토목섬유로 보강된 연약지반의 정 · 동적 모형실험
Static and Repeat Loads Model Test on Soft Clay Layer due to the Geotextile Reinforcement

김영수[1], Kim-Young Su, 권성목[2], Kwon-Sung Mok, 김연욱[3], Kim-yeun wook, 김형준[4], Kim-Hyoung Jun

[1] 경북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, KyungPook University
[2] 포스코건설 차장, 공학박사 수료, Posco enc Deputy Chief
[3] 경북대학교 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, KyungPook University
[4] 경북대학교 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, KyungPook University

SYNOPSIS : Recently geosynthetics that can be constructed on soft ground have been used for reinforcement and separation in various ways. Through laboratory model tests and numerical analysis, in this study, estimated the suitability of cable elements and appropriate input factors considering loading effect in modeling of geosynthetics. First, in laboratory model tests, geosynthetics were constructed on the clay, and covered with the thickness, 7.5cm of sand mat. And then static and dynamic model tests were performed measuring loading, settlement, ground lateral displacement, and displacements of geosynthetics, but, for cyclic loading, bearing capacity increased linearly with stiff slop because cyclic loading with constant cyclic pressure compacted the ground. Numerical analysis were performed with FLAC 4.0 2D using Mohr-Coulomb and Modified Cam-Clay models, and they compared with the results of model tests. Cable elements of FLAC in modeling geosynthetics couldn't consider the characteristics of geosynthetics that increase shear strength between geosynthetics and clay according to the loading increase. Therefore, in this study, appropriate equation that can consider loading effects in Cable elements was proposed by Case Study.

Key words : Geotextile, Static, Repeat loading, Numerical analysis

1. 서 론

연약지반위에 토목섬유와 sand mat층을 포설하는 보강 메카니즘에 관한 연구는 지속적으로 진행되고 있으며 이에 대한 지지력을 평가하는 이론식들은 많이 제시되어 있다. 그러나 실제 설계에 반영하고 있는 이론식들은 토목섬유와 흙과의 마찰의 영향과 하중재하에 따른 연약지반의 근입깊이의 영향을 무시하거나 명확하지 않은 계수를 사용하는 등의 모순점을 나타내고 있다. 또 기존의 상용프로그램을 이용하여 토목섬유로 보강된 지반의 설계에 있어서는 사면이나 보강토 옹벽에서 부분적으로 사용하고 있으며 연약지반상의 토목섬유로 보강된 sand mat 의 설계에 대해서는 상용프로그램의 사용이 전무한 실정이다. 현제 토목섬유로 보강된 지반의 상용프로그램을 이용한 설계 방법 또한 단순히 섬유와 흙의 각각의 물성을 입력하여 해석함으로서 흙과 섬유간의 하중에 따른 마찰특성을 제대로 고려하지 않고 있다. 이에 본 논문에서는 실내 정·동하중 모형실험을 통하여 지표변위와 지중변위, 하중에 따른 토목섬유의 변위량을 측정하였고. 이를 통해 기존의 상용프로그램인 FLAC 4.0 2d를 이용하여 토목섬유를 이용한 sand mat층 포설시 토목섬유의 보강조건을 달리했을 때의 적절한 지반의 적용 model과 수치해석에서 토목섬유의 modeling시 cable요소 사용의 적합성 여부를 판단하고 하중의 영향을 고려한 연약지반 토목섬유의 적절한 입력요소에 대해 판단해 보고져 한다.

2. 시료 및 시험방법

2.1 점토시료및 토목섬유의 특성

시료는 충분한 함수비를 가지도록 물을 첨가하여 교반기로 교반한 후 슬러리 상태에서 200번체(0.074mm)를 통과시켜 원지반 내에 함유되어 있는 유기질 및 불순물을 제거하였다. 점토시료의 기본적인 물리적 특성은 표 1 과 같으며, 토목섬유는 인장강도 5t/m의 woven geotextile을 사용하였다.

표 1. 점토시료의 물성치

Gs	LL(%)	PL(%)	PI(%)	#200 통과율(%)	USCS
2.55	50.41	28.52	21.89	98	CH

2.2 시험방법

2.2.1 하중 재하실험

정하중 실험과 반복하중 실험 모두 N값이 2~4정도인 연약지반을 형성하기 위해 0.5kg/㎠의 하중으로 90% 이상 압밀을 실시하였다.

1) 정하중 재하 실험
하중재하는 매 단계 0.1kg/㎠씩 점진적으로 재하 하였으며 평판재하 실험시의 하중재하 방식을 사용하여 15분 동안 1/100mm의 침하가 일어나지 않을 때 다음단계의 하중을 재하 하였다.
2) 반복하중 재하 실험
0.7kg/㎠의 하중으로 1회/sec로 재하 하였으며 전체 침하량이 전체 시료 높이의 약 25% 발생할 때까지 재하 하였다. 그림 1은 전반적인 장치의 개략도를 나타낸 것이며 표 2는 전체적인 실험조건을 요약한 표이다.

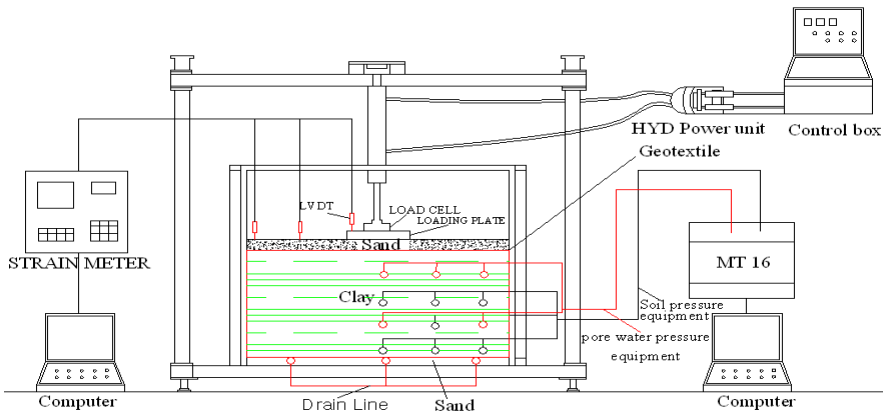
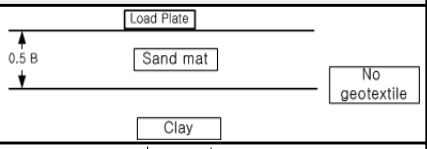
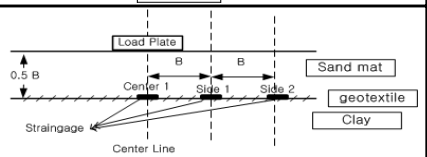
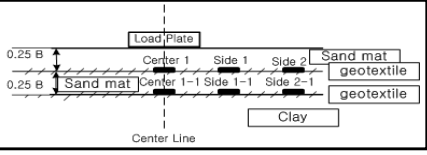


그림 1. 장치 개략도

표 2. 하중 재하실험 요약

하중조건	보강조건	보강 형상	지반조성 압밀하중	하중(kg/㎠) 정하중	하중(kg/㎠) 반복하중	비 고
정하중 (0.1kg/㎠의 단계하중) 및 반복하중 (0.7kg/㎠)	무보강		0.5kg/㎠	0.2~1.3	약 500회	반복하중 (1회/sec)
	1층 보강		0.5kg/㎠	0.2~1.6	약 3500회	
	2층 보강		0.5kg/㎠	0.2~2.3	약 15000회	

3. 실내시험 결과

3.1 정하중 시험 결과

그림 2는 본 연구에서 수행한 세 가지 보강 조건에 대한 하중과 침하관계를 나타낸 것이다. 동일 침하량일때 재하 하중을 각각 비교해 보면 무보강 조건의 경우보다 1층 보강에서 지지력이 약 117%크게 나타났으며 2층 보강에서는 약 147%의 지지력 증대가 나타났는데 이는 토목섬유가 인장력을 발휘해 지지력을 증대시킨 효과라 볼 수 있다.

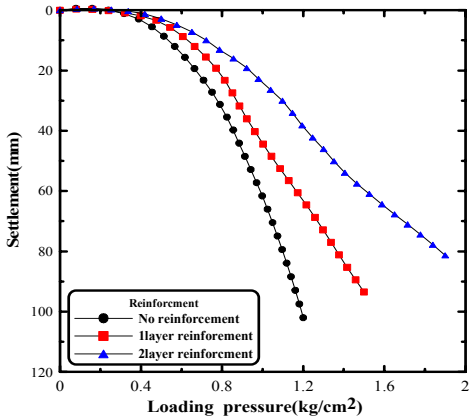
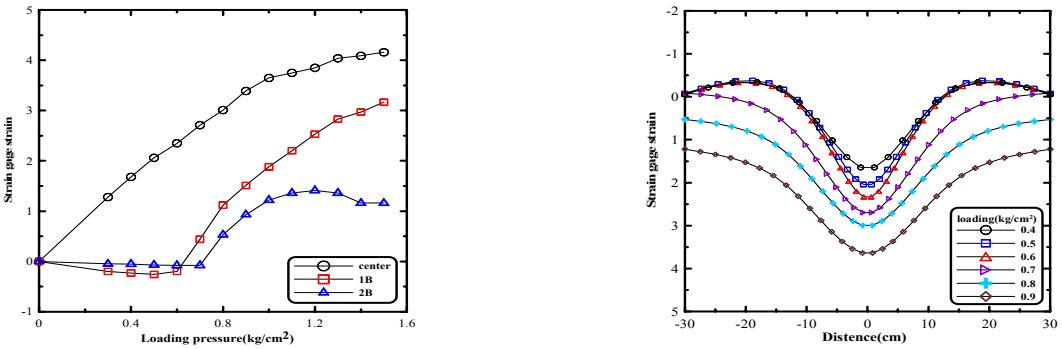


그림 2. 하중과 침하관계

3.1.1 Woven Geotextile의 거동

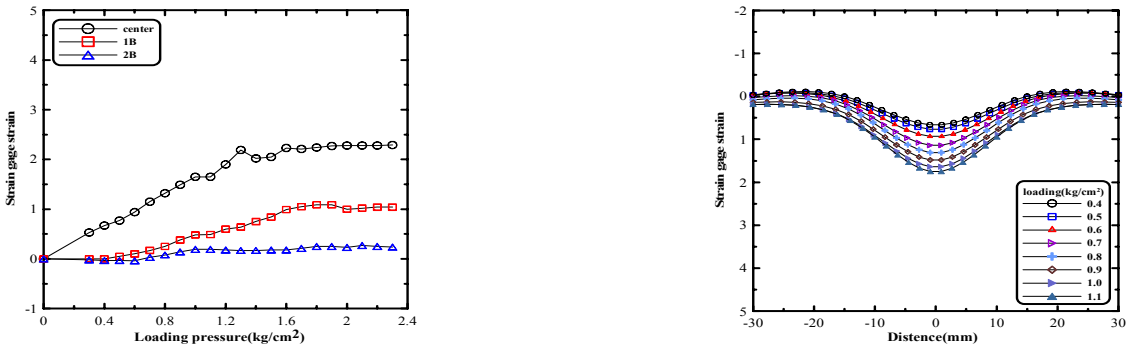
그림 3과 그림 4는 각각 1층보강 일때와 2층보강 일때 모래와 점토사이의 토목섬유의 변위량을 보여주는 것이다. 하중판 폭(B)만큼 떨어진 부분에서는 작은 하중단계에서는 두드러진 압축양상을 보이던 1층 보강의 경우와 달리 미세한 압축양상을 나타내고 있으며 재하하중의 크기가 커질수록 섬유가 인장

양상을 보이는 폭이 점점 증가하고 있음을 보여주고 있다. 전체적으로 하중단계가 증가함에 따른 섬유의 인장 변위가 1층 보강때와 비교하여 변위의 폭이 현저히 감소했음을 알 수 있다. 이는 모래층 사이에 보강된 섬유가 어느 정도의 인장력을 분담하고 있으며 섬유와 섬유사이의 모래층이 토목섬유와 고착되어 토목섬유 부근에서 흙이 밀실한 상태가 됨으로서 지지력의 증가에 기여하는 것으로 판단된다.



(a) 하중과 변위 관계 (b) 위치별 변위량 관계

그림 3. 1층 보강일 때 토목섬유의 변위량

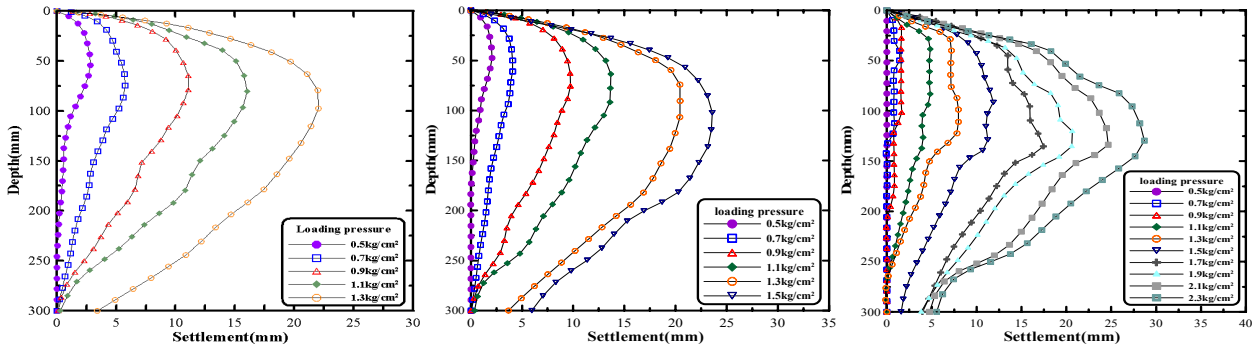


(a)하중과 변위 관계 (b) 위치별 변위량 관계

그림 4. 2층 보강일 때 토목섬유의 변위량

3.1.2 지중 측방변위

그림 5는 각 보강별 재하판 edge부분의 지중 측방변위를 측정한 결과이다. 보강층수에 따라서 측방 변위량이 현저하게 줄어들며 최대 변위가 발생하는 깊이도 점차 깊어지면서 하중 분포가 지중으로 넓게 분포되고 있다. 이는 무보강 상태에서는 국부 전단파괴였으나 섬유 보강으로 전반전단 파괴로 점차 변화됨을 알 수 있다.



(a) 무보강 (b) 1층 보강 (c) 2층 보강

그림 5. 재하판 edge부분의 지중 측방변위

3.2 동하중 시험 결과

표 3은 각 침하량에 따른 정하중의 하중과 반복하중의 반복횟수를 나타낸 것이며 그림 6, 7은 이를 그래프로 나타낸 것이다. 보강효과는 보강층수에 따라 선형적인 증가를 보이지만 침하가 깊어질수록 정하중시험 보다는 반복하중 시험에 보강효과가 크게 나타내는 것을 알 수 있으며 이는 반복 하중시 지반의 다짐과 동일하중으로 재하 시킨 결과라 판단된다

표 3. 동일 침하량 일때 하중 - Cycle 수 비교

침하량	20mm		40mm		60mm		80mm	
하중	정하중 (kg/㎠)	반복하중 (N)	정하중 (kg/㎠)	반복하중 (N)	정하중 (kg/㎠)	반복하중 (N)	정하중 (kg/㎠)	반복하중 (N)
무보강	0.57	20	0.75	120	0.87	190	1	280
1층보강	0.67	30	0.87	220	1.07	1100	1.24	1800
2층보강	0.98	150	1.28	1000	1.57	4000	1.97	8000

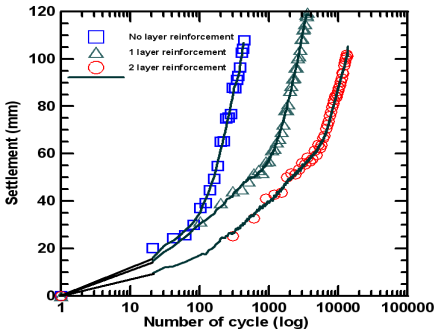


그림 6. 침하량과 반복 횟수 관계

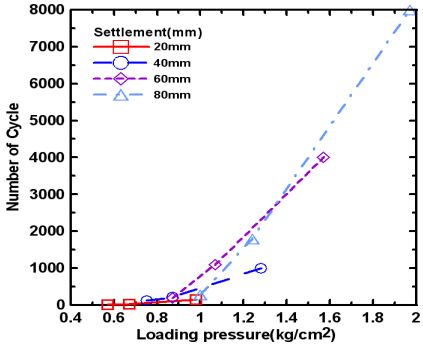


그림 7. 침하량 정, 동하중 관계

4. 수치해석

4.1 수치해석 방법 및 입력 물성치

본 논문에서 수행된 수치해석에는 탄성범위를 넘는 지반의 비선형 거동을 비교적 쉽고 정확하게 모델링 할 수 있는 2차원 유한차분 해석 프로그램인 FLAC 4.0 2d가 사용되었다. 지반해석 model은 Mohr-Coulomb과 Modified Cam-clay model을 사용하여 실험 계측치와 비교 해석을 실시하였다. 수치해석으로 실제에 가까운 결과를 얻기 위해서 실제 시공방법과 시공순서를 정확히 시뮬레이션 하였고 특히 Modified Cam-clay model을 사용하였을 경우 모형실험에서의 하중재하 시간을 고려하여 해석을 실시하였다. 토목섬유는 cable 요소를 이용하여 실내모형 실험시 사용섬유인 wonen geotextile이 점토층과 모래층 사이에 위치하였을 때의 적합성에 대해 판단하였다.

4.1.1 지반 입력 물성치

표 4와 표 5는 수치해석에 적용한 입력 물성치를 나타낸 것이다. sand mat로 사용한 건조모래의 경우 삼축압축 시험으로 결정한 물성치이며, 점토는 일축압축 및 삼축압축 시험을 통해 결정하였다.

표 4. 모래 입력 물성치

	단위중량(t/㎥)	탄성계수(t/㎡)	포아송비	점착력(t/㎡)	내부마찰각(°)
건조모래	1.7	3000	0.25	0	34

표 5. 점토 입력 물성치

	단위중량(t/㎥)	탄성계수(t/㎡)	포아송비	점착력(t/㎡)	lambda	kappa
해성점토	1.8	390	0.3	2.0	0.146	0.023

4.1.2 Woven Geotextile의 입력 물성치

Woven geotextile 입력자료는 표 6과 같으며 고유의 물성이외에 섬유 인장 실험을 통하여 검증된 값을 사용하였다. 요소와 매질간의 물성은 ITASCA Consulting Group Inc.에서 cable요소 사용시 FLAC에서 사용하기 위한 합리적인 K_{bond} 추정 식이라고 제시한 식(1)과 식(3)을 그대로 적용하였다.

표 6. 토목섬유 입력 물성치

물성 요소 / 사용섬유	섬유 고유물성			섬유와 흙간의 물성		
	Area	Young's modulus	Tensile strength	Bond stiffness	Bond strength	Bond friction angle
Woven Geotextile	0.005(㎡)	4818000(t/㎡)	5(t/m)	637(t/㎡)	0.2(t/m)	30(°)

5. 수치해석 결과

5.1 하중단계에 따른 침하량

그림 9는 무보강일때 침하량을 계측치와 수치해석을 통해 결과를 비교한 것이다. Mohr-Columb model을 사용하였을 때 보다 Cam-Clay model을 사용 하였을때 실험 계측치와 유사한 거동을 나타내고 있다.

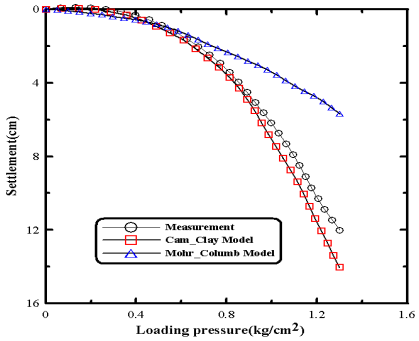


그림 9. 하중과 침하 관계 (무 보강)

5.2 토목섬유에 대한 케이블요소의 적용성

많은 경우에 아래의 식 (1)이 FLAC에서 사용하기 위한 합리적인 K_{bond} 추정식인 것으로 알려졌다.

$$K_{bond} \cong \frac{2\pi G}{10\ln(1+2t/D)} \quad (1)$$

여기서, D : 토목섬유의 두께, t : 고리($annulus$)의 두께, G : 주변지반의 전단탄성계수

케이블 길이당 최대 전단력은 식(2)로 결정한다. 점착강도와 마찰각은 서로 다른 봉압하에서의 인발시험을 통해 결정할 수 있으며 그러한 결과가 없을 경우 단위 길이당 최대력은 최대 전단강도로부터 근사될 수 있다 (St. John & Van Dillen,1983).

$$\tau_{peak} = \tau_I Q_B \quad (2)$$

τ_I는 재료의 일축 압축강도의 반 정도가 되며 Q_B는 그라우트와 암석간의 결합품질을 나타낸다. 마찰구속효과를 무시할 때 S_{bond} 는 다음 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$S_{bond} = \pi(D+2t)\tau_{peak} \quad (3)$$

본 연구에서는 토목섬유를 cable요소로 모사함에 있어서 하중의 영향을 배제한 기존의 제안식의 적용은 불합리하다고 판단하여 실내실험 결과를 바탕으로 적절한 섬유와 매질간의 강성과 점착력을 case study를 통하여 토목섬유에 맞는 적절한 경험식 (4)을 제안하였다.

$$S_{bond(g)} = 3.4n\left(S_{bond} + \frac{2\sigma_p}{5L}\right) \quad (4)$$

여기서 σ_p: 하중(P/m^2), n : 보강재갯수, L : 재하판길이(m), S_{bond}: 그라우트의점착력(P/m)

τ_I는 토목섬유와 접하는 점토층 일축압축강도의 반 정도가 되며 Q_B는 토목섬유와 흙 간의 결합품질을 나타낸다.(완전결합의 경우 Q_B =)1 그림 10, 11은 점토층과 모래층 사이에 토목섬유로 보강된 지반의 하중단계에 따른 침하량을 실측치와 기존의 cable요소 사용 시 매질과 보강재간의 점착력 공식과 본 연구에서 제안한 식을 이용하여 수치 해석한 결과를 비교한 것이다. 매질과 보강재 간의 점착력은 재하하중에 따라 상관된다는 제안식이 실측치와 어느 정도 유사한 거동을 보이고 있음을 보여준다.

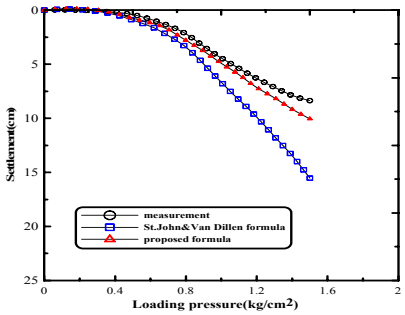


그림 10. 하중과 침하 관계 (1층 보강)

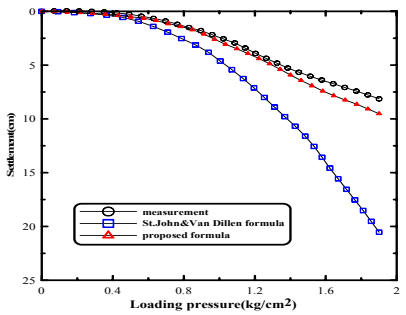


그림 11. 하중과 침하 관계 (2층 보강)

6. 결 론

Woven geotextile을 이용한 연약지반 표층 보강공법 중 sand mat공법에 대한 정량적인 설계지침을 마련할

목적으로 실시된 실내실험 결과와 수치해석과의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연약지반 표층처리에 관한 실내실험에 의한 계측치와 수치해석치의 비교분석결과 하중의 영향을 고려하지 않은 기존의 cable요소 사용 시 적용공식을 그대로 사용하는 것은 문제가 있다고 생각하여 본 논문에서는 점토와 모래 사이의 토목섬유에 대하여 case study를 통하여 경험식을 제안하였다.

2. 보강층수를 늘릴수록 섬유의 인장력 증가로 정하중에서는 동일 침하량 기준으로 지지력이 117~147%증가하였으며 반복하중에서는 선형적으로 큰 증가가 나타났는데 이는 반복하중에서 지반의 다짐으로 지지력이 증가와 재하시 압력을 증가시키지 않고 동일한 하중으로 재하 시킨 결과로 추측된다

3. 토목섬유로 보강된 sand mat에서 작은 하중에서의 토목섬유는 재하하중의 폭(B)의 2B폭에서는 약간의 압축양상을 나타내며 재하하중의 크기가 증가할수록 압축양상은 소멸되며 인장양상을 보이는 폭이 점점 증가하는 것으로 나타났다. 이때 재하 초기에 발생하는 압축양상은 sand mat보강에 따른 하중분산에 의한 지지효과로 인하여 점토지반에 하중이 크게 작용하지 않은 것으로 판단된다.

4. 하중재하에 따른 측방 변위량은 보강 층수에 따라 급격히 감소되었으며 최대 변위가 발생하는 깊이도 점차 깊어지면서 파괴 형태가 국부 전단파괴에서 전반 전단 파괴로 변화되는 것을 알 수 있다.

5. 보강조건에 따른 파괴 양상을 보면 무보강의 경우 파괴균열이 전단 Zone을 따라 길게 형성되면서 파괴되었으나 보강 조건이 좋을수록 파괴균열의 기울기와 길이는 작아지며 균열 발생영역 또한 폭넓게 분포됨으로서 토목섬유가 지반의 지지력 증진에 기여하고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Adams, M.T . and Collin, J .C. (1997), "Large Model Spread Footing Load Test s on Geosynthetic Reinforced Soil Foundations", *J ournal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng ineering* , Vol. 123, No.1, pp.66~72.
2. Akinmusuru, J .O. and Akinbolande, J .A. (1981), "St ability of Loaded Footings on Reinforced Soil", *J ournal of Geotechnical Eng ineering ,* Vol. 107, No. GT,pp.819~827.
3. Binquet , J ., and Lee, K.L. (1975), "Bearing capacity test s on reinfoeced earth mas s, *J ournal of Geotechnical Eng ineering Divis ion*, ASCE, Vol. 101, No. GT 12, pp.1241~1255.
4. Binquet , J ., and Lee, K.L. (1975), Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs , *J ournal of Geotechnical Eng ineering Divis ion*, ASCE, Vol. 101, No. GT 12, pp.1257~1276.
5. 양기석, 양태선(2003), “연약지반상에 작용하는 정하중 및 동하중 비교모형재하시험”, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집 pp.3537~3542.
6. “Astudy of Geotextile and Reinforced Earth Method", 한국건설 기술연구원 Reserch Report pp.120~125.
7. Das, B.M. and Omar , M.T . (1994), "T he Effect s of Foundation Width on Model T est s for Bearing Capacity of Sand with Geogrid Reinforcement ", *Geotechnical and Geolog ical Eng ineering,* Vol. 12, No. 2, pp.133~141.
8. Das, B.M. and Shin, E.C. (1998), "Ultimat e Bearing Capacity of Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Sand", *4th International Symp os ium on Environmental Geotechnical and Global S us tainable Development*.
9. Das, B.M. (1999), Shallow Foundations ; Bearing Capacity and Settlement , CRC Press LLC, pp. 287~321.