



ตัวอย่างการวิเคราะห์

ความนำ

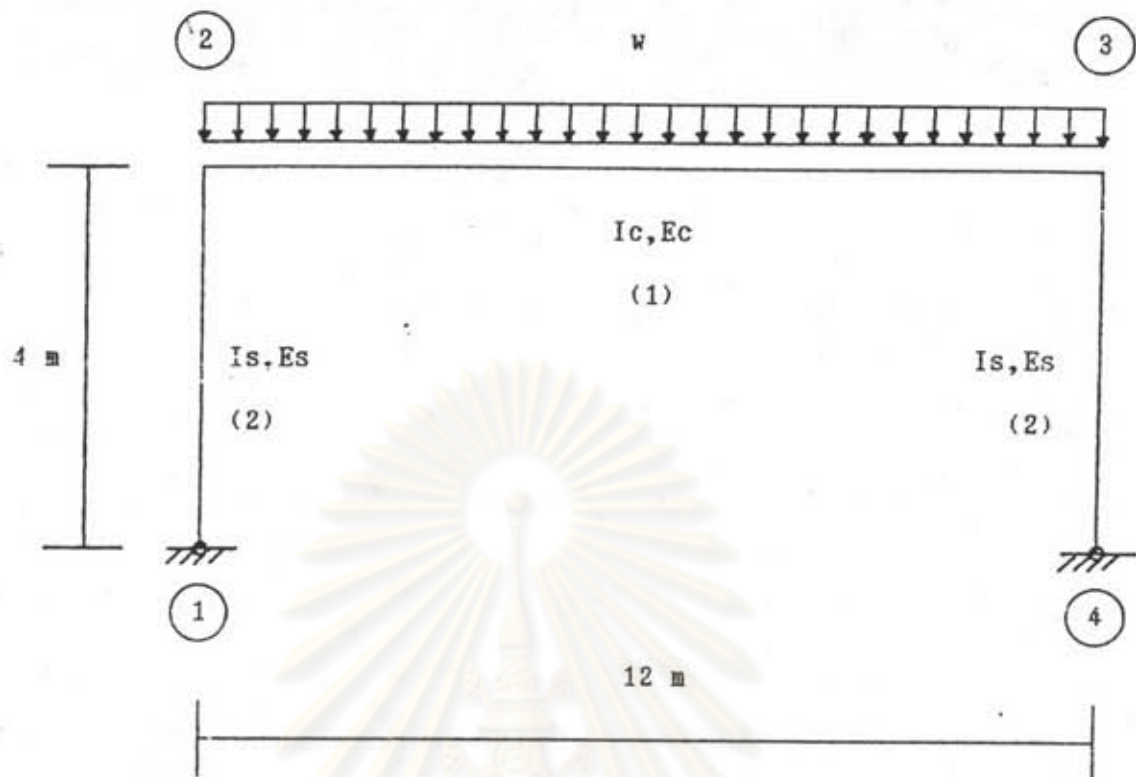
งานวิจัยนี้ได้เลือกตัวอย่างที่ปรากฏอยู่ในเอกสารอ้างอิงต่าง ๆ รวมทั้งตัวอย่างโครงสร้างจริงเพื่อใช้ทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ตัวประมวลผลรุ่น 80386SX ทำงานในระบบปฏิบัติการ MS DOS 5.0 โดยใช้ภาษา Microsoft Quick Basic 4.5 การคำนวณตัวเลขกระทำด้วยตัวเลขจำนวนจริงชนิดความละเอียดทั่วไป (Single Precision) สำหรับตัวอย่างที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้มี 4 ตัวอย่าง คือ

1. โครงสร้างขั้วแฉ่งพอร์ทอล
2. คานคอนกรีตค้ำเนื่อง
3. คานคอนกรีตอัดแรงค้ำเนื่อง
4. สะพานพระรามเจ็ด

ตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างนี้มาจาก Dilger [1] ลักษณะโครงสร้างเป็นโครงขั้วแฉ่งพอร์ทอล (Portal Frame) ประกอบด้วยคานคอนกรีตและเสาเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.1 พร้อมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากเสาทำจากวัสดุเหล็ก ผลของการค้ำจึงมีเฉพาะในคานคอนกรีตเท่านั้น โดยน้ำหนักบรรทุกที่พิจารณาคือ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) ของคาน และการก่อสร้างถูกพิจารณาว่าค่าเนิ่นการเสิร์ฟพร้อมกันทั้งคานและเสา ดังนั้นจึงมีเพียงขั้นตอนการก่อสร้างเดียว

ในการวิเคราะห์โครงสร้างนี้ได้พิจารณาการตอบสนอง (Response) ทั้งที่ทันใดและการตอบสนองเมื่อเวลาสุดท้ายซึ่งสมมติเท่ากับ 10000 วัน ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ได้ค่าการปรับกระจายของโมเมนต์ค้ำและค่าของโมเมนต์ค้ำที่เวลาสุดท้าย ที่ตำแหน่งปลายคานเท่ากับ -19.8161 กิโลนิวตัน-เมตร และ -43.4083 กิโลนิวตัน-เมตร ตามลำดับ ซึ่งจากการ



$$w = 5 \text{ kN/m}$$

$$t = 10000 \text{ วัน} \quad t_0 = 28 \text{ วัน}$$

คานคอนกรีต (1)

$$\phi(t, t_0) = 2.5 \quad \chi(t, t_0) = 0.82$$

$$I_c = 0.01 \text{ m}^4 \quad E_c = 25 \times 10^3 \text{ MPa}$$

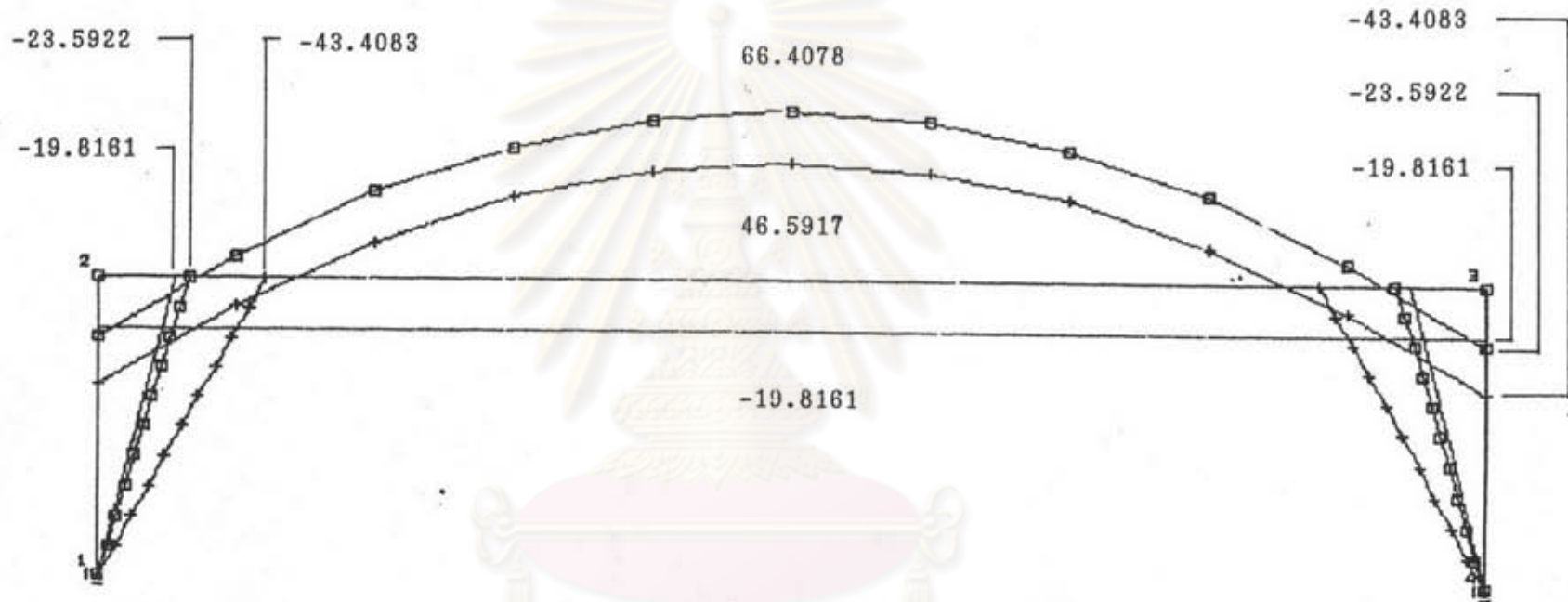
เสาเหล็ก (2)

$$\phi(t, t_0) = 0 \quad \chi(t, t_0) = 0$$

$$I_s = 0.00018 \text{ m}^4 \quad E_s = 200 \times 10^3 \text{ MPa}$$

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างที่ 1

COMBINED OVERALL



หน่วยของโมเมนต์คด เป็น กิโลนิวตัน-เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 วิทยาลัย

BENDING MOMENT DIAGRAM  
 COMB. INSTANTANEOUS —■—  
 COMB. TIME DEPENDENT ———  
 COMB. INSTAN. + TIME. —+—

รูปที่ 5.2 ผลรวมโมเมนต์คดที่เวลาสุดท้ายตัวอย่างที่ 1

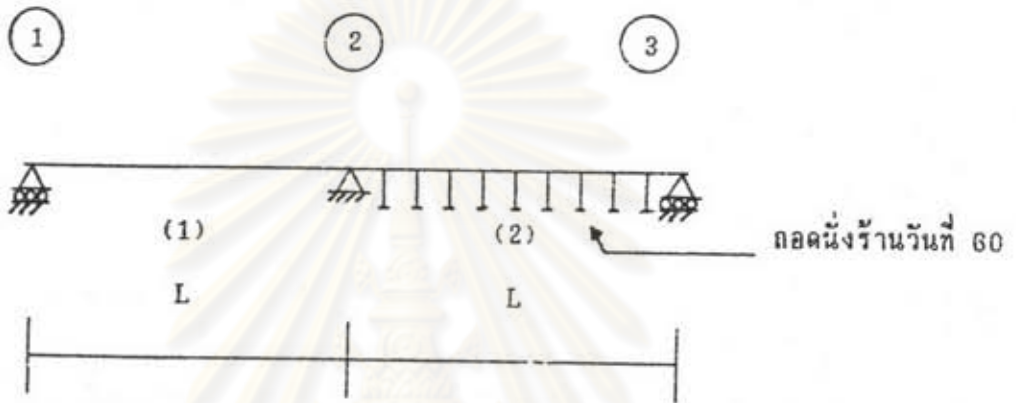
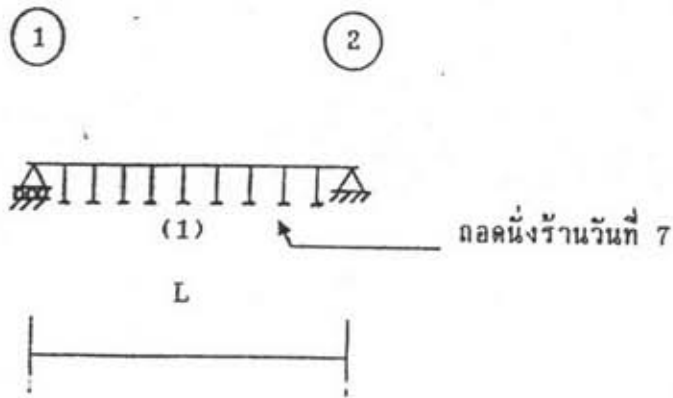


วิเคราะห์ด้วยวิธีแรง (Force Method) ตามวิธีการที่ Dilger เสนอ จะได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกันมาก โดยถูกต้องถึงตัวเลขทศนิยมตำแหน่งที่สี่ รูปที่ 5.2 ได้แสดงรูปร่างผลรวมของโมเมนต์คัตที่เวลาสุดท้าย ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการปรับกระจายของโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นตามเวลา เมื่อพิจารณาถึงผลของการคืบ จากผลที่ได้พบว่า มีการปรับกระจายของโมเมนต์คัตที่ปลายคานเพิ่มขึ้น จากค่าโมเมนต์คัตที่คำนวณจากทฤษฎีอัสติคถึง 84% แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลของการคืบที่มีต่อโครงสร้างซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติการคืบต่างกันมาก ๆ

## ตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างนี้เป็นคานคอนกรีตต่อเนื่องจำนวน 2 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 5.3 พร้อมข้อมูลที่เกี่ยวข้อ มีความยาวเท่ากัน แต่ก่อสร้างไม่พร้อมกัน โดยแบ่งการก่อสร้างเป็น 2 ขั้นตอน คานช่วงแรก (1-2) ถูกหล่อเมื่อวันที่ 0 เมื่อคอนกรีตมีอายุ 7 วัน ก็ทำการอัดแรงและถอดแบบนั่งร้าน คานช่วงที่สอง (2-3) ถูกหล่อเมื่อวันที่ 53 อัดแรงและถอดแบบนั่งร้านเมื่อวันที่ 60 ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มีความลึบซับซ้อนมากกว่าตัวอย่างแรก เนื่องจากที่เวลาใด ๆ คานแต่ละช่วงจะมีอายุไม่เท่ากัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตลอดจนการคืบไม่เท่ากันด้วย เพื่อให้เห็นความถูกต้องของการวิเคราะห์โดยโปรแกรมที่เสนอในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์คานต่อเนื่องนี้ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่ตามขั้นตอนการก่อสร้าง โดยใช้ขั้นเวลา (Time Step) 2 ช่วง คือ จาก 7 - 60 วัน และ 60 - 10000 วัน การคำนวณที่เวลา 10000 วัน (ซึ่งถือได้ว่าเป็นเวลาอนันต์) ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงของ Ghali [14] ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ค่าโมเมนต์คัตที่เวลาสุดท้ายที่ฐานรองรับตัวกลางเท่ากับ  $-0.11228 ql^2$  หน่วย ใกล้เคียงกับผลของ Ghali มาก โดยแตกต่างกันน้อยกว่า 1 % และเป็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับการวิเคราะห์ของ Ghali มีการปิดเศษทศนิยม ทำให้ค่าตอบเกิดการผิดพลาดสะสมเล็กน้อย เมื่อทำการคำนวณให้ละเอียดขึ้นโดยการเพิ่มจำนวนตำแหน่งทศนิยมให้มากขึ้น พบว่าได้ผลการวิเคราะห์ตรงกันกับผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีความถูกต้องถึงทศนิยมตำแหน่งที่ห้า

รูปที่ 5.4 แสดงไดอะแกรมของโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นเมื่อไม่คิดผลของการคืบ (กราฟ ก) และเมื่อคิดผลของการคืบ (กราฟ ค) ที่เวลาสุดท้าย ส่วนกราฟ (ข) จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของโครงสร้าง เมื่อพิจารณาถึงผลของการคืบและขั้นตอนการก่อสร้าง ซึ่งมีการปรับกระจายโมเมนต์คัตสูงถึง 61 % ของโมเมนต์คัตที่คำนวณจากทฤษฎีอัสติค



$q = 1$  หน่วย                       $L = 1$  หน่วย

$t = 10000$  วัน

$\phi(t, 7) = 2.7$                        $x(t, 7) = 0.74$

$\phi(t, 60) = 2.3$                        $x(t, 60) = 0.78$

$\phi(60, 7) = 1.1$                        $x(60, 7) = 0.79$

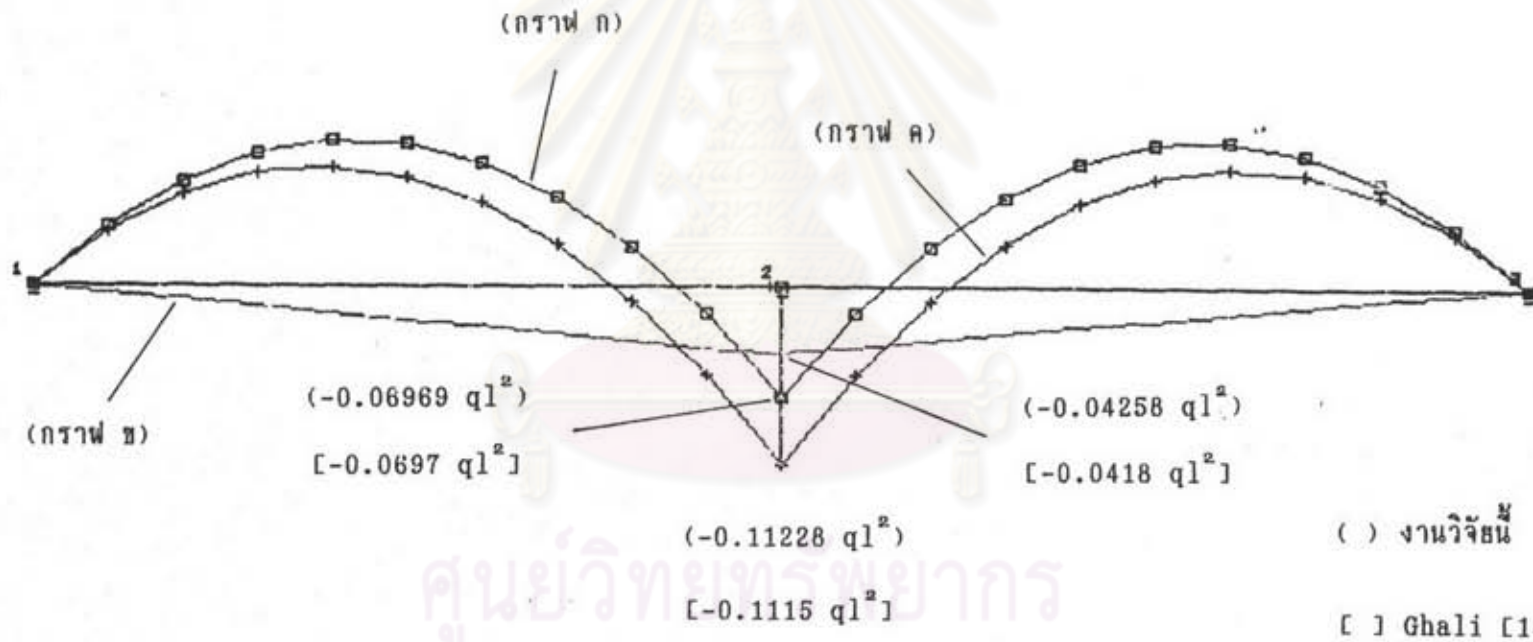
$E_c(60)/E_c(7) = 1.26$

$E_c(7) = 1000$  หน่วย

$E_c(60) = 1260$  หน่วย

รูปที่ 5.3 ตัวอย่างที่ 2

COMBINED OVERALL



BENDING MOMENT DIAGRAM  
 COMB. INSTANTANEOUS  $\square$   
 COMB. TIME DEPENDENT  $\text{---}$   
 COMB. INSTAN. + TIME.  $\text{---}+$

รูปที่ 5.4 ผลรวมโมเมนต์คัตที่เวลาสุดท้ายตัวอย่างที่ 2



### ตัวอย่างที่ 3

ตัวอย่างนี้ นำมาจาก Ghali [14] ลักษณะโครงสร้างเป็นคานคอนกรีตอัดแรงต่อเนื่อง จำนวน 2 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 5.5 พร้อมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง มีความยาวเท่ากัน แต่ก่อสร้างไม่พร้อมกัน โดยแบ่งการก่อสร้างเป็น 2 ชั้นตอน คานช่วงแรก (1-2-3) และคานช่วงที่เหลือ (3-4) หล่อเมื่อวันที่ 0 และวันที่ 53 ตามลำดับ การอัดแรงและการถอดนั่งร้านกระทำเมื่อวันที่ 7 วัน และวันที่ 60 ตามลำดับเช่นเดียวกับตัวอย่างที่แล้ว คานทั้งสองช่วงถูกพิจารณาให้รับน้ำหนักบรรทุกคงที่  $q$  และรับแรงสม้ำเสมอเทียบเท่า (Equivalent Load) จากการอัดแรง มีขนาด  $0.75 q$  ในตัวอย่างนี้ได้พิจารณาการเสื่อมลดแรงดึง (Loss) ของเหล็กเสริมอัดแรงด้วย โดยสมมติว่าเกิดการเสื่อมลดแรงดึงทั้งหมดเท่ากับ 15 % ของแรงดึงเริ่มแรกและการเสื่อมลดแรงดึงทั้งหมดนี้ เกิดขึ้นในช่วงเวลาหลังจากการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วในชั้นตอนที่สอง ไปจนถึงเวลาสุดท้าย

ในตัวอย่างนี้ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้าง เนื่องจากผลของการคืบตามขั้นตอนการก่อสร้าง โดยพิจารณาการเสื่อมลดแรงดึงด้วย จนถึงเวลาสุดท้ายซึ่งสมมติเท่ากับ 10000 วัน การจำลองชิ้นส่วนของโครงสร้างนั้น พิจารณา 2 แบบ คือ แบบที่หนึ่งใช้แบบจำลองชิ้นส่วนแบบคาน (Beam Element) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์โครงข้อแข็งทั่วไป ส่วนแบบที่สองใช้แบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรง (Prestressing Element) ในกรณีแรกผลจากการอัดแรงพิจารณาในลักษณะแรงสมดุล (Load Balancing) ที่เสนอโดย Lin [17] โดยแทนแรงที่เกิดจากการอัดแรงด้วยแรงสม้ำเสมอเทียบเท่า ส่วนในกรณีที่ใช้แบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงนั้น จะแบ่งโครงสร้างทั้งหมดให้มีจำนวนข้อต่อและชิ้นส่วนย่อยเพิ่มขึ้น หนึ่งแต่ละชิ้นส่วนยาวเท่ากับ  $0.1 L$  เท่ากันทุกชิ้นส่วนย่อย ดังแสดงตามรูปที่ 5.6

ผลของการปรับกระจายโมเมนต์คดที่หน้าตัดตรงรอยต่อการก่อสร้าง (ข้อต่อหมายเลข 3) ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงของ Ghali [14] ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งจะเห็นว่าแบบจำลองชิ้นส่วนแบบคานให้ค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของ Ghali มากโดยมีความแตกต่างกันเพียง 0.32 % ในขณะที่แบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรง มีความแตกต่าง 2.12 % มากกว่าแบบจำลองชิ้นส่วนแบบคาน เนื่องจากใช้วิธีการคิดแรงจากการอัดแรงแตกต่างกันและจำนวนชิ้นส่วนย่อยที่ใช้แบ่งโครงสร้างมีจำนวนไม่มากนัก

หากแบ่งจำนวนชิ้นส่วนย่อยให้เพิ่มมากขึ้น จะได้ค่าตอบใกล้เคียงกันมากขึ้น นอกจากนี้ยังจะเห็นได้ว่าการใช้แบบจำลองชิ้นส่วนแบบคานและชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรง ให้ผลใกล้เคียงกัน จึงเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้เป็นอย่างดี

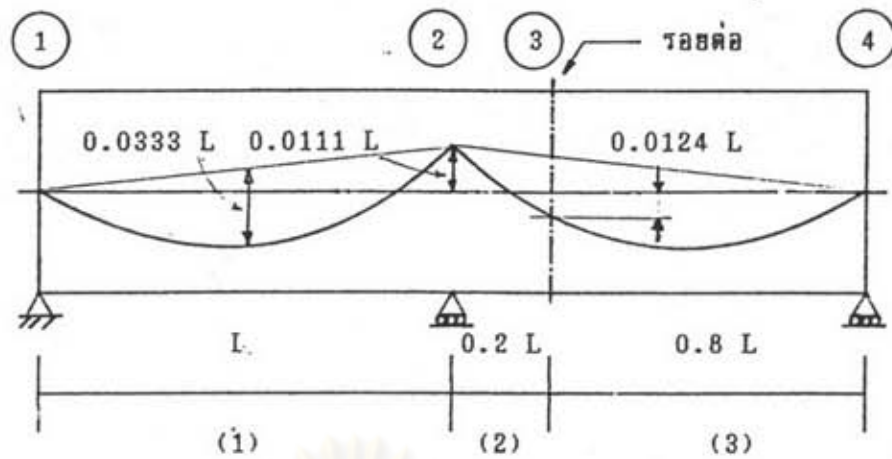
รูปที่ 5.7 แสดงไดอะแกรมของโมเมนต์คัตที่เวลาสุดท้าย เมื่อคิดผลของการคืบตามขั้นตอนการก่อสร้างและการเสื่อมลดแรงดึง จะเห็นได้ว่าโมเมนต์คัตคลับที่เวลาสุดท้ายที่ฐานรองรับตัวกลาง มีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นถึง 2.9 เท่าของค่าโมเมนต์คัตคลับที่คำนวณจากทฤษฎีอัสติค ในขณะที่โมเมนต์คัตคลับในช่วงคานมีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าการปรับกระจายโมเมนต์คัตที่ข้อต่อหมายเลข 3 ที่เวลา 10000 วัน สำหรับตัวอย่างที่ 3

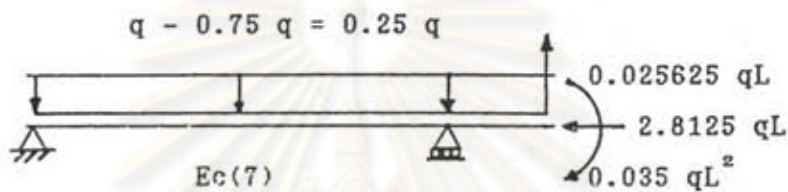
กรณีวิเคราะห์	Ghali [14] ( $\times ql^2$ )	งานวิจัยนี้ ( $\times ql^2$ )	
		แบบจำลองชิ้นส่วน แบบคาน	แบบจำลองชิ้นส่วน คอนกรีตอัดแรง
มีการเสื่อมลดแรงดึง 15 % (ผลต่าง)	-0.0138	-0.013844 (0.32 %)	-0.014092 (2.12 %)

หมายเหตุ โมเมนต์คัตคลับหมายถึงโมเมนต์คัตที่ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวบนเหนือแกนศูนย์ถ่วงของชิ้นส่วนและเกิดหน่วยแรงอัดที่ผิวล่างใต้แกนศูนย์ถ่วงของชิ้นส่วน

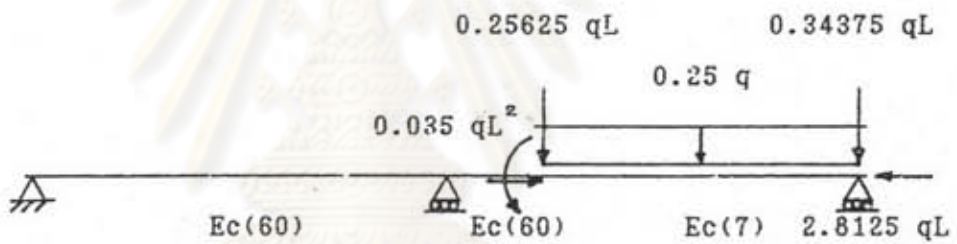




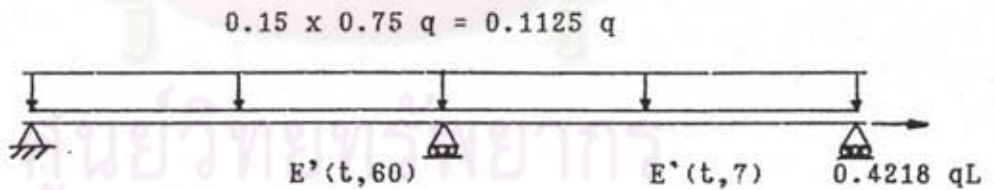
วันที่ 7



วันที่ 60



Loss



$q = 1$  หน่วย

$L = 1$  หน่วย

$t = 10000$  วัน

$\phi(t, 7) = 2.7$

$x(t, 7) = 0.74$

$\phi(t, 60) = 2.3$

$x(t, 60) = 0.78$

$\phi(60, 7) = 1.1$

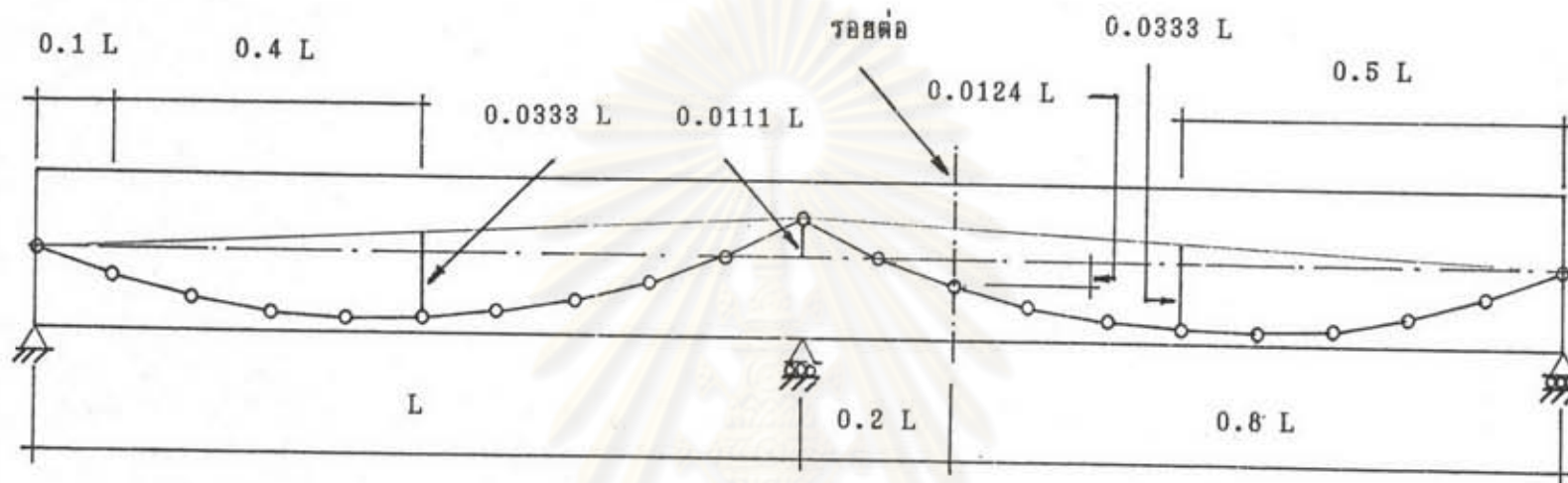
$x(60, 7) = 0.79$

$E_c(60)/E_c(7) = 1.26$

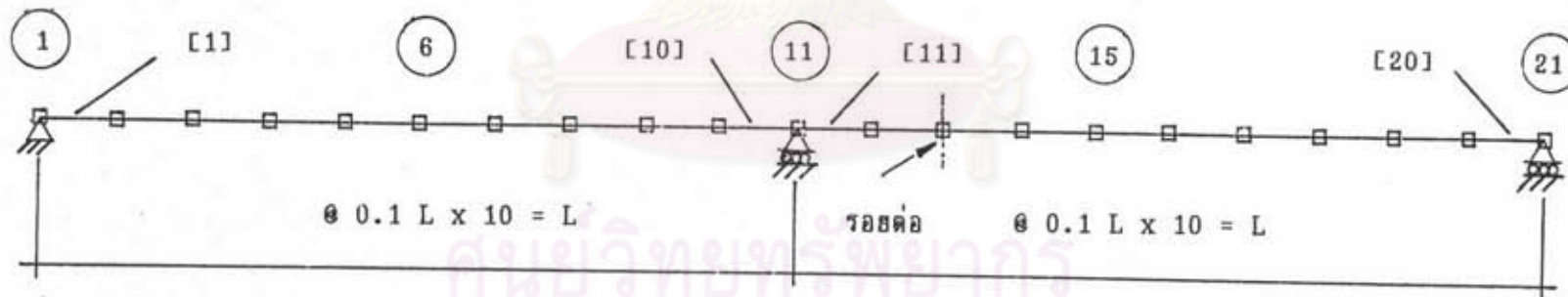
$E_c(7) = 1000$  หน่วย

$E_c(60) = 1260$  หน่วย

รูปที่ 5.5 ตัวอย่างที่ 3



□ แทนตำแหน่งเหล็กเสริมอัดแรงที่ข้อต่อโครงสร้าง



□ แทนข้อต่อโครงสร้าง

[ ] แทนหมายเลขชิ้นส่วน

○ แทนหมายเลขข้อต่อ

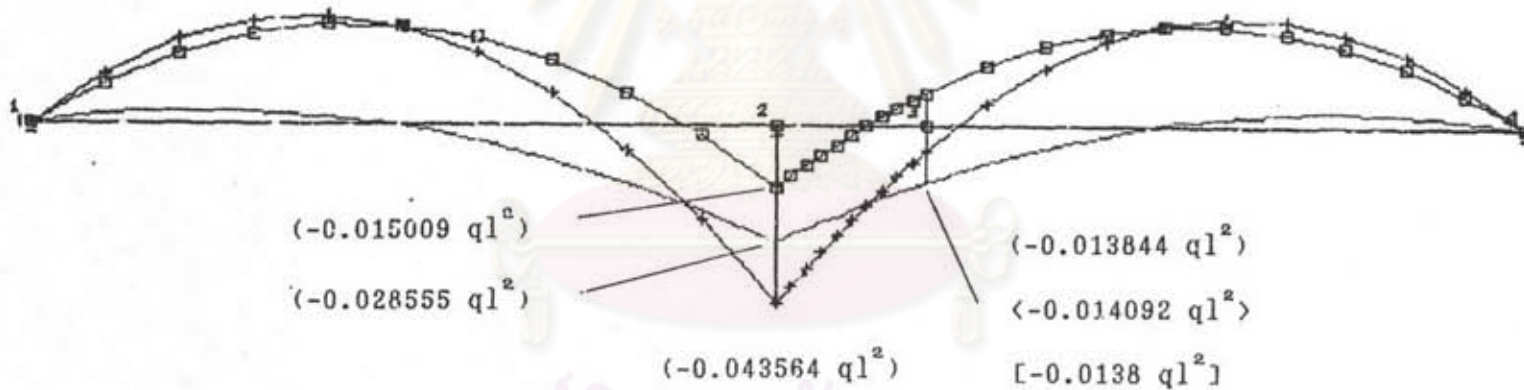
รูปที่ 5.6 แสดงแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงตัวอย่างที่ 3 ในกรณีที่ใช้แบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรง

### COMBINED OVERALL

( ) งานวิจัยนี้ ใช้แบบจำลองชิ้นส่วนแบบคาน

< > งานวิจัยนี้ ใช้แบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรง

[ ] Ghali [14]



BENDING MOMENT DIAGRAM  
 COMB. INSTANTANEOUS —■—  
 COMB. TIME DEPENDENT - - -  
 COMB. INSTAN. + TIME. - · -

รูปที่ 5.7 ผลรวมโมเมนต์คดที่เวลาสุดท้ายตัวอย่างที่ 3  
 ในกรณีที่ใช้แบบจำลองชิ้นส่วนแบบคาน



#### ตัวอย่างที่ 4

ตัวอย่างสุดท้ายนี้ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างจริงโดยใช้สะพานพระรามเจ็ดเป็นตัวอย่าง ตัวสะพานเป็นโครงข้อแข็งระนาบโดยมีคานสะพานเป็นคานคอนกรีตอัดแรงต่อเนื่อง จำนวน 3 ช่วง ความยาวของสะพานช่วงกลางแม่น้ำเท่ากับ 120 เมตร ช่วงริมแต่ละช่วงยาวเท่ากับ 85 เมตร ส่วนเสาเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา (ดูรูปที่ 5.8 และ 5.9 ซึ่งแสดงโครงสร้างและแบบจำลองโครงสร้างเพียงครึ่งเดียวเนื่องจากลักษณะสมมาตร) และได้แสดงข้อมูลคุณสมบัติวัสดุของชิ้นส่วนสะพานตามตารางที่ 5.2 การก่อสร้างสะพานกระทำโดยการหล่อที่ละส่วนต่อเนื่องกันไป ด้วยวิธีช่วงยื่นสมดุลย์ (Free Cantilever Balancing Method) จำนวน 11 ขั้นตอน (ดูรูปที่ 5.10) โดยเริ่มทำการก่อสร้างที่บริเวณเสาตอม่อ (Pier) ในแม่น้ำทั้งสองข้างพร้อมกัน ใช้ระยะเวลาการก่อสร้างประมาณ 250 วัน ในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง ชิ้นส่วนของสะพานจะถูกก่อสร้างในลักษณะคานยื่นปลาออกจากเสาตอม่อเท่ากันทั้งสองข้างแล้วทำการอัดแรง ทำให้โครงสร้างสะพานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่ตามมาได้ ค่าเงินการก่อสร้างในลักษณะดังกล่าว เรือไปจนถึงขั้นตอนการก่อสร้างก่อนสุดท้าย ซึ่งปลายยื่นกลางน้ำจะยื่นมาพบกันที่บริเวณกลางแม่น้ำ ส่วนปลายอีกข้างจะยื่นไปใกล้ตอม่อริมฝั่ง ในขั้นตอนการก่อสร้างสุดท้ายจะหล่อชิ้นส่วนกลางสะพาน (ชิ้นส่วนที่ 47) และชิ้นส่วนด้านริมฝั่ง (ชิ้นส่วนที่ 1 ถึง 9) เพื่อให้สะพานทั้งสองด้านบรรจบกันเป็นโครงสร้างที่ต่อเนื่องกันอย่างสมบูรณ์

ในตัวอย่างนี้ต้องการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน เนื่องจากผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ การคืบ การหดตัว การอัดแรง (ดูรูปที่ 5.11 แสดงตำแหน่งเหล็กเสริมอัดแรงของคานสะพาน) การเสื่อมผลแรงดึงและขั้นตอนการก่อสร้างตามเวลา รวมทั้งกรณีที่เกิดการเสื่อมผลแรงดึงเนื่องจากแรงเสียดทาน ที่เวลาสุดท้ายสมมติ 10950 วัน หรือ 30 ปี ซึ่งการศึกษานี้ทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของสะพานซึ่งเป็นโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในระยะยาว

แบบจำลองชิ้นส่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างนี้ เป็นชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงชนิดขนาดไม่คงที่แบบซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับองค์อาคารจริง และใช้แนวศูนย์ถ่วงของชิ้นส่วนจริงเป็นแกนของแบบจำลองโครงสร้างในการวิเคราะห์ ในการคิดแรงเสียดทานได้แบ่งชิ้นส่วนเหล็กเสริมอัดแรงออกเป็นจำนวน 10 ชิ้นส่วนย่อยและ 20 ชิ้นส่วนย่อยในแบบจำลอง ก. และ ข. ตามลำดับ โดยสมมติค่าสัมประสิทธิ์  $k = 0.003$  อนุกรม และ  $u = 0.26$  ส่วนคุณสมบัติของคอนกรีตตามเวลา

เป็นไปตามข้อกำหนดของ ACI 209 [11] และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การคืบสุดท้ายเท่ากับ 2.35 วิธีคิดเกี่ยวกับการเสื่อมลดของแรงดึงเป็นดังเช่นตัวอย่างที่ 3 โดยสมมติว่าเกิดการเสื่อมลดแรงดึงทั้งหมดเท่ากับ 20 % ของแรงดึงเริ่มแรก

รูปที่ 5.12 แสดงกราฟการเปลี่ยนตำแหน่งของสะพาน สำหรับกรณีที่พิจารณา

1. ผลการตอบสนองอีลาสติคเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และการอัดแรง โดยรวมผลการเสื่อมลดแรงดึงทันทีทันใดจากแรงเสียดทานด้วย จะเห็นว่าผลการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากการคืบทำให้ค่าการโก่งตัวในระยะยาว ณ ตำแหน่งที่เกิดการโก่งตัวมากที่สุด มีค่าสูงกว่าค่าการโก่งตัวที่คำนวณจากทฤษฎีอีลาสติคประมาณ 4 เท่า

2. ผลการคืบและการเสื่อมลดแรงดึงตามเวลาที่เวลาสุดท้าย

3. ผลรวมของข้อ 1 และข้อ 2

สำหรับผลรวมของโมเมนต์คดที่เวลาสุดท้าย (30 ปี) แสดงไว้ในรูปที่ 5.13 ซึ่งสอดคล้องกับกรณีที่ 1 และ 3 ข้างต้น พบว่าโมเมนต์คดของคานสะพานในระยะยาว ณ ตำแหน่งที่มีค่ามากที่สุด มีค่าสูงกว่าโมเมนต์ที่คำนวณจากทฤษฎีอีลาสติคประมาณ 6.38 เท่า (เมื่อไม่คิดเครื่องหมาย) ส่วนโมเมนต์คดบวกในระยะยาว ณ ตำแหน่งที่มีค่ามากที่สุด มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ที่คำนวณจากทฤษฎีอีลาสติคประมาณ 0.64 เท่า

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณของ ภพศักดิ์ [9] โดยเลือกตรวจสอบเฉพาะโมเมนต์คดที่ด้านซ้ายและขวาของค่อมอน้ำ จากตารางดังกล่าวพบว่า

1. การแบ่งชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงออกเป็น 10 ชิ้นส่วนย่อยและ 20 ชิ้นส่วนย่อยตามแบบจำลอง ก. และ ข. เพื่อใช้ในการคำนวณผลเนื่องจากการเสื่อมลดแรงดึงจากแรงเสียดทานรวมทั้งการคำนวณเสถียรของชิ้นส่วนขนาดไม่คงที่ ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกันมากโดยมีความแตกต่างกันมากที่สุดไม่เกิน 0.08 % แสดงว่าการแบ่งจำนวน 10 ชิ้นส่วนย่อยในการคำนวณแรงเสื่อมลด



นั้น ให้ความถูกต้องเพียงพอ

2. ในกรณีที่ไม่มีผลของการอัดแรง ผลลัพธ์ที่ได้ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของภพศักดิ์ [9] โดยที่ความแตกต่างมากที่สุดเป็นเพียง 2.67 %

3. ในกรณีที่คิดผลของการอัดแรงประสิทธิผลคงที่ (กรณีที่ 4) ได้ค่าโมเมนต์คัตทางด้านขวาใกล้เคียงกับภพศักดิ์ [9] ส่วนโมเมนต์คัตทางซ้ายแตกต่างกันถึง 62 % ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลและข้อสมมติฐานที่ใช้แตกต่างกันหลายประการ กล่าวคือ

3.1 งานวิจัยนี้พิจารณาแบบจำลองชิ้นส่วนที่มีขนาดไม่คงที่ ซึ่งใกล้เคียงกับชิ้นส่วนของสะพานจริงมากกว่า ในขณะที่ภพศักดิ์ใช้แบบจำลองชิ้นส่วนที่มีขนาดคงที่

3.2 งานวิจัยนี้พิจารณาแบบจำลองโครงสร้างคานสะพานตามแนวศูนย์กลางของชิ้นส่วนจริง ในขณะที่ภพศักดิ์พิจารณาตามแนวราบเดียวกันหมด

3.3 ภพศักดิ์พิจารณาการเสื่อมลดแรงดึงตามเวลาของเหล็กเสริมอัดแรงในการวิเคราะห์เชิงเวลา โดยการปรับแก้แรงยึดแน่นที่ปลายชิ้นส่วนจากแรงเสื่อมลดตามเวลาที่รู้ค่า ในขณะที่งานวิจัยนี้พิจารณาการเสื่อมลดแรงดึงตามเวลาแบบรวมยอด (Lump Sum) และสมมติว่ามีค่าคงที่หรือทุกชิ้นส่วนเกิดการเสื่อมลดแรงดึงตามเวลาในอัตรา (Rate) เท่ากันที่เวลาสุดท้ายคำนวณแรงยึดแน่นที่ปลายชิ้นส่วนจากการแทนแรงเสื่อมลดตามเวลาด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกเสมือนเทียบเท่ากระทำกับชิ้นส่วนหรือแรงเทียบเท่ากระทำที่ข้อต่อของโครงสร้าง

4. ในกรณีที่คิดผลของการอัดแรงเร็วแรกและคำนึงถึงการเสื่อมลดของแรงดึงทันทีทันใดในเหล็กเสริมอัดแรงจากแรงเสียดทานด้วย เพื่อควบคุมให้ได้แรงประสิทธิผลเท่ากับที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 3 พบว่าได้ผลเป็นไปตามความคาดหมาย กล่าวคือได้ผลใกล้เคียงกับกรณีที่ 3 โดยแตกต่างกันไม่เกิน 1.26 % เนื่องจากในกรณีที่ 4 นั้น การเสื่อมลดของแรงดึงทันทีทันใดที่กระทำกับชิ้นส่วนมีผลตามเวลาด้วย

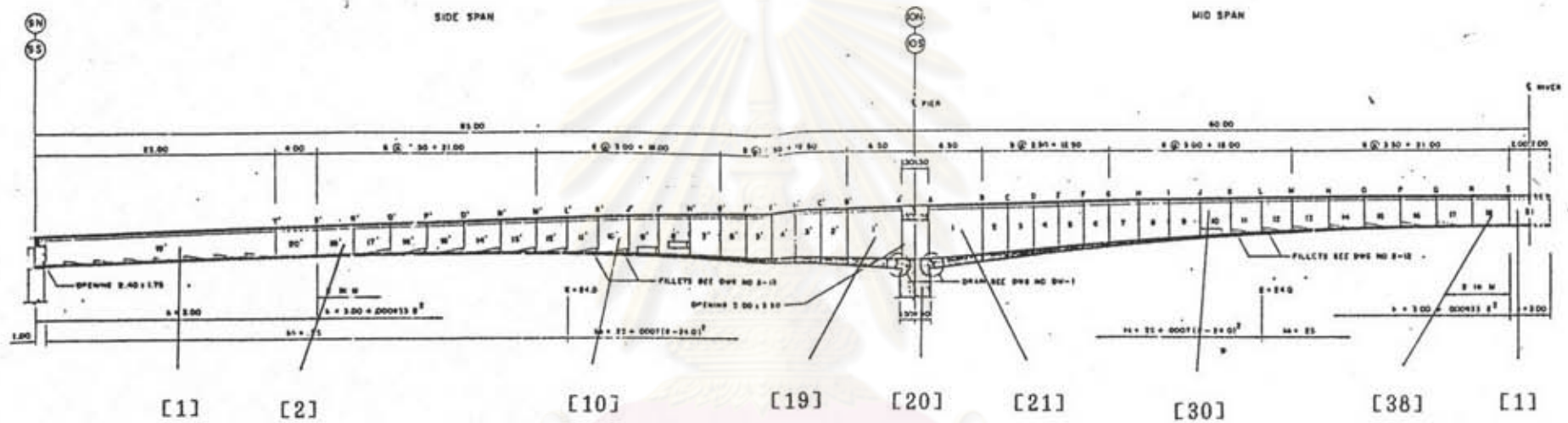
5. ขั้นตอนการก่อสร้างมีผลต่อการปรับกระจายของแรงภายใน โดยชิ้นส่วนที่ทำการ



ก่อสร้างในขั้นตอนการก่อสร้างก่อนหน้า ซึ่งเกิดการคืบหรือการหดตัวบ้างแล้วบางส่วน ไม่สามารถเกิดการคืบหรือการหดตัวตามเวลาได้อย่างอิสระ เนื่องจากการยึดรั้งจากชิ้นส่วนใหม่ในขั้นตอนการก่อสร้างต่อมา ทำให้แรงภายในชิ้นส่วนที่ทำการก่อสร้างก่อน กระจายแรงไปยังชิ้นส่วนที่ก่อสร้างทีหลัง ซึ่งเพิ่งจะเริ่มเกิดการคืบหรือการหดตัว ดังนั้นในกรณีที่เดิมมีแรงภายในอยู่น้อย การกระจายแรงภายในเนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้าง จะทำให้มีแรงภายในเพิ่มมากขึ้น และในทางกลับกัน หากเดิมมีแรงภายในมาก การกระจายจะทำให้แรงภายในเกิดขึ้นน้อยลง

นอกจากนี้ผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้ยังพบว่า ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ข้อต่อของโครงสร้างที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของโครงสร้างทั้งระบบ กล่าวคือ ในกรณีที่วิเคราะห์ผลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ การคืบ การอัดแรง การเสียมลดแรงดึงของเหล็กเสริมทันทีทันใดจากแรงเสียดทานและการเสียมลดแรงดึงตามเวลา พบว่าค่าการเปลี่ยนตำแหน่งในระยะยาวตามแนวราบมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.031 เมตร ส่วนค่าการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวตั้งมีค่ามากที่สุดเท่ากับ -0.096 เมตร เป็นระยะเพียง 0.03 % เมื่อเทียบกับความยาวสะพานทั้งหมด ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยโครงสร้างจะต้องมีค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ข้อต่อน้อย ภายใต้อิทธิพลของน้ำหนักที่กระทำ ทำให้ไม่จำเป็นต้องปรับแก้พิกัดของโครงสร้างทั้งระบบใหม่จากค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดขึ้น ในทุก ๆ รอบของการวิเคราะห์โครงสร้างในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง

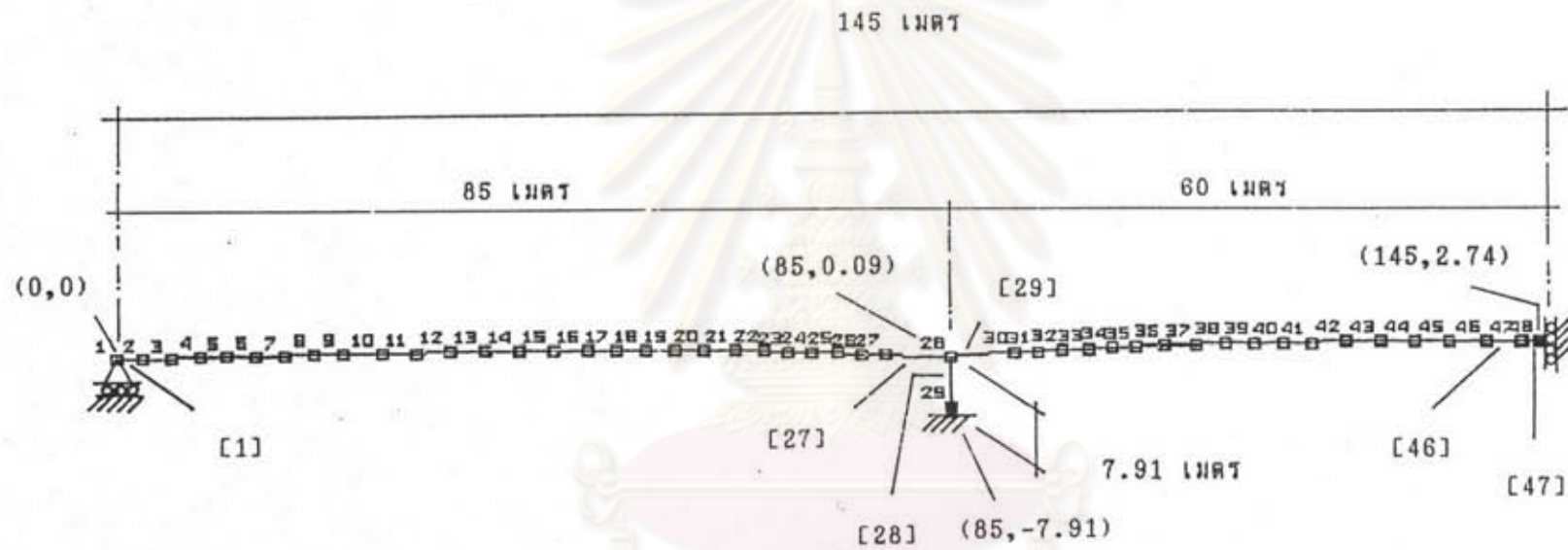
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



[ ] หมายถึงชนิดวัสดุของชิ้นส่วน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
รูปที่ 5.8 ตัวอย่างที่ 4 สะพานพระรามเจ็ด  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# GEOMETRY



□ และ ■ แทนข้อต่อโครงสร้าง    [ ] แทนหมายเลขชิ้นส่วน    ( ) แทนพิกัดของข้อต่อ

รูปที่ 5.9 แบบจำลองโครงสร้างสะพานพระรามเจ็ด



วันที่

๒

๔

๖

๘

๑๐

๑๒

๑๔

๑๖

๑๘

๒๐

๒๒

(๓)  
๒๗ ๒๘ ๒๙

(๒)  
๒๕ ๒๖ ๒๗ ๒๘ ๒๙ ๓๐ ๓๑

(๓)  
๒๓ ๒๔ ๒๕ ๒๖ ๒๗ ๒๘ ๒๙ ๓๐ ๓๑ ๓๒ ๓๓

(๔)  
๒๑ ๒๒ ๒๓ ๒๔ ๒๕ ๒๖ ๒๗ ๒๘ ๒๙ ๓๐ ๓๑ ๓๒ ๓๓ ๓๔ ๓๕

(๕)  
๑๙ ๒๐ ๒๑ ๒๒ ๒๓ ๒๔ ๒๕ ๒๖ ๒๗ ๒๘ ๒๙ ๓๐ ๓๑ ๓๒ ๓๓ ๓๔ ๓๕ ๓๖ ๓๗

(๖)  
๑๗ ๑๘ ๑๙ ๒๐ ๒๑ ๒๒ ๒๓ ๒๔ ๒๕ ๒๖ ๒๗ ๒๘ ๒๙ ๓๐ ๓๑ ๓๒ ๓๓ ๓๔ ๓๕ ๓๖ ๓๗ ๓๘ ๓๙

(๗)  
๑๕ ๑๖ ๑๗ ๑๘ ๑๙ ๒๐ ๒๑ ๒๒ ๒๓ ๒๔ ๒๕ ๒๖ ๒๗ ๒๘ ๒๙ ๓๐ ๓๑ ๓๒ ๓๓ ๓๔ ๓๕ ๓๖ ๓๗ ๓๘ ๓๙ ๔๐ ๔๑

(๘)  
๑๓ ๑๔ ๑๕ ๑๖ ๑๗ ๑๘ ๑๙ ๒๐ ๒๑ ๒๒ ๒๓ ๒๔ ๒๕ ๒๖ ๒๗ ๒๘ ๒๙ ๓๐ ๓๑ ๓๒ ๓๓ ๓๔ ๓๕ ๓๖ ๓๗ ๓๘ ๓๙ ๔๐ ๔๑ ๔๒ ๔๓

(๙)  
๑๑ ๑๒ ๑๓ ๑๔ ๑๕ ๑๖ ๑๗ ๑๘ ๑๙ ๒๐ ๒๑ ๒๒ ๒๓ ๒๔ ๒๕ ๒๖ ๒๗ ๒๘ ๒๙ ๓๐ ๓๑ ๓๒ ๓๓ ๓๔ ๓๕ ๓๖ ๓๗ ๓๘ ๓๙ ๔๐ ๔๑ ๔๒ ๔๓ ๔๔ ๔๕

(๑๐)  
๑๐ ๑๑ ๑๒ ๑๓ ๑๔ ๑๕ ๑๖ ๑๗ ๑๘ ๑๙ ๒๐ ๒๑ ๒๒ ๒๓ ๒๔ ๒๕ ๒๖ ๒๗ ๒๘ ๒๙ ๓๐ ๓๑ ๓๒ ๓๓ ๓๔ ๓๕ ๓๖ ๓๗ ๓๘ ๓๙ ๔๐ ๔๑ ๔๒ ๔๓ ๔๔ ๔๕ ๔๖

(๑๑)  
๑ ๒ ๓ ๔ ๕ ๖ ๗ ๘ ๙ ๑๐ ๑๑ ๑๒ ๑๓ ๑๔ ๑๕ ๑๖ ๑๗ ๑๘ ๑๙ ๒๐ ๒๑ ๒๒ ๒๓ ๒๔ ๒๕ ๒๖ ๒๗ ๒๘ ๒๙ ๓๐ ๓๑ ๓๒ ๓๓ ๓๔ ๓๕ ๓๖ ๓๗ ๓๘ ๓๙ ๔๐ ๔๑ ๔๒ ๔๓ ๔๔ ๔๕ ๔๖ ๔๗



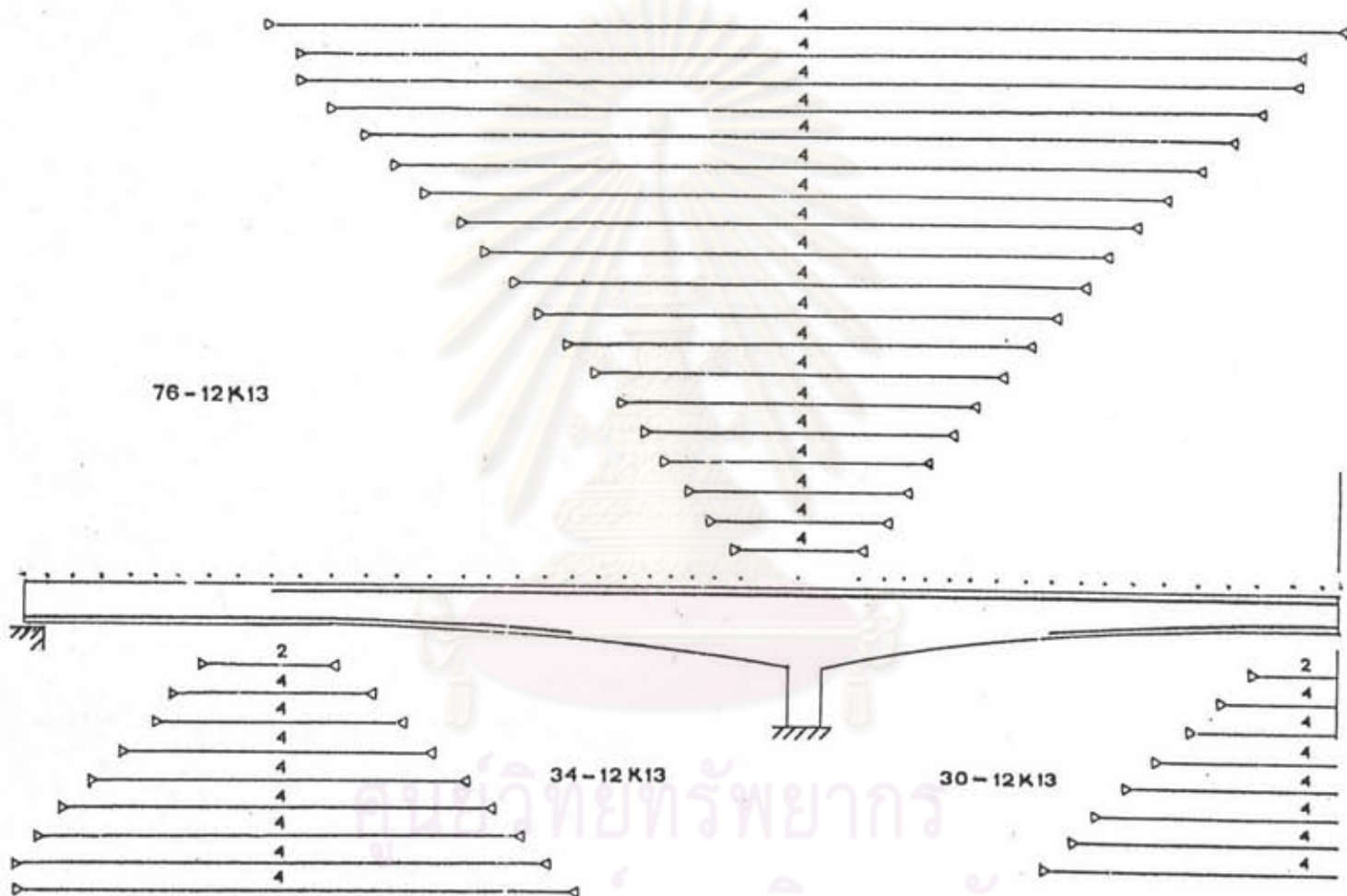
ชั้นส่วนที่ก่อสร้างใหม่



ชั้นส่วนเก่าที่ก่อสร้างเสร็จแล้ว

[ ] หมายถึงชั้นตอนการก่อสร้าง

รูปที่ 5.10 แผนภาพแสดงชั้นตอนการก่อสร้างสะพานพระรามเจ็ด



รูปที่ 5.11 การวางเหล็กเสริมอัดแรงคานสะพาน

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลวัสดุของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานพระรามเจ็ด

หมายเลข วัสดุ	E28	AL	IL	YTL	YBL
		AR	IR	YTR	YBR
1	2500000	8.55	10.98	1.11	1.89
		8.55	10.98	1.11	1.89
2	2500000	8.55	10.98	1.11	1.89
		8.56	11.07	1.11	1.90
3	2500000	8.56	11.07	1.11	1.90
		8.59	11.42	1.12	1.93
4	2500000	8.59	11.42	1.12	1.93
		8.64	11.86	1.14	1.96
5	2500000	8.64	11.86	1.14	1.96
		8.72	12.60	1.18	2.00
6	2500000	8.72	12.60	1.18	2.00
		8.82	13.66	1.22	2.07
7	2500000	8.82	13.66	1.22	2.07
		8.94	14.87	1.27	2.14
8	2500000	8.94	14.87	1.27	2.14
		9.06	16.24	1.32	2.22
9	2500000	9.06	16.24	1.32	2.22
		9.25	18.03	1.38	2.30
10	2500000	9.25	18.03	1.38	2.30
		9.51	20.44	1.47	2.37
11	2500000	9.51	20.44	1.47	2.37
		9.85	23.55	1.58	2.44
12	2500000	9.85	23.55	1.58	2.44
		10.26	27.31	1.71	2.50



ตารางที่ 5.2 ข้อมูลวัสดุของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานพระรามเจ็ด (ต่อ)

หมายเลข วัสดุ	E28	AL	IL	YTL	YBL
		AR	IR	YTR	YBR
13	2500000	10.26	27.31	1.71	2.50
		10.79	32.21	1.87	2.55
14	2500000	10.79	32.21	1.37	2.55
		11.24	38.83	2.01	2.60
15	2500000	11.24	36.83	2.01	2.60
		11.81	42.46	2.17	2.64
16	2500000	11.81	42.46	2.17	2.64
		12.38	48.65	2.33	2.69
17	2500000	12.38	48.65	2.33	2.69
		13.07	55.88	2.51	2.73
18	2500000	13.07	55.88	2.51	2.73
		13.72	63.87	2.69	2.79
19	2500000	13.72	63.87	2.69	2.79
		15.39	84.00	3.12	2.88
20	2500000	18.60	13.95	1.00	1.00
		18.60	13.95	1.00	1.00
21	2500000	15.39	84.00	3.12	2.88
		13.72	63.87	2.69	2.79
22	2500000	13.72	63.87	2.69	2.79
		13.07	55.88	2.51	2.73
23	2500000	13.07	55.88	2.51	2.73
		12.38	48.65	2.33	2.69
24	2500000	12.38	48.65	2.33	2.69
		11.81	42.46	2.17	2.64

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลวัสดุของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานพระรามเจ็ด (ต่อ)

หมายเลข วัสดุ	E28	AL	IL	YTL	YBL
		AR	IR	YTR	YBR
25	2500000	11.81	42.46	2.17	2.64
		11.24	36.83	2.01	2.60
26	2500000	11.24	36.83	2.01	2.60
		10.79	32.21	1.87	2.55
27	2500000	10.79	32.21	1.87	2.55
		10.26	27.31	1.71	2.50
28	2500000	10.26	27.31	1.71	2.50
		9.85	23.55	1.58	2.44
29	2500000	9.85	23.55	1.58	2.44
		9.51	20.44	1.47	2.37
30	2500000	9.51	20.44	1.47	2.37
		9.25	18.03	1.38	2.30
31	2500000	9.25	18.03	1.38	2.30
		9.06	16.24	1.32	2.22
32	2500000	9.06	16.24	1.32	2.22
		8.94	14.87	1.27	2.14
33	2500000	8.94	14.87	1.27	2.14
		8.82	13.66	1.22	2.07
34	2500000	8.82	13.66	1.22	2.07
		8.72	12.60	1.18	2.00
35	2500000	8.72	12.60	1.18	2.00
		8.64	11.86	1.14	1.96
36	2500000	8.64	11.86	1.14	1.96
		8.59	11.42	1.12	1.93

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลวัสดุของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานพระรามเจ็ด (ต่อ)

หมายเลข วัสดุ	E28	AL	IL	YTL	YBL
		AR	IR	YTR	YBR
37	2500000	8.59	11.42	1.12	1.93
		8.53	11.07	1.11	1.90
38	2500000	8.56	11.07	1.11	1.90
		8.55	10.98	1.11	1.89

E28 = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (ตัน ต่อ ตารางเมตร)

AL = พื้นที่หน้าตัดที่ปลายเริ่มต้น (ตารางเมตร)

AR = พื้นที่หน้าตัดที่ปลายสิ้นสุด (ตารางเมตร)

IL = โมเมนต์อินเนอร์เซียที่ปลายเริ่มต้น (เมตร<sup>4</sup>)

IR = โมเมนต์อินเนอร์เซียที่ปลายสิ้นสุด (เมตร<sup>4</sup>)

YTL = ระยะจากแกนศูนย์ถ่วงถึงขอบผิวบนชิ้นส่วนที่ปลายเริ่มต้น (เมตร)

YTR = ระยะจากแกนศูนย์ถ่วงถึงขอบผิวบนชิ้นส่วนที่ปลายสิ้นสุด (เมตร)

YBL = ระยะจากแกนศูนย์ถ่วงถึงขอบผิวล่างชิ้นส่วนที่ปลายเริ่มต้น (เมตร)

YBR = ระยะจากแกนศูนย์ถ่วงถึงขอบผิวล่างชิ้นส่วนที่ปลายสิ้นสุด (เมตร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โมเมนต์ค้ำรวมที่เวลาสุดท้าย  
ที่ต่อม่อน้ำ สำหรับตัวอย่างที่ 4 (หน่วย คัด-เมตร)

กรณี วิเคราะห์	ตำแหน่ง	งานวิจัยนี้		ภพศักดิ์ [9]
		แบบจำลอง ก.	แบบจำลอง ข.	
<1> DL	ซ้าย	-43071	-43073	-43055
	ขวา	-40273	-40263	-39671
<2> DL+CR	ซ้าย	-39901	-39912	-40342
	ขวา	-37620	-37608	-37889
<3> DL+CR+SH	ซ้าย	-40598	-40607	-41066
	ขวา	-38689	-38679	-37847
<4> DL+CR+P <sub>u</sub>	ซ้าย	-5184	-5184	-8408
	ขวา	-6602	-6597	-6002
<5> DL+CR+P <sub>1</sub> +FR	ซ้าย	-5158	-5158	-
	ขวา	-6686	-6681	-

<1> = น้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดคูณกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

<2> = น้ำหนักบรรทุกคงที่ + การคืบ (CR)

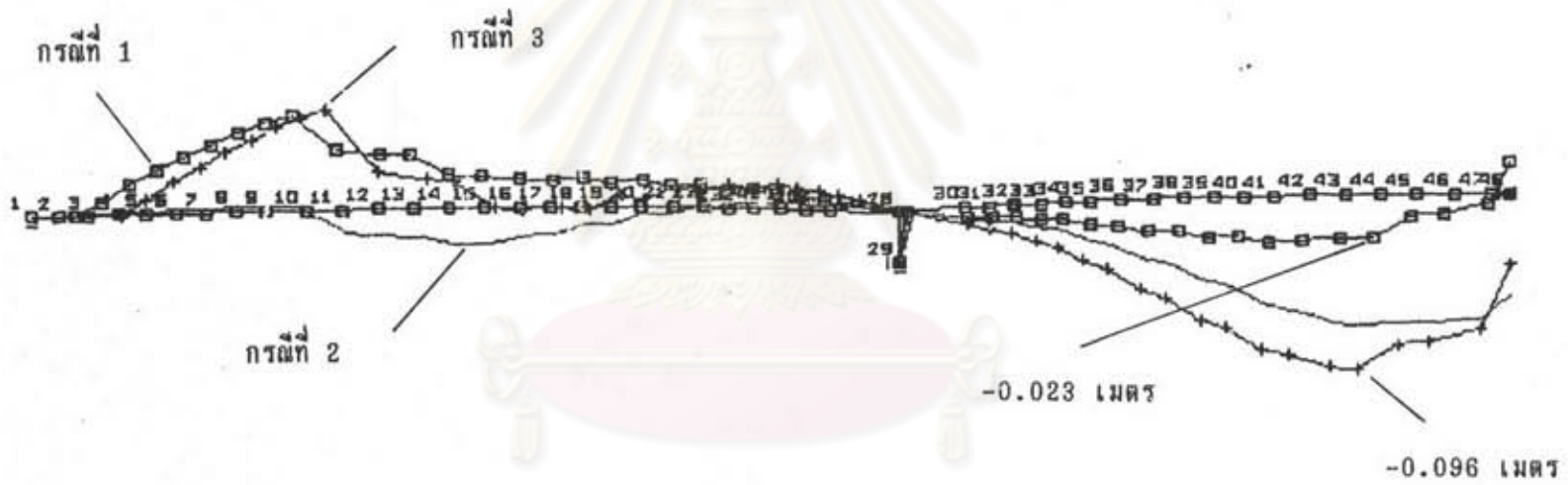
<3> = น้ำหนักบรรทุกคงที่ + การคืบ + การหดตัว (SH)

<4> = น้ำหนักบรรทุกคงที่ + การคืบ + แรงอัดประสิทธิผล (P<sub>u</sub> = 157 ton/tendon) +  
การเสื่อมลดแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงตามเวลา 20 %

<5> = น้ำหนักบรรทุกคงที่ + การคืบ + แรงอัดเริ่มแรก (P<sub>1</sub>) + การเสื่อมลดแรงดึงของเหล็ก  
เสริมอัดแรงตามเวลา 20 % + การเสื่อมลดแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงทันทีทันใดจาก  
แรงเสียดทาน (FR)



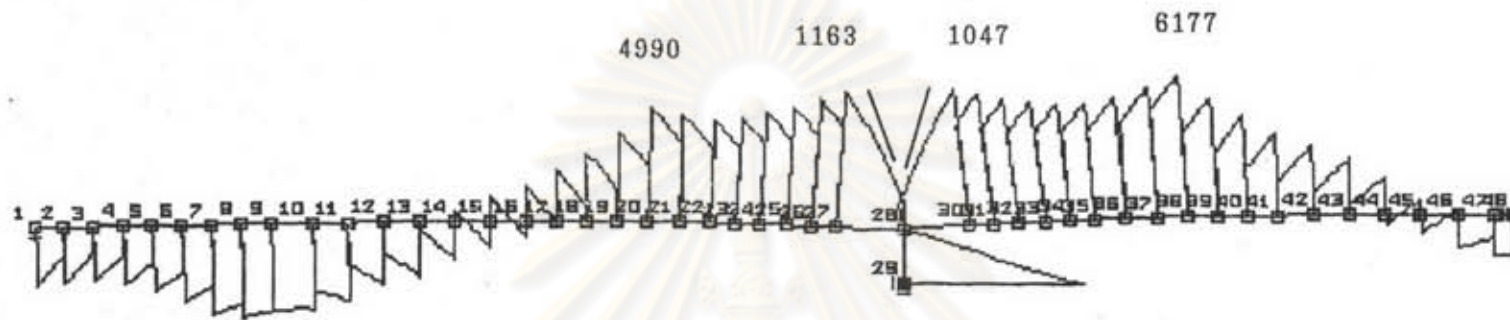
COMBINED OVERALL



DISPLACEMENT  
 COMB. INSTANTANEOUS    —□—  
 COMB. TIME DEPENDENT    ———  
 COMB. INSTAN. + TIME.    —+—

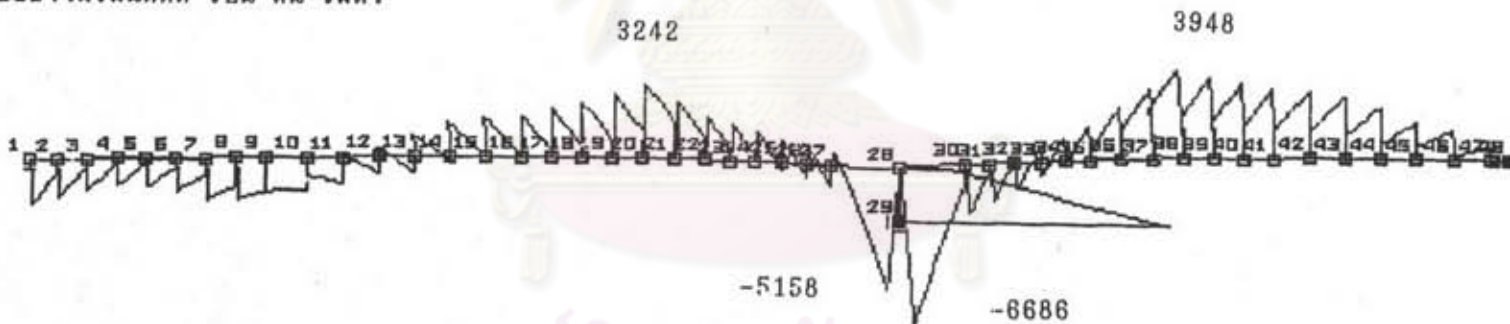
รูปที่ 5.12 แสดงผลรวมการเปลี่ยนตำแหน่งที่เวลาสุดท้ายตัวอย่างที่ 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 อุดมสารณ์มหาวิทยาลัย



COMBINED INSTANTANEOUS

หน่วยของโมเมนต์คือ เป็น คิว-เมตร



COMBINED INSTANTANEOUS + TIME DEPENDENT

รูปที่ 5.13 แสดงผลรวมโมเมนต์คัตที่เวลาสุดท้ายตัวอย่างที่ 4