

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์

4.1 อาคารตัวอย่างในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ ได้คัดเลือกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 9 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารที่พักอาศัยแห่งหนึ่งมาเป็นกรณีศึกษา โดยมีผังอาคารและรายละเอียดของโครงสร้างแสดงในภาพประกอบที่ 21 และ 22 ตามลำดับ และมีรายละเอียดที่สำคัญ ดังนี้

ก. ผังอาคารมีขนาด 14.40x35.10 เมตร แต่ละชั้นสูง 2.5 เมตร รวมเป็นความสูง 22.5 เมตร ในแต่ละชั้นมีห้องพักอาศัย แบ่งเป็น 2 ฟากๆละ 8 ห้อง มีทางเดินอยู่ตรงกลางอาคาร

ข. พื้นอาคารส่วนใหญ่เป็นแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปหนา 5 ซม. และมีคอนกรีตทับผิวพื้นอีก 5 ซม. โครงสร้างอาคารเป็นระบบคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยที่คอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัย 240 กก./ซม.² เหล็กข้ออ้อยใช้เกรด SD30 เหล็กกลมใช้เกรด SR24

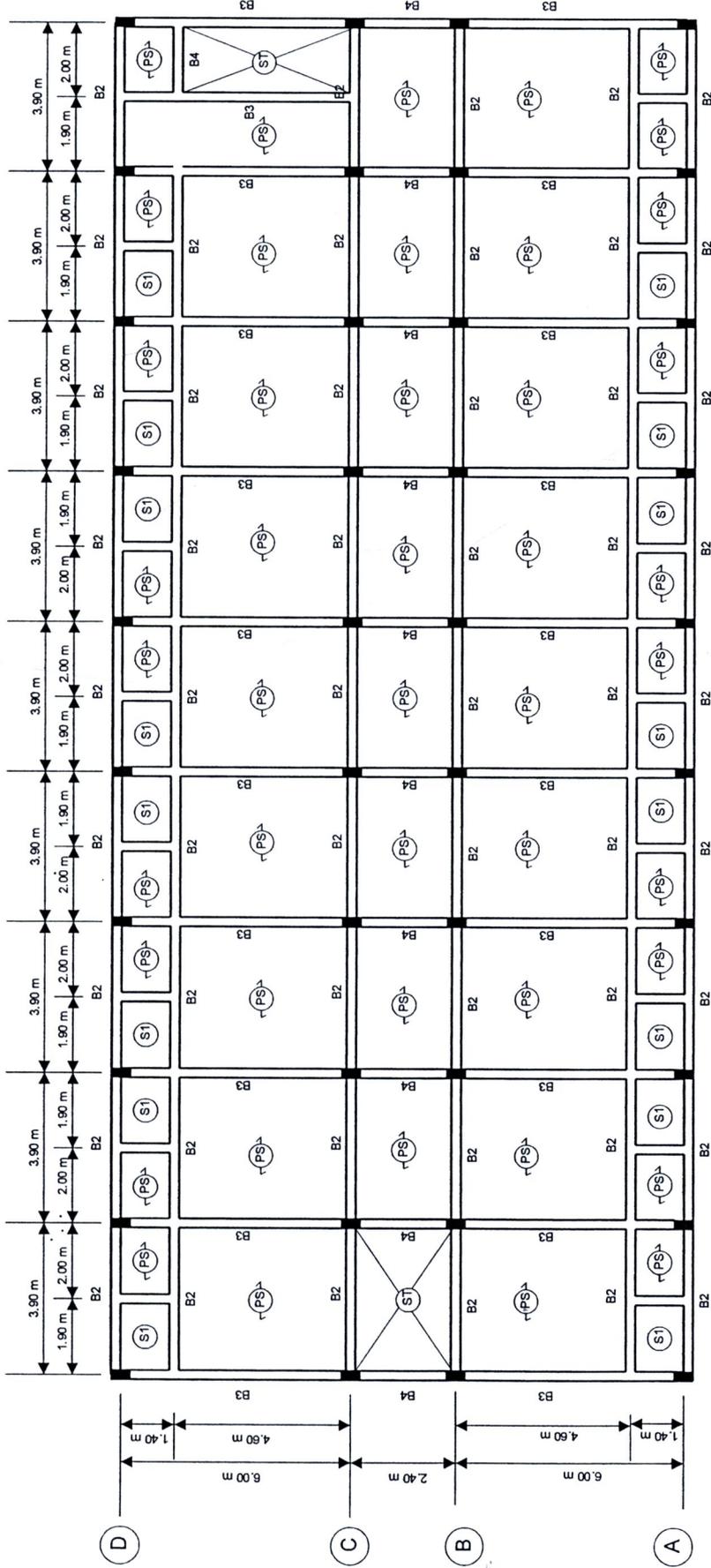
ค. เสามี 3 ขนาด โดยที่เสาชั้นที่ 1-2 เป็นเสา C1 มีขนาดหน้าตัดใหญ่ที่สุด เสาชั้นที่ 3-5 เป็นเสา C2 มีขนาดหน้าตัดประมาณ 80%ของเสา C1 ส่วนเสาชั้นที่ 6-9 เป็นเสา C3 มีขนาดหน้าเล็กที่สุด ประมาณ 65%ของเสา C1

ง. ผนังกันห้องเป็นอิฐก่อหนา 6.5 ซม. มีค่ากำลังอัดประลัย 40 กก./ซม.² และโมดูลัสยืดหยุ่น 13,250 กก./ซม.²

จ. โครงสร้างอาคารออกแบบตามข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ไม่ได้มีการออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว

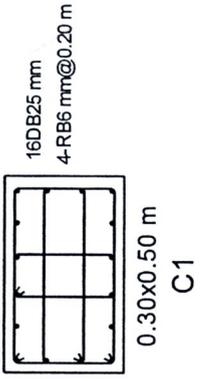
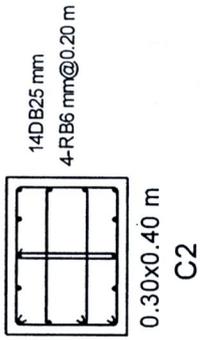
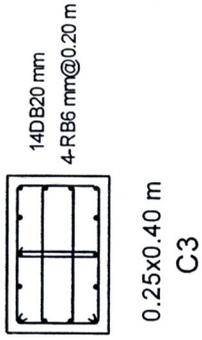
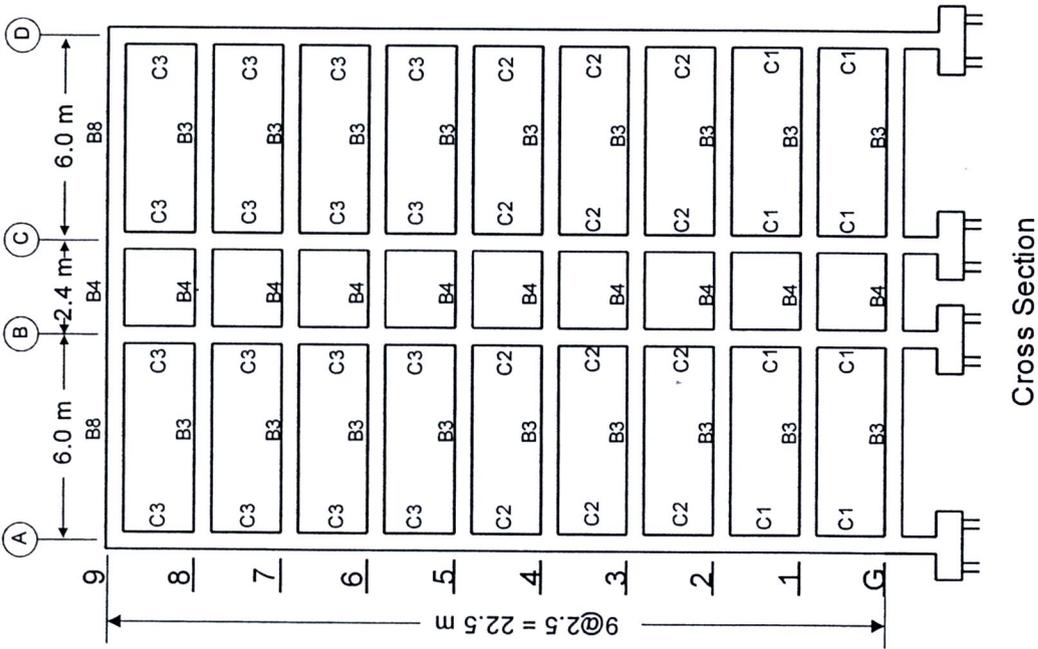
ฉ. โครงสร้างอาคารมีลักษณะรูปทรงสม่ำเสมอทั้งในผังอาคารและในแนวตั้ง การวิเคราะห์โครงสร้างใช้ แบบจำลองโครงสร้างดังแสดงในรูปตัดขวาง จำลองพฤติกรรมการรับแรงของเสาและคานภายใต้แรงกระทำแบบวิจักรด้วยแบบจำลองตามที่แสดงในบทที่ 3

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

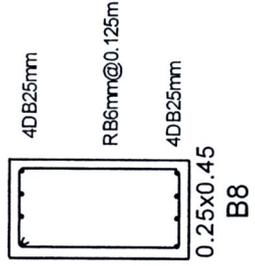
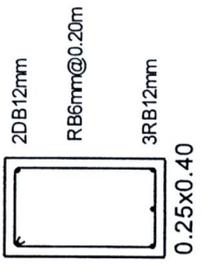
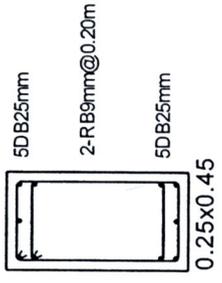


- (S1) cast-in-place slab
- (PS) precast slab
- (S1) stairway

ภาพประกอบ 21 ผังคาน พื้น และเสาของอาคารสูง 9 ชั้นที่เนกาทีฟเคาระท์



Column Details

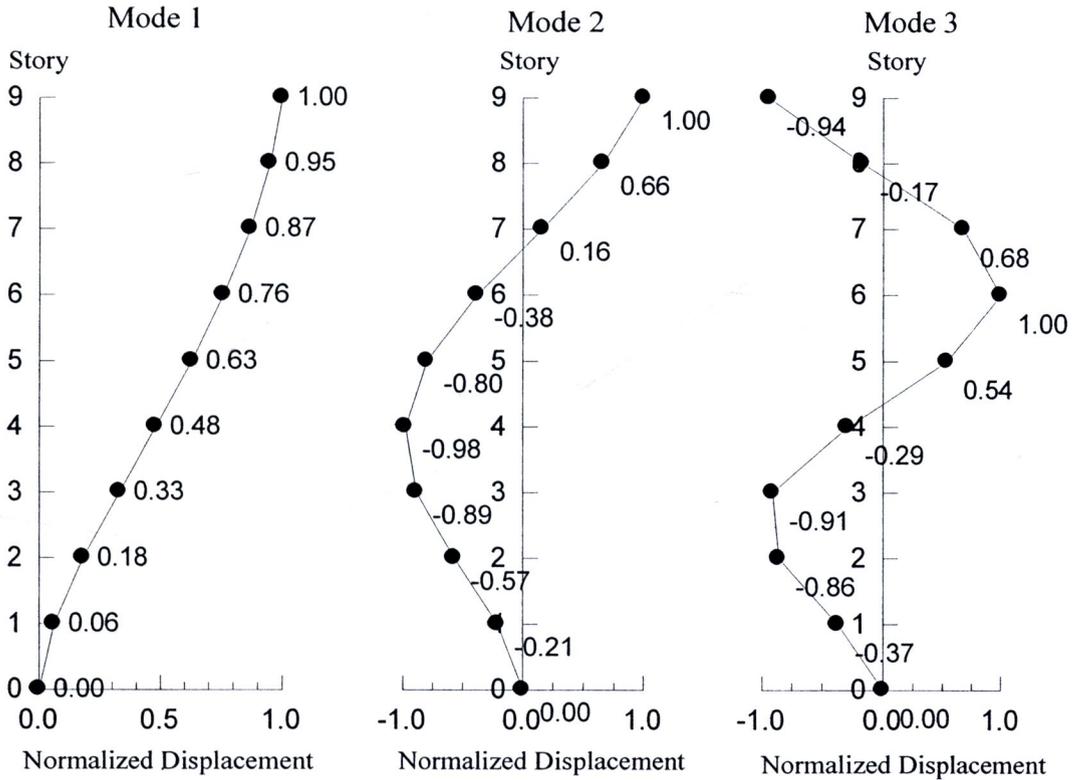


Beam Details

Cross Section

ภาพประกอบ 22 รายละเอียดโครงสร้างอาคารที่ใช้ในการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม RUAUMOKO (Carr, 2006) จะได้รูปร่างการสั่นในแต่ละรูปแบบ (mode shape) ทั้ง 3 รูปแบบ แสดงในภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 รูปร่างการสั่นในแต่ละรูปแบบ (mode shape) ทั้ง 3 รูปแบบ

การกระจายแรงกระทำตามรูปแบบการสั่น (F_i) ค่าตัวประกอบการมีส่วนร่วม (PF) ค่าน้ำหนักอาคารตามรูปแบบการสั่น (W_m) สำหรับโหมดที่ 1-3 แสดงในตารางที่ 9



ตารางที่ 9ก การวิเคราะห์แรงสำหรับการเคลื่อนที่ในโหมดที่ 1 (Modal Analysis)

Level	W_i (kg)	Mode 1 $T_1 = 0.639$ sec. $C_{s1} = 0.0768g, r = 1.58$			Mode 1
		ϕ_1	$\phi_1 W_i$	$\phi_1^2 W_i$	F_i
Roof	18494	1.00	18494	18494	2966
8	19694	0.95	18709.3	17773	3000
7	19694	0.87	17133.78	14906	2748
6	19694	0.76	14967.44	11375	2400
5	19934	0.63	12558.42	7912	2014
4	20174	0.48	9683.52	4648	1553
3	20174	0.33	6657.42	2197	1068
2	20534	0.18	3696.12	665	593
1	20894	0.06	1253.64	75	201
Σ	179286		103154	78047	16544
PF		1.322			
α_m		0.76044			
$V_m = C_{sm} W_m r$		16,544 kg			16,544
W_m		136,337 kg			

ตารางที่ 9ข การวิเคราะห์แรงสำหรับการเคลื่อนที่ในโหมดที่ 2

Level	W_i (kg)	Mode 2 $T_2 = 0.209$ sec. $C_{s2} = 0.105g, r = 1.58$			Mode 2
		ϕ_2	$\phi_2 W_i$	$\phi_2^2 W_i$	F_i
Roof	18494	1	18494	18494	-1517
8	19694	0.66	12998	8579	-1066
7	19694	0.16	3151	504	-258
6	19694	-0.38	-7484	2844	614
5	19934	-0.8	-15947	12758	1309
4	20174	-0.98	-19770	19375	1622
3	20174	-0.89	-17955	15980	1473
2	20534	-0.57	-11704	6672	960
1	20894	-0.21	-4388	921	360
Σ	179286		-42605	86126	3496
PF		-0.495			
α_m		0.11756			
$V_m = C_{sm} W_m r$		3,496 kg			3,496
W_m		21,076 kg			

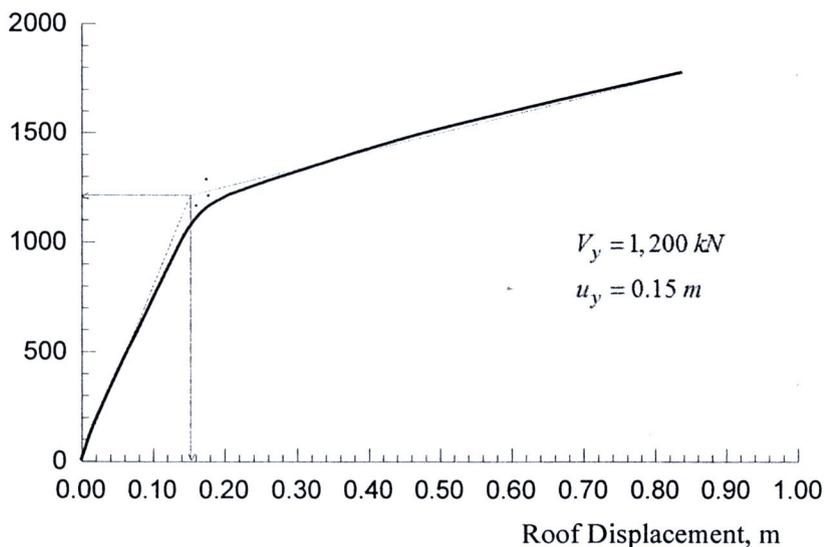
ตารางที่ 9ค การวิเคราะห์แรงสำหรับการเคลื่อนที่ในโหมดที่ 3

Level	W_i (kg)	Mode 3 $T_3=0.117$ sec. $C_{s3}=0.105g, r=1.58$			Mode 3
		ϕ_3	$\phi_3 W_i$	$\phi_3^2 W_i$	F_i
Roof	18494	-0.94	-17384	16341	868
8	19694	-0.17	-3348	569	167
7	19694	0.68	13392	9106	-669
6	19694	1	19694	19694	-983
5	19934	0.54	10764	5812	-537
4	20174	-0.29	-5850	1696	292
3	20174	-0.91	-18358	16706	916
2	20534	-0.86	-17659	15187	881
1	20894	-0.37	-7730	2860	386
Σ	179286		-26481	87974	1322
PF		-0.301			
α_m		0.04446			
$V_m = C_{sm} W_m r$		1,322 kg			1,322
W_m		7,971 kg			

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis

จากการวิเคราะห์การผลักอาคาร (Pushover Analysis) ด้วยโปรแกรม RUAUMOKO (Carr, 2006) จะได้กราฟการผลักอาคาร (Pushover Curve) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 24

Base Shear, kN

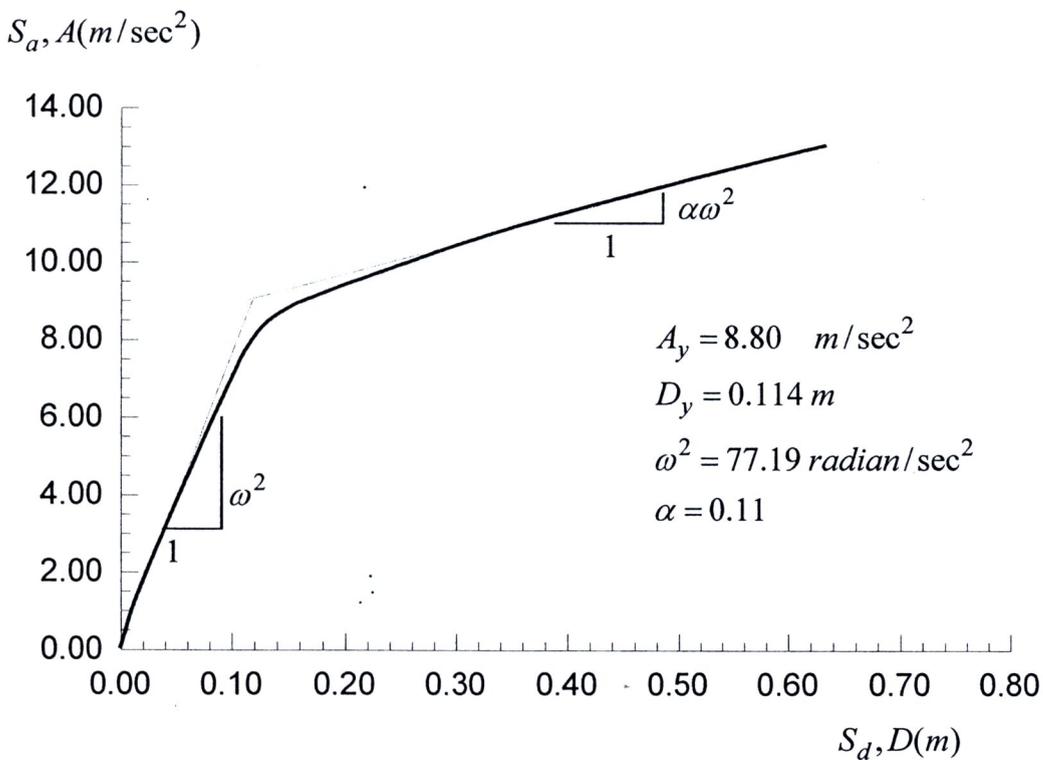


ภาพประกอบ 24 กราฟการผลักอาคาร (Pushover Curve) Mode 1

จากกราฟการผลักราการนี้ จะได้ค่าแรงเฉือนที่ฐานและการเคลื่อนที่ ณ จุดคราก เท่ากับ 1,200 กิโลนิวตันและ 0.15 เมตร ตามลำดับ เมื่อดำเนินการสร้างกราฟความสามารถด้านทานแผ่นดินไหว (Capacity Spectrum) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมของความเร่ง S_a และสเปกตรัมของการเคลื่อนที่ S_d สำหรับการผลักใน Mode 1 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 25 และเมื่อสร้างกราฟ Bilinear Curve โดยใช้สมมติฐานตามเอกสาร FEMA 440 ดังนี้

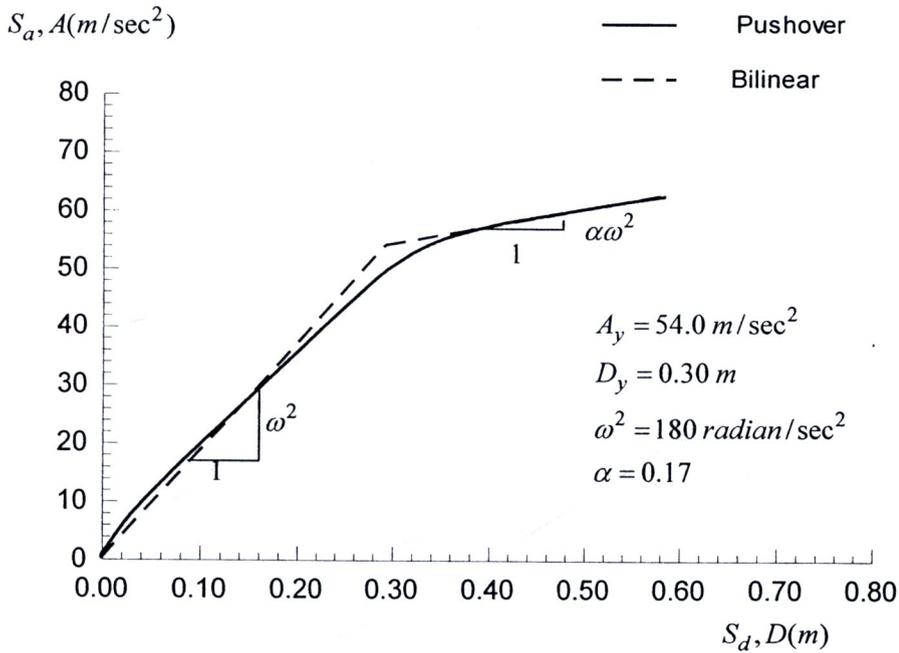
- ก) เส้นตรงที่ลากจากจุดกำเนิดจะตัดกราฟ Pushover Curve ที่ระยะประมาณ $0.6S_a$ โดยที่ S_a คือ ค่าความเร่งตอบสนองของอาคารเมื่อโครงสร้างเกิดการคราก
- ข) เส้นตรงที่ลากเชื่อมระหว่างจุดครากและจุดประลัยจะแบ่งพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง Pushover Curve และเส้นตรงนี้ เป็นพื้นที่เท่าๆกัน

จะได้ค่าความเร่งและค่าการเคลื่อนที่ ณ จุดคราก เท่ากับ 8.80 m/sec^2 และ 0.114 เมตร ตามลำดับ และจะได้ค่า สติฟเนสในรูปของ ω^2 และสัมประสิทธิ์ α ซึ่งเป็นการลดลงของสติฟเนสหลังจากเลยจุดครากเท่ากับ $77.19 \text{ radian/sec}^2$ และ 0.11 ตามลำดับ



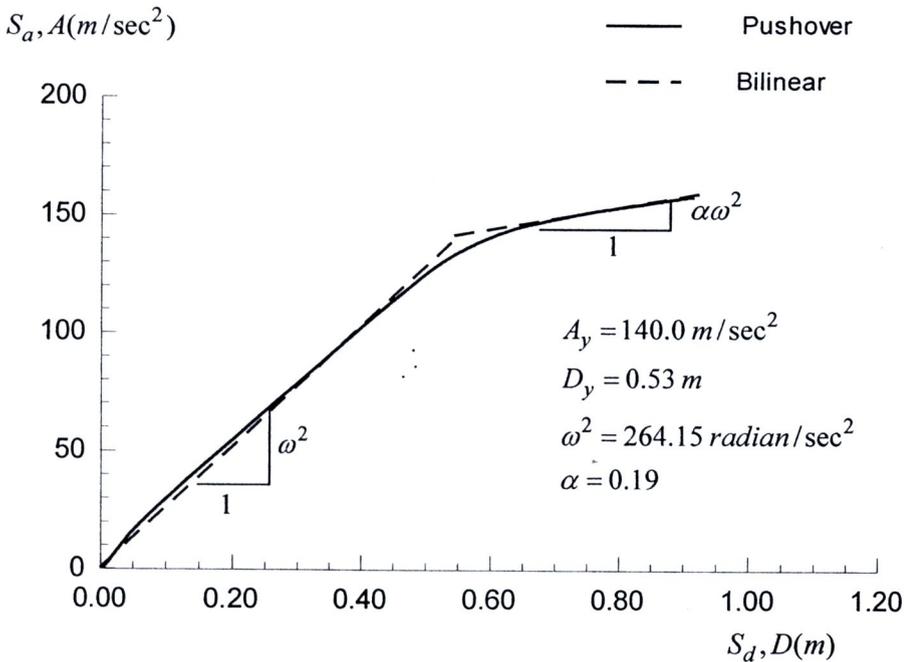
ภาพประกอบ 25 กราฟความสามารถด้านทานแผ่นดินไหว (Capacity Spectrum)
สำหรับการผลัก Mode 1

สำหรับการผลักใน Mode 2 ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมของความเร่ง S_a และสเปกตรัมของการเคลื่อนที่ S_d สำหรับการผลักใน Mode 2 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 26



ภาพประกอบ 26 กราฟความสามารถต้านทานแผ่นดินไหว (Capacity Spectrum) สำหรับการผลึก Mode 2

สำหรับการผลึกใน Mode 3 ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสเปคตรัมของความเร่ง S_d และสเปคตรัมของการเคลื่อนที่ S_d สำหรับการผลึกใน Mode 3 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 27

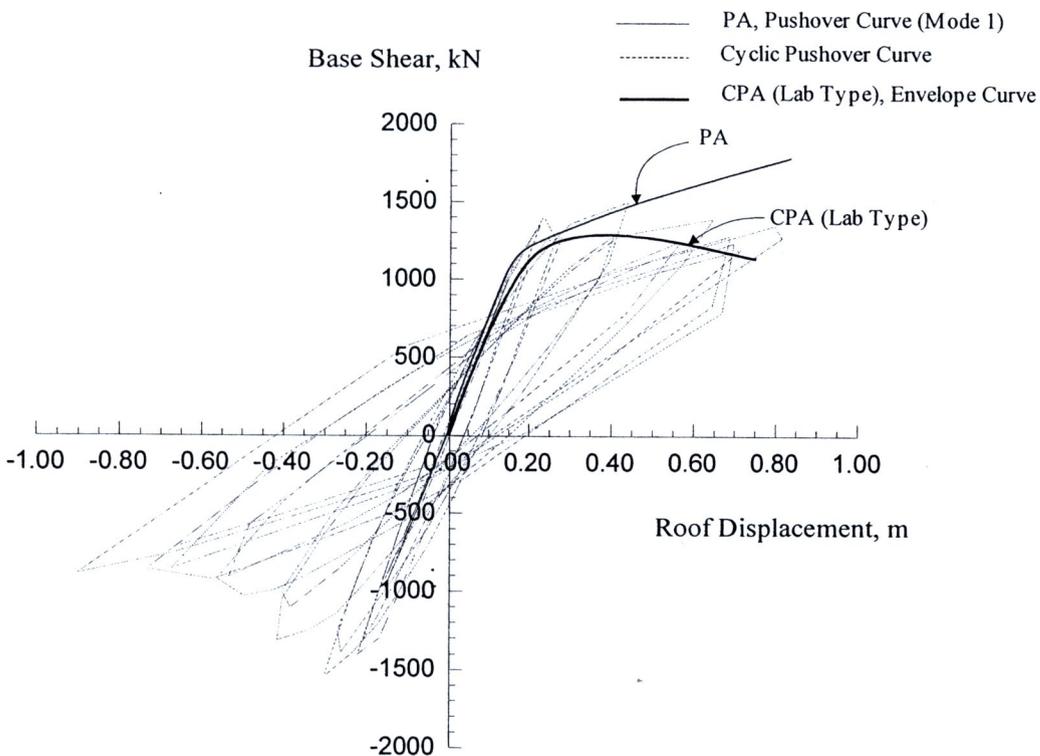


ภาพประกอบ 27 กราฟความสามารถต้านทานแผ่นดินไหว (Capacity Spectrum) สำหรับการผลึก Mode 3

ในการคำนวณค่าสเปกตรัมของความเร่ง $S_{am} = \frac{V_m}{W\alpha_m}$ และสเปกตรัมของการเคลื่อนที่ $S_{dm} = \frac{\Delta_{roof}}{PF_m\phi_{m,roof}}$ ใช้ค่า $W = 179,286 \text{ kg}$ ที่แสดงในตารางที่ 9 สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม Bispec แสดงในตารางที่ 10

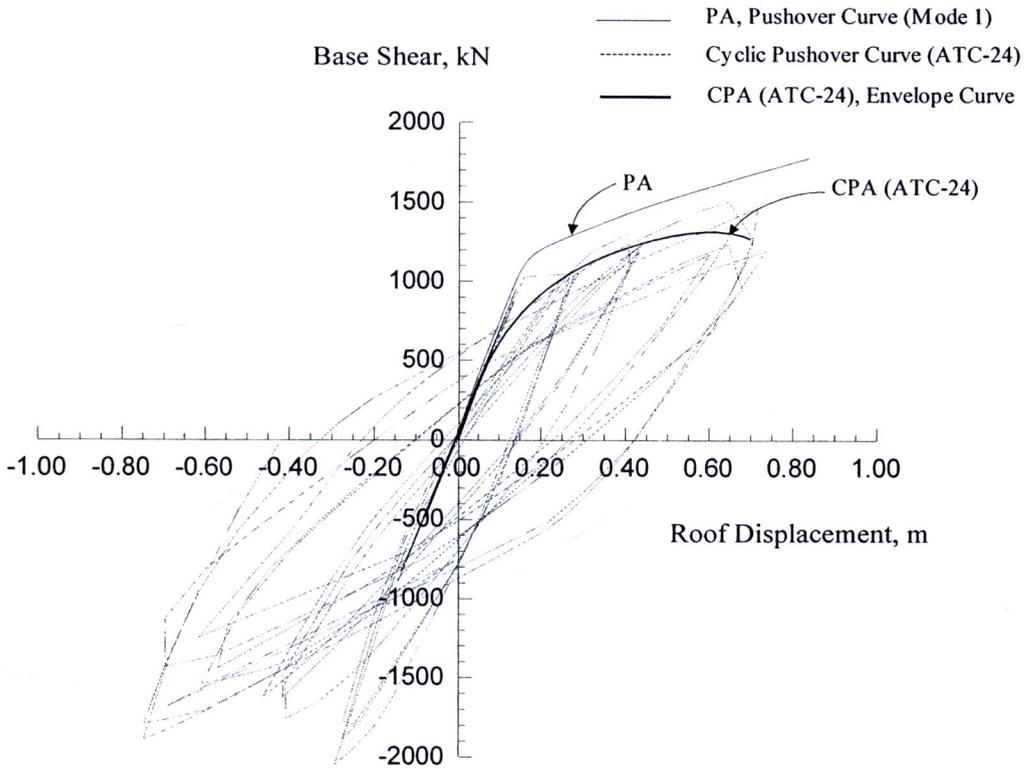
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Cyclic Pushover Analysis

จากการวิเคราะห์การผลักอาคารแบบวัฏจักร (Cyclic Pushover Analysis) ด้วยโปรแกรม RUAUMOKO (Carr, 2006) จะได้กราฟการผลักอาคารแบบวัฏจักร (Cyclic Pushover Curve) สำหรับประวัติการเคลื่อนที่แบบ Laboratory Type ดังแสดงในภาพประกอบที่ 28 และสร้างเส้นโค้งขอบนอก (Envelope Curve) สำหรับกราฟการผลักอาคารแบบวัฏจักรนี้ โดยใช้หลักการว่า เส้นโค้งขอบนอกลากเชื่อมตามจุดตัดระหว่างกราฟช่วงมีแรงกระทำ (Loading branch) และกราฟช่วงผ่อนคลายแรงกระทำ (Unloading branch) ตามเอกสาร ASCE-SEI 41-06 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 28

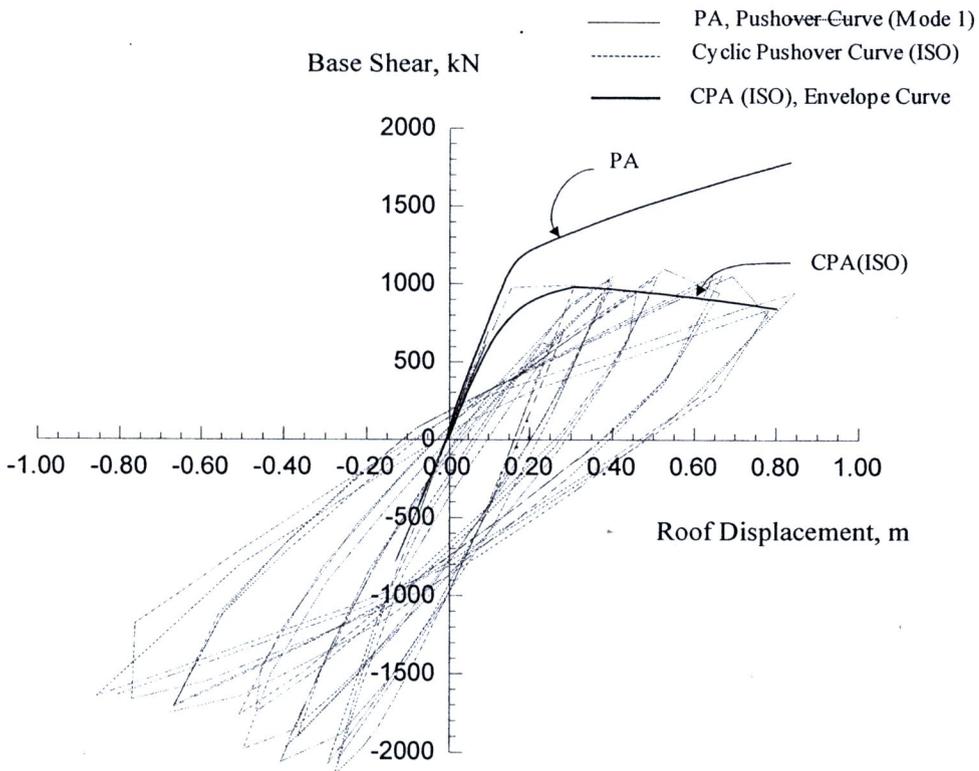


ภาพประกอบ 28 กราฟการผลักอาคารแบบวัฏจักร (Laboratory Type) เปรียบเทียบกับกราฟการผลักอาคารปกติ (Pushover) ในโหมดที่ 1

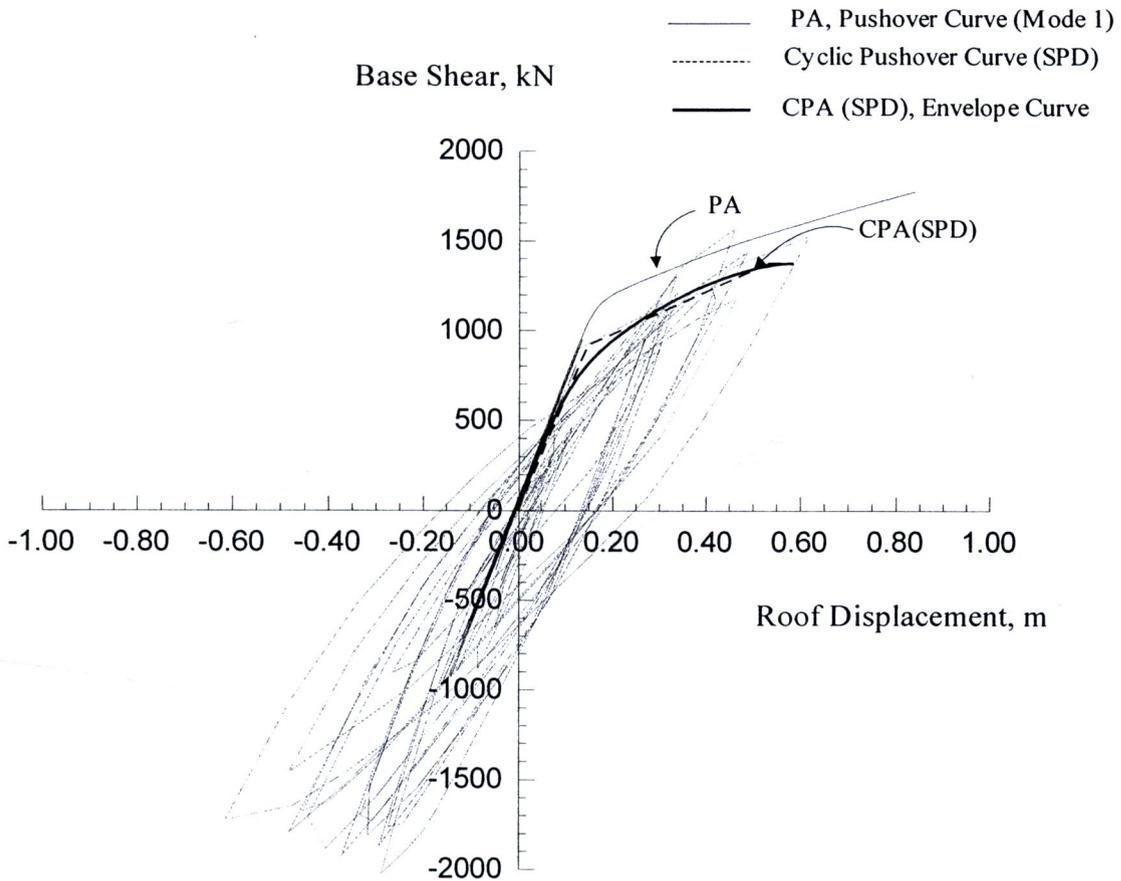
กราฟการผลักอาคารแบบวัฏจักรสำหรับประวัติการเคลื่อนที่แบบ ATC-24 และเส้นโค้งขอบนอก แสดงในภาพประกอบที่ 29



ภาพประกอบ 29 กราฟการผลักรอาคารแบบวัฏจักร (ATC-24 Type) เปรียบเทียบกับ
กราฟการผลักรอาคารปกติ (Pushover) ในโหมดที่ 1



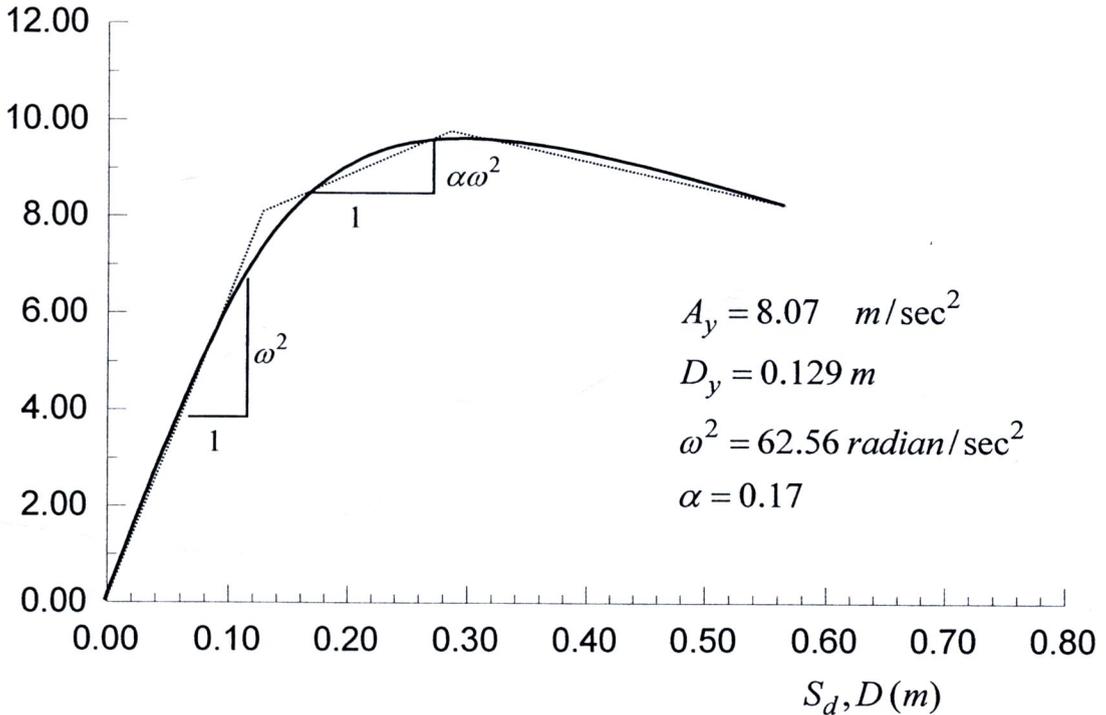
ภาพประกอบ 30 กราฟการผลักรอาคารแบบวัฏจักร (ISO Type) เปรียบเทียบกับ
กราฟการผลักรอาคารปกติ (Pushover) ในโหมดที่ 1



ภาพประกอบ 31 กราฟการผลักรูปแบบแบบวัฏจักร (SPD Type) เปรียบเทียบกับ
กราฟการผลักรูปแบบปกติ (Pushover) ในโหมดที่ 1

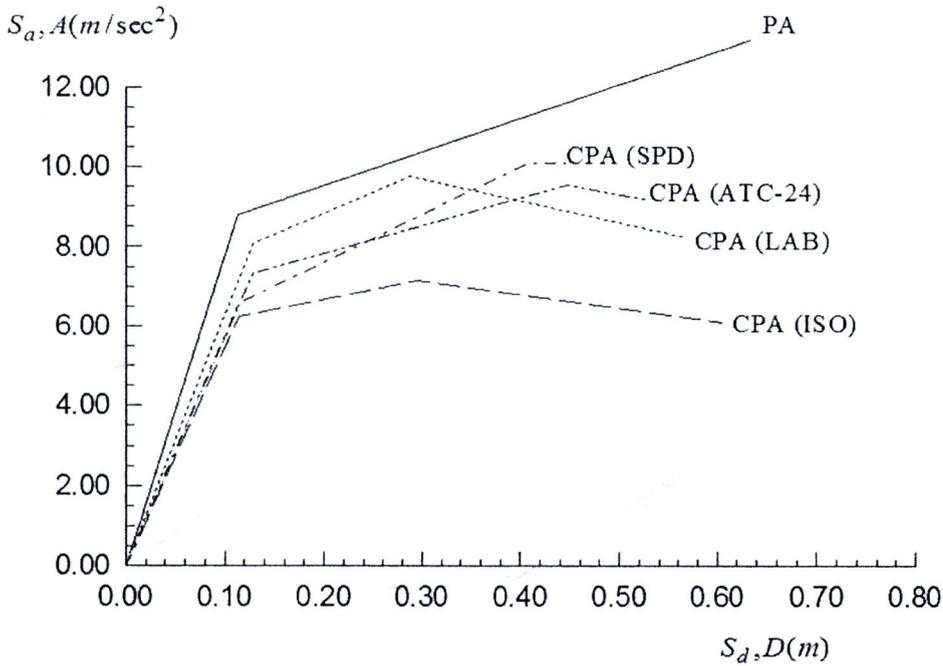
เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟการผลักรูปแบบเดิม (Pushover Curve) ซึ่งเป็นการผลักในโหมดที่ 1 พบว่า โครงสร้างเมื่อถูกแรงกระทำแบบวัฏจักรมีค่าสติฟเนสที่ลดลงมากกว่าแรงกระทำแบบด้านเดียว เนื่องจาก การเสื่อมถอยของค่าสติฟเนสของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร

เมื่อดำเนินการสร้างกราฟความสามารถต้านทานแผ่นดินไหว (Capacity Spectrum) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมของความเร่ง S_d และสเปกตรัมของการเคลื่อนที่ S_d สำหรับประวัติการเคลื่อนที่แบบ Laboratory Type ดังแสดงในภาพประกอบที่ 32 และเมื่อสร้างกราฟ Bilinear Curve โดยใช้สมมติฐานตามเอกสาร FEMA 440 ดังกล่าวข้างต้น จะได้กราฟมีลักษณะแบบ Tri-linear Curve โดยค่าความเร่งและค่าการเคลื่อนที่เท่ากับ 8.07 m/sec^2 และ 0.129 เมตร ตามลำดับ และจะได้ค่าสติฟเนสในรูปของ ω^2 และสัมประสิทธิ์ α ซึ่งเป็นการลดลงของสติฟเนสหลังจากเลยจุดครากเท่ากับ $62.56 \text{ radian/sec}^2$ และ 0.17 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟ Bilinear Curve ที่ได้จากการผลักรูปแบบเดิม (Pushover Curve) โครงสร้างมีค่าสติฟเนสที่ลดลงเนื่องจาก การเสื่อมถอยภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร

$S_a, A (m/sec^2)$


ภาพประกอบ 32 กราฟความสามารถต้านทานแผ่นดินไหว (Capacity Spectrum) จาก
การผลักรอาคารแบบวิถุจักร (CPA, Lab Type)

เมื่อนำกราฟ Bilinear ของการผลักรอาคารแบบต่างๆมาเขียนลงในรูปเดียวกันดังแสดงในภาพประกอบ 33 จะสังเกตเห็นได้ว่า กราฟการผลักรอาคารแบบวิถุจักรทั้ง 4 แบบ ให้ค่าสตีฟเนสเริ่มแรกที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรการผลักรอาคารแบบปกติ เนื่องจากคานบางชิ้นส่วนภายในโครงสร้างมีการรับแรงกระทำเกินจุดคราก จากแรงกระทำแบบไป-กลับหลายๆรอบ ซึ่งเป็นรอบแบบไม่ยืดหยุ่นหรืออินเอลลาสติก (inelastic cycles) เกิดเป็นข้อหมุนพลาสติก ซึ่งมีการดูดซับพลังงาน (Hysteretic energy) หลายๆรอบ จึงเกิดความเสียหายสะสม (cumulative damage) ในแต่ละชิ้นส่วนนั้น ทำให้เกิดการเสื่อมลดสตีฟเนสขององค์อาคารแต่ละชิ้นส่วนของภายในโครงสร้าง ภายใต้แรงกระทำหลังจุดคราก



ภาพประกอบ 33 กราฟ Bilinear ของ Capacity Spectrum จาก
การผลักอาคารแบบวิภูจักร และการผลักอาคารแบบปกติโหมดที่ 1

4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของยอดอาคาร

จากกราฟความสามารถต้านทานแผ่นดินไหว (Capacity Spectrum) โดยวิธีการผลักอาคารแบบต่างๆ จะได้ค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม Bispec ดังแสดงใน ตารางที่ 10 เพื่อหาค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของยอดอาคารในการผลักอาคาร

ตารางที่ 10 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม Bispec

Parameters	PA			CPA			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	(LAB)	(ATC)	(ISO)	(SPD)
ω^2 (radian/sec ²)	77.19	180.0	264.15	62.56	56.38	54.65	57.89
m (kip·sec ² /in.)	0.778	0.120	0.046	0.778	0.778	0.778	0.778
k (kip/in.)	60.05	21.60	12.15	48.67	43.86	42.52	45.04
F_y (kip)	269.54	255.12	253.54	247.18	224.52	190.82	202.16
Post-elastic stiffness, α	0.11	0.17	0.19	0.17	0.12	0.09	0.20



จากการคำนวณค่าการเคลื่อนที่สูงสุด ด้วยวิธี Cyclic Pushover Analysis และคำนวณเปรียบเทียบผลกับวิธี Modal Pushover Analysis และ วิธี Nonlinear Time History Analysis นำค่าที่ได้สำหรับแต้เคลื่อนแผ่นดินไหวมาแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดที่ยอดอาคาร

EQ	Results from BISPEC Umax from Pushover Analysis			Cyclic Pushover Umax from Cyclic Pushover Analysis				Nonlinear Time History Analysis
	Mode 1 (cm)	Mode 1+2 (cm)	Mode 1+2+3 (cm)	LAB (cm)	ATC-24 (cm)	ISO (cm)	SPD (cm)	(cm)
IMP-1	10.78	11.15	11.18	12.93	16.86	17.19	16.12	14.46
IMP-2	13.36	13.57	13.61	16.25	15.21	14.37	16.02	14.73
IMP-3	9.33	9.97	10.10	8.70	10.49	10.58	10.21	8.62
IMP-4	13.10	13.23	13.26	17.23	18.64	17.86	18.57	12.72
LOMA-1	4.30	4.58	4.67	4.16	4.06	4.03	4.10	3.76
LOMA-2	3.46	4.50	4.76	4.10	4.97	5.24	4.73	4.33
LOMA-3	10.68	11.19	11.23	10.38	11.48	11.69	11.25	10.17
LOMA-4	16.59	16.72	16.75	11.82	9.57	9.44	9.91	8.91
LOMA-5	15.08	15.42	15.44	25.86	29.28	27.70	26.66	29.54
LOMA-6	19.91	20.05	20.07	21.83	25.12	25.72	24.65	26.38
MAM-1	11.54	12.09	12.14	12.12	13.73	13.77	13.53	12.3
MAM-2	11.99	12.42	12.45	9.57	10.68	10.98	10.21	10.12
NAHAN-1	4.53	4.66	4.69	4.37	4.16	4.23	4.16	3.98
NAHAN-2	4.63	4.76	4.79	4.53	4.97	5.04	4.90	4.32
NORTH-1	3.86	3.96	3.98	3.56	3.26	2.99	3.39	3.3
NORTH-2	2.35	2.56	2.62	2.32	2.42	2.38	2.35	2.85
PARK-1	4.10	4.73	5.03	4.40	4.77	4.97	4.63	4.33
PARK-2	4.23	4.90	5.10	3.59	4.30	4.57	4.06	4.16
SPI-1	13.57	13.78	13.82	21.09	24.08	20.89	21.62	22.55
SPI-2	7.66	8.34	8.46	9.27	12.16	12.96	11.38	13.56
Mean	9.25	9.63	9.71	10.40	11.51	11.33	11.12	10.75
Error (%)	-13.97	-10.46	-9.70	-3.23	7.07	5.35	3.43	

ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดบนยอดอาคาร สำหรับแรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic Pushover Analysis) ให้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.40 ซม. 11.51 ซม. 11.33 ซม. 11.12 ซม. สำหรับรูปแบบ Laboratory Type, ATC-24, ISO, SPD ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ถูกต้องจากวิธี Nonlinear Time History Analysis ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.75 ซม. คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้อง ซึ่งเป็นการประเมินต่ำไปร้อยละ -3.23 (under-estimate) และเป็นการประเมินสูงไปร้อยละ 7.07, 5.35, 3.43 (over-estimate) ตามลำดับ หากพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีการผลัดแบบ Modal Pushover Analysis ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.25 ซม. 9.63 ซม. 9.71 ซม. สำหรับการผลัดแบบ 1 โหมด 2 โหมด และ 3 โหมด ตามลำดับ คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้อง ซึ่งเป็นการประเมินต่ำไปร้อยละ -13.97, -10.46, -9.70 (under-estimate) ตามลำดับ

ผลที่ได้จากวิธี Cyclic Pushover Analysis ให้ภาพรวมที่เป็นการประเมินสูงไปบ้างเล็กน้อยและให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้องมากกว่าวิธี Modal Pushover Analysis ซึ่งให้ภาพรวมเป็นการประเมินต่ำไป

ในการศึกษานี้ได้นำค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเหล่านี้มาพิจารณาเชิงสถิติเพื่อหาความแม่นยำในการประเมินผล โดยคำนวณค่าอัตราส่วนของค่าการเคลื่อนที่สูงสุดบนยอดอาคาร (Peak Roof Displacement Ratio, PDRD) ดังนี้

$$PRDR = \frac{D_{estimate}}{D_{exact}} \quad (4.1)$$

เมื่อ *PRDR* คือ ค่าอัตราส่วนของค่าการเคลื่อนที่สูงสุดบนยอดอาคาร

D_{estimate} คือ ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดบนยอดอาคารที่ได้จากการประเมิน

D_{exact} คือ ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดบนยอดอาคารที่ถูกต้อง

ค่า PDRD ที่คำนวณได้ในแต่ละวิธีสำหรับคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 20 คลื่น แสดงในตารางที่ 12 เมื่อนำค่า PDRD ที่คำนวณได้ของแต่ละวิธีมาหาจำนวนของค่า PDRD ในแต่ละช่วง และคำนวณค่าความถี่ของจำนวนข้อมูลในแต่ละช่วง เทียบกับจำนวนข้อมูลทั้งหมด จะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 13 และนำมาเขียนเป็นกราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PDRD และ ค่าความถี่ของข้อมูล (Frequency, %) แสดงในภาพประกอบ 34

ตารางที่ 12 ค่า PDRD และค่าความถี่ของข้อมูล

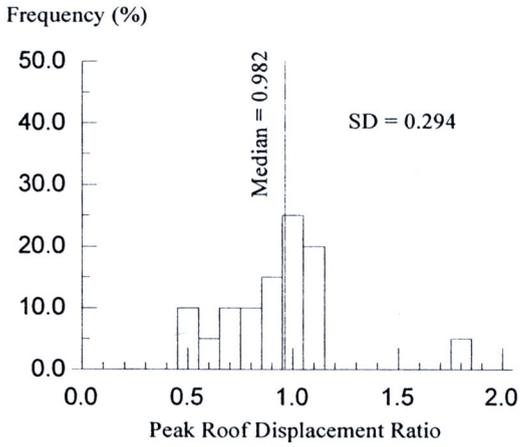
คลื่นแผ่นดินไหว EQ	ค่าอัตราส่วนของค่าการเคลื่อนที่สูงสุดบนยอดอาคาร					
	MPA (1 Mode)	MPA (3 Modes)	LAB	ATC-24	ISO	SPD
IMP-1	0.745	0.773	0.894	1.166	1.189	1.115
IMP-2	0.907	0.924	1.103	1.033	0.976	1.087
IMP-3	1.083	1.171	1.009	1.217	1.227	1.184
IMP-4	1.030	1.042	1.354	1.465	1.404	1.460
LOMA-1	1.143	1.243	1.106	1.081	1.072	1.090
LOMA-2	0.799	1.098	0.946	1.148	1.210	1.093
LOMA-3	1.050	1.105	1.020	1.129	1.149	1.106
LOMA-4	1.862	1.880	1.327	1.074	1.059	1.112
LOMA-5	0.510	0.523	0.875	0.991	0.938	0.903
LOMA-6	0.755	0.761	0.827	0.952	0.975	0.934
MAM-1	0.938	0.987	0.986	1.117	1.119	1.100
MAM-2	1.185	1.230	0.946	1.055	1.085	1.009
NAHAN-1	1.139	1.178	1.097	1.046	1.063	1.046
NAHAN-2	1.073	1.109	1.049	1.150	1.166	1.135
NORTH-1	1.170	1.207	1.079	0.987	0.906	1.028
NORTH-2	0.825	0.918	0.813	0.848	0.837	0.825
PARK-1	0.946	1.162	1.016	1.101	1.148	1.070
PARK-2	1.017	1.227	0.864	1.033	1.098	0.977
SPI-1	0.602	0.613	0.935	1.068	0.926	0.959
SPI-2	0.565	0.624	0.683	0.896	0.956	0.839
Median	0.982	1.101	0.997	1.071	1.078	1.079
Mean	0.967	1.039	0.996	1.078	1.075	1.054
Standard Deviation	0.294	0.300	0.161	0.129	0.135	0.137

ตารางที่ 13 ช่วงของค่า PDRD และความถี่ของข้อมูล

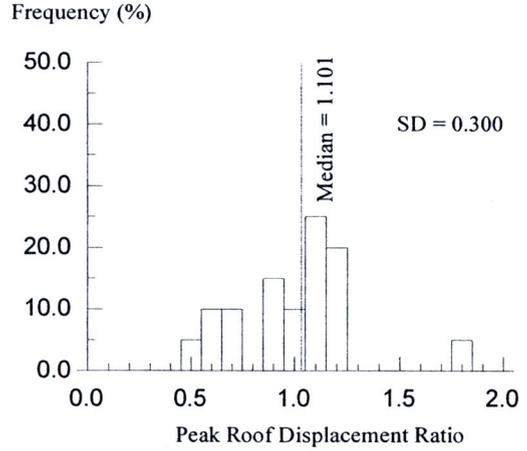
ช่วงของค่า PDRD	ค่า PDRD ที่ใช้เป็น กราฟแท่ง	ความถี่ของข้อมูล (Frequency, %)					
		MPA (1 Mode)	MPA (3 Modes)	LAB	ATC-24	ISO	SPD
0.00-0.09	0	0	0	0	0	0	0
0.10-0.19	0.1	0	0	0	0	0	0
0.20-0.29	0.2	0	0	0	0	0	0
0.30-0.39	0.3	0	0	0	0	0	0
0.40-0.49	0.4	0	0	0	0	0	0
0.50-0.59	0.5	10	5	0	0	0	0
0.60-0.69	0.6	5	10	5	0	0	0
0.70-0.79	0.7	10	10	0	0	0	0
0.80-0.89	0.8	10	0	25	10	5	10
0.90-0.99	0.9	15	15	20	15	30	20
1.00-1.09	1.0	25	10	25	35	25	35
1.10-1.19	1.1	20	25	15	30	25	30
1.20-1.29	1.2	0	20	0	5	10	0
1.30-1.39	1.3	0	0	10	0	0	0
1.40-1.49	1.4	0	0	0	5	5	5
1.50-1.59	1.5	0	0	0	0	0	0
1.60-1.69	1.6	0	0	0	0	0	0
1.70-1.79	1.7	0	0	0	0	0	0
1.80-1.89	1.8	5	5	0	0	0	0
1.90-1.99	1.9	0	0	0	0	0	0
2.00-2.09	2.0	0	0	0	0	0	0

จากตารางที่ 12-13 และภาพประกอบ 34 ผลการประเมินด้วยวิธีการผลักอาคารแบบวัฏจักร (Cyclic Pushover Analysis) ให้ค่ามัธยฐาน (Median) ของอัตราส่วนของการเคลื่อนที่สูงสุดบนยอดอาคาร (PDRD) เท่ากับ 0.997, 1.071, 1.078, 1.079 และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) เท่ากับ 0.161, 0.129, 0.135, 0.137 สำหรับรูปแบบ Laboratory Type, ATC-24, ISO, SPD ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้องมาก (PDRD = 1.00) และยังมีค่าความเบี่ยงเบนที่อยู่ในเกณฑ์ดี

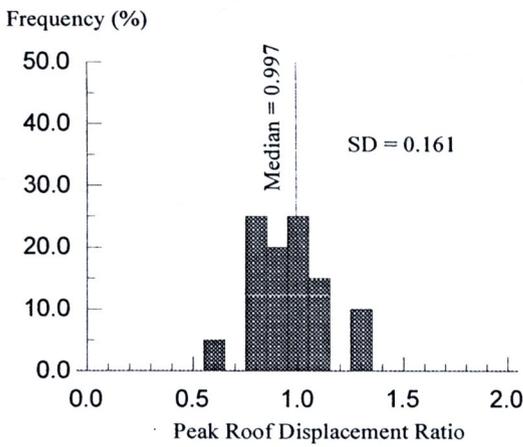
เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Modal Pushover Analysis ให้ค่ามัธยฐาน (Median) ของอัตราส่วนของการเคลื่อนที่สูงสุดบนยอดอาคาร (PDRD) เท่ากับ 0.982, 1.101 และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) เท่ากับ 0.294, 0.300 สำหรับการผลักแบบ 1 โหมด และ 3 โหมด ตามลำดับ พบว่าวิธีการผลักอาคารแบบวัฏจักร (Cyclic Pushover Analysis) ให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้องมากกว่าและยังมีค่าความเบี่ยงเบนน้อยกว่าวิธี Modal Pushover Analysis



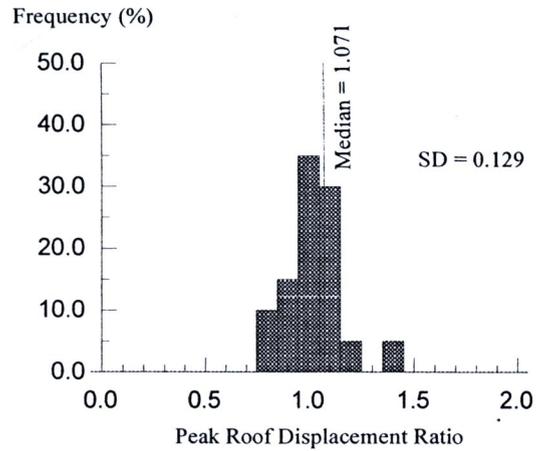
a) PA - 1 mode



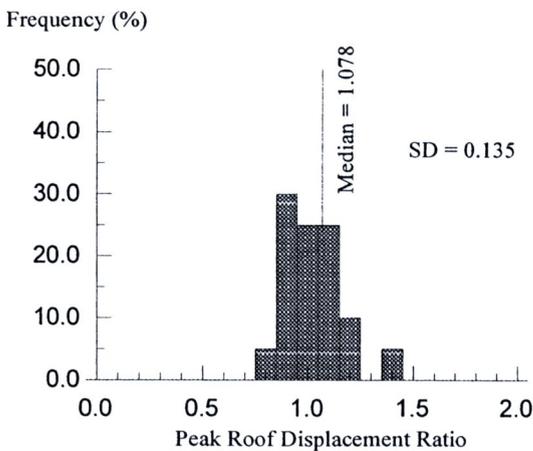
b) MPA - 3 modes



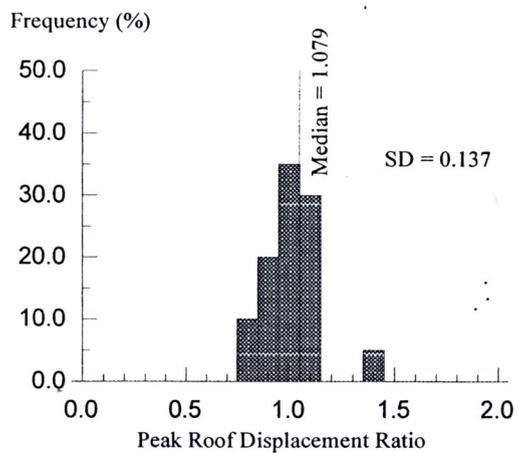
c) CPA - LAB Type



d) CPA - ATC-24 Type



e) CPA - ISO Type

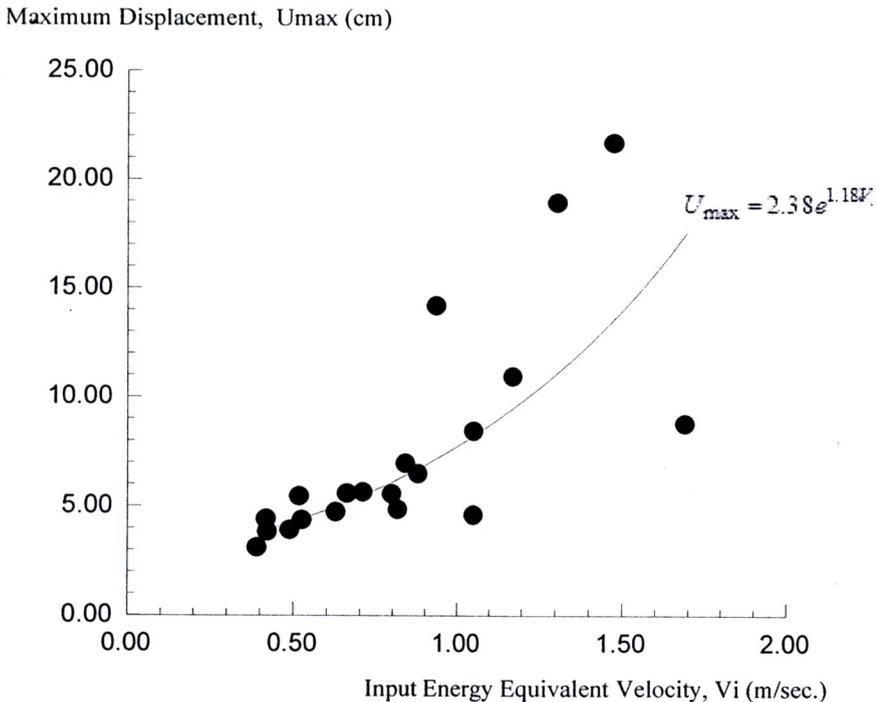


f) CPA - SPD Type

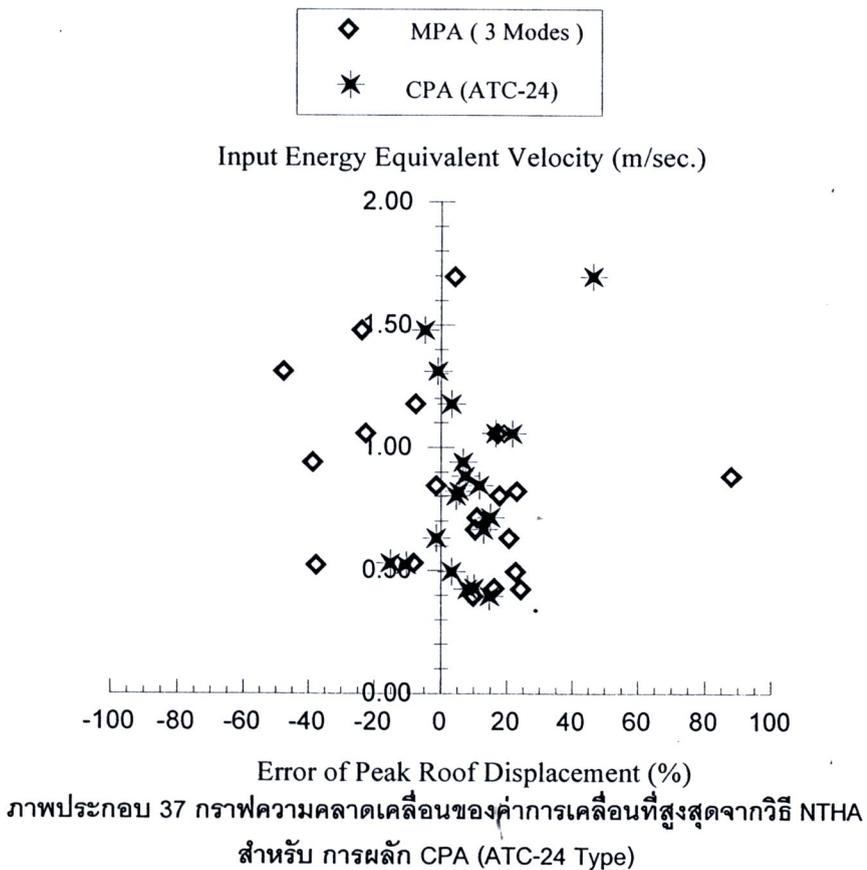
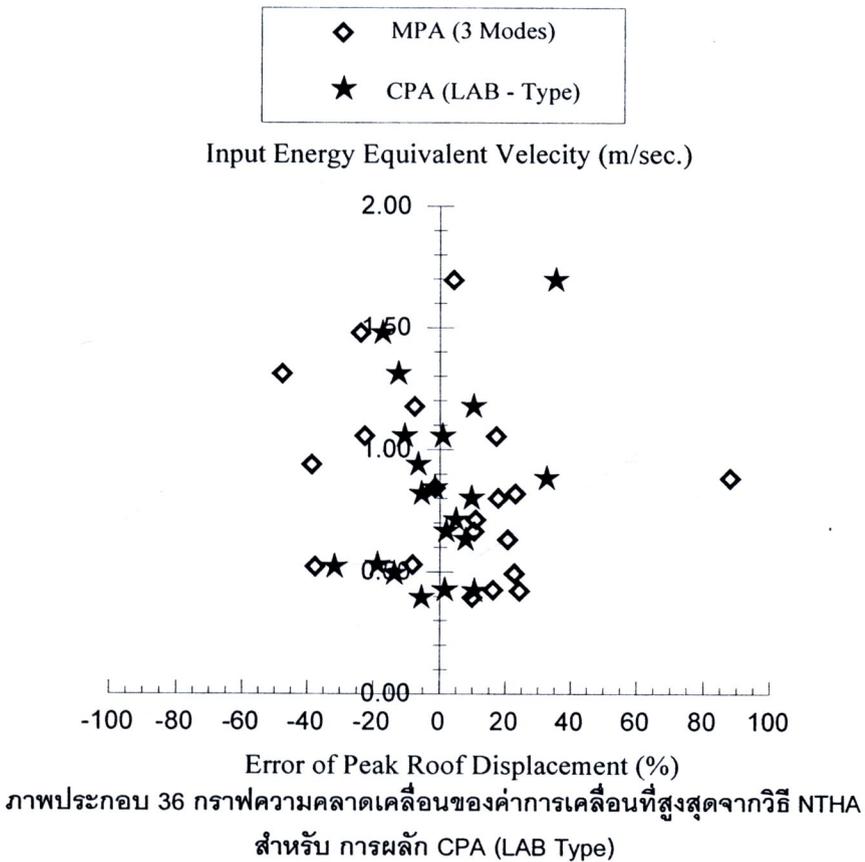
ภาพประกอบ 34 กราฟแท่งสำหรับค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่บนยอดอาคารภายใต้แรงกระทำแบบต่างๆ

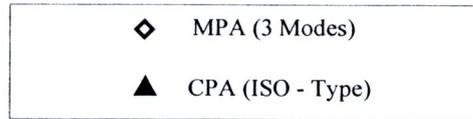
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนที่สูงสุดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว 10 ชุด และค่าความเร็วเทียบเท่า $V_I(\mu = 4)$ แสดงในภาพประกอบ 35 ซึ่งแสดงว่าค่าการเคลื่อนที่สูงสุดมีการเพิ่มค่าเป็นสัดส่วนแบบเอ็กโพเนนเชียลกับพลังงานจากคลื่นแผ่นดินไหวในรูปแบบของความเร็วเทียบเท่า ดังนั้น จึงพิจารณาใช้ค่าความเร็วเทียบเท่า $V_I(\mu = 4)$ ซึ่งคำนวณสำหรับค่าความเหนียวของโครงสร้างเท่ากับ 4 เป็นตัวประกอบเพื่อเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเมื่อคำนวณโดยวิธีต่างๆกัน

ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการประเมินค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของวิธี Cyclic Pushover Analysis (CPA) และ Modal Pushover Analysis (MPA, 3 modes) เทียบกับวิธี Nonlinear Time History Analysis (NTHA) แสดงในภาพประกอบ 36-39 จากภาพเหล่านี้ แสดงว่า ผลการคำนวณจากวิธี CPA มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้องจากวิธี NTHA หลายจุด และมีค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงกระจายตัวในช่วงแคบกว่าค่าจากวิธี MPA

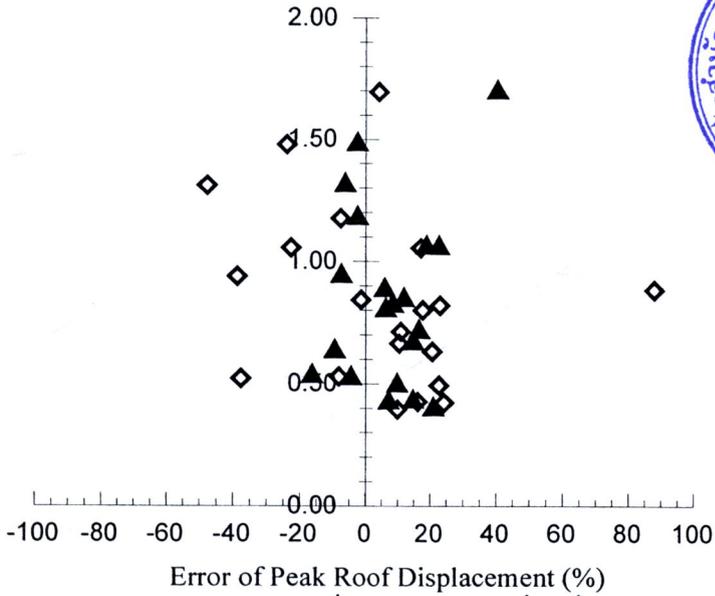


ภาพประกอบ 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนที่สูงสุดและค่าความเร็วเทียบเท่า $V_I(\mu = 4)$

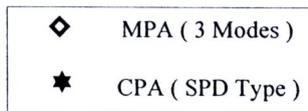




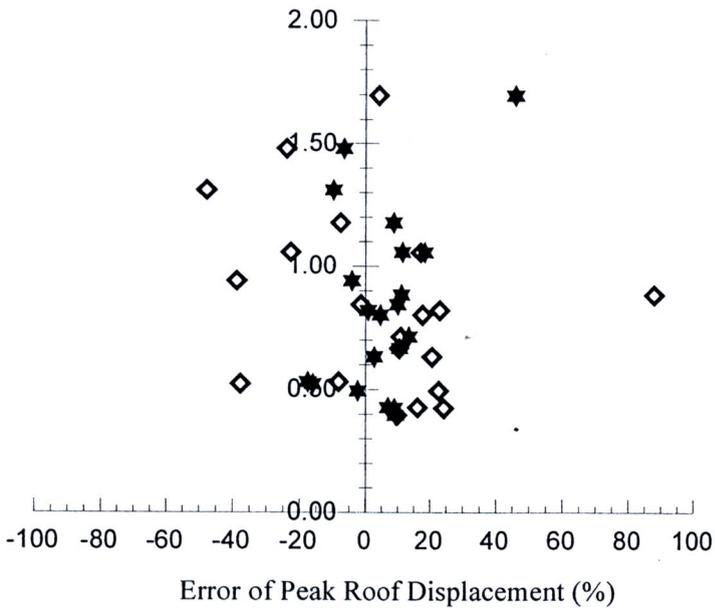
Input Energy Equivalent Velocity (m/sec.)



ภาพประกอบ 38 กราฟความคลาดเคลื่อนของค่าการเคลื่อนที่สูงสุดจากวิธี NTHA สำหรับ การผลัก CPA (ISO Type)



Input Energy Equivalent Velocity (m/sec.)



ภาพประกอบ 39 กราฟความคลาดเคลื่อนของค่าการเคลื่อนที่สูงสุดจากวิธี NTHA สำหรับ การผลัก CPA (SPD Type)

ตารางที่ 14 ค่าความคลาดเคลื่อนจากวิธี NTHA สำหรับค่าการเคลื่อนที่สูงสุดที่ยอดอาคาร

Earthquakes	Cyclic Pushover Analysis				Modal Pushover Analysis		
	% Error				% Error		
	LAB	ATC-24	ISO	SPD	1 Mode	2 Modes	3 Modes
IMP-1	-10.60	16.57	18.90	11.46	-25.46	-22.89	-22.66
IMP-2	10.33	3.27	-2.43	8.74	-9.27	-7.85	-7.61
IMP-3	0.89	21.73	22.71	18.42	8.29	15.69	17.12
IMP-4	35.42	46.51	40.44	45.98	2.95	4.04	4.23
LOMA-1	10.56	8.06	7.17	8.95	14.31	21.71	24.30
LOMA-2	-5.39	14.77	20.98	9.34	-20.12	3.93	9.83
LOMA-3	2.02	12.92	14.90	10.61	5.00	10.06	10.45
LOMA-4	32.66	7.41	5.90	11.18	86.17	87.66	87.99
LOMA-5	-12.47	-0.88	-6.22	-9.74	-48.96	-47.80	-47.73
LOMA-6	-17.26	-4.79	-2.50	-6.57	-24.52	-23.98	-23.92
MAM-1	-1.45	11.66	11.93	10.02	-6.20	-1.69	-1.33
MAM-2	-5.44	5.51	8.50	0.87	18.45	22.72	23.02
NAHAN-1	9.68	4.62	6.30	4.62	13.90	17.02	17.76
NAHAN-2	4.93	15.04	16.59	13.48	7.27	10.15	10.89
NORTH-1	7.86	-1.30	-9.44	2.77	17.02	19.85	20.66
NORTH-2	-18.70	-15.17	-16.35	-17.53	-17.53	-10.12	-8.20
PARK-1	1.59	10.12	14.77	7.02	-5.39	9.23	16.15
PARK-2	-13.63	3.32	9.78	-2.33	1.71	17.85	22.72
SPI-1	-6.49	6.77	-7.38	-4.10	-39.84	-38.88	-38.73
SPI-2	-31.65	-10.36	-4.41	-16.05	-43.54	-38.50	-37.63

ตารางที่ 15 ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากวิธี NTHA สำหรับค่าการเคลื่อนที่สูงสุดที่ยอดอาคาร

Mean	Cyclic Pushover Analysis				Modal Pushover Analysis		
	LAB	ATC	ISO	SPD	1 Mode	2 Modes	3 Modes
Mean Error over NTHA (%)	11.59	12.55	15.30	11.68	17.51	19.99	22.09
Mean Error under NTHA (%)	-12.31	-6.50	-6.96	-9.39	-24.08	-23.96	-23.48
Mean Absolute Error from NTHA (%)	11.95	11.04	12.38	10.99	20.79	21.58	22.65

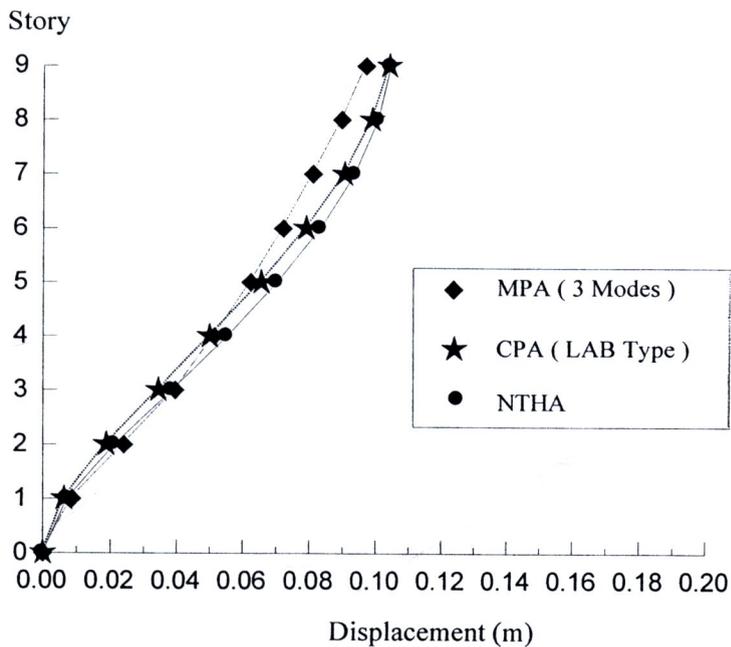
จากผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการเคลื่อนที่สูงสุดบนยอดอาคารเปรียบเทียบกับวิธี NTHA ดังแสดงในภาพประกอบ 36-39 และตารางที่ 14-15 พบว่า ผลการคำนวณโดยวิธีการผลักแบบวัฏจักร(CPA) มีค่าความคลาดเคลื่อน ในด้านที่สูงกว่าค่าที่ถูกต้องเท่ากับ 11.59%, 12.55%, 15.30%, 11.68% และด้านที่ต่ำกว่าค่าที่ถูกต้องเท่ากับ -12.31%, -6.50%, -6.96%, -9.39% และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 11.95%, 11.04%, 12.38%, 10.99% สำหรับรูปแบบ Laboratory Type, ATC-24, ISO, SPD ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

ในขณะที่ค่าที่คำนวณโดยวิธี MP ให้ผลที่คลาดเคลื่อนมากกว่า ทั้งในด้านที่สูงกว่า (การผลักแบบ 1 โหมด = 17.51% แบบรวม 2 โหมด = 19.99% แบบรวม 3 โหมด = 22.09%) และด้านที่ต่ำกว่า (การผลักแบบ 1 โหมด = -24.08%, แบบรวม 2 โหมด = -23.96%, แบบรวม 3 โหมด = -23.48%) โดยมีค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน ในการผลักแบบ 1 โหมด เท่ากับ 20.79% แบบรวม 2 โหมด = 21.58% แบบรวม 3 โหมด = 22.65% ในกรณีการผลักแบบรวมโหมด จะสังเกตได้ว่า ให้ค่าความแตกต่างเพิ่มมากขึ้นเมื่อพิจารณารวมโหมดที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าการเคลื่อนที่สูงสุดที่คำนวณด้วยวิธี MPA ให้ผลที่สูงกว่าค่าที่ถูกต้อง (NTHA) เป็นจำนวนมาก เมื่อรวมผลจากโหมดที่สูงขึ้น ทำให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นเกินจากค่าที่ถูกต้องยิ่งขึ้นไปอีก

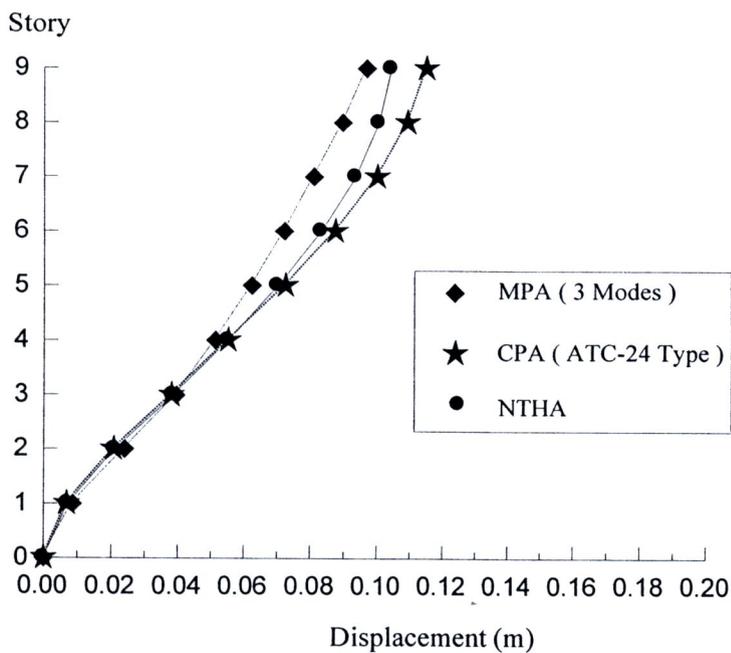
ในขณะที่ผลการคำนวณโดยวิธีการผลักแบบวัฏจักรให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้องมากกว่า เนื่องจากโครงสร้างมีค่าสติเฟนสที่ลดลงเนื่องจาก การเสื่อมถอยภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร ทำให้ความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่ลดลง ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่สอดคล้องกับพฤติกรรมโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว เป็นผลทำให้ ค่าการเคลื่อนที่เข้าใกล้กับค่าที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นอาคาร

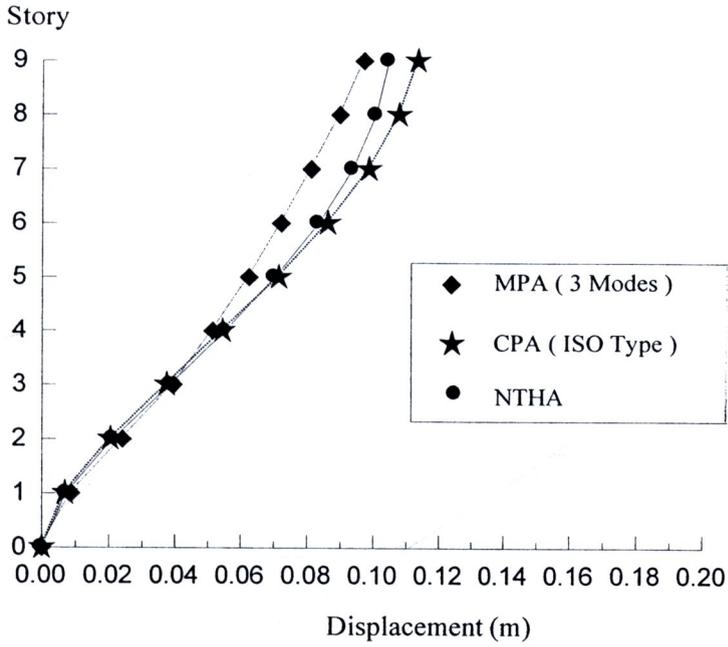
ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นอาคารสำหรับวิธีการผลักแบบวัฏจักรเปรียบเทียบกับวิธีการผลักแบบรวมโหมด และวิธีที่ถูกต้อง NTHA แสดงในภาพประกอบ 40-43



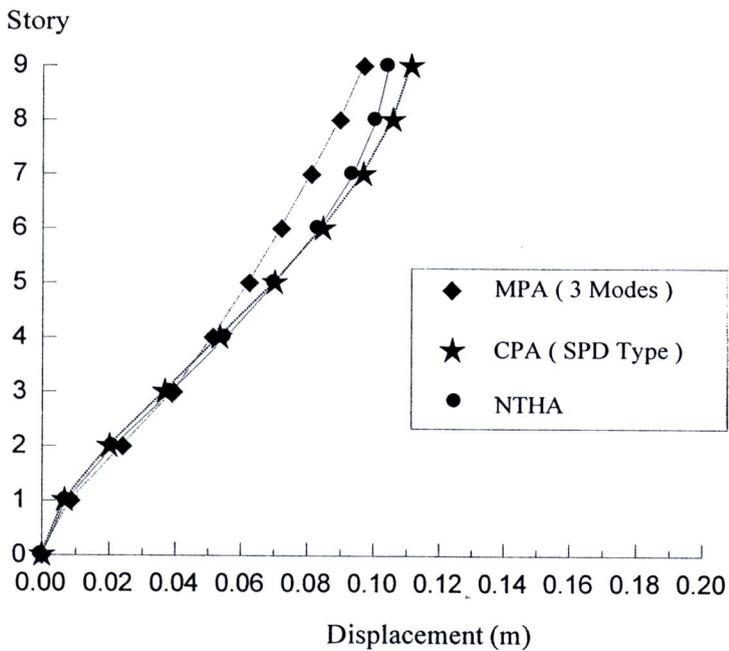
ภาพประกอบ 40 ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่สูงสุดของชั้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 10 ชุด สำหรับ การผลัก Cyclic Pushover (LAB-Type)



ภาพประกอบ 41 ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่สูงสุดของชั้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 10 ชุด สำหรับ การผลัก Cyclic Pushover (ATC-24 Type)



ภาพประกอบ 42 ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่สูงสุดของชั้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 10 ชุด
สำหรับ การผลัก Cyclic Pushover (ISO-Type)



ภาพประกอบ 43 ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่สูงสุดของชั้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 10 ชุด
สำหรับ การผลัก Cyclic Pushover (SPD-Type)

ตารางที่ 16 ค่าความคลาดเคลื่อนจากวิธี NTHA
สำหรับค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นอาคาร

Story Level	Cyclic Pushover Error (%)				Modal Pushover Error (%)		
	LAB	ATC	ISO	SPD	1 Mode	2 Modes	3 Modes
Roof	-0.34	10.26	8.53	6.54	-11.37	-7.76	-7.10
8	-1.77	8.68	6.97	5.01	-12.64	-10.88	-10.86
7	-3.26	7.03	5.35	3.42	-13.97	-13.84	-13.35
6	-5.00	5.10	3.45	1.56	-15.52	-14.63	-13.32
5	-6.54	3.40	1.77	-0.09	-16.89	-11.56	-11.07
4	-9.43	0.20	-1.37	-3.18	-19.46	-7.13	-6.93
3	-10.50	-0.98	-2.53	-4.32	-20.40	-0.63	2.81
2	-10.77	-1.28	-2.83	-4.61	-20.65	5.18	14.16
1	-12.26	-2.93	-4.46	-6.21	-21.97	7.96	21.40
G	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 17 ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากวิธี NTHA
สำหรับค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นอาคาร

Mean	Cyclic Pushover				Modal Pushover		
	LAB	ATC	ISO	SPD	1 Mode	2 Modes	3 Modes
Mean Error over NTHA (%)	0	5.78	5.22	4.13	0	6.57	12.79
Mean Error under NTHA (%)	-6.65	-1.73	-2.80	-3.68	-16.99	-9.49	-10.44
Mean Absolute Error from NTHA (%)	6.65	4.43	4.14	3.88	16.99	8.84	11.22

จากภาพประกอบ 40-43 และตารางที่ 16-17 พบว่า ผลการประเมินค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นอาคารด้วยวิธีการผลัดแบบวัฏจักร มีค่าใกล้เคียงกับวิธีที่ถูกต้อง NTHA โดยเฉพาะในส่วนชั้นที่ 2-6 แต่มีค่าที่เบี่ยงเบนไปจากค่าที่ถูกต้องตั้งแต่ชั้นที่ 7 ถึงชั้นหลังคาและชั้นล่าง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลกระทบของโหมดที่สูงขึ้นไป ทำให้ผลค่าการเคลื่อนที่จากวิธี NTHA น้อยลงในชั้นที่ 1 และชั้นบนยอดอาคาร เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นที่ 2-6

ผลการคำนวณโดยวิธีการผลักแบบวัฏจักรให้ค่าใกล้เคียงกับวิธีที่ถูกต้องมากกว่าวิธีการผลักแบบรวมโหมด โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยตลอดความสูงอาคารเพียง 6.65%, 4.43%, 4.14%, 3.88% สำหรับรูปแบบ Laboratory Type, ATC-24, ISO, SPD ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความแตกต่างจากการผลักแบบโหมดที่ 1 = 16.99% แบบรวม 2 โหมด = 8.84% แบบรวม 3 โหมด = 11.22%

สาเหตุที่ การผลักแบบวัฏจักรนี้ให้ผลการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับวิธีที่ถูกต้อง เนื่องจาก การผลักแบบวัฏจักร ทำให้องค์อาคารบางชั้นส่วนมีการเคลื่อนที่เกินจุดครากเป็นผลทำให้ค่าสติเฟเนสลดลงตามรอบการผลักที่มากขึ้นจากการเชื่อมลดกำลังต้านทานของโครงสร้างคอนกรีต

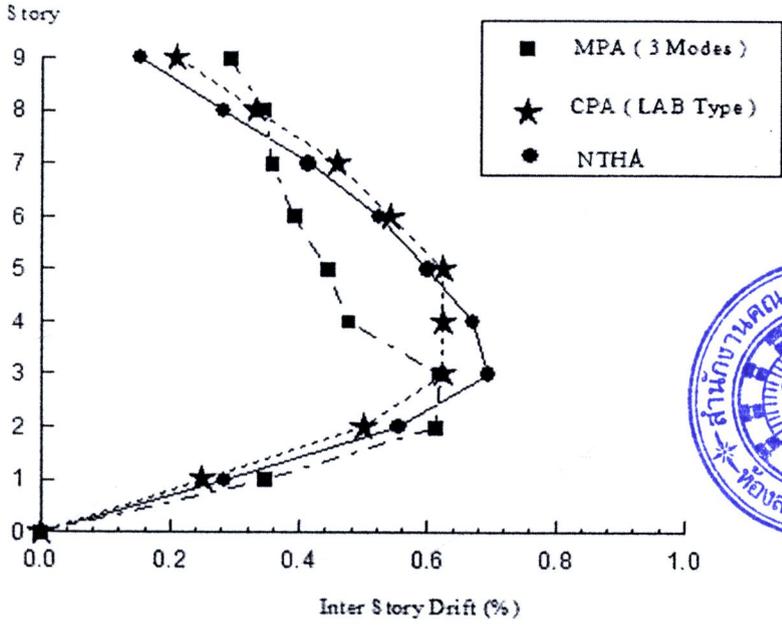
เป็นที่น่าสังเกตว่า การผลักแบบวัฏจักรไม่ได้ให้ผลการเคลื่อนที่มากกว่าการผลักแบบรวมโหมดสำหรับทุกๆ คลื่นแผ่นดินไหว บางคลื่นแผ่นดินไหว ได้แก่ LOMA-1, LOMA-4, MAM-2, NORTH-1, PARK-2 กลับให้ผลการผลักแบบวัฏจักรที่น้อยกว่าการผลักแบบรวมโหมดเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก คลื่นแผ่นดินไหว มีค่าความถี่ที่สอดคล้องกันกับค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ที่มาจากค่าสติเฟเนสของโครงสร้างสำหรับการผลักแบบรวมโหมดมากกว่า

อย่างไรก็ตาม การใช้เส้นโค้งขอบนอกในการพิจารณาค่าสติเฟเนสของโครงสร้าง ควรคำนึงพฤติกรรมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรมากกว่า เนื่องจากเป็นพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับแรงแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการเชื่อมลดกำลังและค่าสติเฟเนสของโครงสร้าง ซึ่งเป็นผลให้ค่าความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้างลดลง พฤติกรรมนี้จะเห็นได้ชัดเจนในกรณีคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่ในช่วงแบบแคบ (Narrowband ground motion) และมีระยะเวลาการสั่นยาวนาน ได้แก่ คลื่นแผ่นดินไหว LOMA-5, LOMA-6 ทำให้เกิดการสั่นในช่วงอินฮิสตริกหลายรอบ และมีค่าการเคลื่อนที่สูงเป็นผลให้ค่าการเคลื่อนที่สำหรับการผลักแบบวัฏจักร มีค่าสูงกว่าผลของการผลักแบบรวมโหมดมาก

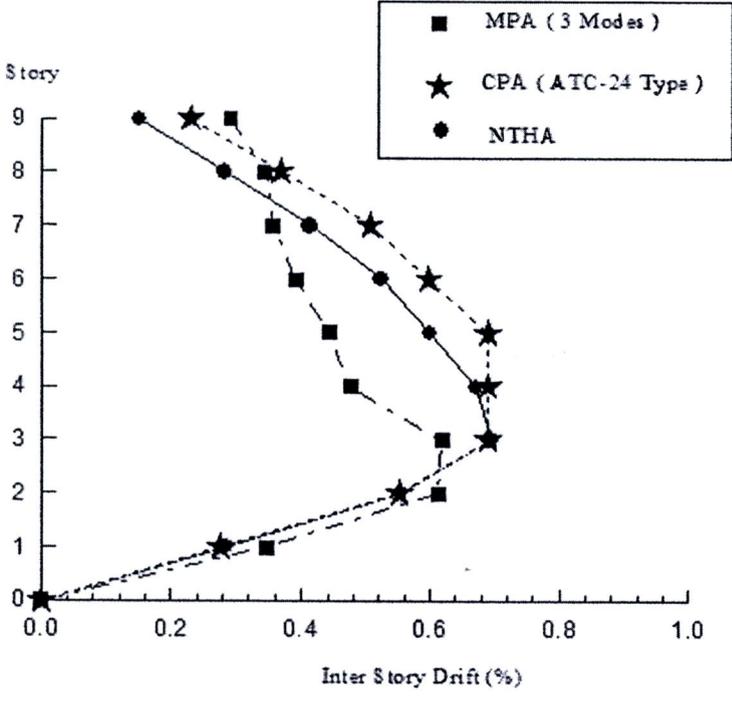
สำหรับในกรณีที่ การศึกษาในโครงสร้างอื่น อาจพบว่าการผลักแบบรวมโหมดให้ผลค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่มากกว่าค่าเฉลี่ยที่ถูกต้องจากวิธี NTHA จะทำให้ผลที่ได้จากการผลักแบบวัฏจักรมีแนวโน้มมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ถูกต้องจากวิธี NTHA ด้วย

4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดของแต่ละชั้นอาคาร

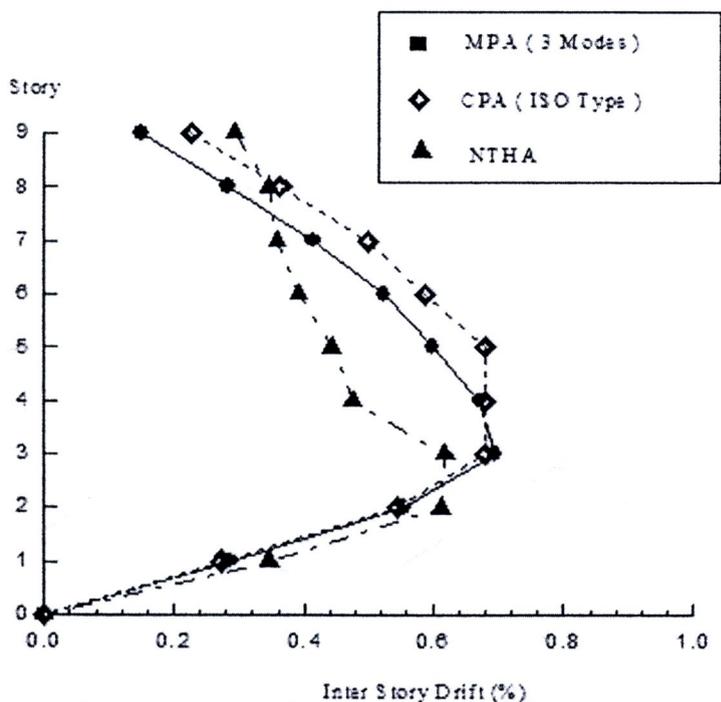
ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดของแต่ละชั้นอาคารสำหรับวิธีการผลักแบบวัฏจักรเปรียบเทียบกับวิธีการผลักแบบรวมโหมด และวิธีที่ถูกต้อง NTHA แสดงในภาพประกอบ 44-47



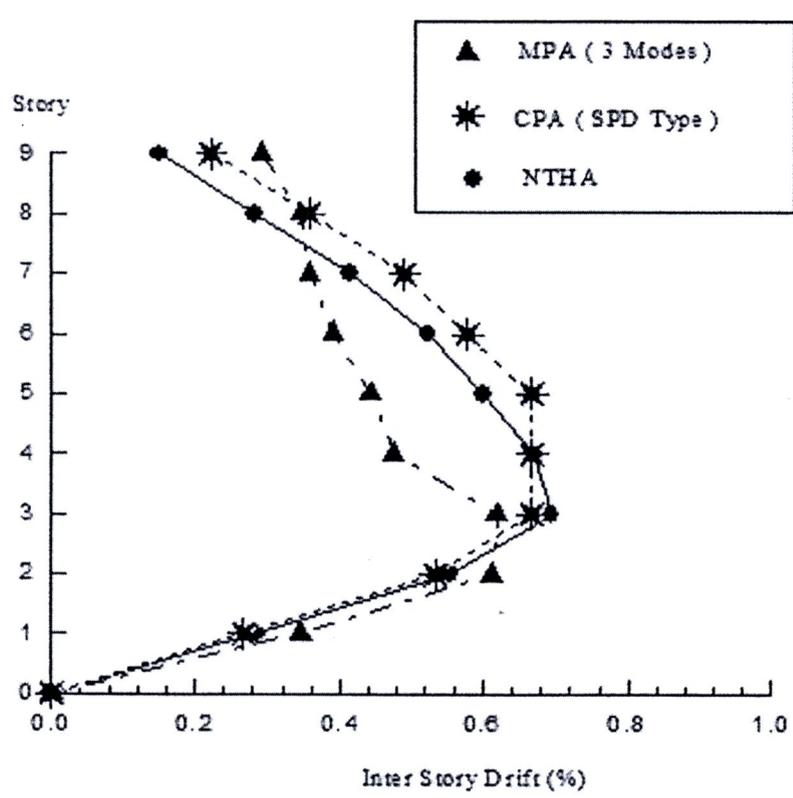
ภาพประกอบ 44 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 10 ชุด สำหรับการผลึก Cyclic Pushover (LAB-Type)



ภาพประกอบ 45 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 10 ชุด สำหรับการผลึก Cyclic Pushover (ATC-24 Type)



ภาพประกอบ 46 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 10 ชุด สำหรับการผลึก Cyclic Pushover (ISO Type)



ภาพประกอบ 47 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 10 ชุด สำหรับการผลึก Cyclic Pushover (SPD Type)

ตารางที่ 18 ค่าความคลาดเคลื่อนจากวิธี NTHA
สำหรับค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดของแต่ละชั้นอาคาร

Story Level	Cyclic Pushover Error (%)				Modal Pushover Error (%)		
	LAB	ATC	ISO	SPD	1 Mode	2 Modes	3 Modes
Roof	37.80	52.46	50.07	47.32	22.55	75.56	92.97
8	17.98	30.52	28.48	26.12	4.92	28.38	22.21
7	10.79	22.57	20.65	18.44	-1.47	-7.54	-13.57
6	3.25	14.23	12.44	10.38	-8.18	-31.05	-25.37
5	4.07	15.14	13.34	11.26	-7.44	-27.82	-26.29
4	-7.00	2.89	1.28	-0.57	-17.29	-22.01	-29.21
3	-10.17	-0.61	-2.17	-3.96	-20.11	-7.64	-10.90
2	-10.00	-0.43	-1.99	-3.79	-19.96	3.75	10.44
1	-12.26	-2.93	-4.46	-6.21	-21.97	7.96	21.40
G	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 19 ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากวิธี NTHA
สำหรับค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นอาคาร

Mean	Cyclic Pushover				Modal Pushover		
	LAB	ATC	ISO	SPD	1 Mode	2 Modes	3 Modes
Mean Error over NTHA (%)	14.77	22.97	21.04	22.70	13.73	28.91	36.75
Mean Error under NTHA (%)	-9.86	-1.33	-2.87	-3.63	-13.78	-19.21	-21.07
Mean Absolute Error from NTHA (%)	12.59	15.76	14.99	14.23	13.77	23.52	28.04

จากภาพประกอบ 44-47 และตารางที่ 18-19 พบว่า การผลึกแบบวัฏจักรให้ผลการประเมินค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดของแต่ละชั้นอาคาร ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตลอดความสูงอาคารเท่ากับ 12.59%, 15.76%, 14.99%, 14.23% สำหรับรูปแบบ Laboratory Type, ATC-24, ISO, SPD ตามลำดับ อยู่ในเกณฑ์ที่ดีกว่าผลของการผลึกแบบรวมไหมด ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตลอด

ความสูงอาคาร สำหรับการผลึกแบบ 1 โหมด = 13.77% การผลึกแบบ 2 โหมด = 23.52% การผลึกแบบ 3 โหมด = 28.04%

4.5 ค่าดัชนีความเสียหาย

ในศึกษานี้ได้คำนวณหาค่าระดับความเสียหายของโครงสร้างเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีการผลึกอาคารแบบวิจจักร โดยการผลึกไปที่ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดบนยอดอาคารตามที่ได้คำนวณไว้แสดงในตารางที่ 11 สำหรับค่าการเคลื่อนที่ของวิธีการผลึกอาคารแบบวิจจักรแบบต่างๆแสดงในตารางที่ 20 และพิจารณาการเกิดข้อหมุนพลาสติกและค่าดัชนีความเสียหาย และเปรียบเทียบกับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Analysis) ในที่นี้ แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหว IMP-1 สำหรับการผลึกแบบวิจจักรด้วยรูปแบบการเคลื่อนที่ LAB-Type, ATC-24, ISO, SPD แสดงในภาพประกอบ 48-51ตามลำดับ

ตารางที่ 20 ค่าประวัติการเคลื่อนที่สำหรับการผลึกแบบวิจจักรเทียบกับคลื่นแผ่นดินไหว IMP-1

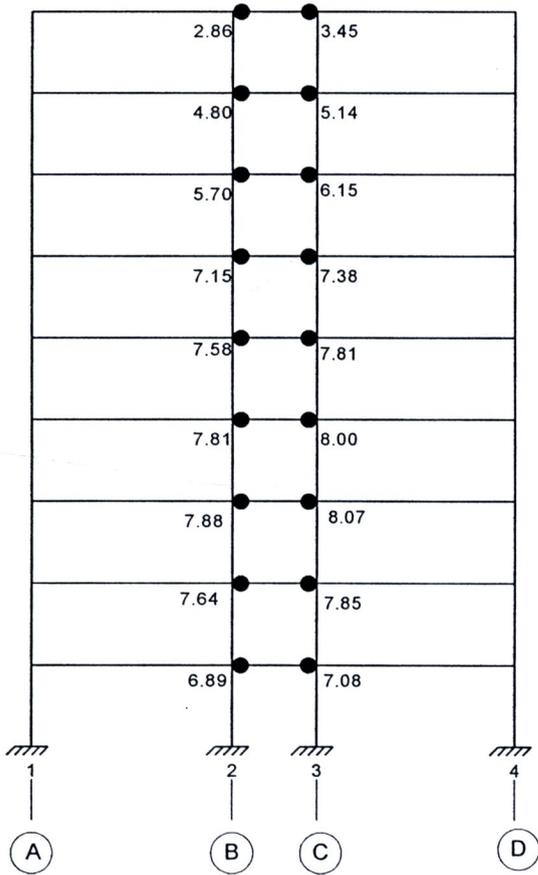
ค่าประวัติการเคลื่อนที่ (เมตร)							
LAB-Type		ATC-24		ISO		SPD	
0.0969	-0.0969	0.0809	-0.0809	0.0103	-0.0103	0.0403	-0.0403
0.1293	-0.1293	0.0809	-0.0809	0.0155	-0.0155	0.0403	-0.0403
0.1293	-0.1293	0.0809	-0.0809	0.0155	-0.0155	0.0403	-0.0403
0.1293	-0.1293	0.1214	-0.1214	0.0309	-0.0309	0.0806	-0.0806
		0.1214	-0.1214	0.0309	-0.0309	0.0806	-0.0806
		0.1214	-0.1214	0.0309	-0.0309	0.0806	-0.0806
		0.1619	-0.1619	0.0722	-0.0722	0.1290	-0.1290
		0.1619	-0.1619	0.0722	-0.0722	0.1290	-0.1290
		0.1619	-0.1619	0.0722	-0.0722	0.1290	-0.1290
		0.1686	-0.1686	0.1031	-0.1031	0.1612	-0.1612
		0.1686	-0.1686	0.1031	-0.1031	0.1290	-0.1290
		0.1686	-0.1686	0.1031	-0.1031	0.0806	-0.0806
				0.1341	-0.1341	0.0403	-0.0403
				0.1341	-0.1341	0.1612	-0.1612
				0.1341	-0.1341	0.1612	-0.1612
				0.1753	-0.1753	0.1612	-0.1612
				0.1753	-0.1753		
				0.1753	-0.1753		



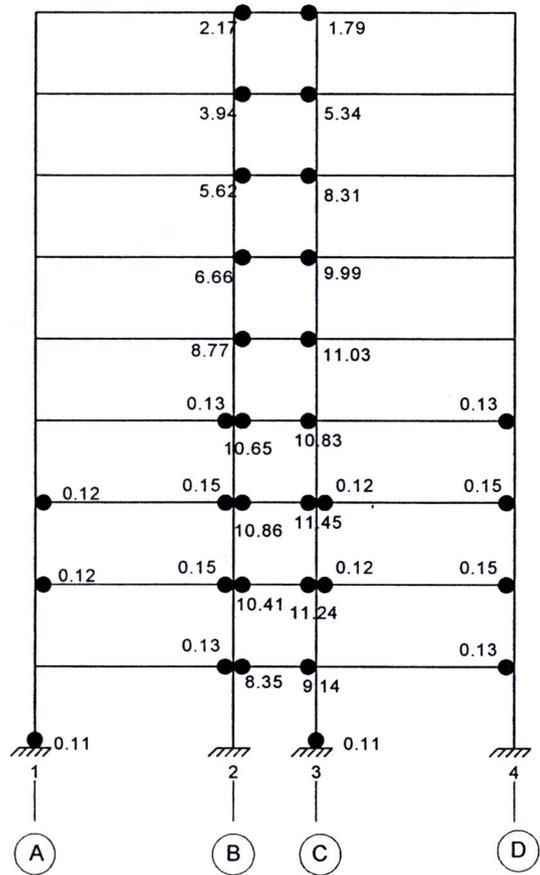
Mean damage index = 2.24

● Damage Index

Mean damage index = 2:20



a) Cyclic Pushover Analysis, CPA (LAB-Type)



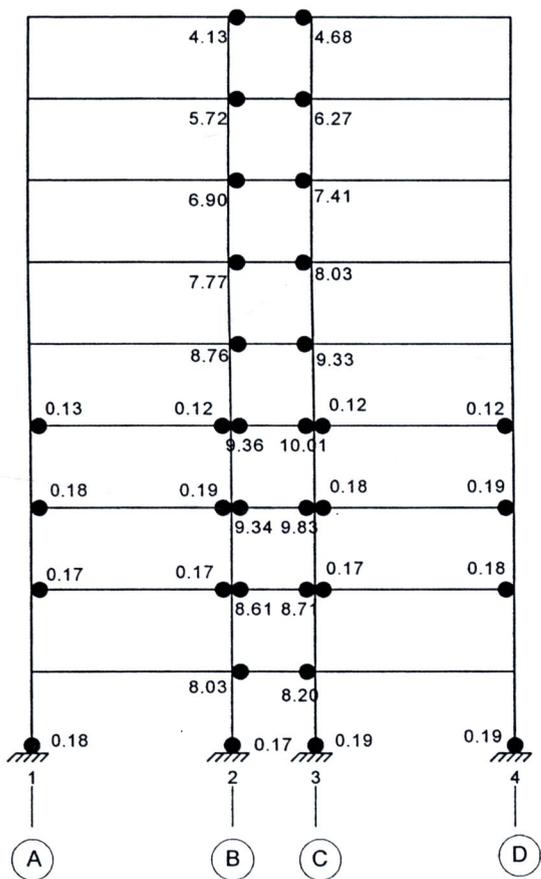
b) Nonlinear Time History Analysis, NTHA (IMP-1)

ภาพประกอบ 48 การเกิดข้อหมุนพลาสติกและค่าดัชนีความเสียหาย
สำหรับการผลัดแบบปฏิจกัร (LAB-Type) และ Nonlinear Time History Analysis (IMP-1)

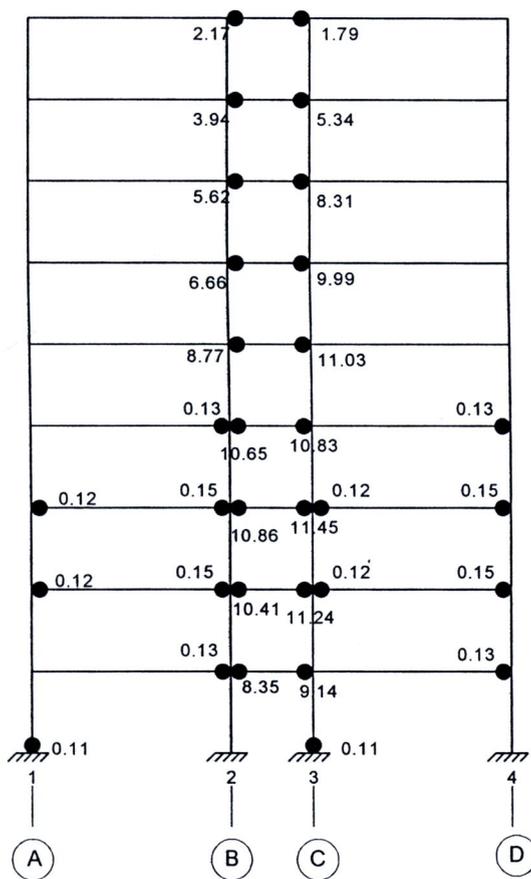
Mean damage index = 2.08

● Damage Index

Mean damage index = 2.20

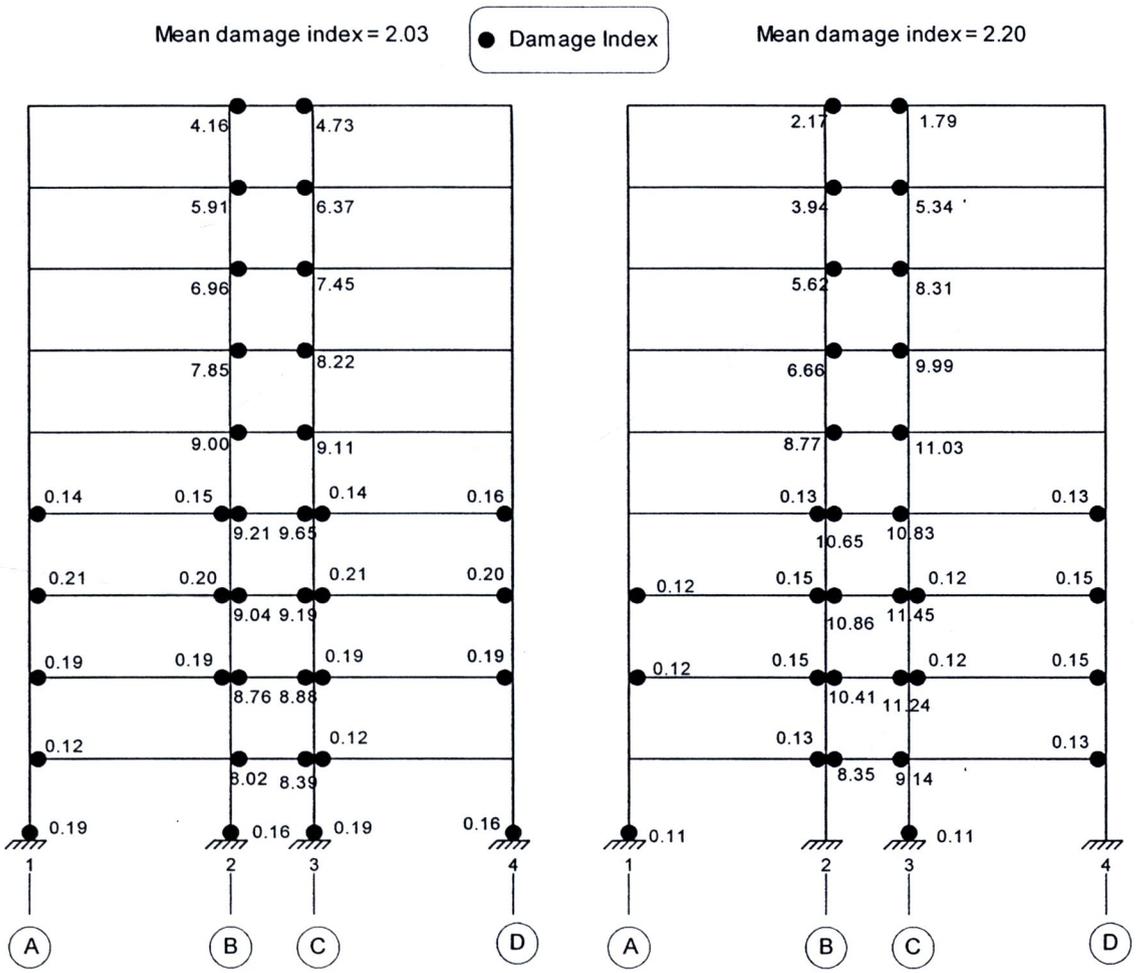


a) Cyclic Pushover Analysis, CPA (ATC-24 - Type)



b) Nonlinear Time History Analysis, NTHA (IMP-1)

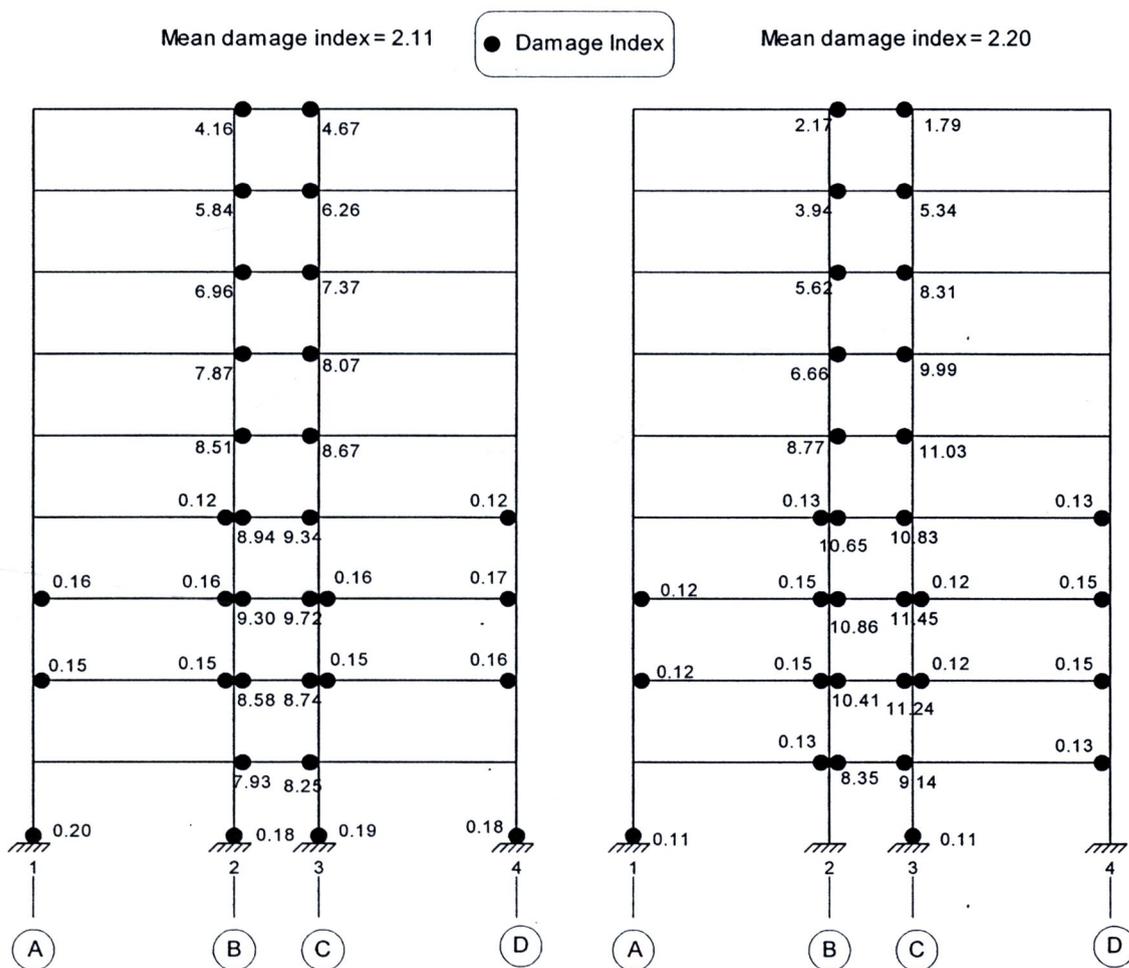
ภาพประกอบ 49 การเกิดข้อหมุนพลาสติกและค่าดัชนีความเสียหาย สำหรับการผลักแบบวัฏจักร (ATC-24 - Type) และ Nonlinear Time History Analysis (IMP-1)



a) Cyclic Pushover Analysis, CPA (ISO-Type)

b) Nonlinear Time History Analysis, NTHA (IMP-1)

ภาพประกอบ 50 การเกิดข้อหมุนพลาสติกและค่าดัชนีความเสียหาย
 สำหรับการผลักแบบวัฏจักร (ISO-Type) และ Nonlinear Time History Analysis (IMP-1)



a) Cyclic Pushover Analysis, CPA (SPD-Type)

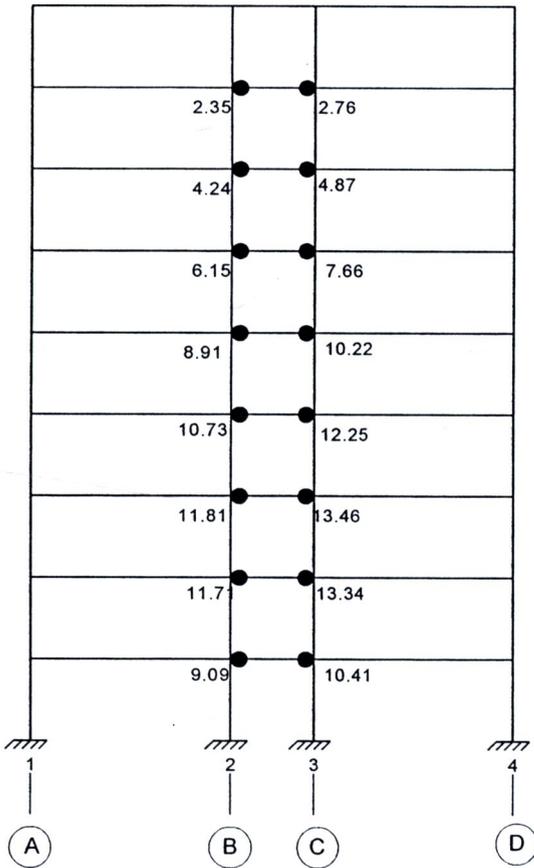
b) Nonlinear Time History Analysis, NTHA (IMP-1)

ภาพประกอบ 51 การเกิดข้อหมุนพลาสติกและค่าดัชนีความเสียหาย สำหรับการผลักแบบวิถัจกร (SPD-Type) และ Nonlinear Time History Analysis (IMP-1)

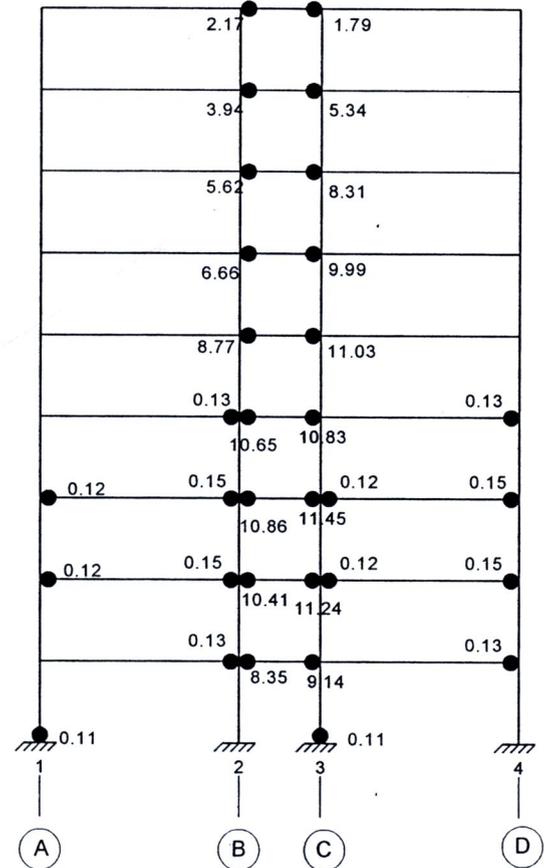
Mean damage index = 2.76

● Damage Index

Mean damage index = 2.20



a) Modal Pushover Analysis, MPA (3 modes)



b) Nonlinear Time History Analysis, NTHA (IMP-1)

ภาพประกอบ 52 การเกิดข้อหมุนพลาสติกและค่าดัชนีความเสียหาย สำหรับการผลักแบบรวมโหมด (MPA – 3 modes) และ Nonlinear Time History Analysis (IMP-1)

จากภาพประกอบ 49-51 แสดงการเกิดข้อหมุนพลาสติกและค่าดัชนีความเสียหายสำหรับการผลักแบบวัฏจักรแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับวิธีที่ถูกต้อง NTHA พบว่า การผลักแบบวัฏจักรรูปแบบ ATC-24, ISO, SPD ทำนายตำแหน่งการเกิดข้อหมุนพลาสติกได้ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ถูกต้อง และทำนายค่าดัชนีความเสียหายได้ใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้อง โดยมีค่าเฉลี่ยดัชนีความเสียหายเท่ากับ 2.08, 2.03, 2.11 สำหรับรูปแบบ ATC-24, ISO, SPD ตามลำดับ เทียบกับค่าเฉลี่ยที่ถูกต้องเท่ากับ 2.20 สำหรับรูปแบบ LAB-Type ไม่อาจทำนายตำแหน่งการเกิดข้อหมุนพลาสติกได้ดีพอ เนื่องจากไม่มีตำแหน่งการเกิดข้อหมุนพลาสติกในช่วงคานแกน A-B และ C-D และโคนเสาชั้นล่าง แม้ว่าค่าเฉลี่ยดัชนีความเสียหายเท่ากับ 2.24 จะใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้องมากก็ตาม

เมื่อเปรียบเทียบกับการผลักแบบรวมโหมด (MPA - 3 modes) ในภาพประกอบ 52 พบว่า การผลักอาคารแบบนี้ไม่อาจทำนายตำแหน่งการเกิดข้อหมุนพลาสติกได้ดีพอ โดยให้ผลการทำนายตำแหน่งการเกิดข้อหมุนพลาสติกคล้ายกับการผลักแบบวัฏจักรในรูปแบบ LAB-Type ซึ่งไม่มีตำแหน่งการเกิดข้อหมุนพลาสติกในช่วงคานแกน A-B และ C-D และโคนเสาชั้นล่าง นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยดัชนีความเสียหายของการผลักแบบรวมโหมดเท่ากับ 2.76 มีค่าสูงกว่าค่าที่ถูกต้องมาก

โดยภาพรวมแสดงว่า การผลักอาคารแบบวัฏจักรสามารถทำนายการเกิดข้อหมุนพลาสติกและค่าดัชนีความเสียหายได้ดีเพียงพอ

