

1/3축소 3층 습식접합 프리캐스트 콘크리트 대형판 입체모델의 진동대 실험

Shaking Table Tests of 1/3-Scale 3-Story Wet-Jointed Precast Concrete Large Panel Box Model

이 한 선*
Lee, Han Seon

요 약

본 연구의 목적은 프리캐스트 콘크리트(P.C) 대형판 아파트 구조물에 대한 우리나라 내진설계기준 안 및 지침을 수립하기 위해 필요로 하는 정보를 취득하는 데 있다.⁽¹⁾

이것은 실제 지진과 유사한 진동을 발생시키는 진동대를 사용하여 P.C대형판 구조물의 거동을 분석 관찰함으로써 달성되었다. 여기에 사용된 시험체중의 하나는 습식접합 1/3 축소 3층 입체 P.C모델이었다. 지진파를 일으키기 위해 4mx4m 크기의 진동대가 사용되었다. 또한 선택한 입력지진가속도파는 Taft N21E 성분기록지진파로서 최대지진가속도(PGA)는 원하는 지진세기수준에 따라 조정되었고 시간축으로는 동적상사성법칙에 따라 축소되었다.

이 P.C모델의 진동대 실험을 통해 얻은 결과를 근거로 하여, 다음과 같은 결론을 도출하였다. (1) 이 시험체에 관한한, 지진안전계수는 7-8정도로 나타났으며, (2) 이 P.C모델의 감쇠계수는 대체로, 철근 콘크리트구조물 감쇠계수의 두배에 해당하는 값인 8% 정도이며, (3) 이 모델은 접합부의 벌어짐과 미끄러짐에 의한 에너지소산을 통해서 2-3정도의 전체적인 변위연성비를 보여주었다.

Abstract

The objective of the research stated herein was aimed at providing the information needed to establish the Korean Seismic Design Code Recommendations and Guides for precast concrete(P. C) large panel apartment buildings.⁽¹⁾

This was accomplished by investigation and analysis of the response of P.C large panel structures subjected to shaking table excitation simulating earthquake ground motion. One of the test specimens used was wet-jointed 1/3-scale 3-story box P.C model. The 4m x 4m shaking table was used to simulate the earthquake ground motion. The employed input accelerogram was the one recorded as Taft N21E component and the peak ground acceleration (PGA) was

* 정회원, 영남대학교 건축공학과 전임강사

● 본 논문에 대한 토의를 1993년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 1993년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

scaled depending on the desired level of seismic severity and the time according to dynamic similitude rule.

Based on results obtained from shaking table test of this P.C model, the following conclusions were drawn. (1) As far as test specimen is concerned, the seismic safety factor turns out to be 7~8. (2) P.C model has damping ratio of about 8% which is twice larger than in-situ R. C. structure. And (3) this model has global displacement ductility ratio of 2~3 through the energy dissipation by opening and sliding of joints.

Keywords : shaking table, natural period, damping ratio, displacement ductility ratio, input accelerogram, peak ground acceleration, similitude law, artificial mass, vertical joint, horizontal joint, opening, sliding, base shear, base overturning moment.

1. 서 론

현재 우리나라 내진설계 기준은 주로 미국 ATC3-06 규준안에 준하되 그 유효 최대지진가속도를 0.12g로 낮추어 수정보완한 것이다. 그러나 이 기준의 적용상 아직도 명확히 밝혀지지 않은 부분이 없지 않다. 특히 프리캐스트 콘크리트(P. C) 대형판 구조물을 설계할 경우, 반응수정계수의 결정시, 벽식철근콘크리트 구조로 볼 것인지 아니면 조적조에 준하는 구조물로 볼 것인지에 따라 설계지진 하중의 차이가 엄청나게 커질수 있다. 따라서 본 연구는 이러한 내진설계상의 주요계수 결정을 위해, 실험에 의한 P. C 대형판 구조물의 파괴형상 및 에너지흡수능력을 확인하였으며, 이외에 P. C 대형판 구조물의 고유주기 및 감쇠계수도 연구대상이 되었다.⁽¹⁾

주어진 여건하에서 소기의 목적을 달성하기 위하여 실험의 범위는 가장 필요로 하는 부분만으로 국한시켰다. 사용된 진동대는 대덕연구단지 소재 한국기계연구소 부설 해사기술연구소의 4m x 4m 크기의 진동대이었다. 이 진동대의 능력한계 및 축소모델제작상의 어려움으로 단순한 2개실로 이루어진 평면을 가진 1/3축소 3층 축소모델(Fig. 1)을 사용하였다.

우선 축소모델의 실험에 있어서 매우 중요한 요건으로서 상사성확보 문제가 있다. 이를 위하여 Fig.1에 점선으로 나타나 있듯이 이 모델의 중간 벽체 1, 2층 부분을 따로 분리한 부분구조물에 대하여 정적반복실험 (static cyclic test)을 수행

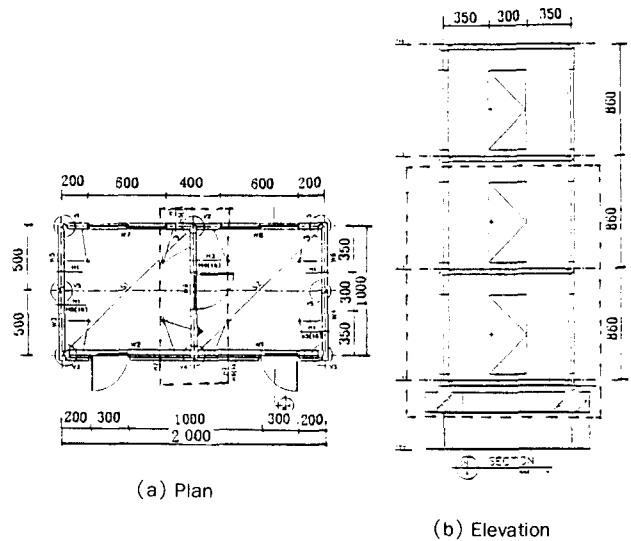


Fig.1 1/ 3-Scale 3-Story P. C model

하여,

- (1) 실물크기 시험체의 거동특성을 규명하고,
- (2) 1/3축소 시험체에 동일한 실험을 수행하여 실물크기시험체와의 상사성을 비교 확인하는 한편,
- (3) 만약 상사성이 맞지 않을 경우, 그의 원인 및 오차에 대하여 분석하였다.

고층 습식 P.C시스템 1세트 및 중층건식 P.C시스템 1세트를 진동대 실험에 사용하였으나 본 논문에서는 전자에 대해서만 언급하기로 한다.

2. 실물 및 1/3축소 부분구조물의 정적실험을 통한 상사성 검토

2.1 개요

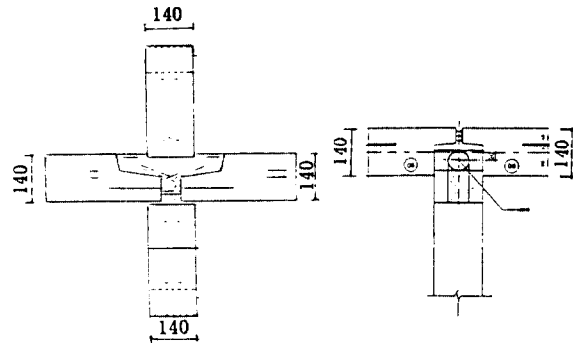
1/3축소 모델의 신뢰성을 확인하기 위한 과정으로서 전술한 바와 같이 실물크기부분구조물과 1/3축소부분구조물 시험체에 대해 정적 반복실험을 수행하였다.

이 실험을 위한 시험체 제작, 실험장치설치 및 실험결과에 대하여 간략히 서술한다.

2.2 실물크기 부분구조물의 정적실험

2.2.1 시험체의 설계 및 제작

습식접합 P.C 시험체에 대한 접합부 상세가 Fig.2에 주어져 있다. 특기할 사항은 수평접합부가 쐐기형(wedge type) 습식이며 상하벽체로부터 장부철근이 일정한 간격으로 돌출되어 있고 바닥판으로부터 철근이 수평연결(tie) 철근을 중



(a) Horizontal joint

(b) Vertical joint

Fig. 2 Joint detail of wet-jointed P.C system

심으로 맞물려 구부러져 있는점과 수직접합부에는 전단키가 없이 루프형 철근이 돌출되어 있고 이를 관통하여 수직 연결철근이 지나가게 되어있는 것이다. 사용된 콘크리트와 철근의 강도는 Table 1에 주어져 있다. 시험체 제작시 실수로 기초부분에 정착된 수직연결철근 및 플랜지벽체를 위한 장부철근의 위치가 설계된 것보다 안쪽으로 약간 치우쳐 있어 이를 수정하여 조립하였다.

Table 1 Test results of materials used for prototype subassembly

(a) Concrete

concrete	compressive strength(kg/cm ²)				tensile strength(kg/cm ²)			
	1	2	3	mean	1	2	3	mean
Panel concrete	299.0	289.0	297.0	295.0	26.3	37.3	33.6	32.4
Panel concrete	197.0	317.0	240.0	251.3	-	-	-	-
Panel concrete	245.0	314.0	270.0	276.3	-	-	-	-
Average				264.2	-	-	-	-
Joint concrete	164	348.5	344.5	336.5	36.4	38.5	37.2	37.4

(b) Reinforcement

re-bar	yield strength(kg/cm ²)				tensile strength(kg/cm ²)				max elongation(%)				
	1	2	3	mean	1	2	3	mean	1	2	3	평균	
D6	3911	-	-	3911									
HD13	4142	4039	4323	4168	6016	5953	6362	21.4	21.0	24.1	22.1		
HD16	3995	3970	4000	3988	6261	6181	6096	6179	22.7	22.6	23.1	22.8	
HD19	4000	3990	4000	3997	6554	6366	6387	6436	18.6	20.8	21.2	20.2	

2.2.2 실험장치 및 방법

1) 가력방법

주기적 반복하중(cyclically reversed loading)의 가력방식을 택하되 변위에 의해 조절하였다. 2층 벽판과 가력장치가 강접이 되도록 하였으며 2층 개구부 린텔의 조기파괴를 방지하기 위해 특별히 보강해 주었다. 4mm를 항복이 일어날수 있는 변위 δ_y 로 보고 $1/2\delta_y, \delta_y, 2\delta_y, 3\delta_y, \dots$ 등의 방식으로 최대변위수준을 증가시켰으며 각 수준에 3사이클을 적용하였다. 채널수와 데이터 취득시간을 감안 1사이클당 3분의 속도를 유지하도록 하였다.

2) 측정기구 설치

Fig. 3과 같이 측정기구를 부착하였다. 이 그림

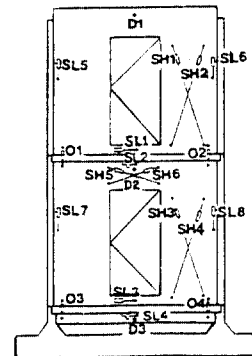


Fig. 3 Location of measurement device

에서 O는 접합부의 벌어짐, SL은 미끄러짐, SH는 벽판의 전단변형 측정을 의미하며, D는 기준프레임과의 층변 절대 횡변위 측정을 나타낸다.

2.2.3 실험결과

1) 균열 및 파괴양상

첫 균열은 2단계($\delta_{max}=\delta_y$)에서 1, 2층 개구부 상단 좌우모서리에서 생겼으며, 4단계($\delta_{max}=3\delta_y$)에서 1층 바닥면에 벌어짐이 생기고 그후 5단계($\delta_{max}=4\delta_y$)에서 1층 개구부상단모서리에서 균열이 심화되었으나 최종파괴는 1층 바닥 수평접합부의 과도한 벌어짐에 의한 수직연결철근의 절단에 의해 일어났다. 이 실험크기 시험체는 1층 수평접합부의 장부철근(dowel bar)의 부착력이 점차 감소되어 이 부분의 벌어짐이 주요파괴양상이 되었고, 상부구조체는 대체로 매우 작은 손상을 입은 것이 그 특징이다.

2) 전체 휘-변위관계

전술한 바, 제작상의 결함에 의해 Fig.4와 같이 전체 힘-변위곡선이 대칭이 되지 못하고, 한 쪽은 최대하중 17ton 이후에 급격한 강도저하를 나타내고 있다. 이의 원인은 결합부분에서의 콘크리

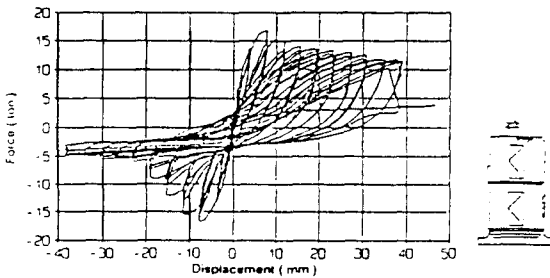


Fig. 4 Global force-displacement hysteretic curve of prototype subassembly

트 및 철근이 조기 파괴됨으로써 수직연결철근에 대한 정착역할을 제대로 해주지 못한 때문으로 판단된다. 그러므로 추후 결과분석에서 제작상 결함 부분에 의한 실험결과는 대상에서 제외한다.

2.3 1/3축소 부분구조물의 정적실험

2.3.1 시험체의 설계 및 제작

1) 개요

상사성 범칙에 의해 철근과 콘크리트의 강도가 실물과 1/3축소 모두 같도록 하는 실제적 진(眞)모델(practical true model)을 표준으로 하였다.⁽⁵⁾ 그러나 재료의 성질이 상사성 원리에 정확히 맞도록 제작함에 있어 현실적으로 어려움이 많았기 때문에, 주어진 여건하에서 상사성 원칙에 근사한 재료를 선택사용하였다.

2) 재료의 제작

접합부 콘크리트는 조골재 대신 세골재를 #8체로 채가름하여 통과한 것을 세골재로, #4체로 통과하고 #8체에 남는 세골재를 자갈로 보아 마이크로콘크리트기법에 의해 가장 실물과 가까운 Table 2의 모델I의 배합비를 채택하였다.⁽⁶⁾

Table 2 Results of joint concrete cylinder tests for 1/3-scale subassembly

Type	mix ratio				aggr-egate			compressive strength(kg/cm ²)				tensile strength(kg/cm ²)			
	W	C	S	G	Sm	Gm	1	2	3	mean	1	2	3	mean	
Prototype	0.65	1.0	3.0	3.0			3164	3065	3045	3065	35.4	28.5	37.2	37.4	
model I	0.70	1.0	3.0	0.0	4:1		3322	3327	3028	3276	50.0	44.0	43.6	45.9	
model II	0.70	1.0	6.0	0.0	1:1		2934	2928	3372	3211	-	-	-	-	
model III	0.70	1.0	6.0	3.0	1:2		2538	2827	2822	2822	-	-	-	-	

S_m: Sand through #8

G_m: Sand through Sieve #4 but remaining on sieve # 8

실물크기 시험체의 수직연결철근으로 HD19를 사용하였으나 축소모델 연결철근으로는 D6을 사용하였으며 HD10의 실물크기 시험체 장부철근에 대해서는 축소모델에서 $\phi 4\text{mm}$ 아연도철선을 사용하였다. 특히 소단면 원형철근은 특별한 기구를 이용하여 이형화 하였다.^(5,6)

2.3.2 실험장치 및 방법

실험장치는 실물시험체 실험시와 축소된 점을 제외하고는 일치하나, 계측기기의 크기가 상대적으로 시험체에 차지하는 비율이 높아진 관계로 몇가지 중요치 않은 부분의 계측은 생략하였다. 실험속도는 실물크기 시험체 실험과 동일하게 사이클 당 3분으로 하였으며 가력방법은 동일하다.

2.3.3 실험결과

1) 균열및 파괴양상

파괴양상은 실물크기시험체 실험의 양상과 매우 유사하게 나타났다. 즉, 1층 수평접합부의 벌어짐이 주요 비탄성거동의 요인이 되고 있다.

2) 전체 힘-변위관계

Fig.5에서 최대강도는 우측방향가력시(→) 최대변위 5.3mm인 4단계에서 1.52ton을 나타내고 좌측방향가력시(←)는 최대변위 6.6mm인 5단계에서 최대하중 1.51ton을 나타내 좌우 대칭성을 대체로 유지하고 있다.

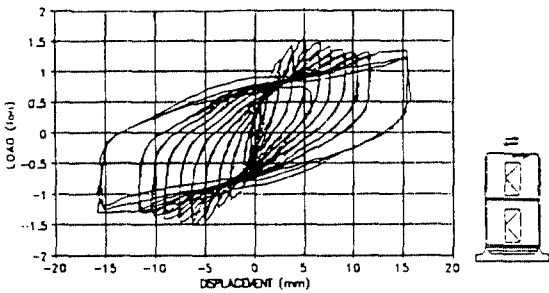


Fig. 5 Global force-displacement hysteretic curve of 1/3-scale subassembly

2.4 1/3축소모델의 상사성확보평가

실물크기시험체의 전체 힘-변위곡선인 Fig.4와 1/3축소모델의 전체힘-변위곡선인 Fig.5를 비교하여 1/3축소모델의 대체적인 상사성 확보상태를 평가해 본다. 1/3축소모델은 강도면에서 실물크기시험체 강도인 17ton의 1/9인 1.88ton에 약 20% 미달된 1.51ton을 나타내고 있으며 이력곡선의 형상면에서는 지나치게 큰 잔류변위에 의해 실물실험의 결과에 비해 훨씬 큰 에너지흡수능력을 나타내고 있다. 그러나 각 단계별 최대강도를 연결한 포락선은 실물실험의 결과와 매우 유사하게 나타났다. 강도저하의 원인으로는 실물시험체의 연결철근인 HD19의 1/3축소모델로서 D6를 사용한 것과 수평접합부에서 장부철근의 부착력이 1/3모델에서는 실물과 같은 효과를 거두지 못하였던 점, 마지막으로 벽판자중의 대폭적인 감소(1/27)에 의한 1층 수평접합부에서의 마찰저항의 급격한 감소도 한 요인이라고 판단된다.

3. 1/3축소 3층 습식접합 P.C모델의 진동대 실험

3.1 실험모델 설계, 제작및 설치

실험모델의 평면및 입면은 Fig.1과 같으며 제작 및 설치완료 후의 모습이 Photo 1에 나타나 있다.

이 입체모델은 정적실험시 사용된 1/3축소모델과 동일한 재료로 제작되었다. 동적거동의 상사성에 관한 변수의 축소율은 Table 3과 같으며 여기서

Table 3 Reduction scale according to similitude law of dynamic experiment

Parameter	r^*
Area	r^2
Stress	1
Mass	r^3 (due to added mass)
Force	r^2
Strain	1
Displacement	r
Time	\sqrt{r}
Period	\sqrt{r}
Moment	r^3

$r^*=1/3$ geometric similitude of model / prototype.

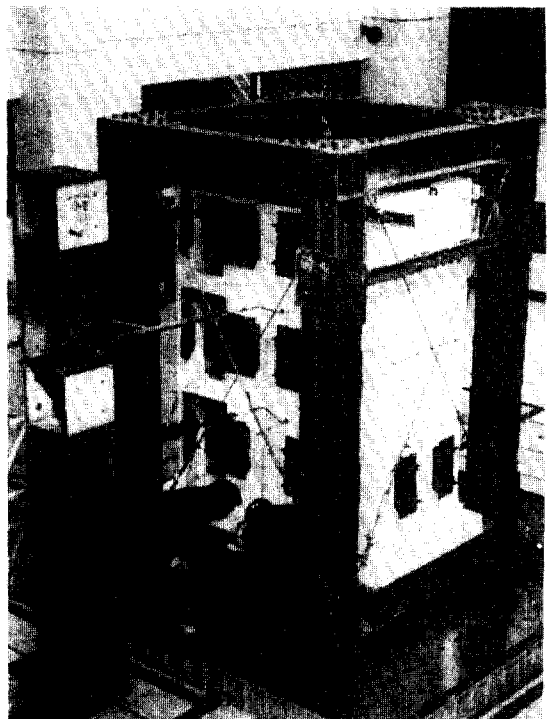


Photo 1 1/3-scale 3-story wet-jointed precast concrete box model on the shaking table

입력지진가속도, 재료의 응력및 변형도가 실물크기 시험체와 같게 하고 중력가속도를 축소모델에도 같은 값으로 할 경우 질량은 축소율의 제곱으로 축소되는 것으로 나타나 있다. 실제 모델의 체적이 축소율의 3제곱으로 줄어들음을 고려할 때 그 차이를 인위적인 질량으로 보충해 주어야 할 필요가 있다. 따라서 적절한 위치에 크기가 480mm x 90mm x 70mm, 무게 25kg의 납덩이를 부착, 인공질량의 역할을 하게 하였다. 이 인공질량은 시험체의 구조특성에 영향을 미치지 않도록 하였다.^(3,7)

시험모델의 설치운반을 위해서 Photo 1과 같은 프레임을 시험체 주위에 조립하였다. 이 프레임의 기초와 시험체 기초가 강접합되었으며 다시 프레임의 기초는 진동대 바닥과 볼트에 의해 강접이 되도록 하였다.

3.2 계측장치및 실험설비

3.2.1 측정계기

이 실험에 사용된 측정계기들은 (1)진동대 자체의 거동 (2) 시험체의 전체응답 (3) 시험체의 국부응답을 관찰하기 위한 것이다.

32개의 채널이 입력지진과 응답측정에 사용되었고 시험체 전체 응답으로서 각층변위 및 가속도 측정을 위해 LVDT 4개및 가속도계 5개가 사용되었

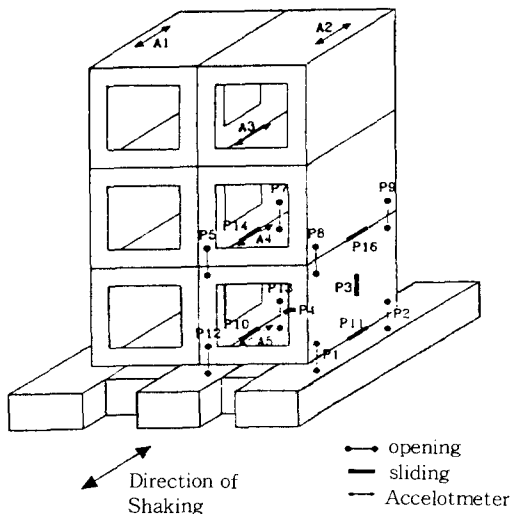


Fig.6 Locations of measurement device

다. P. C모델의 국부거동 관찰을 위해 주요 수평접합부를 따라, 벽판사이의 미끄러짐과 벌어짐을, 수직접합부에서는 벽판사이의 미끄러짐이 측정되었으며 주로 포텐쇼미터(potentiometer)를 사용하였다. 측정계기 부착위치는 Fig. 6에 나타나 있다. 각층의 수직연결철근에는 층바닥 상부 2cm 위치에 스트레인게이지를 부착하여 변형도를 측정하도록 하였다.

3.2.2 실험설비

이 PC모델의 진동대 실험은 한국기계연구소 부설 해사기술연구소에서 수행되었으며 사용된 진동대와 데이터획득시스템에 대하여 간략히 소개한다.

1) 진동대(shaking table)

진동대는 넓이 4m x 4m로서 수평방향으로 100ton 용량의 가력장치(actuator)4대, 수직방향으로 50ton용량의 가력장치 4대로 이루어져 있다. 가진(加振)자유도는 6개이며, 가진진동범위는 0~50Hz이고 자중 15ton 최대무게 30ton의 시험체를 수평가속도 1.5g 수직가속도 1.0g까지 실험이 가능하다.

2) 데이터 취득시스템(data acquisition system)

이 시스템의 기능은 실험중의 데이터수집과 진동대를 가력하는 입력신호를 발생시키는 것이다. 이와 관련하여 설치된 컴퓨터는 Micro Vax3200으로 진동대에 원하는 파형을 입력하고 최대 64개의 아날로그채널로 부터 시간차없이 동시에 데이터를 인식한다.

3.3 실험진행프로그램

실험입력진동대가속도의 크기를 초기에는 약하게 하다 점차 증가시킴으로서 P.C모델의 탄성거동에서 부터, 이후 비탄성및 붕괴에 이르는 전체 거동을 관찰할수 있도록 하였다. 또한 각 지진입력실험사이 마다 시험체의 고유주기와 감쇠계수 등의 동적특성을 측정하는 실험을 수행하였다. 이것은 시험체가 입력지진에 의한 손상도를 나타내는 강성저하(stiffness degradation)량을 알 수 있

고, 감쇠계수 또한 실험을 통해서만 구할 수 있기 때문이다.

3.3.1 입력지진파의 결정

입력지진파는 1952년 미국 Taft에서 기록된 N21E요소(Fig.7)를 사용하였다. 또한 이 지진기록은 동적실험상의 상사성법칙을 만족시키기 위해 시간축으로 $1/\sqrt{3}$ 배 축소하였으며, 최대입력 가속도는 원하는 수준에 따라 조정하여 사용하였다. 이 입력지진에 대하여 실제 일어난 진동대의

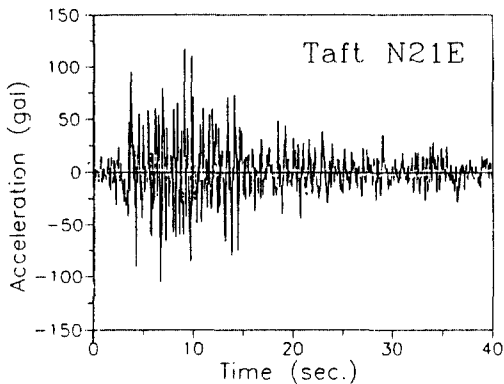


Fig. 7 Accelerogram of Taft N21E component with adjusted peak acceleration of 0.12g

Table 4 Maximum values of responses to Taft N21E input accelerograms

		0.12g	0.25g	0.40g	0.60g
Acceleration (gal)	Roof	-542.1 (3.87)	-1005.29 (3.05)	-1390.23 (2.95)	-1782.06 (2.78)
	3	-294.0 (2.10)	-629.91 (1.91)	-1036.89 (2.20)	-1098.66 (1.71)
	2	-257.1 (1.84)	-476.54 (1.44)	677.93 (1.44)	-714.92 (1.11)
	Table	140.6 (1.00)	329.89 (1.00)	470.84 (1.00)	641.62 (1.00)
Relative Displ. (mm)	Roof	0.618 (1.00)	1.946 (1.00)	3.643 (1.00)	
	3	0.646 (1.05)	1.289 (0.66)	2.554 (0.70)	
	2	0.434 (0.72)	0.888 (0.46)	1.742 (0.48)	
Table Displ.(mm)	2.32	4.86	7.726		
base overturning moment		-377.9	-714.92	-1166.28	-1379.79
base shear		2.13	-4.10	-6.38	-7.15

base shear : ton, base overturning moment : ton-cm

최대가속도와 변위가 Table 4에 주어져 있다. 이 표에서 입력최대가속도(peak ground acceleration : PGA) 수준은 우리나라 내진설계기준의 0.12g을 기준으로 0.06g, 0.12g, 0.25g(손상범위), 0.4g~1.0g(붕괴범위)로 하였으나⁽²⁾PGA 0.06g은 매우 약한 지진이었고 PGA 1.0g의 경우는 과도한 시험체의 붕괴응답으로 프레임과 시험체 사이에 충돌이 발생하여 이를 수록치 않았다.

3.3.2 고유주기 및 감쇠계수의 측정

각 지진반응실험의 전후에 자유진동(free vibration)실험과 주변진동(ambient vibration)실험을 수행하여 시험체의 고유주기를 측정하였다.

자유진동실험은 초기에 와이어로프등으로 시험체를 잡아당겨 일정한 변위를 주었다가 일 순간에 이를 해제시킴으로써 나타나는 자유진동현상을 분석하여 고유주기와 감쇠계수를 결정하는 실험이다. 또한 주변진동실험은, 시험체가 고정되어 있는 진동대에 매우 낮은 진폭의 백색파(white noise)를 가하여 시험체 지붕에 부착된 수평가속도계로 부터 가속도 기록을 구하는 것이다. 이 얻어진 가속도기록으로써 스펙트럼분석을 통해 시험체의 고유주파수를 구한다. 여기서 백색파란 대개 0.5Hz에서 20~30Hz까지의 고주파에 걸쳐 균등한 파워를 가진 인위적인 랜덤(random)합성파를 말한다.⁽⁴⁾

4. 진동대 실험결과분석

4.1 파괴양상에 대한 안목 관찰

시험체 하부, 즉 프레임의 철골기초와 진동대 고정시, 이 철골보의 초기휨변형이 퍼지면서 상부 시험체에, 특히 1층 수평접합부 하단에 눈으로 뚜렷이 확인할수있는 수평균열을 초래하였다. PGA 0.12g에 대해서는 전혀 추가적인 균열을 발견할 수 없었다. 외관상으로는 PGA 0.40g 까지도 강체(rigid body)로서 수평운동하는 것같은 느낌을 주었다. PGA 0.60g에서 1층바닥 및 2층바닥수평접합부에 심각한 균열이 나타나고 양측벽 수직접합부에도 균열이 발생하였다.

PGA 1.0g에서 1층 바닥 수평접합부가 개폐운동(rocking motion)에 의해 완전히 기초와 분리되는 현상을 보여 주었다. 수직접합부내의 수직연결철근이 파단된 것으로 보이며, 지나친 지붕횡치짐으로 인해 지붕에 부착된 채널이 프레임의 측벽가새와이어에 충돌하는 현상을 나타내었다.

이때 대체로 손상이 1층바닥 수평접합부에 집중되었으며 2층바닥 수평접합부에 심각한 균열이 발생하였고 1층 측벽 수직접합부도 손상이 매우 컸다.

4.2 진동대 실험결과 분석

이 시험체는 최대입력진동대 가속도(PGA)로 0.06g, 0.12g, 0.25g, 0.40g, 0.60g 및 1.0g에 대하여 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 0.12g과 0.60g의 최대입력가속도에 관한 결과를 분석하고, 기타의 것은 한꺼번에 입력가속도의 변화에 따른 분석에서 다루고자 한다. 1.0g의 최대입력가속도 실험결과는 도중 시험체와 프레임간의 충돌이 발생하여 실험결과의 신뢰성이 결여된 것으로 보아 생략하였다. 또한 실험결과 얻어진 왜곡된 데이터, 특히 가속도응답데이터는 분석가능한 자료로 바꾸는 작업(data reduction)을 수행하였다.⁽⁶⁾

4.2.1 Taft N21E 0.12g에 대한 실험결과

1) 진동대 기동

이 실험은 우리나라 예상최대지진유효가속도 0.12g의 지진에 대한 이 시스템의 거동을 관찰하기 위한 것이다. 진동대의 최대변위는 2.32mm 최대수평가속도는 140.6cm/sec²으로서 큰 지진이 아니었기 때문에 포텐쇼미터등 계기에 계측된 변형이 대부분 계측최소단위 범위내에 들었다.

2) 가속도및 상대변위

Table 4에서 가속도계에 얻어진 지붕의 최대가속도는 542cm/sec²로서 진동대 최대가속도의 약 3.9배를 나타내고 2층바닥, 3층바닥 및 지붕에서의 최대가속도비는 1.0 : 1.14 : 2.1로 나타나 지붕의 가속도가 다른 층에 비해 매우 높은 것을 보여주었다. 각층의 절대변위에서 진동대 변위를

벤 값을 상대변위로 하면, 그 최대치는 약 3.6초 정도에서 발생하였으며 흥미로운 것은 3층바닥이 지붕의 최대치보다 약간 더 크며 2층 바닥의 상대변위 최대치 0.434mm는 지붕의 최대치 0.618mm에 비해 상당히 큰 양을 나타내고 있다는 것이다.

3) 밀면전단력및 밀면전도모멘트

시험체의 질량이 각층에 집중되어 있는 3자유도 모델로 보고($m_1=1856\text{kg}$, $m_2=m_3=2464\text{kg}$), 각층에서 계측된 가속도에 해당층의 질량을 곱하여 관성력을 구하고, 각층에 작용하는 이들 관성력의 합을 밀면전단력으로, 또한 해당층의 관성력에 밀면으로 부터의 층높이를 곱하여 더한 것을 밀면전도모멘트로 보았다. 최대 밀면전단력 및 최대 밀면전도모멘트는 Table 4에 주어져 있다.

4) 철근변형도

수직접합부에서의 수직연결(tie)철근에 대해서만 변형도를 측정하였으며 측정높이는 각층 바닥 판 상부 2cm로 하였다.

큰 변형도가 나타난 곳은 1층 바닥부분으로서 밀면전도모멘트와 변형도간의 이력관계가 Fig. 8에 나타나 있다.

대체로 압축인장 양쪽으로 대칭이기는 하나, 압축변형이 인장변형보다 상대적으로 작은 값을 보

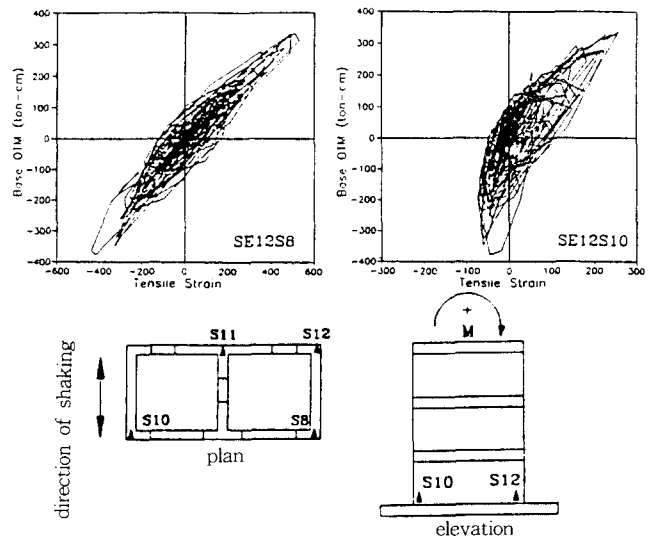


Fig. 8 Hysteretic curves between base overturning moment and strain at 1st-floor vertical tie bars under Taft N21E 0.12g

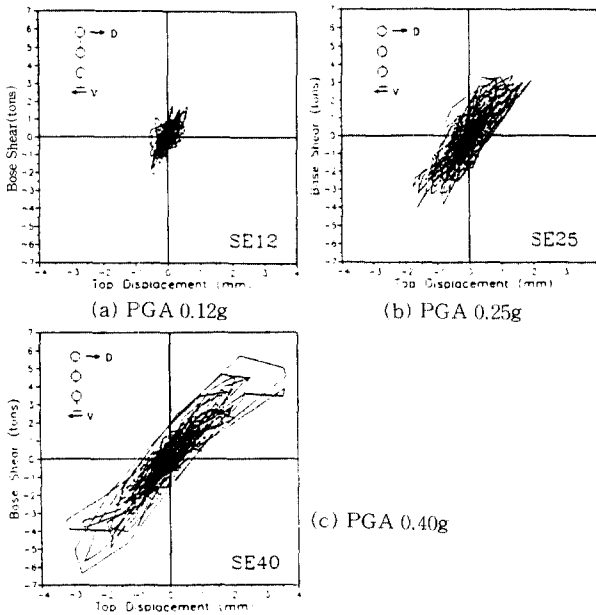


Fig. 9 Hysteretic curves between base shear and roof displacement under Taft N21E input acceleration

이고 있다. 상층부(2층, 3층)의 변형도는 200×10^{-6} 이내로서 1층 바닥경우보다 훨씬 낮았다.

5) 접합부 국부변형

접합부의 국부변형으로서 수평접합부의 벌어짐이 주로 계속되었으며 P1, P8 및 P13을 제외하고는 최소축정단위수준변형 이내에 들었다.

밀면전단력과 지붕의 횡차집간의 이력곡선이 Fig. 9에 주어져 있으며 이것으로부터 대체로 이 시험체는 2.5t/mm의 강성을 보유하고 있는 것을 알 수 있다. 한편 최대변위가 0.62mm인 것에 비해 0하중시 최대잔류변위의 비가 80% 이상되어 매우 산만한 형태를 나타내고 있다. 이에 대한 원인으로서 첫째 변위측정계기의 최소축정단위가 관심측정범위에 비하여 적절하게 설정되지 못한 듯 하며, 둘째 가속도의 실험결과를 처리하는 과정에서 변위와 가속도사이에 위상각의 차이가 발생하여 실제데이터에 인위적인 시간차이가 개입하였을 가능성을 들 수 있다.

4.2.2 Taft N21E 0.60g에 대한 실험결과

1) 가속도와 상대변위

이 실험은 붕괴수준에서의 시험체 거동을 관찰

하고자 수행되었다. Table 4에서 지붕의 최대가속도 1782cm/sec^2 은 진동대 최대입력가속도 642cm/sec^2 의 2.78배를 나타내고 있다. 이것은 PGA 0.12g 경우의 증폭비 3.9에 비해 현저히 낮은 값이며 시험체가 접합부등에서 비탄성적으로 거동함으로써 많은 에너지를 흡수한 것이 그 이유라고 판단된다. 2층바닥, 3층바닥 및 지붕에서의 최대가속도비는 1.0:1.54:2.49로 대체로 역삼각형 분포를 나타내고 있다. 이 수준의 진동대 실험에서 붕괴수준의 큰 횡변위가 일어날 것을 예상하고, 총횡변위 측정계기(LVDT)를, 과도한 변위에 의한 계기의 손상을 방지한다는 취지에서 사전에 제거하였기 때문에, 이에 대한 실험결과를 얻지 못한 것은 매우 아쉬운 일이었다.

2) 밀면전단력 및 전도모멘트

전과 같이 3자유도 집중질량모델로 보고 각층의 가속도기록을 이용해서 밀면전단력과 전도모멘트 시간이력을 구해본 결과, 밀면전단력은 3.75초 부근에서 최대값 7.15 ton을, 밀면전도모멘트도 같은 시각에 최대값 1379.8tcm를 기록하였다.

3) 철근의 변형도

1층 수평접합부의 한 수직연결철근의 밀면전도모멘트와 관련한 이력곡선이 Fig.10에 나타나 있다. 이 그림으로 부터 역시 인장축의 강성이 압축축에 비해 상당히 작은 것을 발견할 수 있다.

4) 접합부 국부거동

각 부위에서의 최대벌어짐 및 미끄러짐 변위는

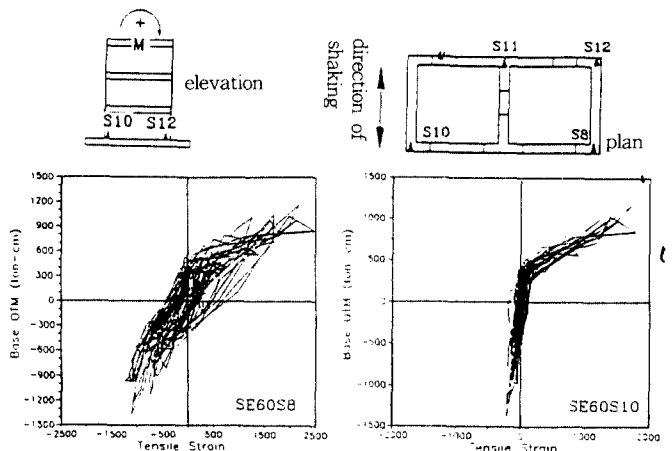


Fig. 10 Hysteretic curves between base overturning moment and strain at 1st-floor vertical tie bar under Taft N21E 0.60g

Table 5 Maximum values recorded at potentiometers under Taft N21E input accelerogram(Unit : mm)

PGA		0.06g	0.12g	0.25g	0.40g	0.60g
Sliding	3	0.0007*	0.0007*	0.033		0.18
	4	0.0007*	0.0014*		0.1	0.175
	10	0.0007*	0.0007*	0.0017*	0.15	
	11		0.0007*	0.0007*	0.0017*	0.5
	16	0.0007*	0.0007*	0.0014*	0.066	0.12
opening	1		0.06	0.25	0.88	1.32
	2	0.0007*	0.0021*	0.125	0.18	0.2
	5	0.0007*	0.0021*	0.052	0.025	0.02
	7	0.0007*	0.0007*	0.07	0.165	0.125
	8	0.0315	0.06	0.14	0.22	0.225
	9	0.0021*	0.0021*	0.0007*	0.15	0.7
	12	0.0007*	0.0007*	0.0007*		0.17
	13	0.095	0.055	0.18	0.3	0.5

* Shows the deformation at the level of resolution unit

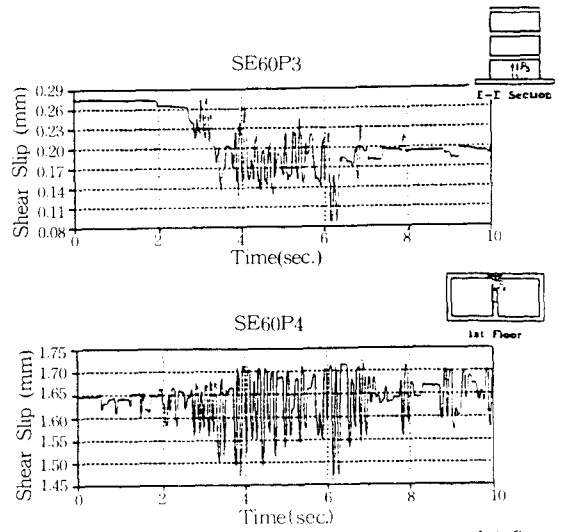


Fig. 11 Time histories of opening and sliding at 1st-floor vertical joints under Taft N21E 0.60g

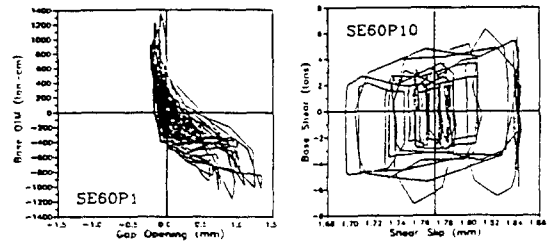
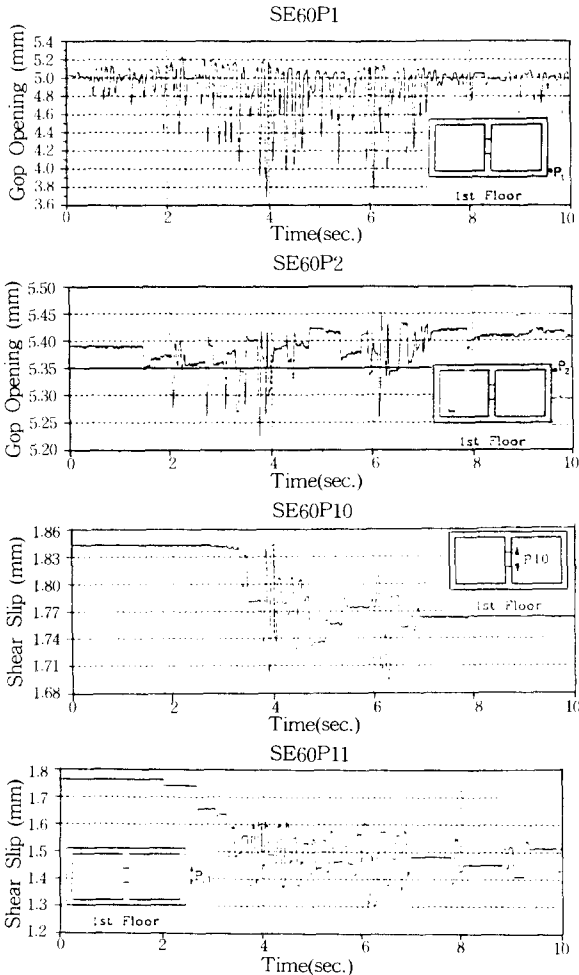


Fig. 12 Hysteretic curves between 1st-floor joint opening and base overturning moment under Taft N21E 0.60g

Table 5에 주어져 있으며 이들중 대표적인 시간 이력이 Fig. 11에 나타나 있다. 이로부터 최대 벌어짐은 P1에서 1.32mm로, 최대미끄러짐은 P11에서 0.5mm로 나타났다. 시형체를 강체로 보았을 때 각각의 최대치가 서로 다른 시각에 나타나고 있음을 Fig.11에서 볼 수 있다. 이 그림에서 P1과 P2의 벌어짐기동에서 P1이 P2보다 자주 벌어지는 현상을 나타내고 있다. P2는 샌드위치판넬쪽으로 개구부가 작은 벽판에 위치한 계기이다.

1층 수평집합부에서 중간벽의 미끄러짐이 (P10) 측벽의 미끄러짐(P11)을 비교할 때 P11이 P10보다 더 자주 미끄러지는 현상을 보여주어 같은 평면에서도 벽체의 위치에 따라 다른 기동을 보일 수 있음을 나타내고 있다.

Fig.11과 같이 1층 측벽중간에 위치한 수직접합부의 미끄러짐(P3)은 최대 0.18mm의 미끄러짐을 나타낼 정도이며 대체로 방향을 바꾸는 반복미끄러짐현상을 보여주었다. 마찬가지로 1층 중간벽과 플랜지벽체가 만나는 수직접합부의 미끄러짐변위(P4)도 P3와 비슷한 현상을 보여주고 있으며 그 최대값은 0.175mm정도이다.

P1의 벌어짐과 밀면전도모멘트, P10의 미끄러짐과 밀면전단력의 이력곡선이 Fig.12에 주어졌다. 전자의 경우 인장시 큰 벌어짐과 압축시의 매우 작은 오프리짐을 보여주고 있으며 후자의 경우 일반정적반복실험결과와 유사한 박스(box)형 커브를 나타내고 있다.

4.3 최대입력가속도의 변화에 따른 거동특성분석

4.3.1 동적특성의 변화

각 지진실험의 전후에 자유진동실험과 주변진동실험을 실시하여 시험체의 고유주기와 감쇠계수를 구하였으며 그 결과가 Table 6에 주어졌다.

Table 6 Natural Periods and damping ratios of 1/3-scale 3-story wet-jointed P.C model

	Free vibration test				Ambient Test	
	T(sec.)	ξ	T(sec.)	ξ	T(sec.)	ω (Hz)
	+		-			
before test	0.0735	4.0%	0.0789	12.3%	0.0735	13.6
after PGA 6%, before PGA 12%	0.0824	10.5%	0.084	8.6%		
after PGA 12%, before PGA 25%	0.083	5.9%	0.0838	8.1%	0.077	12.98
after PGA 25%, before PGA 40%	0.077	7.8%	0.0796		0.0772	12.95
after PGA 40%, before PGA 60%	0.095	7.3%	0.0876	10.4%	0.084	11.90
after PGA 60%					0.088	11.36

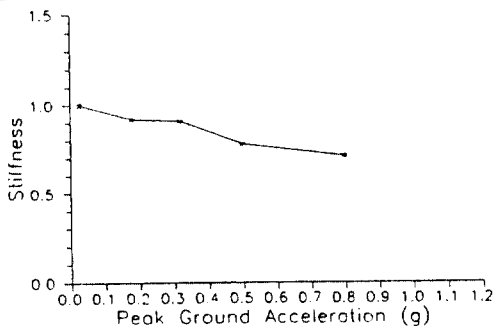


Fig. 13 Stiffness degradations due to increase of input peak accelerations

강성 K_1 , K_2 와 그때의 고유주기 T_1 , T_2 사이의 관계가,

$$\frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 \quad (1)$$

로 주어진다. 이를 감안할 때 초기 고유주기 0.074초의 강성을 K 라 할 때 강성 저하 현상은 Fig.13에 주어져 있으며 PGA 0.6g 실험이후 약 30%정도 강성저하가 일어난 것을 알 수 있다.

이 시험체의 감쇠계수는 Table 6에서 고르지 않은 값을 보여주고 있다. 그러나 대체적으로 약 8% 내외의 감쇠계수를 보유한 것으로 판단된다.

4.3.2 가속도 및 변위

Table 4로부터 진동대 최대가속도에 대한 시험체지붕 최대가속도의 비를 구할 수 있다. 이 증폭비를 도표화한 것이 Fig.14로서 초기 3.87에서 2.78로 떨어진 것을 알 수 있으며, 이 비의 저감현상은 시험체의 비탄성거동에 의한 에너지흡수가 주원인이다.

Table 4의 팔호속에 지붕의 최대처짐을 1로 하였을 때 2층 및 3층바닥의 상대변위비를 나타내고 있다. PGA 0.12g에 대해서는 상대변위비가 거의 1에 가까와 대체로 강체운동(rigid body motion)을 보여주었으나 PGA 0.25g이상부터는 높이의 증가에 따라 선형적으로 상대변위가 증가하는 현상을 나타내었다. 이는 상부구조부분에서의 변형이 대체로 고르게 분포된 것을 의미한다.

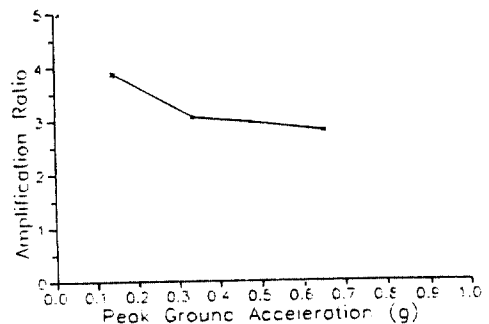


Fig. 14 Ratio of roof acceleration to shaking table one due to the increase of input peak accelerations

4.3.3 밀면전단력과 지붕횡처짐과의 관계

각 단계 지진실험에 대한 밀면전단력과 지붕횡처짐의 이력곡선이 Fig.9에 주어져 있다. 이미 언급하였듯이 PGA 0.6g이상의 실험에 대해서는 층변위를 측정하지 않았기 때문에 누락되었다. 이들 이력곡선으로부터 지붕처짐의 밀면전단력에 대한 강성은 PGA 0.12g 및 0.25g에 대해서는 2.5 ton/mm, PGA 0.40g에 대해서는 대체로 2.0 ton/mm를 나타내고 있으며 PGA 0.40g 실험 후반부에는 현저한 강성저하를 관찰할 수 있다.

또한 입력지진가속도가 커질수록 최대잔류변위의 지붕최대변위에 대한 비율이 낮아지는 것을 볼 수 있다.

마지막으로 각 단계 지진실험결과 나타난 최대 밀면전단력과 최대지붕횡처짐을 연결한 곡선이 Fig.15에 주어져 있으며 이로부터 이 시스템의 변위연성비를 구할 수 있다. PGA 0.60g에 대한 최대 지붕변위를 7mm 정도로 보면 유효항복변위 (effective yield displacement)는 약 2.5mm로 나타나고 이때 유효항복강도는 6ton을 조금 넘어서는 것으로 보이며, 여기서 최대지붕변위 7mm의 불확실성을 감안할 때 대체적인 변위연성비 δ_u / δ_y 는 2~3 정도로 판단된다.

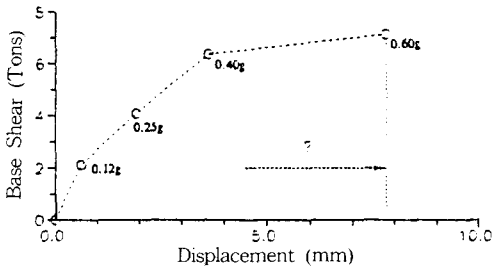


Fig. 15 Relation between max. base shear and max. roof displacement due to the increase of input peak accelerations

4.3.4 집합부에서의 국부변형

Table.5에서 수평접합부의 미끄러짐은 PGA 0.49g 지진실험에서도 활성화되지 않고 있으며 PGA 0.6g에 대하여 1층 중간벽 수평접합부에서 0.15mm, 측벽수평접합부에서 0.5mm의 미끄러짐이 발생하였다. 이와 대조적으로 수직접합부에서, 특히 측벽 1층 중간수직접합부는 PGA 0.25g에서

별써 0.033mm의 미끄러짐이 일어나고 PGA 0.4g에서 1층중간벽브릭과 플랜지벽과의 수직접합부에서 0.1mm의 미끄러짐이 나타나 수직접합부가 수평접합부에 비해 상대적으로 전단력에 취약한 것으로 나타났다.

5. 결 론

실물크기 부분구조물시험체와 이에 상응하는 1/3축소모델의 정적반복실험(cyclically reversed test)을 통해 1/3축소모델의 강도가 상사성에서 요구하는 값에 약 20%정도 미달되며 에너지 흡수능력은 훨씬 크게 나타나고 있으나 파괴모드나 최대강도 포락선은 일치되는 것으로 나타났다.

1/3축소 3층 box형 습식접합 P.C모델에 대한 진동대실험을 수행한 결과, 우리나라 예상최대지진가속도 0.12g수준의 지진세기에 대해서는 선형탄성적으로 거동하였고 거의 손상이 없었으며 최대입력지진가속도 1.0g에 이르러서야 1층 바닥부의 개폐운동(rocking motion)에 의해 붕괴됨으로써, 이 시험체에 관한한, 7내지 8배의 내진안전성을 보유한 것으로 나타났다. 이 실험에 의하여 P.C시스템의 지진 에너지 소산(dissipation)은 집합부의 미끄러짐과 벌어짐의 국부메카니즘에 주로 의존하며 최대연성비는 2내지 3정도 되는 것으로 밝혀졌다. 또한 이 P.C모델의 감쇠계수는 일반현장타설콘크리트 구조물의 2배가 되는 8%정도로 나타났다.

감사의 글

본연구는 대한주택공사 주택연구소가 1990.1부터 1991.12까지 수행한 "PC아파트의 내진설계규준제정을 위한 실험연구⁽¹⁾"의 일부로서 수행된 것이며, 이 실험연구에 (주)삼환 까부에서 습식접합시험체를 제공하였다. 이 실험연구에 참여하거나 후원해주신 많은 분들에게 심심한 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1. 이한선의 31명, "PC아파트 내진설계규준제정을 위한 실험연구," 대한주택공사 주택연구소, 연구 91-21, 1991. 12
2. Clough R. W. and Oliva M. G., "Shaking Table Tests of Large-Panel Precast Concrete Building System Assemblage," Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, UCB/EERC-83/14, June 1983.
3. Caceese, V. and Harris, H. G., "Report 2: Small Scale Tests of Simple Precast Concrete Shear Wall Models under Earthquake Loading," Department of Civil Engineering, Drexel University, December 1984.
4. Clough R. W. and Penzien J., "Dynamics of Structures," McGraw-Hill Inc., 1975.
5. Sabnis, G. M., Harris, H. G., White, R. N. and Mirza, M. S., "Structural Modeling and Experimental Technique," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 1983.
6. Kim, W., El-Affar, A. and White, R. N., "Small-Scale Modeling Technique for Reinforced Concrete Structures Subjected to Seismic Loads," School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, November 1988
7. Uang, C-M, and Betero, V. V., "Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 0.3-Scale Model of a Six-Story Concentrically Braced Steel Structure," Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, UCB/EERC-86/10, December 1986.
8. 박창호, "주파수 영역에서의 가속도기록보정," 석사학위논문, 한국과학기술원, 토목공학과, 1991.
(접수일자 : 1992. 12. 26)