

## 상대밀도가 토목섬유 보강지반의 지지력에 미치는 영향 Bearing Capacity of Geosynthetics Reinforced Ground with Different Relative Densities

주재우 JAE-WOO, JU \*            심재범 JAE-BUM, SIM \*\*  
손순종 SOON-JONG, SON \*        김재영 JAE-YOUNG, KIM\*\*\*  
최경호 KYONG-HO, CHOI \*\*\*\*    최혁남 HYUEK-NAM, CHOI \*\*\*\*

\* 순천대학교 공과대학 토목공학과 교수    \*\* 신한국당 건설교통자문위원  
\*\*\* 전북대학교 농과대학 농공학과 교수    \*\*\*\* 순천대학교 대학원

<SYNOPSIS> This study was performed to investigate the effect of the relative density on the geosynthetics reinforced sandy ground with horizontally one-layer reinforcement. Values of 0.7B and 4B as the depth and length of one-layer reinforcement were used, where B is the loading plate width. A series of plane strain model tests on the sandy ground were performed with three different relative densities ( $D_r=49\%, 68\%, 86\%$ ). Here geosynthetics such as geonet, tensar grid and fortrac geogrid were used as reinforcing materials and the standard sand of Korea, which is called 'Jumunjin sand', was used as a soil of model ground. From the test results it shows that the effect of relative density was very great on the increase of the ultimate bearing capacity. However, BCR, which is the ratio of the unreinforced one to the peak bearing capacity of reinforced ground, was inclined to be almost constant in spite of the difference of relative density. And  $BCR_s$ , which is defined as the bearing capacity ratio of the unreinforced one to the reinforced ground, at the same settlement, was smallest at  $D_r=68\%$  among them.

### 1. 서론

최근들어 토목섬유를 입상토 지반에 부설하므로써 지반의 지지력을 증가시키는 공법의 사용이 점차 증가하는 추세에 있다. 즉, 구조물의 기초, 제방기초, 도로기층 및 표층, 철도노상등의 보강에 토목섬유가 '경제적 보강'이란 측면에서 효과적으로 사용되고 있음을 말하는 것이다. 그러나 입상토 기초지반의 보강과 관련한 연구는 아직 진행중에 있으며 그에 대한 설계방법등이 아직 명확하게 확립되었다고 말할 수 없다. 본 연구실에서는 입상토지반에 대한 1층 및 다층보강에 대한 설계방법을 확립할 목적으로 실험을 진행하여 왔으며, 1층으로 보강한 경우 지금까지의 연구결과를 요약하면, (1) Geonet보강재를 지중에 1층 보강을 행할 경우 최대의 보강효과를 얻을 수 있는 최적부설깊이가 존재하는데 그 값은 기초폭의 0.7배정도였다. (2) 역시 최대보강효과를 얻을 수 있는 Geonet보강재의 최적부설깊이는 보강재의 부설깊이에 관계없이 6B였다. (3) 보강효과로 인해 극한지지력이 증가하게 되면 피크상태에서의 침하량도 증가하였다. (4) 침하의 억제효과는 극한지지력의 증가효과에 비례하며 극한지지력의 증가는 최대 1.9배, 침하억제율은 최대 30%였다. (5) 기초의 깊이를 증가시켰을 경우 극한지지력은 증가했지만, 그 증가속도는 무보강의 경우 기초깊이에 따른 증가속도와 일치하는 경향을 보였다.

본 연구의 경우, 상대밀도가 보강효과에 미치는 영향을 검토하기 위한 실험을 행하고 그 결과를 정리한 것이다. 상대밀도란 현재의 다짐상태가 아주 밀한 상태와 아주 느슨한 상태사이에 있어서, 어느정도

의 상태를 나타내는가 하는 지표로서 입상토의 역학적특성을 알 수 있는 척도이다. 즉 입도가 다른 두 종류의 입상토지반이 있다면, 밀도의 크기가 아니고 상대밀도의 크기가 같을 경우 그 역학적성질들은 일치한다. 본 연구에서는 입상토의 상대밀도가 토목섬유를 이용하여 지반내 소정의 깊이에 1층으로 부설하여 보강을 한 경우, 지반보강의 거동 및 지지력에 미치는 영향을 연구하기 위한 실험을 실시하였다. 지반의 보강효과를 판단하는 방법으로서  $BCR$ ,  $BCR_s$  등이 있으며 다음과 같다.

$$BCR = q_{ur}/q_u \quad (1)$$

$$BCR_s = q_{sr} / q_s \quad (2)$$

여기서,  $q_{ur}$  및  $q_u$ 는 각각 보강 및 무보강지반의 극한지지력을 나타내며,  $q_{sr}$ ,  $q_s$ 는 침하량이 일정할 경우, 보강 및 무보강지반의 지지력을 나타낸다. 보강지반의 경우, 보강효과에 미치는 인자들을 고려하면  $BCR$  또는  $BCR_s$ 은 아래와 같이 식으로 나타낼 수가 있다.

$$BCR \text{ or } BCR_s = f(u/B, L/B, Dr, Tg, Ft) \quad (3)$$

여기서,  $B$ 는 재하중의 폭을 나타내고,  $u$ ,  $L$ 은 각각 부설깊이 및 부설깊이에 해당되며  $Dr$ 은 지반의 상대밀도를 나타낸다.  $Tg$ 는 보강재의 인장강도를 말하며  $Ft$ 는 보강재의 인발저항 특성치를 나타낸다.

본 연구의 경우 상대밀도가 49%,68%,86%로 다른 지반에 4종의 토목섬유 보강재를 사용하여 1층으로 보강하였을 경우, 보강지반에 미치는 영향을 실험을 통하여 검토 하였다. 보강모델지반으로는 주문진 표준사를 사용하여 지반의 균일성을 확보하고자 하였으며, 부설깊이는 재하판의 폭  $B$ 의 0.7배인 7cm로 하였고 부설폭은 재하판폭  $B$ 의 4배인 40cm로 하였다. 실험결과로 부터 1) 상대밀도에 따른 보강지반의 하중 및 침하거동 2) 상대밀도에 따른 토목섬유 보강지반의 파괴형태 3) 토목섬유 보강지반에서 상대밀도가 극한지지력의 크기에 미치는 영향 4) 토목섬유 보강지반에서 상대밀도가  $BCR$ ,  $BCR_s$ 의 크기에 미치는 영향등을 검토하였다.

## 2. 실험

### 2.1 모델지반제작

다중채위로 모래를 낙하시켜서 균일한 밀도를 갖는 지반을 제작하는 방법인 다중채낙하법을 이용하여 모델지반을 제작하였으며, 상대밀도가 다른 모델지반을 제작하기 위하여 체눈의 크기, 낙하고 및 모래가 유출되는 유출구의 직경을 변화시켰는데 그 조건은 표-1과 같다.

표-1. 모델지반 제작 조건

상대밀도 (%)	체의 층수	체눈의 크기(mm)	낙하고(cm)	유출구 직경 (mm)	제작소요시간	사용모래
49	5	3.0	50	40	약 30 min	주문진 표준사
68	5	5.3	70	40	약 40 min	
86	5	5.3	70	10	약 6 hour	

## 2.2 모델지반 재하장치

본 연구에서 사용된 모델지반 재하장치는 그림2-1에 나타낸것과 같이 크기는 폭 120cm, 길이 30cm, 최대높이 70cm이며, 평면변형조건으로 실험할 수 있는 장치이다. 토조의 양 측면은 2cm두께의 투명아크릴을 사용하여 제작하였고, 실험도중 측면에서 발생하는 마찰저항을 없애기 위하여, 실리콘 그리이스 및 rubber membrane을 사용하였다. 또한 아크릴면과 rubber membrane상에 각각 5cm크기의 격자를 다른 색깔로 그려넣어, 하중 재하시 모델지반이 rubber membrane과 같이 침하할 때, 아크릴상의 격자점과 비교를 통해 지반의 침하 및 파괴형상을 관찰할 수 있도록 하였다. 실험은 먼저 다중체 낙하장치를 이용하여 바닥에서 43cm의 높이까지, 모델지반을 제작하고 소정의 위치에 지오네트 보강재를 1층으로 부설한 후 다시 7cm두께의 모래층을 포설하였다. 그리고, 폭 10cm, 길이 30cm의 재하판을 중앙에 설치한 후 재하실험을 실시하였다. 재하하중 및 침하를 측정하였으며 하중재하속도는 약 1mm/min으로 하였다.

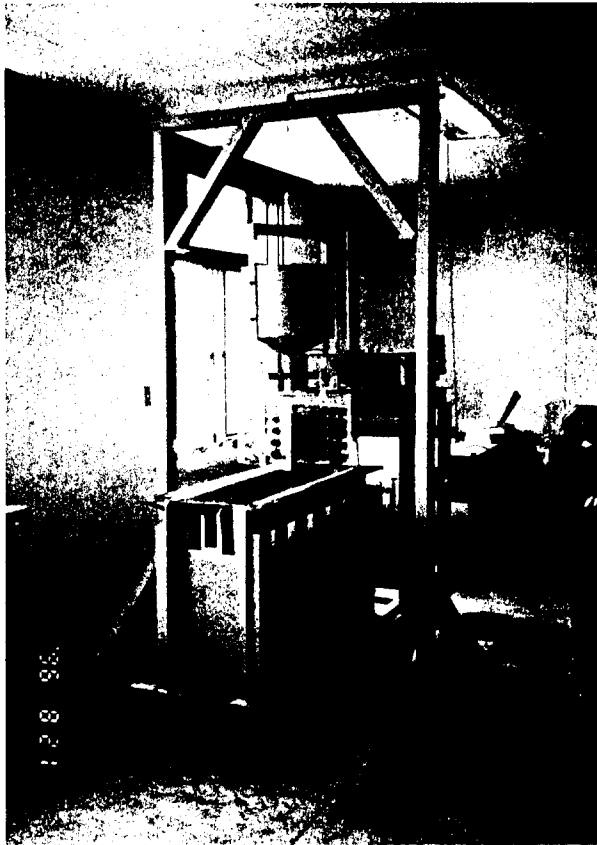


그림 2-1 모델 지반 재하 장치

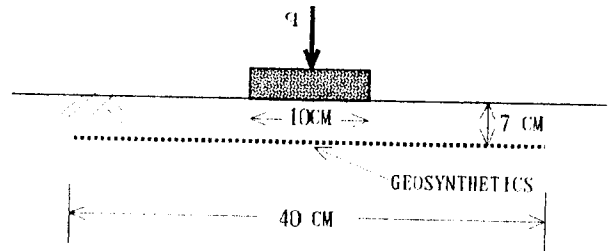


그림 2-2 토목섬유 1층 보강

## 2.3 실험내용

본 실험의 경우 그림2-2에 나타낸바와 같이 길이 40cm의 토목섬유보강재가 깊이 7cm위치에 1층으로 지반보강을 위해 삽입된다. 상대밀도 및 보강재의 종류를 변화시킨 실험내용은 표-2와 같다.

표-2. 실험 내용

상대밀도 (%)	보강재 종류	최대인장강도 (tonf/m)	최대하중신율 (%)	망눈크기 (mm)	보강재 매설깊이 (cm)	보강재 매설깊이 (cm)	비고
49	무보강				7	40	모델지반의 총높이 50cm
	geonet-1	0.2	41.0	8 x 6			
	geonet-2	0.76	20.2	8 x 6			
	geogrid(tensar)	1.2 x 1.7	15.0	29x38			
	geogrid(fortrac)	5.5	12.5	20x20			
68	무보강						
	geonet-1	0.2	41.0	8 x 6			
	geonet-2	0.76	20.2	8 x 6			
	geogrid(tensar)	1.2 x 1.7	15.0	29x38			
	geogrid(fortrac)	5.5	12.5	20x20			
86	무보강						
	geonet-1	0.2	41.0	8 x 6			
	geonet-2	0.76	20.2	8 x 6			
	geogrid(tensar)	1.2 x 1.7	15.0	29x38			
	geogrid(fortrac)	5.5	12.5	20x20			

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 무보강 지반의 하중-침하거동

입상토 지반에서 상대밀도가 크면, 재하중이 극한지지력에 도달할 경우, 파괴가 일어나게 되는데 이때 최대 전단저항이 발휘되며, 전단 파괴면은 기초하부에서 출발하여 기초옆 지반의 표면까지 확장하게 된다. 그리고 극한지지력을 나타내는 뚜렷한 피크를 보이며 잔류용력은 극한지지력에 비하여 매우 작은 현상을 보인다. 상대밀도가 작은 느슨한 지반의 경우 뚜렷히 피크를 보이지 않으며 피크를 보이는 경우에도 잔류용력은 극한지지력에 비교할 때 매우 크다.

그림 3-1은 Vesic(1963)에 의해 제안된 것으로 상대밀도와 기초깊이에 따라 파괴형태를 판단할 수 있는데, 본 모델지반의 경우 상대밀도는 49%,68%,86%이며 기초깊이의 비는  $Df/B=0$ 이므로 그림에 표시한 위치에 각각 존재하는데 49%,68%지반은 국부파괴로 나타나며 86%는 전반전단파괴로 분류되고 있다.

그림 3-2는 무보강지반에 대한 모형실험을 실시한 결과로서 지지력은 상대밀도가 커짐에 따라 커지고 있다. 하중에 따른 침하의 거동에 있어서는 상대밀도가 86%일때는 전반전단파괴로서 피크를 뚜렷히 보이며 잔류하중은 극한하중에 비해 아주 작는데 이는 그림 3-1에서의 분류와 잘 일치하고 있다. 상대밀도 49%,68%에서는 피크는 보이나 잔류하중이 극한하중에 비해 크게 나타나고 있어 국부전단파괴양상을 보이는 것으로 판단된다.

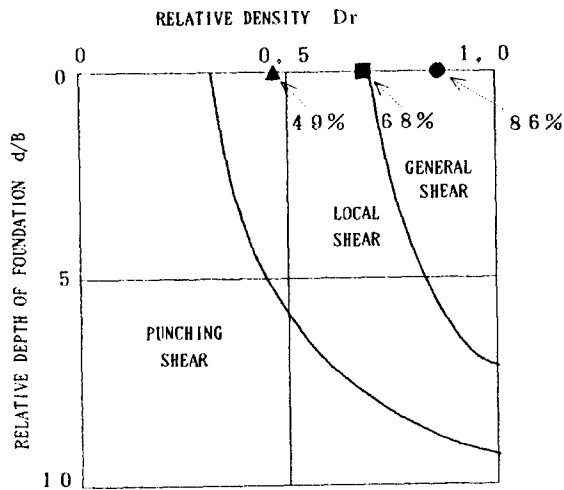


그림 3-1 상대밀도 및 기초깊이에 따른 파괴 유형도에서 본 모델지반의 위치

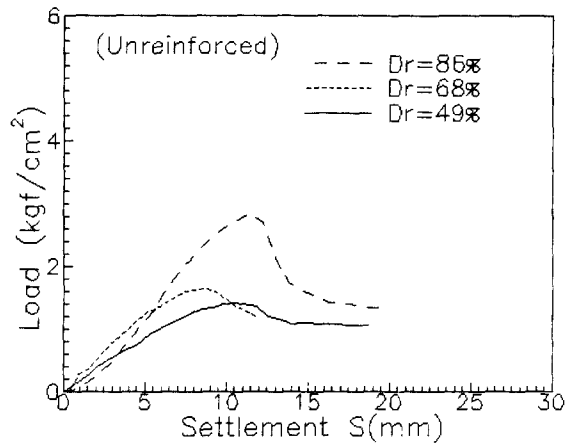


그림 3-2 무보강지반의 하중-침하 관계

### 3.2 보강지반에서의 하중-침하의 거동비교

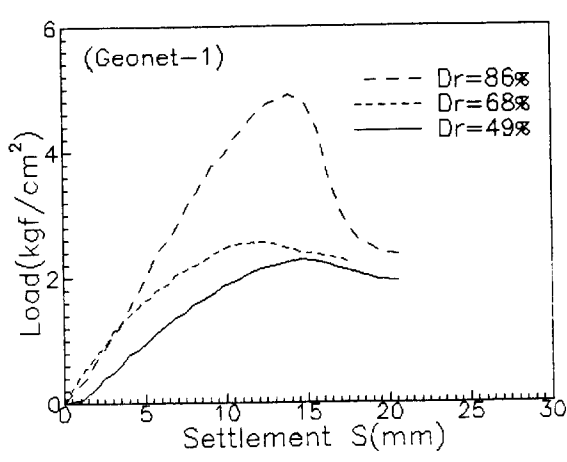
#### 3.2.1 상대밀도에 따른 보강지반 거동특성

그림 3-3(a)(b)(c)(d)는 지오네트 2종과 Tensar grid, Fortrac grid등을 보강재로 사용, 상대밀도를 49%,68%,86%로 달리하여 재하시험을 행한 결과중 하중의 증가에 따른 침하의 거동을 나타낸 것이다. 그림3-3(a),(b)인 Geonet-1과 Geonet-2에서 상대밀도가 86%인 경우에는 극한지지력은  $4.90\text{kgf/cm}^2$ ,  $5.01\text{kgf/cm}^2$  으로서 매우 크며 잔류응력은 둘다  $2.2\text{kgf/cm}^2$  정도로 떨어지는것을 알 수가 있다. 또한 피크가 뚜렷히 형성되고 있으며, 이 시점이 토목섬유보강재인 지오네트에 최대인장력이 작용하여 파단 파괴가 일어난 때이다.

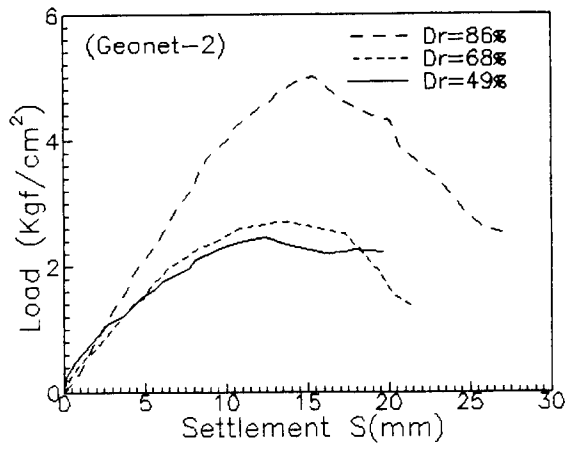
그림3-3(c),(d)에서 상대밀도가 86%인 경우에는 극한지지력은  $3.57\text{kgf/cm}^2$ ,  $4.08\text{kgf/cm}^2$  이었으며 특히, Tensar grid의 경우, 잔류응력은 약  $2.0\text{kgf/cm}^2$  에서  $2.2\text{kgf/cm}^2$  정도인데 침하가 12mm에서 20mm사이의 하중과 침하의 거동이 매우 불규칙하게 변하는 것을 볼 수가 있다.

이는 보강지반이 보강재의 인발에 의해 파괴된 후 다시 보강효과를 발휘하려고 하는 과정에서 나타나는 현상이라고 판단된다.

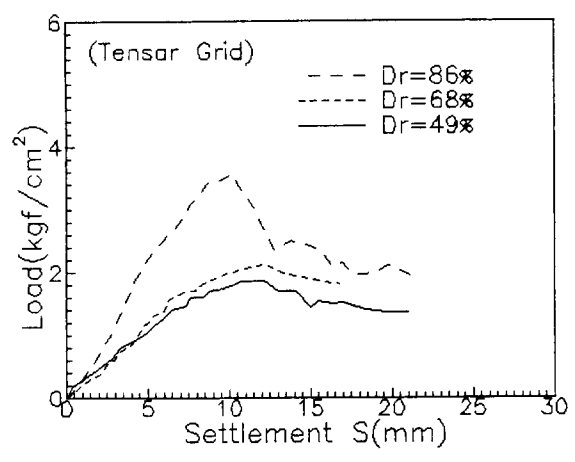
한편, 무보강지반에서와 마찬가지로 보강지반의 경우에도 상대밀도의 크기에 따라 파괴형태가 유사한 경향을 보임에 따라 Vesic이 제안한 파괴형상의 분류가 1층으로 보강된 지반에도 유사하게 적용되는 것으로 판단할 수가 있다. 적절한 깊이, 적절한 길이의 토목섬유 보강재를 1층으로 한 경우에도 보강하지 않은 입상토지반의 경우와 같이, 파괴형상분류는 보강재의 종류 및 보강재의 삽입여부와는 무관하며 지반의 상대밀도에 의존하는 것으로 판단된다. 단 Fortrac grid는 49%,68%에서도 뚜렷한 피크를 보이는 예외적인 경향을 보이고 있다.



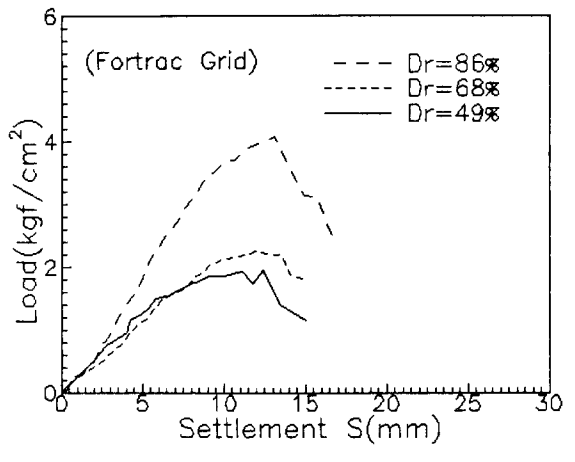
(a)



(b)



(c)



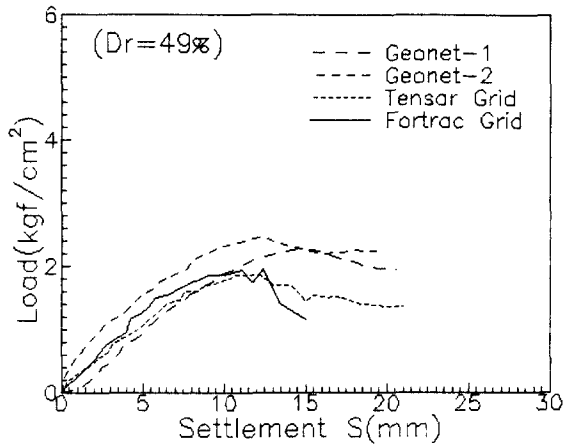
(d)

그림 3-3 상대밀도에 따른 보강지반의 거동

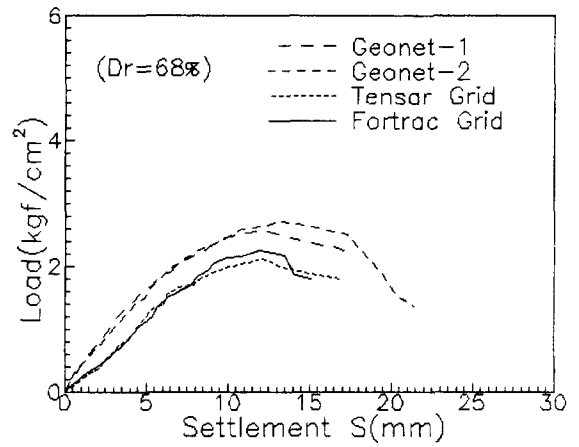
### 3.2.2 보강재별 보강거동

그림 3-4(a),(b),(c)는 상대밀도가 49%,68%,86%로 일정할때 보강재의 종류에 따른 하중과 침하거동을 나타낸 것이다. 표-2에 나타낸 바와 같이 각각의 보강재별 특성치중 최대인장강도와 망눈의 치수등을 비교하면, 최대인장강도는 net계통에 비해 grid계통이 크고, 망눈의 크기는 grid계통에 비해 net계통이 작다. 보강효과는 인장강도가 큰 grid계통에 비해 망눈의 크기가 작은 net계통이 상대밀도의 크기에 관계없이 더 큰 극한지지력을 유발시키고 있음을 알 수가 있다.

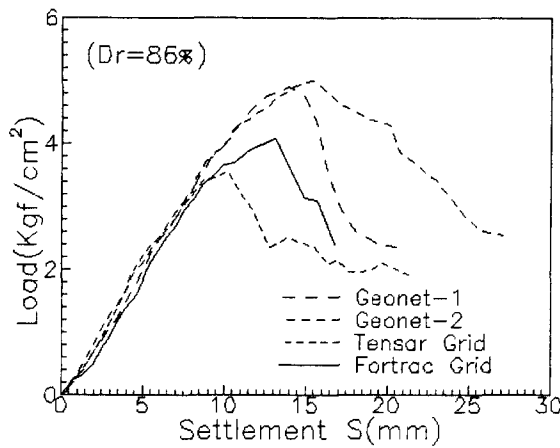
보강재를 지반속에 부설함으로써 보강효과가 발생하는 이유는, 인장에 약한 지반의 인장변형을 인장강도가 큰 보강재가 보완해 줌으로서 지지력의 증가를 도모할 수 있다는 것이다. 보강재가 인장력을 충분히 발휘하도록 하기 위해서는 보강재와 흙사이에 마찰강도가 커야한다. 따라서, 보강재와의 마찰력의 증대를 위해서는 보강지반의 역학적특성치 즉 상대밀도를 높이는 방법이 그 첫째이며, 망눈이나 그리드의 크기를 작게함으로써 흙과의 접촉면을 증가시키는 것이 그 두번째라 말할 수 있다. 본 실험결과, 기초지반의 지지력 증대를 위해서는 인장강도의 증가효과에 비하여 흙과의 접촉면의 증가효과가 더욱 크게 나타나고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 3-4 보강재별 보강거동

### 3.3 시험후 보강재관찰에 의한 파괴요인 검토

보강된 기초지반의 경우 지반의 파괴요인은 첫째, 보강재의 인장강도부족으로 인한 보강재의 파단 (breaking) 파괴나 둘째, 인발저항강도의 부족으로 인한 보강재의 인발 (pullout) 파괴등을 들 수가 있다. 이러한 파괴요인의 판단은 시험후 보강재를 관찰하므로써 확인 할 수가 있다. 표-3은 시험을 행한 후, 보강재를 관찰한 결과를 나타낸 것으로 상대밀도 86%에서, geonet-1 및 geonet-2은 보강재의 중심에서 파단파괴가 일어났으며, Tensar grid, Fortrac grid는 파단흔적이 없기 때문에 인발에 의한 파괴가 일어났다. 보강재의 파단된 모양은 그림 3-5에서 보여주고 있다. 이는 상대밀도가 보강지반의 파괴요인과 관련이 있음을 말해주는 것이다.

즉, 상대밀도의 증가는 흙과 보강재사이의 마찰력을 증대시키므로 보강재가 인장력이 약할경우 파단에 의한 지반파괴가 발생하게 된다. grid계통의 보강지반의 경우는 전부 인발파괴형태를 보이고 있는데, 이는 grid계통이 인장강도는 크지만, 반면에 망눈이 커서 인발저항력의 발휘와 관련한 부착강도의 저하가 그 원인이라 생각된다.

표-3 파괴 요인

상대밀도 \ Case	geonet-1	geonet-2	geogrid (Tensar SS-1)	geogrid (Fortrac)	비 고
49 %	◎	◎	◎	◎	◎ : 인발파괴 × : 파단파괴
68 %	◎	◎	◎	◎	
86 %	×	×	◎	◎	

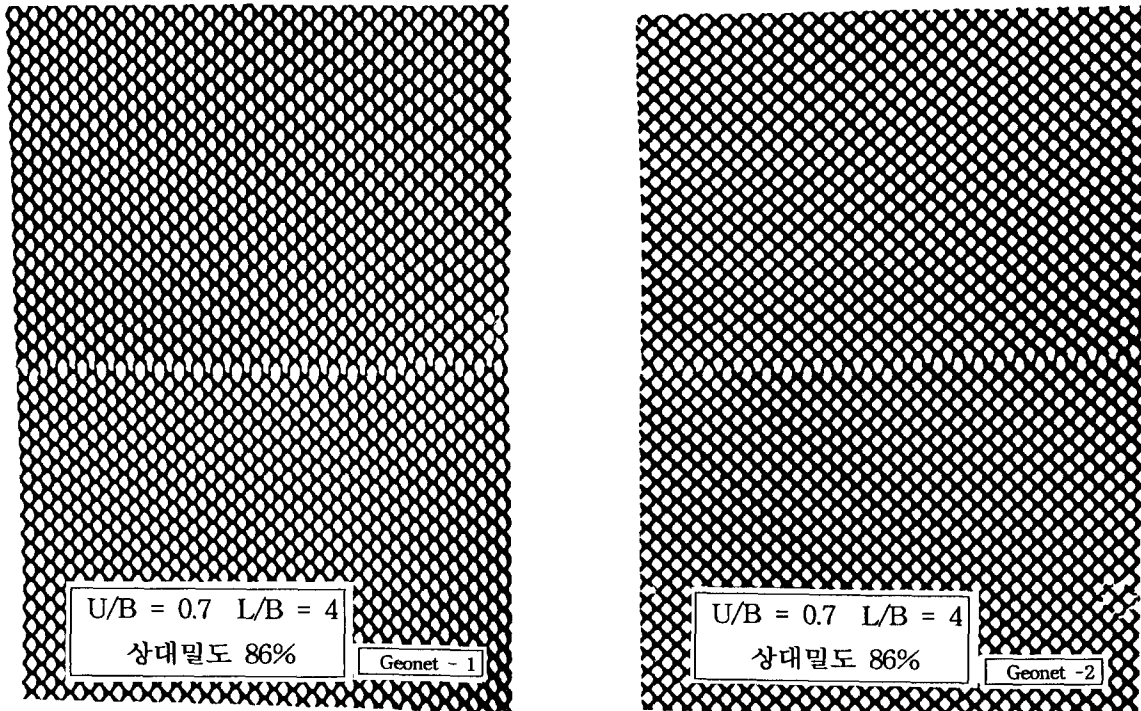


그림 3-5 파단된 보강재

### 3.4 상대밀도에 따른 보강지반의 극한지지력 특성

그림3-6은 상대밀도에 따른 극한지지력의 크기를 무보강 및 4종의 보강재별로 나타낸 것이다. 상대밀도가 49%에서 68%로 증가할때, net계통중 geonet-1을 사용한 지반의 극한지지력은 2.57kgf/cm<sup>2</sup>에서 4.90 kgf/cm<sup>2</sup>로 증가하여 증가율은 약 13%정도이지만, 상대밀도가 68%에서 86%로 증가할때 지반의 극한지지력은 2.57kgf/cm<sup>2</sup>에서 4.90 kgf/cm<sup>2</sup>로 증가하여 증가율은 무려 90%에 이른다. 즉 상대밀도가 커짐에 따라 그 극한지지력의 증가속도는 매우 커지는 것을 알 수가 있다.

이와같은 현상은 보강재의 종류에 관계없이 같은 경향을 나타낸다. 따라서, 보강지반의 경우 현장다짐이 얼마나 중요한가 하는 것을 알 수가 있다.



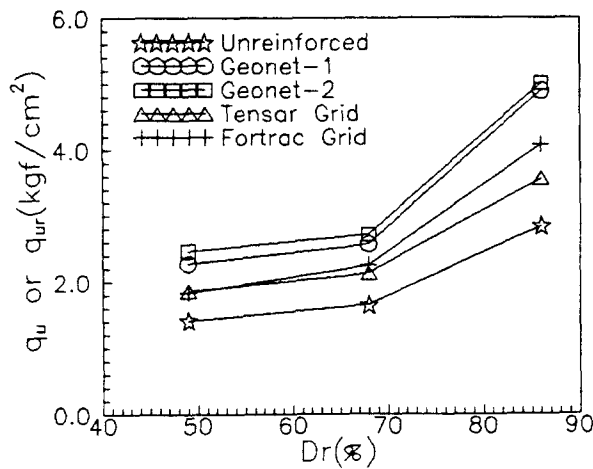


그림 3-6 상대밀도와 극한지지력과의 관계

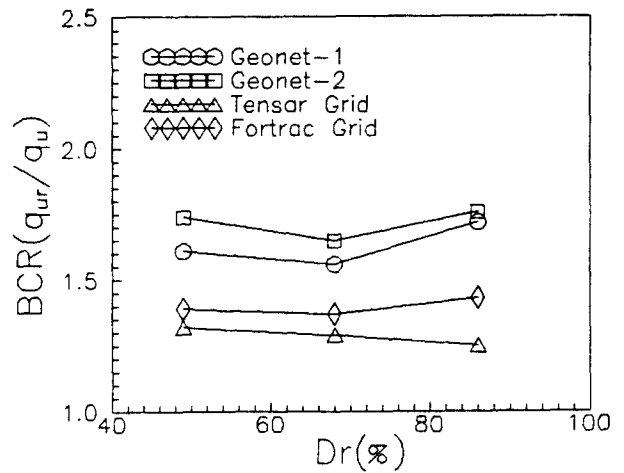


그림 3-7 Dr - BCR

### 3.5 상대밀도가 지지력비에 미치는 영향

#### 3.5.1 BCR

그림3-7은 상대밀도에 따른 BCR의 변화를 나타낸인데 net계통인 geonet-1,2보강재를 사용하였을때 상대밀도가 68%인 경우가 BCR이 약간 작은 경향을 보이며, grid계통중에서 fortrac은 상대밀도와 관계없이 BCR은 일정한 값을 나타내고 있으며, tensar는 상대밀도가 커질수록 약간씩 작아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 땅눈의 크기나 강도 강성의 차이등이 그 원인의 일부가 되겠지만 전반적인 면에서 판단해 볼때 상대밀도는 지반보강에 의해 나타나는 BCR의 크기에 별다른 영향을 미치고 있지 않는것으로 판단되어진다. 즉 느슨한 사지반이나 조밀한 사지반에 있어서 보강재의 삽입은 거의 비슷한 보강효과 즉 BCR은 대략 일정하다는 것이다.

#### 3.5.2 BCRs

무보강지반과 보강지반이 똑같은 침하를 허용할때, 무보강지반의 지지력에 대한 보강지반의 지지력의 비를 식(2)에서와 같이 BCRs로 정의하였다. 그림 3-8(a)(b)(c)는 허용침하량이 각각 5mm,8mm,10mm일때, 상대밀도 및 보강재종류에 따른 BCRs의 크기를 나타낸것이다. geonet-1의 경우 상대밀도의 증가에 따라 BCRs가 증가하는 경향을 보이고 있지만 나머지 보강재의 경우 68%에서 최소치를 보이고 있다. 그러나 그 경향이 허용침하량이 큰 10mm의 경우 그림3-8(c)에서와 같이 그 차가 점차 감소하고 있음을 보여준다. 보강재는 인장변형과 더불어 마찰력이 발생하게 되어 어느정도의 침하가 보강효과 발휘를 위해서는 반드시 필요하다는 것이 일반론이다. 그림3-9(a)에 그 예가 잘 나타나고 있는데 상대밀도 68%의 경우를 보면 보강재의 종류에 관계없이 침하량의 증가에 따라 BCRs가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 그림3-9(b)은 상대밀도 86%의 경우인데 오히려 규정침하가 증가할수록 BCRs가 떨어지는 경향을 보이고 있어 아주 흥미롭다. 이는 작은 침하에도 불구하고 상대밀도가 크기 때문에 발휘가 가능한 마찰력을 얻을 수 있기 때문인것으로 판단된다.

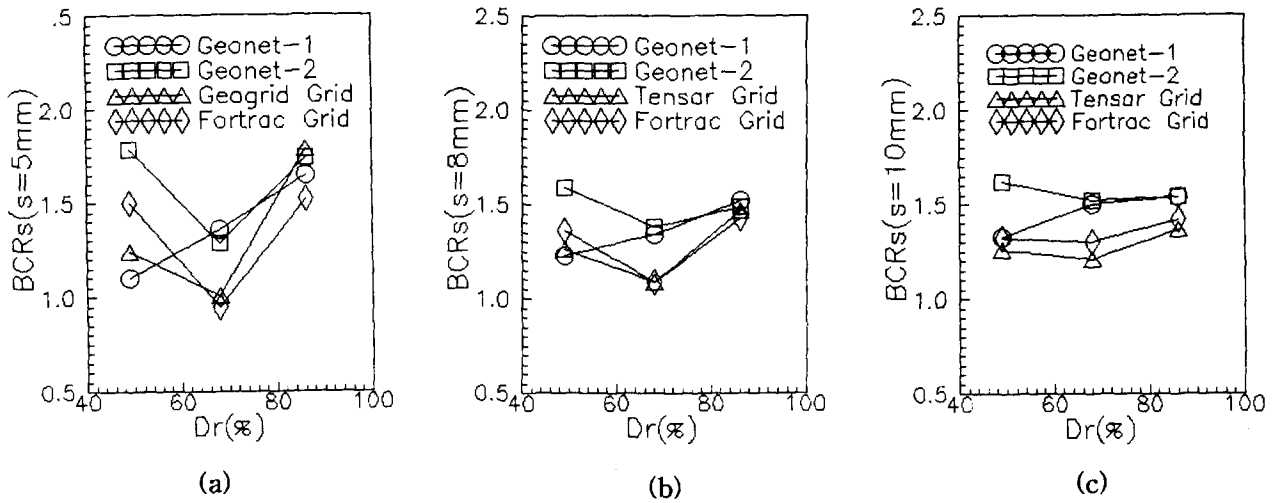


그림 3-8 Dr - BCRs

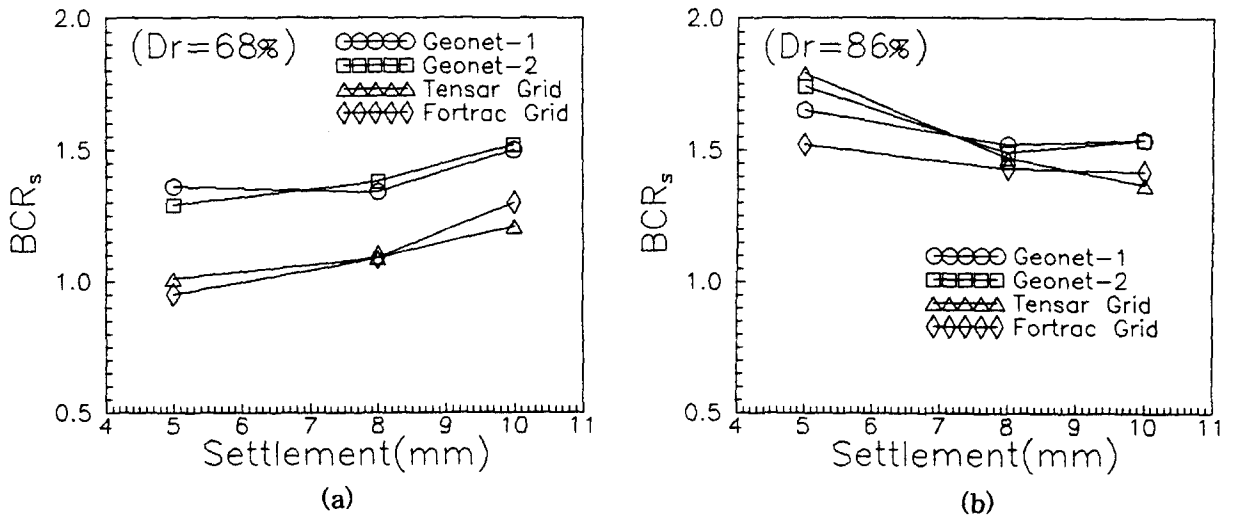


그림 3-9 규정침하 - BCRs

#### 4. 결론

본 연구의 경우 상대밀도가 49%, 68%, 86%로 다른 지반에 보강재로서 Geonet-1, Geonet-2, Tensar grid, Fortrac grid 등 4종의 토목섬유 보강재를 사용하여 1층으로 보강하였을 경우, 보강지반에 미치는 영향을 실험을 통하여 검토하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 상대밀도가 다를 경우 무보강지반에서 나타나는 파괴형상이 보강지반에서도 똑같이 나타나는 경향을 보였다.
- 2) 기초지반의 지지력증대를 위해서는 토목섬유 보강재의 인장강도보다 흙과의 접촉면의 증가효과가 더 컸다.
- 3) 상대밀도가 큰 수록 흙과 보강재의 마찰력이 커지므로 파단파괴가 일어날 가능성이 크다.

- 4) 상대밀도가 클수록 극한지지력이 증가하는 속도는 보강이나 무보강지반에 관계없이 매우 컸다.
- 5) BCR은 전반적인 면에서 볼때 상대밀도의 크기에 영향을 받지 않는것으로 판단된다.
- 6) BCRs는 68%에서 가장 작은 경향을 보였다.
- 7) BCRs는 상대밀도 68%에서는 규정침하가 증가할수록 커지는 경향을 보이거나 86%의 경우는 반대로 허용침하가 커질수록 작아지는 흥미있는 경향을 보이고 있다.

## 5. 참고문헌

- 1) T.William Lambe & Robert V.Whitman, 1979, **Soil Mechanics**.
- 2) Binquet,J. & Lee,K.L.,1975, Bearing Capacity Analysis of Reinforced slabs. J.Geotech.eng div.,ASCE,101,GT12,pp1241-1255.
- 3) J.W Ju & I.N Jung , 1995, Bearing Capacity of Geonet Reinforced Sandy Ground,pp.47-64, '95 GeosyntheticsConference,30November, Seoul,Korea.
- 4) C. Huang & F. Tatsuoka,1990, Bearing Capacity of Reinforced Sandy Ground
- 5)곽정민, 1994, 다중체낙하법에 의한 상대밀도 재현에 관한 연구, 순천대학교 석사학위논문.
- 6)주재우,손순중,정인규,최혁남,1996,토목섬유보강지반에서 상대밀도의 영향,대한토목학회 논문발표회, 토질기초분야 (V),pp499-502.