지오셀 특성 변화에 따른 하중지지력 연구

Experimental Study of the Changing Characteristics of Geocell with Load Carrying capacity

홍승록¹, 최진욱², 유충식^{3*}, 이대영⁴, 이수형⁵, 유인균⁶

Seungrok Hong¹, Jinwook Choi², Chungsik Yoo^{3*}, Daeyoung Lee⁴, Suhyung Lee⁵, Inkyoon Yoo⁶

¹Graduate 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

²Graduate 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

³Member, Professor, Dept. of Civil Engrg, Sungkyunkwan Univ., 300 Chun-Chun Dong, Jan-An Gu, Suwon, Kyong-Gi Do, 440-746, Republic of Korea

⁴Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg Division, KICT, 1190 Simindae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

⁵Member, Senior Researcher, Highway Research Division, KICT, 1190 Simindae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

⁶Member, Research Fellow, Highway Research Division, KICT, 1190 Simindae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

ABSTRACT

This paper presents the results of a laboratory investigation of the porous pavement substructure effect when reinforced with geocell. In order to analyze load carrying capacity of Geocell, a series of 9 reduced-scale laboratory tests was performed, changing the type, thickness, diameter of Geocell. The results of the analyses indicated that the bearing capacity of the reinforced Geocell increases much more than the non-reinforced Geocell and load carrying capacity was considered to be insignificant according to the type of Geocell. It was also found that the most supportive effects appeared as 30 cm in diameter and 1.8mm in thickness.

요 지

본 논문에서는 투수성 포장 하부구조의 지반에 지오셀 보강에 따른 거동특성을 다루었다. 지오셀을 이용한 포장구조체의 하중지지력 증가효과를 고찰하기 위하여 지오셀 결합부의 유형, 벽 두께, 직경을 변화시켜가며 총 9가지의 실험 케이스의 실내 축소모형실험을 진행하여 무보강 투수성 포장에 비해 지오셀로 보강된 포장 하부구조에서 더 큰 지지력이 발현 되는 것으로 나타났고 지오셀의 단면 형태의 관계 없이 거의 일정한 하중 지지력을 보이는 것으로 나타났다. 또한 지오셀 속채움 시 지오셀의 형상은 직경 30cm, 두께 1.8mm에서 가장 지지 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

Keywords : Reinforced Geocell, Porous pavement substructure, Reduced-scale laboratory tests, Bearing Capacity

1. 서 론

최근 인구증가와 산업화로 인한 도시개발은 콘크리트,

아스팔트 포장 등으로 인한 불투수 면적을 증가시켜 도시형 수해의 증가, 하천수의 감소, 지하수의 고갈, 물 순환 문제와 열섬현상 문제를 발생시키는 주요원인으로 지목되고 있는데 이러한 도심지 불투수면의 증가로 인한 문제점을 해결하기 위한 방안의 일환으로 최근 들어 투수성 포장에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 투수성 포장은 우

Received 27 Dec. 2012, Revised 26 Jul. 2013, Accepted 2 Aug. 2013

*Corresponding author

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

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

천 시 우수를 노상까지 침투시키는 포장으로 노면배수를 통해 물 순환 체계를 개선시키는 효과가 있으나 우수 침투로 인해 노반 또는 노상 층의 지지력 약화가 발생할 수 있어 하부 지반을 보강하기 위한 다양한 토목섬유 보강 공법 연구가 진행되어 오고 있다. 특히 토립자의 구속 효과가 탁월하여 하부보강에 활용되고 있는 지오셀을 이용한 지반의 지지력 개선 연구가 활발히 진행되고 있으며 국외에서는 다양한 시공조건에 적용되고 있다. 지오셀은 벌집 구조의 형상을 갖으며 따라서 단면의 직경 및 형상 등 다양한 형태로 제작될 수 있다.

지오셀 보강효과에 관한 국내 연구를 살펴보면 조삼덕 등(2002)은 고속철도의 노반을 강화할 수 있는 지오셀 층에 대하여 다양한 형태의 평판재하시험과 동적 모형토조 시험을 수행하여 속채움 종류 및 지오셀 층수, 복토층 두께, 원지반 강성도 변화에 따른 보강효과를 규명하였으며 신은철 등(2009)은 도로 보강용 토목섬유의 일종인 다공성 지오셀의 도로노반 보강효과 평가를 위한 실내시험과 현장시험을 실시하여 다공성 지오셀의 보강효과와 지반의 내부마찰각의 영향을 연구한 바 있다. 해외 연구를 살펴보면 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; Mhaikar and Mandal, 1992, 1996; Dash et al., 2001a, 2001b, 2003, 2004; Tafreshi and Dawson, 2010, 2012; Dash, 2012; Thakur, 2012a, 2012b; Yang et al., 2012). 기존 연구 중 Dash et al.(2003)은 실내 축소모형실험을 통하여 지오셀의 폭과 높이 그리고 지오텍스타일을 이용하여 지오셀 효과를 검증하였는데 지오셀의 폭이 재하판의 폭의 1.2배일 때 최적의 보강효과가 나타나며 지오셀의 높이가 재하판의 2.1배까지 보강효과는 점점 증가한다고 제시하였다. 최근 들어 Dash(2012)는 지오셀 보강시 다양한 지오그리드 매트에 따른 하중지지 효과를 기초의 침하, 표층의 변형 및 지오셀의 변형을 통해 지오그리드의 강도가 높고 구멍이 작을 때 효율적인 보강효과 있는 것으로 보고한 바 있다.

한편, Tafreshi and Dawson(2010, 2012)는 지오셀 보강 사질토 지반에서 정적, 동적 하중 작용시 지오셀의 폭, 높이 및 문힘 깊이를 매개변수로 하여 실내 축소모형실험을 수행하고 그 결과를 토대로 최적의 문힘 깊이는 기초 폭의 0.1배 해당되고 지오셀의 폭이 기초 폭의 3.2배 이상부터 지오셀의 보강 증가 효과를 미미하다고 보고하였으며 사질토 지반

에서 지오셀과 지오텍스타일을 이용하여 하부지반 보강 평가를 실시하여 지오텍스타일보다 지오셀의 보강 효과가 우수함을 검증하였다. 또한 차량하중 작용시 하부구조 보강에 관한 연구가 진행되고 있는데 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. Thakur et al.(2012a, 2012b)는 도로포장에 있어서 많이 사용되어지고 있는 RAP의 영구 변형이나 러팅(rutting)과 같은 문제를 해결하기 위하여 novel polymeric alloy(NPA) geocell을 이용하여 보강할 경우 RAP의 초기 변형은 18~73%, creep 변형은 6~60%로 감소시킬 수 있었고 특히 속채움재의 다짐도가 높을 경우나 작용되는 수직응력이 작을 경우 크리프 변형은 감소한다고 보고한 바 있다.

최근 들어 국내에서 지오셀의 다짐 등 시공성을 높이고 하중 지지력 향상 방안 강구의 일환으로 지오셀의 단면이 하부로 갈수록 좁아지는 형상을 갖는 제품이 생산 적용되고 있으며 이에 본 연구에서는 지오셀 단면의 형태와 단일 셀 단면 직경 및 벽 두께 등 형상에 따른 포장 구조체의 하중 지지력에 관한 연구를 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 투수성 포장 하부구조 보강용 지오셀의 보강효과를 규명하고 지오셀 단면의 형태와 단일 셀 단면의 직경 및 벽 두께 등 형상에 따른 지오셀의 하중 지지력 변화 고찰에 주목적을 두었다. 이에 다양한 형상의 지오셀에 대해 제품별 하중 지지력 변화여부를 검토하기 위해 현장 포장 구조체를 대상으로 축소 모형을 구축하여 이에 대한 하중 재하 실험을 수행하였으며 결과 분석을 통해 지오셀 단면의 형태와 단일 셀 단면의 직경 및 벽 두께 등 형상에 따른 지오셀의 하중 지지력 변화 경향을 고찰하였다.

2. 이론적 배경

2.1 지오셀 공법 및 적용분야

Koerner(1986)에 따르면 지오셀은 종래의 지반보강을 위해 지반 보강재의 마찰력 및 인발저항력을 이용하는 평면형태의 보강방법인 지오그리드와 지오텍스타일과 달리 3차원적 구조적 특징에 의해 효율적인 토립자 구속효과를 발휘하는 특징을 가지고 있으며 벌집모양의 삼차원 형태

로 제작된 단위셀 안에 속채움재를 넣고 다짐함으로써 복합구조체의 강성 등 공학적 특성을 증대시켜 지반의 전단강도 및 지지력을 극대화시킨 방법이다. 이러한 지오셀 시스템은 외력에 대하여 흙과 지오셀의 마찰저항, 이웃한 셀의 수동저항과 셀의 원형 응력 등에 의해서 지반보강 효과를 나타나기 때문에 셀의 재질, 형태 및 크기, 벽 두께, 속

Fig. 1. Load Distribution Effect of Geocell (Shin et al., 2009)

Fig. 2. Geocell for Pavements (TERRAM brochure, 2012)

Fig. 3. Application of roads (TERRAM brochure, 2012)

채움재의 종류 및 다짐도 등에 의해 영향을 받는다.

한편, Fig. 1과 같이 셀의 구속력으로 보완하여 상재 하중 자체는 사방으로 분산이 되고 전달 된 하중은 연직 셀의 벽에 의하여 제공되는 구속효과로 인해 상쇄되어 자체의 하중 지지력이 증가한다.

지오셀 공법은 지반의 지지력 증가 및 안정성을 요구하는 토목분야에 많이 적용되고 있다. Fig. 2와 같이 도로건설 분야에 적용되는 지오셀은 속채움재가 채워졌을 때 셀 구조의 구속압 제공효과로 인해 접촉 압력을 줄이고 표면의 러팅(rutting)을 최소화하며 반 강성 슬래브의 역할을 한다(Bathurst and Jarrett, 1981).

이러한 지오셀은 기층에 보강이 되어 아스팔트 포장의 두께를 보다 얇게 하는 효과가 있고 기층의 두께를 약 50%이상 감소시켜 건설 비용을 감소 할 수 있다. Fig. 3은

도로건설 적용 예를 보여주고 있다.

Figs. 4와 5는 사면안정 및 옹벽보강을 위하여 적용된 예이며 지오셀의 입체구조는 모래, 자갈 그리고 폐콘크리트 등의 재료를 이용하여 셀을 형성하기 때문에 사면이나 옹벽에 작용되는 외부 하중을 지지하는 효과 및 안정성을 향상시킬 수 있다(Hausemann, 1976).

또한 표층에서의 빗물로 인한 표토들은 Fig. 6과 같이 지오셀의 노출된 패널 모서리에 의하여 추가 유실을 방지하며 여과성 구멍으로 인하여 사면 안정뿐만 아니라 녹화 이용까지 가능한 보강 공법이다.

2.2 지오셀의 하중지지 메카니즘 & 지지력

지오셀은 단일 셀 안에 속채움재를 채워 다짐함으로 공학적 특성을 증대시켜 지반의 지지력 및 전단강도를 극대화 시킨 3차원적인 복합 구조체이다. Fig. 7(a)는 Terzaghi가 제안한 전반전단파괴 메카니즘을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 기초하중 재하시 썩기형태의 영역 1은 아래로 밀리면서 원호전단영역 2와 Rankine의 수동영역 3을 옆, 위로 밀리게 한다. 지오셀로 보강된 지반의 경우 Fig. 7(b)와 같이 격벽에 의해 구속이 되면 무보강에 비하여 하중 재하 주변 지반의 융기현상은 지오셀의 속채움재 구속

Fig. 4. Application of retaining walls (PRS report, 2012)

Fig. 5. Application of slope and greening (PRS report, 2012)

Fig. 6. Geocell for Stability of slope (TERRAM brochure, 2012)

Fig. 7. Support Mechanism of Geocell (Emersleben, 2010)

Fig. 8. Influential range (Kief and Rajagopal, 2011)

효과로 억제되고 단일 셀 모양의 다수의 셀로 형성된 지오셀의 격벽은 주위에서 작용하는 수평응력의 중립위치에 있기 때문에 침하는 감소시키고 지지력은 증가시키는 효과를 얻을 수 있다(Emersleben, 2010).

한편, 재하하중에 의한 하부지반에서의 응력분포 또한 지오셀의 구속효과로 인해 감소된다. 즉 Kief and Rajagopal (2011)의 연구에 의하면 Fig. 8와 같이 동일한 하중이 작용시 무보강의 경우 높이 h 와 폭 w 의 범위만큼 하중의 영향이 미치게 된다면 지오셀 보강의 경우는 높이 $0.4 \sim 0.6h$ 와 폭 $1.5 \sim 2.5w$ 의 하중분산 효과를 얻게 되어 넓은 매트리스의 역할을 하는 것으로 보고된 바 있다.

지오셀 보강지반의 극한지지력은 Terzaghi의 지지력 공식을 바탕으로 미 육군 공병단(1981)에서 제안한 식을 이용하여 평가할 수 있다.

$$\text{무보강 지반} : P = cN_{\zeta_c} + qN_{\zeta_q} + 0.5\gamma BN_r\zeta_r$$

$$\text{지오셀 보강 지반} : P = 2\tau + cN_{\zeta_c} + qN_{\zeta_q} + 0.5\gamma BN_r\zeta_r$$

여기서, c : 점착력 (모래의 경우 0), q : 상재하중 ($= \gamma_q D_q$), γ_q : 지오셀 안의 흙의 단위중량, D_q : 지오셀의 깊이, B : 하중 재하 폭, γ : 파괴영역내 지반의 단위 중량, N_c , N_q , N_r : 지지력계수, ζ_c , ζ_q , ζ_r : 기초의 모양에 따른 형상계수, 원형기초의 경우 $\zeta_c = 1 + (N_q/N_c)$, $\zeta_q = 1 + \tan\phi$, $\zeta_r = 0.6$, τ : 지오셀 벽과 채움재와의 마찰에 의한 전단저항($\sigma_h \tan\delta$, 사질토의 경우, $\sigma_h = PK_a$, P : 연직하중, δ : 셀 벽체 재료와 흙과의 마찰각(High-density polyethylene, HDPE는 약 18° , 부직포는 약 35°)이다.

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 4.5kg매를 이용하여 다짐도는

85%를 유지하며 16cm씩 5층 다짐을 통해 조성하였다. 지 오셀 채움재로는 평균입경 20mm이고 입도범위 2~30mm 인 쇄석을 사용하였다. 사용된 화강풍화토와 쇄석의 입도 분포 곡선은 Fig. 9와 같으며 이 데이터를 바탕으로 통일 분류법(USCS)을 적용한 결과, 본 실험에 사용하는 화강풍

Fig. 9. Grading curve of gravel and soil

화토는 SP에 해당하는 입도분포가 균질하지 않은 모래질 흙으로 분류되었으며 쇄석의 경우 GP에 해당하는 입도분포가 균질하지 않은 자갈로 분류되었다.

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 이용하였으며 재하 하였으며 이때 편심 발생을 방지하기 위하여 재하판 설치 후 라벨링 측정을 통해 재하 판의 수평을 유지하도록 하였으며 실험에서 사용된 재하판의 위치를 동일하게 하기 위하여 재하판에 직접적으로 하중을 재하하는 로드셀의 위치를 실험 전에 Fig. 10(c)와 같이 모형 토조 중간에 고정하여 실시하였다. 본 실험에 사용된 모형 장치와 하중재하장치의 제원은 Fig. 10과 Table 2와 같다.

Fig. 10. Reduced-scale model test equipment

Table 1. Mechanical property of fill materials

fill materials	Grain size	USCS	γ (kN/m ³)
Soil	$C_u = 5.714$ $C_c = 0.7$	SP	18.6
Gravel	$C_u = 3.091$ $C_c = 0.091$	GP	17.5

Table 2. Hydraulic loading controller specification

Devices	specification
Hydraulic loading controller	Static & Cyclic load Displacement Control : 0.001 ~ 100 mm/min Load Control : 0.8 ~ 2 kPa/min Wave curve : 0.001 ~ 1.0 Hz Capacity : 200 kN

3.1.2 실험 방법

모형실험은 노상을 조성한 후 지오셀 설치 및 쇄석 채움, 그리고 하중재하의 순으로 수행하였다. 특히 노상을 조성 한 후 재료분리를 위한 아스테이지를 노상위에 한 겹 깔고 지오셀을 설치하였으며 지오셀을 펼쳐 직경(25cm와 30cm)내에 쇄석을 채워 다짐을 수행하였다. 그리고 각 실험마다 채움재인 쇄석의 상대밀도 60%의 균질성을 유지하기 위하여 실험 전 쇄석량을 측정하였으며 3층 다짐을 실시하여 총 쇄석량 243kg을 투입하였다. 3층 다짐시 지

오셀 변형 발생을 방지하기 위하여 강철 지지 봉을 이용하여 지오셀 직경을 고정시킨 후 쇄석을 충전 하였으며 토조의 영향으로 인한 지지력 증가를 방지하기 위하여 지오셀 설치 시에는 모형토조와 5cm의 이격거리를 두었다.

셀 안에 쇄석을 채운 후 5cm의 쇄석 층을 균질하게 추가로 포설하여 모형 노상위에 지오셀 층을 포함하여 총 17cm 두께의 쇄석 층을 형성하였으며 쇄석층 포설 후 편심을 방지하기 위해 라벨링 측정을 통해 수평을 확인 후 하중을 재하 하였다. Fig. 11은 지오셀을 설치하고 쇄석을

(a) Weathered Granite Soil ground

(b) Base film installation

(c) Geocell installation procedure

(d) Reinforced Geocell completed

(e) Eccentricity prevention

(f) Loading

Fig. 11. Geocell installation and experimental procedure

충진시킨 후 하중을 재하 하는 실험 순서를 보여주고 있다. 한편, 재하하중은 60mm/min의 변위제어 방식으로 하중을 재하하고 침하를 측정하여 구축된 하중-변위 곡선을 이용하여 극한 하중을 산정하고 이를 비교하였다.

3.2 실험 조건

앞서 기술한 바와 같이 본 연구는 다양한 셀 형상 및 직경, 그리고 벽 두께를 갖는 제품에 대한 보강효과를 검토하였다. 실험에 사용된 지오셀은 얇은 띠 형태 HDPE 시트 벌집 구조를 갖는 대표적인 형태로서 셀의 상·하부

단면 직경이 동일한 일자형 지오셀과 상부 단면이 하부 단면보다 큰 직경을 갖는 사선형 지오셀에 대한 검토를 수행하여 지오셀 속채움재의 형상 변화와 단면의 크기 변화에 따른 하중 지지력 변화 경향을 평가하였다(Fig. 12 참조). 아울러 각 지오셀의 단면 직경 및 벽 두께가 다른 제품에 대한 하중 지지력 변화 경향 또한 검토하였다.

Fig. 12(c)는 실험에 사용된 지오셀의 형상을 보여주고 있으며 Table 3은 지오셀의 공학적 특성을 보여주고 있다.

Table 4는 본 연구에서 사용된 실험조건과 목적을 정리하여 나타내었으며 각각의 직경 및 두께는 Fig. 13(c)에 나타내었다.

Fig. 12. Geocell bond type and specification

Table 3. Engineering Characteristics of Geocell

Geocell			
Material	HDPE	Tensile strength	3.77 ton/m
Elongation	Max 9.5%	Manufacturer	Hangil geocell

Table 4. Experimental condition according to geocell

condition	Bond shape	Diameter (cm)	Wall Thickness (mm)	case compared	purpose
1	non-reinforced	—	—	1 and 2~9	To evaluate the reinforced geocell effect
2	Line type	25	1.8		
3			1.5	2 and 6, 3 and 7, 4 and 8, 5 and 9	To analyze the reinforced geocell effect according to the bond shape
4		30	1.8		
5			1.5	2 and 4, 3 and 5, 6 and 8, 7 and 9	To analyze the reinforced geocell effect according to the diameter
6	Diagonal type	25	1.8		
7			1.5	2 and 3, 4 and 5, 6 and 7, 8 and 9	To analyze the reinforced geocell effect according to the thickness
8		30	1.8		
9			1.5		

Table 5. Ultimate load according to the shape of geocell

Condition	Bond shape	Diameter(cm)	Wall Thickness(mm)	Ultimate load(ton)
1	non-reinforced	—	—	3.2(failure)
2	Line type	25	1.8	4.4
3			1.5	3.3
4		30	1.8	6.3
5			1.5	5.2
6	Diagonal type	25	1.8	4.7
7			1.5	3.6
8		30	1.8	6.2
9			1.5	5.3

Fig. 13. Load-Settlement curve according to Geocell type

4. 실험결과 및 고찰

4.1 지오셀 보강 유무에 따른 지반의 지지력

Fig. 13은 지오셀 보강 유무에 따른 하중-침하 특성을 나

타내고 있다. 보이는 바와 같이 전반적으로 지오셀 보강조건
의 경우 무보강 조건의 결과와 비교할 때 하중-침하곡선의
기울기가 급하고 항복 후 극한하중의 크기가 증가하는 경향
을 보이고 있다. 즉, 무보강 지반의 경우 하중 증가에 따라
침하가 증가하다가 재하하중 3.2ton에서 60mm의 침하가 발
생하나 지오셀 보강조건의 경우 동일한 침하에 해당하는 재
하하중이 30~50% 증가하는 것으로 나타나 지오셀 보강에
따른 노상 보강 효과를 확보할 수 있는 것을 확인 할 수 있다.

한편, 지오셀 보강조건의 경우 지오셀 크기와 벽 두께에
따라 무보강에 비해 하중 지지력이 약 1~2.5배 가량 증가
하는 것을 알 수 있는데 이는 지오셀의 채원에 따라 하중
지지효과가 달라 질 수 있음을 의미하는 것으로서 이는 다
음절에서 다루도록 한다. Table 5는 각 실험조건별 극한하
중을 정리하였으며 Table 5의 직경 및 두께는 Fig 12(c)에
나타내었다.

4.2 지오셀 결합부 유형에 따른 보강 지반의 지지력

Fig. 14는 사선형 및 일자형 지오셀에 대한 하중-변위

(a) Diameter 25 cm, Thickness 1.5 mm

(b) Diameter 25 cm, Thickness 1.8 mm

(c) Diameter 30 cm, Thickness 1.5 mm

(d) Diameter 30 cm, Thickness 1.8 mm

Fig. 14. Load-Settlement curve according to Bond shape

곡선을 보여주고 있다. 즉, Fig. 14(a)와 14(b)는 지오셀 직경 25cm인 지오셀에 대한 결과를 보여주고 있으며 Fig. 14(c)와 14(d)는 지오셀 직경 30cm에 대한 결과를 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 단면형태에 관계없이 거의 유사한 극한하중을 보이는 것으로 나타났다. 이는 지오셀의 속채움재 형상 변화에 따른 하중 지지능력 차이는 없음을 의미하며 따라서 지오셀 단면형상(사선형, 직선형)은 보강 지반의 하중지지력에 미미한 영향을 미치는 인자인 것으로 판단된다.

4.3 지오셀 직경에 따른 보강 지반의 지지력

Fig. 15는 Fig. 14로부터 산정된 각 조건에 대한 극한지 지지력을 일자형 지오셀($D=25\text{cm}$)의 극한지 지지력으로 정규화한 결과를 보여주고 있다. Fig. 15(a)에서는 벽 두께 1.5mm 지오셀의 경우 직경 증가($25\text{cm} \rightarrow 30\text{cm}$)시 하중

지지력이 60%이상 향상되는 것으로 검토 되었으며 벽 두께 1.8mm 지오셀의 경우 직경 증가시 약 45% 정도의 하중 지지력 향상 효과가 있는 것으로 검토되었다. 이러한 경향은 지오셀 단면 직경은 보강 지반의 하중 지지력에 큰 영향을 미치는 인자인 것을 의미하며 다만 직경 증가로 인한 하중 지지력 증가율은 벽 두께가 증가할수록 다소 감소하는 것으로 검토되었다. 반면 본 연구에서는 지오셀 직경 25cm와 30cm에 대한 지지력을 평가 하였으나 더 많은 종류의 지오셀 직경 변화에 대한 지지력 실험을 통하여 단위 체적당 투입되는 채움재양 변화에 대한 지지력 변화의 비교연구가 향후 수행되어야 한다고 판단된다.

4.4 지오셀 벽 두께에 따른 보강 지반의 지지력

Fig. 16은 Fig. 14로부터 산정된 각 조건에 대한 극한지 지지력을 일자형 지오셀(벽 두께 1.5mm)의 극한지 지지력으로

(a) Thickness 1.5 mm

(b) Thickness 1.8 mm

Fig. 15. Normalized Ultimate Bearing Capacity according to Normalized diameter

(a) Diameter 25 cm

(b) Diameter 30 cm

Fig. 16. Normalized Ultimate Bearing Capacity according to Normalized Thickness

정규화한 결과를 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 전반적으로 직경의 크기에 관계없이 벽 두께가 증가할수록 하중 지지력이 증가하는 것으로 검토되었다. 즉, Fig. 16(a)에서는 직경 25cm 지오셀의 경우에 대한 결과를 보여주고 있는데 벽 두께 증가(1.5mm → 1.8mm)시 하중 지지력이 40%이상 향상되는 것으로 검토 되었으며 직경 30cm 지오셀의 경우 벽 두께 증가시 약 20% 정도의 하중 지지력 향상 효과가 있는 것으로 검토되었다. 이러한 경향은 지오셀의 벽 두께는 보강 지반의 하중 지지력에 큰 영향을 미치는 인자인 것을 의미하며 다만 이러한 벽 두께 증가로 인한 하중지지력 증가는 직경이 작은 지오셀에서 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 검토되었다.

5. 결 론

최근 들어 불투수 면적증가로 인한 도시형 수해의 증가, 하천수의 감소 그리고 지하수의 고갈 등의 물 순환 문제와 열섬현상을 해결하기 위한 방안의 일환으로 투수성 포장 이 적용되고 있다. 본 연구에서는 투수성 포장구조체 하부 노상의 하중 지지력 향상을 위한 보강 방안으로 적용되는 지오셀 보강 노상에 대한 축소모형실험을 실시하여 지오셀 적용시 보강효과, 지오셀 단면의 형태와 단일셀 단면의 크기 및 벽 두께 등 지오셀의 형상에 따른 보강효과 변화 여부를 검토하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 지오셀로 보강된 노상의 실험결과 무보강 노상에 비해

하중-변위 곡선의 기울기가 증가하고 하중 지지력이 30% 이상 증가하는 것으로 나타나 투수성 포장 시공시 노상을 지오셀로 보강할 경우 포장구조체의 하중 지지력 증가 효과를 확보할 수 있는 것으로 검토되었다.

- (2) 지오셀의 단면 형태(일자형 및 사선형)에 따른 하중 지지력 변화 경향을 검토한 결과 단면 형태에 관계없이 거의 일정한 하중 지지력을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 노상 보강용 지오셀 선정 시 지오셀의 단면 형태는 하중 지지력 관점 보다는 경제성 및 시공성을 중심으로 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (3) 지오셀 단면의 직경에 따른 보강 효과를 고찰한 결과 셀 단면의 직경이 증가할수록 (25cm → 30cm) 지오셀 벽 두께에 따라 하중 지지력이 45~60%정도 향상되는 것으로 검토 되었다. 이러한 경향은 지오셀 단면 직경은 보강 지반의 하중 지지력에 큰 영향을 미치는 인자인 것을 의미하며 다만 직경 증가로 인한 하중 지지력 증가율은 벽 두께가 증가할수록 다소 감소하는 것으로 검토되었다. 반면 본 연구에서는 지오셀 직경 25cm와 30cm에 대한 지지력을 평가 하였으나 더 많은 종류의 지오셀 직경 변화에 대한 지지력 실험을 통하여 단위체적당 투입되는 채움재양 변화에 대한 지지력 변화의 비교연구가 향후 수행되어야 한다고 판단된다.
- (4) 지오셀 벽 두께에 따른 보강효과를 고찰한 결과 벽 두께가 증가할수록 지오셀 단면 직경에 따라 하중 지지력이 20~40%이상 향상되는 것으로 검토 되었다. 이러한 경향은 지오셀의 벽 두께는 보강 지반의 하중 지지력에 큰 영향을 미치는 인자인 것을 의미하며 다만 이러한 벽 두께 증가로 인한 하중지지력 증가는 직경이 작은 지오셀에서 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 검토되었다.
- (5) 제시된 연구결과는 현장 포장구조체를 축소한 모형에 대한 하중 재하시험 결과이며 따라서 사용된 지오셀 단면의 직경 대비 모형 재하판 크기의 치수효과(scale effect)가 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되므로 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant from the Highway Research Division, KICT.

References

1. Bathurst, R. J., and Jarett, P. M. (1981), "Largescale model tests of geocomposite mattresses over peat subgrades", *Transportation Research Record 1188*. Transportation Research Board, Washington, D.C
2. 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.
3. Dash, S. K., Krishnaswamy, N. R., and Rajagopal, K. (2001a), "Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand." *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.19, pp.235-256.
4. Dash, S. K., Rajagopal, K., and Krishnaswamy, N. R. (2001b), "Strip footing on geocell reinforced sand beds with additional planar reinforcement" *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.19, pp.529-538.
5. 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.
6. 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.
7. Emersleben A. (2010), "Load transfer mechanism of geocell for stabilization of granular base layers at static and dynamic loads", *PhD-Thesis at Clausthal University of Technology*, Department of Geotechnical Engineering, Germany.
8. Hausemann, M. R. (1976), "Strength of Reinforced Soil", *Proceedings of 8th Australian Road Research Conference*, Vol.8.
9. 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.
10. Kief, O., and Rajagopa, K. (2011), "Modulus Improvement Factor for Geocell-Reinforced Bases", *Geosynthetics India'11*, Chennai, India.
11. Koerner, R. M. (1986), *Designing with Geosynthetics*, Prentice Hall, Engelwood.
12. Mhaikar, 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.
13. Mhaikar, 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.
14. Rea, C., and Mitchell, J.K. (1978), "Sand reinforcement using paper grid cells", *Proc. Symposium on Earth Reinforcement, Pittsburg*, ASCE, 644-663.
15. Shimizu, M., and Inui, T. (1990), "Increasing in the bearing

- capacity of ground with geotextile wall frame”, *Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, 254.
16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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.
 21. 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.
 22. 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.