

흙과 열유도 토목섬유 접촉면의 마찰저항 특성

The Effect of Forced Temperature Change Cycles on Physical and Mechanical Properties of Sand and Weathered Granite Soil

신승민¹, 신춘원^{2*}, 유충식³
Seung-min Shin¹, Chun-won Sin^{2*}, Chung-Sik Yoo³

¹Member, the master's course, School of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ. Natural Sciences Campus, Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea

²Member, the master's course, School of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ. Natural Sciences Campus, Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea

³Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ. Natural Sciences Campus, Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea

ABSTRACT

This paper presents the results of an investigation into the effect of forced temperature change cycles on physical and mechanical properties of sand and weathered granite soil. The effect of forced temperature change cycles on the particle arrangement and the thermal conductivity was first investigated. A series of triaxial compression tests on the soils were also performed to look into the effect of temperature change cycles on the stress-strain-strength behavior.

요 지

본 논문에서는 보강토옹벽에 주로 사용되는 화강풍화토 내부에 열선 및 지오그리드를 설치하여 온도변화에 따른 화강풍화토와 지오그리드 사이의 전단력의 변화를 분석하였다. 실제 보강제로 보강되어있는 화강풍화토 내부에 열선에 의한 온도상승이 지반과 보강재 사이의 전단력에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위해 대형직접전단시험장치를 이용하여 전단시험을 진행하였으며 몰드내부에는 가열된 물로 열을 공급할 수 있는 실리콘재질의 열선이 설치되어 지반의 온도를 상승시키며 온도에 따른 전단 특성을 분석하였다. 또한 축방향 하중을 다르게 하여 온도상승에 의한 지반의 내부마찰각의 변화를 검토하였다.

Keywords : Thermo-hydromechanical, Heat exchangers, Weathered granite soil, Geosynthetic

1. 서 론

현재 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 강우로 인한 옹벽의 붕괴 사고가 빈번히 발생하고 있다. 보강토 옹벽 내부에 설치되어 있는 배수장치는 강우로 인해 스며든 물을 유동적으로 배수하여 지반의 강도를 저하시키는 목적을 가지고 있지만 강우가 지속되거나 많은 양의 강우가 집중적으로 발생 시 지반의 간극수압이 높아지며 그로인한 지

반의 강도저하와 옹벽 벽면으로 발생하는 주동토압이 상승하게 되어 옹벽의 붕괴가 발생되어 진다. 그러므로 옹벽 내부의 배수가 가장 중요하며 현재 국내외 적으로 옹벽의 배수를 원활히 하기 위한 연구가 진행되고 있으며 그중 대표적인 연구가 옹벽 내부에 열유도 장치를 설치하여 지반 내부의 온도 상승으로 수분을 유동적으로 배수시키는 방법이 연구되어지고 있다(참고문헌). Lovisa(1995), Ayato et al.(2012)은 점토에서의 온도 상승에 따른 비배수 삼축 압축 시험을 진행하며 온도상승에 따른 점토의 변화를 실험을 통해 확인 하였으며 Vega et al.(2012)은 주기적인 온도적용과 OCR 값에 따른 실트지반의 압밀시험을 진행

Received 12 Jan. 2017, Revised 21 Jun. 2017, Accepted 22 Jun. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-31-290-7537; Fax: +82--31-290-7549

E-mail address: scw97212@naver.com (C.-w. Sin)

하여 축차응력의 변화를 확인하였다. Coccia 등(2013)은 토조에 열선을 설치하여 Bonny silt에서의 온도변화를 통해 각 층에 설치된 습윤센서와 토조 상부에 설치된 로드셀을 통해 Loading-Unloading을 가하며 온도를 점차 상승시켜 각 층의 습윤도와 하중의 변화 분석을 하였으며 McCartney et al.(2010)은 지열활용을 활용하여 지반의 온도변화 적용시 지반구조물 주변 지반의 거동에 관한 연구 결과를 발표한 바 있다. Miachael et al.(2011)에서는 교량에 사용되는 옹벽에서의 보강재의 지반에서의 성능을 실험을 통해 규명하였다.

하지만 온도상승으로 인한 삼축시험 및 화강풍화토를 이용한 보강재와 지반 사이의 전단응력의 온도상승에 의한 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 전단몰드 내부에 자갈 배수층 및 열선을 설치하여 지반의 온도를 상승시켜 다양한 온도조건과 온도 유지 시간을 변수로 두고 실험을 진행하였으며 온도 및 온도상승 유지시간에 따른 화강풍화토와 보강재 사이의 전단응력을 비교 분석하였다.

2. 실험 장비 및 방법

2.1 실험 장비

이 실험은 온도변화가 가능한 대형몰드로 직접전단시험을 위해 Fig. 1의 대형직접전단 시험장치를 사용하였다. 대형직접전단 시험장치는 전단속도를 최대 0.01~10 mm/min까지 속도를 조절 가능하며 전단실험 진행 시 ICE (Institution of Civil Engineers, 2007)규정에 따라 2mm/min의 속도로 전단실험을 진행하였다. 실험을 진행하기 위해 몰드 내부에는 함수비 15%를 가지는 화강풍화토를 조성하였으며 이는 최적함수비 10%를 가질 때 보다 5%가 많

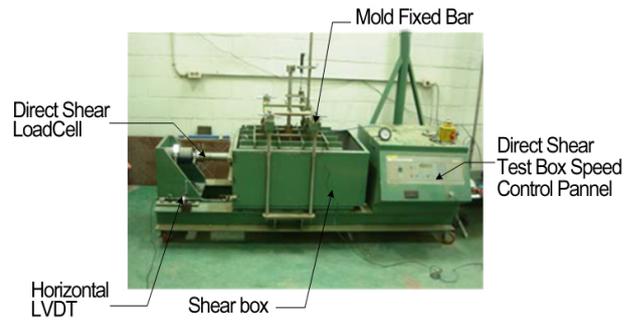


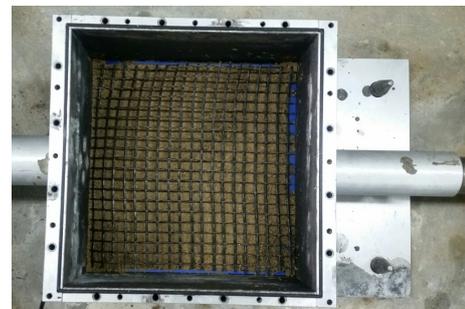
Fig. 1. Direct shear apparatus

은 함수량이며 지반의 wet side의 다소 물 함량이 많은 지반을 모사하였다. 또한 화강풍화토의 내부에 있는 수분의 배수를 위해 몰드 하단부에는 부직포와 자갈을 이용한 자갈층을 설치하였다. 화강풍화토 조성 시 실험 조성조건을 동일하게 하기 위하여 다짐봉을 이용하여 4층 다짐으로 각 100회씩 타격을 하여 지반을 조성하였다. 전단실험 진행 시 대형직접전단박스 내부에 설치되어있는 몰드가 대형직접전단박스과 함께 밀리며 고정되어있는 고정 Loadcell이 몰드 내부에 있는 보강재와 화강풍화토간의 전단력을 측정하게 하였으며 수평 LVDT를 설치하여 전단 시 이동되는 전단박스의 변위를 측정하게 하였다.

Fig. 2는 몰드에 설치된 열선과 5TE센서 그리고 지오그리드를 나타내고 있다. 몰드 중앙부분에는 실리콘 열선을 설치하여 항온수조로부터 가열된 물을 전달하여 실리콘 열선의 온도를 상승시키며 몰드 내부의 온도를 조절하였고 몰드내부의 온도를 측정하기위해 열선 바로아래에 5TE센서를 설치하여 열에 의한 지반의 온도변화와 체적함수율의 변화를 1분에 한번씩 측정하였다. 열선상당에 5 mm 두께의 화강풍화토를 쌓은 후 몰드 전단면에 지오그리드를 설치하여 화강풍화토를 추가 타설 하였다. 타설된 화강풍화토 상단부분에 0~600kg까지 하중을 가할 수 있



(a) Heating wire and 5TE sensor



(b) Geogrid

Fig. 2. Heating wire and geogrid installed inside the mold

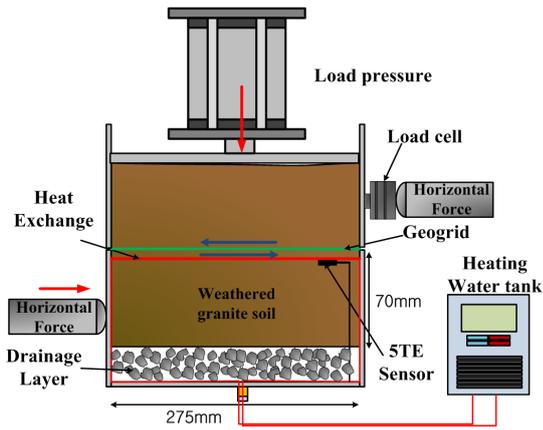


Fig. 3. Components of shear test with heat exchange

는 공압실린더를 설치하여 전단시험 진행 시 축방향 하중을 가할 수 있도록 하였다.

2.2 실험 방법

열변화 직접전단 시험을 진행하기 위해 Fig. 3에서와 같이 직경 275mm, 높이 250mm를 가지는 전단몰드를 제작하였으며 전단몰드의 하단 부는 구멍이 뚫려있어 5TE센서와 열선을 빼낼 수 있게 하여 전단시험 진행 시 열선 및 계측장치 선이 실험에 영향을 가하지 않도록 하였다. 또한 온도가 상승하면서 지반내 수분은 하단부 배수층을 통해 배수되게 되며 실험조건 온도와 온도 지속시간이 지난 후 공압실린더로 수직하중을 적용하여 실험을 진행한다. 전단시험 진행 시 대형직접전단장치가 하단부의 전단몰드를 밀게 되며 상부몰드는 설치되어있는 로드셀에 힘을 가하게 되며 고정되며 움직이지 않게 되어 화강풍화토와 보강재 사이의 전단응력을 측정하게 된다. 이 때 전단시험 진행시에도 열선의 온도는 계속 유지하도록 한다. 열을 가하지 않는 조건의 시험에서도 동일한 조건을 만족

Table 1. Test case

No.	Temperature (°C)	Heating Time (hr)	Axial stress (kPa)
1	15	12	40
2			70
3			100
4	70		40
5			70
6			100

시키기 위해 열선과 5TE 센서는 항상 설치하였다.

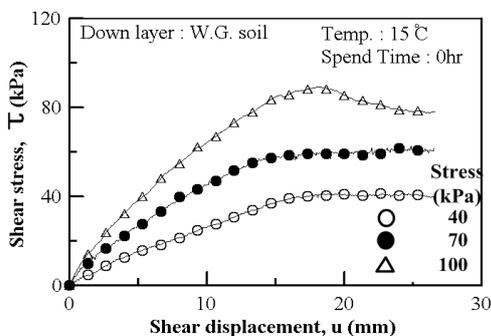
3. 열변화 보강개념 적용시 흙/보강재 마찰 특성 변화 분석

3.1 실험 조건

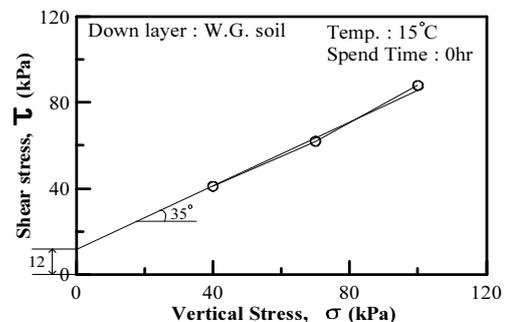
본 연구에서는 열변화 작용에 의한 보강토 옹벽에 설치되어 있는 보강재와 화강풍화토 사이의 전단저항 마찰각과 점착력의 물성 변화를 검토하기 위해 특수제작된 전단상자 내부에 15%의 함수비를 가지는 습윤 화강풍화토와 보강재를 설치하여 실험을 진행하였다. 각각의 온도 조건에서의 내부마찰각을 구하기 위해서 축차응력은 40kPa, 70kPa 그리고 100kPa로 설정하였으며 온도는 상온인 15°C와 열선의 열을 가하여 70°C의 조건에서 실험을 진행하였다. 온도 적용 시 지반에 전해지는 온도 시간을 고려하여 몰드전체에 열선의 온도 상승으로 인해 온도의 수렴하는 지점이 8시간 이후 이므로 12시간으로 온도적용시간을 정하여 실험을 진행하였다. Table 1은 실험에 적용한 온도, 온도적용시간 그리고 축방향 하중을 나타낸 표이다.

3.2 실험 결과

Fig. 4는 몰드내부의 온도를 15°C로 설정하여 전단시험

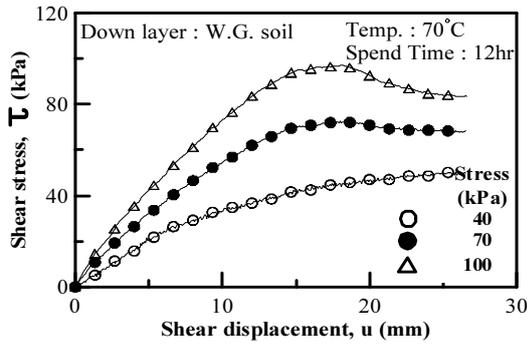


(a) Load-displacement curve - 15°C

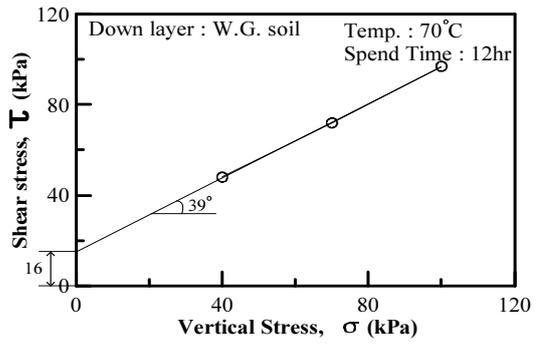


(b) Failure envelope - 15°C

Fig. 4. Analysis of weathered soil friction angle - 15°C



(a) Load-displacement curve - 70°C



(b) Failure envelope - 70°C

Fig. 5. Analysis of weathered soil friction angle - 70°C

결과를 나타낸 그래프로 항온수조의 온도 15°C에서 축방향 응력값의 변화에 따라 측정된 각각의 전단응력을 보여주고 있다. Fig. 4(b)는 전단시험진행 시 작용되는 수직응력에서의 최대전단력을 이어 15°C에서의 화강풍화토와 보강재 사이의 파괴포락선을 나타내고 있다. 그 결과 15°C에서의 화강풍화토와 보강재 사이의 마찰각(ϕ)은 35°로 측정되었으며 점착력(c)은 약 12kPa로 나타났다.

Fig. 5에서는 항온수조의 온도를 70°C로 설정하여 지반에 열을 12시간동안 적용한 후 각각의 수직응력에 대해 전단시험을 한 결과를 나타내고 있다. 전단시험진행시 시료의 변위는 27mm까지 나타나도록 진행하였으며 각각의 수직응력의 조건에서 전단응력값의 최대값을 통해 Fig. 5(b)와 같이 파괴포락선을 작도하였다. 항온수조 적용온도가 70°C일 때 화강풍화토와 보강재의 마찰각(ϕ)은 39°로 측정되었으며 점착력(c)은 16kPa로 15°C조건에서보다 내부마찰각이 4°증가하였고 점착력은 4kPa 증가하였다.

4. 열변화 지속시간에 따른 흙/보강재 사이의 전단강도 변화 분석

4.1 실험 조건

함수비 15%를 가지는 화강풍화토 지반에서 열선에 가해지는 열의 지속시간에 따라 지오그리드와 화강풍화토 사

이의 전단응력 변화를 비교하기위해 비교의 기준값이 되는 열을 가하지 않은 15°C상태에서 실험값과 비교하였다. 항온수조의 물 온도는 45°C와 70°C를 유지하며 실리콘 열선을 통해 지반에 열을 가하였으면 열을 가하는 시간은 6시간, 12시간 그리고 24시간으로 하여 열을 가한 후 전단시험을 통해 지속된 열에따라 전단응력이 변화를 확인하였다. 실험조건은 Table 2와 같으며 전단시험 진행 시 축차응력은 100kPa로, 전단속도는 2mm/min으로 동일하게 실험 진행 하였다.

4.2 실험 결과

Fig. 6에서는 항온수조로부터 45°C와 70°C로 가열된 물을 열선으로 공급하여 지반내 온도를 6시간, 12시간 그리고 24시간 가열 한 후 화강풍화토와 지오그리드간의 전단응력값과 가열을 하지 않은 조건에서의 전단응력값을 그래프로 비교하였다. Fig. 6(a)에서는 6시간 동안 45°C와 70°C로 가열 후 전단시험을 한 그래프를 비교한 것으로 45°C에서는 최대 전단력이 가장 작게 나타났으며 70°C에서 최대 전단력이 가장 크게 나타났다. 또한 Fig. 6(b)에서는 12시간 열변화 적용 후 전단시험한 결과를 나타내고 있으며 45°C와 15°C에서 최대 전단력이 비슷하게 나타나며 70°C에서 최대 전단응력값이 약 15%정도 최대전단응

Table 2. Shear test case in heating time

Case	Temperature (°C)	Applied Time (hr)	Normal Stress (kPa)
1	45	0	100
2		6	
3		12	
4		24	
2	70	6	
3		12	
4		24	

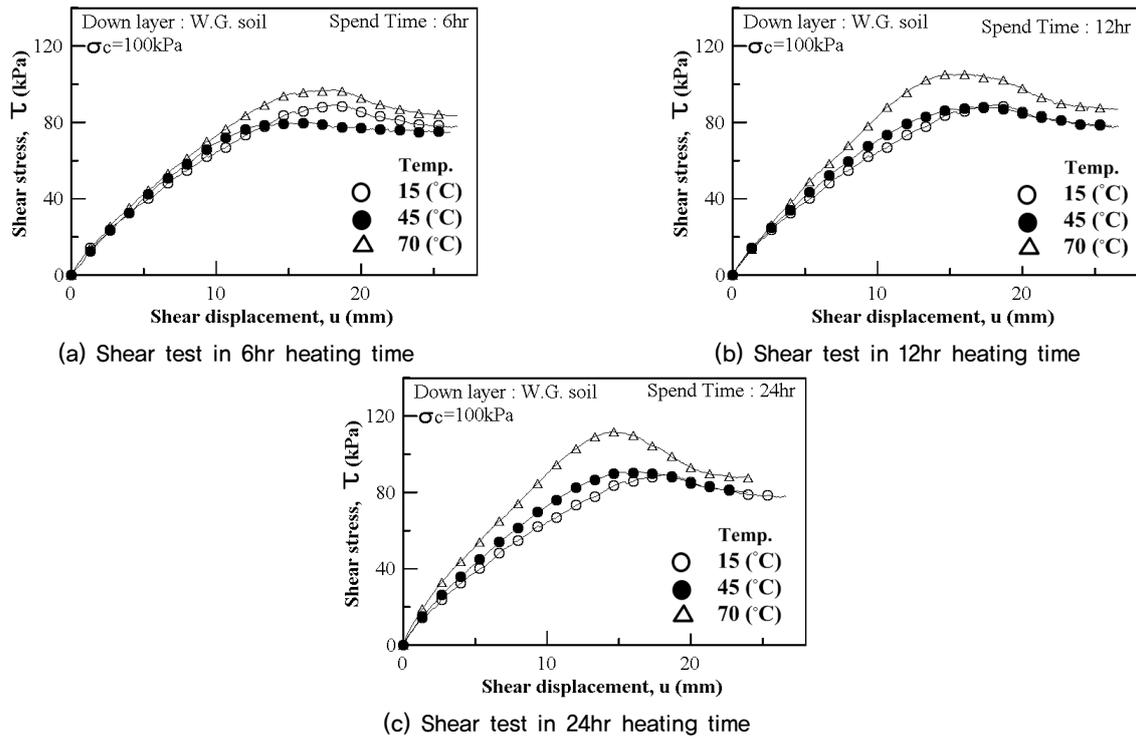


Fig. 6. Shear stress for thermal changes heating time

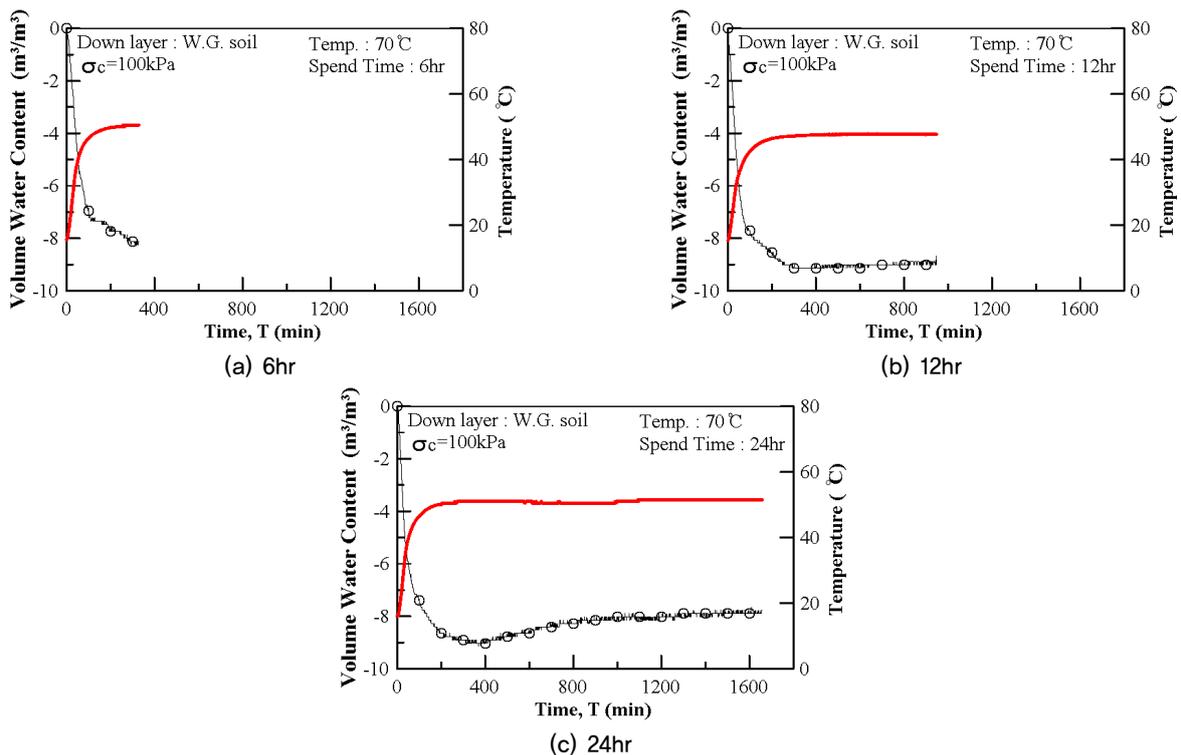
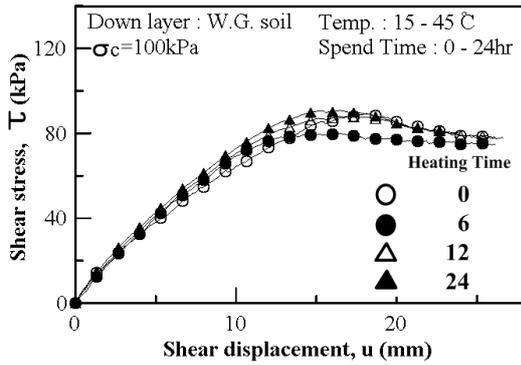


Fig. 7. Temperature and volume water content of soil

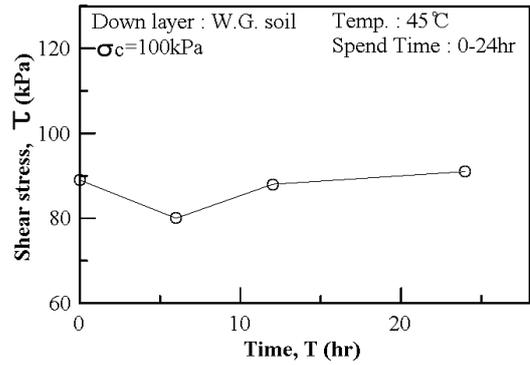
력값이 증가한 것으로 나타난다. 또한 Fig. 6(c)에서는 24 시간 동안 열변화를 가한 후 전단실험을 한 결과 그래프로 열변화를 가하지 않은 결과에 비해 45°C에서 다소 크게 나타났으며 70°C에서는 최대 전단력이 약 22% 증가한

것으로 나타나 지반내 온도가 상승 후 지속시간이 오래될 수록 화강풍화토와 지반내 지오그리드 사이의 전단력은 점차 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7에서는 지반내부에 온도적용 시 시간에 따른 지반

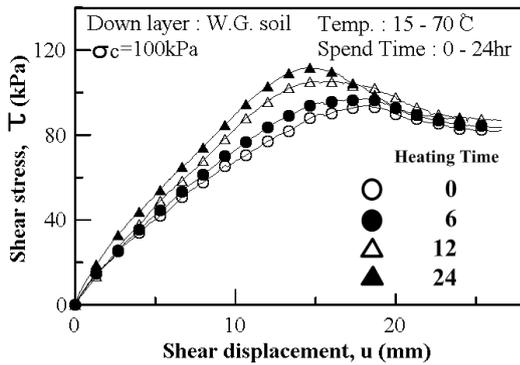


(a) Shear stress curve

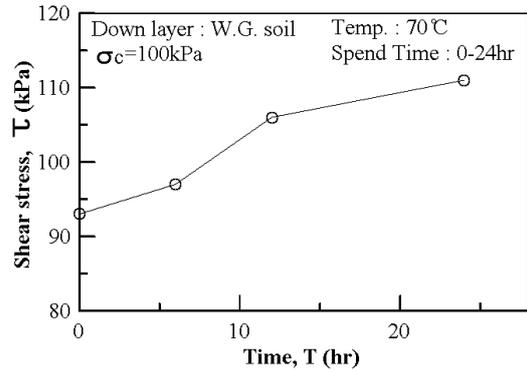


(b) Max. shear stress

Fig. 8. Variation of shear stress curve with heating duration -45°C



(a) Shear stress curve



(b) Max. shear stress

Fig. 9. Variation of shear stress curve with heating duration -70°C

내 온도변화와 체적함수를 변화를 그래프로 나타내었다. Fig. 7(a)는 온도적용 6시간 작용 시의 지반내 온도 및 체적함수를 변화를 나타낸 그래프로 지반의 온도의 경우 200분 경과 후 약 50°C로 수렴하는 모습을 보이며 체적함수의 경우 지반내 온도가 증가하면서 급격히 감소 후 점차 감소율이 줄어드는 경향을 보였다. Fig. 7(b)에서는 몰드 내부를 12시간 동안 열을 가할 시 몰드 내부의 온도 및 체적함수의 변화를 나타낸 그래프로 6시간 이전까지 이전의 실험과 동일하게 나타나며 6시간 이후 온도가 일정하게 유지되면서 지반의 체적함수 또한 약 9%로 일정하게 수렴하는 경향을 나타냈다. Fig. 7(c)에서는 열을 24시간 가할 시 온도변화에 따른 체적함수 변화를 나타낸 것으로 12시간 이전까지 유사한 경향을 보이며 12시간 이후에 점차 8%로 수렴하는 양상을 나타내고 있다. 이는 일정한 온도 상승 후 유지 시 화강풍화토 내부 체적함수를 또한 감소한 후 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

5. 결과 및 요약

보강토 옹벽에서 온도변화 및 온도변화 지속시간에 의한 화강풍화토와 보강재 사이의 전단응력 변화를 확인하기 위해 온도, 온도지속시간, 수직응력을 변수로 하여 실험을 진행하였다. 온도지속시간을 12hr으로 하여 15°C와 70°C에서의 마찰각과 점착력의 변화를 비교하였으며 온도상승에 의해 내부마찰각은 35°에서 39°로 증가하여 약 11%의 화강풍화토와 보강재의 마찰각 상승효과를 확인할 수 있었으며 점착력 또한 12kPa에서 16kPa로 증가하여 기존 점착력에 비해 33%이상 점착력이 증가한 것으로 확인되었다.

Fig. 8, Fig. 9에서는 열을 가하지 않은 조건과 화강풍화토 내부 45°C, 70°C로 열을 가하여 6시간, 12시간 그리고 24시간을 가했을 때 몰드 내부의 화강풍화토와 지오그리드 사이의 전단력의 변화를 나타냈다. Fig. 8에서는 45°C 조건에서 가열시간이 증가함에 따라 보강재와 화강풍화토 사이의 전단응력의 변화를 나타내고 있다. 전단값은 45°C

에서 시간이 지남에 따라 점차 증가하지만 그 영향은 작게 나타났다. 그러므로 70°C에 비해 45°C에서는 지반의 특성 변화가 크게 나타나지 않았으며 지반의 전단강도 또한 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

Fig. 9(a)에서는 몰드내부에 열을 가하는 시간이 증가할수록 최대전단력은 점차 증가하며 이는 화강풍화토 내부의 온도가 증가하면서 지반 내부의 수분이 이동 및 배수로 인해 몰드 내부의 화강풍화토의 함수량이 감소하였고 이에 낮아진 함수량의 지반과 지오그리드 간의 전단력이 증가한 것으로 검토되어진다. Fig. 9(b)에서는 전단시험 시 열변화 작용 시간에 따른 최대전단력의 변화를 나타낸 그래프로 열변화 작용 시간에 따라 최대 전단력이 어떤 추세로 증가하는지 나타내고 있으며 6시간에서 12시간 사이 최대 전단력의 증가폭이 가장 크게 나타나 12시간의 열변화 작용이 적정시간으로 판단된다.

Acknowledgement

This research is supported by Grant No. 2014004636 from the Basic Research Program of the Korea Science &

Engineering Foundation. The financial supports are gratefully acknowledged.

References

1. Adams, Michael. (2011), "Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System." EuroGeo4 Paper number 271.
2. Tsutsumi, Ayato, and Hiroyuki Tanaka. (2012), "Combined effects of strain rate and temperature on consolidation behavior of clayey soils." Soils and Foundations 52.2, pp.207-215.
3. Moritz, Lovisa. (1995), "Geotechnical properties of clay at elevated temperatures." Swedish Geotechnical Institute SGI, S-581.
4. Coccia, C. J. R. and John S. McCartney, J. (2013), "Impact of Heat Exchange on the Thermo-Hydro-Mechanical Response of Reinforced Embankments", Geo-Congress 2013, ASCE 2013, pp343-352.
5. Vega, A. (2012), "Impact of temperature cycles on the thermal consolidation of saturated silt under different stress states", B.S., Colorado State University-Pueblo.
6. McCartney, J. S., HaHaise, D., LaHaise, T., and Rosenberg, J. (2010), "Application of Geoexchange Experience to Geothermal Foundations", GeoFlorida, 2010.