

축소모형실험에 의한 반복하중 작용시 지오그리드 감쌘 쇄석말뚝의 비배수 거동 특성

Undrained Characteristics of Geogrid-Encased Stone Column under Cyclic Load Using Reduced-Scale Model Tests

최진욱¹ Choi, Jin-Wook
이대영² Lee, Dae-Young
유충식³ Yoo, Chung-Sik

Abstract

This paper presents the results of a laboratory investigation into a study on undrained characteristics of a geogrid-encased stone column (GESC) installed in soft clay under cyclic load. In order to analyze behavior of settlement, pore water pressure, stress concentration ratio and strain of the GESC compared to a stone column, a series of reduced-scale laboratory tests were performed. The model tests show that GESC provides a simple and effective method of deformation resistance and settlement restraint when a short-term cyclic load is applied. The maximum strain of geogrid occurred at 1.2D and 1.5D from the top of the column. This paper highlights the importance of considering overlay effect and replacement ratio on cyclic load supporting GESC.

요 지

본 논문에서는 반복하중 작용시 연약지반에 설치된 토목섬유 감쌘 쇄석말뚝의 비배수거동특성을 다루었다. 모형실험을 통해 점성토 지반에 적용된 지오그리드 감쌘 쇄석말뚝의 침하량, 과잉간극수압, 응력분담비 그리고 지오그리드 변형률의 변화특성을 기존의 쇄석말뚝과 비교하여 분석하였다. 실험결과를 통하여 연약지반에 설치된 GESC는 단기하중 재하시 쇄석기둥의 변형을 토목섬유의 인장력으로 구속 시켜 변형저항력의 증가와 침하저감 효과가 있음을 알 수 있으며 지오그리드의 최대 변형률은 1.2D와 1.5D에서 발생하는 것으로 나타났다. 본 논문에서는 반복하중 재하시 지오그리드 감쌘 쇄석말뚝에서의 지오그리드 감쌘 효과와 치환율이 쇄석말뚝에 미치는 영향을 고찰하였다.

Keywords : Geogrid-encased, Stone column, Reduced-scale laboratory tests, Overlay effect, Replacement ratio

1. 서 론

연약지반 공사현장에서 자갈이나 쇄석을 이용하고

지반을 개량하며 지반강도를 높이는 공법인 쇄석기둥 공법(Stone Column Method)은 철도, 도로, 항만시설물, 성토구조물등 상부구조물의 하중을 지지하기 위한 연

1 비회원, 성균관대학교 초고층장대교량학과 석사과정 (Student Member, Graduate Student, Dept of Mega Building and Bridge, Sungkyunkwan Univ.)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반공학연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg Division, KICT)

3 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg, Sungkyunkwan Univ., Tel: +82-31-290-7518, Fax: +82-31-290-7549, csyoo@skku.edu, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 7월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

약지반 보강에 효율적인 공법으로 알려져 있다. 최근 들어 연약지반 내에서 모래 또는 쇄석말뚝의 상부 별징 파괴 및 침하를 감소시키며 지반의 지지력 증가를 위하여 모래말뚝이나 쇄석말뚝을 토목섬유로 감싸는 공법 (geosynthetic-encased stone column, GESC)에 관한 많은 연구가 수행되어왔다(Kempfert et al., 2002; Alexview et al., 2003; Murugesan and Rajagopal, 2006, 2010; Lee et al., 2006; You et al., 2007; Gneil and Bouzza, 2010; Yoo, 2010; Castro and Sagasetta, 2011; Pulko et al., 2011). Castro and Sagasetta(2011)는 GESC의 변형과 압밀에 관한 연구를 통해 탄성거동일 때의 토목섬유 감쌈에 따른 효과는 미미하며 소성거동일 때 감쌈효과가 크게 나타나는데 이는 감쌈재료의 강성도와 비례하며, 침하저감계수와 치환율간의 상관관계는 없다고 보고하였다. Pulko et al. (2011)은 쇄석말뚝의 침하량 추정을 위하여 다양한 토목섬유의 강성도, 쇄석말뚝의 배치 그리고 하중 재하 크기에 따른 디자인 차트를 제시하였다. 특히 최근에는 유럽에서 연약지반위에 건설되는 도로 및 철도노반의 침하제어를 위한 보강공법으로 토목섬유 감쌈 쇄석말뚝의 적용이 증가하고 있다.

반복하중을 고려한 토목섬유 보강 연약지반의 거동 평가에 대한 기존의 연구를 살펴보면 Tafreshi and Dawson (2012)은 모래지반을 대상으로 토목섬유 보강재인 지오셀의 보강 유무 그리고 직경, 높이 변화에 따른 효과를 평가, 비교하여 침하저감에 가장 효과적인 기초 폭의 0.1배에 해당하는 설치 깊이를 제시하였다. 그리고 Bhandari and Han(2010)은 DEM방법을 이용하여 토목섬유와 모래 지반사이에서의 상호 특성을 연구하여 토목섬유 인장력의 증가가 지반보강을 향상시키고 토목섬유의 설치위치가 얕을수록 효과적인 거동이 나타난다고 하였다. 연약지반에 GESC 시공의 경우 고치환율의 Sand compaction pile(SCP), 쇄석기둥 공법과는 달리 쇄석기둥과 점토부의 거동이 상호 복합적으로 발생하게 되어 하중전이 특성 및 압밀침하특성 파악이 설계 및 해석에 있어 중요한 역할을 한다. 특히 반복하중 적용에 관하여 쇄석말뚝과 지반의 복합지반에서 연구가 많이 부족하고 향후 증가하는 철도산업의 적용성을 위해서 지속하중 뿐만 아닌 반복하중 조건의 GESC 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구는 반복하중 작용시 연약지반 내에 설치된 GESC 공법의 적용성 평가를 위한 기초연구로서 점토지반에 설치된 GESC의 비배수 침하 거동과 응력

분담 특성을 평가하기 위해 실내축소모형실험을 수행하였다. 연약지반 조건의 GESC 저치환율 시공시 비배수 침하량, 과잉간극수압, 응력분담비 그리고 지오그리드의 변형을 분석을 통하여 반복하중 작용시 연약지반에 설치된 GESC의 비배수 거동 특성을 고찰하였다.

2. 이론적 배경

2.1 GESC 공법

GESC공법은 고강도 지오그리드로 쇄석 기둥을 감싸 별징파괴를 방지하고 구조물 안정성을 확보하기 위해 고안된 방법이다. 쇄석 기둥은 상부 구조물의 하중이 재하시 Fig. 1과 같이 상부로부터 직경의 2~3배의 깊이에서 팽창파괴(Bulging Failure)를 일으켜 과도한 침하와 지지력의 감소를 야기한다(Hughes et al. 1975; Barksdale et al. 1983; Lee and Yoo, 2011). 반면 GESC 공법은 쇄석기둥에서 발생하는 팽창파괴를 지오그리드의 구속력

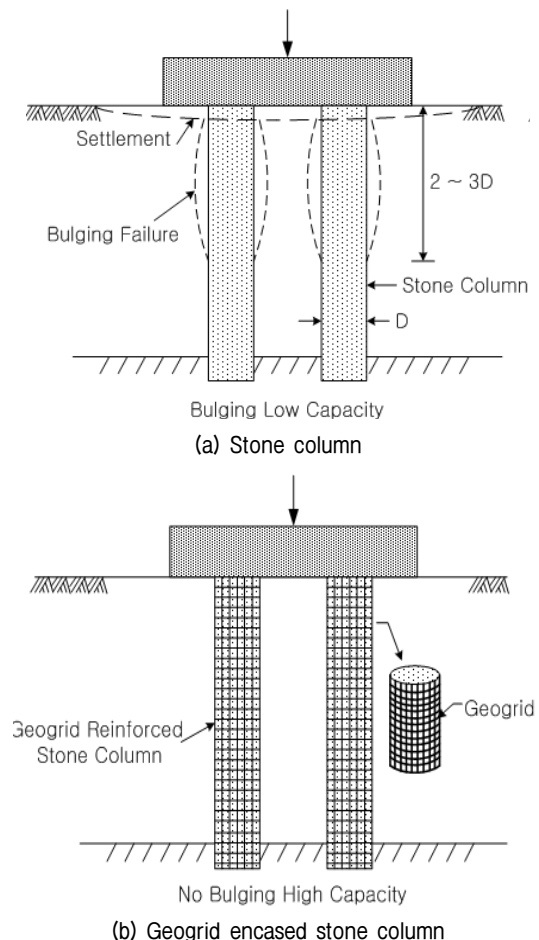


Fig. 1. Failure modes of stone column groups (Barksdale and Bachus, 1983)

으로 횡방향 변형을 억제하여 쇄석기둥의 변형을 감소하고 지반의 강도를 증진시키는 쇄석기둥 보강공법이다. 또한 고강도 지오그리드를 사용함으로써 채움재를 쇄석, 재활용 골재 또는 폐콘크리트 이용 할 수 있고 지오그리드의 구속효과로 인한 저치환율의 시공이 가능하므로 경제적인 공법이다. 특히 GESG 시공의 경우 고치환율의 SCP, 쇄석기둥 공법과는 달리 쇄석기둥과 점토부의 거동이 상호 복합적으로 발생하게 되기 때문에 하중전이 특성과 침하 특성 파악이 설계 및 해석에 있어 매우 중요한 역할을 한다.

2.2 단일 조립토 말뚝의 지지력

쇄석기둥공법과 같은 조립토 말뚝은 배수재로서 효율이 높을 뿐만 아니라 동시에 상부 구조물의 기초로서 복합지반의 지지력을 증진시키기 때문에 지반개량에 널리 이용된다. Aboshi and Suematsu(1985)는 단일 조립토 말뚝의 극한지지력 산정방법을 파괴유형에 따라 정리하였다. 그 중 조립토 단일말뚝에서 가장 많이 발생하는 파괴는 별징파괴로 하중에 대해 말뚝이 항복하기 시작하면 주변지반으로 하중이 전이되어 말뚝의 주동파괴응력과 수평토압응력의 평형상태가 되는 과정에서 하중재분배가 이루어지면서 발생하는 파괴유형이다 (Handy, 2001). 따라서 말뚝의 주동파괴응력에 대해 지반의 수평저항력을 증가시켜서 별징파괴로 인한 지반의 침하량 감소를 막고 지지력을 향상 시켜야한다. Greenwood(1970)는 하중으로 발생하는 말뚝의 주동토압이 주변지반에서 작용하는 수동토압과 같다는 가정하에 Rankine의 수동토압계수를 사용하여 다음과 같은 극한지지력 산정식을 제안하였다.

$$q_{ult} = (\gamma_c z K_{pc} + 2c_o \sqrt{K_{pc}}) \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \quad (1)$$

여기서, γ_c 는 점토의 단위중량, z 는 복합지반의 깊이, c_o =주변지반의 비배수 강도, K_{pc} 는 주변지반의 수동토압계수($K_{pc} = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi_c}{2}) + \frac{2c}{\sigma_v} \tan(45^\circ + \frac{\phi_c}{2})$), ψ_s =쇄석기둥의 내부마찰각이다.

Vesic(1972)은 공동팽창이론을 이용하여 반경방향의 응력평형조건과 Mohr-Coulomb 파괴규준으로부터 흙의 압축성계수들을 유도하였고, 다음 식을 제안하였다.

$$q_{ult} = (F'_c c_o + F'_q q_o) \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \quad (2)$$

여기서, F'_c , F'_q 는 말뚝직경에 대한 공동팽창계수 (cylindrical cavity expansion factor),

ϕ 는 주변지반의 내부마찰각, c_o =주변지반의 비배수 강도, q_o =파괴심도에서의 평균응력, $q_o = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ 이다.

2.3 지오그리드 인장저항력과 인장변형률

토목섬유로 모래 및 쇄석 기둥을 감싸 보강하는 공법은 기존의 쇄석기둥 공법보다 개선된 공법으로 토목섬유의 수평방향 인장저항력(Ring tension force)에 의해 쇄석기둥에서 발생하는 횡방향 변형을 억제하므로 침하량 감소와 지지력 향상 효과를 보인다(Kempfert et al. 2002). 지오그리드의 인장저항력은 Fig. 2에 보이는 바와 같이 쇄석기둥의 주동토압을 지오그리드가 구속하는 힘으로 나타낼 수 있으며, Paul and Ponomarjow (2004)은 지오그리드의 선형탄성거동 가정과 수평방향의 평형방정식을 이용하여 지오그리드 보강으로 인한 지지력의 증가를 정량적으로 산정하였다.

지오그리드의 Ring tension stress, $\sigma_{h,geo}$ 는 Kessel 공식으로 부터 유추하여 식 (3)으로 정의된다.

$$\sigma_t = \sigma_{h,geo} = F_R / A_L \quad (3)$$

여기서, F_R 는 Ring tension force, A_L 는 지오그리드 감쌈 면적이다.

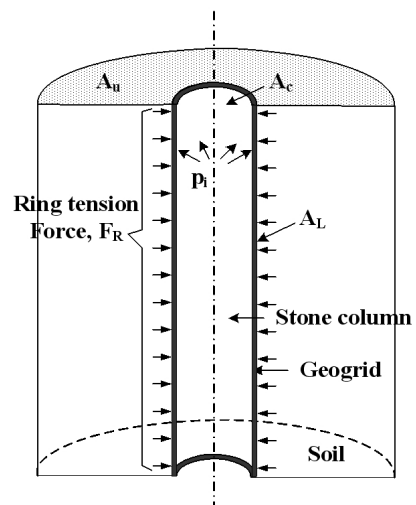


Fig. 2. Ring Tension Force (Paul and Ponomarjow, 2004)

지오그리드가 선형탄성 거동을 한다는 가정 하에 F_R 은 지오그리드의 인장강도로 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (3)와 식 (4)의 관계에서 식 (5)이 유도된다.

$$F_R = J \times \epsilon_{geo} = J \times \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} \quad (4)$$

$$\sigma_{h,geo} = \frac{J}{A_L} \times \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} \quad (5)$$

여기서, J 는 탄성계수, ϵ_{geo} 는 지오그리드 변형률, Δr_{geo} 는 지오그리드 감쌈 반경 증가량, r_{geo} 는 지오그리드 감쌈 반경이다.

Henkel and Gilbert(1952)는 쇄석말뚝의 체적변화가 없다는 조건 하에 축방향 변형률을 이용하여 식 (6)과 같은 인장변형률 산정식을 제시하였다.

$$\epsilon_c = \frac{1 - \sqrt{1 - \epsilon_a}}{\sqrt{1 - \epsilon_a}} \quad (6)$$

여기서, ϵ_a 는 쇄석말뚝의 축방향 변형률이다.

2.4 응력분담비

GESC의 하중지지특성을 평가하기 위해서는 토목섬유의 인장저항력과 쇄석기둥에 발생하는 응력분배 메커니즘을 평가하여야 한다. Barksdale and Bachus(1983)은 쇄석기둥공법 적용 및 설계에 관한 보고서를 통해 응력집중이란 쇄석기둥과 주변지반의 강성차이에 의해 쇄석기둥에 재하하중의 집중이 발생하게 되어 쇄석기둥의 전단강도가 증가하는 동시에 주변지반의 침하량은 감소한다고 하였다. 쇄석기둥과 주변지반에서 발생하는 평균응력의 비인 응력집중비 n 은 쇄석기둥과 주변지반에서 동일한 침하량이 발생한다는 가정 하에 탄성이론으로부터 유도된 식 (7)와 같은 방법으로 산정되며 쇄석기둥 공법 적용시 지반의 보강효과를 설명해주는 주요개념으로 쇄석기둥과 주변지반의 강성차이에 의해 영향을 받는다.

$$\text{응력분담비 } n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \quad (7)$$

여기서, σ_c 는 쇄석기둥 응력, σ_s 는 주변지반 응력이다.

응력분담비 산정에 관해서는 기존의 여러 학자들에 의하여 이론식이 발표되어 왔다. Yoshikuni(1979)는 연직배수공법에 기초한 강성 재하 조건을 바탕으로 고치환율로 갈수록 응력분담비가 감소하는 경향을 제시하였고 모래말뚝이나 쇄석말뚝과 같은 배수재에 응력이 집중하는 현상으로부터 식 (8)의 응력분담비 산정법을 제안하였다.

$$n = \frac{\alpha_3[1 - U(t)] + \beta_3}{\alpha_4[1 - U(t)] + \beta_4} \quad (8)$$

여기서, α 와 β 는 전단계수비의 함수, $U(t)$ 는 압밀도이다.

3. 실내 축소모형실험

3.1 실험장치

본 연구에서는 연약지반에 설치된 GESC의 비배수거동을 평가하기 위해 실내축소모형실험을 수행하였다.

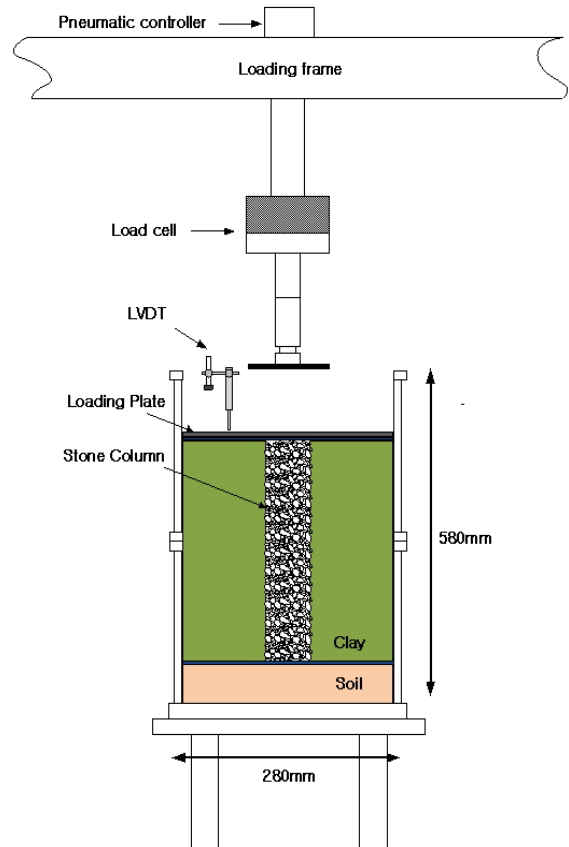


Fig. 3. Experimental setup

실험에 사용된 토조는 내경 280mm, 내부심도 560mm이고 토조 내부에는 시료와의 측면마찰을 줄이기 위해 크롬도금처리를 하였다. 상부 재하판은 단위셀 시험 조건을 모사할 수 있도록 직경 280mm의 원형 스테인리스 스틸재질로 재하판에 직경 2mm의 구멍을 다수 만들어 예비압밀시 모형지반 상부로 배수가 가능토록 하였다. 하중재하는 파일재하판과 연결봉 사이에 위치한 20Ton 용량의 로드셀을 이용하여 반복하중으로 재하 하였으며 이때 편심 발생을 방지하기 위해 재하판의 수평을 유지하였다. 그리고 하중 작용시 계측되는 모든 항목은 TDS-303(데이터 로거)을 통해 저장되었다.

3.2 사용시료 및 지반조성

균질한 모형지반을 조성하기 위하여 플로리아산 EPK 카오린(Kaolin) 점토를 사용하여 연약지반을 모사하였다. 카오린 시료의 물리적 특성은 Table 1에 나타난 바와 같으며, 모형쇄석말뚝의 재료는 축소모형 실험의 제원을 고려한 상사비를 적용하여 평균입경 4mm, 입도범위 2~7mm의 쇄석을 사용하였다. Fig. 4는 본 실험에 사용된 쇄석의 입도분포곡선을 나타내고 있다.

모형 지반제작을 위해 토조 바닥면에 60mm의 모래층을 포설하고 그 위에 배수재로 부직포를 설치한 후 과잉간극수압 측정을 위해 토조 상단부와 하단부에 각각 12cm 이격된 거리에 간극수압계를 위치시켰다. 그리

Table 1. Properties of clay

Material	Liquid limit	Plastic limit	Plastic index	Specific gravity
EPK Kaolin	54.1 %	17.7 %	36.4 %	2.677

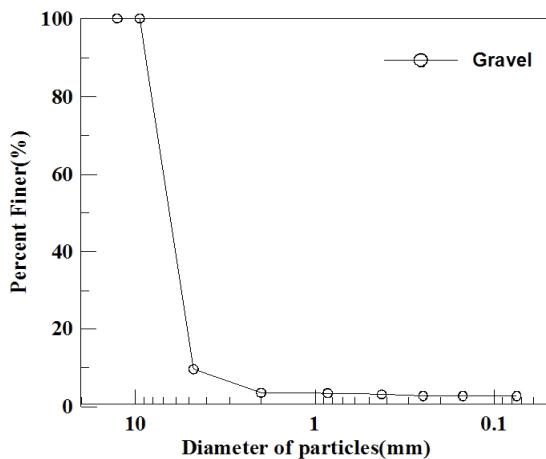


Fig. 4. Grain size distribution of gravel

고 물과 카올리나이트가 혼합된 80%의 함수비를 가진 교반된 점토시료를 토조 내부에 500mm 높이가 되도록 충전 한 후 하중재하판과 점토와의 분리를 위해 최상단부에 부직포 설치하였다. 일반적으로 GESC는 비배수전단강도가 20kPa 이하의 지반에서 적용되므로 예비압밀시 상재하중 16.3kPa의 조건에서 48시간동안 진행하여

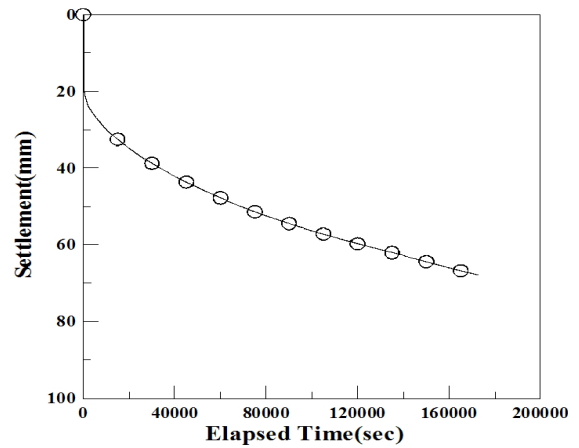


Fig. 5. Preconsolidation settlement curve



Fig. 6. Portable vane test



Fig. 7. Frozen model column

Fig. 6과 같이 포터블 베인 시험기를 이용하여 비배수 전단강도가 5kPa의 균질한 모형 지반을 조성하였다. 압밀 종료 후에는 Fig. 5와 같이 68mm의 침하가 발생하였다.

모형 GESCC 제작을 위해 토목섬유는 축소모형실험의 제원에 적합하도록 상사조건을 고려하여 상업적으로 사용되고 있는 인장강도 5kN/m의 단섬유 부직포를 사용하였다. 모형 Stone Column(SC)는 연약한 점토지반 내에 설치시 지반의 교란을 최소화하고 균질한 형태의 쉘석 기둥을 형성하기 위해 직경 50mm와 100mm의 케이싱 내에 쉘석과 물을 혼합한 후 -10℃의 온도에서 24시간 냉동시켜 모형 냉동말뚝을 제작하였다. 모형 GESCC는 Fig. 7과 같이 제작된 냉동말뚝에 단섬유 부직포를 말뚝상단부에 감싸 제작하였다. 그리고 압밀된 지반의 중심에 쉘석말뚝 설치 시 현장 시공시 주변교란이 상당부분 발생하게 되는데 이를 방지하기 위하여 냉동말뚝의 직경보다 약 2mm 정도의 직경이 큰 케이싱을 삽입하고 오거를 이용하여 냉동말뚝 설치시 점토지반의 교란을 최소화 할 수 있었고 모형 지반내에 냉동말뚝 설치 후 지반과 말뚝의 안정화를 위해 일정 시간이 지난 뒤 실험을 수행하였다.

3.3 계측장치

본 실험에서는 치환율 변화와 지오그리드 감쌈 유무



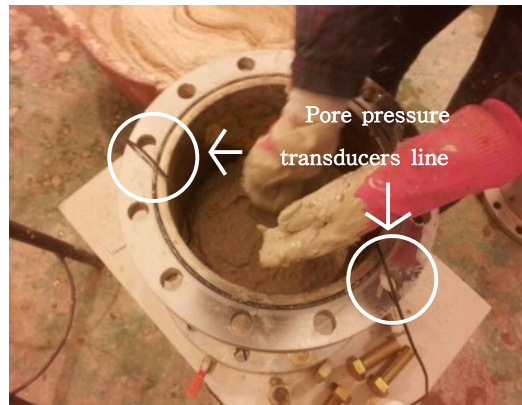
Fig. 8. Installation of earth pressure cell

에 따른 비배수 거동 특성을 측정하기 위해 간극수압계, 토압계, LVDT, Strain gauge를 사용하였다. 모형 토조 내부에는 말뚝 설치 후 말뚝과 점토지반에 발생하는 응력분담비를 측정하기 위해 Fig. 8과 같이 말뚝 중심부와 말뚝 중심부에서 7cm 이격된 점토부에 최대허용범위 1MPa용량의 직경 10mm 소형 토압계를 설치하였다.

간극수압 변화 측정을 위하여 Fig. 9(a)와 같이 모형 몰드 최하단부를 통해 간극수압계를 투입하였고 모형 몰드 안에 점토 충전 시 선을 9(b)와 같이 외부로 처리한 후 상하부 12cm 이격된 거리에 200kPa용량의 간극수압계를 각각 접착테이프를 이용하여 토조 내 설치를 하였다.



(a) Initial process



(b) Treatment of Pore pressure transducers line

Fig. 9. Installation of Pore pressure transducers

Table 2. Test instrumentations

Monitoring factor	Model name	Capacity	Manufacturer
Pore water pressure	BPR-A-200KPS	200KPa	KYOWA
Stress	Pressure Transducer (PDA-1MPA)	1MPa	Tokyo Sokki Kenkyujo Co.
Settlement	CDP-100	100mm	Tokyo Sokki Kenkyujo Co.
Strain (GESCC)	YFLA-5-5L	-	Tokyo Sokki Kenkyujo Co.

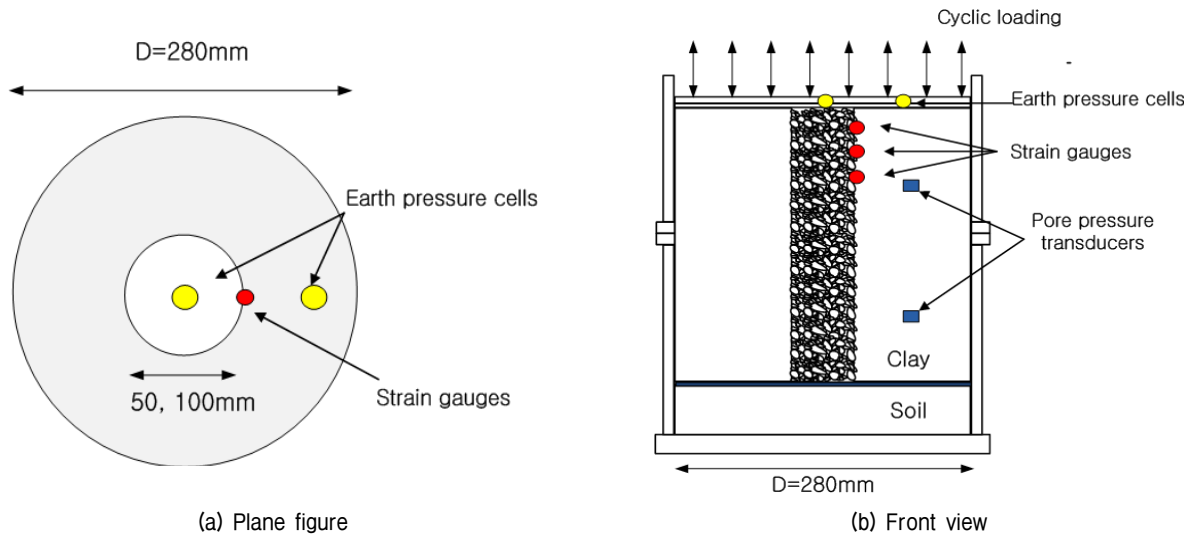


Fig. 10. Test instrumentation of reduced model test

Table 3. Experimental case conditions

Case	Load condition	Replacement ratio	Type	Purpose	
1	Cyclic Load	4%	SC	1+2, 3+4	To evaluate the geogrid encasement effect of GESC compared to under cyclic load
2			GESC		
3		12%	SC	1+3, 2+4	To analyze characteristics of complex ground as the replacement area ratio changes
4			GESC		
5	Static Load	4%	SC	1+5, 2+6	To analyze characteristics of complex ground as the Load condition changes
6			GESC		

또한 반복하중 재하에 따른 비배수 상태시 지반의 침하를 측정하기 위해 상부 재하판에 100mm의 LVDT를 설치하였고 토목섬유에 발생하는 감쌈 깊이별 변형률 변화를 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 토목섬유 감쌈 부위에 수직으로 깊이변화에 따른 3개의 strain gauge를 설치하였다.

3.4 실험 방법

반복하중의 진폭을 결정하기 위해서는 현장조건 및 상황에 따라서 지속하중의 0.1, 0.25, 0.5배 크기만큼의 하중을 산정하는데 본 연구에서는 임계상황을 구현하고자 예비압밀시 재하하중이었던 100kg의 0.5배인 50kg을 반복하중의 진폭으로 결정하여 100kg~150kg의 반복하중을 한 시간 동안 재하 하였다(Tafreshi and Dawson, 2012). 반복하중 재하시 쇄석말뚝의 직경을 50mm와 100mm로 변화 시켜감에 따라 치환율 변화에 따른 복합지반에서의 거동 특성을 분석하였고 SC와 GESC를 점

토 지반에 설치하였을 경우를 비교하여 토목섬유의 보강효과를 평가하였다. 한편 정적하중에서 GESC의 거동 특성을 비교분석하기 위해 치환율 4%의 조건에서 실험을 수행하였다. Table 3에서는 본 실내실험에서 수행한 실험조건을 보여주고 있다.

3.5 실험결과 및 고찰

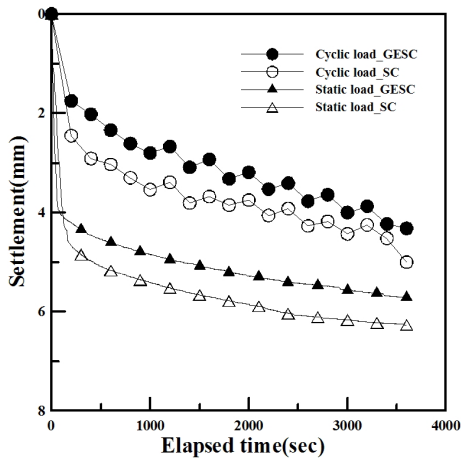
3.5.1 침하량 변화

Fig. 11(a)는 치환율 4%에서 시간의 경과에 따른 반복하중시 지반의 침하량을 나타내고 있다. 시간이 경과함에 따라 침하는 증가하고 있으며, SC의 경우 반복하중 재하시 한 시간 동안의 침하량이 5mm 발생하였고 GESC의 경우 4.32mm가 발생이 되었음을 확인할 수 있었다. 그리고 150kg의 지속하중이 작용 시에는 SC일 경우 6.27mm, GESC의 경우 5.72mm가 발생하였다. 이러한 결과로 볼 때 지오그리드 감쌈 보강시 무보강에 비해 반복하중의 경우 13.6%, 지속하중의 경우 8.77%의 침하

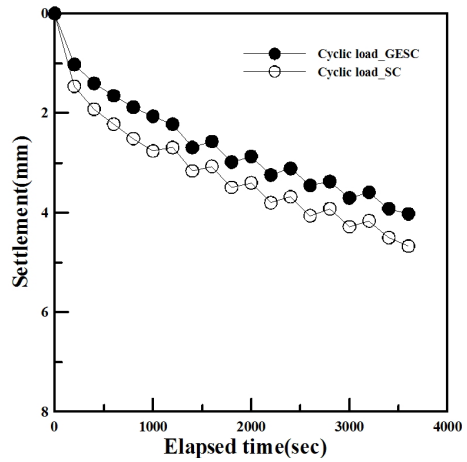
감소효과가 있음을 알 수 있다.

Fig. 11(b)는 치환율 12%에서의 시간 경과에 따른 반복하중 재하시 지반의 침하량을 나타내고 있다. SC의

경우 한 시간 동안의 침하량이 4.671mm 발생하였고 GESC의 경우 4.016mm가 발생이 되었음을 확인할 수 있었다. 실험결과 치환율 증가에 따라 SC의 경우 6.58%,

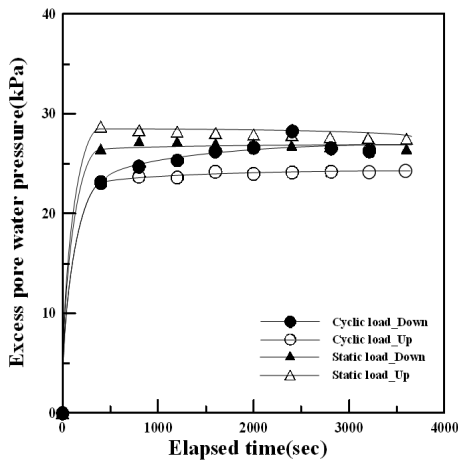


(a) As=4%

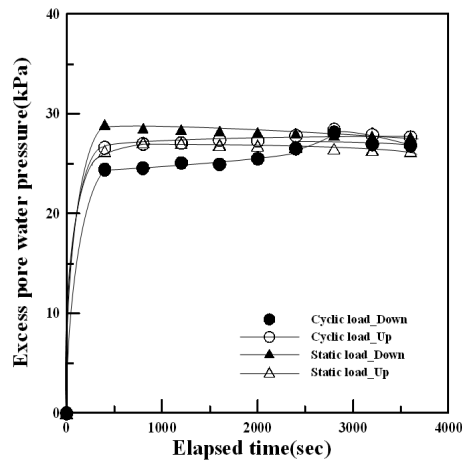


(b) As=12%

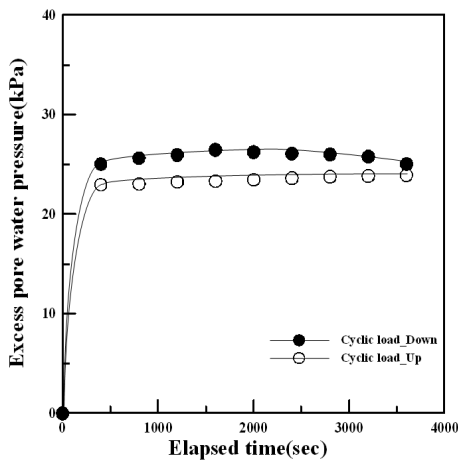
Fig. 11. Variation of settlement with elapsed time



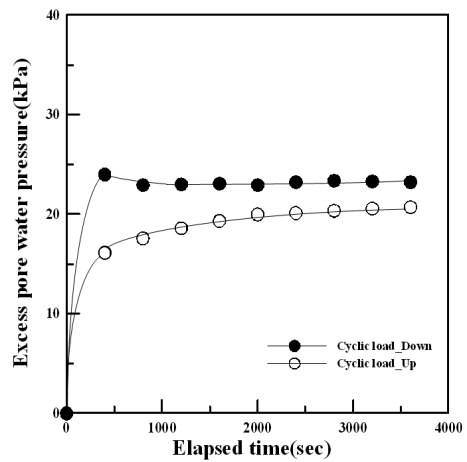
(a) SC (As=4%)



(b) GESC (As=4%)



(c) SC (As=12%)



(d) GESC (As=12%)

Fig. 12. Variation of pore water pressure with elapsed time

GESC의 경우 4.95%의 침하감소효과로 GESC가 SC에 비해 침하감소효과가 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 GESC는 반복하중과 지속하중에 따른 섶석기둥의 변형을 토목섬유의 인장력으로 구속시켜 횡방향 변형 억제와 침하를 감소시키는 효과를 발휘하며 치환율이 증가함에 따라 침하저감효과를 극대화 할 수 있을 것으로 판단된다.

3.5.2 과잉간극수압 변화

Fig. 12는 점토부 상·하부에 설치된 간극수압계에서 시간경과에 따른 과잉간극수압 변화 결과를 치환율에 따라 나타내고 있다. 토조 상·하부에 각각 설치된 간극수압계로부터 측정된 시간경과에 따른 과잉간극수압의 경향은 서로 유사하게 일치하고 있으며 비배수 상태로

확인된다. 이러한 경향으로 볼 때 반복하중 재하시간에 따른 과잉간극수압 발생 경향은 치환율에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있는데 이는 하중재하시간이 영향을 미쳤을 것으로 판단되며 지오그리드 보강여부와 치환율에 따른 과잉간극수압의 변화를 평가하기 위해서는 다양한 하중조건과 재하시간의 변화에 따른 실험이 추가로 수행되어야 할 것이다.

3.5.3 응력분담비 변화

Fig. 13과 14은 GESC와 SC의 치환율 4%과 12%에서의 시간경과에 따른 응력변화와 응력분담비를 나타내고 있다. 응력분담비는 재하하중에 대해 섶석기둥과 점토지반의 중간층에서 발생하는 응력의 비로서 치환율의 영향을 받고, 응력분담비가 클수록 보강지반의 지지

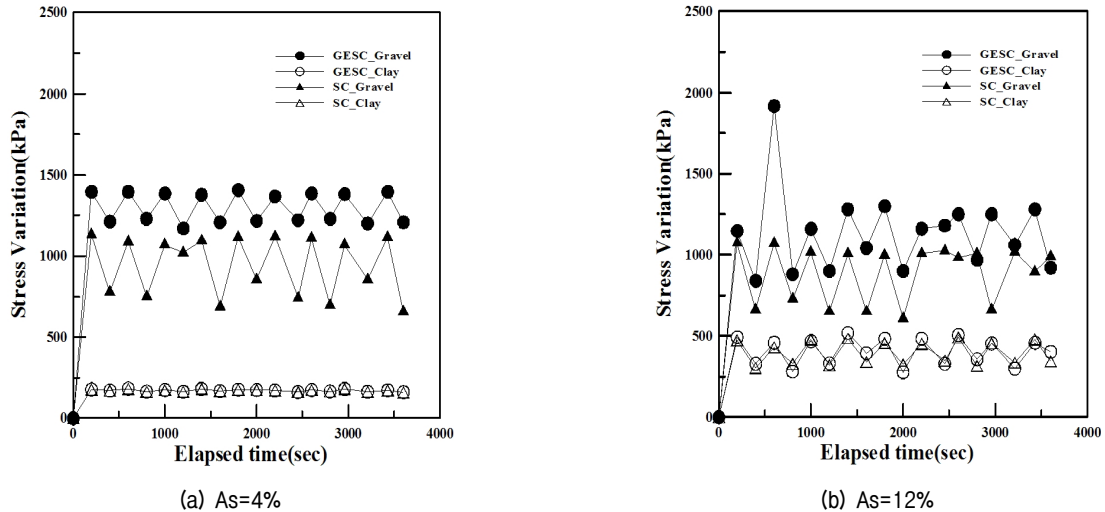


Fig. 13. Variation of stress with elapsed time

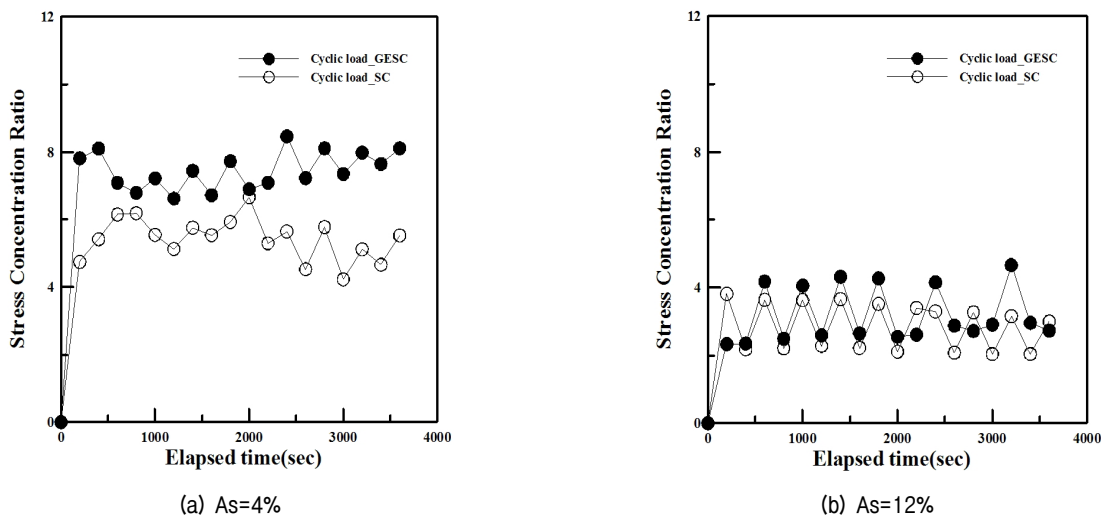


Fig. 14. Variation of stress concentration ratio with elapsed time

Table 4. Variation of stress with replacement ratio

	As=4%		As=12%	
	Column	Clay	Column	Clay
SC	700~1100 kPa	140~200 kPa	600~1000 kPa	300~500 kPa
GESC	1200~1400 kPa	160~180 kPa	900~1100 kPa	300~500 kPa

력이 증가하게 된다. 실험결과를 통해 치환율의 4%일 경우 SC의 응력분담비는 4~6, GESC의 응력분담비는 6~8로 나타났고 치환율이 12%일 경우 SC의 응력분담비는 2~3, GESC의 응력분담비는 3~4로 나타났다. 그리고 Murugesan and Rajagopal(2010)은 침하량에 따른 응력분담비를 나타내는 그래프를 제시하였는데 5mm의 침하량 발생시 SC의 경우 3.5, GESC의 경우 5.8~8.5로 나타나 지오그리드의 감쌈 효과로 인하여 GESC가 SC에 비해 응력분담비가 커지는 경향을 확인하였다. 또한 치환율 변화에 따른 응력분담비는 본 실험에서 적용시킨 1.5t/m²~2.4t/m²처럼 재하하중이 작은 경우 쇄석기둥의 치환율이 증가함에 따라 응력분담비가 작아지는 모습을 나타내는 경향이 나타난다. 이러한 결과는 전체 면적에서 쇄석기둥이 차지하는 면적이 커짐에 따라 발생한 것으로 판단된다. 한편, 지오그리드를 감쌌 경우 반복하중에 대한 응력변화의 변형이 상대적으로 적은 것을 예측이 되었는데 이는 지오그리드의 인장구속력이 발휘됨에 따라 외부하중에 대한 변형의 저항력이 커짐을 확인 할 수 있었다. Table 4는 복합지반에서의 치환율 변화에 따른 응력분포를 나타내고 있다.

Fig. 15와 Table 5는 응력분담비를 Yoshikuni(1979)의 이론식을 이용하여 구한 값과 실험을 통해 얻은 값을 비교한 결과를 나타내고 있다. 이론식을 통한 GESC와 SC의 응력분담비는 치환율에 상관없이 유사한 응력분담비를 나타내고 있으며 예측을 통해 산정된 응력분담비는 치환율이 증가함에 따라 응력분담비가 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 차이는 이론식의 경우 치환율 증가에 따른 단기하중재하시 응력분담비 산정 제안식에 영향을 주는 요소인 압밀도에서 SC와 GESC가 서로 큰 차이를 보이려 보이지 않고 α 와 β 값의 적절한 선택을 함에 어려움이 있어 실험값과 제안식의 결과값이 다소 차이가 발생되었다고 판단된다.

3.5.4 토목섬유 인장변형률 변화

Fig. 16은 쇄석말뚝 감쌈 토목섬유의 위치별 변형률

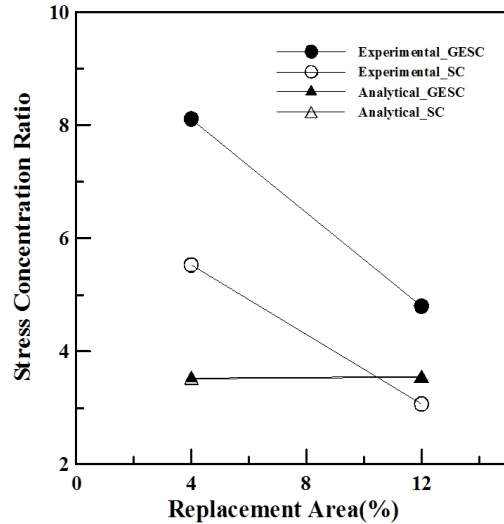
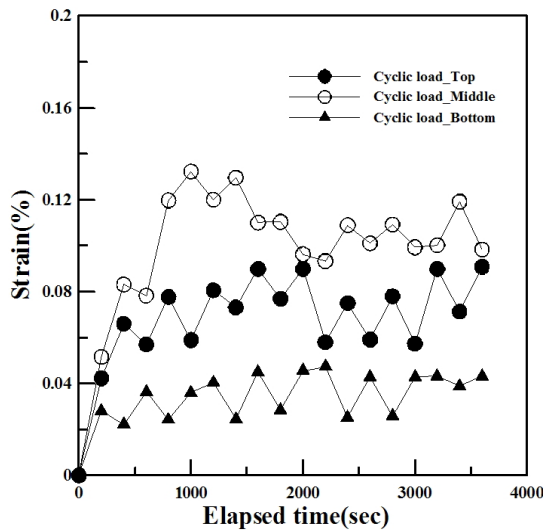


Fig. 15. Comparison between experimental and theoretical results

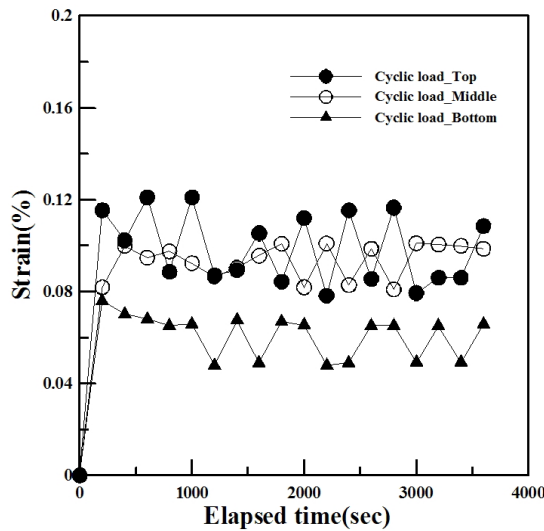
Table 5. Experimental and theoretical results (Stress concentration ratio)

	Stress concentration ratio			
	As=4%		As=12%	
	SC	GESC	SC	GESC
Experimental	5.53	8.11	3.07	4.80
Analytical	3.53	3.56	3.50	3.52

을 나타내고 있다. 토목섬유의 보강깊이는 기존의 연구에서 결과 분석을 통해 bulding과파가 발생하는 영역인 말뚝 상부로부터 4.0D 깊이만큼 보강을 하였다(Lee et al., 2006). 실험결과를 통해 치환율 4%의 경우 토목섬유의 최대 인장변형률은 0.138%로 감쌈 부의 중간부분인 직경의 약 2D 깊이에서 발생하였으며 쇄석기둥의 감쌈 하단 부분에서 가장 변형이 작게 나타났다. 한편 Fig. 16(b)는 치환율이 12%의 GESC의 인장변형률을 나타내고 있는데, 토목섬유의 최대 인장변형률은 0.132%로 감쌈 부의 상단부분인 직경의 약 1.2D 깊이에서 발생하였으며 감쌈 부위 하단부에서 변형이 가장 작게 나타났다. 이러한 경향은 GESC의 횡방향 변형이 가장 크게 발생하는 영역인 상부로부터 약 1.5D~2.0D에서 발



(a) As=3%



(b) As=12%

Fig. 16. Variation of hoop strain with elapsed time

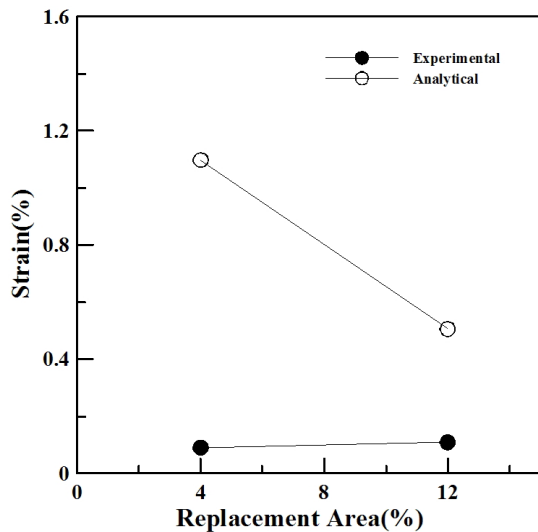


Fig. 17. Comparison between experimental and theoretical results

Table 6. Experimental and theoretical results (Geogrid strain)

	Geogrid strain (%)	
	As=4%	As=12%
Experimental	0.091	0.109
Analytical	1.098	0.506

생한다는 기존의 연구경향과 유사함을 알 수 있다(Murugesan and Rajagopal 2006). 연약지반의 효율적인 보강을 위해서는 반복하중 조건에 따른 GESC의 감쌈 깊이를 고려해야 할 것이다.

Fig. 17과 Table 6은 치환율 변화에 따른 토목섬유 변형률을 나타내고 있다. 토목섬유 변형률 산정은 실험을 통해 측정한 값과 Henkel and Gilbert(1952)가 제안한 이론식을 이용하여 비교하였다. 실험을 통해 측정된 토목섬유 변형률은 치환율 변화에 따라 차이가 나타나지 않는 경향을 보이고 있으나 이론식을 통해 얻은 변형률은 치환율 12% 일때가 4%에 비하여 적게 발생되었다. 이론값으로 제시된 토목섬유 변형률은 침하가 발생되기 시작되는 최상단 지점에서의 값을 이용하였고 실험값에서 제시한 토목섬유 변형률은 최상단 지점에서 가장 가까운 Top(1.2D)에서의 변형률 값을 이용하였다.

4. 결론

본 논문에서는 반복하중 작용시 연약지반내 설치된 GESC 공법의 적용성 제고를 위한 연구의 일환으로 GESC의 비배수 침하 특성에 관한 연구내용을 다루었다. 이를 위해 축소모형 실험을 통해 GESC와 SC의 침하, 과잉간극수압, 응력분담비 그리고 지오그리드의 변형률을 비교, 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연약지반 상단부에서의 침하 형태는 SC가 GESC에 비하여 크게 발생하였으며 치환율 증가시 증가시 침하가 감소하는 형태를 보이고 있다. 이러한 경향은 하중적용에 따른 쇄석기둥의 변형을 토목섬유의 인장력으로 구속 시켜 횡방향 변형을 억제 시키고 쇄석말뚝의 강성 및 단면적 증가로 인한 지지력 증가하였음을 보여주고 있다.
- (2) 반복하중 작용시 GESC 응력분담비는 치환율이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이러한 경향은 작은 재하하중 작용시 치환율 증가로 인한

쇄석말뚝이 지지할 수 있는 하중은 증가하였지만 단면적의 증가로 인하여 쇄석의 응력이 감소되었기 때문에 판단된다. 한편 동일한 치환율일 경우 지오그리드 감쌈 효과로 인해 GESC가 SC에 비해 응력분담비가 큰 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

- (3) 지오그리드 감쌈 쇄석말뚝의 최대 인장변형률의 발생위치는 치환율에 따라 말뚝 상단부로부터 1.2D와 2.0D 로 나타났으며 지오그리드 감쌈 하단부에서 변형이 작게 발생하였다. 이러한 경향은 GESC의 최대인장변형이 쇄석말뚝 상부로부터 1.5D~2.0D깊이에서 발생한다는 기존의 연구결과와 유사함을 알 수 있었다. 따라서 경제적이고 효율적인 GESC 보강을 위해서는 반복하중에 따른 감쌈 깊이의 선정이 중요한 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구에서는 반복하중시 연약지반에 설치된 GESC의 비배수 거동특성 평가하였으며, 향후 철도나 도로 노반의 기초공법으로 GESC의 현장적용을 위해서는 치환율 변화에 따른 응력분담효과나 장기적인 압밀 침하 특성에 대해 보다 구체적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Aboshi, H. and Suematsu, N. (1985), "Sand compaction pile method: state-of-the-art paper", *In Proceedings of the 3rd International Geotechnical Seminar on Soil Improvement Methods*, Nanyang Technological Institute, Singapore, pp.38-44.
2. Alexiew, D., Horgan, G. J., and Brokemper, D. (2003), "Geotextile encased columns(GEC): load capacity & geotextile selection, Sweden.", *BGA International Conference on Foundation*.
3. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C. (1983), "Design and construction of stone columns", *U.S. Federal Highway Administration Report, FHWA/RD-83/026*
4. Bhandari, A. and Han, J. (2010), "Investigation of geotextile-soil interaction under a cyclic vertical load using the discrete element method", *Geotextile and Geomembranes*, Vol.28, pp.33-43.
5. Castro J. and Sagasetta, C. (2011), "Deformation and consolidation around encased stone columns", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.29, pp.268-276.
6. Gniel, J. and Bouazza, A. (2010), "Construction of geogrid encased stone columns: A new proposal based on laboratory testing", *Geotextile and Geomembranes* Vol.28, pp.108-118.
7. Greenwood, D. A. (1970), "Mechanical Improvement of Soils Below Ground Surface", *Proc., Ground Engineering Conference*, Institution of Civil Engineers, pp.11-22.
8. Handy, R. L. (2001), "Does Lateral Stress Really Influence Settlement", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.127, No.7, pp.623-626.
9. Henkel, D. J. and Gilbert, G. D. (1952), "The effect of the rubber membrane on the measured triaxial compression strength of clay samples." *Geotechnique*, Vol.3, No.1, pp.20-29.
10. Hughes, J. M. O., Withers, N. J., and Greenwood, D. A. (1975), "A Field Trial of Reinforcing Effects of Stone Columns in Soil", *Geotechnique*, Vol.25, No.1, pp.31-44.
11. Kempert, H. G., Wallis, P., Raithel, M., Geduhn, M., and McClinton, R. G. (2002), "Reclaiming land with geotextile-encased columns", *Geotechnical fabrics Report*, Vol. 20, No.6, pp.34-39.
12. Lee, D. Y. and Yoo, C. S. (2011), "Load carrying capacity of geogrid-encased stone column", *International Symposium of Korean Geosynthetics Society*, Seoul, South Korea, pp.127-134.
13. Lee, D. Y., Song, A. R., and Yoo, C. S. (2006), "Load Carrying Capacity and Failure Mechanism of Geogrid Reinforced Stone Columns : Reduced-Scale Model Tests", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.22, No.10, pp.1078-1084.
14. Murugesan, S. and Rajagopal, K. (2006), "Geosynthetic-encased stone column; Numerical evaluation", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.24, pp.349-358.
15. Murugesan, S. and Rajagopal, K. (2010), "Studies on the Behavior of single and group of Geosynthetic Encased Stone Columns", *Journal of Geotechnical and environmental engineering*, Vol.136, No.1, pp.129-139.
16. Paul, A. and Ponomarjow, A. (2004), "The bearing behaviour of geogrid reinforced crushed stone columns in comparison to non-reinforced concrete pile foundations", *EUROGEO 3. Geotechnical Engineering with Geosynthetics*, Munich, Germany
17. Pulko, B., Majes, B., and Logar, J. (2011), "Geosynthetic-encased stone columns: Analytical calculation model", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.29, pp.29-39.
18. Tafreshi, S. N. and Dawson, A. R. (2012), "A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand", *Geotextile and Geomembranes*, Vol.32, pp.55-68.
19. Vesic, A. S. (1972), "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, Vol.98, No.SM3, pp.265-290.
20. Yoo, C. S. (2010). "Performance of geosynthetic-encased stone columns in embankment construction:Numerical investigation", *Journal of Geotechnical and environmental engineering*, Vol.136, No.8, pp.1148-1160.
21. Yoo, C. S., Song, A. R., Kim, S. B., and Lee, D. Y. (2007), "Finite Element Modeling of Geogrid-Encased Stone Column in Soft Ground", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.23, No.10, pp.133-150.
22. Yoshikuni, H. (1979), "Design and construction management of vertical drain method", *Soils and Foundation series*, Gihoudou, Tokyo, Japan (in Japanese)

(접수일자 2012. 10. 26, 심사완료일 2013. 1. 10)