

비선형 동적해석을 이용한 건축물 내진성능설계

Performance Based Seismic Design of Building Structures Using the Nonlinear Dynamic Analysis Methods



안 태 상*



신 동 현**

* DRB 동일 건설기술연구소 소장
 ** 서울시립대학교 건축공학과 석사과정

1. 서 론

최근 들어 전 세계적으로 증가한 지진재해 사례(장해남 등, 2007)에서와 같이 지진으로 인한 인명 및 사회, 경제적 손실 규모는 사회적 기반시설의 손상 및 붕괴와 같은 직접적인 피해뿐만 아니라 이재민 발생 등의 2차 피해의 발생과 함께 점차 증가하는 추세이다. 지진은 순간적이며 사전에 예측하기가 매우 힘든 자연현상이기 때문에 경계의 필요성이 대두된다. 유라시아판의 동단에 위치한 한반도는 지리적 조건으로 판내부에 위치하기 때문에 지진활동이 비교적 적으며 그로 인한 피해역시 미약한 상황이라 볼 수 있으나, 2008년 중국 쓰촨성 지진(규모 7.8)과 같이 대륙의 내부에서도 대규모 지진이 발생할 가능성이 존재하기 때문에 국내의 지진위험도에 대한 경각심은 고조되고 있다. 또한 판 내부에 위치한 지역의 지진활동은 예측하기가 매우 어려우며 지진의 재현주기가 상당히 길기 때문에 상당한 기간동안에 주목할 만한 지진활동이 없던 지역에서도 중국의 당산이나 미국의 New Madrid의 경우와 같이 상당한 피해를 초래할 수 있는 지진이 발생할 가능성을 배제할 수 없다.

국내에서도 기상청에 따르면 2010년 한반도의 지진 발생

횟수는 42회로 이 중 경기 시흥, 울산(해역), 제주(해역, 2회), 충남 태안(해역) 등에서는 지진 규모가 3.0을 넘었다(기상청, 2010). 지진횟수의 증가와 함께 보다 큰 규모의 지진에 대한 대비책으로 적절한 내진대책을 수립할 필요성이 있다. 국내에서는 1988년 처음으로 20층 이상의 고층아파트에 대해서 미국의 UBC(Uniform Building Code)에 근거하여 내진설계를 시행하기 시작하였으며, 건축구조물에 대해서 적용할 내진설계기준을 제정하여 1988년 8월부터 시행하고 있다.

국내 내진기준에 의한 내진해석법으로 정형구조물에는 등가정적해석법(Equivalent static analysis method)을 비정형 구조물과 초고층건물에 대해서는 모드해석법을 이용하고 있으며, 이는 탄성해석에 근거하고 있다(김형근 등, 2013). 그러나 설계기준에서 정하고 있는 탄성설계 밀면전단력은 구조엔지니어가 해당 구조물에 가정된 가상의 탄성 설계력을 바탕으로 설계를 진행하는 것으로 실제 구조물의 내진 저항 능력의 척도인 초기강도, 잉여력, 연성능력 역시 가상의 요소로서 평가할 수 밖에 없다는 제한사항이 존재한다. 이러한 탄성설계가 가지고 있는 한계는 1994년 미국의 노스리지 지진이나 1995년 일본의 고베지진으로 인해 내진설계 방법에 대한 패러다임 변화를 야기하였으며, 실제 해당

건물에 대해 미리 내진성능 목표를 설정하여 성능의 만족 여부를 확인하는 성능기반 내진설계가 본격적으로 제도화되기 시작하였다. 한편, 현행 내진설계 절차상에 부합하게 탄성설계 개념을 적용할 경우, 지진의 재현주기에 따라 차이를 나타낼 수는 있지만 다른 하중에 비하여 강도가 너무 커 탄성거동을 하도록 할 경우 구조물을 구성하는 구조부재가 과도하게 되어 탄성해석 기반 내진설계의 실효성이 없어지게 될 우려가 있다. 따라서 실제 발생하는 지진의 강도를 고려하여 구조물을 설계하기 위해서는 구조물의 비선형 거동을 감안하여 설계할 것이 요구되는데, 비선형 동적해석을 적용시 재료 및 부재의 비선형 특성과 시간의존적인 특성을 반영하여 구조물의 변위, 속도 및 가속도 응답이력을 정확하게 구할 수 있다는 이점이 존재한다. 본고에서는 비선형 동적해석을 활용한 성능기반 설계시 요구되는 구조물의 상세모델링 방법과 일반적인 절차에 대해서 기술하였다. 이를 통하여 현재 개정 중인 건축물 구조설계 기준에도 포함될 예정인 성능기반 내진설계에 대한 이해를 돕고 실무 적용성 향상에 도움이 되고자 한다.

2. 비선형 동적해석 방법 (Nonlinear dynamic analysis method)

구조물의 동적해석은 구조물의 내진성능을 정밀하게 평가하기 위한 기법으로 크게 모드해석법(Mode Analysis)과 시간이력해석법(Time History Analysis)이 있다. 모드해석법은 내진설계에서 구조물의 각 모드별 최대응답을 조합하여 전체 구조물의 응답을 구하는 방법이다. 구조물의 모드형상과 지진하중에 대한 응답 스펙트럼으로 간단하게 구조물의 동적 응답을 구할 수 있어 내진설계에서 널리 사용되고 있으나, 선형해석에만 적용할 수 있고 시간에 따른 동적 거동을 고려하지 못하는 단점이 있다.

비선형 시간이력해석은 구조부재의 비선형성을 해석모델에 직접 구현하고, 구조물의 가진은 실제 지진파를 사용하는 해석법이다. 다른 해석방법에 비해서 지진을 받은 구조물의 변위, 속도, 가속도와 구조부재의 이력거동을 파악함에 있어 가장 정확하고 신뢰도가 높은 해석방법이라 할 수 있다. 일반적으로 직접적분법(Direct Integration Method)의 수치적분법을 통해서 시간의 증분에 따른 구조물의 변위 증분을 반복적인 계산으로 산정한다.

2.1 지진파 선정

비선형 동적해석을 수행하기 위해서는 지반가속도 기록이 요구된다. 이 때 구조물이 건설될 지역과 지반의 성질이

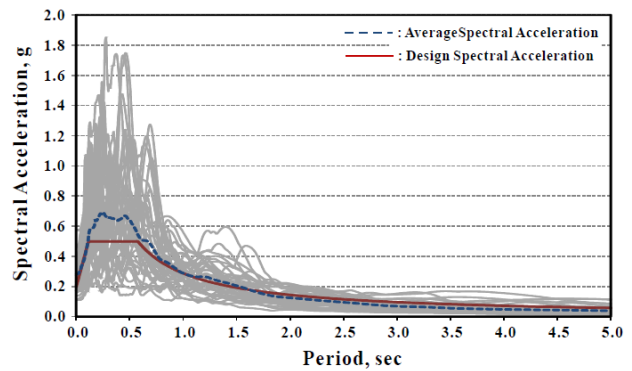


그림 1 40개 지진파에 대한 스케일링 결과

비슷한 지역에서 발생한 지진의 가속도 기록이나 합성된 지진가속도 기록을 사용하게 된다. 이러한 가속도 기록들은 각 지역의 지진위험도에 알맞은 것을 선택해야 하는데, 지반의 성질을 고려하여 지진파의 주파수 성분을 결정하고 지진의 규모에 의한 최대지반가속도를 결정하게 된다.

KBC2009에서 정하고 있는 설계용 지진파에 대한 기준에 따르면, 지반조건에 맞는 최소한 3개 이상의 계측된 지진기록을 바탕으로 구성된 시간이력 성분들을 이용하여 설계하고, 7개 이상의 지진을 이용하여 해석할 경우에는 평균 응답을 사용하여 설계한다. 계측된 지진시간이력을 구할 수 없는 경우, 설계스펙트럼을 이용하여 요구되는 수만큼 적절한 인공지진의 시간이력을 생성하여 사용할 수 있다. 이 때, 설계대상 건물 주기의 0.2배부터 1.5배 사이에서 5%의 감쇠를 갖는 지진시간이력들의 제공량의 제공근(SRSS) 스펙트럼 평균값은 같은 구간의 설계 스펙트럼 평균값의 1.3배 이상이 되도록 조정하여야 한다(ASCE/SEI 7-10, 2010).

2.2 구조물 해석모델의 결정

비선형 시간이력해석 절차에서 고려해야 할 사항은 대상 건물의 지반조건에 적합한 설계용 지진파와 건물의 해석모델을 결정하는 것이다. 건물의 해석모델은 그림 2와 같이 단자유도 모델(SDOF), 다자유도 모델(MDOF) 및 상세해석 모델(Detail)로 구분할 수 있다(이동우 등, 2009).

각 해석모델은 구조물을 어느 수준까지 간략하게 이상화 하면서 정확한 해석결과를 도출하느냐가 관건이라고 할 수 있다. 그림 2는 구조물의 비선형 해석방법 별 신뢰도를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 부재수준의 비선형성이 고려된 모델(Detailed model)의 비선형 시간이력 해석의 신뢰성이 가장 높은 것을 알 수 있다.

- Simplified MDOF dynamic analysis : 비선형 동적해석 결과를 통하여 층변위 및 층간변위 등과 같은 부재수

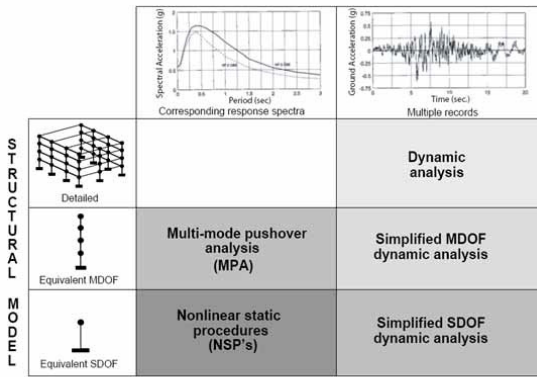


그림 2 비선형 해석방법의 신뢰도

준의 결과값을 얻을 수 있음.

- Simplified SDOF dynamic analysis : 전체 구조모델을 등가단자유도 모델로 치환하였기 때문에 직접적으로 여러 가정과 불확실성을 포함하고 있음.
- Detail model dynamic analysis : 상세해석모델의 해석을 실시하면 부재수준의 결과값을 직접 구할 수 있으며, 이러한 부재 변형의 결과의 합을 통해 층변형각을 산정할 수 있으며, 최종적으로 구조물의 최대 변형각을 구할 수 있다.

2.3 부재 요소모델링

상세 해석모델의 구축시에는 구조부재의 탄성영역에서 비탄성영역까지 모든 중요한 응답을 표현할 수 있어야 하므로 탄성강성, 항복내력, 최대내력, 항복 후 강성비(Post-Yield Stiffness ratio), 최대내력 후 강성 및 강도저감, 이력형상 등이 반드시 포함되어 모델링되어야 한다. 이와 같은 부재의 비선형 특성은 간략하게 부재의 강성과 변형능력으로 표현할 수 있다. 그림 3은 ASCE 41-06(FEMA 356)에서 정하고 있는 대표적인 부재 비선형 특성을 나타낸 것으로

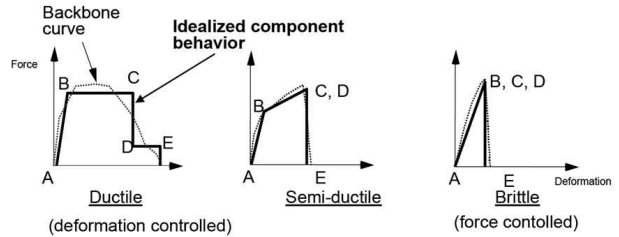


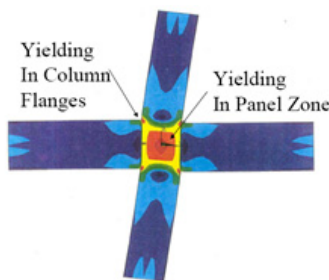
그림 3 부재 비선형 특성의 정의(FEMA356, 2000)

서 이력특성은 지진하중과 같이 부재에 반복적으로 작용하는 재하(loading), 제하(unloading), 재재하(reloading) 하중에 대한 부재의 거동특성이다.

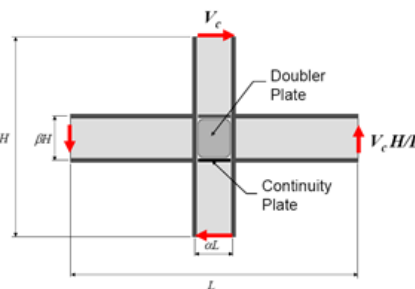
부재 비선형은 부재에 소성힌지가 발생되어 부재 길이에 따른 모멘트 분배 및 거동에 따라 변화하는 소성힌지의 특성을 어떻게 정의하는가에 따라서 집중형 소성힌지 모델과 분산형 소성힌지 모델로 구분된다. 집중형 소성힌지 모델은 부재 단부에 부재전체의 비선형 거동특성을 반영하는 비탄성 힌지를 모델링하는 개념이다. 분산형 소성힌지 모델의 경우, 부재 길이 전체에 비탄성 힌지특성을 정의하는 개념이다. 일반적으로 인장, 압축, 휨 및 전단에 의한 소성힌지를 부재 비선형으로 모델링할 수 있다. 해석대상 부재의 적합한 비선형 특성을 정의하기 위해서는 부재에 다른 특성의 소성힌지를 조합하여야 한다.

2.4 접합부 모델링

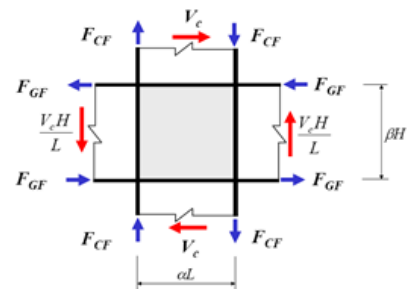
모멘트골조 건물에서 보-기둥 접합부인 패널존(Panel zone)은 일반적으로 강체로 가정하여 발생할 수 있는 변형을 무시하는 경우가 많다. 하지만 저층 및 중층 규모의 모멘트골조의 횡변위는 주로 보-기둥 패널존의 전단변형과 보와 기둥 부재의 휨에 의한 탄성 및 소성변형에 의해 발생된다(그림 4). 이와 같은 이유로 패널존 모델링을 해석에 포함시키는 것이 상세 해석모델 구축시에 요구된다고 할 수 있다. 모멘트골조 내 패널존의 거동을 모델링하는 다양한 해석모



(a) 패널존에서의 응력분포



(b) 자유물체도(Free-body diagram)



(c) 힘의 평형

그림 4 모멘트골조 상세해석모델에서의 패널존 요소

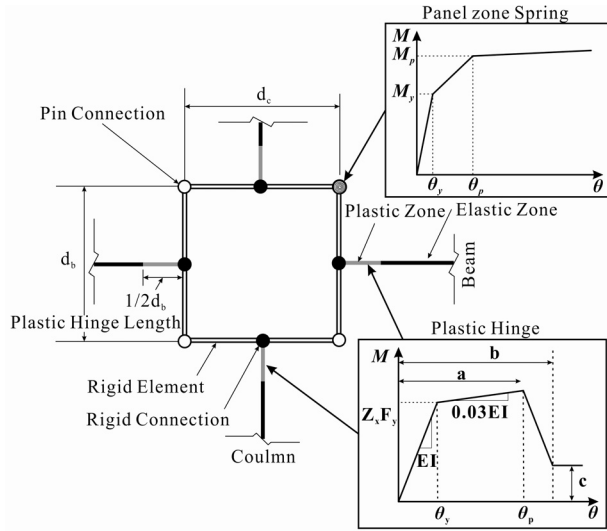


그림 5 패널존 요소의 모델링(Guapa and Krawinkler, 1999)

텔이 있지만, 충분한 정확성과 함께 비교적 간단한 방법으로 거동을 예측할 수 있는 Guapa와 Krawinkler(1999)의 모델이 일반적으로 적용되고 있다. 이 모델에서 패널존은 그림 5와 같이 8개의 절점과 각 절점을 연결하는 강체(rigid element)로 이루어진 사각형 형상이며, 한 변의 길이는 방향에 따라 보의 춤 d_b 와 기둥의 춤 d_c 로 모델링된다. 그림에서 사각형 각 변의 중앙에 위치한 절점은 보 또는 기둥요소와 패널존이 만나는 접점을 모사한 것이며, 사각형의 네 모서리중 하나에는 탄소성거동의 회전스프링을 위치시키고 나머지 세 절점은 자유로운 회전이 가능한 힌지로 모델링하여 패널존의 전단거동을 예측할 수 있도록 한다. 탄소성거동의 회전스프링의 항복강도와 항복회전각 등의 거동 특성은 Guapa와 Krawinkler(1999)가 제시한 다음 식에 따라 결정된다.

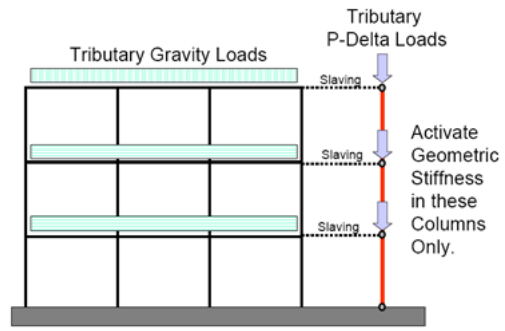
$$\theta_y = \frac{F_y}{\sqrt{3} G} \quad (1)$$

$$M_y = \frac{F_y}{\sqrt{3}} (0.95 d_c d_b t_p) \quad (2)$$

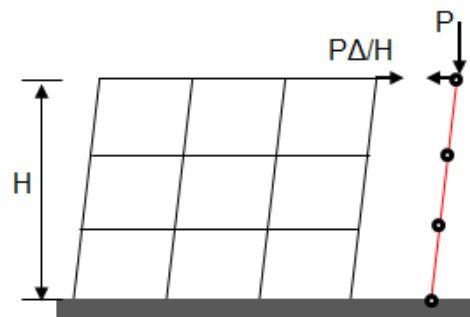
$$\theta_p = 4\theta_y \quad (3)$$

$$M_p = M_y \left(1 + \frac{3b_c t_c^2}{d_b d_c t_p} \right) \quad (4)$$

여기서, θ_y 는 패널존의 항복 전단변형각이고, V_y 는 항복전단강도, M_y 는 회전스프링의 항복모멘트이다. 위 식에서 F_y , G , d_c , t_p , d_b 는 각각 강재의 항복강도, 강재의 전단탄성계수, 기둥의 춤, 패널존의 두께 그리고 보의 춤을 의미한다.



(a) P-Δ효과 구현 모델



(b) 가상의 의지기둥의 불안정 효과

그림 6 가상의 의지기둥을 이용한 P-Δ효과 모델링 기본 개념

2.5 P-Δ효과 모델링

해석골조의 횡변위 증대에 따라 해당 공간에 부과되는 P-Δ 효과로 발생한 축력에 의한 이차모멘트(secondary moment)를 반영시키기 위하여 그림 6과 같은 모델링 기법을 사용할 수 있다(이철호 등, 2004). 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 가상의 의지기둥(fictitious leaning column)을 설치하고 주두의 수평 자유도를 골조의 수평자유도와 동일하도록 강체링크요소로 연결시킴으로써 바닥의 강막작용(diaphragm action)이 반영되도록 한다. 여기서 가상의 의지기둥은 보와 전단접합된 모든 중력기둥을 집합하여 단일의 기둥요소로서 치환한 것이다. 이 기둥에 가해지는 수직하중은 FEMA273(1997)의 권고대로 적재하중의 25% 및 바닥자중이 포함된 중력하중이다. 이러한 구조모델에 대하여 재료 및 기하학적 비선형해석 옵션을 적용하여 변형된 좌표계에 대하여 강성행렬이 매 단계마다 구성되도록 하여 그림 6(b)와 같은 P-Δ효과가 골조에 누가되도록 한다. 즉 횡변위 Δ , 가상의 중력기둥에 작용하는 하중 P , 그리고 층고 H 인 경우 $(P \cdot \Delta)/H$ 에 해당하는 추가의 횡하중이 P-Δ효과로써 골조에 작용하게 된다.

3. 성능목표의 설정 및 평가

성능기반설계(Performance-Based Design)의 기본개념은 사

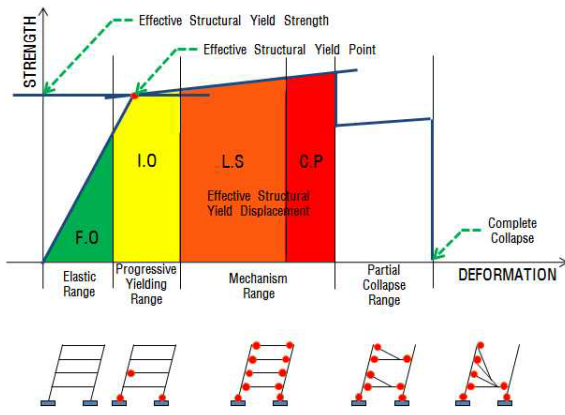


그림 7 비선형 해석을 통한 성능설계

표 1 지진 위험수준(FEMA356)

초과확률	재현주기(년)	비 고
50%/50년	72	-
20%/50년	225	-
10%/50년	474	BSE-1
2%/50년	2,475	BSE-2 또는 MCE

BSE : Basic Safety Earthquake
MCE : Maximum Considered Earthquake

용자의 요구 성능(Demand)을 달성하기 위해 설계자의 능력에 따라 다양한 설계방법을 이용하여 설계를 수행하는 방법으로, 구조물이 위치하게 될 지역적, 환경적 특성에 따라 외부하중으로부터 발생하는 위험수준 범위를 규정하여 구조물의 손상상태가 사용자의 요구 성능을 초과하지 않도록 보유능력(Capacity)을 설계하는 방법이다(천영수 등, 2012). 성능기반 내진공학은 구조물의 성능수준과 지진위험 수준을 선택하여 성능목표를 설정하는 것으로 시작한다. 그 다음 개념설계, 예비설계, 최종설계의 단계를 거쳐 설계의 허용성을 검토하여 최종적으로 시공상 품질보증과 시공 후 건물의 유지관리를 포함한다. 선택한 성능목표를 만족하기 위한 설계의도에 따라 단계별로 중요도가 상이할 수 있으며, 간단한 구조물에는 절차를 간략하게 하여 사용할 수 있다. 또한, 설계단계와 허용여부 검토단계는 설계법이나 성능목표에 따라 내용이 변할 수 있다(박지형, 2006).

3.1 지진 위험수준

건물에 나타나는 지진피해의 주요 원인인 지반운동에 대한 위험수준은 건물의 위치에 대한 함수이며, FEMA356(2000)에서는 확률적 지진 위험수준의 개념을 사용한다. 확률적 지진 위험수준은 표 1과 같이 50년 안에 고려하는 지진보다 더 큰 지진이 발생할 확률인 초과확률(Probability of Exceedance)로 정의한다.

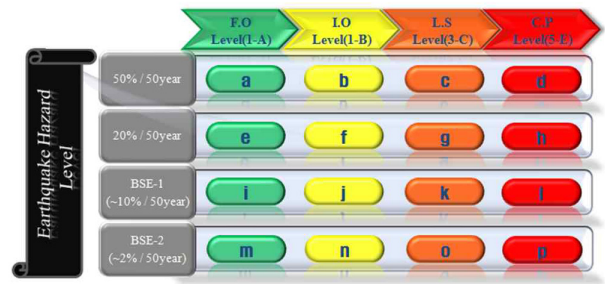


그림 8 성능수준별 지진하중 성능레벨(FEMA356, 2000) 예시

3.2 성능 수준(Performance Level)

성능수준은 지진발생시 구조물의 피해상태 정도를 나타낸다. 구조물의 성능수준은 구조적 성능수준과 비구조적 성능수준, 그리고 이 두 수준의 조합으로 나타나는 건물의 성능수준으로 구분된다. 건물의 성능수준은 통상적으로 기능유지(Operational), 즉시거주(Immediate Occupancy), 인명안전(Life Safety)과 붕괴방지(Collapse Prevention)로 구분할 수 있다. 건물의 중요도가 높아질수록 해당 재현주기의 지진강도에 대한 구조물의 목표성능은 한 단계씩 높아지게 된다(그림 8).

- Operational : 기능성과 관련되는 단계
- Immediate Occupancy : 필수시설에 대해 가장 광범위하게 사용되는 기준에 적절한 단계
- Life Safety : 구조적 피해 또는 비구조적 건물요소의 낙진으로부터 생명안전에 대한 위협의 가능성이 매우 낮은 피해상태를 얻기 위한 단계
- Collapse Prevention : 건물이 횡력에 대한 저항력은 상실하고 오직 수직하중만 부담할 수 있는 단계

3.3 성능 목표의 평가

성능 목표의 평가는 구조부재별로 성능수준이 성능 목표를 달성하였는지 해석결과를 분석하여 파악하여야 한다. 이는 해석결과 중 부재의 변형(소성힌지 회전각, 변위)정도가 각 성능수준과 지진위험 수준의 조합에 의해 결정되는 여러 단계의 성능 목표를 만족하는지 여부에 따라 평가하게 된다. 일반적으로 하나의 지진파에 대하여 모든 구조부재가 동일한 성능수준을 달성하는 경우는 거의 없다. 즉, 구조부재별 성능수준이 다른 경우, 내진성능 목표의 달성여부를 판단하기 위해서 추가적인 기준이 필요하다. 다양한 성능기반 내진설계 지침 등에서는 전체 구조부재 수에 대하여 일정 성능수준에 도달한 구조부재 수의 비를 이용하여 목표 성능수준 달성여부를 판단하게 된다. 이러한 각 성능수준별 지

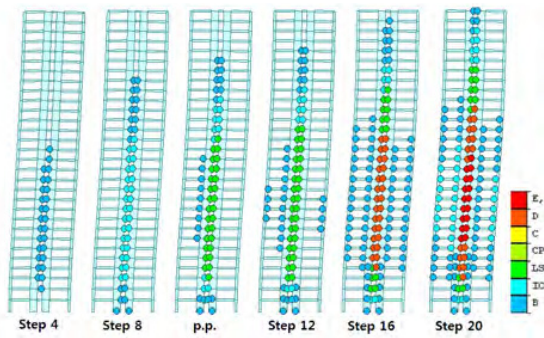


그림 9 해석결과를 바탕으로한 부재별 성능수준의 평가

진하중 성능레벨의 설정은 ICC Performance Code(2009), ASCE 41-06 등을 참고하여 결정할 수 있다(그림 9).

4. 결 론

최근 들어 세계적으로 대형 지진에 의한 피해가 증가하는 추세이며 내진설계기준 또한 강화되고 있는 상황에서 비선형 동적해석을 활용한 성능기반 내진설계에 대한 필요성이 대두되고 있다. 성능기반 내진설계는 기존의 사양설계에 의한 구조물의 지진에 대한 저항력을 확보하고자 하는 엔지니어링 방법에 비하여 설계 지진 시 정확한 응답예측이 가능하다는 우수성으로 인해 각광받고 있다. 하지만 기존에 일반적으로 사용되던 해석방법과 달리 비선형 동적해석법은 구조부재의 비선형성을 해석모델에 직접 구현하고, 구조물의 가진에 실제 지진파를 사용하기 때문에 정확한 해석모델의 수립이 필수적이라고 할 수 있다. 이에 본 고에서는 비선형 동적해석을 위한 해석모델의 수립에 요구되는 상세 모델링 방법에 대한 개념 및 절차에 대해 기술하였다. 또한 이를 바탕으로 하여 성능목표 설정 및 평가 방법에 대해 제시하여, 이를 통하여 향후 비선형 동적해석법을 이용한 성능기반 내진설계를 진행함에 있어 도움을 주고자 하였다.

참 고 문 헌

1. 장해남, 이종윤. 우리나라의 지진 현황 및 국외 지진 피해 사례, 대한토목학회지 제55권 제4호, pp133-139, 2007.
2. 기상청, 2010년 1/4분기 국내의 지진발생 현황, 2010.
3. 김형근, 강지연, 안태상, 박진화, 황정현, 김영주, 김용구, 조영욱, 최현훈, 조성우, 공동주택 코어집중형 제진시스템 개발, SH공사 도시연구소, 2013.
4. ASCE STANDARD, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structure(ASCE 7-10), 2010.
5. 이동우, 임철우, 김형근, 안태상, 인방형 제진시스템의 구조 설계절차, 한국강구조학회지, pp. 58-66, 2009.
6. Gupta, A., and Krawinkler, H., Seismic Demands for Performance Evaluation of Steel Moment Resisting Frame Structures (SAC Task 5.4.3), John A. Blume Earthquake Engineering Research Center Rep. No. 132, Stanford University, 1999.
7. 이철호, 김정재, P- Δ 효과를 고려한 역 V형 철골 가새골조의 내진성능평가: 사례연구, 한국지진공학회 논문집, 제8권 제3호, pp. 97-103, 2004.
8. FEMA, NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
9. 천영수, 박지영, 최경륜, 내진성능 향상을 위한 공동주택 제진구조시스템 개발, 공동주택의 제진구조 도입방안 연구, 한국토지주택공사 토지주택연구원, 2012.
10. 박지형, 철골 가새 골조의 성능기반 최적 내진설계법 개발, 연세대학교 석사학위논문, 2006.
11. 2009 ICC Performance Code for Buildings & Facilities, International Code Council, 2009. 