

# 철근콘크리트 축소모델의 부재거동 상사성에 관한 연구

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

장진혁\* 이한선\*\*

Chang, Chin Hyuk Lee, Han Seon

### 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- $\Delta$  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- $\Delta$  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 also roughly simulated by 1/10 scale model. (3)The failure modes of simple beams without stirrups are brittle shear failure in prototype whereas those of 1/10 scale models were the yielding of tension steel followed by large diagonal tension cracking + compressive concrete failure. (4)The behaviors of prototype and 1/10 scale model in T-beams appear very similar.

### 1. 서론

철근콘크리트 구조물이 지진동을 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 방법외에는 대안이 없다. 그러나, 일반 구조요소의 거동 실험과는 달리 전체 구조 시스템의 구조성능 실험을 위해 실물크기 실험을 수행한다는 것은 현실적으로 불가능하며 결국 축소모델에 의한 실험방법을

택하지 않을 수 없다. 또한 우리나라의 일반적인 실험실 규모를 고려할 때 1/10이하의 큰 축소율을 가진 모델을 사용하여야 한다. 그러나 이러한 비교적 큰 비율의 축소는 실물과 모델사이의 상사성 확보에 어려움을 야기시킬 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 부재 수준에서의 거동특성이 어느 정도 1/10축소 모델에서 재현될 수 있는 지 실험적 방법을 통해 모델제작 및 상사성 확보 기법을 제시하는 것이다.

본 논문의 내용은 앞서 진행되었던 논문<sup>(3)</sup>에 이어 단순보의 전단거동, T형보의 휨거동, 기둥(장주, 단주)의 압축 실험을 통하여 부재수준에서 모델의 상사성을 검토하고 최대 실험체계의 재료특성에 일치하

\* 영남대 대학원 석사과정

\*\* 영남대 건축공학과 조교수

이 논문은 초대형 구조시스템 연구센터 지원에 의함

도록 하며 이 중 기둥은 실물이 1/2축소, 모델은 그의 1/5축소이며 단순보의 전단거동과 T형보의 휨거동은 실물이 1/1로, 모델은 1/10축소로 제작, 실험하였다.

실물크기에 대한 모델의 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 조정되었다.

## 2. 실물크기와 모델재료의 제작 및 역학적 특성

모델의 재료에는 모델콘크리트와 모델철근이 있으며 이것을 실물크기 재료와 축소율에 맞게 그대로 재현하여 정확히 일치시키는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 몇 가지 요구되는 성질에 기준 하여 최대한 근접하려 노력하였다.

### 2.1 원형 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 우리는 극한 압축강도( $f'_c$ ), 탄성계수( $E_c$ ), 극한 압축 변형률( $\epsilon_u$ ), 극한 인장강도( $f'_t$ )와 같은 성질이 일치되는 모델콘크리트를 얻기 위해서 시멘트와 골재의 혼합비(A/C), 물-시멘트비(W/C), 잔골재율(S/A)의 여러가지 변수를 선택하여 가장 적합한 배합비를 도출하고자 한다. 원형 콘크리트의 경우 모래의 비중은 2.58, 자갈은 2.60 이며 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트로 하였으며 비중은 3.15, 분말도는 3200 $\text{cm}^2/\text{g}$  이고 굵은 골재의 최대치수는 25mm로 하였다. 이는 원형 콘크리트 전체에 사용한 것이다.

모델콘크리트에는 원형콘크리트와 같은 보통포틀랜드 시멘트와 골재를 사용하여 제작하였다. 그리고 골재의 입도분포를 조절하기 위하여 No.8에 통과하고 No.20에 남는 골재를 자갈(Gm)로 하였고, No.20을 통과하는 골재를 모래(Sm)로 하였다.

그러나, 앞서 수행된 실험<sup>(3)</sup>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 개선하고 최대압축강도를 증가시켰다.

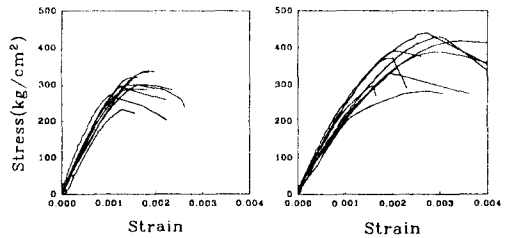
실물크기와 모델의 시험배합비가 <표 1>

<표 1> 콘크리트의 배합비(중량배합)

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

<표 2> 콘크리트의 역학적 특성(평균값)

| Mix        | $f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $f'_t$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $f'_t/f'_c$ |
|------------|------------------------------|------------------------------|-------------|
| 실물크기 단주    | 298                          | 29.6                         | 0.099       |
| 실물크기 상주    | 275                          | 30                           | 0.11        |
| 실물크기 단순보   | 283                          | 30.5                         | 0.108       |
| 실물크기 T형보   | 340                          | 31                           | 0.092       |
| 모델콘크리트 I   | 248.7                        | 38.2                         | 0.154       |
| 모델콘크리트 II  | 207.4                        | 41.08                        | 0.198       |
| 모델콘크리트 III | 144.74                       | 19.46                        | 0.134       |
| 모델콘크리트 IV  | 344.3                        | 38.1                         | 0.111       |
| 모델콘크리트 V   | 215                          | 47                           | 0.218       |



(a) 실물크기 (b) 모델콘크리트IV  
<그림 1> 콘크리트 응력-변형도곡선

에 나타나 있으며 이들의 실험결과가 <표 2>에 나타나있다. 모델은 5가지 시험배합중 워커빌리티가 가장 우수하고 실물크기의 강도에 근접한 모델콘크리트 IV를 실험체 제작에 적용하였다. 실물크기 및 모델콘크리트의 응력-변형도 곡선을 <그림 1>에 나타내었다

## 2.2 모델철근의 제작 및 역학적 특성

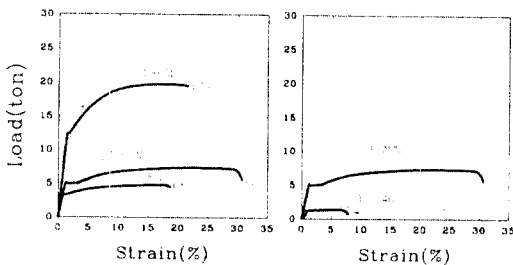
모델철근이 실물크기철근에 재현되기 위해서는 인장에서의 항복 및 극한강도, 하중-변형도 곡선의 형상, 연성(ductility), 철근-콘크리트의 부착특성이 고려되어야 한다. 따라서 모델철근을 실물과 거의 비슷하게 만들기 위해서 시중에서 판매되는 강선을 열처리를 통하여 강도를 낮추고 명확한 항복점을 가지게 하며, 이형화 작업을 통하여 강선에 마디를 만드는 방법을 행하였다.

실물크기 철근은 SBD24인 상용 D10, D13과 SBD40인 D19,  $\phi 6$ 을 사용했다. 모델 철

근은 시중에서 판매하는 경강선  $\phi 1\text{mm}$ ,  $\phi 2\text{mm}$ ,  $\phi 3\text{mm}$ 를 구입하여 현재 보유중인 기구를 이용하여 이형화 시켰다. 이 결과 D1.84와 D2.8의 이형철근을 얻을 수 있었다. 실제의 실물크기 철근을 기하학적 상사성으로 축소시킨 모델철근의 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<sup>(3)</sup>에서는 열처리시 진공관을 이용하여 열처리를 수행하였으나 본 연구에서는 진공관을 이용하지 않고 수행하였다. 모델철근의 열처리는 노에서 목표 온도까지 2시간정도가 소요되었으며 목표온도에서 10분간 유지한 후 노냉을 하였다. 모델철근을 실물크기로 환산하여 그 결과를 <표 3>에 나타내었으며 괄호 안의 온도가 목표온도이다. 응력-변형도곡선은 <그림 2>에 나타내었다. 그림에서 보듯이 D13과 D2.8에서만 강도면에서 차이를 보이고 나머지는 대체로 성공하였으나 연성면에서는 실물보다 모델이 50%이하를 나타내며 진공관을 사용한 경우와는 다소 차이를 나타내었다.

<표 3> 실물크기철근과 모델철근

| 종류     |                             | $F_y(\text{ton})$ | $F_u(\text{ton})$ | 변형율(%) |
|--------|-----------------------------|-------------------|-------------------|--------|
| 기<br>형 | $\phi 1(740^\circ\text{C})$ | 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   |
| 보      | $\phi 1(800^\circ\text{C})$ | 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   |



(a)보철근 (b)기둥철근  
<그림 2> 철근의 하중-변형율곡선

## 3. 기둥

철근콘크리트 건축 구조물에서 기둥은 가장 중요한 부재중의 하나로서, 기둥의 해석과 설계는 휨모멘트만으로 설계되는 보와 슬래브에 비해 복잡하다. 그 이유는 실제 철근콘크리트 기둥은 대부분이 축력과 모멘트를 동시에 받으며 편심에 의한 모멘트 확대 효과(P- $\Delta$  효과)를 고려해야 하기 때문이다.

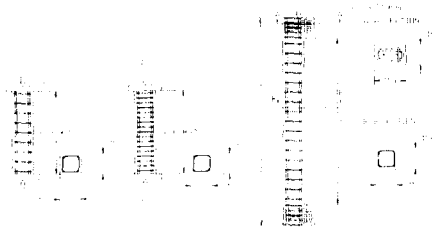
본 연구에서는 기둥을 장주(Slender column), 단주(Short column)로 구분하였고 여기서 단주는 또다시 구속(confinement)된

것과 구속되지 않은 것으로 구분하였다.

### 3.1 장주(Slender column)

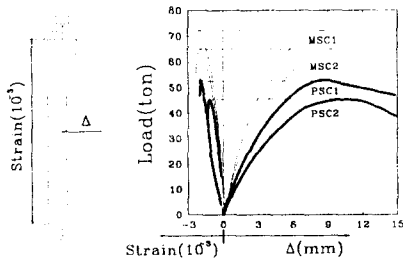
#### 3.1.1 실험체 설계 및 제작

장주는 실물 크기의 단면  $30 \times 30\text{cm}$ 로 설계하여 실험을 하려고 했으나 현재 보유 중인 U.T.M의 용량을 고려하여 부득이 1/2 축소로서 실험을 행하게 되었다. <그림 3> (b)에서 보여주는 단면과 배근으로 하였고 높이가 150cm 로써 편심이 3.75cm가 되도록 설계하였으며 기둥 단부에는 국부파괴가 일어나지 않도록 단면을  $22.5 \times 15\text{cm}$ 로 하며 10mm 철판을 대어 집중하중에 대한 지압파괴를 방지하였다. 모델은 이의 1/5로서 주근으로 열처리된 D2.8(800℃)과 띠근  $\phi 1(740^\circ\text{C})$ 을 사용하여 실험체를 제작하였다. 실험체의 제작은 실물인 경우 2EA, 모델인 경우 4EA을 제작하였다.



(a) 단주 (b) 장주

<그림 3> 장주, 단주 단면상세도(unit:mm)



(a) 실험장치 (b) 축하중-축변형률 및 횡변위 곡선

<그림 4> 장주 실험결과

### 3.1.2 실험결과

<그림 4>(a)에서 보는 바와 같이 실험체 상하단부에 knife edge를 설치하여 가력점이 정확한 편심과 힌지의 역할을 동시에 하게 하였다. 실험결과에 있어서 실물크기 (PSC1, PSC2)와 모델(MSC1, MSC2)의 하중과 횡변위, 축변위를 비교하였다. <그림 4>(b)에서 보면 하중은 모델이 실물크기보다 20ton정도 더 발생했는데 이는 공시체의 실험결과에서 보듯이 모델의 강도가 훨씬 높은 것에 기인한다고 볼 수 있다. 그러나 최대 하중에 있어서  $\Delta$ 와 변형율은 별차이가 없음을 알 수 있다.

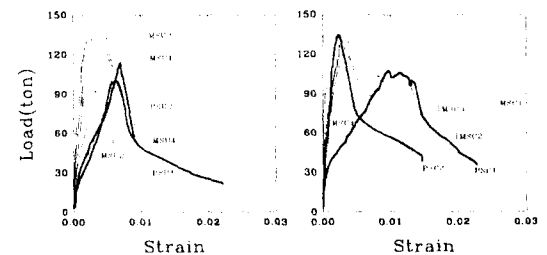
### 3.2 단주(Short column)

#### 3.2.1 실험체 설계 및 제작

단주도 역시 1/2축소(실물크기)로서 <그림 3> (a)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 종류로써 띠근의 간격이 3.75cm와 7.5cm로 하였다. 그 이유로는 구속이 된 기둥과 구속이 되지 않은 기둥의 차이점을 모델에도 적용시켜 살펴보기 위함이다. 각각의 실험체에 대해 실물인 경우



(a) 무구속

(b) 구속

<그림 5> 단주 하중-축변위 곡선

2EA씩 제작하였고 모델인 경우 4EA씩 제작하였다.

### 3.22 실험결과

<그림 5> (a)는 띠근의 간격이 7.5cm로서 무구속이며 장주와 같이 실물크기(PSU)보다 모델(MSU)이 하중을 더 받은 것으로 나타났으며 변형율이 거의 비슷한 수준에서 파괴가 일어난 것을 알 수 있다. (b)에서는 3.75cm로 구속된 것을 나타내며, 이것의 경우 실물크기(PSC)와 모델(MSC)이 거의 비슷한 곡선을 나타내었다. 그리고 무구속보다 구속된 경우가 하중은 거의 비슷하되 연성이 큰 것으로 나타났다.

## 4. 단순보 전단실험

### 4.1 실험체 설계 및 제작

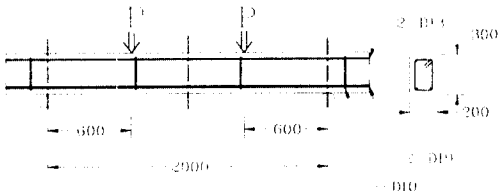
이전의 실험<sup>(4)(5)</sup>에서 단순보 휨 실험을 통해 모델과의 상사성을 검토하였으므로 본 실험에서는 단순보 전단거동에 대해 상사성을 검토하고자 하였다.

단순보의 전단거동을 유도하기 위하여 <그림 6>에서 보여주는 것처럼 스테럽의 간격은 75cm이고, 전단스팬비를 60cm/25cm로 하여 실험을 수행하였다. 모델에는 주근을 D1.8(740℃)을 인장축에 배근하였고,  $\phi$  1mm(740℃) 압축축에 배근하였다. 스테럽은  $\phi$  1mm(800℃)를 4EA 배근하였다.

재하는 <그림 6>에서와 같이 2지점 등집중 하중을 가하였다.

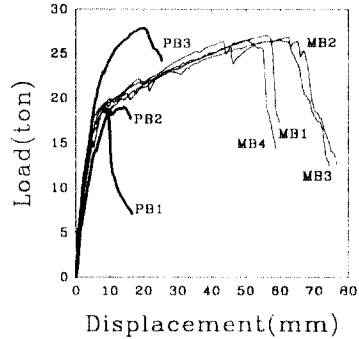
### 4.2 실험결과

<그림 7> 및 <그림 8>에서 실물크기(PB)

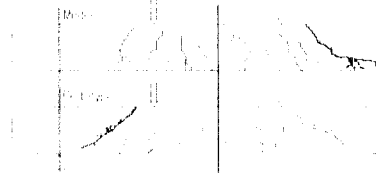


<그림 6> 단순보 단면 상세도(unit : mm)

의 거동은 전형적인 전단취성파괴로 나타났다. PB3의 강도가 높게 나타난 것도 콘크리트 강도가 다른 것에 비해 높았기 때문일 것으로 판단된다. 모델의 결과를 살펴보면 최후의 파괴모드는 사인장 균열의 심화에 의한 콘크리트 파괴로 나타났다. 그 하중-처짐 거동은 휨-인장 철근의 항복에 의한 파괴거동을 그대로 나타내고 있다.



<그림 7> 단순보 하중-중양부 처짐 곡선



<그림 8> 단순보 파괴모드

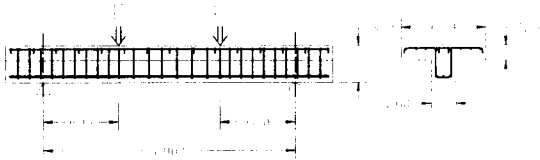
## 5 T형보 휨실험

### 5.1 실험체 설계 및 제작

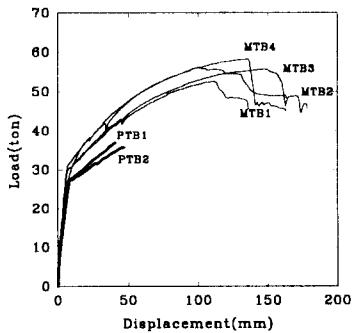
실제 구조물의 경우, 구형(矩形)보보다 슬라브와 일체로 된 보, 즉 T형보의 거동이 지배적이므로 이의 거동특성을 축소모델에서 그대로 재현할 수 있는지 확인하여 보았다.

<그림 9>과 같이 부재가 설계되었고 웹 부분의 인장축 주근은 3-D19(3-D1.8, 800℃), 압축축 주근은 2-D13(2- $\phi$  1mm, 740℃), 슬라브측 길이방향 철근은 6-D13(6- $\phi$  1mm, 740℃), 슬라브측 직교방향 철근

D10( $\phi$ 1mm, 800 $^{\circ}$ C)의 간격은 20cm, 스티럽 D10( $\phi$ 1mm, 800 $^{\circ}$ C)의 간격이 10cm이다(괄호 안의 수치는 모델에 적용).



<그림 9> T형보 단면 상세도



<그림 10> T형보 하중-중앙부 처짐 곡선

## 5.2 실험결과

<그림 10>에서 보듯이 모델(MTB)이 실물크기(PTB)보다 하중이 약간 더 크게 나타났으나 전반적으로 비슷한 파괴모드와 휨-변위 관계를 나타내고 있다. 단, 실물크기의 변위는 변위측정장치의 용량부족으로 파괴시까지의 값을 얻지 못했다. 목측에 의하면 거의 같은 수준의 변형능력을 가진 것으로 판단된다.

## 6. 결론

- (1)콘크리트에 있어서 실물크기와 모델의 상사성은 골재비와 물시멘트비를 조절함으로써 근사하게 조절할 수 있다.
- (2)철근은 이형화와 열처리를 통하여 하중-변형율곡선을 근사하게 일치시킬 수 있다. 그러나, 무진공관을 이용한 열처리에 있어 진공관 열처리보다 다소 연성이 떨어져 연

성확보의 문제가 제기된다.

- (3)장주 실험으로부터 모델의 콘크리트강도와 철근의 연성만 보정된다면 축력과 휨모멘트에 의한 P- $\Delta$  거동은 거의 완벽하게 나타낼 수 있음을 알 수 있다.
- (4)단주 실험으로부터 다소 불규칙적인 결과가 나타났지만 재료의 강도만 일치시킬 수 있다면 상사성을 확보할 수 있다고 본다.
- (5)단순보 전단실험은 일단 연성면에서 큰 차이를 보이므로 모델콘크리트의 전단강도를 저하시키는 것이 가장 큰 과제로 판단된다.
- (6) T형보 휨실험은 항복하중에서 약간의 차이를 보였지만 모델철근의 강도를 보정한다면 이것 역시 상사성을 가질 것으로 생각된다.

## 참고문헌

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. 배성용, 이한선, 신영식, "철근콘크리트 구조물의 축소모델 재료의 역학적 특성에 관한 실험연구", 한국콘크리트 학회 가을 학술발표회 논문집, 1994.11, P249 - 254.
3. 이한선, "구조물의 축소모델 재료에 관한 연구", 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터, 1995.2.
4. 이한선, 장진혁, 김상규, "1/10 축소 철근 콘크리트 보의 휨 거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트 학회 봄 학술발표회 논문집, 1995.5, P325 - 330.
5. 이한선, 장진혁, 김상규, "구조물의 축소 모델 재료에 관한 실험연구", 대한건축 학회 논문집, 1995.9.