

## 부재별 탄소성 이력해석을 이용한 거대 지진에서의 고층 강구조 건물 내진 설계 검토

# Examination of Seismic Design for High-Rise Steel Frames Under Huge Earthquake Using Element Bi-linear Time-History Analysis

김문정 Kim, Moon-Jeong\*<sup>†</sup>

(Received October 25, 2011 ; Revised November 15, 2011 ; Accepted December 2, 2011)

### ABSTRACT

Because strong urban earthquakes must produce huge losses of both life and property, examinations about the effect of huge earthquakes for tall buildings are very required. The goal of this report is examining model safety and compare the behavior of 2-D tall models under huge seismic loads. This report examines high-rise models designed KBC2009 codes using 1) seismic loads regulated by KBC2009 and 2) amplified seismic loads assumed to strong earthquakes. And observing for more realistic behavior of tall buildings under huge earthquakes, this report takes two analysis methods - response spectrum analysis and non-linear time history analysis considering P-delta effect.

### 요 지

본 연구는 인공지진과 및 기록 지진파를 이용하여, KBC2009 규준으로 설계된 강구조 건물의 거대 건물에 대한 내력 여유도를 평가하는 것을 목표로 하고 있다. 이 논문에서는 검토에 있어서 콘크리트 슬래브로 층강성이 고정되어 있는 2-D 프레임을 고려하였고, 각각의 프레임을 구성하고 있는 보와 기둥 부재는 각 부재단에 소성힌지를 적용하였다. 검토에 사용한 해석법은 응답 스펙트럼을 이용한 모드 해석과 기록 및 인공지진파를 이용한 시간이력해석을 선택하여 모델의 거동을 조사하였으며 해석에서는 P-delta 효과를 고려한다.

**Key Words:** time history analysis (시간이력해석), response spectrum method(응답스펙트럼해석), huge earthquake(거대지진), deformation concentration(변형집중현상)

## 1. 서 론

건축물이 받는 가장 큰 외력 중 하나인 지진은 발생 시기가 예측 불가능하다는 점과 발생 시의 규모를 예측할 수 없다는 점으로 건축물의 잠재적인 붕괴 요소로 위협을 가해오고 있다. 최근 들어 전 세계적으로 진도 7 이상의 거대 지진이 일어나는 빈도가 높아지고 있는 경향이 관찰되고 있는데, 이러한 거대 지진은 불의 고리에 인접한 대도시를 중심으로 발생할 확률이 매우 높다고 발표되고 있다. 이러한 예측은 2011년 3월 11일에 이제까지 일본 내진규준이 규정한 규모를 월등히 뛰어넘는 진도 M9.0의 동일본대지진이 일어난 것으로 맞아 떨어지게 되어, 지진 위험국 뿐 아니라 인접국인 국내에서도 대지진에 대한 불안감이 더더욱 가중되고 있는 상황이다.

우리나라에서도 멕시코 지진을 시작으로 1980년대 이후 지진에 대한 관심이 높아져 지속적으로 내진 설계에 대한 규정을 강화하고 있다. 이에 외국 법제의 단순 참고를 넘어 국내 실정에 맞는 합리적인 내진설계 실행을 위해 개정된 KBC2009에서는 이전 규준인

KBC2005보다 국내 지진 발생 빈도 및 지반상황 등을 합리적으로 고려하는 등의 노력을 반영하였다. 그러나 한편, 여러 연구논문 및 보고서 등에서 KBC2009의 경우 이전 KBC2005 규정보다 내진설계가 오히려 완화되는 경향이 나타나고 있음이 제시되고 있다(안태상 외, 2010) (이동우 외, 2009). 현재 국내 실무는 거대지진에 대한 내진 설계를 일반적으로 고려하지 않고 있으며 내진 설계에 대비한 소프트웨어 역시 그 내용의 복잡성과 사용 및 이해에 전문성을 필요로 함에 따라 현업에서의 활용도가 매우 낮은 실정이다. 그러나 현업계에서도 최근 들어 국내에 진도 5 이상 지진의 발생 빈도가 높아지는 경향(<http://www.kma.go.kr>)과 동일본 지진 등에 의해, 거대지진을 대비한 내진 설계 기준을 준비해야 한다는 목소리가 생겨나고 있다.

지진 다발 국가인 일본의 경우를 살펴보면, 한신 대지진 이후, 규정치 이상의 거대지진(M 8.0이상)이 건축물에 끼치는 영향을 설계에 고려하고 있으며, 2005년에 새로 개정된 건축법에서는 고층, 초고층 건물의 구조 설계에 공시 지진동을 이용한 시간 이력해석(time-history analysis)이 필수적으로 시행되어야 함을

\*<sup>†</sup> 정회원.현대건설(주) 연구개발실 과장, 교신저자(moonjeong.kim@hdec.co.kr)

규정하고 있다.(日本構造技術者協會. 2008) 현 국내코드인 KBC2009 중, 비선형시간이력해석에 관한 규정을 살펴보면 설계용 시간이력해석에 사용하는 지진 규모의 기준에 의한 지진의 규모는 최대 M6 정도의 중급 지진으로, 거대 지진에 대한 고려가 미흡하다는 것을 예측할 수 있다.

이에, 본 연구는 거대 지진이 일어날 경우에 대한 대비를 목적으로 2차원 고층골조에 대한 해석적 검토를 실시한다. 내진검토는 다음과 같은 두 단계로 진행한다.

- (1) KBC2009 규정에 의거한 가속도 응답 스펙트럼을 활용한 해석과 기록 지진파를 이용한 부재단위의 비선형 시간이력해석 실시 비교
- (2) 진도 7 이상의 거대 지진이 일어날 경우를 상정한 해석을 실시 : 대지진에 대한 KBC2009 규정의 타당성 검토

## 2. 해석 모델

### 2.1 모델의 설계 개요

본 논문에서는 해석 결과를 비교함에 있어, 구성요소에 의한 특이점 발생 가능성을 최대한 억제시키기 위해 제진 부재와 벽체, 가새 부재 등을 사용하지 않은 2차원 강구조 라멘 모델을 해석 모델로 설정하였다. 모델의 설계 개요는 다음과 같다.

- (1) 모델 단면은 기둥을 Box형 용접 형강, 보는 H형강으로 가정한다. 또한 모델 단면은 3개 층을 하나의 그룹으로 하여 동일 단면으로 설계한다.
- (2) 모델 부재는 강구조로 항복강도 31.4kN/cm<sup>2</sup>인 재재를 사용한다.
- (3) 모델의 형상과 스펠 길이는 Fig.1에 제시한다.
- (4) 모델은 초고층건물의 세장비(aspect rate)를 고려하여 3스팬으로 가정하였다. (30층 모델=4.20, 40층 모델=5.59)
- (5) 고층 건물의 일반적 설계를 반영하여 모델의 항복 기구를 보강복형 구조로 유도하기 위해 기둥 압축력을 고려한 보에 대한 기둥의 내력비를 1.5 이상으로 설계하였다.
- (6) 모델 단면은 일본식  $A_i$  분포 계수를 적용한 정적 수평하중을 사용하여 설계하였고 각 모델의 강성을 다르게 하기 위하여 단면 설계 시 적용하는 수평하중식 중 표준전단계수  $C_0$ 를 각각 A=0.2, B=0.25, C=0.3으로 두었다. 일본식  $A_i$  분포계수 및 각 층당 수평하중은 다음 식(1)~(3)에 의한다.
- (7) 설계용 수평 하중을 변수로 한 각 모델의 고유주기는 표 1에 나타낸다. 모델명 중 30은 30층 모델을, 40은 40층 모델을 나타낸다.
- (8) 철골조의 강제 보와 콘크리트 슬래브 사이의 합성 효과를 고려하기 위하여 강제 보의 강성을 2배 증가시켰다.

$$Q_i = W_i \cdot C_i \tag{1}$$

$$A_i = 1 + \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \frac{2T}{1+3T} \tag{2}$$

$$C_i = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0 \tag{3}$$

( $Q_i$ =해당 i층에 재하하는 수평하중,  $W_i$ =해당 i 층 상부 하중,  $Z$ =지역계수,  $R_t$ =건물특성계수,  $T$ =고유주기  
 $\alpha_i$ =(해당 i층이 지지하는 상부중량)/(건물 지상부 총 중량))

: 건축물의 구조관계 기술기준 해설서 참조 (일본국교성)

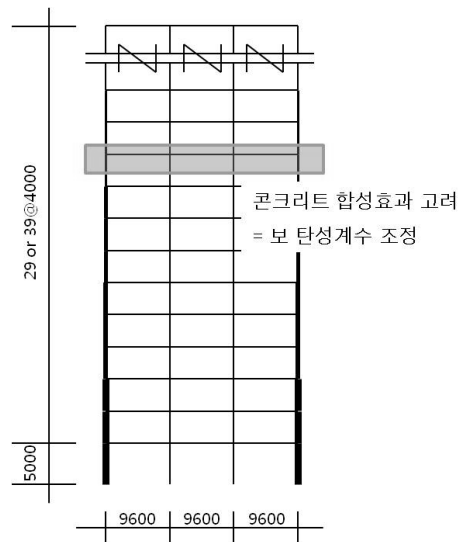


Fig. 1 해석 대상 모델 형상 및 치수

Table 1 해석 모델의 고유주기 비교

모델명	고유주기	모델명	고유주기
Model 30A	4.55 초	Model 40A	5.64 초
Model 30B	4.25 초	Model 40B	5.57 초
Model 30C	3.95 초	Model 40C	5.17 초

### 2.2 소성 설계 및 내진 검토 개요

내진 규준에 의한 모델의 소성설계 및 내진 검토의 개요는 다음과 같다.

- (1) KBC2009에 의한 검토에서는 지역을 수도권, 지방반등급을 매립지 등을 고려하여 S<sub>c</sub> 지반으로 상정한다. 이 경우, 내진설계 D로 판정된다.
- (2) 오피스 건물로서 가정하여 모델의 내진등급을 내진등급 I (중요도계수 = 1.2)로 판정한다.
- (3) 비선형시간이력해석에서 사용하는 고유주기는 정밀 고유주기 식으로 산정한다. 고유주기를 나타내는 Table 1에 의하면 A에서 C의 순으로 모

델 강성이 높아짐을 알 수 있다.

- (4) 모델의 감쇠율은 강성감쇠 2%로 설정한다.
- (5) 모드해석법 검토 프로그램은 MIDAS(v.7.85)을 사용하였다. 모드는 20차 모드까지 고려하며 (중력 부담률=99%) 모드의 중첩계산은 SRSS법을 이용하였다.
- (6) 비선형 시간이력해석은 부재레벨별 탄소성 비선형 루프이력해석이 가능한 임의형 평면골조 복합 비선형 해석 프로그램인 CLAP(v.2.2)(小川厚治 등, 1994)를 사용하였다.
- (7) 시간이력해석 시, 모델 각 부재의 1차 강성에 대한 항복 후 2차 강성비는 부재부분파괴 및 재료 합성효과 등을 고려하여 0.01로 가정하였다.
- (8) 지진 발생시, 모델에 비틀림이나 국부 좌굴이 발생하지 않는다고 가정하며, 각 층별로 바닥은 수평 자유도가 구속된 강체로 가정하였다.

### 3. KBC 2009를 적용한 내진 검토

#### 3.1 모드 해석의 개요

현행의 내진 설계 중 모드해석법에 의한 설계는, 탄성 해석을 실시한 결과에 경험에 의한 설계 계수 등을 적용하여 건물의 소성 거동을 유추해내는 방법으로, 설계가 간단하고 시간이 절약되는 이점이 있다. 그러나 이러한 모드 해석법은 지진이 일어날 경우의 실제 부재 소성정도나 건물의 실제 거동을 명확하게 파악하지 못한다는 결점이 있다. 또한, 댐퍼 등의 에너지 소산장치를 이용한 제진 설계에 모드해석법을 이용할 경우, 댐퍼의 소성 정도가 과대평가 된 상태로 설계될 수 있다는 위험성도 지적되어 왔다. (FEMA, 2000, 2005)

이에 3장에서는 30층 및 40층의 2차원 고층골조를 대상으로 KBC2009가 규정하고 있는 설계용 응답스펙트럼에 의한 모드해석 결과와 KBC2009 규정에 맞춰 증폭시킨 기록지진파에 의한 비선형시간이력해석 결과를 비교하여 검토, 현 규정의 타당성을 검토하여 보기로 한다.

#### 3.2 해석조건 및 목표성능

3장에서 모델 해석 조건 및 검토 확인 목표 성능은 다음과 같다.

- (1) 내진계수 : 전 모델은 강구조 보통모멘트골조로 규정되었으며 비정형성은 고려하지 않는다. (반응 수정계수  $R = 3.5$ , 변위증폭계수  $C_d = 3$ )
- (2) 사용지진파 : 비선형시간이력해석에 사용하는 지진파는 기록지진파로서 El Centro, Taft, Hachinohe 3개. 응답가속도 스펙트럼은 Fig. 2를 참조한다.
- (3) 층간변형각 : KBC2009에서 규정한 설계용 지진하중에 의한 모드 해석 및 비선형 시간이력해석 결과는 P-delta효과를 고려하여 해석하였을 경우

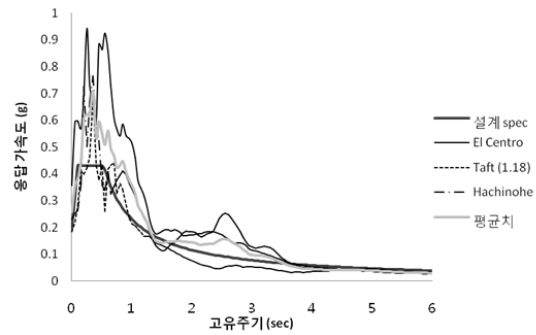


Fig. 2 사용지진파의 응답가속도 스펙트럼

최대 층간 변형각 0.015rad 이하로 한다.

- (4) 항복 기구 (부재 레벨) : 1층 주각을 제외한 전 기둥이 KBC2009에서 규정한 설계용 지진하중에 의한 비선형 시간이력해석 결과에서 탄성을 유지한다.

#### 3.3 해석결과

각각의 모델에 대한 해석결과를 다음 Fig. 3에 제시한다. Fig. 3의 그래프는 3.2에서 규정한 바와 같이, KBC2009의 설계용 응답스펙트럼 및 그에 준하는 기록지진파를 이용한 비선형 시간이력해석 결과 중 (P-delta 효과 고려) 모델의 최대 층간변형각을 나타낸 것으로 그래프의 X축은 해석 중 모델이 나타내는 각 층의 최대 층간변형각을, Y축은 층을 나타낸다. Fig. 3에 의하면 각 모델의 최대 층간변형각은 0.003에서 0.0045rad 사이로 3.2에서 정한 목표성능을 만족하고 있는 것을 알 수 있다.

같은 규모의 지진하중을 가정한, 비선형 시간이력 해석 결과와 모드 해석 결과를 비교하여 보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- (1) Fig. 4(a)에 의하면, 30층 모델 전 해석에 있어 최대 층간변형각은 0.0045rad 이하로 내진규정을 만족하고 있으며, 모드 해석에 의한 결과는 시간이력 해석결과와 일치함을 보인다.
- (2) 30층 모델의 경우, Taft 지진파에 의한 시간이력 해석결과를 제외한 해석 결과는 대체적으로 유사한 값을 나타낸다.
- (3) 30층 모델 해석 결과, El Centro, Hachinohe 지진파에서는 Model 30C이, Taft에서는 Model 30A이 최대값을 나타낸다.
- (4) 30층 모델 중, 동 지진파에서 모델의 응답편차가 가장 큰 지진파는 Taft이며, 그 편차는  $0.74 \times 10^{-3}$  rad이다.
- (5) Fig. 3(b)에 의하면, 전 해석에서 40층 모델 최대 층간변형각은 0.0045rad 이하로 목표성능을 만족하고 있으며, 모드해석에 의한 결과와 시간이력

해석결과가 거의 일치함이 나타난다.

- (6) 40층 모델의 경우, 모델의 강도가 낮을수록 지진동의 종류에 따라 편차가 크게 발생하며, 최대 0.002rad 정도의 편차가 나타남이 관찰된다.
- (7) 40층 모델 해석 결과, El Centro, Hachinohe 지진파에서는 Model 40A이, Taft에서는 Model 40B이 최대값을 나타낸다.
- 8) 40층 모델 중, 동 지진파에서 모델의 응답편차가 가장 큰 지진파는 El Centro이며, 그 편차는  $2.02 \times 10^{-3}$  rad이다.

또한, 모델의 비선형 시간이력 해석결과를 살펴보면 3장에서 사용한 증폭 기록지진파 하에서 기둥을 포함한 모든 부재가 탄성을 유지하고 있음이 관찰되었다.

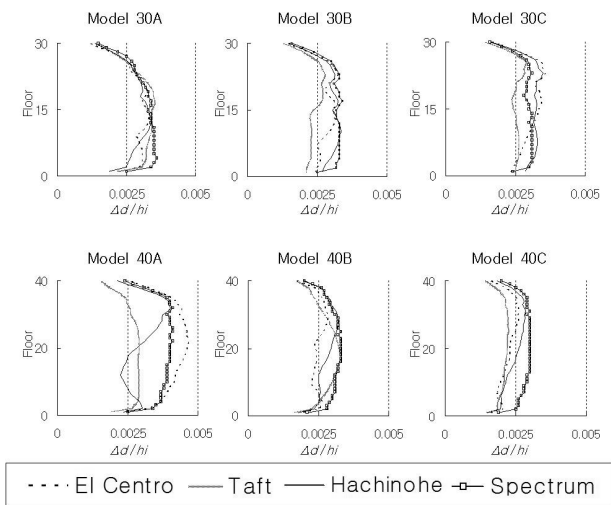


Fig. 3 모델의 해석결과 (층간변형각)

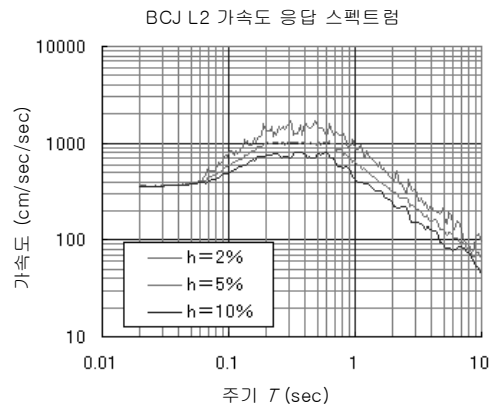
#### 4. 거대 지진을 상정한 검토

4.1 인공지진파를 이용한 비선형 시간이력해석  
일반적으로 힘(F)=강성(K)x변위(x)로 대표되는 하중과 강성간의 관계를 생각하여 볼 때, 해석 이전에 모델의 주기가 늘어날수록 응답 층간변형각이 증가하게 될 것이라 유추할 수 있었다. 그러나 3장의 해석 결과를 살펴보면 지진파의 종류에 따라 이 가정이 일치하지 않는 특이점이 나타나는 것을 발견할 수 있다. 이는 기록 지진파의 탁월 주기와 모델의 주기의 공진관계에 의거한 것으로, 이에 의해 기록지진을 이용한 시간 이력해석의 결과 고찰에 기록지진의 성질(응답속도 탁월주기 등)과 해당 모델의 성질(1차 고유주기 등)의 상관관계를 무시한다면 기록 지진에 따라 심각한 오판을 내릴 수 있음을 유추할 수 있다.

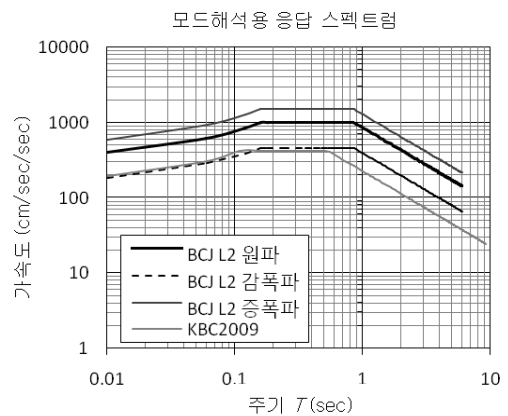
따라서 내진성능 평가에 수치 해석 결과를 이용하기 위해서는 지진 특성과 모델 고유 성질의 상관성을 최대한 배제할 수 있는 방법을 적용하여야 한다. 이에 본 논문 4장에서는 특이점을 최대한 배제시키기 위해 시간이력해석에 탁월주기를 가지지 않는 인공지진파를

적용하여 지진하중의 성질이 모델의 고유성질에 미치는 영향을 최소화하기로 하였다.

본 연구에서는 국가 범위의 공시(公示)적인 면과 범용적인 공개성, 내진설계에서의 활용도 등을 고려하여 일본건축센터의 BCJ 인공지진파와 L2를 적용한다. (<http://www.bcj.or.jp/>) BCJ L2의 응답 가속도 스펙트럼 및 모드해석용 응답가속도 스펙트럼은 Fig. 4에 나타낸다.



(a) BCJ L2 공식 가속도 응답 스펙트럼



(b) 모드해석에 사용한 가속도 응답 스펙트럼

Fig. 4 BCJ L2 지진파의 가속도 응답 스펙트럼

#### 4.2 해석조건

인공지진파 및 그에 상응하는 응답가속도 스펙트럼을 사용한 해석은 2, 3장에 제시된 조건 및 다음과 같은 조건으로 행한다.

- (1) 각 지진동에 의한 시간이력해석은 지진 종료 뒤의 잔류 변형을 고려하기 위하여 해석 시간을 180sec으로 한다.
- (2) 지진 기록 이후의 지진(약 120sec 이후)은 자유진동으로 설정한다.

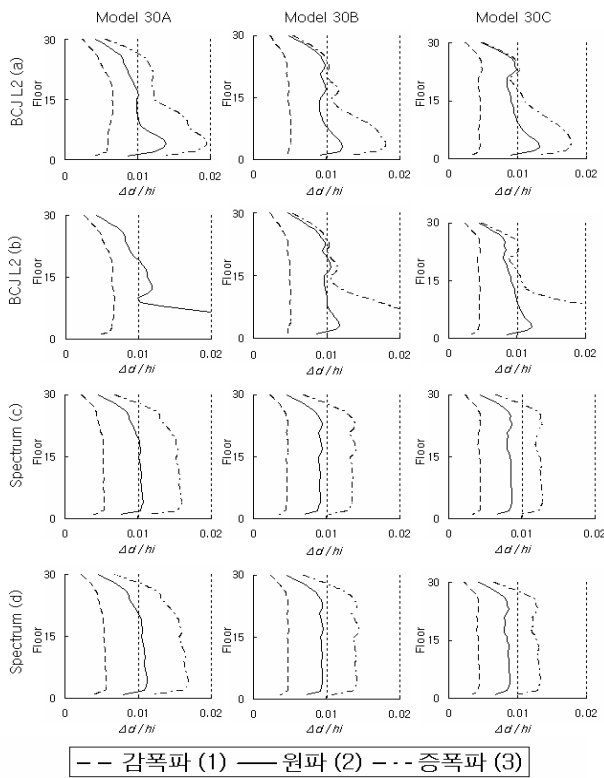


Fig. 5 30층 모델에 대한 지진 해석결과

- (3) 시간이력해석에는 BCJ L2 지진파(이하 BCJ L2 원파)와, KBC2009에서 규정한 최대 응답 가속도 값과 같은 값을 가지도록 감폭시킨 BCJ L2 지진파 (이하 BCJ L2 감폭파. 원파의 약 1/2), 대규모의 지진 이벤트를 가정하기 위해 BCJ L2를 1.5배 증폭시킨 지진파(이하 BCJ L2 증폭파)의 세 종류를 사용한다.
- (4) 모드해석은 BCJ L2 감폭파, 원파 및 증폭파의 규모에 맞게 설정한 가속도 응답 스펙트럼(이하 각각 증폭 스펙트럼 1, 2, 3)을 적용한다.
- (5) 4장의 검토는 최대 층간변형각 및 소성힌지의 생성유무 만을 고려한다.
- (6) 4장에서는 거대지진 하에서의 P-delta 효과에 의한 영향을 알아보기 위하여 P-delta 효과의 고려 유무에 대한 해석을 각각 실시한다.
- (7) 증폭 스펙트럼을 이용한 탄성 모드 해석에서의 설계용 사용계수는 KBC2009에 준하여 3장과 동일하게  $R=3.5$ ,  $C_d=3.0$ , 중요도계수=1.2를 적용한다.

### 4.3 해석결과

#### (1) 30층 모델

BCJ L2 원파, 감폭파, 증폭파 및 스펙트럼 등을 이용하여 해석한 결과는 다음 Fig. 5~8에 나타낸다. 각 해석조건은 다음과 같다.

- (a) BCJ L2 지진파 시리즈를 적용하였을 때의 부재

레벨의 비선형 이력을 허용한 비선형 시간이력해석결과 (P-delta 효과 무시)

- (b) BCJ L2 지진파 시리즈를 적용하였을 때의 부재 레벨의 비선형 이력을 허용한 비선형 시간이력해석결과 (P-delta 효과 고려)
- (c) BCJ L2 지진파 시리즈와 같은 규모의 가속도 응답스펙트럼을 적용시켰을 때의 모드해석 결과 (P-delta 효과 무시)
- (d) BCJ L2 지진파 시리즈와 같은 규모의 가속도 응답스펙트럼을 적용시켰을 때의 모드해석 결과 (P-delta 효과 고려)

Fig. 5에 의하면, KBC2009 규정 규모의 BCJ L2 강폭과에서는 해석조건 (a)~(d)의 결과가 거의 동일하게 나타남이 관찰되나 ① KBC2009 규정 하중 초과 지진하중에서 모드 해석 결과 최대치와 비선형 시간이력해석 결과 최대치 사이의 차가 발생되며 ② 지진하중이 커질수록 ③ 모델 강성이 낮아질수록 해석방법에 따른 결과의 차가 커지고 ④ KBC2009 규정의 약 2배 이상의 하중에서 P-delta 효과의 영향이 무시할 수 없을 정도로 나타나기 시작함을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4의 결과를 참고하여 30층 모델 중 P-delta 효과의 영향 및 해석방법에 의한 결과의 차이가 가장 잘 나타난 BCJ L2 원파를 적용하였을 때의 Model 30A의 힌지 소성 상태를 나타낸 그림이다. 여기에서의 힌지 소성 상태는 비선형 시간이력해석 시간 중 부재 단부에서의 소성 힌지 생성 유무 및 해석 시간 내에서의 최대 소성율을 나타낸다. 이 논문에서의 소성율은 다음 식 (4)를 참고한다. ○는 소성율 1이상 2미만, 작은 ●는 소성율 2이상 4미만, 큰 ●는 소성율 4이상의 소성 힌지를 나타낸다. Fig. 6에 의하면, ① 소성 힌지는 대부분 모델의 중층 및 하층부에 생성되며

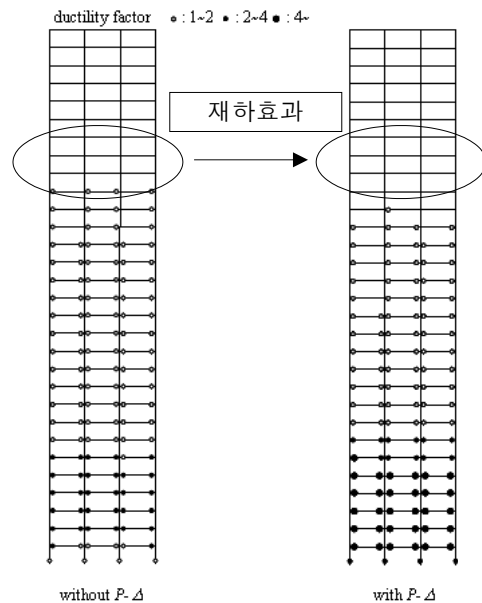


Fig. 6 BCJ L2 원파에서의 Model 30A 부재소성힌지도

② P-delta 효과에 의해 하부 부재 단부에 나타난 소성힌지의 소성율이 약 2배가량 증가하는 반면 ③ 상부층에 발생한 소성힌지는 P-delta 효과에 의해 하부 소성힌지의 소성율이 증가할 경우 그림에서 표시하듯 재하 효과에 의하여 소성 상태에서 탄성 상태로 돌아가는 것이 관찰된다.

$$\text{소성율 } \mu = \frac{\text{해석시간내에서의부재단최대회전각}}{\text{부재단탄성항복회전각}} \quad (4)$$

(2) 40층 모델

Fig. 7은 (1)의 Fig. 5와 같은 개념으로, 해석 결과 중 해석 시간동안 모델이 거동하는 각 층의 최대의 층간 변형각을 표시한 그래프이다. Fig. 7에 의하면, 40층 모델에서도 ① KBC2009 규정 규모의 BCJ L2 감폭과 에서는 모든 모델 및 해석조건에서 결과가 거의 동일하게 나타나게 되나 ② 해석용 지진파가 증가함에 따라 모드 해석의 결과와 부재레벨의 비선형 시간이력해석 결과의 차가 무시할 수 없을 정도가 되며 ③ 그 양상은 30층 모델과 동일하게 지진하중의 강도가 커 질수록, 모델 강성이 낮을수록 증가됨을 알 수 있다. 또한 ④ 지진하중이 증가할수록 P-delta 효과에 의해 모델 하층부에 변형 집중 현상이 나타나는 것이 관찰된다. Fig. 5와 Fig. 7을 비교해 보면 하중이 낮은 지진파에도

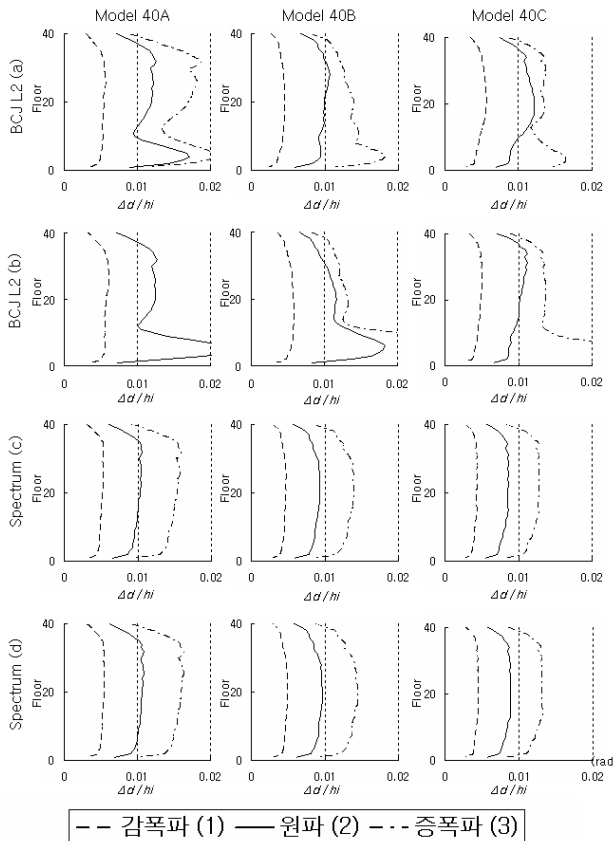


Fig. 7 40층 모델에 대한 지진 해석결과

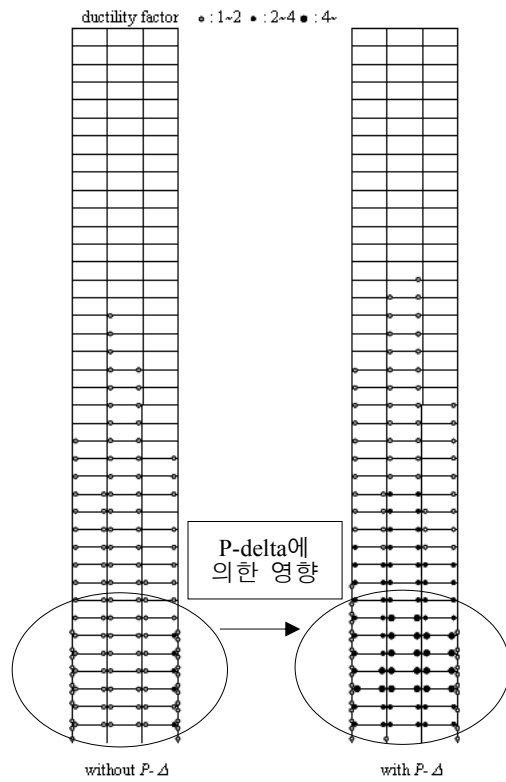


Fig. 8 BCJ L2 원파에서의 Model 30A 부재소성힌지도

30층 모델 보다 자체 중량이 높은 40층 모델에서 해석 방법에 의한 결과의 차가 벌어지는 경향이 더 빨리 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 6과 같은 개념으로 Fig. 7을 참고하여 40층 모델 중 P-delta 효과에 의한 차이가 가장 명확하게 나타난 모델을 선택, 소성힌지상태를 표시한 그림이다. Fig. 8에서는 BCJ L2 원과 하에서의 Model 40B의 소성힌지 상태를 선택하였다. Fig. 8을 관찰하여 보면, ① P-delta 효과를 고려하여 해석을 실시한 경우, 부재 단부에 생기는 소성힌지의 수가 늘어남과 동시에 특히 ② 저층부에서 생성되는 소성힌지의 소성율이 최대 2배 이상 늘어나며 ③ P-delta 효과에 의해 하부 소성힌지의 소성율이 증가할 경우 상부 층의 부재 단부는 소성 상태에서 탄성 상태로 돌아가는 것이 관찰된다.

5. 결론 및 고찰

5.1 해석결과 종합

보-기둥 내력비를 1:1.5로 하여 보 항복형 붕괴기구 유지 및 초고층 건물을 고려, KBC2009 내진기준 하중에서 부재 탄성을 유지하도록 설계한 30층 및 40층 3스팬을 가진 이차원 강구조 순라멘 골조를 대상으로 내진 검토를 시행한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- (1) 본 연구의 모델을 대상으로 KBC2009 규정에 의한 지진하중을 이용하여 실시한 모드해석 및 비선형 시간이력의 결과는 거의 동일하게 나타난다.
- (2) 거대지진을 상정한 지진과 및 응답스펙트럼을 이용하여 지진 해석을 실시한 결과, KBC2009 규정치를 초과하는 지진하중에서 모드해석 결과와 비선형 시간이력해석 결과 사이에 차이가 나타나기 시작한 것이 관찰된다.
- (3) 모드 해석과 비선형 시간이력 해석의 결과 차는 동일 층 모델의 경우 그 차이는 ① 지진하중이 증가할수록 ② 모델의 강성(Stiffness)이 낮을수록 ③ 모델 층수가 높아질수록 현저하게 증가하였다.
- (4) P-delta 효과의 영향은 KBC2009 규정의 지진하중에서는 대부분 발현되지 않았으나 30층 모델에서는 KBC2009 규정 하중의 약 2배 이상, 40층 모델에서는 KBC2009 규정 하중치 초과 지진하중에서 무시할 수 없을 정도로 발현되어 대부분의 경우 모델 하부 층에서 변형집중현상이 나타났다.

## 5.2 결과 고찰

5.2에 서술한 사실에 의해 다음과 같은 사항을 고찰할 수 있다.

- (1) KBC2009에 규정되어 있는 지진하중 강도에서는 지진 해석 방법에 따른 결과에 차이가 나타나지 않으나, 기준치를 초과하는 하중에서는 모델에 따라 지진 해석 방법에 따른 차이가 나타났다.
- (2) (1)의 결과는, KBC2009 규정치 이상의 지진에서 증대하는 건축물 및 부재의 소성율을 현 KBC2009가 보완하지 못하는 부분이 있음에 따른 결과로 보인다.
- (3) (2)에 의해, KBC 규정 이상의 거대 하중을 고려하여 내진 설계를 하여야 할 경우가 발생할 시, 그에 대비한 설계 기준을 공신력 있는 기관에서 별도로 정비할 필요가 있다고 생각된다.
- (4) (3)에 있어서, 지진 해석에 있어서 거대 하중을 고려해야 할 경우, P-delta 효과 등에 의해 변형집중현상 등이 발생할 우려의 건물에 대하여는 그 해석방법을 정밀한 거동해석이 가능한 비선형 시간이력해석방법만으로 규정하거나 모드 해석의 경우 적용하는 설계 계수 값을 더 높게 새로이 규정할 필요가 있다고 판단된다.

## 참고 문헌

1. (사)대한건축학회(2008), *KBC2009 건축구조기준 및 해설*, 기문당, 서울
2. (사)대한건축학회(2004), *KBC2005 건축구조기준 및 해설*, 기문당, 서울

3. (사)한국건축구조기술사회(2010), *KBC2009에 따른 강구조 내진설계 매뉴얼*, 구미서관, 서울
4. 안태상, 김영주, 황정현(2010), ASCE 7-10 기준의 소개, *면진제진학회지*, Vol. 8, pp. 9~27
5. 이동우, 임철우, 김동우, 안태상(2009), 인방형 제진 시스템의 구조설계절차, *한국강구조학회지*, 12, pp. 58~66
6. (株)日建設計東京オフィス構造設計室(2003), *建築物の性能設計と検討方*, 오ーム社, 東京
7. 日本構造技術者協會(2008), *耐震構造設計ハンドブック*, 第1版, 오ーム社, 東京
8. 小川厚治, 多田元英(1994), 柱・梁接合部パネルの変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発, *CLAP v2.2, 第17回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集*, pp.79~84
9. 日本免震構造協會(2005), *パッシブ制振構造設計・施工マニュアル*, 第2版, 오ーム社, 東京
10. 日本鋼構造協會(2005), 阪神淡路大震災以降の制振・免震構造, *JSSCテクニカルレポート*, No. 67
11. 金紋廷, 荒木慶一, 田川 浩, 上谷宏二(2007), 柱軸力変動を考慮した鋼構造高層骨組における変形集中現象の検討, *日本鋼構造協會鋼構造年次論文報告集*, Vol. 15, pp. 47~54
12. 金紋廷, 荒木慶一, 山川 誠, 田川 浩, 五十子幸樹(2009), 極大地震動に対する超高層純ラーメン鋼構造建物の動的応答に及ぼすP-Δ効果の影響, *日本建築学会構造系論文集*, No. 644, pp. 1861~1868
13. 金紋廷(2010), 長周期地震動に対する超高層鋼構造建物の応答に及ぼすP Δ効果の影響に関する解析的研究, *博士学位論文*, 京都大学工学研究科, 建築学専攻
14. 上谷宏二, 田川浩(1996), 梁降伏型平面骨組の動的崩壊過程における変形集中現象, *日本建築学会構造系論文集*, 第483号, pp. 51~60
15. Federal Emergency Management Agency(2000), *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA 356
16. Federal Emergency Management Agency(2005), *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedure*, FEMA 440
17. ASCE Standard(2010), *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI-07
18. A Gupta, H Krawinkler(2000), *Behavior of ductile SMRFs at various seismic hazard levels*, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.126, No.1, pp. 98~107
19. A Gupta, H Krawinkler(2000), *Dynamic P-delta effect for flexible inelastic steel structures*, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.126, No.1, pp. 145~154
20. <http://www.bcj.or.jp/> (사단법인 일본건축센터)
21. <http://www.kma.go.kr/> (기상청 홈페이지)