

인방보에 마찰형 감쇠기가 설치된 전단벽의 제진효과

Control Effectiveness of Shear Walls Connected by Beams with Friction Dampers

정 희 산* 민 경 원†

Chung, Hee-San Min, Kyung-Won

(논문접수일 : 2008년 10월 25일 ; 심사종료일 : 2008년 12월 29일)

요 지

휨거동을 하는 전단벽을 대상으로 동일한 총 단면적을 갖는 1개의 전단벽과 마찰형 감쇠기로 연결된 전단벽의 내진성능을 수치해석을 통해 비교하였다. KBC 2005 설계스펙트럼을 근거로 축소 조절한 7개의 지진파를 입력하중으로 마찰형 감쇠기가 설치된 전단벽의 평균응답을 분석하였다. 마찰형 감쇠기의 중요한 설계변수인 기준 마찰력인 슬립하중은 각층의 마찰형 감쇠기 위치에 생기는 수직방향 전단력의 총합의 5, 10, 20, 30, 60, 90%값으로 하여 슬립이 특정한 층에 편중되지 않도록 하였다. SeismoStruct 프로그램을 이용해 비선형시간이력 해석을 수행하여 밀면 전단력, 에너지 소산량, 1층 벽체곡률, 최상층변위 측면에서 마찰 감쇠기의 제진성능을 분석하였다. 기준마찰력의 30%이하 수준의 총 마찰력을 갖는 마찰 감쇠기가 우수한 제진성능을 보였다.

핵심용어 : 마찰형 감쇠기, 슬립하중, 전단벽, 비선형 시간이력해석

Abstract

Numerical analysis of shear walls governed by flexural behavior is conducted for the seismic control performance of proposed friction dampers installed at the center of coupling beams. Control effectiveness of shear walls connected by beams with the proposed dampers are compared for single shear wall with same flexural rigidity. Average responses of the shear walls with the dampers are found with seven scaled-down earthquakes based on KBC 2005 design spectrum. Slip load is the most important design parameter. It is designed to be 5, 10, 20, 30, 60, 90% of total vertical shear force at damper location to prevent damper slip in specific stories. Nonlinear time-history analysis is conducted by using SeismoStruct analysis program. Seismic control performance of the dampers is evaluated for base shear, energy dissipation, curvature and top-floor displacement. Results show that the dampers are the most effective in reducing the responses when their total slip load is 30% of total vertical shear force.

Keywords : friction damper, slip load, shear wall, nonlinear time-history analysis

1. 서 론

우리나라 공동주택의 대부분을 차지하고 있는 전단벽식 아파트는 평면계획의 용이성과 내부 공간의 활용측면에서 뛰어난 구조형식이라 할 수 있다. 그러나 그림 1과 같이 전단벽의 방향이 세대간을 구분해주는 단변방향으로 대부분 분포하고 있어 단변방향으로 횡저항에 강할 뿐 장변방향으로는 취약함을 보이고 있다. 장변방향으로는 그림 1에서와 같이 세대 평면이 다른 양쪽 세대에서의 전단벽 일부분을 볼 수 있다.

본 논문에서는 전단벽식 아파트의 부족한 내진성능확보를

위하여 구조부재를 추가하는 기존의 강성보강법 대신 마찰형 감쇠기(friction dampers)를 이용한 보강방법을 제시하고자 한다. 감쇠기는 이력거동에 의한 에너지 소산을 통해 구조물의 진동에너지를 흡수하여 구조물의 피해를 최소화한다. 일반적으로 골조형식의 경우에는 가새를 이용하여 감쇠기를 설치하게 된다. 골조형식 구조물에서는 가새 설치 시에 상대적으로 횡강성이 큰 가새에 전단력이 집중되며 이곳에 감쇠기를 설치하여 효과적으로 지진에 의한 진동에너지를 소산시키게 된다. 이렇게 가새를 이용한 감쇠기는 이미 외국에서 많은 연구가 진행되었고, 적용된 사례도 많이 있다. 그러나 전

† 책임저자, 정희원 · 단국대학교 건축공학과 교수
Tel: 031-8005-3734 ; Fax: 031-8005-3755
E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

* 단국대학교 건축공학과 석사과정

· 이 논문에 대한 토론을 2009년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

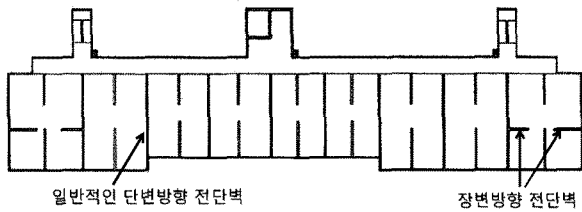


그림 1 9세대를 가지는 공동주택 평면

단벽식 구조의 경우 감쇠기를 설치하기 위해 가새를 이용하는 것은 효과적이지 못하다. 왜냐하면 전단벽의 강성이 커서 가새로 전달되는 하중이 크지 않아 충분한 양의 에너지를 소산시킬 수 없기 때문이다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위하여 전단벽식 아파트에 적합한 감쇠기 및 설치형식의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 장변방향으로 부족한 전단벽식 공동주택의 내진성능을 향상시키기 위한 방안으로 장변방향으로 이웃한 전단벽을 이어주는 인방보의 중간에 마찰형 감쇠기를 설치하는 것을 다루고 있다. 정희산(2008) 등의 논문에서와 같이 이웃하는 전단벽을 연결하는 인방보의 양쪽이 구조적으로 취약하여 강한 지진에 대하여 소성힌지(plastic hinge)가 발생하기가 쉽다. 따라서 인위적인 소성힌지를 유도하기 위하여 힌지와 같은 슬립(slip)이 일어나도록 슬립하중을 설계한 마찰형 감쇠기를 설치하였다.

전단벽에 감쇠기를 이용한 보강방법과 관련된 기존 연구는 다음과 같다. 홍성걸과 이지형(2005)은 전단벽 보강을 위하여 stayed column의 에너지 소산에 의한 감쇠효과와 강성증대효과가 있음을 확인하였으며, 박지훈과 곁길환(2007)은 전단벽-골조 시스템에 대한 마찰형 감쇠기의 성능검증을 위하여 설치형식 및 마찰재의 크기별로 비선형해석을 수행하였다. Killin Lu와 Xiaohan Wu(2000)는 전단벽의 중앙에 고무패드 혹은 마찰재를 설치하여 에너지 소산이 일어나도록 새로운 전단벽 시스템을 개발하였다. Holden, T.(2003) 등은 프리캐스트 콘크리트벽에 설치된 포스트텐션(post-tension)을 받는 철근(tendon)에 의해 이력거동이 발생함을 실험으로 검증하였다. 정희산(2008) 등은 두 개의 인접한 전단벽을 대상으로 강체 인방보 중간에 마찰형 감쇠기를 설치하는 방법을 제안하고 순수하게 강체 인방보만을 통해 얻어진 강성보강 방법과 비교하였다.

정희산(2008) 등의 논문에서는 분할된 벽체를 강체 인방보로 연결하여 단순히 강성만 증가시키는 방법과 벽체를 마찰형 감쇠기를 연결하여 강성 및 감쇠를 증가시키는 방법의 비교를 통해 마찰형 감쇠기의 연결 시의 제진성능을 분석하였다. 그러나 특정한 1개의 지진파를 이용하였기에 불특정한 다른 지진파에 관한 효능을 검증하지 못하였으며 다수 지진파의 생성과 축소조정에 관한 논리도 다루어진 바 없어 응답

분석에 한계가 있다. 중요한 설계변수인 마찰형 감쇠기의 슬립하중(slip load)을 층에 생기는 최대전단력의 부분으로 산정하였기에 슬립이 전단력이 큰 곳에 편중되었다. 마지막으로 응답분석이 최상층 변위, 층간변위 및 밀면전단력에 국한되어 에너지 소산의 특성을 파악하지 못하였다.

본 논문에서는 제안된 마찰형 감쇠기의 타당성을 검증하기 위하여 KBC 설계스펙트럼에서 유추한 7개의 지진하중을 전단벽 구조물의 비탄성 및 부정정 특성을 고려하여 축소 조정하였다. 이를 입력으로 하여 많은 응답을 평균하여 제진성능을 분석하여 신뢰성을 파악하였다. 마찰형 감쇠기의 중요한 설계변수인 슬립하중은 각층의 마찰형 감쇠기 위치에 생기는 수직방향 전단력의 총합의 5, 10, 20, 30, 60, 90%값으로 하여 슬립이 특정한 층에 편중되지 않도록 하였다. 또한 전단벽 모델은 수직강성을 수직트러스 모델로, 각층의 슬래브를 강체보 모델로, 벽체의 수평강성을 스프링 모델로 변경하는 MVLEM모델을 이용하는 방법 대신 섬유 보요소(fiber beam element)로 단일화하는 단순 방법을 적용하였다. 마지막으로 2개의 다른 중력하중에 관한 2세트의 지진하중에 관한 해석을 수행하여 최상층변위, 밀면전단력, 층간변위는 물론 회전각분포, 전단벽의 손상도를 의미하는 벽체곡률, 에너지 소산량, 최적마찰력과 전단벽의 개수에 따른 변화 등 다양한 응답을 평균하여 분석함으로써 제안된 마찰형 감쇠기의 신뢰성을 검증하였다.

2. 전단벽의 휨변형을 이용한 마찰형 감쇠기

횡저항 시스템으로 효과적인 전단벽식 구조는 폭과 높이에 따라 휨거동과 전단거동에 의해 저항하게 된다. 그 비가 3이상인 전단벽은 외팔보와 같이 주로 휨거동에 의해 지배된다.

정희산(2008) 등의 논문에서는 두 개의 전단벽이 인접해 있을 때 횡하중에 의한 휨변형이 나타나 있다. 인접한 전단벽의 경우 휨변형 시 양끝단의 변형에 의해 수직변위와 회전각이 발생하게 된다. 두 벽체를 연결하는 인방보가 있다면 인방보에 큰 휨변형이 발생하게 된다. 따라서 그림 2에서와

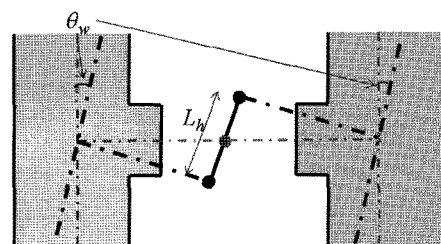
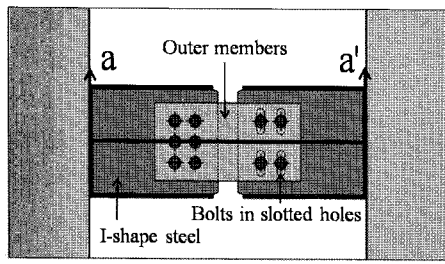
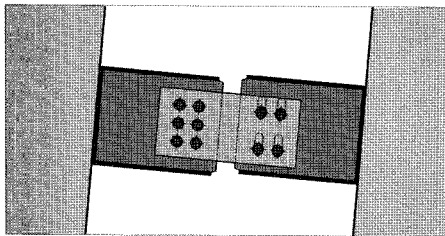


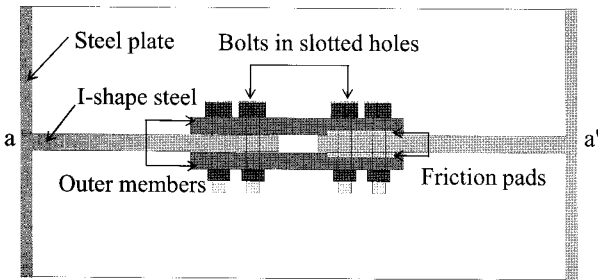
그림 2 전단벽의 휨변형으로 인해 발생하는 상대변위



(a) 입면도



(b) 벽체의 휨변형에 의한 슬롯볼트형 접합부의 슬립



(c) 단면도

그림 3 인방보 사이에 설치된 슬롯볼트형 접합부

같이 두 벽체에 각각 강체에 가까운 부재를 연결할 수 있다면 그림 상의 L_h 와 같은 큰 상대변위가 발생할 수 있게 되고 여기에 마찰형 감쇠기를 적용하면 에너지를 소산시켜 전단벽의 감쇠능력을 향상시킬 수 있게 되며 궁극적으로 동적응답이 감소하게 된다.

특히, 내진설계가 되지 않은 노후 벽식 아파트의 경우에 그림 1에서 볼 수 있는 것과 같이 단변방향으로는 긴 세대간 벽에 의해 충분한 벽량을 확보하게 되나, 장변방향으로는 상대적으로 벽의 길이가 짧아지고 그 수도 부족하기 때문에 내진성능이 부족한 경우가 많다. 따라서 상대적으로 길이가 짧은 두 벽체 사이에 발생하는 상대변위를 이용한다면 에너지 소산효과를 거둘 것으로 예측할 수 있다. 정희산(2008) 등은 그림 3(a)와 (b)같이 강성이 큰 캔틸레버형 인방보를 두 벽체 사이 설치하고, 중앙부에 수직방향의 상대변위를 허용하는 슬롯볼트형 접합부 형태의 마찰형 감쇠기를 설치하는 방법을 제안하였다.

그림 3(c)는 전단벽의 휨거동을 이용한 슬롯볼트형 접합부의 설치형상과 변형을 나타낸다. 마찰형 감쇠기는 H형강

2개, 덮판 플레이트 2개, 접합용 강판 2개 그리고 마찰재인 동판 2개로 이루어져 있다. 벽체와 마찰형 감쇠기는 앵커를 이용하여 접합한다. 마찰형 감쇠기의 좌측부는 볼트접합부이고 우측부는 슬롯 홀을 이용한 마찰부분이다. 그림 2와 같이 벽체가 휨변형에 의해 θ_w 의 회전각이 발생하면 마찰형 감쇠기는 그림 3(b)와 같이 슬롯 홀의 길이만큼 변형을 하면서 에너지 소산이 일어나게 된다. 마찰형 감쇠기는 슬롯형 홀을 이용하여 수직변위가 발생하도록 유도하고 철판과 마찰재인 황동판사이의 마찰계수 μ 와 볼트의 조임력에 T 에 의한 슬립하중이 결정된다. 이때 결정된 슬립하중과 수직변위를 통해 이력거동으로 인한 에너지 소산량이 결정된다.

3. 전단벽과 마찰형 감쇠기 모델링

본 연구에서는 짧은 수평 길이를 갖는 벽체 사이에 인방보 형식으로 설치된 마찰형 감쇠기의 제진성능을 긴 수평 길이를 갖는 단일벽체의 내진성능과 비교하여 제안된 제진보강의 성능을 검증한다. 이를 위해 벽체길이를 1/2로 줄인 2개의 전단벽을 마찰형 감쇠기로 연결한 경우와, 1/3로 줄인 3개의 전단벽을 마찰형 감쇠기로 연결한 경우의 제진효과를 마찰형 감쇠기가 설치되지 않은 단일벽체모델과 비교하였다. 해석대상 벽체는 단일벽체 모델 W1, 2등분된 벽체를 마찰형 감쇠기로 연결한 모델 W2, 3등분된 벽체를 마찰형 감쇠기로 연결한 모델 W3으로 구분된다. 각각의 해석모델 치수와 마찰형 감쇠기 설치형상은 그림 4와 같다.

벽체는 높이 36m로서 층고 3.0m로 가정하여 층당 1개씩 총 12개의 보요소(beam element)로 할증계수하여 모델링 하였다. 모델 W1은 길이 6m의 단일벽체, 모델 W2는 길이 3m의 2개 벽체, 모델 W3은 길이 2m의 3개 벽체로 구성되며 각 모델에서 연결되는 벽체의 간격은 공통적으로 2m이다. 모델 W2 및 W3은 격막작용을 고려하여 변형 시 벽체

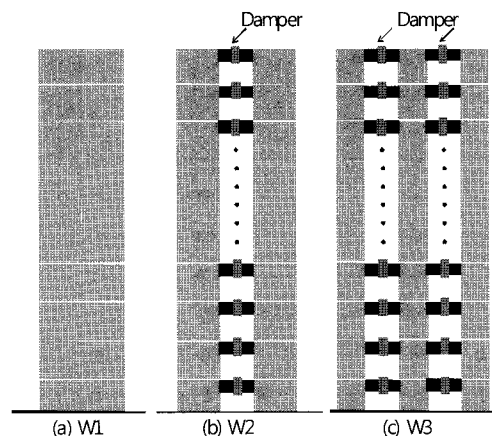


그림 4 해석 대상벽체

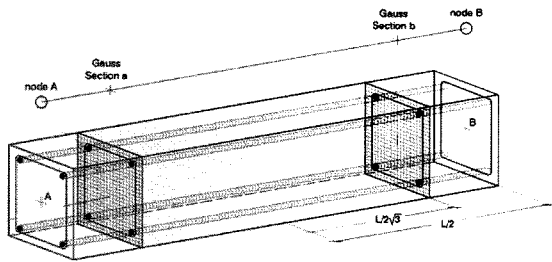


그림 5 섬유보요소(Fiber Beam Element) 모델링

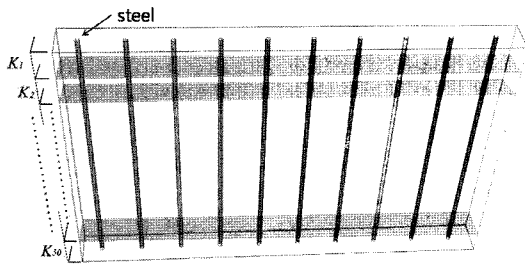


그림 6 벽체단면 모델링

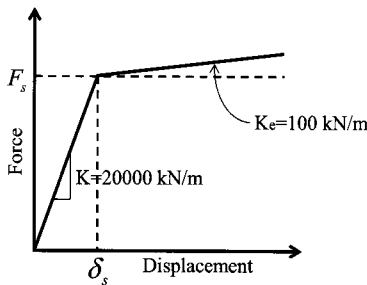


그림 7 마찰형 감쇠기의 역학적 모델

간격은 일정하게 유지된다. 각 모델의 입면 형상을 그림 4에 나타내었다.

벽체 두께는 300mm로서 동일하고 결과적으로 각 모델 벽체 총 단면적은 $1.8 \times 10^6 \text{mm}^2$ 로서 동일하다. 콘크리트 강도 $f_{ck} = 27 \text{Mpa}$ 이고, 철근 강도 $f_y = 495 \text{Mpa}$ 인 재료를 사용하였다. 철근비는 0.005로서 균등분포로 가정하였다. 해석 프로그램으로 이용한 SeismoStruct에서 비탄성 재료의 휨거동을 모사하기 위해 섬유보요소(Fiber Beam Element)를 이용한 모델링을 하였다. 프로그램에서 섬유보요소는 양 단부에서 부재길이의 21%에 해당되는 위치에 Gauss 적분점이 있으며, 3차의 형상함수가 적용된 요소로 그림 5에 나타나 있다. 본 논문에서 적용된 벽체모델 W1, W2, W3의 단면은 50개로 분할하였으며, 단면 모델링 형상은 그림 6과 같다. 정희산(2008) 등의 논문에서와 같이 철근의 재료모델은 Menegotto와 Pinto(1973)가 제안하고 Filippou(1983) 등이 개선한 모델로서 Bauschinger 효과가 반영된 이력 특성을 갖는다. 콘크리트 재료모델의 특성은 Mander(1989) 등이 제시한 구성식

과 Enrique Martinez-Rueda와 Elnashai(1997)가 제안한 이력법칙이 적용된 모델이다.

마찰형 감쇠기는 벽체와 벽체 사이의 두 캔틸레버 인방보 사이에 연결된 링크요소로 모델링하였다. 재료모델은 해석프로그램의 제한 때문에 Coulomb 마찰을 정확하게 모델링하기 힘들어 그림 7과 같이 초기 강성이 $K = 20000 \text{kN/m}$, 항복 후 강성비가 $K_e = 100 \text{kN/m}$ 인 이선형(bilinear)모델을 적용하였다. f_s 는 마찰형 감쇠기의 슬립하중으로 설계자가 지정하는 변수이며, δ_s 는 슬립 발생 시의 변위이다. 캔틸레버 인방보는 강체보로 모델링하였다. 인방보의 강성이 제진효과에 큰 영향을 미치며 실질적으로 2m경간의 강체보는 상당히 큰 춤이 요구된다. 그러나 본 연구에서는 이와 같은 설치방식을 통해 복수의 벽체 사이에 마찰형 감쇠기를 설치함으로써 얻을 수 있는 제진효과를 확인하는 단계의 연구로서 해석조건 수를 줄이기 위해 인방보를 강체로 가정하였다.

벽체 W1의 질량은 각 층에 등분포 된 것으로 가정하였으며, 건축구조설계기준의 전단벽식 건축물 기본진동주기 산정식에 따라 목표주기를 결정하고 이를 만족시키는 질량을 찾았다. 적용된 주기 산정식은 다음과 같다.

$$T_a = 0.0743h_n^{0.75} / \sqrt{A_c} \quad (1)$$

여기서,

$$A_c = \sum A_e [0.2 + (D_e/h_n)^2]$$

$$D_e/h_n \leq 0.9$$

여기서, h_n 은 건물 전체높이, A_e 는 지진하중방향에 평행한 벽체의 전단단면적, D_e 는 지진하중방향에 평행한 전단벽 길이이다. 적용된 질량에 따른 벽체의 1차 모드 고유주기는 ATC-40을 참조하여 벽체의 휨강성이 균열에 의해 80%로 저감된 것으로 가정한 탄성구조해석 모델을 대상으로 고유치 해석을 수행하여 시행착오를 통해 결정하였으며, 목표주기와 동일함을 검증하였다. 나머지 모델 W2와 W3에서도 격막으로 연결된 한 층의 질량은 벽체의 수와 무관하게 W1과 동일한 것으로 가정하였다. 결과적으로 얻어진 기본진동주기와 총 질량을 표 1에 정리하였다.

중력하중에 대한 비선형정적해석을 수행하고, 이어서 지진 하중에 대한 비선형시간이력을 수행하였다. 중력하중은 자중

표 1 대상구조물의 기본진동주기 및 총질량

모델명	기본진동주기 (sec)	총 질량 (ton)
W1	2.276	3089
W2	4.551	
W3	6.827	

의 일부를 직교방향의 벽체를 포함한 다른 부재가 부담하는 것으로 가정하여 자중의 20%와 40%를 적용하였으며, 이후 중력하중조건을 각각 P20과 P40으로 명칭 한다. 비선형시간이력해석은 SeismoSoft Ltd의 Stelsios Antoniou, Rui Pinho가 개발한 SeismoStruct 프로그램을 사용하여 수행하였다.

4. 지진하중 및 마찰력

지진하중으로는 KBC2005의 지반조건 Sd에 해당되는 설계스펙트럼에 따라 7개 인공지진을 생성한 뒤 다음과 같이 스케일링하여 기본지진하중으로 사용하였다. 인공지진의 지반가속도 시간이력 생성에는 SIMQKE를 사용하였으며 시간 간격 0.01초로 동일 설계스펙트럼에 대해 기저수(seed number)만 바뀌며 생성하였다. 지반가속도의 포락함수는 Jennings(1968) 등이 제안한 B형을 사용하였으며, 초기 상승구간은 4초, 정상부 지속시간은 11초이며 전체 지속시간은 40초이다. 인공지진의 스케일링은 지진하중에 의한 탄성 전도모멘트가 벽체 W1의 공칭휨모멘트강도와 같아지도록 다음 등식에 기초하였다.

$$M_e / \mu = M_n \tag{2}$$

여기서 M_e 는 탄성해석에 의한 전도모멘트, μ 은 연성계수, M_n 은 벽체의 공칭휨모멘트강도이다. 연성계수는 KBC2005를 참고하여 전단벽 구조물의 반응수정계수 4.5를 초과강도 계수 2.5로 나눈 1.8을 적용하였다. 탄성전도모멘트를 통상의 반응수정계수 R 대신 연성계수로 나누어준 것은 W1이 정정구조물이고 재료강도에 안전율이 적용되지 않았으므로 구조해석상 초과강도가 반영될 수 없기 때문이다. KBC2005 설계스펙트럼과 스케일링된 기본지진하중의 설계스펙트럼 및 평균응답스펙트럼을 그림 8에 나타내었으며, 대표적인 기본지진하중의 시간이력을 그림 9에 나타내었다. 전단벽체의 내진성능 평가를 위한 지진하중은 기본지진하중의 1.0 및 2.0 배를 적용하였으며 이후에는 EQ1 및 EQ2 지진하중으로 명칭 한다. 이후에 제시하는 각각의 지진하중에 대한 해석결과는 7개 시간이력에 대한 해석결과의 평균이다.

마찰형 감쇠기는 인방보를 2등분하여 절단한 지점에 설치되는 것으로 모델링하였으며 인방보는 강체로 가정하였다. 마찰형 감쇠기의 마찰력 결정을 위한 기준마찰력은 스케일링된 기본지진하중에 대한 층전도 모멘트의 총합을 캔틸레버 인방보의 길이(=벽체 간격 l_g 의 1/2)로 나눈 값을 사용했으며, 적용된 총 마찰력은 기준마찰력의 5, 10, 20, 30, 60

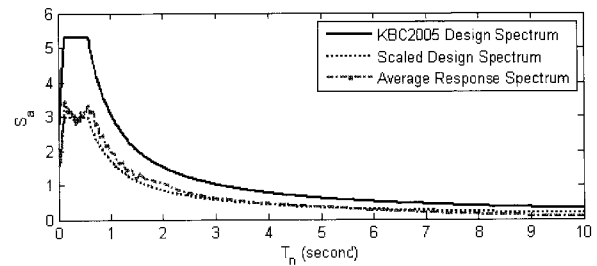


그림 8 KBC 설계스펙트럼 및 기본지진하중 응답스펙트럼

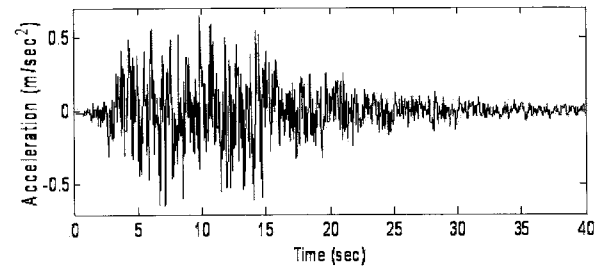


그림 9 기본지진하중

및 90%이며, 이후에는 다음과 같이 정규화하여 나타내도록 한다.

$$NF = \frac{\sum_{i=1}^{12} F_{s,i}}{\sum_{i=1}^{12} M_i / (0.5l_g)} \times 100 (\%) \tag{3}$$

여기서, NF 는 정규화된 총 마찰력, $F_{s,i}$ 는 i 번째 층의 마찰력, M_i 는 i 번째 층의 전도모멘트를 의미한다. 개별 마찰형 감쇠기의 마찰력으로는 총 마찰력을 균등하게 배분한 값을 적용하여 각층에 동일한 용량의 감쇠기가 설치되도록 하였다.

5. 비보강 벽체의 내진성능 비교

5.1 변위 및 전도모멘트

표 2, 3은 대상 구조물을 구성하는 벽체 수에 따른 변위 및 밀면전단력의 변화를 나타내고 있다. 구성 벽체 수가 증가할수록 강성이 감소하고 고유주기가 증가하여 변위는 증가하고 밀면전단력은 감소한다. 직사각형 단면의 비균열 단면 2차모멘트는 철근을 무시한다면 층의 3층에 비례하므로 벽체 W1, W2 및 W3의 비균열 단면 2차모멘트비는 216:27:8이며, 구성 벽체가 격막에 의해 연결됨을 고려하면 강성비는 27:16:3이 된다. 또한 고유주기가 강성의 제곱근에 반비례함과, 변위응답은 고유주기에 비례하고 밀면전단력은 반비례함을 이용하면 변위와 밀면전단력의 비율은 각각 1:1.3:3.0

표 2 비제진 벽체의 최대 변위(m)

지진하중	EQ1		EQ2	
	P20	P40	P20	P40
중력하중				
W1	0.174	0.124	0.510	0.406
W2	0.279	0.284	0.643	0.643
W3	0.328	0.306	0.593	0.608

표 3 비제진 벽체의 밀면전단력(kN)

지진하중	EQ1		EQ2	
	P20	P40	P20	P40
중력하중				
W1	1584.16	1707.95	2486.08	2863.12
W2	920.50	1222.84	1632.94	1873.41
W3	785.16	907.64	1497.49	1479.36

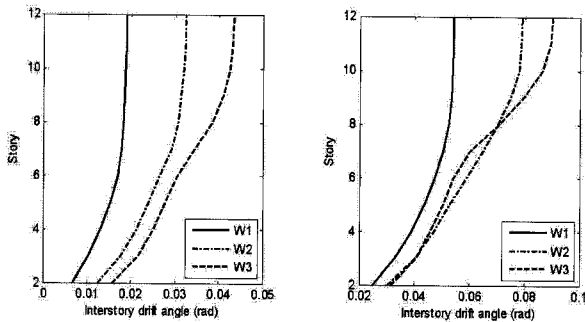
표 4 항복곡률 및 극한곡률 값

항복곡률 (m ⁻¹)	W1	P20	P40
		W2	5.72×10 ⁻⁴
극한곡률 (m ⁻¹)	W1	1.14×10 ⁻³	1.11×10 ⁻³
	W2	1.71×10 ⁻³	1.67×10 ⁻³
	W3	3.05×10 ⁻³	1.99×10 ⁻³
	W1	6.10×10 ⁻³	3.97×10 ⁻³
	W2	9.14×10 ⁻³	5.96×10 ⁻³

및 1:0.77:0.33이 된다. 그러나 변위의 비율은 구성 벽체 수가 2에서 3으로 증가함에 따라 오히려 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 탄성해석에 의해 예측할 수 있는 것보다는 우수한 변위응답 성능을 갖고 있는 것으로 볼 수 있다. 반면에 밀면전단력은 강성비에 의해 예측되는 것보다 분할에 따른 상대적인 밀면전단력 감소는 둔화되나 상당히 낮은 수준의 밀면전단력이 발생함을 알 수 있다.

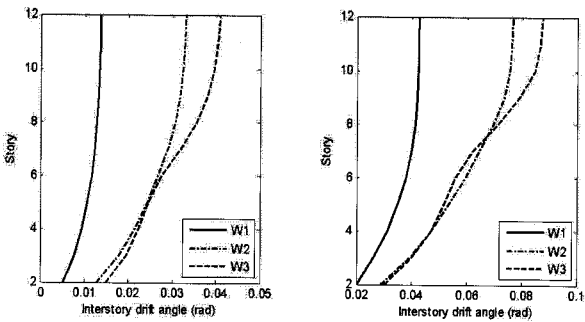
5.2 변형의 분포

그림 10은 층간변위각의 분포를 나타내고 있으며, 구성 벽체 수가 3으로 증가하면 층간변위의 크기도 커지고, 고차 모드의 영향이 증가하여 층별 분포도 불규칙해지는 것을 확인할 수 있다. 건축구조설계기준(KBC 2005)에서는 건축물의 내진등급에 따라 층간변위각의 허용치를 0.01~0.02로 정의하고 있으며, 기본지진하중의 2배 수준인 EQ2 지진에 대해서는 분할된 벽체의 층간변위각이 허용치를 상당한 수준으로 초과하고 있어서 제진보강의 필요성이 높다고 할 수 있다. 다음으로는 비제진 벽체의 각층 곡률을 극한곡률로 정규화하여 나타내면 그림 11과 같다. 사용한 극한곡률 값은 표 4에 나타나 있다. 구성 벽체 수가 증가할수록 정규화된 벽체의 곡률은 크게 감소하여 단일벽체에 비해 짧은 복수의 벽체가 연결된 경우에 벽체의 휨변형 측면에서는 더욱 유리함을 알 수 있다.



(a) 중력하중 : P20, 지진하중 : EQ1

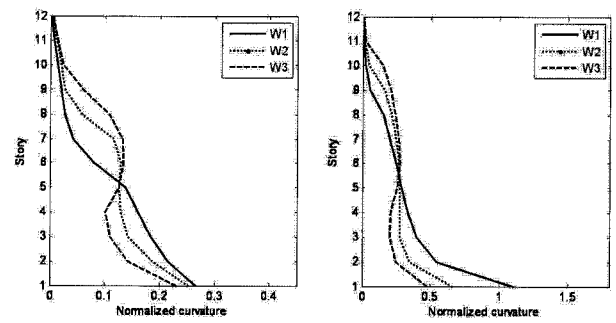
(b) 중력하중 : P20, 지진하중 : EQ2



(c) 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ1

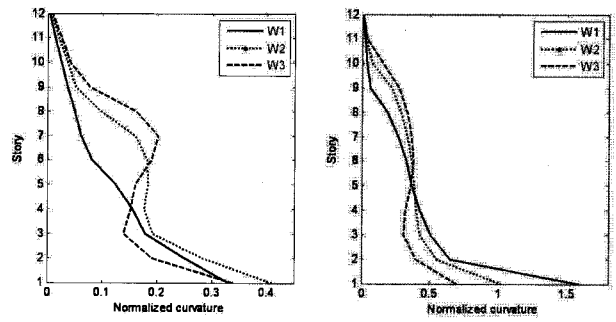
(d) 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2

그림 10 비제진 벽체의 최대 층간변위각 분포



(a) 중력하중 : P20, 지진하중 : EQ1

(b) 중력하중 : P20, 지진하중 : EQ2



(c) 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ1

(d) 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2

그림 11 비제진 벽체의 정규화된 최대 곡률 분포

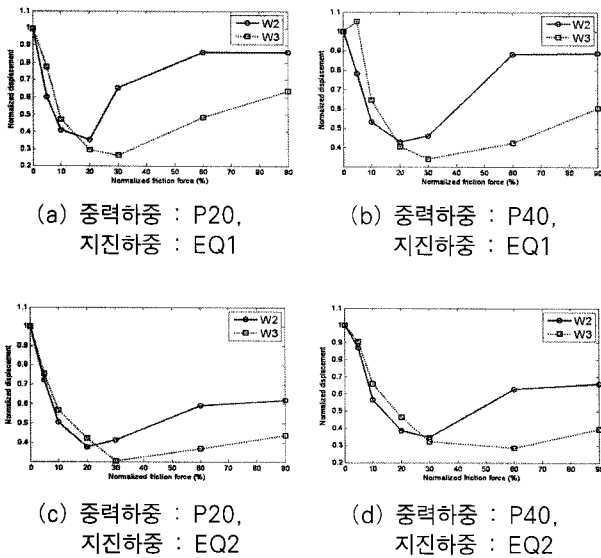


그림 12 제진 벽체의 정규화된 최대 최상층 변위

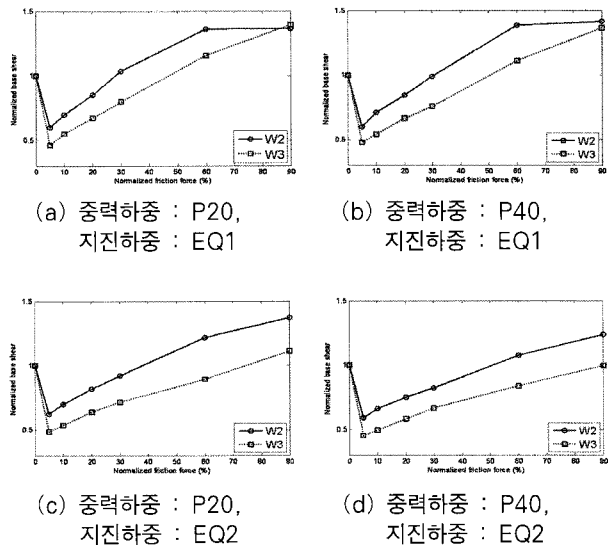


그림 13 제진 벽체의 정규화된 밀면전단력

6. 보강 벽체의 응답 비교

6.1 최상층 변위

마찰형 감쇠기가 설치된 복수 벽체의 최상층 최대변위를 비보강 단일 벽체의 최상층 최대변위로 정규화하여 나타내면 그림 12와 같다. 복수 벽체 사이에 마찰형 감쇠기 설치 시 중력하중 P40, 지진하중 EQ1 조건일 때 감쇠기의 슬립하중이 5%일 경우의 정규화된 최상층 변위 값을 제외하면, 마찰력에 관계없이 복수 벽체는 단일벽체에 비해서 변위가 감소하는 것으로 나타났다. 비보강 단일 벽체 대비 응답 감소율은 지진의 강도가 높아질수록 커지고 있다. 즉 지진의 강도가 셀수록 제안된 마찰형 감쇠기의 효과는 향상된다. 변위 제어 효과에 있어서 최적의 마찰력이 존재함을 확인할 수 있으며, 구성 벽체 수가 많은 W3의 최적 마찰력이 W2보다 크음을 알 수 있다. 이는 W3의 경우에 강성이 현저히 작아져서 에너지 소산뿐만 아니라 강성을 증대시키는 것이 변위제어에 효과적이기 때문이다. 특히 분할 벽체의 경우에 벽체간 거리가 2m이기 때문에 감쇠기 설치를 위한 강재 인방보에서 슬립이 발생하지 않는다면 단일벽체에 비해 큰 단면이차모멘트를 갖게 된다.

6.2 밀면전단력

마찰력에 따른 밀면전단력 변화는 그림 13과 같다. W2의 밀면전단력의 경우에 정규화된 마찰력 60과 90 사이에 거의 차이가 없다. 이는 마찰력이 커서 두 경우 모두 슬립이 거의 발생하지 않아 두 개 벽체가 강제로 연결된 것과 동일한 상

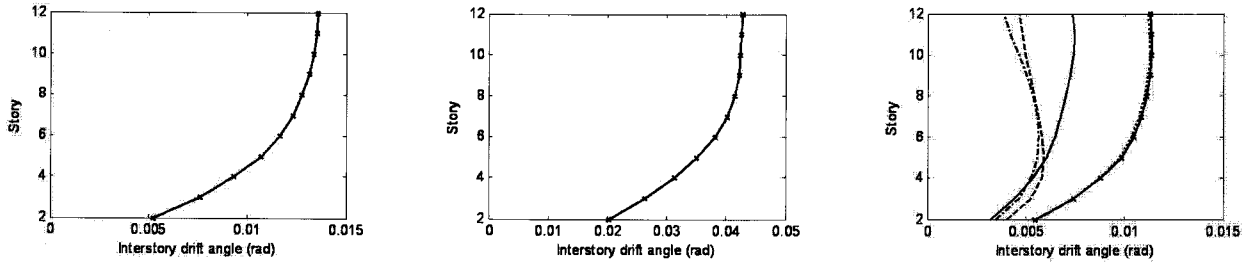
태가 되기 때문이다. 밀면전단력은 마찰력이 증가할수록 증가하며, 일정 수준 이상의 마찰력에 도달 시 단일 벽체에 비해서 복수 벽체의 밀면전단력이 더 증가한다. 따라서 적정 마찰력의 선정이 중요한데 앞서 최상층 변위의 제어결과를 기준으로 한 최적 마찰력에서의 밀면전단력은 모두 단일 벽체에 비해서 감소하여 제안된 제진보강 방법이 변위와 하중 저감에 있어서 공통적으로 유효함을 확인할 수 있다.

6.3 층간변위

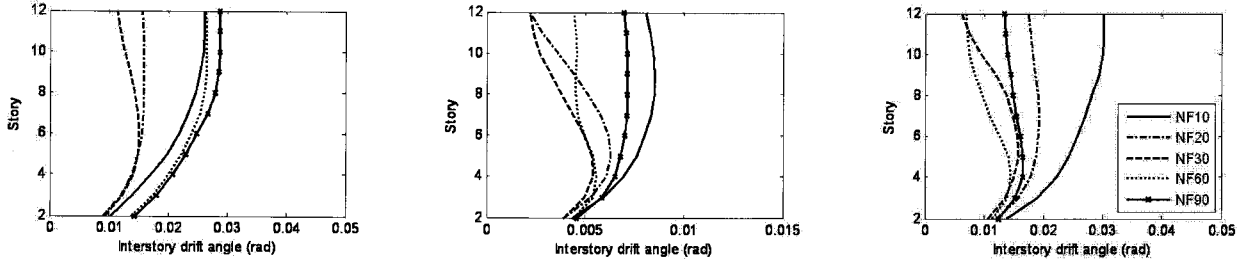
정규화된 마찰력 수준별로 층간변위의 변화를 살펴보면 그림 14와 같고, 각층 상대변위의 변화를 살펴보면 그림 15와 같다. 단일 벽체의 경우에는 최상층에서 최대 층간변위가 발생하고 있으나 마찰형 감쇠기가 설치된 복수 벽체에서는 마찰력 수준에 따라 최대 층간변위 발생 층이 변화함을 알 수 있다. 층간변위가 최소화되는 경우에 최대 층간변위는 4층 또는 5층에서 발생하고 있음을 확인할 수 있으며, 구조물의 거동특성이 상당히 변화함을 알 수 있다. 이는 그림 15에 나타난 상대변위의 변화에서도 알 수 있는데 최적 마찰력 사용 시 하층부에 비해 상층부의 변위가 현저히 감소하여 골조건물에 가까운 변형형상을 보이게 됨을 알 수 있다. 그러나 마찰력이 증가하면 인방보가 강재거동을 하여 복수 벽체가 마치 강성이 큰 전단벽처럼 거동하게 됨을 볼 수 있다.

6.4 회전각 분포

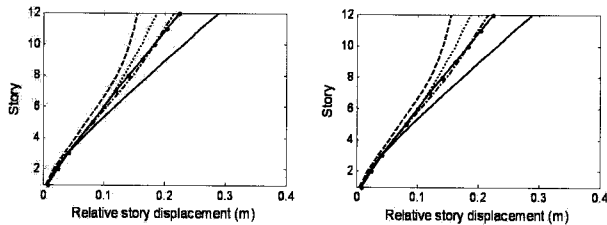
마찰형 감쇠기에 의한 에너지 소산량은 감쇠기에서 발생한 미끄럼 변위에 비례하므로 이와 관련된 각층 회전각의 분포



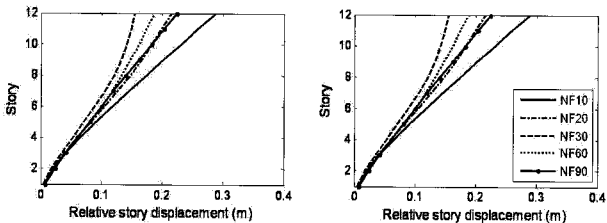
(a) W1, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ1 (b) W1, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2 (c) W2, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ1



(d) W2, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2 (e) W3, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ1 (f) W3, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2
그림 14 제진벽체의 층간변위 분포

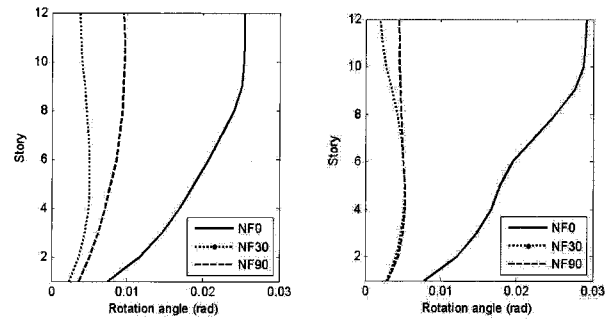


(a) W2, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ1 (b) W2, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2



(c) W3, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ1 (d) W3, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2

그림 15 제진벽체의 상대변위 분포



(a) W2, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2 (b) W3, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2

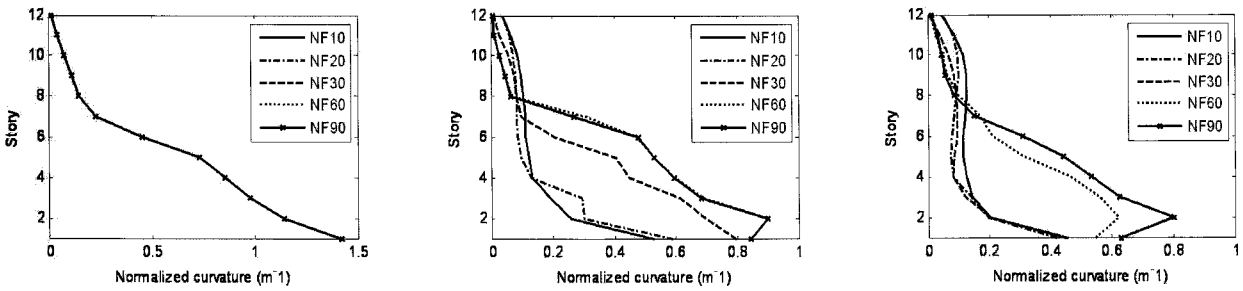
그림 16 제진벽체의 최대 회전각 분포

6.5 벽체곡률

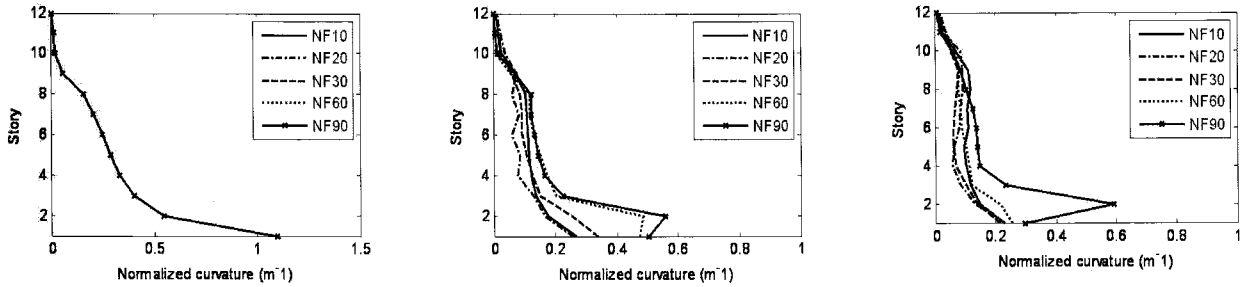
휨과파괴가 발생하는 전단벽 구조물의 손상도를 나타내는 가장 중요한 지표인 곡률의 층별 분포를 살펴보면 그림 17, 18과 같으며, 여기서 지진하중 EQ1에 대한 곡률은 해당 벽체의 항복곡률로, EQ2에 대한 곡률은 극한곡률로 정규화하여 나타내었다. 사용한 항복곡률 및 극한곡률 값은 표 4에 나타내 주었다. 단일벽체 W1의 경우에 지진하중 EQ1에 대해서는 항복하나 극한상태에 도달하지는 않았다. 복수 벽체에 감쇠기를 설치하면 EQ1에 대해서는 벽체가 탄성수준으로 유지되며, EQ2에 대해서는 벽체가 항복하나 극한상태에는 도달하지 않는 수준으로 변형이 제어됨을 확인할 수 있다. 또한 최대곡률의 발생 위치는 대부분의 경우에 1층이지만, 마찰력이 증가하면 2층으로 바뀌고 있다.

를 고려하여 감쇠기의 설계에 반영할 필요가 있다. 그림 16은 각각 분할벽체 W2 및 W3에 대해서 EQ2 지진 작용 시의 회전각 분포를 마찰력 크기별로 나타내고 있다.

각 층 회전각은 정규화된 마찰력이 0일 때, 즉 감쇠기가 설치되지 않은 경우에는 상층부에서 큼을 알 수 있다. 그러나 마찰형 감쇠기가 설치되면 최대회전각은 4층에서 7층 사이의 중간층에서 발생함을 볼 수 있다. 따라서 상층부 보다는 중층부에 마찰력을 집중시키는 마찰력 분배 방식이 더욱 효율적일 것으로 판단된다.

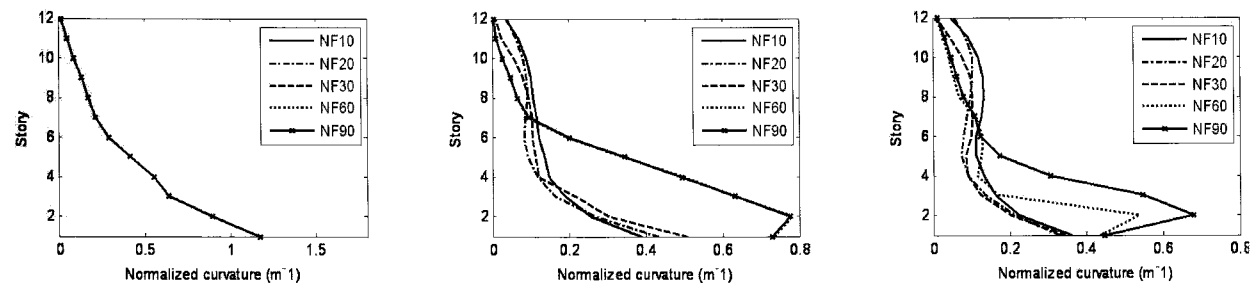


(a) W1, 중력하중 : P20, 지진하중 : EQ1 (b) W2, 중력하중 : P20, 지진하중 : EQ1 (c) W3, 중력하중 : P20, 지진하중 : EQ1

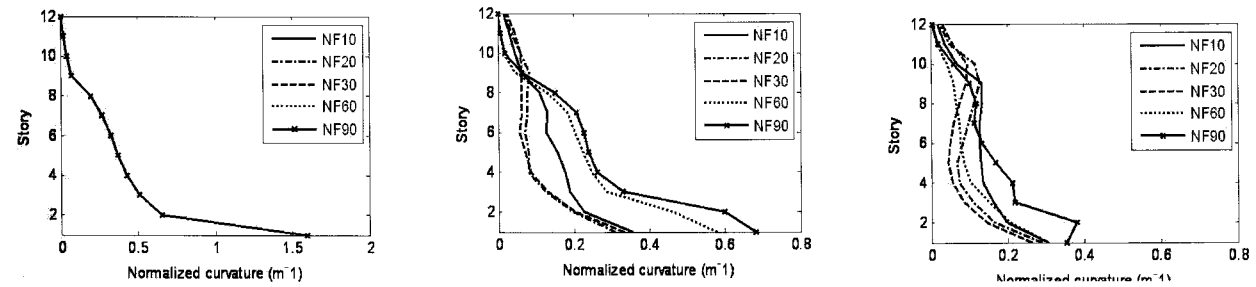


(d) W1, 중력하중 : P20, 지진하중 : EQ2 (e) W2, 중력하중 : P20, 지진하중 : EQ2 (f) W3, 중력하중 : P20, 지진하중 : EQ2

그림 17 제진벽체의 정규화된 곡률 분포(중력하중 : P20)



(a) W1, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ1 (b) W2, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ1 (c) W3, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ1



(d) W1, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2 (e) W2, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2 (f) W3, 중력하중 : P40, 지진하중 : EQ2

그림 18 제진벽체의 정규화된 곡률 분포(중력하중 : P40)

6.6 에너지 소산량

복수 벽체에 설치된 마찰형 감쇠기의 마찰력 변화에 따른 총에너지 소산량을 살펴보면 그림 19와 같다. 복수 벽체 W2의 경우에는 정규화된 마찰력을 가장 낮은 10%로 하는 것이 에너지 소산효과를 극대화하고 복수 벽체 W3에도 그러하나 다만 후자의 경우에 지진하중 EQ2에 대해서는 20 또는 30%의 정규화된 마찰력이 가장 우수한 에너지 소산효과를

보이고 있다. 따라서 강도 대비 하중이 크고 구조물의 강성이 작은 경우에 최적의 마찰력이 증가하는 경향이 있고 그렇지 않은 경우에는 단일 벽체의 총 10%미만의 낮은 마찰력을 사용하는 것이 에너지 소산 측면에서 유리하다.

6.7 최적마찰력

그림 19에 최상층변위 및 1층 벽체곡률 기준의 최적마찰

력에 해당되는 에너지를 각각 사각형 및 원으로 함께 표시하였다. 이로부터 곡률 기준의 최적마찰력이 최상층변위 기준의 마찰력에 비해 상대적으로 에너지에 대한 최적 마찰력과 근접해있음을 확인할 수 있다. 또한 최상층변위에 대한 최적 마찰력과 곡률에 대한 최적마찰력의 차이는 중력하중이 클수록, 구조물의 강성이 작을수록 커짐을 그림 19에서 확인할 수 있다. 최상층변위를 기준으로 하는 최적마찰력에 비해 벽체곡률을 기준으로 하는 최적마찰력이 다소 작고 에너지에 대한 최적 마찰력에 근접해 있다. 이는 최상층 변위의 경우에 감쇠 뿐만 아니라 강성의 영향이 크기 때문에 큰 마찰력을 사용하여 강성증가효과를 얻는 것이 중요한 역할을 하는 반면에 1층 벽체곡률은 상부 구조물에 작용하는 하중에 직결되므로 에너지 소산과 밀접한 관계가 있고 주기를 낮춰주기 위해서 낮은 마찰력을 적용할 필요가 있다고 할 수 있다.

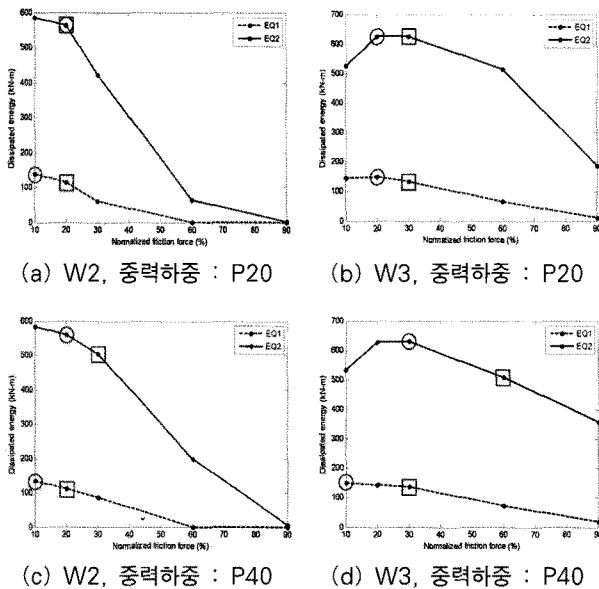


그림 19 마찰형 감쇠기의 총 에너지 소산량

표 5 구성벽체 수에 따른 응답

지진하중		EQ1		EQ2	
중력하중		P20	P40	P20	P40
최상층변위 (m)	W1	0.175	0.124	0.510	0.403
	W2	0.114	0.057	0.211	0.143
	W3	0.045	0.042	0.155	0.132
밀면전단력 (kN)	W1	1542	1619	2484	2865
	W2	1598	1604	2288	2353
	W3	1232	1224	1779	1904
극한곡률로 정규화된 1층벽체곡률 (m ⁻¹)	W1	1.143	0.898	0.546	0.651
	W2	0.698	0.305	0.253	0.205
	W3	0.205	0.202	0.140	0.146
에너지소산량 (kN-m)	W2	62.1	87.3	422.9	504.0
	W3	135.7	136.4	626.3	630.5

6.8 구성벽체 수의 영향

총 벽체단면적이 동일하면서 구성 벽체 수가 2인 경우와 3인 경우의 차이를 최상층변위, 밀면전단력, 1층 벽체곡률, 에너지소산량 등의 측면에서 정리하면 표 5와 같다. 총마찰력 수준에 따라서는 구성 벽체 수에 따른 차이가 상당히 발생할 수 있지만 적정 마찰력을 통해 얻어지는 최적응답만을 비교할 경우에는 서로 유사한 성능을 가짐을 확인할 수 있다. 따라서 인방보를 이용하여 감쇠기를 설치함으로써 수평 길이가 짧은 전단벽체의 내진성능을 효과적으로 향상시킬 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 비선형 시간이력해석을 통해 복수의 짧은 전단벽체를 마찰형 감쇠기가 설치된 인방보로 연결하는 제진 보강 방안의 내진성능을 동일한 벽량의 단일 벽체와 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 벽량을 갖는다면 짧은 벽체를 마찰형 감쇠기로 연결하여 우수한 변위 및 하중 저감효과를 얻을 수 있다. 그러나 구성벽체의 수에 따른 성능 차이는 크지 않다.
- 2) 복수 벽체에 감쇠기 설치 시, 동일 벽량 단일벽체의 설계지진 수준의 지진하중에 대해서 벽체 휨변형을 구조물의 변형을 탄성수준으로, 2배에 해당되는 지진하중에 대해서는 극한변형 수준 이내로 제어할 수 있었다.
- 3) 응답의 종류별로 최적 마찰력은 차이가 있으며, 밀면전단력, 에너지 소산량, 1층 벽체곡률, 최상층변위의 순서로 최적마찰력은 증가하고, 대부분은 기준마찰력의 30%이하의 수준을 갖는다.
- 4) 마찰형 감쇠기 설치를 위한 인방보를 강제인 것으로 가정하였다. 인방보의 실제 구현 가능한 강성을 고려하면 감쇠기의 상대변형 및 감쇠기에 전달되는 힘이 감소하여 제진성능은 저하될 수밖에 없기 때문이다. 따라서 추후 연구를 통해 실제 구현 가능한 인방보의 강성이 제진성능에 미치는 영향에 대해 추가 연구를 수행할 필요가 있다.
- 5) 2개의 다른 중력하중에 관한 2세트의 지진하중에 관한 해석을 수행하여 최상층변위, 밀면전단력, 층간변위는 물론, 회전각분포, 벽체곡률, 에너지 소산량, 최적마찰력과 전단벽의 개수에 따른 변화 등 다양한 응답을 평균하여 분석함으로써 제안된 마찰형 감쇠기의 신뢰성을 검증하였다.

감사의 글

이 연구는 2008학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

- 고동우, 이한선** (2007) 1:12축소 비정형 고층 RC 건물의 비선형거동에 대한 실험과 해석의 상관성, 한국지진공학회 논문집, 11(2), pp.95~104.
- 박지훈, 김길환** (2007) 에너지 소산형 감쇠기를 이용한 철근 콘크리트 전단벽-골조 시스템의 진동제어, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, KSNVE07S-21-03.
- 장극관, 서대원, 천영수** (2002) 벽식 아파트 구조에서 연결부의 거동특성, 한국콘크리트학회논문집, 14(1), pp.83~91.
- 장극관, 천영수, 서대원** (2001) 벽식구조 아파트에서 전단벽 연결부의 구조적거동, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회논문집, 13(1), pp.411~416.
- 전대한, 강호근, 조한욱, 이정원** (1998) 정적 탄소성 해석에 의한 고층 벽식 아파트의 수평내력 검토, 한국지진공학회 논문집, 2(4), pp.31~40.
- 정란, 우성식, 최기영, 박태원** (2007) 기존 철근콘크리트 벽식 공동주택의 내진 성능 예비 평가법에 관한 연구, 한국콘크리트학회 논문집, 19(3), pp.293~300.
- 정희산, 문병욱, 박지훈, 이성경, 민경원, 변지석** (2008) 전단벽식 구조의 휨거동을 이용한 마찰형 감쇠기의 제어성능, 한국소음진동공학회논문집, 18(8), pp.856~863.
- 홍성걸, 이지형** (2005) 전단벽의 내진보강을 위한 방법에 관한 연구, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회논문집, 17(2), pp.25~28.
- Filippou, F.C., Popov, E.G., Bertero, V.V.** (1983) Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints, *EERC Report No.UCB/EERC-83/19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Calif.*, pp.184.
- Holden, T., Restrepo, J., Mander, J.B.** (2003) Seismic Performance of Precast Reinforced and Prestressed Concrete Walls, *Journal of structural engineering*, 129(3), pp.286~296.
- Jennings, P.C., Housner, G.W., Tsai, N.C.** (1968) Simulated earthquake motions, *California Institute of Technology, Pasadena*, pp.52.
- Mander, J.B., Priestley, J.N., Park, R.** (1989) Theoretical stress-strain model for confined concrete, *ASCEJ. Struct. Div.* 144(12), pp.1804~1826.
- Martinez-Rueda, J.E., Elnashai, A.S.** (1997) Confined Concrete Model Under Cyclic Load, *Materials and structures*, 30(197), pp.139~147.
- Menegotto, M., Pinto, E.** (1973) Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements Under Combined Normal Force and Bending, *Proceedings, IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads*, Lisbon, pp.15~22.
- Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J.** (2007) Displacement-based Seismic Design of Structures.
- Paulay, T., Priestley, M.J.N.** (1992) Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, Wiley, New York.
- SeismoSturct** (2002) Earthquake engineering software solution, SeismoSoft Ltd.
- Soong T.T., Dargush G.F.** (1997) Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley & Sons.
- Vulcano, A., Bertero, V.V., Colotti, V.** (1988) Analytical Modeling of RC Structural Walls, *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan*, 6, pp.41~46.
- Wallace, John W.** (1994) New Methodology for Seismic Design of RC Shear Walls, *Journal of Structural Engineering*, 120(3), pp.863~884.
- Xilin Lu, Xiaohan Wu, Liang Meng** (1997) Seismic behavior of a new type of seismic energy dissipation shear wall system, *Structural Engineering and Mechanics*, 5(2), pp.167~175.
- Xilin Lu, Xiaohan Wu** (2000) Study on a new shear wall system with shaking table test and finite element analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, pp.1425~1440.