

전기로 제강 환원 슬래그 혼합토의 지반공학적 특성

Geotechnical Characteristics of Reduced Slag-soil Mixtures in Electric Furnace

신재원¹⁾ · 윤여원[†] · 윤길림²⁾

Shin, Jaewon · Yoon, Yeowon · Yoon, Gillim

ABSTRACT : Only a few studies have been conducted using reduced slag as recycled material. The reduced slag in electric furnace is produced as a by-product in making a steel and a few applications of the reduced slag as expensive additives and bonding materials or as the stabilized soils was reported. The purpose of this study is to present the feasibility of the reduced slag as recycled material, especially, in a field of civil engineering. In order to achieve the purpose experiments such as SEM and XRF analysis was conducted for the reduced slag in electric furnace. Based on the results various geotechnical experiments were conducted to know engineering properties of slag-soil mixtures. Weathered soils and clay are mixed with reduced slag for various ratios. As the ratio of reduced slag to weathered soil increases, the maximum dry unit weight of the mixture decreased with increasing optimum moisture content. The results indicates that there is no effect on a reduced slag by compaction efforts. The shear strengths of the weathered soil-slag mixtures are slightly higher or similar to those of weathered soils. The permeability of the weathered soil-slag mixtures is similar to that of silty or sandy soils. Therefore, it is possible to use the mixtures as embankment or backfill materials in the fields. The unconfined strength of the mixtures of reduced slag and clay is higher than that of clay and it tends to increase with the curing time. Therefore it can be used to improve the soft ground.

Keywords : Reduced slag, Recycled material, Shear strength, The unconfined strength, Soft ground

요 지 : 철강의 생산 중에 부산물로 발생하는 전기로 제강 환원슬래그는 토질안정제로서의 적용성, 결합재 및 팽창제로서 활용법에 대한 약간의 연구 보고만 있을 뿐, 전기로 제강 환원슬래그 재활용에 관한 연구 및 시공실적은 거의 없는 실정이다. 본 연구는 전기로 제강 환원슬래그를 토목 분야에 재활용할 수 있는 방법을 모색하는데 이러한 목적을 달성하기 위하여 SEM, XRF 시험을 수행하였다. 이를 바탕으로 풍화토 및 점토와 환원슬래그를 일정한 혼합율로 혼합한 후, 환원슬래그 혼합토의 물리·공학적 특성을 고찰하기 위한 다양한 지반공학적 실내시험을 수행하였다. 다짐시험에서는 환원슬래그의 혼합율이 증가할수록 최대건조단위중량이 감소하고 최적함수비는 증가하였다. 이것은 환원슬래그를 성토재 및 재하재로 사용할 경우, 환원슬래그가 혼합된 풍화토는 지내력의 증가 등의 관점에서는 성토재 및 재하재로 적합하지 않음을 의미한다. 환원슬래그와 풍화토를 혼합한 환원슬래그 혼합토의 전단강도 특성은 일반적인 모래의 내부마찰각보다 약간 크거나 비슷하였고, 투수특성 또한 실트 또는 모래와 비슷한 결과를 확인하였다. 환원슬래그와 점토를 혼합한 환원슬래그 혼합토의 일축압축강도는 순수점토의 일축압축강도보다 크게 나타났고, 재령일수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 따라서 연약점토 지반의 표층개량에 적용할 경우 개량효과가 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 환원슬래그, 재활용, 전단강도, 일축압축강도, 연약지반

1. 서 론

철강의 생산 중에 부산물로 발생하는 철강슬래그는 우리나라 철강 산업의 발달에 따라 그 양 또한 기하급수적으로 증가하고 있으며, 처리공정에 따라 크게 고로(高爐)슬래그와 제강(製鋼)슬래그로 나누어진다. 따라서 정부에서도 슬래그를 ‘폐기물관리법(1997)’에서 지정 폐기물로 지정하고, ‘자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률’에서 슬래그의 재활용의 용도 및 방법을 표준화하여 재활용을 촉진하고 있다

(도갑수 등, 1991).

우리나라 철강 생산 공정의 대부분이 고로에서 철광석을 용융하는 방법을 사용하고 있으므로, 고로슬래그의 발생량 또한 전체 슬래그 발생량의 대부분을 차지한다. 고로슬래그를 재활용하기 위한 연구는 1970년대부터 시작하여 현재 레미콘 및 토목건축자재로 광범위하게 사용되고 있다.

그리고 전로 또는 전기로에서 제련 및 제강과정 중 발생하는 제강슬래그는 산화슬래그와 환원슬래그로 나누어진다. 현재는 산화슬래그를 아스팔트 콘크리트의 골재로 개발

1) 학생회원, 인하대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

† 정회원, 인하대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail : yoonyw@inha.ac.kr)

2) 정회원, 한국해양연구원 책임연구원

하여 특허를 획득한 후, 고속도로 및 일반도로에 도로용 골재로써 적극 활용하고 있는 사례도 있다(채성태 등, 2007). 또한 산화슬래그는 도로용 골재 외에도 매립용, 복토용 및 뒷채움, 벽돌용, 호안공사용 골재 등 다양한 용도로 널리 사용되고 있다(임희대, 1996; 이승한, 1996; 이형수 등, 1999; 이문수 등, 2000).

그러나, 환원슬래그의 경우 그 자체가 갖고 있는 팽창 붕괴 특성 때문에 콘크리트용 골재로 사용되지 못하고 거의 공지 매립용에 한하여 사용되고 있으며, 실제 건설현장에서의 활용은 전무한 상태이다. 또한 토질안정제로서의 적용성, 결합재 및 팽창재로서 활용법에 대한 약간의 연구 보고만 있을 뿐, 환원슬래그 재활용에 관한 연구 및 시공실적은 거의 없는 실정이다(도갑수 등, 1991).

본 연구는 환원슬래그의 사용 촉진을 위해서 환원슬래그 자체의 기본특성, 역학특성 및 투수특성을 확인함으로써 토

목재료로서의 활용가능성을 고찰하고자 한다.

2. 전기로 슬래그의 발생

일반적으로 강재의 제조 공정은 그림 1에 나타낸 바와 같이 철광석으로부터 철을 제련하여 선철(용선)을 제조하는 제선 공정, 선철을 정련하여 강괴 또는 강편을 제조하는 제강 공정과 강괴를 롤러로 압축하여 일정한 형상의 강재를 제조하는 압연 공정으로 구성된다. 제선 공정은 용광로에 철광석과 코크스 등을 투입하고 가열하여 용융된 쇳물을 뽑아내는 공정이고, 압연 공정은 강괴를 롤러에 통과시킴으로써 형강이나 열연 코일과 같은 강재를 생산하는 공정이다.

그림 2는 전기로 슬래그의 발생 과정을 나타낸 것으로 투입 원료(철스크랩 등)를 전기로에서 아크열을 열원으로 하여 용융, 용강 중에 산화슬래그가 발생되며, 전기로에서 나온 쇳물을 LF(Ladle Furnace)에서 아크열로 승온 및 성분 조정을 하는 과정에서 환원슬래그가 생성된다.

이러한 제철 과정에서 발생되고 있는 고체상태의 폐기물에는 슬래그, dust, 슬러지 등이 있으며, 이 중에서 양적으로 가장 많이 배출되고 있는 것은 슬래그로서 연간 약 1,200만 톤이 발생하고 있다.

슬래그는 크게 제선슬래그(고로슬래그)와 제강슬래그로 나누어지며 이에 대한 상세한 분류는 그림 3에 나타내었다. 제선 슬래그는 현재 거의 전량이 활용되고 있으나 제강 슬래그는 일부분만이 재활용되고 대부분이 매립되고 있는 실정이다.

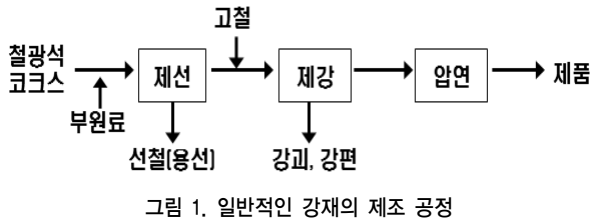


그림 1. 일반적인 강재의 제조 공정

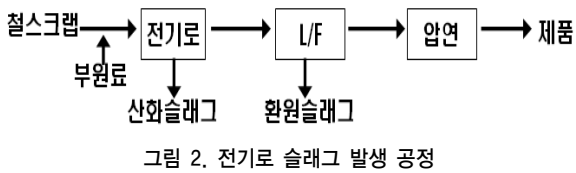


그림 2. 전기로 슬래그 발생 공정

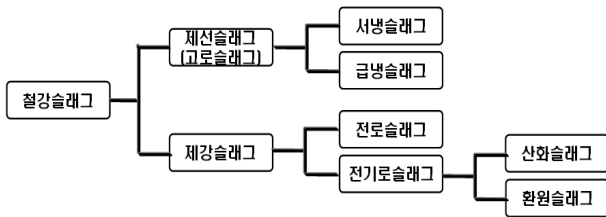
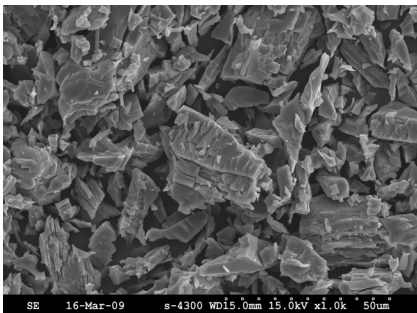


그림 3. 철강슬래그 구분

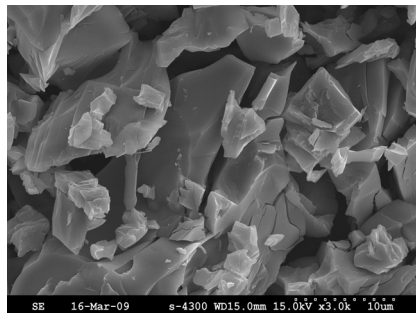
3. 환원 슬래그 기본

3.1 SEM 촬영 결과

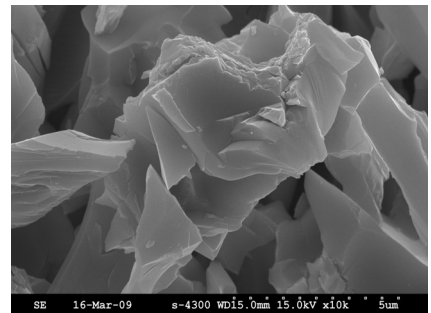
본 연구에서는 인천의 제철공장에서 발생하는 회백색 환원슬래그 시료를 SEM(Scanning Electron Microscope)를 이



(a) 1,000배 촬영



(b) 3,000배 촬영



(c) 10,000배 촬영

그림 4. 인천 회백색 시료 SEM사진

표 1. 환원슬래그의 성분 비율 [단위 : At%(Atomic)]

구분	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	SrO	TiO ₂	MnO	BaO
인천 공장 (1)	61.6	27.3	4.59	4.17	0.63	0.6	0.05	0.54	0.41	0.08
당진 공장 (9)	65.52	19.26	6.35	3.68	1.52	1.76	0.08	0.67	0.75	0.15
전체 평균 (10)	65.13	20.06	6.17	3.73	1.43	1.64	0.08	0.66	0.72	0.14

용하여 분석하였다. 그림 4의 사진에서 보는 바와 같이 인천 공장 회백색 시료의 경우에는 입자 크기가 균일하지 않으며 배열 또한 매우 불규칙한 모습을 볼 수 있다. 또한, 입자 표면이 거칠고 곳곳에 약간의 층상구조를 볼 수 있는 것이 특징이다.

3.2 XRF 분석 결과

XRF(X-ray Fluorescence)분석 결과는 표 1에 정리하였다. 분석을 위해 사용된 시료는 인천과 당진의 제철공장에서 발생된 총 10개의 시료에 대한 XRF 평균값을 나타낸 것이며, 그림 5는 채취한 총 시료 10개에 대한 평균값을 원형 도표로 나타낸 것이다.

이 값은 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 구성 성분 및 비율과 거의 유사함을 확인할 수 있다(나현수, 2011).

각 시료의 성분비율은 전체 평균과 어느 정도의 오차를 나타내고 있으나 모든 시료에서 CaO와 SiO₂가 주요성분으로 각각 60%, 20% 이상씩 포함되어 있다.

또한 알루미늄(Al), 마그네슘(Mg), 철(Fe), 황(S)의 산화물이 1% 이상, 스트론튬(Sr), 티타늄(Ti), 망간(Mn), 바륨(Ba)의 산화물이 1% 이하로 환원슬래그에 포함되어 있다. 특히, CaO와 SiO₂의 함유율이 많은 이유는 정련과정에서 발생되는 O₂와 S를 제거하기 위하여 코크스와 생석회를 넣게 되는 데 이에 따른 영향 때문이라 할 수 있다.

4. 환원 슬래그 혼합토의 물리·역학적 특성

환원슬래그는 그 자체만으로는 매립용으로 한정되어 사

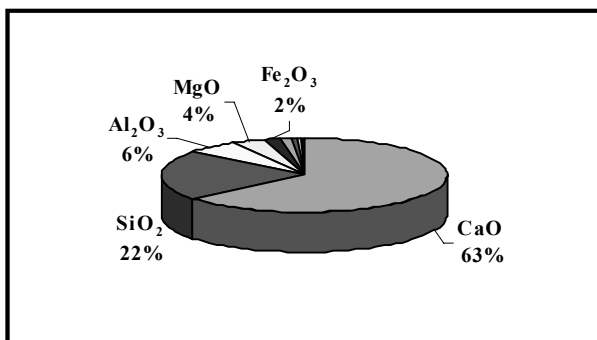


그림 5. 환원슬래그의 성분 비율(평균값)

용되므로 이를 건설현장에 활용하기 위하여 현장에서 흔하게 사용되는 풍화토를 일정비율로 혼합하여 환경적 특성(나현수, 2011)과 병행하여 물리적 특성을 확인하였으며, 표 2에 혼합 비율을 나타내었다. 본 연구에서 사용한 풍화토는 경기도 의왕시에서 채취한 시료이다.

4.1 입도분석

그림 6은 풍화토 및 채취장소가 다른 환원슬래그 A시료, B시료의 입도분포곡선이다. 그림 6에 나타난 환원슬래그 A시료는 산화슬래그가 일부 혼합되어 있을 것으로 판단되는 진회색의 시료, 환원슬래그 B 시료는 환원슬래그 위주의 회백색 분말 시료이다.

풍화토 100% 시료는 통일분류법에 의해 No.200체 통과량이 5% 미만이고, No.4체(4.75mm) 통과량이 50% 이상이

표 2. 환원슬래그의 혼합율

구분	S0	S5	S10	S20	S100
혼합율 (%)					
풍화토	100	95	90	80	0
환원슬래그	0	5	10	20	100

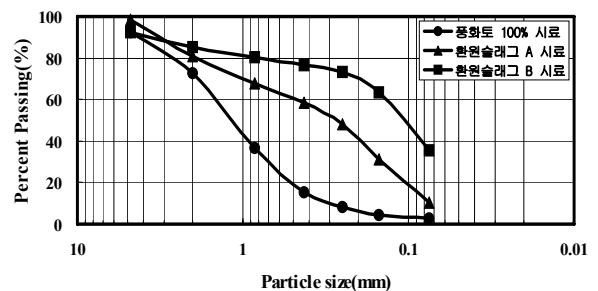


그림 6. 입도 분포 곡선

표 3. 환원슬래그와 풍화토의 입도 및 비중 시험 결과

구분	풍화토100%	환원슬래그100% (A시료)	환원슬래그 100% (B시료)
D ₁₀ (mm)	0.33	0.76	-
D ₃₀ (mm)	0.72	0.148	-
D ₆₀ (mm)	1.51	0.506	0.15
C _u	4.58	6.66	-
C _c	1.04	0.57	-
통일분류법 판정	SP	SP	-
비중(G _s)	2.72	2.98	

므로 모래질 흙이다. 흙을 분류하는 방법인 통일분류법에 따라서 SP(입도분포가 불량한 모래질 흙)에 해당한다.

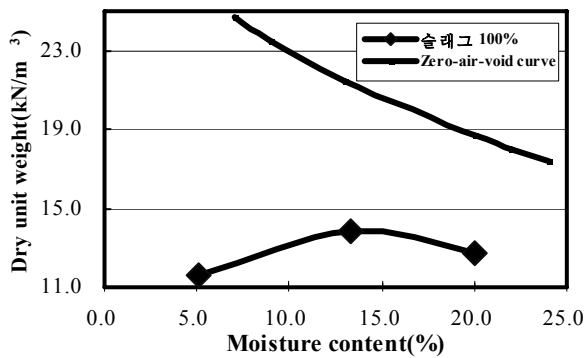
현재 인천의 제철 공장에서는 제강 시에 발생하는 산화 슬래그와 환원슬래그의 분리가 되지 않는 상태로 생산되기 때문에 시료 채취 장소에 따라 입도분석이 상당히 다른 결과를 나타낸다. 표 3은 각 시료의 입도분석 판정을 정리한 결과이다.

4.2 비중

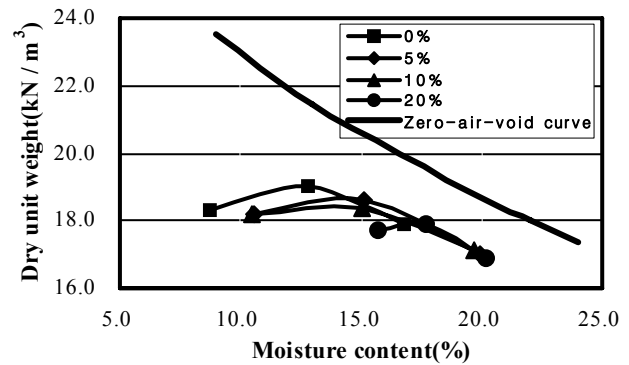
본 연구에서는 KS F 2308 방법에 의거하여 환원슬래그와 풍화토에 대하여 비중시험을 각각 3회 실시하였으며, 측정된 값들은 평균하여 대표값으로 결정하여 시험결과를 표 3에 나타내었다. 시험결과 풍화토의 비중은 2.72로 나타났고, 환원슬래그의 비중은 풍화토에 비해 약 1.1배 정도 큰 값을 나타내고 있다.

4.3 다짐

풍화토와 환원슬래그가 혼합된 풍화토에 대한 다짐시험



(a) 환원슬래그 100% 시료



(b) 환원슬래그 혼합토 시료

그림 7. 다짐시험 결과(A다짐)

표 4. 풍화토와 환원슬래그가 혼합된 혼합토의 다짐결과

구 분	S0	S5	S10	S20	S100
최대건조단위중량(kN/m ³)	19.0	18.6	18.4	17.9	13.8
최적 함수비(%)	12.8	15.1	15.0	17.7	13.3

표 5. 정수위 투수 시험 결과

구 분	T(°C)	온도 보정 k(cm/sec)	비 고
풍화토 100%	23.2	7.6*10 ⁻⁴	실트
풍화토 95%+슬래그 5%	23.1	9.5*10 ⁻⁴	실트
풍화토 90%+슬래그 10%	23.0	1.4*10 ⁻³	고운 모래
풍화토 80%+슬래그 20%	23.0	1.5*10 ⁻³	고운 모래
슬래그 100%	24.2	2.1*10 ⁻⁴	실트

의 결과를 그림 7, 표 4에 나타내었다. 그림 7, 표 4에서 환원슬래그의 혼합율이 증가할수록 최대건조단위중량이 감소하고 최적함수비는 증가하였다. 이것은 환원슬래그를 성토재 및 재하재로 사용할 경우, 환원슬래그가 혼합된 풍화토는 지내력의 증가 등의 관점에서는 성토재 및 재하재로 적합하지 않음을 의미한다. 그러나 본 시험의 경우 No. 4체에 의해 통과된 시료를 대상으로 한 것이므로 실제 현장에서 시공하는 최대 입경 40mm 이하의 환원슬래그가 혼합된 지반에 대한 다짐 영향과는 다소 차이를 보일 수 있다.

4.4 환원 슬래그 혼합토의 투수성

풍화토와 환원슬래그 혼합비를 달리하여 상대다짐도 95%에 대하여 정수위 투수시험을 실시하였다. 본 연구에서는 KS F 2322 규정에 의거하여 시험을 진행하였다. 투수시험 결과는 표 6에 정리 하였다. 시험결과 풍화토 100% 시료보다 슬래그의 혼합율을 증가한 시료의 투수계수가 약 1.5~1.9배 정도 큰 것을 알 수 있다. 또한 환원슬래그 100% 시료의 투수계수는 풍화토 100% 시료와 같은 실트 등급의 투수계수 값을 나타내었다.

표 5에서 보는 바와 같이 환원슬래그 혼합토의 투수계수는 $2.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec} \sim 1.5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 의 범위를 가지므로, 실트 질 흙 또는 고운 모래질 흙의 투수계수와 비슷함을 파악할 수 있다.

표 6. 환원슬래그 혼합토의 강도 시험 개요

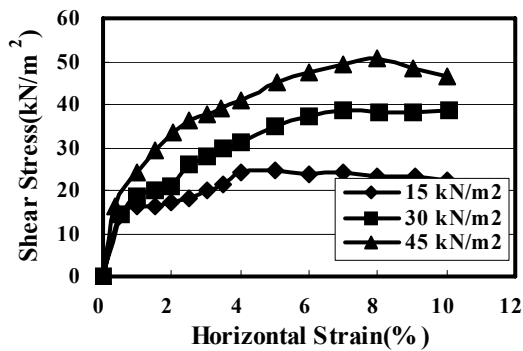
구 분	환원슬래그 혼합율(%)	비 고
직접전단시험	0, 5, 10, 20, 100	상대다짐도 90%, 95%
일축압축시험 (점토)	0, 10	시료크기 : 7×14cm 시료성형 : 강관 성형 양생조건 : 항온항습 재령일 : 3, 7, 14, 28일

5. 환원 슬래그 혼합토의 강도

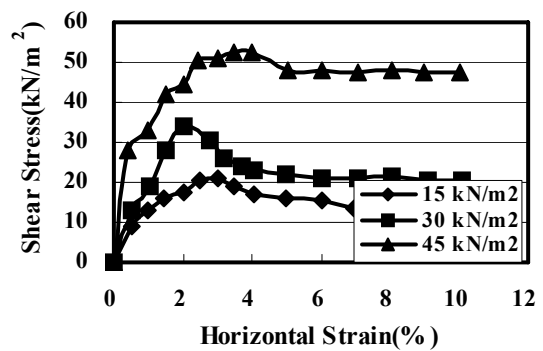
환원슬래그 혼합토의 강도특성을 고찰하기 위하여 직접 전단시험, 일축압축시험을 수행하였으며, 표 6에 각 시험에 대한 개요를 정리하였다.

5.1 직접전단시험

직접전단시험의 결과를 그림 8, 그림 9에 풍화토 100% 시료와 환원슬래그 100%의 응력 변형률 곡선을 대표적으로 도시하고, 표 7에 직접전단시험 결과를 정리하였다.

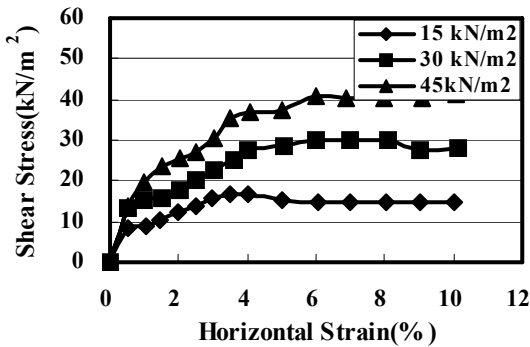


(a) 상대다짐도 90%

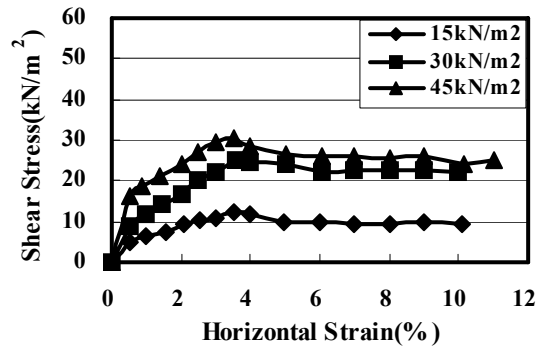


(b) 상대다짐도 95%

그림 8. 응력-변형률 곡선(풍화토 100% 시료, S0)



(a) 상대다짐도 90%



(b) 상대다짐도 95%

그림 9. 응력-변형률 곡선(슬래그 100% 시료, S100)

표 7. 환원슬래그 혼합토의 전단 특성

구 분		S0	S5	S10	S20	S100
상대다짐도 90%	내부마찰각 (ϕ , °)	42.2	40.2	35.5	38.2	35.5
	점착력 (c , kN/m ²)	15	3	9	4	7
상대다짐도 95%	내부마찰각 (ϕ , °)	43.8	43.1	40.2	43.5	31.4
	점착력 (c , kN/m ²)	5	6	8	7	4

표 7에 따르면 환원슬래그와 환원슬래그 혼합토의 내부 마찰각은 30°~45°의 범위를 갖으며, 점착력은 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 나타냈다. 따라서 환원슬래그 혼합토의 강도특성은 일반적인 토사와 유사하게 나타남을 확인하였다.

5.2 일축압축시험

5.2.1 시험 개요

본 연구에서 사용한 점토 시료는 인천 영종도에서 채취하였으며, 물성치는 아래 표 8에 나타내었다. 일축압축시험으로 환원슬래그의 강도 증진 효과를 확인하였다. 최적의 환원슬래그 혼합율과 일축압축강도가 수렴하는 재령일수를 확인할 수 있었다.

본 시험에서 공시체의 직경은 일반적으로 3.0cm 또는 5.0cm, 높이는 지름의 2배로 한다. 본 선행 시험에서는 직경 7cm, 높이 14cm 공시체를 사용하였다. 흙의 종류나 시료의 상태에 따라서는 시료튜브에서 꺼낸 시료를 지름 끝면만 성형

표 8. 채취시료의 기본 물성치

구 분	강관 몰드로 실시한 시험
자연함수비(%)	170
액성한계(%)	59.4
소성한계(%)	38.4
소성지수	21.0

후 공시체로 사용할 수 있다. 공시체의 제작은 순서에 따라 시료의 함수비가 변화되지 않도록 하였다. 환원슬래그를 혼합한 점토의 경우에 점토를 재성형하는 방법을 선택하였다. 이를 위해 점토를 건조로에서 노건조시킨 후 분말화하여 환원슬래그를 10% 혼합, 혼합 점토를 다짐을 통해 강관에 재성형 하였다. 또한 강도 증진을 비교하기 위해 환원슬래그를 혼합하지 않은 점토도 동일한 조건으로 성형하였다. 재성형한 시료는 3일, 7일, 14일, 28일 동안 항온 항습기에서 양생을 거친 후 샘플링 등에 따라 부스러진 부분을 제거하였다. 그림 10은 시료를 강관에서 추출하는 모습, 시료를 추출한 전·후의 사진이다.

5.2.2 일축압축시험 결과

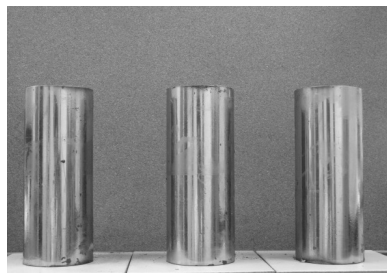
일축압축강도 시험 결과는 그림 11에 나타내었다. 시험 결과에 따르면, 두 시료 모두 양생기간이 증가함에 따라 강도가 증가하는 모습을 보였다.

그림 11(a)에서 3, 7, 14일 순수 점토의 일축압축시험 결과는 재령일수에 따라 강도 및 강성에 뚜렷한 차이를 볼 수 없으나, 28일 순수 점토의 강도는 약 1.5배 증가하였고, 강성 또한 약간 증가하였다. 그림 11(b)는 환원슬래그가 10% 혼합된 점토의 일축압축시험 결과이다.

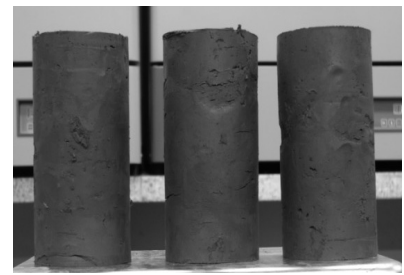
환원슬래그가 10% 혼합된 점토의 응력-변형률 곡선은 재령일수에 따라 뚜렷한 차이를 보이며, 강도 및 강성이 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 점토에 혼합된 환원슬래그



(a) 시료 추출

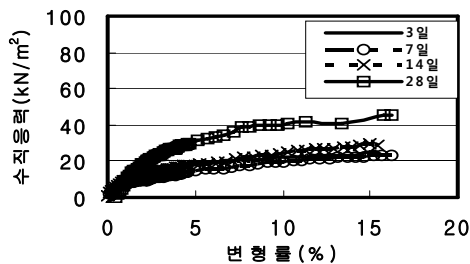


(b) 추출 전

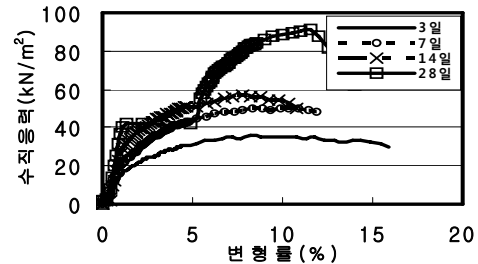


(c) 추출 후

그림 10. 시험 과정



(a) 100% 점토 시료(S0)



(b) 환원 슬래그 10% 혼합한 점토 시료(S10)

그림 11. 일축압축시험 결과(응력-변형률 곡선)

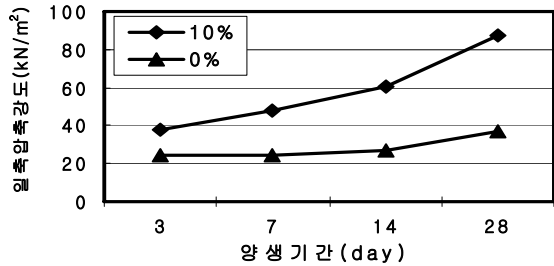


그림 12. 양생기간에 따른 일축압축강도(선행시험)

가 고화작용을 일으켜 시료의 강도 및 강성이 증가하였다고 판단된다.

그림 11(a), (b)에 나타난 일축압축시험 결과는 그림 12에 시료 종류와 양생기간에 따른 최대 일축압축강도로 정리하였다.

그림 12에서 주목해야 할 점은 환원슬래그의 혼합에 따른 강도 특성의 변화이다. 이는 S0 시료와 S10 시료의 일축압축강도를 비교하면 알 수 있다. 환원슬래그를 10% 혼합한 시료의 경우 일축압축강도가 순수점토의 강도에 비해 약 1.1~2.5배 정도 증가하였다. 본 결과는 환원슬래그가 강도 발현에 효과적인 영향을 끼친 것으로 판단할 수 있다.

본 연구의 목적은 환원슬래그의 고화유무 가능성을 파악하는 것이다. 시험 기본 조건을 동일시하여 환원슬래그의 혼합 유무로써 환원슬래그 고화능력을 판단할 수 있는 시험이다. 일축압축시험 결과를 분석하면 환원슬래그의 고화처리 능력에 대한 긍정적인 판단을 할 수 있으며, 추후에 좀 더 광범위하고 다양한 추가시험이 필요하다고 사료된다.

6. 결 론

환원슬래그의 실질적인 재활용 가능성 분야를 고찰하기 위하여 본 연구에서는 환원슬래그의 기본 성분을 분석한 후, 토목 현장에서 흔히 볼 수 있는 토사와 혼합하여 물리·역학적 특성, 투수특성, 강도특성을 고찰하였다. 또한 점토와 혼합하여 강도 증진 특성을 고찰하기 위하여 실내시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 환원슬래그 혼합토의 전단강도 특성은 일반적인 모래의 내부마찰각보다 약간 크거나 비슷하였다. 투수특성 또한 실트 또는 모래와 비슷하지만, 다짐시험 결과를 본

석하면 토목현장에서 성토재 또는 뒷채움재로 활용은 추가적인 시험을 통해 판단해야 될 것으로 사료된다. 본 연구의 경우 No. 4체에 의해 통과된 시료를 대상으로 한 것이므로 실제 현장에서 시공하는 최대 입경 40mm 이하의 환원슬래그가 혼합된 지반에 대한 다짐 영향과는 다소 차이를 보일 수 있다.

(2) 환원슬래그와 점토를 혼합한 환원슬래그 혼합토의 일축압축강도는 순수 점토의 일축압축강도보다 크게 나타났다. 재령일수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 따라서 연약점토 지반의 표층개량에 적용할 경우 개량효과가 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 환원슬래그의 재활용 가능성 분야를 고찰하기 위하여 실내에서 수행한 기초 연구이다. 연구결과를 고찰한 결과, 환원슬래그를 점토지반 개량재 등에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 나현수(2011), 전기로 제강 환원슬래그의 환경적 영향, 석사학위논문, 인하대학교, pp. 21~33.
2. 도갑수, 이승무, 이정진, 이성희, 이근원, 김시경, 이유미, 한정원, 조규훈, 노성욱(1991), 철강슬래그의 재생 이용 활성화 방안 연구, 한국폐기물자원순환학회지, pp. 5~62, pp. 137~160.
3. 이문수, 이광찬, 정규향, 허준희, 문영민(2000), 제강슬래그 현장 투수성에 관한 연구보고서, 한국지반공학회, pp. 3~26.
4. 이승한(1996), 보조기층제로서 한국산 전기로슬래그의 특성에 관한 연구, 産業技術研究所論文報告集, pp. 105~112.
5. 이형수, 김수삼, 이송, 정승용, 한상재, 김지용, 김용수(1999), 제강슬래그를 이용한 연약지반 개량기술 개발연구, 대한토목학회, pp. 9~32, pp. 63~96.
6. 임희대(1996), 벤토나이트 혼합율에 따른 제강 슬래그 및 슬러지의 투수특성, 충남대학교 산업기술연구소논문집, Vol. 11, No. 2, pp. 15~21.
7. 채성태, 남궁연, 최재석, 정승호, 변경일, 한종민(2007), 전기로 산화 슬래그를 이용한 아스팔트 혼합물 평가 및 현장 적용성 연구, 한국건자재시험연구원, pp. 4~95.

(접수일: 2010. 12. 15 심사일: 2011. 3. 3 심사완료일: 2011. 6. 15)