

강섬유보강 습식 슛크리트의 리바운드 저감대책
Countermeasure of rebound reducing for wet-mixed steel fiber
reinforced shotcrete

임주영*
Lim, Joo-Young

박해균**
Park, Hae-Geun

이명섭***
Lee, Myeong-Sub

조남섭****
Cho, Nam-Sup

ABSTRACT

From the early 1980's, the New Austrian Tunneling Method (NATM) has been developed as a one of the standard tunneling method in Korea. Owing to the results of many researches, the practical problems of shotcrete has been improved for a last decade. However, the excess amount of rebound still remains one of the critical problems in shotcrete technology. In order to improve for this rebound problem, recently developed cement mineral accelerator has been successfully applied to several NATM tunnels in Korea. An experimental investigation was carried out in order to verify the rebound characteristics of wet-mix Steel Fiber Reinforced Shotcrete (SFRS) with powder types cement mineral accelerator. Mortar setting test, SEM analysis, bonding test under spring water condition and rebound test were conducted. From the result, wet-mix SFRS with cement mineral accelerator exhibited excellent bonding characteristics even spring water condition and less rebound ratio compared to the conventional liquid accelerator.

1. 서론

최근 들어 사회기반시설 확충의 필요성 및 국토이용의 효율성을 위하여 지상환경을 보존하고 국토의 효율적인 활용을 위해 지하철, 도로, 국철 및 고속철도 공사등에서 터널 및 지하공간의 건설공사가 증가하고 단면이 대형화되는 추세이다. 현재 터널 및 지하공간에 주로 사용되는 공법은 NATM(New Australian Tunneling Method) 공법이다. NATM공법은 단순한 굴착, 지보공의 수단, 지보공의 설치 순서 등을 말하는 것이 아니고 현실에 맞게 판단하는 지반거동의 계 원칙에 따라 시공하는 것으로 터널을 구성하는 주체가 주변지반이고 지보공은 지반 본래의 강도를 유지하고 보강하는 수단으로 생각하는 개념이며, 강제지보, rock bolt와 슛크리트를 지보재로 사용하고 암반 굴착 직후 원지반의 지지능력을 최대한도 활용하여 지반을 안정화시킴으로써 터널의 안전성을 유지시키는 공법이다. 이 중 슛크리트(shotcrete)는 별도의 거푸집이 필요 없이 슛크리트 장비를 사용하여 굴착된 원지반에 공기압으로 뿜어붙이는 콘크리트로서 지반의 이완을 방지하여 원지반의 강도를 유지하고, 콘크리트 아치로서 하중을 분담하는 역할을 하므로 조기강도 확보, 굴착 암반과의 부착성 향상, 리바운드와 분진발생을 최소화하는 기능이 함께 요구된다. 그러나 슛크리트는 사용되는 재료나 배합, 각종 시공조건 및 타설방법 등에 민감하게 영향을 받기 때문에 콘

* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 삼성물산(주) 건설부문 토목공사팀장

** 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 과장, 공학박사

*** 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 부장, 구조기사

**** (주)유니온 부설연구소 부소장

크리트를 급결시켜 지반에 부착하기 위한 혼화제인 급결제(accelerator)의 품질과 콘크리트의 제반역전에 따라 리바운드량이 증가하고 시공능률이 저하되는 등의 품질관리상의 어려움이 많으며 이로 인해 지보성능이 저하되는 문제가 발생되고 있다. 뿐만 아니라 시공시 숏크리트의 성능이나 품질보다는 타설시 리바운드 양을 줄이기 위해 당초 시방서에 명시되어있는 표준량보다 훨씬 많은 급결제를 사용하고 있어 장기적으로 숏크리트의 강도가 크게 저하되는 문제가 발생하고 있다. 따라서 본 고에서는 습식 숏크리트의 리바운드를 발생시키는 다양한 원인 중에 재료적으로 중요한 역할을 차지하는 있는 급결제를 중심으로 최근 새롭게 개발된 시멘트 광물계 급결제에 대한 응결특성시험, 주사전자현미경(SEM)분석, 용수부에서 부착시험, 그리고 급결제에 따른 리바운드 실험을 통해 부착력 향상이 숏크리트의 리바운드에 미치는 영향에 대해 평가하였다.

2. 급결제(Accelerator)

숏크리트 시공에 있어서는 일반 현장타설 콘크리트와는 달리 초기강도 확보와 리바운드 저감, 지반의 이완을 조기에 억제하기 위해 급결제(accelerator)를 사용하고 있다. 이 급결제는 숏크리트의 초기강도뿐만 아니라 장기강도 발현과 내구성, 숏크리트 두께 등에 영향을 미치고 있어 배합에 사용되는 다른 재료와 비교했을 때 그 중요성이 강조되는 재료적 요소이다. 건설교통부 콘크리트 표준시방서와 터널표준시방서에서는 바람직한 급결제의 성능으로 콘크리트의 응결, 경화를 촉진시키고, 최종강도의 저하가 작으며, 작업원의 피해가 적고, 장기간의 강도증진을 해치지 않는 것으로 정의하고 있다.

현재 국내에서 사용되고 있는 급결제 종류는 약 4가지로 실리케이트(물유리계), 알루미늄이트, 시멘트 광물계, 알칼리 프리계로 요약할 수 있다. 실리케이트계는 시멘트와의 수화반응에 직접 관여하지 않아 사용되는 시멘트 특성과 무관하게 사용할 수 있고, 숏크리팅 후 겔(gel)화 시간이 빨라 1회 타설 두께를 크게 할 수 있다는 장점 때문에 많이 사용되었다. 하지만 사용량 증가에 따른 장기강도 저하와 급결에 사용되지 않은 잉여분의 배출에 따른 환경오염, 작업 간 체내 흡수시 체외 배출이 힘든 관계로 오스트리아에서는 그 사용량을 제한하는 등의 단점을 가지고 있다. 알루미늄이트계는 현재 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 급결제로 시멘트 수화반응을 촉진시켜 급결효과를 나타내며 실리케이트보다 우수한 장기강도의 발현이 가능하지만, 사용량이 초과하면 내구성 및 장기강도를 급격히 감소시키고 겔(gel)화 시간이 약간 느리며 pH 13~14의 강한 염기성으로 작업자의 화상을 일으켜 프랑스, 노르웨이 등 유럽의 일부 국가에서는 사용을 금지하고 있다.

최근 건설 환경에 대한 관심증대로 요구되는 조기강도 확보와 함께 장기강도 발현에 손상을 주지 않는 환경 친화적인 새로운 급결제가 개발되어 이에 대한 성능평가 및 시공이 활발히 진행되고 있다. 그 대표적인 제품으로 일본에서 개발된 시멘트 광물계(칼슘 알루미늄이트)급결제와 유럽에서 개발된 알칼리 프리 급결제가 있다. 일본에서는 1960년대부터 강알칼리의 액상형 급결제를 사용해 왔으나 1980년대부터 시멘트 광물계의 분말형 급결제가 개발되어 실용화되었으며 사용 비율이 점점 증가하여 현재 일본 숏크리트 급결제 시장의 90% 이상을 차지하고 있다. 금번 국내에서 새로이 개발된 비정질 $C_{12}A_7$ 계 시멘트 광물계 급결제는 칼슘알루미늄이트 광물을 주성분으로 하고 있으며 선행의 급결제에 비해 급결력이 우수하여 용수부위에서 숏크리트 타설이 용이하며, 초기 강도 확보가 유리하고 안정적인 강도발현으로 장기강도 손실을 최소화 할 수 있어 숏크리트 타설시 발생하는 리바운드 저감이 가능하다. 또한 보통 포틀랜드 시멘트와 유사한 정도의 자극성을 보여 작업간 호흡에 의한 인체 내 축적 및 피부나 점막 접촉시의 화상, 손상 등의 기

존의 급결제가 갖고 있는 문제점을 해결할 수 있어 인체에 대한 유해성이 적은 물론 급결력이 우수하여 선행의 급결제에 비해 급결제의 사용량을 줄일 수 있어 사용되지 않은 잉여분에 배출에 의한 지하수 오염 등의 환경오염을 최소화 할 수 장점을 가지고 있다. 분말급결제 사용을 위해서는 별도의 전용장비를 필요로 하는데 일본의 분말급결제 전용장비는 국내 현장의 작업여건에 적합하지 않으며 국내 습식 슛크리트 현장에 적합한 장비시스템이 개발되지 않아서 본격적인 적용이 어려웠으나 다년간의 시공 시스템 개발과 시행착오를 통해 현재에는 안정적으로 타설이 이루어지고 있다. 한편, 90년대 중반부터 유럽에서 개발된 환경 친화적인 알칼리 프리 급결제는 슛크리트가 터널지보거동에 미치는 중요한 요소인 초기강도 저하의 문제와 용수구간에서의 부착문제, 그리고 시멘트 등 유류과의 재료 및 시공환경 차이로 인해 국내에서 적용하기에는 아직까지 선결되어야 할 부분이 많다는 현장의 목소리가 있어 추가적인 개선이 필요할 것으로 판단되며 향후 이에 대한 개선이 이루어진다면 고성능 슛크리트에 사용될 급결제로서의 잠재능력은 충분할 것으로 판단된다.

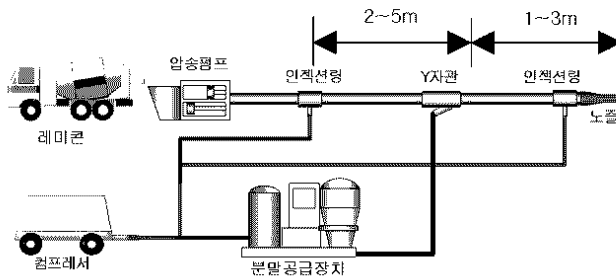


그림 1. 시멘트 광물계 급결제를 사용한 습식 슛크리트 시공 시스템

3. 시멘트 광물계 급결제를 사용한 재료시험

3.1 급결제별 응결시험

시멘트 광물계 급결제의 응결특성을 평가하기 위하여 KS F 2436 「관입 저항질에 의한 콘크리트의 응결시간 시험방법」을 바탕으로 수정하여 굵은 골재를 제외한 KCI SC 102의 규준에 의해 W/C=0.5, S/C=3인 모르타르 샘플을 만들어 응결시험을 실시하였다. 급결제의 응결시간 결과는 <그림 2>와 같다. 급결제별 응결시간을 살펴보면 먼저 실리케이트계(S) 급결제를 첨가한 모르타르의 경우 초결시간은 빠른 반면 종결은 가장 늦은 것으로 나타났다. 이는 시멘트 특성에 상관없이 실리케이트 급결제 자체의 겔화에 의한 풀효과로 급결효과를 나타내는 특성에 의한 것으로 판단된다. 알루미늄이트계(Al) 급결제의 경우, 초결은 실리케이트계보다 약간 늦었으나 수중에서 가수분해된 수산화나트륨(NaOH)의 급결효과 및 시멘트의 C₃S의 수화반응을 촉진시키는 급결 특성상 종결시간은 30분 내외의 양호한 결과를 보였다. 한편, 시멘트 광물계는 초결 및 종결시간이 가장 짧은 결과를 나타냈는데, 시멘트 광물계 급결제의 경우 배합수와의 반응시 수초 이내에 급격히 에트리나이트를 생성하면서 그물구조를 형성하기 때문에 응결시간이 빠른 것으로 나타났으며, 이러한 결과로 판단해 볼 때 급결제의 중요한 특성인 급결성능은 시멘트 광물계가 가장 우수한 것으로 판단된다.

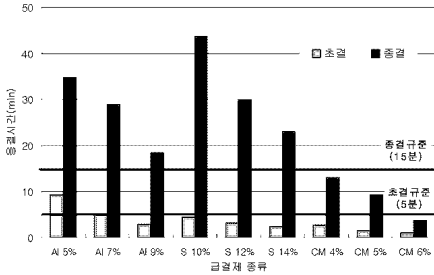
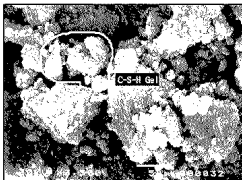


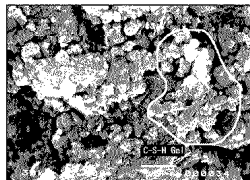
그림 2. 급결제별 응결시간

3.2 주사전자현미경(SEM)에 의한 미세구조 분석

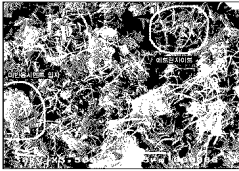
급결제 종류에 따른 초기 응결조직을 주사전자 현미경(SEM)으로 분석한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 (a)와 같이 실리케이트 급결제의 초기 응결조직은 시멘트의 입자나 수화광물은 보이지 않고 물유리가 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 생성된 겔상 물질로 시멘트 입자가 덮여 있는 상태로 관찰된다. 이는 초기에 물유리 자체가 시멘트에서 용출된 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 로 인해 순간적으로 겔화된 것이며 이 연결의 겔상은 시멘트 입자들을 피복하여 응집하지만 시멘트의 수화반응을 저해하므로 종결이 느리게 나타나는 특징을 보인다. 그림 3의 (b)와 같이 1일 경과 후에서도 초기와 같이 시멘트 입자나 특별한 수화물은 관찰되지 않고 단순히 C-S-H 겔상이 초기 보다 더 작은 알갱이 형태로 나타나고 있다. 이것은 시간의 경과에 따라 초기 겔상 물질이 수축되며 갈라지고 시멘트와 계속 반응하여 안정화 되고 있음을 나타내고 있지만 시멘트 입자가 피복되어 있는 구조이기 때문에 장기적인 시멘트의 수화에 불리하며 이로 인해 장기강도의 감소가 일어나게 되는 것으로 판단된다. 한편, 시멘트 광물계 급결제는 그림 3의 (c)와 같이 30분경과 후의 응결조직을 보면 수화 초기부터 응결 및 초기강도를 발휘하는 중요한 광물인 에트린자이트 결정이 생성되어 기미줄 같이 뻗어 나와 미반응 상태인 시멘트 입자들을 결합시키고 있는 것을 관찰할 수 있다. 또한 그림 3의 (d)와 같이 1일 경과 후의 조직에서는 길이가 짧아지고 그분저립 영커 안정화 되어 있는 에트린자이트의 결정을 관찰할 수 있으며 이 조직들은 미수화 입자와 공극을 유지하여 계속적으로 수화반응이 원활히 진행될 수 있는 형태를 가지므로 초기강도의 확보 및 장기강도 저감에 효과적으로 작용할 것으로 판단된다.



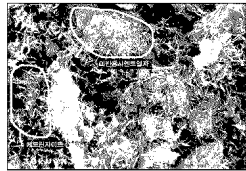
(a)실리케이트 (3시간 경과 후)



(b)실리케이트 (1일 후)



(c)시멘트 광물계 (30분경과 후)



(d)시멘트 광물계 (1일 후)

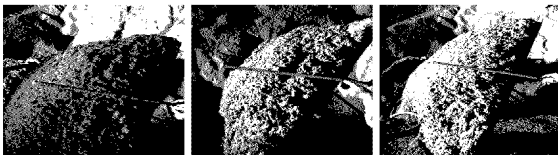
그림 3. SEM을 통한 급결반응 분석

3.3 용수구간에서의 부착시험

실제 터널 굴착시에는 지하수의 유출로 많은 용수가 굴착면을 통해 배출되는데 이에 대한 부착 성능을 확인하기 위해 용수부에 대한 부착시험을 통해 부착성능을 확인하였다. 800×1200mm의 철제 프레임에 제작하고 12mm두께의 합판을 부착하여 새우고 슛크리트 장비를 이용하여 타설한 후 타설상태와 두께를 측정하였다. 이때 용수 및 압력수에 대한 부착효과를 평가하기 위하여 다음과 같이 3가지 조건으로 나누어 실시하였으며, 시멘트광물계 급결제 투입량은 5%, 시공속도는 시공조건과 동일한 15m³/hr로 하여 각각의 관널에 약 1분간 분사하였다. 시험 결과, 시멘트 광물계 급결제의 사용은 용수부에서도 충분히 부착성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

표 1. 용수부 부착시험 조건

구분	표면 조건	용수/비용수
관널 1	물이 흐르지 않는 건조상태의 관널	비용수구간
관널 2	직경 15mm의 steel pipe를 관널의 중앙에 구멍을 뚫고 분당 40ℓ 압력수가 분출되도록 유도	용수구간
관널 3	직경 25mm의 steel pipe를 관널 상부에 고정된 후, 직경5mm의 구멍 4개 뚫어 분당40ℓ 물이 흘러내리도록 유도	용수구간



(a) 비용수구간

(b)용수구간(분출)

(c)용수구간(흘러내림)

그림 4. 시험 후 각관널의 두께를 측정하는 모습

표 2. 용수부 부착시험 결과

구분	관널 1	관널 2	관널 3
부착시험 결과	정상타설	초기 약 5초간 물 분출 즉시 지수 정상 타설	부착상태가 양호하여 흘러내림 없이 정상 타설
부착 두께	45cm	40cm	40cm

4. 리바운드 시험

급결제 종류에 따른 리바운드 성능을 평가하기 위해 실리케이트, 알루미늄이트, 시멘트 광물계 급결제를 사용하여 리바운드 시험을 실시하였다. 각 급결제의 사용량은 현재 실 시공되고 있는 사용량과 제품별 추천 사용량을 근거로 결정하였다. 리바운드 측정치는 측벽부와 취점부를 모두 포함하여 측정된 결과로서 바닥에 시트를 벽에 붙여서 시공부위 전체 바닥에 깔은 상태에서 콘크리트 2m²를 터널의 모든 단면에 대해 알고루 시공한 후 바닥에 떨어진 재료를 모아서 계량하고 사용한 콘크리트에 대한 백분율로 계산하였다. 이때의 장비 조건은 시공과 동일하게 15m³/hr의 속도로 하였다. 표 4의 리바운드 시험결과, 시멘트 광물계 급결제를 사용한 습식 슛크리트의 경우 기존의 급결제를 사용한 공법에 비해 리바운드가 적은 것을 알 수 있는데 이는 진술한 것과 같이 빠른 응결특성과 타설 초기부터 응결 및 초기강도를 발현하는 중요한 광물인 에트리자이트 결정이 생성되어 미반응 상태인 시멘트 입자들을 결합시켜 뛰어난 급결성을 확보하였고 또한 시멘트의 수화반응에 직접 관여함으로써 슛크리트의 초기강도를 증진시켜 압반과의 부착력 향상을 통한 리바운드 저감을 유도한 것으로 판단된다.

표 3. 리바운드 시험에 사용한 슛크리트의 배합

G _{max} (mm)	Shump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)					accelerator cement × %
				W	C	S	G	S/F	
13	10±2	45.5	65	209.3	460	1047	581	40	6% (알루미늄이트) 10% (실리케이트) 5% (시멘트광물계)

표 4. 리바운드 시험결과

구 분	알루미늄이트	실리케이트	시멘트광물계	비 고
리바운드	13~16%	15~19%	11~14%	급결제면 2m ² 의 슛크리트를 천장과 벽면에 타설

5. 결 론

본 논문에서는 습식 슛크리트의 리바운드를 발생시키는 다양한 원인 중에 재료적으로 중요한 역할을 차지하는 있는 급결제를 중심으로 최근 새롭게 개발된 시멘트 광물계 급결제에 대한 응결 특성시험, 주사전자현미경(SEM)분석, 용수부에서 부착시험, 그리고 급결제 종류에 따른 리바운드 실험을 통해 부착력 향상이 슛크리트의 리바운드에 미치는 영향에 대해 평가하였다.

그 결과 시멘트광물계 분말형 급결제를 사용한 습식 슛크리트는 기존의 급결제를 사용한 슛크리트에 비해 리바운드가 적은 것으로 나타났는데 이는 응결시험과 주사현미경(SEM)을 통한 조적분석에서도 나타난 것과 같이 빠른 응결특성과 타설 초기부터 응결 및 초기강도를 발현하는 중요한 광물인 에트리자이트 결정이 생성되어 미반응 상태인 시멘트 입자들을 결합시켜 뛰어난 급결성을 확보하였고, 시멘트의 수화반응에 직접 관여함으로써 슛크리트의 초기강도를 증진시켜 압반과의 부착력 향상을 통한 리바운드 저감과 함께 용수부에서도 우수한 부착력을 보인 것으로 판단된다. 따라서 선행의 급결제를 시멘트 광물계 급결제로 대체함으로써 슛크리트의 품질 및 리바운드 문제를 개선함으로써 향후 공사비 절감 등 경제성 확보에도 유리하게 작용함으로써 향후 슛크리트 공사에 널리 활용될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 박혜균, 이명성, 원종필 외 (2004), "시멘트광물계 분말형 급결제를 사용한 습식 슛크리트의 성능 평가", 대한토목학회 논문집, 제24권 1C호, pp.65~69.