

점탄성감쇠기를 설치한 구조물의 비용효율성 평가

Cost-Effectiveness Evaluation of the Structure with Viscoelastic Dampers

고현무*
KOH, Hyun Moo

함대기†
HAHM, Daegi

조상열‡
CHO, Sang Yul

Abstract

Installing vibration control devices in the structure rises as a solution instead of increasing structural strength considering construction cost. Especially, viscoelastic dampers show excellent vibration control performance at low cost and are easy to install in existing structures compared with other control devices. Therefore, cost-effectiveness of structure with viscoelastic dampers needs to be evaluated. Previous cost-effectiveness evaluation method for the seismically isolated structure(Koh et al., 1999;2000) is applied on the building structure with viscoelastic dampers, which combines optimal design and cost-effectiveness evaluation for seismically isolated structures based on minimum life-cycle cost concept. Input ground motion is modeled in the form of spectral density function to take into account acceleration and site coefficients. Damping of the viscoelastic damper is considered by modal strain energy method. Stiffness of shear building and shear area of viscoelastic damper are adopted as design variables for optimization. For the estimation of failure probability, transfer function of the structure with viscoelastic damper for spectral analysis is derived from the equation of motion. Results reveal that cost-effectiveness of the structure with viscoelastic dampers is relatively high in low seismic region and stiff soil condition.

1. 서론

지진응답을 감소시키기 위한 목적으로 일반적으로는 구조물의 강도를 증가시키는 방법이 사용되나, 건설비용을 고려하여 구조물에 제진장치를 설치하는 경우가 점차 증가하고 있는 추세이다. 그 가운데서 특히, 점탄성감쇠기는 다른 제진장치에 비하여, 비교적 저렴한 비용으로 진동제어에 있어서의 우수한 성능을 보이며, 기존의 구조물에 대한 장착이 용이한 장점을 지니고 있다. 한편, 제진장치의 성능과 효율은 지진, 지반조건에 따라 다른 양상을 보인다. 그러므로, 점탄성감쇠기를 설치한 구조물에 대한 비용효율성 평가가 필요하다. 이 연구에서는 최소 사용기간비용 개념에 근거하여 제안된 지진격리 구조물의 최적설계 및 비용효율성 평가방법을, 점탄성감쇠기를 장착한 빌딩 구조물에 도입하여 지진가속도, 지반조건에 대한 비용효율성을 평가하고자 하였다.

2. 입력지반운동 모델링

건설부지의 지진가속도조건과 지반조건을 반영하기 위하여, 입력지반운동은 격리장치에 대한 평가(고현무 외, 1999;2000)에서 도입된 바와 같이 응답스펙트럼에 상응하는 스펙트럼 밀도함수(power spectral density)의 형태로 모델링하였다. 건설부지의 지반운동에 상응하는 스펙트럼밀도함수는, 목표응답스펙트럼과 개선된 스펙트럼 밀도함수로부터 모사된 응답스펙트

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

† 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

‡ 서울대학교 토목공학과 석사

럼을 비교해가며 스펙트럼 밀도함수를 개선하는 과정을 반복하는 스펙트럼 표현법을 통하여 구한다. 가속도계수는 입력지반운동의 크기와 관련된 인자이고, 지반계수는 입력지반운동의 주파수 특성과 지반운동에 의한 변위의 크기를 나타내는 인자이다.

3. 점탄성감쇠기 설치 구조물의 모델링

감쇠기 설치 구조물과 비설치 구조물간의 상대적인 비용효율성 평가는 구체적인 상세설계 사항보다, 해석을 수행하고 구조물의 거동을 예측하는데 중점을 둘 필요가 있기 때문에, 예비설계 단계로서 효율적으로 모델링하는 것이 필요하다.

전단 면적 A_d 와 두께 h_d 를 갖는 점탄성감쇠기(그림1)의 힘-변위 관계식은 식(1)과 같다.

$$F_d(t) = k_d(f)x(t) + c_d(f)\dot{x}(t) \quad (1)$$

여기서, f 는 외부입력의 주파수이며, k_d , c_d 는 강성계수, 감쇠계수이다.

이 연구에서는, 감쇠기 재료의 면적과 빌딩 구조물의 기동 강성이 설계변수이며, 감쇠기는 프레임에 가새(bracing) 형태로 모델링 하였다. 따라서, 등가강성계수는 식(2)와 같다.

$$\bar{k}_d = \frac{A_d G'}{h_d} \quad (2)$$

여기서, G' 는 전단 저장계수(shear storage modulus)이다. 이 해석에서 사용된 감쇠기 특성은 3M감쇠기에 대하여 실험을 통해 제안된 식(3),(4)를 사용하였다(Chang et al., 1991).

$$G' = c_1 f_s^{0.69} T^{-2.26} \quad \eta = c_2 f_s^{-0.27} T^{-0.12} \quad (3), (4)$$

여기서, η 는 감쇠기의 손실율(loss factor)이며, f_s 는 감쇠기 비장착 구조물의 고유주파수이고, T 는 감쇠기 주변의 온도, c_1, c_2 는 상수이다.

MSEM(modal strain energy method)은 점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 등가감쇠비를 예측하는데 적용되어왔으며, 일반적으로 구조물 고유의 감쇠는 무시한다. 그러나, 이 연구에서는 감쇠기 설치 구조물과 비설치 구조물간의 비용효율성을 비교 평가하므로, 식(5)와 같이 구조물 고유의 감쇠를 고려하는 수정된 MSEM(Shen et al., 1995)을 적용하였다.

$$\begin{aligned} \zeta_n &= \zeta_s + \frac{\eta(f_n) - 2\zeta_s}{2} \left[\frac{E_d^n}{E^n} \right] \\ &= \zeta_s + \frac{\eta(f_n) - 2\zeta_s}{2} \left[\frac{\phi_n^T \mathbf{k}_d \phi_n}{\phi_n^T (\mathbf{k}_d + \mathbf{k}_s) \phi_n} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

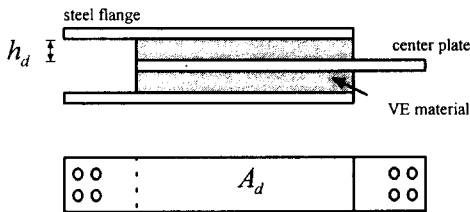


그림1 점탄성감쇠기 모델

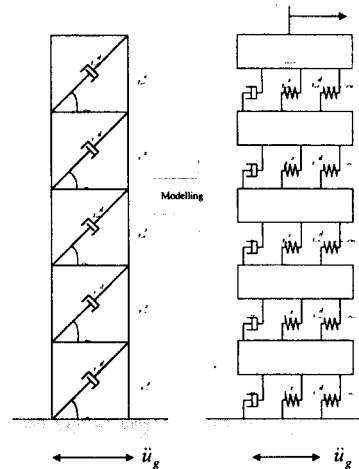


그림2 점탄성감쇠기 설치 구조물 모델링

여기서, ζ_n 는 전체구조물의 n 번째 모드 감쇠비, ζ_s 는 구조물의 고유 감쇠비, $\eta(f_n)$ 는 구조물의 주파수 f_n 에서 감쇠기의 손실계수, E^n 는 점탄성 감쇠기를 장착한 구조물의 n 번째 모드 변형 에너지이고, E_n^d 는 그 때 점탄성 감쇠기에 저장되는 에너지이다. 또한, ϕ_n 는 n 번째 모드 벡터, \mathbf{k}_d 는 점탄성 감쇠기로부터 추가되는 강성행렬, \mathbf{k}_s 는 구조물만의 강성행렬이다.

사용기간비용을 최소화하는 과정에서 파손확률을 산출하는 방법은 많은 횟수의 반복을 하므로, 비교적 간단하게 구조물 기둥 강성을 증가시키기 위하여 빌딩 구조물을 전단빌딩(shear building)으로 단순화하였다(그림2). 점탄성감쇠기 설치 구조물의 운동방정식은 식(6)과 같다.

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = -\mathbf{m}\mathbf{1}\ddot{u}_g \quad (6)$$

여기서, \mathbf{k} 는 \mathbf{k}_s 와 \mathbf{k}_d 를 중첩한 강성행렬이다.

4. 파손확률 산출

지진발생시, 빌딩 구조물의 층간상대변위는 안전성에 있어서 중요한 영향인자가 되므로, 이 연구에서는 층간상대변위를 파손확률 산출을 위한 구조물의 한계상태로 정의하였다. 또, 감쇠기의 보수비용을 고려하여 점탄성 재료의 전단변형 파손을 감쇠기의 한계상태로 정의하였다.

층간상대변위의 스펙트럼 밀도함수는 구조 시스템의 전달함수와 스펙트럼 표현법으로부터 구한 입력지반운동으로부터 식(7)과 같이 나타내어진다. ω 는 입력지반운동의 각주파수이다.

$$S_{u_j}(\omega) = |H_j(\omega) - H_{j-1}(\omega)|^2 \cdot S_g(\omega) \quad (7)$$

여기서, $S_{u_j}(\omega)$ 는 j 층의 층간상대변위의 스펙트럼 밀도함수, $H_j(\omega)$ 는 j 층변위의 전달함수이다. 전달함수 행렬은 식(6)으로부터 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H}(\omega) = [\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{m} + i\omega \mathbf{c}]^{-1} \mathbf{m} \mathbf{1} \quad (8)$$

Narrow-Band System이라고 가정했을 때, 층간상대변위응답의 응답의 시간변화율의 분산은 식(9),(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{u_j}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{u_j}(\omega) d\omega \quad \sigma_{\dot{u}_j}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_{u_j}(\omega) d\omega \quad (9),(10)$$

입력지반운동이 정규분포를 따른다는 가정 하에 한계상태를 초과하는 빈도수는 식(11)과 같다.

$$v_{u_{lim}^k} = 2v_{u_{lim}^k}^+ = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{\dot{u}_k}}{\sigma_{u_k}} \exp\left[\frac{-u_{lim}^k{}^2}{2\sigma_{u_k}^2}\right] \quad (11)$$

여기서, u_{lim}^k 는 k 조건 한계상태이다. 구조물의 응답이 지진 지속시간 동안 한계상태를 넘어서는 회수가 Poisson분포를 따른다고 가정하였을 때, 지진 발생시 k 조건 한계상태의 파손확률은 식(12)와 같이 구할 수 있다.

$$P_{f_k} = P_{f_k|eq} \cdot P_{eq} = P_{eq} [1 - \exp(-v_{u_{lim}^k} \cdot t_d)] \quad (12)$$

여기서, $P_{f_k|eq}$ 는 지진발생시 k 조건 한계상태의 파손확률이고, P_{eq} 는 지진발생확률, t_d 는 지진지속시간이다.

5. 비용효율성 평가

비용효율성 평가를 위한 점탄성감쇠기 설치 구조물의 사용기간 비용함수는 식(13)과 같이 부피의 함수로 나타내었으며, 기둥강성 k_{col} 과 점탄성 재료 전단면적 A_d 를 설계변수로 정의

하였다.

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{VED}(k_{col}, A_d) = & V_{col}(k_{col}) + r_{VED/col} V_{VED}(A_d) \\ & + D \mathbf{r} \mathbf{P}_f(k_{col}, A_d) \frac{P_{eq}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda_{eff}}) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, $V_{col}(k_{col})$ 는 구조물 부피, $r_{VED/col}$ 는 구조물의 초기비용에 대한 점탄성감쇠기 초기비용의 비를 부피로 나타낸 것이고, $V_{VED}(A_d)$ 는 점탄성 재료의 부피, D 는 부피로 나타낸 손상비용 규모, \mathbf{r} 는 각 한계상태의 중요도에 따른 가중치 벡터, \mathbf{P}_f 는 파손확률 벡터, λ 는 구조물의 감가상각비이다. 감쇠기 비설치 구조물의 경우에는 두번째항이 제외된다. 식(13)의 비용함수를 최소화함으로써, 최적설계안을 도출할 수 있게 된다. 감쇠기 설치 구조물과 비설치 구조물간의 상대적 비용효율성을 평가하기 위해 식(14)와 같은 비용효율성 지수를 도입한다.

$$J_{VED/non} = \frac{\min \{ \tilde{C}_{VED}(k_{col}, A_d) \}}{\min \{ \tilde{C}_{nonVED}(k_{col}, A_d) \}} \quad (14)$$

여기서, $J_{VED/non}$ 이 작을수록, 점탄성감쇠기 설치 구조물의 비용효율성이 높음을 나타낸다.

그림3과 같이 점탄성감쇠기를 설치한 6층 steel frame에 수치모사를 통한 비용효율성 평가를 수행하였다. 각 층 질량은 $36500 \text{ N} \cdot \text{sec}^2/\text{m}$, 점탄성 재료의 초기 전단 면적 200 cm^2 이고, 두께 h_d 는 3 cm 이며, 구조물의 초기 강성은 식(15)와 같다. 기둥의 강성과 감쇠기 전단 면적을 증가시켜가며, 가속도계수 A 와 지반계수 S 를 매개변수로 하는 비용효율성 평가를 수행하였다.

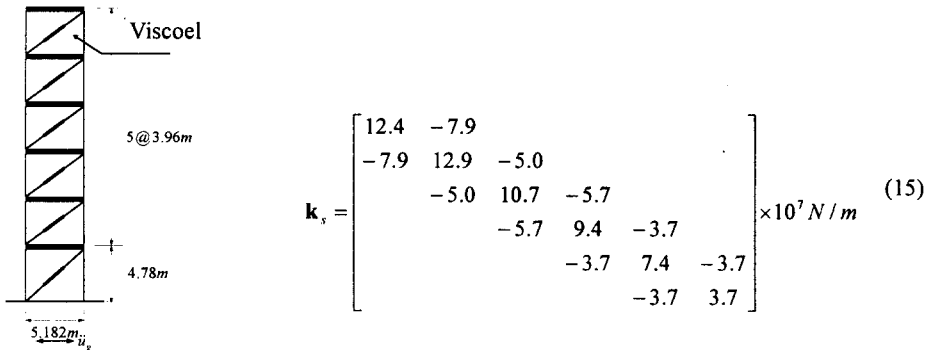
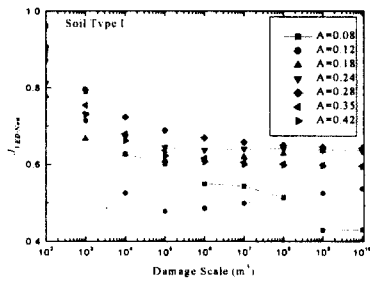
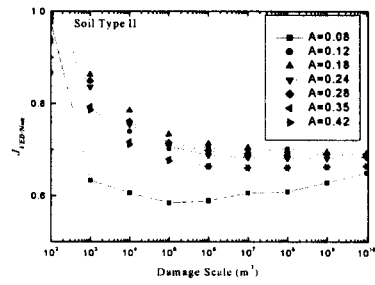


그림3 수치모사 모델

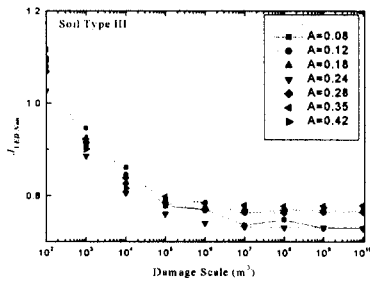
그림4a~4d는 지진가속도조건에 따른 점탄성감쇠기 설치 구조물의 비용효율성을 각 지반조건에 대하여 나타낸 것이다. 구조물의 중요도가 높을 때(손상비용 규모 증가시), 지진가속도가 증가할수록 견고한 지반(그림4a, 4b)에서는 감쇠기 설치 구조물의 비용효율성이 낮은 경향을 나타낸다. 그러나, 연약 지반(그림4c, 4d)에서는 뚜렷한 경향을 보이지 않는다. 그림5a~5g는 지반조건에 따른 점탄성감쇠기 설치 구조물의 비용효율성을 각 가속도조건에 대하여 나타낸 것이다. 모든 지진가속도 지역에 있어서, 견고한 지반일수록 비용효율성이 높음을 나타낸다. 감쇠기 설치로 인한 지진응답감소에 있어서 한계가 있기 때문에 강진지역, 연약지반에 있어서는 보다 큰 구조물 고유의 강성을 요구하게 되므로, 구조물 고유의 강성 감소 효과가 떨어져 감쇠기의 비중이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 가속도계수가 0.08인 지역에서는 비용효율성이 가속도계수가 0.12인 지역보다 비용효율성이 낮은 경향을 보이는데, 이는 가속도계수가 너무 낮은 지역에서는 이미 구조물의 강성만으로도 어느 정도 충분한 지진응답감소능력을 지니고 있기 때문인 것으로 판단된다.



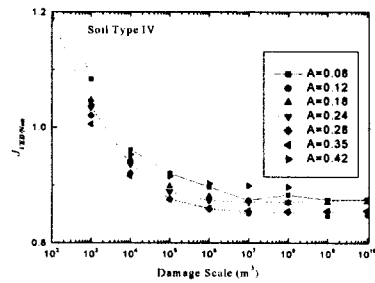
(a) 지반계수 I



(b) 지반계수 II

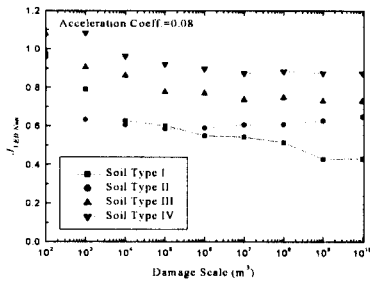


(c) 지반계수 III

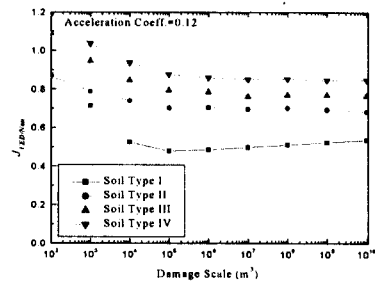


(b) 지반계수 IV

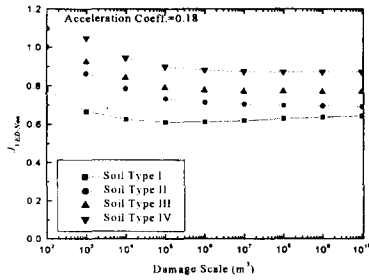
그림4 지진가속도조건에 따른 비용효율성



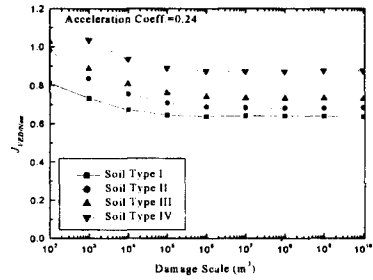
(a) 가속도계수 0.08



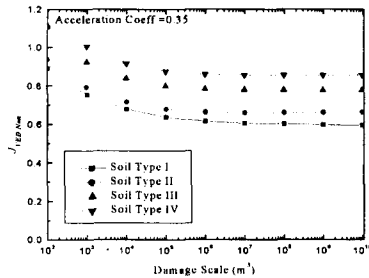
(b) 가속도계수 0.12



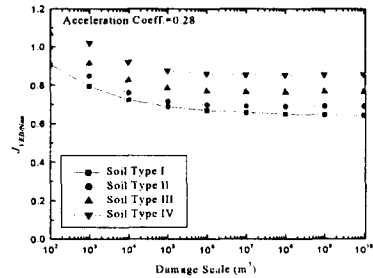
(c) 가속도계수 0.18



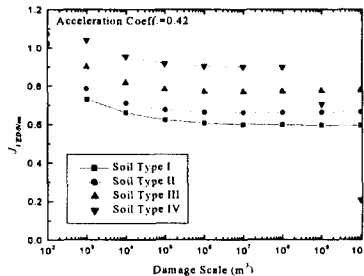
(d) 가속도계수 0.24



(e) 가속도계수 0.28



(f) 가속도계수 0.35



(g) 가속도계수 0.42

그림5 지반조건에 따른 비용효율성

6. 결론

점탄성감쇠기를 설치한 구조물이 한계상태에 다다를 파손확률을 산출하여 각각의 지진가속도, 지반조건에 매개변수 조합에 대하여 사용기간 비용함수를 최소화하고, 감쇠기 비설치 구조물과의 상대적 비용효율성을 평가하였다. 수치모사 결과에 따르면 점탄성감쇠기 설치 구조물의 비용효율성은 약진지역과 견고한 지반에서 상대적으로 높은 경향을 나타내었다. 이는 점탄성감쇠기 장착으로 인한 지진응답의 감소에는 그 한계가 있고, 강진을 대비하기 위해 더 큰 구조물 고유 강성을 요구하게 되므로 상대적으로 강진인 지역에서의 감쇠기의 비중이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 이 연구에서는 파손확률 산출시의 많은 횟수의 반복으로 인해 비교적 단순화된 방법으로 구조시스템을 모델링하였고, 비용에 관한 구체적인 정보의 한계로 인해 구조물이 건설될 부지 조건의 변화에 따르는 경향 파악에 주안점을

두었다. 따라서, 좀더 정밀한 구조 시스템의 모델링과 구체적인 비용정보의 수집을 통하여, 보다 정량적인 비용효율성 평가와 최적 설계안을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 감사의 글

이 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

8. 참고 문헌

고현부, 송준호(1999), "사용기간비용 최소화에 의한 지진격리교량의 경제성평가", *대한토목학회논문집*, 19(1-4), pp. 539-550

고현부, 박관순, 송준호(2000), "유체-구조물 상호작용을 고려한 지진격리 수조구조물의 비용효율성 평가", *대한토목학회논문집*, 20(2-A), pp. 201-215

Chang, K.C., Soong, T.T., Oh, S-T. and Lai, M.L.(1991), *Dynamic Characteristics of a Full-Size Five-Story Steel Structure and a 2/5 Scale Model*, Technical Report NCEER 91-0012, National Center for Earthquake Engineering Research

Chang, K.C., Lai, M.L., Soong, T.T., Hao, D.S. and Yeh, Y.C.(1993), *Seismic Behavior and Design Guidelines for Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers*, Technical Report NCEER 93-0009, National Center for Earthquake Engineering Research

Shen, K.L., Soong, T.T., Chang, K.C. and Lai, M.L.(1995), "Seismic Behavior of Reinforced Concrete Frame with Added Viscoelastic Dampers", *Journal of Engineering Mechanics*, 17(5), pp. 372-380

Soong, T.T. and Dargush, G.F.(1997), *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons

Warszawski, A., Gluck, J. and Segal, D.(1996), "Economic Evaluation of Design Codes - Case of Seismic Design", *Journal of Structural Engineering*, 122, pp. 1400-1408

Wen, Y.K. and Ang, A.H-S.(1991), "Reliability and Cost-Effectiveness of Structures with Active Control", *Proceedings of the International Workshop on Intelligent Systems*, pp. 63-76

Zhang, R.H. and Soong, T.T.(1992), "Seismic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Applications", *Journal of Structural Engineering*, 118(5), pp. 1375-1392