축소모델 철근콘크리트 보의 휨, 전단 및 정착거동에 관한 상사성 실험연구

Experimental Study on the Similitude in Flexure, Shear and Bond Behavior of Small-scale R.C. Beams

이 한 선* 고 동 우**
Lee, Han-Seon Ko, Dong-Woo

ABSTRACT

The small-scale models have been utilized for the prediction of inelastic behavior of reinforced concrete structures for a long time. The parameters that affect the similitude between the model and the prototype are various. Among them, the effect of bond between the model reinforcement and the model concrete is one of the most important factors. The study reported herein is addressed to verifying this similitude in bond behavior. Another topic is the similitude in shear. The selected scales are 1/1, 1/5, 1/10 and 1/12. Two prototype specimens and three models were tested in addition to the associated material tests. The test results are compared from the viewpoint of similitude.

1. 서론

강한 지진의 발생 시 구조물의 거동은 선형탄성영역을 벗어나 비선형 소성거동영역에 이른다. 이때 철근콘크리트 구조물의 안전성정도를 판단하기 위해서는 비탄성 거동에 대한 고려가 필요하다. 기존의 해석프로그램의 경우 선형 탄성영역에서는 어느 정도 신뢰성을 갖고 있으나 비선형 소성거동의 예측에서는 전산해석 프로그램상의 한계로 인해 그 신뢰성이 떨어진다. 따라서, 실험적인 방법에 의한 거동의 예측이 요구된다. 실물크기의 실험은 현실적으로 어렵기 때문에 구조물의 크기와 실험실의 여건에 따라 적절한 축소율을 갖는 축소모델 실험을 하게 된다. 이 때, 크기가 작아지거나 재료의 성질이 달라짐으로 인해 거동이 상이한 결과를 보여줄 가능성이 있다. 이러한 차이를 극복하기 위한 연구가 축소모델거동의 신뢰성을 확보하는데 필수적이다.

따라서, 본 연구에서는 1/5, 1/10, 1/12모델에 대해 실물콘크리트와 모델콘크리트 강도의 상호관계, 모델철근의 제작 및 인장실험, 이음길이를 달리한 단순보의 이음정착실험, 스터럽이 없는 보의 전단 실험을 통해 실물과 축소모델의 거동과 파괴모드에서의 상사성을 실험적으로 분석하고자 한다.

* 정회원, 고려대학교 건축공학과 부교수 ** 정회원, 고려대학교 건축공학과 석사과정

2. 모델콘크리트 실험

모델콘크리트의 성질을 실물과 정확히 일치시키기 위해서는 콘크리트 재료의 크기 뿐만 아니라 내부 공극이나 시멘트입자까지 줄여야 하나 이는 현실적으로 어렵다. 이러한 이유들로 인해 모델콘크리트는 축소율이 커질수록 강성이 작아지고 인장강도와 압축강도의 비는 커지며 워커빌리티가 떨어지는 경향을 보인다.

실물콘크리트는 설계강도가 210kg/cm^{2}인 D사의 레미콘을 사용하였으나, 실험결과 약 200kg/cm^2 으로 나타났다. 모델콘크리트 제작을 위해 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고 골재는 체가름을 하여 표면건조 상태로 사용하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 시멘트와 골재의 혼합비(A/C), 물시멘트비(W/C) 등을 변수로 하여 4가지의 시험비빔을 한 후 압축강도, 인장강도, 인장강도와 압축강도의 비가 실물콘크리트와 가장 일치되는 결과를 보여주는 모델콘크리트를 얻도록 하였다. 실물콘크리트의 공시체는 20cm×10cm 원통형몰드를 사용하였고, 모델콘크리트는 5cm×10cm의 몰드를 사용하였다.

표 2에서는 실물과 모델콘크리트의 실험결과를 평균하여 나타내었는데, 축소율이 클수록 압축강도는 작아지는 경향을 보여주었다. 강도의 편차가 적고, 인장압축비가 실물과 일치하는 배합비 I 을 실험체 제작에 사용하였다.

표 1 실물 및 모델콘크리트 배합 (단위: g)

Mix	A/C	W/C (%)	S/A (%)	Water	Cement	Sand	Aggregate	Super-Plasticizer	비고
Prototype		54.3	47.2	46.3	100	272.9	279.3	0.3	
배합 I	2.55	57	46.4	63.7	100	117.0	131.8	1	선택
배합 II	3.05	57	46.4	64.4	100	139.9	157.7	1	
배합 III	3.55	57	46.4	65.6	100	162.7	183.5	1	
배합 IV	3.55	62	46.4	70.6	100	162.7	183.5	1	

표 2 콘크리트의 평균강도 (단위: kg/cm^2)

구분	Prototype			1/5Model			1/10Model			1/12Model		
	압축강도 (f_c')	인장강도 (f_t)	f_t/f_c'	인장강도 (f_c')	압축강도 (f_t)	f_t/f_c'	압축강도 (f_c')	인장강도 (f_t)	f_t/f_c'	압축강도 (f_c')	인장강도 (f_t)	f_t/f_c'
배합 I	198.95	18.98	0.095	282.96	25.59	0.090	275.15	22.27	0.081	219.33	16.29	0.074
배합 II	-	-	-	229.4	28.7	0.125	207.56	17.92	0.086	242.4	16.87	0.074
배합 III	-	-	-	226.2	17.11	0.076	157.4	19.25	0.122	230.29	21.52	0.093
배합 IV	-	-	-	230.9	18.48	0.080	163.6	15.95	0.097	216.24	18.53	0.070

3. 모델철근 실험

모델철근이 실물철근과 일치하는 거동을 보이기 위해서는 응력-변형도 곡선의 형상과 항복강도, 그리고, 충분한 연성, 부착거동을 필요로 한다. 시중에서 쉽게 구할 수 있는 경강선의 경우 항복점이 명확하지 않고 연성이 충분하지 않기 때문에 열처리

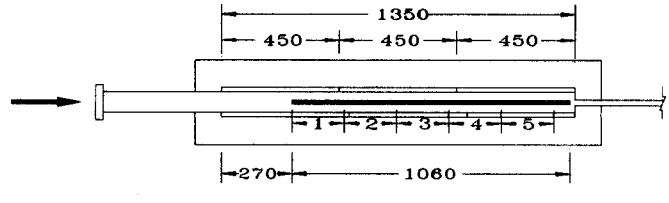


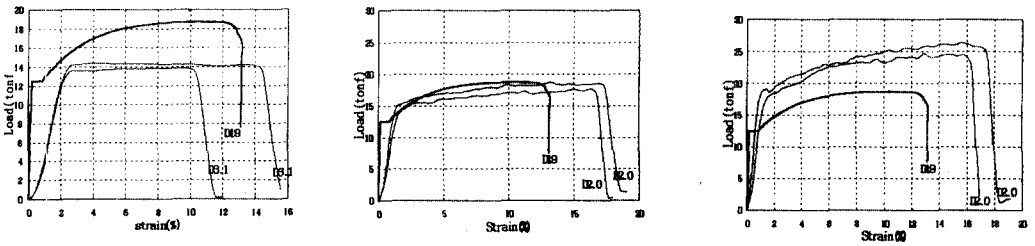
그림 1 전기로와 열처리 Zoning

표 3 모델철근의 열처리 및 항복강도

구분	열처리온도	유지시간	span length	평균항복강도				
				Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	Zone5
D2.0(1/12)	720℃	1시간 30분	10cm	-	124.3	155	122.7	158
D2.0(1/10)	720℃	2시간 30분	10cm	-	130	165	125	130
D3.1(1/5)	600℃	2시간	10cm	553	585	531	531	598

표 4 실험체에 사용된 실물과 모델철근

구분	Prototype	1/5 Model	1/10 Model	1/12 Model
하부근	D19	D3.1	D2.0	D2.0
(요구항복강도(kgf))	(12505)	(500.2)	(125.1)	(86.8)
상부근	D13	D2.0	ϕ1	ϕ1
늑근	D10	D2.0	ϕ1	ϕ1



(a) 실물철근과 1/5모델철근 (b) 실물철근과 1/10모델철근 (c) 실물철근과 1/12모델철근

그림 2 실물철근과 모델철근의 비교

온도와 유지시간을 변수로 한 진공 열처리를 통해 충분한 연성과 항복강도를 갖도록 하였다. 열처리 후 그림 1에서와 같이 5개의 가열구역으로 나누어 20cm 간격으로 절단하여 인장실험을 수행하였다. 표 3에서는 실험체 제작에 사용된 모델철근의 종류, 열처리 온도 및 유지시간, 평균항복강도를 나타내었고, 열처리 후에 일정한 항복강도가 생기고 연성이 훨씬 커짐을 알 수 있다. 표 4에서는 실험체에 사용된 철근의 종류및 실물철근과 모델철근의 요구항복강도를 볼 수 있는데, 인장실험 결과는 그림 2에서 보듯이 모델철근의 항복강도가 1/5 모델은 11%, 1/10 모델은 20%, 1/12 모델은 44%정도 높고, 연성도 대체로 크게 나타났다.

4. 단순보의 이음정착실험

4.1 실험체의 제작

본 실험은 철근과 콘크리트의 부착거동의 상사성을 확인하기 위하여 이음길이가 $1.0l_d$, $0.7l_d$, $0.4l_d$인 단순보를 실물, 1/5, 1/10, 1/12 축소모델로 제작하여 그 거동을 비교하였다.

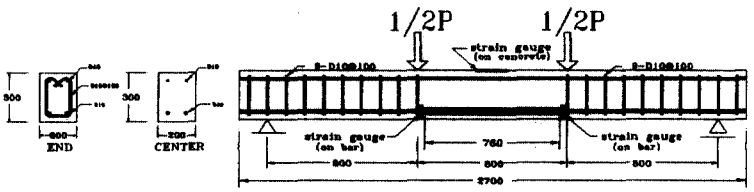
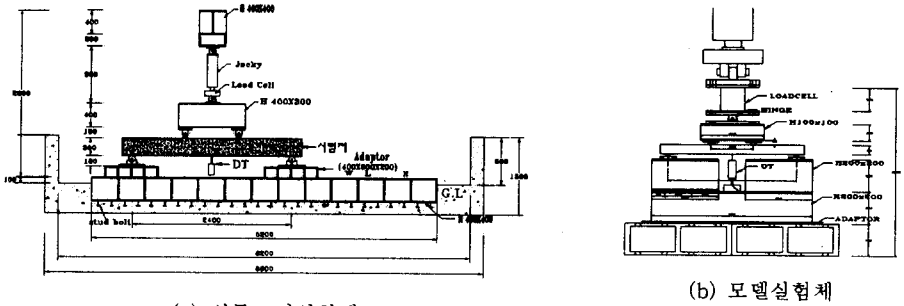


그림 3. 이음길이가 $1.0l_d$인 실물크기 실험체

실물실험체는 2개씩 제작하였고, 축소모델실험체는 각각 3개씩 제작하여 실험을 수행하였다. 그림 3은 실물크기 이음길이가 $1.0l_d$인 실험체를 보여주고 있다.

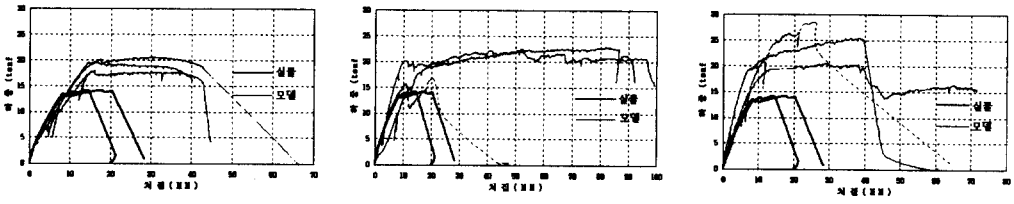
4.2 실험장치 및 방법

실물과 모델 모두 1/3스팬에 2개의 등집중하중을 가하는 방식을 택하였다. 실물의 경우 보의 상부에 콘크리트용 스트레인게이지 2개를 부착하고 하부근에 철근용 스트레인게이지 4개를 부착하였으며, 중앙부에서 처짐을 측정하기 위한 변위측정기를 설치하였다. 모델은 하중과 중앙부처짐을 측정하였다. 그림 4는 실물과 모델 단순보실험 장치를 보여주고 있다.



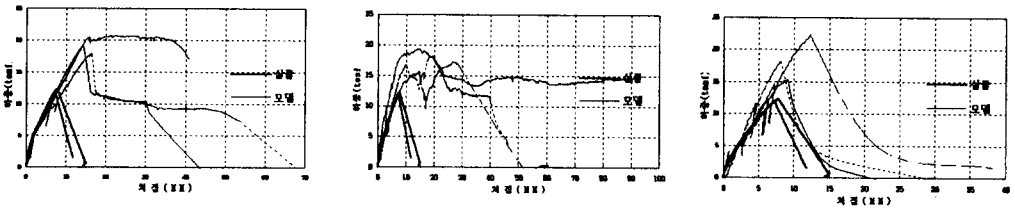
(a) 실물크기실험체 (b) 모델실험체

그림 4. 실험장치(단위:mm)



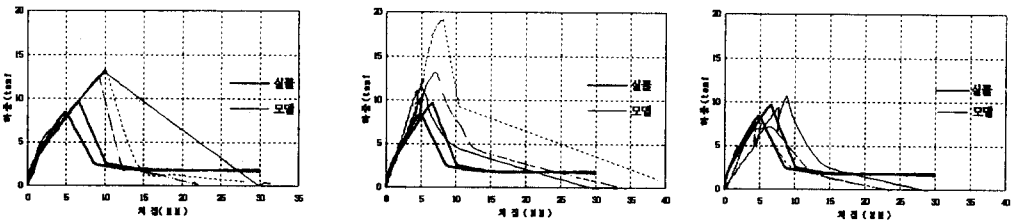
(a) 실물과 1/5모델비교 (b) 실물과 1/10모델비교 (c) 실물과 1/12모델비교

그림 5 $1.0l_d$의 P-δ 곡선



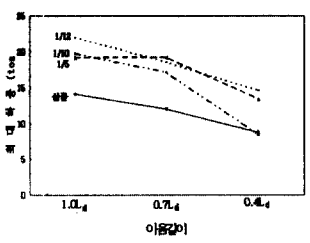
(a) 실물과 1/5모델비교 (b) 실물과 1/10모델비교 (c) 실물과 1/12모델비교

그림 6 $0.7l_d$의 P-δ 곡선

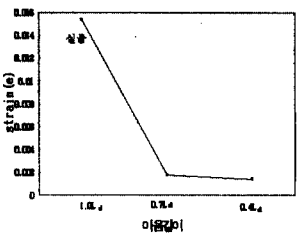


(a) 실물과 1/5모델비교 (c) 실물과 1/12모델비교 (b) 실물과 1/10모델비교

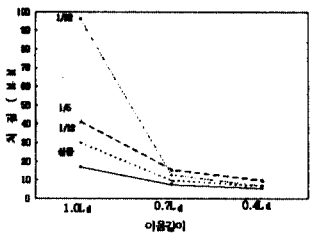
그림 7 $0.4l_d$의 P-δ 곡선



(a)축소율별, 이음길이별 최대평균하중



(b) 이음길이별 철근의 최대 strain



(c)축소율별, 이음길이별 평균최대처짐

그림 8 단순보 정착실험 결과

4.3 실험결과분석

그림 5~그림 7은 이음길이에 따른 하중-처짐관계를 나타내었다. 이음길이에 따른 거동은 실물과 모델 모두 $1.0l_d$의 경우 일단 항복한 후 어느 정도의 연성을 유지하다가 파괴되는 경향을 보여주고 있고, $0.7l_d$의 경우 항복강도의 90%정도에서 파괴되고, $0.4l_d$는 70%정도에서 파괴되어 대체로 비슷하나, $1.0l_d$에서의 연성은 모델이 2배이상 큰 경향을 보이고 있다. $0.7l_d$이하의 이음실험체에서의 정착파괴는 대부분 취성파괴를 보여 실물과 모델이 유사한 파괴모드를 보여주고 있다.

균열양상을 비교해보면, 실물의 경우 휨균열발생하다가 이음부분의 단부에서부터 균열이 발전한 후 정착파괴에 이르는 형태를 보여주고 있다. 모델은 축소율이 커질수록 균열의 수가 현저히 줄어들었다.

5. 스터럽이 없는 보의 전단파괴실험

5.1 실험개요

일반적으로 모델콘크리트는 인장강도가 실물콘크리트에 비해 크기 때문에 그만큼 전단저항력이 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 그림 9과 같이 전단스팬비(a/d)를 2.4로 하여, 실물실험체와 1/5모델, 1/10모델, 1/12모델의 스터럽이 없는 보의 전단실험을 수행하였다.

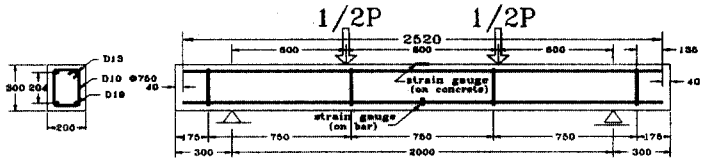
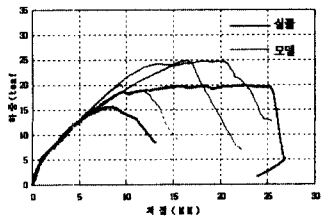
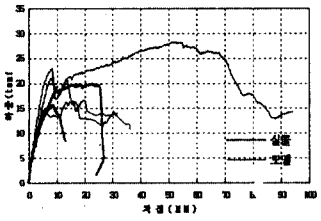


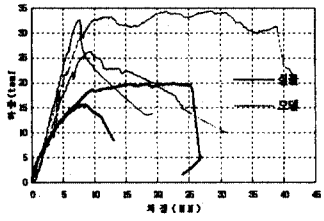
그림 9 스터럽이 없는 보의 실물크기 실험체 (단위:mm)



(a) 실물과 1/5모델비교



(b) 실물과 1/10모델비교



(c) 실물과 1/12모델비교

그림 10 스터럽이 없는 보의 P-δ 곡선

5.2 실험결과분석

그림 10을 보면 실물실험체의 경우 일반적으로 나타나는 취성파괴만 보여준 게 아니라, 1개의 실험체는 연성파괴의 양상을 보여주었다. 1개의 실험체는 초기에 휨균열을 보여주다가 사인장균열이 발생하고 사인장균열 상부에 압괴가 발생하면서 취성파괴를 보여주었고, 다른 하나는 사인장균열이 지속적으로 커지면서도 연성을 유지하는 양상을 보여주었다. 모델의 경우도 대부분 사인장균열이 발생하면서 바로 파괴에 도달했으나, 연성파괴를 일으킨 실험체는 실물보다 큰 연성을 보여주었다.

6 결론

이상의 실험결과에 의한 결론은 다음과 같다.

(1)모델철근의 항복강도가 실물보다 높아서 단순보의 이음정착실험결과 모델의 항복강도가 실물 보다 높게 나왔다.

(2)단순보의 이음정착실험과 스터럽이 없는 보의 실험에서 모델의 연성은 실물보다 훨씬 크게 나왔다.

(3)이음정착실험에서 파괴양상은 실물에서와 유사한 결과를 보여주었다.

(4)스터럽이 없는 보의 실험에서 실물과 모델 모두 연성파괴와 취성파괴의 양상을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 고려대학교 교비연구과제로 수행되었으며, 부분적으로 건교부 국책과제인 "우리나라 중,저층 철근콘크리트 건축물의 지진피해예측 및 보수보강법연구"의 지원에 의한 것입니다. 이 지원에 대해 감사드립니다.

참고 문헌

1. ACI Ad Hoc Committee on Structural Models, "Models for Concrete Structures", ACI SP.24, Detroit, Michigan, 1970.

2. F.A. Noor, L.F. Boswell, "Small Scale Modelling of Concrete Structures", Elsevier Science Publishers LTD, 1992,

3. Bertero, V.V, Aktan, A.E., Harris, H.G., and Chowdhury, A.A.,"Mechanical Characteristics of Materials Used in a 1/5 Scale Model of a 7-Story Reinforced Concrete Test Structure", University of California, Verkery, EERC-83/21, Oct, 1983

4. Harris, H.G., Sbins, G.M., and White, R.M., "Small Scale Direct Models of Reinforced and Prestressed Concrete Structures", Report No.37,

5. Sabins, G.M., Harris, H.G., White, R.N., and Mirza, M.S., "Structural Modeling and Experimental Techniques", Prentice-Hall Inc., nglewood

6. Andrew G. Mphonde and Gregory C. Frantz, "Shear Tests of High- and Low-Strength Concrete Beams Without Stirrups", ACI Journal Jul-Aug, 1984

7. 김 우, 김대중, 강성후, "철근콘크리트 구조연구를 위한 소축적구조실험기법", 한국콘크리트학회 논문집, 제 3권 제 4호, 1991,12

8. 이한선, "구조물의 축소모델 재료에 관한 연구", 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터, 1995.2

9. 이한선, 장진혁, 김상규, "1/10축소철근콘크리트보의 휨거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집 1995.5