한국도로학회 논문집
제11권제3호 2009년 9월
pp. 51 ~ 60

시멘트콘크리트 포장의 고강도 고내구성을 위한 기초 연구 :

Part II 최적배합콘크리트의 강도 및 내구특성 분석

Fundamental Study on High Strength and High Durability Cement Concrete Pavement:

Part II Strength and Durability Evaluations

윤 경 구* 박 철 우** 홍 승 호***
Yun, Kyong-Ku Park, Cheol woo Hong, Seung-Ho

Abstract

This study investigates the fresh state characteristics, strength, chloride ion penetration resistance and freeze-thaw resistance of the suggested high strength-high durability cement concrete pavement. The required workability and air content could be achieved by using an appropriate admixtures. However its dosage should be carefully determined through field trial batches. Compressive strength increased with the increased cement content and, in particular, high cement volume concrete continuously developed strength up to 90 days. No clear relationship, however, existed between flexural strength and cement content. Chloride penetration resistance seemed as a function of curing age rather than the cement content. Freeze-thaw resistance test was conducted using two different coolants, tap water and 4% NaCl solution. When the tap water was used no severe damage was observed up to 300 cycles regardless the air content. Under 4% NaCl solution, specimens of 326kg/m^3 cement content showed severe damage with surface scaling. Based on the experimental investigations herein, it is highly recommended that the cement content be greater than 400kg/m^3 for strength-high durability cement concrete pavement structures.

Keywords : cement concrete pavement, high strength, high durability, resistance to chloride ion penetration, freeze-thaw resistance

요 지

본 연구에서는 고강도 고내구성 시멘트콘크리트 포장을 위하여 도출된 배합 콘크리트의 굳지않은 콘크리트 특성, 강도발현 특성, 염소이온의 투수특성 및 동결-융해에 대한 저항성 등의 역학적·내구적 특성을 분석하였다. 제시된 배합의 목표스럼프와 공기량은 적절한 혼화제의 사용으로 확보가 가능하나, 혼화제의 적정사용량은 충분한 현장배합실험을 통하여 구하여야 할 것이다. 단위시멘트량을 증가한 경우 일반적으로 강도가 증가하였으며 특히 재령 28일 이후의 강도가 지속적으로 증가하는 양상을 나타내었다. 휨강도는 그 특성상 단위시멘트량을 증가하더라도 뚜렷한 효과는 나타나지 않았다. 염소이온 침투저항성도 단위시멘트량보다는 재령에 따른 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다. 공기량에 가장 많은 영향을 받는 동결-융해 저항성은 각 실험변수에 대한 시험체를 공기량이 3% 이하 및 이상인 경우에 대하여 그리고 동결시 수돗물을 사용한 경우와 현장의 열악한 환경을 모사하기 위하여 4%의 NaCl 용액을 사용한 경우로 구분하여 실시하였다. 공기량에 상관없이 수돗물을 사용한 경우에는 동결-융해반복회수가 300회까지 상대동탄성계수나 표면의 손상이 거의 발생하지 않았다. 4%

* 정회원 · 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail : kkyun@kangwon.ac.kr)
** 정회원 · 강원대학교 건설공학부 토목공학전공(E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr)
*** 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원(E-mail : hsh373@ex.co.kr)

NaCl 용액을 사용한 경우에는 단위시멘트량이 현재의 한국도로공사의 표준배합인 경우 손상이 발생하였으며, 단위시멘트량이 동결-융해 저항성에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서, 동결-융해에 대한 저항성을 충분히 확보하는 고내구성의 시멘트콘크리트 포장을 위해서는 단위시멘트량을 현재의 수준보다 증가시키는 것이 유리한 것으로 판단되며, 실험결과로부터 이러한 요구성능을 발휘하기 위해서는 단위시멘트량을 400kg/m^3 이상으로 할 것을 권장한다.

핵심용어 : 시멘트콘크리트 포장, 고강도, 고내구성, 염소이온침투저항성, 동결융해저항성

1. 서 론

이 연구는 국내의 도로환경을 고려한 고성능 고강도 시멘트콘크리트 포장 개발을 위한 기초 연구로서 '시멘트콘크리트 포장의 고강도 고내구성을 위한 기초 연구: Part I 최적배합의 도출'에서 제시된 유럽형 고성능 콘크리트포장의 최적배합에 대하여 강도 및 내구특성을 분석하기 위하여 실험적 연구를 수행하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

제시된 최적배합은 고강도 고내구성의 시멘트콘크리트포장을 위한 유럽형의 단위시멘트량을 증가한 배합이며, 이를 다음의 표 1과 같이 단위시멘트량 및 잔골재율과 혼화제의 종류에 따라 분류하여 배합설계를 수행하였다.

표 1. 최적배합표를 바탕으로 한 배합설계

Mix	W/C	S/a	Unit content (kg/m^3)				
			W	C	F.A.	C.A.	AEA
C-326*	0.45	0.38	151	326	678	1161	Product of J. 0.3%
							Product of S. 0.007%
C-365	0.40	0.34	150	375	596	1204	Product of J. 0.3%
							Product of S. 0.013%
C-400			160	400	579	1171	Product of J. 0.35%
							Product of S. 0.015%
C-425			170	425	563	1139	Product of J. 0.35%
							Product of S. 0.015%

* 2005년 한국도로공사 설계기준 배합표 포장 배합 [2]

각 실험변수에 대하여 경화전의 특성인 공기량 및 슬럼프를 분석하였으며, 재령 3, 28 및 90일의 압축강도를 고찰하였다. 또한, 제설제로 인한 손상에 대한 저항성을 분석하기 위하여 염소이온침투 저항성을 분석하였으며, 추가적으로 콘크리트 내부의 공기량에 따른 동결-융해에 대한 저항성을 고찰하였다.

본 연구에 사용된 시멘트 및 골재 등의 재료는 문헌에 사용된 재료들과 동일한 것이며, 콘크리트용 화학혼화제로 국내 J사 제품인 표준형 AE감수제와 국내 S사 제품인 공기연행제를 사용하였으며, 표 2는 각각 혼화제의 물리적인 특성을 나타낸 것이다. 문헌[1]에서 제시된 배합에서는 S사의 공기연행제를 사용할 경우 감수제를 함께 사용할 것을 권장하였으나 감수제의 사용없이도 목표공기량과 슬럼프를 확보할 수 있어 감수제의 사용은 배제하였다(윤경구 등, 2009).

표 2. 사용된 혼화제의 물리적 특성

Admixtures	Description	Color	S.G.	Solid content	Acidity
Product of J.	AE감수제 (나프탈렌 변성고중합 폴리머)	암갈색 액체	1.15± 0.05	30± 5.0	8.5± 1.5
Product of S.	AE제	엷은 암갈색	1.05± 0.05		

2.1 실험방법

2.1.1 공기량 및 슬럼프

공기량은 콘크리트 배합의 경화전후의 성질에 많은 영향을 미치는 중요한 요소로서, 표 1의 각 실험변수에 대한 콘크리트의 배합에 대하여 공기량 시험은 KS F 2421(굳지않은 콘크리트의 압력법에 의한

공기 함유량 시험방법)에 준하여 수행하였다. 또한 슬럼프 시험은 KS F 2402(콘크리트의 슬럼프 시험 방법)에 준하여 수행하였다.

2.1.2 압축강도 및 휨강도

재령에 따른 압축강도 및 휨강도의 변화를 고찰하였으며, 각 실험변수에 대하여 재령 3일, 28일 그리고 장기강도에 해당하는 90일에 실험을 실시하였다. 시험체의 강도실험은 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)의 규정에 의하여 ø150×300㎜의 압축강도 측정용 원주형 공시체와 150×150×550㎜의 휨강도 측정용 각주형 공시체를 제작하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)와 KS F 2408(콘크리트의 휨 강도 시험 방법)에 의거하여 각 실험재령일에 수행하였다.

2.1.3 염소이온 침투 저항성

외부 환경에서 콘크리트 내부로 침투하는 이온, 수분, 이산화탄소 등의 물질은 여러 화학 반응을 통해 철근의 부식이나 콘크리트 체적의 변화를 초래하고, 이에 따라 콘크리트의 내구성에 중대한 영향을 미친다. 따라서 이러한 물질들의 침투에 대한 콘크리트의 저항성을 정확하게 평가하는 것은 콘트리트의 장기 공용성을 나타내는 지표로서 매우 중요한 역할을 한다(stock,1988)(Huang,1993). 외부로부터의 침투 저항성은 물/시멘트(W/C)비, 재령, 미세간극구조, 골재의 종류 및 양생 등의 여러 가지 이유에 의하여 영향을 받게 되는데, 이를 평가하기 위한 방법으로는

그림 1. 염소이온 침투 저항성 실험 전경

투수 시험, 기체 투과 시험 등이 있지만, 모두 오랜 시간과 특수한 장비를 필요로 하는 시험 방법이므로 빠른 시간 내에 콘크리트의 투수 저항성을 평가하기 위한 방법으로 KS F 2711(전기 전도도에 의한 염소이온의 침투 시험 방법)을 활용하였다. 그림 1은 실험을 수행하는 장면을 보여주고 있다.

ø10×20㎝원주형 몰드로 제작한 콘크리트 공시체를 20±1℃의 수중에서 14일 양생한 후 50㎜ 두께로 절단한 시편의 측면에 콘크리트 보호용 도장재료를 도포한 후 그림 1과 같이 확산셀을 구성하여 실험을 실시하였다. 확산셀에 들어가는 전해질 용액은 셀의 (-)전극에 3.0%의 NaCl용액을 (+)전극에는 0.3M의 NaOH용액을 채웠으며, 매 30분마다 전압을 6시간까지 측정하여 기록하였다. 측정한 전압 값을 전류 값으로 환산한 후 회로를 통과한 총 전하량을 식 1을 이용하여 산정하였다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \cdots + 2I_{330} + I_{360}) \qquad (1)$$

여기서, Q=회로를 통과한 전하량(Coulombs), I_n=전압이 가해진 후 n분이 경과하였을 때의 전류(Amperes)이다. 결과의 해석은 시간(sec)에 따른 전류(amperes)의 변화를 측정하여 도시한다. 이를 활용하여 위의 식과 같이 총 6시간 동안의 전하량(Coulombs)을 결정하며 총 통과 전하량은 시험 기간 동안의 콘크리트의 전기전도도를 나타내는 값이다.

측정된 통과 전하량을 표 3에 나타낸 기준과 비교하여 외부로 부터의 염소이온 침투 저항성을 평가할 수 있다.

표 3. 통과 전하량에 따른 염소이온 침투성

Total Charge Passed (Coulomb)	Chloride Ion Penetrability
> 4,000	높 음
2,000 ~ 4,000	보 통
1,000 ~ 2,000	낮 음
100 ~ 1,000	매우 낮음
< 100	무시할만함

2.1.4 동결-융해저항성

동결-융해에 대한 저항 시험은 KS F 2456(급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험 방법)에 따라 공기 중 급속 동결 수중 급속융해의 방법으로 실시하였으며, 이때 시험체 중심의 온도를 동결 시 -18℃, 융해 시 4℃로 상승시키는 것을 1 사이클 4시간으로 하여 반복 수행하였다. 각 시험체는 300사이클을 원칙으로 수행하나 시험체의 상대 동탄성계수가 60% 이하로 되는 경우 시험을 종료하는 것으로 하였다. 본 연구에서는 고유진동수에 의한 측정법을 이용하여 동탄성계수를 측정하였으며 그림 2는 본 연구에 사용된 시험체와 동탄성계수 측정 전경을 보여주고 있다.

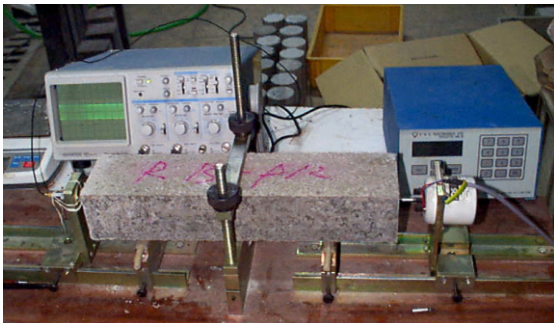


그림 2. 동탄성계수 측정 전경

3. 실험 결과 및 토의

3.1 굳기 전의 콘크리트 특성

각 실험변수에 대하여 콘크리트가 함유한 공기량에 따른 내구성을 평가하기 위하여 혼화제의 혼입률 및 그 종류를 달리하여 실험을 수행하였으며, 이에 따른 콘크리트의 공기량 및 슬럼프 측정결과는 표 4와 같다. 단위시멘트량이 425kg/m^{3}인 경우(C-425), S사 혼화제 혼입률 0.015%의 경우 공기량이 4.8%로 가장 높게 나타났으며, 단위시멘트량 400kg/m^{3}의 경우, J사 혼화제 혼입률 0.35%의 경우 공기량이 1.8%로 가장 낮게 측정되었다. J사의 공기연행제를 사용한 경우, 대부분 예상보다 낮은 수준의 공기량을 나타내었으며, S사 제품을 사용한 경우에는 상대적으로 높게 측정되었다. 슬럼프 값은 본 실험의 기준 목표인 40mm 이하를 모두 만족하는 것으로 나타났다. 한편, 국내 대부분의 공기연행제가 감수제의 특성을 동시에 가지는 것으로 판단되며 이에 따라 적절한 워커빌리티와 목표공기량을 동시에 만족할 수 있도록 사용하고자하는 혼화제의 특성을 고려하여 현장에서 충분한 예비배합을 통하는 등의 주의를 기울여야 할 것이다. 특히 본 연구의 경우 J사의 혼화제를 사용한 경우에는 목표 슬럼프는 확보하였지만 공기량의 경우 예상하는 값에 미치지 못하여 강도 및 염소이온 침투저항성 실험에는 J사의 혼화제를 사용한 경우를 제외하였다.

표 4. 공기량 및 슬럼프 측정 결과

Mix	Measured Air Content (%)		Slump (mm)	AEA used
C-326	2.2	Air Cont. < 3%	0	Product of J. 0.3%
	3.5	Air Cont. > 3%	0	Product of S. 0.007%
C-375	1.9	Air Cont. < 3%	0	Product of J. 0.3%
	4.7	Air Cont. > 3%	10	Product of S. 0.013%
C-400	1.8	Air Cont. < 3%	10	Product of J. 0.35%
	4.6	Air Cont. > 3%	20	Product of S. 0.015%
C-425	2.4	Air Cont. < 3%	0	Product of J. 0.35%
	4.8	Air Cont. > 3%	25	Product of S. 0.015%

3.2 강도발현 특성

재령에 따라 측정된 압축강도 및 휨강도는 표 5와 같으며 그림 3은 압축강도를 비교하고 있다. 초기재령의 경우(3일) 단위시멘트량이 400kg/m^{3}인 경우 26.3MPa로 가장 높게 나타났으며, 장기강도(90일)는 단위시멘트량 375kg/m^{3}의 경우가 44.9MPa로 가장 높게 나타났다. 재령 28일에서 단위시멘트량을 증가시킨 배합의 경우 모두 현재의 표준인 C-326 보다 큰 값을 나타내었지만 추가되는 시멘트량에 따른 강도 증가가 크게 비례하지 않는 것으로 나타났다. 하지만,

단위시멘트량을 증가시킨 경우의 시험체에서는 기준이 되는 C-326시험체에 비하여 재령 28일 이후의 강도의 증가가 지속적으로 발현되는 것을 알 수 있다.

표 5. 재령별 압축강도 및 휨강도 측정 결과

Mix	Compressive strength (MPa)			Flexural strength (MPa)			AEA
	3day	28day	90day	3day	28day	90day	
C-326	19.7	34.6	38.6	3.6	5.0	4.9	S사 0.007%
C-375	22.8	37.6	44.9	3.7	4.9	4.6	S사 0.013%
C-400	26.3	34.1	43.6	3.5	5.0	5.1	S사 0.015%
C-425	23.1	36.6	44.1	3.8	4.8	5.5	S사 0.015%

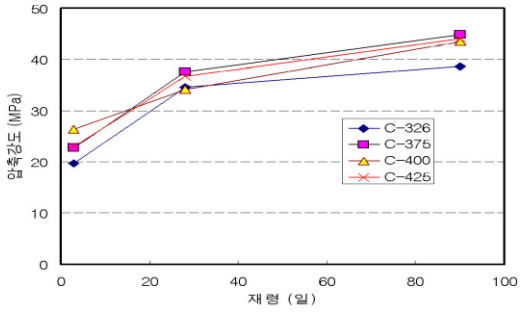


그림 3. 재령별 압축강도 측정 결과(S사 혼화제 사용)

재령에 따라 측정된 휨강도는 그림 4에서 비교하고 있다. 재령 28일의 휨강도 측정결과 모든 경우 콘크리트 포장의 기준강도인 4.5MPa를 만족하는 것으로 나타났으며 단위시멘트량이 425kg/m^{3}의 경우를 제외하고 모든 경우 그 강도 증진 효과가 미비하게 나타났으며, C-375배합의 경우 휨강도가 재령 증진에 따라 감소하는 것으로 나타났는데 이는 실험오차에 기인한 것으로 판단된다.

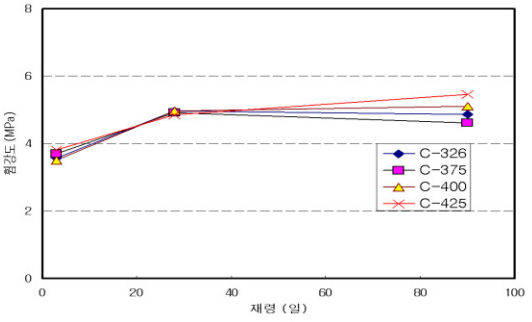


그림 4. 재령별 휨강도 측정 결과(S사 혼화제 사용)

3.3 염소이온 침투 저항성 측정 결과

유럽형 단위시멘트량이 높은 고강도 고내구성 콘크리트 포장 최적배합 개발을 위하여 기초 내구성을 평가하고자 염소이온 침투 저항성을 재령 28일과 90일에 선별적으로 측정하였으며 그 결과는 표 6 및 그림 5와 같다.

공기량이 3%를 넘는 모든 변수의 경우 재령이 증가할수록 염소이온 침투저항성이 감소하는 것으로 나타났으며 재령 28일의 경우에는 C-326배합을 제외하고는 단위시멘트량에 따른 저항성의 증가가 비례하게 나타났으며 전체적으로 표 3에 따르면 보통의 수준으로 나타났다. 단위시멘트량이 425kg/m^{3}인 경우 염소이온 침투 저항성이 가장 낮게 나타났으며, 재령 90일의 경우에는 표 3의 기준에 따르면 낮음의 수준을 나타내며 단위시멘트량 보다는 재령에 따라 저항성의 증가가 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

표 6. 염소이온 침투 저항성 측정 결과

Mix	Total Charge Passed (Coulomb)	
	28day	90day
C-326	4575.9	2215.3
C-375	5420.7	1538.4
C-400	3670.1	1398.3
C-425	3167.9	1898.8

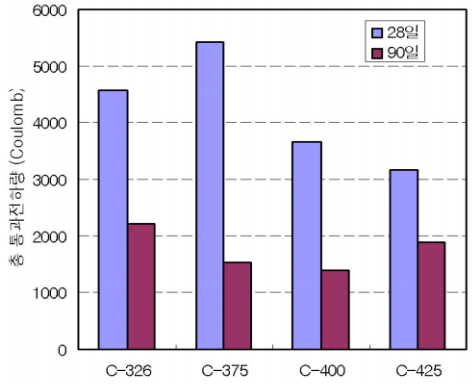


그림 5. 재령별 단위 시멘트량에 따른 염소이온 침투 저항성 (S사 혼화제 사용)

3.4 시멘트 함량 및 공기량 변화에 따른 동결-융해 실험

동절기 제설 및 결빙 방지를 위해 적용되는 제설제는 콘크리트 구조물의 장기공용성에 불리한 영향을 미치게 된다. 외국 사례에서 제설제가 매우 확실하게 동상 작용에 의한 표면 스케일링을 증가시킨다고 보고되었다(pigeon, 1995). 특히, 동결-융해에의 반복작용에 의한 가장 심한 손상은 염화나트륨, 염화칼슘, urea 등의 농도가 3~4%인 경우로 나타난 바 있다(10th International Symposium on Concrete Roads, 2006). 따라서 본 연구에서는 동결융해 실험은 일반적인 수돗물을 사용한 경우와 염화나트륨(NaCl) 4%인 용액을 사용한 경우로 구분하여 수행하였다. 또한 동결-융해의 저항성은 콘크리트 내부의 공기량이 절대적인 영향을 미치게 되므로 이를 분석하기 위하여 공기량 3% 이하인 경우(J사 혼화제 사용)와 공기량 3% 이상(S사 혼화제)인 경우에 대하여 각각 실험을 수행하였다.

3.4.1 공기량 3% 이하 시험체의 동결-융해 시험 결과

공기량 3% 이하이고 동결-융해 실험 시 수돗물을 사용한 경우의 실험결과는 그림 6에 나타내었다. 모든 실험변수에 대하여 동결-융해 반복회수가 증가함에 따른 상대동탄성 계수 또는 동결-융해에 대한 내구성 지수의 변화가 거의 없으며, 최종 300회에서 측정한 값도 모두 90% 이상의 아주 양호한 값을 나타내었다. 가장 낮은 값이 C-375 시험편이 반복회수 300회에서 91.3%로 나타났다. 그림 7은 공기량 3% 이하이고 동결-융해 저항성 실험 시 NaCl 4% 용액을 사용한 경우에 측정된 상대동탄성 계수의 측정결과이다. 모든 시험체에 대하여 한계값인 60%에 근접하지는 않았지만, 단위시멘트량에 따른 손상의 변화는 상당히 뚜렷한 것으로 나타났다. 일반적인 수돗물에서는 동결-융해저항성에 변화가 거의 없는 것으로 나타났지만, 적정수준의 공기량을 확보하지 못하는 경우(3% 이하) NaCl 용액을 사용하여 열악한 조건을 모사한 경우에는 동결-융해에 대한 저항성이 시멘트함량에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. C-326시험체의 경우에는 반복회수 300회의 경우 78.9%까지 저하되는 것으로 나타났다. 하지만 단위시멘트량이 425kg/m^{3}인 경우에는 300회의 경우에도 98%수준을 유지하는 것으로 나타났다. 이로서, 현장의 조건이나 시공상의 문제로 인하여 적정수준의 공기량을 확보하지 못하는 경우에 현재의 포장배합은 동결-융해에 의한 손상을 받을 수 있는 것으로 판단된다. 이러한 문제점은 유럽형의 단위시멘트량이 높은 배합으로 대치함으로써 위험을 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다.

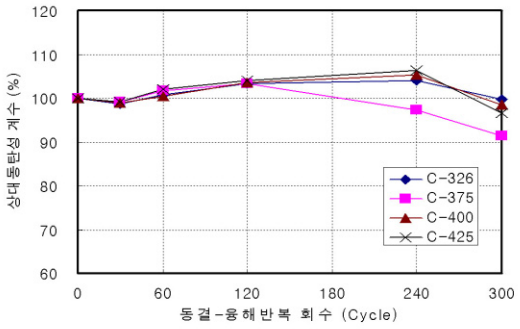


그림 6. 공기량 3% 이하 (물) 동결 - 용해 실험 결과

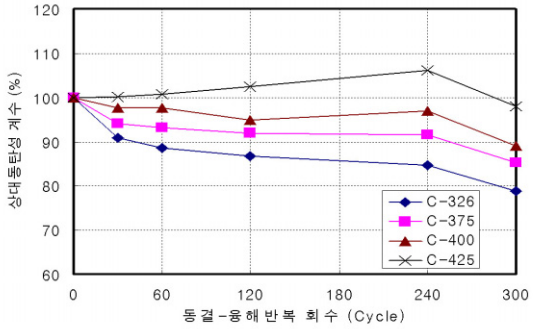
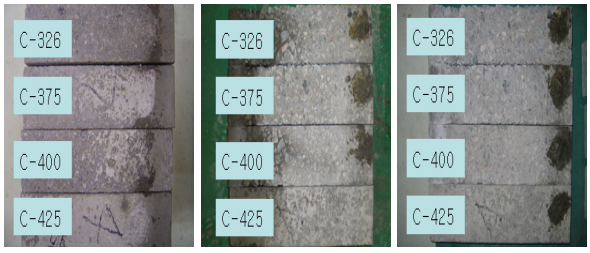


그림 7. 공기량 3% 이하 (NaCl 4% 용액) 동결-용해 실험 결과

다음의 그림 8과 그림 9는 공기량이 3%이하이고 동결-융해 실험시 각각 수돗물과 4%의 NaCl용액을 사용한 경우에 대하여 동결-융해 반복회수(30회, 120회, 300회)가 증가함에 따른 시험체의 외관

(a) 30 Cycle (b) 120 Cycle (c) 300 Cycle

그림 8. 공기량 3% 이하 시험체의 각 사이클 별 시험체 형상 (수돗물 사용)



(a) 30 Cycle (b) 120 Cycle (c) 300 Cycle

그림 9. 공기량 3% 이하 시험체의 각 사이클 별 시험체 형상 (NaCl 4% 용액 사용)

상태의 변화를 나타내고 있다. 그림 8에서와 같이, 공기량 3% 이하이고 수돗물이 적용된 시험체에서는 반복회수가 300회로 증가할 때까지 시험체의 표면에 육안으로 식별가능한 손상이 발생하지 않았다. 공기량이 3% 이하이고 4% NaCl 용액이 적용된 시험체에서는 동결-융해 반복회수가 30회 정도에서부터 표면의 탈리(scaling)현상이 발생하였으며, 이는 단위시멘트량이 적을수록 심하게 나타났다. 반복회수 120회 및 300회에서는 표면에서 굵은골재가 노출될 정도의 탈리현상이 발생하는 것을 알 수 있었으며, 특히 C-326시험체의 경우 국부적으로 심각한 수준의 손상이 발생하였다. 콘크리트 포장의 동결-융해 저항성의 증대를 위해서는 최우선적으로 적정공기의 연행이 보장되어야한다. 하지만, 연구의 실험결과를 기준으로 할 때 여러 가지 발생가능한 조건을 고려하여, 즉, 공기연행제를 사용하였지만 예상보다 낮은 수준의 공기량을 포함하는 경우 등에 대하여는 제설제를 많이 사용하는 열악한 노출환경에서 콘크리트 포장의 배합에 있어 단위시멘트량을 현재의 326kg/m^{3}을 상회하는 수준으로 증가시킬 것을 권장한다.

3.4.2 공기량 3% 이상 동결-융해 시험결과

공기량 3% 이상(평균 4% 이상)이고 동결-융해 실험 시 수돗물을 사용한 경우의 실험결과는 그림 10에 나타내었다. 그림 6의 공기량이 3% 이하인 경우와 마찬가지로 반복회수 300회까지 손상의 발생은 거의 없었다. 그림 11에서는 4% NaCl 용액을 사용한 경우의 실험결과를 나타내고 있는데 공기량이 적정수준 이상으로 확보된 경우에서는 열악한 환경의 동결-융해에 노출된 콘크리트 시험체에서도 손상의 수준이 상대적으로 미미한 것으로 나타났다. 본 실험에서는 단위시멘트량이 375kg/m^{3}에 해당하는 시험체는 실험수행상의 오류로 인하여 실험에서 제외되었지만, C-400 및 C-425 시험체의 경우와 같이 단

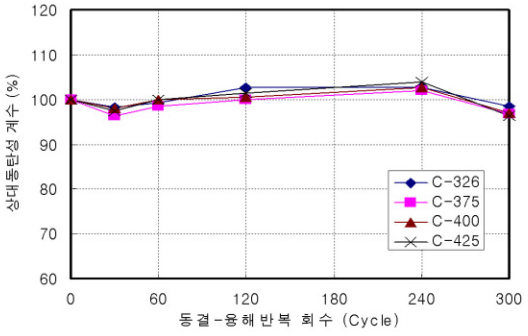


그림 10. 공기량 3% 이상 (물) 동결-융해 시험결과

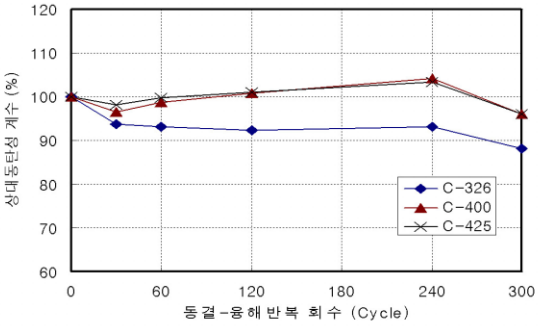
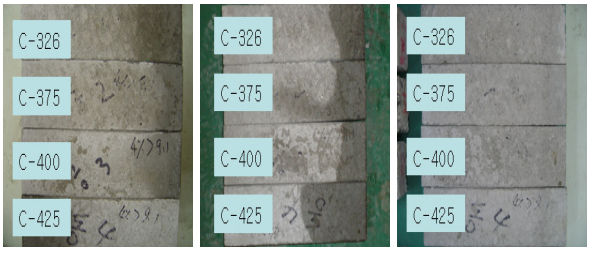


그림 11. 공기량 3% 이상 (NaCl 4% 용액) 동결-융해 시험결과

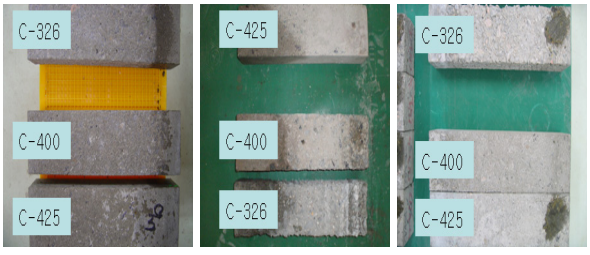
위시멘트량을 증가한 경우의 시험체에서는 반복회수 300회에서도 상대동탄성 계수가 96% 이상의 아주 양호한 결과를 나타내었다. 하지만 기존의 단위시멘트량을 사용한 시험체의 경우는 88% 수준으로 상대적으로 낮은 값을 나타내었다.

다음의 그림 12와 그림 13은 공기량이 3% 이상(평균 4% 이상)이고 동결-융해 실험시 각각 수돗물과 4%의 NaCl용액을 사용한 경우에 대하여 동결-융해 반복회수(30회, 120회, 300회)가 증가함에 따른 시험체의 외관상태의 변화를 나타내고 있다. 적정수준 이상의 공기가 연행된 시험체를 수돗물을 이용하여 실험한 경우에는 반복회수가 300회에 이르기까지 시험체 표면에 특이한 변화는 관찰되지 않았다. 하지만, 4% NaCl 용액을 사용한 경우에는 적정수준의 연행공기가 포함되었음에도 불구하고, 동결-융해 반복회수 30회 이상에서부터 경미한 탈리 현상이 발생하기 시작하였다. 이는 공기량이 3% 이하인 경우와 마찬가지로 단위시멘트량이 적을수록 손상의 정도는 증가하는 것으로 관찰되었다. 반복회수가 300회인 경우, C-326 시험체의 표면에는 굵은골재가 노출되는 수준의 심각한 손상이 발생하였다. 하지만 그림 13의 (c)에서와 같이 C-400과 C-425 시험체의 경우, 그 손상은 상대적으로 아주 경미하였다.



(a) 30 Cycle (b) 120 Cycle (c) 300 Cycle

그림 12. 공기량 3% 이상 시험체의 각 사이클 별 시험체 형상 (수돗물 사용)



(a) 30 Cycle (b) 120 Cycle (c) 300 Cycle

그림 13. 공기량 3% 이상 시험체의 각 사이클 별 시험체 형상 (NaCl 4% 용액 사용)

이러한 일련의 동결-융해에 대한 저항성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다. 공기연행제를 사용하였지만 설계상의 수준으로 연행공기를 확보하지 못한 경우, 동결-융해 저항성 실험에서 일반적인 수돗물을 사용한 경우에는 현재의 콘크리프 포장 배합에서도 손상은 크게 발생하지 않았지만, 실제 현장의 경우를 모사한 4% NaCl용액을 사용한 경우에는 반복회수가 증가함에 따라 심각한 수준의 손상이 발생하였다. 하지만 이러한 손상은 단위시멘트량을 증가시킴으로써 최소화할 수 있는 것으로 나타났다. 공기연행제를 사용하여 일정수준 이상의 연행공기를 확보한 경우에도 4% NaCl용액을 사용한 경우에는 현재의 배합 시험체의 표면 탈리 등의 손상이 발생하였다. 하지만, 단위시멘트량을 400kg/m^3 이상으로 증가한 경우에는 표면의 탈리 현상이 거의 발생하지 않았다. 따라서, 동결-융해에 대한 저항성을 충분히 확보하는 고내구성의 시멘트콘크리트 포장을 위해서는 단위시멘트량을 현재의 수준보다 증가시킬 것이 요구되는 것으로 판단된다. 실험결과로부터 이러한 요구성능을 발휘하기 위해서는 단위시멘트량을 400kg/m^3 이상으로 할 것을 권장한다.

4. 결 론

본 연구에서는 고강도 고내구성을 위하여 도출된 배합의 콘크리트의 굳지않은 콘크리트 특성, 강도발현 특성, 염소이온의 투수특성 및 동결-융해에 대한 저항성 등의 역학적·내구적 특성을 분석하였다. 현재 한국도로공사의 기준배합에 대하여 상대적인 특성의 변화를 고찰하기 위하여

단위시멘트량을 375, 400 및 425kg/m^{3}으로 증가시킨 실험변수에 대하여 실험적 연구를 수행하였으며 결과에 따라 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 두 가지 종류의 공기연행제를 고려하였으며, 각 혼화제 종류의 특성에 따라 목표 슬럼프를 확보하는 범위 내에서 연행공기량의 값이 다르게 나타날 수 있으므로 현장에서 사용할 경우에는 적절한 시험배합을 통하여 기대하는 목표값을 얻을 수 있도록 하여야 할 것이다.

(2) 단위시멘트량을 증가하였지만 물-시멘트비를 0.4로 고정하였으며, 재령에 상관없이 단위시멘트량을 증가한 시험체들이 일반적으로 높은 압축강도를 나타내었다. 또한 단위시멘트량이 증가할수록 장기재령의 압축강도가 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 재령 90일의 장기강도에서는 모든 실험변수에 있어서 단위시멘트를 증가한 시험체들은 약 44MPa의 높은 강도를 나타내었다.

(3) 재령 28일의 휨강도 측정결과 모든 경우 콘크리트 포장의 기준강도인 4.5MPa를 만족하는 것으로 나타났다. 하지만, 단위시멘트량과 휨강도의 증가는 상대적으로 상관성이 약한 것으로 나타났다.

(4) 일반적으로 단위시멘트량이 증가할수록 그리고 재령이 증가할수록 염소이온 침투 저항성이 증가하는 것으로 나타났다. 재령 90일의 경우, 기존의 기준배합 시험체에서는 염소이온침투저항성이 2,000Coulomb을 약간 상회하는 수준이었으나 단위시메트량을 증가한 시험체에서는 2,000Coulomb 이하의 '낮음' 으로 판정되었다.

(5) 동결-융해 저항성은 각 실험변수에 대한 시험체를 공기량이 3% 이하인 경우와 3%이상인 경우(평균 4% 이상)로 구분하여 실험을 수행하였으며, 시험체의 동결시 사용한 냉매는 일반적인 동결-융해의 경우를 모사한 수돗물과 열악한 환경을 모사한 4% NaCl 용액을 사용하였다. 수돗물을 사용한 동결-융해 저항성 실험에서는 공기량에 상관없이 갇힌공기에 추가적으로 적정수준의 연행공기가 포함될 경우, 반복회수가 300회가 될 때까지 식별가능한 손상이 발생하지 않았으며, 상대동탄성 계수의 변화도 거의 없었다. 따라서 단위시멘트량에 따른 변화도 거의 없는 것으로 나타났다.

(6) 열악한 환경을 모사하기 위하여 4% NaCl 용액을 사용한 경우에는, 공기량이 3% 이하인 경우 시험체의 상대동탄성 계수는 반복회수가 증가함에 따라 다소 감소하였으며, 단위시멘트량이 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 공기량이 3% 이상(평균 4%)인 콘크리트 시편에서는 시멘트 함량이 증가할수록 동결-융해 저항성이 증가되고, 표면 탈리 현상이 감소하는 것을 알 수 있었다. 특히, 시멘트 함량이 가장 낮은 326kg/m^{3}인 시편에서는 동결-융해 반복횟수 300회에서 공기량 3% 이하인 경우, 상대동탄성계수가 78.1%, 공기량 3% 이상인 경우 88.2%로 나타났다. 하지만, 공기량이 3% 이상이고 단위시멘트량이 400kg/m^3 이상인 경우에는 그 손상이 아주 미미한 것으로 나타났다. 또한 시험체 표면의 손상도 마찬가지의 관계를 가지며 발생하였다. 반복회수가 300회인 경우 공기량이 3%이하 또는 단위시멘트량이 326kg/m^{3}인 경우 굵은 골재가 노출되는 등 그 손상이 심각한 수준으로 발생하였다.

(7) 동절기 동결-융해 현상이 빈번하게 발생하고, 강설 및 결빙 현상이 자주 발생하는 지역에서는 시멘트 함량과 공기량을 높게 유지하는 것이 동결-융해 현상에 의한 파손을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 이 연구의 실험결과에 기초하여 동결-융해에 대한 저항성을 충분히 확보하는 고내구성의 시멘트콘크리트 포장을 위해서는 단위시멘트량을 현재의 수준보다 증가시킬 것이 요구되는 것으로 판단되며, 실험결과로부터 이러한 요구성능을 발휘하기 위해서는 단위시멘

트량을 400kg/m^3 이상으로 할 것을 권장한다.

(8) 이 연구에서 제시하는 결론은 실내실험의 연구를 기초로 한 것으로, 건조수축에 대한 검증과 추후 현장적용을 통하여 제시된 배합에 대한 추가적인 거동 특성의 분석이 반드시 필요한 것으로 판단한다.

참고 문헌

윤경구, 박철우(2009), 시멘트콘크리트 포장의 고강도 고내구성을 위한 기초 연구 : Part I 최적배합에 관한 연구, 한국도로학회 논문집, 제11권제3호 pp. 41-49

한국도로공사(2005), 시멘트 콘크리트 설계 기준 배합표(개정)

Stock, A. F.(1988), *"Concrete Pavements,"* Elsevier Applied Science Publishers Ltd.

"The Design and Performance of Road Pavements," (1991), Second Edition, McGraw-Hill Book Company,

Huang, Y. H., "Pavement Analysis and Design," (1993), *Prentice Hall Englewood Cliffs,* New Jersey 0763237.

Pigeon, M. and Pleau, R.,(1995) *"Durability of Concrete in Old Climates,"* E & FN SPON

(2006)Proceedings CD, *10th International Symposium on Concrete Roads,* Sep. 18-22

접 수 일 : 2009. 3. 12
심 사 일 : 2009. 3. 18
심사완료일 : 2009. 4. 16