การวิเคราะห์เชิงเวลาของการหดตัวของเสาเชิงประกอบในอาคารสูง ตามขั้นตอนการก่อสร้าง

นายพิทักษ์ ศิริภาพรรณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2539
ISBN 974-634-910-4
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 17378102

TIME - DEPENDENT ANALYSIS OF AXIAL SHORTENING OF CONCRETE COMPOSITE COLUMNS IN HIGH - RISE BUILDINGS WITH STAGE CONSTRUCTION

MR. Pitak Siripharphun

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Civil Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1996

ISBN 974-634-910-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์เชิงเวลาของการหดตัวของเสาเชิงประกอบในอาคารสูง ตามขั้นตอนการก่อสร้าง

โดย นายพิทักษ์ ศิริภาพรรณ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณบดีคณะแพทย์ศาสตร์

รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม สุริยะมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)

..... กรรมการ

(ดร. บุญไชย ลลิตมั่นในธรรม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

พิทักษ์ ศิริภาพรรณ : การวิเคราะห์เชิงเวลาของการหดตัวของเสาเชิงประกอบในอาคารสูง ตามขั้นตอนการก่อสร้าง (TIME-DEPENDENT ANALYSIS OF AXIAL SHORTENING OF CONCRETE COMPOSITE COLUMNS IN HIGH-RISE BUILDINGS WITH STAGE CONSTRUCTION) อ. ที่ปรึกษา : ศ.ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ , 192 หน้า. ISBN 974-634-910-4

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของเสาหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กรวมทั้งเสาเชิงประกอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำคงค้าง (Sustained load) โดยพิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นทันทีทันทันใด และผลแปรเปลี่ยนเชิงเวลาจากการคืบ (Creep) และการหดตัว (Shrinkage) ของคอนกรีต ในวิธีวิเคราะห์ที่ใช้ได้จำลองโครงสร้างเป็นโครงข้อแข็งประกอบด้วยชิ้นส่วนคานขนาดสม่ำเสมอ (Prismatic beam element) ซึ่งสมมติว่าไม่เกิดการแตกร้าวในช่วงใช้งาน เหล็กเสริม และเหล็กรูปพรรณซึ่งเสริมในชิ้นส่วนคานจะถือว่ามีการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตอย่างสมบูรณ์ จึงทำให้เขียนสติฟเนสของเหล็กได้ในพจน์การเปลี่ยนตำแหน่งของขั้วของชิ้นส่วนคาน โดยวิธีสติฟเนสโดยตรง (Direct stiffness method) สามารถทำการสังเคราะห์สติฟเนสของโครงสร้างตามเวลา โดยที่พฤติกรรมเชิงเวลาของคอนกรีตถูกจำลองด้วยวิธีโมดูลัสเทียบเท่าปรับแก้อายุ (Age-adjusted effective modulus method) ค่าสัมประสิทธิ์การคืบจะพิจารณาตามข้อแนะนำของคณะกรรมการ ACI 209 การวิเคราะห์จะพิจารณาสภาพการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกตามขั้นตอนการก่อสร้างด้วย วิธีวิเคราะห์ที่เสนอนี้เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าการหดตัวที่แตกต่างกันของเสา (Differential column shortening) ซึ่งมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงในอาคารสูง

จากผลลัพธ์การวิเคราะห์เสาเดี่ยวซึ่งมีปริมาณเหล็กเสริม 1%, 2%, 5% และ 8% เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากวิธีแรงของ Beasley พบว่าการคำนวณโดยวิธีสติฟเนสอย่างละเอียดจะให้ผลลัพธ์ตรงกัน ส่วนวิธีประมาณโดยใช้ค่าสติฟเนสที่เวลาเฉลี่ยในช่วงเวลาที่พิจารณาจะให้ความผิดพลาดมากที่สุดประมาณ 10%-12% ของค่าจริง เหล็กเสริม (หรือเหล็กรูปพรรณที่เสริม) ในคอนกรีตจะให้ผลเหนี่ยวรั้งทำให้ลดการหดตัวของเสาอันเกิดจากการคืบ และการหดตัวจากการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตให้น้อยลงได้ 20%-70% สำหรับปริมาณเหล็กเสริม 1%-8% โดยอัตราการลดนี้ไม่เป็นแบบเชิงเส้น แต่จะมีอัตราลดลงเร็วประมาณ 15%-20% เมื่อปริมาณเหล็กเสริมอยู่ในช่วง 1%-2% และอัตรานี้จะเหลือราว 5% ที่ปริมาณเหล็กเสริม 8% ผลจากการเหนี่ยวรั้งของเหล็กเสริมทำให้เกิดการปรับกระจายแรงภายในคอนกรีตลดลงและส่งถ่ายไปยังเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น ทำให้หน่วยแรงภายในเหล็กเสริมที่เวลาอนันต์มีค่าประมาณ 2-3.5 เท่าของหน่วยแรงเริ่มแรก

การวิเคราะห์ผลการหดตัวของเสาในกรณีศึกษาคือ อาคารใบหยก 2 พบว่าการหดตัวที่แตกต่างกันของเสาคู่ประชิดกันที่ชั้นบนสุดมีค่ามากที่สุดประมาณ 22.5 มม.ในกรณีที่สมมติว่าเสาหดตัวได้โดยอิสระ แต่ถ้าพิจารณาผลการเหนี่ยวรั้งของคานยึดระหว่างเสาที่ทุกชั้น ค่าการหดตัวที่แตกต่างกันนี้จะลดลงประมาณ 20% จากค่าการหดตัวอย่างอิสระ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโครงสร้าง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C 615209 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEY WORD: TIME DEPENDENT / AXIAL SHORTENING / STAGE CONSTRUCTION / AGE-ADJUSTED EFFECTIVE MODULUS

PITAK SIRIPHARPHUN : TIME-DEPENDENT ANALYSIS OF AXIAL SHORTENING OF CONCRETE COMPOSITE COLUMNS IN HIGH - RISE BUILDINGS WITH STAGE CONSTRUCTION. THESIS ADVISOR : PROF. PANITAN LUKKUNAPRASIT , Ph.D. 192 pp. ISBN 974-634-910-4

The behaviour of axial shortening of reinforced concrete and composite columns under sustained loading was studied , considering the instantaneous component and time dependent effects of creep and shrinkage in concrete. In the method of analysis the structure is modeled as a plane frame using prismatic beam elements which are assumed to be uncracked in the service condition. The embedded reinforcing steel and structural steel are assumed to be perfectly bonded with the concrete. Thus the steel stiffness can be obtained in terms of the nodal displacements of the concrete beam element. The time dependent stiffness property of the structure is synthesized by means of the direct stiffness method , using the age-adjusted effective modulus approach to model the time dependent behaviour of concrete , with the creep coefficient as recommended by the ACI Committee 209 used in the formulation. Incremental loading with stage construction is taken into accout in this study. The method is suitable for computing differential column shortenings which are significant and need to be taken into consideration in the design of high - rise buildings.

Free shortening analyses of a reinforced concrete column with varying reinforcement ratios of 1% , 2% , 5% and 8% yielded excellent agreement between the detailed method proposed and the force method developed by Beasley , whereas the approximate method gives rise to maximum discrepancies of about 10%-12% in the column shortening. In the approximate method , the stiffness matrices were evaluated at an average time in the time interval under consideration The steel reinforcement (or embedded structural steel) results in restraining effect , thereby reduces column shortening due to creep and shrinkage of concrete by about 20%-70% for reinforcement ratios of 1%-8%. The rate of decrease is not linear , being about 15%-20% at reinforcement ratios of 1%-2% and 5% at the maximum reinforcement ratio of 8%. The restraining effect of steel reinforcement leads to transfer of some of the internal force in the concrete to the reinforcing steel , thereby increasing the internal stress in the steel to about 2-3.5 times of the initial values.

In the case study of Baiyoke 2 tower , the maximum differential free column shortening was found to be 22.5 mm. However , when the frame interaction arising from the presence of the connecting beams was considered , the differential column shortening was significantly reduced by 20%.

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโครงสร้าง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาได้ให้ความรู้ ความสนใจเอาใจใส่ และให้คำแนะนอแนะต่าง ๆ ในอันที่เป็นประโยชน์อย่างดียิ่งรวมทั้งกรุณาตรวจสอบ และแก้ไขในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปอย่างสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม สุริยะมงคล และ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม ที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ในอันที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างมาก

นอกจากนี้การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ผู้จัดทำได้รับความร่วมมือ การตอบข้อข้องใจต่างๆ และได้รับความอนุเคราะห์เกี่ยวกับข้อมูล ที่เป็นประโยชน์ด้วยดีเสมอมาอย่างดียิ่ง ผู้เขียนจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย จากผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องดังนี้ คือ

1. คุณ ชาติชาย ศรีศรัณยา
2. คุณ ปิยะ กนกนิตย์อนันต์ วิศวกรประจำบริษัท โปรเจค เพลนนิ่ง เซอร์วิส จำกัด
3. คุณ ฐานิต ปัญจันทร์สิงห์ วิศวกรประจำบริษัท คอนกรีตคอนสตรัคชั่น (ประเทศไทย) จำกัด
4. MR. CHRIS LEVY , CONCRETE CONSTRUCTIONS (THAILAND) CO.,LTD

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์อันพึงจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่าน และขอแสดงความกตัญญูกตเวทิตา ต่อจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ความสามารถให้แก่คณะผู้จัดทำด้วยความเคารพรักอย่างสูง

นาย พิทักษ์ ศิริภาพรรณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ฎ
คำอธิบายสัญญลักษณ์และคำย่อ	ฐ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความนำ	1
1.2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.4 ขอบข่ายงานวิจัย	4
1.5 ข้อสมมติฐานที่ใช้ในการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ของการศึกษา	5
2. การคืบ การหดตัวจากการสูญเสียความชื้น และโมดูลัสปรับแก้อายุ	6
2.1 ความนำ	6
2.2 การเปลี่ยนแปลงของคอนกรีต	6
2.3 ความเครียดอีลาสติค	7
2.4 การคืบของคอนกรีต	7
2.5 การหดตัวจากการสูญเสียความชื้นของคอนกรีต	8
2.6 หลักการรวมผลโดยตรง	9
2.7 สัมประสิทธิ์อายุ	10
2.8 การคลายตัวของคอนกรีต	12
3. การวิเคราะห์โครงสร้างเชิงประกอบระนาบ 2 มิติ ตามเวลาการก่อสร้าง	19
3.1 ความนำ	19
3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้การรับน้ำหนักกระทำทันทีทันใด	19
3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้ผลเชิงเวลา	24
4. ตัวอย่างการวิเคราะห์	36
4.1 ความนำ	36
4.2 ตัวอย่างที่ 1 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ค่าเดียว	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3 ตัวอย่างที่ 2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุกคงค้าง 4 ขั้นตอน	41
4.4 ตัวอย่างที่ 3 โครงข้อแข็งพอร์ทอล (Portal frame) 1 ชั้น	44
4.5 ตัวอย่างที่ 4 อาคารใบหยก 2	45
5. สรุปผลการวิจัย	75
รายการอ้างอิง	77
ภาคผนวก	80
ก สมการการคืบ และการหดตัวจากการสูญเสียความชื้นของคอนกรีตตามคณะกรรมการ ACI 209 (1985)	81
ข สมการการวิเคราะห์การหดตัวอิสระของเสาเชิงประกอบจากผลเชิงเวลา โดยวิธีโมดูลัสปรับแก้อายุ (AEMM)	85
ค รายละเอียดข้อมูลและผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ 1 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ค่าเดียว	99
ง รายละเอียดข้อมูลและผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ 2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุกคงค้าง 4 ขั้นตอน	115
จ รายละเอียดข้อมูลและผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ 3 โครงข้อแข็งพอร์ทอล (Portal frame)	144
ฉ รายละเอียดข้อมูลและผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ 4 อาคารใบหยก 2	150
ช รายละเอียดการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	186
ประวัติผู้เขียน	192

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีต และเหล็กเสริม (ตัวอย่างที่ 1) 37

4.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การคืบ (Creep coefficient) และสัมประสิทธิ์อายุ (Aging coefficient) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของคอนกรีต(ตัวอย่างที่ 1) 37

4.3 แสดงการเปรียบเทียบการหดตัวตามเวลาของเสาโดยวิธีต่าง ๆ กับวิธีของ Beasley (1994) (ตัวอย่างที่ 1) 38

4.4 แสดงการเปรียบเทียบแรงตามเวลาภายในเหล็กเสริมของเสาโดยวิธีต่าง ๆ กับวิธีของ Beasley (1994) (ตัวอย่างที่ 1) 39

4.5 แสดงการเปรียบเทียบแรงตามเวลาภายในคอนกรีตของเสาโดยวิธีต่าง ๆ กับวิธีของ Beasley (1994) (ตัวอย่างที่ 1) 39

4.6 แสดงค่าการหดตัวของเสา และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่คำนวณโดยวิธีของ Beasley (1994) 40

4.7 แสดงค่าการหดตัวของเสา และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่คำนวณโดยวิธีประมาณ 40

4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างวิธี Beasley (1994) และวิธีโดยประมาณที่เวลาสุดท้าย 40

4.9 แสดงแรงตามเวลาภายในเหล็กเสริมของเสา โดยวิธีของ Beasley (1994) (ตัวอย่างที่ 1) 41

4.10 แสดงแรงตามเวลาภายในคอนกรีตของเสา โดยวิธีของ Beasley (1994) (ตัวอย่างที่ 1) 41

4.11 แสดงค่าความเครียดหดตัวของคอนกรีตที่เวลาต่าง ๆ (ตัวอย่างที่ 2) 42

4.12 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่เวลาต่าง ๆ (ตัวอย่างที่ 2) 42

4.13 แสดงการเปรียบเทียบการหดตัวตามเวลาของเสาโดยวิธีในงานวิจัยกับวิธีแรง Gilbert (1988) (ตัวอย่างที่ 2) 43

4.14 แสดงการเปรียบเทียบแรงภายในเหล็กเสริมตามเวลาของเสาโดยวิธีในงานวิจัยกับวิธีแรง Gilbert (1988) (ตัวอย่างที่ 2) 43

4.15 แสดงการเปรียบเทียบแรงภายในคอนกรีตตามเวลาของเสาโดยวิธีในงานวิจัยกับวิธีแรง Gilbert (1988) (ตัวอย่างที่ 2) 44

4.16 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ (ตัวอย่างที่ 3) 44

4.17 แสดงการปรียบเทียบค่าโมเมนต์ลบที่หัวเสา และโมเมนต์บวกที่กึ่งกลางคานในช่วงเวลา 28 วันถึง 30 ปีระหว่างงานวิจัยนี้กับวิธีแรง Neville และคณะฯ (1983) (ตัวอย่างที่ 2) 45

4.18 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ และน้ำหนักบรรทุกกระทำตามแนวแกนของเสา CA , CC และ CB ในอาคารใบหยก 2 (ตัวอย่างที่ 4) 46

4.19 แสดงค่าการหดตัวอย่างอิสระของเสา CA , CC และ CB เมื่อก่อสร้างถึงชั้นที่ 65 51

4.20 แสดงค่าการหดตัวที่พิจารณาผลการยึดรั้งจากคานของเสา CA , CC และ CB เมื่อก่อสร้างถึงชั้นที่ 65 53

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.21 แสดงค่าการหดตัวอย่างอิสระของเสา CA , CC และ CB ที่เวลา 10 ปี 55

4.22 แสดงค่าการหดตัวที่พิจารณาผลการยึดรั้งจากคานของเสา CA , CC และ CB ที่เวลา 10 ปี 57

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 องค์ประกอบความเครียดของคอนกรีตภายใต้หน่วยแรงคงค้าง 15

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและหน่วยแรงในคอนกรีต 15

2.3 พฤติกรรมการคืบ (Creep) ตามเวลาในคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง 16

2.4 หลักการรวมกันโดยตรง (Principle of superposition) ของความเครียดคอนกรีตที่เวลาใด ๆ เนื่องจากหน่วยแรงกระทำที่เวลาต่าง ๆ กัน 16

2.5 หน่วยแรงที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลาภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง 17

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดจากหน่วยแรงคงค้างและหน่วยแรงที่แปรเปลี่ยนกับเวลา 17

2.7 พฤติกรรมของการคลายตัวของคอนกรีตจากหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปตามเวลา 18

3.1 ชิ้นส่วนเชิงประกอบคอนกรีตและเหล็กเสริม 32

3.2 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างตามเวลา 33

3.3 การวิเคราะห์ผลของการคืบ และการหดตัวบนหน้าตัดคอนกรีตเชิงประกอบที่ไม่แตกร้าว (Uncracked section) 34

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงเวลาตามขั้นตอนการก่อสร้าง 35

4.1 น้ำหนักบรรทุกคงค้างคงที่ค่าเดียวในโครงสร้างเสาเดียว (ตัวอย่างที่ 1) 60

4.2 น้ำหนักบรรทุกคงค้าง 4 ขั้นตอนในโครงสร้างเสาเดียว (ตัวอย่างที่ 2) 60

4.3 หน่วยแรงคงค้างในคอนกรีตของโครงสร้างเสาเดี่ยว (ตัวอย่างที่ 1) 61

4.4 หน่วยแรงคงค้างในเหล็กเสริมของโครงสร้างเสาเดี่ยว (ตัวอย่างที่ 1) 62

4.5 หน่วยแรงคงค้างในคอนกรีตที่แปรเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างเสาเดี่ยว (ตัวอย่างที่ 1) 63

4.6 หน่วยแรงคงค้างในเหล็กเสริมที่แปรเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างเสาเดี่ยว (ตัวอย่างที่ 1) 63

4.7 การเปรียบเทียบการหดตัวของเสาที่คำนวณโดยวิธีของ Beasley (1994) กับวิธีโดยประมาณ เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเสริม (ตัวอย่างที่ 1) 64

4.8 หน่วยแรงคงค้างในคอนกรีตของโครงสร้างเสาเดี่ยว (ตัวอย่างที่ 2) 65

4.9 หน่วยแรงคงค้างในเหล็กเสริมของโครงสร้างเสาเดี่ยว (ตัวอย่างที่ 2) 66

4.10 โครงสร้างพอร์ทอล (Portal frame)) 1 ชั้น (ตัวอย่างที่ 3) 67

4.11 ผลรวมโมเมนต์ดัดที่เวลาเริ่มแรกและเวลาสุดท้ายของโครงสร้างพอร์ทอล (Portal frame) (ตัวอย่างที่ 3) 68

4.12 ผังอาคารใบหยก 2 69

4.13 หน้าตัดเสา CA 70

4.14 รูปตัดตามขวางของอาคารใบหยก 2 71

4.15 โครงสร้างจำลอง (Idelized structure) ที่ใช้ในการวิเคราะห์อาคารใบหยก 2 72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.16 การหดตัวของเสา CA , CC และ CB อย่างอิสระ และคิดผลการยึดรั้งจากคาน เมื่อก่อสร้างถึงชั้นที่ 65 (ตัวอย่างที่ 4) 73

4.17 การหดตัวของเสา CA , CC และ CB อย่างอิสระ และคิดผลการยึดรั้งจากคาน ณ เวลา 10 ปี (ตัวอย่างที่ 4) 74

ข.1 เสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบสมมาตรรับน้ำหนัก P กระทำตามแนวแกน 98

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญญลักษณ์และคำย่อ

a = ค่าคงที่

$[a]$ = เมตริคส์แปลงของการเปลี่ยนตำแหน่ง

A_c = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

A_{si} = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมใด ๆ หรือส่วนเล็ก ๆ ที่พิจาณาในเหล็กรูปพรรณ

b = ค่าคงที่

$E_c(t_0)$ = โมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนด์ของคอนกรีตที่อายุ t_0

$\overline{E}_c(t,t_0)$ = ค่าโมดูลัสเทียบเท่าปรับแก้อายุของคอนกรีตจากเวลา t_0 ที่มีน้ำหนักกระทำเริ่มแรกถึงเวลา t

$\overline{E}_c(t_{\bar{j}},t_0)$ = โมดูลัสยืดหยุ่นปรับแก้อายุเฉลี่ยของคอนกรีตจากเวลา t_0 ที่มีน้ำหนักกระทำเริ่มแรกถึงเวลา $t_{\bar{j}}$

E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

$\{F\}_{(t,t_0)}$ = แรงยึดรั้งสมมติกระทำที่จุดต่อของชิ้นส่วน

i = เหล็กเสริมที่พิจารณา

I_c = โมเมนต์ความเฉื่อยของคอนกรีต

I_{si} = โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กเสริมใด ๆ หรือส่วนเล็ก ๆ ของเหล็กรูปพรรณ

$[K]_{t_0}$ = สติฟเนสเมตริคส์รวมของทั้งระบบที่เวลา t_0

$[k]^c$ = สติฟเนสเมตริคส์ย่อยในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวของคอนกรีตในแต่ละชิ้นส่วน

$[k]^s$ = สติฟเนสเมตริคส์ย่อยในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวของเหล็กในแต่ละชิ้นส่วน

$[K]^c_{t_0}, [K]^s_{t_0}$ = สติฟเนสเมติกซ์ย่อยของคอนกรีต และเหล็กเสริมตามลำดับ แต่ละชิ้นส่วนในระบบโกลบัลโคออร์ดิเนตที่เวลา t_0

$[k]^c_{t_0}, [k]^s_{t_0}$ = สติฟเนสเมตริคส์ย่อยของคอนกรีต และเหล็กเสริมตามลำดับ ในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว (Local coordinate system) ที่เวลา t_0 ของชิ้นส่วนเชิงประกอบ

$[k]_{t_0}$ = สติฟเนสเมตริคส์ย่อยของชิ้นส่วนเชิงประกอบที่รวมทั้งคอนกรีต และเหล็กเสริมในระบบโคออร์ดิเนต (Local coordinate) ประจำตัวที่เวลา t_0

$[K']_{t,t_0}$ = สติฟเนสเมตริคส์รวมปรับแก้อายุของทั้งระบบที่เวลา t_0 ถึงเวลา t

$[K']^c_{t,t_0}, [K]^s_{t,t_0}$ = สติฟเนสเมตริคส์ย่อยของคอนกรีตที่พิจารณาผลของโมดูลัสปรับแก้อายุ และเหล็กเสริมตามลำดับ แต่ละชิ้นส่วนในระบบโกลบัลโคออร์ดิเนตที่เวลา t_0 ถึงเวลา t

$[K']_{\bar{j}.0}$ = สติฟเนสเมตริคส์รวมปรับแก้อายุเฉลี่ยของทั้งระบบที่เวลา t_0 ถึงเวลา $t_{\bar{j}}$

$[k']^c_{t,t_0}$ = สติฟเนสเมตริคส์ย่อยปรับแก้อายุของคอนกรีตในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวเวลา t_0 ถึงเวลา t

คำอธิบายสัญญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

L = ความยาวของชิ้นส่วน

$M_{1,2}(t,t_0)$ = โมเมนต์ดัดที่ใช้ยึดรั้งที่ปลายชิ้นส่วนทั้งสองข้างในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

m_1 , m_2 = โมเมนต์ดัดภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ดัด 1 หน่วยกระทำที่ข้อต่อแรกและข้อต่อปลายของชิ้นส่วนตามลำดับ

$N_{1,2}(t,t_0)$ = แรงตามแนวแกนที่ใช้ยึดรั้งที่ปลายชิ้นส่วนทั้งสองข้างในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

n = ตำแหน่งขององค์อาคารที่พิจารณา

n_1 = แรงกระทำตามแนวแกนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำ 1 หน่วยกระทำที่ข้อต่อปลายทั้งสองด้าน

NM = จำนวนองค์อาคาร (Member) ของโครงสร้างที่พิจารณาที่เวลา t_0

$\{P\}_{t_0}$ = เวคเตอร์ของแรงกระทำที่ขั้วจากภายนอก ณ เวลา t_0

$\{P_0\}_{t_0}$ = เวคเตอร์ของแรงกระทำยึดรั้งที่ขั้วเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระจายกระทำบนชิ้นส่วน ณ เวลา t_0

$\{P'\}_{t,t_0}$ = เวคเตอร์แรงยึดรั้งรวมที่ขั้วของจุดยึดปลายที่เกิดขึ้นจากผลของแรงกระทำคงค้างจากเวลา t_0 ถึงเวลา t ภายใต้ผลของการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต

$r(t,t_0)$ = ฟังก์ชั่นการคลายตัว (Relaxation function) ของคอนกรีตในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

$\{S\}_{t_0}$ = เวคเตอร์แรงภายในของชิ้นส่วนเนื่องจากแรงกระทำ ณ เวลา t_0

$\{S_0\}_{t_0}$ = เวคเตอร์แรงภายในของชิ้นส่วนที่สภาวะยึดแน่น ณ เวลา t_0

$\{S\}_{t,t_0}$ = เวคเตอร์แรงภายในของชิ้นส่วน ณ เวลา t_0 ถึงเวลา t

$\{S\}_u^s$ = เวคเตอร์แรงกระทำที่ขั้วของเหล็กเสริมที่สอดคล้องกับค่าของ $\{u\}$

$\{S\}_w^s$ = เวคเตอร์แรงกระทำที่ขั้วของเหล็กเสริมที่สอดคล้องกับค่าของ $\{w\}$

t_0 = อายุของคอนกรีตที่เวลาเริ่มแรกมีน้ำหนักกระทำ

t_j = เวลาเฉลี่ยในช่วงระหว่างเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1}

$\{u\}_{t_0}$ = เวคเตอร์การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่สอดคล้องกับชิ้นส่วนที่พิจารณา ณ เวลา t_0

$\{u'\}_{j,0}$ = เวคเตอร์การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของขั้วจากเวลา t_0 ถึงเวลา t_j อันเป็นผลมาจากการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต

$\{u\}_{j+1,j}$ = เวคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งโคออร์ดิเนต ณ เวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1}

$u(x,z)$ = เป็นระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของจุด (x,z) ใด ๆ

$u_0(x)$ = เป็นระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของจุดบนแกนสะเทิน (Neutral axis) ของหน้าตัดคอนกรีตที่ระยะ x

u_1 , u_2 = ระยะการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวแกนที่ขั้วทั้งสอง

$V_{1,2}(t,t_0)$ = แรงตามแนวแกนที่ใช้ยึดรั้งที่ปลายชิ้นส่วนทั้งสองข้างในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

คำอธิบายสัญญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$w(x)$ = เป็นระยะการเปลี่ยนตำแหน่ง (Transverse displacement) ของจุดบนแกนสะเทินของหน้าตัดคอนกรีตที่ระยะ x

w_1, w_2 = ระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวที่ตั้งฉากกับแนวแกนที่ขั้วทั้งสอง

z = ระยะใด ๆ ที่วัดในแนวดิ่งจากแนวแกนสะเทินถึงตำแหน่งที่พิจารณา

$\{\beta\}, \{\psi\}$ = ฟังก์ชั่นรูปร่างในรูปของโพลิโนเมียลเชิงเส้น (Linear polynomial) และโพลิโนเมียลอันดับสาม (Cubic polynomial)

$\{\beta\}_s(t)$ = ฟังก์ชั่นไร้มิติขึ้นกับช่วงเวลาที่พิจารณา

$\{\delta u\}, \{\delta w\}$ = ระยะการเปลี่ยนตำแหน่งสมมติใด ๆ ที่เล็กมาก (Infinitesimal virtual displacement) จากตำแหน่งสมดุลย์

δU_c = พลังงานความเครียดสมมติภายในคอนกรีต

δU_s = พลังงานความเครียดสมมติภายในเหล็ก

δW = งานสมมติจากภายนอก

$\delta \varepsilon_{xx}$ = ค่าความเครียดสมมติในแนวแกน x

$\varepsilon(t, t_0)$ = ความเครียดทั้งหมดในช่วงระหว่างเวลา t_0 ถึงเวลา t

$\varepsilon_e(t_0)$ = ความเครียดอีลาสติคที่เกิดขึ้นทันทีทันใดที่เวลา t_0

$\varepsilon_c(t, t_0)$ = ความเครียดคืบ (Creep strain) ของคอนกรีตในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh})$ = ความเครียดหดตัวอิสระ (Shrinkage strain) จากการสูญเสียความชื้นในช่วงระหว่างเวลา t_{sh} ถึงเวลา t

$(\varepsilon_{sh})_u$ = ค่าความเครียดหดตัวสุดท้าย (Ultimate shrinkage strain)

$\varepsilon_{xx}(x, z)$ = ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริงตามแนวแกน x .

θ_1, θ_2 = มุมหมุนของการเปลี่ยนตำแหน่งจากแนวแกนที่ขั้วทั้งสอง

$\sigma_0(t_0)$ = หน่วยแรงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดที่เวลา t_0

$\sigma_c(t_0)$ = หน่วยแรงของคอนกรีตที่เวลา t_0

$\sigma_{c,ec}(t)$ = หน่วยแรงทั้งหมดในคอนกรีตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในช่วงอีลาสติค และการคืบในช่วงระหว่างเวลา t_0 ถึงเวลา t

$\sigma_{c,sh}(t)$ = หน่วยแรงทั้งหมดในคอนกรีตเนื่องการหดตัวจากการสูญเสียความชื้นในช่วงระหว่างเวลา t_0 ถึงเวลา t

σ_{xx} = หน่วยแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นจริงตามแนวแกน x

τ = เวลาที่พิจารณาอยู่ในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

$\phi(t_\infty, t_0)$ = สัมประสิทธิ์ของการคืบ (Ultimate creep coefficient)

$\phi(t, t_0)$ = สัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีตที่เวลา t เนื่องจากน้ำหนักกระทำเริ่มแรกที่เวลา t_0

คำอธิบายสัญญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\chi\left(t,t_0\right)$ = สัมประสิทธิ์อายุจากเวลา t_0 ที่มีน้ำหนักกระทำเริ่มแรกถึงเวลา t

$\psi\left(t_0\right)$ = ค่าความโค้ง (Curvature) ของหน้าตัดที่เวลา t_0

ξ_1 , ξ = ฟังก์ชั่นเวลาไร้มิติ

γ_c = ตัวประกอบปรับแก้สัมประสิทธิ์การคืบของคอนกรีต

γ_{sh} = ตัวประกอบปรับแก้สัมประสิทธิ์การหดตัวของคอนกรีต

$\Delta L\left(t,t_0\right)$ = ระยะการยืด (หรือหดตัวซึ่งจะเป็นเครื่องหมายลบ) ตามแนวแกนของชิ้นส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

$\Delta M_{1,2}\left(t_{j+1},t_j\right)$ = โมเมนต์ที่ใช้ยึดรั้งที่ปลายชิ้นส่วนทั้งสองข้างในช่วงเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1}

$\Delta N_{1,2}\left(t_{j+1},t_j\right)$ = แรงตามแนวแกนที่ใช้ยึดรั้งปลายชิ้นส่วนทั้งสองข้างในช่วงเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1}

$\left\{\Delta P\right\}_{j+1,j}$ = เวคเตอร์แรงยึดรั้งรวมที่ขั้วของจุดยึดปลายที่เกิดขึ้นจากผลของแรงกระทำคงค้างที่เวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1} ภายใต้ผลของการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต

$\left\{\Delta S\right\}_{j+1,j}$ = เวคเตอร์ของแรงภายในชิ้นส่วนเนื่องจากแรงกระทำในช่วงเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1}

$\left\{\Delta u\right\}_{j+1,j}$ = เวคเตอร์ของระยะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่สอดคล้องกับชิ้นส่วนที่พิจารณาในช่วงเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1}

$\Delta V_{1,2}\left(t_{j+1},t_j\right)$ = แรงเฉือนที่ใช้ยึดรั้งที่ปลายชิ้นส่วนทั้งสองข้างในช่วงเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1}

$\Delta\varepsilon\left(t,t_0\right)$ = การเปลี่ยนแปลงความเครียดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t ภายใต้ผลของการคืบ และการหดตัว

$\Delta\varepsilon_c\left(t,t_0\right)$ = ความเครียดคืบเนื่องจากหน่วยแรงที่แปรเปลี่ยนในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

$\Delta\varepsilon_{sh}\left(t_{j+1},t_j\right)$ = ความเครียดหดตัวอิสระที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1}

$\Delta\theta_{1,2}\left(t,t_0\right)$ = มุมหมุนที่ข้อต่อแรกและปลายของชิ้นส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t

$\Delta\psi\left(t,t_0\right)$ = การเปลี่ยนแปลงค่าความโค้งของหน้าตัดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t_0 ถึงเวลา t ภายใต้ผลของการคืบ และการหดตัวของคอนกรีต

$\Delta\sigma_c(t)$ = หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นที่เวลา t ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง

$\Delta\phi\left(t_{j+1},t_j\right)$ = สัมประสิทธิ์การคืบที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างเวลา t_j ถึงเวลา t_{j+1}