

## 토목섬유 보강토의 장기적 성능시험 Long-Term Performance Test for Geosynthetic Reinforced Soil

이 상 호 Sang-Ho Lee

경북대학교 농업토목공학과 부교수

Associate Professor, Dep't. of Agricultural Civil Eng., Kyungpook National University

**SYNOPSIS:** A modified soil-geosynthetic performance test was devised in this study. The test simulates the predominant creep behavior of Geosynthetic Reinforced Soil(GRS) structure in a 'worst' condition by allowing geosynthetic reinforcement and its confining soil to deform in an interactive manner under a sustained surcharge without lateral confinement. A series of performance tests were performed to examine test repeatability and to investigate the effect of soil type, geosynthetic type and sustained load intensity on the soil-geosynthetic composite. Many of the tests were conducted at an elevated temperature of 125°F to accelerate the creep of GRS by 100 to 400 folds. In addition, a finite element model was employed to analyze one of the performance tests and to compare the analytical results with the experimental ones.

**KEYWORDS:** Geosynthetic reinforced soil, Performance test, Accelerated creep test, Finite element model.

### 1. 서론

토목섬유 보강토 옹벽(Geosynthetic reinforced soil retaining wall)은 연성옹벽으로서 전통적 철근콘크리트 옹벽에 비하여 시공성과 경제성이 탁월하며 다양한 전면재료를 활용하므로써 보다 환경친화형 옹벽으로 축조할 수 있기 때문에 선진외국에서는 그 시공실적이 급증하는 추세이다. 토목섬유는 크리이프에 민감한 여러 종류의 폴리머로 제조되기 때문에 보강토벽 자체 혹은 영구적 옹벽구조물 뒤채움재의 보강재로 사용될 때 토목섬유 보강토의 장기적 성능은 특별히 흙과 토목섬유의 상호작용에 의한 크리이프 거동에 좌우된다. 보강토 내부에서 토목섬유의 크리이프 거동은 토목섬유와 흙의 내부마찰력에 의하여 토목섬유 자체의 크리이프 특성과는 현저한 차이를 보인다.

본 연구에서는 보강토의 크리이프 특성시험 방법을 제시하고 보강토의 장기적 크리이프 특성과 하중 전달 메카니즘을 규명할 목적으로 가속크리이프시험(Accelerated creep test)을 포함한 여러 가지 실험조건에서 수종의 흙-토목섬유 보강토 단면에 대하여 그 양측면을 전혀 구속하지 않은 '최악'의 조건으로 모형실험을 수행하였으며 이미 개발된 유한요소해석 모델에 의하여 실측치와 비교하였다.

### 2. 실험재료

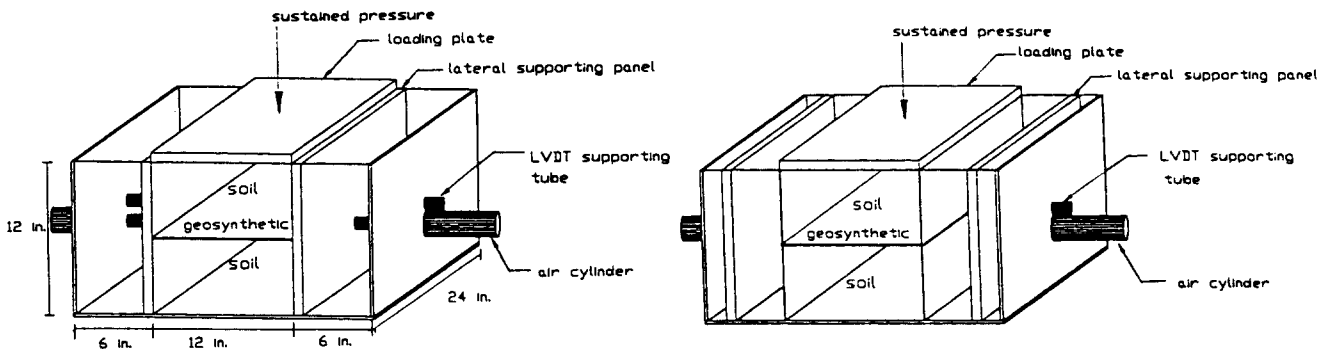
보강토 모형에 사용된 흙 시료는 A-1-B(O)로 분류되는 현장의 도로 노반재료와 A-6로 분류되는 점토질 흙, 2종으로 하였으며 토목섬유 재료는 AMOCO사의 폴리프로필렌 직포 지오텍스타일(Polypropylene woven geotextile) 제품 중에서 고강도의 AMOCO2044와 저강도의 AMOCO2002

및 TYPER사의 폴리프로필렌 열융착 부직포 지오텍스타일(Polypropylene heatbonded nonwoven geotextile)인 TYPER3301, 3종을 사용하였다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1. 실험장치

실험장치는 Fig. 1 과 같이 외형치수를 2×2×1 ft 크기로 4개 제작하였으며 그 내부에는 1×2×1 ft 크기의 보강토 모형을 축조할 수 있도록 수평이동이 가능한 양측면 지지판을 장치하였고 하중재하판은 피라미드 형태로 제작하여 등분포하중이 재하될 수 있도록 하였다. 또한 수직하중은 CONBEL사의 압축공기 재하장치(Conbel pneumatic loader)를 이용하였고 보강토의 수평변위와 수직변위를 측정하기 위하여 보강토의 양측면에는 LVDT(Linear voltage deformation transducer)를, 상면에는 다이얼게이지를 장착하였으며 특별히 토목섬유 보강재 폭방향의 수평변형도 분포를 측정하기 위한 실험에서는 보강재 상면에 일정한 간격으로 스트레인게이지를 장착하였다. LVDT와 스트레인게이지는 컴퓨터에 연결하여 경과 시간에 따른 변위량을 기록할 수 있도록 하였다.



(a) Before releasing lateral supporting panels.

(b) After releasing lateral supporting panels.

Fig. 1. Schematic diagram of the modified long-term creep test device of geosynthetic reinforced soil.

#### 3.2. 실험방법

보강토와 접하는 벽면에 마찰을 최소화하기 위하여 그리이스(Grease)를 바른후 레이텍스 멤브레인(Latex membrane)을 부착하고 압축공기에 의하여 양측면 지지판을 축조될 보강토 폭까지 이동시켜 고정한 후 95%의 상대다짐도로 보강토 모형 하반부를 축조하고 토목섬유 보강재를 설치한 후 상반부를 축조하였다. 실험기간 중 보강토의 함수비를 일정하게 유지하기 위하여 재하판을 탑재한 후 토조의 상면을 플라스틱 쉬트(Plastic sheet)로 덮고 LVDT와 재하장치 및 다이얼게이지를 장착하였다. 실험준비가 완료되면 압축공기에 의하여 하중을 재하한 후 보강토 모형의 양측면 지지판을 수평으로 이동시켜 측면의 구속을 해제시킴과 동시에 LVDT가 연결된 컴퓨터를 작동시켜 크리이프시험을 수행하였다.

Table 1 은 실험목록을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 R-2와 R-3에서는 동일한 실험조건에서 실험결과와의 일치성 여부를 평가하기 위하여 반복실험을 수행하였으며 U-1에서는 MTS-810 재료시험기를 사용하여 보강토 내부 보강재의 파열강도시험을 수행하였다. D-1에서는 보강재의 변형도 분포 양상을 규명하기 위하여 토목섬유 상면에 스트레인게이지를 장착하여 실험하였고 수종의 보강토 모형에 대하여서는 실험온도를 상온(70°F)와 가온(Elevated temperature) 125°F로 변화를 주어 실험을 수행하였으며 수

종의 실험에서는 흙의 종류, 보강재의 종류 및 수직지속하중(Sustained vertical load)을 변화시켰다.

Table 1. Test list

Test	Soil	Reinforcement	Temperature (°F)	Vertical Pressure (psi)	Elapsed Time (days)
C-1	C. S.	None	70	15	30
C-2	C. S.	Amoco 2044	70	15	30
D-1	R. B.	Typar 3301	70	15	15
H-1	R. B.	Amoco 2044	125	30	30
R-1	R. B.	Amoco 2044	70	15	30
R-2	R. B.	Amoco 2044	125	15	30
R-3	R. B.	Amoco 2044	125	15	30
S-1	R. B.	None	70	15	30
S-2	R. B.	None	125	15	30
U-1	R. B.	Amoco 2002	70	Failure	Failure
W-1	R. B.	Amoco 2002	125	15	30

Note: R. B. = road base soil,

C. S. = a clayey soil with 43% of fines and PI = 11

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1. 실험방법의 검증

#### 4.1.1. 반복실험 결과의 일치성 평가

동일한 실험조건에서 실험결과의 일치성 여부를 평가하기 위하여 노반토와 AMOCO2044 보강재로 구성되는 보강토에 대하여 15 psi의 수직하중으로 125°F의 가온실에서 동일한 조건으로 R-2와 R-3 실험을 수행한 결과 보강재 설치점에서 경과시간 10분의 초기 수평변위는 R-2와 R-3에서 각각 0.028 in 및 0.013 in 로, 초기 수직변위는 0.018 in 및 0.020 in 로 측정되어 미소한 차이를 보였으나 실험종료 시간인 43,200분(30일) 후의 장기적 수평변위는 0.055 in 및 0.054 in, 수직변위는 0.054 in 및 0.055 in 로 거의 일치하는 것으로 나타났다. 초기의 미소한 변위차는 실제로 보강토의 구조수명간 전혀 의미가 없으므로 본 실험방법에 의한 실험결과의 일치성은 상당히 만족스러운 것으로 평가된다.

#### 4.1.2. 보강재의 파열형태

저강도의 AMOCO2002 보강재와 노반토로 구성되는 보강토에 대하여 MTS-810 재료시험기에 의하여 U-1 실험을 수행한 결과 보강토의 파괴에 의한 보강재의 파열강도는 대략 80 psi (56.24 t/m<sup>2</sup>) 로 나타났다. 실험이 종료된 후 보강재의 파열양상을 관찰해 본 결과 명백히 보강재 폭의 2등분점에서 길이방향 축선을 따라 양분되어 파열된 것을 알 수 있었다. 따라서 수직하중에 대한 보강재의 최대응력은 분명히 이 파열선을 따라 발생하고 이러한 실험결과는 D-1 실험에서 보강토 폭방향의 하중 분포 양상과 일치하므로써 본 실험방법의 타당성이 입증되었다.

## 4.2. 장기적 크리이프 거동

### 4.2.1. 측면 수평변위 양상과 보강재의 변형도 분포

보강토 측면의 수평변위 양상을 규명하기 위하여 측면의 4등분점에 3개의 LVDT를 장착하여 수평변위를 측정된 결과(D-1 실험)를 도시하면 Fig. 2 와 같다. 그림에서와 같이 보강토 측면의 상부(Point 2)와 하부점(Point 2)의 변위는 보강재 설치점인 중앙부(Point 1)의 변위보다 훨씬 크게 나타나 보강재의 보강효과가 명백히 입증되었다. 또한 상하부의 초기변위는 거의 같은 것으로 나타났으나 시간이 경과함에 따라 하부의 변위가 상부보다 점진적으로 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그러므로 보강재의 설치간격은 보강토 하부로 갈수록 감소되어야 할 것으로 판단된다.

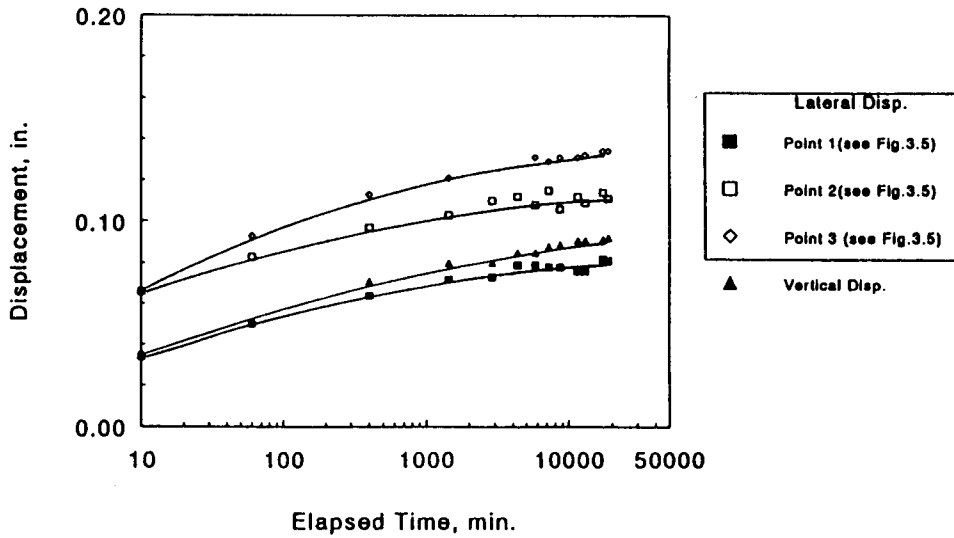
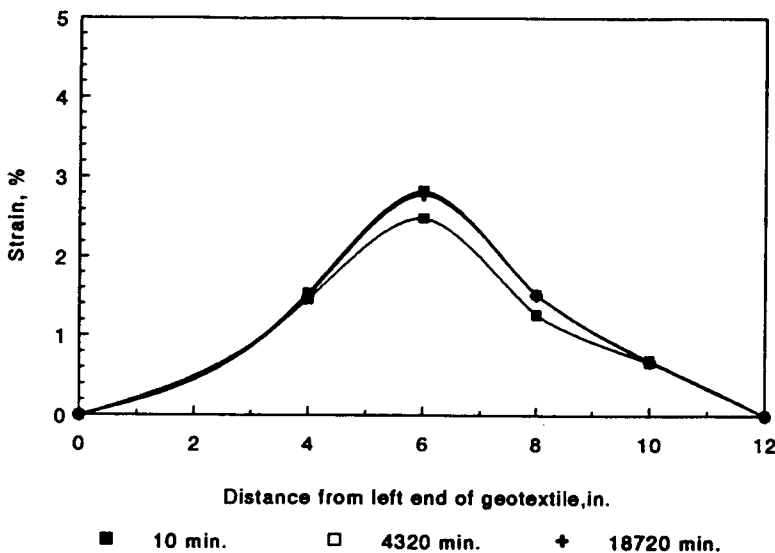


Fig. 2. Lateral and vertical displacements versus time with test D-1.



한편 Fig. 3 은 토목섬유 보강재의 변형도 분포를 규명하기 위하여 토목섬유 보강재 폭방향 2 in 간격으로 스트레인게이지를 장착하여 각 지점의 변형도를 측정된 결과(D-1 실험)를 나타낸 것으로 보강토의 폭방향 중앙부에서 2.8%의 최대변형도를 나타내었으며 양단으로 갈수록 변형도는 감소하여 양단부에서는 0%에 접근하는 것으로 나타났다.

Fig. 3. Measured strains along the width of geotextile reinforcement with test D-1 at the elapsed time of 10 min, 4,320 min and 18,720 min.

#### 4.2.2. 토목섬유 보강재의 응력

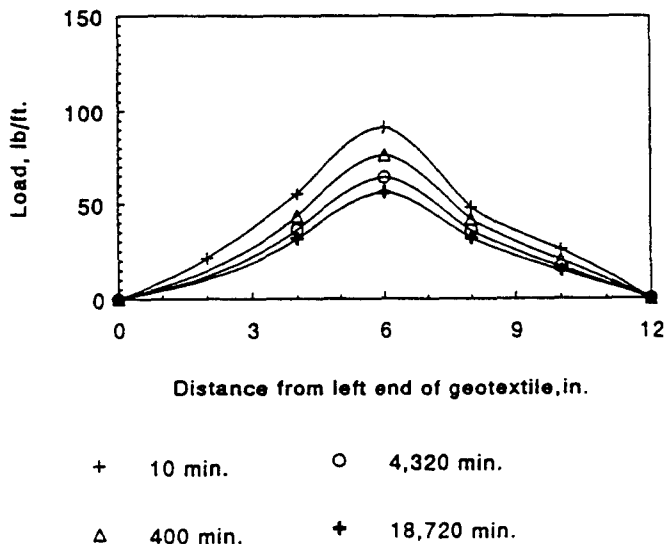


Fig. 4. Loads along the width of geotextile reinforcement with test D-1 at different elapsed time.

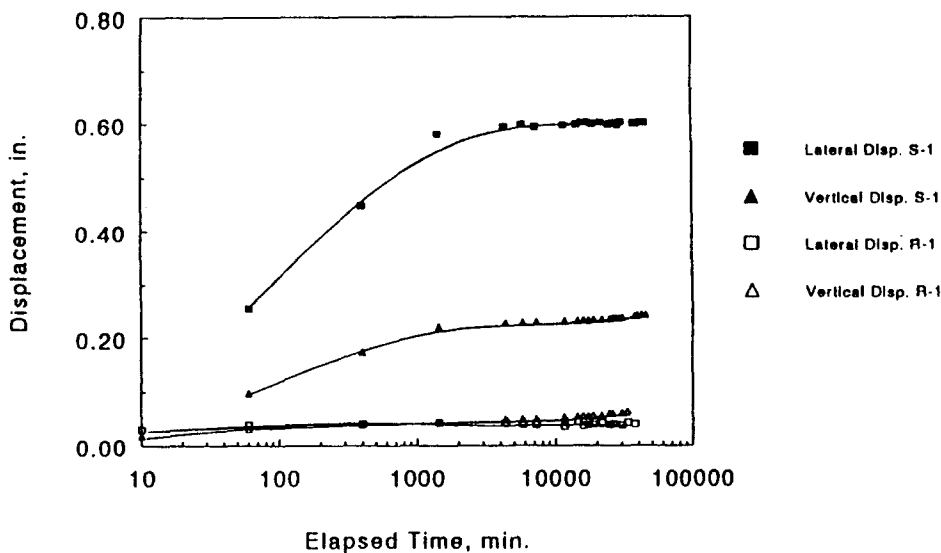


Fig. 5. Lateral and vertical displacements versus time with tests S-1, R-1.

#### 4.2.4. 토목섬유 보강재의 종류에 따른 효과

동일한 실험조건(노반토, 가온, 15 psi)에서 고강도의 AMOCO2044 보강재를 사용한 R-2와 저강도의 AMOCO2002를 사용한 W-1 실험결과 30,000분(약 21일) 경과 후의 수평변위는 각각 0.06 in 및 0.12 in

Fig. 4 는 D-1 실험에서 스트레인게이지로 측정된 변형도를 토목섬유 자체의 하중-변형도 곡선을 이용하여 하중으로 환산한 결과치를 가지고 경과시간별 보강토의 폭방향 하중분포를 도시한 것이다. 그림에서와 같이 보강재가 받는 하중은 시간이 경과함에 따라 감소하여 응력이완(stress relaxation) 현상을 보였다.

#### 4.2.3. 보강재의 보강효과

Fig. 5 는 보강재가 없는 노반토 자체에 대한 S-1 및 S-2 실험과 동일한 조건에서 AMOCO2044 보강재를 사용한 R-1 및 R-2 실험결과를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 노반토 자체에 대한 수평 및 수직변위가 현저하게 크게 나타났으며 수직변위보다는 수평변위차가 더욱더 크게 나타나 S-1과 R-1 실험(노반토, 상온, 15 psi)에서 40,000분(약 28일) 경과 후의 수평변위는 각각 0.60 in 및 0.04 in 로 고강도 보강재를 사용한 R-1의 경우는 크리이프 변형이 무려 1/15로 감소하였으며 수직변위는 0.24 in 및 0.07 in 로 1/3로 감소하였다. 또한 보강재가 없는 점토질 흙 자체에 대한 C-1 실험에서는 측면 지지판을 제거한 후 17분만에 완전히 파괴되었으나 동일한 조건(점토질 흙, 상온, 15psi)에서 AMOCO2044 보강재를 사용한 C-2 실험에서는 40,000분 경과 후의 수평변위가 0.1 in 에 불과하였다. 이로써 토목섬유 보강재의 보강효과는 충분히 입증되었다.

로 나타났으며 고강도 직포인 AMOCO2044와 열융착 부직포인 TYPER3301을 사용한 비교실험에서도 역시 고강도 직포의 보강효과가 현저하게 탁월한 것으로 나타나 보강재의 강도에 따라 보강효과는 상당한 차이를 보임을 알 수 있었다.

#### 4.2.5. 흙의 종류에 따른 효과

상온상태에서 15 psi 의 지속하중 하에서 AMOCO2044 보강재를 사용한 점토질 흙 및 노반토 보강토에 대한 비교실험을 수행한 결과 경과시간 40,000분 후의 수평변위는 각각 0.11 in 및 0.04 in, 수직변위는 0.16 in 및 0.07 in 로 노반토를 사용한 보강토의 경우 크리이프 변형이 현저하게 감소하였다. 보강토에서도 흙 자체의 경우와 마찬가지로 흙의 강도가 증가함에 따라 크리이프 변형이 감소한다는 것은 자명한 사실이다.

#### 4.2.6. 실험온도의 효과

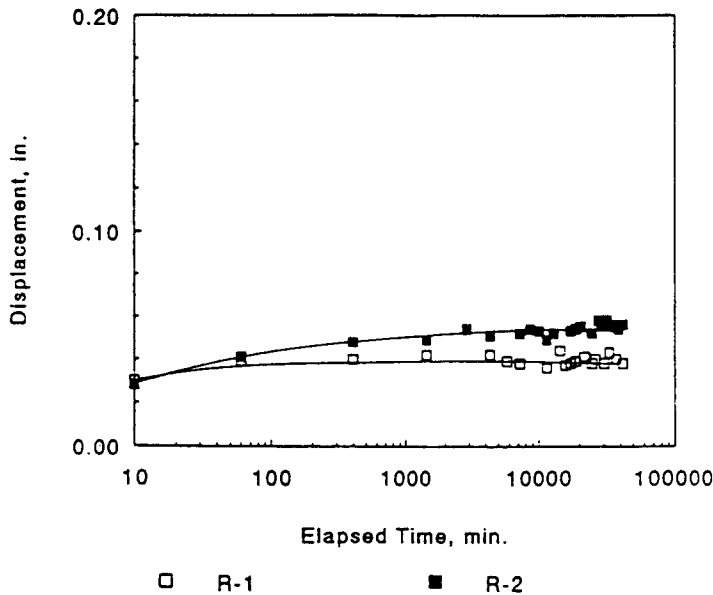


Fig. 6. Lateral displacement versus time with tests R-1, R-2.

수평 및 수직변위가 가온상태에서 크게 증가하였으며 특히 수평변위차는 시간이 경과함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 또한 본 실험의 결과로부터 수평변위의 가속화율은 0.02 in 이상의 변위에 대하여 거의 무한대로 나타났다.

#### 4.2.7. 상재하중에 따른 효과

상재하중의 변화에 따른 보강토의 보강효과를 규명하기 위하여 수직지속하중을 15 psi (10.55 t/m<sup>2</sup>)로 실험한 R-2와 30 psi (21.09 t/m<sup>2</sup>)로 한 H-1 실험결과가 비교되었다. 하중을 증가함에 따른 수평 및 수직변위는 시간이 경과함에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으나 수직변위에서는 경과시간 1,000분까지는 30 psi 를 재하한 H-1 실험에서 오히려 작게 나타났다. 이는 실험준비 과정에서 야기되는 불가피한 오차로서, 실험이 시작될 때 측면 지지판을 해제하기 전에 재하장치를 통하여 압축공기를 주입하여야 하므로 하중이 30 psi 로 증가된 H-1 실험의 경우 보강토 상부의 다짐효과가 R-2 실험에서보다 증가되었기 때문으로 사료된다.

### 4.3. 유한요소 해석치와의 비교

#### 4.3.1. 유한요소 모델

본 연구에 사용된 유한요소 프로그램은 DACSAR(Deformation analysis considering stress anisotropy and reorientation)로서 적용된 유한요소 모델은 흙의 압밀과 크리이프 거동을 시뮬레이션하기 위하여 개발된 탄점소성 모델(elasto-viscoplastic soil model)과 비선형 점탄성 모델(nonlinear visco-elastic model)을 근거로 Helwany와 Wu(1992)에 의하여 개발된 일반 토목섬유 크리이프 모델(generalized geosynthetic creep model)을 조합한 것이다.

#### 4.3.2. 실험에 대한 유한요소 시뮬레이션

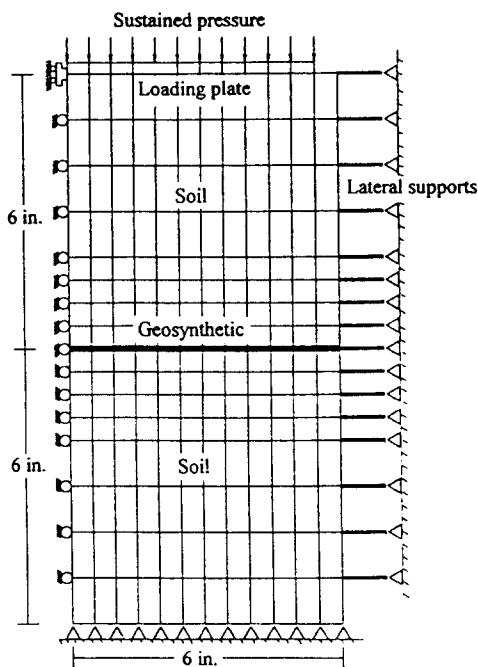


Fig. 7. Finite element discretization.

대하여 경과시간에 따른 수평변위에서는 Fig. 8 과 같이 이론치가 실측치보다 근소하게 작게 나타났으나 전반적으로 그 차는 경과시간에 대하여 거의 균등하게 변화하여 이론치와 실측치가 상당히 일치하는 것으로 나타났으며 측면 4등분점 각각에 대한 수평변위의 이론치도 Fig. 9 에서와 같이 실측치보다 다소 작게 나타났으나 전반적으로 변위의 분포는 동일한 형태를 보였다.

또한 Fig. 10 과 같이 보강재 폭방향의 변형도 분포에서는 중앙부에서 이론치가 실측치보다 작게 나타났으나 양단으로 가면서 크게 나타나 이론치에 의한 변형도 분포도가 보다 완만한 곡선의 형태를 보였다.

Fig. 7 은 보강토의 측면에 3개의 LVDT와 보강재 상면에 5개의 스트레인게이지를 장착하여 측정된 D-1 실험에 대한 해석을 위하여 구분한 유한요소를 나타내고 있다. 측면을 구속하지 않은 보강토의 수평변위는 좌우대칭이므로 한 쪽에 대해서만 해석하면 될 것이다. 보강토의 흙에 대해서는 탄점소성 모델에 의하여 총 192개의 사변형 요소로 구분하였고 보강재에 대해서는 일반 토목섬유 크리이프 모델에 의하여 12개의 트러스 요소로 구분하였으며 측면 지지점은 16개의 트러스 요소로 하였다.

#### 4.3.3. 유한요소 해석 결과

D-1 실험에 대하여 유한요소 해석에 의한 이론치와 실험에 의한 실측치가 비교되었다. 측면 중앙의 보강재 설치점에

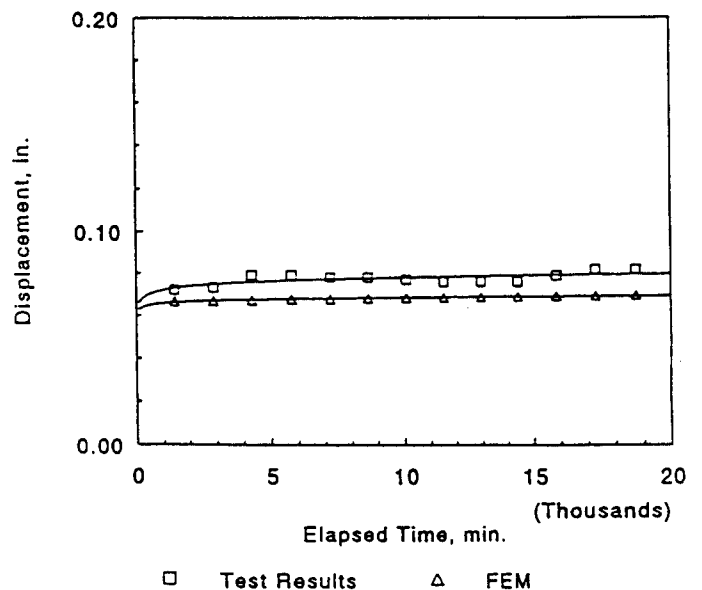


Fig. 8. Lateral displacements versus time after releasing of lateral supports; Test results and theoretical results by FEM.

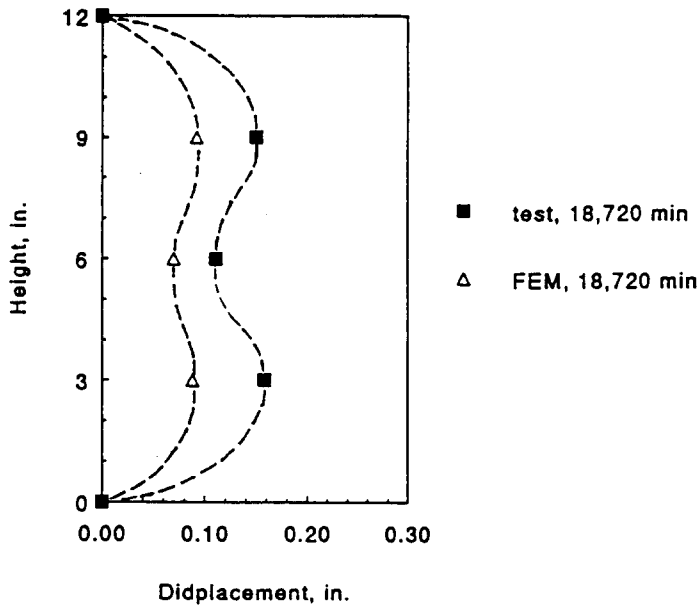


Fig. 9. Distribution of lateral displacements at elapsed time of 18,720 min; Test results and theoretical results by FEM.

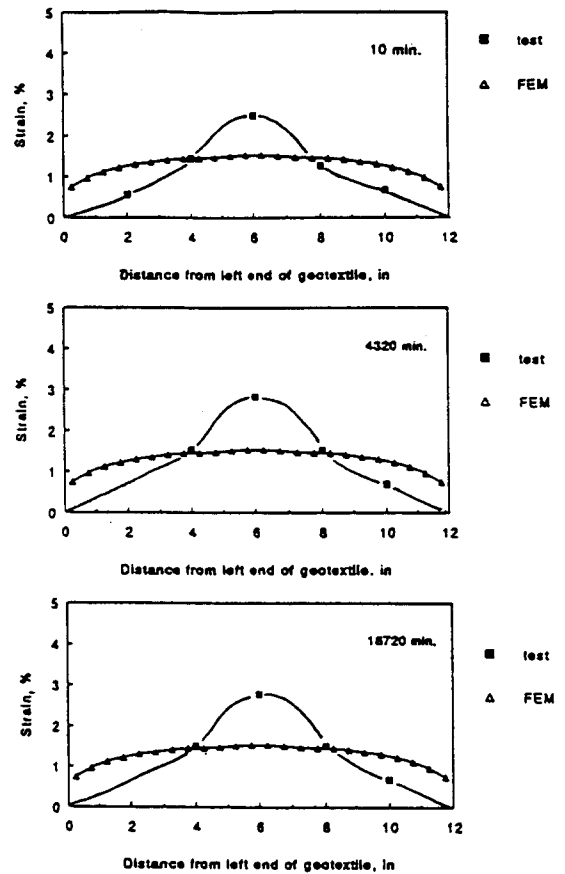


Fig. 10. Distribution of strains along the width of geotextile reinforcement; Test results and theoretical results by FEM.

## 5. 결론

토목섬유 보강토에 대한 크리이프시험 결과의 분석과 유한요소해석 모델에 의한 이론해석의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 반복실험에 의한 일치성 평가와 보강재의 파열형태의 관찰로부터 본 실험의 타당성은 만족스러운 것으로 검증되었다.
2. 측면 길이방향의 수평변위 분포를 분석한 결과 보강재의 설치간격은 보강토의 하부로 갈수록 감소되어야 할 것으로 판단되고 자유단 측면을 갖는 보강재 폭방향의 변형도 분포는 중앙에서 최대로 되어 양단으로 가면서 '0'에 접근하는 하였으며 크리이프시험 중 보강재는 시간이 경과함에 따라 응력이완 현상을 보였다.
3. 토목섬유 보강재의 보강효과는 탁월한 것으로 나타났으며 보강토의 강도는 보강재의 종류와 흙의 종류에 따라 크게 좌우되는 것으로 나타났다. 또한 상재하중이 증가함에 따라 보강토의 수평 및 수직변위는 증가하였으며 각각에 대한 변위차는 시간이 경과함에 따라 다소 증가하는 경향을 보였다.
4. 실험온도를 상승시킨 가속크리이프시험에 의하여 동일한 경과시간에서의 크리이프 변형은 크게 증가하였으므로 단기간의 실험으로 보강토의 구조수명간의 크리이프 변형을 예견할 수 있음이 입증되었다.



5. 유한요소해석에 의한 보강토의 장기적 수평변위 이론치는 실측치와 상당히 일치하는 것으로 나타났으나 이론치가 실측치보다 근소하게 작게 나타났으며 보강재 폭방향 변형도의 분포도에 대한 이론치와 실측치를 비교한 결과 중앙부에서는 이론치가 실측치보다 작게, 양단부에서는 크게 나타나 이론치 분포도는 실측치에서보다 완만한 곡선의 형태를 보였다.

## 감사의 글

본 과제 of 연구비를 지원하여 준 University of Colorado at Denver의 Dr. Jonathan T. H. Wu 교수께 감사를 드린다.

## 참고문헌

1. Allen, T.M., Christopher, B.R. and Holtz, R.D. (1992): "Performance of a 12.6 m High Geotextile Wall in Seattle, Washington", 1992 International Symposium on Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls, Balkema Publisher, Netherlands, pp. 81-100.
2. Billiard, J.W. and Wu, J.T.H. (1991): "Load Test of a Large-Scale Geotextile-Reinforced Retaining Wall", Proceedings of 1991 Geosynthetics Conference, Atlanta, U.S., pp. 537-548.
3. Helwany, M.B. and Wu, J.T.H. (1995): "A Numerical Model for Analyzing Long-Term Performance of Geosynthetic Reinforced Soil Structures", Geosynthetics International, Journal of International Geotextile Society, Vol. 2, No. 2, pp. 429-453.
4. Helwany, M.B. and Wu, J.T.H. (1992): "A Generalized Creep Model for Geosynthetics", Earth Reinforcement Practice, Proceedings of 1992 International Symposium on Earth Reinforcement Practice, Fukuoka, Japan, Vol. 1, pp. 79-84.
5. Iizuka, A. and Ohta, H. (1987): "A Determination Procedure of Input Parameters in Elasto-viscoplastic Finite Element Analysis", Soils and Foundation, Vol. 27, No. 3, pp. 71-87.
6. Wu, J.T.H. and Helwany, M.B. (1996): "A Performance test for Assessment of Long-Term Creep Behavior of Soil-Geosynthetic Composites", Geosynthetic International, Journal of International Geotextile Society, Vol. 3, No. 1.
7. Wu, J.T.H. (1991): "Measuring Inherent Load Extension Properties of Geotextiles for Design of Reinforced Structure", ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 14, No. 2, pp. 157-165.
8. Wu, J.T.H. (1991): "Construction and Instrumentation of the Denver Walls", Proceedings of 1991 International Symposium on Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Wall, Netherlands, pp. 21-30.