

Research Paper

High Sulfated Calcium Silicate 시멘트 콘크리트의 염소이온침투저항성 평가 Evaluation of Chloride Ion Penetration Resistance of High Calcium Silicate Cement Concrete

정석만^{1,2} · 양완희² · 김현수³ · 이건철^{4*}

Jeong, Seok-Man^{1,2} · Yang, Wan-hee² · Kim, Hyeon-Soo³ · Lee, Gun-Cheol^{4*}

¹Doctoral Course, Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk, 27469, Korea

²Researcher, R&D Center, Withmtech Co., Ltd., Suwon-si, Gyeonggi-do, 16367, Korea

³Researcher, Department of Building Research, Korea Institute of Construction Technology, Ilsan Gu, Goyang, 10223, Korea

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk, 27469, Korea

*Corresponding author

Lee, Gun-Cheol

Tel : 82-43-841-8207

E-mail : gclee@ut.ac.kr

ABSTRACT

The aim of this work was to a comparative review the performance of high calcium silicate cement (HSCSC) and that of ordinary Portland cement(OPC) and blast furnace slag cement(S/C). The result of the compressive test confirmed that the compressive strength development rate of high calcium silicate cement concrete at the age of 3 days was 73.6% that of ordinary Portland cement concrete. However, at the age of 28 days, the strength development rate of high calcium silicate cement increased to about 107.0% compared to ordinary Portland cement. In addition, the test of the chloride ion penetration resistance of concrete showed that at the age of 28 days, the passed charge decreased by 73.4% and 93.0%, respectively, in blast furnace slag cement and high calcium silicate cement compared to ordinary Portland cement, and at the age of 56 days, it decreased by 79.1% and 98.3%, exhibiting excellent resistance to chloride ion penetration. In particular, it was confirmed that the rate of decrease in the passed charge with age was higher in high calcium silicate cement than in ordinary Portland cement and blast furnace slag cement.

Keywords : eco-friendly concrete, high calcium silicate, cement binder, eco cement, blast furnace slag cement

1. 서론

국제적으로 환경 문제가 크게 대두되면서 콘크리트의 이산화탄소 배출에 따른 환경오염 문제가 부정적으로 인식되고 있다. 대부분 콘크리트의 결합재로 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하는데 제조과정에서의 이산화탄소 배출 등의 환경오염 요인으로 인하여 시멘트의 사용량을 줄여 친환경 콘크리트를 만드는 추세이다. 생태건축에서도 규모에 따라 기초 및 슬래브 등에 기존의 건축물에 활용되는 시멘트 콘크리트의 적용이 필요한 경우가 발생할 수 있는데, 기존의 포틀랜드 시멘트는 천연 자원 및 고에너지 소비 논란 등이 있으므로 좀 더 개선된 형태의 콘크리트 개발 및 적용이 필요한 상황이다.

또한, 콘크리트는 내구성이 우수하여 구조물의 사용수명이 70년에서 100년으로 알려져 왔으나 일산화탄소, 탄산가스, 산성우, 황산염, 염화물 등의 다양한 열화 인자들에 의해 영향을 받고 있으며, 이로 인해 유해성분에 의한 침식작용, 탄산화작



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용, 비래염분, 해사 및 제빙제 사용에 따른 염해 작용, 온도변화와 건습 반복에 의한 동결융해 작용 등이 단독 혹은 복합적으로 영향을 미쳐 콘크리트의 내구성을 저해하고 있다. 최근 국내외에서 상기 작용들에 의해 콘크리트 구조물의 내구성 저하에 따른 피해의 심각성이 크게 대두되고 있다. 이 중에서도 염해는 콘크리트 구조물의 초기 성능 저하와 구조적 안전성 및 사용수명 저하에 치명적인 원인이 되고 있다. 특히 철근 콘크리트 구조물에 염화물이 침투 확산하는 경우 철근의 부식으로 이어져 철근 팽창에 의한 콘크리트의 균열, 박리와 같이 내구성능 저하의 주요인을 야기시키고 있다[1]. 따라서 해양환경과 다양한 화학적 내구성능이 요구되는 콘크리트 및 지하구조물의 적용이 가능한 시멘트의 개발 및 적용이 필요한 실정이다. 통상적으로 환경오염의 요인과 더불어 고내구성을 요구하는 해양환경의 콘크리트의 경우 배합 측면의 대책으로 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement 이하: OPC)만 사용하기보다는 고로슬래그(Blast Furnace Slag 이하: BFS), 플라이애시(Fly Ash 이하: FA)와 같은 혼화재를 단위 시멘트량에 부분적으로 치환하여 혼입하는 경우가 많다. 그러나 BFS를 활용한 고로슬래그시멘트(Portland blast-furnace slag cement 이하: S/C)의 경우 OPC의 사용량 저감의 한계가 있기에 고로슬래그 미분말의 적극적인 활용과 OPC의 적극적인 저감을 위한 현실적인 측면의 대안을 검토하고자 한다. High Sulfated Calcium Silicate Cement(이하: HSCSC)의 경우 기존의 보통포틀랜드시멘트와는 다르게 경제적이며, 생산 과정에서 에너지 소비가 적고, 산업부산물의 적극적인 활용이 가능한 측면에서 현실적인 대안이 될 수 있다. HSCSC는 일반적으로 잠재 수경성 재료와 황산염 및 석회 광물로 구성되는데 생산 과정에서 소량의 CO₂를 배출하고, 해수 및 황산염 지하수 등의 가혹한 환경에서도 우수한 내구성을 발휘한다[2]. 1940년대 이후 영국, 프랑스, 독일 등에서 활용되어왔으며, 유럽 등지에 관련 규격[3]이 존재하는 등 주요한 고내구성 건설재료로 인식되고 있다. HSCSC는 주로 잠재 수경성이 있는 산업 부산물을 활용하므로 경제적이며, OPC와 달리 소성 공정이 없이 제조할 수 있으므로 에너지 소비가 적고 천연광물의 보호 및 온실가스(CO₂) 저감에 기여할 수 있다. 또한 OPC 대비 초기 강도는 다소 작지만 장기 강도에서 우수한 성능을 발휘하며, 상대적으로 월등히 우수한 내구성을 보여주는 장점이 있다[4-7]. 이러한 고내구성을 기반으로 해양환경의 콘크리트 및 지하구조물에 적용되는 콘크리트 등의 활용이 가능한 HSCSC의 기초특성을 분석하고 이를 활용한 콘크리트의 염소이온침투저항성과 압축강도 성능을 검토하고자 일련의 실험을 실시하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 실험은 보통포틀랜드시멘트(OPC)와 고로슬래그 시멘트(S/C) 그리고 HSCSC를 각각 적용하여 이에 따른 기초특성 및 물리특성 변화와 염소이온에 대한 침투저항성능을 검토하기 위해 시멘트 페이스트와 모르타르, 콘크리트로 각각 실험을 진행하였다. 시멘트의 기초특성을 확인하고자 비중, 분말도, 표준주도에 따른 응결시간을 측정하였으며, 표준 모르타르 배합 실험을 통하여 모르타르의 플로와 재령에 따른 압축강도를 측정하였다. 또한 콘크리트 특성에 미치는 영향을 검토하기 위해 콘크리트 배합실험을 통하여 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프, 공기량을 측정하였으며, 경화 콘크리트는 재령에 따른 압축강도 및 염소이온 침투 저항성 측정을 실시하였다.

2.1.1 시멘트 페이스트, 모르타르 실험계획

본 연구의 시멘트 페이스트와 모르타르 실험요인은 Table 1과 같고, 모르타르 배합표는 Table 2와 같다. 실험요인과 같이 페이스트 및 모르타르 결합재를 OPC, S/C, HSCSC로 구성하였고, OPC와 S/C의 경우 국내 기업 S 사의 제품을 선정하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 결합재 각각을 변수로 설정하였으며, 최적 배합량은 사전실험을 거쳐 결정되었다.

Table 1. Experimental factor I

		Factor		Levels
Experiment of paste	Mixture	Binder	3	OPC, S/C, HSCSC
	Test item	Fresh state	1	Setting time
Experiment of mortar	Mixture	Binder	3	OPC, S/C, HSCSC
		B/S	1	1:3
	Test item	Fresh state	1	Flow
		Hardened state	1	Compressive strength(3, 7, 28 days)

Table 2. Mix proportion of mortar specimens

	W/B (%)	Binder(%)			Sum	Sand (B:S)
		OPC	S/C	HSCSC		
OPC		100	-	-		
S/C	50.0	-	100	-	100	1:3
HSCSC		-	-	100		

2.1.2 콘크리트 실험계획

본 연구의 콘크리트 실험요인은 Table 3과 같고, 콘크리트 배합표는 Table 4와 같다. 선행되었던 시멘트 실험요인과 동일하게 콘크리트 결합재를 OPC, S/C, HSCSC로 구성하였고, Table 3에 나타난 바와 같이 결합재 각각을 변수로 설정하였다. 최적 배합량은 사전실험을 거쳐 결정되었으며, 그 외 물시멘트비, 잔골재율, 고성능감수제의 혼입율은 사전실험에서 적절한 작업성 및 강도가 확보되었던 범위에서 선정하였다.

Table 3. Experimental factor II

		Factor		Levels
Experiment of concrete	Mixture	Binder	3	OPC, S/C, HSCSC
		Admixture(%)	1	0.8
	Test item	Fresh state	2	Slump(mm) Air(%)
		Hardened state	2	Compressive strength(3, 7, 28 days) RCPT ^{*)} (28, 56 days)

*) RCPT: Resist Chloride Ion Penetration Test(ASTM C 1202)

Table 4. Mix proportion of concrete specimens

	W/B (%)	S/a (%)	W	Weight for unit volume: kg/m ³						
				OPC	S/C	HSCSC	Sum	S	G	Ad.
OPC				340	-	-	340	881	918	
S/C	45.0	49.0	153	-	340	-	340	876	912	2.7
HSCSC				-	-	340	340	870	910	

2.2 실험재료

실험재료는 아래의 Table 5, Figure 1과 같은 3종류의 시멘트를 사용하였으며, 밀도 3.15g/cm^3 , 분말도 $3,412\text{cm}^2/\text{g}$ 의 1종 보통포틀랜드시멘트, 밀도 3.04g/cm^3 , 분말도 $3,890\text{cm}^2/\text{g}$ 의 2종 고로슬래그시멘트를 사용하였다. HSCSC는 밀도 2.95g/cm^3 , 분말도 $6,275\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고 미분말 형태이며, 철강산업의 부산물인 황산염 활성화를 이용한 Super Sulfated Cement(이하: SSC)의 일종으로 BS EN 15743[3] 규격에 기반한 SSC 조성은 Table 6과 같다. 기존의 연구 Huang et al.[8], Cyr and Andre[9]에서 SSC의 고로슬래그미분말의 분말도 증가에 따른 콘크리트 성능이 더욱 우수한 연구결과를 보고하고 있다. 이에따라 본 실험에 사용된 HSCSC는 SSC의 범주에 있는 친환경 시멘트로써 본 논문에서는 시멘트의 함량을 최소로 낮추고도 적절한 강도 특성을 확보하기 위하여 3종 고로슬래그미분말 보다 분말도가 높은 2종 고로슬래그미분말을 사용하였다. HSCSC는 당사에서 제조되었으며, 80%의 BFS와 15%의 Calcium Sulfate(이하: CS), 3%의 OPC, 마지막으로 2%의 Calcium hydroxide(이하: CH)로 혼합되었고, 구성성분의 화학적 조성은 Table 7과 같다.

Table 5. Physical properties of cement

	Shape	Color	Density(g/cm^3)	Blain(cm^2/g)
OPC	Powder	Dark Grey	3.15	3,412
S/C	Powder	Dark White	3.04	3,890
HSCSC	Powder	White	2.95	6,275



Figure 1. Cement used in the experiment

Table 6. Composition of SSC(percentage by weight)[9]

Main Constituents		Additional Constituents	
Granulate Blast furnace slag	Calcium sulfate	Portland cement clinker	Other
S	Cs	K	A
$S \geq 75$	$5 \leq Cs \leq 20$	$0 \leq K \leq 5$	$0 \leq A \leq 5$

Table 7. Chemical composition of HSCSC constituents

Category	Chemical composition(%)						
OPC	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O
	62.39	20.83	5.30	3.00	2.31	2.03	1.01
BFS	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O
	41.22	32.54	15.79	0.55	6.45	0.18	0.24
CS	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	
	40.36	0.76	0.11	0.07	0.06	55.16	
CH	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	LOI	
	69.71	0.64	0.61	0.12	2.34	22.5	

2.3 실험방법

2.3.1 시멘트 페이스트, 모르타르 실험방법

시멘트 페이스트의 비빔 방법은 KS L 5109 「굳지 않은 수경성 시멘트 페이스트 및 모르타르의 기계적 혼합 방법」에 근거하여 혼합하였으며, 비카트 침에 의한 시멘트 응결시험은 사전실험을 통하여 얻어진 결합재 각각의 표준주도에 따른 물 결합재비(OPC: 27.5 %, S/C: 31.0 %, HSCSC: 34.5 %)를 적용하고 KS L ISO 9597 「시멘트의 응결 및 안정성 시험방법」에 준하여 실시하였다. 표준 모르타르 배합실험의 경우 KS L ISO 679 「시멘트의 강도 시험방법」에 근거하여 실시하였다. 또한, 시멘트 플로의 결정은 KS L 5111 「수경성 시멘트 시험용 플로 테이블」에 근거하여 측정하였다.

2.3.2 콘크리트 실험방법

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프는 KS F 2402 「콘크리트의 슬럼프 시험 방법」에 근거하여 측정하였으며, 공기량은 KS F 2421 「압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법」에 근거하여 측정을 실시하였다. 경화 콘크리트의 경우 KS F 2403 「콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법」규정에 근거하여 지름 100mm, 높이 200mm의 실린더 원형 공시체를 제작하여 표준양생 후 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 근거하여 재령에 따른 압축강도 측정을 진행하였으며, KS F 2711 「전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투저항성 시험방법」에 근거하여 진행하였다. 시험에 사용된 시험체는 $\varnothing 100 \times 200$ mm 공시체를 28일간 양생한 후 $\varnothing 100 \times 50 \pm 3$ mm가 되도록 시험체를 절단하였다. 이후 3시간 동안 진공상태를 유지한 후, 18시간 동안 증류수에 침지하여 완전히 포화가 되도록 하였다. 시험셀(Applied Voltage Cell)의 (-)전극에 3.0%의 NaCl 용액을 채우고 (+)전극쪽에는 0.3N의 NaOH 용액을 채운 후, 시험체를 시험셀에 고정 시키고 Figure 2와 같이 회로를 구성하여 재령에 따른 염소이온침투저항성 실험을 실시하였다.

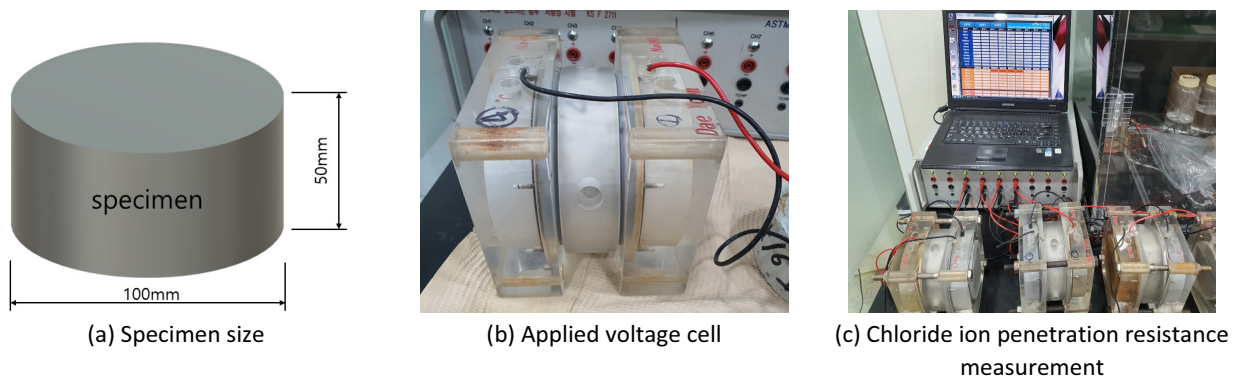


Figure 2. Preparation for test to resist chloride ion penetration

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시멘트 페이스트, 모르타르 실험결과

시멘트 기초특성 평가를 위한 페이스트 및 모르타르의 배합실험 결과는 Table 8과 같다. 시멘트 페이스트의 시멘트별 응결시간은 결합재 각각 표준주도를 잡아 실시하였으며, OPC는 측정결과 초결, 종결이 각각 195min, 340min 측정되었으며, S/C의 경우 OPC 대비 초결 15.4%, 종결 13.2% 지연되었고, HSCSC 또한 OPC 대비하여 초결 48.7%, 종결 54.4% 지연된 것을 확인하였다. 표준모르타르 배합실험 결과의 경우 플로 측정결과로는 OPC, S/C, HSCSC 순서로 180mm, 190mm, 205mm 측정되었고, 압축강도 측정결과는 Table 8과 같으며, 특이사항으로 고로슬래그시멘트와 High Sulfated Calcium Silicate Cement의 경우 3일 재령과 7일 재령에서는 보통포틀랜드시멘트보다 감소했으나, 28일 재령에서는 High Sulfated Calcium Silicate Cement의 강도 발현율이 상승하여 보통포틀랜드시멘트 대비 약 101.1%로 유사한 수준을 확인하였다.

Table 8. Physical properties of cement

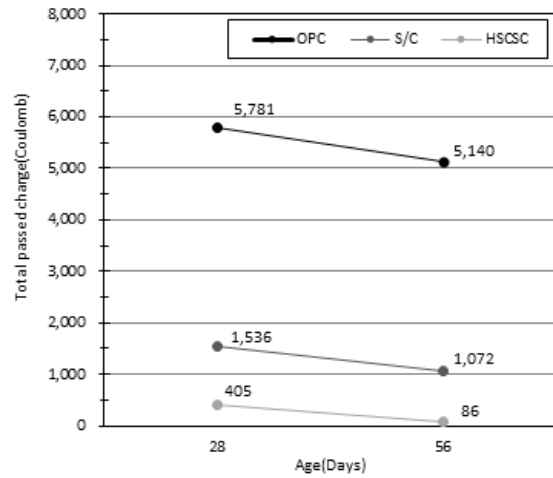
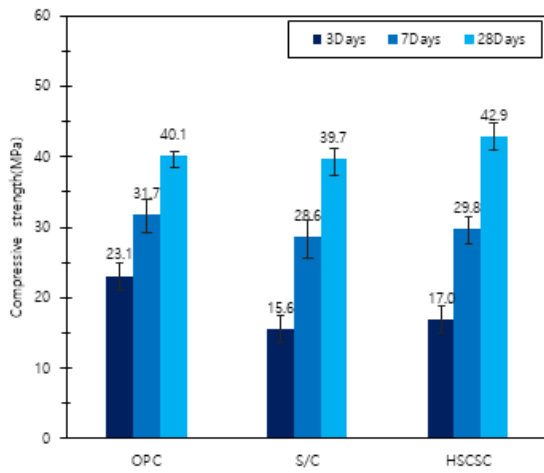
	Setting time of paste		Compressive strength of mortar		
	Setting time(min)		Compressive strength(MPa)		
	initial	final	3 Days	7 Days	28 Days
OPC	195	340	19.5	29.1	43.7
S/C	225	385	16.2	24.0	42.9
HSCSC	290	525	17.7	26.8	44.2

3.2 콘크리트 실험결과

슬럼프 실험결과 보통포틀랜드시멘트, 고로슬래그시멘트, High Sulfated Calcium Silicate Cement의 순서로 140mm, 155mm, 165mm로 측정되었다. 공기량의 경우 5.2%, 5.0%, 4.7%로 측정되어 미소하게 감소하였다. 한편, 재령에 따른 압축강도 측정결과는 Table 9, Figure 3과 같다. 특이사항으로 고로슬래그시멘트와 High Sulfated Calcium Silicate Cement의 경우 3일 재령에서는 보통포틀랜드시멘트보다 감소하였으나, 7일 재령에서 유사한 수준으로 회복되었고, 28일 재령에서는 High Sulfated Calcium Silicate Cement의 강도 발현율이 상승하여 보통포틀랜드시멘트 대비 약 107.0% 수준으로 소폭 상승하였다. 기존의 연구 Kim et al.[10]에서는 SSC에 OPC를 첨가하면 수화작용으로 인하여 수산화칼슘이 생성되고 슬래그 용해를 촉진 시키는 알칼리성 환경을 조성하는 것으로 보고하고 있다. 이는 고로슬래그에서 용해된 이온이 혼합물에 존재하는 황산칼슘과 반응하여 에트린자이트와 같은 주요 생성물 형성에 기여한 것으로 사료되며, 높은 분말도의 2종 고로슬래그는 물이 존재하는 상온에서 시멘트 수화반응에 의해 생성된 수산화칼슘과의 반응을 촉진하여 규산칼슘 수화물(C-S-H) 생성의 추가 발달로 인해 강도 증진에 기여한 것으로 사료된다.

Table 9. Summary of test results measured in hardened concrete specimens

(a) Compressive strength of concrete	Compressive strength(MPa)			(b) Ability to resist chloride ion penetration of concrete	Total passed charge(Coulomb)	
	3 Days	7 Days	28 Days		28 Days	56 Days
	OPC	23.1	31.7		40.1	OPC
S/C	15.6	28.6	39.7	S/C	1,536	1,072
HSCSC	17.0	29.8	42.9	HSCSC	405	86



(a) Compressive strength graph of concrete

(b) Ability to resist chloride ion penetration graph of concrete

Figure 3. Graph of test results measured on hardened concrete specimens

콘크리트 염소이온 침투 저항성 측정결과는 Table 9, Figure 3과 같으며, 재령 28일의 경우 OPC 대비 S/C, HSCSC의 순서로 73.4%, 93.0% 감소하였다. 재령 56일의 경우 79.1%, 98.3% 감소하여, 우수한 염소이온 침투저항 성능을 확인할 수 있었으며, 특이사항으로는 재령이 경과 함에 따라 OPC, S/C보다 HSCSC의 통과전하량 감소율이 더 높은 것을 확인하였다.

기존의 연구 Shi et al.[11]에서 포틀랜드시멘트를 플라이애시나 고로슬래그 미분말 등의 혼화재로 대체할 경우 염소이온 침투저항성이 향상되는 것으로 보고하고 있는데, 이는 미세기공의 크기나 분포, 기공 용액의 조성 변화로 인해 염화물 이온의 투과성이 저하하기 때문이다. 특히 기존의 연구 Roy[12]에서는 고로슬래그 미분말을 포틀랜드시멘트에 대체할 경우 염소이온 확산계수가 감소하는 경향을 나타내는 것으로 분석하고 있으며, 포틀랜드시멘트의 활용을 최소화하고 고로슬래그 미분말을 다량 활용한 본 연구에서도 이러한 분석결과와 유사한 결과를 나타낸 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 보통포틀랜드시멘트(OPC)와 고로슬래그시멘트(S/C), High Sulfated Calcium Silicate Cement (HSCSC)의 특성을 비교 검토하고자 일련의 실험을 실시하였다. 실험항목으로 시멘트 페이스트의 응결시간을 확인하였으며, 표준모르타르 배합실험을 통하여 플로와 압축강도를 확인하였다. 콘크리트의 경우 굳지 않은 콘크리트는 슬럼프, 공기량을 확인하였고, 경화 콘크리트는 압축강도, 염소이온침투저항성을 확인하였으며 그 결과를 다음과 같이 기술하였다.

- 1) 본 연구에서 사용한 시멘트 3종의 페이스트 응결 측정결과 OPC는 초결과 종결이 각각 195min, 340min 측정되었으며, S/C의 경우 OPC 대비 초결 15.4%, 종결 13.2% 지연되었고, HSCSC 또한 초결 48.7%, 종결 54.4% 지연된 것을 확인하였다.
- 2) HSCSC의 모르타르, 콘크리트 특성을 검토한 결과 압축강도 성능에 있어서 HSCSC 배합은 OPC, S/C 배합과 동등 또는 그 이상의 성능을 나타내었다. 특히 초기 재령 강도가 저하되었던 점이 7일은 유사, 28일은 더 크게 측정되었다. 이는 고로슬래그에서 용해된 이온이 혼합물에 존재하는 황산칼슘과 반응하여 에트린자이트와 같은 주요 생성물 형성에 기여한 것으로 사료되며, 높은 분말도의 2종 고로슬래그는 물이 존재하는 상온에서 시멘트 수화반응에 의해 생성된 수산화칼슘과의 반응을 촉진하여 규산칼슘 수화물(C-S-H) 생성의 추가 발달로 인해 강도 증진에 기여한 것으로 사료된다.

- 3) HSCSC 콘크리트의 염소이온침투저항 성능에 있어서 재령 28일의 경우 OPC 대비 S/C, HSCSC 순서로 각각 73.4%, 93.0% 감소하였으며, 재령 56일의 경우 79.1%, 98.3% 감소하여, 우수한 염소이온 침투저항 성능을 확인할 수 있었다. 특이사항으로는 재령이 경과 함에 따라 HSCSC는 OPC, S/C 보다 염소이온침투저항성 감소율이 더 높은 것을 확인하였다. 이는 미세기공의 크기나 분포, 기공 용액의 조성 변화로 인해 염화물 이온의 투과성이 저하된 것이 원인으로 사료된다.
- 4) 이를 종합해 보면 HSCSC 콘크리트의 우수한 염소이온 침투 저항성능, OPC보다 우수한 장기 재령에서의 압축강도를 기반으로 향후 내구성이 요구되는 해안 및 수중콘크리트 등의 적용 및 보급화가 가능할 것으로 사료되며, 앞으로도 본 연구와 같은 다양한 콘크리트의 시멘트 사용량 저감과 관련된 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

요약

High Sulfated Calcium Silicate cement(HSCSC) 콘크리트의 성능을 보통포틀랜드시멘트(OPC), 고로슬래그시멘트(S/C)와 비교 검토하고자 하였다. 콘크리트 압축강도 실험결과 초기 3일 재령에서의 High Sulfated Calcium Silicate cement 콘크리트 압축강도 발현율이 보통포틀랜드시멘트 콘크리트의 73.6% 수준으로 다소 적게 확인되었으나, 28일 재령에서 High Sulfated Calcium Silicate cement의 강도 발현율이 상승하여 보통포틀랜드시멘트 대비 약 107.0% 수준으로 소폭 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 콘크리트의 염소이온침투저항성 실험결과 재령 28일의 경우 보통포틀랜드시멘트 대비 고로슬래그시멘트, High Sulfated Calcium Silicate cement 순서로 각각 73.4%, 93.0% 감소하였으며, 재령 56일의 경우 79.1%, 98.3% 감소하여, 우수한 염소이온 침투 저항성능을 확인하였다. 특이사항으로는 보통포틀랜드시멘트, 고로슬래그시멘트보다 High Sulfated Calcium Silicate cement의 재령 경과에 따른 통과 전하량 감소율이 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

키워드 : 친환경 콘크리트, 고 황산염, 시멘트 결합재, 친환경 시멘트, 고로슬래그 시멘트


Funding


Not applicable


Acknowledgement


This research was supported by a grant from National Land Transportation Technology Project by Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of Korean(No. 22AUDP-B146511-05).

ORCID

Seok-Man Jeong,  <https://orcid.org/0000-0003-0853-2629>

Wan-Hee Yang,  <https://orcid.org/0000-0002-0737-7519>

Hyeon-Soo Kim,  <http://orcid.org/0000-0002-5648-5399>

Gun-Cheol Lee,  <http://orcid.org/0000-0003-4743-6373>

References

1. Kim DS, Khil BS, KIM WJ, Choi SJ, Lee SY, Jung SJ. An experimental study on the engineering properties and chlorides penetration resistance of concrete added with durability improvement agent. *Proceeding of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea*; 2006 Oct 27-28; Daegu, Korea. Seoul (Korea): Architectural institute of korea; 2006. p. 433-6.
2. Bazaldua-Medellin ME, Fuentes AF, Gorokhovskiy A, Escalante-Garcia JI. Early and late hydration of supersulphated cements of blast furnace slag with fluorgypsum. *Materiales de Construcción*. 2015 Feb;65(317):06013. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2015.06013>
3. 15743+ A1. Supersulfated cement – Composition, specifications and conformity criteria. United Kingdom: British Standards Institution. 2015.
4. Gruskovnjak A, Lothenbach B, Holzer L, Figi R, Winnefeld F. Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement. *Advances in cement research*. 2006 Jul;18(3):119-28. <https://doi.org/10.1680/adcr.2006.18.3.119>
5. Haha MB, Le Saout G, Winnefeld F, Lothenbach B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. *Cement and Concrete Research*. 2011 Mar;41(3):301-10. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.016>
6. Dutta DK, Borthakur PC. Activation of low lime high alumina granulated blast furnace slag by anhydrite. *Cement and Concrete Research*. 1990 Sep;20(5):711-22. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90005-I](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90005-I)
7. Bijen J, Niel E. Supersulphated cement from blastfurnace slag and chemical gypsum available in the Netherlands and neighbouring countries. *Cement and Concrete Research*. 1981 May;11(3):307-22. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90104-6)
8. Huang, TY, Nguyen HA, Chang TP, Chen CT, Liu YW. Engineering properties and microstructural performance of low energy super-sulfated cement using industrial waste anhydrite. *Concrete and asphalt materials*. 2017 Oct;130:04001-5. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713004001>
9. Cyr M, Andre L. Durability of supersulfated cement with improved early strength. karen scrivener. 15th International Congress on the Chemistry of Cement. 2019 Sep 16-20; Prague, Czech. Dusseldorf (Germany): Cement and Concrete Research. 2019. p. 616-23.
10. Kim HS, Kim IK, Yang WH, Moon SY, Lee JY. Analyzing the basic properties and environmental footprint reduction effects of highly sulfated calcium silicate cement. *Sustainability*. 2021 Jul;13(14):7540. <https://doi.org/10.3390/su13147540>
11. Shi C, Stegemann J, Caldwell R. Effect of supplementary cementing materials on the rapid chloride permeability test (AASHTO T 277 and ASTM C 1202) results. *ACI Materials*. 1998 Jul;95(4):389-94. <https://doi.org/10.14359/381>
12. Roy DM. Hydration, microstructure, and chloride diffusion of slag-cement pastes and mortars - Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. *Third International Conference Proceedings*; 1989 Jun 18-23; Trondheim, Norway. Southern California (USA): Special Publication. 1989. p. 1265-82.