

광물질 혼화제를 혼입한 초속경시멘트 콘크리트의 투수 특성

Permeability of Jet Set Cement Concrete with Mineral Admixtures

원 종 필* · 공 태 응**

Won, Jong Pil · Kong, Tae Woong

Abstract

The purpose of this study is to improve the performance of jet set cement, which mixed with the mineral admixtures such as silica fume, fly ash and ground granulated blast furnace slag. First, the test of mortar according to the substitute ratio of mineral admixtures were evaluated. And then using it obtained from test results, it was conducted with experiment of mechanical, physical and permeable characteristics of concrete. Laboratory test results showed that concrete substituted for 5% of silica fume didn't have an effect on prominent performance relating to compressive strength. However it was superior to concrete in case of resistance of chloride permeation.

Keywords : jet set cement, mineral admixtures, permeability

I. 서 론

과학과 산업기술의 급속한 발전은 재료특성 세분화와 혁신적인 개선을 요구하고 있어 시멘트 분야에서도 긴급공사용으로 조기강도를 발현시키는 연구가 계속되어 왔다.¹⁾ 콘크리트 구조물의 급속시공

및 긴급보수에 따른 콘크리트의 조기강도화를 요구함에 따라, 이를 해결하기 위해 많은 연구 및 개발이 진행되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 최근 건축물의 외벽, 건물옥상의 상판, 수리구조물, 도로 및 교량 노면의 보수 등 콘크리트 구조물의 긴급 보수공사에 있어 초속경시멘트의 수요가 증가하고 있는 실정이다.¹³⁾ 초속경시멘트를 사용한 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 조기에 높은 강도발현을 하기 때문에 긴급을 요하는 공사, 동절기공사, 시멘트 2차 제품, 터널공사에 사용하는 샷크리트(shotcrete), 그라우트(grout) 등에 사용된다.^{7),8)} 그러나 초속경시멘트를 사용한 콘크리트의 경우 조기강

* 건국대학교 생명환경과학대학
사회환경시스템공학과 부교수

** 건국대학교 대학원

* Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3750
Fax: +82-2-2201-0907

E-mail address: jpwon@konkuk.ac.kr

도 발현에는 효과적이지만 양생 초기 일반콘크리트에 비해 상대적으로 높은 수화열과 건조수축이 발생한다. 이에 따라 구조물 내에서 열과 수분의 이동으로 인한 수축이 내·외부적 요인에 의해 구속됨으로써 미소균열이 발생하기 쉽다.^{9),11)} 이러한 미소균열은 콘크리트 내의 투수성을 증가시킴과 동시에 다양한 형태의 파괴를 유도함으로써 구조물의 내구성능저하에 직접적인 원인이 될 수 있어 구조물의 안정성에 심각한 영향을 미칠 수 있다.¹²⁾

산업부산물 및 폐기물로 발생되는 실리카 흙, 플라이 애시 및 고로 슬래그 미분말과 같은 광물질 혼화재를 콘크리트에 혼입하여 사용하면 여러 가지 물성 개선 및 향상에 효과적인 연구 성과들이 발표되어 그 사용이 점차 증가하고 있는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 초속경시멘트의 투수 저항성을 향상 시키고자 광물질 혼화제인 실리카 흙, 플라이 애시 및 고로 슬래그 미분말을 시멘트 중량에 대해 치환 첨가하여 모르타르의 성능을 평가한 후 적정 치환율을 콘크리트에 적용함으로써 초속경시멘트를 사용한 콘크리트의 투수 저항성능을 향상시키고자 한다.

II. 실험개요

1. 사용재료

가. 시멘트 및 광물질 혼화재

시멘트는 초속경시멘트를 사용하였으며, 광물질

혼화재로서 실리카 흙은 분말도가 약 240,000 cm²/g인 제품을 사용하였고, 플라이 애시는 보령 화력 발전소에서 부생되는 플라이 애시를 사용하였다. 고로 슬래그 미분말은 광양제철에서 부생되는 것을 사용하였으며, 각각에 대한 물리적 특성 및 화학성분은 Table 1과 같다.

나. 골재 및 지연제

모르타르 실험에서 잔골재는 KS L 5100(시멘트 강도 시험용 표준사)에 의한 주문진 천연사가 사용되었다. 콘크리트 실험에서 굵은 골재는 최대치수 25 mm인 부순 자갈을 사용하였으며, 잔골재는 강 모래를 사용하였다. 모르타르 및 콘크리트 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다. 그리고 응결지연제로서 옥시칼본산계의 구연산(citric acid)을 사용하였으며, 이에 대한 물리적 특성 및 화학구조는 Table 3과 같다.

Table 2 Physical properties of fine and coarse aggregate

Type	Aggregate	Specific gravity			Absorption (%)	F.M
		Bulk	Bulk (SD)	Apparent		
Mortar	Fine	2.61	2.62	2.63	0.48	2.92
Concrete	Fine	2.59	2.61	2.63	0.67	2.86
	Coarse	2.60	2.62	2.63	0.35	6.92

Table 1 Physical and chemical properties of Silica fume (SF), Fly ash (FA) and Blast-furnace slag (BS)

Types	Physical properties			Chemical properties (%)							
	Specific gravity	Ig. loss	Fineness (cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	NaO ₂
SF	2.2	2.8	240.000	94.0	0.3	0.8	-	0.3	0.4	0.8	0.2
FA	2.14	3.28	3400	58.12	23.56	7.69	1.05	2.59	1.12	1.42	0.31
BS	2.91	0.5	4500	31.10	14.69	0.31	-	47.00	3.50	0.39	0.44

Table 3 Physical properties and chemical structure of citric acid

Physical properties		Chemical structure
Type	Solubility (°C)	
Colorless and transparent powder	【crystal】 207g (25 °C)	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{COOH} \\ \\ \text{HO} - \text{C} - \text{COOH} - n\text{H}_2\text{O} \\ \\ \text{CH}_2 - \text{COOH} \end{array}$
	【anhydrous】 145g (20 °C)	

Ⅲ. 광물질 혼화재를 사용한 초속경시멘트 콘크리트의 투수 특성 파악을 위한 예비실험

본 연구에서는 Table 4와 같이 초속경시멘트의 일부를 광물질 혼화재로 치환한 후, 이에 따른 투수성능 변화를 알아보기 위한 예비실험을 실시하였다. 광물질 혼화재는 실리카 흙(SF) 5%, 10%, 15%, 플라이 애시(FA) 5%, 10%, 15% 및 고로슬래그 (BS) 10%, 15%, 20%를 치환 사용하였다. 아울러 각 배합에 대한 모르타르의 응결시간, 압축강도 및 염소이온투과성을 비교, 분석함으로써 투수 저항성능이 우수한 최적의 치환율을 도출하고자 한다.

Table 4 Mix proportion

(Unit: g)

Mixture	W/C	Cement	SF*	FA**	BS***	Sand	Water
Plain	0.41	1500	0	0	0	3,000	615
SF5		1425	75	0	0		
SF10		1350	150	0	0		
SF15		1275	225	0	0		
FA5		1425	0	75	0		
FA10		1350	0	150	0		
FA15		1275	0	225	0		
BS10		1350	0	0	150		
BS15		1275	0	0	225		
BS20		1200	0	0	300		

* SF: Silica fume
 ** FA: Fly ash
 ***BS: Blast-furnace slag

1. 실험방법

가. 응결시간

실리카 흙, 플라이 애시 및 고로 슬래그의 치환율에 따른 초속경시멘트의 응결특성은 KS L 5103 (길모어 침에 의한 시멘트의 응결 시간 시험 방법)에 준하여 2회 반복하여 시험을 실시하였다. 본 실험에서는 충분한 작업시간을 확보할 수 있도록 응결지연제를 사용하였다.

나. 압축강도

실리카 흙, 플라이 애시 및 고로 슬래그의 치환율에 따른 초속경시멘트의 압축강도는 KS L 5105 (수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법)에 준하여 시험을 실시하였다. 50×50×50 mm의 입방체 몰드를 제작하여 재령 3시간, 7일, 28일의 압축강도를 측정하였으며, 공시체는 온도 23±2 °C, 상대습도 50%의 양생실에서 1일 초기양생 후 탈형하여 23±2 °C의 항온조건으로 수중양생을 하였다. 공시체는 재령당 3개씩 2회 반복하여 제작하였다.

다. 염소이온 투과성

실리카 흙, 플라이 애시 및 고로 슬래그의 치환율에 따른 초속경시멘트의 투수성은 ASTM C 1202- 94 (Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration)에 준하여 각 재령(3시간, 7일, 28일)에 따라 2회 반복하여 시험을 실시하였다.⁴⁾

2. 실험결과

가. 응결시간

실리카 흙, 플라이 애시 및 고로 슬래그의 치환율에 따른 초속경시멘트 모르타르에 대한 응결시간 시험결과는 Fig. 1과 같다. 전반적으로 25분 내외에서 초결이 일어났으며, 35분 내외에서 종결이 일어났다. 광물질 혼화재치환율에 따른 응결시간의 변화는 그리 크지 않았다.

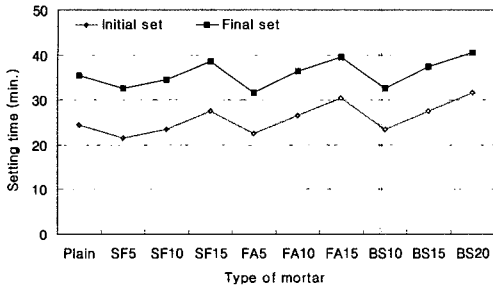


Fig. 1 Setting time of jet set cement mortar with admixtures

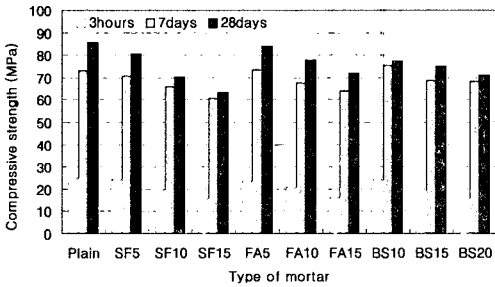


Fig. 2 Compressive strength of jet set cement mortar

나. 압축강도

실리카 흙, 플라이 애시 및 고로 슬래그의 치환율에 따른 초속경시멘트 모르타르의 재령에 따른 압축강도 특성은 Fig. 2와 같다. 실리카 흙, 플라이 애시 및 고로 슬래그의 치환율이 높아질수록 초기 강도와 장기강도에서 있어서 Plain 배합에 비해 비교적 낮은 압축강도를 나타냈는데, 이는 높은 강도를 발현시키는 성분들의 상대적인 감소로 인해 $3CaO \cdot SiO_2$ 의 수화가 다소 지연되고 C-S-H 겔

등의 수화생성물의 생성을 억제함으로써 강도발현을 저해한 결과인 것으로 판단된다.

다. 염소이온 투과성

실리카 흙, 플라이 애시 및 고로 슬래그의 치환율에 따른 초속경시멘트 모르타르의 재령에 따른 염소이온 투과시험 결과는 Fig. 3과 같다. 재령 3시간에서 모든 배합이 Plain 배합에 비해 높은 투과성을 나타내었는데, 이는 실리카 흙, 플라이 애시 및 고로 슬래그가 초기에 높은 수화열을 억제시켜 초기강도발현과 함께 미소공극을 충전시켜 조직을 치밀하게 하는 칼슘알루미늄모노설페이트 수화물 ($C_3A \cdot CS \cdot H_{12}$)이나 에트린자이트($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)의 생성을 방해했기 때문으로 사료된다. 하지만 재령이 길어질수록 점차 에트린자이트의 생성으로 인해 투과 저항성이 향상되었다. 또한 실리카 흙, 플라이 애시 및 고로 슬래그의 치환율이 증가함에 따라 투과성도 커졌는데, 이는 이들 광물질 혼화제의 과다한 양으로 인해 초속경시멘트의 경화를 억제했기 때문인 것으로 판단된다.

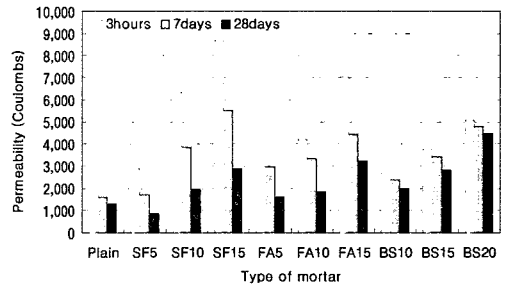


Fig. 3 Chloride permeability of mortar

Table 5 Mix proportion

Type of concrete	G_{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	s/a (%)	W/C (%)	Unit weight (kg/m^3)						
						W	C	SF	G	SP*	AE**	RA***
E1	25	6±1	5±1	45	0.35	154	440	75	936	9.68	0.06	2.64
E2										9.68	0.07	2.64

* SP: Superplasticizer

**AE: Air entraining admixture

***RA: Retarder admixture

IV. 실리카흙을 혼입한 초속경시멘트 콘크리트의 적용성 평가

예비시험결과를 토대로 초속경시멘트의 일부를 5%의 실리카 흙 및 플라이 애시로 치환한 배합이 Plain 배합과 비교하여 볼 때 압축강도의 경우는 모든 재령에 있어서 통계학적으로 95% 신뢰수준에서 유의한 차이가 없었다. 또한 투과성은 재령 7 일에는 실리카 흙 및 플라이 애시 5%를 치환한 배합이 Plain 배합과 유사한 결과를 보였으며, 재령 28일에는 실리카 흙 5% 치환한 배합이 다른 배합에 비해 우수한 결과를 나타내었다. 이러한 결과를 종합 평가해보면 실리카 흙을 5% 치환한 배합의 경우가 투과 저항성을 향상시키는 측면에서 볼 때 적절하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 초속경시멘트 콘크리트의 배합설계를 Table 5와 같이 정하고 실리카 흙을 미혼합한 배합(E1)과 혼합한 배합(E2)의 비교시험을 실시하였다. 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프는 6 ± 1 cm, 공기량은 $5 \pm 1\%$ 로 고정하였다. 목표 슬럼프 값을 맞추기 위하여 폴리카본산계 고성능 감수제를 첨가하였으며 공기량을 확보하기 위해 공기연행제를 사용하였다. 또한 적절한 작업시간을 확보하기 위한 응결지연제로서 옥시카본산계의 구연산을 사용하였다.

1. 시험방법

가. 슬럼프 및 공기량

초속경시멘트 콘크리트의 슬럼프는 KS F 2402 (콘크리트의 슬럼프 시험방법)에 준하여 시험을 실시하였으며, 공기량은 KS F 2421(압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법)에 준하여 시험을 실시하였다. 목표 슬럼프 값인 6 ± 1 cm 및 목표 공기량인 $5 \pm 1\%$ 를 만족시킬 때까지 고성능 감수제와 공기연행제를 변화시키면서 시험을 실시하였으며, 시험은 3회 반복하였다.

나. 응결시간

초속경시멘트 콘크리트의 응결특성은 KS F 2436(관입저항침에 의한 콘크리트 응결시간 시험방법)에 준하여 시험을 실시하였으며, 시험은 3회 반복하였다.

다. 압축강도

초속경시멘트 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 시험을 실시하였다. $\Phi 100 \times 200$ mm의 실린더 공시체를 제작하여 재령 3시간, 1일, 7일 및 28일에 압축강도를 측정하였으며 공시체는 23 ± 2 °C, 상대습도 50%의 양생실에서 1일 초기양생 후 23 ± 2 °C의 항온조건으로 수중양생을 실시하였다. 각각의 공시체 제작 및 시험은 2회 반복하였다.

라. 염소이온 투과성

초속경시멘트 콘크리트의 투수성은 ASTM C 1202-94(Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration)와 AASHTO T 259 (Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete)에 준하여 시험을 실시하였다.^{3),4),10)} $\Phi 100 \times 200$ mm의 실린더형 공시체를 제작하여 재령 3시간, 7일 및 28일에 각각 2개씩의 염소이온투과시험을 실시하였으며, 시험은 2회 반복하였다.

2. 시험결과

가. 슬럼프 및 공기량

초속경시멘트 콘크리트의 슬럼프 및 공기량시험 결과는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 목표 슬럼프를 맞추기 위하여 다량의 고성능 감수제를 첨가하였고, 실리카 흙을 혼합한 배합(E2 배합)의 경우는 미혼합한 배합(E1 배합)과 비교하여 볼 때, 슬럼프가 약간 감소하였지만 목표범위 내에 만족하였다.

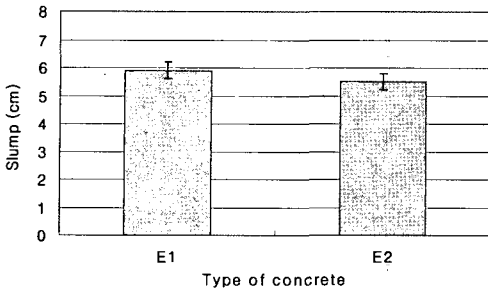


Fig. 4 Slump of jet set cement concrete

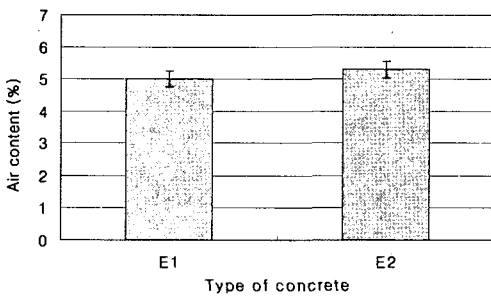


Fig. 5 Air content of jet set cement concrete

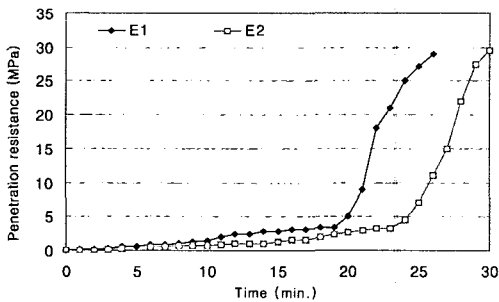


Fig. 6 Setting time of jet set cement concrete

나. 응결시간

초속경시멘트 콘크리트의 응결특성은 Fig. 6과 같다. E1 배합은 초결이 19분 30초, 종결이 25분에 일어났으며, E2 배합은 초결이 23분 30초, 종결이 29분에 일어났다. 초속경시멘트를 사용할 경우 초기에 급결하면 작업이 불가능하며 작업시간이 너무 지연되면 초기강도 발현에 문제가 발생하기 때문에 적절한 작업시간 확보가 매우 중요한데, 2

가지 배합은 모두 적절한 작업시간을 확보하고 있었다. 또한 이와 같이 초결과 종결의 시간간격이 짧은 것은 초속경시멘트 콘크리트의 특성이라고 할 수 있다.

다. 압축강도

초속경시멘트 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현특성은 Fig. 7과 같다. 두 배합 모두 재령 3시간에서 27 MPa 이상의 빠른 강도발현을 보였고 재령 28일에서는 모두 46 MPa를 상회하는 높은 압축강도를 나타냈다. E1 배합과 E2 배합을 비교해 볼 때 재령 1일까지는 E1 배합이 높은 압축강도를 나타냈지만, 재령 7일 이후로는 두 배합이 통계적으로 95%신뢰구간에서 유의한 차이가 없었다. 따라서 실리카 흙의 혼합은 압축강도 측면에 있어서 특별한 작용을 하지 않는 것으로 사료된다.

라. 염소이온 투과성

초속경시멘트 콘크리트의 염소이온 투과 시험결과는 Fig. 8과 같다. 시험결과 재령 3시간에서 보통 단계의 투과성으로 7일 및 28일보다 다소 높은 결과를 보였으나 재령이 지날수록 빠른 에트린자이트의 생성으로 인해 투과 저항성이 향상 되었다. E2 배합은 E1 배합에 비해 초기에는 높은 투과성을 보였지만 점차 재령이 지날수록 투과 저항성이 향상되어 재령 28일에는 매우 낮은 단계의 투과 저항성을 나타냈다. 이는 실리카 흙의 혼합이 초속

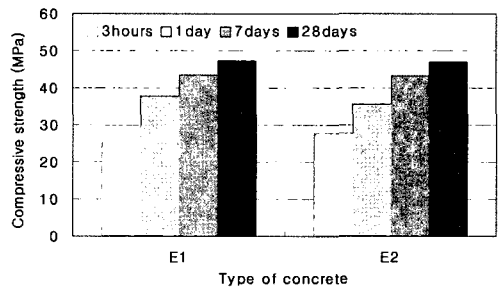


Fig. 7 Compressive strength of jet set cement concrete

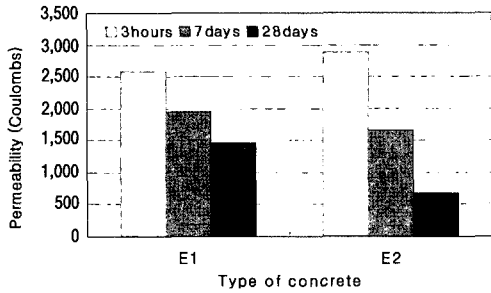


Fig. 8 Chloride permeability of jet set cement concrete

경시멘트 내에서 상대적으로 초기의 높은 수화열을 억제함으로써 초기경화를 저감시킨 결과로 판단된다.^{2),5),6),14)} 한편 장기재령으로 갈수록 실리카 흡이 수산화칼슘과 결합하는 포졸란 반응에 의해서 미세공극을 감소시켜 초속경시멘트 경화체의 공극을 보다 치밀하게 함으로써 투과 저항성을 향상시킨 것으로 사료된다.⁷⁾

V. 결 론

본 연구는 초속경시멘트 콘크리트의 투수 저항성을 향상시키기 위하여 초속경시멘트 콘크리트의 배합에 광물질 혼화재를 혼합하여 투수 저항성능을 향상시키고자 실험을 실시하였으며 실험을 통해 얻어진 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1. 초속경시멘트 콘크리트의 응결시간 시험결과 물을 첨가함과 동시에 빠른 수화반응을 시작해서 콘크리트를 타설한 후 20분 내외에서 초결이 일어났으며, 그 후 콘크리트의 응결이 더욱 가속화되어 26~30분경에 종결이 일어났다. 이와 같이 초결과 종결의 시간간격이 짧은 것은 초속경시멘트 콘크리트의 특성이라 할 수 있다. 따라서 초속경시멘트 콘크리트는 적절한 작업시간을 확보하기 위해서는 적정량의 응결지연제를 사용할 필요가 있다고 사료된다.

2. 초속경시멘트 콘크리트의 압축강도 시험결과 모든 배합이 재령 3시간에서 27 MPa의 빠른 강도

발현을 보였고 재령 28일에서는 모두 46 MPa을 상회하는 높은 압축강도를 나타냈다. 또한 실리카 흡을 혼합한 배합이 재령 1일까지는 실리카 흡을 미혼합한 배합보다 낮은 압축강도를 나타냈지만, 재령 7일 이후부터는 두 배합의 압축강도가 통계적으로 95%신뢰구간에서 유의한 차이가 없었다.

3. 초속경시멘트 콘크리트의 염소이온 투과 시험 결과 실리카 흡을 혼합한 배합의 경우는 미혼합한 배합에 비해 초기에는 다소 낮은 투수 저항성을 나타냈는데, 그 이유는 실리카 흡이 초기의 높은 수화열을 억제함으로써 초기경화를 저감시킨 결과로 판단된다. 그러나 점차 재령이 경과할수록 매우 낮은 투과성을 나타내었다. 이는 재령이 경과함에 따라 실리카 흡이 수산화칼슘과 결합하는 포졸란 반응에 의해서 미세공극을 감소시켜 초속경시멘트 콘크리트 경화체의 공극을 보다 치밀하게 함으로써 투과 저항성을 향상시킨 것으로 사료된다.

이상의 결과를 종합해 보면, 적정량의 실리카 흡을 사용한 초속경시멘트 콘크리트는 투수 저항성에 있어서 매우 효과적인 작용을 하는 것으로 나타났다.

References

1. 秋山桂一, セメントコンクリートの化學.
2. Chatterji, S., Thaulow, N., and Christensen, P., 1982, Pozzolanic Activity of Byproduct Silica Fume from Ferro-Silicon Production, *Cement and Concrete Research*, Vol.12(6), pp.781-784.
3. Ding, J., Fu, Y., and Beaudoin, J. J., 1997, Effect of Different Zeolites on Conversion Prevention in High Alumina Cement Products, *ACI Materials Journal*, Vol.94, No.3, pp.220-226.
4. Feldman, R. F., Chan, G. W., Brousseau, R. J., and Tumigajski, P. J., 1994, Investigation of the Rapid Chloride Permeability Test, *ACI Materials Journal*, Vol.91, No.2, pp.246-255.
5. Grutzeck, M. W., Atkinson S. D., and Roy, D.

- M., 1983, Mechanism of Hydration of CSF in Calcium Hydroxide Solutions, *Proceeding of the First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Vol.2, American Concrete Institute, SP-79, pp.643-664.
6. Gutteridge, W. A., and Dalziel, J. A., 1990, Filler Effects—the Effects of Secondary Component on the Hydration of Portland Cement, *Cement and Concrete Research*, Vol.20, pp.853-861.
 7. Kwon, K. H., 1990, Mix Design and Strength for the Regulated Set Cement Concrete, Master's Thesis, *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, pp.1-2.
 8. Moon, H. Y., Kim, S. S., 1996, Materials for Civil Engineers, Goomibook.
 9. Parviz Soroushian and Siavosh Ravanbakhsh, 1999, High-Early-Strength Concrete : Mixture Proportioning with Processed Cellulose Fibers for Durability, *ACI Materials Journal*, September-October, pp.593-599.
 10. Wee, T. H., Suryavanshi, A. K., and Tin, S. S., 2000, Evaluation of Rapid Chloride Permeability Test(RCPT) Results for Concrete Containing Mineral Admixtures, *ACI Materials Journal*, Vol.97, No.2, pp.221-232.
 11. Whiting, D., Nagi, M., and Okamoto, P. A., 1994, Early Strength Gain of Rapid High Repair Concrete, *Concrete International*, Vol.16, No.8, August, pp.28-35.
 12. Won, J. P., Hwang, K. S., Park, C. G., Park, H. G., 2004, Evaluation of Crack Control and permeability of hydrophilic PVA Fiber Reinforced Cement Composite, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.16, No.3, pp.391-396.
 13. Won, J. P., Kim, H. H., Ahn, T. S., 2001, Long-Term Durability Performance of High Early Strength Concrete for Early Traffic Opening Considering Economic Benefits, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.21, No.5-D, pp.665-672.
 14. Yogendran, V., Langan, B. W., and Ward, M. A., 1991, Hydration of Cement and Silica Fume Paste, *Cement and Concrete Research*, Vol.21, pp.691-708.