

철근콘크리트 축소모형의 발파해체실험을 위한 상사법칙 및 축소율

박 훈^{1)*}, 유지완²⁾, 이희광²⁾, 송정언²⁾, 김승곤²⁾

Similitude Law and Scale Factor for Blasting Demolition Test on RC Scale Models

Hoon Park, Ji-Wan Yoo, Hee-Gwang Lee, Jung-Un Song and Sung-Kon Kim

Abstract : When doing a blasting demolition on RC structures made of scale models, scale model members considering both a proper scale factor and mechanical characteristics of materials have to be similar to prototype RC members to analyze the collapse behavior of RC structures. In this study, a similitude law considering the density of prototype materials is calculated. Both mix of concrete and arrangement of reinforcement have been described referring to Concrete Standard Specification as well as Design Standard of Concrete Structure. The scale factor on scaled concrete models considering maximum size of coarse aggregate is about one-fifth of a cross section of prototype concrete members. A scale factor on scaled steel bar models is about one-fifth of a nominal diameter of prototype steel bar. According to the mechanical test results of scale models, it can be concluded that the modified similitude law may be similar to compressive strength of prototype concrete and yield strength of prototype steel bar.

Key words : scale model, scale factor, similitude law, blasting demolition

초 록 : 축소모형을 이용한 철근콘크리트 구조물 발파해체 시 구조물의 붕괴거동을 분석하기 위해서는 축소모형 부재에 대한 적절한 축소율 산정과 축소모형 부재를 구성하는 재료의 역학적 특성이 원형 철근콘크리트 부재와 상사되어야 한다. 본 연구에서 축소모형의 상사법칙은 밀도를 기준으로 산정하였고, 콘크리트 표준시방서와 콘크리트 구조설계기준에 의해 축소모형 철근콘크리트의 배합 및 배근을 기술하였다. 또한 축소모형 콘크리트의 축소율은 굵은골재 최대치수를 고려하여 부재 단면 길이를 1/5로 축소하였고, 축소모형 철근의 축소율은 공칭지름을 1/5로 축소하였다. 축소모형에 대한 역학적 실험결과로부터 제안된 상사법칙을 적용함으로써 축소모형 콘크리트의 평균압축강도 및 축소모형 철근의 평균항복강도가 상사관계를 가지는 것으로 나타났다.

핵심어 : 축소모형, 축소율, 상사법칙, 발파해체

1. 서 론

발파에 있어서 축소모형을 이용한 연구는 시간적·공간적인 제약을 최소화시키면서 원형모형(prototype model)의 물리적·역학적 특성을 만족하고 발파 전·후의 모형 상태를 확인할 수 있는 자료를 제시해 왔다. 축소모형은 재료, 형태, 기폭

제에 따라 다양한 연구에 사용되었다. 발파에 사용된 축소모형 재료로는 화강암, 사암, 대리석, 석고, 시멘트모르타르, 콘크리트, PMMA(polymethyl methacrylate) 등이 있으며, 형태에 따라 관형, 블록 등으로 제작되었고, 기폭제로는 폭약, 도폭선, 파쇄제, 뇌관 등이 사용되어 왔다. 이들은 축소모형의 재료, 형태, 기폭제에 따라 다양한 발파 분야에 적용되어 왔다.

철근콘크리트 구조를 연구하기 위한 축소모형 실험에 대해서는 부재 파괴 및 붕괴거동을 위해 주로 마이크로 콘크리트(micro-concrete) 또는 석고를 사용하였으나 강성이 작고, 축적이 작아질수록 인장강도 대 압축강도의 비가 커져 철근콘크

1) 전북대학교 공업기술연구소 객원연수원

2) 전북대학교 자원·에너지공학과

* Corresponding author : hujin@chonbuk.ac.kr

접수일 : 2007년 5월 18일

게재승인일 : 2007년 6월 25일

리트 구조물을 모형화하는데 문제가 있었다(김우 외, 1991; 배상용 외, 1994). 축소모형 실험에서 철근콘크리트 구조물의 붕괴거동을 분석하기 위해서는 구성 재료의 역학적 특성들과 상사 관계인 재료를 사용하여야 한다. 또한 적합한 축소율을 선택하여 축소모형의 크기효과(size effect)를 최소화시켜야 한다.

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 붕괴거동에 적합한 상사법칙과 축소모형 부재의 축소율을 산정하고, 축소모형 재료와 역학적 특성이 유사한 축소모형 콘크리트 및 철근을 선정하였다. 축소모형 철근콘크리트 부재 제작에 대한 축소모형 콘크리트의 배합 및 축소모형 철근의 배근은 콘크리트 표준시방서, 콘크리트 구조설계기준에 준하여 설계하였다. 또한 구성 재료인 축소모형 콘크리트와 축소모형 철근의 역학적 특성에 대해 실험을 하여 제안된 상사법칙과의 상사관계를 검토하였다.

2. 상사법칙 및 축소율 산정

축소모형을 이용한 발파해체 실험에서 뇌관을 기폭제로 하여 콘크리트의 파쇄형태 및 파쇄도를 비교할 경우에 축소율은 1/4이 적합하지만(김승곤, 2003; 정과 양, 2004), 뇌관만을 기폭제로 하

여 전체 구조물의 붕괴거동을 해석하기에는 적합하지 않았다. 축소모형 구조물 해체 시 과도한 축소율은 재료의 역학적 특성 및 구조물의 구조적 특성을 유지하기 힘들기 때문에 재료의 파쇄 및 붕괴거동을 해석하기에는 적합하지 않다. 따라서 축소모형실험은 원형모형과의 크기효과를 최소화시켜야 하며 축소모형 재료의 역학적 특성도 원형모형의 역학적 특성을 그대로 유지해야 한다. 또한 축소모형실험에 적합한 상사법칙을 적용하여야 하며, 축소모형의 재료, 형태, 기폭제에 따라 적합한 축소율을 선정해야 할 것이다.

시간이력하중 문제에서 길이(L), 질량(M), 시간(T)의 세 가지를 기본 차원으로 하여 나머지 물리량들을 기본 차원의 조합으로부터 유도한다. 특정한 실험목적에서는 1:1 또는 특정한 축소율을 고려하여 상사법칙을 유도해야 한다. 일반적인 상사법칙은 기본 차원을 기준으로 나머지 물리량들을 조합하게 된다. 본 연구에서는 축소모형 콘크리트의 압축강도와 축소모형 철근의 항복강도를 고려하여 축소모형 철근콘크리트 구조물의 붕괴거동 해석을 위해 상사법칙은 구성 재료의 밀도를 기준으로 하였다. Table 1은 일반적인 기준의 상사법칙과 본 연구에 적용된 상사법칙을 나타낸 것이다.

Table 1. Similitude laws

물리량	차원	축소율				
		질량	시간	가속도	붕괴거동	지반진동
길이	L	S	S	S	S	S
질량	M	1	S	S^2	S^3	S
시간	T	$S^{-1/2}$	1	$S^{1/2}$	S	1
밀도	ML^{-3}	S^{-3}	S^{-2}	S^{-1}	1	S^{-2}
강도	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1	1	1	1
속도	LT^{-1}	$S^{3/2}$	S	$S^{1/2}$	1	S
가속도	LT^{-2}	1	S	1	S^{-1}	S
힘	MLT^{-2}	S^2	S^2	S^2	S^2	S^2
강성도	MT^{-2}	S	S	S	S	S
감쇠	MT^{-1}	$S^{1/2}$	S	$S^{3/2}$	S^2	S
주파수	T^{-1}	$S^{1/2}$	1	$S^{-1/2}$	S^{-1}	1

축소모형 콘크리트는 굵은골재 최대치수에 따른 축소모형 부재의 단면 길이를 축소하였다. 축소모형 철근은 제품화된 어닐링 철선의 지름을 고려하여 전체적인 축소모형 부재의 축소율을 산정하였다. 따라서 Table 2와 Table 3에 제시된 것처럼 축소모형 부재 중 기둥은 압축부재 단면의 길

이, 보는 폭과 높이, 슬래브는 두께에 대해 1/5로 축소율을 산정하였으며, 사용되는 굵은골재 최대치수는 10mm이다. 축소모형 철근은 이형봉강의 공칭지름에 대해 주철근, 띠철근 및 배력철근을 모두 1/5로 축소율을 산정하였다.

Table 2. The scale factor of column, beam and slab

종류	원형 부재 규격(mm)		축소모형 부재 규격(mm)		축소율
주기둥	단면 길이	400 × 600	단면 길이	80 × 120	1/5
보조기둥	단면 길이	400 × 400	단면 길이	80 × 80	1/5
보	폭과 높이	400 × 600	폭과 높이	80 × 120	1/5
슬래브	두께	150	두께	30	1/5

Table 3. The scale factor of steel bar

종류	원형 철근 (이형봉강)		축소모형 철근 (어닐링 철선)		축소율
	호칭명	공칭지름(mm)	호칭명	공칭지름(mm)	
주철근	SD300, D19	19.1	SWM-A, 4.00	3.81	1/5
띠철근, 배력철근	SD300, D16	15.9	SWM-A, 3.20	3.18	1/5

3. 축소모형부재의 콘크리트 배합 및 철근의 배근

3.1 콘크리트 배합

축소모형 콘크리트는 굵은골재 최대치수에 따른 부재 단면의 길이를 고려하여 콘크리트 표준시방서 및 콘크리트 구조설계기준에 준하여 배합하였다. 굵은골재 최대치수는 부재 최소치수의 1/5를 초과하지 않고, 철근피복 및 철근의 최소 순간격의 3/4을 초과하지 않아야 하며(한국콘크리트학회, 2004), 또한 거푸집 양 측면 사이의 최소거리의 1/5, 슬래브 두께의 1/3, 개별철근, 다발철근, 프리스트레싱 긴장재 또는 덕트 사이 최소 순간격

의 3/4를 초과하지 않아야 한다(한국콘크리트학회, 2004). 콘크리트 표준시방서에 의해 본 연구에서 사용하고자 하는 굵은골재 최대치수는 철근 콘크리트 기둥 및 보의 최소치수 80mm의 1/5인 16mm 미만, 철근피복 15mm의 3/4인 11.25mm 미만, 철근의 최소 순간격 21mm의 3/4인 15.75mm 미만이어야 하며, 콘크리트 구조설계기준에 의해 거푸집 양 측면사이의 최소거리 80mm의 1/5인 16mm 미만, 슬래브 두께 30mm의 1/3인 10mm, 개별철근 사이 최소 순간격 21mm의 3/4인 15.75mm 미만이어야 한다. 따라서 축소모형 콘크리트에 사용되는 굵은골재 최대치수는 10mm가 적합하다.

축소모형 콘크리트의 설계기준강도, f_{ck} 는 대한주택공사 전문시방서(대한주택공사, 2006)에 제시된 상부구조, 기초구조를 포함한 건축공사 설계기준강도인 24MPa을 설계기준강도로 적용하였다.

축소모형 콘크리트의 배합강도, f_{cr} 은 식 (1)에 의해 계산된 표준편차를 이용하여 식 (2)와 식 (3)에 의해 계산된 값보다 커야한다.

$$s = \left[\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, s 는 표준편차, X_i 는 개개의 강도 시험값, \bar{X} 는 n 개의 강도 시험 결과 평균값, n 은 연속 강도 시험 횟수이다.

$$f_{cr} \geq f_{ck} + 1.34s \quad (2)$$

$$f_{cr} \geq (f_{ck} - 3.5) + 2.33s \quad (3)$$

여기서, 콘크리트 압축강도 표준편차는 실제 사용한 콘크리트에 대한 30회 이상의 연속적인 실험 자료로부터 결정되지만 콘크리트 압축강도의 시험 횟수가 29회 이하이고 15회 이상인 경우는 Table 4의 보정계수를 곱한 값을 표준편차로 사용할 수 있다.

Table 4. Correction factor of standard deviation when test counts are 29 or less

시험 횟수	표준편차의 보정계수
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30이상	1.00

축소모형 콘크리트 배합에서는 혼화제를 쓰지 않고 시험배합설계 없이 배합설계를 하기위해 기존 배합표에 의한 간이 배합설계를 기준으로 시멘트-물비 C/W 와 재령 28일 압축강도, f_{28} 과의 관계식(김성수, 1998)을 단위 환산한 식 (4)를 이용하였다.

$$f_{28} = -20.59 + 21.08 \times \frac{C}{W} \quad (4)$$

여기서 C 는 단위시멘트량, W 는 단위수량이다. 간이 배합설계 시 보통포틀랜드시멘트 밀도는 $3.16g/cm^3$, 잔골재 표준밀도는 $2.60g/cm^3$, 굵은 골재 표준밀도는 $2.65g/cm^3$ 이며, 축소모형 부재의 콘크리트 배합에서 굵은 골재의 최대치수가 10mm이므로 기존 배합표에서 제시된 단위수량은 228kg, 슬럼프 범위 10cm, 공기량 범위 3%, 잔골재율 54%로 각각의 단위량을 산출하였다.

Table 5. Specified mix of scaled concrete model

굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량 범위 (%)	물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량 (kg/m ³)				
					물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화제 (g/m ³)
10	10	3	47.2	54	228	483	827	718	—

축소모형 콘크리트의 설계기준강도는 24MPa이므로 이것을 재령 28일 콘크리트의 압축강도로 산정하면 식 (4)에서 시멘트-물비는 2.12, 따라서 W/C는 0.472이다. 각각의 단위량을 산정하면 단위시멘트량은 483kg, 골재의 절대용적은 589l, 잔골재의 절대용적은 318l, 단위잔골재량은 827kg, 굵은골재 절대용적은 271l, 단위굵은골재량은 718kg이다. 본 축소모형 콘크리트의 시방배합표는 Table 5와 같다.

3.2 철근의 배근

축소모형 철근은 이형봉강의 공칭지름에 대해 축소율을 산정하였고, 축소모형 철근의 항복강도를 고려하였다. KS D 3054 철근콘크리트용 봉강의 기계적 성질에서 SD300의 항복강도는 300 N/mm² 이상, 인장강도는 440N/mm² 이상으로 규정하고 있다. 또한 KS D 3552 철선의 기계적 성질은 SWM-A의 인장강도를 260~590 (N/mm²)으로 규정하고 있다. 본 연구에서는 축소모형 주철근은 SWM-A, 4.00으로, 띠철근 및 배력철근은 SWM-A, 3.20으로 배근하였다.

축소모형 철근의 배근은 콘크리트 구조설계기준 해설(한국콘크리트학회, 2004) 및 콘크리트 구조설계기준 건축구조물 설계예제집(대한건축학회, 2004)을 기준으로 축소모형 부재인 기둥, 보, 슬래브에 대해 압축과 인장을 고려한 배근을 하였으며, 전단과 뒤틀림은 제외하였다.

기둥 배근

옥외 또는 흠에 접하지 않는 경우 기둥의 최소 피복두께는 40mm이며 굵은골재 최대치수의 4/3 배 이상이어야 한다. 따라서 축소모형 기둥의 최소 피복두께는 1/5인 8mm 이상, 굵은골재 최대치수의 4/3배인 13.3mm 이상이어야 하므로, 피복두께를 15mm로 하였다.

띠철근 압축부재인 기둥 단면의 최소 치수는 200mm이고, 단면적은 60000mm² 이상이어야 하므로 띠철근 압축부재인 축소모형 기둥 단면의 최소 치수는 단면 길이의 1/5인 40mm이고, 단면적

은 1/25인 2400mm² 이상이어야 한다. 축소모형 주기둥의 단면 길이는 80×120(mm)이고, 단면적은 9600mm²이며, 보조기둥의 단면 길이는 80×80(mm)이고 단면적은 6400mm²이다. 띠철근 기둥에서 종방향 철근의 순간격은 40mm 이상, 또한 철근 공칭 지름의 1.5배 이상으로 하여야 하고, 굵은골재 최대치수의 4/3배 이상으로 하여야 한다. 따라서 축소모형 띠철근 기둥의 종방향 축소모형 철근의 순간격은 40mm의 1/5인 8mm 이상, 축소모형 철근 공칭지름 4mm의 1.5배인 6mm 이상, 굵은골재 최대치수의 4/3배인 13.3mm 이상이어야 하므로, 축소모형 기둥의 종방향 철근 간격은 주기둥의 경우 30mm, 보조기둥의 경우 25mm로 하였다.

압축부재의 축방향 주철근의 직사각형 띠철근 내부 최소 개수는 4이고, 축방향 주철근 단면적은 전체 단면적 A_g 의 0.01배 이상, 0.08배 이하로 하여야 한다. 따라서 단면적 A_g 가 12.56mm²인 SWM-A, 4.00을 축소모형 주기둥에는 8개를 배근하였고, 축소모형 보조기둥에는 6개를 배근하였다. 이때 압축 철근비는 축소모형 주기둥의 경우 0.011, 축소모형 보조기둥의 경우 0.012이다.

띠철근의 수직간격은 종방향 철근지름의 16배 이하, 띠철근이나 철선 지름의 48배 이하, 또한 기둥단면의 최소치수 이하로 해야 한다. 따라서 축소모형 기둥의 띠철근 수직간격은 종방향 철근 지름의 16배 이하인 64mm 이하, 띠철근이나 철선지름의 48배 이하인 153.6mm 이하, 기둥 단면의 최소 치수인 80mm 이하로 배근해야하므로, SWM-A, 3.20을 62mm 간격으로 배근하였다.

횡지지된 종방향 철근의 양쪽으로 순간격이 150mm 이상 떨어지지 않아야 하므로 축소모형 기둥의 경우에는 150mm의 1/5인 30mm 이상 떨어지지 않아야 한다. 축소모형 주기둥의 순간격은 26mm이고, 보조기둥의 순간격은 21mm이므로 두 기둥 모두 30mm 이하이므로 횡지지된 띠철근은 배근하지 않았다.

보 배근

옥외 또는 흙에 접하지 않는 경우 보의 최소 피복두께는 기둥과 동일한 40mm이다. 또한 굵은골재 최대치수의 4/3배 이상이다. 그러므로 축소모형 보의 최소피복두께는 1/5인 8mm 이상, 굵은골재 최대치수의 4/3배인 13.3mm 이상이어야 하므로, 피복두께는 20mm로 하였다.

인장철근 보강이 요구되는 보의 모든 단면에 대해 최소 양의 인장철근 보강이 필요하며 인장철근의 단면적, A_s 는 다음 식 (5), 식 (6)에 의해 계산된 값 중에서 큰 값 이상으로 하여야 한다.

$$A_{s,\min} = \frac{0.25\sqrt{f_{ck}}}{f_y}bd \quad (5)$$

$$A_{s,\min} = \frac{1.4}{f_y}bd \quad (6)$$

여기서, f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도, f_y 는 철근의 설계기준 항복강도, b 는 부재의 압축면의 폭, d 는 압축연단으로부터 인장철근 중심까지의 거리를 나타낸다.

축소모형 보의 인장철근 최소단면적은 식 (5)에서 $A_{s,\min}$ 는 32.65mm^2 이고, 식 (6)에서 $A_{s,\min}$ 는 37.33mm^2 이다. 따라서 축소모형 철근 단면적 12.56mm^2 인 SWM-A, 4.00을 3개 배근 하였으며, 인장 철근비는 0.0047이다.

동일 평면에서 평행하는 철근 사이의 수평 순간격은 25mm 이상, 철근의 공칭 지름 이상으로 하여야 하며, 굵은골재 최대치수 조건을 만족해야 한다. 따라서 축소모형 보의 수평 순간격 25mm의 1/5인 5mm 이상, 철근 공칭지름 4mm 이상, 굵은골재 최대치수의 4/3배인 13.3mm 이상이어야 하므로, 축소모형 보의 철근 간격은 25mm로 하였다.

상단과 하단에 2단 이상으로 배치된 경우 상하 철근은 동일한 연직면 내에 배치되어야 하고, 이때 상하철근의 순간격은 25mm 이상으로 하여야 하므로 축소모형 보의 순간격은 25mm의 1/5인 5mm 이상이고, 축소모형 단근보의 하단에 배치된 축소모형 철근과 동일하게 축소모형 복근보의 상단에 축소모형 철근을 배치하였다. 또한 본 연구에서는 축소모형 보의 전단이나 뒤틀림은 고려하지 않았으며, 축소모형 복근보의 띠철근이나 스트립은 배근하지 않았다.

슬래브 배근

축소모형 슬래브는 장변과 단변이 동일하고 4변이 모두 지지되는 2방향 슬래브를 기준으로 배근하였다. 2방향 슬래브의 각 방향 철근 단면적은 최소 철근비 0.0014 이상이어야 한다.

옥외 또는 흙에 접하지 않는 경우 D35 이하 슬래브의 최소 피복두께는 20mm이다. 또한 설계기준 항복강도가 300MPa 일 때 2방향 슬래브 시스템의 최소 두께는 식 (7)과 같으나 지판이 없는 슬래브의 경우 최소 두께는 120mm 이상으로 해야 한다.

$$h_{\min} = l_n/35 \quad (7)$$

여기서, h_{\min} 은 2방향 슬래브 최소 두께, l_n 은 모멘트가 결정되는 방향으로 측정한 받침부 사이의 순경간이다.

따라서 축소모형 슬래브의 철근의 최소 피복두께는 4mm 이상, 슬래브의 최소 두께는 24mm 이상이어야 한다. 또한 굵은골재 최대치수가 슬래브 두께의 1/3이하이므로 축소모형 슬래브의 두께를 30mm로 하였다.

슬래브에서 휨 주철근의 간격은 슬래브 두께의 3배 이하이므로 축소모형 슬래브에서는 SWM-A, 4.00을 90mm 간격으로 배근하였으며, 축소모형 주철근에 수직하게 수축온도철근인 배력철근을 슬

레브 두께의 5배 이하로 SWM-A, 3.20을 150mm 간격으로 배근하였다. 축소모형 슬래브 주철근 방향의 철근비는 0.0045이고, 배력철근 방향

의 철근비는 0.0015이다.

Fig. 1은 축소모형 철근콘크리트 부재의 단면 및 축소모형 철근의 배근상태를 나타낸 것이다.

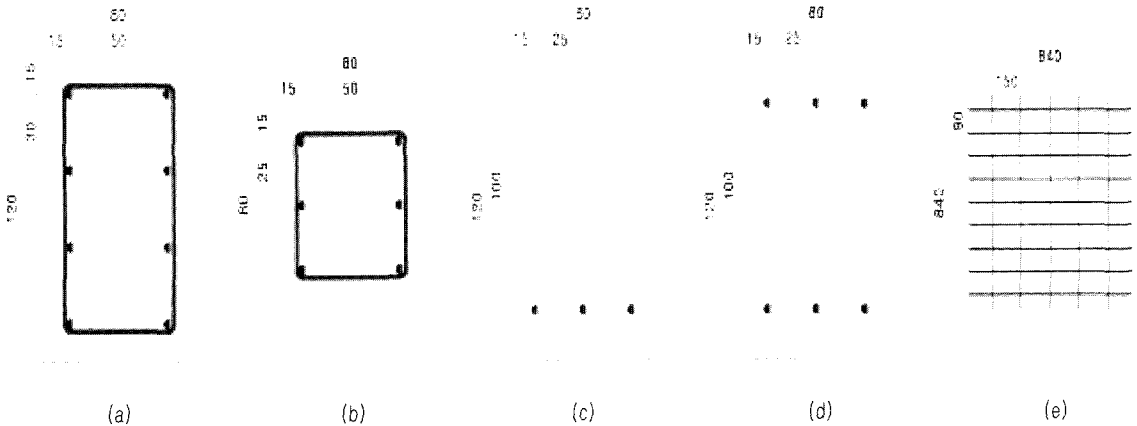


Fig. 1. Cross section of scaled members and arrangement of bars(unit : mm)
 ((a) main column, (b) sub column, (c) singly RC beam, (d) doubly RC beam, (e) slab).

4. 축소모형 재료의 역학적 특성

4.1 콘크리트 공시체 제작

본 연구에서는 축소모형 콘크리트의 압축강도 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법), 인장강도 KS F 2423 (콘크리트의 쪼갬 인장강도 시험방법) 시험용으로 표준공시체 $\phi 150 \times 300$ mm를 제작하였고, 축소모형 콘크리트의 휨강도 KS F 2408 (콘크리트의 휨강도 시험방법) 시험용으로 표준공시체 $150 \times 150 \times 500$ (mm)를 제작하였다.

표준공시체의 콘크리트 설계기준강도는 24MPa이고, 제작에 사용된 시멘트는 보통포틀랜드시멘

트, 잔골재는 $\phi 5$ mm 체를 통과한 모래를 사용하였으며, 굵은골재는 $\phi 5$ mm 체에는 남고 $\phi 10$ mm 체를 통과한 최대치수 10mm 부순돌을 사용하였다. 축소모형 콘크리트의 시방배합표는 Table 5와 동일하며 표준양생 하였다.

4.2 철근 시험편 제작

축소모형 철근 시험편은 KS B 0801 (금속재료 인장시험편) 시험용으로 인장 시험편 규격은 Table 6과 같으며, SWM-A, 4.00, SWM-A, 3.20을 각각 10개씩 9A호로 제작하였다.

Table 6. Designation for specimen of tensile strength test

시험편 종류	표점거리 L(mm)	물린 간격(mm)
9A호	100	150 이상
9B호	200	250 이상

4.3 실험결과

표준공시체 압축강도시험 및 탄성파속도시험 결과

축소모형 콘크리트 압축강도용 표준공시체의 지름은 149.29~151.87(mm)이고, 높이는 289.68~297.10(mm)이다. 콘크리트 설계기준강도는 24MPa, 표준편차는 식 (1)에 계산된 1.93MPa에 압축강도의 시험횟수가 15회이므로 Table 4에서 제시된 보정계수 1.16을 곱한 2.24MPa이다. 따라서 식 (2)와 (3)에 의한 값 중 큰 값인 27MPa를 콘크리트 배합강도로 정하였다.

표준공시체 압축강도시험 결과, 압축강도는 29.54~35.98(MPa)이며, 평균압축강도는 31.70

MPa이다. 압축강도가 배합강도보다 큰 원인은 굵은골재인 부순돌의 표면이 모를 이루어서 굵은골재와 시멘트풀과의 부착이 좋기 때문이며, 일반적으로 강자갈을 사용한 콘크리트의 압축강도보다 약 1.20~1.35의 강도비를 갖는다(김성수, 1998). 따라서 강자갈을 사용한 원형 콘크리트의 압축강도와 비교하면 표준공시체의 평균압축강도는 23.48~26.42(MPa)이며, 원형 콘크리트의 설계기준강도에 대한 축소모형 콘크리트의 압축강도 비는 0.98~1.10이다. 표준공시체의 탄성파속도는 3921~4233(m/s)이며, 평균탄성파속도는 4084m/s이다. Table 7은 표준공시체 압축강도시험과 탄성파속도시험 결과를 나타낸 것이다.

Table 7. The results of compressive strength test and elastic wave velocity test of standard specimen

시료 번호	지름 (mm)	높이 (mm)	수직하중 (KN)	압축강도 (MPa)	도달시간 (μ sec)	탄성파속도 (m/s)
C-1	150.29	289.68	534.17	30.13	72.6	3990
C-2	151.69	294.63	585.36	32.41	69.6	4233
C-3	149.29	292.03	612.62	35.02	69.3	4214
C-4	151.00	293.99	535.54	29.92	72.0	4083
C-5	150.27	296.65	533.88	30.12	72.6	4086
C-6	151.87	293.38	538.29	29.73	73.2	4008
C-7	150.45	294.86	561.73	31.61	70.6	4176
C-8	151.42	295.75	647.54	35.98	70.9	4171
C-9	150.08	293.85	566.93	32.06	70.3	4180
C-10	150.84	297.10	587.62	32.90	71.1	4179
C-11	151.61	296.17	554.86	30.75	74.3	3986
C-12	149.92	294.88	567.51	32.17	75.2	3921
C-13	150.25	296.73	523.48	29.54	73.6	4032
C-14	151.38	294.60	590.36	32.82	73.3	4019
C-15	150.69	294.94	539.95	30.29	74.2	3975
평균	150.74	294.62	565.32	31.70	72.19	4084

표준공시체 인장강도시험 결과

축소모형 콘크리트 인장강도용 표준공시체의 지름은 148.53~152.19(mm)이고, 높이는 283.05~297.65(mm)이다. 표준공시체의 인장강도는

2.67~3.75(MPa)이고, 평균인장강도는 3.13MPa이다. 평균인장강도와 평균압축강도의 비는 0.0987이고, Table 8은 표준공시체의 인장강도시험 결과를 나타낸 것이다.

Table 8. The results of splitting tensile strength test of standard specimen

시료 번호	지름 (mm)	길이 (mm)	수직하중 (KN)	인장강도 (MPa)
T-1	148.53	297.04	214.47	3.10
T-2	151.21	297.19	224.28	3.18
T-3	150.28	295.12	247.62	3.56
T-4	150.45	293.35	225.65	3.26
T-5	150.78	295.64	262.23	3.75
T-6	151.44	294.14	187.41	2.68
T-7	152.19	283.05	180.54	2.67
T-8	150.51	294.47	198.68	2.86
T-9	150.65	294.23	237.71	3.42
T-10	150.26	297.65	198.10	2.82
평균	150.63	294.19	217.67	3.13

표준공시체 휨강도시험 결과

축소모형 콘크리트 휨강도용 표준공시체의 전체길이는 549~553(mm)이고, 두께는 149~152(mm), 폭은 149~151(mm)이며, 지간길이는 450mm이다. 실험결과 휨강도는 중앙 집중재하시 4.21~5.30

(MPa)이며, 3등분 점재하시 3.28~4.66(MPa)이다. 평균휨강도는 중앙 집중재하시 4.75(MPa)이고, 3등분 점재하시 4.03(MPa)이다. Table 9는 표준공시체의 휨강도시험 결과를 나타낸 것이다.

Table 9. The results of flexural strength test of standard specimen

시료번호	전체길이 (mm)	두께 (mm)	폭 (mm)	지간길이 (mm)	수직하중 (KN)	휨강도 (MPa)	비고
B-1	549	151	150	450	24.71	4.88	중앙 집중재하
B-2	550	150	151	450	26.67	5.30	
B-3	549	150	150	450	24.71	4.94	
B-4	553	151	149	450	21.18	4.21	
B-5	550	152	149	450	22.56	4.42	
평균	550	151	150	450	23.97	4.75	
B-6	550	150	151	450	35.21	4.66	3등분 점재하
B-7	549	151	150	450	29.71	3.91	
B-8	549	149	150	450	33.83	4.57	
B-9	552	150	150	450	28.05	3.74	
B-10	550	150	149	450	24.42	3.28	
평균	550	150	150	450	30.24	4.03	

철근 인장강도시험 결과

축소모형 철근의 인장강도시험 결과는 Table 10, Table 11과 같다. SWM-A, 3.20의 항복강도는 253.68~417.82(N/mm²)이고, 평균항복강도는 301.88N/mm²이다. 인장강도는 402.59~475.79(N/mm²)이고, 평균인장강도는 420.89N/mm²이다. SWM-A, 4.00의 항복강도는 272.16~358.01(N/mm²), 평균항복강도는 313.08N/mm²이다. 인장강도는 390.39~413.82(N/mm²)이며 평균 인장강도는 409.13N/mm²이다. SWM-A의 인장강도는 3.20mm, 4.00mm 모두 260~590(N/mm²)으로 규정하고 있으며 본 연구에 사용된 축소모형 철근은 모두 규정을 만족하고 있다.

또한 원형 철근인 SD300의 항복강도는 300(N/mm²) 이상으로 규정하고 있으며, 본 연구에 사용된 축소모형 철근인 SWM-A, 3.20의 평균항복강도는 301.88(N/mm²)이며, SWM-A, 4.00의 평균항복강도는 313.08(N/mm²)이다. 따라서 본 연구에 사용된 축소모형 철근은 원형 철근인 SD300의 항복강도 조건에 상사된다. 원형 철근인 SD300의 인장강도는 440(N/mm²) 이상으로 규정하고 있으며, 원형 철근에 대한 축소모형 철근의 인장강도 비는 0.93~0.96이다. Fig. 2는 어닐링 철선, SWM-A, 3.20의 인장강도와 변위와의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 3은 어닐링 철선, SWM-A, 4.00의 인장강도와 변위와의 관계를 나타낸 것이다.

Table 10. The results of tensile strength test of annealing wire, SWM-A, 3.20

시료번호	철근지름 (mm)	표점거리 (mm)	물린 간격 (mm)	항복강도 (N/mm ²)	인장강도 (N/mm ²)
A-3.2-1	3.18	100	150	268.36	402.59
A-3.2-2	3.18	100	150	315.38	402.59
A-3.2-3	3.18	100	150	391.05	439.19
A-3.2-4	3.18	100	150	417.82	475.79
A-3.2-5	3.18	100	150	264.75	402.59
A-3.2-6	3.18	100	150	306.83	439.19
A-3.2-7	3.18	100	150	287.92	439.19
A-3.2-8	3.18	100	150	256.17	402.59
A-3.2-9	3.18	100	150	253.68	402.59
A-3.2-10	3.18	100	150	256.79	402.59
평균	3.18	100	150	301.88	420.89

Table 11. The results of tensile strength test of annealing wire, SWM-A, 4.00

시료번호	철근지름 (mm)	표점거리 (mm)	물린 간격 (mm)	항복강도 (N/mm ²)	인장강도 (N/mm ²)
A-4.0-1	3.81	100	150	350.92	413.82
A-4.0-2	3.81	100	150	297.90	413.82
A-4.0-3	3.81	100	150	322.10	413.82
A-4.0-4	3.81	100	150	322.10	413.82
A-4.0-5	3.81	100	150	358.01	413.82
A-4.0-6	3.81	100	150	299.86	390.39
A-4.0-7	3.81	100	150	272.16	390.39
A-4.0-8	3.81	100	150	295.51	413.82
A-4.0-9	3.81	100	150	335.40	413.82
A-4.0-10	3.81	100	150	276.80	413.82
평균	3.81	100	150	313.08	409.13

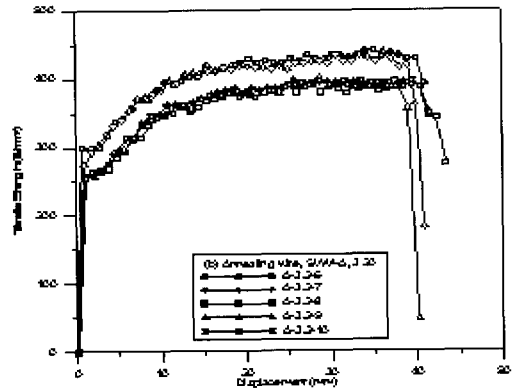
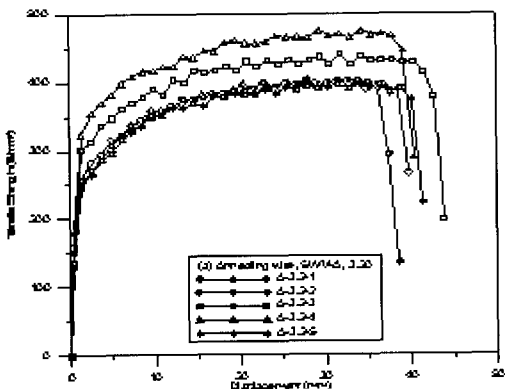


Fig. 2. Tensile strength VS. displacement for annealing wire, SWM-A, 3.20.

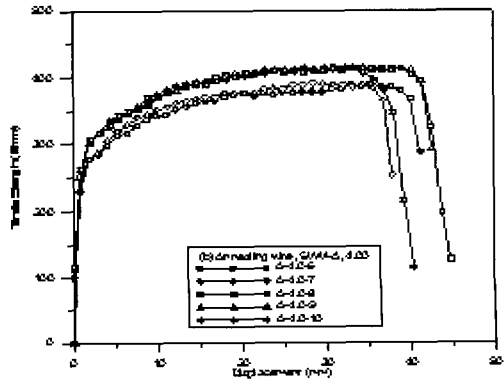
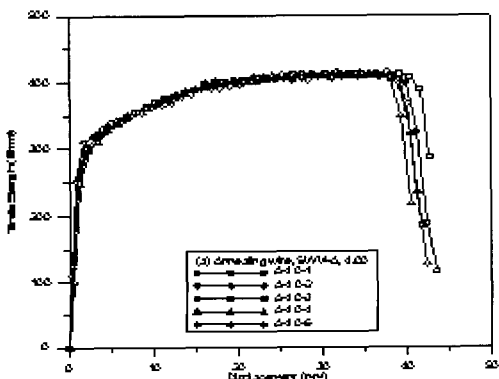


Fig. 3. Tensile strength VS. displacement for annealing wire, SWM-A, 4.00.

5. 결 론

본 연구에서는 뇌관을 기폭제로 사용하는 축소 모형 구조물의 붕괴거동을 고려하기 위해 밀도를 기준으로 축소모형의 상사법칙을 제안하였으며, 축소모형 콘크리트는 굵은골재 최대치수를 고려하여 단면의 길이를 1/5로 축소하였고, 축소모형 철근은 공칭지름의 길이를 1/5로 축소하였다. 콘크리트 표준시방서 및 콘크리트 구조설계기준에 적합한 축소모형 콘크리트 배합, 압축과 인장을 고려한 축소모형 철근의 배근을 설계하였다.

축소모형 콘크리트의 평균압축강도는 31.70MPa이었고, 원형 콘크리트의 설계기준강도에 대한 축소모형 콘크리트의 압축강도 비는 0.98~1.10이었다. 축소모형 철근 SWM-A, 3.20의 평균항복강도는 $301.88\text{N}/\text{mm}^2$ 이었으며, SWM-A, 4.00의 항복강도는 $313.08\text{N}/\text{mm}^2$ 이었고, 원형 철근에 대한 축소모형 철근의 인장강도 비는 0.93~0.96이었다.

제안된 밀도기준의 상사법칙을 적용함으로써 축소모형 콘크리트의 압축강도 및 축소모형 철근의 항복강도는 원형 콘크리트의 압축강도 및 원형 철근의 항복강도와 상사관계를 가지는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구센터 지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

1. 김승근, 2003, 구조물 축소모형의 발파해체로 인한 지반진동 및 파쇄도에 관한연구, 전남대학교 박사학위논문.
2. 김성수, 1998, 최신토목재료학, 구미서관, pp. 96-145.
3. 김우, 김대중, 강성후, 1991, 철근콘크리트구조 연구를 위한 소축적 구조모형실험기법, 콘크리트학회논문집, Vol. 3, No. 4, pp. 133-142.
4. 대한건축학회, 2004, 콘크리트 구조설계기준 건축구조물 설계예제집, 기문당.
5. 대한주택공사, 2006, 콘크리트 전문시방서, 20210 콘크리트, pp. 163.
6. 배성용, 이한선, 신영식, 1994, 철근콘크리트 구조물의 축소모델 재료의 역학적 특성에 관한 실험연구, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, pp. 249-254.
7. 정동영, 양형식, 2004, 폭원의 축소율 산정과 축소모형 실험에의 적용, 화약발파, Vol. 22, No. 4, pp. 1-6.
8. 한국콘크리트학회, 2004, 콘크리트 구조설계기준 해설, 기문당.
9. 한국콘크리트학회, 2004, 콘크리트 표준시방서 해설, 기문당.



박 훈

전북대학교 공업기술연구소
직원연구원

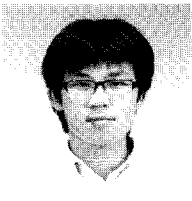
전화 : 063)270-2358
E-mail : hujin@chonbuk.ac.kr



유 지 완

전북대학교 자원·에너지공학과
석사과정

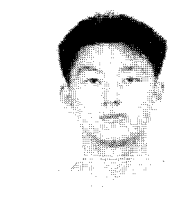
전화 : 011-9477-0720
E-mail : zaamchi@nate.com



이 희 광

전북대학교 자원·에너지공학과
석사과정

전화 : 011-9437-8250
E-mail : leeheegwang@nate.com



송 정 언

전북대학교 자원·에너지공학과
박사수료

전화 : 017-642-4007
E-mail : sjuda@chonbuk.ac.kr



김 승 곤

전북대학교 자원·에너지공학과 교수

전화 : 063)270-2365
E-mail : kimsk@chonbuk.ac.kr
