

토목섬유 접촉면의 역학적 특성에 관한 연구

A study on the mechanical properties of geosynthetic interface

남 용¹⁾, Yong Nam, 김광호²⁾, Gwang-Ho Kim, 임종철³⁾, Jong-Chul Im, 주인곤⁴⁾, In-Gon Ju, 권정근⁵⁾, Jeong-Geun Kwon

1) 부산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan University

2) 부산대학교 토목공학과 박사수료, Ph.D. candidate, Hangaram Engineering

3) 부산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan University

4) 부산정보대학 건축디자인학과 부교수, Professor, Dept. of Architecture Design, Busan Info-tech College

5) 부산대학교 토목공학과 박사수료, Ph.D. candidate, Dept. of Civil Engineering, Pusan University

SYNOPSIS : Shear properties of geosynthetic/geosynthetic and geosynthetic/soil were evaluated from direct shear tests. The type of geosynthetic is Velcro which is effective for geosynthetic interface and make up for the weakness of sandbag. In this study, the cohesion and the angle of internal friction of each interface was estimated. The test results showed that the cohesion and the angle of internal friction of the geosynthetics depended on the amount of normal stress, the type of the geosynthetics used, and combinations of the geosynthetics and soils. Finally, by comparing the apparent cohesion and the friction angle of the geosynthetics, the applicability to design was identified.

Keywords : Direct shear test, Geosynthetics, Velcro, Shear strength, Friction angle, cohesion

1. 서론

우리나라는 급속한 경제 성장과 더불어 산업 용지, 주거용지 및 사회간접기반의 수요가 점차 증가 되고 있으나 반도에 위치한 좁은 국토에서 지반의 조건이 양호한 사업지구의 확보가 어려운 상황이다. 따라서 산지가 70% 이상을 차지하는 지형적 특성을 고려할 때 국토의 효율적이고 균형 있는 발전을 위한 사면의 발생은 필연적이다. 그리고 여러 가지 형태에 따른 가장 적절한 대책(보수 및 보강)을 수립해야 하나 간간히 적절치 못한 공법을 적용하여 재 붕괴 및 주변과 일치되지 않은 친환경적이지 못한 시공 사례가 늘고 있다. 그리고 종래의 흙채움 마대(Sand bag)는 흙채움 마대 상호간의 접촉면 강도가 낮아 전도와 활동에 취약하여 집중호우 시 하천제방의 임시복구나 보강토 옹벽 전면의 임시보강을 위한 전면 벽체 등으로 이용에 국한되어왔다.

이에 본 연구에서는 흙채움 마대의 이런 단점을 보완하고자 흙채움 마대 상호간의 접촉면 강도에 유리한 벨크로(Velcro)를 그림 1과 같이 부착하여 전단강도를 증대시키고자 한다. 이로 인해 보강토 옹벽 전면의 강도를 증진시킴으로써 대형장비의 주행성을 증대시키고 시공속도를 증가시켜 공기를 단축하는 효과를 가질 것으로 판단한다. 그리고 사면파괴 시 사면과 접촉면을 일체화시킴으로써 사면의 응급복구나 영구보강에 유리하다. 접촉면 전단강도 실험을 위해 대형직접전단시험기를 이용해 그림 2와 같이 사면과 토목섬유간의 접촉면 실험과 토목섬유간의 접촉면 실험을 실시하여 마찰특성과 전단강도를 분석하고 그 적용가능성을 평가해 보았다.

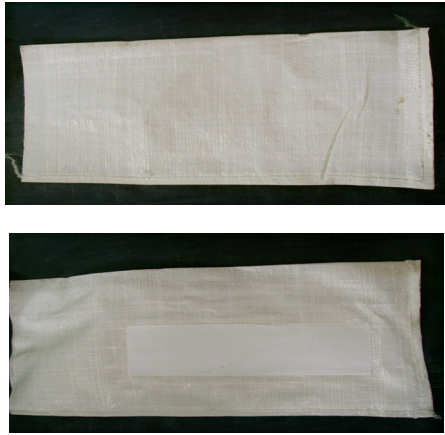


그림 1. 마대와 마대에 벨크로를 부착한 모습

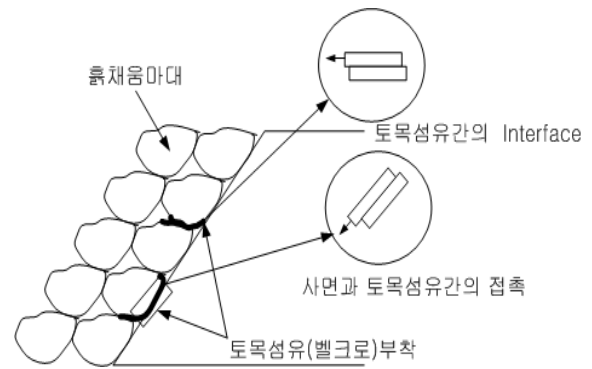


그림 2. 흡채움 마대 사면

2. 전단시험의 마찰특성

2.1 흙-토목섬유 보강재 경계면에서의 마찰특성

Collios, et al.(1980)은 보강토 시스템에서 관측된 파괴메커니즘을 모델링하기에 가장 적합한 시험은 인발시험과 직접전단시험인 것으로 보고하고 있다. 인발시험은 보강토벽에서의 마찰특성조사에 가장 적합한 것으로 알려지고 있으나, 인발시험장치는 상대적으로 규모가 크고, 비용과 시간이 많이 드는 경향이 있다. 또한, 토목섬유의 길이에 대한 불규칙한 응력분포는 인발시험결과 해석을 어렵게 한다. 이해 비해 전단시험은 간편하고 해석이 용이하므로 본 연구에서는 직접전단시험을 통해 흙-토목섬유 경계면의 마찰특성을 평가한다.

2.2 전단시험에 의한 토목섬유의 응력-변형 특성에 관한 연구사례

경계면의 마찰시험을 수행하기에 가장 적합한 시험은 직접전단시험이다. 직접전단의 시험은 종종 효율계수(efficiency factor), $\tan\delta/\tan\phi$ 의 항목으로 보고된다. 이에 대한 전형적인 효율계수의 범위는 0.6~1.0으로 보고되고 있다(Richards & Scott,1985). Collios는 토목섬유의 구멍 직경이 흙입자의 크기를 초과하고 파괴면이 흙의 보강재의 접촉면에서 집중될 때 1.16과 같이 큰 효율계수가 나타나지만, 효율계수가 1보다 클 경우에는 실제 시스템은 흙에서 파괴되므로 설계 시 사용하지 않는 것이 바람직하다고 보고하고 있다. 앞에서 언급한 연구자들은 흙과 보강재의 접촉효율(contact efficiency)에 영향을 주는 요소들에 대해 상당히 많은 연구결과를 발표하였는데, 주로 영향을 미치는 인자는 흙 입자의 크기와 토목섬유 구멍의 크기와 형태 등으로 보고하고 있다. 또한, Richards & Scott (1985)등은 직접전단시험장치 형태 효과에 대한 결과에 대해 연구하였다. 이들의 연구는 시험동안에 일정한 전단표면적을 유지하는 것이 보다 좋은 결과를 나타내는 것으로 결론지었다.

3. 실험재료

3.1 토목섬유

본 연구에서는 일반적으로 흔히 쓰이는 토목섬유가 아닌 일반적인 마대와 벨크로(요-부드러운면, 철-거친면)라는 섬유를 이용하여 매끄러운 면과 거친 면에 대한 실험과 흙의 포화상태와 불포화 상태에 따른 실험을 수행하여 이에 대한 전단강도의 특성과 흡채움 마대의 기능을 보완하는 공법을 제시하고자 한다.

3.2 시료의 물리적·역학적 특성

본 연구에 사용된 시료는 일반적으로 점착력은 가지지 않고 내부마찰각만 가진 주문진 표준사와 점착력과 내부마찰각 모두 가지는 원지반 토사(Soil 1,2)를 이용하여 실험하였다. Soil 1은 통일 분류법으로 인해 ML으로 분류되었고, 입도시험결과 균등계수(C_u) = 8.28, 곡률계수(C_g) = 0.79로 나타났고, Soil 2도 Soil 1과 같은 ML으로 분류되었고 입도시험결과 균등계수(C_u) = 38.80, 곡률계수(C_g) = 0.55로 나타났다.

표 1. 흙의 물성치

	통일분류 (USCS)	액성한계 LL(%)	소성한계 PL(%)	소성지수 PI	비중 G_s
Soil 1	ML	35.45	30.22	5.13	2.66
Soil 2	ML	33.40	26.81	6.59	2.67

표 2. 입도시험결과

특성	기호	Soil 1	Soil 2	표준사
유효입경	D_{10} (mm)	0.0145	0.015	0.433
균등계수	C_u	8.28	38.80	1.402
곡률계수	C_g	0.79	0.55	0.912

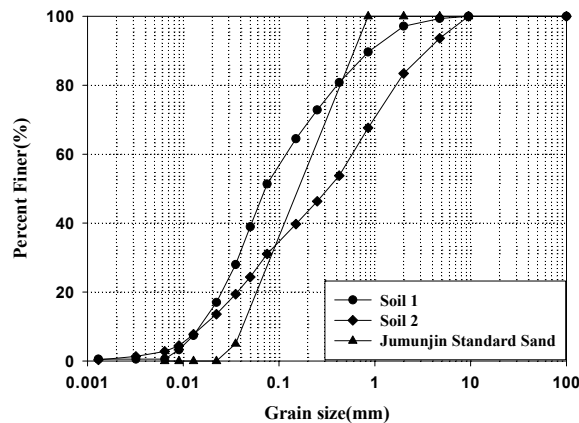


그림 3. 입도분포곡선

4. 토목섬유 접촉마찰 저항시험

4.1 직접 전단 시험 장치

본 연구에서는 토목섬유에 따른 전단강도의 특성을 알아보기 위함으므로, 흙의 전단강도와 흙/벨크로(요-철), 흙/흙채움 마대에 따른 대형직접전단시험을 실시하였다.

대형 직접 전단시험기의 개략도는 그림 4와 같으며, 그 제원은 1650mm(L)×300mm(W)×1060mm(H)이다. 수직하중 재하는 모멘트 재하방식으로, 하부가동형이며, 수평하중 재하는 감속기가 설치된 모터(motor)를 이용하여 일정 변형률 속도로 전단력을 가한다. 또한, 전단력은 로드셀(용량 : 500kgf)을 이용하여 측정한다. 전단상자는 그림 4와 같으며, 전단상자의 제원은 15cm(L)×15cm(W)×6cm(H)이다. 상·하부 전단상자의 기계적인 마찰을 줄이기 위하여 상자의 상·하면에 베어링을 부착하였으며, 전단상자의 한쪽

측면에는 투명 아크릴판을 이용하여 지반의 거동을 관찰하는데 용이하게 하였다. 전단시험과정에서 측정되는 전단력, 수평변위 및 연직변위는, 본 시험기의 그림 4와 같이 자동화 계측 시스템이 설치되어 있어 전단시험의 전 과정이 통일성 있게 수행되므로 시험조작과정으로 발생하는 시험결과와의 오차가 거의 없다고 볼 수 있다

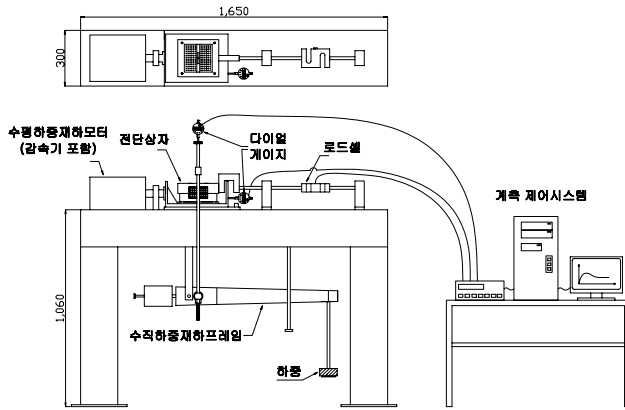


그림 4. 전단시험기

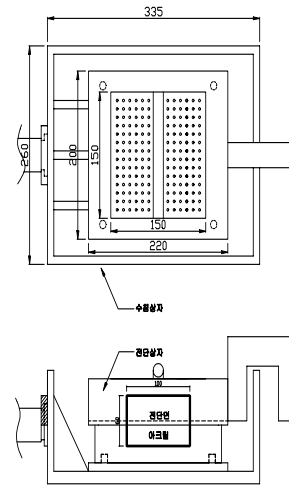


그림 5. 전단상자

4.2 직접전단시험 방법

대형직접전단시험은 세 가지 시료에 대해서 포화상태와 불포화상태 두 가지 경우와 세 종류의 토목섬유에 대해 실험하였다. 현장상태의 습윤단위중량을 그대로 유지하기 위해서 사각 블록샘플링을 통하여 대형직접전단시험을 실시하였다. 또한 주문진 표준사의 경우에는 낙하고 0.9m부터 밀도가 16.25kN/m^3 가까이 수렴한다(2003.박,그림 6)는 이론을 바탕으로 낙하고 1.2m를 유지하면서 시험을 실시하였다.

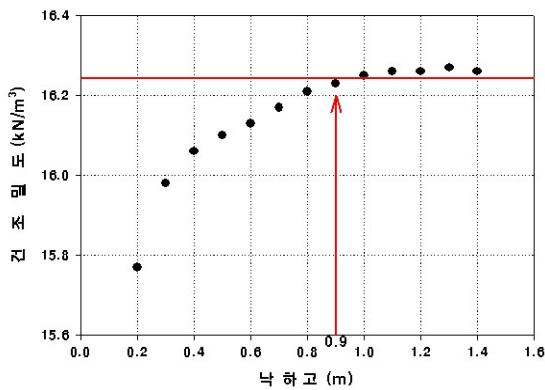
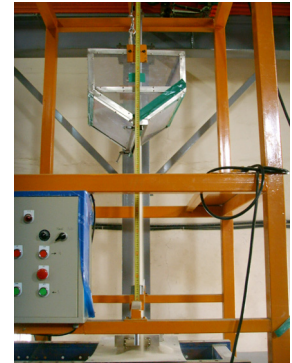


그림 6. 낙하고에 따른 모래의 밀도



그림 7. 표준사를 전단상자에 뿌리는 모습



흙과 토목섬유의 경계면 마찰특성을 파악하기 위해 전단상자 하부에는 그림 8과 그림 9와 같은 방식으로 나무로 제작된 강체 $15\text{cm}\times 15\text{cm}\times 3.1\text{cm}$ (가로×세로×높이)를 삽입하였다. 그림 8은 토목섬유의 마찰특성을 위해 고안된 강체에 토목섬유(벨크로와 흡착용 마대)를 감싼 모습이고, 그림 10은 강체에 토목섬유를 감싼 상부표면이 전단상자와 전단면이 일치하도록 설치한 후 시료를 삽입한 후의 전체적인 모식도이다.

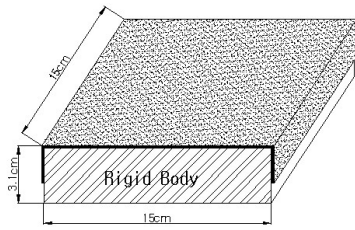


그림 8. 나무로 제작된 강체와 토목섬유

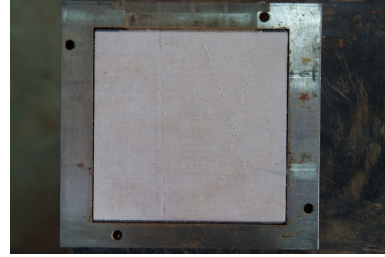


그림 9. 전단상자에 배치된 강체

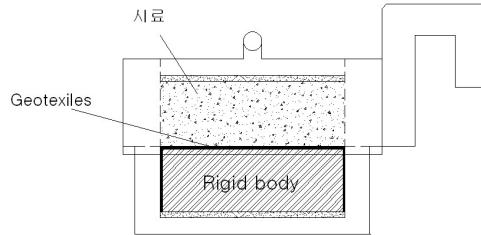


그림 10. 전단상자에 배치된 흙과 토목섬유

4.4 토목섬유의 Interface 실험

본 연구에서는 사면보강 시 쓰이는 흙채움 마대에 벨크로를 부착하여 전단강도를 강하게 하기 위함이다. 부속되는 벨크로와 흙채움 마대에 대한 전단면 강도 실험(그림 11)을 하여 전단강도를 비교분석함으로써 유리하게 작용하는 토목섬유를 파악하였다. 그리고 토압으로 인한 여러 가지 형태의 파괴를 대비하여 벨크로의 진행성 파괴실험(그림12)을 하여 벨크로의 강도를 알아보도록 하였다. 전단면 강도 실험은 4.2절과 같은 방법으로 진행되었고, 진행성 파괴실험은 벨크로의 한면은 고정시키고 다른 한면은 수평하게 당기는 방법으로 실험을 진행하였다.

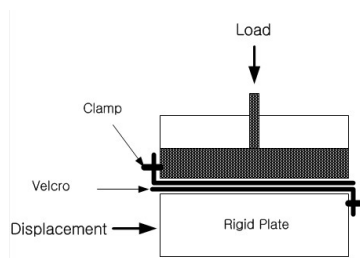


그림 11. 토목섬유의 전단면 강도실험

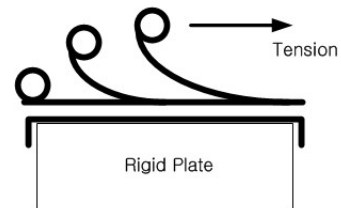


그림 12. 토목섬유의 진행성파괴 실험

5. 시험 결과 및 분석

5.1 토목섬유의 종류에 따른 흙과의 마찰특성 분석

흙-토목섬유의 경계면에서의 전단응력-변형률 곡선은 구속압이 증가함에 따라 전단응력이 증가함을 볼 수 있고, 최대전단응력 이상에서는 전단응력-변형률 곡선이 거의 소성적인 경향을 보이고 있는데, 이러한 곡선의 변화 경향은 구속응력의 크기와 토목섬유의 종류에는 무관하게 대부분 유사한 경향을 나타내고 있다.

흙의 전단강도에 비해 흙-토목섬유의 전단강도가 낮아지는 경향을 보이고 있는데 이는 본 연구에서는

흙채움 마대에 벨크로를 부착했을 경우와 흙채움 마대만 있을 때의 강도의 차이를 비교하는 것이어서 일반적인 보강토공법에 사용되는 토목섬유의 강도 실험과 달리, 흙과 토목섬유를 함께 다지지 않고 블록샘플링을 한 흙의 표면에 토목섬유를 마찰시키는 것이기 때문에 전단강도가 낮아진다.

사면이 포화되었을 경우에 발생하는 안정성을 고려하기 위해 흙을 완벽히 포화 시킨 후에 전단강도의 변화를 비교분석하였다. 흙의 전단강도의 경우 불포화 시 입자간의 표면장력으로 인해 겔보기점착력이 발생하지만 완전히 포화된 후에는 사라지는 것을 볼 수 있다. 그에 반해 흙과 토목섬유의 강도특성의 경우 약간의 차이는 포화상태와 불포화상태 모두 점착력이 나타났다. 이는 흙과는 달리, 토목섬유의 특성상 거친표면을 가지고 있기 때문에 흙의 입자가 토목섬유의 격자 틈 사이로 밀고 들어가서 저항력을 발휘하기 때문으로 판단된다. 내부마찰각의 경우, 불포화상태 보다 포화상태에서 2~3° 정도 낮게 나타나는데 이는 물과 입자간의 마찰효과 즉, 윤활효과(lubrication effect) 때문이라고 판단된다. Bergado. D.T.(2006)등은 이 윤활효과에 대해 보고한 바 있다.

토목섬유의 종류에 대한 비교분석에서는 시료의 종류에 따라 약간의 차이는 나타나지만, 대부분 흙채움 마대에 비해 벨크로의 경우가 10배 정도 더 큰 점착력을 지니고 있는 것을 알 수 있고 내부마찰각 면에서도 2°에서 크게는 5° 가량 차이가 나는데 이는 흙채움 마대 보강 시 벨크로를 부착한 흙채움 마대가 일반 흙채움 마대에 비해 안정성에서 더욱 유리하게 작용할 것으로 판단된다. 두 가지 토목섬유 즉, 벨크로(요)와 벨크로(철)의 점착력과 내부마찰각의 비교에서는 벨크로(철)의 점착력이 좀 더 크게 나타나지만 이는 무시할 수 있을 정도의 차이이며, 내부마찰각 역시 1° 미만의 차이를 보이기 때문에 보강 사면의 시공 시, 두 토목섬유의 차이는 없는 것으로 판단된다.

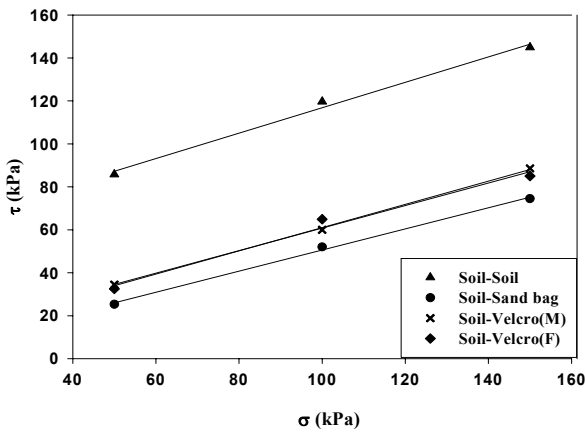


그림 13. Soil 1의 파괴포락선(불포화시)

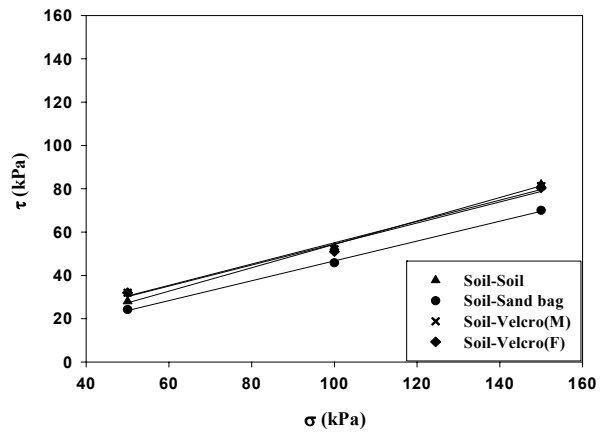


그림 14. Soil 1의 파괴포락선(포화시)

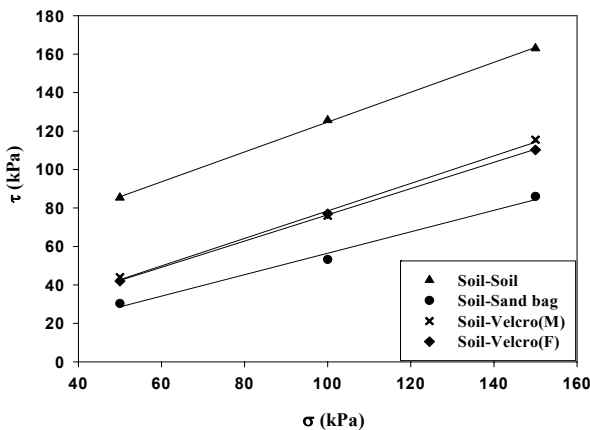


그림 15. Soil 2의 파괴포락선(불포화시)

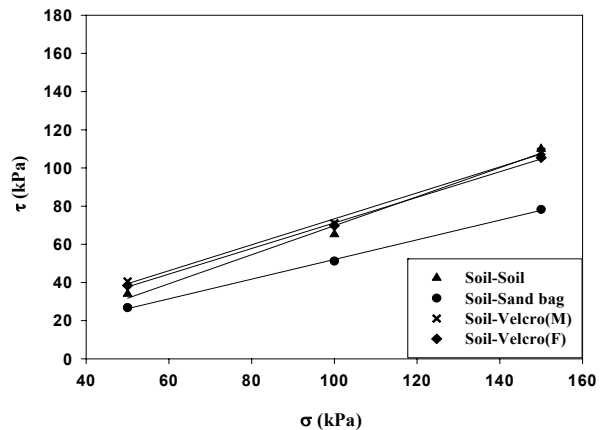


그림 16. Soil 2의 파괴포락선(포화시)

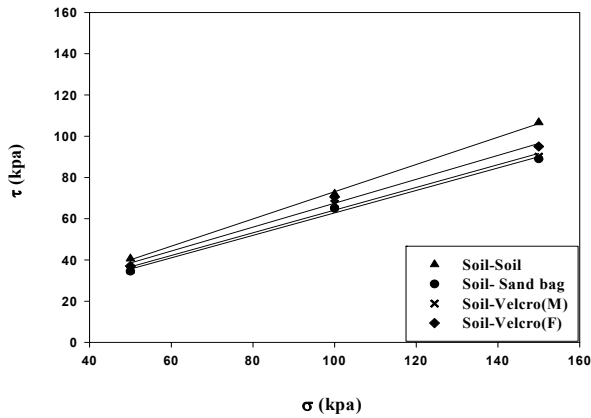


그림 17. 표준사의 파괴포락선(불포화시)

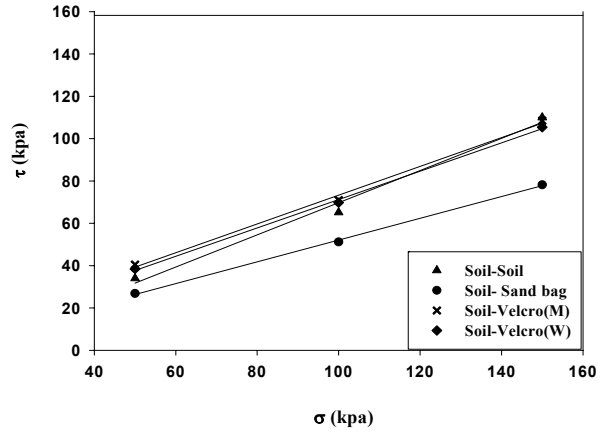


그림 18. 표준사의 파괴포락선(포화시)

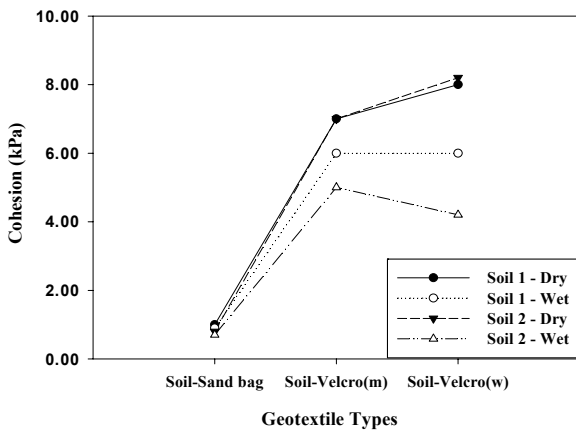


그림 19. 토목섬유에 따른 점착력

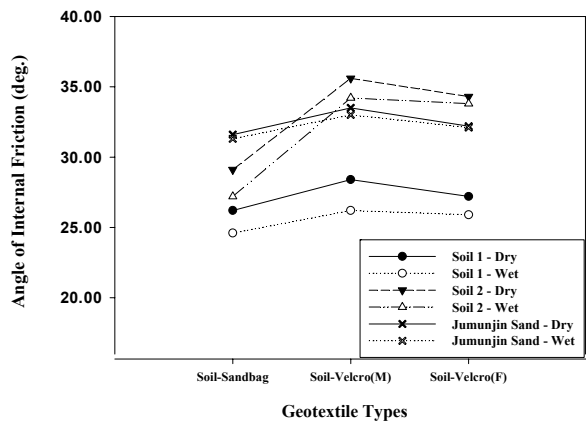


그림 20. 토목섬유에 따른 내부마찰각

흙과 토목섬유의 경계면에서의 마찰력의 평가를 Jones & Miyamori(1986)등이 제한한 식(1)을 이용하여 각각의 전단 시험에 대해 효율계수로 결정하였으며, 그 결과를 표 3에 나타내었다.

$$\text{마찰각에 대한 효율계수, } \phi_{\text{eff.}} = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \quad (1)$$

여기서, δ : 흙과 토목섬유의 마찰각

ϕ : 흙의 내부마찰

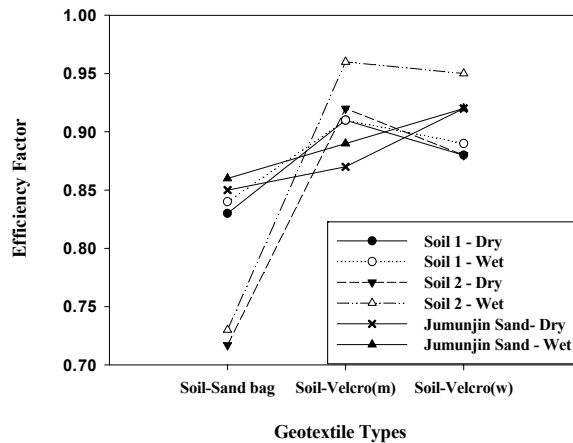


그림 21. 흙-토목섬유 경계면에서의 마찰각 효율계수

표 3. 전단시험 결과

Soil Type	Test Type	포화시			불포화시		
		효율계수	강도정수		효율계수	강도정수	
		내부마찰각 $\phi_{eff.}$	점착력 c(kPa)	내부마찰각 ϕ (deg.)	내부마찰각 $\phi_{eff.}$	점착력 c(kPa)	내부마찰각 ϕ (deg.)
Soil 1	Soil-Soil	1.0	0	28.5	1.0	57.6	30.6
	Soil-Sandbag	0.84	0.87	24.6	0.83	1.4	26.2
	Soil-Velcro(M)	0.91	5.9	26.2	0.91	6.9	28.4
	Soil-Velcro(W)	0.89	6.0	25.9	0.88	8.3	27.7
Soil 2	Soil-Soil	1.0	0	35.2	1.0	48	37.8
	Soil-Sandbag	0.73	0.67	27.2	0.717	0.8	29.1
	Soil-Velcro(M)	0.96	5.0	34.2	0.92	7.0	35.6
	Soil-Velcro(W)	0.95	4.2	33.8	0.88	8.0	34.3
표준사	Soil-Soil	1.0	0	35.2	1.0	0	35.8
	Soil-Sandbag	0.86	0	31.3	0.85	0	31.6
	Soil-Velcro(M)	0.89	0	32.1	0.87	0	32.2
	Soil-Velcro(W)	0.92	0	33.0	0.92	0	33.5

효율계수의 전형적인 범위는 0.6~1.0 이며, 모든 토목섬유의 효율계수가 범위에 포함 되었다. 하지만, 흙채움 마대에 비해 벨크로가 더 큰 효율계수를 나타내는 것을 알 수 있다.

5.2 토목섬유-토목섬유의 전단특성

흙채움 마대와 흙채움 마대 사이의 강도 실험과 벨크로(요)과 벨크로(철)의 강도실험을 4.2절과 같은 방법으로 직접전단실험을 실시하여 비교분석하였다. 그 결과 벨크로(요)-벨크로(철)의 점착력은 90kPa으로 다른 실험들에 비해 비교적 큰 값을 나타냈고, 흙채움 마대간의 점착력은 20kPa 으로 현저히 낮은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 내부마찰각은 각각 11.6°, 8°으로 비교적 작은 값을 도출할 수 있었는데 이는 토목섬유간의 전단강도는 내부마찰각 보다는 점착력에 좌우된다고 볼 수 있다.

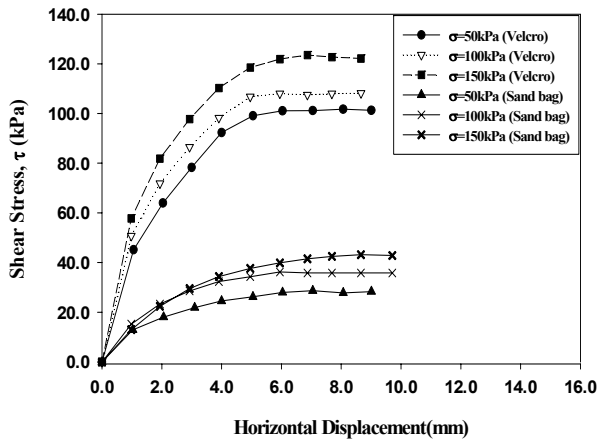


그림 22. 수평 변위에 따른 전단강도

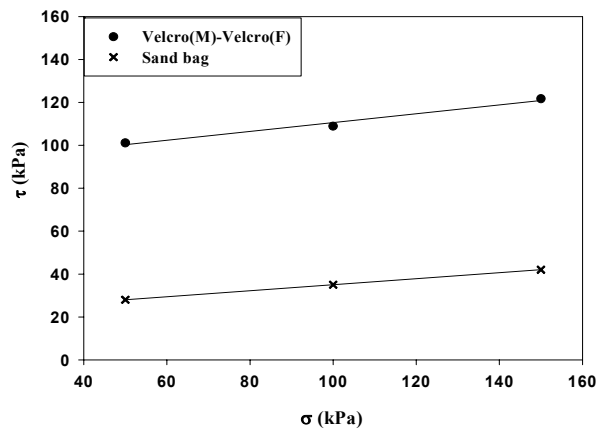


그림 23. 토목섬유에 따른 파괴포락선

진행성 파괴 실험의 결과 2.04kPa의 힘을 견디는 것으로 나타났는데 이는 전단면강도실험의 결과에 비해 현저하게 낮은 결과를 나타내었다.

7. 결론

토목에서 일반적으로 쓰이는 토목섬유가 아닌 흙채움마대의 전단강도를 높이기 위한 벨크로의 마찰면 실험을 대형직접전단시험기를 통해 직접전단시험을 실시하여 전단특성을 살펴보았다. 시험을 통해 측정된 전단 특성을 마찰각과 전단력, 효율계수로 나누어 비교 분석하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 흙과 토목섬유의 경계면 마찰전단특성은 흙의 전단특성과 같이 연직응력이 증가함에 따라 전단응력이 증가하다가 최대전단응력 이상에서는 전단응력-변형률 곡선이 소성적인 경향을 보이고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 토목섬유의 종류에 따라 최대 전단응력이 나타나는 변위는 다르지만 대부분 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.
- (2) 흙의 불포화상태 전단강도에서는 겉보기 점착력이 나타나지만, 포화상태에서 사라지는 것을 알 수 있다. 하지만 흙-토목섬유의 전단강도에서는 토목섬유가 거친면을 가지고 있기 때문에 불포화상태나 포화상태 모두 점착력을 지니고 있는 것으로 나타났다.
- (3) 내부마찰각에 있어서는 포화상태에서 물과 입자간의 유효효과 때문에 2~3°정도 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 토목섬유의 종류에 따라 미세한 차이는 있지만, 대부분의 경우 벨크로가 일반 흙채움 마대에 비해 점착력(5.7~10.25%)과 내부마찰각(2~5°) 모두 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 벨크로를 부착한 마대가 일반 흙채움 마대에 비해 사면의 안정 시 유리하게 작용한다고 판단될 수 있다.
- (5) 벨크로(요)와 벨크로(철)의 비교에서는 흙의 종류에 따라 약간의 차이는 있지만 거의 비슷한 경향을 나타나고 있어서, 두 접촉면에 대한 강도의 차이는 없기 때문에 시공 시 편리하게 작용할 것으로 판단된다.
- (6) Jones & Miyamori(1996)등이 제한한 수식을 이용하여 효율계수를 구한 결과 0.72~0.96사이로 만족스러운 결과를 도출할 수 있었다. 그러나 벨크로의 경우가 훨씬 더 높게 나타난다는 것을 알 수 있다.
- (7) 토목섬유간의 Interface실험 중, 강도실험의 경우 벨크로간의 점착력은 90kPa, 내부마찰각은 $\phi=11.6^\circ$ 이고 흙채움 마대간의 점착력은 20kPa, 내부마찰각은 $\phi=8^\circ$ 으로 벨크로가 더욱 뛰어난 강도를 발휘하고, 토목섬유간의 전단강도는 내부마찰각 보다는 점착력이 우선한다고 판단되었다. 그리하여 벨크로를 부착한 흙채움 마대가 흙채움 마대만 쌓아서 사면을 보강할 때 보다 더 강한 강도를 보인다는 것을 알 수 있다. 진행성 강도실험결과 2kPa의 강도를 나타냈는데 이는 전단면 강도실험에 비해 현저하게 낮은 강도를 나타냈다.
- (8) 위와 같은 결과를 바탕으로 사면 보강 시에 사용되는 흙채움 마대에 벨크로를 부착하여 더 높은 강도를 발휘할 수 공법을 제시해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 임종철(2005), 토목공학의 길잡이, 도서출판 새문.
- 박이근(2003), “얇은 토사터널 굴착시의 주변지반거동 특성과 마이크로 파일의 침하억제효과에 관한 연구,” 부산대학교 토목공학과 박사학위 논문.
- 서민우 외(2003), “경사관 시험을 통한 토목섬유와 흙의 접촉 전단 특성 평가,” 한국지반공학논문집, 제 19권, 제 6호, pp.285~298.

- Bergado, D.T.(2006), "Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand," *Geotextiles and Geomembranes*.
- Collios, A. Delmas, Gourc J.P, and Giroud, J.P,(1980) "Experiments on Soil Reinforcement with Geotextiles" *The Use of Geotextiles for Soil Improvement*, 80-177, ASCE National Convention, Portland, Oregon, pp.53-73
- Richard, E. A, and Scott, J. D.(1985), "Interface Response of Geotextiles," *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, California, pp. 1801-1804.
- Miyamori, T.,Iwai, S. and Makiuchi, K.(1986) "Frictional Characteristics of Non-Woven Fabrics," *Proceedings of the Third International Conference on Geo-Textiles*, Vienna, Austria, pp.701-705.