

지반개량재로써 동제련슬래그의 활용에 관한 연구

Applications of the Copper Slags as Ground Improvement Material

천병식* · 정헌철** · 조한영***

Chun, Byung-Sik · Jung, Hun-Chul · Cho, Han-Young

Abstract

This study is about the applicability of copper slag as the ground improvement material. By the geo-technical characteristics of the copper slag and by the effect of consolidation and under drainage condition, it is proved that the copper slag can be used for ground improvement material as substitution for sand. As a result of laboratory tests, it was shown that the permeability of the copper slag was similar to that of sands under the vertical drainage condition. In addition, the copper slag showed higher critical hydraulic gradient than that of sand under up-ward vertical flow state. The copper slag has potential safety against piping and it has internal stability of particles. The conclusion is that the copper slag is suitable for drainage and filter material.

Keywords : Copper Slag, Drainage, Filter, Internal Stability, Piping

요 지

본 연구는 동제련슬래그를 지반개량재로써 활용하기 위하여 배수에 대한 적용가능성을 평가한 것이다. 모래말뚝의 모래 대체재로써의 동제련슬래그 활용방안을 검토하였고, 동제련슬래그의 재료특성, 동제련슬래그말뚝이 설치된 복합지반에서의 압밀 배수 특성, 배수·필터재로써의 특성 등을 파악하였다. 연구결과, 동제련슬래그는 일반적으로 쓰여지는 모래와 유사한 연직배수효과를 나타내었으므로, 모래말뚝의 모래 대체재로써의 적용은 충분히 가능할 것으로 판단된다. 더욱, 분사현상에 대한 안정성 및 입자 유실에 대한 내적안정성을 검토한 결과, 일반적인 사질토에 비해 한계동수경사가 크게 나타나고, 내적안정성이 우수하게 평가되었다. 따라서 동제련슬래그는 지반조건에 따라 배수·필터기능을 충분히 발휘할 수 있으며, 내적으로도 안정된 배수·필터재로써 사용이 가능한 것으로 판단된다.

주요어 : 동제련슬래그, 배수, 필터, 내적안정성, 분사현상

* 정희원 · 한양대학교 토목공학과 교수 · 공학 박사

** 정희원 · 한양대학교 토목공학과 박사 과정

*** LG-Nikko 동제련(주) 건설 연구팀 팀장

1. 서 론

건설 골재 난 및 환경에 대한 관심이 높아지면서 국내에서도 석탄회, 광재, 제강슬래그, 동제련슬래그 등 각종 부산물의 재활용과 그에 따른 기술개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 동제련 과정에서 발생하는 동제련슬래그는 국내에서 연간 70여만톤에 이르고 있으며 시멘트제조용 가철제 및 수리 조선소에서 선박의 녹을 제거하는 샌드블라스팅용 등으로 주로 사용되고 있으며, 이외에도 벽돌, 경계석, 인터로킹블럭, 적벽돌, 레미콘용 골재 등으로 한정되어 쓰이고 있다. 우리나라에서 생산되는 동제련슬래그는 조립상태로 생산되며 입도범위가 0.15~5mm로 건설공사의 세골재로 이용할 수 있다. 특히 동제련슬래그는 모래에 비해 높은 비중이 특징이며 안정된 유리질 상태로 환경적으로도 매우 안정된 제품으로 일본, 독일 등 해외에서는 항만공사, 호안공사 및 해양구조물의 제작 등에 널리 활용되고 있다(한국건설기술연구원, 2000). 국내에서도 천연골재의 고갈에 따라 골재 공급이 석산골재(부순골재)나 해사(세척사)에 대한 사용 비중이 증가하고 있으나 그 한계성이 점차적으로 나타나고 있어 천연자원의 고갈에 따른 대체자원으로서 동제련슬래그와 같은 부산물의 활용 가능성은 높을 것으로 판단된다. 그러나 이러한 부산물의 재활용 실용화 단계에는 많은 어려움이 따르기 때문에 실질적 활용을 위해서는 충분한 기술적 자료 및 검토가 뒷받침되어야 하고, 그에 따라 실용화 및 실질적 활용이 결정되어야 할 것이다.

본 연구는 배수재로써 동제련슬래그를 활용하는 방안을 검토하고 적합성을 평가하기 위해 토질시험 및 실내모형시험을 실시하였다. 토질시험을 통해 모래와 동제련슬래그의 재료특성을 비교·분석하고, 실내모형시험에서는 점토지반을 대상으로 하여 모래말뚝, 동제련슬래그말뚝을 형성하여, 각각 점토지반과 모래말뚝, 동제련슬래그말뚝이 받는 지반침하와 간극수압을 측정하여 비교·분석하였다. 또한, 배수·필터재로써의 내적안정성과 분사현상에 대한 안정성 검토를 실시하였다.

2. 동제련슬래그의 재료적 특성

2.1 동제련슬래그의 부산과정

동제련슬래그는 동의 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 발생하는 동제련슬래그는 수쇄(급냉) 슬래그이다.

동제련이란 일차 동광석을 녹여 조동(Anode)을 만들고 정련과정을 거쳐 전기동을 생산하는 일련의 공정을 말하는데, 일반적으로 동광석은 황화광 정광을 이용하며 주로 CuFeS₂로 Cu, Fe, S의 양이 거의 비슷하다. 이러한 정광을 용제(Flux)인 규사(SiO₂)와 혼합하여 고농도의 산소부화공기와 반응시키면 정광 중의 S는 산소와 결합하여 가스상태인 SO₂로 연소되고, 이 가스는 포집되어 황산(Sulfuric Acid)으로 제조된다. Fe는 산화물 형태인 FeO로 역시 산화되어 용제인 SiO₂와 결합하여 슬래그를 형성하고, Cu가 주성분인 매트(Matte)와 비중차에 의해 분리 제거된다.

생성된 Matte는 전로공정(Convertng), 정제로공정(Fire Refining), 전해정련(Electro-Refining) 등 일련의 정련(Refining)과정을 통하여 99.99%의 전기동으로 생산된다. 제련과정 중에서 매트와 분리된 동제련슬래그는 전기로(Electric Resistance Furnace)에서 유가 금속 회수를 위한 Setting 과정을 거친 후 고압수에 의해 수쇄된다. 수쇄 후의 동제련슬래그는 조립상태로 대략 0.3~5.0mm의 입도 분포를 갖게 된다.

국내에서 생산되는 동의 제련공정은 크게 두 가지로 구분되며 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.

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. 자용로공정과 차이점은 제련과정중 동광석과 규사 외에 석회석을 투입한다는 점이다(한국건설기술연구원, 2000).

2.2 동제련슬래그의 지반공학적 재료특성

모래 대체재료로서의 동제련슬래그의 적합성을 평가하기 위하여, 토질시험들의 결과를 토대로 물리적·역학적 특성을 분석하였다.

(1) 물리적 특성

① 입도분포와 연경도

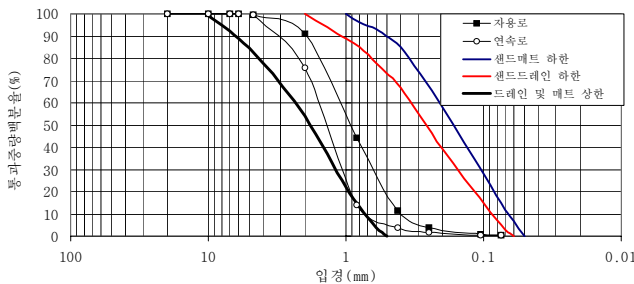


그림 1. 동제련슬래그 입도분포곡선과 연직배수재의 입도기준(藤田圭一, 1995)

실험에 사용된 동제련슬래그의 입도분포곡선은 그림 1과 같다. 유효입경(D_{10})은 자용로인 경우 0.4mm, 연속로인 경우 0.73mm이며, 균등계수(C_u)는 자용로인 경우 2.5, 연속로인 경우 2, 곡률계수(C_g)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 배수재료로서의 적합한 입도분포특성을 가지고 있다. 또한, 통일분류법에 의해 동제련슬래그를 분류하면, 입도분포가 균등한 SP로 분류되며, 액·소성 시험 결과는 모든 시료가 비소성(NP)으로 나타나 재료적 특성은 양호한 것으로 평가된다.

② 비중

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

(2) 전단특성

표준A다짐 최대건조단위중량을 기준으로 직접전단시험을 실시한 결과, 동제련슬래그 강도정수는 자용로인 경우 $\theta=43^\circ$, $C=0$ 로 나타났으며, 연속로인 경우 $\theta=46^\circ$,

$C=0$ 로 추정되어 실내시험에서 사용한 모래의 경우($\theta=36^\circ$, $C=0$)보다 내부마찰각이 크게 나타났다.

(3) 다짐특성

표준A다짐시험결과 자용로인 경우 최대건조밀도 23.5 kN/m^3 최적함수비 7.46%, 연속로인 경우 최대건조밀도 21.3 kN/m^3 , 최적함수비 6%로 나타났다. 일반성토재료인 화강풍화토의 경우 최대건조밀도 13.1~17.5 kN/m^3 , 최적함수비 7~8%를 나타낸다.

(4) 투수특성

정수위투수시험결과 자용로인 경우 0.18cm/sec, 연속로인 경우 0.3cm/sec로서 비교적 큰 값을 나타냄으로써, 표 1에서 동제련슬래그의 투수계수가 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이상으로 나타나므로 배수재료로서의 기준을 만족하여 적합한 것으로 평가되었다.

표 1. 모래말뚝에 사용되는 모래기준, 동제련슬래그 재료특성 요약

구 분	모래기준 (한국도로공사, 도로설계요령 토공편)	동 슬래그	
		자용로	연속로
함수비(%)		1.52	0.30
통일분류		SP	SP
유효입경, D_{10} (mm)		0.4	0.73
D_{15} (mm)	0.1~0.9	0.45	0.83
D_{85} (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 (kN/m^3)		23.5	21.3
투수계수 (cm/sec)	1×10^{-3} 이상	1.8×10^{-1}	3.0×10^{-1}

3. 동제련슬래그의 지반보강재료로서의 특성

3.1 대상토(점토)와 비교 모래의 물성치

본 실험에서 사용된 점토는 김해점토를 교란 형태로 채취하여 사용하였으며, 액성한계 83%, 소성지수 52%,

200번체 통과량이 약 93%로써 통일분류상 CH로 판정되었다. 점토시료는 현장함수비(약 85%)상태에서 재성형되었다. 이때 삼축압축시험(UU Test)와 소형 베인시험기로

측정한 비배수전단강도값은 잘 일치하며 약 5kPa을 보여 매우 연약한 상태이다(표 2참조).

표 2. 대상토(김해점토)의 토질시험결과

구분	비 중	Atterberg Limits			입도분석시험				통일 분류	비배수 전단강도 (kPa)
		액성 한계 (%)	소성 한계 (%)	소성 지수	# 4 통과량 (%)	# 10 통과량 (%)	# 40 통과량 (%)	# 200 통과량 (%)		
김해 점토	2.70	83	31	52	100	100	100	92.97	CH	5.0

모래는 그림 2에서 보이는 것과 같은 자용로 동제련슬래그와 유사한 입도분포곡선을 보이는 굵은 모래(SP)를 사용하였다. 직접전단시험을 통하여 구한 내부마찰각은 약 36°로 나타났으며, 점착력은 0이다. 표준 A다짐을 실시하여 얻은 최대건조단위중량은 15.8kN/m³로써 일반적인 사질토의 단위중량을 보인다. 토질시험결과는 표 3에 나타내었으며, 동제련슬래그의 물성치와 비교하였다.

3.2 실내모형 압밀시험

실내모형시험은 모래말뚝의 모래 대체재로써 동제련슬래그말뚝이 설치된 지반의 배수특성을 파악하기 위하여 높이(H)와 직경(D)이 50cm×50cm인 모형토조(그림 3참조)를 이용한 압밀시험으로 실시하였다. 하중재하장치는 유압잭을 사용하도록 고안·제작되었으나, 소형 베인 전단시험기를 이용하여 재성형된 점토지반의 비배수 전단강도를 측정할 결과 약 5kPa로 매우 연약하여 무게추에 의한 정재하시험을 실시하였다. 압밀시험에서 중요한 물성치인 압축지수(Cc) 값을 알아내기 위하여 다단계의 압밀하중을 재하하는 것이 필요하나, 실내 시험장치의 제약성으로 인한 재하하중의 한계로 인하여 압밀하중은 5kPa, 10kPa 2단계로 재하하였다.

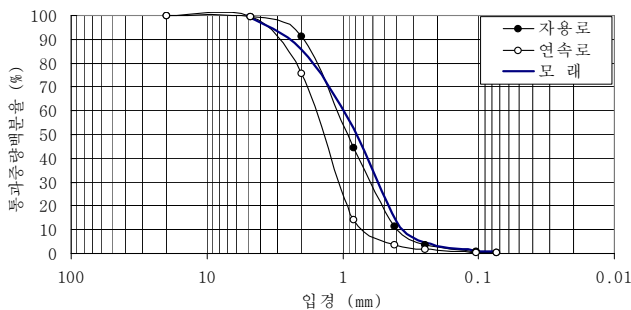


그림 2. 비교 대상 모래의 입도분포곡선

표 3. 비교대상 모래의 물성치

구분	비 중 Gs	다짐시험		강도정수(직접전단)		통일 분류
		최대건조 단위중량 (kN/m³)	최적함수비 (%)	내부 마찰각 (°)	점착력 (kPa)	
모래	2.62	15.8	7.15	36	0	SP
동제련슬래그 자용로	3.78	23.5	7.46	43	0	SP
동제련슬래그 연속로	3.44	21.3	6.11	46	0	SP

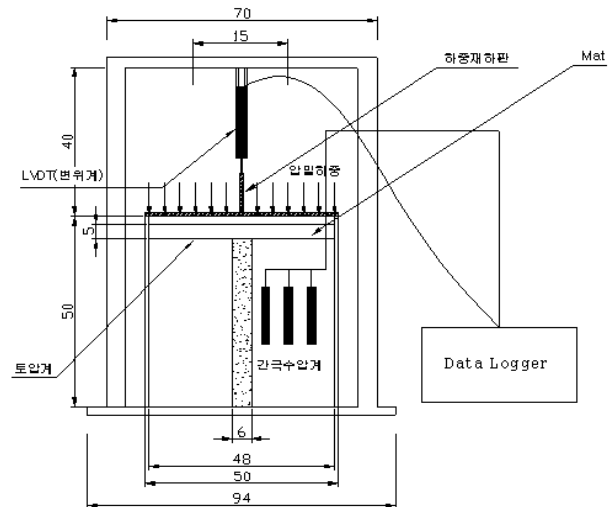


그림 3. 실내모형 압밀시험장치

직경은 6cm, 길이는 40cm의 모래다짐말뚝과 동제련슬래그다짐말뚝을 설치하기 위하여 직경 6cm관을 미리 모형토조에 설치하고, 관을 조금씩 인발하는 동시에, 모래 또는 동제련슬래그를 넣고 진동을 가하면서 설치하여 타설된 모래 또는 동제련슬래그가 조밀해지도록 하였다.

3.3 시간-침하량 관계 특성

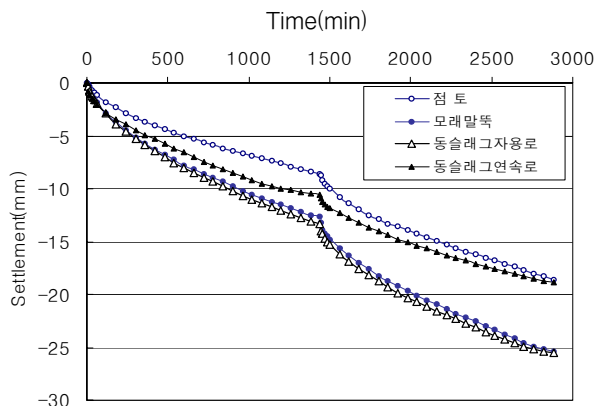
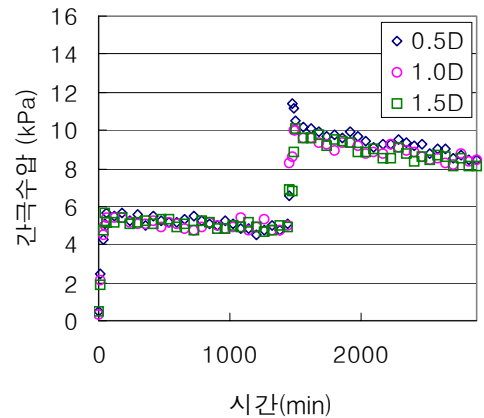


그림 4. 시간-침하량 곡선

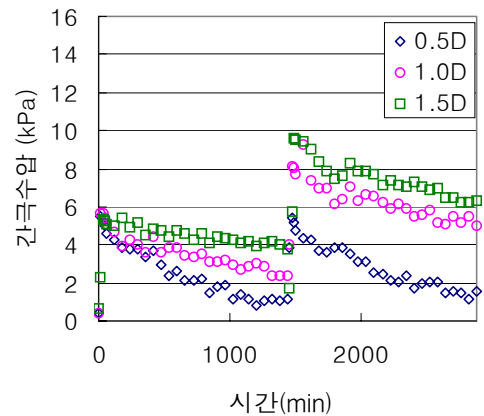
압밀침하 측정결과 전체 침하량은 점토, 동제련슬래그연속로, 모래, 동제련슬래그 자용로 순으로 나타났으며, 특히 모래다짐말뚝과 동제련슬래그 자용로의 침하경향은 매우 유사한 양상을 나타내었다. 여기서는 연속로 동제련슬래그의 침하량이 예상 밖으로 낮게 나타났고, 이는 내부마찰각이 큰 연속로 동제련슬래그말뚝이 지반 지지력향상에 기여하여 침하량이 적게 나타난 것으로 판단된다.

3.4 간극수압 측정 분석

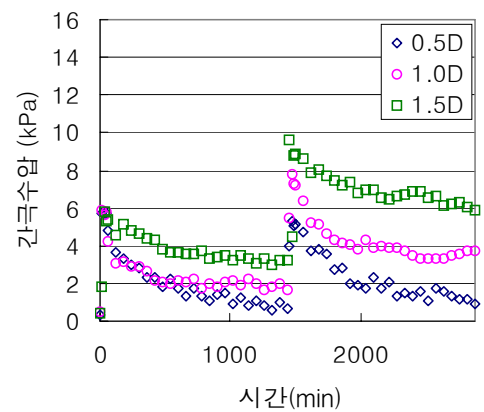
모형토조 압밀실험에서 간극수압을 측정한 결과 그림 5와 같이 나타났다. 점토만으로 구성된 모형실험(그림 5a)에서는 간극수압 소산이 느리게 나타나는 반면 모래(그림 5b), 동제련슬래그가 설치된 모형지반(그림 5c,d)에서는 유사한 소산형태를 보이며, 0.5D, 1.0D, 1.5D 순으로 간극수압이 빨리 소산되는 것으로 나타났다. 0.5D에서 측정된 간극수압은 24시간 동안 거의 모든 과잉간극수압이 소산되는 반면, 1.5D에서는 24시간동안 약 20~30%의 과잉간극수압이 소산되었다.



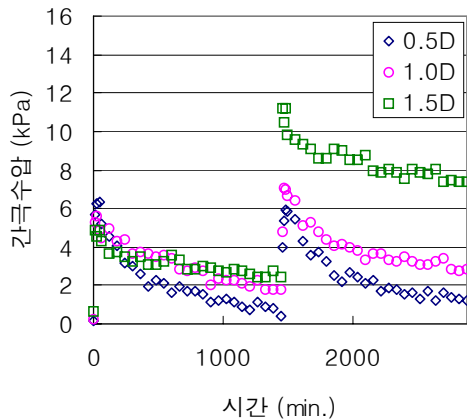
(a) 점토지반



(b) 모래말뚝



(c) 자용로 말뚝



(d) 연속로 말뚝

그림 5. 간극수압 측정결과

3.5 쌍곡선법을 이용한 장래침하량 예측

침하결과분석은 현장 침하분석시 널리 이용되고 있는 쌍곡선법(Hyperbolic Method)을 이용하였다. Tan 등 (1991)은 실내실험데이터와 현장데이터를 통한 쌍곡선 방법이 Terzaghi 1차원 압밀모델과 Barron의 연직배수압밀 모델뿐만 아니라 불균등한 점토, 모래 혼합지반에도 적용 가능하다고 하였고, Sridharan & Parakash(1985)는 쌍곡선법이 Taylor의 \sqrt{t} 법과 Casagrande의 Log t 방법보다 압밀계수를 더 쉽게 추정할 수 있다는 것을 보였다.

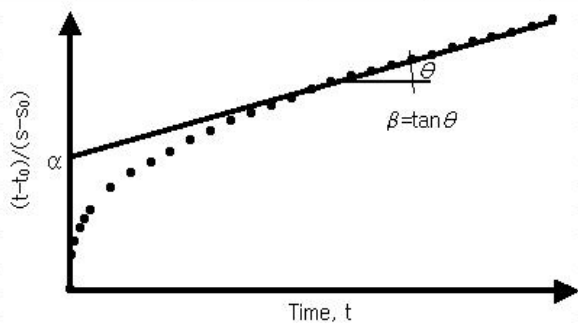


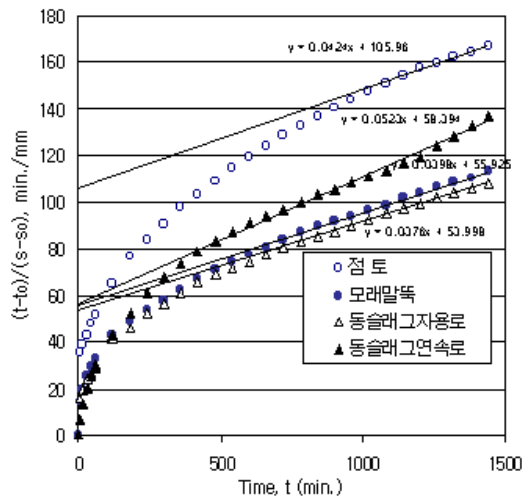
그림 6. Hyperbolic 방법의 $t/s - t$ 관계

쌍곡선법에서는 압밀침하와 시간의 관계는 쌍곡선적인 선형을 따른다는 것으로 가정하며, 그 관계는 식 1과 같다.

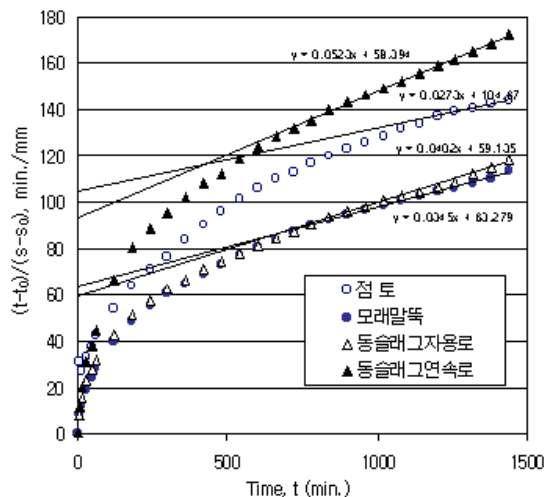
$$s = \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (1)$$

따라서, 침하량 S 는 식 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{\alpha}{t} + \beta} = \frac{1}{\beta} \quad (2)$$



(a) 1단계 압밀 하중(5kPa)



(b) 2단계 압밀 하중(10kPa)

그림 7. 쌍곡선법에 의한 결과 분석

그림 7는 각 하중단계에 따른 쌍곡선을 나타낸 것이며, 압밀하중 5kPa일 때 직선의 기울기 β (mm^{-1})는 점토, 모래 다짐말뚝, 동제련슬래그 다짐말뚝 자용로, 연속로는 각각 0.0424, 0.0398, 0.0376, 0.0523 으로 나타나며, 압밀

하중 2단계인 10kPa일 때에는 0.0273, 0.0345, 0.0402, 0.0523 로 나타난다. 여기서, 직선부위의 기울

기가 클수록 최종 침하량의 크기는 작아지며, 대체적으로 동제련슬래그 연속로 다짐 말뚝에서 가장 작게 나타났다.

표 4. 압밀침하량 결과분석

구 분		점토	모래	동제련슬래그 자용로	동제련슬래그 연속로
1 단계하중 (5kPa)	최종침하량, $1/\beta$ (mm)	23.6	25.1	26.6	19.1
	24hr 침하량, s (mm)	8.6	12.7	13.4	10.5
	침하비, r (%)	36.5	50.5	50.3	55.1
2 단계하중 (10kPa)	최종침하량, $1/\beta$ (mm)	36.6	29.0	24.8	18.5
	24hr 침하량, s (mm)	10.0	12.7	12.2	8.4
	침하비, r (%)	27.3	43.8	49.2	45.2

모형토조를 이용한 압밀실험에서 나타난 침하량은 점토와 연속로, 모래와 자용로 간에 서로 비슷한 정도를 나타내고 있지만, 모래다짐말뚝이 설치된 지반에서는 하중-압밀침하관계와 하중-지지력관계가 상호 복합적으로 작용하여 나타나게 되므로 여기서는 쌍곡선법에 의해 추정된 최종침하량과 24시간동안 실측한 침하량의 비($r = 24hr$. 침하량/추정된 최종침하량)를 구하여 동제련슬래그 다짐 말뚝의 연직배수재로서의 성능을 평가하고 결과는 표 4에 나타내었다.

연직배수재가 설치된 모형에서 24시간동안 측정된 침하비율은 배수재가 설치되지 않은 지반에 비하여 약 15%이상의 초기압밀침하를 촉진시키는 것으로 나타났으며, 동제련슬래그를 연직배수재로 사용하였을 경우 대체적으로 모래보다 다소 우수하게 나타났다. 이는 투수성이 양호하며 모래보다 큰 내부마찰각을 가진 동제련슬래그를 모래 대신 지반개량을 위한 배수재나 Compaction Pile에 적용함으로써 복합지반의 지지력증대 효과뿐만 아니라 연직배수재로써 우수한 성능을 기대 할 수 있음을 보여준다.

4. 배수·필터 특성

4.1 내적안정성 평가

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

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. 그러나 동제련슬래그의 경우 입도가 균등한 성질을 갖고 있어 배수재로 사용시 Clogging에 대한 적절한 검토가 필요하다.

배수재의 Clogging의 가능성은 배수재 주변지반 토사의 입경과 배수재의 입경 혹은 Opening size의 관계에 의해서 추정할 수 있다. Clogging을 방지하기 위한 배수재의 선정기준에는 Terzaghi의 기준이나 일본대담회의의 기준이 사용될 수 있다.

$$\frac{D_{15(G)}}{D_{85(S)}} \leq 4 \quad (\text{Terzaghi, 1926}) \quad (3)$$

$$\frac{D_{15(G)}}{D_{85(S)}} \leq 5 \quad (\text{일본대담회의}) \quad (4)$$

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

여기서, $D_{15(G)}$: 배수층 재료의 15% 통과하는 직경

$D_{15(S)}$: 보호대상인 흙의 15% 통과하는 직경

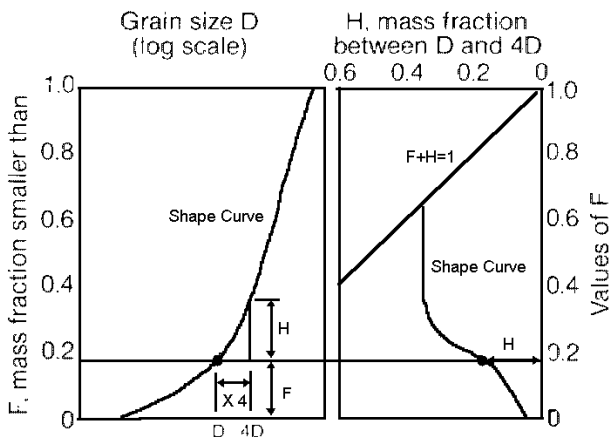
$D_{85(S)}$: 보호대상인 흙의 85% 통과하는 직경

Kenny T. C & Lau D.(1985, 1986)은 작은 흙입자가 내부간극속에서 유출되지 않고, 구속할 수 있는 입자의 크기는 약 4배의 입자크기를 가진다고 하였다(그림 8a). 이것을 바탕으로 배수필터재의 내적안정성을 평가하기 위하여 아래와 같은 조건을 제안을 하였고 입도분포가 양호(균등계수, $C_u < 3$)할 경우 통과백분율 $F < 20\%$ 범위에서 적용하며, 입도분포가 불량(균등계수, $C_u > 3$)할 경우 통과백분율 $F < 30\%$ 에 대해서 고려한다.

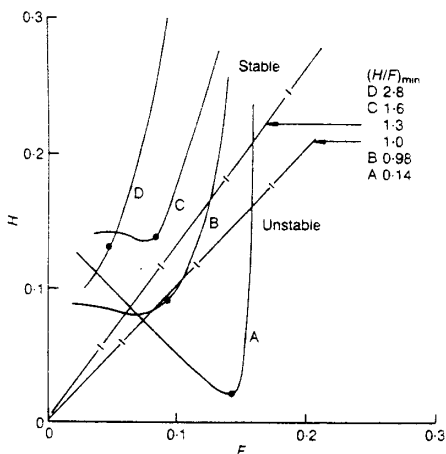
느슨한 경우 $H = 1.3F$ (6a)

촉촉한 경우 $H = 1.0F$ (6b)

여기서, H : 입경 D 와 4D사이의 백분율
 F : 입경 D의 통과백분율



(a) F-H 관계



(b) 배수재의 내적안정성평가

그림 8. 배수재의 내적안정성평가를 위한 입도분포 (Kenny T. C & Lau D.,1985)

그림 8b는 Kenny & Lau (1985)의 실험결과이며 $F+H=100\%$ 를 상한선으로 한다. A, B시료는 불안정(Unstable)한 상태이며 C, D시료는 입자유출에 대한 배수재의 내적안정성(Internal Stability)이 있음을 말한다. 이 방법을 동제련슬래그에 적용한 결과, 그림 9과 같이 H/F 기준선 위로 나타나므로, 동제련슬래그가 배수재로서 내적안정조건을 만족하는 것으로 나타났다.

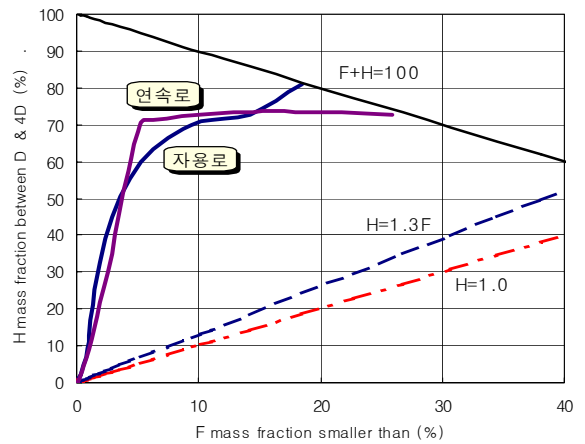


그림 9. 동제련슬래그의 내적안정성평가

4.2 분사현상에 대한 안정성

사질토 지반에서 물이 상향 혹은 수평방향으로 일정하게 흐를 경우, 지반의 유효응력을 0으로 만들어 분사현상이 발생하게 되며, 이때의 동수경사를 한계동수경사(i_c) 라고 하며 식 7로 결정한다.

$$i_c = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{Gs-1}{1+e} \quad (7)$$

여기서, G_s : 흙입자의 비중
 e : 간극비

Skempton & Brogan (1994)는 사질토에 대한 분사현상 시험을 통하여, 한계동수경사값이 수평, 상향 침투인 경우 각각 0.7, 1.0정도로 나타난다고 하였으며, 배수재의 내적안정성이 확보되지 않을 경우 상향침투가 발생하는 곳에서의 한계동수경사값이 0.3정도로 낮아진다고 하였다(그림 10참조).

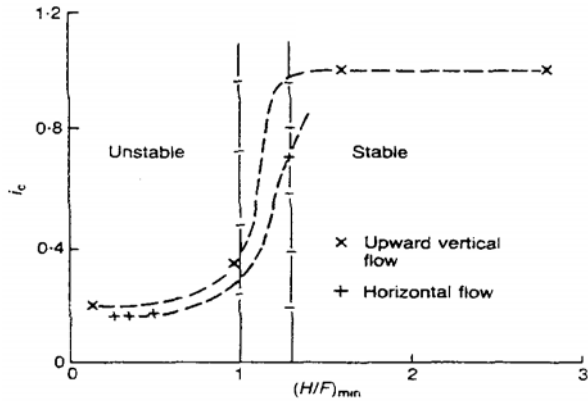
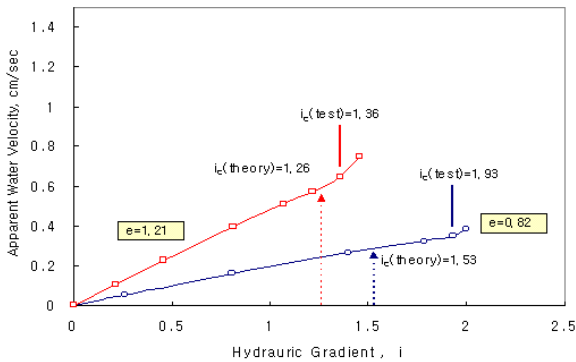


그림 10. Skempton and Brogan(1994)의 시험결과

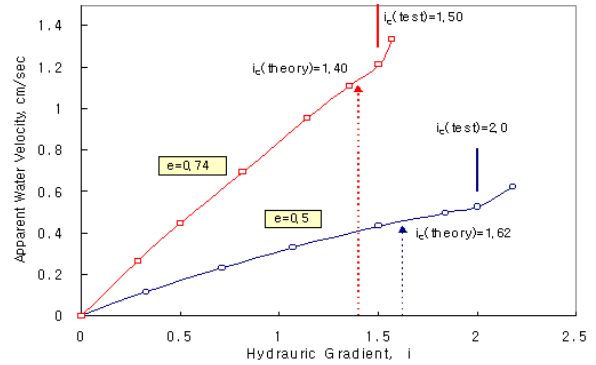
본 실험에서는 정수위 투수시험기를 이용하여 동수경사에 따른 투수계수 산정과 분사현상 발생여부를 육안으로 확인하였다. 시험은 동제련슬래그를 진동을 가하여 조밀하게 다짐하였고, 한번 분사현상이 발생되고 느슨해진 상태에서, 다시 분사현상시험을 실시하였다.

시험결과, 느슨한 상태에서 한계동수경사값이 자용로, 연속로인 경우 각각 1.36, 1.50으로 나타나 일반적인 사질토의 한계동수경사값이 1인 것보다 크다. 동제련슬래그의 분사현상에 대한 안정성을 한계동수경사(i_c)값이 이론식에 의한 값보다 크게 나타난다. 조밀한 경우에 더욱 크게 나타난다. 이는 동제련슬래그 입자간의 엇물림(Interlocking)과 시험 몰드의 직경이 6cm로 작아, Scale Effect로 인하여 식 7에 의한 이론값보다 한계동수경사값이 크게 측정된 것으로 판단된다.

동제련슬래그의 경우 내적안정성이 확보되어 있고, 비중(G_s)값이 커 분사현상에 대한 안정성이 우수하다고 판단된다.



(a) 자용로 동제련슬래그



(b) 연속로 동제련슬래그

그림 11. 분사현상 실험결과

동제련슬래그의 입도분포는 균등하며, 물의 흐름이 발생하는 곳에서 내부 입자유출은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 분사현상에 대한 저항도 매우 큰 것으로 나타났다. 비중이 큰 동제련슬래그를 분사현상이 우려되는 상황에서 배수재나, 압성토재료로 사용한다면, 일반적인 조립질 흙을 사용하는 것보다 더욱 효과가 뛰어날 것으로 판단된다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 모래말뚝의 모래 대체재로서 동제련슬래그의 활용방안연구를 위하여, 동제련슬래그의 재료특성, 동제련슬래그말뚝이 설치된 복합지반에서의 압밀배수 특성, 배수·필터재료로서의 특성 등에 대하여 검토하였으며, 그 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

1. 비중과 단위중량이 큰 동제련슬래그의 재료 특성과 투수계수를 평가한 결과 배수재로서 적합하고, 내부마찰각이 모래보다 크게 나타나 모래말뚝의 모래 대체재로서의 적용은 충분히 가능할 것으로 판단된다.
2. 실내 모형실험에 의한 복합지반의 압밀배수 특성을 분석하였을 때, 동제련슬래그를 사용한 모형지반의 연직배수효과가 모래말뚝이 설치된 지반보다 다소 우수하게 나타나 동제련슬래그다짐말뚝의 연직배수효과가 우수하다고 판단된다.
3. 분사현상 발생여부 및 입자 유실에 대한 내적안정성을

평가한 결과, 대상 토질조건에 따라 배수·필터기능을 충분히 발휘할 수 있으며, 내적으로도 안정한 배수·필터재로써 사용이 가능한 것으로 판단된다.

4. 동제련슬래그의 토목공사에서의 폭넓은 적용을 위해서는, 우선 동제련슬래그의 공학적 특성을 파악하고 많은 실내모형시험 및 현장시험시공이 실시되어 다양한 현장여건이 충분히 반영되어 조사·검토되어야 한다.

감사의 글

본 논문은 2001년 LG-Nikko 동제련(주)에서 지원하는 연구과제인 “동슬래그의 토목공사용 재료로서의 활용성에 관한 개발연구”의 연구수행 결과의 일부임을 밝히며, 아울러 연구비를 지원해준 LG-Nikko 동제련(주) 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

(접수일자 : 2001. 11. 1)

참고 문헌

1. 한국건설기술연구원(2000), LG-Nikko 동제련(주)(2000), “동제련 슬래그의 건설재료 활용 및 기준 개발”, pp.168~236.
2. 천병식 등(2001), “대형압밀시험기를 이용한 동슬래그 다짐말뚝의 배수 특성”, 추계학술대회논문집, 한국철도학회, pp. 552~557.
3. 천병식 (2001), “동제련슬래그골재의 토목공사에의 활용”, 동제련슬래그의 건설용 골재활용 심포지움, 한국건설기술연구원, pp. VI-1~VI-13.
4. 藤田圭一(1995), “軟弱地盤對策工法總技術總監”, 日本軟弱地盤對策技術委員會, pp. 749~753.
5. T. C. Kenney, D. Lau(1985), “Internal stability of granular filters”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, pp. 215~225.
6. T. C. Kenney, D. Lau(1986), Discussion on “Internal stability of granular filters”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 23, pp. 420~423.
7. Tan, T. S. et al.(1991), “Hyperbolic Method for Consolidation Analysis”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 11, pp. 1723~1737
8. Sridharan, A., Parakash, K.(1985), “Improved Rectangular Hyperbola Method for the Determination of Coefficient of Consolidation.” Geotech. Testing. J. Vol 8, No. 1, pp. 37~40.
9. Skempton, A. W., Brogan, J. M. (1994), “Experiments on Piping in Sandy Gravels”, Géotechnique Vol. 44, No. 3, pp. 449~460.