

옹벽 배면토체 적용을 위한 단섬유 보강토의 전단강도 특성

Shear Strength Characteristics of Short-fiber Reinforced Soil for the Application of Retaining Wall Backfill

박영곤* 차경섭** 장병욱***
Park, Young-Kon Cha, Kyung-Seob Chang, Pyoung-Wuck

ABSTRACT

As a fundamental study to develop the retaining wall of new type, short-fibers are mixed with soils and a series of compaction tests and triaxial compression tests for short-fiber reinforced soils are performed. From the results of compaction tests, optimum moisture content is increased and maximum dry unit weight is decreased with fiber mixing ratio. When 60mm fibrillated fiber of 0.2% mixing ratio is added to SM soil, strength increment of short-fiber reinforced soil is above 1.2 times compared to soil only. Strength increment shows maximum value for composite reinforced soil, namely, soil+short-fiber+planar reinforcement. But in case of mixing with ML soil and short-fiber, the strength of short-fiber reinforced soil is nearly the same as soil only. Internal angle of short-fiber reinforced soil is increased about 2~3 degrees and cohesion is also increased above 10kPa compared to soil only. Therefore, it is judged that short-fiber is a good material to strengthen the soil.

Key words : *Short-fiber Reinforced Soil, Shear Strength, Reinforced Retaining Wall*

1. 서 론

건설재료의 고갈 및 콘크리트의 이용에 따른 전체 환경의 부조화는 새로운 건설재료에 대한 요구를 가져오고 있으며 환경친화적인 재료에 대한 국민의식이 최근 날로 높아가는 상황에서 자연재, 특히 흙 자체를 구조물로 이용하는 것에 대한 연구에 그 관심이 증대되고 있다.

그러나 흙구조물은 재료 구득의 용이성, 시공 및 보수의 편의성으로 고대부터 오늘날까지 전 세계적으로 사용되고 있는 구조형식 중의 하나이지만 흙이 삼상으로 존재하고 또한 불연속체이기 때문에 그 자체로는 임의의 형상을 가진 구조물로서 기능을 유지하기 어렵다. 또한 하중에 대한 강도도 콘크리트에 훨씬 미치지 못하며 경사가 급하고, 기복이 심하며 환경적 제약이 있는 지표면에서는 구조물 시공이 매우 어렵다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해 흙 속에 보강재를 삽입 또는 혼합함으로써 흙의 강성을 증가시키고자 하는 보강토 연구가 활발히 진행되고 있는데, 지오텍스타일, 지오그리드 등 평면보강재 이외에 단섬유 등의 인장성이 높은 선형보강재를 보강하였을 경우 파괴후

* 한국철도기술연구원 선임연구원

** 서울대학교 농업생명과학대학 박사과정

*** 서울대학교 농업생명과학대학 교수

의 전단강도 감소가 타 재료에 비해 극히 적어 안전한 구조물 시공에 선형보강재를 적극적으로 활용할 수 있음을 보여 주었다. 이와 같은 보강토에 대한 연구는 지금까지 평면보강재 중심이었지만, 앞서 언급한 바와 같이 선형보강재의 장점을 최대한 활용하여 이를 평면보강재와 복합적으로 사용하였을 경우 그 안정성을 크게 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

다라서 본 연구에서는 향후 영구적인 구조물로서 보다 안전한 새로운 형태의 흙구조물을 개발, 적용하기 위해 선형보강재와 평면보강재를 복합적으로 사용하는 복합보강토 옹벽공법을 개발하고자 하였으며, 이를 위한 기초연구로서 배면토체에 단섬유 보강토를 사용할 경우에 대한 흙의 전단강도 특성변화를 살펴보고자 한다.

2. 재료 및 시험방법

2.1 흙과 보강재

본 연구에 사용된 흙시료는 SM시료(수원)와 ML시료(의왕)이며, 그 물리적인 특성은 <도표 1>과 같다. 보강재로 선형보강재(단섬유)는 폴리프로필렌 재질의 단섬유를 선정하였고, 평면보강재는 폴리에스터 재질의 지오텍스타일을 선정하였다. 선형보강재의 경우 섬유의 길이 및 종류에 따른 강도 특성과 변형특성을 살펴보기 위하여 19mm망사, 38mm망사, 60mm망사, 60mm단사 4가지 섬유를 선정하였는데, 보강재의 물리적 특성은 <도표 2>와 같다.

<도표 1> 흙시료의 물리적 특성

Name	Specific Gravity	LL (%)	PL (%)	U.S.C.S	Grain Size Distribution						OMC (%)	γ_d (tf/m ³)
					No.4	No.10	No.40	No.200	0.01mm	0.002mm		
Soil#1	2.75	N.P	N.P	SM	99.1	97.2	76.9	41.2	11.1	4.3	23.0	1.61
Soil#2	2.73	32.97	24.18	ML	100.0	99.9	98.8	57.1	23.7	7.1	20.2	1.70

<도표 2> 보강재의 물리적 특성

Linear Reinforcement	Material	Specific gravity	Tensile strength (kPa)	Young's Modulus (MPa)		Melting point (°C)	
	Polypropylene	0.90-0.92	350-770	3500		163	
Planar Reinforcement	Material	Type	Tensile strength (t/m)	Expansibility (%)	Weight (g/m ²)	Permeability (cm/sec)	Product name
	Polyester	Woven	3.0	10-40	880	10 ⁻² -10 ⁻⁴	CT30

2.2 공시체 제작 및 시험방법

선형보강재와 흙을 혼합하여 공시체를 제작할 때 단섬유 양은 흙시료의 노건조 중량을 기준으로 하였다. 일반적으로 흙과 섬유를 혼합하게 되면 흙과 섬유의 비중차이로 인하여 재료가 분리되어 섬유는 섬유끼리 엉키는 현상이 발생하게 되는데, 이 엉킴 현상은 흙과 섬유의 혼합을 저해하게 되어 보강토의 역학적 특성을 저하시키는 결과를 가져온다. 따라서 단섬유 보강토에서는 흙과 섬유의 적절한 혼합이 매우 중요한 인자로 평가될 수 있다. 본 연구에서는 시험결과의 오차를 줄이기 위해 다짐공시체 제조시 약 30분 동안 손으로 흙과 섬유를 혼합하였으며, 육안관찰에 의해 섬유가 흙 속에 균등하게 분포되도록 하였다.

시료의 다짐은 표준에너지로 3층 다짐하였고, 공시체의 크기는 직경 50mm× 높이 100mm이다. <도표 3>과 <도표 4>는 단섬유 보강토와 복합보강토의 강도특성을 평가하기 위해 먼저 혼합시 흙의

적정함수비, 적정 섬유(길이 및 형태) 그리고 적정 혼합비를 산정하기 위한 시험 조건 및 계획이다.

<도표 3> 단섬유 보강토의 시험조건 및 계획

Test type		Test for determining water content	Test for determining mixing ratio
Specimen	Fiber type		
SM soil	No fiber 19mm FF ¹⁾ 38mm FF	OMC+5%, OMC, OMC-5%	Mixing ratio=0% Mixing ratio=0.5% for all fiber Mixing ratio=0.3% for 19mm and 38mm FF
ML soil	60mm FF 60mm MF ²⁾		

¹⁾ FF : Abbreviation of Fibrillated Fiber, ²⁾ MF : Abbreviation of Monofilament Fiber

<도표 4> 복합보강토의 시험조건 및 계획

Specimen type	Test type	Triaxial compressive test
Soil only		SM, ML soil
Fiber reinforced soil ¹⁾		SM, ML soil + 60mm FF ²⁾
Geotextile reinforced soil ¹⁾		SM, ML soil + Geotextile(1 layer)
Composite reinforced soil ¹⁾		SM, ML soil + 60mm FF + Geotextile(1 layer)

¹⁾ Each test is performed at the water content and the mixing ratio determined from <Table 3>(<도표 3>), ²⁾ FF : Abbreviation of Fibrillated Fiber

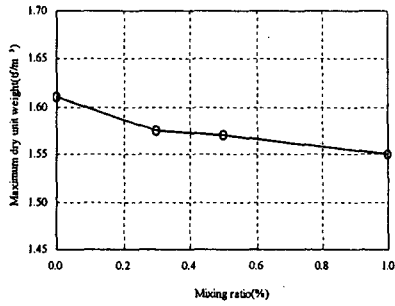
삼축압축시험은 영국의 GDS사 제품을 사용하여 암밀배수시험을 실시하였고, 하중제어방식은 변형률제어으로써 15%의 변형이 일어날 때까지 시험하였다. 따라서 시료의 파괴점은 변형이 15%까지 일어나는 동안 최대점을 선정하였으며, 최대점이 불분명하거나 나타나지 않을 경우에는 15%의 변형율 일 때의 값을 최대점으로 간주하였다. 이 때 전단속도는 2mm/hr이며, 구속압은 50, 100, 200kPa이다.

3. 단섬유 보강토의 다짐특성

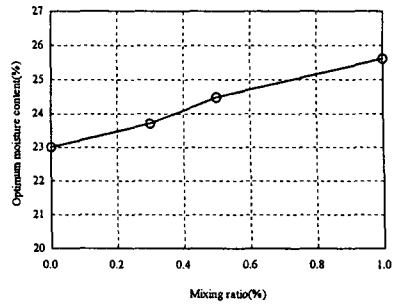
단섬유 보강토에 대한 섬유 혼합비에 따른 최대건조단위중량 및 최적함수비의 변화양상을 살펴본다. 섬유는 19mm 망사, 38mm 망사, 60mm 망사 및 단사 섬유를 사용하였으며, 혼합비는 중량비로 0.2%, 0.5%, 1.0%를 사용하였다.

<그림 1>에서 기존의 연구에서와 마찬가지로 섬유의 양이 많아질수록 최대건조단위중량이 작아지고 최적함수비는 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 섬유의 양이 증가할수록 흙이 차지하는 체적과 중량이 섬유로 대체됨으로써 최대건조단위중량은 상대적으로 감소하고, 최적함수비는 섬유의 신축성에 의한 스펀지현상이 크게 증대하기 때문에 증가되는 것으로 판단된다. 19mm 망사의 경우 혼합비 1%에서 최대건조단위중량은 무보강토에 비해 3.7% 감소하였고, 최적함수비는 무보강토에 비해 11.7% 증가하였다.

혼합비의 증가에 따른 최대건조단위중량은 Nataraj 등³⁾과 조, 김²⁾은 감소한다고 하였고, Mayer와 Ho⁴⁾는 변화가 없다고 하였으며 혼합비와 최적함수비의 관계는 모두 증가한다고 하였다. Mayer와 Ho⁴⁾는 섬유길이의 영향에 대해서도 연구하였는데 섬유길이는 최대건조단위중량 및 최적함수비에 영향을 주지 않는다고 하였다.



(a) 최대건조단위중량



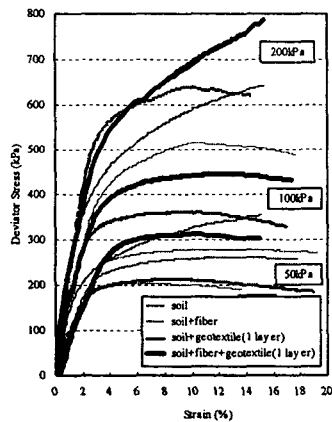
(b) 최적함수비

<그림 1> 혼합비에 따른 최대건조단위중량 및 최적함수비 변화 (SM시료)

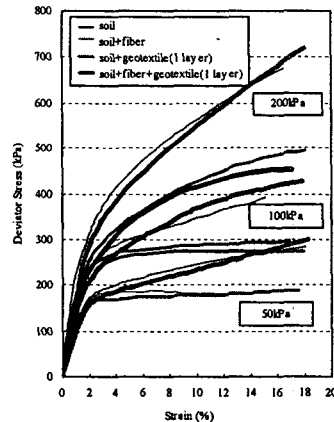
4. 전단강도 특성

4.1 응력-변형률 관계

각 시료에 대하여 삼축압축시험을 실시하였다. 시험은 불포화상태로 실시하였으며 배수전단을 실시하였고, 그 결과는 <그림 2>와 같다. 그림에서 무보강토와 평면보강재만 혼합한 공시체의 경우에는 최대(피크)점이 뚜렷하였으나, 섬유를 혼합한 공시체의 경우에는 최대점이 뚜렷하지 않았으며, 구속압력이 증가할수록 변형률에 따라 축차응력도 계속 증가하는 양상을 나타내었다. 무보강토에 비하여 섬유 및 평면보강재를 혼합한 공시체의 경우 강도증가가 발현되었으며, 구속압력이 증가할수록 뚜렷하였다.



(a) SM 시료



(b) ML 시료

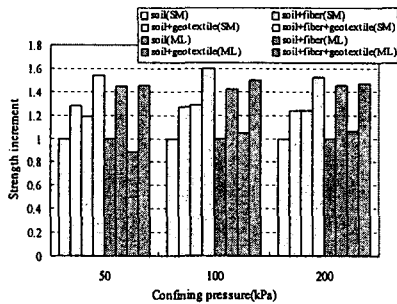
<그림 2> 응력-변형률 관계 곡선 (60mm 망사, 지오텍스타일 1단 보강)

각 시료별 최대축차응력과 그때의 변형률을 정리하면 <도표 5>와 같다. 표에서 ML시료의 경우 단 섬유 보강토 및 복합보강토의 경우에는 전단강도가 크게 발현되었으나 평면보강재 보강토의 경우에는 무보강토와 비슷한 경향을 보였는데, 이와 같이 1단 보강은 크게 효과를 나타내지 못하였다.

<도표 5> 최대축차응력 및 변형률

Specimen	Confining pressure	Maximum deviatoric stress (kPa)			Strain at failure (%)		
		50kPa	100kPa	200kPa	50kPa	100kPa	200kPa
S M	Soil only	203.5	278.9	517.2	5.9	11.2	13.1
	Soil+Fiber	261.0	354.0	643.0	11.2	15.0	15.0
	Soil+Geotextile(1 layer)	242.0	360.8	639.8	8.4	9.1	10.1
	Soil+Fiber+Geotextile(1 layer)	312.5	445.2	788.1	9.6	11.5	15.0
M L	Soil only	187.5	275.47	450.11	7.61	12.64	15.0
	Soil+Fiber	270.98	391.07	656.78	15.0	15.0	15.0
	Soil+Geotextile(1 layer)	166.97	290.06	478.12	15.0	15.0	15.0
	Soil+Fiber+Geotextile(1 layer)	274.01	411.89	659.87	15.0	15.0	15.0

무보강토에 대하여 보강토의 보강효과를 살펴보기 위하여 보강토의 최대축차응력을 무보강토의 그것으로 나눈 값, 즉 강도증가비를 구속응력별로 <그림 3>에 도시하였다. SM시료의 경우 세 공시체 모두 1.2이상의 강도증가비를 나타내었다. 여기서 복합보강토(흙+단섬유+평면보강재)의 경우에 강도증가비가 평균 1.55로서 가장 크게 나타났으며, 단섬유 보강토 및 평면보강재 보강토의 경우 서로 비슷한 증가비를 나타내었다. 한편, 구속응력별 강도증가비는 1.33~1.39로서 비슷한 값을 나타내었다. ML시료는 평면보강재보강토에서는 강도증가가 거의 없었으며, 단섬유 보강토 및 복합보강토에서는 강도증가비가 약 1.44로 비슷한 값을 나타내었다. 한편 구속응력별 강도증가는 모두 비슷한 값을 나타내었다.



<그림 3> 무보강토에 대한 보강토의 강도증가비

<도표 6> 내부마찰각 및 점착력

Specimen	Shear constant	Slope α	Intercept m	Internal friction angle ϕ	Cohesion c (kPa)
S M	Soil only	0.526	18.36	27.65	21.6
	Soil+Fiber	0.602	16.91	30.84	21.18
	Soil+Geotextile(1 layer)	0.580	17.82	29.96	21.89
	Soil+Fiber+Geotextile(1 layer)	0.620	24.71	31.57	31.49
M L	Soil only	0.489	21.721	25.98	24.90
	Soil+Fiber	0.563	31.799	29.23	38.47
	Soil+Geotextile(1 layer)	0.511	17.975	26.97	20.91
	Soil+Fiber+Geotextile(1 layer)	0.566	31.527	29.36	38.24

4.2 전단상수 및 p-q 관계

각 시료에 대한 전단상수, 즉 내부마찰각과 점착력은 p-q 관계를 통해 산정하였다. 각 시료에 대한 p-q 관계를 통해 기울기, 절편, 그리고 내부마찰각 및 점착력을 요약 정리하면 <도표 6>과 같다. 표에서 SM시료는 내부마찰각의 경우 무보강토에 비해 2.3° ~ 3.9°의 증가가 발생하였고, 점착력의 경우 무보강토에 비해 복합보강토에서만 약 10kPa의 증가가 발생하였다. 단섬유 보강토와 평면보강재 보강토의 경우에는 내부마찰각만 증가하였고, 복합보강토에서는 모두 증가하였다. ML시료는 내부마찰각의 경우 무보강토에 비해 1° ~ 3.38°의 증가가 발생하였고, 점착력의 경우 흙+평면보강재 공시체에서 다소 감소하였으나, 단섬유 보강토 및 복합보강토에서는 약 13.5kPa의 증가가 발생하였다. 또한

ML시료에 대한 시험결과 평면보강재(1단)에서는 보강효과가 발현되지 않았으나, 단섬유 보강토의 경우에는 큰 강도증가가 발생하였다.

5. 요약 및 결론

연구 구조물로서 보다 안전한 새로운 형태의 흙구조물을 개발하기 위한 기초연구로서 선형보강재를 흙과 혼합한 경우의 전단강도 특성을 파악하고자 하였으며, 이에 사용된 재료의 기본물성조사, 단섬유 보강토의 다짐특성 및 정적전단특성에 대한 일련의 시험을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 단섬유 보강토의 다짐시험결과 무보강토에 비해 섬유를 혼합할수록 OMC는 증가하고 최대건조단위 증량은 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, SM시료의 경우 OMC 건조측에서는 강도가 거의 일정하게 나타났으며 습윤측으로 갈수록 많이 감소하였다. ML시료의 경우에는 OMC 건조측에서 다소 증가하다가 함수비가 더 감소하면 오히려 강도가 작아지는 경향을 나타내었고, 습윤측에서는 크게 감소하였다.
- 2) SM시료의 경우 단섬유 보강토, 평면보강재 보강토에서 약 1.2배 및 복합보강토에서 1.55배의 강도 증가비를 나타내었다. ML시료에서는 평면보강재보강토에서는 강도증가가 거의 없었으며, 단섬유 보강토, 복합보강토에서는 약 1.44로서 비슷한 값을 나타내어 평면보강재의 효과가 없는 것으로 나타났다.
- 3) SM시료의 경우 보강토의 경우 $29.96^{\circ} \sim 31.57^{\circ}$ 로서 무보강토에 비하여 $2.3^{\circ} \sim 3.9^{\circ}$ 의 증가가 발생하였고, 점착력은 복합보강토에서만 31kPa로서 약 10kPa의 증가가 발생하였다. ML시료의 경우, 보강토에서 $26.97^{\circ} \sim 29.36^{\circ}$ 로서 무보강토에 비하여 $1^{\circ} \sim 3.38^{\circ}$ 의 증가가 발생하였고, 점착력의 경우에는 단섬유 보강토 및 복합보강토에서 38kPa로서 약 13.5kPa의 증가가 발생하였다.

감사의 글

본 연구는 산학연 공동연구개발사업의 일환으로 건교부의 연구지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 건교부(2003년), “배면토체에 단섬유 보강 매트릭스를 적용한 철도 보강옹벽 공법 개발”, 2001년 산학연 공동연구개발사업 최종보고서(안)
2. 조삼덕, 김진만(1993년), “섬유혼합 보강토의 전단 특성”, '93년도 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, 지반보강, pp.23-28.
3. Chang, P.W., K.S. Cha, T.S. Park, and Y.K. Park(2003), “Shear Strength Characteristics of Composite Reinforced Soils”, Proceedings of the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (I2ARC), pp.453-456
4. Maher, M. H., and Y. C. Ho(1994), “Mechanical Properties of Kaolinite/Fiber Soil Composite”, Jr. of Geotechnical Eng., ASCE, Vol. 120(8), pp.1381-1393
5. Nataraj, M. S., Addula, H. R., and K. L. Mcmanis(1996), “Strength and Deformation Characteristics of Fiber Reinforced Soils”, Environmental Technology: Proc. of the 3rd Int. Symp., Vol. 1, pp.826-831