

표면 거칠기 정도가 접촉면 전단력에 미치는 영향 The Influence of Surface Roughness on Interface Strength

이석원, Seok-Won Lee

한국건설기술연구원 지하구조물그룹 선임연구원, Senior Researcher, Underground Structure Research Group, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : This paper summarizes the results of a study which uses the recently developed Optical Profile Microscopy technique (Dove and Frost, 1996) as the basis for investigating the role of geomembrane surface roughness on the shear strength of geomembrane/geotextile interfaces. The results show that interface friction can be quantitatively related to the surface roughness of the geomembrane. The peak and residual interface strengths increase dramatically through the use of textured geomembranes as opposed to smooth geomembranes. For the smooth geomembranes, the sliding of the geotextile is the main shear mechanism. For the textured geomembranes, the peak interface strength is mainly mobilized through the micro-texture of the geomembrane, however, the residual interface strength is primarily attributed to macro scale surface roughness which pulls out and breaks the filaments from the geotextile. The results of this study can be extended to the other interfaces such as joints in rock mass, and also can be used to provide a quantitative framework that can lead to a significantly improved basis for the selection and design of geotextiles and geomembranes in direct contact.

Key Words : Surface roughness, Interface strength, Geomembrane, Geotextile, Direct shear test, Digital image analysis,

1. 서론

최근 들어 토목섬유 특히 지오멤브레인, 지오텍스타일, 지오그리드와 같은 토목재료들은 흙 또는 암석과 병행하여 많은 토목공사에서 쓰여지고 있으며, 그것들의 사용량은 계속 증가추세에 있다. 따라서 이러한 토목재료의 사용은 토목재료간에 접촉면(interface)을 형성하게 되고, 이 면을 따라 미끄러짐 등 상대 변위가 발생하게 된다. 일반적으로 알려진 바에 의하면 이러한 접촉면에서의 전단강도는 주변 지반의 자체 전단 강도보다 작아 주로 이곳에 의하여 설계가 지배된다고 알려져 있다(Paikowsky et al., 1995; Stark et al., 1996).

전술된 접촉면이란 여러 가지 형태로 분류될 수 있으며, 예를 들면 암반내 절리면, 토목섬유와 지반과의 접촉면, 토목섬유간의 접촉면, 특히 흙은 입상체이므로 흙과 흙 사이의 접촉도 하나의 접촉면을 형성하여 전단강도가 발휘된다고 할 수 있다. 요즈음 이러한 개념에서 사용되어 지는 수치해석 기법이 바로 개별요소법(DEM; Distinct Element Method)이라 할 수 있다. 즉, 대상지반을 연속체로 보지 않고 개개의 강성 입자로 생각하여, 각 입자간의 접촉면에서 전단력이 발생한다는 것이다.

따라서 접촉면을 구성하는 토목재료의 종류에 따라서 접촉면 전단력에 영향을 미치는 요소들이 다르므로, 한 접촉면의 전단력을 산정하고자 할 경우에는 우선적으로 구성물질의 특성 파악이 가장 중요하

다고 하겠다. 예를 들어 흙이 하나의 토목재료로 사용되어진 접촉면이라 한다면, 흙의 angularity, D_{50} (mean grain size), 단위중량, 균등계수, soil structure, 표면 거칠기 등이 접촉면 전단력에 영향을 미치는 요소라 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 여러 인자들 중에서 표면 거칠기 정도(surface roughness)가 접촉면 전단력에 미치는 영향을 조사하고자, 접촉면 중 한가지 대상으로 지오멤브레인과 지오텍스타일로 구성된 접촉면에서 지오멤브레인의 표면 거칠기 정도가 접촉면 전단력에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구를 수행하기 위하여 우선적으로 지오멤브레인 표면의 거칠기 정도를 정량화 하였으며, 고안된 직접전단 시험기를 사용하여 그에 따른 접촉면 전단력을 측정함으로써, 표면 거칠기 정도와 접촉면 전단력과의 관계를 유추할 수 있었다. 이와 더불어 지오멤브레인과 지오텍스타일 접촉면에서의 전단 메카니즘에 대한 규명을 얻을 수 있었다. 추후 이 연구는 모래와 지오멤브레인의 접촉면 또한 암반내 절리면에서 절리면의 거칠기 정도에 따른 접촉면 전단력의 변화 등으로 확장될 수 있으며, 실무에서 지오멤브레인과 지오텍스타일의 접촉면 설계 및 종류의 선택에 있어서 정량적으로 도움이 될 수 있으리라 사료된다.

2. 시험 방법

2.1 표면 거칠기 정도의 정량화

본 연구에서는 지오멤브레인의 표면 거칠기 정도를 측정하기 위하여 Digital Image Analysis(Frost 와 Kuo, 1996)를 이용한 Optical Profile Microscopy(OPM) 방법(Dove 와 Frost, 1996)을 사용하였다. 그림 1에서와 같이 120° 각도로 떨어져 있는 3개의 시편(coupon)을 만들어, 그림 2에서 보여진 바와 같이 응고되지 않은 석고가 들어져있는 플라스틱 그릇에 시편을 수직으로 삽입시켜 응고시킨 후, 바닥면을 샌드 페이퍼 등을 사용하여 시편이 잘 보일 수 있도록 표면 처리를 한 후, 대상 표면의 형상을 CCD 카메라로 촬영하여, 컴퓨터와 연결되어 있는 Digital Image Analysis 시스템을 이용하여 거칠기 정도를 정량화 하였다. 자세한 표면 거칠기 측정 방법은 이 석원(1999 a, b)의 논문에 나타내어져 있다.

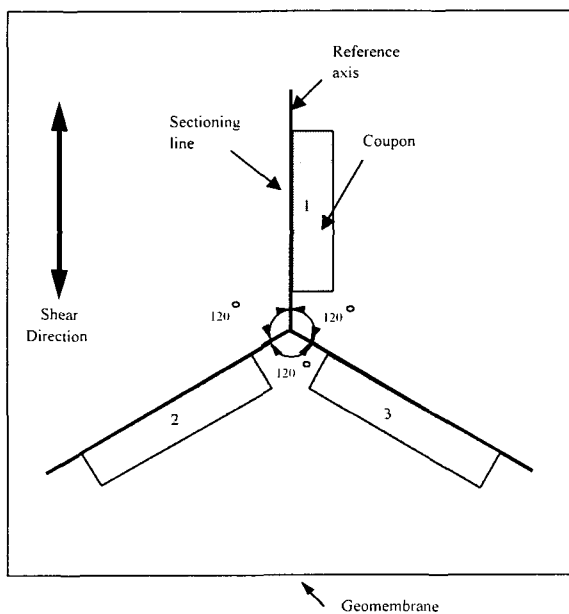


그림 1. 지오멤브레인 시편 선택 방법

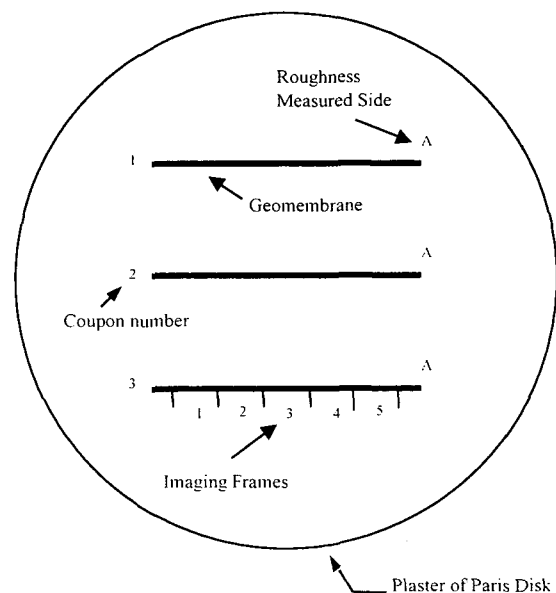


그림 2. 거칠기 측정을 위한 시료

이렇게 측정된 표면 형상(surface profile)을 정량화 할 수 있는 매개변수들은 현재까지 상당히 많이 제안되었으나(Ward, 1982), 본 연구에서는 검토결과 다음과 같이 2차원적인 형상 거칠기 매개변수(profile roughness parameter), R_L 과 3차원적인 표면 거칠기 매개변수(surface roughness parameter), R_S 를 사용하여 다음과 같이 지오멤브레인의 표면 거칠기 정도를 정량화 하였다.

$$R_L = \frac{L}{L_0} \quad (1)$$

여기에서, L = 실제 형상의 길이

L_0 = 형상이 투영되었을 때의 직선 길이

$$R_S = \frac{A_S}{A_0} \quad (2)$$

여기에서, A_S = 실제 표면의 면적

A_0 = 실제 표면이 투영되었을 때의 면적

여기에서 R_S 값은 이론적으로 완전히 평면인 경우의 값 1.0부터 무한대까지 변화할 수 있으나, 실제적으로 지오멤브레인을 사용하여 측정하여본 결과, 대략 스무드 지오멤브레인의 경우인 1.05부터 매우 심한 돌기형 지오멤브레인의 1.90 범위에서 변화하였다.

2.2 지오멤브레인 시료 준비

본 연구에서는 다음과 같이 현재 사용되고 있는 지오멤브레인의 표면 거칠기 정도의 범위를 포함할 수 있도록, 한 개의 스무드 지오멤브레인과 3개의 돌기형(textured) HDPE 지오멤브레인을 사용하였다.

- National Seal Co. 제품인 Dura Seal HD : 스무드(smooth) 지오멤브레인
- GSE Lining Technology, Inc. 제품인 Friction Flex : 돌기형(textured) 지오멤브레인
- National Seal Co. 제품인 Friction Seal HD : 돌기형(textured) 지오멤브레인
- Poly-Flex, Inc. 제품인 Poly-Flex Textured HDPE : 돌기형(textured) 지오멤브레인

그림 3에서 나타낸 바와 같이 지오멤브레인은 6.4mm 두께와 102mm 크기의 정사각형 모양의 알루미늄 프레임에 스프레이 epoxy를 사용하여 감싼 후, 하루동안 경화시키고, 102mm 정사각형 알루미늄 블록(전단 박스 역할)에 볼트를 사용하여 결합하였다. 지오멤브레인의 설치방향은 전단방향과 지오멤브레인의 기계제작방향이 평행하도록 하였다. 이렇게 고안된 방법은 전단시험 시에 가장 문제시 될 수 있는 지오멤브레인 자체의 상대적 변형을 구속함으로써, 실제적으로 지오멤브레인과 지오텍스타일 사이에서 전단 변형이 발생할 수 있도록 하였다.

2.3 지오텍스타일 시료 준비

본 연구에서는 다음과 같이 다른 종류의 polymer와 fiber 또한 다른 중량(mass per unit area)을 가진 4 종류의 지오텍스타일을 사용하였다.

- Hoechst-Celanese 제품인 Trevira Spunbond 011/550 지오텍스타일 : continuous filament polyester nonwoven needle punched fabric with a mass per unit area of 16 oz/yd²

- Amoco 제품인 #4506, #4510, #4516 지오텍스타일 : staple filament polypropylene nonwoven needle punched fabric with a mass per unit area of 6, 10, 16 oz/yd², respectively

지오텍스타일은 전단시험 시에 자체의 상대 변위를 구속하기 위하여 유연한(flexible) 스무드 지오멤브레인에 스프레이 epoxy를 사용하여 152×254mm 크기로 부착하였다. 그 후 하루동안 경화시킨 후, 직접 전단 시험기 위의 시험판(testing platform)에 금속 bracket과 볼트를 사용하여 고정시켰다(그림 3 참조).

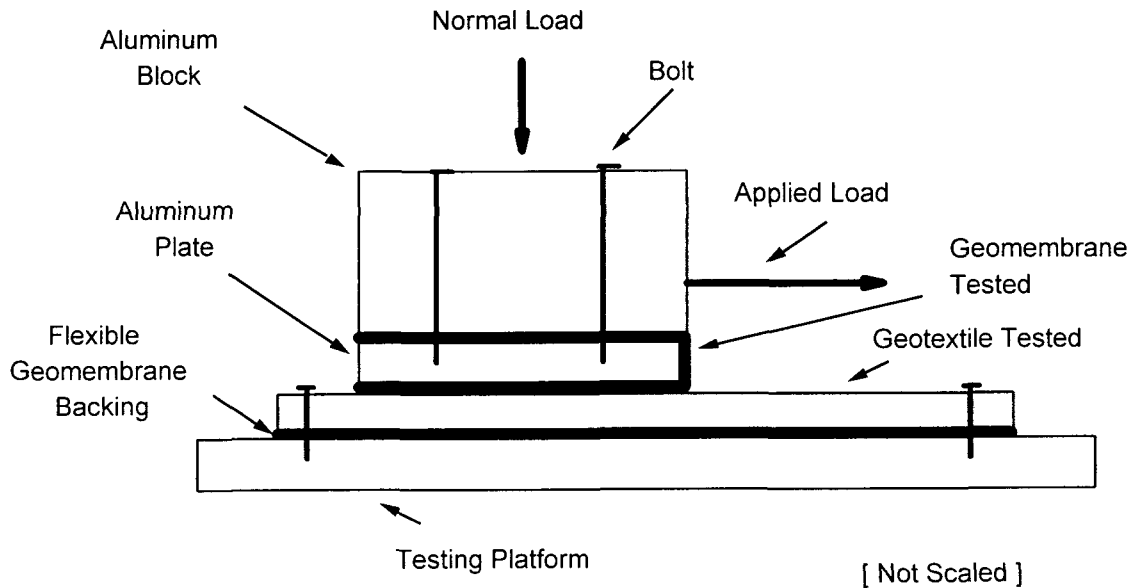


그림 3. 지오멤브레인과 지오텍스타일의 직접 전단 시험기

2.4 접촉면 직접 전단 시험

최대 80mm의 수평 변위(horizontal displacement)를 측정할 수 있도록 고안된 직접전단 시험기를 사용하여 지오멤브레인과 지오텍스타일의 접촉면 전단력을 측정하였다. 지오텍스타일 위에 지오멤브레인이 있는 전단 박스를 설치한 후 metal cross arm을 사용하여 연직응력(normal stress) 50, 100, 또는 150 kPa을 가하였다. 전단시험은 0.08 in/min의 속도로 시행하였으며, 한 개의 load cell과 3개의 LVDT에서 측정된 하중, 수평변위, 연직변위의 시험값들은 LabView data acquisition 시스템을 이용하여 컴퓨터에서 자동적으로 측정하였다.

3. 시험 결과

3.1 지오멤브레인의 표면 거칠기 정도

본 연구에 사용된 4가지 종류의 지오멤브레인의 측정된 평균 표면 거칠기 정도(R_L , R_S)와 그에 따른 표준 편차가 표 1에 나타내어져 있다. 제시된 측정값과 같이 표면 거칠기 매개변수 R_L 과 R_S 는 사용된 지오멤브레인의 거칠기 정도를 잘 대표할 수 있도록 충분한 범위에서 변화양상을 보여주고 있으며, 일반적으로 거칠기가 증가함에 따라 그에 따른 표준 편차가 증가하는 양상을 보였다. 또한, 본 연구에서 측정된 거칠기 정도는 Dove et al.(1997)에 의하여 발표된 수치와 잘 일치하였다.

표 1. 표면 거칠기 측정 결과

지오멤브레인 종류	표면 거칠기 값과 표준편차				거칠기 구분 ¹⁾
	평균 R _L	표준편차	평균 R _S	표준편차	
NSC Dura Seal	1.07	-	1.09	-	smooth
GSE Friction Flex	1.20	0.03	1.25	0.03	slightly textured
NSC Friction Seal	1.42	0.04	1.51	0.05	moderately textured
Poly-Flex Textured	1.58	0.10	1.71	0.12	moderately/heavily textured

1) Dove 와 Frost(1996)에 의하여 제안된 분류법

3.2 지오멤브레인의 표면 거칠기 정도가 접촉면 전단 메카니즘에 미치는 영향

그림 4는 본 연구에서 수행한 전단 시험 중의 하나의 예로서 Amoco #4510 지오텍스타일과 4가지 다른 지오멤브레인의 전단 시험시 전단응력(shear stress)-수평변위(horizontal displacement)의 관계를 보여주고 있다. 예상되었듯이, 거칠기 정도가 큰 지오멤브레인을 사용한 경우가 더욱 높은 전단 강도 (shear strength)를 유발함을 알 수 있었다. 또한 표면 거칠기 정도가 증가할수록, 최대(peak) 및 잔류(residual) 전단 강도를 유발하는 수평변위가 증가됨을 알 수 있었다. 한가지 특이한 현상으로는, 스무드(smooth) 지오멤브레인을 사용한 경우는 전단응력-수평변위 그래프의 형상이 매우 작은 변위에서 최대 전단강도에 이른 후, 별다른 전단강도의 감소 없이 계속 진행되나, 거칠은 돌기형(textured) 지오멤브레인을 사용하면, 최대 전단강도에 도달한 후, 상당부분의 강도 감소(표면 거칠기가 커질수록 감소가 커짐)후에 잔류 전단강도에 도달함을 알 수 있었다. 이러한 경향은 다른 지오텍스타일을 사용하여도 똑같이 나타났다. 이것은 근본적으로 전단 변형 메카니즘이 지오멤브레인의 표면 거칠기 정도에 따라 다를 것을 제시하는 것으로써, 자세한 관찰을 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 시험을 실시하였다.

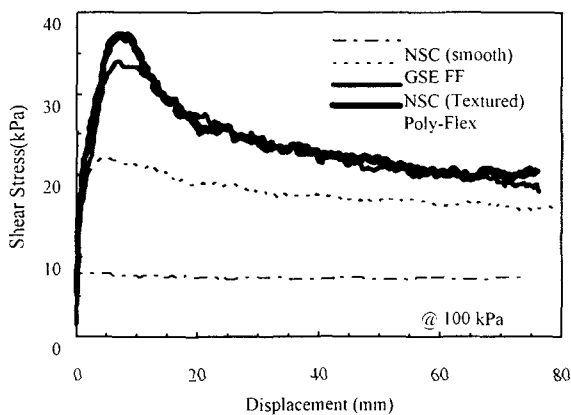


그림 4. 전단응력-수평변위 관계 : 4가지 지오멤브레인 vs Amoco #4510 지오텍스타일

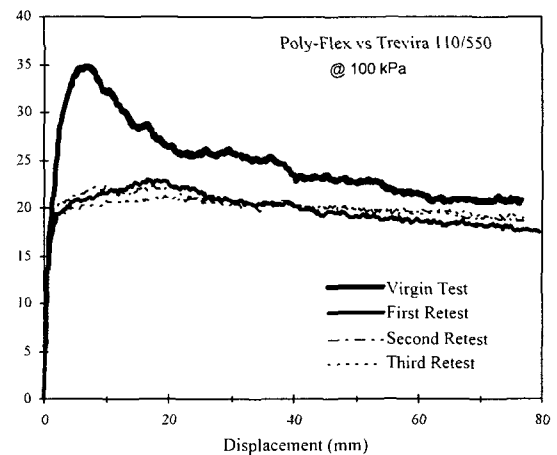


그림 5. 지오멤브레인의 재사용으로 인한 영향 : Poly-Flex 지오멤브레인 vs Trevira 011/550

사용된 지오멤브레인 중 표면이 가장 거칠은 Poly-Flex Textured 지오멤브레인과 Trevia 011/550 지오텍스타일을 사용하여 시험하는데, 지오멤브레인은 한번의 80mm 직접전단시험이 끝난 후에 다음 전단 시험에 새것의 지오텍스타일과 다시 시험하였다. 즉, 4번의 연속적인 전단시험에서 지오멤브레인은 한 개를 계속 사용하였으나, 지오텍스타일은 매번 새것으로 교체해주었다. 이것은 돌기형 지오멤브레인을 계속 사용하였을 경우, 전단응력-수평변위의 관계가 어떻게 변화하는가를 알기 위해서였다. 시험 결과, 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이, 처음 시험(virgin test in Fig. 5)시에는 그림 4에서와 같이 확연한 최대 전단강도 및 강도 감소를 볼 수 있었으나, 첫 번째, 두 번째, 세 번째 재사용 시(first, second, and third retest in Fig. 5)에는 대략 첫 번째 시험의 잔류 전단강도 값에 해당하는 강도까지 증가한 후 별다른 강도 감소 없이 계속 진행되는 형태를 보여주고 있다. 이러한 과정에서, 지오멤브레인의 재사용 시 표면 거칠기의 변화 정도를 육안으로 관찰하여 본 결과, macro scale 상의 거칠기는 거의 변화가 없으나, 손끝으로 느낄 수 있는 정도의 micro scale의 거칠기(micro-texture)는 첫 번째 전단시험에서 거의 없어짐을 알 수 있었다.

결국, 이 시험은 지오멤브레인과 지오텍스타일의 접촉면 전단 메카니즘에 주요한 정보를 주고 있다. 돌기형 지오멤브레인과 지오텍스타일의 접촉면 최대 전단강도는 표면 거칠기 중에서 micro scale에 해당하는 거칠기(micro-texture)가 지오텍스타일에 의하여 제거됨으로 인하여 발생하며, 이것은 매우 작은 수평변위에서 전부 발생된다고 하겠다. 그 후 모든 micro-texture가 제거된 후, 전단응력은 macro scale의 거칠기가 지오텍스타일의 filament를 당기거나 끊음으로서 잔류 전단강도에 도달함을 알 수 있었다. 이러한 지오멤브레인의 재사용에 따른 현상은 다른 종류의 돌기형 지오멤브레인인 NSC Friction Seal을 사용한 경우에 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이와는 달리 스무드 지오멤브레인과 지오텍스타일의 전단응력은 지오멤브레인이 지오텍스타일 위를 미끄러지면서 발생함을 시험을 통하여 알 수 있었다.

3.3 표면 거칠기 정도와 접촉면 전단력과의 관계

측정된 표면 거칠기(R_s)와 그에 따른 최대 및 잔류 마찰각(friction angle)과의 관계를 각각 그림 6과 7에 나타내었다. 여기에서 마찰각은 점착력이 '0'이라 가정한 접선(secant) 마찰각이다. 두 그림에서 알 수 있듯이, 접촉 마찰각은 표면 거칠기(R_s)가 증가함에 따라 초기에는 급격히 증가하나, 어떤 거칠기(R_s)값 이상에서는 그 증가율이 감소하기 시작하여 R_s 가 증가하여도 접촉 마찰각은 더 이상 증가하지 않는 경향을 알 수 있었다. 이것은 전술된 전단 메카니즘과 직접적으로 관련된 현상으로, 우선 최대 접촉 마찰각의 경우는 전술된 것과 같이 micro-texture에 의하여 유도되었다. 이것은 보통 R_s 를 측정할 당시 표면 거칠기를 지배할 수 있는 macro scale의 거칠기와는 다른 면모로써, 표면 거칠기가 어느정도를 벗어나서는 비록 R_s 가 증가한다 하여도 micro-texture의 증가는 그것에 따르지 않고 적은량의 증가를 보이고 있다는 것이다. 결국 최대 접촉 마찰각이 특정 R_s 값 이상에서 증가하지 않는 것은 그 이상의 R_s 범위에서는 micro-texture의 증가가 거의 없음을 의미하며, 정량적인 측정은 본 연구에서 이루어지지 못했으나, 정성적인 촉감으로 관찰될 수 있었다. 이와는 달리, 잔류 접촉 마찰각의 경우는 macro-scale의 거칠기가 지오텍스타일의 filament를 당기거나 끊어트림으로 인해서 발생한다고 가설하였는데, 이것은 잔류 접촉 마찰각은 특정 R_s 값을 지나서는 지오멤브레인의 거칠기가 잔류 접촉 마찰각을 형성하는 것이 아니라, 지오텍스타일 자체의 강도와 같다는 것을 의미한다. 따라서, 관측되었듯이 특정 R_s 값 이상에서는 튀어나온 지오멤브레인의 거칠기가 지오텍스타일의 filament를 당기거나 끊을 수 있는 강도가 잔류 접촉 마찰각을 형성하여 더 이상의 증가가 없는 것으로 판단된다.

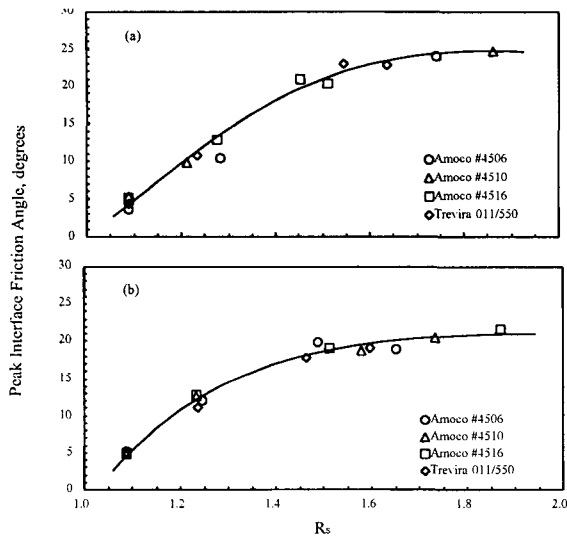


그림 6. 최대 접촉마찰각과 표면 거칠기와의 관계
(a) 50 Kpa, (b) 100 kPa normal stress

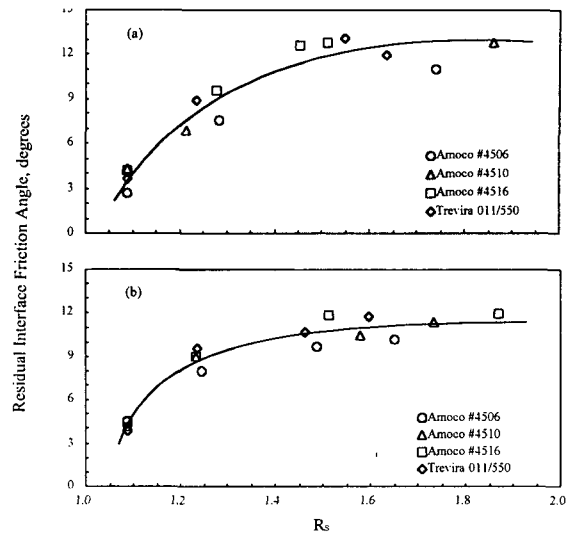


그림 7. 잔류 접촉마찰각과 표면 거칠기와의 관계
(a) 50 Kpa, (b) 100 kPa normal stress

4. 결론

본 연구는 여러 가지 가능한 접촉면(interface) 중에서 한가지의 사례로서, 지오멤브레인의 표면 거칠기 정도가 지오멤브레인과 지오텍스타일의 접촉면 전단력에 미치는 영향을 정량적으로 제시하였다. 시험 결과, 표면 거칠기 정도는 접촉면 전단력에 매우 중요한 역할을 수행함을 알 수 있었다. 또한 본 연구는 추후 다른 형태의 접촉면 전단력에 대한 표면 거칠기 정도의 영향을 수행하는데 활용 될 수 있으며, 지오멤브레인의 표면 형상 설계에 많은 도움이 되리라 판단된다. 다음은 본 연구에서 얻어진 결론들이다.

- 1) 본 연구에 사용된 거칠기 매개변수 R_L 과 R_S 는 지오멤브레인의 표면 거칠기 정도를 대표할 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 돌기형(textured) 지오멤브레인은 스무드(smooth) 지오멤브레인보다 높은 최대 및 잔류 접촉면 전단 강도를 유발함을 알 수 있었다.
- 3) 스무드(smooth) 지오멤브레인과 지오텍스타일의 접촉면에서는 미끄러짐(sliding)이 주요 전단 메카니즘임을 알 수 있었다.
- 4) 돌기형(textured) 지오멤브레인과 지오텍스타일의 접촉면에서 최대 접촉면 전단력은 지오멤브레인 표면의 micro-texture에 의하여 지배되며, 잔류 접촉면 전단력은 macro scale의 거칠기가 지오텍스타일의 filament를 당기거나 끊어트림으로써 발생됨을 알 수 있었다.
- 5) 표면 거칠기 정도와 접촉면 전단력은 정량적으로 관계됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Dove, J. E. and Frost J. D. (1996), "A Method for Measuring Geomembrane Surface Roughness", *Geosynthetics International*, Vol. 3, No. 3, pp. 369~392.
2. Dove, J. E., Frost, J. D., Han, J. and Bachus, R. C. (1997), "The Influence of Geomembrane

- Surface Roughness on Interface Strength", *Geosynthetics '97*, San Diego, CA, USA, Vol. 2, pp. 863~876.
3. Frost, J. D. and Kuo, C. Y. (1996), "Automated Determination of the Distribution of Local Void Ratio from Digital Images", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 19, No. 2, June, pp. 107~117.
 4. Lee, S-W (1999 a), "Quantification of Surface Topography Using Digital Image Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 15, No. 3. pp. 131~149.
 5. Lee, S-W (1999 b), "Directional Variations in Surface Roughness Determinations", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 15, No. 4.
 6. Paikowsky, S. G., Player, C. P. and Connors, P. J. (1995), "A Dual Interface Apparatus for Testing Unrestricted Friction of Soil along Solid Surfaces", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, No. 2, pp. 168~193.
 7. Stark, T. D., Williamson, T. A. and Eid, H. T. (1996), "HDPE Geomembrane/Geotextile Interface Shear Strength", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 3, pp. 197~203.
 8. Ward, H. C. (1982), "Profile Characterization", *Chapter 4. In: Rough Surfaces*, Thomas, T. R., Ed., Longman, London, 261p.