

실내 및 현장시험에 의한 제강 슬래그의 투수성 고찰

Considerations of Permeability of Converter Slag by Laboratory and In-situ Tests

이 문 수* · 이 광 찬**
Lee, Moon Soo · Lee, Kwang Chan

Abstract

The permeability of converter slag, replacing material of sand mat on improving soft clay foundation, was evaluated in the laboratory as well as in situ test. Effects of grain size, flow water time and aging were investigated using sea and fresh water. Converter slag which has a grain size less than 10mm were submerged with fresh water and sea water. In fresh water, the coefficients of permeability in samples A and B were measured as 4.50×10^{-2} cm per second and 1.20×10^{-1} cm per second, respectively while as 1.88×10^{-2} cm per second and 3.86×10^{-1} cm per second in sea water. The condition of turbulent flow may exit and was experimentally certified based on the relationship of hydraulic gradient and seepage velocity. After 180 days in using sea water, the coefficients of permeability of samples A and B decreased ten times smaller than those initial values, and after that time continually decreased as for till 360 days. Finally, filling with voids in high-calcium quicklime(CaO) may result in the reduction of coefficient of permeability. In-situ coefficient of permeability however was practically satisfactory.

I. 서 론

일반적으로 골재는 포장공사에 많은 양이 소요 되는데 특히 최근 표층뿐만 아니라 보조기층 재료, 구조물 뒤채움 재료로 많이 이용 되어왔다. 그러나 골재의 고갈과 환경보전 강화에 따른 석산개발의 어려움으로 양질의 천연골재를 얻기가 점차 어렵게 되어가고 있는 현실에 즈음하여 90년대에는 슬래그로 대체되어 가는 과정으로 전환되는 시기라고 할 수 있다. 그러나 최근 여러 학자들의

연구에 의하면 제강슬래그(일명 전로슬래그)는 시멘트와 매우 유사한 재료이지만 무해성 물질임이 확인되었고(방봉찬, 1997) 그 후 여러 방면에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 일본을 비롯한 여러 선진국에서도 이를 치환공법, 선행재하공법, Drain 공법, Sand Compaction Pile 공법, Cell 호안 및 호안의 중립재 등까지 확장되어 널리 활용되고 있다(原田韶二, 1997). 그러나 우리나라와 같이 좁은 국토에 해안매립과 같은 대규모 연약지반 처리공사가 이루어지면서 개량공사에 사용되는

* 전남대학교 농과대학

** 동신대학교 공과대학

키워드 : 제강슬래그, 에이징 효과,

동수경사, 유리석회, 투수계수

Sand Mat용 모래의 적절한 공급의 불가피성으로 인한 공사진행에 어려움이 있고 이에 즈음하여 대체 재료의 확보는 중요한 관심사라는 이야기를 종종 들어 왔다. 이와 같은 관점에서 제강 슬래그를 연약지반 처리시 복토겸 Sand Mat 대체 재료로서의 사용성 가능 여부 즉, 투수성에 국한하여 기초 연구를 시도한 것이다. 본 연구에서는 슬래그가 사용될 지역의 특수성을 고려해 해수와 담수에 사용될 경우의 슬래그의 투수계수 특히, 시간경과에 따른 투수계수의 변화에 많은 관심을 갖고 샌드매트 대체 재료로서의 이용 가능한가를 실내시험과 현장시험을 통해 파악하였다.

II. 각국의 재활용 현황

국내에서는 슬래그 기층 및 보조기층 설계 지침서(1982)가 제정되고 고로 슬래그의 재활용은 활발한데 비하여 제강 슬래그는 철광석 회수에 국한될 뿐 대부분 매립재료로 활용되고 있고 90년 후반부터 연약지반 개량에 필요한 선행재하공법과 복토 재료겸 Sand Mat(즉 S/M로 약칭) 대체재료로서의 활용을 시도하고 있는 추세이다. 각국의 재활용 현황은 다음의 Table 1과 같다.

Table 1 The worldwide products and usage of converter slag (unit : t)

Nations	Crude steel (A)	Products (B)	Slag usage					B/A (kg/t)	C/B (%)
			total(C)	Road	Fertilizer	Reuse	Other		
France	-	-	2,235	-	2,235	-	-	-	-
Belgium	13,424	2,402	2,052	10	1,827	215	-	179	85
Soviet union	-	24,000	10,160	8,500	560	1,100	-	-	42
America	-	-	7,711	6,940	-	-	771	-	-
Australia	7,953	1,433	1,433	390	-	270	773	180	100
Japan	111,000	14,760	14,760	1,390	320	2,800	9,330	132	100

Table 2 Products and usage of converter slag in Korea (unit : t)

Classifications		1994		1995		1996	
		P. Hang	K. Yang	P. Hang	K. Yang	P. Hang	K. Yang
Products	Furnace	1,504	1,800	1,645	1,857	1,803	2,060
	Converter	87	-	84	-	80	-
	Total	1,591	1,800	1,729	1,857	1,883	2,060
Recycling	Reuse	437	536	458	488	371	948
	Cement	541	-	514	-	496	-
	Civil	-	-	-	-	915	-
Total		1,021	571	1,039	506	1,789	695
Reclamation		570	1,229	690	1,351	94	1,365

Ⅲ. 시험재료의 특성

1. 화학적 및 물리적 성질

제강슬래그의 성분 중 석회는 실리케이트(silicate) 상, 베스타이트(wüstite) 상 등으로 구성되어 있고 일부는 미용해 상태의 Mg, Mn, Fe 등을 포함한 라임(lime) 상(일명 유리석회를 의미)으로 되어 있다. 여러 가지 화학적 구성성분을 파악하기 위

해 EDXA 분석(Electron Dispersed X-ray Analysis)을 의뢰하여 분석한 결과 Ca, Si는 각각 40.63%, 7.0%이고 에이징 처리 후에는 33.22%, 4.37%로 감소한 경향을 보이고 해사의 경우 Si는 44.22%로 슬래그에 비해 다소 크게 나타났다. 이를 종합한 화학적 성분 결과는 Table 3과 같다. 특히, 이들 성분 중 Ca는 물과 반응하여 팽창 가능성이 있다고 보고 시험도중 많은 관심을 가져야

Table 3 Chemical component of converter slag (EDXA)

(unit : %)

Tape Elements	Converter slag		Land sand		After aging slag	
	W. percent	E. percent	W. percent	E. percent	W. percent	E. percent
O	45.79	66.79	43.44	58.20	43.57	55.53
Na	-	-	0.57	0.53	-	-
Mg	0.84	0.8	1.56	1.37	0.78	0.66
Al	0.81	0.7	3.10	2.46	0.67	0.51
Si	7.00	5.82	44.22	33.75	4.37	3.17
S	0.63	0.46	-	-	0.94	0.6
Cl	-	-	1.99	1.21	-	-
K	0.35	0.21	3.17	1.74	-	-
Ca	40.63	23.65	-	-	33.22	16.90
Ti	0.73	0.36	-	-	-	-
Mn	0.35	0.15	-	-	0.43	0.16
Fe	1.91	0.8	1.95	0.75	3.27	1.20

Table 4 Physical properties of converter slag

Types	Gs	w _n (%)	L _i (%)	#200 passing (%)	C _u	C _g	USCS
Test	3.22	3.69	16	3 ~ 7	14	0.8 ~ 1.0	SW, SP

Table 5 The kinds of converter slag used in test

Sorts		A sample	B sample
Test items	9.60 mm	99	96
	6.30 mm	94	82
	4.75 mm	91	65
	2.36 mm	65	33
	425 μm	30	2
	75 μm	7	0
w (%)	3	2.3	
γ _d (t/m ³)	1.92	1.91	
SP (%)	4.5	3.2	
e ₀	0.72	0.72	

```

graph TD
    SlagA[Slag A] --> FW[Fresh Water]
    SlagA --> SW[Sea Water]
    SlagA --> SaltW[Salt Water]
    FW --> AgingSlag[Aging Slag]
    SW --> AgingSlag
    SaltW --> AgingSlag
    
```

Ref) Flowchart of permeability test in laboratory

할 인자로 판단하였다. 왜냐하면 해사에는 Ca가 전혀 검출되지 않기 때문이다.

본 연구에 사용된 입경 10 mm 미만인 제강 슬래그의 물리적 성질은 Table 4와 같고 그리고 Table 5은 특히, 투수성에 영향을 주는 #200체 통과량 유무와 제안된 샌드매트의 시방규정에 의거하여 입경별 A시료와 B시료로 구분하여 시험에 이용하였다.

2. 국내의 Sand Mat 시방규정

현재까지 국내외에서 연약지반 처리시 사용되고 시방화된 Sand Mat(즉 S/M)의 입경별 범위를 Table 6에 나타내었다. 이 표에서 특히, #200체 통과량이 중요한자로 평가된다. 또한 제강 슬래그, 해사 그리고 육사(land sand)의 입도시험 결과와

슬래그 A, B시료의 입도시험 결과와 기재안된 JIS와 ASTM의 규정과 함께 Fig 1에 나타내었다. 입도시험에 사용되는 제강 슬래그는 200번체 통과율이 2~7%이고 유효입경 D_{10} 은 0.1~0.15 mm이고 그리고 D_{60} 은 1.5~2 mm이며 균등계수 평균값 Cu는 14, 곡률계수 Cg는 0.8~1.0의 값을 갖는다. 그림을 상세히 살펴보면 ①과 ②는 ASTM의 시방규정으로 ①은 샌드매트의 상한선이고 ②는 하한선의 입도곡선으로 규정되어 있는데 슬래그 B와 에이징 처리한 B시료의 입도 곡선과 좋은 대응성을 보이며 ③과 ④는 JIS의 규정으로서 ③은 역시 상한선이고 ④는 하한선으로서 슬래그 A와 에이징 처리한 A시료와도 역시 좋은 대응성을 보이고 있다. 고로 입도시험 결과만으로 판단할 때 슬래그 입경 제한이 이루어진다면 양호한 투수계수가 측정될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 6 The size range of S/M in Code

U · S FHWA		JSCE		KHWC	
S/M grains	Percent(%)	S/M grains	Percent(%)	S/M grains	Percent(%)
3/8" (9.5mm)	80~100	No.4(4.75mm)	100	No.4(4.75mm)	100
No.8(2.36mm)	5~50	No.8(2.36mm)	98	No.8(2.36mm)	75~100
No.30(0.6mm)	0~20	No.16(1.2mm)	95	No.16(1.2mm)	40~85
No.50(0.3mm)	0~5	No.50(0.3mm)	56	No.50(0.3mm)	2~30
No.200(0.074mm)	5~10	No.100(0.14mm)	30	No.100(0.14mm)	0~7
		No.200(0.074mm)	< 5	No.200(0.074mm)	< 3

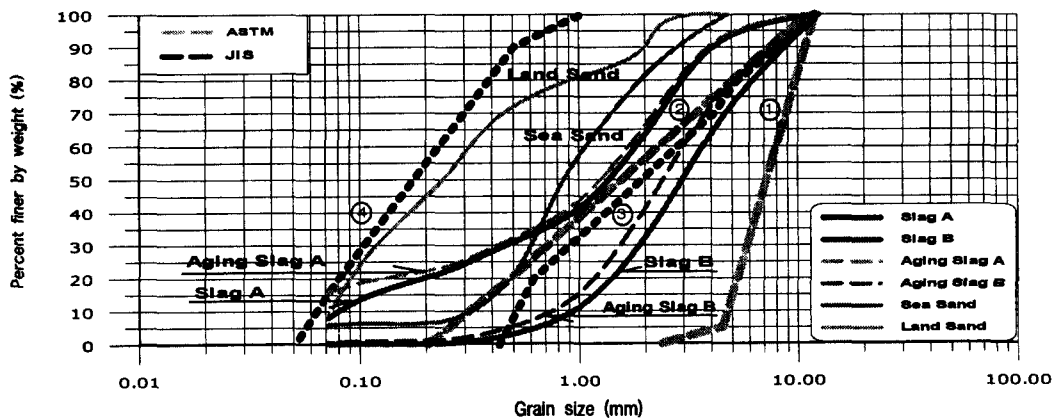


Fig. 1 Gradation of converter slag, sea sand and land sand

IV. 시 험

슬래그 입경을 최대 10 mm로 제한하고 투수용 공시체는 직경 150 mm, 높이 170 mm가 적정할 것으로 판단되어 CBR 몰드를 시험용 공시체로 준비하였다. 또한 측벽을 타고 흐르는 물의 흐름을 방지하기 위하여 수 많은 시행착오를 거친 후 황토(투수계수가 1.0×10^{-7} cm/s 이하)를 이용하여 측벽을 형성해 가면서 시험용 시료를 준비하였다. 또한 공시체의 포화는 상향 또는 하향 침투를 번갈아 반복 실시한 후 메스실린더로 1000cc가 유출구로 나올 때 포화된 것으로 보고 시험을 실시하였다. 또한, 흐름의 한계 입경을 찾기 위해 A시료의 슬래그를 입경에 따라 7단계로 분류하여 투수 시험을 반복 실시하였다. 한편 현장시험은 Packer 시험법을 응용한 주수시험법을 사용(해수와 담수를 사용)하였는데 본 탱크 2000 l에 보조탱크 42 l에 정밀한 유량계를 설치하여 연직방향과 수직방향의 투수계수를 측정하였다.

V. 결과 분석 및 고찰

1. 실내시험 결과

가. 입도결과에 의한 고찰

시험실에서 구한 입도시험 결과를 적용하여 구한 투수계수 값은 Table 7과 같다. 이 표를 살펴보면 Terzaghi 식을 제외한 NAVFAC, Creager의 경험식에 의한 투수계수는 각각 1.28×10^{-2} cm/s

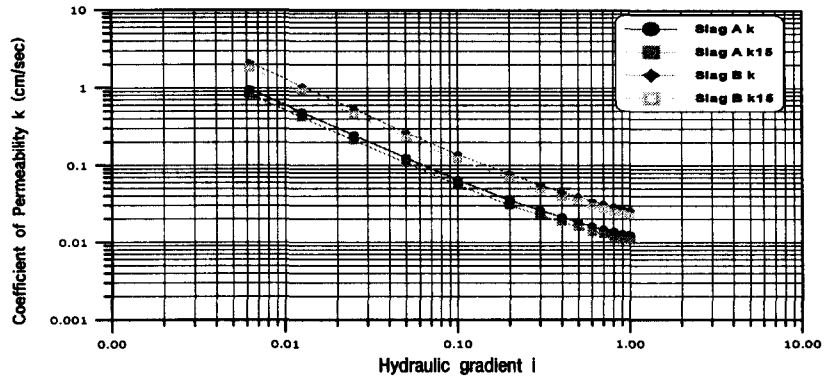
1.4×10^{-2} cm/s이고 Hazen은 Slag A는 9.03×10^{-3} cm/s, slag B는 9.6×10^{-1} cm/s 값을 나타냈다. 결과적으로 기존 경험식은 제한된 입도와 간극비를 중심으로 한 값이기는 하나 재료의 특성이 상이한 제강 슬래그의 개략적인 투수계수를 결정하는데도 적용 가능할 것으로 보인다.

나. 담수, 해수 사용시 투수성 변화

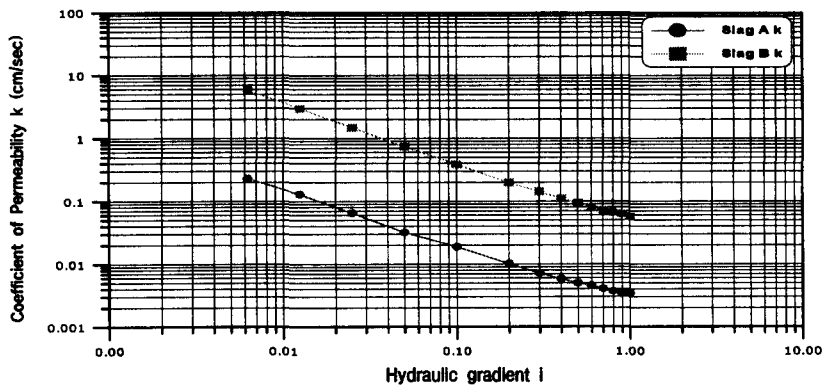
Fig 2는 슬래그의 A시료와 B시료에 대해 담수와 해수를 사용하여 얻은 투수계수 변화를 나타낸 것이다. 담수사용시 동수경사가 0.1일 때 A시료의 투수계수는 각각 4.50×10^{-2} cm/s, 5.99×10^{-2} cm/s의 값을 보이는 반면에 해수 사용시 A시료의 투수계수는 2.0×10^{-2} cm/s, B시료는 3.9×10^{-1} cm/s의 투수성을 나타냈다. 그리고 동수경사(*i*)가 증가함에 따라 투수계수는 감소하며 특히 A시료는 담수보다 해수 사용시 다소 감소하는 경향을 보이지만 B시료는 A시료와는 다소 다른 결과를 보이는데 이는 #200 통과량이 물의 흐름을 방해한 것으로 추정된다. 그리고 Fig 3은 담수를 사용할 때 동수경사와 유속과의 관계로서 동수경사(*i*)가 0.1~0.2의 범위에서 굴곡 되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 물의 점성력에 따라 천이영역에서 난류 영역으로 바뀌는 경사로 현재까지의 시험결과에서 확인되고 있다. Fig 4는 Fig 2와 3의 결과를 동수경사와 유속의 관계를 종합하여 나타낸 것이다. 그림내의 일반 중립질 모래에서의 흐름거동과 같이 직선으로 나타나지 않고 동수경사 0.2이상에서 유속 $v = k' i^{1/n}$ 의 관계가 성립되며 여기서

Table 7 Prediction of permeability based on experimental formula

Researchers	soil types	experienced formula	calculated
Terzaghi	river sand	$k = \frac{C_r}{\mu} \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_{10}^2$	$C_r = 10, n = 42(\%)$ $d_{10} = 0.01, k = 10.706$ cm/s
NAVFAC	sandy gravel	D_{10}, C_u use	$k = 1.28 \times 10^{-2}$ cm/s
Creager	coarse soil	D_{20} use	$k = 1.40 \times 10^{-2}$ cm/s
Hazen	well graded sand	D_{10} use	$k(\text{slag A}) = 9.03 \times 10^{-3}$ cm/s $k(\text{slag B}) = 9.60 \times 10^{-1}$ cm/s

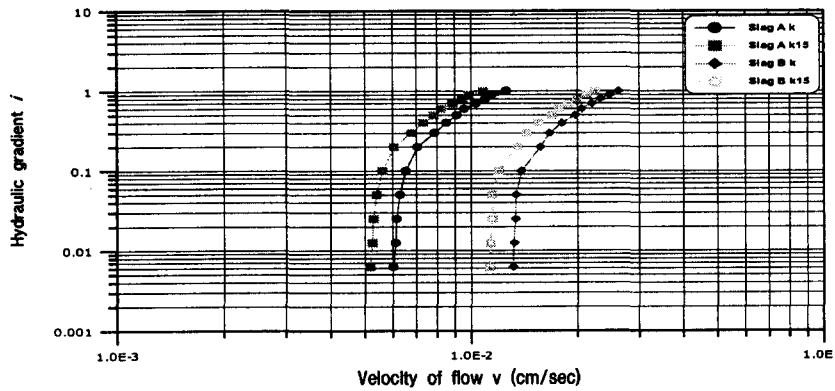


(a) In fresh water

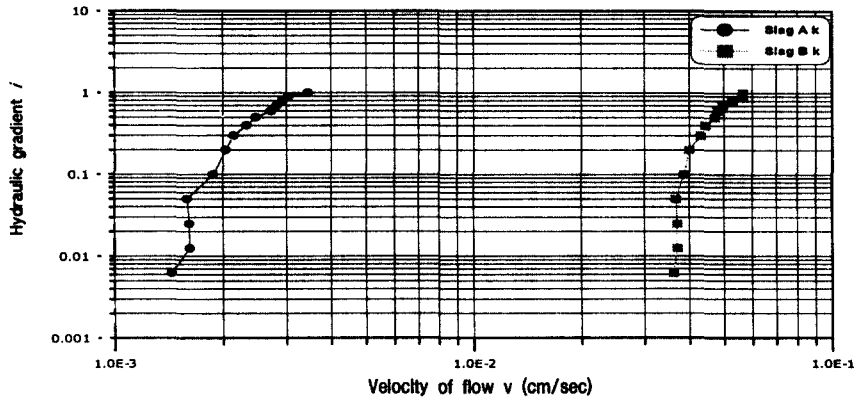


(b) In sea water

Fig. 2 Permeability vs hydraulic gradient



(a) In fresh water



(b) In sea water

Fig. 3 Hydraulic gradient vs flow velocity

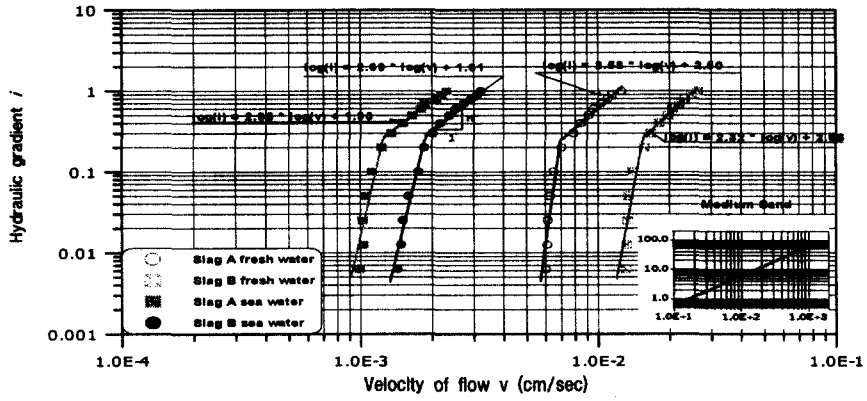


Fig. 4 Comparison of results in fig 2 and 3

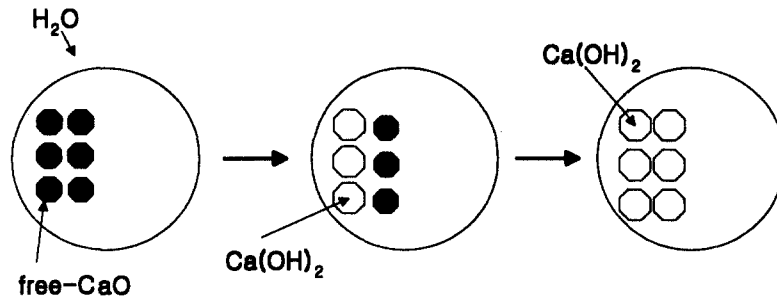


Fig. 5 Process of aging for free CaO

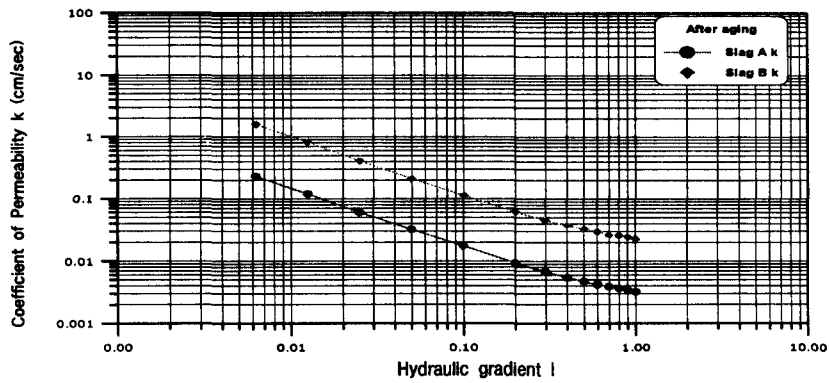


Fig. 6 Permeability vs hydraulic gradient after aging

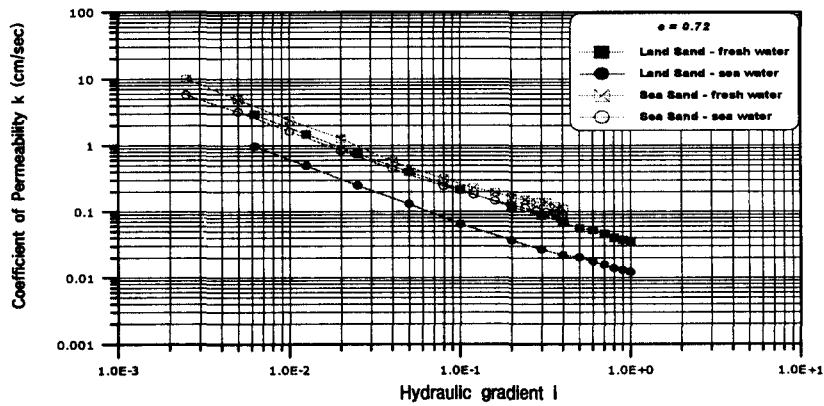


Fig. 7 Comparison of permeability land sand and sea sand

k' 는 흐름에 관계된 형상계수이다. 그리고 이를 양변에 \log 를 취하여 정리하면 $\log(i) = n \times (\log(v) - \log k')$ 의 관계가 성립된다. 그림에서 담수를 사용한 경우 슬래그 A와 B에서 n 은 각각 2.58, 2.32이고 해수를 사용한 경우는 2.96, 2.93이고 $1/n$ 의 값은 0.33~0.43의 범위를 갖는다. 이는 Anadkrishnan, M and Vara-dajulu, G. H(1963)의 중립질 모래, 자갈이나 쇄석 등의 연구결과에 의하면 n 값이 1보다 크면 난류흐름이 지배된다는 보고와 일치한 경향이 있다.

다. 에이징 처리 후 투수성의 고찰

슬래그 표면의 유리석회는 물 (H_2O)과 반응하여 제강 슬래그 입자에 미세 균열을 발생시키고

미세 균열을 통해 물이 침투하여 재차 $Ca(OH)_2$ 로 되는데 그 분화되는 과정을 Fig 5에 나타낸다. Fig 6은 에이징 처리 후 해수 사용시의 투수계수와 동수경사의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 해수 사용시도 A시료는 1.76×10^{-2} cm/s, B시료는 1.12×10^{-1} cm/s로 변화하였다. 이것은 에이징 처리 후 흐름을 방해하는 유리칼슘이 물과 반응할 때 수산화 칼슘으로 반응이 촉진되어 나타난 것으로 판단된다.

라. 일반 육사와 해사 그리고 Slag 투수성의 비교

Fig 7은 육사와 해사의 투수성을 상호 비교한 것이다. 해사의 경우, 담수와 해수에 대하여 차이가 나타나지 않으며 동수경사 0.1일 때 투수계수

실내 및 현장시험에 의한 제강 슬래그의 투수성 고찰

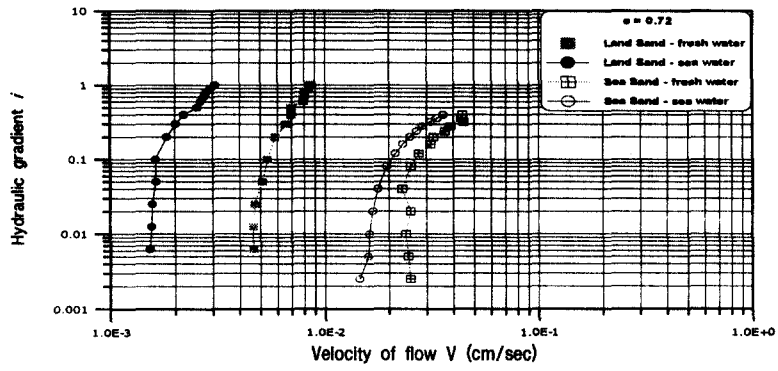
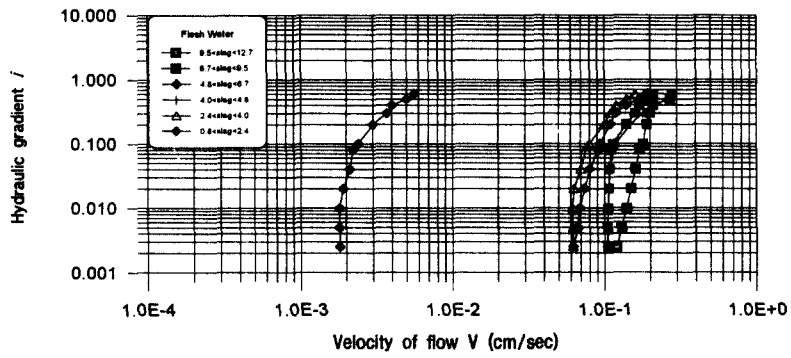
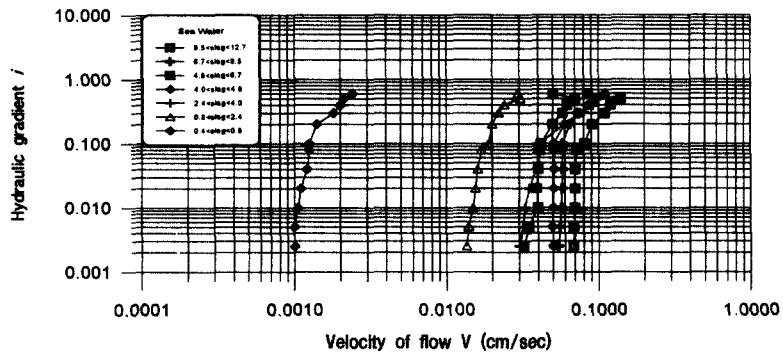


Fig. 8 Velocity vs hydraulic gradient land sand and sea sand



(a) In fresh water



(b) In sea water

Fig. 9 Hydraulic gradient vs flow velocity based on gradation using fresh water, sea water and converter slag

Table 8 Comparison of permeability for sea sand, land sand and converter slag

(unit : cm/s)

Materials	Sea Water		Fresh water	
	In-situ	After aging	In-situ	After aging
Slag A	1.88×10^{-2}	1.76×10^{-2}	6.52×10^{-2}	2.42×10^{-2}
Slag B	3.86×10^{-1}	1.12×10^{-1}	5.99×10^{-1}	1.39×10^{-1}
Land sand	6.48×10^{-2}	-	2.40×10^{-1}	-
Sea sand	2.3×10^{-1}	-	2.43×10^{-1}	-

는 2.43×10^{-1} cm/s의 값을 가지고 반면에 육사의 경우에는 다소 차이를 나타냈다. 육사의 경우를 해수 사용시, A시료의 투수계수와 비교할 때 동일한 값을 보이고 다만, B시료와는 차이를 나타낸다. 그러나 입도를 제한한 B시료의 투수계수는 해사의 투수계수와 유사함을 보였다(Table 9).

Fig 9는 육사와 해사의 유속과 동수경사의 관계를 상호 비교한 것이고 Table 8은 해사와 육사 그리고 제강슬래그의 동수경사가 0.1에 대한 투수계수의 시험결과를 요약한 것이다. 제강슬래그는 담수를 사용할 경우가 해수를 사용할 경우보다 투수성이 양호하고 자연상태에 존재한 경우의 시료는 수화반응이 촉진되어 에이징 처리 후에는 투수성에서 큰 차이를 나타내지 않았다. 그리고 입도를 제한한 B시료가 A시료보다 투수성이 크게 나타났으며 육사보다 입경이 큰 해사가 해수 사용시 상대적으로 투수성이 좋았다. 특히 B시료는 해사의 그것과 유사한 투수성을 보였다.

마. 동수경사와 유속의 관계

Fig 9(a, b)은 담수와 해수 사용시 입경별 동수경사와 유속과의 관계를 나타낸 것인데 투수시험시 동수경사(수두차 h)를 작은 값부터 변화시켜 얻은 결과이다. 입경별 시험결과를 유심히 관찰해 보면 i 가 0.1을 전후로 굴곡되는 점을 확인할 수 있다. 이 굴절점보다 작은 경사의 범위에서는 직선 경사가 이론적으로 1이 되어야 하나 12이상의 값을 나타내며 슬래그의 투수시험시 동수경사가 변함에 따라 유속은 크게 변화하지 않음을 알 수 있으며 동수경사가 작은 부분에서는 i 가 0.1에 가까울 때까지 마찰저항이 크게 발생하는 것으로 생

각된다. 특히 제강 슬래그의 공극 자체는 매우 작고 서로 불규칙하게 연결되어 있으며 보습성이 다소 있으므로(즉 CaO 때문) 일정시간 동안 흐르지 않고(그림에서 ◆는 예외) 일정 수두차가 형성되면 동수경사와 유속의 관계에서 비례관계가 성립된 것 같다. 따라서 대부분의 슬래그내의 물의 흐름은 전술한 Fig 9의 경우에서처럼 i 가 0.1이하인 범위에 있어 흐름은 층류에서 난류로 바뀌는 천이 영역으로 추정되며 동수경사 i 가 미세하게 변화하는 부분에서는 Darcy의 법칙이 성립될 것으로 추정했지만 절곡점(즉 $i > 0.1$)보다 큰 경사의 범위에 있어서는 직선 경사가 1보다 크므로 슬래그 속의 물의 흐름은 난류상태가 되어 이미 Darcy 법칙은 성립되지 않는다는 것을 시사하고 있는 것으로 이해된다. 즉 제강 슬래그의 흐름은 작은 동수경사에 있어 층류에서 난류영역으로 이동하기 때문에 층류와 난류 양면에서 고찰해 갈 필요가 있다고 생각한다.

바. 실내시험에 의한 시간경과에 따른 투수성 평가
담수와 해수를 이용하고 A시료와 B시료를 일정한 시간 간격으로 시험한 결과를 각각 Fig 10과 Fig 11에 나타냈다. 시험개시 후 시간이 경과(180일 까지)되면서 투수계수의 감소하는 경향이 둔화되고 그 후 일정하게 수렴해 가는 경향을 볼 수 있다. 특히, 담수 사용시 A시료는 k 값이 $1/10$ (6.52×10^{-2} cm/s에서 1.35×10^{-2} cm/s)로 감소하고 B시료는 그 보다 작은 변화를 보이는 반면에 해수 사용시 A 시료 투수계수(k)값이 $1/10$ (즉 1.88×10^{-2} cm/s에서 1.83×10^{-3} cm/s)로 감소하고 B 시료도 3.86×10^{-1} cm/s에서 2.72×10^{-2}

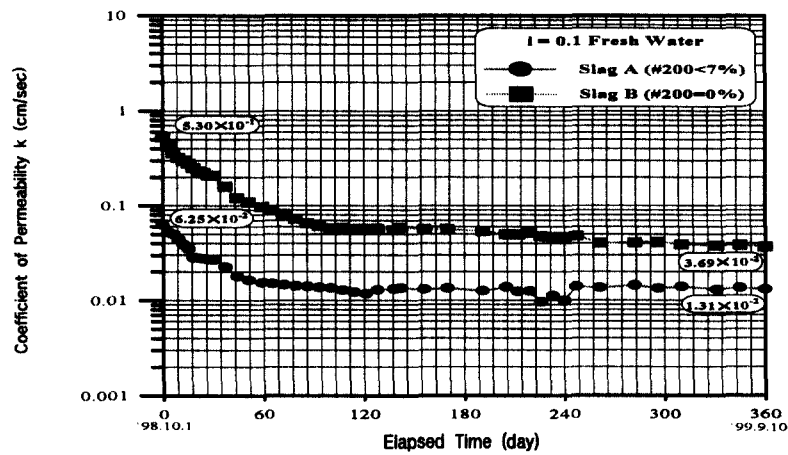


Fig. 10 Change of permeability with elapsed time in fresh water

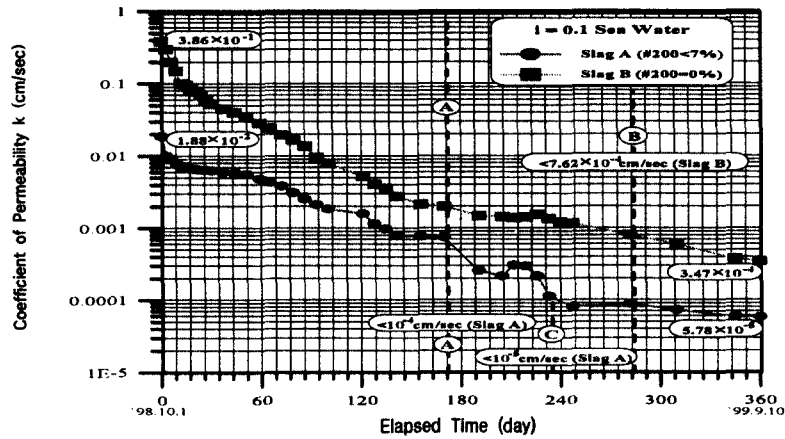


Fig. 11 Change of permeability with elapsed time in sea water

cm/s로 감소하는 경향이 확인되고 있다.

2. 현장시험 결과

가. 현장시험에 의한 시간경과에 따른 투수성 평가
Table 9은 지금까지 발표된 자연토 또는 자연 지반에서의 토질 종류에 따른 k 값과 투수성 여부를 판단하는 기준을 제안하고 있어(Terzaghi and Peck, 1968) 본 연구 결과와 대비하여 귀중한 자료로 이용 할만한 가치가 있다고 생각된다. Table 10은 Casagrande와 Fadum(1940) 등이 제안한 것

인데 k 값에 따른 투수특성과 배수특성 등을 판단 자료로 활용하기 위해 나타낸 것이다. 본 시험결과와도 대비해 불만한 가치가 있다고 판단되어 (Power, 1992) 이의 내용과의 연관성을 후술하기로 한다.

또한 본 연구의 현장투수시험 결과(Table 11, 360일 전 슬래그 포설 초기에 현장 투수성을 평가 하여 나타낸 것임. 이문수, 1999)에서도 해수와 담수에 상관없이 시험오차를 감안하더라도 $\alpha \times 10^{-2}$ cm/s 전후의 값을 보여 투수성이 양호하거나 우

Table 9 Judgement of permeability

Degree of permeability	k (cm/s)	Soils type
High	$> 1 \times 10^{-1}$	Medium and coarse gravel
Medium	$> 1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-3}$	Fine gravel: fine sand
Low	$< 1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5}$	Silty sand : loose silt
Very low	$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7}$	Dense silt : clayey silt, clay
Impervious	$< 1 \times 10^{-7}$	Homogeneous clays

Table 10 Judgement of drainage

k (cm/s)	$10^{-2} \sim 10^{-4}$	$< 10^{-2} \sim 10^{-4}$	$< 10^{-7}$
Drainage property	good drainage	poor drainage	impervious
Application in earth dams and dikes	pervious	impervious	

Table 11 Comparison of in-situ permeability using fresh water and sea water

Hole No.	Fresh water-once		Fresh water-twice		Mean k_{15}	Sea water		Mean k_{15}
	k_h	k_{h15}	k_h	k_{h15}		k_h	k_{h15}	
1	1.31×10^{-1}	1.11×10^{-1}	3.23×10^{-1}	2.59×10^{-1}	2.27×10^{-1}	2.83×10^{-1}	2.02×10^{-1}	2.46×10^{-1}
2	1.03×10^{-0}	8.75×10^{-1}	1.03×10^{-0}	8.27×10^{-1}	1.03×10^{-0}	1.07×10^{-0}	7.6×10^{-1}	1.04×10^{-0}
3	9.75×10^{-1}	8.28×10^{-1}	1.41×10^{-1}	1.13×10^{-1}	1.19×10^{-1}	8.14×10^{-2}	5.80×10^{-2}	1.06×10^{-1}

수하며 게다가 배수관점에서도 우수(Well drainage)한 것으로 평가되었다.

나. 360일 후 현장의 투수시험 결과

360일 전 지반조건은 대략 동일하지만 다만 Surcharge로 인한 H만 증가한 상태인 지층에 Casing (ϕ 50mm)를 매입(preboring 실시 후)하고 지반의 교란의 영향을 최소화하기 위하여 매입 후 1주일 후에 해수와 담수를 번갈아 가며 현장 투수성을 평가하였다. 물론 시험방법과 접근방법에 따라 다소 의견의 차이는 있을 수 있지만 그 결과는 평균적으로 담수 사용시 수평 k 값은 1.19×10^{-2} cm/s 이고 연직 k 은 8.90×10^{-3} cm/s이며 해수 사용시 수평 k 값은 1.04×10^{-2} cm/s이고 연직 k 값은 4.75×10^{-3} cm/s이다. 360일 후 동일한 지점에서 측정된 결과 연직은 6.83×10^{-3} cm/s, 수평은 1.12×10^{-2} cm/s이었다. 물론 이러한 k 값은 측정시

의 온도에 따라 약간의 차이가 있지만 해수나 담수사용에 관계없이 평균적으로 볼 때 수평 $k = 1.12 \times 10^{-2}$ cm/s이고, 연직 $k = 6.83 \times 10^{-3}$ cm/s로 평가되었다. 전술한 Table 10, 11의 연구결과와 대비해 볼 때 투수성은 우수 내지 보통이며, 배수 특성은 양호한 것으로 평가할 수 있다. 고로 현행의 S/M(Sand mat) k 값이 10^{-3} cm/s이상으로 규정하고 있는 값과 유사한 값을 보여 배수나 투수성에는 문제가 없는 것으로 평가할 수 있다.

VI. 결 론

본 연구는 제강 슬래그를 대상으로 해수와 담수를 사용하여 실내시험과 현장시험을 실시하고 시간 경과에 따른 투수계수의 변화를 파악하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

가. 실내시험에 의한 고찰

1) 담수 사용시, A시료인 슬래그의 동수경사 $i=0.1$ 에서 투수계수(k_{15})는 4.50×10^{-2} cm/s이고 B시료의 투수계수(k_{15})는 1.20×10^{-1} cm/s로 측정되었다. 반면에 해수 사용시, A시료의 투수계수(k_{15})는 1.88×10^{-2} cm/s이고 B시료의 투수계수(k_{15})는 3.86×10^{-1} cm/s로 측정되었다. 현행 샌드 매트용으로 사용되는 해사의 투수계수는 2.3×10^{-1} cm/s와 유사한 값을 보였다.

2) 해수에 접할 경우에 침투유속과 동수경사의 관계에서 층류에서 난류로 변하는 사실이 확인되었는데 10 mm미만의 입경에서는 동수경사가 0.1~0.2에서 난류흐름으로 전환되는 경향을 보였다.

3) 해수를 사용하여 360일 동안의 시간경과에 따른 투수계수의 변화를 검토한 결과, A시료의 투수계수는 1.88×10^{-2} cm/s에서 5.78×10^{-5} cm/s로 감소한 반면에 B시료의 투수계수는 3.86×10^{-1} cm/s에서 3.74×10^{-4} cm/s로 감소한 것으로 나타나는데 이는 유리석회(CaO)가 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 로 전환되어 하부 다공석판에 퇴적된 것으로 판명되었다.

4) 담수사용시 360일 시간경과에 따른 투수계수는 A시료의 경우 6.25×10^{-1} cm/s에서 1.31×10^{-2} cm/s로 감소하고 B시료는 5.30×10^{-1} cm/s에서 3.69×10^{-2} cm/s로 감소하는데 해수보다 담수쪽이 작게 나타난다.

나. 현장시험에 의한 고찰

1) 40mm이하 포설지역에서 담수사용시 투수계수 k_{15} 는 $1.09 \times 10^0 \sim 9.75 \times 10^{-2}$ cm/s이고 해수 사용시 투수계수는 $1.04 \times 10^0 \sim 8.14 \times 10^{-2}$ cm/s를 보였다.

2) 360일 후에는 해수와 담수에 상관없이 수평 k 는 1.53×10^{-2} cm/s~ 2.61×10^{-3} cm/s로 측정되었으며 평균 수평 k 값은 1.12×10^{-2} cm/s이고 평균 연직 k 값은 6.16×10^{-3} cm/s로 측정되었다.

참 고 문 헌

1. 대한토목학회(1985), "제강슬래그를 사용한 아스팔트 포장 설계·시공지침", pp.53~66
2. 이문수, 오재화, 이광찬, 허준희(1998), "제강슬래그의 투수성 연구", 한국농공학회 학술발표회 논문집, pp.414~418
3. 이광찬, 이문수(1998), "재활용을 위한 전로슬래그의 투수성 고찰(1)", 한국지반공학회 논문집, Vol. 15, No. 4, pp.69-83
4. 이문수(1999), "제강슬래그의 투수성에 관한 학술연구 최종보고서", 한국지반공학회, pp.13~73
5. 原田韶二(1997), "일본에 있어서의 제강슬래그 활용의 현황", 한국자원사이클링학회 강연집, pp.63~82
6. 松尾新一郎·木暮敬二(1970), "碎石の透水性に関する實驗", 土と基礎, Vol.18, No.2, pp.5~10.
7. Anadakrishnan, M. and Varadarajulu, G.H. (1963), "Laminar and turbulent flow of water through sand", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol.98, No.1, pp.311~325
8. Lane, K.S.(1964), "Laminar and turbulent flow of water through sand", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.90, pp.171~176
9. Allan, F.R. and John, A.C.(1979), Ground-water, Prentice Hall, pp.69~76
10. J. Patrick, Powers(1992), "Construction Dewatering" - New Methods and Applications - Second Edition, Wiley Series of Practical Construction Guides, pp. 38~64