

확률론적 지진하중에 의한 모멘트 골조의 동적거동평가

Evaluation of Dynamic Behavior of moment resisting frame under probabilistic ground motions

권 오 성* 한 상 환**
Kwon, Oh-Sung Han, Sang Whan

ABSTRACT

Base shear and roof drift relation was acquired from experiment of 3 story ordinary moment resisting frame which was designed using gravity loads. To evaluate the dynamic behavior of the frame, analytical model was generated from experimental result. Dynamic analysis was performed using the analytical model subjected to earthquake ground motions with 500, 1000, and 2400 years of return period. And capacity spectrum method was adopted to find the performance points of the frame. Both dynamic analysis and CSM showed that the performance of the frame meet the life safety objectives suggested by FEMA 273 and ATC 40.

1. 서 론

UBC 1997, NEHRP 1997 기준에서는 철근 콘크리트 구조물을 지역 및 구조물의 중요도에 따라 보통모멘트골조, 중간모멘트골조, 특수모멘트골조로 설계하도록 되어 있다. 이러한 분류에 의하면 우리나라에서는 대부분의 철근 콘크리트 구조물이 보통 모멘트골조로 설계된다. 그리고 국내 기준에는 6층 이상의 구조물이 지진하중에 의한 구조 안전성을 검토 받도록 되어 있기 때문에 대부분의 저층 구조물은 중력하중 만으로 설계된다. 현행 설계 기준은 반응수정계수 R을 적용하여 구조물의 비탄성 거동을 허용하고 있다. 이러한 구조물의 비탄성 거동을 파악하기 위한 방법으로 실험적, 해석적 방법이 있다. 실험적 방법에는 기둥, 보, 접합부 등의 부재의 성능평가 실험, 구조물 전체를 이용한 골조의 성능평가 실험 등이 있으며, 해석적 연구에는 부재를 하나의 비선형 요소로 두고 해석하는 방법과, 각 부재를 매우 작은 요소로 나누어 해석하는 유한요소법 등이 있다.

본 연구에서는, 중력하중만으로 설계된 보통모멘트골조를 1:3 규모의 축소모델 준정적실험을 통해 구조물의 보유능력을 파악한 후 이를 이용하여 해석 모델을 만들었다. 해석모델을 이용한 동적해석과 능력스펙트럼법을 이용하여 주어진 지진하중에 대한 골조의 내진성능수준을 평가하였다.

* 정회원, 한양대 건축공학과, 석사과정

** 정회원, 한양대 건축공학과, 조교수

2. 골조 실험 및 결과

그림 1과 같은 평면과 입면의 사무실 용도 골조를 ACI 318-99 규준에서 정의하는 보통모멘트골조 방식으로 설계하였다. 대상 골조는 자중을 포함한 포함한 고정하중 0.53tonf/cm^2 과 적재하중 0.25tonf/cm^2 에 대하여 설계하였으며, 사용재료는 보통포틀랜드 시멘트($f_{ck}=0.24\text{tonf}$)와 D19, D10 철근을 사용하였다. 하나의 기둥열에 대한 1:3 축소 모델을 제작하여 변위 제어를 통한 준정적 실험을 수행하였다.

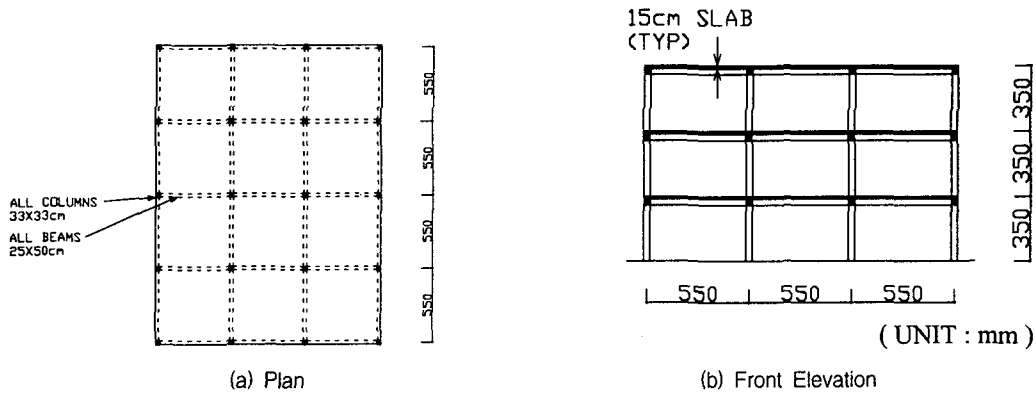


그림 1. 대상건물

본 연구에서 선정된 3층 건물과 같은 저층건물의 경우 등가정적해석에서의 층지진력이 역삼각형 형태로 건물에 작용하며, 이때 발생하는 층변위 또한 층지진력의 분포형태와 유사한 역삼각형 형태이다. 따라서 지붕층의 변위각을 기준으로 변위형태가 역삼각형을 유지하도록 3개의 가력기(actuator)를 동시에 변위 제어하며 가력하였다.

준정적 실험을 통한 1층 전단력과 층간 변위각은 그림 2와 같다. 최대내력의 90%에 해당하는 강도에서 평가된 최대변위와 최대내력의 75%에서 평가된 할선강성(secant stiffness)에 의한 항복변위 및 변위 연성비(displacement ductility ratio)가 표 1과 그림 3에 나타나 있다. 구조물의 변위 연성비는 5.64로 일반적인 RC구조물 보다 크게 나왔으나 이는 항복 변위의 계산 방법에 따라 차이가 클 것으로 사료된다.

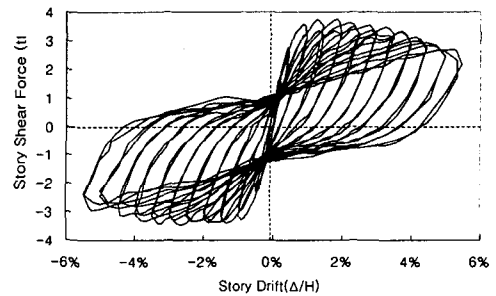


그림 2. 실험체의 1층 변위각 - 층 전단력 곡선

표 1. 실험체의 변형능력 지표

구분	최대하중 V_{max} (t)	항복변위각 Δ_y (%)	최대변위각 Δ_{max} (%)	변위 연성비 μ_d
정가력	3.75	0.64	3.61	5.64

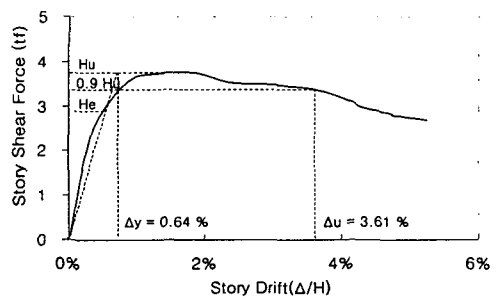


그림 3. 실험체의 최대 변위 및 항복 변위의 계산

3. 구조물의 해석적 모델

구조물의 동적 거동을 해석적으로 평가하기 위해 실험으로부터 얻어진 구조물의 하중-변위각 관계로부터 해석 모델을 제시하였다. 실험 모델은 1:3의 축소 모델로 제작 실험되었기 때문에 하중-변위각 관계를 설계된 구조물의 하중-변위각 관계로 환산하였다. 설계된 구조물과 실험 모델의 철근과 콘크리트의 응력-변형률 곡선이 유사하였으므로 진 모델(true replica)의 상사법칙(similitude law)을 적용하였다.

해석 모델의 각 부재는 IDARC 5.0에서 계산된 부재의 하중-변위 관계를 적용하였다. IDARC 5.0에서 계산된 부재의 하중-변위 곡선을 검증하기 위해 수정된 압축장 이론(modified compression field theory)을 적용한 단면 해석 프로그램인 Response 2000과 단면해석 결과를 비교하였다. 1층 내부 기둥에 대한 모멘트 곡률 관계는 그림 4와 같아 두 프로그램이 유사한 강도와 강성을 보여준다. 모든 부재의 하중-변위 관계는 IDARC 5.0에서 생성한 결과를 적용하였다. 단면 해석에 사용한 철근과 콘크리트의 재료적 성질은 표 2와 같다.

보는 슬래브의 유효폭을 고려하여 T형보로 모델링하였다. 실험 모델과 해석 모델의 강도저하, 강성저하, 에너지 소산 능력 등이 일치하도록 프로그램내의 계수를 조정하였다. 실험시 가력한 것과 같은 방법으로 변위 제어를 이용하여 해석 모델을 해석하였을 때의 층 전단력-층간 변위의 관계는 그림 5과 같다.

실험 모델과 해석 모델에서 소산되는 에너지는 그림 6과 같다. 그림 6으로부터 18 사이클(지붕층 변위각 4%)까지는 해석 모델과 실험 모델의 에너지 소산 능력이 95% 이내로 해석 모델이 실험 모델의 동적 특성을 잘 반영한다고 할 수 있다.

표2. 해석 모델에 사용된 재료의 물성

주근(D19)	f_y (kgf/cm ²)	E_s (kgf/cm ²)	ϵ_{sh}	E_{sh} (kgf/cm ²)	f_{su} (kgf/cm ²)	ϵ_{su}
		4000	1.988×10^6	0.030	1.42×10^4	5035
콘크리트	f'_c (kg/cm ²)	ϵ_c	E_c (kg/cm ²)	ϵ_u		
	240	0.003	2.3×10^5	0.02		

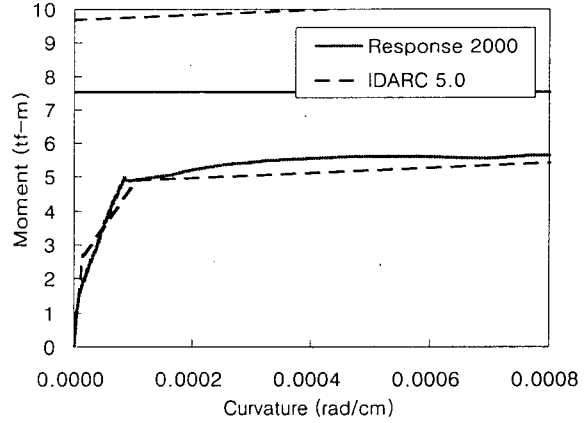


그림 4. 1층 내부 기둥의 모멘트-곡률관계

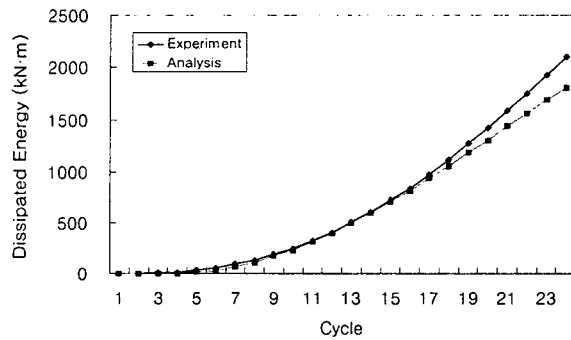


그림 6. 소산된 에너지

4. 지진 하중의 산정

구조물의 동적 해석 및 능력스펙트럼법을 이용한 성능점을 찾기 위해 사용된 지진 기록은 U.S. Geological Survey(1992)의 CD-ROM에서 수집된 S1지반에 대한 10개의 지진기록을 사용하였다. 재현주기별 위험도계수를 사용하여 재현주기 500년, 1000년, 2400년에 대하여 PGA를 각각 0.11g, 0.154g, 0.22g로 정규화하였다. 사용된 지진 하중의 응답 스펙트럼 및 설계 응답스펙트럼은 그림 7과 같다. 선정된 지진 목록은 표 3과 같다.

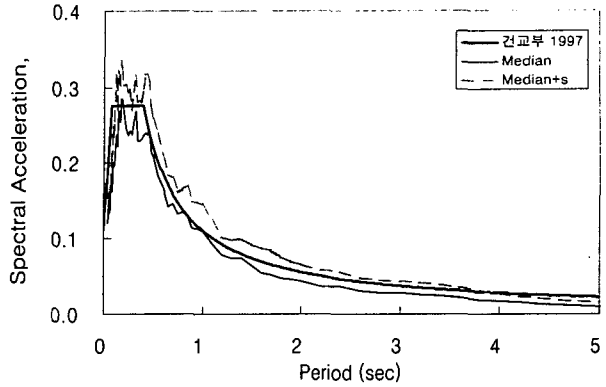


그림 7. 재현주기 500년 지진기록 가속도 스펙트럼

표 3. 선정된 지진기록 목록(S1)

Event Name	Station Name	Date	M	Comp	PGA	PGV	PGD
Whittier	Pacoima-Kagel Canyon	01/10/87	6.1	90	154.9	7.75	-1.03
Imperial Valley	El Centro	18/05/40	6.7	NS	-312.4	-36.07	-21.20
Mammoth Lakes	Long Valley Dam, Right Crest C14	25/05/80	6.1	90	465.8	-34.45	5.76
Mammoth Lakes	Long Valley Dam, Left Crest	25/05/80	6.1	90	-134.7	9.50	-2.70
Mammoth Lakes	Long Valley Dam, Bed Rock	25/05/80	6.1	90	-66.1	-6.15	-2.93
Mammoth Lakes	Long Valley Dam, Right Crest	25/05/80	6.1	90	191.6	-18.39	5.73
Mammoth Lakes	Long Valley Dam, Left Abutment	25/05/80	6.1	0	-118.9	-15.12	5.67
Taft	Taft Lincoln School Tunnel	21/07/52	7.7	S69E	-175.9	17.64	10.14
Michoacan	Caleta De Campo	21/08/85	8.1	N90W	81.4	6.36	-1.60
Michoacan	Caleta De Campo	21/08/85	8.1	N90W	161.8	18.12	-11.67

PGA : cm/sec² PGV : cm/sec PGD : cm

5. 동적해석

IDARC 5.0을 이용하여 선정된 지진 하중 30개에 대하여 동적 해석을 수행하였다. 최대 지붕층 변위각에서의 밀면 전단력을 측정하여 500년, 1000년, 2400년 재현주기를 갖는 지진하중에 의한 구조물의 거동을 파악하였다. 골조는 대부분의 지진에 의한 최대 변위가 탄성 범위 내에 있었다. 계산된 최대 지붕층 변위 및 밀면 전단력은 그림 9 및 표 4와 같다.

표 4. 동적해석과 능력스펙트럼에 의한 지붕층 최대변위 비교

		재현주기 500년	재현주기 1000년	재현주기 2400년
동적해석	Median, cm	3.60	3.98	6.70
	Stdv, cm	1.57	2.48	2.36
능력스펙트럼법, cm		3.52	4.04	4.96
오 차 (%)		2.4	-1.4	35

6. 능력스펙트럼법

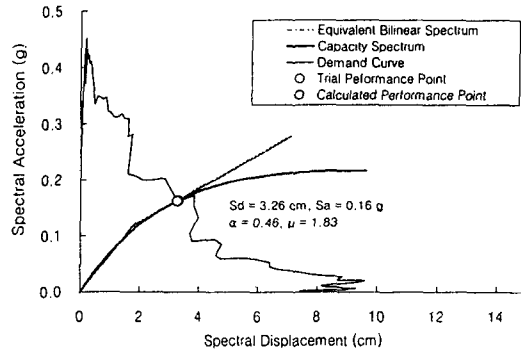
능력스펙트럼법(CSM, Capacity Spectrum Method)에 의해 각 성능 수준에 요구되는 지진하중에 대하여 내진 성능평가를 수행하였다.

실험모델의 지붕층 변위각-밀면 전단력의 실험 결과에 상사성의 법칙을 적용하여 실제 규모 골조의 하중-변위 관계를 얻었다. 이를 1차 모드에 의한 영향만 고려한 변위 및 하중으로 변환한 후 하중을 응답 가속도 값으로 변환하여 가속도-변위의 그래프로 나타내었다. 구조물의 성능점을 가정한 후 구조물의 지붕층 변위각-하중 관계를 등가의 에너지 소산 능력을 갖는 이선형 모델로 치환하였다. 이선형 모델과 같은 강성 및 변위 연성비를 갖는 단자유도 시스템의 동적해석으로부터 요구스펙트럼을 생성하였다. 생성된 요구스펙트럼과 능력스펙트럼의 교점과 가정된 성능점과의 오차를 계산하였다.

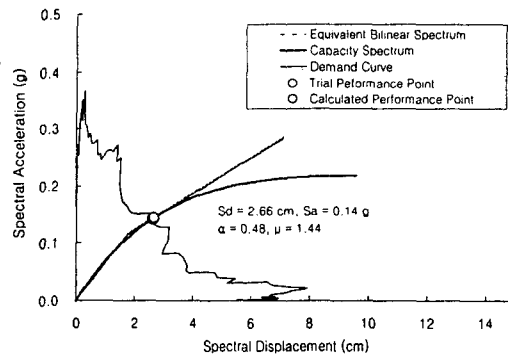
이러한 과정을 반복하여 가정된 성능점과 계산된 성능점이 5% 범위 내에 들 때까지 반복하였다. 각각의 재현주기에 대하여 찾은 성능점은 그림 8과 같다.

7. 구조물의 허용제한

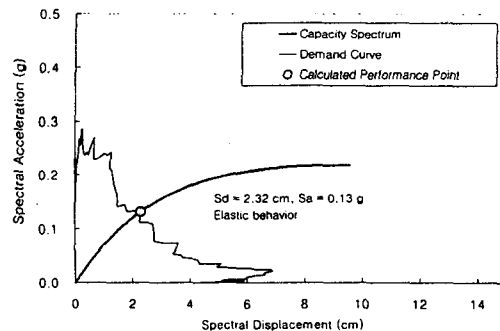
FEMA 273에서는 인명안전, 붕괴 수준에 대하여 각각 변위 4%, 2%의 제한을 두고 있다. 이 제한치와 동적 해석을 통해 얻은 최대 지붕층 변위, CSM에 의해 얻은 성능점을 그림 9에 나타내었다.



(a) 2400년 재현주기에서의 성능점



(b) 1000년 재현주기에서의 성능점



(c) 500년 재현주기에서의 성능점

그림 8. 재현주기별 성능점

8. 결 론

실험으로부터 얻어진 구조물의 하중-변위 관계를 바탕으로 구조물의 해석 모델을 생성하여 동적해석을 수행하였고, CSM을 이용하여 성능점을 찾았다. 두 결과를 변위 제한치와 비교한 결과 다음을 알 수 있었다.

- (1) 해석 모델은 재현주기 500년, 1000년, 2400년의 지진에 대하여 각각 3.6cm, 3.98cm, 6.70cm의 최대 변위를 보였다. 표준 편차는 1.57~2.36 cm로 매우 분산되어 있음을 알 수 있다.
- (2) 표 4로부터, CSM에 의해 얻어진 성능점과 비선형 동적해석을 이용하여 얻어진 구조물의 최대 변형은 재현주기 500년, 1000년의 지진에 대해서는 유사한 값을 가지며 재현주기 2400년의 지진에 대해서는 35%의 오차를 보였다.
- (3) 보통 모멘트 골조는 FEMA 273에서 제안하는 인명안전수준, 붕괴방지수준의 변위 제한치를 500년, 1000년, 2400년의 재현주기를 갖는 지진에 대하여 모두 만족하였다. 이로부터 적절한 상세로 설계된 보통 모멘트 골조는 국내의 설계지진 및 최대지진에 대하여 안전함을 알 수 있다.

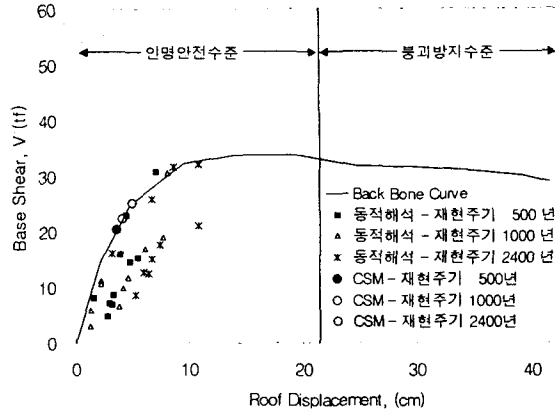


그림 9. 동적해석 및 CSM에 의한 구조물의 성능점과 변위 제한치의 비교

감사의 글

이 연구는 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 지원으로 수행된 과제로 이에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. Applied Technology Council, "ATC 40 : Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Vol. 1 & Vol. 2," California Seismic Safety Commission No. SSC 96-01, Nov. 1996.
2. Building Seismic Safety Council, "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management, Report No. FEMA 273, Washington D.C. Oct. 1997.
3. Bae, S.J. "Seismic Performance Evaluation of R/C Buildings Designed in the Ordinary Moment Frame", 석사학위논문, 한양대학교 대학원, Jun, 2000.
4. 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.
5. 건설교통부, "건축물의구조기준등에관한규칙", 건설교통부령제235호 제정 2000. 5.22
6. 건설교통부, "내진설계기준연구(II)", 1997. 12.
7. 배성진, 한상환, 이리형 "철근콘크리트 보통모멘트골조 건물의 기둥에 대한 구조 성능 평가", 2000년도 춘계학술발표대회 논문집, 한국콘크리트학회 제12권 1호, 440-445, 2000. 5. 20
8. 이한선, 장진혁, "철근콘크리트 축소모델의 부재거동 상사성에 관한 연구", 콘크리트학회논문집 제8권 3호 1996.2.
9. 홍두표, 한상환, "수정된 CSM을 이용한 보통모멘트골조의 내진성능평가 비교," 대한건축학회 추계 학술발표대회 논문집, 제 20권 제 2호, pp95-98, 2000.10