

## 수재슬래그를 이용한 강화노반재료의 기초적 특성 연구

### A Study on Basic Properties of the Reinforced-roadbed Material Using Water Quenched Blast Furnace Slag

이 선 복\*<sup>1</sup> Lee, Sun-Bok

윤 지 선\*<sup>2</sup> Yoon, Ji-Son

#### Abstract

The development of reinforced-roadbed material in substitute for existing roadbed is necessary to protect its failure from the dynamic stress and vibration caused by the traveling of the high-speed and heavy trains. The water quenched blast furnace slag having potential hydraulic reactivity is one of the materials in substitute for soil reinforced-roadbed. We carried out the study of basic properties of roadbed material using Portland cement and CSA(calcium sulphoaluminate) as the activator for the evaluation of its application. As the result of the strength test, this material satisfied design criterion for reinforced-roadbed. Optimum mixing ratio of this reinforced-roadbed material was 15~17.5 percent of cement and 2.5 percent of CSA by weight of the blast furnace slag. Especially, as permeability is above  $10^{-3}$ cm/sec, this material proved to have functions of both reinforced roadbed and drainage layer.

#### 요 지

고속 및 하중이 큰 열차의 운행으로 인한 동적하중과 진동으로 인해 발생하는 노반의 파괴를 억제하기 위해 기존의 노반을 대체할 보강 재료의 개발이 필수적이라 할 수 있다. 잠재수경성을 가지고 있는 수재슬래그는 이러한 특성을 대신 할 수 있는 재료중의 하나이다. 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 포틀랜드시멘트와 CSA(calcium sulphoaluminate)를 자극재로 사용하는 수재슬래그 강화노반재에 대한 기초특성에 관한 연구를 수행하였다. 강도시험결과 이 재료는 강화노반에 대한 설계기준을 만족시켰다. 본 강화노반재료의 최적의 혼합비율은 수재슬래그양에 대하여 시멘트 첨가량 15~17.5%, 팽창재(CSA) 첨가량 2.5%로 나타났으며, 특히 투수계수가  $10^{-3}$ cm/sec 이상이므로 본 재료는 강화노반의 성능과 동시에 배수층의 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

**Keywords :** Reinforced roadbed, Water quenched blast furnace slag

#### 1. 서 론

고속 및 하중이 큰 열차의 운행을 위해서는 과도한 교통하중에서 오는 궤도파괴와 노반파괴에 대처하여 선로시설을 계속 원형으로 유지해 나갈 수 있는 기술적 방안을 찾아내는 것이 선결과제이다. 특히 본 연구의

대상인 철도노반은 선로의 하부에 위치하여 차량운행의 근간이 되는 부분으로서, 열차의 통과에 의한 동적하중과 진동에 대해서 궤도를 지지하여 열차를 안전하고 신속하게 운행할 수 있도록 하는 것이 그 역할이다. 그러나 도상 및 노반의 압력, 노반토의 함수비, 배수불량 등의 원인으로 발생하는 분니, 동상, 침하현상 등으

\*1 정회원, 동부건설(주) 토목설계팀 (Member, Manager, Dongbu Corporation, Civil Design Team, bamboo21c@chol.com)

\*2 정회원, 인하대학교 환경토목공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Environment & Civil Engrg., Inha Univ.)

로 인해 노반이 연약화되어 궤도의 변형 내지는 파괴가 발생하는 경우가 많다.

이와 같은 철도노반의 문제점을 해결할 수 있는 방안의 하나로 수재슬래그를 강화노반재료로 사용 하는 방법이 있다. 수재슬래그는 철을 생산하는 과정에서 발생하는 부산물로 잠재수경성을 가지고 있으며 기공을 다량 함유한 재료로 수화반응 후 우수한 강도특성 및 투수특성을 가지고 있다. 그러나 수재슬래그의 수화반응을 위해서는 적절한 자극재를 첨가하여야 한다. 따라서 이 재료를 철도노반재로 사용하기 위해서는 자극재의 종류 및 함유량에 따른 특성변화에 대한 분석이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 포트랜드 시멘트와 K형 팽창재를 자극재로 사용하는 강화노반재에 대한 기초특성에 관한 연구를 수행하였다.

수화이론연구 및 혼합물시험법에 의한 시험을 바탕으로 자극재의 적정 첨가량 범위를 구하고, 이 범위내에서 자극재 첨가량변화에 따른 압축강도시험, 투수시험, 주사전자현미경관찰 및 X선 회절분석 등의 시험을 수행하여 기초적 특성의 변화를 분석하고, 철도의 강화노반재로 사용할 수 있는 최적배합비를 제시하였다.

## 2. 철도노반의 특성

철도노반(roadbed)은 도상(ballast)의 바로 아래에서 궤도를 직접 지탱하고, 궤도로부터 작용되는 열차하중을 지지하는 토구조물을 지칭하는 것으로 상부로부터 오는 압력과 충격으로 인해 침하되거나 변형되어서는 안되며, 우수와 유수의 침해를 받지 않아야 된다.

노반의 공간으로서의 범위(두께)는 역학적으로 열차하중에 의해 어느 한도 이상의 동적변화를 받는 부분을 칭하는 것이 취급상 편리하나 그 범위도 토질이나 하중의 작용조건에 따라 많은 차이가 있다. 현재로서는 토질노반의 경우 궤도중심에서 노반표면으로부터 30~80cm의 두께를 표준으로 하는데 이 표준은 주로 노반의 분기발생을 방지하기 위한 목적으로 정해진 것이다.

노반은 토질노반과 토질노반을 개량 강화한 강화노반으로 나누어지며, 강화노반은 다시 흙강화노반 및 쇄석강화노반으로 세분된다. 쇄석강화노반은 상부 아스팔트 콘크리트와 하부 입도조정쇄석 또는 입도조정 슬래그쇄석의 2층 합성구조이며, 슬래그 강화노반은 수경성 입도조정 고로 슬래그쇄석의 단일층 구조이다.

Fig. 1은 일본 신간선 경우의 쇄석강화노반의 구조를 나타낸 것이며, Table 1은 노반조건에 따른 쇄석강화노

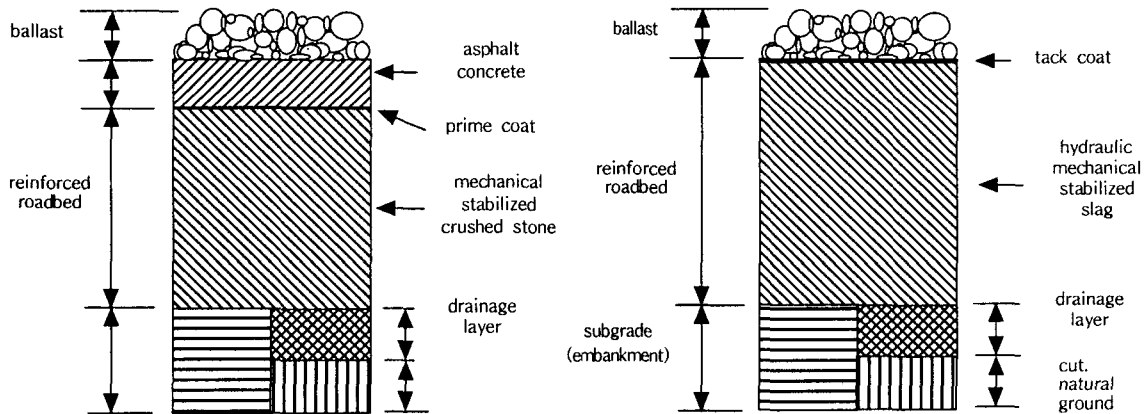


Fig. 1. Structure of reinforced roadbed

Table 1. The thickness of reinforced roadbed

Types of roadbed	Crushed stone roadbed (cm)			Slag roadbed (cm)	
	Asphalt concrete	Mechanical stabilized crushed stone	Drainage layer	Hydro-mechanical stabilized slag	Drainage layer
embankment ( $K_{30} \geq 11 \text{ kgf/cm}^2$ )	5	30	-	25	-
embankment ( $7 \leq K_{30} < 11 \text{ kgf/cm}^2$ )	5	65	-	50	-
cut. natural ground ( $K_{30} \geq 11 \text{ kgf/cm}^2$ )	5	30	15	25	15
cut. natural ground ( $7 \leq K_{30} < 11 \text{ kgf/cm}^2$ )	5	65	15	50	15

Table 2. The quality of hydraulic mechanical stabilized slag roadbed

Types	Items	Modified CBR (%)	Uniaxial compressive strength	Dry unit weight (tf/m <sup>3</sup> )
Mechanical stabilized crushed stone (MS)		> 80	-	> 1.5
Hydro-mechanical stabilized slag (HMS)		> 80	> 12kgf/cm <sup>2</sup> (after 2 weeks curing)	> 1.5

반의 두께이다. Table 2는 고로슬래그노반의 품질을 나타낸 것으로, 일본의 경우 수경성 고로슬래그강화노반의 경우 14일 강도가 12kgf/cm<sup>2</sup> 이상으로 관리되고 있다.

### 3. 수재슬래그에 관한 이론적연구

#### 3.1 수재슬래그의 특성

용선의 제조과정에서 부산물로 생산되는 고로슬래그는 그 처리공정에 따라 크게 서냉슬래그와 급냉슬래그로 구분된다. 약 1,400℃의 고온용융상태의 고로슬래그를 슬래그방류장에 흘려내려 공냉 및 적당한 양의 살수(撒水)를 하면서 2~4일간 냉각 고화시킨 것을 서냉슬래그라 하며, 대량의 물로 급냉시킨 슬래그를 급냉슬래그 또는 수재슬래그라 한다. 서냉슬래그는 그 형상이

괴상(塊狀)이며 결정질구조(crystalline structure)를 가지고 있는 반면에 수재슬래그의 경우 세립의 유리질구조(amorphous or glassy structure)이다.

일반적으로 수재슬래그는 제철공업의 부산물로 얻어지기 때문에 원광의 산지, 품위 및 용융슬래그의 점도관리 등에 따라 화학조성에 상당한 변동폭이 있으나 Table 3에 나타낸바와 같이 주성분은 CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO로 시멘트의 주성분과 유사하다.

색은 대부분이 황갈색이며 대부분이 0.5~2.5mm의 입경범위를 갖는다. Fig. 2에 보인바와 같이 입자형태는 대부분이 소립의 불규칙한 입자상으로 존재하고 있으며 내부에 기공을 함유하고 있다. 생산 조건에 따라 기공의 내포량이 달라지기 때문에 비중은 1.2 이하에서 2.5 이상에 이르기까지 넓은 범위를 보인다. 단위용적당 중량은 0.7~1.7kg/ℓ이며 비표면적은 3,500~4,400 cm<sup>2</sup>/g의 범위를 갖는다.

Table 3. Abundance of major elements from the blast furnace slag and portland cement

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	S	SO <sub>3</sub>
Blast furnace slag	30~41	12~20	35~45	3~8	0.2~1.7	0.1~1.0	0.2~1	0.004~0.051	0.2~2.2	0.6~0.35	0.02~0.35
Portland cement	17~25	3~8	60~67	0.1~5.5	2~3	0.5~6.0	-	0.1~0.2	0.1~0.4	1~2	1~3



(a) Shape of particle



(b) Shape of pore

Fig. 2. Scanning electron microscope photographs of water quenched blast furnace slag

### 3.2 수화이론

수재슬래그는 잠재수경성 물질이므로 포틀랜드시멘트 크링카 광물과 같이 물과 접할때 자기촉발적인 수화 반응을 개시하지 않는다. 슬래그와 물과의 접촉반응에서는 규산염이 풍부한 겔의 박막이 치밀하게 형성되므로 중심부까지의 물의 침입이 어렵다. 따라서 수재슬래그가 수화작용을 일으키게 하기 위해서는 알칼리나 황산염을 첨가하여 이 겔을 성근구조를 갖는 겔로 변화시켜야 한다. 이것을 잠재수경성 물질에 대한 자극작용이라고 한다. 수재슬래그를 강화노반재료로 사용하기 위해서는 소정의 강도를 가져야하므로 수재슬래그를 자극하여 수화반응을 일으켜야 한다. 본 연구에서는 자극재로 포틀랜드시멘트와 팽창성시멘트를 사용하였다.

고로수재슬래그와 포틀랜드시멘트 및 팽창성시멘트로 구성된 혼합물의 수화반응을 간단히 정리하면 다음과 같다. 반응초기에는 시멘트의 수화반응으로 생성된  $\text{Ca(OH)}_2$  의해 자극받아 수재슬래그로부터 용출된  $\text{Al}_2\text{O}_3$  와  $\text{CaSO}_4$ 의 수화로 진행되는 에트리נג가이트가 형성된다. 반응후기에는 용출성분의 반응으로 C - S - H와 C - A - H가 생성되어 후기강도를 발현하게 된다. 또한 팽창재(calcium sulphoaluminate)의 주성분인 Hauyne의 수화반응은 시멘트의 CaO소비를 증진시켜 전체적으로 시멘트의 수화를 촉진하므로 자극작용을 하는  $\text{Ca(OH)}_2$ 의 생성을 원활하게 한다. 이론적으로 수재슬래그는 중량의 약 10%에 상당하는  $\text{Ca(OH)}_2$ 와 결합하게 된다. 포틀랜드시멘트는 약25%의  $\text{Ca(OH)}_2$ 를 생산 방출하기 때문에 시멘트대 슬래그의 비가 25대 75의 혼합비 까지는 슬래그 전부를 활성화 하는데 충분한  $\text{Ca(OH)}_2$ 를 확보하는 것이 가능하게 된다.

### 3.3 혼합물시험법에 의한 강도추정식 산정

#### 3.3.1 실험모델설계

제품이 여러 개의 성분(k)의 혼합물로 이루어져 있고 각 성분의 혼합비율만이 문제가 되는 경우 실험에서 반응을 최대 또는 최소로 만드는 최적혼합비율을 찾고자 하는 실험계획을 혼합물의 혼합비율에 관한 실험계획이라고 한다.

k개의 성분의 혼합에 있어서  $x_i$ 를 i번 성분의 혼합비율이라고 하면 다음과 같은 관계식 (1)을 만족시켜야 한다.

Table 4. The Outline of pretests

Item	Factors	Contents
Uniaxial compressive strength	mixing ratio (wt. %)	slag : cement : CSA (75~95 : 5~15 : 0~5)
	curing days	14
	compaction	no compaction
	w/slag	25 wt. %

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_k,$$

$$x_i \geq 0, i=1, 2, 3, 4, \dots, k \quad (1)$$

이와 같은 관계식을 만족시키는 집합을 심플렉스 (simplex)라고 하며, 본 연구에서는 과거의 자료나 이론적인 근거를 통해 각인자의 실험영역을 제한하여 실험을 실시하는 제한된 영역에서의 실험법을 이용하였다.

이론적으로 시멘트 대 슬래그의 비가 25대 75의 혼합비 까지는 슬래그 전부를 활성화하는데 충분하며, 팽창성시멘트는 시멘트양의 5~15% 혼합하여 사용하는 것이 적절하므로 이를 이용하여 Table 4와 같이 실험영역을 정하고 KS F 2314에 의거 직경5cm, 높이 10cm의 원주형 시료에 대한 일축압축강도 시험을 다짐을 수행하지 않은 상태에서 수행하였다.

기준강도는 Table 2에서 제시한 일본의 고로슬래그 철도노반의 강도기준(JIS A 5015)을 적용하여 14일 재령에서  $12 \text{ kg/cm}^2$  이상으로 하였다.

#### 3.3.2 결과 및 추정식 산정

Table 5는 각 혼합비에 따른 일축압축시험 결과와 이로부터 구한 강도( $S_c$ ) 추정식 (2)로부터 얻은 추정강도 값을 비교하여 나타낸 것이다. 이 식에서 얻은 결정계수 값  $R^2=0.9926$ 으로 매우 적절한 모형임을 알 수 있었다. 시료를 제작하는 과정에서 다짐을 하지 않았지만 포틀랜드시멘트와 팽창재의 함유량에 따라 기준강도 이상을 얻을 수 있었다.

$$S_c = 137x_1 + 27057x_2 + 33010x_3 - 30133x_1x_2 - 34933x_1x_3 - 32267x_2x_3 \quad (2)$$

여기서

$$x_1 = \text{수재슬래그의 배합비 } (0.7 \leq x_1 \leq 0.95)$$

$$x_2 = \text{포틀랜드시멘트의 배합비 } (0.05 \leq x_2 \leq 0.15)$$

$$x_3 = \text{팽창성시멘트(CSA)의 배합비 } (0.00 \leq x_3 \leq 0.05)$$

Table 5. Result of pretests

Specimens	Mixing ratio			Uniaxial compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Calculated uniaxial compressive strength, S <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )
	Slag	Cement	CSA		
1	0.95	0.05	0	2.5	4.7
2	0.85	0.15	0	17.8	7.6
3	0.80	0.15	0.05	27.8	11.7
4	0.90	0.05	0.05	4.8	17.0
5	0.90	0.10	0	5.2	6.6
6	0.825	0.15	0.025	20.3	10.3
7	0.85	0.10	0.05	13.3	14.7
8	0.925	0.05	0.025	9.6	20.5
9	0.875	0.10	0.025	9.6	27.6

#### 4. 실험

##### 4.1 사용재료

시멘트는 KS L 5021 규격품인 A사 제품을 사용하였으며, 팽창제는 D사의 K형의 설포알루미늄산염계의 제품을 사용하였다.

##### 4.2 실험방법

배합비는 자극재로 사용된 시멘트 및 팽창제의 첨가

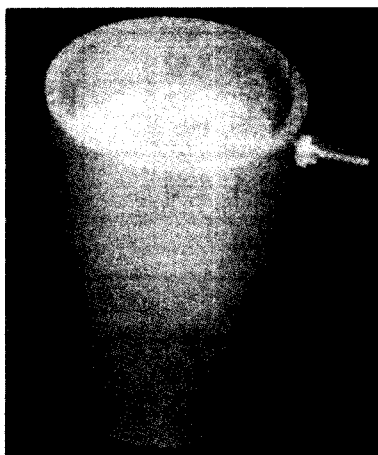
량에 따른 특성변화를 분석하기 위하여 혼합물시험법에서 얻은 강도추정식을 바탕으로 노반재료의 기준강도인 12kgf/cm<sup>2</sup>을 초과하는 배합비를 기준으로 Table 6과 같이 결정하였다. 공시체의 제조는 건조한 상태에서 혼합한 시료에 물을 슬래그양의 25% 첨가한 후 믹서로 혼합하여 각 시험항목에 맞는 몰드를 제작하였으며, 양생은 21~25℃의 온도로 공기 중에서 시행하였다.

##### 4.2.1 일축압축시험

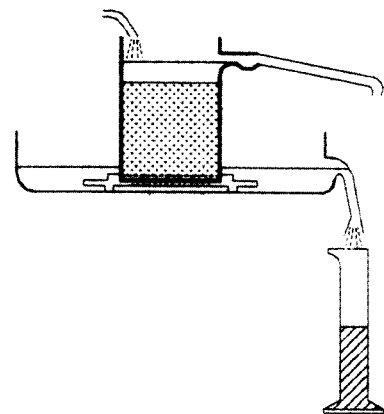
공시체는 직경 5cm, 높이 10cm의 원주형 몰드로 제작하였다. 이 공시체에 대하여 재령일수 3, 7, 14, 21,

Table 6. Mixing ratio of specimens

specimens	cement/slag	CSA/slag	specimens	cement/slag	CSA/slag	specimens	cement/slag	CSA/slag
MA-1	0.1	-	MA-5	0.1	0.025	MA-9	0.1	0.05
MA-2	0.125	-	MA-6	0.125	0.025	MA-10	0.125	0.05
MA-3	0.15	-	MA-7	0.15	0.025	MA-11	0.15	0.05
MA-4	0.175	-	MA-8	0.175	0.025	MA-12	0.175	0.05



(a) Testing mold



(b) Testing apparatus

Fig. 3. Permeability testing apparatus

28, 60일 별로 일축압축시험을 수행하였다.

#### 4.2.2 투수시험

투수 시험용 몰드는 Fig. 3에 보인바와 같은 직경 10cm, 높이 10cm의 원주형으로 제작하였다. 이 공시체에 대하여 시료 상하부에 필터재로 슬래그를 채운 후 재령일수 7, 14, 28, 35, 60일 별로 정수위 투수시험을 수행하였다.

#### 4.2.3 XRD분석

MA-3, MA-7, MA-11번 시료를 재령일수 7, 14, 28일 별로 아세톤으로 수화를 정지시키고 X-ray 회절분석을 실시하였다. 관찰조건은 CuK $\alpha$ , Ni filter, 30kV, 10mA 였다.

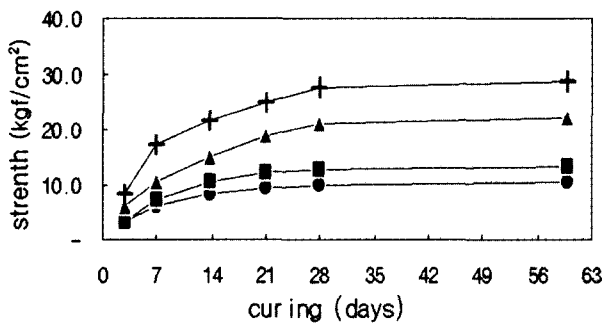
#### 4.2.4 용출시험

수재슬래그를 철도노반재로 활용시 슬래그의 침출수가 인근지역 및 주변환경에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Pb, Cu, Cd, As, Hg, Cr<sup>+6</sup>, CN, 유기인, TCE, TECE 등의 10개항목에 대한 회분식 용출시험을 수행하였다.

### 5. 결과 및 분석

#### 5.1 강도시험

Fig. 4는 재령에 따른 압축강도의 변화를 팽창재 및 시멘트 첨가량에 따라 나타낸 것이다. 시험결과 재령에 따른 강도변화는 초기 7일까지는 급격히 증가하고 28일까지 강도의 증가가 현저하나 28일 이후로는 완만한 강도증가 양상을 보여준다.



(a) CSA 2.5 wt. %

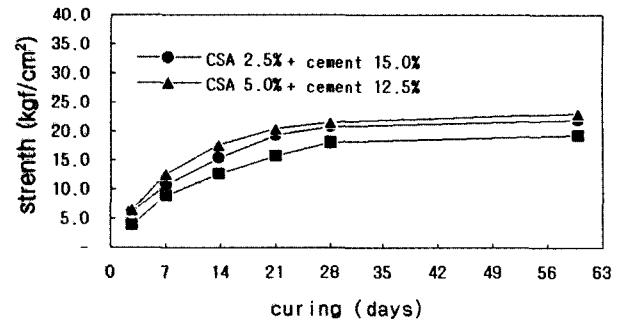


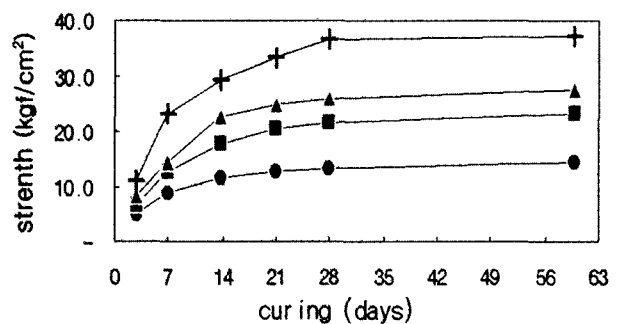
Fig. 5. Relations between strength and curing

일반 콘크리트의 경우 기건양생일 경우 14일 이후로는 강도의 증가가 매우 적은 것과 비교하면 수재슬래그의 경우 장기적으로 수화가 계속 진행되는 특성을 가진 것을 알 수 있다.

시멘트 및 팽창재의 함유량이 증가 할수록 압축강도는 증가하는 경향을 보여 주었다. 특히 팽창재의 함유량이 증가할수록 시멘트의 자극작용을 촉진하는 역할이 증대되어 강도증가가 현저 하였다. Fig. 5에서 보인바와 같이 자극재로 사용된 혼화재 첨가량(시멘트와 팽창재를 합한량)이 슬래그양의 17.5% 이상으로 조합된 MA-4, MA-7, MA-8, MA-10, MA-11, MA-12의 경우 일본의 수경성 슬래그강화노반의 14일 재령 기준강도인 12kg/cm<sup>2</sup> 이상의 압축강도를 얻을 수 있었다.

#### 5.2 투수시험

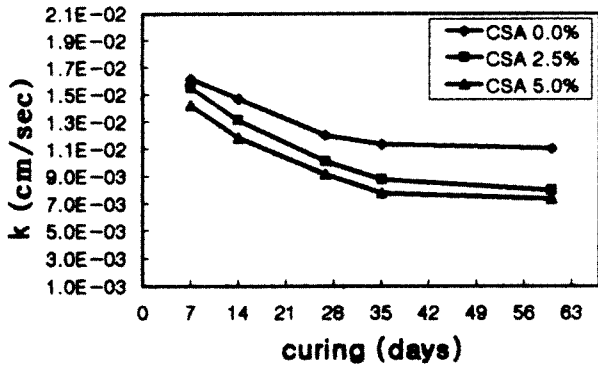
Fig. 6에 보인 바와 같이 재령에 따른 투수계수의 변화를 보면 28일까지는 급격히 감소하며 그후 35일까지는 완만히 감소하나 35일 이후로는 감소율이 현저히 줄어들어 60일까지 거의 변화를 보이지 않았다.



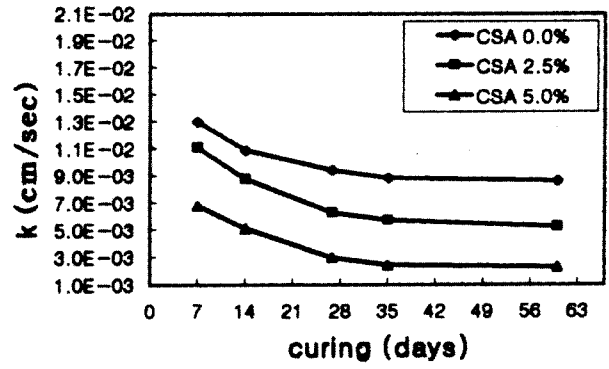
(b) CSA 5 wt. %

(-●- : cement 10%, -■- : cement 12.5%, -▲- : cement 15%, -+- : cement 17.5%)

Fig. 4. Relations between strength and curing days



(a) Cement 10 wt.%



(b) Cement 17.5 wt.%

Fig. 6. Relations between the coefficient of permeability and curing days

시험결과 혼화재의 첨가량이 증가함에 따라 투수계수는 감소하는 경향을 보여주었으나 본실험의 모든 배합비에서 일반적인 투수층의 기준치인  $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$  이상의 값을 얻을 수 있었다. 따라서 본 재료의 경우 강화노반으로의 역할 뿐 아니라 절토지역의 노반 하부에 설치되는 투수층의 역할도 동시에 수행할 수 있는 장점이 있는 것으로 확인되었다.

### 5.3 X선 회절분석

수재슬래그의 경우 Fig. 7의 (a)에서 보인 것과 같이 유리질로 존재하기 때문에 X선 회절분석에 의한 광물의 정성분석이 곤란하다. 그러나 시멘트와 팽창재를 혼합하여 만든 투수강화노반의 경우 재령이 증가함에 따라 자극재의 수화 촉진작용에 의한 수재슬래그의 수화가 진행되어 Fig. 7의 (b)에 보인바와 같이 CSH의 생성을 확인 할 수 있었다.

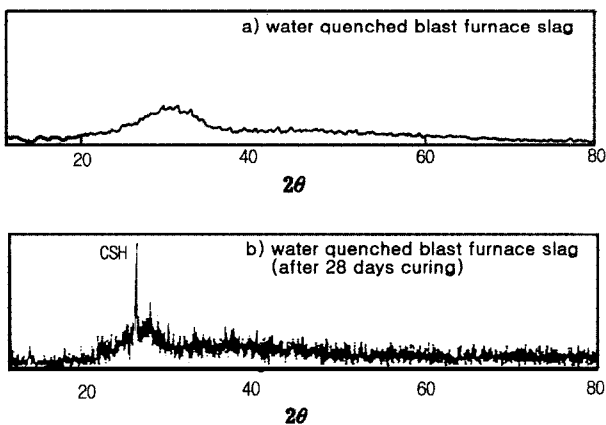


Fig. 7. XRD patterns

### 5.4 침출수의 수질분석

Pb, Cu, Cd, As, Hg,  $\text{Cr}^{+6}$ , CN, 유기인, TCE, TECE 등의 10개항목에 대한 회분식 용출시험결과 모든 항목이 0.05ppm의 검출한계 이하로 중금속 내지 환경에 악영향을 미치는 인자는 용출되지 않았다.

## 6. 결론

잠재수경성재료인 고로수재슬래그에 자극재로 포틀랜드시멘트 및 K형팽창재를 첨가하여 수화시킨 철도강화노반재에 대한 기초특성 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 혼화재첨가량이 슬래그 양의 17.5% 이상인 공시체의 경우 강화노반의 강도기준인  $12 \text{kg/cm}^2$  이상의 압축강도를 보였다
- (2) 혼화재의 첨가량에 따라 투수계수는 감소하는 경향이 있으나 모든배합비에서  $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$  이상의 값을 보였다.
- (3) 수재슬래그 강화노반에 대한 X선회절분석결과 수화반응 이전의 수재슬래그에서 관찰되지 않았던 CSH의 결정이 검출되었다.
- (4) 회분식 용출시험결과 모든 시험항목에서 검출한계 (0.05ppm)이하의 값을 보여 토목재료로 사용할 경우 용출에 의한 문제는 없을 것으로 보인다.

시험결과 수재슬래그 강화노반재는 강화노반의 설계기준강도를 만족시키며 투수성능이 우수한 특성을 가지고 있다. 최적배합비는 수재슬래그양에 대하여 시멘트첨가량 15~17.5wt.%, 팽창재(CSA)첨가량 2.5wt.%, 물량 2wt.%였다.

## 참 고 문 헌

1. 권중현(1992), 고로슬래그 골재 콘크리트에 관한 실험적 연구, 건국대학교, pp.3-6.
2. 김영진(1992), 제철소 산업폐기물 슬래그의 특성과 활용, 김영진, 건설기술정보, pp.13-17.
3. 대우건설기술정보(1994), 혼화재료의 적용, 기술관리부, pp.52-54.
4. 박춘근, C<sub>4</sub>S<sub>3</sub>A Type Clinker 및 Calcined Dolomite를 촉진제로 한 고험산염 slag Cement의 수화반응, 한양대학교, pp.27-31.
5. 양기탁(1993), 철도노반의 연약화 방지에 관한 연구, 한양대학교, p.12, 13, 17, 18, 39.
6. 윤익상(1970), 철도공학, 홍화출판사, pp.123-125.
7. 이재활(1983), 철도노반의 개량과 구축에 관한 연구, 한양대학교, pp.42-51.
8. 한국건자재시험연구원(1996), CSA시멘트의 특성평가에 관한연구, pp.1-3.
9. 허남환(1992), "수제품질에 미치는 냉각수 공급조건의 영향", 산업과학기술연구소 연구논문, 제6권, 제3호, pp.411-413.
10. 鐵道總合技術研究所(1992), 鐵道構造物等設計標準・同解説, pp.292-304.

(접수일자 2002. 9. 17, 심사완료일 2002. 12. 10)