

열유도 배수공법이 적용된 지반의 하중지지 특성

Heat Exchange Drainage Method Induced Bearing Capacity Characteristic

신승민¹, 신춘원², 유충식^{3*}

Seung-min Shin¹, Chun-won Sin², Chung-Sik Yoo^{3*}

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 thermo-hydrromechanical response of weathered granite soil. The effect of forced change temperature and relative humidity at the soil layer boundaries were monitored during heating. A series of load settlement test were performed on layers of compacted, unsaturated weathered granite soil with geosynthetic embedded at mid height before and after application of heat exchanger to the base of the soil layers. The results from this study indicated the potential for using embedded heat exchangers for the mechanical improvement of geotechnical systems incorporating weathered granite soil.

요 지

본 논문에서는 화강풍화토 조건에서 온도변화에 따른 지반의 하중지지 특성의 변화를 관찰하기 위해 실험을 진행하였다. 지반의 온도변화의 시간의 흐름에 의한 각 지층의 온도 및 체적함수율(V.W.C)를 지속하여 측정하여 온도변화가 보강토에 미치는 영향을 확인하였다. 또한 온도상승 후 지반에 수직으로 Loading-Unloading 작용을 통해 열에 의한 지반의 열-수리-역학적 관점에서의 하중지지력을 검토하였으며 비보강 지반과 실제 보강토 옹벽에서처럼 보강재와 배수층을 설치한 지반내 온도 작용에 의한 배수작용과 보강재의 영향에 관하여 분석하였다. 그 결과 열교환 장치를 설치한 경우 수직하중의 강도가 더 크게 나타나 지반의 강도가 증가한 것으로 나타났다.

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

1. 서 론

최근 들어 지구온난화로 인한 이상기후현상들이 빈번히 발생하며 특히 여름철 집중호우가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 집중호우는 지반에 스며들어 함수율이 높아지고 간극수압을 상승시켜 지반의 강도를 저하시켜 옹벽 구

조물의 붕괴가 빈번히 발생되고 있다. 현재 보강토 옹벽에 배수를 용이하게 하기 위해 여러 가지 방법들이 사용되어 지고 있으며 본 연구에서는 이러한 보강토 옹벽의 붕괴를 미연에 방지하기 위해 화강풍화토 조건에서 열유도 배수 시스템의 적용성을 확립하는데 목적을 두고 있다. 현재 국외에서는 실트질 지반에서 열유도 배수공법의 적용성을 확인하기 위해 여러 실험들이 진행되어지고 있는데 Abuel-Naga et al.(2007)은 온도변화가 가능한 압밀셀을 이용하여 Bangkok caly, Boom clay, MC clay를 사용하여 온도

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.-S. Yoo)

변화를 가하며 압밀을 진행하여 OCR 값에 따른 온도변화 및 시료의 변형률을 체크하여 점토의 열에 대한 영향 분석을 하였으며 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 상승 시켜 각 층의 습윤도와 하중의 변화 분석을 하였으며 McCartney et al.(2010)은 지열 활용을 활용하여 지반의 온도변화 적용시 지반구조물 주변 지반의 거동에 관한 연구결과를 발표한 바 있다.

이와 아울러 국내에서도 Choi et al.(2008) 이지열 시스템에 사용되는 열 교환기의 그라우트재의 역학적 특성에 대해 연구를 수행하였으며 Yoon et al.(2012)는 코일형 열 교환기를 이용한 흙의 열전도특성 평가에 관한 연구를 수행하고 그 결과를 보고한 바 있다.

이와 같이 열에 의한 지반에 특성 분석에 대한 연구가 지속적으로 진행 중이지만 우리나라의 보강토 옹벽에 대표적으로 사용되는 화강풍화토에 온도상승에 물리적·역학적 특성에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 연구가 미흡한 시점이다. 따라서 본 연구에서는 화강풍화토를 사용하여 온도변화에 따른 지반 내부의 온도변화 및 체적함수율(V.W.C.)의 변화와 하중변위 시험을 통해 지반의 공학적 거동변화 특성을 분석하였다. 또한 보강토 옹벽의 조건을 만족시키기 위하여 지반 하부에 배수층과 상부에 지오

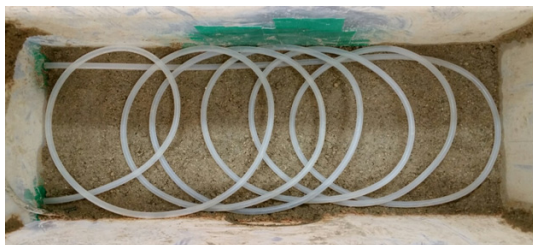
그리드를 설치하여 보강토 옹벽 단면 조건에서도 동일한 조건으로 실험을 진행 하였다.

2. 실험 장비

본 연구에서는 지반 내부의 열원에 의한 지반강도 및 체적함수율의 변화를 분석하기위해 항온수조를 이용하여 물을 가열하였으며 지반 내부에 지속적인 열을 공급하기 위해 Fig. 1에서와 같이 5mm직경의 실리콘 튜브를 지반 중앙부분에 설치하였으며 보강토 옹벽의 조건을 만족시키기 위하여 Fig. 1(b)와 같은 10mm 격자 직경을 가지는 지오그리드를 사용하여 실험을 진행하였다.

Fig. 2(a)는 열선으로부터 일정하게 떨어져 있는 지층에서의 온도변화와 체적함수율 변화를 측정 가능한 5TE 센서이며 열원에서부터의 거리에 따라 지반의 온도 및 체적함수율(V.W.C.)의 변화를 측정하기위해 토조 내부에 3개의 5TE 센서를 설치하였다. Fig. 2(b)의 Em50 데이터 로거이며 1분에 한번 씩 열원으로부터 떨어진 위치마다 측정된 지반의 온도 및 체적함수율을 저장하였다.

Fig. 3은 실험 진행 시 토조와 유압셀 그리고 계측장치들을 나타내고 있다. 토조 내부에 열선을 설치하여 토조 내부 지반의 온도를 조절 한 후 유압셀을 이용하여 변위제어를 통해 지반의 수직변위에 따른 하중을 측정하였다. 유



(a) Silicon heater



(b) Geogrid

Fig. 1. Silicon heater and geogrid in soil



(a) 5TE Sensor



(b) Em50 data logger

Fig. 2. Measuring equipment of temperature and volume water content

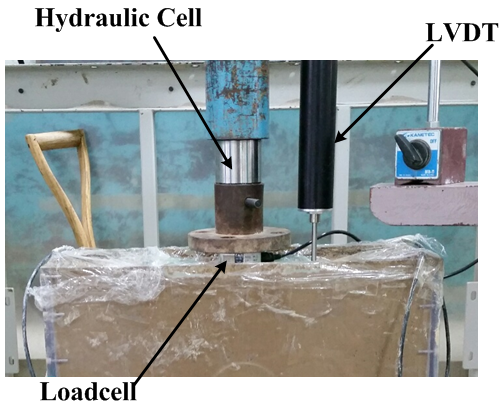


Fig. 3. Loading applied to increase the strength soil

압셀 내부에 하중 및 변위장치가 있지만 정확한 측정을 위하여 별도의 로드셀과 변위계를 설치하여 하중과 변위를 측정하여 지반의 온도에 따른 지반강도를 비교 분석하였다.

3. 지반내 온도변화에 따른 비보강 지반의 하중 지지 특성 변화 분석

3.1 실험 방법

Fig. 4에서는 지반내 온도변화에 따른 비보강 불포화토 화강풍화토지반의 하중지지특성 변화 실험의 전체 모식도가 나타나 있다. 토조 내부에는 13%의 함수비를 가지고 있는 화강풍화토로 채워져 있으며 이는 현재 사용하고 있는 화강풍화토의 최적함수비 10%보다 약 3% 높은 함수율로써 ‘Wetside’ 지반을 표현하였다. 다소 함수율이 높은 지반내부 중앙에 실리콘 열선을 설치하여 토조 내부의 온도를 조절하였으며 열선 부근 및 각각 열선으로부터 상부,

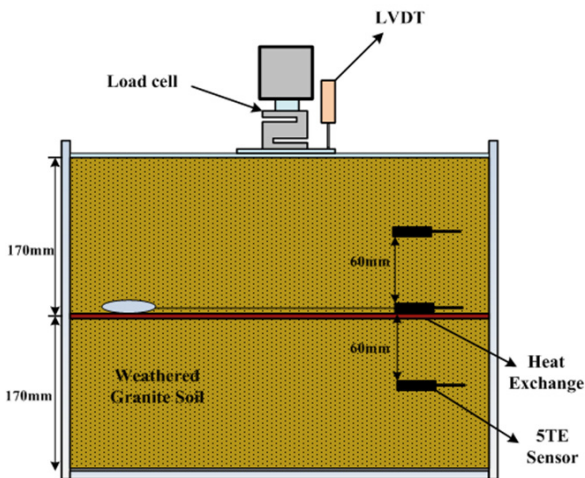


Fig. 4. Concept of heat exchange loading test

Table 1. Temperature and load

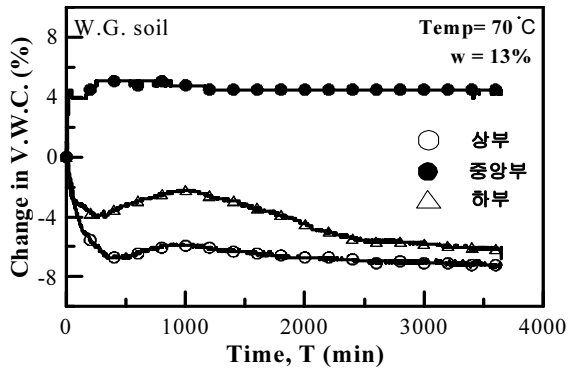
Temperature (°C)		25°C	45°C	70°C
Vertical Load	Loading (kg)	50	100	150
	Unloading (kg)	25	50	75

하부 60mm 떨어진 지층에 5TE 센서를 설치하여 Em50 로거를 이용하여 1분에 한번씩 지반의 온도와 체적함수율을 측정하게 하였다. 또한 상부에 로드셀과 변위계를 설치하여 토조 상부로부터 작용하는 하중의 크기와 변위를 측정하여 온도변화에 따른 지반의 하중지지력의 변화를 분석하였다. 지반의 온도는 상온인 20°C 부터 45°C 그리고 70°C 까지 단계별로 상승시켰으며 온도변화에 따른 지반의 체적함수율 변화 그리고 Loading-Unloading작용에 의한 지반강도 변화를 분석하였다. Table 1에서는 온도조건 및 지반에 가해지는 하중에 대해 나타나 있으며 지반의 Loading은 50kg, 100kg, 150kg를 적용하였고 Unloading은 Loading값의 50%만 적용하여 응력변위 곡선을 통해 열원에 의한 온도작용에 따른 지반강도 변화를 분석하였다.

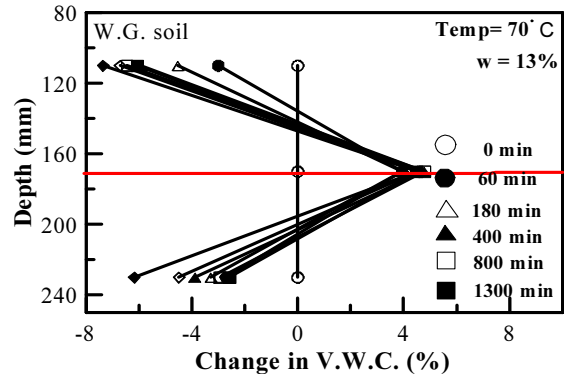
3.2 실험 결과

Fig. 5와 Fig. 6에서는 지반 중앙부에 설치된 열원으로부터 발생된 열에 의해 지반내 체적함수율과 온도변화를 시간의 흐름에 따른 그래프로 나타냈다. 열원으로부터 60mm 씩 떨어져 있는 3개의 5TE 센서를 이용하여 각 시간에서의 체적함수율 변화량과 지반의 온도를 측정된 결과, 체적함수율의 경우 열원부분은 온도가 상승하면서 4%상승하여 유지되었고 열원으로부터 상부와 하부 지반은 시간이 지남에 따라 체적함수율이 점차 감소하며 대칭적인 경향을 보였다. 또한 지반의 온도는 시간이 지나면서 점차 증가하며 열원으로부터 멀어질수록 온도가 점차 낮아졌으며 300분 이후부터 온도는 일정하게 수렴하는 형상을 나타냈다.

Fig. 7에서는 지반에 25°C, 45°C, 70°C로 점차 온도를 상승시키며 지반 상부에 Loading-Unloading을 가하여 지반의 강도변화분석을 하였다. 초기하중 작용 시 지반의 변위는 6mm까지 나타났으며 45°C 상승 후 4mm, 70°C에서는 2mm가 나타나면서 점차 변위가 감소되면서 Fig. 7(b) 처럼 재압축에 의한 재압축 곡선을 나타냈으며 온도가 상승하면서 점차 증가하였다. 이는 온도상승으로 인해 지반 내부의 체적함수율이 점차 감소하였고 지반의 점착력이

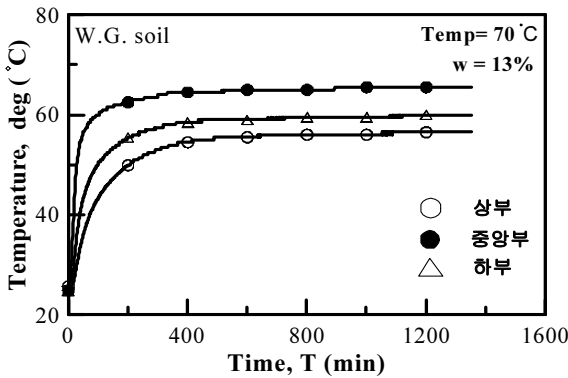


(a) Time - V.W.C

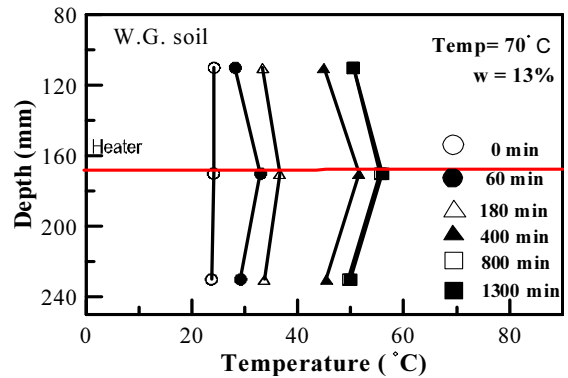


(b) Location - V.W.C

Fig. 5. Variation of Time-V.W.C. curves with location in soil

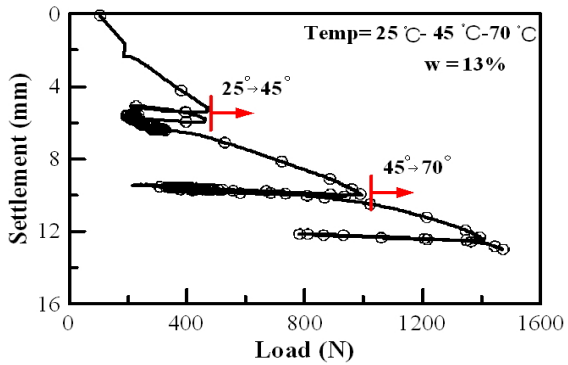


(a) Time - Temperature

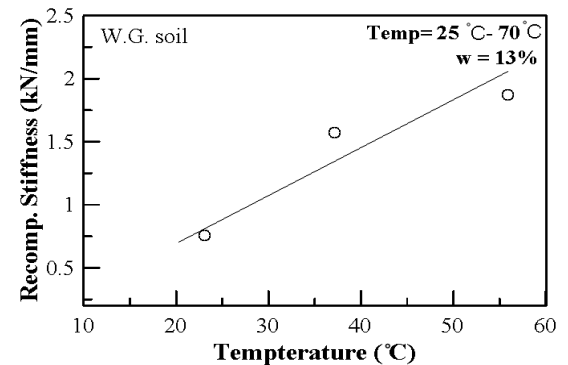


(b) Location - Temperature

Fig. 6. Variation of Time-Temperature curves with location in soil



(a) Temperature induced load-settlement curve



(b) Temperature induced Recom. stiffness

Fig. 7. Load-settlement curves for ambient and elevated temperature conditions

상승하여 지반의 강도가 점차 증가한 것으로 보여진다.

4. 지반 내 온도변화 및 토목섬유 보강지반의 하중 지지 특성 변화 분석

4.1 실험 방법

본 실험은 보강토 용벽에서의 온도상승 시 지반의 강도

변화를 분석하기 위한 실험으로써 보강토 용벽에 사용되는 화강풍화토와 자갈배수층 그리고 지오그리드를 보강토 용벽의 단면으로 설치하여 Fig. 8과 같이 실험을 진행하였다. 중앙의 열원의 온도상승으로 인해 지반내 수분을 하단부 자갈 배수층으로 흐르게 하였으며 열원으로부터 상단부로 45mm간격으로 5TE 센서를 설치하여 시간의 지남에 따른 각 지층의 체적함수율 변화와 온도변화를 측정하였다. 또한 온도상승 후 토조에 Loading-Unloading을 가해

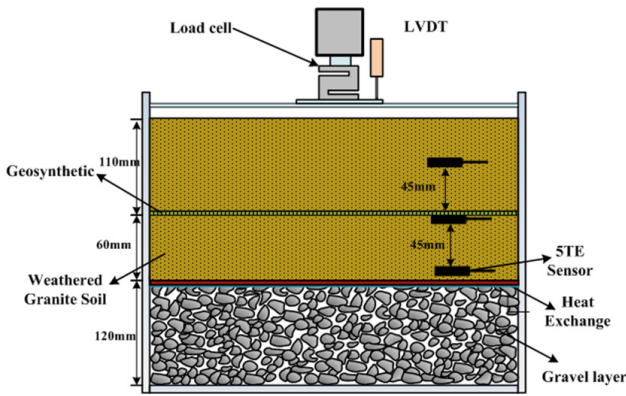


Fig. 8. Concept of heat exchange loading test with drainage and geogrid

Table 2. Temperature and load

Case	Temperature (°C)	Vertical Load (kg)	
		Loading	Unloading
1	25	100	50
2	70	100	50

25°C와 70°C에서의 지반강도변화를 그래프로 비교하였다. 열선의 작용온도와 하중은 Table 2에 나타나 있다.

4.2 실험 결과

Fig. 9에서는 열원으로부터 상부에 위치한 5TE 센서에 계측된 각 지층에서 시간에 흐름에 따른 체적함수율과 온도변화를 나타낸 그래프이다. 그래프의 빨간선은 열원을 뜻하며 초록색 선은 지오그리드의 위치를 나타내고 있다. 지반의 체적함수율은 시간의 흐름에 따라 점차 감소하는데 지오그리드를 기점으로 상부에 위치한 지반의 체적함수율의 감소폭은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 9(b)에서는 각 지점에서의 시간의 흐름에 따른 온도

변화를 나타내고 있으며 시간이 지남에 따라 열원으로부터 각 지층에 열이 전달되는 것을 확인하였다. 약 800분 이후부터 온도상승폭은 수렴하게 되며 열원으로부터 멀어질수록 온도의 증가폭이 감소하였다. 그러므로 상부의 체적함수율의 변화 또한 감소하게되며 지반에 내포되어있는 수분은 열원으로 점차 모여들어 열원 하부의 배수층으로 흘러들어가 지반의 체적함수율이 점차 감소되는 것으로 보여진다.

Fig. 9에서는 동일하게 조성된 열 변화 토조에 각각의 온도 25°C와 70°C에서 수직방향으로 Loading-Unloading 을 가하여 하중변위곡선과 온도변화에 따른 재압축 강도를 나타냈다. Fig. 9(a)에서는 온도상승에 의한 지반의 강도를 분석하기 위해 온도상승한 조건과 하지 않은 조건에서 동일한 하중 100kg과 50kg지점에서 재압축을 통해 각각의 온도에서의 재압축지수를 나타내어 지반의 강도변화를 분석하였다. 25°C 조건에서는 100kg 하중 작용 시 3.3mm의 지반변위가 발생하였으며 70°C 온도조건에서는 100kg 하중 작용 시 1.5mm의 수직 변위가 발생하여 지반 내 온도상승으로 인해 수직변위가 약 55% 감소한 것으로 나타났다. Fig. 9(b)에서는 재압축에 의한 재압축강도를 온도에 따라 나타냈으며 온도상승에 따른 지반의 재압축 강도 또한 2.48kN/mm에서 2.74kN/mm로 약 10% 재압축 강도가 증가하였다.

5. 결과 및 요약

본 연구에서는 보강토옹벽에 열유도 배수시스템 작용 시 지반의 거동변화를 분석하기 위해 뒤채움 흙으로 쓰이는 화강풍화토를 이용하여 지반 내부 열원을 설치하여 흙

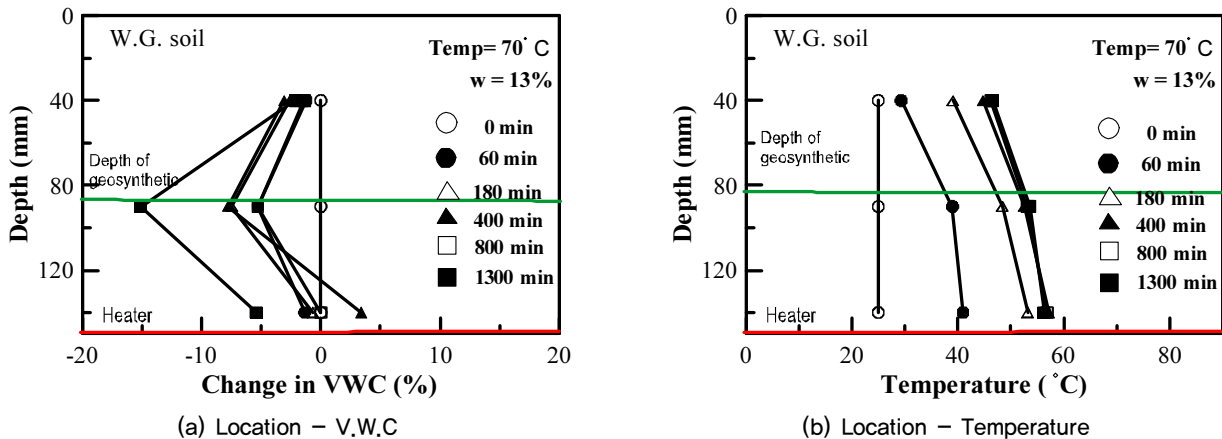
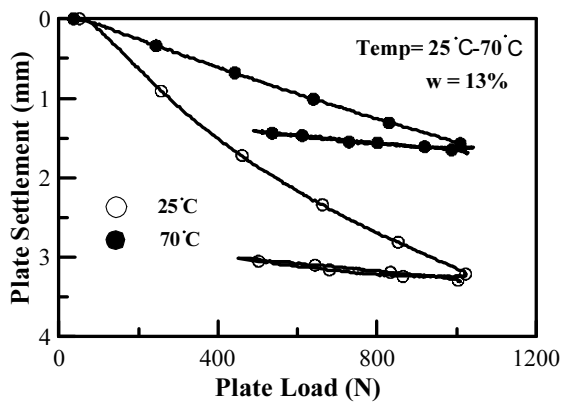
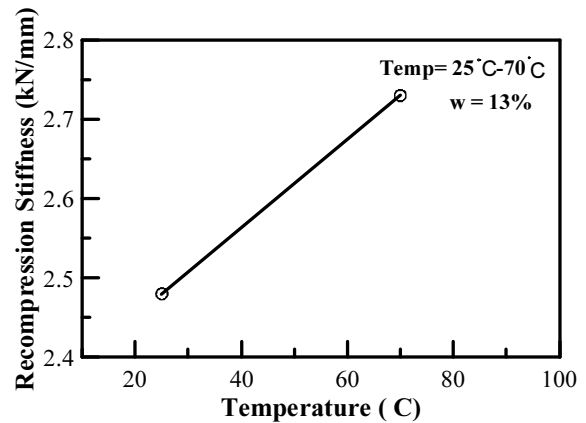


Fig. 9. Variation of Time curves with loaction in soil



(a) Temperature induced load-settlement curve



(b) Temperature induced Reomp. stiffness

Fig. 10. Load-settlement curves for ambient and elevated temperature conditions

만 있는 조건과 배수층과 지오그리드가 있는 각각의 조건에서 온도변화가 흙의 물리적·역학적 특성에 미치는 영향에 대한 영향에 대한 고찰을 위해 지중 열변화에 따른 지층의 체적함수율과 온도 변화를 관찰하였고 수직하중 작용시 변위를 통해 지반의 강도 특성 변화 경향을 고찰하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 온도상승 후 시간이 지남에 따라 지반의 전반적으로 온도는 상승하고 체적함수율은 점차 감소하였다. 이러한 원인은 지반에 가해진 온도상승이 지반 내부의 수분의 이동을 빠르게 하여 열원으로 수분이 모이게 되어 열원 하부에 있는 배수층으로 지반내 수분을 유도된 것으로 판단된다.
- (2) 지반 내부의 온도변화에 따른 체적함수율 변화는 열원으로부터 떨어진 거리에 선형적이지만 지오그리드 설치 상부 지반의 체적함수율과 온도변화는 비선형적으로 변하게 되는 것으로 나타나 보강토 옹벽에 설치된 보강재의 품질 및 위치에 따라 열원에 의한 체적함수율 감소율의 변화를 좌우하는 것을 설명할 수 있다.
- (3) 온도가 상승한 지반에서 수직하중을 가한 후 재압축을 가할 시 온도를 상승시키지 않은 지반에서보다 수직변위가 작게 나타났으며 재압축강도 또한 크게 나타나 지반의 온도상승은 지반내부의 수분을 감소시켜 점착력을 상승시키고 지반의 강도를 증가시키는 것으로 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. Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., Bouazza, A., and Ramana, G.V. (2007), "Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling", Canadian Geotechnical Journal, 2007.
2. Choi, H. S., Lee, C. H., Choi, H. P., and Woo, S. B. (2008), "A study on the physical characteristics of grout material for backfilling ground heat exchanger", Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.24, No.1, pp.37-49.
3. 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, pp.343-352.
4. McCartney, J. S., HaHaise, D., LaHaise, T., and Rosenberg, J. (2010). "Application of Geoexchange Experience to Geothermal Foundations", GeoFlorida, 2010.
5. Yoon, S., Lee, S. R., Park, H., and Park, S. (2012), "Thermal Conductivity Estimation of Soils Using Coil Shaped Ground Heat Exchanger", Journal of Korean Civil Engineering Society, Vol.32, No.5C, pp.177-183.