

FPF(Fibrillated Polypropylene Fiber)보강 성토재료의 강도 특성에 관한 연구

Characteristics of Soils Reinforced by FPF(Fibrillated Polypropylene Fiber)

김낙경¹⁾, Kim, Nak-kyung 박종식²⁾, Park, Jong-Sik

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 was to analyze characteristics of soils reinforced by FPF(Fibrillated Polypropylene Fiber). Laboratory test, model test and field tests were performed on soils reinforced by fibers, to evaluate the shear strength characteristics. For the silty sand, clayey sand and silty clay, the influence of fiber shape, fiber length and fiber content were evaluated from compaction test, direct shear test, uniaxial test, california bearing ratio(CBR) test. Fibrillated type fiber, 5cm long with a content of 0.5% shows 5~30% increase of friction angle and 7~55 percent increase of CBR value.

Key words : FPF(Fibrillated Polypropylene Fiber), Fiber-reinforced soil, Direct shear test, Uniaxial test, California bearing ratio(CBR) test, Model test.

1. 서론

최근 국내에서는 신도시 개발, 대단위 주택단지 조성 및 도로공사의 확충 등 도시 개발 사업이 계속적으로 확장되어 가고 있다. 따라서 이와 같은 건설 공사에 필요한 양질의 토사량은 막대하게 필요한 실정이다. 하지만 건설 공사에 필요한 양질의 토사를 확보하는 데는 많은 어려움이 있다. 절토한 흙을 이용하여 성토 재료로 사용하는 것이 가장 경제적이고 시공 속도도 빠르다. 그러나 절토한 흙이 성토 재료로 적합하지 않을 때에는 여러 가지 형태의 섬유제품을 이용하여 성토 재료를 개량하여 사용하고 있다. 최근 선진국에서는 이에 관한 활발한 연구가 진행 중이며 섬유혼합 보강토에 관한 연구를 보면 다음과 같다. Gray & Ohashi (1983)는 모래질 흙을 연구대상으로, 실내 전단시험을 실시하여 섬유혼합 보강토의 전단강도 개선효과를 평가하였다. Gray & Al-Refeai (1986)는 삼축압축시험을 통하여 섬유가 불규칙적으로 혼합되어 있는 모래질 흙 시료와 섬유가 직물구조로 보강되어 있는 모래질 흙 시료와의 역학적 특성에 대한 비교 분석을 실시하였다. 또한 Freitag (1986)는 입도가 양호한 흙을 대상으로 흙과 섬유의 체적비와 보강효과의 관계를 연구하였다. 최근 O' Rourke, Druschel & Netravali (1990)와 Frost & Han (1999) 등은 흙과 섬유의 접촉면(Interface)에서의 역학적 거동에 관한 연구를 실시하여 흙과 섬유의 역학적 거동에 대한 연구가 활발히 진행 중인 것을 알 수 있다. 이들이 실험에 사용한 섬유들은 야자수 줄기와 갈대 등의 천연섬유에서부터 PVC, 나일론, 폴리프로필렌(PP) 등의 합성섬유이었으며, 이 섬유들의 인장강도와 길이, 혼합율 등을 변화시켜가며 여러 시험방법을 시도하였다.

본 연구는 건설공사에서 수반되어 발생하는 건설잔류토와 역학적으로 안정을 요하는 성토재를 대상으로 흙 종류별로 FPF(Fibrillated Polypropylene Fiber)보강재를 이용하여 섬유의 길이와 함유량 등을 변화시켜 역학적 특성을 분석하고 모형토조를 이용한 시험과 현장 시험시공을 통하여 지지력 특성에 대한 연구를 수행하여 섬유 보강효과를 검증하려 한다.

2. FPF보강재의 기초 성능 평가

성토 재료의 보강공법에 사용되는 섬유 종류에는 폴리프로필렌 섬유, 나일론계 섬유, 폴리에스터 계의 섬유 등을 들 수 있으나 폴리프로필렌은 가격이 저렴하고 재활용이 가능한 재료이며, 화학적으로 안정되어 지하수와 반응하여 화합물을 배출할 위험이 없다. 그러므로 본 시험에서는 재활용된 폴리프로필렌 섬유(표 1)를 사용하였고 섬유의 형태에 따르는 보강효과를 비교하기 위하여 세섬유(Fibrillated Fiber)(그림 1), 단섬유(Monofilament Fiber)(그림 2), 테이프형 섬유(Tape Fiber)(그림 3)를 선택하였다.

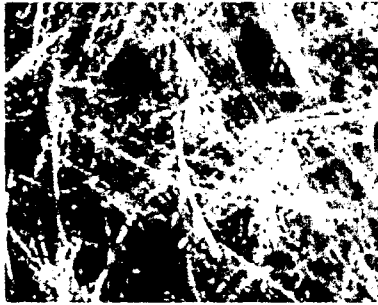


그림 1. 세섬유

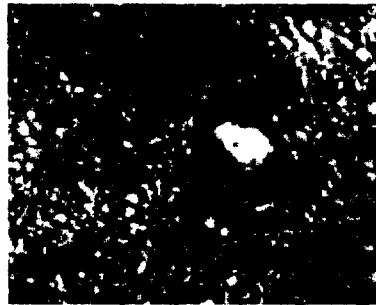


그림 2. 단섬유

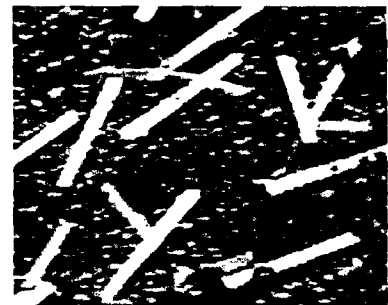


그림 3. 테이프섬유

표 1. FPF보강재의 제반 특성값

시료명	세섬유(F10)	단섬유(M50)	테이프(T1000)	비고
재질	Polypropylene	Polypropylene	Polypropylene	(KS K 0210)
인장강도(gf)	47.61	107.3	4768.9	(KS K 0412)
인장신도(%)	22.7	121.2	17.4	(KS K 0412)
탄성계수(kgf/cm ²)	2.6×10^4	1.5×10^4	9.0×10^3	(KS K 0412)
Denier(g/9,000m)	8.8	45.4	974.2	(KS K 0415)
비중	0.91	0.91	0.91	(KS M 3016)

3. 평가시험에 사용된 흙 시료의 종류 및 일반 물성

본 연구에 사용된 흙 시료는 모두 세 가지의 시료를 선택하였으며 세립분의 함유량에 따라 실트질 모래, 점토질 모래, 실트질 점토로 분류된다(표 2). 실트질 모래 시료는 성균관대학교 공사 현장에서 지표면으로부터 약 3m 깊이의 심도에서 채취하였으며 갈색의 습윤한 상태였으며 약간의 자갈을 함유하였다. 점토질 모래는 성균관대학교 지반 시험장에서 깊이 약 1.5m에서 채취하였으며 황갈색을 띠며 습윤한 상태이고 약간의 자갈을 함유하였다. 실트질 점토는 성균관대학교 식물원에서 표토를 제거하고 지표면으로부터 약 1m 내외에서 채취하였으며 적황색을 띠고 약간의 식물 뿌리가 존재하였다.

4. FPF보강재로 보강된 흙 시료의 다짐 특성

FPF(Fibrillated Polypropylene Fiber)보강재로 보강된 흙 시료의 최대건조단위중량과 최적함수비를 알아내기 위하여 다짐시험을 수행하였다. 흙 시료는 흙의 물리 시험용 시료 조제 방법(KSF 2301)에

의거하여 준비하였다. 그리고 흙의 표준다짐시험 방법(KSF 2312)에 의해서 흙 시료의 함수비를 조절하여 시험을 실시하였다. 시료의 사용 방법은 비반복법을 이용하였으며 자동다짐기를 이용하여 흙 시료의

표 2. 흙 시료의 물리적 특성

	흙의 통일분류	No. 200 통과중량 백분율	액성한계/ 소성지수	시료상태
Sample 1.	SM	18.23~19.21 %	NP	갈색의 습윤한 상태, 약간의 자갈 함유
Sample 2.	SC	43.20~47.52 %	37~37.8/16.8~18	황갈색을 띠며 습윤한 상태, 약간의 자갈을 함유
Sample 3.	CL	58.50~61.92 %	37~39/14.3~16	적황색을 띠고, 약간의 식물 뿌리가 존재

다짐을 실시하였다. 섬유는 길이는 2cm와 5cm로 일정하게 잘라서 준비된 건조시료와 혼합 및 포설하였으며 Fiber 함량은 흙 시료의 건조중량의 0.5%와 1.0%로 하였다. 그림 4-6은 FPF보강재로 보강된 흙 시료의 다짐 특성을 나타낸 것이다. 섬유의 종류, 함유량 및 길이를 고려한 시험결과를 근거로 할 때 흙 시료의 최대건조단위중량은 약 3.0~5.0% 정도 감소하였고 최적함수비는 약 2%정도 증가하였다.

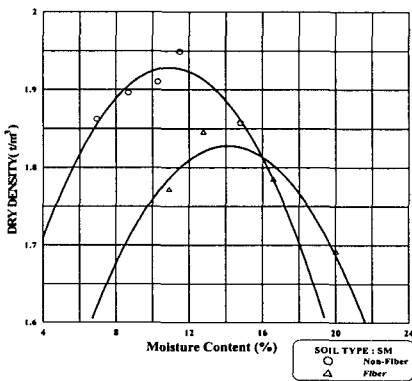


그림 4. 세섬유로 보강된 SM의 다짐곡선

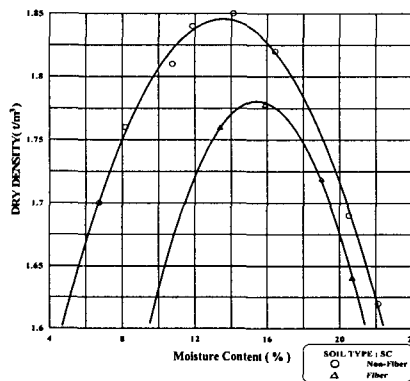


그림 5. 세섬유로 보강된 SC의 다짐곡선

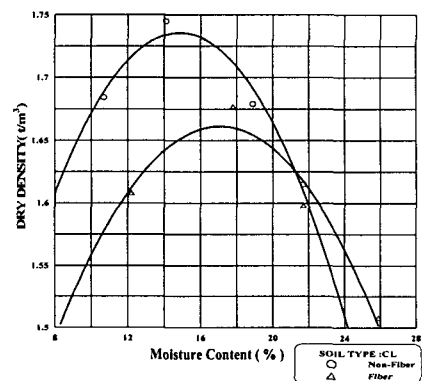


그림 6. 세섬유로 보강된 CL의 다짐곡선

5. FPF보강재로 보강된 흙 시료의 전단강도 특성

5.1 FPF보강재의 종류에 따른 보강효과

FPF보강재로 보강된 흙 시료(CL)의 전단강도 특성에서 섬유종류에 따른 보강효과를 알아보았다. 세섬유(Fibrillated Fiber), 단섬유(Monofilament Fiber)와 테이프섬유(Tape Fiber)로 보강된 흙 시료(CL)의 일축압축시험을 통해서 보강형태가 2cm, 1.0%일 경우 세섬유, 단섬유, 테이프 순으로 일축압축강도가 일정하게 증가함을 알 수 있었다. 그림 7-8은 섬유의 종류에 따른 일축압축강도를 비교 분석한 것이다.

5.2 FPF보강재의 함유량에 따른 보강효과

FPF보강재로 보강된 흙 시료의 전단강도 특성에서 섬유함유량에 따른 보강효과를 알아보았다. 일

축압축시험을 통해서 건조단위 중량비가 0.5%, 1.0% 그리고 2.0%이고 섬유길이는 2cm일 경우에 대한 보강효과를 분석하였다. 그림 9-10은 세섬유(Fibrillated Fiber)의 함유량에 따른 일축압축강도를 비교한 것이다. 시험결과에 의하면 섬유함유량이 0.5%에서 2.0%로 증가할수록 일축압축강도가 증가하는 것으로 나타났다.

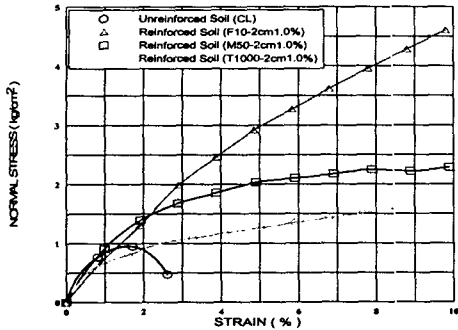


그림 7. 섬유의 종류에 따른 일축압축강도 비교

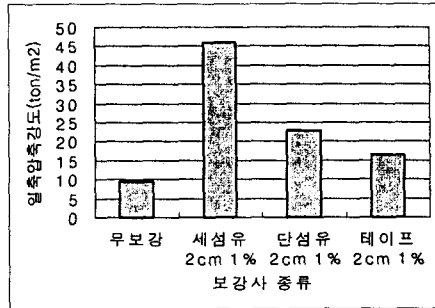


그림 8. 섬유의 종류에 따른 일축압축강도 비교

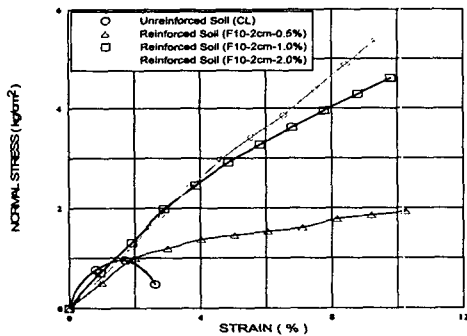


그림 9. 섬유의 함유량에 따른 일축압축강도 비교

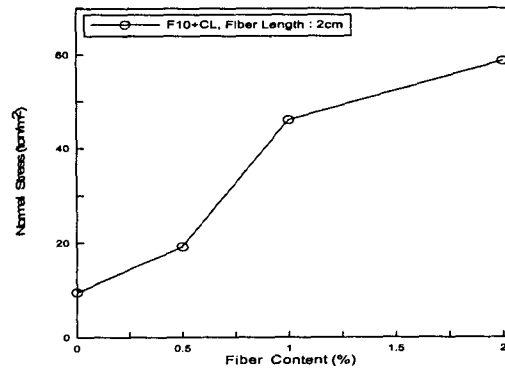


그림 10. 섬유의 함유량에 따른 일축압축강도 비교

5.3 FPF보강재의 길이에 따른 보강효과

FPF보강재로 보강된 흙 시료의 전단강도 특성에서 섬유길이에 따른 보강효과를 알아보았다. 세섬유 함유량이 1.0%인 경우, 길이가 2cm와 5cm에 대하여 일축압축시험을 실시하였다. 그림 11-12는 세섬유의 길이에 따른 일축압축강도를 비교한 것이다. 시험결과를 근거로 볼 때, FPF보강재의 길이에 따른 보강효과는 미미한 것으로 판단된다.

5.4 토질 특성에 따른 보강효과

FPF보강재로 보강된 흙 시료의 전단강도 특성에서 토질 특성에 따른 보강효과를 알아보았다. 직접전단시험을 통하여 섬유 함유량이 1.0%, 길이가 2cm인 경우 흙 시료의 종류에 대한 보강효과는 표 3과 같다. 시험결과에 의하면 섬유에 의한 전단특성의 변화는 점착력은 거의 변화가 없으나 전단저항각은 점토질 모래의 경우 15.38% 증가하였고 실트질 점토와 실트질 모래의 경우 각각 29.6%, 15.4%의 증가를 보였다.

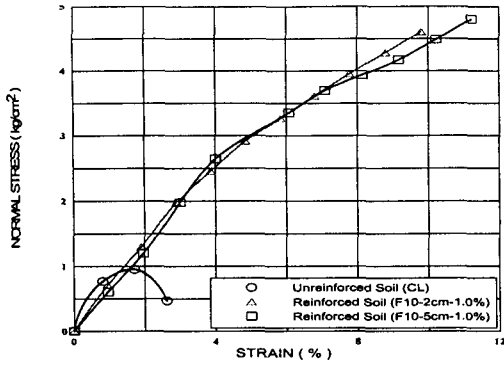


그림 11. 섬유 길이에 따른 일축압축강도 비교

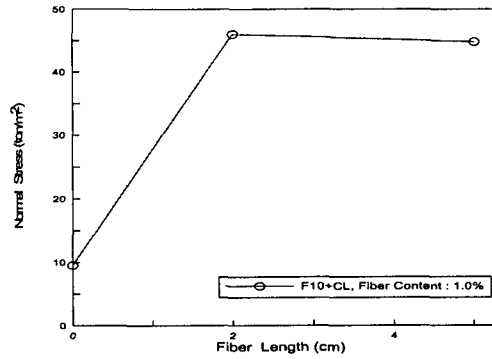


그림 12. 섬유 길이에 따른 일축압축강도 비교

표 3. 흙 시료와 세섬유로 보강된(F10) 시료와의 전단 특성 비교

흙 시료 조건	SM		SC		CL	
	흙 시료	흙 시료+F10	흙 시료	흙 시료+F10	흙 시료	흙 시료+F10
점착력(kg/cm ²)	0.11	0.16	0.13	0.14	0.17	0.17
전단저항각(°)	33.3	38.3	28.6	33.0	24.7	32.0

6. FPF보강제로 보강된 흙 시료의 지지력 특성

6.1 FPF보강제의 종류에 따른 보강효과

FPF보강제로 보강된 흙 시료의 지지력 특성을 파악하기 위하여 실내CBR시험을 실시하였다. 섬유의 종류에 따른 보강효과를 알아보기 위하여 세섬유(F10) 2cm, 1.0%와 단섬유(M50) 2cm, 1.0% 및 테이프섬유(T1000) 2cm, 1.0%의 형태로 보강효과를 알아보았다. 시험결과(표 4)에 의하면 세섬유(F10)로 보강된 흙 시료의 CBR값이 단섬유(M50)나 테이프(T1000)로 보강된 흙 시료의 CBR값에 비해서 훨씬 큰 지지력 효과를 가지는 것으로 나타났다.

표 4. 섬유종류별 실내CBR시험결과의 비교

	실트질 모래(SM)	점토질 모래(SC)	실트질 점토(CL)
무보강	38.09	10.47	4.27
세섬유(F10), 2cm, 1.0% CBR(%)	39.00	13.81	9.05
단섬유(M50), 2cm, 1.0% CBR(%)	14.28	12.54	
테이프(T1000), 2cm, 1.0% CBR(%)	23.38	11.90	

6.2 FPF보강제의 길이와 함유량에 따른 보강효과

FPF보강제로 보강된 흙 시료의 지지력 특성에서 섬유의 길이와 함유량에 따른 보강효과를 알아보았다. 시험결과(그림 13-14)에 의하면 모든 흙 시료에 대하여 섬유의 길이에 따른 보강효과는 미미한

것으로 나타났으나 섬유 함유량을 0.5%에서 1.0%로 증가할 경우 보강효과의 증가하는 것으로 나타났다.

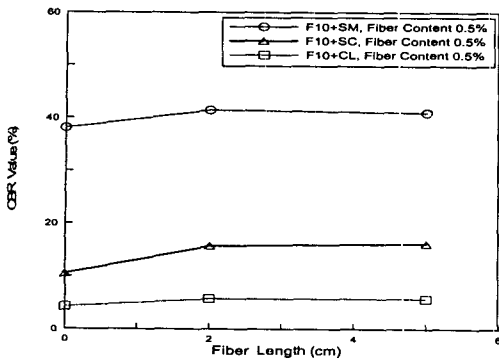


그림 13. 섬유함유량(0.5%)에 대한 길이별 CBR 값의 비교

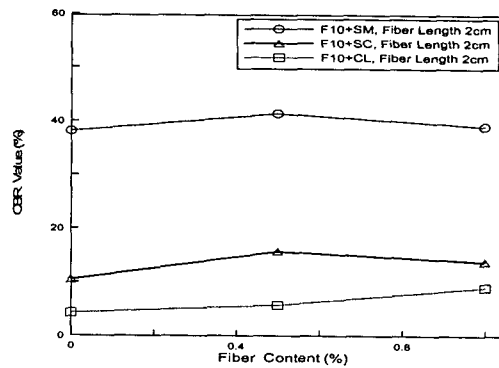


그림 14. 섬유길이(2cm)에 대한 함유량별 CBR 값의 비교

7. 모형토조를 이용한 성토층의 재하시험

FPF보강재로 보강된 흙 시료의 기초연구 평가시험을 수행한 후, 섬유의 보강효과를 검증하기 위한 방법으로써, 모형토조를 이용한 재하시험을 실시하였다(그림 15). 모형토조는 폭90cm × 길이90cm × 높이60cm로 제작하였으며, 하중재하판의 크기는 직경30cm의 원형판을 사용하였다. 흙 시료를 최대건조단위중량의 90%로 다짐하여 지반을 모형토조 안에 조성한 후, 재하판을 중앙에 설치하고, 하중프레임에 설치된 유압잭을 이용하여 재하시험을 수행하였다. 하중재하시, 지반의 변형을 관측하기 위해서 아크릴판을 측면으로 위치하게 하였다. 또한 토조에서 섬유로 보강되는 부분은 층간격(10cm)으로 포설하여 보강하지 않은 지반과의 보강효과를 비교하였다. 벽면의 마찰을 줄이기 위하여 측면에 매끄러운 필름을 붙여 최대한 평면 변형을 조건을 조성하였다. 세섬유의 보강형태는 실내 CBR 시험결과를 근거로 하여 5cm, 0.3~0.5%의 보강조건을 선택하였으며 가로 20cm × 세로 20cm의 평판(Steel Plate)을 준비하였다. 평판(Steel Plate)의 무게는 약 3.54kg이며 다짐층수는 6층으로 결정하였다. 평판(Steel Plate)의 낙하고는 1.0m로 결정하여 최대건조단위중량의 90%가 되는 다짐 횟수를 확인하고 다짐을 실시하였다. 시험기구는 재하판, 하중(반력)장치, 재하장치(70~140kgf/cm², 직경14.8cm), 침하량 측정장치(LVDT) 2개, 아크릴판, EDX 1500(하중 Data 처리)이 사용되었다. 그림 16은 모형토조를 이용한 평판재하시험결과를 나타낸 것이다. 시험결과에 의하면 10% 변형을 발생시 무보강 모형지반의 극한하중값에 비해서 26%의 보강효과를 보이는 것으로 나타났다. FPF보강재로 보강된 모형지반의 극한하중값의 증가는 FPF보강재의 보강효과에서 기인하는 것으로 판단된다.

8. FPF보강재를 이용한 현장시험

8.1 시공 조건

경기도 남양주시 △△읍에 위치한 택지 개발 현장에 연장 약 20 미터에 해당하는 구간에 실트질 모래(SM)를 이용하여 무보강 2 미터, 보강사(세섬유, 5cm, 0.5% 와 세섬유, 5cm, 0.3% 및 단섬유, 5cm, 0.5%)로 보강한 구간 각 2 미터를 시험 시공하였다. 무보강 구간은 A 구간, 세섬유, 5cm, 0.5%로 보강된 구간은 B 구간, 세섬유, 5cm, 0.3%로 보강된 구간은 C 구간, 단섬유, 5cm, 0.5%로 보강된 구간은 D 구간으로 정하였고 노상토의 두께를 약 80cm로 조성하였다. 시공 구간 조성시 1층다짐두께가 10cm를 넘지 않도록 하였으며 보강사를 각 층마다 인력 포설하여 성토구간의 다짐도가 최대건조중량의 90%가

되도록 진동로울러를 이용하여 다짐작업을 실시하였다. 그리고 현장에 조성된 지반을 대상으로 평판재하시험 및 현장CBR시험을 실시하였다.

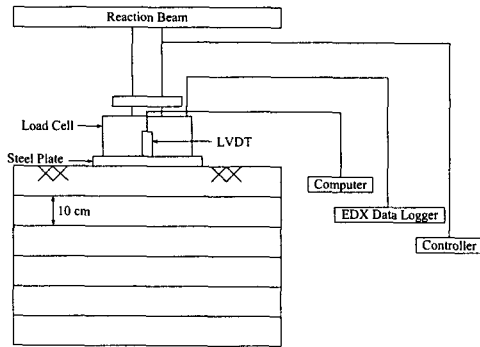


그림 15. 모형토조 개략도

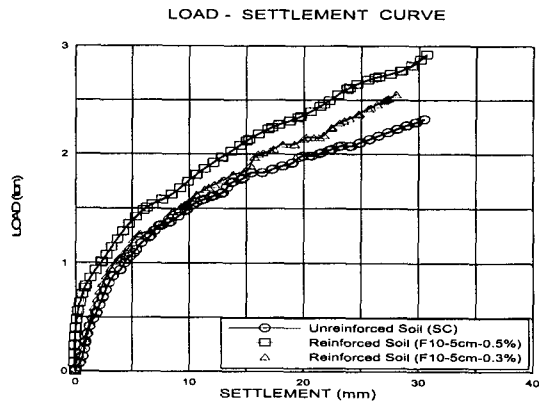


그림 16. 모형지반 지지력 시험결과

8.2 현장시험결과

그림 17-18은 현장시험결과를 나타낸 것이다. 평판재하시험에 의한 지지력계수(K_{30})는 A 구간(무보강)에 비하여 B, C 구간에서 12.5%의 증가를 보였으며 이는 섬유보강효과에 기인하는 것으로 사료된다. 한편 현장CBR시험에 의한 CBR값은 무보강 구간의 경우 17.57%이고 반면에 FPF보강재로 보강된 시험시공 구간의 경우 B 구간은 26.25%로 나타났다. C 구간과 D 구간의 경우 각각 29.79%와 22.98%의 CBR값을 나타냈다. 위 시험결과는 역시 섬유보강효과에 의한 것으로 판단된다.

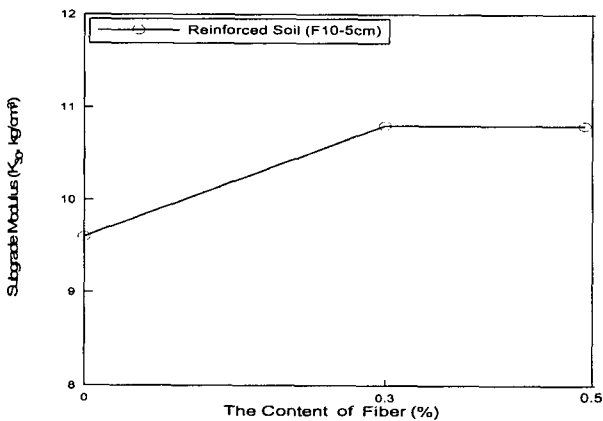


그림 17. 섬유함유량에 따른 지지력 계수(K_{30})의 비교

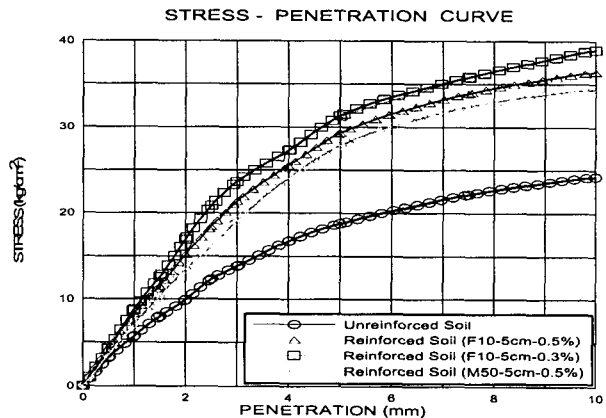


그림 18. 보강형태에 따른 현장CBR 시험의 시험결과 비교

9. 결론

본 연구는 FPF(Fibrillated Polypropylene Fibers)보강 성토재료의 강도특성에 관한 연구로서 FPF보강재로 보강된 흙 시료의 역학적 특성 및 지지력 특성의 분석, 효율적인 배합비의 평가, 모형토조를 이용한 시험과 현장 시험시공을 통하여 지지력 특성에 대한 연구를 수행하여 섬유 보강효과를 검증하려 하였다. 지금까지의 시험결과를 근거로 다음의 결론을 얻게 되었다.

1. FPF보강재로 보강된 흙 시료의 다짐, 전단강도 특성에 대한 분석을 실행하였고 보다 효율적인 섬유 보강에 대하여 평가를 실시하였다. FPF보강재로 보강된 흙 시료의 경우 흙의 점착력의 증가는 미미하며 내부마찰각의 경우 흙의 종류에 따라 15.4%~29.6% 정도 증가하였다. FPF보강재의 종류에 따른 보강효과는 세섬유(5cm, 0.5%)로 보강된 흙 시료가 단섬유와 테이프로 보강된 흙 시료에 비해 크게 나타났다.
2. FPF보강공법의 지지력 특성에 대하여 실내CBR시험을 실시하여 분석하였다. 세섬유(5cm, 0.5%)로 보강된 흙 시료의 지지력 특성이 단섬유, 테이프로 보강된 흙 시료보다 크게 나타났다. 실내CBR 값은 세섬유로 보강된 경우 흙의 종류에 따라 7.5%~54.6% 증가하였다.
3. 모형토조를 이용하여 모형지반을 조성하고 전단강도 및 지지력 증가효과를 검토하였다. FPF보강재(세섬유, 5cm, 0.5%)로 보강된 성토지반의 경우 지지력계수가 26% 증가하였다.
4. 현장시험을 통하여 FPF보강공법의 시공성 및 보강효과를 검증하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Freitag, D.R. (1986), "Soil Randomly Reinforced with Fibers." , *Journal. of Geotech. Engrg.* ASCE, 112, pp. 823-826.
2. Frost, J.D. and Han, J. (1999). "Behavior of Interfaces between Fiber-Reinforced Polymers and Sands." , *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* ASCE, 125, pp. 633-640.
3. Gray, D.H. and Ohashi, H. (1983), "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand." , *Journal. of Geotech. Engrg.* ASCE, 109(3), pp. 335-353.
4. Gray, D.H. and Al-Refeai, T. (1986), "Behavior of Fabric vs. Fiber-Reinforced Sand." , *Journal. of Geotech. Engrg.* ASCE, 112, pp. 804-820.
5. O' Rourke, T.D., Druschel, S.J. and Netravali, A.N. (1990). "Shear Strength Characteristic of Sand-Polymer Interfaces." , *J. of Geotech. Engrg.* ASCE, 116, pp. 451-469.