

보강 혼합토의 역학적 특성(II)

-섬유 혼합토-

송창섭¹⁾ · 임성운²⁾

¹⁾ 충북대학교 농공학과 · ²⁾ 충북대학교 대학원

Mechanical Characteristics of Reinforced Soil(II)

-Fiber Reinforced Soil-

Song, Chang Seob¹⁾ and Lim, Seong Yoon²⁾

¹⁾ Dept. of Agricultural Engineering, Chungbuk Nat'l Univ., ²⁾ Graduate school, Chungbuk Nat'l Univ.

ABSTRACT

This study has been performed to investigate the physical and mechanical characteristics of compaction, volume change and compressive strength for reinforced soil mixed with polypropylene fiber, and to confirm the reinforcing effects with admixture such as polypropylene fiber. To this end, a series of compaction test and compression test was conducted for clayey soil(CL) and polypropylene fiber reinforced soil.

In order to determine proper moisture contents and mixing ratio, pilot test was carried out for natural soil and PFRS(polypropylene fiber reinforced soil). And the mixing ratio of mono-filament fiber and fibrillated polypropylene fiber admixture was 0.1%, 0.3%, 0.5% and 1.0% by the weight of dry soil.

From the experimental results, it was found that the optimum moisture contents(OMC) increased with the mixing ratio of fiber, but the maximum dry unit weight and the volume change was decreased with the mixing ratio. It means that the improvement of the workability and the reduction of the weight of embankment was done by the addition of the polypropylene fiber. And, from the compression test results, it was found that the addition of the polypropylene fiber remarkably improved the compressive strength of PFRS. And it was observed in the viewpoint of strength that the fibrillated polypropylene fiber reinforced soil was more effective than the mono-filament polypropylene fiber reinforced soil.

Key words : *fiber reinforced soil, mono-filament fiber, fibrillated fiber, volume change*

I. 서 론

제 I 보에 이어 본문에서는 섬유 혼합토의 역학적 특성에 대해서 규명하였다.

일반적으로 흙은 다른 재료에 비하여 균질하지 못하고, 강도가 작고 함수량에 따라 특성이 달라지는 등의 단점을 가지고 있다. 이러한 흙의 단점을 보완하기 위하여 여러 첨가재를 사용하고 있는데, 그 중에서 토목섬유를 이용한 보강토 공법은 이미 널리 사용되고 있으며 아직도 연구의 대상이 되고 있다. 특히, 흙을 재료로 구조물을 축조하는 경우에는 주로 Geotextile, Geogrid, Geoweb 등의 토목섬유 인장력을 이용하여 흙의 단점을 보완하고 있다.

최근에는 지반보강이나 재료의 보강이라는 측면에서 Web의 형태가 아닌 짧은 형태의 섬유보강토에 대한 연구가 시도되고 있는 추세이다(Austin et al, 1993). 섬유 혼합토는 흙의 강도 증진이라는 측면 외에 균열의 감소를 목적으로 하는 경우에도 사용되고 있다. 그러나, 섬유의 혼합에 따른 흙과 섬유사이의 메카니즘, 응력-변형특성, 강도특성 또는 다짐성에 대한 연구는 미비한 상태에 있다. 이러한 섬유 혼합토의 역학적 특성이 규명되면, 옹벽이나 기초지반의 보강, 축조재료, 뒤채움 재료 등에 효과적으로 사용할 수 있으며 흙이 가지지 못하는 인장에 대한 저항성이 증가되고, 내부균열을 최소화할 수 있는 장점 때문에 여러 분야에서 환경친화

적으로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

따라서, 본 연구에서는 국내에서 생산되는 폴리프로필렌 섬유를 사용하여 혼합비에 따른 다짐특성, 체적변화 및 강도특성을 바탕으로 섬유 혼합토의 역학적 특성을 분석하여 짧은 형태의 토목섬유에 의한 보강효과를 규명하고자 한다.

II. 재료 및 실험방법

1. 재료

사용한 흙은 제 I 보에서 같은 화강토를 사용하였다.

섬유는 국내 S사의 폴리프로필렌 섬유이며, 형태는 단사형과 망사형의 두 종류를 사용하였다. 사용된 섬유의 제원은 단사형은 2941.2데니어(denier), 망사형은 1233.7데니어이며, 섬유의 길이는 19mm이다. 섬유의 구성성분비와 물리적 특성은 Table 1 및 Table 2와 같다.

2. 실험방법

시료는 KS F 2301 구정에 따라 교란시료를 채취하여, 자연상태에서 기건시켜 유발로 잘게 부순 후 4분법에 의하여 시료를 조제하였다. 다짐시험은 KS F 2312에 의하여 A다짐방법으로 시험하였다.

시료는 흙 시료의 건조중량에 대한 중량비 0.1%, 0.3%, 0.5%, 1.0% 비율로 단사형 및 망사형 섬유를 혼합하여 8종류로 조제하였으며, 혼

Table 1. Chemical components of polypropylene fiber used.

components	Sodium chloride	Potassium chloride	Magnesium chloride	Calcium chloride	Ferric chloride	Sodium sulfate	Citric acid	Others	Total
values(%)	20	31	20	15	2	3	3	6	100

Table 5. Physical properties of polypropylene fiber used.

	Quality of material	Shape of Fiber	Length	Absorption	Specific Gravity	Melt Point	Acid Resistance	Alkali Resistance	Tensile Strength	Young's Modulus
PM TYPE	Homopolymer	Fibrillated Bundle	19mm	nothing	0.91	162℃ over	very high(in-activity)	very high(in-activity)	3500~7700 kgf/cm ²	35×10 ³ kgf/cm ² over
PF TYPE	Polypropylene	Multifilament								

함비는 사전에 행한 예비시험의 결과로부터 정하였다. 0.1% 미만인 경우에는 섬유유 보강효과를 얻을 수 없었으며, 1% 이상인 경우에는 혼합하는 과정에서 엉키거나 한쪽으로 몰리는 현상이 발생하여 시공상 어려울 것으로 판단하여 제외시켰다. 각각의 시료는 스프레이를 사용하여 다짐시험에서 도출된 최적함수비가 되도록 물을 가하여 함수비를 조절하였다.

공시체는 직경 5cm, 높이 10cm의 몰드를 사용하여, Proctor의 표준다짐 에너지로 가압하여 각각의 비율에 대하여 6조씩 48개를 제작하였으며, 3조는 체적변화, 3조는 압축강도 측정에 사용하였다. 제작된 공시체는 통풍이 양호한 실내에서 양생기간 0일, 1일, 7일, 14일 및 28일에 따라 체적변화 및 압축시험을 KSF 규정에 따라 수행하였다. 체적변화는 공시체의 윗부분, 중간 및 아래부분의 직경을 측정하여 부피의 변화과정을 검토하였으며, 압축강도는 정해진 양생기간이 경과된 후 일축압축시험기를 이용하여 변위 및 압축응력을 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 다짐특성

자연 흙 및 섬유 혼합토의 다짐특성을 요약하면 Table 3과 같다. 단사형 또는 망사형 섬유유 혼합으로 인하여 건조단위중량은 감소하며, 최적함수비(OMC)는 증가하는 경향을 보였다.

섬유유 혼합에 따른 건조단위중량(γ_d)은 자연시료와 비교하여 단사형에서는 0.12%~1.85%, 망사형에서는 0.62%~2.03% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 최적함수비는 자연시료에 비해 높게 나타나는데, 단사형에서는 0.53%~5.36%, 망사형에서는 1.06%~3.92% 정도 높게 나타나고 있다.

Table 3. OMC and γ_{dmax} of natural soil and fiber reinforced soil.

Mixed ratio	OMC(%)		$\gamma_{dmax}(tf/m^3)$	
	Fibrillated fiber	Mono filament fiber	Fibrillated fiber	Mono filament fiber
Nat. soil	18.87	18.87	1.625	1.625
0.1%	19.06	18.97	1.616	1.623
0.3%	19.31	19.18	1.602	1.616
0.5%	19.49	19.49	1.596	1.604
1.0%	19.61	19.87	1.592	1.596

섬유유 혼합에 따른 최적 함수비와 건조단위중량을 도시하면 Figure 1과 Figure 2와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 섬유유 혼합에 따라 최적 함수비는 증가하고 건조단위중량은 감소하는 경향을 보인다. 그러나 단사형인 경우에는 혼합비에 따라 최적 함수비와 건조단위중량은 거의 선형적인 변화를 보이고 있으나, 망사형인 경우에는 낮은 혼합비에서 급격한 변화를 보이다가 0.5% 이상에서는 거의 변화가 미소하

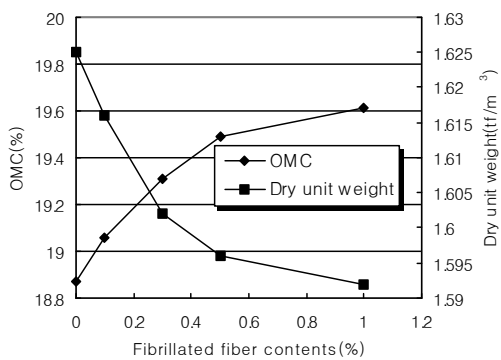


Figure 1. OMC and γ_{dmax} for fibrillated fiber reinforced soil.

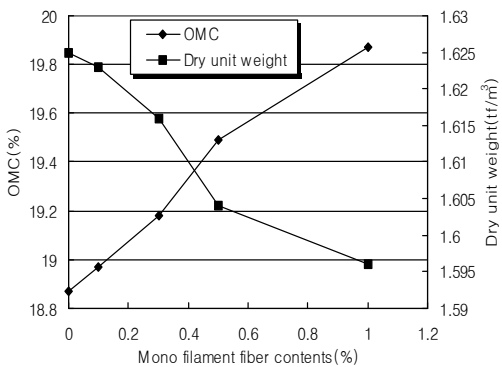


Figure 2. OMC and γ_{dmax} for mono-filament fiber reinforced soil.

게 된다. 이는 단사형인 경우에는 섬유가 단순히 흙과 혼합하면서 섬유와 흙의 마찰에 의해서 구조가 유지되는 반면에 망사형의 경우는 섬유의 망 속에도 흙이 메워지면서 작은 양의 섬유로도 충분히 보강을 하기 때문에 사료된다. 따라서, 섬유혼합토의 경우 섬유의 혼합비에 따라 최적 함수비가 증가하므로 시공성이 양호하게 되면 건조단위중량이 감소하므로 자중의 감소가 요구되는 구조물에 사용성이 우수한 것으로 판단된다.

2. 체적변화

자연 흙 및 섬유혼합토의 혼합비에 따른 체적변화를 재령에 따라 요약하면 Table 4와 같다. 섬유의 혼합에 따라 건조에 따른 수축량이 급격하게 줄어들고 균열도 감소하는 것을 알 수 있었다. 재령 28일의 경우, 단사형 섬유 혼합토는 자연 흙에 비해서 38%~53%, 망사형은 23%~46% 정도 수축하여, 단사형보다 망사형이 효과적인 것으로 나타났다.

이를 재령에 따라 도시하면 Figure 3 및 Figure 4와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 공시체의 체적변화는 7일 근처에서 거의 발생하였으며 시간의 경과에 따른 수축량이 감소되는 것을 볼 수 있다.

Table 8. Volume change of natural soil and fiber reinforced soils.

Mixed ratio	Volume change ratio(%)							
	Fibrillated fiber				Mono filament fiber			
	0day	1day	7days	28days	0day	1day	7days	28days
Nat. soil	0	-2.18	-6.44	-6.71	0	-2.18	-6.44	-6.71
0.1 %	0	-1.91	-3.99	-4.17	0	-2.25	-4.95	-5.17
0.3 %	0	-1.72	-3.65	-3.81	0	-2.10	-4.57	-4.84
0.5 %	0	-1.39	-3.33	-3.50	0	-1.75	-3.74	-4.60
1.0 %	0	-1.11	-2.85	-3.18	0	-1.52	-3.64	-3.60

특히, 단사형 섬유 혼합토는 혼합비에 따라서 수축량이 거의 선형적으로 나타나고 있으나, 망사형의 경우는 0.5% 혼합비까지는 이와 비슷하게 선형적으로 감소하다가 1% 혼합비에서 급격

한 감소를 보인다. 이는 망사형의 섬유사이에 흙알갱이가 충분히 채워지면서 섬유의 인장력에 의하여 흙의 건조에 따른 수축을 억제한 것으로 판단된다. 이를 도시하면 Figure 5와 같다.

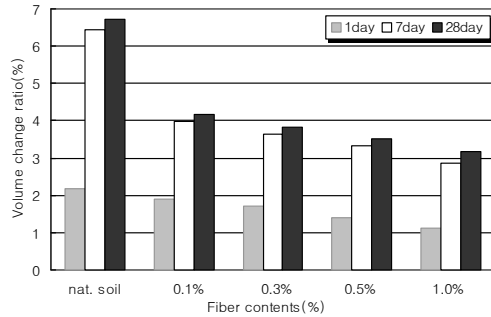


Figure 3. Volume change of natural soil and fibrillated fiber reinforced soil for elapsed time

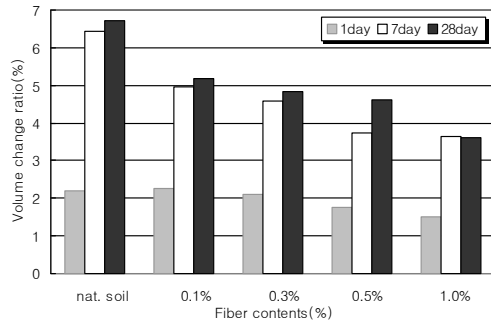


Figure 4. Volume change of natural soil and mono-filament fiber reinforced soil for elapsed time

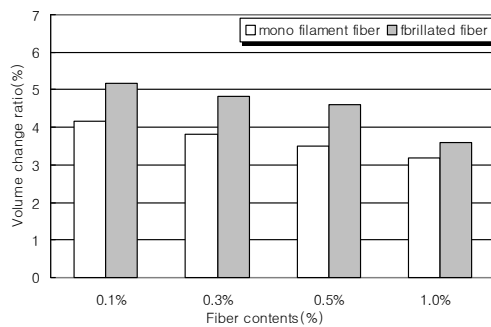


Figure 5. Comparison between fibrillated fiber and mono-filament fiber reinforced soil of volume change after 28days.

3. 강도특성

섬유 혼합토의 재령 및 혼합비에 따른 압축 강도를 자연 흙과 비교하여 요약하면 Table 5와 같다. 단사형이나 망사형 섬유 혼합으로 압축 강도가 크게 증가하여 섬유에 의한 강도 보강 효과를 쉽게 확인할 수 있다. 재령 28일의 경우, 단사형 섬유 혼합토는 자연흙에 비하여 약 2배, 망사형은 약 2.5배 정도의 강도가 증가되는 것으로 나타났다.

망사형 섬유 혼합토 및 단사형 섬유 혼합토의 재령에 따른 강도 변화를 도시하면 Figure 6 및 Figure 7과 같다. 단사형 섬유 혼합토의 경우, 혼합비가 0.1%에서 강도 보강효과가 가장 크게 나타나고 그 이상의 섬유 혼합으로 인한 보강효과는 미소한 것으로 나타났다. 반면에, 망사형 섬유 혼합토는 단사형과 마찬가지로 0.1%에서 가장 보강효과가 두드러지나 혼합비가 증가되면 압축강도도 증가되는 것으로 나타났다. 이는 단사형 섬유 혼합토는 섬유와 흙과의 마찰 또는 부착에 의해서 섬유의 인장강도가 공시체의 압축강도에 영향을 미치는 반면, 망사형 섬유 혼합토는 섬유의 망사이에 흙 알갱이가 채워지면서 섬유와 흙의 부착과 망과 흙의 전단 등이 공시체의 압축강도에 영향을 주기 때문으로 사료된다.

따라서, 강도의 보강측면에서 단사형보다 망사형이 효과적이며, 혼합비는 약 1.0%정도가 타당할 것으로 판단된다. 이는 너무 많은 섬유를 혼합한 경우에는 혼합과정에서 섬유끼리 뭉쳐져 오히려 강도의 발현에 제약을 가하는 요인이 되기 때문이다.

또한, 섬유의 혼합에 따른 응력 특성을 검토하기 위하여 망사형 섬유 혼합토 재령 28일의 응력-변형률 특성을 도시하면 Figure 8과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 자연 흙에 비하여 섬유 혼합토의 응력-변형률 곡선이 우측 상단으로 위치하게 되는데, 이는 섬유 혼합으로 인하여 강도의 증가는 물론 최대응력을 나타내는 변형률도 크게되어 인장에 대한 저항력이 증가되는 것을 볼 수 있다. 특히 잔류강도의 경우 자연 흙에 비하여 크게 증가되는 것을 볼 수 있다.

Table 5. Compressive strength of natural soil and fiber reinforced soil.

Mixed ratio	Compressive strength(kgf/cm ²)							
	Mono filament fiber				Fibrillated fiber			
	0day	1day	7day	28day	0day	1day	7day	28day
Nat. soil	1.68	3.87	12.04	12.49	1.68	3.87	12.04	12.49
0.1%	2.81	5.34	22.37	22.20	2.35	4.08	19.41	21.93
0.3%	3.45	7.05	20.57	22.47	2.85	4.47	19.24	24.11
0.5%	3.95	6.15	20.59	22.51	2.67	4.18	19.59	25.61
1.0%	4.12	8.01	22.47	23.49	3.08	6.65	21.39	29.22

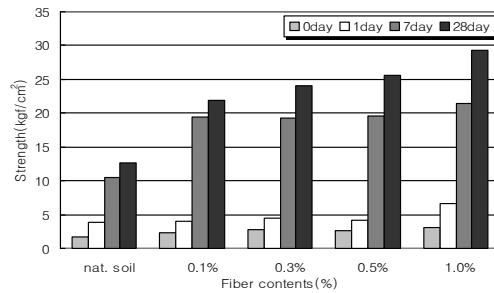


Figure 6. Comparison between natural soil and fibrillated fiber reinforced soil for compression strength.

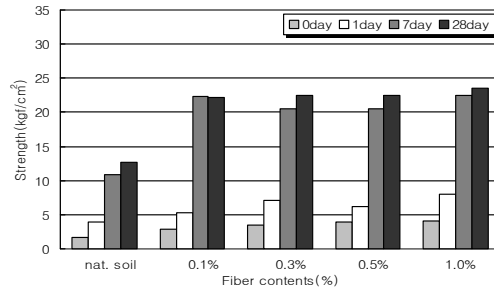


Figure 7. Comparison between natural soil and mono-filament fiber reinforced soil for compression strength.

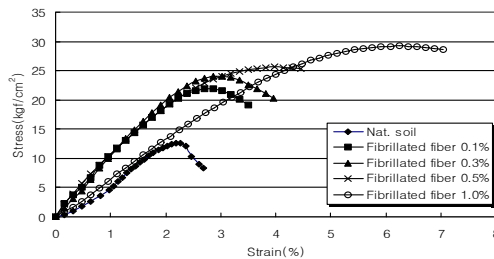


Figure 8. Stress-strain curve of fibrillated fiber reinforced soil. (Elapsed time 28 days)

IV. 결 론

흙이 가지는 단점을 보완, 개선하기 위하여 단사형과 망사형의 폴리프로필렌 섬유를 혼합한 섬유 혼합토의 다짐, 체적변화 및 압축강도 특성을 요약하면 다음과 같다.

1. 폴리프로필렌 섬유를 혼합한 섬유 혼합토의 다짐에서 최적 함수비는 혼합비의 증가에 따라 증가하는 반면, 최대건조단위중량은 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 섬유 혼합토를 사용하여 축조하는 경우, 시료의 함수량이 증가하여 시공성이 양호해질 뿐만 아니라 중량을 줄일 수 있다.

2. 최적 함수비 근처에서 다지면 망사형 섬유 혼합토보다 단사형 섬유 혼합토가 건조단위중량이 0.2%~0.5% 정도 높게 나타나며, 혼합비가 높을수록 재료의 자중을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 비비기, 타설 등의 시공성의 문제점, 마감처리 등이 문제가 되기 때문에 다짐측면에서는 0.3%~0.5%가 적당한 것으로 나타났다.

3. 공시체의 재령에 따른 체적변화는 섬유의 혼합에 따라 급격한 감소하게 되는데, 망사형 섬유 혼합토의 경우 자연 흙의 23%~46%까지 체적변화를 줄일 수 있고, 단사형의 경우에는 38%~53%까지 체적변화를 줄일 수 있는 것으로 나타났으며, 망사형이 단사형보다 효과적으로 나타났다.

4. 섬유 혼합토에서 섬유 혼합비가 증가할수록 섬유의 형태에 관계없이 최대응력 및 잔류강도는 증가하는 것으로 나타났으며, 동시에 최대응력을 나타내는 변형률도 혼합비에 따라 증

가하는 것으로 나타났다. 이는 섬유와 흙의 부착하여 섬유의 인장응력이 시료의 파괴를 저항하기 때문으로 판단된다.

5. 강도의 보강이라는 측면에서 단순한 부착에 의한 단사형 섬유보다 전단과 인장을 동시에 나타내는 망사형 섬유가 7%~24% 정도 효과적인 것으로 나타났으며, 적정 혼합비는 약 0.5~1.0% 정도가 타당한 것으로 나타났다.

인 용 문 헌

- 농림부. 1999. 농업구조물예의 이용을 위한 보강흙벽의 공법개발.
- 성찬용 · 이신호 · 송창섭. 2001. 폴리프로필렌 섬유를 혼합한 에코콘크리트의 물리·역학적 특성. 한국농공학회지 43(1) : 116-121.
- 송창섭 · 임성윤. 1999. 섬유 보강토의 균열 특성 연구. 한국농공학회지 41(3) : 59-66.
- Austin, D. N. · S. L. Shrader and D. S. Chill. 1993. Soil stabilization with discrete fibrillated polypropylene fibers. Geotech. fabrics Report 11(4) : 4-10.
- Gray, D. H. and H. Ohashi. 1986. Mechanics of fiber reinforcement in sand, J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, 112(8) : 804-820.
- Ingold, T. S. 1994. The geotextiles and geomembranes manual, Elssvier. Oxford.
- Michalowski, R. L. and A. Zhao. 1996. Failure of fiber-reinforced granular soils. J. of Geotech. Eng. Div. ASCE 122(3) : 226-234.

接受 2002年 11月 17日