

토목섬유로 보강된 슬래그 재료의 전단강도 및 변형 특성

Strength and Deformation Characteristics of Geosynthetics-Reinforced Slag Materials

신 동 훈^{1*} Shin, Dong-Hoon
이 종 석² Lee, Jong-Seok

ABSTRACT

In this paper, characteristics of shear strength and deformation of geosynthetics-reinforced slag materials are described. In order to investigate the effect of geosynthetics on shear strength and deformation behavior of slags, when they are reinforced with geosynthetics or geomat such as PET mat, large triaxial tests were performed under consolidated-drained condition. The materials used in the study are real ones as they are in the field, so that the scale effect of samples disappeared. From the large triaxial tests, it was observed that the stress-strain relationship of geosynthetics-reinforced slags shows relatively small dilatancy and weak tendency of strain hardening, compared with that of slags without reinforcement. The shear strength parameters such as apparent cohesion and internal friction angle increase with PET mat reinforcement, consequently result in about 1.2 (for low confining pressure) to 1.4 (for high confining pressure) times of shear strength of un-reinforced sample. Therefore, the adoption of geomat-reinforced slag layers leads to an increase in the factor of safety for embankment design on soft soil formations.

요 지

본 연구에서는 토목섬유가 충상으로 보강된 슬래그 재료의 전단강도와 변형특성을 다루었다. PET mat와 같은 토목섬유에 의한 보강이 슬래그의 전단강도와 변형특성에 미치는 영향을 조사 및 분석하기 위해 압밀배수 조건 하에서의 대형삼축압축시험을 수행하였다. 연구에 사용된 슬래그 재료는 현장에서 사용되는 재료와 동일한 재료로서 scale effect로 인한 문제점은 없었다. 토목섬유로 보강된 슬래그의 응력-변형률 거동은 무보강시 보다 다일러턴시의 양이 작고, 축변형률 증가시 항복 이후에도 축차응력이 증가하는 변형률경화(strain hardening) 거동을 나타내었다. 토목섬유로 보강된 슬래그 재료의 겉보기 점착력과 내부마찰각 등의 강도정수는 보강되지 않은 경우의 값보다 1.2-1.4배 정도 크고, 구속압 수준이 클수록 커지는 것으로 나타났다. 따라서 슬래그를 사용한 제방의 설계나 시공시 슬래그 재료에 토목섬유를 충상으로 보강하여 사용할 경우에는 강도증가 효과에 의해 안전율을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords : Large triaxial test, Geotextile, PET Mat, Shear strength, Slag

1. 서 론

우리나라에서는 주로 1980년대 초반부터 철강생산 공정의 부산물인 슬래그(slag)를 도로포장재료, 뒷채움재료, 성토재료, 연약지반 배수재료 및 콘크리트 제조용 보조재

료 등 각종 건설공사의 공사용 재료로 활용하려는 시도가 활발하게 이루어져 왔다(성수웅, 1982; 김형석 등, 2000; 김영수 등, 2001; 주재우 등, 1999, 2003, 2004; 김영민 등, 2001; 배상수 등, 2002). 연약지반처리와 관련하여 사용되는 슬래그는 선형압밀공법 적용을 위한 성토하중 재하용

1* 정회원, 한국수자원공사 K-water연구원 댐안전연구소 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Dam Safety Reseach Center, K-water Institute, K-water, E-mail: uwshin@yahoo.com)

2 비회원, 한국건설교통기술평가원 건설사업본부 제3실장 (Non-Member Chief Research Manager, Construction R&D Dept., KITEP)

표 1. 슬래그의 기본물성

비 중	흡수율(%)	NO.200체 통과율(%)	최대입경(mm)	균등계수	곡률계수	통일분류
3.35	1.04	0.0	50.8	2.12	0.92	GP

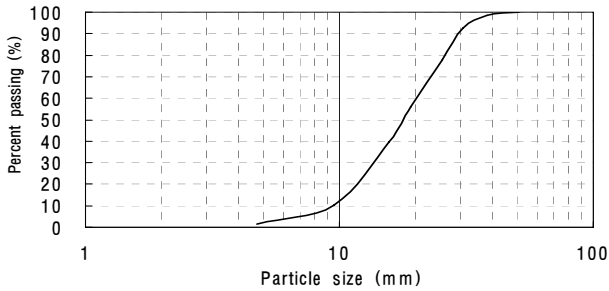


그림 1. 본 연구에 사용된 슬래그의 입도분포

(주재우 등, 1999), 압밀침하축진 및 기초지지력 확보를 위한 stone column재료용(김영수 등, 2001) 등으로 사용된다. 이 중에서 연약지반 위 또는 속에 面상으로 설치하여 하중재하에 의한 과도한 침하나 측방유동의 방지, 재료의 분리, 토압의 저감, 인장강도의 증대 등을 목적으로 지오그리드, 지오텍스타일, 지옴브레인 등의 토목섬유(geosynthetics)를 설치하는 공법이 개발되어 사용되고 있다. 준설투기된 초연약지반의 표층처리방법 중의 하나로써 토목섬유(geotextile)와 슬래그(slag)를 병용하여 포설하는 방법도 이러한 예 중의 하나이다.

한편, 토질재료와 토목섬유를 함께 사용하는 것은 토질재료의 전단강도 증대와 변형량 제어를 목적으로 하고 있으며, 이와 관련한 연구가 활발히 이루어지고 있다(김성수 등, 2001; 문익주, 1993; 박병기 등, 1993; 신방웅 등, 1995; 주재우 등, 2003). 김성수 등(2001)은 소형삼축압축 시험기에 국소변형을 측정장치(LDT; Local Deformation Transducer)를 사용하여 토목섬유로 보강된 주문진 표준사의 응력-변형 특성을 조사하였으며, 보강된 모래의 강도가 유효구속응력 및 압밀응력비에 의존하는 성질이 있음을 밝힌 바 있다. 문익주(1993)는 모형토조에 토목섬유로 보강된 모래-점토 지반을 조성하여 지지력시험을 실시하여 토목섬유의 설치방법에 따른 지지력 증대효과를 분석하였다. 신방웅 등(1995)은 지오그리드로 보강된 철도노반 및 제방의 보강 효과를 검토한 바 있고, 조성민 등(1998)은 연약점토 지반을 보강할 목적으로 설치된 토목섬유(PET Mat)의 변형거동을 분석하기 위하여 스트레인 게이지를 설치하여 시험시공 실시결과를 보고한 바 있다. 그러나 슬래그와 같은 조립질재료를 토목섬유로 보강한

경우의 전단강도와 변형특성 등에 대해서는 아직까지 연구가 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는, 슬래그층에 토목섬유(본 연구에서는 PET Mat)가 보강된 지반을 대상으로 대형삼축시험을 실시하여 PET Mat로 보강된 슬래그의 전단강도 특성과 변형특성 등을 분석하였다.

2. 시험방법

2.1 시험개요

본 연구에서 사용한 슬래그 재료는 준설투기된 초연약지반 현장에서 장비의 주행성 확보와 수평배수층 확보의 목적으로 표층처리재료로 사용 중인 것을 현장에서 채취한 것이고, PET Mat는 인장강도 15t/m와 25t/m의 두 종류의 것을 사용하였다.

슬래그 재료에 대해서는 비중 및 흡수율 시험, 입도시험 등의 기본물성시험과 다짐시험 등을 실시하였다. PET Mat는, 대형삼축시험용으로 직경 300mm, 높이 620mm의 대형 원주형 공시체를 사용하므로, 현장에서 사용하는 재료와 동일한 재료를 그대로 사용하였다. 대형삼축시험은 무보강, 보강1(인장강도 25t/m의 PET Mat로 보강된 경우), 보강2(인장강도 25t/m과 15t/m로 보강된 경우)의 3가지 경우에 대하여 실시한 후 각각에 대하여 응력-변형을 관계, 전단강도 및 체적변형 특성 등의 역학적 특성을 비교 분석하여 PET Mat 보강에 따른 전단강도 향상 여부를 확인하였다.

2.2 시험재료

2.2.1 슬래그

본 연구에서 사용한 슬래그는 전로에서 선철을 정련하여 강을 제조하는 과정에서 생산되는 제강슬래그로서 광양제철소에서 생산된 것이며, 기본물성 및 입도는 표 1 및 그림 1과 같다. 연구에 사용한 슬래그는 최대입경은 50.8mm으로 통일분류법상 GP에 해당하며, 그림 2에서 보는 바와 같이 대부분의 입자가 각지고(angular) 단단하

여 PET Mat나 Membrane과의 접촉 시 손상의 원인이 될 수 있는 것으로 보인다.

2.2.2 시험에 사용된 토목섬유(PET Mat)

본 연구에 사용된 토목섬유의 물리적, 역학적 성질은 표 2와 같다.

2.3 다짐시험

슬래그 재료의 다짐특성을 분석하기 위하여 대형자동다짐장치(그림 3)를 사용하여 실내다짐시험을 실시하였다.

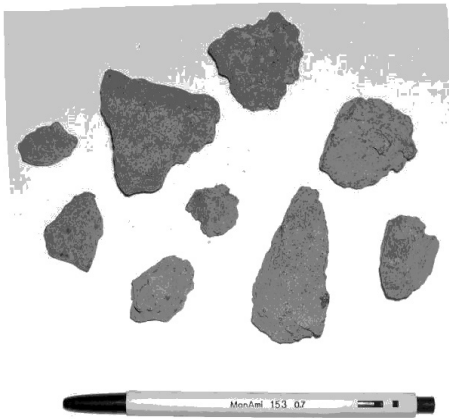


그림 2. 슬래그 입자의 형상 및 크기

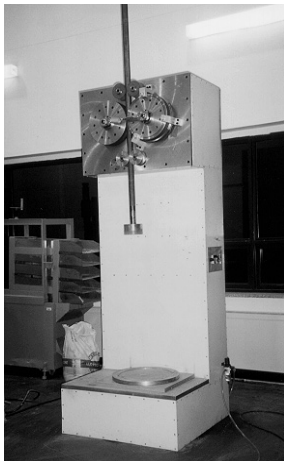


그림 3. 대형자동다짐장치

다짐시험은 내경 304mm, 높이 620mm의 2분할형 원주형 몰드에 투입한 후 직경 150mm, 중량 16kg의 램머를 자유낙하시키되 다짐에너지를 0.0~3.087 kg·cm/cm³로 변화시켜가면서 다진 후 투입한 시료의 중량과 시료의 높이변화를 측정하여 건조밀도를 산정하였다. 그림 4는 슬래그의 다짐에너지-다짐곡선 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 본 연구에 사용된 슬래그는 다짐에너지가 가해지지 않은 경우(비다짐 조건, E=0.0 cm·kg/cm³)의 건조단위중량은 1.823t/m³이나 다짐에너지가 높은 경우(다짐조건 E=3.087 cm·kg/cm³)에는 2.144t/m³이다.

한편, 모래-자갈 또는 록필재료와 같이 비점착성의 조립질 재료의 경우 다짐도는 함수비의 영향을 거의 받지 않고, 다짐에너지에 따른 밀도 변화를 쌍곡선식으로 근사할 수 있는 것으로 알려져 있다(신동훈, 2009). 따라서 슬래그 재료에 대한 다짐곡선을 쌍곡선(hyperbola)형태로 근사(curve fitting)하여 구한 최대건조밀도는 $\gamma_{dmax} = 2.228$ t/m³로 나타났다.

2.4 대형삼축시험

대형삼축시험은 표 3 및 그림 6에 나타난 바와 같이 무보강, 보강1 및 보강2의 3가지 조건에 대하여 실시하였다. 각 시험 조건의 공시체는 현장조건을 반영하여 비다짐조건으로 제작하였으며, 보강1의 경우 공시체 높이의 1/2 위

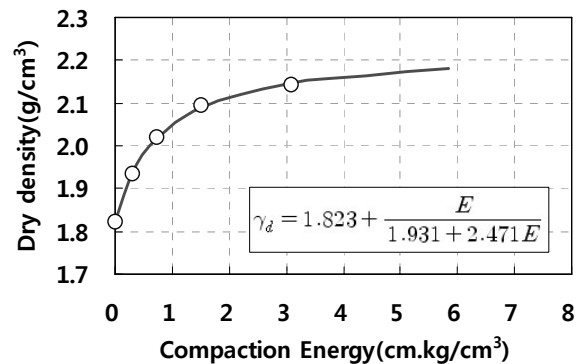


그림 4. 슬래그의 다짐시험 결과

표 2. 본 연구에 사용된 토목섬유(PET Mat)의 물리적 및 역학적 성질

품 명	재 질	비중	중량 (gf/m ²)	인장강도(kg) (그레브법)		인장변형율(%) (그레브법)		투수계수 (cm/sec)	봉합강도 (kgf)
				경사	위사	경사	위사		
25t/m	폴리에스테르	1.33	813.9	670.1	643.7	24	14	1.9×10 ⁻³	949.3
15t/m	폴리에스테르	1.33	513.6	498.1	434.3	20	17	3.4×10 ⁻³	499.8

표 3. 대형삼축시험 조건

	보 강 조 건	구속압 (kg/cm ²)	검 토 항 목
무보강	슬래그	0.5, 1.0 및 1.5	-응력-변형을 관계 -내부마찰각, 점착력 -전단강도 비교 등
보강1	슬래그+PET Mat(25t/m)		
보강2	슬래그+PET Mat(25t/m)+PET Mat(15t/m)		

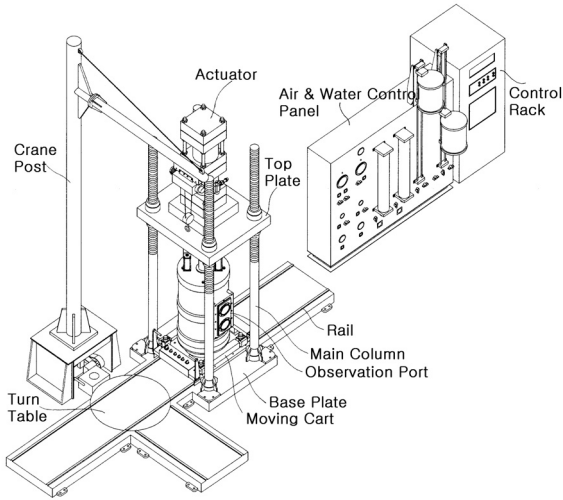


그림 5. 대형삼축시험장치 개요도 (한국수자원공사, 2001)

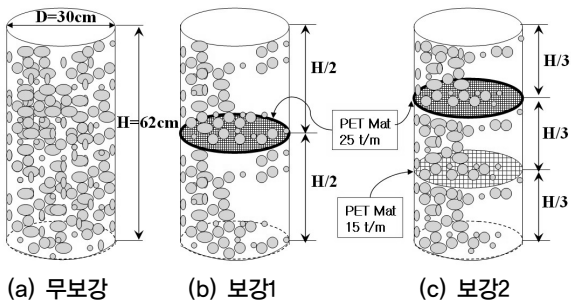


그림 6. 대형삼축시험 조건(토목섬유 보강 형태)

치에 공시체 직경과 동일 크기의 인장강도 25t/m의 PET Mat를 설치하였으며, 보강2의 경우에는 공시체 하단에서 위로 1/3H 높이에 15t/m의 PET Mat를, 상단에서 아래로 1/3H 높이에 25t/m PET Mat를 설치하여 제작하였다.

공시체 제작시 슬래그 입자에 의한 손상을 방지하기 위하여 멤브레인은 두께 2.0mm 1장과 1.0mm 1장 등 2장을 겹쳐 사용하였다. 그림 5와 같이 공시체를 대형삼축시험 장치 본체에 세팅한 후에는 포화를 용이하게 하기 위하여 저압으로 탄산(CO₂)가스를 약 2시간 공급하고, 공시체의 하부에서 상부로 약 1.6m의 수두차를 이용하여 탈기수 (de-aired water)를 약 24 시간 이상 통수시켜서 시료가 포화되도록 하였다. 압밀은 소요의 구속압을 가하여 밸브를 열어 배수량을 측정하고 압밀배수량-시간 관계곡선을

작성하여 3t법으로 압밀이 완료된 것을 확인하였다. 전단은 과잉간극수압이 발생하지 않도록 3mm/min의 속도로 하였으며, 이중관 뷰렛과 차압계를 사용하여 체적변화량을 측정하면서 축변형율이 18~20%가 될 때까지 전단하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 응력-변형률 특성

응력-변형률 거동은 그림 7에 나타난 것처럼 무보강시에는 구속압이 작은 경우 peak강도(↓) 이후에는 약간의 변형률 연화(strain softening)거동을 보이지만 보강1과 보강2의 경우에는 변형률 경화(strain hardening)거동을 나타내고 있으며, 구속압이 작고 전단변형율이 클수록 체적팽창량이 크게 나타났다. 본 연구에서 peak강도는 축변형률 15% 이하에서 최대값으로 선정하였다.

또한 그림 8에서 보는 바와 같이 peak강도 시의 축변형률은 11.5~14.5%의 비교적 큰 변형률로 나타났으나 보강시와 무보강시의 차이는 뚜렷하지 않다. 그러나 체적변형률은 PET Mat로 보강된 경우가 보강되지 않은 경우보다 전반적으로 작으며, 이는 보강재가 입자간의 맞물림을 더욱 견고하게 하는 효과를 발휘하고 있는 것으로 보이며, 이로 인하여 보강재에 의한 전단강도의 증대효과가 발생하는 것으로 볼 수 있다. 그림 9는 무보강시와 보강시의 전단 후의 공시체의 형상으로 보강재의 설치 위치를 경계로 체적변화 형태가 확연하게 구분되는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 9에 나타난 공시체의 변형 형상을 볼 때 보강시의 체적변화량이 많은 것으로 보이지만 앞에서 설명한 바와 같이 실제의 체적변형률은 보강시가 적은 것으로 나타나 보강재에 의한 보강효과가 분명한 것을 알 수 있다.

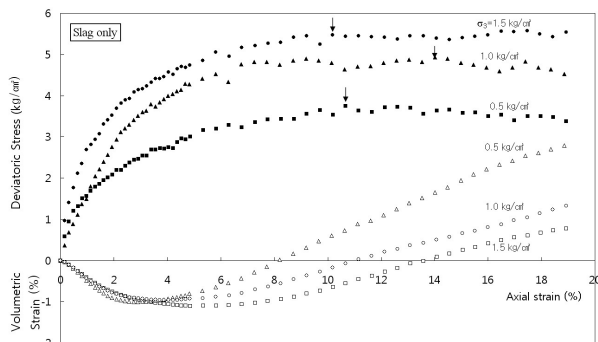
3.2 전단강도 특성

표 4는 대형삼축시험 결과를 요약한 것으로서 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 는 15% 이하의 축변형률에서 최대값이고, ϕ_0

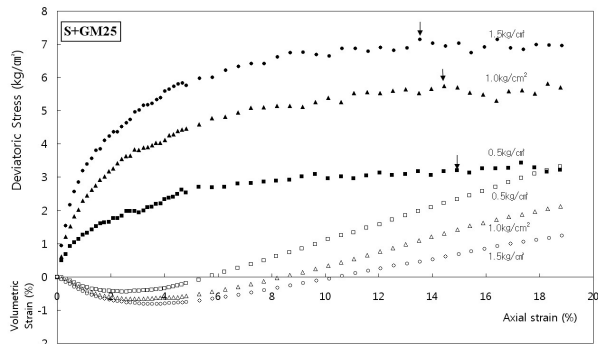
는 각각의 구속압에 대하여 얻어진 Mohr원에 접하고 원점을 지나는 접선의 기울기를 나타내며, 대개 모래, 자갈 또는 쇄석과 같은 조립재료의 구속압 의존성을 검토하는데 사용되는 파라메타이다.

그림 10은 구속압과 peak시의 축차응력의 관계를 나타낸 것으로 보강1과 보강2의 경우가 무보강시 보다 파괴시의 축차응력이 크게 나타나 보강재에 의한 보강효과를 확인할 수 있다. 한편, 그림 11로부터 슬래그 역시 모래, 자갈과 마찬가지로 구속압이 증가함에 따라서 내부마찰각이 감소하는 구속압 의존성을 나타냄을 알 수 있다.

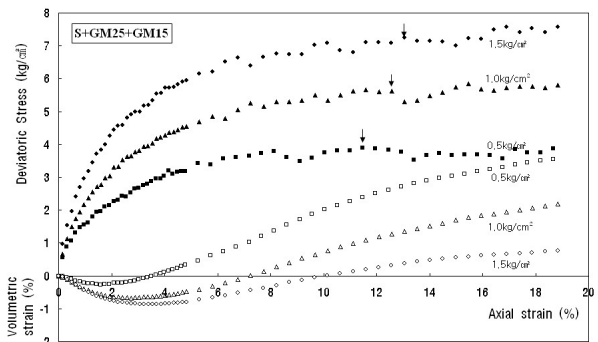
그림 10은 구속압과 파괴시의 축차응력의 관계를 나타낸 것으로 보강1과 보강2의 경우가 무보강시 보다 파괴시의 축차응력이 크게 나타나 보강재에 의한 보강효과를 확



(a) 무보강



(b) 보강1



(c) 보강2

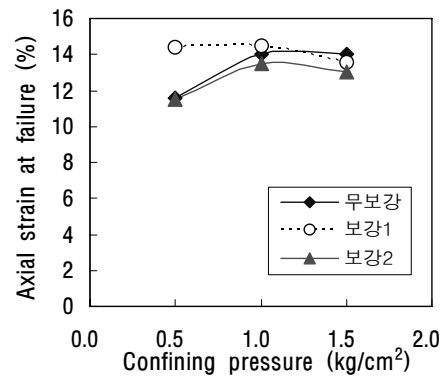
그림 7. 응력-변형률 관계

인할 수 있다.

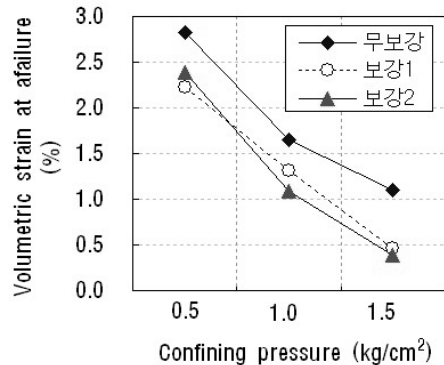
PET Mat에 의한 전단저항력 증진효과는 그림 12~13을 통하여 더욱 분명하게 볼 수 있다. 즉, 보강재 삽입에 의하여 점착력과 내부마찰각이 증대하여 결과적으로 전단강도가 증가됨을 알 수 있다. 또한 그림 13에서 0.5kg/cm²일 때는 보강2의 경우 무보강시 보다 1.43배가 전단강도가 증대하고, 1.5 kg/cm²일 때는 1.24배로서 구속압이 작을수록 보강효과가 크게 나타났다.

3.3 설계에의 적용방안 검토

주재우 등(2003)에 따르면 지지력을 증가시킬 목적으로 보강재를 포설하는 경우에는 보강재의 층수나 길이에 따라서 지지력이 변화함을 밝히고, 보강재의 층수나 길이에 따라 증가된 강도정수를 사용한 설계방법을 제안한 바 있으나 실험실에서 사용한 시료의 밀도, 입도, 보강재의 크기효과(scale effect) 등이 실제 현장조건에 미치는 영향 및 상호관계 등에 대한 추가적인 검토가 필요한 것으로 보인다. 본 연구에서도 전술한 바와 같이 PET Mat보강에 의하여 점착력과 내부마찰각 등의 강도정수 증가효과를 확인



(a) 구속압-파괴시 축변형률의 관계



(b) 구속압-파괴시 체적변형률의 관계

그림 8. 파괴시의 구속압과 축변형률 및 체적변형률의 관계



(a) 무보강시



(b) 보강1



(c) 보강2

그림 9. 전단 후의 공시체의 형상

표 4. PET Mat로 보강된 Slag재료의 대형삼축시험 결과

구분	구속압 (kg/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ (kg/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ (kg/cm ²)	$(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ (kg/cm ²)	강도정수		ϕ_0 (도)
					c (kg/cm ²)	ϕ (도)	
무보강	0.5	2,588	1,299	1,799	0.28	36.7	46.2
	1.0	4,928	2,464	3,464			45.3
	1.5	5,572	2,786	4,286			40.5
보강1	0.5	3,201	1,600	2,100	0.30	41.9	49.6
	1.0	5,751	2,875	3,875			47.9
	1.5	7,145	3,572	5,072			44.8
보강2	0.5	3,889	1,945	2,445	0.53	38.8	52.7
	1.0	5,661	2,831	3,831			47.6
	1.5	7,251	3,626	5,126			45.0

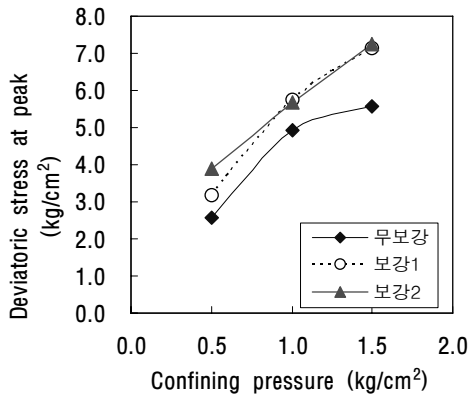


그림 10. 구속압-파괴시의 축차응력의 관계

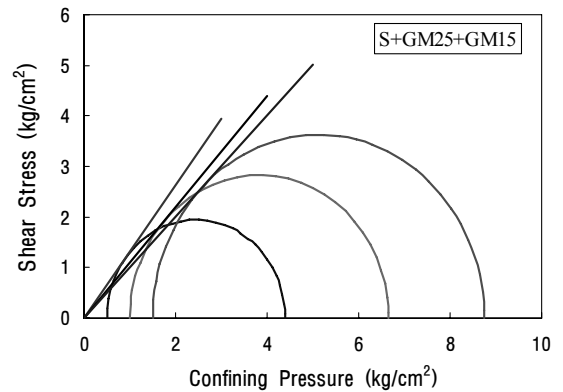
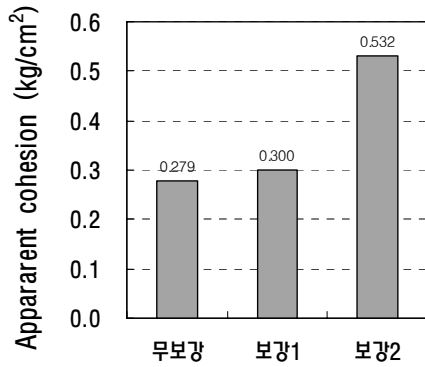


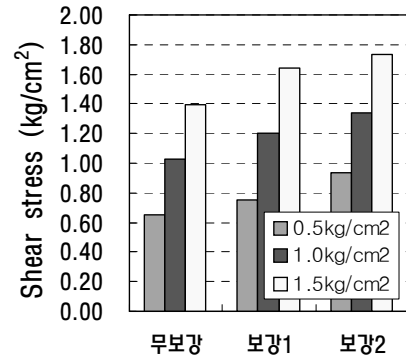
그림 11. 슬래그 재료의 구속압 의존성(보강2의 경우)

할 수 있었고, 대형삼축시험기를 사용하여 현장에서 사용하고 있는 것과 동일한 슬래그와 PET Mat 재료를 사용함으로써 실내시험시 발생하는 크기효과를 무시할 수 있었으나 아쉽게도 보강재의 층수나 간격 등에 따른 정량적인

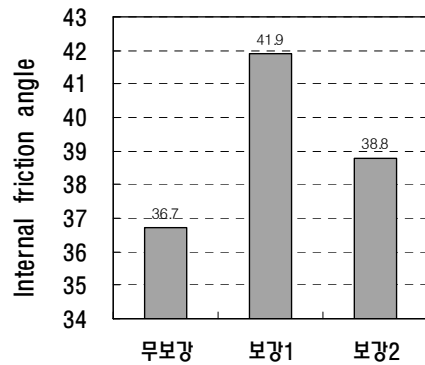
평가는 이루어지지 않았다. 다양한 밀도 조건과 보강재 설치방법에 대한 추가적인 시험이 이루어질 경우 보강재 삽입에 따른 강도정수의 증가효과를 정량적으로 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 연약지반에서 장비진입을 위



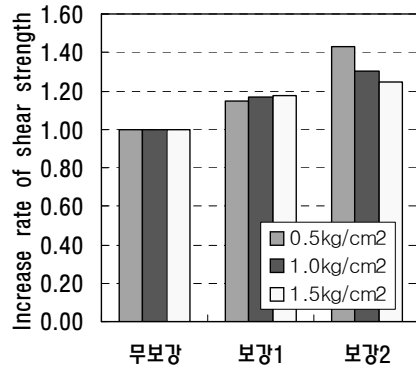
(a) 겉보기 점착력



(a) 전단강도



(b) 내부마찰각



(b) 전단강도 증가율

그림 12. PET Mat보강에 의한 강도정수의 변화

그림 13. PET Mat보강에 의한 전단강도 증가

한 표층처리공법으로서 PET Mat와 같은 보강재를 포설하는 경우에는 보강층수가 1~2층이 대부분이고 구속압이 대부분 1.0kg/cm² 이내임을 고려할 본 연구결과와 적용성은 충분한 것으로 볼 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 설계시 보강재 삽입에 따른 강도정수 증가의 정량적 표현 보다는 전단강도의 증가율을 고려하는 방안을 검토하였다.

전술한 바와 같이 PET보강에 의하여 점착력과 내부마찰각이 증가하여 결과적으로 전단강도가 약 1.2(높은 구속압)~1.4(낮은 구속압)배 정도 증가하는 것으로 나타났는데 이는 한계평형해석의 개념에서 보면 사면안정해석시 안전율이 1.2~1.4배 정도 증가되는 것으로 볼 수 있다. 따라서 사면안정해석에 의한 안정검토시 산정된 안전율에 1.2~1.4배의 값을 적용하여도 무방할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 슬래그 지반을 토목섬유(PET Mat)로 보강하는 경우에 그 토목섬유에 의한 보강효과를 검토하기 위해 대형삼축시험을 실시하여 토목섬유 보강에 의한 슬

래그의 전단강도 증진 및 변형 특성을 조사하였으며, 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 토목섬유로 보강된 슬래그의 전단강도 및 변형 특성을 파악하기 위해 대형삼축압축시험을 실시하였다. 대형삼축시험에 사용한 슬래그는 현장에서 사용되고 있는 것과 동일한 입도와 물성을 갖는 슬래그 재료를 사용하고, 토목섬유도 실물을 사용하여 실내시험에서 발생하는 크기효과(scale effect)로 인한 시험결과의 오차원인을 제거함으로써 실험결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있었다.
- (2) 대형삼축시험 결과, 토목섬유로 보강된 슬래그는 무보강시 보다 점착력과 내부마찰각 등의 강도정수가 증가되는 것으로 나타났으며, 전단강도는 약 1.2(높은 구속압)~1.4(낮은 구속압)배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 토목섬유에 의하여 슬래그 재료의 체적변형거동이 억제되면서 전단저항력 증가효과가 유발되었기 때문으로 판단된다.
- (3) 토목섬유로 보강된 슬래그의 응력-변형을 거동은, 다

일러턴시(dilatancy)의 양도 작고, 변형을 경화(strain hardening)거동을 나타내었는데, 이는 토목섬유와 슬래그 입자 사이의 마찰작용과 토목섬유 자체의 인장강도가 슬래그의 체적변형을 제한하기 때문으로 볼 수 있다.

(4) 본 연구에서는 보강재의 층수나 간격 등의 영향, 다양한 밀도 조건과 보강재 설치방법 등에 의한 영향에 대하여 시험이 이루어지지 않았으며, 향후 보강재 삽입에 따른 강도정수의 증가효과를 정량적 평가를 위해서는 이 분야에 대한 연구가 추가적으로 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김성수, 이재열, 이광준, 김유성 (2001), “삼축압축시험에 의한 보강 모래의 응력-변형 특성”, *대한토목학회 학술발표회 논문집(C)*.
2. 김영민, 박성재, 박재환, 정경환 (2001), “제강슬래그와 플라이애쉬를 혼합한 성토재의 개발에 관한 연구”, *대한토목학회 학술발표회 논문집(C)*.
3. 김영수, 서인식, 박영철, 진 군, 박수용 (2001), “제강 slag를 활용한 Stone Column의 지지력 예측(II)”, *대한토목학회 학술발표회 논문집(C)*.
4. 김형석, 변태봉, 한기봉, 이학봉, 배우현 (2000), “슬래그계 연약지반 개량재 개발”, *RIST 연구논문*, 제14권, 제4호, pp.445-452.

5. 문익주 (1993), “토목섬유를 이용한 얇은기초의 지지력 효과”, *한국지반공학회 학술발표회 논문집*, pp.35-48.
6. 박병기, 이진수, 이강일, 이광찬 (1993), “Geotextile을 이용한 지반보강토의 모형실험과 변형해석”, *대한토목학회 학술발표회 논문집(C)*, pp.429-432.
7. 배상수, 임기석, 송시훈, 지홍기, 이순탁 (2002), “슬래그 채움재를 사용한 계비온 옹벽의 안정해석”, *대한토목학회 학술발표회 논문집(C)*, pp.385-388.
8. 성수용 (1982), “도로용 슬래그 시험포장공사보고”, *대한토목학회지*, 제30권, 제2호, pp.67-74.
9. 신동훈, 조성은, 임은상, 박한규 (2009), “자갈질 재료의 비선형적 전단강도 특성 평가법”, *한국지반공학회 봄학술발표회 논문집*, pp.288-298.
10. 신방용, 신은철, 정기택, 이봉직 (1995), “지오그리드로 보강된 철도노반 및 제방보강에 관한 연구”, *대한토목학회 학술발표회 논문집(C)*, pp.351-354.
11. 조성민, 김홍중, 장용채, 남순성 (1998), “보강용 토목섬유의 거동과약을 위한 현장계측”, *한국지반공학회 학술발표회 논문집*, pp.73-83.
12. 주재우, 오세란, 곽희영, 최경호 (1999), “Pre-Load재료로서 제강슬래그의 활용 방안 연구”, *대한토목학회 학술발표회 논문집(C)*, pp.181-184.
13. 주재우, 한성현, 정규항, 김장흥, 박종범 (2003), “보강토지반에서 보강효과로서 강도정수의 증가”, *대한토목학회 정기학술대회 발표논문집*, pp.3207-3212.
14. 주재우, 서계원, 장민호, 송춘석, 박종범 (2004), “토목섬유와 Sand Mat에 의한 연약지반의 하중분산각 연구”, *대한토목학회 정기학술대회*, pp.1685-1689.
15. 한국수자원공사 (2001), *대형삼축시험기를 이용한 댐재료의 전단강도 특성 연구*, 수자원연구소 연구보고서.

(논문접수일 2009. 8. 18, 심사완료일 2009. 12. 18)