

## บทที่ 2

### วิธีการขององค์กรต่างๆ และ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 1 บทนำ

ประเทศที่เป็นผู้นำทางวิชาการตลอดจนนักวิชาการชั้นนำของโลก มีการพัฒนาวิธีการจากค่าการทดลองของคอนกรีตในท้องถิ่นขึ้นมาใช้ในการประมาณค่าการคืบและการหดตัวของคอนกรีต เพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตในท้องถิ่นนั้น ซึ่งองค์กรต่างๆที่นำมาศึกษาในงานวิจัยมีดังนี้ สมาคมคอนกรีตอเมริกา, สมาคมคอนกรีตยุโรป, สมาคมมาตรฐานอังกฤษ, วิธีการของบาซอนท์ เป็นต้น

การประมาณค่าการคืบและการหดตัวในสำหรับงานวิจัยนี้ ได้นำสมมติฐานเส้นทางการแห้งตัวของ Vadhanavikkit C. และ Bryant A.H.แนะนำไว้ในวารสารวัสดุของสมาคมคอนกรีตอเมริกา ปี 1987 มาใช้แทนอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวเพื่อการศึกษาค่าของการคืบและการหดตัวที่แตกต่างกันโดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติในการเปรียบเทียบ และนำวิธีการประมาณค่าในช่วงมาใช้ในการประมาณค่าตัวเลขของตารางตัวเลข เพื่อให้ได้ตัวเลขที่เหมาะสม

#### 2 สมาคมคอนกรีตอเมริกา

ปี 1971 และปี 1992(1982) สมาคมคอนกรีตอเมริกาได้แนะนำวิธีการประมาณค่าการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต โดยวิธีการทั้ง 2 ปี มีความแตกต่างกันในสมการของการหดตัว ข้อกำหนดต่างๆของสมาคมคอนกรีตอเมริกามีดังนี้

##### 2.1 สมาคมคอนกรีตอเมริกา ปี 1971

###### 2.1.1 การคืบ

ความเครียดของการคืบ(creep strain) ที่อายุ  $t$  ประมาณค่าจากสัมประสิทธิ์ของการคืบ (creep coefficient) ดังสมการที่ 2.1

$$\varepsilon_{\text{creep}}(t) = \frac{\sigma}{E_c(t_0)} v_t \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\varepsilon_{\text{creep}}(t)$  = ความเครียดของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ  $t$   
 $\sigma$  = หน่วยแรงที่กระทำต่อคอนกรีต (MPa)  
 $E_c(t_0)$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ  $t_0$  (MPa)  
 $v_t$  = สัมประสิทธิ์ของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ  $t$   
 $t$  = อายุของคอนกรีต (วัน)  
 $t_0$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)

กรณีที่ไม่มีการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ  $t_0$  สามารถประมาณค่าจากกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ  $t_0$  และกรณีที่ไม่มีการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ  $t_0$  สามารถประมาณค่าได้จากกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน ดังแสดงสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$E_c(t_0) = 0.043 [w^3 \cdot fc'(t_0)]^{1/2} \quad (2.2)$$

$$fc'(t_0) = \frac{t_0}{(a + \beta t_0)} fc'(28) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_c(t_0)$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ  $t_0$  (MPa)

$t_0$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)

$w$  = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$fc'(t_0)$  = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ที่อายุ  $t_0$  (MPa)

$fc'(28)$  = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ที่อายุ 28 วัน (MPa)

$a$  และ  $\beta$  = ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับวิธีการบ่มและประเภทของปูนซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.1

สัมประสิทธิ์ของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ  $t$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.4 โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการคืบสูงสุด(ultimate creep coefficient) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.5 และปรับแก้ด้วยแฟกเตอร์ปรับแก้ค่าในสมการที่ 2.6 เป็นค่าที่ปรับแก้สภาวะต่างๆที่ไม่อยู่ในสภาวะมาตรฐาน

$$V_t = \frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} V_u \quad (2.4)$$

สมการที่ 2.4 สำหรับอายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนักที่ 7 วันในการบ่มขึ้น หรือ อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนักที่ 1-3 วัน ในการบ่มใต้น้ำ

$$V_u = 2.35 \gamma_c \quad (2.5)$$

$$\gamma_c = \gamma_a \cdot \gamma_\lambda \cdot \gamma_h \cdot \gamma_s \cdot \gamma_\psi \cdot \gamma_\alpha \quad (2.6)$$

เมื่อ  $t$  = อายุของคอนกรีต (วัน)

$t_0$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)

$V_t$  = สัมประสิทธิ์ของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ  $t$

$V_u$  = สัมประสิทธิ์ของการคืบสูงสุด

$\gamma_c$  = แฟกเตอร์ปรับแก้ค่าในสภาวะต่างๆ

$\gamma_a$  = แฟกเตอร์อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก แสดงในสมการที่ 2.7 และ 2.8

$\gamma_\lambda$  = แฟกเตอร์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม แสดงในสมการที่ 2.9

$\gamma_h$  = แฟกเตอร์ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วน แสดงในสมการที่ 2.10 และ 2.11

$\gamma_s$  = แฟกเตอร์ค่ายุบตัว แสดงในสมการที่ 2.12

$\gamma_\psi$  = แฟกเตอร์เปอร์เซ็นต์มวลรวมละเอียด แสดงในสมการที่ 2.13

$\gamma_\alpha$  = แฟกเตอร์เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศ แสดงในสมการที่ 2.14

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่  $\alpha$  และ  $\beta$ 

ชนิดของการบ่ม	ประเภทของปูนซีเมนต์	ค่าคงที่	
		A	$\beta$
บ่มชื้น	I	4.0	0.85
	III	2.3	0.92
บ่มไอน้ำ	I	1.0	0.95
	III	0.7	0.98

(ACI, Part I, 2000)

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสภาวะมาตรฐานการคืบของสมาคมคอนกรีตอเมริกา

แฟกเตอร์	ค่าสภาวะมาตรฐาน
อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก	
-บ่มชื้น	7 วัน
-บ่มไอน้ำ	1-3 วัน
ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม	40 %
ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วน	150 มม.
ค่ายุบตัว	70 มม.
เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียด	50 %
เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศ	$\leq 6 \%$
อัตราส่วนของหน่วยแรงต่อกำลังคอนกรีต	$\leq 0.50$
ประเภทของปูนซีเมนต์	I และ III

(ACI, Part I, 2000)

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวและการคืบของความหนาเฉลี่ย

ความหนาเฉลี่ย		สัมประสิทธิ์การคืบ: $\gamma_h$		สัมประสิทธิ์การหดตัว: $\gamma_s$	
นิ้ว	มม.	$\leq 1$ ปี	ค่าสูงสุด	$\leq 1$ 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

( ACI, Part I, 2000)

แฟกเตอร์ปรับแก้ค่าใช้ในสภาวะของชิ้นส่วนไม่ตรงกับสภาวะมาตรฐานที่มีค่าปรับแก้เท่ากับหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 2.2 แฟกเตอร์ปรับแก้ค่าสามารถคำนวณได้ดังนี้

1. อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก

สำหรับคอนกรีตที่ทำการบ่มชื้น และอายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนักมากกว่า 7 วันขึ้นไป ต้องปรับแก้ค่าตามสมการที่ 2.7 ส่วนของคอนกรีตที่ทำการบ่มไอน้ำ และอายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก 1-3 วันขึ้นไป ต้องปรับแก้ค่าตามสมการที่ 2.8

สำหรับคอนกรีตบ่มชื้นและอายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนักมากกว่า 7 วันขึ้นไป:

$$\gamma_{la} = 1.25(t_o)^{-0.118} \quad (2.7)$$

สำหรับคอนกรีตบ่มไอน้ำและอายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก 1-3 วันขึ้นไป:

$$\gamma_{la} = 1.13(t_o)^{-0.094} \quad (2.8)$$

2. ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม

สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมที่มีค่ามากกว่า 40 % ปรับแก้จากสมการที่ 2.9 ส่วนของค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมที่มีค่าต่ำกว่า 40 % แฟกเตอร์สำหรับการคืบมีค่ามากกว่า 1 แต่สภาพความเป็นจริงไม่มีการใช้งาน

$\lambda > 40\%$  :

$$\gamma_{\lambda} = 1.27 - 0.0067\lambda \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\lambda$  = ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม (%)

3. ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วน (average thickness of member)

ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วนที่มีค่าน้อยกว่า 150 มม. ปรับแก้ค่าในตารางที่กำหนดให้ตารางที่ 2.3 ส่วนความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วนมีค่ามากกว่า 150 มม. แต่น้อยกว่า 380 มม. ปรับแก้จากสมการที่ 2.10 สำหรับระยะเวลาหลังจากเริ่มรับน้ำหนักไม่เกิน 1 ปี และปรับแก้จากสมการที่ 2.11 สำหรับระยะเวลาหลังจากเริ่มรับน้ำหนักมากกว่า 1 ปี

สำหรับ 150 มม. < h < 380 มม.

$t-t_o \leq 1$  ปี :

$$\gamma_h = 1.14 - 0.00092h \quad (2.10)$$

$t-t_o > 1$  ปี :

$$\gamma_h = 1.10 - 0.00067h \quad (2.11)$$

เมื่อ  $h = 4 \frac{v}{s}$

$v$  = ปริมาตรของคอนกรีต (มม.<sup>3</sup>)

$s$  = พื้นที่ผิวที่แห้งตัว (มม.<sup>2</sup>)

4. ค่ายุบตัว

$$\gamma_s = 0.82 + 0.00264s \quad (2.12)$$

เมื่อ  $s$  = ค่าความยุบตัวของคอนกรีตสด (มม.)

5. เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด

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

เมื่อ  $\psi$  = มวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (%)

6. เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศ

$$\gamma_{\alpha} = 0.46 + 0.09\alpha \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\alpha$  = ปริมาณอากาศ (%)

### 2.1.2 การหดตัว

ความเครียดของการหดตัว (shrinkage strain) ที่คอนกรีตอายุ  $t$  ขึ้นอยู่กับวิธีการบ่มคอนกรีต สำหรับวิธีการบ่มชื้น ที่มีระยะเวลาการบ่มชื้น 7 วัน ใช้สมการที่ 2.15 สำหรับวิธีการบ่มไอน้ำ ที่มีระยะเวลาการบ่มไอน้ำ 1-3 วัน ใช้สมการที่ 2.16

สำหรับการบ่มชื้น :

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{(t - t_{sh})}{35 + (t - t_{sh})} \epsilon_{shu} \quad (2.15)$$

สำหรับการบ่มไอน้ำ:

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{(t - t_{sh})}{55 + (t - t_{sh})} \epsilon_{shu} \quad (2.16)$$

- เมื่อ  $\epsilon_{sh}(t)$  = ความเครียดของการหดตัว ที่คอนกรีตอายุ  $t$
- $\epsilon_{shu}$  = ความเครียดของการหดตัวสูงสุด (ultimate shrinkage strain)
- $t$  = อายุของคอนกรีต (วัน)
- $t_{sh}$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มปล่อยแห้งตัว (วัน)

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าสภาวะมาตรฐานการหดตัวของสมาคมคอนกรีตอเมริกา

แฟกเตอร์	ค่าสภาวะมาตรฐาน
ระยะเวลาการบ่มชื้น	7 วัน
ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม	40 %
ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วน	150 มม.
ค่ายุบตัว	70 มม.
เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียด	50 %
เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศ	$\leq 6$ %

(ACI, Part I, 2000)

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การหดตัว เนื่องจากการระยะเวลาการบ่ม

ระยะเวลาการบ่มคอนกรีต	สัมประสิทธิ์การหดตัว : $\gamma_{cp}$
1	1.2
3	1.1
7	1.0
14	0.93
28	0.86
90	0.75

(ACI, Part I, 2000)

ความเครียดของการหดตัวสูงสุดขึ้นอยู่กับวิธีการบ่มคอนกรีต สำหรับการบ่มชื้นใช้สมการที่ 2.17 และสำหรับการบ่มไอน้ำใช้สมการที่ 2.18 และปรับแก้ด้วยแฟกเตอร์ปรับแก้ค่าในสมการที่ 2.19 เป็นค่าที่ปรับแก้สถานะต่างๆที่ไม่อยู่ในสภาวะมาตรฐาน สำหรับการบ่มชื้น :

$$\epsilon_{shu} = 800 \gamma_{sh} \times 10^{-6} \quad (2.17)$$

สำหรับการบ่มไอน้ำ :

$$\epsilon_{shu} = 730 \gamma_{sh} \times 10^{-6} \quad (2.18)$$

$$\gamma_{sh} = \gamma_{cp} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot \gamma_h \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{\psi} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_{\alpha} \quad (2.19)$$

เมื่อ  $\gamma_{sh}$  = แฟกเตอร์ปรับแก้ค่าในสภาวะต่างๆ

$\gamma_{cp}$  = แฟกเตอร์ระยะเวลาการบ่มชื้น แสดงในตารางที่ 2.4

$\gamma_{\lambda}$  = แฟกเตอร์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม แสดงในสมการที่ 2.20 และ 2.21

$\gamma_h$  = แฟกเตอร์ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วน แสดงในสมการที่ 2.22 และ 2.23

$\gamma_s$  = แฟกเตอร์ค่ายุบตัว แสดงในสมการที่ 2.24

$\gamma_{\psi}$  = แฟกเตอร์เปอร์เซ็นต์มวลรวมละเอียด แสดงในสมการที่ 2.25 และ 2.26

$\gamma_c$  = แฟกเตอร์ปริมาณซีเมนต์ แสดงในสมการที่ 2.27

$\gamma_{\alpha}$  = แฟกเตอร์เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศ แสดงในสมการที่ 2.28

แฟกเตอร์ปรับแก้ค่าใช้ในสภาวะของชิ้นส่วนไม่ตรงกับสภาวะมาตรฐานที่มีค่าปรับแก้เท่ากับหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 2.4 แฟกเตอร์ปรับแก้ค่าสามารถคำนวณได้ดังนี้

1. ระยะเวลาของการบ่มชื้น

สำหรับคอนกรีตที่ทำการบ่มขึ้น และมีระยะเวลาของการบ่มคอนกรีตตั้งแต่ 1 ถึง 90 วัน ต้องปรับแก้ค่าตามตารางที่ 2.5 ค่าในช่วงตารางให้ประมาณค่าเป็นเชิงเส้น

## 2. ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม

สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมที่มีค่ามากกว่า 40 % แต่น้อยกว่า 80 % ใช้สมการที่ 2.20 และสำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมที่มีค่ามากกว่า 80 % ขึ้นไป ใช้สมการที่ 2.21 ส่วนของค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมที่มีค่าต่ำกว่า 40 % ค่าแฟกเตอร์สำหรับการหดตัวมีค่ามากกว่า 1 แต่สภาพความเป็นจริงไม่มีการใช้งาน

$40\% < \lambda \leq 80\%$  :

$$\gamma\lambda = 1.40 - 0.010\lambda \quad (2.20)$$

$\lambda > 80\%$  :

$$\gamma\lambda = 3.00 - 0.030\lambda \quad (2.21)$$

เมื่อ  $\lambda$  = ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม (%)

## 3. ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วน

ความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วนที่มีค่าน้อยกว่า 150 มม. ปรับแก้ค่าในตารางที่กำหนดให้ตารางที่ 2.3 ส่วนความหนาเฉลี่ยของชิ้นส่วนมีค่ามากกว่า 150 มม. แต่น้อยกว่า 380 มม. ปรับแก้จากสมการที่ 2.22 สำหรับระยะเวลาหลังจากเริ่มปล่อยแห้งตัวไม่เกิน 1 ปี และปรับแก้จากสมการที่ 2.23 สำหรับระยะเวลาหลังจากเริ่มปล่อยแห้งตัวมากกว่า 1 ปี

สำหรับ  $150 \text{ มม.} < h < 380 \text{ มม.}$

$t - t_{sh} \leq 1$  ปี :

$$\gamma h = 1.23 - 0.0015h \quad (2.22)$$

$t - t_{sh} > 1$  ปี :

$$\gamma h = 1.17 - 0.00114h \quad (2.23)$$

เมื่อ  $h = 4 \frac{v}{s}$

$v$  = ปริมาตรของคอนกรีต (มม.<sup>3</sup>)

$s$  = พื้นที่ผิวที่แห้งตัว (มม.<sup>2</sup>)

## 4. ค่ายุบตัว

$$\gamma_s = 0.89 + 0.00161s \quad (2.24)$$

เมื่อ  $s$  = ค่าความยุบตัวของคอนกรีตสด (มม.)

## 5. เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด

เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดน้อยกว่าเท่ากับ 50 ใช้สมการที่ 2.25 ส่วนเปอร์เซ็นต์ที่มีค่ามากกว่า 50 ขึ้นไป ใช้สมการที่ 2.26

$\psi \leq 50\%$  :

$$\gamma\psi = 0.30 + 0.014\psi \quad (2.25)$$

$\psi > 50\%$  :

$$\gamma_{\psi} = 0.90 + 0.002\psi \quad (2.26)$$

เมื่อ  $\psi$  = มวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (%)

6. ปริมาณของปูนซีเมนต์

$$\gamma_c = 0.75 + 0.00061c \quad (2.27)$$

เมื่อ  $c$  = ปริมาณของปูนซีเมนต์ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

7. เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศ

$$\gamma_{\alpha} = 0.95 + 0.008\alpha \quad (2.28)$$

เมื่อ  $\alpha$  = ปริมาณอากาศ (%)

## 2.2 สมาคมคอนกรีตอเมริกา ปี 1992(1982)

### 2.2.1 การคืบ

ความเครียดของการคืบที่อายุ  $t$  คำนวณเหมือนปี 1971 โดยใช้สมการที่ 2.1 ถึง 2.14 ฉะนั้นความเครียดของการคืบปี 1992 เหมือนปี 1971

### 2.2.2 การหดตัว

ความเครียดของการหดตัวที่คอนกรีตอายุ  $t$  คำนวณเหมือนปี 1971 ยกเว้นสมการคำนวณหาค่าความเครียดของการหดตัวสูงสุด คือสมการที่ 2.17 และ 2.18 สมาคมคอนกรีตอเมริกาได้แนะนำสมการที่ 2.29 แทนสำหรับการบ่มชื้น และการบ่มไอน้ำ

$$\epsilon_{shu} = 780 \gamma_{sh} \times 10^{-6} \quad (2.29)$$

## 3 สมาคมคอนกรีตยุโรป

ปี 1970, ปี 1978 และปี 1990 สมาคมคอนกรีตยุโรปได้แนะนำวิธีการประมาณค่าการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต ข้อกำหนดต่างๆของสมาคมคอนกรีตยุโรปมีดังนี้

### 3.1 สมาคมคอนกรีตยุโรป ปี 1970

#### 3.1.1 การคืบ

ความเครียดของการคืบที่อายุ  $t$  ประมาณค่าจากสัมประสิทธิ์ของการคืบ ดังสมการที่ 2.30

$$\epsilon_{creep}(t) = \frac{\sigma}{E_c(28)} \phi(t) \quad (2.30)$$

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

$\sigma$  = หน่วยแรงที่กระทำต่อคอนกรีต (MPa)

$E_c(28)$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

$\phi(t)$  = สัมประสิทธิ์ของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ  $t$

$t$  = อายุของคอนกรีต (วัน)

กรณีที่ไม่มีการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน สามารถประมาณค่าจากกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน ดังแสดงสมการที่ 2.31

$$E_c(28) = 6.6\sqrt{f'_c(28)} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $E_c(28)$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (GPa)

$f'_c(28)$  = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ที่อายุ 28 วัน (MPa)

สัมประสิทธิ์ของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ  $t$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.32 โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการคืบเป็นผลคูณของค่าปรับแก้ตามสภาวะต่างๆ ดังนี้

$$\phi(t) = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \quad (2.32)$$

เมื่อ  $k_1$  = สัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม ดังภาพที่ 2.1

$k_2$  = สัมประสิทธิ์อายุคอนกรีตเริ่มรับน้ำหนัก ดังภาพที่ 2.2

$k_3$  = สัมประสิทธิ์ส่วนประกอบคอนกรีต ดังภาพที่ 2.3

$k_5$  = สัมประสิทธิ์การพัฒนาคืบกับเวลา ดังภาพที่ 2.5

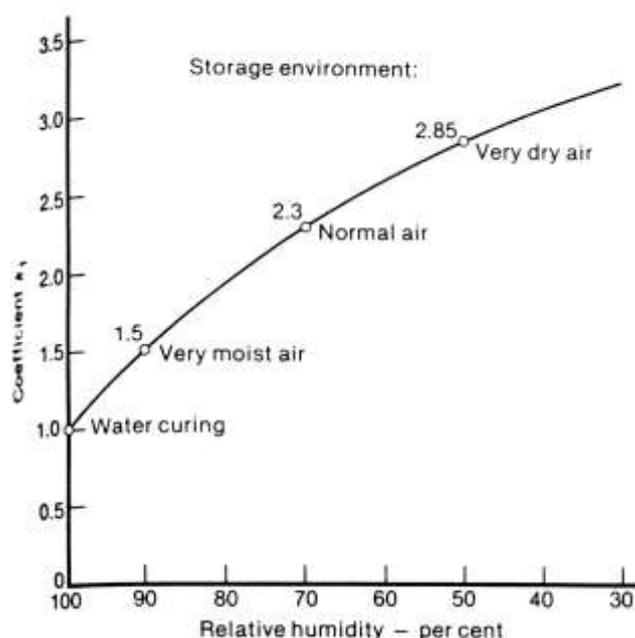
$k_4$  = สัมประสิทธิ์ความหนาของชั้นส่วน ดังภาพที่ 2.4

ใช้ค่าความหนาของชั้นส่วน (theoretical thickness) :  $h_o$

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

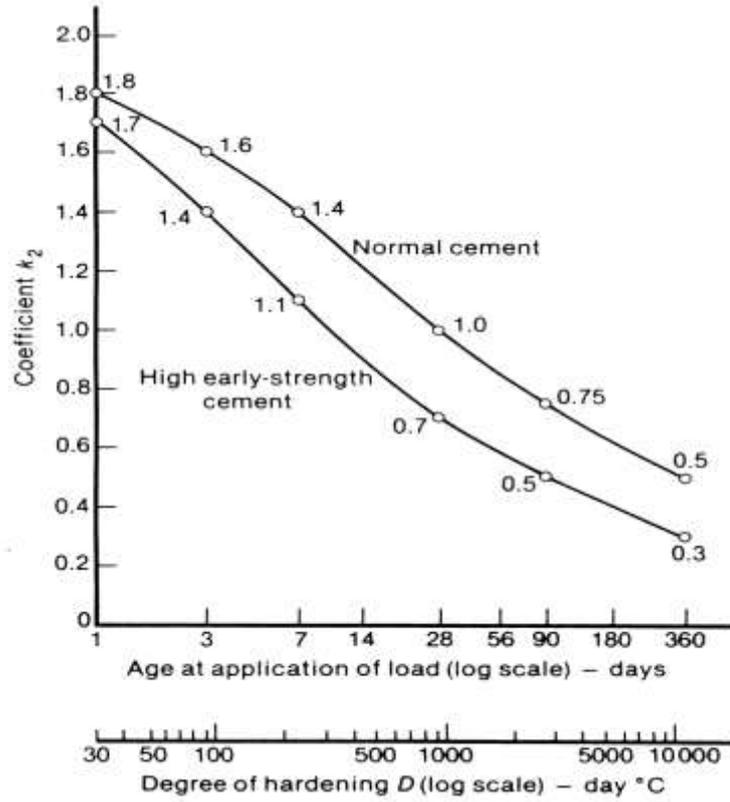
$Ac$  = พื้นที่หน้าตัดของชั้นส่วน (มม.<sup>2</sup>)

$u$  = เส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดที่จะแห้งตัว (มม.)

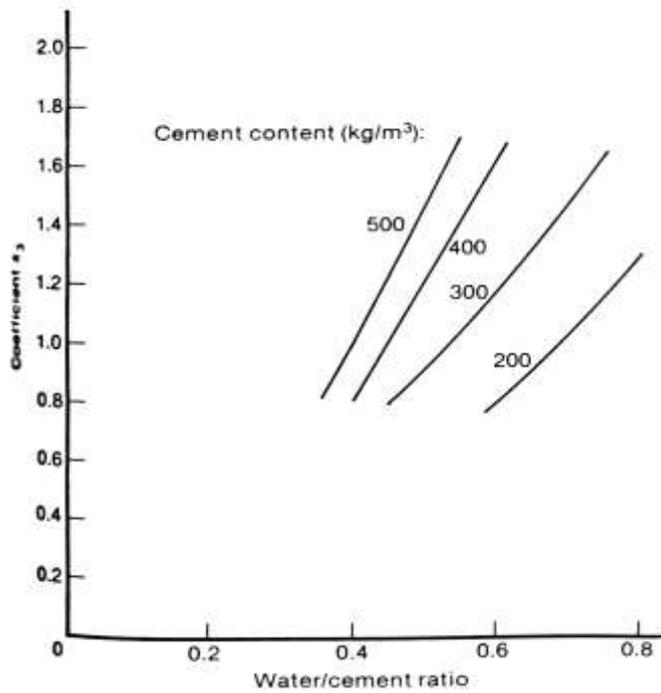


ภาพที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมของการคืบ:CEB-FIP 70

(Neville et al., 1983)

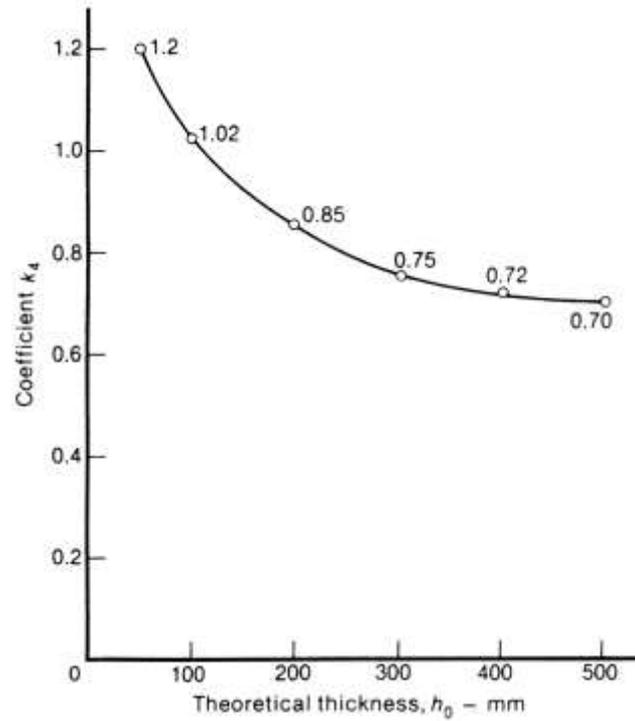


ภาพที่ 2.2 สัมประสิทธิ์อายุคอนกรีตเริ่มรับน้ำหนักของการคืบ:CEB-FIP 70 (Neville et al., 1983)

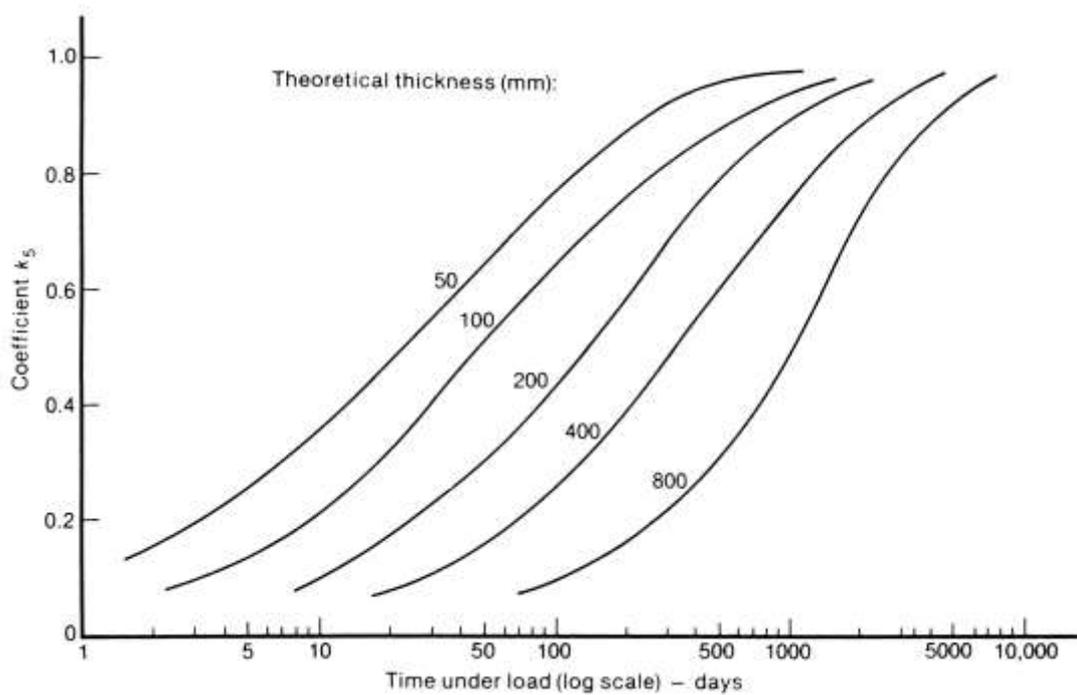


ภาพที่ 2.3 สัมประสิทธิ์ส่วนประกอบคอนกรีตของการคืบและการหดตัว:CEB-FIP 70

(Neville et al., 1983)



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



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

3.1.2 การหดตัว

ความเครียดของการหดตัวที่คอนกรีตอายุ t ประมาณค่าได้จากสัมประสิทธิ์ของสภาวะต่างๆ ความเครียดของการหดตัวหาได้จากสมการที่ 2.33

$$\epsilon_{sh}(t) = k_1 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \tag{2.32}$$

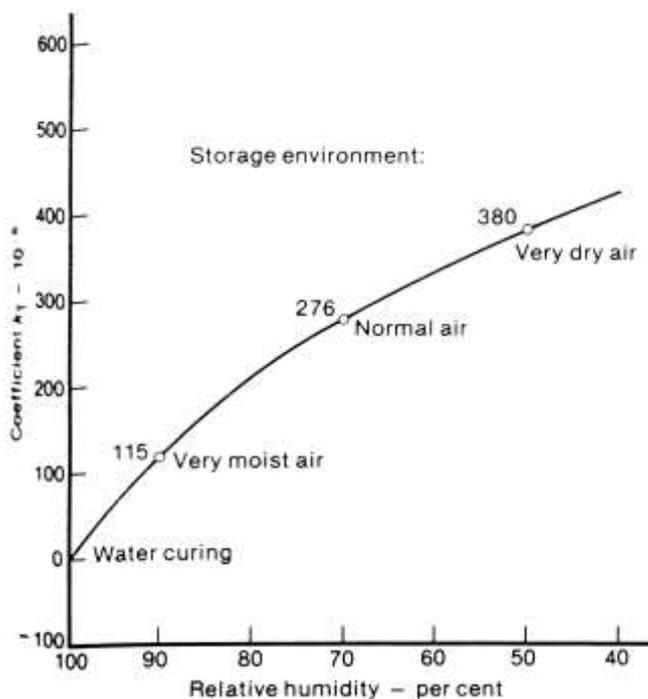
- เมื่อ  $k_1$  = สัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม ( $10^{-6}$ ) ดังภาพที่ 2.6
- $k_3$  = สัมประสิทธิ์ส่วนประกอบคอนกรีตใช้เหมือนกันกับการหาค่าการคืบ ดังภาพที่ 2.3
- $k_5$  = สัมประสิทธิ์การพัฒนาคืบกับเวลาใช้เหมือนกันกับการหาค่าการคืบ ดังภาพที่ 2.5
- $k_4$  = สัมประสิทธิ์ความหนาของชั้นส่วน ดังภาพที่ 2.7

ใช้ค่าความหนาของชั้นส่วน (theoretical thickness) :  $h'_o$

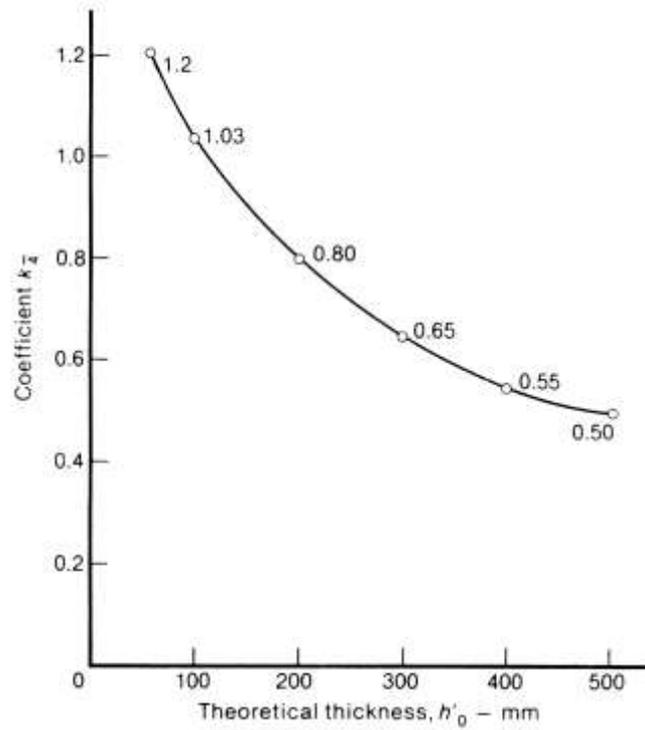
$$h'_o = 2 \frac{Ac}{u}$$

$Ac$  = พื้นที่หน้าตัดของชั้นส่วน (มม.<sup>2</sup>)

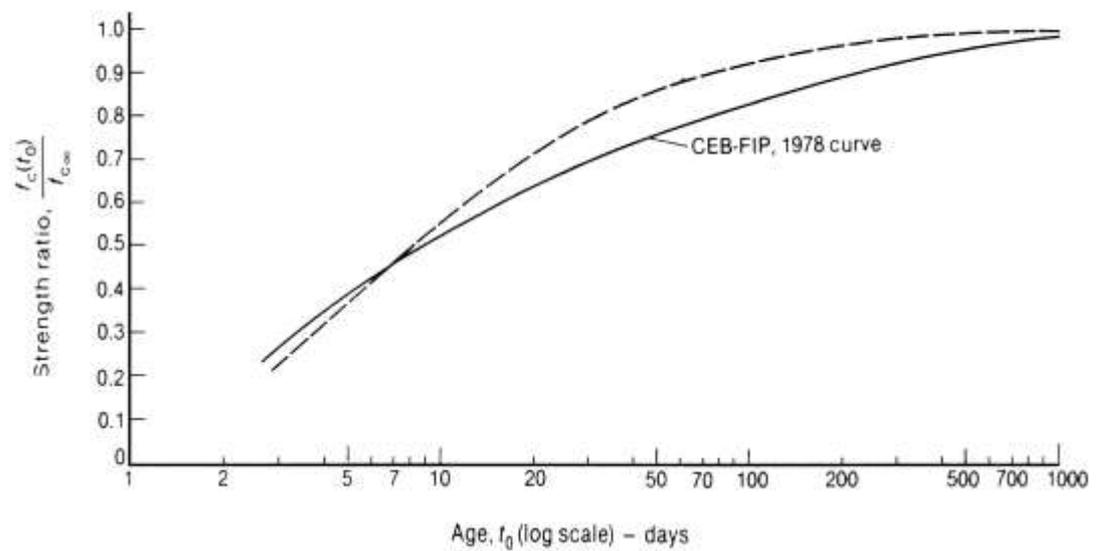
$u$  = เส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดที่จะแห้งตัว (มม.)



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



ภาพที่ 2.7 สัมประสิทธิ์ความหนาชั้นส่วนของการหดตัว:CEB-FIP 70 (Neville et al., 1983)



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

### 3.2 สมาคมคอนกรีตยุโรป ปี 1978

#### 3.2.1 การคืบ

ความเครียดของการคืบที่อายุ  $t$  ประมาณค่าจากสัมประสิทธิ์ของการคืบ ดังสมการที่ 2.30 ในสมาคมคอนกรีตยุโรป ปี 1970 สำหรับกรณีที่ไม่มีผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน สามารถประมาณค่าจากกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในสมการที่ 2.34 และสัมประสิทธิ์ของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ  $t$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.35

$$E_c(28) = 9.5 \sqrt[3]{f_c'(28)} \quad (2.34)$$

$$\phi(t) = \beta a(t_0) + \phi_d \cdot \beta d(t - t_0) + \phi_f [\beta f(t) - \beta f(t_0)] \quad (2.35)$$

เมื่อ

$E_c(28)$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (GPa)

$f_c'(28)$  = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ที่อายุ 28 วัน (MPa)

$t$  = อายุของคอนกรีต (วัน)

$t_0$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)

$$\beta a(t_0) = 0.8 \left[ 1 - \frac{f_c(t_0)}{f_{c\infty}} \right]$$

$$\frac{f_c(t_0)}{f_{c\infty}} = \text{อัตราส่วนความแข็งแรงของคอนกรีตดังภาพที่ 2.8}$$

$\phi_d$  = อัตราส่วนของขีดจำกัดความเครียดยืดหยุ่นตามเวลา ต่อความเครียดยืดหยุ่นเริ่มแรกที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 0.4

$\beta d(t-t_0)$  = การพัฒนาการของความเครียดยืดหยุ่นที่ตามมาภายหลังกับเวลา ดังภาพที่ 2.9

$\phi_f$  =  $\phi_{f1} \cdot \phi_{f2}$

$\phi_{f1}$  = สัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม แสดงในตารางที่ 2.6

$\phi_{f2}$  = สัมประสิทธิ์ของความหนาของชั้นส่วน ดังภาพที่ 2.10

$\beta_f(t), \beta_f(t_0)$  = พารามิเตอร์การไหลพลาสติก ดังภาพที่ 2.11

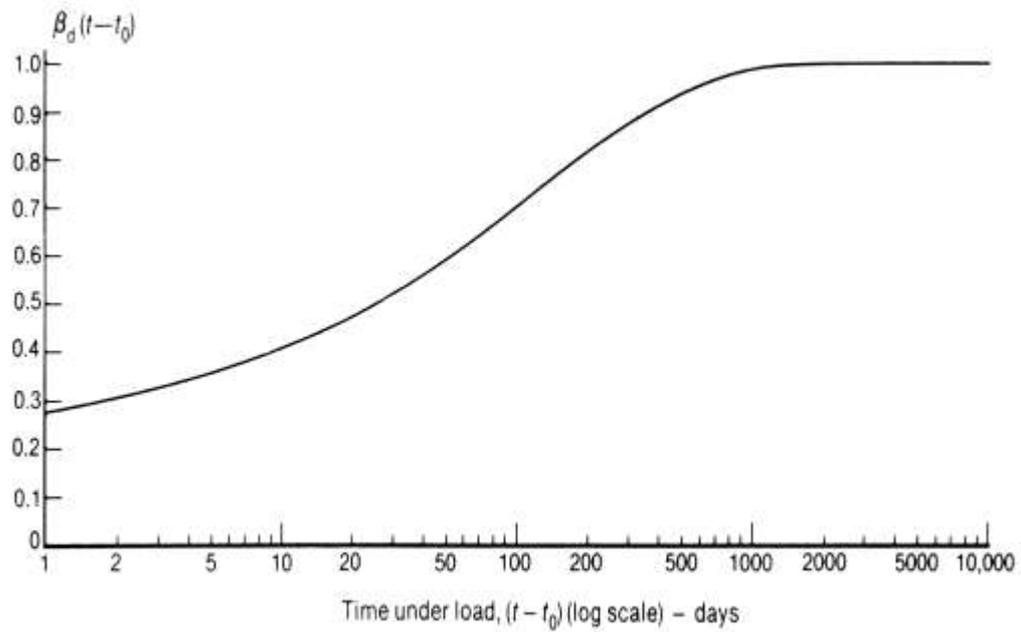
ความหนาของชั้นส่วน(notional thickness) :  $h_o$

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

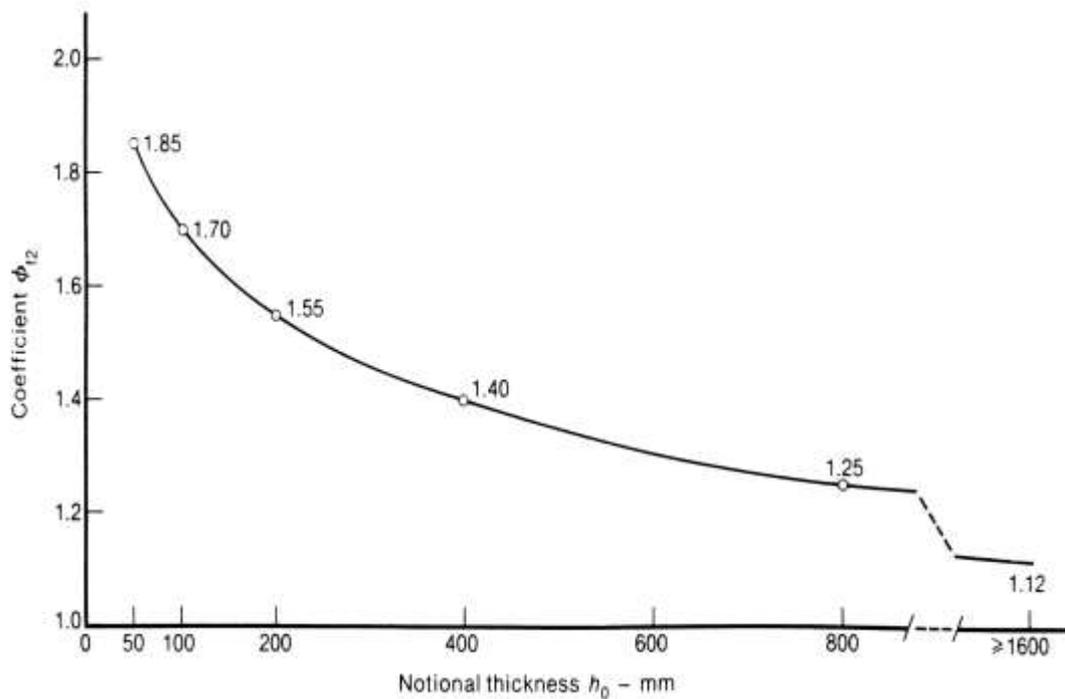
$A_c$  = พื้นที่หน้าตัดของชั้นส่วน (มม.<sup>2</sup>)

$u$  = เส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดที่แห้งตัว (มม.)

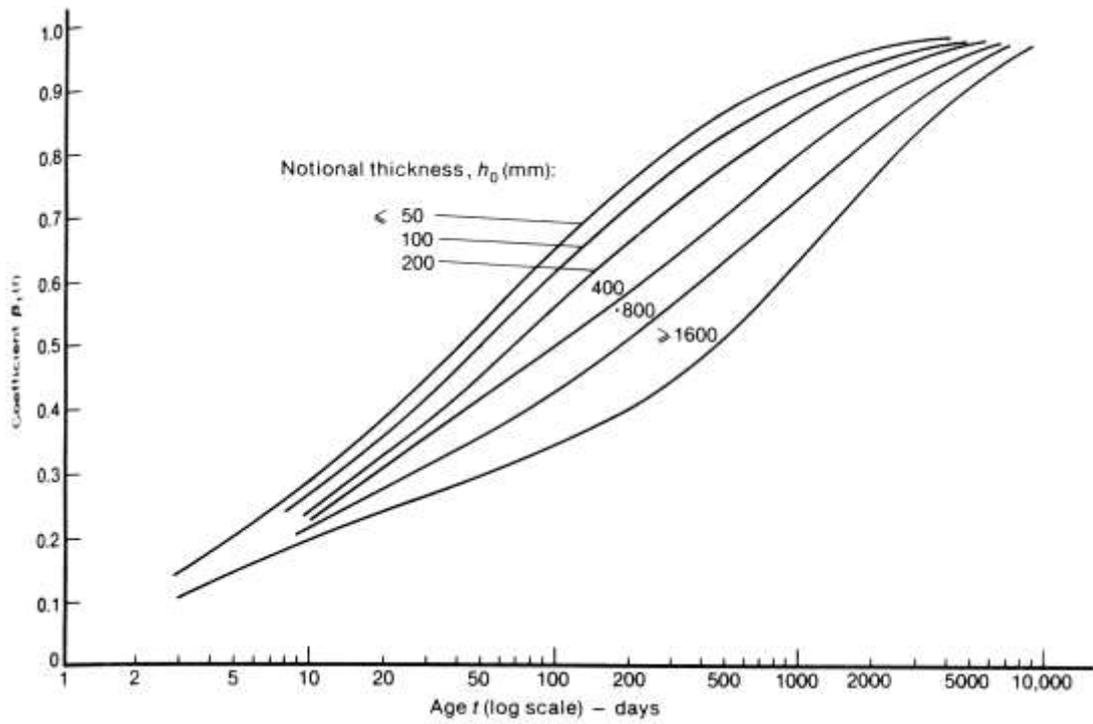
$\lambda$  = สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบ แสดงในตารางที่ 2.6



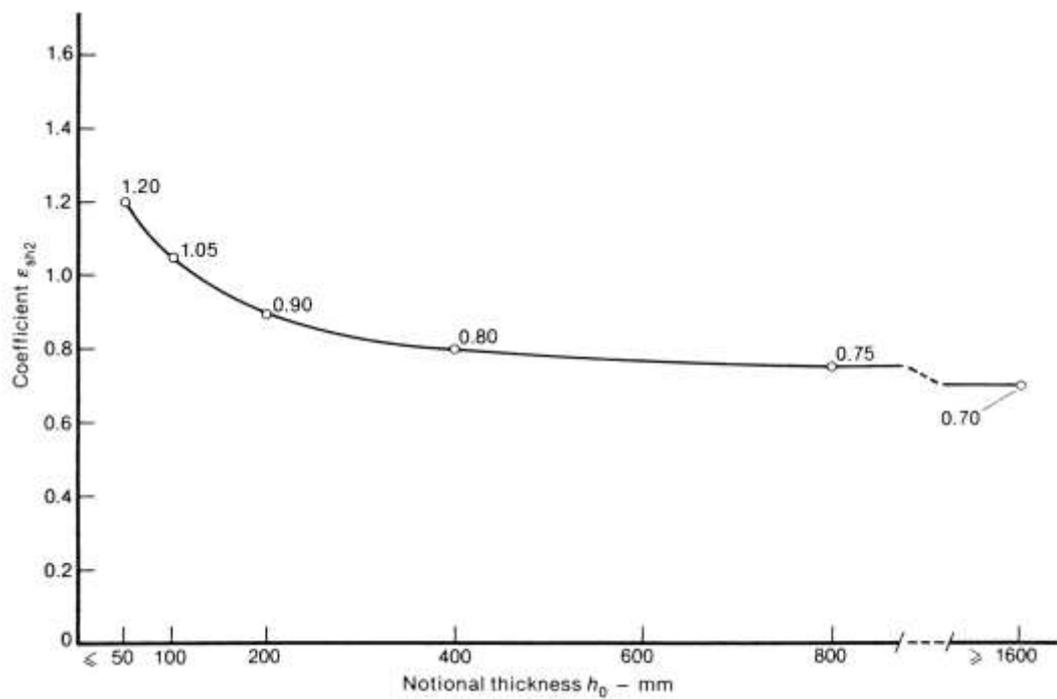
ภาพที่ 2.9 สัมประสิทธิ์การพัฒนาค่าความเครียดยึดหยุ่นที่ตามมาภายหลังกับเวลา :CEB-FIP 78  
(Neville et al., 1983)



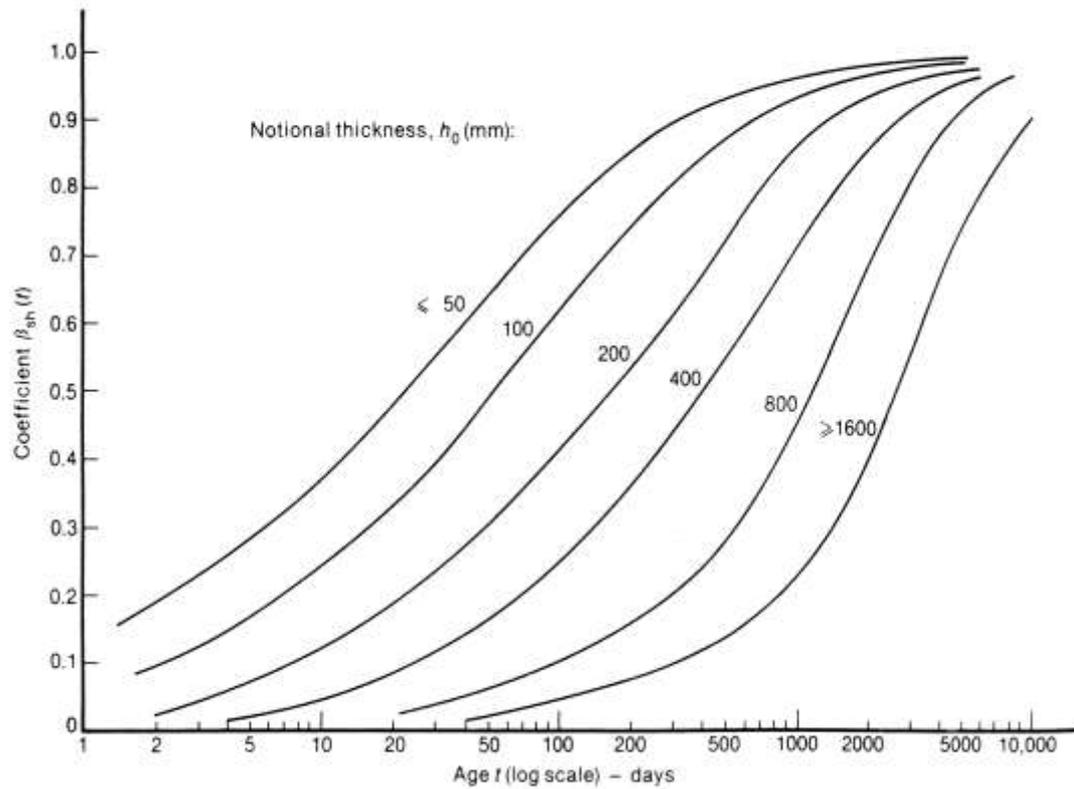
ภาพที่ 2.10 สัมประสิทธิ์ความหนาโนชั้นนอลของการคืบ :CEB-FIP 78 (Neville et al., 1983)



ภาพที่ 2.11 พารามิเตอร์การไหลพลาสติกของการคืบ :CEB-FIP 78 (Neville et al., 1983)



ภาพที่ 2.12 สัมประสิทธิ์ความหนาแน่นของการหดตัว :CEB-FIP 78 (Neville et al., 1983)



ภาพที่ 2.13 ฟังก์ชันการพัฒนาการหดตัวที่เวลา  $t$ :CEB-FIP 78 (Neville et al., 1983)

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของการหดตัวและการคืบ :CEB-FIP 78

สภาพแวดล้อม	ความชื้นสัมพัทธ์ ของสภาพแวดล้อม (%)	สัมประสิทธิ์		สัมประสิทธิ์ของ ความหนา $\lambda$
		การคืบ $\phi_{FI}$	การหดตัว $\epsilon_{sh1} (10^{-6})$	
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 et al., 1983)

หมายเหตุ เครื่องหมายลบหมายถึงการหดตัว และเครื่องหมายบวกหมายถึงการพองตัว

### 3.2.2 การหดตัว

ความเครียดของการหดตัวที่คอนกรีตอายุ  $t$  ประมาณค่าได้จากสัมประสิทธิ์ของสภาวะต่างๆ ความเครียดของการหดตัวหาได้จากสมการที่ 2.36

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{sho} [\beta_{sh}(t) - \beta_{sh}(t_{sh})] \quad (2.36)$$

- เมื่อ  $t_{sh}$  = อายุคอนกรีตเริ่มแห้งตัว (วัน)  
 $\epsilon_{sho}$  = สัมประสิทธิ์ของการหดตัวเบื้องต้น =  $\epsilon_{sh1} \times \epsilon_{sh2}$   
 $\epsilon_{sh1}$  = สัมประสิทธิ์ของความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม แสดงในตารางที่ 2.6  
 $\epsilon_{sh2}$  = สัมประสิทธิ์ของความหนาของชั้นส่วน ดังภาพที่ 2.12  
 $\beta_{sh}(t)$  = ฟังก์ชันการพัฒนการหดตัวที่เวลา  $t$  ดังภาพที่ 2.13

### 3.3 สมาคมคอนกรีตยุโรปปี 1990

#### 3.3.1 การคืบ

ความเครียดของการคืบที่อายุ  $t$  ประมาณค่าจากสัมประสิทธิ์ของการคืบ ดังสมการที่ 2.30 ในสมาคมคอนกรีตยุโรปปี 1970 สำหรับกรณีที่ไม่มีการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน สามารถประมาณค่าจากกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในสมการที่ 2.37 และความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตจะแปรผันตามอายุ  $f_{cm}(t)$  ประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.38 และ 2.39

$$E_c(28) = E_{co} \sqrt[3]{f_{cm}/f_{cmo}} \quad (2.37)$$

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (2.38)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t/t_1} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2.39)$$

- เมื่อ  $E_c(28)$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)  
 $f_{cm}$  = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ที่อายุ 28 วัน (MPa)  
 $f_{cm}(t)$  = ค่ากลางของกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ  $t$  วัน (MPa)  
 $f_{cmo}$  = 10 MPa  
 $E_{co}$  =  $2.15 \times 10^4$  Mpa  
 $\beta_{cc}(t)$  = สัมประสิทธิ์ของอายุคอนกรีต  $t$  วัน  
 $t$  = อายุของคอนกรีต (วัน)  
 $t_1$  = 1 วัน  
 $s$  = สัมประสิทธิ์ของชนิดปูนซีเมนต์  
     = กำลังสูง (rapid hardening high strength cements :RS) = 0.20  
     = ปกติ (normal and rapid hardening cements :N&R) = 0.25  
     = แข็งตัวช้า (slowly hardening cements :SL) = 0.38

สัมประสิทธิ์ของการคืบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.40

$$\phi(t) = \phi_o \cdot \beta_c(t - t_o) \quad (2.40)$$

เมื่อ  $\phi_o$  = สัมประสิทธิ์ความคืบโน้มนอล (notional creep coefficient)  
 $\beta_c$  = สัมประสิทธิ์ของการพัฒนาการคืบกับเวลาหลังการรับน้ำหนัก  
 $t$  = อายุคอนกรีตที่พิจารณา (วัน)  
 $t_o$  = อายุคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)

สัมประสิทธิ์ความคืบโน้มนอล สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.41, 2.42, 2.43 และ 2.44

$$\phi_o = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_o) \quad (2.41)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/RH_o}{0.46(h/h_o)^{1/3}} \quad (2.42)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cmo})^{0.5}} \quad (2.43)$$

$$\beta(t_o) = \frac{1}{0.1 + (t_o/t_1)^{0.2}} \quad (2.44)$$

เมื่อ  $f_{cm}$  = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (MPa)  
 $f_{cmo}$  = 10 MPa  
 $RH$  = ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม (%)  
 $RH_o$  = 100 %  
 $t_1$  = 1 วัน  
 $h_o$  = 100 มม.  
 $h = 2 \frac{Ac}{u}$   
 $Ac$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน (มม.<sup>2</sup>)  
 $u$  = เส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดที่สัมผัสบรรยากาศ (มม.)

สัมประสิทธิ์ของการพัฒนาการคืบกับเวลาหลังการรับน้ำหนัก หาได้จากสมการที่ 2.45 และ 2.46

$$\beta_c(t - t_o) = \left[ \frac{(t - t_o)/t_1}{\beta_H + (t - t_o)/t_1} \right]^{0.3} \quad (2.45)$$

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left( 1.2 \frac{RH}{RH_o} \right)^{18} \right\} \frac{h}{h_o} + 250 \leq 1500 \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } RH_0 &= 100 \% \\ h_0 &= 100 \text{ มม.} \\ t_1 &= 1 \text{ วัน} \end{aligned}$$

ผลกระทบชนิดของปูนซีเมนต์ต่อสัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตจะมีผลต่ออายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก ดังนั้นจะต้องปรับแก้ค่าอายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนักดังสมการที่ 2.47

$$t_{o,k} = t_o \left[ \frac{9}{2 + (t_o)^{1.2}} + 1 \right]^\alpha \geq 0.5 \text{ วัน} \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } t_{o,k} &= \text{ปรับแก้อายุคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)} \\ t_o &= \text{อายุคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)} \\ \alpha &= \text{สัมประสิทธิ์ของชนิดปูนซีเมนต์} \\ &= \text{กำลังสูง, } \alpha = 1 : \text{ปกติ, } \alpha = 0 : \text{แข็งตัวช้า, } \alpha = -1 \end{aligned}$$

ผลกระทบของหน่วยแรงที่มีค่ามาก หน่วยแรงที่มีค่ามากกว่า 0.4 เท่าแต่น้อยกว่า 0.6 เท่าของกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ  $t_o$  จะต้องปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ความคืบโน้ชั้นนอล ดังสมการที่ 2.48

สำหรับ  $0.4 < k_\sigma \leq 0.6$

$$\phi_{o,k} = \phi_o \exp(\alpha_\sigma (k_\sigma - 0.4)) \quad (2.48)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \phi_{o,k} &= \text{ปรับแก้สัมประสิทธิ์ความคืบโน้ชั้นนอล แทนในสมการที่ 2.40} \\ k_\sigma &= \text{อัตราส่วนของกำลัง, } |\sigma| / f_{cm}(t_o) \\ f_{cm}(t_o) &= \text{ค่ากลางของกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ } t_o \text{ วัน (MPa)} \\ \alpha_\sigma &= 1.5 \end{aligned}$$

### 3.3.2 การหดตัว

ความเครียดของการหดตัวที่คอนกรีตอายุ  $t$  ประมาณค่าได้จากสัมประสิทธิ์ของสภาวะต่าง ๆ ความเครียดของการหดตัวหาได้จากสมการที่ 2.49

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{cso} \beta_s(t - t_{sh}) \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } t &= \text{อายุคอนกรีต (วัน)} \\ t_{sh} &= \text{อายุคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว (วัน)} \\ \epsilon_{cso} &= \text{สัมประสิทธิ์ของการหดตัวโน้ชั้นนอล} \\ \beta_s(t-t_{sh}) &= \text{สัมประสิทธิ์การพัฒนาการหดตัวกับเวลา} \end{aligned}$$

สัมประสิทธิ์ของการหดตัวโน้มนอล หาได้จากสมการที่ 2.50 และ 2.51

$$\epsilon_{cso} = \epsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \quad (2.50)$$

$$\epsilon_s(f_{cm}) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm}/f_{cmo})] \times 10^{-6} \quad (2.51)$$

เมื่อ  $f_{cm}$  = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (MPa)  
 $f_{cmo}$  = 10 MPa  
 $\beta_{sc}$  = สัมประสิทธิ์ของชนิดปูนซีเมนต์  
 = กำลังสูง,  $\beta_{sc} = 8$  : ปกติ,  $\beta_{sc} = 5$  : แข็งตัวช้า,  $\beta_{sc} = 4$   
 $\beta_{RH}$  =  $-1.55 \cdot \beta_{SRH}$  , สำหรับ  $40 \% \leq RH < 99 \%$   
 $\beta_{RH} = 0.25$  , สำหรับ  $RH \geq 99 \%$   
 $\beta_{SRH} = 1 - (RH / RH_0)^3$   
 $RH$  = ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม (%)  
 $RH_0 = 100 \%$

สัมประสิทธิ์การพัฒนการหดตัวกับเวลา หาได้จากสมการที่ 2.52

$$\beta_s(t - t_{sh}) = \left[ \frac{(t - t_{sh})/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t - t_{sh})/t_1} \right]^{0.5} \quad (2.52)$$

เมื่อ  $h$  = ความหนาโน้มนอลของชิ้นส่วน (มม.)  
 $h_0 = 100$  มม.  
 $t$  = อายุคอนกรีต (วัน)  
 $t_{sh}$  = อายุคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว (วัน)  
 $t_1 = 1$  วัน

#### 4 สมาคมมาตรฐานอังกฤษ

ปี 1978 และปี 1985 สมาคมมาตรฐานอังกฤษได้แนะนำวิธีการประมาณค่าการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต ข้อกำหนดต่างๆของสมาคมมาตรฐานอังกฤษมีดังนี้

##### 4.1 สมาคมมาตรฐานอังกฤษ ปี 1978

###### 4.1.1 การคืบ

ความเครียดของการคืบในสมาคมมาตรฐานอังกฤษจะพิจารณาค่าสุดท้ายของการคืบที่อายุ 30 ปี จะหาค่าได้จากสมการที่ 2.53

$$\epsilon_{creep} = \frac{\sigma}{E_c(t_0)} \phi \quad (2.53)$$

เมื่อ  $\epsilon_{creep}$  = ความเครียดของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ 30 ปี  
 $\sigma$  = หน่วยแรงที่กระทำต่อคอนกรีต (MPa)  
 $E_c(t_0)$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ  $t_0$  (MPa)

$\phi$  = สัมประสิทธิ์ของการคืบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ 30 ปี ดังภาพที่ 2.14

$t_0$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)

กรณีที่ไม่มีการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ  $t_0$  สามารถประมาณค่าจากกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐานที่อายุ 28 วัน ดังแสดงสมการที่ 2.54 และ 2.55

$$E_c(t_0) = E_c(28) [0.4 + 0.6(f_{cu}(t_0)/f_{cu}(28))] \quad (2.54)$$

$$E_c(28) = K_o + 0.2 f_{cu}(28) \quad (2.55)$$

เมื่อ

$E_c(28)$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน (GPa)

$f_{cu}(28)$  = กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐาน ที่อายุ 28 วัน (MPa)

$K_o$  = ค่าคงที่มีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 20 GPa สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติใช้ 20 GPa

$t_0$   $\geq$  อายุ 3 วัน

$f_{cu}(t_0)/f_{cu}(28)$  = อัตราส่วนกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐาน ในตารางที่ 2.7

สัมประสิทธิ์ของการคืบสามารถประมาณค่าได้ในภาพที่ 2.14 ซึ่งต้องทราบค่าความหนาของหน้าตัดประสิทธิภาพ โดยกำหนดให้หน้าตัดของวัสดุสม่ำเสมอตลอดความยาว จะสามารถหาค่าได้จากสองเท่าของพื้นที่หน้าตัดหารด้วยเส้นรอบรูปของหน้าตัด ในกรณีที่สามารถป้องกันการระเหยของน้ำ หรือแช่น้ำ ค่าความหนาของหน้าตัดประสิทธิภาพ คิดที่มากกว่า 400 มิลลิเมตร ค่าการคืบที่ 80 , 50 และ 30 เปอร์เซ็นต์ของค่าสูงสุดของการคืบจะเกิดหลัง 6 เดือนของการรับแรง โดยพิจารณาจากความหนาของหน้าตัดประสิทธิภาพมากกว่า 200 , ระหว่าง 200 กับ 400 และ มากกว่า 400

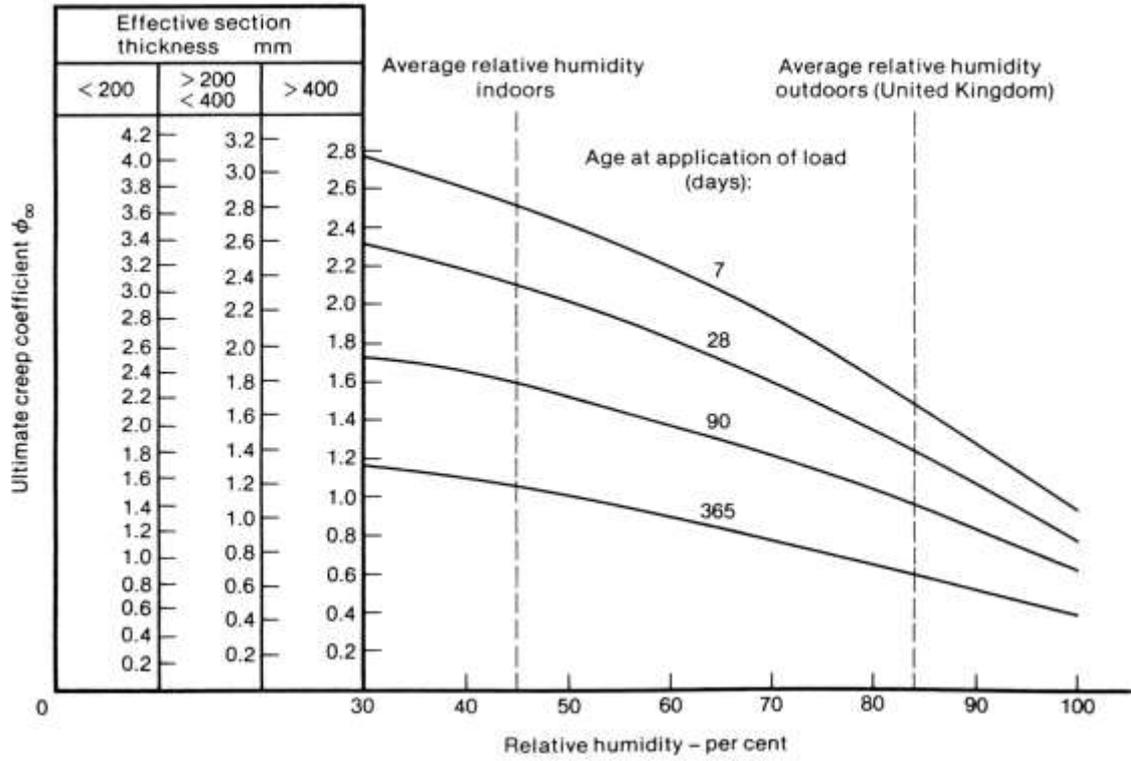
#### 4.1.2 การหดตัว

ความเครียดของการหดตัวของคอนกรีตสามารถประมาณค่าได้จากภาพที่ 2.15 โดยใช้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม, อายุของคอนกรีต และความหนาของหน้าตัดประสิทธิภาพ รูปภาพนี้ได้จากค่าของคอนกรีตน้ำหนักปกติ และ ปริมาณของน้ำที่ 8 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่ปริมาณของน้ำไม่เท่ากับ 8 เปอร์เซ็นต์ ให้ใช้เทียบสัดส่วนปริมาณน้ำปรับแก้ค่า

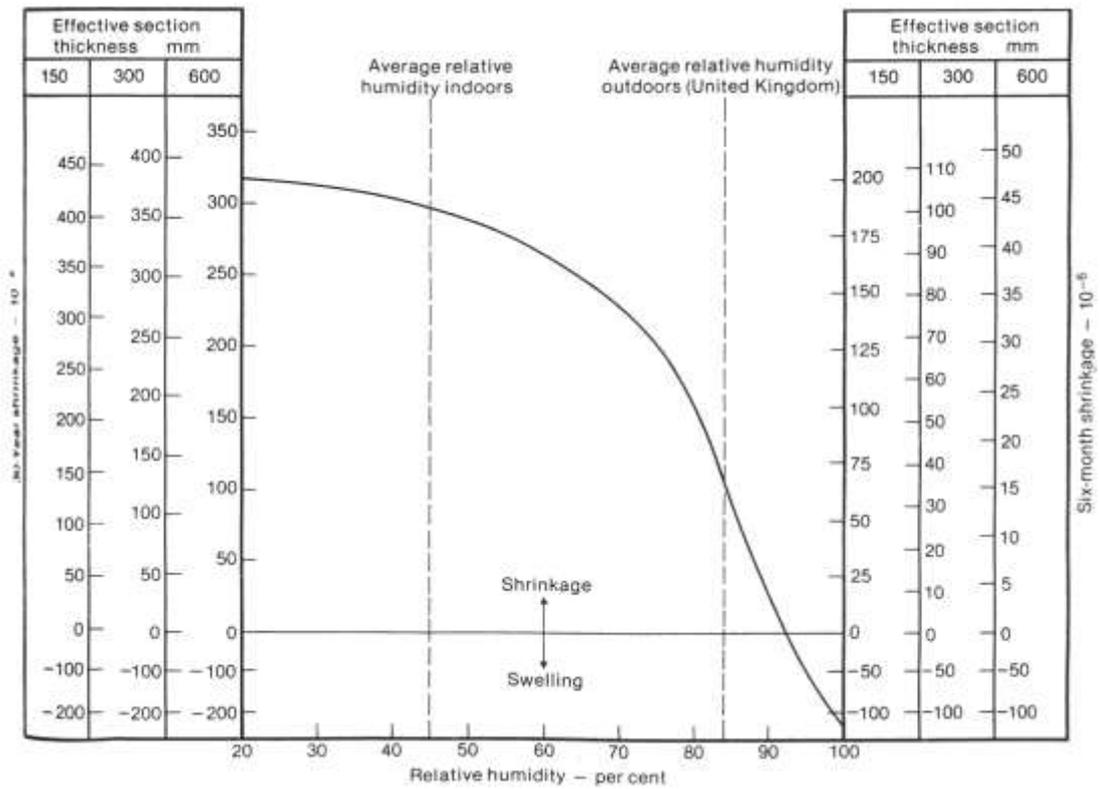
ตารางที่ 2.7 แสดงค่าอัตราส่วนกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐานต่อเวลา : BS 78

อายุเริ่มรับน้ำหนัก $t_0$ (วัน)	อัตราส่วนกำลังอัด : $f_{cu}(t_0) / f_{cu}(28)$	
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3
7	0.65	0.75
28	1.00	1.00
90	1.20	1.15
365	1.35	1.20

(Neville et al., 1983)



ภาพที่ 2.14 ค่าสัมประสิทธิ์การคืบ :BS 78 (Neville et al., 1983)



ภาพที่ 2.15 การหดตัวของคอนกรีตน้ำหนักปกติ :BS 78 (Neville et al., 1983)

4.2 สมาคมมาตรฐานอังกฤษ ปี 1985

4.2.1 การคืบ

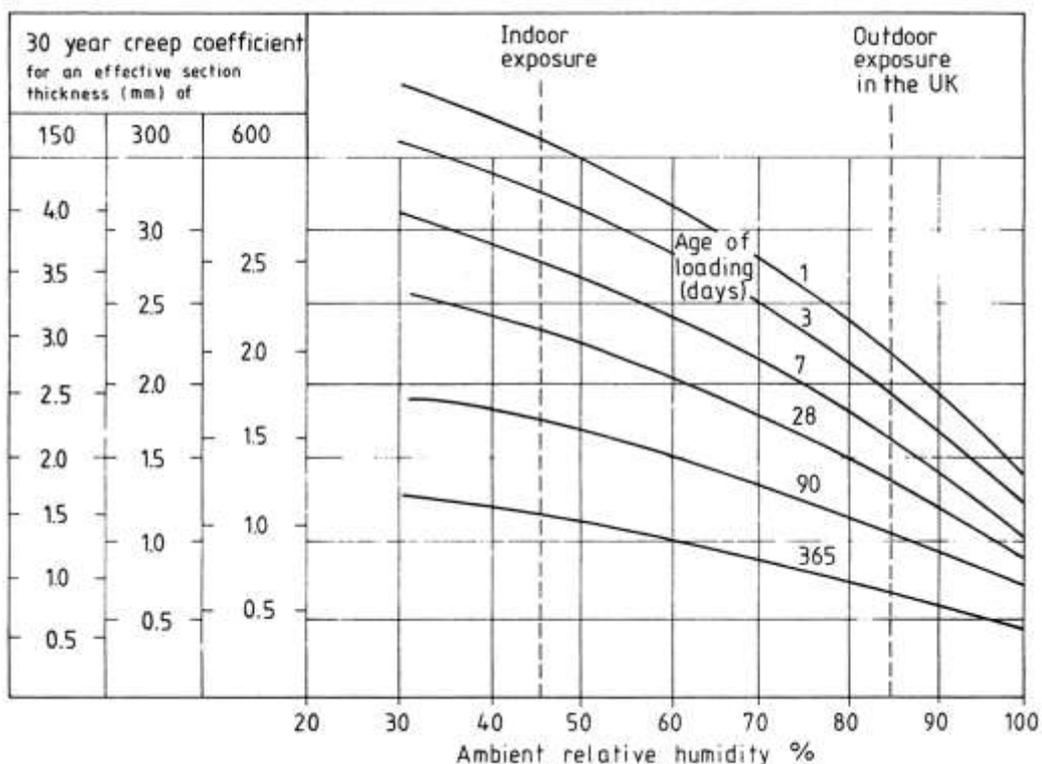
ความเครียดของการคืบในสมาคมมาตรฐานอังกฤษจะพิจารณาค่าสุดท้ายของการคืบที่อายุ 30 ปี จะหาค่าได้จากสมการที่ 2.53 เหมือนในปี 1978

กรณีที่ไม่มีผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ  $t_0$  สามารถประมาณค่าจากกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐานที่อายุ 28 วัน ดังแสดงสมการที่ 2.54 และ 2.55 เหมือนในปี 1978 แต่จะแตกต่างกันที่ค่า  $f_{cu}(t_0)$  ใช้ตารางที่ 2.8 ในการประมาณค่า

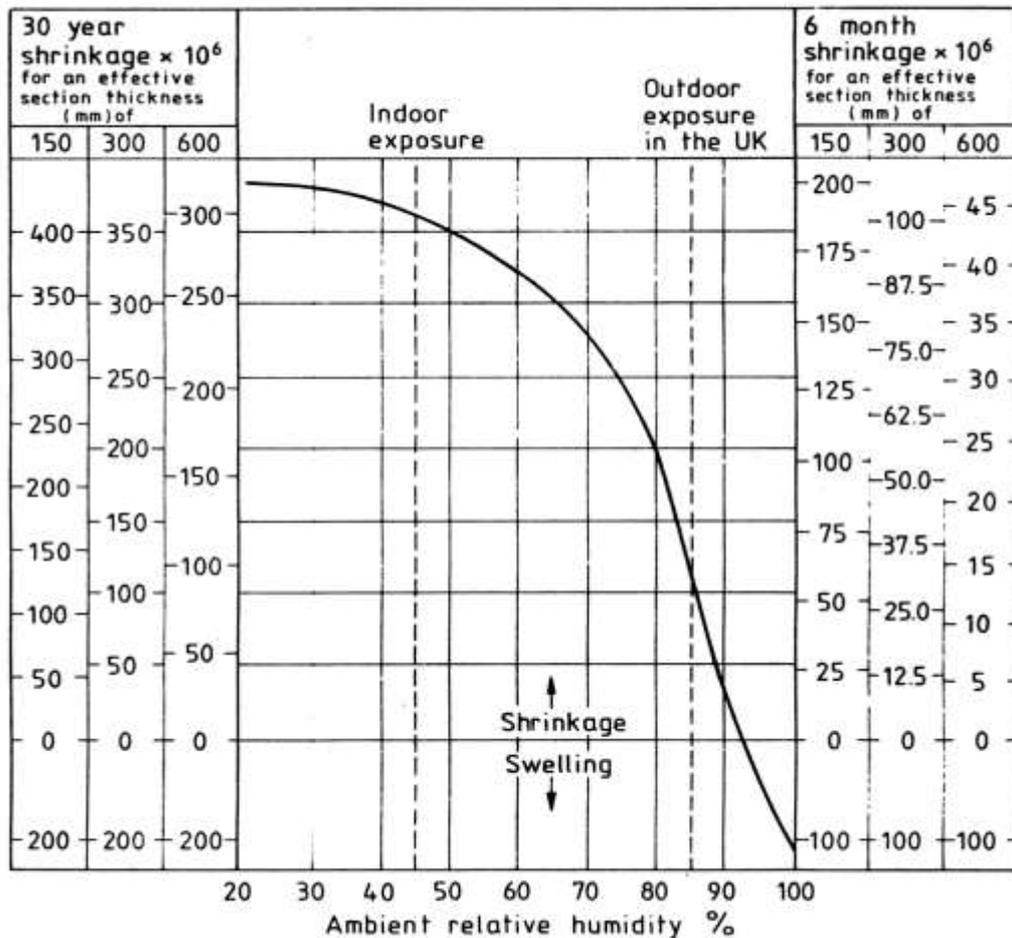
สัมประสิทธิ์ของการคืบสามารถประมาณค่าได้ในภาพที่ 2.16 ซึ่งต้องทราบค่าความหนาของหน้าตัดประสิทธิภาพ โดยกำหนดให้หน้าตัดของวัตถุสม่ำเสมอตลอดความยาว จะสามารถหาค่าได้จากสองเท่าของพื้นที่หน้าตัดหารด้วยเส้นรอบรูปของหน้าตัด ส่วนในกรณีที่สามารถป้องกันการระเหยของน้ำ หรือแช่น้ำ ค่าความหนาของหน้าตัดประสิทธิภาพ คัดที่ 600 มิลลิเมตร ค่าการคืบที่ 40 , 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ของค่าสูงสุดของการคืบจะเกิดขึ้นจากการรับน้ำหนักเป็นระยะเวลา 1 เดือน , 6 เดือน และ 30 เดือน ตามลำดับ

4.2.2 การหดตัว

ความเครียดของการหดตัวของคอนกรีตสามารถประมาณค่าได้จากภาพที่ 2.17 โดยใช้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม, อายุของคอนกรีต และความหนาของหน้าตัดประสิทธิภาพ รูปภาพนี้ได้จากค่าของคอนกรีตน้ำหนักปกติ และ ปริมาณของน้ำที่ 190 ลิตร/ม<sup>3</sup> ในกรณีที่ปริมาณของน้ำแตกต่างไปจากนี้แต่อยู่ในช่วง 150 – 230 ลิตร/ม<sup>3</sup> สามารถใช้ภาพที่ 2.17 หาปริมาณการหดตัวได้



ภาพที่ 2.16 ค่าสัมประสิทธิ์การคืบ :BS 85 (BS, Part 2, 1985)



ภาพที่ 2.17 การหดตัวของคอนกรีตน้ำหนักปกติ :BS 85 (BS, Part 2, 1985)

ตารางที่ 2.8 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐาน ที่อายุ t วัน :BS 85

เกรด	กำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน: $f_{cu}(28)$	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ				
		7 วัน	2 เดือน	3 เดือน	6 เดือน	1 ปี
	$N/mm^2(MPa)$	$N/mm^2$	$N/mm^2$	$N/mm^2$	$N/mm^2$	$N/mm^2$
20	20	13.5	22	23	24	25
25	25	16.5	27.5	29	30	31
30	30	20	33	35	36	37
40	40	28	44	45.5	47.5	50
50	50	36	54	55.5	57.5	60

(BS, Part 2, 1985)

## 5 วิธีการของบาชอนท์

บาชอนท์เป็นนักวิชาการของประเทศสหรัฐอเมริกาได้แนะนำวิธีการประมาณค่าการคืบและการหดตัวมีวิธีการที่แนะนำออกมาแล้ว 3 วิธี ตั้งแต่ปี 1978, 1991 และ 1995 ข้อกำหนดต่างๆของวิธีบาชอนท์มีดังนี้

### 5.1 แบบจำลองบีพี ปี 1978

#### 5.1.1 การหดตัว

การประมาณค่าความเครียดของการหดตัวสามารถได้จากความเครียดของการหดตัวสูงสุดคูณกับสัมประสิทธิ์ต่างๆ ดังสมการที่ 2.56

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{sh\infty} \cdot k_h \cdot S(t) \quad (2.56)$$

เมื่อ  $\epsilon_{sh}$  = ความเครียดของการหดตัว  
 $\epsilon_{sh\infty}$  = ความเครียดของการหดตัวสูงสุด  
 $t$  = อายุของคอนกรีต (วัน)  
 $S(t)$  = สัมประสิทธิ์ของเวลา  
 $k_h$  = สัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม

สัมประสิทธิ์ของเวลา แสดงในสมการที่ 2.57

$$S(t) = [(t - t_{sh})/\tau_{sh} + (t - t_{sh})]^{1/2} \quad (2.57)$$

เมื่อ  $\tau_{sh}$  = สัมประสิทธิ์ขนาดของชิ้นส่วน  
 $t_{sh}$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว (วัน)

สัมประสิทธิ์ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม แสดงในสมการที่ 2.58

$$k_h = 1 - h^3 \quad : \text{สำหรับ } h \leq 0.98 \quad (2.58)$$

เมื่อ  $h$  = ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม  
 สำหรับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมเท่ากับ 1 ให้ใช้ค่า  $k_h = -0.2$  แต่ถ้าความชื้นอยู่ระหว่าง 0.98 ถึง 1.00 จะสามารถเฉลี่ยค่า  $k_h$  ของความชื้นสัมพัทธ์ 0.98 กับ 1.00 เป็นเชิงเส้นได้

สัมประสิทธิ์ขนาดของชิ้นส่วน และความหนาประสิทธิผล แสดงในสมการที่ 2.59 และ 2.60

$$\tau_{sh} = 600(D \cdot k_s / 150)^2 \cdot [C_1^{ref} / C_1(t_{sh})] \quad (2.59)$$

$$D = 2(v/s) \quad (2.60)$$

เมื่อ  $k_s$  = สัมประสิทธิ์รูปร่างของชิ้นส่วน  
 $v$  = ปริมาตรของชิ้นส่วน (มม.<sup>3</sup>)  
 $s$  = พื้นที่ผิวของชิ้นส่วน (มม.<sup>2</sup>)  
 $C_1^{ref}$  = 10 มม.<sup>2</sup>/วัน  
 $C_1(t_{sh})$  = สัมประสิทธิ์ของอายุคอนกรีต

สัมประสิทธิ์ของอายุคอนกรีต แสดงในสมการที่ 2.61

$$C_1(t_{sh}) = C_7 [0.05 + (6.3 / t_{sh})^{0.5}] \quad (2.61)$$

$$C_7 = (c/8) - 12 \quad : \text{ถ้า } C_7 < 7 \text{ ใช้ } C_7 = 7$$

$$: \text{ถ้า } C_7 > 21 \text{ ใช้ } C_7 = 21$$

เมื่อ  $c$  = ปริมาณของซีเมนต์ (kg/m<sup>3</sup>)

สัมประสิทธิ์รูปร่างของชิ้นส่วน

แผ่นพื้นขนาดใหญ่	: $k_s = 1$
ทรงกระบอกขนาดใหญ่	: $k_s = 1.15$
สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดใหญ่	: $k_s = 1.25$
ทรงกลม	: $k_s = 1.30$
ทรงลูกบาศก์	: $k_s = 1.55$

ความเครียดของการหดตัวสูงสุด แสดงในสมการที่ 2.62

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{s\infty} [ E_c(7+600) / E_c(t_{sh}+\tau_{sh}) ] \quad (2.62)$$

ประมาณค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ  $t$  วัน แสดงในสมการที่ 2.63

$$E_c(t) = E_c(28) [ t / (4+0.85t) ]^{0.5} \quad (2.63)$$

เมื่อ  $E_c(28)$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน ( $10^6$  xpsi)

ความเครียดของการหดตัวสุดท้าย ( final shrinkage  $\times 10^{-6}$ ) แสดงในสมการที่ 2.64

$$\varepsilon_{s\infty} = 1,210 - 880y \quad (2.64)$$

แทน  $y = (390.z^{-4} + 1)^{-1}$

$$Z = \left\{ \left[ 1.25\sqrt{a/c} + 0.5(g/s)^2 \right] \cdot \left[ \frac{1 + (s/c)}{w/c} \right]^{1/3} \cdot \sqrt{fc'} \right\} - 12$$

ค่า  $z$  จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

เมื่อ  $a/c$  = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์

$g/s$  = อัตราส่วนน้ำหนักรวมของมวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียด

$s/c$  = อัตราส่วนน้ำหนักรวมของมวลรวมละเอียดต่อปูนซีเมนต์

$w/c$  = อัตราส่วนน้ำหนักรวมของน้ำต่อปูนซีเมนต์

$fc'$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (ksi)

### 5.1.2 การคืบ

การประมาณค่าความเครียดของการคืบของคอนกรีต สามารถได้จากความเครียดของการคืบเบื้องต้นรวมกับการคืบแห้ง ดังแสดงในสมการที่ 2.65

$$\varepsilon_{creep} = \sigma \cdot [ C_o(t, t_o) + C_d(t, t_o, t_{sh}) - C_p(t, t_o, t_{sh}) ] \quad (2.65)$$

เมื่อ  $\sigma$  = หน่วยแรงกระทำต่อตัวอย่าง (MPa)

$C_o(t, t_o)$  = การคืบเบื้องต้น (micro/MPa) แสดงในสมการที่ 2.66

$C_d(t, t_o, t_{sh})$  = การคืบในช่วงเวลาแห้งตัว (micro/MPa) แสดงในสมการที่ 2.69

$C_p(t, t_o, t_{sh})$  = การคืบก่อนแห้งตัว (micro/MPa) แสดงในสมการที่ 2.70

$t$  = อายุของคอนกรีต (วัน)

$t_o$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)

$t_{sh}$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว (วัน)

การคืบเบื้องต้น (basic creep)

$$C_o(t, t_o) = (\varphi_1/E_o) \cdot (t_o^{-m} + \alpha) \cdot (t - t_o)^n \quad (2.66)$$

แทน  $\varphi_1 = 10^{3n} / 2(28^{-m} + \alpha)$

$\alpha = 1 / (40 w/c)$

$m = 0.28 + 1/(fc')^2$

$n = 0.12 + [0.07 x^6 / (5130 + x^6)] \quad : x > 0$   
 $= 0.12 \quad : x \leq 0$

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

เมื่อ  $t =$  อายุของคอนกรีตที่พิจารณา (วัน)

$t_o =$  อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)

$a/c =$  อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์

$s/c =$  อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมละเอียดต่อปูนซีเมนต์

$w/c =$  อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำต่อปูนซีเมนต์

$a/g =$  อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดต่อมวลรวมหยาบ

$fc' =$  กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (ksi)

$E_o =$  โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (asymptotic elastic modulus: psi)

สัมประสิทธิ์ของชนิดปูนซีเมนต์

Type I,II :  $a_1 = 1.00$

Type III :  $a_1 = 0.93$

Type IV :  $a_1 = 1.05$

การประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่น  $E_o$  สามารถประมาณได้จากผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในสมการที่ 2.67 และสำหรับกรณีที่ไม่มีการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน สามารถประมาณค่าจากกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน ดังแสดงสมการที่ 2.68

$$E_o = E_c(28) \cdot (1 + (\varphi_1) \cdot (28^{-m} + \alpha) \cdot (0.1)^n) \quad (2.67)$$

$$1/E_o = 0.09 + [ 1 / (1.7(z_1)^2) ] \quad , (10^{-6} / \text{psi}) \quad (2.68)$$

แทน  $z_1 = 0.000 05 (p)^2 fc'$

เมื่อ  $p =$  หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ( lb/ft<sup>3</sup> )

$fc' =$  กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (ksi)

$E_c(28) =$  โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (psi)

การคืบในช่วงเวลาแห้งตัว ( creep during drying )

$$C_d(t, t_o, t_{sh}) = (\varphi_d'/E_o).(t_o^{-m/2}).k_h'.\varepsilon_{sh\infty}.S_d(t, t_o) \quad (2.69)$$

แทน  $\varphi_d' = [1 + (t_o - t_{sh})/10\tau_{sh}]^{-1/2} \cdot \varphi_d$

$$S_d(t, t_o) = [1 + 10\tau_{sh}/(t - t_o)]^{-C_d.n}$$

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

$$C_d = 2.8 - 7.5n$$

$$r = \{ 5600[fc' (s/a)]^{0.3} \cdot (g/s)^{1.3} \cdot [(w/c)/\varepsilon_{s\infty}]^{1.5} \} - 0.85$$

$$r > 0, \varphi_d = 0.008 + 0.027 u, \quad u = 1/[1 + 0.7(r^{-1.4})]$$

$$r \leq 0, \varphi_d = 0.008$$

การคืบก่อนแห้งตัว ( creep predrying )

$$C_p(t, t_o, t_{sh}) = c_p.k_h''.S_p(t, t_{sh}).C_o(t, t_o) \quad (2.70)$$

แทน  $S_p(t, t_{sh}) = [1 + 100\tau_{sh}/(t - t_{sh})]^{-n}$

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

$$C_p = 0.83$$

เมื่อ  $t$  = อายุของคอนกรีตที่พิจารณา (วัน)

$t_o$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)

$t_{sh}$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว (วัน)

$h$  = ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม

$h_o$  = ความชื้นสัมพัทธ์ของชื้นตัวอย่างเริ่มต้น (0.98 ถึง 1.00)

$s/a$  = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด

$w/c$  = อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำต่อปูนซีเมนต์

$g/s$  = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียด

$fc'$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (ksi)

$n, m$  = จากการคำนวณหาการคืบเบื้องต้น

## 5.2 แบบจำลองบีพี-เคเอ็ก ปี 1991

### 5.2.1 การหดตัว

การประมาณค่าความเครียดของการหดตัวสามารถได้จากความเครียดของการหดตัวสูงสุดคูณกับสัมประสิทธิ์ต่างๆ ดังสมการที่ 2.56 ใน แบบจำลองบีพี ปี 1978 แต่ในตัวแปรสัมประสิทธิ์ของเวลาได้แทนค่าดังสมการที่ 2.71

$$S(t) = \tanh [(t - t_{sh})/\tau_{sh}]^{1/2} \quad (2.71)$$

เมื่อ  $t$  = อายุของคอนกรีต (วัน)

$t_{sh}$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว (วัน)

$\tau_{sh}$  = สัมประสิทธิ์ขนาดของชื้นส่วน

สัมประสิทธิ์ขนาดของชิ้นส่วน และความหนาประสิทธิผล แสดงในสมการที่ 2.72 และ 2.73

$$\tau_{sh} = 0.32(D.k_s)^2 / C_1(t_{se}) \quad (2.72)$$

$$D = 2(v/s) \quad (2.73)$$

เมื่อ  $D$  = ความหนาประสิทธิผล (มม.)

$v$  = ปริมาตรของตัวอย่าง (มม.<sup>3</sup>)

$s$  = พื้นที่ผิวของตัวอย่าง (มม.<sup>2</sup>)

สัมประสิทธิ์ของอายุคอนกรีต แสดงในสมการที่ 2.74

$$C_1(t_{se}) = C_o [0.6 + (4.5 / t_{se})^{0.5}] \quad (2.74)$$

$$C_o = 10 \quad \text{แต่ } C_1(t_{se}) \leq 18$$

เมื่อ  $t_{se} = 25 + t_{sh}$  , สำหรับการบ่มไอน้ำ  
 $= t_{sh}$  , สำหรับการบ่มวิธีอื่นๆ

สัมประสิทธิ์รูปร่างของตัวอย่าง

แผ่นพื้นขนาดใหญ่ :  $k_s = 1$

ทรงกระบอกขนาดใหญ่ :  $k_s = 1.15$

สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดใหญ่ :  $k_s = 1.25$

ทรงกลม :  $k_s = 1.30$

ทรงลูกบาศก์ :  $k_s = 1.55$

ความเครียดของการหดตัวสูงสุด แสดงในสมการที่ 2.75

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_s \infty [G(17 + \tau_{sh}/40).G(12 + t_{se})] \quad (2.75)$$

แทน  $G(x) = [x / (4 + 0.9x)]^{1/2}$

ความเครียดของการหดตัวสุดท้าย ( $10^{-3}$ ) แสดงในสมการที่ 2.76

$$\varepsilon_s \infty = (1.15 \alpha_1 + 0.16) \alpha_2 \cdot \alpha_3 \quad (2.76)$$

แทน  $\alpha_1 = (w/c)^{1.5} c^{1.1} (fc')^{-0.2} [1 - (a/\rho_c)] \cdot \alpha_4$

$\alpha_4 = 0.7 + 0.3 [(a/s) - 1.6]^{-3}$  , สำหรับ  $a/s > 2.6$  และมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับค่าอื่น

$\alpha_2 = 1.0$  สำหรับปูนซีเมนต์ชนิดที่ I

$= 0.85$  สำหรับปูนซีเมนต์ชนิดที่ II

$= 1.1$  สำหรับปูนซีเมนต์ชนิดที่ III

$\alpha_3 = 1.0$  สำหรับชิ้นตัวอย่างบ่มในน้ำ

$= 1.4$  สำหรับชิ้นตัวอย่างปิดผนึก

$= 0.74$  สำหรับชิ้นตัวอย่างบ่มไอน้ำ

เมื่อ  $a/s$  = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดต่อมวลรวมละเอียด

$w/c$  = อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำต่อปูนซีเมนต์

$a/\rho_c$  = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

$c$  = ปริมาณของปูนซีเมนต์ ( $lb/ft^3$ )

$fc'$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (psi)

### 5.2.2 การคืบ

การประมาณค่าความเครียดของการคืบของคอนกรีต สามารถได้จากความเครียดของการคืบเบื้องต้นรวมกับการคืบแห้ง ดังแสดงในสมการที่ 2.77

$$\epsilon_{\text{creep}} = \sigma \cdot F(\sigma) \cdot [C_o(t, t_o) + C_d(t, t_o, t_{sh}) + C_p(t, t_o, t_{sh})] \quad (2.77)$$

เมื่อ  $\sigma$  = หน่วยแรงกระทำต่อตัวอย่าง (MPa)

$F(\sigma)$  = สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรง แสดงในสมการที่ 2.78

$C_o(t, t_o)$  = การคืบเบื้องต้น แสดงในสมการที่ 2.79

$C_d(t, t_o, t_{sh})$  = การคืบในช่วงเวลาแห้งตัว แสดงในสมการที่ 2.80

$C_p(t, t_o, t_{sh})$  = การคืบก่อนแห้งตัว แสดงในสมการที่ 2.81

สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรง

$$F(\sigma) = (1+3s^5)/(1-\Omega) \quad (2.78)$$

แทน  $s = \sigma / fc'$

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

การคืบเบื้องต้น

$$C_o(t, t_o) = q_2 \cdot Q(t, t_o) + q_3 \cdot \ln[1+(t-t_o)] + q_4 \cdot \ln(t/t_o) \quad (2.79)$$

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

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

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

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

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

$$q_3 = \alpha \cdot q_2$$

$$c \geq 26 \text{ lb/ft}^3, \alpha = 0.0003 c + 0.0125$$

$$15 \leq c \leq 26 \text{ lb/ft}^3, \alpha = 0.001 c + 0.005$$

$$c \leq 15 \text{ lb/ft}^3, \alpha = 0.01$$

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

เมื่อ  $t$  = อายุของคอนกรีตที่พิจารณา (วัน)

$t_o$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก (วัน)

$c$  = ปริมาณของปูนซีเมนต์ (lb/ft<sup>3</sup>)

$w/c$  = อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำต่อปูนซีเมนต์

$a/\rho_c$  = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

$s/g$  = อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ

$fc'$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (psi)

การคืบในช่วงเวลาแห้งตัว และการคืบก่อนแห้งตัว

$$C_d(t, t_o, t_{sh}) = q_5 \cdot k_h' \cdot \epsilon_{sh\infty} \{ S[(t - t_{sh})/\tau_m] - S[(t_o - t_{sh})/\tau_m] \}^{1/2} \quad (2.80)$$

$$C_p(t, t_o, t_{sh}) = 0.7 \cdot k_h'' \cdot [1/G(7 + t_{sh}) - 0.9^{1/2}] \times \{ S[(t_o - t_{sh})/0.5\tau_m] - S[(t_o - t_{sh})/5\tau_m] \} \cdot C_o(t, t_o) \quad (2.81)$$

แทน  $q_5 = 40 / (fc')^{1/2}$

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

$S_d(t)$  = ดังสมการที่ 2.71

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

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

- เมื่อ  $t$  = อายุของคอนกรีตที่พิจารณา  
 $t_o$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก  
 $t_{sh}$  = อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว  
 $h$  = ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม  
 $h_o$  = ความชื้นสัมพัทธ์ของชั้นตัวอย่างเริ่มต้น (0.98 ถึง 1.00)

### 5.3 แบบจำลองบีสาม ปี 1995

#### 5.3.1 การหดตัว

การประมาณค่าความเครียดของการหดตัวสามารถได้จากความเครียดของการหดตัวสูงสุดคูณกับสัมประสิทธิ์ต่างๆ ดังสมการที่ 2.56 ใน แบบจำลองบีพี ปี 1978 และตัวแปรสัมประสิทธิ์ของเวลาใช้สมการที่ 2.71 ใน แบบจำลองบีพี-เคเอ็ก ปี 1991

สัมประสิทธิ์ขนาดของชิ้นส่วน และ ความหนาประสิทธิผล แสดงในสมการที่ 2.82 และ 2.83

$$\tau_{sh} = k_t (D \cdot k_s)^2 \quad (2.82)$$

$$D = 2(v/s) \quad (2.83)$$

$$k_t = 190.8(t_o)^{-0.08} \cdot (fc')^{-0.25} \quad (\text{วัน} / \text{นิ้ว}^2)$$

- เมื่อ  $D$  = ความหนาประสิทธิผล (นิ้ว.)  
 $v$  = ปริมาตรของตัวอย่าง (นิ้ว.<sup>3</sup>)  
 $s$  = พื้นที่ผิวของตัวอย่าง (นิ้ว.<sup>2</sup>)  
 $fc'$  = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (psi)

สัมประสิทธิ์รูปร่างของตัวอย่าง

แผ่นพื้นขนาดใหญ่ :  $k_s = 1$

ทรงกระบอกขนาดใหญ่ :  $k_s = 1.15$

สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดใหญ่ :  $k_s = 1.25$

ทรงกลม :  $k_s = 1.30$

ทรงลูกบาศก์ :  $k_s = 1.55$

ความเครียดของการหดตัวสูงสุด แสดงในสมการที่ 2.84

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_s \infty [ E(7+600)/E(t_{sh}+\tau_{sh}) ] \quad (2.84)$$

โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ t วัน แสดงในสมการที่ 2.85

$$E(t) = E(28) [ t / (4+0.85t) ]^{0.5} \quad (2.85)$$

ความเครียดของการหดตัวสุดท้าย ( $10^{-6}$ ) แสดงในสมการที่ 2.86

$$\varepsilon_{s\infty} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 (26w^{2.1}(fc')^{-0.28} + 270) \quad (2.86)$$

แทน  $\alpha_1 = 1.0$  สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทที่ I  
 $= 0.85$  สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทที่ II  
 $= 1.1$  สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทที่ III

$\alpha_2 = 1.0$  สำหรับชั้นตัวอย่างบ่มในน้ำ  
 $= 1.2$  สำหรับชั้นตัวอย่างปิดผนึก  
 $= 0.75$  สำหรับชั้นตัวอย่างบ่มไอน้ำ

เมื่อ w = ปริมาณน้ำในคอนกรีต ( lb/ft<sup>3</sup> )

fc' = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (psi)

### 5.3.2 การคืบ

การประมาณค่าความเครียดของการคืบของคอนกรีต สามารถได้จากความเครียดของการคืบเบื้องต้นรวมกับการคืบแห้ง ดังแสดงในสมการที่ 2.87

$$\varepsilon_{creep} = \sigma [ C_0(t, t_0) + C_d(t, t_0, t_{sh}) ] \quad (2.87)$$

เมื่อ  $\sigma$  = หน่วยแรงกระทำต่อตัวอย่าง (MPa)

$C_0(t, t_0)$  = การคืบเบื้องต้น แสดงในสมการที่ 2.88

$C_d(t, t_0, t_{sh})$  = การคืบแห้ง แสดงในสมการที่ 2.89

การคืบเบื้องต้น

$$C_0(t, t_0) = q_2 \cdot Q(t, t_0) + q_3 \cdot \ln[1 + (t - t_0)^n] + q_4 \cdot \ln(t / t_0) \quad (2.88)$$

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

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

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

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

$$m = 0.5 \quad \text{และ} \quad n = 0.1$$

$$q_2 = 451.1 c^{0.5} (fc')^{-0.9}$$

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

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

เมื่อ	$t$	= อายุของคอนกรีตที่พิจารณา
	$t_0$	= อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก
	$c$	= ปริมาณของปูนซีเมนต์ ( lb/ft <sup>3</sup> )
	$w/c$	= อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำต่อปูนซีเมนต์
	$a/c$	= อัตราส่วนน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์
	$fc'$	= กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน (psi)

การคืบแห้ง แสดงในสมการที่ 2.89

$$C_d(t, t_0, t_{sh}) = q_5 [\exp\{-8H(t)\} - \exp\{-8H(t_0)\}]^{1/2} \quad (2.89)$$

$$\text{แทน } q_5 = 7.57 \times 10^5 (fc')^{-1} \varepsilon_{sh\infty}^{-0.6}$$

$$H(t) = 1 - (1 - h)S(t)$$

$$S(t) = \text{ดังสมการที่ 2.71}$$

เมื่อ	$t$	= อายุของคอนกรีตที่พิจารณา
	$t_0$	= อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก
	$t_{sh}$	= อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มแห้งตัว
	$h$	= ความชื้นของสภาพแวดล้อม

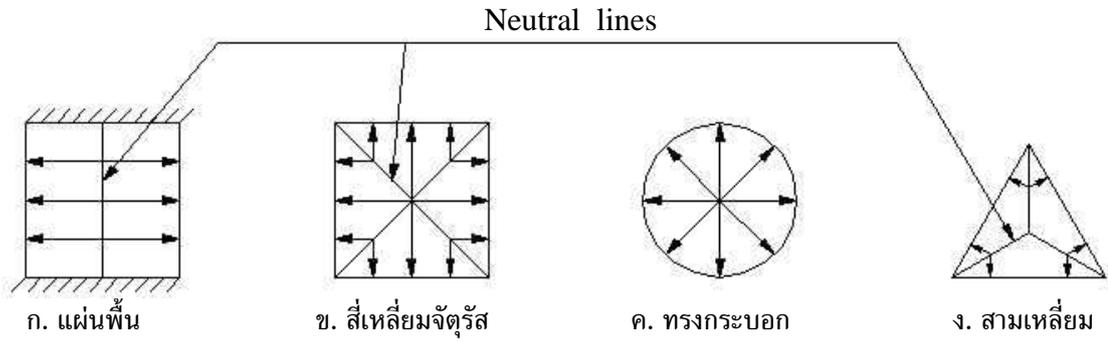
## 6 สมมติฐานเส้นทางการแห้งตัว

Vadhanavikkit C. และ Bryant A.H. ได้แนะนำสมมติฐานเส้นทางการแห้งตัว (Drying Path Hypothesis) และแสดงตัวอย่างแนวทางการกระจายความชื้น (moisture diffusion patterns) ดังภาพที่ 2.18 เมื่อนำสมมติฐานนี้มาศึกษารูปร่างอื่นๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถใช้รูปร่างของแผ่นพื้นและสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาแทนได้ ซึ่งเส้นทางการกระจายความชื้นเหมือนกัน ดังภาพที่ 2.19 รูปร่างส่วนใหญ่ของโครงสร้างคอนกรีตจะประกอบไปด้วยรูปร่างแผ่นพื้นและสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจะเรียกรูปร่างทั้ง 2 นี้ว่าเป็นรูปร่างพื้นฐาน (basic shapes) และสัญลักษณ์แทนด้วย  $H$  และ  $X$  โดยพิจารณาจากรูปแบบของเส้นแบ่งการกระจายความชื้น (neutral lines) ดังภาพที่ 2.20

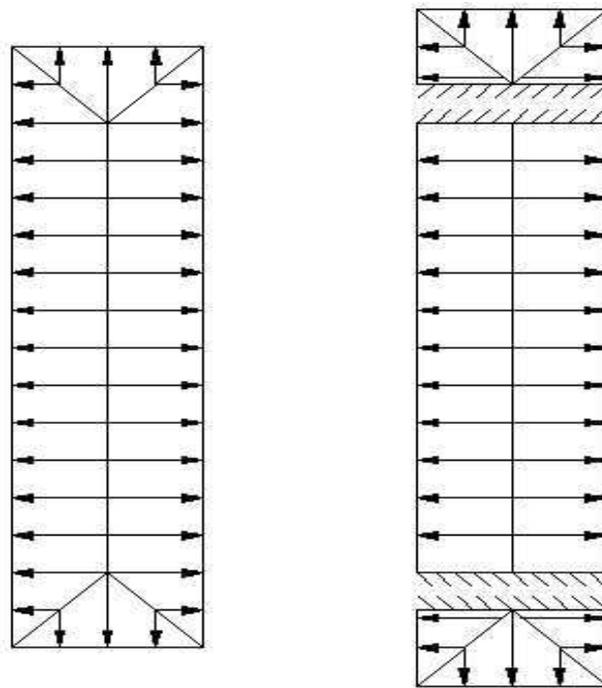
ผลกระทบของรูปร่างและขนาดต่อการหดตัวของคอนกรีต จะเปลี่ยนแปลงตามความยาวของค่าเฉลี่ยเส้นทางการแห้งตัว ( $\bar{d}_p$ ) ของชิ้นส่วน เส้นทางการแห้งตัวเฉลี่ยที่ยาวจะทำให้การหดตัวซ้ำ รูปร่างของชิ้นส่วนที่แตกต่างกันแต่เส้นทางการเฉลี่ยเท่ากันเป็นผลให้อัตราการหดตัวเท่ากัน สำหรับเส้นทางการแห้งตัวเฉลี่ยของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตจะเฉลี่ยจากระยะทางความชื้นที่เคลื่อนตัวไปยังผิวแห้ง ค่าเฉลี่ยของเส้นทางการแห้งตัวคำนวณได้จากสมการที่ 2.90

$$\bar{d}_p = \Sigma (V \cdot dp) / Vt \quad (2.90)$$

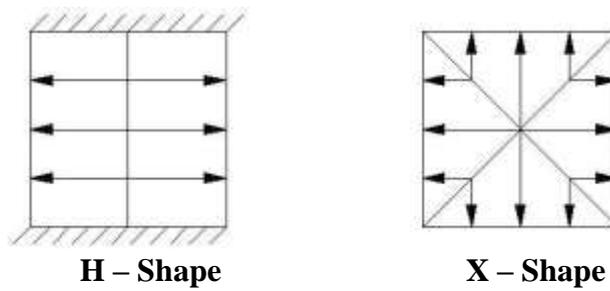
เมื่อ	$\bar{d}_p$	= ค่าเฉลี่ยของเส้นทางการแห้งตัวของชิ้นส่วนตัวอย่าง
	$dp$	= ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง ถึงผิวที่แห้งของปริมาตร
	$V$	= ปริมาตรคอนกรีตของระยะ $dp$
	$Vt$	= ปริมาตรคอนกรีตทั้งหมดของชิ้นส่วน



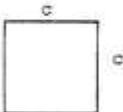
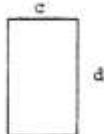
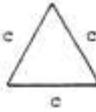
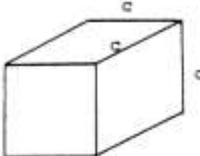
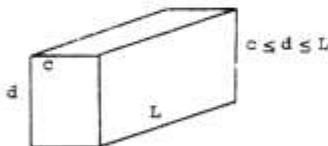
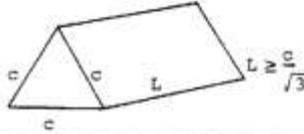
ภาพที่ 2.18 แสดงตัวอย่างแนวทางการกระจายความชื้น (Vadhanavikkit, Bryant, 1984)



ภาพที่ 2.19 แสดงแนวทางการกระจายความชื้นของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Vadhanavikkit, Bryant, 1984)



ภาพที่ 2.20 แสดงรูปร่างพื้นฐาน (Vadhanavikkit, Bryant, 1984)

Member Shapes	Equivalent Thickness $T_d = 4 \frac{d}{p}$	Effective Thickness $T_e = 2 V/S$
1) a slab 	c	c
2) a square prism 	$\frac{2}{3} c$	$\frac{2}{3} c$
3) a rectangular prism $c \leq d$ 	$\frac{(c-c^2)}{3d}$	$\frac{cd}{(c+d)}$
4) an equilateral triangular prism 	$\frac{2\sqrt{3}}{9} c$	$\frac{\sqrt{3}}{6} c$
5) a cube 	$\frac{2}{3} c$	$\frac{2}{3} c$
6) a short rectangular prism  $c \leq d \leq L$	$\frac{c}{6dL} (c^2 - 2c(d+L) + 6dL)$	$\frac{cdL}{(cd+dL+Lc)}$
7) a short equilateral triangular prism  $L \geq \frac{c}{\sqrt{3}}$	$\frac{4\sqrt{3}cL - c^2}{18L}$	$\frac{\sqrt{3}cL}{(6L + \sqrt{3}c)}$

ภาพที่ 2.21 แสดงค่าการคำนวณสี่เท่าของเส้นทางการแห้งตัวเฉลี่ย เทียบกับสองเท่าของอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว (Vadhanavikkit, Bryant, 1984)

นำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับสองเท่าของอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวของแผ่นพื้น

$$Td = 4 \cdot \bar{dp} = 2 \cdot V/S$$

ผลการคำนวณแสดงค่าสี่เท่าของเส้นทางการแห้งตัวเฉลี่ย(Td) ของรูปร่างต่างๆ ในภาพที่ 2.21 และตัวอย่างการคำนวณหาค่า Td จากหน้าตัดรูปตัวไอ ดังภาพที่ 2.22 หน้าตัดรูปตัวไอสามารถหาค่าประมาณของเส้นทางการแห้งตัวเฉลี่ยได้จากการรวมรูปของแผ่นพื้นเทียบกับความลึกของปีก และเทียบกับความกว้างของแผ่นตั้งตัวไอ ดังภาพที่ 2.23

วิธีคำนวณหาค่าเส้นทางการแห้งตัวเฉลี่ย ของหน้าตัดรูปตัวไอ

เนื่องจากหน้าตัดรูปตัวไอสมมาตรทั้ง 2 แขน จึงพิจารณาเพียง 1 ใน 4 ส่วน

เขียนเส้นแบ่งการกระจายความชื้นทุกพื้นที่ผิวแห้ง

หาค่า  $\Sigma(A \cdot dp)$

$$\begin{aligned} \text{พื้นผิว A:} &= 2.8 \times (5.7)^2 / 2 + (5.7)^3 / (2 \times 3) + 2.8 \times 1.1 (5.7 + 1.1 / 3) / 2 \\ &= 85.69 \text{ in}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พื้นผิว B:} &= 8 \times (5.7)^2 / (2 \times 3) \\ &= 43.32 \text{ in}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พื้นผิว C:} &= 7 \times (3.5)^2 / 2 + 4 \times 2.1 (3.5 + 2.1 / 2) + 4 \times 1.2 (2.1 + 3.5 + 1.2 / 3) / 2 \\ &\quad + 3 \times 2.1 (3.5 + 2.1 / 2) / 2 \\ &= 109.83 \text{ in}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พื้นผิว D:} &= 10 \times (3.5)^2 / 2 + 1.5 \times 3.5 / 2 + 2 \times 3.5 / 3 \\ &= 67.38 \text{ in}^3 \end{aligned}$$

$$\Sigma(A \cdot dp) = 306.22 \text{ in}^3$$

หาค่า Td เมื่อ  $A = 133 \text{ in}^2$

$$Td = 4 \cdot \bar{dp} = 4 \times 306.22 / 133 = 9.20 \text{ in}$$

วิธีการคำนวณหาค่า Td โดยประมาณ

$$\begin{aligned} Td &= (8.5 \times 10.5 \times 10.5 + 12.5 \times 3.5 \times 7) / 133 \\ &= 9.35 \text{ in} \end{aligned}$$

สมมติฐานของเส้นทางการแห้งตัว ได้นำไปใช้กับชิ้นส่วนที่เส้นทางการกระจายความชื้นขนานกันและจะแห้งออกจากผิวที่เรียบ สำหรับการประยุกต์ใช้กับผิวโค้ง เช่น ทรงกระบอกการกระจายความชื้นจะกระจายตามเส้นรัศมีแต่ไม่เป็นจริง ดังนั้นการใช้เส้นทางการแห้งตัวสำหรับรูปทรงกระบอกจะใช้ผลการทดลองของ Keeton ช่วยในการหาค่าจากตัวอย่างที่ความชื้น 50% และอัตราส่วนของปริมาตรต่อพื้นที่ผิวดังภาพที่ 2.24 ค่าการหดตัวของรูปทรงกระบอกจะมากกว่า 20-25% ของรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวเท่ากัน ความเข้ากันได้ของค่าการหดตัวของทรงกระบอกกับสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะได้ความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.91

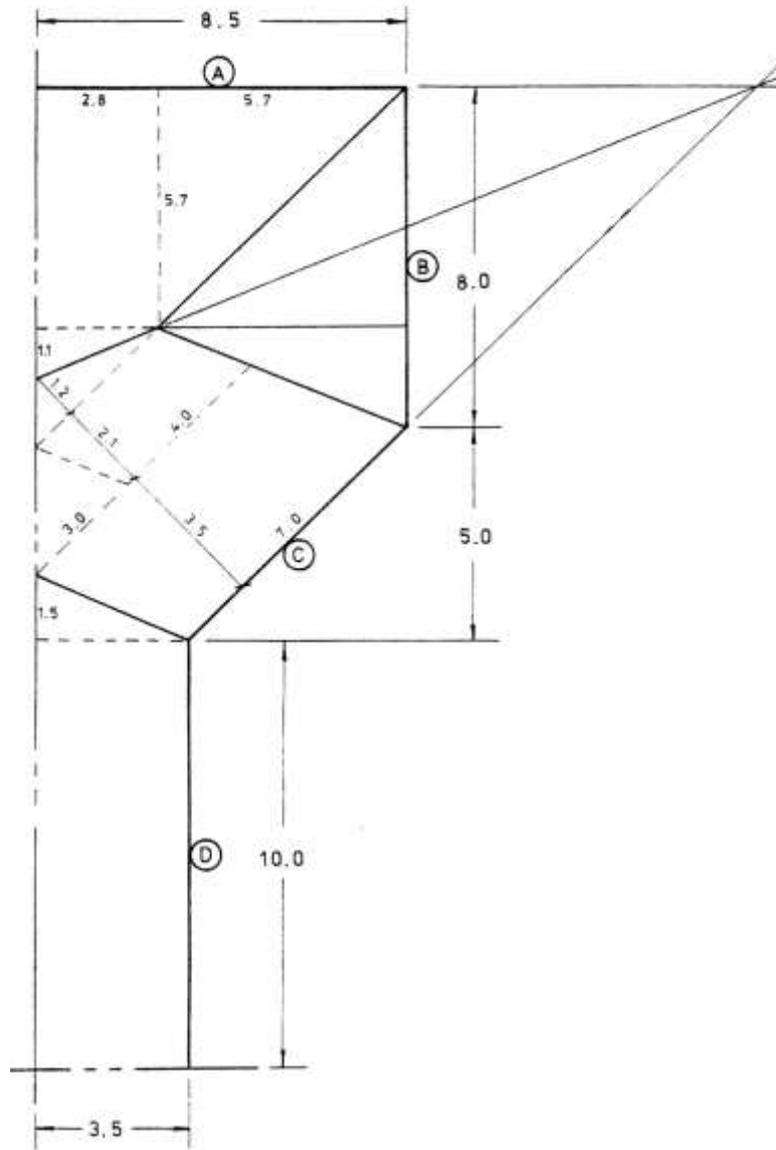
$$Cx = do / 1.5 \quad (2.91)$$

เมื่อ  $do$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอก

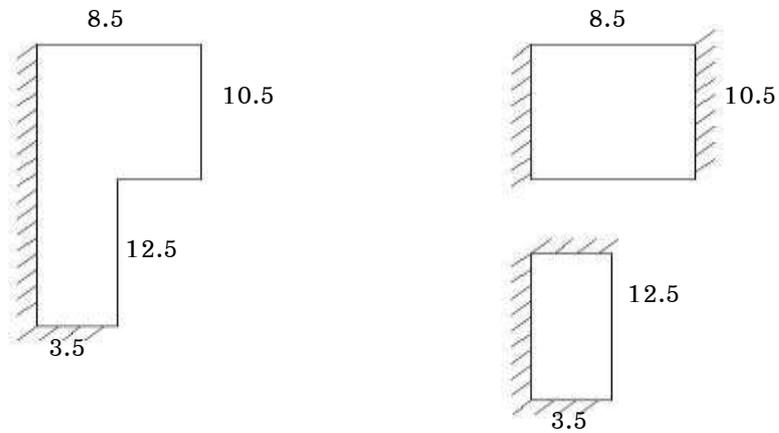
$Cx$  = ด้านของสี่เหลี่ยมพื้นผ้า

และเมื่อนำเส้นทางการแห้งตัวของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาเทียบกับผลการทดลองของ Keeton จะได้ดังสมการที่ 2.92 และแสดงให้เห็นดังภาพที่ 2.25

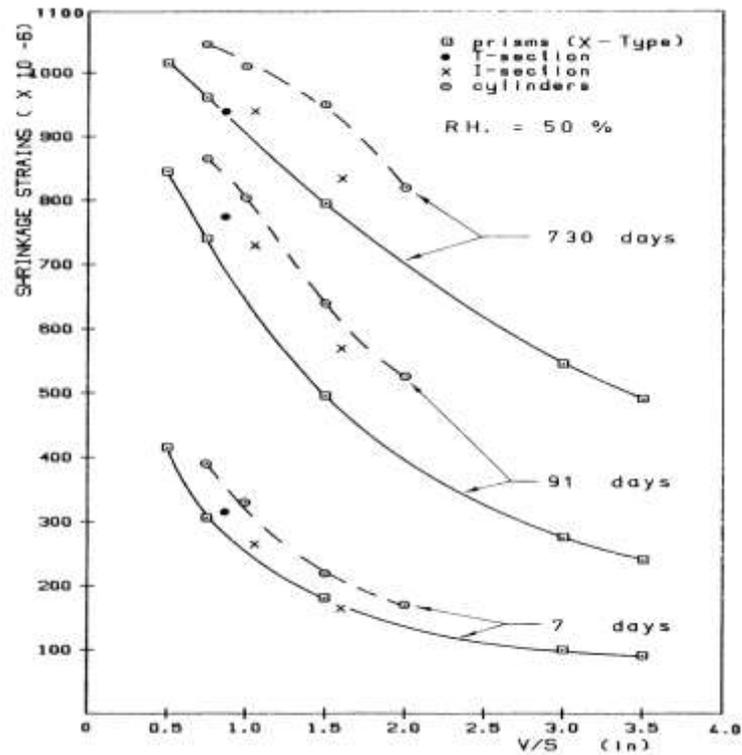
$$\begin{aligned} Td &= Cx / 1.5 \\ \text{ดังนั้น } Td &= do / 2.25 \end{aligned} \quad (2.92)$$



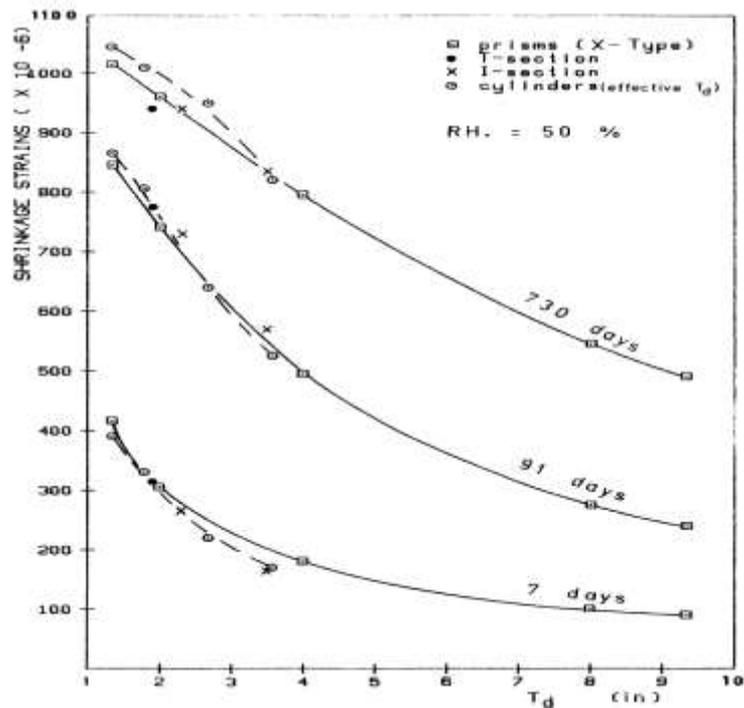
ภาพที่ 2.22 แสดงรูปหน้าตัดตัวไอโซในการคำนวณ (Vadhanavikkit, Bryant, 1984)



ภาพที่ 2.23 แสดงรูปหน้าตัดตัวไอโซในการประมาณค่า (Vadhanavikkit, Bryant, 1984)



ภาพที่ 2.24 แสดงความเครียดของการหดตัวรูปร่างต่างๆเทียบกับอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว ที่ความชื้นของสภาพแวดล้อม 50 % (Vadhanavikkit, Bryant, 1984)



ภาพที่ 2.25 แสดงความเครียดของการหดตัวรูปร่างต่างๆเทียบกับสมมติฐานเส้นทางการแห้งตัว ที่ความชื้นของสภาพแวดล้อม 50 % (Vadhanavikkit, Bryant, 1984)