

연약지반상 고속철도 노반재로서 지오셀 시스템의 적합성 평가

Use of Geocell System for the Reinforcement of High-Speed Railroad on the Soft Ground

김진만¹⁾, Jin-Man Kim, 조삼덕²⁾, Sam-Deok Cho, 정문경¹⁾, Moon-Kyung Chung, 윤수호¹⁾, Soo-Ho Yoon, 이일화³⁾, il-Wha Lee, 김영윤, Young-Yoon Kim⁴⁾

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Div. of Geotechnical Eng. KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원, Research Fellow, Div. of Geotechnical Eng. KICT

³⁾ 한국철도기술연구원 시설연구부 주임연구원, Researcher, Div. of Civil Eng. & Environment KRRI

⁴⁾ 보강기술(주) 기술연구소 소장, Director, E&S Eng. Co., Ltd

SYNOPSIS : Geocell mattress is a three-dimensional confinement cell filled with coarse granule. This paper addresses the use of geocell system as a track sub-ballast load support. A series of field test of pilot scale was performed to investigate the load transfer mechanism of geocell system applied on soft clay. Strain gages and load cells were installed on the geocell and the underlying clay. The tests were conducted as a function of type of filler material, number of geocell layer, thickness of topsoil overlying the geocell layer, and stiffness of the soil. The results indicate that geocell layer is effective in reinforcing track structure which is subject to shear deformation induced by repeated dynamic train loads.

KEYWORDS : Geocell, Geosynthetics, railway, Reinforcement

1. 서 론

최근 국내에서는 국가적 차원의 사회간접자본 확충계획을 가지고 도로, 항만, 신공항 등의 건설사업에 막대한 국가적 재원을 투자하고 있다. 특히, 이러한 국토개발계획에 의한 고속철도 및 일반철도의 증설 계획은 우리나라의 지형여건상 많은 연약지반을 통과하게 되어 있어 철도건설 과정 혹은 건설후 운행시 지반침하, 지지력 감소 등으로 인한 문제들이 발생될 것으로 예상된다.

일반적으로 연약지반상의 고속철도의 구축은 연약지반을 치환하거나 개량하는 방법에 의해 수행되고 있으나 이들 전통적인 공법은 공기와 경제성에서 많은 문제점을 내포하고 있다. 특히 연약지반상에 동 하중이 가해질 때, 액상화 등으로 지반강도가 감소되어 철도 구조물이 파괴될 수 있으며 이러한 연약지반상의 철도 시공은 복잡한 기술적 문제의 해결을 요구하고 있다.

현재 연약지반위에 건설된 철도노반의 강화기술로서 각광받고 있는 것으로는 지오셀 시스템(geocell system)을 들 수 있다. 지오셀 시스템은 종래의 지반보강을 위해 지반/보강재의 마찰력 및 인발저항력을 이용하는 평면형태의 보강방법인 지오그리드(geogrid)와 같은 토목섬유(geosynthetics)에서 한 단계 더 진전된 것이다. 지오셀 시스템은 두께 1.2mm 이상의 합성수지판으로 벌집모양의 삼차원 형태로 제

작된 토목섬유 보강재를 이용하여, 단위 셀(cell)안에 조립토를 채워 다짐함으로써 복합구조체의 강성 등 공학적 특성을 증대시켜 지반의 전단강도 및 지지력을 극대화시킨 방법이다.

최근 일본은 1960년대 이전에 시공된 철도를 보수하면서 지오셀 시스템의 적용 연구를 수행하였다. 그 연구의 배경은 다분히 경험에 의존하여 설계·시공된 1960년대 이전의 일본철도에서 철도노반 지지구조에 문제점이 노출되어 이에 대한 효율적인 보수보강의 조치가 필요하다는 것이었다. 기존 철도의 보수·보강에 적용된 지오셀 시스템은 철도노반 지지구조를 보다 견고하게 하였으며, 이러한 적용사례를 통해 지오셀 시스템은 고속철도 노반의 보강기법으로서도 매우 효율적인 것으로 판단된다.

지오셀 시스템은 간편한 시공이 될 수 있어 공기 단축의 효과가 크고 구조적 내구성이 뛰어나 보수 및 보강에 필요한 유지비용이 경미하다. 따라서 지오셀 시스템으로 시공된 철도노반에서는 철도교통의 원활한 소통과 안정성이 증가되어 경제적으로 큰 이익이 기대된다. 또한, 고속철도에 대한 토목분야의 설계, 시공 및 유지관리 관련 기술을 종합적으로 개발하여 자립기술을 확보하고 국가 경쟁력을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

2. 철도노반의 파괴 형태 및 지오셀 시스템을 이용한 노반강화 기법

궤도를 지탱하고 있는 노반이 손상되면 선로기능의 마비 혹은 반복적인 선로의 보수작업이 필요하다. 노반의 손상은 크게 궤도와 노반의 원호활동파괴, 점진적 전단파괴, 과도한 소성변형, 압밀침하, 노반의 마멸(attrition)과 지속적인 세립토의 도상 간극으로의 혼입, 동결/융해에 의한 강도저하, 함수비 변화에 의한 팽창 및 수축에 의해 발생한다(ORE 1970; Li and Selig, 1995). 이중 점진적 전단파괴 및 과도한 소성변형 등은 차량의 반복하중에 의한 대표적인 연약지반상 노반파괴의 형태이다.

일반적으로 노반을 강화하는 방법은 (1) 기존 노반의 교체없이 현장에서 노반물성을 개선하는 방법, (2) 노반의 교체 재시공을 통한 노반물성의 개량, (3) 아스팔트 콘크리트를 이용한 강화방법, (4) 궤도사면의 표면파괴에 대한 보강법, (5) 토목섬유를 이용한 개량 등이 있다. 이 중 토목섬유(geosynthetics)를 이용한 지반보강은 토체내에 보강재를 삽입하여 토류구조물을 보강하는 방법으로서 이렇게 시공된 흙/보강재 복합건설재료는 기존의 지반에 비하여 개선된 인장 및 압축특성을 갖는다. 지금까지 널리 알려진 보강재의 종류는 크게 시이트(sheet)형 보강재, 대상(strip)형 보강재, 그리드(grid)형 보강재 등의 3종류로 구분될 수 있다. 특히, 지오그리드(geogrid)와 지오택스타일(geotextile)과 같은 연약지반상 제방 및 도로의 축조, 토류벽의 보강, 얇은 기초의 지지력 확보, 철도 노반의 지지력 확보 등 다양한 토목분야에서 적용되어 왔다(Koerner, 1994; 한국지반공학회, 1998).

한편, 그림 1에서는 지오셀 시스템의 지지력 개선 메카니즘을 보여준다. 그림 1에서 보듯이 지오셀 시스템은 평면형태의 지오그리드 보강재와 달리 두께 1.2mm 이상의 합성수지판으로 벌집모양의 삼차원 형태로 제작된 토목섬유 보강재를 이용하여 단위 셀(cell)안에 조립토를 채워 다짐함으로써 복합지반의 공학적 특성을 증대시켜 지반의 압축특성 및 지지력을 극대화시킨 방법이다. 지오셀 시스템의 지반보강은 외력에 대한 흙/지오셀의 마찰저항, 이웃한 셀의 수동저항, 셀의 원형응력 등에 의해서 이루어진다. 따라서 지오셀 시스템은 셀의 재질, 형태 및 크기, 속채움재의 종류 및 다짐도, 재하하중 등 지오셀 메카니즘에 영향을 주는 여러 인자들에 의해 영향을 받는다. 그림 2에서는 고속철도가 아닌 일반 철도에서의 지오셀 시스템의 적용형태를 보여준다. 그림 2에서 보듯이 지오셀 시스템은 앞서 언급된 지오셀 메카니즘에 의해서 도상 및 보조도상의 횡방향 변위를 억제시킴으로써 위에서 언급된 노반파괴를 최소화시켜 연약지반상 철도지반 노반재로서의 그 활용성이 기대된다.

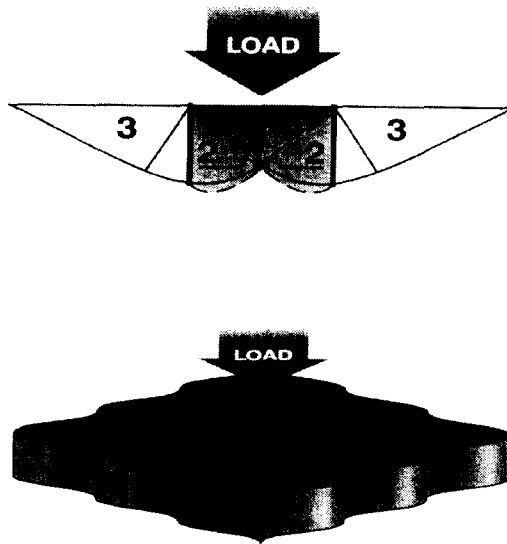


그림 1. 지오셀 시스템의 지지력 개선 메카니즘

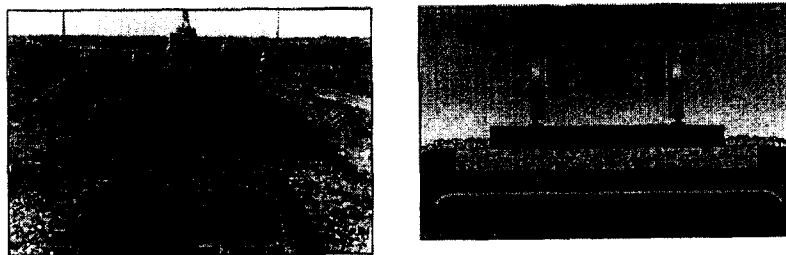


그림 2. 일반 철도에서의 지오셀 시스템의 적용형태

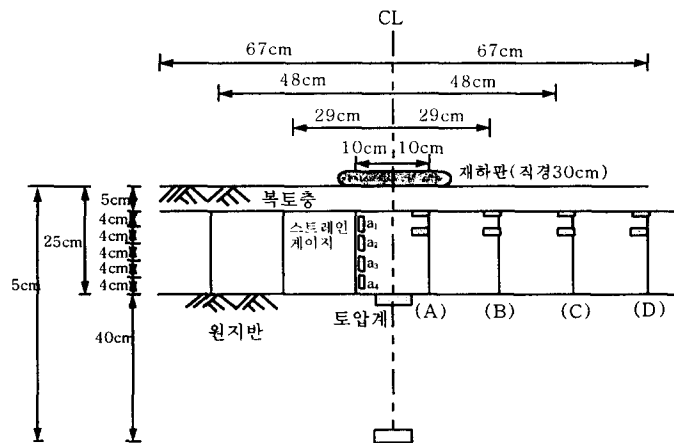
3. 시험개요

본 연구에서는 연약지반상 지오셀 보강지반에 대해 다양한 형태의 평판재하시험을 수행하여 재하판 주변의 각 셀들의 거동과 원지반의 토압분포를 측정함으로써 지오셀 시스템의 하중전달 메카니즘(지지력 개선에 대한 흙/지오셀의 마찰저항, 이웃한 셀의 수동저항, 셀의 원형응력 등의 영향)을 규명하고자 하였다. 또한, 개량·미개량 연약지반에서 수행된 다양한 형태의 평판재하시험 결과를 토대로 지오셀 시스템의 속채움 종류 및 지오셀 층수, 복토층 두께, 원지반 강성도의 변화에 따른 보강효과 등을 규명해 보고, 이를 양질의 성토재로 치환된 지반과 비교해 봄으로써 고속철도 노반재로서 지오셀 시스템의 적합성을 평가하고자 하였다.

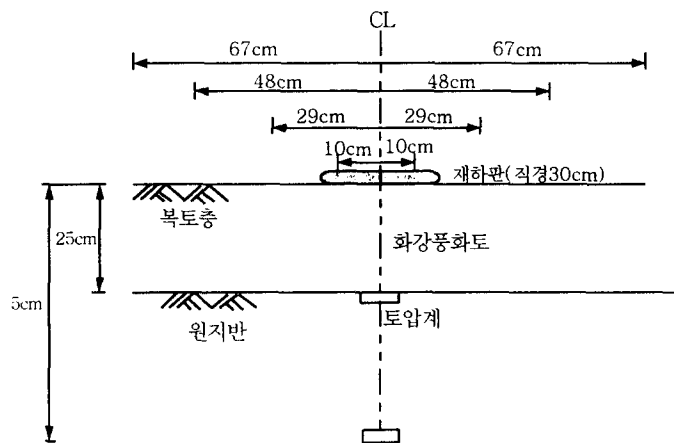
본 연구의 대상 현장은 인천시 영종도내의 “인천 국제신공항 제 1 공구 A-4지역 부지조성 공사현장”의 개량 및 미개량 연약지반 두 곳을 선정하였다. 선정된 개량지반지역은 '93년도까지 1년 6개월 동안 1.8~2.0m의 흙 성토를 통해 자중압밀이 진행된 후, 현재 0.5m 정도의 복토층을 제외한 모든 압밀성토층이 해제된 지역으로 연약지반 개량처리에 의해 지반의 강성도가 증진된 것으로 평가된 곳이다. 반면에 미개량 지역은 현재의 계획 공정상 연약지반 개량 계획이 없이 국내 서해안지역의 대표적인 연약지반 형태를 보이고 있다. 현장배인시험 결과, 원지반의 전단강도는 미개량지반에서 0.06~0.1 kg/cm², 개량지반에서 0.07~0.13 kg/cm²으로 나와 개량전·후의 전단강도의 차이가 크지 않고, 지반의 균등성은 충분히 확보된 것으로 평가되었다.

본 연구에 사용된 시험대상시료는 영종도 신공항 부지 연약지반 주변에 널리 분포되고 있는 압축성이 작은 점토질 흙(CL)과 지오셀 시스템의 속채움재 및 성토재로 활용된 화강풍화토 및 쇄석 등의 흙시료와 보강재인 지오셀 등이다. 대상 흙시료의 공학적 특성을 살펴보면, 속채움재인 화강풍화토(A시료)는 최대건조밀도 2.12 g/cm³, 최적함수비 5.65%인 양입도의 모래질 흙으로, 쇄석(B시료)은 입경이 35mm 이하인 양입도의 자갈(GW)로 평가되었다. 또한, 원지반 점토질 흙(C 시료)은 소성지수(PI) 8.8, 최대 건조 밀도 1.73 g/cm³, 최적 함수비 15.1 %인 점토(CL)로 평가되었다. 한편, 보강재인 지오셀은 프레스토사의 표준형인 모델명 GW 8298 (2440×6090×200mm)이다.

그림 3에서는 연약지반상 지오셀 시스템의 하중전달 메카니즘 규명을 위한 계측기 매설 단면을, 그림 3에서는 평판재하시험을 통한 고속철도 노반재로서 지오셀 시스템의 적합성 평가를 위한 평가 항목별 지오셀 및 흙성토 포설단면을 보여준다. 표 1에서는 지오셀 시스템의 고속철도 노반재로서의 적합성을 평가하기 위해 수행한 평판재하시험의 종류와 내용을 보여준다.

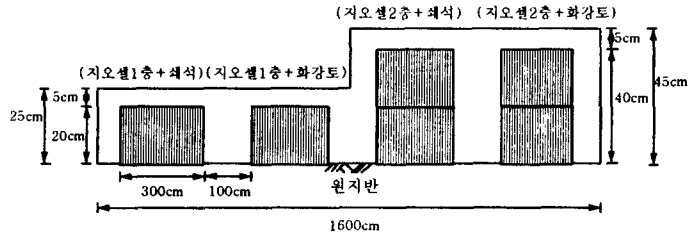


(a) 지오셀 단면

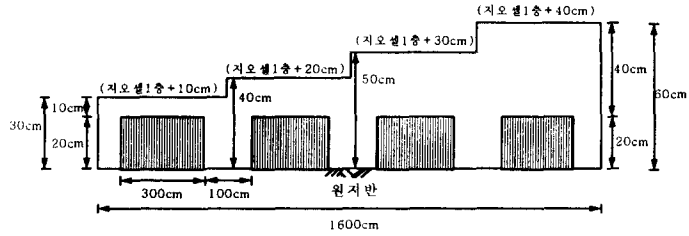


(b) 화강풍화토 단면

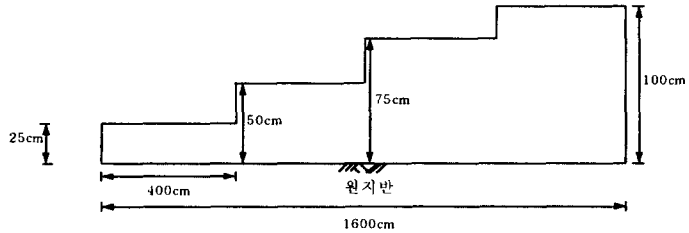
그림 3. 하중전달 메카니즘 규명을 위한 계측기 매설 단면도



(a) 속채움 종류 및 다층효과



(b) 복토층 효과



(c) 치환지반효과

그림 4. 평가 항목별 지오셀 및 흙성토 포설단면도

표 1. 수행한 평판재하시험의 종류와 내용

보강 형태	실험항목	변화인자	변화 값
지오셀 보강	속채움 종류 및 다층효과	원지반 조건	미개량 및 개량지반
		속채움 종류	화강풍화토, 쇄석
	복토층 효과	원지반 조건	미개량 및 개량지반
		속채움 종류	화강풍화토
비보강	치환지반 효과	지오셀	1층
		복토층 두께	5, 10, 20, 30, 40 cm
		원지반 조건	미개량 및 개량지반
		흙 종류	화강풍화토
		복토층 두께	0, 25, 50, 75, 100 cm

4. 시험결과 분석 및 평가

4.1 지오셀 시스템의 메카니즘 분석

(1) 흙/지오셀의 마찰저항

그림 5에서는 평판재하시험에 의한 재하판 직하 지오셀의 하중강도별 연직방향 변형률-하중강도 관계

를 보여준다. 그림 5에서 보듯이 연직방향 변형률은 모든 계측위치에서 하중단계별로 인장변형없이 압축변형이 점진적으로 증가하는 경향을 보이다가 하중강도 2.0kg/cm^2 이상에서 급격한 증가 추세를 나타내었다. 이러한 지오셀 시스템의 변형특성은 재하판 아래 흙이 하중재하에 따라 압축변형을 유발시키고 이에 따른 흙/지오셀의 마찰이 유발되면서 지오셀이 흙의 마찰에 의해 같이 압축된다는 것을 의미한다. 또한, 압축변형률의 크기는 최대하중단계에서 셀의 위치별로 $0.4\sim 0.8\%$ 정도를 보이며, 지오셀의 마찰저항은 중간부위 이하 보다는 중간부위 이상에서 크게 나타나는 것으로 평가되었다. 이러한 마찰저항 유발특성은 재하하중에 의한 셀내 흙의 수평방향 팽창이 셀 상단에서 더 크게 발현되는 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

(2) 지오셀의 수동저항 및 원형응력 특성

그림 3의 현장실험 개략도에서 보듯이 수평방향 스트레인이게이지 부착위치인 A지점(재하판 중심으로부터 거리 10cm 인 지점)은 재하판 바로 밑이라는 위치적 조건 때문에 흙의 수동저항 보다 압축변형이 우세하여 셀의 수동저항 보다 원형응력이 우세한 곳인 반면에 그 이후의 다른 지점(B, C, D지점)은 수동저항의 영향이 우세한 지역이다.

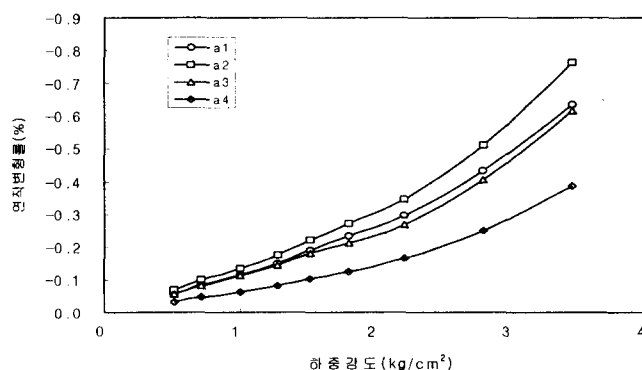


그림 5 지오셀의 연직방향 변형률-하중강도 관계곡선

그림 6에서는 재하판 중심으로부터 떨어진 거리별 지오셀의 수평방향 변형률 관계곡선을 보여준다. 그림 6에서 보듯이 셀의 원형응력이 우세한 A지점의 수평방향 변형률은 하중단계별로 인장변형이 점진적으로 증가하는 경향을 보이는 반면에 수동저항이 우세한 B지점(거리 29cm 인 지점)의 수평방향 변형률은 하중강도 2.2kg/cm^2 이하의 경우 A지점과 거의 유사한 수평방향 변형특성을 보이다가, 하중강도 2.2kg/cm^2 이상의 경우에서 급격하게 수평방향 변형률이 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 거리 29cm 이후의 지오셀들(C, D지점)은 셀의 원형응력이나 수동저항의 발현이 미미한 경향을 나타내었다.

한편, A지점과 B지점의 수평방향 변형률을 통한 원형응력 및 수동저항의 크기를 비교해 보면, 수동저항이 우세한 B지점의 지오셀은 하중강도 1.5kg/cm^2 이하의 경우, A지점과 거의 동일한 저항력을 보이다가 최대하중강도 2.2kg/cm^2 의 경우, 수평방향 변형률이 원형응력이 우세한 A지점이 0.2% 정도인데 반해 0.7% 로 나타나, 외력에 대한 셀의 저항이 A지점 원형응력저항만의 3배 이상의 수동저항이 발현되는 것으로 평가되었다.

이러한 지오셀의 거동특성은 본실험에 사용된 재하판의 크기와 지오셀 내의 재하하중에 따른 흙의 변형특성과 관련이 있다. 즉, 지오셀내의 흙은 재하판 바로 아래지점과 재하하중이 작은 경우, 흙의 소성변형에 의한 수동저항의 영향없이 흙의 압축·탄성변형이 우세하여 포아송비 만큼의 토체내 수평변형을 야기시켜 지오셀의 원형응력만을 유발시키는 반면에 재하판 주변과 재하하중이 큰 경우, 주변 흙에 소성변형이 촉발되어 토체내 수동저항에 의한 지오셀의 저항(수동저항)과 그로 유발된 원형응력을 유발시킨다. 이러한 분석결과는 그림 6에서 보듯이 A, B지점의 수평방향 변형률이 하중단계 1.8kg/cm^2 미만에서 거의 같다는 사실에서도 뒷받침 된다.

한편, 재하판 중심으로부터 29cm 이상 떨어진 지점들(C, D지점)의 원형응력 및 수동저항의 감소 및 미미한 발현은 재하판으로부터 멀리 떨어질수록 그 지점의 셀내 원형응력이나 소성·수동변형의 영향이 점차 감소되기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

(3) 지오셀의 하중분산효과

지오셀 시스템은 앞서 언급된 흙/지오셀의 마찰저항, 이웃한 셀의 수동저항, 셀의 원형응력 등에 의해 재하하중에 따른 원지반 발생 토압분포를 작게하여 지반의 지지력을 증대시킨다. 본 연구에서는 그림 3와 같이 지오셀 보강지반과 동일 성토두께의 화강풍화토 치환지반에 대해 깊이별로 토압계를 매설한 후 평판재하시험에 의한 하중단계별 토압분포를 측정함으로써 지오셀 시스템의 지지력 개선 정도를 비교·분석하였다.

그림 7에서는 실험대상 지반에서 수행한 평판재하시험에 의한 하중강도-수직토압 관계 곡선을 보여준다. 그림 7에서 보듯이 지오셀 보강지반은 계측된 모든 깊이(재하판으로부터 25cm, 65cm)에서 하중강도에 상관없이 수직토압의 증가가 거의 없는 반면에 화강풍화토 치환지반은 하중강도의 변화에 따라 원지반 상단(재하판으로부터 깊이 25cm)에서 수직토압이 급격히 증가하는 특성을 나타낸다.

이러한 지오셀 지반의 토압분포특성은 앞서 언급된 지오셀의 3가지 지지력 개선 메카니즘에 의해 재하하중을 지오셀 복합지반 전체로 균등 분산시켜 재하전·후의 수직토압의 변화가 발생되지 않도록 함으로써 일어난다. 반면에 화강풍화토 치환지반은 재하판으로부터 깊이 25cm되는 지점의 경우, 지오셀 지반에 비해 하중분산효과의 현격한 차이로 하중강도의 변화에 따른 수직토압의 급격한 증가 경향을 보이며, 재하판으로부터 깊이 65cm 되는 지점의 경우, 실험에 사용된 재하판 크기로 인해 응력구근의 영향이 작게 미쳐 약간의 수직토압의 증가가 일어난 것으로 판단된다. 결과적으로 지오셀 보강지반은 하중강도(3.5kg/cm^2)작용시 동일 두께의 화강풍화토 치환지반에 비해 4배 정도의 하중분산 효과가 있는 것으로 평가되었다.

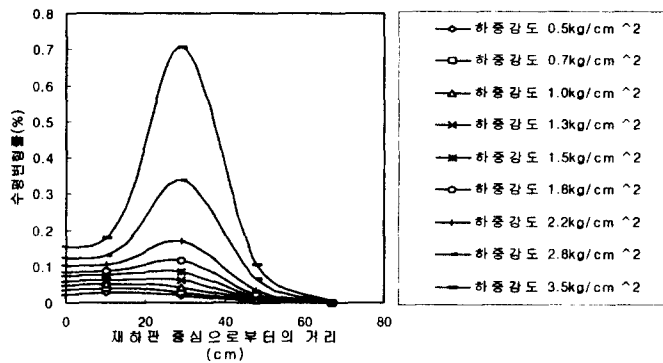


그림 6. 재하판 중심으로부터의 거리별 수평방향 변형률 관계곡선

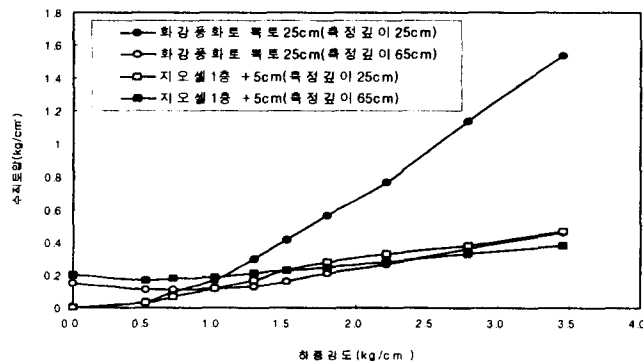


그림 7 평판재하시험에 의한 하중강도-수직토압 관계

4.2 지오셀 시스템의 평판재하시험 결과 및 분석

본절에서는 다양한 종류의 현장 평판재하시험을 수행하여 지오셀 시스템의 속채움 종류 및 다층효과, 복토층 효과, 원지반 강성도 효과 등의 영향 정도를 일반 화강토 치환지반과 비교·분석하여 연약지반 상 고속철도 노반강화 기법으로써 지오셀 시스템의 적합성을 평가하고자 하였다.

(1) 속채움 종류 및 다층효과의 영향

그림 8에서는 연약지반상의 평판재하시험에 의한 속채움 종류 및 지오셀 포설층수별 하중강도-침하량 관계곡선을 나타낸다. 그림 8에서 보듯이 개량지반의 경우, 원지반층은 0.6kg/cm^2 정도의 하중강도에서 극한지지력을 보이는 반면에 지오셀 보강지반은 극한 지지력 형태없이 하중강도 변화에 따른 선형적인 침하특성을 나타내었다. 또한, 이러한 경향은 원지반이 미개량된 지반에서도 유사하게 나타났다.

그림 8을 이용한 시험대상지반의 변형계수(E_v)는, 개량지반의 경우 하중강도 $0.5\sim 1.0\text{kg/cm}^2$ 정도에서 원지반 6.7kg/cm^2 , 지오셀 보강지반 $76.8\sim 101.1\text{kg/cm}^2$ 정도로 평가되어, 지오셀 보강지반은 원지반에 비해 속채움 종류 및 다층효과에 의한 11.5~15.1배의 지반보강효과가 있는 것으로 평가되었다. 이러한 지오셀 시스템의 보강효과는 지오셀의 보강원리(마찰력저항, 원형응력, 수동저항 등)에 의해 원지반의 지지력이 급격히 개선된다는 것을 보여주는 것이다.

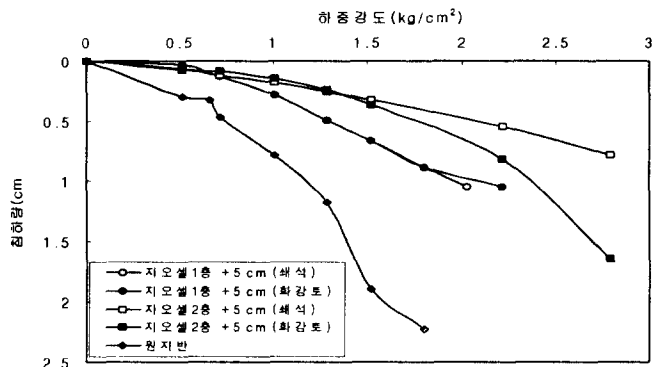
한편, 표 2에서는 속채움 종류 및 포설층수별 지오셀 보강지반의 지반반력계수(K_{30}) 및 하중강도 $0.5\sim 1.0\text{kg/cm}^2$ 에서의 변형계수(E_v)값을 나타낸다. 표 2에서 보듯이 지오셀 시스템의 다층에 의한 지지력 개선 효과는 작은 변형 조건인 지반반력계수(K_{30})의 경우 화강토에서 21%, 쇄석에서 20%로, 반면에 변형계수(E_v)의 경우 화강토에서 27%, 쇄석에서 24%로 상당히 작게 평가되었다. 이러한 지오셀 다층효과는 재하된 외력이나 상재하중이 지오셀 다층 포설지반의 최상단층에서 충분히 분산되어 다음층이 분담해야 할 하중이 급격히 작아짐으로써 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 경제성을 고려한 효율적인 지오셀의 포설은 각층의 하중분담률 및 최대 재하하중을 충분히 반영하여 결정해야 할 것으로 판단된다.

또한, 표 2와 그림 8에서 보듯이 채움재 종류별 지오셀 시스템의 지반보강효과는 쇄석의 지지력이 화강풍화토에 비해 오히려 작은 경향을 나타낸다. 이러한 원인은 재하응력의 토체내 전달이 화강풍화토에 비해 우수한 쇄석의 경우 하중재하에 따른 연약한 원지반층으로의 쇄석 관입에 의한 영향인 것으로 판단된다. 일반적으로 고속철도 시스템에서는 도상 또는 노상과 연약한 원지반 경계층 사이에 지오텍스타일과 같은 머드펌핑방지재를 포설하는 것을 원칙으로 한다. 따라서 위에서 언급된 쇄석의 관입현상은 실제 철도시공에서 발생되기 어려울 것으로 판단된다.

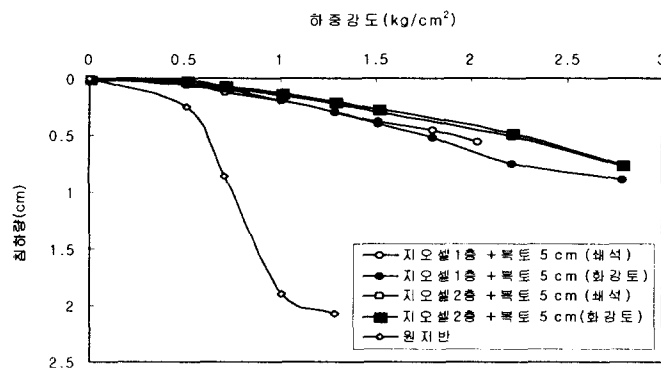
이상과 같은 지오셀 시스템의 속채움 종류 및 다층효과를 고려해 볼 때 지오셀을 이용한 고속철도의 노반 시스템은 지반반력계수 K_{30} 이 7kg/cm^2 인 것만을 고려하면 속채움재 화강풍화토, 포설층수 2층으로 하는 것이 바람직하나, 변형계수(E_v)를 고려할 경우 속채움재 화강풍화토, 포설층수 1층도 가능할 것으로 판단된다.

표 2. 속채움 종류 및 포설 층수별 K_{30} 및 E_v 값 (개량지반)

지오셀 층수 속채움 종류	1층		2층	
	K_{30} (kg/cm^3)	E_v (kg/cm^2)	K_{30} (kg/cm^3)	E_v (kg/cm^2)
화강풍화토	6.4	79.4	7.8	101.1
쇄 석	5.9	76.8	7.1	95.0



(a) 미개량 지반



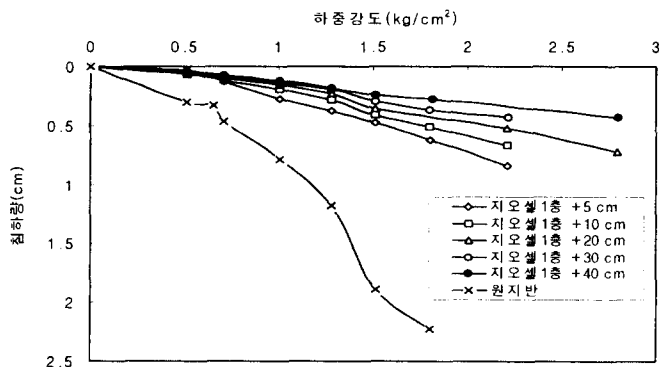
(b) 개량 지반

그림 8. 속채움 종류 및 포설층수별 하중강도-침하량 관계곡선

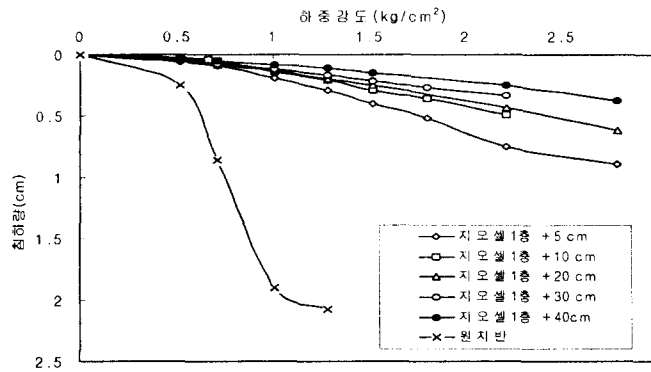
(2) 복토층의 영향

지오셀 시스템은 지오셀의 포설, 속채움재의 채움 및 다짐 등의 간단한 시공공정으로 이루어져 있다. 그러나 속채움재의 다짐은 지오셀의 형상적 특성에 기인하여 일반적인 장비로 다짐하는데 어려움이 있다. 현재 지오셀의 다짐시공은 백호우와 같은 장비를 이용하여 지오셀 상단의 복토두께가 2.5cm가 되도록 느슨한 상태의 속채움을 실시한 후, 다짐롤러로 지오셀 상단 복토층의 상대다짐밀도가 95%가 되도록 한다.

그림 9에서는 연약지반 개량·미개량지반의 평판재하시험에 의한 복토두께별 하중강도 - 침하량 관계 곡선을 나타낸다. 그림 9에서 보듯이 지오셀 복합지반은 지반개량 정도에 상관없이 전술한 속채움 종류 및 다짐효과의 재하실험결과와 유사하게 극한 지지력 형태없이 하중강도 변화에 따른 선형적인 침하특성을 나타낸다.



(a) 미개량 지반



(b) 개량 지반

그림 9. 복토두께별 하중강도-침하량 관계곡선

한편, 표 3에서는 복토두께별 지오셀 보강지반의 지반반력계수(K_{30}) 및 하중강도 $1.5 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 에서의 변형계수(E_v)값을 나타낸다. 표 3에서 보듯이 지오셀 시스템의 복토층 두께에 의한 지지력 개선 효과는 복토두께가 증가될수록 지지력 개선이 뚜렷하게 증가되는 경향을 나타낸다. 예로써, 복토두께 5cm를 기준으로 지반반력계수(K_{30})의 경우, 10cm에서 17%, 20cm에서 18%, 30cm에서 30%, 40cm에서 72% 정도로, 변형계수(E_v)의 경우, 10cm에서 71%, 20cm에서 92%, 30cm에서 200%, 40cm에서 250% 정도의 지지력 개선효과가 있는 것으로 평가되었다.

이러한 지오셀 복토층에 의한 지반보강효과는 복토층 다짐에 의한 지오셀내 속채움재 다짐밀도 상승과 복토층에 의한 하중분산 효과가 복합적으로 나타난 결과이다. 따라서 효율적인 지오셀의 복토두께는 경제성을 고려하여 적용현장에 맞는 복토두께를 선정해야 할 것으로 판단된다.

표 3. 복토두께별 K_{30} 및 E_v 값 (개량지반)

평가항목	지오셀 1층 포설				
	5cm	10cm	20cm	30cm	40cm
K_{30}	6.4	7.5	7.6	8.3	11.0
E_v	44.9	76.7	86.2	134.4	157.3

(3) 원지반의 강성도의 영향

Martin et al.(1995)은 지오셀 시스템에 대한 일반 도로노상의 강성지반과 연약지반에 대해 동일한 반복재하시험을 수행하여 강성지반의 경우 비보강변형의 50% 정도, 연약지반의 경우 40% 정도의 변형이 발생하여 지반보강효과가 원지반의 강성도에 따라 차이가 있다고 보고하였다. 본 연구에서는 지오셀 원지반의 강성도 변화에 따른 영향을 평가하고자 연약지반 미개량 및 개량지반을 대상으로 하여 동일 항목의 시험을 수행하였다.

표 4 및 그림 10에서는 평가항목별 지오셀 보강지반의 지반반력계수(K_{30}) 및 하중강도 $1.5 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 에서의 변형계수(E_v)값을 나타낸다. 표 4 및 그림 10에서 보듯이 원지반 지지력에 대한 강성도 차에 따른 지오셀 시스템의 지지력 개선정도를 지반반력계수(K_{30})를 이용하여 비교해 보면, 항목별로 미개량 지반의 경우 속채움 종류 및 다층효과에서 232~335%, 복토층 효과에서 253~376%로, 개량지반의 경우 속채움 종류 및 다층효과에서 181~271%, 복토층 효과에서 257~424% 정도로 나타나 대체적으로 원지반 강성도가 작을수록 지지력 보강효과가 큰 것으로 평가되었다. 이러한 지반 강성도 차에 따른 지지력 개선효과의 차이는 그림 7의 지오셀 시스템의 하중강도별 수직토압 분포특성에서 보듯이 지오셀의 하중분산효과에 의해서 실제 원지반이 받아야할 하중이 급격히 작아짐으로써 원지반이 연약할수록 그 개선효과가 두드러지기 때문인 것으로 사료된다.

(4) 지오셀 시스템의 지반보강효과

2장에서도 언급되었듯이 고속철도의 하부노반은 지반반력계수 K_{30} 이 7kg/cm^2 에 상응하는 E_v 값을 확보하는 것을 원칙으로 하고 있다. 이러한 노반의 공학적 특성이 시방서 규정에 만족되지 않을 경우 고속철도 시방서에서는 양질의 성토재로 치환하거나 지반개량의 실시를 권고하고 있다.

본 연구에서는 미개량 및 개량지반에 치환재로서 화강풍화토를 사용하여 복토두께를 25cm, 50cm, 75cm, 100cm 등으로 변화시켜가며 평판재하시험을 수행하여 고속철도 시방에 의해 양질의 성토재로 개량했을 경우 시방규정을 만족하는 지반의 치환성토높이와 이에 상응하는 지오셀의 포설단면을 평가하고자 하였다.

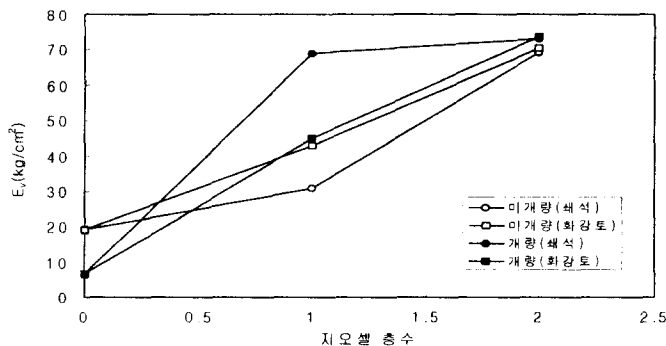
그림 11에서는 연약지반의 평판재하시험에 의한 치환두께별 하중강도-침하량 관계곡선을 나타낸다. 그림 11에서 보듯이 치환지반의 지지력은 복토두께가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 또한, 그림 12에서는 원지반 강성도 차에 따른 치환지반의 성토두께별 지반반력계수(K_{30}) 및 하중강도 $1.5\sim 2.0\text{kg/cm}^2$ 에서의 변형계수(E_v)값을 나타낸다. 그림 12에서 보듯이 변형계수(E_v)값은 원지반의 강성도차에 상관없이 흙 성토두께가 증가할수록 변형계수(E_v)가 급격히 증가하는 경향을 나타낸다.

한편, 표 4에서 보듯이 속채움재 화강풍화토, 복토두께 5cm인 지오셀 1층 및 2층의 K_{30} 및 E_v 값은 지오셀 1층인 경우 6.4kg/cm^3 , 44.9kg/cm^2 로, 지오셀 2층인 경우 7.8kg/cm^3 , 73.7kg/cm^2 로 평가되었다. 그림 12에서 보듯이 변형계수(E_v)에 의한 지오셀 단면은 비보강 치환지반과 비교하여 지오셀 1층 포설의 경우 비보강 치환두께 42.0cm, 지오셀 2층 포설의 경우 치환두께 60.0cm에 해당하는 것으로 나타나 각각 17cm(40%), 15cm(25%)의 성토량 절감효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 이러한 지오셀 시스템의 성토단면의 절감효과는 연약지반상 고속철도 성토체의 자중감소에 따른 역학적 안정과 시공규모 및 시공기간 단축 등에도 큰 기여가 기대된다.

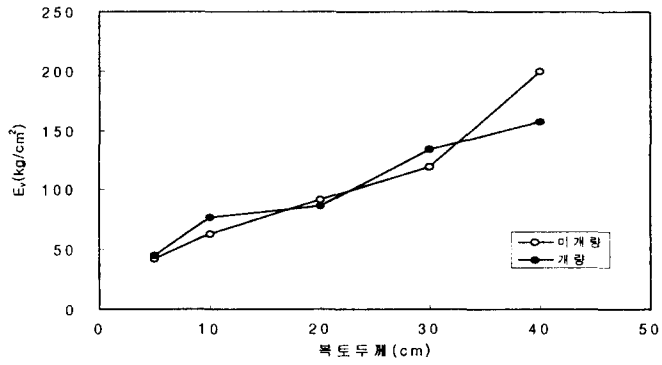
표 4 강성도 차에 따른 항목별 K_{30} 및 E_v 값

평가항목		대상지반		개량지반	
		미개량지반	개량지반	K_{30}	E_v
속채움 종류 및 다층효과	지오셀1층+5cm(화강토)	5.8	42.8	6.4	44.9
	지오셀1층+5cm(쇄석)	5.7	30.8	5.9	68.9
	지오셀2층+5cm(화강토)	7.4	70.5	7.8	73.7
	지오셀2층+5cm(쇄석)	6.0	69.3	7.1	73.2
복토층효과	지오셀1층+10cm	6.0	62.9	7.5	76.7
	지오셀1층+20cm	6.6	91.4	7.6	86.2
	지오셀1층+30cm	7.7	119.0	8.3	134.4
	지오셀1층+40cm	8.1	199.9	11.0	159.3
원지반	-	1.7	22.8	2.1	6.7

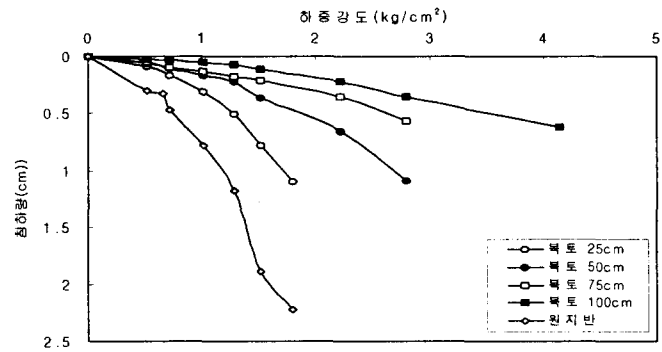
주)원지반의 경우 하중강도 $0.5\sim 1.0\text{kg/cm}^2$ 일 경우임.



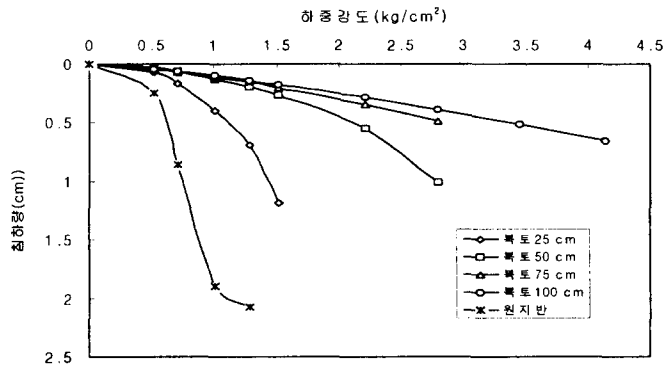
(a) 속채움 종류 및 다층효과



(b) 복토층 효과(화강풍화토)
그림 10. 강성도 차에 따른 항목별 E_v 관계곡선



(a) 미개량 지반



(b) 개량 지반

그림 11. 복토 두께별 하중강도-침하량 관계곡선

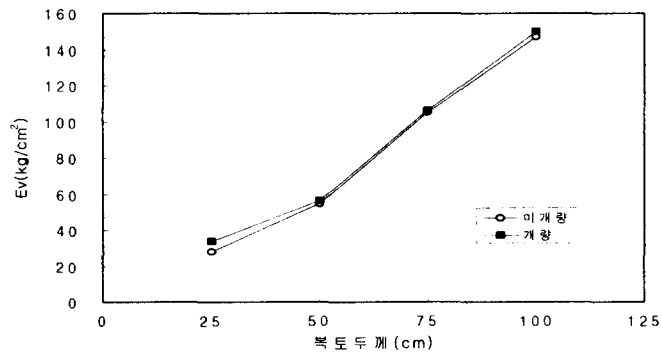


그림 12. 강성도 차에 따른 복토 두께별 E_v 관계곡선

5. 결 론

본 연구에서는 연약지반 구간 위를 통과하는 고속철도의 노반을 강화할 수 있는 지오셀 시스템에 대해 다양한 형태의 평판재하시험을 수행하여 지오셀 시스템의 하중전달 메카니즘, 속채움 종류 및 지오셀 층수, 복토층 두께, 원지반 강성도의 변화에 따른 보강효과, 마찰특성 등을 규명해 보고, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지오셀의 마찰저항은 하중강도 $3.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 평균 연직변형률 0.6%를 유발시켜 셀 단면적당 마찰력이 200kg 정도인 것으로 평가 되었고, 셀 하단에 비해 상단에서 크게 발현되는 분포특성을 나타낸다.
- 2) 원형응력 및 수동저항은 지오셀 내의 재하하중에 따른 흙의 변위진전과 밀접한 관련이 있으며, 수평방향 변형률이 원형응력이 우세한 재하판 아랫 지점의 경우 0.2%, 수동저항이 우세한 재하판 바로 옆 지점의 경우 0.7%로 나타나, 외력에 대한 셀의 저항이 흙의 수동저항에 의해서 발현되는 것으로 평가되었다.
- 3) 지오셀 시스템은 재하판으로부터 깊이 25cm, 하중강도 $3.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 경우, 동일 두께의 화강풍화토 치환지반에 비해 4배 정도의 지지력 개선효과가 있는 것으로 평가되었다.
- 4) 지오셀의 다층효과는 연약지반 개량지반의 경우, 변형계수(E_v)값에 의한 비교에서 화강풍화토에서 27%, 쇄석에서 24%로 상당히 작게 나타나, 효율적인 지오셀의 포설은 각층의 하중분담률 및 최대 재하하중을 충분히 반영하여 결정해야 할 것으로 평가되었다.
- 5) 지오셀의 복토층 효과는 복토두께 5cm를 기준으로 변형계수(E_v)의 경우, 10cm에서 71%, 20cm에서 92%, 30cm에서 200%, 40cm에서 250% 정도로 복토두께가 증가될수록 지지력 개선효과가 있는 것으로 평가되었다.
- 6) 지오셀의 원지반 강성도 효과는 지오셀의 하중분산효과에 의해서 실제 원지반이 받아야할 하중이 급격히 작아짐으로써 원지반이 연약할수록 그 개선효과가 두드러져 원지반 강성도가 작을수록 지지력 보강효과가 큰 것으로 평가되었다.
- 7) 지오셀 시스템은 화강풍화토 치환지반과 비교하여 지오셀 1층 포설의 경우 치환두께 42.0cm, 지오셀 2층 포설의 경우 치환두께 60.0cm와 동일한 지지력 특성을 보여 각각 화강풍화토 지반의 40%, 25%의 성토량 절감효과가 있는 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 한국지반공학회 (1998), 토목섬유, 한국지반공학회 지반공학시리즈 9.
2. Koerner, R. E. (1994), Designing with Geosynthetics, Prentice Hall, Englewood Cliff, New Jersey.
3. Li, D., and Selig, E. T. (1995), "Evaluation and Remediation of Potential Realway Subgrade Problems under Repeated Heavy Axle Loads", Rep. No. R-884, Assoc. of Am. Railroads, Transp. Technol. Ctr., Pueblo, Colorado.
4. Office for Research and Experiments(ORE) (1970), "Repeated Loading of Clay and Track Foundation Design", Rep. No. D71/RP 12, ORE f the Int. Union of Railways, Utrecht, The Netherlands.