

장경간 PSC Beam 교량을 위한 고강도콘크리트의 개발에 관한 연구(Ⅱ)

A Study on the Development of High Strength Concrete for Long Span PSC Beam Bridge(Ⅱ)

백 상 현* 이 형 준** 김 기 수*** 엄 태 선*** 정 원 기**** 황 은 영****
Paik, S. H. Lee, H. J. Kim, K. S. Um, T. S. Chung, W. K. Hwang, E. Y.

ABSTRACT

In the present study, the high strength concrete which is adequate for the long span PC beam above 40 meters has been developed. The optimum cement for high strength concrete was selected through laboratory tests and in-situ mock-up applications. The optimal concrete mix design was performed, and the properties of fresh concrete and hardened concrete have been investigated. These results of laboratory study are analyzed and compared to domestic and foreign design codes and specifications. Finally, the developed high strength concrete was applied to half-scale PSC beams and showed good applicability in field conditions. It is concluded that the developed high strength concrete can be applied to civil and architectural structures in the field applications.

1. 서론

본 연구에서는 내구성, 경제성 및 안전성이 확보된 40m의 장경간 PSC빔 교량에 적합한 고강도콘크리트(600,700,800kg/cm²)를 개발하였다. 이를 위하여 최적재료를 선정하고, 최적배합설계를 수행하여, 기존 PSC빔(400kg/cm²)용 콘크리트와의 비교시험을 통하여 굳지않은 콘크리트 특성, 역학적 특성, 내구특성 및 장기거동특성을 시험적으로 고찰하여 이를 국내 시방규정 및 국외의 규격과 비교, 분석하여 고강도콘크리트의 재료역학적 특성을 규명하고자 하였다. 최종적으로 실험구조시험체(실물1/2)에 타설한 결과, 우수한 현장 적용성을 보였으며, 구조시험을 통하여 구조적 안전성 및 사용성을 입증하였다.

2. 고강도콘크리트의 현장적용성 평가

2.1 장경간보용 고강도콘크리트의 요구조건

표 1 장경간보용 고강도콘크리트의 유동특성 및 압축강도 요구 spec.

유동특성	슬럼프(cm)		공기량(%)	기타 요구사항
요구 특성	18±3		2~4	· 과다한 점설 방지
설계압축강도 (kg/cm ²)	요구 발현율(%)			시방배합 할증계수
	3일(탈형)	7일이후(PS도입)	28일	
600, 700, 800	60	80	100	1.15

* 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 연구원

** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 콘크리트구조연구실 책임연구원

*** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 책임연구원

**** 정회원, 동아건설산업(주) 연구소 토목구조팀 부부장 책임연구원

***** 정회원, 동아건설산업(주) 연구소 토목구조팀 연구원

2.2 고강도콘크리트의 현장적용성 평가

2.2.1 검토시멘트

장경간보용 고강도콘크리트에 적용된 시멘트는 조강형 시멘트와 1종시멘트이다. 조강형 시멘트는 수화반응을 촉진함으로써 조기강도가 높고, 촉진양생조건을 완화시키며, 일정 단위시멘트량에 대하여 높은 강도를 발현하여 단위시멘트량을 감소시킬수 있어 고강도콘크리트의 제조에 적합하다.

표 2 검토대상 시멘트의 물리 특성

물리특성	Blaine (cm ² /g)	용결		압축강도(kg/cm ²)			수화열(Kcal/g/°C)	
		초결 m	종결 h:m	3일	7일	28일	7일	28일
3종시멘트	4400	185	4:45	243	355	466	98.9	106
HPC시멘트	4100	215	5:45	259	350	455	66.9	76.4
조강슬래그시멘트	6100	260	7:10	236	368	510	83.5	89.2
1종시멘트	3200	300	7:10	200	278	371	83.3	94.8

2.2 모형부재시험을 통한 현장 적용성 평가

2.2.1 현장 적용배합 및 양생

표 3 시험부재 현장 적용배합

시험명	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m ³)						비고
			W	C	S	G	고성능AE감수제	공기연행제	
HE	28.6	40	162	567	638	998	7.9	-	증기양생
HPC	28.9	41	164	567	644	1041	6.0	-	
HBS	29.8	40	169	567	635	995	8.5	-	
HFA	26.5	34	154	581	536	1064	11.6	0.29	

2.2.2 시험결과 및 분석

현장경시변화 및 작업성은 HE 및 HFA가 상대적으로 좋은 특성을 나타냈으며, 경시변화에 대한 대책이 필요하다. 수화열 측정결과, HE는 상대적으로 낮은 대기온도에서 콘크리트가 타설되어 다소 낮게 측정된 것으로 판단되며, HPC가 가장 낮은 특성을 보였다. 고강도콘크리트에서는 단위시멘트량이 많아지므로 증기양생을 하는 경우, 최고온도 및 강온속도를 최대한 낮추어 온도 응력의 유발을 최대한 방지하여야 한다. 현장 압축강도는 요구강도(700kg/cm²)를 만족하였으며, 장기강도 발현이 적었는데, 이는 수화열 상승전에 증기양생을 시작한것과 저온환경에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 장기강도 저하시, 양생조건 보완 및 혼합재 사용을 검토하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

표 4 슬럼프 및 공기량 경시변화 시험결과(1종)

시험명	작업성(점성)		슬럼프(cm)			공기량(%)			수화열(단면폭 50cm)		압축강도 (kg/cm ²)				
	B/P	타설시	초기	30분	60분	초기	30분	60분	최고온도 (°C)	대기온도 (°C)	3일	7일	14일	28일	56일
HE	양호	양호	20	15	11	3.0	2.9	2.7	76.6	-2.1	670	722	726	757	774
HPC	양호	다소 불량	20	12	9	2.4	2.7	3.0	82.2	7.6	624	693	689	726	902
HBS	다소 불량	불량	24	16	13	3.5	6.7	6.5	73.7	8.9	542	572	730	776	742
HFA	양호	양호	22	19	15	3.0	4.0	4.0	90.9	9.4	489	546	619	703	750

3. 고강도콘크리트의 재료역학 특성

3.1 배합설계 및 양생조건

현장 적용을 통하여 3종 및 1종시멘트를 선정하였으며, 3종시멘트는 경시변화 개선을 위하여 지연형고성능AE감수제를 적용하였다. 또한, 콘크리트의 용결특성을 반영한 양생 조건을 선정, 적용하였다.

표 5 변수별 배합설계표

시멘트	배합명	설계강도 (kg/cm ²)	할증 계수	S/a (%)	W/C (%)	단위재료량(kg/m ³)				혼화제 (C*%)	AE제 (C*%)	슬럼프 (%)	공기량 (%)	초결 (h:m)	비고		
						C(B)	W	S	G								
1종	CTR-a	400	1.15	34	35.2	540	190	549	1148	0.50	0.0010	18±3	3±1	4.3	기존PSC빔		
3종	HE6	600		37	36.0	470	169	633	1147	1.50	0.0020			7:20	장경간PSC빔		
	HE7	700		36	30.7	550	169	591	1119	1.50	0.0020						
	HE8	800		35	28.2	600	169	560	1108	1.50	0.0020						
1종	CTR-b	400		34	33.9	560	190	559	1106	0.40	0.0010			18±3	3±1	4.3	기존PSC빔
*1종	HFA6	600		35	28.0	561	157	552	1049	1.70	0.10					10↑	장경간PSC빔
+혼합	HFA7	700		34	24.5	683	167	501	997	2.00	0.10						
재5%	HS8	800		33	24.0	629	151	511	1081	2.00	0.10						

*HFA : 1종+플라이애쉬(FA)5%, HS : 1종+실리카폼 5%

표 6 변수별 양생조건

변수	전치(hrs.)	중기양생조건(hrs.)				총양생시간(hrs.)
		승은	최고온도(°C)	등온	강은	
CTR	10	2	45	10	2	24
HE	7	2		8	2	19
HFA, HS	10	2		10	2	24

3.2 역학적 특성

3.2.1 압축강도

압축강도 시험결과, HE 배합 및 HFA 배합에 대하여 설계압축강도 및 조기의 Prestress 도입강도를 발현하였다.

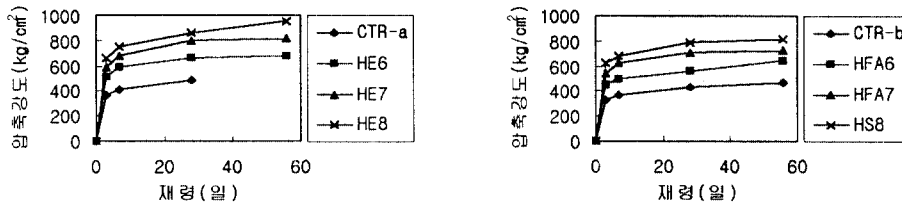


그림 1 압축강도 특성

3.2.2 탄성계수 및 포와슨비

탄성계수 시험결과, 도로교시방서에 규정된 일반콘크리트의 탄성계수 추정식을 적용하면 과대평가되며, 고강도콘크리트 추정식과는 5% 내외에서 계산치가 상회하여 안전측 설계를 위하여는 탄성계수식에 대하여 이를 고려하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 포와슨비는 압축강도에 따라 일정한 경향을 보이지는 않았으며, 대략 0.15~0.25의 범위에 있어 일반콘크리트에 비하여 다소 작은 결과를 보였다.

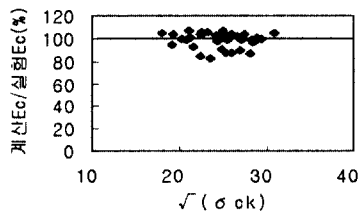


그림 2 탄성계수 시험치와 도로교시방식 비교

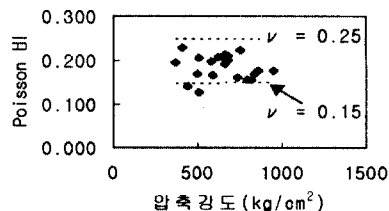


그림 3 압축강도와 포와슨비의 관계

3.2.3 할렬인장강도 및 휨인장강도

할렬인장강도와 압축강도와의 관계를 그림 4에 나타내었는데, ACI의 제안식에 비하여 작은 결과를 나타내 설계 적용시 이를 고려하여야 할 것으로 판단된다. 그림 5에는 휨인장강도 시험결과에 대하여 압축강도와의 관계를 나타내었는데, ACI 실험식에 비하여 다소 작은 경향을 보였으며, 도로교시방서에 규정된 프리스트레스 콘크리트의 허용인장응력에 대하여는 안전측의 값을 나타냈다.

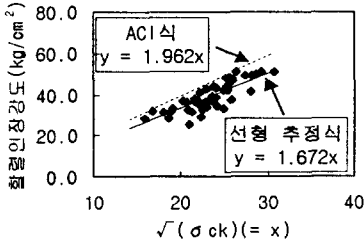


그림 4 압축강도와 할렬인장강도의 관계

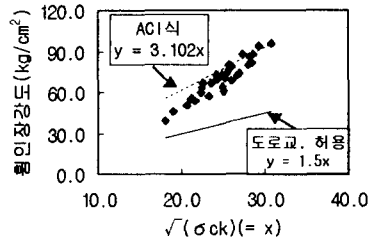


그림 5 압축강도와 휨인장강도의 관계

3.3 내구특성

3.3.1 동결융해저항성

HFA 배합에 동결융해 특성을 시험한 결과, 본 연구에서 설정된 2~4%의 공기량을 확보하는 경우 양호한 결과를 나타내었으며, 공기연행을 많은 경우에는 동결융해 저항성이 저하되는 것으로 나타났다. 또한, 공기연행시에는 압축강도에 거의 무관하게 동결융해 저항성을 확보하였으며, 공기연행을 많은 경우에는 강도가 클수록 동결융해 저항성이 증가하는 경향을 보였다.

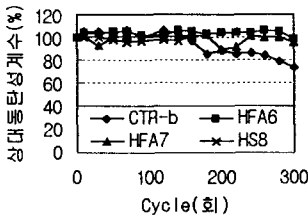


그림 6 공기연행시 동결융해저항성

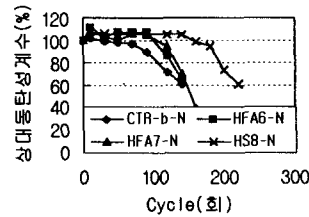


그림 7 공기연행을 많은 경우의 동결융해저항성

3.3.2 염이온 침투성

축진염이온침투시험 결과, 400kg/cm²에 비하여 침투성이 크게 감소하였으며(그림 8 ; HE7에서 약 50%감소), 소요의 재령(28일 이후)에서 ASTM 분류에 따른 “매우 낮음”의 투수성범위값을 나타내었다(그림 9). 이는 고강도화에 따라 조직이 치밀해져 내구성이 향상되는 것을 보여준다. 또한, HE7과 HFA7의 결과를 보면 HE7에서 침투성이 감소하였는데, 이는 배합강도가 상대적으로 크고, 3종시멘트의 분말도가 커 보다 치밀한 조직이 형성된 것으로 판단된다.

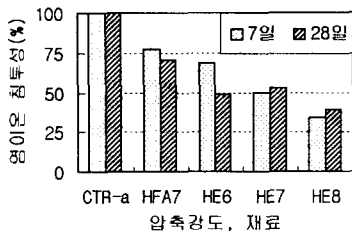


그림 8 압축강도 및 재료에 따른 염이온 침투성

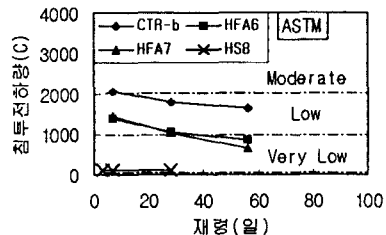


그림 9 압축강도 염이온 침투성

3.3.3 중성화

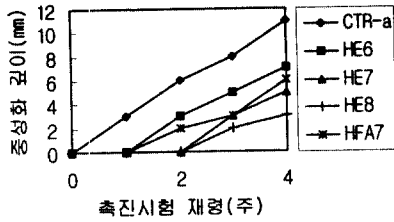


그림 10 중성화 특성

중성화 특성은 강도 증진에 따라 중성화 특성이 감소하는 경향이 나타나 700kg/cm²에서 약 50%가량 감소하였으며, HFA7과 HE7의 비교는 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 경향은 고강도 화됨에 따라 시멘트페이스트가 밀실하여짐에 따라 중성화 특성이 개선되는 것으로 판단된다.

3.4 장기거동 특성

3.4.1 건조수축

건조수축 시험결과, 기존 400kg/cm²과 비교하여 강도가 증가할수록 건조수축량이 감소하는 경향을 나타내었는데(400kg/cm²경우;재령28일에서 약40%감소), 이는 고강도를 위하여 물-시멘트비가 작아지고 고성능의 감수제 사용으로 요구단위수량이 감소하면서 나타나는 결과인 것으로 분석된다.

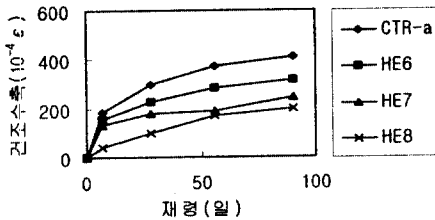


그림 11 재령에 따른 HE배합의 건조수축

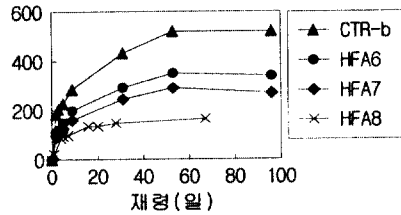


그림 12 재령에 따른 HFA배합의 건조수축

3.4.2 크리프

그림 13에 HFA7 배합에 대한 크리프 특성을 도시하였는데, 추가적 시험결과를 통해 정량적 평가를 할 계획이다. 재령 70일까지 약 1.8의 크리프효과가 나타났으며, 재령 28일 이후 둔화되는 경향을 보여 도로교시방서에서 제시된 크리프 계수에 비하여 작은 크리프 특성을 보이는 것으로 판단된다.

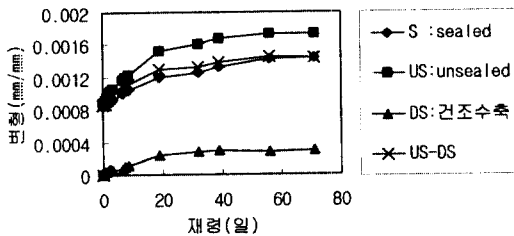


그림 13 크리프 시험결과(1종시멘트 ; HFA7)

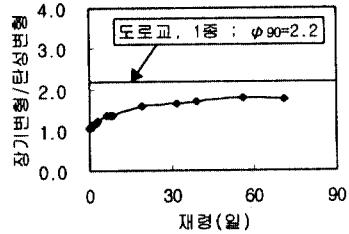


그림 14 크리프 변형 특성

4. 실험부재 구조시험을 통한 적용성평가

4.1 현장 배합조건

표 7 구조시험 부재의 현장 콘크리트 배합

시험구분	설계압축강도 (kg/cm ²)	시멘트	S/a (%)	W/C (%)	단위재료량(kg/m ³)				고성능AE 감수제(C*%)	AE제(C*%)
					C(마인더)	W	S	G		
HE7	700	TYPEIII	36	30.7	550	169	591	1119	1.45	0.0020
HFA7		TYPE I + FA5%	34	24.5	683	167	518	1247	2.00	0.0020

4.2 현장 시공성 및 강도 특성

그림 15에는 현장 레미콘에서 HE7의 경시변화 특성을 나타내었는데, 30분 경과후에도 B/P에서의 작업성을 유지하여 부재타설시 양호한 시공성을 확보하였다. 그림 16에는 재령별 압축강도 및 휨강도의 결과를 나타냈는데, 28일 설계압축강도 및 도입강도에 대하여 요구강도를 만족하였다.

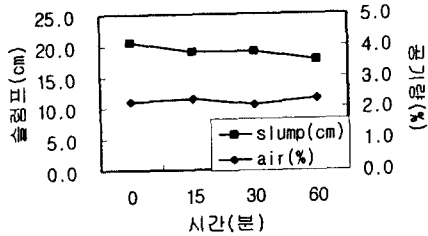


그림 15 현장 레미콘 경시변화 특성(HE7)

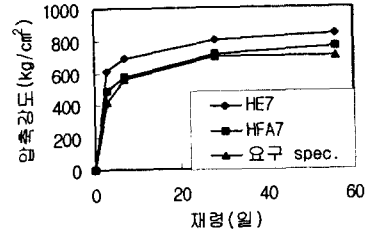


그림 16 구조시험 부재의 압축강도

5. 결론

장경간보용 고강도콘크리트에 적용될 수 있는 재료를 선정하여 콘크리트의 재료역학특성에 대한 시험 연구와 현장 적용시험 등을 수행한 결과 다음의 결론을 도출할 수 있었다.

1) 모형부재시험을 통하여 최적시멘트를 선정하여 설계강도별(600, 700, 800kg/cm²) 최적배합설계를 도출하였다.

2) 고강도콘크리트의 물성규명을 위한 시험실적 검토결과, HE 및 HFA배합은 고강도 PSC빔의 요구강도를 만족하였다. 탄성계수는 시방 규격과 근접된 결과를 보였으나 시방식이 탄성계수를 다소 과대평가하는 결과가 일부 나타났으며, 할렬 및 휨인장강도는 ACI 제안식 보다 작은 경향을 나타내 이를 고려한 설계가 필요할 것으로 판단된다.

3) 내구성 평가 결과, 염이온침투 및 중성화 특성은 기존 PSC빔용 콘크리트에 비하여 크게 감소되었으며, 동결융해저항성은 소요의 공기량(3±1%)을 필요로 하는 것으로 나타났다.

4) 건조수축 및 크리프 등의 장기거동 특성은 기존 PSC빔용 콘크리트에 비하여 감소하는 경향을 나타내었으며, 추후 장기적인 시험결과를 통하여 정량적인 평가를 수행할 예정이다.

5) 개발된 고강도콘크리트를 구조시험용 실험부재에 현장적용한 결과, 우수한 경시변화 및 강도특성을 나타냈으며, 제작된 구조시험용 실험부재는 정적,동적,장기거동시험을 통하여 구조적 안전성 및 사용성을 확보하였다.

참 고 문 헌

1. Malhotra, V. M, Ed., "High Performance Concrete", ACI SP-149, 1994.
2. Henry G. Russell, Anthony E. Fiorato "High Strength Concrete Research for Building and Bridges" International Workshop on High Performance Concrete, Bangkok, Thailand, 1994.
3. H. J. Jobse, S. E. Moustafa, "Applications of High Strength Concrete for Highway Bridge", PCI J. V.30, No. 5, pp 44-73, May-June 1991.
4. Zia, P., et al., "Mechanical Behaviour of High Performance Concrete", SHRP, 1993.