ อีกทั้งค่าการ

แข็งตัวของคอนกรีต และค่าความเครียดสูงสุดที่ได้จะน้อยกว่าการทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามค่าต่าง ๆ ดังกล่าวนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งหากพิจารณาจากผลที่ได้โดยรวมแล้วค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีความใกล้เคียงกับการทดสอบจริง ฉะนั้นแล้วจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้กำลังรับกำลังรับแรงวัฏจักรได้ โดยทั้งนี้ต้องอาศัยข้อมูลพื้นฐานของการทดสอบกำลังรับแรง จากเครื่อง Universal testing machine

5.1.4 แบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้เป็นทางเลือกในการประยุกต์เป็นโปรแกรมย่อย (Sub routine) ในโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม

5.2.1 ศึกษาเพิ่มเติมแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีจากงานวิจัยนี้ โดยการพัฒนาเพิ่มพารามิเตอร์อื่น ๆ เช่น พารามิเตอร์ทางอุณหภูมิ เพื่อใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในการประยุกต์ใช้เป็นทางเลือกต่อไป

5.2.2 ประยุกต์แบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีไปใช้เปรียบเทียบพฤติกรรมและศึกษาค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงอัด 3 แกน สำหรับวัสดุวิศวกรรม เช่น คอนกรีต, หิน ฯลฯ กับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Triaxial Rock Mechanics (ณ สาขา วิศวกรรมปฐพี ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

5.2.3 นำแบบจำลองไฮเปอร์พลาสติกซิตีจากงานวิจัยนี้ ไปใช้ทำนายพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของงานทางด้านคอนกรีต เช่น คอนกรีตกำลังสูง (800 – 1500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และคอนกรีตทนซัลเฟต

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

รัชชวาล เศรษฐบุตตร. คอนกรีต เทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร, 2540.

รัชชวาล เศรษฐบุตตร และ คณะ. คู่มือการทดสอบ หิน ทราวย และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร, 2541.

วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร: ป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2544.

สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. เอกสารประกอบการเรียนวิชา Plasticity in soil mechanics: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

### ภาษาอังกฤษ

Annual Book of ASTM Standards. 1st. Volume 04.02. Detroit: American Concrete Institute, 1996.

Changes in the properties of ordinary Portland cement and their effects on concrete. Concrete Society Technical No 29, 1986

Higginson, E.C.,Wallace, G.B. and Ore, E.L., "Effect of maximum size of aggregate on compressive strength of mass concrete," Amer. Concr. Inst. Sp. Publicn (1963): 219-256.

Jirasek, M and Bazant, Z.P., "Inelastic analysis of structure," (2002)

Likitlersuang, S and Houlsby, G.T., "Hyperplasticity model for Bangkok clay," Proceeding of the 15<sup>th</sup> Southeast Asian Geotechnical Conference (November 2004):813-818.

Likitlersuang, S., "Tuning of thermomechanic model for fine resistance concrete work," Proceeding of the 10<sup>th</sup> NCCE (May 2005)

Neville, A.M. Properties of Concrete. 3rd. New York: Longman, 1981.

Neville, A.M., and Brooks, J.J. Concrete Technology. 1st. Singapore: Longman, 1987.



- Price, W.H., "Factors influencing concrete strength," J. Amer. Concr. Inst. (1951): 417-432.
- Puzrin, A.M and Houlsby, G.T., "A thermomechanical framework for rate-independent dissipative materials with internal function," International Journal of Plasticity (2001): 1147-1165.
- Puzrin, A.M and Houlsby, G.T., "Fundamentals of kinematic hardening hyperplasticity," International Journal of Solids and Structures (2001): 3771-3794.
- Teychenne, D.C., Franklin, R.E. and Erntroy, H. Design of Normal Concrete Mixes. London: Department of the Environment, 1986
- Wang, P.T., Shah, S.P., and Naman, A.E., "Stress-strain curves of normal and lightweight concrete in compression," J. Amer. Concr. Inst. (November 1978): 603-611.

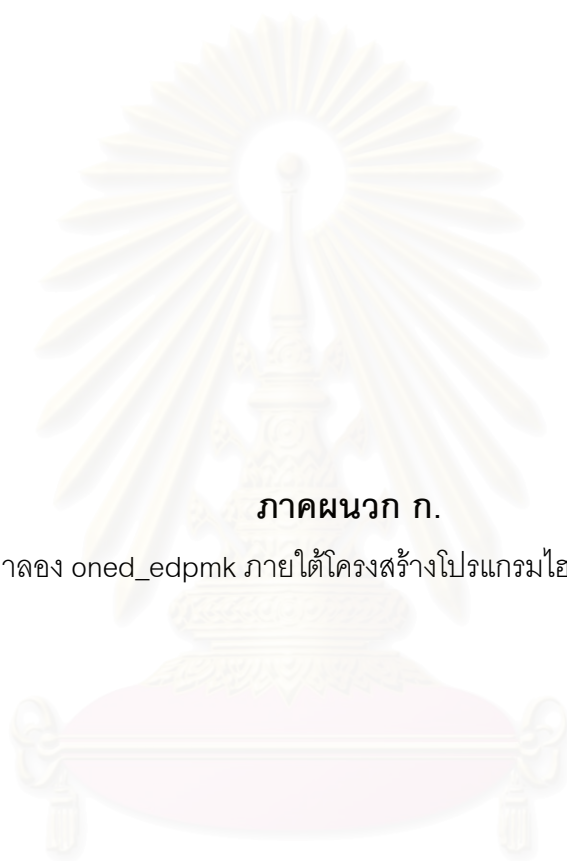


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

แบบจำลอง oned\_edpmk ภายใต้โครงสร้างโปรแกรมไฮเปอร์พลาสติคซิติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

%Kinematic hardening hyperplasticity model with damage parameter
%multiple yield surfaces
%
%Created on June, 2005 by S. Likitlersuang & T.Chompoorat
%
%Created an abbreviation of parameter
%stress = sig, d_stress = dsig
%strain = eps, d_strain = deps
%plastic_parameter = alpp(i), d_plastic_parameter = dalpp(i)
%damage_parameter = alpd, d_damage_parameter = dalpd
%
%Material parameters
%n = number of yield surface
%E = Young modulus
%H(i) = (1-i/n)^3*E/2, Hardening function
%k(i) = k0+(k1-k0)*i/n, Yield criteria
%R = 1st damage parameter
%alpinf = 2nd damage parameter
%
%Input variable
%inc_eps = Incremental strain
%
%Output variable
%C = [dsig; deps; dalpd; lamda_d; dalpp(i); lamda_p(i)]
%g = energy function
%yp(i) = plastic yield function
%yd = damage function
%-----
clear;

```

```

%Data from universal testing machine
load matlab150_1
sig = data(:,1);
eps = data(:,2);
plot(eps,sig,'b*','linewidth',1)
hold on
load matlab150_2
sig = data(:,1);
eps = data(:,2);
plot(eps,sig,'b*','linewidth',1)
hold on
load matlab150_3
sig = data(:,1);
eps = data(:,2);
plot(eps,sig,'b*','linewidth',1)
hold on
%Input strength
fcp =230;
fcinf = 229;
E = 387027; % The value of initial young modulus
%Model parameters
n = 50;
%E = 15210*sqrt(fcp); The equation reference from Secant young modulus
alpinf = 1-(fcinf/fcp)^2
R = fcp^2/(2*E*alpinf);
a = 0.04;
b = 0.04;
for i = 1:1:n,
    H(i) = (1-(i/n))^b*E/(2*a);

```

```

k(i) = (0.05*fcf)+(1.1*fcf-0.05*fcf)*(i/n);
end
%Initial values
sig = 0; dsig = 0;
eps = 0; deps = 0;
alpd = 0; dalpd = 0;
alpp = zeros(n,1); dalpp = zeros(n,1);
sgalpp = zeros(n,1);
A = zeros (4+2*n, 1);
B = zeros (4+2*n, 4+2*n);
C = zeros (4+2*n, 1);
echeck=-1;
%testing programme
ntest = 1;
nstep = [144;200;1000];
inc_eps = [0.00001; -0.00001; 0.00001]; %strain control
%Calculation
for itest = 1:1:ntest,
    for istep = 1:1:nstep(itest),
        g = -sig^2/(2*E*(1-alpd))-sig*sum(alpp)/n+ (1-alpd)*sum(H'.*(alpp.^2))/(2*n);
        chip = sig-(1-alpd)*(H'.*alpp)/n;
        chid = sig^2/(2*E*(1-alpd)^2);
        yp = abs(chip)-k';
        yd = chid-R*alpinf/(1-alpd);
        A (1, 1) =inc_eps(itest); %strain control
        B (1, 2) =1; %strain control
        B(2,1)=1/(E*(1-alpd)); B(2,2)=-1; B(2,3)=sig/(E*(1-alpd)^2);
        B (3, 3) =-1; B (3, 4) =1;
        if yd >= 0 %damage calculation

```

```

B (4, 1) =sig/ (E*(1-alpd) ^2);
B (4, 4) =sig^2/ (E*(1-alpd) ^3)-(R*alpinf)/ (1-alpd)^2;
A (4, 1) =-yd;
else %elasto-plastic calculation
    B (4, 1) =0;
    B (4, 4) =1;
    A (4, 1) =0;
end
for i = 1:1:n,
    if chip(i) == 0
        sgalpp (i) = 0;
    else
        sgalpp (i) = abs(chip(i))/chip(i);
    end
    B (2, 3+2*i) =1/n;
    B (3+2*i, 3+2*i) =-1;
    B (3+2*i, 4+2*i) =sgalpp (i);
    if yp(i) >= -k(i)/500 %plastic calculation
        B (4+2*i, 1) =sgalpp (i);
        B (4+2*i, 4+2*i) =-(1-alpd)*H (i)/n;
        B (4+2*i, 4) =H (i)*alpp (i)*sgalpp (i);
        A (4+2*i, 1) =-yp (i);
    else %elastic calculation
        B (4+2*i, 1) =0;
        B (4+2*i, 4+2*i) =1;
        B (4+2*i, 4) =0;
        A (4+2*i, 1) =0;
    end
end
end

```

```

C = BA;
if C(4) < 0 %elastic check
    B (4, 1) =0;
    B (4, 4) =1;
    A (4, 1) =0;
    echeck=1;
end
for i = 1:1:n
    if C(4+2*i) < 0 %elastic check
        B (4+2*i, 1) =0;
        B (4+2*i, 4+2*i) =1;
        B (4+2*i, 4) =0;
        A (4+2*i, 1) =0;
        echeck=1;
    end
end
if echeck == 1
    C = BA;
    echeck=-1;
end
sig = sig+C(1);
eps = eps+C(2);
alpd = alpd+C(3);
for i = 1:1:n,
    alpp (i,1) = alpp(i,1)+C(3+2*i,1);
end
fprintf ('%12.2f\n',sig);
fprintf ('%12.5f\n',eps);
if itest==1

```



```
    plot (eps,sig,'r.','linewidth',0.5);  
elseif itest==2  
    plot (eps,sig,'y.','linewidth',0.5);  
else  
    plot (eps,sig,'b.','linewidth',0.5);  
end  
hold on  
end  
end  
xlabel ('strain'); ylabel('stress (ksc)');  
title ('stress-strain curve');  
grid on
```

---

The end

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนกร ชมภูรัตน์ เกิดวันที่ 4 สิงหาคม 2523 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2546 ในขณะที่ศึกษาอยู่นั้น ได้รับทุนผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย ปีการศึกษา 2547 และได้รับทุนผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย