บทที่ 3

การวิเคราะห์

ได้มีนักวิจัย วิจัยถึงพฤติกรรมการคืบตัวและการหดตัวของคอนกรีตและได้เสนอทฤษฎีเพื่ออธิบายและคาดคะเนพฤติกรรมการคืบตัวและการหดตัวของคอนกรีต พอสรุปได้ดังนี้ คือ

3.1 ทฤษฎี Visco Elastic

ทฤษฎีนี้เป็นทฤษฎีหลักที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการคืบตัวของคอนกรีต ทฤษฎีนี้แบ่งคอนกรีตออกเป็น 2 ส่วน คือ ซีเมนต์เพสท์ที่มีคุณสมบัติไหลหนืด และมวลรวมที่มีคุณสมบัติอีลาสติค เมื่อคอนกรีตรับแรงกระทำซีเมนต์เพสท์จะไหลหนืดขณะที่มวลรวมรับแรงกระทำเมื่อเวลาผ่านไปหน่วยแรงในมวลรวมจะมากขึ้น ขณะที่หน่วยแรงในซีเมนต์เพสท์ลดลงอัตราการคืบตัวของคอนกรีตจะลดลงเมื่อหน่วยแรงในซีเมนต์เพสท์ลดลง

U.J. Counto[8] อธิบายการคืบตัวของคอนกรีตโดยให้ทฤษฎีนี้ว่าการที่มีมวลหยาบมีผลต่อการคืบตัวเนื่องจากเมื่อคอนกรีตรับแรงกระทำทั้งซีเมนต์เพสท์ และมวลหยาบจะรับแรงกระทำแต่เนื่องจากซีเมนต์เพสท์มีคุณสมบัติไหลหนืดเมื่อรับแรงกระทำไหลหนืดทำให้รับแรงกระทำได้ลดลง ทำให้มวลหยาบรับแรงมากขึ้นมวลหยาบที่มีค่าอีลาสติคโมดูลัสสูงจะรับแรงกระทำได้มากทำให้เกิดหน่วยแรงในซีเมนต์เพสท์น้อยทำให้เกิดการคืบตัวน้อย

Hansen[11] ได้เสนอรูปจำลองเชิงกล Burger ดังแสดงในรูปที่ 3ข โดยมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือสปริงที่มีคุณสมบัติอีลาสติคและ Dashpot ที่มีคุณสมบัติไหลหนืดประกอบกัน รูปจำลองนี้ประกอบด้วยตัวคงที่ 4 อย่างคือ Gm, Øm, Gk และ Øk จึงมีค่าเปลี่ยนไปตามเวลา

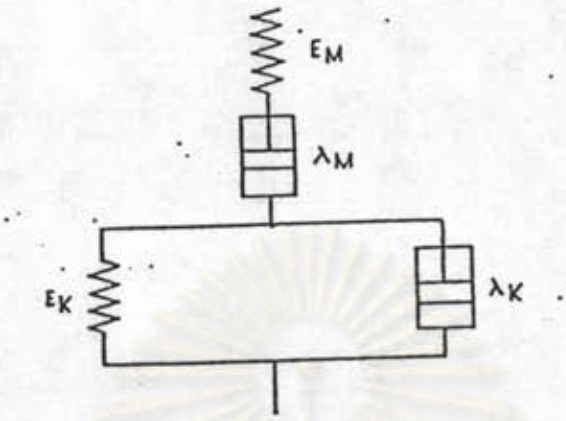
Hansen[11] ได้วิจัยหาสูตรแสดงค่าการคืบตัวของคอนกรีตที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% โดยหาค่าคงที่จากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ปริมาณของซีเมนต์เพสท์, ชนิดของซีเมนต์, อายุและระยะเวลาที่รับแรงกระทำ ดังนี้

$$\frac{\varepsilon_c}{\sigma} = \frac{\beta\ (.31\ hk + \frac{Wo}{c})\ Vl\ (1-e^{-m(t_1-t_o)}) + \alpha_1 \frac{Wo}{c}\ V_1\ Ln\ \frac{tl}{to}}{(NKl + .31)\ hk} \quad \text{----------(1)}$$

โดยมี α_1, β, m เป็นค่าคงที่

$\frac{Wo}{c}$ = อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

V_1 = ปริมาณของซีเมนต์เพสท์



รูปที่ 42 แสดงรูปจำลอง Burger

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

hk = อัตราของปฏิกริยาของซีเมนต์กับน้ำเมื่อรับแรงกระทำ

K_1 = อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำที่ระเหยไม่ได้ต่อน้ำหนักซีเมนต์เมื่อเกิดปฏิกริยาเต็มที่

t_1 = อายุคอนกรีต

N = .75 (1 + 4k)

K = .23 (C3S) - .32 (C2S) + .317 (C3A) + .368 (C4AF)

t_o = อายุคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำ

ค่าการคืบตัวที่ได้จากสูตรนี้จะเป็นค่าการคืบตัวของคอนกรีตที่บ่มและเก็บในน้ำโดยมีค่าคงที่

$\beta = 1.76 \times 10^{-6}$, m = 0333, $\alpha = 5.7 \times 10^{-6}$

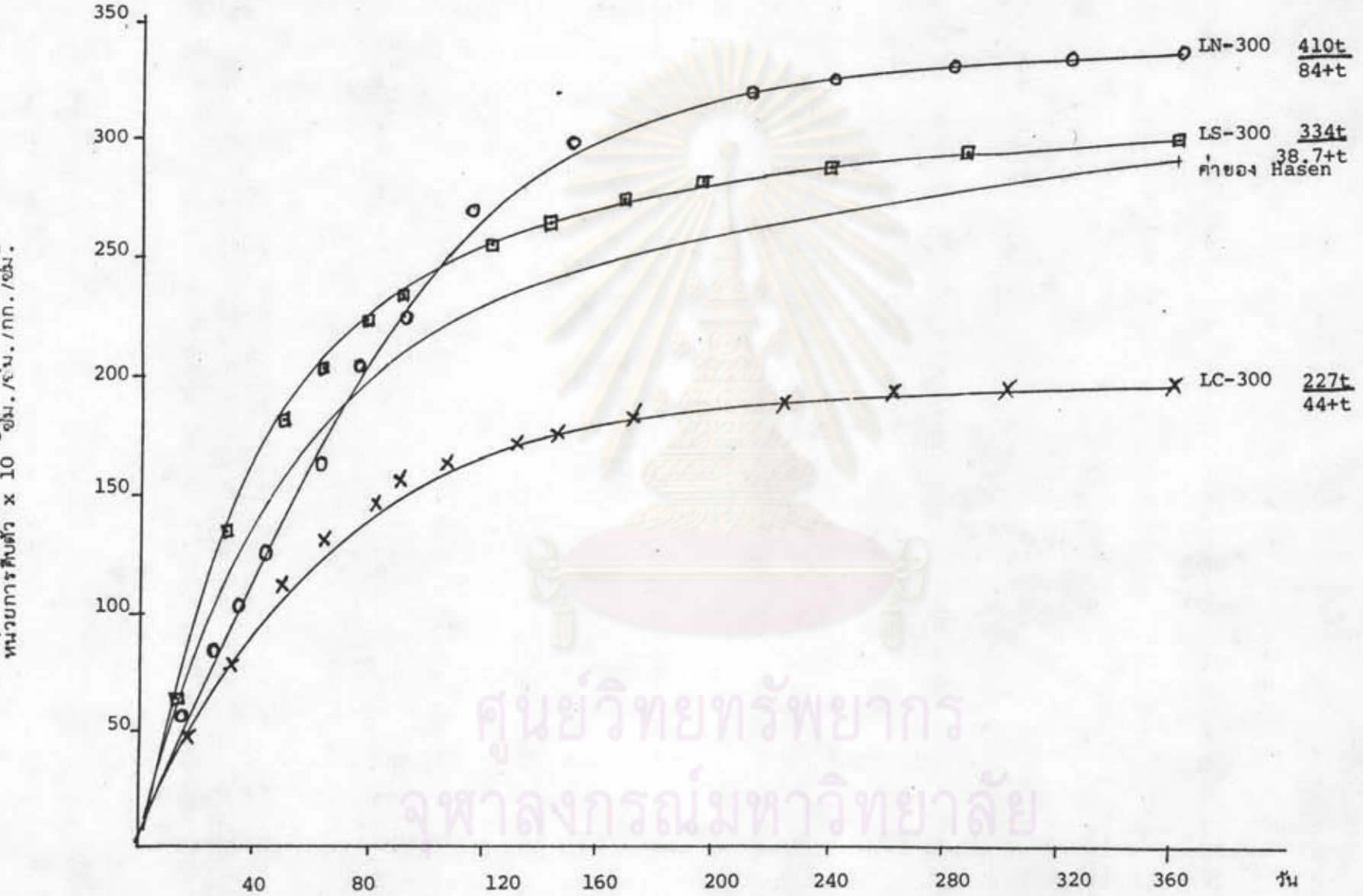
Hansen[11] ได้ดัดแปลงให้ใช้วิธีการของ Wagner ในการหาค่าการคืบตัวของคอนกรีตที่ความชื้นสัมพัทธ์อื่น ๆ

เมื่อใช้สมการที่ 1 คำนวณค่าหน่วยการคืบตัวของคอนกรีตจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 39 และ 40 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจะพบว่า มีค่าใกล้เคียงกับค่าการคืบตัวของตัวอย่างทดสอบ

3.2 ทฤษฎี Seepage

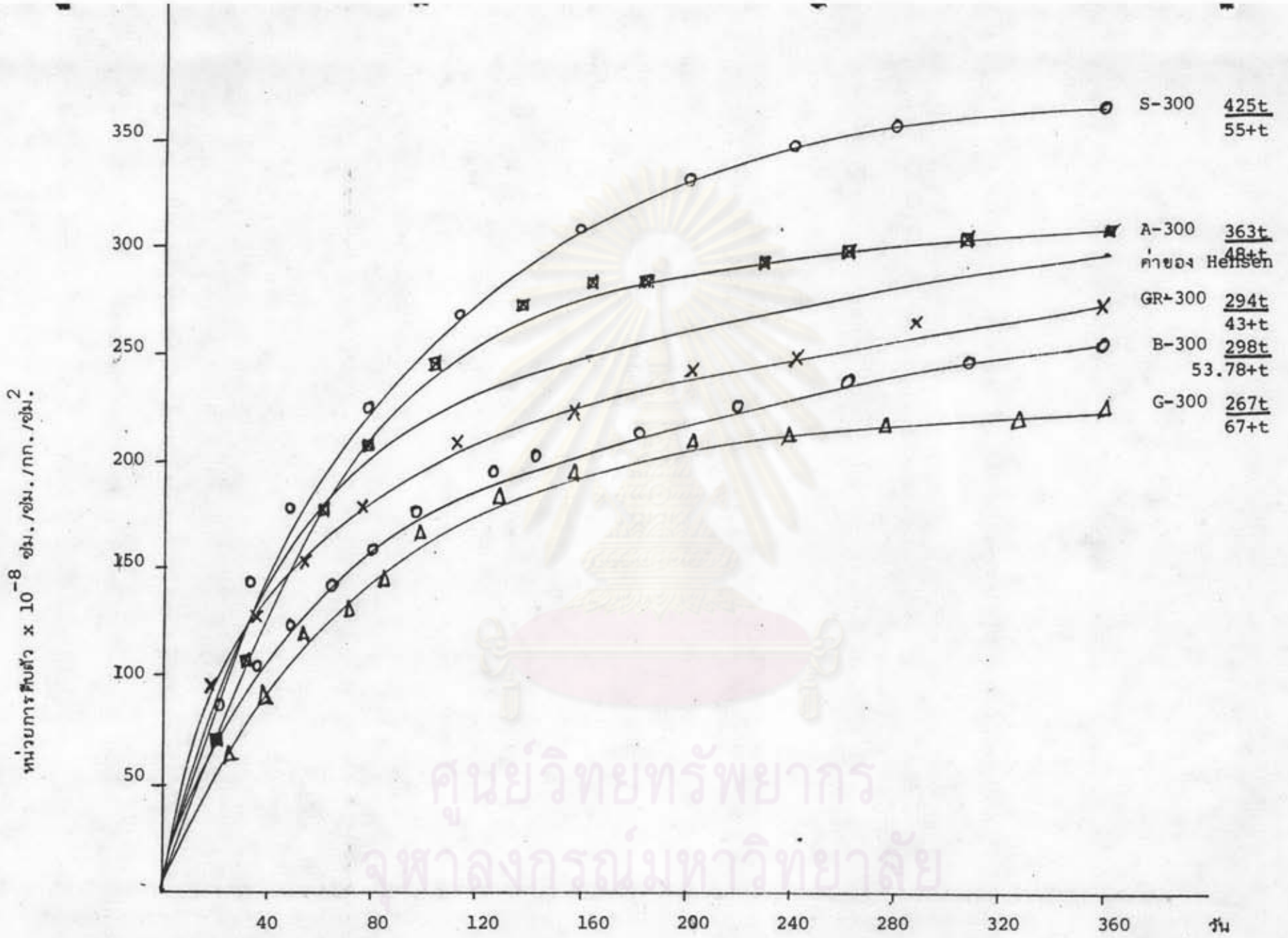
Wallo[18] ได้แบ่งการคืบตัวของคอนกรีตออกเป็น 2 แบบ คือ การคืบตัวเบื้องต้นเกิดจากแรงกระทำโดยไม่มีการไหลของน้ำในคอนกรีต กล่าวคือเป็นการคืบตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% และการคืบตัวเนื่องจากความชื้นเกิดจากการที่น้ำไหลออกจากคอนกรีตเนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

ทฤษฎีนี้เสนอโดย Lynam[16] ทฤษฎีนี้อธิบายการคืบตัวของคอนกรีตว่าเกิดเมื่อคอนกรีตรับแรงกระทำจะทำให้น้ำอิสระในซีเมนต์เพสท์ถูกขับไหลออกมาที่ผิวนอกของคอนกรีตทำให้หน่วยแรงกระทำต่อน้ำลดลงถ่ายเทไปยังที่ซีเมนต์เพสท์และมวลรวม ทฤษฎีได้อธิบายพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตว่ามีพฤติกรรมเหมือนกับการคืบตัวต่างกันที่การหดตัวเกิดจากแรงดันภายในคอนกรีตมีค่าสูงกว่าแรงดันอากาศภายนอก



รูปที่ 43 แสดงค่าการคืบตัวที่คำนวณโดยใช้รูปจำลอง Hensen กับผลการทดลองยุดหินปูน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 44 แสดงค่าการคืบตัวที่คำนวณโดยใช้รูปจำลองของ Hensen กับผลการทดลองยุดดินอื่น ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คอนกรีตเมื่อหล่อแล้วเล็กจะเกิดปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดซีเมนต์เจล ซึ่งมีลักษณะพรุนและช่องว่างมาก ช่องว่างระหว่างเจลจะมีขนาดเล็กมากประมาณ 40-50A ซึ่งจะเท่ากับความหนาของน้ำ 4-5 โมเลกุล ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตทั่วไปจะมีปริมาณมากกว่าที่ต้องการสำหรับทำปฏิกริยากับน้ำ น้ำส่วนที่เหลือนี้จะอยู่ในช่องว่าง Capillary Channel ซึ่งมีขนาดประมาณ 100 เท่าของช่องว่างในเจล เมื่อ Capillary Channel มีน้ำเต็มปฏิกริยาซีเมนต์กับน้ำจะเกิดต่อเนื่องมีผลทำให้เกิดซีเมนต์เจลในช่วง Capillary Channel

Gucklich, Ishai [17] แบ่งน้ำในคอนกรีตเป็น 3 สภาพ คือ

1. น้ำใน Capillary
2. น้ำในช่องว่างในเจล
3. น้ำในเจล

น้ำใน Capillary จะเป็นน้ำอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น

น้ำในช่องว่างเจลถูกขับออกยากกว่าน้ำใน Capillary เนื่องจากช่องว่างในเจลมีขนาดเล็กน้ำสภาพนี้จะไม่ถูกขับออกเนื่องจากความชื้นที่เปลี่ยนแปลงมีเพียงแรงดันระทำที่มีค่าสูงเท่านั้นที่จะขับน้ำนี้ออกมาได้ แต่จะเกิดชื้นได้ช้าเนื่องจากความฝืดระหว่างน้ำกับซีเมนต์เจล

น้ำในซีเมนต์เจลจะถูกขับออกยากมากเนื่องจากน้ำในเจลจะมีสภาพเสมือนเป็นของแข็งเนื่องจากช่องที่น้ำนี้อยู่มีขนาดเล็กมาก

Wallo [18] ได้เสนอรูปจำลองของส่วนประกอบของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 41 และได้เสนอรูปจำลองแสดงพฤติกรรมการคืบตัวของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 42 และได้เสนอสมการแสดงค่าการคืบตัวที่อุณหภูมิ $70^{\circ}F$ และความชื้นสัมพัทธ์ 100%

$$\frac{\varepsilon}{\sigma} = \beta \left[225\ (1-e^{-t/35}) + 115\ (1-e^{-t/2}) + .3t \right] \times 10^{-9} \quad \text{---} (2)$$

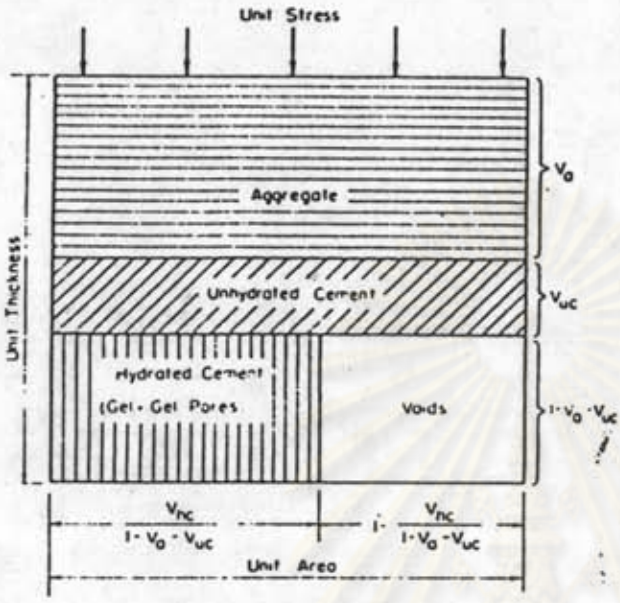
$$\beta = \left[1 - \frac{Va - (1-h)\ Vc}{ghVc} \right]^2$$

h = Degree of Hydrate

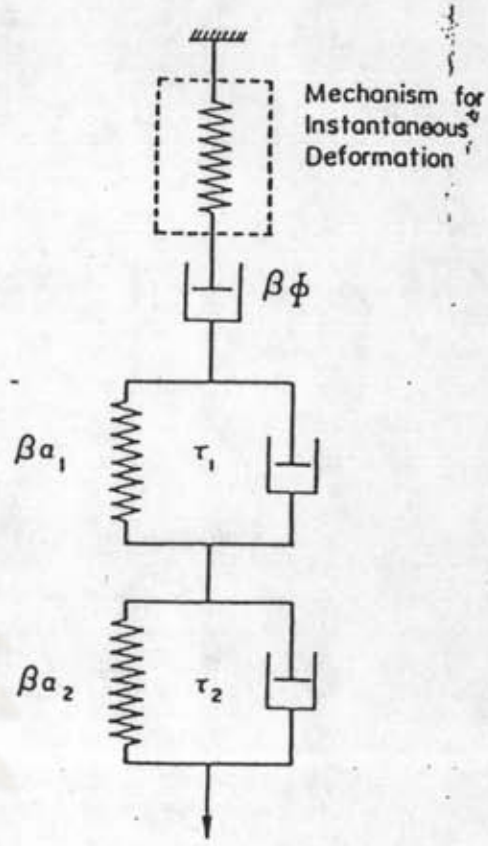
g = ค่าคงที่ตัวแทนปริมาณของเจล

Vc = ปริมาณของซีเมนต์

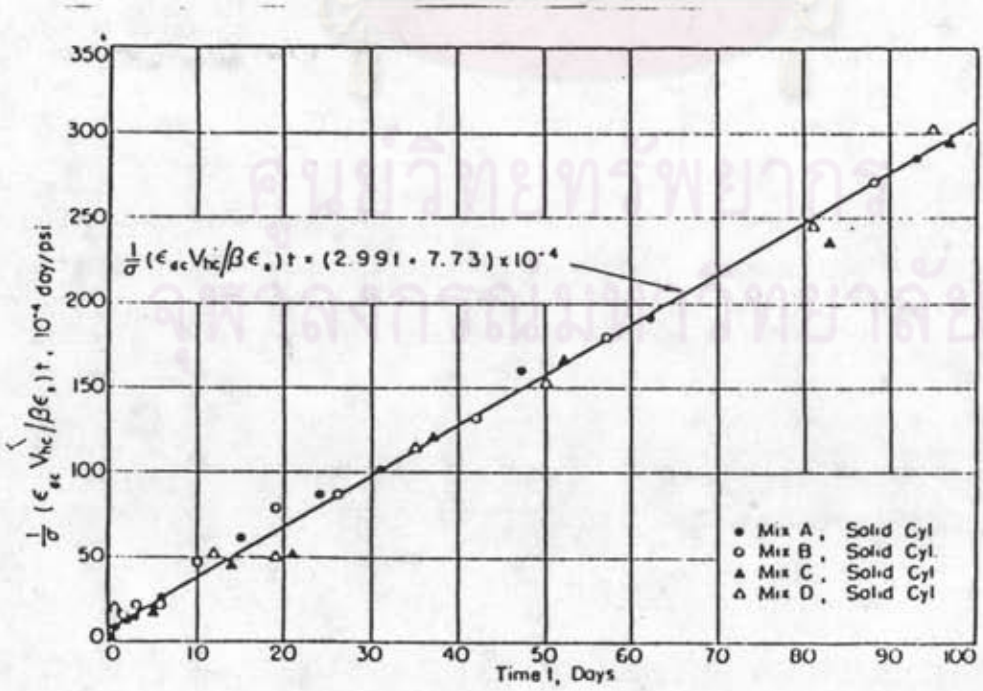
Va = ปริมาณของมวลรวม



รูปที่ 45 รูปแสดงส่วนประกอบของคอนกรีต



รูปที่ 46 รูปจำลองแสดงพฤติกรรมของคอนกรีต



รูปที่ 47 แสดงค่า Unit Drying Creep

และ Wallo ได้ใช้สมมุติฐานที่ว่าการหดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความชื้นและปริมาณ Hydrated Cement Pate และมวลรวม โดยใช้สมการของ Dutson และค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองหาสมการแสดงค่าการหดตัวคือ

$$\varepsilon_s = (2400-2100\ Vhe)(1-Vs)(.96\ Log\ \frac{105-R}{5})(1-e^{-.1(S/V)\ t.65}) \times 10^{-6} \quad \text{----------(3)}$$

Vhc = ปริมาณของ Hydrated Cement

Vs = ปริมาณของมวลรวมและ Unhydrate Cement

R = ความชื้นสัมพัทธ์

และค่าการคืบตัวเนื่องจากความชื้นโดยใช้ค่า Unit dry Creep จากรูปที่ 43 ซึ่งใช้สมมุติฐานที่ว่า Drying Creep เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการหดตัว

$$\varepsilon = \frac{6\beta\ \varepsilon_s}{Vhc}(2.99 + \frac{7.73}{t}) \times 10^{-4} \quad \text{----------(4)}$$

เมื่อใช้สมการที่ 2-4 กับตัวอย่างทดสอบครั้งนี้จะได้ค่า ดังแสดงในรูปที่ 44 และ 45 จะพบว่าค่าการคืบตัวจากรูปจำลองนี้สูงกว่าค่าการทดสอบแต่ใกล้กับของหินทราย, ค่าการหดตัวให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบของยูตหินปูน

3.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับวิธีการประมาณค่าการคืบตัวและการหดตัวของคอนกรีต

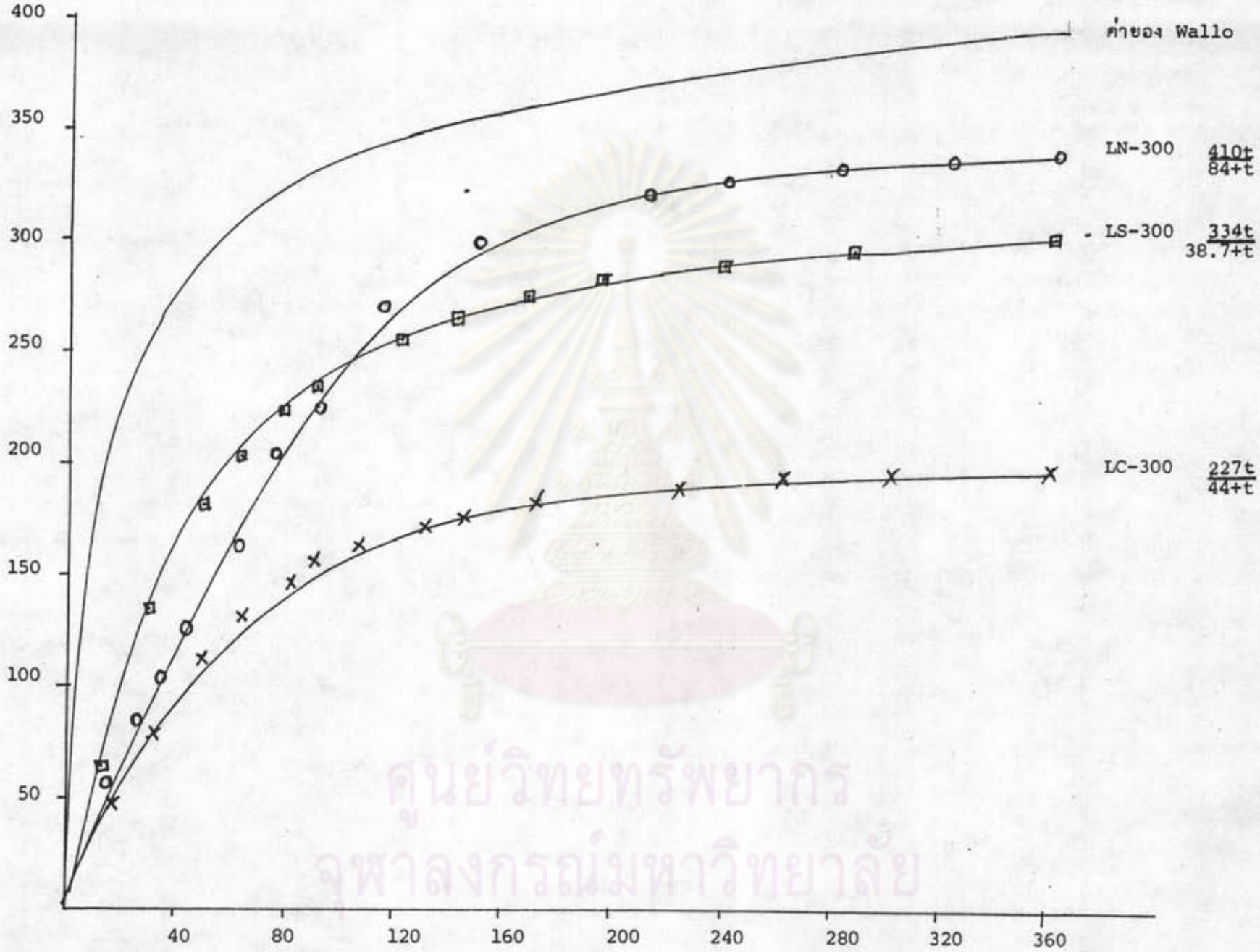
Branson[12, 19] ได้เสนอวิธีการประมาณค่าการคืบตัวและหดตัวของคอนกรีตที่เป็นที่ยอมรับใช้งานกันทั่วไปโดยใช้สมการมาตราฐานและตัวแปรกอบแก้ไขสมการ

เมื่อใช้สมการของ Branson ประมาณค่าการคืบตัวและการหดตัวของคอนกรีตแปรมวลสยาบ และคอนกรีตแปรกำลังที่อายุ 1 ปี จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 19 และ 20

จะพบว่าค่าการคืบตัวประมาณโดยสมการของ Branson ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากจะให้ค่าที่ต่างจากผลการทดลอง $\pm$ 20% ยกเว้นบะซอลท์เพียงอย่างเดียว แต่ค่าการหดตัวที่คำนวณจากสมการของ BranSon มีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการทดลอง

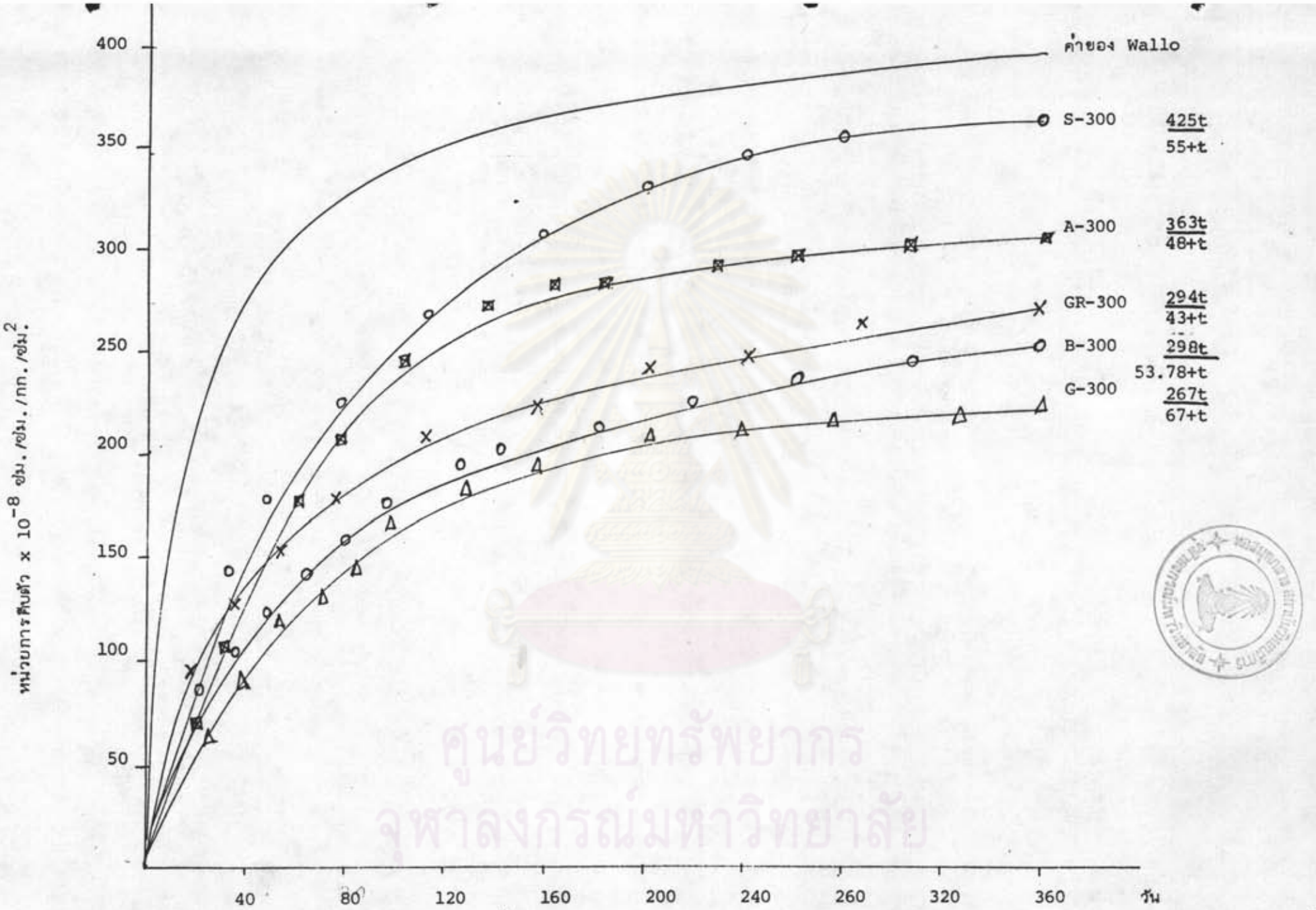
ค่าการหดตัวอีลาสติคคำนวณโดยใช้มาตราฐาน ACI และผลการทดสอบแสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 21

ค่าการคืบตัวและการหดตัวคำรวณโดยใช้ PCI[20] ของตัวอย่างทดสอบแสดงเปรียบเทียบ



รูปที่ 48. แสดงค่าการคืบตัวคาดคะเนโดยวิธีการของ Wallo กับผลทดลองยูคาลิปตัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 49 แสดงค่าการคืบตัวคาดคะเนโดยวิธีการของWallo กับผลการทดลองยุดหินปูนอื่น ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 19 เปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Branson สำหรับตัวอย่างทดลองแปรมวลหยาบ

ตัวอย่างทดลอง	หน่วยการคืบตัวที่เวลา 360 วัน ผลการทดลอง ($\times 10^{-8}$)	สมการ ของ Branson
LC-300	200	197
LN-300	330	300
LS-300	301	295
G-300	219	250
GR-300	276	313
A-300	309	317
B-300	260	340
S-300	371	396

ตารางที่ 20 เปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Brason สำหรับตัวอย่างทดลองแปรกำลัง

ตัวอย่างทดลอง	หน่วยการคืบตัวที่เวลา 360 วัน ผลการทดลอง ($\times 10^{-8}$)	สมการของ Branson	การหดตัวที่ 360 วัน ผลการทดลอง ($\times 10^{-6}$)	สมการของ Branson
LC-250-20	260	205	273	214
LC-300-20	200	184	286	217
LC-350-20	220	209	190	214
LC-400-20	238	190	235	213

ตารางที่ 21 เปรียบเทียบค่าการหดตัวอีลาสติคคำนวณโดยใช้มาตราฐาน ACI กับผลการทดลอบ และเปรียบเทียบค่าการคืบตัว และการหดตัวโดยใช้วิธีของ PCI กับผลการทดลอบ

ตัวอย่างทดลอบ	ค่าการหดตัวอีลาสติค จากผลการทดลอบ $\times 10^{-8}$ ซม./ซม.	ค่าการหดตัวอีลาสติค โดยมาตราฐานACI $\times 10^{-8}$ ซม./ซม.	ค่าหน่วยการคืบตัว จากผลการทดลอบ $\times 10^{-8}$ ซม./ซม.	ค่าหน่วยการคืบตัว โดยวิธีPCI $\times 10^{-8}$ ซม./ซม.	ค่าหน่วยการหดตัว จากผลการทดลอบ $\times 10^{-6}$ ซม./ซม.	ค่าหน่วยการหดตัว โดยวิธี PCI $\times 10^{-6}$ ซม./ซม.
LC-300	207	423	200	495	286	234
LN-300	306	395	330	731	300	377
LS-300	301	410	301	719	254	364
A-300	323	364	309	772	361	420
B-300	346	374	260	827	305	353
G-300	255	383	219	609	353	289
GR-300	319	384	276	762	312	410
S-300	403	434	371	963	423	624
LC-250	227	428	260	542	273	257
LC-350	249	391	220	595	190	282
LC-400	233	349	238	557	235	264

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กับผลการทดลองในตารางที่ 21 ค่าการคืบตัวคำนวณโดยใช้วิธีของ PCI มีค่าสูงกว่าผลการทดลอง มากแต่ค่าการหดตัวคำนวณโดยใช้วิธีของ PCI มีค่าใกล้เคียงผลการทดลอง

3.4 ผลของมวลหยาบต่อการคืบตัวและการหดตัว

การที่คอนกรีตผสมด้วยหินทรายมีค่าการคืบตัวสูงกว่าคอนกรีตผสมด้วยมวลหยาบอื่น เกิดจากการที่หินทรายมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่ามวลหยาบอื่น หน่วยการหดตัวอีลาสติคแปรเป็นส่วนกลับกับโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลหยาบ[8] และแปรตามการดูดซึมของมวลหยาบการที่มวลหยาบที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะผสมให้คอนกรีตที่มีค่าการคืบตัวสูงเนื่องจากเมื่อคอนกรีตรับแรงกระทำตามทฤษฎี Visco Elastic ซีเมนต์เพสท์จะไหลหนืดขณะที่มวลหยาบรับแรงกระทำมวลหยาบที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำจะมีค่าการหดตัวสูงทำให้แรงที่กระทำต่อซีเมนต์เพสท์มีค่าสูงทำให้ค่าการคืบตัวมีค่าสูงแสดงว่าค่าการคืบตัวของคอนกรีตแปรเป็นส่วนกลับกับโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลหยาบ

คอนกรีตผสมด้วยหินทรายมีค่าการหดตัวสูงกว่าคอนกรีตผสมด้วยมวลหยาบอื่น เกิดจากการที่หินทรายมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่ามวลหยาบอื่น มวลหยาบที่อยู่ในคอนกรีตจะมีผลทำให้ค่าการหดตัวของคอนกรีตมีค่าลดลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลหยาบแสดงถึงความสามารถที่จะต้านการหดตัวของคอนกรีตได้ Wallo[18] กล่าวว่า ถ้าใช้มวลรวมทำด้วยยางที่ยืดหยุ่นและไม่ดูดซึมน้ำ คอนกรีตจะมีค่าการคืบตัวเท่ากับการคืบตัวของซีเมนต์เพสท์ ดังนั้นหินทรายที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำสุดจะให้คอนกรีตที่มีค่าการหดตัวสูงสุด

3.5 ผลของระดับหน่วยแรงต่อการคืบตัว

จากผลการทดลองพบว่าค่าการคืบตัวของคอนกรีตผสมด้วยมวลหยาบทั้ง 6 ประเภท ที่ระดับหน่วยแรง 20,40,60% มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระดับหน่วยแรง

3.6 ผลของกำลังต่อการคืบตัวและการหดตัวของคอนกรีต

เนื่องจากกำลังของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้มีค่าแตกต่างกันไม่มาก และค่าการคืบตัวและการหดตัวคอนกรีตที่มีกำลังที่ออกแบบ 250,300,350,400 กก./ซม.^{2} มีค่าแตกต่างกันไม่มาก ทำให้ไม่สามารถบ่งได้ชัดว่าค่าการคืบตัวและการหดตัวของคอนกรีตขึ้นอยู่กับตัวแปรนี้