

이력댐퍼를 이용한 기존 RC구조물의 내진보강

Seismic Retrofit of Existing RC Structure Using Hysteretic Dampers



최 선 영*

* 한빛구조엔지니어링 기술연구소 소장

1. 머리말

우리나라에서는 1988년 이후부터 내진설계가 적용되었기 때문에, 그 전에 시공된 중·저층 건축물의 대부분은 내진설계가 되어 있지 않다. 1988년 이후에 시공되어 내진설계가 되었다고 하더라도 내진설계에 대한 인식이 부족하였기 때문에 내진상세가 취약하여 구조물 자체에 적절한 연성과 여유도를 갖고 있지 못하는 경우가 많아 지진에 취약한게 현실이다. 특히, 이 건물이 국가적으로 중요한 시설물일 경우, 언제 발생할지 모르는 대형지진에 대비하기 위하여 현행 내진기준에 적합하도록 다시 시공을 하거나, 적절한 보강을 통해 내진성능을 확보해야 한다.

내진설계가 되어 있지 않은 건물의 내진성능을 보강하는 방법은 단면증대, 철판보강, 탄소섬유 보강 등과 같은 여러 가지 방법들이 있다. 그러나 이들 대부분의 보강법들은 구조물을 전체적으로 리모델링할 경우 적용하기 쉬운 방법들로서 건물의 기능을 수행하면서 내진보강을 하기에는 공사기간이나 건물의 여건에 비추어 볼 때 한계가 있다. 또한, 이와같은 보강법에 의한 내진성능 향상방법은 하중수준에 따른 주구조체의 손상제어 및 다단계 요구성능조건을 만족시키는 구조물과 시공상 불확실성으로 인해 합리적이지 못한 방법이 될 수 있다. 이와 같은 불편함과 불합리성을 극복하기 위해 근래들어 기존건물에 에너지소산장치(이하 제진장치)를 도입하여

내진성능을 향상시키는 방법이 제시되고 있다^{1),2)}.

제진장치를 설치한 제진보강구조는 건축물의 변위와 변형이 집중된 부재의 변형률 등으로 손상을 정량화하여 그 수준을 적절하게 통제할 수 있다는 측면에서 성능기반설계의 개념을 구현할 수 있고, 예상되는 경제적 손실 또한 합리적으로 저감할 수 있다. 특히 제진장치의 하나로 사용되는 이력댐퍼(이력형 에너지 소산장치)는 강재의 탄소성특성을 이용하는 것으로, 온도 등 외부환경의 영향에 민감하지 않아 비용 대비 고효율의 구조성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다. 그리고 이력댐퍼에 의한 제진보강은 수평강성이 낮은 주구조체에 입력되는 에너지를 재하초기에 높은 수평강성을 나타내는 이력댐퍼에 집중시켜 소산함으로써 건축물의 진동 및 주구조체의 손상을 저감시키는 방법이기 때문에, 기존 구조체에 변화를 주지 않는 장점이 있다. 또한 이력댐퍼는 낮은 레벨의 진동상태로부터 소성역에 진입하는 한편 높은 인성을 보유하고, 가새형, 간주형, 전단벽형, 인방형 등으로 다양하게 주구조체와 간섭되지 않는 위치에 배치될 수 있기 때문에 기존 건축물의 내진성능을 향상시키는 방법으로 매우 실용적이다.

이력댐퍼 자체의 재료, 구성 등에 관한 연구는 많이 이루어졌으나, 이를 실무에서 쉽게 적용할 수 있는 제진보강 설계에 관한 연구는 부족한 실정이다. 특히 제진보강구조에서 이력댐퍼는 주구조체와 복합적으로 거동하여 댐퍼의 감쇠성능으로 인한 내진성능 향상도의 평가가 용이하지 않기 때문에,

표 1. 건물개요

규모	지하 1층, 지상 6층		
용도	통신시설		
구조형식	철근콘크리트조		
구조시스템	보통 모멘트저항골조		
재료 강도	콘크리트		$f_{ck} = 21\text{MPa}$
	철근	HD16 이하	$f_y = 300\text{MPa}$
		HD19 이하	$f_y = 350\text{MPa}$

실험을 병행하거나 모델링 및 해석에 매우 높은 신뢰도가 요구된다. 또한 개별 이력담퍼의 감쇠성능에 기반한 설계는 설정한 내진성능 목표에 이르기까지 감쇠정수의 반복 재산정이 필요하고 많은 시간이 소요되므로 실무에 직접 적용하기가 용이하지 않다. 특히, 기존연구 또는 예제는 대부분 정형적인 건물을 대상으로 해석과 성능평가를 수행하였으나, 실제 건물들은 비정형성을 띠기 때문에 기존 연구 또는 예제에서 언급하고 있는 방법을 따르기에는 여러모로 복잡하다.

본 연구에서는 내력에 기반하여 기존 철근콘크리트조 건축물의 내진성능을 평가하고 내진성능을 향상하기 위한 이력담퍼의 설계법을 제시하고자 한다.

2. 대상 건물의 개요

대상건물은 준공 후 약 16년이 경과된 통신시설로서, 해당 건물의 개요 및 기준층 평면은 표 1과 그림 1에 보이는 바와 같다. 그림 1에서 보듯이 횡력을 저항하는 코어가 건물의 한쪽에 몰려 있는 전형적인 비틀림 거동이 예상되는 평면형태를 나타내며, 특히 e_y 값이 e_x 보다 큰 것으로 보아 Y방향 지진보다 X방향 지진일 때 큰 비틀림 거동이 발생할 수 있음을 추정할 수 있다.

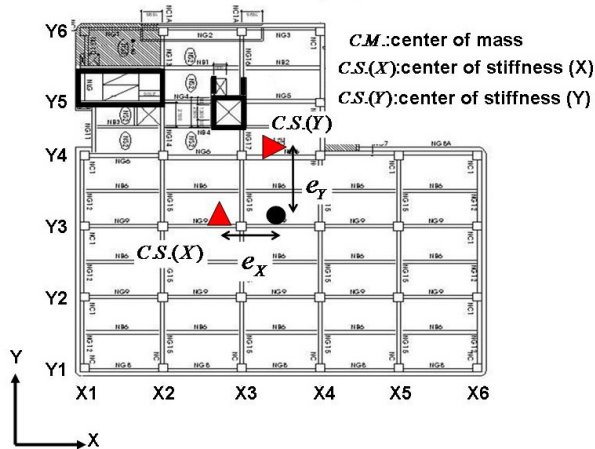


그림 1 기준층 평면

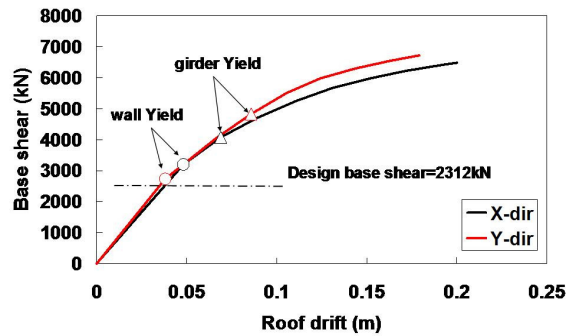


그림 2 밀면전단력-지붕변위 관계

3. 대상건물의 성능평가

3.1 비선형 정적해석

대상 건축물의 이력특성과 내진성능을 평가하기 위해 SAP 2000³⁾을 이용하여 일방향 비선형 정적해석(Push-over 해석)을 수행하였다. 기둥과 보, 그리고, 벽체 등과 같은 구조요소들은 양단에 집중힌지가 있는 보요소를 적용하였다. 특히 벽체의 경우 이형단면을 갖는 1개의 기둥으로 단면을 부여하였다. 이때 각 부재의 강성은 FEMA 356⁴⁾에서 제시한 바에 따라 균열강성으로서 휨강성은 0.5배 전단강성은 0.4배를 적용하였다. 각 층의 질량중심에 해당층의 모든 질량이 집중됨과 동시에 각 층의 모든 절점이 격막거동을 하도록 하였으며, 횡력의 수직분포는 등가정적해석 시 산출한 횡력분포에 따랐다. 힌지부분의 비탄성 요소는 이선형(bi-linear) 특성을 가지며, 최대소성변형각은 FEMA 356⁴⁾에서 비구속부재에 적용하는 최대회전성능을 참고하였다. 각 부재의 비선형 거동은 단부에 위치한 집중힌지의 거동에 따라 달라지게 되는데, 보의 경우 부재의 공칭항복모멘트를, 기둥의 경우 공칭 P-M상관관계를 집중힌지영역에 부여하였다. 힌지가 항복한 후 발생하는 비선형 거동은 기본적으로 FEMA 356⁴⁾에서 제시하는 비구속 철근콘크리트부재의 최대 연성을 참고하여 힌지물성을 지정할 때 지정하였다.

그림 2는 Push-over 해석결과 나타난 밀면전단력과 지붕변위의 관계로, 양방향 모두 설계지진하중을 넘어서서 벽체 저면이 항복하고, 그 후 연약골조에 있는 보가 항복하여 최종적으로는 연약축 골조의 보와 기둥에서 과도한 소성변형이 발생하여 파괴된 것으로 나타났다.

3.2 내진성능 평가

대상 건축물의 내진성능을 평가하기 위해 ATC-40⁵⁾에서 제시한 방법에 따라 설계지진(DBE: Design based earthquake)과

표 2 강성비로부터 최적의 이력댐퍼 내력수준 산출

층수	층강성 (kN/m)		강성비(κ)	β_{opt}	Q_D (kN)	k_D (kN/m)	D_y (m)	D_u (m)
	강한골조	연약골조						
6	-36,742	36,762	-	-	-605,074	-73,504	0.0082	0.0217
5	98,623	19,224	5.130	0.596	724,4341	79,399	0.0091	0.0400
4	167,100	18,700	8.936	0.683	1104,531	148,400	0.0074	0.0490
3	215,185	25,699	8.373	0.673	1189,618	189,486	0.0063	0.0503
2	356,210	29,241	12.182	0.725	2046,509	326,969	0.0063	0.0461
1	730,436	72,637	10.056	0.699	2700,374	657,799	0.0041	0.0223

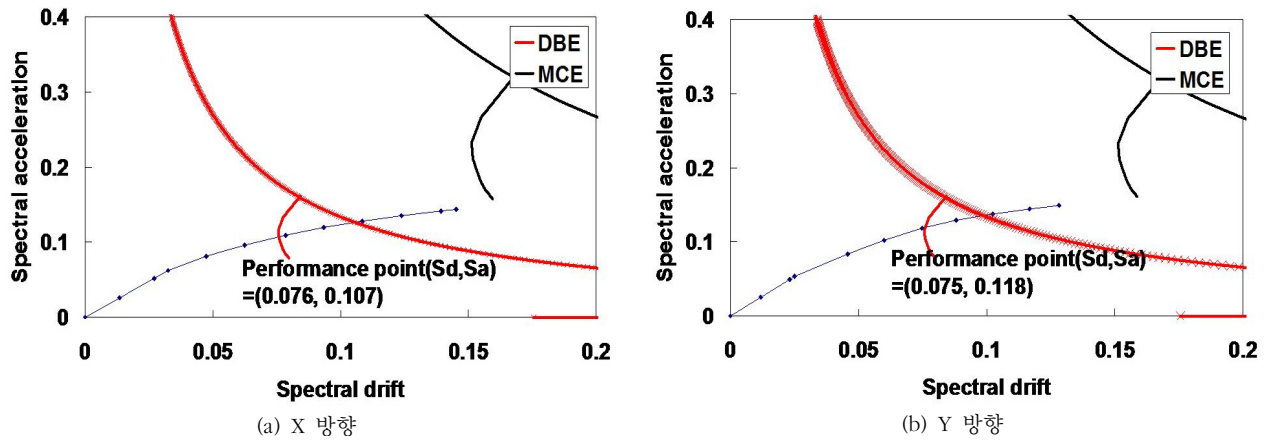


그림 3 ADRS에 의한 성능점 산출

최대가능지진(MCE: Maximum considered earthquake)수준에 대한 요구 가속도-변위 스펙트럼(ADRS: acceleration-displacement response spectrum)을 작성한 후, 해석결과 나타난 밀면전단력과 지붕변위의 관계로부터 구한 성능 ADRS를 비교함으로써 대상건물의 성능을 평가하였다. 그림 3(a)와 (b)에서는 각각 X방향과 Y방향에 대한 요구 스펙트럼과 성능스펙트럼을 비교하고 있다. 설계지진 수준에 대해서는 요구성능을 만족하였으나, 최대가능 지진 수준에 대해서는 붕괴하는 것으로 나타났다. 이는 최대지진이 발생하더라도 건물은 붕괴하지 말아야 한다는 내진설계의 대전제를 만족하지 못하고 있을 뿐만 아니라, 통신시설로서 국가 중요시설에 해당하므로 내진보강이 필요한 것으로 나타났다.

3.3 대상건물의 거동특성과 파괴양상

비선형 일방향해석결과 나타난 대상건물의 파괴양상을 살펴보면, 설계지진 수준의 하중단계에서 코어벽체의 저면에서 항복이 발생한 후, 평면 비정형에 의한 비틀림거동으로 인해 연약골조의 보와 기둥이 항복하면서 과도한 변형이 발생함으로써 최종 파괴에 도달하였다.

4. 제진보강

4.1 제진보강 개요

일반적인 제진보강은 구조체에 변화를 주지 않고 제진장치에 에너지흡수에 의한 응답저감효과를 이용한 방법이다. 그러나, 본 연구에서는 좌굴이 방지된 가새형 이력댐퍼를 적용함으로써 댐퍼를 설치한 골조의 강성과 강도를 함께 증진시켜, 구조체의 편심거동방지와 연성증대효과를 통해 내진성능을 향상시켰다.

대상건물은 수직적으로는 거의 정형에 가까운 반면 수평적으로는 비틀림비정형에 해당하므로, 평면상에서 편심이 가장 적게 발생할 것으로 예상되는 위치의 각 층에 걸쳐 균일하게 배치하였다. 이력댐퍼의 최적 위치는 그림 1에 나타난 Y1행의 X3와 X4열 사이의 골조에 이력댐퍼를 설치할 경우 비틀림이 가장 적게 발생할 것으로 판단하였다. 이 때, 이력댐퍼의 루프는 국부좌굴에 의한 복원력특성의 비대칭성과 불완전성은 발생하지 않으며, 동적하중에 대한 좌굴이나 파단으로 인한 강성이나 내력저하 등이 발생하지 않는 완전탄소성의 형태를 취하는 것으로 가정하였다.

4.2 이력댐퍼의 설계

일반적인 제진보강구조의 하중-변형관계는 그림 4와 같이 충전단력(Q)-충간변형(δ) 관계로 나타낼 수 있다. 여기서, Q_u 는 제진보강구조의 충전단력, Q_{Dy} 는 이력댐퍼가 부담하는 내력, β 는 이력댐퍼의 내력분담율, κ 는 이력댐퍼와 주구조체의 강성비이다.

제진보강구조의 등가점성감쇠비 ξ_{eq} 는 β 에 대한 최대값이 존재하기 때문에, 제진보강구조의 최대충전단력 Q_u 에 대한 이력댐퍼의 내력분담율(β)을 적정 범위로 조절함으로써 지진 시 주구조체의 응답을 효과적으로 제어할 수 있다.

$$\beta Q_u = k_D R_{Dy} \quad (1-\beta) Q_u = k_F R_{Fy} \quad (1)$$

$$\frac{\beta}{1-\beta} = \kappa \frac{R_{Dy}}{R_{Fy}} = \kappa \frac{\gamma_F}{\gamma_D} \quad (\kappa = \frac{k_D}{k_F}) \quad (2)$$

여기서, β 는 이력댐퍼의 내력 수준을 나타내는 지표로서, 식 (1), 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, K_F 와 K_D 는 각각 주구조체와 댐퍼의 수평강성, R_{Fy} 와 R_{Dy} 는 항복 시 충전변형 각, 그리고, γ_F 와 γ_D 는 주구조체와 댐퍼의 소성율이다.

또한, 등가점성감쇠비 ξ_{eq} 는 제진보강구조의 최대변형에너지 E_S 와 이력저동에 의한 소산에너지 E_D 를 포함하는 식 (3)과 같이 나타내고, 식 (1)과 식 (2)를 이용하면 β 와 κ 에 대하여 식 (4)와 같이 정리되고, 이로부터 강성비 κ 를 이용하면, 식 (5)에서와 같이 최적의 댐퍼의 내력분담율 β_{opt} 를 구할 수 있다⁶⁾.

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} \quad (3)$$

$$\xi_{eq} = \frac{\pi}{2} \left[1 - \frac{\beta^2}{(1-\beta)\kappa\gamma_F} - \frac{1-\beta}{\gamma_F} \right] \quad (4)$$

$$\beta_{opt} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1+\kappa}} \quad (5)$$

그런데 대상건물의 경우 평면적으로 비틀림비정형에 해당하므로 그림 4와 같이 구조물의 거동을 단순화하기 어려운데 현실이다. 따라서, 횡력에 대해 대상건물이 비틀림거동이 발생하지 않도록 연약골조에 가새형댐퍼를 설치한다. 연약골조 부분의 강성을 강한골조의 강성과 동일하도록 유도함과 동시에 연약골조의 연성을 극대화시킴으로써 건물 자체의 성능을 증대시키는 방법을 제시할 수 있다. 이 경우 그림 4와 같은 제진보강구조의 이력특성을 연약골조에 국한하여 적용한다

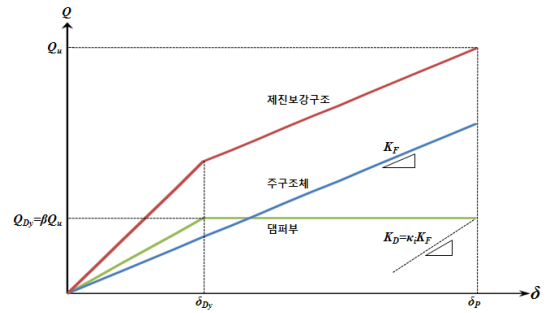


그림 4 제진보강구조의 이력특성

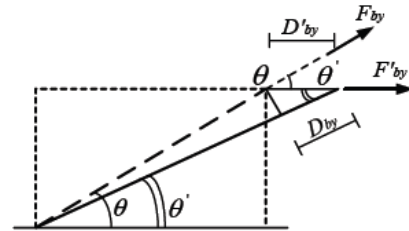


그림 5 가새형댐퍼의 하중 산출

면, 가새형댐퍼의 설계를 더욱 단순화시킬 수 있다.

강한골조와 연약골조의 강성을 동일하게 유도하기 위해 건물전체에 대한 일방향가력해석 또는 강한골조와 연약골조의 일방향가력해석을 통해 각 골조의 강성을 산출한 후, 연약골조의 강성을 강한골조의 강성과 동일하게 하기 위한 제진 장치의 충강성비(κ)와 최적의 이력댐퍼 내력수준(β_{opt})을 표 2와 같이 정리할 수 있다. 또한, 연약골조의 최대강도와 표 2에서 구한 강성비(κ)를 식 (1)에 적용하면, 댐퍼의 항복강도를 구할 수 있으며, 이로부터 댐퍼의 항복 시 충전변형을 표 2과 같이 구할 수 있다. 그리고 댐퍼의 최대 횡변위는 연약골조의 최대횡변위와 동일하게 정하였다.

4.3 이력댐퍼의 산정

표 2의 κ 를 이용하여 각 층의 내력을 확보하기 위해 필요한 이력댐퍼의 강성 k_D 를 구할 수 있다. 가새형 이력댐퍼가 그림 5와 같이 거동할 때, 절점의 횡변위가 아주 작다고 가정하면 식 (6), 식 (7), 식 (8)을 이용하여 각 층의 가새형 이력댐퍼의 강성(k'_D), 가새형 이력댐퍼의 항복강도(Q'_D), 가새형 이력댐퍼의 최대변위(D'_u)를 구할 수 있다.

$$k'_D = k_D / (2\cos\theta)^2 \quad (6)$$

$$Q'_D = Q_{Dy} / (2\cos\theta) \quad (7)$$

표 3 가새형 댐퍼의 물성

층수	Q_D' (kN)	k_D' (kN/m)	D_y' (m)	D_u' (m)
6	-473	-89,662	0.0064	0.0169
5	604	110,484	0.0076	0.0333
4	921	206,500	0.0062	0.0409
3	992	263,671	0.0052	0.0419
2	1707	454,979	0.0052	0.0385
1	2252	915,330	0.0034	0.0186

$$D_u' = D_u / (2\cos\theta) \quad (8)$$

위 식에 따라 각 층에 배치되는 이력담퍼의 물성을 표 3에서 정리하였다.

5. 제진보강구조의 성능평가

5.1 제진보강구조의 일방향 가력해석

그림 6은 제진보강된 건물에 대해 X방향과 Y방향으로 비선형 일방향해석을 수행한 결과이다. 제진보강된 경우 설계 지진력을 넘어서 직후 벽체가 항복하였으며, 최대 밀면전단력은 X방향과 Y방향 각각 8,766kN과 6,911kN으로 제진보강 이전보다 X방향은 1.35배, Y방향은 1.03배 증가하였다. 그리고, 지붕변위는 X방향과 Y방향 각각 0.283m와 0.199m로서 제진보강 이전보다 각각 1.42배와 1.11배 증가하였다. X방향

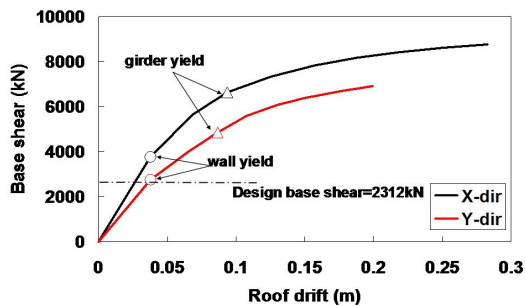


그림 6 제진보강 후 밀면전단력-지붕변위 관계

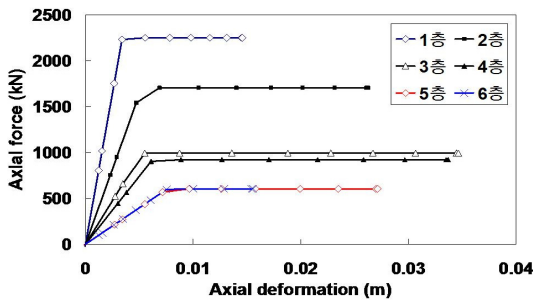


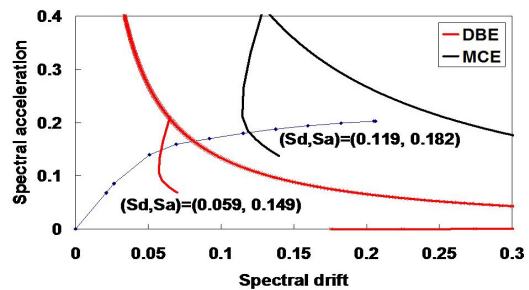
그림 7 가새댐퍼의 하중-변형관계

의 경우 비좌굴가새가 포함되어 상대적으로 강도와 변형능력이 증가하였으나, Y방향의 경우 가새의 추가로 인한 내력 또는 변형능력이 조금 증가하였다. 이와 같이 미미한 증가는 첫째, Y방향 하중에 대해 벽체와 가새가 인장-압축의 형태로 건물이 저항하기 때문에 발생한 것으로 보인다.

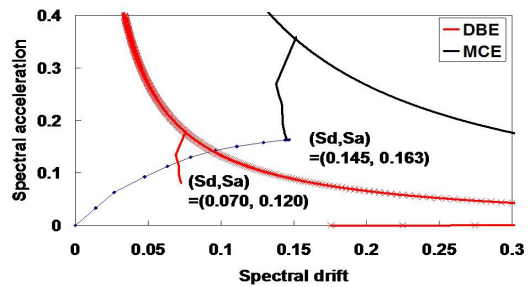
그림 7은 가새댐퍼의 하중-변형관계로서 6층을 제외한 모든 층이 3~4단계에서 최대강도에 도달한 후 가새의 에너지흡수능력으로 횡력에 저항하였음을 보여주고 있다. 이와 같이 가새댐퍼가 거의 동시에 항복하면서 횡력에 저항한다는 것은 가새 댐퍼가 전층에 걸쳐 횡력에 효과적으로 저항하고 있음을 의미하는 것으로, 앞에서 제시한 각 골조별 하중-변위 관계를 이용하여 가새댐퍼를 설계하더라도 그 효율성은 크게 증가할 것임을 보여주고 있다.

5.2 제진보강구조의 성능평가

제진보강구조의 성능을 평가하기 위한 요구 ADRS와 성능 ADRS를 그림 8에서 비교하였다. X 방향과 Y방향 모두 최대 가능지진에 대해서도 붕괴수준을 넘어서는 부재는 나타나지 않아 요구성능을 만족하였다. 이로부터 대상건물의 경우 편심을 제어하는 가새댐퍼를 적절하게 설치하는 것만으로도 구조물의 비틀림을 방지할 뿐만 아니라, 직각방향 하중에 대해서도 어느정도 횡력저항성능을 증대시켜줌으로써 건물 전체적으로 내진성능은 개선되었다고 볼 수 있다.



(a) X 방향



(b) Y 방향

그림 8 제진보강구조의 성능평가


6. 요약

준공 후 상당한 시간이 지나 내진설계가 되지 않았거나 내진상세가 이루어지지 않은 건물의 부족한 내진성능을 보완하기 위한 방법의 하나로 좌굴이 제한된 가새형 댐퍼를 적용할 수 있다. 이 방법을 적용할 경우, 기존 내진보강법의 불확실성을 줄일 수 있었음에도 불구하고, 댐퍼의 설계과정이 복잡하여 실무에 적용하기 어려웠다. 그러나 본 원고에서는 강성과 강도개념을 적용한 댐퍼의 설계법을 적용함으로써, 실무에서 쉽게 적용할 수 있도록 하였다. 준공된 지 16년이 지난 비틀림 비정형 건물에 대한 내진성능을 평가한 후, 가새형 댐퍼로 보강한 결과는 다음과 같다.

- ① 일방향해석결과 나타난 골조별 하중-지붕변위의 관계를 이용하여, 연약골조의 강성을 강한 골조의 강성과 일치시키고, 이 강성비로부터 댐퍼가 부담하는 최적의 내력비율을 정하여 내진보강을 수행한 결과, 가새를 설치한 방향으로 가새형댐퍼가 비틀림 방지와 연성증대효과를 구조물에 부여하여 성능이 획기적으로 증가하였다. 또한, 그 가새의 직각방향 하중에 대해서도 가새를 설치함으로써 비틀림 강성이 증가하고, 가새와 코어벽체가 인장과 압축으로 횡력에 저항하여 횡저항 성능이 증가하였다.
- ② 내진성능이 부족한 비틀림 비정형 건물의 내진성능을 증진시키기 위해 가새형 댐퍼를 적용함에 있어, 댐퍼의 강성을 이용하여 구조체의 비틀림 거동을 최소화하고,

연성을 증진시키는 방법을 채택할 경우, 실무자들이 보다 쉽게 적용할 수 있으면서 그 효과도 상당히 클 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. 김진구, 성능수준 만족을 위한 가새형 소성 감쇠기의 설계, 한국지진공학회 논문집 제 5권 제 6호(통권 제22호), 2001. 12, p.47-54.
2. Kelly, T. "In-structure damping and energy dissipation," Holmes Consulting Group, 2001.
3. Computer and Structures Inc., "SAP 2000: Analysis and Design Ver.14," Computer and Structures Inc.,
4. FEMA, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA-356, Federal Energy Management Agency, Washington D.C., 2000.
5. ATC, Seismic evaluation & retrofit of concrete buildings, ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
6. Inoue, K. and Kuwahara, S. "Optimum strength ratio of hysteretic damper," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, 1998, pp. 577-588. 

[담당 : 고동우 편집위원]