

지반보강재로서 페타이어의 보강 효과

Reinforcing Effect of Waste Tires As Reinforcement Material

윤여원¹⁾, Yeo-Won Yoon, 최경순²⁾, Kyung-Soon Choi, 천성한³⁾, Sung-Han Cheon

¹⁾인하대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ.)

²⁾에스코컨설턴트 (Engineer, ESCO Engineers & Consultant Co.,Ltd.)

³⁾인하대학교 박사과정, 인천국제공항공사(Graduate School, Inha Univ., Incheon Int'l Airport Co.)

SYNOPSIS : This study presented the reinforcing effect of sands by using newly devised 3D Tirecell. Plate loading tests for sand were conducted for different relative density and number of reinforced layers. From the tests, the ultimate bearing capacity of reinforced sand increased with increasing relative densities. The effect of reinforced layers with 0.4B interval is limited to 2 layers and further reinforcing effects can not be obtained beyond 3 layers. Especially the bearing capacity increased remarkably at 1 layer of Tirecell reinforcement and the degree of increase was small for 1 layer to 2 layers increase of reinforcement. Test results show that the reinforcing effect of Tirecell is prominent compared with commercial geocell in the literature.

Key words : Reinforcement, Geocell, Waste tire, Tirecell

1. 서론

오늘날 전세계적으로 자동차 산업의 성장과 국민생활수준의 향상으로 고무폐기물의 대부분을 차지하고 있는 페타이어의 발생량이 매년 증가되고 있고 우리나라는 1998년이래 매년 2000만개 이상의 페타이어가 발생되고 있으며 이러한 경향으로 볼 때 앞으로는 더욱 더 폐기되어야 할 페타이어의 양은 증대되어 이에 대한 처리가 시급한 문제로 부각되고 있다. 페타이어를 그대로 방치할 경우 주변 경관의 손상, 해충의 서식처 제공, 화재 발생의 위험, 화재에 의한 인적·물적 피해 등의 환경문제와 아울러 우리 나라처럼 국토가 좁은 여건 하에서 야적장 확보의 어려움 등 그 처리에 따른 여러 가지 문제가 발생된다. 현재 사용되고 있는 페타이어의 처리기술로는 매립, 재생타이어 생산, 소각처리, 재생고무 이용, 열분해 등이 있으나 여러 면에서 문제가 있고 최근 국내외에서 수행된 페타이어의 재활용율을 높이기 위한 연구는 페타이어로부터 탄소추출, 페타이어를 섞은 아스팔트, 보도블럭, 고무 콘크리트 개발, 경량성토재, 도로의 동상방지층 등에 대한 실험적 연구가 발표되고 있으나 실질적인 실용화가 이루어지지 못하고 있다(Humphrey와 Manion, 1992; Foose 등, 1996; Nguyen, 1996; Garga와 O'Shaughnessy, 2000; 김규래, 2001). 페타이어 처리를 위하여 다양한 기술도입, 기술개발 및 처리 공정에 대한 연구가 이루어지고는 있지만 경제성과 효율성을 만족하는 처리 기술은 아직 없는 실정으로 폐자원의 재활용 측면에서 페타이어의 재활용율을 높이기 위한 기술개발 및 연구가 국내 여건상 절실히 요구된다. 따라서 본 연구에서는 지오셀 시스템과 같은 기능을 할 수 있는 윤여원(2002)에 의해 고안된 페타이어를 이용한 타이어셀이 지반에 보강되었을 때 지반에 미치는 지지력 증가 효과와 침하 감소 효과를 구명하고 이를 상업용 지오셀과 비교하여 타이어셀의 지반보강 적용 가능성을 고찰하고자 한다.

2. 지오셀과 타이어셀의 특징

2.1 지오셀

지오셀은 단위 셀 안에 채움재를 채워 다짐함으로써 공학적 특성을 증대시켜 지반의 지지력 및 전단강도를 극대화시킨 3차원적인 복합 구조체이다(Fig. 1). 지반에 집중하중을 가하면 일반적으로 Terzaghi 이론에 따라 파괴가 일어나지만 Fig. 1과 같이 격벽에 의하여 구속되면 마치 격벽이 토체의 주변을 둘러싸고 있는 벽체의 형태로 작용하며 주변 셀에서도 이에 대응하는 수평응력으로 격벽을 밀어내고 있기 때문에 격벽은 중립위치에 있게 되어 자립성을 유지하며 셀에 채워진 흙은 마치 슬래브 형태로 작용하여 하중분산효과를 얻을 수 있으며 수직방향의 변위를 구속하고 일반적인 지반 파괴 개념을 개선하여 지반 지지력을 향상시킬 수 있다.

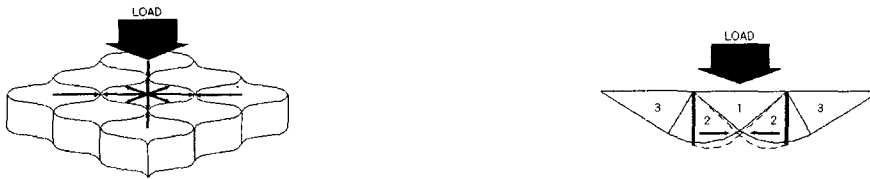


Fig. 1

2.2 페타이어셀

지오셀과 타이어셀은 그 형상면에서는 차이가 있으나 흙을 구속하여 전단강도를 향상시킬 뿐만 아니라 사용면에서도 거의 모든 장소에 공통적으로 적용할 수 있다는 장점이 있다. 타이어셀에 의한 지반 보강효과를 연구하기 위하여 우선 페타이어의 양측면(sidewall)을 자르게 되면 가운데가 구멍이 뚫린 원통형 모양의 트레드 부분만 남는다. 그 트레드 폭의 임의의 중간 부분을 선정하여 드릴을 이용해 구멍을 뚫고 셀 모양을 8자 모양으로 만들기 위해 정확히 그 구멍의 반대편에 구멍을 뚫어 볼트와 너트로 접합을 하면 8자 모양의 셀이 하나 만들어진다(Yoon, 2002). 이러한 셀을 16개 만들어서 볼트와 너트를 이용해 연결 부위를 모두 연결해서 하나의 타이어셀 매트를 제작하였다(Yoon, 2002). 본 연구에서 사용된 타이어셀은 소형트럭용 타이어(LT)이며 Table 1과 Fig. 2에 기본 내용을 요약하였으며, 이 그림에서 단위는 cm이다.

Table 1

1. Tirecell dimension	19 cm × 73 cm × 13.5 cm
2. Tirecell mat dimension	152 cm × 146 cm × 13.5 cm
3. Tirecell volume	2721.6 cm ³
4. Tirecell mat volume	43545.6 cm ³

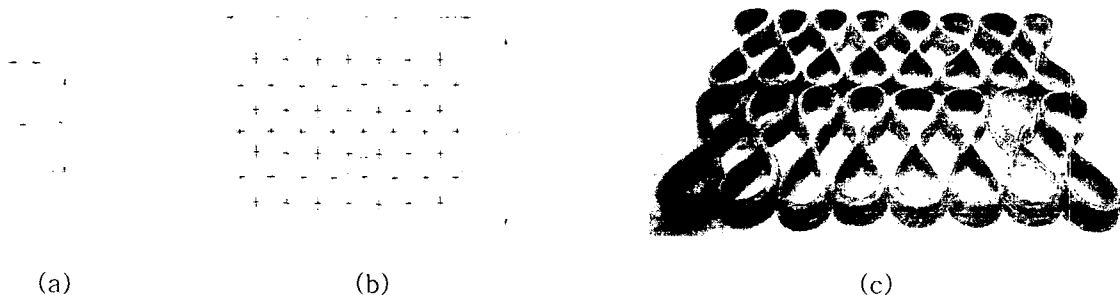


Fig. 2

3. 시료 및 실험

3.1 시료

본 연구에서 모형지반 조성을 위해 사용한 시료는 인천 송도 해안지역에서 채취한 모래를 사용하였으며 입도분포를 인위적으로 조절하지 않고 자연상태 그대로의 입도분포를 유지하였다. 사용된 시료의 입도분포곡선은 Fig. 3과 같고 대표적인 시료의 특성치를 Table 2에 나타내었으며 시료는 통일분류법상 SP로 분류되었다.

Table 2

Dr (%)	ϕ (°)	w (%)	C_u	C_c	G_s	$\gamma_{d, max}$ (g/cm^3)	$\gamma_{d, min}$ (g/cm^3)
40	34.6	0	2.31	1.0	2.65	1.617	1.353
55	35.5						
70	36.5						

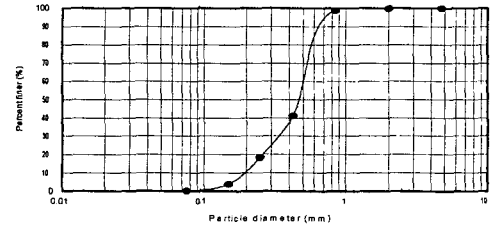


Fig. 3

3.2 토조 및 지반조성

현장 지반조건을 재현하기 위해 사용한 토조는 H형강과 Γ 자형앵글을 사용하여 제작하였고 형강의 모든 연결부위는 고강도 볼트를 사용하여 연결해서 전체 토조의 틀을 제작하였다. 그리고 틀 사이사이에 토류판을 끼워 넣어 직육면체의 박스형태로 만들었으며 그 크기는 폭(2m)× 길이(3m)× 높이(1.5m)이고 실제 실험에 사용한 공간은 폭(2m)× 길이(2m)× 높이(1.5m)이다(Fig. 4). 토조는 지지력에 미치는 경계면 효과 유무를 FEM해석을 수행한 후 제작되었으며 재하시험 중 침하계측 결과에서도 경계면의 영향은 전혀 없는 것으로 나타났다.

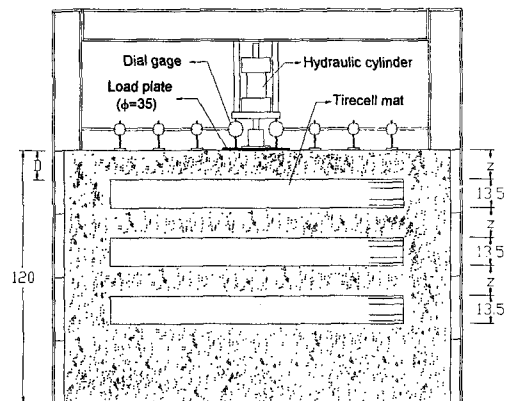
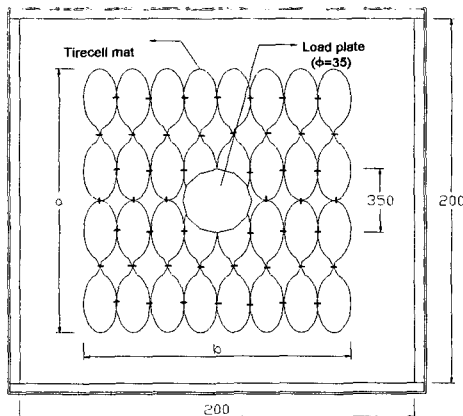


Fig. 4

토조내 지반조성을 위한 모래의 다짐은 Undercompaction 방법을 사용하였으며 Undercompaction 개념을 이용하여 각 층의 높이를 계산한 후에 토조 안벽에 그 깊이를 표시하여 놓고 그 선 높이까지 다짐봉을 사용하여 바깥쪽부터 안쪽으로 돌아가면서 균일하게 다짐을 하였다. 또한 균일한 상대밀도로 지반을 조성하기 위하여 계량된 모래를 9개의 격실로 구분된 틀 안에 넣은 후 다짐을 수행하였다. 전체 모형지반의 높이는 120cm, 폭은

200cm, 길이는 200cm이며, 상대밀도가 40%, 55%, 70%인 세 가지 경우의 지반을 조성하였다. 상대밀도는 페타이어셀의 부피를 감안하여 지반을 조성하였다.

3.3 재하시험

재하시험은 직경 35cm의 원형 재하판을 모형 지반 가운데에 놓고 유압기를 사용하여 단조하중(monotonous load)을 재하하는 방법으로써 현장에서의 평판재하시험을 재현하였다. 하중재하는 최초하중 4~6kg/cm²에서 5분마다 4~6kg/cm²씩 증가시켰으며 재하판의 직경의 15% 내외(약40mm)에 해당하는 침하가 발생하면 재하를 중지하였다. 본 연구에서 수행한 시험은 크게 상대밀도 40%, 55%, 70%인 무보강 지반, 상대밀도 55%인 지반에 대하여 보강층간 간격에 따른 재하시험을 수행하였다. 재하시험을 통하여 지반 보강 효과를 판단하는 방법으로는 지지력비(Bearing Capacity Ratio, BCR)와 침하감소율(Settlement Reduction Factor, SRF)이 있으며 BCR과 SRF는 각각 식 (1)과 식(2)로 표현된다.

$$BCR = q_r / q_o \quad (1)$$

$$SRF = s_r / s_o \quad (2)$$

위 식에서 q_o 은 무보강지반의 극한지지력, q_r 은 보강지반의 극한지지력, s_o 는 무보강지반의 극한지지력에 대한 침하량, s_r 은 무보강지반의 극한지지력과 일치하는 지지력에 대한 보강지반의 침하량이다. 따라서 BCR이 클수록 지반보강효과가 큰 것을 나타내며 SRF가 작을수록 지반보강으로 인한 침하 경감효과가 큼을 알 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 상대밀도

Fig. 5는 무보강 지반의 재하시험결과이며 Fig. 6은 보강층수 N=1, 복토두께 0.2B, 재하폭 4.34B인 조건인 보강 모래 지반에서 상대밀도의 변화에 대한 BCR과 SRF 결과이다.

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 상대밀도가 증가할수록 극한지지력은 증가하나 BCR은 상대밀도가 증가할수록 감소하므로 지지력 증가 효과는 감소한다고 할 수 있다. 또한 SRF는 침하 감소 효과면에서는 상대밀도가 증가할수록 침하 감소 효과가 줄어든다고 할 수 있다. 이것은 상대밀도가 낮은 무보강 지반인 경우 지반이 느슨한 상태이기 때문에 지반 강성이 작은데 이러한 지반에 타이어셀과 같은 보강체를 넣으면 지반의 강성이 크게 증가하여 지반은 큰 지지력과 작은 침하를 나타나게 되나 상대밀도가 높은 비보강 지반인 경우 지반 자체의 강성이 커서 그 자체만으로도 하중에 견딜 수 있는 큰 강성을 가지고 있고 이런 지반에 페타이어셀 매트 같은 강성체를 넣으면 지반 강성의 증가는 작게 된다.

4.2 보강층수

등간격으로 배치된 페타이어 매트와 보강층 수에 따른 보강효과를 고찰하기 위하여 모래 지반에 $b/B=4.34$, $D_r=55\%$ 인 상태로 타이어셀 간격을 0.4B로 하여 재하시험을 수행하였다. 여기서 간격을 0.4B로 한 이유는 다음 절에 나타낸 참고문헌에서의 결과와 비교를 위한 것이다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 보강재를 등간격 0.4B로 배치하여 재하시험을 한 경우에 대한 BCR과 SRF를 나타낸 것으로 그림에서 보강층 수가 한 층인 경우 지지력은 약 1.7배 증가하며 층 수가 증가함에 따라 BCR이 1.9에 근접하고 있다. 등간격 0.4B의 경우 보강층 수가 2개층에서 3개층으로 증가함에 따라 BCR과 SRF가 거의 수렴함을 짐작할 수 있으며 이로부터 보강층의 수가 3개층 이상은 보강효과가 없음을 알 수 있다. 또한 SRF는 한 개 층 보강의 경우 약 0.4로서 침하가 60% 경감됨을 알 수 있으며 이러한 침하경감은 층수가 증가함에 따라 수렴하게 된다.

수 있으며 이러한 침가정감은 층수가 증가함에 따라 수렴하게 된다.

4.3 지오셀과의 비교

본 절에서는 상업용 Geoweb으로 지반 보강 효과를 연구한 Guido와 Christou(1988)의 연구결과를 본 페타이어 매트와 지반보강 효과와 비교 고찰하였다(Fig.9). 본 연구에서 사용된 타이어셀과 상업용 지오웹을 정확히 비교하는 것은 보강셀의 높이와 재료의 특성 등이 다르므로 대단히 어려운 일이라 할 수 있으나 BCR과 SRF가 무차원화된 값이므로 보강효과만을 비교하는데는 무리가 없을 것으로 생각된다. 또한 여기서는 지반보강효과를 비교해 봄으로써 폐자원 재활용의 효용성을 가늠할 수 있을 것으로 생각된다.

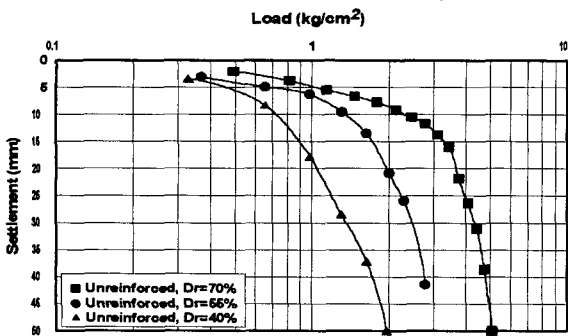


Fig. 5

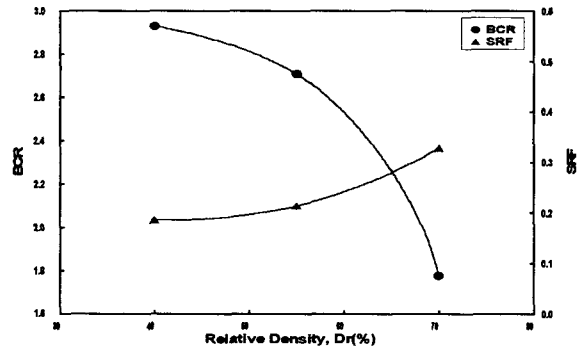


Fig. 6

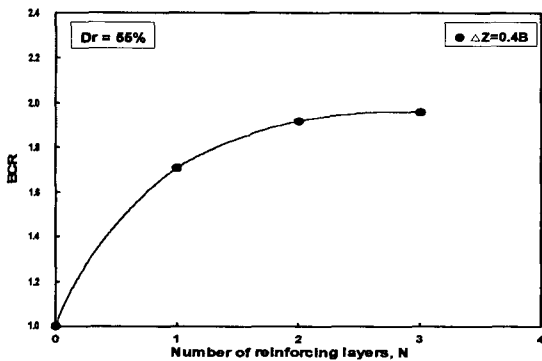


Fig. 7

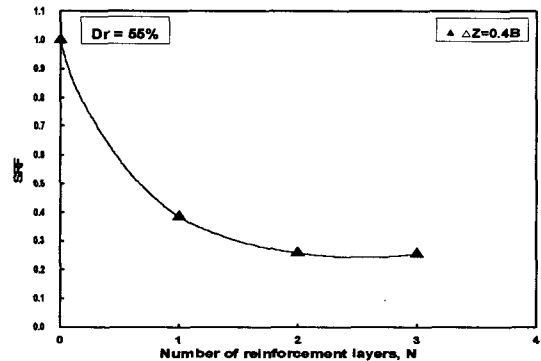


Fig. 8

2층 보강한 경우 타이어셀과 지오웹 보강시 BCR은 각각 1.92와 1.40으로 타이어셀 보강시 BCR이 약 1.4배 더 크다. 그러나 지오웹의 실험조건은 $z/B=0.25$, $b/B=2$, $Dr=55\%$ 이고 페타이어셀 매트의 실험조건은 $z/B=0.4$, $b/B=4.34$, $Dr=55\%$ 인데 페타이어셀 매트의 실험시 등간격이 $0.4B$ 가 아닌 $0.25B$ 로 했을 경우 페타이어셀 매트 실험조건의 $0.4B$ 보다는 BCR이 더 크게 나올 것이므로 정확한 비교를 위해 실험조건을 맞추어서 페타이어셀 매트의 실험을 등간격 $0.4B$ 로 했을 경우 Fig. 9의 타이어셀 보강층수에 대한 BCR 그래프는 더 위쪽으로 올라갈 것이다. 따라서 모든 조건이 같은 상태에서 실험을 했다면 두 보강재의 지지력 증가 효과 차이는 Fig. 9보다 더 크게 나고 2층 보강인 경우 1.4배 이상의 BCR차이가 있을 것이다. SRF는 페타이어셀 매트와 지오웹 보강시 보강층수가 증가할수록 두 보강재의 차이가 점점 증가한다. 2층인 경우 페타이어셀 매트와 지오웹 보강시 SRF 은 각각 0.26, 0.63으로 페타이어셀 매트 보강시 SRF가 약 2.4배 더 작고 침하는 2배가 더 감소된다. SRF도 마찬가지로 실험조건을 맞추어서 실험을 하면 Fig. 9의 타이어셀 보강층 수에 대한 SRF그래프는 더 아래쪽으로 내

려갈 것이다. 따라서 모든 조건이 같은 상태에서 실험을 했다면 두 보강재의 침하 감소 효과 차이는 Fig. 9보다 더 크게 나고 2층 보강인 경우 2.4배 이상의 SRF 차이가 있을 것이다.

이상의 결과로 타이어셀은 일반 상업용 지오웹보다 지지력 증가면과 침하 감소면에서 탁월한 효과를 보이는데 이것은 지오웹을 만드는 섬유의 강성보다 타이어의 강성이 훨씬 크기 때문에 일어나는 현상이라 판단된다.

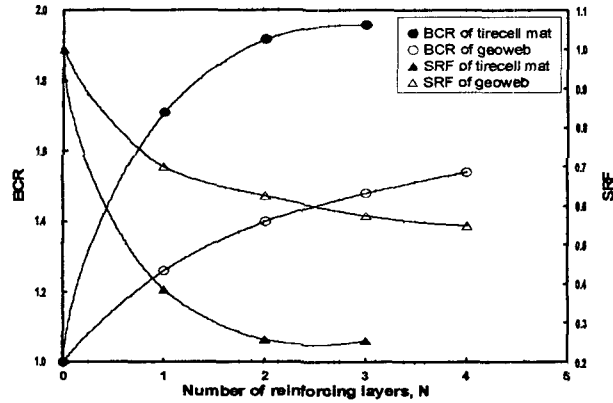


Fig. 9

5. 결론

본 연구에서는 새로이 고안된 타이어셀에 대한 재하시험을 수행하였다. 재하시험 결과 타이어셀에 의한 지반은 상대밀도가 증가할수록 극한지지력은 증가하고 침하량은 감소하나 지지력비(BCR)와 침하감소 효과를 나타내는 침하비(SRF)는 밀도가 증가할수록 감소하였다. 또한 타이어셀은 일반 상업용 지오웹보다 지지력 증가면과 침하 감소면에서 탁월한 효과를 보였으며 이러한 현상은 지오웹을 만드는 섬유의 강성보다 타이어의 강성이 훨씬 크기 때문으로 판단되었으며 장차 타이어셀이 지반보강에 우수한 재료로 사용할 수 있음을 간접적으로 입증하였다.

참고문헌

1. 김규래(2001), "옹벽 뒤채움재로서 페타이어 활용방안에 관한 연구", 한양대학교 산업대학원 석사학위논문.
2. 윤여원(2002), 페타이어를 활용한 지반 강화 성토공법 (2차 중간보고서), 대림산업(주).
3. Foose, G.J., Benson, C.H. and Boscher P.J.(1996), "Sand reinforced with shredded waste tire", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, pp.760~767.
4. Garga V.K. and O'Shaughnessy V.(2000), "Tire-reinforced earth fill. Part1: Construction of a test fill, performance and retaining wall design", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, pp.75~96.
5. Humphrey, D.N. and Manion, W.P.(1992), "Properties of tire chips for light weight fill", *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Special Publication*, No. 30, Vol. 2, pp.1345~1355.
6. Nguyen T.H.(1996), "Utilization of used tyres in civil engineering - The Pneusol 'Tyresoil'", *Proc. of the 2nd Int'l Congress on Environmental Geotechnics*, pp.809~814.
7. Vito A. Gudio and Sotirakis N. Christou(1998), "Bearing Capacity and Settlement Characteristics of Geoweb-Reinforced Earth Slabs", *ASCE 1988 Spring Meeting*, pp.21~36.