

산업폐기물인 동슬래그의 배수재로서의 활용에 관한 연구

A Study on the Applicability of Copper Slag as Drainage Material

천병식*

Chun, Byung-Sik

Abstract

Within a country, owing to the restriction of aggregate which have been supplied to construction sites, applicability of byproducts such as the copper slag is expected to be more reasonable. In this study, on the basis of characteristics, grain distribution and environmental stability of copper slag, its engineering application was estimated as the vertical and horizontal drainage material.

As a results of laboratory tests, it was shown that the permeability of the copper slag was similar to that of sands under vertical drainage condition. In addition, the copper slag showed higher critical hydraulic gradient than that of sand under upward vertical flow state. The copper slag has potential safety against piping and it that the copper slag is suitable for drainage and filter material.

Keywords : Copper slag, Grain distribution, Environmental stability, Potential safety, Drainage material

요 지

건설 골재 수급 문제 및 환경에 대한 관심이 높아지면서 국내에서 동슬래그와 같은 각종 산업폐기물의 재활용과 그에 따른 기술개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 본 연구는 동슬래그의 재료특성, 입도분포와 환경적 안정성의 검토를 통하여 동슬래그의 배수재로 적용성을 검토하였다.

실내시험결과를 통하여 일반적으로 쓰여지는 모래보다 우수한 연직배수효과가 있음을 알 수 있었다. 특히 분사현상에 대한 안정성 및 입자유실에 대한 내적안정성을 검토한 결과, 일반적인 사질토에 비해 한계동수경사가 크게 나타나고 내적안정성이 우수하게 평가되었다. 따라서 동슬래그는 지반조건에 따라 배수기능을 충분히 발휘할 수 있으며 내적으로도 안정한 배수재로서 사용이 가능한 것으로 판단된다.

주요어 : 동슬래그, 입도분포, 환경적 안정성, 내적 안정성, 배수재

* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

건설골재의 수급문제 및 환경에 대한 관심이 높아지면서 국내에서 석탄회, 광재, 제강슬래그, 동슬래그 등 각종 산업폐기물의 재활용과 그에 따른 기술개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 동 제련과정에서 발생하는 동슬래그는 연간 70만톤에 이르고 있으며 시멘트제조용 가철제 및 수리 조선소에서 선박의 녹을 제거하는 샌드블라스팅용 등으로 주로 사용되고 있다. 이외에도 벽돌, 경계석, 인터로킹블럭, 적벽돌, 레미콘용 골재 등으로 한정되어 쓰이고 있다. 우리나라에서 생산되는 동슬래그는 조립상태로 생산되며 입도범위가 0.3~5.0mm로 건설공사의 잔골재로 이용할 수 있다. 특히 동슬래그는 모래에 비해 높은 비중이 특징이며 안정된 유리질 상태로 환경적으로도 매우 안정된 재료로써 일본, 독일 등 해외에서는 항만공사, 호안공사 및 해양구조물의 제작 등에 널리 활용되고 있다(한국건설기술연구원, 2000). 또한 국내에서도 콘크리트 골재용으로 사용하기 위한 동슬래그의 품질 제정안을 만든 상태이나 지반공학분야에 대한 적용성 연구는 미흡한 상태이다.

국내에서 양질의 천연골재의 고갈에 따라 골재 수급이 석산골재(부순골재)나 해사(세척사)에 대한 사용 비중이 증가하고 있으나 그 한계성이 점차적으로 나타나고 있어 천연자원의 고갈에 따른 대체 자원으로서 동슬래그와 같은 부산물의 활용 가능성은 높을 것으로 판단된다. 그러나 이러한 부산물의 재활용을 위한 실용화 단계에는 많은 어려움이 따르기 때문에 실질적 활용을 위해서는 충분한 환경적·기술적 자료 및 검토가 뒷받침되어야 하고, 그에 따라 실용화 및 실질적 활용이 결정되어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 실내시험 및 결과분석을 통하여 동슬래그의 배수재로서 적합성과 기술적인 타당성을 파악하고자 한다.

2. 동슬래그의 부산과정

동슬래그는 동 제련 후 남은 철분과 석회석, 규석이 결합하여 생성된 물질을 용융상태에서 고압수에 의해 급냉, 수쇄하여 세립화한 것으로 화학적 조성은 Fe가 약 40%, SiO₂가 30% 정도이며, 약 1~5% 정도의 CaO, 미량의 Cu 등을 포함하고 있다.

국내에서 생산되는 동의 제련공정은 크게 두 가지로 구

분되며 핀란드 Outokumpu사에서 개발된 자용로공정과 일본 Mitsubishi사의 연속동제련공정이 있다.

자용로공정(Outokumpu Flash Smelting Process)은 건조한 정광을 산소부화 공기와 함께 반사로형의 자용로에 분사시켜 황화정광이 산화성 분위기와 급격한 반응을 일으켜 Matte와 Slag로 분리시킨다(그림 1).

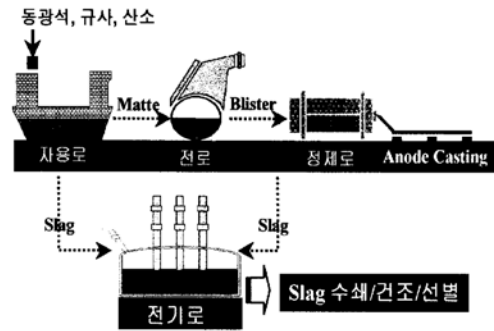


그림 1. 자용로공정

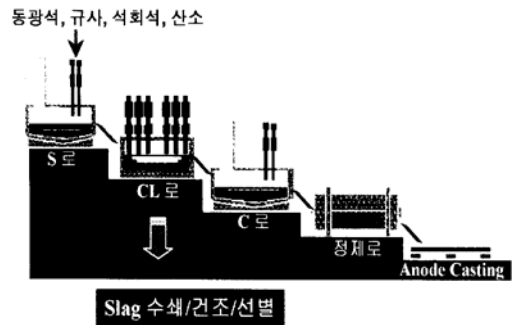


그림 2. 연속동제련공정

연속동제련공정(Mitsubishi Continuous Copper Smelting process)은 건조한 정광과 산소부화 공기를 Top Blow Lance로 투입하는 방식을 적용하며 Launder를 통한 용탕의 연속 이동과 자용로공정에 의해 P-S Converter(전로)를 제거하여 환경문제해결과 간단한 물류이송을 가능하게 하였다(그림 2). 자용로공정과 차이점은 동제련과정중 동광석과 규사 외에 석회석을 투입한다는 점이다(LG-Nikko 동제련(주), 2000).

3. 동슬래그의 환경 영향 평가

3.1 EPT법(Extraction Procedure Toxicity 57 Test)에 의한 결과

미국에서 환경유해성 평가를 위하여 실시하는 EP Toxicity Test(Methods 1310)를 고형화된 폐기물의 잠재 용출성 평가와 유해폐기물의 여부를 판단하기 위하여 실시하였다.

동슬래그를 대상으로 미국의 EPT법에 의한 용출시험 결과, 표 1에서와 같이 규제물질로 규정하고 있는 Pb, Ag, As, Hg, Cd, Cr, Se, Ba 중 Hg, Cd, Cr 등은 전혀 검출이 없었으며, Ag와 Se는 0.03ppm 이하로 거의 검출이 없는 것과 마찬가지로 나타났으며, 나머지 물질도 허용기준에 비하여 매우 낮은 용출을 보이고 있다(한국건설기술연구원, 2000).

3.2 폐기물 공정 시험법에 의한 용출시험

동슬래그의 환경에 유해한 용출특성 평가를 위하여 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 폐기물 공정 시험법에 의한 용출시험이 한국화학시험연구원에 의뢰/분석되었으며, 실험결과는 표 2와 같다. “폐기물 관리법” 시행규칙 제2조에서 정하고 있는 폐기물 분류기준인 표 2의 허용기준에 따라 일반 폐기물과 특정 폐기물로 구분할 수 있다. 표 2의 용출실험결과에 의하면 동슬래그는 Cu가 각각 0.39, 0.68ppm으로 나타났으며 나머지 항목에서는 검출되지 않았다. 따라서 동슬래그는 모든 유해항목에서 기준 이하로 판명되었으며, 환경적으로 안정적인 것으로 나타났다(한국건설기술연구원, 2000).

표 1. 허용기준 및 실측치 : EPT법

규제물질	단위	허용기준 (이하)	동슬래그 (자용로 공법)
Pb	ppm	5.0	0.1
Ag	ppm	5.0	tr.
As	ppm	5.0	0.01
Hg	ppm	0.2	N.D.
Cd	ppm	1.0	N.D.
Cr	ppm	5.0	N.D.
Se	ppm	1.0	tr.
Ba	ppm	100	0.053

※ tr. : 0.03ppm 이하, N.D. : 불검출

표 2. 폐기물 공정 시험법에 의한 용출 시험결과

규제물질	단위	허용 기준	동슬래그	
			연속로	자용로
Pb	ppm	3.0	0.08	0.09
Cu	ppm	3.0	0.39	0.68
As	ppm	1.5	N.D.	N.D.
Hg	ppm	0.005	N.D.	N.D.
Cd	ppm	0.3	tr.	N.D.
Cr	ppm	1.5	N.D.	N.D.
CN	ppm	1.0	N.D.	N.D.
트리클로로에틸렌	ppm		N.D.	N.D.
테트라클로로에틸렌	ppm		N.D.	N.D.
유기인	ppm	1.0	N.D.	N.D.

※ tr. : 0.03ppm 이하, N.D. : 불검출

4. 동슬래그의 공학적 특성 및 수직·수평 배수재로서의 적용성 평가

수직·수평 배수재로서 동슬래그의 적합성을 평가하기 위하여, 각종 기본 특성실험들의 결과를 토대로 물리적·역학적 특성을 분석하였다.

4.1 물리적 특성

4.1.1 입도분포와 연경도

실험에 사용된 동슬래그의 입도분포곡선은 그림 3과 같다. 그림 3에서와 같이 유효입경(D₁₀)은 자용로인 경우 0.4mm, 연속로인 경우 0.73mm이며, 균등계수(Cu)는 자용로인 경우 2.5, 연속로인 경우 2, 곡률계수(Cg)는 자용로인 경우 1.0, 연속로인 경우 1.39로 나타나 대체로 입도분포가 균등한 것을 알 수 있다. No. 200체 통과분이 거의 0%로서 압밀 축진을 위한 배수재로서의 적합한 입도분포특성을 가지고 있다(藤田圭一, 1995). 또한, 통일분류법에 의해 동슬래그를 분류하면, 입도분포가 균등한 SP로 분류되며, 액·소성 시험결과는 모든 시료가 비소성(N.P.)으로 나타나 재료적 특성은 양호한 것으로 평가된다.

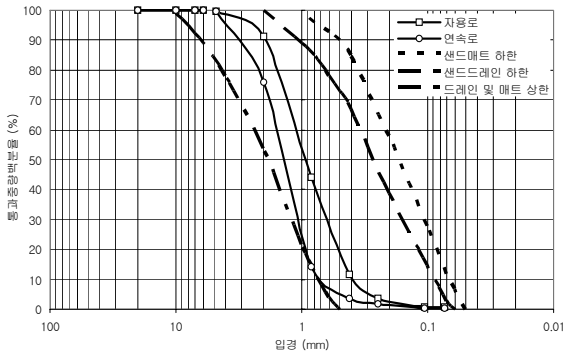


그림 3. 동슬래그 종류별 입도분포곡선

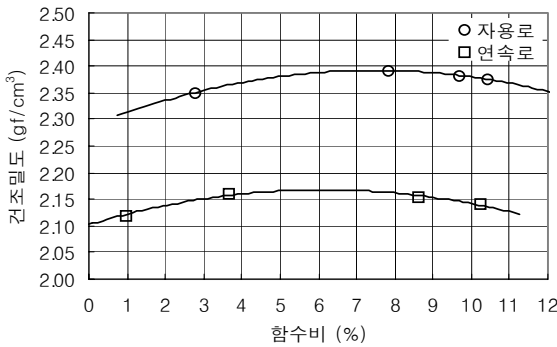


그림 4. 동슬래그의 다짐곡선

4.1.2 비중

동슬래그의 비중은 자용로인 경우 3.78, 연속로인 경우 3.44로서 화강풍화토 2.67~2.68과 비교하여 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 동슬래그에 포함되어 있는 산화철 등의 금속성분에 의한 것이다.

4.2 다짐특성

A다짐시험결과 자용로인 경우 최대건조밀도 2.39gf/cm³, 최적함수비 7.46%, 연속로인 경우 최대건조밀도 2.17gf/cm³, 최적함수비 6.11%로 나타났다. 일반 성토재료인 화강풍화토의 경우 최대건조밀도 1.34~1.78gf/cm³, 최적함수비 11.9~33.2%를 나타낸다. 동슬래그로 성토시 토피하중의 영향이 증가할 것이며, 그림 4의 다짐곡선에서 보는 바와 같이 밀도가 완만한 경향을 나타내어 다짐시공시 함수비의 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

4.3 전단특성

직접전단시험을 실시한 결과, 동슬래그 강도정수는 자용로인 경우 $\phi=43^\circ$, $c=0$ 로 나타났으며, 연속로인 경우 $\phi=46^\circ$, $c=0$ 로 측정되어 실내시험에서 사용한 모래의 경우 ($\phi=36^\circ$, $c=0$)보다 내부마찰각이 크게 나타났으며, 일반 성토재인 화강풍화토(SC)의 강도정수가 내부마찰각 $\phi=20^\circ$, 점착력은 $c=0.44\text{kgf/cm}^2$ 인 것을 감안하면 강도 특성은 매우 양호한 것으로 판단된다.

4.4 투수특성

정수위투수시험 결과 자용로인 경우 $2.91 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$, 연속로인 경우 1.47cm/sec 로서 비교적 큰 값을 나타냄으로써, 배수재로서의 적용기준을 만족하는 적합한 것으로 평가되었다.

표 3. SCP에 사용되는 모래기준, 동슬래그 재료특성 요약

구 분	모래기준 (한국도로공사, 도로설계요령 토공편)	동슬래그	
		자용로	연속로
함수비(%)		1.52	0.30
통일분류		SP	SP
유효입경, $D_{10}(\text{mm})$		0.4	0.73
$D_{15}(\text{mm})$	0.1~0.9	0.45	0.83
$D_{85}(\text{mm})$	1~8	1.3	1.9
균등계수, C_u		2.5	2.0
곡률계수, C_g		1.0	1.39
No. 200체 통과량(%)	3%이하	0.58	0.33
비 중		3.778	3.443
최대건조밀도(tonf/m^3)		2.392	2.168
투수계수(cm/sec)	1×10^{-3} 이상	2.91×10^{-1}	1.47

4.5 배수 특성 평가

4.5.1 내적안정성 평가

일반적으로 배수재의 투수성은 모래, 쇄석 등의 입상체를 사용할 경우에는 주로 입경에 의해서 인공재료를 사용

하는 경우에는 주로 opening size에 의해 지배된다. 투수성을 높일 경우에는 입경 혹은 opening size를 크게 해주면 되지만, 너무 클 경우에는 clogging에 의해 투수성이 저하되어 배수재의 기능이 상실될 수 있다. 따라서 사용 배수재는 주변지반에 대하여 적절한 배수기능을 유지할 수 있는 입도조건을 갖추어야 한다(그림 5). 그러나 동슬래그의 경우 입도가 균등한 성질을 갖고 있어 배수재로 사용시 clogging에 대한 적절한 검토가 필요하다.

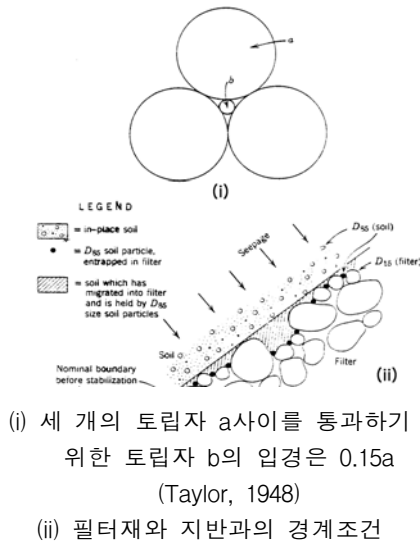


그림 5. 배수재에 의한 입자유실 방지형태 (Cedergren, 1977)

배수재의 clogging 가능성은 배수재 주변지반 토사의 입경과 배수재의 입경 혹은 opening size의 관계에 의해서 추정할 수 있다. Clogging을 방지하기 위한 배수재의 선정 기준에는 Terzaghi의 기준이나 일본대담회의의 기준이 사용될 수 있다(Harry, 1977 ; Das, 1997).

$$\frac{D_{15(G)}}{D_{85(S)}} \leq 4 \quad (\text{Terzaghi, 1926}) \quad (1)$$

$$\frac{D_{15(G)}}{D_{85(S)}} \leq 5 \quad (\text{일본대담회의}) \quad (2)$$

$$\frac{D_{15(G)}}{D_{15(S)}} \geq 4 \sim 5 \quad (3)$$

여기서, $D_{15(G)}$: 배수층 재료의 15% 통과하는 직경

$D_{15(S)}$: 보호대상인 흙의 15% 통과하는 직경

$D_{85(S)}$: 보호대상인 흙의 85% 통과하는 직경

상기의 기준은 필댐과 같이 정상침투류가 존재할 경우의 장기적인 clogging 효과를 평가하기 위한 기준이다. 그러나 배수재에서의 clogging은 주로 지진시에 발생한 과잉간극수압에 의해서 단시간에 생긴다.

Clogging 방지를 위한 배수재 선정기준으로서 大野 등이 실시한 실험결과로부터 다음 식이 제안되어 널리 사용되고 있다.

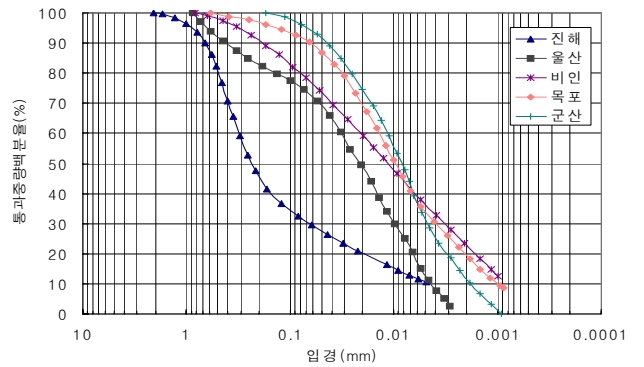


그림 6. 우리나라의 대표적 총적연약지반시료의 입도분포곡선

$$\frac{D_{15(G)}}{D_{85(S)}} < 9 \quad (\text{大野 등}) \quad (4)$$

그림 6은 우리나라의 대표적인 총적연약지반인 진해, 울산, 비인, 목포, 군산 다섯 곳의 채취시료의 입도분석결과를 식 (3)에 적용하여 clogging 방지를 위한 배수재 선정 기준에 적합한지를 파악하여 표 4와 같이 정리하였다. 진해, 울산지역 시료의 경우 자용률과 연속로 모두 선정기준을 만족하였으나, 서해안의 비인, 군산과 남해안의 목포의 경우에는 clogging이 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 동슬래그는 배수재로서의 배수특성과 더불어 주변 지반조건에 따라 배수의 기능을 충분히 발휘할 수 있는 재료로 사용 가능할 것으로 판단된다.

표 4. Clogging 방지를 위한 배수재 선정기준 평가

	자 용 로			연 속 로		
	D _{15(G)} / D ₈₅ (S)	D _{15(G)} / D ₁₅ (S)	적합성 여부	D _{15(G)} / D ₈₅ (S)	D _{15(G)} / D ₁₅ (S)	적합성 여부
진 해	0.81	47	O.K	1.45	84	O.K
울 산	1.96	88.7	O.K	3.5	158.5	O.K
비 인	4.7	213.6	O.K	8.4	381.8	N.G
목 포	11.7	361.5	N.G	21	646.2	N.G
군 산	15.6	470	N.G	28	840	N.G

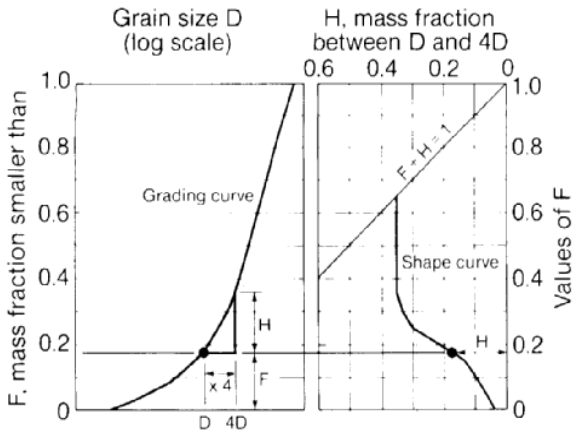


그림 7. 배수재의 내적안정성 평가를 위한 입도분포(Kenny T. C & Lau D.,1985)

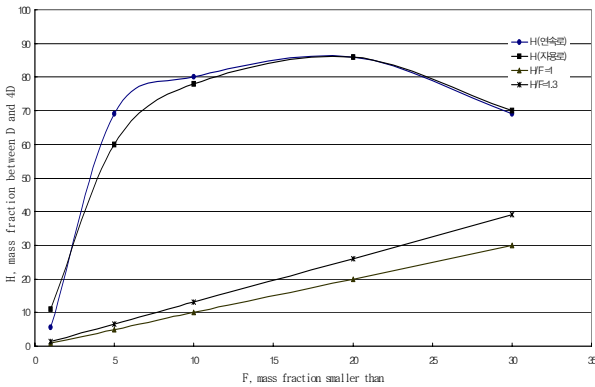


그림 8. 동슬래그의 내적안정성 평가

또한, Kenny T. C & Lau D.(1985)은 작은 흙입자가 내부간극 속에서 유출되지 않고, 구속할 수 있는 입자의 크기는 약 4배의 입자크기를 가진다고 하였다. 이것을 바탕으로 배수필터재의 내적안정성을 평가하기 위하여 아래와

같은 조건을 제안을 하였고 입도분포가 양호(균등계수, Cu>3)할 경우 통과백분율, F<20% 범위에서 적용하며, 입도분포가 불량(균등계수, Cu<3)할 경우 통과백분율, F<30%에 대해서 고려한다(그림 7).

$$\begin{aligned} \text{느슨한 경우} &: H = 1.3F, \\ \text{촉촉한 경우} &: H = 1.0F \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, H : 입경 D와 4D 사이의 백분율
F : 입경 D의 통과백분율

위 조건을 동슬래그에 적용한 결과, 그림 8과 같이 H/F 기준선 위로 나타나므로 동슬래그가 배수재로서 내적안정 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

4.5.2 분사현상에 대한 안정성

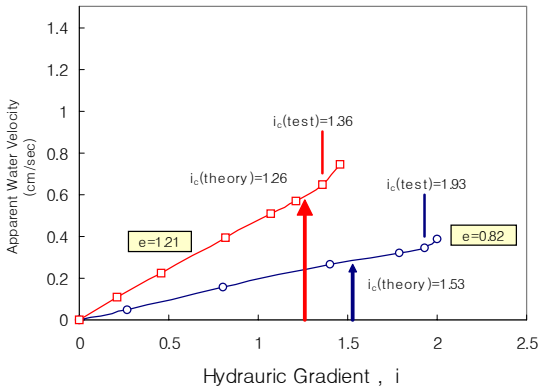
사질토 지반에서 물이 상향 혹은 수평방향으로 일정하게 흐를 경우, 지반의 유효응력을 0으로 만들어 분사현상이 발생하게 되며, 이 때의 동수경사를 한계동수경사, i_c 라고 하며 식 6으로 결정한다.

$$i_c = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (6)$$

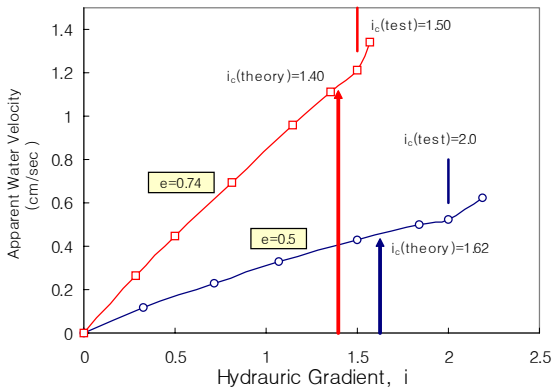
여기서, γ_{sub} : 흙의 수중단위중량
 γ_w : 물의 단위중량
 G_s : 입자의 비중
e : 간극비

본 연구에서는 정수위투수시험기를 이용하여 동수경사에 따른 투수계수 산정과 분사현상발생 여부를 육안으로 확인하였다. 시험은 동슬래그를 진동을 가하며 조밀하게 다짐하였고, 한번 분사현상이 발생되고 느슨해진 상태에서 다시 분사현상시험을 실시하였다.

Skempton과 Brogan(1994)는 사질토에 대한 분사현상 시험을 통하여, 한계동수경사값이 수평, 상향 침투인 경우 각각 1.0, 0.7 정도로 나타난다고 하였으며, 배수재의 내적안정성이 확보되지 않을 경우 상향침투가 발생하는 곳에서의 한계동수값이 0.3 정도로 낮아진다고 하였다.



(a) 실내실험용



(b) 현장시험용

그림 9. 분사현상 실험결과

시험결과, 그림 9에 나타난 것처럼 느슨한 상태에서 한계동수경사값이 실내시험용의 경우 1.36, 현장시험용의 경우 1.50으로 나타나 일반적인 안정한 상태의 사질토의 한계동수경사값이 1인 것보다 크게 나타났다. 동슬래그는 한계동수경사, i_c 값이 이론식에 의한 값보다 크게 나타나며 조밀한 경우에 더욱 크게 나타난다. 이는 동슬래그 입자간의 엇물림(inter-locking)과 시험 몰드의 직경이 6cm로 작아 Scale effect로 인한 현상으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 동슬래그의 배수재로서의 적합성을 평가하기 위해 동슬래그의 물리·역학적 특성 및 환경 유해성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동슬래그의 환경 영향 평가는 EP Toxicity Test와 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 폐기물 공정 시험법에 의해 분석되었고, 그 결과 모든 규제항목의 허용기준치 이하로 판명되었으며 환경적으로 안정적인 것으로 나타났다.
- (2) 동슬래그의 입도분포곡선은 자용로, 연속로 모두 Sand Mat 및 Sand Drain재로서의 상한·하한의 범위안에 분포하였으며, No. 200체 통과분이 거의 0%로서 압밀 축진을 위한 배수재로서 적합한 입도분포특성을 가지고 있다.
- (3) 한국도로공사 규정에 의하면, 수평 및 연직배수재로서의 활용에 있어서 배수재로 사용되는 모래의 투수계수는 10^{-3} cm/sec 이상이어야 하는데, 동슬래그의 정수위 투수시험 결과 투수계수가 자용로의 경우 2.91×10^{-1} cm/sec, 연속로의 경우 1.47cm/sec이며, 자체경화성능이 없기 때문에 동슬래그는 연약지반 개량재인 모래 대체재료로서 우수한 공학적 특성을 가지고 있다.
- (4) Clogging 및 Piping 발생여부 및 내적안정성을 평가한 결과, 지반조건에 따라 배수기능을 충분히 발휘할 수 있으며, 내적으로도 안정한 배수재로서 사용이 가능한 것으로 판단된다.
- (5) 비중이 큰 동슬래그의 분사현상에 대한 안정성을 검토한 결과, 입도분포가 균등하며 물의 흐름이 발생하는 곳에서 내부 입자유출은 발생하지 않는 것으로 나타나서 분사현상에 대한 저항도 매우 큰 것으로 나타났다.
- (6) 향후 동슬래그의 토목공사에서 폭넓은 적용을 위해서는 우선 동슬래그의 공학적 특성을 파악하고 많은 실내모형시험 및 현장시험시공이 실시되어 다양한 현장여건이 충분히 반영되어 조사·검토되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2001년도 한양대학교 교내연구비지원인 “산업폐기물의 배수재로서의 활용에 관한 연구”에 의해 이루어졌으므로 밝히며 대학 당국에 심심한 감사를 드립니다.

(접수일자 : 2004년 10월 22일)

참 고 문 헌

1. LG-Nikko 동제련(주) 제련기술연구소(2000), 토목·건설용 소재 LG-FERROSAND, pp. 3~22.
2. 한국건설기술연구원(2000), 동제련 슬래그의 건설재료 활용 및 기준 개발, pp. 168~236.
3. 大野義郎, 伊藤克彦, 南川洋土雄, 大北康治(1984), 碎石ドレーンの短期目詰まり限界について, 第19回 土質工學研究發表會, pp. 191~192.
4. 藤田圭一(1995), 軟弱地盤對策工法總技術, 日本軟弱地盤對策技術委員會, pp. 749~753.
5. Harry R., Cedergren, (1977), Seepage, Drainage & Flownets, John Wiley & Sons, Inc., pp. 179~184.
6. Das, B. M(1997), Advanced Soil Mechanics, Taylor & Francis, pp. 211~213.
7. Kenney, T. C., Lau, D.(1985), Internal stability of granular filters, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, pp. 215~225.
8. Skempton, A. W., Brogan, J. M.(1994), Experiments on Piping in Sandy Gravels, Geotechnique, Vol. 44, No. 3, pp. 449~460.