



## บทที่ 5

### ตัวอย่างการวิเคราะห์

ตัวอย่างในงานวิจัยนี้คำนวณโดยใช้โปรแกรม CU-NTABS จำนวนเลขจำนวนจริง ( Floating Point ) แบบความละเอียดสองเท่า ( Double Precision) คอมไพเลอร์ด้วยฟอร์แทรนคอมไพเลอร์ 5.1 (MS Fortran Compiler V.5.1) ใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เทียบเคียงไอบีเอ็ม (IBM Compatible Micro Computer) หน่วยประมวลผลกลาง (CPU.) แบบ 80386 ส่งถ่ายข้อมูลแบบ 32 Bit ทำหน้าที่ความถี่ 64 MHz ทำการคำนวณบนระบบปฏิบัติการดอส 5.0 (DOS 5.0) ทำการคำนวณโดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับเท่ากับ 0.001

โปรแกรมที่นำมาคำนวณเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้มี 2 โปรแกรม ได้แก่

1. โปรแกรม SUPER-ETABS (Maison, Neuss และ Rodriguez 1983) ทำการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตโดยวิธีประมาณ ทำการคำนวณด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เทียบเคียงไอบีเอ็ม หน่วยประมวลผลกลางแบบ 80386 เช่นเดียวกับโปรแกรม CU-NTABS
2. โปรแกรม GTSTRUDL (GTICES System Laboratory 1993) ทำการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตโดยวิธีทำซ้ำแบบแทนค่าโดยตรง (Direct Substitution Method) ทำการคำนวณด้วยเครื่อง Sun Work Station หน่วยประมวลผลกลางแบบ SPARC Processor ส่งถ่ายข้อมูลด้วยความเร็ว 17.4 MIPS ใช้ระบบปฏิบัติการ UNIX ทำการคำนวณโดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับเท่ากับ 0.001

โครงสร้างที่นำมาวิเคราะห์เป็นตัวอย่างมีดังนี้

ตัวอย่าง 1 : เสาเอ็น

ตัวอย่าง 2 : โครงข้อแข็งพอร์ทัล(Portal Frame)

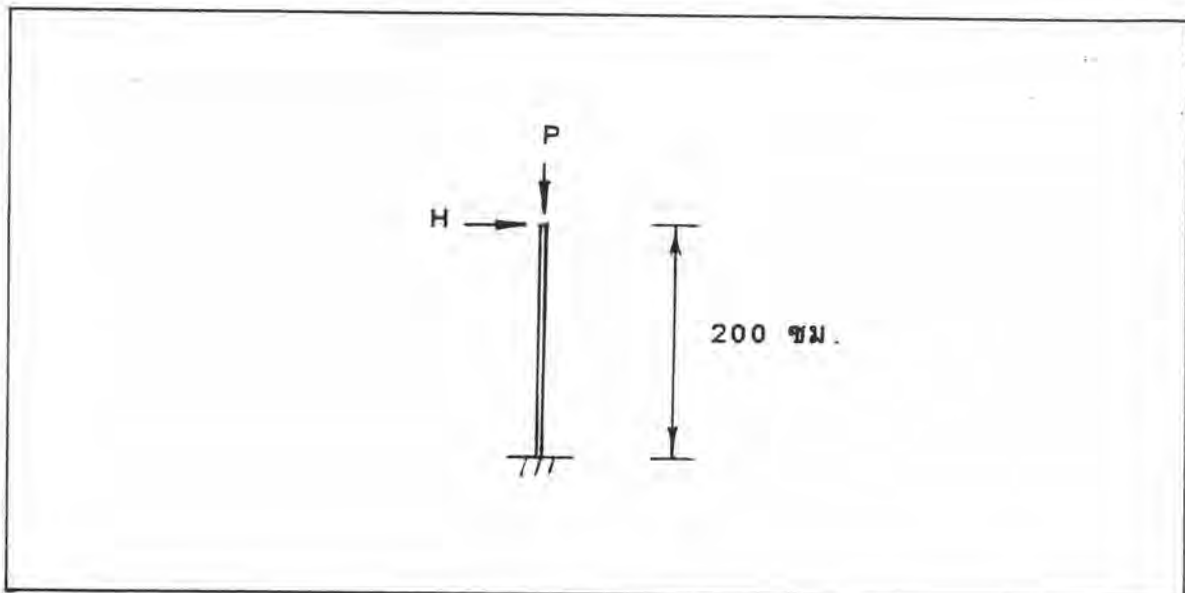
ตัวอย่าง 3 : โครงข้อแข็ง 4 ชั้น

ตัวอย่าง 4 : โครงข้อแข็งประกอบผนังต้านแรงเฉือน 25 ชั้น 3 ช่วงเสา

แฟ้มป้อนข้อมูลและแฟ้มแสดงผลการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง.

ตัวอย่าง 1 : เสาเอ็น

เสาเอ็นต้นเดี่ยวที่พิจารณามีความสูง 200 ซม. ฐานรองรับมีสภาพยึดแน่นดังแสดงในรูป 5.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเสาเหมือนกันตลอดทั้งต้น โมดูลัสยืดหยุ่น(E)เท่ากับ 2,000,000 กก.ต่อตารางซม. โมเมนต์อินเนอร์เซีย (I) เท่ากับ 476 ซม.<sup>4</sup> พื้นที่หน้าตัด (A)เท่ากับ 24.7 ตารางซม. มีแรงกระทำในแนวตั้งที่ปลายบนสุด P กก. และ แรงกระทำในแนวราบที่ปลายบนสุดขนาด  $H = P/2000$  กก.



รูป 5.1 เสาเอ็น

ตัวอย่างนี้ใช้เพื่อทดสอบการหาหน้าหนักบรรทุกวิกฤติ กระทำได้โดยการวิเคราะห์หาระยะเปลี่ยนตำแหน่งสำหรับค่า  $P$  ที่กำหนดขึ้น แล้วเพิ่มค่า  $P$  ขึ้นตามลำดับจนกระทั่งได้ค่าแรงที่ทำให้การเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายบนของเสามีค่ามากที่สุด (เมื่อเพิ่มค่า  $P$  มากกว่านั้น จะมีผลให้การเปลี่ยนตำแหน่งกลับไปในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงกระทำด้านข้างเนื่องจากค่าดีเทอร์มิแนนต์กลายเป็นลบซึ่งถือว่าเสาเริ่มเกิดการสูญเสียเสถียรภาพ (Unstable or Buckle)) จากการวิเคราะห์โดยแบ่งเสาออกเป็น 1, 2 และ 4 ชิ้นส่วน(element) ได้ผลหน้าหนักบรรทุกวิกฤติจากโปรแกรมทั้งสามดังแสดงไว้ในตาราง 5.1 พร้อมทั้งผลการเปรียบเทียบกับหน้าหนักบรรทุกโก่งเดาะออยเลอร์ ( Euler Buckling Load )

ตาราง 5.1 หน้าหนักบรรทุกวิกฤติของเสายื่น

จำนวน ชิ้นส่วน	SUPER-ETABS		GTSTRUDL		CU-NTABS	
	$P_c$	ผลต่าง* (%)	$P_c$	ผลต่าง* (%)	$P_c$	ผลต่าง* (%)
1	71250	+21.330	49800	-15.196	59100	+0.640
2	61750	+5.153	55900	-4.809	58750	+0.044
4	59400	+1.151	57900	-1.403	58725	+0.001

\*ค่าผลต่างเทียบกับหน้าหนักบรรทุกโก่งเดาะออยเลอร์ ซึ่งมีค่า 58,724 กก.

จากการวิเคราะห์พบว่าหน้าหนักบรรทุกวิกฤติที่ได้จากโปรแกรมCU-NTABS มีค่ามากกว่าหน้าหนักบรรทุกโก่งเดาะออยเลอร์เสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากการสร้างสติฟเนสเมตริกซ์เชิงเส้น และสติฟเนสเมตริกซ์เรขาคณิตของโครงสร้างในงานวิจัยนี้ แทนสนามการเปลี่ยนตำแหน่งด้วยฟังก์ชันกำลังสามที่สมบูรณ์ (Complete Cubic Displacement Function) และมีความต่อเนื่อง (Compatibility) ที่จุดต่อ

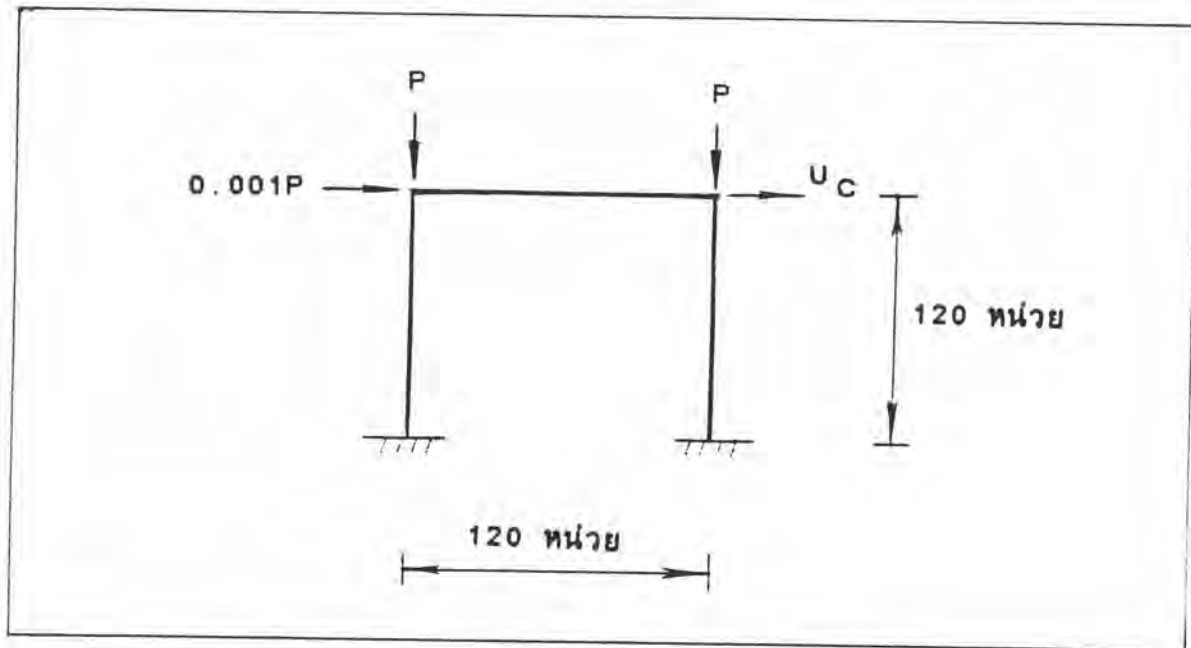
สอดคล้องกับเงื่อนไขการเข้าสู่ค่าตอบถูกต้อง (Convergence Criteria) ทำให้ได้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติเข้าใกล้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติตามทฤษฎี ทางด้านขอบเขตบน (Upper Bound Solution)

จากตาราง 5.1 พบว่า เมื่อแบ่งเสาออกเป็นชิ้นส่วนจำนวนเท่ากัน น้ำหนักบรรทุกวิกฤติที่ได้จากโปรแกรม CU-NTABS ใกล้เคียงน้ำหนักบรรทุกวิกฤติตามทฤษฎีมากที่สุด ในขณะที่โปรแกรม SUPER-ETABS ให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติมากกว่าค่าตามทฤษฎี และโปรแกรม GTSTRUDL ให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติน้อยกว่าค่าตามทฤษฎี แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม SUPER-ETABS จำลองโครงสร้างนี้แข็งแกร่งกว่าความเป็นจริง และ โปรแกรม GTSTRUDL จำลองโครงสร้างนี้อ่อนกว่าความเป็นจริง

การแบ่งเสาออกเป็นชิ้นส่วนมากขึ้น จะทำให้โปรแกรมทั้งสาม สามารถหาค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติได้ใกล้เคียงค่าตามทฤษฎีมากขึ้น และน่าสังเกตว่าเมื่อวิเคราะห์เสาโดยโปรแกรม CU-NTABS โดยใช้เพียงชิ้นส่วนเดียว ก็จะได้ผลใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติตามทฤษฎีมากกว่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติที่หาได้จากโปรแกรม SUPER-ETABS และโปรแกรม GTSTRUDL ที่แบ่งเสาออกเป็น 4 ชิ้นส่วนเสียอีก

## ตัวอย่าง 2 : โครงข้อแข็งพอร์ทัล (Portal Frame)

ตัวอย่างที่สองนำมาจากบทความของ Wen และ Rahimzadeh (1983) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ปัญหา โครงข้อแข็งพอร์ทัลชั้นเดียวดังแสดงในรูป 5.2 ความสูง 120 หน่วย ระยะห่างระหว่างฐาน 120 หน่วย ฐานรองรับมีสภาพยึดแน่น คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำโครงข้อแข็งเหมือนกันตลอดโครงสร้าง โมดูลัสยืดหยุ่น (E) เท่ากับ 30,000 หน่วย โมเมนต์อินเนอร์เซีย (I) เท่ากับ 310.1 หน่วย<sup>4</sup> พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 11.77 หน่วย<sup>2</sup> มีแรงกระทำในแนวดิ่งที่มุมบนซ้ายและขวาขนาด P หน่วย แรงกระทำในแนวราบที่มุมบนซ้ายมีขนาด 0.001P หน่วย



รูป 5.2 โครงข้อแข็งพอร์ทอล

ในการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต ในแต่ละขนาดของแรงกระทำ โปรแกรม CU-NTABS ใช้เวลาประมาณ 8 วินาที โดยเฉลี่ย โปรแกรม SUPER-ETABS ใช้เวลาประมาณ 1 วินาทีโดยเฉลี่ย และโปรแกรม GTSTRUDL ใช้เวลาประมาณ 1 วินาที โดยเฉลี่ย เหตุที่โปรแกรม CU-NTABS ใช้เวลามากที่สุด เนื่องจากต้องทำการทำซ้ำถึง 3 รอบ ในขณะที่โปรแกรม SUPER-ETABS ทำการคำนวณโดยวิธีประมาณเพียง 1 รอบ(ไม่มีการทำซ้ำ) ส่วนโปรแกรม GTSTRUDL ทำการคำนวณบนเครื่อง Sun Work Station ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ CPU 80386 มาก จึงเปรียบเทียบกันไม่ได้

#### 1. นำนักบรรทุกฤติ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์โดยแบ่งเสาดันซ้ายและขวาออกเป็น 2 ชิ้นส่วน(element) กาน 1 ชิ้นส่วน สามารถหาค่านำนักบรรทุกฤติจากโปรแกรม SUPER-ETABS,GTSTRUDLและ CU-NTABS ได้ 5200 หน่วย , 4280 หน่วย และ 4719 หน่วย ตามลำดับ และมีผลต่างเทียบจากงาน วิจัยของ Wen

และRahimzadeh (ซึ่งได้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ 4680 หน่วย) เท่ากับ +11.111% , -8.547% และ +0.833 % ตามลำดับ จะเห็นว่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ ที่หาได้จากโปรแกรม CU-NTABS มีความคลาดเคลื่อน(ในทางบวก)น้อยที่สุด ในขณะที่น้ำหนักบรรทุกวิกฤติที่หาได้จากโปรแกรม SUPER-ETABS ผิดไปในทางมาก และโปรแกรม GTSTRUDL ผิดไปในทางน้อยที่ร้อยละของความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับโปรแกรม CU-NTABS

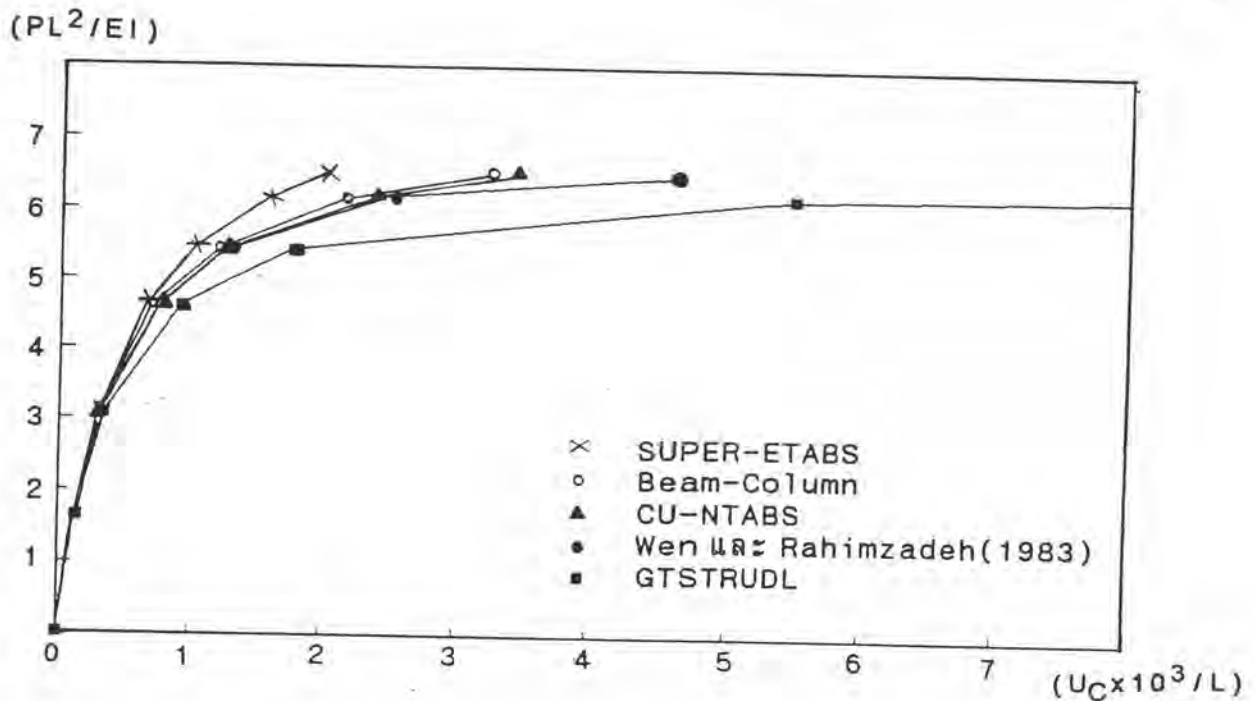
## 2. เส้นสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุกและการเปลี่ยนตำแหน่ง

เพื่อให้เห็นพฤติกรรมไม่เชิงเส้นชัดเจนได้ทำการแปรเปลี่ยนแรง  $P$  จาก 0 ถึง 4,200 หน่วย ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทั้งสาม ได้ผลการคำนวณการเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างที่มุมบนขวาของโครงข้อแข็งพอร์ทอลแสดงไว้ในตาราง 5.2 ซึ่งเมื่อแสดงเป็นเส้นกราฟได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยแสดงผลงานวิจัยของ Wen และ Rahimzadeh(1983)ไว้เพื่อเปรียบเทียบกับ

ตาราง 5.2 การเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างที่มุมบนขวาของโครงข้อแข็งพอร์ทอล

P (หน่วย)	การวิเคราะห์ เชิงเส้น (หน่วย)	การวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต(หน่วย)		
		CU-NTABS	SUPER-ETABS	GTSTRUDL
4,200	0.0470	0.4157	0.2411	2.2842
4,000	0.0447	0.2877	0.1917	0.6570
3,500	0.0391	0.1496	0.1187	0.2097
3,000	0.0335	0.0913	0.0788	0.1101
2,000	0.0224	0.0386	0.0362	0.0414
1,000	0.0112	0.0142	0.0138	0.0144





รูป 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง ( $PL^2/EI$ ) และการเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างที่มุมบนขวา ( $U_C \times 10^3 / L$ ) ของโครงข้อแข็งพอร์ทอล

จากกราฟในรูป 5.3 การเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างที่มุมบนขวาของโครงข้อแข็งพอร์ทอลที่คำนวณได้จากโปรแกรม CU-NTABS จะใกล้เคียงค่าที่คำนวณได้จากวิธีคาน-เสา (Beam-Column) ที่แสดงไว้ในงานวิจัยของ Wen และ Rahimzadeh (1983) มากที่สุด รองลงมาเป็นงานวิจัยของ Wen และ Rahimzadeh โปรแกรม SUPER-ETABS ให้ผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนตำแหน่งน้อยที่สุดในกรณีแรงกระทำมีขนาดเท่ากัน อันเนื่องมาจากโปรแกรม SUPER-ETABS วิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตโดยวิธีประมาณ โปรแกรม GTSTRUDL และ SUPER-ETABS ให้ผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนตำแหน่งออกห่างจากงานวิจัยของ Wen และ Rahimzadeh มากขึ้นเมื่อ  $P$  มีค่าเพิ่มขึ้น โดยโปรแกรม GTSTRUDL ให้ผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนตำแหน่งในทางมากกว่างานวิจัยของ Wen และ Rahimzadeh ส่วนโปรแกรม SUPER-ETABS ให้ผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนตำแหน่งในทางน้อยกว่างานวิจัยของ Wen และ Rahimzadeh หากต้องการให้ผลการคำนวณจากโปรแกรม GTSTRUDL และ SUPER-ETABS มีความถูกต้องมากขึ้น จำเป็นต้องแบ่งเสาให้มีจำนวนชิ้นส่วนมากขึ้น

การวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตโดยโปรแกรม CU-NTABS ให้ผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนตำแหน่งในทางมากกว่าการวิเคราะห์เชิงเส้นในอัตราส่วนที่มากขึ้นเมื่อ  $P$  มากขึ้น จากการวิเคราะห์โครงข้อแข็งพอร์ทอลนี้พบว่า แม้เพียง  $P$  มีค่า 2000 หน่วยหรือประมาณ 40 % ของน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ การเปลี่ยนตำแหน่งที่คำนวณจากการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต ก็มีค่าประมาณ 2 เท่าของการเปลี่ยนตำแหน่งที่คำนวณจากการวิเคราะห์เชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์โครงข้อแข็งพอร์ทอลโดยวิธีเชิงเส้นให้ผลการวิเคราะห์ไม่ถูกต้องเท่าที่ควร

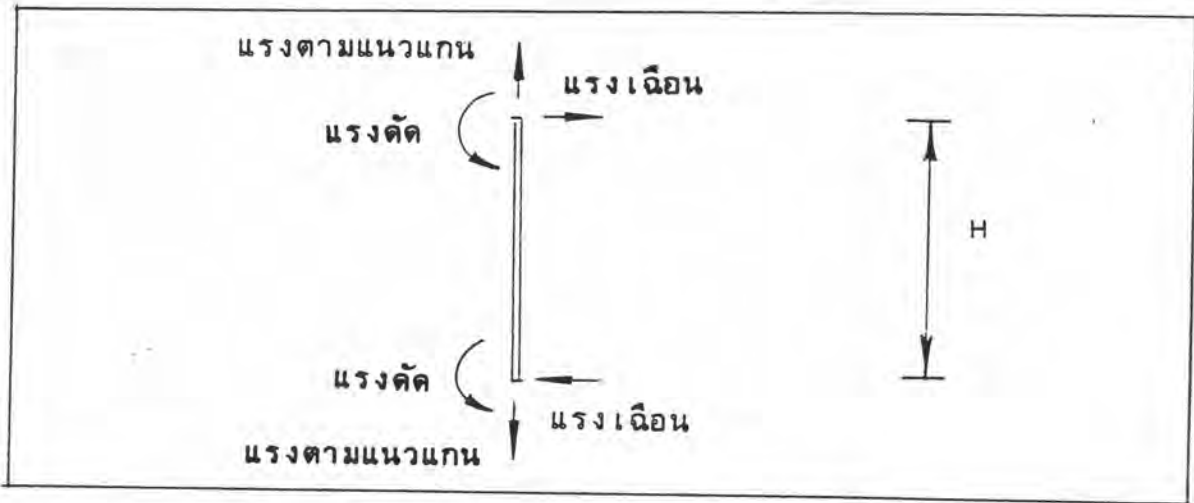
### 3. แรงภายในองค์อาคาร

ตาราง 5.3 รูปที่ 5.5 และ 5.6 แสดงผลของแรงภายในองค์อาคารของเสาต้นซ้ายชั้นส่วนบน(เสาแต่ละต้นจำลองเป็นชั้นส่วน 2 ชั้น) กรณีแรงกระทำในแนวดิ่ง  $P = 1,000$  หน่วย โดยที่มีทิศทางบวกเป็นดังแสดงในรูป 5.4

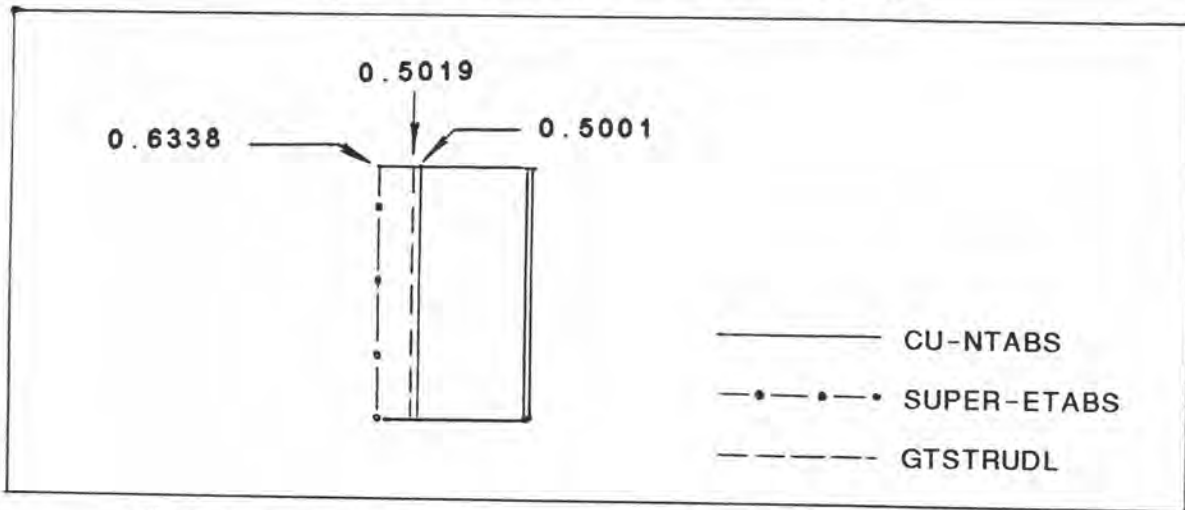
ตาราง 5.3 แรงภายในที่คำนวณได้จากโปรแกรมทั้งสาม

	CU-NTABS	SUPER-ETABS	GTSTRUDL
ที่ปลายบน :			
แรงตามแนวแกน(หน่วย)	-999.4631	-999.4680	-999.4578
แรงเฉือน(หน่วย)	0.5001	0.6338	0.5019
แรงดัด(หน่วย)	32.2154	31.9172	32.6435
ที่ปลายล่าง :			
แรงตามแนวแกน(หน่วย)	-999.4631	-999.4680	999.4578
แรงเฉือน(หน่วย)	0.5001	0.6338	0.5019
แรงดัด(หน่วย)	5.9847	6.1086	5.9170

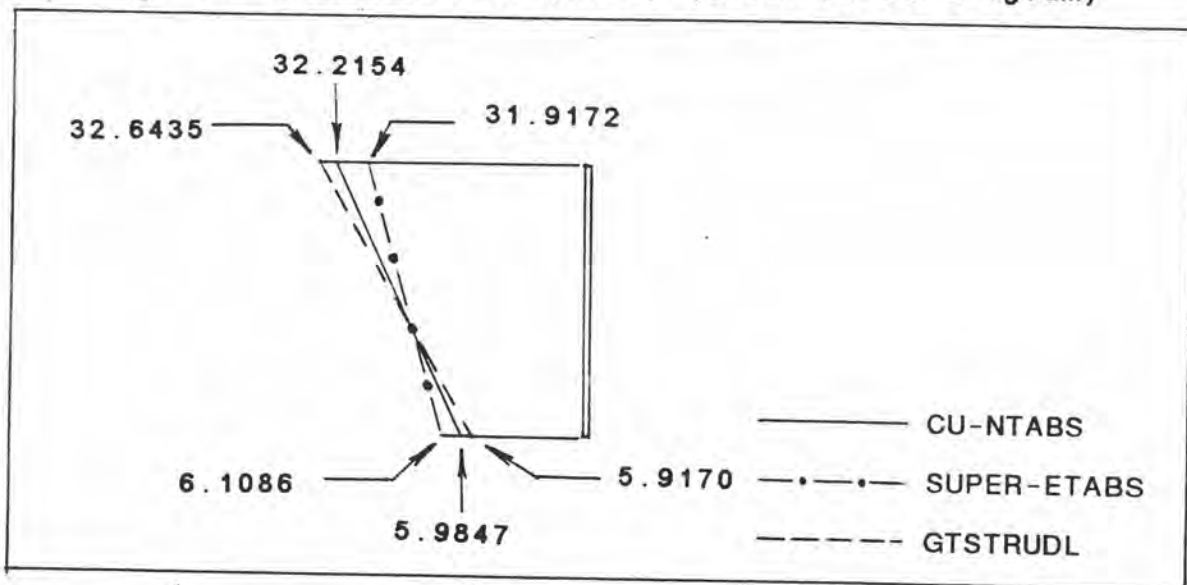




รูป 5.4 ทิศทางบวกของแรงภายในเสา



รูป 5.5 แผนภาพแรงเฉือน (หน่วย) (Shear Force Diagram)



รูป 5.6 แผนภาพแรงดัด (หน่วย) (Bending Moment Diagram)

จากตาราง 5.3 แรงเฉือนที่คำนวณจากโปรแกรม SUPER-ETABS มีค่ามากกว่าแรงเฉือนที่คำนวณจากโปรแกรม GTSTRUDL และ CU-NTABS เนื่องจากแรงเฉือนในโปรแกรม SUPER-ETABS คำนวณจากสมการ (5.1) โดยไม่คำนึงผลการเปลี่ยนตำแหน่งในการเขียนสมการสมดุลย์

$$\text{แรงเฉือน} = (1/H) (\text{แรงดัดที่ปลายบน} + \text{แรงดัดที่ปลายล่าง}) \quad (5.1)$$

ในขณะที่แรงเฉือนในโปรแกรม CU-NTABS และ GTSTRUDL คำนวณจากสมการ (5.2) ซึ่งคำนึงผลการเปลี่ยนตำแหน่งในการเขียนสมการสมดุลย์อย่างถูกต้องนั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{แรงเฉือน} = (1/H) (\text{แรงดัดที่ปลายบน} + \text{แรงดัดที่ปลายล่าง} + \text{แรงตามแนวแกน} \\ (\text{การเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายบน} - \text{การเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายล่าง})) \end{aligned} \quad (5.2)$$

จากการตรวจสอบดุลย์แรงภายในและภายนอกทั้งแรงในแนวดิ่ง แนวนราบ และแรงดัด (แสดงในภาคผนวก จ.) ผลรวมแรงภายในต่างจากผลรวมของแรงภายนอกไม่เกิน 0.001%

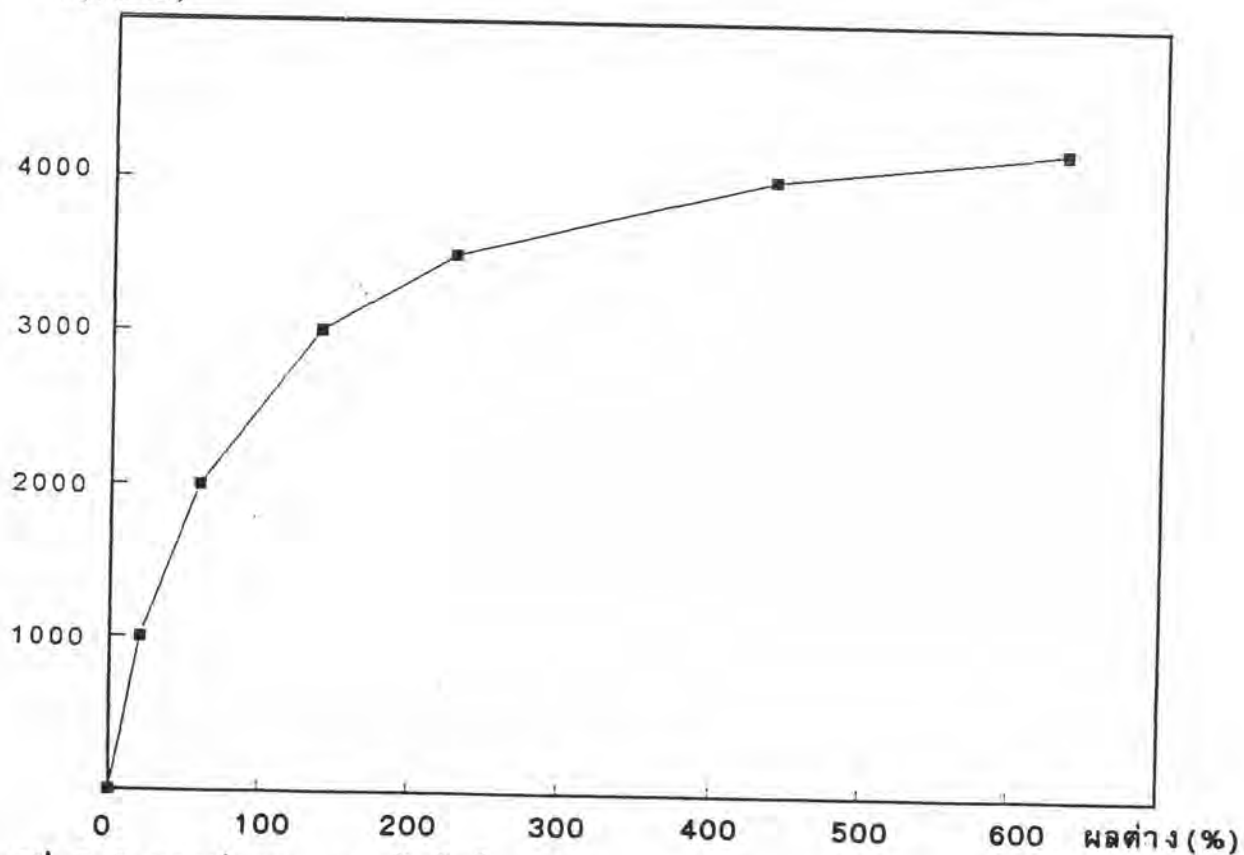
#### 4. แรงดัดที่ฐาน

แรงดัดที่ฐานของโครงสร้างเป็นอีกตัวแปรหนึ่ง ที่ควรคำนึงในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง การวิเคราะห์แรงดัดที่ฐานผิดพลาด นำไปสู่การออกแบบฐานรองรับของโครงสร้างที่ไม่เหมาะสม และโครงสร้างอาจวิบัติในที่สุด ในการนี้พิจารณาแรงดัดที่ปลายล่างของเสาต้นขวาชั้นส่วนล่าง ของโครงข้อแข็ง-พอร์ทอล ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงเส้นและการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต คำนวณโดยโปรแกรม CU-NTABS ดังแสดงในตาราง 5.4 และรูป 5.7

ตาราง 5.4 แรงดัดที่ปลายล่างของเสาต้นขวาชั้นส่วนล่าง

P (หน่วย)	จากการวิเคราะห์ เชิงเส้น (หน่วย)	จากการวิเคราะห์ ไม่เชิงเส้น(หน่วย)	ผลต่าง* (%)
4200	144.67	1062.30	+634
4000	137.78	743.06	+439
3500	120.56	396.58	+228
3000	103.34	247.74	+139
2000	68.89	109.72	+59
1000	34.45	41.49	+20

\*ผลต่างเทียบกับการวิเคราะห์เชิงเส้น  
P(หน่วย)



รูป 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ P และผลต่างของแรงดัดที่ปลายล่างของเสาต้นขวาชั้นส่วนล่าง

จากกราฟในรูป 5.7 พบว่าความสัมพันธ์ของแรงดัดที่ปลายล่างของเสาต้นขวา ที่คำนวณจากการวิเคราะห์เชิงเส้น และการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต มีความคล้ายกับความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนตำแหน่งที่คำนวณจากการวิเคราะห์เชิงเส้นและการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต คือยิ่ง P มีค่ามากขึ้น แรงดัดที่ฐานที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต จะมากกว่าผลจากการวิเคราะห์เชิงเส้นในอัตราส่วนที่มากขึ้น แม้เพียง P มีค่า 2000 หน่วยหรือประมาณ 40 % ของน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ แรงดัด ที่ฐานที่คำนวณจากการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต ก็มีค่ามากกว่า แรงดัดที่ฐานที่คำนวณจากการวิเคราะห์เชิงเส้น เกือบ 60 %

#### 5. การวิเคราะห์โดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบ วิธีการแก้ปัญหาไม่เชิงเส้นโดยวิธีทำซ้ำแบบแทนค่าโดยตรง ซึ่งใช้ในโปรแกรม CU-NTABS กับวิธีทำซ้ำแบบ นิวตัน-ราฟสัน ได้ผลการคำนวณการเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้าง ที่มุมบนขวา ของโครงข้อแข็งพอร์ทอล ดังแสดงในตาราง 5.5

ตาราง 5.5 การเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างที่มุมบนขวาของโครงข้อแข็งพอร์ทอล

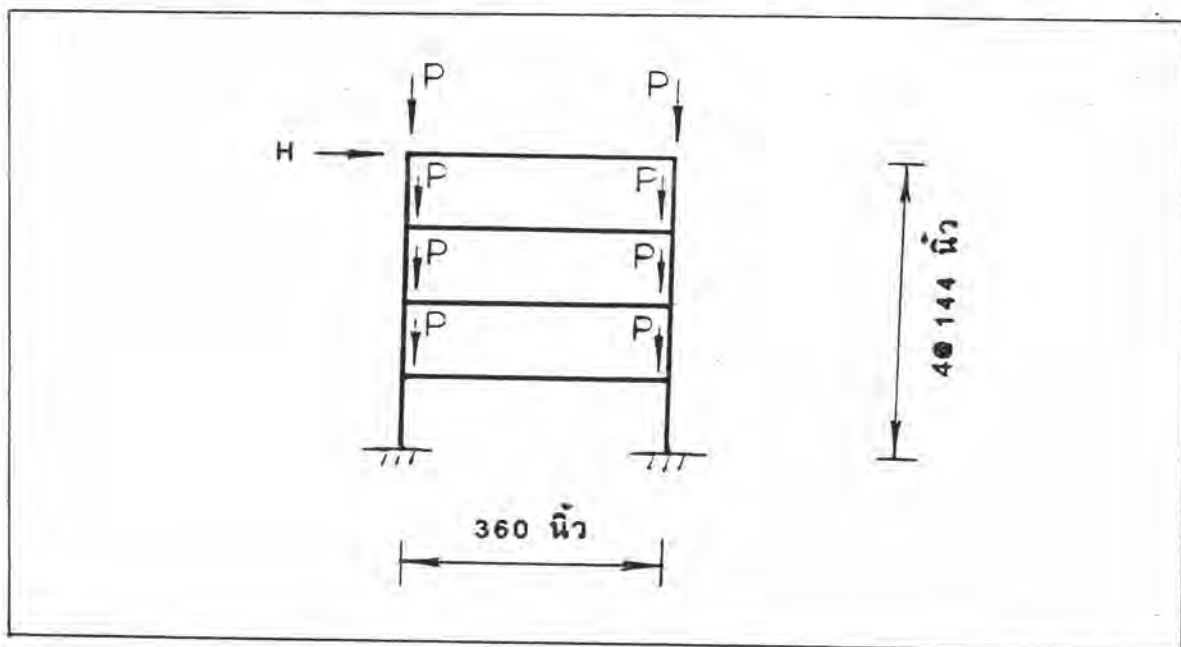
P (หน่วย)	วิธีแทนค่าโดยตรง (หน่วย)	วิธีนิวตัน-ราฟสัน (หน่วย)	ผลต่าง* (%)
4,000	0.2877	0.2874	-0.104
3,000	0.0913	0.0910	-0.329
2,000	0.0386	0.0385	-0.259
1,000	0.0142	0.0141	-0.704

\*ผลต่างเทียบกับวิธีแทนค่าโดยตรง

จากตาราง 5.5 พบว่าการแก้ปัญหาไม่เชิงเส้นทั้งสองวิธี ให้ผลการคำนวณการเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างที่มุมบนขวาของโครงข้อแข็งพอร์ทอลต่างกันไม่ถึง 1 % เท่านั้น โปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อแก้ปัญหาไม่เชิงเส้นโดยวิธีทำซ้ำแบบ นิวตัน-ราฟสัน แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ฉ.

### ตัวอย่าง 3 : โครงข้อแข็ง 4 ชั้น

โครงข้อแข็ง 4 ชั้น (รูป 5.8) ที่วิเคราะห์โดย Harrison (1973) จะเป็นตัวอย่างถัดไป โครงสร้างนี้มีความสูงแต่ละชั้น 144 นิ้ว ระยะห่างระหว่างฐาน 360 นิ้ว ฐานรองรับมีสภาพยึดแน่น วัสดุที่ใช้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ  $3 \times 10^7$  ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เสาทั้ง 2 ข้าง มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 17.66 ตารางนิ้ว โมเมนต์อินเนอร์เซียเท่ากับ  $343.7$  นิ้ว<sup>4</sup> คานชั้นล่างและชั้นที่ 2 มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 17.64 ตารางนิ้ว โมเมนต์อินเนอร์เซียเท่ากับ  $984.0$  นิ้ว<sup>4</sup> คานชั้นที่ 3 และชั้นบนสุดมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 16.19 ตารางนิ้ว โมเมนต์อินเนอร์เซียเท่ากับ  $889.9$  นิ้ว<sup>4</sup> มีแรงกระทำในแนวตั้งกระทำที่จุดต่อทุกจุดระหว่างเสาและคานขนาดเท่ากับ  $P$  ปอนด์ แรงกระทำในแนวราบกระทำที่มุมบนซ้ายสุดขนาดเท่ากับ  $H = P/6$  ปอนด์



รูป 5.8 โครงข้อแข็ง 4 ชั้น

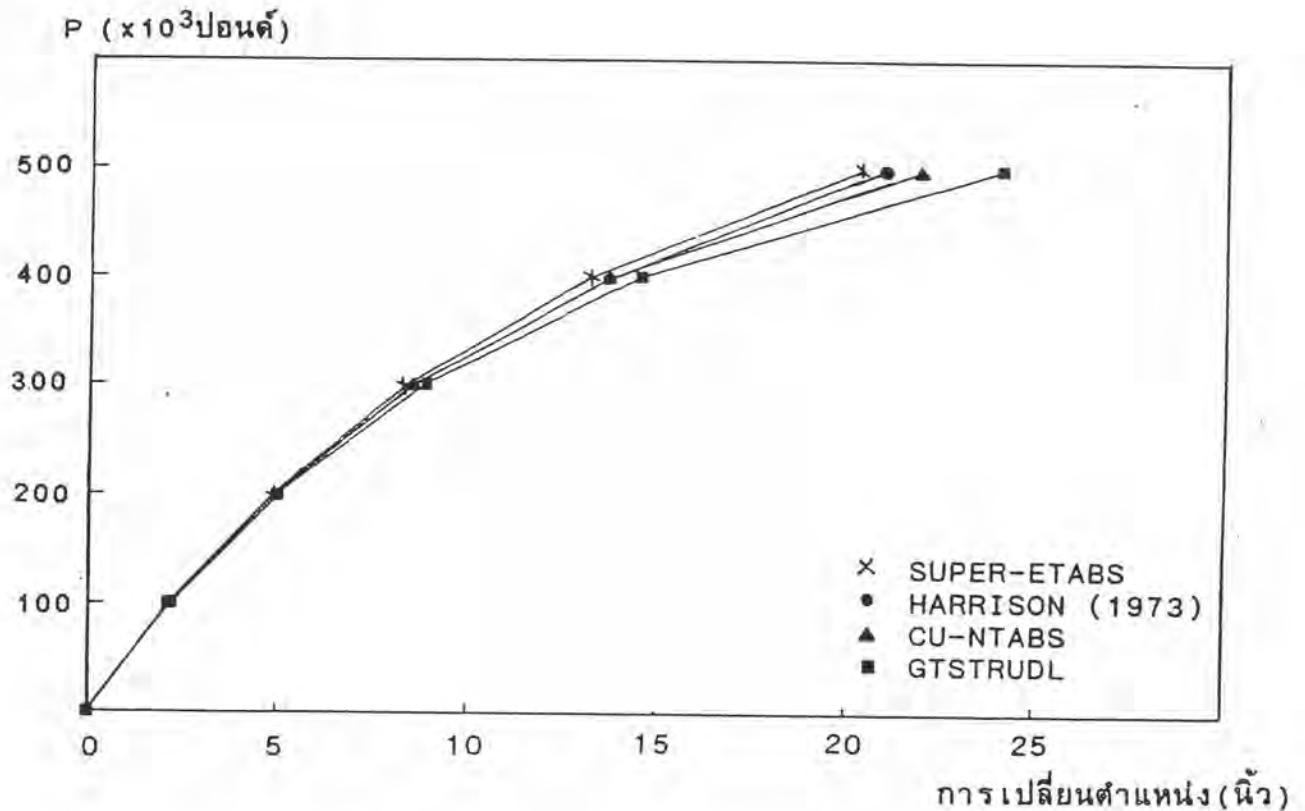
ในการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต ในแต่ละขนาดแรงกระทำ โปรแกรม CU-NTABS ใช้เวลาประมาณ 15 วินาทีโดยเฉลี่ย โปรแกรม SUPER-ETABS ใช้เวลาประมาณ 2 วินาทีโดยเฉลี่ย และโปรแกรม GTSTRU DL ใช้เวลาประมาณ 1 วินาที โดยเฉลี่ย

ผลการคำนวณของโครงข้อแข็งนี้แสดงไว้ในตาราง 5.6 และ 5.7 และกราฟในรูป 5.9

ตาราง 5.6 การเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างที่มุมบนขวาของโครงข้อแข็ง 4 ชั้น

P ( $\times 10^3$ ปอนด์)	การ วิเคราะห์ เชิงเส้น (นิ้ว)	การวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต(นิ้ว)		
		CU-NTABS	SUPER-ETABS	GTSTRU DL
500	9.8170	21.9468	20.3607	24.0746
400	7.8607	13.8325	13.2490	14.5258
300	5.8926	8.6341	8.4198	8.8663
200	3.9245	4.9566	4.8891	5.0227
100	1.9681	2.1933	2.1809	2.2032





รูป 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง P และ การเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างที่มุมบนขวาของโครงข้อแข็ง 4 ชั้น

จากกราฟในรูป 5.9 การเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้าง ที่มุมบนขวาของโครงข้อแข็ง 4 ชั้นที่คำนวณได้จากโปรแกรม CU-NTABS และ SUPER-ETABS จะใกล้เคียงกับ ผลการวิเคราะห์ของ Harrison (1973) มาก (ต่างกันประมาณ 4%) ในขณะที่ โปรแกรม GTSTRUDL ให้ค่ามากกว่าพอสมควรราว 14% จากการวิเคราะห์พบว่าที่ แรง P เท่ากับ 300,000 ปอนด์ (หรือประมาณ 40% ของน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ ซึ่ง ใช้โปรแกรม CU-NTABS หาได้เท่ากับ 750,000 ปอนด์) การเปลี่ยนตำแหน่งด้าน ข้างที่มุมบนขวาของโครงข้อแข็งนี้จากการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตจะมาก กว่า การวิเคราะห์เชิงเส้นประมาณ 47% และแรงดัดที่ปลายล่างของเสาต้นขวาจาก การวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตจะมากกว่าประมาณ 53% ผลต่างดังกล่าว น้อยกว่ากรณีโครงข้อแข็งพอร์ทอลเนื่องจากโครงข้อแข็ง 4 ชั้นนี้แข็ง (Rigid) มากกว่าซึ่งจะลดผลของความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตลง

ตาราง 5.7 แรงภายในที่ปลายล่างของเสาต้นซ้ายชั้น 1 และ 4 สำหรับ  
P เท่ากับ 100,000 ปอนด์

	CU-NTABS	SUPER-ETABS	GTSTRU DL
ชั้น 4			
แรงตามแนวแกน ( $\times 10^3$ ปอนด์)	-96.0708	-96.0655	-96.0760
แรงเฉือน ( $\times 10^3$ ปอนด์)	8.3644	8.7203	8.0459
แรงดัด ( $\times 10^3$ ปอนด์-นิ้ว)	548.4644	547.5189	553.3184
ชั้น 1			
แรงตามแนวแกน ( $\times 10^3$ ปอนด์)	-375.0754	-375.1489	-374.9973
แรงเฉือน ( $\times 10^3$ ปอนด์)	8.4290	9.4888	8.4281
แรงดัด ( $\times 10^3$ ปอนด์-นิ้ว)	854.4936	862.9213	845.6155

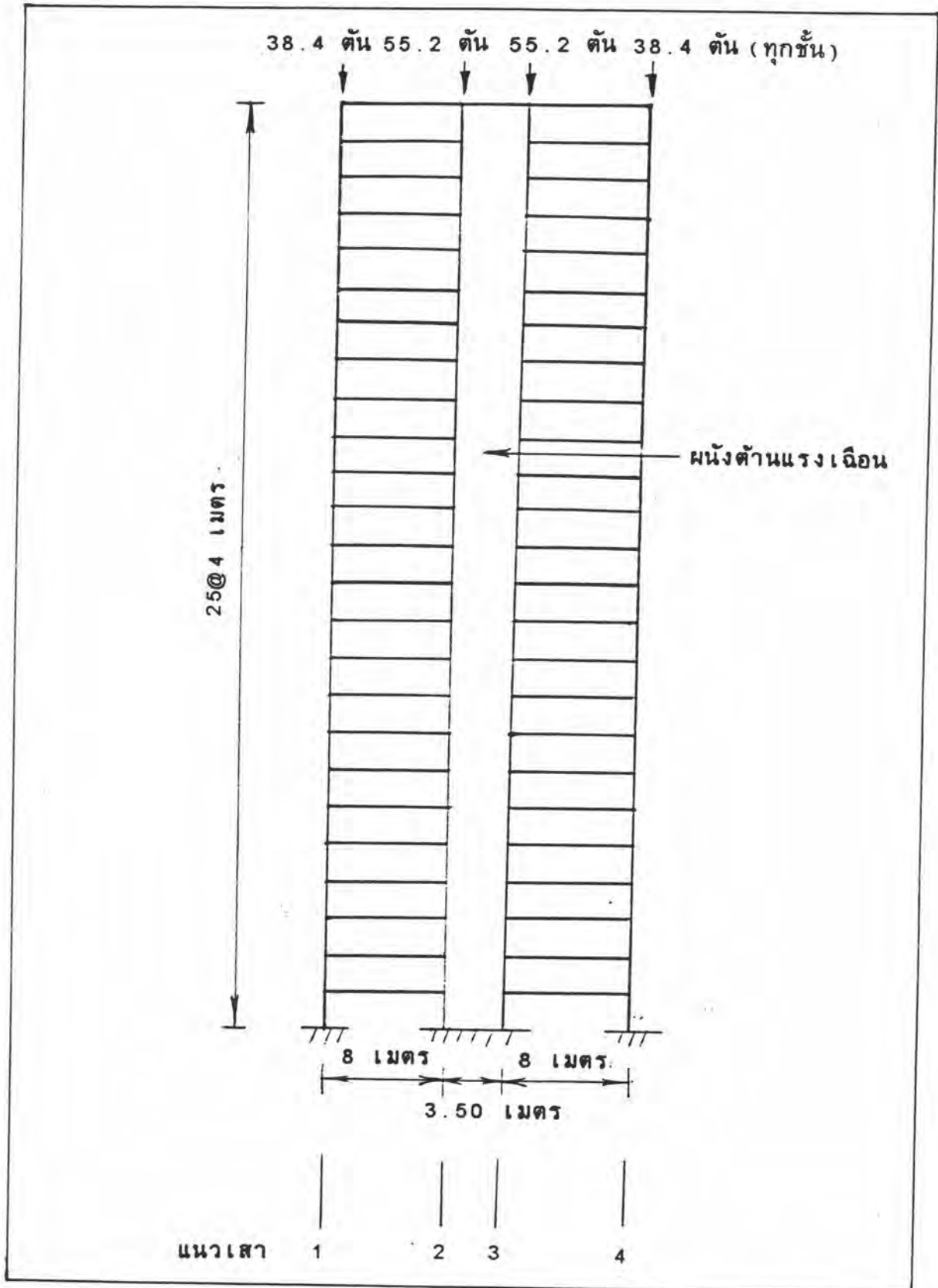
จากตาราง 5.7 จะเห็นว่าแรงเฉือนที่คำนวณได้โดยโปรแกรม SUPER-ETABS คลาดเคลื่อนมาก มีค่ามากกว่าโปรแกรม CU-NTABS และ GTSTRU DL ดังเหตุผลที่ได้กล่าวแล้วในตัวอย่าง 2 ส่วนแรงภายในอื่นๆ ใกล้เคียงกันมากโดยแตกต่างกันไม่เกิน 1%

ตัวอย่าง 4 : โครงข้อแข็งประกอบผนังต้านแรงเฉือน 25 ชั้น 3 ช่วงเสา

ตัวอย่างสุดท้าย เป็นอาคารสูง 25 ชั้น 3 ช่วงเสา ประกอบด้วยโครงข้อแข็งประกอบผนังต้านแรงเฉือน มีมิติทางเรขาคณิตดังแสดงในรูป 5.10 และคุณสมบัติของชิ้นส่วนในตาราง 5.8 โครงสร้างทำด้วยวัสดุมีโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 3,042,000 ตันต่อตารางเมตร โครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกกระทำในแนวตั้งที่แนวเสา 1 และ 4 ทุกชั้นขนาด 38.4 ตัน และที่เสาแนว 2 และ 3 ทุกชั้นขนาด 55.2 ตัน และรับแรงกระทำด้านข้างจากแรงลมดังแสดงในตาราง 5.10

ตาราง 5.8 คุณสมบัติของชิ้นส่วน

	ชั้น	พื้นที่หน้าตัด (ม. <sup>2</sup> )	โมเมนต์อินเนอร์เซีย (ม. <sup>4</sup> )
เสาแนว 1 และ 4	1 ถึง 9	0.8100	0.0546
	10 ถึง 15	0.5625	0.0266
	16 ถึง 20	0.3600	0.0108
	21 ถึง 25	0.1600	0.0021
เสาแนว 2 และ 3	1 ถึง 25	0.6000	0.0125
คาน	1 ถึง 25	1.0000	0.0052
ผนังต้านแรงเฉือน	1 ถึง 25	1.0500	1.0718



รูป 5.10 โครงข้อแข็งประกอบด้วยผนังต้านแรงเฉือน 25 ชั้น 3 ช่วงเสา

ตาราง 5.9 ตำแหน่งและขนาดแรงกระทำด้านข้าง

ชั้น	ขนาด ( ตัน )
1 และ 2	1.60
3 และ 4	2.56
5	3.20
6 ถึง 9	3.84
10	4.48
11 ถึง 24	5.12
25	2.56

เนื่องจากโปรแกรม GTSTRUDL ไม่มีชั้นส่วน(Element)ผนังต้านแรงเฉือนในลักษณะที่ใช้ในโปรแกรมSUPER-ETABS จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบเฉพาะโปรแกรม CU-NTABS และ SUPER-ETABS เท่านั้นโดยทำการวิเคราะห์สำหรับค่าคูลน้ำหนัก (Load Factor)  $\alpha$  เท่ากับ 0.5 แล้วเพิ่มครั้งละ 0.5 จนถึง 2.5

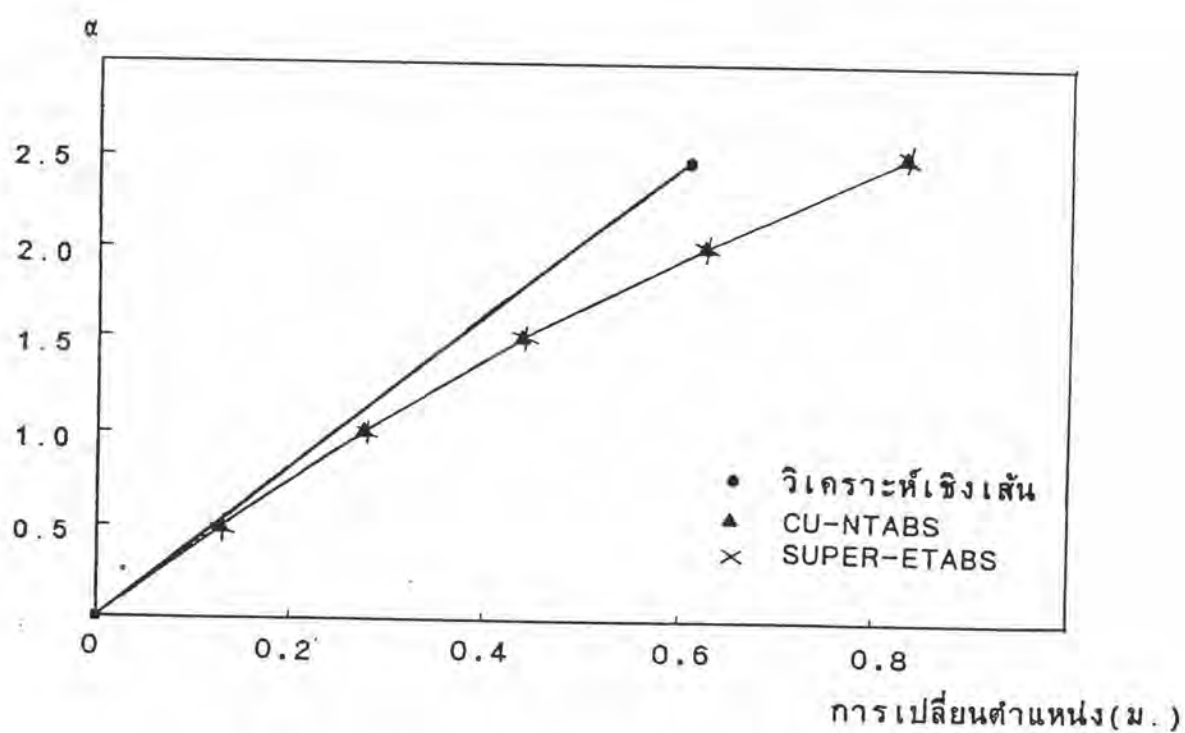
การวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตในแต่ละค่าคูลน้ำหนัก โดยโปรแกรมSUPER-ETABSใช้เวลาประมาณ 100 วินาทีโดยเฉลี่ย ในขณะที่โปรแกรม CU-NTABS ใช้เวลาประมาณ 290 วินาทีโดยเฉลี่ยและสามารถหาคำตอบที่มีความละเอียดภายในความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ โดยทำการทำซ้ำ 3 รอบ

#### 1. เส้นสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุกและการเปลี่ยนตำแหน่ง

ผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างของชั้น 25 ได้แสดงไว้ในตาราง 5.10 และ กราฟในรูป 5.11

ตาราง 5.10 การเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างของชั้น 25

$\alpha$	การวิเคราะห์เชิงเส้น (ม.)	การวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต (ม.)	
		CU-NTABS	SUPER-ETABS
2.5	0.6134	0.8306	0.8298
2.0	0.4907	0.6205	0.6201
1.5	0.3680	0.4365	0.4363
1.0	0.2454	0.2740	0.2739
0.5	0.1227	0.1294	0.1294

รูป 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  และ การเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างของชั้น 25



จากตาราง 5.10 การเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างของชั้น 25 ที่คำนวณได้ โดยวิธีไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตจากโปรแกรมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากแรงภายนอกที่กระทำถือว่ามิต่ำน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของอาคารนี้ ซึ่งจากการใช้โปรแกรม CU-NTABS คำนวณพบว่าค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของอาคารนี้คือค่า  $\alpha$  เท่ากับ 9 ดังนั้นผลของความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตจึงยังมีน้อยอยู่

อาคารในตัวอย่างนี้มีความสูง 100 เมตร มีความชะลูดประมาณ 5 การวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต ให้ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งทางข้างของชั้นบนสุด ที่น้ำหนักบรรทุกใช้งาน ( $\alpha = 1$ ) มากกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงเส้นประมาณ 10 % และที่น้ำหนักบรรทุก 2 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งานผลต่างจะเพิ่มขึ้นเป็น 26% ซึ่งถ้าอาคารมีความชะลูดและอ่อนมากกว่านี้ความแตกต่างก็จะเพิ่มมากขึ้น ในการออกแบบอาคารชะลูดและอ่อนควรคำนึงถึงผลความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตซึ่งจะมีผลต่อการควบคุมการโย้ระหว่างชั้น (Story Relation Drift) และความรู้สึกอยู่สบาย (Comfort) ของผู้อยู่อาศัยด้วย

## 2. แรงภายในองค์อาคาร

เลือกตรวจสอบคูลย์แรงภายในองค์อาคารของเสาแนว 1 ชั้น 25 กรณี  $\alpha = 0.5$  ดังแสดงในตาราง 5.11

ตาราง 5.11 แรงภายในที่คำนวณได้จากโปรแกรมทั้งสอง

	CU-NTABS	SUPER-ETABS
ที่ปลายบน :		
แรงตามแนวแกน (ตัน)	- 16.4349	- 16.4347
แรงเฉือน (ตัน)	4.1578	4.1775
แรงดัด (ตัน-ม.)	9.2100	9.2124
ที่ปลายล่าง :		
แรงตามแนวแกน (ตัน)	- 16.4349	- 16.4347
แรงเฉือน (ตัน)	4.1578	4.1775
แรงดัด (ตัน-ม.)	7.4999	7.4978

แรงเฉือนที่คำนวณได้จากโปรแกรม SUPER-ETABS ยังคงมากกว่าค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม CU-NTABS แม้ว่าแรงภายในอื่นอันได้แก่ แรงตามแนวแกนและแรงดัดจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังเหตุผลที่กล่าวแล้วในตัวอย่าง 2

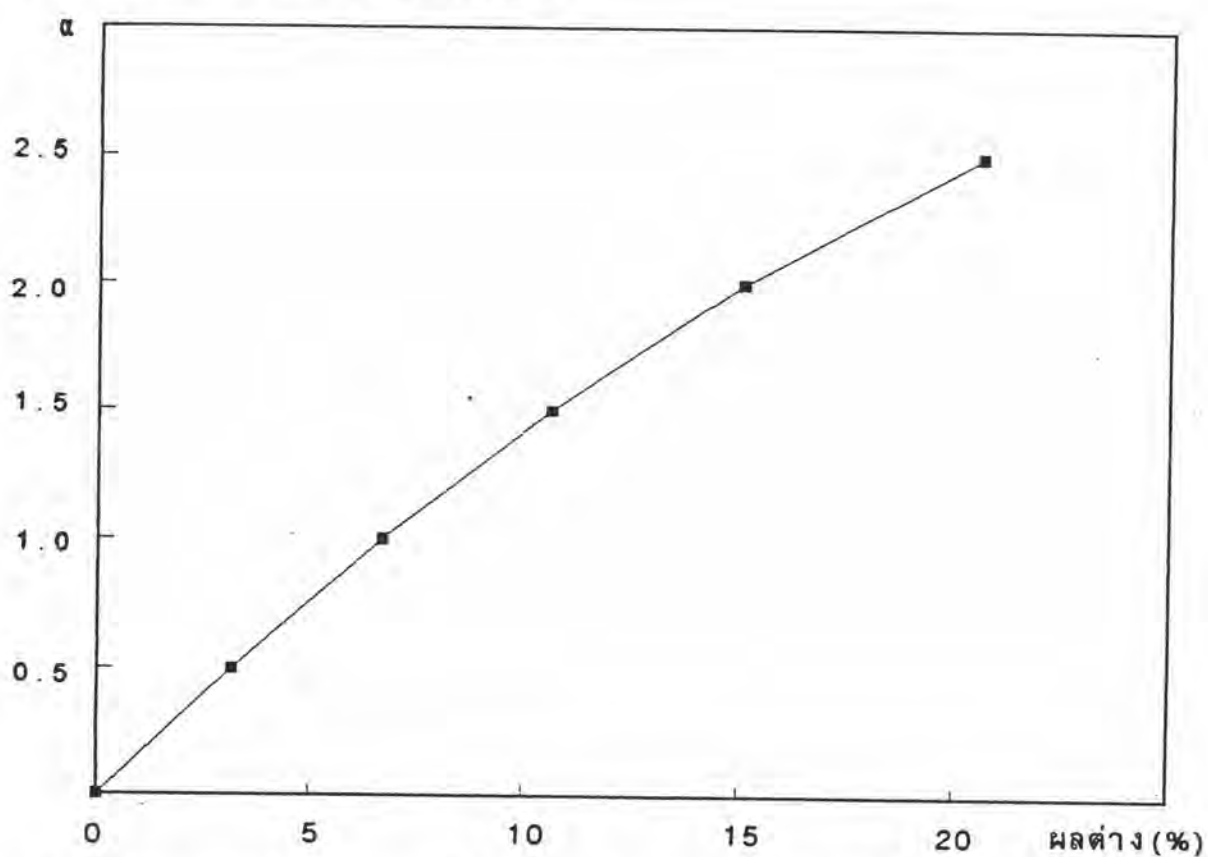
### 3. แรงดัดที่ฐาน

พิจารณาแรงดัดที่ปลายล่างของเสาแนว 4 ชั้นล่าง ของโครงข้อแข็งนี้ ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงเส้นและการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต คำนวณโดยโปรแกรม CU-NTABS ดังแสดงในตาราง 5.12 และรูป 5.12

ตาราง 5.12 แรงดัดที่ปลายล่างของเสาแนว 4 ชั้นล่าง

$\alpha$	การวิเคราะห์ เชิงเส้น(ต้น-ม.)	การวิเคราะห์ ไม่เชิงเส้น(ต้น-ม.)	ผลต่าง*
2.5	87.48	105.50	20.60
2.0	69.98	80.53	15.07
1.5	52.49	58.07	10.64
1.0	34.99	37.34	6.70
0.5	17.50	18.05	3.18

\*ผลต่างเทียบกับการวิเคราะห์เชิงเส้น

รูป 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ(แปรผันตามค่า  $\alpha$ ) และ ผลต่างของแรงดัดที่ปลายล่างของเสาแนว 4 ชั้นล่าง

ที่นำหน้ากับบรรทุกใช้งาน ( $\alpha = 1$ ) แรงดัดที่ฐานรองรับที่เสาแนว 4 ที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์เชิงเส้นประมาณ 7% เช่นเดียวกับการเปลี่ยนตำแหน่งดังที่ได้กล่าวแล้ว แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตจะให้ผลการวิเคราะห์คือ การเปลี่ยนตำแหน่งและแรงภายในองค์อาคารมากกว่าการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีเชิงเส้น ซึ่งการนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้าง จะทำให้ได้โครงสร้างที่แข็งแรงเหมาะสมกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้าง