

P- Δ 효과를 고려한 철골 구조물의 비선형 동적거동 평가

Evaluation of Nonlinear Dynamic Behavior for Steel Moment Frame Structures Considering P- Δ Effects

최 원 호*
Choi, Won-Ho

이 주 완**
Lee, Joo-Wan

이 동 근***
Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

Inelastic seismic response of steel moment frame structures, which are usually quite gravity load and subject to large displacement under severe earthquake, may be severely influenced by the structure P- Δ effects. The P- Δ effect may have an important impact on the dynamic behavior of the structure in the nonlinear seismic analysis. In multi degree of freedom systems P- Δ effects may significantly affect only a subset of stories or a single story alone. Therefore, a story drift amplification of structure is happened by P- Δ effects and such nonlinear dynamic behaviors are very difficult to evaluate in the structures. In this study, two systems having different design methods of steel moment frame structures are investigated to evaluate the P- Δ effects due to gravity load. The plastic hinge formations, maximum rotational ductility demands, and energy distribution will be compared and evaluated following whether the P- Δ effects are considered or not. And design methods are proposed for the prevention of the instability of structures which due to the P- Δ effects.

1. 서 론

성능에 기초한 내진설계(Performance Based Seismic Design)에서는 다양한 수준의 지진하중에 대한 구조물의 실질적인 거동을 예측하기 위하여 비선형 정적 및 동적해석을 이용한다. 붕괴방지(collapse prevention)는 내진설계에서 구조물의 기본적인 목표라고 할 수 있다. 구조물의 붕괴현상은 수평 및 수직저항 요소들이 지진하중과 중력하중에 대하여 충분히 전달할 수 있는 능력을 상실한 경우에 발생할 수 있는 구조물의 불안정 상태를 말한다. 일반적으로 구조물이 비선형 거동을 하는 경우에는 선형 거동을 하는 경우보다 중력에 의한 영향을 더 많이 받는다. 그러므로 내진설계에서는 이러한 영향을 충분히 고려해야 할 필요가 있다. 지진하중과 같은 횡하중에 의한 구조물의 변형에 미치는 이러한 중력의 영향을 P- Δ 효과라고 한다. 특정한 층에서 충분한 변형이 발생한 경우에 이러한 P- Δ 효과에 의하여 구조물은 충전단에 대한 저항력을 상실할 수 있으며, 이로 인하여 구조물이 불안정하게 됨으로써 파괴에 도달하게 된다. 구조물에 정적하중이 가진되는 경우에 P- Δ 효과는 1차(first order) 해석에 의한 응답보다 조금 크게 평가된다. 그러나 지진하중과 같은 동적하중이 작용하는 경우에는 작용하중의 특성에 따라서 응답이 증가하거나 감소할 수 있으며, 지진응답이 한 방향으로 치우치면서 비대칭적인 형태로 나타나는 것으로 연구되었다. P- Δ 효과에 의한 구조물의 비선형 거동에 관한 연구는 대부분 단자유도(SDOF) 시스템에 국한되었다.

* 학생회원 성균관대학교 건축공학과 박사과정

** 학생회원 성균관대학교 건축공학과 석사과정

*** 정 회 원 성균관대학교 건축공학과 교수

그리고 다자유도(MDOF) 시스템에서의 P- Δ 효과에 관한 연구는 Krawinkler 등에 의하여 연구되어진 바 있으나 주로 비선형 정적해석에 의한 응답의 분석이었다. 본 연구에서는 강기동-약보(SCWB) 및 약기동-강보(WCSB) 개념에 의하여 설계된 두 가지 철골 모멘트골조 구조물에 대하여 비선형 동적해석에 의한 P- Δ 효과의 영향을 분석하였다. P- Δ 효과의 고려 유·무에 따라서 어떻게 구조물의 비선형 지진응답이 달라지는지에 대하여 연구하였다. 비선형 지진응답의 분석은 시스템 연성요구도, 소성힌지분포, 최대 회전 층연성요구도, 에너지 분포 등을 이용하여 평가하였다.

2. P- Δ 효과에 의한 구조물의 비선형 거동

구조물에서 발생하는 P- Δ 효과는 횡하중에 대한 저항능력을 감소시킨다. 특히, P- Δ 효과는 구조물의 부분적인 층에서 집중적으로 발생하기 때문에 층간변위(story drift)의 증폭(amplification) 현상으로 인하여 구조물의 불안정성(instability)을 야기시킨다는 점에서 비선형 지진응답의 평가에 있어서 매우 중요하다. 특정한 층에서 발생하는 P- Δ 효과에 의한 구조물의 안정상태는 층안정계수(story stability coefficient)에 의하여 평가가 가능하며, 다음 식에 의하여 산정될 수 있다.

$$\theta = P_i \Delta_i / V_i h_i \quad (1)$$

여기서, P_i 는 층에 작용하는 중력하중의 합, Δ_i 는 층간변위, V_i 는 층전단력, h_i 는 층의 높이를 나타낸다. 선형 정적 해석을 수행하는 경우에는 위에서 산정한 층안정계수를 이용하여 층 레벨에서의 하중과 변위에 대한 증폭 정도를 평가하게 된다. 그러나 비선형 동적해석을 수행하는 경우에는 P- Δ 효과를 정량적으로 평가하기가 힘들다. 왜냐하면, 층의 강성(stiffness)과 강도(strength)는 비선형 동적해석을 수행할 경우에 고차모드와 힘의 재분배 효과로 인하여 매우 민감하게 반응하기 때문이다. 또한 구조물의 복잡한 동적특성으로 인하여 발생하는 변형경화(hardening)와 연화(softening) 효과는 파악하기가 매우 어렵다. 비선형 동적해석에서 P- Δ 효과는 구조물의 형태와 지진하중 및 중력하중의 크기 그리고 하중의 진동수 특성에 따라 다르게 평가될 수 있다. 만약 강성 및 강도저감 효과가 있는 부재 이력특성을 가지며 접합부에서의 파괴(fracture) 현상이 발생하는 철골구조물의 경우는 더욱 더 복잡한 동적 불안정(dynamic instability) 현상이 발생한다. MacRae 등의 연구에 의하면 다자유도계 구조물의 경우에는 인접하는 층 사이에서 발생하는 동적상호작용(dynamic interaction) 때문에 P- Δ 효과를 고려한 단자유도(SDOF) 시스템과 다자유도(MDOF) 시스템 사이의 일관성 있는 관계를 설정하기가 매우 힘들다는 연구가 있었다. 그림 1은 캔틸레버 기둥에서 발생하는 P- Δ 효과에 의한 구조물의 비선형 응답 변화를 보여주고 있다.

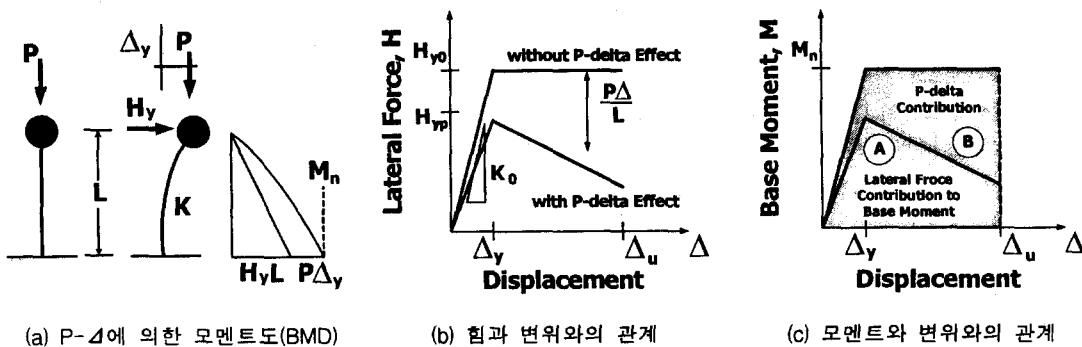


그림 1 캔틸레버 기둥에서 나타나는 P- Δ 효과에 의한 비선형 응답 변화

3. 구조물의 비선형 동적거동에 대한 평가 방법

본 연구에서는 비선형 시간이력해석에 의한 구조물의 비선형 동적거동을 평가하기 위하여 대표응답, 시스템 연성요구도, 최대 회전 층연성요구도, 소성힌지분포, 에너지분포 등을 이용하였다.

3.1 시스템 연성요구도 평가

구조시스템에 대한 연성요구도의 평가는 Lee 등(1997)에 의하여 제안된 대표변위와 대표저항력의 관계를 이용하여 평가하였다. 구조물에서 대부분의 동적응답이 첫 번째 진동모드에 의하여 지배된다고 가정을 한다면 구조시스템을 대표할 수 있는 대표변위(u)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u(t) = \frac{\phi_1^T M X(t)}{\phi_1^T M 1} \quad (2)$$

여기서, $X(t)$ 는 비탄성 시간이력해석에 의한 각 층의 변위를 나타낸다. 그리고 구조물의 응답이 정확하게 첫 번째 진동모드에 의하여 동적거동을 하고 또한 탄성범위내에서 거동을 한다고 가정한다면, 다자유도계에 대한 구조시스템의 대표적 저항력 $r(u)$ 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(u) = \Psi^T R(D) = \phi_1^T R(D) = \phi_1^T K D = \phi_1^T K \phi_1 u = k_1 u = V_e \quad (3)$$

여기서, k_1 는 1차모드에 의한 등가강성, u 는 식(2)에 의하여 산정되는 대표변위를 나타낸다. 구조시스템에 대한 연성요구도는 비선형 시간이력해석에 의한 다자유도계의 동적응답으로부터 직접 평가되는 대표변위 $u(t)$ 와 대표저항력 $r(u(t))$ 을 산정한 후에 두 시간이력의 관계를 이선형(bilinear)관계로 근사화함으로써 평가할 수 있다.

3.2 최대 회전 층연성요구도 평가

일반적으로 지진과 같은 횡하중을 받는 부재에서는 비대칭 휨이 발생한다. 부재 길이의 중앙에서 변형과 모멘트에 대한 변곡점(inflexion point)이 발생한다고 가정한다면, 부재의 양 단부에서 발생하는 회전각은 그림2와 같이 나타낼 수 있다. 그러므로 부재에서 발생하는 회전연성도는 항복회전각에 대한 최대회전각의 비로서 표현할 수 있으며 식(4)와 같이 정의될 수 있다.

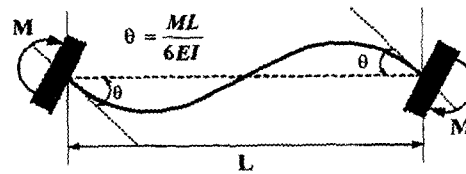


그림 2 지진하중을 받는 부재의 회전각

$$\mu_\theta = \frac{\theta_{\max}}{\theta_y} = \frac{\theta_y + \theta_{\text{plastic}}}{\theta_y} = 1 + \frac{\theta_{\text{plastic}}}{\theta_y} = 1 + \frac{\theta_{\text{plastic}}}{M_y L / 6EI} \quad (4)$$

여기서, θ_{\max} 는 최대회전각, θ_y 는 항복회전각, θ_{plastic} 는 소성회전각, L 과 EI 는 각각 부재의 길이와 휨강성을 나타낸다.

3.3 에너지 분포에 대한 평가

비선형 거동을 하는 구조물의 에너지 이력곡선은 지진하중에 의하여 구조물이 어느 정도의 지진에너지가 흡수되며 비선형 거동과 감쇠에 의하여 어느 정도 소산되는지를 효과적으로 보여준다. 본 연구에서는 Uang과 Bertero (1990)에 의하여 제안된 절대 에너지방정식을 이용하여 구조물의 에너지 분포를 평가하였다. 지진하중을 받는 구조물의 에너지 방정식은 식(5)과 같이 구성된다.

$$E_K + E_D + E_S + E_H = E_I \quad (5)$$

여기서, E_K 는 운동에너지, E_D 는 감쇠에너지, E_S 는 탄성변형에너지, E_H 는 소산에너지, E_I 는 지진하중에 의한 입력에너지를 나타낸다. 각 에너지 성분을 근거로 하여 다자유도(MDOF) 시스템의 절대 에너지방정식을 정리하면 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_0^t \dot{D}^T M \ddot{D}_a dt + \int_0^t \dot{D}^T C \dot{D} dt + \int_0^t \dot{D}^T R(D) dt = \int_0^t 1^T M \ddot{D}_a dx_g \quad (6)$$

여기서, D_a 와 u_a 는 구조물에서의 절대변위(absolute displacement)를 나타낸다.

4. 철골 모멘트골조 구조물의 비선형 지진거동 평가

본 연구에서는 다자유도 시스템에서의 P-Δ효과에 의한 비선형 지진거동 분석을 위하여 8층 철골 모멘트골조 구조물을 선택하였다. 예제구조물은 강기둥-약보(SCWB)와 약기둥-강보(WCSB)의 개념에 따라서 2가지 형태로 설계되었다. 본 연구에서는 P-Δ 효과의 유·무에 따른 두 가지 시스템의 비선형 지진거동을 살펴보고 설계 형식에 따른 거동의 차이가 구조물의 내진성능에 미치는 영향을 비교·분석하였다.

4.1 예제구조물

강기둥-약보(Strong Column-Weak Beam) 및 약기둥-강보(Weak Column-Strong Beam) 구조물의 부재 크기는 표1에서 제시하였다. 보와 기둥에서 발생하는 소성힌지(plastic hinge)는 부재의 단부에 집중된다고 가정하였다. 부재의 이력거동 특성은 항복 후에 2%의 강성비를 가지는 이선형(bilinear) 곡선으로 가정하였다. 중력하중에 의한 영향을 고려하기 위하여 고정하중은 123 lb/ft² (600kg/m²), 적재하중 51.2 lb/ft² (250kg/m²)을 고려하였다. 구조물에 가진되는 중력하중은 절점 하중으로 치환하였으며, 중력하중의 크기에 따른 P-Δ효과를 분석하기 위하여 표2와 같은 3가지 경우의 하중조합에 대하여 비선형 지진거동을 분석하였다.

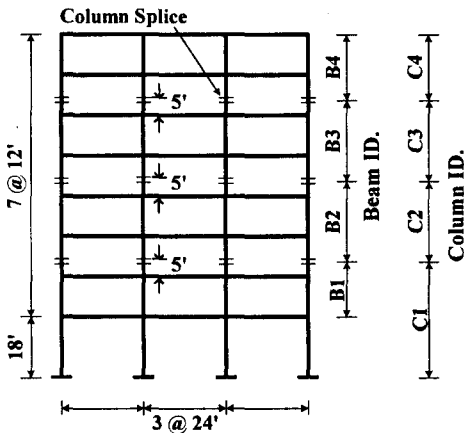


그림 3 8층 철골 모멘트골조

표 1 예제구조물에 사용된 부재단면

부재명		8-SCWB	8-WCSB
내부 기둥	C4	W 24×55	W 18×40
	C3	W 24×84	W 18×60
	C2	W 24×94	W 18×76
	C1	W 24×131	W 21×131
외부 기둥	C4	W 14×48	W 14×43
	C3	W 14×74	W 14×48
	C2	W 14×90	W 14×61
	C1	W 14×99	W 24×82
보	B4	W 18×40	W 24×68
	B3	W 21×50	W 24×76
	B2	W 24×55	W 24×68
	B1	W 24×68	W 24×102

표 2 P-Δ 효과를 분석하기 위한 하중조합 (Load Combination)

구분	하중조합 (Load Combination)	치환된 절점 하중
CASE-1	1.0×Dead Load	77.6 kips
CASE-2	1.0×Dead Load + 0.5×Live Load	99.5 kips
CASE-3	1.0×Dead Load + 1.0×Live Load	119.4 kips

4.2 지진하중

예제구조물의 비선형 시간이력해석에 적용될 하중은 그림 4와 같이 El Centro (NS, 1940) 지진하중이며, 유효최대가속도(Effective Peak Acceleration, EPA)를 0.40 g로 조정하였다. 구조물의 감쇠는 Rayleigh 감쇠의 원리를 적용하였고, 첫 번째와 두 번째 진동모드에 대한 모드감쇠계수는 0.02와 0.05로 가정하였다.

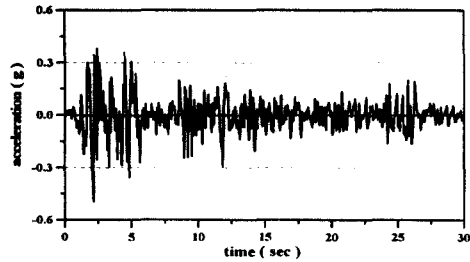


그림 4 지진하중 (El Centro, NS 1940) EPA = 0.4 g

4.3 예제구조물의 비선형 지진거동 평가

본 연구에서는 비선형 시간이력해석을 수행하고 시스템 연성요구도, 소성힌지분포, 최대 회전층연성요구도, 에너지 분포 등의 평가를 이용하여 예제구조물에 대한 P- Δ 효과를 분석하였다.

(1) 시스템 연성요구도 평가

예제구조물에 대한 시스템 연성요구도는 비선형 시간이력해석에 의한 응답 성분 중에서 대표변위와 대표저항력을 산정함으로써 평가하였다. 그리고 P- Δ 효과에 따른 대표변위와 대표저항력의 변화는 그림 5, 6, 7, 8에서 나타내었으며, 대표응답을 이용한 시스템 연성요구도의 변화를 분석하였다. P- Δ 효과에 의하여 발생하는 구조물의 최대변위는 주어진 지진하중의 특성에 따라서 증가하거나 감소할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 구조물의 대표변위의 경우에는 P- Δ 효과를 고려할수록 비대칭성이 커지는 것을 알 수 있다. 두 시스템에서 P- Δ 효과를 고려하지 않을 경우에는 대표변위와 대표저항력의 크기가 서로 비슷하기 때문에 연성요구도는 서로 비슷하게 평가되었다. P- Δ 효과에 의한 시스템 연성요구도는 중력하중이 커 질수록 변위가 비대칭적으로 변하면서 저항력의 크기는 줄어들고 하중과 변위의 형상이 불규칙적으로 변화하고 있다. 이것은 P- Δ 효과에 의하여 특정층에 불안정성이 집중되면서 구조물의 대표응답에 영향을 주었기 때문이다.

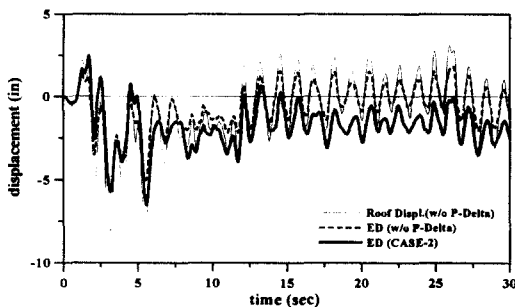


그림 5 P- Δ 효과에 따른 대표변위의 변화 (SCWB)

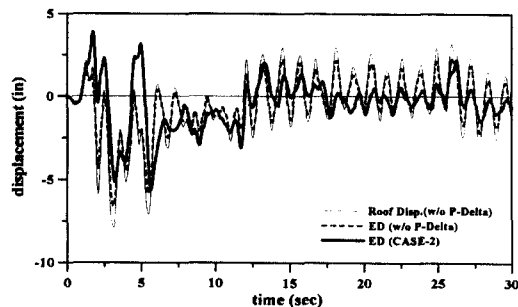


그림 6 P- Δ 효과에 따른 대표변위의 변화 (WCSB)

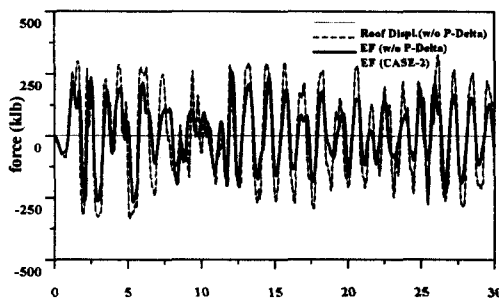


그림 7 P- Δ 효과에 따른 대표저항력의 변화 (SCWB)

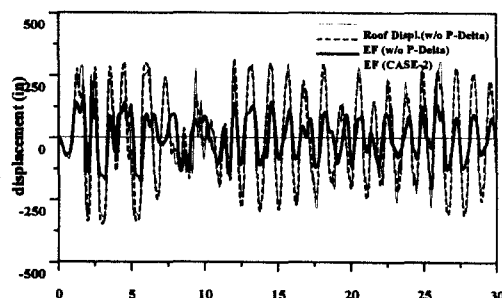


그림 8 P- Δ 효과에 따른 대표저항력의 변화 (WCSB)

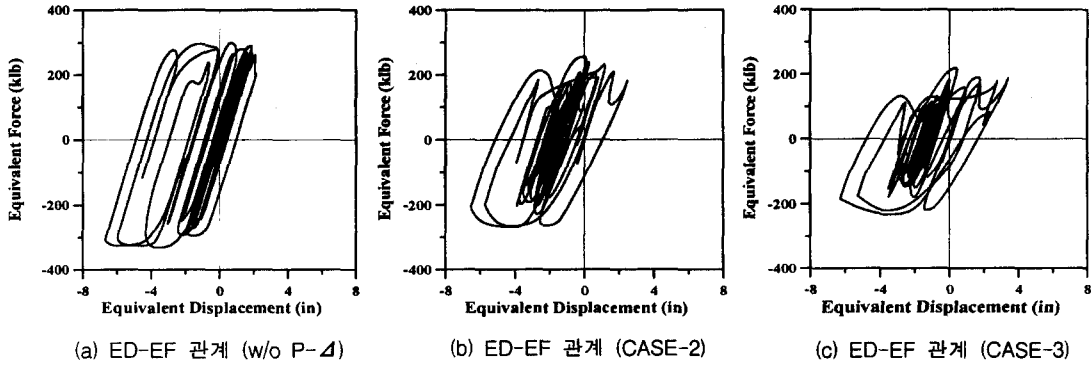


그림 9 P-Δ효과에 따른 대표변위-대표저항력 관계의 변화 (SCWB)

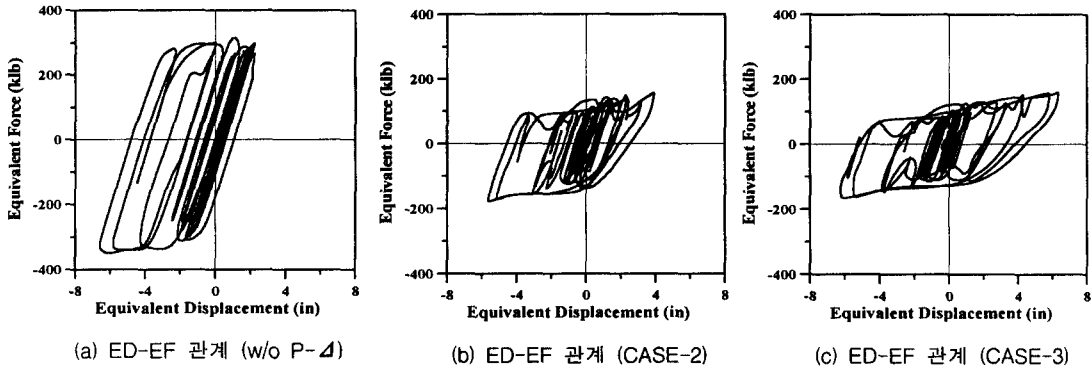


그림 10 P-Δ효과에 따른 대표변위-대표저항력 관계의 변화 (WCSB)

(2) 소성힌지분포와 최대 회전 층연성요구도 평가

구조시스템에 대한 연성요구도에 의해서는 두 가지 시스템의 비선형 거동을 정확하게 비교·평가할 수 없다. 즉, P-Δ효과로 인하여 발생하는 각 층에서의 불안정성들을 표현하기 위해서는 구조물의 소성힌지분포(plasti hinge formations)와 최대 회전 층연성요구도(maximum story rotational ductility demand)를 이용하는 것이 매우 효과적이다. 일반적으로 P-Δ효과는 저층부로 갈수록 모멘트가 증가하기 때문에 소성회전각의 증가로 인하여 소성힌지분포와 최대 회전 층연성도가 특정층에 집중된다는 것을 그림 11, 12, 13, 14에서 볼 수 있다.

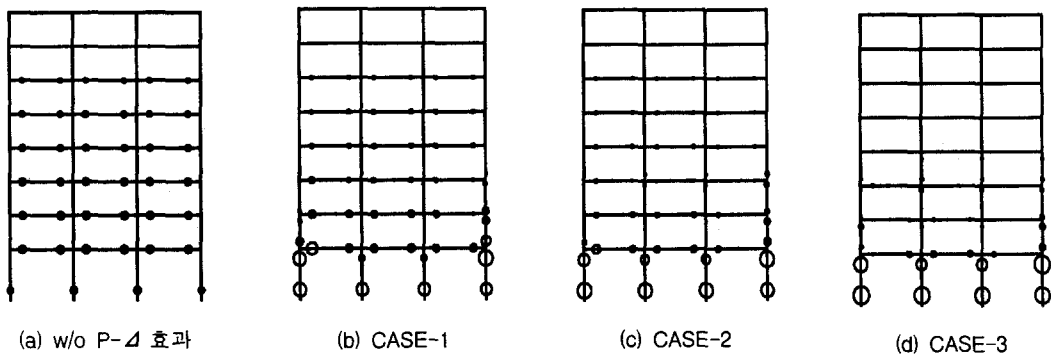


그림 11 P-Δ효과를 고려한 소성힌지분포의 비교 (SCWB)

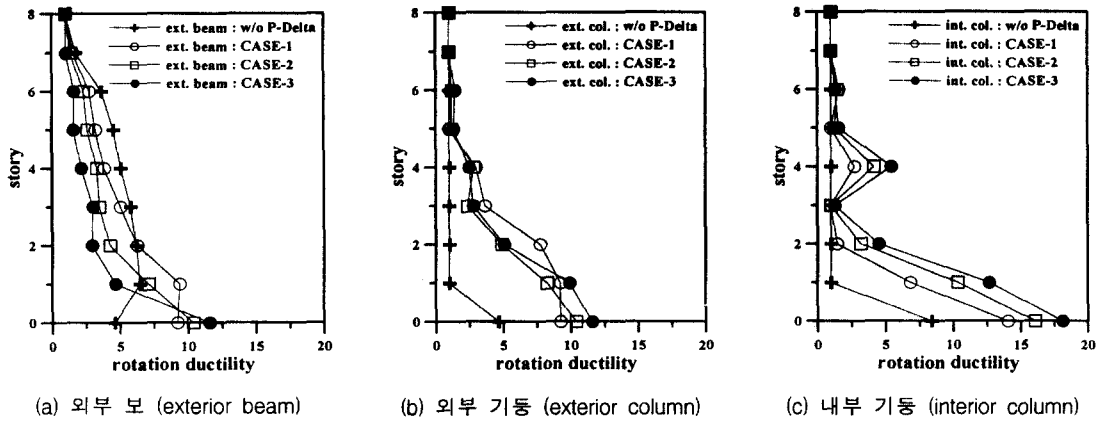


그림 12 P-Δ 효과를 고려한 최대 회전 충연성 요구도의 비교 (SCWB)

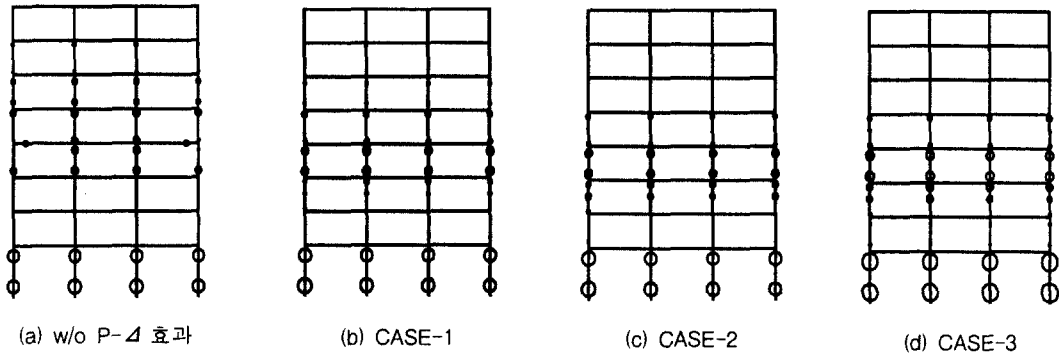


그림 13 P-Δ 효과를 고려한 소성힌지분포의 비교 (WCSB)

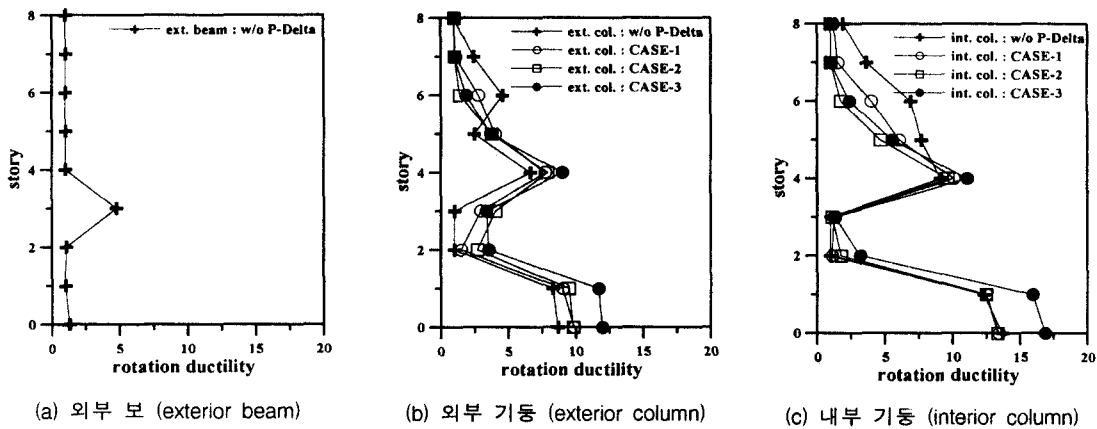


그림 14 P-Δ 효과를 고려한 최대 회전 충연성 요구도의 비교 (WCSB)

(3) 에너지 분포에 대한 평가

에너지 분포를 비교함으로써 두 가지 시스템에서 P-Δ 효과로 인한 영향을 비교·분석하였다. 소성힌지분포와 최대 회전 충연성 요구도와 마찬가지로 저층부에 소산에너지가 집중되었으며, WCSB 구조물보다 SCWB 구조물의 경우가 P-Δ 효과로 인한 불안정성이 더 크게 나타났다. P-Δ 효과를 고려할수록 상대가속도가 줄어들기 때문에 입력에너지가 감소된다는 것을 볼 수 있다.

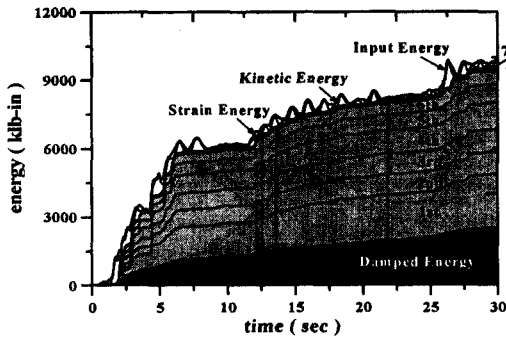


그림 15 에너지 성분의 분포 (SCWB, w/o P-Δ)

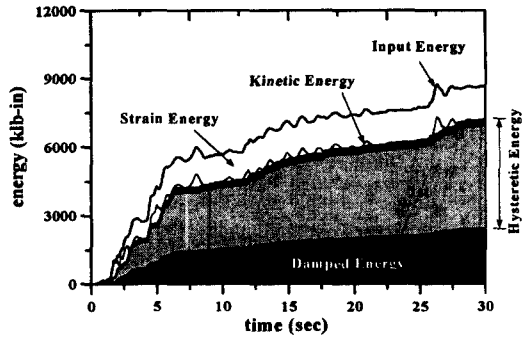


그림 16 P-Δ효과에 의한 에너지 분포 (SCWB, CASE-2)

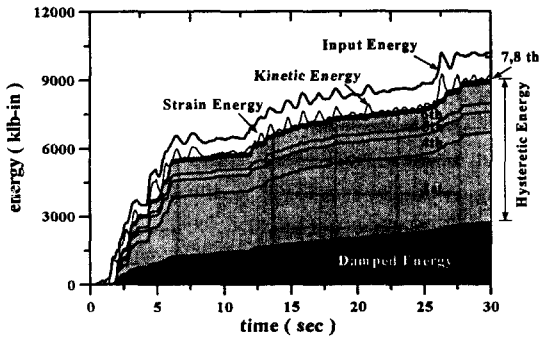


그림 17 에너지 성분의 분포 (WCSB, w/o P-Δ)

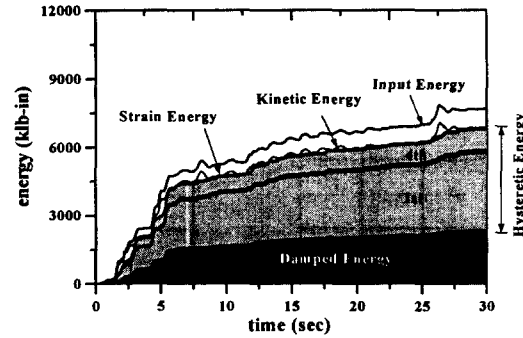


그림 18 P-Δ효과에 의한 에너지 분포 (WCSB, CASE-2)

5. 결론

본 연구에서는 강기둥-약보 및 약기둥-강보 구조물의 P-Δ효과를 고려한 비선형 동적거동을 비교·분석하였다. P-Δ효과에 의한 하부층 모멘트의 증가로 특정층에 비선형 거동이 집중되는 현상을 소성힌지분포, 최대 회전 층연성요구도, 에너지 분포 등을 이용하여 파악할 수 있었다. 대표변위의 경우는 P-Δ효과로 인하여 비대칭적으로 증가하는 경향을 보였으며, 대표저항력은 감소하였다. 이로 인하여 구조물 시스템에 대한 이력특성은 불규칙하게 나타났기 때문에 P-Δ효과를 고려한 시스템의 연성요구도 파악에 관한 기법이 필요할 것으로 판단된다. P-Δ효과로 인한 특정층에 집중되는 구조물의 불안정성은 내진설계를 적용할 경우에 특별한 고려가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 두뇌한국21 사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단 우수연구센터에 의하여 지원되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Gupta, A. and Krawinkler, H. (2000), "Dynamic P-Delta Effects For Flexible Inelastic Steel Structures", *Journal of Structure Engineering*, Vol. 126, No. 1, pp. 145-154.
2. MacRae, G. A. (1994), "P-Δ Effects on Single-Degree-of-Freedom Structures in Earthquakes", *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No. 3, pp. 539-568.
3. Uang, C.M. and Bertero, V.V. (1990), "Evaluation of seismic energy in structures," *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, Vol. 19, pp. 77-90.
4. Lee, D.G., Song, J.K. and Yun, C.B. (1997), "Estimation of system-level ductility demands for multi-story structures," *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 12, pp. 1025-1035.