

철근콘크리트 구조물의 축소모델 재료의 역학적특성에 관한 실험연구

An Experimental Study on the Mechanical Characteristics of Materials
for Reduced-Scale Models of Reinforced Concrete Structures

배 성 용* 이 한 선** 신 영 식***
Bae, Seung-Yong Lee, Han-Seon Shin, Young-Shik

ABSTRACT

The main objectives of this paper are to compare the obtained mechanical characteristics of reduced-scale model materials with those of the prototype and to provide the information on the best selection of materials. Manufacturing techniques on the micro-concrete and reduced reinforcement are introduced. The test results of these materials are shown to be satisfactory with regard to the similitude requirement. The simple beam tests were performed to verify similitude in the bond behavior between micro-concrete and reduced reinforcement. Those results also prove that these manufacturing and experimental techniques are useful and reliable for reduced-scale model tests.

1. 서 론

외부의 하중이 가해졌을 때 철근콘크리트의 구조물의 전체적 거동은 비선형범주에 속하며 손상이나 붕괴에 해당하므로 반드시 신뢰성 있는 방법에 의하여 그 안전성 검토하여야 한다. 그러나 근래에 구조물에 대한 컴퓨터해석기법이 큰 발전을 이루고 있는 가운데서도 아직도 여전히 비선형적인 철근콘크리트부재로 이루어진 3차원구조물의 붕괴모드와 붕괴하중을 해석적으로 예측한다는 것은 사실상 불가능한 일이다. 이로 인하여 구조물의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 구조요소의 구조성능 뿐만 아니라, 전체 구조물에 이르기까지의 거동을 실험을 통

하여 검토할 필요가 있다. 오늘날 구조물의 대형화로 인하여 실험크기의 실험을 행한다는 것은 현실적으로 불가능하며, 이로 인해 축소 모델에 의한 실험방법을 생각하지 않을 수 없다. 축소모델의 장점은 가력장치, 기구의 소형화와 실험 구조체의 제작 준비과정 및 실험 후 처리 문제에 있어서 간편하고 공간적으로 제한을 받지 않으며, 많은 비용과 시간을 줄일 수 있다. 특히 국내처럼 구조실험시설이 소규모일 경우에 축소모델을 이용한 축소모델실험은 매우 바람직한 연구 방향이라고 여겨지며 축소 모델실험을 통해 아직 미확인된 구조해석의 거동 예측이 가능하며 교육 목적상의 수단으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 축소모델로서는 실험크기의 1/5축소 실험체를 사용하여 같은 실험방법에 의하여 실험결과를 얻은 후 분석을 통해 축소모델의 상사성(Similitude) 여부를 확인하며 구조물의 재료역학적특성(Mechanical

- * 정회원, 영남대학교 토목공학과 석사과정
- ** 정회원, 영남대학교 건축공학과 조교수, 공박
- *** 정회원, 영남대학교 토목공학과 교수, 공박

characteristics)을 비교 분석하고자 한다. 상사성법칙(Similitude rule)은 다음(Table 1.)과 같다.

Table 1. Summary of scale factors for reinforced concrete models

Quantity	Dimension	True Model	Practical	Distorted	Distorted	
			True Model	Model	Model	
(1)	(2)	(3)	Case I (5)	Case II (6)	Case III (7)	
Material Property	Concrete stress, σ_c	FL ⁻²	S _c	1	S _c	S _c
	Concrete strain, ϵ_c	--	1	1	S _c	S _c
	Modulus of concrete, E _c	FL ⁻²	S _c	1	S _c /S _c	S _c /S _c
	Poisson's ratio, ν_c	--	1	1	1	1
	Mass density, ρ_c	FL ⁻³	S _c /S _c	1/S _c	S _c /S _c	S _c /S _c
	Reinforcing stress, σ_s	FL ⁻²	S _s	1	S _s	S _s
	Reinforcing strain, ϵ_s	--	1	1	S _s	S _s
	Modulus of reinforcing, E _s	FL ⁻²	S _s	1	1	1
	Bond stress, u	FL ⁻²	S _s	1	S _s	.
Geometry	Linear dimension, l	L	S _l	S _l	S _l	S _l
	Displacement, δ	L	S _l	S _l	S _l S _l	S _l S _l
	Angular displacement, β	--	1	1	S _l	S _l
	Area of reinforcement, A _r	L ²	S _l ²	S _l ²	S _l ²	S _l ² /S _l
Loading	Concentrated load, Q	F	S _s S _l ²	S _l ²	S _s S _l ²	S _s S _l ²
	Line load, w	FL	S _s S _l	S _l	S _s S _l	S _s S _l
	Pressure, q	FL ⁻²	S _s	1	S _s	S _s
	Moment, M	FL	S _s S _l ³	S _l ³	S _s S _l ²	S _s S _l ³

2. 콘크리트의 역학적 특성

2.1 일반사항

모형콘크리트의 성질을 원형(Prototype)콘크리트와 상사(Similitude)하기는 매우 어렵다. 골재의 크기, 시멘트의 입자, 콘크리트 내부의 공극까지 축소화시켜야 한다. 모형콘크리트배합은 잔골재율(S/a)조절로 일부는 만족시킬 수 있지만 시멘트와 모형콘크리트의 공극의 크기 등은 상사시킨다는 것은 현실적으로 불가능하며, 모형콘크리트는 강성(Stiffness)이 적고 축적계수(Scale-Factors)가 클수록 인장강도와 압축강도의 비 (f_t'/f_c')가 커져서 균열에 의한 거동이 크게 지배를 받고 있다. 원형콘크리트와 모형콘크리트의 다음과 같은 성질들을 상사(Similitude)되어야 한다.

1. 극한 압축강도 (f_c')
2. 탄성계수 (E)
3. 극한 압축변형률 (ϵ_u)
4. 극한 인장강도 (f_t')

위와 같은 성질들을 상사(Similitude)하기 위해서는 시멘트와 골재의 혼합비(A/C), 물·시멘트

비(W/C), 잔골재율(S/a)을 여러 가지로 변화시켜 가장 적합한 배합 비를 얻고자 한다.

2.2 재료 실험

골재는 강자갈, 강모래이며 건조기에 110±5°C에서 24시간동안 건조시켜 절대건조상태로 하고 모래의 비중은 2.58, 자갈은 2.60이며 시멘트는 원형콘크리트에서는 보통포틀랜드시멘트의 비중은 3.15 분말도는 3200cm²/g 이고 굵은 골재의 최대치수는 25mm인 일반골재를 사용하였다. 모델콘크리트는 초조강시멘트의 비중은 3.12 분말도는 6200cm²/g인 것을 사용하고 골재는 입도 분포를 조절하기 위하여 No 8을 통과하는 모래를 모형모래(Sm)이며 No 4에 통과하고 No 8에 남은 모래(Gm)로 하였다. 이 Gm과 Sm의 골재비를 여러 입도 분포를 갖는 여러 종류의 모델콘크리트용 골재를 혼합하여 만들었다. 각각의 콘크리트에 대해서는 14개의 원형공시체로 부터 제작하였으며 압축강도실험용 7개 인장강도실험 7개를 1배치로 제작하였으며 원형콘크리트는 ϕ 15x30cm를 제작하고 모형콘크리트는 ϕ 5x10cm를 제작하여 28일 동안 수중양생을 시켰다. 실험체 하중재하는 100t용량의 유압식 만능시험기(U.T.M)로 사용하였다. 공시체변형은 로드셀과 Compressor meter에 Transducer displacement를 양쪽에 설치하여 평균값을 응력-변위관계를 구한다.

Table 2. Mix ratios of concrete

Mixs	W	C	S (Sm+Gm)	A	F.M	Remarks
Prototype	0.45	1	2.06	3	7.1	
Micro-I	0.65	1	3(2.4+0.6)	0	3.3	
Micro-II	0.65	1	6(3.0+3.0)	0	4.9	혼화제 0.7%
Micro-III	0.65	1	6(2.0+4.0)	0	5.1	혼화제 0.7%

Note :

Sm ; Model sand defined by particlesize smaller than #8 sieve

Gm ; Model gravel defined by particle size than #8 sieve and small than #4 sieve

Admixture ; Superplasticizer

3.2 재료의 실험

3.2.1 재료의 선택

원형철근은 SD 40인 제품화된 D10, D13, D19로 선택하였다. 그러나 모형철근은 제품화되지 않았기 때문에 경강선을 구입하여 KS D 3051 규격에 맞도록 마디와 리브형태를 이형화기구(Deformer)로 이형화를 시킨 D1.8, D3.2를 냉간 압연가공하여 실험을 실시하였다.

3.2.2 실험 방법

열처리(Annealing)는 냉간압연후 원형철근과 모형철근의 유사한 $P - \delta$ 곡선을 얻기 위해서 이형화시킨 철근을 진공관에 넣어 전기로에서 열처리한다. 열처리는 요구되는 수준까지 온도가 도달하면 10분 정도 최고온도에서 등온상태로 유지시킨 후 전기로를 끄고 온도가 실내 온도와 같을 때까지 전기로 안에 계속 유지시키며 노냉(Furnace cooling)을 한다.

3.3 결과

모형철근에 요구되는 항복강도를 가지게 하고 연성의 개선과 명확한 항복점을 얻기 위해서는 몇 번의 시행착오(Trial and Error)방법으로 원형철근과 유사한 성질을 얻기 위하여 모형철근에 대한 가장 적합한 열처리 온도와 시간을 결정하였으며, D19를 모형화시킨 D3.2는 전기로의 온도를 750℃로 하고 D10, D13을 모형화시킨 D1.8은 전기로의 온도를 800℃로 하고 각각 시간은 14hr정도에서 열처리를 실시하였다. 본 연구에서는 극한강도 상사성(Ultimate strength similitude)에 중점을 두었다.

Table 4. Load-strain values of reinforcing bar

Bar types	f_y (Kgf)	f_u (Kgf)	Elongation (%)	Remarks
D1.8	98	201	14	
D3.2	415	545	17	
D10	107	173	21	#
D13	200	297	19.5	#
D19	510	751	19	#

f_y : Yield force f_u : Ultimate force

: Adjusted force = $(1/S_t^2) \times$ measured force

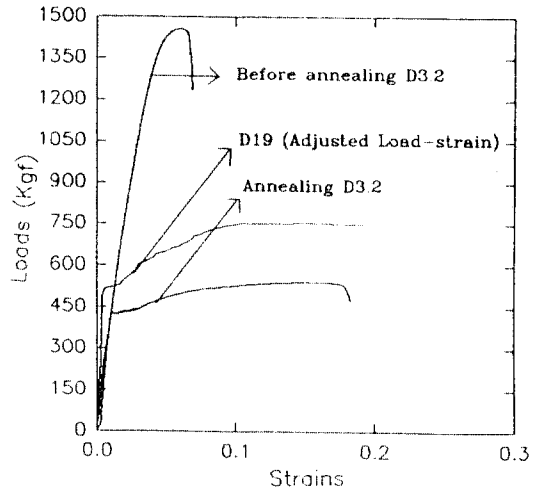


Fig 4. Load-strain curves of reinforcing bar

4 부착실험

4.1 일반사항

부착 상사성(Bond Similitude)확보에 있어서 주요한 문제점은 다음과 같다.

1. 부착강도는 철근의 크기에 따라 다르기 때문에 실제 부착거동과 같다고 볼 수가 없다.
2. 실물크기 구조물에서의 부착 메카니즘을 축소모델 적용은 어려운 문제로 나타나고 있다.
3. 철근의 단위길이당 부착강도는 $\sqrt{f_c'}$ 에 비례한다. 그러나 소단면 철근의 부착에 대해 이 관계를 적용하는 데는 어려움이 있다.

그 이유는 첫째 $\sqrt{f_c'}$ 은 차원적으로 이질적인(Dimensionally Inhomogeneous)이며, 둘째는 철근크기와 부착이 연관이 있으며, 셋째는 이형화의 정확성을 기하기가 어렵다는 점이다.

4.2 실험

축소모델의 부착 및 거동을 관찰을 위해 다음과 같은 세가지형태의 실험을 수행하였다.

4.2.1 인장 실험

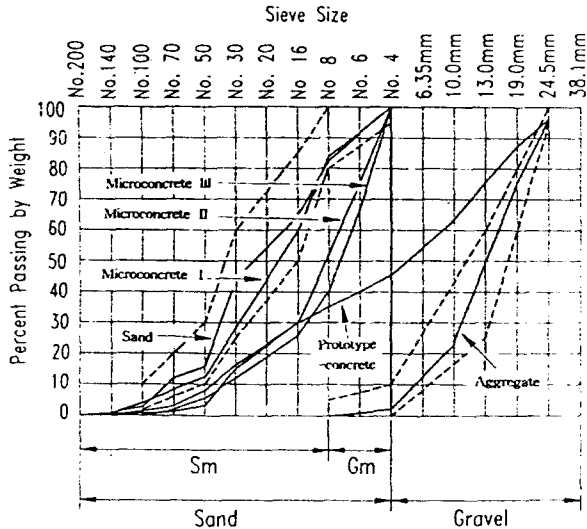


Fig 1. Grading curve of aggregate

2.3 실험결과 및 분석

여기서 고려한 가장 중요한 관점은 모형콘크리트에 대한 지나친 인장강도를 감소시키고 강성을 증가시키는 것이다.

Table 3. Mean values of concrete properties

Mixs (W:C:S:A)	f'_c (kg/cm^2)	f'_t (kg/cm^2)	ϵ_u	f'_c/f'_t
Prototype (0.45:1:2.06:3)	321.80	29.17	0.00212	0.0907
Micro - I (0.65:1:3:0)	316.22	32.14	0.00360	0.1016
Micro - II (0.65:1:6:0)	327.32	28.66	0.00268	0.0876
Micro - III (0.65:1:6:0)	322.12	23.22	0.00290	0.0721

원형(Prototype)콘크리트와 가장 유사한 성질을 얻기 위한 변수로는 골재·시멘트비(A/C)와 물·시멘트비(W/C)를 선택하였다. 골재·시멘트비(A/C)가 증가하면 압축강도는 증가하고 인장강도는 감소하는 것을 보여주고 있다. 원형콘크리트와 가장 유사하게 나타내고 있는 것은 모형콘크리트 II인 것으로 보여 주고 있다.

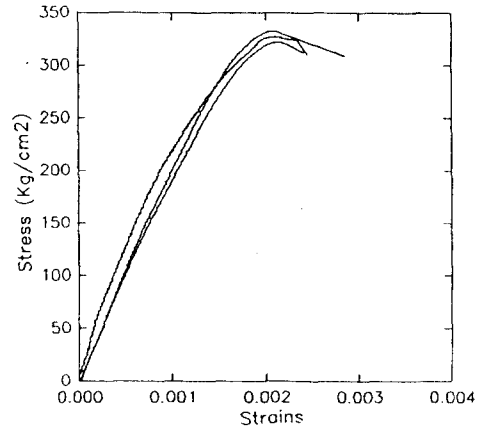


Fig 2. Stress-strain curves of prototype concrete

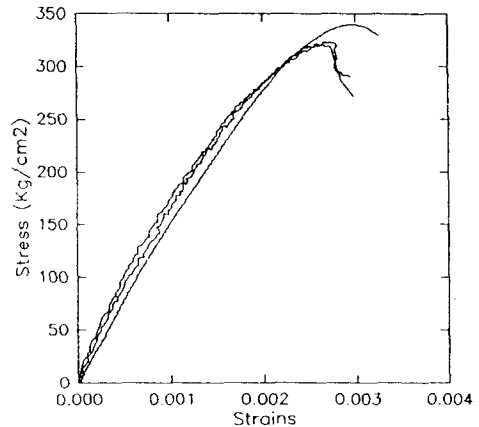


Fig 3. Stress-strain curves of micro concrete II

3. 철근의 역학적 특성

3.1 일반사항

대부분의 실제 철근콘크리트 구조물은 철근의 항복을 유도하는 과소설계(Underreinforced Design)의 요구를 충족시키기 위해 명확한 항복점과 충분한 연성(Ductility)을 보유한 철근을 사용하고 있다. 아래와 같은 실제 철근의 특성들이 축소모델용 제작시 고려되어야 한다.

1. 항복 및 극한강도
2. 하중-변형도 곡선의 형상
3. 연성(Ductility)
4. 철근-콘크리트의 표면에서의 부착특성

실험체 크기의 단면의 크기는 철근직경의 3배이며, 길이는 철근직경의 24배로 제작하여 철근의 항복강도까지 양쪽에서 당긴 후, 실험체의 균열 간격과 균열 수를 관찰하였다.

4.2.2 인발 실험

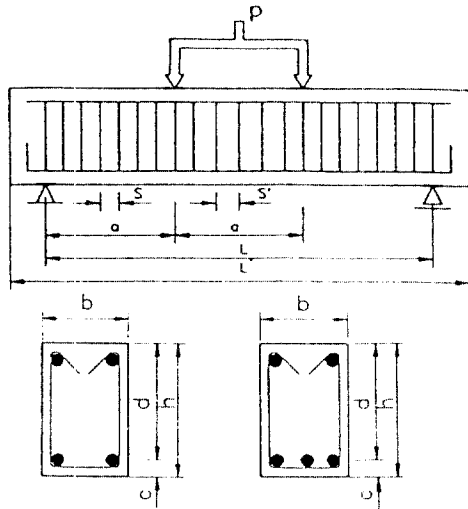
실험체 크기는 각각 철근직경의 6배인 정육면체이며, 부착구역은 철근직경의 4배 비부착구역은 철근직경의 2배로 제작하여 실험결과를 분석을 분석하였다.

4.2.3 휨 실험

원형보 실험체의 단면은 20 x 30cm로 하고 길이는 260cm이며 전단스판비(a/d)는 3.2, 인장철근은 2D19, 압축철근은 2D13, 스티럽은 D10개인 실험체 2개를 제작하였다.

Table 5. Dimensions of specimen (단위:mm)

Scale	a	L	L'	s	s'	b	d	c	h
Prototype Beams	800	2400	2600	100	150	200	250	50	300
1/5 Model Beams	160	480	520	20	30	40	50	10	60



Prototype beams Micro beams

Fig 5. Details of specimens

모형보 실험체의 크기는 원형보 실험체의 1/5 축소된 것이며, 원형보에서 인장철근 2D19의 극한강도값($1/S_f^2$)이 1502Kgf이고 모형보에서 인장철근은 3D3.2의 극한강도값은 1635Kgf로 나타났다, 다소 모형보의 극한강도가 8.1% 정도 크며 압축철근은 2D1.8, 스티럽은 D1.8인 모형 실험체 5개를 제작하였다.

4.3 결과 및 분석

첫째로 인발 실험은 각각 원형 실험체의 균열 수는 D19--6개, D13--6개, D10--5개이며 실험체의 최소 균열 간격은 D19는 55mm, D13은 30mm, D10은 40mm로 관찰할 수 있었다. 모형 실험체의 균열 수는 D3.2--5개, D1.8--4개이며, 최소 균열 간격은 D3.2는 10mm, D1.8은 8mm 나타났다.

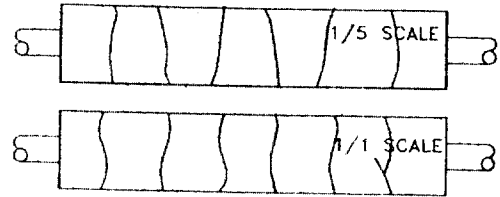


Fig 6. Crack patterns of specimen

각각의 실험 결과는 3개의 실험체들의 평균한 값들이다. 축소 모델이 원형보다 균열 간격과 균열 수가 적게 나타나고 있다. 둘째로 인발 실험은 모형 철근이 원형 철근보다 초기 미끄러짐량이 많이 나타나고 실험체는 할렬 파괴(Splitting failure)가 일어났다. 세 번째는 휨 실험로서 철근 콘크리트의 휨 역학(Flexural mechanics)에 축소 모델 관련한 실험체 크기의 거동을 분석하였다. 축소 모델보가 원형보보다 휨 강성(Flexural Rigidity)이 더 크게 나타나며 균열 수가 적게 관찰할 수 있다. 축소 모델보는 원형에 대한 재료 상사성(Material similitude)에 적용에 의해 요구 되는 철근 인장 강도가 8.1% 정도 높게 나타나고 있다. $P - \delta$ 곡선에서는 축소 모델보가 원형보보다 극한 하중이 20% 정도 높게 나타나고 있다. 원형보에서는 Load-cell의 하중값으로 측정하였고 축소 모델보는 U.T.M의 하중값으로 측정하였고

다. 여기서 계측기기오차(Calibration오차, Gage Factor오차등)가 발생하여 오차정도를 분석하고 있다.

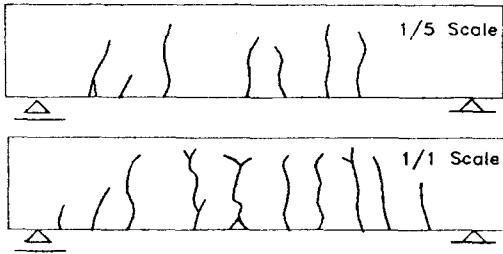


Fig 7. Crack patterns on beam sides

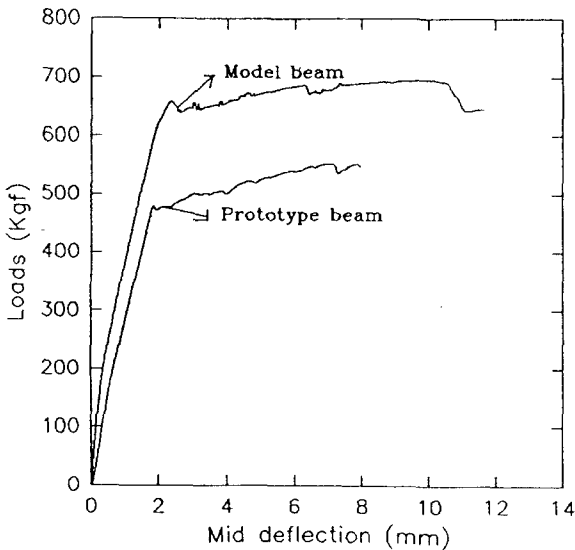


Fig 8. Load-deflection curves of beam

5. 결론

본 연구에서 구조물의 대형화와 복잡함에 따른 전체적 거동을 해석함에 있어서 축소모델실험을 통한 재료의 역학적 특성을 수행한 결론은 다음과 같다.

(1) 모형콘크리트의 응력-변형곡선은 골재, 시멘트 및 물·시멘트(W/C)비의 적절한 선택으로

원형콘크리트의 응력-변형곡선과 매우 근접시킬 수 있다.

(2) 모형철근은 경강선을 이형화(Deformation) 작업후 적절한 온도에서 열처리(Annealing)함으로써 원형철근과 유사한 힘-변위관계와 연성(Ductility)을 가질 수 있다.

(3) 이형기기(Deformer)의 고정된 단면직경으로 인하여 개개의 원형철근에 대해 정확한 축소율을 적용할 수는 없으나, 힘의 상사성을 만족시키도록 축소철근의 개수를 조정시킴으로써 단순보의 휨거동에 대한 상사성을 얻을 수 있다.

(4) 축소모형모델은 원형보다 균열간격과 균열수는 적게 나타나고 있다.

감사의 글

이 연구는 1993년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Ad Hoc Committee on Structural Models, "Models for Concrete Structures," ACI Special-Publication No. 24, Detroit, Michigan, 1970.
2. Sabins, G.M., Harris, H.G., White, R.N., and Mirza, M.S., "Structural Modeling and Experimental Techniques," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 1983.
3. 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.
4. 김우, 김대중, 강성후, "철근콘크리트 구조연구를 위한 소축적 구조실험기법," 한국콘크리트학회 논문집, 제 3권 제 4호, 1991.12
5. 윤재진, "1/3 축적 모델실험에 의한 프리캐스트 콘크리트관구조물의 상사성에 관한 연구," 한국콘크리트학회지, 제 4권 제 3호, 1992.9
6. 이한선, "1/3 축소 3층 습식접합부 프리캐스트 콘크리트 대형관 입체모델의 진동대실험," 한국콘크리트학회지, 제 5권 제 1호 1993.3