

비내진 상세를 가진 10층 R.C.골조의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상관성 연구

Correlation of the Experimental and Analytical Inelastic Response of a 1/12-Scale 10-Story Reinforced Concrete Frame with Nonseismic Detail

이 한 선* 강 귀 용** 김 정 우***
Lee, Han-Seon Kang, Kyi-Yong Kim, Jeong-Woo

ABSTRACT

Nowadays, the pushover analysis technique is becoming a very useful tool for the prediction of inelastic behavior of structures in the seismic evaluation of existing buildings in the worldwide. However, the reliability of this analysis method has not been fully checked by the test results. The objective of this study is to verify the correlation between the experimental and analytical response of a high-rise nonseismic reinforced concrete frame using DRAIN-2DX program and the test results performed previously.

This study concludes that the overall responses such as story-shear versus story-drift can be predicted with quite high reliability while the local deformations such as plastic rotations in the ends of critical members can not be described reasonably.

1. 서론

일반적으로 구조물은 극심한 지진이 발생하는 경우, 탄성범위를 지나 비탄성 거동을 나타내게 된다. 현행 내진규준에서는 선형탄성거동에 근거하여 구조물을 설계하고 있으며, 단지 반응수정계수의 사용을 통해 구조물의 비선형 거동을 고려하고 있다. 그러나 최근의 연구결과에서 이러한 계수의 신뢰성에 대해 의문이 제기되고 있다. 또한, 이러한 비선형거동 예측을 위한 몇가지 해석 프로그램들이 현재 사용되고 있으나, 프로그램의 신뢰성을 확인하기 위해서는 실험결과에 근거하여 해석결과를 비교, 검토하여 비선형 거동 예측에 대한 기존 전산프로그램의 신뢰성을 검증하는 것이 필요하다.

국내에서 일반적으로 설계, 시공되고 있는 대부분의 철근콘크리트 구조물은 비내진 상세를 사용하고 있다. 그러나 이러한 구조물의 지진응답 특히, 비선형 거동에 대한 자료는 극히 빈약한 실정이다. 본 연구진은 국내에서 실제로 설계, 시공된 구조물을 선정하고 이를 1:12로 축소하여 실험체를 제작하였고, 옥상층 변위제어에 의한 횡방향 가력실험을 수행한 바 있다⁽¹⁾. 이 실험결과를 이용하여 현재 세계적으로 널리 사용되고 있는 비탄성 해석프로그램(DRAIN-2DX)으로부터 얻은 해석결과를 서로 비교, 검토함으로써 그 응용상의 문제점과 신뢰성을 확인하고자 한다.

2. 실험

* 정회원, 고려대학교 건축공학과 부교수 ** 정회원, 고려대학교 건축공학과 석사과정

*** 학생회원, 고려대학교 건축공학과 석사과정

2.1 실험 개요

본 연구를 위한 실험 개요는 참고문헌 (1)에 나타나 있으며, 해석과의 비교를 용이하게 하기 위해 간단히 다시 소개하고자 한다. 선정된 건물의 용도는 사무소 건물이며, 실험실의 여건에 따라 축소율을 1:12로 제작하였다. 항복강도(Stress)에 단면적을 곱한 항복력(Force)이 상사성 법칙에 일치하도록 모델철근을 제작하였는데, 실물 구조물에 사용된 D25, D22, D10의 항복력(tf)은 약 23.6tf, 18.4tf, 3.1tf이며, 실험체에 사용된 모델철근의 항복력은 상사법칙에 따라 조정할 경우 24.2tf, 19.8tf, 5.0tf로 나타나, 항복력과 관련하여 상사성이 일치하고 있음을 보여주고 있다. 실험체의 제작 및 실험방법에 관한 자세한 내용은 참고문헌 (1), (2)에 나타나 있다.

2.2. 휘플트리(Whiffle Tree) 및 기둥 축하중의 설정

각층의 지진력 분포를 역삼각형으로 일정하게 유지하기 위해 그림 1과 같이 휘플트리를 구성하였다. 그리고 모멘트의 저항을 받지 않도록 연결부를 힌지로 구성하였으며, 휘플트리의 자중에 의한 처짐을 방지하기 위하여 휘플트리 전체를 상하좌우로 벗어나지 못하게 하면서 수평으로만 움직이도록 하였다.

상사법칙에 따라 축소율에 의한 자중을 보상하기 위하여, 그림 1과 같이 로드셀(Load Cell), 강봉 및 턴버클로 구성된 수직타이(Vertical Linkage)를 이용하여 각 기둥의 최상층에 부가하중을 가하였다. 이때 가한 하중의 크기는 중층정도에 작용하는 축하중 0.68톤, 1.4톤, 1.15톤으로 하였다.

횡적 불안정성에 대비하고 실험시 안전을 보장하기 위해서 그림 1.(b)와 같이 횡변위 고정용 프레임과 4층, 7층, 옥상층 좌우에 4개씩 롤러를 설치하였다.

그림 1에서와 같이 각층의 횡변위와, 1층 기둥과 2, 3층 보의 회전각을 측정하기 위하여 기준프레임과 변위측정기를 설치하였다.

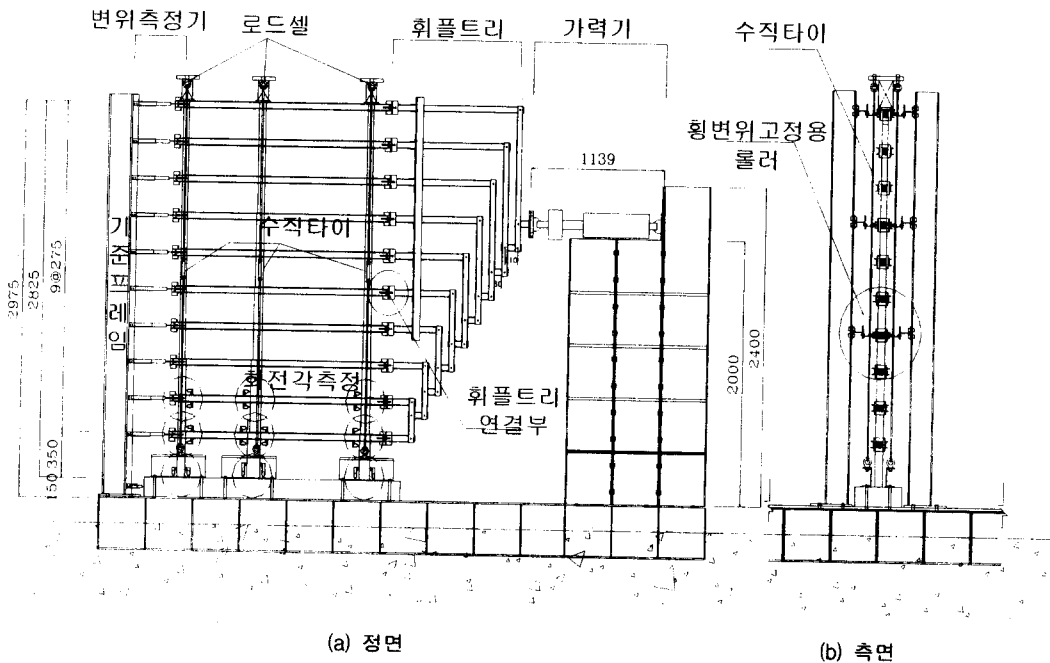


그림 1 실험 장치 (단위 : mm)

3. 해석

DRAIN-2DX⁽⁶⁾를 사용하여 기둥과 보만으로 이루어진 실험체에 대해 비선형 정적해석을 수행하였다. 본 논문에서는 실험과 동일한 조건으로 일방향 가력해석을 수행하였다.

3.1 재료 모델

콘크리트와 철근의 재료 특성은 실험에 실제로 사용된 재료실험 결과를 근거로 하여야 하나, 콘크리트 압축강도와 철근의 인장강도, 항복강도 이외에는 상세한 자료를 얻지 못하여 추정치를 사용하였다.

표 1에서 나타난 콘크리트의 압축강도(f_c')는 평균값이다. 최대응력점에서의 변형률은 축소모델의 경우 보통 콘크리트의 값 0.002(Type A)보다 약 25%정도 더 커진 것으로 가정하여 0.0025(Type B)로 정하였다^{(3),(4)}. 철근 항복강도 및 인장강도는 철근 재료실험결과와의 평균강도를 근거로 하였으며, 탄성계수는 정확히 측정되지 않아 일반적인 철근 탄성계수(E_s) $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 을 사용하였다. 그림 2에 재료의 해석 모델을 나타내었다.

3.2 구조물 모델

골조의 해석 모델 수립은 접합부의 경우 그림 3과 같이 충분히 강하게(Rigid) 접합되었다고 가정하여, 보와 기둥의 절점 부분에서 보와 기둥의 두께만큼 강접부위(Rigid End Zone)를 설정하였다⁽⁴⁾.

구조물의 질량은 실험체의 질량을 계산하여 각 절점에 집중하였고, 실험 시 부가질량으로 사용된 수직타이를 고려하여 최상층의 각 절점에서 집중하중을 작용시켰으며, 소성힌지 보-기둥 요소(Plastic Hinge Beam-Column Element) (Type 02)⁽⁶⁾를 이용하여 모델링하였다. 이 요소는 그림 3에서와 같이 하나의 탄성 보와 이 보의 양 끝단에 소성힌지와 강접부위로 구성되어 있다. 그림 4에서는 콘크리트 기둥(C1)과 보(G1)에 대한 P-M 상관도를 보여주고 있다. 모든 기둥과 보에 대해 변형 경화를 (Strain-Hardening Ratio)을 10%로 가정하였다.

표 2는 해석에 사용된 기둥과 보의 P, M값을 나타내고 있고, 그림 5에서는 일방향 가력 해석에 사용된 실험체의 해석모델을 보여주고 있다.

표 1 콘크리트 및 철근의 재료 실험 결과

모델 콘크리트 압축강도 평균치 (kg/cm^2)		모델 철근 항복력 및 인장력 평균치 (kgf)					
습윤양생(28일)	현장양생(실험시, 51일)	D2A (D25)		D2B (D22)		$\phi 1.0$ (D10)	
245.1	315	항복력	인장력	항복력	인장력	항복력	인장력
		174	199	138	179	35	50

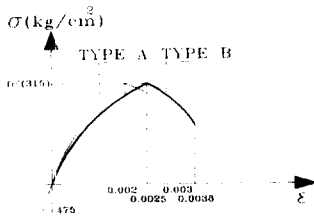


그림 2.a 콘크리트 해석 모델

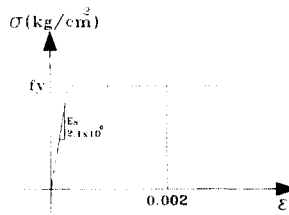


그림 2.b 철근 해석 모델

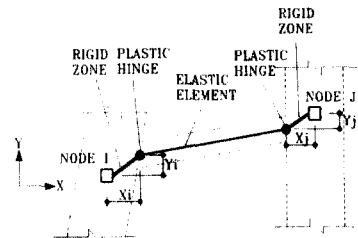


그림 3 요소의 구성

표 2 기둥과 보요소의 P-M 값

	P_{vt} (ton)	P_{vc} (ton)	M_{y^+} (t-mm)	M_{y^-} (t-mm)	M_b^+	P_b^+	M_b^-	P_b^-
C1	7.3	26.0	333.2	333.2	476.0	9.8	476.0	9.8
C2	6.3	21.9	238.4	238.4	341.3	8.0	341.3	8.0
C3	4.4	17.2	139.5	139.5	218.7	7.2	218.7	7.2
C4	3.6	13.2	99.3	99.3	151.7	5.6	151.7	5.6
C5	2.5	10.1	59.9	59.9	98.0	4.0	98.0	4.0
C6	3.3	12.1	79.5	79.5	120.5	4.9	120.5	4.9
C7	2.2	8.8	45.6	45.6	73.2	3.5	73.2	3.5
G1	-	-	37.9	25.7	-	-	-	-
G2	-	-	29.8	68.1	-	-	-	-
G3	-	-	13.6	37.8	-	-	-	-

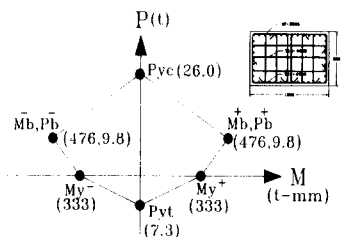


그림 4.a C1기둥 P-M값

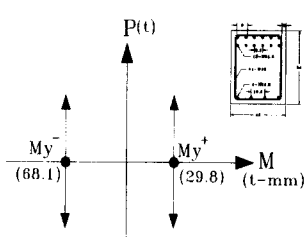


그림 4.b G2보 P-M값

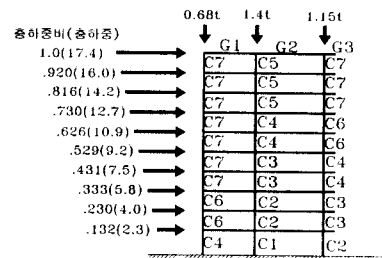


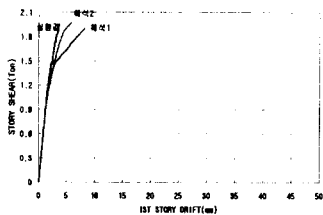
그림 5 실험체 해석 모델

4. 해석 결과와 실험 결과의 비교

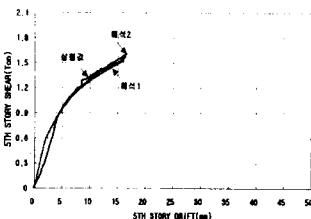
축소 모델 실험과 DRAIN-2DX를 사용하여 얻어낸 층전단력과 층간변위, 소성힌지 위치에서의 회전각을 서로 비교하였다.

4.1 층전단력과 층간변위

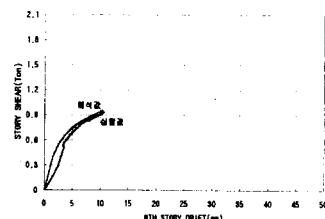
층전단력과 층간변위의 관계를 살펴보면, 재료의 실제값을 이용한 해석 1의 경우에 중,상층부에서는 거의 실험치와 유사한 거동이 나타났으나, 하부층 특히 1층과 2층의 경우 실험치보다 먼저 항복하는 현상이 나타났다. 이는 실제 모델 철근의 항복강도가 입력값 보다 훨씬 클 가능성에 기인한다고 생각된다. 이에 따라, 기둥과 보의 P, M값을 증가시켜 해석을 재수행하였는데, 어떤 경우에는 수치해석상의 불안정성이 발생하는 것으로 확인되었다. 그러나, 1층과 2층 기둥의 P-M상관도 값만을 증가하였을 때 즉, C1, C2는 초기값의 1.5배로, C3, C4는 1.3배로 하고 나머지는 초기값을 그대로 사용한 해석 2의 경우, 전체적으로 실험결과와 유사한 거동을 나타냈다. 그림 6은 이러한 실험결과와 해석결과를 비교하여 나타내었다.



(a) 1층



(b) 5층

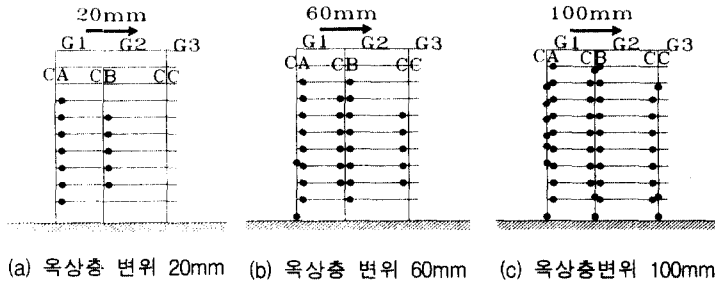


(c) 8층

그림 6 층전단력 - 층간 변위 관계

4.2 소성힌지의 분포

그림 7로부터 소성힌지의 생성과정을 살펴보면, 실험초기에는 G1보에서 소성힌지가 처음 발생하였으며 점차 G2, G3보로 진행하였다. 초기 40mm까지는 주로 소성힌지가 보에서 발생하였고, 약 42mm에서 상대적으로 약한 기둥인 CA기둥의 1층부에서 소성힌지가 형성되었다. 100mm까지 가력한 경우, 상대적으로 약한 기둥인 CA 기둥의 중간층에서 소성힌지가 형성되었다. 이는 그림 8의 일방향 가력실험에서 관찰된 파괴모드와 상당히 일치하는 경향을 보여주고 있다.



(a) 옥상층 변위 20mm (b) 옥상층 변위 60mm (c) 옥상층 변위 100mm

그림 7 각 단계별 소성힌지

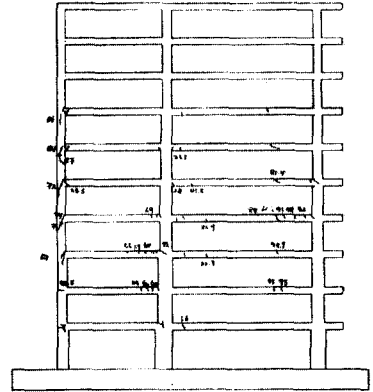
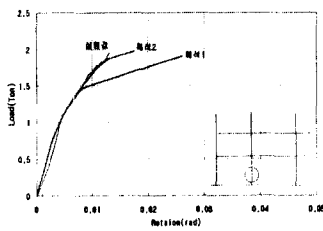


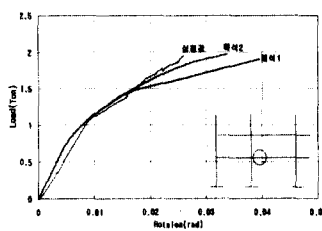
그림 8 일방향 가력실험 후 균열모습

4.3 회전각

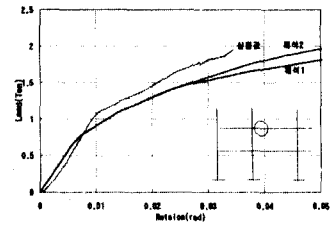
해석에서 회전각은 처짐각법(Slope-Deflection Method)을 사용한 탄성회전각과 DRAIN-2DX에서 얻어낸 소성회전각을 더하여 산출하였다. 회전각의 비교결과, 해석 2의 경우 1층 기둥에서의 회전각이 실험결과에 근접한 것으로 나타났다. 보의 경우, 그림 9 (b)와 (c)에서는 해석 1과 해석 2가 실험결과에 근접하게 나타나고 있으나, 그림 9 (d), (e), (f)에 나타난 바와 같이 2층 보와 3층 보 우측 일부에서 실험결과보다 상당히 큰 회전각을 나타내고 있음을 알 수 있다.



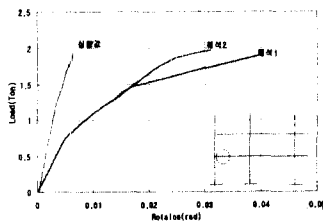
(a) 1층 기둥 회전각 비교



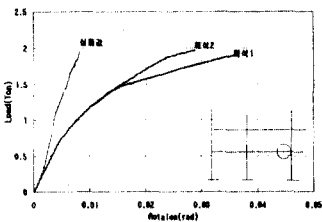
(b) 2층 보 회전각 비교 1



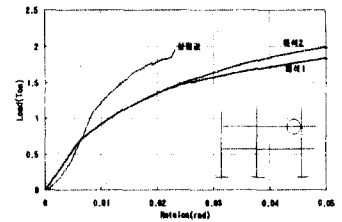
(c) 3층 보 회전각 비교 1



(d) 2층 보 회전각 비교 2



(e) 2층 보 회전각의 비교 2



(f) 3층 보 회전각 비교 3

그림 9 실험치와 해석치의 회전각 비교

5. 결 론

이상의 비내진 상세를 가진 1:12 축소 10층 R.C. 골조의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상호 비교에 의한 결론은 다음과 같다.

(1) DRAIN-2DX 프로그램의 소성힌지 보-기둥 요소 (TYPE 02)는 해석모델 수립이 단순하고 모델링이 간편하다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 수치해석상의 불안정성을 발견할 수 있었다.

(2) 층간변위 및 층전단력의 관계에서 기둥과 보의 실제 P, M값을 사용한 해석 1의 경우 중·상층부 이상에서는 실험결과와 유사한 거동을 나타냈으나, 저층부 특히 1층과 2층에서 실험결과보다 먼저 항복하는 현상이 나타났다. 그러나, 1층과 2층의 기둥에 대해서만 P, M값을 증가시킨 해석 2의 경우 전체적으로 실험결과와 상당히 일치하는 경향을 나타냈다. 이는 실제 모델 철근의 항복강도가 입력데이터에 사용된 값보다 훨씬 클 가능성에 기인한다고 본다. 이에 대해 현재 실험체에서 철근을 채취하여 확인중에 있다.

(3) 실험초기에는 G1보에서 소성힌지가 처음 발생했으며 점차 G2, G3보로 진행하였다. 초기 40mm까지는 주로 소성힌지가 보에서 발생하였고, 약 42mm에서는 상대적으로 약한 기둥인 CA기둥의 1층부에서 소성힌지가 형성되었다. 100mm까지 가력한 경우, 상대적으로 약한 기둥인 CA 기둥의 중간층에서 소성힌지가 형성되었다. 이는 일방향 가력실험의 손상부위와 상당히 일치하는 경향을 보이나, 실험상의 파괴모드는 해석상의 휨파괴가 아닌 접합부 전단파괴였다는 점이 다르다.

회전각의 비교결과 1층 기둥에서의 회전각은 해석 2의 경우가 실험결과에 근접하게 나타났다. 보의 경우에는 일부에서 해석 1과 해석 2가 실험결과에 근접하게 나타나고 있으나, 2층 보와 3층 보 우측 일부에서는 상당히 실험결과보다 큰 회전각을 나타내고 있음을 알 수 있다.

(4) DRAIN-2DX를 이용한 해석은 전체적인 층전단력과 층간변위 예측에는 실험결과와 상당히 잘 일치하는 결과를 보여주고 있으나 국부거동에 있어서는 상당히 큰 차이를 보여줌으로써 추후 이러한 비선형 프로그램의 사용시 그 신뢰성에 대해 보다 신중해야 한다고 생각한다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 지원에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이한선, 강귀용, 김정우, "비내진 상세를 가진 10층 철근콘크리트골조의 횡방향 가력 실험", 한국 콘크리트 학회 봄 학술발표회, 제10권 제1호, 1998. 5
2. 이한선, 강귀용, "고층철근 콘크리트 건물의 실험적 모델 해석", 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터, 1998.
3. 이한선, "구조물의 축소모델 재료에 관한 실험연구", 대한건축학회논문집 제11권 9호, 1995. 9
4. 강훈, 김상대, "중진지역의 저층 RC 건축물의 지진피해에 관한 해석적 연구", 대한건축학회 춘계학술 발표대회, 제18권 제1호, 1998. 4.
5. 김상대, 이한선, 김영문, 조순보, 우운택의 25명, "우리나라 중·저층 철근콘크리트 건축물의 지진피해 예측 및 보수보강법 연구", 건설교통부 '96 연구개발사업 최종 연차 보고서. 1997. 12
6. V. Prakash., G.H.Powell., "DRAIN-2DX BASE PROGRAM DESCRIPTION AND USER GUIDE", Report No. UCB/SEMM--93/17, November 1993.
7. F.A.Charney., "Correlation of the Analytical and Experimental Inelastic Response of a 1/5-Scale 7-Story Reinforced Concrete Frame-Wall Structure", SP-127, April 1991.
8. V.Bertero., G. Frandon., "Structural Response Modification Factors", ATC-19, 1995