

## 대형 지하공간의 영구지보재로서 고성능 슛크리트의 내구 특성

원종필<sup>1)\*</sup> · 김황희<sup>1)</sup> · 장창일<sup>1)</sup> · 이상우<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>건국대학교 사회환경시스템공학과

### Durability Characteristics of High Performance Shotcrete for Permanent Support of Large Size Underground Space

Jong-Pil Won<sup>1)\*</sup>, Hwang-Hee Kim<sup>1)</sup>, Chang-Il Jang<sup>1)</sup>, and Sang-Woo Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

**ABSTRACT** This study evaluated the durability of high-performance shotcrete mixed in the proper proportions using alkali-free and cement mineral accelerators as a permanent support that maintains its strength for the long term. Durability tests were performed the chloride permeability, repeated freezing and thawing, accelerated carbonation, and the effects of salt environments. Test results showed that all the shotcrete mixes included silica fume had low permeability. In addition, after 300 freeze/thaw cycles, the shotcrete mix had excellent freeze/thaw resistance more than the 85% relative dynamic modulus of elasticity. The accelerated carbonation test results were no effect of accelerator type but, the depth of carbonation was greater in the shotcrete mix containing silica fume. No damage was seen in a salt environments. Therefore, the high performance shotcrete mix proportions used in this study showed excellent durability.

**Keywords** : alkali-free accelerator, cement mineral accelerator, durability, permanent support, shotcrete

#### 1. 서 론

최근 국토의 효율적인 활용을 위해 터널 및 지하공간의 건설 공사가 증가하고 있고 그 규모가 점점 장대화 및 대형화 되는 추세이다. 터널 및 지하공간이 장대화 및 대형화 되면서 콘크리트 라이닝의 설치가 어렵고 또한 콘크리트 라이닝의 역할에 대한 구체적 설계 개념이 확립되지 않아 그로 인하여 그 필요성에 대한 논란이 여전히 계속 되고 있다<sup>2)</sup>. 최근 유럽 및 일본 등에서는 콘크리트 라이닝을 생략한 무라이닝 터널에 대한 연구가 급격히 증가하고 있으며 유럽 터널의 경우 그 시공 사례가 증가하고 있다<sup>10)</sup>. 즉 유럽, 일본 등에서 유지관리 비용저감과 시공성 향상을 위하여 영구지보재 개념의 슛크리트가 고품질, 고내구성의 고성능 특성을 갖도록 설계되고 있다<sup>1,6,8)</sup>. 슛크리트가 2차 콘크리트 라이닝을 대체 및 생략하기 위해서는 슛크리트의 장기적인 거동 및 내구성의 관점에서 최대 압축강도가 50 MPa 정도에 이르는 고강도 슛크리트가 일반적으로 요구된다<sup>4,9,10)</sup>.

종래의 터널 구조는 슛크리트와 2차 콘크리트 라이닝 사이에 방수 시트 (2차 콘크리트 라이닝의 구속, 균열 방지를 목적으로 한 완충재)가 시공되어 양자 간에 전단력

이 전달되지 않는 이중 구조가 일반적이다. 그러나 영구지보재 개념의 터널 공법은 단층 또는 다층의 고성능 슛크리트와 2차 콘크리트 라이닝 사이의 방수 시트의 설치 및 2차 콘크리트 라이닝을 생략하여 단층 또는 다층의 고성능 슛크리트로 대체하는 공법이다. 영구지보재 개념의 다층 슛크리트는 슛크리트 층과 일체 거동을 함으로써 양자 간에 전단력의 전달이 가능하고 그 경우에는 지반과 슛크리트 층이 일체가 된 합성구조로 거동한다<sup>6)</sup>. 전단력이 전달되는 단일 구조는 역학적으로 합리적이고 유리하며 거푸집을 사용하여 시공되는 2차 콘크리트 라이닝을 최소화 또는 생략할 수 있으므로 시공비를 절감할 수 있다<sup>2)</sup>. 상기에서 언급한 내용을 전체로 영구지보재로서 슛크리트는 지보재와 콘크리트 라이닝의 역할을 동시에 하게 됨으로써 종래의 슛크리트에 비하여 고강도, 고내구성 등의 기능을 갖는 고품질화가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 영구지보재로서 사용될 수 있는 슛크리트의 내구성능을 평가하였다.

#### 2. 사용 재료

##### 2.1 시멘트 및 골재

본 연구에서 사용된 시멘트는 KS L 5201에 적합한 H사의 1종 시멘트를 사용하였으며 물리적 특성은 Table 1과 같다.

\*Corresponding author E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr  
Received January 30, 2007, Accepted July 20, 2007  
©2007 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Physical and chemical properties of cement

Physical properties	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Specific gravity	Stability (%)	Setting time		Compressive strength (MPa)		
				Initial (min)	Final (min)	3 days	7 days	28 days
	3,449	3.15	0.07	245	5:40	23.0	30.5	39.4
Chemical properties	Loss on ignition(%)			MgO(%)		SO <sub>3</sub> (%)		
	1.3			2.8		2.1		

굵은골재는 최대 치수를 13 mm, 비중이 2.68인 쇠석을 사용하였고 잔골재는 비중이 2.61이고 조립률이 2.65인 강사를 사용하였다. 잔골재 입도 곡선은 Fig. 1과 같다.

**2.2 혼화제**

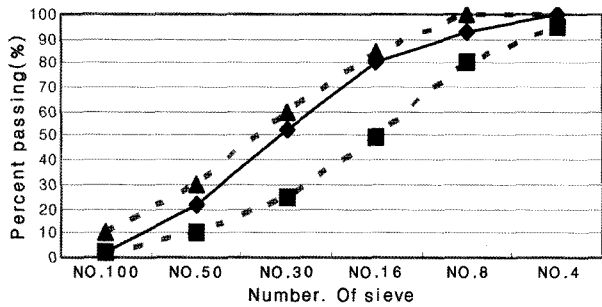
본 연구에서는 광물질 혼화제인 실리카퓌미가 사용되었다. 물리·화학적 특성은 Table 2와 같다.

**2.3 급결제**

본 연구에 사용된 급결제는 현재 국내에서 시판되고 있는 알칼리 프리계 급결제와 C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> 광물계 급결제를 사용하였다. 급결제별 기본 물성은 Table 3과 같다.

**3. 목표 성능 및 배합설계**

본 연구에서는 영구지보재로서 고성능 슛크리트의 내구성능을 평가하기 위하여 알칼리 프리계 및 시멘트 광물계 급결제로 각각 10%와 4%을 사용하고 실리카퓌미 7%



**Fig. 1** Grading curve of fine aggregate

**Table 2** Physical and chemical properties of silica fume

Items	Specific gravity	Ig. loss (%)	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)
Type										
Silica fume	2.2	2.8	180,000~200,000	94.0	0.3	0.8	0.3	0.4	0.8	0.2

**Table 4** Mix proportions of high performance shotcrete as permanent support

Mix	Accelerator (kg/m <sup>3</sup> )	G <sub>max</sub> (mm)	Slump (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					
							W	C	SF	S	G	SP (g/m <sup>3</sup> )
CP	Cement	13	100±20	40	65	4±1	190	475	-	1,046	574	2,375
CSF	mineral 19							441.75	33.25			3,325
AP	Alkali							475	-			2,375
ASF	free 47.5							441.75	33.25			3,325

를 사용한 Table 4와 같은 배합을 사용하였다. 잔골재율은 65%, 물/시멘트비는 0.4, 슬럼프는 100±20 mm, 공기량은 4±1%로 고정하였다. 목표 슬럼프를 맞추기 위해서 폴리카본산계 고유동화제를 첨가하였다. 또한 영구지보재로 사용하기 위한 슛크리트의 강도는 재령 28일 기준으로 압축강도 35 MPa 이상, 휨강도 4.5 MPa 이상을 목표로 하고 있으며 본 연구에서의 압축강도 및 휨강도 시험 결과 이를 모두 만족하였다.

Table 4는 모든 목표 성능을 만족하는 영구지보재로서 고성능 슛크리트의 배합비를 나타낸 것이다.

**4. 실험 방법**

**4.1 염소이온 투과 시험**

영구지보재로서 사용될 슛크리트는 방수 시트를 설치하지 않기 때문에 투수저항성이 우수한 슛크리트를 사용해야 한다. 투수성의 증가는 슛크리트 내부에 공극과 미세균열이 많이 발생하였다는 것을 의미한다. 따라서 투수성이 큰 콘크리트는 다량의 공극과 미세균열의 존재로 인하여 강도가 감소하고, 장기적으로 보면 슛크리트 내

**Table 3** Accelerator properties of material

Accelerator	Alkali-free based	C <sub>12</sub> A <sub>7</sub> mineral based
Color	Beige liquid	gray powder
Specific gravity	1.40 ± 0.05 (20°C)	2.76
pH	2.6 ± 0.5	11.7
Viscosity	> 400 mPa.s	-
Chloride content	+5°C ~ +35°C	-
Hot stability	< 0.1%	-

부의 공극과 미세균열을 통하여 수분이 침투하고 침투된 수분이 동결융해 작용에 영향을 받아 내구성능을 악화시켜 궁극적으로 구조체의 기능을 저하시킨다. 따라서 본 연구에서는 영구지보재로서 고성능 숏크리트의 간접적인 투수성을 알아보기 위하여 ASTM C 1202-94에 준하여 실시하였다. Fig. 2는 콘크리트의 염소이온 투과 시험 모습이다. 실험 공시체의 제작은  $\Phi 100 \times 200$  mm 원주형 공시체를 제작한 후 공시체의 중간 부분에서 50 mm를 콘크리트 절단기를 이용하여 절단 한 후 실험을 실시하였다.

### 4.2 동결융해 시험

영구지보재로서 숏크리트는 동절기 기온의 변화와 함께 동결융해의 반복 작용을 받는다. 동결융해의 반복 작용은 숏크리트 중의 자유수가 동결되어 체적이 팽창되므로 숏크리트 내부에 큰 팽창압력으로 인한 인장응력이 발생되어 숏크리트를 파괴시킨다. 본 연구에서는 급결제 종류에 따른 숏크리트의 동결융해 저항성을 측정하기 위해서  $100 \times 100 \times 400$  mm의 각주형 공시체를 제작하여  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 양생 수조에서 14일간 양생한 후 KS F 2456에 따라 동결융해 시험을 수행하였다. 기준 공시체를 제작하여 공시체 중심에서의 온도를  $4^\circ\text{C}$ 에서  $-18^\circ\text{C}$ 로 떨어뜨리는 동결작용과 다시  $4^\circ\text{C}$ 로 올리는 융해작용을 반복하였다. 매 30사이클에서 상대동탄성계수를 측정하였으며 시험 결과는 공시체 2개를 제작하여 평균값을 사용하였다. Fig. 3은 동결융해 시험 관련 사진이다.

### 4.3 중성화 시험

중성화란 숏크리트가 공기중의 탄산가스, 수중에 존재하는 탄산, 그 외의 산성가스 혹은 염류의 작용에 의하여 알칼리성을 상실해가는 현상으로 숏크리트의 내구성을 저하시키는 중요한 원인 중의 하나이다. 이에 본 연구에서는 영구지보재로서 고성능 숏크리트의 중성화 시험을 실시하였다. 중성화 시험은 기존 연구자들의 실험 방법을 기본으로하여 실시하였다<sup>4)</sup>. Fig. 4와 같은 중성화 촉진 장비에서 대기환경보다 매우 높은 이산화탄소의 촉진 환경을 인공적으로 조성하여 숏크리트의 중성화 저항 특성을 평가하였다.  $\Phi 100$  mm  $\times$  200 mm의 원주형 공시체

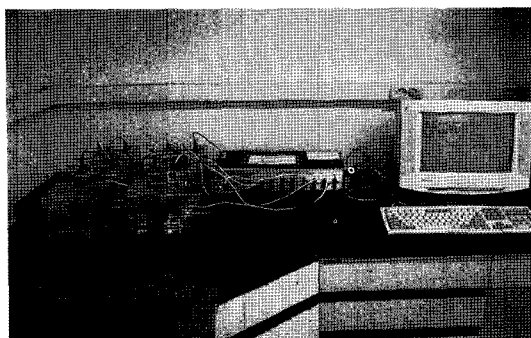
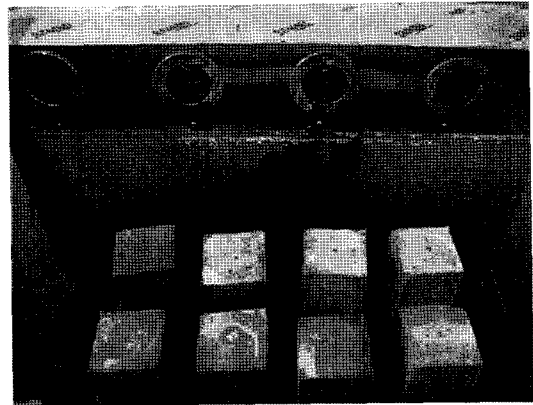
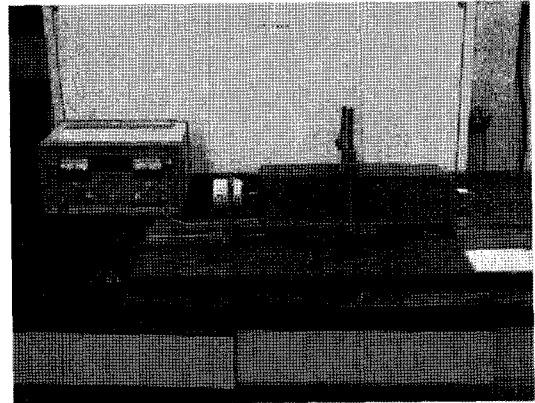


Fig. 2 Photograph of chloride permeability test



(a) Freezing-thawing repeat



(b) Dynamic modulus of elasticity

Fig. 3 Photograph of freezing-thawing test

를 제작하여  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 양생 수조에서 28일 동안 표준 양생을 실시한 후 중성화 촉진기 내에서 Table 5의 조건으로 공시체를 90일간 노출시켰다. 그 후 각각의 공시체를 할렬 인장한 후 1%의 페놀프탈레인 용액을 분무하여 나타난 상하 단면의 변색 유무의 판별로서 중성화 깊이를 측정하여 숏크리트의 중성화 정도를 평가하였다.

### 4.4 염해 환경

알칼리 프리계 및 시멘트 광물계 급결제를 사용한 고성능 숏크리트가 영구지보재로서 해수에 영향을 받는 지하구조물에 사용될 경우 숏크리트의 염해 환경에 대한 영향을 검토하였다. 실험 방법은 기존 연구자에 의해서 수행되었던 방법을 이용하였다<sup>12)</sup>. 본 연구에서는  $\Phi 100 \times 200$  mm의 원주형 공시체를 제작하여 온도  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , 상대습도 50%의 양생실에서 1일 양생 후 3%의 NaCl 용액에 침지한 후 재령 3일, 7일, 28일, 91일에 압축강도 시험을 실시하였다.

## 5. 실험 결과

### 5.1 염소이온 투과 시험

염소이온 투과에 의한 전하량 측정 방법에 따라 염소이온 투과 시험을 실시한 결과는 Fig. 5와 같다. 그림에

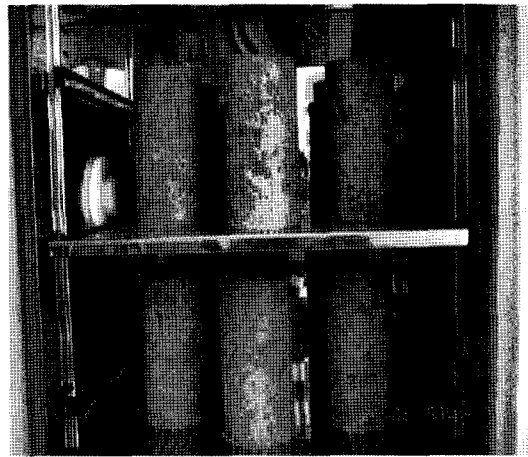
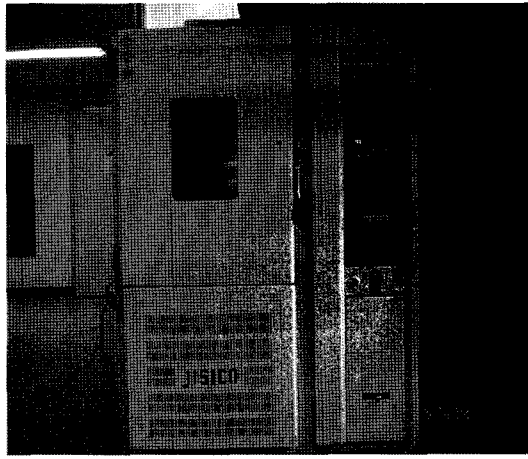


Fig. 4 Photograph of carbonation test

Table 5 Accelerated carbonation condition<sup>3)</sup>

Carbon dioxide (% , vol)	Temperature (°C)	Humidity (%)
10	50	50

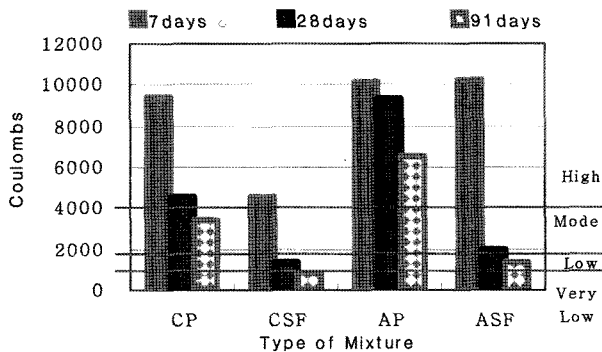


Fig. 5 Chloride permeability test result

서 보는 바와 같이 모든 배합에서 재령이 늘어남에 따라 통과전하량이 감소하는 경향을 보였다. 재령 7일에서는 통과전하량이 4,000 Coulomb 이상의 높은 상태로 나타났다. 재령 28일에서는 실리카폼을 사용한 배합에서 모두 낮은 투과성을 나타내었으며 실리카폼을 사용하지 않은 배합은 높은 투과성을 나타내었는데 이것은 실리카폼이 시멘트 입자 사이의 공극을 충전하는 마이크로 필러 효과가 있으며 수산화칼슘 (Ca(OH)<sub>2</sub>)과 결합하여 포졸란반응에 의해 미세한 공극을 감소시켜 공시체의 내부

를 치밀하게 하였기 때문이다. 따라서 실리카폼의 사용으로 인하여 숏크리트의 투수저항성을 향상시킬 수 있다.

### 5.2 동결융해 시험

동결융해 반복 후 영구지보재로서 고성능 숏크리트의 동탄성계수 측정 결과는 Fig. 6에 정리하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 모든 배합에서 동결융해 반복 300회까지 상대동탄성계수가 85% 이상으로 나타나 기준인 60% 이상의 우수한 동결융해 저항성을 보여주었다. 이는 동결융해 저항성에 가장 큰 영향을 미치는 공기량의 범위를 본 연구에서는 모든 배합에서 4±1%로 고정하였기 때문에 동결융해 저항성이 우수하게 나타났다. 일반적으로 공기량이 증가하면 동결융해 저항성이 증가하는 것으로 알려져 있다. 그러나 공기량을 크게 증가시키면 콘크리트의 압축강도에 영향을 미치기 때문에 강도에 크게 영향을 미치지 않는 범위에서 공기량을 확보하여야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 내용을 고려하여 공기량의 범위를 4±1%로 결정하여 적용하였으며 따라서 각 배합마다 동결융해 저항성에 작은 차이는 나타나고 있으나 그 범위는 크지 않았다. 또한 시험 결과는 알칼리 프리계 급결제 및 시멘트 광물계 급결제의 종류에 상관없이 실리카폼을 치환한 배합이 Plain 배합보다 동결융해 반복에 따른 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 이것은 실리카폼을 사용함으로써 시멘트 입자 사이의 공극을 충전하고 포졸란반응에 의해 미세한 공극을 감소시켜 시멘트 수화체의 공극을 치밀하게 하여 동해의 원인이 되는 수분의 침투를 억제하는 투수저항성이 향상되었기 때문이다.

### 5.3 중성화 시험

90일간의 중성화 노출 환경에 따른 시험 결과는 Fig. 7과 같다. 중성화 시험 결과를 보면 급결제에 따른 영향은 크게 나타나지 않았으며 실리카폼을 사용한 배합에서 중성화 깊이가 약간 깊게 나타났다. 이러한 경향은 실리카폼과 같은 혼화제는 콘크리트 중의 수산화칼슘과 포졸

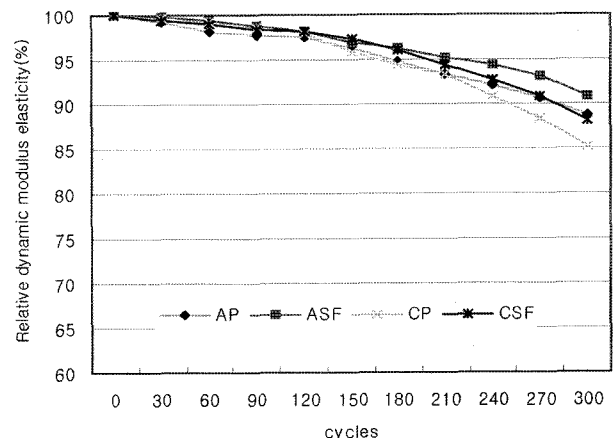


Fig. 6 Relative dynamic modulus elasticity

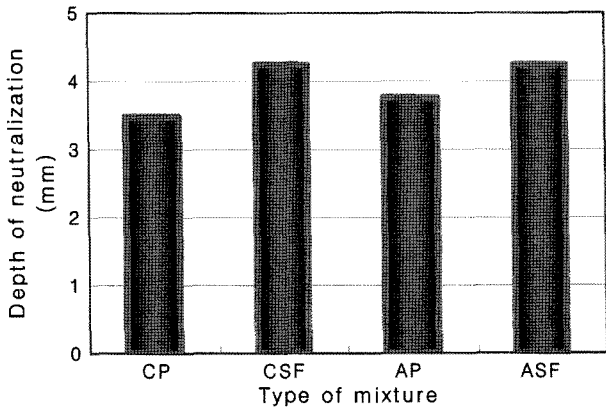


Fig. 7 Depth of neutralization

란반응에 의해 칼슘 실리케이트 하이드레이트 (CSH)를 생성함으로써 콘크리트 중에 있는 수산화칼슘을 소모하게 되어 숏크리트의 알칼리도가 감소하기 때문인 것으로 사료된다.

#### 5.4 염해 환경

염해 환경에 따른 단기거동과 장기거동의 특성을 알아보기 위하여 재령 28일 및 91일에서의 압축강도 및 염소이온 투과 시험을 실시한 결과는 Figs. 8 및 9와 같다. 압축강도 시험 결과를 보면 재령 28일 및 91일에서 배합별로 약간의 차이가 있지만 압축강도비가 95~105% 범위로 염해에 따른 압축강도 저하 현상은 나타나지 않는 것으로 나타났다. 염소이온 투과 시험 결과 역시 염해 환경에 따른 영향은 나타나지 않는 것으로 나타났다. 염해 환경에 따른 단기거동과 장기거동의 특성을 알아보기 위하여 압축강도 및 염소이온 투과 시험 결과 단기 및 장기거동에서는 아무런 영향이 나타나지 않았다. 이와 같은 결과는 숏크리트의 내부 구조가 치밀하여 염소이온이 침투할 수 있는 가능성을 최소화하였기 때문이다. 투수 저항성이 우수하다는 것은 콘크리트의 내부가 치밀하고, 공극률이 작기 때문에 나타난 결과이다. 따라서 염해 환

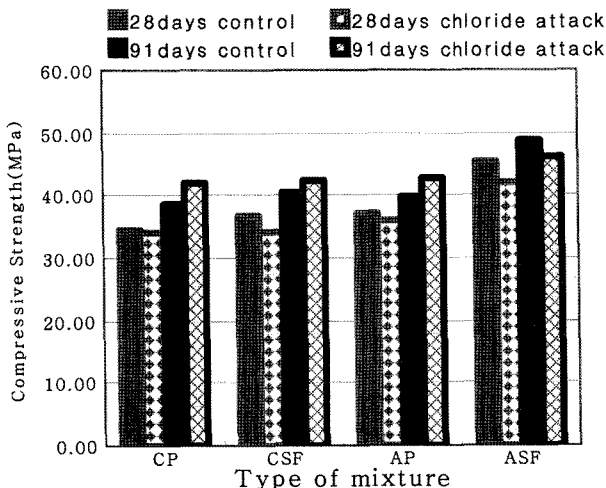


Fig. 8 Compressive strength test result

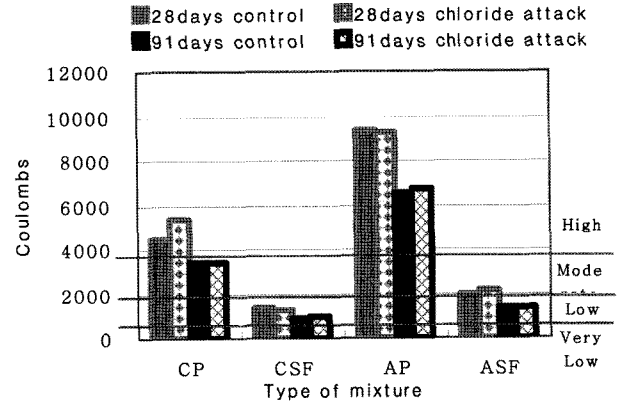


Fig. 9 Chloride permeability test result

경에 노출된 숏크리트 공시체 모두 투수저항성이 우수하였기 때문에 상대적으로 염해 환경에서 강도 저하가 크지 않았다. 이는 염소이온의 투과량이 적은 것으로 증명할 수 있다.

#### 6. 요약 및 결론

영구지보재로서 고성능 숏크리트의 내구성능을 평가하기 위하여 염소이온 투과 시험, 동결융해 시험 및 중성화 시험을 실시하였고 염해 영향에 대한 평가 실험을 실시하였으며 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 실리카폼을 사용한 영구지보재로서 숏크리트 배합은 모두 낮은 투과성을 나타내었다.
- 2) 영구지보재로서의 숏크리트 배합에서는 동결융해 반복 300회까지 상대동탄성계수가 85% 이상의 우수한 동결융해 저항성을 보였다. 알칼리 프리계 급결제 및 시멘트 광물계 급결제의 종류에 상관없이 동결융해 반복에 따른 저항성이 우수하게 나타났다.
- 3) 중성화 시험 결과 급결제에 따른 영향은 크게 나타나지 않았으며 영구지보재로서 숏크리트 배합에서 중성화 깊이가 약간 깊게 나타났다.
- 4) 염해 환경에 압축강도 시험 결과를 보면 재령 28 및 91일에서 배합별로 약간의 차이가 있지만 압축강도비가 95~105% 범위로 염해에 따른 압축강도 저하 현상은 나타나지 않았다. 염소이온 투과 시험 결과 역시 염해 환경에 따른 영향은 나타나지 않았다.

#### 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. 김영진, 이상수, 김동석, 유재강, “혼화제 종류 및 치환

- 율이 콘크리트의 내염성능 향상에 미치는 영향에 관한 연구”, 콘크리트 학회지, 16권 3호, 2004, pp.319~326.
2. 박해균, 이명섭, 김재권, 이철우, “영구 슛크리트 터널 라이닝 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발 (Alkali Free 급결제 적용성 검토)”, 콘크리트 학회지, 2003, 15권 3호, pp.66~73.
  3. 배규진, 이두화, 장수호, “Single-Shell 터널공법의 국내 적용방안”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2002, pp.1~6.
  4. 원종필, 정상경, 박해균, 이명섭, “C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> 광물계 급결제를 사용한 슛크리트의 내구 특성”, 대한토목학회 논문집, 25권 3C호, 2005, pp.235~240.
  5. 이상필, 김동현, 류종환, 이상돈, 최명식, “PCL 공법을 적용하기 위한 고성능 슛크리트 개발”, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, 2004, pp.3662~3667.
  6. ASTM C 1202, *Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, ASTM, 1997.
  7. Geo-front 연구회, Single Shell 분과회, 슛크리트 설계 SWG, 슛크리트 복공에 의한 Single shell의 설계에 관한 검토 보고서, pp.12~20.
  8. KS F 2456, *Method of Test for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*, 한국표준협회, 1993.
  9. Garshol, Knut F., “How to Use Modern Wet Mix Shotcrete Technology for Single Shell Permanent Tunnel Linings”, *Shotcrete for Underground Support VIII : Eighth International Conference Proceedings*, São Paulo, Brazil, April 11-15, 1999, pp.46~56.
  10. Melbye, T. A. and Dimmock, R. H., “Modern Advances and Applications of Sprayed Concrete”, *Keynote Paper Given at the International Conference on Engineering Developments in Shotcrete*, Hobart, Tasmania, Australia, April 2-4, 2001, pp.1~25.
  11. Tom Melbye, *MBT International Underground Construction Group*, Sprayed Concrete for Rock Support, 2001, pp.113~115.
  12. Paglia, C., Wombacher F., and Böhni, H., “The Influence of Alkali-Free and Alkaline Shotcrete Accelerators within Cement Systems: Influence of the Temperature on the Sulfate Attack Mechanisms and Damage”, *Cement and Concrete Research*, Vol.33, No.3, 2003, pp.387~395.

---

**요 약** 본 연구는 장기간 슛크리트의 강도를 유지할 수 있는 영구지보재로서 알칼리 프리계 및 시멘트 광물계 급결제를 사용한 적정 배합비의 고성능 슛크리트의 내구성을 평가하였다. 내구성 실험은 염소이온 투과 시험, 동결융해 반복 시험, 축진 중성화 시험 및 슛크리트에 염해의 영향 실험을 실시하였다. 실험 결과 실리카폼을 사용한 모든 배합이 낮은 투과성을 나타내었다. 실험 결과 실리카폼을 사용한 모든 배합이 모두 낮은 투과성을 나타내었다. 또한 동결융해 300회 반복 후에 상대동탄성계수가 85% 이상을 초과하는 우수한 동결융해 저항성을 보였다. 축진 중성화 시험 결과 급결제에 따른 영향은 나타나지 않았으며 실리카폼을 사용한 배합에서 중성화 깊이가 약간 깊게 나타났다. 염해 환경에서 어떠한 영향도 없었다. 따라서 본 연구에서의 고성능 슛크리트 배합은 우수한 내구 성능을 보여주었다.

**핵심용어** : 알칼리 프리계 급결제, 시멘트 광물계 급결제, 내구성, 영구지보재, 슛크리트