

지반보강재로서 페타이어의 활용; (1) 지반보강 효과

Utilization of Waste Tires as Soil Reinforcement; (1) Soil Reinforcing Effect

윤 여 원¹ Yoon, Yeo-Won

최 경 순² Choi, Kyung-Soon

윤 길 림³ Yoon, Gil-Lim

김 방 식⁴ Kim, Bang-Sik

Abstract

This paper is to investigate the reinforcing effects of newly devised Tire-cell mat made of waste tires in sand. Parametric study on number of connection bolts between Tirecells, relative density of sand, embedded depth, number of reinforced layers and width of Tirecell mat was made by using plate loading tests. It is found that the number of connection bolt was enough to maintain the given pressure. The bearing capacity ratio(BCR), which is defined as the rate of ultimate bearing capacity of reinforced soil to that of unreinforced soil, is the highest at the lowest density. And the reinforcing effect can be obtained in case of embedded depth within $1.0B$, where B is loading width. Also settlement reduction is the highest at the lowest density of sand. The effect of number of Tirecell reinforced layers with $0.4B$ to $0.5B$ 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 reinforcement and the degree of increase was small from 1 layer to 2 layers of reinforcement. The effect of mat width of Tirecell was not significant because of high stiffness of Tirecell although the maximum bearing capacity was shown at the $2.0B$ mat width and the reinforcing effects of Tirecell, in general, was prominent compared with those of commercial Geoweb.

요 지

본 연구에서는 페타이어를 활용하여 새롭게 고안한 타이어셀 매트와 모래지반 보강효과를 알아보기 위하여 다양한 조건의 평판재하시험을 수행하였다. 재하시험조건은 셀 간의 연결을 위한 볼트 수, 상대밀도, 복토두께, 보강층수, 타이어셀 매트 폭을 변수로 보강효과를 조사하였다. 재하시험 결과 연결용 볼트의 수는 지지력에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 1개의 볼트로 주어진 하중을 충분히 전달 수 있었다. 보강토의 극한지지력과 무보강토의 극한지지력의 비로 정의되는 지지력비(BCR)는 낮은 밀도에서 최대값을 나타내었다. 또한 극한상태에서의 침하감소효과도 낮은 밀도에서 큰 것으로 나타났다. 복토에 따른 보강효과는 복토두께가 $1.0B$ 이내에서 보강효과를 얻을 수 있었으나 그 이상에서는 보강효과가 나타나지 않았다. 보강층의 간격이 재하판폭의 0.4내지 0.5배일 경우 보강효과는 보강층이 2층일 때까지는 보강효과가 있으나 3층 이상에서는 효과가 없는 것으로 나타났다. 특히 보강층이 1개층일 때 지지력 증가 효과가 크며 2개층으로 증가함에 따라 증가율은 저하되는 것으로 나타났다. 타이어셀 매트폭이 $2.0B$ 에서 최대지지력을 보였으나 매트폭의 영향은 타이어셀의 강성이 크기 때문에 미소하였다. 타이어셀 매트의 지반보강효과는 문헌상의 상업용 지오웹과 비교하여 뛰어난 것으로 나타났다.

Keywords : Bearing capacity, Plate load test, Settlement, Reinforcement, Waste tire

1 정회원, 인하대학교 환경토목공학부 부교수 (Member, Assoc. Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Inha Univ., yoonyw@inha.ac.kr)

2 정회원, 에스코 컨설턴트 (Member, ESCO Consultant)

3 정회원, 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 책임연구원 (Member, Principal researcher, Geotech team)

4 정회원, 인하대학교 환경토목공학부 박사과정, 충주대학교 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Choongju Univ.)

1. 서론

전 세계적으로 매년 수십 억 개에 달하는 페타이어가 발생하고 있으며 미국의 경우를 보더라도 매년 5천만 개가 발생한다고 보고되고 있다(Garga와 O'Shaughnessy, 2000). 국내의 경우 그 수가 1998년 이후 약 2,000만개에 이르고 있다(한국자원재생공사, 2002). 국내의 페타이어 회수비율은 약 40~80%이며 전량 수거되고 있지는 못한 형편이다. 페타이어는 야외 적치 등으로 미관을 해칠 뿐만 아니라 각종 병원체의 전달 매개체인 동물의 서식지역활을 하게 되어 여러 가지로 사회적 문제를 야기하고 있다. 최근 국내외에서 수행된 지반공학 관련분야와 관련된 페타이어의 재활용율을 높이기 위한 연구는 타이어 칩에 의한 경량성토재, 타이어체의 한쪽 측면(sidewall)을 제거하거나 타이어를 그대로 연결하여 옹벽 혹은 성토에 사용, 성토층의 배수재, 지반보강재 등에 대한 현장 적용 및 실험적 연구가 발표된 바 있으며(Humphrey와 Manion, 1992; Foose 등, 1996; Nguyen, 1996; Garga와 O'Shaughnessy, 2000; Gerscovich 등, 2001; 김규래, 2001; Westerberg와 Macsik, 2002; 윤여원 등, 2003), Garga와 O'Shaughnessy(2000)는 미주, 유럽에서의 토공구조물에 타이어를 실제 적용한 다양한 사례를 소개한 바 있다. 타이어는 트레드(tread)내부에 다수의 강선을 포함하고 있어서 압력에 저항할 수 있는 성질과 반영구적인 수명을 흙의 보강기능에 효과적으로 이용할 수 있으며, 동시에 페타이어의 적치로 인한 환경문제를 경감할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구는 페타이어를 보다 효율적으로 토목공사에 활용하기 위한 연구로서 현재 지반보강 또는 옹벽 등으로 사용되고 있는 지오셀(Geocell)과 유사한 형태의 타이어셀(Tirecell[®])을 고안하였다. 타이어셀의 지반보강 효과를 알아보기 위하여 모래지반에서 상대밀도, 복토두께, 보강매트의 크기, 보강층 간격 등의 변수에 따른 지반보강 효과를 고찰하였으며 그 결과를 상업용 보강재와 비교하였다.

2. 지반보강재로서 페타이어

지반보강재로는 geotextiles(토목섬유), 지오그리드, 지오네트, 지오멤브레인, geo-synthetic clay liners, 지오파이프, 지반복합재료, 기타 등으로 분류하고 있다(Koerner, 1994). 이 중 지오셀은 기타 지반보강재로서 분류하고

있으며 현재 옹벽 및 토류구조물의 공사에 많이 사용되고 있다.

2.1 지오셀

흙의 구속은 흙의 전단강도를 향상시키며 구속으로 인하여 향상된 전단강도는 훨씬 증가된 지지력을 제공하게 된다. 이러한 셀식 구속 개념은 1970년대에 미국 공병단에 의하여 개발되었으며 주로 차륜하중을 받는 해변가의 조립질의 재료를 안정화하는데 적용되었다. 그 후 상업용으로 소개되어 여러 분야에 사용이 확대되었다. 즉, 도로 기층 혹은 자갈길의 강화, 성토제방의 기층 강화, 사면의 침식 억제, 수로 라이닝, 옹벽 등에 활용되고 있다. 공장 제작된 유연한 폴리머로 된 지반 구속용 재료는 폴리머 쉬트의 띠를 서로 초음파 용접하여 별집모양으로 만든 것으로 북 아메리카에서 1980년대 초반부터 사용되고 있으며 토목섬유의 분류시 지오셀로 분류하고 있다.

지오셀로 보강된 지반에 집중하중을 가하면 마치 격벽이 토체의 주변을 둘러싸고 있는 벽체의 형태로 작용하며 주변 셀에서도 이에 대응하는 수평응력으로 격벽을 밀어내고 있기 때문에 격벽은 중립위치에 있게되어 자립성을 유지하며 셀에 채워진 흙은 마치 슬래브형태로 작용하여 하중분산효과를 얻을 수 있다. 그러므로 지오셀은 전술한 수평방향의 변위를 구속하고 일반적인 흙 파괴 개념을 개선하여 지반의 지지력을 향상시킬 수 있다. 지오셀에 대한 연구가 그 동안 국내외에서 이루어져 왔으며, 그 사례로는 Rea와 Mitchell(1978), Jamned 등(1986), Guido와 Christou(1988), Bathurst와 Jarrett(1988), Mhaiskar와 Mandal(1992), Krishnaswamy 등(2000), Dash 등(2001), 이진웅과 이종덕 등(1993), 이상구(1999), 김진만 등(2002), 윤여원 등(2003), 기타 여러 연구가 있다.

2.2 타이어 셀

본 연구에서는 지오셀과 마찬가지로 그물망 형태로써 흙을 셀 안에 구속하도록 타이어를 지반보강 목적에 이용하도록 그림 2와 같이 고안된 타이어셀을 다수 연결한 타이어셀 매트의 보강효과를 고찰하였다. 이러한 타이어셀은 그림 1과 같이 타이어의 양 측면을 절단하고 원형의 트레드 부분을 더 작은 8자 모양의 셀로 분할하여 만들어진 것이다. 지오셀과 타이어셀은 그림 2에 나타

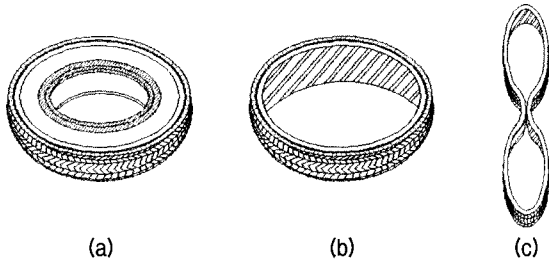


그림 1. 타이어셀의 구성

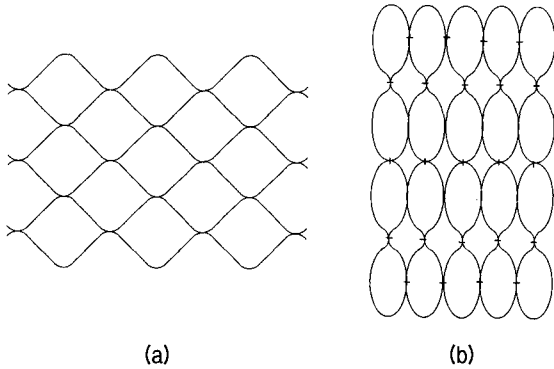


그림 2. (a)지오셀과 (b)타이어셀의 평면

넨 바와 같이 형상면에서는 차이가 있으나 흙을 구속하여 전단강도를 향상시킬 뿐만 아니라 사용 면에서도 거의 모든 장소에 공통적으로 적용할 수 있다는 장점이 있다.

2.3 페타이어의 특성

타이어는 고온경화 고무로 제조되며 고무에는 보강 섬유 끈, 고강도 철 혹은 직물 띠 그리고 고강도 철사로 보강된 비드를 포함한다. 비드는 고무로 덮은 금속철사 혹은 쉽게 변형되지 않는 꼬아 만든 끈으로 구성된다. 타이어내의 직물은 보통 꼬아놓은 레이온 줄로 만들어져 있으며 요즈음 사용되고 있는 타이어는 전체 무게의 9.8~12.5%가 철사로 되어 있다(Humphrey, 1996).

Leclercq 등(1990)에 의하면 타이어는 폴리에스터와 고온경화 고무로 되어 있으므로 통상적으로 부식의 영향을 받지 않는다. 그러나 타이어 재료의 초기의 역학적 성질은 물리·화학적 노화(aging), 자외선 노출(UV radiation), 크리프, 시공 중의 손상 등에 영향을 받을 수도 있다. 물리·화학적 노화는 가수분해되는 폴리에스터와 폴리아미드의 화학적 특성의 결과로서 발생하며 보강된 구조물의 수명이 다하기 전에는 아마 결코 관찰되지 않을 것이다. 또한 자외선노출과 오존의 영향을 받

기 쉬우며 연소가능한 재료이나 자외선의 영향은 흙으로 덮여있게 되면 거의 영향을 받지 않으며 WYMCC(The West Yorkshire Metropolitan County Council)에서의 시험에 의하면 연소에도 문제가 되지 않는 것으로 알려지고 있다. pH가 약 1정도의 강한 산은 고무를 파괴시키지만 산성의 지표수라 할지라도 보통 pH는 4와 5사이로 알려져 있다. 이러한 pH수준에서 고무의 열화는 거의 무시될 정도다. 그러나 이 변수는 만약 산업용 폐기물 또는 산성 광산폐기물이 뒤채움 재료로 사용될 경우 중요할 수 있다. 타이어는 다짐 중 주변 흙의 변형과 같은 정도로 연성으로 거동함으로써 높은 응력을 견딜 수 있다(O'Shaughnessy와 Garga, 2000).

AB-Malek과 Stevenson(1986)은 고온 경화된 천연고무를 24m의 바다에 42년 동안 침수시켜 놓고 외관의 물리적인 변화를 관찰 연구하였으며, 이들의 연구에 의하면 타이어의 열화(deterioration)는 심각하지 않았으며 42년 해수 중에 잠겨진 후 흡수된 물의 양은 4.7%이었으며 타이어의 강도에는 영향을 미치지 않으며 소정의 흡수된 물은 0.05mm의 얇은 표층을 형성하는데 쓰여진다고 보고하고 있다. 이러한 연구 결과는 낡은 페타이어조차도 부식이나 열화에 매우 강하며 고품질의 지반보강재로 사용될 수 있음을 의미한다(O'Shaughnessy와 Garga, 2000).

3. 연구내용 및 방법

3.1 시험용 재료, 장치 및 지반조성

3.1.1 타이어셀

타이어셀에 의한 지반 보강효과를 연구하기 위하여 우선 그림 1에 보인 타이어셀을 다수 연결하여 타이어셀 매트를 제작하였다. 시험에 주로 사용된 타이어 매트 크기는 1460mm × 1520mm이다. 타이어는 소형트럭(light truck, LT)용을 사용하였다. 타이어의 제원은 그림 3과 표 1에 나타내었다. 표 1에서 인장강도는 타이어 트

표 1. 타이어셀 매트(LT)의 특성

1. Tirecell dimension (cm)		19 × 73 × 13.5
2. Tirecell mat dimension (cm)		152 × 146 × 13.5
3. Tensile strength(kN)	1 bolt connection	2.48
	2 bolts	5.70
	3 bolts	7.47

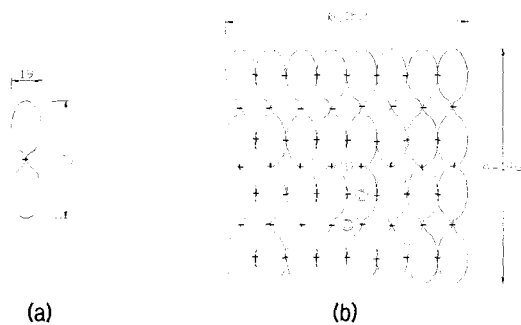


그림 3. (a) 타이어셀 (b) 타이어셀 매트(Unit: cm)

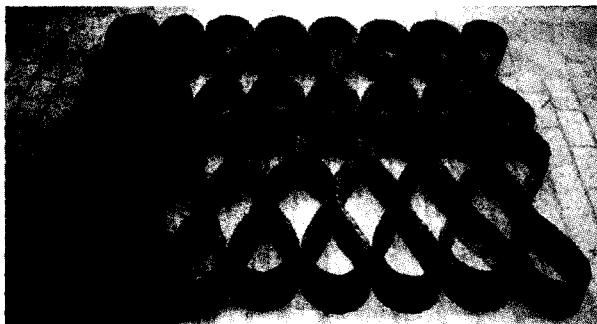


사진 1. 타이어셀 매트 사진

래드를 플라스틱 볼트로 연결한 후 이를 인장한 결과로서 인장강도는 타이어가 연결될 경우 연결부의 볼트 강도에 의하여 결정되며 타이어 자체의 인장강도는 타이어 내부에 들어 있는 20여 개의 강선으로 인하여 크게 나타난다. 사진 1은 재하시험에 사용된 소형트럭용 타이어로 만든 타이어셀 매트를 보여주고 있다.

3.1.2 토조

그림 4는 시험에 사용한 토조의 평면도와 입면도이다. 현장지반을 재현하기 위해 사용한 실험용 토조는 H

형강과 γ 자형앵글을 사용하였고 형강의 모든 연결 부위는 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)이다. 그림 4는 앞서 설명한 토조의 평면도와 입면도이다. 이 그림에서 u 는 복토 두께이며 z 는 보강층간의 간격이다.

3.1.3 시료 및 지반조성

본 연구에서 모형지반 조성을 위해 사용한 시료는 인천 해안지역에서 채취한 건조된 모래를 사용하였다. 입도분포를 인위적으로 조절하지 않고 자연상태 그대로의 입도분포를 유지하였다. 사용된 시료의 입도분포곡선은 그림 5에 보였으며, 모래 시료의 대표적인 특성치를 표 2에 나타내었다. 시료는 통일분류법상 SP로 분류되었다. 시료의 내부마찰각(ϕ)과 타이어 트레드와 시료간의 접촉면 마찰각을 구하기 위해서 직접전단시험을 수행하였다. 접촉면 마찰각(δ)은 타이어 트레드의 외측면과 내측면에서 거의 같은 값을 나타내었다.

지반조성을 위한 모래의 다짐은 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. 또한 타이어셀 매트가 들어감으로써 그 부피만큼 모래

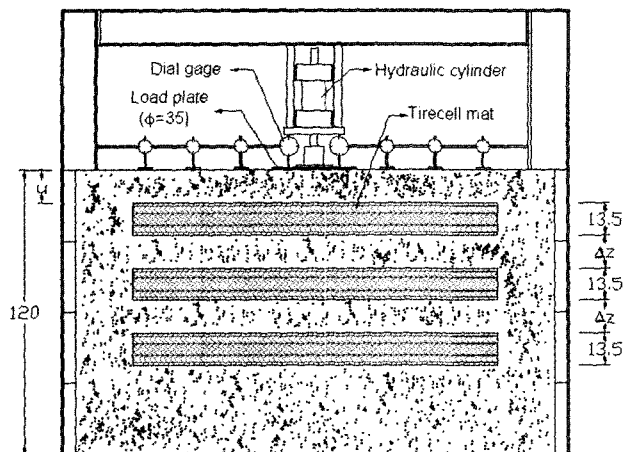
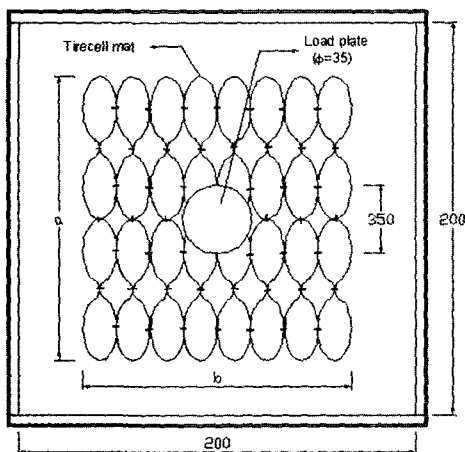


그림 4. 토조의 평면도와 입면도(Unit: cm)

표 2. 시료의 기본 특성

균등계수, C_u		2.81
곡률계수, C_c		1.00
유효입경, D_{10}		0.19
최대건조단위중량, $\gamma_{d, \max}$		1.62
최소건조단위중량, $\gamma_{d, \min}$		1.35
비 중, G_s		2.64
내부마찰각, ϕ	Dr=40%	34.6
	Dr=55%	35.4
	Dr=70%	36.5
접촉면마찰각/내부마찰각, δ/ϕ		$\cong 0.90$

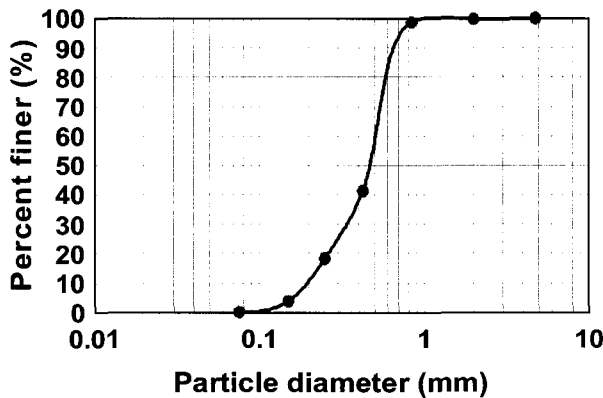


그림 5. 시료의 입도분포 곡선

가 들어갈 페타이어공간이 줄어들게 되고 그 만큼 원래 계획했던 것 보다 상대밀도는 높아지게 되므로 타이어 셀 매트와 부피에 해당하는 양의 모래를 감안하여 지반을 조성하였다.

3.2 재하시험 및 보강효과 해석

3.2.1 재하시험

재하시험은 직경 35cm의 원형 재하판을 모형 지반 가운데에 놓고 유압기를 사용하여 하중을 재하하여 현장에서의 평판재하시험을 재현하였다. 하중재하는 최초 하중 4~6kg/cm²에서 5분마다 4~6kg/cm²씩 증가시켰으며 재하판의 직경의 15% 내외(약 40mm)에 해당하는 침하가 발생하면 시험을 중지하였다. 각 재하 단계에서는 2.5분 간격으로 하중판의 중심으로부터 10.5cm 떨어진 거리에 있는 침하 측정 게이지를 측정하고 2.5분 간격으로 하중판의 중심으로부터 각각 30.5cm, 50.5cm, 70.5cm 떨어진 곳의 지반 변형을 측정하기 위해 설치한 게이지를 측정하였다.

본 연구에서 수행한 시험은 크게 상대밀도 40%, 55%,

70%인 무보강 지반, 타이어셀 매트의 연결부가 지지력에 미치는 영향, 복토두께, 보강층 간격, 재하폭 비로 분류할 수 있으며 보강층 간격과 재하폭비는 재하판의 폭과의 비로서 표현되었다.

3.2.2 지지력비와 침하감소율

본 연구에서는 침하량이 재하판 직경의 10%(=35mm) 일 때의 하중을 극한지지력으로 하였으며, 재하실험을 통하여 지반 보강 효과를 판단하는 방법으로 지지력비(Bearing Capacity Ratio, BCR)와 침하감소율(Settlement Reduction Factor, SRF)을 이용하였다. BCR과 SRF는 다음 식으로 정의된다.

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

여기서, q_o = 무보강지반의 극한지지력

q_r = 보강지반의 극한지지력

$$SRF = (s/B)_r / (s/B)_o \quad (2)$$

여기서, $(s/B)_o$ = 무보강지반의 극한지지력에 대한 침하율

$(s/B)_r$ = 무보강지반의 극한지지력과 일치하는 지지력에 대한 보강지반의 침하율

따라서 BCR이 클수록 지반보강효과가 큰 것을 나타내며 SRF가 작을수록 지반보강으로 인한 침하경감 효과가 큼을 알 수 있다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 무보강 지반의 지지력

지반 보강의 효과를 알아보기 위해서 보강 지반과 무보강 지반에 대하여 실험을 수행하였다. 무보강 지반은 상대밀도 40%, 55%, 70%로 조성하였고 표 3은 각각의 상대밀도에 대한 무보강 지반의 극한지지력이고 그림 6은 각각의 상대밀도에 대한 무보강 지반의 하중-침

표 3. 무보강 모래지반의 지지력

Dr (%)	q_o (kg/cm ²)
40	1.4
55	2.4
70	4.5

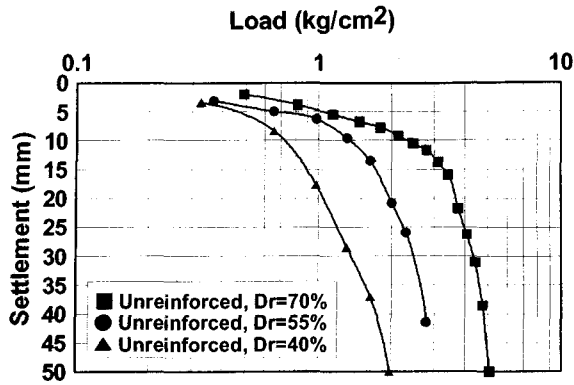


그림 6. 무보강 지반의 하중-침하 곡선

하 곡선이다.

무보강 지반의 재하시험에서 각각의 상대밀도에 대해 초기 침하하는 거의 비슷하나 상대밀도가 작은 40%는 압축성이 큰 지반으로서 국부전단파괴가 일어나 아래 쪽으로 완만한 형태의 하중-침하 곡선을 나타내며 상대 밀도가 증가할수록 전반전단파괴 형태의 지반 거동을 나타내고 있다.

4.2 타이어셀 연결부의 영향

타이어셀의 연결은 나일론 끈이나 볼트 등 여러 가지 방법이 있을 수 있으나 본 시험에서 페타이어는 지중에 매입됨을 감안하여 플라스틱 볼트로 연결하였다. 페타이어 트레드의 높이는 볼트를 1~3개까지 연결할 정도의 높이가 되며 볼트를 트레드의 상단과 중앙, 하단을 연결하는 방법과 중앙부에 1~2개를 사용하는 방법이 가능하며 중앙부에 한 개를 사용할 경우 페타이어가 지반내에서 하중을 받을 경우 트레드 상면이 굴곡되어 지지력에 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 볼트 수에 따라 지지력이 어떻게 변화하는 지를 알아보기 위하여 보강층수 $N=1$, 보강층 깊이 $u/B=0.2$, 재하폭 $b/B=4.34$, 상대밀도 $Dr=40\%$ 인 모래 지반에 연결부의 볼트 수를 한 개와 세 개로 달리한 상태에서 재하시험을 수행하였다. 표 4에 나타난 시험결과에서 보인 바와 같이 페타이어 연결용 볼트 수가 한 개인 경우와 세 개인 경우의 보강지반의 극한지지력이 거의 차이를 나타내지 않고

표 4. 연결 볼트 수에 따른 지지력($Dr=40\%$)

N	q_s (kg/cm ²)	BCR	SRF
1	4.0	2.86	0.21
3	4.1	2.93	0.19

있다. 따라서 연결부의 강도가 지지력에 미치는 효과는 거의 없음을 알 수 있으며 타이어의 트레드가 지반내에서 구속되어 있고 강성이 어느 정도 큰 상태이기 때문에 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로 여러 변수에 대한 후속 실험은 한 개의 볼트로 연결한 타이어셀 매트를 사용하였다.

4.3 타이어셀 매트폭

타이어셀의 매트폭과 재하판의 폭과의 관계가 지지력에 미치는 영향에 대해 $N=1$, $u/B=0.2$, $Dr=55\%$ 인 보강 모래 지반을 조성하였다. 타이어셀 매트의 기하학적 인 모양상 재하 위치를 동일하게 하기 위해 매트 폭 b 와 길이 a 를 모두 동시에 일정한 비율로 줄일 수가 없어서 폭 b 만을 줄여서 실험을 하였다(그림 3 참조).

표 5는 시험결과로서 재하폭비 b/B 가 2.17과 4.34인 경우에 지지력비 BCR은 일치하였고 b/B 가 1.09인 타이어셀 매트의 BCR은 약간의 차이를 보이고 있다. 또한 침하감소계수 SRF는 모든 폭에 대해 같은 결과가 나왔다. 이와 같이 매트의 폭이 재하판 폭의 1.09배로부터 2.17배로 변화함에도 지지력 증가가 크게 나타나지 않는 것은 매트의 강성이 재하 하중을 충분히 견딜 정도로 크기 때문으로 판단된다. 여기서 매트의 최적 폭은 약 2.0B임을 짐작할 수 있다.

4.4 상대밀도

상대밀도의 변화에 따른 지반보강 효과를 알아보기 위하여 보강층수 $N=1$, 복토두께 $u/B=0.2$, 매트폭 비 $b/B=4.34$ 인 보강 모래지반을 조성하여 재하시험을 수행하였다.

표 6과 그림 7에 나타난 바와 같이 상대밀도가 증가할수록 극한지지력은 증가하나 상대밀도 40%일 때 $BCR=2.93$ 으로 무보강 지반보다 지지력이 2.93배 증가한 반면 상대밀도 70%일 때 $BCR=1.78$ 로 무보강 지반보다 지지력이 1.78배의 증가를 보이므로 상대밀도가

표 5. 폭비, b/B 에 따른 지지력($Dr=55\%$)

b/B	q_s (kg/cm ²)	BCR	SRF
1.09	6.1	2.54	0.21
2.17	6.5	2.71	0.21
4.34	6.5	2.71	0.21

표 6. 상대밀도에 따른 지반보강 효과($u/B=0.2$)

D_r (%)	q_r (kg/cm ²)	BCR	SRF
40	4.1	2.93	0.19
55	6.5	2.71	0.21
70	8.0	1.78	0.33

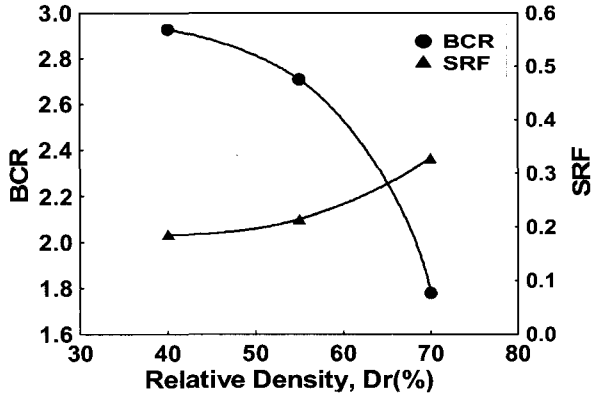


그림 7. 상대밀도에 따른 BCR과 SRF의 변화

증가할수록 지지력 증가 효과는 감소한다고 할 수 있다. 또한 SRF는 상대밀도 40%일 때 0.19, 즉 무보강지반 침하량의 19%로서 무보강 지반보다 81%의 침하 감소를 보이는 반면 상대밀도 70%일 때 0.33으로 무보강 지반보다 67%의 침하 감소를 보이고 있어 침하감소 효과면에서는 상대밀도가 증가할수록 침하 감소 효과가 줄어 든다고 할 수 있다. 이것은 상대밀도가 낮은 무보강 지반인 경우 지반이 느슨한 상태이기 때문에 지반 강성이 작는데 이러한 지반에 타이어셀 매트 같은 보강체를 넣으면 지반의 강성이 크게 증가하여 지반은 큰 지지력과 작은 침하를 나타나게 되나 상대밀도가 높은 무보강 지반인 경우 지반 강성은 상당히 커서 그 자체만으로도 하중에 견딜 수 있는 큰 강성을 가지고 있고 이런 지반에 타이어셀 매트 같은 강성체를 넣으면 지반 강성의 증가는 작게 된다.

4.5 복토두께

복토두께에 따른 보강지반의 지지력 변화를 알아보기 위하여 $N=1$, $b/B=4.34$, $D_r=55\%$ 인 보강 모래 지반을 조성하여 재하시험을 수행하였다.

표 7에 나타난 바와 같이 u/B 가 0.2인 경우 BCR은 2.71로 무보강 지반보다 2.71배 극한지지력이 증가하고 계속해서 u/B , 즉, 복토두께가 증가할수록 보강 효과는 감소하다가 u/B 가 1.0인 경우 BCR은 1.04로 보강 지반

표 7. 복토두께에 따른 지지력($D_r=55\%$)

u/B	q_r (kg/cm ²)	BCR	SRF
0.2	6.5	2.71	0.21
0.3	4.8	2.00	0.31
0.4	4.1	1.71	0.39
0.5	3.3	1.38	0.50
1.0	2.5	1.04	0.87

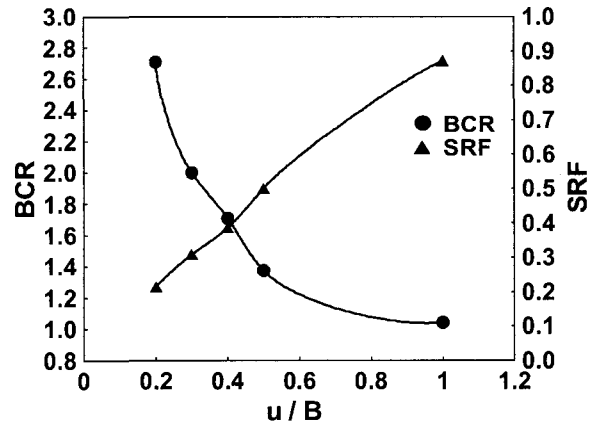


그림 8. 복토두께에 따른 BCR과 SRF의 변화

의 극한지지력은 무보강 지반과 차이가 없었다. 그림 8에서 u/B 가 1.0 근방에서 BCR값이 1에 수렴한다. SRF는 u/B 가 0.2인 경우 0.21로 무보강 지반보다 79%의 침하 감소를 보이고 계속해서 u/B 가 증가할수록 SRF는 증가, 즉 침하 감소효과는 감소하다가 u/B 가 1.0인 경우 SRF는 0.87로 무보강 지반보다 13%의 침하 감소를 보이며 그림 8에서 횡축의 u/B 가 1.0 이상이면 SRF값은 1에 근접한 값, 즉 보강효과가 없는 상태를 나타낸다. 따라서 u/B 가 1.0이상이면 지지력 증가와 침하감소 효과를 얻을 수 없기 때문에 그 이상의 복토두께는 무의미하며 보강효과를 얻기 위해서는 u/B 를 1.0이하로 설치해야 한다. 따라서 u/B 가 1.0이상일 때 타이어셀 매트는 하중 재하시 지반의 파괴면 형성에 영향을 주지 못하고 지반의 전단 파괴는 타이어셀 매트의 상부에서 발생하는 것으로 볼 수 있다.

4.6 보강층 수

4.6.1 보강층 수에 따른 BCR과 SRF

등간격으로 배치된 타이어셀 매트의 보강층 수에 따른 보강효과를 고찰하기 위하여 모래 지반에 $b/B=4.34$, $D_r=55\%$ 인 상태로 타이어셀 매트를 보강하여 재하시험을 수행하였다. 시험결과는 표 8과 그림 9, 10에 나타내

표 8. 보강층 수에 따른 BCR과 SRF($D_r=55\%$)

N	z/B	q_r (kg/cm ²)	BCR	SRF
1	0.2	6.5	2.71	0.21
	0.3	4.8	2.00	0.31
	0.4	4.1	1.71	0.39
	0.5	3.3	1.38	0.50
2	0.2	7.2	3.00	0.16
	0.3	5.5	2.29	0.24
	0.4	4.6	1.92	0.26
	0.5	3.7	1.54	0.30
3	0.2	7.8	3.25	0.14
	0.3	5.9	2.46	0.19
	0.4	4.7	1.96	0.25
	0.5	3.6	1.50	0.29

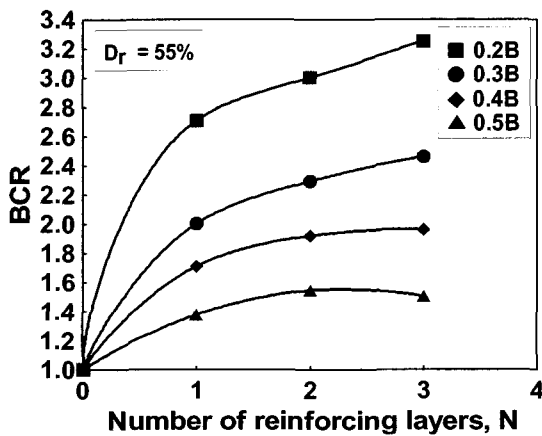


그림 9. 보강층 수에 따른 BCR의 변화

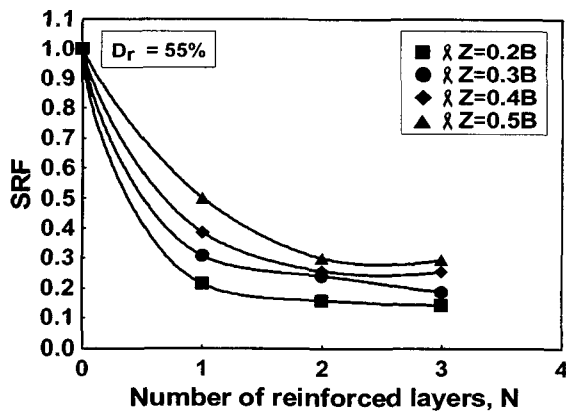


그림 10. 보강층 수에 따른 SRF의 변화

었다. 그림 9와 10은 각각 보강재의 간격에 따른 BCR의 변화와 SRF의 변화를 도시한 것이다. 그림 9로부터 보강재를 등간격으로 배치할 경우 보강재의 층수가 증가함에 따라 극한지지력이 증가함을 알 수 있으며 그림 10으로부터 보강층의 수가 많아짐에 따라 침하가 줄어

드는 것을 알 수 있다.

그림 9에서 BCR은 등간격 0.2B인 경우 1층 보강했을 때 급격하게 증가하였다. 2층, 3층 보강했을 때 1층 보강보다 증가분은 줄어들었지만 계속해서 거의 선형적으로 증가하며 등간격 0.4B, 0.5B는 보강층 수가 증가하면서 부드러운 곡선을 그리며 증가하는데 2층 보강과 3층 보강의 BCR값의 차이는 거의 없이 수렴하는 값을 보이고 있다. 이 그림으로부터 BCR면에서 보강재를 등간격으로 배치할 경우 등간격 0.2B, 0.3B의 경우에는 보강층 수가 4개 층까지 증가하게 되면 BCR이 거의 수렴하게 됨을 짐작할 수 있으며 이로부터 보강층의 수가 4개 층 이상은 보강효과가 없음을 알 수 있다. 등간격 0.4B, 0.5B로 보강할 경우 보강층수가 2층을 초과하게 되면 피복두께를 포함하면 재하판 직경 이상의 깊이가 되어 응력영향권 밖에 위치하여 BCR곡선이 수렴을 해가므로 최적의 보강재 층수는 2층이라 할 수 있다. 등간격 0.2B, 0.3B에서 지지력이 계속 증가하는 경향은 보강재의 간격이 작아 기초의 파괴형상이 보강재 간격이 넓은 경우보다 더 아래로 확대되기 때문으로 판단된다.

한편 앞의 표 7과 그림 10에서 복토두께 0.2B, 상대밀도 55%일 때 SRF=0.21로 무보강 지반보다 79%의 침하량 감소를 나타내므로 상당한 침하감소 효과를 나타내고 있다. 0.3B인 경우 1층 보강했을 때 무보강 지반보다 약 70% 정도의 침하 감소를 보이지만 2개층 이상을 보강했을 때 두 경우 모두 76%~86% 정도의 침하 감소를 나타내므로 침하 감소 효과면에서 큰 효과를 볼 수 있으며 2층과 3층 보강했을 때 침하감소율은 비슷한 경향을 보이며 수렴한다.

등간격 0.4B, 0.5B인 경우 1층 보강했을 때 무보강 지반보다 50%~61%의 침하감소를 보이고 2층과 3층으로 보강할 경우 무보강 지반보다 70%~75%의 침하 감소를 보이므로 등간격 0.2B, 0.3B 보다는 작은 침하 감소를 보인다. 모든 등간격에서 1층 보강인 경우 SRF는 간격이 0.1B 증가함에 따라 10%정도의 차이가 나타나는 반면 2층과 3층 보강시 등간격 각각의 차이는 5%정도로 나타나고 모든 등간격에서 수렴하는 그래프가 그려지므로 2층을 초과하는 보강층은 효과가 적은 것으로 판단된다. 따라서 본 연구결과로서 판단하면 SRF면에서 모든 등간격의 최적의 보강층수는 2층이라 할 수 있다.

4.6.2 보강간격과 BCR

그림 11은 보강 간격(z)에 따른 지지력의 변화를 보

강층 수에 따라 나타난 것이며 복토두께(u)와 보강층 간격을 같은 상태로 유지하였다. 1개층 보강은 복토두께 0.2B로부터 0.5B까지 4개의 경우에 대한 실험결과이고 2개층 이상의 보강은 층간격을 각각 0.2B부터 0.5B까지 변화시켜 시험한 것이다. 따라서 0.5B간격 3개층의 최하단은 0.2B간격 3개층의 최하단보다 재하면으로부터 더 깊은 곳에 위치해 있게 된다. 이 그래프로부터 각각의 간격에서 1층과 2층 보강의 차이는 2층과 3층 보강의 차이보다 크게 나타나고 보강층 수가 같을 경우 간격이 증가할수록 지지력은 점차 줄어든다. 이것은 등간격이 증가하면 최하층의 보강층의 깊이는 증가하는데 이 때 재하판으로부터 전달되는 응력이 작기 때문이다. 각각의 등간격에서 2층과 3층 보강의 차이는 등간격이 증가할수록 1개 층과 2개 층 보강의 차이보다는 급격하게 줄어들고 등간격 0.4B, 0.5B에서는 그 차이가 없는 데 이 또한 재하판으로부터 전달되는 응력이 작기 때문이다. 따라서 등간격 0.4B, 0.5B의 경우 최적의 보강층 수는 2개 층이고 등간격 0.2B, 0.3B의 경우는 각각의 등간격에서 층수가 증가할수록 지지력 차이는 감소한다.

4.6.3 최대심도계수와 BCR

그림 12에는 보강재의 최대심도계수(d_r/B)와 BCR과의 관계를 나타내었다. 여기서 d_r 은 타이어셀 매트와 층수와 관계없이 최하 보강층 상면에서 재하판까지의 거리이다. 이 그래프를 보면 보강재의 최대심도계수가 증가함에 따라 보강지반의 BCR은 증가하다가 수렴하는 경향을 보이며, 간격이 0.5B인 경우에는 간격이 0.2B인 경우보다 심도비가 작은 상태에서 BCR이 수렴하는 경향을 보임을 알 수 있다. 즉 간격 0.2B인 경우는 0.5B인 경우보다 심도비가 훨씬 큰 상태에서 지지력이 수렴함을 알 수 있다. 이는 보강층 간격이 작을수록 재하판으로부터의 응력의 영향깊이가 커짐을 의미한다. BCR이 수렴하는 심도비를 한계심도비, 즉 $(d_r/B)_{cr}$ 로 정의하면 간격 0.5B인 경우 $(d_r/B)_{cr} \approx 1.0$, 0.4B인 경우 $(d_r/B)_{cr} \approx 1.25$, 0.3B인 경우 $(d_r/B)_{cr} \approx 2.0$, 0.2B인 경우 $(d_r/B)_{cr} \approx 2.5$ 이며 간격이 작을수록 한계심도비가 커짐을 알 수 있다. 따라서 다층 보강시 일정한 심도 이하에 설치된 타이어셀 매트는 지지력의 증가 효과에 크게 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있고 타이어셀 매트의 한계심도비 이상의 깊이에서는 지지력 증대효과를 보지 못한다. Akinmusuru와 Akinbolade(1981)의 연구에서는 보강재의 최대심도비가 1.25B를 초과하게 되면 극한지지력의 증

대효과가 거의 없었다. 또한 신 등(1994)의 연구에 의하면 보강재의 깊이가 1.33B를 초과했을 때는 더 이상 보강재의 유용한 효과를 얻을 수 없다고 하였다. 그러나 앞의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 한계심도비는 보강재의 설치간격에 따라 다르므로 이를 보강재의 간격과 한계심도비의 관계로 나타내면 그림 13과 같다. 그림에

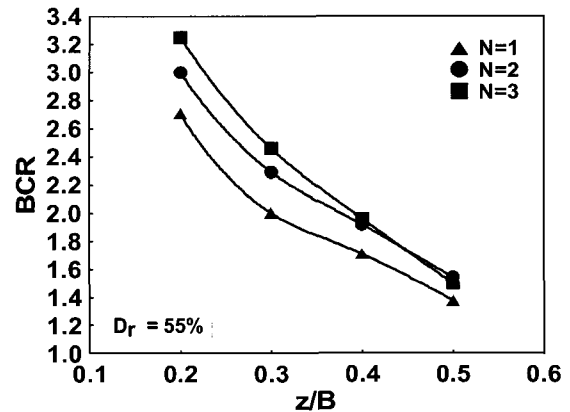


그림 11. 보강층 수에 따른 BCR과 z/B 관계

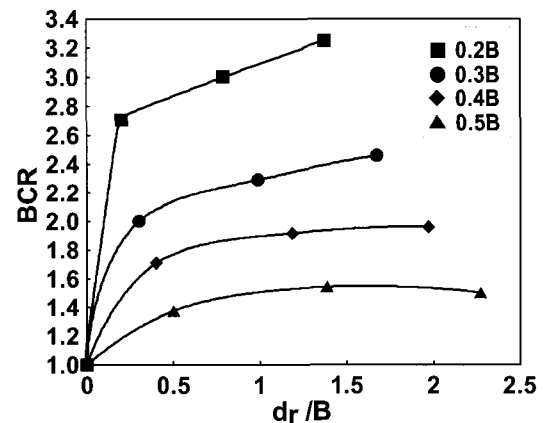


그림 12. BCR과 d_r/B 관계

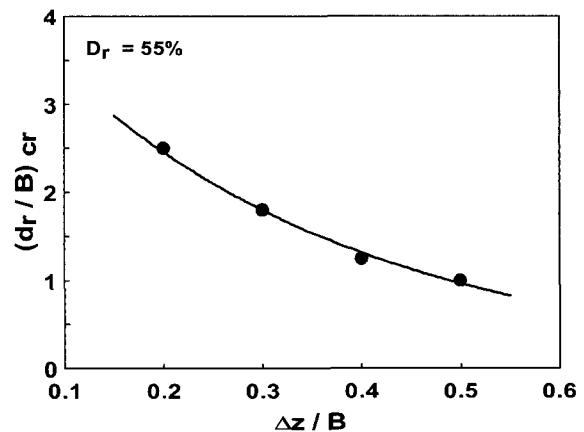


그림 13. $\Delta z/B$ 과 $(d_r/B)_{cr}$ 관계

서 한계심도비도 보강재의 간격이 아주 커지면 수렴하는 경향을 보임을 알 수 있다. 즉 한계심도비는 지지력 증가효과가 없는 깊이인 $\Delta z/B \approx 1$ 근방에서 수렴하는 경향을 나타낼 것이다.

4.7 지오웹과의 보강효과 비교

4.7.1 복토두께

상업용 지오웹으로 지반 보강 효과를 연구한 Guido와 Christou(1988)의 연구결과를 본 연구의 타이어셀 매트와 지반보강 효과와 비교 고찰하였다. 본 연구에서 사용된 타이어셀 매트와 상업용 지오웹을 정확히 비교하는 것은 보강셀의 높이와 재료의 특성 등이 다르므로 대단히 어려운 일이라 할 수 있으나 BCR과 SRF가 무차원화 된 값이므로 보강효과만을 비교하는데는 무리가 없을 것으로 생각된다. 또한 여기서는 지반보강효과를 비교해 봄으로써 폐자원 재활용의 효용성을 가늠할 수 있을 것으로 생각된다. 인용문헌의 상업용 지오웹은 2500mm×600mm×23mm에 대한 것으로서 상세 특성은 문헌에 잘 나타나 있다. 지오웹은 타이어셀의 13.5mm보다 높이가 크며 폭과 길이도 큰 상태이다.

타이어셀 매트의 지반 보강 시험은 $b/B=4.34$ 인 경우에 대한 것이며 모든 지오웹의 지반 보강 실험의 b/B 는 2인 경우에 대한 것이지만 상업용 지오웹의 연구에서 Guido와 Christou(1988)의 연구결과 b/B 가 2인 경우 최적의 폭이고 그 이상의 폭은 지반 보강 효과에 영향을 주지 못한다고 하였으므로 지오웹의 b/B 가 4.34일 때와 큰 차이가 없을 것으로 판단되므로 BCR과 SRF는 b/B 가 2인 경우를 비교하였다.

그림 14에는 복토두께에 대한 BCR과 SRF를 같은 그

래프에 나타내었다. 타이어셀 매트와 지오웹의 복토두께에 대한 BCR그래프에서 u/B 가 0.5이상이면 두 보강재 모두 BCR값은 거의 비슷하게 나오고 0.5이하이면 곡선의 기울기상 타이어셀 매트의 보강시 BCR값이 u/B 가 감소할수록 훨씬 크게 나온다. u/B 가 0.25인 경우 타이어셀 매트와 지오웹 보강시 BCR은 각각 2.25와 1.56으로 타이어셀매트 보강의 경우 BCR이 약 1.5배 더 크다. 그러나 지오웹의 실험조건은 보강층 수 $N=2$, 간격비 $z/B=0.25$, 매트폭비 $b/B=2$, $Dr=55\%$ 이고 타이어셀 매트의 실험조건은 $N=1$, $b/B=4.34$, $Dr=55\%$ 인데 타이어셀 매트의 실험시 현재의 1층이 아닌 2층으로 했을 경우에는 1층보다는 BCR이 더 크게 나올 것이므로 그림 13의 타이어셀 매트의 복토두께에 대한 BCR은 그림 14에 나타난 값보다 더 위쪽으로 올라갈 것이다. 따라서 모든 조건이 같은 상태에서 실험을 했다면 두 보강재의 지지력 증가 효과 차이는 이 그림보다 더 크게 나올 것이며 u/B 가 0.25인 경우 1.5배 이상의 BCR차이가 있을 것이다. SRF는 타이어셀 매트와 지오웹 보강시 u/B 가 감소할수록 두 보강재의 차이가 점점 증가한다. u/B 가 0.25인 경우 타이어셀 매트와 지오웹 보강시 SRF는 각각 0.26, 0.58으로 타이어셀 매트 보강시 SRF가 약 2.2배 더 작고 침하는 약 1.8배가 더 감소된다. SRF도 마찬가지로 실험조건을 맞추어서 실험을 하면 그림의 타이어셀 매트의 복토두께에 대한 SRF그래프는 더 아래쪽으로 내려갈 것이다. 따라서 모든 조건이 같은 상태에서 실험을 했다면 두 보강재의 침하 감소 효과 차이는 그림 13보다 더 크게 나고 u/B 가 0.25인 경우 2.2배 이상의 SRF차이가 있을 것이다. 이와 같이 타이어셀 매트와 보강된 지반의 지지력 증가 효과와 침하 감소 효과가 좋은 이유는 타이어셀의 강성이 상업용 지오웹보다 크기 때문으로 판단된다.

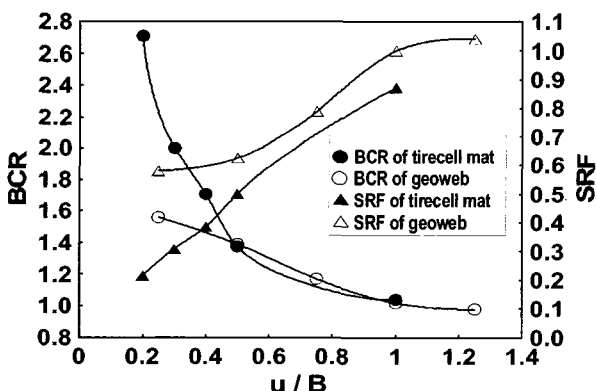


그림 14. 복토두께에 따른 타이어셀 매트와 Geoweb의 지지력

5. 결 론

폐타이어의 재활용을 촉진시키기 위한 방안으로 고안된 폐타이어를 이용한 타이어셀 매트가 모래지반에 보강되었을 때 그 효과를 규명하기 위하여 볼트 수, 상대밀도, 복토두께, 보강층 수, 셀 폭을 다르게 하여 재하 시험을 수행한 결론은 다음과 같다.

- (1) 타이어셀 매트의 연결시 볼트 수는 타이어셀 매트의 강성에 영향을 미치지 못하므로 지반 보강 효과

에 영향을 미치지 못 한다. 즉, 타이어의 강성만으로 볼트의 추가 연결 없이 충분히 하중을 지지할 수 있는 것으로 판단된다.

- (2) 모래지반의 상대밀도가 증가할수록 보강지반의 극한지지력은 증가하고 침하량은 감소하나 지지력 증가 효과와 침하 감소 효과는 낮은 상대밀도에서 크게 나타난다.
- (3) 지지력 증가 효과면에서 타이어셀 매트를 등간격 0.2B, 0.3B로 보강할 경우 보강층수를 4층으로 했을 때 지지력이 최대일 것으로 판단된다. 그러나 등간격 0.4B, 0.5B로 보강할 경우 곡선이 수렴하므로 최적의 보강층수는 2층이며 침하 감소 효과면에서 모든 등간격의 최적의 보강층수는 2층으로 판단된다.
- (4) 보강효과를 볼 수 있는 한계심도는 보강층의 간격과 관계가 있으며 보강층의 간격이 증가할수록 줄어드는 것으로 나타났다.
- (5) 타이어셀 매트는 지지력 증가면과 침하 감소면에서 상염용 지오웹 못지 않은 효과를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 폐자원의 재활용측면에서 폐타이어를 지반보강재로 사용하게 될 수 있을 것으로 판단된다.
- (6) 타이어의 종류, 손상정도, 크립, 연결부의 장기적인 거동 특성 등에 따른 보강효과는 추가적인 연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 대림산업(주)의 2003년도 연구비에 의하여 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김규래 (2001), 웅벽 뒤채움재로서 폐타이어 활용방안에 관한 연구, 한양대학교 산업대학원 석사학위논문.
2. 김진만, 조삼덕, 윤수호, 정문경, 김영운 (1999), "연약지반상 고속철도 노반 축조시 지오셀 시스템의 효과", 토목섬유 학술발표회 논문집, pp.131-141.
3. 신방웅, 여병철, 김수삼, Das. B.M. (1994), "지오그리드 보강 여부에 따른 정방향 얇은 기초의 지지력에 관한 연구", 한국지반공학회지 제10권 제3호, 5-16.
4. 윤여원, 김풍식, 천성한 (2003), "모래지반에서 모형 지오셀에 의한 보강 효과", 한국지반환경공학회 논문집, 제4권 제3호, pp. 51-59.
5. 윤여원, 최경순, 천성한 (2003), "지반보강재로서 폐타이어의 보강 효과", 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp.827-832.
6. 이상구 (1999), 연약지반상 철도 노반에 적용한 지오셀 시스템의 보강 효과에 관한 연구, 경희대학교 석사학위 논문, pp.1-49.
7. 이진웅, 이종덕 (1993), "지오셀을 이용한 지반 안정", KGS '93 National Conference/Ground Stabilization and Reinforcement, pp. 33-35.
8. 한국자원재생공사, <http://www.koreco.or.kr>, 재활용종합정보, 2002.
9. Akinmusuru, J.O., and Akinbolade, J.A. (1981), "Stability of Loaded Footings on Reinforced Soil", ASCE, No.GT6, pp.819-828.
10. Bathurst, R.J., and Jarrett, P.M. (1988), "Large-Scale Model Tests of Geocomposite Mattresses over Peat Subgrades", Proc. Transportation Research Record 1188, pp.28-36.
11. Dash, S.K., Krishnaswamy, N.R., and Rajagopal, K. (2001), "Bearing Capacity of Strip footings supported on geocell-reinforced sand", Geotextile and geomembranes, Vol.19, pp.235-256.
12. Foote, 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.
13. Garga V.K., and O'Shaughnessy, V. (2000), "Tire-reinforced earthfill. Part1:Construction of a test fill,performance and retaining wall design", Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, pp.75-96.
14. Gerscovich, D.M.S., de Medeiros, L.V., and Sayao, A.S.F.J. (2001), "Field pullout tests of scrap tire reinforcement layers under different soil surcharges", Proc. of the 15th ISMGE, Vol.2, pp.1587-1590.
15. Guido, V. A., and Christou S. N. (1988), "Bearing Capacity and Settlement Characteristics of Geoweb-Reinforced Earth Slabs", Proc. ASCE 1988 Spring Meeting, pp.21-36.
16. Humphrey, D.N. (1996), Investigation of exothermic reaction in the shred fill located on SR 100 in Ilwaco, Washington. Fedral Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D. C.
17. 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.
18. Jamnejad, G., Kazerani, B., Harvey, R.C., and Clarke, J.D. (1986), "Polymer Grid Cell Reinforcement in Pavement Construction", Proc. The 1986 International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, pp.537-546.
19. Koerner, R.M (1994), Designing with Geosynthetics, Third Edition, Prentice Hall, pp.720-726.
20. Krishnaswamy, N.R., Rajagopal, K., and Madhavi Latha, G. (2000), "Model Studies on Geocell Supported Embankments Constructed over a Soft Clay Foundation", Proc. The American Society for Testing and Materials, pp.45-54.
21. Mhaikar S.Y. and Mandal J.N. (1992), "Soft Clay Subgrade Stabilisation Using Geocells", Journal of Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Vol.2, pp.1092-1103.
22. 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.
23. Rea, C. and Mitchell, J.K. (1978), "Sand Reinforcement Using Paper Grid Cells", Proc. ASCE Symposium on Earth reinforcement, pp.644-663.
24. Westerberg B., and Macsik J. (2001), "Geotechnical and environmental properties of tire shreds in landfill drainage applications", Proc. of the 15th ISMGE, Vol.3, pp.2017-2021.

(접수일자 2003. 10. 17, 심사완료일 2004. 4. 1)