

경사판 시험을 통한 토목섬유와 흙의 접촉 전단 특성 평가

Evaluation of Interface Shear Properties Between Geosynthetics and Soils Through Inclined Board Tests

서민우*¹ Seo, Min-Woo

신준수*² Shin, Joon-Soo

박준범*³ Park, Jun-Boum

박인준*⁴ Park, Inn-Joon

Abstract

Shear properties of geosynthetic/geosynthetic and geosynthetic/soil interfaces which are widely met in landfill sites were evaluated from the inclined board tests. The inclined board testing apparatus is known to reproduce the shear behavior on the low normal stress most accurately. In this study, the friction angle of each interface was estimated and the tensile force mobilized at the geosynthetic was measured as well. The test results showed that the friction angle of each interface and the tensile force of the geosynthetics depended on the amount of normal stress, the type of the geosynthetics used, and the combinations of geosynthetics and soils. In addition, the sand/geotextile/geomembrane interface system was simulated in this study, and it was observed that the tensile force developed at the geomembrane decreased due to the protection effect of the geotextile located above the geomembrane. The test results of this research was compared with those of direct shear tests published, too. Finally, by comparing the measured tensile force of the geosynthetics when the initial displacement of the box occurs, when the slope is called as the critical slope, with suggested analytic solution, the accuracy of analytic solution and the applicability to design were identified.

요 지

본 연구에서는 경사판 시험기를 이용하여 매립지에 흔히 나타나는 토목섬유/토목섬유, 토목섬유/모래의 접촉 마찰 특성을 평가하였다. 경사판 시험기는 연직응력이 낮은 상태에서의 전단 거동을 정확히 모사하는 시험기로 널리 알려져 있으며, 본 연구에서는 이 시험기를 이용하여 각 접촉면의 마찰각을 평가하는 동시에, 각 토목섬유에 유발되는 인장력도 측정하였다. 실험 결과, 연직 응력의 크기, 토목섬유의 종류, 토목섬유의 흙의 구성에 따라 접촉면의 마찰각과 토목섬유에 유발되는 인장력이 각각 다르게 측정됨을 확인하였다. 한편, 본 연구에서는 모래/지오텍스타일/지오멤브레인, 즉 두개의 접촉면을 동시에 모사하는 실험을 실시하여, 지오멤브레인 상부에 위치하는 지오텍스타일로 인해 지오멤브레인에 유발되는 인장력이 감소함을 관찰하였다. 본 연구 결과는 동일한 접촉면을 대상으로 실시된 직접 전단 시험 결과와 비교하였으며, 마지막으로 상자의 변위가 발생하기 시작하는 시점, 즉 각 접촉면의 한계 경사에서 토목섬유에 유발되는 인장력을 기존에 제안된 해석해와 비교하여, 해석해의 정확도와 설계시 적용 가능성에 대하여 고찰하였다.

Keywords : Direct shear test, Geosynthetic, Inclined board test, Interface shear strength, Landfill

*1 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., redsmw1@snu.ac.kr)

*2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

*3 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부, 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

*4 정회원, 한서대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanseo Univ.)

1. 서론

매립지에는 다양한 토목섬유와 흙으로 구성된 차수 시스템(liner system)이 설치되어 내부의 침출수가 밖으로 유출되어 환경오염을 유발시키는 것을 방지하고, 매립 종료 후에는 최종 덮개(final cover)가 설치되어 매립가스(LFG)가 외부로 유출되거나 우수 등이 매립지 내부로 침투하여 침출수가 과다하게 발생하는 것을 막는다. 매립지에는 이러한 목적으로 많은 종류의 토목섬유와 흙이 이용되기 때문에, 다양한 특성을 가지는 접촉면(interface)이 발생된다. 그러나, 이러한 접촉면들에서 나타나는 낮은 전단강도로 인해 각 접촉면들은 매립지의 파괴면으로 작용하게 되는데, 이 때문에 토목섬유 접촉면이 존재하는 구조물의 설계시에는 각 접촉면에 대한 세심한 고려가 요구된다(서민우 등, 2002a; 서민우 등, 2002b; Jones와 Dixon, 1998; Mitchell 등, 1990).

매립지 사면부의 차수 및 최종 덮개 시스템에는 지오멤브레인(Geomembrane, 이하 GM), 지오텍스타일(Geotextile, 이하 GT), 토목섬유 점토 차수재(Geosynthetic clay liner, 이하 GCL) 등 다양한 인장강도와 변형 특성을 갖는 토목섬유들과 모래 및 점토가 이용되고 있다. 이들 토목섬유와 흙은 각기 다른 역학적 특성을 가지고 있으며, 이들 사이에 형성되는 접촉면 역시 접촉하는 재료에 따라 각기 다른 전단 거동을 보이기 때문에, 이러한 복합 시스템의 거동을 정확히 파악하는 것은 매우 어렵다고 알려져 있다.

일반적으로 매립지에 설치된 토목섬유에는 상부에 매립되는 쓰레기 혹은 상부에 작용하는 연직 하중과 차수재 자중으로 인해 인장력 또는 전단력이 발생하게 되는데, 설계시 각 토목섬유에 유발되는 인장력을 예측하는 것과 잠재적인 파괴면의 전단 강도를 정확하게 평가하는 것은 매우 중요한 일이다. 토목섬유 사이의 접촉 전단 강도(interface shear strength)는 사면에 설치되는 차수 및 최종 덮개 시설의 설계시 요구되는 중요한 인자로서 일반적으로 (1) 직접 전단 시험(direct shear test), (2) 링 전단 시험(ring shear test), (3) 경사판 시험(inclined board test) 등을 통해 구하게 된다.

직접 전단 시험은 제한된 변위 내-일반적으로 100mm 이하-에서 시험이 실시되기 때문에 잔류 전단강도를 정확히 평가할 수 없고, 비교적 큰 연직응력 상태에서 시험을 실시하여야 한다는 단점이 있지만, 시험기의 구조가 간단하고 많은 연구자들에게 익숙한 시험기라는 장

점 때문에 현재에도 널리 이용되고 있다(Jones와 Dixon, 1998a). Stark와 Poepoel(1994)은 링 전단 시험법을 이용하여, 토목섬유/토목섬유 또는 흙/토목섬유 사이의 전단 강도를 측정할 바가 있는데, 이 시험기는 변위의 제약이 없어 비교적 정확하게 잔류 전단강도를 측정할 수 있고 전단 도중 접촉면이 동일하게 유지되며 기계적 마찰이 거의 없다는 장점이 있으나, 전단 방향이 실제 현장에서 이루어지는 방향과 같지 않고 적용되는 재료의 크기가 비교적 작다는 한계가 있다(서민우 등, 2002b).

경사판 시험(inclined board test)은 앞서 제기된 두 가지 시험법의 한계를 보완하기 위하여 현재 널리 사용되고 있는 시험법으로서 일반적으로 낮은 연직 응력에서의 전단 거동을 비교적 정확하게 모사한다고 알려져 있다(Lopes 등, 2001; Wasti와 Özdüzgün, 2001). 이 시험법은 시험 기계 자체의 구조적 한계로 인해 비교적 낮은 연직 응력에서 시험을 실시해야 하는 단점이 있지만, 토목섬유 사이의 거동을 모사하는데 있어서 앞서 제시한 세가지 방법 중 가장 정확하다고 알려져 있다(Jones와 Dixon, 1998a). 따라서, 현재 댐, 운하 그리고 basin 등과 같은 수리 구조물과 쓰레기 매립지에 나타나는 접촉면의 설계 정수를 산정하는데 널리 이용되고 있다.

발표된 문헌을 통해 경사판 시험기를 통해 측정된 토목섬유/토목섬유, 흙/토목섬유 사이의 접촉 마찰각을 살펴보면, smooth GM(이하 S-GM)과 GT 사이의 마찰각은 $10^{\circ} \sim 19^{\circ}$ (Koutsourais 등, 1991; Wasti와 Özdüzgün, 2001; Briançon 등, 2002), S-GM과 모래 사이의 마찰각은 $16.5^{\circ} \sim 19.0^{\circ}$ (Izgin과 Wasti, 1998), GT과 모래 사이의 마찰각은 38.9° (Briançon 등, 2002) 정도로 나타났으며, 표 1에 이들 결과를 정리하여 제시하였다.

Briançon 등(2002)은 지오텍스타일(GT)와 지오멤브레인(GM) 사이의 접촉 마찰각을 측정하기 위하여 비교적 큰 $2.0\text{m} \times 1.2\text{m} \times 0.3\text{m}$ 크기의 상자를 제작하고, 이를 이용하여 GT/GM의 접촉 마찰각을 측정할 바 있다. 또한, 토목섬유에 하중계를 설치하여 경사판이 상승함에 따라 하부에 설치된 토목섬유에 인장력이 유발되는 것을 측정하였는데, 이 인장력은 경사판이 상승할수록 점점 증가하다가 상부상자가 미끄러지는 순간 최고점을 나타내고, 그 이후 다시 줄어드는 모습을 보였다. 한편, Lopes 등(2001)은 하부 경사판 대신 하부에도 흙으로 채워진 상자를 설치하여, 경사판 시험기의 하부 구조의 차이, 즉 하부구조를 경사판으로 구성한 경우와 흙으로 채워진 상자로 구성한 경우에 따른 마찰각의 변화를 평가

표 1. Inclined board 시험을 통한 마찰각 측정

Interface	마찰각(°)	Reference	Interface	마찰각(°)	Reference
S-GM/GT	19.0	Koutsourais 등 (1991)	S-GM/GT	10.3~12.4	Wasti와 Özdöğün (2001)
GM(PVC*)/GT	22.0		GM(PVC)/GT	18.3~18.8	
S-GM/모래	16.5~19.0	Izgin과 Wasti (1998)	S-GM/GT	14.7~16.7	Briançon 등 (2002)
R-GM*/모래	24.0~28.0				
S-GM/파쇄된 돌	23.5~26.5				
R-GM/파쇄된 돌	27.5~31.5				

* PVC : poly-vinyl chloride, R-GM : rough geomembrane

하였다. Lopes 등(2001)은 경사판 실험을 통해, 흙/지오 그리드의 접촉면에서는 하부구조의 차이로 인해 마찰각이 크게 영향을 받는 반면에, 다른 접촉면에서는 하부구조의 차이가 마찰각에 큰 영향을 미치지 않는 것을 관찰하였다.

본 연구에서는 inclined board(혹은 tilting table) 시험 기기를 이용하여, 토목섬유/토목섬유와 토목섬유/모래 사이의 접촉 전단 강도, 즉 최대 마찰각과 이 때 토목섬유에 유발되는 인장력을 측정하여, 토목섬유의 종류, 연직 응력의 크기, 접촉면의 종류가 접촉 전단 강도와 토목섬유에 유발되는 인장력에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 그리고, 본 시험 결과를 직접 전단 시험 결과와 비교하여, 시험법에 따라 측정되는 전단 강도를 비교하였다. 한편, 흙/토목섬유/토목섬유 시스템, 즉 두 개의 접촉면을 가지는 경우에 대한 실험을 추가로 실시하여, 지오텍스타일(GT)로 인해 지오멤브레인(GM)에 유발되는 인장력이 감소됨을 정량적으로 평가하고자 하였으며, 마지막으로 기존에 제시된 해석해와 실험을 통해 측정된 인장력을 비교하여 해석해의 적절성을 검토하고 설계 적용 가능성에 대하여 고찰하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 토목섬유

본 연구에서는 세 종류의 토목섬유, 즉 부직포 지오텍

스타일(nonwoven GT), HDPE(high-density polyethylene) GM, 두 종류의 GCL을 이용하여 실험을 실시하였다. GCL은 두 종류의 지오텍스타일 사이에 과립형 벤토나이트를 넣어 needle-punching한 형태(GCL(A))와 벤토나이트를 토목섬유에 부착시킨 형태(GCL(B))의 GCL을 이용하였다. 본 시험에 사용된 각 토목섬유의 두께, 구성 성분, 인장 특성 등은 표 2와 같다.

2.1.2 흙

본 실험에 이용된 모래는 주문진 표준사로, 최대 건조 단위중량은 1.65g/cm³, 최소 건조 단위중량은 1.35g/cm³, 비중은 2.64였다. 상대 밀도는 Lopes 등(2001)이 이용한 식과 같은 식 (1)을 통해 계산하였다.

$$D_r = \left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma} \cdot \frac{\gamma - \gamma_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

여기에서, γ_{min} 은 최소 건조 단위중량, γ_{max} 는 최대 건조 단위중량을 의미한다. 흙/토목섬유 접촉면 실험에서는 초기에 모래의 상대 밀도를 50%로 조성한 후, 그 위에 연직 응력을 가하여 실험을 실시하였다. 일반적으로 모래의 상대밀도가 접촉전단강도에 영향을 미친다고 알려져 있지만, 본 연구에서는 토목섬유/토목섬유의 접촉전단 강도에 초점을 맞추어 실험을 수행하였기 때문에, 일단 모래는 상대밀도 50%인 한 가지 경우에 대하여만 실험을 실시하는 것으로 하였다. 향후 흙의 종류 및 특성-밀도, 함수비 등이 흙/토목섬유의 접촉전단강도에 미치는 영향에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

표 2. 토목섬유의 구성 및 물리적 특성(건조 상태)

기 호	설 명	두께(mm)	재료 및 구성
S-GM	Smooth Geomembrane	2.0	HDPE
GT	Geotextile	9.0	staple fiber PP*
GCL(A)	Geosynthetic Clay Liner	7.0	GT+벤토나이트+GT
GCL(B)	Geosynthetic Clay Liner	8.0	벤토나이트+GM

* PP : Poly Propylene

2.2 실험장치

본 실험에 사용된 경사판 시험(inclined board test)기의 개략적인 모습은 그림 1과 같다.

시험기는 크게 모터와 경사판 등으로 구성된 본체와 변위 및 인장력을 측정하는 계측 장비와 이를 본체에 고정시켜주는 장치, 그리고 상자와 연직응력을 가하기 위한 철판으로 구성되어 있다. 본 시험기의 하부에는 경사판을 일정한 각속도로 회전시키는 기능을 하는 모터가 달려있으며, 상자가 놓이게 되는 경사판은 하부 모터와 봉(rod)으로 연결되어 있다. 그리고, 본 시험기의 용량, 즉 경사판 위에 최대로 올려놓을 수 있는 무게는 100kg이다. 경사판 오른쪽에는 2개의 하중계 고정장치를 설치하여 동시에 두개의 토목섬유에 발생하는 인장력을 측정할 수 있도록 하였다. 즉, 상자 하부에 한개의 토목섬유를 위치시키는 single interface 시험과 상자에 흙을 채우고 하부에 두 종류의 토목섬유를 위치시켜 실시하는 double interface 시험을 실시할 수 있도록 하였다. Double interface 시험은 실제 매립지에 설치되어 여러 가지 토목섬유의 거동을 동시에 알아보기 위하여 계획되었다.

시험기 상부 상자의 단면은 30cm×30cm였으며, 하부 판의 왼쪽 끝은 힌지(hinge)로 고정되어 있다. 시험시 하부판의 다른 한쪽 끝은 모터를 통해 일정한 속도로 위쪽 방향으로 올려지며, 연직 하중은 steel plate를 상자 내부에 올려 놓는 방식으로 가하게 된다. 앞서 언급한 바와 같이 본 시험기는 토목섬유가 경사면에 놓여있는 현장 상태에서의 전단 거동을 비교적 정확하게 모사할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 시험기의 경우, LVDT와 하중계(load cell)를 설치하여, 시험이 실시되는 동안 자

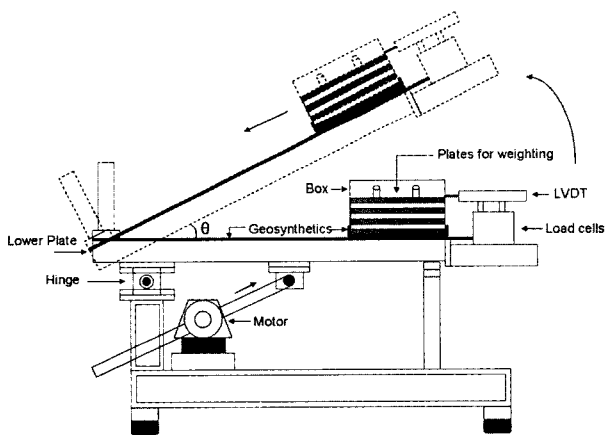


그림 1. 경사판(inclined board) 시험기의 개략도

로 취득기(data logger)를 통하여 상부 상자의 변위와 상자 하부에 놓인 토목섬유에 유발되는 인장력을 측정할 수 있도록 하였다.

본 실험에 앞서 시험기의 바닥판과 토목섬유(geomembrane, geotextile) 사이의 마찰각을 평가한 결과, 경사판과 지오멤브레인(GM) 사이의 마찰각은 17.1°, 경사판과 지오택스타일(GT) 사이의 마찰각은 12.3°로 측정되었다.

2.3 실험 절차

실험 순서는 다음과 같다. 먼저 하부에 놓일 토목섬유를 적당한 크기(1.0m×0.3m)로 절단한 후 고정핀을 이용하여 경사판 하단에 고정시키고, 그 토목섬유의 상단은 금속 집게를 이용하여 하중계에 연결시켰다. 그리고, 상자의 아래쪽에 나사를 이용하여 토목섬유를 고정시키거나 흙(모래)을 채운 후 원하는 밀도로 다지고, 하중 재하판(steel plate)를 이용하여 원하는 상재 하중까지 가하였다. 본 연구에서는 시험기의 용량이 10kPa였으므로 실험 시에는 이 크기의 연직 응력까지만 가하였으며, 바닥판의 상승속도는 1.5°/분으로 일정하게 유지하였다. 실험 시작 후, 컴퓨터와 연결된 자료 취득 장치(data logger)를 통해 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 하중계(loadcell)로부터 계측된 변위와 인장력을 측정하여 컴퓨터에 저장하였고, 상부에 놓인 상자가 미끄러지는 순간 시험을 중단하였다. 상부 상자에 급격한 변위가 유발될 때의 경사각을 이용하여 각 접촉면에서의 마찰각을 산정하였다. 즉, 접촉면의 마찰각은 일정한 각속도와 시험 시작시부터 상자가 움직인 시간까지의 차이를 측정하여 산정하였으며, 기계에 부착된 각도기를 통해 그 값을 다시 한번 검증하였다.

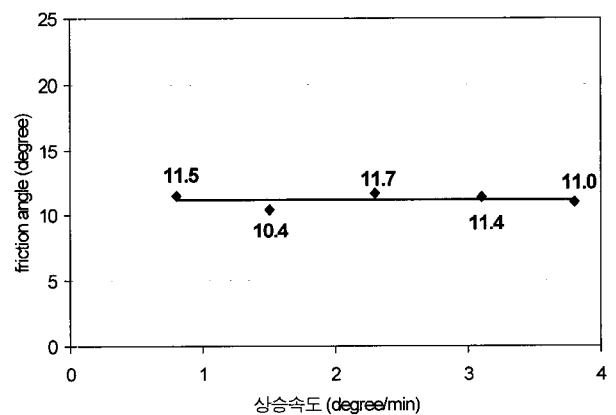


그림 2. 상승속도가 마찰각에 미치는 영향(S-GM/GT, $\sigma_n=5.2\text{kPa}$)

본 실험에 앞서 경사판 상승 속도가 마찰각에 미치는 영향을 알아보기 위하여 S-GM/GT 접촉면에 5.2kPa의 연직응력을 가한 상태에서, 상승속도를 0.8°/분, 1.5°/분, 2.3°/분, 3.1°/분, 3.8°/분으로 변화시켜 가면서 마찰각을 측정하였다. 그림 2에서 확인할 수 있는 바와 같이, 경사판의 상승 속도는 토목섬유/토목섬유 접촉면의 마찰각에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

2.4 시험 항목

본 연구에서는 접촉면의 유형을 크게 세가지, 즉 (1) 토목섬유/토목섬유, (2) 흙/토목섬유, (3) 흙/토목섬유/토목섬유로 나눈 후, 각각에 대하여 실험을 실시하였다. 실험이 실시된 접촉면의 종류와 그 때 가해진 연직 응력의 크기 및 시험 횟수는 표 3에 정리하여 제시하였다. 시험 항목은 일차로 실험시 형성되는 접촉면의 개수에 따라 single interface와 double interface로 나누고, single interface는 다시 토목섬유/토목섬유 접촉면과 흙(모래)/토목섬유의 접촉면으로 분류하였다. 흙/토목섬유 접촉면의 경우, 접촉면을 형성하는 흙(모래)의 무게도 연직 응력 산정시 포함시켰다.

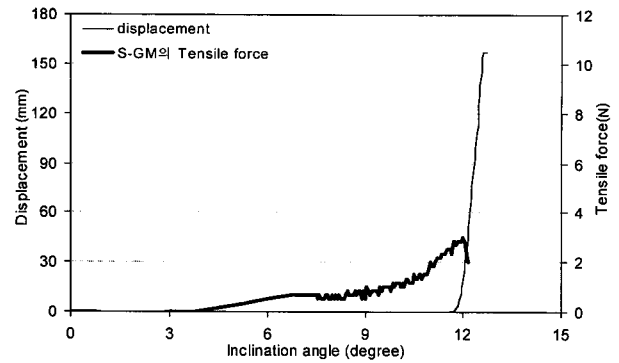
3. 시험결과

3.1 토목섬유/토목섬유

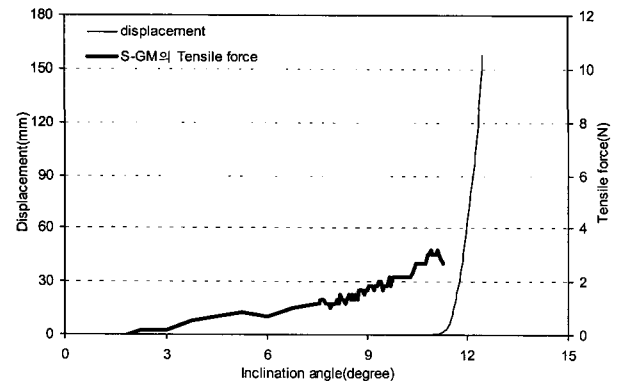
본 연구에서 네 종류의 토목섬유/토목섬유 접촉면을 대상으로 실험을 실시하였다. 그림 3은 본 시험을 통해 측정된 경사각에 따라 변화하는 상자의 변위와 토목섬유에 유발된 인장력을 보여주고 있다.

그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이, 경사판이 일정한 속도로 기울어짐에 따라 경사판에 부착된 GM에 인장력이 유발되기 시작하고(4° 부근), 경사판이 계속적으로 상승함에 따라 인장력은 계속적으로 증가하다가 상부 상자가 미끄러지는 순간(12° 부근)에 최대 인장력이 측

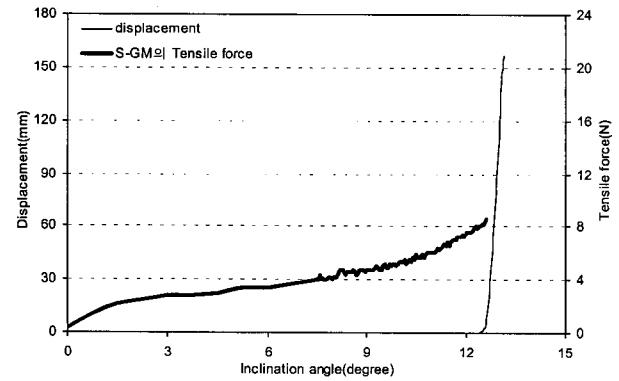
정되었다. 앞서 언급한 바와 같이 본 실험에서는 상부 상자가 미끄러지는 순간 경사판의 경사를 측정하여, 이때의 경사각을 최대 마찰각으로 하였다.



(a) 초기 연직 응력 = 3.90 kPa



(b) 초기 연직 응력 = 6.51 kPa



(c) 초기 연직 응력 = 9.76 kPa

그림 3. 경사각의 변화에 따른 S-GM/GT 접촉면에서의 변위와 인장력

표 3. 시험 항목

Interface	종 류	연직응력 범위 (kPa)	종 류	연직 응력 범위 (kPa)
single interface	GT/S-GM	1.3~9.8 (10종류)	GCL(B)벤토나이트면/S-GM	2.0~9.8 (8종류)
	GCL(A)부직포면/S-GM	2.0~9.8 (8종류)	GCL(A)직포면/S-GM	2.0~9.8 (8종류)
	모래/S-GM	1.4~5.3 (4종류)	모래/GT	1.4~5.3 (4종류)
double interface	모래/GT/S-GM	1.4~5.3 (4종류)	-	-

() : 가해진 연직응력의 횟수

그림 4는 토목섬유/토목섬유 접촉면의 접촉 마찰 특성, 즉 상자가 미끄러지는 순간 연직응력과 전단응력의 관계를 보여주고 있다. 여기서, 기울기는 각 접촉면의 마찰각을 의미하고, 접착력(adhesion)은 없는 것으로 가정하였다. 그림 4의 전단 응력과 연직응력은 초기 연직 응력과 미끄러짐이 일어나는 경사각을 이용하여 구하였다. 즉, 전단 응력은 초기 연직응력과 미끄러짐 경사각의 \sin 값을 의미하여, 연직응력은 초기 연직응력과 미끄러짐 경사각의 \cos 값을 의미한다.

그림 4에 제시된 네 종류의 토목섬유/토목섬유 접촉면에 대한 마찰각 값은 표 4에 다시 정리하여 제시하였다. 그림 4에서도 확인할 수 있는 바와 같이, 본 연구의

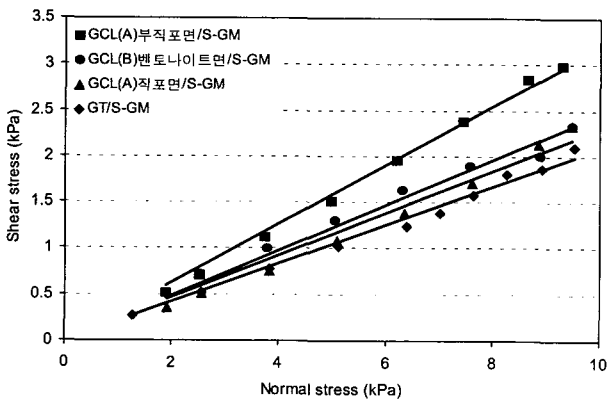


그림 4. 토목섬유/토목섬유 사이의 연직응력과 전단응력 관계

표 4. 토목섬유/토목섬유 접촉면의 마찰각

Interface	마찰각 (°)
GT/S-GM	11.8
GCL(A) 부직포면/S-GM	17.6
GCL(A) 직포면/S-GM	13.0
GCL(B) 벤토나이트면/S-GM	13.8

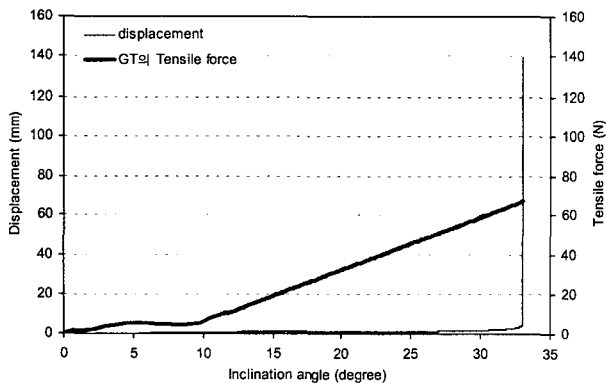
대상인 네 종류의 토목섬유/토목섬유 접촉면 중에서는 GCL(A)부직포면/S-GM에서 가장 큰 마찰각 17.6(°)을 보였으며, 반대로 GT/S-GM 접촉면이 가장 작은 11.8(°) 값을 보였다. 이는 한 현상에 위에 제시된 네 종류의 접촉면(interface) 혹은 경계면이 존재하고 접촉면은 건조 상태일 경우, S-GM/GT 접촉면이 미끄러짐 파괴에 가장 취약할 수 있음을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

하지만 여기서 한가지 특별한 거동이 발견되었다. 즉, 시험 종료 후 경사각이 일정한 상태에서 상자의 변위가 상당히 발생함에 따라, 최대값을 보인 후 감소하였던 인장력이 다시 증가하였다. 본 연구에서는 변위가 일정 크기 이상 발생하면 실험을 종료하였기 때문에 누적 변위와 인장력의 관계를 정확하게 파악할 수는 없었지만, 이는 토목섬유에 유발되는 인장력이 접촉면에서 발생하는 변위와도 밀접하게 관련되어 있다는 사실을 보여주는 것이었다. 따라서, 이에 대한 추가적인 연구가 요구되었으나, 이는 본 연구의 범위를 벗어나는 사항이기 때문에 추후 이에 대한 심도있는 연구를 실시하기로 하였다.

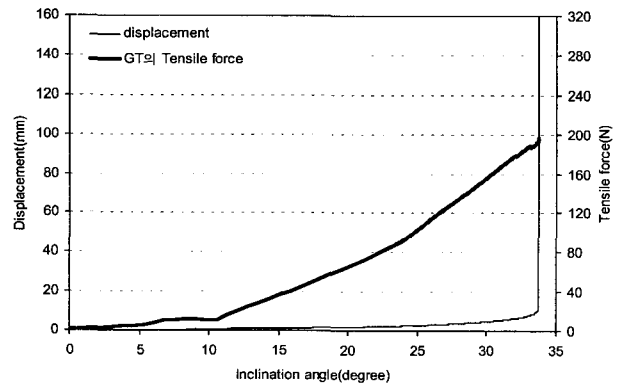
3.2 토목섬유/모래

토목섬유/모래의 접촉면에 대한 실험은 매립지 차수 시스템에서 배수층 및 토목섬유의 보호층으로 흔히 사용되는 모래와 이와 접촉하게 되는 토목섬유 사이의 마찰 특성을 파악하기 위해 실시되었다. 그림 5는 그림 3과 동일하게 모래/GT의 접촉면에서 경사판 시험의 전형적인 결과를 보여주고 있다.

GT/모래의 접촉 마찰특성은 S-GM/GT(그림 3)에서의 거동과 유사한 경향을 보임을 관찰할 수 있었다. 즉, 경사판이 상승하면서 모래와 접촉하고 있는 GT에 인장력



(a) 초기 연직 응력 = 1.38 kPa



(b) 초기 연직 응력 = 3.98 kPa

그림 5. 경사각에 따른 상자의 변위와 GT의 인장력(모래/GT 접촉면)

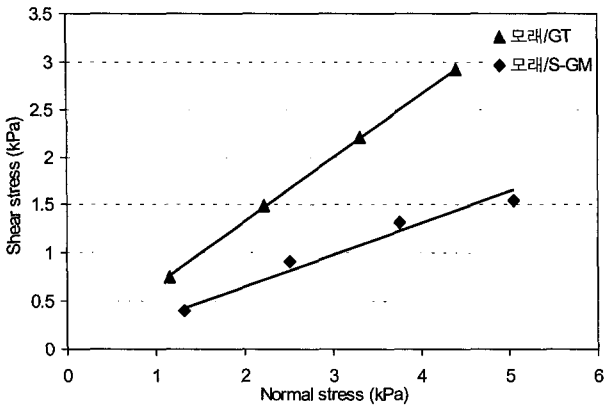


그림 6. 연직응력과 전단응력 관계(모래/토목섬유)

이 유발되고, 그 인장력은 경사판이 상승할수록 점점 증가하였다. 하지만, GT/모래의 접촉면에서는 일단 상자가 움직이기 시작하면 S-GM/GT에 비하여 짧은 시간 동안 훨씬 큰 변위가 발생하였다. 즉, GT/모래의 접촉면에서는 S-GM/GT에 비하여 상부에 놓여진 상자가 순간적 매우 빨리 미끄러져 내려가는 것이 관찰되었다. 따라서, 그림 3에서와 같이 GM에 유발된 최대 인장력을 찾기가 어려워 토목섬유/모래의 접촉면의 경우 상부 상자가 미끄러지는 순간에 토목섬유에 유발되는 인장력을 측정하여, 이를 한계 평형상태에서 유발되는 최대 인장력(peak tensile force)으로 하였다.

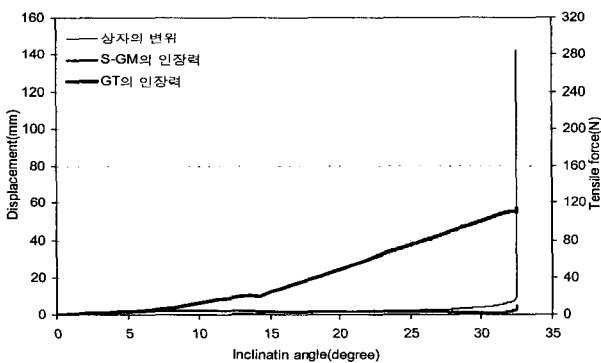
그림 6은 모래/토목섬유 접촉면 중, 실험이 실시된 모래/GT과 모래/S-GM 접촉면에서 미끄러지는 순간의 연직 응력과 전단 응력의 관계, 즉 최대 마찰각(기울기)을 보여주고 있다. 물론 이 때에도 점착력(adhesion)은 없는 것으로 가정하였다. 네 종류 크기의 연직응력에 대하여 실험을 실시한 결과, 모래/S-GM 사이의 마찰각은 18.1°, 모래/GT 사이의 마찰각은 이보다 큰 33.7°로 산정되었다. 모래/GT의 접촉 마찰각이 S-GM/GT의 마찰각(11.8°)

보다 크다는 사실은, 매립지의 사면 차수 시스템 구조, 모래 배수층 혹은 모래 보호층 아래에 일반적으로 GT이 설치되고 다시 그 아래에 S-GM이 설치되는 것을 고려할 때, 두개의 경계면 중에서 S-GM/GT이 잠재적인 파괴면이 될 가능성이 큼을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

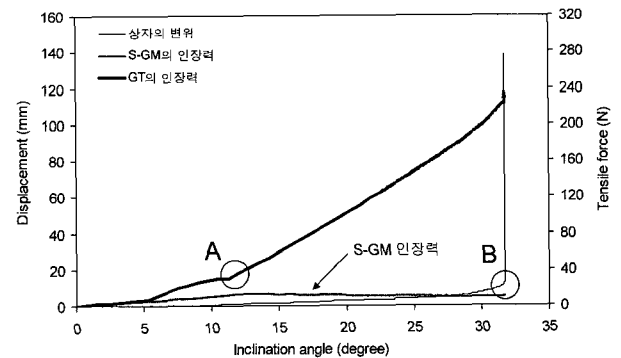
3.3 모래/지오텍스타일(GT)/지오멤브레인(S-GM)

모래/토목섬유/토목섬유 접촉면에 대한 실험은, 실제 매립지에 흔히 나타나는 여러 접촉면을 동시에 모사하기 위하여 수행되었다. 일반적으로 매립시설의 차수 시스템의 배수층으로 모래 혹은 경제적으로 유리한 모래 대체 재료가 사용되고, 그 하부에는 침출수의 유출을 방지하기 위하여 지오멤브레인이 설치된다. 이 때 모래 배수층 아래 설치된 지오멤브레인은 배수층으로 사용된 흙 또는 자갈 그리고 쓰레기 등에 의해 손상을 입을 수 있기 때문에, 일반적으로 둘 사이에 보호용 혹은 완충용 지오텍스타일(GT)을 삽입하여 지오멤브레인(GM)의 손상 및 GM에 과도한 인장력 발생하는 것을 억제하도록 설계된다(정문경 등, 1998).

Briançon 등(2002)도 이와 유사한 실험을 실시하여, 경사각에 따른 상자의 변위, GT의 인장력, GM의 인장력 등을 측정 후, 그 결과로부터 GM/GT의 마찰각을 산정한 바 있다. Briançon 등(2002)은 이러한 시스템, 즉 2개의 접촉면을 동시에 고려하는 시험에서는 각기 다른 두개 접촉면의 마찰 특성에 따라 2개의 점(경사각)에서 변위가 급격하게 증가하는 것을 관찰하고, 그 점들을 이용하여 두 개의 접촉면, S-GM/GT 그리고 모래/GT의 접촉 마찰각을 산정하였다. 본 연구에서도 이와 동일한 방법을 이용하여 2개의 접촉면을 동시에 고려하는 실험



(a) 초기 연직 응력 = 2.68 kPa



(b) 초기 연직 응력 = 5.28 kPa

그림 7. Sand/GT/S-GM 접촉면에서 경사각에 따른 변위와 토목섬유에 유발되는 인장력

결과를 통해 각 접촉면에서의 마찰각을 산정하였다. 그림 7은 모래/GT/S-GM 구조에서의 마찰각의 변화에 따른 상자의 변위, GT와 S-GM에 유발되는 인장력을 보여 주고 있다.

그림 7을 자세히 살펴보면 인장력은 주로 GT에 발생하고, GT 하부에 놓인 S-GM에는 아주 작은 크기의 인장력만 유발됨을 확인할 수 있다. 또한, 두 개의 접촉면을 동시에 고려하는 실험에서 GT에 유발되는 인장력은 모래/GT에서 GT에 걸리는 인장력보다 조금 작게 측정되었으며, S-GM에 걸리는 인장력은 모래/S-GM 접촉면 실험에서 S-GM에 걸리는 인장력보다 훨씬 작게 측정되었다.

본 실험과 같이 2개의 접촉면이 존재하는 경우, S-GM/GT의 마찰각은 다음과 같이 산정하게 된다. 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이, 경사판이 기울어질수록 GT에 유발되는 인장력이 증가하다가, 상부 상자에 약간의 변위가 발생하면서 GT에 유발되는 인장력이 급격히 증가하는 위치(A지점, 그림 7)가 존재한다. 모래/GT/S-GM에서 GT/S-GM 사이의 마찰각은 이 위치의 경사각을 이용하여 산정하게 된다. 이와 유사하게 마지막으로 상자의 변위가 크게 증가하는 부분의 마찰각을 측정하여(B지점, 그림 7), 모래/GT 접촉면의 마찰각을 평가하게 된다. 이렇게 구한 GT/S-GM과 모래/GT의 마찰각을 표 5에 정리하였으며, 또한 한 개의 접촉면, 즉 GT/S-GM과 모래/GT에서 구한 결과를 모래/GT/S-GM에서 구한 마찰각과 비교하기 위해서 표 5에 함께 제시하였다.

표 5에서 확인할 수 있는 바와 같이, single interface인 GT/S-GM 사이의 마찰각은 연직 응력이 1.30~9.76kPa

의 범위일 때 10.9~12.4°(평균 11.6°)로 측정된 반면, double interface인 모래/GT/S-GM 시스템에서 구해진 GT/S-GM 사이의 마찰각은 연직응력 1.38~5.25kPa의 범위에서 12.0~15.8°(평균 13.7°)로 single interface보다 double interface에서 GT/S-GM 사이의 마찰각이 더 크게 측정되었다. 이는 가해진 연직응력의 차이에서 기인하는 것으로 판단되었으며, 동일한 연직응력이 가해진 모래/GT와 모래/GT/S-GM에서는 모래/GT의 마찰각이 각각 33.6°와 32.3°로 비슷한 크기의 값을 보였다. 또한, 모래/GT/S-GM (double interface) 시스템에서 구한 S-GM/GT과 모래/GT 사이의 마찰각은 연직응력이 커질수록 감소하는 경향을 보였다.

모래/GT 사이의 마찰각(single interface)은 연직응력이 1.38~5.28kPa의 범위일 때 33.0~33.4°(평균 33.6°)로 측정되었으며, double interface인 모래/GT/S-GM 시스템에서 구해진 모래/GT 사이의 마찰각은 연직응력 1.38~5.28kPa의 범위일 때 31.3~33.6°(평균 32.3°)로서 비슷하게 나타났다. 표 5를 살펴보면 두개의 실험에서 가해진 연직응력이 동일함을 확인할 수 있는데, 이를 통해 연직응력이 낮은 경우에서도 연직 응력이 마찰각에 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

4. 고찰

4.1 직접 전단 시험(direct shear test) 결과와 비교

본 연구에서는 경사판 시험이 실시된 접촉면과 동일한 접촉면에 대하여 실시된 직접 전단시험(direct shear

표 5. 모래/GT/S-GM 접촉면에서 각 접촉면의 마찰각 및 비교

GT/S-GM		모래/GT		모래/GT/S-GM		
연직응력(kPa)	마찰각(°)	연직응력(kPa)	마찰각(°)	연직응력(kPa)	마찰각(°)	
					S-GM/GT	모래/GT
1.30	11.8	1.38	33.0	1.38	15.8	33.6
2.60	11.6					
3.90	11.5					
5.21	11.3	2.68	34.0	2.68	14.5	32.5
6.51	10.9					
7.16	11.1					
7.81	11.6	3.98	33.7	3.98	12.5	31.3
8.46	12.3					
9.11	11.8					
9.76	12.4	5.28	33.6	5.28	12.0	31.7
평균	11.6	평균	33.6	평균	13.7	32.3

test) 결과와 본 연구의 경사판시험(inclined board test) 결과를 비교하여, 시험기의 종류와 연직 응력이 전단강도 및 마찰각에 미치는 영향을 고찰하였다. 분석에 사용된 직접 전단시험 결과(서민우 등, 2002a; 서민우 등, 2002b)는 본 연구에 적용된 단면적과 동일한 단면적(30cm×30cm)을 갖는 대형 직접전단 시험을 통해 측정된 결과이다. 그림 8은 각 접촉면(interface)에 대한 연직 응력과 전단응력의 관계를 보여주고 있으며, 그림 9에서는 연직 응력에 따른 최대 마찰각을 비교하고 있다. 그림 8에서 점선은 경사판 시험에 의해 구해진 결과를 이용하여 더 큰 연직응력 범위, 즉 경사판 시험이 실시되지 아니한 연직 응력 범위까지 확대하여 외삽한 결과를 가리킨다.

일반적으로 경사판 시험이 접촉 마찰각 혹은 접촉 전단강도를 비교적 정확하게 평가한다는 점을 고려할 때 (Jones와 Dixon, 1998a), 그림 8의 비교 결과는 직접 전단시험 결과를 이용하여 시험이 실시되지 아니한 낮은 연직응력에서의 강도를 예측하면-본 연구에서는 30kPa 이하 전단 강도를 과대 평가할 가능성이 높기 때문에, 낮은 응력에서의 전단강도를 정확하게 측정하기 위해서는 꼭 경사판 시험을 실시해야함을 보여주고 있다. 또한 그림 8을 통해 기존의 연구자들에 의해서 제기되었

던 파괴 포락선 문제(Jones와 Dixon, 1988b; Gilbert 등, 1996; Stark 등, 1996), 즉 낮은 연직응력에서는 파괴 포락선이 곡선(curve) 모습을 보이기 때문에 직접전단 시험 결과를 가지고 모든 연직응력 상태에서의 전단강도를 선형으로 가정하여 예측하면 안된다는 사실 또한 확인할 수 있었다.

동시에 낮은 연직응력에서 행해진 경사판 시험결과를 높은 연직응력까지 외삽하여 예측한 곡선과 그 영역에서 행해진 전단강도를 비교해보면, 두 가지 시험법의 강도가 크게 차이가 남을 확인할 수 있다(그림 8). 즉, 실험이 수행되지 아니한 연직응력 영역의 값을 다른 연직응력 영역에서 얻어진 결과에서 유추하여 예상할 경우 매우 큰 오차를 발생시킬 수 있으므로, 가능한 현장에서 예상되는 연직응력의 범위를 정확히 평가하여 이에 알맞은 시험법을 선정하여 그 영역에서 실험을 실시하는 것이 필요할 것이다. 이러한 사항은 일반 지반공학 적 관점에서도 중요하게 강조되는 부분이기도 하다.

표 6은 시험 방법에 따른 마찰각과 점착력을 보여주고 있는데, 그림 8에서와 같이 경사판 시험에서는 더 큰 마찰각을, 직접 전단실험에서는 작은 마찰각과 큰 점착력(adhesion)이 측정되었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 직접전단시험 결과를 가지고 시험이 수행되지 않은 작

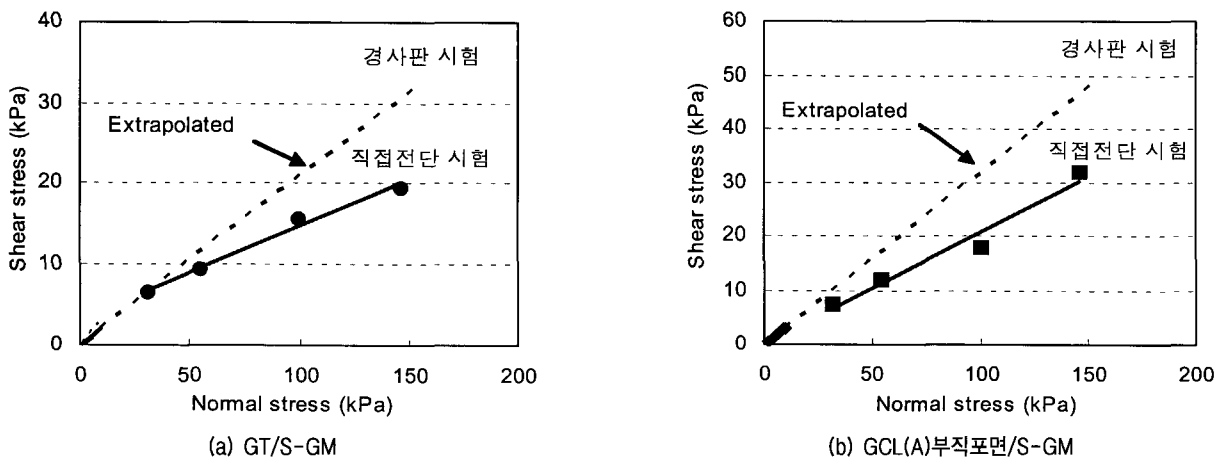
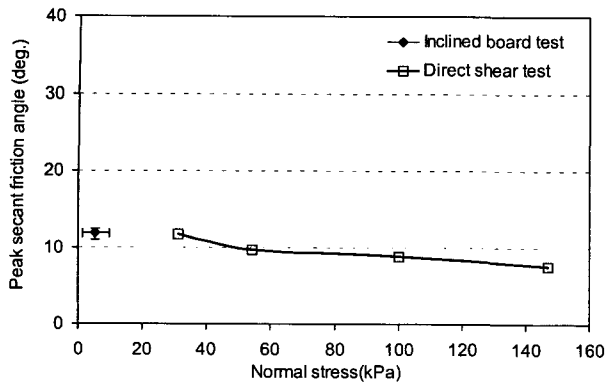


그림 8. 직접전단 시험과 경사판 시험 결과 비교(연직 응력과 전단 강도의 관계)

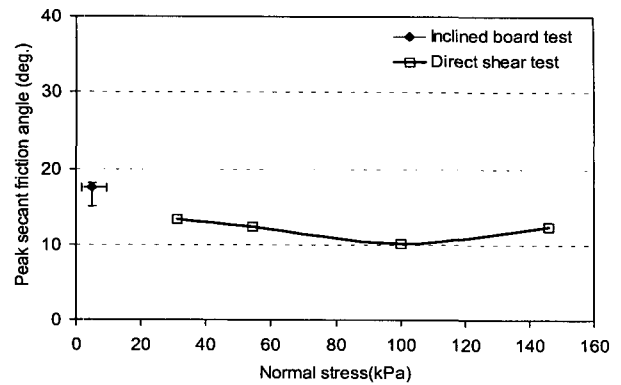
표 6. 직접전단 시험과 경사판 시험의 마찰각 비교

Interface	Direct shear test	Inclined board test
GT/S-GM	6.6°(3.1kPa)	11.8°(0kPa)
GCL(A)직포면/S-GM	6.7°(10.0kPa)	13.0°(0kPa)
GCL(A)부직포면/S-GM	11.6°(0.2kPa)	17.6°(0kPa)
GCL(B)벤토나이트면/S-GM	13.4°(5.1kPa)	13.8°(0kPa)

() : 점착력(adhesion)



(a) GT/S-GM



(b) GCL(A)부직포면/S-GM

그림 9. 직접전단 시험과 경사판 시험 결과 비교(최대 secant 마찰각)

은 연직응력 범위($\leq 30\text{kPa}$)의 값을 예측할 때, 큰 점착력으로 인해 실제보다 전단강도를 과대평가할 가능성이 있음을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

그림 9에서 x축, 즉 연직 응력은 경사판 시험의 경우 미끄러지는 순간의 연직 응력을, 직접전단 시험의 경우에는 초기에 가해진 연직 응력을 의미한다. 그리고, 직접전단 시험에서의 마찰각은 최대 secant 마찰각, 즉 최대 전단 강도를 보이는 지점에서의 강도와 그 때 가해진 연직응력 비의 \tan^{-1} 값을 의미한다(식 (2)).

$$\phi_{secant} = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_{peak}}{\sigma_n}\right) \quad (2)$$

그림 9를 통해서도 낮은 연직 응력에서 더 큰 secant 마찰각(점착력을 0으로 가정했을 때의 값)을 가짐을 확인할 수 있었다. 즉, 연직 응력이 증가함에 따라 secant 마찰각은 감소하였으며, 따라서 가해진 연직 응력이 작은 inclined board 실험에서 가장 큰 secant 마찰각을 보였다. 이는 최대 마찰각 혹은 한계 경사각을 평가하기 위한 실험을 실시하고자 할 때에는 실제 현장의 하중 조건을 정확하게 평가하여 실험시 이를 고려하여야 하며, Lopes 등(2001)이 제안한 바와 같이 현장 상황-하중 조건-이 적절한 실험법을 선정하기(select) 위한 중요한

요인임을 보여주는 것이다.

Wasti와 Özdüzgün(2001) 역시 경사판 시험을 통해 이와 유사한 비교 결과를 도출하고, 설계정수 산정을 위한 실험시 현장의 하중조건을 꼭 고려할 것을 강조하고, 현장의 하중 조건이 비교적 작은 경우에는 경사판 시험을 연직 응력이 큰 경우에는 직접전단 시험을 실시할 것을 제안하였다.

4.2 토목섬유에 유발되는 최대 인장력

앞서 언급했듯이 본 실험에서는 LVDT와 하중계를 설치하여, 경사판의 한쪽 끝이 상승함에 따라 상부 상자에 유발되는 변위와 경사판에 고정된 토목섬유에 발생하는 인장력을 측정하였다. 표 7에 제시된 인장력은 접촉면에서 상자가 움직이기 시작하는 순간 유발되는 인장력을 측정하여 이를 한계 평형상태에서의 최대 인장력으로 가정하고, 이들 값들을 측정한 후 정리한 것이다. 측정된 인장력은 미끄러짐 파괴가 발생하는 순간에 토목섬유에 유발되는 최대 인장력을 의미하는 것으로, 본 연구에서는 기존에 널리 사용되었던 한계 평형법을 이용하여 예측되었던 인장력과의 비교를 통해 한계 평형법에 근거한 해석의 적절성을 검증하고자 하였다.

표 7. 토목섬유에 유발되는 최대 인장력

Interface	연직응력 (kPa)	Peak tensile force (N)
GT/S-GM	1.3 - 9.8	0.8 - 8.1
GCL(A) 부직포면/S-GM	2.0 - 9.8	18.3 - 41.4
GCL(A) 직포면/S-GM	2.0 - 9.8	16.4 - 28.8
GCL(B) 벤토나이트면/S-GM	2.0 - 9.8	7.7 - 24.0
모래/S-GM	1.4 - 5.3	20.3 - 29.0
모래/GT	1.4 - 5.3	67.2 - 282.9

토목섬유에 유발되는 최대 인장력은 접촉면의 마찰각과 유발되는 최대 인장력의 비교를 통해, 접촉면의 마찰각이 클수록 하부 토목섬유에 유발되는 최대 인장력도 크게 측정됨을 확인하였다. 토목섬유/토목섬유 접촉면에서는 GCL(A)부직포/S-GM 접촉면에서 마찰각(17.6°)이 가장 크게 측정되었는데, 역시 동일하게 이 접촉면에서 가장 큰 인장력(18.3~41.4N)이 측정되었다. 모래/토목섬유 접촉면(모래/S-GM(18.1°), 모래/GT(33.7°))에서도 역시 마찰각이 클수록 토목섬유에 유발되는 인장력이 큼을 확인할 수 있었다.

그림 10은 연직응력에 따른 토목섬유/토목섬유 접촉면과 흙/토목섬유 접촉면에 유발되는 최대 인장력을 보여주고 있다. 그림 10에서 볼 수 있듯이, 흙/토목섬유 접촉면에서는 연직응력이 증가할수록 토목섬유에 유발되는 인장력도 증가하였다.

본 연구에서는 실험을 통해 측정된 최대 인장력과 매립지에 설치된 토목섬유에 유발되는 인장력을 예측하기 위해 널리 이용되는 식을 통해 산정된 인장력을 서로 비교하였다. 이광열(1997)은 다음과 같은 과정을 통해 토목섬유에 유발되는 인장력을 산정한 후, 제방의 높이와 사면의 경사, 매립 폐기물의 종류 그리고 경사각에 따른 토목섬유에 유발되는 인장력을 평가한 바 있는데, 그 식은 다음의 순서와 같다.

먼저 차수 구조를 구성하는 하나의 토목섬유만을 고려할 때(그림 10), 그 토목섬유의 상부층 표면에서는 상재 하중인 매립 폐기물에 의한 전단력(F_{am})이 작용하게 되며 하부층 표면에서는 전단저항력(F_{bm})이 작용하게 된다(이광열, 1997). 이 전단력(F_{am})과 전단 저항력(F_{bm})은 인접한 재료간의 접촉 마찰각(interface friction angle)과 주응력에 의한 관계식으로서 나타낼 수 있는데 이는

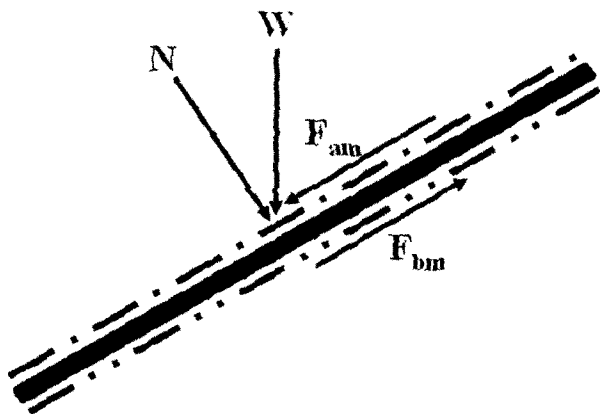


그림 10. 하나의 토목섬유만을 고려한 차수구조(이광열, 1997)

다음과 같다.

$$F_{am} = N \tan(\delta_{am}) \quad (3)$$

$$F_{bm} = N \tan(\delta_{bm}) \quad (4)$$

여기서, δ_{am} = 상부층 접촉재 사이의 마찰각, δ_{bm} = 하부층 접촉재 사이의 마찰각, N = 연직 하중(N)

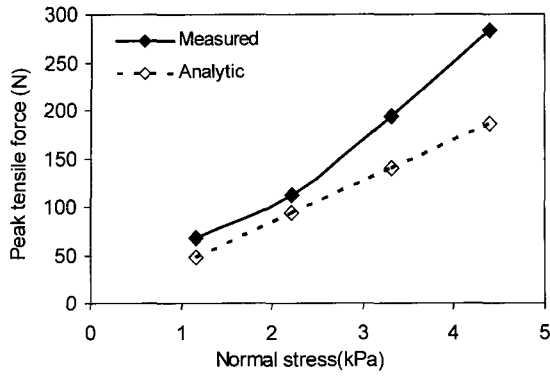
부재에 작용하여 인장 파괴를 유발할 수 있는 인장력은 식 (3)과 식 (4) 사이의 관계에서 알 수 있다. 부재에 인장파괴가 발생하는 조건은 결과적으로 $F_{am} > F_{bm}$ 이다. 따라서 부재에 작용하는 인장력은 다음의 식에 의해 구하게 된다.

$$F_{act} = F_{am} - F_{bm} \quad (5)$$

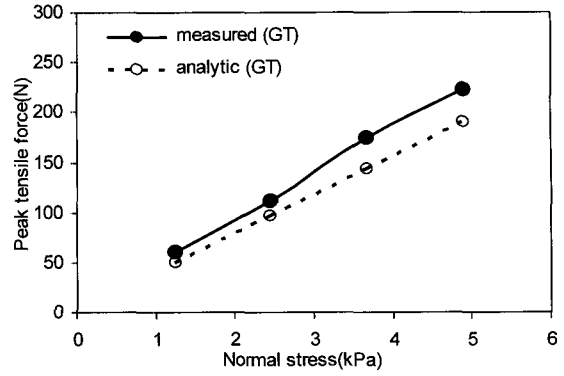
그림 11은 본 실험을 통해 측정된 지오텍스타일(GT)의 인장력과 해석적 방법을 통해 산정된 인장력을 비교하여 보여주고 있다. 이때 연직응력은 상부상자가 미끄러지는 순간의 연직응력을 의미한다. 모래/GT 접촉면의 경우, 한계평형법을 이용하여 산정한 GT에 유발되는 인장력이 실험치보다 16.0~34.3%(평균 26.5%) 작게 나타났다으며, double interface 모래/GT/S-GM에서는 GT에 유발되는 인장력의 경우 해석치가 실험치보다 13.2~17.8%(평균 15.8%) 정도 작게 산정되었다. 즉, 측정된 값과 비교를 했을 때, double interface에서 더 근접한 값이 산정됨을 확인할 수 있었다. 전체적으로 보았을 때 한계평형법에 근거한 방법도 비교적 높은 정확도를 가지는 값을 예측함을 확인할 수 있었다.

해석치와 측정치의 비교를 통해서 한계 평형법에 근거한 해석적 방법은, 실제로 현장에서 미끄럼 파괴가 발생하기 이전에 토목섬유에 유발될 수 있는 최대 인장력보다는 조금 작은 값을 제공함을 확인할 수 있었다. 따라서, 설계자가 한계 평형법에 근거하여 토목섬유에 유발되는 인장력을 산정할 때에는, 한계평형법이 실제 발생할 수 있는 값보다 작은 값을 제공한다는 사실을 염두에 두어야 한다. 본 연구를 통해 확인된 토목섬유에 유발되는 최대 인장력은 해석적 방법에 의한 값의 1.2~1.4배 범위에 존재하였다.

한편, 본 연구에서 구한 토목섬유에 유발되는 인장력 측정치는 각 접촉면의 한계 경사각에서 최대로 유발될 수 있는 인장력을 산정한 결과이기 때문에, 만약에 설계 대상의 경사가 접촉면의 한계 경사각(최대 마찰각)보다



(a) 모래/GT에서 GT



(b) 모래/GT/S-GM에서 GT

그림 11. 파괴시 토목섬유에 유발되는 최대 인장력의 해석치와 측정치 비교

작아서 경계면에서 비교적 작은 상대변위가 예상되는 경우는 본 연구에서 측정된 인장력 값보다 작은 값이 나타날 수도 있다.

4.3 Geotextile의 Geomembrane 보호 효과

지오멤브레인(GM)과 점토(clay liner)가 복합 차수층을 구성하는 경우, 점토 차수층 위에 놓인 지오멤브레인 상부에 흔히 지오텍스타일(GT)이 포설된다. 이는 지오멤브레인 상부에 두터운 부직포 지오텍스타일을 설치함으로써, 예상치 못한 충격이나 물질에 의해 지오멤브레인(GM)이 손상될 가능성을 줄이고, 상재 하중에 의해 과도한 인장력이 유발되는 것을 막으며, 온도 변화에 의해 GM이 수축하거나 늘어지는 것을 막기 위함이다. 이러한 GM에 대한 GT의 보호 효과는 Kanou 등(1997)이 실시한 현장 실험을 통해서도 확인할 수 있는데, Kanou 등(1997)은 쓰레기의 downdrag에 의해 GM에 유발되는 인장력을 측정하여 GT가 있는 경우 그 인장력이 상당히 감소됨을 하중계를 통해 정량적으로 확

인하였다.

본 실험에서는 S-GM 상부에 GT의 포설 유무가 S-GM에 유발되는 인장력에 어떤 영향을 미치는지를 정량적으로 확인하기 위해, 모래/S-GM 접촉면과 모래/GT/S-GM 접촉면에서 S-GM에 유발되는 인장력을 측정하여 비교하였다. 그림 12는 GT의 유무에 따른 S-GM에 유발되는 인장력의 차이를 나타낸 것이다. 그림 12를 통해 모래/GT/S-GM 시스템에서 S-GM에 유발되는 인장력이 GT의 보호 효과로 인해 모래/S-GM 접촉면에서 유발되는 인장력보다 작게 측정됨을 확인할 수 있었다.

그림 13은 single interface와 double interface 시스템에서 각각의 연직응력에 따라 S-GM에 유발되는 인장력을 비교하여 나타낸 것이다.

모래/S-GM 접촉면에서 유발된 최대 인장력은 20.3~29.0(N)로 측정되었고, 모래/GT/S-GM 접촉면에서 S-GM에 유발된 인장력은 5.2~10.4(N)였다. 즉, 본 연구를 통해 모래와 S-GM 사이에 GT를 설치함으로써 S-GM에 유발되는 인장력을 58.7~77.8% 정도 감소시킬 수 있음을 정량적으로 확인하였으며, 이는 보호층(모래)/GT/S-GM/점

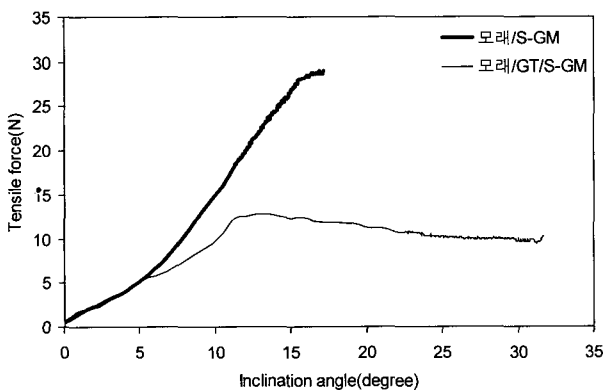


그림 12. S-GM에 유발되는 인장력 ($\sigma_n=5.28\text{kPa}$)

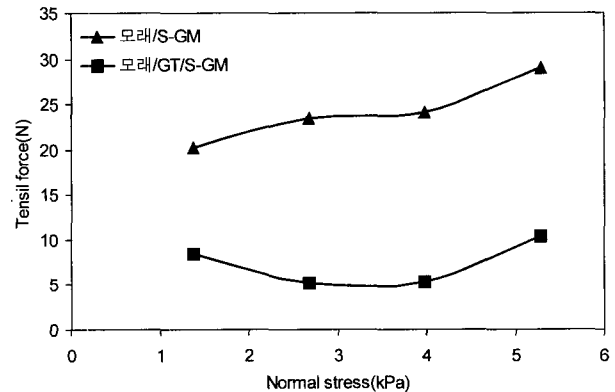


그림 13. GT 유무에 따른 S-GM 인장력 변화

토 차수 시스템에서 GT은 S-GM에 발생할 손상(damage)을 방지하는 기능을 할 뿐만 아니라, S-GM에 유발되는 인장력을 감소시키는데에도 매우 효과적임을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

5. 결론

경사판 시험(inclined board test)을 통해, 매립지의 차수 및 최종 덮개 시스템에 흔히 나타나는 토목섬유/토목섬유, 모래/토목섬유, 모래/토목섬유/토목섬유에서의 접촉 마찰특성을 평가하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 토목섬유/토목섬유에서는 경사판이 상승함에 따라 경사판에 고정된 토목섬유에 인장력이 유발되기 시작하였으며, 이 인장력은 경사판이 상승함에 따라 계속적으로 증가하다가 상부 상자가 미끄러지는 순간을 전후로 하여 최대값을 나타낸 후 감소하였다. 그리고, 이 때의 경사각을 측정하여 토목섬유/토목섬유 사이의 접촉 마찰각으로 산정하였다.
- (2) 흙/토목섬유에서의 접촉 마찰특성을 알아보기 위해, 모래/GT과 모래/S-GM에 대한 실험을 실시하였다. 모래/토목섬유 사이의 접촉 마찰특성은 대체로 토목섬유/토목섬유 사이의 접촉 마찰특성과 유사한 경향을 보였지만, 경사판 위에 놓여있던 상부 상자가 토목섬유/토목섬유에서와 비교했을 때 매우 짧은 시간에 빨리 미끄러지는 경향을 보였다.
- (3) 경사판 시험을 통해 모래/GT 사이의 마찰각은 33.7°, S-GM/GT의 마찰각은 11.8°임을 확인하였다. 일반적으로 매립지의 차수층이 모래/GT/S-GM/GCL 또는 clay 순서로 설치됨을 고려할 때, 모래/GT의 마찰각이 S-GM/GT 사이의 마찰각보다 크므로 이런 순서로 차수 혹은 덮개 시스템이 구성되는 경우에는 S-GM/GT이 잠재적인 파괴면이 될 가능성이 매우 높다고 판단된다.
- (4) 실제 매립지에서는 다양한 접촉면이 동시에 존재함을 고려하여, 모래/GT/S-GM 접촉면에 대한 실험을 실시하여, 경사각의 변화에 따른 상자의 변위와 각 토목섬유(GT, S-GM)에 유발되는 인장력을 측정하였다. 이를 통해 구한 모래/GT, GT/S-GM의 마찰각은 이전에 single interface에 대하여 측정된 결과와 비교하였으며, double interface 즉 모래/GT/S-GM 접촉면에서 구한 S-GM/GT과 모래/GT 사이 마찰각은

연직응력이 커질수록 마찰각이 감소하는 경향을 보였다.

- (5) 일반적으로 경사판 시험이 접촉 마찰각 혹은 접촉 전단강도를 비교적 정확하게 평가한다는 점을 고려하여 직접전단시험 결과와 경사판 시험결과를 비교할 때, 직접 전단시험 결과를 이용하여 시험이 실시되지 아니한 낮은 연직응력에서의 강도를 예측하면 (본 연구에서는 30kPa 이하) 전단 강도를 과대 평가할 가능성이 높음을 확인할 수 있었다. 동시에 낮은 연직응력에서 행해진 경사판 시험결과를 높은 연직응력까지 외삽하여 예측한 곡선과 그 영역에서 행해진 전단강도를 비교해보면, 두 가지 시험법의 강도가 크게 차이가 남을 확인하였다. 이들 비교결과를 통해 실험이 실시되지 아니한 연직응력 영역의 값을 다른 실험에서 실시한 후 연직응력 영역에서 얻어진 결과를 외삽하여 예측할 경우 매우 큰 오차를 발생시킬 수 있으므로, 가능한 현장에서 예상되는 연직응력의 범위를 정확히 평가하여 이에 알맞은 시험법을 선정한 후, 해당 연직응력 수준에서 실험을 실시하는 것이 중요함을 확인하였다.
- (6) 토목섬유에 유발되는 최대 인장력과 마찰각을 비교하여, 토목섬유 사이의 접촉 마찰각이 클수록 유발되는 최대 인장력도 크게 측정됨을 확인하였다. 또한 한계 평형법에 근거한 해석치와 본 연구에서 측정된 최대 인장력을 비교하여, 본 연구에 의해 측정된 값이 기존에 널리 사용되는 해석적 방법을 통해 산정된 인장력보다 1.2~1.4배의 값을 보이는 것을 확인하였다. 하지만, 본 연구에서 측정된 최대 인장력은 접촉면의 마찰각이, 즉 한계 경사각이 현장의 경사보다 작아서 과도한 변위가 예상되는 경우에 해당되는 값으로서, 만약 현장의 경사가 한계경사보다 작은 경우에는 본 연구에서 측정된 값보다 작은 인장력이 유발될 수도 있다.
- (7) 본 연구에서는 모래/S-GM 접촉면에서 S-GM에 유발되는 인장력과 모래/GT/S-GM 접촉면에서 S-GM에 유발되는 인장력을 비교하였다. 모래/S-GM 접촉면에서 유발된 인장력은 20.3~29.0(N)로 측정되었으나, 모래/GT/S-GM 접촉면에서 S-GM에 유발된 인장력은 이보다 매우 작은 5.2~10.4(N)로 측정되었다. 이를 통해 매립지에서 일반적으로 흔히 발견되는 차수 시스템 구조, 즉 차수층 보호층/GT/S-GM/점토 차수 시스템에서 GT이 S-GM을 보호하는 기능뿐만 아

니라, S-GM에 유발되는 인장력도 상당히 감소시키는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 서민우, 김동진, 박준범, 박인준(2002a), “토목섬유 점토 차수제(GCL)와 지오멤브레인(GM)의 접촉 전단강도 평가”, 한국지반공학회논문집, 제18권, 제4호, pp.137-146.
2. 서민우, 박준범, 김운영(2002b), “지오멤브레인/지오택스타일의 접촉 전단강도 평가”, 한국지반공학회논문집, 제18권, 제1호, pp.79-89.
3. 이광열(1997), “폐기물매립지 사면차수구조의 HDPE 인장강도에 관한 연구”, 한국폐기물학회지, 제14권, 제7호, pp.832-840.
4. 정문경, 정하익, 이용수, 최희철, 우제윤(1998), 폐기물 매립시설의 설계·시공 기술에 관한 연구, 한국건설기술연구원, 건설기술연구원 연구보고서, pp.3-32.
5. Briançon, L., Girard, H. and Poulain, D.(2002), “Slope stability of lining systems - experimental modeling of friction at geosynthetic interfaces”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.20, pp.147-172.
6. Gilbert, R.B., Fernandez, F. and Horsfield, D.W.(1996), “Shear strength of reinforced geosynthetic clay liner”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.122, No.4, pp.259-266.
7. Izgin, M. and Wasti, Y.(1998), “Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.16, pp.207-219.
8. Jones, D.R.V. and Dixon, N.(1998a), “The stability of geosynthetic landfill lining systems, Geotechnical Engineering of Landfill”, *Proceedings of the Symposium at the Nottingham Trent University*, Department of civil and structural engineering on 24 September, pp.99-117.
9. Jones, D.R.V. and Dixon, N.(1998b), “Shear strength properties of geomembrane / geotextile interfaces”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.16, pp.45-71.
10. Kanou, H., Doi, Y, Imaizumi, S. and Tsuboi, M.(1997), “Evaluation of geomembrane stress on side slope caused by settlement of waste”, *Proceedings Sardinia 97*, Sixth Landfill Symposium, Italy, pp.525-534.
11. Koutsourais, M.M., Sprague, C.J. and Pucetas, R.C.(1991), “Interfacial friction study of cap and liner components for landfill design”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.10, pp.531-548.
12. Lopes, P.C., Lopes, M.L. and Lopes, M.P.(2001), “Shear behaviour of geosynthetics in the inclined plane test-influence of soil particle size and geosynthetic structure”, *Geosynthetics International*, Vol.8, No.4, pp.327-342.
13. Mitchell, J.K., Seed, R.B. and Seed, H.B.(1990), “Kettleman Hills waste landfill slope failure. I : Liner system properties”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.116, No.4, pp.647-668.
14. Stark, T.D. and Poeppel, A.R.(1994), “Landfill liner interface strengths from torsional ring shear tests”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.120, No.3, pp.597-615.
15. Stark, T.D., Williamson, T.A. and Eid, H.T.(1996), “HDPE Geomembrane / geotextile interface shear strength”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.3, pp.197-203.
16. Wasti, Y. and Özdüzgün, Z.N.(2001), “Geomembrane-geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.19, pp.45-57.

(접수일자 2003. 8. 19, 심사완료일 2003. 11. 21)