

## 섬유혼합토의 전단강도 특성

## Shear Strength Properties of Fiber Mixed Soil

이 상 호\* · 차 현 주\*\* · 최 재 원\*\*

Lee, Sang Ho · Cha, Hyun Ju · Choi, Jae Won

## Abstract

This study was performed to use fiber mixed soil which has clayey soil or sandy soil with fibrillated fiber or monofilament fiber on purpose of construction materials, filling materials, and back filling materials. In addition, this study was conducted to analyze strength properties and fiber reinforcing effect with fiber mixed soil by direct-shear test. In case of fibrillated fiber mixed soil, the more quantity of fiber was in both cohesive soil and sandy soil, the larger shear stress was in respective step of normal load. The respective mixed soil at 0.5% and 0.1% mixing ratio of monofilament fiber mixed soil showed maximum shear stress. According to unconfined compression or direct-shear test, making specimen of the monofilament fiber mixed soil, it is required to be careful and stable mixing method, while it is expected that monofilament fiber mixed soil doesn't increase strength.

*Keywords : Fiber mixed soil, Shear strength, Unconfined compressive test, Direct-shear test, Monofilament fiber, Fibrillated fiber*

## I. 서 론

흙은 그 자체로 존재할 때에는 불연속체로 토립자들이 쉽게 분리되고, 인장력이 약하여 외력을 가했을 때 변형이 쉽게 일어나며 이러한 단점을 개선하기 위하여 흙에 보강재료를 혼합하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 보강재료는 천연

섬유, 합성섬유, 강섬유, 분말형태의 재료 등이 있으며 최근에는 시멘트, 석회, 플라이 애쉬 등의 분말형태와 토목섬유를 이용한 보강토 구조물의 건설이 증가되고 있다. 점성토를 대상으로 한 천연섬유, 식물의 뿌리 등의 혼합은 예로부터 주택의 벽체 및 지붕이나 토담에 사용되었고, 보온 및 보습과 에너지 절감효과를 기대한 환경 친화형 주택, 농산물저장시설 등과 같은 구조물에 이용한 연구가 있었다. 사질토를 성토 및 뒤채움재로 사용하기 위해서 토목섬유를 이용한 보강토 연구는 넓은 판상의 토목섬유를 사용한 보강토옹벽 및 토류구조물에 대한 것이 주류를 이루고 있었으나, 사질토를 성토 및

\* 경북대학교 농업생명과학대학

\*\* 경북대학교 대학원

\* Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5735

fax: +82-53-950-6852

E-mail address: sahlee@knu.ac.kr

뒤채움재로 사용하기 위한 짧은 형태의 단섬유를 혼합한 섬유혼합토의 연구는 부족한 실정이다. 최근 단섬유를 흙에 혼합한 섬유혼합토는 흙과 섬유의 마찰력을 이용하여 흙의 성질을 개선한 것으로 균열방지 및 마찰각의 증가로 인한 전단강도를 증가시킬 수 있다.

본 연구에서는 점성토와 사질토에 콘크리트 보강용으로 널리 사용되고 있는 2종의 폴리프로필렌 섬유를 다양한 비율로 혼합한 섬유혼합토에 대한 직접전단시험을 행하여 혼합비에 따른 전단강도특성 및 강도정수를 구하고, 각 섬유혼합토에 대해 비교 분석을 하여 적정혼합비와 친환경 건축재료의 이용에 대한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

## II. 사용재료

### 1. 흙 시료

시험에 사용된 흙 시료는 수원 및 발안지역에서 채취한 점성토와 사질토로서 점성토인 CS시료 (Clayey Soil, CS)는 비중 2.63, 소성지수 22이며 통일분류법에 의해 CL로 분류되며, 사질토인 SS시료 (Sandy Soil, SS)는 비중 2.71, 비소성의 SM으로 물리적 특성 및 입도분포곡선은 각각 Table 1, Fig. 1과 같다.

### 2. 보강재

보강재는 흙과 섬유의 마찰력을 이용하여 균열방지 및 마찰각 증가로 인한 전단강도를 증가시키기 위하여 폴리프로필렌 섬유(Polypropylene, PP)를 절단길이 19 mm의 단사(Monofilament fiber, MF)와 망사(Fibrillated fiber, FF)를 각각 사용하였다. 이때 망사는 PP를 녹인 후 적당한 크기로 절단한 후 일정하게 칼질을 하여 cutting을 한 것으로 섬유의 물성치는 Table 2와 같으며 인장강도는 망사  $3.3 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ , 단사  $2.3 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 인 제품으로 망사가 단사보다 인장강도가 크다.

Table 1 Physical properties of soil

Sample	G <sub>s</sub>	LL (%)	PL (%)	PI	OMC (%)	γ <sub>dmax</sub> (tf/m <sup>3</sup> )	USCS
CS	2.63	39	17	22	18.5	1.68	CL
SS	2.71	NP	NP	-	12.3	1.8	SM

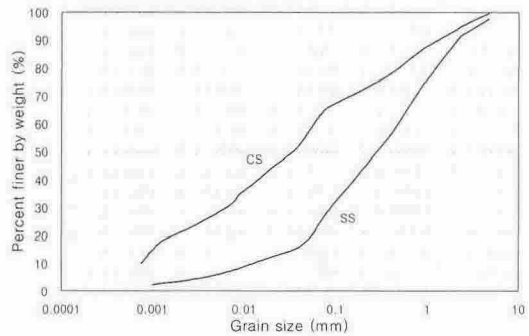


Fig. 1 Grain size distribution curves

Table 2 Physical properties of fiber

Form	Material	Specific Gravity	Tensile Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Young's Modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )	Melt Point (°C)	Diameter (mm)
Fibrillated fiber (FF)	Polypropylene	0.91	$3.3 \times 10^3$	$39.6 \times 10^3$	168	0.08
Monofilament fiber (MF)			$2.3 \times 10^3$	$33.0 \times 10^3$		0.08

## III. 시험방법

공시체는 CS와 SS 시료를 노건조 시킨후 증량비에 대해 2종의 섬유를 각각 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0%으로 첨가시키고, 최적함수비에 2%를 증가한 함수비를 초기함수비로 하여 최적함수비 상태의 혼합토를 조제하여 공시체를 제작하였으며, KS F 2346 규정에 준하여 시험을 수행하였다. 시험장치는 전동 구동식 직접전단시험기로 시료를 수직력을 가한 상태에서 수평력(전단력)을 가하여 시료를 직접 전단하는 장치로서 직경 6.35 cm, 높이 2.54 cm인 공시체를 제작하고, 전단 상자에 삽입한 후

수직하중을 각각 4.75, 9.47, 15.78 tf/m<sup>2</sup>를 가하여 0.5~2%/min의 전단속도로 실험을 실시하였다.

#### IV. 결과 및 고찰

##### 1. 섬유 혼합 점성토

CS 시료에 단사 및 망사 섬유를 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0%의 혼합비로 혼합한 시료의 전단시험결과는 Table 3 및 Fig. 2, 3과 같다.

Fig. 2와 같이 단사혼합토의 경우 섬유의 양이 증가할수록 전단응력은 각 수직하중 단계 모두 증가하였다. 특히 섬유가 혼합되지 않은 흙에서 0.3%의 혼합비에서 전단응력 증가폭은 약 0.2~0.4 tf/m<sup>2</sup>으로 작게 나타났으나, 0.3%에서 0.5% 혼합비에서의 증가폭은 1~3.5 tf/m<sup>2</sup>로 크게 나타났다. 그리고 0.5%에서 1.0%의 혼합비에서의 전단강도의 증가폭은 완만하게 나타났다.

망사혼합토의 경우, Fig. 3과 같이 각 하중단계에서 모두 섬유의 양이 증가함에 따라 전단응력이 증가하다가 0.3%의 혼합비에서 최대 전단응력을 나타냈고, 이후 섬유의 양이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 그리고 그 증가폭 및 감소폭은 단사혼합토에 비해 작게 나타났다. 이는 망사혼합토의 공시체 제조시 망사의 혼합이 용이치 못하고 혼합시 망사가 찢어져 섬유의 길이가 길어지고 뭉쳐져 흙과의 마찰력은 증가하는 반면, 섬유의 엉킴 현상이 두드러지며, 특히 혼합시 입경이 큰 입자들은 서로 엉켜있는 섬유사이에서 이탈하는 경향이 나타나 섬유가 엉켜진 덩어리 형태로 존재하기 때문으로 사료된다.

전단강도시험시 최대 압축응력에 도달한 후의 파괴시의 형태는 섬유가 혼합되지 않은 흙이나 섬유혼합토 모두 급격한 파괴는 나타나지 않았다. 그러나 섬유가 혼합되지 않은 흙에서보다는 섬유혼합토에서 변형률의 증가에 따라 완만하게 전단응력이 감소하였다.

특히, 단사혼합토에서는 0.5% 이후의 혼합비에서 파괴되지 않고, 전단응력이 증가하는 형태로 나타났다. 공시체 직경의 15%의 변형률에서의 전단응력을 최대 전단강도로 계산하였다. 이러한 현상은 흙에 혼합된 섬유가 흙과의 마찰력에 의해 섬유

Table 3 Shear strength of fiber mixed clayey soil with fiber content

Fiber content	$\sigma = 4.75$ tf/m <sup>2</sup>		$\sigma = 9.47$ tf/m <sup>2</sup>		$\sigma = 15.78$ tf/m <sup>2</sup>	
	MF	FF	MF	FF	MF	FF
0 %	3.54		5.48		7.23	
0.1 %	3.67	3.61	5.63	5.56	7.61	7.63
0.3 %	3.71	3.78	5.82	5.61	7.66	7.71
0.5 %	4.86	3.14	7.79	5.38	11.10	7.62
1.0 %	5.28	3.01	8.23	4.82	11.50	7.58

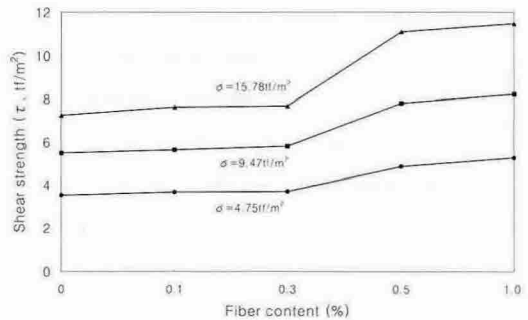


Fig. 2 Relation between shear strength and monofilament fiber content

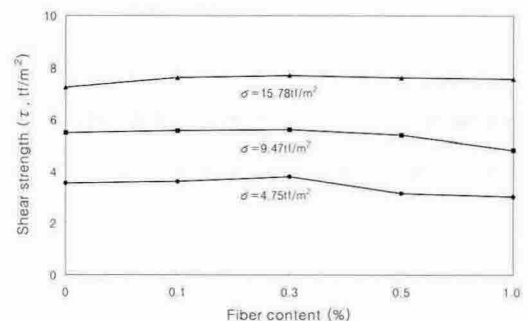


Fig. 3 Relation between shear strength and fibrillated fiber content

혼합토의 수평방향 변형을 구속하는 효과에 기인하는 것으로 사료된다.

### 2. 섬유 혼합 사질토

SS 시료에 단사 및 망사 섬유를 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0%의 혼합비로 혼합한 혼합토에 수직하중을 각각 4.75, 9.47, 15.78 tf/m<sup>2</sup>를 가하여 전단시험을 실시한 결과 Table 4 및 Fig. 4, 5와 같다.

Fig. 4와 같이 단사혼합토의 경우 CS 시료의 단사혼합토와 마찬가지로 섬유의 양이 증가할수록 전단응력은 각 수직하중 단계에서 모두 증가하였다. 그러나 증가폭은 크게 나타나지 않았다.

망사혼합토의 경우, Fig. 5와 같이 각 하중단계에서 모두 섬유의 양이 증가함에 따라 전단응력이 증가하다가 0.1%의 혼합비에서 최대 전단응력을 나타냈다. 이후 섬유의 양이 증가함에 따라 감소하여, 흙 자체보다 전단강도가 작게 나타났다. 그리고 그 증가폭 및 감소폭 또한 앞선 CS 시료에서의 망사혼합토와 비슷하게 단사혼합토에 비해 작게 나타났다. 일련의 일축 및 전단강도 시험의 결과에 의하면 망사혼합토의 경우, 혼합시 망사 섬유(FF)가 찢어지고 뭉쳐져 다짐 공시체 제작시 다짐 및 역학적 특성의 저하로 인해 점성토 및 사질토 모두 그 보강효과가 크게 나타나지 않은 것으로 사료된다.

Table 4 Shear strength of fiber mixed sandy soil with fiber content

Fiber content	$\sigma = 4.75$ tf/m <sup>2</sup>		$\sigma = 9.47$ tf/m <sup>2</sup>		$\sigma = 15.78$ tf/m <sup>2</sup>	
	MF	FF	MF	FF	MF	FF
0 %	2.59		5.06		7.40	
0.1 %	3.32	3.40	5.20	5.41	8.24	7.93
0.3 %	3.33	2.92	5.60	4.83	8.31	7.28
0.5 %	3.40	2.68	5.70	4.69	8.67	7.18
1.0 %	3.44	2.08	5.89	4.50	9.16	7.07

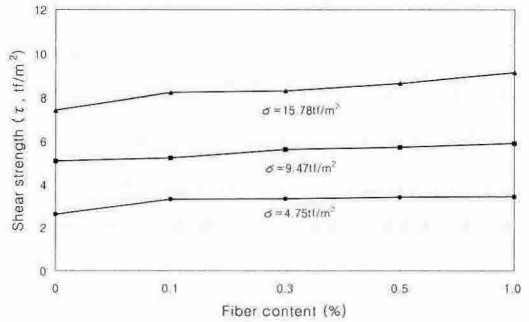


Fig. 4 Relation between shear strength and monofilament fiber content

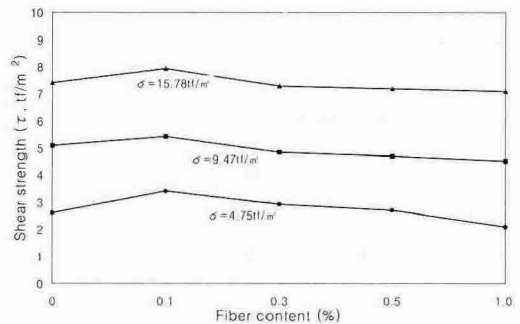


Fig. 5 Relation between shear strength and fibrillated fiber content

### 3. 강도 정수

직접 전단강도 시험으로 얻어진 최대 전단강도와 각 수직하중을 다음의 회귀분석식에 대입하여 섬유혼합토의 강도정수를 계산하였다.

$$a = \frac{n \sum \sigma \cdot \tau - \sum \sigma \cdot \sum \tau}{n \sum \sigma^2 - (\sum \sigma)^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\phi = \tan^{-1}(a) \dots\dots\dots (2)$$

$$c = \frac{n \sum \sigma^2 \cdot \sum \tau - \sum \sigma \cdot \sum \sigma \cdot \tau}{n \sum \sigma^2 - (\sum \sigma)^2} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $a : \tan \phi$ ,  $n$  : 실측갯수,  $\phi$  : 내부마찰각 ( $^{\circ}$ ),  $c$  : 점착력(tf/m<sup>2</sup>),  $\tau$  : 전단강도(tf/m<sup>2</sup>),  $\sigma$  : 수직하중(tf/m<sup>2</sup>) 이다.

계산된 강도정수는 Table 5와 같고, Fig. 6, 7은 혼합비와 점착력 및 마찰각의 관계를 도시한 그래프이다. 점성토 자체(CS)의 점착력과 내부마찰각은 각각 2.10 tf/m<sup>2</sup>, 18.36°이며, 사질토 자체(SS)의 0.97 tf/m<sup>2</sup>, 23.38°로 점착력은 점성토가 컸고, 내부마찰각은 사질토가 큰 것으로 나타나 일반적인 흙의 역학적 성질을 나타냈다.

Fig. 6는 점착력과 혼합비의 관계를 나타낸 것으로 섬유유 함량이 증가할수록 단사 섬유 혼합 점성토에서의 점착력은 전반적으로 증가하는 경향을 보여 흙 자체보다는 큰 값을 나타냈고, 단사 섬유 혼합 사질토에서의 점착력은 증가하여 혼합비 0.3%에서 최대값을 나타낸 후 감소하였으나 그 값은 흙 자체보다는 큰 값을 나타냈다. 망사 섬유 혼합 점성토와 망사 섬유 혼합 사질토에서의 점착력은 각각 0.3, 0.1%의 혼합비에서 최대값을 나타낸 후 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 7은 내부마찰각과 혼합비의 관계를 도시하였다. 섬유 혼합비가 증가할수록 섬유 혼합 점성토의 내부마찰각은 대체로 증가하는 경향을 보였다. 특히 단사혼합토의 경우, 0.3~0.5% 혼합비사이의 내부마찰각 증가량이 9.89°로 크게 나타났다. 섬유 혼합비가 증가할수록 섬유 혼합 사질토의 내부마찰각 또한 대체로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 망사혼합토의 경우 0.3% 혼합비까지는 내부마찰각이 감소하여 최저값을 나타냈고, 이후 증가하여 1.0% 혼합비에서의 내부마찰각은 흙 자체보다 큰 값을 나타냈다. 그리고 내부마찰각의 증가폭은 섬유 혼합 점성토에 비해 작게 나타났다. 이는 흙에 섬유유가 첨가됨으로서 점착력의 증가는 크게 기대하기는 어려우나 흙에 혼합된 섬유유가 흙과의 마찰력에 의해 섬유혼합토의 변형을 구속하는 효과로 인하여 섬유유 함량이 증가하면 각 섬유혼합토에서의 내부 마찰각이 증가하는 결과를 나타낸 것으로 사료된다.

Table 5 Cohesion and angle of internal friction of fiber mixed soil by shear strength test

CS	MF		FF	
	c (tf/m <sup>2</sup> )	φ (°)	c (tf/m <sup>2</sup> )	φ (°)
0	2.01	18.36	2.10	18.36
0.1	2.09	19.53	1.97	19.94
0.3	2.19	19.53	2.15	19.53
0.5	2.28	29.41	1.35	21.95
1.0	2.72	29.32	0.98	22.57
SS	c (tf/m <sup>2</sup> )	φ (°)	c (tf/m <sup>2</sup> )	φ (°)
0	0.70	23.38	0.70	23.38
0.1	1.11	24.14	1.48	22.30
0.3	1.24	24.25	1.12	21.34
0.5	1.15	25.53	0.77	22.17
1.0	0.98	27.40	0.45	24.21

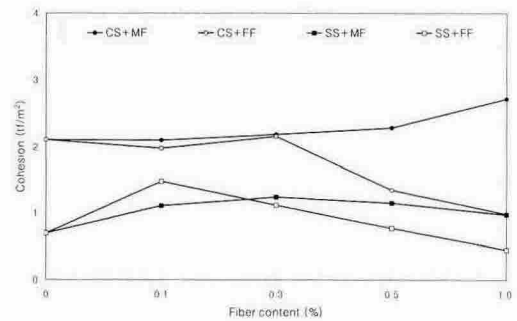


Fig. 6 Relation between cohesion and fiber content

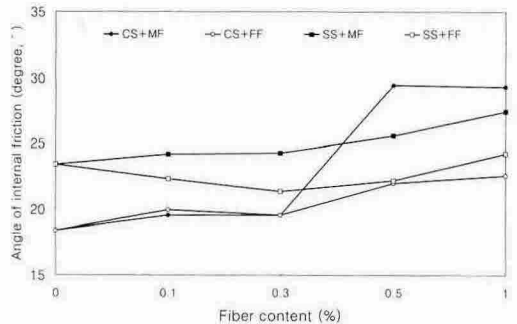


Fig. 7 Relation between angle of internal friction and fiber content

## V. 결 론

섬유혼합토의 전단강도특성을 비교 분석하기 위하여 점성토와 사질토에 2종의 폴리프로필렌 섬유를 혼합하였으며 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단사혼합토의 경우, 섬유 혼합 점성토와 섬유 혼합 사질토 모두 섬유의 양이 증가할수록 전단응력은 각 수직하중 단계에서 모두 증가하였고, 망사혼합토의 경우 점성토와 사질토에서 각각 0.3, 0.1%의 혼합비에서 최대 전단응력을 나타내 0.1~0.3%의 혼합비를 적정혼합비로 판단할 수 있다.

2. 섬유혼합토의 섬유가 흙과 마찰력에 의해 변형을 구속하여 섬유의 양을 증가시킬수록 섬유혼합토에서의 내부 마찰각이 증가하였고, 점착력의 증가는 기대하기 어려운 것으로 판단되었다.

3. 직접전단 시험 결과에서, 망사혼합토의 공시체 제작시 신중하고 안전한 혼합방법이 요구되며, 흙과 혼합하여 강도증가 및 보강효과를 크게 기대하기는 어려운 것으로 판단된다.

## References

1. Al-Hussaini M. and Perry E. B., 1978, Field Experiment of Reinforced Earth Wall, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 104(GT3): 307-321.
2. Cho, S. D. and J. M. Kim, 1995, The experimental study on engineering properties of fiber-reinforced soil, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 11(2): 107-120. (in Korean)
3. Consoli N. C. and Prietto P. D. M. and Ulbrich L. A., 1998, Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of a Sandy Soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 124(12): 1211-1214.
4. Chang, P. W., Y. K. Park., C. W. Woo and K. S. Kim, 1992, Unconfined strength characteristics of fiber reinforced soil, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 41(1): 72-78. (in Korean)
5. Gray D. H. and Al-Refefai T., 1986, Behavior of Fabric Versus Reinforced Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112(8): 804-820.
6. Legrande J. and Baguelin F., 1969, La Terre Armée, Principles Exemples d'Quvrages de Soutenement, Proc. 7th Intl. Conf. on SMFZ, Speciality Session 14: 206-211.
7. Lee, S. H., H. J. Cha and P. W. Chang, 2000a, Physical properties of reinforced soil mixture powder, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 42(5): 125-132. (in Korean)
8. Lee, S. H., H. J. Cha and P. W. Chang, 2000b, Variation of unit weight and compressive strength by long-term dry shrinkage of reinforced soil mixture, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 42(6): 90-97. (in Korean)
9. Lim, S. Y. and C. S. Song, 2000, Shear characteristics for synthetics fiber reinforced soils, *2000 Geotechnical Engineering Conference*, KSAE, 51-62. (in Korean)
10. Freitag, D. R., 1986, Soil Randomly Reinforced with Fibers, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112(8): 823-826.
11. Shewbridge. S. E. and Sitar. N., 1989, Deformation Characteristics of Reinforced Sand in Direct Shear, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 115(8): 1134-1147.
12. Yoo, H. K., 1994, A study on the behavior of reinforced clay subjected to direct shear, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 10(4): 67-81. (in Korean)