



การประเมินสมการสำหรับคำนวณค่าการหดตัวของคอนกรีต
Evaluation of Concrete Shrinkage Prediction Model by Various
Methods.

นายนพรัตน์ เพื่อกอ้อน รหัส 53360354
นายพงศกร คำชุมภู รหัส 53360477

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาชีววิศวกรรมโยธา ภาควิชาชีววิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2556

๑๖๗๕๘๐๓๘	- ๒	๙.๘ ๒๕๕๘
๑๖๗๕๘๐๓๘	๙.๘ ๒๕๕๘	๑๖๗๕๘๐๓๘
๑๖๗๕๘๐๓๘	๙.๘ ๒๕๕๘	๑๖๗๕๘๐๓๘
๑๖๗๕๘๐๓๘	๙.๘ ๒๕๕๘	๑๖๗๕๘๐๓๘

2556



ใบรับรองปริญญาบัตร

ชื่อหัวข้อโครงการ	การประเมินสมการสำหรับทำนายค่าการหดตัวของคอนกรีต	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายนพรัตน์ เพือกอ่อน	รหัส 53360354
	นายพงศกร คำชุมกุ	รหัส 53360477
ที่ปรึกษาโครงการ	ผศ.ดร.สรัณกร เนมวิบูลย์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	
ปีการศึกษา	2556	

คณะกรรมการศาสตราจารย์ มหาวิทยาลัยเรศวร อนุมัติให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผศ.ดร.สรัณกร เนมวิบูลย์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.สสิกรณ์ เหลืองวิชเจริญ)

.....กรรมการ
(นายบุญพล มีโชค)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การประเมินสมการสำหรับคำนวณค่าการหดตัวของคอนกรีต	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายนพัฒน์ เพือกอ่อน	รหัส 53360354
	นายพงศกร คำชุมภู	รหัส 53360477
ที่ปรึกษาโครงการ	ผศ.ดร. สรัณกร เหมะวิบูลย์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	
ปีการศึกษา	2556	

บทคัดย่อ

ปริญญาในพันธน์มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการต่างๆ ที่ได้รับการยอมรับและใช้งานทั่วไปในต่างประเทศ โดยค่าที่คำนวณได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าการหดตัวของคอนกรีตที่ได้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับการคำนวณค่าการหดตัวของคอนกรีตใช้ 5 วิธี ประกอบด้วยวิธีของ ACI (American Concrete Institute), Bazant (Bazant's Medthods), CEB MC90 (Comite' Europ'een du B'eton, 1990), CEB MC90-99 (Comite' Europ'een du B'eton, 1999) และ GL2000 (Gardner and Lockman) โดยปัจจัยที่พิจารณา คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (0.35, 0.55 และ 0.65) จากการศึกษาพบว่าค่าการหดตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการทั้ง 5 สำหรับกรณี ส่วนผสมของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.65 ค่าการหดตัวที่ได้จากการคำนวณเรียงลำดับจากมากไปหน้ายโดยที่การคำนวณด้วยวิธีของ GL2000 มีค่าการหดตัวที่สูงที่สุดรองลงมา คือ วิธีของ Bazant, CEB MC90-99, ACI และวิธีของ CEB MC90 ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 พบว่า ค่าการหดตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ CEB MC90-99 มีค่าการหดตัวสูงที่สุดรองลงมา คือ ACI, CEB MC90, GL2000 และวิธีของ Bazant ตามลำดับโดยเรียงจากมากไปหน้าย และเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลทดสอบพบว่าทุกส่วนผสม ค่าการหดตัวที่ได้การทดสอบมีค่าสูงกว่าการคีบตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีทั้ง 5

คำสำคัญ : การหดตัว, แบบจำลองการหดตัว

Project title	Evaluation of Concrete Shrinkage Prediction Model by Various Methods.	
Name	Mr.Nopparat Phuak-on	ID. 53360354
	Mr.Pongsakorn Kamchumpu	ID. 53360477
Project advisor	Dr.Saranagon Hemavibool	
Major	Civil Engineering	
Department	Civil Engineering	
Academic year	2013	

Abstract

This project aims to study and compare the total shrinkage strains for concrete calculated using different existing prediction models of the world. Predicted values of shrinkage were compared with the experimental results. For the prediction of concrete's shrinkage, there are five methods of calculations including ACI (American Concrete Institute), Bazant (Bazant's Methods), CEB MC90 (Comité' Europ'een du Béton, 1990), CEB MC90-99 (Comité' Europ'een du Béton, 1999) and GL2000 (Gardner and Lockman). The water-binder ratios (0.35, 0.55 and 0.65) are the parameters to be considered. The study has found that for the concrete mixture which the water-binder ratios is equal to 0.55 and 0.65, the total shrinkage which has been calculated by the GL2000 was the highest followed by the method of Bazant, CEB MC90-99, ACI and CEB MC90 respectively. However, in the case of concrete mixture which the water-binder ratios is equal to 0.35 – Prediction of shrinkage by the method of CEB MC90-99 was the highest followed by ACI, CEB MC90, GL2000 and Bazant respectively. When comparing the calculation results with the experimental results, it was found that all of the shrinkage predictions underestimate the experimental results.

Keyword : Shrinkage, shrinkage prediction model

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญา尼พนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้ความอนุเคราะห์จากบุคลากรท่านซึ่งไม่สามารถนำมากล่าวได้ทั้งหมด ซึ่งผู้มีพระคุณท่านแรกที่ผู้ศึกษาได้ขอกราบขอบพระคุณคือ ผศ. ดร.สรัณกร เหมะวิบูลย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ในทุกขั้นตอนการทำงาน จนปริญญา尼พนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ที่ท่านที่สอง คือ นายชานาณ น้อยพิทักษ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหา รวมถึงให้คำชี้แนะขั้นตอนการทำงานจนโครงการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณอาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้สอน และให้คำแนะนำในการจัดทำปริญญา尼พนธ์นี้ที่ไม่ได้กล่าวนาม

ขอขอบพระคุณ พ่อ และแม่ ที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดมา



คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม
นายพรัทท์ เพื่อก่ออ่อน
นายพงศกร คำขุนทด

เมษายน 2557

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาบัณฑิต.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
 บทที่ 1 บทนำ.....	 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	3
2.1 วิธีของ ACI (American Concrete Institute).....	3
2.2 วิธีของ BAZANT (Bazant's Medthods).....	9
2.3 วิธีของ CEB MC 90 (Comite' Europ'een du B'eton, 1990).....	13
2.4 วิธีของ CEB MC90-99 (Comite' Europ'een du B'eton, 1999).....	16
2.5 วิธีของ GL2000 (Gardner and Lockman)	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	22
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	22
3.2 โครงสร้างโปรแกรม.....	22
3.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	25

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	29
4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณการทดสอบตัวของไมเดลต่างๆ.....	29
4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบตัว และกราฟรวม ของสมาคมต่างๆ กับผลการทดลองจริงในประเทศไทย (ในกรณีที่ w/c มีค่าเป็น 0.35).....	31
4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบตัว และกราฟรวม ของสมาคมต่างๆ กับผลการทดลองจริงในประเทศไทย (ในกรณีที่ w/c มีค่าเป็น 0.55).....	33
4.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบตัว และกราฟรวม ของสมาคมต่างๆ กับผลการทดลองจริงในประเทศไทย (ในกรณีที่ w/c มีค่าเป็น 0.65).....	35
4.5 การวิเคราะห์ผลการคำนวณของโปรแกรมจากภาพ.....	36
4.6 ค่าการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของทฤษฎีกับผลการทดลอง.....	39
4.7 ผลการการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของทฤษฎีกับผลการทดลอง.....	43
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	44
5.1 บทสรุป.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	44
เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก ก.....	46
ภาคผนวก ข.....	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การปั่นชีน, $\gamma_{sh,tc}$	6
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การออบแห้ง, $\gamma_{sk,d}$	7
2.3 แฟกเตอร์ของความชื้น, k_h	10
2.4 ค่าคงที่ของประเภทชีเมนต์, α_1	11
2.5 ค่าสภาพการปั่น, α_2	11
2.6 ค่าสัมประสิทธิ์รูปร่างหน้าตัด, k_s	12
2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนชีเมนต์, β_{sc}	15
2.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนชีเมนต์, α_{as} , α_{ds1} และ α_{ds2}	17
2.9 ค่าคงที่การทดสอบตัวที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนชีเมนต์, ค่า s และค่า k	20
4.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบของห้อง 5 มोเดลกับการทดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.35).....	31
4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบของห้อง 5 มोเดลกับการทดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.55).....	33
4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบของห้อง 5 มोเดลกับการทดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.65).....	35
4.4 ความคลาดเคลื่อนของแต่ละสมาคมกับผลทดสอบจริง (w/c = 0.35).....	40
4.5 ความคลาดเคลื่อนของแต่ละสมาคมกับผลทดสอบจริง (w/c = 0.55).....	41
4.6 ความคลาดเคลื่อนของแต่ละสมาคมกับผลทดสอบจริง (w/c = 0.65).....	42

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 แผนผังการทำงาน.....	24
3.2 การเปิด Microsoft Excel.....	25
3.3 ตารางสำหรับกรอกข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณการทดสอบตัว.....	26
3.4 การป้อนข้อมูลที่สมบูรณ์.....	26
3.5 การแสดงผลในรูปแบบของตารางรวมเพื่อเปรียบเทียบค่าของแต่ละสมาคม.....	27
3.6 การแสดงผลการคำนวณในรูปแบบของกราฟ.....	28
3.7 การเปรียบเทียบค่าการทดสอบตัวของแต่ละสมาคมกับผลการทดสอบจริง.....	28
4.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวของห้อง 5 โนเดลกับผลการทดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.35).....	32
4.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวของห้อง 5 โนเดลกับผลการทดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.55).....	34
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวของห้อง 5 โนเดลกับผลการทดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.65).....	36



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

การแตกร้าวของคอนกรีตเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ ได้แก่ แตกร้าวนៅองรับน้ำหนักบรรทุกเกินกว่าที่กำหนดไว้ การแตกร้าวนៅองจากการออกแบบไม่เหมาะสมและการควบคุมงานไม่ครอบคลุมในระหว่างการก่อสร้าง นอกจากนี้ยังมีการแตกร้าวที่พบมากในปัจจุบัน คือ การแตกร้าวนៅองจากการหดตัวของคอนกรีตยังเป็นปัญหาที่ยังคงพบอย่างต่อเนื่อง การแตกร้าวหดตัวเกิดขึ้นจากพฤติกรรมของคอนกรีตเองและมีลักษณะการเกิดที่ซับซ้อน การหดตัวของคอนกรีตเป็นปัจจัยหลักและเป็นสาเหตุที่ทำในคอนกรีตเกิดการแตกร้าวนៅองจากการหดตัว ซึ่งเมื่อเกิดการแตกร้าวจะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมและส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตมีอายุการใช้งานสั้นกว่าที่ออกแบบไว้ ส่งผลทำให้ต้องสื้นเปลืองงบประมาณในการบำรุงรักษาเพิ่มมากขึ้น ปัจจุบันมาตรฐานที่ใช้ประเมินค่าการหดตัวที่ใช้ในประเทศไทยได้อ้างอิงตามมาตรฐานของต่างประเทศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่ไม่ทันสมัย สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน และในปัจจุบันองค์ประกอบปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นไม่คงที่จึงอาจเป็นเหตุทำให้การตอบสนองของโครงสร้างที่ใช้สมการต่างจากประเทศไทยได้ค่าการตอบสนองของโครงสร้างไม่ตรงกับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้น ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่านจากต่างประเทศได้คิดค้นสมการประเมินค่าการหดตัวของคอนกรีตให้มีความทันสมัยมากขึ้นและเป็นที่นิยมใช้มากในต่างประเทศ งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อเลือกสมการที่เหมาะสมกับประเทศไทยและนำมาปรับปรุงต่อไป จึงได้คำนวณค่าการหดตัวของคอนกรีตด้วยวิธีต่างๆ และค่าที่จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการในประเทศไทยเพื่อเป็นแนวทางการเลือกใช้สมการการประเมินค่าการหดตัวที่เหมาะสม สำหรับการประเมินค่าการหดตัวของคอนกรีตงานวิจัยนี้เลือกศึกษาวิธีการของ ACI (American Concrete Institute), Bazant (Bazant's Method), CEB MC 90 (Comite' Europ'een du B'eton 1990), CEB MC90-99 (Comite' Europ'een du B'eton 1999), และวิธีการของ GL2000 (Gardner and Lockman)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการค่าการหดตัวของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณทั้ง 5 วิธี
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าการหดตัวที่คำนวณจากทั้ง 5 วิธีกับค่าการหดตัวที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.3 ขอบเขตการทำโครงการ

ศึกษาวิธีการและขั้นตอนการคำนวณการหดตัวด้วยวิธีของ ACI, Bazant, CEB MC 90, CEB MC90-99 และวิธีการของ GL2000 โดยพิจารณาส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35, 0.55 และ 0.65 บ่ม 7 วัน ขนาดโตสุดของหิน 20 มิลลิเมตร และอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 28 องศา เชลเซียส สำหรับการศึกษานี้จะเปรียบเทียบผลการคำนวณการหดตัวของแต่ละวิธี และเปรียบเทียบผลการหดตัวที่ได้จากการคำนวณทั้ง 5 วิธีกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ทราบขั้นตอนการคำนวณการหดตัวของแต่ละวิธีโดยละเอียด
- 1.3.2 ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวและการคำนวณการหดตัวของคอนกรีต
- 1.3.3 ทราบค่าการหดตัวที่คำนวณได้ในแต่ละวิธี และสามารถเปรียบเทียบการการหดตัวที่คำนวณจากแต่ละวิธีได้
- 1.3.4 สามารถเลือกวิธีในการคำนวณการหดตัวที่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในประเทศไทยได้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

ประเทศไทยต่างๆ ที่เป็นผู้นำทางวิชาการ ตลอดจนนักวิชาการชั้นนำของโลกมีการพัฒนาวิธีการจากค่าการทดสอบของคอนกรีตในท้องถิ่นขึ้นมาใช้ในการประมาณค่าการทดสอบของคอนกรีต เพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตในท้องถิ่นนั้น ซึ่งองค์กรต่างๆ ที่นำมาศึกษาในวิทยานิพนธ์มีดังนี้ วิธีของ ACI, วิธีของ CEB, วิธีของ GL2000 และ วิธีของ Bazant เป็นต้น

การประมาณค่าการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้นำสมมติฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวกับการทดสอบแต่ละสมาคมมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อการเปรียบเทียบ และนำวิธีการประมาณค่าในช่วงเวลาต่างๆ มาใช้ในการประมาณค่าการทดสอบ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม

2.1 วิธีของ ACI

วิธีนี้เป็นการทดลองที่ถูกพัฒนาโดย BRANSON และ CHRISTIASON ปี 1971 โดยการปรับเปลี่ยนมาเป็นวิธีของ ACI 209R-82 (คณะกรรมการ ACI 209 1982)

เป็นวิธีการสำหรับการประเมินความเครียดของการทดสอบของคอนกรีต เป็นฟังก์ชันที่มีหลักการเดียวกับเวลาสูตรแบบของสมการเหล่านี้เป็นความคิดที่จะอำนวยความสะดวกเพื่อการออกแบบซึ่งเป็นแนวคิดในการใช้ค่าสูงสุดของเวลาที่มีการแก้ไขโดยอัตราส่วนเวลา (ข้อนอยู่กับเวลาที่เปลี่ยนไป) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ

รูปร่างของเส้นโค้งและค่าสูงสุดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น สภาพการบ่ม อายุการรับน้ำหนักบรรทุก ส่วนผสม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

วิธีการออกแบบที่นำเสนอในการคำนวณการทดสอบอ้างอิงถึงมาตรฐานและปัจจัยอื่นๆ ที่นอกเหนือจากมาตรฐาน ปัจจัยที่ได้รับการแก้ไขแล้วจะถูกนำไปใช้กับค่าสูงสุด เพราะว่าสมการทดสอบในระยะเวลาใดๆ นั้นเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของค่าสูงสุด แต่ปัจจัยที่แก้ไขในขั้นตอนนี้อาจจะนำไปใช้กับการทดสอบในระยะสั้นได้เช่นกัน

สมการนี้แนะนำสำหรับการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดของการทดสอบซึ่งไม่ถูกจำกัดในเวลาใดๆ รวมทั้งค่าสูงสุดนำไปใช้กับน้ำหนักปกติ ทรัพย์ที่มีน้ำหนักเบาและคอนกรีตมวลเบา (โดยใช้ทั้งการบ่มชั้นและบ่มไอน้ำ, ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 และปูนซีเมนต์ชนิดที่ 3)

พารามิเตอร์ที่ต้องการ

- อายุของคอนกรีตแห้ง มักจะใช้เป็นอายุสุดท้ายของการบ่มชี้น (วัน)
- อายุของคอนกรีตที่บรรทุก (วัน)
- วิธีการบ่ม
- ความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อม
- อัตราปริมาณพื้นผิวหรือความหนาเฉลี่ย (มม. หรือ นิ้ว)
- ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (มม. หรือ นิ้ว)
- ร้อยละของมวลรวม (%)
- ปริมาณปูนซีเมนต์ (kg/m^3 หรือ lb/yd^3)
- ร้อยละปริมาณอากาศของคอนกรีต (%)
- ประเภทปูนซีเมนต์

ความเครียดหดตัว $E_{sh}(t, t_c)$ ที่อายุของคอนกรีต (วัน) โดยวัดจากจุดเริ่มต้นของ การอบแห้งที่ t_c (วัน), คำนวณจากสมการ

$$E_{sh}(t, t_c) = [(t-t_c)^\alpha / (f + (t-t_c)^\alpha)] E_{shu} \quad (\text{A-1})$$

ซึ่ง f (ในหน่วยวัน) และ α จะถือว่าเป็นค่าคงที่สำหรับรูปทรงของชิ้นส่วนและขนาดที่ใช้ กำหนดเป็นส่วนหนึ่งของอัตราส่วนเวลา

E_{shu} คือ ความเครียดที่สูงสุดของการหดตัว
 $(t - t_c)$ คือ เวลาจากจุดสิ้นสุดของการบ่ม

สำหรับเงื่อนไขในมาตรฐานในกรณีที่ไม่มีข้อมูลของการหดตัวที่เฉพาะเจาะจง เช่น ลักษณะมวลรวมและสภาพแวดล้อมและ 40% ของความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบ ค่าเฉลี่ยที่แนะนำ สำหรับ ความเครียดของการหดตัวสูงสุด E_{shu} เท่ากับ 780 ใหมครอน (A-2)

สำหรับอัตราส่วนของเวลาในสมการ (A-1) ACI 209R-92 แนะนำให้ใช้ค่าเฉลี่ยสำหรับ f เท่ากับ 35 และ 55 เป็นเวลา 7 วันของการบ่มชี้นและ 1 ถึง 3 วันของการบ่มในน้ำตามลำดับ ในขณะที่ใช้ค่าเฉลี่ย 1.0 ซึ่งเป็นข้อแนะนำสำหรับรูปแบบที่เกินจริงนั้นควรจะตั้งข้อสังเกตว่า

อัตราส่วนของเวลาที่ จะไม่แตกต่างระหว่างการอบแห้ง, การแห้งด้วยตัวเองและการหดตัวด้วยการคาร์บอนเข็นนอกจากนี้ก็มีความเป็นอิสระของรูปร่างและขนาดของชิ้นตัวอย่าง เพราะ f เป็นค่าคงที่ผลรูปทรงและขนาดที่ได้รับการพิจารณาทั้งหมดโดยการเปลี่ยนอัตราส่วน เวลาจะเท่ากับ 1.0 และ f จะหาค่าได้จากสมการ (A-3) โดยที่ V/S อัตราส่วนปริมาณพื้นผิวนิว มน. หรือ นิว

$$f = 26.0e^{[1.42 \times 10^{-2} (V/S)]} \quad \text{ในหน่วย SI}$$

$$f = 26.0e^{[0.36(V/S)]} \quad \text{ในหน่วย in-lb.} \quad (\text{A-3})$$

สำหรับเงื่อนไขอื่นนอกเหนือจากเงื่อนไขมาตรฐานค่าเฉลี่ยของการหดตัวสูงสุด ε_{shu} (สมการ (A-2)) จะต้องมีการแก้ไขโดยปัจจัยการแก้ไขดังแสดงในสมการ (A-4) และ (A-5) ACI 209R-92 (คณะกรรมการ ACI 209 1992) แสดงให้เห็นว่าการคูณ γ_{shu} ด้วยปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับสภาพที่เฉพาะเจาะจง

$$\varepsilon_{shu} = 780\gamma_{sh} \times 10^{-6} \quad \text{นม./มม. (นิว/นิว)} \quad (\text{A-4})$$

โดยที่

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,tc} \gamma_{sh,RH} \gamma_{sh,vs} \gamma_{sh,s} \gamma_{sh,\psi} \gamma_{sh,c} \gamma_{sh,\alpha} \quad (\text{A-5})$$

ค่าสัมประสิทธิ์การบ่มชิ้น $\gamma_{sh,tc}$ สำหรับคอนกรีตบ่มชิ้นจะได้จากในตารางที่ 2.2 หรือ สมการ (A-6) บ่มไอน้ำที่มีระยะเวลา 1 ถึง 3 วันจะได้ $\gamma_{sh,tc} = 1$

$\gamma_{sh,tc}$ เป็นปัจจัยการแก้ไข ที่แสดงในตาราง 2.1 ตัวแปรระยะเวลาการบ่มชิ้นจะได้รับจาก การวิเคราะห์การทดสอบโดยใช้เส้นในสมการ (A-6)

$$\gamma_{sh,tc} = 1.202 - 0.2337\log(t_c) \quad R^2=0.9987 \quad (\text{A-6})$$

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การบ่มชื้น, $\gamma_{sh,tc}$

Moist curing duration (t_c) days	$\gamma_{sh,tc}$
1	1.2
3	1.1
7	1
14	0.93
28	0.86
90	0.75

ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ โดยรอบ $\gamma_{sh, RH}$ คือ

$$\gamma_{sh, RH} = 1.40 - 1.02h \quad \text{สำหรับ } 0.40 \leq h \leq 0.80$$

$$\gamma_{sh, RH} = 3.00 - 3.00h \quad \text{สำหรับ } 0.80 \leq h \leq 1 \quad (\text{A-7})$$

ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบที่น้อยกว่า 40% จะใช้ความชื้นสัมพัทธ์เป็นค่าสูงสุดเท่ากับ 1.0 สำหรับการทดสอบ $\gamma_{sh, RH}$ เพราะ $\gamma_{sh, RH} = 0$ เมื่อ $h = 100\%$ วิธี ACI จะไม่ได้คำนึงถึงความชื้นสัมพัทธ์

ค่าสัมประสิทธิ์ $\gamma_{sh,vs}$ ใช้สำหรับขนาดของชิ้นส่วนที่มีอัตราส่วนปริมาณพื้นผิวตามมาตรฐาน

สำหรับชิ้นส่วนที่มีสัดส่วนปริมาณพื้นผิวอื่น ๆ นอกเหนือจาก 38 มิลลิเมตร (1.5 นิ้ว) หรือความหนาเฉลี่ยอื่น ๆ นอกเหนือ 150 มิลลิเมตร (6 นิ้ว)

ความหนาเฉลี่ย (d) ของชิ้นส่วนถูกกำหนดให้เป็นสี่เท่าของอัตราส่วนปริมาณพื้นผิวที่ $d = 4(V/S)$ ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับสองเท่าของความหนาที่เกิดขึ้นจริงในกรณีของแผ่นพื้น

$$\gamma_{sh,vs} = 1.2e^{\{-0.00472(V/S)\}} \quad \text{ในหน่วย SI}$$

$$\gamma_{sh,vs} = 1.2e^{\{-0.12(V/S)\}} \quad \text{ในหน่วย in-lb} \quad (\text{A-8})$$

ชีง V คือ ปริมาตรของชิ้นงานใน ลบ.มม. หรือ ลบ.นิ้ว

S คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงานใน ตร.มม. หรือ ตร.นิ้ว

อีกทางเลือกหนึ่งนอกจากนี้ยังมีวิธีการในการช่วยโดยการใช้วิธีถ่วงเฉลี่ยวความหนาสำหรับผลของขนาดชิ้นส่วนบน Σ_{sh} วิธีถ่วงเฉลี่ยวความหนามีแนวโน้มที่จะคำนวณค่าปัจจัยการแก้ไขที่สูงเมื่อเทียบกับวิธีการอัตราส่วนปริมาณพื้นผิวสำหรับความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วนน้อยกว่า 150 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) หรืออัตราส่วนปริมาณพื้นผิวน้อยกว่า 37.5 มิลลิเมตร (1.5 นิ้ว) ใช้ปัจจัยที่กำหนดในตารางที่ 2.2 สำหรับความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วนมากกว่า 150 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) และได้ถึงประมาณ 300-380 มิลลิเมตร (12 ถึง 15 นิ้ว) ใช้สมการ (A-9) และ (A-10)

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การรอบเหล็ก, $\gamma_{sk,d}$

Average thickness of member d, mm (in.)	Volume/surface ratio V/S, mm (in.)	Shrinkage factor $\gamma_{sk,d}$
51 (2)	12.5 (0.50)	1.35
76 (3)	19 (0.75)	1.25
102 (4)	25 (1.00)	1.17
127 (5)	31 (1.25)	1.08
152 (6)	37.5 (1.50)	1

ในช่วงปีแรกที่รอบเหล็ก ($t - t_c$) ≤ 1 ปี

$$\gamma_{sh,d} = 1.23 - 0.0015d$$

$$\gamma_{sh,d} = 1.23 - 0.006(V/S) \quad \text{ในหน่วย SI}$$

$$\gamma_{sh,d} = 1.23 - 0.038d$$

$$\gamma_{sh,d} = 1.23 - 0.152(V/S) \quad \text{ในหน่วย in-lb} \quad (\text{A-9})$$

สำหรับค่าสูงสุด ($t - t_c$) > 1 ปี

$$\gamma_{sh,d} = 1.17 - 0.00114d$$

$$\gamma_{sh,d} = 1.17 - 0.00456(V/S) \quad \text{ในหน่วย SI}$$

$$\gamma_{sh,d} = 1.17 - 0.029d$$

$$\gamma_{sh,d} = 1.23 - 0.116(V/S) \quad \text{ในหน่วย in-lb} \quad (A-10)$$

ซึ่ง $d = 4(V/S)$ คือ ความหนาเฉลี่ย (มม. หรือ นิ้ว) เป็นส่วนหนึ่งของตัวแปรที่อยู่ภายใต้การพิจารณา

สำหรับแต่ละวิธีการ อย่างไรก็ตาม γ_{sh} ที่ไม่ควรน้อยกว่า 0.2

- สำหรับคุณวิธีที่อยู่สภาพเปียกและอบแห้งโดยรอบ

$$\gamma_{sh}\epsilon_{shu} \geq 100 \times 10^{-6} \text{ มม./มม. (นิ้ว/นิ้ว)}$$

- สำหรับคุณวิธีที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งสมำเสมอ

$$\gamma_{sh}\epsilon_{shu} \geq 150 \times 10^{-6} \text{ มม./มม. (นิ้ว/นิ้ว)}$$

ปัจจัยการแก้ไขส่วนประกอบของคุณวิธีมี

- ปัจจัยการบุบตัว $\gamma_{sh,s}$ ซึ่งคือ ค่าการบุบตัวของคุณวิธีสด (มม. หรือ นิ้ว)

$$\gamma_{sh,s} = 0.89 + 0.00161s \quad \text{ในหน่วย SI}$$

$$\gamma_{sh,s} = 0.89 + 0.041s \quad \text{ในหน่วย in-lb} \quad (A-11)$$

- ปัจจัยมวลรวม $\gamma_{sh,\psi}$ ซึ่ง ψ คือ อัตราส่วนของมวลรวมและเอียงตั้งหมุดโดยน้ำหนักแสดงเป็นเบอร์เช่นต์

$$\gamma_{sh,\psi} = 0.30 + 0.014\psi \quad \text{สำหรับ } \psi \leq 50\%$$

$$\gamma_{sh,\psi} = 0.90 + 0.002\psi \quad \text{สำหรับ } \psi > 50\% \quad (A-12)$$

ปัจจัยปริมาณซีเมนต์ $\gamma_{sh,c}$ โดยที่ c เป็นปริมาณซีเมนต์ใน kg/m^3 หรือ lb/yd^3

$$\gamma_{sh,c} = 0.75 + 0.00061c \quad \text{ในหน่วย SI}$$

$$\gamma_{sh,c} = 0.75 + 0.00036c \quad \text{ในหน่วย in-lb} \quad (A-13)$$

- ปัจจัยปริมาณอากาศ $\gamma_{sh,\alpha}$ ซึ่ง α เป็นปริมาณร้อยละของอากาศ

$$\gamma_{sh,\alpha} = 0.95 + 0.008\alpha \geq 1 \quad (A-14)$$

ปัจจัยการแก้ไขเหล่านี้เป็นองค์ประกอบของคอนกรีตที่ควรใช้เฉพาะที่เกี่ยวข้องกับค่าเฉลี่ยของค่าที่แนะนำสำหรับ $\epsilon_{shu} = 780 \times 10^{-6}$ มม./มม. (นิวตัน) ค่าเฉลี่ยนี้สำหรับ ϵ_{shu} การใช้เฉพาะในกรณีที่ไม่มีการทดสอบตัวของข้อมูลที่เฉพาะเจาะจงสำหรับมวลรวมและเงื่อนไขตามมาตรฐาน ASTM

2.2 วิธีของ Bazant

วิธีการประเมินการทดสอบตัวของ Bazant (B3) เป็นวิธีที่เรียบง่ายและมีความเหมาะสมในทางทฤษฎีที่ดีกว่าโมเดลก่อนหน้านี้ ผลกระทบขององค์ประกอบคอนกรีตและความแข็งแรงในการออกแบบไม่เด่นนักพารามิเตอร์ต่างๆ จะเป็นแหล่งที่มาของข้อผิดพลาดของโมเดล

การคาดการณ์ของพารามิเตอร์ในวิธีของ Bazant จากองค์ประกอบและความแข็งแรงจะถูกจำกัดโดยประเภทของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับพารามิเตอร์ต่อไปนี้ช่วง

- $0.35 \leq w/c \leq 0.85$
- $2.55 \leq a/c \leq 13.5$
- $17 \text{ MPa} \leq f_{cm28} \leq 70 \text{ MPa}$ ($2500 \text{ psi} \leq f_{cm28} \leq 10,000 \text{ psi}$)
- $160 \text{ kg/m}^3 \leq c \leq 720 \text{ kg/m}^3$ ($270 \text{ lb/yd}^3 \leq c \leq 1215 \text{ lb/yd}^3$)

ซึ่ง f_{cm28} คือ การบีบอัดในทรงกระบอก 28 วัน ตามมาตรฐานความแข็งแรงของคอนกรีต (MPa หรือ PSI)

w/c คือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

a/c คือ สัดส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

หากใช้ความแข็งแรงในการออกแบบเพียงอย่างเดียวจะได้

$$f_{cm28} = f_c' + 8.3 \text{ MPa} \quad (f_{cm28} = f_c' + 1,200 \text{ PSI})$$

พารามิเตอร์ที่ต้องการ

- อายุของคอนกรีตแห้งเมื่อเริ่มนักจะใช้เป็นอายุสุดท้ายของการบ่มชั้น (วัน)
- อายุของคอนกรีตที่รับน้ำหนักบรรทุก (วัน)
- มวลรวมในคอนกรีต (kg/m^3 หรือ lb/yd^3)
- ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีต (kg/m^3 หรือ lb/yd^3)

- ปริมาณน้ำในคอนกรีต (kg/m^3 หรือ lb/yd^3)
- ประเภทของปูนซีเมนต์
- แรงอัดคอนกรีตที่ 28 วัน (MPa หรือ PSI)
- โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ 28 วัน (MPa หรือ PSI)
- สภาพการบ่ม
- ความชื้นสัมพัทธ์
- รูปทรงของขั้นงานตัวอย่าง
- อัตราส่วนปริมาณพื้นผิวหรือความหนาของหน้าตัดที่มีประสิทธิภาพ (มม. หรือ นิ้ว)

ความเครียดของการหดตัวเฉลี่ย $E_{sh}(t, t_c)$ ในช่วงอายุของคอนกรีต (วัน) โดยวัดจากวันสุดท้ายของการอบแห้งที่ t_c (วัน)

คำนวณโดย

$$E_{sh}(t, t_c) = -E_{sh\infty} k_h S(t - t_c) \quad (\text{A-15})$$

ซึ่ง

$E_{sh\infty}$ คือ ความเครียดในการหดตัวสูงสุด

k_h คือ แฟกเตอร์ของความชื้นได้จากการ 2.3

$S(t-t_c)$ คือ เส้นโค้งของเวลา

$(t-t_c)$ คือ เวลาจากการหดตัวสูงสุดถึงการบ่มคอนกรีต

ตารางที่ 2.3 แฟกเตอร์ของความชื้น, k_h

Relative humidity	k_h
$h \leq 0.98$	$1 - h^3$
$h = 1.00$	- 0.2
$0.98 < h < 1.00$	$12.74 - 12.94h$

การหดตัวสูงสุด $E_{sh\infty}$ จะได้จากสมการ

$$E_{sh\infty} = E_{soil} E_{cm607} / E_{cm(t_c + \tau_{sh})} \quad (\text{A-16})$$

ซึ่ง E_{soil} เป็นค่าคงที่กำหนดโดยสมการ

$$\varepsilon_{s\infty} = -\alpha_1 \alpha_2 [0.019 w^{2.1} f_{cm28}^{-0.28} + 270] \times 10^{-6} \text{ ในหน่วย SI}$$

$$\varepsilon_{s\infty} = -\alpha_1 \alpha_2 [0.02565 w^{2.1} f_{cm28}^{-0.28} + 270] \times 10^{-6} \text{ ในหน่วย in-lb (A-17)}$$

โดยที่ w คือ ปริมาณน้ำในหน่วย kg/m^3 หรือ lb/yd^3
 f_{cm28} คือ แรงอัดในทรงกระบอก 28 วัน มาตรฐานความแข็งแรงของ
 คอนกรีต (MPa หรือ PSI)

ซึ่ง α_1 และ α_2 เป็นค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับประเภทชีเมนต์และสภาพการบ่ม ค่าของ α_1 และ α_2 จะได้จากตาราง 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า $S_{h\infty} = S_\infty$ สำหรับ $t_c = 7$ วัน และ $\tau_{sh} = 600$ วัน

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ของประเภทชีเมนต์, α_1

Type of cement	α_1
Type I	1
Type II	0.85
Type III	1.1

ตารางที่ 2.5 ค่าสภาพการบ่ม, α_2

Curing	α_2
Steam curing	0.75
Cured in water or at 100% relative humidity	1
Sealed during curing or normal curing in air with initial protection against drying	1.2

$E_{cm607}/E_{cm(t_c+t_{sh})}$ คือ แฟกเตอร์จะต้องคำนึงถึงช่วงเวลาของการหดตัวสูงสุด

โดย $E_{cm607}/E_{cm(t_c+t_{sh})} = 1.167421[(t_c + t_{sh})/(4 + 0.85(t_c + t_{sh}))]$ (A-18)

ฟังก์ชันเวลาสำหรับการหดตัว $S(t - t_c)$ จะได้โดยสมการ

$$S(t - t_c) = \tanh \sqrt{\frac{(t - t_c)}{\tau_{sh}}} \quad (\text{A-19})$$

ซึ่ง t และ t_c คือ อายุของคอนกรีตและอายุของการบ่มซึ่งของคอนกรีตในหน่วยวัน ตามลำดับและ τ_{sh} คือ การหดตัวครึ่งเวลาแรกในวันตามที่กำหนดไว้ในสมการ

$$\begin{aligned} \tau_{sh} &= 0.085 t_c^{-0.08} f_{cm28}^{-0.25} [2k_s(V/S)]^2 && \text{ในหน่วย SI} \\ \tau_{sh} &= 190.8 t_c^{-0.08} f_{cm28}^{-0.25} [2k_s(V/S)]^2 && \text{ในหน่วย in-lb} \end{aligned} \quad (\text{A-20})$$

ซึ่ง k_s คือ ฟังก์ชันของรูปร่างหน้าตัด ได้จาก (ตาราง 2.6) และ V/S เป็นอัตราส่วน ปริมาณพื้นผิวในหน่วย มม. หรือ นิวตัน

ตารางที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์รูปร่างหน้าตัด, k_s

Cross section shape	k_s
Infinite slab	1
Infinite cylinder	1.15
Infinite square prism	1.25
Sphere	1.3
Cube	1.55

หมายเหตุ: นักวิเคราะห์ความต้องการที่จะประเมินซึ่งรูปทรงเหล่านี้ที่ดีที่สุดใกล้เคียงกับรูปทรงที่แท้จริงของชิ้นส่วนหรือโครงสร้างจะทำให้มีความแม่นยำสูง, ในกรณีที่ไม่จำเป็นต้องใช้ และ $k_s = 1$ จะสามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์อย่างง่าย

ค่า E_{cm28} หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} E_{cm28} &= 4734 \sqrt{f_{cm28}} && \text{ในหน่วย SI} \\ E_{cm28} &= 57,000 \sqrt{f_{cm28}} && \text{ในหน่วย in.-lb} \end{aligned} \quad (\text{A-21})$$

2.3 วิธีของ CEB MC 90

วิธีของ CEB MC90 (Muller และ Hilsdorf 1990; CEB1993) มีไว้เพื่อคาดการณ์พฤติกรรมภาคตัดขวางกับเวลาเฉลี่ยของชิ้นส่วนคอนกรีต มีแนวคิดคล้ายกับวิธีของ ACI ในแต่ที่จะช่วยเปลี่ยนแปลงค่าที่เกินความจริงในส่วนของเวลาสำหรับการทดสอบตัวและยังใช้ค่าสูงสุดแก้ไขตามสัดส่วนการผสมคอนกรีตและสภาพแวดล้อมเว้นแต่ข้อกำหนดพิเศษที่ได้รับ

การคาดการณ์พฤติกรรมการทดสอบตัวที่ขึ้นอยู่กับเวลาของคอนกรีตที่มีความแข็งแรงทั่วไป ($12 \text{ MPa} [1740 \text{ PSI}] \leq f_c' \leq 80 \text{ MPa} [11,600 \text{ PSI}]$) รักษาความชื้นที่อุณหภูมิปกติไม่เกิน 14 วันและสัมผัสถ้วนความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยโดยรอบ ในช่วง 40 ถึง 100% ที่อุณหภูมิเฉลี่ย $5\text{-}30^\circ\text{C}$ ($41\text{-}86^\circ\text{F}$)

วิธีที่ถูกต้องสำหรับโครงสร้างพื้นฐานน้ำหนักปกติจะมีที่ปรึกษาด้านอัตราการทดสอบตัวของคอนกรีตเฉลี่ยอยู่ในช่วง $20 \text{ MPa} (2,900 \text{ PSI}) \leq f_{cm28} \leq 90 \text{ MPa} (13,000 \text{ PSI})$

อายุในการรับแรงควรจะต้องมีอายุอย่างน้อย 1 วันและมีความเครียดสมำเสมอไม่ควรเกิน 40% ของ ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของคอนกรีต f_{cmto} ในช่วงเวลาการรับแรงที่ t_0 ข้อกำหนดพิเศษจะปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นหรือลดลงและปรับระดับความเครียดสูงขึ้น

แบบจำลอง CEB ไม่ต้องใช้ข้อมูลเกี่ยวกับระยะเวลาของการบ่ม หรือสภาพของการบ่มใดๆ แต่คำนึงถึงความชื้นสัมพัทธ์และขนาดเฉลี่ยของชิ้นคอนกรีต

พารามิเตอร์ที่ต้องการ

- อายุของคอนกรีตแห้งเมื่อเริ่มน้ำจะเป็นอายุสุดของการบ่มชี้น (วัน)
- อายุของคอนกรีตที่รับน้ำหนักบรรทุก (วัน)
- กำลังรับแรงอัตราที่ 28 วัน (MPa หรือ PSI)
- ความชื้นสัมพัทธ์
- อัตราปริมาณพนผ้าหรือความหนาแน่นต่อประสิทธิภาพของคอนกรีต (มม. หรือ นิว.)
- ประเภทปูนซีเมนต์

ความเครียดในการทดสอบตัวรวมของคอนกรีต $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$ คำนวณจาก

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cso} \beta_s(t - t_c) \quad (\text{A-22})$$

ซึ่ง

ε_{cso} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การทดสอบตัวโดยประมาณ

$\beta_s(t - t_c)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของการทดสอบตัวกับเวลาของ การอบแห้ง

t

คือ อายุของคอนกรีต (วัน) ที่ในขณะที่พิจารณา

t_c คือ อายุของคอนกรีตที่จุดเริ่มต้นของการอบแห้ง (วัน)
 $(t - t_c)$ คือ ระยะเวลาของการอบแห้ง (วัน)

ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวประมาณอาจจะได้รับจาก

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm28})\beta_{RH}(h) \quad (A-23)$$

โดย

$$\varepsilon_s(f_{cm28}) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm28}/f_{cmo})] \times 10^{-6} \quad (A-24)$$

และ

$$\beta_{RH}(h) = -1.55[1 - (\frac{h}{h_0})^3] \quad \text{เมื่อ } 0.4 \leq h < 0.99$$

$$\beta_{RH}(h) = 0.25 \text{ for } h \geq 0.99 \quad (A-25)$$

ซึ่ง

f_{cm28} คือ แรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตทรงกระบอก อัดท่ออายุ 28 วัน

(MPa หรือ PSI)

f_{cmo} คือ 10 MPa (1,450 PSI)

β_{sc} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ (ตารางที่ 2.7)

h คือ ความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบ

h_0 คือ 1

ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของการหดตัวกับเวลาของการอบแห้ง

$$\beta_s(t - t_c) = [((t - t_c)/t_1) / \{350((V/S)/(V/S)_0)^2 + (t - t_c)t_1\}]^{0.5} \quad (A-26)$$

ซึ่ง

$(t - t_c)$ คือ ระยะเวลาของการอบแห้ง (วัน)

t_1 คือ 1 วัน

V/S คือ อัตราส่วนปริมาณพื้นผิว (มม. หรือ นิ้ว)

$(V/S)_0$ คือ 50 มม. (2 นิ้ว.)

วิธีการนี้จะถือได้ว่าการบ่มของชิ้นคอนกรีตระยะเวลาน้อยกว่า 14 วันที่อุณหภูมิปกติ ระยะเวลาของการบ่มชิ้นนั้นไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการหดตัว ดังนั้นพารามิเตอร์นี้รวมทั้งผลของการ

บ่มจึงไม่ได้นำเข้าในสมการ ดังนั้นในสมการ (A-22) และ (A-26) ในช่วงระยะเวลาที่แท้จริงของการอบแห้ง ($t-t_c$) จะมีการใช้เมื่ออุณหภูมิคงที่มากกว่า 30°C (86°F) จะถูกนำไปใช้ในขณะที่ค่อนกรีตแห้ง

CEB MC90 แนะนำให้ใช้การแก้ไขอุณหภูมิให้สูงขึ้นเพื่อ $\beta_{RH}(h)$ และ $\beta_s(t-t_c)$ และดังให้เห็นดังต่อไปนี้

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH}(h)[1 + (0.08/[1.03 \cdot h/h_0])([T/T_0 - 20]/40)] \quad \text{ในหน่วย SI}$$

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH}(h)[1 + (0.08/[1.03 \cdot h/h_0])([18.778T/T_0 - 37.778]/40)] \quad \text{ในหน่วย lb-lb (A-27)}$$

ตารางที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์, β_{sc}

Type of cement according to Ec2	β_{sc}
SL (slowly-hardening cements)	4
N and R (normal or rapid hardening cements)	5
RS (rapid hardening high-strength cements)	8

ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการหดตัวโดย

ในหน่วย SI

$$\beta_{s,T}(t-t_c) = \left[\frac{(t-t_c)/t_1}{350 \left[\frac{s}{V} \right]^2 \exp \left[-0.06 \left(\frac{T}{T_0} - 20 \right) \right] + \frac{(t-t_c)}{t_1}} \right]^{0.5} \quad \text{ในหน่วย lb-lb (A-28)}$$

$$\beta_{s,T}(t-t_c) = \left[\frac{(t-t_c)/t_1}{350 \left[\frac{s}{V} \right]^2 \exp \left[-0.06 \left(18.778 \frac{T}{T_0} - 37.778 \right) \right] + \frac{(t-t_c)}{t_1}} \right]^{0.5}$$

ซึ่ง $\beta_{RH,T}$ คือ ปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์แก้ไขโดยอุณหภูมิที่ใช้แทนที่ β_{RH} ในสมการ (A-23)

$\beta_{s,T}(t-t_c)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิขึ้นอยู่กับการแทนที่ $\beta_s(t-t_c)$ ในสมการ (A-22)

h คือ ความชื้นสัมพัทธ์

h_0 คือ 1

V/S คือ อัตราส่วนปริมาณพื้นผิว (มม. หรือ นิ้ว)

(V/S) คือ 50 มม. (2 นิ้ว)

T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$ หรือ $^{\circ}\text{F}$), T_0 เท่ากับ 1°C (33.8°F)

2.4 วิธีของ CEB MC90-99

CEB MC90-99 เป็นวิธีที่ถูกปรับปรุงขึ้นจากวิธีของ CEB MC90 วิธีนี้ได้รับผลจากการพัฒนาค่อนกรีตทั่วไปและค่อนกรีตความแข็งแรงสูงและการพิจารณาแยกการทดสอบรวมออกเป็นส่วนความเครียดของการทดสอบตัวและทดสอบตัวแห้ง วิธีการหาค่าทดสอบตัวนี้มีจุดมุ่งหมายในการคาดการณ์พฤติกรรมของหัวตัดที่อยู่ขึ้นกับเวลาเฉลี่ยของชั้นส่วนค่อนกรีตบ่มชั้นที่อุณหภูมิปกติไม่เกิน 14 วัน และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 40 ถึง 100% ที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยโดยรอบ $10-30^{\circ}\text{C}$ ($50-86^{\circ}\text{F}$) ใช้ได้สำหรับโครงสร้างค่อนกรีตหน้าหนักปกติทั่วไปที่มีแรงอัดเฉลี่ยในช่วง 15 MPa ($2,175 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}$) $\leq f_{cm28} \leq 120 \text{ MPa}$ ($17,400 \text{ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}$) อายุที่บรรทุกไม่ควรน้อยกว่า 1 วัน และเกิดการคีบไม่เกิน 40% ของความแข็งแรงของค่อนกรีตในช่วงเวลาของการรับน้ำหนัก

แบบจำลองนี้ไม่ต้องใช้ข้อมูลเกี่ยวกับระยะเวลาของการบ่มหรือสภาพของการบ่มใด ๆ แต่คำนึงถึงความชื้นสัมพัทธ์และขนาดเฉลี่ยของชั้นค่อนกรีต

พารามิเตอร์ที่ต้องการ

- อายุของค่อนกรีตแห้งเมื่อเริ่มนักจะเป็นอายุสุดท้ายของการบ่มชั้น (วัน)
- อายุของค่อนกรีตที่รับน้ำหนักบรรทุก (วัน)
- ค่อนกรีตที่อัดแรงที่ 28 วัน (MPa หรือ PSI)
- ความชื้นสัมพัทธ์
- อัตราปริมาณพื้นผิวหรือความหนาหน้าตัดประสิทธิผลของชั้นค่อนกรีต (มม. หรือ นิ้ว.)
- ประเภทปูนซีเมนต์

การทดสอบ CEB MC90-99 การทดสอบของค่อนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูง วิธีการทดสอบใหม่นี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็นส่วนของการทดสอบตามธรรมชาติและการทดสอบแห้ง ในขณะที่แบบจำลองสำหรับการทดสอบแห้งเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับวิธีการที่กำหนดในโนเมเดล CEB MC90 (CEB1993) และสำหรับการทดสอบตามธรรมชาติ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสมการใหม่ ที่จะต้องได้รับมา ปรับเปลี่ยนบางอย่าง อย่างไรก็ตามควรที่จะดำเนินการในส่วนการทดสอบแห้งก่อน

ตามวิธีใหม่นี้จะมีการครอบคลุมทั้งการทดสอบของค่อนกรีตปกติและค่อนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นการทดสอบตามธรรมชาติจะต้องมีการจำลองสำหรับค่อนกรีตความแข็งแรงปกติ

การทดสอบรวมของค่อนกรีต $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{c_{ds}}(t, t_c) \quad (\text{A-29})$$

- ชี้ง $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$ คือ การหดตัวทั้งหมด
 $\varepsilon_{cas}(t)$ คือ การหดตัวตามธรรมชาติ
 $\varepsilon_{cds}(t, t_c)$ คือ การหดตัวอับแห้งที่คอนกรีตอายุ t (วัน) หลังจากเริ่มต้น
 อบแห้งที่ t_c (วัน)

องค์ประกอบของการหดตัว ตามธรรมชาติ $\varepsilon_{cas}(t)$ จะถูกคำนวณจากสมการ

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{caso}(f_{cm28})\beta_{as}(t) \quad (A-30)$$

- ชี้ง $\varepsilon_{caso}(f_{cm28})$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวตามธรรมชาติโดยประมาณจาก
 สมการ

$$\varepsilon_{caso}(f_{cm28}) = -\alpha_{as}[(f_{cm28}/f_{cm0})/\{6+(f_{cm28}/f_{cm0})\}]^{2.5} \times 10^{-6} \quad (A-31)$$

$\beta_{as}(t)$ คือ พังผืนการอธิบายเวลาที่เพิ่มขึ้นของการหดตัวตามธรรมชาติจากสมการ

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp[-0.2(t/t_1)^{0.5}] \quad (A-32)$$

แล้ว f_{cm28} คือ แรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa หรือ PSI)

f_{cm0} เท่ากับ 10 MPa (1,450 PSI)

t คือ อายุคอนกรีต (วัน)

t_1 เท่ากับ 1 (วัน)

α_{as} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์จากตาราง 2.8

ตารางที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์, α_{as} , α_{ds1} และ α_{ds2}

Type of cement according to EC2	α_{as}	α_{ds1}	α_{ds2}
SL (slowly-hardening cements)	800	3	0.13
N or R (normal or rapid hardening cements)	700	4	0.12
RS (rapid hardening high-strength cements)	600	6	0.12

ตัวแปรสำหรับการหาดตัวตามธรรมชาติเป็นอิสระจากความชื้นและขนาดของชั้นคอนกรีตและส่งผลได้เร็วกว่าการหาดตัวอ่อนแห้ง

การหาดตัวอ่อนแห้ง $\varepsilon_{cds}(t, t_c)$ สามารถคำนวณจากสมการ

$$\varepsilon_{cds}(t, t_c) = \varepsilon_{cdso}(f_{cm28}) \beta_{RH}(h) \beta_{ds}(t - t_c) \quad (A-33)$$

ซึ่ง $\varepsilon_{cdso}(f_{cm28})$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การหาดตัวอ่อนแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28}) = [(220 + (100\alpha_{ds1})\exp(-\alpha_{ds2}f_{cm28}/f_{cm0})) \times 10^{-6}] \quad (A-34)$$

$\beta_{RH}(h)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนึงถึงผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการหาดตัวอ่อนแห้งหาได้จากสมการ

$$\beta_{RH}(h) = -1.55[1 - (h/h_0)^3] \quad \text{for } 0.4 \leq h < 0.99\beta_{s1} \quad (A-35)$$

$$\beta_{s1} = [(3.5f_{cm0})/(f_{cm28})]^{0.1} \quad (A-36)$$

ตามสมการนี้ สำหรับคอนกรีตที่มีความแข็งแรงปกติ และจะเกิดอาการบวมถ้าคอนกรีตความแข็งแรงสูงสัมพันธ์กับความชื้นโดยรอบ 99% อาการบวมจะเกิดขึ้นน้อยในที่มีความชื้นสัมพัทธ์ลดลงอันเนื่องมาจากการลดลงของความชื้นสัมพัทธ์ภายในเนื่องจากการแห้งตามธรรมชาติของคอนกรีตก่อนหน้านี้

$\beta_{ds}(t - t_c)$ คือ ฟังก์ชันใช้อธิบายการศึกษาการเพิ่มขึ้นของเวลาของการหาดตัวอ่อนแห้งจากสมการ

$$\beta_{ds}(t - t_c) = [\{(t - t_c)/t_1\} / \{350[(V/S)/(V/S)_0]^2 + (t - t_c)/t_1\}]^{0.5} \quad (A-37)$$

จะได้ α_{ds1} และ α_{ds2} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ จากตาราง 2.8

β_{s1} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนึงถึงการแห้งด้วยตัวเองในคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูง

h คือ ความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบ, $h_0 = 1$

V/S คือ อัตราส่วนบริมาณพื้นผิว (mm. หรือ in.), $(V/S)_0 = 50$ มม. (2 นิ้ว)

f_{cm0} คือ 10 MPa (1,450 PSI)

t_c คือ อายุการบ่มคอนกรีต (วัน)

$(t - t_c)$ คือ ระยะเวลาของการอบแห้ง (วัน)

2.5 GL2000 model

วิธีที่นำเสนอในที่นี้จะสอดคล้องกับรุ่นล่าสุดของวิธีของ GL2000 (Gardner 2004) รวมทั้งการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์บางอย่างเล็กน้อยและการพัฒนาความแข็งแรงด้วยสมการที่เขียนกับเวลาของรูปแบบเดิมที่พัฒนาโดย Gardner และ Lockman (2001) ซึ่งแก้ไขมาจากโนเมเดล Atlanta 97 (Gardner และ Zhao 1993) และได้รับอิทธิพลจากวิธีของ CEB MC 90 ซึ่งจะนำเสนอขั้นตอนการออกแบบสำนักงานสำหรับการคำนวณการหดตัวของคอนกรีตความแข็งแรงปกติจะกำหนดให้คอนกรีตที่มีกำลังอัดเฉลี่ยน้อยกว่า 82 MPa (11,890 PSI) ที่ไม่ได้ทำให้แห้งตามธรรมชาติ โดยใช้ข้อมูลที่มีอยู่ในการออกแบบคือ 28 วันที่ของความแข็งแรงของคอนกรีต, ความแข็งแรงขณะบรรทุก, ขนาดของคอนกรีตและความชื้นสัมพัทธ์ตามที่ Gardner และ Lockman (2001) วิธีการที่สามารถนำมาใช้โดยไม่คำนึงถึงสิ่งที่ผสมสารเคมีหรือแร่ธาตุที่อยู่ในคอนกรีต, อุณหภูมิในการหล่อ และวิธีการบ่มค่านี้สามารถทำนายได้เพียงแค่วัดค่าความแข็งแรงของคอนกรีตที่เปลี่ยนไปตามเวลาและค่ามอตูลัสของความยืดหยุ่นโดยรวมแล้วค่าความแข็งของเข้าไปในสมการได้โดยใช้ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงในทรงกระบอกที่วัดได้และคำนวนกลับจากค่ามอตูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่วัด

ผลที่ได้จากการปฏิบัติตามจะขึ้นอยู่กับค่าโมตูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วันไม่ใช้ค่าโมตูลัสยืดหยุ่น ณ วันที่ให้น้ำหนักบรรทุก วิธีนี้คำนึงถึงระยะเวลาในการอบแห้งก่อนที่จะให้น้ำหนัก ซึ่งนำไปใช้กับการหดตัวและการคีบอบแห้งได้

พารามิเตอร์ที่ต้องการ

- อายุของคอนกรีตแห้งเมื่อเริ่มดำเนินการน้ำกเป็นอายุของวันสุดท้ายในการปั่นชีน (วัน)
- อายุของคอนกรีตที่เริ่มรับแรง (วัน)
- แรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน (MPa หรือ PSI)
- แรงอัดคอนกรีตที่หลด (MPa หรือ PSI)
- ค่ามอตูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ 28 วัน (MPa หรือ PSI)
- ค่ามอตูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่หลด (MPa หรือ PSI)
- ความชื้นสัมพัทธ์
- อัตราส่วนปริมาณพื้นผิว (mm. หรือ นิ้ว)

กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต f_{cm28} สามารถประมาณได้จากสมการ

$$f_{cm28} = 1.1f_c' + 5.0 \quad \text{ในหน่วย SI}$$

$$f_{cm28} = 1.1f_c' + 700 \quad \text{ในหน่วย in.-lb.} \quad (\text{A-38})$$

สมการนี้อนุโลมระหว่างสมการที่แนะนำของคณะกรรมการ ACI 209 (1982) และคณะกรรมการ ACI 363 (1992) สามารถสังเกตได้ว่าสมการนี้ไม่คำนึงถึงผลกระทบของความแข็งหรือ

ความหนาแน่นของคอนกรีตแทนที่ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต จะใช้ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น ซึ่งเป็นที่นิยมในการวัด

ถ้าค่าจากการทดสอบจะไม่สามารถใช้ได้ ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น E_{cmt} และค่าความแข็งแรงที่เวลาได้ f_{cmt} สามารถคำนวณได้จากกำลังรับแรงอัดโดยใช้สมการ

มอดูลัสของความยืดหยุ่น

$$\begin{aligned} E_{cmt} &= 3500 + 4300\sqrt{f_{cmt}} && \text{ในหน่วย SI} \\ E_{cmt} &= 500,000 + 52,000\sqrt{f_{cmt}} && \text{ในหน่วย in.-lb.} \end{aligned} \quad (\text{A-39})$$

2.5.1 ความแข็งแรงรวม

ความแข็งแรงสามารถวัดได้จากการความแข็งแรงค่าเฉลี่ยของคอนกรีตทรงกระบอกและคำนวณกลับสมการจากสมการมอดูลัสของความยืดหยุ่นที่วัดโดยใช้สมการข้างต้นในคำนวณการทดสอบตัวประสิทจิภาพสมการข้างต้นถูกนำมาใช้เป็นตัว旁ชี้ความแตกต่างของแข็งแรงที่วัดจากค่ามาตรฐาน

ค่าความแข็งแรงที่เวลาได้

$$f_{cmt} = \beta_e^2 f_{cm28} \quad (\text{A-40})$$

สมการนี้ปรับเปลี่ยนมาจากการความสัมพันธ์ของความแข็งแรง ของโมเดล CEB

และ $\beta_e = \exp\left[\frac{s}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right]$ (A-41)

ซึ่ง s คือ รูปแบบพารามิเตอร์ความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงของวิธีของ CEB (1993) ได้จากตาราง 2.9 จะเกี่ยวข้องประเภทปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.9 ค่าคงที่การทดสอบที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์, ค่า s และค่า k

Cement type	s	k
Type I	0.335	1.00
Type II	0.400	0.75
Type III	0.130	1.15

2.5.2 การหดตัว

ความเครียดในการหดตัว ϵ_{sh} (t, t_c) คำนวณ จากสมการ

$$\epsilon_{sh}(t, t_c) = \epsilon_{shu} \beta(h) \beta(t - t_c) \quad (\text{A-42})$$

ชื่อ	ϵ_{shu}	คือ ความเครียดสูงสุดของการหดตัว
	$\beta(h)$	คือ ค่าที่ปรับแก้สำหรับความชื้น
	$\beta(t - t_c)$	คือ ค่าที่ปรับแก้สำหรับเวลาของการอบแห้ง

ค่าความเครียดสูงสุดของการหดตัวสามารถหาได้จาก

$$\epsilon_{shu} = 900k[30/f_{cm28}]^{0.5} \times 10^{-6} \quad \text{ในหน่วย SI}$$

$$\epsilon_{shu} = 900k[4350/f_{cm28}]^{0.5} \times 10^{-6} \quad \text{ในหน่วย in-lb (A-43)}$$

ชื่อ	f_{cm28}	คือ แรงอัดคอนกรีตเฉลี่ย ที่ 28 วัน (MPa หรือ PSI)
	k	คือ ค่าคงที่หดตัวที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ (ตารางที่ 2.9)

ค่าที่ปรับแก้สำหรับความชื้น $\beta(h)$ จะได้รับจาก

$$\beta(h) = (1 - 1.18h^4) \quad (\text{A-44})$$

เพิ่มเติม สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ 0.96 จะไม่มีการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง แต่จะเกิดการบวมขึ้นฟังก์ชันเวลาสำหรับการหดตัว $\beta(t - t_c)$ จะได้รับจากสมการ

$$\beta(t - t_c) = [(t - t_c) / ((t - t_c) + 0.12(V/S)^2)]^{0.5} \quad \text{ในหน่วย SI}$$

$$\beta(t - t_c) = [(t - t_c) / ((t - t_c) + 77(V/S)^2)]^{0.5} \quad \text{ในหน่วย in-lb (A-45)}$$

ชื่อ	t และ t_c	คือ อายุของคอนกรีตและอายุของการบ่มชี้นในหน่วยวัน
	V/S	คือ อัตราส่วนปริมาณพื้นผิว (มม. หรือ นิ้ว)

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของโปรแกรมและแนะนำวิธีการใช้โปรแกรมทั้งหมด โดยเริ่มจากวิธีการเรียกใช้โปรแกรม การเขียนโปรแกรมการคำนวณ การใช้โปรแกรมคำนวณ และการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ รวมทั้งการแสดงผลในรูปแบบกราฟและตาราง นอกจากนี้ยังบอกถึงข้อจำกัดต่างๆ ของโปรแกรมและคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมอีกด้วย

3.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินการวิจัยมีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ศึกษาสมมุติฐานและวิธีการในการประมาณค่าขององค์การต่างๆ

โดยที่มีวิธีการของสมาคมคอนกรีตอเมริกา (American Concrete Institute: ACI) ได้ศึกษาในปี 1992, วิธีการของสมาคมคอนกรีตยุโรป (Comite' Europ'een du B'eton: CEB MC 90) ได้ศึกษาในปี 1990 และปี 1999, วิธีการของบازอนท์ (Bazant's Method) ปี 1995 และสุดท้ายคือวิธีการของการเดนอร์และล็อกแมน (Gardner 2004; GL2000) ปี 2004 รวมวิธีการทั้งสิ้น 5 วิธีการ

ในการประมาณค่าของวิธีการต่างๆ ได้นำสมมุติฐานของเส้นทางการทดสอบตัวมาใช้ด้วยเพื่อการพิจารณาเลือกการประมาณค่าที่เหมาะสมกับข้อมูลการทดลอง

3.1.2 เขียนโปรแกรม

นำโปรแกรม MICROSOFT EXCEL 2010 มาใช้เขียนโปรแกรม ในการการคำนวณหาค่าการทดสอบ โดยแบ่งออกเป็นส่วนๆ ได้แก่ ส่วนรับข้อมูล, ส่วนประมาณผล, ส่วนการแสดงผล

3.2 โครงสร้างโปรแกรม

วางแผนการเขียนโปรแกรมตามแผนผังดังแสดงในภาพที่ 3.1 แผนผังนี้แสดงถึงการทำงานของโปรแกรมหลัก การทำงานของโปรแกรมอธิบายได้ดังนี้

3.2.1 เมื่อเริ่มทำงานโดยการเปิดโปรแกรม โปรแกรมจะเปิดเป็นหน้า DATA เพื่อป้อนข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณหาค่าการทดสอบ

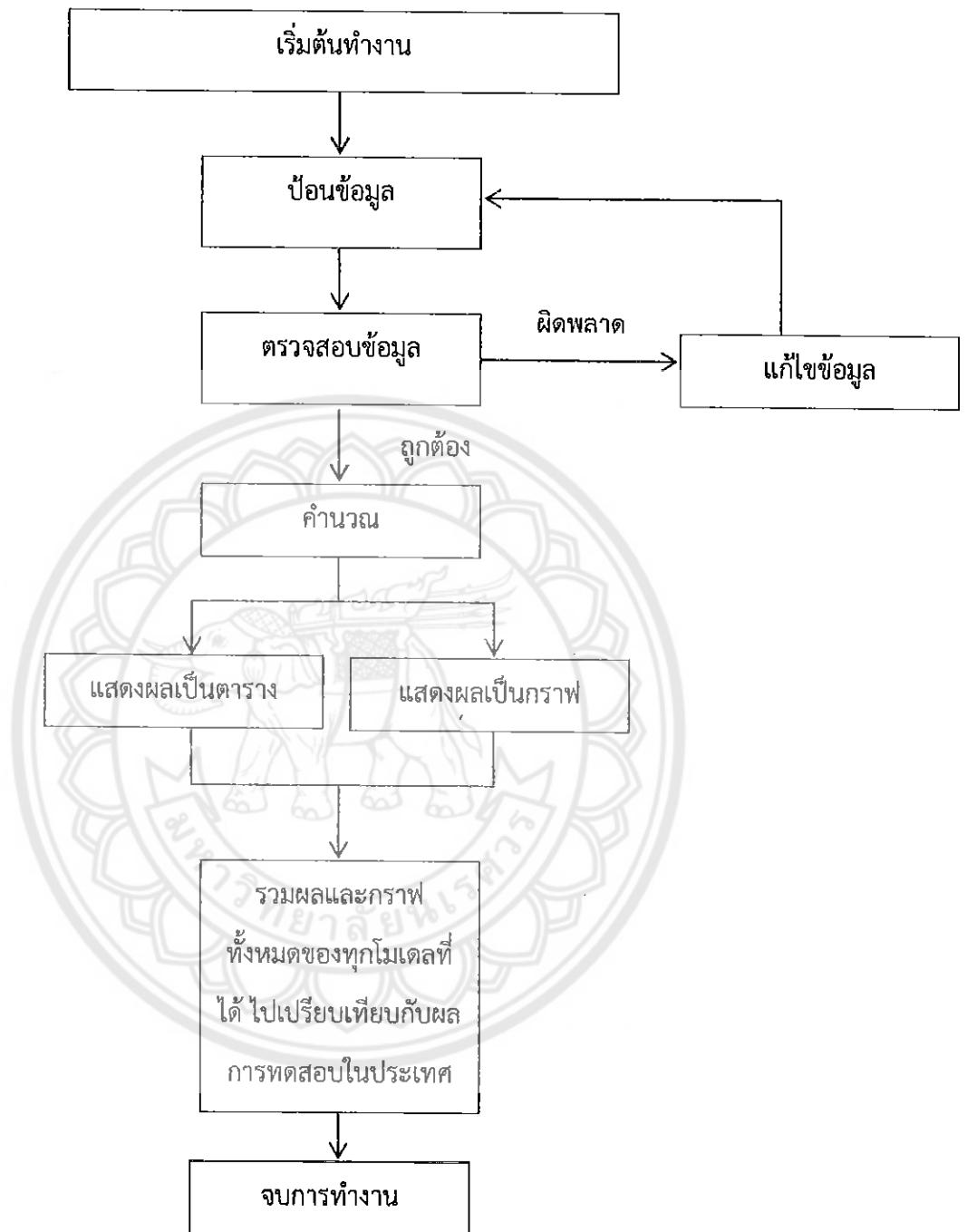
3.2.1 ข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณหาค่าการหดตัว มี กำลังของคอนกรีตที่ 28 วัน ,ค่าความชื้น สัมพัทธ์ ,อุณหภูมิ ,อัตราส่วนพื้นที่ผิว ,อายุการบ่ม ,ช่วงความเครียดที่นำมาใช้ ,ชนิดของปูนซีเมนต์ ,ขนาดรวม ,ปริมาณซีเมนต์ ,ปริมาณน้ำ ,ปริมาณอากาศ ,ร้อยละมวลรวมละเอียด ,ค่าการยุบตัวของ คอนกรีต และ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต จะต้องใส่ในช่องสีเหลือง

3.2.3 เมื่อใส่ข้อมูลเบื้องต้นเสร็จสิ้น สามารถเปิดไปยังหน้าต่างๆ ได้โดยโปรแกรมจะคำนวณ ผลลัพธ์

3.2.4 หลังจากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาค่าการหดตัว ณ อายุของคอนกรีตในแต่ละสมาคมแล้ว แสดงออกเป็นกราฟ โดยมีจำนวนวันอยู่ในแกน X และ ค่าความเครียดของการหดตัวอยู่ในแกน Y

3.2.5 สุดท้ายโปรแกรมจะทำการเปรียบเทียบค่าของวิธีต่างๆ กับกราฟของผลทดสอบในประเทศไทย เล้าและแสดงกราฟรวมของทุกสมาคมรวมถึงกราฟของผลทดสอบจริงในประเทศไทย เพื่อที่จะ เปรียบเทียบความแตกต่าง และสามารถเลือกใช้สมการการหดตัวจากสมาคมต่างๆ เหล่านี้ ไปศึกษา และพัฒนาให้สามารถหาค่าการหดตัวได้จริงในประเทศไทย



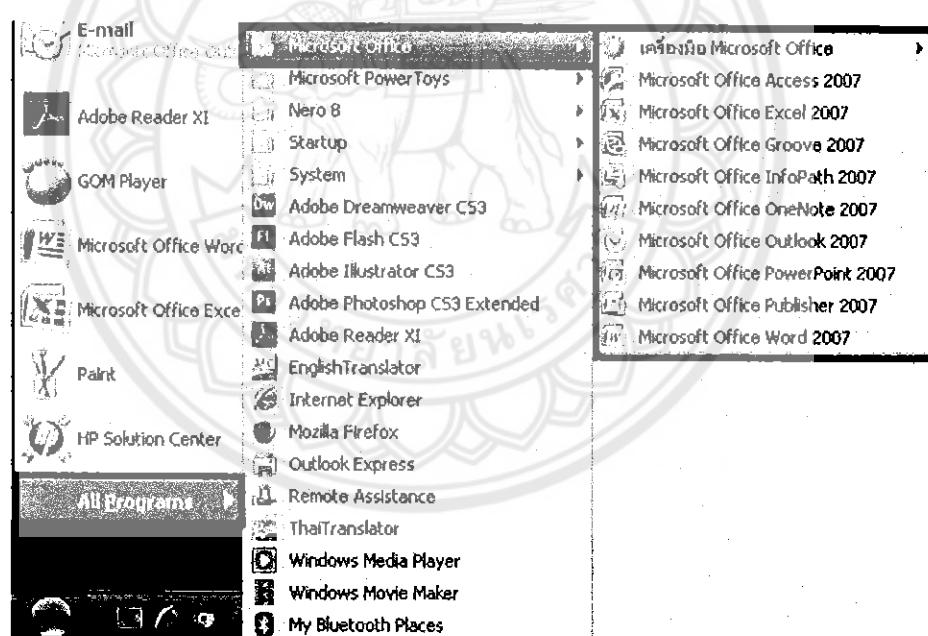


รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงาน

3.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

3.3.1 เริ่มต้นการทำงาน เปิดโปรแกรมการคำนวณโดยทำงานใน Microsoft Excel 2000 ขั้นไปสำหรับระบบปฏิบัติการบนวินโดว์ (Windows) ดังนี้ความต้องการประสิทธิภาพเครื่องคอมพิวเตอร์ในการใช้โปรแกรมมีดังนี้

- หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) มีความเร็วไม่น้อยกว่า 233 เมกะเฮิรตซ์ (MHz)
- หน่วยความจำ (RAM) ไม่น้อยกว่า 64 เมกะไบต์ (mb)
- ระบบปฏิบัติการวินโดว์ 98 หรือวินโดว์ที่สูงกว่า
- พื้นที่ว่างสำหรับโปรแกรมบนယาร์ดดิสก์ไม่น้อยกว่า 100 เมกะไบต์ (mb)
- ชีดกราฟ มีความเร็วไม่น้อยกว่า 12X



รูปที่ 3.2 การเปิด Microsoft Excel

3.3.2 ป้อนข้อมูล ก่อนการป้อนค่าควรทำความสะอาดเข้าใจความหมายของตัวแปลและพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อความถูกต้องในการป้อนค่า หลังจากนั้นทำการใส่ค่าตัวแปลและพารามิเตอร์ต่างๆ ให้ครบตามที่กำหนดไว้

โปรแกรมนาค่าการทดสอบตัวของคอนกรีต

สำนักงานทดสอบชั่วคราว
สำนักงานทดสอบการสำรวจ
สำนักงานเครื่องทดสอบการทดสอบ

ตารางสำหรับกรอกข้อมูล

Problem data			t, days	→→→วันที่ทดสอบ
Concrete data:				
Specified 28-day strength	$f_c =$	MPa	→→→แรงดันของคอนกรีต 28 วัน	
Ambient conditions:				
Relative humidity	$h =$		→→→ความชื้นสิ่งที่ใส่	
Temperature	$T =$	°C	→→→อุณหภูมิ	
Specimen:				
Volume-surface ratio	$V/S =$	mm	→→→อัตราส่วนพื้นที่ผิว	
Shape				
Initial curing:				
Curing time	$t_c =$	days	→→→ระยะเวลาในการนึ่งคอนกรีต	
Curing condition				
Concrete at loading:				
Age at loading to	$t_0 =$	Moist cured		
Applied stress range Δs	$\Delta s =$	%	→→→ช่วงความเครียด	
Estimated concrete mixture				
Cement type		1		→→→ประเภทปูนซีเมนต์
Maximum aggregate size		mm	→→→ขนาดมวลรวมสูงสุด	
Cement content	$c =$	Kg/m ³	→→→ปริมาณปูนซีเมนต์	

รูปที่ 3.3 การกรอกข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณการทดสอบตัวของข้อมูล

3.3.3 ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล เมื่อกรอกข้อมูลเสร็จแล้วควรตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล เพื่อป้องกันความผิดพลาดของการคำนวณ

3.3.4 แก้ไขข้อมูล เมื่อทราบพบข้อผิดพลาดหรือค่าที่ไม่ถูกต้อง ต้องแก้ไขหรือป้อนค่าใหม่

ตารางสำหรับกรอกข้อมูล

Problem data			t, days	→→→วันที่ทดสอบ
Concrete data:				
Specified 28-day strength	$f_c =$	53.13 MPa	→→→แรงดันของคอนกรีต 28 วัน	
Ambient conditions:				
Relative humidity	$h =$	0.75	→→→ความชื้นสิ่งที่ใส่	
Temperature	$T =$	28 °C	→→→อุณหภูมิ	
Specimen:				
Volume-surface ratio	$V/S =$	16.57 mm	→→→อัตราส่วนพื้นที่ผิว	
Shape				
Initial curing:				
Curing time	$t_c =$	7 days	→→→ระยะเวลาในการนึ่งคอนกรีต	
Curing condition				
Concrete at loading:				
Age at loading to	$t_0 =$	Moist cured		
Applied stress range Δs	$\Delta s =$	40 %	→→→ช่วงความเครียด	
Estimated concrete mixture				
Cement type		1		→→→ประเภทปูนซีเมนต์
Maximum aggregate size		20 mm	→→→ขนาดมวลรวมสูงสุด	
Cement content	$c =$	468.85 Kg/m ³	→→→ปริมาณปูนซีเมนต์	
Water content	$w =$	164 Kg/m ³	→→→ปริมาณน้ำ	
Water-cement ratio	$w/c =$			
Aggregate-cement ratio	$a/c =$			
Fine aggregate percentage	$\psi =$	29.83 %	→→→เมอร์เซนต์ของมวลรวม	
Air content	$\alpha =$	10 %	→→→ปริมาณอากาศ	
Slump	$s =$	190 mm	→→→SLUMP ของคอนกรีต	

รูปที่ 3.4 การป้อนข้อมูลที่สมบูรณ์

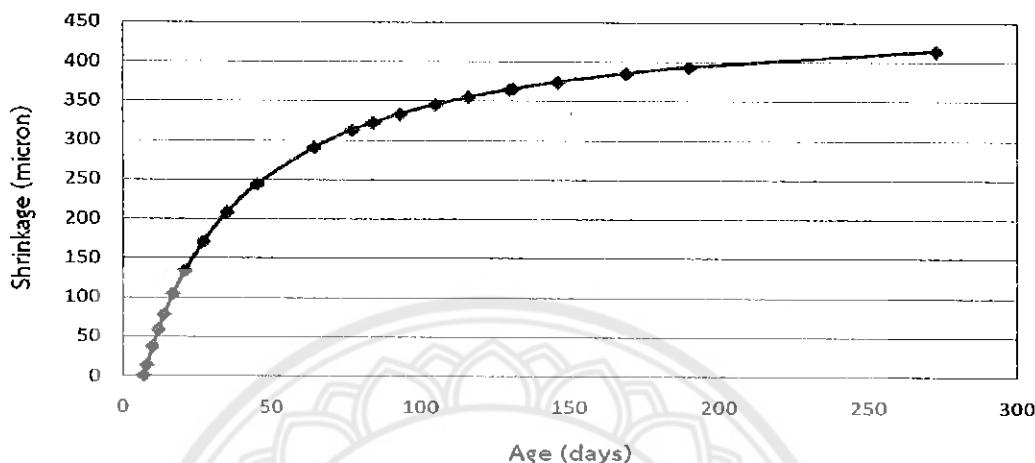
3.3.5 โปรแกรมคำนวณ เมื่อการป้อนค่าต่าง ๆ ถูกต้อง โปรแกรมจะคำนวณค่าการทดสอบตัวของแต่ละสมบูรณ์ในรูปแบบของตารางและกราฟ

3.3.6 แสดงผลอุณามในรูปตาราง เมื่อป้อนข้อมูลที่มีความสมบูรณ์โปรแกรมจะนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาแสดงผลในรูปของตารางของแต่ละสมาคม และรวมเพื่อเปรียบเทียบค่าของแต่ละสมาคมให้เห็นอย่างชัดเจน

t, days	Shrinkage of concrete (micron)					
	ACI	7	CEB MC90	CEB MC90-99	GL2000	Data test
7	0	8	0	37	0	0
8	14	10	65	105	67	78
10	40	12	110	155	112	150
12	63	14	138	186	141	192
14	84	15	160	211	163	228
15	94	17	169	222	172	230
17	112	21	185	240	187	252
21	145	28	211	269	212	312
28	190	35	242	306	242	366
35	225	44	265	333	263	390
44	260	63	286	359	282	416
63	311	76	314	393	308	461
84	348	92	333	416	325	489
92	358	105	339	423	329	493
105	373	115	346	432	336	515
115	382	130	350	438	340	527
130	394	145	356	445	345	535
145	404	168	361	451	348	545
168	416	189	366	458	354	547
189	424	272	371	464	357	555
272	447	335	381	477	366	567

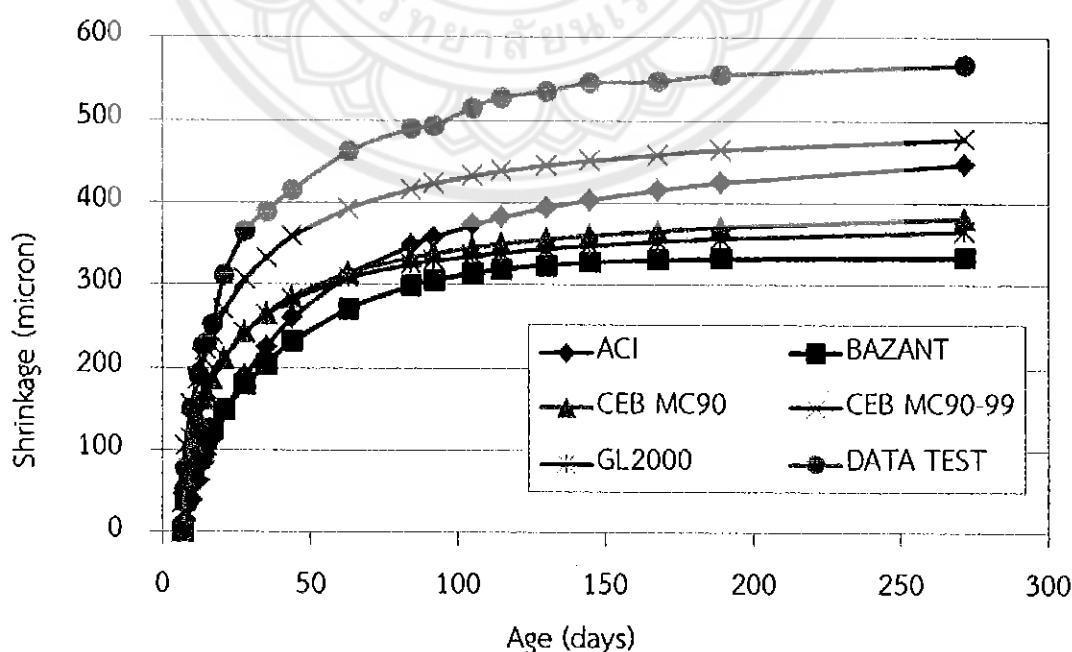
รูปที่ 3.5 แสดงผลในรูปแบบของตารางรวมเพื่อเปรียบเทียบค่าของแต่ละวิธี

3.3.7 แสดงผลออกมาในรูปกราฟ หลังจากโปรแกรมคำนวณค่าการหดตัวของแต่ละสมาคม
แล้วจะแสดงผลออกมาในรูปของกราฟเพื่อศึกษาแนวโน้มของการหดตัวที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่
เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.6 แสดงผลการคำนวณในรูปแบบของกราฟ

3.3.8 นำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบจริง เมื่อได้ค่าหดตัวของแต่ละสมาคมแล้ว
โปรแกรมจะนำค่าของแต่ละสมาคมมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง เพื่อให่ง่ายต่อ¹
การตัดสินใจในการเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมกับค่าการหดตัวของแต่ละภูมิภาค



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบค่าการหดตัวของแต่ละสมาคมกับผลการทดสอบจริง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณการทดสอบตัวของวิธีการต่างๆ

โดยการนำข้อมูลผลการทดสอบจริงจาก สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ มาเป็นตัวอย่างในการคำนวณ โดยมีข้อมูลดังนี้

4.1.1 ในกรณีที่ w/c มีค่าเป็น 0.35

- ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
- กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน = 541.59 กก/ลบ.ม.
- ความชื้นสัมพัทธ์ (h) = 0.75
- อุณหภูมิ (T) = 28 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาของการบ่ม (t_c) = 7 วัน
- อัตราส่วนพื้นที่ผิว (V/S) = 16.57 มม.
- ขนาดมวลรวมหยาบ = 20 มม.
- ปริมาณปูนซีเมนต์ (c) = 468.85 กก/ลบ.ม.
- ปริมาณน้ำ (w) = 164 กก/ลบ.ม.
- เปอร์เซ็นต์ของอากาศ (α) = 10 %
- ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด (s) = 190 มม.
- เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียด (ψ) = 29.83 %
- หน่วยน้ำหนักคอนกรีต = 2400 กก/ลบ.ม.

4.1.2 ในกรณีที่ w/c มีค่าเป็น 0.55

- ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
- ใช้ประเภทการบ่มชั้นแบบอบไอน้ำ

- กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	=	326.91 กก./ลบ.ม.
- ความชื้นสัมพัทธ์ (h)	=	0.75
- อุณหภูมิ (T)	=	28 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาของการบ่ม (t_c)	=	7 วัน
- อัตราส่วนพื้นที่ผิว (V/S)	=	16.57 มม.
- ขนาดมวลรวมหยาบ	=	20 มม.
- ปริมาณปูนซีเมนต์ (c)	=	361.52 กก./ลบ.ม.
- ปริมาณน้ำ (w)	=	199 กก./ลบ.ม.
- เปอร์เซ็นต์ของอากาศ (α)	=	10 %
- ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด (s)	=	190 มม.
- เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียด (ψ)	=	30.30 %
- หน่วยน้ำหนักคอนกรีต	=	2400 กก./ลบ.ม.

4.1.3 ในกรณีที่ w/c มีค่าเป็น 0.65

- ใช้ปูนซีเมนต์ประจำที่ 1		
- กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	=	231.39 กก./ลบ.ม.
- ความชื้นสัมพัทธ์ (h)	=	0.75
- อุณหภูมิ (T)	=	28 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาของการบ่ม (t_c)	=	7 วัน
- อัตราส่วนพื้นที่ผิว (V/S)	=	16.57 มม.
- ขนาดมวลรวมหยาบ	=	20 มม.
- ปริมาณปูนซีเมนต์ (c)	=	324.15 กก./ลบ.ม.
- ปริมาณน้ำ (w)	=	211 กก./ลบ.ม.
- เปอร์เซ็นต์ของอากาศ (α)	=	10 %
- ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด (s)	=	190 มม.
- เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียด (ψ)	=	30.46 %
- หน่วยน้ำหนักคอนกรีต	=	2400 กก./ลบ.ม.

สำหรับวันที่ใช้คำนวณจะเป็นวันที่ใช้จริงตามผลของการทดลองใน สถาบันเทคโนโลยี
นานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คือวันที่ 7, 8, 10, 12, 14, 17, 21, 27, 35, 45, 64,
77, 84, 93, 105, 116, 130, 131, 146, 169, 190 และ 273

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลจากการคำนวณของห้อง 5 สมาคม กับผลการทดลองจริง
ได้อย่างแม่นยำและถูกต้องโปรแกรมจะทำมาไว้ 3 ตัวคือ การคำนวณหาค่าการหดตัวของ
คอนกรีต ($w/c = 0.35$), แก้แล้วการคำนวณหาค่าการหดตัวของคอนกรีต ($w/c = 0.55$) และ
การคำนวณหาค่าการหดตัวของคอนกรีต ($w/c = 0.65$) เพื่อสามารถเปรียบเทียบการ
เปลี่ยนแปลงได้

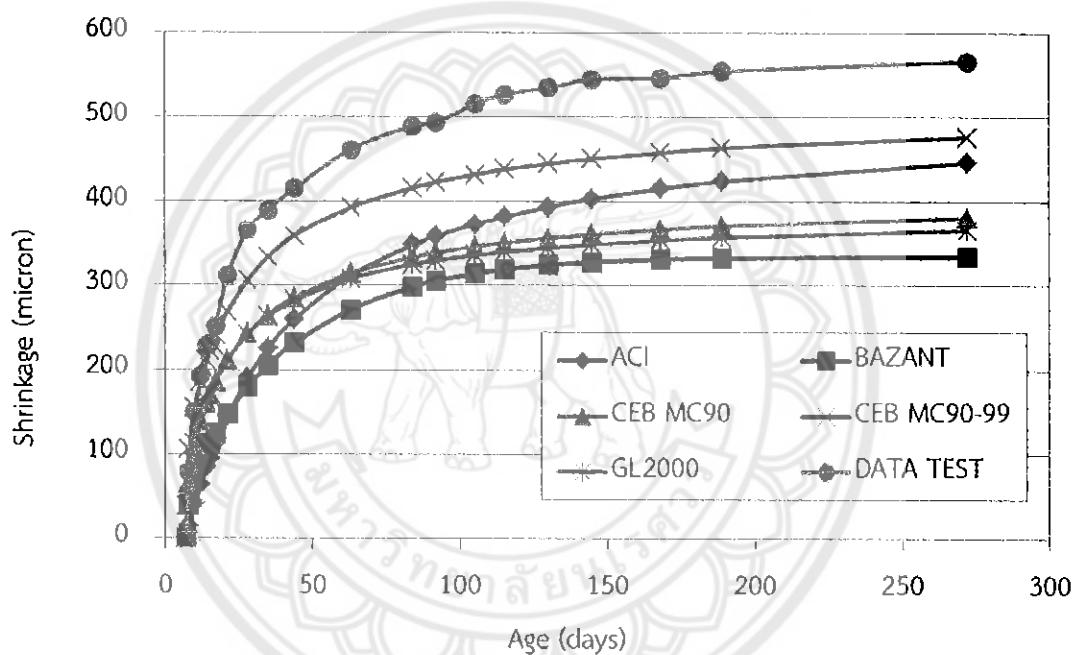
4.2 เปรียบเทียบผลการหดตัว และกราฟรวม ของวิธีต่างๆ กับผลการทดสอบจริงในประเทศไทย (ในกรณีที่ w/c มีค่าเป็น 0.35)

ผลของสมาคมต่างๆ จะมีค่าการหดตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้การศึกษาเป็นไปได้โดยง่าย
จึงมีการเปรียบเทียบผล และกราฟดังนี้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการหดตัวของห้อง 5 วิธีกับการทดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.35)

t (days)	Shrinkage of concrete (micron)					
	ACI	BAZANT	CEB MC90	CEB MC90-99	GL2000	Data test
7	0	0	0	37	0	0
8	14	40	65	105	67	78
10	40	69	110	155	112	150
12	63	89	138	186	141	192
14	84	105	160	211	163	228
15	94	112	169	222	172	230
17	112	125	185	240	187	252
21	145	148	211	269	212	312
28	190	179	242	306	242	366
35	225	205	265	333	263	390
44	260	231	286	359	282	416
63	311	271	314	393	308	461
84	348	298	333	416	325	489
92	358	305	339	423	329	493

105	373	314	346	432	336	515
115	382	319	350	438	340	527
130	394	324	356	445	345	535
145	404	328	361	451	348	545
168	416	331	366	458	354	547
189	424	333	371	464	357	555
272	447	335	381	477	366	567



รูปภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการหดตัวของทั้ง 5 วิธีกับผลการหดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.35)

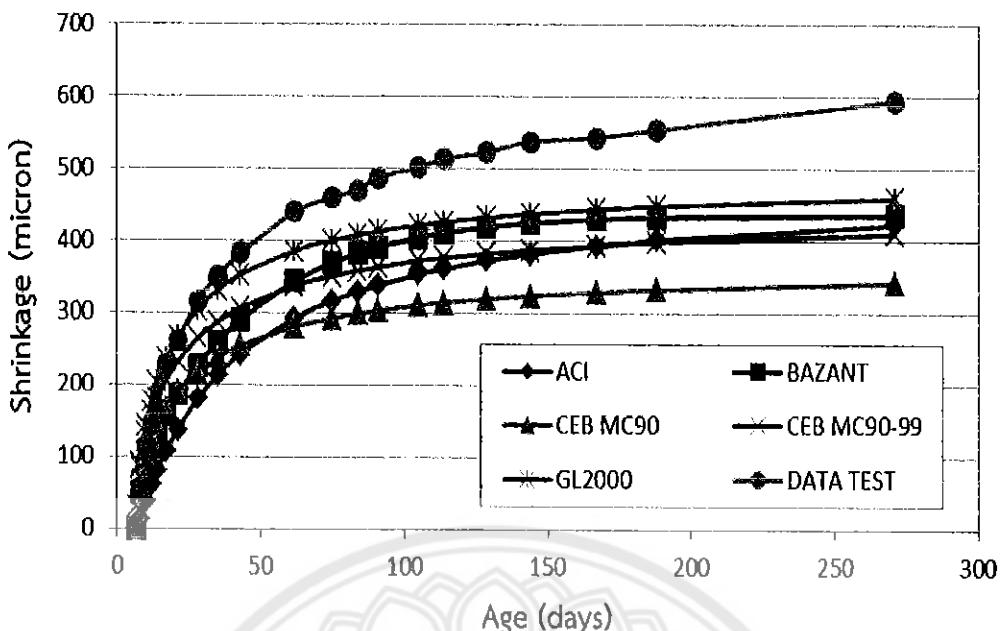
จากราฟจะเห็นได้ว่าค่าการหดตัวของสมาคมคอนกรีตยุโรป ปี 1999 หรือวิธีของ CEB MC 90-99 นั้นจะมีความใกล้เคียงกับผลการหดสอบในประเทศไทยมากที่สุด อันดับที่สอง จะเป็นค่าการหดตัวของสมาคมของสมาคมคอนกรีตอเมริกา หรือวิธีของ ACI ส่วนอันดับที่สาม จะเป็นค่าการหดตัวของสมาคมคอนกรีตยุโรป ปี 1990 หรือวิธีของ CEB MC 90 อันดับที่สี่ จะเป็นค่าการหดตัวของการคเนอร์ หรือวิธีของ GL2000 และสุดท้าย จะเป็นค่าการหดตัวของบาซอนท์ หรือวิธีของ Bazant

**4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบตัว และกราฟรวม ของวิธีต่างๆ กับผลการทดสอบจริงในประเทศไทย
(ในกรณีที่ w/c มีค่าเป็น 0.55)**

ผลของสมาคมต่างๆ จะมีค่าการทดสอบตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อให้การศึกษาเป็นไปได้โดยง่าย จึงมีตารางเปรียบเทียบผล และกราฟดังนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวของห้อง 5 วิธีกับการทดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.55)

t (days)	Shrinkage of concrete (micron)					
	7	BAZANT	CEB MC90	CEB MC90-99	GL2000	Data test
7	8	0	0	30	0	0
8	10	50	58	89	84	56
10	12	87	98	132	141	110
12	14	112	124	160	177	146
14	17	132	143	181	204	164
17	21	158	166	206	235	228
21	28	186	189	232	266	262
28	35	226	217	264	304	316
35	43	259	238	287	330	350
43	62	290	254	305	352	382
62	75	343	281	337	385	439
84	91	382	299	358	408	469
91	105	391	303	363	413	487
105	114	404	310	372	421	501
114	128	411	314	376	426	513
128	129	419	319	382	432	499
129	144	419	319	382	432	523
144	167	425	324	387	437	537
167	188	430	329	393	444	543
188	271	433	332	398	448	554
271	423	436	342	410	459	595



รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการหดตัวของห้อง 5 วิธีกับผลการหดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.55)

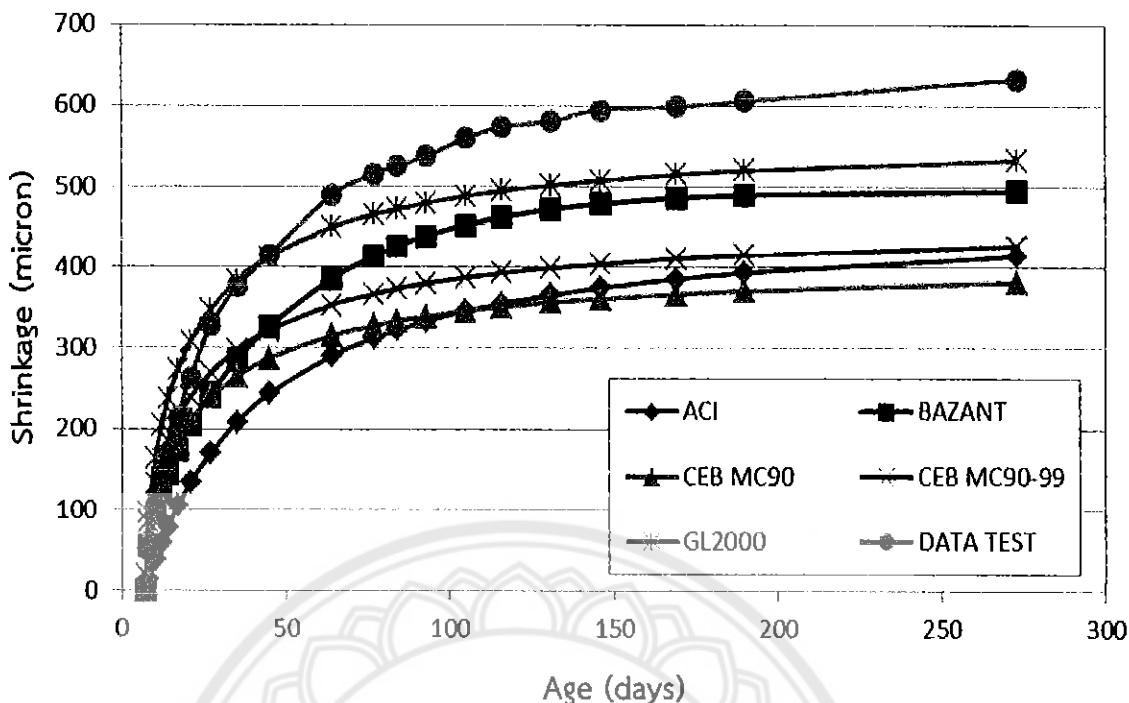
จากราฟจะเห็นได้ว่าค่าการหดตัวของการ์ดเนอร์ หรือวิธีของ GL2000 นั้นจะมีความใกล้เคียงกับผลการหดสอบในประเทศไทยมากที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกับอันดับที่สอง ที่เป็นค่าเป็นค่าการหดตัวของบازอนท์ หรือวิธีของ Bazant ส่วนอันดับที่สามและอันดับที่สี่นั้น จะมีค่าการหดตัวที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเป็นค่าการหดตัวของสมาคมคอนกรีตเมริกา หรือวิธีของ ACI และค่าการหดตัวของสมาคมคอนกรีตยุโรป ปี 1999 หรือวิธีของ CEB MC 90-99 สุดท้าย จะเป็นค่าการหดตัวของสมาคมคอนกรีตยุโรป ปี 1990 หรือวิธีของ CEB MC 90

4.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบตัว และกราฟรวม ของสมาคมต่างๆ กับผลการทดสอบจริงในประเทศไทย (ในกรณีที่ w/c มีค่าเป็น 0.65)

ผลของสมาคมต่างๆ จะมีค่าการทดสอบตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อให้การศึกษาเป็นไปได้โดยง่าย จึงมีการเปรียบเทียบผล และกราฟดังนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวของห้อง 5 วิธีกับการทดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.65)

t (days)	Shrinkage of concrete (micron)					
	ACI	BAZANT	CEB MC90	CEB MC90-99	GL2000	Data test
7	0	0	0	22	0	0
8	13	55	56	76	97	50
10	37	95	95	114	163	106
12	59	123	120	139	205	142
14	78	145	139	158	237	168
17	104	173	161	180	273	214
21	134	205	184	203	308	264
27	170	243	208	228	347	328
35	208	285	230	252	383	376
45	244	327	250	272	413	416
64	290	385	274	298	449	489
77	312	413	285	310	466	515
84	322	426	290	315	473	525
93	333	439	295	320	480	537
105	345	453	301	327	488	559
116	355	463	305	332	495	573
130	365	472	310	337	501	557
131	366	472	310	337	502	581
146	374	479	314	341	508	595
169	385	486	319	346	515	599
190	393	490	323	351	520	606
273	414	495	332	360	532	633



รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวของห้องทั้ง 5 โน๊มเดลกับผลการทดสอบจริง (w/c เท่ากับ 0.65)

จากราฟจะเห็นได้ว่าค่าการทดสอบของ ACI หรือวิธีของ GL2000 นั้นจะมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในประเทศไทยมากที่สุด อันดับที่สอง เป็นค่าเป็นค่าการทดสอบของ Bazant หรือวิธีของ CEB MC 90-99 และสุดท้ายนี้ จะเป็นค่าการทดสอบของสมาคมคอนกรีตยุโรป ปี 1990 หรือวิธีของ CEB MC 90

โดยผลที่ได้มานี้ได้ใช้ข้อมูลในการคำนวณหาค่าการทดสอบจากข้อที่ 4.2 ในกรณีที่ w/c มีค่าเป็น 0.65

4.5 การวิเคราะห์ผลการคำนวณของโปรแกรมจากการทดสอบ

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบของแต่ละโน๊มเดล สำหรับการทดสอบของคอกนกรีตจะพบว่า วิธีการสมาคมคอนกรีตอเมริกา หรือ ACI นั้นในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.35 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.1) มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในประเทศไทยเป็นอันดับที่สองจาก 5 วิธีที่

ทำการศึกษา เมื่อในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.55 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.2) มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองในประเทศไทยเป็นอันดับที่สามจาก 5 วิธีที่ทำการศึกษา และเมื่อในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.65 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.3) มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองในประเทศไทยเป็นอันดับที่สี่จาก 5 โมเดลที่ทำการศึกษา จากการสังเกตุแนวโน้มของกราฟนั้น วิธีของ ACI นั้นมีแนวโน้มออกห่างจากราฟผลการทดสอบในประเทศไทย จึงไม่เหมาะสมกับประเทศไทย

สำหรับการทดสอบตัวของคอนกรีตของบะซอน์ หรือวิธีของ Bazant นั้นในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.35 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.1) มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองในประเทศไทย เป็นอันดับสุดท้ายจาก 5 วิธีที่ทำการศึกษา เมื่อในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.55 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.2) และในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.65 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.3) มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองในประเทศไทยเป็นอันดับที่สองจาก 5 วิธีที่ทำการศึกษา จากการสังเกตุ แนวโน้มของกราฟนั้น วิธีของ Bazant นั้นมีแนวโน้มเข้าหาราฟผลการทดสอบในประเทศไทย เหมาะสมกับประเทศไทยถ้ามีมาพัฒนาต่อไปนี้เพิ่มขึ้น

สำหรับการทดสอบตัวของคอนกรีตของสมาคมคอนกรีตยุโรป ปี 1990 หรือวิธีของ CEB MC 90 นั้นในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.35 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.1) มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในประเทศไทยเป็นอันดับที่สามจาก 5 วิธีที่ทำการศึกษา เมื่อในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.55 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.2) และในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.65 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.3) มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในประเทศไทยเป็นอันดับสุดท้ายจาก 5 โมเดลที่ทำการศึกษา จากการสังเกตุแนวโน้มของกราฟนั้น วิธีของ CEB MC 90 นั้นมีแนวโน้มออกห่างจาก กราฟผลการทดสอบในประเทศไทย จึงไม่เหมาะสมกับประเทศไทย

สำหรับการทดสอบตัวของคอนกรีตของสมาคมคอนกรีตยุโรป ปี 1999 หรือโมเดล CEB MC 90-99 นั้นในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.35 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.1) มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองในประเทศไทยมากที่สุดเป็นอันดับหนึ่ง แต่ในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.55 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.2) มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองในประเทศไทยเป็นอันดับที่สี่จาก 5 วิธีที่ทำการศึกษา และเมื่อในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.65 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.3) มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองในประเทศไทยเป็นอันดับที่สามจาก 5 วิธีที่ทำการศึกษา จากการสังเกตุ แนวโน้มของกราฟนั้น วิธีของ CEB MC 90-99 นั้นมีแนวโน้มออกห่างจากราฟผลการทดสอบในประเทศไทย จึงไม่เหมาะสมกับประเทศไทย

สำหรับการทดสอบตัวของคอนกรีตขององค์กรดเนอร์ หรือวิธีของ GL2000 นั้นในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.35 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.1) มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบในประเทศไทย เป็นอันดับสี่จาก 5 วิธีที่ทำการศึกษา เมื่อในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.55 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.2) และในกรณีที่ค่า w/c เท่ากับ 0.65 (ใช้ข้อมูลในการคำนวณจากข้อ 4.2.3) มีความใกล้เคียง กับผลการทดลองในประเทศไทยมากที่สุดเป็นอันดับหนึ่ง จากการสังเกตุแนวโน้มของกราฟนั้น วิธีของ

GL2000 นั้นมีแนวโน้มเข้าหาก拉法ผลการทดสอบในประเทศไทย จึงเหมาะสมกับประเทศไทยมากที่สุดในทั้งหมด ถ้ามีมาพัฒนาไว้ก็เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจะสามารถใช้วิธีของ GL2000 ของการ์ดเนอร์ เป็นวิธีในการคำนวณหาค่าการทดสอบในประเทศไทยได้



4.6 ค่าการเบรี่ยบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของทฤษฎีกับผลการทดลอง

เนื่องการค่าการทดสอบตัวที่ได้จากการประมาณของแต่ละวิธีการมีค่าแตกต่างกัน เพื่อให้ง่ายต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้วิธีการที่มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงและมีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของภูมิภาค ต่างๆ จึงจำเป็นต้องคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดสอบตัวแต่ละวิธีการเมื่อเทียบกับผลการทดสอบจริง ในแต่ละช่วงเวลาเพื่อให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน ซึ่งวิธีการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

เบอร์เข็นต์ความคลาดเคลื่อน : $\%E_i$

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

โดย

J = ค่าการคีบตัวจากการทดลอง

J_i = ค่าการคีบตัวจากทฤษฎี

เบอร์เข็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย : $\%E_{AVE}$

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

ซึ่งจากการคำนวณค่าตามสมการได้ค่าความคลาดเคลื่อนของการทดสอบตัวในรูปแบบเบอร์เข็นตามตาราง

4.4, 4.5, และ 4.6

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสมาคมกับผลทดสอบจริง ($w/c = 0.35$)

วัน	ความคลาดเคลื่อน										
	ค่าการทดสอบของคอนกรีต ($w/c = 0.35$)										
	จากการทดลอง	วิธีของ ACI	วิธีของ Bazant	วิธีของ CEB 90	วิธีของ CEB90-99	วิธีของ GL2000					
j	J _i	%E _i	J _i	%E _i	J _i	%E _i	J _i	%E _i	J _i	%E _i	
7	0	0	0.000	0	0.000	0	0.000	37	0.000	0	0.000
8	78	14	81.959	40	49.045	65	16.731	105	35.218	67	14.329
10	150	40	73.337	69	54.118	110	26.744	155	3.457	112	25.148
12	192	63	67.018	89	53.749	138	27.876	186	3.009	141	26.548
14	228	84	62.968	105	53.952	160	29.768	211	7.345	163	28.603
15	230	94	59.021	112	51.224	169	26.294	222	3.362	172	25.339
17	252	112	55.326	125	50.287	185	26.407	240	4.648	187	25.536
21	312	145	53.608	148	52.638	211	32.311	269	13.679	212	32.011
28	366	190	48.094	179	50.939	242	33.704	306	16.293	242	33.763
35	390	225	42.268	205	47.401	265	32.023	333	14.513	263	32.459
44	416	260	37.419	231	44.300	286	31.264	359	13.598	282	32.104
63	461	311	32.521	271	41.198	314	31.918	393	14.869	308	33.315
84	489	348	28.921	298	39.043	333	31.891	416	15.000	325	33.637
92	493	358	27.360	305	38.108	339	31.367	423	14.270	329	33.230
105	515	373	27.658	314	39.052	346	32.868	432	16.179	336	34.872
115	527	382	27.537	319	39.500	350	33.543	438	16.946	340	35.617
130	535	394	26.422	324	39.410	356	33.468	445	16.878	345	35.635
145	545	404	25.988	328	39.872	361	33.864	451	17.300	348	36.103
168	547	416	24.063	331	39.500	366	33.061	458	16.323	354	35.414
189	555	424	33.193	333	47.620	371	41.617	464	26.956	357	43.801
272	567	447	31.784	335	48.942	381	41.778	477	27.199	366	44.152
$\%E_{max} =$		81.959	$\%E_{max} =$		54.118	$\%E_{max} =$		41.778	$\%E_{max} =$		35.218
$\%E_{ave} =$		40.013	$\%E_{ave} =$		42.979	$\%E_{ave} =$		29.300	$\%E_{ave} =$		13.728
											44.152
											29.983

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสมาคมกับผลทดสอบจริง ($w/c = 0.55$)

วัน	ความคลาดเคลื่อน										
	ค่าการทดสอบของคอนกรีต ($w/c = 0.55$)										
	จากการทดลอง	วิธีของ ACI		วิธีของ Bazant		วิธีของ CEB 90		วิธีของ CEB90-99		วิธีของ GL2000	
j	J _i	%E _i	J _i	%E _i	J _i	%E _i	J _i	%E _i	J _i	%E _i	
7	0	0	0.000	0	0.000	0	0.000	30	0.000	0	0.000
8	56	13	76.231	50	10.571	58	4.048	89	59.250	84	49.771
10	110	38	65.611	87	21.167	98	10.390	132	20.142	141	28.103
12	146	60	58.977	112	23.359	124	14.919	160	9.717	177	21.227
14	164	80	51.303	132	19.321	143	12.410	181	10.501	204	24.578
17	228	106	53.298	158	30.742	166	27.035	206	9.542	235	3.292
21	262	137	47.747	186	28.881	189	27.692	232	11.345	266	1.613
28	316	179	43.136	226	28.275	217	31.118	264	16.355	304	3.714
35	350	213	39.153	259	25.924	238	32.052	287	17.901	330	5.545
43	382	243	36.398	290	24.079	254	33.331	305	20.061	352	7.713
62	439	292	33.448	343	21.901	281	36.123	337	23.317	385	12.342
75	459	316	31.230	369	19.789	292	36.351	350	23.718	400	12.974
84	469	329	29.909	382	18.610	299	36.302	358	23.775	408	13.167
91	487	338	30.690	391	19.824	303	37.826	363	25.526	413	15.270
105	501	353	29.667	404	19.349	310	38.100	372	25.808	421	15.982
114	513	361	29.754	411	19.950	314	38.831	376	26.760	426	17.089
128	499	371	25.667	419	16.167	319	36.166	382	23.508	432	13.500
129	523	372	28.941	419	19.920	319	39.020	382	27.011	432	17.461
144	537	381	29.060	425	20.966	324	39.790	387	27.981	437	18.613
167	543	393	27.728	430	20.861	329	39.511	393	27.671	444	18.345
188	554	401	35.238	433	30.120	332	46.335	398	35.730	448	27.647
271	595	423	37.041	436	35.032	342	49.069	410	38.914	459	31.576
$\%E_{max} =$		76.231	$\%E_{max} =$		35.032	$\%E_{max} =$		49.069	$\%E_{max} =$		59.250
$\%E_{ave} =$		38.192	$\%E_{ave} =$		21.582	$\%E_{ave} =$		30.292	$\%E_{ave} =$		22.933
											16.342

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสมาคมกับผลทดสอบจริง ($w/c = 0.65$)

วัน	ความคลาดเคลื่อน										
	ค่าการทดสอบของคอนกรีต ($w/c = 0.65$)										
	จากการทดลอง	วิธีของ ACI		วิธีของ Bazant		วิธีของ CEB 90		วิธีของ CEB90-99		วิธีของ GL2000	
j	J _i	%E _i	J _i	%E _i	J _i	%E _i	J _i	%E _i	J _i	%E _i	
7	0	0	0.000	0	0.000	0	0.000	19	0.000	0	0.000
8	50	13	73.930	55	9.995	65	29.900	85	70.037	97	94.449
10	106	37	65.049	95	10.149	110	3.667	132	24.681	163	54.117
12	142	59	58.691	123	13.448	138	2.480	162	14.221	205	44.499
14	168	78	53.446	145	13.492	160	4.687	185	10.250	237	40.977
17	214	104	51.270	173	18.931	185	13.338	212	0.814	273	27.582
21	264	134	49.213	205	22.431	211	20.003	239	9.360	308	16.908
27	328	170	47.976	243	25.753	239	27.145	269	17.890	347	5.985
35	376	208	44.531	285	24.073	265	29.492	298	20.650	383	1.927
45	416	244	41.280	327	21.274	288	30.773	322	22.503	413	0.536
64	489	290	40.665	385	21.270	315	35.558	353	27.872	449	8.174
77	515	312	39.371	413	19.769	328	36.431	367	28.878	466	9.624
84	525	322	38.665	426	18.973	333	36.552	373	29.011	473	10.053
93	537	333	38.007	439	18.331	339	36.905	380	29.284	480	10.694
105	559	345	38.255	453	19.053	346	38.143	387	30.810	488	12.688
116	573	355	38.117	463	19.316	351	38.798	393	31.451	495	13.734
130	557	365	34.531	472	15.323	356	36.091	399	28.409	501	10.044
131	581	366	37.119	472	18.718	357	38.656	399	31.361	502	13.657
146	595	374	37.102	479	19.457	361	39.344	404	32.134	508	14.737
169	599	385	35.684	486	18.851	367	38.795	411	31.418	515	14.080
190	606	393	43.239	490	29.314	371	46.496	415	40.130	520	24.985
273	633	414	43.036	495	31.960	381	47.536	427	41.276	532	26.780
$\%E_{max} =$		73.930	$\%E_{max} =$		31.960	$\%E_{max} =$		47.536	$\%E_{max} =$		70.037
$\%E_{ave} =$		43.144	$\%E_{ave} =$		18.631	$\%E_{ave} =$		28.672	$\%E_{ave} =$		26.020
									$\%E_{max} =$		94.449
									$\%E_{ave} =$		20.738

4.7 กวิเคราะห์ผลการการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของทฤษฎีกับผลการทดลอง

จากการคำนวณค่าการทดสอบตัวของสมการต่าง ๆ ได้ค่าการทดสอบตัวที่แตกต่างกันไปตามวิธีของแต่ละสมาคม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบจริง เกิดความคลาดเคลื่อนกับค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณซึ่งความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ จะเป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยให้เห็นความแตกต่างกันได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ส่งผลให้การตัดสินใจในการเลือกใช้วิธีการในการคำนวณหาค่าการทดสอบตัวที่ใกล้เคียงกับแต่ละภูมิภาค ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามอัตราส่วน W/c ดังนี้

ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบจริงที่ ($w/c = 0.35$) ได้ผลว่า วิธีการของสมาคมที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่มีค่ามากที่สุดคือ วิธีของสมาคมคอนกรีตอเมริกา (ACI) ให้ค่าเบอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนถึง 81.959 % วิธีของสมาคมที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ วิธีการของสมาคมคอนกรีตยุโรป (CEB MC90-99 (CEB 1999))) ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 35.218 % และนอกจานี้ยังให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดด้วย ซึ่งให้ค่าเพียง 13.728 % และวิธีการที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากที่สุดคือ วิธีการของบازอนท์ (Bazant's Method) ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 42.979 % จากที่กล่าวมาทั้งหมดวิธีการที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ วิธีการของสมาคมคอนกรีตยุโรป (CEB MC90-99 (CEB 1999))

ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบจริงที่ ($w/c = 0.55$) ได้ผลว่า วิธีการของสมาคมที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่มีค่ามากที่สุดคือสมาคมคอนกรีตอเมริกา (ACI) ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงถึง 76.231 % นอกจากนี้ยังให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่มีค่าสูงสุดอีกด้วยซึ่งให้ค่าเท่ากับ 38.192 % วิธีที่ให้ค่าการทดสอบตัวสูงสุดมีค่าน้อยสุดคือ วิธีการของบازอนท์ (Bazant's Method) ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 35.032 % และวิธีการที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ วิธีการของการ์ดเนอร์ (GL2000) ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 16.342 %

ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบจริงที่ ($w/c = 0.65$) ได้ผลว่า วิธีการของสมาคมที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดมีค่ามากที่สุดคือ วิธีการของการ์ดเนอร์ (GL2000) ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 94.449 % วิธีการที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดมีค่าน้อยที่สุดคือ วิธีการของบازอนท์ (Bazant's Method) ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 31.360 % วิธีที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากที่สุดคือ วิธีของสมาคมคอนกรีตอเมริกา (ACI) ให้ค่าเท่ากับ 43.144 % และวิธีที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ วิธีการของบازอนท์ (Bazant's Method) ให้ค่าเท่ากับ 18.631 %

บทที่ 5

บทสรุป

จากการเปรียบเทียบค่าการทดสอบตัวที่คำนวณได้แต่ละวิธี และผลเปรียบเทียบค่าการทดสอบตัวที่คำนวณได้กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

จากการคำนวณโดยตัวแปรที่กำหนดให้คงที่ ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.75 อุณหภูมิเท่ากับ 28 องศาเซลเซียส ระยะเวลาของการบ่มเท่ากับ 7 วัน อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวเท่ากับ 16.57 มิลลิเมตร. ขนาดมวลรวมหนา 20 มิลลิเมตร. และเปอร์เซ็นต์ของอากาศเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกรณีส่วนผสมของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อสัดส่วนปูนที่ 0.55 และ 0.65 และมีกำลังอัดที่อายุ 28 วันอยู่ในช่วงระหว่าง 231-326 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการศึกษาพบว่าค่าการทดสอบตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการทั้ง 5 มีค่าเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยโดยค่าการทดสอบตัวที่คำนวณที่วิธีของ GL2000 มีค่าการทดสอบตัวสูงที่สุดรองลงมา คือ วิธีของ Bazant, CEB MC90-99, ACI และวิธีของ CEB MC90 ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อสัดส่วนปูนที่สุดประมาณมา คือ การคำนวณด้วยวิธีของ ACI, CEB MC90, GL2000 และวิธีของ Bazant ตามลำดับโดยเรียงจากมากไปหาน้อย และเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลทดสอบพบว่าทุกส่วนผสมค่าการทดสอบตัวที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าการคีบตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีทั้ง 5

5.2 ข้อเสนอแนะ

ปริญญาในพนธน์นี้เป็นเพียงแนวทางสำหรับการเลือกใช้สมการเพื่อคำนวณการทดสอบตัวของคอนกรีตเท่านั้น หากเลือกสมการที่จะนำไปใช้กับการประเมินการทดสอบตัวในประเทศไทยต้องมีการปรับปรุงเพื่อให้ค่าการทดสอบตัวที่ได้จากการคำนวณนั้นให้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

Carlos C.Videl. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage, and Creep in Hardened Concrete. ACI Committee 209.

Zdenek P.Bazant and Sandeep Baweja. 2001. Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3. Farmington Hills

James A.Rhodest. 1997. Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures.

David W.Mokarem . May 1, 2002. DEVELOPMENT OF CONCRETE SHRINKAGE PERFORMANCE SPECIFICATIONS. The Virginia Polytechnic Institute in State University

Zdenek P. Bazant. Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete . Northwestern University. Evanston. Illinois. USA



1. สมการคำนวณการหดตัวที่อายุของคอนกรีต (วัน) โดยวัดจากจุดเริ่มต้นของการอบแห้ง (A-1)

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = [(t-t_c)^\alpha / (f+(t-t_c)^\alpha)] \varepsilon_{shu}$$

2. สมการคำนวณค่าความเครียดสูงสุดของการหดตัว (A-2)

$$\varepsilon_{shu} = 780 \times 10^{-6}$$

3. สมการคำนวณค่าคงที่ของการหดตัว (A-3)

ในหน่วย SI

$$f = 26.0e^{[1.42 \times 10^{-2} (V/S)]}$$

ในหน่วย in.-lb.

$$f = 26.0e^{[0.36(V/S)]}$$

4. สมการคำนวณค่าเฉลี่ยของการหดตัวสูงสุด (A-4)

$$\varepsilon_{shu} = 780 \gamma_{sh} \times 10^6 \text{ mm/mm (in./in.)}$$

5. สมการปรับแก้การหดตัวของสมาคม ACI (A-5)

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,tc} \gamma_{sh,RH} \gamma_{sh,vs} \gamma_{sh,s} \gamma_{sh,p} \gamma_{sh,c} \gamma_{sh,\alpha}$$

6. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การบ่มชี้น (A-6)

$$\gamma_{sh,tc} = 1.202 - 0.2337 \log(t_c)$$

7. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ (A-7)

$$\gamma_{sh, RH} = 1.40 - 1.02h$$

สำหรับ $0.40 \leq h \leq 0.80$

$$\gamma_{sh, RH} = 3.00 - 3.0h$$

สำหรับ $0.80 \leq h \leq 1$

8. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์อัตราส่วนบริมาณพื้นผิwa (A-8)

ในหน่วย SI

$$\gamma_{sh,vs} = 1.2e^{-0.00472(v/s)}$$

ในหน่วย in-lb

$$\gamma_{sh,vs} = 1.2e^{-0.12(v/s)}$$

9. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การออบแห้ง ในช่วงปีแรกที่ออบแห้ง $(t - t_c) \leq 1$ ปี (A-9)

ในหน่วย SI

$$\gamma_{sh,d} = 1.23 - 0.0015d$$

$$\gamma_{sh,d} = 1.23 - 0.006(V/S)$$

ในหน่วย in-lb

$$\gamma_{sh,d} = 1.23 - 0.038d$$

$$\gamma_{sh,d} = 1.23 - 0.152(V/S)$$

10. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การออบแห้งสำหรับค่าสูงสุด, $(t - t_c) > 1$ ปี (A-10)

ในหน่วย SI

$$\gamma_{sh,d} = 1.17 - 0.00114d$$

$$\gamma_{sh,d} = 1.17 - 0.00456(V/S)$$

ในหน่วย in-lb

$$\gamma_{sh,d} = 1.17 - 0.029d$$

$$\gamma_{sh,d} = 1.23 - 0.116(V/S)$$

11. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัวของคอนกรีตสด (A-11)

ในหน่วย SI

$$\gamma_{sh,s} = 0.89 + 0.00161s$$

ในหน่วย in.-lb

$$\gamma_{sh,s} = 0.89 + 0.041s$$

12. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์มวลรวม (A-12)

$\gamma_{sh,\psi} = 0.30 + 0.014 \Psi$	สำหรับ $\Psi \leq 50\%$
$\gamma_{sh,\psi} = 0.90 + 0.002 \Psi$	สำหรับ $\Psi > 50\%$

13. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณซีเมนต์ (A-13)

ในหน่วย SI

$$\gamma_{sh,c} = 0.75 + 0.00061c$$

ในหน่วย in.-lb

$$\gamma_{sh,c} = 0.75 + 0.00036c$$

14. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณอากาศ (A-14)

$$\gamma_{sh,\alpha} = 0.95 + 0.008\alpha \geq 1$$

15. สมการคำนวณความเครียดของการหดตัวเฉลี่ย (A-15)

$$\epsilon_{sh}(t, t_c) = -\epsilon_{sh,0} k_h s (t - t_c)$$

16. สมการคำนวณค่าหดตัวสูงสุด (A-16)

$$\epsilon_{sh,0} = \epsilon_{so} E_{cm607} / E_{cm(t_c+t_{sh})}$$

17. สมการคำนวณค่าคงที่ของการหดตัว (A-17)

ในหน่วย SI

$$\epsilon_{so} = -\alpha_1 \alpha_2 [0.019 w^{2.1} f_{cm28}^{-0.28} + 270] \times 10^{-6}$$

ในหน่วย in.-lb

$$\epsilon_{so} = -\alpha_1 \alpha_2 [0.02565 w^{2.1} f_{cm28}^{-0.28} + 270] \times 10^{-6}$$

18. สมการคำนวณแฟกเตอร์สูงสุดของการหดตัว (A-18)

$$E_{cm607} / E_{cm(t_c+t_{sh})} = 1.167421 [(t_c + t_{sh}) / (4 + 0.85(t_c + t_{sh}))]$$

19. สมการคำนวณฟังก์ชันเวลาของการหดตัว (A-19)

$$S(t - t_c) = \tanh \sqrt{\frac{(t - t_c)}{\tau_{sh}}}$$

20. สมการคำนวณค่าการหดตัวครึ่งแรกของเวลาการหดตัวทั้งหมด (A-20)

ในหน่วย SI

$$\tau_{sh} = 0.085 t_c^{-0.08} f_{cm28}^{-0.25} [2k_s(V/S)]^2$$

ในหน่วย in-lb

$$\tau_{sh} = 190.8 t_c^{-0.08} f_{cm28}^{-0.25} [2k_s(V/S)]^2$$

21. สมการคำนวณมอดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ 28 วัน (A-21)

ในหน่วย SI

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

ในหน่วย in-lb

$$E_{cm28} = 57,000 \sqrt{f_{cm28}}$$

22. สมการคำนวณความเครียดในการหดตัวรวมของคอนกรีต (A-22)

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cso} \beta_s(t - t_c)$$

23. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การหดตัว (A-23)

$$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_s(f_{cm28}) \beta_{RH}(h)$$

24. สมการคำนวณค่าประมาณสัมประสิทธิ์การหดตัว (A-24)

$$\varepsilon_s(f_{cm28}) = [160 + 10 \beta_{sc} (9 - f_{cm28}/f_{cm0})] \times 10^{-6}$$

25. สมการคำนวณค่าประมาณสัมประสิทธิ์การหดตัว (A-25)

$$\beta_{RH}(h) = -1.55[1 - (\frac{h}{h_0})^3] \quad \text{เมื่อ } 0.4 \leq h < 0.99$$

26. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของการหดตัวกับเวลาของการอบแห้ง (A-26)

$$\beta_s(t - t_c) = [\{ (t - t_c)/t_1 \} / \{ 350 [(V/S)/(V/S)_0]^2 + (t - t_c)t_1 \}]^{0.5}$$

27. สมการคำนวณค่าปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์แก่ไขโดยอุณหภูมิที่ใช้แทนที่ β_{RH} (A-27)

ในหน่วย SI

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH}(h) [1 + (0.08 / \{1.03 - h/h_0\}) (\{T/T_0 - 20\} / 40)]$$

ในหน่วย In-lb

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH}(h) [1 + (0.08 / \{1.03 - h/h_0\}) (\{18.778T/T_0 - 37.778\} / 40)]$$

28. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิชื้นอยู่กับการแทนที่ β_s ($t - t_c$) (A-28)

ในหน่วย SI

$$\beta_{s,T}(t - t_c) = \left[\frac{(t - t_c)/t_1}{350 \left[\frac{\dot{s}}{V} \right]^2 \exp \left[-0.06 \left(\frac{T}{T_0} - 20 \right) \right] + \frac{(t - t_c)}{t_1}} \right]^{0.5}$$

ในหน่วย In-lb

$$\beta_{s,T}(t - t_c) = \left[\frac{(t - t_c)/t_1}{350 \left[\frac{\dot{s}}{V} \right]^2 \exp \left[-0.06 \left(18.778 \frac{T}{T_0} - 37.778 \right) \right] + \frac{(t - t_c)}{t_1}} \right]^{0.5}$$

29. สมการคำนวณการหดตัวรวมของคอนกรีต (A-29)

$$\epsilon_{sh}(t, t_c) = \epsilon_{cas}(t) + \epsilon_{cds}(t, t_c)$$

30. สมการคำนวณองค์ประกอบของการหดตัว ตามธรรมชาติ (A-30)

$$\epsilon_{cas}(t) = \epsilon_{caso}(f_{cm28}) \beta_{as}(t)$$

31. สมการคำนวณค่าประมาณสัมประสิทธิ์การหดตัวตามธรรมชาติ (A-31)

$$\epsilon_{caso}(f_{cm28}) = -\alpha_{as} [(f_{cm28}/f_{cm0}) / \{ 6 + (f_{cm28}/f_{cm0}) \}]^{2.5} \times 10^{-6}$$

32. สมการคำนวณเวลาในการพัฒนาของการหดตัวตามธรรมชาติ (A-32)

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp[-0.2(t/t_1)^{0.5}]$$

33. สมการคำนวณการหดตัวอ卜แห้ง (A-33)

$$\epsilon_{cds}(t, t_c) = \epsilon_{cdso}(f_{cm28}) \beta_{RH}(h) \beta_{ds}(t - t_c)$$

34. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวอบแห้ง (A-34)

$$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28}) = [(220 + |10a_{ds}|) \exp(-a_{ds2} f_{cm28}/f_{cm0})] \times 10^{-6}$$

35. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนึงถึงผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการหดตัวอบแห้ง (A-35)

$$\beta_{RH}(h) = -1.55[1 - (h/h_o)^3] \quad \text{for } 0.4 \leq h < 0.99\beta_{sl}$$

36. สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนึงถึงผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการหดตัวอบแห้งที่ 1 วัน (A-36)

$$\beta_{s1} = [(3.5f_{cm0})/(f_{cm28})]^{0.1}$$

37. สมการที่ใช้อธิบายการศึกษาการเพิ่มเติมของเวลาของการหดตัวอบแห้ง (A-37)

$$\beta_{ds}(t - t_c) = [\{(t - t_c)/t_1\} / \{350[(V/S)/(V/S)_0]^2 + (t - t_c)/t_i\}]^{0.5}$$

38. สมการคำนวณกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต (A-38)

$$f_{cm28} = 1.1f'c + 5.0 \quad \text{ในหน่วย SI}$$

$$f_{cm28} = 1.1f'c + 700 \quad \text{ในหน่วย in.-lb}$$

39. สมการคำนวณค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีต (A-39)

ในหน่วย SI

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

ในหน่วย in.-lb

$$E_{cmt} = 500,000 + 52,000\sqrt{f_{cmt}}$$

40. สมการหาค่าความแข็งแรงที่เวลาใดๆ (A-40)

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

41. สมการสัมประสิทธิ์การหดตัวของการอบแห้งเนื่องจากเวลา (A-41)

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

42. สมการคำนวณความเครียดในการหดตัว (A-42)

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{shu} \beta(h) \beta(t - t_c)$$

43. สมการคำนวณค่าความเครียดสูงสุดของการหดตัว (A-43)

ในหน่วย SI

$$\varepsilon_{shu} = 900k[30/f_{cm28}]^{0.5} \times 10^{-6}$$

ในหน่วย in-lb

$$\varepsilon_{shu} = 900k[4350/f_{cm28}]^{0.5} \times 10^{-6}$$

44. สมการคำนวณค่าที่ปรับแก้ความชื้น (A-44)

$$\beta(h) = (1 - 1.18h^4)$$

45. สมการการบวมชั้นฟังก์ชันเวลาการหดตัว (A-45)

ในหน่วย SI

$$\beta(t - t_c) = [(t - t_c)/((t - t_c) + 0.12(V/S)^2)]^{0.5}$$

ในหน่วย in-lb

$$\beta(t - t_c) = [(t - t_c)/((t - t_c) + 77(V/S)^2)]^{0.5}$$



ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การบ่มชื้น, $\gamma_{sh,tc}$

Moist curing duration (t_c) days	$\gamma_{sh,tc}$
1	1.2
3	1.1
7	1
14	0.93
28	0.86
90	0.75

ที่มา: ACI 209R-92 model

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การอบแห้ง, $\gamma_{sk,d}$

Average thickness of member d, mm (in.)	Volume/surface ratio V/S, mm (in.)	Shrinkage factor $\gamma_{sk,d}$
51 (2)	12.5 (0.50)	1.35
76 (3)	19 (0.75)	1.25
102 (4)	25 (1.00)	1.17
127 (5)	31 (1.25)	1.08
152 (6)	37.5 (1.50)	1

ที่มา: ACI 209R-92 model

ตารางที่ 2.3 แสดงแฟกเตอร์ของความชื้น, k_h

Relative humidity	k_h
$h \leq 0.98$	$1-h^3$
$h=1.00$	-0.2
$0.98 < h < 1.00$	$12.74 - 12.94h$

ที่มา: B3 model

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ของประเภทซีเมนต์, α_1

Type of cement	α_1
Type I	1
Type II	0.85
Type III	1.1

ที่มา: B3 model

ตารางที่ 2.5 ค่าสภาพการบ่ม, α_2

Curing	α_2
Steam curing	0.75
Cured in water or at 100% relative humidity	1
Sealed during curing or normal curing in air with initial protection against drying	1.2

ที่มา: B3 model

ตารางที่ 2.6 สัมประสิทธิ์ปร่างหน้าตัด, k_s

Cross section shape	k_s
Infinite slab	1
Infinite cylinder	1.15
Infinite square prism	1.25
Sphere	1.3
Cube	1.55

ที่มา: B3 model

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์, β_{sc}

Type of cement according to Ec2	β_{sc}
SL (slowly-hardening cements)	4
N and R (normal or rapid hardening cements)	5
RS (rapid hardening high-strength cements)	8

ที่มา: CEB MC90 model

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์, α_{as} , α_{ds1} และ α_{ds2}

Type of cement according to EC2	α_{as}	α_{ds1}	α_{ds2}
SL (slowly-hardening cements)	800	3	0.13
Nor R (normal or rapid hardening cements)	700	4	0.12
RS (rapid hardening high-strength cements)	600	6	0.12

ที่มา: CEB MC90-99 model

ตารางที่ 2.9 แสดงค่าคงที่การหดตัวที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ , ค่า s และค่า k

Cement type	s	k
Type I	0.335	1.00
Type II	0.400	0.75
Type III	0.130	1.15

ที่มา: GL2000 model

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายพงศกร คำชุมภู
ภูมิลำเนา 187 หมู่ 4 ต. สถาน อ. ป่า จ. น่าน

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนป่า
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยแม่ฟ้า

E-mail: p.kamchumpu@gmail.com



ชื่อ นายนพรัตน์ เพือกอ่อน
ภูมิลำเนา 49/1 หมู่ 12 ต. ตอนทอง อ. เมือง จ. พิษณุโลก

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพุทธชินราช
พิทยา
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยแม่ฟ้า

E-mail: nopparat_work@hotmail.com