

가새형 소성감쇠기가 설치된 철골건물의 거동분석 Behavior of Steel Structures with Buckling-Restrained Braces

김진구
Kim, Jinkoo

최현훈
Choi, Hyunhoon

ABSTRACT

Energy dissipation capacity and earthquake responses of steel structures installed with unbonded braces(UB) were investigated. Nonlinear dynamic time history analyses were carried out to investigate the seismic response of multi-story model structures with UB having various size and strength. Various techniques were applied to determine proper story-wise distribution of UB in multi-story structures. The analysis results show that the maximum displacements of structures generally decrease as the stiffness of UB increases. However there are cases that the maximum displacement and accumulated damage increases as the stiffness of UB increases, which needs to be checked before deciding proper amount of UB.

1. 서 론

지진으로 인한 철골조 건물의 과도한 횡변형은 구조부재 뿐만 아니라 비구조부재의 손상을 가져온다. 이러한 현상을 개선하기 위하여 일반적인 가새(normal brace)를 설치함으로써 구조물의 횡방향 강성을 증가시킬 수 있다. 그러나 가새가 설치된 건물의 비탄성 거동은 가새의 불안정한 이력거동으로 인하여 강성과 강도가 저하되고 에너지 소산량이 작기 때문에 만족스럽지 못하다. 철골조의 에너지 소산과 손상방지 능력은 그림 1과 같은 좌굴이 방지된 소성감쇠기(buckling-restrained unbonded brace, UB)를 설치함으로써 크게 향상시킬 수 있다. UB는 큰 지진하중을 받을 때 중심 철골부재가 전체 혹은 국부적인 좌굴이 발생하지 않고 큰 비탄성 변형이 발생하도록 중심부의 철골부재 주위를 강관과 콘크리트로 감싸준다. 이전의 연구에 의하면^{(1),(2)} UB는 매우 안정적으로 많은 에너지를 소산시킴을 알 수 있다. 그림 2는 일반적인 가새와 UB가 설치된 구조물의 개략적인 거동을 보여주고 있다. 일반적인 가새는 압축력을 받을 때 좌굴이 발생하기 때문에 횡방향 변위가 증가하게 되지만 UB가 설치된 구조물은 좌굴이 방지되었기 때문에 압축을 받을 때도 안정적으로 거동한다. 가새가 설치된 구조물의 에너지 소산은 가새의 이력거동에 따라 크게 달라지기 때문에 이력거동이 안정적인 UB를 설치함으로써 전체 시스템의 에너지 소산능력은 증가시키고 골조의 비탄성 변형은 줄어들게 된다. 또한 지진이 발생한 후 손상된 UB부재는 쉽게 교체할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 UB의 설계변수가 구조물의 지진응답과 손상에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. UB의

* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 조교수

** 성균관대학교 건축공학과 박사과정

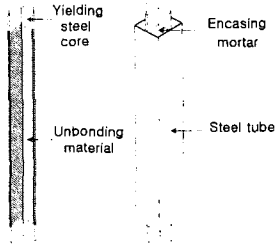
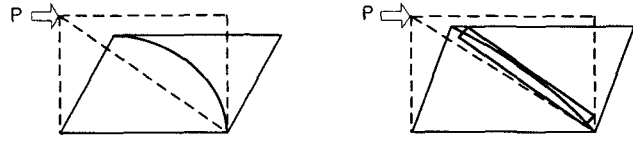


그림 1. 좌굴이 방지된 소성감쇠기



(a) 일반적인 가새

(b) 좌굴이 방지된 소성감쇠기

그림 2. 횡력이 작용할 때 가새가 설치된 구조물의 거동

설계변수로는 UB의 단면적, 항복응력 등을 들 수 있다. 또한 다자유도계 구조물에서 UB의 각 층별 분배방법에 대하여 여러 가지 분배방법을 적용하여 검토하였다. 비선형 정적해석법(pushover analysis)과 동적 시간이력 해석을 통하여 UB의 설계변수를 찾기 위하여 각 응답들을 비교하였다.

2. 소성감쇠기가 설치된 구조물의 거동

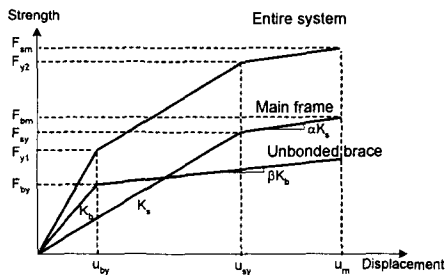


그림 3. UB가 설치된 구조물의 힘-변위 관계

그림 3은 UB가 설치된 구조물의 힘-변위 관계를 보여주고 있다. UB가 설치된 시스템의 항복하중 F_{y1} 과 F_{y2} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{y1} = F_{by} + K_s D_{by} \quad (1)$$

$$F_{y2} = F_{by} + F_{sy} \quad (2)$$

여기서 F_{sy} , D_{sy} 그리고 K_s 는 각각 구조물의 항복강도, 항복변위 그리고 횡강성을 나타낸다. 그리고 F_{by} 와 D_{by} 는 UB의 항복 강도와 항복변위를 나타낸다. 강성비 (S_r)는 다음과 같이 정의할 수 있다.⁽³⁾

$$S_r = K'_b / K_s \quad (3)$$

여기서 K'_b 는 UB의 횡방향 강성을 나타내고 다음 식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$K'_b = K_b \cos^2 \theta = \frac{A_b E_b}{L_b} \cos^2 \theta \quad (4)$$

여기서 K_b 는 UB의 축방향 강성이고 A_b 와 E_b 는 UB의 단면적과 탄성계수를 나타낸다. 또한 L_b 는 UB의 좌굴이 구속된 부분의 길이를, θ 는 설치된 UB와 구조물의 보부재 사이의 각을 나타낸다. 따라서 주어진 구조물의 층강성과 강성비를 이용하면 필요한 UB의 단면적을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_b = \frac{K_b L_b}{E_b} = \frac{K'_b L_b}{E_b \cos^2 \theta} = \frac{(S_r K_s) L_b}{E_b \cos^2 \theta} \quad (5)$$

또한 UB의 항복강도(F_{by})와 항복변위(D_{by})는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 UB의 항복변위는 $D_{by} < D_{sy}$ 조건을 만족하여야 한다.

$$F_{by} = \frac{(S_r K_s) L_b}{E_b \cos \theta} \sigma_{by} \quad D_{by} = \frac{F_{by}}{K_b} = \frac{L_b}{E_b} \sigma_{by} \quad (6)$$

3. 일반적인 가새와 소성감쇠기가 설치된 구조물의 거동비교

일반적인 가새와 UB가 설치된 구조물의 거동을 비교하기 위하여 그림 8과 같이 층고가 4m이고 경간의 길이가 6m인 5층 건물에 같은 단면적을 가진 가새와 UB를 설치하였다. 가새가 설치되지 않은 골조의 주기는 0.91초이고 가새가 설치된 구조물의 주기는 0.51초이다. 사용한 UB의 항복응력은 2.4tonf/cm^2 이고 구조물의 1차모드에 비례하게 층진하중을 가하고 pushover 해석을 수행하여 구한 예제 구조물의 밀면전단력과 최상층 변위의 관계는 그림 4와 같다. 여기서 UB가 설치된 구조물의 강도가 일반적인 가새를 설치한 구조물보다 큼을 알 수 있다. 이것은 일반적인 가새가 설치된 구조물은 압축력을 받는 두 개(2, 4층)의 가새만이 횡하중에 안정적으로 저항하기 때문이다. 그림 5에는 El Centro(1940, NS)지진에 대한 각 예제구조물의 최대 층변위를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 UB를 설치한 구조물은 가새가 설치된 구조물과 설치되지 않은 구조물보다 변위가 많이 감소한 것을 알 수 있다. 주목할만한 것은 일반적인 가새가 설치된 경우 4층에서의 층간변위가 가새가 설치되지 않은 구조물보다 크게 발생하였는데 이것은 단순히 강성만 증가시키면 추가적인 강성으로 인하여 보다 많은 지진하중이 구조물에 입력되기 때문이다. 이러한 결과는 그림 7의 에너지 시간이력을 보면 일반적인 가새가 설치된 구조물에 입력된 에너지가 가새가 설치되지 않은 구조물보다 큰 것을 알 수 있다. 좌굴이 방지된 UB가 설치된 경우 다른 경우보다 구조물의 변형에너지는 줄어들었고, UB의 소성변형에 의하여 많은 에너지가 소산되었다. 소성힌지의 발생위치와 크기를 나타낸 그림 8을 살펴보면 구조부재에 발생하는 소성힌지를 줄이는데 일반적인 가새는 그다지 효과적이지 않음을 알 수 있다. 그러나 UB를 설치한 구조물의 경우는 소성힌지의 수도 줄어들었을 뿐만 아니라 그 크기도 현저하게 줄어들었음을 알 수 있다.

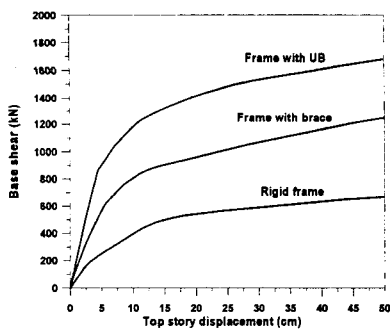


그림 4. 밀면전단력-최상층 변위의 관계

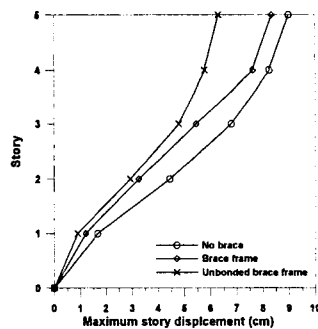


그림 5. 최대 층변위

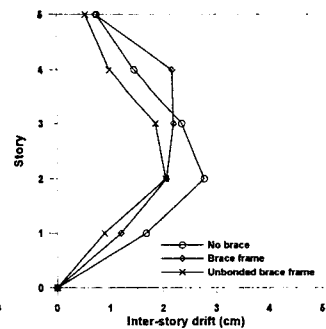


그림 6. 최대 층간변위

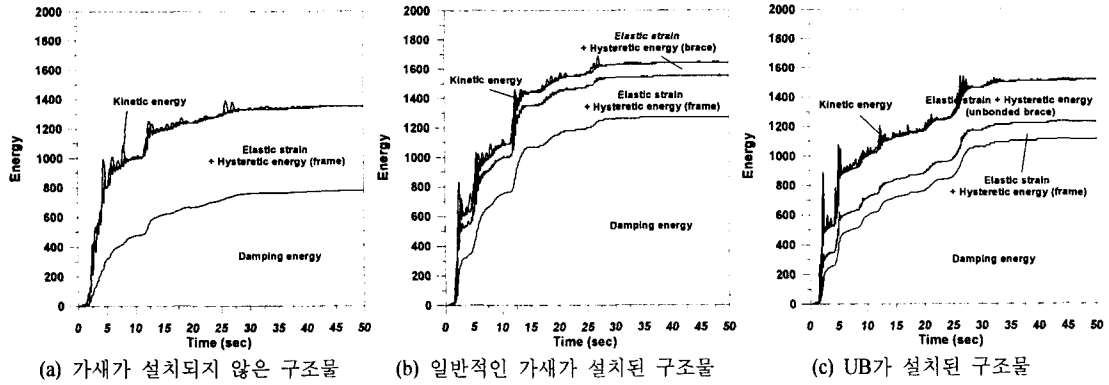
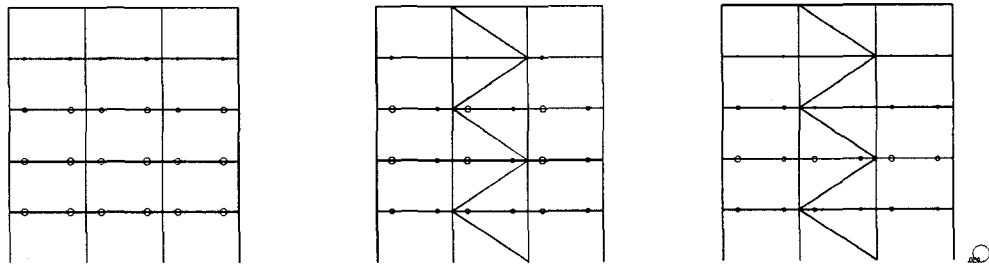


그림 7. 예제 구조물의 에너지 시간이력



(a) 가새가 설치되지 않은 구조물 (b) 일반적인 가새가 설치된 구조물 (c) UB가 설치된 구조물

그림 8. 소성힌지의 발생 위치와 크기

4. 소성감쇠기가 설치된 구조물의 비탄성 거동

4.1 예제 구조물과 지진하중

층고가 4m이고 경간이 6m인 3경간의 5층과 10층 구조물에 UB를 설치하고 지진하중에 대한 거동을 살펴 보았다. 10층 건물의 기본진동주기는 1.41초이고 기둥에는 3.3tonf/cm², 보에는 2.4tonf/cm²의 철골부재를 사용 하였다. 비선형 시간이력 해석을 위한 지진하중은 El Centro 지진의 유효최대가속도(effective peak acceleration)

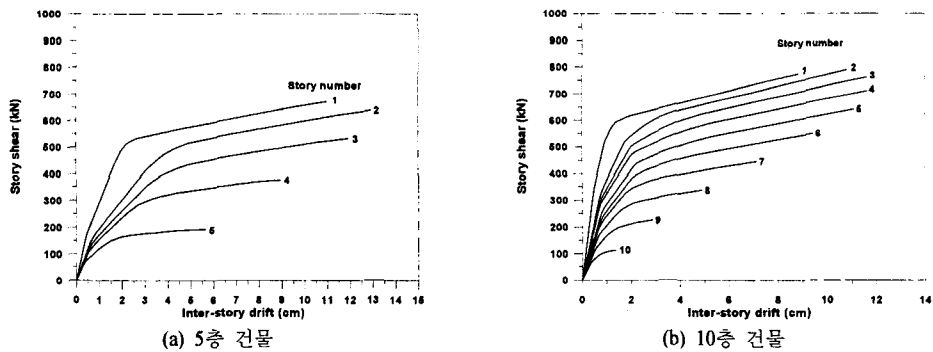


그림 9. 예제 건물의 pushover 곡선

를 0.2g와 0.4g로 조정하여 사용하였다. 각 층별 층강성을 산정하기 위하여 DRAIN 2D+(4)를 이용하여 pushover 해석을 수행하여 얻은 각 층별 층전단력과 층간변위의 관계는 그림 9와 같다. pushover 곡선을 이선형곡선(bilinear curve)으로 이상화하여 산정한 층강성은 표 1과 같다.

표 1. 예제 구조물의 층강성, 층간변위비와 층 전단력비

층	5층 구조물			10층 구조물		
	층강성(kN/cm)	층간변위비	층 전단력비	층강성(kN/cm)	층간변위비	층 전단력비
1	276.7	0.849	1.000	578.3	0.809	1.000
2	145.4	1.000	0.947	328.1	0.946	0.988
3	125.9	0.924	0.810	277.4	1.000	0.957
4	122.1	0.691	0.593	250.1	0.992	0.905
5	114.6	0.434	0.314	213.8	0.941	0.833
6	-	-	-	205.2	0.805	0.738
7	-	-	-	202.8	0.602	0.622
8	-	-	-	197.0	0.416	0.488
9	-	-	-	174.7	0.224	0.337
10	-	-	-	158.5	0.116	0.172

4.2 소성감쇠기의 층별 분배

강성비를 1에서 10까지 증가시키면서 식(5)를 이용하여 UB의 단면적을 산정하였다. 해석에는 항복응력이 1.0tonf/cm²과 2.4tonf/cm²인 두 가지의 UB를 이용하였다. 다음과 같이 네 가지 방법에 따라 UB를 층별로 분배하였다.

- Case 1: 층강성에 비례하게 UB를 설치
- Case 2: 모든 층에 같은 크기의 UB를 설치
- Case 3: pushover 해석에서 얻은 층간변위에 비례하게 UB를 설치
- Case 4: 층 전단력에 비례하게 UB를 설치

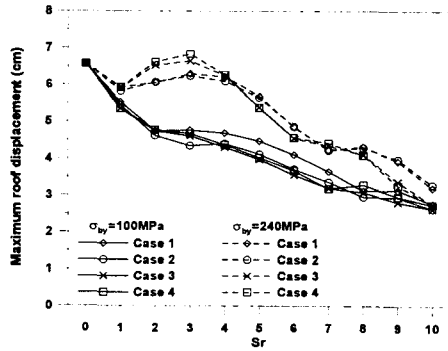
각 분배방법의 효율성을 비교하기 위하여 Case 1에서 얻은 전체 UB의 양을 기준으로 각 분배방법에 따라 분배하였다.

4.3 예제 건물의 최상층 변위

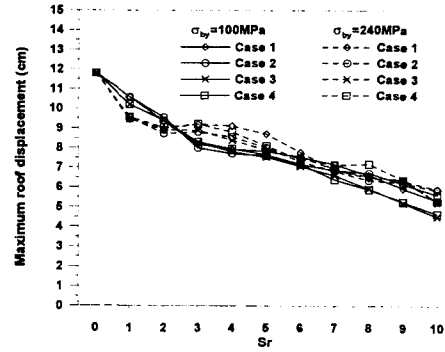
그림 10과 11은 두 단계의 지진하중이 작용할 때 UB의 항복응력과 크기에 따른 구조물 최상층의 최대변위를 보여주고 있다. 5층 구조물의 경우 EPA=0.2g의 지진하중에 대하여 UB의 항복응력이 2.4tonf/cm²인 경우를 제외하고 UB의 강성이 증가할수록 구조물의 최대변위는 감소하였다. 그리고 각 분배방법별로도 커다란 차이는 보이지 않았다. 10층 건물의 경우 어떤 강성비까지는 변위가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였는데 이것은 UB의 강성비가 증가하면 전체 시스템의 주기는 짧아지고 지진하중은 커지기 때문인 것 같다.

4.4 소성힌지와 누적된 소성변형

구조물에 발생한 소성힌지의 수는 UB의 항복응력에 관계없이 강성비가 증가함에 따라 감소하였다. 그러나 10층 건물의 경우 S_r 이 증가함에 따라 기둥에서 발생한 소성힌지의 수가 증가하였는데 이것은 그림 11과

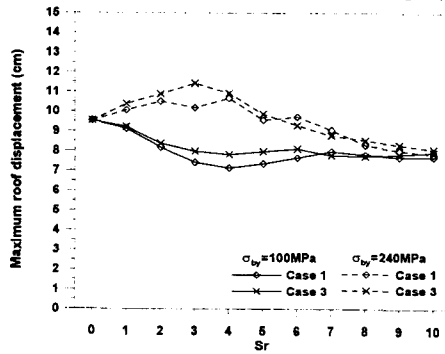


(a) EPA=0.2g

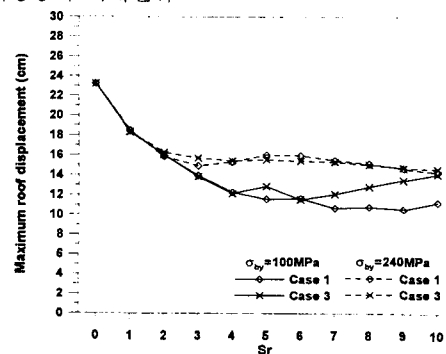


(b) EPA=0.4g

그림 10. 5층 구조물의 최상층의 최대변위

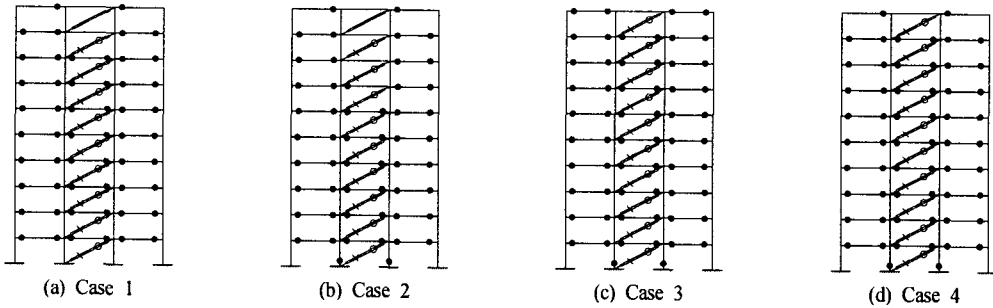


(a) EPA=0.2g



(b) EPA=0.4g

그림 11. 10층 구조물의 최상층의 최대변위



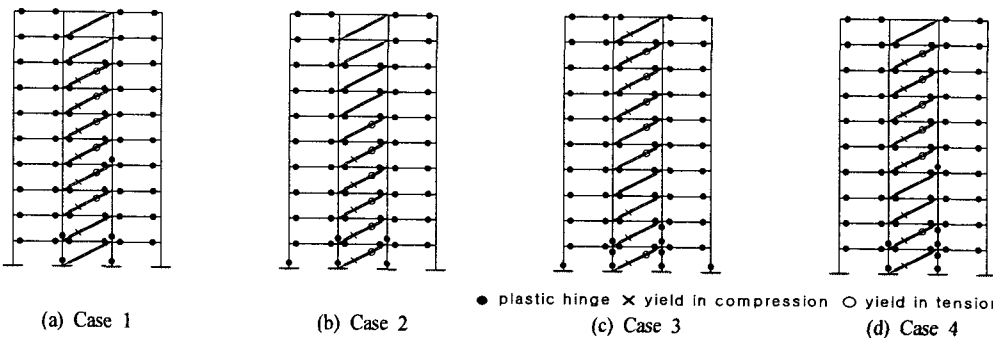
(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

그림 12. 소성힌지의 위치 ($\sigma_{by}=1.0\text{tonf/cm}^2$, EPA=0.4g, $S_r=4$)



(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

그림 13 소성힌지의 위치 ($\sigma_{by}=2.4\text{tonf/cm}^2$, EPA=0.4g, $S_r=4$)

같이 최상층의 변위가 증가하는 현상과 관계있는 것으로 생각된다. UB의 항복응력과 분배방법에 따른 소성 변위의 분포를 나타낸 그림 12와 13을 보면 보와 기둥의 소성변위는 분배방법에 관계없이 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 UB에서 소성변형의 발생여부는 항복응력에 따라 다르다. $\sigma_{by}=1.0\text{tonf/cm}^2$ 의 UB를 사용한 경우(그림 12)는 거의 모든 층의 UB가 항복하여 소성거동을 하였는데 2.4tonf/cm^2 의 항복응력을 가진 UB를 사용한 경우는 일부 층의 UB는 항복하지 않았다. 이것은 UB의 항복응력이 낮을수록 진동에너지를 UB의 소성변형에 의하여 소산시키기 때문에 최대변위를 줄일 수 있음을 보여준다. 또한 Case 3과 4에 따라 분배한 경우 모든 층에서 UB의 항복이 일정하게 발생하지만 Case 1의 경우는 중간층에 Case 2의 경우는 하부 층의 UB에서 소성변형이 발생함을 알 수 있다.

소산된 에너지 양을 나타내는 다른 중요한 변수가 구조부재에 발생한 누적된 소성변형(accumulated plastic deformation)이다. 그림 14와 같이 5층 건물에서는 강성비가 증가할수록 보와 기둥에서 발생한 누적된 소성회전량이 감소하였다. 또한 Case 3과 4에 따라 분배한 경우의 누적된 소성회전량이 다른 경우보다 작았다. 또한 $\sigma_{by}=1.0\text{tonf/cm}^2$ 를 사용한 경우 구조물의 손상이 더욱 작았다.

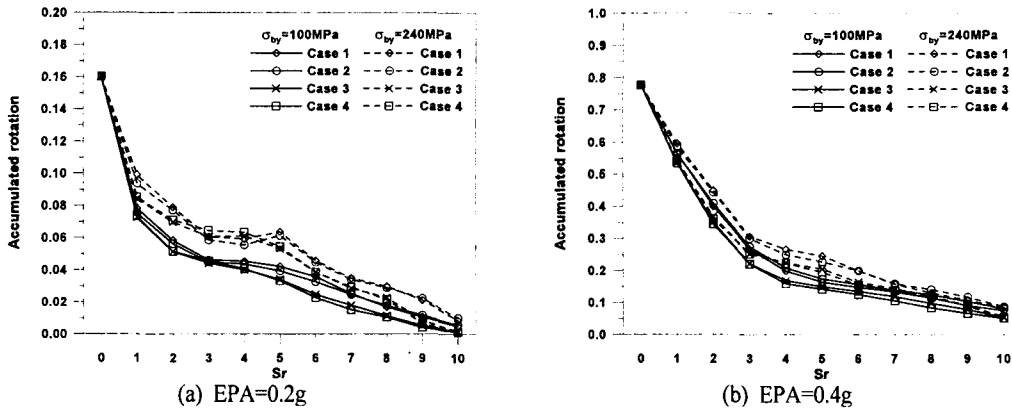


그림 14. 5층 구조물의 구조부재에서 발생한 누적된 소성회전량

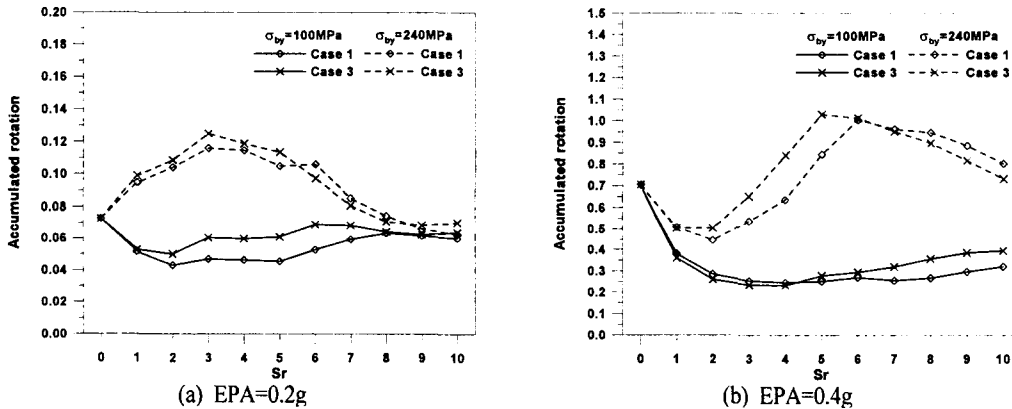


그림 15. 10층 구조물의 구조부재에서 발생한 누적된 소성회전량

5. 결 론

본 연구에서는 소성감쇠기가 설치된 구조물의 성능에 영향을 주는 변수에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 소성감쇠기의 강성이 증가할수록 구조물의 최대변위는 감소하였다. 그러나 어떤 경우에는 UB의 강성이 증가할수록 최대변위와 누적된 소성변형량이 증가하였다. 따라서 UB의 양을 결정하기 전에 구조물의 응답을 검토하여야 할 것으로 사료된다.
2. UB의 항복응력이 작을수록 큰 소성변형이 발생하고 보다 많은 에너지를 소산하기 때문에 구조부재의 손상을 줄이는데 보다 효과적이다.
3. 강접합된 구조물에서 층간변위와 층전단력에 비례하게 각 층에 UB를 설치하였을 때 구조물의 응답을 개선하는데 효과적이었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 과제(과제번호 : R01-1999-00298)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Clark P.W., Aiken, I.D., Kasai, K., Ko, E., and Kimura, I., "Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices," Proceedings 68th annual convention, Santa Barbara, SEAOC, 1999.
2. Tremblay, R., Degrange, D., and Blouin, J., "Seismic rehabilitation of a four-story building with a stiffened bracing system," Proceeding of the 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 1999
3. 김진구, 김유경, 최현훈, "성능수준 만족을 위한 가새형 소성 감쇠기의 설계," 한국지진공학회 논문집, 5권 6호, 2001, pp.47~54.
4. Tsai, K.C., and Li, J.W., "DRAIN2D+, A general purpose computer program for static and dynamic analyses of inelastic 2D structures supplemented with a graphic processor," Report No.CEER/R86-07, National Taiwan University, Taiwan.