

철근콘크리트 축소모델의 부재거동 유사성에 관한 연구

A Study on the Similitude of Member Behavior for Small-Scale Modeling of Reinforced Concrete Structure

이한선*

장진혁**

Lee, Han Seon Chang, Chin Hyuk

요 약

실물크기와 1/10 축소모델의 부재거동 유사성을 검토하기 위하여 네가지 형태의 실험을 수행하였다 : (1) P- Δ 효과를 가지는 장주의 실험, (2) 구속 띠철근의 유무에 따른 단주의 실험, (3) 스티럽이 없는 단순보(전단)실험, (4) T형보 휨실험.

실험의 결과에 기초하여 다음의 결론을 도출하였다 : (1) 장주의 P- Δ 효과는 1/10 축소모델에서 거의 정확하게 상사할 수 있다. (2) 단주의 띠철근에 의한 구속 효과는 1/10 축소모델에서 대체로 상사할 수 있다. (3) 스티럽이 없는 단순보의 파괴모드는 실물크기의 경우 전단취성파괴를 나타내었으나 1/10 축소모델은 인장철근의 항복과 더불어 상당한 크기의 연성을 나타낸 후 사인장균열 심화에 뒤이은 압축 콘크리트 파괴를 나타내었다. (4) T형보에서 실물크기와 1/10 축소모델의 거동은 매우 근사하게 나타났다.

Abstract

Four types of experiments were performed to check the similitude of member behavior between prototype and 1/10 scale models : (1) Test of slender columns with P- Δ effect, (2) Test of short columns with and without confinement steel, (3) Test of simple beams without stirrups, and (4) T-beam test.

Based on the results of experiments, the conclusions were made as follows : (1) The P- Δ effect of slender columns can be almost exactly represented by 1/10 scale model. (2) The effect of confinement on short columns by the hoop steel can be also roughly simulated by 1/10 scale model. (3) The failure modes of simple beams without stirrups are brittle shear failures in prototype whereas those of 1/10 scale models are the ductile yielding of tension steel followed by large diagonal tension cracking and compressive concrete failure. (4) The behaviors of prototype and 1/10 scale model in T-beams appear very similar.

Keywords : reinforced concrete, prototype, model, similitude

* 정회원, 고려대학교 건축공학과 조교수

** 동양시멘트(주) 건설사업본부 구조팀

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 1996년 10월호에 토의회담을 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물이 지진 등을 받을 때 대체로 비탄성 영역의 대변형에 이르게 되며, 이때 발생하는 손상이나 붕괴의 예측은 구조물의 안전성 확보에 매우 중요하고 필수적이다. 그러나 컴퓨터에 의한 해석적 예측 기술은 아직도 한계가 있어, 초대형 구조물의 경우 시스템의 전체 손상 및 붕괴에 이르기까지의 거동을 예측하기 위해서는 실험적 방법 외에는 대안이 없다. 그러나, 일반 구조요소의 거동 실험과는 달리 전체 구조시스템의 구조특성 실험을 위해 실물크기 실험을 수행한다는 것은 현실적으로 매우 어려우며 결국 축소모델에 의한 실험방법을 택하지 않을 수 없다. 또한 우리나라의 일반적인 실험실 규모를 고려할 때 대형구조물의 경우 1/10이하의 큰 축소율을 가진 모델을 사용하여야 할 경우가 생길 수 있다. 그러나 이러한 비교적 큰 비율의 축소는 실물과 모델 사이의 상사성 확보에 어려움을 야기시킬 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 부재 수준에서의 거동특성이 어느 정도 1/10축소 모델에서 재현될 수 있는지, 실험적 방법을 통해 모델제작 및 상사성 확보 가능성 및 문제점을 제시하는 것이다.

본 논문의 내용은 앞서 진행되었던 연구^(5,6,7,8) 이어 단순보의 전단거동, T형보의 휨거동, 기둥(장주, 단주)의 압축 실험을 통하여 부재수준에서 모델의 상사성을 검토하고 최대한 실물크기 실험체의 재료특성에 일치하도록 하며 이 중 기둥은 실물이 1/2축소, 모델은 그의 1/5축소이며 단순보의 전단거동과 T형보의 휨거동은 실물이 1/1로, 모델은 1/10축소로 제작, 실험하였다.

실물크기와 모델에서 철근과 콘크리트의 응력도-변형률 곡선의 일치를 전제로 한 진모델(True replica)의 상사법칙은 $(p=\text{실물크기}, m=\text{모델}, S=1/\text{축소율})$ (하중) $_p=(\text{하중})_m \times S^2$, (변위) $_p=(\text{변위})_m \times S$, (변형율) $_p=(\text{변형율})_m$ 이며 이것을 모델의 거동에 적용하여 실물크기의 값으로 조정하였다.

2. 실물크기와 모델 재료의 제작 및 역학적 특성

모델의 재료에는 모델콘크리트와 모델철근이 있으며 이것을 실물크기 재료와 축소율에 맞게 그대로 재현하여 정확히 일치시키기에는 현실적으로 어려운 점을 발견하게 되었다. 따라서 몇 가지 요구되는 성질에 기준하여 최대한 근접하려 노력하였다.

2.1 실물크기 및 모델콘크리트

모델콘크리트의 경우, 실물크기 콘크리트의 골재의 크기, 시멘트의 입자, 콘크리트의 내부공극을 축소율에 맞게 일치시키지는 못하므로 모델 재료의 선택은 이론적 근거에 의하기보다 실험적인 근거로 행해져야 한다. 따라서 압축강도(f_c'), 탄성계수(E_c), 극한 압축 변형률(ϵ_u), 인장강도(f_t)와 같은 성질이 일치되는 모델콘크리트를 얻기 위해서 시멘트와 골재의 혼합비(A/C), 물-시멘트비(W/C), 잔골재율(S/A) 등 여러가지 변수를 조절하여 가장 적합한 배합비를 도출하고자 하였다. 실물크기 콘크리트의 경우 세골재의 비중은 2.58, 조골재는 2.60이며 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트로 하였으며 비중은 3.15, 분말도는 $3200\text{cm}^2/\text{g}$ 이고 굵은 골재의 최대치수는 25mm로 하였다. 이는 실물크기 콘크리트 전체에 사용한 것이다.

모델콘크리트는 실물크기 콘크리트와 같은 보통포틀랜드 시멘트와 골재를 사용하여 제작하였다. 그리고 골재의 입도분포를 조절하기 위하여 No. 8에 통과하고 No. 20에 남는 골재를 조골재(Gm)로 하였고, No. 20을 통과하는 골재를 세골재(Sm)로 하였다.

Table 1 Mix ratio of concrete(Weight mix)

Mix	W	C	S(Sm+Gm)	A	F.M.	Superplasticizer
Prototype	0.45	1	2.06	3	7.1	.
Model I	0.65	1	3(2.4+0.6)	0	4.86	.
Mode II	0.65	1	6(3+3)	0	6.22	1%
Mode III	0.65	1	6(2+4)	0	6.56	1%
Mode IV	0.5	1	4(1.4+2.6)	0	6.63	0.7%
Mode V	0.5	1	5(2+3)	0	6.49	0.7%

그러나, 앞서 수행된 실험⁽³⁾에서는 모델콘크리트의 워커빌리티가 좋지 않았는데 그 이유는 시멘트에 대한 골재비(A/C)가 너무 과대하였기 때문으로 생각되어 골재비를 줄이고 물시멘트비(W/C)를 감소시키면서도 고성능 유동화제를 첨가하여 워커빌리티를 개선하여 압축강도를 증가시켰다. 실물크기와 모델의 시험배합비가 Table 1에 나타나 있으며, 각 배합비별로 14개의 공시체(실물크기 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$, 축소모델 $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$)를 제작하여 각각 7개씩의 압축 및 인장시험을 수행하였으며 그 평균값을 Table 3에 나타내었다. 모델은 5가지 시험배합 중 워커빌리티가 가장 우수하고 실물크기의 강도에 가장 근접한 모델콘크리트 IV를 실험체 제작에 적용하였다. 실물크기 및 모델콘크리트의 응력-변형도 곡선을 Fig. 2에 나타내었다.

Table 2 Demension of deformed bar
(Unit : mm)

Bar Type	D	S	H	T	Remark
D1.8	1.84	1.32	0.16	0.5	Deformed
D2.8	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

Table 3 Mean values of mechanical characteristics of concrete

Mix	$f'_c(\text{kg/cm}^2)$	$f'_t(\text{kg/cm}^2)$	f'_t/f'_c
Prototype Short Column	298	29.6	0.099
Prototype Slender Column	275	30	0.11
Prototype Simple Beam	283	30.5	0.108
Prototype T-Beam	340	31	0.092
Model I	248.7	38.2	0.154
Model II	207.4	41.08	0.198
Model III	144.74	19.46	0.134
Model IV	344.3	38.1	0.111
Model V	215	47	0.218

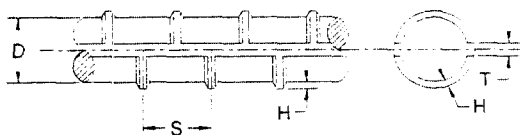
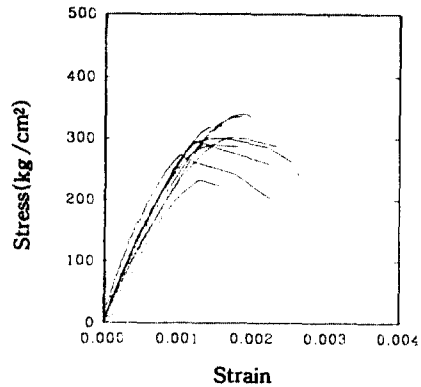
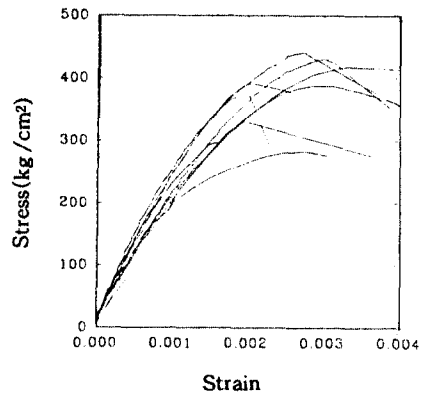


Fig. 1 Detail of reinforcement



(a) Prototype concrete



(b) Model concrete IV

Fig. 2 Stress-strain curves of concrete

2.2 모델철근의 제작 및 역학적 특성

모델철근이 실물크기철근을 재현하기 위해서는 인장에서의 항복 및 극한강도, 하중-변형도 곡선의 형상, 연성(ductility), 철근-콘크리트의 부착 특성이 고려되어야 한다. 따라서 모델철근을 실물과 거의 비슷하게 만들기 위해서 시중에서 판매되는 강선을 열처리를 통하여 강도를 낮추고 명확한 항복점을 가지게 하며, 이형화 작업을 통하여 강선에 마디를 만드는 방법을 행하였다.

실물크기 철근은 SBD24인 상용 D10, D13과 SBD40인 D19, $\Phi 6$ 를 사용했다. 모델철근은 시중에서 판매하는 경강선 $\Phi 1\text{mm}$, $\Phi 2\text{mm}$, $\Phi 3\text{mm}$ 를 구입하여 현재 보유 중인 기구를 이용하여 이형화시켰다. 이 결과 D1.84와 D2.8의 이형철근을 얻은

수 있었다. 이들 실물크기의 기하학적인 상사성을 Fig. 1와 Table 2에서 나타내고 있다. 실제의 실물 크기 철근을 기하학적 상사성으로 축소시킨 모델 철근의 직경은 각각 D1, D1.2, D1.3, D1.9, D2.2, D2.6을 요구하고 있다. 그러나, 이 기하학적 상사성을 만족시키기는 현실적으로 매우 어려웠으므로 본 연구에서는 응력이 아닌 힘을 기준으로 실물과 모델이 요구하는 상사성을 만족시키도록 노력하였다. 이전 논문^(5,6,7,8)에서는 열처리된 진공관을 이용하여 열처리를 수행하였으나 본 연구에서는 진공관을 이용하지 않고 수행하였다. 모델철근의 열처리는 노에서 목표온도까지 2시간 정도가 소요되었으며 목표온도에서 10분간 유지한 후 냉각을 하였다. 모델철근을 실물크기로 환산하여 그 결과를 Table 4에 나타내었으며, 괄호 안의 온도가 목표온도이다. 응력-변형도 곡선은 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보듯이 D13과 D2.8에서만 강

도면에서 차이를 보이고 나머지는 대체로 성공하였으나 연성면에서는 실물보다 모델이 50% 이하를 나타내어 진공관을 사용한 경우와는 차이를 나타내었다.

Table 4 Mechanical characteristics of reinforcing bars

Type	F_y (ton)	F_u (ton)	Elongation(%)	
Column	$\phi 1(740^\circ\text{C})$	1.3	1.86	9.9
	D2.8(800 $^\circ\text{C}$)	7.3	10.5	10.2
	$\phi 6$	1.2	1.4	7.9
	D13	5.1	6.1	31.1
Beam	$\phi(800^\circ\text{C})$	4.3	5.9	10.4
	$\phi 1(740^\circ\text{C})$	5.2	7.5	9.9
	D1.8(740 $^\circ\text{C}$)	10.3	19.9	9.6
	D10	3.1	4.5	19.9
	D13	5.1	6.1	31.1
	D19	12.5	18.0	25.0

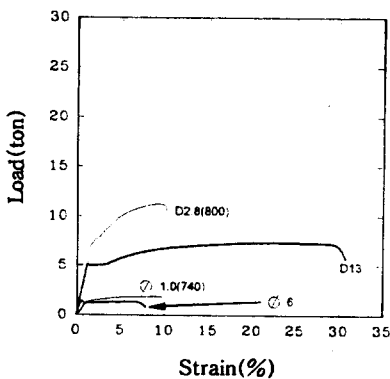
3. 기둥

철근콘크리트 건축 구조물에서 기둥은 가장 중요한 부재중의 하나로서, 기둥의 해석과 설계는 휨모멘트만으로 설계되는 보와 슬래브에 비해 복잡하다. 즉 실제 철근콘크리트 기둥은 대부분이 축력과 모멘트가 강도면에서 상호영향을 미치며 장주의 경우 편심에 의한 모멘트 확대효과(P- Δ 효과)를 고려해야 하고, 단주(short column)에서도 띠철근의 구속(confinement)효과를 압축강도와 연성(ductility)면에서 고려하여야 한다.

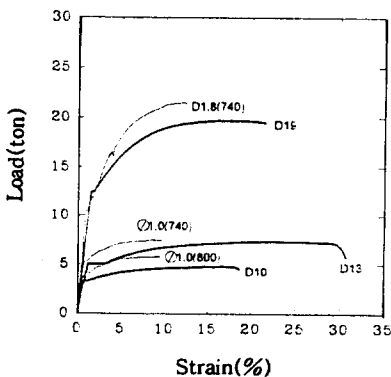
3.1 장주(Slender column)

3.1.1 실험체 및 실험장치의 설계 및 제작

장주는 실물크기의 단면이 30 \times 30cm로서 설계하여 실험을 하려고 했으나, 사용U.T.M의 용량(100ton)의 제한으로 부득이 1/2축소로서 실험을 행하게 되었다. 실험체는 Fig. 4(a)에서 보여주는 단면과 배근으로 하였고, 높이가 150cm로서 편심이 3.75cm가 되도록 설계하였으며 기둥 단부에는 국부파괴가 일어나지 않도록 단면을 22.5 \times 15cm로 하며 10mm 철판을 대어 집중하중에 대한 지압 파괴를 방지하였다. 모델은 이의 1/5로서 주근으로 열처리된 D2.8(800 $^\circ\text{C}$)과 띠근 $\phi 1(740^\circ\text{C})$ 을 사용하여 실험체를 제작하였다. 실험체의 제작은 실



(a) columns



(b) beams

Fig. 3 Load-strain curves of steel(Temperature, $^\circ\text{C}$)

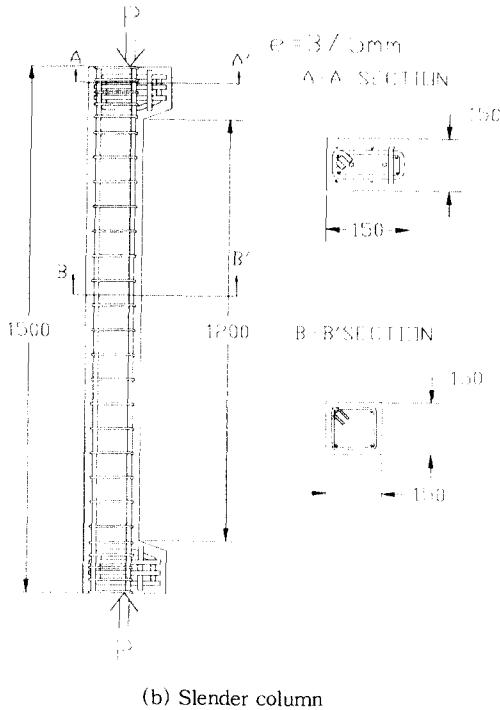
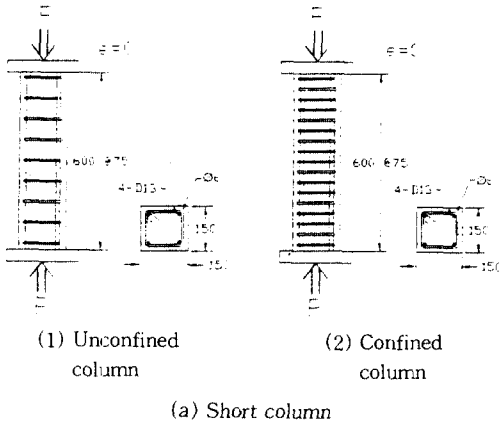


Fig. 4 Detail of columns(Unit : mm)

물인 경우 2개, 모델인 경우 4개를 제작하였다.

Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 실험체 상하단부에 knife edge를 설치하여 가력점이 정확한 편심과 힌지의 역할을 동시에 하게 하여 U, T, M으로 하중을 가하였다. 재하에 따른 축변형과 중앙부분에서의 횡변위 측정을 위해 가력판의 양 옆면에 $\phi 10\text{mm}$ 의 강봉을 용접하고 이것을 수직으로 홈이 파인 □각형 강관을 이용하여 실험체의 회전과 수

직변위가 자유롭게 일어날 수 있도록 하였다. 실험체의 재하시 압축이 예상되는 곳에 스트레인게이지를 부착하여 그 부분의 변형율을 측정하였다. 데이터의 취득은 System 4000을 이용하였다. 여기서 실물크기와 모델 공히 상하 단부에 철판을 덧대고 그 외는 보강없이 하였다. 그러나 모델의 실험결과중 2개가 단부에서 파괴가 일어났기 때문에 나머지 2개는 3mm 철판을, 편심을 주기 위해 단부에 확대한 부분 사면에 보강하여 종국파괴를 실험체 중앙부분에 일어나도록 유도하였다. 따라서 실험의 결과로서 실물크기 2개, 보강한 모델 실험체 2개를 비교 분석하였다.

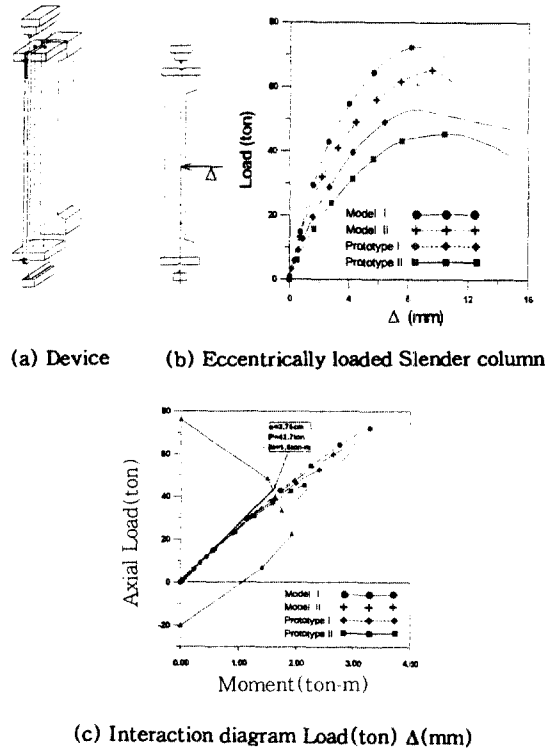


Fig. 5 Test device and results of slender column

3.1.2 실험결과 및 분석

Fig. 5(b)에서는 실물크기(prototype)와 모델(model)의 하중과 축변위를 비교하였다. 여기서 하중은 모델이 실물크기보다 20ton 이상 더 크게 발생하였는데 이는 공시체의 실험결과에서 보듯이 모델의 콘크리트 강도($344\text{kg}/\text{cm}^2$)가 실물크기 콘크리트 강도($275\text{kg}/\text{cm}^2$)보다 높은 것과

Fig. 3에서 D2.8이 D13보다 큰 항복강도를 가진 것에 기인한다고 볼 수 있다. 이러한 모델 재료 특성의 실물크기 재료 특성과의 차이는 1절에서 언급된 상사법칙에서 전제조건인 응력도-변형률 곡선의 일치성을 만족시키지 못함으로써 진모델(True Replica)이 아닌 왜곡모델(Distorted Model)로서의 상사법칙 적용을 필요로 하고 있다. 그러나 최대 하중에 있어서 축변형율은 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 5(c)은 단면에 의한 하중-모멘트곡선으로 편심(e)에 의한 모멘트 확대로 Δ 가 증가하는 상황을 보여준다. 가로축은 축하중 $\times(e+\Delta)$ 을 나타내는 중앙부 휨모멘트로서 여기서 $e=3.75\text{cm}$ 이다. 이 그림에서 편심이 3.75cm일 때의 이차 거동이 없다는 가정하의 기울기가 굵은 실선으로 나타나 있으며, 굵은 실선과 실험결과와의 기울기는 초기에는 거의 일치하나 Δ 의 증가로 인한 이차 모멘트 확대가 일어나 점차 갈수록 완만해지는 것을 알 수 있다. 그러나 종국파괴는 예측된 하중과 모멘트보다 상당히 증가한 후에 일어난 것을 알 수 있다. 이것은 예측에 사용된 철근과 콘크리트의 강도($2400\text{kg}/\text{cm}^2$ 및 $275\text{kg}/\text{cm}^2$)가 실제보다 작았다는 것을 의미한다.

3.2 단주(Short column)

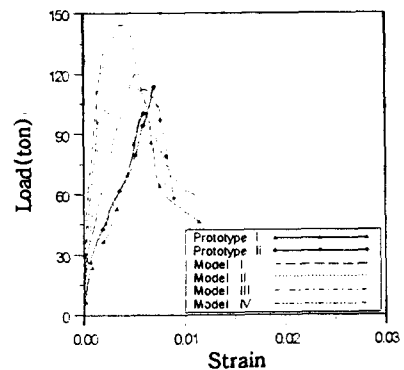
3.2.1 실험체 설계 및 제작

단주도 역시 1/2축소(실물크기)로서 Fig. 4(b)와 같이 실험체를 설계하여 제작하였다. 모델은 이의 1/5축소이다. 단주의 단면은 장주와 같이 $15\times 15\text{cm}$ 이고 높이는 60cm이다.

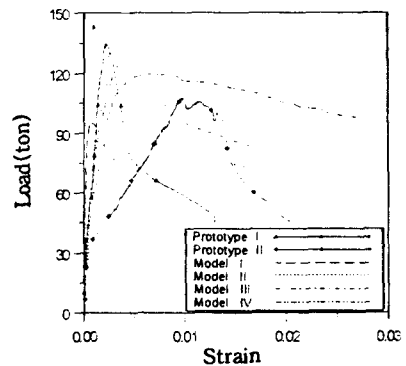
단주는 편심이 일어나지 않도록 재하하였으며 단부면에는 지압파괴가 일어나지 않도록 철판을 덧대었다. 모델은 덧판을 대지 않고 제작하였다. 단주는 두가지 종류로서 띠근의 간격이 7.5cm (Fig. 4(b)(1))와 3.75cm(Fig. 4(b)(2))로 하였다. 그 이유로는 구속이 된 기둥과 구속이 되지 않은 기둥의 차이점을 모델에도 적용시켜 살펴보기 위함이다. 각각의 실험체에 대해 실물인 경우 2개씩 제작하였고 모델인 경우 4개씩 제작하였다.

3.2.2 실험결과 및 분석

Fig. 6(a)는 띠근의 간격이 7.5cm로서 무구속이며 장주와 같이 실물크기보다 모델이 하중을 더 받은 것으로 나타났으며 최대하중에서의 변형율에 대해서는 모델이 실물크기보다 작은 변형율에서 파괴가 일어난 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)에서는 띠근 간격이 3.75cm로 구속된 것을 나타내며, 이것의 경우 실물크기(Prototype I)와 모델이 거의 비슷한 곡선을 나타내었다. 그리고 축소모델이 실물크기보다 연성이 큰 경향을 나타내었다. 축소모델이 강도면에서는 실물크기와 비슷하게 나타나고 있으나 이처럼 연성(ductility)면에서 대체로 큰 경향을 나타낸 것은 모델콘크리트의 최대 변형율이 Fig. 1에서 실물크기보다 크고, Fig. 3에서 후프철근으로 사용된 모델철근($\Phi 1.0$)이 실물크기 철근($\Phi 6$)보다 다소 연성이 큰 점에 기인한



(a) Unconfined column



(b) Confined column

Fig. 6 Load-strain curve of short column

것으로 판단된다. 축소모델에서 띠근 간격이 3.75mm인 경우가 7cm인 경우에 비해 연성이 확실히 크게 나타나는 것을 발견할 수 있다.

4. 단순보 전단실험

4.1 실험체 설계 및 제작

타 실험^(3,5,7)에서 단순보 휨실험을 통해 모델과의 유사성을 검토하였으며, 본 실험에서는 단순보 전단거동에 대해 유사성을 검토하고자 하였다. 단순보의 전단거동을 유도하기 위하여 Fig. 7에서 보여주는 것처럼 스테럽의 간격은 75cm이고, 전단 스패너를 60cm/25cm(2.4)로 하여 실험을 수행하였다. 철근비는 0.012이다. 모델에는 주근을 D1.8(740℃)을 인장축에 배근하였고, Φ 1mm(740℃)를 압축축에 배근하였다. 스테럽으로 Φ 1mm(800℃)를 4개 배근하였다.

재하는 Fig. 7에서와 같이 2점 등집중 하중을 가하였다.

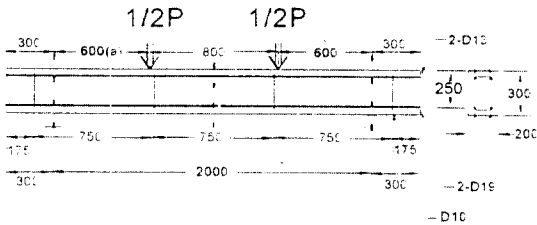


Fig. 7 Shear beam Detail(unit : mm)

4.2 실험결과 및 분석

일반적으로 전단파괴는 전단스패너가 2.5보다 작은 경우, 전단압축 혹은 전단인장파괴로 압축콘크리트 파쇄 혹은 인장철근 정착 상실 등으로 이어지는 것으로 알려지고 있다. 여기에서도 Fig. 8에서 보는 바와 같이 실물크기와 축소모델 보의 거동은 공히 전형적인 전단압축파괴로 나타났다. 그러나 Fig. 9에서 같은 실물크기 보라도 최대 강도에서 상당히 차이가 발생하였고, 취성적인 파괴였음을 알 수 있다. 반면 모델 보의 거동은 오히려 휨에 의한 연성 거동이 지배적인 가운데 마지막

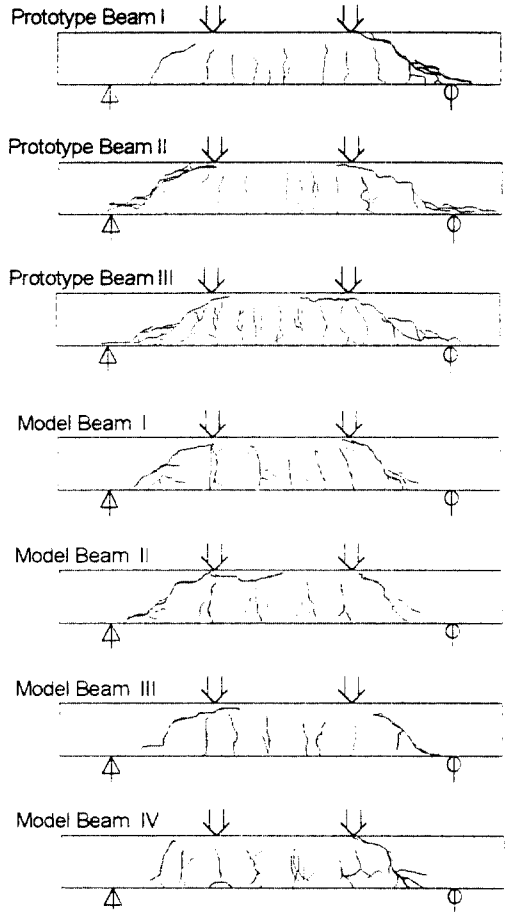


Fig. 8 Crack patterns of shear beams

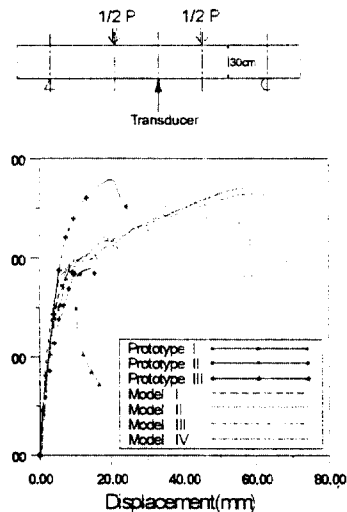


Fig. 9 Load-displacement Curve of shear beams

형보 실험에서는 거의 완벽한 상사성을 나타내었고 다만 모델이 실물크기보다 항복점에서 조금 차이를 나타내고 있다. 이는 모델 철근의 항복점이 실물크기보다 더 높은 것에 기인한다고 볼 수 있다.

6. 결 론

이상의 각 실험결과에 의한 결론은 다음과 같다.

(1) 콘크리트에 있어서 실물크기와 모델의 상사성은 골재비와 물시멘트비를 조절함으로써 근사하게 조절할 수 있다.

(2) 철근은 이형화와 열처리를 통하여 하중-변형률 곡선을 근사하게 일치시킬 수 있다. 그러나, 진공관을 사용하지 않은 열처리에 있어 진공관 열처리보다 다소 연성이 떨어져 연성확보의 문제가 제기된다.

(3) 장주 실험으로부터 모델 콘크리트강도만 보정된다면 축력과 휨모멘트에 의한 P- Δ 거동은 거의 완벽하게 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

(4) 단주 실험으로부터 다소 불규칙적인 결과가 나타났지만 재료의 강도만 일치시킬 수 있다면 강도와 연성면에서 상사성을 확보할 수 있다고 본다. 다만 모델의 경우, 보다 큰 연성을 나타내는 경향이 있다.

(5) 단순보 전단실험에서 최종 파괴양상은 전단스팬에서 사균열이 심화되면서 이 균열이 콘크리트 압축 부분을 잠식하고 최종적으로 콘크리트의 파쇄를 초래하는 전단압축파괴로서 동일하게 나타나고 있으나, 축소모델에서는 이러한 전단스팬의 사균열이 심화되는 과정에서 인장철근의 항복이 동시에 진행됨으로써 상당히 큰 연성거동을 나타내는 점이 실물크기의 취성거동과 다르게 나타난 점이다. 따라서 축소모델에 있어서 전단파괴의 상사성을 확보하기 위해 보다 깊이있는 연구가 더 필요하다고 생각된다.

(6) T형보 휨실험은 항복하중에서 약간의 차이를 보였지만 모델철근의 항복강도를 보정한다면 이것 역시 상사성 확보가 용이하다고 생각된다.

감사의 말씀

이 논문은 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터 지원에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

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. 김우, 김대중, 강성후, "철근 콘크리트 구조연구를 위한 소축적 구조실험기법," 한국 콘크리트학회 논문집, 제3권 제4호, 1991, 12
4. 윤재진, "1/3축적 모델실험에 의한 프리캐스트 콘크리트판 구조물의 상사성에 관한 연구," 한국 콘크리트학회지, 제4권 제3호, 1992, 9
5. 배성용, 이한선, 신영식, "철근콘크리트 구조물의 축소모델 재료의 역학적 특성에 관한 실험연구", 한국콘크리트 학회 가을 학술발표회 논문집, 1994. 11, pp.249-254.
6. 이한선, "구조물의 축소모델 재료에 관한 연구", 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터, 1995. 2.
7. 이한선, 장진혁, 김상규, "1/10 축소 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 1995. 5, pp. 325-330.
8. 이한선, 장진혁, 김상규, "구조물의 축소모델 재료에 관한 실험연구", 대한건축학회 논문집, 1995. 9.

(접수일자 : 1996. 1. 10)