

토목섬유보강지반의 변형거동 해석

Deformation Analysis of Reinforced Earth Using Geotextile

이 진 수*
Lee, Jean Soo

Summary

This study aims at investigating reinforcement effect and deformation behavior relevant to the soft foundation reinforced with geotextile subjected to undrained loading. It also deals with developing the numerical technique for the behavior analysis of the foundation. In a quick loading such as undrained condition, instability may occur in the foundation with geotextile, and the effect of reinforcement may be different depending on the working method as well as the properties of geotextile employed. To scrutinize this problem, 2 dimensional model load tests(7 cases) were performed with the variation of the number of layers covered by geotextile and its spacing. Numerical deformation analysis using elasto-plastic constitutive model was carried out, coupled with the beam element and truss element respectively. The validation was satisfactorily established by the comparison of observational values with numerical results.

I. 서 론

입상체 지반과 달리 배수성이 충분하지 못한 연약한 점성토 지반상에 급속재하가 이루어질 때 점토지반내에 발생한 간극수압은 소산의 여유가 없다. 이러한 단기간, 혹은 비배수 재하동안 점토지반은 지지력 부족과 함께 과도한 변형을 일으켜 종종 불안정을 유발한다. 따라서 재하에 따른 연약지반의 안정화는

지반의 지지력 보강과 변형을 억제시킴으로서 그 성취가 가능하다. 토목섬유를 사용한 연약지반의 안정화 공법은 일종의 얇은층 개량으로서 비교적 시공이 용이하고 그 효과도 여러 측면에서 기대 할 수 있어 종종 사용되고 있다. 그러나 토목섬유 부설조건에 따라 지반의 보강정도나 변형억제효과 등과 같은 지반내 변형거동 특성이 중요한 의미를 갖고 있음에도 불구하고 지금까지의 실제 축조에 있어서

* 동신대학교 공과대학

키워드 : 보강효과, 토목섬유보강지반, 모형재하 시험, 비배수재하, 변형해석법

나 연구는 매우 경험적으로 이루어지고 그 적용에도 매우 제한적 이므로 좀더 체계적인 시험과 더불어 합리적인 해석적 접근이 필요하다고 본다. 이와 같은 관점에서 본 연구는 비배수 재하에 따른 토목섬유보강지반의 가능성 있는 효과를 조사하는 한편, 지반내 변형에 대하여 적용성이 있는 변형해석법을 개발하고자 하는 연구 목적을 갖고 있다. 이를 위하여 제1논문¹⁰⁾에서는 실제지반을 재생성하고 여기에 2차원 모형재하시험을 실시함으로써 토목섬유보강지반의 일반적인 변형거동 특성 규명과 기초적인 변형해석법을 마련하였으며, 제2논문⁹⁾에서는 sand mat 부설지반의 보강 효과 및 변형거동과도 비교가 이루어지는 한편 변형의 불연속조건을 표현가능 하도록 변형해석법을 확장한 바 있다.

본 연구에서는 제1, 2논문^{9,10)}에서 적용성이 인정된 바 있는 탄·소성구성식에 beam 요소를 결합한 변형해석법과 함께 truss 요소까지 결합한 수치해석기법을 개발하여 비교가 이루어지도록 하였다. 또한 2차원 모형재하시험은 7가지 경우에 대해 수행되었는데 기왕의 시험에 토목섬유 층수 및 간격을 더하여 실시되었으며 이 시험 결과에 의한 토목섬유보강 지반의 변형특성, 보강효과의 정도 및 한계를 규명 할 수 있도록 하였다.

II. 이론 및 유한요소해석의 구성

1. 탄·소성 구성식

탄·소성 구성식인 Cam-clay 모델은 Roscoe⁶⁾에 의해 제안된 것으로 항복곡선적식과 흙의 응력-변형을 관계를 표현하는 상태경계면 식은 다음과 같다.

$$P \left[\frac{(q/p)^2 + M^2}{M^2} \right] - P_y \dots \dots \dots (1)$$

$$P_e = P \left[\frac{(q/p)^2 + M^2}{M^2} \right]^{(1-\kappa/\lambda)} \dots \dots \dots (2)$$

여기서, P_y = 등방압밀곡선과 항복곡선의 교차점의 P값

$$q = \sqrt{3J_2 D}, P = \frac{J_1}{3}, M = q/p, \kappa = \text{팽윤지수}, \lambda = \text{압축지수}$$

다음으로 유한요소 정식화를 위해 평면변형률 조건에서 유도하면 다음과 같다^{1,2,11)}

$$[\epsilon] = [\epsilon]^e + [\epsilon]^p = [D]^{-1}[\sigma] + \alpha[a] \dots (3)$$

$$[\sigma_1] = [[D] - 1/\beta[d][d]^T][\epsilon_i]_{i=x, y, z, xy} \dots \dots \dots (4)$$

2. Beam 요소

토목섬유에 적용한 beam 요소³⁾는 선형 휨 요소의 변형을 각각의 절점에서 수직변위 v와 회전각 $\theta = dv/dx$ 만 있는 것으로 본다. 이때 처짐함수는 다음과 같다.

$$v = [N]\{d\} \dots \dots \dots (5)$$

여기서, [N]은 형상함수이다. 한편, 선형 휨 요소의 변형에너지는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u = \frac{1}{2} \{d\}^T [K_b] \{d\} \dots \dots \dots (6)$$

여기서, $[K_b]$ 는 요소의 강성행렬로 다음과 같다.

$$[K_b] = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & & & & & \\ 6l & 4l^2 & & & & \\ -12 & -6l & 12 & & & \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 & & \end{bmatrix} \dots (7)$$

3. Truss 요소

토목섬유는 축방향 인장력에 대해서 큰 저항력을 나타내지만 휨이나 비틀림에 대해서는 거의 저항하지 않기 때문에 부재의 접합부를 핀(pin)으로 연결시킨 truss요소의 이용이 가능하다.

truss 요소³⁾의 변위는 양 절점에서의 축방향 변위 u_1 와 u_2 만이 있는 것으로 가정한다. 따라서 처짐함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u=[N]\{d\} \dots\dots\dots (8)$$

여기서, $[N]$ 은 형상함수이다. 한편, truss요소의 변형에너지는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u = \frac{1}{2}\{d\}^T [K_b]\{d\} \dots\dots\dots (9)$$

여기서, $[K_b]$ 는 강성행렬로 다음과 같다.

$$[K_b] = \frac{AE}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

III. 시 험

1. 시료의 재생성

시험에 사용한 시료는 영산강 하류 무안에

서 채취한 해성점토로서 물과 함께 교반시킨 후 현탁(slurry)상태로 대형토조¹²⁾에 투입하여 수두제어 방식에 의한 0.5kg/cm²의 압력으로 재압밀 재생성한 것이다. 기타 자세한 시료의 제작과정은 문헌(9, 10, 12)를 참고하면 된다.

2. 토질상수 및 특성

재생성시료의 물리적인 특성과 유한요소해석에 필요한 토질상수 및 토목섬유의 재료성질은 각각 Table-1, 2^{9,10)}에 나타낸다.

3. 2차원 재하시험

무안점토로 재생성한 모형지반에 대한 2차원재하시험은 평면변형을 조건에서 수행하였다. 2차원 모형재하시험장치¹²⁾는 특별히 제작한 길이 120cm, 폭 25cm, 높이 100cm로서 임의의 압밀압력에 의한 지반의 재생성으로부터 2차원 재하시험까지 일괄적으로 수행할 수 있는 기능을 갖고 있다. 재하시험전에 측정된 재생성지반의 함수비 및 비배수강도(Cu)의 대표치는 각각 53% 및 0.27kg/cm²이었다. 재생성지반에 대한 2차원재하시험은 7가지 경우에 대해 이루어 졌으며 그 목록은 Fig. 1과 Table-3에 나타낸다.

Fig. 1 및 Table-3에 보인 바와 같이 기초

Table-1. Physical properties and soil parameters

Physical properties	LL(%)	PI(%)	passing the No.200 sieve(%)	USCS	Gs
	52	21	62	CH	2.68
Soil parameters	*M	*λ	*κ	*K	*Ko
	1.34	0.325	0.049	.55 × 10 ⁻⁴	0.597

*Table에서, M : p-q평면에서 한계상태선의 기울기, λ : e-lnp곡선에서 정규압밀 부분의 기울기, κ : e-lnp곡선에서 팽윤선의 기울기, K : 투수계수, Ko : 정지토압계수

Table-2. Physical properites of geotextile

Tensile strength (kg/cm)	Weight (g/cm ²)	Tensile strain (%)	E (kg/cm ²)	ν	A (cm ² /cm)	I (cm ⁴ /cm)
750	0.022	20	8.0 × 10 ⁴	0.333	1.0 × 10 ⁻¹	8.3 × 10 ⁻⁵

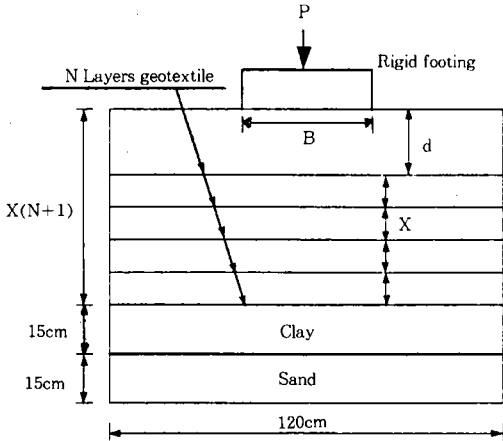


Fig. 1. Model test

Table-3. List of various cases

Case	Reinforcement condition
1	Without reinforcement
2	With G/T (One layer)
3	With G/T (Two layers)
4	With G/T (Three layers)
5	With G/T (Four layers)
6	With G/T (Five layers)
7	With G/T (Two layers at 9cm and 18cm of depth)

* G/T : Geotextile

는 강성기초(폭 15cm, 길이 25cm, 높이 2cm)를 사용하여 2차원 재하시험을 수행하였으며, 하중재하 방법으로는 일정변형률 속도 (0.025mm/min)로 지반이 파괴될 때까지 재하하였다. Table-3에서 Case 1은 토목섬유를 부설하지 않은 비보강지반, Case 2~6은 지표면으로부터 3cm 깊이와 간격으로 토목섬유를 부설한 보강지반이고, Case 7은 지표면으로부터 9cm 깊이와 간격으로 토목섬유를 2층 부설한 경우이다. 재하중의 지반내 거동은 연직변위, 측방변위 및 하중 등을 측정하였다.

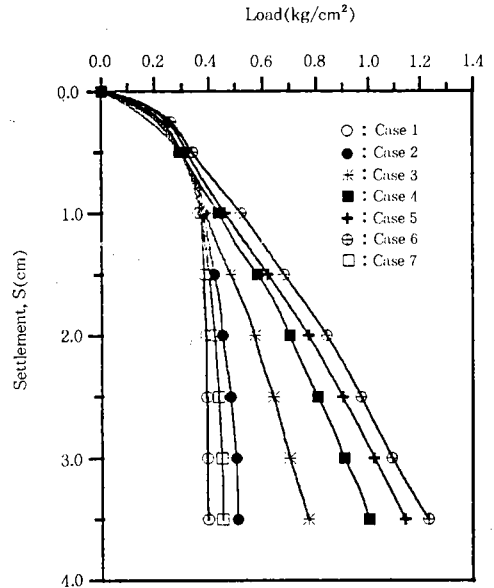


Fig. 2. Load -settlement curves

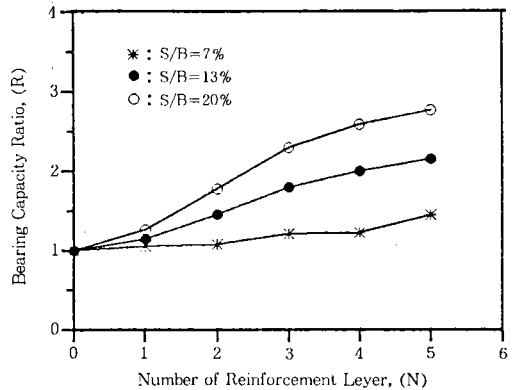


Fig. 3. Effect of reinforcement on bearing capacity

IV. 시험결과

1. 지지력

Fig. 2와 3은 토목섬유 부설조건(Table-3)에 따른 지지력-침하관계 및 보강지반에 대한 비보강 지반의 지지력비(R)를 각각 나타낸 것으로 지지력은 부설층수가 많을 수록 크게

증가하나 침하도 크다. 이것은 토목섬유부설이 비정착임을 감안 할 때 어느정도의 변형이 발생한 후에 토목섬유와 토층간의 전단저항이 비로소 발현한다고 생각할 수 있다. 또한, 지지력은 부설층수가 증가함에 따라서 어느 일정한 값에 이를 때까지 증가 범위가 크며, 그 이상층에서는 증가폭이 둔화 됨을 알 수 있다. 본 실험결과에서는 기초폭에 상당하는 깊이인 4층(12cm)이상으로 부설한 경우(Case 5) 부터이다.

Fig. 4 및 5는 보강지반에 대한 비보강지반의 보강비(R)를 각각 토목섬유 부설 간격비(x/B)와 깊이비(d/B)에 대해 나타낸 것으로

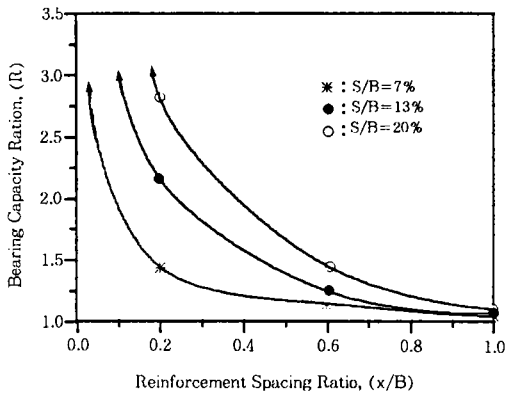


Fig. 4. Model footing test result (R vs x/B)

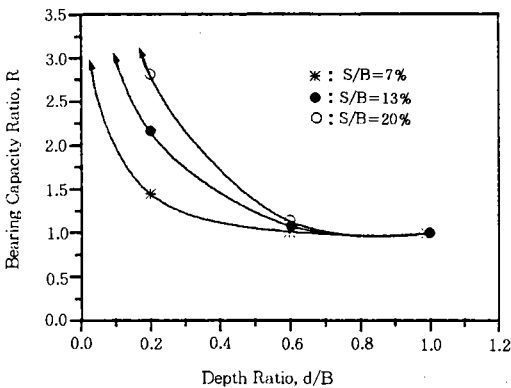


Fig. 5. Model footing test result (R vs d/B)

부설 간격비 및 깊이비 어느 경우나 0.3~0.4 이하를 한계로 큰 보강효과가 나타나고 있다. 그림에서 부설 간격비 및 깊이비가 1.0일 때의 보강비 값은 문헌^{4,5)}에 기초한 값이다.

2. 변 위

Fig. 6은 재하후 지표면 침하가 5cm일 때의 측방변위를 재하관 끝지점에서 깊이에 따라 나타낸 것으로 부설층수가 증가할수록 측방변위의 억제효과가 더 크다. 이러한 측방변위의 감소는 지반의 지지력 또는, 파괴강도에 유리한 요소⁸⁾로 작용함을 Fig. 2, 3과 Fig. 6의 관계에서 확인할 수가 있다. 또한, 보강지반에 있어서 가장 밑에 위치한 토목섬유 부설층 아래 일정깊이 $[(0.3\sim0.4)\times B]$ 에서 최대측방변위가 일어나고 있다. 이는 Fig. 4, 5, 6에서 볼 수 있듯이 커다란 보강효과가 기대되는 부설 간격비와 깊이비의 한계인 0.3~0.4와 일치한다.

Fig. 7은 재하후 재하관 침하가 5cm일 때 모형지반 중앙으로 부터 수평거리에 따른 침

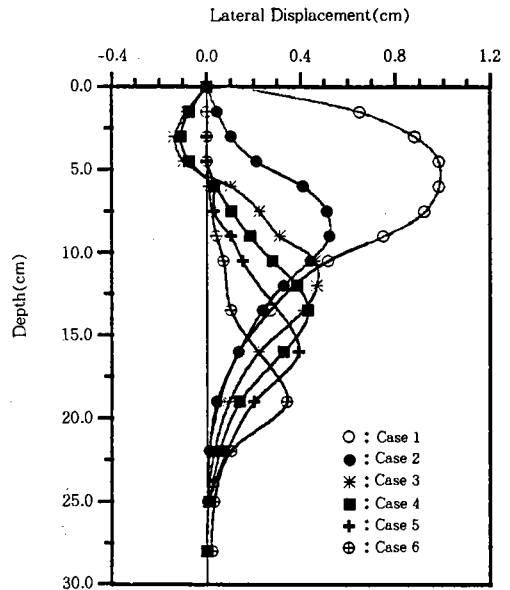


Fig. 6. Lateral displacements

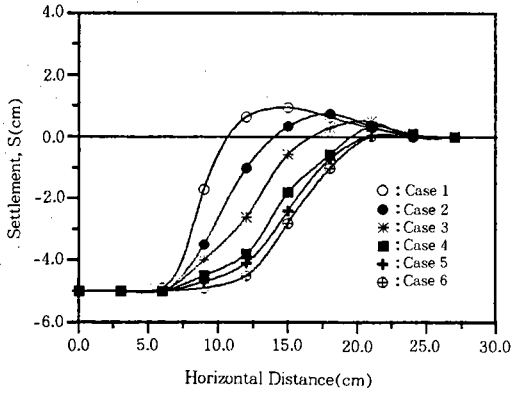


Fig. 7. Vertical displacements

하분포를 나타낸 것으로 부설층수 증가에 따라 침하범위를 더 확산시키는 반면, 지표면 융기는 크게 억제시키고 있다. 이 결과는 토목섬유가 지반융기와 같은 변형을 구속함으로써 일어나는 보상효과로 판단된다.

V. 유한요소해석

유한요소해석은 7가지 경우의 모형지반중 비보강지반(Case 1)과 토목섬유를 2층으로 보강한 지반(Case 3)을 선정하여 시험결과와 해석결과를 비교하였다.

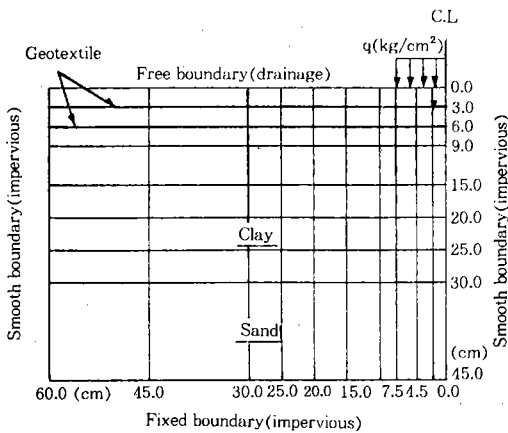


Fig. 8. FEM mesh

1. 해석조건 및 영역

1) 모형지반의 해석영역은 Fig. 8과 같이 수평거리 120cm, 깊이는 45cm이다. 2) 모형지반의 변형조건으로는 평면변형률로 해석한다. 3) 변형해석에 사용되는 구성식으로는 점토층에 대하여 탄·소성구성식⁶⁾을, 토목섬유에는 beam 및 truss 요소³⁾를 적용하였다. 4) 점토층은 Ko 압밀층으로 간주하며 해석에 사용된 토질상수는 Table-1을, beam 및 truss 요소의 재료상수는 Table-2와 같다.

2. 시험 및 해석 결과

1) 지지력에의 적용

Fig. 9는 비보강지반(Case 1)과 보강지반(Case 3)의 침하와 하중관계에 대해 실측치와 해석치를 같이 나타낸 것으로 본문에서 개발한 해석법이 적용성을 갖고 있음을 알 수 있다. 보강지반(Case 3)에 있어서 토목섬유에 대해 도입한 truss 요소가 beam 요소 보다

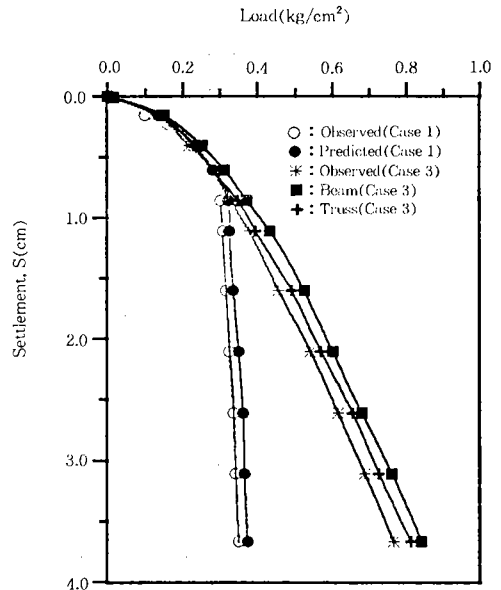


Fig. 9. Comparison of load-settlement curves by FEM solutions

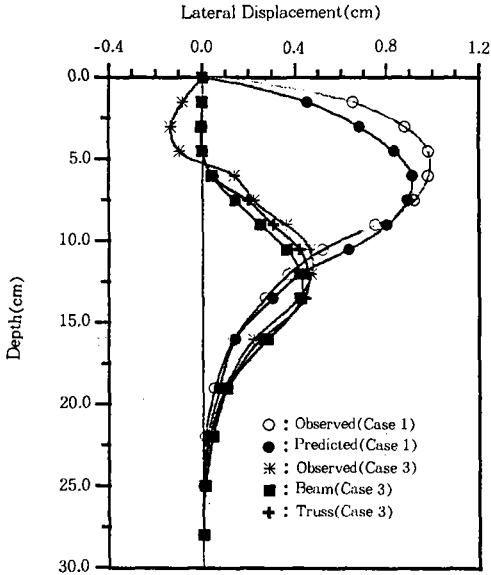


Fig. 10. Comparison of lateral displacements by FEM solutions

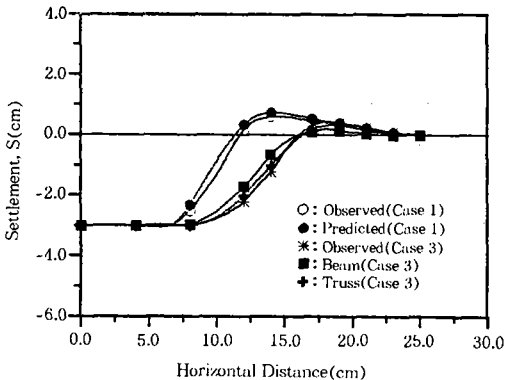


Fig. 11. Comparison of vertical displacements by FEM solutions

값이 더 작으며 시험치와 접근하고 있다.

2) 변위에의 적용

Fig. 10 및 11은 각각 재하판 끝에서의 깊이 에 따른 측방변위와 수평거리에 따른 지표면 침하를 나타낸 것으로 해석에 정도가 높다는 것이 검증된다. 또한 여기에서도 truss 요소가 beam 요소를 적용하는 것보다 변위가

더 크게 일어나며 실측치와도 더 접근하고 있다. 이것은 truss 요소가 beam 요소와 달리 부재의 접합부를 핀으로 연결시켜 휨이나 비틀림에 대해 더 작게 저항하며, 토목섬유의 성질과도 더 잘 부합하기 때문으로 판단된다.

VI. 결 론

토목섬유 보강지반에 대해 2차원 모형재해 시험을 실시하고, 유한요소법에 의한 변형해석을 수행하여 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 비배수재하를 받는 점토지반에 대해 토목섬유의 부설층수를 증가시킬수록 커다란 지지력 증가가 있는 반면에 이 지지력 보강효과는 큰 침하에서 기대할 수 있다.

2) 토목섬유 부설지반에서 보강효과를 얻기 위해서는 단층인 경우에 재하폭에 대한 부설 깊이비가 0.3~0.4이하일 때로 추정되고, 다층인 경우에는 재하폭에 대한 부설 깊이비 및 간격비 역시 0.3~0.4이하가 한계이다.

3) 토목섬유의 부설층수가 많아질수록 지반의 파괴강도에 큰 영향을 미치는 측방변위도 억제효과가 커진다. 또한 이 최대측방변위는 최하단에 부설된 토목섬유 아래의 일정깊이 $[(0.3 \sim 0.4) \times B]$ 에서 일어났는데 이 깊이는 2)에서 밝힌 바와 같이 보강 효과를 기대할 수 있는 토목섬유 부설 깊이비 및 간격비와 일치한다.

4) 본문에서 개발한 변형해석법은 시험결과와의 비교를 통해 적용성이 있음을 검증할 수 있었으며, 토목섬유에 대해서는 beam 요소보다 truss 요소가 시험치와 더 잘 부합하였다.

5) 이상의 결과로부터 토목섬유 보강지반의 비배수 재하에 대해 지반의 보강효과 및 변형거동을 어느 정도 밝힐 수 있었고, 변형해석법에 대한 적용성도 검증할 수 있었다.

다만, 앞으로 여러 조건하에서의 시험과 실제
지반에의 적용 및 분석을 통 하여 더 좋은 연
구성과의 활용도를 높일 수 있을 것으로 본다.

본 연구는 1994년도 동신대학교 교내 학
술연구조성비 지원에 의해 수행한 것으로
본 학교에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Atkinson, J. H. and Bransby, P. L., "The Mechanics of Soils", McGraw-Hill, pp. 184-368, 1978.
2. Christian, J. T. and Boehmer, J. W., "Plane Strain Consolidation by Finite Elements", ASCE, SM. 4, No. 96, pp. 1435~1457, 1970.
3. Desai, C. S., "Elementary Finite Element Method", Prentice Hall, pp. 172-200, 1979.
4. Giroud, J. P. and Noiray, L., "Geotextile Reinforced Unpaved Road Design", J. of the Geotechnical Division, ASCE, Vol. 107, GT. 9, pp. 1233-1254, 1981.
5. Koerner, R. M., "Designing with Geosynthetics", Prentice Hall, pp. 1-269, 1990.
6. Roscoe, K. H. and Burland, J. B., "On the Generalized Stress-Strain Behavior of Wet'Clay", Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, pp. 535-609, 1968.
7. Segerlind, L. J., "Applied Finite Element Analysis", John Wiley and Sons, pp. 246-271, 1984.
8. Sekiguchi, H. and Shibata, T., A Method of Predicting Failure of Embankment Foundation Based on Elasto-viscoplastic Analysis", JSCE, Vol. 301, pp. 39-104, 1980.
9. 이진수, 이문수, "개량연약지반의 모형 실험과 변형해석(II)", 한국농공학회지 제36 권 제4호, pp. 73-86, 1994.
10. 이문수, 이진수, 오재화, "개량연약지반의 모형실험과 변형해석(I)", 한국농공학회지, 제36권, 제2호, pp. 67-78, 1994.
11. 이진수, "Joint 요소를 이용한 개량연약지반의 변형해석", 전남대학원, 박사학위논문, 1988.
12. 박병기, 강권수, "2차원 재하시험장치의 시작", 대한토질공학회지, 제4권, 제2호, pp. 55-64, 1988.