고성능 콘크리트의 교량 바닥판 적용을 위한 실험적 연구

A Experimental Study on the High Performance Concrete for Bridge Decks

서진원* 이지영** 정해문* 구본성* 신도철***

Suh, Jin Won Rhee, Ji Young Cheong, Hai Moon Ku, Bon Sung Shin, Do Chul

ABSTRACT

To develop more durable concrete deck, performance characteristic test of HPC(High Performance Concrete) mixtures was carried out. The parameters used in this project were ; the mineral admixture details were 4 types such as ordinary portland cement(OPC), 20% fly ash(FA), 20% fly ash and 4% silica fume(FS), and 40% ground granulated blast-furnace slag(BS). Their design compressive strengths were 27MPa and 35MPa respectively. The results showed the compressive strength of concrete did not much affect the durability of concrete. HPC with blast-furnace slag(BS) showed the good durability but was prone to crack. HPC with fly ash(FA) or with fly ash and silica fume(FS) had the good durability and crack resistance.

1. 서론

교량 바닥판은 공용기간동안 차량하중 및 다양한 환경조건(동결융해, 우수 및 융빙제)에 직접적으로 노출되어 있는 부재이다. 이로 인해, 교량 바닥판은 다른 주요부재에 비해서 다양한 결함 및 손상이 자주 발생하여, 고속도로상의 문제 교량은 대부분 바닥판에 결함을 지니고 있다. 따라서, 바닥판의 내구성 증진은 교량의 수명연장으로 이어지는 가장 직접적인 대책이라고 할 수 있다. 이러한 이유로 외국의 경우는 콘크리트 바닥판을 지속가능 콘크리트, 즉, 고성능 콘크리트(HPC : High Performance Concrete)로 시공하는 사례가 늘어나고 있는 추세이다. 특히 덧씌우기 포장이 없는 콘크리트 일체식 바닥판의 경우, 염화물 침투에 의한 상부철근의 부식으로 박락, 박리 등의 손상이 발생되는 경우가 지배적이므로, 요구되는 가장 중요한 성능은 고내구성이라 할 수 있다.

그러므로, 고속도로 교량의 콘크리트 바닥판에 적용할 수 있는 고성능 콘크리트의 배합비를 도출하고자, 혼화재를 포함한 다양한 배합조건에 대하여 굳지 않은 콘크리트 성능 및 경화 후 내구성능을 비교 평가하였다.

2. 배합설계

현행 고속도로 교량의 콘크리트 바닥판에 적용되는 배합비 기준을 근거로, 고성능 콘크리트 배합을 위한 혼화재별 적정 치환율을 얻기 위해서, 기존의 적용실적 및 연구자료를 분석한 결과, 혼화재별로 최적의 성능을 발휘할 수 있는 혼입량이 일정한 범위 내에서 결정되고 있는 것으로 나타났다.[1] 또한, 교량 바닥판의 내구성 저하에 가장 주된 요인 중의 하나가 균열이기 때문에, 이를 최소화할 수 있는 혼화재별 치환률을 표 1과 같이 결정하였다. 실험변수는 보통 콘크리트(OPC)를 기준으로 플라이애시(FA), 플라이애시+실리카퓸(FS), 고로슬래그미분말(BS)를 혼입한 계열 등 4가지의 경우를 고려하였으며, 각 계열당 27MPa, 35MPa의 두 가지 강도를 변수로 하여 총 8종의 배합에 대해 내구성을 평가하였다.

본 연구에서는 경화 전 콘크리트와 경화 후 콘크리트의 내구성능을 평가하기 위해서 표 2에서와 같이 11가지 항목에 대해서 실험을 실시하여 분석하는 것으로 하였다.

* 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구개발실 책임연구원

** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구개발실 전임연구원

*** 정회원, 한국건설품질시험원 건재연구소 이사

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도

결합재 사용조건에 따른 콘크리트 강도발현 특성은 시멘트 단독 사용조건(OPC 27, 35)에 비해 혼화재로 플라이애시와 고로슬래그미분말을 사용하는 조건이 초기 3,7일 강도발현은 낮지만 28일, 56일 장기로 진행함에 따라 강도증진율이 높게 나타나고 있다. 28일 강도 기준으로는 시멘트 중량의 일부를 혼화재로 치환하여 사용하는 조건이 장기강도에서는 더 높게 나타났다. 결합재 종류에 따라서는 고로슬래그미분말을 40%로 혼합사용하는 조건이 강도가 가장 높게 나타났으며, 특히 장기강도 증진율이 높은 것으로 나타났다. 1종 시멘트에 플라이애시를 20% 단독 혼합하는 조건에 비해 포졸란 작용이 우수한 실리카퓸 4%를 함께 사용하는 조건이 다소 양호한 경향을 보여주고 있다.

3.2 콘크리트 길이변화

강도 규격에 따라서 콘크리트 건조수축에 의한 길이변화는 단위 시멘트 함량에 영향을 주로 많이 받으며, 전체 단위 시멘트 사용량(결합재 함량)이 많은 35MPa 조건에서 전체적인 건조수축값이 27MPa 조건에 비해 약 23% 정도 큰 것으로 나타났다. 결합재 사용조건에 따라서는 시멘트 단독 사용조건에 비해 플라이애시(FA)를 혼합 사용하는 조건이 건조수축량이 약 10% 정도 적은 것으로 나타났다. 고로슬래그미분말(BS)을 혼합하는 조건도 동일한 배합조건에서 상대적으로 단위 시멘트 사용량의 저감으로 인해 건조수축량이 시멘트 단독 사용하는 조건에 비해 동등 이하 수준으로 나타났으나 장기재령으로 갈수록 건조수축량이 증가하여 마지막 12주에는 일반콘크리트(OPC)의 길이변화율보다 더 높은 증가양상을 보였다.

따라서, 슬래브와 같이 건조수축이 많이 일어나는 부위에서 건조수축에 의한 균열저감을 위해서는 단위시멘트 사용량의 저감(또는 강도규격 조정)이나 시멘트 일부를 혼화재로 대체하여 사용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

3.3 동결융해저항성

강도수준에 따른 동결융해 저항성은 27MPa 규격에 비해 고강도인 35MPa 규격이 다소 양호한 것으로 나타났지만, 그 증진효과는 전체적으로 2~6% 수준으로 작게 나타나고 있다. 즉, 콘크리트의 동결융해 저항성은 고강도화나 단위 시멘트 사용량의 증가 등에 의한 영향보다는 콘크리트 중의 연행공기량의 적정수준 확보(약 4~6%)에 의해 주로 좌우되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 고로슬래그미분말(BS)을 제외한 혼화재 사용조건이 시멘트 단독 사용조건에 비해 동결융해저항성이 전반적으로 유사한 것으로 나타났다.

3.4 염소이온 침투저항성

강도수준에 따라서는 35MPa 고강도 조건이 낮은 물/시멘트비, 높은 결합재 사용량 등의 영향으로 27MPa 규격의 83% 수준으로 염소이온침투저항성이 더 양호한 것으로 나타났다. 결합재 사용조건에 따라서는 시멘트를 단독으로 사용하는 조건에 비해 혼화재를 사용하는 것이 양호한 것으로 나타났으며, 특히 플라이애시를 단독으로 혼합사용하는 조건(FA)에 비해 실리카퓸을 함께 혼합 사용하는 조건(FS)이 염소이온침투저항성능에 있어서 시멘트 단독 사용조건(OPC)에 비해 약 54% 정도로 크게 향상되는 것으로 나타났다. 고로슬래그미분말을 혼합하는 조건(BS)도 염소이온침투저항성능이 약 47% 정도로 향상되는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 염소이온침투저항성능 향상을 위해서는 콘크리트 강도의 고강도화나 단위 시멘트 사용량을 증가시키는 방향보다는, 혼화재로 고로슬래그미분말 또는 플라이애시와 실리카퓸을 혼합 사용하는 조건(BS, FS)에서 효과가 큰 것으로 나타났으며, 혼화재를 사용하는 조건은 강도 수준을 높여도 염소이온투과저항성능에 미치는 효과가 크지 않은 것으로 나타났다.

3.5 염분이온 침투깊이

염소이온에 대한 침투저항성능을 3.4절의 RCPT와는 별도로 KS F 4930에 따라 수행하였다. 실험결과, 강도 규격에 따라서는 35MPa의 고강도 조건이 시멘트 단독 사용조건에서 염분 침투깊이가 감소하는 경향을 보여 주었으며, 전체적으로는 27MPa 규격에 비해 염분침투깊이가 86% 수준으로 나타났다. 염분침투 깊이는 혼화재를 사용하는 경우 그 차이가 뚜렷하게 나타나는데, 플라이애시(FA) 혼합조건은 보통콘크리트(OPC)의 약 87%, 플라이애시와 실리카퓸혼합조건(FS)는 66%, 고로슬래그미분말(BS) 혼합조건은 약 57% 수준으로 나타났다. RCPT 시험의 결과와 유사하게, 콘크리트 내부로 침투하는 염소이온을 억제하기 위해서는 혼화재 사용이 콘크리트 사용 규격의 고강도화보다는 유효하다는 것을 보여주고 있으며, 첨가재 조건에서는 고로슬래그미분말 40%(BS) > 플라이애시 20%와 실리카퓸 4%(FS) > 플라이애시 20%(FA) 순으로 나타났다.

3.6 박리저항성

염화칼슘용액을 상면의 다이크에 넣고 50회 동결-융해를 반복한 후, 상부표면에 대한 육안관찰결과를 ASTM C 672의 기준

에 따라 평가하였다. 실험결과, 결합재량을 증가시켜 강도를 증진시키는 경우에, 박리저항성은 유사하거나 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 단순히 강도를 증진시키는 것은 박리저항성 향상에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다. 결합재로 실리카퓸+플라이애시(FS) 또는 고로슬래그미분말(BS)을 혼합 사용한 경우가 시멘트만을 사용한 경우에 비해서 박리 저항성이 양호해지는 것으로 나타났다.

3.7 균열저항성

콘크리트의 건조수축에 의한 균열특성을 평가하기 위하여 O-ring 실험을 실시하였다. 본 실험은 내경과 외경을 갖는 도우넛 형태의 강제틀의 도우넛 내부에 콘크리트를 타설한 후, 실온에 방치하여 최초의 균열을 관측하는 것으로 AASHTO Designation PP34-99에 따라 실험을 수행하였다. 재령 21일 경과한 27MPa 규격 중 고로슬래그미분말을 사용하는 조건(BS)을 제외하고는 콘크리트 균열이 발생하지 않았다. BS 조건에서는 상부표면에 0.08mm 정도의 헤어크랙이 10일 경과 후에 나타났으며, 발생된 균열에 대해 더 이상의 진행이나 폭의 변화는 나타나지 않았다. 이러한 이유는, 고로슬래그미분말의 분말도가 4000cm^2/g 이상의 미립자로 인해 타배합에 비해 조기에 균열발생이 일어난 것으로 판단된다. 재령 21일이 경과한 35MPa 규격에서는 일반 콘크리트 조건(OPC)과 고로슬래그미분말을 사용한 조건(BS)에서 균열이 발생하였다. 균열의 폭이 27MPa에서와 마찬가지로 미세한 형상을 취하고 있었고 추가 진전은 나타나지 않았다.

모든 강도의 규격에서, 고로슬래그미분말을 포함한 조건(BS)에서 모두 균열이 발생한 것으로 미루어 보아, BS 조건이 다른 혼입조건보다 균열면에서는 저항성이 떨어지는 것으로 판단할 수 있다.

6. 결론

(1) 내구성있는 교량 바닥판을 적용하기 위하여, 고성능 콘크리트를 배합하여 이에 대한 내구성 실험을 실시한 결과, 시멘트량을 증가시켜 강도를 증진시키는 것보다는 혼화재를 사용하는 것이 내구성능 향상에 크게 이바지하는 것으로 나타났다.

(2) 슬래그 미분말을 혼화재로 사용하는 경우에 전반적인 내구성능은 향상되는 것으로 나타났으나, 균열저항성이 저하되는 것으로 나타나는 문제가 있었다. 따라서, 슬래그을 사용하는 경우에는 균열저항성을 검토가 필요한 것으로 판단된다.

(3) 균열저감과 내구성능을 종합적으로 고려한 결과, 시험배합한 결과중 플라이애시 20%와 실리카퓸 4%를 결합재로 함께 사용하는 경우가 가장 효과적인 것으로 판단되어, 향후에 시험시공을 실시하여 현장적용성을 분석할 계획이다.

참고문헌

1. Compilation and Evaluation of Results from High Performance Concrete Bridge Projects, FHWA Contract No. DTFH61-00-C-00009, Henry G. Russell, Inc., 1993
2. 한국도로공사, "콘크리트 노출 바닥판의 적용 및 유지관리에 관한 연구", 2005
3. 한국도로공사, "콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위한 시멘트 종류별 특성 연구", 1999
4. Edwin G. Burdette et al, "Development of High Performance Concrete Mixture for Tennessess Bridge Decks", TNSPR-RES1236, State of Tennessee DOT, 2005
5. Khossrow Babaei, Neil M. Hawkins, "Evaluation of Bridge Deck Protective Strategies", Report No. NCHRP-297, Transportation Research Board, September 1987

표 1 배합조건

구분		W/C (%)	S/A (%)	단위 재료사용량 (kg/m^3)							
					결합재 사용조건						
				물	보통 시멘트	플라이애시	실리카퓸	슬래그미분말	잔골재	굵은골재	고성능AE감수제
27 MPa	OPC	42.2	42.5	154	365	-	-	-	774	1059	2.19
	FA	41.4	42.4	151	292	73	-	-	766	1044	2.19
	FS	42.2	42.5	152	272	72	14	-	765	1043	2.15
	BS	42.3	42.5	150	213	-	-	142	777	1060	2.13
35 MPa	OPC	35.6	38.9	155	436	-	-	-	684	1083	2.62
	FA	35.1	38.9	153	349	87	-	-	674	1067	2.62
	FS	35.8	38.9	154	327	86	17	-	672	1064	2.58
	BS	34.1	38.7	151	252	-	-	168	689	1091	2.52

표 2 콘크리트 물성실험항목

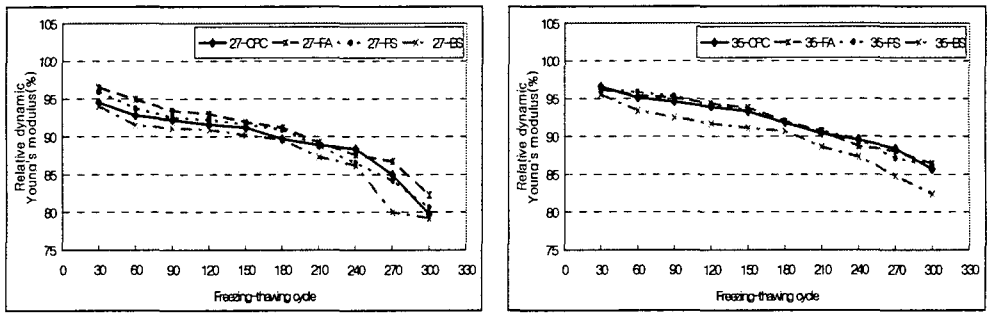
구분		실험기준	일시	비 고
FRESH	슬럼프	ASTM C 143	배합시	배합설계
	공기량	ASTM C 23	배합시	
	압축강도	ASTM C 512	3, 7, 28, 56일	
	균열저항성	AASHTO PP34-98		O-Ring Test
HARDENED	건조수축	ASTM C 517	1, 2, 3, 4, 6주	12주*
	투수성	AASHTO T 259	28일	RCPT
	마모저항성	ASTM C 944	1000g, 500cycles	Tapertlr
	동결융해저항성	AASHTO T 161	30,60,90,120,150, 180,210,240,270	300cycles*
	박리저항성	ASTM C 672	0, 15, 30	50cycles*
	염분침투깊이	ASTM C 512	40일 침지	발색법
	공극율-기포	확대경		실체현미경

표 3 콘크리트의 압축강도 측정결과

강도 규격	구분	슬럼프 (%)	공기량 (%)	압축강도 (MPa) 3 일	7 일	28 일	56 일
27 MPa	27-OPC	12.0	5.4	24.5	28.4	34.2	38.5
	27-FA	11.5	5.2	22.5	27.1	33.8	41.6
	27-FS	12.5	5.3	20.5	26.8	35.3	40.4
	27-BS	11.0	5.6	22.6	26.2	34.7	43.9
35 MPa	35-OPC	12.5	5.4	30.1	35.1	42.6	45.9
	35-FA	13.0	5.5	30.0	34.3	42.4	48.6
	35-FS	12.5	5.2	27.2	33.9	44.0	50.5
	35-BS	11.5	5.0	25.0	33.6	43.1	53.1

표 4 콘크리트 길이변화

강도 규격	구 분	길이변화율(×10-4) 1 주	2 주	3 주	4 주	6 주	8 주	12 주
27 MPa	27-OPC	-0.64	-1.23	-1.64	-2.86	-3.48	-4.27	-5.06
	27-FA	-0.70	-1.31	-1.75	-2.67	-3.20	-4.10	-4.56
	27-FS	-0.39	-0.83	-1.26	-2.36	-3.13	-4.02	-4.70
	27-BS	-0.55	-1.14	-1.58	-2.57	-3.26	-4.25	-5.13
35 MPa	35-OPC	-1.58	-2.22	-2.64	-3.64	-4.61	-5.59	-6.22
	35-FA	-1.31	-2.22	-2.78	-3.78	-4.17	-5.21	-5.79
	35-FS	-1.78	-2.54	-3.07	-4.01	-4.28	-5.38	-5.84
	35-BS	-0.73	-1.40	-2.01	-3.28	-4.32	-5.50	-6.31



(a) 27MPa (b) 35MPa

그림 1 동결융해 횟수에 따른 상대동탄성계수 측정결과

표 5 염화이온 침투저항성

강도 규격	구 분	측정결과 (Coulomb) 재령 28일	재령 56일	재령 90일	Chloride Ion Permeability
27 MPa	27-OPC	2,158	1,747	1,583	낮음
	27-FA	1,953	1,453	1,173	낮음
	27-FS	1,299	1,032	874	매우 낮음
	27-BS	1,416	1,079	850	매우 낮음
35 MPa	35-OPC	1,670	1,475	1,381	낮음
	35-FA	1,657	1,287	1,124	낮음
	35-FS	1,153	1,054	830	매우 낮음
	35-BS	1,184	1,031	864	매우 낮음

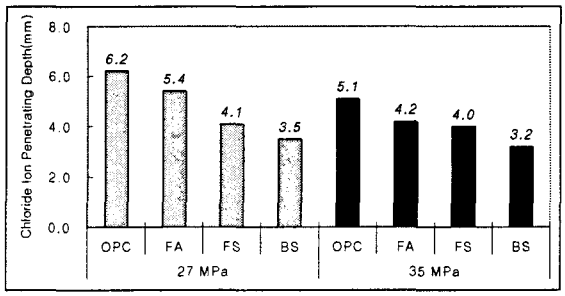


그림 2 염화이온 침투깊이

표 6 박리저항성 실험 후의 표면손상상태(50 cycles)

강도규격	구 분	관찰결과	판 정
27 MPa	27-OPC	- 전면적으로 표면 박리, 골재 노출	Ⅲ
	27-FA	- 중앙부위에서 표면박리, 골재노출	Ⅱ
	27-FS	- 중앙부위로 골재노출, 표면박리	Ⅱ
	27-BS	- 부분적으로(1/5수준) 표면 박리 - 일부 골재노출	Ⅰ
35 MPa	35-OPC	- 전면적으로 표면박리, 골재 노출	Ⅲ
	35-FA	- 전면적으로 표면박리, 골재 노출	Ⅲ
	35-FS	- 중앙부위로 골재노출, 표면박리	Ⅱ
	35-BS	- 부분적으로 표면박리, 골재노출	Ⅱ

표 7 콘크리트 균열저항성 실험결과

강도 규격	구 분	측정결과 경과재령(일)	균열발생시기(일)	균열폭(mm)
27 MPa	27-OPC	21	균열없음	-
	27-FA	21	균열없음	-
	27-FS	21	균열없음	-
	27-BS	21	10.4	0.08
35 MPa	35-OPC	21	17.6	0.08
	35-FA	21	균열없음	-
	35-FS	21	균열없음	-
	35-BS	21	8.7	0.10