

알칼리 프리계 급결제를 사용한 강섬유 보강 콘크리트의 성능 평가

Performance of Steel Fiber Reinforced Shotcrete using Alkali Free Based Accelerator

원종필* · 백철우** · 박찬기*** · 전언중****

Won, Jong-Pil · Baek, Chul-Woo · Park, Chan-Gi · Jun, Oun-Jung

Abstract

Modern underground and tunnel works that the wet type shotcrete is getting widely designed and applied in a large scale project. Further to its applications, the needs of improving the performance of the shotcrete, such as new and developed additives and accelerators for increasing the performance of shotcrete, become the most important issue in the field.

The main objective of this study evaluated to performance of steel fiber reinforced shotcrete using alkali free based accelerator for the durability and high quality of shotcrete. The major test variables are accelerator type and its dosage. One type silicate based accelerator and one type aluminate based accelerator and one type alkali free based accelerator were used. The dosage of accelerators is determined by the manufactures and laboratory test condition.

Compressive strength test results showed that the dosage of silicate and aluminate based accelerators caused reduction of mechanical properties of shotcrete. Compressive strength of alkali free based accelerator is more stable than of silicate and aluminate based accelerators. Also, according to the compressive strength and flexural test results, it was found that steel fiber reinforced shotcrete used alkali free based accelerator could attain significant improvement in the mechanical and flexural performance.

Keywords : Accelerator, Alkali free, Aluminate, Shotcrete, Silicate, Flexural Performance

* 건국대학교 사회환경시스템공학과

** 유진종합개발(주) 기술연구소

*** 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사후 과정

**** 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과

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

Fax: +82-2-2201-0907

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

I. 서 론

최근 들어 급속한 경제성장으로 인해 국토 이용의 효율성을 위하여 건설공사가 대형화되고 있는 추세이다. 특히 지하공간의 건설에 사용되는 공법 중 솗크리트 공법은 지하공간의 건설, 수리구조물(수로의 라이닝 콘크리트, 도수터널 등)건설 및 보수공사에 널리 사용되며 적용사례가 점점 더 증가하고 있다. 솗크리트 공법은 신재료의 개발 및 타설장비의 발달로 그 기술의 발전이 지속적으로 이루어지고 있으며 특히 휨하중을 받는 터널 및 지하구조물, 라이닝 콘크리트에 주로 사용된다. 이러한 구조물은 구조물의 특성상 휨인성을 증가시켜야 구조적으로 안정된다.^{1),2),3),4),5),8)} 이와 같은 필요성으로 철근 및 와이어매쉬를 사용하여 솗크리트의 휨성능을 증가시켜 왔다.^{1),2),3),4),5),8)} 그러나 솗크리트가 주로 적용되는 지하공간 및 라이닝 콘크리트에서는 철근이나 와이어매쉬를 사용하는데 따른 문제점, 예를 들어 공사기간의 장기화와 협소한 공간에서 시공성 감소 등으로 인해 새로운 보강재의 개발이 요구되어 왔다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 현재 국내외에서는 강섬유보강 솗크리트가 널리 사용되고 있다.

강섬유보강 솗크리트는 기존 솗크리트의 균열저항성, 인성, 충격저항성 등을 향상시켜 사용이 증가되고 있는 실정이다.^{8),18)} 그러나 강섬유보강 솗크리트공법은 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 균일한 품질관리가 어려우며 사용재료와 배합에 따라 리바운드량이 증가하며 급결제의 종류에 따라 시공성은 물론 품질관리에 많은 문제점이 발생되고 있다.^{8),18)} 강섬유 보강 솗크리트에 대한 국내에서 이루어진 대부분의 연구는 강섬유보강 솗크리트의 강섬유 혼입률에 따른 휨성능의 변화 등 역학적 특성에 초점을 맞추어 왔으며 특히 강섬유보강 속크리트의 최적배합비를 결정하는 연구 등이 대부분이었다.^{12),20)} 그러나 현재의 경우 강섬유 보강 속크리트에 사용되는 강섬유의 혼입률은 40 kg/m^3 ~

60 kg/m^3 으로 결정되어 사용되고 있는 상태이며 특히 현장 조건상 대부분 40 kg/m^3 이 적용되고 있다.^{8),12),20)} 그러나 속크리트는 휨성능 뿐만 아니라 장기 내구성 및 각종 시공조건, 환경친화성에 대한 문제가 대두되고 있으며 이에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 특히 급결제의 경우 속크리트의 성능뿐만 아니라 인체에 유해성과 중성화 촉진 등의 문제가 발생하는 큰 단점을 발생시키고 있다.^{9),19)}

현재 국내에서는 실리케이트계 및 알루미네이트계 급결제가 대부분 공사현장에서 사용되고 있다.^{9),18)} 그러나 실리케이트계 급결제의 경우 작업 중 호흡에 의한 흡입으로 인체에 축적될 경우 인체 밖으로 배출이 불가능하여 장기적으로 인체에 치명적인 영향을 미칠 수 있으며, 알루미네이트계 급결제는 pH 13~14의 강염기성재료로 작업자에 인체에 접촉시 부식성이 있어 피부병 등을 유발하며 작업자의 눈에 들어갔을 경우 실명을 일으킬 정도로 독성이 강하기 때문에 작업시 특별한 보호대책이 필요하다. 이에 반해 알칼리 프리계 급결제는 pH 가 0~7 정도의 중성 또는 산성으로서 부식성이 없어 인체에 접촉시 문제점을 발생시키지 않으며 알칼리 골재 반응 등을 방지한다. 또한 빗물이나 지하수에 의해 용해되어 주변환경으로 유입되는 유독성분을 가지고 있지 않다. 그러므로 속크리트 공사시 인체에 무해한 알칼리 프리계 급결제(무독성)의 사용은 꼭 필요하다.^{9),19)} 따라서 본 연구에서는 지하공간 및 수리구조물 등에 적용되는 강섬유보강 속크리트의 물리·역학적 성능을 향상시키기 위하여 무독성의 알칼리 프리계 급결제를 사용하였을 때의 영향을 평가코자 한다.

II. 사용재료 및 시험방법

1. 사용재료

가. 시멘트 및 골재

시멘트는 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사

Table 1 Physical and chemical properties of cement

Physical properties	Blaine fineness (m ² /g)	Specific gravity	Stability (%)	Setting time		Compressive strength (MPa)		
				Initial (min)	Final (min)	3days	7days	28days
	3200	3.15	0.02	220	400	20.0	30.0	38.0
Chemical properties	Loss on Ignition (%)		MgO (%)			SO ₃ (%)		
	1.5		3.0			2.0		

용하였으며, 물리·화학적 성질은 Table 1과 같다. 굵은골재는 최대치수 13 mm 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 비중 2.61의 강모래를 사용하였다.

나. 강섬유

본 연구에서 사용된 강섬유는 길이 30 mm, 지름 0.5 mm, 형상비 ($l/d = 30/0.5$)가 60인 후크타입의 강섬유를 사용하였으며 물리·역학적 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 Properties of steel fibers

Property	Steel fiber
Elastic modulus(MPa)	20×10^4
Specific gravity	7.85
Fiber length	30
Tensile strength(MPa)	1100
Ultimate elongation(%)	3.5
Acid/Aalkali resistance	Low
Electrical conductivity	High

다. 실리카 흄

숏크리트 타설시 시공 및 환경적인 측면에서 가장 큰 문제점 중에 하나가 리바운드량에 대한 문제이다. 현재 숏크리트의 리바운드량에 대한 문제점을 해결하고자 실리카흡이 사용되고 있으며 실리카흡은 숏크리트의 점착성을 증가시켜 리바운드량을 감소시킬 뿐만아니라 내구성 증진에도 효과가 있는 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서 사용한 실리카흡은 노르웨이산이며 물리적 특성과 화학성분은

Table 3 Physical properties of silica fume

Specific surface area (m ² /gr)	Specific gravity	Average particle size (μm)	Particle shape	Form
18~20	2.2	8.94	Spherical	Amorphous

Table 4 Chemical composition of silica fume

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	H ₂ O
90	1.5	3.0	3.0	2.0	2.5	3.0	3.0	1.0

Table 3 및 Table 4와 같다.

라. 급결제

급결제는 숏크리트의 초기강도 발현을 빠르게 하여 숏크리트가 지보재로서의 역할을 신속히 할 수 있도록 하는 콘크리트용 혼화제이다.^{9),13),19)} 현재 국내에서 사용되고 있는 급결제의 종류는 알루미네이트계, 실리케이트계 및 알칼리 프리계가 있으나 대다수의 현장에서는 실리케이트계 및 알루미네이트계를 사용하고 있으며 부분적으로 알칼리 프리계 급결제를 적용하고 있다.^{8),13),18)} 본 연구에서는 실리케이트계(silicate), 알루미네이트계(aluminate) 및 알칼리(alkali free) 프리계 급결제를 사용하였다.

2. 배합설계

가. 모르타르 배합설계

급결제 종류에 따른 물리·역학적 성능은 Table 5와 같은 모르타르 배합으로 평가하였다. 급결제의

Table 5 Mix proportions of mortar with accelerator type

Type of mixture	W/C	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	Accelerator (kg/m ³)
Normal	48.5	270.86	558.48	1396.20	-
Silicate					55.85
Aluminate					27.92
Alkali free					44.68

양은 현재 가장 널리 사용되고 있으며 제조사에서 권장하고 있는 첨가율을 선택하였다.

나. 콘크리트 배합설계

알칼리 프리계 급결제를 사용한 강섬유보강 속크리트의 성능을 평가하기 위하여 재령 1일, 3일, 28일의 설계기준 휨강도가 2.1, 3.0, 4.5MPa이 되도록 예비시험을 거쳐 Table 6과 같은 콘크리트 배합설계를 결정하였다.

3. 시험 방법

가. 급결제 성능시험

실리케이트계, 알루미네이트계 및 알칼리 프리계 급결제를 각각 현장에서 많이 사용하고 있고 기존 문헌에서도^{7),14),20)} 적정량으로 판명된 10%, 5%,

8%를 첨가하여 응결시간 시험 및 압축강도시험을 실시하였다. 응결시간은 KS L 5108 및 ASTM C 1102-88에 의해 측정하였고, 압축강도는 KS L 5105에 의해 측정하였다.^{7),15),16)}

나. 압축강도

알칼리 프리계 급결제를 사용한 강섬유보강 속크리트의 압축강도는 KS F 2405에 의하여 측정하였으며, $\Phi 10 \times 20$ cm의 공시체를 제작하여 재령 1일, 3일, 7일, 28일, 91일에 대하여 3개씩 2회 반복 실시하였다.¹⁷⁾ 또 알카리 프리계 급결제 8%를 첨가하여 각 재령에서의 압축강도 경향을 분석코자 한다. 공시체는 $20 \pm 3^\circ\text{C}$, 상대습도 50%의 양생실에서 1일 양생 후 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 항온조건으로 수중양생을 실시하였다.

다. 휨강도 및 휨인성

알칼리 프리계 급결제를 사용한 강섬유보강 속크리트의 휨성능을 알아보기 위하여 ASTM C 1102-88과 JCI-SF4에 따라 휨시험을 실시하였다.^{6),12)} 휨시험시 중앙점 순수 처짐측정장치는 Fig. 1과 같다.¹²⁾ 시험은 $15 \times 15 \times 55$ cm의 공시체를 2개씩 각각 반복하여 제작하고 양생실에서 초기 양생 후 1일, 3일, 28일의 재령에서 하중 재하 속도를 0.1 mm/min으로 하여 시험을 실시하였다.^{8),12)} 휨인성

Table 6 Mix proportions of concrete

Type of mixture	G _{max} (mm)	Slump range (cm)	Air content range (%)	W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Steel fiber (kg/m ³)	Silica fume (kg/m ³)	Admixture* (g/m ³)
A0	13	10±2	4.5±1.5	50	60	200	400	975.6	652.9	40	-	3214
AS5							380				20	3750
AS10							360				40	5714
B0	13	10±2	4.5±1.5	45	60	202.5	450	947.4	634	40	-	2520
BS5							427.5				22.5	3750
BS10							405				45	5714

* Admixture : superplasticizer

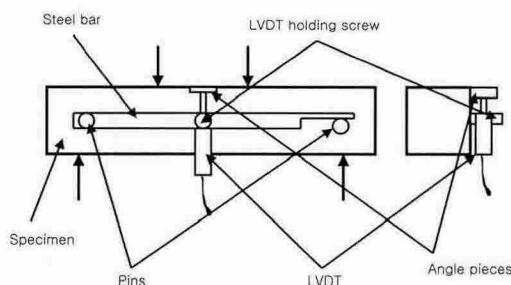
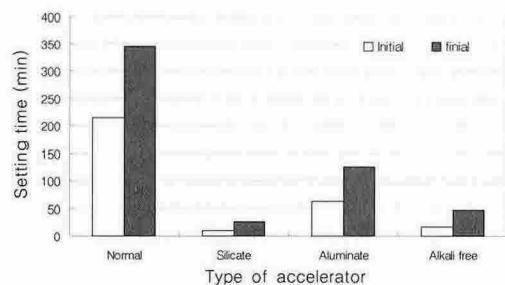
Fig. 1 Deflection measurement apparatus¹²⁾

Fig. 2 Test result of setting time with accelerator type

평가는 JCI-SF4의 규정을 이용하여 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 급결제 성능시험

가. 응결시간 시험

급결제의 종류에 따른 응결시간 시험결과는 Fig. 2와 같다. 급결제를 첨가한 경우가 첨가하지 않은 경우보다 훨씬 빠른 응결시간을 보여준다. 실리케이트계가 가장 빨리 응결되었고 알루미네이트계가 다소 늦었다. 이와 같은 결과는 실리케이트계 급결제의 급결효과는 풀효과에 의한 것으로 시멘트의 특성과는 관계없이 응결속도가 빨랐다. 반면 알루미네이트계 급결제는 시멘트의 수화반응 자체를 빠르게 하여 급결효과를 나타내므로 응결속도가 다소 느리게 나타났다. 알칼리 프리계 급결제는 알루미네이트계보다는 빠르고 실리케이트계 보다는 느리

게 응결되었다. 그러나 알칼리 프리계 급결제의 응결시간은 실리케이트계 급결제와 비교하여 큰 차이가 발생하지 않았기 때문에 현장 적용시 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

나. 모르타르 압축강도 시험

급결제를 첨가한 모르타르의 압축강도 시험결과는 Fig. 3과 같다. 시험결과와 같이 1일에는 급결제의 영향으로 급결제를 첨가한 경우가 첨가하지 않은 경우보다 다소 큰 강도를 보였다. 실리케이트계 및 알루미네이트계 급결제의 경우 3일 강도부터 기준 공시체보다 낮아지는 경향을 보였다. 알칼리 프리계 급결제의 경우에 있어서는 3일 강도까지는 기준 공시체보다 높다가 7일부터는 약간 떨어지는 결과를 보여주었다. 급결제를 첨가하지 않은 모르타르의 압축강도는 재령이 경과할수록 압축강도가 꾸준히 증가하는 경향을 보이나 급결제를 첨가한 모르타르는 1일 이후 강도발현이 적음을 알 수 있다. 알칼리 프리계의 강도저하율이 가장 적게 나타나 그 성능이 가장 우수하게 판단되었다.

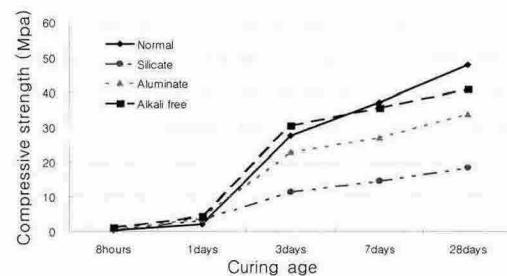


Fig. 3 Compressive strength of mortar with accelerator type

2. 알칼리 프리계 급결제를 사용한 강섬유보강 콘크리트의 성능

가. 압축강도

급결제의 성능 평가 결과 알칼리 프리계 급결제를 사용한 모르타르가 강도저하 및 응결시간이 우

수하게 나타났다. 본 연구에서는 알칼리 프리계 급결제만을 사용한 배합의 압축강도만을 평가하였다. 알칼리 프리계 급결제를 사용하지 않은 강섬유보강 콘크리트의 압축강도 시험결과는 Fig. 4와 같고 급결제 성능시험 후 가장 우수하게 판단된 알칼리 프리계 급결제를 8% 첨가한 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도 시험결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서는 급결제의 영향으로 초기강도는 급결제를 첨가하지 않은 강섬유 보강 콘크리트의 강도보다 2배 이상 강도증진을 보이다가 장기강도로 갈수록 4%에서 17% 정도의 강도 저하현상을 보여주었다. 이와 같은 결과는 급결제의 사용이 콘크리트의 장기적인 거동에 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여준다. 그러나 알칼리 프리계 급결제를 사용한 콘크리트의 강도 감소경향은 일반적으로 현재 사용되고 있는 실리케이트 급결제를 사용할 경우 최대 약 50%의 강도감소가 나타나는 결과로 볼 때 장기강도의 개선효과를 기대할 수 있다. 또한 Fig. 6의 시험결과를 살펴보면 실리카 흄 5%를 첨가한 배합의 압축

강도는 초기에는 약간 높게 나타났지만 7일 이후에는 실리카 흄 10%를 첨가한 배합이 높은 강도 증진을 보였다. 실리카 흄을 5% 첨가한 AS5, BS5 배합이 실리카 흄을 첨가하지 않은 배합보다 각각 34.61%, 29.50%의 강도 증진을 보였으며, 10% 첨가한 AS10, BS10 배합에서는 51.11%, 32.76%의 강도 증진을 보였다. 따라서 적정량의 실리카 흄을 첨가하면 콘크리트의 압축강도 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

나. 휨강도 및 휨인성

휨실험 후 강섬유 혼입량이 40 kg/m^3 일 때 휨하중-변위 특성은 Fig. 6과 같다. 휨하중-변위 곡선을 살펴보면 실리카 흄의 혼입량이 22.5 kg/m^3 이고 강섬유의 혼입량이 40 kg/m^3 인 BS10의 배합의 경우가 가장 우수한 거동을 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 강섬유보강 콘크리트의 휨거동은 적정량의 실리카 흄을 첨가하여 향상시킬 수 있다고 할 수 있다.

강섬유보강 콘크리트의 휨강도 시험결과는 Fig. 8과 같다. 휨강도 시험결과 목표로한 재령 1일, 3일, 28일의 휨강도 기준인 2.1 MPa , 3.0 MPa , 4.5 MPa 을 모두 만족하는 결과를 보여주었다. 또한 휨강도 측면에서 보면 초기재령에서는 실리카 흄의 영향 없이 일정한 강도수준을 보였는데 AS10, BS5, BS10 배합에서는 장기재령으로 갈수록 실리카 흄을 첨가하지 않은 배합의 휨강도보다 17.17%, 16.04%, 22.75% 증진되었다. 따라서 적정량의 실

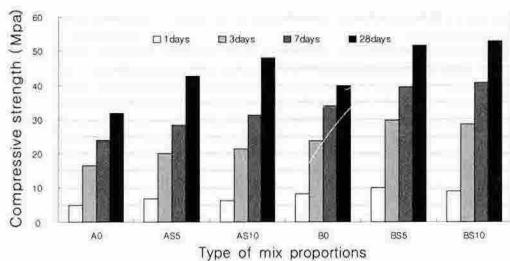


Fig. 4 Compressive strength of steel fiber reinforced concrete

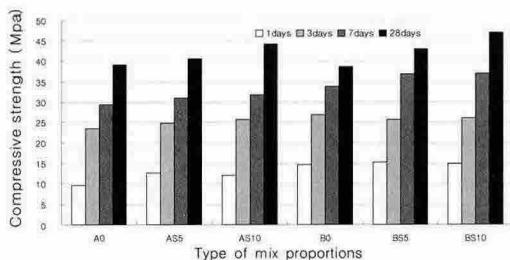


Fig. 5 Compressive strength of steel fiber reinforced concrete with alkali free based accelerator

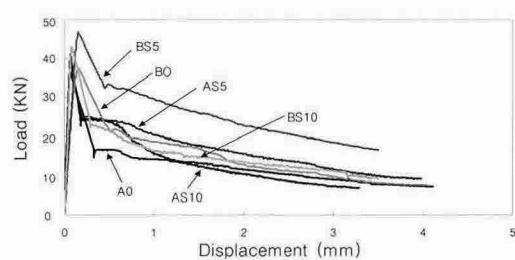


Fig. 7 Load-displacement curve of steel fiber reinforced concrete with alkali free based accelerator

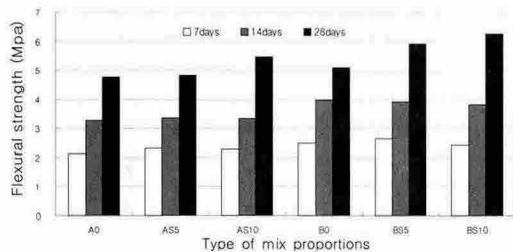


Fig. 8 Test results of flexural strength

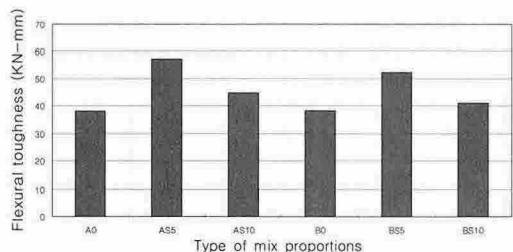


Fig. 9 Test results of flexural toughness

리카 흄을 첨가하면 알칼리 프리제 급결제를 사용한 강섬유보강 콘크리트의 휨강도를 향상시킬 것으로 판단된다.

알칼리 프리제 급결제를 사용한 강섬유보강 콘크리트의 휨인성은 JCI SF-4의 기준에 따라 변위가 3 mm일 때 까지의 하중-변위 곡선의 아래 면적으로 계산하였다. 알칼리 프리제 급결제를 사용한 강섬유보강 콘크리트의 휨인성 시험결과는 Fig. 9 와 같다. 휨인성 시험결과 AS5 배합이 가장 우수한 결과를 보여주었고 A0 및 B0 배합이 가장 작은 값을 나타내었다. 또한 휨인성 시험결과 급결제는 휨인성에는 큰 영향을 미치지 않으며 실리카 흄이 약간의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 실리카 흄은 전량 수입하는 재료로서 콘크리트의 경제성을 악화시킬 우려가 있으므로 이를 고려하여 적정량의 실리카 흄을 사용하면 콘크리트의 성능을 향상시킬 수 있을 것이라 판단된다.

IV. 결 론

알칼리 프리제 급결제를 사용한 강섬유보강 콘크리트의 성능을 평가코자 실내시험을 실시하였는데 시험은 압축강도 및 휨성능을 평가하였다. 시험을 통한 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1. 급결제 성능시험에서 응결시간은 실리케이트계가 가장 빨리 응결되었고 알루미네이트계가 다소 늦었다. 이와 같은 결과는 실리케이트계 급결제의 급결효과는 폴효과에 의한 것으로 시멘트의 특성과 관계없이 응결속도가 빨랐다. 반면 알루미네이트계 급결제는 시멘트의 수화반응 자체를 빠르게 하여 급결효과를 나타내므로 응결속도가 다소 느리게 나타났다.

2. 모르타르 압축강도 시험결과 실리케이트계 급결제 및 알루미네이트계는 장기강도 저하가 발생하였지만 알칼리 프리제 급결제의 경우 장기강도가 일반 모르타르와 비슷한 압축강도를 유지하는 것을 알 수 있다. 따라서 알칼리 프리제를 사용하는 것이 강도저하를 최소화하면서 급결성능을 발휘할 수 있을 것이다.

3. 알칼리 프리제 급결제를 사용한 강섬유보강 콘크리트의 압축강도 시험결과 급결제를 사용하지 않는 배합보다 초기강도는 증가하나 장기강도에서 약 4%~17% 정도의 강도저하가 발생하였다. 그러나 일반적으로 실리케이트 급결제를 사용하였을 때 발생하는 장기강도 저하가 약 50% 정도까지 발생하는 것을 고려할 때 장기강도 측면에서 매우 우수한 결과이다.

4. 알칼리 프리제 급결제를 사용한 강섬유보강 콘크리트의 휨성능은 실리카 흄의 사용량에 영향을 받았다. 따라서 실리카 흄이 전량 수입되고 있는 제품이기 때문에 경제성을 고려하여 사용하면 콘크리트의 성능을 향상시킬 수 있다.

References

1. ACI Committee 506, 1995. *Guide to shotcrete*, ACI 506R-90.
2. ACI Committee 506, 1995. *State-of-the-art report on fiber reinforced shotcrete*, ACI 506.1R-84.
3. ACI Committee 506, 1995. *Specification for materials, proportioning, and application of shotcrete*, ACI 506.2-90.
4. ACI Committee 506, 1995. *Guide to certification of shotcrete nozzlemen*, ACI 506.3R-91.
5. ACI Committee 506, 1995. *Guide for evaluation of shotcrete*, ACI 506.4R-94.
6. ASTM C 1018, 1989. *Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete*.
7. ASTM C 1102-88, *Standard test method for time of setting of portland-cement pastes containing accelerating admixtures for shotcrete by the use of gillmore needle*.
8. Baek, Chul Woo, 2003. Mechanical and physical properties of structural polymer fiber reinforced shotcrete, MS thesis, Konkuk Univ., Seoul, Korea.
9. Paglia. C., Wombacher. F., and Bohni. H., 2001. The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems I. Characterization of the setting behavior, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31. pp.913-918.
10. Morgan. D., Heere. R., McAskil. N. and Chan. C., 1999. Comparative evaluation of system ductility of mesh and fibre rein forced shotcretes, *Shotcrete for Underground Support VIII*, April. pp.1-23.
11. Papworth. F., 2002. Design guidelines for the use of fiber-reinforced shotcrete in ground support, *Shotcrete Magazine*, Summer, pp.16-21.
12. JCI-SF4, 1983. *Method of test for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete*.
13. Jeon, Eon Jung, 2003. Performance of steel fiber reinforced shotcrete with alkali free accelerator, MS thesis, Konkuk Univ., Seoul, Korea.
14. Kim, Jae Dong, and Kim, Deog Young, 2000, A study on the flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced shotcrete, *Tunnel and Underground*, Vol. 10, pp.196-210
15. KS L 5105, *Testing method for compressive strength of hydraulic cement mortar*.
16. KS L 5108, *Testing method for time of setting of hydraulic cement*.
17. KS F 2405, *Testing method for compressive strength of molded concrete cylinders*.
18. Lim, Dong Hee, 2002. The optimum geometry factor of high-performance structural synthetic fibers, MS thesis, Konkuk Univ., Seoul, Korea.
19. Luiz Roberto Prudencio Jr, 1998. Accelerating admixtures for shotcrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 20, pp.213-219.
20. Lee, Yang Kyoo and Kwon, In Hwan, 2001. Experimental study on reduce of rebound amounts in shotcrete works, *Journal of KSEC*, Vol. 21, No. 4-D, pp.499-508