

동 수쇄 슬래그의 배수용 재료로써의 이용 The Usage of Copper Slag as The Drainage Materials

민덕기¹⁾, Tuk-Ki Min, 황광모²⁾, Kwang-Mo Hwang, 이경준³⁾, Kyung-Jun Lee, 김현도³⁾, Hyun-Do Kim

¹⁾ 울산대학교 토목환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Univ. of Ulsan

²⁾ 울산대학교 토목공학과 박사수료, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng, Univ. of Ulsan

³⁾ 울산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng, Univ. of Ulsan.

SYNOPSIS : Copper slag is produced about 700,000 tons annually though copper refining process in Korea. In the paper, a laboratory investigation was carried out to estimate the geotechnical properties of copper slag and examine the feasibility of using the copper slag as a substitute for conventional construction materials and the improvement of the soft clay deposit. The specific gravity of copper slag is 3.45, and pH is 7.83. And the size distribution of the copper slag is well graded, so usage of copper slag will be extended in Geotechnical engineering fields. Copper slag has the permeability of 3.502×10^{-2} cm/sec, which is satisfied with the criterion of sand drainage materials.. At the same time, it is thought to be suitable material for sand mat since it meets JIS of grain size distribution. The content of CaO from steel slag is about 40 percent while that of CaO from copper slag is about 5 percent. Based on this fact, copper slag has less hardening property compared to steel slag. Therefore, copper slag can be used as vertical drains, filters, and sand mats for improving the soft deposit.

Key words : copper slag, vertical drain material, filter material, sand mat material

1. 서론

철, 아연, 동과 같은 금속의 제조과정에서 발생하는 슬래그는 천연광석으로부터 특정한 금속을 채취한 후 남은 무기질 부산물이며, 철, 아연, 동을 제조하는 과정에서 철은 제선(고로) 슬래그와 제강(전로) 슬래그, 아연은 아연 슬래그, 동은 동제련 슬래그가 발생된다. 일반적으로 철강 슬래그는 오랜 기간 철도(mining roads)의 노반재료로써 이용되었으며, 현재는 도로의 기층재료나 건물 기초의 지지력을 증대시키는 쇄석층 대체용 매립재로 사용되고 있다. 국내의 동제련 과정에서 부산물로 발생하는 동 수쇄 슬래그는 연간 70여만톤 정도이며, 주로 시멘트의 원료, 선박의 녹을 제거하는 샌드블라스팅용 등으로 사용되고 있다. 향후 동 수쇄 슬래그는 토목, 건축분야에 널리 이용될 것이 예상되고 있으며, 이에 대한 연구로는 천연골재 부족에 따른 골재 대체재료로써의 개발 및 연구가 진행되고 있다.

동제련 슬래그는 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 동제련 슬래그는 연속동제련 공법에 의해 발생하는 수쇄(급냉) 슬래그이다. 국내 철강 슬래그는 약 40%의 CaO를 함유하고 있어 수경성을 가지고 있는 반면, 동제련 슬래그는 약 1~5%의 CaO를 함유하고 있어 수경성이 적으므로 연직 배수재나 필터재, 샌드 매트용 재료로의 활용에 유효한 재료라 사료된다. 본 연구에서는 동 수쇄 슬래그를 천연골재 대체용 재료로 이용되는 것 외의 다른 건설재료로써의 그 가능성을 밝히고자 하였다.

2. 동 수쇄 슬래그의 공학적 특성 및 화학적 특성

2.1 동 수쇄 슬래그의 공학적 특성

동 수쇄 슬래그는 비중이 3.45로 상당히 큰 편이며, pH는 7.83으로 강알칼리성을 보이는(pH가 12) 제강슬래그에 비해 약알칼리성의 성질을 지니고 있는 것으로 나타났다. 동 수쇄 슬래그의 입도분석 결과 균등계수(Cu)가 3.08로 입도가 좋은 모래의 균등계수(Cu>6)보다는 약간 작은 편이며, 곡률계수(Cc)는 1.15로 좋은 입도(1<Cc<3)의 범위에 해당된다. 본 연구의 대상시료인 동 수쇄 슬래그의 공학적인 특성은 아래의 표 1에 나타내었다. 통일분류법(USCS)에 의한 분류로는 SP로 나타나 필터재료로 적용시 유용한 재료로 판단된다. 동 수쇄 슬래그의 투수계수는 $3.502 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 로 사질토의 범위에 해당한다.

표 1. 동 수쇄 슬래그의 공학적 특성

구 분	함수비 ω , (%)	Gs	pH	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Cu	Cc	D ₈₅ (mm)	D ₁₅ (mm)	통일분류법 (USCS)	투수계수, k (cm/sec)
동 수쇄 슬래그	1.59	3.45	7.83	0.52	0.98	1.60	3.08	1.15	2.30	0.70	SP	3.502×10^{-2}

2.2 슬래그의 화학적 특성

본 연구에 사용된 동 수쇄 슬래그는 연속 동제련 공법에 의해 발생된 슬래그로서 Fe가 약 40%, SiO₂가 약 30%로 이 두 성분이 대부분을 차지하고 있으며, CaO의 함량이 약 5% 정도의 값을 가지고 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 철강 슬래그는 약 40%정도의 CaO를 함유하고 있으며, 동 수쇄 슬래그의 CaO의 함량은 약 5% 정도이므로 동 수쇄 슬래그는 수경성이 적은 것으로 사료된다. 동 수쇄 슬래그의 화학적인 특성은 아래의 표 2와 같다.

표 2. 동 수쇄 슬래그의 화학구성 성분(XRF)

분석항목 시료명	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	CaO	PbO	SO ₃
동 수쇄 슬래그	31.379	5.286	41.474	0.683	0.459	1.455	0.074	0.077	6.335	0.244	1.160
	Cu	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	ZnO	As ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO	ZrO ₂	MoO ₃	SnO ₂
	0.940	0.382	UD	UD	0.563	UD	UD	0.024	0.037	0.201	UD

※ UD : Undetected(검출한계 이하)

3. 동 수쇄 슬래그의 다짐특성

3.1 대상토의 공학적 특성

동 수쇄 슬래그의 다짐 효과를 검토하기 위하여 본 연구에서는 해성점토 및 육성점토 각각 1종씩을 선택하여 실험을 하였으며 자연함수비는 해성점토 37.14%, 육성점토 26.38%로, No. 200체 통과율은 해성점토에서 88.31%, 육성점토에서 97.88%로 대상토 모두 미세립토로 나타났다. 해성점토의 비중은 2.60, 육성점토의 비중은 2.75로 나타났으며, 해성점토의 소성지수는 14.61%, 육성점토의 소성지수는 17.10%로 고소성을 가진 연약토이다. 본 연구에 사용된 대상토는 모두 통일분류법상(USCS) CL로 분류되었으며, 유기물 함유량이 5%이상인 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 대상토인 해성점토 및 육성점토에 대한

공학적 특성은 아래 표 3과 같다.

표 3. 대상토의 공학적 특성

구 분	채취심도 (m)	자연 함수비 (%)	Atterberg Limits(%)			비중 Gs	pH	No. 200체 통과율(%)	유기물 함유량 (%)	흙의 분류 (USCS)
			Liquid Limits	Plastic Limits	Plasticity Index					
해성점토	지표하 18~22	37.14	28.48	13.87	14.61	2.60	8.10	88.31	5.28	CL
육성점토	지표하 4	26.38	37.50	20.40	17.10	2.75	4.82	97.88	7.49	CL

3.2 대상토의 화학적 특성

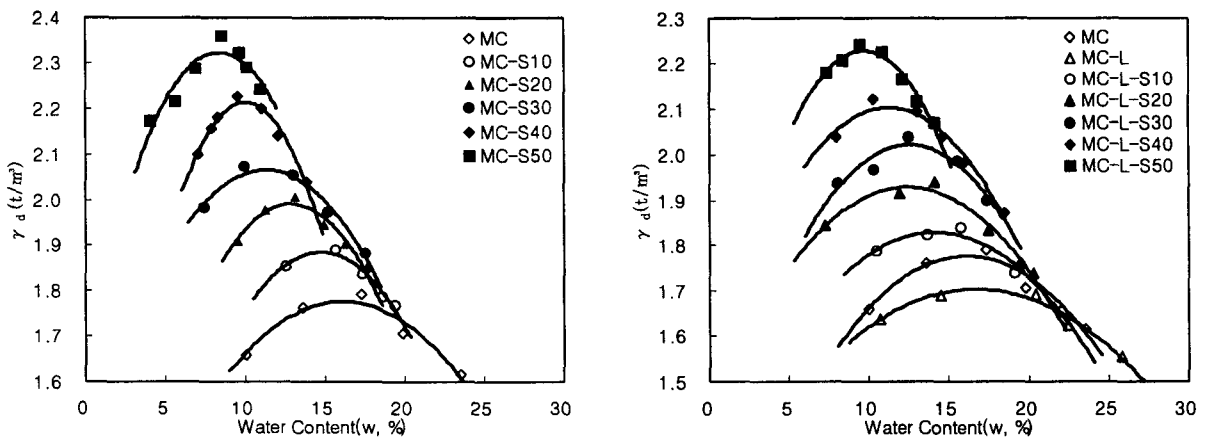
대상토의 구성성분에서 SiO₂는 65%이상, Al₂O₃가 15%이상으로 SiO₂와 Al₂O₃가 대상토 성분의 대부분 차지하고 있는 것으로 나타났다. 대상토인 해성점토 및 육성점토의 화학적 특성은 아래 표 4와 같다.

표 4. 대상토의 화학구성 성분(XRF)

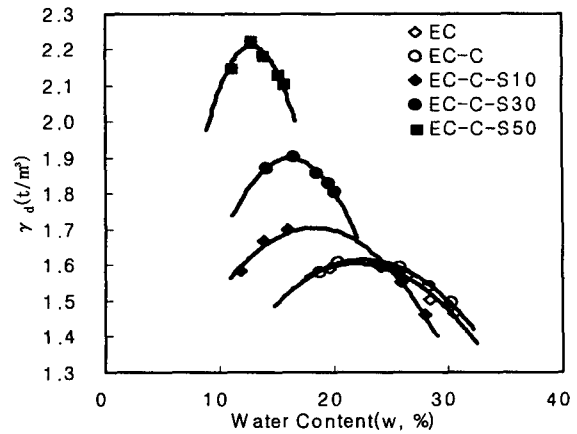
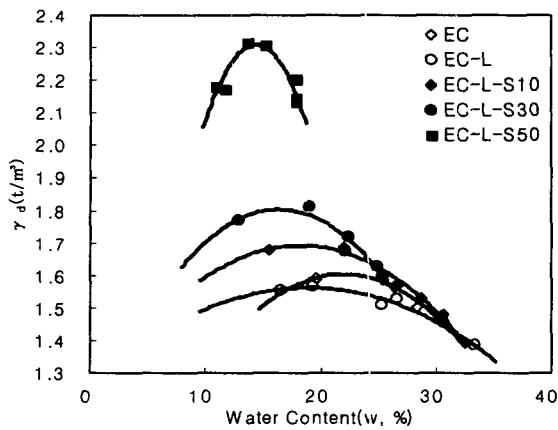
분석항목 시료명	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SUM	LOI
육성점토	70.690	16.846	5.572	0.068	0.852	1.478	2.284	1.546	0.041	0.795	100.172	5.576
해양점토	67.581	19.599	6.209	0.091	0.537	1.156	2.746	0.161	0.025	0.948	99.052	6.229

3.3 동 수쇄 슬래그 혼합토의 다짐특성

해성점토(MC)와 육성점토(EC)에 각각 생석회(L) 및 시멘트(C)(건조토 중량의 10%로 고정)를 첨가하고 동 수쇄 슬래그(S)를 혼합(10%, 20%, 30%, 40%, 50%)하였다. 즉, 건조시킨 해성점토 및 육성점토 중량의 10%에 해당하는 생석회 및 시멘트를 해성점토와 육성점토로 나누어 각각 첨가한 후, 동 수쇄 슬래그를 증가시키면서 혼합하였다. 아래의 그림 1은 해성점토 및 육성점토에 각각 생석회와 시멘트를 첨가한 후, 동 수쇄 슬래그를 혼합하여 다짐시험을 실시한 결과를 보여 주고 있다.



(a) 해성점토에 동 수쇄 슬래그를 배합한 경우 (b) 해성점토에 생석회와 동 수쇄 슬래그를 배합한 경우



(c)육성점토에 생석회와 동 수쇄 슬래그를 배합한 경우 (d)육성점토에 시멘트와 동 수쇄 슬래그를 배합한 경우
그림 1. 해성점토 및 육성점토에 동 수쇄 슬래그를 첨가한 경우의 다짐곡선

해성점토의 경우, 동 수쇄 슬래그가 첨가됨에 따라 최적함수비는 최대 8.3% 감소되고, 건조단위중량은 최대 $0.565t/m^3$ 증가하였다. 또한 생석회 및 동 수쇄 슬래그가 첨가될 경우 최적함수비는 최대 6.0% 감소되고, 건조단위중량은 최대 $0.545t/m^3$ 증가되는 것으로 나타났다. 육성점토의 경우도 혼합되는 동 수쇄 슬래그의 양이 증가할수록 최적함수비는 최대 7.5% 감소하고, 건조단위중량은 최대 $0.710t/m^3$ 증가하였다. 또한, 시멘트 및 동 수쇄 슬래그가 첨가될 경우 최적함수비는 최대 9.0% 감소되고, 건조단위중량은 최대 $0.610t/m^3$ 증가되는 것으로 나타났다. 결론적으로 동 수쇄 슬래그가 첨가될수록 다짐특성이 개선되므로 도로공사시 노건토로의 활용이 가능할 것으로 사료된다.

4. 동 수쇄 슬래그 혼합토의 수리특성

혼합토의 수리특성에 관한 시험에서 대상토와 첨가재인 생석회 및 시멘트의 화학적 반응으로 직접적인 변수두 투수시험이 곤란하여 압밀시험을 통하여 간접적으로 투수계수를 구하였다. 동 수쇄 슬래그의 입경이 대부분 1mm~2.5mm이므로 No.10체를 통과한 동 수쇄 슬래그를 대상토에 혼합하여 압밀시험을 실시하였다. 그 결과, 육성점토에 시멘트를 첨가한 경우가 생석회를 첨가한 경우보다 투수계수가 작은 것으로 나타났으며, 육성점토에 생석회를 첨가한 경우의 투수계수에 비해 생석회 및 동 수쇄 슬래그를 첨가한 경우의 투수계수가 더 크게 나타났다. 동 수쇄 슬래그를 혼합한 혼합토에 대한 투수계수는 그림 2와 같다.

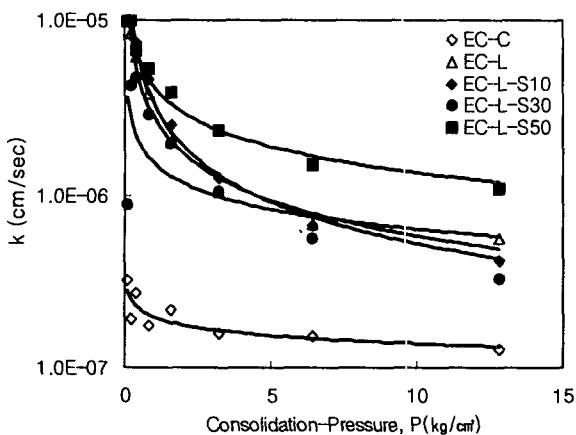


그림 2. 혼합토의 투수계수

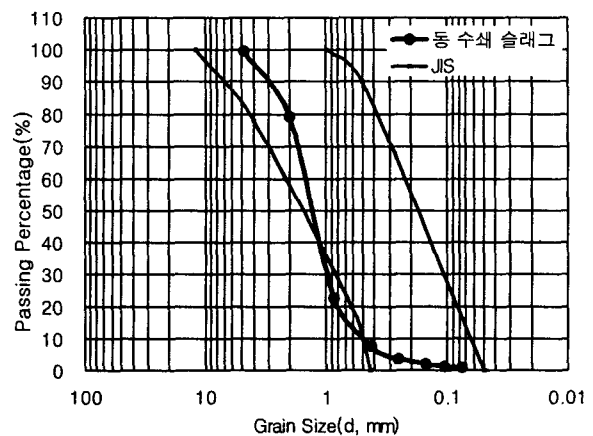
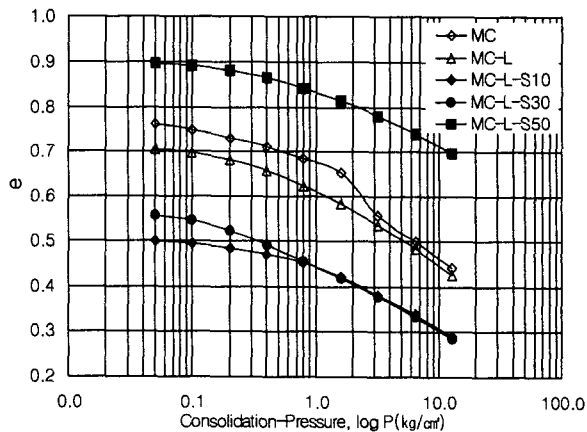


그림 3. 동 수쇄 슬래그의 입도분포 곡선

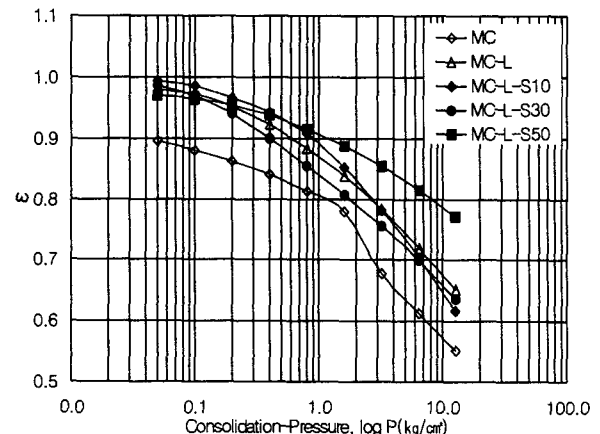
일반적으로 샌드드레인 재료로 사용되는 모래의 기준은 $75\mu\text{m}$ (No. 200) 통과량이 3%이하, D_{85} 는 $1\text{mm}\sim 8\text{mm}$, D_{15} 는 $0.1\text{mm}\sim 0.9\text{mm}$, 투수계수는 $1.0\times 10^{-3}\text{cm}/\text{sec}$ 이상이다. 동 수쇄 슬래그는 투수계수가 $3.502\times 10^{-2}\text{cm}/\text{sec}$ 로 사질토의 범위에 해당하며, 샌드드레인 재료로 사용되는 모래의 입도기준에 모두 만족한 것으로 나타났다. 그림 3에는 동 수쇄 슬래그의 입도분포곡선을 JIS의 샌드 매트 시방기준과 비교하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 JIS의 기준에 비교적 만족하는 입도분포를 나타내고 있어 샌드 매트용 재료로써 적합한 재료로 사료된다. 일반적으로 철강 슬래그는 약 40%정도의 CaO를 함유하고 있는데 비하여, 동 수쇄 슬래그의 CaO 함량은 약 5%정도이다. 장기시공시, 동 수쇄 슬래그는 철강 슬래그에 비해 수경성이 적으므로 연직배수재나 필터재, 샌드 매트용 재료로써 적합한 것으로 사료된다.

5. 동 수쇄 슬래그 혼합토의 압축특성

동 수쇄 슬래그의 입경이 대부분 $1\text{mm}\sim 2.5\text{mm}$ 이므로 No.10체를 통과한 동 수쇄 슬래그를 대상토에 혼합하여 압밀시험을 실시하였다. 본 연구에 사용된 대상토인 해성점토에 대한 하중-간극비 곡선을 아래 그림 4(a)에 나타내었으며, 재성형 시료에 대한 하중-간극비 곡선의 일반적인 특성인 선형압밀압력이 뚜렷이 나타나지 않고 있다. 전체적으로 해성점토의 압축성이 가장 크게 나타났으며, 동 수쇄 슬래그 함유량의 차이에 따른 압축성의 변화는 확연히 구별할 수 없는 것으로 나타났다. 아래의 그림 4(b)는 본 연구 시료에 하중-변형을 곡선을 나타낸 것이다. 동 수쇄 슬래그 첨가로 변형율의 변화가 작아지므로 압축성이 감소되는 것을 알 수 있다.



(a) 각 시료별 하중-간극비 곡선



(b). 각 시료별 하중-변형율 곡선

그림 4. 해성점토에 동 수쇄 슬래그를 혼합한 혼합토의 압축특성

일반적으로 압축지수(C_c)는 소성이 높은 점토일수록 크게 나타나며, 압축지수가 클수록 침하가 크게 발생하게 된다. 해성점토의 압축지수가 0.23으로 가장 크고, 해성점토에 생석회를 혼합하는 경우 압축지수가 0.18, 해성점토에 생석회 및 동 수쇄 슬래그 50%를 첨가하는 경우 압축지수가 0.13으로 생석회와 동 수쇄 슬래그를 첨가할수록 압축지수가 작아지는 경향을 보이고 있다. 이는 동 수쇄 슬래그가 첨가될수록 간극비와 변형율의 변화가 작게 나타나 전체 압밀침하량이 감소하게 되어 실제 지반개량에 효과가 있는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 논문에서는 동제련 과정 중 부산물로 발생하는 동 수쇄 슬래그의 배수재, 필터재 등의 지반공학적인 활용 방안에 대하여 검토하였다. 동 수쇄 슬래그에 대한 기본적인 물성 시험 및 화학적 분석을 실시하고, 대상토인 해성점토 및 육성점토에 혼합하여 다양한 지반공학적인 시험을 실시하여 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

1. 동 수쇄 슬래그는 비중은 3.45, pH는 7.83으로 약 알칼리성을 띠고 있었다. 동 수쇄 슬래그의 입도는 입자의 크기가 대부분 1mm~2.5mm인 조립토이며, 통일분류법에 의한 분류로는 SP로 나타나 필터재 료로 적용시 유용한 재료로 판단된다.
2. 동 수쇄 슬래그는 Fe가 약 40%, SiO₂가 약 30%로 구성성분의 대부분을 차지하고 있으며, CaO의 함량이 약 5% 정도의 값을 가지고 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 철강 슬래그는 약 40%정도의 CaO를 함유하고 있는데 비하여, 동 수쇄 슬래그의 CaO의 함량은 약 5%정도이므로 수경성이 적은 것으로 나타났다.
3. 다짐시험결과, 해성점토의 경우 동 수쇄 슬래그의 혼합비가 증가할수록 최적함수비가 감소하고, 최대 건조단위중량이 증가하였다. 육성점토의 경우, 동 수쇄 슬래그의 혼합비가 커질수록 최적함수비는 감소하고, 최대건조단위중량은 증가하는 것으로 나타났다. 동 수쇄 슬래그가 첨가될수록 다짐특성이 개선되므로 도로공사시 노건토로의 활용이 가능할 것으로 사료된다.
4. 동 수쇄 슬래그는 투수계수가 3.502×10^{-2} cm/sec로 사질토의 범위에 해당되며, 샌드드레인 재료로 사용되는 모래의 입도기준에 모두 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 샌드 매트용 JIS의 시방기준을 만족하므로 샌드 매트용 재료로써 적합한 재료로 사료된다. 장기 시공시, 동 수쇄 슬래그는 철강 슬래그에 비하여 수경성이 적으므로 연직 배수재나 필터재, 샌드 매트용 재료로써 적합한 것으로 사료된다.
5. 압축특성 시험결과, 동 수쇄 슬래그 함유량의 차이에 따른 압축성의 변화경향은 확연히 구별되지 않았으나, 생석회와 동 수쇄 슬래그를 첨가할수록 압축지수가 작아지는 경향을 보이고 있다. 이는 동 수쇄 슬래그가 첨가될수록 간극비와 변형율의 변화가 작게 나타나 전체 압밀 침하량이 감소하게 되어 실제 지반개량에 효과가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 이광찬, 이문수(1999), "재활용을 위한 전로슬래그의 투수성 고찰(I)", 한국지반공학회논문집, 제15권, 제4호, pp.69~83
2. 이광찬 정규향, 김영남, 이문수(2000), "연직배수공법에 있어서 제강슬래그의 재활용을 위한 투수성 연구", 한국지반공학회 연약지반처리위원회 학술세미나, pp.12~31
3. 황선근, 이성혁, 이시한, 최찬용(2000), "철도노반재로서의 수경성 입도 조정 고로 슬래그(HMS-25)의 적용성 평가", 한국지반공학회논문집, 제16권, 제1호, pp.157~165
4. 이세현(2000), "건설용 골재로서 동제련 슬래그의 재활용", 한국건설기술연구원 기술정보, 제204호, pp.47~50
5. 이세현(2000), "동제련 슬래그 골재의 토목공사 활용검토 보고서", 한국건설기술연구원
6. S. Wild a, J.M. Kinuthia a, G.I. Jones a, D.D. Higgins b, "Effect of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag(GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils", Elsevier Science Engineering Geology 51(1990) pp.37~53
7. Braja M. Das, Anthony J. Tarauin, and Andrew D. Jones(1982), "Geotechnical Properties of a Copper Slag", Transportation Research Record 941
8. B.B. Lind, A.M. Fallman, L.B. Larsson(2001), "Environmental impact of ferrochrome slag in road construction", Waste management 21(2001), pp.255~264