

토목섬유로 보강한 연약지반의 정·반복하중 모형실험에 의한 평가

Assessments of Static and Cyclic Load Model Test on Soft Clay Layer Reinforced by Geosynthetics

김 영 수¹ Kim, Young-Su

권 성 목² Kwon, Sung-Mok

김 연 옥³ Kim, Yeun-Wook

김 형 준⁴ Kim, Hyoung-Jun

Abstract

Each static and cyclic load test was performed in a laboratory model test. As a result, ground displacement decreased and bearing capacity of the soil increased owing to the shear strength of geosynthetics in general. In addition, numerical analysis was operated using Mohr-Coulomb, Modified Cam-Clay models, and FLAC 4.0 2D and compared with the laboratory model test. The results were shown to be of a great difference because the existing equations had not considered the characteristics that shear strength increases with a load increment. Therefore, this paper proposes an equation of cable elements considering an effect of load given through repeated tests.

요 지

실내 모형실험으로 정,반복하중 재하 실험을 실시하여 하중과 침하, 지중 측방변위, 토목섬유 변위 등을 측정하고 결과 지반과의 마찰과 토목섬유 인장력의 영향으로 전반적으로 지반의 변위가 줄고 지지력이 증가하였다. 또한 Mohr-Coulomb 및 수정Mohr-Coulomb 모델들과 FLAC 4.0 2D를 사용하여 수치해석을 실시하였고 실내 모형 실험결과와 비교하였다. 기존식들은 토목섬유 모델링시 FLAC의 케이블 요소는 하중증가에 따른 전단강도를 증가되는 특성을 고려할수 없었기 때문에 실험 결과치와 상이하게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 반복적인 하중으로 상재 하중의 영향을 고려한 케이블 구성요소의 적절한 식을 제시하였다.

Keywords : Cable, Cyclic load, Geosynthetics, Numerical analysis, Static load

1. 서 론

연약지반위에 토목섬유와 샌드 매트(sand mat)층을 포설하는 보강 메카니즘에 관한 연구는 지속적으로 진행되고 있으나 토목섬유와 흙과의 마찰의 영향과 하중재하에 따른 연약지반의 근입깊이의 영향을 무시하거나 명확하지 않은 계수를 사용하는 등의 모순점을 나타내고 있다. 연약지반상의 토목섬유로 보강된 샌드 매트설계에 대해서는 상용프로그램의 사용이 전무한 실정이다. 현재

토목섬유로 보강된 지반의 상용프로그램을 이용한 설계 방법 또한 단순히 섬유와 흙의 각각의 물성을 입력하여 해석함으로써 흙과 섬유간의 하중에 따른 마찰특성을 제대로 고려하지 않고 있다. 또한 McGown(1981)는 토목섬유는 선형 요소로 흙-토목섬유의 마찰력은 스프링 요소로 표현하여 해석하였으며 Andrawes(1982)등은 흙은 삼각형 또는 사각형 요소로 하고 비선형 탄성 변곡선 모델로 하여 토목섬유는 직선의 선형요소로 흙-토목섬유의 인터페이스(interface) 요소는 스프링 요소로 하는

1 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수 (Member, Pro., Dept. of Civil Engrg., KyungPook Univ.)

2 정회원, (주)포스코건설 차장, 기술사 (Member, Deputy General Manager, POSCO E&C Co., Ltd. P.E, kwonsm@poscoenc.com)

3 정회원, (주)다산 ENG 사원 (Member, Engineer, Dasan ENG Co., Ltd.)

4 정회원, 동아건설탄트(주) 사원 (Member, Engineer, Dong A Consultant Co., Ltd)

프로그램을 개발하였다. 본 연구에서는 실내 정·동하중 모형실험을 통하여 지표변위와 지중변위, 하중에 따른 토목섬유의 변위량을 측정하였고, 이를 통해 기존의 상용프로그램인 FLAC 4.0 2D를 이용하여 토목섬유를 이용한 샌드 매트층 포설시 토목섬유의 보강조건을 달리 했을 때의 적절한 지반의 적용 모델과 수치해석에서 토목섬유 모델링(modeling)시 케이블 요소 사용의 적합성 여부를 판단하고 하중의 영향을 고려한 연약지반 토목섬유의 적절한 입력요소에 대해 판단하고자 한다.

2. 시료 및 실험방법

2.1 시료 및 토목섬유

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

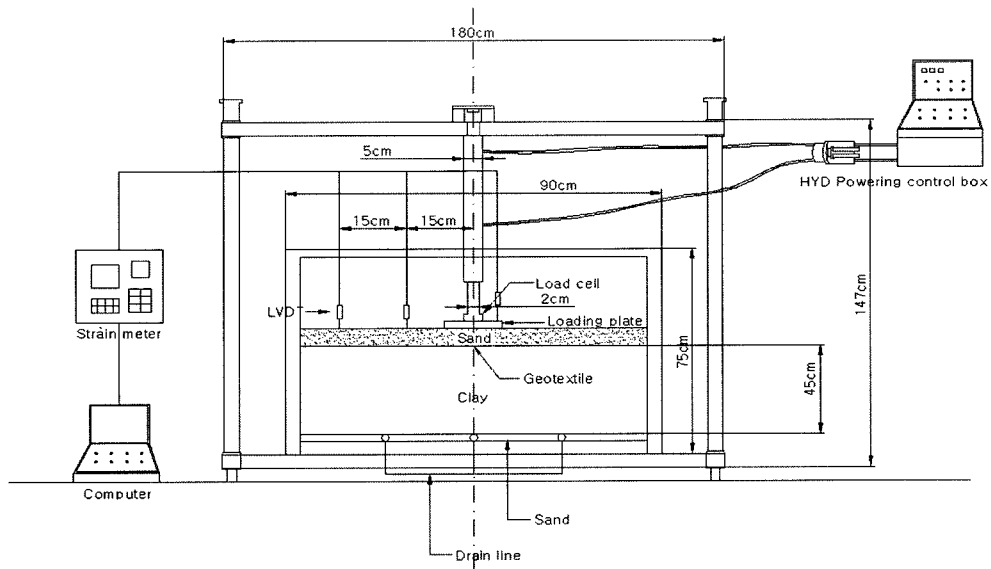


그림 1. 모형 실험 장치

표 1. 점토시료의 물성치

G_s	LL (%)	PL (%)	PI (%)	200번체 통과율 (%)	통일 분류기호
2.55	50.41	28.52	21.89	98	CH

표 2. 하중 재하실험 요약

하중조건	보강조건	보강 형상	지반조성 압밀하중	하중(kgf/cm ²)		비고
				정하중	반복하중	
정하중 및 반복하중 (0.7kgf/cm ²)	무보강		0.5kgf/cm ²	0.2~1.3	약 500회	하중판 (15cm×15cm)
	1층 보강		0.5kgf/cm ²	0.2~1.6	약 3500회	
	2층 보강		0.5kgf/cm ²	0.2~2.3	약 15000회	

스타일(woven geotextile)을 사용하였다. 또한 모래는 낙동강에서 채취하였으며 불순물을 제거하여 사용하였다.

2.2 하중재하 실험

그림 1은 전반적인 실험 장치를 나타낸 것으로서, 모형틀은 길이(90cm)×높이(75cm)×폭(15cm)의 크기로 제작하였으며 변위 측정장치(LVDT)와 변형률계(Strain gage)를 각각 데이터 로거에 연결하여 10초 간격으로 하중과 변위를 측정하였고 하중재하 모터박스를 이용하여 각 단계별 하중을 재하하였다. 표 2는 전체적인 실험 조건을 요약한 표이다.

정하중 실험과 반복하중 실험 모두 N값이 2~4정도 인 연약지반을 형성하기 위해 점토를 0.5kgf/cm²의 하중으로 90% 이상 압밀을 실시한 후 토목섬유를 설치하고 약 20cm 높이에서 모래가 등분포 되도록 포설하였다. 또한 지중변위 측정은 점토 표면에 표점을 설치하여 변위를 계측하였다.

(1) 정하중 재하 실험

하중재하는 매 단계 0.1kgf/cm²씩 점진적으로 재하하였으며 평판재하시험시의 하재하 방식을 사용하여 15분 동안 1/100mm의 침하가 일어나지 않을 때 다음단계의 하중을 재하하였다.

(2) 반복하중 재하 실험

0.7kgf/cm²의 하중으로 1회/sec로 재하하였으며 전체 침하량이 전체 시료 높이의 약 25% 발생할 때까지 재하하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정하중 실험결과

그림 2는 정하중 재하시 세 가지 보강 조건에 대한 하중과 침하관계를 나타낸 것이며 토목섬유 설치매수(층수)가 증가할수록 지지력은 증가하고 침하는 상대적으로 적게 발생한다. 또한 침하가 증가할수록 명확한 항복점은 나타나지 않고 있다. 이는 지반이 항복한 후에도 지중에 부설한 토목섬유가 인장력과 마찰력을 계속 발휘하기 때문이라 판단된다(G.V. RAO & R.K. DUTTA, 2002).

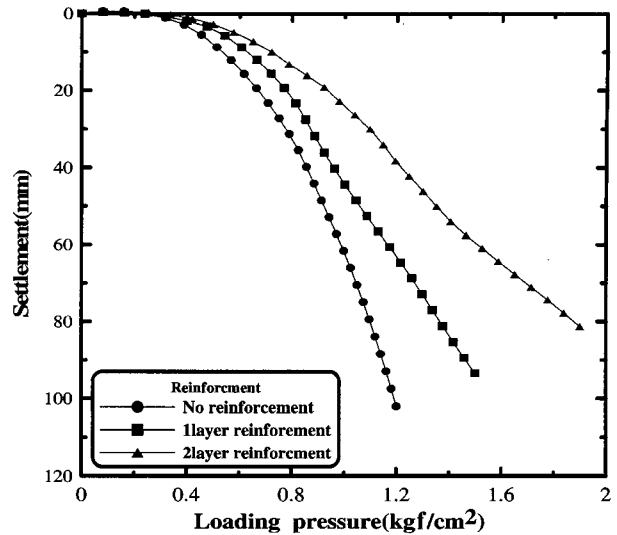


그림 2. 하중과 침하관계

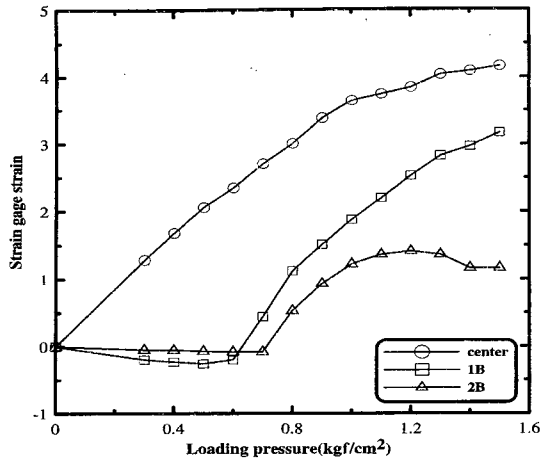
또한 동일 침하량일 때 재하 하중을 각각 비교해 보면 무보강 조건의 경우보다 1층 보강에서 지지력이 약 117%~124% 크게 나타났으며 2층 보강에서는 약 171%~197%의 지지력 증대가 나타났는데 이는 토목섬유가 인장력과 마찰력을 발휘해 지반의 지지력을 증대시킨 효과라 볼 수 있다(황순중, 1989).

3.1.1 토목섬유 매트(직포 지오텍스타일)의 거동

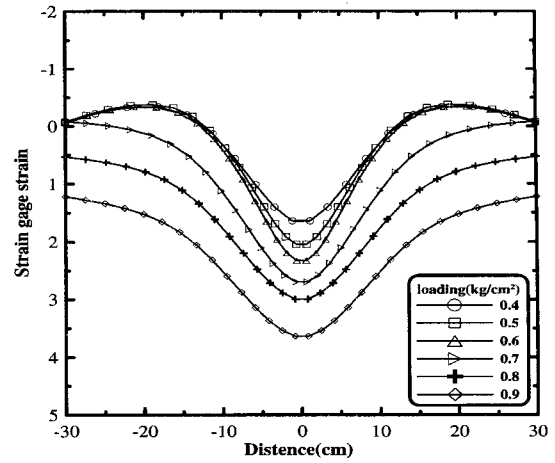
그림 3과 그림 4는 각각 1층 및 2층 보강시 모래와 점토사이의 토목섬유의 변위량을 보여주는 것이다. 1층 보강시에는 하중판 폭(B)만큼 떨어진 위치에서 0.5kgf/cm²까지 하중 재하시 다소 압축양상을 보이나 2층보강에서는 압축 양상이 거의 나타나지 않으며 이는 하중 초기 재하에 따른 인장력 발생 전이라 판단된다. 전체적으로 하중이 증가함에 따라 변위발생이 커지며 2층보강시 인장변위가 1층 보강 때와 비교하여 현저히 감소했음을 알 수 있다(J.G. Collin, T.C. Kinney and X. Fu. 1996). 이는 모래층 사이에 추가로 보강된 토목섬유가 어느 정도의 인장력을 분담하고 있으며 지지력의 증가에 기여하는 것으로 판단된다.

3.1.2 지중 측방변위

그림 5는 각 보강별 재하판 모서리 부분의 지중 측방 변위를 측정한 결과이다. 2층 보강시 동일한 하중단계에서 측방 변위량이 현저하게 줄어들며 최대 변위가 발생하는 깊이도 점차 깊어지면서 하중 분포가 지중으로 넓게 분포되고(손순중, 1990, 고흥석, 1987) 있다.

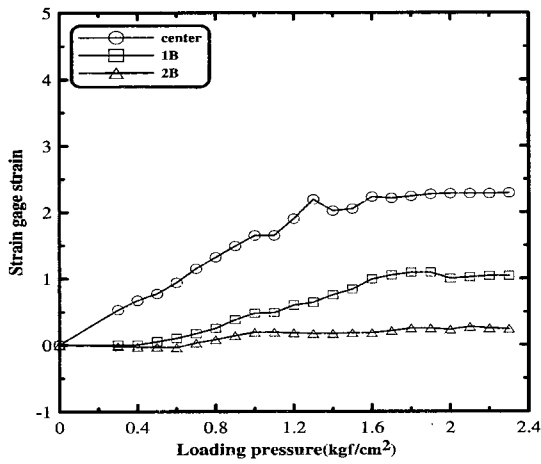


(a) 하중과 변위 관계

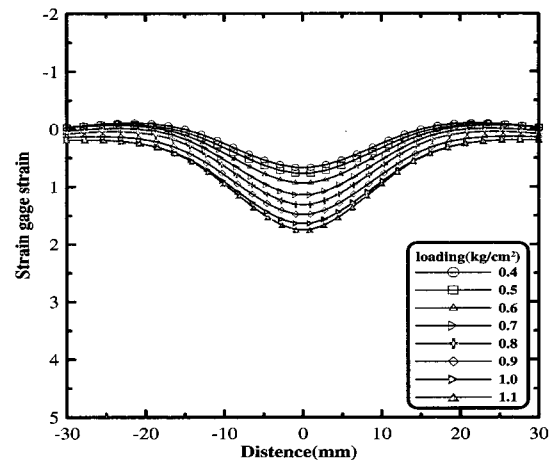


(b) 위치별 변위량 관계

그림 3. 토목섬유의 변위량(1층보강)

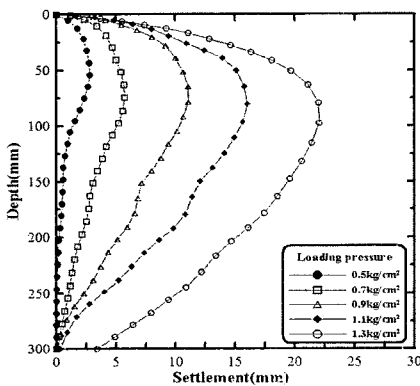


(a) 하중과 변위 관계

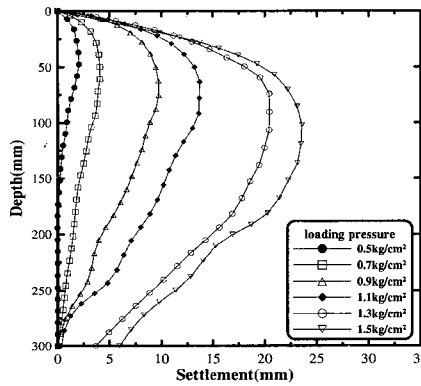


(b) 위치별 변위량 관계

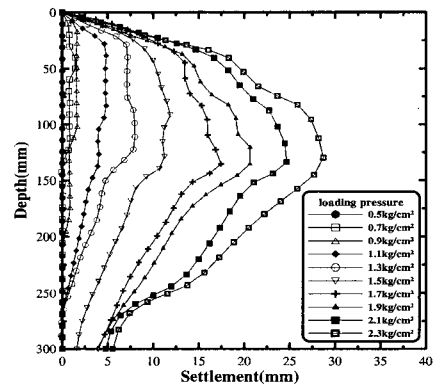
그림 4. 토목섬유의 변위량 (2층보강)



(a) 무보강



(b) 1층 보강



(c) 2층 보강

그림 5. 재하판 모서리 부분의 지중 축방변위

3.2 반복하중 실험 결과

그림 6은 반복하중 재하시 각 보강 조건에 대한 하중

과 침하관계를 나타낸 것이며, 항복 반복하중수를 각각 비교해 보면 무 보강시 120회, 1층 보강시 1200회, 2층 보강시 7000회로 급격히 재하수 증가가 나타났으며 하

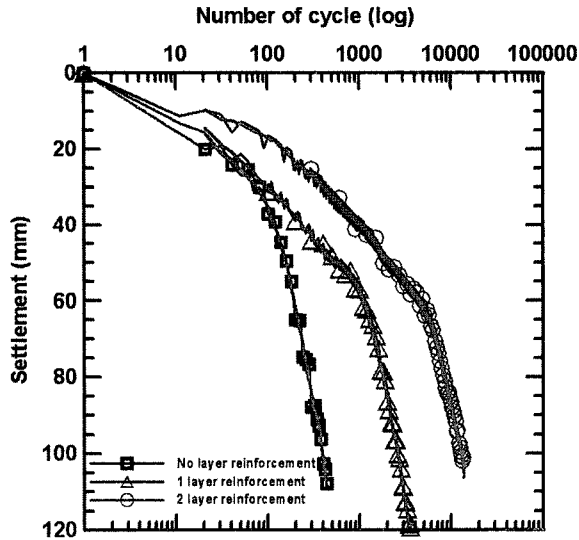


그림 6. 반복하중과 침하량

중재하에 따른 변위는 서서히 증가하다가 다소 시간과 하중이 경과한 후 급격히 침하가 발생되었다. 이는 하중 재하와 하중 제거에 따른 지반의 반복 이력효과로 추측된다. 또한 정하중보다는 반복하중에서 보강효과가 더 크게 나타났으므로 실제 현장에서 활용시 효과가 있을 것으로 예상된다.

3.2.1 정하중과 반복하중과의 관계

표 3은 각 침하량에 따른 정하중의 하중과 반복 하중 수를 나타낸 것이며 그림 7은 이를 그래프로 나타낸 것이다. 보강효과는 보강층수에 따라 선형적인 증가를 보이지만 침하가 깊어질수록 정하중시험 보다는 반복하중 시험에 보강효과가 다소 크게 나타내는 것을 알 수 있으며 이는 신속 재하조건에서 동일한 하중으로 반복 재하시킨 결과라 판단된다. 또한 정하중과 반복 하중수를 비교한 그래프는 정하중 실험으로서 반복하중시 침하량을 추정할 수 있도록 하기 위함이다.

3.3 정하중 수치해석 결과

본 연구에서 수행된 수치해석에는 탄성범위를 넘는 지반의 비선형 거동을 비교적 쉽고 정확하게 모델링할 수 있는 2차원 유한차분 해석 프로그램인 FLAC 4.0 2D를 사용하였다. 지반해석 모델은 Mohr-Coulomb과 수정 Cam-clay 모델을 사용하여 모형실험 계측치와 해석치를 비교분석하였다. 수치해석으로 실제에 가까운 결과를 얻기 위해서 실제 시공방법과 시공순서를 정확히 시뮬레이션 하였고 특히 수정 Cam-clay 모델을 사용하였을 경우 모형실험에서의 하중재하 시간을 고려하여 해석을 실시하였다. 토목섬유는 케이블 요소를

표 3. 동일 침하량 일때 하중 - Cycle 수 비교

침하량	20mm		40mm		60mm		80mm	
	정하중 (kgf/cm ²)	반복하중 (N)	정하중 (kgf/cm ²)	반복하중 (N)	정하중 (kgf/cm ²)	반복하중 (N)	정하중 (kgf/cm ²)	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

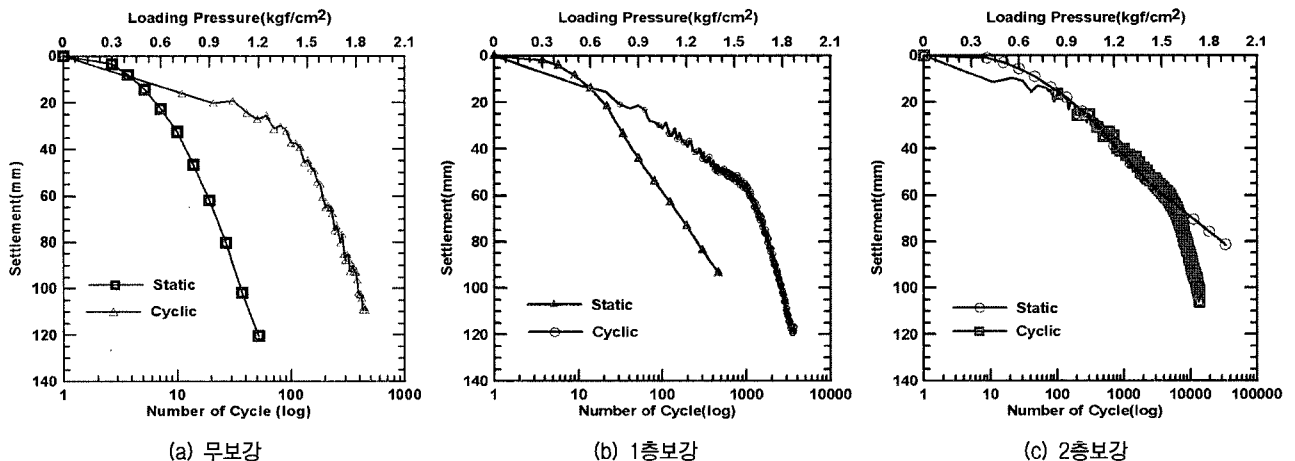


그림 7. 정하중과 반복하중과의 관계

이용하여 적합성에 대해 판단하였다.

3.3.1 지반 입력 물성치

표 4와 표 5는 수치해석에 적용한 입력 물성치를 나타낸 것이다. 샌드 매트르 사용한 건조모래의 경우 삼축 압축 시험으로 결정된 물성치이며, 점토는 일축압축 및 삼축압축시험을 통해 결정하였다.

3.3.2 Woven Geotextile의 입력 물성치

직포 지오텍스타일의 입력자료는 표 6과 같으며 고유의 물성이외에 섬유 인장 실험을 통하여 검증된 값을 사용하였다. 요소와 매질간의 물성은 ITASCA 사에서 케이블 요소 사용시 FLAC에서 사용하기 위한 합리적인 전단 강성(K_{bond}) 추정식 이라고 제시한 식 (1)과 식 (3)을 그대로 적용하였다.

3.3.3 하중단계에 따른 침하량

그림 8은 무보강일때 침하량을 계측치와 수치해석을 통해 결과를 비교한 것이다. Mohr-Columb 모델을 사용하였을 때 보다 Cam-Clay 모델을 사용 하였을 때 실험 계측치와 유사한 거동을 나타내고 있다.

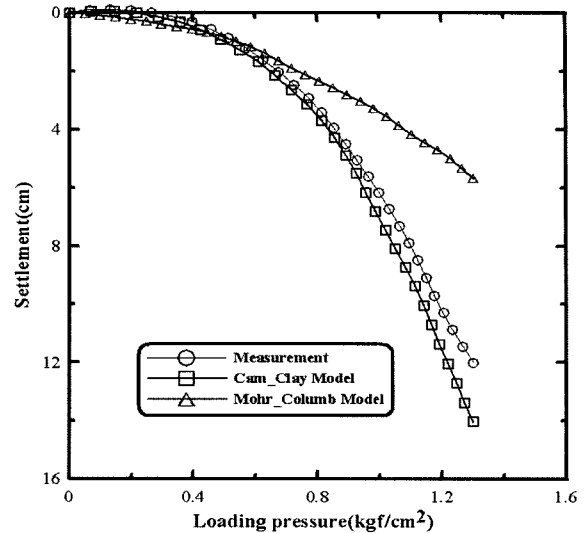


그림 8. 하중과 침하 관계(무 보강)

는 매질, 매질과 매질간의 전단저항에 의해 제공된다. FLAC에서는 식 (1)이 합리적인 전단강성(K_{bond}) 식인 것으로 나타내고 있다.

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

여기서, D : 토목섬유의 두께

t : 고리(annulus)의 두께

G : 주변지반의 전단탄성계수

3.3.4 토목섬유에 대한 케이블 요소의 적용성

본 연구에서는 유한차분법에 의한 해석시 토목섬유를 케이블 요소로 적용 하였다. 보강재의 축 강성뿐만 아니라 휨도 전단변형에 대해서는 중요하며 FLAC에서는 이러한 종류의 모델은 파일요소와 케이블요소를 이용하여 모델링할 수 있다. 이때 케이블요소는 길이에 따른 전단저항을 모델링 할 수 있는데 이는 케이블과 접하

그라우트 고리의 전단거동은 절점에 위치한 스프링-슬라이더시스템으로 표현하였으며, 그라우트 고리의 전단거동은 그라우트의 전단강성으로 나타낼 수 있다. 케이블 길이당 최대 전단력은 식 (2)로 결정한다. 점착강도와 마찰각은 서로 다른 봉압하에서의 인발시험을 통

표 4. 모래 입력 물성치

	단위중량(tf/m ³)	탄성계수(tf/m ²)	포아송비	점착력(tf/m ²)	내부마찰각(°)
건조모래	1.7	3000	0.25	0	34

표 5. 점토 입력 물성치

	단위중량(tf/m ³)	탄성계수(tf/m ²)	포아송비	점착력(tf/m ²)	λ	κ
해성점토	1.8	390	0.3	2.0	0.146	0.023

표 6. 토목섬유 입력 물성치

물성 요소	섬유 고유물성			섬유와 흙간의 물성		
	Area	Young's modulus	Tensile strength	Bond stiffness	Bond strength	Bond friction angle
Woven Geotextile	0.005(m ²)	4818000(tf/m ²)	5(tf/m)	637(tf/m ²)	0.2(tf/m)	30(°)

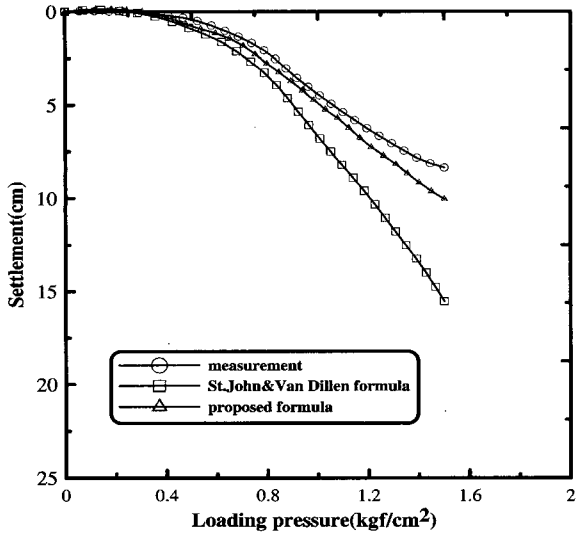


그림 9. 하중과 침하 관계(1층 보강)

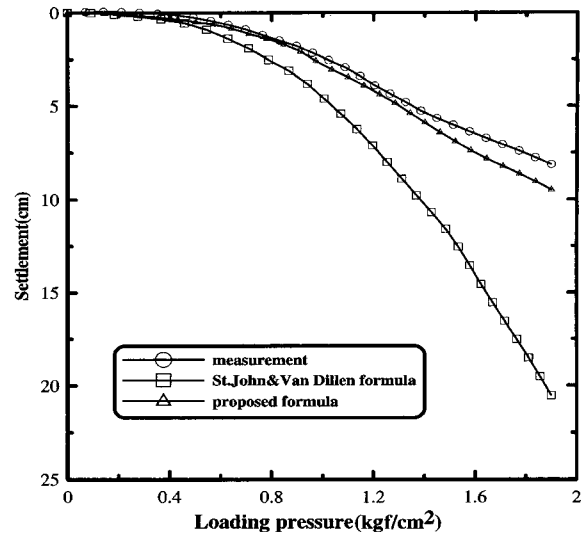


그림 10. 하중과 침하 관계(2층 보강)

해 결정할 수 있으며 그러한 결과가 없을 경우 단위 길이당 최대력은 최대 전단각도로 부터 근사될 수 있다 (St. John & Van Dillen, 1983).

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

τ_I 는 재료의 일축압축강도의 절반 정도가 되며, Q_B 는 그라우트와 암석간의 결합품질을 나타낸다(완전결합의 경우 $Q_B=1$). 마찰구속효과를 무시할 때 그라우트의 점착력 (S_{bond})는 다음 식 (3)으로 구할 수 있다.

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

토목섬유로 보강된 지반 모델링시 토목섬유를 기존의 케이블요소(3)로 적용했을때 수치해석치와 모형실험 계측치와는 상당한 차이가 있었으며, 그 차이는 극한 지지력범위 내에서 하중이 증가함에 따라 더 커지는 경향을 나타내었다. 따라서 하중의 영향과 토목섬유 보강층수가 고려되지 않는 기존의 제안식 (3)의 적용은 모순이 있음을 발견하고 모형실험 결과를 바탕으로 섬유와 매질간의 점착력을 사례연구를 통하여 토목섬유에 적합한 경험식 (4)를 제안하였다.

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

여기서 σ_p : 재하중(P/m^2)

n : 보강재수

L : 재하판 길이(m)

S_{bond} : 그라우트의 점착력(P/m)

그림 9, 10은 점토층과 모래층 사이에 토목섬유로 보강된 지반의 하중단계에 따른 침하량을 실측치와 케이블 요소 사용 시 매질과 보강재간의 점착력 공식과 본 연구에서 제안한 식 (4)를 이용하여 수치 해석한 결과를 비교한 것이다. 매질과 보강재 간의 점착력은 재하하중과 관련된다는 제안식이 실측치와 어느 정도 유사하게 나타났다.

4. 결론

직포 지오텍스타일을 이용한 연약지반 표층 보강공법중 샌드 매트 공법에 대한 정량적인 설계지침을 마련할 적으로 실시된 모형실험 결과와 수치해석과의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Flac 4.0 2D를 사용하여 토목섬유 모델링시 케이블 요소의 기존식 (3)을 적용했을때 하중과 보강층수가 고려되지 않아서 수치해석치와 모형실험 계측 결과와는 상당한 차이가 발생하며 하중이 커질수록 차이는 점점 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 이러한 모순점을 해결하고자 점토와 모래 사이의 토목섬유에 대하여 사례연구를 통하여 토목섬유 케이블 요소 적용에 대한 경험식 (4)를 제안하였다.
- (2) 보강층수를 늘릴수록 섬유의 인장력 증가로 정하중에서는 동일 침하량 기준으로 지지력이 117~197% 증가하였다. 또한 침하가 증가할 수록 명확한 항복점은 나타나지 않았으며 이는 지반이 항복한 후에도

지중에 부설한 토목섬유가 인장력과 마찰력을 계속 발휘하기 때문이라 판단된다.

- (3) 직포 지오텍스타일 거동은 재하판 중심밑에는 인장 변위가 즉시 발휘되나 폭(B) 만큼 떨어진 부분에서는 0.5kgf/cm²까지 재하시 약간의 압축양상을 나타내고 재하하중의 크기가 증가할수록 압축양상은 소멸되며 인장변위 폭이 점점 증가하는 것으로 나타났다. 이때 재하 초기에 발생하는 압축양상은 하중재하 초기시 하중 영향이 재하판 옆에까지는 작용하지 않해서 발생하는 초기현상이라 판단된다.
- (4) 하중재하에 따른 측방 변위량은 2층 보강시 급격히 감소하였으며 최대 변위가 발생하는 깊이도 점차 깊어지면서 하중분포가 지중으로 넓게 분포됨을 알 수 있었다.
- (5) 동하중 재하시에도 정하중 보강 효과와 유사한 경향을 나타내나 항복 변위는 서서히 시간이 경과한 후에 급격히 발생하였다. 이는 하중재하와 제거에 따른 지반의 반복 이력 효과와 동일하중으로 신속하게 재하시킨 결과라 판단된다.

참 고 문 헌

1. 고흥석 (1987), 토목섬유 보강이 점토의 역학적 거동에 미치는 영향, 박사학위논문, 서울대학교, pp.38-112.
2. 손순중 (1990), Geogrid와 Geotextile에 의한 지반보강 효과의 실험 및 해석, 박사학위논문, 전남대학교, pp.91-115.
3. 주재우 등 (2003), 토목섬유-Sand Mat 로 보강한 지반의 지지력 연구, 대한 토목학회 정기 학술대회 논문집, pp.3163-3169.
4. 황순중 (1989), Geotextile을 이용한 모형 연약 지반의 거동 연구, 석사학위논문, 전남대학교, pp.15-37.

5. Adams, M.T. and Collin, J. C. (1997), "Large Model Spread Footing Load Tests on Geosynthetic Reinforced Soil Foundations" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No.1, pp.66-72.
6. Andrawes, K.Z., A. McGown, M.M., Mashhour and R.F. Wilson-Fahmy, and (1982), "The finite element methods of analysis applied to soil geotextile systems", *Proc. of the 2nd Int'l. Conf. on Geotextile*, Vol.3, pp.695-700.
7. Ashmawy, A.K. and Bourdeau. P. L. (1995), "Geosynthetic-Reinforced Soils Under Repeated Loading : A Review and Comparative Design Study", *Geosynthetics International*, Vol.2, No.4, pp.643-678.
8. Binquet, J. and Lee, K.L. (1975), "Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.101, No.GT 12, pp.1257-1276.
9. Cernica, J.W (1995), *Geotechnical Engineering : Foundation Design*, pp.113-134.
10. Das, B.M. and Omar, M.T. (1994), "The Effects of Foundation Width on Model Tests for Bearing Capacity of Sand with Geogrid Reinforcement", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.12, No.2, pp.133-141.
11. Das, B.M. and Shin, E.C. (1998), "Ultimate Bearing Capacity of Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Sand", *4th International Symposium on Environmental Geotechnical and Global Sustainable Development*.
12. Guido, V.A., Chang, D.K. and Sweeney, M.A. (1986), "Comparison of Geogrid and Geotextile Reinforced Earth Slabs", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.23, No.4, pp.436-440.
13. G.V. RAO & R.K. DUTTA. (2002), "Testing and application of coir based geotextiles", *7th International Conference on Geosynthetics*, pp.955-958.
14. J.G. Collin, T.C. Kinney and X. Fu. (1996), "Full scale highway load test of flexible pavement systems with geogrid reinforced base courses", *Geosynthetics International*, pp.537-548.
15. McGown, A., K.Z. Andrawes, M.M. Mashhour and B. Myles (1981), "strain behaviour of soil-fabric model embankments" *proc. of the 10th int'l. Conf. on SM and FE, Stockholm*, pp.739-744.

(접수일자 2005. 5. 31, 심사완료일 2005. 7. 5)