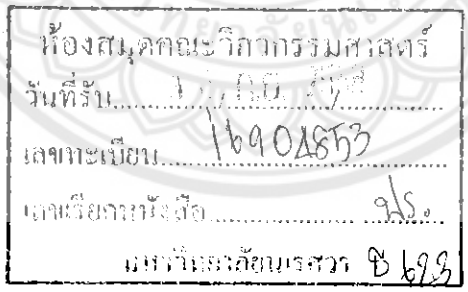
การประเมินสมการสำหรับทำนายค่าการคืบตัวของคอนกรีต

Evaluation of Concrete Creep Prediction Model by Various Methods

นายธีรเดช นาคเกิด รหัส 53360316

นายพิสิฐชัย ออเขาย้อย รหัส 53360552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2556

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การประเมินสมการสำหรับทำนายค่าการคืบตัวของคอนกรีต		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายธีรเดช	นาคเกิด	รหัส 53360316
	นายพิสิฐชัย	ออเขาย้อย	รหัส 53360552
ที่ปรึกษาโครงงาน	ผศ.ดร.สรัณกร เหมะวิบูลย์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
ปีการศึกษา	2556		

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงงาน

(ผศ.ดร.สรัณกร เหมะวิบูลย์)

.....กรรมการ

(ผศ.ดร.สสิกรณ์ เหลืองวิชชเจริญ)

.....กรรมการ

(อาจารย์บุญพล มีไชโย)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การประเมินสมการสำหรับทำนายค่าการคืบตัวของคอนกรีต	
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายธีรเดช นาคเกิด	รหัส 53360316
	นายพิสิฐชัย ออเขาย้อย	รหัส 53360552
ที่ปรึกษาโครงงาน	ผศ.ดร.สรัณกร เหมะวิบูลย์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	
ปีการศึกษา	2556	

.....

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าการคืบตัวแบบดึงของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการต่างๆ ที่ได้รับการยอมรับและใช้งานทั่วไปในต่างประเทศ โดยค่าที่คำนวณได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าการคืบตัวของคอนกรีตที่ได้ทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับการคำนวณค่าการคืบตัวแบบดึงของคอนกรีตใช้ 4 วิธี คือ วิธีของ ACI (American Concrete Institute), CEB MC90-99 (Comite' Europ'een du B'eton), Bazant(Bazant s Methods) และ GL2000 (Gardner and Lockman) โดยปัจจัยที่พิจารณาสำหรับกรณีการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดสอบประกอบด้วย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(0.35และ0.55) และอายุของคอนกรีตเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก (7 และ 28 วัน)จากการศึกษาพบว่าค่าการคืบตัวแบบดึงที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการทั้ง 4 สำหรับกรณี ส่วนผสมของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากับร้อย 40 ของกำลังดึงอายุ 14 วัน พบว่าค่าการคืบตัวแบบดึงที่คำนวณได้จากแต่ละวิธีมีค่าเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยโดยที่การคืบตัวที่คำนวณด้วยวิธีของ GL2000 มีค่าสูงที่สุดรองลงมาได้แก่ วิธีของ Bazant, CEB MC90-99 และวิธีของ ACI ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลทดสอบพบว่าสำหรับทุกปัจจัยที่พิจารณาค่าการคืบตัวที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าการคืบตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีทั้ง 4

คำสำคัญ : การคืบตัว, การคืบตัวแบบดึง, แบบจำลองการคืบตัว

Project title	Evaluation of Concrete Creep Prediction Model by Various Methods
Name	Mr. Theeradet Nakkert ID. 53360316
	Mr. Pisitchai Orkoayoy ID. 53360552
Project advisor	Asst. Prof. Dr. Saranagon Hemavibool
Major	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Academic year	2013

.....

Abstract

This project aims to study and compare the tensile creep of concrete calculated using different existing prediction models in the world. Predicted values of tensile creep werecompared with the experimental results. For the prediction of concrete s tensile creep, there are four types of calculations including ACI (American Concrete Institute), CEB MC90-99 (Comite' Europ'een du B'eton), Bazant(Bazant s Methods)andGL2000 (Gardner and Lockman). The water-binder ratios (0.35 and 0.55), and the age at loading (7 days and 28 days) were the parameters to be considered. The study has found that in the case of concrete mixture which water-binder ratios is equal to 0.50 andapplied 40% tensile stress of the ultimate tensile strengthatthe age 14 days,the tensile creep which has been calculated by method of the GL2000 was the highest followed by the method of Bazant, CEB MC90-99 and methods of ACI respectively. When comparing the calculation results with the experimental results, it was found that all of the creep predictions underestimate the experimental results

Keywords : creep, tensile creep, creep prediction model

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การประเมินสมการสำหรับทำนายค่าการคืบตัวของคอนกรีตฉบับนี้ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้นเพื่อประกอบการศึกษา ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปีการศึกษา 2556 ในการนี้ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้า รวบรวมจากตำรา วิทยานิพนธ์ เอกสารทางวิชาการอื่นๆ ตลอดจนข้อมูลบนเว็บไซด์ แล้วทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์ตามแนวทางการศึกษาวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุลวงด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สรัณกร เหมะวิบูลย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน รวมถึงนายชำนาญ น้อยพิทักษ์ และนายมนตรี คงสุข ผู้ช่วยที่ปรึกษา ที่ได้ประสาทความรู้ตลอดจนการตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้ผู้วิจัย ซึ่งผู้วิจัยจะได้จดจำและระลึกถึงตลอดไป หากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ก่อคุณประโยชน์ใดบ้าง ผู้วิจัยขอมอบความดีเหล่านี้ให้อาจารย์ที่ปรึกษา คณาจารย์และมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่บ่มความรู้และวิทยาการให้กับผู้วิจัย และหากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีส่วนบกพร่องใด ผู้วิจัยขอน้อมรับและจะได้ปรับปรุงในโอกาสต่อไป

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรม
นายธีรเดช นาคเกิด
นายพิสิฐชัย ออเขาย้อย
กันยายน 2557

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญภาพ ..... ช

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดการวิจัย 1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 1

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี 3
2.1 การแตกร้าวของคอนกรีต 3
2.2 การหดตัวของคอนกรีต 4
2.3 การคืบตัวของคอนกรีต 5
2.4 การประเมินการคืบตัว 6
2.4.1การประเมินการคืบตัวด้วยวิธี ACI 6
2.4.2การประเมินการคืบตัวด้วยวิธี Bazant 10
2.4.3การประเมินการคืบตัวด้วยวิธี CEB MC90-99 16
2.4.4การประเมินการคืบตัวด้วยวิธี GL2000 26

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน 29
3.1 ศึกษาการประเมินค่าการคืบตัว 29
3.2 โครงสร้างโปรแกรม 29
3.3 ลักษณะโปรแกรมการคำนวณ 31

บทที่ 4 ผลการวิจัย 40
4.1 ค่าการเปรียบเทียบจากการทดลองใช้โปรแกรม 40
4.2 การวิเคราะห์ผลการใช้งาน 56

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุป 57
5.1 สรุปผล 57
5.2 ข้อเสนอแนะ 57

บรรณานุกรม 58
ภาคผนวก 61
ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน 66

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่aและ b 8
ตารางที่ 2.2 ค่าสภาวะมาตรฐานการคืบของสมาคมคอนกรีตอเมริกา 8
ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวและการคืบของความหนาเฉลี่ย 8
ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของการหดตัวและการคืบ :CEB-FIP 78 22
ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของประเภทปูนซีเมนต์ 23
ตารางที่ 2.6 สัมประสิทธิ์ของกำลังที่ขึ้นอยู่กับประเภทปูนซีเมนต์ 25
ตารางที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของชนิดปูนซีเมนต์แต่ละประเภท 27
ตารางที 2.8 ตัวแปรที่สำคัญใช้ในการคำนวณแต่ละวิธี 28
ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความคลาดเคลื่อนของการคืบตัว 41
ตารางที่ 4.2 ค่าการคืบตัวและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองใช้งานครั้งที่ 1 45
ตารางที่ 4.3 ค่าการคืบตัวและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองใช้งานครั้งที่ 2 48
ตารางที่ 4.4 ค่าการคืบตัวและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองใช้งานครั้งที่ 3 51
ตารางที่ 4.5 ค่าการคืบตัวและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองใช้งานครั้งที่ 4 54

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมของการคืบ: CEB-FIP 70 17
ภาพที่ 2.2 สัมประสิทธิ์อายุคอนกรีตเริ่มรับน้ำหนักของการคืบ: CEB-FIP 17
ภาพที่ 2.3 สัมประสิทธิ์ส่วนประกอบคอนกรีตของการคืบและการหดตัว: CEB-FIP 70 18
ภาพที่ 2.4 สัมประสิทธิ์ความหนาชิ้นส่วนของการคืบ: CEB-FIP 70 18
ภาพที่ 2.5 สัมประสิทธิ์การพัฒนาการคืบและการหดตัวกับเวลา 19
ภาพที่ 2.6 อัตราส่วนความแข็งแรงของคอนกรีต: CEB-FIP 70 20
ภาพที่ 2.7 สัมประสิทธิ์การพัฒนาความเครียดยืดหยุ่นที่ตามมาภายหลังกับเวลา:CEB-FIP 78 21
ภาพที่ 2.8 สัมประสิทธิ์ความหนาโนชั่นนอลของการคืบ:CEB-FIP 78 21
ภาพที่ 2.9 พารามิเตอร์การไหลพลาสติกของการคืบ: CEB-FIP 78 22
ภาพที่ 3.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรม 30
ภาพที่ 3.2 การใส่ค่าฟังก์ชั่น 31
ภาพที่ 3.3 การใช้ฟังก์ชั่นเชื่อมโยง 32
ภาพที่ 3.4 การเรียกใช้ฟังก์ชั่นทางสถิติ 33
ภาพที่ 3.5 การใส่ข้อมูลให้ฟังก์ชั่น 33
ภาพที่ 3.6 การแทรกกราฟ 34
ภาพที่ 3.7 หน้าต่างข้อมูลของกราฟ 34
ภาพที่ 3.8 การเปิดไฟล์โปรแกรมช่วยคำนวณ 35
ภาพที่ 3.9 การกรอกข้อมูลต่างๆ 36
ภาพที่ 3.10 การข้อมูลการทดลองการคืบตัว 36
ภาพที่ 3.11 วิธีดูผลการเปรียบเทียบ 37
ภาพที่ 3.12 ค่าการคืบตัวในรูปแบบตาราง 37
ภาพที่ 3.13 ค่าการคืบตัวในรูปแบบกราฟ 38
ภาพที่ 3.14 ค่าความคลาดเคลื่อนของทฤษฎีกับค่าการทดลอง 38
ภาพที่ 3.15 การปิดโปรแกรม 39
ภาพที่ 4.1 กราฟค่าการคืบตัวที่ได้จากโปรแกรมคำนวณ 42
ภาพที่ 4.2 กราฟค่าการคืบตัวที่ได้จากทฤษฎี 42
ภาพที่ 4.3 การคืบตัวตามทฤษฎีเปรียบเทียบค่าการคืบตัวของการทดลองครั้งที่ 1 46
ภาพที่ 4.4 การคืบตัวตามทฤษฎีเปรียบเทียบค่าการคืบตัวของการทดลองครั้งที่ 2 49
ภาพที่ 4.5 การคืบตัวตามทฤษฎีเปรียบเทียบค่าการคืบตัวของการทดลองครั้งที่ 3 52
ภาพที่ 4.6 การคืบตัวตามทฤษฎีเปรียบเทียบค่าการคืบตัวของการทดลองครั้งที่ 4 55

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตเป็นปัญหาที่พบมากในปัจจุบันและยังคงพบอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตมีกลไกการเกิดที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทำให้นักวิจัยและวิศวกรในปัจจุบันเริ่มเห็นความสำคัญของปัญหาดังกล่าวและพยายามแก้ไขด้วยวิธีการต่างๆ และพบว่าการคืบตัวแบบดึง(Tensile Creep) ของคอนกรีตสามารถช่วยลดหน่วยแรงดึงที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีตช่วยใช้คอนกรีตมีการแตกร้าวยากขึ้นแต่ข้อมูลการคืบตัวแบบดึงทั้งในประเทศและต่างประเทศมีน้อยมาก เนื่องจากนักวิจัยส่วนใหญ่เน้นศึกษาการคืบตัวแบบอัดเป็นหลัก ทำให้สมการที่ใช้คำนวณหรือประเมินค่าการคืบตัวของคอนกรีตมีแต่แบบอัด (Compressive Creep) งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาแนวทางการสร้างสมการประเมินค่าการคืบตัวแบบดึงใช้เองในประเทศโดยการเริ่มจากการศึกษาจากสมการประเมินการคืบตัวแบบอัดที่นิยมใช้ในต่างประเทศ สำหรับสมการต่างประเทศที่นำมาศึกษาทั้งหมด 4 วิธีประกอบด้วย วิธีของ ACI (American Concrete Institute), CEB MC90-99 (Comite' Europ'een du B'eton), Bazant (Bazant s Methods) และ GL2000 (Gardner and Lockman)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าการคืบตับของคอนกรีตที่ได้จากคำนวณวิธีทั้ง 4 วิธี

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าการคืบตัวที่คำนวณจากทั้ง 4 วิธีกับการคืบตัวที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาการคำนวณการคืบตัวแบบดึงของคอนกรีตใช้วิธีของ ACI, CEB MC90-99, Bazant และ GL2000 เพื่อเปรียบเทียบค่าการคืบตัวที่ได้ในแต่ละวิธี โดยการคำนวณค่าการคืบตัวจะใช้ส่วนผสมของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ให้น้ำหนักบรรทุกกระทำเท่ากับร้อย 40 ของกำลังดึง และเริ่มให้น้ำหนักบรรทุกที่คอนกรีตอายุ 14 วันและเปรียบเทียบระหว่างการคืบตัวที่ได้จากการคำนวณทั้ง 4 วิธีกับการคืบตัวที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเปรียบในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ0.35 และ 0.55และคอนกรีตแรงที่เริ่มรับน้ำหนักบรรทุกที่อายุ 7 และ 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้เข้าใจวิธีการและขั้นตอนการคำนวณค่าการคืบตัวทั้ง 4 วิธี และทราบค่าการคืบตัวของแต่ละวิธีและสามารถเปรียบเทียบได้ว่าการคืบตัวที่ได้จากการคำนวณแต่ละวิธีมีค่าแตกต่างกันอย่างไร

1.4.2 ทราบปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการประเมินค่าการคืบตัวของคอนกรีต

1.4.3 ทราบความแตกต่างของค่าการคืบตัวที่คำนวณจาก 4 วิธีกับการคืบตัวที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.4.4 สามารถเลือกวิธีการคำนวณการคืบตัวที่เหมาะสมจากทั้ง 4 วิธีได้

บทที่ 2

หลักการ และ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 นี้เป็นการศึกษาแนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าวของคอนกรีต ซึ่งผู้วิจัยจะเน้นไปที่การคืบตัวของคอนกรีต ซึ่ง หากแบ่งตามลักษณะของการเกิดหน่วยแรงสามารถแบ่งการคืบตัวได้เป็น 2 ประเภท คือ การคืบตัวที่เกิดจากหน่วยแรงของคอนกรีตเอง (Self-induced Stresses) ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับแรงกระทำภายนอก (ได้แก่ การคืบตัวที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต) และ การคืบตัวที่เกิดจาก แรงกระทำภายนอก (External Tensile Load)

2.1 การแตกร้าวของคอนกรีต

ปัจจุบันปัญหาการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้รับความสนใจจากสาธารณชนอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงการสาธารณะขนาดใหญ่ ไม่ว่าจะเป็นงานก่อสร้างถนน ทางด่วน หรืออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กนอกจากนี้ยังมีโครงสร้างอีกเป็นจำนวนมากที่เกิดปัญหาการแตกร้าวและต้องทำการซ่อมแซม ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก คนส่วนใหญ่เข้าใจว่าการแตกร้าวมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้ว การแตกร้าวยังส่งผลต่อปัญหาด้านความคงทนของโครงสร้างซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานลดลงอย่างมาก เนื่องจากเมื่อเกิดการแตกร้าว น้ำ อากาศและสสารต่างๆ สามารถแทรกผ่านรอยแตกเข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้อย่างรวดเร็ว

การแตกร้าวของคอนกรีตเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากการคำนวณออกแบบ หรือขั้นตอนการก่อสร้างที่ไม่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามกลับพบว่าแม้จะมีการออกแบบโครงสร้างอย่างถูกต้องและมีการควบคุมการก่อสร้างอย่างเคร่งครัดถูกต้องตามหลักวิชาการ แต่การแตกร้าวก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากกลไกการเกิดการแตกร้าวค่อนข้างซับซ้อน มีตัวแปรที่มาเกี่ยวข้องมากมาย และข้อมูลที่นำใช้ในการออกแบบเพื่อควบคุมการแตกร้าวยังมีไม่เพียงพอ

การแตกร้าวที่ไม่ได้มีสาเหตุจากน้ำหนักที่มากระทำและการทรุดตัว เช่น การแตกร้าวที่เกิดจากอุณหภูมิและการหดตัวของคอนกรีต มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมายเช่น อุณหภูมิ, สัมประสิทธิ์การขยายตัว, การหดตัวแบบอิสระ (Free Shrinkage), อัตราการหดตัว (Shrinkage Rate), การคืบตัวแบบดึง (Tensile Creep), โมดูลัสยืดหยุ่น, เปอร์เซ็นต์การยึดรั้ง และความสามารถในการต้านทานการแตกร้าว (Tensile Strain Capacity, TSC) ของคอนกรีต ปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการออกแบบและการทำนายการแตกร้าวที่เกิดจากอุณหภูมิและการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งเป็นการแตกร้าวที่พบมากในปัจจุบัน

2.2 การหดตัวของคอนกรีต

การหดตัว คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตเมื่อเกิดการสูญเสียน้ำ หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีของส่วนผสม การหดตัวของคอนกรีตมักจะเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์การหดตัวของคอนกรีตมีหลายประเภทเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆกันและเกิดจากสาเหตุที่แตกต่างกันไปชนิดของการหดตัวอาจสรุปได้เป็น 4 ชนิดดังต่อไปนี้

1. การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Chemical Shrinkage หรือ Hydration Shrinkage)
2. การหดตัวแบบออโตจีนัส(Autogenous Shrinkage)
3. การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)
4. การหดตัวเนื่องจากคาร์บอเนชั่น (Carbonation Shrinkage)

การหดตัวส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดปัญหาการแตกร้าวได้แก่การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้งการหดตัวแบบออโตจีเนียสเป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Chemical Shrinkage) ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายของคอนกรีตรวมกับอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องคะปิลลารี (Capillary Pores) ในเพสต์เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำทำให้เกิด Capillary Suction นี้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Self-desiccation การหดตัวแบบออโตจีเนียสแตกต่างจากการหดตัวแบบแห้งตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อมแต่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตเองการหดตัวแบบออโตจีเนียสเกิดขึ้นทันทีหลังจากผสมเสร็จแต่ในทางปฏิบัติจะมีผลต่อปริมาตรหลังจากที่เทคอนกรีตเสร็จแล้วเนื่องจากการหดตัวในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเทและจะมีผลในทางโครงสร้างหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวแล้วเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีตดังนั้นจึงนิยมวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น

การหดตัวแบบออโตจีนัสจะเกิดมากในคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาแล้วคอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคะปิลลารีที่น้อยกว่ามีขนาดเล็กกว่าและมีความต่อเนื่องของช่องว่างคะปิลลารีน้อยกว่าหรืออีกนัยหนึ่งมีค่าความซึมน้ำต่ำมากดังนั้นเมื่อความชื้นในช่องว่างคะปิลลารีถูกใช้ไปในปฏิกิริยาจึงเป็นการยากที่ความชื้นจากส่วนอื่นหรือความชื้นจากการบ่มจะเข้ามาเสริมในบริเวณดังกล่าวได้จึงทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสในคอนกรีตเหล่านี้สูงจนไม่สามารถละเลยได้ในการออกแบบ

ส่วนการหดตัวแบบแห้งเกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำ ทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำและเกิดการหดตัว โดยที่การหดตัวที่เกิดขึ้นนั้นบางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเปียกชื้นขึ้นมาใหม่การหดตัวแบบแห้งและการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง เกิดขึ้นในคอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศมีความชื้นต่ำกว่าความชื้น

ในช่องว่างคะปิลลารี เนื่องจากสูญเสียน้ำอิสระไปสู่อากาศได้ด้วยการระเหยทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างคะปิลลารี ประกอบกับปริมาตรของคอนกรีตลดลงหรือหดตัวลงจากการสูญเสียน้ำ ถ้าการหดตัวนี้ถูกยึดรั้งไม่ว่าด้วยโครงสร้างที่อยู่รอบข้าง หรือด้วยเนื้อคอนกรีตภายในที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นรอยแตกร้าวก็อาจเกิดขึ้นได้ถ้าการยึดรั้งนี้ก่อให้เกิดหน่วยแรงยึดรั้งที่มีค่าสูงกว่ากำลังแรงดึงของคอนกรีตในขณะนั้น

การหดตัวทั้งสองแบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมๆ กัน แต่การหดตัวแบบออโตจีนัสจะมีค่าสูงในคอนกรีตกำลังสูง ในขณะที่การหดตัวแบบแห้งจะมีค่าสูงในคอนกรีตกำลังปกติ ซึ่งจะทำให้การหดตัวโดยรวมที่เกิดขึ้นในช่วงอายุต้นและที่ระยะยาวจากการหดตัวทั้งสองแบบนี้แตกต่างกัน

2.3 การคืบตัวของคอนกรีต

การคืบตัวของคอนกรีต ซึ่งหากแบ่งตามลักษณะของการเกิดหน่วยแรงสามารถแบ่งการคืบตัวได้เป็น 2 ประเภท คือ การคืบตัวที่เกิดจากหน่วยแรงของคอนกรีตเอง (Self-induced Stresses) ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับแรงกระทำภายนอก (ได้แก่ การคืบตัวที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต) และ การคืบตัวที่เกิดจาก แรงกระทำภายนอก (External Tensile Load)

การคืบตัวของคอนกรีตเป็นผลจากการที่คอนกรีต ที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกค้างเป็นเวลานาน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาว (Deformation) โดยในช่วงแรกขณะที่น้ำหนักกระทำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวแบบทันทีทันใด (Instantaneous Strain) และเมื่อมีน้ำหนักกระทำค้างต่อไปการเปลี่ยนแปลงความยาวนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แม้ว่าน้ำหนักที่กระทำจะคงที่ ซึ่งในบางครั้งอาจมีค่ามากกว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวที่เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดหลายเท่า ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1907 โดย Hattและปัจจุบันถูกเรียกว่าการคืบตัว การเปลี่ยนแปลงความยาวที่เพิ่มตามเวลาของคอนกรีตนอกจากจะเกิดจากการคืบตัวแล้วยังเกิดจากการหดตัวของคอนกรีตร่วมด้วย

การคืบตัวนอกจากจะเกิดจากหน่วยแรงจากน้ำหนักกระทำจากภายนอกแล้วยังเกิดจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการที่คอนกรีตถูกยึดรั้งการหดตัว ไม่ว่าจะเป็นการหดตัวเนื่องอุณหภูมิ หรือการหดตัวที่มีความชื้นมาเกี่ยวข้องเช่น การหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง ความเครียดที่เกิดจากการคืบตัว (Creep Strain) จะมีความสัมพันธ์กับเวลา โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของการคืบตัวจะลดลงตามเวลา การคืบตัวเกิดขึ้นในส่วนของซีเมนต์เพสต์ และสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของความชื้นในคอนกรีต การคืบจะทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Micro-crack) อย่างช้าๆ ในคอนกรีต และส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว หากแบ่งตามลักษณะของแรงที่มากระทำสามารถแบ่งการคืบตัวของคอนกรีตได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การคืบตัวแบบอัด และการคืบตัวแบบดึง โดยถ้าน้ำหนักที่มากระทำเป็นแรงอัดก็จะเกิดการคืบตัวแบบอัด และในทางกลับกันหากมีแรงดึงมากระทำก็จะทำให้เกิดการคืบตัวแบบดึง สำหรับโครงสร้างที่รับแรงอัดการคืบตัวแบบอัดจะก่อให้เกิดผลเสียขึ้นในโครงสร้าง เช่น ในส่วนของเสาซึ่งต้องรับแรงกดเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการคืบตัวแบบอัดและทำให้เสามีการ

ยุบตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การคืบตัวยังทำให้การแอ่นตัว เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอาจส่งผลต่อการใช้งานของอาคาร ในกรณีของคอนกรีตอัดแรงการคืบตัวแบบอัดจะทำให้หน่วยแรงอัดในระบบมีค่าลดลงในขณะที่หน่วยแรงดึงจะมีผลดีต่อโครงสร้าง โดยการลดหน่วยแรงดึงที่ทำให้เกิดการแตกร้าวหาก พิจารณาการเกิดการคืบตัวโดยมีความชื้นมาเกี่ยวข้องสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบที่หนึ่งคือ การคืบตัวที่เกิดขึ้นจากหน่วยแรงที่มากระทำค้างในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นออกจากคอนกรีต เรียกการคืบตัวนี้ว่า Basic Creep แบบที่สอง เป็นการคืบตัวที่เกิดขึ้นนอกเหนือจาก Basic Creep โดยเกิดจากการที่คอนกรีตสูญเสียความชื้นสู่สภาพแวดล้อมเรียกการคืบแบบนี้ว่า การคืบตัวแบบแห้ง Drying Creep

2.4 การประเมินการคืบตัวของคอนกรีต

จากปรากฏการณ์ แนวคิดทฤษฎีที่ได้ศึกษาข้างต้น การคืบตัวจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญทางวิศวกรรมโยธา เพราะเกี่ยวข้องกับงานออกแบบโครงสร้าง จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบและทดลองเนื้อคอนกรีตให้เหมาะสมกับลักษณะงาน จากการศึกษาพบว่าประเทศต่างๆตลอดจนนักวิชาการชั้นนำของโลก มีการพัฒนาวิธีการจากค่าการทดลองของคอนกรีตในท้องถิ่นมาใช้ในการหาค่าการคืบตัวของคอนกรีต ซึ่งวิธีการทำนายค่าการคืบตัวของคอนกรีตที่นำมาศึกษาในงานวิจัย มีดังนี้ วิธีของ ACI 209R-92 model, วิธีของ CEB MC 90-99 model, วิธีของ B3 model และวิธีของ GL2000 model

2.4.1 วิธี ACI ปี 1992

การเครียดของการคืบ(creep strain) ที่อายุ t ประมาณค่าจากสัมประสิทธิ์ของการคืบ (creep coefficient) ดังสมการ (2.1)

$$\varepsilon_{creep}(t) = \frac{1+\phi(t,t_0)}{E_{mct0}} \qquad (2.1)$$

เมื่อ $\varepsilon_{creep}(t)$ = ความเครียดของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ t

E_{mcto} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ t_o(MPa)

$\phi(t,t_0)$ = สัมประสิทธิ์การคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ t

t = อายุของคอนกรีต (day)

t_o = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (day)

กรณีที่ไม่มีผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ t_o สามารถประมาณกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ t_o และกรณีที่ไม่มีผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ t_oสามารถประมาณค่าได้จากกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน ดังแสดงสมการ (2.2)และ (2.3)ตามลำดับ

$$E_{mcto} = 0.043\,[w^3 f_{cmt0}]^{1/2} \qquad (2.2)$$

$$f_{cmt0} = \frac{t_0}{(a + bt_0)} f_{cm28} \quad (2.3)$$

เมื่อ E_{mcto} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ t_o(MPa)

t_o = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (day)

w = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (kg/m^3)

f_{cmt0} = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ t_o (MPa)

f_{cm28} = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 (MPa)

a และ b =ค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นกับวิธีการบ่มและประเภทปูนซีเมนต์ แสดงในตาราง 2.1

สัมประสิทธิ์การคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ t คำนวณได้จากสมการที่ (2.4)โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการคืบสูงสุด(ultimate creep coefficient) ที่คำนวณได้จากสมการที่(2.5)และปรับแก้ด้วยแฟกเตอร์ปรับแก้ค่าในสมการ (2.6)เป็นค่าที่ปรับแก้สภาวะต่างๆ ที่ไม่อยู่ในสภาวะมาตรฐาน

$$\phi(t, t_0) = \frac{(t - t_o)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \phi u \quad (2.4)$$

สมการที่ (2.4)สำหรับอายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก 7 วัน ในการบ่มชื้น หรือ อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนักที่ 1-3 วัน ในการบ่มไอน้ำ

$$\phi u = 2.35 \gamma_c \quad (2.5)$$

$$\gamma_c = \gamma_{c,to} \gamma_{c,RH} \gamma_{c,d} \gamma_{c,s} \gamma_{\psi} \gamma_{c,a} \quad (2.6)$$

เมื่อ t = อายุของคอนกรีต (day)

t_o = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (day)

$\phi(t, t_0)$ = สัมประสิทธิ์การคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ t

ϕu = สัมประสิทธิ์การคืบสูงสุด

γ_c = แฟกเตอร์ปรับแก้ค่าในสภาวะต่างๆ

$\gamma_{c,to}$ = แฟกเตอร์อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนักแสดงในสมการ (2.7)และ(2.8)

$\gamma_{c,RH}$ = แฟกเตอร์ความชื้นสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อมแสดงในสมการ (2.9)

$\gamma_{c,d}$ = แฟกเตอร์ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วนแสดงในสมการ (2.10)และ(2.11)

$\gamma_{c,s}$ = แฟกเตอร์ค่ายุบตัวแสดงในสมการ (2.12)

γ_{ψ} = แฟกเตอร์เปอร์เซนต์มวลรวมละเอียดแสดงในสมการ (2.13)

$\gamma_{c,a}$ = แฟกเตอร์เปอร์เซนต์ของปริมาณอากาศแสดงในสมการ (2.14)

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ a และ b

ชนิดของการบ่ม	ประเภทของปูนซีเมนต์	ค่าคงที่	
		a	b
บ่มชื้น	I	4.0	0.85
	III	2.3	0.92
บ่มไอน้ำ	I	1.0	0.95
	III	0.7	0.98

ตารางที่ 2.2 ค่าสภาวะมาตรฐานการคืบของสมาคมคอนกรีตอเมริกา

แฟกเตอร์	ค่าสภาวะมาตรฐาน
อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก - บ่มชื้น - บ่มไอน้ำ	 7 วัน 1 3 วัน
ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม	40%
ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วน	150 มม.
ค่ายุบตัว	70 มม.
เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียด	50%
เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศ	≤6%
อัตราส่วนของหน่วยแรงต่อกำลังคอนกรีต	≤0.50
ประเภทของปูนซีเมนต์	I และIII

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวและการคืบของความหนาเฉลี่ย

ความหนาเฉลี่ย		สัมประสิทธิ์การคืบ: $\gamma_{c,d}$		สัมประสิทธิ์การหดตัว: $\gamma_{sh,d}$	
นิ้ว	มม.	≤ 1 ปี	ค่าสูงสุด	≤ 1 ปี	ค่าสูงสุด
2	51	1.30	1.30	1.35	1.35
3	76	1.17	1.17	1.25	1.25
4	104	1.11	1.11	1,17	1,17
5	127	1.04	1.04	1.08	1.08
6	152	1.00	1.00	1.00	1.00

แฟกเตอร์ปรับแก้ค่าใช้ในสภาวะของชิ้นส่วนไม่ตรงกับสภาวะมาตรฐานที่มีค่าปรับแก้เท่ากับหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 2.2 แฟกเตอร์ปรับแก้สามรถคำนวณได้ดังนี้

1. อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก

สำหรับคอนกรีตที่ทำการบ่มชื้นและ อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนักมากว่า 7 วันขึ้นไป ต้องปรับแก้ค่าตามสมการ (2.7) ส่วนคอนกรีตที่ทำการบ่มไอน้ำ และอายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนักที่ 1-3 วัน ต้องปรับแก้ค่าตามสมการ (2.8)

สำหรับคอนกรีตที่ทำการบ่มชื้นและ อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนักมากว่า 7 วันขึ้นไป:

$$\gamma_{c,to} = 1.25(t_o)^{-0.118} \quad (2.7)$$

สำหรับคอนกรีตที่ทำการบ่มไอน้ำ และอายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนักที่ 1-3 วันขึ้นไป:

$$\gamma_{c,to} = 1.13(t_o)^{-0.094} \quad (2.8)$$

2 .ความชื้นสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อม

สำหรับความชื้นสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อมที่มีค่ามากกว่า 40 % ปรับแก้จากสมการ (2.9) ส่วนของค่าความชื้นสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อมที่มีค่าต่ำกว่า 40 %แฟกเตอร์การคืบมีค่ามากกว่า 1 แต่สภาพความเป็นจริงไม่มีการใช้งาน

h ≥40%:

$$\gamma_{c,RH} = 1.27 \quad 0.0067h \quad (2.9)$$

เมื่อ h = ความชื้นสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อม (%)

3 .ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วน

ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วนที่มีค่าน้อยกว่า 150 มม.ปรับค่าในตารางที่กำหนดให้ตารางที่ 2.3ส่วนความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วนที่มีค่ามากกว่า150มม.แต่น้อยกว่า 380 มม. ปรับแก้จากสมการ (2.10)สำหรับระยะเวลาหลังจากเริ่มรับน้ำหนักไม่เกิน 1 ปี และปรับแก้จากสมการ (2.11)สำหรับระยะเวลาหลังจากเริ่มรับน้ำหนักมากกว่า 1 ปี

สำหรับ 150 มม. <d< 380 มม.

$t - t_0 \le 1$ ปี

$$\gamma_{c,d} = 1.14 \quad 0.00092d \quad (2.10)$$

$t - t_0 > 1$ ปี

$$\gamma_{c,d} = 1.10 \quad 0.00067d \quad (2.11)$$

เมื่อ $d = 4\frac{V}{s}$

V = ปริมาตรคอนกรีต ($mm.^3$)

s = พื้นที่ผิวที่แห้งตัว ($mm.^2$)

4 .ค่ายุบตัว

$$\gamma_{c,s}=0.82 + 0.00264\ S \qquad (2.12)$$

เมื่อ S = ค่าความยุบตัวของคอนกรีตสด (mm.)

5 .เปอร์เซนต์มวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด

$$\gamma_{\psi} =0.88 + 0.0024\psi \qquad (2.13)$$

เมื่อ ψ = มวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (%)

6 .เปอร์เซนต์ของปริมาณอากาศ

$$\gamma_{c,a}=0.46 +0.09\alpha \qquad (2.14)$$

เมื่อ α = ปริมาณอากาศ (%)

2.4.2 วิธีของ Bazant B3 model

Bazant เป็นนักวิชาการของประเทศสหรัฐอเมริกาได้แนะนำวิธีการประมาณค่าการคืบและการหดตัวมีวิธีการแนะนำออกมาแล้ว 3 วิธี ตั้งแต่ปี 1978, 1991 และ 1995 ข้อกำหนดต่าง ๆ ของวิธี Bazant มีดังนี้

2.4.2.1 วิธีของ Bazant BP Model ปี 1978

การประมาณค่าความเครียดของการคืบของคอนกรีต สามารถได้จากความเครียดของการคืบเบื้องต้นรวมกับการคืบแห้ง ดังแสดงในสมการที่ (2.15)

$$\varepsilon_{creep} =\sigma[C_o(t ,t_0)+C_d(t ,t_0,t_{sh})-C_P(t ,t_0,t_{sh})] \qquad (2.15)$$

เมื่อ σ = หน่วยแรงกระทำต่อตัวอย่าง (MPa)

$C_o(t ,t_0)$ = การคืบเบื้องต้น (micro/MPa) แสดงในสมการที่ (2.16)

$C_d(t ,t_0,t_{sh})$ = การคืบในช่วงเวลาแห้งตัว (micro/MPa) แสดงในสมการที่ (2.19)

$C_p(t ,t_0,t_{sh})$ = การคืบก่อนแห้งตัว(micro/MPa) แสดงในสมการที่ (2.20)

t = อายุของคอนกรีต (day)

t_o = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (day)

t_{sh} = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว (day)

การคืบเบื้องต้น (basic creep)

$$C_o(t ,t_0)= (\frac{\phi_1}{E_o})(t_0^{-m}+\alpha)(t-t_0)^n \qquad (2.16)$$

แทน $\phi_1 = \dfrac{10^{3n}}{2(28^{-m}+\alpha)}$

$\alpha = \dfrac{1}{(40w/c)}$

$$m = 0.28 + \frac{1}{(fc')^2}$$

$$n = 0.12 + \left[\frac{0.07x^6}{(5130+x^6)}\right] \quad : x>0$$

$$= 0.12 \quad : x\leq 0$$

$$x = \left\{2.1\left[\frac{\left(\frac{a}{c}\right)}{\left(\frac{s}{c}\right)^{1.4}}\right]+0.1(fc')^{1.5}\left(\frac{w}{c}\right)^{1/3}\left(\frac{a}{g}\right)^{2.2}\right\}a_1-4$$

เมื่อ t = อายุของคอนกรีตที่พิจารณา (day)

t_o = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (day)

$\frac{a}{c}$ = อายุส่วนน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์

$\frac{s}{c}$ = อายุส่วนน้ำหนักของมวลรวมละเอียดต่อปูนซีเมนต์

$\frac{w}{c}$ = อายุส่วนน้ำหนักของน้ำต่อปูนซีเมนต์

$\frac{a}{g}$ = อายุส่วนน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดต่อมวลรวมหยาบ

fc' = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28วัน (MPa)

E_o = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (asymptotic elastic modulus: MPa)

สัมประสิทธิ์ของชนิดปูนซีเมนต์

Type I, II : $a_1 = 1.00$

Type III : $a_1 = 0.93$

Type IV : $a_1 = 1.05$

การประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E_oสามารถประมาณได้จากผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในสมการที่ (2.17) และสำหรับกรณีที่ไม่มีผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน สามารถประมาณค่าจากกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน ดังแสดงสมการที่ (2.18)

$$E_o = E_{cm28}(1+(\phi_1).(28^{-m}+\alpha).(0.1)^n) \quad (2.17)$$

$$1/E_o = 0.09 + \left[\frac{1}{(1.7(z_1)^2)}\right],(10^{-6}/MPa) \quad (2.18)$$

แทน z_1 = $0.00005(\rho)^2 fc'$

เมื่อ ρ =หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (kg/m^3)

f_c' =กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (MPa)

E_{cm28} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

การคืบในช่วงเวลาแห้งตัว (creep during drying)

$$C_d(t,t_0,t_{sh}) = \left(\frac{\phi_{d'}}{E_o}\right).(t_o^{-m/2}).k_{h'}.\varepsilon_{sh\infty}.S_d(t,t_0) \qquad (2.19)$$

แทน $\phi d' = \left[1+\frac{(t_0-t_{sh})}{10\tau_{sh}}\right]^{-1/2} \phi d$

$$S_d(t,t_0) = \left[1+\frac{10\tau_{sh}}{(t-t_0)}\right]^{-Cd.n}$$

$K_{h'} = |h_o^{1.5}-h^{1.5}|$

$C_d = 2.8 \quad 7.5n$

$$r = \left\{5600\left[f_c'\left(\frac{s}{a}\right)\right]^{0.3}\left(\frac{g}{s}\right)^{1.3}\left[\left(\frac{w}{c}\right)/.\varepsilon_{s\infty}\right]^{1.5}\right\} - 0.85$$

$r>0$,$\phi d = 0.008+0.027\,u$,$u = \frac{1}{[1+0.7(r^{-1.4})]}$

$r\leq 0$,$\phi d = 0.008$

การคืบก่อนแห้งตัว (creep predrying)

$$C_p(t,t_0,t_{sh}) = c_p.k_{h''}.s_p(t,t_{sh}).c_o(t,t_0) \qquad (2.20)$$

แทน $s_p(t,t_{sh}) = \left[1+\frac{100\tau_{sh}}{(t-t_{sh})}\right]^{-n}$

$k_{h''} = h_o^2-h^2$

$C_p = 0.83$

เมื่อ t = อายุของคอนกรีต (day)

t_o = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (day)

t_{sh} = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว (day)

h = ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม

h_o = ความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นตัวอย่างเริ่มต้น (0.98 ถึง 1.00)

$\frac{s}{a}$ = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด

$\frac{w}{c}$ = อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำต่อปูนซีเมนต์

$\frac{g}{s}$ = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียด

f_c' = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28วัน (MPa)

n, m = จากการคำนวณหาการคืบเบื้องต้น

2.4.2.2 วิธีของ Bazant BP-KX Model ปี 1991

การประมาณค่าความเครียดของการคืบของคอนกรีต สามารถได้จากความเครียดของการคืบเบื้องต้นรวมกับการคืบแห้ง ดังแสดงในสมการที่ (2.21)

$$\varepsilon_{creep}=\sigma\, F(\sigma)[C_o(t,t_0)+C_d(t,t_0,t_{sh})-C_P(t,t_0,t_{sh})] \quad (2.21)$$

เมื่อ σ = หน่วยแรงกระทำต่อตัวอย่าง (MPa)

$F(\sigma)$ = สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรง แสดงในสมการ (2.22)

$C_o(t,t_0)$ = การคืบเบื้องต้น แสดงในสมการที่ (2.23)

$C_d(t,t_0,t_{sh})$ = การคืบในช่วงเวลาแห้งตัว แสดงในสมการที่ (2.24)

$C_P(t,t_0,t_{sh})$ = การคืบก่อนแห้งตัวแสดงในสมการที่ (2.25)

สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรง

$$F(\sigma)=\frac{1+3s^5}{1-\Omega} \quad (2.22)$$

$$s=\sigma/fc'$$

$$\Omega=s^{10}$$

การคืบเบื้องต้น

$$C_o(t,t_0)=q_2 Q(t,t_0)+q_3 \ln[1+(t-t_0)^n]+q_4 \ln(t/t_0) \quad (2.23)$$

แทน $Q(t,t_0)=Q_f(t_0)[1+(Q_f(t_0))/Z(t,t_0)^{r(t_o)}]^{-1/r(t_o)}$

$$Q_f(t_0)=[0.086(t_0)^{2/9}+1.21(t_0)^{4/9}]^{-1}$$

$$Z(t,t_0)=(t_0)^{-1/2}.\ln[1+(t-t_0)^{0.1}]$$

$$r(t_0)=1.7(t_0)^{0.12}+8$$

$$q_2=[0.011(\frac{w}{c})^{0.8} c^{1.5}(1-\frac{a}{\rho_c})^{-0.9}(0.001\, fc')^{-0.5}(\frac{s}{g})^{0.02}]-0.39$$

$$q_3=\alpha.q_2$$

$C\geq 416$ kg/m^3 , α = 0.0003 c +0.0125

$240\leq C\leq 416$ kg/m^3 , α = 0.001 c +0.0125

$C\leq 240$ kg/m^3 , α = 0.01

$$q_4=0.072(\frac{w}{c})^{2.3}.c^{0.2}(1-\frac{a}{\rho_c})^{-0.39}.(0.001\, fc')^{0.46}.(\frac{s}{g})^{-0.73}$$

เมื่อ t = อายุของคอนกรีตที่พิจารณา (day)

t_o = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (day)

c = ปริมาณของปูนซีเมนต์ (kg/m^3)

$\frac{w}{c}$ = อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำต่อปูนซีเมนต์

$\frac{a}{\rho_c}$ = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

$\frac{s}{g}$ = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ

fc' = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ28วัน(MPa)

การคืบในช่วงเวลาแห้งตัว และ การคืบก่อนแห้งตัว

$$C_d(t,t_0,t_{sh}) = q_5.k_h'.\varepsilon_{sh\infty}\{S[\frac{(t-t_{sh})}{\tau_m}]-S[\frac{(t-t_{sh})}{\tau_m}]\}^{1/2} \quad (2.24)$$

$$C_p(t,t_0,t_{sh}) = 0.7.k_h''.[\frac{1}{G(7+t_{sh})}-0.9^{1/2}] \times\{S[\frac{(t_0-t_{sh})}{0.5\tau_m}]-S[\frac{(t_0-t_{sh})}{5\tau_m}]\}.C_o(t,t_0,) \quad (2.25)$$

แทน $q_5 = \frac{40}{(fc')^{1/2}}$

$\tau_m = 2[1+\frac{3.5}{(t_{sh})^{1/2}}][1+\frac{5}{(t_0+t_{sh})^{1/2}}]^{-1}\tau_{sh}$

$S_d(t) = \tanh[\frac{(t-t_{sh})}{\tau_{sh}}]^{1/2}$

$k_h' = h_o^3-h^3$

$k_h'' = h_o^2-h^2$

เมื่อ t = อายุของคอนกรีตที่พิจารณา

t_o = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก

t_{sh} = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว

τ_{sh} = สัมประสิทธิ์ขนาดของชิ้นส่วน

h = ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม

h_o = ความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นตัวอย่างเริ่มต้น (0.98 ถึง 1.00)

2.4.2.3 วิธี Bazant B3 Model ปี 1995

การประมาณค่าความเครียดของการคืบของคอนกรีต สามารถได้จากความเครียดของการคืบเบื้องต้นรวมกับการคืบแห้ง ดังแสดงในสมการที่ (2.26)

$$\varepsilon_{creep} = q_1 + C_o(t,t_o) + C_d(t,t_o,t_c) \quad (2.26)$$

เมื่อ $q_1 = 0.6/E_{cm28}$

$C_o(t, t_o)$ = การคืบเบื้องต้น แสดงในสมการที่ (2.27)

$C_d(t,t_o,t_c)$ = การคืบแห้ง แสดงในสมการที่ (2.28)

E_{cm28} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

$E_{cm28} = 4734\sqrt{f_{cm28}}$

การคืบเบื้องต้น

$$C_o(t, t_o) = q_2 Q(t, t_0) + q_3 \ln[1 + (t - t_0)^n] + q_4 \ln(t / t_0) \qquad (2.27)$$

แทน $Q(t, t_o) = Q_f(t_o)\left[1 + \left(\frac{Q_f(t_0)}{Z(t,t_0)}\right)^{r(t_0)}\right]^{-1/r(t0)}$

$Q_f(t_0) = [0.086(t_0)^{2/9} + 1.21(t_0)^{4/9-1}]$

$Z(t, t_0) = (t_0)^{-m}\ln[1 + (t - t_o)^n]$

$r(t_0) = 1.7(t_0)^{0.12} + 8$

$m = 0.5$

$n = 0.1$

$q_2 = 185.4 \times 10^{-6} c^{0.5} f_{cm28}^{-0.9}$

$q_3 = 0.29(w/c)^4 q_2$

$q_4 = 0.14 (a/c)^{-0.7}$

เมื่อ t = อายุของคอนกรีตที่พิจารณา (day)

t_o = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (day)

c = ปริมาณของปูนซีเมนต์ (kg/m^3)

w/c = อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำต่อปูนซีเมนต์

a/c = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์

f_{cm28} = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 (MPa)

การคืบแห้ง แสดงในสมการที่ (2.28)

$$C_d(t,t_o,t_c) = q_5[\exp\{-8H(t)\} \quad \exp\{8H(t_0)\}]^{1/2} \qquad (2.28)$$

แทน $q_5 = 0.757 f_{cm28}^{-1}|\varepsilon_{sh\infty} \times 10^6|^{-0.6}$

$H(t) = 1 \quad (1-h)S(t - t_c)$

$S(t - t_c) = \tanh[(t-t_c)/\tau_{sh}]^{1/2}$

เมื่อ t = อายุของคอนกรีตที่พิจารณา (day)

t_c = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งต้ว (day)

τ_{sh} = สัมประสิทธิ์ขนาดของชิ้นส่วน

h = ความชื้นของสภาพแวดล้อม

2.4.3 วิธี CEB MC90-99

ปี 1970, ปี 1978 และปี 1990 สมาคมคอนกรีตยุโรปแนะนำวิธีการประมาณค่าการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต ข้อกำหนดต่าง ๆ ของสมาคมคอนกรีตยุโรปมีดังนี้

2.4.3.1 วิธี CEB-FIP 70

ความเครียดของการคืบที่อายุ t ประมาณค่าจากสัมประสิทธิ์ของการคืบ ดังสมการที่ (2.29)

$$\varepsilon_{creep}(t) = \frac{\sigma}{E_{cm28}}\phi(t) \qquad (2.29)$$

เมื่อ $\varepsilon_{creep}(t)$ = ความเครียดของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ t

E_{cm28} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

$\phi(t)$ = สัมประสิทธิ์การคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ t

t = อายุของคอนกรีต (day)

กรณีที่ไม่มีผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน สามารถประมาณค่าจากกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน ดังแสดงสมการที่ (2.30)

$$E_{cm28} = 6.6\sqrt{f_{cm28}} \qquad (2.30)$$

เมื่อ E_{cm28} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

f_{cm28} = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ที่อายุ 28 วัน (MPa)

สัมประสิทธิ์ของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ t คำนวณได้จากสมการที่ (2.31) โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการคืบเป็นผลคูณของค่าปรับแก้ตามสภาวะต่าง ๆ ดังนี้

$$\phi(t) = k_1.k_2.k_3.k_4.k_5 \qquad (2.31)$$

เมื่อ k_1 =สัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม ดังภาพที่ 2.1

k_2 =สัมประสิทธิ์อายุคอนกรีตเริ่มรับน้ำหนัก ดังภาพที่ 2.2

k_3 =สัมประสิทธิ์ส่วนประกอบคอนกรีต ดังภาพที่ 2.3

k_4 =สัมประสิทธิ์ความหนาของชิ้นส่วน ดังภาพที่ 2.4

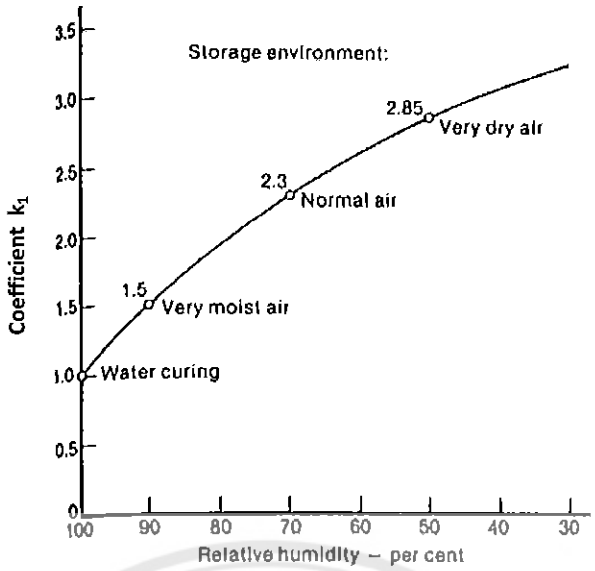
k_5 =สัมประสิทธิ์การพัฒนาการคืบกับเวลา ดังภาพที่ 2.5

ใช้ค่าความหนาของชิ้นส่วน (theoretical thickness) : h_0

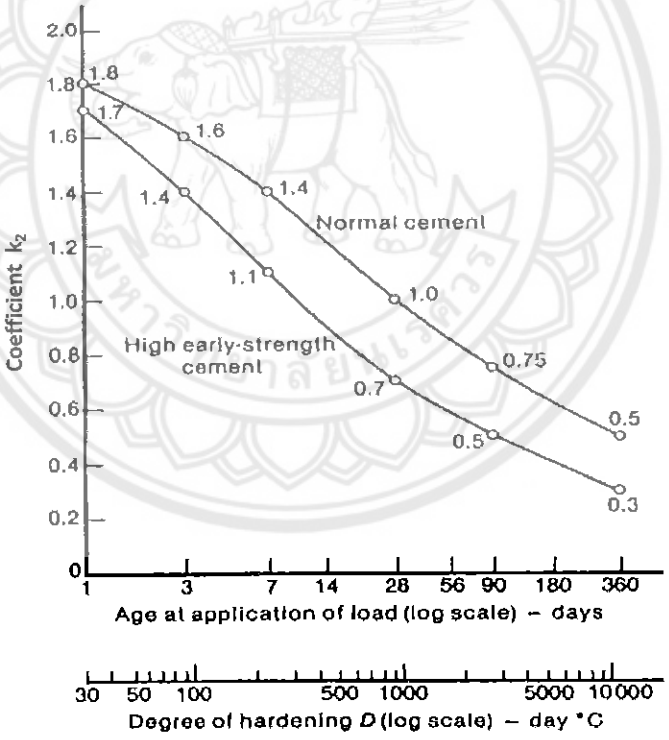
$$h_0 = 2\frac{Ac}{u}$$

Ac = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน ($mm.^2$)

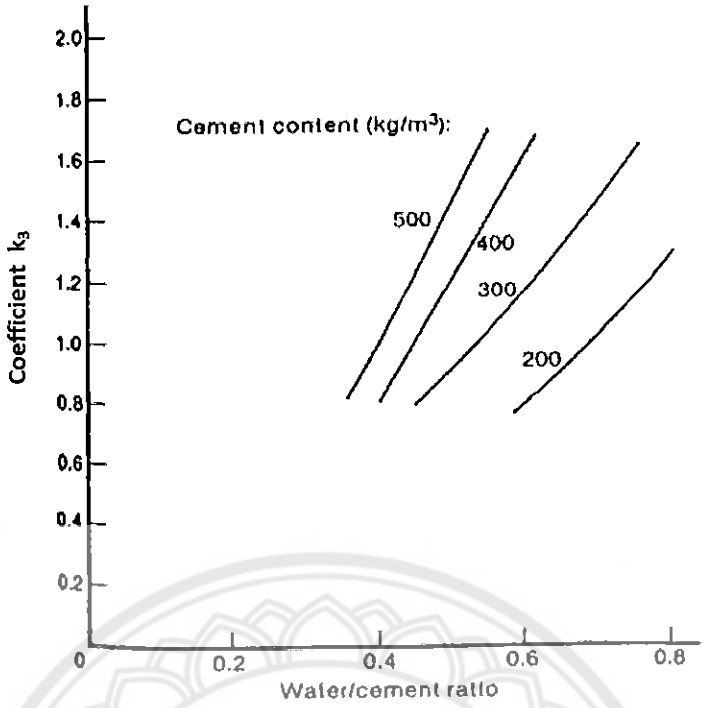
u = เส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดที่จะแห้งตัว (mm.)



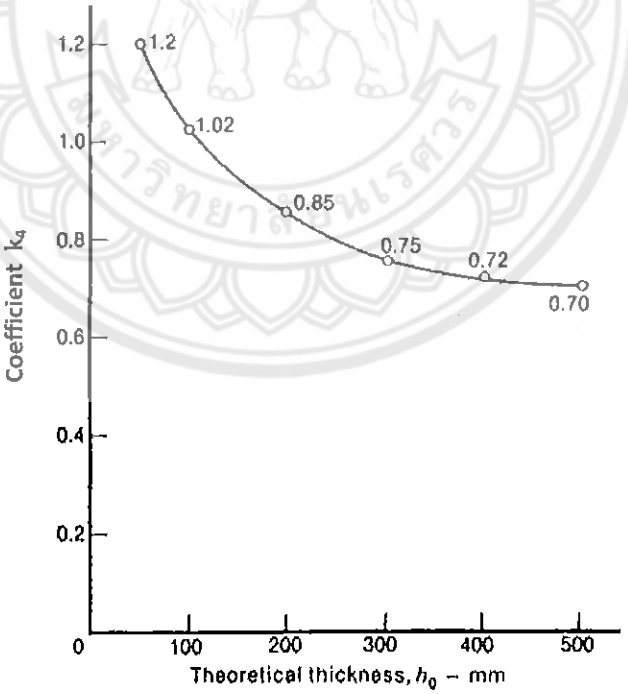
ภาพที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมของการคืบ: CEB-FIP 70 (Neville et al., 1983)



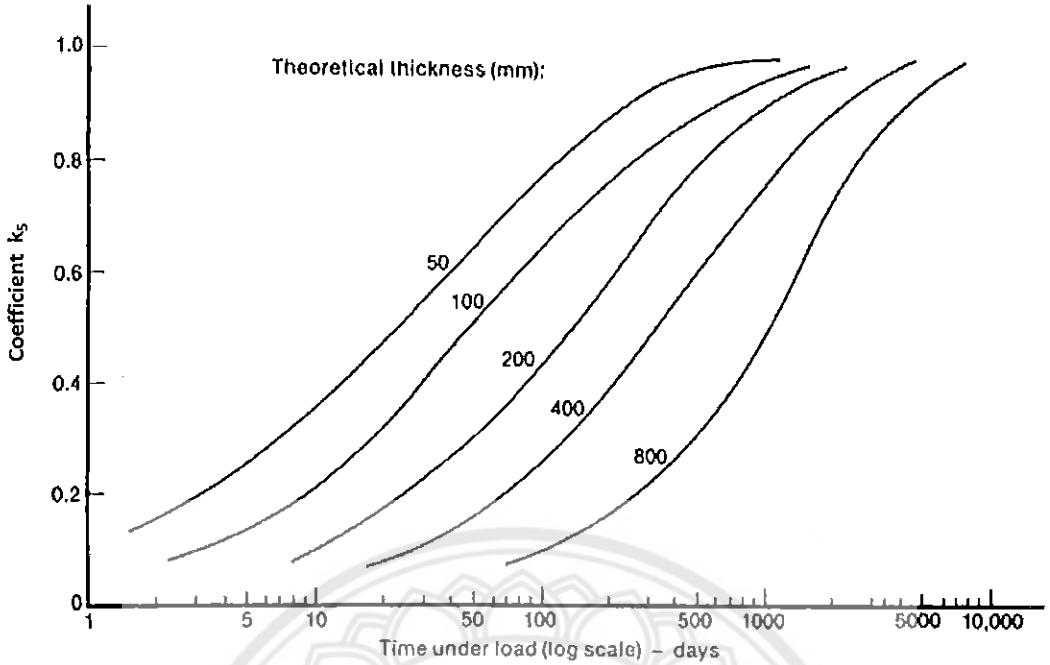
ภาพที่ 2.2 สัมประสิทธิ์อายุคอนกรีตเริ่มรับน้ำหนักของการคืบ: CEB-FIP 70 (Neville et al., 1983)



ภาพที่ 2.3 สัมประสิทธิ์ส่วนประกอบคอนกรีตของการคืบและการหดตัว: CEB-FIP 70 (Neville et al., 1983)



ภาพที่ 2.4 สัมประสิทธิ์ความหนาชิ้นส่วนของการคืบ: CEB-FIP 70 (Neville et al., 1983)



ภาพที่ 2.5 สัมประสิทธิ์การพัฒนาการคืบและการหดตัวกับเวลา: CEB-FIP 70 (Neville et al., 1983)

2.4.3.2 วิธี CEB-FIP 78

ความเครียดของการคืบที่อายุ t ประมาณค่าจากสัมประสิทธิ์ของการคืบ ดังสมการที่ (2.30) ในสมาคมคอนกรีตยุโรป ปี 1970 สำหรับกรณีที่ไม่มีผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน สามารถประมาณค่าจากกำลังของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในสมการที่ (2.32) และสัมประสิทธิ์ของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ t คำนวณได้จากสมการที่ (2.33)

$$E_{cm28} = 9.5\sqrt[3]{f_{cm28}} \qquad (2.32)$$

$$\phi(t) = \beta a(t_0)+\phi d.\beta d(t-t_0)+\phi f[\beta f(t)-\beta f(t_0)] \qquad (2.33)$$

เมื่อ E_{cm28} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

f_{cm28} = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ที่อายุ 28 วัน (MPa)

t = อายุของคอนกรีต (day)

t_0 = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (day)

$$\beta a(t_0) = 0.8\left[1-\frac{fc(t_0)}{fc_\infty}\right]$$

$\frac{fc(t_0)}{fc_\infty}$ = อัตราส่วนความแข็งของคอนกรีต ดังภาพที่ 2.6

ϕd = อัตราส่วนของขีดจำกัดความเครียดยืดหยุ่นตามเวลา ต่อความเครียดยืดหยุ่นเริ่มแรกที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 0.4

$\beta d(t-t_0)$= การพัฒนาการของความเครียดยืดหยุ่นที่ตามมาภายหลังกับเวลา ดังภาพที่ 2.7

ϕf = $\phi f1.\phi f2$

$\phi f1$ = สัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม แสดงในตารางที่ 2.4

$\phi f2$ = สัมประสิทธิ์ของความหนาของชิ้นส่วน แสดงในภาพที่ 2.8

$\beta f(t)\beta f(t_0)$ = พารามิเตอร์การไหลพลาสติก ดังภาพที่ 2.9

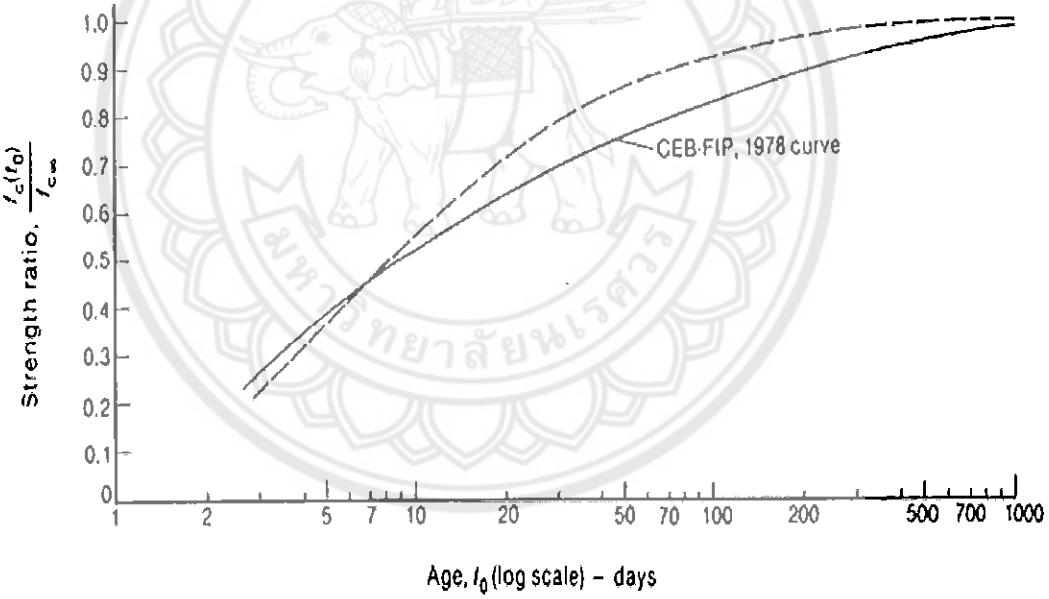
ความหนาของชิ้นส่วน (notional thickness) :h_o

$$h_o = \lambda \left[2\frac{Ac}{u} \right]$$

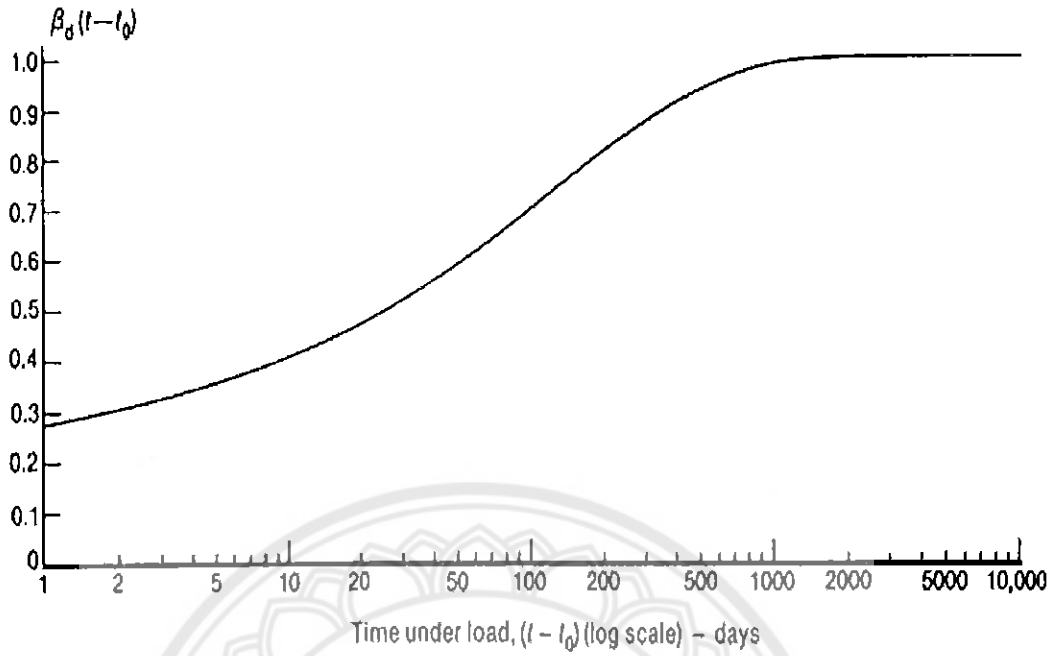
Ac = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน ($mm.^2$)

u = เส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดที่แห้งตัว (mm.)

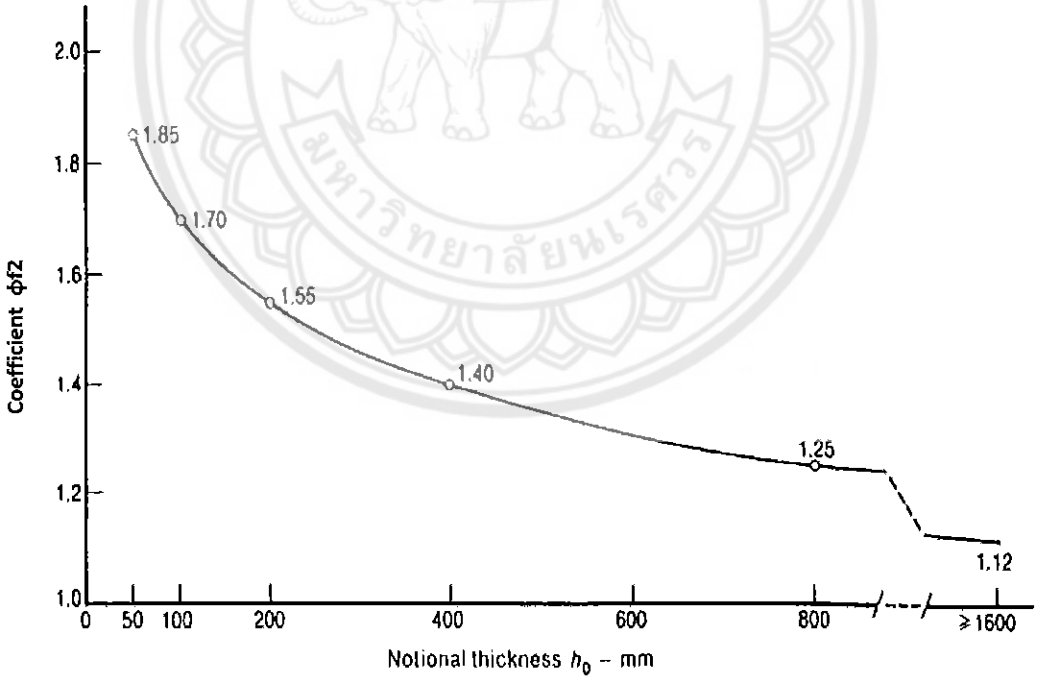
λ = สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบ แสดงในตารางที่ 2.4



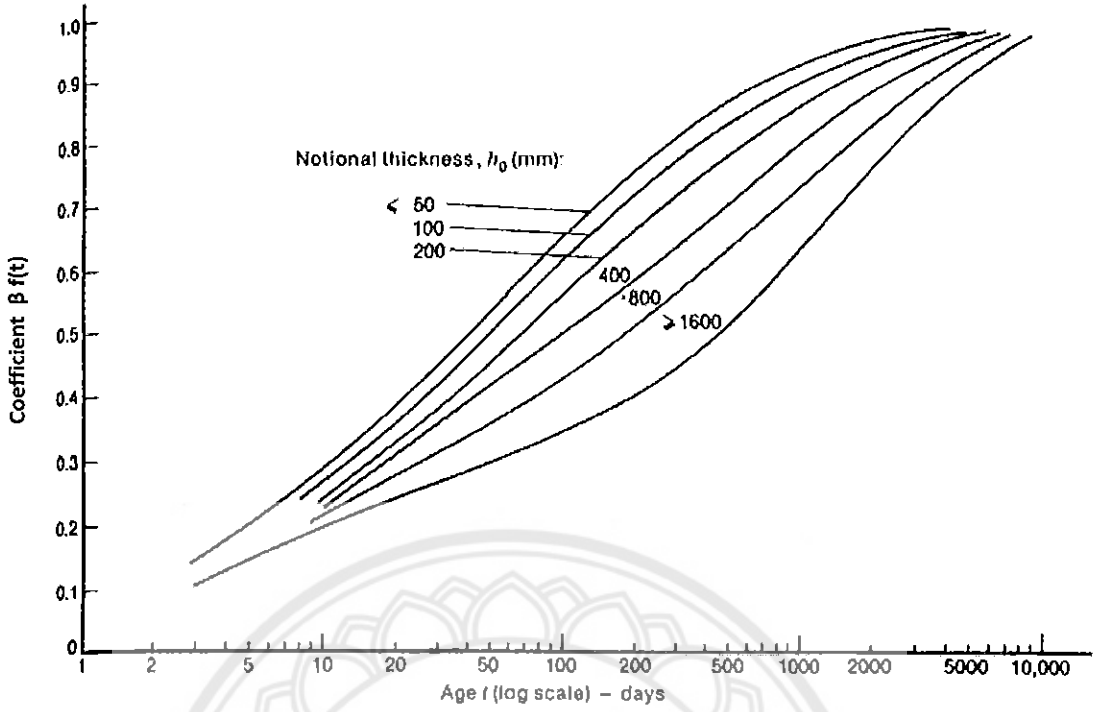
ภาพที่ 2.6 อัตราส่วนความแข็งแรงของคอนกรีต: CEB-FIP 70 (Neville et al., 1983)



ภาพที่ 2.7 สัมประสิทธิ์การพัฒนาความเครียดยืดหยุ่นที่ตามมาภายหลังกับเวลา: CEB-FIP 78 (Neville et al., 1983)



ภาพที่ 2.8 สัมประสิทธิ์ความหนาโนขั่นนอลของการคืบ:CEB-FIP 78 (Neville et al., 1983)



ภาพที่ 2.9 พารามิเตอร์การไหลพลาสติกของการคืบ: CEB-FIP 78 (Neville et al., 1983)

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของการหดตัวและการคืบ: CEB-FIP 78

สภาพแวดล้อม	ความชื้นสัมพัทธ์	สัมประสิทธิ์		สัมประสิทธิ์ความหนา λ
		การคืบ ϕ_{fi}	การหดตัว $\varepsilon_{shl}(10^{-6})$	
ชุ่มน้ำ	100	0.8	+100	30
ชื้น	90	1.0	-130	5
ปกติ	70	2.0	-320	1.5
แห้งมาก	40	3.0	-520	1

(Neville etal.,1983)

หมายเหตุ เครื่องหมายลบหมายถึงการหดตัว และเครื่องหมายบวกหมายถึงการพองตัว

2.4.3.3 วิธี CEB MC90-99

การประมาณค่าความเครียดของการคืบของคอนกรีตหาได้จากสมการ (2.34)

$$\varepsilon_{creep}=\frac{1}{E_{cm28}}[\eta(t_0)+\phi_{28}(t,t_0)] \qquad (2.34)$$

$$=\frac{1}{E_{cmt0}}+\frac{\phi_{28}(t,t_0)}{E_{cm28}}$$

$$\eta(t_0)=E_{cm28}/E_{cmt0}$$

เมื่อ E_{cm28} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

E_{cmt0} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่เวลารับน้ำหนัก (MPa)

$\phi_{28}(t, t_0)$ = สัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตที่อายุ 28 วันแสดงในสมการที่ (2.36)

สำหรับกรณีไม่มีผลทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน สามารถประมาณได้จากค่ากำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28วัน ดังแสดงในสมการ (2.35)

$$E_{cm28} = 21500\sqrt[3]{\frac{f_{cm28}}{f_{cm0}}} \qquad (2.35)$$

$$f_{cm28} = f_c + 8.0$$

$$E_{cmt} = E_{cm28}\exp\left[\frac{s}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t/t_1}}\right)\right]$$

เมื่อ f_{cm28} = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 (MPa)

f_{cm0} =10 MPa

f_c =กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานกำหนด (MPa)

s = สัมประสิทธิ์ของประเภทปูนซีเมนต์ตามตารางที่ 2.5

t = อายุของคอนกรีตที่พิจารณา (day)

t_1 = 1 วัน

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของประเภทปูนซีเมนต์

f_{cm28}	ประเภทของปูนซีเมนต์ (type)	s
≤ 60 MPa	แข็งตัวอย่างรวดเร็ว-กำลังสูง (RS)	0.20
	แข็งตัวอย่างรวดเร็ว-ปกติ (N,R)	0.25
	แข็งตัวช้า (SL)	0.38
> 60 MPa	ทุกประเภท	0.20

สัมประสิทธิ์การคืบ

$$\phi_{28}(t, t_0) = \phi_0\beta_c(t \quad t_0) \qquad (2.36)$$

แทน $\phi_0 = \phi_{RH}(h)\beta(f_{cm28})\beta(t_0)$ (2.37)

$$\phi_{RH}(h) = \left[1 + \frac{1-\frac{h}{h_0}}{\sqrt[3]{0.1\left[\frac{(V/S)}{(V/S)_0}\right]}}\alpha_1\right]\alpha_2 \qquad (2.38)$$

$$\beta(f_{cm28}) = \frac{5.3}{\sqrt{\frac{f_{cm28}}{f_{cm0}}}}$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1+(t_0/t_1)^{0.2}}$$

$$\alpha_1 = \left[\frac{3.5 f_{cm0}}{f_{cm28}}\right]^{0.7}$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{3.5 f_{cm0}}{f_{cm28}}\right]^{0.2}$$

เมื่อ h = ความชื้นสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อมในรูปแบบทศนิยม

h_0 = 1

V/S = อัตราส่วนปริมาณพื้นผิว (mm.)

$(V/S)_0$ = 50 mm.

สัมประสิทธิ์การพัฒนาการคืบกับอายุของคอนกรีตที่ปรับแก้ หาได้จากสมการ

$$t_{0,k} = t_{0,T}\left[\frac{9}{2+\left(\frac{t_{0,T}}{t_{1,T}}\right)^{1.2}}+1\right]^{\alpha} \geq 0.5 \text{ day}$$

$$\beta_c(t\ \ t_0) = \left[\frac{(t-t_0)/t_1}{\beta_H+(t-t_0)/t_1}\right]^{0.3} \qquad (2.39)$$

แทน $\beta_H = 150[1 + (1.2\ h/h_0)^{18}](V/S)/(V/S)_0 + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3$ (2.40)

$$\alpha_3 = \left[\frac{3.5 f_{cm0}}{f_{cm28}}\right]^{0.5}$$

เมื่อ $t_{0,k}$ = อายุของคอนกรีตที่ปรับแก้ (day)

$t_{0,T}$ = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ T (day)ตามสมการ (2.41)

$t_{1,T}$ = 1 วัน

α = สัมประสิทธิ์ของกำลังที่ขึ้นอยู่กับประเภทปูนซีเมนต์ตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สัมประสิทธิ์ของกำลังที่ขึ้นอยู่กับประเภทปูนซีเมนต์

ประเภทของปูนซีเมนต์	α
แข็งตัวอย่างรวดเร็ว-กำลังสูง	1
แข็งตัวอย่างรวดเร็ว-ปกติ	0
แข็งตัวช้า	-1

ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าต่างๆ

สำหรับช่วงอุณหภูมิ 5 ถึง 80 ℃

$$E_{cm28}(T) = E_{cm28}(1.06 \quad 0.003T/T_0)$$

$$\phi_{28}(t, t_0, T) = \phi_0 \beta_c(t \quad t_0) + \Delta\phi_{T,trans}$$

$$t_{0,T} = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \exp[13.65 - \frac{4000}{273 + \frac{T(\Delta t_i)}{T_0}}] \qquad (2.41)$$

$$\beta_{H,T} = \beta_H \beta_T$$

$$\beta_T = \exp[\frac{1500}{(273+T/T_0)} - 5.12]$$

$$\phi_{RH,T} = \phi_T + [\phi_{RH}(h) \quad 1]\phi_T^{1.2}$$

$$\phi_T = \exp[0.015(T/T_0 - 20]$$

$$\Delta\phi_{T,trans} = 0.0004(T/T_0 - 20)^2$$

เมื่อ $E_{cm28}(T)$ = ค่าปรับแก้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วันที่อุณหภูมิ T(MPa)แทนสมการที่ (2.35)

$\phi_{28}(t, t_0, T)$ = ค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตที่อายุ 28 วันที่อุณหภูมิ T แทนสมการที่ (2.36)

$\beta_{H,T}$ = ผลของอุณหภูมิต่อเวลาในการพัฒนาของการคืบแทนสมการที่ (2.40)

$\phi_{RH,T}$ = ค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์การคืบที่ความชื้นสัมพันธ์ที่อุณหภูมิ Tแทนสมการที่ (2.38)

ϕ_T = สัมประสิทธิ์การคืบที่อุณหภูมิ T

$\Delta\phi_{T,trans}$ = สัมประสิทธิ์การคืบเพิ่มเติม

$T(\Delta t_i)$ = อุณหภูมิในช่วงระยะเวลาΔt_i(℃)

T = อุณหภูมิ(℃)

T_0 = 1 ℃

ผลกระทบของความเครียดที่มีค่ามาก เมื่อความเครียดมีค่าอยู่ในช่วง 40ถึง 60 % ของกำลังอัด จะต้องปรับแก้สัมประสิทธิ์การคืบโนซั่นนอล

สำหรับ $0.4 < k_\sigma \leq 0.6$

$$\phi_{0,k} = \phi_0 \exp[1.5(k_\sigma \quad 0.4]$$

เมื่อ $\phi_{0,k}$ = ปรับแก้สัมประสิทธิ์การคืบโนซั่นนอล แทนในสมการ (2.37)

k_σ = อัตราส่วนกำลัง

2.4.4 วิธี GL2000

การประมาณค่าความเครียดของการคืบของคอนกรีตหาได้จากสมการ (2.42)

$$\varepsilon_{creep} = \frac{1}{E_{cmt0}} + \frac{\phi_{28}(t,t_0)}{E_{cm28}} \qquad (2.42)$$

เมื่อ E_{cm28} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

E_{cmt0} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่เวลารับน้ำหนัก (MPa)

$\phi_{28}(t, t_0)$ = สัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตที่อายุ 28 วันแสดงในสมการที่ (2.44)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดของคอนกรีตที่ระบุและค่าแรงอัดของคอนกรีตกลาง

$$f_{cm28} = 1.1 f_c + 5.0$$

$$E_{cmt} = 3500 + 4300\sqrt{f_{cmt}}$$

แทน $f_{cmt} = \beta_e^{\,2} f_{cm28}$

$$\beta_e = \exp\left[\frac{s}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right] \qquad (2.43)$$

เมื่อ f_{cm28} = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 (MPa)

f_c = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานกำหนด (MPa)

E_{cmt} = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

f_{cmt} = ค่าการพัฒนากำลังด้วยเวลา

β_e = ค่าการพัฒนากำลังให้กับประเภทปูนซีเมนต์

s = สัมประสิทธิ์ของชนิดปูนซีเมนต์ในสมการ (2.43) ตามตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของชนิดปูนซีเมนต์แต่ละประเภท

ประเภทของปูนซีเมนต์	s
Type I	0.335
Type II	0.40
Type III	0.13

สัมประสิทธิ์การคืบ

$$\phi_{28}(t,t_0) = \phi(t_c)[2\frac{(t\ t_0)^{0.3}}{(t\text{-}t_0)^{0.3}+14} + \frac{7^{0.5}}{t_0}\left(\frac{(t\ t_0)}{(t\text{-}t_0)+7}\right)^{0.5} + 2.5(1\text{-}1.086h^2)\left(\frac{(t\text{-}t_0)}{(t\text{-}t_0)+0.12(V/S)^2}\right)^{0.5}] \qquad (2.44)$$

เมื่อ t = อายุของคอนกรีตที่พิจารณา (วัน)

t_o = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)

t_c = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว (วัน)

ถ้า $t_o = t_c$

$$\phi(t_c) = 1$$

ถ้า $t_o > t_c$

$$\phi(t_c) = [1 - \left(\frac{(t_0\text{-}t_c)}{(t_0\text{-}t_c)+0.12(V/S)^2}\right)]^{0.5}$$

เมื่อ $\phi(t_c)$ =ระยะการแก้ไขสำหรับผลของการแห้งตัวก่อนที่จะรับน้ำหนักแทนในสมการ (2.44)

จากวิธีของสมาคมต่างๆ จะเห็นได้ชัดเจนว่าวิธีของแต่ละองค์กรนั้น ให้ความสำคัญกับตัวแปรต่างๆในการนำมาใช้คำนวณอาจต่างกันบ้างโดยวิธีของ ACI จะนำตัวแปร ระยะสลัม เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียด เปอร์เซ็นต์ของอากาศในตัวอย่าง และขนาดโตสุดของวัสดุผสมเข้ามาใช้ในการคำนวณ วิธีของ CEB MC90-99 จะนำตัวแปรที่เกี่ยวกับลักษณะของตัวอย่างมาใช้ในการคำนวณด้วย วิธีของBazant B3 Model จะนำตัวแปรที่เกี่ยวกับปริมาณของส่วนผสมมาใช้ในการคำนวณ วิธีของ GL2000 จะใช้ตัวแปรพื้นฐานในการคำนวณซึ่งสามารถสรุปตัวแปรที่สำคัญใช้ในการคำนวณแต่ละวิธีปรากฏตามตารางที่ 2.8 ดังนี้

ตารางที่ 2.8 ตัวแปรที่สำคัญใช้ในการคำนวณแต่ละวิธี

หัวข้อที่	ปัจจัย	วิธี ACI	วิธี B3 model	วิธี CEB MC90-99	วิธี GL2000
1	ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน	/	/	/	/
2	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	/	/	x	/
3	ประเภทของคอนกรีต	/	/	/	/
4	ประเภทของการบ่มชื้น	/	/	x	x
5	ค่าความชื้นสัมพัทธ์	/	/	/	/
6	อายุของคอนกรีตที่เริ่มรับน้ำหนัก	/	/	/	/
7	ระยะเวลาในการบ่มชื้น	/	/	/	/
8	อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว	/	/	x	/
9	ปริมาณปูนซีเมนต์	/	/	x	x
10	ค่าการยุบตัว	/	x	x	x
11	เปอร์เซ็นต์มวลรวมละเอียด	/	x	x	x
12	เปอร์เซ็นต์ปริมาณอากาศ	/	x	x	x
13	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต	/	x	x	x
14	ขนาดโตสุดของวัสดุผสม	/	x	x	x
15	ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม	x	/	x	x
16	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	x	/	x	x
17	อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์	x	/	x	x
18	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง	x	x	/	x
19	พารามิเตอร์ของส่วนที่สัมผัสกับอากาศ	x	x	/	x
20	รูปร่างของหน้าตัด	x	x	/	x

จากวิธีต่างๆ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องข้างต้น เป็นการศึกษาการคืบตัวของคอนกรีตซึ่งมีค่าตัวแปรสำหรับการคำนวณคล้ายกันจะต่างกันบ้างเพียงเล็กน้อย แต่ได้รับการยอมรับในการใช้งานอย่างแพร่หลายซึ่งผู้วิจัยจะได้ทำการพิสูจน์ผลการคำนวณค่าการคืบตัวตามทฤษฎีทั้ง 4 วิธีโดยเขียนโปรแกรมคำนวณเพื่อพิสูจน์ค่าการคืบตัวเปรียบเทียบแต่ละสมาคม ดังจะได้ดำเนินการศึกษาในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

การดำเนินงานในบทนี้ เป็นการเขียนโครงสร้างโปรแกรม เพื่อพิสูจน์และเปรียบเทียบค่าการคืบตัวของคอนกรีตตามแนวคิดทฤษฎีทั้ง 4 สมาคมที่ได้ศึกษาไว้แล้วในบทที่ 2 โดยจะทำการป้อนตัวแปรที่สำคัญที่ระบุไว้ในแต่ละสมาคม ลงในโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งมีขั้นตอนแผนดำเนินงานและโครงสร้างโปรแกรมดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษาการประเมินค่าการคืบตัว

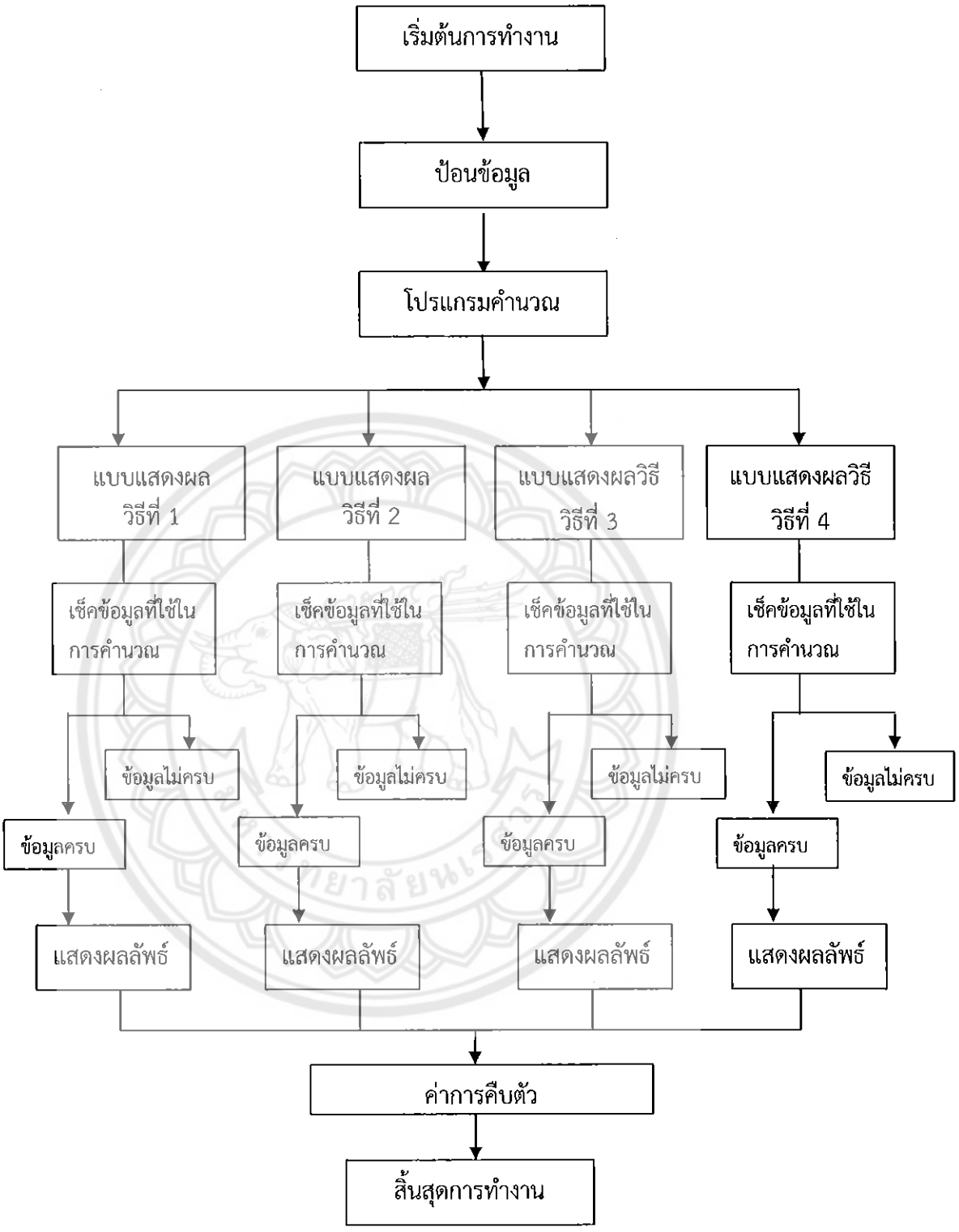
การดำเนินงานโครงงานมีขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาสมมติฐานและวิธีการในการประมาณค่าขององค์กรต่างๆ โดยที่ศึกษาวิธีของ ACI วิธีของ CEB MC90-99 Model วิธีของ B3 Model และวิธีของGL2000 Model รวมทั้งสิ้น 4 วิธีในการประมาณค่าของวิธีต่างๆ ได้นำสมมติฐานของเส้นทางการแห้งตัวมาใช้ด้วยเพื่อการพิจารณาเลือกการประมาณค่าที่เหมาะสมกับข้อมูลการทดลอง
2. วิธีการขององค์กรบางองค์กรยังใช้ข้อมูลจากกราฟช่วยในการประมาณค่าการคืบตัว ซึ่งการนำข้อมูลไปใช้ในการเขียนโปรแกรมจะต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการ ดังนั้นการดำเนินงานในขั้นตอนนี้จะต้องหาข้อมูลและทำความเข้าใจกราฟแล้วเปลี่ยนให้เป็นสมการ
3. เนื่องจากโปรแกรมมีหลายวิธีการประมาณค่าการคืบตัว ทำให้ต้องกรอกข้อมูลหลายครั้ง ทางโปรแกรมจึงจำเป็นต้องมีการแบ่งรับข้อมูลโดยการรวมค่าที่ต้องการในการคำนวณ การประมาณค่าของแต่ละองค์กรมารวมไว้ในที่เดียวกัน เพื่อง่ายต่อการกรอกข้อมูลและไม่ต้องกรอกข้อมูลหลายรอบ
4. นำผลการทดลองจริงที่มีการทำโดยผู้ทดลอง มาใช้เปรียบเทียบผลการคำนวณของแต่ละวิธีซึ่งการที่คำนวณจากโปรแกรม เพื่อการศึกษาวิธีการประมาณค่าที่เหมาะสมกับผลการทดลองจริง

3.2 โครงสร้างโปรแกรม

การทำงานของโปรแกรมอธิบายได้ดังนี้

1. เมื่อเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมจะเข้ามาอยู่ในส่วนกรอกข้อมูล
2. ให้ผู้ใช้ทำการกรอกข้อมูลของคอนกรีตที่ใช้ทดลองและผลการทดลองจริงที่ทำการทดลอง
3. เมื่อกรอกเสร็จโปรแกรมจะทำการคำนวณ การประมาณค่าการคืบตัวของวิธีต่างๆจะสามารถตรวจดูค่าหรือการคำนวณของแต่ละวิธีได้ด้วยการกดที่ชื่อขององค์กรที่เราสนใจ
4. หากต้องการดูการเปรียบเทียบข้อมูลของทุกวิธีกับค่าการทดลองจริงให้กดที่สรุปการเปรียบเทียบ ตามแผนภาพที่ 3.1 ดังนี้

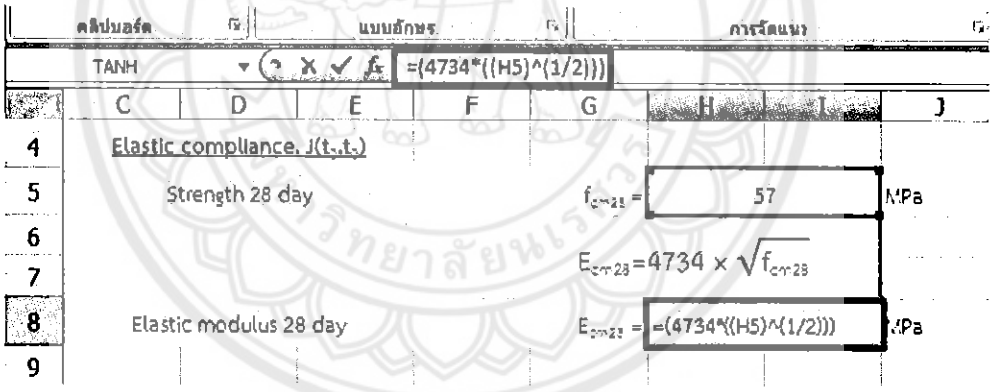


ภาพที่ 3.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

3.3 ลักษณะโปรแกรมการคำนวณ

ลักษณะของตัวโปรแกรมเป็นไฟล์ Microsoft Excel โดยในตัวไฟล์นั้นจะเขียนสูตรทฤษฎีการประมาณค่าการคืบตัวของคอนกรีตขององค์กรต่างๆ เพื่อช่วยให้การคำนวณและประมาณค่าได้เร็วขึ้น ซึ่งในการใช้โปรแกรมประมาณค่านั้นต้องกรอกข้อมูลตามที่สูตรต้องการ ด้วยเหตุนี้ตัวโปรแกรมจะต้องมีการเชื่อมโยงข้อมูลและนำไปใช้คำนวณ จึงต้องศึกษาการใช้สูตรและฟังก์ชั่นต่างๆ ของตัวโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อนำมาใช้ในเขียนสูตรการประมาณค่าการคืบตัว ประเภทหลักๆที่นำมาใช้

1. ฟังก์ชั่นพื้นฐาน บวก ลบ คูณ หาร ยกกำลัง
   - คลิกเซลล์ที่เราต้องการจะสร้างสูตร
   - พิมพ์เครื่องหมายเท่ากับ (=) แล้วตามด้วยค่าคงที่ที่เป็นตัวเลข (สามารถคลิกเลือกเซลล์ที่มีค่าคงตัวแทนการพิมพ์ได้) และตัวดำเนินการการคำนวณเช่น เครื่องหมายบวก (+) เครื่องหมายลบ (-) เครื่องหมายดอกจัน (*) เครื่องหมายทับ (/) และเครื่องหมายแคเรต (^) สามารถใส่ค่าคงที่และตัวดำเนินการได้สูงสุด 8192 อักขระ
   - กด Enter เพื่อแสดงผล
   - ตัวอย่างการใช้ฟังก์ชั่นดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การใส่ค่าฟังก์ชั่น

ตัวอย่าง

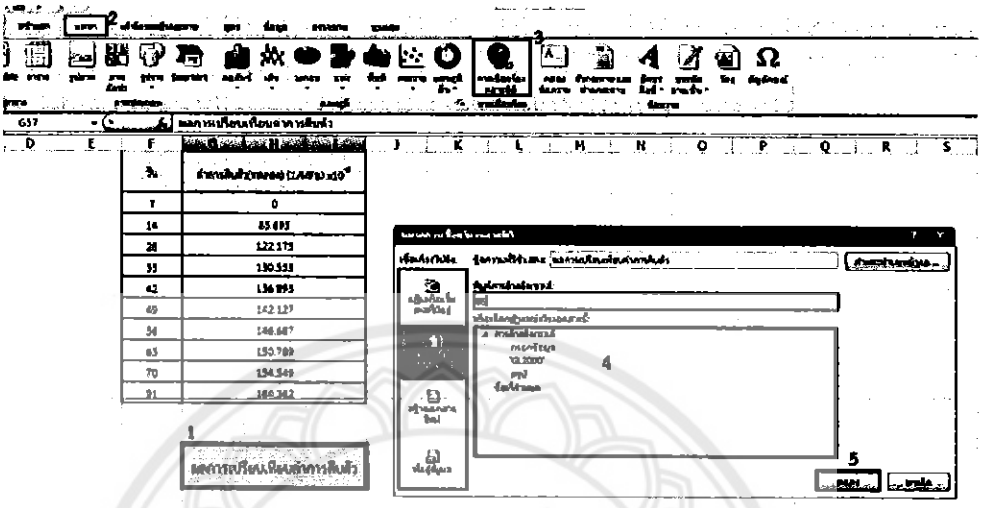
จากสูตร หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน :

$$E_{cm28} = 4734 \times \sqrt{f_{cm28}} = (4734*((H5)^(1/2)))$$

หมายความว่า ให้นำค่าที่เซลล์ H5 มายกกำลังด้วยเศษ 1ส่วน2 จากนั้นนำไปคูณด้วย 4,734

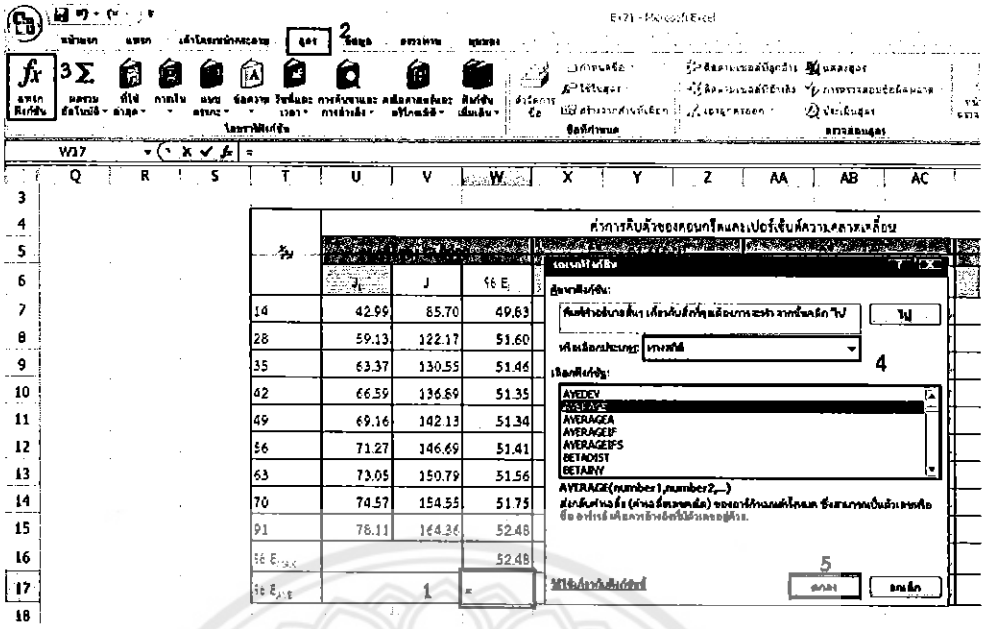
2. ฟังก์ชั่นเชื่อมโยงข้อมูล
   - คลิกเซลล์ที่เราต้องการเชื่องโยง
   - เลือกเมนูแทรก แล้วเลือกการเชื่อมโยงหลายมิติ

- เลือกปลายทางที่เราต้องการจะเชื่อมโยง
- กดตกลง
- ตัวอย่างการใช้ฟังก์ชั่นดังภาพที่ 3.3

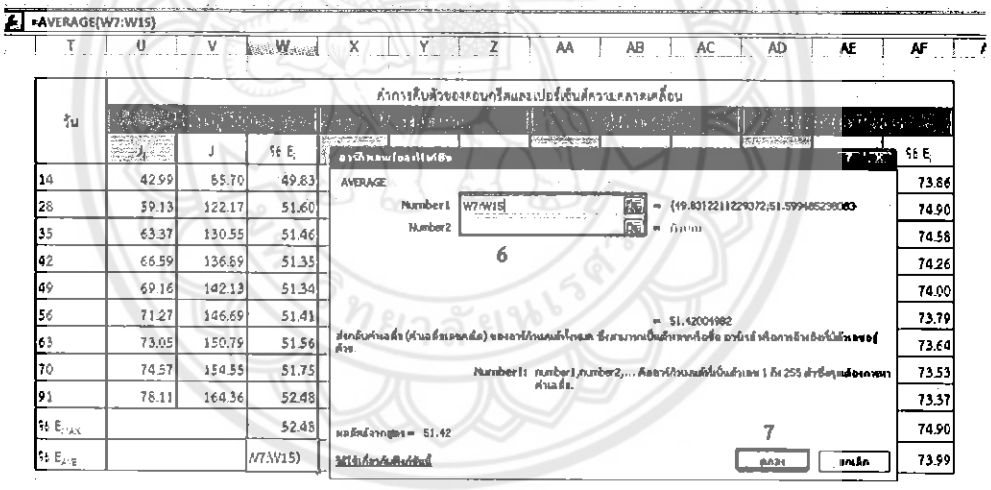


ภาพที่ 3.3 การใช้ฟังก์ชั่นเชื่อมโยง

3. ฟังก์ชั่นสถิติ
   - คลิกเซลล์ที่เราต้องการจะใส่ฟังก์ชั่น
   - เลือกเมนูสูตร
   - เลือกแทรกฟังก์ชั่น
   - เลือกฟังก์ชั่นที่เราต้องการ ซึ่งจะมีหลายหมวด
   - กดตกลงเพื่อเรียกใช้ฟังก์ชั่น
   - ใส่ข้อมูลตามที่ฟังก์ชั่นต้องการ
   - กด Enter เพื่อแสดงผล
   - ตัวอย่างการใช้ฟังก์ชั่นดังภาพที่ 3.4 – 3.5

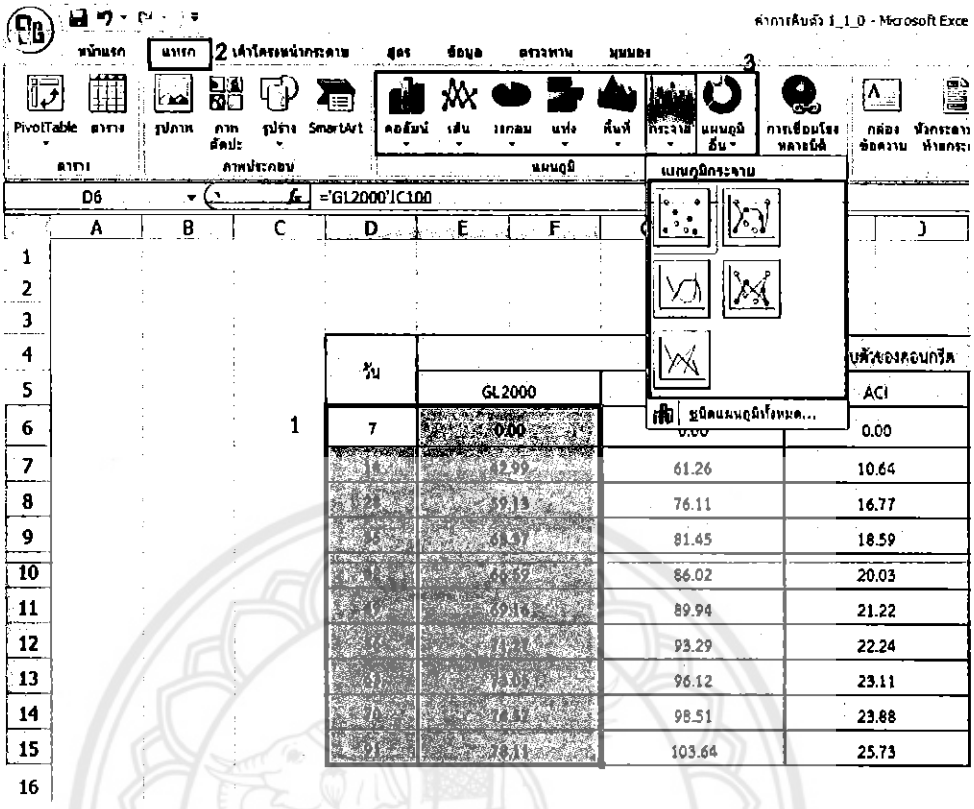


ภาพที่ 3.4 การเรียกใช้ฟังก์ชั่นทางสถิติ

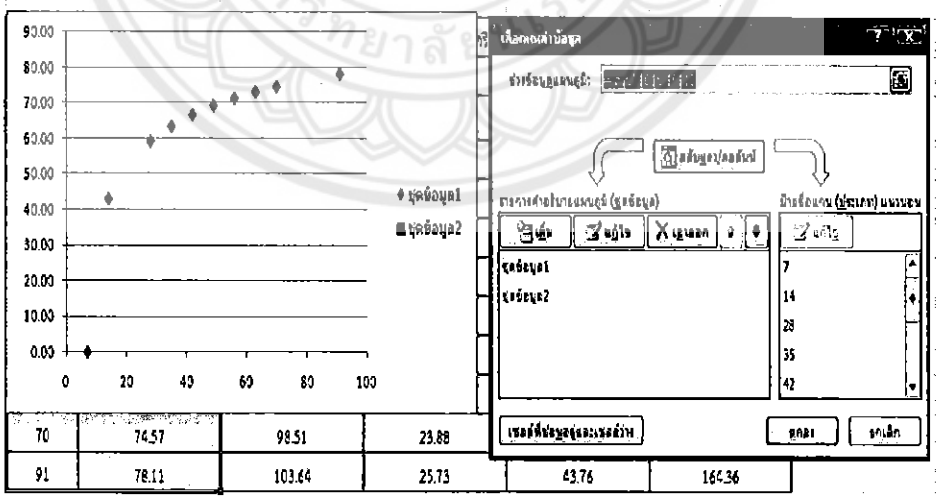


ภาพที่ 3.5 การใส่ข้อมูลให้ฟังก์ชั่น

4. ฟังก์ชั่นกราฟ
   - เลือกคอลัมน์ที่ต้องการจะสร้างกราฟ
   - เลือกเมนูแทรก
   - เลือกชนิดของกราฟที่เราต้องการจะแทรก
   - คลิกขวาที่กราฟ เลือกข้อมูล
   - ใช้ตั้งค่าข้อมูลของกราฟ
   - ตัวอย่างการใช้ฟังก์ชั่นดังภาพที่ 3.6 – 3.7



ภาพที่ 3.6 การแทรกกราฟ

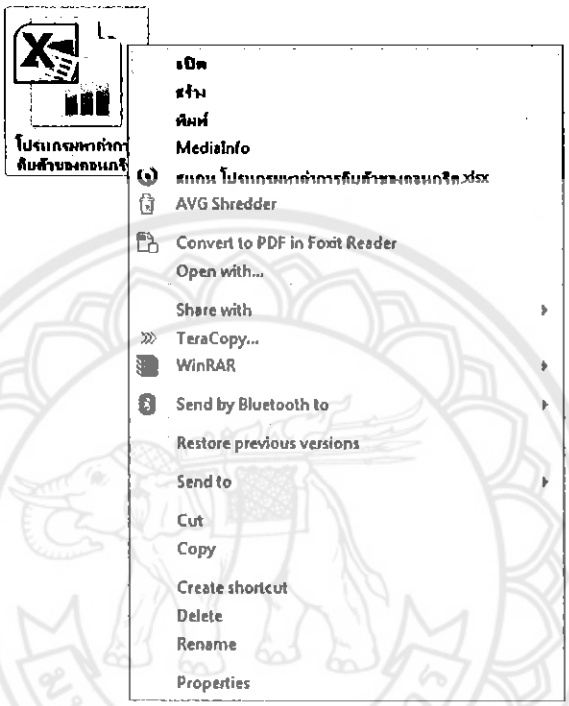


ภาพที่ 3.7 หน้าต่างข้อมูลของกราฟ

โปรแกรมช่วยในการคำนวณและประมาณค่าการคืบตัวของคอนกรีตเป็นโปรแกรม Microsoft Excel ที่เขียนสูตรหรือฟังก์ชั่นของการคำนวณการคืบตัวของทฤษฎีต่างๆลงไป ใช้งานง่ายและไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมอื่นเพิ่มเติม เนื่องจากตัวโปรแกรมจะมีติดตั้งอยู่แล้วในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนมาก

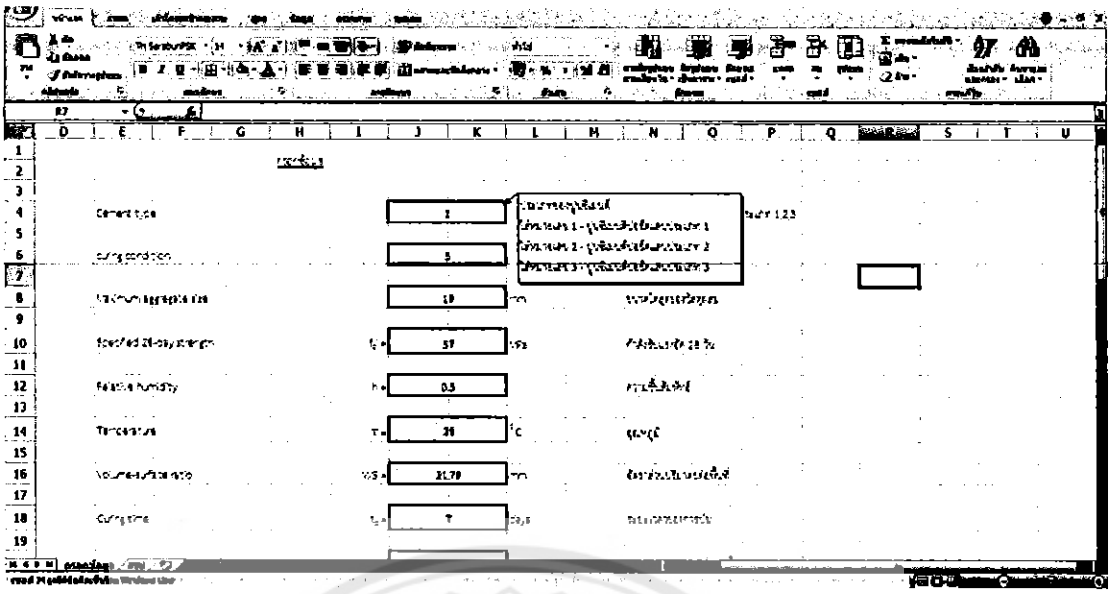
ขั้นตอนการใช้โปรแกรมมี 6 ขั้นตอน ดังนี้

1) เปิดโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนไว้ปรากฏตามภาพ ซึ่งจะ Save เป็น File Microsoft Excel ดังภาพที่ 3.8



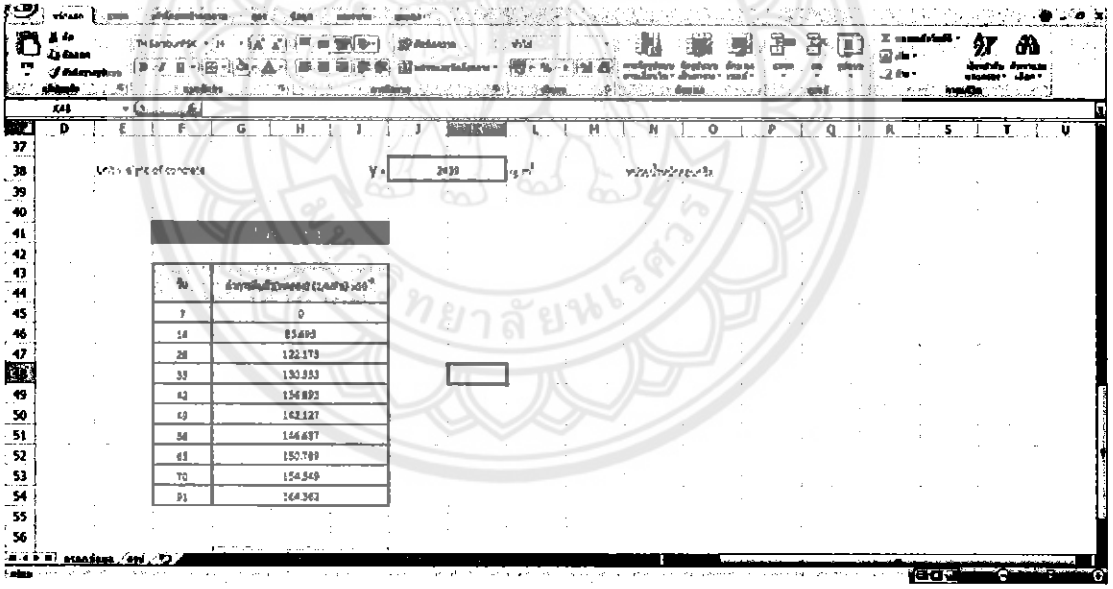
ภาพที่ 3.8 การเปิดไฟล์โปรแกรมช่วยคำนวณ

2) กรอกข้อมูลต่างๆ ตามที่ได้ระบุไว้ ซึ่งช่องสีเหลืองนั้นจะได้จากข้อมูลการทดลองหรือค่าที่ผู้ใช้งานต้องกรอกลงไป และจะมีส่วนของคำอธิบายเกี่ยวกับข้อมูลที่จะกรอกหรือเงื่อนไขในการกรอกข้อมูลดังภาพที่ 3.9



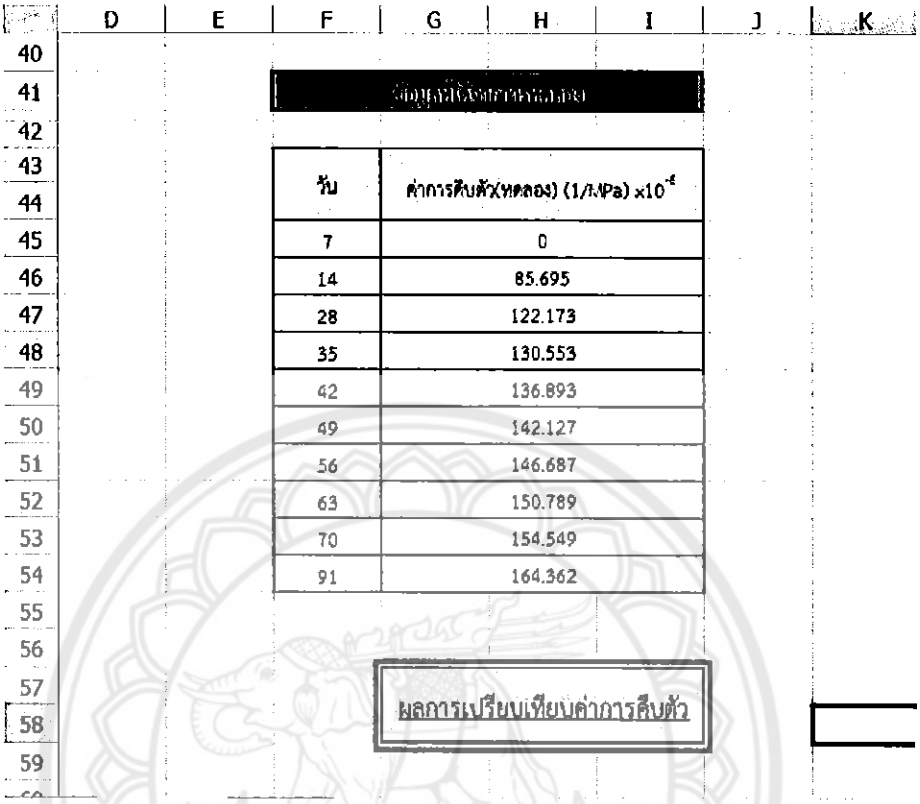
ภาพที่ 3.9 การกรอกข้อมูลต่างๆ

3) กรอกผลของการทดสอบใส่ตารางด้านล่างของส่วนกรอกข้อมูลดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การข้อมูลการทดลองการคืบตัว

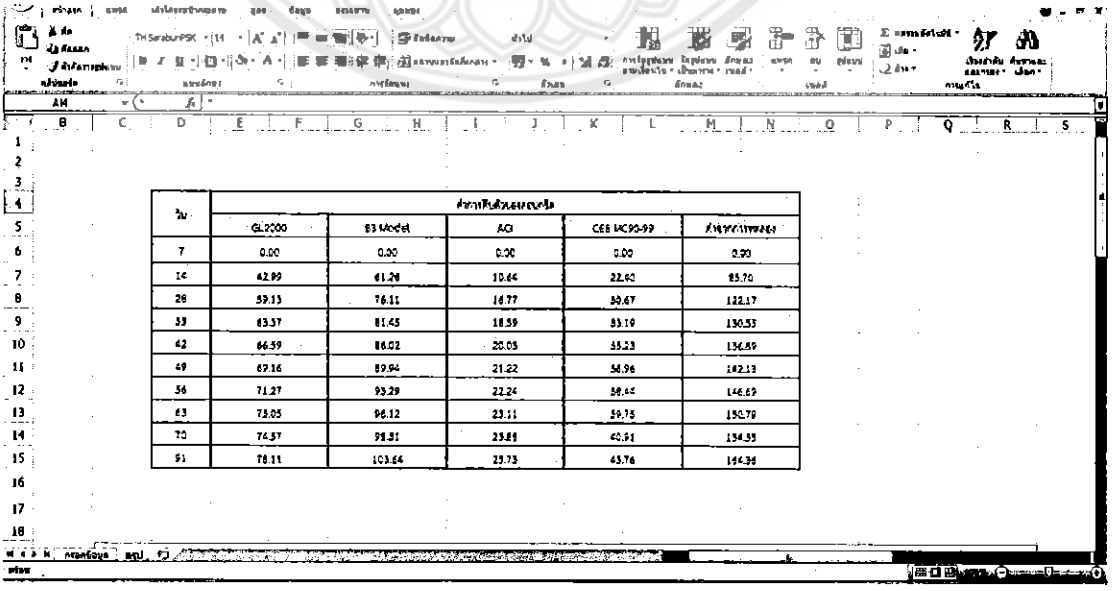
4) คลิกผลการเปรียบเทียบค่าการคืบตัว เพื่อดูผลการเปรียบเทียบค่าการคืบตัวของคอนกรีตจากทฤษฎีกับค่าจากการทดลองดังภาพที่ 3.11



วัน	ค่าการคืบตัว(ทดลอง) (1/MPa) x10^{-6}
7	0
14	85.695
28	122.173
35	130.553
42	136.893
49	142.127
56	146.687
63	150.789
70	154.549
91	164.362

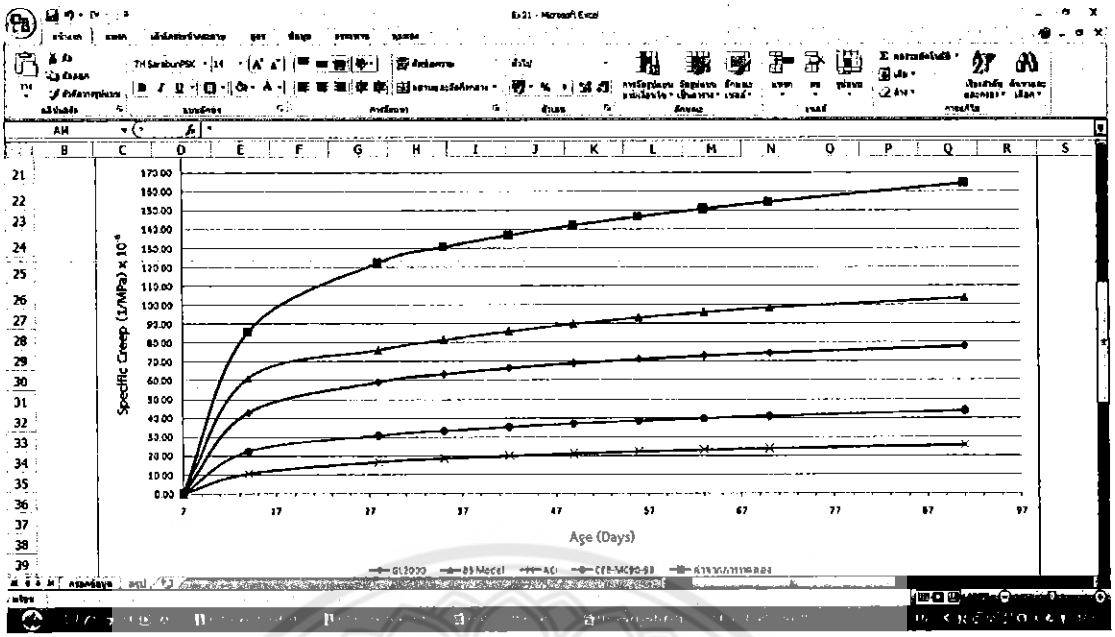
ภาพที่ 3.11 วิธีดูผลการเปรียบเทียบ

5) สามารถเลือกดูการเปรียบเทียบค่าการคืบตัวของแต่ละองค์กร ในรูปแบบของตารางและกราฟได้ดังภาพที่ 3.12 – 3.14

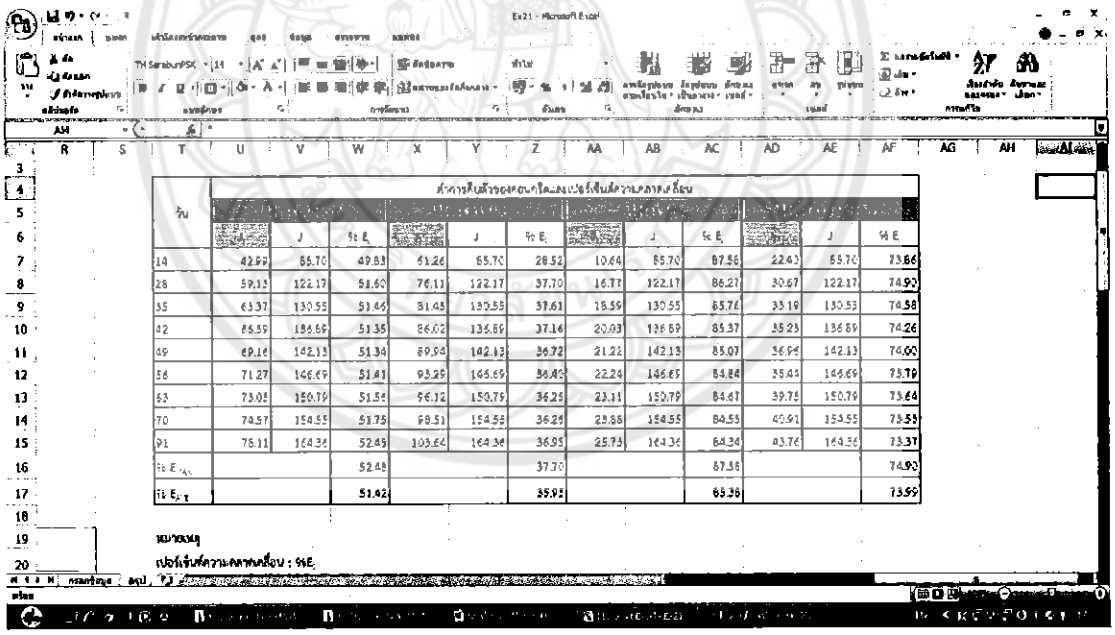


วัน	ค่าการคืบตัวแบบจำลอง				
	GL2000	B3 Model	ACI	CEB MC90-99	
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	62.99	61.26	10.44	22.60	85.70
28	89.13	76.11	16.77	30.67	122.17
35	83.37	81.45	18.59	33.19	130.53
42	86.59	86.02	20.05	35.23	136.89
49	89.16	89.94	21.22	36.96	142.13
56	91.27	93.29	22.24	38.45	146.69
63	93.05	96.12	23.11	39.75	150.79
70	94.57	98.51	23.89	40.91	154.55
91	98.11	103.66	25.73	43.76	164.36

ภาพที่ 3.12 ค่าการคืบตัวในรูปแบบตาราง



ภาพที่ 3.13 ค่าการคืบตัวในรูปแบบกราฟ

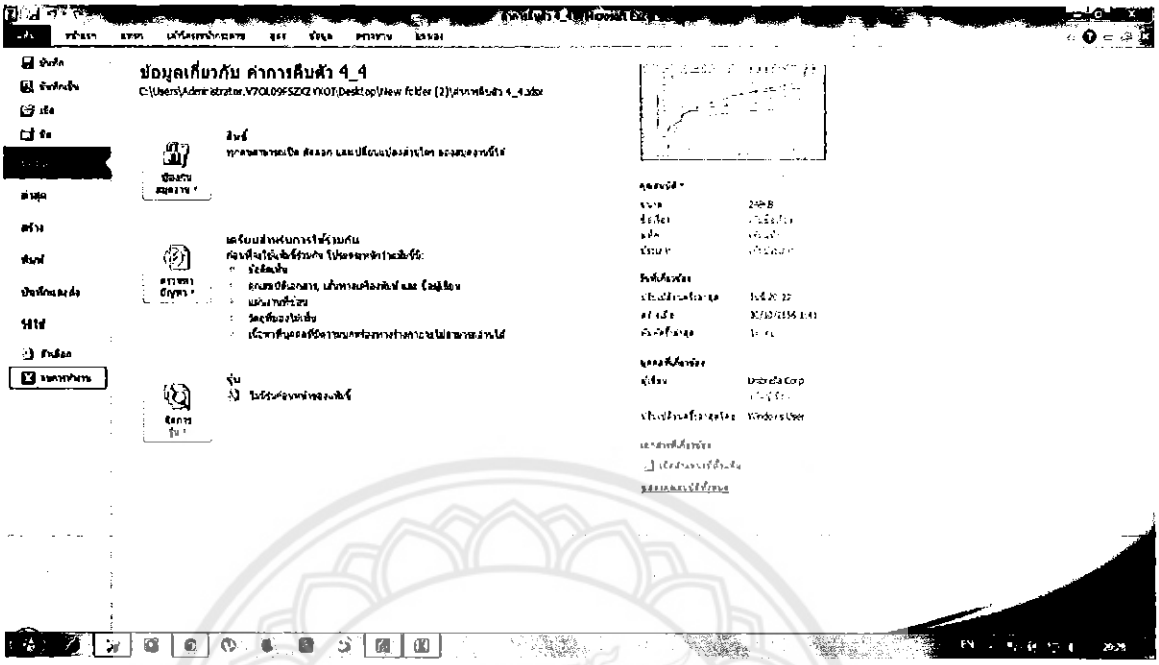


วัน												
		J	% E		J	% E		J	% E		J	% E
14	42.69	85.70	49.83	51.26	85.70	28.52	10.64	85.70	87.56	22.43	85.70	73.66
28	59.13	122.17	51.60	76.11	122.17	37.70	16.77	122.17	86.21	30.67	122.17	74.90
35	63.37	130.55	51.46	81.45	130.55	37.61	18.59	130.55	85.76	33.19	130.53	74.58
42	66.59	136.89	51.36	86.02	136.89	37.14	20.03	136.89	85.37	35.23	136.89	74.26
49	69.16	142.13	51.34	89.54	142.13	36.72	21.22	142.13	85.07	36.94	142.13	74.00
56	71.27	146.69	51.41	93.29	146.69	36.40	22.24	146.69	84.84	38.43	146.69	73.79
63	73.05	150.79	51.54	96.12	150.79	36.25	23.11	150.79	84.67	39.75	150.79	73.64
70	74.57	154.55	51.75	98.51	154.55	36.25	23.88	154.55	84.55	40.91	154.55	73.53
91	78.11	164.36	52.45	103.64	164.36	36.95	25.73	164.36	84.34	43.76	164.36	73.37
% E_{AV}			52.48			37.70			87.56			74.90
% E_{AT}			51.42			35.95			85.36			73.59

หมายเหตุ
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน : %E

ภาพที่ 3.14 ค่าความคลาดเคลื่อนของทฤษฎีกับค่าการทดลอง

6) จบการทำงาน และออกจากโปรแกรมดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 การปิดโปรแกรม

จากแผนดำเนินงานและโครงสร้างโปรแกรม ซึ่งเป็นแนวคิดในการวิจัยครั้งนี้ จึงเห็นได้ว่ามีขั้นตอนและรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนครบถ้วนแล้วสำหรับการคำนวณหาค่าการคืบตัวของคอนกรีต ซึ่งได้ดำเนินการวิเคราะห์ในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้แสดงการตรวจสอบความสามารถของโปรแกรมช่วยคำนวณ หาข้อสรุปว่าโปรแกรมช่วยคำนวณค่าการคืบตัวของคอนกรีตสามารถใช้ได้จริงหรือไม่ แสดงผลการเปรียบเทียบค่าการคืบตัวจากทฤษฎีกับค่าการคืบตัวจากการทดสอบและหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน โดยมีหลักการคำนวณทางคณิตศาสตร์สถิติดังนี้

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน($\%E_i$)

$$\%E_i = \left|\frac{J-J_i}{J}\right| \times 100$$

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ($\%E_{AVE}$)

$$\%E_{AVE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\%E_i)}{n}$$

เมื่อ J คือ ค่าการคืบตัวจากการทดลอง, J_i คือค่าการคืบตัวจากทฤษฎี ,$\%E_i$ คือเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน,$\%E_{MAX}$ คือเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด

4.1. ค่าการเปรียบเทียบจากการทดลองใช้โปรแกรม

4.1.1 การทดลองการเปรียบเทียบ

ตัวอย่างในการคำนวณโดยใส่ข้อมูลต่าง ๆลงในโปรแกรมข้อ 4.1ดังนี้

1. ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
2. ใช้ประเภทการบ่มชื้นแบบอบไอน้ำ

3.	ขนาดโตสุดของวัสดุผสม	= 20	มิลลิเมตร
4.	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน (f_c)	=33.3× 10^6	นิวตันต่อตารางเมตร
5.	ความชื้นสัมพัทธ์ (h)	=0.7	
6.	อุณหภูมิ (T)	=20	องศาเซลเซียส
7.	อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ (V/S)	=100	มิลลิเมตร
8.	ระยะเวลาของการบ่มชื้น	=7	วัน
9.	อายุของคอนกรีตที่เริ่มรับน้ำหนัก	= 14	วัน
10.	ขนาดของแรง (k_s)	=40	เปอร์เซ็นต์
11.	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตอายุ 28 วัน	=28178× 10^6	นิวตันต่อตารางเมตร
12.	ปริมาณปูนซีเมนต์ (c)	=390	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
13.	ปริมาณน้ำ (w)	=205	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

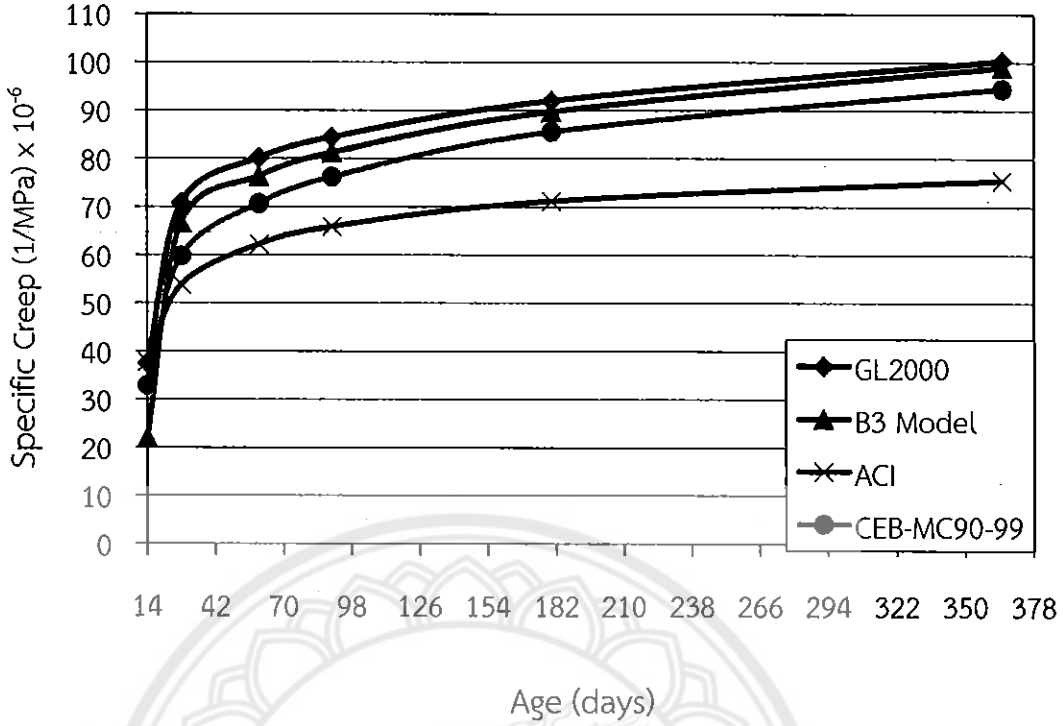
14. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) =0.5
15. อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์(a/c) =4.23
16. เปอร์เซ็นต์มวลรวมละเอียด(ψ) =40 เปอร์เซ็นต์
17. ปริมาณอากาศ(α) =2 เปอร์เซ็นต์
18. ค่าการยุบตัว (s) =75 มิลลิเมตร
19. หน่วยน้ำหนักคอนกรีต =2,345 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

นำข้อมูลข้างต้นคำนวณตามทฤษฎีตามวิธีของแต่ล่ะองค์กร จะได้ผลปรากฏตามตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความคลาดเคลื่อนของการคืบตัว

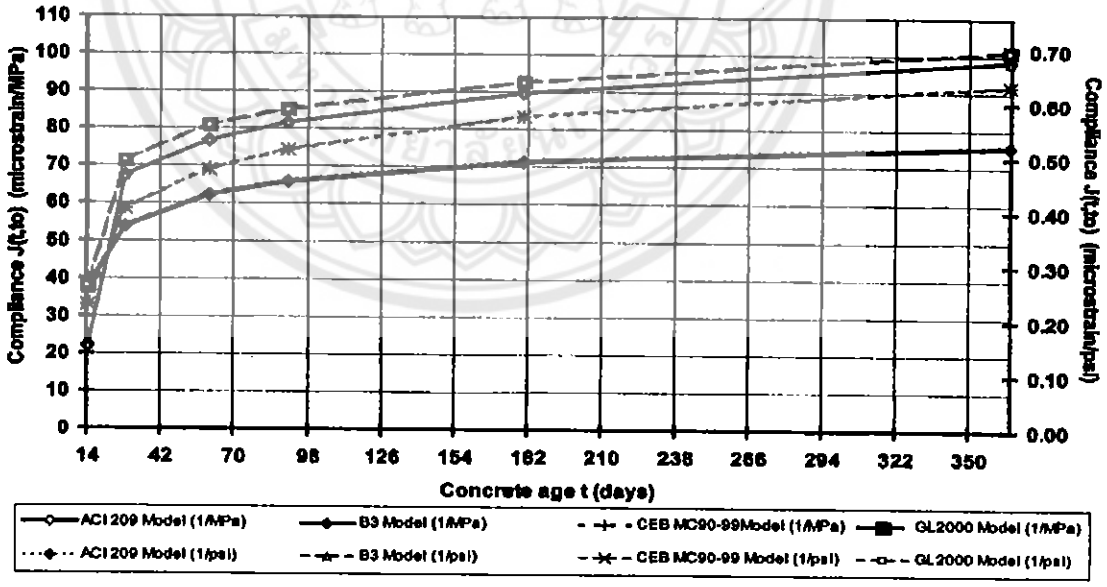
วัน	ค่าการคืบตัวของคอนกรีต											
	วิธีของ GL2000			วิธีของ B3 Model			วิธีของ ACI			วิธีของ CEB MC90-99		
	J_i	J	$\%E_i$	J_i	J	$\%E_i$	J_i	J	$\%E_i$	J_i	J	$\%E_i$
14	37.52	37.92	1.05	21.96	21.96	0.02	37.82	37.82	0.00	32.80	32.90	0.30
28	71.84	71.38	0.64	67.27	67.27	0.01	53.86	53.86	0.00	58.26	58.65	0.67
60	81.55	80.85	0.86	76.91	76.87	0.05	62.24	62.24	0.00	68.60	69.11	0.74
90	85.98	85.17	0.95	81.74	81.66	0.10	65.90	65.90	0.00	73.82	74.40	0.77
180	93.74	92.74	1.08	90.12	89.84	0.31	71.24	71.24	0.01	82.67	83.34	0.81
365	102.35	101.10	1.24	99.29	98.48	0.82	75.58	75.58	0.01	91.16	91.94	0.85
$\%E_{MAX}$			1.24			0.82			0.01			0.85
$\%E_{AVE}$			0.97			0.22			0.00			0.69

หมายเหตุ $\%E_i$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
J =การคืบตัวจากการทดลอง
J_i = ค่าการคืบตัวจากทฤษฎี
$\%E_{AVE}$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย
$\%E_i$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
$\%E_{MAX}$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด



ภาพที่ 4.1 กราฟค่าการคืบตัวที่ได้จากโปรแกรมคำนวณ

นำกราฟค่าการคืบตัวที่ได้จากโปรแกรมภาพที่ 4.1 ไปเปรียบเทียบกราฟค่าการคืบตัวจากทฤษฎีในภาพที่ 4.2 ด้านล่างดังนี้



ภาพที่ 4.2 กราฟค่าการคืบตัวที่ได้จากทฤษฎี

เมื่อนำผลการคำนวณของแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากทฤษฎีโดยใช้สถิติวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ถึงความคลาดเคลื่อนของค่าการคืบตัวโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณกับการคำนวณแบบปกติและหาข้อสรุปว่าโปรแกรมการคำนวณค่าการคืบตัวของคอนกรีตนี้สามารถใช้งานได้จริงหรือไม่

ปรากฏผลการเปรียบเทียบมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อย อาจเกิดจากความละเอียดในการคำนวณทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน จึงอาจสรุปผลในข้างต้นว่าโปรแกรมดังกล่าวสามารถใช้งานได้ และจากการสังเกตจะพบว่ากราฟของแต่ละวิธีการคำนวณนั้นให้ค่าและลักษณะกราฟต่างกัน ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากตัวแปลที่ใช้ในการคำนวณของแต่ล่ะองค์กร หรือรูปแบบของวิธีการคำนวณที่แตกต่างกัน

จึงได้ทำการทดลองใช้งานจริงเพื่อยืนยันผลปรากฏอีก 4 ครั้งซึ่งแต่ละการทดลองนั้นจะกำหนดให้มีค่าตัวแปรที่แตกต่างกันออกไปด้วยเพื่อให้มีข้อเปรียบเทียบในรูปแบบที่หลากหลาย ซึ่งการทดลองได้กำหนดให้มีตัวแปรอายุของคอนกรีตกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลง โดยกำหนดให้อายุของคอนกรีตมีสองค่าคือ 7 วันกับ 28 วัน และแต่ละอายุของคอนกรีตจะมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สองค่าคือ 0.35 และ 0.55 ดังแสดงตามข้อ 4.1.2 - 4.1.5

4.1.2ผลการทดลองใช้งานครั้งที่ 1

ใช้ข้อมูลในการคำนวณต่าง ๆ ดังนี้

1.	ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1		
2.	ประเภทการบ่มชื้นแบบปิดผนึก		
3.	ขนาดโตสุดของวัสดุผสม	= 19	มิลลิเมตร
4.	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน (f_c)	=57× 10^6	นิวตันต่อตารางเมตร
5.	ความชื้นสัมพัทธ์ (h)	= 0.5	
6.	อุณหภูมิ (T)	= 28	องศาเซลเซียส
7.	อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ (V/S)	=21.79	มิลลิเมตร
8.	ระยะเวลาของการบ่มชื้น	= 7	วัน
9.	อายุของคอนกรีตที่เริ่มรับน้ำหนัก	= 7	วัน
10.	ขนาดของแรง (k_s)	=40	เปอร์เซ็นต์
11.	ปริมาณปูนซีเมนต์ (c)	=483	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
12.	ปริมาณน้ำ (w)	=166	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
13.	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c)	=0.35	
14.	อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์ (a/c)	=3.7	
15.	เปอร์เซ็นต์มวลรวมละเอียด (ψ)	=46.34	เปอร์เซ็นต์
16.	ปริมาณอากาศ (α)	=1	เปอร์เซ็นต์
17.	ค่าการยุบตัว (s)	=90	มิลลิเมตร
18.	หน่วยน้ำหนักคอนกรีต	= 2,439	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
19.	ค่าการหดตัวสูงสุด ($\varepsilon_{sh\infty}$)	=-685.68× 10^{-6}	
20.	ค่าการหดตัวครึ่งเวลา (τ_{sh})	=50.28	

นำข้อมูลข้างต้นคำนวณตามทฤษฎีตามวิธีของแต่ละองค์กร จะได้ผลปรากฏตามตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ค่าการคืบตัวและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองใช้งานครั้งที่ 1

วัน	ค่าการคืบตัวของคอนกรีตและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน											
	วิธีของ GL2000			วิธีของ B3 Model			วิธีของ ACI			วิธีของ CEB MC90-99		
	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i
14	42.99	85.70	49.83	61.26	85.70	28.52	10.64	85.70	87.58	22.40	85.70	73.86
28	59.13	122.17	51.60	76.11	122.17	37.70	16.77	122.17	86.27	30.67	122.17	74.90
35	63.37	130.55	51.46	81.45	130.55	37.61	18.59	130.55	85.76	33.19	130.55	74.58
42	66.59	136.89	51.35	86.02	136.89	37.16	20.03	136.89	85.37	35.23	136.89	74.26
49	69.16	142.13	51.34	89.94	142.13	36.72	21.22	142.13	85.07	36.96	142.13	74.00
56	71.27	146.69	51.41	93.29	146.69	36.40	22.24	146.69	84.84	38.44	146.69	73.79
63	73.05	150.79	51.56	96.12	150.79	36.25	23.11	150.79	84.67	39.75	150.79	73.64
70	74.57	154.55	51.75	98.51	154.55	36.26	23.88	154.55	84.55	40.91	154.55	73.53
91	78.11	164.36	52.48	103.64	164.36	36.95	25.73	164.36	84.34	43.76	164.36	73.37
$\%E_{MAX}$			52.48			37.70			87.58			74.90
$\%E_{AVE}$			51.42			35.95			85.38			73.99

หมายเหตุ $\%E_i$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

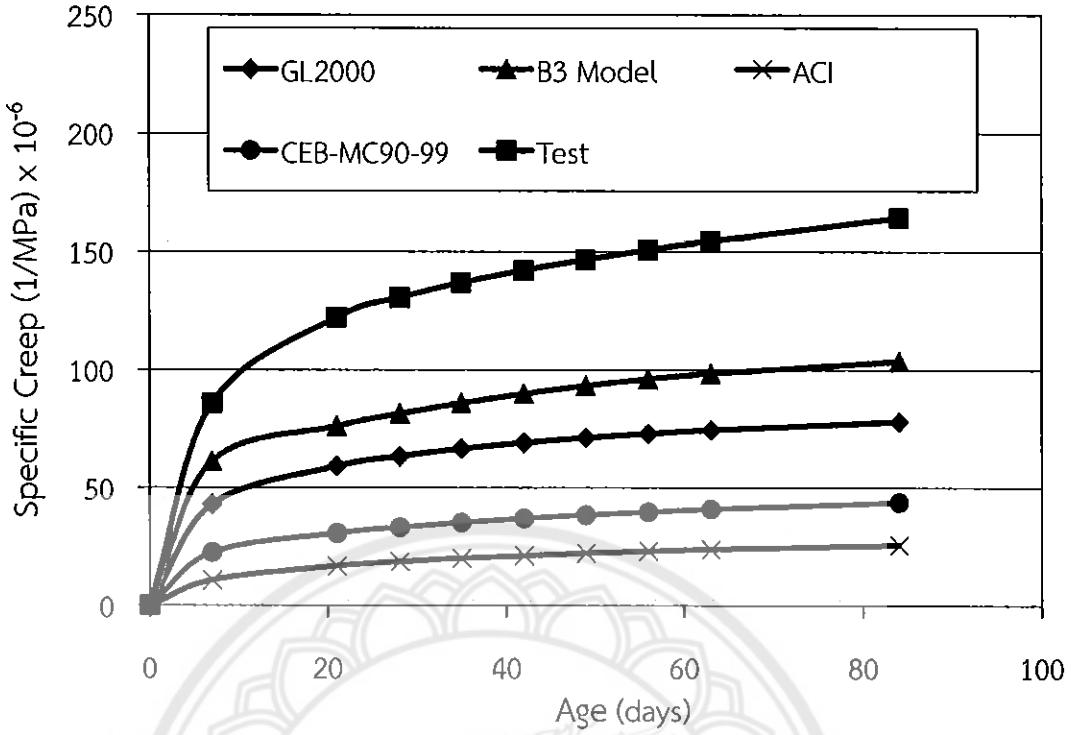
J =การคืบตัวจากการทดลอง

J_i = ค่าการคืบตัวจากทฤษฎี

$\%E_{AVE}$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย

$\%E_i$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

$\%E_{MAX}$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด



ภาพที่ 4.3 การคืบตัวตามทฤษฎีเปรียบเทียบค่าการคืบตัวของการทดลองครั้งที่ 1

เมื่อนำผลการคำนวณตามทฤษฎีของแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้สถิติวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการคืบตัวของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.2 วิธีของ ACI มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 85.60% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 87.58% วิธีของ CEB MC90-99 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 74.08% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 74.90% วิธีของB3 Modelมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 36.13% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 37.70% วิธีของ GL2000 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 51.53% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 52.48%

4.1.3ผลการทดลองใช้งานครั้งที่ 2

ใช้ข้อมูลในการคำนวณต่าง ๆ ดังนี้

1. ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
2. ประเภทการบ่มชื้นแบบปิดผนึก
3. ขนาดโตสุดของวัสดุผสม = 19 มิลลิเมตร
4. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน (f_c) =31× 10^6 นิวตันต่อตารางเมตร
5. ความชื้นสัมพัทธ์ (h) =0.5
6. อุณหภูมิ (T) =28 องศาเซลเซียส
7. อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ (V/S) =21.79 มิลลิเมตร
8. ระยะเวลาของการบ่มชื้น = 7 วัน
9. อายุของคอนกรีตที่เริ่มรับน้ำหนัก = 7 วัน
10. ขนาดของแรง (k_s) =40 เปอร์เซ็นต์
11. ปริมาณปูนซีเมนต์ (c) =372 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
12. ปริมาณน้ำ (w) =205 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
13. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) =0.55
14. อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์ (a/c) =4.8
15. เปอร์เซ็นต์มวลรวมละเอียด (ψ) =44.48 เปอร์เซ็นต์
16. ปริมาณอากาศ (α) =1 เปอร์เซ็นต์
17. ค่าการยุบตัว (s) =120 มิลลิเมตร
18. หน่วยน้ำหนักคอนกรีต = 2,385 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
19. ค่าการหดตัวสูงสุด ($\varepsilon_{sh\infty}$) =-977.44x 10^{-6}
20. ค่าการหดตัวครึ่งเวลา (τ_{sh}) =58.55

นำข้อมูลข้างต้นคำนวณตามทฤษฎีตามวิธีของแต่ละองค์กร จะได้ผลปรากฏตามตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าการคืบตัวและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองใช้งานครั้งที่ 2

วัน	ค่าการคืบตัวของคอนกรีตและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน											
	วิธีของ GL2000			วิธีของ B3 Model			วิธีของ ACI			วิธีของ CEB MC90-99		
	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i
14	58.30	61.35	4.98	67.52	61.35	10.05	26.38	61.35	57.00	49.69	61.35	19.01
28	80.18	99.04	19.04	84.94	99.04	14.23	41.57	99.04	58.03	68.25	99.04	31.09
35	85.93	111.34	22.82	91.41	111.34	17.90	46.07	111.34	58.62	73.96	111.34	33.57
42	90.30	121.60	25.74	97.08	121.60	20.16	49.65	121.60	59.17	78.63	121.60	35.34
49	93.78	130.43	28.10	102.08	130.43	21.74	52.60	130.43	59.67	82.58	130.43	36.69
56	96.64	138.22	30.08	106.47	138.22	22.97	55.11	138.22	60.13	86.01	138.22	37.78
63	99.05	145.20	31.78	110.30	145.20	24.03	57.28	145.20	60.55	89.03	145.20	38.68
70	101.12	151.52	33.26	113.62	151.52	25.01	59.19	151.52	60.94	91.74	151.52	39.45
91	105.91	167.61	36.81	121.00	167.61	27.81	63.78	167.61	61.95	98.46	167.61	41.25
$\%E_{MAX}$			36.81			27.81			61.95			41.25
$\%E_{AVE}$			25.85			20.43			59.56			34.76

หมายเหตุ $\%E_i$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

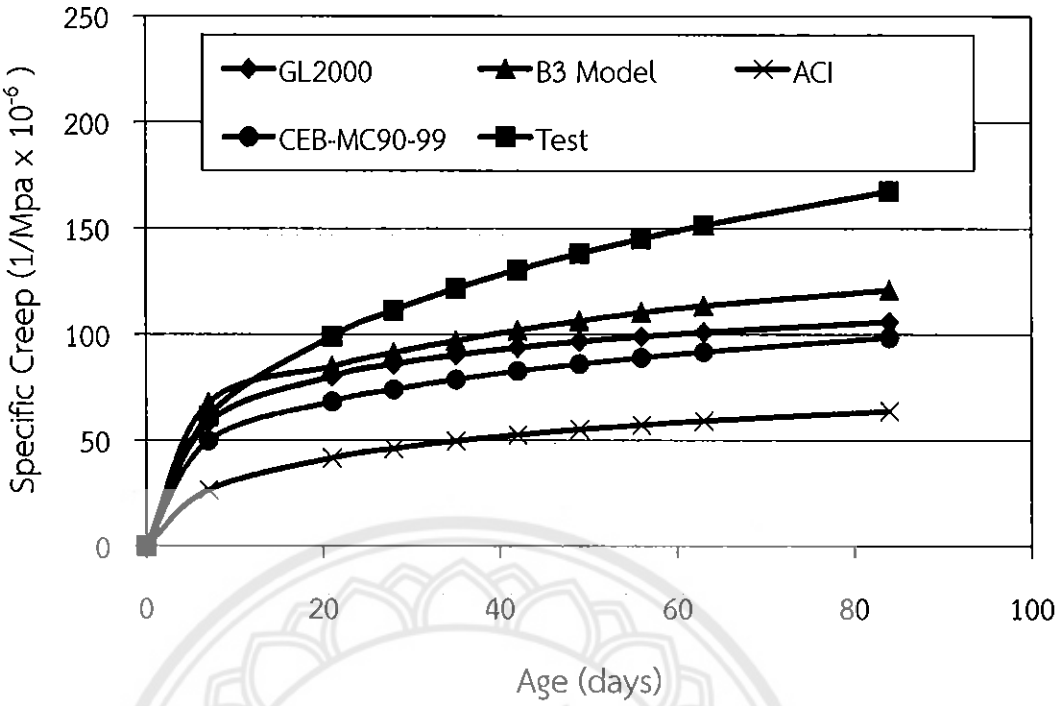
J =การคืบตัวจากการทดลอง

J_i = ค่าการคืบตัวจากทฤษฎี

$\%E_{AVE}$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย

$\%E_i$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

$\%E_{MAX}$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด



ภาพที่ 4.4 การคืบตัวตามทฤษฎีเปรียบเทียบค่าการคืบตัวของการทดลองครั้งที่ 2

เมื่อนำผลการคำนวณตามทฤษฎีของแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้สถิติวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการคืบตัวของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.3 วิธีของ ACI มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 59.56% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 61.95% วิธีของ CEB MC90-99 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 34.76% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 41.25% วิธีของ B3 Model มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 20.43% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 27.81% วิธีของ GL2000 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 25.85% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 36.81%

4.1.4ผลการทดลองใช้งานครั้งที่ 3

ใช้ข้อมูลในการคำนวณต่าง ๆ ดังนี้

1. ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
2. ประเภทการบ่มชื้นแบบปิดผนึก

3. ขนาดโตสุดของวัสดุผสม	= 19	มิลลิเมตร
4. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน (f_c)	=59× 10^6	นิวตันต่อตารางเมตร
5. ความชื้นสัมพัทธ์ (h)	= 0.5	
6. อุณหภูมิ (T)	= 28	องศาเซลเซียส
7. อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ (V/S)	= 21.79	มิลลิเมตร
8. ระยะเวลาของการบ่มชื้น	= 28	วัน
9. อายุของคอนกรีตที่เริ่มรับน้ำหนัก	= 28	วัน
10. ขนาดของแรง (k_s)	=40	เปอร์เซ็นต์
11. ปริมาณปูนซีเมนต์ (c)	= 483	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
12. ปริมาณน้ำ (w)	= 166	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
13. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c)	= 0.35	
14. อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์ (a/c)	= 3.7	
15. เปอร์เซ็นต์มวลรวมละเอียด (ψ)	= 46.34	เปอร์เซ็นต์
16. ปริมาณอากาศ (α)	=1	เปอร์เซ็นต์
17. ค่าการยุบตัว (s)	= 90	มิลลิเมตร
18. หน่วยน้ำหนักคอนกรีต	= 2,439	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
19. ค่าการหดตัวสูงสุด ($\varepsilon_{sh\infty}$)	=-676.83x 10^{-6}	
20. ค่าการหดตัวครึ่งเวลา (τ_{sh})	= 44.62	

นำข้อมูลข้างต้นคำนวณตามทฤษฎีตามวิธีของแต่ละองค์กร จะได้ผลปรากฏตามตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ค่าการคืบตัวและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองใช้งานครั้งที่ 3

วัน	ค่าการคืบตัวของคอนกรีตและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน											
	วิธีของ GL2000			วิธีของ B3 Model			วิธีของ ACI			วิธีของ CEB MC90-99		
	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i
35	32.53	44.28	26.52	35.17	44.28	20.56	7.42	44.28	83.23	16.50	44.28	62.74
42	40.96	63.50	35.49	41.67	63.50	34.38	10.00	63.50	84.25	20.15	63.50	68.26
49	46.21	76.31	39.44	47.06	76.31	38.33	11.70	76.31	84.67	22.59	76.31	70.40
56	49.99	85.90	41.80	51.75	85.90	39.75	12.96	85.90	84.91	24.44	85.90	71.55
63	52.90	93.53	43.44	55.81	93.53	40.33	13.97	93.53	85.06	25.94	93.53	72.26
70	55.25	99.84	44.67	59.27	99.84	40.64	14.80	99.84	85.17	27.21	99.84	72.75
77	57.19	105.21	45.64	62.17	105.21	40.90	15.51	105.21	85.26	28.30	105.21	73.10
84	58.84	109.85	46.44	64.58	109.85	41.21	16.12	109.85	85.33	29.26	109.85	73.37
91	60.25	113.94	47.12	66.56	113.94	41.58	16.66	113.94	85.38	30.11	113.94	73.57
$\%E_{MAX}$			47.12			41.58			85.38			73.57
$\%E_{AVE}$			41.17			37.52			84.81			70.89

หมายเหตุ $\%E_i$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

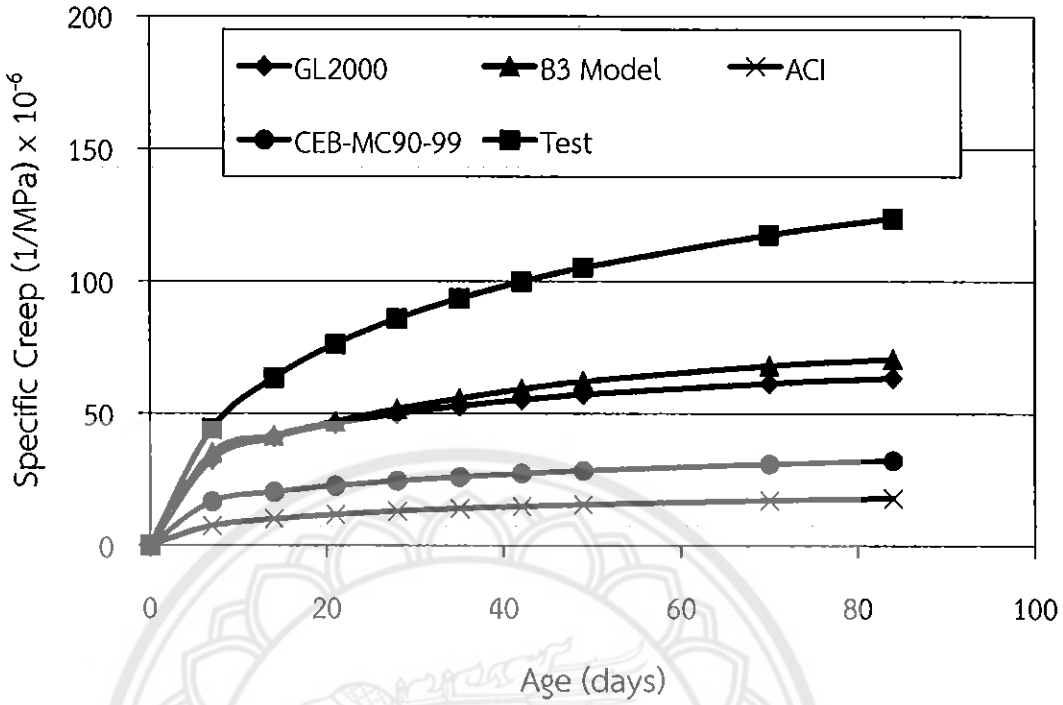
J =การคืบตัวจากการทดลอง

J_i = ค่าการคืบตัวจากทฤษฎี

$\%E_{AVE}$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย

$\%E_i$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

$\%E_{MAX}$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด



ภาพที่ 4.5 การคืบตัวตามทฤษฎีเปรียบเทียบค่าการคืบตัวของการทดลองครั้งที่ 3

เมื่อนำผลการคำนวณตามทฤษฎีของแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้สถิติวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการคืบตัวของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.4 วิธีของ ACI มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 84.81% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 85.38% วิธีของ CEB MC90-99 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 70.89% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 73.57% วิธีของ B3 Model มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 37.52% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 41.58% วิธีของ GL2000 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 41.17% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 47.12%

4.1.5ผลการทดลองใช้งานครั้งที่ 4

ใช้ข้อมูลในการคำนวณต่าง ๆ ดังนี้

1. ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
2. ประเภทการบ่มชื้นแบบปิดผนึก

3. ขนาดโตสุดของวัสดุผสม	= 19	มิลลิเมตร
4. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน (f_c)	=35× 10^6	นิวตันต่อตารางเมตร
5. ความชื้นสัมพัทธ์ (h)	= 0.5	
6. อุณหภูมิ (T)	= 28	องศาเซลเซียส
7. อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ (V/S)	= 21.79	มิลลิเมตร
8. ระยะเวลาของการบ่มชื้น	= 7	วัน
9. อายุของคอนกรีตที่เริ่มรับน้ำหนัก	= 7	วัน
10. ขนาดของแรง (k_s)	=40	เปอร์เซ็นต์
11. ปริมาณปูนซีเมนต์ (c)	= 372	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
12. ปริมาณน้ำ (w)	= 205	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
13. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c)	= 0.55	
14. อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์ (a/c)	= 4.8	
15. เปอร์เซ็นต์มวลรวมละเอียด (ψ)	= 44.48	เปอร์เซ็นต์
16. ปริมาณอากาศ (α)	=1	เปอร์เซ็นต์
17. ค่าการยุบตัว (s)	= 120	มิลลิเมตร
18. หน่วยน้ำหนักคอนกรีต	= 2,385	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
19. ค่าการหดตัวสูงสุด ($\varepsilon_{sh\infty}$)	=-950.53x 10^{-6}	
20. ค่าการหดตัวครึ่งเวลา (τ_{sh})	= 580.84	

นำข้อมูลข้างต้นคำนวณตามทฤษฎีตามวิธีของแต่ล่ะองค์กร จะได้ผลปรากฏตามตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ค่าการคืบตัวและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองใช้งานครั้งที่ 4

วัน	ค่าการคืบตัวของคอนกรีตและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน											
	วิธีของ GL2000			วิธีของ B3 Model			วิธีของ ACI			วิธีของ CEB MC90-99		
	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i	J_i	J	% E_i
35	42.24	58.02	27.19	40.68	58.02	29.88	17.62	58.02	69.63	32.53	58.02	43.93
42	53.18	75.23	29.30	48.32	75.23	35.77	23.73	75.23	68.46	39.79	75.23	47.11
49	60.00	86.44	30.58	54.70	86.44	36.72	27.76	86.44	67.88	44.65	86.44	48.34
56	64.90	95.03	31.70	60.33	95.03	36.52	30.77	95.03	67.62	48.38	95.03	49.09
63	68.69	102.18	32.78	65.32	102.18	36.08	33.16	102.18	67.55	51.42	102.18	49.68
70	71.73	108.43	33.85	69.69	108.43	35.73	35.13	108.43	67.60	53.98	108.43	50.21
77	74.25	114.06	34.90	73.46	114.06	35.59	36.81	114.06	67.73	56.21	114.06	50.72
84	76.39	119.24	35.94	76.67	119.24	35.70	38.26	119.24	67.92	58.18	119.24	51.21
91	78.23	124.08	36.95	79.38	124.08	36.02	39.53	124.08	68.14	59.93	124.08	51.70
$\%E_{MAX}$			36.95			36.72			69.63			51.70
$\%E_{AVE}$			32.58			35.33			68.06			49.11

หมายเหตุ $\%E_i$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

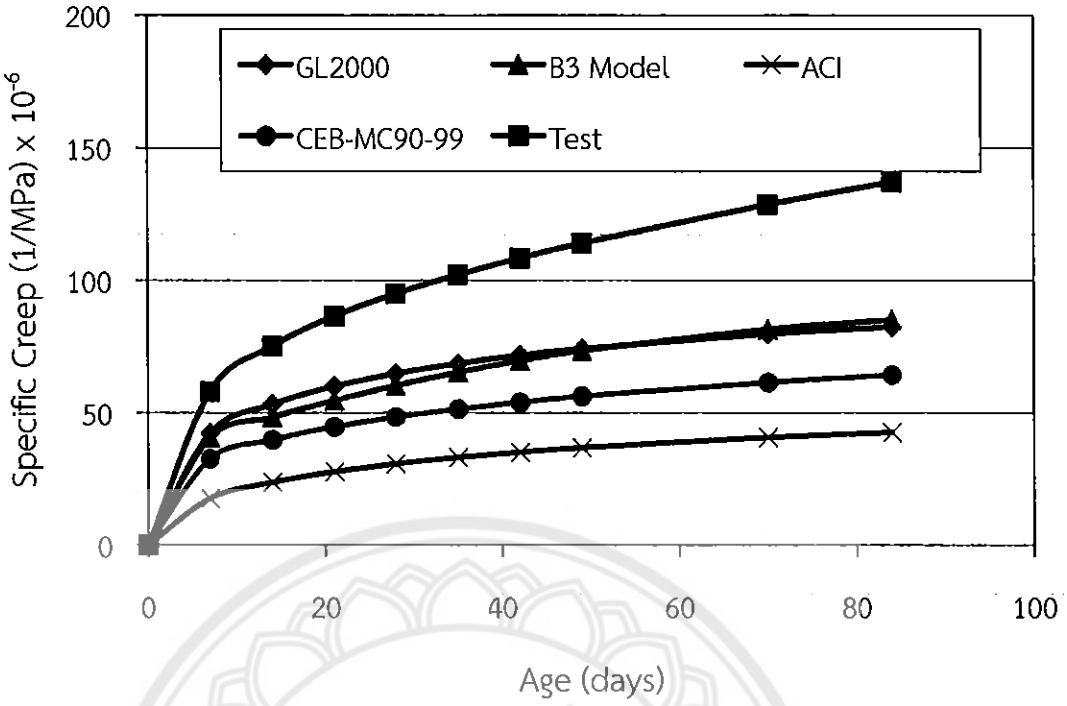
J =การคืบตัวจากการทดลอง

J_i = ค่าการคืบตัวจากทฤษฎี

$\%E_{AVE}$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย

$\%E_i$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

$\%E_{MAX}$ = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด



ภาพที่ 4.6 การคืบตัวตามทฤษฎีเปรียบเทียบค่าการคืบตัวของการทดลองครั้งที่ 4

เมื่อนำผลการคำนวณตามทฤษฎีของแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้สถิติวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการคืบตัวของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.5 วิธีของ ACI มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 68.06% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 69.63% วิธีของCEB MC90-99 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 49.11% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 51.70% วิธีของ B3 Model มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 35.33% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 36.72% วิธีของ GL2000 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 32.58% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 36.95%

4.2 การวิเคราะห์ผลการใช้งาน

ผลการทดลองใช้โปรแกรมตามข้อ 4.1.1 ซึ่งเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมโดยใช้ข้อมูลจากตำราในชั้นเรียน ได้ผลปรากฏว่าโปรแกรมสามารถใช้งานยืนยันผลทางทฤษฎีได้ในระดับหนึ่งตามภาพที่ 4.1- 4.2 และเมื่อนำมาใช้งานจริงจำนวน 4 ครั้ง ตามข้อ 4.1.2 4.1.5 ปรากฏผลตามภาพที่ 4.3 4.6 ปรากฏผลการคืบตัวของการทดลองใช้งานครั้งที่ 1 และครั้งที่ 3 มีค่าการคืบตัวสูงกว่าค่าได้จากทฤษฎี ส่วนครั้งที่ 2 และครั้งที่ 4 มีค่าใกล้เคียงค่าการคืบตัวได้จากทฤษฎีทั้งนี้อาจมีผลมาจากปริมาณน้ำและปริมาณปูนซีเมนต์มีปริมาณไม่เท่ากัน ซึ่งจะได้นำผลการทดลองใช้งานข้างต้นไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

บทที่ 5
สรุป

จากผลการเปรียบเทียบค่าการคืบตัวที่คำนวณได้แต่ละวิธี และผลเปรียบเทียบค่าการคืบตัวที่คำนวณได้กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

จากการคำนวณโดยตัวแปรที่กำหนดให้คงที่ ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิเท่ากับ 20องศาเซลเซียส ระยะเวลาของการบ่มเท่ากับ 7 วันเริ่มให้น้ำหนักที่อายุ 14 วัน อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวเท่ากับ 100 มิลลิเมตร ขนาดมวลรวมหยาบ 20 มิลลิเมตรและเปอร์เซ็นต์ของอากาศเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกรณีส่วนผสมของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5และมีกำลังอัดที่อายุ 28 วันอยู่ที่ 2,345กิโลกรัมต่อตารางเมตรจากการศึกษาพบว่าค่าคืบตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการทั้ง 4 มีค่าเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยโดยค่าการคืบตัวที่คำนวณที่วิธีของ GL2000 มีค่าการคืบตัวสูงที่สุดรองลงมา คือ วิธีของ Bazant, CEB MC90-99 และวิธีของ ACI ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลทดสอบพบว่าทุกส่วนผสมค่าการคืบตัวที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าการคืบตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีทั้ง 4เนื่องจากมีการเปรียบเทียบกับค่าการทดลองน้อยครั้งและยังไม่ครอบคลุมปัจจัยทั้งหมดจึงไม่สามารถสรุปได้ว่าวิธีใดเหมาะสมกับประเทศไทยมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นเพียงแนวทางสำหรับการเลือกใช้สมการเพื่อคำนวณการคืบตัวของคอนกรีตเท่านั้น หากเลือกสมการที่จะนำไปใช้กับการประเมินการคืบตัวในประเทศอาจต้องมีการปรับปรุงเพื่อให้ค่าการคืบตัวที่ได้จากการคำนวณนั้นให้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

ACI Committee 209, 1971, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures," Designing forthe Effects of Creep, Shrinkage and Temperature, SP-27, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 51-93.

ACI Committee 209, 1982, Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures," Designing for Creep and Shrinkage in Concrete Structures, A Tribute to Adrian Pauw, SP-76, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 193-300.

ACI Committee 209, 1992, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures (ACI 209R-92)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 47 pp.

Bazant, Z. P., 1975, "Theory of Creep and Shrinkage in Concrete Structures: a Precis of Recent Developments," Mechanics Today, V. 2, Pergamon Press, 1975, pp. 1-93.

Bazant, Z. P., 1987, "Statistical Extrapolation of Shrinkage Data-Part I: Regression," ACI Materials Journal, V. 84, No. I, Jan.-Feb., pp. 20-34.

Bazant, Z. P., 1999, "Criteria for Rational Prediction of Creep and Shrinkage of Concrete," Revue Francaise de Genie Civil, V. 3, No. 3-4, pp. 61-89.

Bazant, Z. P., 2000, "Criteria for Rational Prediction of Creep and Shrinkage of Concrete," The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage-Structural Design Effects, SP-194, A. Al-Manaseer, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 237-260.

CEB, 1984, "CEB Design Manual on Structural Effects of Time-Dependent Behaviour of Concrete," M. A. Chiorino, P. Napoli, F. Mola, and M. Koprna, eds., CEB Bulletin d'Information No. 142/142 bis, Georgi Publishing Co., Saint-Saphorin, Switzerland, 391 pp. (See also: Final Draft, CEB Bulletin No. 136, 1980).

CEB, 1991, "Evaluation of the Time Dependent Properties of Concrete," Bulletin d'lnformation No. 199, Comite European du BetonlFederationInternationale de la Precontrainte, Lausanne,Switzerland, 201 pp.

CEB, 1993. "CEB-FIP Model Code 1990," CEB Bulletin d'lnformation No. 2131214, Comite Euro-International du Beton, Lausanne, Switzerland, pp. 33-41.

CEB, 1999, "Structural Concrete-Textbook on Behaviour, Design and Performance. Updated Knowledge of the CEBI FIP Model Code 1990," fib Bulletin 2, V. 2, Federation Internationale du Beton, Lausanne, Switzerland, pp. 37-52.

Gardner, N. J., 2000, "Design Provisions for Shrinkage and Creep of Concrete," The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage-Structural Design Effects, SP-194, A. Al-Manaseer, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 101-134.

Gardner, N. J., 2004, "Comparison of Prediction Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal Strength Concretes," Canadian Journalfor Civil Engineering, V. 31, No.5, Sept.-Oct., pp. 767-775.

Gardner, N. J., and Lockman, M. J., 2001, "Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal Strength Concrete," ACI Materials Journal, V. 98, No.2, Mar.-Apr., pp. 159-167.

Gardner, N. J., and Tsuruta, H., 2004, "Is Superposition of Creep Strains Valid for Concretes Subjected to Drying Creep?" ACI Materials Journal, V. WI, No.5, Sept.-Oct., pp.409-415.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ตารางแสดงผลการคำนวณและประมาณค่าการคืบตัวของคอนกรีต โดยได้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1 ซึ่งมีอายุคอนกรีตอยู่ที่ 7 วัน และค่าอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์อยู่ที่ 0.35

วัน	ค่าการคืบตัวของคอนกรีต				
	GL2000	B3 Model	ACI	CEB MC90-99	ค่าจากการทดลอง
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	42.99	61.26	10.64	22.40	85.70
28	59.13	76.11	16.77	30.67	122.17
35	63.37	81.45	18.59	33.19	130.55
42	66.59	86.02	20.03	35.23	136.89
49	69.16	89.94	21.22	36.96	142.13
56	71.27	93.29	22.24	38.44	146.69
63	73.05	96.12	23.11	39.75	150.79
70	74.57	98.51	23.88	40.91	154.55
91	78.11	103.64	25.73	43.76	164.36

ค่าการคืบตัวของคอนกรีตจากทฤษฎีจะมีค่าบวกเพิ่มเติมในช่วงก่อนที่จะให้น้ำหนักกับตัวอย่างเป็นค่าการคืบตัวที่เกิดขึ้นจากหน่วยแรงที่มากระทำค้างในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นออกจากคอนกรีต เรียกการคืบตัวนี้ว่า Basic Creep

ซึ่งข้อมูลจากการทดลองนี้ค่า Basic Creep ของแต่ล่ะวิธีมีค่าต่างกันและจะคงที่ วิธี ACI มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 30.49 x 10^{-6}(1/MPa) วิธีCEB MC90-99มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 29.50x 10^{-6} (1/MPa) วิธี B3 Model มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 16.79x 10^{-6}(1/MPa) วิธีGL2000 มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 32.30x 10^{-6}(1/MPa)

ตารางแสดงผลการคำนวณและประมาณค่าการคืบตัวของคอนกรีต โดยได้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2 ซึ่งมีอายุคอนกรีตอยู่ที่ 7 วัน และค่าอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์อยู่ที่ 0.55

วัน	ค่าการคืบตัวของคอนกรีต				
	GL2000	B3 Model	ACI	CEB MC90-99	ค่าจากการทดลอง
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	58.30	67.52	26.38	49.69	61.35
28	80.18	84.94	41.57	68.25	99.04
35	85.93	91.41	46.07	73.96	111.34
42	90.30	97.08	49.65	78.63	121.60
49	93.78	102.08	52.60	82.58	130.43
56	96.64	106.47	55.11	86.01	138.22
63	99.05	110.30	57.28	89.03	145.20
70	101.12	113.62	59.19	91.74	151.52
91	105.91	121.00	63.78	98.46	167.61

ข้อมูลจากการทดลองนี้ค่า Basic Creep ของแต่ละวิธีมีค่าต่างกันและจะคงที่ วิธีACI มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 43.85x 10^{-6}(1/MPa) วิธีCEB MC90-99 มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 36.15x 10^{-6} (1/MPa) วิธีB3 Model 1995 มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 22.76x 10^{-6}(1/MPa) วิธีGL2000 มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 42.11x 10^{-6}(1/MPa)

ตารางแสดงผลการคำนวณและประมาณค่าการคืบตัวของคอนกรีต โดยได้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3 ซึ่งมีอายุคอนกรีตอยู่ที่ 28 วัน และค่าอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์อยู่ที่ 0.35

วัน	ค่าการคืบตัวของคอนกรีต				
	GL2000	B3 Model	ACI	CEB MC90-99	ค่าจากการทดลอง
28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	32.53	35.17	7.42	16.50	44.28
42	40.96	41.67	10.00	20.15	63.50
49	46.21	47.06	11.70	22.59	76.31
56	49.99	51.75	12.96	24.44	85.90
63	52.90	55.81	13.97	25.94	93.53
70	55.25	59.27	14.80	27.21	99.84
77	57.19	62.17	15.51	28.30	105.21
84	58.84	64.58	16.12	29.26	109.85
91	60.25	66.56	16.66	30.11	113.94

ข้อมูลจากการทดลองนี้ค่า Basic Creep ของแต่ละวิธีมีค่าต่างกันและจะคงที่ วิธีACI มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 25.05x 10^{-6}(1/MPa) วิธี CEB MC90-99 มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 25.74x 10^{-6} (1/MPa) วิธีB3 Model มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 16.50x 10^{-6}(1/MPa) วิธีGL2000 มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 27.38x 10^{-6}(1/MPa)

ตารางแสดงผลการคำนวณและประมาณค่าการคืบตัวของคอนกรีต โดยได้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 4 ซึ่งมีอายุคอนกรีตอยู่ที่ 28 วัน และค่าอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์อยู่ที่ 0.55

วัน	ค่าการคืบตัวของคอนกรีต				
	GL2000	B3 Model	ACI	CEB MC90-99	ค่าจากการทดลอง
28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	42.24	40.68	17.62	32.53	58.02
42	53.18	48.32	23.73	39.79	75.23
49	60.00	54.70	27.76	44.65	86.44
56	64.90	60.33	30.77	48.38	95.03
63	68.69	65.32	33.16	51.42	102.18
70	71.73	69.69	35.13	53.98	108.43
77	74.25	73.46	36.81	56.21	114.06
84	76.39	76.67	38.26	58.18	119.24
91	78.23	79.38	39.53	59.93	124.08

ข้อมูลจากการทดลองนี้ค่า Basic Creep ของแต่ละวิธีมีค่าต่างกันและจะคงที่ วิธีACI มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 34.49x 10^{-6}(1/MPa) วิธีCEB MC90-99 มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 30.63x 10^{-6} (1/MPa) วิธีB3 Model มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 21.42x 10^{-6}(1/MPa) วิธีGL2000 มีค่าการคืบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 34.56x 10^{-6}(1/MPa)

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน

ชื่อ นายธีรเดช นาคเกิด
ภูมิลำเนา 95/10 หมู่ 11 ต. วังทอง อ. วังทอง
จ. พิษณุโลก

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวังทองพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: theenak2@hotmail.com

ชื่อ นายพิสิฐชัย ออเขาย้อย
ภูมิลำเนา 170/94 หมู่ 4 ต. นครสวรรค์ตก อ. เมือง
จ. นครสวรรค์

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนครสวรรค์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: ooPeaToo@hotmail.com