

# 흙과 섬유와의 상호마찰 특성의 측정에 관한 연구

## A study on the Measurement of Interface Friction between Soils and Fibers

장 병 옥 (서울대) · 서 동 옥\* (서울대) · 박 영 곤 (서울대)

Chang, Pyoung Wuck · Seo, Dong Uk · Park, Young Kon

### Abstract

The interface friction angle between soil and fibers is important to evaluate improvement of the shear strength on fiber mixed soils. Direct shear test and pullout test conducted by an apparatus made specially for the purpose of this study, was analyzed to know how fiber and soils affect on interface friction angle. By the results, The value of interface friction angle of sandy soils is larger than that of clayey soils. As a diameter of fiber is large, the value of friction coefficient of sandy soil is increase and that of clayey soil is decrease. An interface friction angle of well graded soil is larger value than that of uniform graded soil.

### I. 서론

보강벽체나 옹벽에 쓰이는 섬유혼합토는 흙의 전단강도를 증진시키고자 섬유를 흙과 혼합한 보강토이다. 일반적으로 섬유혼합토의 전단강도는 혼합되는 흙의 입도분포와 흙입자의 형상과 같은 흙의 특성과 섬유의 형태, 길이, 직경, 인장강도, 탄성계수, 마찰계수, 섬유혼합율 등과 같은 섬유의 물리적, 역학적 특성에 따라 다르며 구속응력, 다짐상태 등의 영향을 받는다<sup>5)</sup>. 이와같이 섬유혼합토에 영향을 미치는 인자는 다양하고 해석하기 복잡하다.

섬유혼합토의 전단강도 증가현상은 흙과 섬유의 상호작용의 영향을 받으며 상호작용을 평가하는데 상호마찰각이 중요한 요소이다. 그러므로 흙과 섬유의 상호마찰각을 평가하기 위해 직접 전단시험과 인발시험을 수행하였다. 상호마찰각은 흙의 입도와 섬유의 직경, 마찰계수, 면적비에 영향을 받으므로 서로 다른 흙과 섬유를 사용하여 이들의 영향을 알아보았다.

### II. 관련이론

섬유혼합토가 외력을 받아 변형이 일어날 때 재질이 서로 상이한 재료인 흙과 섬유는 상호간의 마찰과 섬유의 인장으로 인해 강도가 증가한다. 이러한 섬유혼합토의 전단강도 증가( $\Delta S$ )는 예를 들어 식 (2.1)과 같이 흙의 단위면적 당 섬유의 인장강도( $T$ ), 흙의 내부마찰각( $\phi$ ), 전단 뒤틀림각( $w$ ) 등에 영향을 받고<sup>1)</sup>, 여러 섬유를 사용할 때는 흙의 단위면적 당 섬유의 인장강도,  $T$ 를 평가

---

1998년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (1998년 10월 24일)

하는 것이 중요하다.

$$\Delta S = T(\sin w + \cos w \tan \phi) \quad (2.1)$$

여기서 인장강도  $T = A \tau_i$ 로 나타낼 수 있고,  $A$ 는 흙과 접촉하고 있는 섬유 표면적이고,  $\tau_i$ 는 인장응력이다.  $T$ 에는 흙과 섬유의 주변 마찰력과 섬유 자체의 인장강도가 포함이 되나 인발시험에서 섬유 자체의 인장강도는 수직하중보다 훨씬 크기 때문에 섬유 자체의 인장은 무시할 수 있다. 따라서 인발시험에서 구하게 되는  $T$ 는 흙과 섬유의 마찰력만을 고려하게 되며,  $T$ 는 인발력과 같게 되고 이로부터  $\tau_i$ 는 인발응력이 된다.

흙에서 섬유를 인발하여 얻게되는  $\tau_i$ 로부터 상호마찰각이 계산되며, 상호마찰각은 흙과 섬유의 인장강도를 평가하는데 중요한 지표가 된다. 섬유와 흙의 인발응력,  $\tau_i$ 은 식 (2.2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_i = a_d + \sigma_N \cdot \tan \delta \quad (2.2)$$

여기서  $\tau_i$  = 흙-섬유의 인발응력,  $a_d$  = 흙-섬유의 부착력( $kg/cm^2$ ),  $\sigma_N$  = 유효수직응력,  $\delta$  = 흙-섬유의 상호마찰각이다. 흙과 섬유의 마찰계수는 흙의 내부마찰각에 대한 흙과 섬유의 상호마찰각의 비로 식 (2.3)과 같이 나타낸다. 이 마찰계수  $f$ 는 흙과 섬유의 종류에 따라 다르게 나타난다.

$$f = \tan \delta / \tan \phi \quad (2.3)$$

### III. 재료 및 방법

본 실험에 쓰인 흙은 세 가지로 흙의 기초물성과 입도분포는 다음 Table 1과 Fig. 1에 제시되었다. 시험에 쓰인 섬유는 Table 2에 제시된 것과 같다. 흙의 강도정수( $c_u, \phi_u$ )를 평가하기 위해 직 접전단시험을, 흙과 섬유의 상호마찰각을 평가하기 위해 인발시험을 수행하였다.

Table 1. Physical properties of soils

Place	Specific gravity, $G_s$	Liquid Limit(%)	Plastic Index(%)	USCS	OMC(%)	$\gamma_{d \max}$ ( $g/cm^3$ )
Balan	2.67	NP	NP	SM	14.1	1.78
Suwon	2.62	38.4	17.2	CL	19.2	1.70
Hadong	2.62	44.0	8.0	CL	27.7	1.44

Table 2. Characteristics of fibers

	PEF1	PEF2
Type	Polyester	Polyester
Specific gravity	1.38	1.38
Diameter(mm)	0.21	0.27
Tensile strength(MPa)	510	600

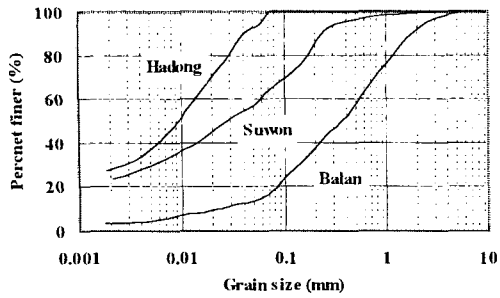


Fig. 1. Grain size distribution curves of soils

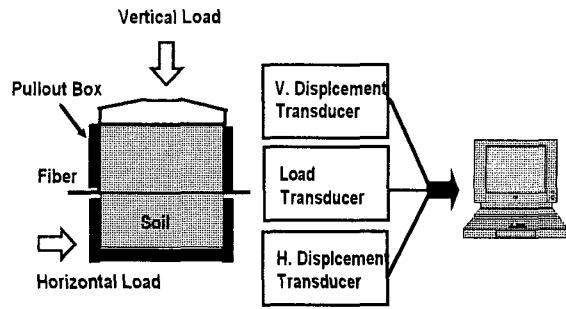


Fig. 2. Schematic view of pullout tester

인발시험은 Fig. 2와 같이 5×5×3cm 크기의 인발상자를 이용하여 디지털 자동기록장치로 변위 및 하중의 데이터를 얻게 된다. 직접전단장치의 전단상자에 다지는 시료의 크기는 10×10×5cm이고, 인발시험과 직접전단 시험 모두 세 가지 시료에 대해 각각 최적함수비로 표준다짐을 하여 재성형하였다. 시험은 모두 변위제어로 수행하였고, 변위속도는 0.1mm/min이다.

#### IV. 결과 및 고찰

세가지 시료에 대해 인발시험의 하중단계와 동일한 하중을 주어 직접전단시험을 수행한 결과는 Table 3과 같다. 시료가 모래질일수록 내부마찰각( $\phi_u$ )은 증가하고 점착력( $c_u$ )은 감소하는데 이 결과는 흙과 점유의 마찰계수를 결정하는데 이용된다.

Table 3. Strength parameters of soils

	Internal friction angle $\phi_u$ (Deg.)	Cohesion $c_u$ ( $kg/cm^2$ )
Balan	33.6	0.27
Suwon	30.3	0.33
Hadong	27.7	0.28

하중을 증가시키면서 인발시험을 한 결과를 응력-변형을 관계로 나타내면 Fig. 3과 같다. 변위는 흙과 접촉하고 있는 점유의 길이에 대한 인발되는 점유의 길이비로 나타내었다.  $\sigma_N = 1 \sim 2 kg/cm^2$ 의 낮은 수직응력 하에서는 점유의 최대인발저항이 변위 3~5%에서 뚜렷이 나타나고 있으며  $\sigma_N = 3 \sim 4 kg/cm^2$ 의 높은 수직응력에서는 5%이상에서 최대인발저항이 나타나고 있다. 또한 수직응력이 증가할수록 최대인발저항은 비례적으로 증가한다. Fig. 4는 점유수에 따른 인발하중-변형을 관계로 보여주고 있으며 점유수가 많을수록 비례적으로 인발력도 증가하고 있음을 알 수 있다. 이후의 모든 시험은 점유수를 10가닥으로 수행하였다. 단, 0.082mm 점유는 점유자체 인장강도가 약하기 때문에 120가닥수로 수행하였다.

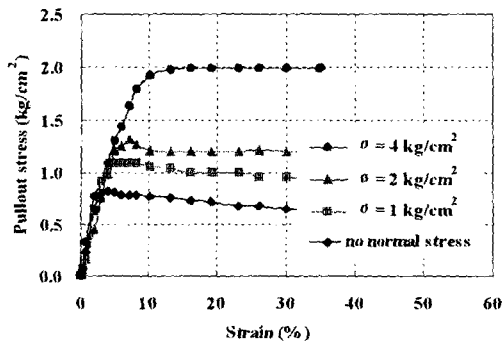


Fig. 3. Pullout stress vs. strain according to normal stress(Balan, PEF2)

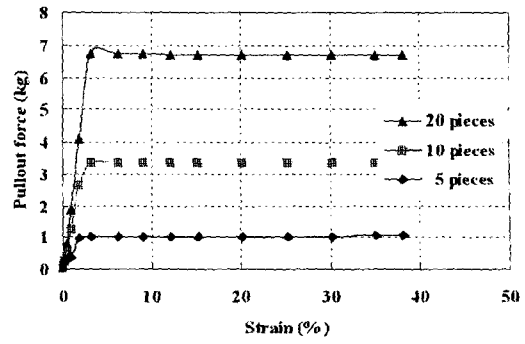


Fig. 4. Pullout strength according to number of fiber(Suwon, PEF2,  $\sigma_N = 1 \text{ kg/cm}^2$ )

Fig. 5, 6은 섬유 직경이 각각 0.21mm와 0.27mm인 PEF1과 PEF2에 대해 인발시험을 한 결과이다. 직선의 기울기는 상호마찰각  $\tan \delta$ , 절편은 부착력  $a_d$ 를 나타내며 시료의 종류에 따른 상호마찰각의 변화가 잘 나타나고 있다. 이들의 값을 Table 4에 나타내었다.

세 시료에서 모래질이 많은 발안시료가 가장 큰 상호마찰각을 보이고 있으며 하동시료가 가장 낮은 값을 나타낸다. 부착력도 발안시료가 가장 크고, 수원시료, 하동시료 순인데 모래질 함인 발안시료가 부착력이 크게 나타나는 것은 모래와 섬유의 마찰이 지배적이며 수원 및 하동시료의 점토분이 저소성으로 큰 부착력을 발휘하지 못하기 때문으로 사료된다.

또한 하동시료와 같이 균일한 입도의 점토 및 실트입자, 또는 입도분포가 균일한 흙보다는 발안시료와 같이 흙입자가 골고루 섞인 양입도의 흙에서 상호마찰각이 크게 나타난다고 할 수 있다. 그리고 섬유의 직경이 0.27mm인 PEF2가 직경이 0.21mm인 PEF1보다 상호마찰각이 더 큰 것이 두 그림을 비교해서 알 수 있다.

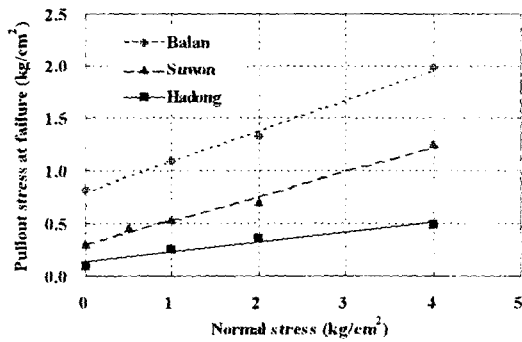


Fig. 5. Pullout stress at failure vs. Normal stress for PEF1 (0.21mm)

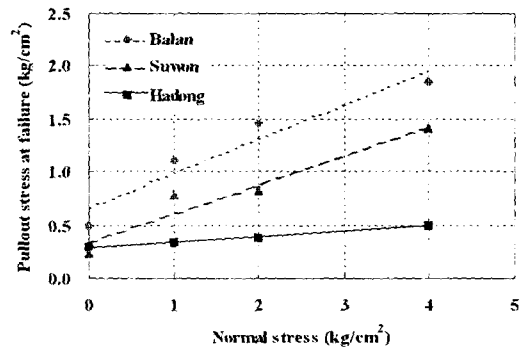


Fig. 6. Pullout stress at failure vs. Normal stress for PEF2 (0.27mm)

Table 4. Results of pullout tests

Soil \ Fiber	Adhesion intercept $a_d$ ( $kg/cm^2$ )		Interface friction angle $\delta$ (deg)	
	PEF1	PEF2	PEF1	PEF2
Balan	0.80	0.66	16.07	17.95
Suwon	0.31	0.34	12.90	15.12
Hadong	0.12	0.29	5.43	2.88

섬유의 직경별로 마찰계수를 구한 결과는 Fig. 7과 같다. 양입도의 발안시료와 수원시료에 대해서는 섬유의 직경이 커질수록 마찰계수가 증가하는 경향을 보이고 있지만 점토성분의 균일한 입도의 하동시료는 섬유직경이 증가할수록 마찰계수가 감소하는 것으로 나타난다. 모래와 실트성분이 많은 시료에 대해서는 섬유와 흙입자간의 마찰효과가 크므로 흙과 접촉하고 있는 섬유의 표면적이 커질수록 마찰효과가 증가한다는 것을 알 수 있다. 그러나 점토입자가 대부분인 하동시료에서는 섬유 표면적의 마찰보다는 부착력에 영향을 크게 받으므로 섬유의 직경이 작을수록 부착효과가 큰 것으로 나타난다.

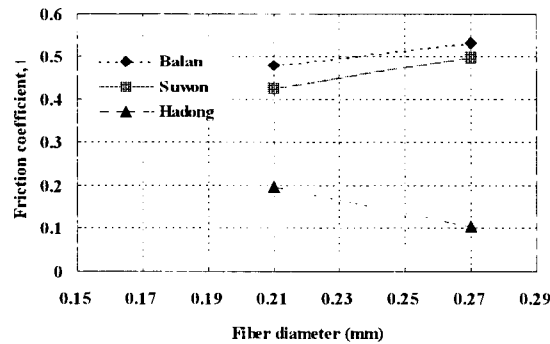


Fig. 7. Friction coefficient vs. fiber diameter

## V. 결론

흙과 섬유의 상호마찰 특성을 평가하기 위해 3종의 흙과 2종의 섬유를 설정하여 직접전단시험과 인발시험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 직접전단시험 결과 모래질 시료인 발안시료가 점토질 시료인 다른 지역의 시료보다 큰 내부 마찰각을 보였고 점착력은 수원시료가 가장 큰 값을 나타내었다.
- 2) 섬유의 인발응력은 흙, 섬유의 종류에 관계없이 수직응력이 증가할수록 증가하였고 발안시료가 가장 큰 부착력과 상호마찰각을 나타내었다.
- 3) 동일시료에 대한 섬유직경에 따른 마찰계수는 수원 및 발안시료가 섬유의 직경이 커질수록 증가하였고 하동시료는 감소하였다.

## 참고문헌

1. Mohamad H. Maher, Donald H. Gray, 1990, Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 11
2. D. K. Atmatzidis, G. A. Athanasooulos, 1994, Sand-Geotextile friction angle by conventional shear testing, New Delhi, inde
3. Thomas Kruse, Thomas Voigt, 1994, Frictional behaviour between smooth and rough geomembranes, various soils and geotextiles, *Prediction versus Performance in Geotechnical Engineering*
4. R. A. Jewell, 1996, Soil reinforcement with geotextiles, *Construction Industry Research and Information Association*
5. 조삼덕, 김진만, 1993, 섬유혼합 보강토의 전단특성, 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회