

지진하중을 받는 대형 콘크리트 판구조의 동적거동

Dynamic Behavior of Large Concrete Panel Structures Subjected Seismic Loads

- 3층 입체구조의 진동실험결과를 중심으로 -

○ 서 수 연¹⁾ 박 병 순²⁾ 백 용 준³⁾ 이 원 호⁴⁾ 이 리 형⁵⁾
Seo, S. Y. Park, B. S. Peak, Y. J. Yi, W. H. Lee, L. H.

ABSTRACT

This paper presents the results of shaking table test conducted on the 1/3.3 scaled large concrete panel model. The behaviors of large concrete panel structures subjected to seismic excitations are controlled by capacity of horizontal and vertical joints. To study the seismic capacity of the large concrete panel structures, experimental researches for joints and structural assemblage are needed. Especially, since the magnitude of seismic loads are depended on the variation of time, period and accelerations, dynamic test is needed for estimating the seismic resistance of large concrete panel structures. The objective of this paper is to study the behaviors of large concrete panel structures on seismic excitations and to estimate the safety. Test results are as follows : 1) Test model was critically damaged in the first floor horizontal joint by rocking. 2) Elastic limit (0.12g) of test model was 5 times higher than that of korean seismic design code. 3) Maxium base shear of test model at the ground acceleration of 0.12g was 3.5 times higher than the result of equivalent static analysis. 4) Damping ratio of test model turned out 3.9~5.3% and the period at 0.12g was 0.065sec.

1 서 론

대형 콘크리트 판구조의 지진에 대한 거동은 접합부를 통한 비탄성 거동이 지배적으로 나타나기 때문에 접합부에서의 강도, 강성 및 연성이 내진구조성능에 주요한 요인이 된다. 이러한 대형 콘크리트 판구조의 접합부 거동에 대한 실험연구는 국내에서 다수 수행되어 왔으나 건물에 작용하는 지진하중은 시간에 따라 여러 형태로 작용하기 때문에 실제

건물의 내진성능을 비교적 정확하게 평가하기 위해서는 지진파에 의한 건물의 진동실험연구가 필요하다. 본 연구는 조인트 박스 접합형 수평접합부와 전단키 접합의 수직접합부로 구성된 대형 콘크리트 판구조 시스템의 구조성능에 관한 실험연구로서 건물에서의 동적특성을 평가하기 위한 연구이다. 실험체는 실물크기의 1/3.3 축척인 3층 입체 구조이며 실험의 진행은 진동대(Shaking Table)를 이용하여 지진파를 입력시켜 모의진동실험을 수행한다. 실험으로 부터 기대되는 연구의 내용은 1) 대형 콘크리트 판구조의 종국파괴성상의 파악, 2) 감쇠, 고유주기, 강성, 연성과 같은 동적 특성의 파악, 3) 국내규준의 최대 지반가속에 대한 안전성 평가 등이다.

- 1) 한양대 대학원 박사과정
- 2) 한양대 대학원 석사과정
- 3) 현대건설 기술연구소 이사·공박
- 4) 광운대학교 조교수·공박
- 5) 한양대학교 교수·공박

2 실험

2.1 실험체 계획

실험체는 3층 2스팬의 입체구조물로 계획하며, 진동대의 용량을 고려하여 실물크기의 1/3.3로 계획한다. 또한 실험체에 사용된 철근, 조인트 박스, 그리고 전단키 등도 모두 축소율에 맞도록 한다. 실험체의 형상은 그림 1과 같으며, 실험시 뒤틀림이 가능한한 발생하지 않도록 한다. 실험체의 접합부 상세는 그림 2와 같다.

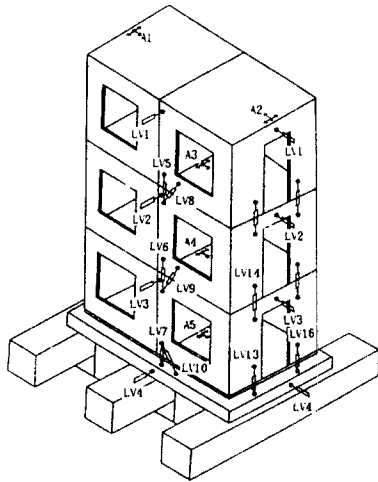
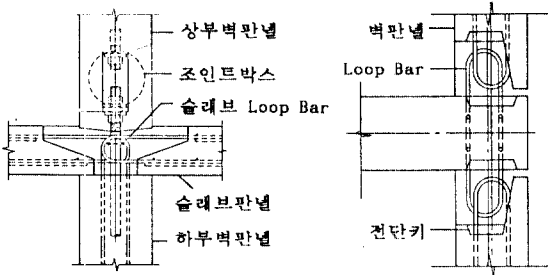


그림 1 실험체 형상



(a) 수평접합부 (b) 수직 접합부

그림 2 접합부 상세

2.2 사용재료의 규격 및 강도

실험체 제작에 사용된 철근 및 용접철망 등의 규격은 실험체의 축척에 맞도록 축소된 철근을 사용하며, 사용된 철근의 인장강도 및 용접철망의 강도는 표 1과 같다. 철근과 마찬가지로 콘크리트에 사용된 골재도 축소된 규

격을 사용하며, 특히 콘크리트와 모르타의 배합비는 여러번의 배합시험을 거쳐 가장 적합한 배합을 선택하여 실험체를 제작한다. 사용재료의 28일 압축강도는 표 2와 같다.

표 1 철근 및 용접철망의 강도특성

구 분	Ex10 ⁶ (t/cm ²)	항 복 시		σ_u (kg/cm ²)
		σ_y (kg/cm ²)	δ_y (x 10 ⁻⁶)	
φ 3	2.15	9309	4617	9791
φ 4	1.43	4694	3299	5020
φ 5	1.09	4622	4208	5405
φ 10	1.67	3102	1856	4293
HD6	2.34	3800	2006	4541
HD7	2.26	4717	2083	5228
HD13	1.38	4430	3205	6304

용접철망(φ4 x 150 x 150)
 인장강도 : 69 kg/mm²
 용접점전단강도 : 41 kg/mm²

표 2 콘크리트 및 모르타의 28일압축강도

구 분		1회	2회	3회	평균
벽판넬 슬래브	공 통	293	315	282	296
	공 통	315	282	315	304
수 직 접합부	3층	237	250	310	265
	2층	411	288	381	360
	1층	228	328	352	302
수 평 접합부	지 붕	301	483	498	491
	3층	470	459	516	482
	2층	476	433	365	425
	1층	377	373	370	373

2.3 실험방법

벽 판넬은 (주)동서산업 이천공장에서 제작하며, 실험체는 대덕 해사기술연구소 구조실험실 내에서 조립한다. 각층의 가속도 측정 은 실험체에 부착된 가속도계에 의하여 계속하며, 각 부위에서 측정된 변위는 증폭기를 거친후 A/D변환기 및 Anti-Aliasing 필터를 통하여 컴퓨터에 디지털 부호로 저장된다.

실험 계획

실험의 진행은 그림 3과 같은 Taft지진의 N21E 성분을 입력시켜 0.06g, 0.12g, 0.25g, 0.40g, 0.6g, 0.8g, 1.0g, 1.2g, 1.4g로 진동 실험을 한다. 또한, 각 단계별로 자유 진동 실험(Free Vibration Test), 유연도 실험(Flexibility Test), 주변 진동 실험(Ambient Test), 그리고 지진 실험(Earthquake Test)을 반복하여 진행한다. 주된 지진 방향은 건물의 장변 방향으로 하지만, 0.06g에서는 단변 방향 가진 실험도 한다.

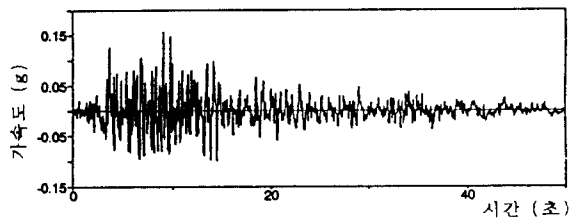


그림 3 Taft 지진 N21E 성분

인공 질량

실험체에 부착한 인공 질량은 두께 2cm의 철판을 사용하며, 인공 질량의 산출은 다음과 같은 상사법칙에 따른다.

원형 (Prototype)	모 델
1	$\frac{1}{n^3} + \alpha = \frac{1}{n^2}$

$$\alpha = \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n^3} = \frac{(n-1)}{n^3}$$

$$\alpha = (3.3-1)/(3.3)^3 = 0.064$$

측정 계기의 부착

본 실험체의 거동을 측정하기 위하여 LVDT 및 Strain Gage를 이용하여 각 부위의 변위 및 변형도를 측정한다. 주로 관찰하고자 한 것은 진동대 자체의 거동과 실험체 전체 응답, 각 층에서의 가속도, 들림 및 미끄러짐 변위, 수직보강철근의 변형도로서, 이를 측정

하기 위하여 그림 1과 같이 측정 계기를 부착한다. 가속도는 각 층에 부착한 총 5개의 가속도계로 부터 측정하며, 들림 및 미끄러짐 변위의 측정은 총 24개의 LVDT를 설치하여 측정하고, 수직 보강철근의 변형도는 실험체 조립시에 매립한 총 19개의 Wire Strain Gage를 통하여 측정한다.

층 전단력, 밀면 전단력, 전도 모멘트의 산정

본 실험체의 층 전단력은 그림 4와 같은 3개의 질량으로 치환된 1자유도의 스프링 모델로 가정하여 층별로 측정된 가속도와 상하 층의 상대 변위로 부터 산정한다.

$$m_1 \dot{y}_1 + k_1(y_1 - y_0) - k_2(y_2 - y_1) = 0$$

$$m_2 \dot{y}_2 + k_2(y_2 - y_1) - k_3(y_3 - y_2) = 0$$

$$m_3 \dot{y}_3 + k_3(y_3 - y_2) = 0$$

$$f_1 = k_1(y_1 - y_0) = -m_1 \dot{y}_1 + k_2(y_2 - y_1)$$

$$f_2 = k_2(y_2 - y_1) = -m_2 \dot{y}_2 + k_3(y_3 - y_2)$$

$$f_3 = k_3(y_3 - y_2) = -m_3 \dot{y}_3$$

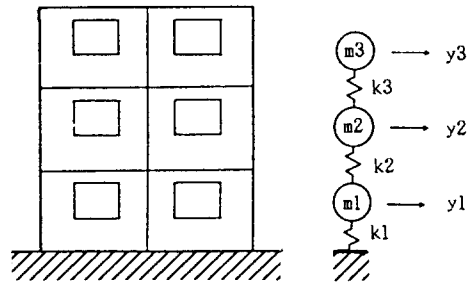


그림 4 실험체의 이상화

감쇠계수 및 고유주기 측정

실험체의 고유주기를 측정하기 위하여 각 가속도 지진의 입력 전·후에 자유진동 실험을 한다. 자유진동 실험은 그림 5와 같이 실험체의 상부에 인위적인 변위를 일으켜 일순간에 해제시킴으로써 나타나는 자유진동 실험치를 분석하여, 고유주기와 감쇠계수를 결정하는 실험으로서 감쇠계수의 결정은 각 사이클의 (+) 또는 (-) 방향의 진폭에 대하여 몇 개 사이클의 저하율을 계산하여 결정한다.

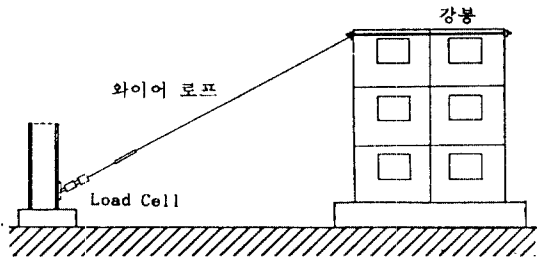


그림 5 자유진동 실험

3 실험 결과

3.1 균열 및 파괴상황

초기 균열은 0.12g일 때 1층과 2층 슬래브 하부에 수평 균열로 나타났으며, 최종 가속도까지 수평 접합부에서 균열이 발생하여 1.4g에서는 조인트 박스에 파괴가 집중적으로 나타났다. 최종 실험체의 파괴 상황은 조인트 박스를 통한 상·하부 수직 보강철근의 연결부가 파단됨으로서, 1층과 2층 수평 접합부에서 실험체가 분리되었으며, 수직 접합부에서의 균열은 거의 나타나지 않았다.

3.2 가속도

각 층에서 나타난 가속도 응답을 그림으로 나타내면 그림 6과 같다. 진동대의 입력가속도 증가에 따라 0.6g까지는 각 층의 가속도가 비례적으로 증가 하였으나, 0.8g에서는 급격하게 저하되었다. 0.12g에서의 진동대의 가속도 응답에 대한 각 층의 가속도 응답을 비로 나타내면 1층이 1.2배, 2층이 2.4배, 3층이 3.5배 높게 나타났으며 최대가속도를 보인 0.6g에서는 진동대에 비하여 1층이 1.1배, 2층이 1.7배, 3층이 2.1배로 높게 나타나 그 비율이 감소하는 것으로 나타났다.

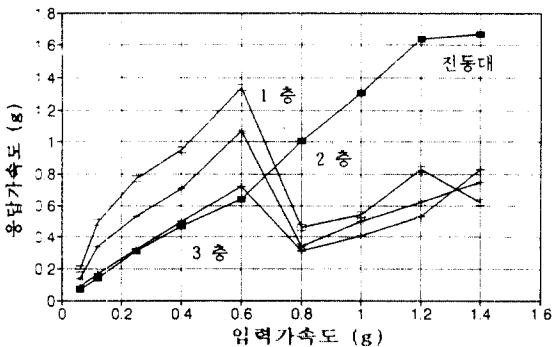


그림 6 각층 가속도 응답

3.3 횡변위

그림 7은 각 가속도별 밀면전단력과 3층의 횡변위 관계를 나타낸 그림이며 그림 8은 각 가속도별 최대값을 나타내는 곡선으로서, 최대하중인 0.6g까지 밀면전단력-횡변위 관계는 거의 탄성관계를 이루고 있다. 이는 국내 규준에서 탄성한계로 규정하고 있는 최대 지진가속도 0.12g에 비하여 5배의 가속도로 실험체의 내력이 매우 높게 나타났다. 그러나 최대 밀면전단력인 0.6g이후 부터 실험체의 강도가 급격히 저하되는 것으로 나타나 최대 내력 이후에는 비교적 취성적인 거동을 보였다. 가속도 변화에 따른 각 층 횡변위 변화를 그림 9에 나타내었다. 그림으로 부터 각 층에

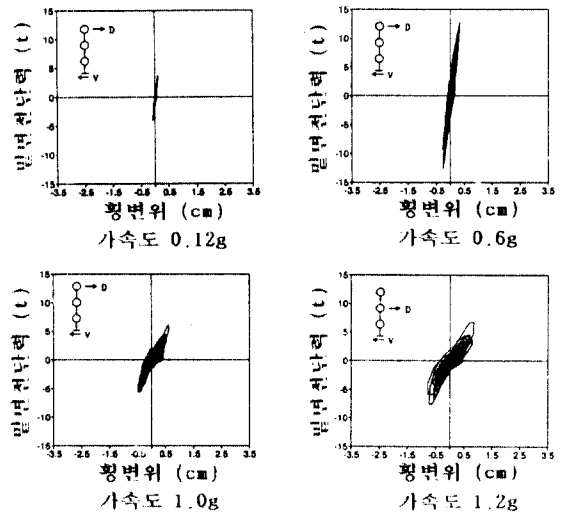


그림 7 가속도별 변위응답 (3층)

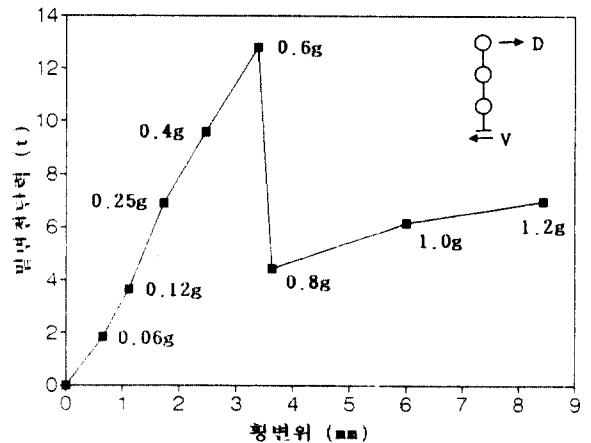


그림 8 밀면전단력-횡변위 곡선 (3층)

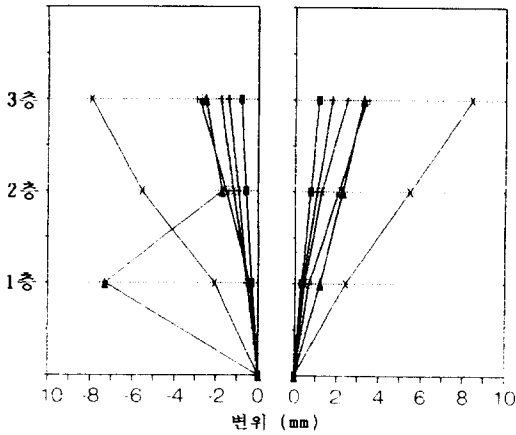


그림 9 층별 횡변위 응답

서의 횡변위 분포가 1.0g까지 거의 비례적으로 증가하여 일부층에서의 집중된 미끄러짐 변형이 나타나지 않는 거동을 보였음을 알 수 있다. 각 층에서의 층간변위를 계산한 결과는 최대 가속도인 1.4g를 제외하고 모두 규준에서 규정하고 있는 층고의 1.5%보다 작은 값으로 나타났다.

3.4 수직 보강철근의 변형도

밀면전단력에 대한 1층 수직보강철근의 변형도 변화를 그림 10에 나타내었다. 0.6g 이후부터 변형도가 항복변형도에 도달하여 비탄성 변형을 보였으며 1.2g에서는 완전 소성

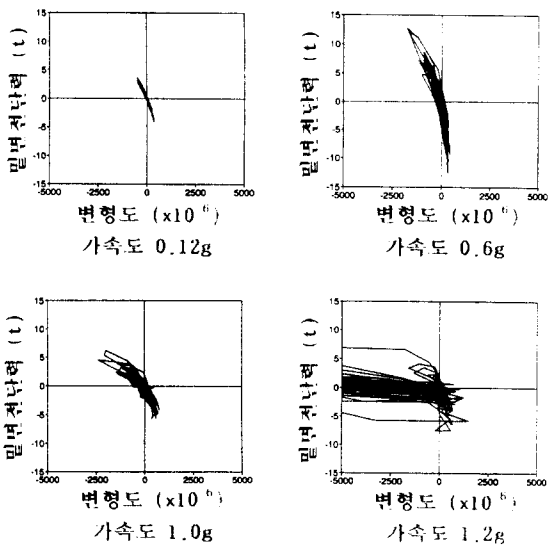


그림 10 수직보강철근 변형도 응답 (1층)

변형을 보여 파괴에 도달하는 것으로 나타났다. 2층과 3층에서 나타난 수직보강철근의 변형도 응답은 최종단계인 1.4g까지 탄성적인 것으로 나타났다.

3.5 수평접합부 들림(Rocking) 변위

수평접합부의 들림변위는 기초와 1층, 그리고 1층과 2층사이에서 측정하였으며 각 가속도별 들림변위를 그림 11에 나타내었다. 1층과 2층 사이에서 측정된 벌어짐은 최대 1mm에도 미치지 못하는 미소한 값을 보였으나 기초와 1층 사이에서는 0.4g에서부터 1mm의 변위를 보였으며 최대 밀면전단력인 0.6g에서는 1.81mm, 최종단계인 1.4g에서는 24.8mm의 큰 변위를 보였다.

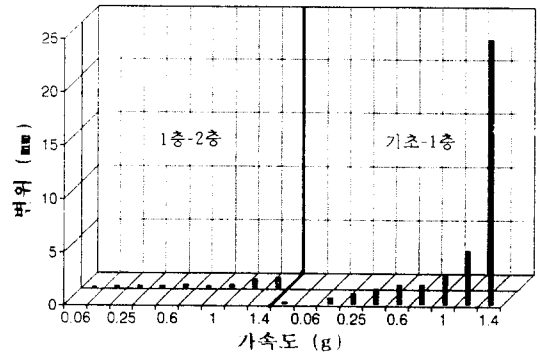


그림 11 수평접합부 들림변위 응답

4 실험결과와 비교분석

4.1 감쇠계수 및 고유주기

자유진동 실험결과 나타난 감쇠계수 및 주기, 강성을 표 3에 나타내었다. 실험전 초기 상태에서의 감쇠계수 값은 약 0.032이었으며, 0.6g에서는 0.046으로 나타났다. 또한 측정된

표 3 자유진동 실험결과

구분	U_1	U_n	n	δ	ξ	T	K_i/K_1
초기	0.050	0.012	7	0.204	0.032	0.06	1.00
0.06g	0.039	0.009	5	0.293	0.047	0.065	0.85
0.12g	0.035	0.005	6	0.324	0.052	0.065	0.85
0.25g	0.039	0.009	6	0.244	0.039	0.067	0.82
0.40g	0.030	0.004	6	0.336	0.053	0.07	0.73
0.60g	0.032	0.008	5	0.290	0.046	0.073	0.68

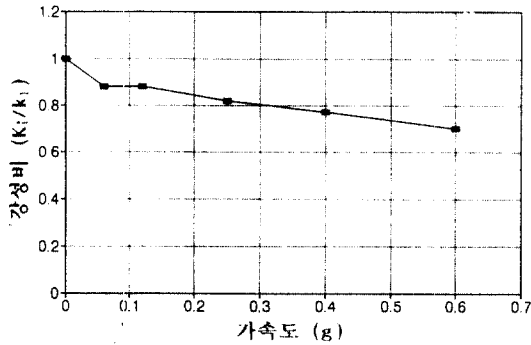


그림 12 가속도별 강성변화

고유주기는 초기상태에서 0.06sec로 나타났으며 0.6g에서는 0.073sec로 나타나 등가정적해석에 의한 값인 0.188sec와 비교하면 훨씬 짧은 주기를 보였다. 측정된 강성의 변화를 나타내면 그림 12와 같으며 초기 상태에서의 강성을 "1"이라고 하면, 0.6g에서의 강성은 0.7로서, 약 30% 강성의 손실이 있는 것으로 나타났다.

4.2 등가정적 해석결과와의 비교

국내의 내진설계기준에서 제시하고 있는 등가정적해석에 의하여 실험체의 밀면전단력을 산정하였다. 실험결과와 계산결과를 비교한 결과, 가속도 0.12g에서는 실험결과가 3.64t 으로서 계산결과인 1.035t에 비하여 약 3.5배로 나타났으며, 0.6g에서는 실험결과가 계산결과에 비하여 약 12배 높은 것으로 나타나 실험체의 내력이 매우 높음을 알 수 있다.

4.3 연성의 평가

본 실험체의 거동은 최대 밀면전단력인 0.6g까지 철근의 변형도 및 부재의 균열상태 등이 별다른 피해없이 탄성적으로 내력이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 0.6g이후 곧바로 급격하게 내력이 저하되어 전체적으로 연성능력은 낮은 것으로 나타났다.

5 결론

이상과 같은 대형 콘크리트 판구조 입체 3층 구조체의 진동실험결과로 부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 조인트 박스 연결형 수평접합인 본 실험체의 종곡파괴는 1층 수평접합부에서의 인장 및 압축파괴로 나타났다.

2) 실험결과 나타난 탄성한계는 0.6g의 가속도로써, 국내기준의 탄성한계인 0.12g의 가속도에 비하여 약 5배 높은 것으로 나타나 기준식의 탄성한계에 대한 안전율은 매우 높은 것으로 판단된다.

3) 최대 밀면전단력에 대하여 등가정적 해석결과와 실험결과를 비교한 결과 등가정적 해석결과에 비하여 실험결과가 0.12g에서는 3.5배, 0.6g에서는 12배로 나타나 본 실험체의 내력은 매우 높은 것으로 나타났다.

4) 본 실험체의 탄성한계는 0.6g의 가속도로써 높은 값을 보였으나, 탄성한계 이후 급격히 내력이 저하되어 연성은 비교적 낮은 것으로 나타났다. 따라서 탄성한계 이상의 가속도에 저항하기 위해서는 연성이 다소 확보되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글 : 본 연구는 (주)현대건설, (주)현대산업개발, (주)동서산업의 연구비 지원하에 수행된 연구로서 관계관 제위께 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- 이한선 (1992), "1/3 축소 3층 삼환 까뮤 P.C. 모델의 진동대 실험," 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 제4권, 제2호, 11월, pp.140-154.
- Chu, Y., Liu, Y., Chen, R., Guan, Q. and Shou, G. (1984), "Experimental Study on the Seismic Behaviour of Multistory Precast Large Panel Residential Buildings," 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, Vol. VI, July 21-28, pp.781-788.
- Harris, H.G. and Caccese, V. (1984), "Seismic Behavior of Precast Concrete Large Panel Buildings Using A Small Shaking Table," 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, Vol. VI, July 21-28, pp.757-764.