

영구 슛크리트 터널 라이닝 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발(II)

- 시멘트 광물계 분말형 급결제를 사용한 습식 슛크리트 시공 -

- Development of High Performance Shotcrete for Permanent Shotcrete Tunnel Linings(II) -
 (Construction of Wet-Mixed Shotcrete with Powder Types Cement Mineral Accelerator)



박해군*
 Park, Hae Geun



이명섭**
 Lee, Myeong Sub



김재권***
 Kim, Jea Kwon



이철우****
 Lee, Cheol Woo

1. 서론

터널시공에 있어서 슛크리트(shotcrete)는 강지보, 록볼트와 함께 NATM공법에서 굴착 후의 지반안정을 위한 주요 지보재로서의 기능을 수행한다. 슛크리트는 뿜어 붙이는 특성으로 인해 지반에 부착하여 급격히 경화하는 특성과 함께 조기에 강도를 발현하여 후속작업을 신속히 진행할 수 있도록 하고 장기적으로 안정한 강도를 발휘하여 영구적으로 1차 지보재로서의 역할을 하여야 한다. 그러나 슛크리트는 초기 급결력의 확보를 위해 급결제를 사용하기 때문에 급결제의 품질과 콘크리트의 제반 여건에 따라 리바운드량이 증가하고 시공 능률이 저하되는 등 품질의 관리가 매우 까다롭고 장기강도가 감소하는 문제가 있어 대부분의 현장에서 해결책에 부심하고 있다. 이와 함께 인체에 대한 유해성 및 환경오염의 감소방안이 해결해야 할 당면과제로 부각되고 있다. 특히, 환경문제에 있어서는 세계적으로도 환경에 유해한 급결

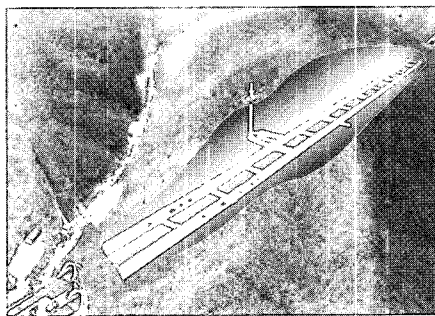


그림 1. 능동터널 조감도

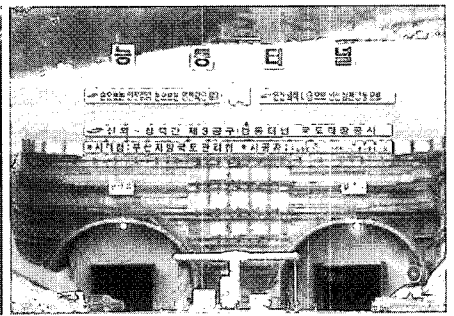


그림 2. 능동터널 현장

제의 사용을 금지하고 있는 추세이며 아직도 이러한 급결제가 보편적으로 사용되고 있는 국내현실은 세계적 흐름에 뒤쳐져 있다 할 수 있다. 최근 이러한 문제의 해결 방법으로서 급결력의 변화가 심하고 장기 강도 손실이 크며 환경오염을 심화시키는 기존의 실리케이트 및 알루미늄에이트계 급결제를 환경오염이 적고 품질이 우수한 새로운 종류의 급결제로 대체하려는 연구가 많이 진행되고 있다. 그 결과로 알카리프리카 급결제와 시멘트광물계 급결제가 개발되어 국내 현장적용을 활발하게 추진하

고 있으나 실용화되기에는 아직 미흡한 상태로써 더 많은 개선을 필요로 하고 있다. 따라서 본고에서는 최근 환경친화적인 급결제로 주목을 받고 있는 급결제 중 시멘트 광물계 급결제를 변수로 재료시험 및 현장시험으로 그 성능을 검토하였다.

2. 현장 소개

시멘트 광물계 분말형 급결제를 사용한 습식 슛크리트 공법이 적용된 현장은 국도 24호선 중 밀양시와 울산시를 연결하는 구간 중 가지산을 통과하는 NATM 터널현장으로서 기존 도로는 산악지 2차선 도로로서 평면선형이 불량하고 종단구배가 급하여 사고위험과 이동성이 불량하였으므로 신설

* 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 토목사업본부 토목기술팀 과장

** 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 토목사업본부 토목기술팀 부장

*** 삼성물산(주) 건설부문 토목사업본부 토목기술팀장 상무

**** 삼성물산(주) 건설부문 토목사업본부 능동터널현장 소장

노선으로 간선도로망을 구축하여 물류비용을 절감하고 이동성을 향상시켜 장래 교통수요의 효율적인 대처와 지역간의 균형적인 발전을 도모하기 위해 터널을 계획하였다. 이 터널은 2차로 병렬터널로서 길이가 4,580m와 4,534m로 현재 시공 중이며 중단 구배는 배수와 환경유지 및 주행성 확보를 위해 0.92%로 설계되었다. 터널 내 평면곡선 반경은 R = 1,800m 이상이고 편구배 2%로써 운전자의 운전 습관을 고려하여 설계하였다. 터널 내의 시설로는 비상주차대와 피난 연락망의 방재시설을 각각 750m 정도의 간격으로 설치하였고 환기는 1개의 수직갱과 켄트팬에 의한 종류식 환기방식을 채택하였다.

3. 시멘트 광물계 급결제

숏크리트 시공에 있어서는 일반 현장타설 콘크리트와는 달리 초기강도 확보와 리바운드 저감, 지반의 이완을 조기에 억제하기 위해 급결제(accelerator)를 사용하고 있다. 기존 급결제인 실리케이트계와 알루미늄계와 알루미네이트계의 단점을 보완하는 환경친화적인 새로운 급결제가 개발되어 이에 대한 성능평가 및 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 대표적인 제품으로 유럽에서 개발된 alkali-free 액상급결제와 일본에서 개발된 시멘트 광물계(칼슘 알루미늄계) 분말급결제가 있다. 1990년대 중반 유럽에서 개발된 alkali-free 액상형 급결제는 기존 급결제가 가지고 있는 단점을 보완하고 고강도 발현 및 작업자의 안전을 확보하는 환경 친화적인 제품으로 각광받고 있다. 국내에서도 alkali-free 급결제가 생산되고 있으나 시공실적이 많지 않으며, 비교적 높은 단가와 압송관 등에 대해서는 부식우려 및 일부 제품의 경우 용수부위에서 초기강도의 발현이 다소 늦어진다고 보고하고 있다.

일본에서는 1960년대부터 강알칼리의 액상형 급결제를 사용해 왔으며 그 후 시멘트 광물계의 분말형 급결제가 개발되어 1980년대부터 분말형 급결제에 대한 사용

비율이 점점 증가하고 있다. 시멘트 광물계 급결제는 시멘트 중에 존재할 수 있는 급결성 광물인 칼슘 알루미늄계 광물을 별도로 함성하여 분말형 분말형 급결제로서 시멘트의 광물을 이용하기 때문에 급결성이 뛰어나고 강도의 발현이 안정적이기 때문에 특수시멘트가 발달한 일본에서는 급결제 시장의 90% 이상을 점유하고 있다. 칼슘알루미늄계는 CA₂로부터 C₃A에 이르는 연속고용체로서 알루미늄 시멘트, 초속경 시멘트 및 특수시멘트에 광범위하게 적용되고 있는 광물이며, Ca(OH)₂나 알칼리와 반응하면 급속한 수화반응이 진행되는 특성을 가지고 있다.

광물계 급결제 중 가장 급결력이 뛰어난 것은 C₁₂A₇계로서 C₁₂A₇은 결정질 보다는 비정질의 상태일 때 더 급결력이 우수하므로 C₁₂A₇의 제조시 용융물을 급속 냉각하여 비정질화 하는 방법을 사용하고 있다. 현재 국내에서는 비정질 C₁₂A₇을 주성분으로 하는 시멘트 광물계 급결제가 개발되어 이미 건식 시공현장에서는 상용화 되어 있다. 비정질 C₁₂A₇은 자체적으로도 물과 반응하면 급속히 경화하는 특성이 있으며 포틀랜드시멘트와 혼합하면 급결하며 포틀랜드시멘트에 존재하는 석고에서 용출된 SO₃와 반응하여 침상형의 에트린자이트(C₃A·3CaSO₄·32H₂O)를 다량 생성하여 초기강도를 발현한다. 에트린자이트는 포틀랜드시멘트의 초기 수화시 생성되는 광물로서 시멘트의 수화를 저해하지 않기 때문에 장기적으로 강도손실이 거의 없으며 조건에 따라 고강도의 발현도 가능하게 한다. 시멘트 광물계 급결제의 가장 큰 특징은 급결력이 강하기 때문에 용수부위에서 숏크리트 타설이 용이하며 장기강도의 손실이 극히 적다는 점이다. 이러한 장점은 리바운드량의 감소와 함께 장기 강도를 높이기 위해 시멘트량을 절감

할 수 있다. 또한 시멘트와 유사한 자극성 및 pH 특성을 보이고 있어 환경오염 및 유해성이 적으며 분말이므로 콘크리트의 슬럼프 변화가 적어 현장에서 숏크리트의 품질관리가 용이한 장점을 가지고 있다. 하지만 광물계 급결제는 분말이기 때문에 현재 사용되는 액상급결제의 시공장비로는 시공이 힘들며 별도의 분말전용 공급장치를 필요로 한다.

4. 재료시험 및 모형시험

4.1 사용재료

시멘트는 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고 세골재는 경북 경주산으로 비중 2.55, 흡수율 2.61을 사용하였다. 조골재는 울산시 중리산으로 비중 2.71, 흡수율 0.71, 최대입경 15mm 이하인 것을 사용하였다. 강섬유는 형상계수 60(φ 0.5 × 30mm)의 Hook & bundle type(비중 7.85) 제품을 사용하였다. 급결제는 국내 U사의 시멘트 광물계 분말형 급결제를 사용하였으며, 타설시 작업성 확보와 슬럼프 조절을 목적으로 나프탈렌계 유동화제를 사용하였다.

4.2 배합설계

본 시험에 사용된 재료의 배합은 <표 1>에 나타내었다.

4.3 분말형 급결제 숏크리트 장비 및 현장 타설

광물계 급결제는 분말형태이므로 분말을 압축공기에 의해 정량적으로 이송할 수 있는 분말공급장치를 기존 숏크리트 장비에 추가하여 사용하였다. 급번 현장타설에 사용된 장비는 일본 Plibrico사의 Q-gun을

표 1. 숏크리트 배합설계

Cement	G _{max} (mm)	Slump(cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kg/m ³)					accelerator (%)	plasticizer (%)
						W	C	S	G	Steel Fiber		
OPC	13	12±2.5	47.6	65	2.5	214	450	1027	587	40	C × 5.0	C × 1.0

Putzmeister사의 습식장비에 결합하여 Y자 관으로 급결제를 콘크리트에 투입하는 방식으로서 기존의 액상장비를 개조한 것이다. 이 장비는 국내 대부분의 장비와 같은 Double piston 압송방식으로서 시간당 최대 20 m³의 속도로 시공할 수 있다. 분말공 급장치에서 압축공기에 부유된 분말급결제는 Y자관에서 콘크리트에 투입되고 노즐에 이르기까지 호스 내에서 혼합이 이루어진 후 노즐에서 분사되도록 하고 있다. 분말공급장치는 분말급결제를 급결제 탱크 하부의 회전 원판에 의해 연속적으로 정량 배출하며 압축공기로 이송하여 Y자관으로 공급하는데 이때 압축공기에 수분이 있으면 급결제가 경화하여 폐색이 발생하므로 압축공기는 air dryer에서 수분을 완전히 제거하여 공급하게 된다. 급결제의 배출량은 인버터의 주파수를 조절하여 원판을 구동하는 모터의 회전수를 변경함으로써 조정한다. 적용초기에는 장비 압축공기의 압력 밸런스의 문제로 Y자관에서 콘크리트가 역류되어 급결제와 함께 굳어 막히는 현상이 발생하는 경우가 많았으나 각 압축공기 연결부의 압력과 분말공급장치의 압력을 조절하고 분말공급장치의 일부를 개조하여 안정된 시공조건을 얻을 수 있었다. <사진 1>은 Putzmeister 사의 습식 장비 모습이고, <그림 1>은 본 연구에서 사용된 분말형 급결제 습식 슛크리트 시공장비의 조합을 나타낸다.

4.4 시험항목 및 방법

4.4.1 굳지 않은 콘크리트 시험

강도 시험용 패널에 타설 하기 전 배치 플랜트에서 생산된 베이스 콘크리트에 대한 슬럼프 경시 변화를 알아보기 위해 KS F 2402 규정에 의한 콘크리트 슬럼프 실험과 KS F 2421의 공기실 압력방법에 의한 공기량 측정시험을 실시하였으며 타설 전 콘크리트의 온도측정을 실시하였다.

4.4.2 압축강도 시험

Plain(급결제 미첨가 콘크리트) 및 급결제를 혼합한 슛크리트의 1일, 7일, 28

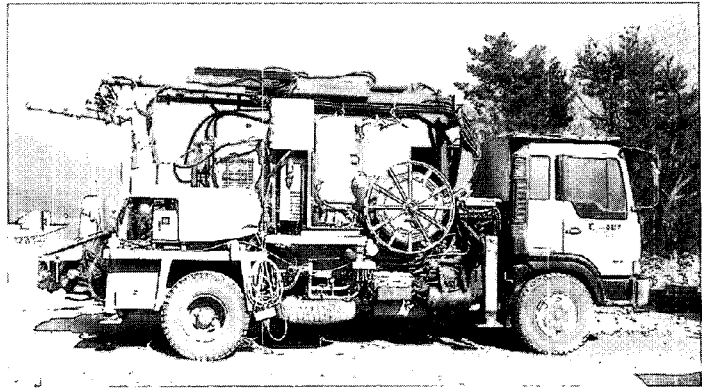


그림 3. Putzmeister 장비

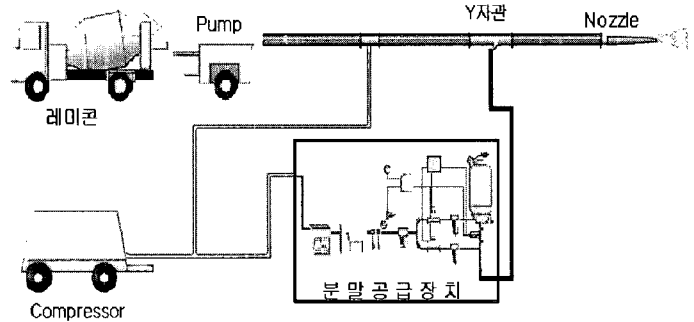


그림 4. 분말형 급결제 습식 슛크리트 장비 조합

표 2. 압축강도 및 휨 성능 시험결과(kgf/cm²)

시험	구분	재령 1일	재령 7일	재령 28일
압축강도	Plain	93.8	276.3	396
	Shotcrete	125	281	350
휨강도	Plain	17.1	46.1	58.4
	Shotcrete	23.6	41.2	50.0
등가휨강도	Plain	-	-	42.3
	Shotcrete	-	-	36.7(휨인성계수 81.5%)

일 재령에서 압축강도를 비교하였다. 급결제 혼합 슛크리트는 시간당 15 ~ 20 m³의 타설속도로 빔몰드에 분사하였다.

4.4.3 휨성능 시험

휨강도 측정을 위해 강재 빔몰드(150 × 150 × 550 mm)를 사용하여 슛크리팅 한 후 KS F 2408(콘크리트의 휨강도 시험방법)규정에 의거 1일, 7일, 28일 재령에서 강도 측정을 실시하였다. 휨인성시험은 지간길이 450 mm의 3등분점 재하법으로 휨인성을 평가하였으며, 처짐 측정을 위해 LVDT를 보의 중앙에 설치하였고 재령 28일 등가휨강도(Equivalent flexural strength, f_e)는 아래의 식 (1)을 통해 처짐(δ)이 지간(l)의 1/150(= 3.0 mm)이 될 때까지 하중-처짐 곡선 아래의 면적(T_b)

을 구해 산정하였다.

$$f_e = (T_b / \delta_{150}) \times (l / bh^2) \quad (1)$$

여기서, b 는 시편의 폭

h 는 시편의 높이

4.4.4 주사전자현미경(SEM) 관찰

1종 보통 포틀랜드시멘트에 물 30%와 각 급결제를 현장의 실제 사용조건을 감안하여 실리케이트계 12%, 광물계급결제 5%를 각각 혼합하여 균일하게 혼합한 후 시편을 만든 후 실리케이트는 3시간 및 1일, 광물계급결제는 30분 및 1일 경과 후에 각각 아세톤에 2시간 동안 넣어 수화를 정지시킨 후 진공 건조하여 파단면을 주사전자현미경(SEM) 시험을 실시하여 급결에 따른 반응조직을 분석하였다.

4.4.5 리바운드 시험

급결제 종류에 따른 리바운드 성능을 비교 분석하기 위해 분말형인 광물계 급결제와 액상형인 실리케이트 급결제를 사용한 슛크리트의 리바운드 시험을 실시하였다. 급결제 사용량은 현재 실 시공에서 사용되고 있는 사용량과 제품별 추천 사용량을 기준으로 결정하였다. 리바운드 시험은 먼저, 타설현장 바닥에 시트를 깔고 급결제별로 각각 2m³씩 천정부 및 측벽부 굴착면에 타설하여 리바운드 된 재료의 무게를 측정하여 슛크리트 총 무게에 대한 백분율로 계산하였다.

5. 결과 및 분석

5.1 강도시험결과

압축강도 및 휨성능 시험 결과는 <표 2>와 같다.

<표 2>의 결과와 같이 시멘트 광물계 급결제를 사용한 슛크리트는 압축강도, 휨강도, 등가휨강도 값이 국내의 관련 기준을 만족하면서 고강도 슛크리트의 특성을 동시에 보유하고 있는 것으로 나타났다. 먼저, 압축강도 결과를 살펴보면 기준에서 제시된 1일 압축강도 100 kgf/cm²을 확보하였으며, 재령 7일 이후에는 급결제 첨가 여부와 관계없이 현재 터널의 설계기준 강도로 적용되고 있는 210 kgf/cm² 이상의 강도를 발현하였다. 재령 28일에는 plain 콘크리트 강도의 88% 인 350 kgf/cm²를 확보하였는데 이는 포틀랜드시멘트의 초기 수화시 생성되는 에트린자이트의 생성 및 발달로 시멘트의 수화반응을 촉진시켜 장기적으로 강도손실을 줄임으로써 고강도 발현이 가능했던 것으로 판단된다. 따라서 높은 초기강도와 함께 범용 급결제가 가지는 장기강도 저감을 극복하고 고강도화 됨으로써 기존 급결제의 사용으로 인한 단점을 보완하고 고성능 슛크리트로서의 품질 확보 가능성을 확인할 수 있었다. 한편, 휨강도 및 휨인성 시험에서도 관련 규정(한국도로공사; 28일 휨강도 45 kgf/cm², 등가휨강도 30.6 kgf/cm², 휨

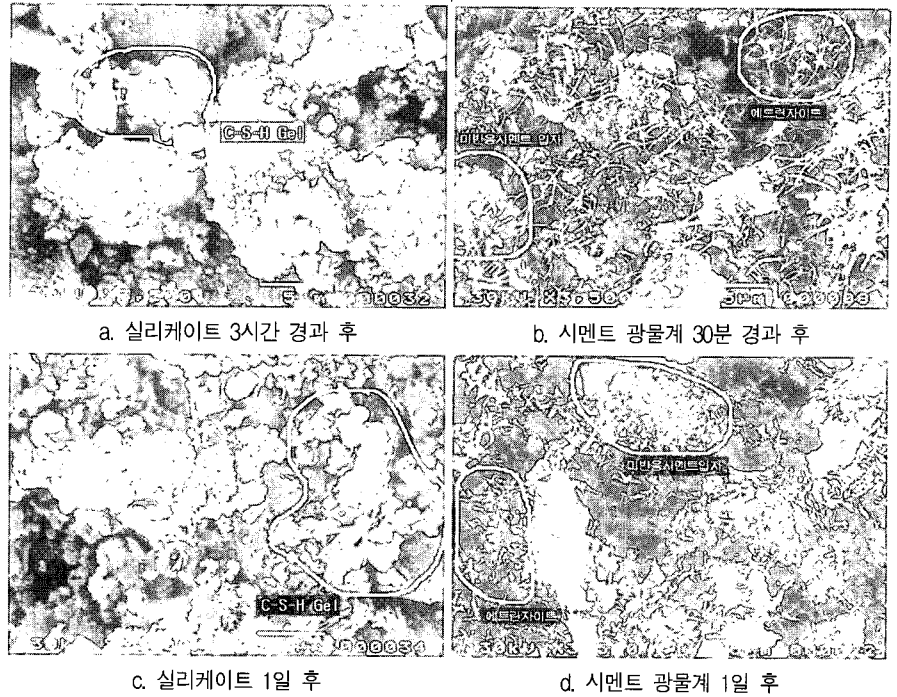


그림 5. SEM을 통한 급결반응 분석

표 3. 리바운드 측정 결과

급결제 종류	급결제 사용량	리바운드량	비 고
시멘트광물계(분말)	시멘트량의 5%	12 ~ 15%	급결제 별 2m ³ 의 슛크리트를 천정과 벽면에 타설
실리케이트(액상)	시멘트량의 12%	16 ~ 19%	

인성계수 68% 이상)을 만족하는 것으로 나타났으며, 재령 28일 기준으로 휨강도는 11%(plain 콘크리트 강도의 85%), 등가휨강도는 20%(plain 콘크리트 강도의 87%) 향상된 결과를 보여주었다.

5.2 주사전자현미경(SEM) 시험결과

급결제 종류에 따른 초기 응결조직을 주사전자 현미경(SEM)으로 분석한 결과는 <그림 5>와 같다. <그림 5>의 (a)와 같이 실리케이트 급결제의 초기 응결조직은 시멘트의 입자나 수화광물은 보이지 않고 물유리가 Ca(OH)₂와 반응하여 생성된 겔상 물질로 시멘트 입자가 덮여 있는 상태로 관찰된다. 이는 초기에 물유리 자체가 시멘트에서 용출된 Ca(OH)₂로 인해 순간적으로 겔화된 것이며 이 연질의 겔상은 시멘트 입자들을 피복하여 응집하지만 시멘트의 수화반응을 저해하므로 종결이 느리게 나타나는 특징을 보인다. <그림 5>의

(c)와 같이 1일 경과 후의 시편에서는 초기와 같이 시멘트 입자나 특별한 수화물은 관찰되지 않고 단순히 C-S-H 겔상이 초기보다 더 작은 알갱이 형태로 나타나고 있다. 이것은 시간의 경과에 따라 초기 겔상 물질이 수축되며 갈라지고 시멘트와 계속 반응하여 안정화되고 있음을 나타내고 있지만 시멘트 입자가 피복되어 있는 구조이기 때문에 장기적인 시멘트의 수화에 불리하며 이로 인해 장기강도의 감소가 일어나게 되는 것으로 판단된다. 한편, <그림 5>의 (b)와 같이 시멘트 광물계의 30분 경과 후의 응결조직을 보면 수화 초기부터 응결 및 초기강도를 발현하는 중요한 광물인 에트린자이트 결정이 생성되어 거미줄 같이 뻗어 나와 미반응 상태인 시멘트 입자들을 결합시키고 있는 것을 관찰할 수 있다. 또한, <그림 5>의 (d)와 같이 1일 경과 후의 조직을 보면 길이가 짧아지고 그물처럼 엉켜 안정화되어 있는 에트린자이트의 결정을 관찰할 수 있으며 이 조직

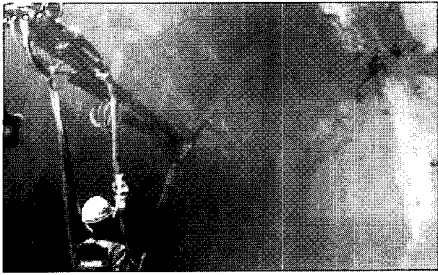


그림 6. 슛크리트 타설

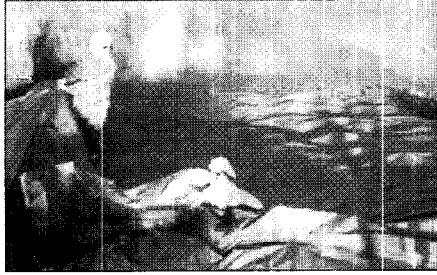


그림 7. 리바운드 측정

들은 미수화 입자와 공극을 유지하여 계속적으로 수화반응이 원활히 진행될 수 있는 형태를 가지므로 포틀랜드시멘트 자체의 강도를 저해하지 않을 것으로 판단된다.

5.3 리바운드 시험결과

〈그림 6~7〉은 리바운드 측정모습을 보여주고 있으며 리바운드 시험결과는 아래 〈표 3〉과 같다. 시험결과와 같이 시멘트 광물계 급결제를 사용한 것이 3~4% 정도 리바운드가 적은 결과를 보였는데 이는 주사현미경(SEM)분석에서 나타난 바와 같이 시멘트계 광물을 사용하기 때문에 조기 급결성이 뛰어나고, 시멘트의 수화반응에 직접 관여함으로써 슛크리트의 조기 강도를 증진시켜 암반과의 부착력 향상을 유도한 것으로 판단된다.

5.4 분진평가

국내에는 아직 분진과 관련된 규정이 없지만 분말형 급결제를 많이 사용하는 일본의 경우 법률로 분진발생을 엄격히 규제(막장 후방 50m에서 측정된 값이 3.0 mg/m³을 초과하지 않아야 함)하는 등 터널시공간 발생되는 환경문제 대해 많은 관심을 가지고 있다. 현재 국내에서 많이 사용되고 있는 액상형 급결제와 비교했을 때 분말형 급결제의 사용은 분진의 발생을 다소 증가시킬 것으로 예상됨에 따라 금번 시험에서는 윤안관측 및 VTR 촬영을 통해 분진에 대한 영향 평가를 실시하였다. 그 결과, 액상형 실리케이트 급결제와 비교했을 때 육안관측 및 VTR 촬영 후 분석으로 큰 차이를 확인 할 수 없었으나 보다

합리적인 평가를 위해 디지털 분진측정기 등 정밀한 장비를 통한 분석이 요구된다.

6. 결 론

본 시험을 통해 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 시멘트 광물계 급결제를 사용한 슛크리트는 압축강도, 휨강도, 휨인성 시험에서 우수한 강도발현을 보였는데, 28일 압축강도는 350 kgf/cm²(plain 콘크리트 대비 88%), 휨강도는 도로공사 기준 대비 11%(plain 콘크리트 강도의 85%) 향상된 50.0 kgf/cm², 등가휨강도는 20% 향상된 36.7 kgf/cm²(plain 콘크리트 대비 86%)를 각각 확보하였다.

(2) 시멘트광물계 급결제를 사용한 슛크리트의 리바운드양은 약 12~15% 정도로 실리케이트계 급결제를 사용한 경우(16~19%)보다 3~4% 정도 리바운드가 적은 것으로 나타났는데 이는 주사현미경(SEM)을 통한 조직분석에서도 나타난 바와 같이 시멘트계 광물을 사용하기 때문에 급결성이 뛰어나고, 급결제가 수화반응에 직접 관여함으로써 슛크리트의 조기 강도를 증진시켜 암반과의 부착력 향상을 유도한 것으로 판단된다.

(3) 본 시험을 통해 Single-shell tunnel 등 신개념 터널건설에 요구되는 고성능 슛크리트 기술에 대한 개발 가능성을 확인하였으며, 향후 추가시험을 통해 분말형 급결제 사용에 따른 슛크리트의 장기내구성 및 경제성 분석, 그리고 각 배합별 강도발현 범위 및 탄성계수 산정을 통해 터널 지보거동에 미치는 영향에 대한

검토도 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 모형시험을 수행하는데 많은 협조를 주신 삼성건설 능동터널현장 김용하 부장님, (주)유니온 연구소의 조남섭 부장님께 감사드립니다. □

참고문헌

1. 박해균, 이명섭, 김재권, 안병제, "Permanent Shotcrete Tunnel Lining 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발(I) 고강도 슛크리트 개발을 위한 alkali-free 급결제 적용", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, Vol.14, 건설업체 기술발표회, 2002. 5.
2. 박해균, 이명섭, 김재권, 안병제, "Permanent Shotcrete Tunnel Lining 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발(II) 용수(湧水)부에서의 조강시멘트 적용", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, Vol.15, 건설업체 기술발표회, 2002. 11.
3. 박해균, 이명섭, 김재권, "영구 슛크리트 터널 라이닝 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발(I)-alkali free 급결제 적용성 검토", 한국콘크리트학회지 Vol.15 No.3, 2003. 5, pp.66~73.
4. E.Grov., "Active Design in Civil Tunnelling with Sprayed Concrete as a Permanent," International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, Australia, 2001, pp.123~133.
5. 건설교통부, "터널표준시방서", (사)대한터널협회, 1999.
6. 건설교통부, "터널설계기준", (사)대한터널협회, 1999.
7. 건설교통부, "콘크리트표준시방서", 1996.
8. ACI, "Reported by ACI Committee 506 Specification for Shotcrete," 1995.
9. EFNARC, "European specification for sprayed concrete guidelines for specifiers and contractors," 1996.
10. (社)日本トンネル技術協會, "トンネルの吹付けコンクリート", 1996.