

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

김 상규* 이 한선**

Kim Sang-Kyu Lee Han-Seon

ABSTRACT

The objective of this study is to provide the information on the techniques of manufacturing and experiment in small scale modeling of precast concrete(P.C.) large panel structures. The adopted scale was 1/5th. 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 may have in general larger compressive strength than expected. (2) Model reinforcement can show 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 prototype's if the ductility of model reinforcement and compressive strength of model concrete could be representative of those of prototype.

1. 서론

P.C. 대형판 구조는 접합부에서의 구조 성능이 현장타설 철근 콘크리트 벽식 구조물에 비하여 확연히 떨어지므로 접합부의 구조성능 뿐만이 아니라 구조물 전체로서의 일체성(Integrity), 혹은 안정성(Stability)의 확보 문제가 큰 관심사로 대두고 있다. 즉 P.C.대형판 구조물의 구조적 안전성을 확보하기 위해서는 부재나 접합부등 구조요소의 구조성능 뿐만 아니라 전체 구조물의 파괴에 이르기까지의 거동을 실험을 통하여 검토할 필요가 있다. 그러나 전체 구조물의 구조 성능 실험을 위해서 실험크기 실험을 수행한다는 것은 현실적으로 불가능하며, 자연히 축소모델에 의한 실험을 택하지 않을 수 없다. 본 연구에서는 P.C.대형판 구조물에 대하여 축소모델 실험이 신뢰성이 있는 구조거동 예측 수단으로 사용되기 위한 제반 이론적, 기술적 문제를 파악하고 이의 해결책을 제시하는 것이다.

실험체로는 1/5축소모델을 대상으로 수평접합부에서의 압축내력 및 파괴 거동, 수직 접합

부에서의 전단 거동을 관찰하며, 부분 구조물에서는 주기 반전, 횡변위 정적 실험을 시행하여 축소모델의 거동이 실험 크기 실험 결과와 상사성에 비추어 일치하는 지를 검토하였으며, 상사성 확보평가에 있어서 기준으로 사용될 실험크기 실험결과는 이미 수행된 타 연구 결과를 이용하였다.

이 과제의 1/5축소모델 결과와 상사성 평가 기준으로 사용될 실험실험 대상은 다음과 같다.

1. 수평 접합부 - 삼환⁽⁵⁾, 영남대⁽⁶⁾
2. 수직 접합부 - 한성⁽³⁾, 한양대⁽³⁾
3. 부분 구조물 - 대한 주택 공사⁽⁴⁾

2. 재료실험

2.1 철근

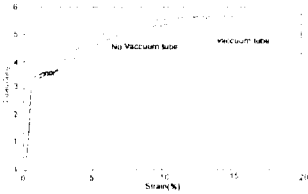
주어진 실험크기 실험체의 철근 항복하중 실험 결과를 기준으로 축소모델의 철근 항복하중에 해당하는 실험 철근 항복하중의 1/25

* 정희원,영남대학교 건축공학과 석사과정

** 정희원,영남대학교 건축공학과 조교수

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

에 힘-변형도 곡선이 근접하도록 제작하였다. 모델 철근의 제작은 경강선 $\phi 2\text{mm}$, $\phi 3.2\text{mm}$ 를 구입하여 원형철근(round bar)은 이형화 과정없이 열처리하고 이형철근(deformed bar)의 경우는 이형화를 한 후 열처리를 하였다. 전번 연구와^{(7),(9)}는 달리 본 연구에서는 진공관을 사용하지 않고 열처리를 수행하여 열처리 후 일부 피막이 산화된 현상을 나타내었다.



<그림.2-1> 철근열처리 결과비교(D2)

2.2 콘크리트

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 #4를 통과하고 #8에 남은 것을 굵은 골재로(G_m), #8을 통과하는 것을 세골재(S_m)로 보고 <표.2-1>에 따른 배합비에 의해 모델 콘크리트를 제작하였다.

<표.2-1> 모델콘크리트 배합표(중량배합)

배합	물	시멘트	골재(S_m+G_m)	혼화재	설계기준강도
모델 I	60	1	1.7+2.4	0	180
모델 II	60	1	1.3+2.1	0	180
모델 III	45	1	1.7+2.4	0.7	270
모델 IV	45	1	1.3+2.1	0.7	270
모델 V	40	1	1.7+2.4	0.7	350
모델 VI	40	1	1.3+2.1	0.7	350

이 결과 실물 콘크리트와 가장 유사한 재료특성을 나타내는 배합비를 채택하였다.

3. 접합부 실험

3.1 재료실험

벽판 및 접합부 모델 콘크리트의 배합비는 <표.2-1>의 모델 III을 채택하였고, 접합부 모

르타르의 배합비는 C:S_m=1:3으로 하였다. 콘크리트 강도실험결과는 <표.3-1>에 나타나 있다. 또 실물 실험체에 사용된 철근과 축소모델 철근의 결과는 <표.3-2>에 나타나 있다.

<표.3-1> 콘크리트 압축 강도 실험

	실험체	압축강도	인장강도	ft'/fc'	
		(kg/cm ²)	(kg/cm ²)		
수평 접합부	실물	벽판*	282.5		
		접합부*	259.4		
		접합부*	300.5		
	축소모델	벽판**	293	34.2	0.11
		접합부**	319.6	34.6	0.10
		접합부**	536.7		
수직 접합부	실물	벽판*	279.0		
		접합부*	347.0		
		벽판**	305.8	36.6	0.12
	축소모델	접합부**	616.6		
		벽판**			
		벽판**			

* $\phi 10 \times 20$ 공시체

@ $\phi 5 \times 10$ 공시체

5 X 5 큐브

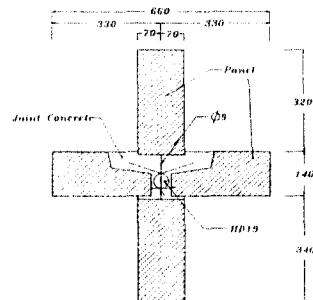
<표.3-2> 철근 인장실험

		항복하중(kg)	인장하중(kg)	연신률(%)
수평 접합부	HD19	11471	-	20.2
	D3*	10775	11980	11.2
	$\phi 9$	2078	-	15.3
	$\phi 2'$	2725	6050	12.6
수직 접합부	D13	5157	8004	13.5
	D2*	5250	5457	12.4

* 축소모델 철근에 대해서는 5'를 굵한 값임

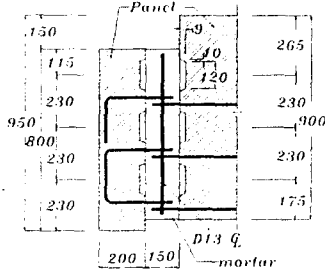
3.2 실험체 제작

수평접합부 실험체는 영남대학교에서 수행된 쐐기(wedge)형 수평접합부 실험결과를 기준으로 하였다. 실험체 상세는 <그림.3-1>에 나타나 있다.



<그림.3-1> 실물크기 수평 접합부 실험체의 상세(mm)

수직접합부 실험체는 <그림.3-2>와 같고 전단키(Shear Key)는 3개로하고 전단키의 깊이 t_k 에 대한 높이 h 의 비 (h/t_k)는 5.6이 되도록 하며, 전단키의 경사각 $\alpha=21.8^\circ$ 로 전단키의 미끄러짐이 발생하지 않는 범위가 되도록 하였다.



<그림.3-2> 실물크기수직접합부 배근 상세(mm)

3.3 실험과정

수평접합부 시험에서는 LVDT를 실험체 양쪽에 1개씩을 설치하여 접합부를 포함한 전체 상·하벽체의 압축 변형을 측정하였다. 가력방법으로는 실험체 상·하부에 석고로 캡핑을 한 후 실험체를 가압판의 중앙에 위치시키고 UTM으로 중심축압을 가한다.

수직접합부 실험은 편칭실험으로 실험체의 접합부 부근에서 2점 가력을 한다. 가력은 최대하중 이후 실험체가 파괴될 때까지 한다. 접합부에서 벽판 상호간의 변위를 측정하기 위해 실험체 상·하부에 2개씩의 LVDT를 설치하였다.

3.4. 실험결과

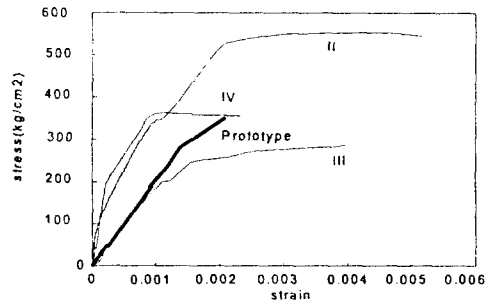
수평접합부 및 수직접합부 실험에서 하중변화에 따른 실험체의 초기균열하중, 최대하중 등의 결과는 <표.3-3>과 <표.3-4>에 나타났다

수평접합부 실물 실험체의 경우 초기균열은 상부벽체 하단과 접합부 모서리에서 발생하였고 슬라브와 하부 접합부의 경계면에서 수직균열이 진전되어 종국에는 이 균열이 상·하벽판으로 이어지는 현상을 나타낸다. 축소모델의 경우 모델 실험체 I, II, III은 초기균열이 접합부에서 시작하여 상부벽판, 하부벽판의 순서로 균열이 진전되었고 실물 실험체와 유사한 파괴모드를 나타내었다. 그러나 모델 실험

체 IV는 벽판하부 캡의 불량으로 초기균열이 하부벽판에서 생성한 후 접합부로 진전이되었으나 상부벽판에 균열이 진전됨이 없이 하부벽판이 파괴되는 지압파괴가 일어났다.

<표.3-3>수평접합부 실험결과

실험체	초기균열하중(t)	최대하중(t)	최대응력(kg/cm ²)
실물 I	55	132.7	315.9
실물 II	30	115	275.9
축소모델 I	110.4	200	476.2
축소모델 II	142.8	232.4	553.4
축소모델 III	88.2	120.3	286.4
축소모델 IV	84.0	152.4	363.4



<그림.3-3> 수평접합부 축하중-축변위관계

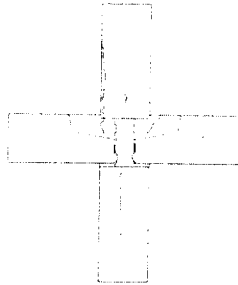
<표.3-4> 수직접합부 실험결과

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

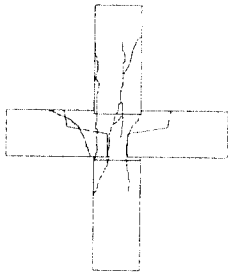
P_c : 초기균열하중 P_s : 접합부 균열하중
 P_{max} : 종국 파괴하중 τ_c : 초기균열 전단응력
 τ_s : 접합부 균열 전단응력 τ_{max} : 종국파괴 전단응력

수직접합부 실물 및 축소모델 실험체에서

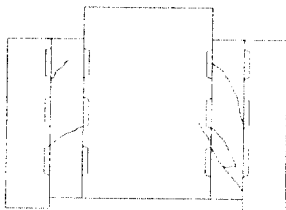
하중-변위 관계는 응력이 집중되는 벽판넬과 접합부 충전모르타르의 접합부분에서 초기 미소균열과 동시에 약간의 변위가 발생하였고, 사인장 균열 발생전까지는 하중의 증가에 따른 변위는 선형적으로 변화하였다. 접합부에서 사인장 균열이 발생하면 균열 및 변위가 급격히 진전되어 강성의 저하가 나타났으며 최대 하중 부근에서는 하중의 증가없이 변위만 증가하여 종국 균열에 도달하였다.



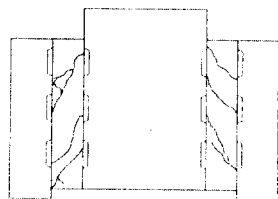
(a) 실물실험체



<그림.3-4> 수평접합부 실험체의 균열현황

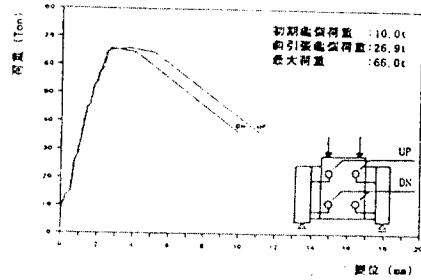


(a) 실물실험체

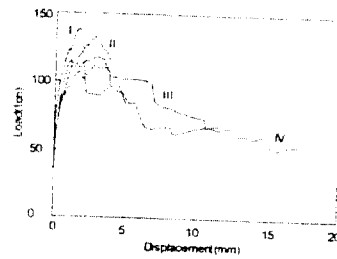


(b) 축소모델 실험체

<그림.3-5> 수직접합부 실험체의 균열현황



(a) 실물실험체



(b) 축소모델실험체

<그림.3-6> 수직접합부 하중-변위 관계

4. 부분구조물 실험

지금까지는 접합부 요소에 따른 거동을 살펴보았으나 이들이 조합하여 하나의 구조물을 이루었을 때 그 축소모델이 어느정도 상사성을 확보할 수 있는지 검토하였다.

4.1. 재료실험

모델 콘크리트의 배합비는 <표2-1>의 모델Ⅲ과 모델Ⅳ을 사용하였으며, 모델콘크리트의 실험결과를 <표.4-1>에, 실물 및 축소모델 철근의 결과는 <표.4-2>에 나타나 있다.

<표.4-1> 콘크리트 강도 실험 결과

실험체		압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	ft'/fc'	
부분구조물	실물	벽판*	264.2	32.4	0.12
	접합부*	336.5	37.4	0.11	
축소모델	벽판@	356.4	43.6	0.12	
	접합부@	403.7	37.3	0.09	

* Ø10 X 20 공시체

@ Ø5 X 10 공시체

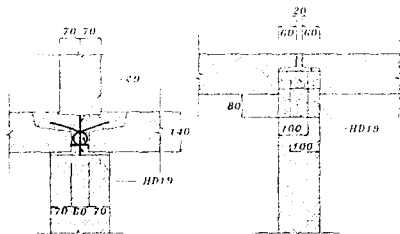
<표.4-2> 철근 실험 결과

		항복하중(kg)	인장하중(kg)	연신률(%)
부 분 구 조 물	HD10	2171	-	19.27
	D2'	2164.2	5375	10.4
조 물	HD13	5293	7698	22.1
	D2'	5250	5475	12.4
	HD19	11471	18407	20.2
	D3'	10775	11980	11.2

* 축소모델 철근에 대해서는 5%을 곱한 값임

4.2 실험체 제작

구조물 조립시 모르타르를 깔고 슬라브 조립 후 벽판 조립을 하기전 수평접합부에 접합부 콘크리트를 일부 타설하여 간격을 유지한 후 하루가 지난 후 벽판을 조립하였다. 부분구조물의 접합부 상세는 <그림.4-1>에 나타나 있다.

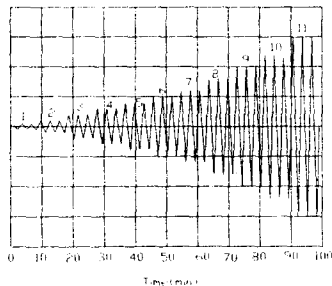


<그림.4-1>부분구조물 접합부 상세

4.3 부분구조물 실험

실험체의 가력 방법으로는 주기적 반전(Cyclically Reversed) 가력방식으로 변위조절에 의해 <그림.4-2>와 같은 변위이력을 사용하여 수행하였다.

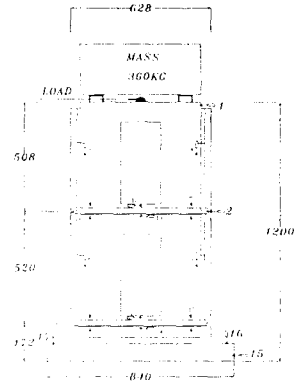
본 실험에서 관찰하고자 하는 주요변위는 접합부에서의 벌어짐과 미끄러짐, 전체 부분구조물의 층별 횡변위등이다. 주요변위 측정위치는 <그림.4-3>에 나타나 있다.



<그림.4-2> 정적실험에 사용된 변위이력

단계	변위
1	0.5 δ _s
2	1.0 δ _s
3	2.0 δ _s
4	3.0 δ _s
5	4.0 δ _s
6	5.0 δ _s
7	6.0 δ _s
8	8.0 δ _s
9	10.0 δ _s
10	12.0 δ _s
11	15.0 δ _s

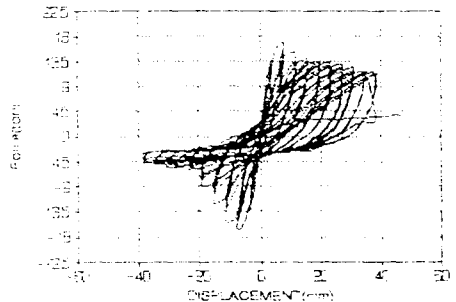
실물 δ_s = 4mm
축소모델 δ_s = 0.8mm



<그림.4-3> 측정계기 부착위치

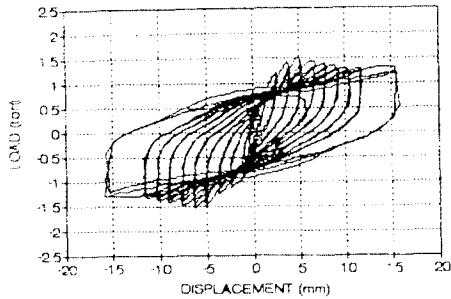
<그림.4-4>를 보면 전체이력거동에서는 실물과 축소모델이 거의 유사하게 나타난 것을 알 수 있다. 최대강도면에서, 축소모델 결과를 5²배한 25.1t이 실물의 17.5t에 비해 약30% 높게 나타난 것을 볼 수 있으며, 실물보다 축소모델의 연성이 낮은 사실을 확인할 수 있다.

재료시험의 결과로 보아 모델근이 실물 철근보다 50%낮은 연성을 가진 것이 부분구조물 모델의 연성저하를 초래했다고 판단된다. 다만 강도의 증가는 모델 콘크리트가 실물보다 약 17% 높게 나온 사실에 일부 영향을 받은 것으로 보인다. 최종파괴모드는 1층 수평접합부의 벌어짐과 수직 tie철근(HD19:D3)의 절단에 의한 것이었다.

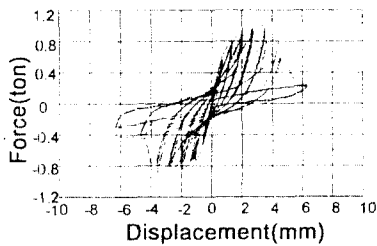


(a) 실물실험체

<그림.4-4> 실물 및 축소모델 이력곡선



(b) 1/3축소모델실험체



(c) 1/5축소모델실험체

<그림.4-4> 실물 및 축소모델 이력곡선

5. 결론

(1). 모델콘크리트의 경우 일반적으로 실물 콘크리트보다 강도면에서 크게 나타나는 경향이 있었으나 시멘트, 잔골재율등의 조절로 실물 콘크리트와의 상사성 확보가 어느정도 가능하였다.

(2). 모델 철근의 경우 열처리과정에서 진공관을 사용하지 않고 열처리를 하였는데 기존의 진공관을 사용한 실험결과^{(8),(9)}와 비교하여 볼때 진공관을 사용하지 않을 경우 연성이 저하하는 경향을 나타냈다.

(3). 수평접합부 및 수직접합부 모델실험에서 예측된 강도가 실물보다 큰 강도를 나타냈으나 종곡파괴모드와 균열형태는 거의 유사하게 나타났으며, 모델 콘크리트의 강도상사성을 유지할 수 있다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있으리라 본다.

(4). 부분구조물의 주기반전 실험에서 이력곡선은 거의 일치하게 나타났으나 연성이 작게 나타나는 경향이 있다. 그러나 이미 수행된 1/3축소모델실험⁽⁴⁾과 비교해보면 이력곡선의 에너지 흡수량상의 측면에서 진전된 것을 볼 수 있다. 이것은 본 실험에서는 축소에 의한 자중손실을 보충한 것 때문이라고 판단된다.

參 考 文 獻

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 No.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 집합부 거동에 관한 연구", 한양대학교,1991.6.
4. "P.C. 아파트의 내진 설계기준 제정을 위한 실험적 연구", 대한 주택공사, 1991.12
5. "삼환 P.C. 시스템의 내진 성능 연구", 영남대학교 부설 공업기술연구소, 1992.7
6. 조 양호,김 현산, 이 한선, "대형 판넬 구조의 쇄기형 집합부 거동에 관한 연구" 영남대학교 부설 공업기술연구소, 1994.6.
7. 배성용, 이한선, 신영식, "철근콘크리트 구조물의 축소모델 재료의 역학적 특성에 관한 실험연구", 한국콘크리트 학회 가을 학술발표회 논문집, 1994.11, P249 - 254.
8. 이한선, "구조물의 축소모델재료에 관한 연구", 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터, 1995.2.
9. 이 한선, 장 진혁, 김 상규, "구조물의 축소 모델 재료에 관한 실험 연구",대한건축학회 논문집,1995.9.