

1:12축소 10층 철근콘크리트 골조-벽식 구조의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상관성

Correlation of Experimental and Analytical Inelastic Responses of
A 1:12 Scale 10-Story Reinforced Concrete Frame-Wall Structure



이한선*

Lee, Han-Seon



김상호**

Kim, Sang-Ho

ABSTRACT

Reinforced concrete structural walls are widely known to provide an efficient lateral load resistance and drift control. However, many reported researches on them are mostly limited to the RC structural walls reinforced according to seismic details. When the pushover analysis technique is used for the prediction of inelastic behavior of frame-wall structures for the seismic evaluation of existing buildings having non-seismic details, the reliability of this analysis method should be checked by the test results. The objective of this study is to verify the correlation between the experimental and analytical responses of a high-rise reinforced concrete frame-wall structure having non-seismic details by using DRAIN-2DX program[11] and the test results performed previously[1].

It is concluded that the behavior of the frame-wall model is mainly affected by the fixed-end rotation(uplift at base) and bending deformation of the wall and that the analysis with the LINKS model[10] in DRAIN-2DX describes them with good reliability.

Keywords : pushover analysis, inelastic behavior, shearwall, uplift, correlation of experiment and analysis, fixed-end rotation

* 정희원, 고려대학교 건축공학과 부교수

** 정희원, 고려대학교 건축공학과 석사과정

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보
내주시면 2001년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근콘크리트 구조용 벽체는 바람이나 지진 등의 횡력을 지지하고 수평방향의 변위를 제어하는데 있어서 매우 효과적인 구조체이다. 현재 국내에서 시공되고 있는 많은 철근콘크리트 건물이 전단벽 또는 구조용 벽체를 갖는 구조시스템을 채택하고 있다. 이들 건물은 대부분 비내진상세를 가지고 있어, 실제 지진이 발생할 때 그 반응과 피해양상이 내진상세를 가진 건물의 것과는 다르게 나타날 수 있다.

일반적으로 건물의 지진평가를 위해 일방향 가력 해석법(pushover analysis method)이 널리 사용되고 있다.⁽⁹⁾ 그러나 이러한 해석방법을 통해 국내에서 시공되고 있는 비내진상세를 갖는 건물의 내진성 평가는 거의 이루어지지 않고 있다. 더욱이 실험을 통해 이 해석방법의 신뢰성을 검증한 예도 거의 없는 실정이다.

골조-벽식 구조의 해석에서는 벽체의 지진에 대한 거동을 잘 나타낼 수 있는 해석모델의 올바른 선택이 요구된다. 구조용 벽체의 해석 모델링은 미시적 방법과 거시적 방법으로 나눌 수 있다. 미시적 방법은 벽체를 작은 유한요소로 나누어 모델링하는 것이다. 그러나 이러한 방법으로 건물 전체를 모델링하는 것은 현실적으로 비경제적이므로 부적합하다. 거시적 방법은 벽체를 등가 보

(선형)요소로 모델링하여 건물의 전체적인 비선형 거동을 살펴볼 수 있는 해석방법이며 적합한 거동 예측을 위한 여러 모델링 기법이 제안되어 왔다.^(10,13)

본 논문의 목적은 벽체에 대한 적절한 해석모델을 찾고 그 신뢰성을 확인하는 것이다. 이를 위해 10층 철근콘크리트 골조-벽식 구조에 대한 일방향 가력실험의 결과와 비탄성 해석 프로그램인 DRAIN-2DX로부터 얻어진 해석결과를 상호 비교 검토하였다.

2. 실험체 제작

2.1 실험체 선정

본 연구에 사용된 실험모델은 실제로 건축된 비내진상세를 가진 10층 철근콘크리트 건축물을 표본으로 하여 제작한 것이다. Fig. 1은 이 표본 건물의 실제 평면도이다. 이미 2개의 주요 평면 골조(모멘트-저항 골조, 조적채움벽 골조)에 대한 실험을 수행한 바 있다.^(7,8) 이 논문에서는 그림의 빗금친 골조-벽식 구조에 대해 수행한 실험과 해석에 그 범위를 국한하고자 한다. 실험체는 실험여건을 고려하여 1/12로 축소 제작되었다. Fig. 2와 4는 실험체의 각 주요 부분 상세를 나타낸 것이다. 독립기둥의 단면은 벽체의 경계요소를 이루는 기둥 중 단면이 큰 것과 동일하다.

2.2 재료

실험모델에 사용된 모델 철근은 축소모델의 상사성을 고려하여, 그 항복력이 실물 철근의 항복력의 $1/12^2$ 과 같도록 하였다. 이러한 모델 철근은 상사성을 확보하기 위해 실험실에서 이형화 및 열처리 과정을 수행하였다. Table 1은 실물 철근과 모델 철근의 강도를 나타낸 것이다.

모델 콘크리트에 사용된 골재는 축소율에 맞게 체가름 하였으며, 배합비를 달리하여 공시체를 제작하고 슬럼프 시험 및 압축강도시험을 통해 필요한 콘크리트의 물성을 얻을 수 있었다. 이때 얻어진 모델 콘크리트의 물성을 Table 2에 나타내었다.

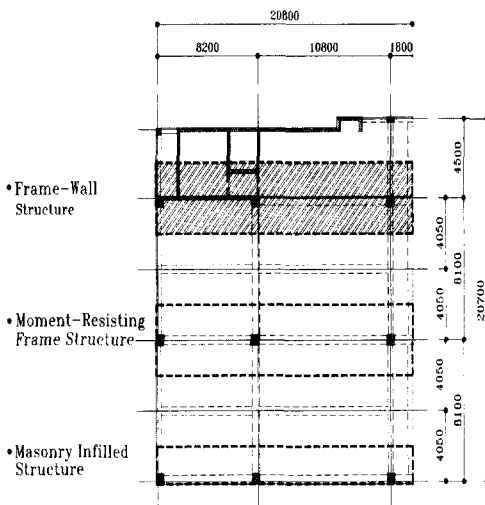


Fig. 1 Plan of the prototype (unit : mm)

Table 1 Types and strengths of reinforcement

		Prototype			1:12 Model		
		Type	Yield strength (tonf)	Ultimate strength (tonf)	Type	Yield strength (kgf)	Ultimate strength (kgf)
Columns and beams	Longitudinal bars	D25 (SD40)	24.3	32.9	D2A	161 (169)	191 (229)
		D22 (SD40)	18.6	25.2	D2B	134 (129)	195 (175)
	Hoops and stirrups	D10 (SD30)	4.4	4.3	φ1B	24 (20)	28 (30)
Wall	Horizontal and vertical bars	D13 (SD30)	2.8	4.3	φ1A	35 (31)	44 (44)

* The values in () indicate the ideal strengths derived from those obtained in prototype by similitude law.

Table 2 Properties of model concrete

	W/C (%)	Water (kg)	Cement (kg)	Fine aggregate (kg)	Coarse aggregate (kg)	Max. aggregate size (mm)	Slump (cm)	Super-plasticize (g)	Cylinder strength* (kgf/cm ²)	
									Moisture curing (28 days)	Field curing (60 days)
Model Concrete	57	10.0	11.4	13.7	16.0	10	11**	114	269	271

* Mean value of compressive strength of model concrete based on φ 5cm×10 cm cylinder

** Slump value based on 15cm-height model slump cone

Table 3 Spring properties used of base of shearwall in the LINKS of DRAIN-2DX model

	Element	Spring ID	AREA (mm ²)	E _c or E _s (kgf/cm ²)	Strain hardening ratio	Yield strength (kgf/cm ²)	
						Compression	Tension
Concrete	left boundary element	Kc1	3,828	2,471	0.0	0.2	2.7
	right boundary element	Kc2	6,264	2,471	0.0	0.2	2.7
	web element	Kc3	4,216	2,471	0.0	0.2	2.7
Steel	left boundary element	Ks1	82	2.1×10 ^b	0.01	42	42
	right boundary element	Ks2	113	2.1×10 ^b	0.01	51	51
	web element	Ks3	17	2.1×10 ^b	0.01	44	44

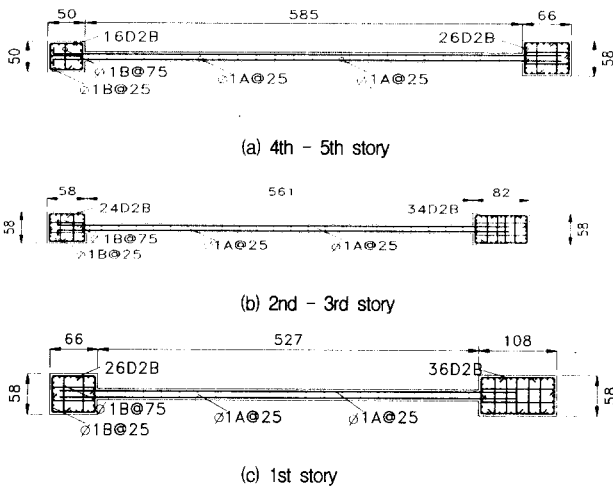


Fig. 2 Section of wall elements (unit : mm)

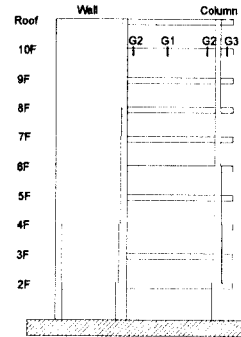


Fig. 3 Member notation

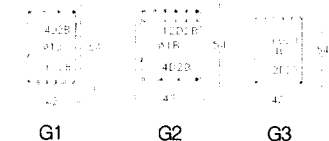


Fig. 4 Section of beam elements (unit : mm)

3. 실험

각 층에 대해 구한 층지진하중의 비율에 따라 휘플트리(whiffle tree)를 구성하고, 변위제어방식으로 최상층의 최대변위가 측정가능변위(100 mm)에 이를 때까지 하중을 가하였다. 또한 벽체와 기둥의 상부에는 각각 2.39 tonf와 1.19 tonf의 축력을 주었다.

각 층에 변위계를 설치하여 횡변위를 측정하였으며 벽체의 전단변형, 휨변형, 미끌어짐, 들뜸과 보와 기둥의 국부변형 등을 측정하였다. 자세한 실험결과는 참고문헌 [1]을 참조하기 바란다.

4. 해석

DRAIN-2DX를 사용하여 실험과 동일한 조건으로, 최상층변위가 100 mm에 도달할 때까지, 비선형 정적해석을 수행하였다.

4.1 모델 재료

해석모델에 사용된 콘크리트와 철근의 강도는 Table 1과 2에 제시된 재료실험의 평균값을 사용하였다. 그러나, 그 이외의 경우에는 통상적으로 사용되는 값을 사용하였다. 콘크리트와 철근의 탄성계수는 $E_c = 15,000\sqrt{f_{ck}} = 247,100 \text{ kgf/cm}^2$ 와 $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 를 사용하였다.

4.2 구조물 모델

거시적 방법으로 벽체를 모델링할 때는 보나 기둥과 같이 보(선형) 요소를 사용한다. 그러나 이와 같은 모델은 벽체의 들뜸을 모사할 수 없다. 벽체의 들뜸은 벽체와 기초의 접합부에서 철근의 미끌어짐이나 늘어남으로 인해 강체 회전각(rigid-body rotation) 혹은 고정단 회전각(fixed-end rotation)을 발생시킨다. 들뜸을 고려하기 위해 Charney⁽¹⁰⁾는 DRAIN-2DX를 사용한 LINKS 모델을 제안하였다. 본 논문에서는 벽체를 DRAIN-2DX의 *Plastic Hinge Beam-Column Element (TYPE-02)*를 사용하여 모델링할 때(해석 1 또는 A1)와 LINKS 모델을

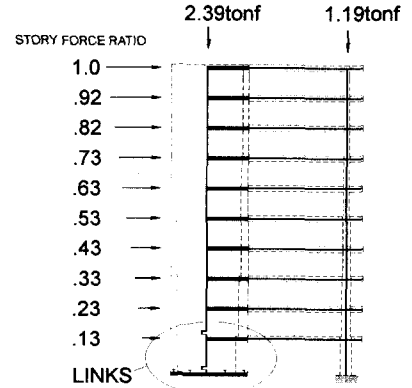


Fig. 5 Analysis Model (A2)

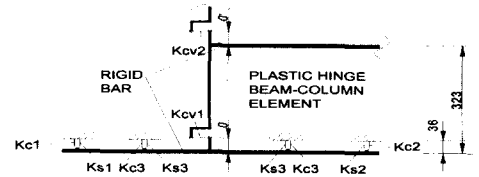


Fig. 6 LINKS model (unit : mm)

벽체 하부에 추가적으로 사용하여 모델링할 때(해석 2 또는 A2)를 서로 비교하였다.

Fig. 5와 6은 해석 2에 사용한 LINKS 모델을 나타낸 것이다. LINKS 모델은 Fig. 5에서와 같이 기초와 강체를 연결하는 bi-linear한 하중-변위 관계를 가지는 일련의 비선형 스프링으로 구성된다. Table 3은 LINKS 모델에 사용된 각 스프링의 물성을 나타낸 것이다. 스프링의 길이는 36 mm로 하였는데, 이 길이는 실제 축소 모델 실험에서 들뜸을 측정하기 위해 부착한 측정장치와 기초면 사이의 거리와 동일하게 한 것이다.

5. 해석과 실험의 상관성

Fig. 7은 실험결과 중 밀면전단력과 옥상층 변위와의 관계와 함께 항복점과 파괴점을 정의하여 나타내었다. 본 실험모델의 항복변위와 항복밀면전단력은 각각 10 mm, 2.3 tonf이며, 파괴변위와 파괴밀면전단력은 각각 72 mm, 4.3 tonf임을 알 수 있다. 파괴변위에 대한 항복변위의 비를 변위연성비라 정의하면 본 실험체는 그 값이 7.2로서, 매우 연성적인 거동을 보임을 알 수 있다.

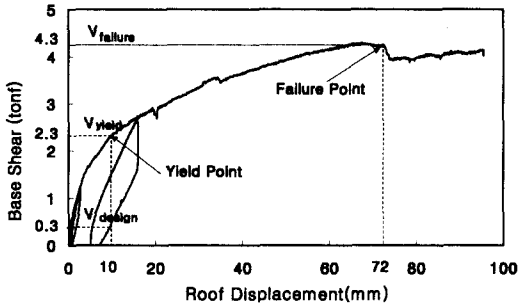


Fig. 7 Relation of base shear and roof displacement

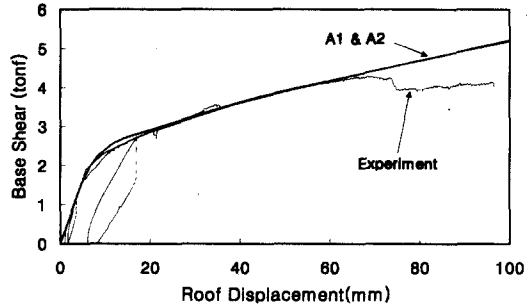


Fig. 8 Comparison of experiment versus analysis

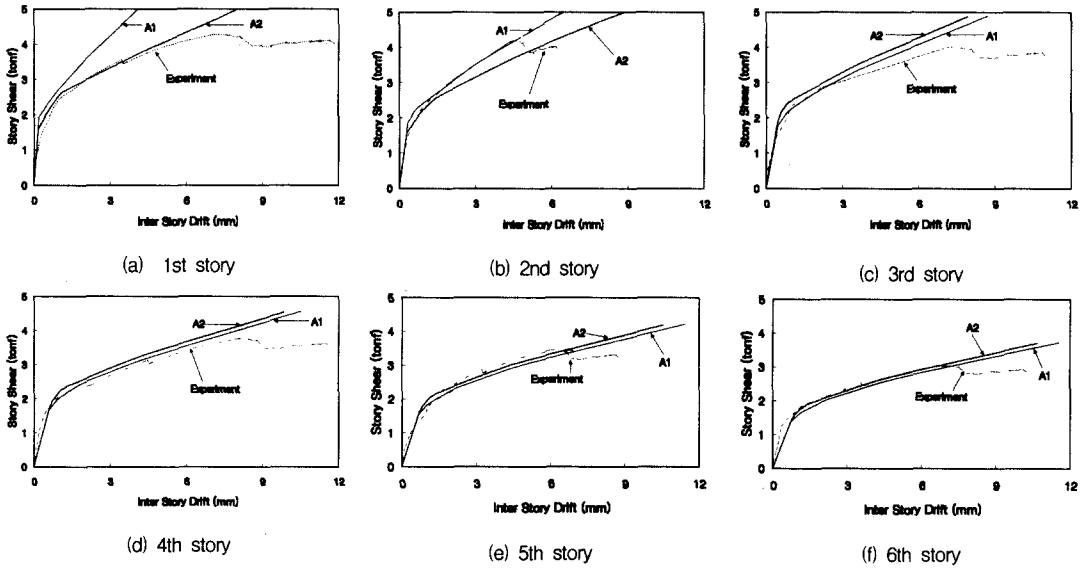


Fig. 9 Story shear versus inter story drift

Fig. 8은 밀면전단력과 옥상층변위와의 관계에 대해 해석결과와 실험결과를 비교한 것이다. 여기서 해석 1과 해석 2의 결과가 실험결과와 일치하도록 하기 위해, 벽체의 항복 후 강성을 각각 초기 강성의 7%와 10%로 가정하였다.

5.1 층전단력과 층간변위의 관계

Fig. 9는 1층에서 6층까지 층전단력과 층간변위와의 관계를 나타낸 것이다. 전체 옥상변위와 밀면전단력의 경우, 해석 1과 해석 2가 비슷한 결과를 나타내는데 반하여, 해석 1에서 구한 1, 2층의 층간변위가 해석 2보다 훨씬 작게 나타남을 알 수 있다.

5.2 벽체의 소성변형

횡하중을 받는 벽체의 거동은 크게 휨과 전단에 대한 거동으로 나눌 수 있다. 휨에 의한 변형은 고정단 회전각(들뜸 회전각)과 순수 휨변형이 있다. 전단에 의한 변형은 미끌어짐과 순수 전단 변형이 있다. 벽체의 소성변형은 대부분 벽체의 하부에 집중되어 나타난다. 따라서 각 변형의 측정은 벽체의 밀면과 벽체의 폭과 같은 높이의 위치 사이에서 이루어졌다. Fig. 10은 실험결과로부터 얻은 미끌어짐, 순수 전단변형, 고정단 회전각(들뜸 회전각), 순수 휨변형에 의한 최상층 변위를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 δ_{rest} 는 옥상층변위에서 앞의 네 개의 값을 뺀 것이다.

Fig. 10으로부터 실험체의 거동이 전단거동의 영향이 적은 반면, 휨에 의해 지배됨을 알 수 있다. 특히 벽체 밀면의 들뜸이 옥상층 변위에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

5.2.1 휨변형

Fig. 11은 전체 옥상변위에 대한 각층 변위의 비율을 표현한 것이다. 좌하와 우상을 잇는 선이 직선에 가까운 것은 대부분의 변형이 1층 또는 밀면에서 발생하였으며 상부층은 단지 강체거동(Rigid Body Motion)을 하였다는 것을 의미한다. 이 그림으로부터

터 초기 단계에서 이미 대부분의 변형이 1층에 집중되었으며 옥상층 변위가 커짐에 따라 그 추세가 더욱 강해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 12은 밀면전단력과 휨변형과의 관계를 나타낸 것이다. 해석 2에서는 휨변형을 다시 Fig. 13과 Fig. 14와 같이 각각 밀면 전단력과 들뜸 회전각 및 순수 휨변형과의 관계로 나누어 나타낼 수 있다. 이때 들뜸 회전각 변형 예측에서 항복 회전각과 항복 후 거동을 정확하게 모사하지는 못하지만 비교적 만족스러운 결과를 주는 것을 알 수 있다.

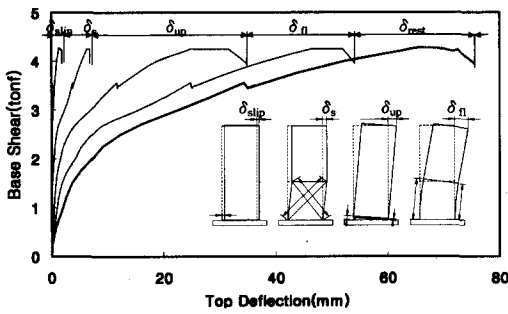


Fig. 10 Base shear vs top deflection

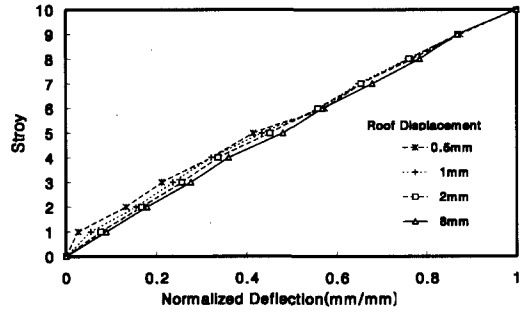


Fig. 11 Deflection profiles

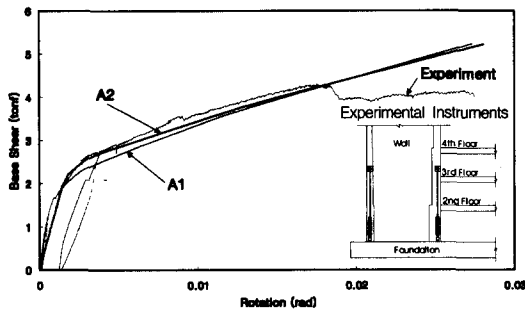


Fig. 12 Flexural bending rotation

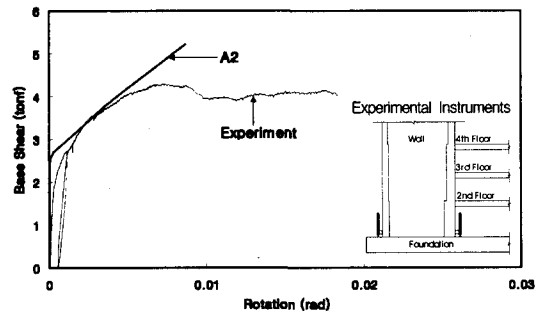


Fig. 13 Fixed-end(Uplift) rotation

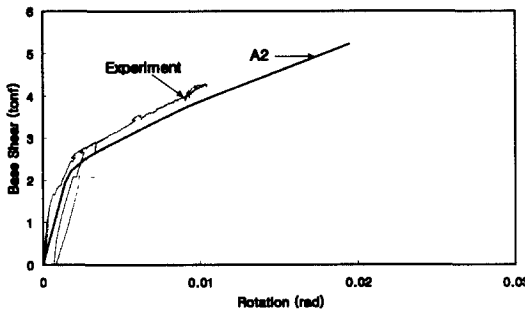


Fig. 14 Pure bending rotation

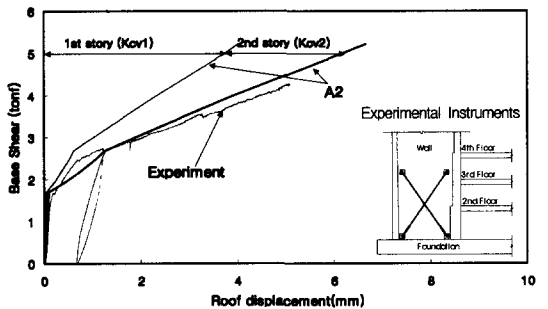


Fig. 15 Shear deformation

5.2.2 전단변형

DRAIN-2DX의 TYPE02요소는 탄성 전단변형만을 고려한다. 해석 2에서는 1층과 2층 벽체의 전단변형을 고려하기 위해 bi-linear한 하중-변형관계를 갖는 수평스프링(Kcv1, Kcv2)을 사용하였다. 스프링의 초기강성은 GA/L로 가정하고, 항복 후 강성은 초기값의 2%로 가정하였다. 또한 항복하중은 실험에서 얻은 결과로부터 1.5 tonf으로 가정하였다. Fig. 15는 밀면전단력과 전단변형에 의해 발생한 최상층변위의 관계를 나타낸 것이다. 벽체의 미끌어짐은 무시할 수 있을 정도로 작게 나타나 본 해석 모델에서는 이를 고려하지 않았다.

5.3 회전각의 비교

각 부재의 소성힌지 부위에서 소성회전각은 참고문헌 [6]과 같이 계산할 수 있다. Fig. 16은 주요 부재의 단부에서 밀면전단력과 회전각의 관계에 대해 실험값과 해석값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 해석 1보다는 해석 2의 결과값이 실험값에 더욱 가까운 것을 알 수 있다. 골조-벽체 구조의 전체적인 거동이 벽체의 거동에 의해 지배되기 때문에 벽체의 거동을 정확히 모사할 수 없는 해석 1의 결과는 구조물의 일부

에서 실제 거동과 차이를 보일 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

1:12 축소 10층 R.C. 골조-벽식 구조의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상관성 비교에 의한 결론은 다음과 같다.

- 1) 일방향 횡가력 실험에서 골조-벽식 구조의 전체적인 거동은 대체로 휨에 의하여 지배되었다.
- 2) 벽체에서 대부분의 소성변형은 실험체의 1층에 해당하는 하부에 집중되어 나타났으며, 특히 들뜸 회전각이 최상층 변위에 미치는 영향이 크게 나타났다.
- 3) 벽체를 보(선형) 요소로만으로 모델링할 때는 벽체 밀면에 발생하는 들뜸 회전각을 모사할 수 없다.
- 4) Charney⁽¹⁰⁾가 제안한 LINKS 모델을 사용하여 들뜸 회전각은 물론 골조-벽식 구조물의 전체적인 거동을 비교적 정확히 예측할 수 있었다.

본 연구의 해석결과는 부재 및 구조물의 최대 강도 및 최대변형, 그리고 파괴시점을 정의할 수

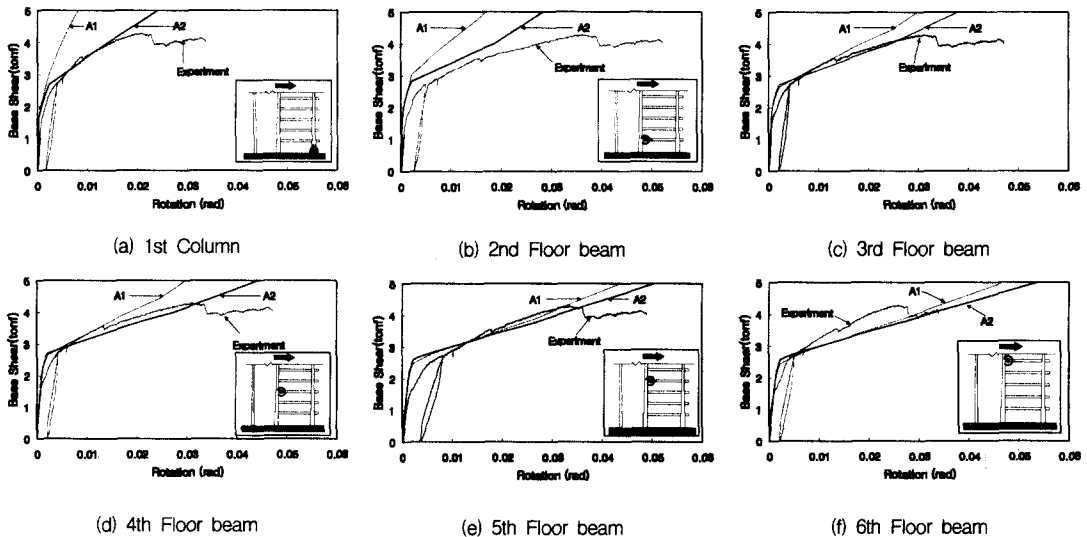


Fig. 16 Base shear versus rotation

없었다. 추후 이에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형 구조시스템 연구 센터의 지원에 의한 것이며, 이에 감사드립니다

참고문헌

1. 이한선, "고층철근콘크리트 건축구조물의 실험적 모델해석," 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터, Report No. STRESS-99-22, 2000.2.
2. 이한선, 김정우, "1:12축소 10층 조적채움 R.C. 골조의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상관성 연구," 한국콘크리트학회논문집, 제12권 1호, pp. 101-112, 2000. 2.
3. 이한선, 김정우, 김상호, "10층 조적채움 R.C. 골조의 비선형 거동에 대한 해석과 실험의 상관성 연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제11권 2호, pp. 487-490, 1999. 11.
4. 이한선, 김정우, 김상호, "비내진 상세를 가진 10층 철근콘크리트 조적채움 골조 일방향 가력 실험," 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제11권 1호, pp. 513-518, 1999. 5.
5. 이한선, 강귀용, "비내진 상세를 가진 1:12축소 10층 R.C. 골조의 비선형 거동에 관한 실험 연구," 콘크리트학회지, 제11권 1호, pp.255-266, 1999. 2
6. 이한선, 강귀용, "비내진 상세를 가진 1:12축소 10층 R.C. 골조의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상관성," 콘크리트학회지, 제11권 1호, pp. 267 - 277, 1999. 2.

7. 이한선, "고층철근콘크리트 건축구조물의 실험적 모델해석," 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터, Report No. STRESS-98-22, 1999.2
8. 이한선, "고층철근콘크리트 건축구조물의 실험적 모델해석," 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터, Report No. STRESS-97-22, 1998.2
9. ATC, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Volume 1.2," ATC-40, Seismic Safety Commission, November 1996
10. Charney, F.A., "Correlation of the Analytical and Experimental Inelastic Response of a 1.5-Scale Seven-Story Reinforced Concrete Frame-Wall Structures," ACI, SP.127-8, April 1991
11. Prakash, P. and Powell, G.H., "DRAIN-2DX Base Program Description and User Guide Version 1.10," Report No. UCB/SEMM -93/17, November 1993.
12. Vulcano, A., Bertero, V. V. and Colotti, V., "Analytical Modeling of R/C Structural Walls," Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VI, Aug 2-9, 1988.
13. Vulcano, A., Bertero, V. V., "Analytical Models for Predicting the Lateral Response of RC Shear walls: Evaluation of Their Reliability," College of Engineering University of California at Berkeley, Report No. UCB/EERC-87/19, November 1987.
14. Wallace, Benjamin J. and Krawinkler, Helmut, "Small-Scale Model Experimentation on R/C Assemblies U.S.-Japan Research Program," Department of Civil Engineering Stanford University, Report No. 74, June 1985.

요 약

철근콘크리트 구조용 벽체는 횡력을 지지하고 수평방향의 변위를 제어하는데 있어서 매우 효과적인 구조체이다. 이러한 벽체에 대한 많은 연구가 이루어져 왔으나, 그 대부분이 내진상세를 가진 구조물에 국한된 것이었다. 따라서, 비내진 상세를 가진 건물의 지진평가에서 구조물의 비탄성 거동을 예측하는데 일방향 가력 해석기법을 사용할 경우, 실험을 통해 그 신뢰성을 검토해야 할 필요가 있다. 본 연구의 목적은 고층 R.C. 골조-벽식 구조에 대해 실험과 해석의 상관성을 검증하는데 있다. DRAIN-2DX⁽¹¹⁾를 이용하여 해석한 결과와 이미 수행된 1:12축소 10층 철근콘크리트 골조-벽식 구조의 실험결과를 서로 비교, 검토함으로써 그 응용상의 문제점과 신뢰성을 확인하였다.

본 연구는 실험과 해석의 상호 비교결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 벽체의 거동은 고정단 회전각, 순수 휨변형 및 전단변형에 영향을 받으며, Charney⁽¹⁰⁾가 제안한 LINKS 모델을 사용하여 비교적 만족스러운 해석결과를 얻을 수 있다.

(접수일자 : 2000. 9. 21.)