

통계적 방법에 의한 교면포장용 고성능 콘크리트의 최적배합비 도출

원종필^{1)*}·서정민¹⁾·이창수²⁾·박해균³⁾·이명섭³⁾

¹⁾ 건국대학교 사회환경시스템공학과 ²⁾ 서울시립대학교 토목공학과 ³⁾ 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부

(2005년 1월 31일 원고접수, 2005년 7월 11일 심사완료)

Optimum Mix Design of High-Performance Concrete for Bridge Deck Overlay by Statistical Method

Jong-Pil Won^{1)*}, Jung-Min Seo¹⁾, Chang-Soo Lee²⁾, Hae-Kyun Park³⁾, and Myeong-Sub Lee³⁾

¹⁾ Dept. of Civil & Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea

²⁾ Dept. of Civil Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

³⁾ Samsung Corporation Engineering & Construction Group, Civil Engineering Technology Team, Sungnam, 463-721, Korea

(Received January 31, 2005, Accepted July 11, 2005)

ABSTRACT

The objective of this study is to optimize the use of mineral admixtures (silica fume, fly ash, and blast furnace slag) in high-performance concrete for bridge deck overlay. For this purpose, high-performance concrete, incorporating mineral admixtures, was tested for compressive strength and permeability. The Box Behnken design was used to determine the optimum mix proportions of the mineral admixtures. The optimized mix compositions were then technically evaluated. Test results are compare with the performance specification for high performance concrete overlay on bridge deck. The optimum mix proportions were shown to possess acceptable properties. Also, it is possible to save the construction and materials costs result from a reduction in actual material cost and from the use of widely available truck mixers instead of mobile mixers.

Keywords : Box Behnken Design, bridge deck overlay, high performance concrete, latex modified concrete, optimum mix design

1. 서 론

교면포장은 매우 열악한 환경에 노출될 뿐만 아니라 일반 토공부에 비하여 가설되는 교량의 위치가 대부분 교통의 요지에 위치하게 되므로 보수에 따른 교통 차단이나 우회와 대단히 어렵다. 이 때문에 교면 포장은 건설 당시에 장기적인 공용성을 갖도록 설계하고 시공되어야 한다. 이러한 이유로 교량 교면포장은 토공부에서와는 다른 포장 개념이 도입되게 되었고 최근에는 교면포장에 대한 특수성을 고려한 교면포장 공법들에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 교면포장의 조건은 먼저 평탄성 확보가 용이하며, 방수성이 있고 교량 바닥판과의 충분한 접착강도를 만족시켜야 하며 내구성이 좋아야 한다. 아울러 동절기에는 융빙제로 인한 염화물침투로 교량에 심각한 영향을 주기 때문에 고밀도의 콘크리트를 요구한다. 이러한 이유로 미국에서는 1980년까지 교면에 많이 사용한 공법중의 하

나로 일반 콘크리트 포장이 아닌 라텍스 개질 콘크리트(Latex Modified Concrete : 이하 LMC)를 사용하고 있었다⁴⁾⁶⁾. 하지만 LMC 공법의 경우는 재료 및 시공 비용이 많이 들기 때문에 1980년대 이후 대체재로써 실리카폼을 일부 치환한 고성능 콘크리트를 검토하기 시작하였다⁶⁾. 1984년에서 1991년까지 미국 30개 주의 교통국에서는 실리카폼을 혼합한 고성능 콘크리트를 교량 교면에 적용하기 위한 논의를 하였으며 실리카폼의 양 및 물-바인더비를 폭넓게 적용한 여러 형태의 배합을 적용하였다⁶⁾. 현재 북미에서 사용되고 있는 교면포장용 콘크리트의 종류는 크게 3가지로 분류할 수 있는데 LMC(Latex 15%), 실리카폼 콘크리트(실리카폼 7%) 및 고성능 콘크리트 포장이 그것이다. 특히, 국내의 경우 LMC 교면포장 콘크리트가 널리 사용되고 북미의 경우 실리카폼 콘크리트가 널리 사용되고 있다. 그러나 최근들어 많은 지역에서 혼화재료들을 이용한 고성능 콘크리트의 사용 예가 점점 더 증가하고 있다¹⁾. 예를 들면 버지니아 교통국(VDOT)에서는 실리카폼과 고로슬래그 혹은 실리카폼과 플라이애쉬 그리고 실리카폼과 고로슬래그로 혼합한 교량의 구조물은 낮은

* Corresponding author

E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

투수성과 긴 수명을 가진다는 연구 결과를 발표하였다. 이렇듯 교량의 장기 공용 연수의 확보 및 초기비용 저감 측면에서 북미의 많은 주에서는 현재 고성능 콘크리트를 교면포장에 널리 사용하고 있다⁵⁶⁾.

현재 국내 교량의 교면포장공법에는 전통적으로 아스팔트 콘크리트 교면 포장이 널리 사용되고 있는데 근래에 LMC 교면포장공법의 적용이 늘어나고 있는 추세이다. LMC는 일반 콘크리트에 비해 유동성이 증가하며 시멘트 페이스트를 골재에 부착시켜 접착력이 증가하고 휨강도는 일반 콘크리트에 비해 매우 크다. 또한 라텍스가 콘크리트 내부의 미세공극을 충전시켜 일반콘크리트에 비해 LMC의 투수저항성은 매우 크다⁹⁾. 이러한 장점으로 인하여 교면포장에 LMC를 설계, 적용하는 사례가 많은데 단점으로는 모빌믹서와 같은 특수한 시공 장비의 사용 및 온도변화에 따른 Latex 재료의 품질변화에 따른 보관 및 적용에 있어 신중을 기하여야 하는 문제점을 가지고 있다⁵⁶⁾. 이에 본 연구에서는 구미에서 많이 시공되고 있는 고성능 콘크리트 교면포장을 국내 교면 포장에 적용하기 위하여 통계학의 최적화 방법을 사용하여 교면 포장용 고성능 콘크리트의 최적배합비를 도출하였다.

2. 교면 포장용 고성능 콘크리트의 배합설계 및 성능 기준

1990년대 이전 미국에서 교량 교면에 적용된 실리카폼의 혼입량은 일반적으로 60 kg/m^3 이상이며, 물-바인더비는 0.33의 범위이다⁵⁾. 1985년 이전에는 연행공기로 인한 동결융해 저항성의 규정은 없었으며 1985년 이후로는 교량에 쓰이는 모든 실리카폼을 혼합한 고성능 콘크리트는 공기연행제를 넣어 시공을 실시하였다. 아울러 1985년부터 교량에 쓰이는 실리카폼을 혼합한 고성능 콘크리트는 아래와 같이 3개의 범위를 만족해야 했다⁵⁾.

① 실리카폼 첨가량은 원하는 역학적 성능을 안전율과 함께 고려하여 결정해야 한다. 일반적으로 물과 결합재의 비는 0.40이며 실리카폼의 첨가량은 $40 \sim 44 \text{ kg/m}^3$ 의 범위가 되어야 한다.

② ①번과 유사한 범위지만 더욱더 신중한 안전율을 고려할시 실리카폼 사용량은 $44 \sim 60 \text{ kg/m}^3$ 의 범위이며 물-바인더비는 일반적으로 0.35를 사용한다.

③ 적절한 물-결합재에서 낮은 실리카폼의 첨가량은 일반적으로 내구성을 높이거나 실리카폼을 시멘트의 대체재로 사용하기 위해 적용된다. 이때 실리카폼의 첨가량은 $15 \sim 30 \text{ kg/m}^3$ 이며, 물-바인더비는 거의 0.45 정도이다.

①과 ②에서는 일반적으로 실리카폼을 추가하는 배합이었으며 ③에서는 실리카폼을 포틀랜드시멘트의 대체재로써 사용하는 배합이다. 스칸디나비아 반도의 국가와 캐나다, 미국 알라바마주에서는 ③번 배합을 선택해서 사용하였으며 많은 주의 교통국에서는 교면포장 콘크리트로서 ②번 배합을 많이 사용하였다. 그리고 다른 구조물의 적용 분야의 대부분은 ①번 기준에 맞추어 사용되고 있다. 콘크리트 교면포장의 굵은골재 최대 치수는 최소 교면포장 두께에 의해 결정되는데, ASTM C 33에서 No. 8 입도는 교면포장의 최소 두께인 30mm에 사용되는 가장 작은 굵은골재이다. 일반적으로 대부분의 교면포장 두께는 5mm를 사용한다.

동결융해 저항성이 요구될 때 공기량은 일반 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 조건에 따르며 가장 일반적인 슬럼프는 8cm에서 20cm이며 일반적으로 광범위한 슬럼프의 범위가 허용된다. 고성능 콘크리트의 믹싱에는 레미콘믹싱, 중앙믹싱, 그리고 모빌믹싱 등이 사용된다. 소정의 슬럼프와 연행공기의 안정화는 포틀랜드시멘트 콘크리트와 유사하고 응결시간은 일반 콘크리트와 같거나 다소 길며 이때 응결 시간은 일반 콘크리트와 같은 영향(기온, 시멘트 타입, 배합의 형태와 혼합 등)을 받는다.

1980년대까지는 고강도의 개념으로 콘크리트를 생산하였지만 1990년대 이후로는 단순히 고강도 콘크리트가 아닌 각각의 구조물에 대하여 특별한 성능을 발휘할 수 있는 고성능 콘크리트를 생산하게 되었다. Table 1은 1990년대 이후 미국의 일부 주에 적용된 교면 포장용 고성능 콘크리트의 배합설계에 대해서 나타낸 표이다³⁾. 또한 고성능 콘크리트가 교면 포장용 콘크리트에 적용되면서, 교면포장용 콘크리트로 충분한 역할과 성능을 발휘할 수 있는 성능기준에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. 특히,

Table 1 Concrete mix designs for bridge decks used by state DOTs³⁾

State	Cement (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	Silica fume (kg/m ³)	W/(C+M)	28-days Comp. strength (MPa)	Permeability (coul.)	Air content (%)	Slump (in)
Colorado (Shing et al., 1999)	391	-	30	0.35	40	-	4-8	
Colorado	365-391	<36-39	-	<0.44	31	-	5-8	
Illinois (Detwiler, 1997)	374	-	41.5	0.31	48 (14day)	540	6-8	-
New York (Alampalli, 2000)	300	88	25	0.4			6.5	7.62
Washington (FHWA-RD-00-124)	391	44.5	-	0.39	27.6-36 (56day)	2800	6.0	-
Nebraska (Beacham, 1999)	445	44.5	-	0.31	55.2 (56day)	589 (56day)	6.0	-
Texas (Rall, 1999)	227-362	52-77	-	0.31-0.4	27.6	<2000	5-8	7.6-22.8
New Hampshire (Waszczuk et al., 1999)	360	-	27	0.383	41.4-50 (56day)	<1000 (56day)	6-9	7.6-13
Virginia (FHWA-RD-00-123)	332	83	-	0.45	34.5	2500	-	-

VDOT에서는 2004년 기존의 연구 결과와 주에서 건설한 교면포장의 성능을 기본으로하여 성능 기준을 제시하였다¹⁾. 2004년 VDOT에 개발 제시한 교면포장용 고성능 콘크리트의 성능기준을 살펴보면 공기량, 압축강도, 염소이온투과저항성, 그리고 부착강도를 성능 하한계(Lower quality limit: LQL) 와 성능 상한계(Upper quality limit: UQL)로

구분하여 제시하고 있다. 그 성능 값을 살펴보면 교면포장에 널리 사용되고 있는 콘크리트 종류에 따라 구분할 수 있는데 성능 기준을 정리해보면 Table 2와 같다.

3. 사용 재료

3.1 혼화재료

혼화재로서 실리카폼, 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말이 사용되었으며 물리·화학적 성질은 Tables 3, 4 및 5와 같다. 플라이애쉬는 태안화력발전소에서 유연탄의 연소 후 전기집진기로 포집되어 정제되어진 것으로 KS L 5405 규정을 만족하였다

3.2 시멘트

본 연구에서 사용된 시멘트는 H사의 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 물리·화학적인 특성은 Table 6과 같다.

3.3 골재

굵은골재로는 최대치수 13mm의 부순 골재가 사용되었으며, 잔골재로는 2.60의 강모래가 사용되었다. 본 연구에 사용된 골재의 물리적 특성은 Table 7과 같다.

Table 2 Performance specification of bridge overly concrete¹⁾

Type of concrete	Test method	Performance specification	
		LQL	UQL
LMC(15% Latex)	Air contents(%)	3	7
	Compressive strength (MPa, at 28days)	26.2	-
	Permeability (coulombs, at 28days)	-	1000
	Bond strength(MPa, at 28days)	1.0	-
Silica fume concrete(7% Silica fume)	Air contents(%)	4	8
	Compressive strength (MPa, at 28days)	36.5	-
	Permeability(coulombs, at 28days)	-	1000
	Bond strength(MPa, at 28days)	1.0	-
High performance concrete (Hydraulic cement concrete)	Air contents(%)	4	8
	Compressive strength (MPa, at 28days)	29.6	-
	Permeability (coulombs, at 28days)	-	1000
	Bond strength(MPa, at 28days)	1.0	-

Table 3 Physical and chemical properties of silica fume

Items Type	Specific gravity	L.O.I* (%)	Fineness (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)
SF	2.2	2.8	180,000 ~ 200,000	94.0	0.3	0.8	-	0.3	0.4	0.8	0.2

* Loss on ignition

Table 4 Physical and chemical properties of fly ash

Specific gravity		Fineness (cm ² /g)		Absorption		L.O.I* (%)	
2.14		3,400		0.13		3.28	
Chemical compositions(%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
58.12	23.56	7.69	2.59	1.12	0.31	1.42	1.05

Table 5 Physical and chemical properties of ground granulated blast-furnace slag

Specific gravity	Fineness (cm ² /g)	Percent flow (%)	Activity index (%)		
			7d	28d	91d
2.91	3500	87	128	115	106
Chemical compositions(%)					
MgO	SO ₃	SiO ₂	L.O.I*	Cl ⁻	
5.58	0.12	33.5	<0.05	0.003	

Table 6 Physical and chemical properties of cement

Physical properties	Fineness (cm ² /g)	Specific gravity	Stability (%)	Setting time		Compressive strength(MPa)		
				Initial (min)	Final (min)	3 days	7 days	28 days
	3,200	3.15	0.02	220	400	20	30	38
Chemical properties	L.O.I* (%)		MgO (%)		SO ₃ (%)			
	1.5		3.0		2.0			

4. 최적배합비 도출

교면포장에서 요구되는 시공성과 경제성 및 내구성능이 좋은 고성능 콘크리트를 생산하기 위하여 혼화재료(실리카폼, 플라이애쉬, 고로슬래그)의 치환을 통한 최적의 배합비를 도출하기 위하여 시험을 실시하였다. 최적배합비를 도출하기 위하여 통계학의 최적화 기법인 Box Behnken 설계 방법을 사용하였다^{9,10}.

영향인자 도출을 위해 실험실에서 실시한 기초 실험에서 도출된 결과로 실리카폼의 치환율 범위를 0%에서 6%로 두었고 플라이애쉬의 범위를 15%에서 30%로 두었으며 고로 슬래그의 범위를 20%에서 40%로 두어 Box Behnken 설계법에 의해 Table 8과 같이 15개의 실험 배합이 산출되었다. 목표 요소는 VDOT에서 제시한 고성능 콘크리트 교면 포장의 성능기준인 28일 재령에서 압축강도가 30 MPa 이상, 염소이온 투과 저항성이 1,000 coulombs 이하로 하였다.¹⁾ Table 2에서와 같이 교면 포장용 콘크리트의 성능기준은 LMC, 실리카폼 콘크리트, 고성능 콘크리트로 성능기준이 세분화되어 있으며, 교면포장에 적용하기 위해서는 Table 2에서 제시한 공기량, 압축강도, 염소이온투과저항성, 부착강도를 모두 만족하여야 한다. 그러나 본 연구의 경우 최적배합비를 결정하는 과정에서 변수를 감소시키고자 공기량과 부착강도는 제외하였다. 왜냐하면 공기량의 경우 AE제(공기연행제) 등을 사용하여 조절이 가능하기 때문에 최적 배합비 도출을 위한 변수에는 제외하고 최적 배합비 도출 후 성능 검토에 포

함시켜 AE제를 사용하여 성능 기준을 만족시키는 방법을 사용하고자하였기 때문이다. 또한 부착강도의 경우 실내 실험이 아닌 현장에서 타설 후 측정하는 현장시험결과로 기준을 제시하고 있고 부착강도 1MPa은 매우 작은 값으로 압축강도 30MPa 이상을 목표로 하고 있는 본 배합에서는 큰 영향이 없이 만족 할 수 있을 것이라 판단되어 제외하였다.

4.1 압축강도

교면 포장용 고성능 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405에 의하여 측정하였다. $\phi 100 \times 200$ mm의 공시체를 제작하여 재령 28일에 3개씩 2회 반복하여 실시하였다. 공시체는 $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 50%의 양생실에서 1일 양생 후 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 항온 조건에서 수중양생을 실시하였다.

4.2 염소이온투과시험

교면 포장용 고성능 콘크리트의 간접적인 투수성을 평가하기 위하여 ASTM C 1202-97에 준하여 시험을 실시하였다. $\phi 100 \times 200$ mm의 공시체를 제작하여 재령 28일에 2개씩 2회 반복하여 실시하였다. 시험체는 공시체의 가운데 부분을 50mm 두께로 절단하여 공시체 내부의 간헐공기를 제거하기위해 테시게이터 안에 넣고 진동펌프를 3시간동안 작동시킨 후 다시 공시체를 물로 포화시키기 위하여 테시게이터에 물을 넣어 1시간 동안 펌프를 작동시켰다. 그 후에 진공펌프의 작동을 중지시키고 공시체를 물속에서 완전히 포화시킨 상태로 18 ± 1 시간 동안 유지하였다. 위와 같이 투수실험을 위한 공시체 준비단계가 끝난 후 투수성을 실험하기 위하여 공시체를 A.V.Cell에 고정시킨다. A.V.Cell(Applied voltage cell)의 (+)전극에는 0.3N의 NaOH 공시체에 직류 60V를 공급하여 6시간 후 전류값을 측정하였다.

Table 7 Physical properties of fine and coarse aggregate

Aggregate	Specific gravity			Absorption (%)	F.M.
	Bulk	Bulk(SSD)	Apparent		
Fine aggregate	2.59	2.60	2.63	0.67	2.99
Coarse aggregate	2.80	2.65	2.83	0.35	6.92

Table 8 Mixture proportions (kg/m³)

Mix no.	W/B	S/a (%)	Binder	Water	Cement	Silica fume	Fly ash	Blast-furnace slag	Sand	Gravel
1	0.4	55	425	170	244.38	0(0%)	95.63(22.5%)	085(20%)	908	757
2					114.75	12.75(3%)	127.50(30%)	170(40%)		
3					159.38	0(0%)	95.63(22.5%)	170(40%)		
4					189.13	12.75(3%)	95.63(22.5%)	127.5(30%)		
5					263.50	12.75(3%)	63.75(15%)	85(20%)		
6					178.50	12.75(3%)	63.75(15%)	170(40%)		
7					199.75	12.75(3%)	127.50(30%)	85(20%)		
8					144.50	25.5(6%)	127.50(30%)	127.5(30%)		
9					208.25	25.5(6%)	63.75(15%)	127.5(30%)		
10					218.88	25.5(6%)	95.63(22.5%)	85(20%)		
11					133.88	25.5(6%)	95.63(22.5%)	170(40%)		
12					233.75	0(0%)	63.75(15%)	127.5(30%)		
13					189.13	12.75(3%)	95.63(22.5%)	127.5(30%)		
14					170.00	0(0%)	127.50(30%)	127.5(30%)		
15					189.13	12.75(3%)	95.63(22.5%)	127.5(30%)		

4.3 결과 분석

시험 결과에 대해 통계적 분석을 통하여 각 인자(실리카폼, 플라이애쉬, 고로슬래그)가 교면포장용 고성능 콘크리트에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 분산분석을 실시하였다. 일반적으로 압축강도나 투수성에 영향을 미치는 결합재에는 시멘트도 포함되어 있으나 시멘트의 양을 분석 결과에서 제외한 이유는 본 논문에서 최적배합비를 도출하는 데는 큰 문제가 없기 때문이다. 즉, 본 연구에서 얻고자 하는 최적배합비의 광물질혼화제는 시멘트의 중량을 치환하여 설계하였다. 따라서 각 광물질 혼화재의 영향을 분석하고 목표성능을 만족하는 최적 치환율을 결정하게 되면 시멘트의 양은 자동적으로 결정될 수 있기 때문이다. 분산분석결과는 다음과 같다.

4.3.1 압축강도

Fig. 1은 압축강도 시험 결과이다. 28일 재령에서의 압축강도를 통계적으로 분산분석을 실시하였으며 Table 9에 분산분석을 실시한 표를 나타냈다. 분산 분석 결과 실리카폼, 플라이애쉬는 통계적으로 95% 신뢰수준에서 압축강도에 유의한 영향을 미쳤다. 하지만 고로슬래그는 유의성이 없어 고로슬래그의 치환율은 압축강도에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 세가지 혼화재료가 압축강도에 미치는 상관관계를 Fig. 2에 나타냈는데 실리카폼 치

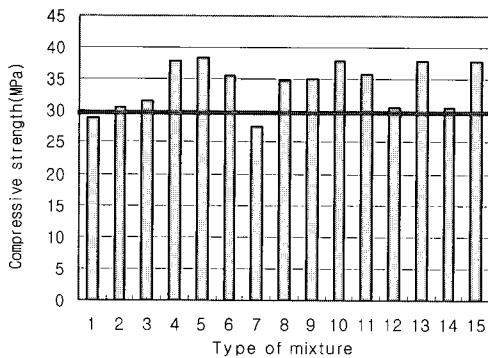


Fig. 1 Compressive strength results

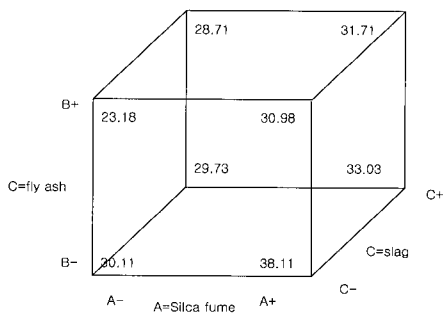


Fig. 2 Effect of silica fume, fly ash, and blast furnace slag for compressive strength

Table 9 ANOVA for compressive strength

Source	Sum of squares	DF	Mean square	F-value	P-value
A*	60.56	1	60.56	12.34	0.0098
B*	33.25	1	33.25	6.78	0.0353
C	0.061	1	0.061	0.012	0.9142
A×B	0.021	1	0.021	4.285E-0.03	0.9496
A×C	5.52	1	5.52	1.13	0.3240
B×C	8.47	1	8.47	1.73	0.2304
Error	34.35	7	4.91		

* : Statically significant at the 95 % level of confidence
A: Silica fume, B: Fly ash, C: Blast-furnace slag

환율이 높아질수록 압축강도의 발현이 커지는 것을 볼 수 있지만, 플라이애쉬와 고로슬래그의 치환율이 높아지면 강도 발현이 오히려 감소하는 것을 볼 수 있다. 실리카폼 유무에 따라 강도 발현 편차가 매우 커짐을 알 수가 있다.

4.3.2 염소이온투과 성능

Fig. 3은 염소이온투과 시험 결과를 나타내었으며, Fig. 4는 각 혼화재료 치환율에 대한 염소이온 투과성에 대한 영향을 나타낸 것이다. Table 10은 염소이온 투과시험에 대한 분산분석을 실시한 것이다. 분산분석 결과 염소이온 투과성에 있어 실리카폼, 플라이애쉬 및 고로슬래그는 통계적으로 95% 신뢰수준에 있어서 유의한 영향을 미쳤다. 실리카폼과 플라이애쉬 그리고 실리카폼과 고로슬래그 사이에는 95% 신뢰수준에서 교호작용이 발생하였다. 하지

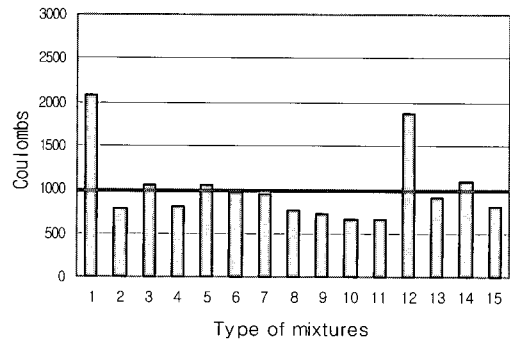


Fig. 3 Chloride permeability test results

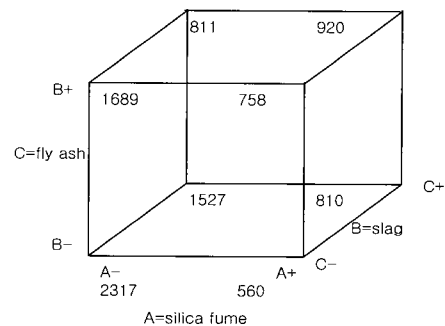


Fig. 4 Effect of silica fume, fly ash and blast furnace slag for chloride permeability

Table 10 ANOVA for chloride permeability

Source	Sum of squares	DF	Mean square	F-value	P-value
A*	1357128	1	1357128	85.03975	< 0.0001
B*	134421.1	1	134421.1	8.423036	0.0229
C*	197192	1	197192	12.35636	0.0098
A×B*	170156.3	1	170156.3	10.66225	0.0138
A×C*	270400	1	270400	16.94368	0.0045
B×C	1936	1	1936	0.121313	0.7379
Error	111711.3	7	15958.75		

* : Statically significant at the 95 % level of confidence
 A: Silica fume, B: Fly ash, C: Blast-furnace slag

만 고로슬래그와 플라이애쉬의 혼합은 영향을 미치지 못하였다. 이로 보아 실리카폼은 어떠한 혼화재와 혼합하여 사용하여도 염소이온투과성에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 1번과 12번 배합은 다른 배합에 비하여 염소이온투과저항성이 매우 높음을 알 수 있다. 이는 실리카폼이 없는 동시에 시멘트량이 다른 배합보다 상당히 크기 때문이다. 본 연구에서 통계적 분석결과 염소이온 투과저항성은 실리카폼이 가장 큰 영향을 미치지만 플라이애쉬와 고로슬래그에도 영향을 받고 있다. 다시 말하면 실리카폼이 첨가되지 않았고 다른 광물질혼화재의 양도 다른 배합보다 작기 때문에 이러한 결과가 나타났다. 또한 시멘트량이 많은 5번 및 10번 배합의 경우 염소이온 투과저항성에 가장 큰 영향을 미치는 실리카폼이 사용되었기 때문에 염소이온투과를 크게 감소시키는 효과를 얻을 수 있었다. 그리고 실리카폼이 없는 3번 및 16번 배합의 경우 상대적으로 시멘트량이 적고 혼화재의 양이 많기 때문에 1번 및 12배합보다는 우수한 투과저항성을 나타내었다. 이와 같은 결과는 기존 연구 결과에서 플라이애쉬, 고로슬래그 및 실리카폼의 치환율이 증가할수록 염소이온 투과저항성이 우수해지는 내용과 동일한 결과이다.

Fig. 4의 혼화재별 상호관계를 살펴보면 실리카폼, 플라이애쉬, 고로슬래그의 치환율이 높아질수록 염소이온 투과율이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 염소이온 투과율은 각 혼화재료가 물리·화학적 작용을 통하여 콘크리트를 밀실하게 만들기 때문이다. 실리카폼의 경우 일반 포틀랜드 시멘트의 분말도보다 높기 때문에 치환율이 높아질수록 고밀도의 콘크리트가 되기 때문이다. 그리고 플라이애쉬의 첨가는 포졸란 반응으로 생성되는 칼슘실리케이트 수화물이나 칼슘알루미네이트 수화물이 생성되어 경화체 내의 모세관공극을 막아 물의 이동을 억제하여 투수저항

Table 11 Optimum mixture proportions (unit : kg/m³)

Mix no.	W/B (%)	S/a (%)	G _{max} (mm)	Water	Binder				Sand	Gravel
					Cement	SF*	FA**	BFS***		
A	40	55	13	170	136	9	110	170	908	757
B					340	21	64			
C					280	21	-	123		

* Silica fume, ** Fly ash, *** Blast-furnace slag,

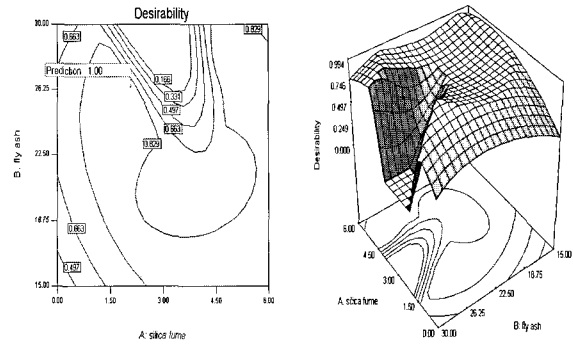


Fig. 5 Optimization of high-performance concrete for bridge deck overlay

이 증가하기 때문이다. 또한, 고로슬래그 미분말은 염화물에 존재하여 복염을 생성하는 광물인 C₃A와 수산화칼슘을 방출하는 광물인 C₃S, C₃A 등을 희석시켜 방출되는 수산화칼슘은 슬래그내의 실리케이트나 알루미네이트를 만나 모세관 공극에서 포졸란 반응을 발생시킴으로써 일부가 소비가 되므로 치밀한 구조조직을 형성하고 투수성을 감소시키기 때문이다.¹⁾

4.4 최적배합 결정

최적배합비의 결정은 통계학의 이론인 Box Behnken 설계방법을 사용하였으며 최적화 결정을 위한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서는 구속조건 내에서 가장 경제적인 지점을 선택하여 최적화되는 점을 2차원과 3차원으로 나타내었다. 최적배합비 도출은 고성능 콘크리트 교면포장의 성능기준과 경제성, 콘크리트 구조설계기준과 국내 레미콘공장의 여건 및 위치를 고려하여 하였다. 결정된 최적배합비는 3가지 종류의 광물질 혼화재를 사용하였을 때와 2가지 종류를 사용하였을 때를 구분하였다. 이는 국내의 레미콘공장 또는 현장 여건 및 위치를 고려한 것으로 일반적으로 두가지 혼화재의 사용은 가능하지만 그 이상의 혼화재를 사용하고자 하면 추가적인 설비를 요구하기 때문이다. Table 11은 도출된 최적배합비들을 나타낸다. Table 11에서 3가지 종류의 광물질혼화재를 사용한 배합은 콘크리트 구조설계기준의 제빙화해제에 노출된 콘크리트의 최대 혼화재 비율은 결합재 전 중량비로 최대값이 50% 이하를 넘어서는 안 된다는 규정을 만족하지 않고 있다. 그러나 다른 배합과 비교하여 경제성이 매우 우수하기 때문에 콘크리트 구조설계기준에는 만족하지 않지만

목표 성능을 만족하고 추후에 내구성 분석 등을 통하여 충분한 검증이 확보 된다면 경제성 확보 측면에서 우수하다고 판단되어 제시하였다.

5. 최적배합비에 따른 교면 포장용 고성능 콘크리트의 성능 평가

Box Behnken 설계법의 분석을 통해 도출된 최적배합비의 성능 평가를 실시하였다. Table 11은 결정된 최적배합비 및 비교 평가를 위한 LMC 배합을 나타냈다. 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프는 18~22cm, 공기량은 교면포장 콘크리트의 성능 기준인 4~8%로 고정하였다. 목표 슬럼프치 및 공기량을 맞추기 위해서 폴리카본산계 고성능감수제 및 AE제를 첨가하였다.

5.1 압축강도

교면포장용 고성능 콘크리트의 최적배합비에 따른 압축강도시험 결과는 Fig. 6과 같다. 시험 결과 재령이 증가함에 따라 모든 배합에서 강도가 증가하였다. 모든 배합에서 28일 재령은 성능 기준인 30MPa를 넘는 수치를 보여 주었다. 고성능 콘크리트에서는 No. B의 배합이 가장 큰 강도 발현을 보여주었다. 실리카폼의 대체율이 큰 배합일수록 강도 발현이 큰데 이는 실리카폼의 혼입률이 크면 재령이 증가할수록 초미립자인 실리카폼이 시멘트 입자 사이의 공극을 밀실하게 채워 시멘트페이스트를 치밀한 구조로 만들어 주는 일명 micro filler 효과 때문이다. 이와 같은 이유로 실리카폼을 단독으로 사용한 배합의 압축강도 성능 기준이 36.5MPa로 가장 큰 이유이기도 하다. 또한, LMC 배합의 경우도 성능 기준으로 본다면 만족하는 결과를 보여주고 있어 압축강도 측면에서는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 압축강도의 발현특성을 보면 큰 의미는 없지만 No. B > LMC > No. C > No. A 순서의 강도 크기를 보여주었다. 각각의 고성능 콘크리트 배합을 LMC와 비교하여 분산분석을 실시한 결과 No. B 및 C 배합은 LMC에 대해 95% 신뢰수준에서 유의한 영향이 없었다. 그러나 No. A 배합은 유의한 감소를 나타내었다.

5.2 휨강도

5.2.1 시험 방법

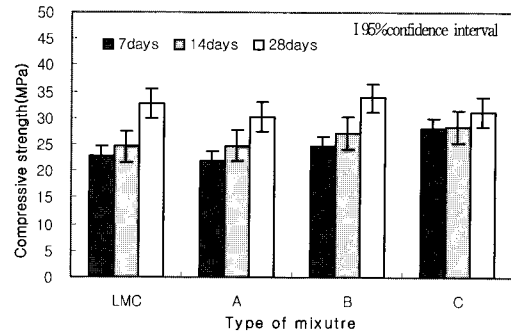


Fig. 6 Compressive strength of high performance concrete for bridge deck overlay

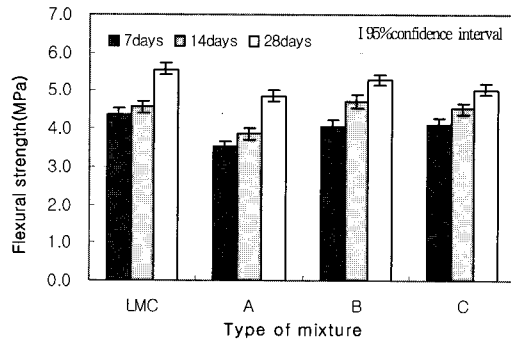


Fig. 7 Flexural strength of high performance concrete for bridge deck overlay

교면포장용 고성능 콘크리트의 휨강도를 평가하기 위해 JCI-SF4 (Method of tests for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete)에 의하여 실시하였다. 실험은 150×150×550 mm의 공시체를 재령 별로 2개씩 2회 반복하여 제작하였으며 24시간 후의 초기 양생 후 23±2℃의 항온 조건으로 수중 양생하여 실험을 실시하였다.

5.2.2 시험 결과

고성능 교면포장용 콘크리트 휨강도시험 결과는 Fig. 7과 같다. 시험결과 모든 배합에서 재령이 증가함에 따라 휨강도가 증가하는 경향을 보였다.

압축강도와 마찬가지로 강도의 크기에는 크게 차이가 난 것은 아니지만 미세한 차이를 본다면 LMC > No. B > No. C > No. A 순으로 휨강도 발현을 보였다. 휨강도가 가장 크게 나타난 배합은 LMC 배합이다. 콘크리트 내

Table 12 Mix proportions of optimum high performance concrete and LMC (kg/m³)

Type of concrete	W/B (%)	S/a (%)	G _{max} (mm)	Water	Binder					Sand	Gravel	SP*	AE**
					C	SF	FA	BFS	Latex				
LMC	37	55	13	88	400	-	-	-	120	951	793	-	-
A	40	55		170	136	9	110	170	-	908	757	4.1	0.024
B					340	21	64	-	-	-	4.1	0.028	
C					280	21	-	123	-	-	4.2	0.024	

* Superplasticizer, ** Air entraining admixture

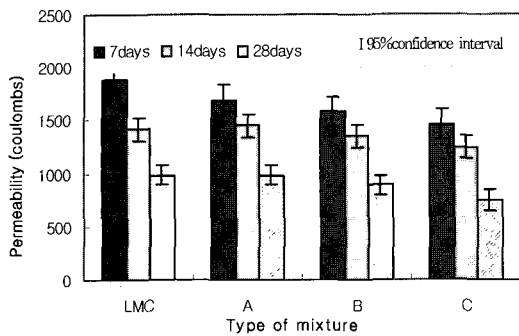


Fig. 8 Chloride permeability of high performance concrete for bridge deck overlay

에 라텍스의 혼입은 압축강도보다는 휨강도의 뛰어난 발현특성을 보이는 것으로 보고되고 있다⁸⁾. No. B, 그리고 C 배합 역시 5MPa 가 넘는 휨강도를 나타내었으며, No. A 배합이 다소 낮은 휨강도 특성을 나타내었다. 그러나 국내 콘크리트 포장의 설계기준강도가 4.5MPa이기 때문에 모든 배합에서 목표 강도를 만족하였기 때문에 큰 문제는 없을 것이라 판단된다.

5.3 염소이온투과시험

교면포장용 고성능 콘크리트 배합의 염소이온투과시험 결과는 Fig. 8과 같다. 시험결과 모든 배합에서 성능기준인 재령 28일에 1,000 coulombs 이하를 모두 만족하였다. 또한 ASTM에서 제시된 평가기준과 비교해서 모든 배합은 7일에서는 '낮음'을 28일에서는 '매우 낮음'의 투수성을 보여주었다. 자세하게 살펴보면 No. B > LMC > No. C > No. A 배합 순으로 낮은 투과성을 보여주었다. 그러나 큰 의미는 없으며, 모든 배합에서 매우 우수한 성능이 발휘되었다. No. A 배합이 다른 배합에 비해 다소 높은 투수성을 보여주었지만 큰 차이는 보이지는 않았다. LMC와 비교하여 분산분석을 실시한 결과 모든 배합에서 95% 신뢰수준에서 유의한 영향을 나타내지 않았다.

6. 결 론

본 연구는 경제성과 성능 및 현장조건과 콘크리트구조 설계기준을 고려하여 교면포장용 고성능 콘크리트의 최적 배합비를 결정하기 위하여 실시하였다. 특히 고성능 콘크리트의 성능기준인 압축강도, 공기량, 염소이온투과저항성을 만족할 수 있는 최적배합비를 도출하기 위하여 압축강도와 염소이온투과저항성을 변수로 통계적 분석을 실시하였다. 집약된 변수들의 영향을 고려한 최적배합비 도출을 위해 통계학의 최적화 기법인 Box Behnken 설계방법을 이용하였다. 교면 포장용 고성능 콘크리트의 최적배합비 결정을 위한 실험결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 최적배합비 도출을 위하여 통계학의 최적화 방법인 반응표면분석법의 Box Behnken 설계방법을 사용하였다. 시험 결과 실리카폼 2%, 플라이애쉬 26%, 고로슬래그 40% 및 실리카폼 5%, 플라이애쉬 15%와 실리카폼 5%, 고로슬래그 29%의 3가지 배합을 성능, 경제성, 현장조건 및 콘크리트 구조설계기준을 고려하여 최적배합비로 도출하였다.
- 2) 교면포장용 고성능 콘크리트의 압축 강도는 모든 배합에서 재령 28일 압축강도 30MPa를 상회하여 교면포장용 고성능 콘크리트의 성능기준인 30MPa 이상을 모두 모두 만족하였다. 따라서 결정된 최적배합은 압축강도 측면에서 교면포장용 콘크리트에 적합하다고 할 수 있다.
- 3) 휨시험 결과를 살펴보면 모든 배합이 재령이 증가함에 따라 휨강도 발현이 증가하는 경향을 보였다. 또한, 콘크리트 포장의 설계기준 휨강도인 4.5MPa를 모두 만족하여 적용시 휨강도에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.
- 4) 염소이온투과시험 결과 성능 기준인 재령 28일 1,000 coulombs를 모두 만족하는 결과를 보여주었다. 또한, 염소이온 투과저항성은 재령이 증가함에 따라 실리카폼의 대체율이 클수록 통과 전하량 값이 감소하는 경향을 보였다. 또한 대부분의 모든 배합에서 ASTM 기준의 매우 낮은 투과성을 보여주었다.
- 5) 본 연구에서 도출한 실리카폼 2%, 플라이애쉬 26%, 고로슬래그 40%를 사용한 배합은 콘크리트 구조설계기준의 제빙화학제에 노출된 콘크리트의 최대 혼화제 비율은 결합제 전 중량비로 최대값이 50% 이하를 넘어서는 안 된다는 규정을 만족하지 않고 있다. 그러나 다른 배합과 비교하여 경제성이 우수하여 성능 평가시험을 실시하였으며 교면포장용 콘크리트의 성능기준을 만족하는 결과를 획득하였다. 그러나 제빙화학제 등에 노출되었을 때 내구성에 대한 분석이 이루어지지 않아 추후에 내구성 분석 등의 연구를 실시하여 충분한 검증 확보가 필요하다.

참고문헌

1. Michael, M. and Sprinkel, P. E., *Performance specification for high performance concrete overlay on bridge*, VTRC 05-R2, Virginia Transportation Council, Charlottesville, Virginia, USA, 2004, pp.5~6.
2. Neville, A. M., *Properties of concrete*, Longman, England, 1996, pp.84~88.
3. Streeter, D. A., *Developing high-performance concrete mix for New York State bridge decks*, Transportation Research Record 1532, Transportation Research Board, Washington D.C., USA, 1988, pp.60~65.

4. Whiting, D. A., Detwiler, R. J., and Lagergren, E. S., Cracking tendency and drying shrinkage of silica fume concrete for bridge deck application, *ACI Material Journal*, Vol.97, No.1 2000, pp.71~77.
5. Luther, Mark D., Silica fume concrete in bridge, *Concrete international*, ACI, Vol.15, No.4, 1993, pp.29~33.
6. Luther, Mark D., *Silica fume concrete in bridges in the United States*, Transportation Research Record 1204, Transportation Research Board, Washington D.C., USA, 1988, pp.11~20.
7. Simon, M. J., *Concrete mixture optimization using statistical method*, FHWA-RD-03-060, Federal Highway Administration, McLean, Virginia, USA, 2003, pp.1~168.
8. Myers, Raymond H. and Montgomery, Douglas C., *Response surface methodology*, John Wiley & Sons Inc., New York, USA, 2000, pp.343~350.
9. Ohama, Y., Principal of latex modification and some typical properties of LMC, *ACI Material Journal*, Vol.84 No.6, 1987, pp.511~518.

요 약

본 연구는 혼화재료(실리카폼, 플라이애쉬, 고로슬래그)를 사용하여 교면 포장에 적용할 고성능 콘크리트의 최적배합비를 도출하기 위하여 실시되었다. 최적배합비를 도출하기 위하여 실리카폼, 플라이애쉬, 고로슬래그의 세가지 혼화재료를 고려하여 통계학의 최적화 기법인 Box Behnken 설계 방법을 사용하였다. 압축강도와 염소이온투과저항성 시험을 실시하였으며 시험 결과를 기초로 최적의 배합비를 도출하였다. 도출된 최적배합은 기술적으로 분석하였으며 시험 결과는 교면포장을 위한 고성능 콘크리트 성능 기준과 비교하였다. 최적배합은 만족할 만한 성능을 보여주었다. 또한 최적배합으로 도출된 고성능 교면포장 콘크리트는 재료의 가격뿐만 아니라 모벌믹서를 사용하지 않고 일반 믹서를 사용하기 때문에 시공비용도 감소시킬 수 있다.

핵심용어 : 고성능 콘크리트, 라텍스개질 콘크리트, 교면포장, 최적배합설계, Box Behnken 설계