

제강슬래그내의 흐름에서 층류로부터 난류의 전환

Conversion of Laminar Flow into Turbulent in Converter Slag

심 주 엽*(전남대) · 백 원 진(전남대) · 이 문 수(전남대) · 오 재 화(조선대)
Shim, Joo Yeop · Baek, Won Jin · Lee, Moon Soo · Oh, Jae Hwa

Abstract

An attention has been drawn to converter slag which in use of it for improvement of soft ground. It has never considered about it. Associated with above fact, it should be carefully examined that the permeability with time delayed of converter slag, the chemical characteristics of converter slag and conversion of laminar flow in to turbulent flow in converter slag and the use of it be scrutinized.

I. 서론

일반적으로 골재는 하천, 산림, 공유수면, 기타 지상, 지하 등에 부존 되어 있는 쇄석용 암석, 모래, 자갈로써 건설공사의 기초재료로 사용되는 것으로 정의 할 수 있다. 그러나 현재 이들 골재의 고갈과 환경보존에 대한 의식이 강화되면서 석산 개발의 어려움으로 양질의 천연골재를 얻기가 점차 어렵게 되어가고 있는 게 현실이다. 또한 이러한 골재의 실제 가능 채취량은 민원, 토지이용제한, 다른 권리의 설정 및 사방사업, 하천정비사업 등에 의하여 매년 급격한 감소 추세를 보이고 있어 대체재료의 개발이 지반공학도들의 시급한 과제라고 할 수 있다.

제강슬래그는 철강의 생산과정에 생산되는 부산물로서 전로 제강슬래그 또는 제강슬래그로 불린다. 제강슬래그만의 고유 특성은 일반적으로 염기도가 높고 비중이 큰 철, 망간 등의 유기 금속을 함유하고 있기 때문에 여러 슬래그 중에서 그 자체의 강도가 높다는 연구보고가 발표된 바 있다. 그러나 제강슬래그의 공학적인 문제점은 공기에 노출되면 풍화에 의하여 붕괴가 잘됨으로서 건설재료로는 제한적으로 이용되어 왔다. 최근 몇몇 학자들에 의한 제강슬래그의 환경적, 공학적인 접근이 시도되고 있으며 또한 연구결과에 의해 고품질 골재와 매우 흡사한 공학적 특성이 확인되고 있으며, 특히 공학적인 재료로서 그 유용성이 입증되면서 도로용 골재, 시멘트 원료, 성토용 및 구조물 뒷채움 재료로 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 제강슬래그를 대상으로 해수와 담수가 사용될 경우 시간경과에 따른 투수성이 변화를 관찰하고 유리석회의 감소가 둔화될 것으로 예상되는 장시간 후의 입경의 변화와 투수시 유수 흐름의 층류와 난류영역을 규명하고, 화학성분분석을 통해 투수계수의 변화의 원인을 검토함으로써 이 재료의 연직배수공법을 위한 샌드매트의 대체 재료로서의 유용성 여부를 파악하여, 자원대체를 유도하는데 연구의 목적이 있다.

II. 실험 및 방법

2.1 실내시험 및 방법

일본의 락판댐 재료에 대한 투수시험 장치를 모델로 하였으며, ASTM에서 허용된 투수된부 내경은 최대입경의 1/12~1/8이하로 제한하고 있어 슬래그 입경을 최대 10mm로 제한할 경우 투수용 공시체는 D=15cm, H=17cm가 적절할 것으로 판단하여 CBR 다짐물드를 개조한 표준 공시체를 제작하였다. 원활한 시험을 위하여 0.074mm필터를 사용해서 시료의 미분으로 인해 투수성이 저하되는 것을 방지하였고 투수시험시 공시체의 측벽과 접하는 입경 사이로 측벽을 타고 흐르는 물의 흐름을 방지하기 위해 불투수재료인 황토($k=1.0 \times 10^{-7}$ cm/sec이하)를 사용하였다. 동수경사의 미세조정을 위해 ELE 표준 정수위 투수시험기를 개량한 대형공시체(200×400mm)를 제작해 투수시험을 시행하였다.

- 실내 투수계수 계산 : $k_T = \frac{L}{h} \cdot \frac{Q}{A(t_2 - t_1)}$
- 실내 투수계수 보정 : $k_{15} = k_T \cdot \frac{\eta_T}{\eta_{15}}$

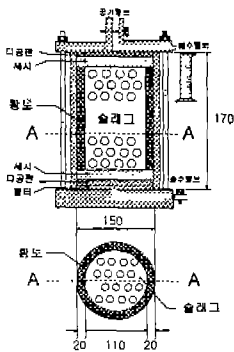


그림-1 시험공시체 평면도와 시료성형

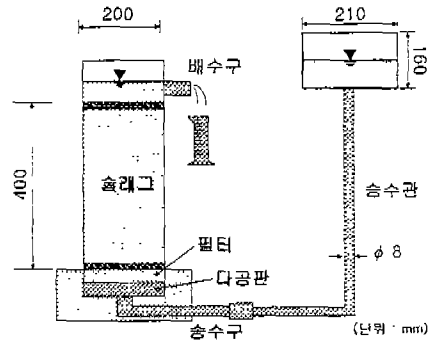


그림-2 대형공시체를 이용한 정수위 투수시험 장치

2.2 현장투수시험 및 방법

현장시험은 대부분의 지반에 사용되고 있는 Packer시험을 응용한 주수시험법을 사용하였다. 그림-3은 실제 포설된 현장투수시험 모형도인데 가로 10m, 세로 40m이며 포설두께는 준설점 토위에 토목섬유(G/T = 40t/m)가 부설된 위에 3m가량 슬래그가 포설되고 대조적으로 한쪽은 모래부설을, 또 다른 한쪽은 슬래그가 부설되고 pack drain이 타설되어 있는 지반에서 투수시험을 하였다.

- 현장 투수계수 계산 : $k = \frac{Q}{2\pi LH} \cdot \log_e \left(\frac{L}{r} \right)$ ($L \geq 10r$)
- $k = \frac{Q}{2\pi LH} \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{L}{2r} \right)$ ($10r \geq L \geq r$)

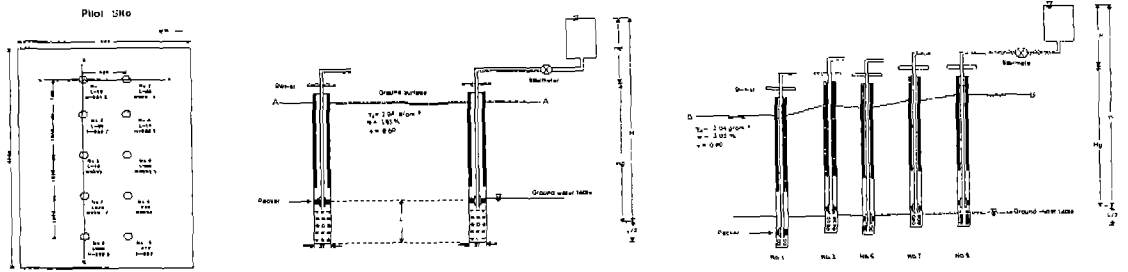


그림-3 현장투수시험 위치도와 주수시험기 단면도

2. 3 화학적실험 및 방법

제강슬래그의 화학적 구성성분을 파악하기 위해 EDX(Electron Dispersed X-ray)분석을 실시하였는데 X-ray선을 시료에 투과시켜서 나온 스펙트럼 파장을 정성분석한 후 중량백분율과 원소 백분율을 구하고 에이징 처리한 슬래그와 샌드매트로 사용되고 있는 해사를 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

3. 1 실내투수시험

본 시험에 사용된 슬래그는 표 1에 나타냈다. 표 2는 시험 슬래그에 대한 해수와 담수를 이용한 투수계수와 에이징처리를 한 후 투수계수값을 육사와 해사의 값을 비교한 것이다.

표 1 본 시험에 사용된 슬래그

시험항목		종 류	
		A시료	B시료
통	9.60mm	99	96
과	6.30mm	94	82
백	4.75mm	91	65
분	2.36mm	65	33
울	425 μm	30	2
(%)	75 μm	7	0
함수비		3	2.3
최대건조중량(t/m ³)		1.92	1.91
팽창비(%)		4.5	3.2
간극비		0.72	0.72

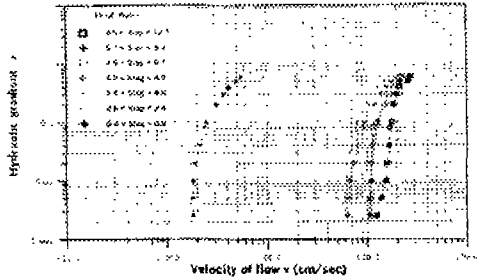
표 2 해사, 육사 그리고 슬래그의 투수계수 비교 (단위 cm/sec)

재료	용도별	해수 사용시		담수 사용시	
		자연상태	에이징 처리후	자연상태	에이징 처리후
제강슬래그 A	자연상태	1.88×10^{-2}	1.76×10^{-2}	6.52×10^{-2}	2.42×10^{-2}
	에이징 처리후	1.76×10^{-2}	1.12×10^{-1}	1.12×10^{-1}	1.39×10^{-1}
제강슬래그 B	자연상태	3.86×10^{-1}	1.12×10^{-1}	5.99×10^{-1}	1.39×10^{-1}
	에이징 처리후	1.12×10^{-1}	1.12×10^{-1}	1.12×10^{-1}	1.39×10^{-1}
육사	자연상태	6.48×10^{-2}	-	2.40×10^{-1}	-
해사	자연상태	2.3×10^{-1}	-	2.43×10^{-1}	-

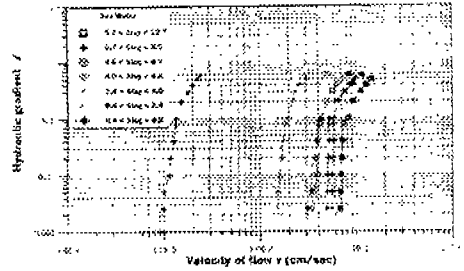
다음 그림-4는 담수와 해수 사용시 입경별 동수경사 i 와 유속 v 와의 관계를 나타낸 것이다. 동수경사가 0.1을 전후로 굴곡되는 경향을 보이고, 동수경사가 변함에 따라 유속은 크게 변하지 않음을 알 수 있으며, CaO성분 때문에 보습성을 지님으로서 일정시간 동안 흐르지 않고 일정 수두차가 형성되면 동수경사와 유속은 비례관계가 성립된다. 따라서 대부분의 슬래그내의 물의 흐름은 동수경사가 0.1이하인 범위에서 흐름이 종류에서 난류로 바뀌는 천이영역으로 추정되며 이 경우 Darcy법칙은 성립될 것으로 추정되지만, 동수경사가 0.1보다 큰 지점에 있어서

는 물의 흐름이 난류상대가 되어 Darcy법칙이 성립되지 않는다는 것을 시사한다.

제강슬래그의 흐름은 작은 동수경사에 있어 층류에서 난류영역으로 이동하기 때문에 층류와 난류 양면에서 고찰해 갈 필요가 있으며 이에 대한 보다 높은 정도를 얻기 위해 시험이 계속 진행중에 있다.



(a) 담수 사용시



(b) 해수 사용시

그림-4 담수, 해수 사용시 동수경사와 유속과의 관계(a, b)

3. 2 현장투수시험

주수시험은 굴착후 투수시험용 튜브를 설치한 후 일주일 간격으로 측정하였으며, 담수와 해수를 번갈아 가며 투수시험을 실시하였다. 측정결과는 표 3에 나타냈는데 담수사용시 투수계수 k_{15} 는 $1.03 \times 10^{-0} \sim 9.75 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 범위를 나타낸다. 특히 해수사용시 투수계수는 담수사용의 보정계수를 이용(이때 실제 해수의 온도는 3.5°C)하여 계산한 결과 $1.07 \times 10^{-0} \sim 8.14 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 를 보여 담수 사용시보다 미소한 차이를 보이고 있다.

표 3 담수와 해수의 현장투수시험 결과 비교

시험공 번호	담수 - 1회		담수 - 2회		담수평균 k_{15}	해수		평균 k_{h15}
	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^{-1}	8.75×10^{-2}	1.03×10^{-0}	8.27×10^{-2}	1.03×10^{-0}	1.07×10^{-0}	7.6×10^{-1}	1.04×10^{-0}
3	8.83×10^{-1}	7.51×10^{-1}	1.09×10^{-1}	8.76×10^{-1}	9.89×10^{-1}	1.02×10^{-1}	7.29×10^{-1}	1.00×10^{-0}
4	2.97×10^{-1}	2.52×10^{-1}	2.83×10^{-1}	2.27×10^{-1}	2.90×10^{-1}	2.89×10^{-1}	2.05×10^{-1}	2.89×10^{-1}
5	9.75×10^{-2}	8.28×10^{-2}	1.41×10^{-1}	1.13×10^{-1}	1.19×10^{-1}	8.14×10^{-2}	5.80×10^{-2}	1.06×10^{-1}
6	9.66×10^{-1}	8.21×10^{-1}	1.03×10^{-0}	8.24×10^{-1}	9.98×10^{-1}	9.39×10^{-1}	6.89×10^{-1}	9.78×10^{-1}
7	3.59×10^{-1}	3.05×10^{-1}	4.51×10^{-1}	3.62×10^{-1}	4.05×10^{-1}	4.62×10^{-1}	3.28×10^{-1}	4.24×10^{-1}
8	4.67×10^{-1}	3.96×10^{-1}	4.48×10^{-1}	3.59×10^{-1}	4.57×10^{-1}	3.39×10^{-1}	2.41×10^{-1}	4.18×10^{-1}
9	9.00×10^{-1}	7.65×10^{-1}	9.15×10^{-1}	7.33×10^{-1}	9.08×10^{-1}	8.93×10^{-1}	6.36×10^{-1}	9.03×10^{-1}
10	2.94×10^{-1}	2.35×10^{-1}	3.27×10^{-1}	2.62×10^{-1}	3.10×10^{-1}	1.65×10^{-1}	1.18×10^{-1}	2.62×10^{-1}

3. 3 화학적 성질

EDX분석을 실시한 결과 Ca, Si는 40.63%, 7.0%이고 에이징 처리후에는 33.22%, 4.37%로 감소한 것으로 나타났다. 해수는 Si가 44.22%로 크게 나타나고 CaO는 전혀 나타나지 않았다. 이

상의 결과를 종합하여 표 4에 나타내었다. 분광분석법을 통한 제강슬래그의 성분시험결과는 표 5와 같으며 EDX분석결과 유사한 값을 보였다.

표 4 제강슬래그의 화학성분조사 결과(EDXA)

종류 원소	제강슬래그		일반 해사		에이징후 제강슬래그	
	중량 백분율	원소 백분율	중량 백분율	원소 백분율	중량 백분율	원소 백분율
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
Cu	0.41	0.15	-	-	0.27	0.09
In	0.54	0.11	-	-	-	-

표 5 분광분석법(ICPA)을 통한 제강슬래그 성분 분석결과

원소	회석비	Slag 1			Slag 2			Slag 3		
		ppm	중량(%)	SD/RSD	ppm	중량(%)	SD/RSD	ppm	중량(%)	SD/RSD
Mg	500	37.2	1.86	0.263	37	1.85	0.463	47	2.35	0.387
Ca ₃	5000	77	38.5	0.28	78.1	39.05	1.36	74.9	37.45	0.318
P	500	2.92	0.146	0.049	2.9	0.145	0.049	2.91	0.1455	0.021
Fe ₂	500	14.2	0.71	0.038	12.9	0.645	0.097	17.7	0.885	0.114
Si	5000	1.74	0.87	0.052	1.48	0.74	0.076	1.53	0.765	0.214

그리고 투수시험시 물이 시료를 통과한 후와 해수 통과 후 이를 채집하여 건조시킨 후 EDX 분석법으로 성분 분석을 할 경우, 담수가 통과한 경우 Si와 Ca는 6.88%, 11.7%이고 해수 통과 시에는 Si와 Ca는 0.31%, 5.46%로 감소하는데 이들 성분은 물과 반응하여 체적이 팽창하기 때문에 제강슬래그의 팽창 안정성을 지배하는 요인이며 일부는 시간에 따라 침투압에 지배되어 투수성을 저하시킬 것으로 추측된다.

IV. 결론

본 연구에서는 연약지반개량에 대체재료로 이용 가능하다고 판단되는 제강슬래그를 이용하여 해수와 담수에 사용될 경우의 투수계수와 시간경과에 따른 투수계수의 변화를 검토함으로써 샌드매트의 대체 재료로 이용 가능성 여부를 추정하기 위한 시험연구이다. 그간 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 10mm이하의 입경에 대해 투수시험 한 결과 담수 사용시 No.200체 통과 백분율이 7%(A시료)인 슬래그의 투수계수(k_{15})는 6.52×10^{-2} cm/sec이고 No.200체 통과 백분율이 0%(B시료)인 슬래그의 투수계수(k_{15})는 5.99×10^{-1} cm/sec로 측정되었다. 해수 사용시 A시료의 투수계

수(k_{15})는 1.88×10^{-2} cm/sec인 반면 B시료의 투수계수(k_{15})는 3.86×10^{-1} cm/sec으로 측정되어 현장에서 샌드매트용으로 사용되는 해사의 투수계수는 2.3×10^{-1} cm/sec으로 추정되어 A, B 시료의 투수계수는 해사와 유사한 값을 보인다.

2. 해수 사용시 침투유속과 동수경사의 관계에 있어서 종류에서 난류로 변하는 사실이 시험에서 확인되고 있으며, 특히 10mm이하의 입경에서는 동수경사가 0.1~0.2에서 난류흐름으로 전환되는 경향을 보여 목하 연구 중에 있다.
3. 해수를 사용하여 시간 경과에 따른 투수계수의 변화를 검토한 결과, A시료의 투수계수는 1.88×10^{-2} cm/sec에서 1.83×10^{-3} cm/sec로 감소한 반면에 B시료의 투수계수는 3.86×10^{-1} cm/sec에서 2.72×10^{-2} cm/sec로 시험결과에서 다소 차이를 보이고 있는데 이는 유리석회예 의한 간극의 막힘 현상으로 판단되고 있으며 목하 연구 중에 있다.
4. 현장투수시험 결과 담수사용시 투수계수 k_{15} 는 $1.09 \times 10^{-0} \sim 9.75 \times 10^{-2}$ cm/sec를 보였으며, 해수사용시 투수계수는 담수사용의 보정계수를 이용하면(T는 3.5°C) $1.04 \times 10^{-0} \sim 8.14 \times 10^{-2}$ cm/sec를 보여 담수 사용시보다 미소의 차이를 보이고 있다.
5. 본 시험에 사용된 슬래그를 샌드매트의 대체재료로 채택할 경우 투수계수에 영향을 주는 No.200번체 통과량을 제한하거나 시험시공 현장에서 예상되는 다양한 동수경사 변화를 고려하여야 할 것으로 보이며 필요시 이를 확인하기 위한 현장시험을 실시하고 여러 가지 문제점을 극복하기 위해 목하 연구 중에 있다.

참고문헌

1. 대한토목학회: 복합슬래그기층 및 보조기층 설계·시공지침, 1989.
2. (사)국제환경노동문화원 ILE환경연구소: 제철소 철강슬래그 제품의 환경친화성 평가, pp.97~117, 1995.
3. 原田詔二: 일본에 있어서의 제강슬래그활용의 현황, 한국자원리싸이클링학회 강연집, pp.63~82, 1997.
4. 김형석, 한기현: 제강slag 신속 aging 기술, 한국자원리싸이클링학회 강연집, pp.97~106, 1997.
5. 허준희: 제강슬래그 투수성의 실험적 연구, 전남대학교 석사학위 논문, 1999.
6. Anaadakrishan, M. and Varadarajulu, G.H. "Laminar and turbulent flow of water through sand", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol.89, No.2, pp.3~15, 1963.