에너지 소산형 감쇠기를 이용한 철근콘크리트 전단벽-골조 시스템의 진동제어

Vibration Control of Shear Wall-Frame System using Energy Dissipation Devices

박지훈† ·김길환*
Ji-Hun Park, Gil-Hwan Kim

Key Words : energy dissipation device, shear wall, nonlinear time history analysis

ABSTRACT

In this study, the seismic control performance of energy dissipation devices installed in a shear all-frame structure is investigated through nonlinear time history analysis of a 12-story building. Inelastic shear walls are modeled using the multiple vertical line element model (MVLEM) and inelastic columns and girders were modeled using fiber beam elements. For a seismic load increased by 38% compared to the design load, the seismic control performance was analyzed based on the results of a nonlinear time history analysis in terms of the inter-story drift, the story shear and the flexural strain. Friction type dampers was found to performs best if they are installed in the form of a brace adjacent to the shear wall with the friction force of 15 % of the maximum story shear force induced in the original building structure without dampers.

1. 서 론

지진이나 태풍 등의 동적 하중에 의해 발생하는 대형 건축/토목 구조물의 손상이나 붕괴를 방지하기 위한 구조물의 보강 방법은 크게 구조체 자체의 보강과 구조물의 동적응답을 저감시킬 수 있는 부가적 감쇠기의 설치로 분류할 수 있다. 이 가운데 구조체 자체의 보강은 구조체의 내력에 의해서만 하중에 저항하기 때문에 구조체의 영구변형 발생을 피할 수 없다는 문제점을 갖고 있으나, 제진장치는 에너지 소산작용을 통해 구조물에 유입되는 에너지를 최소화하여 구조물을 보호하는 방법이다. 따라서 구조물 자체의 소성변형을 방지하거나 최소화하고 감쇠기에만 변형이 집중되므로 지진발생 이후의 보수보강이 용이하고 사용하중에 대해서도 월등한 진동저감 성능을 갖는다.

다양한 에너지 소산형 감쇠기 가운데 마찰형 감쇠기는 에너지소산 메커니즘이 단순하고 설치 및 제작이 쉬운 이점을 가지고 있다. 건축구조물의 지진응답제어를 위해 마찰감쇠기를 설계하는 경우에 가장 중요한 것은 감쇠기의 개수와 개별 감쇠기의 마찰력 및 설치용 가새의 강성을 체계적으로 결정하는 것이다. 이와 같은 설계변수의 결정을 위해 많은 연구가 수행되어 왔으나 대부분 골조 구조물을 대상으로 하고 있다는 한계가 있다. 그러나 많은 건축물에서는 보-기둥으로 구성된 골조에 더하여 전단벽을 횡력저항 시스템으로 채택하고 있다. 전단벽이 효율적으로 횡력에 저항할 수 있는 구조시스템이지만 예전에 지어진 건축물은 내진설계가 되어 있지 않거나 또는 되어 있다고 하더라도 최근 들어 하중기준의 강화로 인해 내력이 부족해 지는 경우가 많다. 따라서 전단벽-골조 시스템을 효과적으로 보강할 수 있는 내진보강 기법에 대한 연구가 요구된다.

본 연구에서는 건축물하중기준(2000)에 따라 12층의 철근콘크리트 전단벽-골조 시스템을 설계하고 지진하중이 보다 강화된 건축구조설계기준(2005)에 따라 생성된 인공지진을 대상으로 비선형 동적해석을 수행하였으며, 마찰감쇠기의 설치위치 및 마찰력의 크기에 따른 변위 및 부재 변형률 저감 효과를 검토하였다.

2. 수치해석모델

2.1 건물 설계

대상건물(Fig.1)은 12 층의 전단벽-골조 시스템 건물로서 건축물하중기준(2000)을 기준으로 지역계수 0.11, 지반계수 1.2 를 가정하였으며 대상 건물은 건물골조 시스템에 해당되어 반응수정계수는 4.0 을 적용하여 설계하였다. 대상건물은 탄성해석 시 골조가 횡력의 15%를 분담하는 것으로 나타났다. 탄성해석 및 설계는 MIDAS Gen 을 사용하여 수행하였으며 내진등급 1 등급을 가정하였다.

비선형 시간이력해석에 사용된 지진하중은 건축구조설계기준(2005)에서 제시된 설계스펙트럼

† 책임저자; 인천대학교 건축공학과
E-mail : jhpark606@hanmail.net
Tel : (032) 770-8474, Fax : (032) 770-4472
* 인천대학교 대학원 건축공학과

가운데 연암지반인 지반조건 C 에 해당되는 설계 스펙트럼을 기준으로 지반가속도의 시간이력을 생성하여 사용하였으며 구조설계에 사용된 동일 조건의 지반에 대한 2002 년도 하중기준의 설계스펙트럼과 함께 Fig.2 에 나타내었다. 구조물의 고유주기는 1.5217 sec 로서 건축물하중기준(2000)과 건축구조설계기준(2005)에 의한 응답스펙트럼은 각각 0.0268g 와 0.0370g 로서 38%의 증가를 보였다. 인공지진 생성은 SIMQKE 를 사용하여 수행하였으며, 지반가속도의 포락선은 Jennings 가 제안한 B type 을 사용하였다.

$$env(t)=\begin{cases}(t/4)^2 & for\ t<4\sec\\ 1 & for\ 4\sec\le t<15\sec\\ e^{-0.0992(t-15)} & for\ 15\sec\le t\end{cases}$$

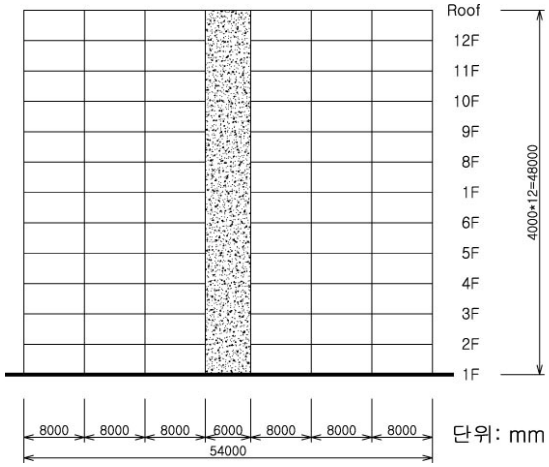


Fig.1 Shear wall-frame system

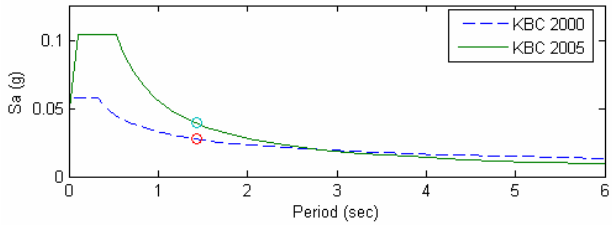
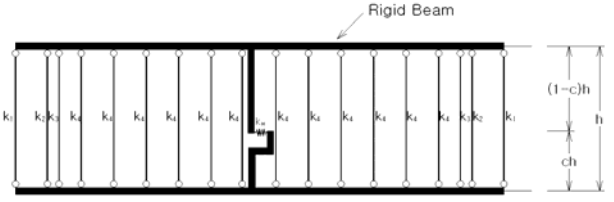


Fig.2 Design Spectra

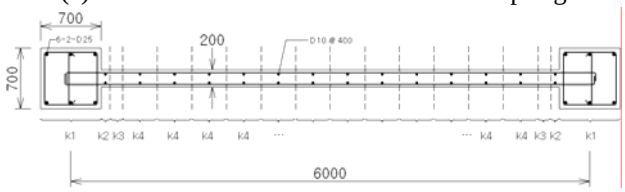
2.2 건물 모델링

보 및 기둥은 비탄성 섬유(Fiber)요소로 모델링하였으며 콘크리트 단면은 6 등분하여 모델링하였고 띠철근비가 적어서 구속효과가 거의 없는 것으로 나타나 모델링의 편의상 전단면의 재료를 비구속 콘크리트로 모델링하였다.

벽체의 모델링에는 Vulcano 등이 제안한 MVLEM(multiple vertical line element model)을 채택하였으며 Fig.3 에 나타내었다. 이 모델은 휨변형을 모델링하기 위해 복수의 수직 트러스 요소가 상하부의 강체보에 연결되고 전단변형은 단일 수평스프링을 통해 모델링된다. 각각의 수직 트러스 요소는 비탄성 재료 모델을 이용한 섬유 요소로 모델링되었으며, 벽체 양 단부의 기둥을 포함한다. 전단스프링의 높이는 각 벽체 높의의 40%에 해당되는 지점을 선정하였고, 전단스프링의 이력모델은 벽체의 비탄성 전단거동에 대한 신뢰도 높은 모델이 아직 없는 관계로 탄성스프링으로 모델링하였으나 이 부분은 추후 보완 되어져야 할 사항이다. 비선형 시간이력해석은 U. C. Berkely 의 Pacific Earthquake Engineering Research Center 에서 제공하는 OpenSees 를 이용하였다.

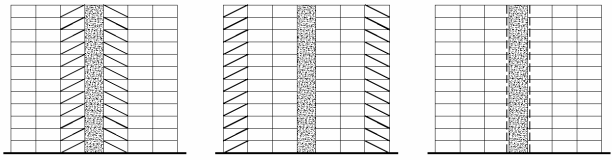


(a) Vertical element and horizontal shear spring



(b) Section of the wall and boundary columns

Fig.3 MVLEM of the Wall



(a) Type A (b) Type B (c) Type C

Fig.4 Installation scheme of the friction damper

2.3 마찰형 감쇠기

마찰형 감쇠기는 Coulomb 감쇠를 갖는 것으로 가정하며, 설치용 가재의 강성을 고려하여 구조해석모델에서는 완전탄소성(elasto-perfectly plastic) 시스템으로 모델링하였다. 설치용 연결부재는 KS 규격의 H 400×408×21/21 단면을 사용하였다. 3 가지 설치형식을 적용하였으며, 벽체 양측에 인접한 경간에 대각가새로 설치하는 형식을 Type A, 건물 양측의 최외곽 경간에 대각 가새로 설치하는 형식을 Type B, 벽체 양단부의 기둥에 평행하게 설치하는 형식을 Type C 로 명명하고 Fig.4 에 설치형상을 도시하였다.

3. 해석결과

본 연구에서는 인공지진에 대한 시간이력 해석

결과를 바탕으로 설치 위치 및 설계변수에 따른 마찰형 감쇠기의 제진효과를 변형과 하중의 관점에서 살펴본다. 이하에서 마찰형 감쇠의 마찰력은 설치전 건물의 비선형시간이력에서 얻어진 최대층전단력을 기준으로 5%부터 30%까지 5%씩 증가시켜가며 해석을 수행하였다.

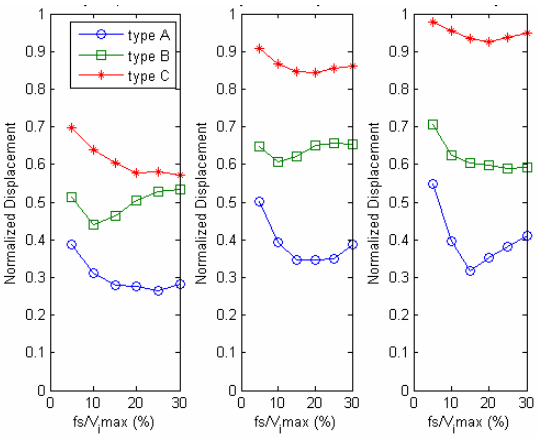
3.1 변위 제어성능

각 층의 상대변위 가운데 1 층, 6 층, 12 층의 상대변위를 감쇠기 설치전의 상대변위로 정규화하여 마찰형 감쇠기의 정규화된 마찰력($f_s/V_i max$)에 따른 변화를 Fig.5 에 나타내었다. 전체적으로 Type A 의 제어효과가 가장 우수하고 Type C의 제어효과가 가장 저조함을 볼 수 있다. 특히 Type C의 경우와 저층부와 고층부의 변위 제어 성능에 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다. 또한 최적의 마찰력 크기는 변위의 발생 층과 감쇠기의 설치형식에 따라서 변화함을 볼 수 있다.

층간변위를 층고로 나눈 층간변위비를 Fig.6 에 나타내었다. 건축구조설계기준에서는 내진 1 등급 구조물에 대해서 층간변위비를 1.5%이내로 규정하고 있는데 감쇠기 설치이전에 이미 규정을 만족시키고 있다. 상대변위와 마찬가지로 층간변위 역시 Type A 가 가장 좋은 성능을 보이고, Type C 가 가장 낮은 성능을 보이고 있다. Type A 의 경우에 가장 우수한 성능을 보이는 마찰력은 모든 층에 있어서 층전단력의 15%임을 알 수 있다.

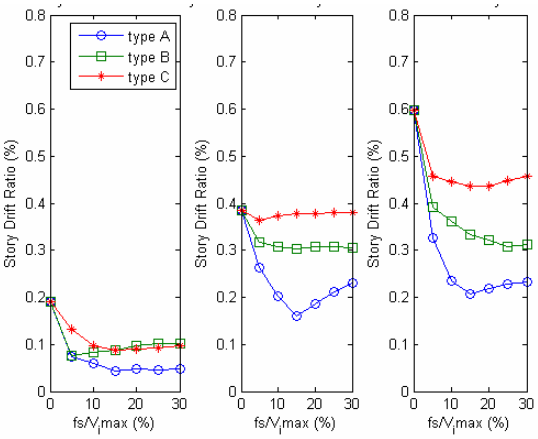
3.2 마찰감쇠기의 에너지 소산량

마찰형 감쇠기에 의한 제진효과는 잠김(lock)상태에서 가새부재에 의한 강성증진과 슬립(slip)상태에서의 에너지 소산효과가 복합적으로 작용해서 얻어진다. 일반 가새부재와 달리 마찰형 감쇠기를 사용하는 주요 목적인 에너지 소산효과를 살펴보기 위해 각 층의 감쇠기에서 발생하는 1 회 왕복변위 당 최대에너지소산량을 Fig.7 에 나타내었다. 에너지 소산량이 공통적으로 6 층에서만 급격히 변화하고 있으나 이를 제외하면 Type A 및 B 의 에너지 소산량이 Type C 에 비해 크고 상층부로 갈수록 증가하고 있다. 이는 전단벽의 변형형상이 캔틸레버와 유사하여 골조의 층간에 가새 형태로 설치된 Type A 및 B 의 변형이 상층부일수록 증가하기 때문이다. 반면에 Type C 는 벽체 단부의 수직변형량이 층간변위에 비해 상대적으로 작기 때문에 전반적인 에너지 소산량이 작은 것으로 보인다. 또한 Type A 및 B 의 에너지 소산량은 정규화된 마찰력의 크기가 5%일 때에 최대가 되지만 이 경우에 상대변위 및 층간변위의 제어성능은 가장 낮다. 상대변위 및 층간변위의 제어성능이 공통적으로 우수한 15% 마찰력의 경우에 5% 및 10%에 비해 상당히 작은 에너지 소산량을 보여주고 있다. 이는 응답 저감에 있어서 에너지 소산량뿐만 아니라 강성증가 효과가 중요함을 의미한다.



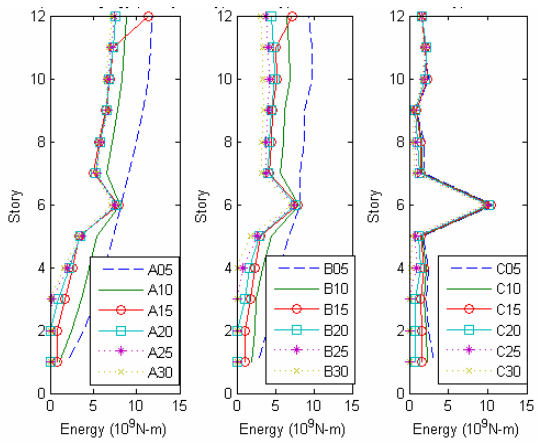
(a) 1st story (b) 6th story (c) 12th story

Fig.5 Normalized story displacement



(a) 1st story (b) 6th story (c) 12th story

Fig.6 Story Drift Ratio



(a) 1st story (b) 6th story (c) 12th story

Fig.7 Maximum energy dissipation per cyclic displacement

3.3 변형률

구조물의 손상도를 검토하기 위해서 섬유요소의 변형률을 조사하였다. Fig.8 은 1 층 벽체 단부 기둥의 변형률을 나타내고 있으며 참고로 철근의 항복변형률로 정규화한 것이다. Fig.8 에서 볼 수 있듯이 단부 기둥의 변형률이 철근 항복 변형률을 20% 정도 초과하였으며 제진장치를 설치함으로써 모두 항복 변형률보다 낮은 수준으로 감소하였다. 벽체의 휨변형 저감에 있어서 세가지 설치 형태가 모두 유효한 역할을 할 수 있으나 층간변위와 마찬가지로 Type A 의 성능이 가장 우수하였다. 또한 1 층의 휨변형 제어 성는은 마찰력의 크기에 큰 영향을 받지 않고 있다. Fig.7 에서 Type A 및 B 의 감쇠기별 에너지 소산량이 1 층에서 가장 작아지는 것으로부터 저층부에서는 에너지 소산효과보다는 강성의 증가효과가 크고 상층부로 갈수록 에너지 소산에 의한 제진효과가 증대되는 것으로 보인다. 이는 1 층의 전단벽체의 소성힌지로 인해 로킹(Rocking) 현상에 의해 Fig.6 에서와 같이 상부로 갈수록 층간변위가 증가하기 때문이다.

벽체 이외의 부재에서 구조물의 손상도 저감효과를 알아보기 위해 벽체 우측 인접 거더의 상부철근, 우측 최외곽 경간 거더의 하부 콘크리트 및 우측 최외곽 기둥 부재의 최우측 철근에 해당되는 변형률을 각각 철근 항복변형률 0.002 와 콘크리트 극한변형률 0.003 으로 정규화하여 Fig.9 에 나타내었다. 콘크리트의 경우에는 감쇠기 설치 이전에도 변형률이 극한변형률의 50%이내임을 알 수 있다. 거더 상부철근의 경우에는 감쇠기 설치를 통해 변형률이 크게 감소되며, 기둥의 경우에 로킹 현상에 의해 상부로 갈수록 변형률이 증가하고 있으나 감쇠기 설치에 의해 크게 저감되고 있다. 또한 두 경우 모두 정규화된 마찰력이 15%인 Type A 에 의해 구조물을 탄성상태로 제어할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 전단벽-골조 시스템 건물에 대한 에너지 소산형 감쇠기의 제진성능 및 특성을 조사하기 위해서 설치 형식 및 마찰력의 크기 별로 비선형 시간이력 해석을 수행하였으며 결과분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전단벽-골조 시스템에서의 마찰형 감쇠기 설치 형식은 벽체에 가장 가까운 경간에 층간 가새의 형식으로 설치하는 것이 가장 우수한 제진성능을 발휘한다.

(2) 전단벽-골조 시스템의 변형 특성상 로킹으로 인해 하부에서는 감쇠기의 변형량이 작아서 에너지 소산량이 적고 상부로 갈수록 에너지 소산량이 증가하므로 하부는 강성증대, 상부는 에너지 소산에 의해 제진효과가 발생한다.

(3) 최적의 제진효과를 얻을 수 있는 마찰력의 크기는 제진효과가 우수한 Type B 의 경우에 층전단력의 약 15%로 나타났다.

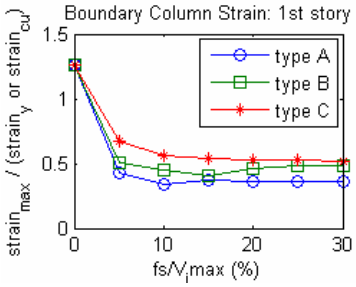
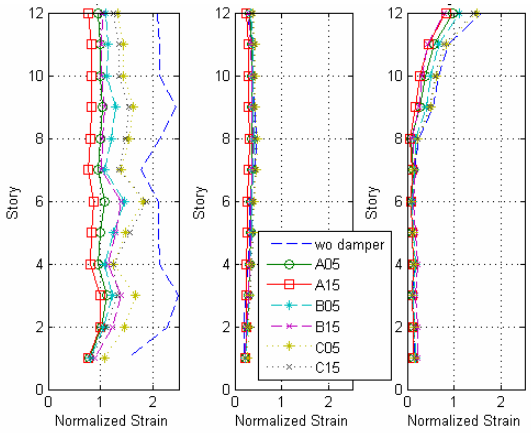


Fig.8 Boundary Column Strains of the 1st Story Wall



(a) Top bar (G3 girder) (b) Bottom concrete (G1 girder) (c) Right-side bar (C1 column)

Fig.9 Strain normalized by yield or ultimate strain

후 기

이 논문은 인천대학교 2006 년도 자체연구비 지원에 의하여 연구 되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 건축물하중기준 및 해설, 대한건축학회, 2000

(2) 건축구조설계기준, 대한건축학회, 2005

(3) Vulcano, A., Betero, V.V., 1987, Analytical Models for Predicting the Lateral Response of RC Shear Walls: Evaluation of Their Reliability, EERC Report No. UCB/EERC-87/19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Calif., 99 pp.

(4) Kutai, O., Wallace, J.W., Conte, J.P., 2004, “Nonlinear Modeling and Analysis of Slender Reinforced Concrete Walls”, ACI Structural Journal, V.101, No.5, 2004, pp.688-698.