

Permanent Shotcrete Tunnel Linings 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발 II (II: 용수(湧水)부에서의 조강시멘트 적용)

Development of High Performance Shotcrete for Permanent Shotcrete Tunnel Linings II(II: Application of high-early strength cement in sump water condition)

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

ABSTRACT

Shotcrete (or Sprayed concrete) has been used as an important support material in New Austrian Tunnelling Method (NATM). Since the mid of 1990, permanent shotcrete tunnel linings such as Single-shell, NMT (Norwegian Method of Tunnelling) has been constructed in many countries for reducing the construction time and lowering construction costs instead of conventional in-situ concrete linings. Among essential technologies for successful application of permanent shotcrete linings, high performance shotcrete providing high strength, high durability, better pumpability has to be developed in advance as an integral component. This paper presents the ideas and first experimental attempts to increase early strength and bond strength of wet-mixed Steel Fiber Reinforced Shotcrete(SFRS) in sump water condition. In order to increase early strength, a new approach using high-early strength cement with liquid alkali-free accelerator has been investigated. From the results, wet-mix SFRS with high-early strength cement and alkali-free accelerator exhibited excellent early strength improvement compared to the ordinary portland cement and good bond strength even under sump water condition.

1. 서론

1907년 미국의 Carl E. Akeley가 모르타르 뿜기 기술을 처음 고안한 이래 슛크리트(Shotcrete)는 세계 각국에서 주로 터널이나 지하구조물의 지보부재, 라이닝 부재로 이용되고 있으며, 그 밖에 비탈면의 보호재, 건축 구조물에 대한 강재의 내화 피복재 및 구조물의 보수·보강재 등으로 널리 이용되고 있다. 국내에서는 1980년대 초 처음으로 적용된 New Austrian Tunnelling Method (NATM)공법의 지보재로 건설분야에서 본격적으로 사용되기 시작하였다.

* 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 과장, 공학박사

** 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 부장, 기술사

*** 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 상무, 기술사

**** 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 본부장 전무, 기술사

최근에는 NATM터널의 2차 현장타설 콘크리트 라이닝의 시공성 향상과 균열발생에 따른 유지관리비 절감을 위해 양질 암반의 배수형 터널 시공에 있어서는 현장타설 콘크리트 라이닝을 설치하지 않고 각층의 슛크리트 특성이 다른 다층의 슛크리트만으로 라이닝을 대체하려는 영구지보 개념의 터널 시공(Single-Shell Tunnel, NMT 등)이 세계적으로 증가하고 있는 추세이다. 또한, 굴착 단면적이 200m²를 넘는 대단면의 도로터널에 고강도 슛크리트를 적용하여 강도증가에 따른 타설 두께 감소로 공기 단축과 함께 건설비용을 절감하려는 움직임이 활발히 진행되고 있다. 이러한 시점에서 고강도(high strength), 고내구성(high durability), 고시공성(high pumpability)을 겸비한 고성능 슛크리트(High Performance Shotcrete)에 대한 연구는 터널 굴착 암반의 등급 분류 방법인 Q-System등과 함께 경제적이고 합리적인 신개념 터널공법 확립에 선결되어야 할 필수적인 요소기술로 그 중요성이 강조되고 있다.

2. 슛크리트용 시멘트 관련 국내의 규정 및 문헌 연구

스�크리트의 품질은 콘크리트를 구성하는 시멘트, 골재, 급결제(accelerator)등 재료의 품질과 배합설계, 시공장비, 양생, 암반특성 등 여러 가지 요인에 의해 달라진다. 현재 국내외에 사용되고 있는 슛크리트용 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트가 대부분이지만 최근에는 리마운드 감소나 강도 확보를 목적으로 슛크리트 전용 시멘트를 개발하여 사용하거나, 시공 환경과 암반 특성에 적합한 특수시멘트의 사용이 증가하고 있는 실정이다. 또한, 급결제를 사용하지 않을 경우에는 알루미나 시멘트나 초조강시멘트(1일에 1종 시멘트 7일 강도 발현) 등을 사용하는 경우도 있으나, 초기 응결경화 속도가 빠르고 수화열도 커서 사용 전 세심한 관심이 요구되고 있다.

스�크리트용 시멘트와 관련된 국내의 규정을 살펴보면, 먼저 국내 터널시방서⁽¹⁾ 및 터널설계기준⁽²⁾에서는 슛크리트용 시멘트는 KS L 5201(시멘트) 기준에 적합한 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 사용을 원칙으로 하고 있다. 콘크리트 표준시방서⁽³⁾에서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하는 것을 원칙으로 하지만 조기에 강도를 발현시킬 필요가 있는 경우, 또는 시공후의 양생기간을 충분히 취할 수 없는 경우에는 조강 포틀랜드 시멘트(3일에 1종 시멘트 7일 강도 발현)나 초속경 포틀랜드 시멘트(3시간에 1종 시멘트 7일 강도 발현)등을 사용하는 경우가 있으며, 슛크리트가 염분의 영향 등을 받는 특수조건에 노출되는 경우에는 내구성이 높은 고로시멘트B 등을 사용할 수 있다고 규정하고 있다. ACI⁽⁴⁾에서는 ASTM C 150에 근거한 Type 1 포틀랜드 시멘트의 사용을 원칙으로 하고 있으며 다른 종류의 시멘트 사용도 허용하고 있다. EFNARC⁽⁵⁾에서도 대부분 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하지만, 관련 기준을 만족할 경우에는 성분이 조정된 시멘트(modified cement)나 다른 종류의 결합재를 사용할 수 있다고 규정하고 있다.

한편, 시멘트를 주변수로 실시한 슛크리트 연구결과를 살펴보면, Lochnig⁽⁶⁾는 터널의 건식 슛크리트를 대상으로 특수시멘트(Chronolith S) 사용에 따른 강도 특성에 대해서 보고하였다. 시멘트 성분대해서는 명확하게 소개되지 않았지만, 이 시멘트를 사용한 슛크리트의 초기강도는 오스트리아(Austria)지침의 초기강도 기준인 J2 (두꺼운 두께로 타설되고 하중을 지지하여야 하는 경우)를 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 하지만, 사용 시에는 건조 처리된 골재를 사용하는 것이 원칙이며, 습윤상태의 잔골재를 사용할 경우 표면수(表面水)가 많을수록, 그리고 잔골재와 시멘트의 혼합에서 물이 첨가되기까지의 시간이 길수록 강도 저하가 크게 된다고 보고하고 있다. Lukas⁽⁷⁾등은 시멘트의 석고

함유량을 조정한 몇 가지 종류의 특수시멘트를 사용한 실험을 실시하였다. 결과에 의하면, 골재가 건조 상태이면 숏크리트의 초기경화가 빨라지지만, 습윤 상태에 있는 골재와 시멘트를 혼합하고 난 다음 물이 첨가되기까지의 시간이 길수록 급결성은 떨어진다고 보고하고 있어 골재의 건조상태와 시멘트의 경화특성과 상관 관계가 있음을 언급하였다.

또한, 지반조건이 화학적 침식성을 가지는 경우나 염해의 위험이 있는 지역에서는 내화확성에 우수한 고로시멘트를 사용한 경우도 있다. 松下⁽⁸⁾는 安房터널 숏크리트 시공에 고로시멘트 B종을 사용한 결과, 온천수에 대한 내구성이 뛰어나고 고온 양생에 대한 악영향도 없는 것으로 보고하였다. 森下⁽⁹⁾ 등은 일본도로공단에서 건설중인 鳥田터널에 조강시멘트와 alkali-free급결제를 사용한 숏크리트에 대한 적용성과 시공성을 확인한 결과, 통상 배합을 사용한 숏크리트에 비해 각 재령별 강도증진과 뛰어난 시공성을 확인했다고 보고하였다. 山鳥⁽¹⁰⁾ 등은 시멘트 종류가 숏크리트의 급결성 및 펌프 압송성에 미치는 영향에 대해 보통 포틀랜드 시멘트, 조강 포틀랜드 시멘트, 고로시멘트 B종을 사용하여 동일한 급결제 조건에서 실험을 실시하였다. 그 결과, 조강 포틀랜드 시멘트를 사용한 숏크리트가 가장 급결성이 우수하였으며, 고로시멘트 B를 사용한 경우에는 낮은 점도로 펌프압송에 유리한 것으로 나타났다.

3. 용수부에서의 숏크리트 부착 성능 평가

실제 터널 굴착 시에는 지하수의 유출로 많은 용수(湧水)가 굴착면을 통해 배출되는데 유도배수 등 이에 대한 적절한 조치를 취하지 못할 경우에는 지보재로 타설되는 숏크리트 품질확보에 상당한 어려움이 발생하게 된다. 다시 말해, 암반 굴착 시 발생하는 용수부분에 타설할 경우 콘크리트의 물-시멘트비를 증가 시켜 강도저하와 함께 굴착면과의 부착성능이 저하되어 굴착된 지반변형의 수렴을 지연시키는 원인이 되고, 아울러 다량의 리바운드로 터널 전체 시공 공정에까지 영향을 미치게 된다. 또한, 수화작용이 완료된 숏크리트가 용출수에 의해 침식(leaching)될 경우에는 숏크리트의 품질 저하와 함께 터널 배수관을 막아 터널 방수 및 배수 시스템에까지 영향을 미치기도 한다. 공사비 절감을 위해 대부분 1차 숏크리트만 시공하는 노르웨이의 경우도 용수(누수)로 인한 숏크리트 하자가 자주 발견되는 것으로 보고되어, 고내구성의 고성능 숏크리트의 적용이 세계적으로 요구되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 아직까지 국내의 연구나 시공실적이 거의 없는 조강시멘트(high-early strength cement)와 환경 친화적인 alkali-free급결제와의 조합을 통해 숏크리트의 초기강도 발현 특성과 용수부에서의 부착성능에 대해 고찰하고 나아가 Single-shell tunnel linings 등 영구 터널 지보 시스템 구축을 위한 필수 요소 기술인 고성능 숏크리트 개발을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

4. 모형시험

4.1 개요

1종 보통 포틀랜드 시멘트(이하, OPC)와 3종 조강 포틀랜드 시멘트(이하, HPC)를 주요 변수로 습식 강섬유보강 숏크리트(Steel Fiber Reinforced Shotcrete, SFRS)에 대한 모형시험을 실시하였다. 제작된 공시체를 통한 압축강도 시험과 암반에 지하수가 유출되는 것을 가정한 용수부 부착성능 시험을 실시하여 그 성능을 고찰하였다.

4.2 사용재료

OPC 및 HPC는 모두 국내산을 사용하였으며, KS L 5201의 1종과 3종 포틀랜드 시멘트 규격을 만족하는 제품을 사용하였다. 골재는 온양(인성골재)의 13mm 조골재(비중2.65)와 아산만의 세골재(비중 2.55)를 사용하였다. 강섬유는 섬유 길이에 대한 직경의 비인 형상계수 60($\phi 0.5 \times 30\text{mm}$)의 Hook & bundle type(비중7.85)의 제품을 사용하였다. 급결제(accelerator)는 국내 M사의 alkali-free 액상형 급결제(비중1.40)를 사용하였으며, 타설시 작업성 확보와 슬럼프 조절을 목적으로 폴리카르복실계 고성능 감수제를 사용하였다. HPC의 일반적인 화학성분 및 물리특성을 표1과 표2에 나타내었다.

표 1. 사용 시멘트의 화학성분

구분	화학성분								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig-loss
HPC	19.7	5.9	3.0	63.1	3.0	0.1	0.75	4.2	1.1
OPC	20.7	5.9	3.2	62.1	3.2	0.09	0.84	1.6	1.2

표 2. 사용 시멘트의 물리적 특성

구분	Blain (cm ² /g)	응 결		압축강도(kgf/cm ²)		
		초결(m)	종결(h:m)	3일	7일	28일
HPC	4520	190	4 : 55	240	350	450
OPC	3430	300	7 : 20	200	280	360

4.3 배합설계

현장의 배치 플랜트를 이용하여 물, 골재, 시멘트, 강섬유를 자동 계량하여 혼합하였으며, 현장 배합을 위해 사용 골재에 대해서는 표면수 보정을 실시하였다. 배합이 완료된 콘크리트는 레미콘 트럭을 이용하여 슷크리트 타설 장소까지 운반하였다. 본 시험에 사용된 재료의 배합을 표3에 나타내었다.

표3. 슷크리트 배합설계

Cement	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kgf/m ³)					acceler ator (%)	superpla -sticizer (%)
						W	C	S	G	Steel Fiber		
HPC	13	12	43	64	2.5	181	420	1102	618	40	7.0	1.0
OPC		13		65		207	480	1026	579			

4.4 슷크리트 타설 및 양생

스킷리트 타설을 위해 더블 피스톤 펌프 압송방식(Meyco Suprema)의 슷크리트 장비와 23.3m³/min 용량의

에어 컴프레서를 사용하였다. 배치플랜트에서 제조된 콘크리트는 쏘크리트 장비의 호퍼(hopper)에 부어져 콘크리트 반송관을 통해 시간당 5~6m³로 압송되었다. Alkali-free액상급결제는 급결제 운송관 (φ25mm)을 통해 노즐(φ40mm)로부터 약 1.5m 후방에서 첨가되었으며, 첨가량은 Meyco 장비의 디지털 계기판을 통해 자동으로 조절하였다. 토출되는 쏘크리트의 배합이 안정된 상태가 된 후 노즐 선단과 패널과의 거리를 약 1.5m 정도 이격하여 노즐맨에 의한 핸드스프레이를 실시하였다. 압축강도 시험시편 채취를 위해 강제 패널(100x100cm)을 사용하였으며, 타설 완료 후, 먼 정리와 함께 양생포를 덮어 습윤양생을 실시하였다. 타설 다음 날, 압축강도 시험을 위한 코어 시편을 채취하였으며, 채취된 코아에 대해서는 수중양생을 실시하였다.

4.5 시험항목 및 방법

4.5.1 굳지 않은 콘크리트 시험

강도 시험용 패널에 타설 하기 전 배치플랜트에서 생산된 base concrete에 대한 슬럼프 경시 변화를 알아보기 위해 KS F 2402규정에 의한 콘크리트 슬럼프 실험(12~13cm)과 KS F 2421의 공기실 압력방법에 의한 공기량 측정시험(2.5%)을 실시하였으며, 타설 전 콘크리트의 온도측정(17~19℃)을 실시하였다.

4.5.2 압축강도(Compressive strength)시험

압축강도 시험용 공시체는 타설 1일 후 코어보링머신(core boring machine)을 이용하여 φ100mm의 코아 공시체를 채취하였으며, 1일, 3일, 7일, 14일, 28일 각 3개의 공시체를 제작하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 의거 강도시험을 수행하였다. 시험 전 채취된 공시체 높이를 측정하여 KS F 2422(콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도시험 방법)에 의거 강도 보정을 실시하였다.

4.5.3 용수부에서의 부착성능시험

용수부 부착성능 평가를 위해 아래 사진에서 보는 바와 같이 강제 판넬(100x100cm)을 제작하였다. 판넬 전면 상단부에 φ20mm정도의 유공 송수호스를 설치하여 분당 약 20ℓ 속도로 분사하였으며, 쏘크리트 타설부에 직접 배출되는 용출수를 묘사하기 위해 판넬 중심부에 φ10mm의 구멍을 만들어 같은 속도로 물을 배출시켰다. 쏘크리트 타설은 판넬 전면에서 약 1m정도 떨어진 곳에서 실시했으며, 쏘크리트 타설시간을 2~3분으로 고정하여 일정 속도로 OPC와 HPC를 사용한 쏘크리트의 부착성능을 평가하였다.

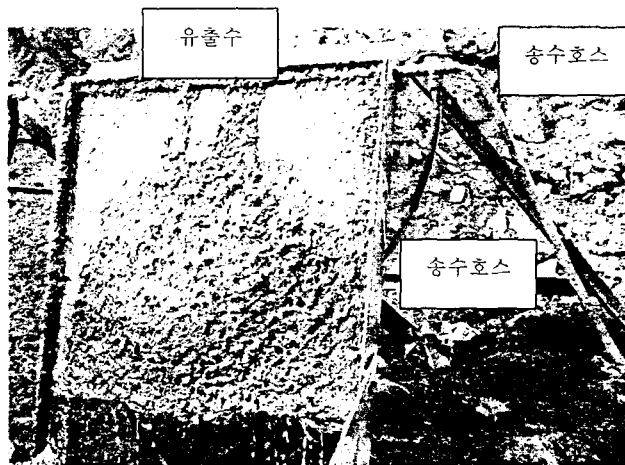


사진 1. 용수부 부착성능시험

5. 모형시험 결과 및 분석

5.1 압축강도 시험결과

본 모형시험을 통해 얻은 압축강도 결과를 그림 1에 나타내었다. 여기서, OPC P(Plain)는 급결제를 사용하지 않은 OPC 쏫크리트를, HPC 7%는 급결제 7%를 사용한 HPC 쏫크리트를 의미한다. 재령1일에 OPC 및 HPC 쏫크리트 모두 100kgf/cm^2 이상의 강도를 확보하였으며, HPC 쏫크리트의 경우에는 150kgf/cm^2 의 강도를 발현하였다. HPC 쏫크리트는 재령7일까지 OPC 쏫크리트보다 평균 25%의 높은 초기강도를 확보하였는데, 이는 HPC의 높은 분말도와 조강성을 나타내는 C_3S 광물 함유량 차이, 그리고 기존 급결제와 달리 alkali-free 급결제는 수화반응을 통해 급결성을 발현하기 때문인 것으로 사료된다.

강도발현은 급결제 사용의 유무와 시멘트 종류에 따라 예상한 대로 OPC Plain \rightarrow OPC 7% \rightarrow HPC Plain \rightarrow HPC 7% 순으로 나타났으며, 재령 7일 이후부터는 HPC 쏫크리트의 강도증가 비율이 점차 떨어져 28일에는 OPC 쏫크리트의 85%정도의 강도를 보였다. 하지만, 재령28일에 317kgf/cm^2 의 고강도를 확보하였는데, 이는 높은 초기강도 발현과 함께 alkali-free 급결제의 사용으로 급격한 장기강도의 저감이라는 범용 급결제의 약점을 보완할 수 있었던 것으로 사료된다. 한편, ACI Specification for Shotcrete (Quality assurance)⁽⁴⁾에서 언급한 코어링 작업이나 커팅 과정에서의 강도손실 15%(실린더 강도 대비)를 고려할 경우, 실제 쏫크리트 강도는 일본 도로공단에서 규정하는 고강도 쏫크리트 기준⁽¹¹⁾인 360kgf/cm^2 을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 참고로, 국내 터널시방서/설계기준(1999)에서는 쏫크리트 재령1일 압축강도를 100kgf/cm^2 이상, 재령28일 강도는 180kgf/cm^2 이상으로 규정하고 있으나, 아직 고강도 쏫크리트에 대한 관련 규정은 전혀 포함되어 있지 않은 상태이다.

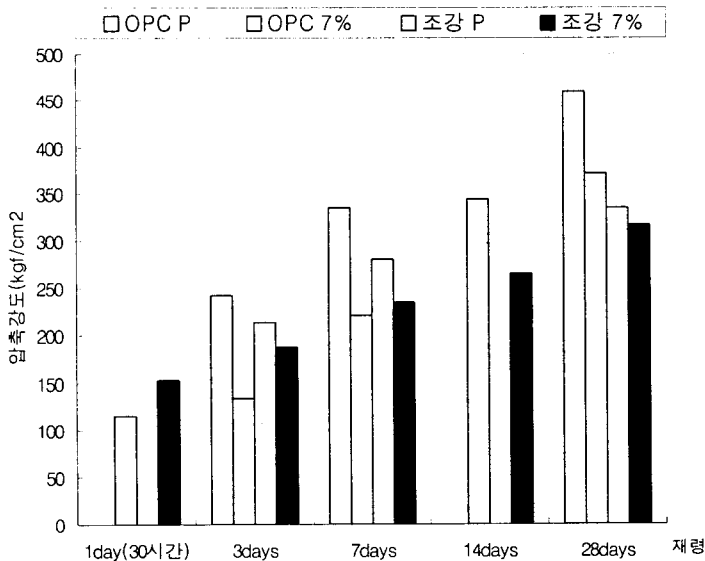


그림 1. 압축강도시험 결과

5.2 용수부에서의 부착성능 평가

용수가 쏫크리트 부착성상에 미치는 영향을 파악하기 위해 부착성능시험을 통해 분석하였다. 사진 2는 OPC 쏫

크리트를 사용한 부착시험 결과로 왼쪽 사진은 비용수부, 오른쪽 사진은 용수부에서 실시한 결과를 나타낸다. 사진에서 보는 바와 같이, 비용수부의 경우에는 타설된 면을 중심으로 $23\pm 1\text{cm}$ 의 두께(본 실험에서 얻은 부착두께 수치는 비교 분석을 위한 상대치이기 때문에 1회 타설시 얻을 수 있는 부착두께로 보기는 힘들 것으로 판단됨)를 얻을 수 있었으며, 중앙부분에 볼록한 형태의 부착면을 얻을 수 있었다. 한편, 용수부에서는 유수에 따른 부착성능 저하로 비용수부에 비해 약 15%정도 손실된 $19\pm 1\text{cm}$ 의 부착두께를 얻었으며, 타설면도 전체적으로 편평한 부착면을 보였다. 하지만, HPC숏크리트의 경우에는 비록 용수부에서도 OPC를 사용한 경우보다 15~20%정도 높은 부착두께를 확보함으로써, 향후 단층 파쇄대나 심한 누수부분 등 연약한 암반상태에서 조기강도 및 부착강도 확보에 유리할 것으로 판단된다.



(a) 비용수부

(b) 용수부

사진 2. 부착성능시험 결과

6. 결론

본 논문에서는 조강시멘트(HPC)와 최근 주목을 받고 있는 환경 친화적인 alkali-free 액상급결제를 사용하여 고성능 숏크리트의 개발 가능성을 확인하였다.

시험결과, HPC 숏크리트는 재령1일에 150kgf/cm^2 의 높은 초기강도를 발현하였으며, 재령7일까지 보통시멘트(OPC)를 사용한 숏크리트보다 평균 25%의 높은 초기강도를 확보하였다. 28일 강도에 있어서도 급격한 장기강도의 저감이라는 범용 급결제의 약점을 alkali-free 급결제 사용으로 보완함으로써 317kgf/cm^2 의 고강도를 확보하였다. 또한, 용수(湧水)부 부착성능시험에서도 OPC를 사용한 경우보다 15~20%의 높은 부착두께를 얻어, 향후 용수부분, 단층 파쇄대, 연약지반 및 편평대단면 터널에서 향상된 초기강도로 지반이완을 조기에 억제하고, 1회 타설시 높은 타설두께를 확보함으로써 시공성 및 안정성 확보에 효과적인 것으로 판단된다.

한편, 재료비에 있어 HPC의 단가가 OPC보다 약간 비싸지만(Bulk 단위: OPC 66,165원, HPC 75,120원), 사용되는 단위 시멘트량을 줄일 수 있고, 동시에 향상된 부착력을 통한 리바운드 저감과 이에 따른 버력처리 비용 등의 절감이 가능하기 때문에 OPC를 사용하는 기존의 숏크리트 공사비와 비교했을 때 충분한 경쟁력을 확보할

수 있을 것으로 판단된다.

향후, 시멘트와 급결제 조합에 따른 초기강도 발현특성(급결제 첨가 후 수화물 생성속도에 영향을 미치는 시멘트 광물조직의 영향)과 초기 수화반응에 따른 건조수축, 온도영향, 내구성 및 Pumpability등에 대한 추가 검토가 필요할 것으로 판단된다

감사의 글

본 연구는 현재 당사에서 추진중인 기술개발과제(“신개념 터널 라이닝 공법 개발”)의 기초연구결과와 일부로서 본 모형시험을 수행하는데 많은 협조를 주신 최명식님께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(1999), 터널표준시방서, (사)대한터널협회.
2. 건설교통부(1999), 터널설계기준, (사)대한터널협회.
3. 건설교통부(1996), 콘크리트표준시방서.
4. ACI (1995), Reported by ACI Committee 506 Specification for Shotcrete.
5. EFNARC(1996), European Specification for Sprayed Concrete Guidelines for Specifiers and Contractors.
6. Loschnig, P. (1995), Environmentally Compatible Spray Cement, Shotcrete for Underground Support pp.276~280.
7. Lukas, W., Kusterle, W., and Pichler, W. (1995), Innovations in Shotcrete Technology, Shotcrete for Underground Support 7, pp.155~164.
8. 松下敏郎 (1992), “高熱帶と高水壓低速度帶を克服した安房トンネル”, トンネルと地下, Vol. 23, No.3.
9. 森下 (2001), “新しい吹付けコンクリート急結劑の適用と評價”, トンネルと地下, Vol. 32, No.4.
10. 中島ほか(2000), “セメントの種類が吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響”, 콘크리트工學年次論文報告書, Vol. 22, No. 2, pp.1~6.
11. (社)日本トンネル技術協會(1996), トンネルの吹付けコンクリート.