

Permanent Shotcrete Tunnel Lining 구축을 위한 고성능 쏘크리트 개발 (I : 고강도 쏘크리트 개발을 위한 새로운 급결제 적용)

Development of High Performance Shotcrete for Permanent Shotcrete Tunnel Lining
(I : Application of New Type Accelerator for High Strength Shotcrete)

박 해 균* 이 명 섭** 김 재 권*** 안 병 제****
Park, Hae Geun Lee, Myeong Sub Kim, Jea Kwon An, Byung Je

ABSTRACT

From the early 1980s, the New Austrian Tunnelling Method (NATM) has been developed as a one of the standard tunneling method in Korea. Approximately 10 years ago, wet-mix shotcrete with sodium silicate accelerator (waterglass) was introduced and widely used to tunnel lining and underground support. However, this accelerator had some disadvantages due to the decrease of long-term strength compared to plain concrete (without accelerator) and low quality of the hardened shotcrete. In order to compensate for these disadvantages, recently developed alkali-free accelerator has been successfully demonstrated in numerous projects and applications as a new material to make tunnels more durable and safer. An experimental investigation was carried out in order to verify the strength behavior of wet-mix Steel Fiber Reinforced Shotcrete (SFERS) with alkali-free accelerator. Compressive strength, flexural strength and equivalent flexural strength were measured by testing specimens extracted from the shotcrete panels. From the results, wet-mix SFERS with alkali-free accelerator exhibited excellent strength improvement compared to the conventional shotcrete accelerator.

1. 서론

경제적인 진보와 함께 많은 터널이 국내에서 건설되었으며, 사회간접자본의 투자 확대에 따른 다양한 터널 건설 수요도 향후 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 특히, 최근에 와서는 터널의 대단면화 및 장대터널에 대한 요구와 함께 보다 안전하고 경제적인 터널 건설을 위한 관심과 실용화를 위한 다양한 검토가 이루어지고 있다.

* 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 과장, 공학박사

** 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 파트장, 부장, 기술사

*** 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀장, 상무, 기술사

**** 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 본부장, 전무, 기술사

1980년 초 서울지하철 건설공사를 계기로 적용하게 된 NATM(New Austrian Tunnelling Method) 공법은 암반 굴착 직후 원지반의 지지능력을 최대한으로 활용하면서 쏘크리트(Shotcrete, Sprayed Concrete)와 록볼트(Rock-bolt)를 주지보재로 터널의 안정성을 유지시키는 공법이다. 이 중 쏘크리트는 거푸집 없이 쏘크리트 장비를 사용하여 굴착된 원지반에 높은 공기압으로 뿜어 붙여지는 콘크리트로서 지반의 이완을 방지하여 원지반의 강도를 유지하고, 콘크리트 아치로서 하중을 분담하는 기능을 수행하며, 조기강도 확보, 굴착면과의 부착성 및 리바운드와 분진의 발생을 최소화하는 성능을 함께 보유해야 한다. 하지만, 국내의 쏘크리트 기술은 NATM공법이 국내에 들어온 초기의 기술력을 답습하고 있는 상태로 다량의 리바운드가 발생하고, 노즐맨의 경험이나 기량 등에 의존하는 경우가 많아 비용절감 및 시공능률 향상을 위한 개선이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 또한, 쏘크리트 품질은 사용되는 재료나 배합, 각종 시공조건 및 시공방법 등의 영향을 받고 있으나, 각 시공 프로세스상에서 발생하는 문제점을 해결하기 위한 시스템 구축이 아직 미비한 상태이며 특히, 막장 근방의 분진농도 기준치를 정하여 엄격한 시공 및 환경관리를 실시하고 있는 선진외국⁽¹⁾과 비교했을 때 개선 및 보완되어야 할 사항이 많은 분야로 판단된다.

2. 고성능 쏘크리트(High Performance Shotcrete) 개발 필요성

최근 사용이 증가하고 있는 3차선 이상의 대단면 터널 시공에서는 지금보다 더 큰 편평한 단면에서 굴착되기 때문에 지반 안정성이 떨어질 확률이 높아지는데 이러한 단점을 보완하기 위해서는 조기에 지반을 안정화시킬 수 있도록 조기강도 확보와 부착력 향상에 유리한 쏘크리트의 개발이 요구된다. 또한, 대단면 터널공사의 경우 쏘크리트 두께가 두꺼워지면 그 수량이 증가하여 터널 건설비용의 증가로 이어지기 때문에 쏘크리트 강도를 증가시켜 타설 두께를 줄임으로써 공사비 절감을 유도할 필요가 있으며, 특히 단층 파쇄대, 연약지대, 용수 부분 등 지반의 변형이 예상되는 부분에 대해서도 높은 탄성계수로 쏘크리트의 초기 강성을 높여 처짐을 억제시키고, 치밀한 내부조직과 향상된 부착성능을 통해 리바운드의 저감을 기대할 수 있는 고성능의 고강도 쏘크리트의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

한편, 서론에서도 언급했듯이 국내에서 적용되고 있는 NATM공법은 원지반의 지지능력을 최대한으로 활용하면서 지보재(쏘크리트, 록볼트)로 터널의 안정성을 유지시키는 원리를 따르고 있는데 터널내의 콘크리트 라이닝의 경우 지반의 특성에 관계없이 전 구간에 걸쳐 현장타설 콘크리트 라이닝으로 시공이 의무화되고 있다. 그러나, 현장타설 콘크리트 라이닝은 품질관리의 불확실성, 시공성 및 재료특성에 따른 균열 등 많은 문제점이 지적되고 있으며, 배수터널 형식을 채용할 경우에는 콘크리트 라이닝을 구조체로 보지 않고, 누수방지나 조명시설물 설치 및 미관상 마감 기능을 주목적으로 하기 때문에 라이닝의 생략 또는 부분적 도입으로 경제적, 안전적 측면에서 라이닝에 대한 새로운 평가와 함께 기능성 라이닝의 적용이 국내에서도 필요할 것으로 판단된다. 국내의 지반특성과 유사한 북유럽의 경우 최근 완공된 세계 최장의 도로터널인 Laerdal 터널(24.5km, Norway, 쏘크리트 설계기준강도 400kgf/cm^2) 등 Permanent Shotcrete Lining의 개념을 적용한 Single-Shell Lining 터널(현장타설 콘크리트 라이닝을 간략화, 또는 생략하여 쏘크리트로 최종 마감처리하는 터널시스템)이나 PCL(Prefabricated Concrete Lining)터널의 건설이 꾸준히 증가하고 있으나, 이러한 새로운 개념의 터널 지보시스템 적용을 위해서는 고강도, 고내구성, 고인성, 낮은 리바운드와 저분진 등의 고성능의 쏘크리트 개발이 우선적으로 선결되어야 한다. 따라서, 콘크리트 라이닝에 대한 인식 변화와 함께 1차 지보재인 쏘크리트의 고품질 및 고성능화는 향후 터널 설계와 시공에 중요한 위치를 차지할 것으로 판단되며, 이러한 시대적 요구에 따라 터널의 건설 및 유지관리비용 절감 등 생애주기비용에 효과적인 고성능의 고강도 쏘크리트의 개발이 절실히 요구되고 있다.

표 1 주요 Single-shell Lining 터널⁽²⁾

국가	이름	형태	시공 연도	압축강도 (MPa)
Canada	BC Rail	Railway	1988	40
Sweden	Lundby	Road	1998	40
Switzer-land	Disentiser	Railway	1999	47
Norway	Laerdal	Road	2001	40

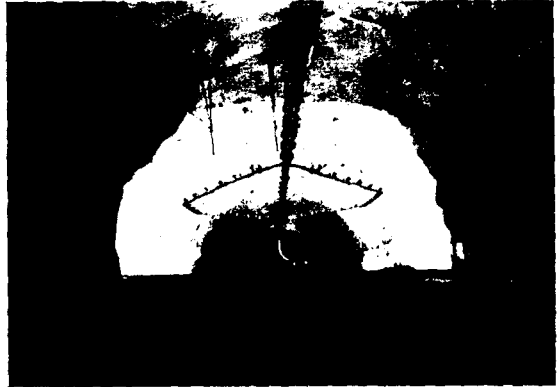


사진 1 세계최장 Laerdal터널(24.5km, 2001년)

3. 급결제 (Accelerator)

쏫크리트 시공에 있어서는 일반 현장타설 콘크리트와는 달리 초기강도 확보와 리바운드 저감, 지반의 이완을 조기에 억제하기 위해 급결제(accelerator)를 사용하고 있다. 이 급결제는 쏫크리트의 초기강도 뿐만 아니라 장기강도 발현과 내구성, 쏫크리트 두께 등에 영향을 미치고 있어 배합에 사용되는 타 혼화재와 비교했을 때 그 중요성이 강조되는 재료적 요소이다. 콘크리트 표준시방서⁽³⁾에서는 바람직한 급결제의 성능으로 콘크리트의 응결, 경화를 촉진시키고, 최종강도의 저하가 작으며, 작업원의 피해가 적고, 장기간의 강도증진을 해치지 않는 것으로 정의하고 있다. 이와 같이 급결제는 필요한 초기강도 확보와 함께 장기강도에 악영향이 없고, 리바운드율을 최소화하여 암반에 견고하게 부착할 수 있고 인체에 유해한 영향이 없는 제품이여야 한다. 또한, 사용량은 급결제 종류에 따라 적정 사용량을 제시하고 있으며 일반적으로 시멘트 중량의 5~10% 이내를 표준으로 기온, 지반조건, 용수 부분, 단층 파쇄대 등 특수 구간에 따라 증감 할 수 있도록 하고 있다. 그러나, 지금까지의 연구결과에 의하면 기존의 범용 급결제를 사용한 쏫크리트의 장기강도는 급결제를 넣지 않은 base concrete와 비교했을 때 20~40%정도의 압축강도 저하와 급결제 첨가량이 증가할수록 강도 저하도 커진다는 것을 확인할 수 있었고, 초기 급결에 따른 장기강도의 저하와 다량의 리바운드로 설계에서 요구되는 기준강도를 만족하지 못하는 경우가 시공 현장에서 자주 발생되고 있는 실정이다. 또한, 대부분의 급결제가 강한 염기성으로 일부 제품의 경우에는 강한 자극성 때문에 작업자의 안전(피부화상 등)에 직접적인 영향을 미치고 있으며 특히, 석회암 지반으로 토질 자체가 염기성인 경우에는 배수구를 통해 시공현장 외부로 배출되어 용해수가 주변 환경을 오염시키는 것으로 알려져 있다.

따라서, 요구되는 초기강도 확보와 함께 장기강도 발현에 손상을 주지 않으면서 작업자에 대한 피해나 주변 환경에 나쁜 영향을 미치지 않는 환경 친화적인 급결제의 사용이 요구되고 있으며, 최근에는 약한 염기성(pH1~3)의 새로운 급결제가 개발되어 이에 대한 성능평가 및 시험시공이 선진외국에서 활발히 이루어지고 있다. 이 가운데 1990년대 중반 유럽에서 개발된 Alkali-free 액상급결제는 현재 몇 가지 종류의 제품이 생산되고 있으며, 그 성능에 있어서도 기존의 급결제가 가지고 있는 단점을 보완하고 작업자의 안전을 확보하는 환경 친화적인 제품으로 인정받고 있다. 국내에서는 2~3종류의 Alkali-free 또는 약염기성 급결제가 생산되고 있으며 도로 및 철도터널의 일부구간에서 적용된 사례는 있으나 터널 전구간에 적용한 사례는 아직 전무한 것으로 알고 있다.

따라서, 본 논문에서는 슛크리트 품질확보에 중요한 위치를 차지하고 있는 급결제를 변수로 모형시험을 실시하여 실리카흙 등의 고강도 발현을 위한 고가의 혼화제를 사용하지 않고서도 품질향상과 함께 시공성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 고강도 슛크리트 개발 가능성을 확인하는데 주목적을 두었으며, 실험 결과를 통해 향후 Single-Shell Tunnel Lining, PCL등 Permanent Shotcrete Lining 적용을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

4. 모형시험

4.1 개요

Alkali-free급결제와 Waterglass급결제(sodium silicate)를 주요 변수로 습식 강섬유보강 슛크리트(Steel Fiber Reinforced Shotcrete, SFRS)에 대한 모형시험을 실시하였으며, 제작된 공시체에 대해 압축강도, 휨강도, 등가휨강도 및 휨인성계수를 평가하여 그 성능을 비교 분석하였다.

4.2 사용재료

시멘트는 KS L 5201에 적합한 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 비중은 3.15였다. 골재는 경북 경산지역에서 생산되는 13mm 조골재(비중2.63)와 세골재(비중2.59)를 사용하였고, 강섬유는 섬유 길이에 대한 직경의 비인 형상계수 60($\phi 0.5 \times 30\text{mm}$)의 hook & bundle type(비중7.85)의 제품을 사용하였다. 급결제는 국내 M사의 Alkali-free 급결제(비중1.40)와 현재 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 Waterglass 급결제(sodium silicate)를 사용하였다. 또한, 타설시 작업환경 확보와 슬럼프 조절을 목적으로 폴리카복실계 고성능감수제(superplasticizer)를 사용하였다.

4.3 배합설계

현장의 배치 플랜트를 이용하여 물(고성능감수제 회석), 골재, 시멘트, 강섬유를 자동 계량하여 혼합하였으며, 고강도 슛크리트 배합의 경우 낮은 물-시멘트비로 골재의 표면수 변동에 따른 단위수량의 영향이 크기 때문에 현장 배합을 위해 사용 골재에 대해서는 표면수 보정을 실시하였다. 배합이 완료된 콘크리트는 레미콘 트럭을 이용하여 슛크리트 타설 장소까지 운반하였다. 본 시험에 사용된 재료의 배합을 표2에 나타냈으며, 급결제 사용량은 Alkali-free의 경우 시멘트량의 7.0%, Waterglass는 시멘트량의 10%를 각각 사용하였다.

표 2 슛크리트 배합설계

G _{max} (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kgf/m ³)					accelerator (C×%)	superplasticizer (C×%)
					W	C	S	G	Steel Fiber		
13	13	41	65	4.0	198	480	1035	593	40	7.0 (A) 10.0 (W)	1.0

4.4 슛크리트 타설 및 양생

스�크리트 타설을 위해 더블 피스톤 펌프 압송방식(Meyco Suprema)의 슛크리트 장비와 23.3m³/min 용량의 에어 컴프레서를 사용하였다. 배치플랜트에서 제조되어 레미콘 트럭으로 운반된 콘크리트는 슛크리트 장비의 호퍼(hopper)에 부어져 직경 $\phi 65\text{mm}$, 길이 25m의 콘크리트 반송관을 통해 시간당 5~

6m³로 압송되었다. 급결제는 급결제 운송관(직경 \varnothing 25mm)을 통해 노즐(직경 \varnothing 40mm) 약1.5m 후방에서 첨가되었으며, 첨가량은 쏫크리트 장비의 디지털 계기판을 통해 자동으로 조절하였다.

토출되는 쏫크리트의 배합이 안정된 상태가 된 후 노즐 선단과 패널과의 거리를 약1.5m 정도 이격하여 노즐 맨에 의한 핸드스프레이를 실시하였다(사진 2). 시험시편 채취를 위해 강제 패널(100×100×10cm)과 빔 몰드(15×15×53cm)를 설치하여 타설 하였다. 타설 후 인력에 의한 패널 이동이 불가능하여 트럭 크레인을 사용하여 타설이 완료된 패널을 운반하였으며, 운반 후 타설면의 정리와 함께 직사광선이나 바람에 의한 수분 증발을 억제하기 위하여 양생포를 덮어 습윤양생을 실시하였다. 타설 다음 날, 쏫크리트가 타설된 면을 아랫방향으로 하여 사진 3에서 보는 바와 같이 강도시험을 위한 코어를 채취하였다.



사진 2 쏫크리트 타설



사진 3 코어 채취

4.5 시험항목 및 방법

4.5.1 굳지 않은 콘크리트

강도 시험용 패널에 타설 하기 전 배치플랜트에서 생산된 base concrete에 대한 슬럼프 경시 변화를 알아보기 위해 KS F 2402규정에 의한 콘크리트 슬럼프 실험(13cm)과 KS F 2421의 공기실 압력 방법에 의한 공기량 측정시험(4%)을 실시하였으며, 타설 전 콘크리트의 온도측정(18℃)을 실시하였다.

4.5.2 압축강도(Compressive strength)

압축강도 시험용 공시체는 타설 1일 후 코어보링머신(core boring machine)을 이용하여 \varnothing 100mm의 코어 공시체를 채취하였으며, 시간에 따른 강도발현 상태를 파악하기 위해 일자별로 3개의 공시체를 제작하여 1일, 3일, 7일, 28일 강도시험을 수행하였다. 공시체의 높이는 타설 후 면처리를 하였으나, 일정한 높이로 얻기가 힘들어 시험 전 채취된 공시체 높이를 측정하여 KS F 2422(콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도시험 방법) 규정에 의거 강도 보정을 실시하였다. 콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 의해 실시하였으며, 100tonf 용량의 UTM을 사용하여 측정하였다.

4.5.3 휨강도(Flexural strength), 동가휨강도(Equivalent flexural strength), 휨인성계수(Toughness quotient)

휨강도 측정을 위해 강제 몰드(15×15×53cm)를 사용하여 쏫크리팅 한 후 KS F 2408 (콘크리트의 휨강도 시험방법)규정에 의거 지간길이 45cm의 3등분점 재하법으로 1일, 3일, 28일 강도 측정을 실시하였다. 또한, 휨인성시험은 시험 여건상 휨강도 시편과 동일한 치수를 이용하여 표준양생 후 재령28일의 동가휨강도를 측정하였다. 처짐 측정을 위해 LVDT를 보의 중앙부에 설치하였으며, 재하점의 처짐이 전체 지간의 1/150(=3.0mm)로 될 때까지의 하중-처짐 곡선 아래 면적(T_b)을 구해 동가휨강도를 구하였다.

5. 모형시험 결과 및 분석

터널표준시방서⁽⁴⁾에서는 슛크리트의 압축강도 및 휨강도는 1회 시험 당 3개의 시료를 채취하여 2개 이상은 설계강도 이상이어야 하며, 1개 이상이 설계강도의 85%보다 작아서는 안되며, 3개의 평균강도는 설계강도 이상이 되어야 한다고 규정하고 있다. 고강도 슛크리트와 관련하여 별도의 목표강도를 설정하지 않은 관계로 본 논문에서는 국내 터널시방서에 규정된 일반스�크리트 강도규정(재령1일 강도 100kgf/cm²이상, 재령 28일 강도 180kgf/cm²이상)과 한국도로공사에서 규정한 강섬유보강 슛크리트의 28일 휨강도 45kgf/cm², 등가휨강도30.6kgf/cm²(휨인성계수 68%)를 근거로 결과치에 대한 비교 분석을 실시하였다. 본 모형 시험간 실시한 압축강도, 휨강도 및 등가휨강도 측정 결과를 표3에 나타내었다.

표 3 강도시험결과

재령	Alkali-free (kgf/cm ²)			Waterglass (kgf/cm ²)		
	압축강도	휨강도	등가휨강도	압축강도	휨강도	등가휨강도
1일	149	37	-	125	30	-
3일	256	52	-	156	43	-
7일	306	-	-	212	-	-
28일	418	73	43	257	67	33

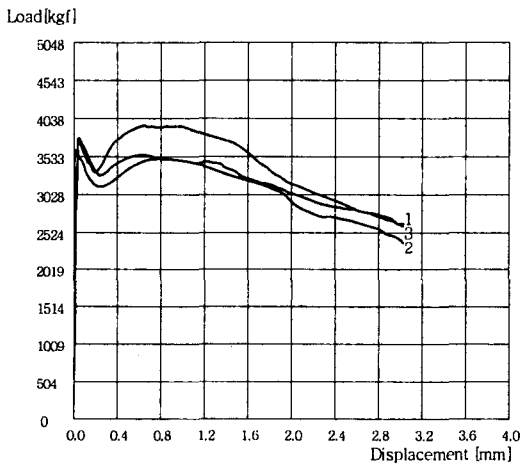
위의 결과를 통해 알 수 있듯이 Alkali-free 액상급결제를 사용한 시편은 현재 국내 터널공사에 가장 많이 사용되고 있는 Waterglass 액상급결제를 사용한 시편보다 압축강도(28일 기준: 63%향상), 휨강도(9% 향상), 등가휨강도(30% 향상)등 전 시험에 걸쳐 우수한 강도를 발현하였다. 특히, 초기재령에서의 압축강도 변화를 살펴볼 때 급결제 종류에 관계없이 모든 시편에서 1일 압축강도100kgf/cm²을 확보하였으나, Alkali-free 급결제 슛크리트의 경우에는 재령1일과 3일 사이에 Waterglass 슛크리트의 2배가 넘는 42%의 강도 증진을 보여 초기강도 및 조기강성 확보로 지반의 이완을 예방하고, 연약 지대나 용수부분의 지보에 유리하게 작용할 것으로 판단된다. 또한, 재령28일 압축강도가 시방 규정의 2.3배인 418kgf/cm²을 보여 실 터널 시공시 시공환경이나 암반으로부터의 용수, 지반과의 부착 등의 원인에 의해 발생될 것으로 예상되는 강도 loss를 고려하더라도 외국에서 규정^(1,5)하는 고강도 슛크리트의 품질기준(예: 일본 360kgf/cm²)에 만족할 수 있을 것으로 사료된다.

휨인성 시험에서는 급결제 종류와 관계없이 도로공사 기준인 30.6kgf/cm²(등가휨강도) 및 인성계수 68%를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 아래 표3의 결과에서 보는 바와 같이 Waterglass 급결제를 사용한 시편의 경우 1개의 시편이 휨인성계수 85%를 확보한 것에 비해 Alkali-free급결제를 사용한 시편은 평균 85%에 가까워 인성확보에 있어서도 우수한 것으로 나타났다. 특히, 초기균열발생 이후의 강도회복 능력이 뛰어나 그림1 Alkali-free 급결제의 하중-처짐 곡선을 살펴볼 때 시편3번의 경우는 초기균열발생 하중보다 더 큰 하중에서 최대하중이 얻음으로써 점진적인 연성파괴와 에너지 흡수능력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 등가휨강도는 식(1)을 통해 산정 하였으며, 여기서 T_b 는 처짐(δ)이 전체 스펠(l)의 1/150(=3.0mm)로 될 때까지의 하중-처짐 곡선 아래 면적을 나타낸다.

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

표 4 휨인성 시험 결과(최대변위 3mm)

종류	시편	최대하중 (kgf)	Peak 변위 (mm)	휨강도 (kgf/cm ²)	T _b 면적 (kgf-cm)	등가휨강도 (kgf/cm ²)	휨인성계수 (%)
Water glass	1	3310	0.052	44.1	862	38.3	86.8
	2	2840	0.073	37.8	617	27.4	72.5
	3	3740	0.054	49.8	789	35.1	70.5
	평균	3290	0.060	43.9	756	33.6	76.6
Alkali-free	1	3790	0.066	50.5	954	42.4	84.0
	2	3630	0.030	48.4	927	41.2	85.1
	3	3940	0.638	52.5	1017	45.2	86.1
	평균	3790	0.245	50.4	966	42.9	85.1



(a) Alkali-free 급결제



(b) Waterglass 급결제

그림 1 휨인성 시험 결과(하중-처짐 곡선)

6. 결론

작업 여건상 충분한 시험체를 제작하지 못하였으며, 리바운드량과 분진측정, 암반과의 부착성능 및 터널 전체 시스템에 미치는 영향 등 고려되지 못한 부분이 많지만, 본 모형시험을 통해 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

Alkali-free급결제를 사용한 습식 강섬유보강 슛크리트는 물유리계 액상급결제를 사용한 슛크리트보다 압축강도는 63% (재령28일 압축강도 418kgf/cm²), 휨강도는 9%, 등가휨강도는 30%의 향상을 보였다. 아울러, Alkali-free급결제의 사용으로 작업자 보호는 물론 실리카 흙 등 고강도 발현을 위한 고가의 혼화재를 사용하지 않고서도 고강도 슛크리트 개발 가능성을 확인할 수 있었으며, 현재 국내 터널시공에 사용중인 슛크리트 장비의 대부분이 습식장비인 점을 고려했을 때 액상급결제는 장비 운용 및 시

공성 면에서도 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 모형시험을 실시하는데 많은 협조를 주신 코리아마스터빌더스(주) 기술연구소 최명식 선임연구원
께 감사를 표하는 바이다.

향후 계획

고성능 슛크리트는 Single-Shell Lining 터널 등 Permanent Shotcrete Lining 구축을 위해 선행되어
야 할 필수 요소기술중의 하나로 최근 그 관심이 증대되고 있다. 이러한 시점에서 당사에서는 고품질
의 고성능 슛크리트의 개발을 위한 기술개발과제[제목: 신개념 한국형 터널라이닝 공법 개발]를 현재
진행 중이며, 연구성과에 대해서는 본 학회의 건설업체 기술발표회를 통해 지속적으로 소개할 예정이
다.

참고문헌

1. EFNARC, European Specification for Sprayed Concrete, 1996.
2. ITA(국제터널협회) Working group 12. Shotcrete Use "Lists of Permanent shotcrete lining."
3. 건설교통부, 콘크리트표준시방서, 1999.
4. 건설교통부, 터널표준시방서, 1999.
5. (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.
6. ACI, Specification for Shotcrete Reported by ACI Committee 506, 1995.
7. Private Communication with Professor Koichi ONO (Univ. of Kyoto, 국제터널협회[ITA] Working
Group 12. Shotcrete Use, Vice animateur).