



비선형 동적 해석을 이용한 비내진 상세 RC 골조의 지진거동 특성 분석

정성훈^{1)*} · 이광호¹⁾ · 이수권²⁾

¹⁾인하대학교 건축학부 ²⁾동양미래대학 건축과

A Study on the Seismic Response of a Non-earthquake Resistant RC Frame Using Inelastic Dynamic Analyses

Seong-Hoon Jeong,^{1)*} Kwang-Ho Lee,¹⁾ and Soo-Kueon Lee²⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

²⁾Dept. of Architecture, Dongyang Mirae University, Seoul 152-714, Korea

ABSTRACT In this study, characteristics of the seismic response of the non-earthquake resistant reinforced concrete (RC) frame were identified. The test building is designed to withstand only gravity loads and not in compliance with modern seismic codes. Smooth bars were utilized for the reinforcement. Members are provided with minimal amount of stirrups to withstand low levels of shear forces and the core concrete is virtually not confined. Columns are slender and more flexible than beams, and beam-column connections were built without stirrups. Through the modeling of an example RC frame, the feasibility of the fiber element-based 3D nonlinear analysis method was investigated. Since the torsion is governed by the fundamental mode shape of the structure under dynamic loading, pushover analysis cannot predict torsional response accurately. Hence, dynamic response history analysis is a more appropriate analysis method to estimate the response of an asymmetric building. The latter method was shown to be accurate in representing global responses by the comparison of the analytical and experimental results. Analytical models without rigid links provided a good estimation of reduced stiffness and strength of the test structure due to bond-slip, by forming plastic hinges closer to the column ends. However, the absence of a proper model to represent the bond-slip posed the limitations on the current inelastic analysis schemes for the seismic analysis of buildings especially for those with round steel reinforcements. Thus, development of the appropriate bond-slip model is in need to achieve more accurate analysis.

Keywords : torsion, plan irregularity, reinforced concrete frame, bond-slip, non-earthquake resistant detail, inelastic dynamic analysis

1. 서 론

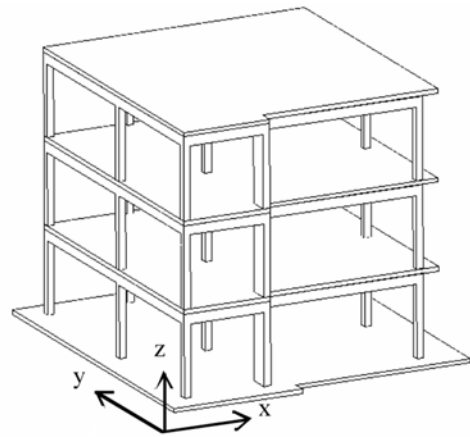
최근 10년 간 인구 밀집 지역을 강타한 지진(1996년 고베 지진, 1999년 터키 지진, 1999년 대만 지진, 2005년 파키스탄 지진, 2006년 인도네시아 지진)들은 인명피해의 가장 큰 요인이 비내진 상세 건물의 부적합한 내진성능임을 보여주었다. 우리나라에서는 내진설계를 위한 시행령을 통하여 일정규모 이상의 건축물에 대하여 내진설계를 의무화하고 있으나 전체 인구의 상당한 부분이 이 내진 규정이 적용되기 이전에 설계되고 시공된 건물에 거주하고 있다. 또한 중력하중에 의한 구조설계에서는 평면의 비정형성을 구조적 취약점으로 간주하고 있지 않으므로 많은 건물들이 지진하중과 같은 강한 횡력에 의한 비틀림 거동이 고려되지 않고 설계되었다. 비정형 평면을 가진 건물은 지진 하중에 의한 구조물의 손

상이 각 층의 연단부에 집중되어 정형 평면을 가진 건물보다 피해의 정도가 더 크다. 따라서 중규모 이상의 지진 발생시 대규모 인명피해가 예상되며 이를 최소화하기 위한 대책이 시급히 요구된다. 기존 건물의 내진 내력(강성, 강도, 연성)증대를 위해서는 각종 보강 방법을 적절히 사용할 수 있도록 비내진 상세 건물의 정밀한 해석방법 개발과 검증이 선행되어야 하며 이러한 노력의 중요성은 이전 연구^{1,2)}에서도 강조되어 왔다. 이 연구는 내진 규정이 적용되지 않은 RC골조 건물을 해석 대상으로 하여 그 지진하중에 대한 구조적 특성을 파악하고, 비선형 동적 해석 모델링 방법의 적합성과 한계점을 고찰하는 것을 목표로 한다. 이를 바탕으로 보다 진보된 해석 방법에 대한 논의를 제공한다.

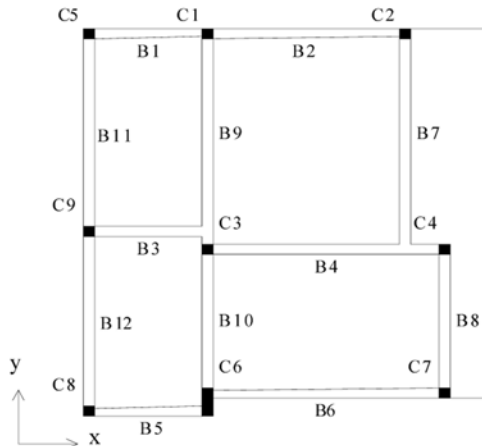
2. 해석 대상 건물의 모델링

이 연구에 사용된 해석 대상 건물(Fig. 1)은 평면 비대칭성을 가진 3층-2×2 베이 RC 골조구조로서 실물크기의 유사동적(pseudo-dynamic) 실험이 실시되었던 구조물

*Corresponding author E-mail: jeong@inha.ac.kr
 Received December 7, 2009, Revised April 5, 2010,
 Accepted April 7, 2010
 ©2010 by Korea Concrete Institute

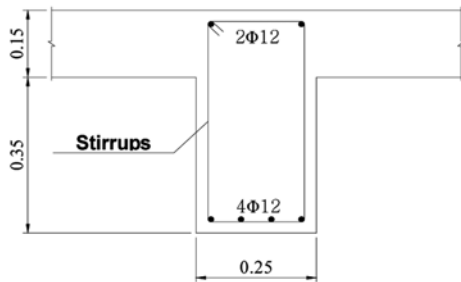


(a) Overview of the example structure

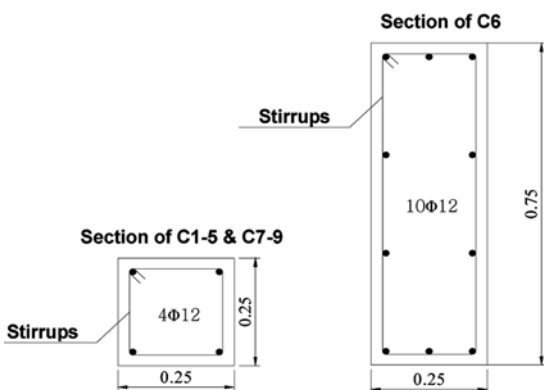


(b) Plan and member identifications

Fig. 1 Overview and plan of the example structure columns



(a) Typical beam section



(b) C1-5 & C7-9 columns

(c) C6 column

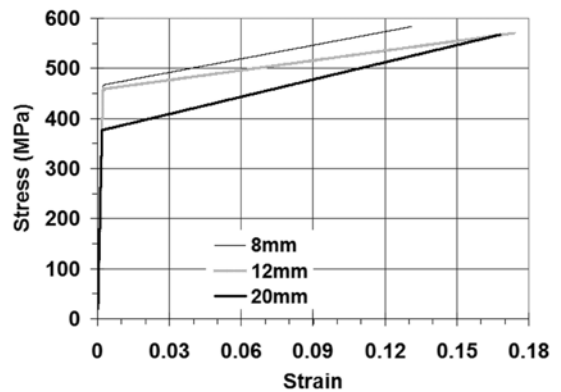
Fig. 2 Section of the beam and columns (C1-5 & C7-9; C6)

이다. 건물의 층고는 각 3 m로 수직적으로 정형이지만, Fig. 1(b)에서 보이듯이 수평적으로는 비정형 평면을 가지고 있다. 기둥 C6은 단면 크기가 750×250 mm로 다른 기둥 단면적(250×250 mm)의 3배에 이르러 평면상 강성과 강도의 비대칭적 분포의 주요인이 된다. 보-슬래브와 기둥의 단면은 Fig. 2에 나타나있다.

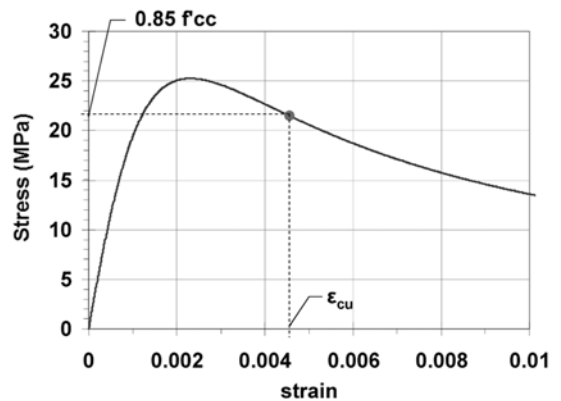
해석 대상 건물은 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ZEUS-NL³⁾을 사용하였다. 이 프로그램은 섬유(fiber) 모델을 이용하여 소성 거동의 부재 길이 방향으로의 진행과 3차원 상호작용(M-M-N interaction)을 정밀하게 예측할 수 있으므로 비틀림과 양방향 지진하중의 영향을 고려해야 하는 비정형 평면을 가진 건물의 해석에 적합하다.

재료의 물성은 해석 대상 건물의 실험체 제작 과정에서 직접 측정된 값이 사용되었다. 재료 비선형을 반영하기 위해 철근의 경우 이선형 응력-변형도 관계를 이용하였다(Fig. 3(a)). 콘크리트는 스티럽에 의한 철근콘크리트 부재 내부의 구속효과와 함께 콘크리트의 응력-변형도 관계가 정의된 Mander et al.의 모델⁴⁾을 적용하였다(Fig. 3(b)). 해석 대상 건물은 중력하중만을 고려한 부재의 전단력을 바탕으로 구조설계가 수행되었기 때문에 구속효과가 매우 작다($K = 1.01$).

해석 대상 건물은 bare frame으로 가정되어 동적 거동 중에 부재들 간의 마찰과 같은 에너지 손실의 요인이 매우 적으므로 점성 감쇠(viscous damping)의 영향은 해석



(a) Steel reinforcing bars



(b) Concrete

Fig. 3 Stress-strain relationships of materials used in the analytical modeling

모델링에서 무시하였다. 부재의 소성변형에 의한 이력 감쇠(hysteretic damping)의 영향은 재료의 비선형 모델을 통해 반영된다.

해석 모델의 보-기둥 연결부 패널존은 rigid 요소 사용 여부에 따라 두 가지로 모델링 되었다. Model #1에서는 소성힌지가 기둥면과 기둥의 중심선 사이에 발생하는 것을 방지하기 위하여 기둥의 중심선과 만나는 보의 양 끝에 rigid 요소를 사용하였고, 마찬가지로 원리로 기둥의 양 끝에도 rigid 요소를 사용하였다(Fig. 4(a)). 반면, Model #2는 보와 기둥의 양 끝에 rigid 요소를 사용하지 않았는데, 이는 보-기둥 접합부의 손상에 의해 발생할 수 있는 추가적인 연성을 패널존에 반영하기 위함이다(Fig. 4(b)). 일반적으로 패널존의 거동을 해석모델에 반영하기 위해서 비선형 스프링 요소가 널리 사용되고 있으나, 이 연구의 대상 구조물과 같이 원형 철근으로 구성된 패널 존은 그 거동에 대한 연구 성과가 매우 부족하여, 스프링 요소의 강성과 강도를 결정할 근거가 없는 실정이다. 따라서 보 요소를 부재 중심선의 교차점까지 연장하여 사용함으로써 패널 존의 추가적인 연성을 반영하였다. 이는 소성힌지가 보의 면에서 가까운 곳에 발생하도록 함으로써 원형철근의 사용으로 인한 부착 미끄러짐을 반영하기에 유리한 모델로 판단된다(Fig. 16).

Fig. 1(b)로부터 관찰할 수 있듯이 기둥 C6의 양쪽의 보는 일직선상에서 어긋나게 연결되어 있다. 이들 보 B5와 B6의 중심선 사이의 거리와 이로 인해 발생하는 기둥 C6의 비틀림 거동을 반영하기 위해 Fig. 5와 같이 rigid 요소를 사용하여 기둥의 중심선과 연결하였다.

해석 모델링 과정에 사용된 가정들은 Table 1에 요약되어 있다.

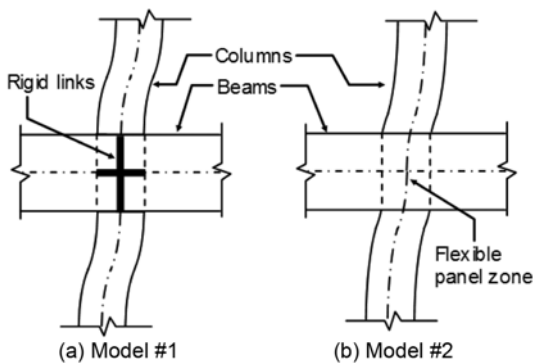


Fig. 4 Rigid links at beam-column connections

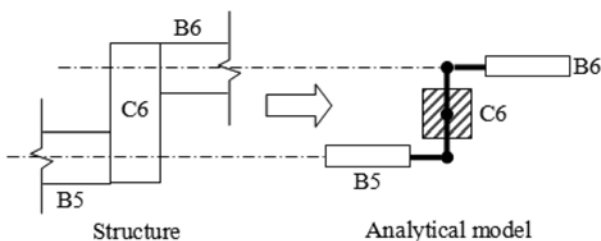


Fig. 5 Rigid links for modeling of C6 (plan)

Table 1 Summary of the modeling assumptions

	Items in analytical modeling	Assumptions
Material	Reinforcement steel	Yield strength $f_y = 474 \text{ MPa}$ ($\phi 12$) $f_y = 397 \text{ MPa}$ ($\phi 20$) Post-yield stiffness ratio $E2/E1 = 0.0032$ ($\phi 12$) $E2/E1 = 0.0056$ ($\phi 20$) Young's modulus $E1 = 206,000 \text{ MPa}$
	Concrete	Compressive strength $f'_c = 26.7 \text{ MPa}$ Confinement factor $K = 1.01$, from Mander et al. ⁴⁾
	Stress-strain relationship	Reinforcement steel Bilinear Elasto-plastic model Concrete Martinez-Rueda and Elnashai ⁵⁾ based on Mander et al. ⁴⁾
Loading	Self weight of RC members	245 kN/m ³
	Gravity loads	DL + 0.3LL
	Seismic dead load for mass calculation	DL + 0.3LL
	Mass distribution	Distributed at beam column connections
	P-delta effect	Considered
	Viscous damping	No (only hysteretic)
	Analysis program	ZEUS-NL ³⁾
Modeling	Element model	Distributed plasticity model
	Centerline dimensions	Yes
	Rigid offset at beam column connection	Yes
	M-M-N interaction	Yes
	Effective flange width of T-beam	Web width plus 7% of the clear span of the beam on either side of the web

3. 비선형 정적 해석

최대밀면전단력, 취약층, 약축 등과 같은 해석 대상 건물의 기본적인 비선형 거동 특성을 조사하기 위하여 Model #1을 대상으로 푸쉬오버(pushover) 해석을 실행하였다. 각 층에 작용하는 횡하중(lateral force)은 해당 층의 무게와 1차 모드형태(mode shape)에 비례하도록 결정되었다(식 (1)).

$$F_i = V \times \left[\phi_i \cdot m_i / \sum_{i=1}^n (\phi_i \cdot m_i) \right] \quad (1)$$

여기서

F_i : i 층에 작용하는 횡하중

V : 밀면전단력

ϕ_i : 1차 모드의 i 층 변위

m_i : i 층의 질량

식 (1)에 의해 계산된 각 층의 횡하중(F_i)은 골조선을 따라 해당 골조가 분담하는 중력하중에 비례하여 분배되었다(Fig. 6). 평면상에서 기둥 C6의 약축과 강축의 방향을 각각 x 방향과 y 방향으로 설정하였다.

정적 푸쉬오버 해석 결과인 밀면전단력-최상층변위 곡선과 건물의 한계상태(limit states)가 Figs. 7과 8에 나타나 있다. 건물의 한계상태를 정확히 예측하는 것은 매우 힘든 일이며 이와 관련된 불확실성을 고려하여 이 연구

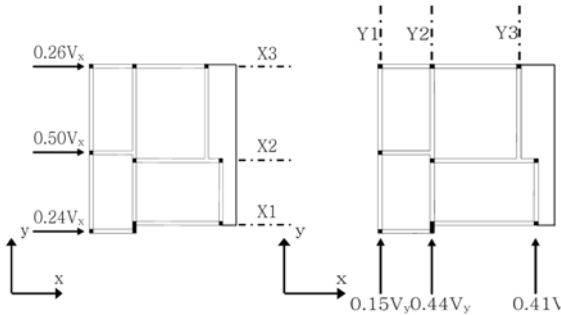


Fig. 6 Distribution of equivalent lateral load on a plan

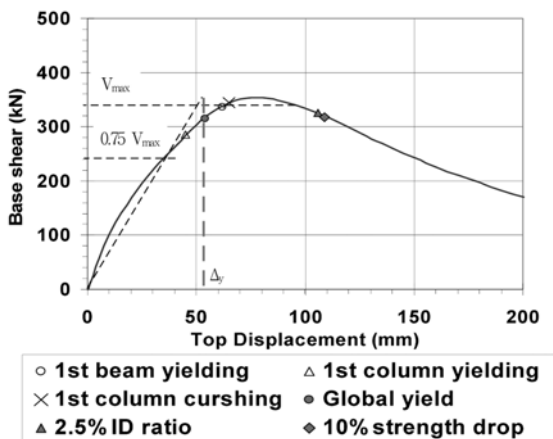


Fig. 7 Capacity curve and limit states (x direction)

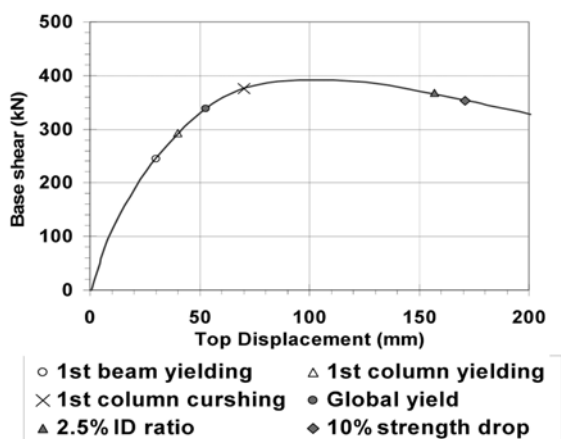


Fig. 8 Capacity curve and limit states (y direction)

에서는 여러 가지 자료를 바탕으로 국부한계상태와 전체 한계상태에 대해 각각 3개씩의 한계상태를 설정한다. 국부한계상태는 각 부재의 항복과 파괴에 이르는 상태를 재료(철근과 콘크리트)의 이론적인 한계상태를 기준으로 하였고, 전체한계상태는 기존의 연구 결과를 바탕으로 설정하였다. Figs. 7과 8에 나타난 건물의 국부 및 전체한계상태는 다음과 같이 정리된다.

국부한계상태(local limit states)

- 첫 번째 보의 항복(1st beam yielding): 보의 주철근이 항복변형률(0.002)에 도달한 상태.
- 첫 번째 기둥의 항복(1st column yielding): 기둥의 주철근이 항복변형률(0.002)에 도달한 상태.
- 첫 번째 기둥의 파괴(1st column crushing): 기둥의 스테럽 내부 콘크리트의 최대 변형률이 0.003에 도달한 상태.

전체한계상태(global limit states)

- 전체 건물의 항복점(global yield): 최대밀면전단력을 지나는 수평선과 이의 75%에 해당하는 하중점과 원점을 잇는 직선의 교차점에 해당하는 변위(Δ_y in Fig. 7)
- 2.5% 층간변위(2.5% ID ratio): SEAOC-Vision 2000⁷⁾에서 제시된 전체붕괴 한계상태
- 10% 강도저감(10% strength drop): 최대밀면전단력에 이룬 후 강도가 10% 이상 저감되는 상태에 이르는 변위를 전체붕괴 한계상태로 가정⁶⁾

Figs. 7과 8의 푸쉬오버 곡선으로부터 건물의 x 방향에 비해서 y 방향의 강성과 강도가 더 크고 최대밀면전단력 이후 더 안정된 거동을 보이는 것을 관찰할 수 있다. 건물의 x 방향 거동에서는 기둥의 항복이 보의 항복보다 먼저 발생하고, 최대하중 이후 강도저감이 급격하여 전체붕괴상태(10% 하중저감)에 대응하는 변위가 항복점의 2배 정도로 연성도가 매우 작다. 반면, y 방향으로는 최대밀면전단력에 이룬 이후에도 강도저감이 완만히 나타나며 상대적으로 여유있는 연성도(3.3)와 안정된 거동을 보인다. 이와 같은 양방향 거동 차이의 원인은 Figs. 9와 10의 소성힌지 발생과정을 통해 파악할 수 있다. 이들 그림에 표현되어있는 번호는 소성힌지의 발생 순번이며 큰 원형은 초기 10개의 소성힌지를 나타낸다. 비내진 상세를 가진 건물의 특징인 약기둥-강보의 골조 시스템으로 인해, x 방향 거동에서는 1층의 모든 기둥의 양단에 소성힌지가 발생한다. 이는 x 방향의 푸쉬오버 곡선이 최대하중점에 이룬 이후 급격하게 떨어져서 연성 확보가 불가능한 원인이다. y 방향 거동에서는 기둥 C6이 횡하중을 건물 전체에 분산시키므로 소성힌지가 비교적 고르게 분포되어 있으며 저층부에 약층(weak story)이 발생하지 않는다.

이상의 비선형 정적 해석방법은 건물의 취약부위 파악, 부재손상의 진행과정 및 전체적인 강성과 강도를 조사하는데 유용하게 이용될 수 있지만, 비정형 평면을 가진

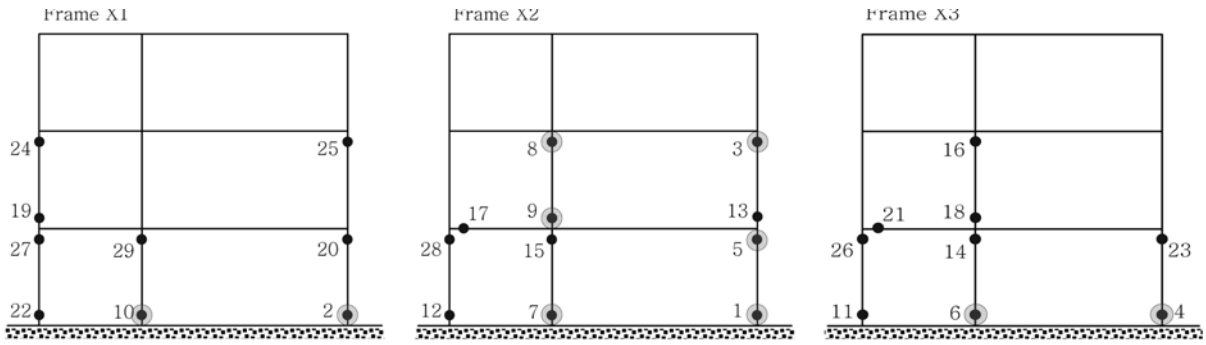


Fig. 9 Plastic hinge formation at peak base shear (x direction)

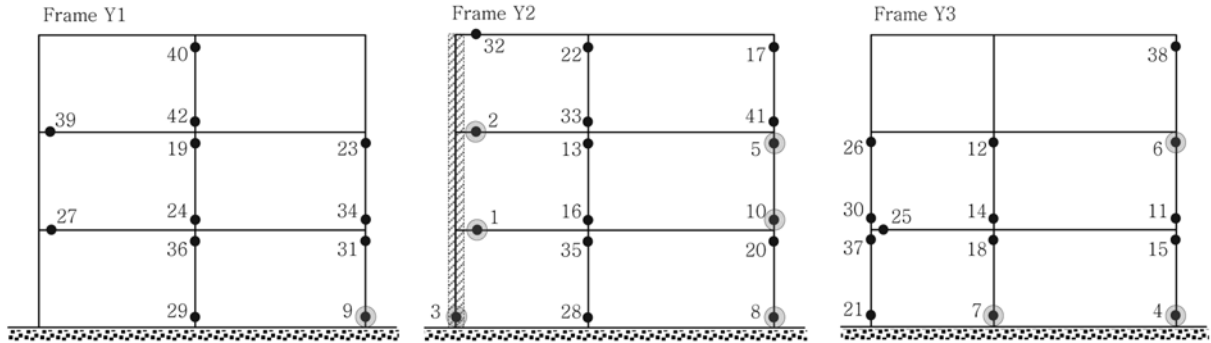


Fig. 10 Plastic hinge formation at peak base shear (y direction)

건물의 비틀림 거동을 분석하는 데는 분명한 한계점이 있다. 이를 확인하기 위해 해석 대상 건물에 재현주기가 975년(Acc. 975)인 인공지진을 사용하여 동적해석을 수행하였다. Fig. 11은 각 층의 중간 기둥과 연단부(flexible edge)에서 각각 측정된 최대 층간변위들의 차이를 비교하여 보여준다.

Fig. 11로부터 비대칭 평면으로 인한 비틀림 현상으로, 같은 층에서 측정된 층간변위일 지라도, 측정위치에 따라서 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 일반적으로 평면 비정형 건물은 동적 거동에 가장 큰 영향을 주는 1차 모드가 비틀림 모드이다. 따라서 비틀림 거동은 구조

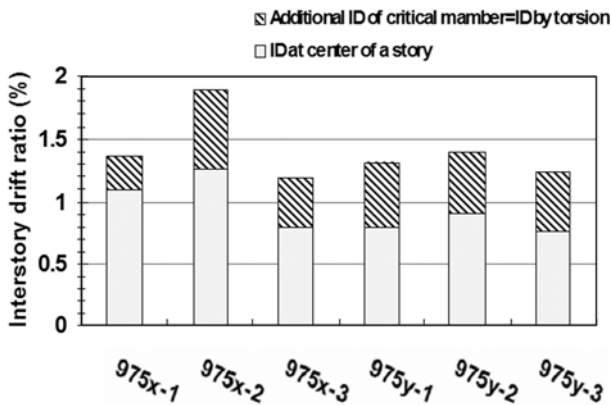


Fig. 11 Difference of Interstory drift between the center and edge columns (975x-i: the maximum interstory drift ratio of the i th story when the Acc. 975 earthquake record is applied in the x direction)



Fig. 12 Pseudo-dynamic test setup of the example frame

물의 동적 모드를 정밀하게 반영할 수 없는 푸쉬오버 해석을 통해서서는 분석하기 힘들다. 이는 3차원 동적해석이 비정형 평면을 가진 건물의 분석에 반드시 필요한 요소임을 인식시켜 준다.

4. 동적해석 및 실험 결과와의 비교

해석 대상 건물의 동적해석 및 실험에 사용된 지진하중은 Montenegro(1979) 지진 당시 Herceg-Novi 계측소에서 측정된 양방향 지진 데이터이며, 0.15 g의 최대 지반 가속도(PGA: peak ground acceleration)를 갖도록 비례

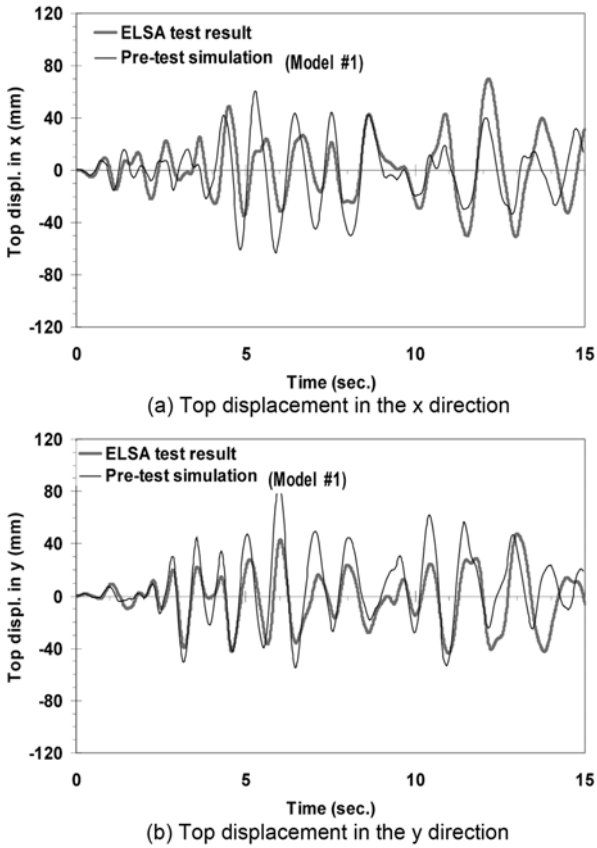


Fig. 13 Comparison of the experimental and analysis results (Model #1)

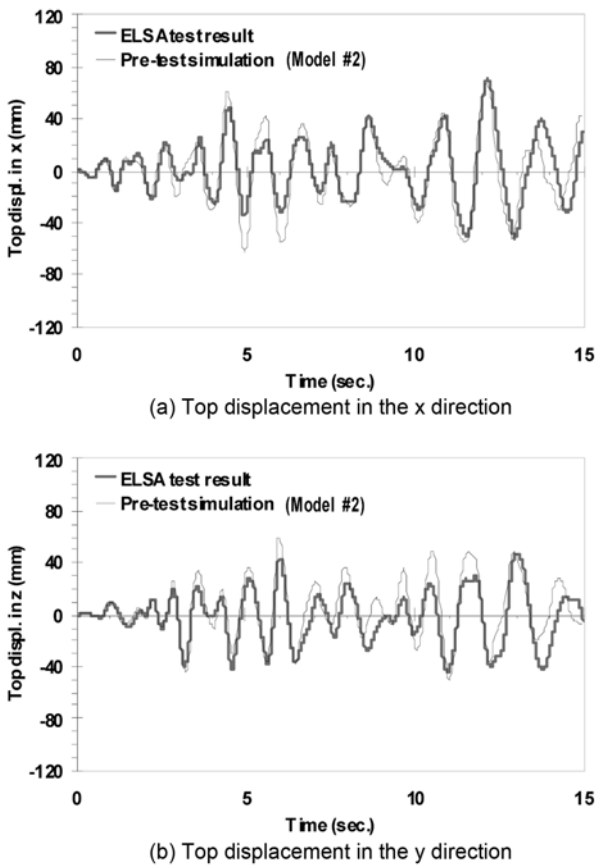


Fig. 14 Comparison of the experimental and analysis results (Model #2)

조정하여 양방향에서 동시에 가력하였다.

비선형 모델링을 통한 동적해석 결과를 검증하기 위해 실물 크기의 유사동적(pseudo-dynamic) 실험 결과와 비교하였다. 이 실험은 European Laboratory for Structural Assessment(ELSA)에서 실시되었으며 그 실험 결과는 Figs. 13과 14에 ELSA test result로 표기되었다. 유사동적 실험은 진동대 실험과 달리 질량과 감쇠는 해석적으로 모델링하고 구조물의 강성을 실험에 의해 결정한다 (Fig. 12). 반력벽과 유압 액추에이터를 이용하여 실험을 진행할 수 있으므로 대규모 실험체에 적합한 방법이며, 각각의 액추에이터를 조정하기 위한 목표 변위는 컴퓨터 해석에 의한 동적 거동 예측에 의해 결정된다. 이 실험에 대한 보다 자세한 사항은 Jeong and Elnashai⁸⁾에 나타나 있다.

보와 기둥의 양단에 rigid 요소를 사용한 Model #1(Fig. 13)로 실시된 비선형 동적해석 결과는 실험 결과와 다소 오차를 보이는 반면, rigid 요소를 사용하지 않은 Model #2(Fig. 14)는 응답의 주기와 최대값에 있어 해석 결과와 실험 결과가 가깝게 나타났다. 실험 결과와 해석 결과로부터 얻은 지붕 최대변위 값의 비교가 Table 2에 요약되어 있다. Model #1과 Model #2의 해석 결과와 실험값과의 최대 차이는 각각 75.7%와 25.5%로 Model #2의 예측이 우수함을 보여준다. Fig. 15에서 볼 수 있듯이 실험체의 보-기둥 접합부에서 주철근의 부착 미끄러짐이 발생하였다. Model #2은 부착 미끄러짐을 예측한 모델링



Fig. 15 Bond slip at column ends of the test frame

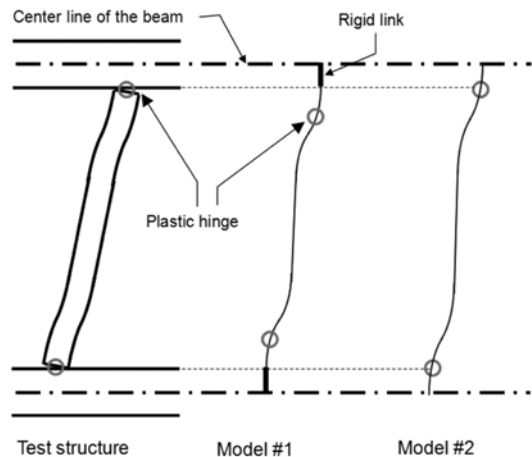


Fig. 16 Comparison of the location of plastic hinges between the Model #1 and Model #2

Table 2 Comparison of the experimental and analytical results

	Max. top displacement			
	Value (mm)		% difference	
	x	y	x	y
Test result	70.06	47.52	0.00	0.00
Model #1	62.60	83.49	-10.65	75.70
Model #2	67.32	59.63	-3.91	25.48

요소를 포함하고 있지 않지만, 보-기둥 접합부에 rigid 요소를 사용하지 않음으로써 추가적인 연성을 반영할 수 있었고 소성힌지의 위치를 실험체와 더 비슷하게 예측할 수 있었다(Fig. 16).

Fig. 14의 결과 비교로부터 이 연구에 사용된 해석방법인 섬유 요소를 바탕으로 한 비선형 동적 해석 모델이 축방향 하중과 양방향 모멘트를 받는 부재의 비선형 3차원 상호작용을 나타내는 데 적합함을 알 수 있다. 그러나 국부적인 응답에서는 부착 미끄러짐과 같이 해석모델이 정밀하게 예측하지 못한 부분이 파악되었다. 비내진 상세를 가진 RC 건물은 원형철근을 사용했거나 철근의 정착 길이가 부족하므로 이상과 같은 부착 미끄러짐은 피할 수 없는 현상이다. 이는 골조의 횡강성을 급격히 저하하여 지진거동에 영향을 주게 된다. 따라서 비내진 상세 RC 건물의 보다 진보된 지진거동 예측을 위해서는 부착 미끄러짐 현상을 고려하여 보-기둥 접합부 거동을 정밀하게 나타낼 수 있는 비선형 모델링 요소의 개발이 필요하다.

5. 요약 및 결론

이 연구에서는 내진 상세가 적용되지 않은 RC 골조의 지진 거동 특성을 파악하고, 그 응답을 예측할 수 있는 해석 방법에 대해 논의하였다. 대상 건물의 해석과 실험 결과의 분석을 통해 관찰된 비내진 상세 RC골조의 지진 거동 특성은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 1) 중력하중만을 고려한 구조설계로 인해 기둥의 단면적과 강성이 보에 비해 작아서 강-보 약-기둥(strong-beam weak-column)으로 인한 취약층(weak story) 발생의 가능성이 크다.
- 2) 평면비대칭으로 인해 지진하중에 의한 비틀림 거동이 발생하고 이는 평면상에서 연단면에 위치한 부재 손상의 원인이 된다.
- 3) 스티럽의 단면적과 간격이 중력하중에 의해 발생하는 부재 전단력을 바탕으로 산정되어 부재 코어의 구속효과 부족으로 적절한 연성확보가 불가능하다.
- 4) 부재의 주철근으로 원형 철근이 사용되어 지진하중과 같은 극한의 횡하중이 가해졌을 경우 부재 내부 주철근의 부착 미끄러짐(bond-slip)이 발생한다.

비정형 평면을 가진 건물의 지진 거동 예측에는 3차원 동적해석방법이 적합하다고 볼 수 있다. 일반적으로 평면 비정형 건물은 동적 거동에 가장 큰 영향을 주는 1

차 모드가 비틀림 모드이므로 이를 제대로 반영할 수 없는 푸쉬오버 해석을 통해서 비틀림 거동 크기를 예측할 수 없으며 평면 비틀림으로 인한 연단부 부재의 손상집중을 파악하지 못한다.

해석 Model #2의 경우 비선형 동적 해석과 실험 크기 실험 결과가 매우 가깝게 나타났는데 이는 섬유 요소를 이용한 3차원 비선형 골조 모델링 방법이 축력과 양방향 모멘트가 동시에 상호작용하는 복잡한 극한 하중조건에서도 구조물의 전반적인 거동을 정밀하게 예측할 수 있음을 의미한다. 또한, 해석 Model #1의 오차원인이 부착 미끄러짐이라는 점은 보다 진보된 비내진 RC 건물의 지진거동 예측을 위해서는 보-기둥 접합부의 국부 거동을 정밀하게 나타낼 수 있는 모델링 요소의 개발이 필요하다라는 것을 보여준다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다. (No.2009-0077667).

참고문헌

1. 한상환, 김인정, “지반특성과 지진지역에 따른 보통모멘트골조의 내진성능평가,” 대한건축학회논문집(구조계), 22권, 7호, 2006, pp. 19~25.
2. Bracci, J. M., Reinhorn, A. M., and Mander, J. B., “Seismic Resistance of Reinforced Concrete Frame Structures Designed Only for Gravity Loads: Part I-Design and Properties of a One-third Scale Model Structure,” Technical Report NCEER-92-0027, 1992, State University of New York, Buffalo, pp. 1~7.
3. Elnashai, A. S., Papanikolaou, V., and Lee, D. H., “ZEUS-NL User Manual,” Mid-America Earthquake Center (MAE) Report, 2002, pp. 6~69.
4. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., “Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete,” *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804~1826.
5. Martinez-Rueda, J. E. and Elnashai, A. S., “Confined Concrete Model under Cyclic Load,” *Materials and Structures*, Vol. 30, No. 197, 1997, pp. 139~147.
6. Park, R., “State-of-the Art Report, Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing,” *Proceedings 9th WCEE*, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. VIII, 1988, pp. 605~616.
7. SEAOC, *Performance Based Seismic Engineering of Buildings*, Vision 2000 Committee, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, 1995, 115 pp.
8. Jeong, S. H. and Elnashai, A. S., “Analytical Assessment of an Irregular RC Frame for Full-scale 3D Pseudo-dynamic Testing: Part II-Condition Assessment and Test Deployment,” *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 9, No. 2, 2005, pp. 265~282.

요 약 이 논문에서는 내진상세가 적용되지 않은 RC골조의 지진 거동 특성을 파악하였다. 해석 대상 건물은 내진 기준의 적용을 받지 않고 중력하중만을 고려하여 설계되었다. 원형철근이 주철근으로 사용되었으며, 부재는 낮은 수준의 전단력을 견딜 수 있는 최소한의 스티럽이 사용되어 코어 부분의 구속효과는 거의 없다. 평면비정형성을 가진 건물의 경우, 푸쉬오버 해석을 통해서 비틀림으로 인한 평면상에서 연단부의 손상집중을 파악할 수 없으므로 비선형 동적해석을 사용하는 것이 바람직하다. 섬유요소를 이용한 비선형 동적해석은 양방향 지진하중과 비틀림 거동의 영향을 받는 RC골조의 거동을 성공적으로 예측할 수 있었다. 하지만, 보다 진보된 응답 예측을 위해서는 부착 미끄러짐과 같은 보-기둥 접합부의 국부거동을 정밀하게 나타내는 모델링 요소의 개발이 필요하다.

핵심용어 : 비틀림, 평면 비정형, 철근콘크리트 골조, 부착 미끄러짐, 비내진 상세