

에너지 흡수효율에 의한 구조물간 내진 성능 비교

Comparative Seismic Evaluation of Structures by Energy Absorption Efficiency

김 장 훈
Kim, Jang Hoon

국문요약

다양한 구조시스템간 반복하중에 대한 거동 성능을 비교하고자 에너지 개념을 확장하였다. 이로부터 에너지 흡수효율이 정의되었는데 이는 구조체의 누적에너지 흡수능력을 기준이 되는 탄성-완전소성시스템의 누적에너지 흡수량으로 나누어 무차원화한 것이다. 이를 위하여 반복하중실험으로부터 구한 실험결과들을 정리하여 에너지곡선의 형태로 표현하여야 한다. 제안된 방법을 이용하여 기하학적으로, 재료적으로 또한 구법이 서로 상이한 구조체간의 내진 성능에 대한 상대적이며 객관적인 비교가 가능해진다. 또한 이 방법의 가장 큰 장점 중의 하나는 구조물의 파괴형태와 관계없이 반복하중에 의한 힘-변위 관계만 주어지면 충분하다는 것이다. 제안된 방법을 두 시험체의 실험결과에 적용하여 그 타당성을 입증하여 보았다.

주요어 : 에너지 흡수효율, 내진 성능비교, 누적소성변위, 에너지 곡선

ABSTRACT

The energy concept has been extended to compare the hysteretic performance between various structural systems. As a result, the energy absorption efficiency is defined as the cumulative energy absorption capacity of a structural system normalized by that of the elasto-perfectly plastic system as a benchmark for comparisons. For this, the construction of energy curves from the experimental results obtained by cyclic loading tests is required. Using the proposed procedure, structures differing from each other in geometry, material and construction can be relatively and objectively compared for seismic performance. Also the beauty of this method is in its irrelevance to the structural failure mode. The proposed procedure was validated by application to the experimental results of two different specimens.

Key words : energy absorption efficiency, comparative seismic evaluation, cumulative plastic drift, energy curves

1. 서 론

현대 내진 설계개념⁽¹⁾의 중심은 사람의 생명보호가 우선이고, 다음이 구조물의 최소한의 기능유지, 그리고 마지막으로 구조물 손상의 최소화라고 할 수 있다. 이러한 목적을 적절한 비용으로 달성하기 위하여 내진 설계기준은 구조물이 약한 지진에 대하여는 탄성적으로 거동하도록 요구하고 있으며, 강한 지진에 대하여는 비탄성적으로 거동하되 충분한 연성을 유지할 것을 요구하고 있다. 그러므로 지진의 영향하에 있는 구조물이 이러한 요구조건에 부합하는가를 판단하기 위하여 적절한 내진 성능평가방법이 필요하다. 특히 내진 성능평가가 지진 후 구조물의 상태 예측, 보수 및 내진 보강, 앞으로 발생할 수 있는 미래의 지진에 대한 구조물의 잔여수명예측 그리고 이에 대한 비용부담-성능개선(cost-benefit) 효과 등과 연계되어 고려하여야 할 상황에서는 보다 객관적이고 구체적인 평가방법의 필요성이 제기된다.

새로이 설계되어 건립되는 구조물이나 오래 전에 설계되어 건립된 기존 구조물의 내진 성능평가방법에는 건축구조물에 대하여는 ATC-14⁽²⁾ 및 ATC-22⁽³⁾ 등이 있으며 교량구조물에 대하여는 ATC-6-2⁽⁴⁾ 및 FHWA 매뉴얼⁽⁵⁾ 등이 있다. 이러한

평가방법들에 있어서 특이할 사항은 제한적이거나 구조물의 거동(즉 힘-변위 관계)을 고려할 수 있으며, 현행설계기준을 근거로 각 구조요소에 대한 보유능력/요구량 비(capacity/demand ratio)를 산출하여 평가한다는 점이다. 고려되는 구조요소로는 밀면전단력을 비롯하여 크레는 휨, 전단 및 축방향력이 있으며, 세분하여 정착길이, 이음길이, 전단철근 간격, 구속철근, 피복, 횡지지 없는 구간의 길이, 보-기둥 접합부 강도 및 좌대길이(seat width) 등이 있다. 그러나 이러한 방법은 비록 사용은 편리할지라도 구조요소들간 상호작용 및 지진하중의 반복적인 요인(cyclic effect)과 시간적인 요인(duration effect)을 제대로 고려할 수 없으므로 평가결과에 대한 신뢰성에 의문이 제기된다.

그러므로 실험을 통한 방법이 구조물의 내진 성능평가에 선호되고 있으며, 실제로 많은 실험연구들이 보고되어 있다. 그러나 실험에 의한 평가에도 분명히 한계가 있다. 일상적인 내진 성능평가 작업을 위하여 모든 대상 구조물을 실험한다는 것은 비용과 시간의 측면에서 비효율적이며 가능하지도 않다. 이를 극복하려면 소수의 구조물에 대한 실험결과를 일반화하여 실험과정을 거치지 않은 다수의 다른 구조물의 내진 성능예측에 이용할 수 있어야 한다. 즉 서로 다른 재료간, 상세간, 구조방식간 및 서로 다른 내진 보강방법간의 실험결과를 객관적으로 비교할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 다양한 시험체의 내진 실험결과를 보다 효율적으로 사용하기

* 정회원 · 아주대학교 환경·도시공학부, 조교수(대표저자 : kimjh@madang.ajou.ac.kr)
본 논문에 대한 토의를 2001년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 2. 5 / 심사종료일 : 2001. 4. 12)

위하여 무차원화 한 에너지 흡수효율(normalized energy absorption efficiency)에 의한 구조물의 내진 성능평가방법을 제안한다. 에너지 흡수능력은 횡하중전달능력 및 소성변형능력 뿐만 아니라 지진하중의 반복적이며 시간적인 요인이 구조물에 미치는 효과를 포괄할 수 있다. 또한 에너지 흡수능력을 각 구조물의 메카니즘 강도에 대하여 무차원화 하면 서로 다른 재료간, 상세간, 구조방식간 및 서로 다른 크기의 구조체간의 객관적인 비교 또한 가능해진다. 마지막으로 실제 구조물의 일부 및 이의 1/3 축소 전체모델간의 반복하중에 의한 실험결과 비교에 제안된 내진 성능평가방법을 적용하여 그 타당성을 보이고자 한다.

2. 에너지 흡수효율

일반적인 에너지 개념은 연속체의 탄성해석에 많이 사용되어온 익숙한 개념이다.⁽⁶⁾ 이 때의 에너지는 탄성체의 회복을 위하여 저장되는(restoring) 에너지로서 소산되지 않는다고 가정한다. 즉 구조물의 거동이 재료나 기하학적으로 선형이거나 비선형이건간에 구조체는 탄성 거동하여야 한다는 가정이다. 본 논문에서는 이러한 일반적인 개념의 에너지를 넘어서서 생각해 보기로 한다.

현행기준에 따라 설계된 대개의 구조물에 지진하중이 작용하면 구조체는 손상을 입게되고 더 이상 연속체로 남아있지 않으며, 결과적으로 비탄성 거동을 하게된다. 이 때의 에너지는 회복되지 않으며 구조물의 비탄성 거동을 통하여 흡수되어 즉 소산되어 없어지게 된다. 따라서 면진베어링과 같이 비탄성 거동을 대신하여줄 장치가 없는 한, 에너지의 소산은 구조체의 손상을 의미한다고 할 수 있다. 여기서 구조체의 비탄성 거동에 의하여 소산될 수 있는 에너지는 구조체 고유의 재료와 형상 및 구법에 의한 에너지 보유량(capacity)을, 그리고 지진으로부터 구조체에 전달되는 소산되어야 할 에너지는 에너지 요구량(demand)을 의미한다. 에너지 보유량이 에너지 요구량을 초과하여야 구조물이 특정 지진에 대하여 안전하게 거동한다고 할 수 있다.

2.1 변형에너지

변형에너지(strain energy)는 Fig. 1과 같이 재료의 응력-변형을 곡선으로 둘러싸인 면적으로서 재료의 단위 체적 당 흡수할 수 있는 에너지의 양이다. 그러므로 구조체의 변형에 의하여 발휘될 수 있는 내부일(internal work done—IWD)은 구조체의 체적을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$IWD = \int_V \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon dV \quad (1)$$

외력에 의하여 구조체가 변형하면 외부일(external work done—EWD)은 Fig. 2와 같이 힘-변위 곡선으로 둘러싸인 면적이 되고 다음과 같이 된다.

$$EWD = \int F d\Delta \quad (2)$$

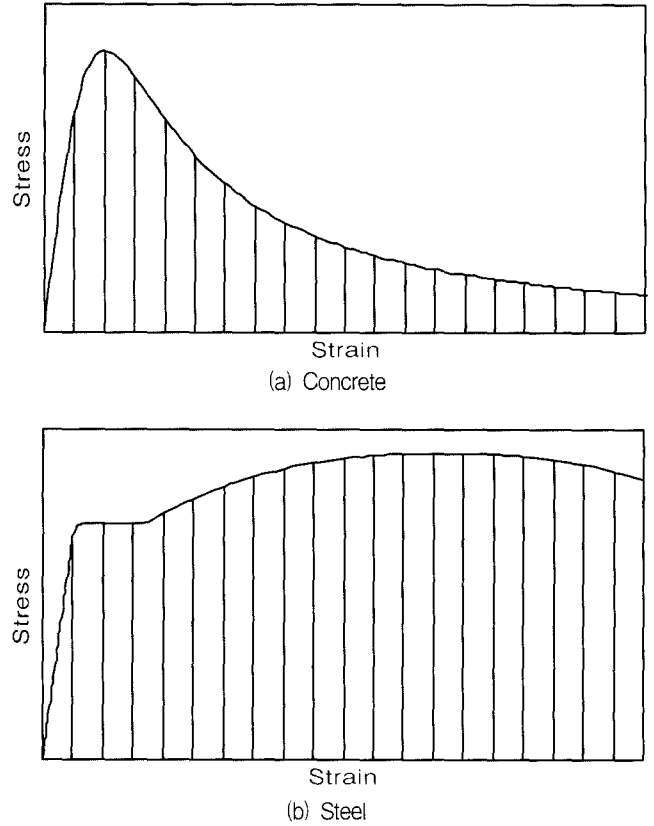


Fig. 1 Strain energy of concrete and steel

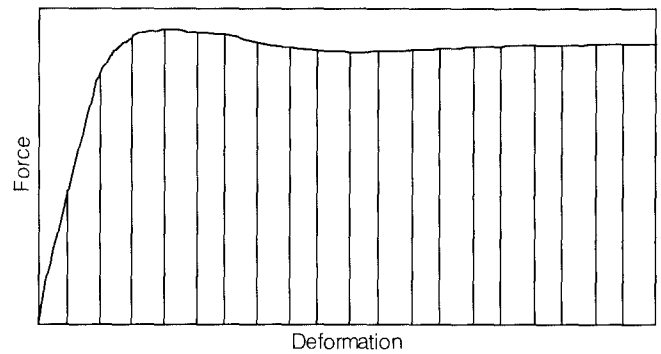


Fig. 2 Force-deformation relationship of a structural system

하중에 의하여 구조체가 변형할 때 발열로 인한 에너지의 손실을 무시하면 외부일과 내부일은 서로 같게 되어 $EWD = IWD$ 가 된다. 이로부터 변형에너지와 외부일은 서로간의 함수로 나타낼 수 있으므로 보유능력으로서의 누적소성변위를 특정한 파괴유형의 변형에너지를 이용하여 구할 수 있음은 이미 알려진 바이다.⁽⁷⁾ 이러한 변형에너지와 외부일의 관계는 구조물의 비탄성 거동의 원인이 명확히 파악될 때에만 가능하지만 일반적으로 구조물이 파괴되기 전에는 파악하기 어려우므로 여러 가지 가능한 파괴유형을 고려하여 에너지 보유량이 가장 작은(즉 불리한) 파괴유형을 택하여 문제를 해결하였다.

본 논문에서는 여러 가지 파괴유형을 이론적으로 고려하기보다는 실험으로부터 얻은 결과를 객관적으로 정리하는 방안을 제안하여 여러 가지 구조물의 내진 성능평가에 이용할 수 있도록 하고자 한다.

2.2 에너지 흡수효율

서로 다른 형태(기하학적 및 재료 그리고 크기 등)의 구조물 상호간의 객관적인 내진 성능비교는 실험에 의한 에너지 흡수효율을 비교함으로써 가능하다. 이를 위하여 잘 알려진 일반적인 반복거동법칙(hysteretic rule)에 의한 값을 기준치로 삼는 것이 편리하다. 본 논문에서는 탄성-완전소성(elasto-perfectly plastic-EPP) system에 대한 구조물의 에너지 흡수효율을 고려하고자 한다.

Fig. 3에 예시된 EPP System에 의하여 흡수 누적된 에너지(cumulative energy) ΣE_{EPP} 는 평행사변형의 면적에 의하여 정의할 수 있는데, 누적소성변위(cumulative plastic drift)를 사용하여 이를 수식으로 표현하면

$$\Sigma E_{EPP} = \Sigma(F_n^+ + F_n^-)(\Delta_p^+ + \Delta_p^-) \quad (3)$$

또는 누적소성변위 각도(cumulative plastic drift angle)를 사용하여 나타내면

$$\Sigma E_{EPP} = \Sigma(F_n^+ + F_n^-)(\Theta_p^+ + \Theta_p^-) h_c \quad (4)$$

여기서 $(F_n^+ + F_n^-)$ 는 양방향 메카니즘 공칭강도의 합으로서 대칭구조물에서는 $2F_n$ 으로 표현할 수 있는데, 이 때에 F_n 은 메카니즘 평균 공칭강도라고 할 수 있다. 또한 h_c 는 구조물을 SDOF system으로 간주했을 때의 순수길이 또는 순수높이이다. 소성변위는 전체변위로부터 탄성부분을 감하여 얻어지며 다음과 같은 관계가 있다.

$$\Delta = \Delta_e + \Delta_p \quad (5)$$

$$\Theta = \Theta_e + \Theta_p \quad (6)$$

여기서 아래첨자 e 는 탄성영역을, p 는 소성영역을 의미한다. 대칭구조물에 양방향으로 같은 크기의 소성변위 각도를 유발하는 n 회의 반복하중이 작용할 때 EPP system에 의하여 흡수 누적된 에너지는 식 (4)로부터

$$\Sigma E_{EPP} = 4nF_n h_c \Theta_p \quad (7)$$

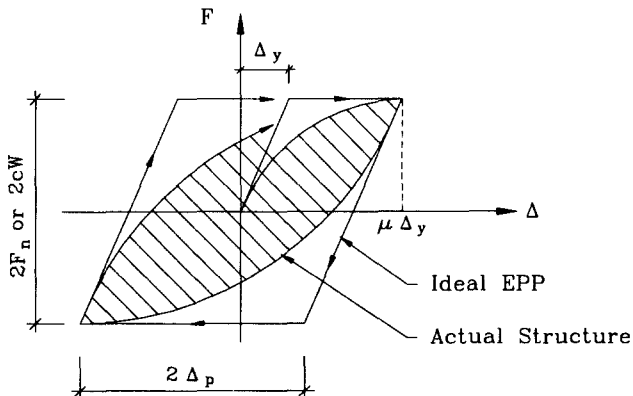


Fig. 3 Definition of energy absorption efficiency

지진과 같은 반복되는 변위의 크기나 횟수를 알 수 없는 경우에는 식 (7)은 다음과 같이 된다.

$$\Sigma E_{EPP} = 2F_n h_c \Sigma \Theta_p \quad (8)$$

EPP system에 대한 일반 구조물의 실험에 의한 에너지 흡수효율 η 는 다음과 같이 정하여진다.

$$\eta = \frac{\Sigma E_{EXP}}{\Sigma E_{EPP}} \quad (9)$$

여기서 ΣE_{EXP} 는 실험을 통하여 관측된 누적 에너지 흡수량이고, 반복하중에 의하여 소모되는 에너지이며, 실험에서 관측된 힘-변위 곡선에 의하여 둘러싸인 면적으로서 수치해석 기법을 이용하여 식 (2)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Sigma E_{EXP} &= \int F d\Delta_p \\ &= \Sigma \left(\frac{F_i + F_{i-1}}{2} \right) (\Delta_{p,i} - \Delta_{p,i-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 F_i 및 $\Delta_{p,i}$ 는 각각 step i 에서의 횡력 및 소성 횡변위이다. 만일 어떤 구조 system이 EPP system과 똑같은 비율로 지진에너지를 소멸시킨다고 가정하면, 이 때의 에너지 흡수효율은 100% 즉 $\eta=1$ 이 된다.

2.3 에너지곡선

에너지 흡수효율의 개념 및 용도를 보다 효과적으로 보이기 위하여 ΣE_{EPP} 및 ΣE_{EXP} 를 $(F_n^+ + F_n^-) h_c$ 로 나누어 무차원화 하면 식 (8)은

$$\frac{\Sigma E_{EPP}}{(F_n^+ + F_n^-) h_c} = \Sigma \Theta_p \quad (11)$$

가 되고 식 (10)은

$$\frac{\Sigma E_{EXP}}{(F_n^+ + F_n^-) h_c} = \frac{1}{4} \Sigma \left(\frac{F_i}{F_n} + \frac{F_{i-1}}{F_n} \right) (\Theta_{p,i} - \Theta_{p,i-1}) \quad (12)$$

가 된다. 식 (11)과 (12)를 식 (9)에 대입하면 해당 구조체의 에너지 흡수효율이 구하여진다. 여기서 식 (9), (11), (12)로부터 ΣE_{EPP} , ΣE_{EXP} 및 η 모두 누적소성변위각 $\Sigma \Theta_p$ 의 함수임을 주목할 필요가 있다.

식 (11)과 (12)를 시각화하면 Fig. 4와 같은 에너지곡선(energy curve)을 얻을 수 있다. 그림에서 보이는바와 같이 EPP system에 의하여 흡수 누적된 에너지는 기울기 1인 직선으로 표현되고, 다른 구조 system들은 재료 및 상세의 특성에 따라 즉 반복하중에 의한 거동에 따라 에너지곡선의 형상이 결정된다. 에너지곡선은 Fig. 5와 같이 곡선이 수렴하게 되는 직선 ① 및 ②에 의하여 그 성격, 즉 에너지 흡수능력이 결정되는데 이를 요약하면 다음과 같다.

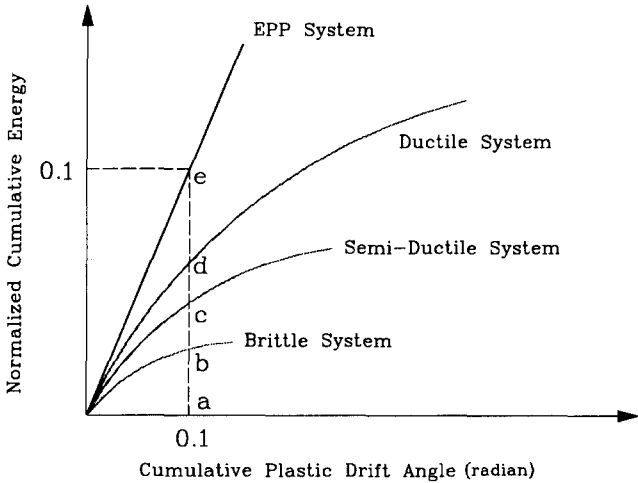


Fig. 4 Energy curves for various structural systems

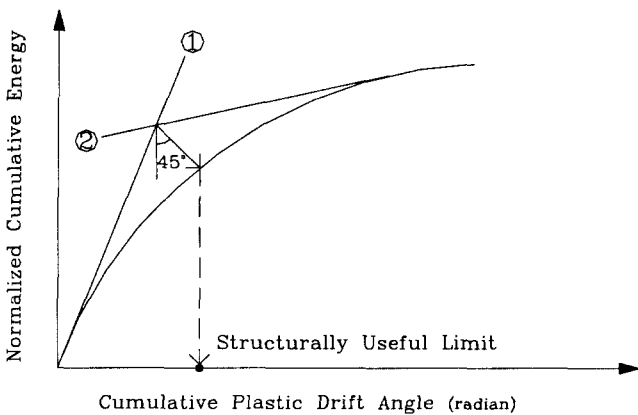


Fig. 5 Characteristics of energy curve

- (1) 구조물의 강도와 강성이 클수록 직선 ①의 기울기는 EPP system에 접근한다. 그러나 대개의 경우 ΣE_{EPP} 의 기울기인 1을 넘지 않는다.
- (2) 구조 system의 연성능력이 클수록 에너지곡선의 곡률이 작아지며 EPP system에 근접한 누적소성변위 구간이 증가한다.
- (3) 반복하중에 의한 구조물의 손상이 누적됨에 따라 에너지곡선은 직선 ①로부터 점점 빠른 속도로 멀어지게 되고, 구조물이 붕괴상태에 이르면 직선 ②의 기울기는 수평에 접근한다. 만일 구조물이 취성파괴하게 되면 직선 ②가 수평에 이르기 전이라도 에너지곡선은 진행을 멈춘다.
- (4) 구조물이 구조적으로 유효한 정도의 저항력을 유지하는 한계 누적소성변위는 에너지곡선이 직선 ①보다 직선 ②에 더 근접하게 되는 때의 누적소성변위이다.
- (5) 누적소성변위가 증가할수록 에너지 흡수효율은 저하한다.

위에 열거한 에너지곡선의 특성은 제한된 수의 실험결과로부터 관찰된 것이므로 다양한 구조재료, 상세 및 구법에 대한 에너지곡선의 특성을 정리하기 위하여는 많은 수의 실험결과로부터 에너지 흡수효율을 정리할 필요성이 제기된다.

3. 요구되는 누적소성변위

Fig. 4와 같은 4가지 구조 system의 에너지곡선으로부터 에너지 흡수효율을 구하여 보기로 한다. 그림에서 보이는바와 같이 에너지곡선이 누적소성변위에 따라 변화하므로 에너지 흡수효율도 일정한 값을 갖는 것이 아니라 누적소성변위에 따라 값이 달라지게 됨을 알 수 있다. EPP system과 비교한 에너지곡선의 형태 그 자체로도 의미가 있지만, 특정 구조 system의 에너지 흡수효율을 구하려면 에너지곡선에서 고려하여야 할 누적소성변위를 알아야 한다. 예를 들어 그림에서 누적소성변위각 $\Sigma\theta_p = 0.1$ radian에서의 에너지 흡수효율은 식 (9)로부터 ductile system은 $\eta = \overline{ad}/\overline{ae}$, semi-ductile system은 $\eta = \overline{ac}/\overline{ae}$, brittle system은 $\eta = \overline{ab}/\overline{ae}$ 가 되어 서로 다른 구조 system을 특정 누적소성변위각에서 에너지 흡수효율에 의하여 비교할 수 있게 된다.

앞서 언급하였듯이 누적소성변위는 변형에너지를 이용하여 구할 수 있는 보유능력으로서 간주될 수도 있지만, 동시에 입력지진파가 가지고 있는 지진에너지를 구조물의 소성거동에 의하여 소산시켜야 하는 요구량으로서 해석할 수도 있다. 이 경우 특정 지진에 의하여 요구되는 누적소성변위는 시간이력해석을 이용하여 규명된다.

식 (9), (11) 및 (12)에서 보이듯이 구조물의 에너지 흡수효율은 누적소성변위각 $\Sigma\theta_p$ 에 따라서 변화하므로 에너지 흡수효율이 계산될 특정 지진에 대하여 요구되는 누적소성변위각 $\Sigma\theta_p(d)$ 를 적절히 결정하는 것이 중요하다. 이를 위하여 순수길이 h_c , 무게 W 인 SDOF 구조물에 소성변위각 θ_p 를 유발하는 반복하중이 작용한다고 가정한다. 그러면 이 구조물에 작용하는 n 회의 반복하중에 의하여 소모되는 에너지(hysteretic energy) E_h 는 Fig. 3의 빗금친 부분의 면적에 해당된다. 이 구조물의 에너지 흡수효율을 η 라고 하면 E_h 는

$$E_h = n \eta (2cW) (2\theta_p h_c) \tag{13}$$

여기서 c =밑면전단계수(base shear coefficient)이고 $2cW$ 및 $2\theta_p h_c$ 는 각각 반복응답곡선(hysteretic loop)의 강도축의 높이와 변위축의 너비를 나타낸다. 식 (13)의 양변을 구조물의 무게로 나누면

$$\frac{E_h}{W} = 4\eta c h_c n \theta_p \tag{14}$$

이 공식에서 E_h/W 는 에너지를 힘으로 나눈 것이므로 무게 W 의 구조물에 작용하는 지진하중에 의하여 에너지 E_h 가 생성되기 위하여 요구되는 누적소성변위임을 알 수 있다. 그러므로 식 (14)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{E_h}{W} = \Sigma\theta_p(d) h_c \tag{15}$$

여기서 $\Sigma\theta_p(d)$ 는 요구되는 등가 누적소성변위각으로서 다음과 같다.

$$\Sigma\theta_p(d) = 4 \eta c n \theta_p \quad (16)$$

그러므로 특정 지진을 견디기 위하여 요구되는 에너지 흡수량 E_h 를 알면 요구되는 누적소성변위 $\Sigma\theta_p(d)$ 를 산정할 수 있게 된다. 즉 식 (15)로부터

$$\Sigma\theta_p(d) = \frac{E_h}{Wh_c} \quad (17)$$

Chang과 Mander⁽⁸⁾는 저사이클피로에 근거하여 여러 가지 지진과 거동모델에 대한 에너지 스펙트럼을 개발하였는데 식 (17)에 적용하여 보면 대개의 일반적인 지진의 경우 요구되는 누적소성변위는 $\Sigma\theta_p(d) \leq 0.1$ radian이 되고, 안전측으로 최대 발생 가능한 지진(maximum credible earthquake)에 대하여는 $\Sigma\theta_p(d) \leq 0.2$ radian이 된다.

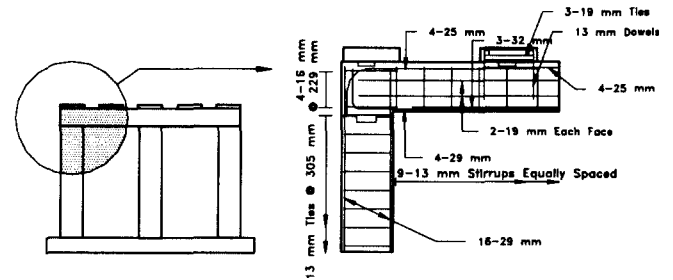
그러나 이는 일회의 지진발생에 대하여 요구되는 누적소성변위이고, 지진발생 후 손상된 구조물의 표면적(cosmetic) 수리 후 구조물을 사용하는 중에 다시 지진을 경험하게 되면 $\Sigma\theta_p(d)$ 는 누적되어 값이 증가하게 되며 따라서 에너지 흡수효율은 저하된다. 이러한 일련의 '지진발생→표면적 수리→지진발생' 사이클을 몇 번 반복하게 되면 누적소성변위가 증가되어 에너지 흡수효율은 극히 작아지게 되며 결국은 구조물의 붕괴로 귀착하게 됨을 Fig. 4로부터 추측할 수 있다. 여기서 구조물의 붕괴는 구조물이 심하게 손상되어 반복하중을 통하여 더 이상 에너지를 흡수할 수 없는 상태, 즉 에너지곡선의 기울기가 수평으로 되거나 에너지곡선의 진행이 멈춘 상태를 의미한다.

4. 적용예제

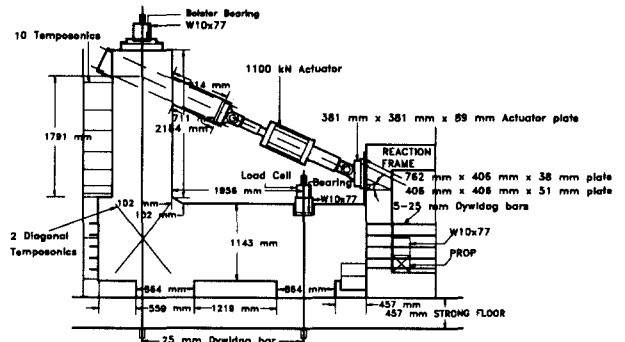
본 논문에서 제시한 에너지 흡수효율에 의한 구조물의 내진 성능평가이론을 예시하기 위하여 Fig. 6 및 Fig. 7의 두 개의 구조물을 고려하기로 한다. 두 구조물 모두 Mander 등^{(9),(10)}에 의하여 실험·보고된 것으로 Fig. 6은 내진설계되지 않은 30년 연령의 원래크기의 실제구조물(full scale—prototype) 중 일부(subassemblage)를 취하여 실험한 것을 나타내고, Fig. 7은 Fig. 6의 원래크기의 구조물의 1/3 축소모델을 만들어 구조체 전부를 실험한 것을 나타낸다. 두 시험체 모두 준정적 반복하중에 의하여 실험하였으며, 실험결과 얻은 힘-변위 곡선은 실험크기 구조물과 1/3 축소모델 각각 Fig. 8 및 Fig. 9에 보여지고 있다.

예제의 두 구조물의 내진 성능을 비교하기 위하여 우선 서로 유사한 점을 고려하면, 둘 다 철근콘크리트 골조이고 하나는 원래크기의 구조물이고 다른 하나는 이를 1/3로 축소한 모델이므로 이들의 내진 성능은 비슷할 것으로 기대된다. 그러나 두 구조물은 크기가 다르며, 하나는 구조체 전부를 실험한 반면, 다른 하나는 구조체의 일부만을 실험한 것이므로 두 구조물의 내진 성능을 힘-변위 곡선을 기준으로 단순비교하기에는 무리가 있음을 직감하게 된다. 또한 1/3 축소모델이라고 하지만 재료 및 시공의 한계 그리고 실험조건

등에 의하여 완벽한 상사성(similitude)을 기대할 수 없다는 것이 축소모델 실험에서 당면하는 일반적인 난제이다.⁽¹¹⁾ 또한 실험결과 관찰된 파괴형태는 Fig. 6의 구조물은 보-기둥

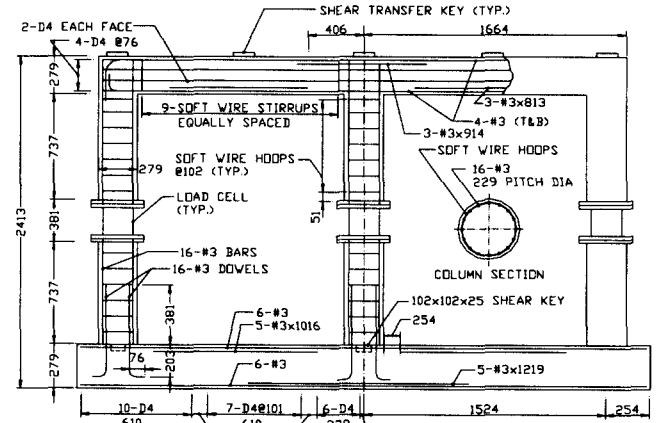


(a) Details of pier subassemblage

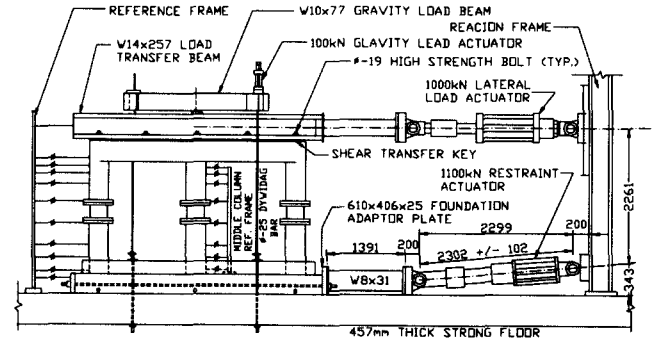


(b) Test setup

Fig. 6 Prototype reinforced concrete frame subassemblage⁽⁹⁾



(a) Construction details



(b) Test setup

Fig. 7 1/3 scale model reinforced concrete frame structure⁽¹⁰⁾

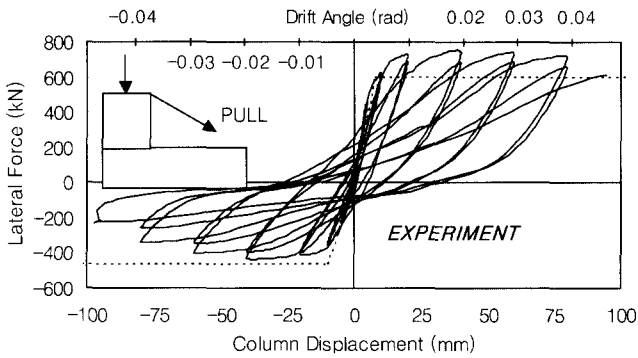


Fig. 8 Force-displacement relationship of prototype subassembly⁽⁹⁾

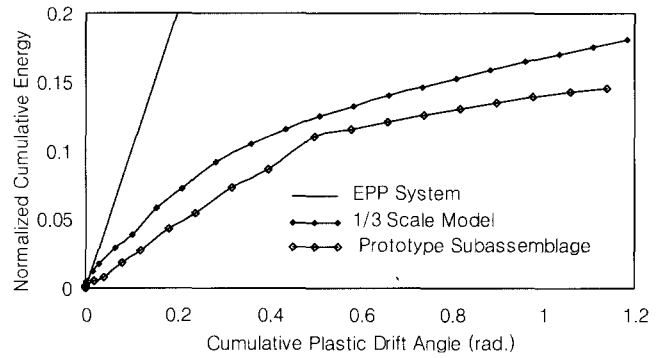


Fig. 10 Comparison of energy absorption capacity

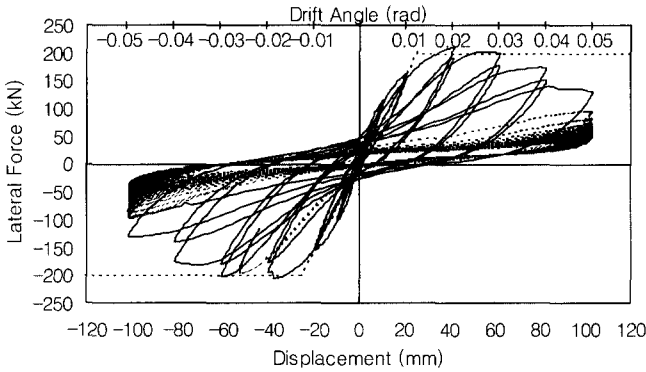


Fig. 9 Force-displacement relationship of 1/3 scale model⁽¹⁰⁾

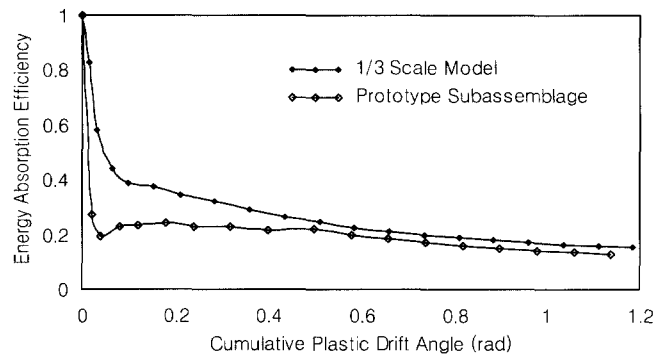


Fig. 11 Comparison of energy absorption efficiency

접합부의 전단파괴이고, Fig. 7의 구조물은 보-기둥 접합부 파괴와 더불어 가운데 기둥 하부 이음철근의 저사이클피로에 의한 파괴를 보여주었다.

이제 Fig. 8 및 Fig. 9의 힘-변위 곡선을 본 논문에서 제시된 식 (11) 및 식 (12)에 의하여 정리하면 Fig. 10과 같은 에너지곡선을 얻을 수 있다. 그러면 무차원화 한 에너지 곡선으로부터 두 구조물의 내진 성능비교는 어렵지 않게 달성할 수 있다. 즉 그림으로부터 1/3 축소모델이 원래구조물에 비하여 우월한 내진 성능을 보유하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림으로부터 구조물이 구조적으로 유효한 정도의 저항력을 유지할 수 있는 누적소성변위는 원래구조물과 1/3 축소모델 모두 $\sum \theta_p \approx 0.4$ radian임을 알 수 있다.

누적소성변위에 대한 에너지 흡수효율을 식 (9)에 의하여 정리하면 Fig. 11과 같은 곡선이 얻어진다. 만일 예시된 두 구조물이 한번의 지진을 경험하였다고 가정하여 누적소성변위 $\sum \theta_p(d) = 0.1$ radian에서 에너지 흡수효율을 비교하여 보면 원래구조물이 $\eta = 0.23$ 이고 1/3 축소모델이 $\eta = 0.38$ 이 되어 축소모델의 내진 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 또한 최대 발생 가능한 지진을 경험하였다고 가정하면, $\sum \theta_p(d) = 0.2$ radian에서 에너지 흡수효율은 원래구조물이 $\eta = 0.23$ 이고 1/3 축소모델이 $\eta = 0.34$ 가 되어 역시 축소모델의 내진 성능이 더 우수함을 알 수 있다.

5. 결론 및 추후연구

본 연구를 통하여 이끌어낼 수 있는 결론 및 에너지개념

을 이용한 내진성능평가방법을 발전시키기 위하여 요구되는 추후연구는 다음과 같이 정리된다.

- (1) 다양한 시험체의 내진 실험결과를 비교하기 위한 방안으로 에너지 흡수효율을 이용한 구조물의 내진성능평가방법을 제안하였으며, 여러 유형의 기하학적 및 재료적 측면에서 서로 다른 구조물들을 지진에너지 흡수능력에 따라 상대적으로 객관적인 관점에서 비교할 수 있음을 보여주었다. 극단적으로는 철근콘크리트 구조체와 철골 구조체와의 비교, 내진보강전·후의 비교 및 내진보강방법간의 비교도 가능하다고 하겠다.
- (2) 제안된 내진성능평가이론을 내진설계되지 않은 30년 된 실제구조물의 일부와 이의 1/3 축소모델 전체구조물에 적용한 결과, 누적소성변위각 0.1~0.2 radian 사이에서 각각 0.23 및 0.34~0.38의 에너지 흡수효율을 보여주었다.
- (3) 제안된 내진성능평가방법을 실무차원에서 사용하기 위하여 충분한 실험결과의 정리와 다양한 거동모델 및 파괴메카니즘을 고려한 에너지스펙트럼의 연구개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구를 수행하는데 도움을 준 University of Canterbury (New Zealand) 토목공학과 Dr. John B. Mander의 조언에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. SEAOC, *Recommended Lateral Force Requirements and Tentative Commentary*, 5th edition, Seismology Committee, Structural Engineers Association of California, San Francisco, California, 1988.
2. ATC-14, *Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings*, Applied Technology Council, 1987.
3. ATC-22, *A Handbook for Seismic Evaluation of Existing Buildings(Preliminary)*, Applied Technology Council, 1992.
4. ATC-6-2, *Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges*, Applied Technology Council, 1983.
5. FHWA, "Seismic retrofitting manual for highway bridges," *Report No. FHWA-RD-94-052*, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 1994.
6. Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., *Mechanics of Materials*, Brooks/Cole Engineering Division, Wadsworth, Inc., California, 1984.
7. 김장훈, "에너지에 근거한 철근콘크리트 구조물의 내진성능 평가 I - 휨요소", 한국지진공학회논문집, 제3권, 제3호, 1999. 9, pp. 33-44
8. Chang, G. A. and Mander, J. B., "Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns, Part II: evaluation of seismic demand," *Technical Report NCEER-94-0013*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1994.
9. 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.
10. 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.
11. ACI, *Models for Concrete Structures*, ACI Publication SP-24, American Concrete Institute, Detroit, 1970.