

전단마찰시험에 의한 섬유혼합토와 지오그리드 사이의 마찰 특성 평가 Friction Properties between Fiber-Mixed Soil and Geogrid by Shear Friction Tests

조삼덕¹⁾, Sam-Deok Cho, 김진만²⁾, Jin-Man Kim, 이광우³⁾, Kwang-Wu Lee, 안주환⁴⁾, Ju-Hwan Ahn

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Research Fellow, Civil Eng. Dept., KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Research Fellow, Civil Eng. Dept., KICT

³⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Eng. Dept., KICT

⁴⁾ 삼양사 산업자재BU 과장, Manager, Industrial Fiber & Products BU, SAMYANG Co.

SYNOPSIS : The shear friction tests using large direct shear test units were performed to evaluate the friction properties of fiber-mixed soil. The used materials and test conditions were flowing. Soils : SM and ML; mixing fibers : three types of polypropylene fibers(net type 38mm and 60mm, and line type 60mm); reinforcement : geogrid; mixing ratio : 0.2% and 0.3%; degree of compaction : 85% and 95%. In the test results, the reinforcing effect of fiber mixed soil was confirmed.

Key words : shear friction test, direct shear test, fiber-mixed soil, geogrid, reinforcing effect

1. 서 론

최근 전 세계적으로 우수한 경제성과 수려한 외관 및 시공의 간편성 등에 의해 토목섬유를 보강재로 이용한 보강토 구조물의 건설이 나날이 증가하고 있으며, 특히 보강재로서는 1980년대 초에 개발된 그리드 형태의 고강도 토목섬유인 지오그리드의 활용이 두드러지고 있다. 일반적으로 보강토공법은 토체 내에 보강재를 삽입하여 토류구조물을 보강하는 공법으로서 이렇게 시공된 흙/보강재 복합건설재료는 기존의 지반에 비하여 개선된 인장 및 압축 특성을 갖는다.

이러한 보강토 구조물 축조시 현장여건상 용지문제가 있거나 양호한 토사의 현장 공급이 원활하지 못할 경우에 대비하여, 일반적으로 사용하는 성토재료(화강풍화토)나 공학적으로 불량한 성토재료에 섬유를 혼합하여 그 역학적 특성을 개선시키는 섬유혼합 보강토에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 실제로 섬유혼합 보강토는 흙에 섬유의 혼합이 용이하고, 강도의 등방성과 그 지속성이 우수하며, 토목섬유공법의 단점인 보강재를 따라 진전되는 잠재적인 취약면이 없는 등의 장점을 가지고 있어 최근 선진 외국에서는 이에 관한 연구가 활발하다. 섬유혼합 보강토에 대한 연구로, 초기에 Brown & Sheu(1975), Wu(1976) 등은 식물뿌리가 흙의 강도증가에 미치는 영향을 평가한 바 있으며, 이후 Gray & Ohashi(1983), Stauffer & Holtz(1995), Santoni & Webster(2001) 등 많은 연구자들이 실험을 통해 섬유혼합 보강토의 전단강도 증대 효과를 평가한바 있다. 그러나 국내에서는 아직까지 그 연구가 미미하여 실제 현장에 적용할 단계의 실질적인 연구가 이루어지지 않은 실정이다.

한편 토목섬유 보강토 구조물의 안정해석 및 설계 시에 필요한 주요 인자 중의 하나로 흙과 토목섬유

사이의 마찰특성이 있다. 흙/토목섬유 마찰특성을 평가하는 방법에는 일반적으로 직접전단시험방식의 전단마찰시험과 인발시험이 사용되고 있다.

본 연구에서는 대형직접전단시험기를 이용한 일련의 전단마찰시험을 수행하여, 공학적으로 다소 불량한 두 가지 종류의 성토재료(통일분류법상 SM 및 ML)에 폴리프로필렌 섬유를 혼합한 섬유혼합토와 지오그리드 사이의 마찰특성을 평가하고자 하였다.

2. 전단마찰시험

2.1 실험재료

2.1.1 흙시료

본 전단마찰시험에서는 흙시료로 경기도 수원시 서울대 부속목장 및 경기도 의왕시 철도기술연구원 신축부지에서 채취한 화강 풍화토를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 흙시료의 입도분포곡선은 그림 1에 나타낸 바와 같고, 토질특성은 표 1에 나타낸 바와 같다.

그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 수원 흙시료는 200번체 통과율이 41.2%이며 통일분류법상 SM으로 분류되는 실트질 모래이고, 의왕 흙시료는 200번체 통과율이 57.1%이며 통일분류법상 ML로 분류되는 실트질 흙이다. SM 시료와 ML 시료의 비중(G_s)은 각각 2.75와 2.73이며, 소성지수는 각각 N.P와 24.2% 이다. 또한 SM 시료의 최적함수비(OMC)와 최대건조밀도($\gamma_{d,max}$)는 23%, 1.61 t/m^3 이며, ML 시료의 경우는 각각 20.2%, 1.70 t/m^3 이다.

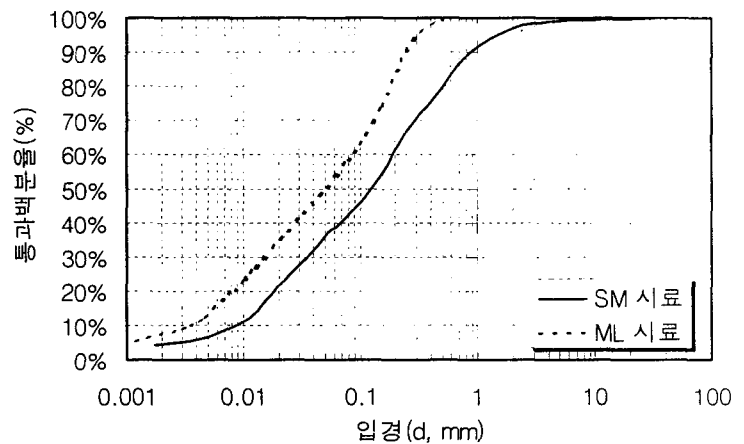


그림 1. SM 시료와 ML 시료의 입도분포곡선

또한 SM 시료의 최적함수비(OMC)와 최대건조밀도($\gamma_{d,max}$)는 23%, 1.61 t/m^3 이며, ML 시료의 경우는 각각 20.2%, 1.70 t/m^3 이다.

표 1. SM 시료와 ML 시료의 물리적 특성

채취장소	비중 (G_s)	액성한계 (W_L , %)	소성지수 (PI, %)	U.S.C.S	최적함수비 (OMC, %)	최대건조밀도 ($\gamma_{d,max}$, t/m^3)
수원	2.75	N.P	N.P	SM	23.0	1.61
의왕	2.73	33.0	24.2	ML	20.2	1.70

2.1.2 섬유시료

본 연구에서는 폴리프로필렌으로 제작된 3가지 종류의 섬유시료를 흙시료와 혼합하여 전단마찰시험을 수행하였다. 본 실험에서 사용한 3가지 섬유시료는 길이가 38mm인 망사, 길이가 60mm인 망사, 그리고 길이가 60mm인 단사이다. 여기서 망사섬유는 흙과의 혼합과정에서 섬유가 망사모양으로 펼쳐져 흙과 결속하게 할 목적으로 제작공정에서 러프하게 칼날로 흠집을 내어 제작한 제품이고, 단사섬유는 실처럼 얇게 만든 제품이다. 이러한 섬유시료의 일반적 특성은 표 2에 나타내었다. 표 2에서 알 수 있는바와 같이 본 섬유시료의 비중은 0.90~0.92이며, 인장강도는 5.2~7.7 kg/cm^2 , 탄성계수 3.5~3.8 $\times 10^4$ kg/cm^2 이다.

표 2. 섬유시료의 특성

비중	열전도율	밀도 (t/m ³)	흡수율	인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)	용융점 (°C)	직경 (mm)	Denier (g/9000m)
0.90~0.92	6	0.89	0	5.2~7.7	3.5~3.8×10 ⁴	163	0.084	45

2.1.3 지오그리드시료

본 실험에서 사용한 지오그리드 보강재는 고강도 폴리에스테르사를 제작하여 격자모양의 원단으로 만든 후 PVC로 코팅(제직/코팅 연속공정)하여 제조한 결합형 지오그리드로서, 일반 특성은 표 3에 나타낸 바와 같다. 그림 2는 본 지오그리드시료에 대한 광폭인장강도시험(ASTM D 4595) 결과를 보인 그림으로, 평균 최대인장강도와 인장변형률은 각각 9.66 t/m, 13.0%이다.

표 3. TRIGRID[®]8T W의 일반 특성

항 목	내 용	기본 물성치
보강사	재질	폴리에스테르(Polyester) 고강력 원사
	용융온도(°C)	258
	연화온도(°C)	250
	그리드조직	결합형
코팅재	코팅량(중량비, %)	55 ~ 65
	재질	PVC
	용융온도(°C)	150
	연화온도(°C)	75

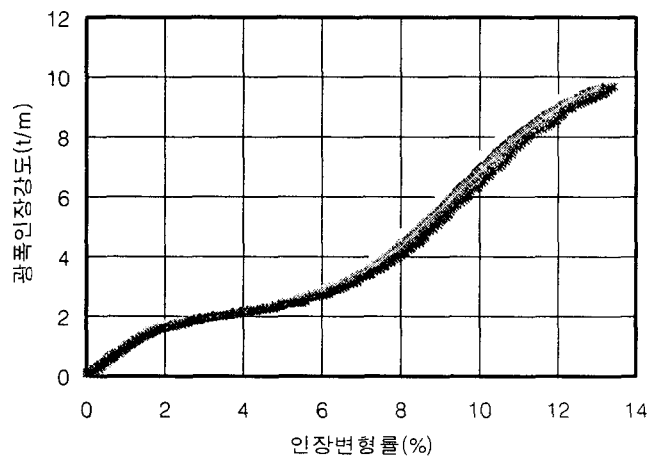


그림 2. TRIGRID[®]8T W의 인장강도-변형률 곡선

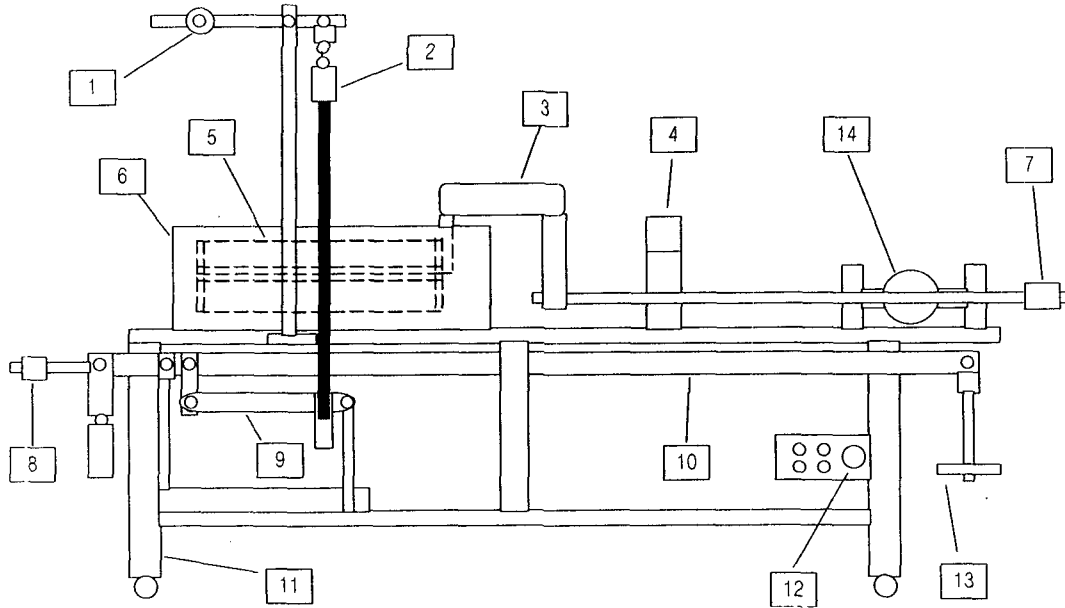
2.2 실험 장비 및 방법

2.2.1 대형직접전단시험기

본 전단마찰시험에 사용한 대형직접전단시험기는 그림 3에 도시한 바와 같이 전단상자, 수직하중 재하장치, 전단하중 재하장치 및 조절장치로 구성되어 있다. 전단상자 내부 크기는 30cm×30cm로 최대 6cm의 변위까지 전단시킬 수 있으며, 상부상자 및 하부상자 높이는 15cm로 동일하다. 한편, 상부상자와 하부상자 사이의 마찰을 억제하기 위하여 6mm정도의 틈을 유지할 수 있도록 볼이 설치되어 있다.

2.2.2 실험계획

본 연구에서는 흙종류, 섬유종류, 섬유혼합률 및 다짐도에 따른 섬유혼합토의 전단마찰특성을 평가하기 위하여, 표 4에 나타낸 바와 같이 실험조건을 변화시켜가면서 대형직접전단시험기를 이용한 전단마찰시험을 수행하였다. 표 4에서 보듯이 다짐조건은 A다짐에서 구한 최대건조밀도의 85%, 95% 조건이며, 혼합한 섬유의 종류는 망사 38mm, 망사 60mm, 단사 60mm 세 종류이다. 또한 섬유혼합률은 0.2%, 0.3% 두 조건으로 하였다. 여기서 섬유혼합률은 흙시료 노건조중량에 대한 섬유시료의 중량비율이다. 한편, 시험시 수직응력은 0.3kg/cm², 0.6kg/cm², 0.9kg/cm²를 각각 재하하였으며, 전단시 전단속도는 1mm/min을 유지하였다.



1. 수직하중재하발란스 2. 수직하중재하bar 3. 전단하중 전달장치 4. 기어상자 5. 전단상자 6. 수조
7. 수평하중재하장치 8. 추레버 9. 수직하중 100:1을 2단으로 가하는 레버 10. 수직하중전달레버
11. 받침대 12. 전달속도 조절장치 13. 추걸이 14. 수평Proving ring

그림 3. 대형직접전단시험기의 모형도

표 4. 직접전단방식에 의한 전단마찰시험 조건

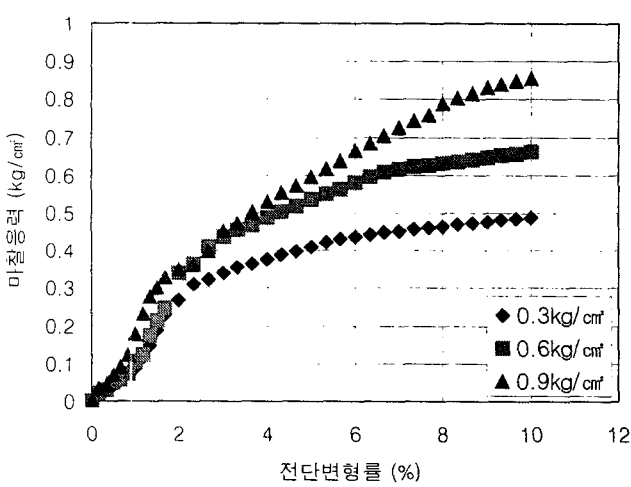
흙종류	다짐조건	섬유종류	섬유혼합률		
			0%	0.2%	0.3%
SM	다짐도 85%	망사 38mm	○	○	○
		망사 60mm		○	○
		단사 60mm		○	○
	다짐도 95%	망사 38mm	○	○	○
		망사 60mm		○	○
		단사 60mm		○	○
ML	다짐도 95%	망사 38mm	○	○	○
		망사 60mm		○	○
		단사 60mm		○	○

3 전단마찰시험 결과

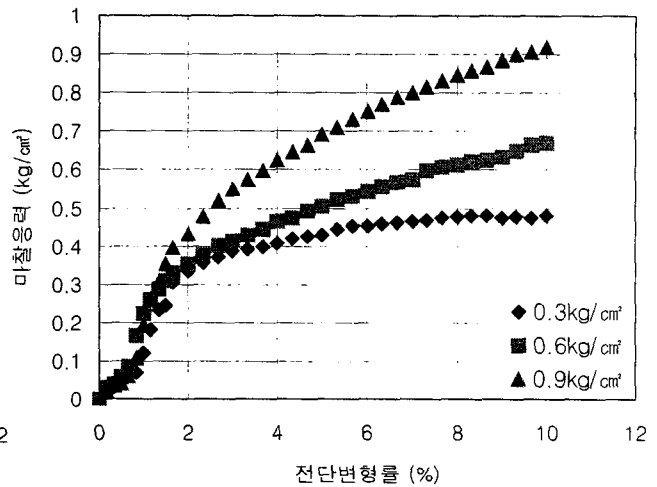
3.1 마찰응력-변형률 관계

섬유혼합토의 전단강도 및 마찰 특성에 영향을 미치는 인자로는 혼합되는 흙의 입도분포와 흙입자의 형상 등과 같은 흙의 공학적 특성과 섬유의 형상, 길이, 직경, 인장강도, 탄성계수, 마찰계수, 섬유 혼합률 등과 같은 섬유의 물리적·역학적 특성 및 구속응력, 다짐상태 등의 외적 인자 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 섬유혼합토의 흙종류, 섬유종류, 섬유혼합률, 다짐도에 따른 전단마찰특성을 평가하기 위하여 표 4에 나

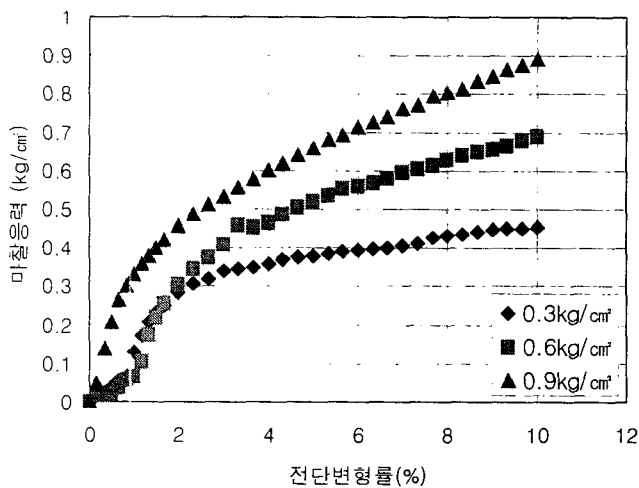
타낸 바와 같이 실험조건을 변화시키면서 대형직접전단시험 방식의 전단마찰시험을 수행하였다. 그림 4는 전단마찰시험 결과 원시료와 섬유혼합토의 마찰응력-변형률 곡선을 나타낸 그래프이다. 그림 4에는 SM시료에 세 종류의 폴리프로필렌 섬유를 0.2% 혼합한 경우에 대한 시험결과를 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 모든 시료에서, 응력-변형 거동은 수직응력에 관계없이 대략 2% 이내의 전단변형률까지는 마찰응력이 급격히 증가하다가, 그 이후에는 전단변형에 따른 마찰응력 증가비율이 초기에 비해 작아지게 되나 어느 일정한 응력 수준으로 수렴하지는 않고 계속해서 증가하는 경향을 보이며, 그 증가율은 수직응력이 큰 경우에 더 크다. 따라서 본 실험에서는 KS F 2343 규정에 의거하여 전단변형률 10%일 때까지 전단을 실시하였다. 한편, 그림 4에서, 섬유를 혼합하지 않은 원시료에 대한 직접전단시험결과를 0.2%의 혼합비율로 섬유를 혼합한 공시체에 대한 시험결과와 비교해 보면, 대체로 섬유를 혼합한 경우의 마찰응력이 원시료에 비해 더 큼을 알 수 있다. 즉, 흙시료에 일정비율의 섬유를 혼합하여 보강할 경우 지반의 전단강도 및 전단마찰응력이 증가함을 알 수 있다.



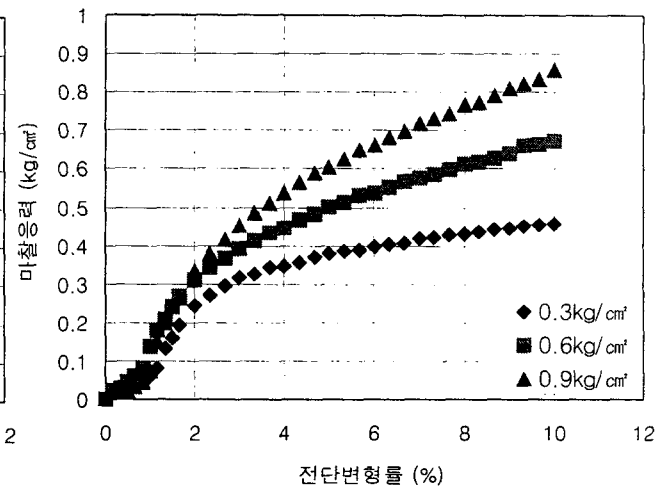
(a) 원시료



(b) 망사 38mm 혼합토



(c) 망사 60mm 혼합토



(d) 단사 60mm 혼합토

그림 4. 섬유혼합률 0.2%, 다짐도 95%인 SM시료에 대한 전단마찰시험 결과

3.2 전단마찰 특성

섬유혼합토의 흙종류, 섬유종류, 섬유혼합률 및 다짐도에 따른 흙/지오그리드의 전단마찰특성을 평가하기 위해 수행한 전단마찰시험 결과를 표 5에 정리하였다. 그림 5에는 대표적으로 섬유혼합률 0.2%, 다짐도 95% 조건의 ML 원시료와 섬유혼합토의 수직응력-마찰응력 관계를 나타내었다.

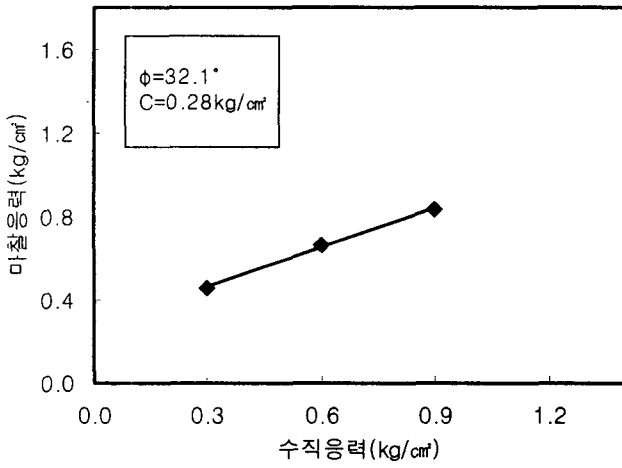
표 5. 전단마찰시험 결과

조건		항목	혼합률 (%)	전단마찰각 (°)	점착력 (kg/cm ²)	전단마찰각 증가율 (%)	점착력 증가율 (%)
SM 시료	다 짐 도 85%	원시료 (SM)	0	23.5	0.24	-	-
		망사 38mm	0.2	25.4	0.25	8.1	4.2
			0.3	25.3	0.28	7.7	16.7
		망사 60mm	0.2	25.8	0.24	9.8	0
			0.3	26.3	0.25	11.9	4.2
	단사 60mm	0.2	25.2	0.25	7.2	4.2	
		0.3	25.4	0.27	8.1	12.5	
	다 짐 도 95%	원시료 (SM)	0	31.5	0.30	-	-
		망사 38mm	0.2	36.1	0.25	14.6	-16.7
			0.3	36.3	0.22	15.2	-26.7
망사 60mm		0.2	36.1	0.24	14.6	-20	
		0.3	36.4	0.26	15.6	-13.3	
단사 60mm	0.2	33.6	0.27	6.7	-10		
0.3	33.5	0.26	6.3	-13.3			
ML 시료	다 짐 도 95%	원시료 (ML)	0	32.1	0.28	-	-
		망사 38mm	0.2	37.1	0.23	15.6	-17.9
			0.3	37.3	0.29	16.2	3.6
		망사 60mm	0.2	36.0	0.25	12.1	-10.7
			0.3	38.5	0.23	19.9	-17.9
		단사 60mm	0.2	36.0	0.32	12.1	14.3
			0.3	35.6	0.34	10.9	21.4

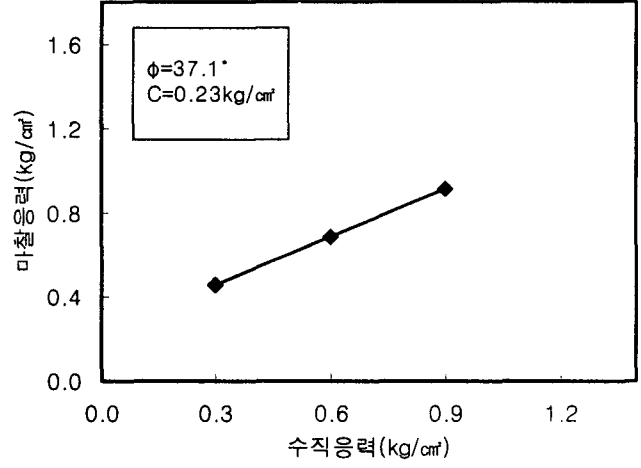
표 5에서 알 수 있는 바와 같이 실험 결과, 전단마찰각(ϕ)은 SM시료 및 ML시료에 대한 실험결과 모두에서 섬유를 혼합한 섬유혼합토의 경우가 섬유를 혼합하지 않은 원시료에 비해 더 큰 것으로 나타나 섬유혼합으로 인한 보강효과를 확인할 수 있었다. 특히 다짐도 95%인 조건에서의 섬유혼합토의 전단마찰각 증가율이 다짐도 85% 조건인 경우보다 더 큰 것으로 나타났다. 한편, 망사섬유를 혼합한 경우가 단사섬유를 혼합했을 때보다 전단마찰각 증가가 다소 크게 측정되었는데, 이는 망사섬유의 경우 러프하게 갈날로 흠집이 내어져 있기 때문에 흙과의 혼합과정에서 섬유가 망사모양으로 펼쳐져 흙과의 결속이 단섬유에 비해 잘 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 점착력(c)은 표 5에서 알 수 있는 바와 같이 다짐도 85%인 SM시료의 경우에는 원시료에 비해 다소 증가하나, 다짐도 95%인 경우에는 오히려 섬유를 혼합한 경우에 대체로 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이상의 결과, 폴리프로필렌 단섬유의 혼합으로 인한 흙/지오그리드의 전단마찰강도증가는, 다짐도가 클수록 전단마찰각의 증가에 의해 발휘되고 점착력이 강도증가에 미치는 영향은 작아지게 되는 것으로 판단된다.

한편, 그림 6은 다짐도 95%조건이고 섬유혼합률이 각각 0.2%, 0.3%인 섬유혼합토의 흙종류에 따른 전단마찰각을 비교한 그래프이다. 그림 6에 나타난 바와 같이 다짐도 95%, 섬유혼합률 0.2%인 SM 흙시료의 경우 원시료에 비해 전단마찰각이 6.3~15.6% 증가하였고, ML 흙시료의 경우에도 SM시료의 경우

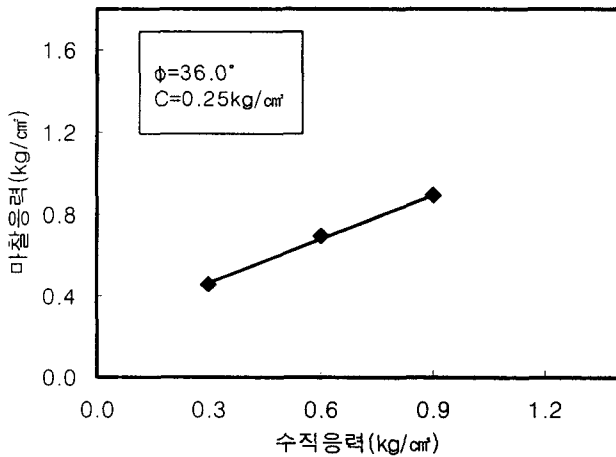
와 유사하게 원시료에 비해 전단마찰각이 10.9~19.9% 증가하였다. 이런 경향은 섬유혼합물 0.3%의 경우에도 유사하게 나타났다. 따라서 섬유혼합에 의한 전단마찰각의 증가에 미치는 흙종류의 영향은 그리 크지 않은 것으로 판단된다.



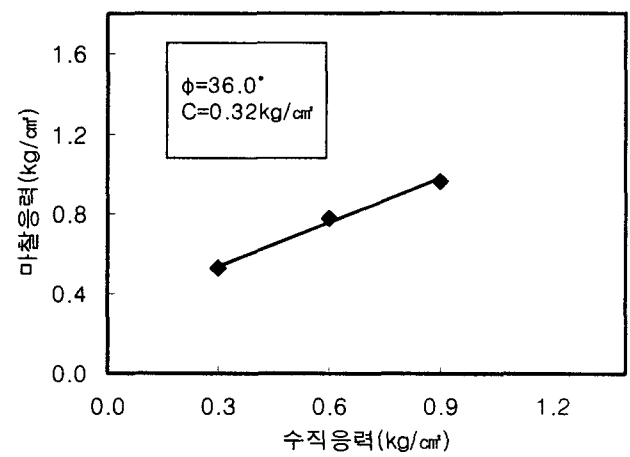
(a) 원시료



(b) 망사 38mm 혼합토

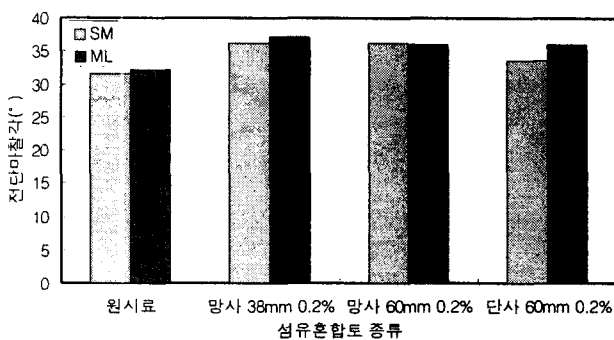


(c) 망사 60mm 혼합토

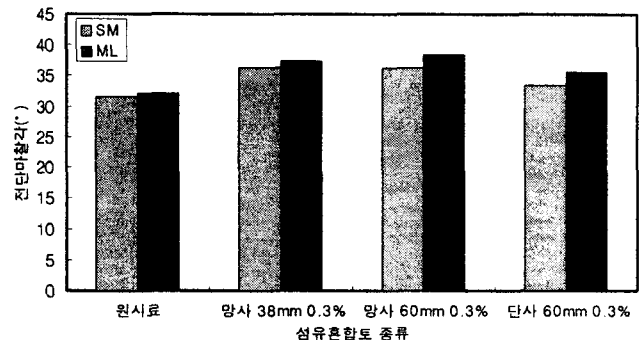


(d) 단사 60mm 혼합토

그림 5. 섬유혼합물 0.2%, 다짐도 95%인 SM시료에 대한 전단마찰시험 결과



(a) 섬유혼합물 0.2%



(b) 섬유혼합물 0.3%

그림 6. 섬유혼합토 종류별 전단마찰각 (다짐도 95%)

4. 결론

본 연구에서는 섬유혼합토/지오그리드의 전단마찰특성 평가하기 위하여 두 가지 종류의 성토재료(통일분류법상 SM 및 ML 시료)를 대상으로 3가지 종류의 폴리프로필렌 섬유(망사 38mm, 망사 60mm, 단사 60mm)를 혼합한 경우에 대한 전단마찰시험을 수행하였다. 연구결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 전단마찰시험 결과, 응력-변형 거동은 변형률이 증가함에 따라 전단응력이 어느 일정한 응력 수준으로 수렴하지 않고 계속해서 증가하는 경향을 보이며, 그 증가율은 수직응력이 큰 경우에 더 큰 것으로 나타났다.
2. 섬유를 혼합하지 않은 원시료에 대한 전단시험결과를 0.2% 및 0.3%의 혼합비율로 섬유를 혼합한 섬유혼합토에 대한 시험결과와 비교한 결과, 섬유혼합으로 인해 6.3%~19.9%의 전단마찰각 증가효과가 나타났으며, 3가지 종류의 폴리프로필렌 섬유 중에서 망사 60mm를 혼합한 경우의 전단마찰각도 증가율이 가장 큰 것으로 나타났다.
3. 섬유 혼합에 의한 흙/지오그리드 전단마찰각도 증가 효과는, 다짐도가 클수록 점착력 보다는 전단마찰각의 증가에 의해 발휘되는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Brown, C.B. & Sheu, M.S.(1975), "Effect of deforestation on slopes", J Geotech. Eng. Div., ASCE, 101, GTI, pp.147-165.
2. Gray, D.H.(1988), "Constitutive behavior of fiber-reinforced sands", Tech. Rep. AFOSR-TR-881007, Bolling Air Force Base, Washington, D.C..
3. Santoni, R.L., Webster, S.L.(2001), "Engineering Properties of Sand-Fiber Mixtures for Road Construction", J. of Geotech. and Geoenv. Eng. Div., ASCE, 127(3), pp. 258~268.
4. Stauffer, S.D. and Holtz, R.D.(1995), "Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continuous filament-reinforced sand", Transp. Res. Rec. 1474, TRB, Washington, D.C., pp. 82~95.
5. Wu, T.H.(1976), "Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska, Geotech. Eng. Report, No.5, Dep. of Civil Eng., Ohio State Univ. Columbus, Ohio.