면진구조물의 기초전단력에 대한 실험적 평가

Experimental Evaluation on the Base Shear Force of a Base Isolation System

김영중* 문석준*
Kim, Young-Joong Moon, Soek-Jun

ABSTRACT

The base shear force and the overturning moment are important factors for the earthquake design of a structure. These should be predicted exactly especially when the nonlinear seismic isolation bearings are used against earthquake motions. Generally, these are derived by the acceleration responses of a structure with the assumed masses. However, these can be contaminated by the noise in the measured responses and the uncertainty of assumed masses. This paper presents the results of the derived base shear force and overturning moment compared with the measured results by multi-axis load cells. Also, discussions are made on the cross-coupling effects of the multi-axis load cell.

1. 서 론

구조물에 지진이 작용할 때 발생하는 기초전단력(base shear force)과 전도모멘트(overturning moment)는 구조물 설계시 매우 중요한 인자이다[1,2]. 특히, 면진구조물의 지진응답 설계시 이들은 면진베어링 등 면진장치의 성능이 대부분 비선형성을 가지므로 이 값들에 따른 특성을 정확히 예측하여 지진응답 해석에 반영하여야 한다[3]. 일반적으로 이들은 구조물 주요 부위에서 구해진 지진응답 가속도와 추정된 질량을 이용하여 산정한다. 실험을 통해 이들을 산정하기 위해서는 구조물의 주요 부위에서 계측된 모든 가속도 응답 신호가 정확히 구해져야 한다. 그러나 계측기의 정확도뿐만 아니라 가속도 응답 신호에는 예기치 못한 잡음의 발생 또는 계측장치의 오작동 등에 따라 하나라도 부정확한 계측 결과가 발생하면 이들을 추정하는 것이 불가능해진다. 또한 구조물의 모든 질량분포를 정확히 추정하는 것도 매우 어렵기 때문에 기초전단력과 전도모멘트를 정확히 산정하는 것은 매우 어려운 점이 된다.

본 연구에서는 5층 구조물의 기초가 고정된 경우와 적층고무베어링(laminated rubber bearing)으로 면진한 경우를 대상으로 하부에 3축의 하중을 동시에 계측할 수 있는 로드셀을 장착하여 기초전단력과 전도모멘트를 직접 계측한 결과를 가속도 신호와 추정된 질량을 이용하여 산정한 결과와 비교, 검토하였다. 입력 지진은 저주파수 성분이 많은 1995년 Kobe에서 관측된 수평방향 지진신호를 적용하였다[4].

* 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹, 선임연구원, 정회원

2. 지진응답 시험

2.1 기초전단력과 전도모멘트의 산정

여러 개의 집중 질량 m_i $(i=1,\cdots,N)$으로 이루어진 구조물의 기초부에 지진에 의한 운동 ($\ddot{y}$)이 작용하여 발생하는 기초전단력(F)과 전도모멘트(M)는 각 집중질량에 발생하는 동적 가속도 응답이 $\ddot{x}_i$ $(i=1,\cdots,N)$이고 지진운동의 입력 지점과 각 집중질량의 무게중심 사이의 거리가 h_i라면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = \sum_{i=1}^{N} m_i \ddot{x}_i \tag{1}$$

$$M = \sum_{i=1}^{N} m_i h_i \times \ddot{x}_i \tag{2}$$

스트레인 게이지를 이용한 3축 로드셀은 직교하는 3방향의 하중을 동시에 계측할 수 있다는 장점이 있는 반면에 서로 다른 방향으로 작용하는 하중에 의한 스트레인을 완전히 배제할 수 없으므로 이 영향을 고려하여 계측결과를 보상해야 한다. 즉, 하중이 3방향으로 각각 F_x, F_y, F_z만큼 실제로 작용한다고 하면 상호간섭효과(cross-coupling effect)에 따라 다음과 같이 f가 계측 결과 얻어진다.

$$f = \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xz} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{yz} \\ a_{zx} & a_{zy} & a_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = A F \tag{3}$$

즉, 계측된 하중은 상호간섭효과 A를 보상하게 되면 다음 식으로 구할 수 있다.

$$F = A^{-1} f \tag{4}$$

이 때 전도모멘트는 수직방향의 하중과 로드셀 사이의 간격을 이용하여 산정한다.

2.2 시험구조물

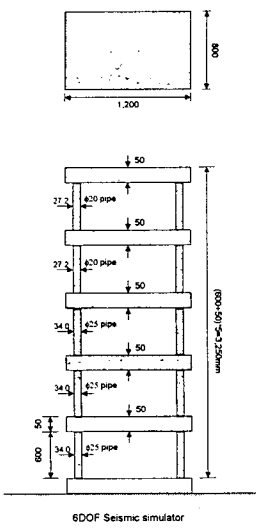


Fig. 1 Test model

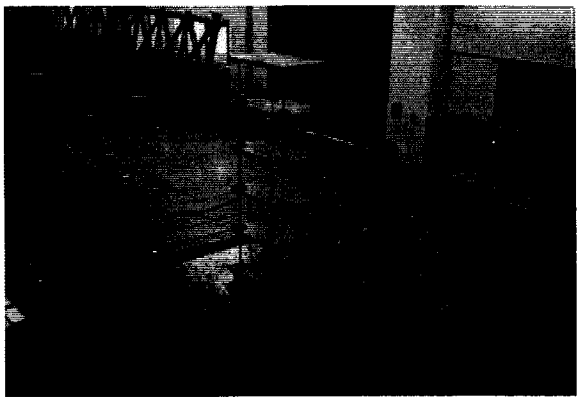


Fig. 2 Model installed on the shaking table

시험용 구조물은 건축 구조물을 표현할 수 있는 5층의 후판 구조로 결정하였다. 즉, 하판을 포함하여 6개의 후판과 각 층 사이에 4개씩의 기둥으로 지지되는 구조물을 제작하였다.

시험체의 중량은 약 2,300kg이며, Fig. 1에서 보는 바와 같이 가로×세로×높이가 1,200mm×800mm×3,300mm이다. 1층~3층 사이의 기둥은 φ25(외경 φ34)의 파이프를, 4층과 5층 사이의 기둥은 φ20(외경 φ27.2)의 파이프를 사용하여 상층부의 강성이 하부의 강성에 비해 작게 제작하였다. 각 층의 기둥은 볼트에 의해 연결되어 층 수의 조정이 용이하고 비대칭 강성을 갖는 구조물의 구현이 가능하도록 제작되었다. 구조물 하판은 대형 6 자유도 진동대에 취부할 수 있도록 제작하였다.

Fig. 2는 시험체가 진동대 상에 설치되어 있는 모습을 보여주고 있다. 먼저 진동대에 부착할 수 있는 후판을 설치하고 후판 위에 로드셀을 부착하였으며, 면진고무베어링 또는 이와 크기가 같이 제작한 강체를 삽입하고 그 위에 구조물을 설치하였다.

2.3 면진베어링

Table 1 Design results of laminated rubber bearing

항 목			기호	단위	특성치
설계변수	적재하중		W	kgf	580
	외경		D_o	cm	5
	고무1층두께		t_r	cm	0.08
	고무층수		n	-	29
	최대변형량		γ	%	60
	철판두께		t_s	cm	0.1
특성설계	유효단면적		A'	cm^2	12.8
	변위	최대수평변위	X_b	cm	1.4
		항복변위	X_y	cm	0.5
	하중	최대압축력	W_{max}	kgf	1420
		항복하중	Y	kgf	43.2
	강성	수평	K_h	kgf/cm	60
		수직	K_v	kgf/cm	8.1×10^4
		이중1	K_a	kgf/cm	29.1
		이중2	K_b	kgf/cm	116.2
	동특성	수평주파수	f_h	Hz	1.6
		수직주파수	f_v	Hz	58.9
		감쇠비	ζ	%	21.2

면진베어링의 성능은 하중-변위 특성과 감쇠특성으로 나누어 볼 수 있으며, 전단강성, 수직강성 및 항복하중 등의 설계변수에 따라 결정된다. 이들 설계변수의 일반적 설계공식은 다음과 같다[5].

전단강성 : $K_H = GA_s/T_r$,

수직강성 : $K_v = E_cA_s/T_r$,

항복하중 : $Y = \tau A_s$

여기서 G는 전단탄성계수(힘/면적), A_S는 전단면적(면적), E_c는 고무의 압축성을 고려한 탄성계수(힘/면적), T_r는 총 적층고무 두께(길이), τ는 항복전단응력(힘/면적)을 의미한다. 설계변수로서 적재하중, 외경, 고무1층 두께, 고무층 수, 최대 변형량, 철판 두께 등을 결정한 다음 특성을 계산하여 평가하였다. 특성설계 결과는 Table 1에 정리되어 있다.

2.4 로드셀

Table 2 Specification of the fatigue rated 3-axes loadcell

Property	Specification
Capacity	Fx=5tf, Fy=5tf, Fz=10tf
Rated Output	1±0.1 mV/V
Nonlinearity	0.05% of R.O.
Repeatability	0.05% of R.O.
Zero Balance	±1% of R.O.
Excitation recommended	10VDC, AC
Overload, allowable	150%

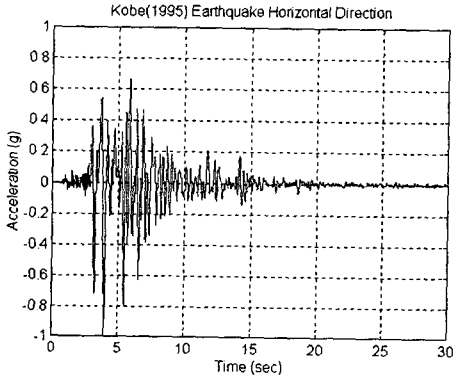
시험체에 가해지는 하중, 즉 기초전단력과 전도모멘트를 직접 계측하기 위한 로드셀은 진동대의 성능에 비추어 여러 경우에도 적용할 수 있는 규모로 설계되었다. 즉, 진동대 성능이 최대 30 ton의 시험체를 수평방향 1.5 g의 가속도로 가진할 수 있으므로 약 45 ton의 동적하중을 계측할 수 있어야 한다. 이를 4개의 로드셀로 계측한다면 각각 수평방향으로 11.25 ton의 하중이 작용하게 되며, 이에 따른 전도모멘트가 수

직방향으로 작용하므로 수직방향의 하중은 이의 2배정도가 요구된다. 그러나 대부분의 시험체가 이에 훨씬 못 미치며, 로드셀의 규모를 감안하여 수평방향으로 5 ton, 수직방향으로는 10 ton의 계측용량을 갖도록 설계되었다. 설계상 이 용량은 피로수명 관점에서 안전한 기준으로 설계되었으며, 이의 1.5배까지의 하중이 작용하는 경우에도 성능을 보장할 수 있다. 로드셀의 성능은 Table 2와 같다.

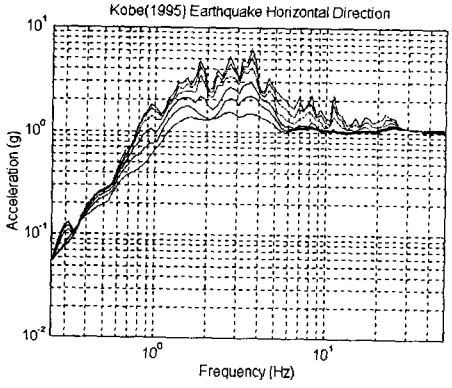
2.5 시험파형

지진응답 시험을 위한 지진파형은 저주파수 성분이 많은 1995년 Kobe에서 관측된 수평방향 지진신호를 적용하였다. Fig. 3은 최대 가속도를 1.0g로 설정한 시간이력과 응답스펙트럼을 감쇠계수를 달리하여 구한 결과이다. 2Hz~5Hz사이에서 특히 증폭현상을 유발하는 주파수 성분을 많이 가지므로 최저차 고유진동수를 약 3Hz 부근으로 설계한 시험구조물에 비교적 큰 응답 진폭을 유발하여 면진베어링의 변위가 많이 발생하도록 되어있음을 알 수 있다.

지진응답 시험은 이 파형의 최대 가속도 값이 0.05g, 0.1g, 0.15g, 0.2g가 되도록 크기를 조정하며 수행되었다.



(a) Time series



(b) Response spectrum (damping 1,2,5,10,20%)

Fig. 3 Kobe(1995) earthquake in horizontal direction

3. 시험결과 및 고찰

3.1 고유진동 특성

제작한 시험체의 동특성 해석을 위해 구조물 모델을 전단 집중질량 모델로 가정하여 고유진동수 및 고유진동형을 계산하였다. 전단 집중질량 모델에서는 관성모멘트를 무시하므로 수평 2방향의 진동수는 같게 산정되며, 회전방향의 진동수는 산정하지 못하였다. 동특성 실험은 진동대에 랜덤파형을 수평방향으로만 가진시키면서 수행하였다.

Table 3 Natural Frequencies of Test Model

Model \ Mode		0	1	2	3	4	5
Fixed	Analysis	-	3.07	7.46	12.10	15.98	21.73
	Experiment	-	2.9	7.3	12.1	15.3	20.7
Isolated	Analysis	2.72	6.57	11.37	13.80	18.86	22.60
	Experiment	2.2	6.0	10.9	13.0	17.0	21.1

구조물의 각 층에는 가속도계를 부착하여 기초가진에 의한 각 층에서의 진동응답을 구하였으며, 최하부 판에는 변위계(LVDT)도

부착하여 면진베어링의 지진응답 변위도 동시에 계측하였다. 해석 및 실험을 통해 원형구조물이 기초가 고정된 경우(fixed) 및 적층고무베어링에 의해 면진된 경우(isolated) 각각의 고유진동수를 구하여 Table3에 정리하였다. 이를 보면 고유진동수의 해석치가 실험치와 매우 일치함을 알 수 있다. 즉 전단 집중질량모델에 근거한 해석 방법의 신뢰성을 입증하고 있다. 기초에 면진베어링을 사용한 면진기초인 경우의 해석은 설계로부터 구한 베어링의 수평강성을 적용해서 구한 것이다. Table 3에서 0차 모드는 기초고정 때와는 달리 면진에 의해 구조물 전체가 거의 강체로 운동하는 모드이다. 이 0차 고유진동수는 해석치가 실험치보다 약간 큰 값을 주고 있는데 이는 면진베어링의 수평강성의 설계치가 실제보다 크게 산정되었음을 의미한다.

3.2 기초전단력 및 전도모멘트

Kobe(1995) 지진파형의 수평방향 성분의 입력운동(이하의 좌표계에서 x방향으로만 가진됨)에 대한 기초고정 및 면진 구조물에 발생하는 가속도 응답과 로드셀에서 계측된 하중 및 최하층 바닥판의 변위를 Fig. 4에서 볼 수 있다. 각각 0.05g 와 0.2g인 경우에 대해서만 예시하였다. Fig. 4에서 a0는 진동대의 입력운동이고, a1～a5는 1층에서 5층의 바닥판, a6는 지붕판의 가속도 응답 계측 결과를 의미한다. Fig. 4에서 (f1x, f1y, f1z) 및 (f2x, f2y, f2z)는 각각 로드셀 1번과 2번에서 x, y, z 방향으로 계측된 하중이고, l1은 바닥판의 변위를 표시한다. 여기서 진동대를 x방향으로만 가진하였기 때문에 y방향의 하중이 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. 그러나 전도모멘트에 의해 수직방향(z)의 하중은 오히려 수평방향(x) 하중보다도 크게 발생함을 볼 수 있다. 로드셀도 이와 같은 현상을 고려하여 수직방향의 하중범위를 수평방향의 2배로 설계한 바 있다.

그림 상으로는 명확히 볼 수 없지만 로드셀의 각 축방향 하중간의 상호간섭효과로 인하여 f1x와 f2x는 항상 일정한 차이를 보이고 있으며, f1z도 f2z 다른 값을 보이고 있다. 즉, 기초전단력과 전도모멘트를 하나의 로드셀만을 가지고 평가한다면 상호간섭효과로 인한 오차를 필수적으로 감수해야 한다.

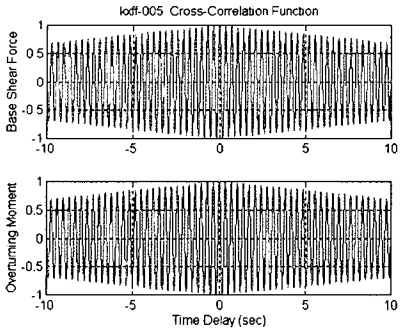
Fig. 5는 식 (1), (2)의 관계로부터 각 층별로 추정된 질량과 계측된 가속도 응답을 이용하여 구한 기초전단력 및 전도모멘트를 식 (4)와 같이 상호간섭효과를 보상하여 실측된 결과와 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 기초전단력은 로드셀 1개에 작용하는 값(전체 기초전단력의 1/4 값)으로 환산하였고, 전도모멘트는 전체의 1/2값으로 환산하였다. 그림으로부터 두 가지 방법으로 구한 결과가 매우 정확히 일치하고 있음을 볼 수 있다. 이들의 차이는 최대 5% 이내이며, 이는 통상적인 계측기 교정 성능에 좌우될 수 있는 정도의 정확도라고 볼 수 있다. 다만, 입력 지진이 작을 때 응답도 매우 작으며, Fig. 4(a)와 4(c)에서 보는 바와 같이 가속도계 중 하나(a4)에서 발생한 잡음으로 인해 Fig. 5(a)와 5(c)의 계산결과에도 영향을 미쳐 부정확한 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 6에서는 Fig. 5의 계산치와 계측치 사이의 상관계수함수를 볼 수 있다. 이를 보면 가속도계에 잡음 영향이 큰 면진시 입력지진 가속도 0.05g인 경우만을 제외하고는 시간지연(time delay) 값 0에서 보이는 최대값이 거의 1.0에 가까운 결과로서 두 방법으로 계산한 결과의 일치성을 보이고 있다.

Table 4 Maximum base shears, displacement and overturning moments

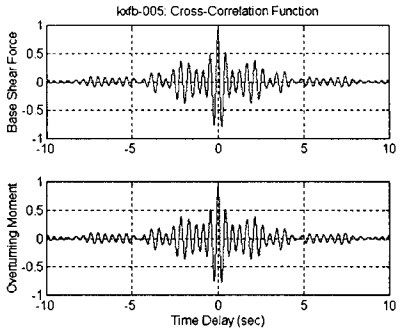
Input Earth-quake	Max. Table Accel. (g)		1/4 Base Shear Force (ton)		Base Displacement (mm)	1/2 Overturning Moment (ton-m)	
	Fixed	Isolated	Fixed	Isolated	Isolated	Fixed	Isolated
Kobe	0.071	0.068	0.110	0.055	2.27	0.549	0.226
	0.130	0.122	0.205	0.091	4.712	1.047	0.364
	0.186	0.178	0.303	0.143	9.668	1.551	0.605
	0.235	0.215	0.384	0.204	15.58	1.909	0.873

Table 4에는 이와 같이 구한 기초전단력, 기초부 면진시의 지진응답 변위 및 전도모멘트를 각각의 입력지진

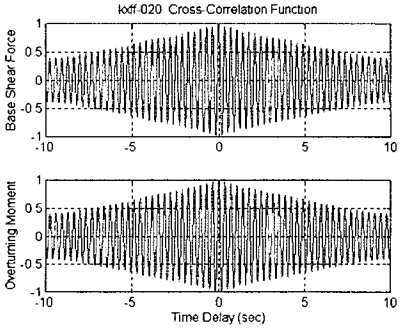
가속도의 크기별로 구분하여 정리하였다. 여기서 기초부 면진시의 지진응답변위가 지진 진폭이 커지면서 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이는 면진베어링의 이중선형 특성에 따른 것으로 추정된다.



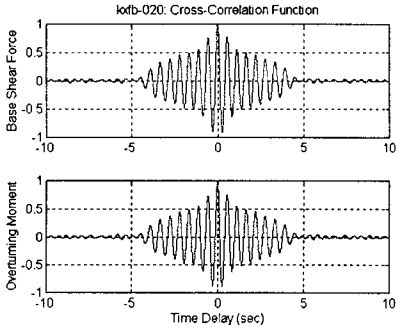
(a) Base fixed model with the max. input acceleration of approx. 0.05g



(b) Base isolated model with the max. input acceleration of approx. 0.05g



(c) Base fixed model with the max. input acceleration of approx. 0.2g



(d) Base isolated model with the max. input acceleration of approx. 0.2g

Fig. 6 Cross-correlation functions between the claculated and the measured results

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결과를 종합하면 다음과 같다.

1) 기초전단력과 전도모멘트를 층별 가속도를 이용하여 추정한 결과는 실제 로드셀로 계측한 결과와 5% 내외의 오차 범위를 보이고 있다. 또한 추정치와 계측치의 상관함수로부터 이들의 파형이 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 즉, 본 논문에서 예시한 것처럼 집중질량으로 구성된 시험체의 경우 계측된 층별 가속도를 이용하여 기초전단력과 전도모멘트를 매우 정확히 추정할 수 있다. 다만, 이 추정된 결과는 질량 분포의 산정과 이 질량의 가속도 측정결과에 직접 영향을 받기 때문에 질량 추정이 어렵거나, 실험시 어느 하나의 가속도 신호라도 불확실하면 기초전단력과 전도모멘트를 추정할 수 없다는 점을 유의할 필요가 있다.

2) 본 실험에서 하중 계측에 사용된 로드셀은 3축을 동시에 계측할 수 있도록 설계되어 있다는 장점이 있는 반면에 각 축방향 하중에 의해 다른 축에 발생하는 변형에 기인하는 상호간섭효과

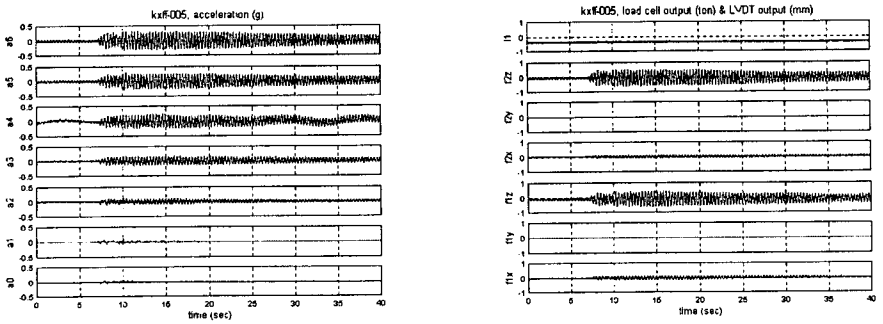
(cross-coupling effect)를 무시할 수 없기 때문에 여러 로드셀에서 계측된 결과를 종합하거나, 하나의 로드셀이 가진 각 축간 특성을 보상하는 방법으로 상호간섭효과를 최소화하여야 한다.

후 기

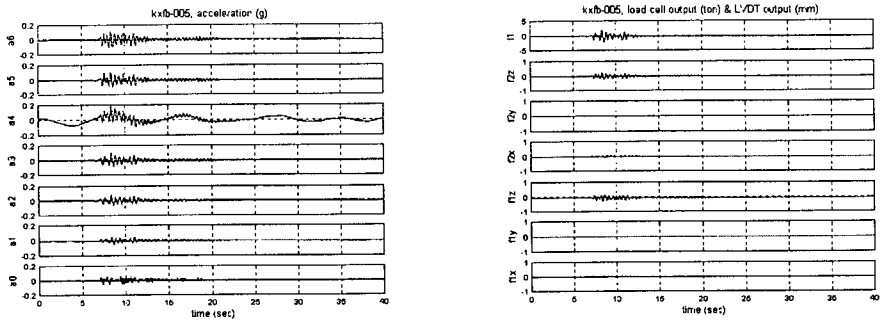
본 연구는 과학기술부에서 지원한 한국기계연구원의 기관고유사업인 "구조물 안전성 확보기술 개발"의 일환으로 수행된 것임을 밝힌다.

참고문헌

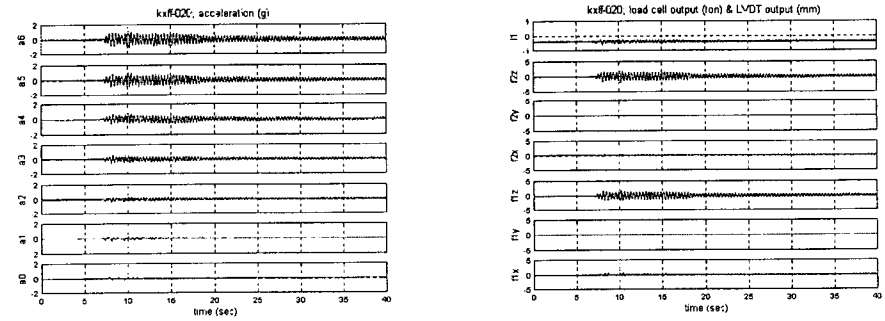
1. UBC, Division IV, Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures.
2. 윤정방, 정우정, 김남식, 김두훈, 1997, "기초격리된 구조물의 내진성능평가를 위한 실험기법," 한국지진공학회 논문집, 제1권 제4호, 45-58.
3. R. I. Skinner, W. H. Robinson, and H. H. McVerry (1993), An introduction to seismic isolation, John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y.
4. 김재승 외, "구조물 안전성 확보기술 개발(연차보고서)," 과학기술처, UCN0610-646.M, 1998.
5. Kelly, J. M., (1997), Earthquake-Resistant Design with Rubber, Springer.



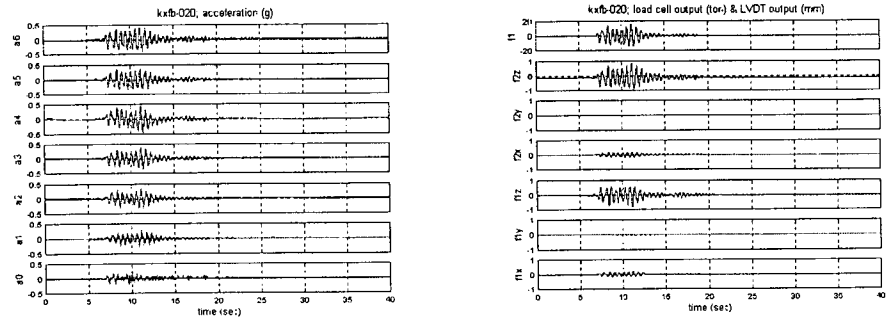
(a) Base fixed model with the maximum input acceleration of approx. 0.05g



(b) Base isolated model with the maximum input acceleration of approx. 0.05g

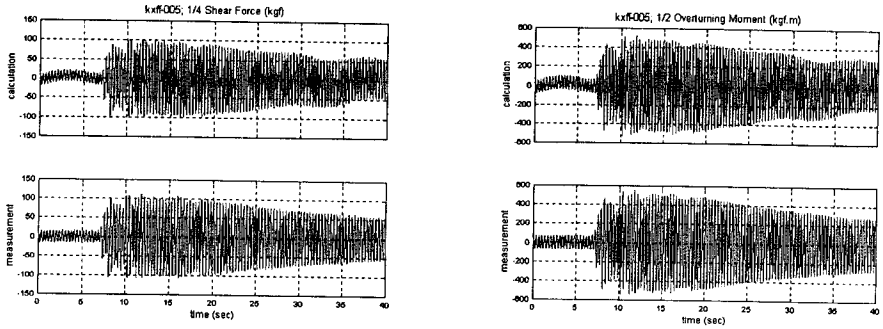


(c) Base fixed model with the maximum input acceleration of approx. 0.2g

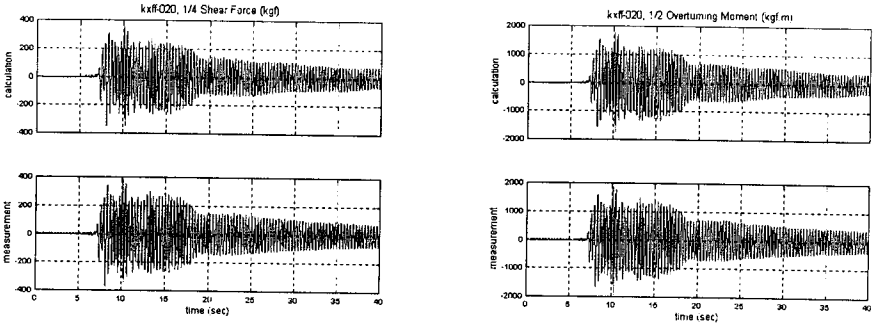


(d) Base isolated model with the maximum input acceleration of approx. 0.2g

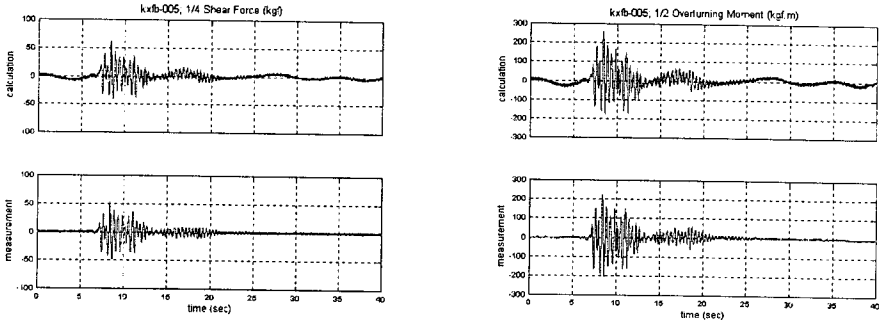
Fig. 4 Measured earthquake responses : accelerations, displacement and loads



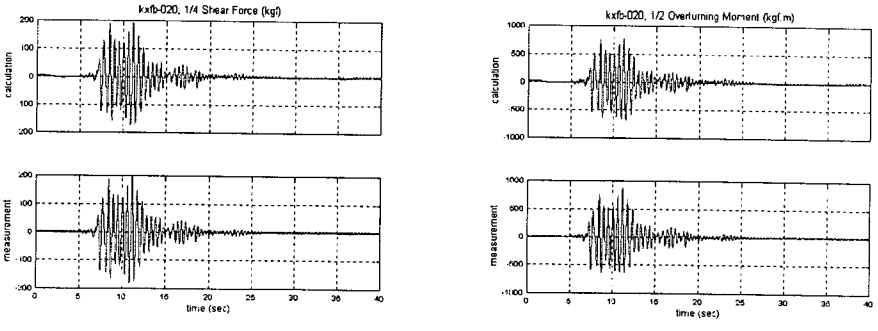
(a) Base fixed model with the maximum input acceleration of approx. 0.05g



(b) Base isolated model with the maximum input acceleration of approx. 0.05g



(c) Base fixed model with the maximum input acceleration of approx. 0.2g



(d) Base isolated model with the maximum input acceleration of approx. 0.2g

Fig. 5 Calculated and measured base shear forces and overturning moments