장경간 PC Beam 교량을 위한 고강도콘크리트의 개발에 관한 연구

A Study on the Development of High Strength Concrete for Long Span PC Beam Bridge

백 상 현* 이 형 준** 김 기 수*** 엄 태 선*** 정 원 기****
Paik, Sang Hyun Lee, Hyung Jun Kim, Ki Soo Um, Tae Sun Chung, Won Ki

In the present study, we have developed high strength concrete which is adequate for the long span PC beam above 40 meters. We have selected the most adequate materials for high strength concerete through laboratory tests and in-situ mock-up applications. We verified and decided the best curing condition of high strength concrete, and suggests the optimum mix design of high strength concrete. In the future, we will verify the properties-fresh and hardened concrete- of high strength concrete and its serviceability, and also apply the high strength concrete to newly-constructed real bridge structure.

1. 서론

최근들어 고강도콘크리트는 새로운 건설재료로써 선진국가에서는 이미 활발한 연구 및 실용화가 이루어지고 있는 실정이나 국내에서의 적용사례는 미흡한 형편이며, 또한 구조물의 품질과 부실시공 문제가 사회적으로 크게 대두되고 있는 현실 등을 감안하면 엄격한 품질관리 및 시공과 함께 고내구성, 고강도, 고품질의 고성능콘크리트가 필연적으로 요구된다.

지금까지 국내의 PC Beam 교량에 사용되고 있는 콘크리트는 압축강도 350~450kg/cm^{2}영역의 콘크리트로써 단경간(25~30m)에 한정되고 있다. 그러나, 교량 점차 대형화, 장경간화되어감에 따라 작업성과 내구성이 확보된 설계강도 600kg/cm^{2}이상의 고강도콘크리트를 필요로하며, 이러한 고강도콘크리트는 이미 1980년대 중반이후로 들어서면서 실용화 단계에 접어들고 있음이 세계적 추세이다.

따라서, 본 연구에서는 장경간 PC Beam(40m 이상)을 위한 고품질, 고내구성의 고강도콘크리트를 개발하여 그 시공성 및 사용성을 검증함에 그 목적이 있으며, 향후 고강도콘크리트의 제반 역학특성을 규명하여 구조설계자료로써 활용하여 실교량에 대하여 실용화함에 그 목적이 있다.

2. 시험실적 배합시험을 통한 고강도콘크리트용 재료특성 검토

2.1 장경간보용 고강도콘크리트의 요구조건

* 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 연구원
** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 콘크리트구조연구실 책임연구원
*** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 책임연구원
**** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 책임연구원
***** 정회원, 동아건설산업(주) 연구소 토목구조팀 부부장 책임연구원

표 1 장경간보용 고강도콘크리트의 유동특성 및 작업성 요구사항

유동특성	슬럼프(cm)		공기량(%)	기타 요구사항
	초기	타설시	타설시	
요구 특성	18±3	14~16	2~4	· 과다한 점성 방지

강도특성	재령	발현율 (%)	I		II		III	
			설계강도 (kg/cm^2)	배합강도 (kg/cm^2)	설계강도 (kg/cm^2)	배합강도 (kg/cm^2)	설계강도 (kg/cm^2)	배합강도 (kg/cm^2)
탈형강도	3일	60	360	414	420	483	480	552
Prestress 도입	7일이후	80	480	552	560	644	640	736
설계강도	28혹은56일	100	600	690	700	805	800	920

2.2 배합시험에 사용된 원재료 특성

2.2.1 시멘트

장경간보용 고강도콘크리트로써 적용될 수 있는 시멘트로써 고분말·조강형 시멘트를 선정하였는데, 이러한 시멘트는 수화반응을 하는 시멘트의 비표면적을 높여 수화반응을 촉진함으로써 조기강도를 발현율이 크고 촉진양생조건을 최대한 완화할 수 있어 고강도콘크리트의 제조에 용이하다.

표 2 검토대상 시멘트의 화학·물리 특성

	화학 성분	화 학 성 분 (%)								
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Ig-loss
고분말·조강형	3종시멘트	19.7	5.9	3.0	62.1	3.0	0.10	0.75	4.2	1.1
	HPC시멘트	22.3	4.3	4.0	62.3	2.4	0.11	0.69	3.4	0.4
	조강슬래그시멘트	25.1	10.4	2.1	52.9	4.3	0.16	0.60	3.7	0.5

	물리특성	Blaine (cm^2/g)	Flow (%)	응결		압 축 강 도(kg/cm^2)			수화열(Kcal/g/℃)	
				초결 m	종결 h:m	3일	7일	28일	7일	28일
고분말·조강형	3종시멘트	4520	70	185	4:45	243	355	466	98.9	106
	HPC시멘트	4100	126	215	5:45	259	350	455	66.9	76.4
	조강슬래그시멘트	6100	89.9	260	7:10	236	368	510	83.5	89.2

2.2.2 골재 및 혼화제

표 3 시험배합에 사용된 골재 및 혼화제의 특성

잔골재				굵은골재					혼화제			
비중	흡수율 (%)	조립률	단위중량	최대크기 (mm)	비중	흡수율 (%)	조립률	단위중량	종류	계열	감수율 (%)	적정사용량
2.60	1.0	2.71	1.57	19	2.81	0.9	7.0	1571	고성능 AE감수제	폴리-카본산계	25	0.8~1.5%

2.2 검토대상시멘트별 콘크리트 강도특성(증기양생조건, 55℃)

표 4 시멘트수준별 콘크리트 특성

변수명	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)						슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(kg/cm^2)			비고
			W	C	S	G	SP제 (C*%)	AE제 (C*%)			3일	7일	28일	
HE	30	40	158	527	747	991	1.2	0.005	20.4	2.7	680	716	752	증기양생
HPC	30	40	158	527	747	991	1.0	0.003	20.3	2.1	505	688	766	
HBS	30	40	158	527	740	986	1.1	0.0025	20.5	3.2	516	737	816	

* HE : 3종시멘트, HPC : HPC시멘트, HBS : 조강슬래그시멘트 사용

3. 현장 적용시험

3.1 시험목적 : 검토시멘트의 현장적용성평가 및 최적재료 선정

3.2 시험계획

3.2.1 시험항목

(1) 강도시험

측정대상	시편크기	측정재령	비고
부재코아 및 현장공시체	10 X 20 cm	3, 7, 14, 28, 56 일	- 공시체 : 단열 Curing Box 보관

(2) 작업성 평가, 슬럼프 및 공기량 경시변화 시험

(3) 수화열 특성 시험

시험항목	측정기간	측정간격	측정대상	측정장비
수화열 측정	타설후 3일간	30분	· 시험부재, 양생조내부 · 대기, M.C.B내부	· Data Logger · Thermocouple TC/K

3.2.2 시험방법

(1) 시험부재 제원 ; 모형시험부재는 40m 장경간보 부재의 실단면에, 단부로부터 5m 길이의 부재이다. 이는 실제 부재의 제작시 발생하는 시공특성, 강도특성, 수화열 특성을 평가하기 위함이다.

(2) 시험부재에 적용된 양생조건

표 5 모형부재시험 증기양생조건

시험 회차	전양생(전치) hrs.	증기양생조건(hrs.)				총양생시간 (hrs.)
		승온시간	최고온도(℃)	등온시간	강온시간	
HE	2.5	2.5	45~50	15	4	24
HPC	3	2		10	자연강온	15+자연강온
HBS	4	2		10	자연강온	16+자연강온

3.2.3 현장 적용배합

표 6 시험부재 현장 적용배합

시험명	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)					
			W	C	S	G	SP-8N	공기연행제
HE	28.6	40	162	567	638	998	7.9	-
HPC	28.9	41	164	567	644	1041	6.0	-
HBS	29.8	40	169	567	635	995	8.5	-

3.3 시험결과 및 분석

3.3.1 작업성 및 유동특성

HE가 가장 좋은 특성을 나타냈으며, 레미콘에 의한 현장타설시 경시변화에 대한 다소의 대책이 필요하다. HPC의 경우 초기 작업성은 양호하였으나, 슬럼프경시변화가 커 시멘트의 개선이나 지연형 혼화제 등에 의한 대책이 필요한 것으로 사료된다. 또한, HBS의 경우 슬럼프 경시변화 및 점성이 커 작업성에 다소의 문제를 야기하였다.

표 7 슬럼프 및 공기량 경시변화 시험결과

시험명	작업성(점성)		슬럼프 경시변화(cm)			공기량 경시변화(%)		
	B/P	타설시	초기	30분	1시간	초기	30분	1시간
HE	양호	양호	20	15	11	3.0	2.9	2.7
HPC	양호	다소 붙량	20	12	9	2.4	2.7	3.0
HBS	다소 붙량	붙량	24	16	13	3.5	6.7	6.5

3.3.2 강도 특성

표 8 재령별 강도측정 결과

시험명	압축강도 (kg/cm^2)					비 고
	3일	7일	14일	28일	56일	
HE	670	722	726	757	774	공시체
	706	739	713	740	750	코아
HPC	624	693	689	726	902	공시체
	725	719	650	702	870	코아
HBS	542	572	730	776	742	공시체
	513	757	745	759	713	코아
*1종	489	546	619	703		공시체
적용시	542	571	614	711		코아

시험결과, 공시체강도가 코아시편보다 초기재령에서 적게 발현되는 양상을 보였는데, 이는 초기 수화열로 인한 콘크리트 성숙도가 부재내부에서 보다 크기 때문이다. 3회 시험에서 장기강도 발현율이 적게 나타났는데, 이는 수화열 상승이전에 증기양생을 시작한것과 동절기 저온환경에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 장기강도 확보대책으로써, 증기양생조건에 대한 보완 및 fly ash 등의 혼합재 사용이 바람직한 것으로 사료된다.

3.3.3 수화열 특성

표 9 시험별 시험부재의 최고 상승온도

시험명	단면 A-A′ (단면폭 50cm)		
	최고상승 온도(℃)	측정위치	대기온도 (℃)
HE	76.6	단2 중부	-2.1
HBS	82.2	단2 중부	7.6
HPC	73.7	단2 중부	8.9
* 1종시멘트의 경우 ; 90.0℃			

수화열 측정온도는 동일 시멘트량에서의 부재 수화열 온도를 나타내는데, 이 중 HE의 시험은 상대적으로 낮은 대기온도의 조건에서 콘크리트가 타설되어 다소 낮게 측정된 것으로 판단된다. 시험결과로부터, 수화열 특성은 HPC 시험의 경우가 가장 낮은 것으로 평가된다. 고강도 콘크리트에서는 단위시멘트량이 많아지면서 수화열이 높아지므로 실부재에서는 온도철근 및 Prestress 도입으로 인한 수화열 균열을 억제하거나, 증기양생을 하는 경우는 강온속도를 최대한 낮추어 외기온도의 급격한 저하로 인한 온도 응력의 유발을 최대한 방지하여야 하며, 하절기 등의 경우 가급적 증기양생을 않는 것이 바람직하다.

4. 적정 증기양생조건의 선정

4.1 개요

fly ash를 치환하거나 동절기와 같은 저온환경에서 타설되는 경우 등에 대하여 조기강도를 위하여 증기양생을 필요로하는데, 이를 위하여 적정한 양생온도 및 양생시간에 대한 검토를 수행하였다.

4.2 증기양생온도 선정

4.2.1 시험변수

표 10 시험수준별 양생조건(S : 표준양생)

시험 구분	전양생 (hrs.)	최고온도 (℃)	승온, 강온 경사 (℃/hour)	양생시간(hrs.)			총양생시간 (hrs.)
				승온시간	등온시간	강온시간	
H	5	75	18	3	12	3	18
M	3	55	17	2	14	2	18
L	2	45	16	1.5	15	1.5	18

표 11 증기양생조건 검토 시험의 각 변수 및 적용배합

시험명	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)						S/L (cm)	Air (%)
			C	W	S	G	SP(%)	AE(%)		
HE	27	40	593	160	640	1042	1.25	0.003	19.3	3.5
HPC			593	160	640	1042	1.05	0.004	18.7	3.4
HBS			593	160	635	1036	1.00	0.002	18.5	2.7

4.2.2 시험결과 및 분석

(1) 시험결과

표 12 증기양생조건 변화에 따른 각 변수의 강도발현율(표준양생, 28일 재령기준)

시험명	압축강도(%)		
	3일	7일	28일
HE-S	67	84	100
HE-H	79	81	90
HE-M	74	83	93
HE-L	70	83	95

시험명	압축강도(kg/cm^2)		
	3일	7일	28일
HPC-S	68	80	100
HPC-H	86	90	92
HPC-M	80	88	99
HPC-L	76	87	98

시험명	압축강도(kg/cm^2)		
	3일	7일	28일
HBS-S	63	82	100
HBS-H	89	87	92
HBS-M	70	86	95
HBS-L	66	84	94

(2) 적정 증기양생온도의 선정

1) HE ; HE의 압축강도는 양생온도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 증기양생으로 인하여, 양생온도가 높을수록 장기강도의 저하를 야기하였다. 따라서, 증기양생온도는 약 40~45℃가 타당하며, 여름철 등 외기온도가 높은 경우, 가급적 증기양생을 피하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

2) HPC ; HPC의 경우, 양생온도가 높아짐에 따라 초기 3일강도에 유리한 영향을 주는 것으로 나타났으며, 28일 강도는 고온인 경우 불리하였다. 적정 증기양생온도는 약 45~55℃로 판단된다.

3) HBS ; HBS의 경우, 증기양생에 의해 28일강도가 하락하였다. 따라서, 양생온도를 최대한 낮추는 것이 바람직할 것으로 판단된다. HBS의 적정 증기양생온도는 45℃ 내외로 사료된다.

4.3 전양생 조건의 선정

모형부재시험 결과, 최적의 재료로써 3종시멘트를 선정하였으며, 경제성, 수화열, 장기강도 등을 고려하여 3종시멘트에 플라이애쉬를 치환한 재료를 선정하였다. 증기양생의 경우, 양생온도, 승온 및 강온 경사, 전양생 등의 양생조건은 콘크리트의 강도, 내구성 등의 품질에 영향을 미치게 된다. 특히, 증기양생 실시이전까지의 전양생시간은 콘크리트의 품질에 큰 영향을 주게 되는데, 품질에의 악영향을 방지하기 위하여 콘크리트 응결 이후 양생을 시작하여야 하는 것으로 보고되고 있다. 이는 콘크리트가 응결이전에 고온에 노출되는 경우, 콘크리트 조직에 충격을 주어 강도 및 내구성을 저하시키기 때문이다. 따라서, 본 절에서는 선정된 배합에 대한 응결시험을 통해, 증기양생시 전양생조건에 적용하였다.

응결시험결과로부터 증기양생시 전양생의 최적조건은 3종시멘트(HE)에 대하여 4시간 30분, 3종+fly ash 10%, 3종+fly ash 15%((HEF10, HEF15)에 대하여 5시간 30분 가량이 적절한 것으로 판단된다.

표 13 고강도콘크리트의 응결특성

구분	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)						슬럼프 (cm)	공기량 (%)	응결특성	
			W	C (B)	S	G	SP제 (C*%)	AE제 (C*%)			초결 (hr:m)	종결 (hr:m)
HE	31	37	155	500	637	1155	1.15	0.0055	21.0	2.5	4:40	7:30
HEF10	31	36	157	506	613	1160	0.95	0.0095	20.8	3.0	5:20	8:00
HEF15	31	36	158	510	608	1151	0.90	0.0110	20.0	3.0	5:40	8:15

5. 고강도콘크리트의 최적배합설계

5.1 fly ash 치환율의 결정(45℃, 증기양생)

표 14 fly ash의 최적 치환율 선정을 위한 시험배합 결과

구분		W/C (%)	S/a (%)	단위재료량 (kg/m^3)		슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(kg/cm^2)			발현율 (FA, 28일기준)			발현율 (각변수, 28일기준)		
변수명	치환율 (%)			W	C(B)			3일	7일	28일	3일	7일	28일	3일	7일	28일
FA	0	29.5	37	155	525	20.2	3.2	651	704	828	79	85	100	79	85	100
FA10	10					20.2	3.2	603	677	826	73	82	100	73	82	100
FA20	20					19.5	3.0	532	634	811	64	77	98	66	78	100
FA30	30					19.3	2.9	492	585	795	59	71	96	62	74	100

플라이애쉬 치환율이 커질수록 초기재령의 강도저하율이 장기재령에 비하여 크게 나타났다. 장경간보의 탈형(60%) 및 Prestress 도입강도(80%)를 만족하는 fly ash 치환율은 20%이내가 적정하며, 또한 fly ash가 20%이상 치환되는 경우, 콘크리트의 점성이 매우 커져 작업성의 저하를 야기하였다. 따라서, 장경간보용 고강도콘크리트에 적용될 최적의 fly ash 치환율은 10%, 15%로 사료된다.

5.2 최적배합설계 도출

(1) 재료별 28일재령 σ-C/W 관계 도출 결과

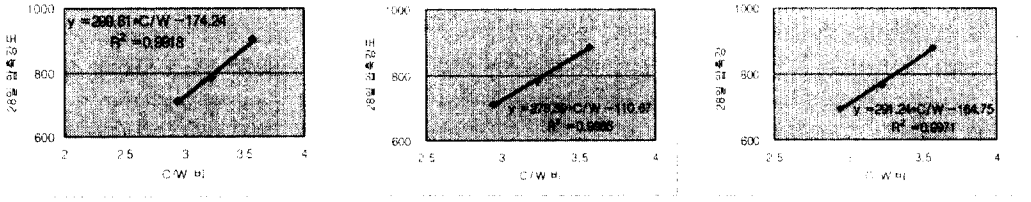

그림 1 28일재령 σ-C/W 관계그래프(HE, HEFA 10, HEFA 15 순서)

(2) 재료별 최적배합설계

표 15 재료별 최적배합설계

변수	설계강도	W/C (%)	S/a (%)	W	C
HE	600	34.7	38	155	447
	700	30.6	37	155	507
	800	27.4	36	155	566

변수	설계강도	W/C (%)	S/a (%)	W	C (B)
HEFA 10	600	34.8	38	157	451
	700	30.4	37	157	516
	800	27.0	36	157	581

변수	설계강도	W/C (%)	S/a (%)	W	C (B)
HEFA 15	600	33.8	37	158	467
	700	29.8	36	158	530
	800	26.5	35	158	596

6. 결론

장경간보용 고강도콘크리트에 적용될 수 있는 재료를 선정하여 시험실적 검토와 모형부재시험 등을 수행한 결과 다음의 결론을 도출할 수 있었다.

1) 유동특성 등의 시공성능은 3종시멘트를 적용한 결과가 가장 양호한 것으로 나타났다.

2) 부재시험결과, 수화열특성은 HPC시멘트 및 3종시멘트가 양호하였으며, 균열 방지를 위하여 양생조건관리(온도 및 강온속도의 저하), 하절기 습윤양생 및 온도철근 배근 등이 필요할 것으로 사료된다.

3) 강도특성은 28일재령에서 700kg/cm^{2}이상을 발현하였으며, 증기양생 및 동절기 시험에 의하여 장기강도 증진율이 저하된 것으로 판단된다.

4) 증기양생시, 양생온도를 낮추거나 콘크리트 초결이후 증기양생을 실시하는 것이 바람직하다. 또한, 하절기는 증기양생을 않는 것이 바람직하며 이 경우 3종시멘트 적용이 바람직한 것으로 사료된다.

5) 부재시험 및 실내배합시험 등을 통하여 3종시멘트와 3종시멘트의 10, 15%를 fly ash로 치환한 재료를 장경간보 고강도콘크리트용 최적의 재료로 선정하여 설계강도별로 최적배합조건을 도출하였다.

본 연구를 통하여 개발된 고강도콘크리트는 교량구조물 이외에도 고품질, 고내구성, 고강도 등의 고성능콘크리트가 요구되는 토목 및 건축구조물에의 확대적용이 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. S. P. Shah and S. H. Ahmad, "High Performance Concretes and Applications", 1994
2. Henry G. Russell, Anthony E. Fiorato "High Strength Concrete Research for Building and Bridges" International Workshop on High Perforamance Concrete, Bangkok, Thailand, 1994.
3. "State-of-the-Art Report on High Strength Concrete" ACI Committee 363 ACI Manual of Concrete Practice, Part, 1, 1996.
4. Duming, Timothy A., and Rear, Keneath B. "Braker Lane Bridge-High Strength Concrete in Prestressed Bridge Girders" PCI J. V.38, No. 3, pp 45-61, May-June 1993.