

## 토목섬유 보강재로 보강된 철도 노반의 반복하중 하중지지력 연구

### Load Carrying Capacity of Geosynthetic Reinforced Railway Subgrade Under Cyclic Load

홍승록<sup>1</sup>, 조윤규<sup>2</sup>, 최정혁<sup>3</sup>, 정용준<sup>4</sup>, 유충식<sup>5\*</sup>

SeungRok Hong<sup>1</sup>, Yungyu Cho<sup>2</sup>, JungHyuk Choi<sup>3</sup>, Yongjun Jeong<sup>4</sup>, ChungSik Yoo<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Dept of Mega Building and Bridge, Sungkyunkwan Univ., 300 Chun-Chun Dong, Jan-An Gu, Suwon, Kyong-Gi Do, 440-746, Republic of Korea

<sup>2</sup>Graduate Student, Dept. of Global Construction Engineering, Sungkyunkwan Univ., 300 Chun-Chun Dong, Jan-An Gu, Suwon, Kyong-Gi Do, 440-746, Republic of Korea

<sup>3</sup>Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engineering, Sungkyunkwan Univ., 300 Chun-Chun Dong, Jan-An Gu, Suwon, Kyong-Gi Do, 440-746, Republic of Korea

<sup>4</sup>Graduate Student, Dept. of Global Construction Engineering, Sungkyunkwan Univ., 300 Chun-Chun Dong, Jan-An Gu, Suwon, Kyong-Gi Do, 440-746, Republic of Korea

<sup>5</sup>Member, Professor, Dept. of Civil Engrg, Sungkyunkwan Univ., 300 Chun-Chun Dong, Jan-An Gu, Suwon, Kyong-Gi Do, 440-746, Republic of Korea

#### ABSTRACT

This paper studied the characteristics of bearing capacity of railway reinforced with geosynthetic against repetitive loading of train. The railway that was based on the porous pavement substructure ground and reinforced with geosynthetic was copied. In order to analyze load carrying capacity of geosynthetic, we have had 3cases experiments - in the first case, the ground was non reinforced, second case was reinforced geocell and last case was reinforced geogrid - and all of them were reduced-scale laboratory tests. The results of the analyses indicated that the bearing capacity of the reinforced geogrid increases much more than the reinforced geocell. Residual deformation of the initial cyclic load was larger than the secondary cyclic loads.

#### 요 지

본 논문에서는 고속철도의 반복하중에 의한 토목섬유로 보강된 철도노반의 지지력 특성을 다루었다. 토목섬유로 보강된 철도노반은 투수성 포장 하부구조의 지반에 지오셀 및 지오그리드 보강을 하여 모사하였다. 포장구조체의 하중지지력 증가효과를 고찰하기 위하여 무보강상태의 지반과 지오셀 보강의 경우, 3층 지오그리드 보강인 경우에 대하여 총 3가지 실험 케이스의 실내 축소모형실험을 진행하였으며 잔류변형량은 초기 동적하중이 작용하는 경우가 2차 동적하중 작용시 보다 크게 나타났다. 지오셀 보강보다 3층 지오그리드 보강된 포장 하부구조에서 더 큰 지지력이 발현 되는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Reinforced geocell, Reinforced geogrid, Cyclic loading, Reduced-scale laboratory tests, Bearing capacity

## 1. 서 론

최근 급격한 인구증가와 도시화로 인해 산업기반시설

이 발달하고 이를 연결하는 철도 및 도로 등 교통인프라 시설의 개발이 확대 되고 있으며 이로 인한 교통인프라 시설의 개발은 고속철도의 개발, 차세대 열차 개발 등으로 이어져 철도 시설의 고속화에 대응 할 수 있도록 기존 선로의 개량, 새로운 선로의 공법 등을 필요로 하고 있다. 한편, 국내의 철도의 경우 열차하중의 고른 분배와 우수의

Received 6 Dec. 2013, Revised 24 Dec. 2013, Accepted 24 Dec. 2013

\*Corresponding author

Tel: +82-31-290-7518; Fax: +82-31-290-7549

E-mail address: csyoo@skku.edu (C. Yoo)

신속한 배수 기능을 가지고 있는 자갈노반의 적용이 대부분을 차지하고 있지만 고속철도와 같이 열차반복하중이 증가하는 철도 노반의 경우 보강이 요구되고 있으며, 보강 방법으로 콘크리트 포장의 적용이 증가하고 있는 추세이다. 하지만 콘크리트 포장의 경우 불투수 면적을 증가시켜 수해의 증가 및 지하수의 고갈, 물 순환 문제 등을 발생시키는 주요원인으로 주목 받고 있다. 이에 콘크리트 포장의 대체공법으로 토목섬유 중 지오셀 및 지오그리드 보강 공법 연구가 진행되어 오고 있다. 지오셀의 경우 토립자의 구속효과가 탁월하여 하부보강 및 지반의 지지력 개선연구가 수행되고 있으며 지오그리드의 경우 지속하중 및 반복하중이 작용하는 영구구조물에서의 적용 및 적용공법 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Cho et al.(2002)은 고속철도의 노반을 강화할 수 있는 지오셀 층에 대하여 다양한 형태의 평판재하시험과 동적 모형토조시험을 수행하였으며 속채움 종류 및 지오셀 층수, 복토층 두께, 원지반 강성도 변화에 따른 보강효과를 규명하였다. Shin et al.(2009)은 도로 보강용 토목섬유의 일종인 다공성 지오셀의 도로노반 보강효과 평가를 위한 실내시험과 현장시험을 실시하여 다공성 지오셀의 보강효과와 지반의 내부마찰각의 영향을 연구한 바 있다. Yoo et al.(2007)은 지오그리드로 보강된 보강토 구조물에 지속하중 및 반복하중 등 다양한 하중지력에 대한 보강토 구조물의 장기변형 특성 메카니즘에 대해 축소모형실험을 통해 고찰한 바 있다. 한편 국외에서는 지오셀의 형상비, 지반의 강도, 하중 조건 등의 매개변수 변화에 따른 지지력 효과를 검증하기 위하여 많은 연구들이 수행되어 왔다(Rea and Mitchell, 1978; Kazerani and Jamnejad, 1987; Shimizu and Inui, 1990; Mhaiskar and Mandal, 1992, 1996; Dash et al., 2001a, 2001b, 2003, 2004; Tafreshi and Dawson, 2010, 2012; Dash, 2012; Tharkur, 2012a, 2012b; Yang et al., 2012). 기존 연구 중 Yang et al.(2012)은 도로포장 하부구조의 지지력 평가를 위해 비포장 도로 하부에 지오셀의 보강 조건을 변화시켜가며 하부구조의 지지력과 변형형상을 관측 한 후 비포장도로에서 지오셀은 안정성을 향상시키며 지반의 영구변형을 감소시키고 시공시 지오셀의 구조형상의 유지가 중요한 것으로 발표하였다. Indraratna et al.(2013)은 실내모형실험을 이용하여 자갈 노반에 설치된 지오그리드에 반복하중 작용시 측면으로의 변위 거동에 대한 연구를 수행하였으며, Tanchaisawat et al.(2010)은 두 가지 타입의 지오그리드(Saint-Gohain geogrid, Polyfelt

geogrid)를 이용하여 채움재 종류 및 모래와 혼화재의 비율 변화에 따른 보강 효과에 대한 연구를 수행하였으며, Tafreshi and Dawson(2010)은 모래지반에 지오셀 및 지오그리드를 설치하여 지오셀의 높이와 넓이, 지오그리드의 층수 변화에 따른 지반의 침하량 및 하중 지지력에 미치는 영향에 대해 검토하였다. Gobel and Weismann(1994)은 철도 자갈노반에 지오그리드를 보강하여 반복 피로하중에 대한 지지력을 검토하여 지오그리드의 보강 효과를 검증하였다.

위에서 기술한 기준에 수행된 실험적·수치해석적 연구에서는 지오셀 및 지오그리드의 거동 메카니즘에 대한 이론을 정리하는데 필요한 중요한 결과를 제시하였으나 자갈노반에 지오셀과 지오그리드를 각각 설치하여 지반의 침하량 및 재료의 변형률, 하중지지력에 대한 연구는 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 토목섬유로 보강된 자갈노반에 반복하중을 작용시켜 하중 지지력 증진 효과 및 잔류변형률, 보강재의 잔류변형률 등에 대해 종합적으로 비교 분석하였다.

## 2. 고속철도 노반에 대한 보강재 적용

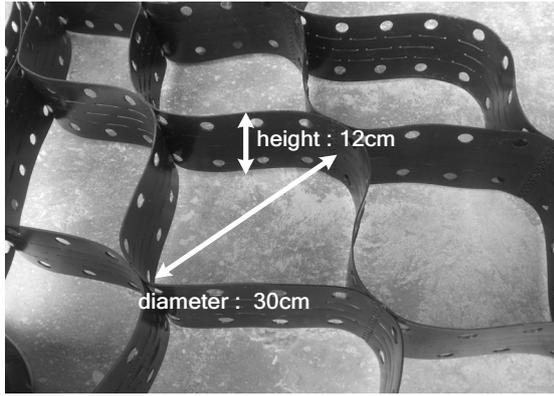
### 2.1 지오셀 및 지오그리드의 재료 특성

본 연구에서는 무보강 지반과 지오셀 및 지오그리드 보강에 따른 하중지지력 증진 효과를 검토하였다. 실험에 사용된 지오셀은 얇은 띠 형태 HDPE 시트 별집 구조를 갖는 대표적인 형태로서 셀의 상·하부 단면 직경이 동일한 지오셀에 대한 검토를 수행하였으며 지오그리드는 Polypropylene(PP)과 Polyethylene Phthalate(PET) 재질로서 6ton/m이상의 인장강도를 보유하며 PP Mat는 4.5ton/m의 인장강도를 가지며 각각의 보강재 변화에 따른 하중 지지력 변화 경향을 평가하였다. Fig. 1(a), (b)는 실험에 사용된 지오셀의 형상 및 지오그리드 형상을 보여주고 있으며 Table 1은 지오셀 및 지오그리드의 공학적 특성을 보여주고 있다.

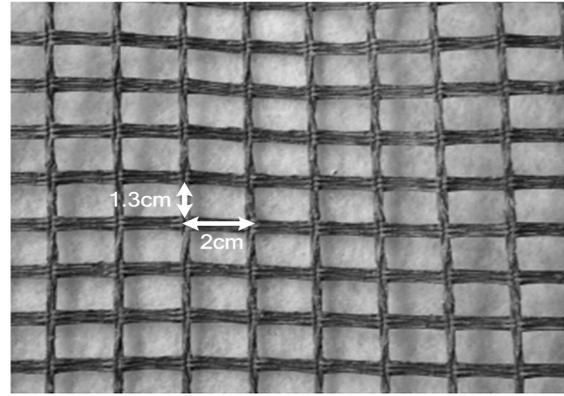
### 2.2 반복하중 적용 방법 및 하중 조건

#### 2.2.1 반복하중 적용 방법

자갈로 구성된 철도 노반은 사용연한 동안 다양한 형태의 하중, 즉, 단순재하하중(Continuous Monotonic Loading, CML) 및 반복 하중(Cyclic Loading, CL)을 경험하게 되며



(a) Specification – Geocell



(b) Specification – Geogrid

Fig. 1. Specification of geosynthetic

Table 1. Engineering Characteristics of Geocell & Geogrid

Geocell		Geogrid	
Material	HDPE	Material	PET + PP
Elongation	Max 9.5%	Elongation	Max 13%
Tensile strength	3.77 ton/m	Tensile strength	6 ton/m
Manufacturer	Hangil Geocell	Manufacturer	Samyang

Table 2. Hydraulic loading controller specification

Devices	specification
Hydraulic loading controller	Static & Cyclic load Displacement Control : 0.001 ~ 100mm/min Load Control : 0.8 ~ 2kPa/min Wave curve : 0.001 ~ 1.0Hz Capacity : 200kN
Strain gauge	$\epsilon$ : 10~15%
TDS-303 Data logger	Data transfer & collection

로 본 연구에서도 이를 감안하여 지속하중 혹은 반복하중의 재하하중이 자갈로 구성된 모형 철도 노반에 작용하는 경우를 고려하였다. Table 2는 하중재하 시스템 사양을 보여주고 있는데 재하시스템은 CML, CL의 구현이 가능한 20ton 용량의 유압식 재하장치를 사용하였다. 하중재하시 내부 변위계를 이용하여 무보강노반 및 보강노반에 대한 변형량을 측정하였으며 보강노반에 사용된 지오셀의 경우 지오셀의 이음부 기둥 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 수평방향의 변형률을 측정하였으며 지오그리드의 경우 격자 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 하중재하시 보강재에 유발되는 인장변형률을 측정하였다. 아울러 측정 데이터의 수집을 위해 TDS-303 데이터 로저를 이용하였

으며, Fig. 2에 모형실험의 계통도를 나타내었다.

### 2.2.2 반복하중 조건

Table 3은 자갈로 구성된 축소 모형 철도노반에 작용하는 하중 조건을 보강재의 종류와 유무에 따라 각각 정리하고 있다. 하중조건은 표에 정리된 바와 같이 반복하중(CL)을 고려하였다. 즉 Table 3에서와 같이 축소 모형 철도노반실험에서 반복하중의 편진폭을 1ton 및 주파수( $f$ ) $f = 1Hz$ , 반복회수 1000회로 동일하게 하여 실험을 수행하였으며 반복하중의 초기 값은 정적하중 실험을 통한 극한 하중 값의 25~35%증분 값을 이용하여 결정하였다. Fig. 3은 보강방법별 하중이력을 나타내고 있다.

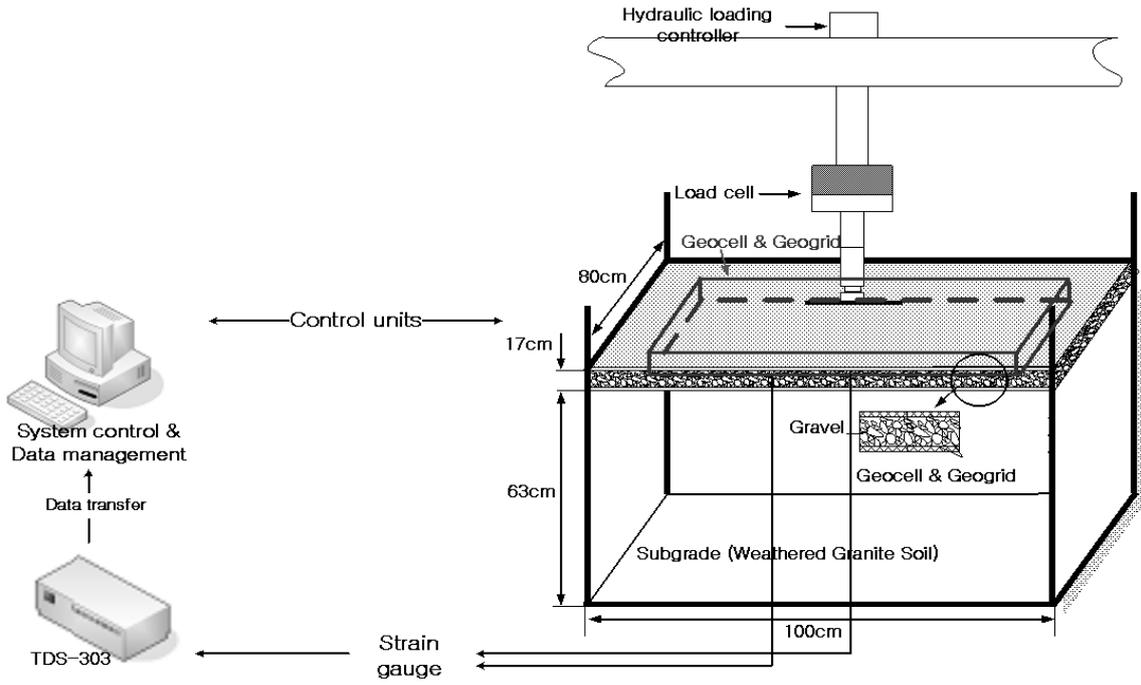
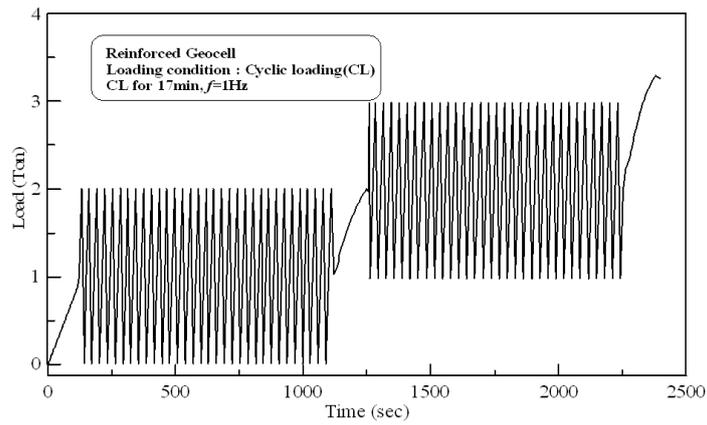
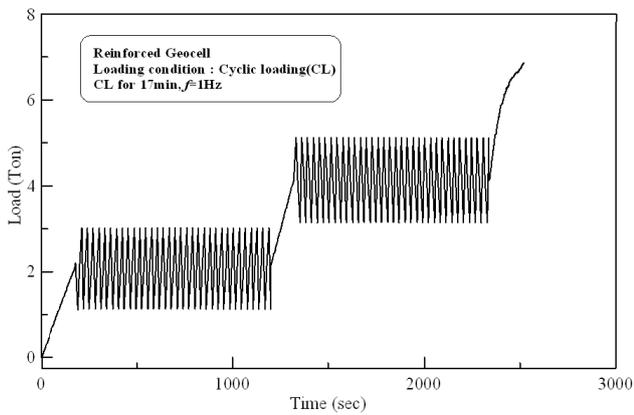


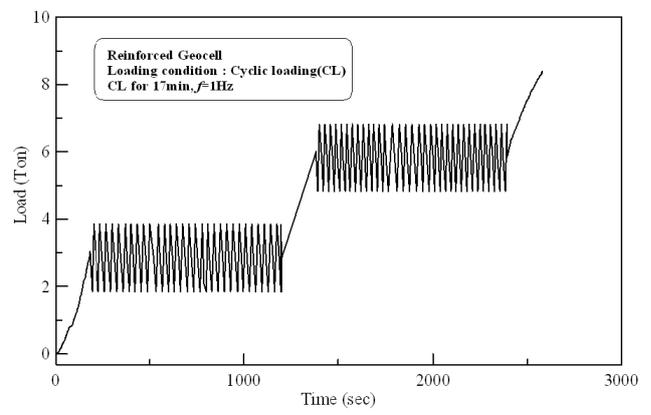
Fig. 2. Reduced-scale model Diagram



(a) Non-Reinforced



(b) Geocell



(c) Geogrid

Fig. 3. Cyclic Loading Curve

Table 3. Hydraulic loading controller specification-Without Geocell & Geogrid

step	Load Control Method	Without Geocell & Geogrid	Geocell	Geogrid
1step	Line Control	Load Control Velocity : 1ton/min, Limit time : 2min, Upper Load : 1ton	Load Control Velocity : 1ton/min, Limit time : 3min, Upper Load : 2ton	Load Control Velocity : 1ton/min, Limit time : 3min, Upper Load : 3ton
2step	Sine Control	Frequency : 1Hz, Initial Value : 1ton, half amplitude : 1ton, Cyclic times : 1000 times	Frequency : 1Hz, Initial Value : 2ton, half amplitude : 1ton, Cyclic times : 1000 times	Frequency : 1Hz, Initial Value : 3ton, half amplitude : 1ton, Cyclic times : 1000 times
3step	Line Control	Load Control Velocity : 1ton/min, Limit time : 2min, Upper Load : 2ton	Load Control Velocity : 1ton/min, Limit time : 2min, Upper Load : 4ton	Load Control Velocity : 1ton/min, Limit time : 3min, Upper Load : 6ton
4step	Sine Control	Frequency : 1Hz, Initial Value : 2ton, half amplitude : 1ton, Cyclic times : 1000 times	Frequency : 1Hz, Initial Value : 4ton, half amplitude : 1ton, Cyclic times : 1000 times	Frequency : 1Hz, Initial Value : 6ton, half amplitude : 1ton, Cyclic times : 1000 times
5step	Line Control	Load Control Velocity : 1ton/min, Limit time : 2min, Upper Load : 4ton	Load Control Velocity : 1ton/min, Limit time : 3min, Upper Load : 6.2ton	Load Control Velocity : 1ton/min, Limit time : 3min, Upper Load : 8.5ton

### 3. 축소모형 재하실험

#### 3.1 모형지반 및 실험장치, 실험 방법

##### 3.1.1 실험 시료 및 장비

포장구조체의 노상은 평균입경 2mm, 입도범위 0.1~10mm의 화강풍화토를 이용하여 조성하였으며 현장 도로 조건을 모사할 수 있도록 4.5kg래머를 이용하여 다짐도는 85%를 유지하며 16cm씩 5층 다짐을 통해 조성하였다. 지오셀 및 지오그리드의 채움재로는 평균입경 20mm이고 입도범위 2~30mm인 쇄석을 사용하였으며 사용된 화강풍화토와 쇄석의 입도분포 곡선은 Fig. 4와 같으며 이 데이터를 바탕으로 통일분류법(USCS)을 적용한 결과, 본 실험

험에 사용하는 화강풍화토는 SP에 해당하는 입도분포가 균질하지 않는 모래질 흙으로 분류되었으며 쇄석의 경우 GP에 해당하는 입도분포가 균질하지 않은 자갈로 분류되었다. 또한 대형직접전단시험기를 사용하여 쇄석의 지반강도 정수인 내부마찰각을 파악하였으며 Fig. 6은 형직접전단시험기를 나타내었다.

대형직접전단시험기의 전단상자 크기는 0.5m(W)×0.5m(L)×0.25m(H)이며 수직하중은 에어백을 이용하여 가할 수 있도록 제작되었으며 수직 및 수평변위는 LVDT를 이용하여 측정하며 데이터로거를 통해 자동 계측이 가능하도록 구성되었다. 시험 방법은 건조시료를 소요밀도(쇄석 1.7t/m<sup>3</sup>)에 따라 무게비로 체분석을 실시한 후 전단상자에 시료를 1/3씩 단계별로 채운 후 램머를 이용하여 쇄석이 파쇄되지

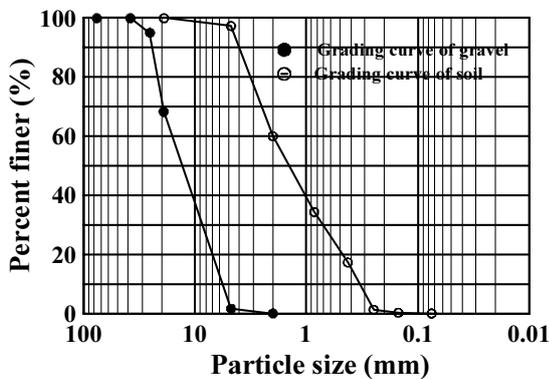


Fig. 4. Grading curve of gravel and soil

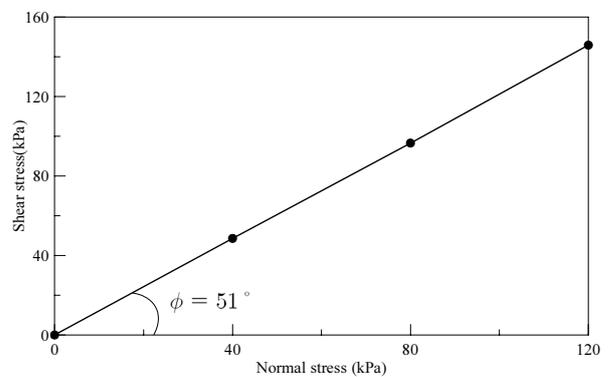


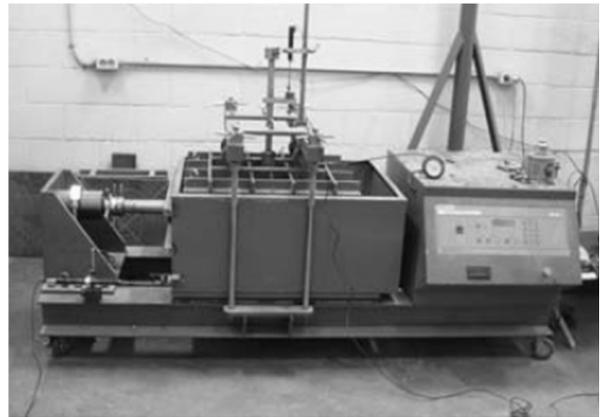
Fig. 5. Shear strength

Table 4. Mechanical property of fill materials

fill materials	Soil	Gravel		
Grain size	$C_u = 5.714, C_c = 0.7$	$C_u = 3.091, C_c = 0.091$		
USCS	SP	GP		
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.6	17.5	$\phi$ (°)	c (kPa)
			51	0



(a) Specimen

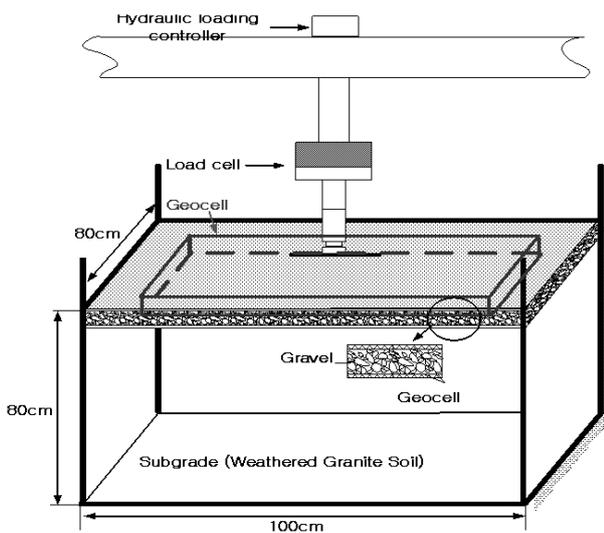


(b) Static Danamic Direct Shear Tester

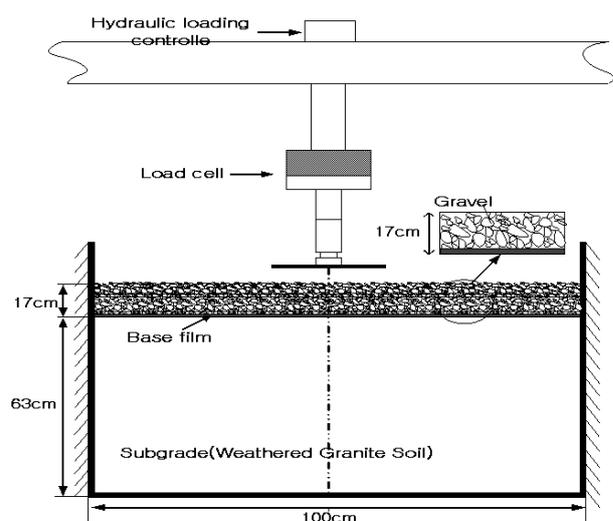
Fig. 6. Static Danamic Direct Shear Tester

않도록 충분히 다짐 하면서 채운다. 시료를 채운 후 고무 튜브 파열방지 나무판을 덮고, 에어백으로 40kPa, 80kPa, 120kPa로 수직하중을 가해준 후 시료의 재배열이 완료되도록 약 10분이 경과한 후에 전단을 실시였다. 대형직접전단시험에서 얻어진 전단응력은 피크강도시의 강도를 최대 강도로 산정하였으며 쇄석의 내부 마찰각은 51°로 나타났으며 Fig. 5는 쇄석의 전단강도 곡선을 나타내었다.

모형실험은 가로 100cm, 세로 80cm 그리고 높이를 80cm의 모형토조를 이용하여 수행하였다. 하중재하는 30cm의 직경의 원형 재하판을 이용하여 휨이나 변형을 방지하고자 스테인리스 스틸재질을 두께 15mm의 강성 재하판을 사용하였다. 한편, 하중은 20ton 용량의 유압재하장치를 이용하여 재하 하였으며 이때 편심 발생을 방지하기 위하여 재하판 설치 후 라벨링 측정을 통해 재하 판이

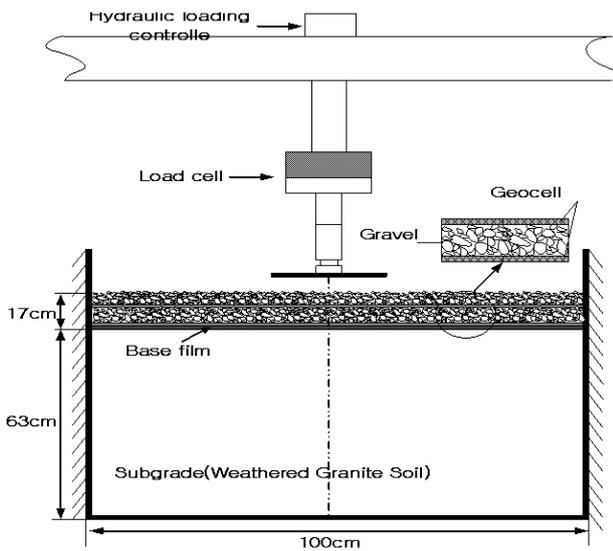


(a) Isometric drawing

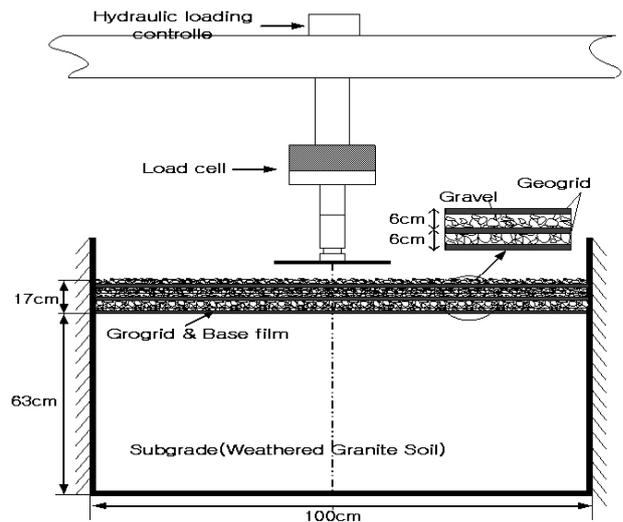


(b) cross-sectional drawing(Without Geocell & Geogrid)

Fig. 7. Reduced-scale model test equipment (continue)



(c) cross-sectional drawing (Geocell)



(d) cross-sectional drawing (Geogrid)

Fig. 7. Reduced-scale model test equipment

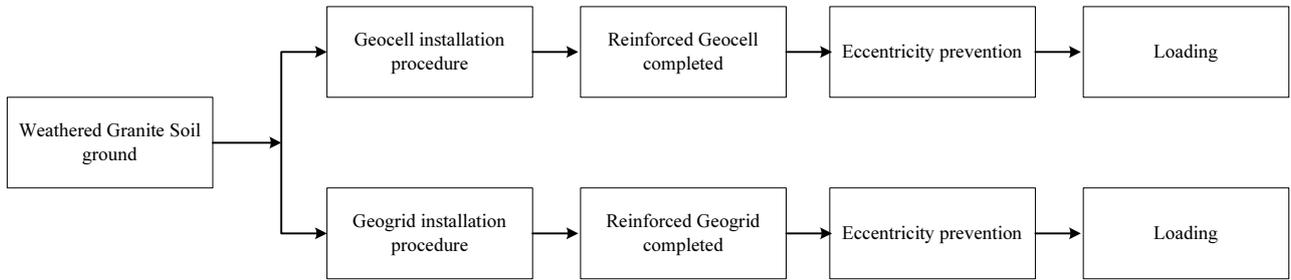


Fig. 8. Total Experiment process



Fig. 9. Reinforced Geocell completed

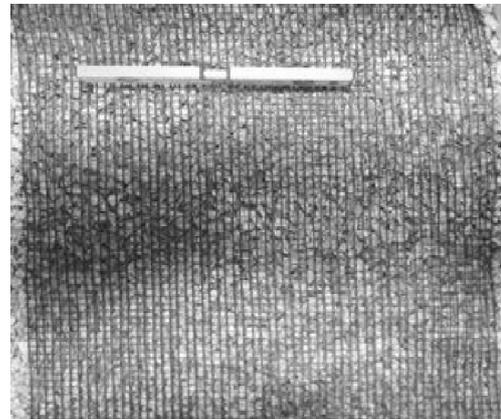


Fig. 10. Reinforced Geogrid completed

수평을 유지하도록 하였으며 실험에서 사용된 재하판의 위치를 동일하게 하기 위하여 재하판에 직접적으로 하중을 재하하는 로드셀의 위치를 실험 전에 Fig. 7(c)와 같이 모형 토조 중간에 고정하여 실시하였다. 본 실험에 사용된 모형실험 장치의 제원 및 보강재 설치 위치는 Fig. 7과 같다.

### 3.1.2 실험 방법

본 실험에서 모형 노반 시공과정은 Fig. 8과 같으며 앞서 설명하였듯이 화강풍화토로 지반을 조성한 후 재료분리를 위한 아스테이지를 한 겹으로 노상위에 설치하였으며 지오셀(Fig. 9)의 경우 지오셀을 펼쳐 직경(30cm)내에 쇄석을 채워 다짐을 수행하였고 지오그리드(Fig. 10)의 경



Fig. 11. Eccentricity prevention



Fig. 12. Loading

Table 5. Experimental condition according to Geocell & Geogrid

condition	Reinforced	Thickness (mm)	case compared	purpose
1	non-reinforced	-	1 and 2~3	To evaluate the reinforced geocell & geogrid effect
2	Geocell	1.8		
3	Geogrid	1.8	2 and 3	To analyze the reinforced geocell & geogrid effect according to the reinforced

우 6cm간격으로 3층 보강하였다. 그리고 각 실험마다 채움재인 쇄석의 상대밀도 60%의 균질성을 유지하기 위하여 실험 전 쇄석량을 측정하였으며 3층 다짐을 실시하여 총 쇄석량 243kg을 투입하였다. 3층 다짐시 지오셀 및 지오그리드의 변형 발생을 방지하기 위하여 강철 지지 봉을 이용하여 지오셀 직경 및 지오그리드의 형상을 고정시킨 후 쇄석을 충전 하였으며 토조의 영향으로 인한 지지력 증가를 방지하기 위하여 지오셀 설치 시에는 모형토조와 5cm의 이격거리를 두었다.

지오그리드 및 지오셀에 쇄석을 설치 후 5cm의 쇄석 층을 균질하게 추가로 포설하여 모형 노상위에 지오그리드 및 지오셀 층을 포함하여 총 17cm 두께의 쇄석 층을 형성 하였으며 쇄석층 포설 후 편심을 방지하기 위해 레벨링 측정(Fig. 11)을 통해 수평을 확인 후 하중을 재하(Fig. 12) 하였으며 Table 5는 본 연구에서 사용된 실험조건과 목적을 정리하여 나타내었다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 무보강 지반의 동적하중 작용시

Fig. 13은 본 연구에서 정의한 반복하중의 진폭( $\Delta F_{CL}$ ), 잔류침하량( $\Delta \delta_{res}$ ), 잔류변형률( $\Delta \epsilon_{res}$ ) 등의 인자들에 대

해서 나타내었다. Fig. 14는 무보강 상태의 지반에 정적하중과 동적하중을 작용했을 때의 하중-침하특성( $q-\delta$ )과 동적하중 작용시의 잔류변형률( $t_{CL}-\Delta \delta_{res}$ )을 나타내었다. 보이는 바와 같이 정적하중 작용시 극한하중 3.5ton이 발휘 되었으며 동적하중 작용시 극한하중은 3.3ton이 나타났으며 이때의 최대 변위는 정적하중 작용시 53.8mm가 나타났으며 동적하중 작용시 126.1mm가 발생하였다. 한편 Fig. 14(b)는 동적하중 작용시의 잔류침하량을 나타내었다. 1차 동적하중 작용시 잔류침하량은 30.2mm가 나타났으며 2차 동적하중 작용시 잔류침하량은 22mm가 나타났으며 잔류침하량은 27% 감소하는 것으로 나타났으며 이는 1차 동적하중으로 인해서 지반에 다짐 효과가 나타

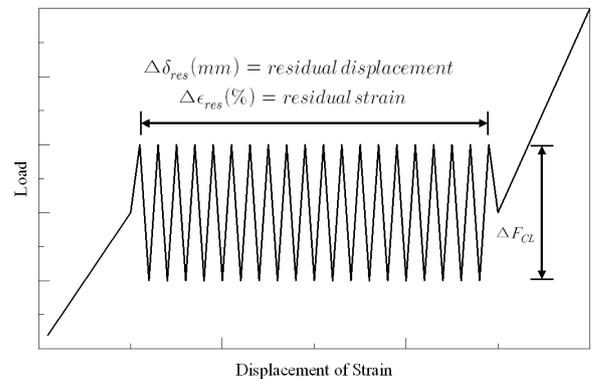


Fig. 13. The definition of the symbol in cyclic loading

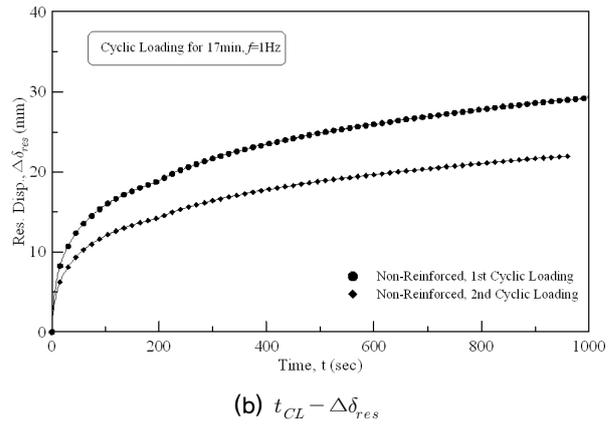
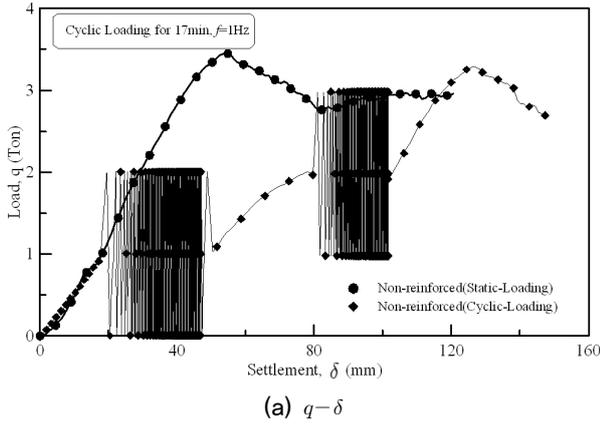


Fig. 14. Load-Settlement curve according to Loading condition

나 2차 동적하중 작용시 잔류침하량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

## 4.2 지오셀 및 지오그리드 보강지반의 동적하중 작용시

### 4.2.1 지오셀 보강 지반의 동적하중 작용시

Fig. 15(a)는 지오셀에 대한 하중-변위 곡선( $q-\delta$ )을 보여주고 있다. 즉 정적하중 작용시와 동적하중 작용시에 대

한 하중-변위 곡선을 보여주고 있으며 Fig. 15(b)와 Fig. 15(c)는 지오셀의 잔류변형량( $t_{CL}-\Delta\delta_{res}$ ) 및 잔류변형률( $t_{CL}-\Delta\epsilon_{res}$ )에 대한 결과를 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 정적하중 작용시 120.2mm의 침하가 발생하였으며 동적하중 작용시 181.1mm가 발생하였다. 동적하중 작용시 극한하중은 6ton으로 무보강의 경우보다 80% 증가한 것으로 나타나 보강효과가 검증되었다. 한편 동적하중 작용시 잔류변형량은 Fig. 15(b)로 나타내었으며 1차 동적하

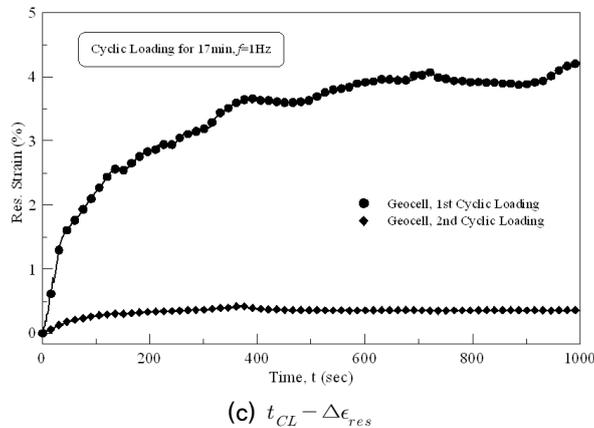
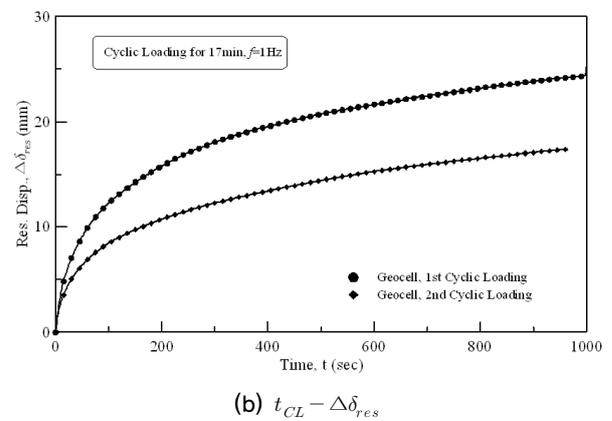
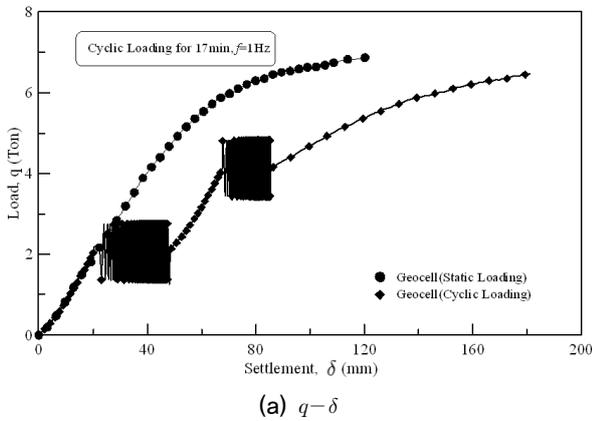


Fig. 15. Load-Settlement curve according to Loading condition

중 작용시 25.2mm의 잔류 변형량이 발생하였으며 2차 동적하중 작용시 잔류 변형량은 17.4mm가 발생하였다. 1차 동적하중에 비해 2차 동적하중 작용시 잔류 변형량은 31%감소하였으며 이는 2차 동적하중 작용시 보다 1차 동적하중 작용시 지오셀이 크게 변형되었다는 것을 판단할 수 있다. 한편 Fig. 15(c)는 지오셀의 잔류 변형률을 나타내었으며 잔류 변형량과 마찬가지로 2차 동적하중에 의한 변형률이 1차 동적하중에 의한 변형률에 비해 3.5%가 감소하였다. 이는 앞서 설명하였듯이 2차 동적하중 작용시 보다 1차 동적하중 작용시 지오셀 형상이 크게 변형한다는 알 수 있었다.

#### 4.2.2 지오그리드 보강 지반의 동적하중 작용시

Fig. 16(a)는 지오그리드에 대한 하중-변위 곡선( $q-\delta$ )을 보여주고 있다. 즉 정적하중 작용시와 동적하중 작용시에 대한 하중-변위 곡선을 보여주고 있으며 Fig. 16(b)와 Fig. 16(c)는 지오그리드의 잔류변형량( $t_{CL} - \Delta\delta_{res}$ ) 및 잔류변형률( $t_{CL} - \Delta\epsilon_{res}$ )에 대한 결과를 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 정적하중 작용시 120.7mm의 침하가 발생

하였으며 동적하중 작용시 142mm가 발생하였다.

동적하중 작용시 극한하중은 8ton으로 무보강의 경우보다 140% 증가한 것으로 나타나 보강효과가 검증되었다. 한편 동적하중 작용시 잔류변형량은 Fig. 16(b)로 나타내었으며 1차 동적하중 작용시 15.2mm의 잔류 변형량이 발생하였으며 2차 동적하중 작용시 잔류 변형량은 8.2mm가 발생하였다. 1차 동적하중에 비해 2차 동적하중 작용시 잔류 변형량은 46%감소하였으며 이는 2차 동적하중 작용시 보다 1차 동적하중 작용시 지오그리드가 크게 변형되었다는 것을 판단할 수 있다.

또한 Table 3에서 나타내었듯이 1차 동적하중과 2차 동적하중의 하중종류(sin파) 및 주파수, 편진폭의 크기, 작용시간이 동일하기 때문에 일정한 경향이 나타났다. 한편 Fig. 16(c)는 지오그리드의 잔류 변형률을 나타내었으며 잔류 변형량과 마찬가지로 2차 동적하중에 의한 변형률이 1차 동적하중에 의한 변형률에 비해 1%가 감소하였다. 이는 앞서 설명하였듯이 2차 동적하중 작용시 보다 1차 동적하중 작용시 지오그리드 형상이 크게 변형한다는 알 수 있었다. 또한 시간 경과에 따라 변형률은 증가하는 경향을 나

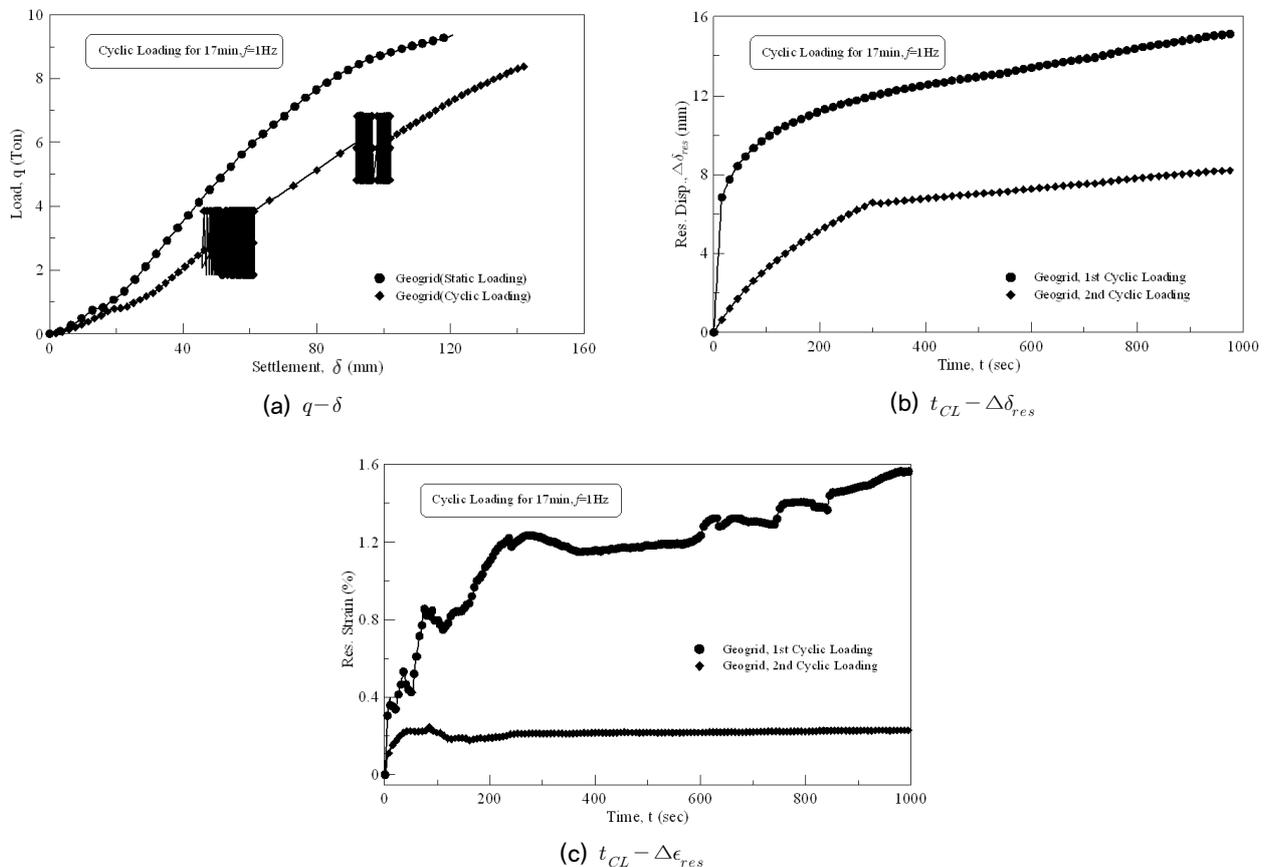


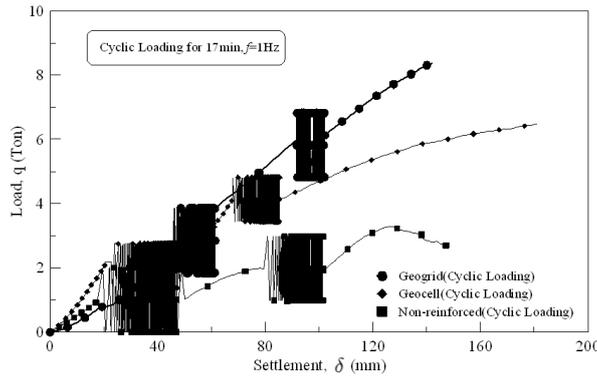
Fig. 16. Load-Settlement curve according to Loading condition

타나지만 불규칙한 거동을 보이는데 이러한 거동은 지오그리드의 상하에 설치되는 쇄석의 영향으로 나타나는 현상이라고 판단된다.

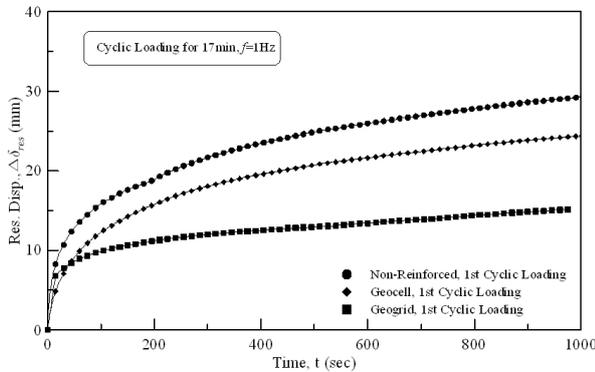
### 4.3 무보강 및 보강시 잔류 변형 특성

Fig. 17(a)는 세가지 조건에 대한 하중-변위 곡선을 보여주고 있다. 즉 정적하중 작용시와 동적하중 작용시에 대한 하중-변위 곡선을 보여주고 있으며 Fig. 17(b)와 Fig. 17(c)는 각 조건에 대한 잔류변형량 대한 결과를 동적하중

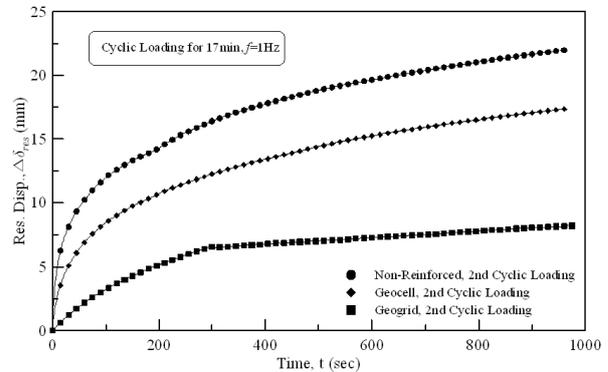
주기에 따라 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 1차 동적하중 재하, 2차 동적하중 재하 두 경우 모두 무보강-지오셀보강-지오그리드보강 순으로 잔류변형량이 나타났다. Fig. 17(d)와 Fig. 17(e)는 1, 2차 동적하중 재하시의 잔류 변형률을 나타내고 있는데 두 경우 모두 지오셀의 잔류 변형률이 지오그리드의 잔류 변형률 보다 크게 나타났다. 1차 동적하중 재하 시 지오셀의 잔류 변형률은 지오그리드의 잔류 변형률보다 3% 크게 발생하였으며 2차 동적하중 재하 시에는 0.2% 크게 나타났다.



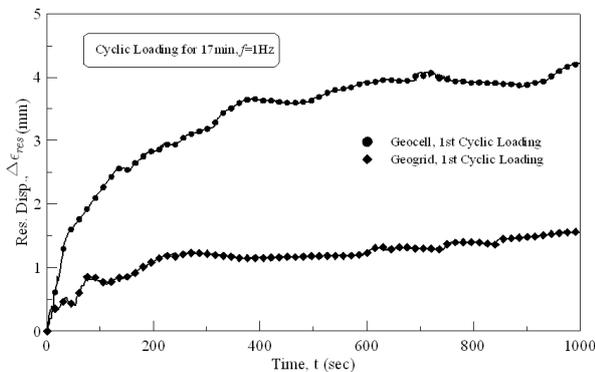
(a)  $q-\delta$  (non-reinforced-Geocell-Geogrid)



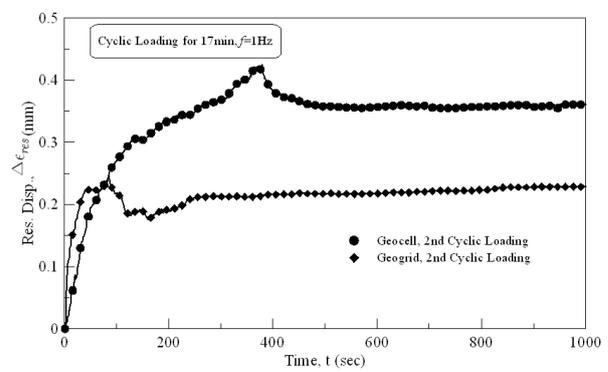
(b)  $t_{CL} - \Delta\delta_{res}$  (1st Cyclic Loading)



(c)  $t_{CL} - \Delta\delta_{res}$  (2nd Cyclic Loading)



(d)  $t_{CL} - \Delta\epsilon_{res}$  (1st Cyclic Loading, Geocell-Geogrid)



(e)  $t_{CL} - \Delta\epsilon_{res}$  (2nd Cyclic Loading, Geocell-Geogrid)

Fig. 17. Load-Settlement curve according to Loading condition

## 5. 결론

교통인프라 시설의 개발은 고속철도의 개발, 차세대 열차 개발 등으로 이어져 철도 시설의 고속화에 대응 할 수 있도록 기존 선로의 개량, 새로운 선로의 공법 등을 필요로 하고 있다. 국내의 철도의 경우 열차하중의 고른 분배와 우수의 신속한 배수 기능을 가지고 있는 자갈노반의 적용이 대부분을 차지하고 있지만 고속철도와 같이 열차반복하중이 증가하는 철도 노반의 경우 보강이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 토목섬유로 보강된 자갈노반에 반복하중을 작용시켜 하중 지지력 증진 효과 및 잔류변형률, 보강재의 잔류변형률 등에 대해 종합적으로 비교 분석하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 무보강 상태의 지반에 정적하중과 동적하중 재하시 정적하중의 극한하중은 3.5ton, 동적하중의 극한하중은 3.3ton으로 나타났으며 이때의 최대 변위는 각각 53.8mm, 126.1mm로 동적하중이 지반의 거동에 더 큰 영향을 끼치는 것으로 검토되었다. 또한 1, 2차 동적하중 재하시 잔류침하량은 27%의 차이를 보여 1차 동적하중으로 인해서 지반에 다짐 효과가 나타나 2차 동적하중 작용시 잔류침하량이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.
- (2) 지오셀로 보강한 지반은 정적하중과 동적하중 재하시 최대 변위는 각각 120.2mm, 181.1mm로 나타났으며, 무보강의 경우와 비교하였을 때 극한하중이 80% 증가하는 것으로 나타났으며 지오셀보강시 보강효과가 증가되는 것을 검증하였다. 반면 1, 2차 동적하중 재하시 잔류침하량은 31%의 차이를 보여 2차 동적하중 작용시 보다 1차 동적하중 작용시 지오셀 형상이 크게 변한다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 지오그리드로 보강한 지반은 정적하중과 동적하중 재하시 최대 변위는 각각 120.7mm, 142mm로 나타났으며, 무보강의 경우와 비교하였을 때 극한하중이 140% 증가하는 것으로 나타났으며 지오그리드로 보강시 보강효과가 증가되는 것을 검증하였다. 반면 지오셀 보강시와 마찬가지로 1, 2차 동적하중 재하시 잔류침하량은 46%의 차이를 보여 2차 동적하중 작용시 보다 1차 동적하중 작용시 지오그리드 형상이 크게 변한다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 지오셀과 지오그리드로 보강된 지반은 1, 2차 동적

하중 재하시의 잔류변형률은 두 경우 모두 지오셀의 잔류변형률이 지오그리드의 잔류변형률 보다 크게 나타났다. 1차 동적하중 재하 시 지오셀의 잔류변형률은 지오그리드의 잔류변형률보다 3% 크게 발생하였으며 2차 동적하중 재하 시에는 0.2% 크게 나타났다.

- (5) 제시된 연구결과로 지오그리드의 보강효과는 무보강 상태의 지지력보다 140%, 지오셀 보강효과는 80% 증가 한 것으로 나타나 지반의 보강재로 사용되는 토목섬유의 보강효과를 검증하였으며, 지오셀 보다 지오그리드의 보강효과가 더 뛰어난 것으로 나타났다.

## References

1. Dash, S. K., Krishnaswamy, N. R., and Rajagopal, K. (2001), "Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand." *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.19, pp.235-256.
2. Dash, S. K., Rajagopal, K., and Krishnaswamy, N. R. (2001), "Strip footing on geocell reinforced sand beds with additional planar reinforcement" *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.19, pp.529-538.
3. Dash, S. K., Sireesh, S., and Sitharam, T. G. (2003), "Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.21, pp.197-219.
4. Dash, S. K., Rajagopal, K., and Krishnaswamy, N. R. (2004), "Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations" *Geosynthetics International*, Vol.11, pp.35-42.
5. Dash, S. K. (2012), "Effect of Geocell Type on Load-Carrying Mechanisms of Geocell-Reinforced Sand Foundations", *International Journal of Geomechanics*, Vol.12, pp.537-548.
6. Gobel, C. H. and Weisemann, C. (1994) "Effectiveness of a reinforcing geogrid in a railway subbase under dynamic loads", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.13, pp.91-99.
7. Indraratna, B., Hussaini K. K. S., and Vinod, J. S. (2013), "The lateral displacement response of grogrid-reinforced ballast under cycling loading", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.39, pp.20-29.
8. Kazerani, G., and Jamnejad, G. (1987), "Polymer grid cell reinforcement in construction of pavement structures", *Geosynthetics '87 Conference*, New Orleans, LA, Feb, pp.58-68.
9. Mhaiskar, S. Y., and Mandal, J. N. (1992), "Soft Clay Subgrade stabilisation using Geocells. *Geotechnical special*

- publications”, New York, American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol.30, S. 1092-1103.
10. Mhaskar, S. Y., and Mandal, J. N. (1996), “Investigations on soft clay subgrade strengthening using geocells”. *Construction and Building Material Journal* 10 Vol.4, 281-286.
  11. Rea, C., and Mitchell, J.K. (1978), “Sand reinforcement using paper grid cells”, *Proc. Symposium on Earth Reinforcement*, Pittsburg, ASCE, 644-663.
  12. Shimizu, M., and Inui, T. (1990), “Increasing in the bearing capacity of ground with geotextile wall frame”, *Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, 254.
  13. Shin, E., Kim, S., and Kim. Y. (2009), “Study on Ground Reinforced effect using the porous Geocell”, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.8, No.1, pp.33-40.
  14. Tafreshi, M. S. N., and Dawson, A. R. (2012), “A comparison of static and cycle loading responses of foundations on geocell-reinforced sand”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.32, pp.55-68.
  15. Tafreshi, M. S. N., and Dawson, A. R. (2010), “Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.28, pp.72-84.
  16. Tanchaisawat, T., Bergado, D. T., Voottipruex, P., and Shehzad, K. (2010), “Interaction between geogrid reinforcement and tire chip-sand lightweight backfill”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.28, pp.119-127.
  17. Thakur, J. K., Han, J., and Parsons, R. L. (2012a), “Creep behavior of geocell-reinforced recycled asphalt pavement (RAP) bases”, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.10, pp.753-772.
  18. Thakur, J. K., Han, J., Pokharel, S. K., and Parsons, R. L. (2012b), “A large test box study on geocell-reinforced recycled asphalt pavement (RAP) bases over weak subgrade under cyclic loading”, *GeoCongress 2012, Oakland, California, USA, March 25-29, State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, Geotechnical Special Publication, No. 225*.
  19. Yang, X., Han, J., Pokharel, S. K., Manadhar, C., Parsons, R. L., Leshchinsky, D., and Halahmi, I. (2012), “Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.32, pp.95-103.
  20. Yoo, C. S., Kim, S. B., Kim, Y. H. and Han, D. H/ (2007), “Time-dependent Deformation Characteristics of Geosynthetic Reinforced Modular Block Walls under Sustained/Cyclic Loading”, *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.23, No.6, pp.5-21.
  21. Yoon, S., Kim, J., Chung, M., Kim, Y., and Cho, S. (2002), “Reinforcing Effect of Geocell on Soft soil Subgrade for high-speed railroad”, *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.18, No.2, pp.5-12.