

사면보수보강을 위한 FPF 보강공법개발

FPF(Fibrillated Polypropylene Fiber) Reinforcement Method for Slope Repair

김낙경¹⁾, Kim, Nak-Kyung, 박동원²⁾ Park, Dong-Won

¹⁾ 정회원, 성균관대학교 토목공학과 조교수, Ass. Prof., Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.

²⁾ 성균관대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.

SYNOPSIS : This study presents the slope stability analysis results for the model slope test. The model slope was made of the soil reinforced by FPF(Fibrillated Polypropylene Fiber). The shear strength properties of the soil reinforced by FPF fibers were evaluated through the direct shear tests. The model slope 1:1 and 1:1.5 were made and the load tests were performed. Back analysis using limit equilibrium method was carried out to evaluate the shear strength increase on the FPF reinforced slope. The factor of safety of the FPF reinforce slope increased about 23% over unreinforced slope.

Key words : Slope analysis, Geosynthetics, Fiber reinforcement, Slope reinforcement and repair

1. 서론

보강섬유(Fibrillated Polypropylene Fiber)를 이용하여 흙을 보강할 경우 기존의 평면적인 보강재(Geotextile)와 마찬가지로 사질토 및 점토의 전단강도를 증진시킬 뿐만 아니라 강도의 지속성이 우수하고 장기간에 대해서 사면의 안전성을 제공한다는 장점을 가지고 있다. 성토사면은 지속성의 강우로 인하여 강도가 감소하면 사면의 Sloughing 또는 사면 파괴가 자주 발생한다. 사면 파괴시 사면의 보수 및 유지 관리에 FPF공법을 사용하여 보수할 수 있다. 먼저 파괴된 사면의 파괴면보다 깊게 사면을 제거한 후 대체 성토재를 이용하여 성토 다짐을 하는데 강도 특성이 좋은 양질의 성토 재료를 사용하여야 한다. 양질의 성토 재료를 사용하기 힘든 경우에 안정화 처리 공법을 사용하여 지반을 개량하여 사용한다. FPF공법으로 보강된 성토 재료는 전단강도나 특성이 우수하여 쉽게 적용하여 사면을 보수할 수 있다.

Geotextile과 달리 보강섬유는 흙 속에 혼합되어서 흙과 섬유가 복합적으로 거동하기 때문에 그 거동과 메커니즘 해석이 난해하고 섬유와 흙과의 특성을 정확히 알아야 해석이 가능하다. 하지만 현재 흙과 섬유를 혼합한 경우 경제성 및 시공성이 부족하여 보강섬유의 장점에도 불구하고 보강재로서 많이 적용하지 못하고 있다. 본 연구에서는 시공성과 경제성을 보완하기 위하여 흙과 혼합하는 대신 각 성토층 사이에 포설하는 방법으로 그 보강효과를 검증하였다.

Gray & Ohashi (1983)는 모래질 흙을 연구 대상으로 실내 전단시험을 실시하여 섬유혼합 보강토의 전단강도 개선 효과를 평가하였다. Gray & Al-Refaei (1986)는 삼축압축시험을 통하여 섬유가 불규칙적으로 혼합되어 있는 모래질 흙시료와 섬유가 직물 구조로 보강되어 있는 모래질 흙시료와의 역학적 특성에 대한 비교 분석을 실시하였다. 또한, Freitag (1986)는 입도가 양호한 흙을 대상으로, 흙과 섬유의 체적비와 보강효과의 관계를 연구하였다.

외국 시공 사례는 1991년 미국의 Synthetic Industries사와 Texas Department of Transportation에서

는 흙사면과 흙노반의 보수를 위해 섬유혼합 보강토 공법을 시험 시공하였으며 1989년 미국의 XIT Paving and Construction Company에서는 도로 노상층의 건설을 위해 섬유혼합 보강토 공법을 시험 시공하였고 이런 시험시공 결과로부터 섬유혼합 보강토 공법의 경제성과 시공성이 우수함을 확인하였다.

보강섬유는 현재까지 대부분 모래와 같은 조립토 위주로 이루어져 왔고 강도 및 파괴기준의 규명에 있어서 실험적인 방법에 중점을 두었다. 본 연구에서는 과거에 적용한 조립토가 아닌 국내에 많이 산재되어 있는 점토질모래(퇴적토)를 이용하여 FPF보강효과를 검증하였다.

2. FPF 보강공법

FPF(Fibrillated Polypropylene Fibers) 보강공법은 약 2-3 cm 길이의 폴리프로필렌 합성수지를 이용하여 성토 재료에 섞어서 사용하는 성토 재료의 기계적인 안정화 공법(Mechanical Stabilization Method)의 종류에 속한다. 섬유의 보강효과를 이론적으로 해석하기 위한 모델의 개발은 그 동안 많은 연구자들에 의해 시도되었으며 그 대부분은 모래질 흙을 대상으로 한 한계 평형 모델(limit equilibrium model)을 이용한 방법이었다. 대표적인 모델은 Gray와 Ohashi(1983)가 제시한 모델이다. 이 모델에서 모래와 보강섬유의 거동을 묘사하는데 있어 힘의 평형 관계에 기초한 단순한 모델로서 섬유 보강된 모래의 전단강도를 예측하고자 하였다. 그림 1과 같이 전단파괴면에 직각인 경우와 경사진 경우의 전단강도 증가 ΔS_R 를 다음과 같이 제시하였다.

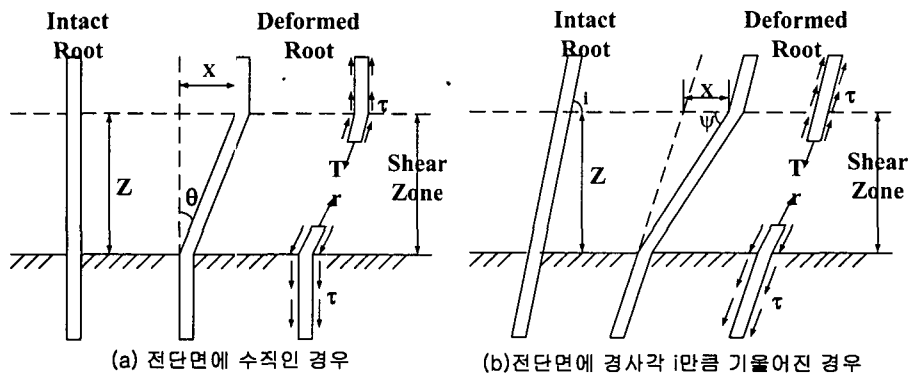


그림 1 보강섬유의 모델링

$$\text{전단면에 수직으로 설치된 경우; } \Delta S_R = t_R [\sin \theta + \cos \theta \tan \phi] \quad (1)$$

$$\text{전단면에 경사각 } i \text{ 만큼 기울어져 있는 경우; } \Delta S_R = t_R [\sin(90 - \psi) + \cos(90 - \psi) \tan \phi] \quad (2) \text{ 여}$$

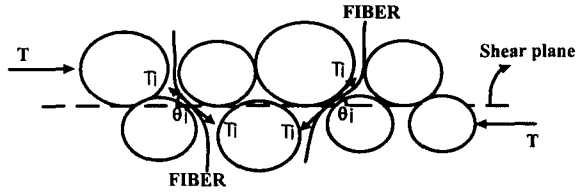
$$\text{기서 } \psi = \tan^{-1} \left[\frac{1}{k + (\tan^{-1} i)^{-1}} \right]$$

ΔS_R : 섬유 보강시 전단강도의 증가량

t_R : 시료의 단위 면적 당 증가한 전단응력, k : 전단변형률 ($k=x/z$), ϕ : 시료의 내부마찰각

i : 초기의 섬유와 전단면이 이루는 각도, x : 수평전단변형량, z : 전단영역의 두께

보강사의 보강효과에 대한 최근 연구의 대부분은 실내 실험을 통해서 흙의 전단 특성 향상을 증명하였다. 실험의 대부분은 삼축실험, 일축실험, CBR, 인장실험을 통해서 전단강도의 향상과 연성이 증가하는 것을 증명하였다. 전단강도의 향상은 점착력의 증가 효과와 흙입자의 물림 현상에 의한 내부마찰각의 증가로 인한 것이다. (그림 2.) 점착력이 적은 모래에 섬유를 첨가함으로써 겉보기 점착력(Apparent Cohesion)이 발생하는 것을 Schlosser와 Long(1972)의 결과에서 알 수 있다. (그림 3.)



$$T = C + \sigma' \tan \phi + \sum T_i \cos \phi_i$$

그림 2. 보강사의 보강효과

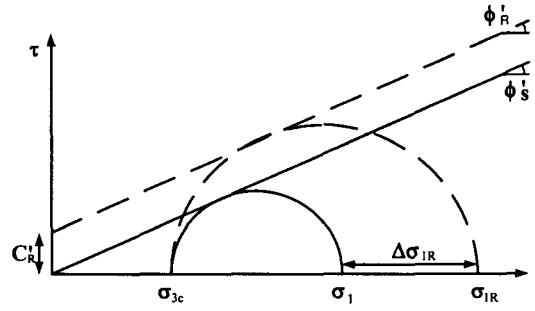


그림 3. 보강사에 의한 겉보기 점착력

3. 모형토조시험

3.1 모형사면 조건

모형사면에 사용된 시료는 성균관대학교 공사 현장에서 지표면으로부터 약 3m 깊이의 심도에서 채취하였으며 갈색의 습윤한 상태였으며 약간의 자갈을 함유한 상태였고 기본물성치는 표 1과 같다. 사면의 조성은 점토질모래(SC)를 사용하여 최대건조단위중량의 90%가 되도록 하였으며, 최적 함수비 13.6%로 사면을 조성하였다. 다짐은 3.5kg(20cm×20cm×1.3cm)의 다짐판을 1m 높이에서 낙하시켜 최대건조단위중량의 90%로 다짐하여 67cm 높이의 성토층을 조성한 후 40cm를 절토하여 사면을 조성하였다.

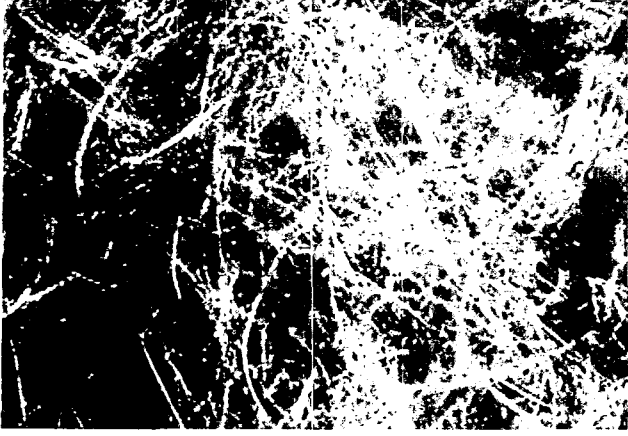
섬유의 조건에 따라 보강효과가 달라지므로 최적의 보강효과를 구하기 위하여 재활용된 폴리프로필렌 섬유로 세섬유(Fibrillated Polypropylene Fiber), 단섬유(Monofilament Fiber), 테이프형 섬유(Tape Fiber)를 선택하였다. 세 가지 섬유에 대해서 실내 실험을 수행한 결과 세섬유(Fibrillated Polypropylene Fiber)의 효과가 가장 탁월하였다. FPF 보강 조건은 섬유 함유량 0.5%, 그리고 길이는 5cm으로 하였다. 사면의 다짐도는 다짐 시험의 결과에 따라 함수비 15.5%, 최대건조단위중량의 90%로 다짐을 실시하였다. 보강되는 부분은 6층(수직간격10cm)으로 FPF를 포설하여 보강효과를 비교하였다. 벽면의 마찰을 줄이기 위하여 측면에 매끄러운 필름을 붙여 최대한 평면 변형을 조건을 조성하였다.

성토 재료의 보강공법에 사용되는 보강사의 종류에는 폴리프로필렌 섬유, 나일론계 섬유, 폴리에스터 계의 섬유 등을 들 수 있으나 폴리프로필렌이 보강효과가 뛰어나고 가격이 저렴하며 재활용이 가능한 재료이고 화학적으로 안정되어 지하수와 반응하여 화학물을 배출할 위험이 없다. 그러므로 본 시험에서는 재활용된 폴리프로필렌 섬유를 사용하였고 섬유의 보강효과를 비교하기 위하여 FPF를 선택하였다. 섬유의 단위로는 데니어(Denier)를 사용하는데 이는 1 데니어가 길이가 9000m인 섬유의 중량이 1g인 경우를 말한다. FPF 보강재는 10데니어로서 F10으로 명명하고 시험에 사용된 폴리프로필렌 섬유의 물리적 특성을 나타낸 시험 성적표가 표 2에 있다.

표 1. 시료의 기본물성치

시료	비중 Gs	200번체 통과량	액성한계	소성한계	최대건조 단위중량 (kN/m ³)	최적 함수비	내부마찰각 ϕ	점착력 (kN/m ²)
원시료	2.67	45%	37	17	18.1	11.0%	28.6°	13
FPF보강시료					17.4	13.7%	33.0°	14

표 2. 한국원사직물시험연구소의 FPF의 시험 성적표

	시료명	세섬유(F10)	비고
	재질	Polypropylene	(KS K 0210)
	인장강도 (gf)	47.61	(KS K 0412)
	인장신도 (%)	22.7	(KS K 0412)
	탄성계수 (kgf/cm ²)	2.6×10^4	(KS K 0412)
	Denier (g/9000m)	8.8	(KS K 0415)
	비중	0.91	(KS M 3016)

3.2 실험장치

모형토조에 조성된 성토사면의 모형도가 그림4~5에 있다. 모형토조는 폭48cm × 길이123cm × 높이 67cm로 제작했고, 하중재하판의 크기는 23cm × 48cm로 제작을 하였다. 하중재하시 지반의 변형을 관측하기 위해서 아크릴 판을 측면으로 위치하게 했고, 지반 내에 수직간격 H=10cm, 수평 간격을 2~3cm로 탄소봉을 아크릴 판 쪽에 배치함으로써 실험 과정과 사면의 변형 과정을 관측할 수 있도록 하였다.

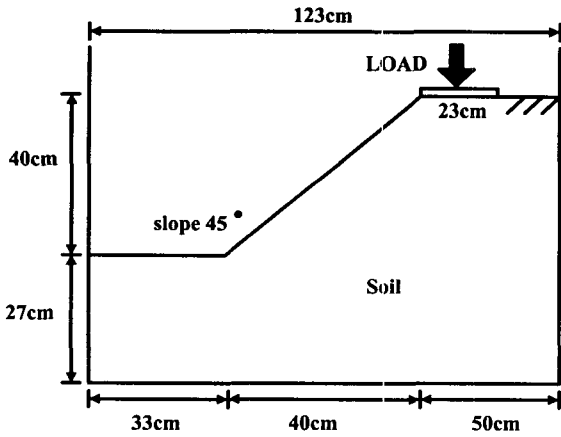


그림 4. 45° 성토사면의 규격(측면도)

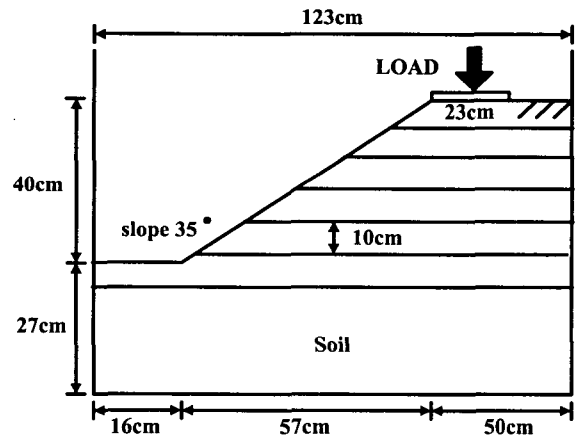


그림 5. 35° 성토사면의 규격(측면도)

시험기구는 재하판, 하중(반력)장치, 재하장치(70~140kgf/cm², 직경14.8cm), 침하량 측정장치(LVDT) 2개, EDX 1500(하중 Data 처리)이 사용되었다. 그림 6~9는 모형토조와 시험 장비의 설치 및 위치를 보여주고 있다.

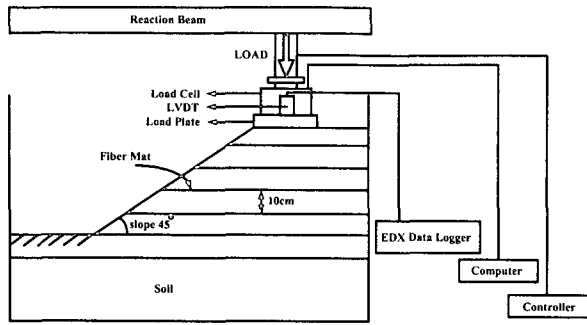


그림 6. 성토사면의 계측기의 설치 및 위치

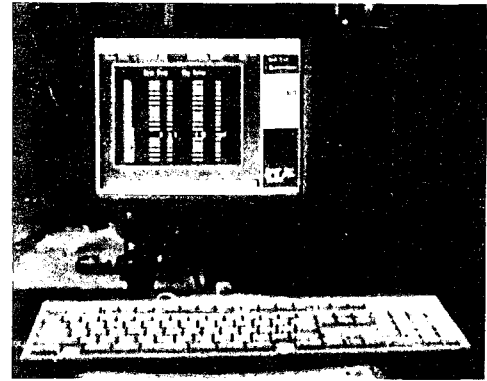


그림 7. EDX 1500(하중 Data 처리)

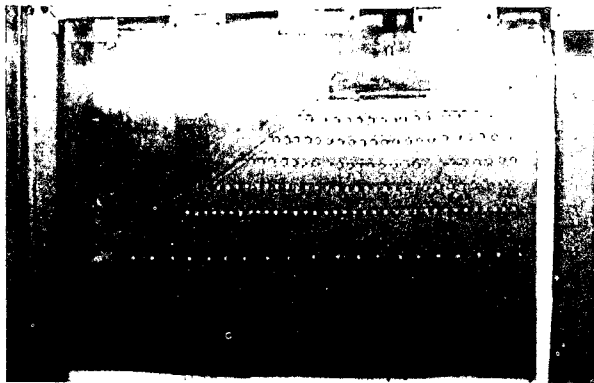


그림 8. 성토사면

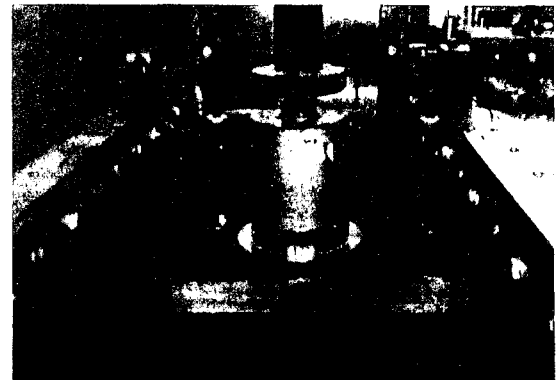


그림 9. 하중재하 장치

4. 모형토조를 이용한 성토사면의 재하시험결과

보강하지 않은 성토사면과 FPF 보강 시료로 조성된 모형사면에 대한 하중재하시험 결과 항복 하중은 45° 경사로 조성된 사면에서는 그림 10~11에서와 같이 각각 1.0ton과 1.9ton으로 나타났으며, 35° 사면의 경우에는 1.7ton과 2.5ton이 측정되었다. 보강하지 않은 성토사면에 비해 FPF로 보강된 성토사면의 지지력이 약 55~60%의 증가를 보였다. 이는 FPF의 보강효과로서 시료(SC)의 내부마찰각이 증가하였기 때문에 흙의 지지력이 증가한 것으로 판단된다. 토조시험 결과 사면의 파괴 형태가 그림 탄소봉의 위치 이동을 추정하면 재하판의 우측 하단부에서부터 사면의 Toe 부분으로 파괴면이 진행되는 것을 관찰할 수 있었다.

섬유를 보강 분야에 적용하는 이유는 섬유의 인장력을 이용하여 토질의 강도정수를 증진하는 것이다. 실험에 사용된 세섬유의 인장강도는 한국원사직물시험연구소의 시험성적서에 따르면 약 47.61gf, 인장신도 22.7%이고 이에 비해 흙의 인장력은 무시할 정도이다. 따라서 보강의 효과는 토질의 강성보다는 항복 후의 연성의 증가에 기여를 한다는 것을 알 수 있다. 이는 일축 압축 시험의 경우 보강하지 않은 시료는 파괴후 강도가 급격히 감소하고 섬유 보강한 시료는 파괴후에도 하중이 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 FPF 보강 사면의 경우 변형의 증가와 더불어 서서히 보강효과가 증가하는 것을 알 수 있으며 사면의 세섬유가 흙과의 마찰저항을 유발시켜 흙 시료의 전단 변형을 구속하는 역할을 하는 것으로 판단된다. 또한 위와 같은 경향은 Gray와 Ohashi(1983)의 실험 결과와 유사한 전단 변형에 따라 강도가 완만히 증가하는 (Strain Hardening) 경향을 보였다. 섬유로 보강된 사면의 보강효과는 일정한 변형율에 도달하면 흙과 섬유 사이의 마찰력이 진전됨으로써 점진적으로 크게 발휘되므로 FPF 보강 사면의 하중-침하 특성으로 유추하면 FPF 보강 사면의 효과는 장기적인 안정성에 기여할 것으로 판단된다.

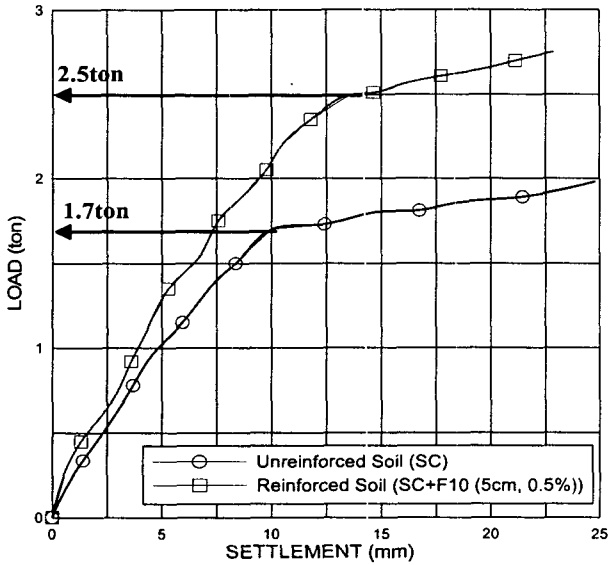


그림 10. 모형토조 성토사면
35° 하중재하시험 결과 비교

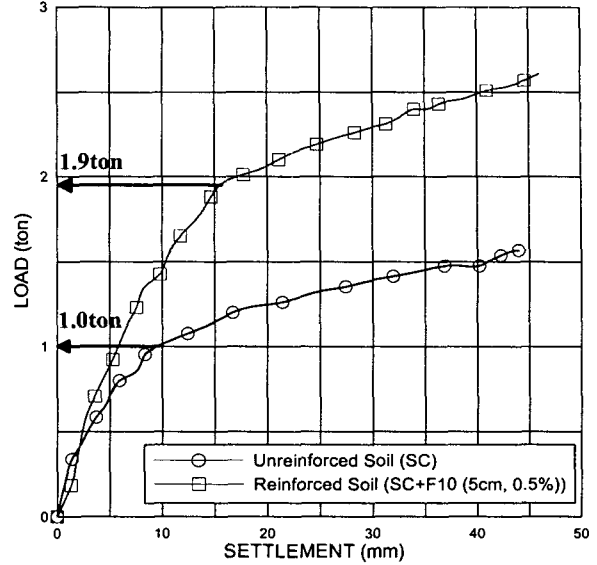


그림 11. 모형토조 성토사면
45° 하중재하시험 결과 비교

5. 사면안정 역해석을 이용한 시험결과 분석

성토사면의 재하시험결과를 이용하여 FPF 보강 사면의 안전을 증진 효과를 알아보기 위하여 사면안정 해석 프로그램인 PCSTABL6M을 이용하여 역해석을 실시하였다. PCSTABL6M의 결과가 그림 12~14에 있다. 실내시험으로부터 구한 전단강도 정수를 이용하여 1:1 성토사면에 대한 사면안정해석을 실시하였으며 재하시험결과 파괴기준이 되는 하중 1ton을 재하하여 안전을 1.04를 구하였다.(그림 12) 안전을 1.0은 파괴 순간의 안전율을 표시하고 있으므로 전단강도 정수의 신뢰성을 보여주고 있으며 탄소봉의 이동을 유추하여 얻어진 재하시험의 파괴원과 일치하는 결과를 보여주고 있다. FPF보강 사면의 사면안정 해석 결과 재하시험의 사면 파괴 하중 1.9ton을 재하하였을 경우 안전을 1.1을 구할 수 있었다.(그림 13) 파괴기준이 되는 안전을 1.0보다 약 10%정도 크게 나왔으며 무보강 사면에 파괴를 유발시킨 하중 1.0ton을 보강 사면에 적용하여 사면 안전율의 증가 효과를 확인하기 위하여 사면안정해석을 실시하여 안전을 1.23을 얻을 수 있었다. 그림 14는 섬유 보강 효과가 사면의 안전율을 기준으로 약 23%정도 증가한 것을 보여주고 있다.

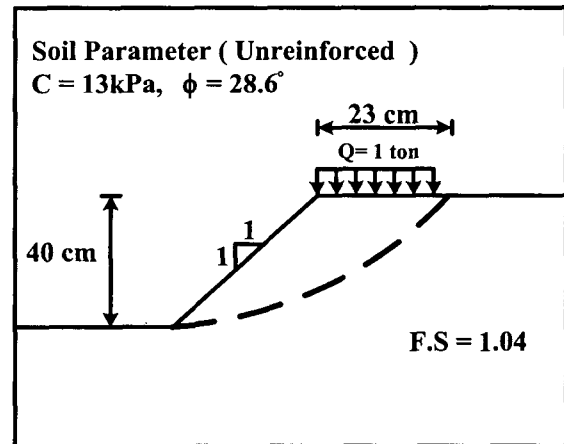


그림 12. 무보강 사면의 사면안정해석 (Q=1.0ton)

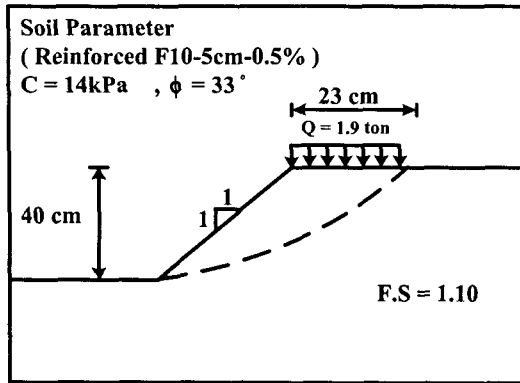


그림 13. 보강 성토사면의 사면안정해석 (Q=1.9ton)

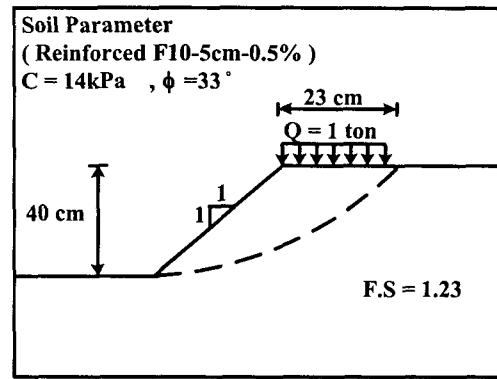


그림 14. 보강 성토사면의 사면안정해석(Q=1.0ton)

6. 결론

본 연구에서는 사면의 보수 보강을 위한 FPF 보강공법을 개발하기 위하여 사면의 재하시험을 수행하였다. 실내시험을 통한 FPF 보강효과의 최적 조건을 국내에 산재하고 있는 점토질모래를 사용하여 조성된 축소 모형사면에 적용시켜 얻은 결과와 PCSTABL6M을 통하여 상대 비교하여 보강효과를 검토하였다. 본 연구에서는 사면 보강공법 중의 하나인 FPF 보강 사면에 대해서 실내 모형시험을 수행하였다.

FPF보강공법에 대한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 보강사로 보강한 성토사면의 보강효과를 알아보기 위하여 보강사를 각 성토층에 포설하는 방법을 사용하여 사면을 조성하고 하중재하시험을 통하여 보강효과를 검증하였다.
2. 사면의 하중-침하 곡선으로부터 사면 경사 35° 일 때 비보강사면과 보강 사면의 파괴 하중이 각각 1.7ton, 2.5ton 그리고 사면 경사 45° 일 때 각각 1.0ton, 1.9ton으로 47%에서 90%정도 증가하였다.
3. 실내 시험을 통한 전단강도 정수를 이용하여 사면 경사 45° 성토사면에 대한 역해석 사면안정해석을 실시하였으며 재하시험결과 파괴기준이 되는 하중 1ton을 재하하여 안전율 1.04를 구하였다. 안전율 1.0은 파괴 순간의 안전율을 표시하고 있으므로 전단강도 정수의 신뢰성을 보여준다.
4. FPF 함유량 0.5%, 길이 5cm의 조건으로 사면보강후 안전율은 비보강사면을 기준으로 23%증가하였다. FPF 보강 사면의 경우 변형의 증가와 더불어 점차 보강효과가 증가하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국토지공사의 중소기업 기술 개발 사업과제로서 수행되었으며 한국토지공사와 (주)도담엔지니어링의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Gray, D.H. and Ohashi, H. (1983), "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand." , *Journal. of Geotech. Engrg.* ASCE, 109(3), pp. 335-353.
2. Gray, D.H. and Al-Refeai, T. (1986), "Behavior of Fabric vs. Fiber-Reinforced Sand." , *Journal. of Geotech. Engrg.* ASCE, 112, pp. 804-820.
3. Tingle, J.S. (1999), Discrete Fiber Reinforcement of Sands for Expedient Road Construction, Thesis, Mississippi State University, MS.
4. Michalowski, R.L. and Zhao, A.(1996), "Failure of Fiber-Reinforced Granular Soils", *Journal. of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 3, pp. 226-234.
5. Freitag, R.(1986), "Soil Randomly Reinforced With Fibers", *Journal. of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 8, pp. 823-826.
6. 한국건설기술연구원.(1995), 섬유혼합 보강토 연구, pp. 73~.74.