

## 급결제에 따른 슛크리트의 응결, 강도 및 리바운드율

이성행<sup>1)\*</sup> · 김용하<sup>2)</sup> · 함형길<sup>1)</sup> · 김관진<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 밀양대학교 토목공학과 <sup>2)</sup> 삼성물산(주) 능동터널현장

(2004년 12월 15일 원고접수, 2005년 5월 20일 심사완료)

### Setting Time, Strength and Rebound Rate of Shotcrete according to Accelerators

Seong-Haeng Lee<sup>1)\*</sup>, Yong-Ha Kim<sup>2)</sup>, Hyung-Gil Hahm<sup>1)</sup>, and Kwan-Jin Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of civil Engineering, Miryang Nation University, Miryang., 627-706, Korea

<sup>2)</sup> Nungdong Tunnel Project, Samsung Construction, Ulsan, 689-823, Korea

(Received December 15, 2004, Accepted May 20, 2005)

#### ABSTRACT

An experimental investigation was carried out in order to verify the compressive strength, flexural strength, equivalent bending strength, rebound rate of shotcrete according to silicate accelerator, aluminate accelerator, cement mineral accelerator respectively and to especially evaluate the performance of shotcrete using cement mineral accelerator for high quality. The test result of compressive strength was showed that all accelerators were satisfied the required test value for each age, for the requirement of having the 75% or higher compressive strength ratio to plain concretes at 28 days, cement mineral accelerator with 87% compressive strength ratio was only satisfied. In flexural strength test, cement mineral accelerator was satisfied the flexural strength requirement in steel fiber reinforced shotcrete for each age. Aluminate type was conformed to the requirement for 28 days, but not at 1 day, silicate type was failed to satisfy standard requirement. Rebound rate was measured between 11~19% and cement mineral accelerator was showed comparatively lower rebound rate. Based on the test results, cement mineral accelerator exhibited excellent strength improvement and lower rebound rate compared to the conventional accelerator, its result is showed the possibility of making high performance shotcrete.

**Keywords :** shotcrete, compressive strength, flexural strength, rebound rate, cement mineral accelerator

#### 1. 서 론

NATM(New Austrian Tunnelling Method)이란 지반을 굴착하고, 강지보공, 록볼트 및 슛크리트를 효과적으로 배치시켜 지반자체의 아치기능을 이용하여 터널을 시공하는 공법으로, 큰 변형과 암반의 느슨함이 예상되는 굴착면에서 조기에 슛크리트를 타설하는 것이 중요하다. 슛크리트 시공은 일반 현장타설 콘크리트와 달리 초기강도 확보와 리바운드 저감, 지반의 이완을 조기에 억제하기 위해 급결제(accelerator)를 사용하고 있다. 슛크리트의 물성은 응결 시간, 압축강도, 휨강도, 휨인성, 리바운드율 등으로 규정하는데 급결제의 종류에 따라서 물성이 크게 변화하기 때문에 시공관리가 매우 까다롭고, 장기강도가 감소하는 문제가 있어 많은 현장에서 해결책에 부심하고 있으며, 인체에 대한 유해성 및 환경오염의 감소 방안이 해결해야 할

과제로 부각되고 있다. 이 급결제는 슛크리트의 초기 강도 뿐만 아니라 장기 강도 발현과 내구성, 재료 손실의 감소와 시공 효율 등에 미치는 영향이 크기 때문에 선택이 중요하다.

스�크리트의 시공법에는 습식공법과 건식공법이 있는데 품질관리가 용이한 습식공법이 주로 사용되며 습식공법에 사용하는 급결제의 종류로는 액상형인 실리케이트계, 알루미늄네이트계, 알칼리프리카계와 분말형인 시멘트광물계가 있다. 현재 우리나라에는 실리케이트계와 알루미늄네이트계가 주로 사용되고 있지만 유럽에서는 알칼리프리카계가 사용되고 있고 일본에서는 분말형인 시멘트광물계가 주로 사용되고 있다<sup>2)</sup>.

콘크리트 라이닝에 대한 인식 변화와 함께 1차 지보재인 슛크리트의 고성능화(고강도, 고내구성, 고시공성)는 양질의 암반을 갖는 지반에서 현장 타설 콘크리트 라이닝을 생략하고 단층 또는 다층의 고성능 슛크리트로 대체하여 최종 마감하는 형식의 영구 슛크리트 라이닝 터널<sup>5)</sup>이라는 신 개념의 터널 건설과 최근 그 수요가 증가하고 있는 3

\* Corresponding author

E-mail : lsh77@arang.miryang.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

차선 이상의 대 단면 터널 시공에 선결되어야 할 필수적인 기술로 그 중요성이 강조되고 있다. 강섬유 보강 숏크리트는 일반 숏크리트에 비해 균열 저항성, 충격 저항성 및 에너지 흡수력이 크기 때문에 최근에 많이 사용하는 추세이며, 시방서는 28일에서 숏크리트의 압축강도를 21 MPa로 규정하고 있지만, 강섬유를 사용하는 숏크리트의 휨 강도의 기준인 45 MPa를 만족하려면 압축강도가 21 MPa보다 훨씬 높게 발현되어야 한다<sup>6,7)</sup>. 최근 이러한 문제의 해결방법으로 기존의 실리케이트계와 알루미늄이트계 급결제를 대체하는, 환경오염이 적고 강도 및 품질이 우수한 새로운 종류의 급결제인 시멘트 광물계 급결제와 알칼리 프리계 급결제에 대한 많은 연구가 진행중에 있다<sup>1,2)</sup>.

알칼리 프리계 급결제는 황산알루미늄과 같은 알루미늄 염을 주성분으로 하는 급결제로서, 장기강도가 저하되지 않고, 인체에 대해 자극성이 적은 친환경적인 제품으로, 액상이기 때문에 기존의 장비를 이용할 수 있다는 장점이 있으나 초결이 느린 편이고, 비교적 높은 단가(실리케이트계의 2~3배)와 급결제 탱크, 압송펌프, 압송관 등에서 부식방지를 위한 재료의 사용이 요구되는 단점이 있다.

시멘트 광물계 급결제에는 C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>계, C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>·CaF<sub>2</sub>계 및 CSA계가 있는데, 급결력이 뛰어난 C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>계가 가장 많이 사용되고 있으며, 시멘트 광물을 주체로 하고 있기 때문에 인체에 해가 적고 초기 수화물로서 다량의 에트링자이트(ettringite)가 형성되는 특징으로 인하여 초기 반응성이 높아서 부착성 및 지수성이 뛰어난 뿐만 아니라 장기적으로 안정한 수화반응이 진행되어 고강도를 나타내는 특성이 있다<sup>1,4)</sup>. 또한 시멘트와 유사한 자극성 및 pH 특성을 보이고 있어 환경오염 및 유해성이 적으며 분말이므로 콘크리트의 슬럼프 변화에 둔감하여 현장에서의 숏크리트 품질관리가 용이한 반면, 현재 국내에 사용되고 있는 숏크리트 타설 장비가 거의 액상용이므로 분말용으로의 개조가 필요하다.

본 연구에서는 대상지구 터널<sup>8)</sup>에서 시공중인 실리케이트계 급결제, 알루미늄이트계 급결제, 시멘트 광물계 급결제를 사용하여 모르타르의 응결시간과 압축강도에 대하여 실내시험하고, 현장에서 제작된 공시체로 숏크리트의 압축강도, 휨강도, 휨인성 및 리바운드율 시험을 시행하여, 급결제가 숏크리

트에 미치는 응결, 강도, 시공성을 비교 검토하고, 특히 시멘트 광물계 급결제의 성능을 평가하여 숏크리트의 고강도화와 품질 고급화를 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트

시멘트는 KS L 5201(시멘트)의 기준에 적합한 1종의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

#### 2.1.2 골재

##### 1) 잔골재

콘크리트 표준시방서의 잔골재 품질을 만족하며 조립률이 2.60~2.80이고, 밀도 2.55 g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 2.61%인 강모래를 사용하였다.

##### 2) 굵은골재

콘크리트 표준시방서의 굵은골재 품질을 만족하며, 입도는 숏크리트의 규격에 적합한 15mm 이하이고, 밀도 2.71 g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 0.71%인 부순돌을 사용하였다.

#### 2.1.3 급결제

급결제는 실리케이트계, 알루미늄이트계 및 시멘트광물계의 급결제를 사용하였다. 급결제의 용량은 콘크리트의 응결시간, 리바운드량 및 강도에 미치는 영향이 크므로 공사특별시방서나 발주처지침 등으로 사용량을 규제하고 있다. 일반적으로 사용량이 적으면 응결이 늦어 급결효과가 떨어지므로 리바운드량이 많고, 반대로 사용량이 많으면 리바운드량은 적으나 장기강도가 저하하게 된다. 이런 현상은 이미 제조회사와 터널공사 현장에서 시험시공으로 확인하였으므로 이번 시험에서는 제조회사의 추천값인 알루미늄이트계는 7%, 실리케이트계는 12%, 시멘트광물계는 5%를 각각 사용하였으며, 이들 급결제의 조성화학적 특성은 Table 1과 같다.

**Table 1** Chemical composition and characteristics of accelerator

#### 1) Silicate and aluminate accelerator

Types	Chemical name	Chemical structure	Feature	Active content
Silicate	Sodium silicate	Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	Transparent yellowish solution	40 %
Aluminate	Sodium aluminate	Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Transparent yellowish solution	40 %

#### 2) Cement mineral accelerator

Types	Chemical composition (%)									Density (g/cm <sup>3</sup> )
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	
Cement mineral	3.05	31.5	0.84	36.40	1.80	0.50	11.50	0.31	1.40	2.76

### 2.1.4 강섬유

강섬유는 길이 30 mm, 지름 0.5 mm, 형상비(30/0.5)가 60이고, 인장강도는 916 MPa이며, 60 °C에서 90°로 굴곡했을 때 이상 없는 제품을 사용하였다. 콘크리트와 부착이 잘 되는 더블후크번들 타입(double hooked bundle type, 비중 7.85) 제품을 분산장치를 사용하여 투입하였다

## 2.2 배합설계

### 2.2.1 모르타르

한국콘크리트학회의 KCI-SC-102 규정(물-시멘트비가 50%, 잔골재-시멘트 질량비를 3.0)에 따라서 배합은 시멘트량은 300 g 단위수량은 150 cc, 잔골재량은 900 g의 비율로 했다. 급결제의 첨가량은 제조회사의 추천값인 실리케이이트계 12%, 알루미늄이이트계 7%, 시멘트광물계 5%를 각각 사용하였다.

### 2.2.2 슛크리트

현장의 배척플랜트를 이용하여 물, 골재, 시멘트, 강섬유를 자동 계량하여 혼합하였으며 이 시험에 사용된 재료의 배합설계 결과를 Table 2에 나타내었다. 배합설계의 순서는 실내시험으로 단위재료량을 결정한 후에 배척플랜트에서 콘크리트를 생산하고, 현장시험에서 슛크리트 장비로 급결제를 혼합하면서 슛크리트를 분사하였다. 급결제의 성능비교는 동일한 시험조건에서 결과를 추출해 내기 위해서 각 급결제별로 해당제품의 추천적정량을 사용하였으며, 타설시 작업성 확보와 슬럼프 조절을 목적으로 나프탈렌계(sulfonated naphthalene) 유동화제를 사용하였다.

## 2.3 실험방법

### 2.3.1 모르타르

급결제의 응결시험은 터널표준시방서에는 KS L 4103 (길모아침에 의한 응결시간 시험방법)을 제시하고, 한국콘크리트학회는 KCI-SC-102(관입저항에 따른 모르타르의 응결시간 측정방법)를 제시하고 있다. 본 시험에서는 강도와의 연계성을 쉽게 비교하기 위하여 프록터 관입시험기로 응결시간을 측정하였다.

강도시험은 모르타르 혼합 즉시 50 mm×50 mm×50 mm의 공시체에 진동대를 사용하여 다짐면의 표면이 평활할

때까지 다졌다. 공시체는 재령 1일 이후 온도 20±3°C의 수중에서 양생하고 각 재령별로 KS L 5105에 따라 압축강도 시험을 시행하였다.

### 2.3.2 슛크리트

#### 1) 공시체 제작

배척플랜트에서 생산된 Plain 콘크리트에 대해 슬럼프와 공기량을 측정하였다. 콘크리트의 슬럼프 실험 결과는 120~150 mm 범위였고, 공기실 압력방법에 의한 공기량 측정 결과는 2~3%이었다. 강도시험용 시료 채취방법은 패널의 취급이 용이하지 않은 관계로 빔몰드를 이용하는 방법을 선택하였다. 콘크리트 휨강도 시험용 몰드(150 mm×150 mm×530 mm)를 사용해서 양쪽 중 한쪽을 제거한 뒤, 반발제가 유출될 수 있도록 70° 정도 경사지게 한 후 상부에서 하부로 뿜어 붙였다. 이때 노즐의 각도는 작업면에 직각으로 유지하고 노즐과 굴착면과의 거리는 1 m 정도를 유지하였다. 슛크리트는 시간당 15~20 m<sup>3</sup>의 타설속도로 빔몰드에 뿜어 붙인 후 몰드의 윗부분을 삼각엇지로 평탄하게 고르고 작업현장에서 경화될 때까지 보호하였다. 현장에서 제작한 공시체는 하루가 경과한 후에 시험실로 옮겨 탈형하고 20±3 °C의 수조에서 양생하였다. 본 시험 대상이된 터널은 총 연장 4.58 km의 난형 2차로 병렬 터널로, 0.63 km는 시멘트 광물계 급결제를, 1.57 km는 알루미늄이이트계 급결제를, 나머지 부분은 실리케이이트계 급결제를 사용하여 시공하였다.

#### 2) 압축강도 시험

스�크리트의 초기강도 시험방법(KCI-SC-104)은 콘크리트 휨시험용 거푸집(15cm×15cm×53cm)을 사용하여 공시체를 만들고, 공시체의 크기를 1mm 단위까지 측정한 후

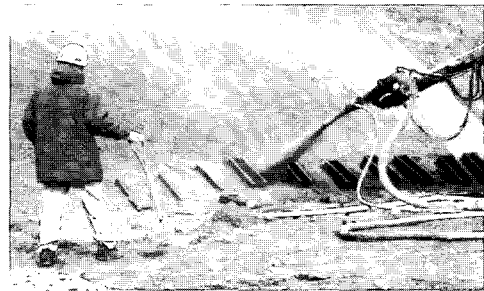


Fig. 1 Making of beam mold specimens

Table 2 Mix design of shotcrete

Concrete	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit mass (kg/m <sup>3</sup> )						
				W	C	S	G	Plas. ad	Fiber	Acc. ad.
Plain	12±2.5	47.0	65	211	450	1047	585	2.25	-	var.
SFRC	12±2.5	47.6	65	214	450	1027	587	4.5	40	var

중양부의 상하면에 한 쌍의 평행한 압축판을 대고 KS F 2413 (휨강도시험용 공시체의 일부분을 사용하는 콘크리트 압축강도 시험방법)에 따라 압축시험을 실시하였다.

### 3) 휨강도 시험

숏크리트의 휨강도 시험은 휨폴드(150mm×15mm×53mm)로 제작한 공시체를 대상으로 KS F 2408 (콘크리트의 휨강도 시험방법)에 준하여 시험하였다.

### 4) 휨인성 시험

휨인성 시험은 국내에 기준이 없으므로 강섬유 보강콘크리트의 휨인성 시험방법(KS F 2566)을 준용하여 시험하였다. 공시체의 제작은 미리 준비한 대형 패널에 뽑아 붙인 콘크리트를 14일 이후에 소정의 치수로 콘크리트용 절단기를 이용해서 잘라내도록 규정하고 있으나, 실제로는 대형패널이 너무 무거워서 취급하기 어려우므로 휨강도 시험용 공시체(150mm×150mm×530mm)를 사용하였다.

휨 인성시험은 공시체를 지점의 폭 중앙에 두고, 스펀의 3등분점에 상부 가압장치를 접촉시켜 공시체에 충격이 가해지지 않도록 하중을 가하며, 처짐을 측정하는 경우에는 처짐 속도가 일정하게 유지되도록 재하한다. 휨인성은 등가휨강도(휨인성 계수)로 나타내며, 재하점의 처짐이 지간의 1/150이 되기까지의 하중-처짐곡선 아래의 면적을 구하고 주어진 계산식에 의하여 등가휨강도를 계산한다.

### 5) 숏크리트 리바운드율 시험

숏크리트 리바운드율 측정은 숏크리트 타설 전에 타설할 전재료의 중량을 측정하고 타설할 부위의 바닥면에 시트 등을 깔고 난 뒤, 숏크리트를 터널 굴착면에 직접 타설하고 바닥에 떨어진 반발재(숏크리트)를 수거, 계량하여 다음 식으로 리바운드율을 산출한다.

$$\text{리바운드율 (\%)} = \frac{\text{반발재의 중량}}{\text{숏크리트용 재료의 총중량}} \times 100$$

## 3. 시험결과 및 고찰

### 3.1 실내시험 결과

#### 3.1.1 급결제를 사용한 모르타르의 응결특성

급결제의 주된 성능은 숏크리트를 급결시키는 것이므로 급결제 종류별로 적정 사용량으로 응결시간의 변화를 측정하여 Fig. 2에 그래프화 하였다. 실리케이트계 급결제는 초결은 빠르나 종결이 가장 느리게 나타나며 알루미네이트계 급결제는 초결은 매우 느리나 종결시간이 실리케이트계 보다 빠른 것으로 나타났다. 광물계 급결제의 경우는

초결 및 종결 시간이 모두 빠른 것으로 나타났다.

실리케이트계 급결제는 높은 알칼리 용액내에서 겔화되어 굳어지는 풀효과(gluing effect)에 의하여 생성된 겔상 물질로 초결은 매우 빠르지만, 미반응 시멘트 입자와 물이 접촉하는 것을 방해하여 장기적인 수화를 더디게 하므로 장기강도가 저하하는 원인으로 생각된다. 반면 알루미네이트계 급결제는 초기의 에트린자이트 형성이 더디어 초결은 느리나, 장기강도는 실리케이트계에 비해 크게 나타난다. 시멘트 광물계 급결제는 초기에 침상의 에트린자이트(ettringite)가 생성되고 시멘트와의 수화를 저해하지 않기 때문에, 시멘트 입자가 수화되면서 생성된 겔이 빠르게 에트린자이트와 엉켜 치밀화 되어 초결 및 종결 시간이 모두 빠른 것으로 판단된다.

Fig. 2에서 초결(3.5MPa)과 종결(28MPa)에 도달하는 프록터 관입 저항치를 KCI-SC-102의 기준(초결 5분 이내, 종결 15분 이내)에 적용해 보면 Table 3과 같이 시멘트 광물계와 알루미네이트계는 기준에 적합하였으나 실리케이트계는 종결시간이 기준에 미흡하였다.

#### 3.1.2 급결제를 사용한 모르타르의 압축강도 특성

모르타르의 압축강도는 응결시간과 더불어 급결제의 선정 기준이 된다. 현장에서 타설하는 숏크리트를 시험실에서 재현하기는 어려우나 급결제별로 우열을 비교하는 시험이므로 급결제 선정을 위한 중요한 비교 시험이 된다. 급결제 종류별로 압축강도의 변화를 구하기 위하여 실내 시험을 2회 실시하여 평균치를 Table 4에 정리하였고

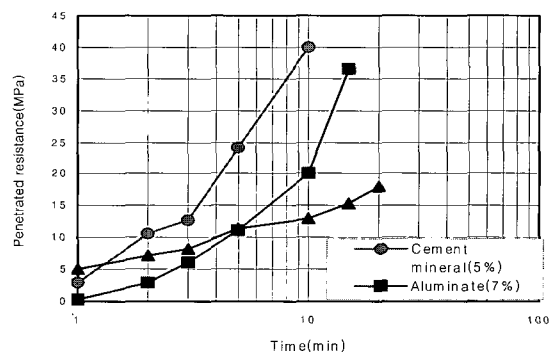


Fig. 2 Curve of penetrated resistance-setting time

Table 3 Setting time by test result

Type	Setting time(min)		Specification (min)	
	Initial	Final	Initial	Final
Cement mineral (5%)	1.1	6	< 5	< 15
Aluminate (7%)	2.1	13		
Silicate (12%)	< 1	Not measurable		

한국콘크리트학회에서 제시된 기준과 비교하여 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 3에서 실리카이트계 급결제는 초기강도가 가장 높으나 장기강도는 알루미늄계 급결제의 강도에 미치지 못하였다. 전반적으로 시멘트 광물계는 실리카이트계나 알루미늄계보다 높은 압축강도를 발현하였다. 한국콘크리트학회에서 제시된 기준(재령 1일 강도 : 10 MPa 이상, 재령 28일 강도 : 21 MPa 이상)과 비교하면 압축강도는 모두 기준에 적합하나 재령 28일에 급결제 첨가전의 콘크리트 강도의 75% (본 연구에서는 33.9 MPa) 이상을 발휘해야 하는 기준에는 시멘트 광물계만이 적합하였다.

### 3.2 현장시험 결과

#### 3.2.1 숏크리트의 강도시험

현장 시방서에는 일반 숏크리트는 압축강도를 기준으로 하고, 강섬유 보강 숏크리트는 휨강도 및 휨인성을 기준으로 규정되어 있으므로 이에 따라 시험하였다. 급결제별로 공시체는 급결제 미첨가 콘크리트 및 급결제를 혼합한 숏크리트에 대해 1일, 7일, 28일의 재령에서 강도를 측정하였다. 시험은 터널을 굴진하는 동안 여러 번에 걸쳐 시행하였고 Table 5에 그 중 대표적인 강도시험 결과를 기록하였고 Fig. 4으로 그래프화 하였으며, 휨강도와 휨인성 실험 결과를 Table 6에 정리하였다.

Fig. 4서 급결제를 사용한 숏크리트는 일반 콘크리트에 비해 단기 강도는 높으나 시간이 지남에 따라 강도의 증가율이 낮았다. 재령 1일에서 시멘트광물계, 알루미늄계, 실리카이트계의 급결제를 배합한 콘크리트의 강도는 plain콘크리트 강도의 각각 213%, 167%, 178%로 증가되었으며, 재령 28일에서 시멘트광물계, 알루미늄계, 실리카이트계의 강도는 plain콘크리트 강도의 각각 87%, 70%, 64%로 저감됨을 볼 수 있었다. 급결제 종류별로 비교한 압축강도의 값은 각 재령별로 숏크리트의 강도 기준에는 적합하였으나 재령 28일의 강도비 75% 이상의 규정에는 시멘트광물계만이 87%로 규격에 적합하였다. 이는 모르타르 압축강도 시험에서도 동일하게 나타났다.

알루미늄계와 실리카이트계의 급결제를 주사전자현미경으로 보면 특별한 수화물은 관찰되지 않고 단순히 C-S-H (Calcium-silicate-hydrate)겔상이 덩어리 형태로 뭉쳐있는 것을 알 수 있는데, 이 겔상 반응물은 초기강도는 증가시키지만 시멘트 입자를 피복하기 때문에 미반응 시멘트 입자와 물이 접촉하는 것을 방해하여 장기적인 수화를 방해하게 되며 장기강도 저하의 원인으로 생각된다. 반면 시멘트광물계는 포틀랜드시멘트의 초기 수화시 생성되는 에드린자이트의 생성 및 발달로 시멘트의 수화반응을 촉진시켜 장기적으로 강도손실을 줄여 상대적으로 고강도 발현이 가능했던 것으로 판단된다.

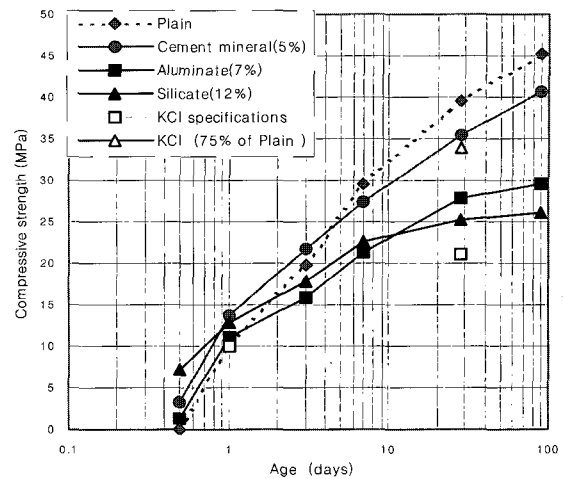


Fig. 3 Curve of compressive strength-time for mortar

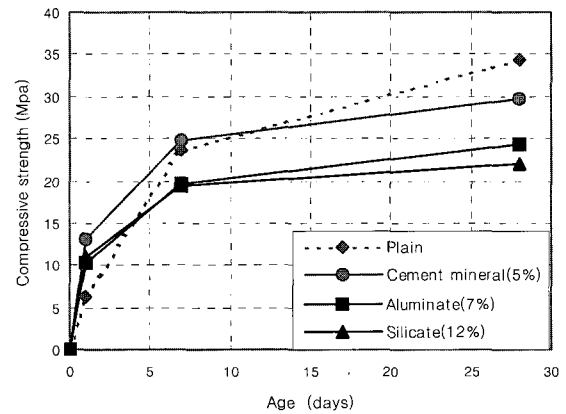


Fig. 4 Curve of compressive strength-time for shotcrete

Table 4 Compressive strength for mortar

Types	Compressive strength (MPa)					
	0.5 day	1 day	3 days	7 days	28 days	90 days
Plain	0	10.2	19.7	29.5	39.5	45.2
Cement mineral	3.2	13.6	21.7	27.3	35.5	40.6
Aluminate	1.2	11.0	15.8	21.2	27.9	29.5
Silicate	7.2	12.9	17.8	22.6	25.2	26.0

Table 5 Compressive strength for shotcrete (MPa)

Types	1 day	7 days	28 days	Specification
Plain	6.3	24.1	35.0	1 day strength > 10 MPa 28 days strength > 21 MPa
Cement mineral (5%)	13.4	25.4	30.3	
Aluminate (7%)	10.5	20.1	24.5	
Silicate (12%)	11.2	19.8	22.3	

**Table 6** Flexural strength and equivalent flexural strength

Types	Flexural strength (MPa)			Equivalent flexural strength (MPa)
	1 day	7 days	28 days	
Plane	1.14	4.06	5.81	4.11
Cement mineral (5%)	2.35	4.08	5.00	3.63
Aluminate (7%)	1.84	3.57	4.59	3.12
Silicate (12%)	1.94	2.65	3.06	2.34

**Table 7** Test results of rebound

Accelerator	Content of rebound (%)
Cement mineral accelerator (5%)	11 ~ 17
Aluminate accelerator (7%)	13 ~ 17
Silicate accelerator (12%)	14 ~ 19

따라서 시멘트광물계의 급결제는 초기의 높은 강도와 함께 종래의 알루미늄이트계와 실리케이이트계의 급결제가 가지는 장기강도 저감을 극복하고 고강도화 됨으로써 고성능 슛크리트의 품질확보 가능성을 확인할 수 있었다.

휨 강도와 휨 인성 실험 결과를 정리한 Table 6에서, 휨강도시험 결과는 강섬유 슛크리트에 대한 한국도로공사 기준<sup>6)</sup>(재령 1일에서는 2.1 MPa, 재령 28일에서는 4.5 MPa)에 시멘트광물계는 모든 적합하였으나 알루미늄이트계는 재령 28일에서만 기준치에 적합하였으며, 실리케이이트계는 모든 기준에 미흡하였다.

또한 휨 인성 실험 결과는 한국도로공사 기준(등가 휨 강도 3.06 MPa, 인성계수율 68%)에 시멘트광물계와 알루미늄이트계는 규정값에 적합하였으나, 실리케이이트계는 이 기준에 미흡하였다. 시멘트 광물계에서 휨강도는 도로공사 기준과 비교하여 19% 향상된 3.63 MPa(plain콘크리트 강도의 86%), 등가 휨 강도는 11% 향상된 5.0 MPa(plain 콘크리트 강도의 88%) 강도 발현을 보였다. 시멘트광물계는 압축강도와 같이 초기 수화시 생성된 에드린자이트가 시멘트의 수화반응을 촉진시켜 28일 강도에서 plain콘크리

트 강도의 86%~88%의 휨강도 발현이 가능했던 것으로 판단된다.

### 3.2.2 슛크리트의 리바운드율 시험

급결제 종류별로 리바운드율 성능을 비교 분석하기 위해 각 급결제를 사용하여 시험을 실시하였다. 슛크리트 타설은 베쳐플랜트에서 생산된 콘크리트를 레미콘트릭(aggitator)으로 터널내의 타설장소까지 운반하고, 준비된 슛크리트 타설기계(분말형 급결제는 Putzmeister사 장비, 액상형 급결제는 Normec사 장비)로 터널 굴착면에 직각으로 노즐과 굴착면과의 거리는 1m 정도를 유지하면서 슛크리트를 타설하였다. 터널은 2차선 난형 도로터널로 완성후의 단면은 폭 12.23m, 높이 8.21m이다.

리바운드율 시험은 타설현장 바닥에 시트를 깔고 급결제별로 각각 슛크리트 2m<sup>3</sup>씩 터널 천정부와 측벽부의 굴착면에 타설하여 반발된 재료의 무게를 측정하여 슛크리트 총무게에 대한 백분율로 계산하였다. 리바운드율 시험 결과를 Table 7에 표시하였다. 시멘트 광물계 급결제를 사용한 쪽이 알루미늄이트계와 실리케이이트계 급결제를 사용한 것보다 2~3% 정도 리바운드율이 작게, 알루미늄이트계 급결제가 실리케이이트계 급결제보다 1~2% 정도 리바운드율이 작게 나타났다.

이는 알루미늄이트계 급결제가 초기 수화물인 Ca(OH)<sub>2</sub>와 반응하여 C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>을 생성시켜 급결효과를 나타내므로, 급결제 자체가 겔화되어 급결효과를 나타내는 실리케이이트계 급결제에 비해 초결이 느려 리바운드율이 작게 나타난 것으로 분석되며, 시멘트 광물계 급결제가 앞 절의 압축강도 시험결과와 같이 초기강도의 발현이 높고, 급결성이 뛰어나며, 시멘트의 수화반응에 직접 관여함으로써 부착력을 향상시킨 것으로 판단된다.

### 3.3 모르타르와 슛크리트의 압축강도 비교

모르타르의 강도와 슛크리트의 강도와의 관계를 연관지어 비교하는 것이 다소 무리가 있지만 현재 국내에서 생산되고 있는 급결제 생산회사가 많아 해당 현장의 골재에 적합한 급결제를 선정하는 제품 선정 단계에서, 메이커별

**Table 8** Compressive strength in mortar and shotcrete (unit : MPa )

Types	1 day strength			7 days strength			28 days strength		
	M	S	Ratio(%)	M	S	Ratio(%)	M	S	Ratio(%)
Cement mineral	13.6	13.4	98.5	27.3	25.4	93.0	35.5	30.3	85.4
Aluminate	11.0	10.5	95.5	21.2	20.1	94.8	27.9	24.5	87.8
Silicate	12.9	11.2	86.8	22.6	19.8	87.6	25.2	22.3	88.5

Note) S : shotcrete, M : mortar, Ratio : strength of shotcrete/ strength of mortar

제품의 우열을 비교할 때 필요한 과정이라 생각되어 모르타르와 슛크리트의 관계를 압축강도로 비교 분석하였다

실내에서 혼합한 모르타르의 압축강도와 현장에서 타설한 슛크리트의 압축강도를 비교한 결과를 Table 8에 정리하였다. 이 표에서 모르타르의 강도에 대한 슛크리트의 강도비는 재령의 증가에 따라 저하되는 경향을 보이는데 시멘트 광물계가 시간이 경과할수록 강도비의 저하가 다른 급결제에 비해 크게 나타났고, 알루미늄네이트는 시멘트광물계에 비하여 완만하게 저하되었으며, 실리케이트는 재령에 관계없이 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 모르타르를 기준으로 슛크리트의 압축강도비를 각 재령별로 비교한 것으로 실내에서 시험한 모르타르의 압축강도와 현장에서 타설한 슛크리트의 압축강도를 비교하면, 재령 1일에서는 슛크리트의 압축강도가 모르타르 압축강도의 86.8~98.5%로 나타났으나 재령 28일에서 85.4~88.5%로 나타났다. 이와 같이 현장시험으로 측정된 슛크리트의 압축강도가 실내시험으로 측정된 모르타르의 압축강도 보다 적게 나타난 것은 재료의 계량과 혼합, 슛크리트의 타설 및 공시체의 제작 등에 기인된 것으로 판단된다.

따라서 슛크리트에 사용할 급결제를 선정할 때는 실내에서 시험한 모르타르의 압축강도를 근거로 급결제를 선정할 수 있음을 의미한다. 이때 재령 28일에서 슛크리트의 강도가 모르타르 강도에 비해 85.4~88.5% 정도로 낮아지므로 급결제를 선정하기 위한 모르타르 시험에서는 모르타르의 강도가 시방서에 규정된 슛크리트의 강도 기준의 113%~117%가 되도록 배합하여 시험하는 것이 합리적인 결과를 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 급결제가 슛크리트에 미치는 영향과 시공성을 파악하고자 대상지구 터널에서 시공중에 있는 실리케이트계, 알루미늄네이트계, 시멘트광물계 급결제를 사용하여 모르타르 실내시험과 현장 슛크리트 공시체 시험을 수행하였다. 본 실험에 이용한 급결제가 반드시 각각 급결제를 대표한 값이라고 확인하기에는 다소 무리가 있을 수 있지만, 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모르타르 응결시간은 실리케이트계 급결제에서 초결은 빠르나 종결이 가장 느리게 나타났고 알루미늄네이트계 급결제는 초결은 느리나 종결시간이 실리케이트계 보다 빠른 것으로 나타났으며, 광물계 급결제의 경우는 초결 및 종결 시간이 모두 빠른 것으로 나타났다. 모르타르의 압축강도시험에서 실리케이트계 급결제는 초기강도가 가장 높으나 장기강도는 알루미늄네이트계 급결제의 강도에 미치지 못하였다. 전반적으로 시멘트 광물계는 실리케이트계나 알루미늄네이트계보다 높은 압축강도를 발현하였다.

- 2) 시멘트광물계 급결제를 사용한 슛크리트의 압축강도는 일반 콘크리트에 비해 단기 강도는 높으나 시간이 지남에 따라 강도의 증가율이 낮았다. 급결제 종류별로 비교한 압축강도의 값은 각 재령별로 슛크리트의 강도 기준에는 적합하였으나 재령 28일의 강도비 75% 이상의 규정에는 시멘트광물계만이 87%로 규격에 적합하였다. 이는 모르타르 압축강도 시험에서도 동일하게 나타났다. 시멘트광물계는 포틀랜드시멘트의 초기 수화시 생성되는 에드린자이트의 생성 및 발달로 시멘트의 수화반응을 촉진시켜 장기적으로 강도손실을 줄여 고강도 발현이 가능했던 것으로 판단된다.
- 3) 휨 강도 시험결과는 강섬유 슛크리트에 대한 한국도로공사 기준에 시멘트광물계는 모든 적합하였으나 알루미늄네이트계는 재령 28일에서만 기준치에 적합하였으며, 실리케이트계는 모든 기준에 미흡하였다. 휨 인성 실험 결과 한국도로공사 기준에 시멘트광물계와 알루미늄네이트계는 규정값에 적합하였으나, 실리케이트계는 이 기준에 미흡하였다. 시멘트광물계에서 휨강도는 도로공사기준과 비교하여 19% 향상된 3.63MPa (plain콘크리트 강도의 86%), 등가 휨 강도는 11% 향상된 5.0MPa(plain콘크리트 강도의 88%)의 강도 발현을 보였다.
- 4) 리바운드율 시험 결과는 대체로 11~19% 사이였으며, 리바운드율은 시멘트 광물계 급결제를 사용한 쪽이 알루미늄네이트계와 실리케이트계 급결제를 사용한 것보다 2~3% 정도 작게, 알루미늄네이트계 급결제가 실리케이트계 급결제보다 1~2% 정도 리바운드율이 작게 나타났다. 이는 시멘트 광물계 급결제가 압축강도 시험과 같이 조기강도의 발현이 높고, 급결성이 뛰어나며, 시멘트의 수화반응에 직접 관여함으로써 부착력을 향상시킨 것으로 판단된다.
- 5) 슛크리트의 압축강도가 모르타르 압축강도에 비해 전체적으로 85.4~99.5%로 나타났으며, 급결제를 선정하기 위한 모르타르 시험에서는 재령 28일에서 모르타르의 강도가 안전측으로 보아서 시방서에 규정된 슛크리트의 강도 기준의 117%가 되도록 배합하여 시험하는 것이 합리적임을 나타내고 있다.

시멘트 광물계 급결제는 모르타르 응결시간, 모르타르 및 슛크리트의 압축강도, 휨강도, 등가휨강도, 리바운드율 등 모든 실험에서 상당히 우수한 것으로 평가되며, 초기의 높은 강도와 함께 종래의 급결제가 가지는 장기강도 저감을 극복하고 고강도화 됨으로써 고성능 슛크리트의 품질확보 가능성을 확인할 수 있었다. 향후 추가시험을 통하여 내구성 향상과, 장기강도 발현, 분말형 장비 개발, 작업효율의 향상 등의 연구가 뒷받침된다면 시멘트 광물계 급결제의 사용에 많은 발전을 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 김용하, 박해균, 이명섭, 김재권, 이철우, “분말형 시멘트 광물계 급결제를 사용한 습식 숏크리트 시공 사례연구”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집, 2003, pp.45~48.
2. 김진철, 류중현, “숏크리트용 급결제를 첨가한 시멘트 모르타르의 응결 및 강도 특성”, 콘크리트학회 논문집, Vol.16, No.1, 2004. 2, pp.70~78.
3. 원종필, 백철우, 박찬기, 전연중, “알칼리 프리계 급결제를 사용한 강섬유 보강 숏크리트의 성능 평가”, 한국농공학회논문집, Vol.46, No.3, 2004. 5, pp.65~72.
4. 김상현, 김준우, 현경훈, 조남섭, 김길환, “시멘트광물계 및 액상급결제를 사용한 숏크리트의 특성 비교”, 제30회 시멘트심포지엄 한국양회공업협회·한국세라믹협회, 2003, pp.239~247.
5. E. Grov., “Active Design in Civil Tunnelling with spray Concrete as a Permanent”, *International Conference on Engineering Developments in Shotcret. Auatralia*, 2001, pp.123~133.
6. 한국도로공사, 고속도로공사 전문시방서, 한국도로공사, 2001, pp.8~24.
7. 한국도로공사, 공사현장 품질관리실무, 한국도로공사, 2001, pp.364~368.
8. 부산지방국토관리청, “산외~상북간 제3공구(능동터널) 국도확장공사 시방서”, 부산지방국토관리청, 2000.
9. 건설교통부, 터널표준시방서, 한국터널공학회, 1997.
10. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서 해설, 한국콘크리트학회, 2000, pp.483~486.
11. 한국표준협회, KS L 5103 길모어 칩에 의한 시멘트 페이스트 응결시간 시험방법, 한국표준협회, 1996.
12. 한국표준협회, KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법, 한국표준협회, 2001.
13. 한국표준협회, KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험방법, 한국표준협회, 2001.
14. 한국표준협회, KS F 2413 휨강도 시험한 공시체로 콘크리트 압축강도를 시험하는 방법, 한국표준협회, 2001.
15. 한국표준협회, KS F 2566 강섬유보강 콘크리트의 휨인성 시험방법, 한국표준협회, 2000.

## 요 약

본 연구에서는 실리케이트계 급결제, 알루미늄이트계 급결제, 시멘트 광물계 급결제를 사용하여 모르타르의 응결시간과 압축강도를 실내시험하고, 현장에서 제작된 공시체로 숏크리트의 압축강도, 휨 강도, 휨 인성 및 리바운드율 시험을 시행하여, 급결제가 숏크리트에 미치는 응결, 강도, 시공성을 비교 검토하고, 특히 시멘트광물계 급결제의 성능을 평가하였다. 급결제 종류별로 비교한 압축강도의 값은 각 재령별로 숏크리트의 강도 기준에는 적합하였으나 재령 28일의 강도비 75% 이상의 규정에는 시멘트광물계만이 87%로 규격에 적합하였다. 휨강도시험 결과는 강섬유 숏크리트에 대한 기준에 시멘트광물계는 모든 적합하였으나 알루미늄이트계는 재령 28일에서만 기준치에 적합하였으며, 실리케이트계는 모든 기준에 미흡하였으며, 휨 인성 실험결과 한국도로공사 기준에 시멘트광물계와 알루미늄이트계는 규정값에 적합하였으나, 실리케이트계는 이 기준에 미흡하였다 리바운드율 시험결과는 대체로 11~19% 사이였으며, 시멘트광물계 급결제를 사용한 쪽이 알루미늄이트계와 실리케이트계 급결제를 사용한 것보다 2~3% 정도 작게 나타났다. 시멘트광물계 급결제는 초기의 높은 강도와 함께 종래의 급결제가 가지는 장기강도 저감을 극복하고 고강도화 됨으로써 고성능 숏크리트의 품질확보 가능성을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 숏크리트, 압축강도, 휨강도, 리바운드율, 시멘트광물계 급결제