

전기로 제강슬래그로 안정화된 연약점토의 강도 발현 특성

Strength Development Characteristics of Clay Stabilized with Electric Furnace Steel Slag

김형주¹⁾ · 함태규²⁾ · 박태웅[†] · 김태언³⁾

Hyeongjoo Kim · Taegew Ham · Taewoong Park · Taeon Kim

Received: April 11th, 2024; Revised: April 12th, 2024; Accepted: April 24th, 2024

ABSTRACT : This study aimed to investigate the changes in chemical components that occur when weak clay is mixed with steel slag modified with calcium oxide, and to understand the expression characteristics of compressive strength according to hydrophilicity and curing time. XRF testing, SEM imaging, vane shear strength and uniaxial compressive strength testing were conducted. Calcium (Ca) released from the steel slag increases the Ca content in clay by increasing the number of crystal particles and forming a coating layer known as calcium silicate hydrate (CaO-SiO₂-H₂O) through chemical reactions with SiO₂ and Al₂O₃ components. The weak clay stabilized with steel slag is classified into an initial inactive zone where strength relatively does not increase and an activation zone where strength increases over curing time. The vane shear strength of the initial inactive area was found to be 4.4 to 18.4 kN/m² in the state of the weight mixing ratio R_{ss} 30% (steel slag 30% + clay 70%). In the case of the active area, the maximum uniaxial compressive strength increased to 431.8 kN/m² after 480 hours of curing time, which increased due to the apparent adhesion strength of clay through pozzolanic reaction. Therefore, considering the strength expression characteristics of stabilized mixed clay based on the mixing ratio (R_{ss}) during the recycling of steel slag can enhance its practicality in civil engineering sites.

Keywords : Electric furnace steel slag, Clay, Mixing ratio, SEM-XRF analysis, Curing time, Compressive strength

요지 : 본 연구는 산화칼슘 개질제로 제강슬래그를 사용하여 연약점토와 혼합 시 발생하는 화학적 성분의 변화가 수경성 및 양생 시간에 따른 압축강도 발현 특성을 파악하고자 XRF 시험과 SEM 촬영, 베인전단강도, 일축압축강도 시험을 수행하였다. 제강슬래그로부터 용출되는 칼슘(Ca)은 점토 내 Ca 함량을 증가시키고, SiO₂ 및 Al₂O₃ 성분과의 화학적 반응으로 칼슘실리카게이트 수화물(CaO-SiO₂-H₂O) 반응으로 점토의 피막층이 형성되어 결정체 입자수를 증가시킨다. 따라서, 중량혼합비 R_{ss} 30%(제강슬래그 30% + 점토 70%) 상태에서 초기 비활성영역의 베인전단강도는 4.4~18.4kN/m²로 나타났다. 활성영역의 경우 양생시간 480시간 경과 시 최대일축압축강도는 431.8kN/m²까지 증가되었으며, 이는 포졸란 반응에 의해 점토의 결보기 점착(Attraction) 강도를 증가시킨다. 본 연구를 통해 토목현장에서 제강슬래그의 재활용을 위해 연약점토와 혼합 시 제강슬래그의 혼합율(R_{ss})에 따라 연약점토는 강도 발현이 되므로 활용성을 높일 수 있다.

주요어 : 전기로 제강슬래그, 점토, 혼합비, SEM-XRF 분석, 양생시간, 압축강도

1. 서론

철강슬래그는 일반적으로 제강 공정에 따라 제강슬래그와 고로슬래그로 분류되며, 제강슬래그는 주로 전로 공정과 전기로 공정에서 발생된다(Kim et al., 2012). 생성과정에서 전로계 슬래그는 주원료로 고철(Scrap)과 부원료인 생석탄(CaO)을 전로에 채워 고압의 산소에 의해 용융되는 과정에서 발생한다. 전기로계 슬래그는 주원료로 고철 등을 부원료인 생석탄을 사용하여 전기로에서 제강할 때 발생한다. 고로슬래그는 주원료로는 철광석과 부원료로 코크스, 석회석

등이 고온에서 용해되어 생성된다(Na et al., 2011). 생성된 슬래그는 주로 시멘트 원료 및 파쇄 골재로 사용되며, 도로, 철도, 콘크리트용 골재뿐만 아니라 항만 공사 및 지반 개량 재료도 재활용되고 있다. 또한, 제강슬래그는 도로 포장재, 아스팔트, 콘크리트 및 항만 공사용 채움재와 복토용 등 다양한 용도로 재활용되고 있으며, 석회질 비료로도 사용되고 있다. 그러나 성토재로 사용될 때 침출수가 해수 또는 물과 접하는 경우, 강한 알칼리성을 띄어 환경 문제를 유발할 수 있다(Shi, 2004; Ahmedzade et al., 2009).

한편 제강슬래그는 일반적으로 CaO 및 SiO₂를 주성분

1) Professor, Department of Civil Engineering, Kunsan National University

2) Research Professor, Renewable Energy Research Institute, Kunsan National University

† Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University (Corresponding Author : r2r3r4r5@kunsan.ac.kr)

3) Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University

으로 하고 있지만, 정련 시간이 길고 석회 함량이 높아서 석회의 일부가 유리 석회로 남아 FeO, MgO, MnO 등을 생성시키고 있으므로 포틀랜드 시멘트와 유사한 화학 조성을 가지는 특징이 있다. 전기로는 전로와는 달리 주원료로 고철을 사용하여 외부에서 열을 가하여 원료를 용해시켜 정련시키므로 내의 환경을 산화성 및 환원성으로 자유롭게 변화시킬 수 있는 특징으로 인해 산화-환원슬래그라고 할 수 있다.

철강슬래그 및 석탄재 배출 사업자의 재활용 지침에 따른 한국 철강협회의 자료에 따르면, 2023년 국내 업체의 제강슬래그 발생량은 1,069만 톤/년으로, 고로슬래그의 재활용률은 95.6%, 제강슬래그의 재활용률은 92.1%로 나타났다. 이는 철강슬래그 고시된 이용 목표율 중 95%를 약간 하회하는 상황이다. 제강슬래그의 재활용 용도를 살펴보면, 성복토용 45.1%, 도로용 26.7%, 제철 원료 18.3%, 시멘트 원료 5.2%, 내화물 제품 2.5%, 기타 2.2%로 분류되므로 전체 재활용의 71.8%가 도로용이나 성복토용으로 사용되는 것으로 나타났다. 전기로 제강슬래그의 물리적 특성은 밀도가 자연사보다 크고 안정성과 흡수율이 양호하며, 팽창성은 10% 이하로 토목 성토용으로 재활용되고 있다. 그러나 토질 안정제로서의 적용성과 결합재 및 세립분의 팽창재로서의 활용법에 대한 연구가 수행되고 있고, 다양하게 제강슬래그를 재활용하는 방법을 모색하는 연구 및 시공기술이 개발되고 있다.

전기로 제강 환원슬래그 혼합토의 지반공학적 특성을 조사하기 위해 환원슬래그와 점토를 혼합하여 일축압축시험을 수행한 결과, 재령 일수가 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하고 있다(Shin et al., 2011).

전기로 제강슬래그를 연약지반 고화제의 재료로 사용할 수 있음을 확인하여 연약 지반 개선의 문제점을 해결할 수 있는 연구를 수행하였다(Lee et al., 2010). 제올라이트와 제강슬래그를 함께 사용하는 경우 반응성 매질로서 복합 오염물질의 제거 능력은 제올라이트-제강슬래그가 반응하는 경우 영양염류와 중금속의 복합 오염물질의 제거 능력이 양호하다고 제시하였다(Kim et al., 2014).

한편 전기로 제강슬래그를 실질적으로 성토용이나 도로 노상 포장층, 항만구조물 재료로 재활용 시 혼합 강도와 강도 발현에 따른 화학적인 변화가 수경성에 미치는 영향에 대한 연구가 미비하다(Horpiulsk et al., 2011; Lorenzo et al., 2004; Miura et al., 2001). 실질적으로 해안가 터파기 시에 발생하는 연약한 저소성 점토와 지역에서 배출되는 제강슬래그를 혼합하여 개질토(CaO Improved Soil) 재료로 활용하는 연구가 요구되고 있다. 그러나, 제강슬래그 부산물인 슬래그 산화칼슘 개질제와 점토를 혼합할 때 화학적 성

분변화가 강도증가에 미치는 영향에 대한 현장 활용 가능성을 포함한 정성적 연구는 아직 부족한 실정이다. 이에 따라 제강슬래그를 건설 현장에서 보다 효율적으로 활용하기 위해 연약점토와 혼합하여 강도 발현 특성을 시험에 의해 분석하였고, 이를 토목현장에서 친환경 재활용 혼합 경화제로 활용되도록 하였다.

2. 시험시료의 물리·화학적 특성

2.1 제강슬래그와 저소성 연약점토의 물리적 특성

본 연구에서는 군산지역 하천 소성 연약점토를 배합토로 사용하였으며, Table 1과 Fig. 1은 점토의 물리적 특성을 나타냈다. 시료의 입도는 #200체 통과량이 94.3%이고, 액성한계와 소성한계는 각각 31.03%, 22.46%, 소성지수는 8.57%, 비중은 2.649, 통일분류법상 저소성 점토(CL)로 분류되어 저소성 경화성 점토이다. 또한, 제강슬래그는 제강회사의 전기로 제강슬래그를 활용하였다. 입자 크기는 체가름에 의해 19mm 미만 슬래그 골재를 사용하였다. #4체 통과량은

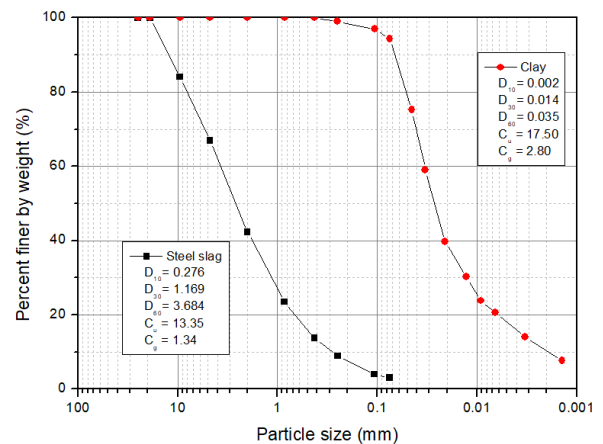


Fig. 1. Particle-size distribution curves for river clay and steel slag

Table 1. Physical properties of Gunsan river clay and steel slag

Property	River bed clay	Steel slag (Less than 19mm)
Moisture content (%)	41.60	2.58
Liquid limit (%)	31.03	-
Plastic limit (%)	22.46	-
Plasticity index (%)	8.57	-
Specific gravity	2.649	3.150
Fine-grained soil (%)	94.30	3.1
Uniformity Coefficient (C_u)	13.34	17.50
Curvature Coefficient (C_c)	1.34	2.80
USCS	CL	SW

66.9%, #200체 통과량 3.1%, 초기함수비 2.58%, 비중 3.150으로 나타났으며, 균등계수(C_u)와 곡률계수(C_c)는 17.5와 2.80으로 통일분류법상 입도가 양호한 모래(SW)로 분류되었다.

2.2 제강슬래그와 연약점토의 화학적 특성

Fig. 2는 전기로 제강슬래그 및 점토에 대한 엑스선형광분석(XRF, X-ray Fluorescence Spectrometer) 결과 중 주요 성분(Ca, Si, Al)의 XRF 에너지 Intensity를 나타냈다. 장비는 ZSX PrimusII 기기로 측정범위 5B(붕소) ~ 92U(우라늄)이다. X선 회절분석에서 결정성이 날카로운 헵크(Peak)를 확인할 수 있다. 산화칼슘 개질제로 사용한 제강슬래그는 CaO가 34.1%로 다량 함유되어 있으며, XRF 에너지 Ca의 Intensity 최대값은 1570.8 kcps로 Ca > Fe > Al > Si > Mg > S 순으로 구성되어 있다.

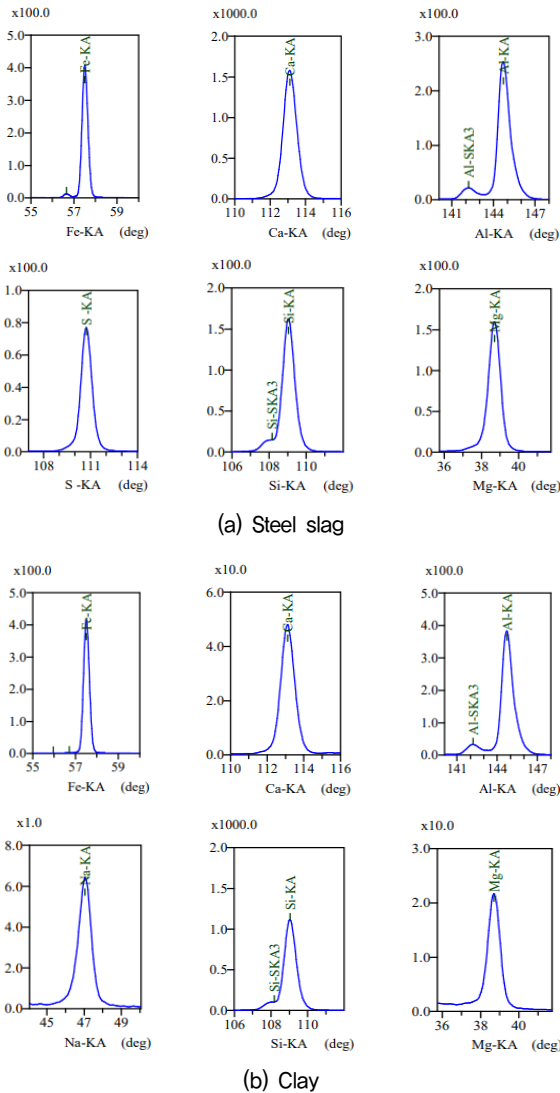


Fig. 2. Light intensity peak and fluorescence degree of steel slag and river clay

또한 개량토로 사용된 점토는 SiO₂가 67.3% 최대함유량으로 Si의 XRF 에너지 Intensity는 최대 1,107.9 kcps이며, 함유량은 Si > Fe > Al > Ca > Mg > Na 순이다. 제강슬래그와 점토의 Intensity는 제강슬래그의 경우 Ca에서 최대값을 나타내고 있으며, 점토는 Si에서 최대 피크값이 관찰되었다. 또한, 제강슬래그와 점토의 성분 함유량에 대한 XRF 패턴은 유사한 것으로 확인되었다.

Fig. 2와 Fig. 3은 XRF 시험에 의한 순수 제강슬래그와 점토에 대한 화학적인 성분 비율을 나타냈다. 개질제로 제강슬래그는 CaO(34.1%) + SiO₂(13.0%) + Al₂O₃(16.7%) + Fe₂O₃(8.6%) 총 72.4%로 구성되어 있으며, 개질토로 점토는 SiO₂(67.3%) + Al₂O₃(17%) + Fe₂O₃(4.9%) + CaO(1.1%)로 총 90.3% 함유되어 있고, 제강슬래그의 CaO는 34.1% 반면에 점토는 CaO가 1.1%로 나타났다

본 시험공시체에 개질제로 제강슬래그를 점토와 혼합 시 제강슬래그 중량혼합비를 10%에서 50%까지 증가 시 순수 점토의 SiO₂는 67.3%에서 53.1%까지 감소한다. 상대적으로 순수 제강슬래그의 SiO₂는 13.0%에서 53.1%까지 증가한다. 반면에 순수 점토의 경우 CaO는 1.1%에서 제강슬래그 50%까지 혼합 시 10.4%까지 증가하고 있다. 또한, Al₂O₃는 혼합비에 따른 성분 변화량은 1% 이내이다.

따라서, 제강슬래그가 미분말 형태로 물과 산화되면 이온교환반응에 의해 알칼리성 성분이 일정량 이상이 되어 지속적으로 석출과 용해가 발생한다. 수화작용에 의해 제강슬래그의 SiO₂ 이온이 점토 입자와 결합하여 피막을 형성하는 포졸란 작용이 강화되어 점토의 강도를 증가시킨다. 또한, 화학적으로 수경성 이온반응에 의해 점토의 수경성을 촉진시키는 알칼리 자극제로서 생석회(CaO)는 비정질 칼슘실리 게이트 수화물(CaO-SiO₂-H₂O) 반응이 촉진된다(Lee et al., 2012). 이러한 반응은 점토광물에 포졸란 반응을 발생시켜 경화 발현이 양생시간에 따라 포텐셜 겉보기 점착(Attraction) 강도를 증가시킨다.

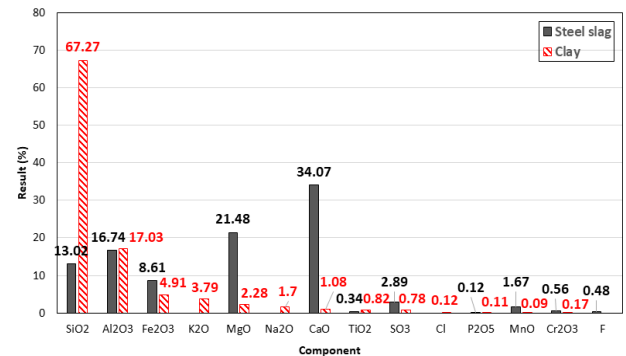


Fig. 3. Comparison of steel slag and river clay chemical composition (%)

2.3 XRF 및 SEM 분석에 의한 혼합토의 화학적 특성

Fig. 4는 XRF 시험을 통해 제강슬래그와 점토를 중량 혼합비(1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5) 변화에 따라 제작된 공시체의 화학적인 성분 변화량 중 주요성분인 Ca, Si, Al의 Intensity를 나타냈다.

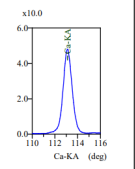
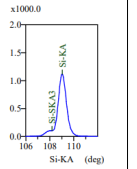
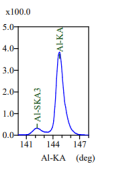
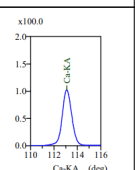
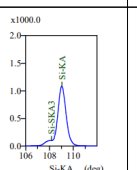
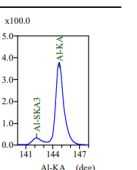
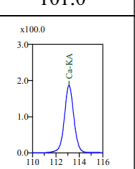
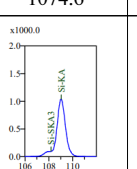
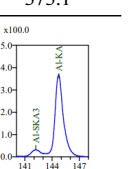
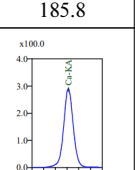
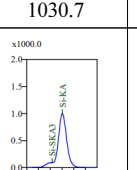
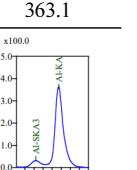
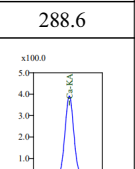
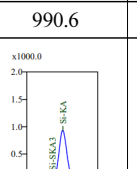
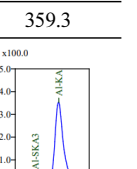
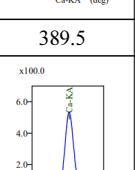
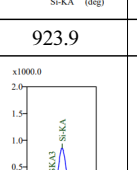
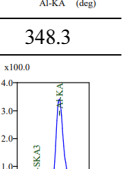
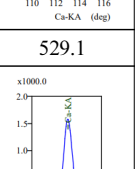
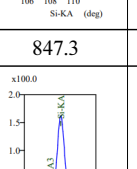
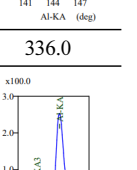
Steel Slag (%)	Clay (%)	Ca	Si	Al
-	100			
Intensity (kcps)		47.4	1107.9	377.8
10	90			
Intensity (kcps)		101.0	1074.6	373.1
20	80			
Intensity (kcps)		185.8	1030.7	363.1
30	70			
Intensity (kcps)		288.6	990.6	359.3
40	60			
Intensity (kcps)		389.5	923.9	348.3
50	50			
Intensity (kcps)		529.1	847.3	336.0
100	-			
Intensity (kcps)		1570.8	161.2	249.2

Fig. 4. Varying XRF Intensity by mixing ratio of steel slag and clay

순수 점토만의 Ca의 XRF 에너지 Intensity 최대값이 47.4 kcps에서 제강슬래그 중량혼합 비율이 10%에서 50%까지 증가 시 101 kcps에서 529.1 kcps로 증가된다(순수 제강슬래그 Intensity 1570.8 kcps). 반면에 Si는 순수 점토(100%)의 XRF 에너지 Intensity가 1107.9 kcps에서 제강슬래그 함유량이 50%까지 증가함에 따라 847.3 kcps로 감소한다. 순수 점토의 Al 또한 Intensity는 377.8 kcps에서 336.0 kcps로 비교적 작게 감소한다. 전반적으로 점토기준 대비 슬래그의 중량혼합 비율이 0%에서 50%까지 증가 시 상대적으로 혼합토의 XRF Ca의 Intensity는 증가하는 반면에 Si와 Al은 다소 감소되고 있어 점토에 제강슬래그를 혼합한 Ca 개질토는 이온수용성을 증가시키고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 5는 점토와 제강슬래그 혼합비율에 따른 성분함유량 변화를 나타냈다. 혼합 전 제강슬래그만의 산화칼슘(CaO)은 34.1%고, 점토는 1.1%로 제강슬래그의 함유량이 비율별로 증가하면서 최대 50% 함유 시 11.5%까지 감소하고 있다. 반면에 산화알루미늄(Al_2O_3)은 혼합 전(점토 17.03%, 슬래그 16.74%)과 혼합 후의 제강슬래그 비율이 50%까지 증가 시 1% 이하로 미소하게 감소한다.

개질제로 제강슬래그의 첨가량이 증가하면서 산화칼슘(CaO)과 산화마그네슘(MgO)의 용출량이 증가되고, 점토의 수화반응을 촉진시키는 Fe_2O_3 , MgO, SO_3 등이 미소하게 증가되므로 양이온 교환능력은 작게 나타난다. 이 외로 TiO_2 , P_2O_5 , MnO, Cr_2O_3 는 1% 이하로 거의 변화가 없는 것으로 나타났으며, F는 점토 함유량이 증가하면서 관찰되지 않았다. 전반적으로 개질제로 제강슬래그 칼슘(Ca)성분과 점토에 함유된 실리카성분(SiO_2 및 Al_2O_3 가 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H) 반응에 의해 점토의 피막을 증가시켜 수경화되고 있음을 알 수 있다.

또한, 제강슬래그와 점토를 혼합하여 혼합토의 미세조직 분석을 위해 SEM(Scanning Electron Microscope) 촬영을 실시하였다. Fig. 6에서 보이는 것과 같이 제강슬래그(100%)는 입자가 균일하지 않으며, 배열도 매우 불규칙한 양상을

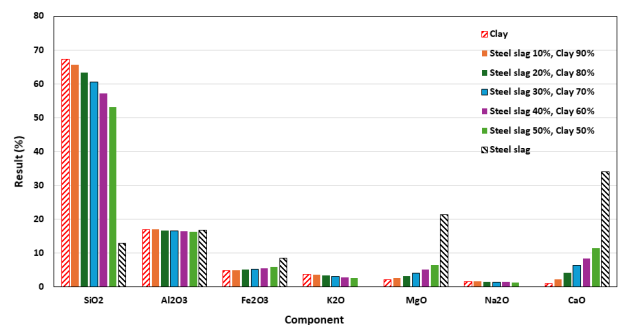


Fig. 5. Comparison of steel slag and clay composition (%) with mixing ratios

보인다. 입자의 표면은 거칠고 약간의 층상 구조를 띠는 것이 특징이라고 할 수 있다. 점토는 하천 퇴적물 6~7m 심도에서 채취되었고, 점토입자(100%)의 경우 비교적 부드럽고 넓은 층상구조를 보였으며, 기공이 있는 구조토가 존재하는 것으로 나타났다. 구조토는 담수나 해수에 서식하는 단세포 조류의 일종인 구조의 잔해물이 쌓여 만들어진 퇴적물 혹은 퇴적암을 말한다. 이러한 구조토는 주로 비정질의 실리카로 구성되어 있으며, 때로는 소량의 결정질 실리카를 포함하기도 한다. 구조류의 높은 공극률과 복잡한 내부 구

조 때문에 밀도는 매우 낮다.

또한, 제강슬래그와 점토를 2:8로 혼합한 경우 혼합토의 SEM 사진에서 점토입자 주위에 알칼리성 수용액이 침투하여 점토입자 간극 사이와 표면에 침전물이 밀실하게 형성되기도 하나 입자의 일부는 피막 형성을 단절시켜 반응성을 저해하는 요소로 작용하기도 한다. 그림에서는 입자주위에 형성된 피막에 일부 벌집구조의 입자가 혼성되어 있다. 또한, 제강슬래그와 점토를 3:7로 혼합한 SEM 사진을 보면 입자 내부에 알칼리 수용액이 충전되어 겔(Gel)타입의 밀실한 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 제강슬래그 칼슘(Ca)성분과 점토의 실리카(SiO_2 , Al_2O_3)성분이 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H) 반응을 통해 수화작용이 발생했기 때문이다. 제강슬래그와 점토의 중량혼합비가 4:6과 5:5인 경우 미반응된 입자의 간극이 나타나고 있으며, 분리된 입자 구조체를 형성하고 있다. 최종적으로 제강슬래그 중량혼합비가 3:7인 경우 수화작용에 의해 비정질 실리카 형태로 결합하며, 입자 내외부에 고결되어 있어 비교적 골고루 섞여 입자가 밀실하게 형성된 것을 볼 수 있다. 또한, 구조토와 혼합된 모습도 확인할 수 있었으며, 제강슬래그의 수화반응에 의해 칼슘실리카게이트가 생성되어 고화되고 있음을 알 수 있다.

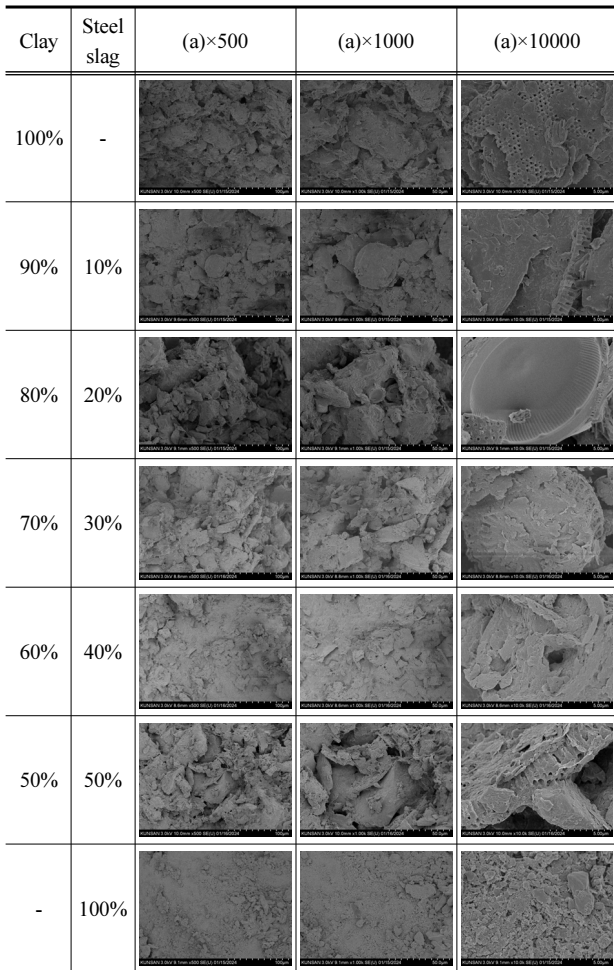


Fig. 6. SEM image of steel slag and clay mixture ratio with variable magnification

3. 혼합토의 일축압축강도 특성

3.1 시료제작

전기로 제강슬래그와 연약점토를 최적의 중량혼합비로 조정하기 위하여 점토는 불순물을 제거하고, 제강슬래그는 4.75mm(#4체)를 통과시킨 시료를 사용하였다. 이후 제강슬래그와 점토의 무게를 측정하여 중량혼합비로 비율에 따라 교반기를 통해 시료를 Table 2에 제시된 초기 자연함수비로 교반하여 혼합토 시료를 준비하였다. 교반된 시료를 이용해 Fig. 7, Fig. 8과 같이 직경 5cm, 높이 10cm가 되는 3연식 청동 몰드에 전기로 제강슬래그와 점토를 중량혼합비 별로

Table 2. Chemical composition ratio according to the mixing ratio of clay and steel slag

Clay	Steel slag	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	SO ₃	Cl	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	F
100%	-	67.27	17.03	4.91	3.79	2.28	1.70	1.08	0.82	0.78	0.12	0.11	0.09	0.17	-
90%	10%	65.67	17.00	5.00	3.67	2.73	1.65	2.29	0.78	0.83	0.11	0.12	0.14	0.03	-
80%	20%	63.28	16.76	5.19	3.46	3.35	1.61	4.18	0.76	0.89	0.12	0.11	0.22	0.06	-
70%	30%	60.47	16.62	5.30	3.14	4.19	1.52	6.35	0.74	1.03	0.11	0.12	0.32	0.10	-
60%	40%	57.09	16.46	5.65	2.91	5.27	1.46	8.50	0.72	1.16	0.10	0.11	0.45	0.12	-
50%	50%	53.05	16.27	5.96	2.60	6.45	1.33	11.46	0.66	1.31	0.09	0.11	0.53	0.16	-
-	100%	13.02	16.74	8.61	-	21.48	-	34.07	0.34	2.89	-	0.12	1.67	0.56	0.48

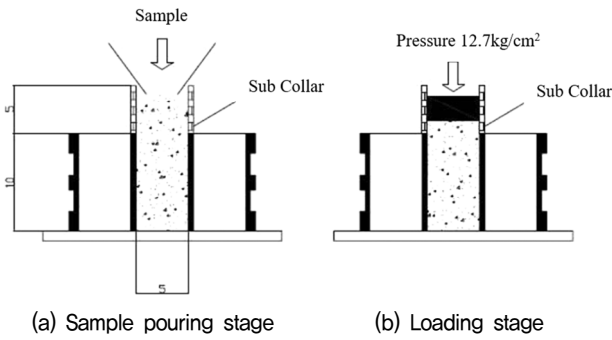


Fig. 7. Sample preparation according to weight mixing ratio

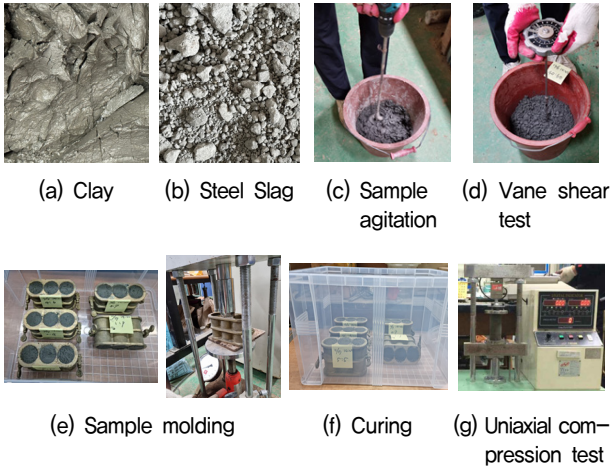


Fig. 8. Sample setup and testing procedure

원형 몰드(직경 5cm × 높이 10cm)에 동일한 조건으로 초기 하중강도(124.4kN/m³)를 가하여 균등하게 시험시료(혼합토)를 제작하였다.

전기로 제강슬래그와 연약점토의 최적의 혼합율을 선정하기 위하여 혼합율(R_{ss})을 R_{ss} 10%: 제강슬래그(10%) + 점토(90%), R_{ss} 20%: 제강슬래그(20%) + 점토(80%), R_{ss} 30%: 제강슬래그(30%) + 점토(70%), R_{ss} 40%: 제강슬래그(40%) + 점토(60%), R_{ss} 50%: 제강슬래그(50%) + 점토(50%)로 제작한 시료를 압축성형 후 일축압축시험을 수행하였다. 폐기물관리법상 부피에 따르면 석탄회를 50% 이하 기준에 의해 50% 이하로 혼합하여 사용하였다. 본 연구에서는 제강슬래그와 연약점토를 최대 5:5까지 혼합하여 강도증가를 파악하였다. 제강슬래그와 점토의 혼합 조건 및 양생시간은 Table 3과 같다.

Table 3. Mixing conditions and curing time

	Initial water content (%)	Mixing ratio (R_{ss})					Curing time (hr)
		10	20	30	40	50	
Steel slag	2.58	10	20	30	40	50	168, 240, 480
Clay	41.60	90	80	70	60	50	

3.2 일축압축시험 결과 및 분석

혼합율(R_{ss})을 10%, 20%, 30%, 40%, 50%로 제작하여 수행한 일축압축시험 결과를 Table 4에 나타냈다. Fig. 9는 점토의 강도를 증가시키는 개질제로 제강슬래그를 10%에서 50%까지 증가 시 제강슬래그 혼합비율에 따른 혼합토의 일축압축강도를 나타낸 것이다. 슬래그 혼합율(R_{ss}) 10%에서 50%까지 증가 시 양생시간에 따른 강도증가는 전반적으로 초기압축강도에 비해 양생시간이 168시간에서 480시간까지 증가되면서 강도증가율은 4.4 ~ 11.2배까지 증가되고 있다. 최대압축강도는 제강슬래그 혼합비 $R_{ss} = 30\%$ (슬래그 30% + 점토 70%)에서 최대압축강도 81.79 ~ 431.79 kN/m², $R_{ss} = 40\%$ (슬래그 40% + 점토 60%)의 경우 최대압축강도는 92.63 ~ 401.73 kN/m²으로 나타나 $R_{ss} = 30\%$ 가 최대압축강도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6의 혼합비에 따른 SEM 사진을 보면 제강슬래그 20% 함유 시 일정한 간극에 양이온 피막을 형성하는 수화 작용 단계이다. 제강슬래그 함유량 30%에서는 점토에 실리카 성분이 증가되면서 양이온 교환능력이 최대로 배가되어 비정질 결정구조체가 형성되었기 때문에 압축강도가 최대로 증가되었다. 따라서, 총 중량대비 제강슬래그 중량이 30%로 혼합 시 최대일축압축강도를 나타내고 있다. Fig. 10에

Table 4. Uniaxial compressive strength result of slag and clay mixture based on curing time

Item	Unconfined strength (kN/m ²)			Strain (%)		
	168 hr	240 hr	480 hr	168 hr	240 hr	480 hr
R_{ss} 10%	15.05	58.80	104.19	24.55	13.56	4.17
R_{ss} 20%	25.24	143.03	282.74	10.08	6.13	4.18
R_{ss} 30%	81.79	214.45	431.79	17.31	4.15	3.12
R_{ss} 40%	92.63	188.55	401.73	9.08	5.04	4.08
R_{ss} 50%	46.51	180.51	214.55	10.02	3.03	1.99

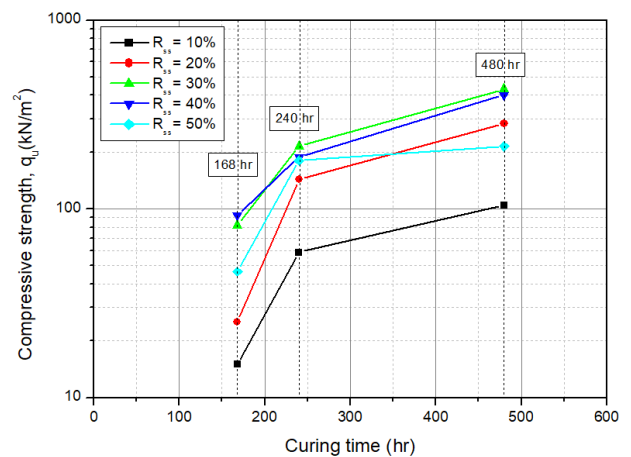


Fig. 9. Relation between curing time and maximum uniaxial compressive strength (q_u) (curing time 168h, 240h, 480h)

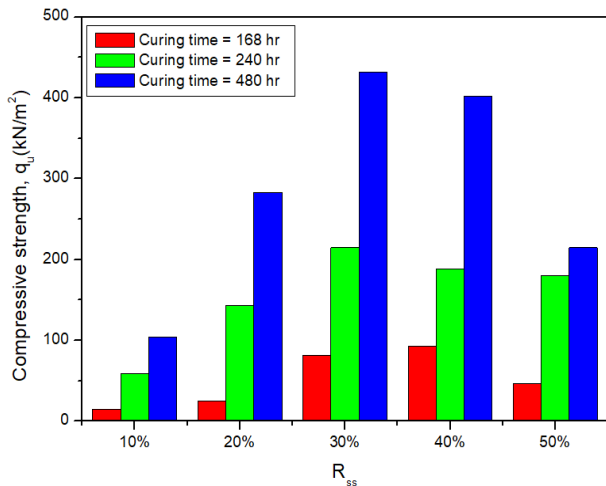


Fig. 10. Relation between mixing ratio (R_{ss}) and maximum uniaxial compressive strength (q_u) (curing time 168h, 240h, 480h)

양생시간(168h, 240h, 480h)과 최대일축압축강도(q_u)의 관계를 나타내고 있으며, 제강슬래그 혼합율(R_{ss}) 별로 양생시간이 증가할수록 일축압축강도(q_u)가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 혼합율 30%와 40%인 경우, 양생시간 168시간까지는 차이가 미미하지만, 240시간 경과 후에는 혼합율이 30%일 때 일축압축강도가 최대치를 보인 후 제강슬래그 혼합율이 40%일 때 Fig. 6과 같이 분리 층상구조를 띠면서 압축강도가 감소하고 있다.

개질제로서 제강슬래그로 처리된 산화칼슘 점토 혼합물은 다양한 용도로 활용될 수 있다. 이러한 용도로는 뒤채움 재료 및 제방의 차수, 도로 노상 및 철도 강화노반, 성토재, 연약지반 치환 등이 있다. 이러한 혼합물을 사용하여 일정한 층 두께와 기울기를 가진 구조물을 형성할 수 있다. 산화칼슘 개질토를 현장에서 사용 시 층의 두께나 경사는 시공 조건에 따라 결정될 수 있다고 언급하고 있다(Tang et al., 2001).

Fig. 11은 슬래그 혼합율(R_{ss})이 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 증가 시 양생시간에 따른 공시체의 파괴 형상을 나타냈다. 슬래그 함유량이 증가하면서 공시체는 점점 연한 회색을 띠고 전체 제강슬래그 혼합율에서 공시체가 경화함에 따라 진회색에서 연회색으로 변한다. 파괴된 공시체의 형상을 관찰하면 양생시간이 168시간까지는 양생된 공시체는 경화되어 점착력과 내부 입자 간 마찰각이 증가하면서 전단 파괴형태를 나타냈다. 반면에 양생시간 168시간 경과 후부터는 전단파괴와 활열파괴가 혼합된 형태로 파괴되고 있다. 제강슬래그와 연약점토를 혼합하는 경우, 제강슬래그의 함량과 양생시간에 따라 파괴 형상이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

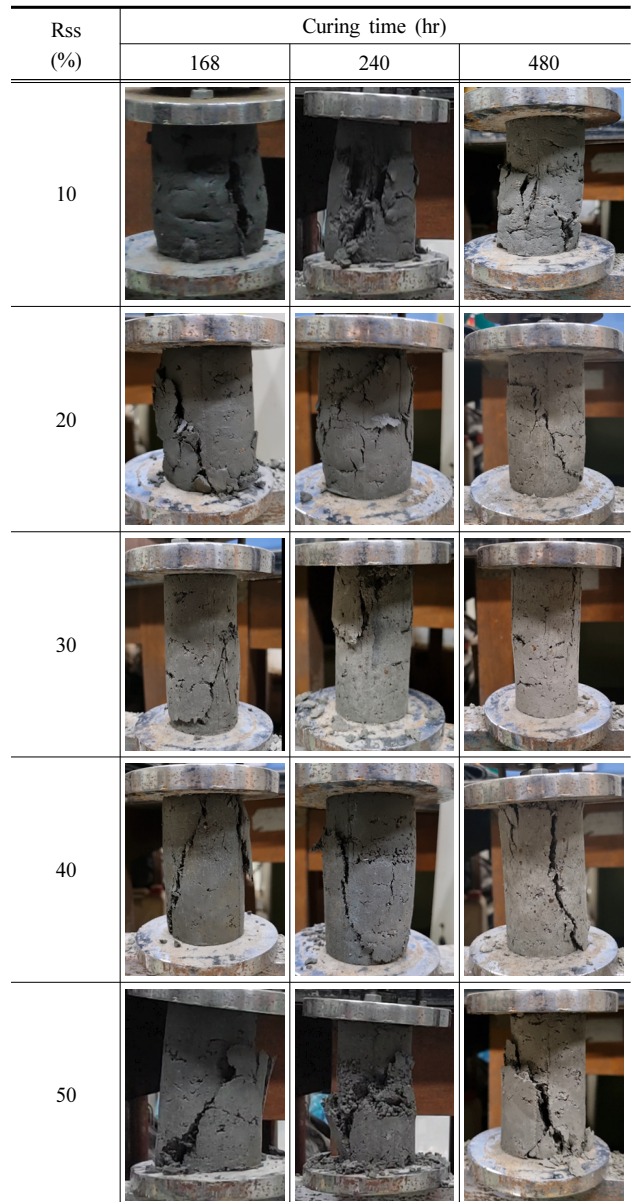


Fig. 11. Failure configurations of steel slag and clay mixture ratio depending on curing time

Fig. 12는 제강슬래그로 안정화된 혼합 점토의 양생시간에 따른 공시체의 강도 발현을 보여준다. 순수 점토의 일축압축강도는 2.4kN/m^2 이며, 산화칼슘 개질재료로 슬래그를 점토와 혼합비 R_{ss} 10%, 20%, 30%, 40%, 50%로 혼합한 후 직후와 2시간 경과 시의 베인전단 강도를 측정된 결과 $R_{ss} = 10\%$ 는 $15.6 \sim 18.4\text{kN/m}^2$, $R_{ss} = 20\%$ $12.8 \sim 16.4\text{kN/m}^2$, $R_{ss} = 30\%$ $9.0 \sim 12.7\text{kN/m}^2$, $R_{ss} = 40\%$ $6.5 \sim 7.3\text{kN/m}^2$, $R_{ss} = 50\%$ $4.4 \sim 5.1\text{kN/m}^2$ 로 증가한다. 따라서, 제강슬래그 혼합율이 작을수록 초기 점착력이 소폭 증가된다. 양생 초기부터 3시간 내에서 강도가 크게 발현되지 않았음을 의미하며, 이 기간을 ‘Inactive zone’(비활성영역)라고 한다. 일반 포틀랜드 시멘트(OPC)로 처리된 해양 점토의 비활성화 기간이 혼합

직후 약 30분이라고 보고하고 있다(Seng et al., 2011). 그러나, 본 시험 결과에서는 전기로 제강슬래그로 안정화된 점토의 강도 발현이 시작되는 응결 시간은 포틀랜드 시멘트(OPC)의 응결 시간보다 상당히 긴 것으로 나타났다. 즉, 안정화된 혼합점토의 강도를 증가시키는 수화반응 속도는 포틀랜드 시멘트(OPC)에 비해 초기 경화단계(3시간 이내)가 느린 것으로 파악되었다.

양생시간이 3시간 이후부터 Active Zone(활성영역)에서는 강도 발현이 시간과 함께 비례하여 강도가 크게 증가하고 있으며, 이는 양생시간이 포졸란 강도 발현에 기여하고 있기 때문이다.

개질제로 사용한 제강슬래그로부터 Ca의 용출이 점토의 Ca를 증가시켜 고결성을 증가시키고 있는 반면에 점토에 포함된 SiO₂나 Al₂O₃는 제강슬래그 혼합량이 증가하면서 미소하게 감소하고 있다. 따라서, 제강슬래그 Ca 성분과 점토의 SiO₂나 Al₂O₃ 성분이 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H)을 형성하여 반응에 의해 고화되고 장기적으로는 강도가 증가되고 있다.

Table 5. Characteristics of steel slag and clay mixture based on curing time

Item	Unconfined strength (kN/m ²)					
	Initial	0.2 hr	2 hr	168 hr	240 hr	480 hr
Clay	2.4	-	-	-	-	-
Rss 10%	-	15.55	18.42	15.05	58.80	104.19
γ_t (kN/m ³)	-	-	-	19.2	18.6	18.7
Rss 20%	-	12.86	16.40	25.24	143.03	282.74
γ_t (kN/m ³)	-	-	-	19.7	18.8	18.9
Rss 30%	-	9.00	12.67	81.79	214.45	431.79
γ_t (kN/m ³)	-	-	-	20.7	20.6	19.7
Rss 40%	-	6.46	7.26	92.63	188.55	401.73
γ_t (kN/m ³)	-	-	-	20.5	20.4	19.6
Rss 50%	-	4.42	5.12	46.51	180.51	214.55
γ_t (kN/m ³)	-	-	-	21.1	19.9	19.8

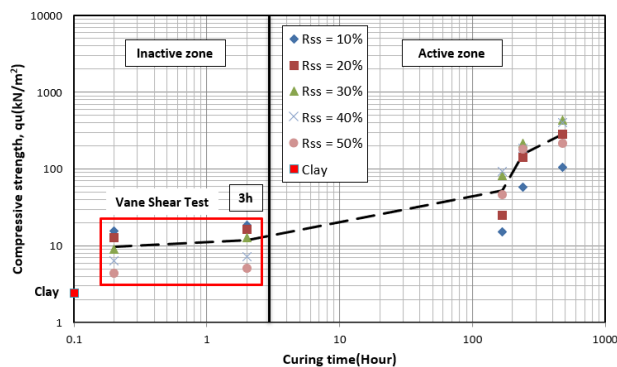


Fig. 12. Strength performance of steel slag and clay mixture according to curing time

이러한 연구 결과를 통해 제강슬래그를 이용하여 토목 현장에서의 재활용 적용 시 제강슬래그의 혼합율(R_{ss})에 대한 혼합점토의 안정화된 강도 발현 특성을 파악할 수 있다. 이는 전기로 제강슬래그에 대한 건설현장에서의 활용성을 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전기로 제강슬래그로 산화칼슘 개질제를 연약한 점토와 혼합 시 화학적 성분의 변화를 분석하기 위해 XRF 시험과 SEM 촬영을 실시하였다. 또한, 제강슬래그를 점토와 혼합 시 제강슬래그 혼합율과 양생시간이 혼합토의 일축압축강도에 미치는 강도 발현 특성을 고찰하였다. 이러한 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 본 연구에서 사용한 개질제로 전기로 제강슬래그와 연약점토의 XRF 분석결과 슬래그의 주요 광물 함유량은 CaO가 34%, MgO가 21.48%, Al₂O₃가 16.7% 함유되어 있으며, 점토는 SiO₂가 67.2%, Al₂O₃ 17.02%, Fe₂O₃ 4.91%, K₂O 3.80%, MgO 2.28%, Na₂O 1.70% 순으로 나타났다. 산화칼슘 개질제로 사용되는 제강슬래그로부터 용출된 Si⁴⁺, Al³⁺ 이온은 OH⁻이온과 결합하여 음이온을 형성하고, Ca²⁺, Mg²⁺, Na²⁺ 이온은 양이온으로 존재하므로 이온 반응에 의해 칼슘실리케이트 수화물(CaO-SiO₂-H₂O)로 형성한다. 이러한 수화반응은 점토의 비정질 유리구조를 형성하여 피막을 강화하며, 경화를 촉진시키는 포졸란 반응이 이루어진다.
- (2) 순수 제강슬래그와 점토의 SEM(Scanning Electron Microscope) 분석을 통해 제강슬래그(100%)는 비균등 입자배열에 의한 층상 구조를 나타내고, 점토입자(100%)는 기공성 분소구조로 구조도 특성을 가지고 있으며, 주로 비정질의 실리카로 구성되어 있다. 개질제로 제강슬래그를 점토에 비율별로 첨가 시 제강슬래그는 혼합비가 증가에 따라 수화작용이 발생하여 비정질 실리카 형태로 피막이 형성되어 포졸란 결합이 증가된다.
- (3) 슬래그와 점토의 중량혼합비 30%(슬래그 30% + 점토 70%)에서 양생시간에 따라 최대 일축압축강도는 81.79 ~ 431.79kN/m²까지 증가되고 있다. 이는 SEM 분석 결과를 통해 슬래그 함유량이 30%인 경우 점토광물 표면에 실리카 성분의 피막이 형성되어 비정질 결정 구조체가 증가되기 때문이다.
- (4) 전기로 제강슬래그로 안정화된 연약점토의 강도는 0.1시간에서 3시간 사이에 양생강도가 증가하지 않는 '비활성

영역'(Inactive zone 3시간 이내), '활성영역'(Active zone 3시간 경과) 단계로 분류되었다.

- (5) 개질제로 사용한 제강슬래그의 Ca의 용출이 점토의 Ca를 증가시켜 점토의 SiO₂나 Al₂O₃ 성분과 화학적 반응으로 칼슘실리카게이트 수화물(C-S-H)을 형성하므로 점토는 고화되고 장기적으로는 강도가 증가된다.
- (6) 제강슬래그 혼합율(R_{ss})에 따른 혼합점토의 강도 발현 특성을 파악함으로써 토목현장에서의 활용성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 및 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 4단계 BK21 미래인재양성사업과 기초연구사업임(4299990614343, NRF-2021R1A6A1A03045185).

References

1. Ahmedzade, P. and Sengoz, B. (2009), Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 165, pp. 300~305.
2. Horpibulsk, S., Rachan, R. Suddeepong, A. and Chinkulkijniwat, A. (2011), Strength development in cement admixed Bangkok clay: laboratory and field investigations, *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 2, pp. 239~251.
3. Kim, J. M. and Park, H. I. (2012), Properties of steel slag aggregate for concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 6, pp. 35~38 (In Korean).
4. Kim, Y. W., Oh, M. H., Park, J. B. and Kwon, O. S. (2014), Removal efficiency of heavy metals and nutrients by zeolite and basic oxygen furnace Slag, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 15, No. 11, pp. 13~19 (In Korean).
5. Lee, K. S., Lee, Y. K., Choi, J. S. and Han, H. M. (2010), An experimental study on the development of soft ground firming agent using EAF reduction slag, *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference*, pp. 998~1001 (In Korean).
6. Lee, S. H., Kim, W. K. and Kang, S. H. (2012), Hydration mechanism of ground granulated blast furnace slag, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 6, pp. 31~34 (In Korean).
7. Lorenzo, G. A. and Bergado, D. T. (2004), Fundamental parameters of cement-admixed clay-new approach, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 10, pp. 1042~1050.
8. Miura, N., Horpibulsk, S. and Nagaraj, T. S. (2001), Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soils and Foundations*, Vol. 41, No. 5, pp. 33~45.
9. Na, H. S., Yoon, Y. W. and Yoon, G. L. (2011), Environmental effect of the reduced slag in the electric furnace, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 12, No. 7, pp. 23~29 (In Korean).
10. Seng, S. and Tanaka, H. (2011), Properties of cement-treated soils during initial curing stages, *Soils and Foundation*, Vol. 51, No. 5, pp. 775~784.
11. Shi, C. (2004), Steel Slag-Its Production, Processing, Characteristics, and Cementations Properties, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 230~236.
12. Shin, J. W., Yoon, Y. W. and Yoon, G. L. (2011), Geotechnical characteristics of reduced slag-soil mixtures in electric furnace, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 12, No. 7, pp. 31~37 (In Korean).
13. Tang, Y. X., Miyazaki, Y. and Tsuchida, T. (2001), Practices of reused dredging by cement treatment, *Soils and Foundations*, Vol. 41, No. 5, pp. 129~143.