

플라이 애시와 고로슬래그 미분말을 복합 활용한 3성분계 혼합 콘크리트의 내구성능에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Durability Performance for Ternary Blended
Concrete Containing Both Fly Ash and Granulated Blast Furnace Slag

이 창 수* 윤 인 석**
Lee, Chang-Soo Yoon, In-Seok

Abstract

Ternary blended concrete, which contains both fly ash and granulated blast furnace slag, has an initial cost effective and is environment friendly. Furthermore, it has a lot of technical advantages such as the improvement of long term compressive strength, high workability, and the reduction of hydration heat. However, as the use and study on the performance of ternary blended concrete is limited, it is worthwhile studying the actual performance of this technology. This study examined the durability performance of ternary blended concrete, compared to binary blended concrete and ordinary portland concrete. It led to the conclusion that ternary blended concrete is very suitable for submerged members under marine environment. However, it should be noticed that ternary blended concrete becomes weak on carbonation, when it is situated on combined deterioration environment of carbonation and chloride. Therefore, the curing duration of ternary blended concrete should be prolonged in order to enhance the resistance of carbonation.

Keywords : Ternary blended concrete, Fly ash, Granulated blast furnace slag, Durability performance

1. 서 론

21세기의 토목구조물은 환경오염, 지하 및 해양개발로 인하여 더욱 가혹한 환경에 처하게 것으로 예상

된다. 또한, 산업 전 분야에서 환경오염, 에너지절약, 자원재활용 등에 대한 사회적 관심이 더욱 고조되고 있어 내구성과 환경친화성을 만족시킬 수 있는 콘크리트에 대한 사회적 요구는 크게 증대될 것이다.

* 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

** 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

E-mail : yisconcrete@hotmail.com 02-2210-2955

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2003년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이에 대한 대표적 해결방법으로 플라이 애시나 고로슬래그 미분말의 활용을 들 수 있는데 국내의 풍부한 부존자원을 이용하여 콘크리트 공사 시 건설초기비용을 절감하고 각종 물성향상 효과를 얻을 수 있어 향후 사용범위가 크게 증가될 것으로 예상된다. 그러나 국내외에서 플라이 애시나 고로슬래그 미분말을 단일 함유한 콘크리트에 대한 시공사례나 관련연구는 상당하지만 플라이 애시와 고로슬래그 미분말을 복합 함유한 3성분계 콘크리트에 대한 연구는 많지 않다.

3성분계 콘크리트는 수화열 저감은 물론 혼화제의 충전효과 및 상호 보완효과로 많은 기술적 장점을 갖는데⁽⁵⁾ 국외에서는 덴마크의 Stoerbelt 교량/터널, 홍콩공항을 연결하는 Chek Lap Kok 교량 등의 대규모 사회기반 시설물에 활용된 바 있으며 국내에서는 부산 광안대교의 주탑 등에 일부 시공된 바 있다.^{(2)~(3)} 그러나 아직까지 적극적으로 사용되지 못하고 있는 것이 현 상황으로서 이에 대한 기술적 한계를 이해하고 시공에 따른 장, 단점을 면밀히 분석해야 한다.

그래서 본 연구는 보통포틀랜드 시멘트와 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 각각 활용한 단일효과와 대비하여 혼합 사용시 복합효과로 인한 내구성 추이 변화를 고찰한 결과를 토대로 3성분계 혼합 콘크리트의 향후 활용 가능성을 분석하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 콘크리트 재료

2.1.1 콘크리트 원재료

Table 1과 같은 천연골재와 Table 2와 같은 보통포틀랜드 시멘트(OPC), 고로슬래그 시멘트(GBC), 플라이 애시(FA)를 이용하였다.

2.1.2 콘크리트 배합

사용된 콘크리트의 배합은 Table 3과 같다. 플라이 애시와 같은 혼화제는 물-결합재비가 낮으면 포졸란 반응속도가 현저히 저하되기 때문에 물-결합재비 42%로 고정하여 낮은 물-결합재비의 조건에서 콘크리트에 대한 적용성을 판단하였다. 혼화제 치환율의

Table 1 Properties of aggregate

Aggregate	Specific gravity	FM
Fine	2.51	2.78
Coarse (G_{max} 25mm)	2.64	7.58

Table 2 Properties of binders

binder	Chemical composition (%)						Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃		
OPC	21.8	5.8	3.6	60.6	3.5	2.6	1.0	3,422
GBC	25.0	11.0	2.0	53.1	4.6	2.2	1.1	2,96
FA	68.0	25.0	2.9	2.0	0.9	-	2.5	2,29

결정은 플라이 애시의 경우 비교적 치환사례가 많은 10~20%에서 검토하였으며 고로슬래그 미분말은 시멘트와 미리 혼합된 것을 사용하였다. 또한, AE제와 감수제를 적량 사용하여 목표슬럼프와 공기량을 확보하였으며 완성된 시험체는 28일 수중양생을 행하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 초기표면 흡수실험

콘크리트의 내구성에 가장 크게 영향을 미치는 표면 콘크리트의 치밀함을 알기 위하여 콘크리트의 흡수실험을 행하였다.

BS 1881의 기준에 따라 Fig. 1과 같이 초기표면 흡수실험(Initial Surface Absorption test, ISAT)으로 단위면적 및 단위시간에 대한 ISAT 값을 구하였다.

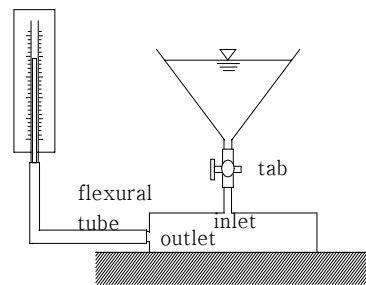


Fig. 1 ISAT setting

2.2.2 내화학약품성

독성의 화학물질은 외기로부터 시멘트 페이스트와 골재사이의 경계영역에 주로 생성되는 에트링가이트와 유리 수산화칼슘 조직체의 화학적 파괴를 일으킬 수 있다. 그래서 5% H₂SO₄ 수용액과 10% Na₂SO₄ 수용액에 28일, 56일 동안 침지하여 수중양생 콘크리트에 대한 압축강도비를 정리하였고 RILEM⁽⁴⁾과 일본 토목학회⁽¹⁾에서 제안된 열화깊이 산정식인 식 (1)과 식 (2)에 의하여 열화인자 침투속도계수를 평가하였다.

$$s_t = \frac{d}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{F_s}{F_i}} \right) \quad (1)$$

$$y = s_t \sqrt{t} \quad (2)$$

여기서,

- y : 열화인자 침투깊이(mm),
- d : 시험체의 직경(mm),
- F_i : 표준양생 시험체 강도(kgf/cm²),
- F_s : 열화된 시험체의 강도(kgf/cm²),
- t : 열화기간(years)이다,
- s_t : 열화인자 침투속도계수(mm/√year)이다.

2.2.3 중성화 촉진 실험

콘크리트의 촉진실험 조건은 이산화탄소 농도 7%, 온도 50°C, 습도 50%의 조건 하에서 중성화 촉진시험을 행하였다.

2.2.4 염화물 침투 실험

외부의 유해한 이온으로부터 매입 철근의 보호성을 검토하기 위하여 28일 표준양생 이후 3M의 NaCl 수용액 침지실험을 하였다. 표면으로부터 2cm까지 시료를 추출하고 Cl-1000(미국 NDT James 사)으로 염화물량을 측정후, Fick의 확산 제2법칙에 의하여 염화물 확산계수를 구하여 확산성을 판단하였다.

3. 실험결과 및 토론

28일 및 56일 압축강도를 측정하여 보인 것이 Fig. 2로서 28일 강도는 보통콘크리트가 가장 높았으나 56일 강도에는 가장 높은 강도 향상을 보인 것이 고로슬래그 혼합 콘크리트이다.

3성분계 혼합 콘크리트는 28일 강도에서 보통 콘크리트보다 낮은 강도를 보이지만 56일 재령에서 보통 콘크리트와 근사한 수준까지 강도발현을 이룰 수 있었고 재령경과에 따른 강도발현성은 지속적인 것으로 기대된다.

Table 3 Mix Proportions of Concrete

Mix Symbol	G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				
						W	C	FA	S	A
OPC	25	12±2.0	4.5±1.0	42	42	160	380	-	711	1032
FC10	25	12±2.0	4.5±1.0	42	42	160	342	38	706	1025
GBC	25	12±2.0	4.5±1.0	42	42	160	380	-	695	1009
TBC10	25	12±2.0	4.5±1.0	42	42	160	342	38	692	1005
TBC20	25	12±2.0	4.5±1.0	42	42	160	304	72	690	1003

- ※ TBC 10
- Fly ash replacement (%)
 - OPC: Ordinary Portland cement
 - GBC: Granulated blast furnace slag cement
 - FC: Fly ash cement
 - TBC: Ternary blended cement

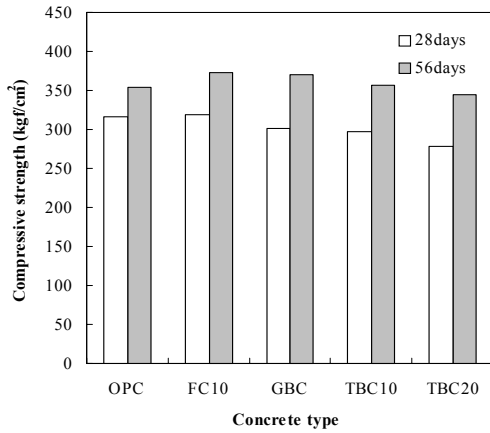


Fig. 2 Compressive strength with concrete type

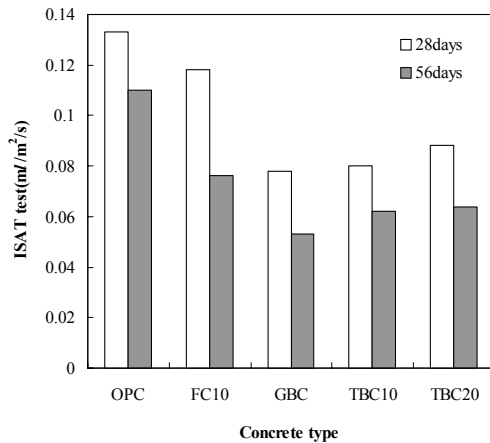


Fig. 3 ISAT value with concrete type

Fig. 3은 콘크리트의 투기성 판단을 위한 지표로서 초기 흡수율을 평가한 결과를 보인 것으로 고로슬래그 콘크리트와 플라이애시 10%를 함유한 3성분계 혼합 콘크리트가 가장 우수한 내흡수율을 보임을 알 수 있다. 56일 재령에서는 고로슬래그 콘크리트의 치밀성이 가장 증가하여 내흡수율이 향상되었다.

Fig. 4와 Fig. 5는 5% 황산용액과 10% 황산염 용액에 각각 침지한 콘크리트의 열화인자 침투속도계수를 보인 것으로 보통콘크리트에 대비하여 2성분계 및 3성분계 혼합 콘크리트가 열화인자 침투속도계수가 크게 감소하여 열화저항성에 대한 효율성이 높은 것을

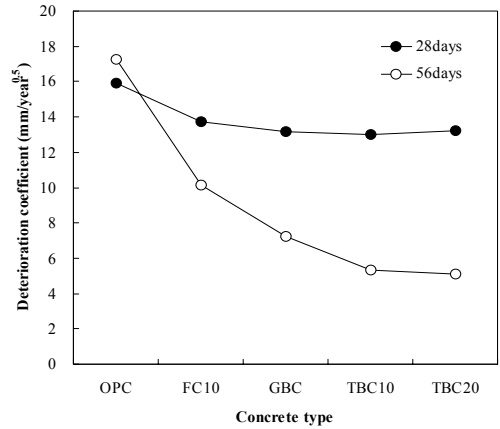


Fig. 4 Deterioration coefficient by 5% H₂SO₄ solution

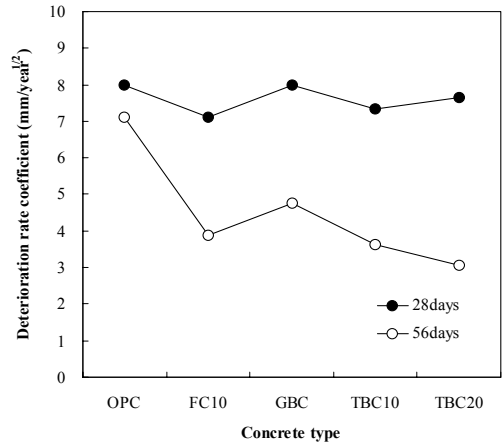


Fig. 5 Deterioration coefficient by 10% Na₂SO₄ solution

알 수 있다. 이것은 플라이 애시의 포졸란 반응과 고로슬래그 미분말의 잠재수경성 작용으로 인한 알칼리성 수화생성물(CH, KH, NH)의 강도발현에 유익한 수화물로 전환되었기 때문으로 생각된다. 따라서 3성분계 혼합 콘크리트는 내화확성이 요구되는 하수암거 및 복개구조물 등의 사용에 적합할 것으로 판단된다. 여기서 침지재령 28일에 대비하여 56일에서 혼합콘크리트가 열화인자 침투속도계수가 다소 감소한 이유는 화학작용에 의한 강도감소보다 혼화제에 의한 강도증가가 더 발현되었기 때문이며 장기적으로 더욱 우수한 내화확약품성이 기대된다.

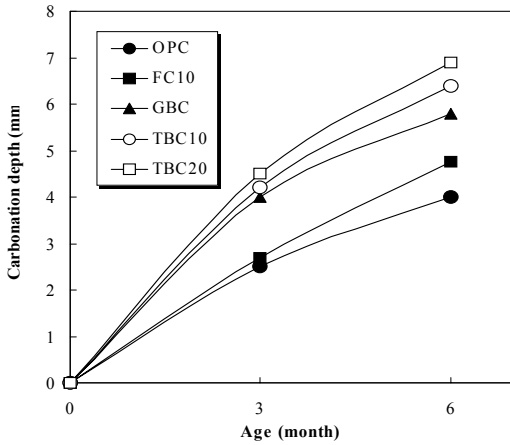


Fig. 6 Carbonation with concrete type

Fig. 6은 각종 콘크리트의 중성화에 대한 저항성을 판단하기 위한 것으로 높은 혼화재의 사용으로 3성분계 콘크리트가 보통콘크리트에 대비하여 1.71배~2배 빠르게 진행되었다. 이는 혼합콘크리트에서 알칼리 생성물이 혼화재와 반응하여 소비된 것이 주요 원인으로, 물-결합재비를 다소 감소시켜 공극감소를 유도하거나 양생일을 증가시켜 콘크리트의 미세구조를 치밀하게 해야 할 것이다.

다음은 보통콘크리트에 대비한 2성분계 및 3성분계 혼합 콘크리트의 염화물 침투에 대한 저항성의 실험 결과를 보인 것이 Fig. 7이다. 보통콘크리트는 재령경과에 따른 총통과전하량의 감소폭이 컸으나 혼합콘크리트가 28일, 56일에서 뛰어난 확산저항성을 보였다.

보다 정량적인 염화물 확산성 평가를 수행하기 위하여 콘크리트 종류 및 재령경과에 따른 염화물 확산계수를 산정한 것이 Fig. 8이다. 혼합 콘크리트가 보통 콘크리트보다 염화물 확산계수가 감소하였으며 특히, 3성분계 혼합 콘크리트는 다른 콘크리트보다도 차명효과가 우수하였는데 6개월 침지에서 보통콘크리트의 0.62~0.63배에 준하는 낮은 확산성을 보였다. 한편, 3성분계 콘크리트는 재령경과에 따른 염화물 확산계수도 다소 감소하였는데 9개월 경과하면서 보통콘크리트에 대비하여 0.55~0.58배로서 다른 콘크리트에 비하여 시간경과에 따른 염화물 확산계수가 뚜렷히 감소하

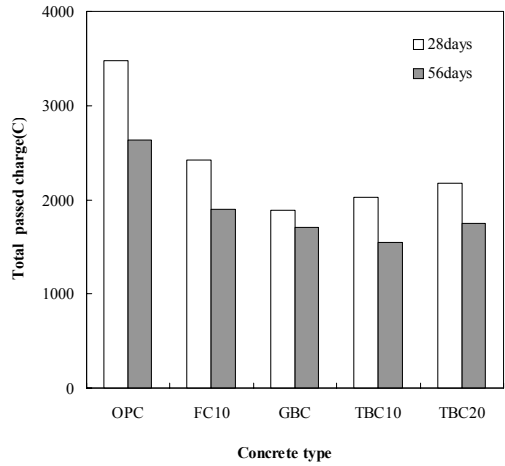


Fig. 7 RCPT result with concrete type

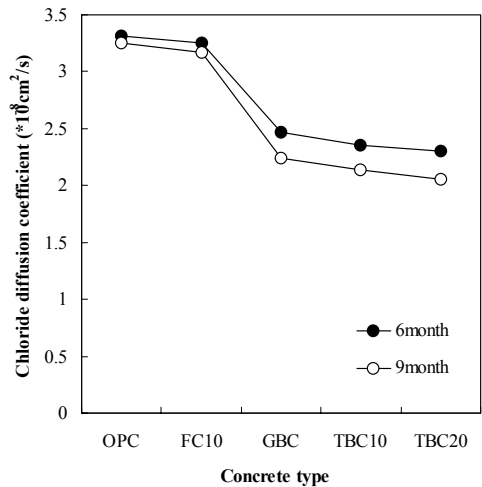


Fig. 8 Chloride diffusion coefficient with concrete type

는 현상을 보였다. 이러한 현상은 Fick의 확산 2법칙을 이용한 내구수명 예측에서 플라이 애시와 고로슬래그를 함유한 콘크리트가 피복두께의 소량증가보다도 내구수명을 연장시키는데 더 유효하다는 문헌적 보고를 반영한다.⁽⁶⁾ 이의 원인은 물리적 측면에서 혼화재의 장기적인 결합작용이 지속되면서 미세구조의 치밀성 향상이 초래되었기 때문이며 화학적 측면에서는 염화물을 흡착할 수 있는 알루미늄이네이트 고상으로 고정화 능력의 향상효과가 내부에서 작용하는 현상에 기인된다.

Arya 등⁽⁷⁾이 염화물의 선혼입 실험에서 고로슬래그 미분말, 플라이 애시, 보통 포틀랜드 시멘트의 순으로 염화물의 고정화가 큰 것을 고려해 볼 때 해양 콘크리트 구조물의 경우, 침지대와 같은 순수한 염화물 침투 환경만 고려한다면 고로슬래그 미분말을 기초로 하고 플라이 애시를 적량 치환한 3성분계 혼합 콘크리트는 차염효과의 극대화를 이룰 수 있는 우수한 콘크리트 배합으로 기대된다. 그러나 중성화에 대한 취약성을 고려한다면 해수 비말대 및 대기 중에 노출된 부위는 중성화에 의한 복합열화가 진행되어 염화물 이온의 탈착으로 콘크리트 내부의 염소농도가 상승할 수 있으므로 이에 대한 문제점을 충분히 고려하여 시공에 반영해야 한다.

4. 3성분계 콘크리트의 활용 가능성

본 연구결과와 관련문헌을 종합하여 향후 3성분계 혼합 콘크리트의 활용 가능성에 대해서 살펴보면 장기강도, 내화학약품성 및 차염성 등에서 우수한 저항효과를 얻을 수 있으므로 내구적인 콘크리트를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 고로슬래그 및 플라이 애시의 사용으로 인한 문제점도 지적되고 있는데 첫째는 낮은 초기강도 발현성을 들 수 있다. 이는 거푸집 존치기간을 장기화시키고 공기 및 공사비의 증가를 초래하므로 혼화재의 작용을 촉진하는 연구가 필요한데 대표적인 방법으로 Na_2SO_4 , CaSO_4 등의 활성제를 적절히 사용하거나 알칼리 활성 시멘트를 이용하는 것이다.^{(8)~(10)} 둘째는 콘크리트의 품질이 양생조건에 민감하므로 초기양생에 대한 각별한 노력을 기울이지 않으면 오히려 침투성이 취약한 콘크리트가 되므로 주의가 필요하다. 셋째는 본 연구에서 도출된 사항으로 혼화재의 치환으로 인한 중성화 속도가 빠르게 진행된다는 점이다, 특히, 물-결합재비가 다소 높은 배합으로 타설했을 경우, 염화물과 중성화의 복합 열화환경에 노출되었거나 배합시 염화물이 혼입되면 오히려 열화속도가 빨라질 수 있다. 따라서 3성분계 혼합 콘크리트는 배합초기부터 시공시 해사의 사용으로 인한 염화물의 도입원을 엄격히 차단하고 보통콘크리트보다 물-결합재비를 다소 감소

시키거나 양생일을 증가시켜 중성화에 대한 저항성을 추가적으로 확보할 필요가 있다.

향후 3성분계 혼합 콘크리트의 안정적인 품질을 확보하기 위해서는 다양한 물-시멘트 조건에서 열화제어에 적합한 배합 도출, 혼화재 복합치환에 따른 강도발현성과 양생조건에 따른 콘크리트 품질변화에 대한 연구가 필요하다.

5. 결 론

본 연구결과를 종합분석하면 3성분계 혼합 콘크리트는 보통콘크리트 보다 초기강도는 낮은 단점이 있으나 내구성 확보 측면에는 유리한 것으로 귀결된다. 특히, 내화학약품성의 향상 및 재령경과가 지속됨에 따른 염화물 확산성의 장기적인 감소효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 3성분계 혼합 콘크리트는 보통콘크리트보다 중성화에 대한 저항성이 다소 취약하므로 이산화탄소가 과다한 지하철 콘크리트 구조물을 비롯한 대도시에 건설되는 구조물, 그리고 해양성 환경에서 중성화와 염화물의 복합열화를 받을 수 있는 부위에는 유의하여 시공되어야 한다.

참고문헌

1. 日本土木學會, 콘크리트標準示方書(維持管理編), pp.128-130, 2001.
2. M.R. Jones, R.K. Dhir, and B.J. Magee, "Concrete Containing Ternary Blended Binders: Resistance to Chloride Ingress and Carbonation," Cement and Concrete Research, Vol.27, No.6, pp.825-831,1997.
3. http://www.ssangyongcement.co.kr/unit_index.htm
4. RILEM Report 16, Penetration and Permeability of Concrete : Barriers to Organic and Contaminating Liquids, E & FN SPON, pp.209, 1997.
5. D.S. Shen and Z.E. Mao, "High Quality Fly Ash Concrete," Shanghai Science and Technology Press, China, pp.54-57, 1992.
6. Michael D.A. Thomas, Phil B. Bamforth, "Modelling Chloride Diffusion in Concrete Effect of Fly Ash and Slag," Cement and Concrete

-
- Research, Vol.29, pp.487-495, 1999.
7. C. Arya, and Y.Xu, "Effect of Cement Type on Chloride Binding and Corrosion of Steel," Cement and Concrete Research, Vol.25, No.4, pp.893-902, 1995.
8. Qian Jueshi, Shi Caijun, Wang Zhi, "Activation of Blended Cements Containing Fly Ash," Cement and Concrete Research, Vol.31, pp.1121-1127, 2001.
9. C.J. Shi, "Pozzolanic reaction and Microstructure of Chemical Activated Lime-Fly Ash Paste," ACI Material Journal, Vol.95, No.5, pp.537-545, 1998.
10. F. Puertas, S. Martiez-Raminez, S. Alonso, T Vazquez, "Alkali activated fly ash /slag cement Strength Behavior and Hydration," Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.1625-1632, 2000.

(접수일자 : 2002년 9월 19일)