

# 철근 콘크리트 특수 모멘트 골조 건물의 비탄성 동적 성능값 Nonlinear Dynamic Capacity of Reinforced Concrete Special Moment Frame Buildings

김태완\*  
Kim, Tae Wan

김태진\*\*  
Kim, Taejin

---

## ABSTRACT

For evaluation of building performance, a nonlinear dynamic capacity of the building is a key parameter. In this study, an reinforced concrete special moment resisting frame building was chosen to study the process of determining the nonlinear dynamic capacity. The building, which was designed by IBC 2003 representing new codes, was composed of special moment resisting frames in the perimeter and internal frames inside the building. The capacity, which is inter-story drift capacity, consists of two categories, local and global collapses. Global collapse capacity was determined by incremental dynamic analysis. Local collapse capacity was determined by the same method except for utilizing damage index. In addition to this, it was also investigated that the effect of including internal frames designed by gravity load in the analysis. Results showed that the damage index is a useful tool for determining local collapse. Furthermore, including the internal frames with special frames in the analysis is very important in determining the capacity of a building so both must be considered at the same time.

---

## 1. 서론

1994년에 발생한 Northridge 지진은 건축물에 많은 피해를 주었다. 이로 인해 수많은 연구자와 기술자들이 기존의 지진 설계 기준에 대한 전면적인 검토와 그 지진의 새로운 영향에 대해 연구를 수행해 왔다. 그 결과 지진 설계에 대한 새로운 개념과 기준들이 제시되었으며, 예로는 FEMA 302<sup>(1)</sup>과 FEMA 273<sup>(2)</sup>가 있다. FEMA 302는 UBC 94<sup>(3)</sup>과 비교해서 많은 차이를 가지며, 그 중 하나가 기본 설계 지진 강도이다. FEMA 302의 지진 강도는 50년 이내 2% 초과 확률(2/50)을, UBC 94는 10% 초과 확률(10/50)을 가지는 지진 위험도(seismic hazard level)로 작

---

\* 정희원 성균관대학교 건축공학과, 박사후 연구원

\*\* 정희원 성균관대학교 건축공학과, 전임강사

성되었다. 또한 UBC 94는 허용응력설계법을, FEMA 302는 강도설계법을 바탕으로 하였다. FEMA 302의 지진 설계 기준 대부분은 IBC 2003<sup>(4)</sup>에 반영되었다. FEMA 273은 지진에 의해 손상된 건물의 보수 보강 방법을 제시하고 있다. 특히 성능 기반 지진 설계를 위하여 성능 수준(performance level)을 제시하고 있으며, 그 종류는 Operational, Immediate Occupancy(IO), Life Safety(LS), Collapse Prevention(CP) 이다. 더불어 성능 목표(performance objective)를 제시하고 있는데, 이는 지진 위험도와 성능 수준의 조합으로 구성된다. FEMA 273는 10/50에 대해 IO, 2/50에 대해 CP를 제시하고 있다. FEMA 302의 설계 성능 목표(design performance objective)는 2/50에 대한 CP이다. IBC 2003도 역시 같은 설계 성능 목표를 가지고 있다.

현재 대부분의 규준에서 주로 사용되는 지진 설계 방법은 탄성 정적 해석이다. 하지만 건물은 지진 발생 시 비탄성 동적 거동을 하므로, 규준에 따라 설계된 건물의 적정성은 비탄성 동적 해석을 통해 지진의 실제적인 영향을 조사함으로써 판단할 수 있다. IBC 2003도 탄성 정적 해석 방법을 따르고 있으므로, 이 규준에 의해 새로이 설계된 건물의 실제 거동 특성을 파악하기 위해서 역시 비탄성 동적 해석이 필요하다. 이런 이유로 김태완<sup>(5)</sup>에서는 철근 콘크리트 특수 모멘트 골조를 주 횡저항 시스템으로 가지는 건물을 선택하여 IBC 2003에 따라 설계한 후 비탄성 동적 해석을 통해 층간변위를 요구값(demand)을 조사하였다. 그 결과 설계된 건물은 규준의 의도에 부합하였으며, 해석 시 주 횡저항 시스템인 특수 모멘트 골조뿐만 아니라 중력 저항 시스템인 내부 모멘트 골조도 함께 고려해야 한다는 사실을 확인하였다. 이에 더하여 IBC 2003에 따라 설계된 건물이 규준의 설계 성능 목표를 달성하는지 여부를 조사하기 위해서는 2/50 지진 위험도에 대한 CP 수준에서의 층간변위를 성능값을 확인할 필요가 있다. 계산된 성능값을 김태완<sup>(5)</sup>에서 구한 요구값과 비교함으로써 그 결과를 예측할 수 있다.

본 연구에서는 CP에 해당되는 층간변위를 성능값을 구하기 위해 먼저 붕괴(collapse)를 부분(local) 붕괴와 전체(global) 붕괴로 나누었다. 부분 붕괴는 하중 저항 시스템의 일부가 저항능력을 상실하지만 전체 시스템은 붕괴되지 않는 것이며, 전체 붕괴는 주 하중 저항 시스템이 저항능력을 상실하여 전체 시스템의 붕괴로 이어지는 것이다. 부분 붕괴 여부는 Park과 Ang<sup>(6)</sup>에 의해 개발된 손상 계수(Damage Index)로 판단하였다. 어떤 부재의 손상계수가 1.0을 초과하면 그 부재는 파괴된 것으로 간주되며, 이 때 측정된 층간변위를 부분 붕괴 시의 성능값이다. 전체 붕괴 시의 층간변위를 성능값은 Vamvatsikos와 Cornell<sup>(7)</sup>에 의해 개발된 Incremental Dynamic Analysis (IDA)를 사용하였다.

## 2. 일반 사항

### 2.1. 예제 건물 및 해석 모델

해석 예제로는 Los Angeles 중심가에 위치한 것으로 가정한 3층 건물을 선택하였으며, 그림 1은 그 건물의 평면과 입면을 보여주고 있다. 건물의 둘레는 횡저항 시스템인 특수 모멘트 골조이며, 건물 내부는 수직력에만 저항하는 모멘트 골조이다. 본 연구에서는 길이방향의 골조만을 고려하였으며, 지진력은 IBC 2003을, 철근 콘크리트 부재의 상세는 ACI 318-02<sup>(8)</sup>를 바탕으로 설계하였다. 특수 모멘트 골조의 부재 설계는 ACI 318-02의 'Chapter 21 - Special Provisions for Seismic Design'에 근거하여 수행되었다. 수직력에만 저항하는 내부 모멘트 골조 또한 지진력을

받으므로 그 규정을 따랐다. 따라서 특수 및 내부 모멘트 골조 모두 충분한 연성을 확보하도록 설계되었다.

철근 콘크리트 부재 모델은 그 전체 부재 길이를 나타내는 탄성 요소와 각 양단의 회전 자유도를 나타내는 비탄성 연결 요소로 구성되었다. 보, 기둥 접합부를 무시하고 각 부재의 길이는 접합부 중심사이의 거리를 사용하였다. 즉, 에너지 소산은 양단에서만 발생하는 것으로 가정하였다. 탄성 요소는 DRAIN-2DX (Prakash et al,<sup>(9)</sup>)의 'No. 2 - Plastic Hinge Beam-Column Element'가 사용되었고, 비탄성 요소는 Foutch et al<sup>(10)</sup>에 의해 개발된 'No. 10 - Connection Element'가 사용되었다. 지진 하중은 Nothridge 지진 이후 미국에서 수행된 SAC 프로젝트에서 사용된 지반 운동들이다. (Somerville et al,<sup>(11)</sup>). 그들 중 2/50 지진 강도를 가지는 10개의 지반 운동을 사용하였다. 지진 규정, 부재 상세, 그리고 철근 콘크리트 부재 모델의 자세한 내용은 김태완<sup>(5)</sup>에 제시되어 있다.

## 2.2. Incremental Dynamic Analysis (IDA)

IDA는 전체 붕괴 시 건물의 층간변위률 성능값을 구하는데 사용되었다. IDA를 수행하기 전 필요한 지진 위험도를 가지는 지반 운동을 정한다. 먼저 탄성 해석을 통해 IDA를 위한 기준선을 구한다. 그 다음 비선형 동적을 수행하여 최대 층간변위률을 구한다. 이를 지반 운동을 점차 증가시키면서 반복한 후 그 결과를 최대 층간변위률에 대한 스펙트럴 가속도 (spectral acceleration,  $S_a$ )로 그래프에 표시한다. 이들을 연결한 선의 기울기가 탄성 해석에 의한 기울기의 20% 이하로 감소할 때, 이 때의 최대 층간변위률이 건물의 층간변위률 성능값이다. FEMA 355F<sup>(12)</sup>에서는 층간변위률 성능값을 10%로 제한하였다. 그 이유는 층간변위률이 10% 이상이면 해석 모델의 신뢰성이 매우 낮기 때문이다. 9층 철골 모멘트 골조 건물에 대한 IDA 예가 그림 2에 나타나 있다. 원으로 표시된 IDA 선은 층간변위률이 7.5% 근처에서 기울기가 탄성 해석에 의한 기울기의 20% 이하로 감소하였다. 이 경우 7.5%가 층간변위률 성능값이 되는 것이다. 삼각형으로 표시된 IDA 선은 층간변위률이 10%를 초과할 때 까지도 기울기가 탄성 해석에 의한 기울기의 20% 이하로 떨어지지 않으므로 한계값 10%가 층간변위률 성능값이다.

## 2.3. 손상계수

철근 콘크리트 부재에 대한 손상계수는 다양한 종류가 있으며 Ghobarah et al<sup>(13)</sup>에 잘 정리되어 있다. 손상계수들은 크게 세 종류로 나뉘는데, 최대 변형이나 누적된 에너지만을 고려한 것들과 두 가지 모두 고려한 것들이다. Park과 Ang의 손상계수는 두 가지 모두를 고려한 것으로서 많은 연구자들에 의해 변형, 개선되어 졌다. 본 연구에서 Park과 Ang의 초기 손상계수를 사용하였는데 그 이유는 두 가지가 있다. 하나는 여기서 사용한 철근 콘크리트 부재의 요소 모델이 손상계수를 정확히 표현할 수 있기 때문이다 (Izuno et al<sup>(14)</sup>). 다른 하나는 동적 push-over 해석 시 지진 하중의 증감은 건물의 고유주기에서의  $S_a$ 를 근거로 하였는데, Elenas와 Meskouris<sup>(15)</sup>에 의하면 이  $S_a$ 는 Park과 Ang의 손상계수와 다른 지진 변수들 (예를 들면, 최대 가속도, 최대 속도 등) 중에서 상관관계가 가장 좋았다. 어떤 부재의 손상계수가 1.0을 초과하면 그 부재는 파괴된 것으로 간주된다. 본 연구에서는 부분 붕괴 시 건물의 층간변위률 성능값을 구하는데 이 손상계수를 사용하였다. 여기서는 IDA에서와 마찬가지로 지반 운동을 단계별로 증가시키면서 최대 층간변

위률이 아니라 각 부재의 손상계수를 측정한다. 측정된 손상계수가 1.0을 초과할 때, 계산된 층간 변위률이 부분 붕괴시 건물의 층간변위를 성능값이다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1. 부분 붕괴 시 성능값

건물의 부분 붕괴가 발생할 때를 측정하기 위해서 김태완<sup>(5)</sup>의 결과를 바탕으로 특수, 내부 모멘트 골조 각각의 1층 기둥 하부에 위치한 4개의 지점을 선택하였다. 보에 대한 지점은 제외하였는데, 그 이유는 기둥에 발생하는 손상이 일부 보의 단부에서 발생하는 손상에 비해 건물에 미치는 위험도가 훨씬 높기 때문이다. 층간변위를 성능값은 특수 모멘트 골조 단독 해석과 내부 모멘트 골조 포함 해석의 경우로 나누어서 구하였다. 후자의 경우, 특수 골조와 내부 골조로 나누어 각각의 골조에서 어떤 부재가 손상계수 1.0을 초과할 때의 층간변위를 구하였다. 이를 통해 내부 골조 포함 유, 무에 의한 차이와 더불어 특수 및 내부 골조의 손상 진행과정의 차이를 비교하였다. 한 가지 언급해야 할 사항은 특정 위치의 손상계수를 이용한 건물의 부분 붕괴 시점은 건물의 전체 붕괴 시점과는 다르다는 것이다. 전체 붕괴는 여러 지점의 손상이 결합하여 나타나는 것이므로, 부분 붕괴시의 최대 층간변위는 전체 붕괴 시 보다 작다.

표 1이 손상계수를 이용한 부분 붕괴 시 성능값을 보여준다. 특수 모멘트 골조 단독 해석의 경우 평균 층간변위를 성능값은 8.13%이고 내부 골조 포함 해석의 경우 특수 모멘트 골조를 기준으로 9.23%이다. 특수 골조만을 대상으로 보면 내부 골조가 더 해졌을 때 성능값이 더 증가하였다. 이는 내부 골조가 일정량의 에너지를 소산하므로 당연한 결과라 하겠다. 내부 골조의 경우는 성능값이 5.73%로 특수 골조 비해 아주 작은 값이다. 표에서 COV 값들은 그 크기가 크지 않으며, 특히 특수 골조만을 고려하면 0.07, 0.14이다. 이것은 여러 지진에 대해 성능값들의 분포가 적다는 것을 의미하는 것으로서, 손상계수를 이용한 층간변위를 성능값 측정이 부분 붕괴를 예측할 수 있는 유용한 방법임을 보여준다.

#### 3.2. 전체 붕괴 시 성능값

건물의 전체 붕괴 시 층간변위를 성능값은 앞서 기술한 대로 IDA를 사용하였다. 전체 붕괴는 부분 붕괴와는 다르게 과도한 횡변위로 인한 P-delta 효과의 증대로 전체 건물이 붕괴하는 것을 의미한다. 따라서 부분 붕괴의 경우와 달리 특수 골조 단독일 때와 내부 골조 포함한 해석으로만 나누어 결과를 비교하였다. 내부 골조 포함 해석의 경우 앞의 손상계수를 이용한 부분 붕괴에서 이미 9%를 초과하는 성능값을 보여주었다. 따라서 전체 붕괴 시에는 9%를 초과하는 값을 예상할 수 있다. 하지만 성능값 한계치가 10%이므로 그 이상의 값은 의미가 없다. 예상한 바와 같이 내부 골조가 포함되었을 때 두 개의 지진을 제외하고 모두 10%를 초과하였다(표 2). 특수 골조 단독일 경우는 표 2에서 볼 수 있듯이 일부 지진에서 성능값이 10%이고 대부분 10%이하의 값을 나타내고 있다. 평균값은 부분 붕괴일 때 보다 약간 높았다.

### 4. 고찰

부분 붕괴에 대한 결과를 고찰하기 위해 LA21 지진에 대한 결과를 그림 3에 나타내었다. 내부

골조 포함 해석에서 낮은 변형률, 즉 요구값 수준인 약 3% 정도 까지는 특수와 내부 골조의 손상 계수가 비슷한 수준으로 나타났다. 3% 이상에서는 변형률이 증가함에 따라 손상계수의 값이 내부 골조에서 급격히 증가하고 있다. 그 결과로 내부 골조는 변형률 4.9%에서 먼저 손상계수 1.0에 도달하고, 특수 골조는 8.3%에서 1.0에 도달하였다. 이는 지진 하중이 증가할 때 특수 골조 보다 내부 골조가 빨리 파괴가 진행된다는 것을 보여준다. 이 현상은 손상계수 식의 형태로 유추할 수 있다. 손상계수는 변형 정도와 소산 에너지의 조합으로 구성되어 있는데, 소산 에너지의 영향은 낮은 지진 하중에서는 상대적으로 작고 높은 지진 하중에서는 상대적으로 크다. 내부 골조는 특수 골조와 같이 지진에 대해 설계가 되었으므로 변형 능력은 크지만, 주 철근은 중력에만 설계되었으므로 에너지 소산 능력은 특수 골조에 비해 떨어진다. 이러한 이유로 해서 높은 지진 하중 하에서 내부 골조의 손상계수가 특수 골조에 비해 매우 증가한다.

전체 붕괴의 성능값은 IDA를 이용하였으므로 그림 4에 5개의 지진에 대한 IDA 선을 나타내었다. 해석 결과에서 제시되었듯이 내부 골조가 포함되었을 때 IDA 선은 변위률이 10%에 다다를 때까지 대부분 기울기의 감소가 발생하지 않았다. 특수 골조 단독일 경우 10%에 가까이 갈수록 기울기가 감소함을 알 수 있다. 이는 특수 골조 단독 해석일 경우 내부 골조에 가해지는 수직력에 의한 P-delta 영향을 특수 골조가 모두 받도록 하여 변위률이 증가할수록 그 영향이 점점 더 커지기 때문이다. 내부 골조의 추가는 전체 붕괴에 대해 강성의 증가뿐 아니라 P-delta 영향을 부담함으로써 성능값을 증가시킨다.

횡력 저항에 대한 주 시스템은 특수 모멘트 골조이다. 그로 인해 성능 평가 시 주 시스템에 초점을 맞추어 해석한다. 하지만 위에 서술된 것과 같이 주 시스템이 붕괴되기 전에 횡력이 아닌 수직력에 저항하는 시스템이 먼저 붕괴되는 상황이 발생할 수도 있다. 이 때 주 시스템이 지진력에 저항하고 있음에도 불구하고 지진력이 아닌 수직력에 의해 붕괴가 일어난다. 이 현상은 수직력 저항 시스템이 대부분의 수직력을 부담하고 있기 때문에 위험한 결과를 초래할 수 있다. 따라서 수직력 저항 시스템의 설계 상세 및 해석 방법 또한 주 시스템과 같이 지진력에 대한 성능 평가에 있어서 매우 중요한 사항이다.

## 5. 결론

3층 철근 콘크리트 모멘트 골조 건물을 비탄성 동적 해석을 통해 증간변위를 성능값을 조사하였다. 건물의 성능값을 부분 붕괴와 전체 붕괴 시로 구분하여 분석, 고찰하였으며, 해석 시 내부 모멘트 골조의 추가 유, 무에 따른 영향도 함께 살펴보았다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻게 되었다.

1. 특수 모멘트 골조의 부분 붕괴 시 성능값은 내부 모멘트 골조 추가로 인해 증가된 결과를 보여주었다. 내부 모멘트 골조의 경우 그 값은 상대적으로 작으므로 특수 모멘트 골조 보다 빠른 파괴가 발생하게 된다.
2. 부분 붕괴 시의 증간변위를 성능값들은 분포 정도가 낮았으므로 손상계수를 이용하는 것이 매우 유용한 방법임을 확인하였다.
3. 전체 붕괴 시의 증간변위를 성능값은 P-delta 영향의 크기에 의해 좌우되므로, 그 값은 특수 모멘트 골조 단독일 때 보다 내부 모멘트 골조를 포함한 해석일 때 더욱 크다.

4. 부분 및 전체 붕괴에 성능값 결과는 지진에 대한 성능 평가 시 내부 모멘트 골조를 특수 모멘트 골조와 함께 고려해야 함을 보여준다.

## 6. 참고문헌

1. FEMA 302, "1997 Edition: NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1 - Provisions", Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
2. FEMA 273, "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
3. UBC, Uniform Building Code, International Conference Building Officials, Whittier, California, 1994.
4. IBC, International Building Code, International Code Council, Inc., Falls Church, Virginia, 2003.
5. 김태완, "철근 콘크리트 특수 모멘트 골조 건물의 비탄성 동적 요구값", 한국지진공학회, 제9권, 제5호, 2005, pp.11-19.
6. Park, Y. J. and Ang, Alfred H.-S., "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete", Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 4, 1985, pp. 722-739.
7. Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A., "Incremental Dynamic Analysis", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, 2001, pp. 491-514.
8. ACI 318 Committee, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2002.
9. Prakash, V., Powell, G. and Campbell, S., "DRAIN-2DX base program description and user guide - version 1.10", Report no. UCB/SEMM-93/17 and 93/18, Structural Eng. Mechanics and Materials, Dept. of Civil Eng., Univ. of California, Berkeley, California, 1993.
10. Foutch, D.A., Shi, S., and Yun, S.-Y., "Element 10: A stiffness and strength degrading element developed for the SAC steel program", distributed with DRAIN-2DX by the National Information Service for Earthquake Engineering, available from <http://nisee.berkeley.edu/software/drain2dx/>, 2003.
11. Somerville, P., N. Smith, S. Puntamurthula, and J. Sun, "Development of Ground Motion Time Histories for Phase 2 of the FEMA/SAC Steel Project", Background Document, Report No. SAC/BD-97/04, 1997.
12. FEMA 355F, "State of the Art Report on Performance Prediction and Evaluation of Steel Moment-Frame Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.
13. Ghobarah, A., Abou-Elfath, H., and Biddah, A., "Response-Based Damage Assessment

of Structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, 1999, pp. 79-104.

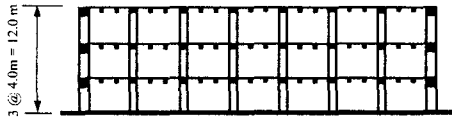
14. Izuno, K., Iemura, H., Yamada, Y., and Fujisawa, S., "Seismic Damage Assessment of RC Structures using Different Hysteretic Models", Memoirs of the Faculty of Engineering, Vol. 55, No. 1, 1993, pp. 1-19.
15. Elenas, A., and Meskouris, K., "Correlation Study between Seismic Acceleration Parameters and Damage Indices of Structures", Engineering Structures, Vol. 23, 2001, pp. 698-704.

표 1 손상계수를 이용한 부분 붕괴 시 층간변위를 성능값

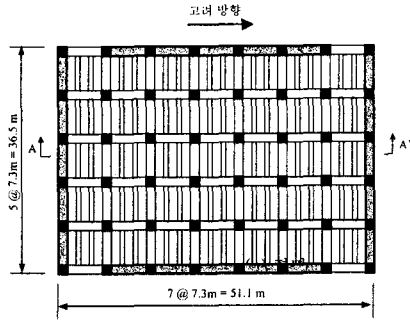
해석 종류	특수 모멘트 골조 단독		내부 모멘트 골조 포함			
			특수 모멘트 골조		내부 모멘트 골조	
변수	변위률(%)	Sa(g)	변위률(%)	Sa(g)	변위률(%)	Sa(g)
LA21	7.03	3.0	8.28	4.1	4.92	2.5
LA22	8.82	3.0	9.69	4.1	5.67	2.6
LA23	10.0	4.8	10.0	4.8	10.0	4.8
LA24	7.89	2.5	8.67	3.8	4.47	3.0
LA25	7.59	3.7	10.0	4.8	6.92	3.6
LA26	6.95	3.5	8.35	4.2	5.27	2.6
LA27	8.14	2.6	9.34	3.8	6.86	3.3
LA28	7.56	2.4	9.11	3.2	6.22	2.6
LA29	10.0	4.8	10.0	4.8	2.13	4.0
LA30	7.35	2.6	8.82	3.7	5.35	2.8
최대값	10.0	4.8	10.0	4.8	10.0	4.8
평균값	8.13	3.3	9.23	4.1	5.78	3.2
C.O.V.	0.14	0.3	0.07	0.1	0.35	0.2

표 2 IDA를 이용한 전체 붕괴 시 층간변위를 성능값

해석 종류	특수 모멘트 골조 단독		내부 모멘트 골조 포함	
	변위률(%)	Sa(g)	변위률(%)	Sa(g)
LA21	10.0	4.8	10.0	4.8
LA22	9.77	3.2	10.0	4.8
LA23	10.0	4.8	10.0	4.8
LA24	5.30	2.3	6.04	3.4
LA25	8.49	3.9	10.0	4.8
LA26	9.60	4.1	10.0	4.8
LA27	8.26	4.3	10.0	4.8
LA28	8.16	2.6	7.41	2.9
LA29	10.0	4.8	10.0	4.8
LA30	8.02	2.8	10.0	4.8
최대값	10.0	4.8	10.0	4.8
평균값	8.76	3.8	9.35	4.5
C.O.V.	0.17	0.3	0.15	0.2



(a) 평면



(b) 단면(A-A')

그림 1 예제건물

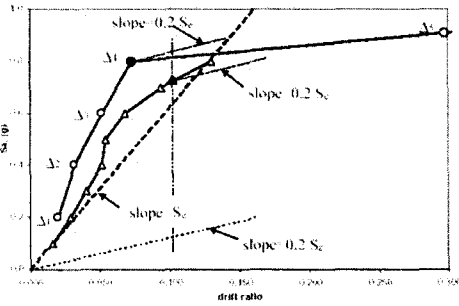


그림 2 IDA 예

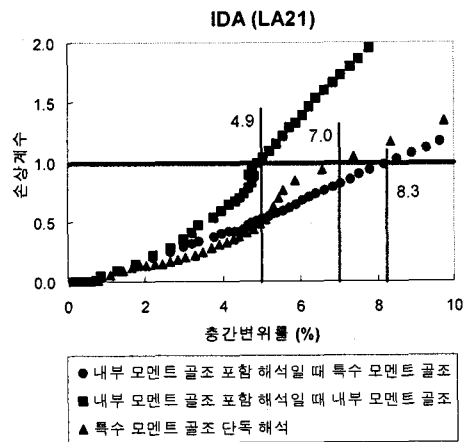
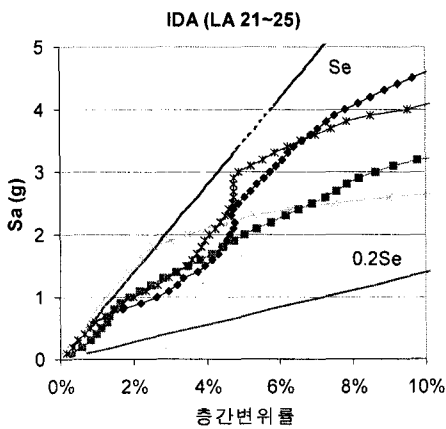
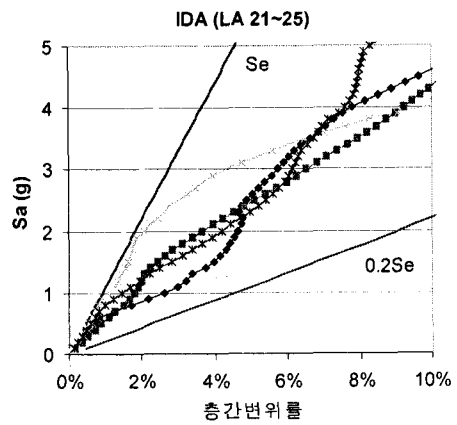


그림 3 층간변위률에 따른 손상계수



(a) 특수 모멘트 골조 단독



(b) 내부 모멘트 골조 포함

그림 4 IDA 결과 (LA21~LA25)