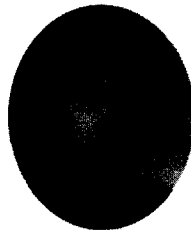

시멘트콘크리트 포장체의 거동연구를 위한 축소모델 배합의 재료적 유사성

The Similitude of Material for Small-Scale Model
Mix Proportion of Concrete Pavement



고영주*

Ko, Young-Zoo



이용우**

Lee, Yeoung-Woo



배주성***

Bae, Ju-Seong

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 proportions of model concrete selected properly which are varied from aggregate grading, cement-aggregate and sand-aggregate ratio.

Keywords : Material similitude, Prototype and model concrete, Stress-strain behavior.

* 정회원, 신성대학 토목과 전임강사

** 정회원, 전북대학교 토목·환경공학부 박사수료

*** 정회원, 전북대학교 토목·환경공학부 교수

·본 논문에 대한 토의를 1999년 8월 30일까지 학회로 보내
주시면 1999년 10월호에 토의회답 을 게재하겠습니다.

1. 서론

시멘트콘크리트 포장체의 역학적 특성과 거동을 파악하기 위한 구조실험은 실물 포장체의 크기와 구조에 대해 수행하는 것이 가장 좋은 방법이지만, 이것은 치수가 크므로 공간적인 제약과 많은 시간 및 비용이 소요되므로 축소모형 (small-scale model) 실험이 요구된다. 이러한 축소모형실험(이하 모형실험)이 최소한의 오차범위내에서 실물 포장체(이하 원형)의 결과를 재현하고 예측할 수 있다면 콘크리트의 다양한 재료적 변수를 용이하게 취급할 수 있으며 환경적인 영향도 고려하므로써 포장체의 거동분석을 위한 많은 자료를 제공할 수 있다. 따라서 모형실험의 오차를 최소화하여 원형실험과 같은 결과를 재현하고 예측하도록 기하구조, 하중, 재료적 상사를 만족하여야한다. 그러나 크기효과(size-effect) 및 재료적 상사성을 확보하는 문제는 상당한 어려움에 따르며 이것 또한 많은 실험적 검증을 요구하게 되므로 대상구조체에 대한 배합특성별 모델연구가 수행되어야 한다.

본 연구는 시멘트콘크리트 포장체의 거동연구를 위한 모형시험체의 제작에 앞서 가장 중요한 변수인 재료적 상사성을 확보하는데 그 목적이 있다. 따라서 현재 고속도로의 콘크리트포장 배합설계기준과 동일한 배합비로 제작한 시험편(이하 원형콘크리트)과 골재의 최대치수를 축소하고, W/C, C/a, S/a, 골재종류를 변수로 한 다양한 시험편(이하 모형콘크리트)을 제작하여 재료적 상사성을 만족하는 모형배합비를 도출함으로써 콘크리트포장체의 실내 모형실험에 대한 신뢰성을 향상시키고, 향후 연구의 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 축소모형의 재료적 상사성

재료적 상사성이란 실물 포장체(prototype, p) 재료의 응력-변형률 곡선과 상사모델(model, m)에 사용되는 재료의 응력-변형률 곡선과의 관계를 말한다. 즉 재료적 상사성을 만족하여야 한다는 것은 하중재하시 재료의 물리적 성질이 응력은 S_σ , 변형은 S_ϵ 라는 일관된 상사율을 갖고 있

어야만 상사모델시험에서 나온 결과를 실물 포장체에 바로 적용시킬 수 있다는 것을 의미한다.

콘크리트와 같은 비균등질인 재료는 그 성질에 영향을 주는 요소의 복잡성 때문에 상사법칙에 의해 각각의 성분들을 축소하는 것으로 실물 포장체의 콘크리트를 모형화하는 모형재료를 얻는 것은 어려운 문제이며, 특히 시멘트 입자들의 물리적이고 화학적인 반응을 상사시킨다는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러나, 이러한 제약은 항복기준, 응력-변형률 곡선을 포함하는 모형 콘크리트의 물리적 특성이 상사법칙에 따라 실물 콘크리트의 항복기준, 응력-변형률 곡선과 일치하면 중요치 않다.⁽¹⁾ 즉, 재료적인 상사성을 만족시킬 경우 기하학적 상사성에 따라 모형시험체를 제작하면 실물 포장체의 강성도 상사율에 비례하여 모델링이 된다. 일반적으로 상사율의 변화에 따른 모델의 파괴양상은 매우 상이한 결과를 나타내는 경우가 많다. 현재까지 모형 콘크리트로서 마이크로콘크리트(micro-concrete)와 석고(gypsum)를 주로 사용하였다.⁽²⁾ 그러나 마이크로 콘크리트는 일반적으로 강성이 작고 모형의 축척이 작아질수록 인장강도대 압축강도비 (f_t'/f_c')가 커져서 균열에 의해 거동이 크게 지배되는 콘크리트 구조를 모형화하는 데 문제가 있었다.⁽³⁾

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

3. 실험

3.1 사용재료

원형콘크리트와 모형콘크리트의 골재는 강자갈과 채석 2종류로 하고, 모형콘크리트의 굵은골재는 No.4~No.10체에 잔류하는 골재(G_m)로 하였으며 잔골재는 No.10체 이하의 골재(S_m)를 사용하였다. 원형콘크리트 골재의 물리적 특성을 Table 1에 나타내었으며, Table 2에 원형콘크리트와 모

형콘크리트의 사용재료를 비교하였다. 한편, 모형 콘크리트에 초조강 시멘트를 사용한 이유는 보통 포틀랜드 시멘트 보다 분말도가 높아 상사조건에 더 부합되고, 단기간에 높은 강도를 발현하므로써 실험기간을 단축할 수 있다는 장점 이외에도 보다 일관성 있는 결과를 얻을 수 있기 때문이다.^(3,4)

Table 1 Physical properties of aggregate

구 분	골재 크기	표준 비중	흡수율 (%)	조립률	
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

Table 3 Comparison of materials between prototype and model concretes

구 분	원형 콘크리트 (prototype concrete)	모형 콘크리트 (model concrete)	
시멘트	종류	보통포틀랜드 시멘트	초조강 시멘트
	비중	3.15	3.12
	분말도	3200cm ² /g	6200cm ² /g
골재	굵은골재	40mm - No.4	No.4 - No.10
	잔골재	No.4 이하	No.10 이하

3.2 배 합

현재 고속도로의 콘크리트포장 배합설계기준에 따라 원형콘크리트의 배합설계를 실시하고 시방 배합을 결정하였으며, 모형콘크리트는 Table 3에 나타난 바와같이 C/a, S/a를 주요 변수로 한 다양한 배합을 설정하였다. 시방배합에서 결정된 원형 콘크리트의 W/C는 40%였으나, 모형콘크리트는 W/C를 50%로 증가시키고 S사의 고성능 유동화제를 시멘트 중량의 1.0%를 첨가하였다. 이는 크기효과(size effect)로 인해 모형콘크리트의 강도가 증가되는 것을 고려하고, 골재입자가 축소됨에

따라 워커빌리티가 저하되는 것을 방지하고자 한 것이다.

Table 4 Mix proportions of prototype and model concretes

원형	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	
모형	강자갈	MR1-1	0.5	1	4.0	-	1.08+2.92	27
		MR1-2					1.48+2.52	37
		MR1-3					1.88+2.12	47
	강자갈	MR2-1	0.5	1	3.3	-	0.90+2.40	27
		MR2-2					1.20+2.10	37
		MR2-3					1.60+1.70	47
	강자갈	MR3-1	0.5	1	2.8	-	0.77+2.09	27
		MR3-2					1.06+1.80	37
		MR3-3					1.34+1.52	47
	강자갈	MR4-1	0.5	1	2.5	-	0.68+1.82	27
		MR4-2					0.93+1.57	37
		MR4-3					1.18+1.32	47
모형	쇄석	MC1-1	0.5	1	3.8	-	1.08+2.77	28
		MC1-2					1.46+2.39	38
		MC1-3					1.85+2.00	48
	쇄석	MC2-1	0.5	1	3.2	-	0.90+2.33	28
		MC2-2					1.23+2.00	38
		MC2-3					1.55+1.68	48
	쇄석	MC3-1	0.5	1	2.7	-	0.78+2.00	28
		MC3-2					1.06+1.72	38
		MC3-3					1.33+1.45	48
	쇄석	MC4-1	0.5	1	2.4	-	0.68+1.76	28
		MC4-2					0.93+1.51	38
		MC4-3					1.17+1.27	48

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 모형콘크리트의 공시체는 배합표의 변수 및 시험항목에 따라 각각 32개 및 192개를 제작하였으며 공시체의 크기는 원형콘크리트에서는 φ15×30cm, 15×15×55cm 크기로 제작하였고 모형콘크리트는 ACI 444에서 추천한 φ5×10cm, 4

×4×16cm의 크기로 제작하였다.⁽⁴⁾

3.3.2 시험방법

압축강도, 휨강도, 할렬인장강도는 UTM (100t)으로 측정하였고 포아슨비 및 변형률을 측정하기 위해 길이가 60mm인 스트레인게이지를 부착하였다. 압축실험으로부터 응력-변형률 곡선을 구한 후 응력을 정규화(Normalization, σ/σ_{max})하여 원형과 모형콘크리트의 응력-변형률 관계를 구하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 원형콘크리트(prototype concrete)

강자갈과 쇄석을 사용한 원형콘크리트에서 재령 28일의 시험결과를 Table 4에 나타내었다. Table에 나타난 바와 같이 쇄석을 사용한 공시체의 강도특성 및 탄성계수가 강자갈에 비해 전반적으로 우수하였으나, 할렬인장강도/압축강도는 강자갈이 10%로 크며, 최대압축응력에서 변형률은 유사하게 나타났다. 또한 강자갈과 쇄석의 포아슨비는 0.198 및 0.174로 일반적인 콘크리트 포아슨비 0.15~0.20의 범위를 만족하고 있다.

Table 5 Test results of specimens in prototype concrete

구분	압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	휨강도 (kg/cm ²)	인장강도/ 압축강도	탄성계수 (kg/cm ²)	포아 슨비
강자갈	314.79	33.21	45.55	0.105	266134	0.198
쇄석	372.07	35.03	52.69	0.094	289336	0.174

4.2 모형콘크리트(model concrete)

4.2.1 압축강도

강자갈과 쇄석으로 골재의 종류를 달리한 재령 7일의 공시체에 대한 모형콘크리트의 시험결과를 Table 5에 나타내었다. Table에서 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 할렬인장강도

강자갈의 할렬인장강도는 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

휨강도의 경우 일정한 S/a에 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 원형콘크리트의 인장강도/압축강도는 5~13%의 값을 갖는다.⁽⁶⁾ Table 5에 나타난 바와같이 본 시험의 모형콘크리트는 인장강도/압축강도비가 쇄석의 경우 6~13%, 강자갈에서는 6.6~11.0%로 나타나 일반적인 콘크리트 수준 이내였다. 특히 쇄석의 MC4-1, MC2-2와 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

Fig. 1~ 4 및 Fig. 5~ 8은 각각 강자갈과 쇄석을 사용한 시편에서 구한 원형과 모형콘크리트의 정규화시킨 응력-변형률 곡선이다. 그림에서 보는 바와 같이 강자갈을 사용한 시편의 경우 전반적으로 모형콘크리트의 탄성계수가 원형콘크리트

트보다 큰 값을 가지나, C/a가 40%일 때 S/a 37%, 47%는 변형률이 크게 나타났다. 이는 C/a가 일정한 비율까지는 모형콘크리트가 원형콘크리트보다 대체로 큰 강성과 작은 변형률을 보이거나 시멘트량이 상당히 증가된 배합에서는 S/a를 변화시킴으로써 작은 강성과 큰 변형률을 갖는 배합을 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 또 동일한 C/a에서는 S/a가 감소함에 따라 탄성계수가 감소되는 결과를 보였다.

한편 채석의 경우는 응력-변형률 거동이 C/a 변화에 따라서 원형콘크리트의 응력-변형률 곡선에 빠르게 근접하여 유사한 형태를 보였다. 특히 최대압축응력의 40%까지 원형콘크리트의 응력-변형률 곡선과 일치하는 모형콘크리트는 C/a 31%에서 S/a가 28, 38%인 경우와 C/a 36%에서 S/a가 38%일 때 나타났다. 또한 C/a 41%에서 S/a가 48%인 시험편의 경우 원형콘크리트와 거의 일치하는 응력-변형률 관계를 얻을 수 있었다.

Table 6 Test results of specimens in model concrete

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	235967
MR1-2	244.58	29.80	49.95	0.122	234585
MR1-3	332.32	34.90		0.105	273444
MR2-1	279.24	26.88		0.096	250657
MR2-2	297.58	29.22	46.67	0.098	258757
MR2-3	304.20	31.85		0.105	261619
MR3-1	294.02	23.31		0.079	257205
MR3-2	321.83	28.41	45.94	0.088	269094
MR3-3	363.32	31.78		0.088	285914
MR4-1	315.42	18.98		0.060	266401
MR4-2	326.62	25.99	48.85	0.080	271089
MR4-3	328.26	28.92		0.088	271769
MC1-1	286.03	31.46		0.110	253686
MC1-2	286.37	24.45	53.6	0.085	253837
MC1-3	311.97	33.69		0.108	264940
MC2-1	310.40	28.96		0.093	264102
MC2-2	318.22	28.24	52.5	0.089	267580
MC2-3	344.72	25.48		0.074	278499
MC3-1	339.24	25.73		0.076	276277
MC3-2	349.55	28.25	53.23	0.081	280443
MC3-3	350.83	25.86		0.074	280956
MC4-1	345.14	28.19		0.082	278669
MC4-2	347.17	25.92	51.41	0.075	279487
MC4-3	374.52	24.81		0.066	290287

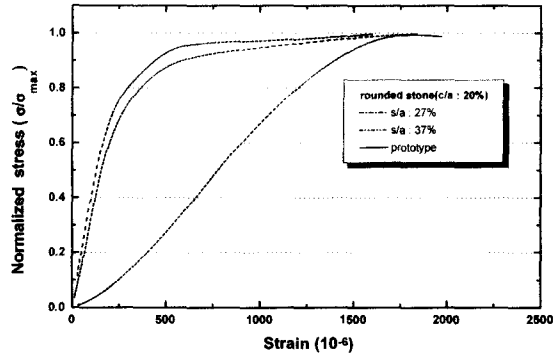


Fig. 4 Stress-strain relationship between prototype and model concrete using rounded stone (c/a=20%)

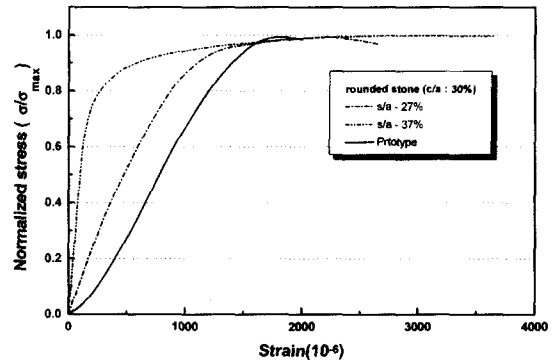


Fig. 5 Stress-strain relationship between prototype and model concrete using rounded stone (c/a=30%)

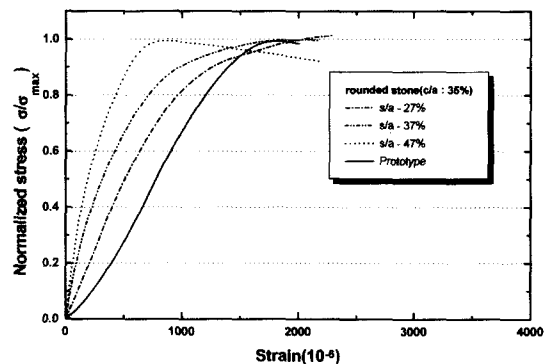


Fig. 3 Stress-strain relationship between prototype and model concrete using rounded stone (c/a=35%)

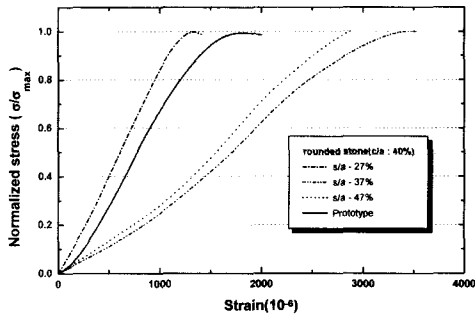


Fig. 4 Stress-strain relationship between prototype and model concrete using rounded stone ($c/a=40\%$)

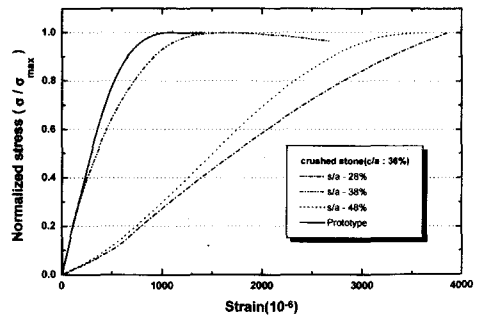


Fig. 7 Stress-strain relationship between prototype and model concrete using crushed stone ($c/a=36\%$)

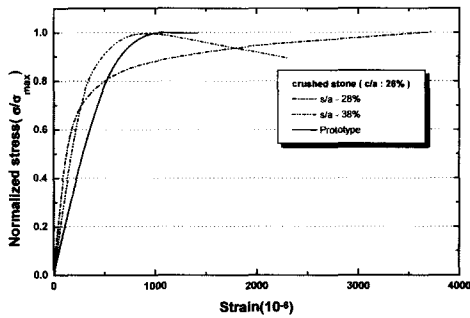


Fig. 5 Stress-strain relationship between prototype and model concrete using crushed stone ($c/a=26\%$)

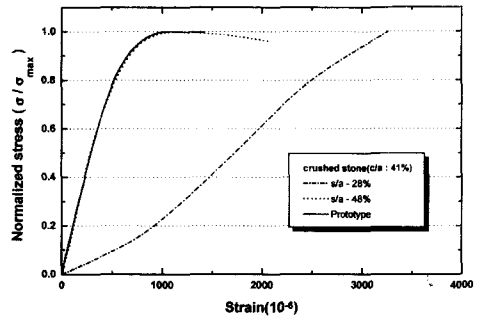


Fig. 8 Stress-strain relationship between prototype and model concrete using crushed stone ($c/a=41\%$)

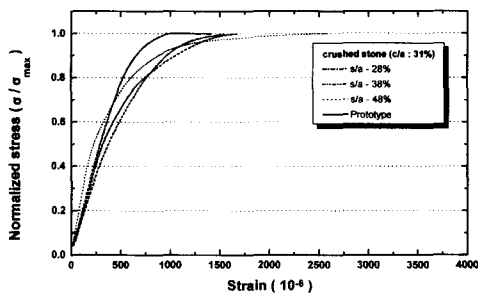


Fig. 6 Stress-strain relationship between prototype and model concrete using crushed stone ($c/a=31\%$)

5. 결론

본 연구는 실험실내에서 모형시험체를 이용하여 실제 시멘트콘크리트 포장체의 거동연구를 위하여 모형시험체의 제작에 가장 중요한 재료적 상사성을 만족하는 모형콘크리트 배합을 구하고, 이를 모형시험체의 제작에 적용하고자 한 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 쇠석을 사용한 모형콘크리트의 응력-변형률 곡선이 강자갈을 사용한 경우보다 비교적 원형콘크리트와 유사하게 나타나고 있다.

(2) 최대압축응력의 40%수준까지 원형콘크리트의 응력-변형률 곡선과 일치하는 모형콘크리트는 C/a 31%에서 S/a가 28% 및 38%인 경우와 C/a 36%에서 S/a가 38%로 채석을 사용한 배합에서 나타났다.

(3) 골재입도, C/a 및 S/a를 적절히 조절함으로써 원형콘크리트의 응력-변형률 곡선과 일치하는 모형콘크리트 배합을 구할 수 있다고 판단된다.

(4) 모형시험체 제작을 위한 모형콘크리트 배합비로 채석은 C/a 31%에서 워커빌리티가 가장 좋은 S/a 28%인 경우이고, 강자갈에서는 C/a 30%에서 S/a가 27%일 때 가장 적합한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 한국학술진흥재단 1997년도 지방대 육성 학술연구조성비 지원에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Sabnis, G. M., Harris, H. G., Structural Modeling an Experimental Techniques, Prentice Hall, 1983, pp. 106~107, 133~134.
2. ACI Ad Hoc Committee on Structural Models, Models, Models for Concrete Structures, ACI Special Publication No. 24, Detroit, Michigan, 1970.
3. White, R. N., Modeling Techniques 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, pp. 133~142.
5. ACI Committee 444, State-of-the-Art Report, "Models of Reinforced Concrete Members, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1977.
6. M. Reza Sarami., Analytical Expression for Uniaxial Tensile Strength of Concrete in terms of Uniaxial Compressive Strength, Transportation Research Record 1335.

요 약

본 연구는 시멘트콘크리트 포장체의 거동연구를 위한 축소모형실험에 앞서 모형시험체의 제작에 가장 중요한 변수인 재료적 상사성을 확보하기 위한 방법론을 기술하였다. 현재 고속도로의 콘크리트 포장 배합설계기준과 동일한 배합비로 제작한 시험편과 골재의 최대치수를 축소하고 W/C, C/a, S/a, 골재종류를 변수로 하여 총 224개의 원형공시체를 제작하여 그들의 응력-변형률 거동을 분석함으로써 재료적 상사성을 만족하는 모형배합비를 도출하였다. 모형콘크리트 배합비로 채석은 C/a 31%에서 S/a 28%, 강자갈은 C/a 30%일 때 S/a 27%가 가장 적합한 것으로 나타났다. 이는 실내 모형실험에 의해 콘크리트포장체의 거동연구를 하고자 할 때 모형실험에 대한 신뢰성을 향상시키고, 향후 연구의 기초자료를 제공할 수 있으리라 판단된다.

(접수일자 : 1998. 9. 30)