

내진역량설계법(Capacity Design Method)을 이용한 비내진설계 R/C 골조의 내진 성능 향상기법 The Capacity Design Method towards Improving Seismic Performance of Gravity-Load Designed R/C Frames

조봉호*
Cho, Bong-Ho

홍성걸**
Hong, Sung-Gul

ABSTRACT

The seismic performance of R/C frame structure designed for gravity load is investigated in this paper. The investigation shows a satisfactory seismic performance against moderate earthquakes but column sway failure mechanism against severe earthquakes. Capacity design method is employed to redesign the R/C frame to improve seismic performance. The redesigned R/C frame structure showed desirable collapse mechanisms. This study provides an insight into seismic upgrading methodology for medium rise R/C frame structures designed for gravity load.

1. 서론

본 연구에서는 비내진 설계된 중-저층 R/C 골조의 비선형 동적 해석을 통해 내진성능을 평가하고, 내진역량설계법(capacity design method)의 기본개념을 이용하여 내진성능향상 기법의 방향을 제시하고자 한다.

비내진 설계된 R/C 골조는 예기치 못한 강진이 발생했을 때 기둥휨쏠림 메커니즘에 의해 치명적인 붕괴로 발전할 수 있다. 본 연구에서는 내진역량설계법을 이용하여 연직하중에 대하여 설계된 R/C 골조의 내진성능향상을 위해 필요한 강도를 구하였다. 내진역량설계법을 이용하면 등가정적해석법이나 시각력해석법등의 복잡한 해석과정없이 내진성능 향상을 위한 부재의 강도요구량을 쉽게 계산할 수 있어, 다양한 보강방법을 통한 골조의 내진성능 향상에 유용하게 사용할 수 있다.

2. 비내진설계 R/C 골조의 설계 및 동적 해석

2.1 설계대상 R/C 골조의 개형

강도설계법에 의해 연직하중(1.4D + 1.7L)에 대하여 사무실용도의 3경간 × 4경간 5층 골조를 압축강도 $240\text{kg}/\text{cm}^2$ 콘크리트와 항복강도 $4000\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 철근을 가정하여 설계하였다. 설계대상

* 서울대학교 건축학과 석사과정

** 서울대학교 건축학과 전임강사, 정회원

골조는 그림 1(a)의 내부골조로 한정하였다.

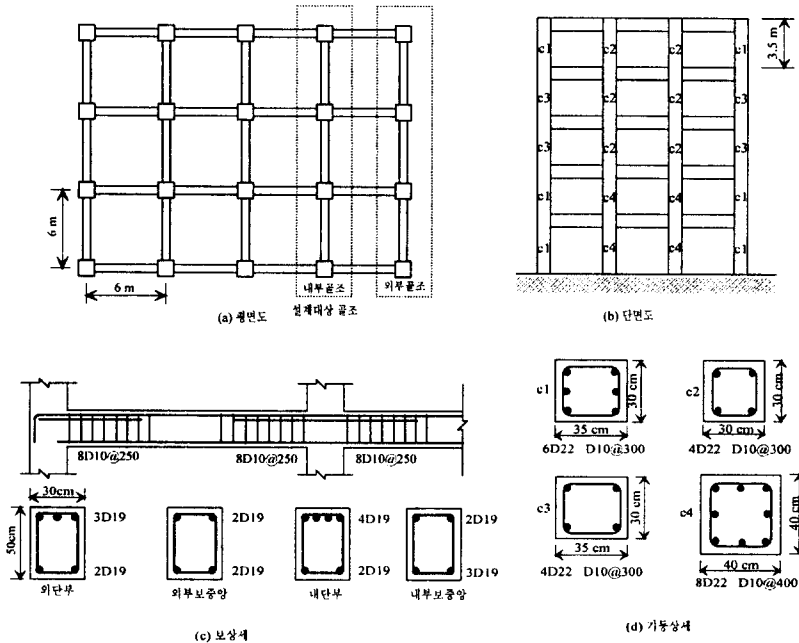


그림 1 골조의 개형

2.2 해석을 위한 기본가정

R/C 골조의 비선형 특성을 해석에 적절히 반영하기 위해 다음과 같은 기본 가정에 비선형 동적해석프로그램 IDARC4.0¹⁾을 사용하여 해석하였다. 슬래브에 의한 보 강성 및 강도의 증가는 고려하지 않았다.

2.2.1 콘크리트

황보강근에 의해 구속된 콘크리트는 구속정도에 따라 극한변형도가 최대 0.012에서 0.05로 증가되나²⁾ 본 연구에 사용된 콘크리트는 기존의 비내진 R/C 골조의 대부분이 황보강근에 의한 구속효과가 극히 작으므로 극한변형도를 0.004로 가정하였다.

2.2.2 부재의 모멘트-곡률 관계 가정

기둥 및 보의 모멘트 곡률 관계는 Park(1984) 등이 제안한 방법을 이용하여 균열모멘트, 항복모멘트(항복곡률), 극한 모멘트(극한곡률)를 구하여 가정하였다.¹⁾

2.2.3 이력모델 : 3변수 Park 모델⁵⁾

비내진 골조의 비연성 특성을 고려하기 위해 3변수를 이용한 Park 모델을 사용하였다. 3변수란 강성감소, 강도저감 그리고 철근의 미끌림 특성을 고려하는 것으로, 특히 바깥쪽 기둥에 접하는 보의 경우, 하부근의 정착길이가 충분하지 못하므로, 이력모델에서 철근의 미끌림에 의한 영향을 고려하였다.

2.2.4 손상도 모델 : Park & Ang 모델⁶⁾

반복하중에 의한 구조물의 손상도를 나타내는 손상도 모델은 부재의 최대변형과 소산된 이력 에너지를 동시에 고려하는 Park & Ang 모델을 사용하였다.

2.3 지진하중의 선택

다양한 지진에 대한 거동을 알아보기 위해 El-Centro, Taft, Nothridge 지진동을 선택하여 중진과 강진을 나타내도록 최대지반가속도를 각각 0.20g, 0.40g 로 조정하여 동적 해석을 수행하였다.

2.4 비선형 동적 해석 결과

2.4.1 층간변위

해석결과 층간변위를 살펴보면, 0.2g의 지진에 대해서는 모든 지진에 대해서 층간 변위가 1.2% 이하로 나타난다. 그러나 0.4g의 지진에 대해서는 Taft지진과 El-Centro 지진에 대해서 1,2,3층의 층간변위가 3%이상이었다. 특히 El-Centro 지진에 의한 2,3층의 층간 변위는 4%이상으로 이 경우 2,3층 기둥의 연성도 요구량이 지나치게 커져서 기둥휨쓸림 메커니즘이 발생하게 된다.

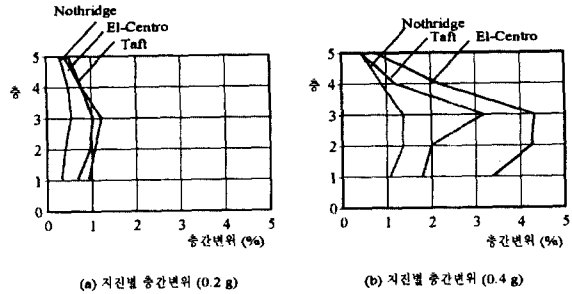


그림 2 층간변위 비교

2.4.2 최종 손상상태

그림 3은 골조의 최종손상상태를 나타내는 것으로, 최대지반가속도 0.2g의 중진의 경우 3개의 지진동에 대해서 대부분의 기둥이 큰 손상을 입지 않고 주로 보에 항복이 발생하는 비교적 바람직한 메커니즘이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그러나 최대지반가속도 0.40g의 강진의 경우 Taft 지진과 El-Centro 지진에 대해서는 3,4층의 기둥에 항복이 발생하는 것을 볼 수 있다. 특히 3층기둥에 항복이 집중해서 발생하는 것은 2층과 3층의 기둥의 강성 및 강도변화가 크기 때문이다. 이 경우, 3층은 기둥휨쓸림 메커니즘이 발생하게 된다.

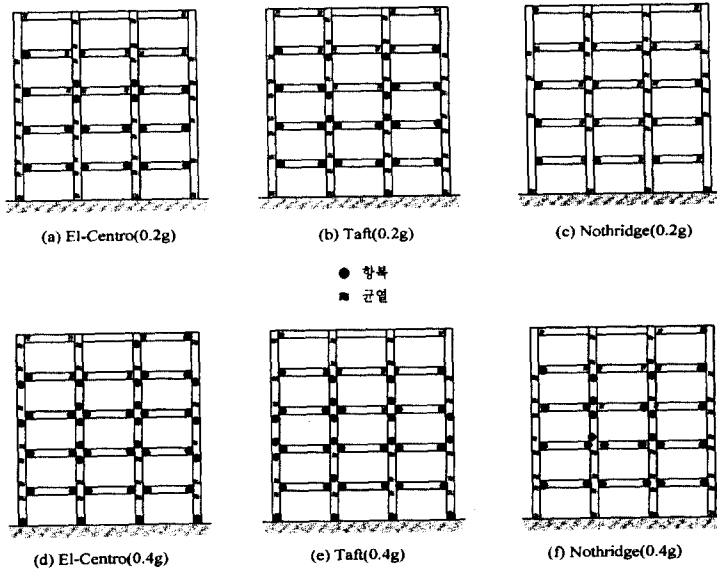


그림 3 최종 손상상태

2.4.3 손상도 평가

Park & Ang모델에 의한 골조의 손상도 계수는 그림 4와 같다. 이는 앞에서 본 골조의 최종손상상태와 거의 유사하게 나타남을 볼 수 있다.

손상도 계수 0.00~0.20는 복구 가능한 가벼운 손상을 의미하고 0.20~0.50는 중간정도의 손상을

의미하며 0.50이상은 복구불가능한 심각한 손상을 의미한다. 중진의 경우 대부분 손상도가 0.20 이하로 나타나 큰 손상이 없음을 알 수 있으나, 강진의 경우 El-Centro 지진과 Taft 지진에 의해 1층, 3층의 기둥에 손상도가 큼을 알 수 있다.

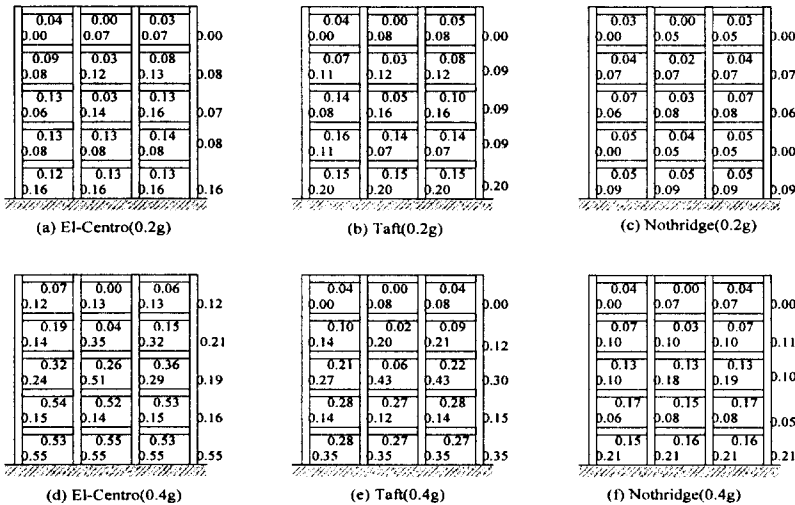


그림 4 손상도 계수

3. 내진역량설계법에 의한 재 설계 및 동적 해석

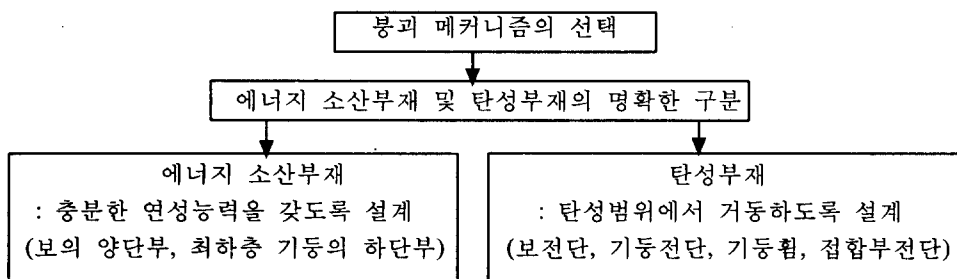
3.1. 내진역량설계법(capacity design method)의 개념

내진역량설계법은 불규칙한 지진동에 대하여 구조물이 설계자의 의도대로 안전하게 거동하도록 하는 설계법으로, 구조물에 발생 가능한 붕괴 메커니즘중 가장 효율적인 에너지 소산능력을 갖는 메커니즘을 선택하여 구조물이 이에 따라 거동하도록 부재의 강도와 연성을 조절한다. 내진역량설계법은 뉴질랜드에서 처음 개발 소개되어 유럽, 캐나다 등의 내진 설계에서 널리 사용되고 있고, 미국에서도 그 개념의 일부가 사용되고 있다.

3.1.1 붕괴 메커니즘

그림 5의 두 가지 붕괴메커니즘을 비교하면, 전체 구조물의 연성도 요구량(global ductility demand)이 같을 때, 1층 기둥의 부분 연성도 요구량(local ductility demand)은 그림 5(a)의 보항복 메커니즘이 그림 5(b)의 기둥 휨솔림 메커니즘에 비해 훨씬 작은 것을 알 수 있다. 이는 그림 5(a)의 보항복 메커니즘의 에너지 소산능력이 훨씬 뛰어난을 의미한다.

3.1.2 내진역량설계법에 의한 설계과정



3.2 내진역량설계법에 의한 재 설계

비내진 골조의 내진성능 향상을 위해 내진역량설계법에 따라 골조를 재 설계하여 내진 성능을 평가하였다. 보 양단(에너지 소산부재)에 소성힌지가 발생하였다고 가정하고, 나머지 부재는 탄성범위내에 존재하도록 설계하였다. 소성힌지에서의 보의 모멘트 강도는 공칭강도에 **overstrength** (철근의 **strain hardening**을 고려할때)계수 1.25를 곱하여 계산하였다.

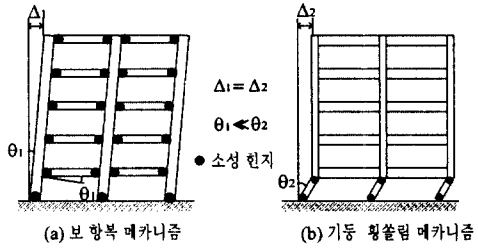


그림 5 골조의 붕괴 메커니즘

3.2.1 보의 휨설계

일반적인 탄성설계방법을 따른다. 보 단부의 압축측은 지진하중에 의해 인장력을 받을 수 있으므로, 최소한의 철근을 배근한다. 내진역량설계법에서는 보의 휨에 대한 항복을 가정하므로, 소성힌지가 예상되는 부분은 충분히 연성을 발휘하여 에너지를 소산시킬 수 있도록 전단근을 배근한다. 구속된 콘크리트의 연성도 향상은 **Paulay, Priestley** 등에 의해 입증된 바 있다.²⁾

보 단부의 철근이 항복하면 보-기둥 접합부의 입력 전단력이 커지고, 접합부내에 정착된 철근의 미끌림 등이 발생할 수 있으므로, 소성힌지가 기둥면과 일정거리 떨어진 위치에서 발생하도록 힌지를 사용하거나, 단부철근을 증가시키는 방법이 있으나, 본 설계에서는 사용하지 않았다.

3.2.2 보의 전단설계

보의 전단파괴가 휨파괴보다 나중에 발생하도록 설계전단력을 보의 소성힌지에서의 **overstrength** 및 연직하중으로부터 구한다.

1층 중앙 보의 전단설계 예를 보면, 보 단부의 설계 전단력은 연직하중에 의한 전단력과 지진에 의한 전단력의 합으로 구한다.

$$V_b = \left(\frac{M_A + M_B}{l_b} \right) \times 1.25 + V_G$$

3.2.3 기둥의 휨설계

바람직한 붕괴메커니즘을 위해 기둥에 소성힌지가 발생하지 않도록 한다. 보-기둥 접합부가 파괴하지 않는다고 가정하면, 접합부에서 만나는 보의 소성힌지에서의 **overstrength** 및 이 때의 전단력이 기둥휨설계의 입력하중이 된다. 특히 외부기둥의 경우, 지진의 방향에 따라 축력의 변화가 크므로, 기둥에 접하는 보에 소성힌지가 발생했을 때의 보 전단력의 합을 기둥축력으로 계산한다.

2층 외부기둥의 휨설계과정을 보면 다음과 같다.

그림 7(a)의 접합부에서의 평형관계식에서 보의 항복모멘트에 대한 접합부 상하부의 모멘트를 각각 M_{cE1} , M_{cE2} 라고 놓으면, $M_{cE1} + M_{cE2} = \Sigma M_b \times 1.25$ 이다. 상, 하부 기둥의 모멘트분배를 가장 불리한 경우로 2:8로 가정하면, $M_{cE2} = 0.8 \times \Sigma M_b \times 1.25$ 이고, 설계모멘트 $M_{c2} = M_{cE2} + M_G$ 로 계산할 수 있다.

외부기둥의 경우, 지진의 방향에 따라 축력의 크기가 변하므로 그림 7(b)와 같이 기둥 상부의 보와 접하는 지점에서 소성힌지를 가정하여 축력을 구하면,

$$P_E = 4 \times V_E = 4 \times \left(\frac{M_A + M_B}{l_b} \right) \times 1.25, \quad P_c = P_E + P_G \text{로 계산}$$

할 수 있다.

3.2.4 기둥의 전단설계

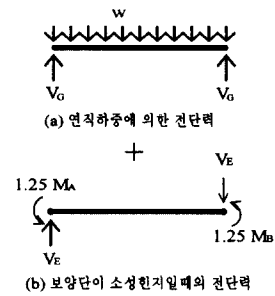


그림 6 보의 전단설계

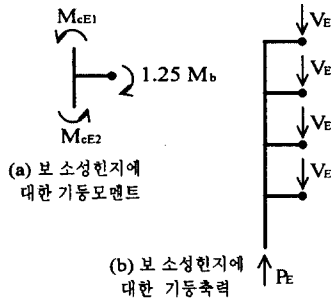


그림 7 기둥의 휨설계

기둥의 전단파괴는 지진 에너지 소산능력을 갖지 못하므로, 발생하지 않도록 해야 한다.

위에서 구한 기둥의 설계휨모멘트는 보의 항복을 가정한 값이므로, 기둥 양단의 모멘트를 각각

M_c 와 $0.5M_c$ 로 가정하여, 기둥의 설계전단력을 $V_c = \frac{M_c + 0.5M_c}{l_c}$ 로 계산한다. 여기서 M_c 는

앞에서 계산한 보 항복시의 기둥모멘트이다.

3.2.5 보-기둥 접합부의 전단설계

보-기둥 접합부의 전단파괴는 지진 에너지 소산능력을 갖지 못하므로 접합부가 충분한 전단강도를 갖도록 설계해야 한다.

2층 외부접합부의 예를 보면, 보단부에 소성힌지가 발행했다고 가정하고 평형관계식에 의해 접합부의 수평방향 전단력을 계산하면 다음과 같다. ⁵⁾

$$V_{jh} = \left(\frac{M_b}{z_b} - \frac{M_b}{l_c \left(1 - \frac{h_c}{l_b}\right)} \right) \times 1.25$$

3.3 재 설계된 골조의 개형

그림 8은 재 설계된 골조의 개형으로 보의 휨강도는 비내진 골조와 같고, 보 및 기둥의 전단강도와 기둥의 휨강도가 증가하여 비내진 골조에 비해 강기둥-약보의 골조가 되었다.

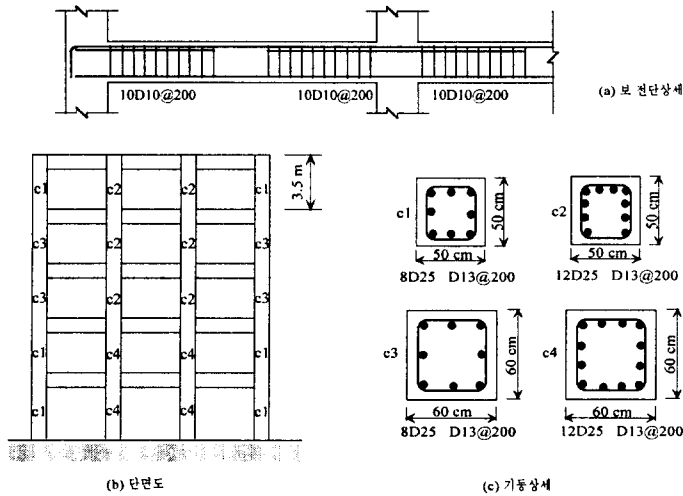


그림 8 내진역량설계법에 의한 재 설계

3.4 재 설계된 골조의 비선형 동적해석

내진역량설계법에 의해 비내진 골조를 재 설계한 후 2절에서와 같은 방법으로 동적 해석을 수행하였다.

3.4.1 층간변위

내진역량설계법으로 설계한 골조의 층간변위를 보면 0.2g의 중진에 대해 층간변위가 0.8% 이하이고, 0.4g의 강진에 대해서도 층간변위가 대부분 2%를 넘지 않는다.(El-Centro, Taft 에 의해 1%가 넘는 것은 모든 보가 항복하면서 강성이 감소하기 때문이다.) 이는 앞의 그림 3과 비교할때 최고층을 제외하고는 기둥 휨쏠림 메커니즘이 발생하기 어렵다는 것을 의미한다.

3.4.2 최종 손상상태

그림 10의 최종 손상상태를 보면 설계의도대로 1층기둥의 하단부와 보 단부에서 소성힌지가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 보항복 메커니즘의 발생으로 대부분의 지진에너지가 보의 소성힌지에서 소산되는 것을 의미한다. (재설계된 골조의 최종변형상태 및 손상도 계수는 본 논문에서는 0.4g에 대해서만 나타내었다.)

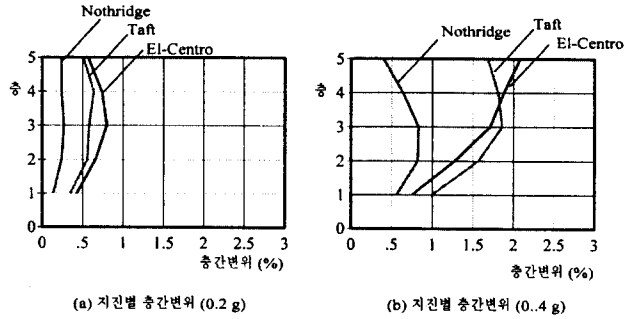


그림 9 재 설계된 골조의 층간변위비교

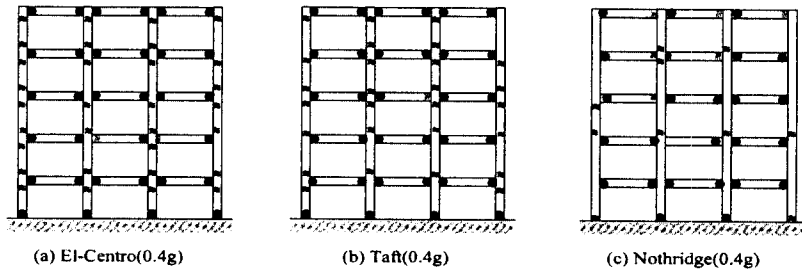


그림 10 재 설계된 골조의 최종 손상상태(0.4g)

3.4.3 손상도 평가

그림 11에서 보듯이 기둥부재의 손상도 계수는 거의 0.20 이하로 나타나고, 보의 손상도 계수는 전체적으로 균등하게 분포하여, 전 층의 보에서 지진에너지를 효과적으로 흡수하는 것을 알 수 있다.

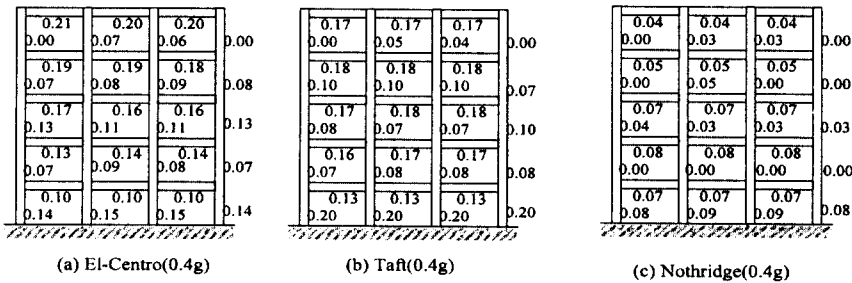


그림 11 재설계된 구조물의 손상도계수(0.4g)

3.5 내진역량설계법을 이용한 내진성능향상기법

내진역량설계법에 의해 계산된 각 부재의 내진성능향상을 위한 강도 요구량을 정리하면 표 1과 같다. 복잡한 해석과정을 거치지 않고 내진역량설계법에 의해 계산된 강도요구량을 이용하면 본 연구에서와 같은 새로운 골조의 설계 뿐 아니라, 적절한 보강방법을 통해 기존의 비내진 골조의 내진성능 향상기법으로 쉽게 사용할 수 있다.

표 1 내진역량설계법에 의한 내진항상 부재강도 요구량

내진성능 향상부재	내진항상 부재강도 요구량
보 전단	$V_b = \left(\frac{M_A + M_B}{l_b} \right) \times 1.25$
기둥 휨	$M_{cE} = 0.8 \times M_b \times 1.25$ $P_E = n \times \left(\frac{M_A + M_B}{l_b} \right) \times 1.25$ (외부기둥의 축력)
기둥 전단	$V_c = \frac{1.5M_c}{l_c}$
보-기둥 접합부 전단	$V_{jh} = \left(\frac{M_b}{z_b} - \frac{M_b}{l_c \left(1 - \frac{h_c}{l_b} \right)} \right) \times 1.25$ (외부접합부)

4. 결론

1. 연직하중에 대해 설계한 비내진설계 R/C 골조를 비선형 동적 해석한 결과 중진(최대지반가속도 0.2g)에 대해서는 보항복 메커니즘이 발생하며 비교적 만족스런 거동을 보이나, 강진(최대지반가속도 0.4g)에 대해서는 일부 층에서 지진에너지를 효과적으로 소산시키지 못하고 기둥에 손상도가 커지며 기둥횡췌림 메커니즘이 발생하는 것을 볼 수 있다.

2. 내진역량설계법(capacity design method)을 이용하여 설계한 골조는 중진에 대해서는 비교적 안정한 거동을 보이고, 강진에 대해서는 대부분의 보와 1층 기둥 하단부에 소성한지가 발생하며 에너지를 소산하는 보항복 메커니즘이 발생하였다. 즉, 예기치 못한 강진이 발생했을 때 구조물의 붕괴를 일으킬 수 있는 치명적인 기둥 횡췌림 메커니즘을 막을 수 있어 새로운 건물의 내진설계뿐 아니라 기존의 비내진 R/C 골조의 효과적인 내진성능 향상기법의 기본개념으로 사용할 수 있다.

참고문헌

1. R.E. Valles, A.M. Reinhorn, S.K. Kunnath, C. Li and A. Mandan(1996), "IDARC Version 4.0", Technical Report NCEER-96-0010, State University of New York at Buffalo.
2. T. Paulay, M.J.N. Priestley(1992), "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", Wiley Interscience.
3. T. Paulay(1990), "Equilibrium Criteria for Reinforced Concrete Beam-Column Joints", ACI Structural Journal, V.86, No.6.
4. R. Park, T. Paulay(1974), "Reinforced Concrete Structures", Wiley Interscience
5. S.K. Kunnath, G. Hoffmann, A.M. Reinhorn, B. Mander(1995), "Gravity-Load-Designed Reinforced Concrete Buildings - Part I : Seismic Evaluation of Existing Construction", ACI Structural Journal, V.92, No.3.
6. Y.G. Park, A. H-S. Ang, Y.K. Wen(1985), " Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings", J. of Structural Engineering, V.111, No.4.
7. 대한건축학회(1994), "철근콘크리트 구조계산규준 및 해설"