

에너지 흡수효율에 의한 철근콘크리트 구조물의 감쇠비 수정계수 결정

Determination of Damping Modification Factor in RC Structures Due to Energy Absorption Efficiency

김 장 훈*

Kim, Jang Hoon

좌 동 훈**

Jwa, Dong Hoon

ABSTRACT

The modification factor(k -factor) of equivalent damping ratio utilized in the current state-of-the-practice to account for the imperfection of reinforced concrete structures in hysteresis loop is investigated. From this, it is found that the current modification factor does not include the effect of cyclic loading, one of the important characteristic properties of earthquake loading. This could be taken into account by considering the energy absorption efficiency based on the cumulative plastic deformation. From the study, it is suggested that the current approach for the modification factor for the equivalent damping ratio should be reformed.

1. 서론

철근콘크리트 구조물에 지진하중이 작용하게 되면 콘크리트에는 변형에 의한 균열이 발전하게 되고, 변형이 커짐에 따라 철근이 항복점을 초과하면 구조물의 거동은 비탄성·비선형 구간으로 들어서게 된다. 이때 구조물의 힘-변위 관계곡선으로 둘러싸인 면적은 구조물의 비탄성 변형에 의하여 흡수되는 에너지로 간주된다. 따라서 철근콘크리트 구조에 의하여 흡수되는 에너지는 강도(strength), 소성변위(plastic deformation) 및 하중 반복 횟수(number of loading cycles)에 의하여 결정된다. 결과적으로 에너지 흡수량이 클수록 더 많은 양의 지진에너지가 소산되어 지진에 의한 구조물의 거동 요구량은 감소한다.

구조물의 에너지소산에 의한 거동 요구량 감소현상은 등가점탄성 감쇠비(equivalent viscous damping ratio)를 이용하여 구조물의 동적요구량 산정에 적용할 수 있으며¹⁾, 이력감쇠(hysteretic damping)으로서도 설명된다²⁾. 최근에 소개된 ATC-40의 비선형 정적해석법(nonlinear static analysis procedure)에서는 이를 이용하여 철근콘크리트 구조물의 거동예측을 보다 신빙성있게 하고자 시도하였다³⁾. 즉 이상적 거동모델에 의한 이력감쇠에 지진특성, 구조물의 여건 및 이력감쇠 자체등을 고려한

* 정회원, 아주대학교 환경도시공학부 부교수

** 정회원, 아주대학교 건축학과 석사과정

감쇠계수를 곱하여 이력감쇠비를 보정함으로써 철근콘크리트 구조물의 불완전한 이력거동특성을 가급적 적절하게 적용하고자 하였다. 그러나 철근콘크리트의 이력거동특성에 의하여 에너지 소산을 평가함에 있어서 지진하중의 반복성을 제대로 고려하지 못하였음을 지적하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 지진하중의 반복성을 고려한 철근콘크리트 구조물의 감쇠비 수정계수를 제안하고자 한다.

2. 이력감쇠 및 수정계수

감쇠에 의한 구조물 거동요구량의 감소는 SDOF 시스템 운동방정식의 감쇠계수와 속도의 곱으로 이루어진 항에 의하여 설명된다. 이의 영향은 탄성설계 스펙트럼에서 지반최대가속도(peak ground acceleration)에 대한 SDOF 시스템 변위의 동적증폭계수(dynamic amplification factor)의 감소로서 나타낼 수 있으며, 여러 지진파에 대한 응답을 50% 및 15.9% 초과 확률에 대하여 감쇠비에 따라 정리하면 Table 1과 같다¹⁾.

Table 1 Dynamic amplification factor for elastic design spectrum¹⁾

Damping, ζ (%)	Median (50 percentile)			One Sigma (84.1 percentile)		
	α_A	α_V	α_D	α_A	α_V	α_D
1	3.21	2.31	1.82	4.38	3.38	2.73
2	2.74	2.03	1.63	3.66	2.92	2.42
5	2.12	1.65	1.59	2.71	2.30	2.01
10	1.64	1.37	1.20	1.99	1.84	1.69
20	1.17	1.08	1.01	1.26	1.37	1.38

비탄성·비선형 이력거동에 의한 등가감쇠는 ATC-40에 따라 Fig 1과 같이 최대변형에너지 E_{S_0} 대한 이력거동에 의하여 소산된 에너지 E_D 의 비로 나타낼 수 있으며 식 (1)과 같이 구한다.

$$\beta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S_0}} + 0.05 \quad (1)$$

여기서 0.05는 구조물에 내재된 점탄성 감쇠계수를 의미한다. 이렇게 결정된 등가감쇠는 Table 1로부터 구한 동적증폭계수를 이용하여 선형·탄성 응답스펙트럼으로부터 비탄성·비선형 이력거동을 하는 구조시스템의 거동 예측을 가능하게 한다.

그러나 철근콘크리트 구조물의 거동은 균열 및 미끄러짐으로 인하여 Fig 1과 같은 이선형 이력거동 모델과는 상당한 차이를 보이게 된다. 이러한 차이를 고려하고자 ATC-40에서는 감쇠수정계수 (k -factor)를 식 (1)에 적용하여 등가감쇠계수를 다음과 같이 나타내었다.

$$\beta_{eff} = \frac{k}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S_0}} + 0.05 \quad (2)$$

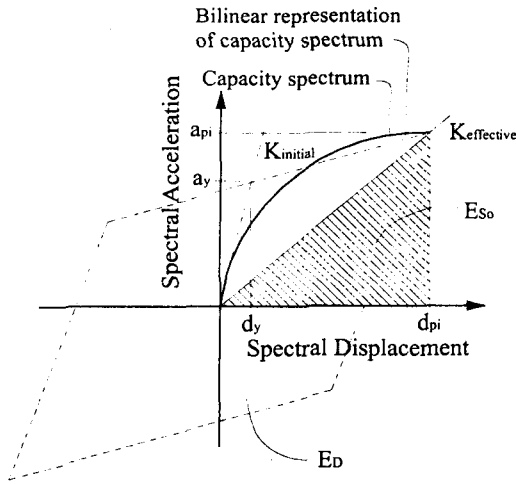


Fig 1 Derivation of damping for spectral reduction³⁾

하면 철근콘크리트 구조물의 감쇠수정계수를 보다 적절하게 구할 수 있다.

철근콘크리트 구조물의 이력거동에 의하여 소산되는 에너지는 Fig 2와 같이 빗금친 부분의 면적과 같다. 이를 기준이 되는 탄성-완전소성 시스템(Elasto-Perfectly Plastic, EPP System)에 의한 면적으로 나누면 주어진 하중 사이클에서 구조물의 EPP 시스템에 대한 에너지 흡수효율이 계산되고 이는 무차원화한 계수로서 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\sum E_{EXP}}{\sum E_{EPP}} \quad (3)$$

여기서 η 는 에너지 흡수효율, $\sum E_{EXP}$ 는 실험을 통하여 관측된 철근콘크리트 구조물의 누적에너지 흡수량이고 $\sum E_{EPP}$ 는 EPP 시스템에 의하여 흡수 누적된 에너지이다. 그러므로 에너지 흡수효율은 매 하중 사이클마다 누적되어 계산된다.

에너지 흡수효율은 철근콘크리트 구조물이 Fig 2와 같은 평행사변형질의 완전한 이력거동을 할 수 없기 때문에 이러한 불완전성을 정량화한 것으로서 해석된다. 이는 앞서 ATC-40에서 정의된 철근콘크리트 구조물의 등가 감쇠비 수정계수 k 의 역할과 정확히 일치하지만, 수정계수 k 에서 고려하지 못한 반복하중 효과를 내포하고 있기 때문에 철근콘크리트의 거동을 더욱 적절하게 대변하고 있다고 간주된다.

4. 철근콘크리트 구조물의 등가감쇠비 감소계수

앞서 소개된 에너지 흡수효율에 의한 철근콘크리트 등가 감쇠비 감소계수를 정하기 위하여 실물크기 철근콘크리트 기둥-보 시스템⁵⁾, 1/3축소 단층 골조⁶⁾ 그리고 긴장방향 단면의 세장한 벽체⁷⁾의 실험으로부터 얻은 이력거동을 고려하였다. 이들 공시체의 실험관측된 힘-변위 이력거동 곡선은 Fig 3과

그러나 식 (2)에 의한 등가감쇠계수는 Fig 1과 같이 1회전에 대한 이력거동에 의한 에너지 소산만을 고려하여 얻은 결과이므로 다수반복 사이클의 이력거동을 보이는 지진에 의한 반복하중 특성을 반영하지 못함이 지적된다. 그러므로 보다 적절한 수정감쇠계수를 얻으려면 반복하중에 따른 누적에너지 소산을 고려하여야 한다.

3. 에너지 흡수효율 이론

에너지 흡수효율에 의한 구조물간 내진성능 비교 기법⁴⁾은 구조물의 여러 가지 변수들(크기, 강도, 재료 및 부재)의 차이와 무관하게 구조물의 이력거동에 의한 에너지 소산능력을 객관적으로 비교할 수 있는 방법이다. 이 방법을 이용

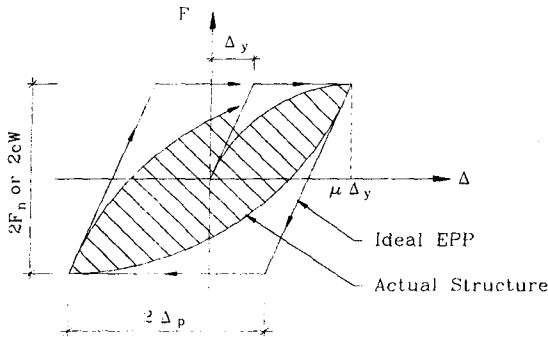


Fig 2 Definition of energy absorption efficiency⁴⁾

0.1radian부터는 일정한 값에 수렴하려는 경향을 보임을 알 수 있다. 에너지 흡수효율에 의한 등가감쇠 수정계수는 규모가 큰 보-기둥 시스템에서는 약 0.2정도이고, 규모가 작은 골조의 경우 0.2~0.4정도 그리고 벽체의 경우 약 0.2~0.3정도임을 알 수 있다. 하지만 누적소성변위가 0.1radian이하에서는 누적소성변위에 따라 등가감쇠 수정계수가 상당히 큰 폭으로 변화하고 있으므로, 이를 실용적으로 사용하기 위하여는 지역별 지반 운동에 대한 누적소성변위 예측기법이 개발되어야 하겠다.

설계시 적용할 수 있는 하나의 방법으로 누적소성변위와 소성거동 반복횟수를 서로 연관지을 수 있다. 즉 일정한 누적소성변위에 도달하기까지 다양한 소성거동 경로를 생각해 볼 수 있는데 이를 표현하면 다음과 같다.

$$\sum \theta_p = \sum N_i \cdot \theta_{pi} \quad (4)$$

여기서 $\sum \theta_p$ 는 누적소성변위이고 θ_{pi} 의 소성변위를 N_i 회 가하여 얻은 소성변위의 합이다. 다시 말하면 지역별 지반운동에 대한 소성거동 반복횟수에 대한 등가감쇠 수정계수의 형태로도 같은 의미를 표현할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기존 비선형 정적 해석 방법에서 철근 콘크리트 구조물의 등가감쇠 수정계수를 적용함에 있어서 고려치 못한 반복하중 효과를 포함하는 에너지 흡수효율에 의한 등가감쇠 수정계수를 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 등가감쇠비는 철근콘크리트의 이력거동에 의한 에너지 소산을 근거로 계산되며 이 때 지진하중의 반복성을 고려하여야 한다. 그러므로 현행 등가감쇠 수정계수의 사용은 재고되어야 한다.
- (2) 현재 입수 가능한 철근콘크리트 구조부재의 이력거동을 분석한 결과 얻은 에너지 흡수효율에 따르면 등가감쇠 감소계수는 규모가 큰 보-기둥 시스템의 경우 0.2 정도, 규모가 작은 골조의 경우 0.2~0.4 정도 그리고 벽체의 경우 0.2~0.3 정도로 나타났다. 하지만 신빙성 있는 값의 제안을 위

같으며, 각각의 누적소성변위에 대한 에너지 흡수효율은 Fig 4와 같다. 여기서 에너지 흡수효율 η

는 등가감쇠 수정계수 k 로서 해석된다. 그림에서 보이듯이 이력거동에 의한 에너지 흡수효율은 등가감쇠 수정계수가 단순히 힘-변위 이력거동의 크기나 형태에 의하여 결정되기 보다는 누적에너지 소산양에 의하여 결정되어야 함을 보여주고 있다. 하지만 대체로 철근콘크리트 구조물의 에너지 흡수효율이 누적소성변위

하여는 더 많은 실험데이터의 분석이 필요하다.

- (3) 에너지 흡수효율에 따른 등가감쇠 감소계수는 누적소성변위가 0.1radian까지는 누적소성변위에 따라 상당히 큰폭으로 변화하지만, 0.1radian이후에는 일정한 값으로 수렴하려는 경향이 있으며, 완만 하게 변화하였다.

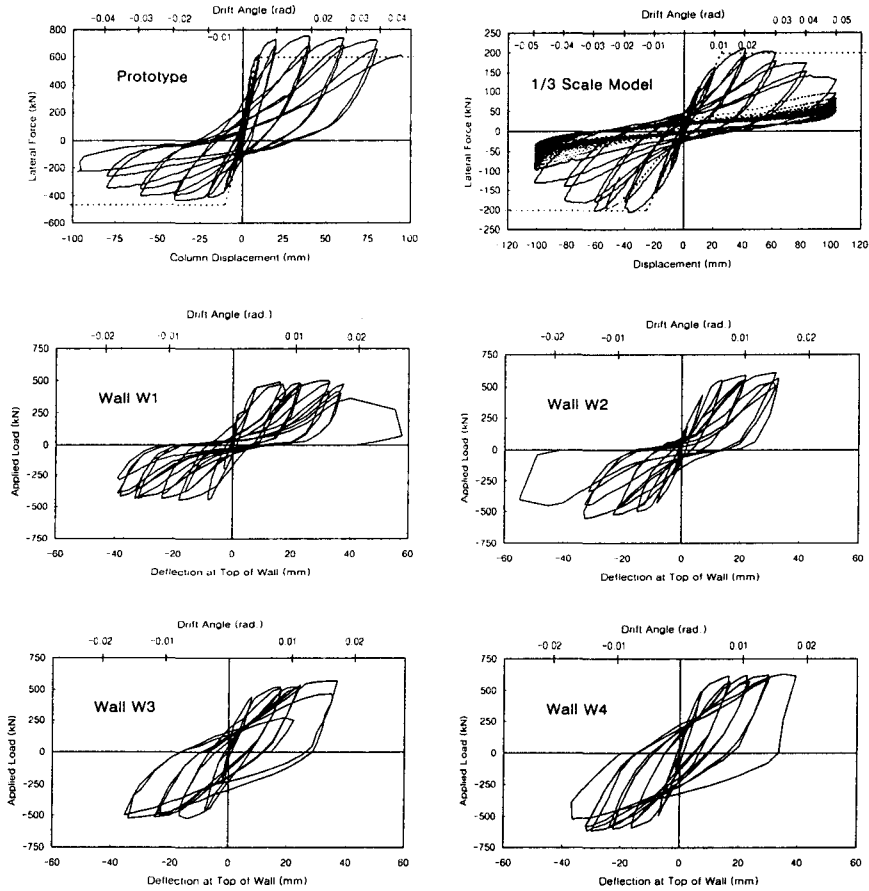


Fig 3 Hysteretic behavior of various reinforced concrete structures

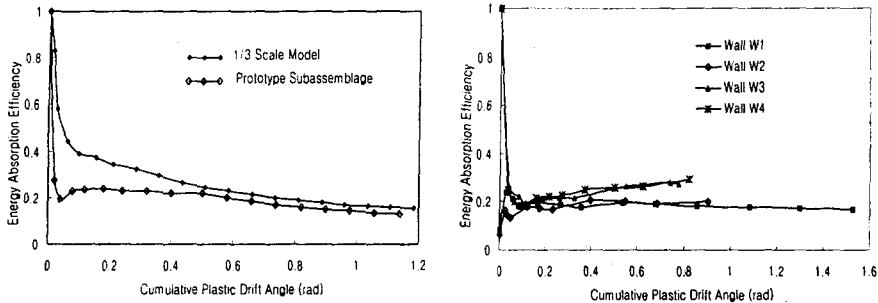


Fig 4 Energy absorption efficiency curves of various reinforced concrete structural elements

감사의 글

이 연구는 POSCO의 2002년 사외 위탁과제 사업 지원하에 수행된 것임을 밝히며, 저자 일동은 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Newmark, N. M. and Hall, W. J., *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif., 1982.
2. Chopra, A. K., *Dynamic of Structures*, Prentice Hall, 1995.
3. ATC-40, *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, Applied Technology Council, 1996.
4. 김장훈, "에너지 흡수효율에 의한 구조물간 내진 성능 비교", 한국지진공학회 논문집, 2001년 6월., pp 37~43.
5. Mander, J. B., Mahmoodzadegan, B., Bhadra, S., and Chen, S. S., *Seismic evaluation of a 30-year-old non-ductile highway bridge pier and its retrofit*, Technical Report NCEER-96-0008, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1996.
6. Mander, J. B., Kim, J. H., and Ligozio, C.A., *Seismic performance of a model reinforced concrete bridge pier before and after retrofit*, Technical Report NCEER-96-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1996.
7. Sittipunt, C. and Wood, S. L., "Development of Reinforcement Details to Improve The Cyclic Response of Slender Structural Walls", *12WCEE*, 2000.