



ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved



ภาคผนวก ก  
คุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

ตาราง ก-1 ผลของสภาพแวดล้อมต่อเส้นใย (NCHRP Report 514)

หัวข้อพิจารณา	เส้นใยคาร์บอน	เส้นใยแก้ว	เส้นใยอะรามิด
การทนกรด/ด่าง	ทนทานมาก	ไม่ทน	ไม่ทน
การยืด/หดตัวตามอุณหภูมิ	เกือบไม่ยืด/หด (ทำให้หน่วยแรงยืดเหนียวสูง)	ใกล้เคียงคอนกรีต	เกือบไม่ยืด/หด (ทำให้หน่วยแรงยืดเหนียวสูง)
การนำไฟฟ้า	นำไฟฟ้าได้ดี	เป็นฉนวน	เป็นฉนวน
ทนการกระแทก	ต่ำ	สูง	สูง
การวิบัติจากการสืบและความล้า	ทนทานมาก	ทนทานต่ำ	ทนทานต่ำ

ตาราง ก-2 ตัวอย่างคุณสมบัติทางกลของเส้นใยภายใต้แรงดึง (ACI 440.2R-02)

ชนิดของเส้นใย	โมดูลัสยืดหยุ่น (จิกะปาสกาล)	กำลังรับแรงดึง (เมกะปาสกาล)	ความเครียดประลัยขั้นต่ำ(%)
เส้นใยคาร์บอน			
เอนกประสงค์	220-240	2050-3790	1.2
กำลังสูง	220-240	3790-4820	1.4
กำลังสูงมาก	220-240	4820-6200	1.5
โมดูลัสสูง	340-520	1720-3100	0.5
โมดูลัสสูงมาก	520-690	1380-2400	0.2
เส้นใยแก้ว			
เอนกประสงค์	69-72	1860-2680	4.5
กำลังสูง	86-90	3440-4140	5.4
เส้นใยอะรามิด			
เอนกประสงค์	69-83	3440-4140	2.5
ประสิทธิภาพสูง	110-124	3440-4140	1.6

ตาราง ก-3 ตัวอย่างคุณสมบัติทางกลของแผ่น FRP ภายใต้แรงดึง (ACI 440.2R-02)

ระบบ FRP	โมดูลัสยืดหยุ่น (จิกะปาสกาล)		กำลังรับแรงดึง (เมกะปาสกาล)		ความเครียด ประลัย ทิส 0 องศา (ร้อยละ)
	ทิส 90 องศา	ทิส 0 องศา	ทิส 0 องศา	ทิส 90 องศา	
เส้นใยคาร์บอน กำลังสูงในอีพ็อกซี					
ทิส 0 องศา	100-140	2-7	1020-2080	35-70	1.0-1.5
ทิส +45/-45 องศา	14-28	14-28	180-280	180-280	1.5-2.5
เส้นใยแก้ว เอนกประสงค์ใน อีพ็อกซี					
ทิส 0 องศา	20-40	2-7	520-1400	35-70	1.5-3.0
ทิส +45/-45 องศา	14-21	14-21	180-280	180-280	2.5-3.5
เส้นใยอารามิด ประสิทธิภาพสูงใน อีพ็อกซี					
ทิส 0 องศา	48-68	2-7	700-1720	35-70	2.0-3.0
ทิส +45/-45 องศา	7-14	7-14	140-210	140-210	2.0-3.0

ตาราง ก-4 คุณสมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ (มยพ.1508-51)

ชนิดของเส้นใย	ความ ถ่วงจำเพาะ	กำลังรับแรงดึง		โมดูลัสแรงดึง	
		เมกะ ปาสกาล	กิโลปอนด์ /ตร.นิ้ว	จิกะปาส กาล	(10 <sup>3</sup> กิโลปอนด์ /ตร.นิ้ว)
เส้นใยแก้ว E-Glass	2.58	2,689	390	72.4	10.5
เส้นใยแก้ว S-2-Glass®	2.48	4,280	620	86.0	13.0
เส้นใยแก้ว ECR-Glass	2.62	3,625	525	72.5	10.5
เส้นใยอะรามิด K-49	1.44	3,620	525	131.0	19.0
เส้นใยคาร์บอน AS4	1.8	3,790	550	234.0	34.0

ตาราง ก-5 คุณสมบัติของแผ่นคอมโพสิตเสริมเส้นใย (มยพ.1508-51)

ระบบ FRP	มอดูลัสยืดหยุ่น (GPa.)		กำลังรับแรงดึง (MPa.)		ความเครียด ประลัย ทิส 0 องศา (%)
	ทิส 0 องศา	ทิส 90 องศา	ทิส 0 องศา	ทิส 90 องศา	
เส้นใย คาร์บอนกำลัง สูงในอีพ็อกซี	100-140	2-7	1,020-2,080	35-70	1.0-1.5
เส้นใยแก้ว เอนกประสงค์ ในอีพ็อกซี	20-40	2-7	520-1,400	35-70	1.5-3.0
เส้นใย อะรามิด ประสิทธิภาพ สูงในอีพ็อกซี	48-68	2-7	700-1,720	35-70	2.0-3.0

คุณสมบัติของแผ่นคอมโพสิตในตาราง ก-5 คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดของแผ่น FRP ซึ่งมีความหนา 2.5 มิลลิเมตร และมีปริมาณเส้นใยประมาณร้อยละ 40 ถึง 60 ของปริมาตรแผ่น FRP

ตาราง ก-6 คุณสมบัติวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด (มยพ.1508-51)

อัตราส่วน เส้นใย คาร์บอน ต่อเส้นใย แก้ว	กำลังรับแรง ดึง เมกะปาสกาล	โมดูลัส แรงดึง กิกะปาสกาล	กำลังรับแรง ดัด เมกะปาสกาล	โมดูลัส แรงดัด กิกะปาสกาล	ความ หนาแน่น กรัม/ลบ.ซม.
0 : 100	604.7	40.1	944.6	35.4	1.91
25 : 75	641.2	63.9	1061.8	63.4	1.85
50 : 50	689.5	89.6	1220.4	78.6	1.80
75 : 25	806.7	123.4	1261.7	1261.7	1.66



**ภาคผนวก ข**

การออกแบบเสริมกำลังจุดต่ออาคาร โดยแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

และ

ตัวอย่างการออกแบบเสริมกำลังชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กโดยแผ่นไฟเบอร์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

**ภาคผนวก ข-1 สัญลักษณ์และหน่วยที่ใช้ในการออกแบบ**

$A_f$	พื้นที่ของการเสริม FRP ( $mm^2$ )
$A_{fv}$	พื้นที่ของการเสริม FRP รับแรงเฉือน ( $mm^2$ )
$c$	ระยะจากจุดที่เกิดแรงอัดสูงสุดของ FRP ถึงแกนสะเทิน ( $mm^2$ )
$C_E$	ตัวคูณลดกำลังในสภาพแวดล้อม
$d_f$	ความลึกของการเสริม FRP รับแรงเฉือน ( $mm^2$ )
$E$	Modulus of Elasticity (MPa)
$f_c$	ความเค้นของคอนกรีต (MPa)
$f_{fu}^*$	ความเค้นของ FRP ตามเอกสารระบุจากโรงงาน (MPa)
$f_y$	ความเค้นของเหล็กเสริม (MPa)
$M_n$	ความสามารถในการรับโมเมนต์ค้ดของหน้าตัด ( $N-mm$ )
$s_f$	ระยะห่างของการติดตั้ง FRP รับแรงเฉือน (mm)
$t_f$	ความหนาของ FRP 1 ชั้น (mm)
$V_n$	ความสามารถในการรับแรงเฉือนของหน้าตัด (N)
$\mathcal{E}$	ความเครียด (mm/mm)

**ภาคผนวก ข-2 การออกแบบเสริมกำลังจุดต่ออาคารโดยแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ในงานวิจัย**

ในการออกแบบจุดต่อริมอาคารเสริมกำลังโดยแผ่นไฟเบอร์ต้องออกแบบให้จุดต่อนั้นรับแรงเฉือนส่วนเกินที่เกิดจากความสามารถในการรับโมเมนต์ค้ดของคาน ( $M_n$ ) ให้เพียงพอเพื่อย้ายตำแหน่งการวิบัติจากที่จุดต่อให้ไปเกิดที่คานแทน และมีพฤติกรรมแบบคานอ่อน-เสาแข็ง ซึ่งเป็นรูปแบบการวิบัติที่เหมาะสมในการรับแรงแผ่นดินไหว

ในขั้นตอนแรกได้คำนวณหาความสามารถในการรับโมเมนต์ของคาน (หน้าตัดคานของแบบจำลองไฟในค้ดอิเลเมนต์) และพบว่าคานมีความสามารถในการรับโมเมนต์ค้ด  $M_n = 19\text{tons}$  จึงนำโมเมนต์ที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณที่ต้องเสริมกำลังโดยแผ่นไฟเบอร์ต่อไป

แรงเฉือนส่วนเกินในจุดต่อริมอาคารสามารถคำนวณได้ดังนี้

แรงเฉือนในเสา ( $V_{col}$ ) มีค่าเท่ากับ  $19/H = 19/2.52 = 7.54\text{tons}$

แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในจุดต่อมีค่าเท่ากับ  $V_j = (A_s f_y) - V_{col}$

$$V_j = \frac{6 \times 2.01 \times 5885}{1000} - 7.54 = 63.43 \text{ tons}$$

$$\begin{aligned} \text{ความสามารถรับแรงเฉือนของจุดต่อรูปอาคาร (} V_n \text{) มีค่าเท่ากับ } &= 3.2 \sqrt{f_c'} A_j \\ &= 3.2 \sqrt{301} \times (20 \times 30) = 33.31 \text{ tons} \end{aligned}$$

$$\phi V_n = 0.85 \times 33.31 = 28.31 \text{ tons}$$

$$\text{แรงเฉือนส่วนเกินที่เกิดขึ้นในจุดต่อเท่ากับ } \Delta V = V_j - \phi V_n$$

$$\Delta V = 63.43 - 28.31 = 35.12 \text{ tons (344.56 kN)}$$

ในการคำนวณหาจำนวนชั้นของแผ่นไฟเบอร์ที่ต้องการจะเลือกใช้คุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วเนื่องจากมีประสิทธิภาพน้อยกว่าแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

$$\text{ความเค้นแรงดึงของแผ่น GFRP } f_{fu} = C_E \times f_{fu}^*$$

เนื่องจากวิเคราะห์จุดต่ออยู่ในสถานที่นอกอาคารจึงเลือกใช้  $C_E = 0.65$

$$f_{fu} = 0.65 \times 1400.47 = 910.31 \text{ N/mm}^2$$

แต่เนื่องจากการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงแผ่นดินไหว จึงต้องพิจารณาตัวคูณลดกำลังในส่วนนี้ด้วย โดยแผ่น GFRP ได้ใช้ตัวคูณดังกล่าวเท่ากับ 0.2

$$\text{เพราะฉะนั้น } f_{fu} = 0.2 \times 910.31 = 182.06 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{ความเครียดที่จุดวิกฤตของแผ่นไฟเบอร์ } \mathcal{E}_{fu} = C_E \times \mathcal{E}_{fu}^*$$

$$\mathcal{E}_{fu} = 0.65 \times 0.035 = 0.0227$$

ความเครียดประสิทธิภาพในกรณีหุ้มแผ่นไฟเบอร์ทั้งหน้าตัดมีค่าเท่ากับ

$$\mathcal{E}_{fe} = 0.75\mathcal{E}_{fu} = 0.017 > 0.004$$

เนื่องจากค่าความเครียดประสิทธิผลห้ามเกิน 0.004 จึงใช้  $\mathcal{E}_{fe} = 0.004$

$$\text{แรงเฉือนที่ใช้หาปริมาณแผ่น GFRP } (V_{f,req}) = \frac{\Delta V_u}{\phi(\psi)}$$

$$= \frac{344.56}{0.85 \times 0.85} = 476.89 \text{ kN}$$

$$A_{fv,req} = \frac{V_{f,req} S_f}{\mathcal{E}_{fe} E_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}$$

$$= \frac{476.89 S_f}{(0.004)(40.01)(1)(300)} = 9.93 S_f$$

$$\text{จำนวนชั้นของการหุ้มแผ่น GFRP } (n) = \frac{A_{fv,req}}{2t_f w_f}$$

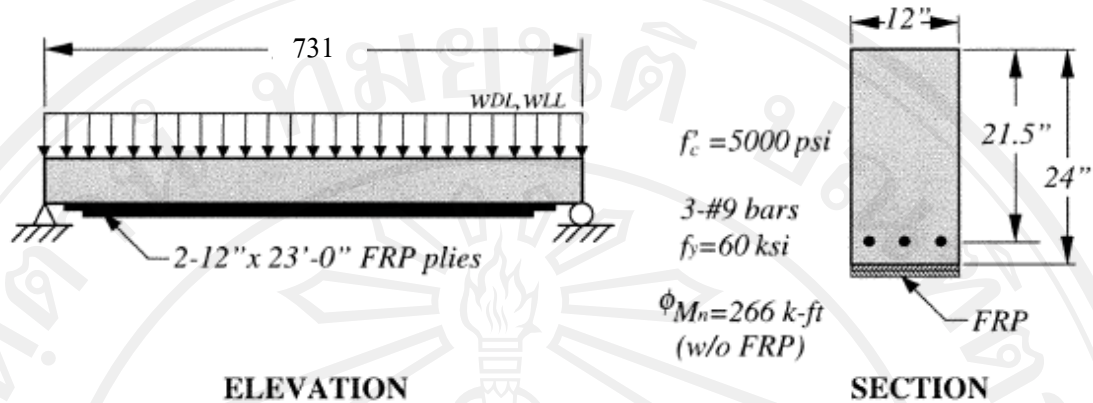
$$n = \frac{9.93 S_f}{2(2.5)w_f} = 1.98 \frac{S_f}{w_f}$$

เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกหุ้มแผ่นไฟเบอร์จำนวน 2 ชั้น ให้กับแบบจำลองทั้งหมด

**ภาคผนวก ข-3 ตัวอย่างการออกแบบชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังโดยการหุ้มแผ่นไฟเบอร์**

**ภาคผนวก ข-3-1 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงดัด**

ในหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการให้คานดังกล่าวสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจรได้เพิ่มขึ้น 50% จึงใช้การเสริมกำลังโดยการหุ้มแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) จำนวน 2 ชั้น ดังรูปที่ ข-1 และทำการวิเคราะห์หาความสามารถในการรับแรงดัดตลอดจนตรวจสอบความสามารถในการรับแรงเฉือน, ระยะแอ่นตัว และรอยแตกร้าวต้องไม่เกินค่าที่กำหนด โดยใช้ขนาดและคุณสมบัติของดังแสดงในตารางที่ ข-1



รูปที่ ข-1 รูปแบบตัวอย่างคานเสริมกำลังรับแรงดัดโดยการหุ้มแผ่นไฟเบอร์ที่นำมาวิเคราะห์

ตาราง ข-1 ขนาดและคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ออกแบบคานเสริมกำลังรับแรงดัด

ความยาวของคาน	7.31 m.
ความกว้างของคาน	30.48 cm.
ความลึกประสิทธิภาพ	54.61 cm.
ความลึกของคาน	60.96 cm.
กำลังอัดคอนกรีต ( $f'_c$ )	34 N/mm <sup>2</sup>
กำลังครากของเหล็กเสริม ( $f_y$ )	414 N/mm <sup>2</sup>
$\phi M_n$ กรณีไม่เสริมแผ่นไฟเบอร์	355.3 kN . m
ขนาดของเหล็กเสริม	28 mm.

ในส่วนของน้ำหนักบรรทุกทุกเดิม, น้ำหนักบรรทุกที่ต้องการ และโมเมนต์ดัดที่กลางคาน คอนกรีตเสริมเหล็กสามารถสรุปได้ดังตารางที่ ข-2

ตาราง ข-2 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบคานเสริมกำลังรับแรงดัด

Loading/moment	Existing loads	Anticipated loads
Dead loads $w_{DL}$	14 N/mm	14 N/mm
Live loads $w_{LL}$	17 N/mm	26 N/mm
Unfactored loads ( $w_{DL} + w_{LL}$ )	32.1 N/mm	40.9 N/mm
Unstrengthened load limit ( $1.2 w_{DL} + 0.85 w_{LL}$ )	N/A	39.8 N/mm
Factor loads ( $1.4 w_{DL} + 1.7 w_{LL}$ )	50.2 N/mm	65.1 N/mm
Dead-load moment $M_{DL}$	96.2 kN-m	96.2 kN-m
Live-load moment $M_{LL}$	114.9 kN-m	173.6 kN-m
Service-load moment $M_S$	211.1 kN-m	269.8 kN-m
Unstrengthened moment limit ( $1.2 M_{DL} + 0.85 M_{LL}$ )	N/A	263.2 kN-m
Factored moment $M_u$	331.3 kN-m	428.8 kN-m

คุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ในการเสริมกำลัง แสดงได้ดังตารางที่ ข-3 โดยทำการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์จำนวน 2 ชั้น ตามแนวยาวของคานเป็นระยะ 7 เมตร ตลอดความกว้างของคาน และใช้วิธีการการขึ้นรูปเปียกในการติดตั้ง

ตาราง ข-3 คุณสมบัติของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) ที่ใช้เสริมกำลังคานรับแรงดัด

Thickness per Ply $t_f$	1.016 mm
Ultimate Tensile Strength $f_{fu}^*$	0.62 kN/mm <sup>2</sup>
Rupture Strain $\epsilon_{fu}^*$	0.017 mm/mm
Modulus of Elasticity of FRP Laminate $E_f$	37 kN/mm <sup>2</sup>

เริ่มต้นการคำนวณ โดยการตรวจสอบกำลังรับแรงดัดของคานที่มีอยู่เดิม ( $\phi M_n$ ) ต้องมีค่ามากกว่ากับขีดจำกัดในการเสริมกำลังเพื่อป้องกันแผ่นไฟเบอร์เกิดการเสียหาย ดังสมการที่ (2.68)

และพบว่า  $\phi M_n = 355.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$  มีค่ามากกว่า  $(1.2 M_{DL} + 0.85 M_{LL}) = 263.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$  หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณในขั้นตอนต่อไป

คำนวณหาความเค้นและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จากสมการ  $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ ,  $\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$  และเนื่องจากการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์ในอาคารจึงใช้  $C_E = 0.95$

$$f_{fu} = (0.95)(620.53 \text{ N/mm}^2) = 589.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{fu} = (0.95)(0.017 \text{ mm/mm}) = 0.0162 \text{ mm/mm}$$

คำนวณคุณสมบัติของคอนกรีต

$$\beta_1 = 1.09 - 0.08 f'_c (\text{N/mm}^2) = 0.81$$

$$E_c = 57,000 \sqrt{34.47 \text{ N/mm}^2} = 334,672 \text{ N/mm}^2$$

$$A_s = 3(615.7 \text{ mm}^2) = 1935.48 \text{ mm}^2$$

$$\rho_s = \frac{1935.48 \text{ mm}^2}{(304.8 \text{ mm})(546.1 \text{ mm})} = 0.00116$$

$$A_f = (2 \text{ plies})(1.016 \text{ mm/ply})(304.8 \text{ mm}) = 619.35 \text{ mm}^2$$

$$\rho_s = \frac{619.35 \text{ mm}^2}{(304.8 \text{ mm})(546.1 \text{ mm})} = 0.00372$$

คำนวณหาความเครียดของหน้าตัดก่อนที่ทำการเสริมกำลัง

$$\epsilon_{bi} = \frac{(97,632 \text{ kN}\cdot\text{mm})[609.6 \text{ mm} - (0.334)(546.1 \text{ mm})]}{(2451 \cdot 10^6 \text{ mm}^4)(28 \text{ kN/mm}^2)}$$

$$\epsilon_{bi} = 0.00061$$

คำนวณหา Bond-Dependent Coefficient ของระบบการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

$$(2)(37 \text{ kN/mm}^2)(1.016 \text{ mm}) = 75,184 < 175,336$$

$$k_m = \frac{1}{60(0.0162)} \left[ 1 - \frac{(2)(37 \text{ kN/mm}^2)(1.016 \text{ mm})}{175,336} \right]$$

$$k_m = 0.588 < 0.6$$

ประมาณค่า  $c$  โดยสมมติให้เท่ากับร้อยละ 20 ของความลึกคาน

$$c = (0.20)(546.1 \text{ mm}) = 109.2 \text{ mm}$$

คำนวณหาความเครียดประสิทธิผลของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

$$\mathcal{E}_{fe} = 0.003 \left( \frac{617.2 \text{ mm} - 109.2 \text{ mm}}{109.2 \text{ mm}} \right) - 0.00061 \leq 0.82 (0.0162)$$

$$\mathcal{E}_{fe} = 0.0131 \leq 0.0133$$

คำนวณหาความเครียดในเหล็กเสริมก่อนที่จะมีการเสริมกำลัง

$$\mathcal{E}_s = (0.0131 + 0.00061) \left( \frac{546.1 - 109.2}{609.6 - 109.2} \right) = 0.012$$

คำนวณหาความเครียด, ความเค้นภายในเหล็กเสริม และในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

$$f_s = (200 \text{ kN} / \text{mm}^2) (0.012) \leq 0.14 \text{ kN} / \text{mm}^2$$

$$f_s = 2.4 \text{ kN} / \text{mm}^2 \leq 0.14 \text{ kN} / \text{mm}^2$$

$$f_{fe} = (37 \text{ kN} / \text{mm}^2) (0.0131) = 0.5 \text{ kN} / \text{mm}^2$$

คำนวณหาแรงภายใน และตรวจสอบความสมดุล

$$c = \frac{(1935.48 \text{ mm}^2)(413.7 \text{ kN} / \text{mm}^2) + (619 \text{ mm}^2)(484 \text{ kN} / \text{mm}^2)}{(0.85)(34.47 \text{ kN} / \text{mm}^2)(0.81)(305 \text{ mm})}$$

$$c = 152 \text{ mm} \neq 109 \text{ in} \quad \text{n.g.}$$

ปรับแก้ค่า  $c$  จนได้สมดุลของแรงภายใน

$$c = \frac{(1935.48 \text{ mm}^2)(0.41 \text{ kN} / \text{m}^2) + (619 \text{ mm}^2)(0.34 \text{ kN} / \text{mm}^2)}{(0.85)(0.03 \text{ kN} / \text{mm}^2)(0.81)(305 \text{ mm})}$$

$$c = \frac{(1935 \text{ mm}^2)(413.7 \text{ N} / \text{mm}^2) + (619 \text{ mm}^2)(343 \text{ N} / \text{mm}^2)}{(0.85)(34.47 \text{ N} / \text{mm}^2)(0.81)(305 \text{ mm})}$$

$$c = 142 \text{ mm} = 142 \text{ mm} \quad \text{O.K.}$$

คำนวณหาคำรับแรงดัดที่ใช้ออกแบบหลังจากการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

$$\phi M_n = 0.90 \left[ (1935.48 \text{ mm}^2)(414 \text{ N} / \text{mm}^2) \left( 546 \text{ mm} - \frac{(0.81)(142 \text{ mm})}{2} \right) \right. \\ \left. + (0.85)(546 \text{ mm}^2)(343 \text{ N} / \text{mm}^2) \left( 607 \text{ mm} - \frac{(0.81)(142 \text{ mm})}{2} \right) \right]$$

$$\phi M_n = 435,329 N \cdot mm = 435.3 N \cdot m \geq M_u = 428.7 N \cdot m$$

เพราะฉะนั้นแสดงว่าหลังจากเสริมกำลังทำให้หน้าตัดมีความสามารถเพียงพอต่อการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นตามต้องการ

ตรวจสอบความเค้นของเหล็กเสริมในสภาวะใช้งาน

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \frac{h}{d}\right) - \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)}$$

$$k = 0.343$$

$$kd = (0.343)(546.1 \text{ mm}) = 187.3 \text{ mm}$$

$$f_{s,s} = 280 N / mm^2 \leq (0.80)(410 N / mm^2) = 330 N / mm^2$$

เพราะฉะนั้นหมายความว่าความเค้นภายในเหล็กเสริมไม่เกินขีดจำกัด

ตรวจสอบความเค้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในสภาวะใช้งาน

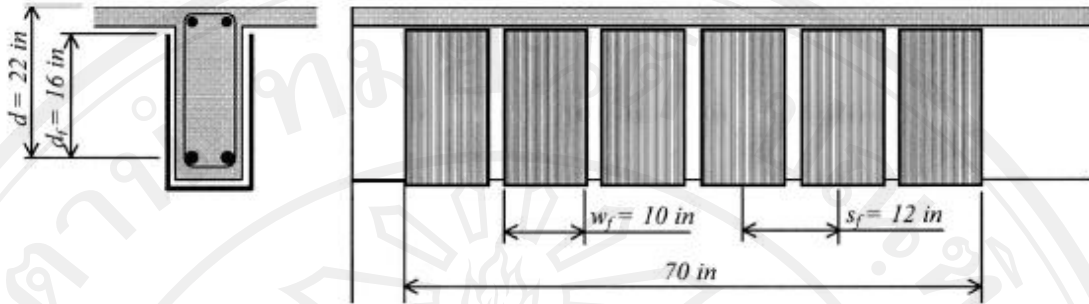
$$f_{f,s} = 0.278 kN / mm^2 \left( \frac{37 kN / mm^2}{20037 kN / mm^2} \right) \left( \frac{609.6 \text{ mm} - 187.2 \text{ mm}}{546.1 \text{ mm} - 187.2 \text{ mm}} \right) - (0.00061)(371 kN / mm^2)$$

$$f_{f,s} = 38.6 N / mm^2 \leq (0.55)(586 N / mm^2) = 322 N / mm^2$$

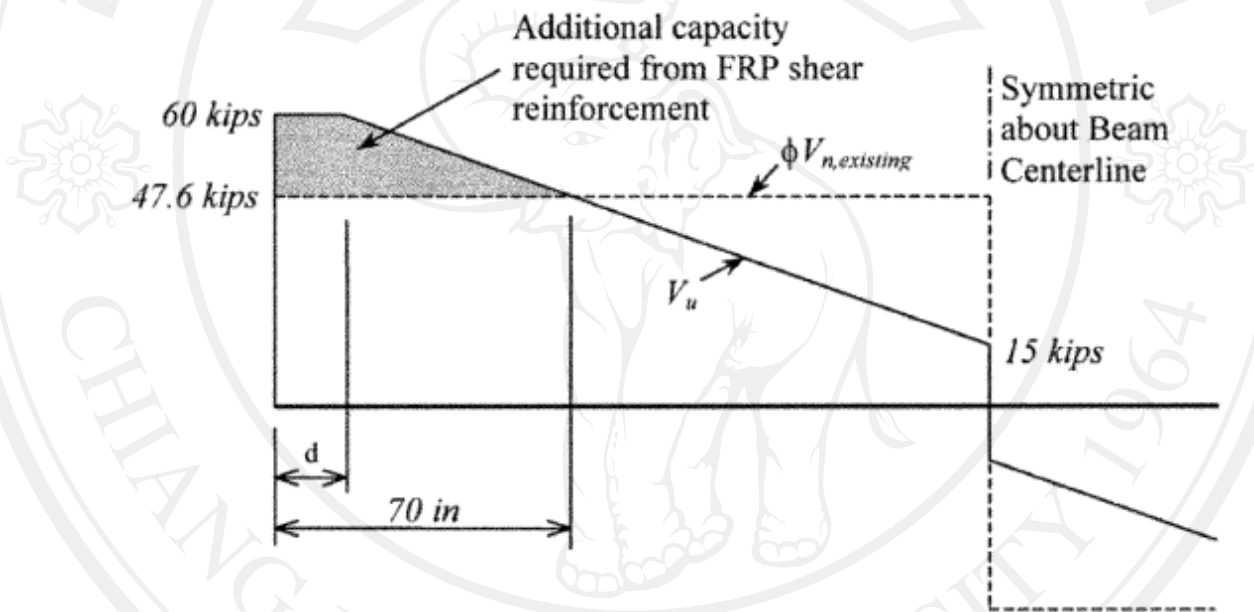
หมายความว่าความเค้นภายในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพียงพอต่อการรับแรงสลับทิศ

#### ภาคผนวก ข-2-2 การออกแบบชิ้นส่วนคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือน

ในหัวข้อนี้ได้แสดงวิธีการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือน (T-Beam) ภายในสำนักงาน ที่ต้องการเสริมกำลังเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกจรได้เพิ่มมากขึ้น หลังจากวิเคราะห์แรงภายในของคานก่อนเสริมกำลังพบว่าต้องเสริมกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มเติมเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นจึงทำการเสริมกำลังโดยติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ดังรูปที่ ข-2 ซึ่งตัวแปรที่จำเป็นในการคำนวณประกอบด้วย  $f'_c = 20.7 N / mm^2$ ,  $V_c = 162 kN$ ,  $V_s = 211.7 kN$ ,  $V_u = 266.7 kN$  และในรูปที่ ข-3 ได้แสดงผังแรงเฉือนในบริเวณที่ต้องการเสริมกำลังตลอดความยาวของคาน



รูปที่ ข-2 รูปแบบตัวอย่างการติดตั้งระบบไฟเบอร์เสริมกำลังรับแรงเฉือน



รูปที่ ข-3 ผังแรงเฉือนในตัวอย่างคานเสริมกำลังรับแรงเฉือน

ระยะและรูปแบบในการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์ แสดงไว้ดังตาราง ข-4 ส่วนคุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ในการเสริมกำลัง แสดงไว้ดังตาราง ข-5

ตาราง ข-4 ระยะและรูปแบบในการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์ในคานเสริมกำลังรับแรงเฉือน

$d$	55.88 cm
$d_f$	40.64 cm
Width of each sheet $w_f$	25.4 cm
Span between each sheet $s_f$	30.48 cm
FRP strip length	177.8 cm

ตาราง ข-5 คุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ในการเสริมกำลังรับแรงเฉือนในคาน

Thickness per ply $t_f$	0.1651 mm
Ultimate tensile strength $f_{fu}^*$	3792 N/mm <sup>2</sup>
Rupture strain $\mathcal{E}_{fu}^*$	0.017 mm/mm
Modulus of elasticity $E_f$	227,527 N/mm <sup>2</sup>

คุณสมบัติวัสดุที่นำมาใช้ออกแบบ เนื่องจากติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายในสำนักงาน จึง  
เลือกใช้  $C_E = 0.95$

$$f_{fu} = (0.95)(3.79 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 3.60 \text{ kN} / \text{mm}^2$$

$$\mathcal{E}_{fu} = (0.95)(0.017) = 0.016$$

คำนวณค่าความเครียดประสิทธิผลของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมกำลังรับแรงเฉือน

$$L_e = \frac{416}{[(1)(0.1651 \text{ mm})(227.53 \text{ kN} / \text{mm}^2)]^{0.58}} = 50.8 \text{ mm}$$

$$k_1 = \left( \frac{20.68 \text{ kN} / \text{mm}^2}{254} \right)^2 = 0.82$$

$$k_2 = \left( \frac{406.4 \text{ mm} - 50.8 \text{ mm}}{406.4 \text{ mm}} \right) = 0.875$$

$$k_v = \frac{(0.82)(0.875)(50.8 \text{ mm})}{468(0.016)} = 0.192 \leq 0.75$$

$$\mathcal{E}_{fe} = 0.192(0.016) = 0.0031 \leq 0.004$$

คำนวณหากำลังรับแรงเฉือนของแผ่นไฟเบอร์

$$A_{fv} = 2(1)(0.1651 \text{ mm})(254 \text{ mm}) = 83.87 \text{ mm}^2$$

$$f_{fe} = (0.0031)(227.52 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 0.703 \text{ kN} / \text{mm}^2$$

$$V_f = \frac{(83.87 \text{ mm}^2)(0.703 \text{ kN} / \text{mm}^2)(1)(406.4 \text{ mm})}{(304.8 \text{ mm})}$$

$$V_f = 78.73 \text{ kN}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด

$$\phi V_n = 0.85[162 + 87.2 + (0.85)(78.73)]$$

$$\phi V_n = 268.7 \text{ kN} > V_n = 267 \text{ kN}$$

เพราะฉะนั้นหน้าตัดที่ได้รับการเสริมกำลังมีความสามารถในการรับแรงเฉือนเพียงพอ

### ภาคผนวก ข-2-3 การออกแบบชิ้นส่วนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือน

นอกจากการเสริมกำลังรับแรงเฉือนให้กับคานแล้ว ยังสามารถเสริมกำลังรับแรงเฉือนให้กับเสาได้ โดยในหัวข้อนี้ได้แสดงตัวอย่างการคำนวณออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายนอกอาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 60.96x60.96 เซนติเมตร ที่ต้องการกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น 266.9 kN ( $\Delta V_u = 266.9 \text{ kN}$ ) จึงทำการเสริมกำลังโดยการหุ้มแผ่นไฟเบอร์ไยแก้ว (GFRP) โดยการหุ้มรอบเสา (complete wrap) คุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ไยแก้วนี้แสดงไว้ดังตาราง ข-6

ตาราง ข-6 คุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ไยแก้ว (GFRP) เสริมกำลังเสารับแรงเฉือน

Thickness per ply $t_f$	1.29 mm
Ultimate tensile strength $f_{fu}^*$	551.6 N/mm <sup>2</sup>
Rupture strain $\mathcal{E}_{fu}^*$	0.020 mm/mm
Modulus of elasticity $E_f$	27,579 N/mm <sup>2</sup>

การหาคุณสมบัติวัสดุที่นำมาใช้ออกแบบ เนื่องจากติดตั้งแผ่นไฟเบอร์ไยแก้วภายนอกอาคาร จึงเลือกใช้  $C_E = 0.65$

$$f_{fu} = (0.65)(551.6 \text{ N/mm}^2) = 358.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\mathcal{E}_{fu} = (0.65)(0.020) = 0.013$$

คำนวณค่าความเครียดประสิทธิผลของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมกำลังรับแรงเฉือน

$$\mathcal{E}_{fe} = 0.004 \leq 0.75(0.013) = 0.010$$

เพราะฉะนั้นใช้  $\mathcal{E}_{fe} = 0.004$

คำนวณหาพื้นที่ของแผ่นไฟเบอร์ที่ต้องการ

$$V_{f,req} = \frac{266.9 \text{ kN}}{0.85(0.95)} = 330.5 \text{ kN}$$

$$A_{fv,req} = \frac{(330.5kN)s_f}{(0.004)(27.6kN/mm^2)(1)(609.6mm)} = 4.91s_f$$

คำนวณหาจำนวนชั้นในการพันของแผ่นไฟเบอร์

$$n = \frac{4.91s_f}{2(1.29mm)w_f} = 1.90 \frac{s_f}{w_f}$$

เพราะฉะนั้นเลือกพันแผ่นไฟเบอร์รอบเสาจำนวน 2 ชั้น ตลอดความสูงของเสา



ภาคผนวก ค

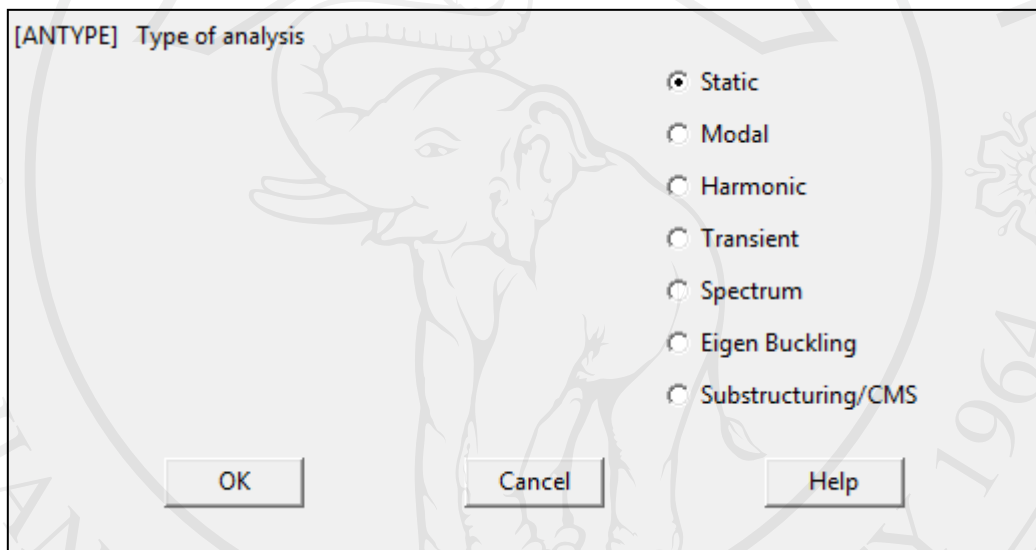
การตั้งค่าโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

### Analysis Type

การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์จุดต่ออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงวิฤจักรในครั้งนี้ ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบสถิตแบบไร้เชิงเส้น การกำหนดค่าในส่วนนี้สำคัญมาก เนื่องจากถ้ากำหนดไม่ถูกต้องหรือมีความละเอียดในการวิเคราะห์ไม่เพียงพออาจทำให้โปรแกรมไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้หรืออาจวิเคราะห์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ขั้นตอนในการกำหนดชนิดของการวิเคราะห์เริ่มต้นต้องเลือกวิธีการวิเคราะห์เสียก่อนซึ่งงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Static ดังรูป ค-1



รูป ค-1 การกำหนดวิธีการวิเคราะห์ในโปรแกรม

หลังจากกำหนดวิธีการวิเคราะห์เรียบร้อยแล้วต้องทำการกำหนดในส่วนของรายละเอียดในการวิเคราะห์ข้อมูลการควบคุมวิธีหาคำตอบในส่วนของการ Solution Control ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อหลักดังนี้

-การตั้งค่าในหัวข้อ Basic เป็นการกำหนดค่าพื้นฐานและความละเอียดในการให้ระยะเคลื่อนที่ของการวิเคราะห์แบบจำลองตลอดจนความละเอียดในการแสดงผลดังรูป ค-2

Basic | Transient | Sol'n Options | Nonlinear | Advanced NL

Analysis Options

Small Displacement Static

Calculate prestress effects

Time Control

Time at end of loadstep: 1

Automatic time stepping: Off

Number of substeps

Time increment

Number of substeps: 100

Max no. of substeps:

Min no. of substeps:

Write Items to Results File

All solution items

Basic quantities

User selected

Nodal DOF Solution

Nodal Reaction Loads

Element Solution

Element Nodal Loads

Element Nodal Stresses

Frequency:

Write every substep

where N = 1

รูป ค-2 การตั้งค่าในหัวข้อ Basic

คำสั่ง Analysis Options เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของแบบจำลองไฟในต่อลิเมนต์เมื่อต้องรับแรงกระทำจากภายนอก ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้แบบ Small Displacement Static เนื่องจากแบบจำลองจุดต่ออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการวิเคราะห์นั้นมีการเปลี่ยนตำแหน่งที่เล็กน้อย และโปรแกรมจะหยุดทำการวิเคราะห์เมื่อพบว่าแบบจำลองเกิดความเสียหายในกรณีที่มีโหนดของอิ ลิเมนต์ใดอิ ลิเมนต์หนึ่งเคลื่อนที่มากเกินไปเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้

คำสั่ง Time Control เกี่ยวข้องกับการกำหนดจำนวนรอบและความละเอียดในการให้ แรงหรือระยะเคลื่อนที่กับแบบจำลอง โดยใน Time at End of Load Step คือการกำหนดระยะเวลา สิ้นสุดในการวิเคราะห์ของการให้แรงหรือระยะเคลื่อนที่ในรอบนั้น ส่วนในการตั้งค่า Automatic Time Stepping หมายถึงวิธีการกำหนดความละเอียดในการให้แรงกระทำกับแบบจำลองโดย สามารถเลือกได้ว่าจะให้โปรแกรมเป็นผู้กำหนดให้ หรือผู้ใช้เป็นผู้กำหนดเอง ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ ได้กำหนดจำนวนรอบในการวิเคราะห์และความละเอียดของแบบจำลองจุดต่ออิมอาคารไว้ดังตาราง ที่ ค-1 โดยสังเกตได้ว่าในรอบการให้ระยะเคลื่อนที่หลายๆจำเป็นต้องเพิ่มความละเอียดในการให้ ระยะเคลื่อนที่ (เพิ่มระยะเคลื่อนที่ที่ละเอียด) เนื่องจากถ้ากำหนดระยะเคลื่อนที่มากเกินไปอาจทำให้ แบบจำลองเกิดการเสียหายแบบฉับพลันและโปรแกรมจะหยุดทำการวิเคราะห์ต่อทันที

ตาราง ก-1 การกำหนดระยะเคลื่อนที่และความระเี่ยดของแบบจำลองจุดต่อริมาการ

Load Step	Drift Ratio	Displacement	Num. Sub-step	Load Step	Drift Ratio	Displacement	Num. Sub-step
1	0.15%	0.248	10	34	-0.75%	-1.238	100
2	-0.15%	-0.248	10	35	0.75%	1.238	100
3	0.15%	0.248	10	36	-0.75%	-1.238	100
4	-0.15%	-0.248	10	37	1.00%	1.65	100
5	0.15%	0.248	10	38	-1.00%	-1.65	100
6	-0.15%	-0.248	10	39	1.00%	1.65	100
7	0.20%	0.330	10	40	-1.00%	-1.65	100
8	-0.20%	-0.330	10	41	1.00%	1.65	100
9	0.20%	0.330	10	42	-1.00%	-1.65	100
10	-0.20%	-0.330	10	43	1.40%	2.31	150
11	0.20%	0.330	10	44	-1.40%	-2.31	150
12	-0.20%	-0.330	10	45	1.40%	2.31	150
13	0.25%	0.413	10	46	-1.40%	-2.31	150
14	-0.25%	-0.413	10	47	1.40%	2.31	150
15	0.25%	0.413	10	48	-1.40%	-2.31	150
16	-0.25%	-0.413	10	49	2.00%	3.30	200
17	0.25%	0.413	10	50	-2.00%	3.30	200
18	-0.25%	-0.413	10	51	2.00%	3.30	200
19	0.35%	0.578	25	52	-2.00%	3.30	200
20	-0.35%	-0.578	25	53	2.00%	3.30	200
21	0.35%	0.578	25	54	-2.00%	3.30	200
22	-0.35%	-0.578	25	55	2.50%	4.125	250
23	0.35%	0.578	25	56	-2.50%	-4.125	250
24	-0.35%	-0.578	25	57	2.50%	4.125	250
25	0.50%	0.825	50	58	-2.50%	-4.125	250
26	-0.50%	-0.825	50	59	2.50%	4.125	250

27	0.50%	0.825	50	60	-2.50%	-4.125	250
28	-0.50%	-0.825	50	61	3.50%	5.775	300
29	0.50%	0.825	50	62	-3.50%	-5.775	300
30	-0.50%	-0.825	50	63	3.50%	5.775	300
31	0.75%	1.238	100	64	-3.50%	-5.775	300
32	-0.75%	-1.238	100	65	3.50%	5.775	300
33	0.75%	1.238	100	66	-3.50%	-5.775	300

ส่วนจำนวนรอบในการวิเคราะห์และความละเอียดของแบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร  
แสดงไว้ดังตารางที่ ก-2

ตาราง ก-2 การกำหนดระยะเคลื่อนที่และความละเอียดของแบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร

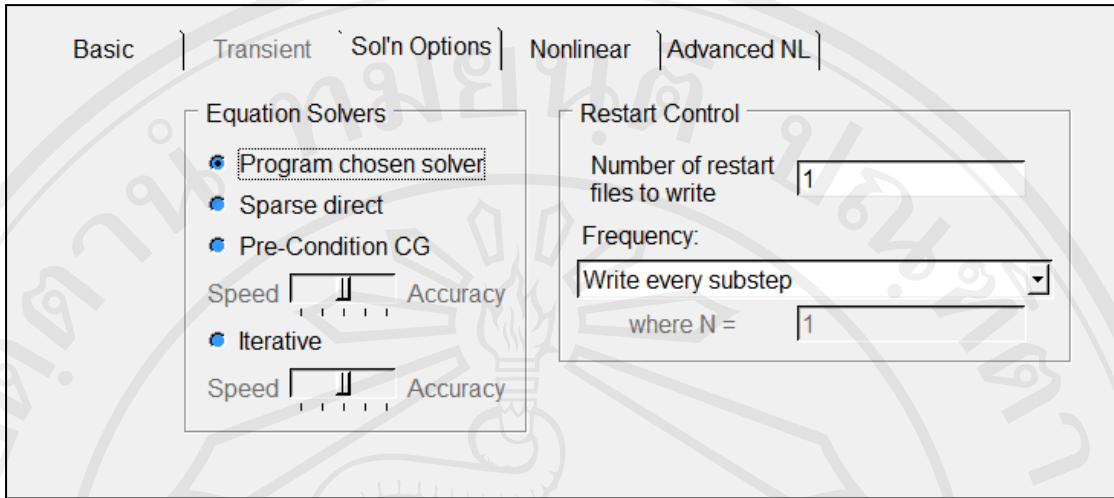
Load Step	Drift Ratio	Displacement	Num. Sub-step	Load Step	Drift Ratio	Displacement	Num. Sub-step
1	0.15%	0.378	10	34	-0.75%	-1.890	100
2	-0.15%	-0.378	10	35	0.75%	1.890	100
3	0.15%	0.378	10	36	-0.75%	-1.890	100
4	-0.15%	-0.378	10	37	1.00%	2.520	100
5	0.15%	0.378	10	38	-1.00%	-2.520	100
6	-0.15%	-0.378	10	39	1.00%	2.520	100
7	0.20%	0.504	10	40	-1.00%	-2.520	100
8	-0.20%	-0.504	10	41	1.00%	2.520	100
9	0.20%	0.504	10	42	-1.00%	-2.520	100
10	-0.20%	-0.504	10	43	1.40%	3.528	150
11	0.20%	0.504	10	44	-1.40%	-3.528	150
12	-0.20%	-0.504	10	45	1.40%	3.528	150
13	0.25%	0.630	10	46	-1.40%	-3.528	150
14	-0.25%	-0.630	10	47	1.40%	3.528	150
15	0.25%	0.630	10	48	-1.40%	-3.528	150

16	-0.25%	-0.630	10	49	2.00%	5.040	200
17	0.25%	0.630	10	50	-2.00%	-5.040	200
18	-0.25%	-0.630	10	51	2.00%	5.040	200
19	0.35%	0.882	25	52	-2.00%	-5.040	200
20	-0.35%	-0.882	25	53	2.00%	5.040	200
21	0.35%	0.882	25	54	-2.00%	-5.040	200
22	-0.35%	-0.882	25	55	2.50%	6.300	250
23	0.35%	0.882	25	56	-2.50%	-6.300	250
24	-0.35%	-0.882	25	57	2.50%	6.300	250
25	0.50%	1.260	50	58	-2.50%	-6.300	250
26	-0.50%	-1.260	50	59	2.50%	6.300	250
27	0.50%	1.260	50	60	-2.50%	-6.300	250
28	-0.50%	-1.260	50	61	3.50%	8.820	300
29	0.50%	1.260	50	62	-3.50%	-8.820	300
30	-0.50%	-1.260	50	63	3.50%	8.820	300
31	0.75%	1.890	100	64	-3.50%	-8.820	300
32	-0.75%	-1.890	100	65	3.50%	8.820	300
33	0.75%	1.890	100	66	-3.50%	-8.820	300

ในส่วนของการคำสั่ง Write Items to Result Files หมายถึงการกำหนดเกี่ยวกับผลลัพธ์ที่ต้องการทราบและความละเอียดในการแสดงผลลัพธ์ ในที่นี้กำหนดให้โปรแกรมสามารถแสดงผลลัพธ์ได้ทุกส่วนที่ต้องการ และสามารถเลือกดูผลลัพธ์ได้ในทุกลำดับ

-การตั้งค่าในหัวข้อ Transient เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกวิธีการวิเคราะห์แบบ Static ทำให้ไม่จำเป็นต้องตั้งค่าในส่วนนี้

-การตั้งค่าในหัวข้อ Sol'n Options เป็นการกำหนดวิธีหาคำตอบของโปรแกรมซึ่งการที่จะเลือกใช้วิธีไหนเกี่ยวข้องกับจำนวน Degree of Freedom ของแบบจำลอง ในที่นี้กำหนดให้โปรแกรมวิเคราะห์เองว่าควรใช้วิธีการหาคำตอบด้วยวิธีไหนจึงเหมาะสมกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยวิธีการตั้งค่าในส่วนนี้แสดงดังรูป ก-3



รูป ค-3 การตั้งค่าในหัวข้อ Sol'n Options

-การตั้งค่าในหัวข้อ Nonlinear ในส่วนนี้จำเป็นอย่างยิ่งในการวิเคราะห์แบบไร้เชิงเส้น เนื่องจากการวิเคราะห์ในช่วงไร้เชิงเส้นมักพบปัญหาโปรแกรมหยุดการวิเคราะห์เนื่องด้วยสาเหตุต่างๆ เช่น โปรแกรมหยุดการวิเคราะห์เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่ของ โหนดในอีลิเมนต์มากเกินไป หรือ โปรแกรมหยุดวิเคราะห์เนื่องจากกำหนดความแม่นยำของผลลัพธ์ให้มีความแม่นยำสูง โดยวิธีการตั้งค่าในส่วนนี้จะใช้ค่าเริ่มต้นที่ทางโปรแกรมกำหนดให้มาดังรูป ค-4 แต่มีส่วนที่จำเป็นต้องปรับแก้คือส่วนของคำสั่ง Set Convergence Criteria ซึ่งเกี่ยวข้องกับการกำหนดค่าความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ผู้วิเคราะห์สามารถยอมรับได้ โดยกำหนดที่คำสั่ง Tolerance ดังรูป ค-5 ซึ่งสามารถกำหนดเป็นตัวเลขที่มากกว่าศูนย์แต่ไม่ถึงหนึ่ง ถ้ากำหนดค่าดังกล่าวไว้ น้อยผลลัพธ์ที่วิเคราะห์ได้นั้นจะมีความแม่นยำสูงแต่เมื่อเริ่มเข้าสู่พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น โปรแกรมจะหยุดวิเคราะห์โดยทันที เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้ในช่วงไร้เชิงเส้นมีความแม่นยำที่ต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้กำหนดค่า Tolerance ไว้ถึง 0.99 เพื่อให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ได้ในช่วงไร้เชิงเส้น เพื่อที่จะได้ทราบถึงรูปแบบการวิบัติของแบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์

รูป ก-4 การตั้งค่าในหัวข้อ Nonlinear

Currently Active Specifications:

Label	Ref. Value	Tolerance	Norm	Min. Ref.
F	calculated	0.99000	L2	none
U	calculated	0.99000	L2	none

Buttons: Add... Edit... Delete

รูป ก-5 การตั้งค่าในคำสั่ง Set convergence criteria

-การตั้งค่าในหัวข้อ Advanced NL คือการตั้งค่าเพิ่มเติมจากหัวข้อ Nonlinear ซึ่งไม่

จำเป็นต้องปรับแก้ค่าใดๆจากค่าเริ่มต้นของโปรแกรมที่กำหนดให้ ดังแสดงในรูป ก-6

Basic | Transient | Sol'n Options | Nonlinear | **Advanced NL**

**Termination Criteria**

Program behavior upon nonconvergence:

Limits on physical values to stop analysis:

Nodal DOF sol'n	<input type="text" value="0"/>
Cumulative iter	<input type="text" value="0"/>
Elapsed time	<input type="text" value="0"/>
CPU time	<input type="text" value="0"/>

**Arc-length options**

Activate arc-length method

Max multiplier	<input type="text" value="0"/>
Min multiplier	<input type="text" value="0"/>

Arc-length termination:

Displacement limit	<input type="text" value="67.0"/>
--------------------	-----------------------------------

**Stabilization**

<input type="text" value="Stabilization Off"/>	
Control	<input type="text" value="Energy dissipation"/>
Value	<input type="text" value="0"/>

รูป ค-6 การตั้งค่าในหัวข้อ Advanced NL



**ภาคผนวก ง**

การคำนวณกำลังรับแรงแนวราบสูงสุดของแบบจำลองจุดต่ออาคารเพื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์  
ไฟไนต์เอลิเมนต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

**แบบจำลอง J1**

จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าแบบจำลองนี้เกิดการวิบัติที่จุดต่อ ที่แรงกระทำแนวราบสูงสุดเฉลี่ย (H) เท่ากับ 38.82 kN. ดังนั้นในการคำนวณความสามารถของแบบจำลองนี้สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} V_n &= 3.2 \sqrt{f'_c} A_j \\ &= 3.2 \times \sqrt{301 \text{ ksc}} \times (20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}) \\ &= 33.31 \text{ ton} = 326.77 \text{ kN} \end{aligned}$$

ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของจุดต่อเท่ากับ

$$M_j = 326.77 \text{ kN} \times 0.3 \text{ m} = 98.03 \text{ kN} - \text{m}$$

แรงดันที่ปลายคานทำให้เกิดโมเมนต์ดัดของจุดต่อนี้เท่ากับ

$$\begin{aligned} P &= (98.03 \text{ kN} - \text{m}) / (1.65 \text{ m}) \\ &= 59.41 \text{ kN}. \end{aligned}$$

สามารถหาค่าดึงแนวราบสูงสุดที่ยอดเสา (H) โดยใช้สมดุลแรง

$$\begin{aligned} (H)(2.52 \text{ m}) &= (59.41) \times (1.65 \text{ m}) \\ H &= 38.90 \text{ kN}. \end{aligned}$$

**แบบจำลอง J1-CFRP1**

จากการวิเคราะห์แบบจำลอง J1-CFRP1 พบว่าเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดที่คานหน้าเสา ที่แรงกระทำแนวราบสูงสุดเฉลี่ย (H) เท่ากับ 84.14 kN. ดังนั้นในการคำนวณความสามารถของแบบจำลองนี้สามารถหาได้ดังนี้

หาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของคานเมื่อรับแรงสลับทิศจาก

$$\begin{aligned} M_n^+ &= (4 \times 2.01 \times 5885 \times 0.3) = 14,194.62 \text{ kg} - \text{m} = 139.25 \text{ kN} - \text{m} \\ M_n^- &= (6 \times 2.01 \times 5885 \times 0.3) = 21,291.93 \text{ kg} - \text{m} = 208.87 \text{ kN} - \text{m} \\ M_{avg} &= (139.25 + 208.87) / 2 = 174.06 \text{ kN} - \text{m} \end{aligned}$$

แรงดันปลายคานทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่หน้าเสาเท่ากับ

$$P = (174.06kN - m) / (1.50m)$$

$$= 116.04kN.$$

สามารถหาค่าลึงแแนวราบสูงสุดที่ยอดเสา (H) โดยใช้สมมูลแรง

$$(H)(2.52m) = (116.04)x(1.65m)$$

$$H = 75.98kN.$$

#### แบบจำลอง J1-CFRP2

จากการวิเคราะห์แบบจำลอง J1-CFRP2 พบว่าเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงคัตที่คานในตำแหน่งสิ้นสุดการหุ้มแผ่นไฟเบอร์ ที่แรงกระทำแนวราบสูงสุดเฉลี่ย (H) เท่ากับ 114.43 kN. ดังนั้นในการคำนวณความสามารถของแบบจำลองนี้สามารถหาได้ดังนี้

ความสามารถในการรับโมเมนต์คัตของคานเท่ากับ 174.06 kN. ดังแสดงวิธีการคำนวณมาแล้วใน

#### แบบจำลอง J1-CFRP1

แรงดันปลายคานทำให้เกิดโมเมนต์คัตที่หน้าเสาเท่ากับ

$$P = (174.06kN - m) / (1.10m)$$

$$= 158.24kN.$$

สามารถหาค่าลึงแแนวราบสูงสุดที่ยอดเสา (H) โดยใช้สมมูลแรง

$$(H)(2.52m) = (158.24)x(1.65m)$$

$$H = 103.61kN.$$

#### แบบจำลอง J1-GFRP1

จากการวิเคราะห์แบบจำลอง J1-GFRP1 พบว่าเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงคัตที่คานหน้าเสา ที่แรงกระทำแนวราบสูงสุดเฉลี่ย (H) เท่ากับ 71.54 kN

เนื่องจากแบบจำลองนี้มีรูปแบบการวิบัติเหมือนกับแบบจำลองจุดต่อ J1-CFRP1 เพราะฉะนั้นในการคำนวณความสามารถในการรับแรงแนวราบสูงสุดของแบบจำลองนี้จึงมีค่าเท่ากับแบบจำลอง J1-CFRP1 คือ 81.36 kN.

**แบบจำลอง J2**

จากการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลอง J2 เกิดการวิบัติที่จุดต่อเนื่องจากแรงเฉือนที่แรงแนวราบสูงสุดเท่ากับ 60.12 kN. เพราะฉะนั้นในการคำนวณกำลังของชิ้นส่วน จึงคำนวณจากความสามารถในการรับแรงเฉือนของจุดต่อเนื่อง

$$\begin{aligned} V_n &= 3.9 \sqrt{f'_c} A_j \\ &= 3.9 \times \sqrt{301 \text{ ksc}} \times (20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}) \\ &= 40.60 \text{ ton} = 398.26 \text{ kN} \end{aligned}$$

ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของจุดต่อเนื่องเท่ากับ

$$M_j = 398.26 \text{ kN} \times 0.3 \text{ m} = 119.48 \text{ kN} - \text{m}$$

แรงดันที่ปลายคานทำให้เกิดโมเมนต์ดัดของจุดต่อเนื่องเท่ากับ

$$\begin{aligned} P &= [(119.48 \text{ kN} - \text{m}) / (1.65 \text{ m})] / 2 \\ &= 36.20 \text{ kN}. \end{aligned}$$

สามารถหาลำดับแนวราบสูงสุดที่ยอดเสา (H) โดยใช้สมมูลแรง

$$\begin{aligned} (H)(2.52 \text{ m}) &= [(36.20) \times (1.65 \text{ m})] + [(36.20) \times (1.65 \text{ m})] \\ H &= 47.40 \text{ kN}. \end{aligned}$$

**แบบจำลอง J2-CFRP1**

จากการวิเคราะห์แบบจำลอง J1-CFRP1 พบว่าเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดที่คานหน้าเสา ที่แรงกระทำแนวราบสูงสุดเฉลี่ย (H) เท่ากับ 143.89 kN. การคำนวณหาลำดับชิ้นส่วนของแบบจำลองนี้จึงหาจากความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของคานทั้งสองฝั่ง

ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของคานเมื่อรับแรงสลับทิศทางได้จาก

$$\begin{aligned} M_n^+ &= (4 \times 2.01 \times 5885 \times 0.3) = 14,194.62 \text{ kg} - \text{m} = 139.25 \text{ kN} - \text{m} \\ M_n^- &= (6 \times 2.01 \times 5885 \times 0.3) = 21,291.93 \text{ kg} - \text{m} = 208.87 \text{ kN} - \text{m} \end{aligned}$$

แรงดันปลายคานทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่หน้าเสาเท่ากับ

$$P_1 = (139.25kN - m) / (1.50m)$$

$$= 92.83kN.$$

$$P_2 = (208.87kN - m) / (1.50m)$$

$$= 139.25kN.$$

สามารถหาค่าลึงแนวราบสูงสุดที่ยอดเสา (H) โดยใช้สมมูลแรง

$$(H)(2.52m) = [(92.83kN - m)x(1.65m)] + [(139.25kN - m)x(1.65m)]$$

$$H = 151.96kN.$$

### แบบจำลอง J2-CFRP2

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองนี้พบว่าเกิดการวิบัติที่เสาชั้นบนที่บริเวณเส้นการหุ้มแผ่นไฟเบอร์ เมื่อมีแรงแนวราบสูงสุดกระทำเท่ากับ 170.04 kN. ในการคำนวณเปรียบเทียบกำลังของชิ้นส่วนจึงทำการหาค่าลึงการรับโมเมนต์ดัดของเสาเมื่อรับแรงแนวราบ แต่เนื่องจากเสาของแบบจำลองไม่มีแรงตามแนวแกนกระทำจึงเสมือนว่าเสานั้นมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับคาน โดยสามารถแสดงวิธีการคำนวณได้ดังนี้

ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของคานเมื่อรับแรงสลับทิศทางได้จาก

$$M_{col} = (4 \times 2.01 \times 5885 \times 0.25) = 11,828.85kg - m = 116.04kN - m$$

แรงแนวราบกระทำที่ปลายเสาชั้นบนมีค่าเท่ากับ

$$(H)(0.92m) = 116.04kN - m$$

$$H = 126.13kN.$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

นายวรา สกลวิธานนท์

วัน เดือน ปี เกิด

25 สิงหาคม 2528

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนนวมินทราชูทิศ มัชฌิม

จังหวัดนครสวรรค์ ปีการศึกษา 2543

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนนวมินทราชูทิศ มัชฌิม

จังหวัดนครสวรรค์ ปีการศึกษา 2546

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved