

능력스펙트럼법을 이용한 비정형 건축구조물의 2차원 지진성능평가 방법 연구

Study on 2-D Seismic Evaluation of Asymmetric Buildings Using Capacity Spectrum Method

김상호*
Kim, Sang-Ho

이한선**
Lee, Han-Seon

ABSTRACT

In the evaluation of asymmetric buildings, torsional effects should be considered by three-dimensional analysis. However, this analysis is time-consuming and requires great efforts. The goal of this study is to give a comprehensible and simple procedure in the seismic evaluation by using two-dimensional analysis of asymmetric buildings so that practicing engineers can easily adapt it to their work.

1. 서론

수평 비정형 건축구조물의 지진성능을 평가하기 위해서는 우발편심모멘트를 포함한 비틀림의 영향을 고려하여야 하며, 이를 위해서는 3차원 해석을 수행하여야 한다. 그러나 이러한 방법은 많은 시간과 노력뿐만 아니라, 이를 위한 3차원 해석프로그램을 필요로 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, 2차원 비선형 해석프로그램으로 널리 사용되는 *DRAIN-2DX*^{(4),(5)}를 이용하면서도 3차원 비정형성의 영향을 고려할 수 있는 2차원 내진성능평가 방법을 제시하고자 한다.

2. 해석방법

비정형 건축구조물에 대해 2차원 해석을 수행할 경우, 비틀림의 영향을 고려할 수 있는 방법을 사용해야 한다. ATC-40⁽¹⁾에서는 임의 층의 어떤 부분에서의 최대변위가 그 층의 질량 중심에서의 변위의 120%를 넘을 때 다음과 같은 방법을 제시하고 있다. 즉, 3차원 선형 정적해석이나 선형 동적해석으로부터 최상층의 질량중심(Center of Mass, 이후 CM)의 변위에 대한 그 층의 최대 변위의 비를 구하고, 능력곡선의 각 점의 변위를 이 비에 비례하게 증가시켜 새로운 능력곡선을

* 고려대학교 건축공학과, 석사

** 고려대학교 건축공학과 부교수, 정회원

구하는 방법이다. 본 연구는 이와 같은 방법을 적용하여, 고려하고 있는 비정형 건물에 적용하고자 한다.

3. 해석 모델

콘크리트의 강도는 $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ 를 사용하였고, 철근의 강도는 HD16이상에 대하여 $f_y = 4,000 \text{ kg/cm}^2$ (SD 40), D13이하에 대하여 $f_y = 3,000 \text{ kg/cm}^2$ (SD 30)을 사용하였다.

본 연구에서 선택한 대상 건물은 10층 RC 골조 시스템 구조이며, 우리나라에서 지어지고 있는 많은 건물에서 찾아볼 수 있듯이, 한쪽 구석으로 계단실을 둘러싼 벽체가 있어 수평 비정형의 평면을 가지고 있다(Fig. 1). 건물의 남북에 면한 벽면은 조적으로 채워져

있으며, 해석모델에서는 등가스트럿으로 치환하였다. 그러나 동서에 면한 벽면은 반만이 조적으로 채워져 있어, 이를 고정하중으로만 고려하였을 뿐 횡력에 대한 저항력은 없는 것으로 가정하였다. Fig. 2는 2차원 일방향 가력해석에 사용된 해석모델을 나타낸 것이다.

범용 구조해석 프로그램인 *GTSTRUDL 25*⁽²⁾를 사용하여 3차원 탄성해석을 수행하였다. Table 1은 최상층의 질량중심의 변위에 대한 최대변위의 비를 구하는 과정을 나타낸 것이며, 이때 UBC-97⁽³⁾에 따라 우발편심을 고려하였다. 이 표로부터 최상층에서 최대변위에 대한 질량중심(CM) 변위의 비(MD/DCM)가 1.57임을 알 수 있다.

4. 일방향 가력해석

층지진하중은 1차 모드형상과 높이에 비례하여 계산하거나, 고차모드의 영향을 고려하여 계산할 수도 있으나, 여기서는 층질량과 높이에 비례하여, $F_x = [w_x h_x / \sum w_x h_x] V$ 와 같이 계산하였다.

주어진 건물에 대해서 *DRAIN-2DX*를 사용하여 2차원 일방향 가력곡선의 각 변위에 MD/DCM 비(1.57)를 곱하여 Fig. 3과 같이 새로운 능력곡선(Capacity Curve)을 구하였다. 이때 얻어진 곡선은 최상층의 질량 중심의 변위와 전체 건물이 저항하는 밀면전단력의 관계를 나타내는 것이다.

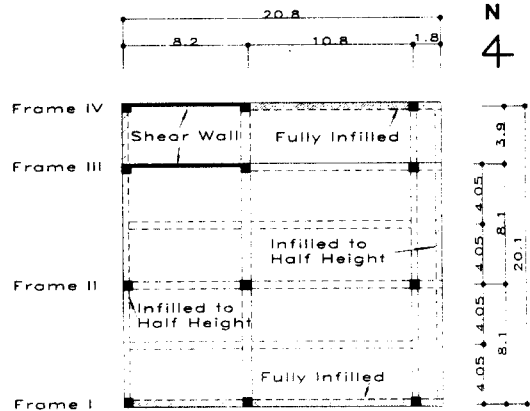


Fig. 1 Plan of the Building (unit: m)

Table 1. Three Dimensional Elastic Analysis

Story	1st Elastic Analysis****					Revised Elastic Analysis			
	Locations of Applied Loads from CM	Max. Displacements (MD)	Displacements at CM (DCM)	MD / DCM Ratio	Amplification Factors***	Locations of Applied Loads from CM	Max. Displacements (MD)	Displacement at CM (DCM)	MD / DCM Ratio
10	100	1.61	1.06	1.52	1.61	161	1.71	1.09	1.57
9	100	1.53	0.98	1.55	1.68	168	1.63	1.02	1.60
8	100	1.42	0.90	1.59	1.75	175	1.51	0.93	1.63
7	100	1.28	0.79	1.62	1.81	181	1.37	0.82	1.66
6	100	1.12	0.68	1.65	1.89	189	1.20	0.71	1.69
5	100	0.94	0.56	1.68	1.97	197	1.01	0.58	1.73
4	100	0.75	0.44	1.72	2.06	206	0.81	0.46	1.77
3	100	0.55	0.31	1.76	2.16	216	0.60	0.33	1.81
2	100	0.36	0.20	1.82	2.30	230	0.39	0.21	1.86
1	100	0.17	0.09	1.89	2.48	248	0.19	0.10	1.92

* Only X-directional values are considered.

** Units : cm

*** $AF = (MD / 1.2 DCM)^2 \leq 3$

**** 5% accidental eccentricities are considered.

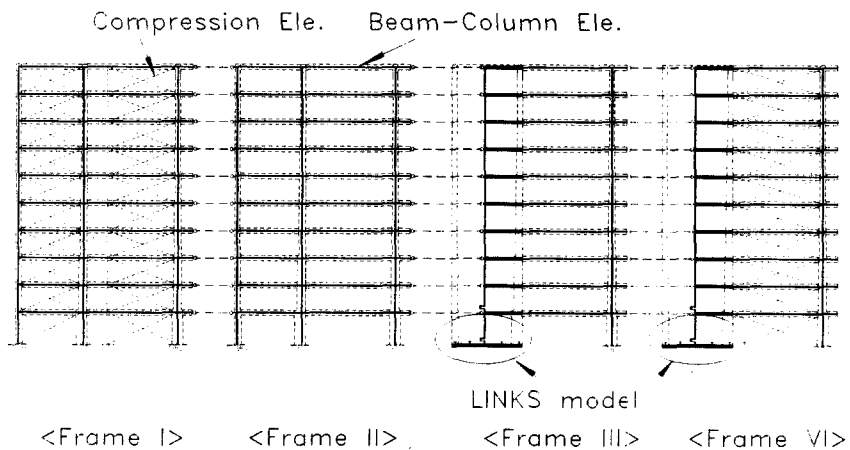


Fig. 2 2-D Pushover Analysis Model (DRAIN-2DX)

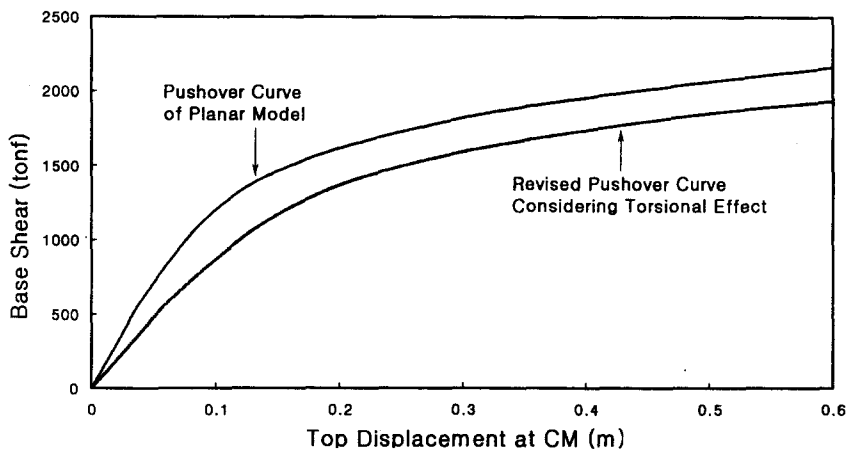


Fig. 3 Pushover Analysis of Planar Model

5. 성능점

능력곡선을 다음의 공식을 사용하여 ADRS(Acceleration-Displacement Response Spectrum)의 형태의 능력스펙트럼으로 변환시킬 수 있다.

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1}, \quad S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \phi_{roof,1}} \quad \text{Eq. 1}$$

이때, 1차 모드 기여 계수($PF_{roof,1}$)와 1차 모드 질량 계수(α_1)을 다음과 같이 구할 수 있으며, Table 2에 그 계산과정을 나타내었다.

$$PF_{roof,1} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1})/g}{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2)/g} \right] \times \phi_{roof,1}, \quad \alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1})/g \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N w_i/g \right] \sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2)/g} \quad \text{Eq. 2}$$

UBC에 따라 감쇠율 5퍼센트 탄성 응답스펙트럼을 구하였다. 이 응답스펙트럼은 UBC의 강진지역에 해당하는 $Z=0.4$ ($C_A=0.4, C_v=0.4$)일 때와 우리 나라 기준에서 정하고 있는 $Z=0.11$ ($C_A=0.11, C_v=0.11$; 선형보간법을 사용하여 구함)일 경우에 대하여 구하였다. 또한 각각의 스펙트럼으로부터 다음의 관계를 이용하여, ADRS 형태로 변환된 요구 스펙트럼을 구하였다.

$$S_a g = \frac{2\pi}{T} S_v, \quad S_d = \frac{T}{2\pi} S_v \quad \text{Eq. 3}$$

Fig. 4에서와 같이 $Z=0.11$ 일 때는 두 곡선이 탄성영역에서 만나므로 그 교차점이 바로 성능점이 된다. $Z=0.40$ 일 때는 Fig. 5에서와 같이 능력스펙트럼법을 이용하여 성능점을 구할 수 있다.

6. 성능 평가

성능 평가는 앞에서 구한 성능점 범위에서 전체 구조물의 거동은 물론, 각 부재의 변형을 구하고, 목표한 성능 수준과 비교하여 이루어진다. 여기서, 성능점은 건물 최상층에서의 질량 중심의 변위이므로 지진방향에 대한 각 주요 골조의 최상층 변위를 다시 계산해 주어야 한다.

Table 3은 3차원 탄성해석의 결과를 나타낸 것이다. 이 표로부터 횡력에 대하여 유연한 쪽에 있는 골조 I과 골조 II의 목표변위를 구할 수 있다. 즉 능력스펙트럼법을 통해 구한 질량중심에서의 목표변위에 질량중심의 변위에 대한 최상층의 변위비를 곱하였다. 예를 들어, $Z=0.11$ 에 대하여, 골조 I의 목표변위는 $1.57 \times (S_d \times PF_{roof,1}) = 1.57 \times (0.026 \times 1.44) = 0.059m$ 가 되는 것이다. 단, 여기서 골조 III과 골조 IV의 목표변위는 평면이 정형일 때의 것과 같다고 보고 질량중심의 변위에 대한 최상층의 변위비를 1로 가정하였다. Table 4는 각 골조의 목표변위를 나타낸 것이다.

여기서 구한 목표변위까지 각 골조별로 일방향 가력해석을 수행하였다. 이때, 각 골조에 가하는 층지진하중의 비율은 골조 I과 골조 II의 경우, Table 3의 층전단력의 비율과 같게 하였으며, 골조 III과 골조 IV의 경우는 전체 건물에 대해 구한 층지진하중의 비율과 같은 값을 사용하였다.

Fig. 6은 각 주요골조의 해석결과를 나타낸 것이다. 모든 곡선의 변위는 최상층의 질량 중심의 변위를 기준으로 하여 나타낸 것이다. 각 곡선의 종료점은 해석의 종료시점과 동일하며 각 골조의

목표변위를 나타낸다. 또한 점선으로 표시된 곡선은 주요골조의 해석결과값을 더하여 나타낸 것이다.

Table 2. Modal Analysis (DRAIN-2DX)

Story	w_x/g (ton)	Mode 1 (East-West : Longitudinal)		
		ϕ_1	$(w_x/g) \times \phi_1$	$(w_x/g) \times \phi_1^2$
10	38.3	0.084	3.226	0.272
9	42.2	0.075	3.171	0.238
8	42.0	0.066	2.762	0.181
7	41.7	0.056	2.323	0.130
6	41.6	0.045	1.892	0.086
5	41.4	0.035	1.457	0.051
4	41.3	0.025	1.044	0.026
3	41.1	0.016	0.667	0.011
2	41.1	0.010	0.394	0.004
1	44.1	0.004	0.163	0.001
SUM	414.7		17.099	1.000
PF_{roof,1}	Eq.	$17.099 \times 0.084 / 1.000 = 1.44$		
α_1	Eq.	$17.099^2 / (414.7 \times 1.000) = 0.705$		

Table 3. Elastic Analysis ($e_d = e + 0.05b$)

Story	Frame I			Frame II			Frame III			Frame IV		
	Shear Force (tonf)	Story Shear (tonf)	Drift Ratio to CM	Shear Force (tonf)	Story Shear (tonf)	Drift Ratio to CM	Shear Force (tonf)	Story Shear (tonf)	Drift Ratio to CM	Shear Force (tonf)	Story Shear (tonf)	Drift Ratio to CM
10	12.9	12.9	1.57	4.5	4.5	1.11	-6.7	-6.7	0.65	14.8	14.8	0.43
9	20.1	7.2	1.60	5.7	1.2	1.12	6.5	13.2	0.63	14.6	-0.3	0.40
8	27.3	7.2	1.63	6.7	1.0	1.12	16.4	9.8	0.61	15.6	1.1	0.37
7	32.2	4.9	1.66	9.2	2.5	1.13	22.2	5.8	0.59	19.3	3.6	0.34
6	37.8	5.6	1.69	9.5	0.3	1.13	29.4	7.2	0.57	20.8	1.5	0.31
5	41.0	3.3	1.73	11.5	2.0	1.14	35.0	5.6	0.55	22.3	1.5	0.27
4	44.0	2.9	1.77	11.7	0.2	1.15	43.7	8.6	0.53	20.5	1.8	0.23
3	45.6	1.6	1.81	12.8	1.0	1.16	48.2	4.5	0.51	20.9	0.5	0.19
2	45.7	0.1	1.86	10.6	-2.2	1.17	65.4	17.2	0.47	11.3	-9.6	0.14
1	38.0	-7.6	1.92	24.4	13.8	1.18	77.6	12.2	0.43	-4.2	-15.5	0.08

Total Base Shear = 135 tonf

Table 4. Target Displacement

Seismic Zone Factor (g's)	Z = 0.11		Z = 0.40	
	$S_{d,CM} = 0.026m$		$S_{d,CM} = 0.090m$	
	Drift Ratio to CM	Target Displacement (m)	Drift Ratio to CM	Target Displacement (m)
Frame I	1.57	0.059	1.57	0.203
Frame II	1.11	0.042	1.11	0.144
Frame III	1.00*	0.037	1.00*	0.130
Frame IV	1.00*	0.037	1.00*	0.130

* The same values as those of a symmetric-plan structure are used.

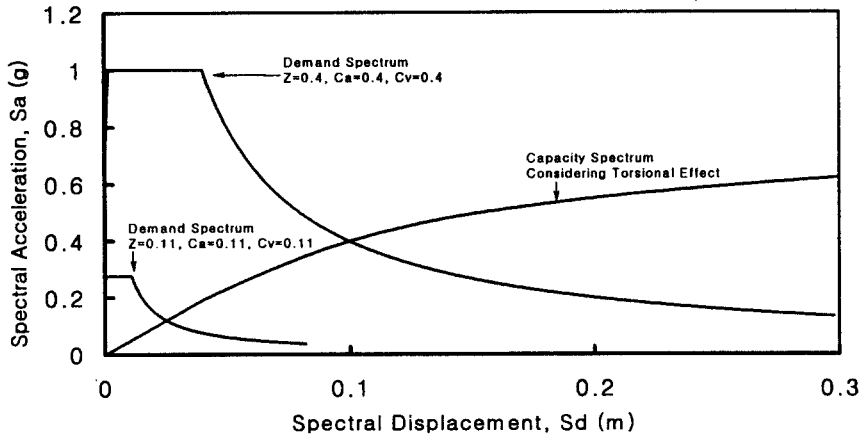


Fig. 4 Acceleration-Displacement Response Spectra

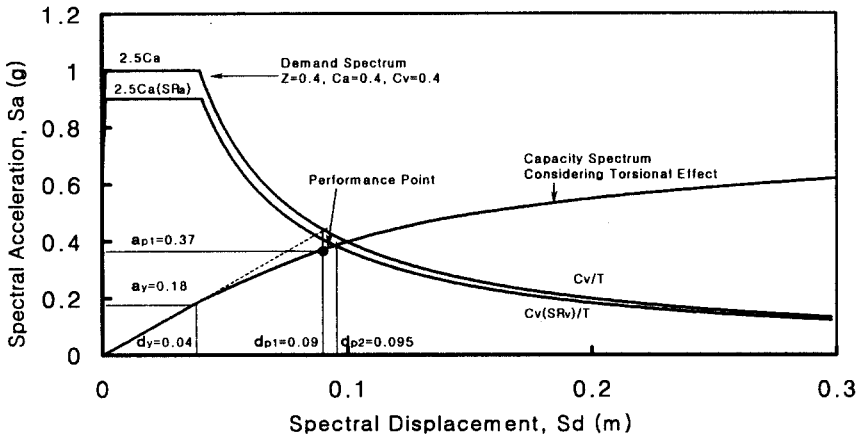


Fig. 5 Performance Point Calculation

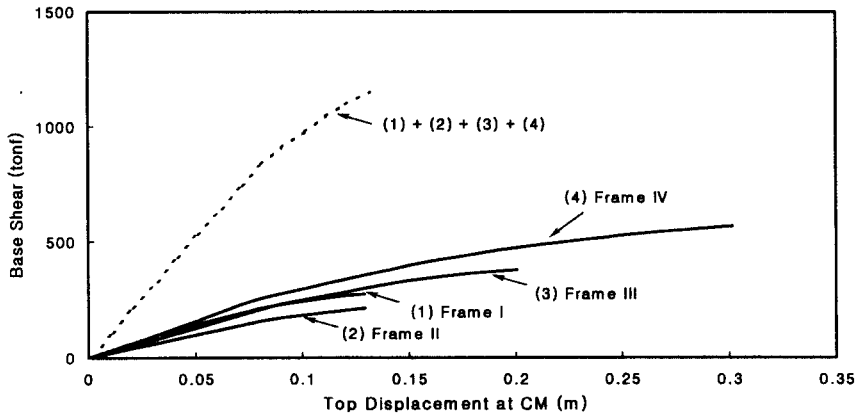


Fig. 6 Analysis of Main Frames

Table 5는 각 골조의 층간변위율을 나타낸 것이다. 좌측열은 ATC-40을 참조하여 성능수준을 나타낸 것이다. 우측열은 Z=0.40일 때 구한 성능점까지의 해석결과와 평가된 결과를 나타낸 것이다. 이 표로부터 일부분만이 즉시거주의 한계상태(0.01)에 근접해 갈 뿐 대부분이 즉시거주에 알맞은 성능을 갖는 것을 알 수 있다.

Table 6은 Z=0.40일 때의 성능점에 대해 가장 큰 변형을 보인 기둥의 부재변형성능을 평가하여 나타낸 것이다. 먼저, 좌측 2, 3열의 설계 축력과 설계 전단력으로부터 3, 4열과 같이 (1)과 (2)에 따라 계산된 값을 구한다. 이 값으로부터, ATC-40을 참고하여, 6열에서 8열까지의 한계상태 허용치를 얻을 수 있다. 마지막으로 9열의 DRAIN-2DX에서 구한 소성형지 회전각이 어느 한계상태에 드는지를 판단하면 되는 것이다. 이 표로부터 본 건물의 기둥은 Z=0.40에 대해 하부층의 일부 기둥에서 생명안전 수준에 드는 것을 알 수 있다.

Table 5. Interstory Drift Ratio

Story	Performance Level			Interstory Drift (m)				Performance Level
	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Frame I	Frame II	Frame III	Frame IV	
10				0.002	0.002	0.004	0.003	IO*
9				0.003	0.003	0.004	0.003	IO*
8				0.004	0.004	0.004	0.004	IO*
7				0.005	0.004	0.004	0.004	IO*
6		0.01 -		0.006	0.005	0.004	0.004	IO*
5	0.01	0.02	0.02	0.008	0.006	0.004	0.004	IO*
4				0.009	0.006	0.003	0.003	IO*
3				0.009	0.005	0.003	0.003	IO*
2				0.008	0.004	0.005	0.007	IO*
1				0.004	0.002	0.003	0.004	IO*

* IO : Immediate Occupancy

Table 6. Numerical Acceptance Criteria for Plastic Hinge Rotations in Reinforced Concrete Columns, in radians

ID	Design Axial Load, P (tonf)	Design Shear Force, V (tonf)	(1)	(2)	Acceptance Criteria			Plastic Hinge Rotation per DRAIN	Performance Level
					IO	LS	SS		
C10	32	9.9	0.042	0.109	0.005	0.01	0.02	N.A.	IO
C9	72	8.8	0.095	0.250	0.005	0.01	0.02	N.A.	IO
C8	111	10.1	0.147	0.247	-	-	-	N.A.	IO
C7	151	10.7	0.199	0.271	-	-	-	N.A.	IO
C6	191	11.5	0.252	0.253	-	-	-	N.A.	IO
C5	230	11.7	0.305	0.247	-	-	-	N.A.	IO
C4	270	12.6	0.357	0.231	-	-	-	0.0008	IO
C3	309	11.5	0.408	0.216	0.0	0.005	0.015	0.0036	LS
C2	343	11.6	0.453	0.189	0.0	0.005	0.015	0.0066	LS
C1	368	5.1	0.486	0.212	0.0	0.005	0.015	0.0033	LS

(1) $\frac{P}{A_g f'_c}$, (2) $\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$

- : some values by interpolation

IO=Immediate Occupancy, LS=Life Safety, SS=Structural Stability

N.A.(Not Applicable) : Deformations remain elastic

7. 결론

이상과 같이 평면이 비정형인 10층 철근콘크리트 건물에 대해서 2차원 내진성능평가를 수행하였다. 이때 비틀림의 영향을 고려하기 위해서 3차원 탄성해석의 결과를 이용하였다. 여기서 적용한 방법은 건물의 정확한 지진거동을 예측할 수 있는 방법은 아니지만, 대략적인 내진성능을 평가하여 해석이나 설계에 이용할 수 있도록 도와주는 수단이 될 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

1. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings : Volume 1, 2", ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996
2. Georgia Tech Research Corporation, "GTSTRUDL User's Manual", Georgia Tech Research Corporation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1996
3. ICBO, "1997 Uniform Building Code", International Conference of Building Officials, 1997
4. Powell, G.H., "DRAIN-2DX Element Description and User Guide Ver. 1.10", Report No. UCB/SEMM-93/18, University of California, Berkeley, California, 1993
5. Prakash, V., Powell, G.H., and Campbell, S., "DRAIN-2DX Base Program Description and User Guide Ver. 1.10", Report No. UCB/SEMM-93/17, University of California, Berkeley, California, 1993
6. 이한선, 김상호, "1:12축소 10층 철근콘크리트 골조-벽식 구조의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상관성", 한국콘크리트학회 논문집, 제12권, 6호, 2000. 12
7. 이한선, 김정우, "1:12축소 10층 조적채움 R.C. 골조의 비선형 거동에 대한 해석과 실험의 상관성", 한국콘크리트학회 논문집, 제12권, 1호, 2000. 2
8. 이한선, 강귀용, "비내진 상세를 가진 1:12 축소 10층 R.C. 골조의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상관성", 한국콘크리트학회 논문집, 제11권 1호, 1999. 2