

프리캐스트 콘크리트 대형판 구조물의 1/5 축소모델 제작 및 실험기법 연구

A Study on Manufacturing and Experimental Techniques
for the 1/5th Scale Model of Precast Concrete Large Panel Structure

이한선*

김상규**

Lee, Han Seon Kim, Sang Kyu

요 약

본 연구의 목적은 프리캐스트 콘크리트(PC) 대형판 구조물의 축소모델 제작 및 실험기법에 관한 정보를 제공하는 것이다. 적용된 축소율은 1/5이며, 4가지의 실험이 수행되었다. : 모델 콘크리트와 모델 철근의 재료실험, 수평접합부의 압축실험, 수직접합부의 전단실험, 2층 부분구조물의 정적 주기 실험. 이들 실험결과를 기초로 다음의 결론을 도출하였다. : (1) 모델 콘크리트는 일반적으로 예상보다 압축강도가 크게 나타났다. (2) 모델 철근은 진공관을 사용하지 않고 열처리를 할 경우 연성의 저하를 보인다. (3) 수평접합부와 수직접합부의 파괴모드는 실물크기와 모델이 거의 유사하였으나, 모델의 강도는 상사법칙에 의한 요구강도보다 크게 나타났다. (4) 실물크기와 유사하게 모델철근의 연성과 모델 콘크리트의 압축강도를 확보할 수 있다면, 1/5 모델 부분구조물의 이력거동은 실물크기와 매우 근접되게 나타낼 수 있다.

Abstract

The objective of this study is to provide the information on the manufacturing and experimental techniques of small scale modeling of precast concrete(P.C.) large panel structures. The adopted scale was one-fifth. 4 types of experiments were performed : material tests for model concrete and model reinforcement, compressive test of horizontal joint, shear test of vertical joint and cyclic static test of 2-story subassemblage structure. Based on the experimental results, the following conclusions are drawn : (1) Model concrete had in general larger compressive strength than expected. (2) Model reinforcement showed less ductility if the annealing processes were performed without using vacuum tube. (3) Failure modes of horizontal and vertical joints were almost same for both prototype and model. But the strength of model appears to be higher than required by similitude law. (4) Hysteretic behavior of 1/5 scale subassemblage model can be made quite similar to that of prototype if the ductility of model reinforcement and compressive strength of model concrete could be representative of those of prototype.

Keywords : Precast Concrete, Panel, Horizontal Joint, Vertical Joint, Model, Prototype, Similitude Law

* 정희원, 고려대학교 건축공학과 조교수
** 정희원, 센구조안전기술연구소(주)연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 1996년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

P.C. 대형관 구조는 접합부에서의 구조 성능이 현장타설 철근 콘크리트 벽식 구조물에 비하여 확연히 떨어지므로 지진과 같은 큰 횡력에 대하여 구조물 전체로서의 일체성(integrity), 혹은 안정성(stability)의 확보가 큰 문제로 대두되고 있다.

즉 P.C. 대형관 구조물의 구조적 안전성을 확보하기 위해서는 부재나 접합부 등 구조요소의 구조 성능 뿐만 아니라 전체 구조물의 파괴에 이르기까지의 거동을 실험을 통하여 검토할 필요가 있다. 그러나 전체 구조물의 구조 성능 실험을 위해서 실물크기 실험을 수행한다는 것은 현실적으로 불가능하며, 자연스럽게 축소모델에 의한 실험을 택하지 않을 수 없다. 본 연구에서는 P.C. 대형관 구조물에 대하여 축소모델 실험이 신뢰성이 있는 구조거동 예측 수단으로 사용되기 위해 실제 P.C. 대형관 구조물의 축소모델을 제작, 실험해 봄으로써 기술적 문제를 파악하고 이의 해결을 시도하여 보았다.

실험체로는 1/5 축소모델을 대상으로 수평접합부에서의 압축내력 및 파괴 거동, 수직 접합부에서의 전단 거동을 관찰하며, 부분 구조물에서는 주기 반진, 횡변위 정적 실험을 시행하여 축소모델의 거동이 실물 크기 실험 결과와 상사성에 비추어 일치하는 지를 검토하였으며, 상사성 확보평가에 있어서 기준으로 사용될 실물크기 실험결과를 아래와 같이 이미 수행된 타 연구 결과를 이용하였다.

- (1) 수평 접합부-영남대^(6,8)
- (2) 수직 접합부-한양대⁽³⁾
- (3) 부분 구조물-대한 주택 공사⁽⁵⁾

본 연구에서는 진모델(true replica)을 가정하여 적용된 모델의 상사법칙은(p =실물크기, m =모델, $S=1$ /축소율) (하중) $p=(하중)m \times S^2$, (변위) $p=(변위)m \times S$, (변형율) $p=(변형율)m$ 이며, 본 논문에서는 이것을 모델의 실험결과에 적용하여 모두 실물크기의 값으로 조정하였다.^(2,4)

2. 재료실험

2.1 모델철근

축소 모델 철근의 단면적을 실물크기 철근의 단면적과 정확히 맞추기가 현실적으로 매우 어려웠기 때문에 주어진 실물크기 실험체의 철근 항복하중 실험 결과를 기준으로 축소모델의 철근 항복하중이 해당하는 실물크기 철근 항복하중의 1/25 ($=1/S^2$)에 힘-변형도 곡선이 근접하도록 제작하였다. 모델 철근의 제작은 Table 1과 같은 성분을 가진 경강선 $\phi 2mm$, $\phi 3.2mm$ 를 구입하여 원형철근(round bar)은 이형화 과정없이 열처리하고 이형철근(deformed bar)의 경우는 이형화를 한 후 열처리를 하여 실물크기 철근과 유사한 특성을 가지도록 노력하였다. 이형화된 경강선의 기하학적 특성은 Fig. 1과 Table 2에 나타나 있다. 이들의 기하학적인 형태는 실물크기 철근과 대체로 유사하나 그의 모델 콘크리트와의 직접적인 부착거동을 미시적으로 관찰하는 것은 대단히 어려워, 간접적인 부착거동의 관찰을 위해 인발실험과 단순 보 휘 실험을 수행한 결과⁽⁹⁾ 대체로 거시적인 부착거동이 실물크기와 일치하는 것으로 나타났다.

그러나 전번 연구^(9,10,11)와는 달리 본 연구에서는 진공관을 사용하지 않고 열처리를 수행하여 열처리 후 일부 피막이 산화된 현상을 나타내었다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 진공관을 사용하지 않을 경우 연성이 저하되는 현상을 나타내고 있다.

Table 1 Chemical properties of deformed model reinforcing bar

Property	C	Si	Mn	P	S	Remark
Model rebar	0.08-0.85	0.12-0.32	0.60-0.90	0.025 or less	0.025 or less	
Prototype rebar	0.29 or less	0.55 or less	1.80 or less	0.05 or less	0.05 or less	SD 40

열처리 변수로는 온도 상승 시간, 열처리 온도, 열처리 시간, 재료 냉각 시간, 전기로 내부 온도 분포 등이 있을 수 있으나, 본 실험에서는 동일한 전기로에서 동일한 상황으로 열처리를 진행하였

고 다만 열처리 온도만 다르게 하여 열처리를 수행하였다.⁽¹⁾ 그 실험 결과는 Table 3에 나타나 있으며 실물크기 철근의 항복하중에 맞추어 모델철근의 종류와 열처리 온도를 적절히 선택하여 사용하였다.

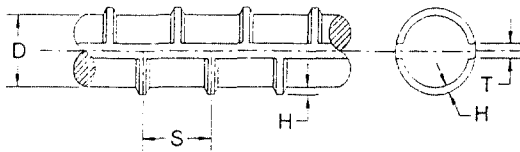


Fig. 1 Detail of Deformation

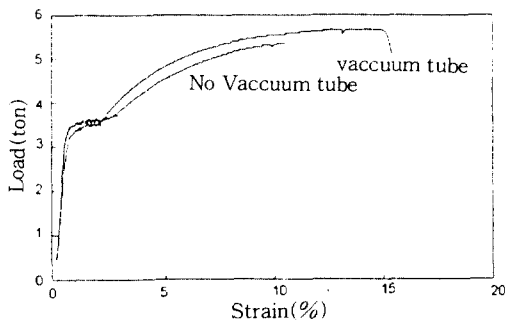


Fig. 2 Comparison of model reinforcement load-strain curves(D2)

Table 2 Demension of deformed reinforcement

(Unit : mm)

Bar Type	D	S	H	T	Remark
D2	1.84	1.32	0.16	0.5	Deformed
D3	2.8	2.6	0.4	0.65	Deformed
D10	9.53	6.60	0.4~0.8	3.6	Commercial
D19	19.1	13.4	1.0~2.0	4.6	Commercial

2.2 모델콘크리트

모델 콘크리트는 강성이 작고 축소계수(scale factor)가 클수록 압축강도에 대한 인장강도의 비(f_t/f_c)가 증가하여 균열현상에 크게 차이가 발생할 수 있다. 본 실험에서 축소모델에 사용되어지는 골재는 #4체를 통과하고 #8체에 남은 것을 굵은 골재(G_m)로, #8체를 통과하는 것을 세골재(S_m)로 보고, Table 4에 따른 배합비에 의해 모델

Table 3 Results of model reinforcement relation to annealing temperature

Annealing temperature(℃)	Type	Yield load (kg)	Ultimate load (kg)	elongation (%)
680	φ2	6458	6258	15.72
	D2	5250	5475	5.96
	φ3	17291	16108	17.45
	D3	13475	13825	11.55
700	φ2	5241	5308	19.64
	D2	4733	4875	15.070
	φ3	15313	14425	22.88
	D3	12225	12566	16.68
720	φ2	4958	5291	13.73
	D2	-	-	-
	φ3	-	-	-
	D3	10350	11850	13.89
740	φ2	3158	4808	16.41
	D2	3683	4650	17.68
	φ3	10400	13775	20.86
	D3	8075	11991	18.18
780	φ2	2925	6375	20.31
	D2	2164	5375	15.59
	φ3	7733	16125	23.16
	D3	6191	13725	22.62
800	φ2	2725	6050	19.57
	D2	2333	5375	16.26
	φ3	7100	16062	25.65
	D3	6025	13883	22.02
840	φ2	3033	6400	19.47
	D2	2366	5408	14.63
	φ3	7083	16550	22.39
	D3	6500	14316	18.68

콘크리트를 제작하였다. 이 결과 실물 콘크리트와 가장 유사한 재료특성을 나타내는 배합비를 채택하였다.

위커빌리티와 관련하여 실물크기의 경우 약 10cm내외의 슬럼프치를 보인 반면 모델 콘크리트에서는 초유동화제를 사용하였음에도 불구하고 위커빌리티가 대단히 적었다. 추후 모델 콘크리트의 위커빌리티 향상을 위한 연구가 필요하다고 사료된다.

실물크기 콘크리트의 강도측정을 위해서는 Φ10 X 20 실린더를, 모델 콘크리트에는 Φ5 X 10 실린더를 사용하였다. 실물크기의 실린더 크기는 Φ15 X 30 실린더로 하는 것이 표준이 되겠으나 재료소요량의 과다로 Φ10 X 20 실린더를 사용하였고, 모

델 콘크리트의 실린더 크기로 $\Phi 5 \times 10$ 실린더를 선정한 이유는 시중에서 구할 수 있는 최소의 실린더이고 타연구자들^(1,2)에 의해 사용된 적도 있어 그대로 사용하였다. 이러한 실린더 공시체 실험은 어디까지나 구조체에 사용되는 구조용 콘크리트의 강도를 가늠하기 위한 것이므로 실린더의 크기에 따른 강도 보정은 수행하지 않았다.

Table 4 Mix(weight) ratio of micro-concrete

Mix	W	C	S($S_m + G_m$)	Super-plasticizer (%)	Design Strength (kg/cm^2)
Model I	60	1	1.7+2.4	0	180
Model II	60	1	1.3+2.1	0	180
Model III	45	1	1.7+2.4	0.7	270
Model IV	45	1	1.3+2.1	0.7	270
Model V	40	1	1.7+2.4	0.7	350
Model VI	40	1	1.3+2.1	0.7	350

3. 접합부 실험

3.1 재료실험

벽판 및 접합부 모델 콘크리트의 배합비는 Table 4의 모델 III을 채택하였고, 접합부 모르타의 배합비는 C:S_m=1:3으로 하였다. 콘크리트 강도 실험결과는 Table 5에 나타나 있다. 또 실물크기 실험체에 사용된 철근과 축소모델 철근의 인장실험 결과는 Table 6에 나타나 있다. 이 표들로부터 대체로 축소모델 재료의 강도가 실물크기 재료의

Table 5 Results of model concrete tests

	Specimen	Compressive strength	Tensile strength		
		(kg/cm^2)	(kg/cm^2)	ft' / fc'	
Horizontal Joint	Prototype	Panel*	282.5	-	-
		Joint concrete*	259.4	-	-
	Model	Joint mortar [#]	390.5	-	-
		Panel [@]	293	34.2	0.11
		Joint concrete [@]	319.6	34.6	0.10
Vertical Joint	Prototype	Panel*	279.0	-	-
		Joint mortar [#]	347.0	-	-
	Model	Panel [@]	305.8	36.6	0.12
		Joint mortar [#]	616.6	-	-

* $\Phi 10 \times 20$ cylinder @ $\Phi 5 \times 10$ cylinder # 5 X 5 cube

Table 6 Results of model reinforcement tensile tests

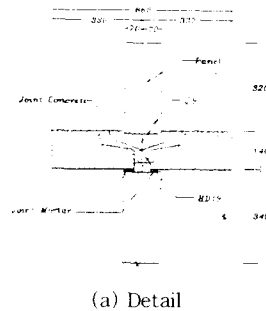
		Yield load (kg)	Ultimate load(kg)	Elongation (%)
Horizontal Joint	HD19	11471	-	20.2
	D3*	10775	11980	11.2
	$\Phi 9$	2078	-	15.3
	$\Phi 2^*$	2725	6050	12.6
Vertical Joint	D13	5157	8004	13.5
	D2*	5250	5457	12.4

* Model reinforcement

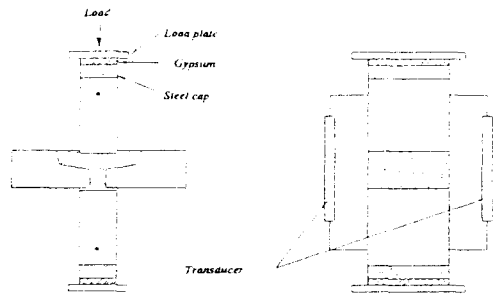
강도에 근접하게 나타나고 있으나, 접합부 모르타의 경우 축소모델에서 훨씬 큰 값을 나타내고 있다.

3.2 실험체 제작

수평접합부 실험체는 영남대학교에서 수행된 웨지(wedge)형 수평접합부 실험체⁽⁸⁾를 기준으로 하였다. 실험체 상세는 Fig. 3에 나타나 있다.



(a) Detail



(b) Experimental setup

Fig. 3 Detail of prototype horizontal joints(mm)

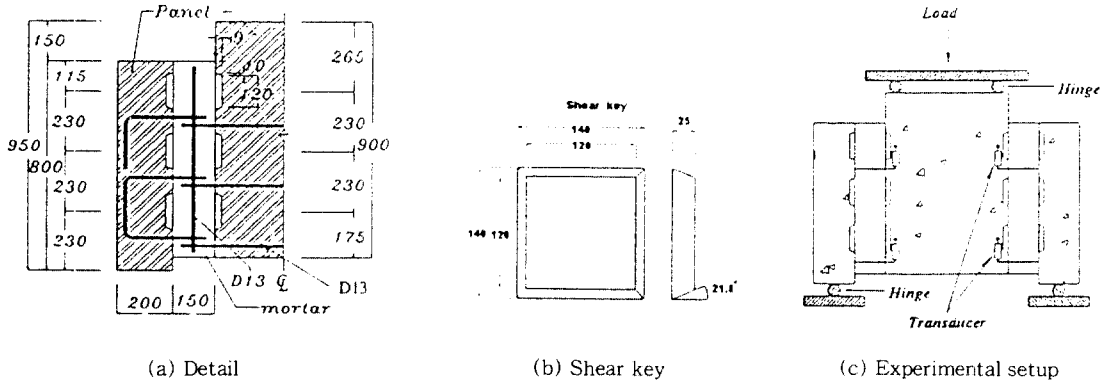


Fig. 4 Detail of prototype vertical joints(mm)

수직접합부 실험체는 한양대학교에서 수행한 접합부 상세⁽³⁾로서 Fig. 4와 같고 전단키(shear key)는 3개로 하고 전단키의 깊이 t_k 에 대한 높이 h 의 비(h/t_k)는 5.6이 되도록 하며, 전단키의 경사각 α 가 21.8°로 전단키의 미끄러짐이 발생하지 않는 범위가 되도록 하였다.

이상의 수평 및 수직접합부에 대하여 1/5 축소 모델 실험체를 축소율에 따라 각기 4개를 제작하여 실험을 수행하였다. 제작 및 조립방법은 실험 크기에 준하도록 하였다.

3.3 실험과정

Fig. 3(b)에서와 같이 수평접합부 실험에서는 변위측정기를 실험체 양쪽에 1개씩을 설치하여 접합부를 포함한 전체 상·하벽체의 압축 변형을 측정하였다. 가력방법으로는 실험체 상·하부에 석고로 캡핑을 한 후 실험체를 가압판의 중앙에 위치시키고 구조용 만능시험기(UTM)로 중심축압을 하중조절에 의해 가하였다.

수직접합부 실험은 Fig. 4(c)와 같이 편칭실험으로 실험체의 접합부 부근에서 2점 가력을 최대 하중 이후 실험체가 파괴될 때까지 하였다. 접합부에서 벽판 상호간의 변위를 측정하기 위해 실험체 상·하부에 2개씩의 변위측정기를 설치하였다.

데이터 취득장비는 미국 M/G사의 SYSTEM 4000을 사용하였다.

3.4 실험결과 및 분석

수평접합부 및 수직접합부 실험에서 하중변화에 따른 실험체의 초기균열하중, 최대하중 등의 결과는 Table 7과 Table 8에 나타나있다.

수평접합부 실험크기 실험체의 경우 초기균열은 상부벽체 하단과 접합부 모서리에서 발생하였고 슬래브와 접합부 하부의 경계면에서 수직균열이 진전되어 종국에는 이 균열이 상·하벽판으로 이어지는 현상을 나타낸다. 축소모델의 경우, 초기 균열 발생하중이 실물에 비해 2~3배 정도 크게 나타났으며 모델 실험체 I, II, III은 초기균열이 접합부에서 시작하여 상부벽판, 하부벽판의 순서로 균열이 진전되었고 실물 실험체와 유사한 파괴모드를 나타내었다. 그러나 모델 실험체 IV는 벽판하부 캡의 불량으로 초기균열이 하부벽판에서 생성한 후 접합부로 진전이 되었으나 상부벽판에 균열이 진전됨이 없이 하부벽판이 파괴되는 지압파괴가 일어났다.

Table 7 Results of horizontal joint compression test

Specimen	Initial crack load(t)	Ultimate load(t)	Ultimate strength(kg/cm ²)
Prototype I	55	132.7	315.9
Prototype II	30	115	275.9
HJ-Model I	110.4	200	476.2
HJ-Model II	142.8	232.4	553.4
HJ-Model III	88.2	120.3	286.4
HJ-Model IV	84.0	152.4	363.4

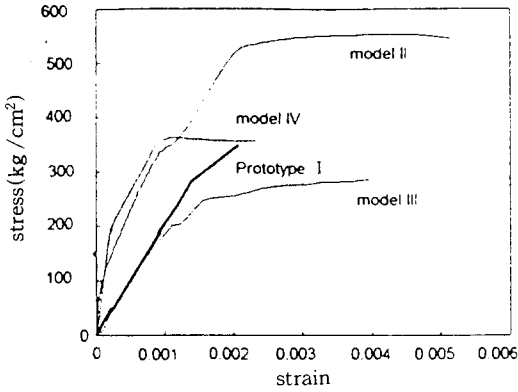


Fig. 5 Axial stress-strain curve of horizontal joints

Fig. 5에서 모델과 실물크기의 초기강성은 대체로 비슷하게 나타나고 있으나 압축강도면에서 모델 II가 월등하게 높게 나타났으며 모델의 경우 연성(ductility)이 실물크기에 비해 대체로 크게 나타나고 있다. 축소모델 수평접합부에서 초기균열강도가 훨씬 높았던 것과 연성이 크게 나타난 것은 모델 콘크리트의 인장 혹은 쪼개짐 거동이 실물보다 강도면에서 높고 연성면에서 크게 됨에 기인한 것으로 보이나 실물크기 콘크리트의 인장강도 자료가 누락되어 비교가 불가능하였다.

Table 8 Results of vertical joint shear tests

Specimen	f'_c (kg/cm ²)		Load (ton)			Shear Stress (kg/cm ²)		
	Panel	Joint	P_c	P_{sc}	P_{max}	τ_{cc}	τ_s	τ_{max}
Prototype I	288	317	26.5	35.5	74.0	22.5	30.1	62.9
Prototype II	269	352	10.0	26.9	66.0	8.5	22.8	56.1
VJ-Model I	305.8	616.6	85.0	117.5	138.7	72.2	99.9	117.9
VJ-Model II			68.7	87.5	133.5	58.4	74.4	113.5
VJ-Model III			65.0	108.7	117.7	55.2	92.4	100.1
VJ-Model IV			65.0	90.0	111.7	55.2	76.5	95.0

P_c : Initial crack load P_{sc} : Joint crack load
 P_{max} : Ultimate load τ_{cc} : Initial crack shear stress
 τ_s : Joint crack shear stress
 τ_{max} : Ultimate shear stress

수직접합부 실물크기 및 축소모델 실험체에서 응력이 집중되는 벽판과 접합부 충전모르타의 접합부분에서 초기 미소균열과 동시에 약간의 변위가 발생하였고, 사인장 균열 발생전까지는 하중의 증가에 따른 변위는 선형적으로 변화하였다. 접합부에서 사인장 균열이 발생하면서 Fig. 3~4에서 보는바와 같이 균열 및 변위가 급격히 진전되어

강성의 저하가 나타났으며 최대하중 부근에서는 하중의 증가없이 변위만 증가하여 종국 균열에 도달하였으나, 축소모델 I, II의 경우는 최대하중 이후 급격한 파괴가 일어났으나 축소모델 III, IV의 경우 연성이 훨씬 크게 나타났고 전반적으로 강도가 실물크기보다 크게 나타났다. 이는 모델 콘크리트 압축강도의 상대적인 커짐과 쪼개짐 인장강도의 증대 및 연성의 증가에 의한 것으로 사료된다.

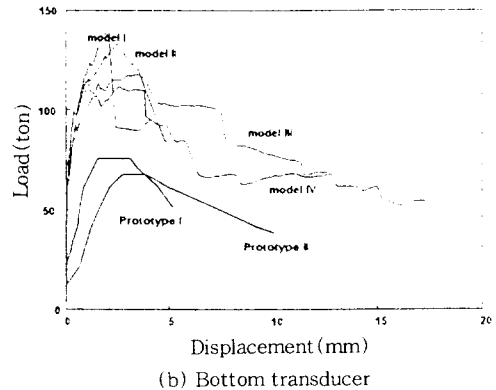
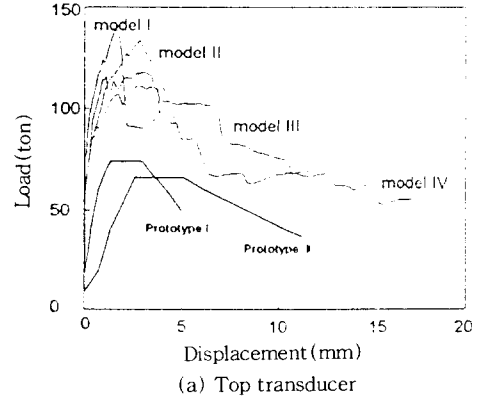


Fig. 6 Load-shear displacement curve of vertical joints



Fig. 7 Crack patterns of horizontal joints

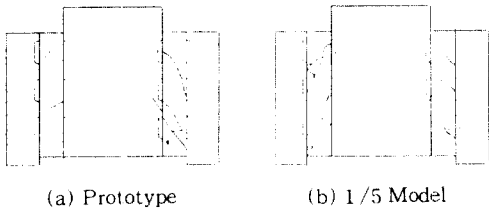


Fig. 8 Crack patterns of vertical joints

4. 부분구조물 축소모델 실험

4.1 실험배경

P.C. 대형관 구조물의 축소모델 실험의 필요성은 실제로 대한주택공사에서 수행한 “P.C. 아파트의 내진설계 기준 제정을 위한 실험연구⁽⁵⁾” 중, 진동대를 이용한 P.C. 대형관 구조물의 지진모의 실험과정에서 대두되었다. 사용된 진동대의 크기는 4m×4m로서 실제 15층 정도의 대형관 구조물을 실험하기 위해서는 최소한 1/10 이하의 축소율이 요구되었으나 기존 국내에서의 축소모델 제작기술이 매우 초보적인 단계이었기 때문에 부득이 축소율을 1/3 정도로 결정하였고 그 층수도 진동대 용량을 감안하여 3층으로 제한하여 실험이 수행되었다.

그러나 1/3 정도의 축소율에 의한 모델조차 실물크기 실험체와의 정적 반복실험 결과비교에서 상사성 확보가 쉽지 않음이 밝혀졌다.^(5,6,7) 즉 Fig. 9, 10에 주어진 실험체 형상과 가력방법을 실물크기와 1/3 축소모델 정적실험에 대하여 적용한 결과, Fig. 11의 접합부 상세를 가진 건식접합 시스템의 경우 Photo. 1(a), (b)에 나타난 바와 같이 파괴모드가 실물크기와 축소모델 사이에 전혀 다르게 나타날 수 있음을 보여주었고^(5,7), Fig. 12의 접합부 상세를 가진 습식접합 시스템의 경우 Fig. 13(b), Fig. 14(b)와 같이 이력곡선상 강도의 차이뿐만 아니라 에너지 소산거동에 현격한 차이를 나타낼 수 있음을 발견하였다.

여기서 알 수 있는 것은 1/3 정도의 축소모델일지라도 P.C. 대형관 구조물의 경우 상사성 확보를 위해 매우 면밀한 사전연구가 필요하다는 것이다.

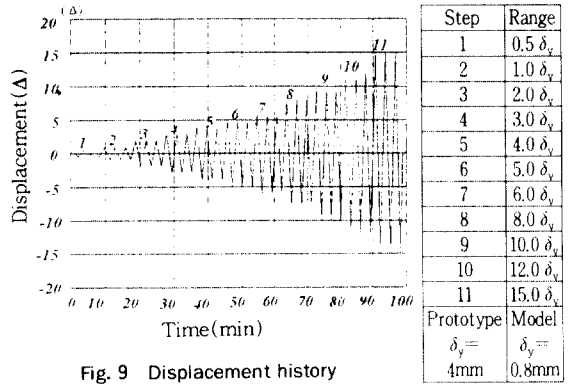


Fig. 9 Displacement history

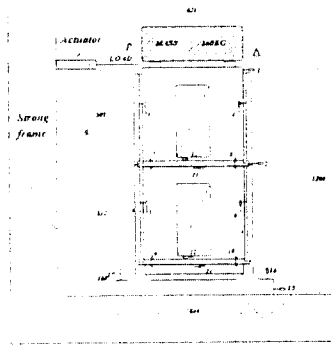
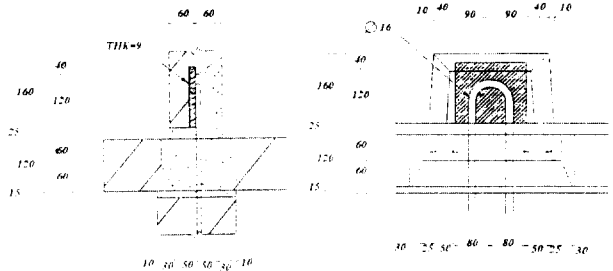


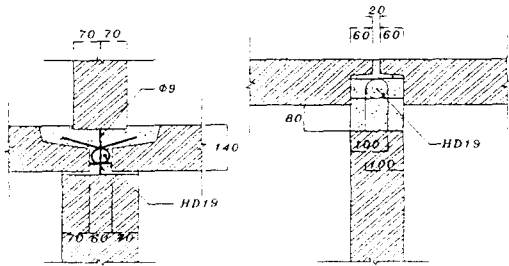
Fig. 10 Configuration of subassembly specimen and experimental setup for 1/5 model



(a) Horizontal joint

(b) Vertical joint

Fig. 11 Details of dry joint system



(a) Horizontal joint (b) Vertical joint

Fig. 12 Details of wet joint system

본 연구에서는 1/5 축소모델에서 위에서 언급한 1/3 축소모델의 문제점을 해결하는 방안을 모색하였다.

4.2 재료실험

모델 콘크리트의 배합비는 Table 4에서 실물크기 실험체의 콘크리트 강도와 가장 근접한 결과를 보여준 것으로서 건식접합 시스템의 경우는 모델 I(접합부)과 모델 II(벽판)를, 습식접합 시스템의 경우는 모델 III(벽판)과 모델 IV(접합부)를 선택, 사용하였으며, 콘크리트의 실험결과는 Table 9에, 실물 및 축소모델 철근의 인장실험 결과는 Table 10에 나타나 있다.

Table 9. Results of model concrete compressive tests

		Specimen	Compressive strength (kg/cm ²)	Tensile strength (kg/cm ²)	f_t/f'_c
Dry joint system	Prototype	Panel*	181.8	26.1	0.14
		Joint*	132.1	38.9	0.29
	Model	Panel [Ⓞ]	221.5	39.1	0.17
		Joint [Ⓞ]	152.8	22.1	0.14
Wet joint system	Prototype	Panel*	264.2	32.4	0.12
		Joint*	336.5	37.4	0.11
	Model	Panel [Ⓞ]	356.4	43.6	0.12
		Joint [Ⓞ]	403.7	37.3	0.09

@ Φ5×10 cylinder * Φ10×20 cylinder

강도면에서 모델 콘크리트가 실물크기 콘크리트보다 대체로 크게 나타났으나, 압축강도에 대한 인장강도 비는 대체로 비슷한 값을 보이고 있다.

모델 철근의 경우, 항복하중이 실물크기 철근과

매우 근사하게 나타남을 알 수 있으나 연신율면에서 실물크기 철근에 비해 상당히 작은 값을 발견할 수 있다. 이러한 차이에도 불구하고 구조체 거동에 있어서 실물크기와 모델사이에 별다른 차이를 보이지 않았던 것은 구조물 최종 파괴시 철근의 연신율이 이들 값보다 모두 작았기 때문으로 사료된다.

Table 10 Results of model reinforcement tensile tests

		Yield load(kg)	Ultimate load(kg)	Elongation(%)
Dry joint system	D13	5157	7401	23.5
	D2*	5250	5475	8.7
	D10	2171	-	-
	D2*	2164	5375	15.59
	φ16	7511	11312	27.0
	φ3*	7733	16125	23.1
	φ12	4486	6340	27.6
	φ2*	4958	5292	13.73
	φ9	2078	-	-
	φ2*	2725	6050	19.57
Wet joint system	HD10	2171	-	19.27
	D2*	2164.2	5375	10.4
	HD13	5293	7698	22.1
	D2*	5250	5475	12.4
	HD19	11471	18407	20.2
	D3*	10775	11980	11.2

* Model reinforcement

4.3 1/5 축소모델 실험체 제작

4.3.1 건식접합 부분구조물

이 부분구조물의 축소모델 조립시 가장 어려운 과제로 대두된 것은 수평접합부에서 모델 원형철근(round bar)과 철판의 용접시 모델 철근의 단면이 일부 용융되어 감소되는 현상에 의해 실물크기 실험체의 파괴모드가 1층 개구부 상부 콘크리트보의 전단파괴임에도 불구하고, 1/3 축소모델에서는 이 수평접합부의 원형철근 용접부분이 파단되는 현상을 나타내었다. 따라서 1/5 축소모델에서는 4.2절의 모델 철근 및 콘크리트에 대한 재료적인 고려 이외에 이 용접과 관련하여 P.C. 판에 미리 매립되는 부분의 용접은 아르곤용접으로, 조립시의 용접은 황동용접을 실시하여 용접에 의한 접합부의 철근단면 손실이 발생하지 않도록 유의하였다.

4.3.2 습식접합 부분구조물

이 부분구조물에 있어서 실물크기 실험체의 파괴모드는 1층 수직접합부의 수직 tie철근의 파단에 의한 1층 수평접합부의 벌어짐이었음을 감안하여 이 수직 tie철근이 실물크기와 모델에서 동일한 역학적 특성을 가지도록 세심한 주의를 하였으며, 기타 제작, 조립과정은 실물크기에 준하여 수행하였다.⁽⁵⁾

4.4 실험과정

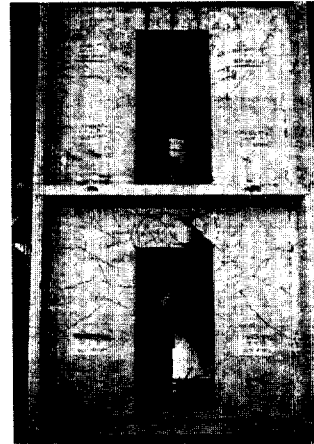
실험체의 가력 방법으로는 주기적 반전(cyclically reversed) 가력방식으로 변위조절에 의해 Fig. 9과 같은 변위이력을 사용하여 수행하였다.

본 실험에서 관찰하고자 하는 주요변위는 접합부에서의 벌어짐과 미끄러짐, 전체 부분구조물의 층별 횡변위등이다. 주요변위 측정위치는 Fig. 10에 나타나 있다. 1/5 축소모델 실험에서는 대한주택공사에서 수행한 1/3 축소모델 실험과는 달리 Fig. 10에서와 같이 상사법칙에서 요구하는 무게를 보상하기 위해 360kg의 무게를 실험체 위에 올려놓고 실험을 수행하였다.

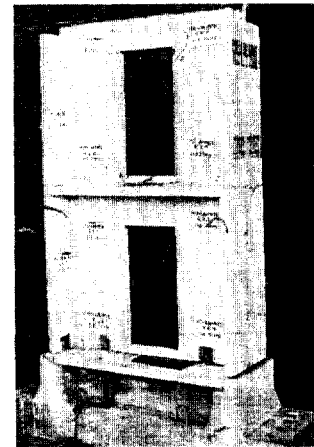
4.5 실험결과 및 분석

4.5.1 건식접합 부분구조물

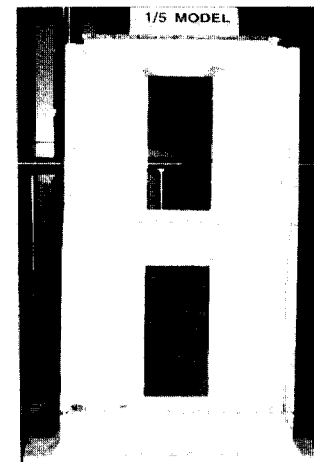
Fig. 13, 14, 15(a)를 보면 전체이력거동에서는 실물크기와 1/3 및 1/5 축소모델이 거의 유사하게 나타난 것을 알 수 있다. 그러나, 최대하중(load)면에서, 실물크기의 22.5ton에 비해 1/5 축소모델 실험의 결과를 5^2 배한 23.7ton은 약 1.05배로서 실물크기 결과와 거의 유사하게 나타났다. Photo. 1에 나타나 있듯이 파괴모드면에서 1/5 축소모델의 경우 균열이 실물크기에 비해서 작게 발생하였으며, 최종파괴모드가 1층이 아닌 2층 개구부 모서리의 사균열 파괴라는 것이 다르기는 하나, 1/3 축소모델의 최종 파괴모드인 수평접합부 용접부위의 절단 현상이 일어나지 않았고 파괴하중도 거의 일치한다는 점에서 2층 벽판의 경계부분만 적절히 보강하였다면 거의 완벽한 상사성을 이룰수 있었을 것으로 사료된다.



(a) Prototype



(b) 1/3 model



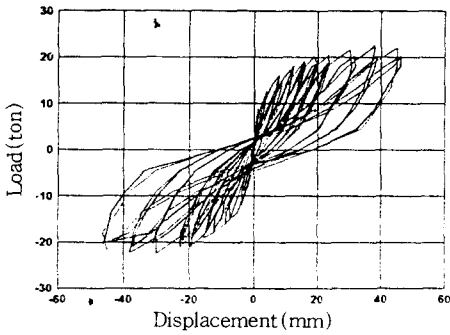
(c) 1/5 model

Photo 1 Failure mode of dry-joint subassemblage

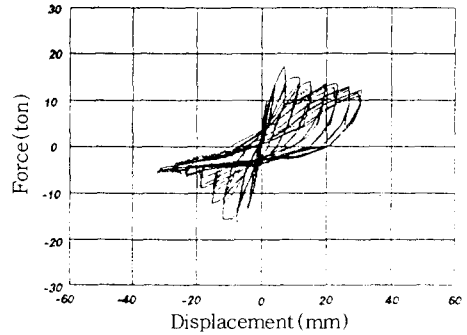
4.5.2 습식접합 부분구조물

Fig. 13, 14, 15(b)를 보면 전체이력거동에서는 실물과 축소모델이 거의 유사하게 나타난 것을 알 수 있다. 최대강도면에서, 축소모델 결과를 5²배한 25.1t이 실물의 17.5t에 비해 약30% 높게 나타난 것을 볼 수 있으며 Table 10의 재료 실험결과에서 모델철근이 실물 철근보다 40%정도 낮은 연

성을 가진 사실에도 불구하고, 실물크기보다 축소 모델의 연성이 크게 나타난 사실을 확인할 수 있다. 다만 강도의 증가는 모델 콘크리트가 실물보다 약 17% 높게 나온 사실에 일부 영향을 받은 것으로 보인다. 1/5 축소모델의 최종파괴모드는 실물크기와 마찬가지로 1층 수평접합부의 번어짐과 수직 tie철근(HD19:D3)의 절단에 의한 것이었다.

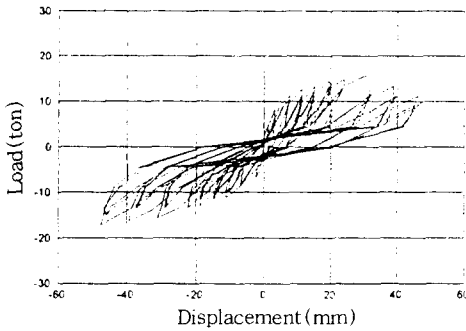


(a) Dry joint system

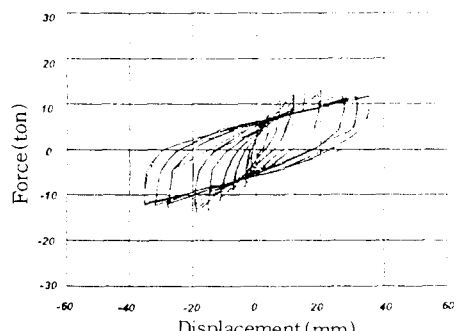


(b) Wet joint system

Fig. 13 P-Δ hysteretic curve(prototype)

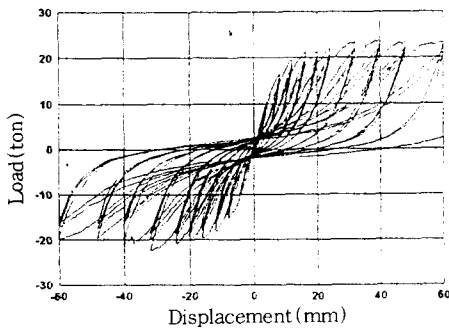


(a) Dry joint system

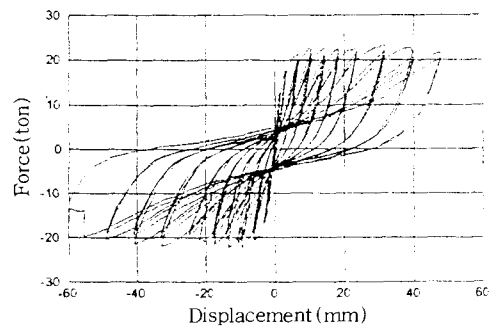


(b) Wet joint system

Fig. 14 P-Δ hysteretic curve(1/ 3 model)



(a) Dry joint system



(b) Wet joint system

Fig. 15 P-Δ hysteretic curve(1/ 5 model)

5. 결 론

P.C. 대형관 구조물의 1/5 축소모델에 관한 제작 및 실험과 관련하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 모델콘크리트의 경우 실물크기와 비교할 때, 동일한 배합비에서 워커빌리티가 저하하는 경향이 있고, 워커빌리티를 향상시키기 위해 물시멘트비가 일정한 가운데 시멘트페이스트의 양을 증가시키면 대체로 f_t/f_c 비 및 압축기동에서의 연성이 증가하는 경향이 있다.^(2,9) 따라서 본 연구에서는 혼화제를 사용하여 물시멘트비를 낮게 한 가운데 워커빌리티의 향상을 기하고 모델 콘크리트의 f_t/f_c 비가 0.1정도가 되도록 하였다. 시멘트, 잔골재율 등의 조절로 실물 콘크리트와의 상사성 확보가 어느정도 가능하였으나, 압축면에서는 실물보다 강도가 크게 나타나는 경향이 있었다. 또한 모델 콘크리트의 워커빌리티가 대체로 나쁘게 나타나 추후 이에 대한 연구가 더 필요한 것으로 생각된다.

(2) 모델 철근의 경우, 실물크기의 단면적을 1/5 축소한 단면적과 동일한 모델 철근을 제작하기가 어려워 실물크기 철근의 항복강도보다는 항복하중을 기준으로 제작하여 실물크기의 상사성을 확보하였으나, 열처리시 진공관을 사용하지 않아 기존^(6,8,9) 진공관을 사용한 철근과 비교할 때 연성의 저하를 나타내었다. 이에 충분한 철근의 연성을 얻기 위해서는 진공관을 사용하는 것이 좋을 것으로 보며, 진공관을 사용하지 않을 경우 열처리 과정의 연구가 좀 더 필요하다고 본다.

(3) 축소모델 접합부 실험에서 수평접합부 및 수직접합부 실험체에 대해서 상대적으로 측정장치가 큰 이유로 측정장치의 설치가 상당히 어려웠으며, 변위 측정 위치를 한정할 수 밖에 없었다.

따라서 사전 실험체 계획에서부터 변위 측정 장치 계획을 신중히 검토할 필요가 있다. 모델실험에서 예측된 강도가 실물크기보다 대체로 큰 강도를 나타냈으나 중국파괴모드와 균열형태는 거의 유사하게 나타났으며, 모델 콘크리트의 압축강도 및 쪼개짐 거동 상사성을 유지할 수 있다면 실물크기 결과에 보다 근접된 결과를 얻을 수 있으리

라 본다.

(4) 1/5 축소 부분구조물의 주기반전 실험에서 이력곡선과 최종파괴모드는 실물크기 결과와 거의 일치하였고, 하중면에서도 실물크기에 비해 1.05내지 1.3배정도로 크게 나타났다. 특히 기 수행된 1/3 축소모델 결과와 비교할 때 파괴모드와 이력곡선의 모양등에서 확실히 개선된 사실을 발견할 수 있다. 이는 축소모델의 용접에서 아르곤 및 황동용접을 사용하여 모델철근의 용융에 의한 단면손실을 피하였고 부피의 축소에 의한 자중 손실을 보완하기 위한 인공중량을 사용한 사실에 기인한다고 본다.

(5) 이상의 결과로 비추어 볼 때, P.C. 대형관 구조물의 축소모델 실험에서 수직 및 수평접합부 실험에서 균열형태 및 파괴모드는 축소모델의 제작으로 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 부분 구조물 주기반전 실험에서와 같이 전체 구조물의 이력거동 및 파괴모드에서도 축소모델로써 실물크기 구조물의 거동을 충분한 신뢰성을 가지고 예측할 수 있다고 판단된다.

감사의 말씀

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었습니다.

参 考 文 献

1. Marayama, Y., and Noda, S., "Study on Small Scale Model Tests for Reinforced Concrete Structures-Small Scale Model Tests by Using 3mm Diameter Deformed Rebars." Report 40, Kajima Institute of Construction Technology, Tokyo, Japan, 1983.
2. Woo Kim, Adel El-Attar and Rivhard N. White, "Small-scale modeling techniques for reinforced concrete structures subjected to seismic loads", 1988
3. 김 성수, "대형 콘크리트관 구조의 접합부 거동에 관한 연구", 한양대학교, 1991.6.
4. 김 우, 김 대중, 강 성후, "철근 콘크리트 구조연구를 위한 소축적 구조실험기법", 한국콘크리트학회지, 제 3 권 제 4 호, 1991.12.

5. 이 한선, "P.C. 아파트의 내진 설계기준 제정을 위한 실험적 연구", 대한 주택공사, 1991.12
6. 이 한선, "삼환 P.C. 시스템의 내진 성능 연구", 영남대학교 부설 공업기술연구소, 1992.7
7. 윤 재진, "1/3 축척 모형실험에 의한 프리캐스트 콘크리트 판구조의 상사성에 관한 연구", 한국콘크리트 학회지, 제 4 권 제 3 호, 1992.9
8. 조 양호, 김 현산, 이 한선, "대형 판넬 구조의 쇄기형 접합부 거동에 관한 연구" 영남대학교 부설 공업기술연구소, 1994.6.
9. 배성용, 이한선, 신영식, "철근콘크리트 구조물의 축소모델 재료의 역학적 특성에 관한 실험연구", 한국콘크리트 학회 가을 학술발표회 논문집, 1994.11, P249-254.
10. 이한선, "구조물의 축소모델재료에 관한 연구", 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터, 1995.2.
11. 이 한선, 장 진혁, 김 상규, "구조물의 축소모델 재료에 관한 실험 연구", 대한건축학회 논문집, 1995.9. (접수일자 : 1996. 1. 10)