급결제 종류 및 혼입률에 따른 슛크리트의 특성

Properties of Shotcrete According to Accelerator Types and Mixing Ratios

최승학* · 한승연** · 김현석*** · 윤경구**** · 하태호*****

Choi, Seunghak*, Han, Seungyeon**, Kim, Hyeonsuk***, Yun, Kyongku****, and Ha, Taeho*****

Abstract

Shotcrete should be attached to the ground and should have stable strength for a long-term. It should develop strength earlier for rapid work. Therefore, in this study, three types of accelerators—aluminate, cement mineral, and alkali-free—were selected and mixed to secure the initial strength. Depending on the type and mixing rate of each accelerator, slump, air amount, and compressive strength were used to evaluate the basic properties, boiling water absorption test, and chloride ion penetration resistance to conduct durability analysis. The mixing of aluminate-based and cement-mineral-based accelerators was effective in improving the initial strength, and alkali-free accelerator was effective in improving the long-term strength. The mixture to which accelerators were not mixed showed the highest water-tightness.

Key words : Shotcrete, Accelerator, Compressive Strength, Rapid Chloride Permeability Test, Boiled Water Absorption Test

요 지

슛크리트는 지면에 부착되어 장기적으로 안정한 강도를 발휘해야 하며 신속한 후속작업을 위하여 조기에 강도를 발현해야 하는 역할을 하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 초기강도 확보를 위하여 알루미네이트계, 시멘트광물계, 알칼리프리계 급결제 3종류를 선정하여 혼입하였다. 각 급결제의 종류 및 혼입률에 따라 슬럼프, 공기량, 압축강도를 통하여 기초특성 평가 및 끓는 물 흡수 시험, 염소이온 침투저항성으로 내구성 분석을 진행하고자 하였다. 알루미네이트계, 시멘트광물계 급결제 혼입이 초기강도를 향상, 장기강도 측면에서 알칼리프리계 급결제 혼입이 효과적으로 판단되었다. 급결제를 혼입하지 않은 변수가 수밀성이 가장 높은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 슛크리트, 급결제, 압축강도, 염소이온 침투저항성 시험, 끓는 물 흡수 시험

1. 서 론

슛크리트는 콘크리트 구조물 수리, 터널의 라이닝, 암석 및 토양 경사면의 안정화 등에 많은 사용이 되고 있다(Leung et al., 2005). 초기강도를 높이고 먼지 및 반발을 줄이기

위하여 건식 슛크리트와 급격한 응결과 강도발현을 위해 습식 슛크리트에 급결제는 필수적으로 사용되어진다. 또한 급결제는 장기강도 발현과 내구성, 슛크리트의 두께까지 영향을 미치고 있어 슛크리트 배합에 사용되는 타 혼화재와 비교했을 때 그 중요성이 강조되는 재료이다(Park et al., 2002).

*정회원, 강원대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: donghaebi@kangwon.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Kangwon University

**강원대학교 강원종합기술연구원 연구교수

Research Professor, Kangwon Institute of Inclusive Technology, Kangwon University

***㈜한국건설품질시험연구원 기술연구소 부장

Head of Department, Department of Research and Development, Korea Construction Quality Test Institute

****강원대학교 토목공학과 교수(E-mail: kkyun@kangwon.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon University

*****교신저자, 정회원, 강원대학교 토목공학과 박사과정(Tel: +82-33-250-6240, Fax: +82-33-255-6241, E-mail: gkxogh2810@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Kangwon University

급결제의 초기강도는 급결제의 화학 기반, 사용용량, 바인더의 구성요소, 광물질 혼화제, 온도 등에 따라 미치는 영향이 달라지며(Prudencio Jr, 1998), 급결제의 대표적인 종류로써 성분에 따라 실리케이트계, 알루미늄이트계, 알칼리프리카, 시멘트광물계로 구분된다(Won et al., 2015). 관련 연구문헌(Paglia et al., 2001; Park et al., 2008)에 따르면 알루미늄이트계 급결제는 에트링가이트 촉진보다는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 무정형 KCACSH 의 빠른 석출, 알칼리프리카 급결제는 급속 응결의 원인이 되는 에트링가이트를 대량 촉진, 시멘트광물계 급결제는 시멘트 중의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 및 CaSO_4 와 반응하여 에트링가이트를 급속히 생성하는 원리로써 작용되어진다.

췌크리트의 성능은 재료, 배합 비, 췌크리트 장비와 작업자의 기술 숙련도에 따라 영향을 크게 받는다(Park et al., 2008). 현재 많은 급결제 관련 연구들이 진행되었으나 사용되어진 급결제의 다른 혼입율과 배합 비는 급결제 종류와 사용 혼입율에 따른 췌크리트 특성을 비교 분석함이 힘들고 목표 로하는 췌크리트 특성에 따른 급결제의 종류와 혼입률 선정에 대한 어려움이 존재한다. 또한 해외의 경우 배수형 터널에서 췌크리트를 영구 지보개념으로 설계, 시공하는 사례가 점차 증가되고 있어(Park et al., 2002) 내구성에 관한 중요성이 부각되고 있으며 급결제의 종류와 혼입율에 따른 내구성 평가가 필요시 되어진다.

따라서, 본 연구에서는 급결제 중 현재 사용빈도가 가장 높은 알루미늄이트계 급결제와 더불어 시멘트광물계, 알칼리프리카 급결제 3종류와 각 급결제별 시멘트 대비 혼입률을 변수로 선정하여 췌크리트의 역학적 특성과 내구성 평가를 위한 실내실험을 수행하였다. 췌크리트의 기초 특성 평가항목으로 슬럼프, 공기량, 압축강도 실험을 수행하였다. 또한, 내구성 분석을 위하여 염소이온 침투저항성과 더불어 끓는 물 흡수 시험을 수행하였다.

2. 실험방법 및 사용재료

2.1 사용재료

시멘트는 국내 C사에서 생산되는 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였다. 굵은 골재는 10 mm 세척 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 부순 모래를 사용하였다. Table 1은 잔골재와 굵은 골재의 물리적 특성을 나타낸 것이다. Figs. 1과 2는 각각 잔골재 및 굵은 골재의 입도 분포를 나타내며 붉은 점선의 합성 입도 안에 표시되었다. 급결제는 국내에서 시판

Table 1. Physical Properties of Aggregate

Material	Classification	Density	Absorption rate (%)
Fine Aggregate	Crushed Sand	2.60	1.14
Coarse Aggregate	10 mm	2.64	1.27

되고 있는 알루미늄이트계(AL) 급결제와 시멘트광물계(C12A7) 급결제, 알칼리프리카(AF) 급결제를 사용하였다. Table 2는 급결제의 기본 물리적 특성을 나타낸 것이다. 유동화제는 국내 S사에서 생산되는 나프탈렌계를 사용하였으며, Table 3은 실험에 사용된 나프탈렌계 유동화제의 물리 화학적 특성을 나타낸 것이다.

Fig. 1. Grain-Size Distribution Curve of Fine Aggregate

Fig. 2. Grain-Size Distribution Curve of Coarse Aggregate

Table 2. Physical Properties of Accelerator

Type	Aluminate (AL)	Cement Mineral (C12A7)	Alkali-free (AF)
Condition	Liquid	Powder	Liquid
Specific Gravity	1.56	2.76	1.40

Table 3. Physical and Chemical Properties of Superplasticizer

Condition	Solid Content (%)	Specific Gravity S.G	pH	Using Amount (%)
Liquid	Min 40	1.19~1.23	8~10	0.5~2.5

Table 4. Mix Proportion of Shotcrete

Mixture	Gmax (mm)	Slump (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)							
					W	C	S	G	Accelerator			Super plasticizer
									AL	C12A7	AF	
R 0%	10	100	43.4	60	194	447	997	675	-	-	-	4.47
AL 3%	10	100	43.4	60	194	447	997	675	13.41	-	-	4.47
AL 5%	10	100	43.4	60	194	447	997	675	22.35	-	-	4.47
AL 7%	10	100	43.4	60	194	447	997	675	31.29	-	-	4.47
CA 2.5%	10	100	43.4	60	194	447	997	675	-	11.175	-	4.47
CA 4.5%	10	100	43.4	60	194	447	997	675	-	20.115	-	4.47
CA 6.5%	10	100	43.4	60	194	447	997	675	-	29.055	-	4.47
AF 4%	10	100	43.4	60	194	447	997	675	-	-	17.88	4.47
AF 7%	10	100	43.4	60	194	447	997	675	-	-	31.29	4.47
AF 10%	10	100	43.4	60	194	447	997	675	-	-	44.7	4.47

Note. AL*: Aluminate, CA**: Cement Mineral, AF***: Alkali-free

2.2 실험계획 및 배합설계

2.2.1 실험계획

본 논문에서는 급결제가 혼입된 쏫크리트의 특성을 평가하기 위하여 쏫크리트의 시방배합을 기준으로 알루미늄이 트계 급결제는 시멘트대비 3, 5, 7%로 혼입하였으며, 시멘트 광물계 급결제는 시멘트대비 2.5, 4.5, 6.5%로 혼입하였다. 알칼리프리게 급결제는 4, 7, 10%로 변환한 배합으로 급결제 혼입량을 산정하였다.

2.2.2 배합설계

쏘크리트 배합은 보통 콘크리트 제조방법과 달리 굵은 골재와 잔골재를 혼합하여 1분의 건비빔을 실시하였다. 골재의 건비빔 후 시멘트를 혼합하여 다시 2분의 건비빔을 수행하였다. 다음으로 유동화제가 희석된 물을 투입한 후 2분의 배합을 수행하였다. Table 4는 실험 변수에 따른 쏫크리트 배합표를 나타낸 것이다. 모든 시험편의 양생은 상대습도 60%의 양생실에서 1일 양생 후 20 ± 2 °C의 항온 수조에서 수중양생을 실시하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 공기량 및 슬럼프 실험

쏘크리트의 압축강도와 내구성에 영향을 미치는 공기량 시험은 KS F 2421 (굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법)에 준하여 실험을 수행하였다.

슬럼프 시험은 굳지 않은 콘크리트의 유동성 측정 방법 중 가장 일반적이고 편리한 방법으로 KS F 2042 (콘크리트의 슬럼프 시험방법)에 준하여 실험을 수행하였다.

2.3.2 압축강도 실험

압축강도 시험은 Φ100 × 200 mm의 원주형 공시체를

Table 5. Chloride Ion Penetrability Based on Charge Passed (ASTM C 1202-05, 2005)

Coulombs	Chloride Ion Penetrability
4,000 ≤	High
2,000~4,000	Moderate
1,000~2,000	Low
100~1,000	Very Low
≤ 100	Negligible

제작하여 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 준하여 수행하였다.

재령 28일의 목표강도는 영구지보재개념의 쏫크리트 타설 기준으로써 35 MPa과 그에 따른 7일 목표강도를 21 MPa로 설정하였다. 초기강도와 추가적인 장기강도를 측정을 위하여 재령 1일, 7일, 28일, 56일에 각각 압축강도를 측정하여 시험하였다.

2.3.3 염소이온 침투저항성 실험

염소이온 침투저항성(RCPT) 시험은 KS F 2711 (전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투저항성 시험방법)에 준하여 수행하였다. 시험편은 Φ100 × 200 mm의 원주형 몰드를 50 mm 두께로 절단하여 상단과 하단의 두 개의 시험편을 이용하였으며, 그 평균값을 사용하여 결과를 분석하였다. Table 5는 ASTM기준 염소이온 침투저항성의 측정 Coulomb 별 평가 등급을 나타낸 것이다.

2.3.4 끓는 물 흡수 실험

끓는 물 흡수 시험은 ASTM 규정(ASTM C 642, 2006)에 준하여 수행하였다. ASTM 규정(ASTM C 642, 2006)에

Table 6. Morgan's Quality Indicators

Sprayed Concrete Quality	Boiled Absorption (%)	Permeable Voids (%)
Excellent	< 6	< 14
Good	6 - 8	14 - 17
Fair	8 - 9	17 - 19
Marginal	> 9	> 19

사용되는 시험편의 형상과 크기는 규정되어 있지 않다. 그러나 시험편은 최소 350 cm³의 부피를 가져야 하며, 일반적인 콘크리트의 중량으로 800 g 이상 되어야 한다. 시험편의 경우 외관상의 균열이 없어야 하고, 모서리에서 탈락된 부분이 없어야 한다.

시험과정은 Dry (건조), Immersion (수침), Boiling (끓임)의 3단계로 구분되며, 각각의 단계에서 시험편의 중량을 측정한다. 추가적으로 끓인 후 수중에서의 중량을 측정하여 총 4개의 중량을 이용하여 단위중량, 흡수율, 공극률을 결정한다. Table 6은 산출된 단위중량, 흡수율, 공극률을 통하여 정성적 기준(Morgan et al., 1987)으로 평가되는 등급을 나타낸 것이다.

장치를 이용하여 시험편은 최소 24시간 동안 건조 시킨다. 오븐에서 건조된 시험편은 공기 중에서 습도 0% 가까이 유지한 채 20-25 °C까지 온도를 낮춰 건조 중량을 측정한다. 그 후 같은 방법으로 반복 실험을 실시하고 1~2회 측정 후 중량의 차이가 0.5% 이내일 때에는 다음 단계로 진행하고, 그렇지 않은 경우에는 0.5%의 중량 차이를 얻을 때까지 실험을 반복하여 수행한다.

수침 단계에서는 건조과정을 통해 건조 중량을 측정한 시험편은 즉시 21 °C의 물에 수침시킨다. 수침 시간은 최소 48시간 유지되어야 한다. 48시간 이상 경과 후 시험편의 무게를 측정한다. 이때 수건을 이용하여 표면의 수분을 모두 제거하고, 표면 건조 상태의 무게를 측정한다. 건조 단계와 마찬가지로 반복 실험을 실시하고, 1~2회 측정 후 중량의 차이가 0.5% 이내일 때 다음 단계를 수행하고, 그렇지 않은 경우에는 0.5%의 중량 차이를 얻을 때까지 실험을 반복하여 수행한다.

끓임 단계에서는 수침 후 표면 건조 상태의 무게를 측정한 시험편을 용기에 담아 5시간 동안 끓인다. 끓인 시험편은 자연 상태에서 14시간 동안 열을 식혀야 하며, 그 후 수건을 이용하여 표면의 수분을 모두 제거한 후 무게를 측정한다. 3단계의 과정이 모두 끝난 시험편은 철망을 이용하여 시험편의 수중 무게를 측정한다.

시험 결과는 건조중량(A), 수침 후 중량(B), 끓인 후 중량(C), 수중 중량(D)를 이용하여 분석한다. 시험결과로 흡수율, 단위중량, 공극률을 구할 수 있으며, 산출 방법은 다음과 같다.

Fig. 3. Desiccator for Humidity Maintenance

$$\text{수침 후 흡수율} = \left[\frac{B-A}{A} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$\text{끓인 후 흡수율} = \left[\frac{C-A}{A} \right] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{건조 중량} = \left[\frac{A}{C-D} \right] \times \rho = g_1 \quad (3)$$

$$\text{수침 후 단위중량} = \left[\frac{B}{C-D} \right] \times \rho \quad (4)$$

$$\text{끓인 후 단위중량} = \left[\frac{C}{C-D} \right] \times \rho \quad (5)$$

$$\text{겉보기 단위중량} = \left[\frac{A}{A-D} \right] \times \rho = g_2 \quad (6)$$

g_1 : 건조단위중량, g_2 : 겉보기단위중량,

ρ : 물의 단위 중량 = 1 g/cm³

Eqs. (4), (5)번 산출 공식을 통하여 구해진 결과를 이용하여 끓는 물 흡수시험의 정성적 기준(Morgan et al., 1987)을 통하여 등급을 평가할 수 있다. Fig. 3은 습도 유지를 위한 데시케이터를 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 공기량 및 슬럼프 실험 결과

공기량 및 슬럼프 실험은 급결제 혼입 전 콘크리트를 이용하여 수행하였다. 모든 변수에서 목표공기량 3% 이하를 만족하였고, 목표 슬럼프 100 ± 15 mm를 만족하였다. Fig. 4는

Fig. 4. Air Content and Slump

Fig. 5. Compressive Strength Based on Using Accelerator Variables

공기량 및 슬럼프 실험결과를 나타낸 것이다.

3.2 압축강도 실험결과

Fig. 5는 재령별 압축강도 실험결과를 나타낸 그림이다. 모든 급결제 변수는 혼입량 증가에 따라 초기강도는 증가하였으나, 장기강도는 감소하는 것으로 나타났다. 초기강도는 시멘트광물계 급결제 6.5%를 혼입한 변수에서 가장 높게 측정되었으며, 장기강도는 알칼리프리게 급결제 4%를 혼입한 변수에서 가장 높게 측정되었다.

7일 강도에서 급결제의 혼입률과 관계없이 모든 변수가 목표강도인 21 MPa 이상을 발현하였다. 7일 기준으로 강도 상승의 폭은 알칼리프리게, 시멘트광물계, 알루미늄이트계 순으로 크게 측정되었다.

알루미늄이트계 7% 혼입 변수와 시멘트광물계 6.5%를 제외한 모든 변수에서 재령 28일 목표강도인 35 MPa를 만족하는 것으로 나타났다. 재령 56일을 기준으로 알칼리프리게 급결제를 혼입한 변수가 알루미늄이트계, 시멘트광물계의 급결제보다 장기강도에 효과적인 것으로 판단된다. 이는 여러 연구자들(De Belie et al., 2005; Shin et al., 2005; Won et al., 2015)이 언급한 급결제에 따라서 시멘트 내에서의 수화초기 생성물의 차이로 판단되어진다.

Fig. 6. Relative Permeability Based on Using Accelerator Variables

3.3 염소이온 침투저항성 실험결과

Fig. 6은 KS F 2711 (전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투저항성 시험방법)에 의한 급결제 종류 및 혼입률에 따른 숏크리트의 염소이온 침투저항성 시험결과를 나타낸 것이다.

모든 변수가 염소이온 침투율이 4,000 Coulombs 이상으로 측정되어 염소이온 침투저항성 평가기준 상 “높음” 등급인 것으로 나타났다. 급결제를 혼입하지 않은 변수에서 가장 낮은 5,281 Coulombs으로 측정되어 수밀성이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 급결제 혼입 변수에서는 급결제의 혼입량이 증가함에 따라 더 높은 Coulombs으로 측정되어 수밀성이 낮아지는 것으로 나타났다.

모든 변수에서 “높음” 등급으로 측정되었지만, 알칼리프리게 급결제 혼입 시 염소이온 침투저항성이 가장 낮게 평가되었으며 이는 다른 급결제 첨가변수보다 상대적으로 높은 장기강도를 발현한 강도특성과는 상반되는 결과이다.

3.4 끓는 물 흡수 실험결과

Fig. 7은 끓는 물 흡수율 시험으로 도출된 흡수율을 나타낸 것이며, Fig. 8은 시험으로 도출된 공극률을 나타낸 것이다. Table 7은 각 변수별로 도출된 흡수율과 공극률을 통하여 Table 6을 기준으로 등급을 평가한 것을 나타낸 것이다.

시멘트광물계 급결제를 6.5% 혼입한 변수를 제외한 모든 변수가 끓는 물 흡수시험의 정성적 기준(Morgan et al., 1987)에서 “Excellent” 등급으로 평가되었다. 알루미늄이트계 급결제를 혼입한 변수에서는 혼입률이 증가함에 따라 흡수율이 감소하는 경향을 보였으나, 공극률에서는 혼입률에 따른 경향이 나타나지 않았다. 시멘트광물계 급결제 혼입 및 알칼리프리게 급결제를 혼입한 변수에서는 혼입률이 증가함에 따라 흡수율과 공극률이 모두 증가하는 것으로 나타났다.

시멘트광물계 급결제를 혼입한 변수 중 급결제 6.5% 첨가 시 다른 급결제 종류와 비교하였을 때 큰 폭으로 흡수율과 공극률이 증가되었다. 알루미늄이트계 급결제를 3% 혼입한 변수를 제외하고는 공극률이 증가할수록 흡수율도 증가하

Fig. 7. Absorption After Immersion & Boiling

Fig. 8. Volume of Permeable Pore Space

Table 7. Results of Boiled Absorption and Volume of Permeable Voids

Mixture	Absorption after immersion & Boiling (%)	Volume of permeable pore space (void, %)	Quality Grade
R 0%	4.885	10.558	Excellent
AL 3%	5.867	12.267	Excellent
AL 5%	5.725	12.952	Excellent
AL 7%	5.551	12.240	Excellent
CA 2.5%	4.438	10.224	Excellent
CA 4.5%	5.647	12.838	Excellent
CA 6.5%	9.016	19.176	Marginal
AF 4%	4.504	9.927	Excellent
AF 7%	5.196	11.457	Excellent
AF 10%	5.942	12.869	Excellent

였다. 급결제를 혼입하지 않은 변수가 가장 수밀한 콘크리트로 나타났으며 급결제 혼입 변수에서는 알칼리프리계 급결제 4%, 시멘트광물성 급결제 2.5%, 알루미늄이트 급결제

7% 순으로 수밀한 콘크리트로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 숯크리트에 있어서 초기 급결과 강도증진을 목적으로 사용되는 급결제의 혼입으로 야기되는 장기강도 저하와 품질저하에 대한 문제점을 보완하고자 수행하였다. 급결제의 종류 및 혼입량에 따라 숯크리트의 압축강도, 염소이온 침투저항성, 끓는 물 흡수 실험을 수행하였으며, 연구결과와는 다음과 같다.

1. 재령 1일을 기준으로 시멘트광물성 급결제와 알루미늄이트계 급결제가 초기 강도발현이 우수하며 알칼리프리계와 시멘트광물성 급결제는 재령 7일 동안 수화가 활발히 진행됨을 보였다. 알칼리프리계 급결제의 7% 이하 첨가는 급결제를 첨가하지 않은 변수보다 장기강도가 우수하였으며 장기강도 측면에서 알칼리프리계 급결제가 가장 우수한 장기강도 특성을 보였다.
2. 염소이온 침투저항성 시험결과 모든 변수에서 “높음” 등급으로 측정되었다. 각각 급결제 종류별 혼입율에 따른 염소이온 침투저항성은 알칼리프리계 급결제 10% 혼입, 시멘트광물성 급결제 2.5% 혼입, 알루미늄이트계 급결제 5% 혼입 변수 순으로 낮게 측정되었다.
3. 끓는 물 흡수 실험 결과 시멘트광물성 급결제 6.5% 혼입 배합을 제외한 모든 배합에서 “Excellent” 등급으로 판정되었다. 다만, 같은 수밀성을 측정하는 시험인 염소이온 침투저항성 시험결과와 상이한 결과가 나타났다. 또한 압축강도와 내구성 분석의 상반된 결과로 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단되어진다.

감사의 글

이 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2020R1A2C3009894)과 2019년도 교육부의 재원으로 연구재단의 지원((NRF-2019R1A6A3A01096309) 및 2017년도 강원대학교 대학회계 지원으로 수행되었습니다.

References

- ASTM C 1202-05. (2005). *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 642. (2006). *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- De Belie, N., Grosse, C.U., Kurz, J., and Reinhardt, H.W. (2005). Ultrasound monitoring of the influence of

- different accelerating admixtures and cement types for shotcrete on setting and hardening behaviour. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 11, pp. 2087-2094.
- Leung, C.K.Y., Lai, R., and Lee, A.Y.F. (2005). Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 4, pp. 788-795.
- Morgan, D.R., McAskill, N., Neill, J., and Duke, N.F. (1987). Evaluation fo silica fume shotcrete. *Proceedings of the International Workshop on Condensed Silica Fume in concrete*, Montreal, Canada, p. 34.
- Paglia, C., Wombacher, F., and Böhm, 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, No. 6, pp. 913-918.
- Park, H.G., Lee, M.S., Kim, J.K., and Jung, M.K. (2002). Application of new type accelerator for high quality shotcrete. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 4, No. 1, pp. 45-55.
- Park, H.G., Sung, S.K., Park, C.G., and Won, J.P. (2008). Influence of a C12A7 mineral-based accelerator on the strength and durability of shotcrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 3, pp. 379-385.
- Prudencio Jr, L.R. (1998). Accelerating admixtures for shotcrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 20, pp. 213-219.
- Shin, J.Y., Kim, J.Y., Hong, J.S., Suh, J.K., and Rho, J.S. (2005). The hydraulic characteristics of liquid shotcrete accelerators within cement system. *Jornal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 6, pp. 1011-1018.
- Won, J.P., Hwang, U.J., and Lee, S.J. (2015). Enhanced long-term strength and durability of shotcrete with high-strength C12A7 mineral-based accelerator. *Cement and Concrete Research*, Vol. 76, pp. 121-129.

Received	■ June 11, 2021
Revised	■ June 11, 2021
Accepted	■ September 14, 2021