

콘크리트 포장 축소모델 배합의 재료적 상사성에 관한 연구

A Study on the Similitude of Material for Small-Scale Model Mix Proportion of Concrete Pavement.

배 주 성* 고 영 주** 김 재 경*** 김 평 수***
Bae, Ju-Seong Ko, Young-Zoo Kim, Jae-Kyoung Kim, Pyoung-Su

ABSTRACT

The objective of this study is to provide the information on the small-scale model mix proportion when the behavior of prototype concrete pavement is studied through small-scale model experiments. However it is difficult to obtain a model material to simulate the prototype concrete by scaling the individual components according to the laws of similitude.

In this paper, the stress-strain behavior in uniaxial compression is used as a means to correlate material similitude between the prototype and the model concrete. Based on the results of experiments, We compared the stress-strain curves of prototype and model concrete mixes using a nondimensional basis. In order to simulate the stress-strain curves of prototype concrete, it is important that various mix as of model concrete selected properly which are varied from aggregate grading, cement-aggregate and sand-aggregate ratio.

Keywords : prototype and model concrete, stress-strain behavior, material similitude.

1. 서론

시멘트콘크리트 포장체의 역학적 거동과 파괴성상을 파악하기 위한 구조실험은 실험크기(이하 원형이라 한다)의 콘크리트 포장에 대해 교통하중에 의한 도로실험을 수행하는 것이 가장 좋은 방법이지만, 이것은 크기로 인한 공간제약을 받고 많은 시간과 비용을 필요로 하기 때문에 축소모델(small-scale

1)*정회원, 전북대학교 토목·환경공학부 교수, 공업기술연구소

2)**정회원, 전북대학교 대학원 박사수료

3)*** 전북대학교 대학원 석사과정

model) 실험은 좋은 연구 방법의 하나이다. 이러한 축소 모델(이하 모형이라 한다)은 실내 실험을 수행할 수 있어 공간적인 장점이 있고, 콘크리트의 다양한 재료적 변수를 용이하게 취급함으로써 실물포장체의 거동분석을 위한 많은 자료를 제공할 수 있다. 따라서 모형실험의 오차를 최소화하여 원형실험과 같은 결과를 재현하고 예측하도록 기하구조, 하중, 재료적 상사를 만족하여야 한다. 그러나 크기효과 (size-effect) 및 재료적 상사성을 확보하는 문제는 상당한 어려움이 따르며 이것 또한 많은 실험적 검증을 요구하게 되므로 대 상구조체에 대한 배합특성별 모델연구가 수행되어야 한다.

본 연구는 시멘트콘크리트 포장체의 거동연구를 위한 모형제작에 앞서 가장 중요한 변수인 재료적 상사성을 확보하는데 그 목적이 있다. 따라서 현재 고속도로의 콘크리트 포장 배합설계기준과 동일한 배합비로 제작한 시험편(이하 원형콘크리트)과 골재의 최대치수를 축소하고 W/C, C/A, S/a, 골재종류를 변수로 한 시험편(이하 모델콘크리트)을 제작하여 재료적 상사성을 만족하는 모델배합비를 도출함으로써 콘크리트포장체의 실내 모형실험에 대한 신뢰성 및 기초자료를 제공하고 자 한다.

2. 축소모델의 상사성

콘크리트와 같은 비균질인 재료는 그 성질에 영향을 주는 요소의 복합성 때문에 상사법칙에 의해 각각의 성분들을 축소하는 것으로 원형콘크리트를 모사할 수 있는 모델콘크리트를 얻는 데는 한계가 있다. 특히 골재의 크기, 시멘트입자의 크기, 굳은콘크리트 내부의 공극까지도 축소되어야 한다. 축소모델의 콘크리트에서 골재의 크기 등은 부분적으로 만족할 수 있으나, 시멘트 입자들의 물리적이고 화학적인 반응을 상사시킨다는 것은 현실적으로 불가능하다.

그러나 이러한 제약은 항복기준, 응력-변형을 곡선을 포함하는 모델콘크리트의 물리적 특성이 상사법칙에 따라 원형콘크리트의 항복기준, 응력-

변형을 곡선과 일치하면 중요치 않다.¹⁾ 즉 원형콘크리트와 모형콘크리트의 응력-변형을 곡선이 일치하는 재료적 상사성을 확보한다면 개별적인 콘크리트 성분들을 축소화하는 것은 문제가 되지 않는다. 현재까지 모델콘크리트로서 마이크로콘크리트(Micro-Concrete)와 Gypsum을 주로 사용하였다.²⁾ 그러나 마이크로콘크리트는 일반적으로 강성이 작고 모형의 축척이 작아질수록 인장강도 대 압축강도비(f_t / f_c)가 커져서 균열에 의해 거동이 크게 지배되는 콘크리트 구조를 모형화하는데 문제가 있었다.³⁾

원형콘크리트와 모델콘크리트의 공학적 특성은 W/C, A/C, 골재의 성질(크기, 경도, 입도 등) 시멘트종류, 적용하중의 응력형태(인장, 휨, 압축)등 여러 인자에 의존하나 모델콘크리트는 원형콘크리트의 극한압축강도(f_c'), 탄성계수(E), 극한압축 변형율(ϵ_u) 및 극한인장강도(f_t')를 일치시킴으로써 재료적 상사성을 만족시킬 수 있다.

3. 실험

3.1 사용재료

원형콘크리트 제작에 사용한 시멘트는 비중 3.15, 분말도 $3200\text{cm}^2/\text{g}$ 인 1종 보통포틀랜드 시멘트이고 굵은골재는 강자갈과 쇄석의 2종류를 사용하였으며 골재의 물리적 특성은 표1과 같다.

표1 골재의 물리적 특성

구분	골재 size	표준 비중	흡수율 (%)	조립율	
굵은 골재	강자갈	40mm - No.4	2.65	2.8	6.88
	쇄석	40mm - No.4	2.69	2.5	6.99
잔골재	No.4 이하		2.50	2.2	2.97

모델콘크리트 제작에 사용된 시멘트는 비중 3.12, 분말도 $6200\text{cm}^2/\text{g}$ 인 초조강시멘트를 사용하였다. 초조강시멘트를 사용한 이유는 보통포틀랜드 시

멘트보다 작은 입자이므로 상사조건에 더 부합되고, 단기간에 높은 강도를 발현함으로써 실험기간을 단축할 수 있다는 장점 이외에도 보다 일관성 있는 결과를 얻을 수 있기 때문이다.^{3,4)} 또한 원형콘크리트에 사용된 골재를 체가름하여 No.4-No.10체의 골재를 모형콘크리트의 굵은골재(G_m), No.10체를 통과하는 골재를 잔골재(S_m)로 사용하였다.

3.2 배합

현재 고속도로의 콘크리트 포장 배합설계기준에 따라 결정된 원형콘크리트의 시방배합에서 C/A, S/a를 변수로 하여 워커빌리티의 개선을 위해 W/C를 10% 증가시키고, 고성능유동화제를 첨가한 모델콘크리트를 제작하였으며 원형 및 모델콘크리트의 배합표를 표2에 나타냈다.

표2. 원형 및 모델콘크리트 배합표

TYPE		W/C(%)		S (S_m+G_m)*	G	C/A	S/a	
		W	C					
원형	강자갈	0.4 (144)	1 (360)	1.36 (491)**	3.71 (1335)	20	27	
	쇄석	0.4 (150)	1 (375)	1.34 (501)	3.52 (1321)	21	28	
모델	강자갈	MR1-1	0.5	1	4.0	-	25	1.08+2.92
		MR1-2						1.48+2.53
		MR1-3						1.88+2.12
	강자갈	MR2-1	0.5	1	3.3	-	30	0.90+2.40
		MR2-2						1.20+2.10
		MR2-3						1.60+1.70
	강자갈	MR3-1	0.5	1	2.86	-	35	0.77+2.09
		MR3-2						1.06+1.80
		MR3-3						1.34+1.52
	강자갈	MR4-1	0.5	1	2.50	-	40	0.68+1.82
		MR4-2						0.93+1.57
		MR4-3						1.18+1.32
	쇄석	MC1-1	0.5	1	3.85	-	26	1.08+2.77
		MC1-2						1.46+2.39
		MC1-3						1.85+2.00
		MC2-1	0.5	1	3.23	-	31	0.90+2.33
		MC2-2						1.23+2.00
		MC2-3						1.55+1.68
MC3-1		0.5	1	2.78	-	36	0.78+2.00	
MC3-2							1.06+1.72	
MC3-3							1.33+1.45	
MC4-1	0.5	1	2.44	-	41	0.68+1.76		
MC4-2						0.93+1.51		
MC4-3						1.17+1.27		

Note : * S_m : Model sand defined by particle size smaller

than #10 sieve

G_m : model gravel defined by particle size larger than #10 sieve and smaller than #4 sieve

** : unit-kg/m³

3.3 시편제작 및 시험방법

3.3.1 시편제작

원형 및 모델콘크리트의 공시체는 배합표의 변수 및 시험항목에 따라 각각 32개 및 192개를 제작하였으며 공시체의 크기는 원형콘크리트에서는 $\phi 15 \times 30$ cm, $15 \times 15 \times 55$ cm 크기로 제작하였고 모델콘크리트는 ACI 444에서 추천한 $\phi 5 \times 10$ cm, $4 \times 4 \times 16$ cm의 크기로 제작하였다.⁵⁾

3.3.2 시험방법

압축강도, 휨강도 및 할열인장강도는 UTM(100t)으로 측정하였고 포아슨비 및 변형율을 측정하기 위해 길이가 60mm인 스트레인게이지를 부착하였다. 압축실험으로부터 응력-변형을 곡선을 구한 후 응력축을 정규화 하여 원형과 모형콘크리트의 응력-변형을 관계를 구하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 원형콘크리트(Prototype Concrete)

강자갈과 쇄석을 사용한 시편의 재령 28일의 시험결과는 표3, 그림1과 같다. 표3에 나타난 바와 같이 쇄석을 사용한 공시체의 강도특성 및 탄성계수가 강자갈에 비해 전반적으로 우수하였으나 할열인장강도/압축강도는 강자갈이 10%로 크며, 최대압축응력에서 변형율은 유사하게 나타났다. 또한 강자갈과 쇄석의 포아슨비는 0.198 및 0.174로 일반적인 콘크리트 포아슨비 0.15-0.20의 범위를 만족하고 있다.

표3. 원형콘크리트 시험결과

구분	압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	휨강도 (kg/cm ²)	인장강도/ 압축강도	탄성계수 (kg/cm ²)	포아 손비
강자갈	314.79	33.21	45.55	0.105	271439	0.198
쇄석	372.07	35.03	52.69	0.094	319989	0.174

그림1. 원형콘크리트 응력-변형을 곡선

4.2 모델콘크리트 (Model Concrete)

4.2.1 압축강도

강자갈과 쇄석으로 골재의 종류를 달리한 재령 7일의 공기체에 대한 시험결과를 표4와 그림2~9에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 강자갈의 MR1-2를 제외한 전 시편에서 C/A가 각각 25, 30, 35, 40%로 일정할 때 S/a의 증가에 따라 압축강도가 크게 나타났다.

또한 S/a별로 나타난 압축강도는 쇄석의 경우 28, 38, 48%, 강자갈은 27%, 37%에서 C/A의 증가에 따라 증가하는 결과를 보였다. 그러나 강자갈에서 S/a가 47%인 경우와 쇄석골재 MC4-2일 때 C/A의 증가와 일정한 관계를 보이지 않았다.

4.2.2 활열인장강도

강자갈의 활열인장강도는 C/A가 일정한 경우 S/a의 증가에 따라 증가되며, S/a가 일정할 때에는 C/A가 증가함에 따라 반대로 감소하는 경향을 보여 시멘트량과 연관성이 있는 결과를 나타냈다. 그러나 쇄석의 경우 C/A와 S/a 대해서는

인장강도의 뚜렷한 증가 또는 감소 현상을 보이지 않았다.

4.2.3 휨강도

일정한 S/a 대해 모든 종류의 시편에서 C/A의 변화와 휨강도 특성은 일정한 관계를 보이지 않았다. 모든 시편에서 휨강도의 편차는 거의 없었으며 쇄석의 휨강도가 강자갈보다 5%정도 크게 나타났다.

4.2.4 인장강도/압축강도

일반적으로 모델콘크리트의 인장강도는 원형콘크리트보다 높으며 인장강도/압축강도는 5-13%의 값을 갖는다.⁶⁾

표4에 나타난 본 시험의 인장강도/압축강도는 쇄석의 경우 6-13%, 강자갈에서는 6.6-11.0%로 나타나 일반적인 콘크리트 수준 이내였다. 특히 쇄석의 MC4-1, MC2-2 와 S/a가 47%인 강자갈을 사용한 시편을 제외하고 전반적으로 인장강도/압축강도 비율이 감소하는 경향을 보였다.

이러한 결과는 시멘트량이 증가함에 따라 압축강도는 증가하는 반면에 상대적으로 인장강도의 증가폭이 작았음을 의미한다.

4.2.5 응력 - 변형률 관계

그림2~9는 정규화시킨 원형과 모델콘크리트의 응력-변형률 곡선이다. 그림에서 보는 바와 같이 강자갈을 사용한 시편의 경우 전반적으로 모델콘크리트의 탄성계수가 원형콘크리트보다 큰 값을 갖으나, C/A가 40%일 때 S/a 37%, 47%는 변형률이 크게 나타났다. 이는 C/A가 일정한 비율까지는 모델콘크리트가 원형콘크리트보다 대체로 큰 강성과 작은 변형률을 보이거나 시멘트량이 상당히 증가된 배합에서는 S/a를 변화시킴으로써 작은 강성과 큰 변형률을 갖는 배합을 얻을수 있다는 것을 의미한다. 또 동일한 C/A에서는 S/a가 감소함에 따라 탄성계수가 감소되는 결과를 보였다.

한편 쇄석의 경우는 응력-변형률 거동이 C/A 변화에 따라서 원형콘크리트의 응력-변형률 곡선에

빠르게 근접하여 유사한 형태를 보였다. 특히 최대압축응력의 40%까지 원형콘크리트의 응력-변형을 곡선과 일치하는 모델콘크리트는 C/A 31%에서 S/a가 28, 38%인 경우와 C/A 36%에서 S/a가 38%일 때 나타났다. 그리고 C/A 41%에서 S/a가 48%인 시험편에서 원형콘크리트와 거의 일치하는 응력-변형을 관계를 얻을 수 있었다.

표4. 모델콘크리트 시험결과

구분	압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	휨강도 (kg/cm ²)	인장강도/ 압축강도	탄성계수 (kg/cm ²)
MR1-1	247.47	27.80		0.112	470998
MR1-2	244.58	29.80	49.95	0.122	-
MR1-3	332.32	34.90		0.105	446808
MR2-1	260.89	26.88		0.103	260292
MR2-2	297.58	29.22	46.67	0.098	-
MR2-3	304.20	31.85		0.105	514181
MR3-1	294.02	23.31		0.079	294355
MR3-2	321.83	28.41	45.94	0.088	364917
MR3-3	363.32	31.78		0.088	421058
MR4-1	315.42	18.98		0.060	292755
MR4-2	326.62	25.99	48.85	0.080	101101
MR4-3	328.26	28.92		0.088	112495
MC1-1	286.03	31.46		0.110	429687
MC1-2	286.37	24.45	53.6	0.085	489540
MC1-3	311.97	33.69		0.108	-
MC2-1	305.61	28.96		0.095	254743
MC2-2	318.22	28.24	52.5	0.089	270345
MC2-3	344.72	25.48		0.074	367104
MC3-1	339.24	25.73		0.076	-
MC3-2	349.55	28.25	53.23	0.081	327619
MC3-3	350.83	25.86		0.074	132212
MC4-1	345.14	28.19		0.082	105468
MC4-2	347.17	25.92	51.41	0.075	-
MC4-3	374.52	24.81		0.066	339965

그림3. 모델콘크리트 응력-변형을 곡선 II

그림4. 모델콘크리트 응력-변형을 곡선 III

그림5. 모델콘크리트 응력-변형을 곡선 IV

그림6. 모델콘크리트 응력-변형을 곡선 V

그림2. 모델콘크리트 응력-변형을 곡선 I

그림7. 모델콘크리트 응력-변형률 곡선VI

2. 최대압축응력의 40%수준까지 원형콘크리트의 응력-변형률곡선과 일치하는 모델콘크리트는 C/A 31%에서 S/a가 28%, 38%인 경우와 C/A 36%에서 S/a가 38%로 쇄석을 사용한 배합에서 나타났다.
3. 최대압축응력까지 원형콘크리트의 응력-변형률곡선과 거의 일치하는 모델콘크리트는 쇄석을 사용하고, C/A 41%에서 S/a가 48%인 배합으로 나타났다.
4. 골재입도, 시멘트대 골재비, 축소된 골재의 S/a를 적절히 조절함으로써 원형콘크리트의 응력-변형률 곡선과 잘 일치하는 모델콘크리트 배합을 구할 수 있다.

참고문헌

그림8. 모델콘크리트 응력-변형률 곡선VII

1. Sabnis, G. M., Harris, H. G., Structural Modeling an Experimental Techniques, Prentice-Hall, 1983, p.p.106~107, 133~134.
2. ACI Ad Hoc Committee on Structural Models, Models for Concrete Structures, ACI special Publication No.24, Detroit, Michigan, 1970
3. White, R.N., Modeling Technigues for Reinforced Concrete Structure, Report No.326, Dept .of structural Engineering, Cornell University , 1976
4. 김우, 김대중, 강성후, 「철근콘크리트 구조 연구를 위한 축척 구조모형 실험기법」 콘크리트학회 논문집, 3권, 4호, 1991, p.p.133~142.
5. ACI Committee 444, State-of-the-Art Report: Models of Reinforced Concrete Members, A merican Concrete Institute, Detroit, Michigan , 1997.
6. M. Reza Sarami., Analytical Expression for uniaxial Tensile Strength of Concrete in terms of Uniaxial Compressive Strength, Transportation Research Record 1335.

그림9. 모델콘크리트 응력-변형률 곡선VIII

5. 결론

본 연구는 원형콘크리트와 재료적 상사를 만족하는 모델콘크리트의 배합을 구하기 위한 것으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 쇄석을 사용한 모델콘크리트의 응력-변형률 곡선이 강자갈을 사용한 경우보다 전반적으로 원형콘크리트와 유사하게 일치하였다.

첨부 : 그림 1 - 그림9

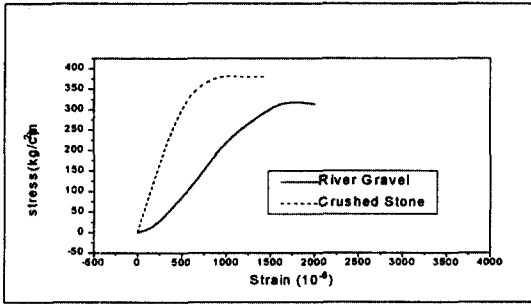


그림1. 원형콘크리트 응력-변형률 곡선

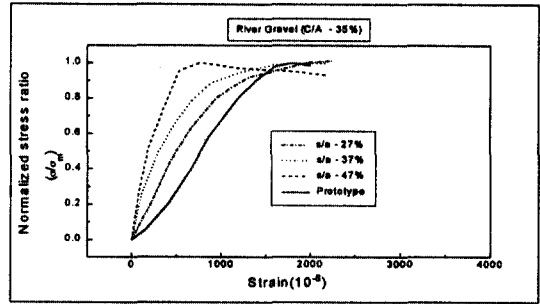


그림4. 모델콘크리트 응력-변형률 곡선Ⅲ

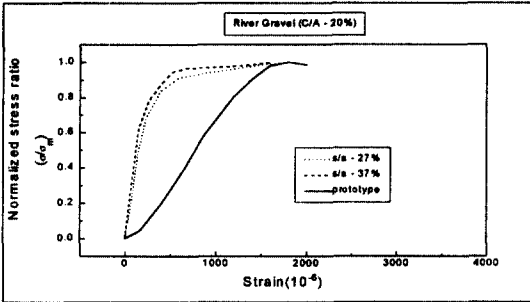


그림2. 모델콘크리트 응력-변형률 곡선Ⅰ

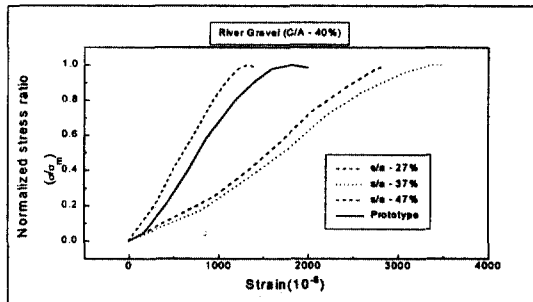


그림5. 모델콘크리트 응력-변형률 곡선Ⅳ

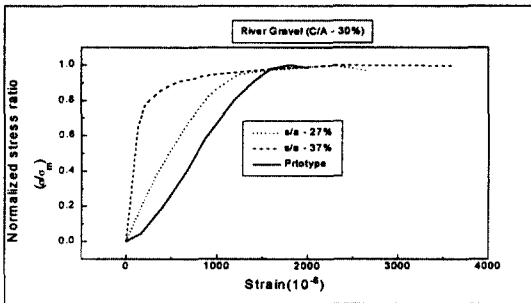


그림3. 모델콘크리트 응력-변형률 곡선Ⅱ

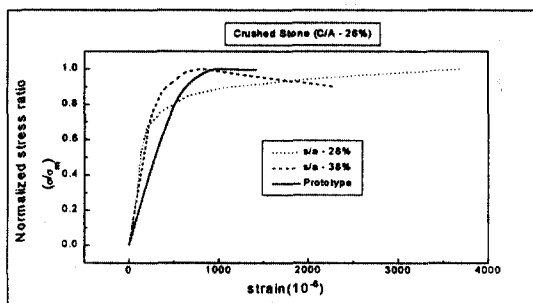


그림6. 모델콘크리트 응력-변형률 곡선Ⅴ

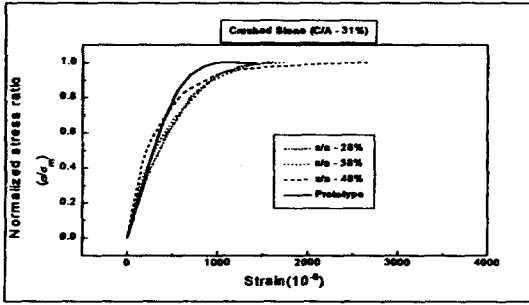


그림7. 모델콘크리트 응력-변형률 곡선VI

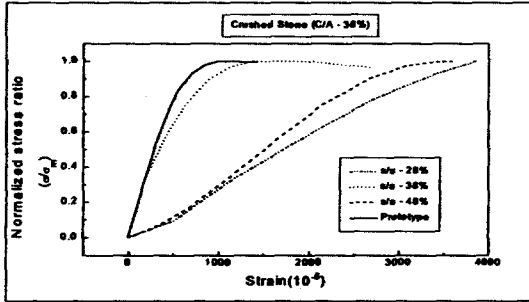


그림8. 모델콘크리트 응력-변형률 곡선VII

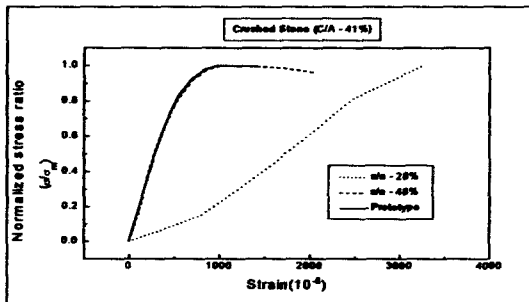


그림9. 모델콘크리트 응력-변형률 곡선VIII