지오멤브레인과 주변흙과의 마찰특성

Interface Frictional Characteristics between Geomembranes and Surrounding Soils

신은철[1], Eun Chul Shin, 이애영[2], Ae-Young Lee, 조삼덕[3], Sam-Deok Cho, 정문경[4], Moonkyung Chung

[1]시립 인천대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng. Univ. of Inchon
[2]시립 인천대학교 대학원 토목공학과 석사과정, M.S. Student, Dept. of Civil Eng., Univ. of Inchon
[3]한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원, Research Fellow, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology
[4]한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : The charateristics of the soil-geomembrane interface are important factors in the design of soild and liquid wastes containment facilities. Several factors such as interface soil types, types of geomembrane, density, shearing speed were considered through large-scale direct shear tests. Based on the interface friction angles determined through the direct shear tests, flexible geomembrane, rapid rate of shearing speed, higher dry density of soil, confining stress are the important factors to increase the shear strength and the interface friction angle. The friction efficiencies for each cases are also presented.

KEYWORDS : Interface friction angle, Geomembrane, Direct shear test, Friction efficiency,

1. 서론

고분자재료 차수재는 영어로 지오멤브레인, 한국어로는 방수시이트로 알려져 있다. 국내 토목섬유의 사용은 1972년 이후 꾸준히 증가하여 최근 위생폐기물 매립장(sanitary landfill)이나 지정폐기물 매립장(hazadous waste landfill), 운하, 터널, 인공호수, 수영장등 차수시설이나 침투제어 시설분야에 광범위하게 사용되고 있다. 고분자재료 차수재는 시공이 용이하고 신뢰할만한 투수계수를 가지고 있으며 재료의 품질관리가 용이한 장점이 있어 점토가 부족한 지반이나 높은 정도의 차수가 요구되는 시설물에 많이 사용되어지고 있다. 실제적인 시공에 있어서 고분자재료의 상부·하부는 직접 토사와 접촉면을 형성하여 차수구조물의 잠정적인 활동면이되어 시공구조물의 안정에 지대한 영향을 미치게 된다. 다시말해 상부·하부에 접촉되는 토사의 종류에 따라 고분자재료의 기능이 크게 좌우되며 접촉토사와 고분자재료와의 접촉마찰각의 결정은 고분자재료의 설계와 시공에 매우 중요한 부분이 된다.

본 연구에서는 고분자재료 차수재 개발을 위하여 고분자재료와 토사와의 접촉마찰각(interface friction angle)을 대형 직접전단시험기를 사용하여 도출하였다. 또한 개발단계의 지오멤브레인제품과 이미 국내에서 생산되고 있는 지오멤브레인제품의 전단시험결과를 상호 비교하였으며 개발제품의 성분·제작방법에 따른 접촉마찰각을 고찰하였다.

2. 연구내용 및 범위

대형 직접전단시험이나 인발시험에 의한 마찰특성의 결정은 보강재의 종류에 따라 달리 선정되어야 한다. 예로서 지오멤브레인이나 돌기없는 띠형 보강재는 대형직접전단시험에 의해서, 돌기 있는 띠형 보강재나 그리드형 보강재는 인발시험에 의해서 마찰특성이 규명되는 것이 바람직하다. 이는 전단에 따른 보강재 주변 흙의 거동특성에 기인하는데, 시이트형 보강재와 같이 접촉마찰(interface friction)이 우세한 보강재의 마찰특성 평가에는 대형직접전단시험이 이용되며, 보강재의 특성상 인발에 따른 저항력이 인발방향과 수직한 수동저항 지지부재의 인발과 주변 흙의 변형에 따라 유발되는 그리드형 보강재는 인발시험이 이용된다(조삼덕 & 김진만, 1995). 본 연구에서는 지오멤브레인과 주변흙과의 마찰특성에 영향을 미치는 요소를 지오멤브레인의 종류, 접촉토사의 종류, 다짐도, 전단속도 등 4가지로 설정하여 대형직접전단시험을 실시하였으며 영향인자들의 변화에 따른 접촉마찰각 변화를 고찰하였다. 또한 개발제품의 성분 및 제작방법에 따른 접촉마찰각의 변화를 비교·분석하였다.

3. 대형직접전단 시험방법 및 시험장치

대형직접전단시험기를 사용하여 시이트형 토목섬유의 접촉마찰각을 구하는 방법에는 그림 3.1에서 보는 바와 같이 고정, 비고정, 부분고정방법으로 3가지 종류가 있다. 일반적으로 부분고정, 고정, 비고정 방법의 순으로 접촉마찰각이 크게 도출된다. 본 연구에서는 지오멤브레인을 더미블록에 완전히 고정하여 전단시키는 고정전단방법을 사용하였으며, 대형직접전단시험기는 전단력 최대 5ton까지 측정가능하며 전단상자의 크기는 30cm×30cm이다. 하부상자의 높이는 10cm, 상부상자의 높이는 15cm이며 상부에는 덮개를 덮어 수직하중을 재하할 수 있다. 전단상자의 구성도는 그림 3.2에서 보는 바와 같으며 대형직접전단시험기의 모식도는 그림 3.3과 같다.

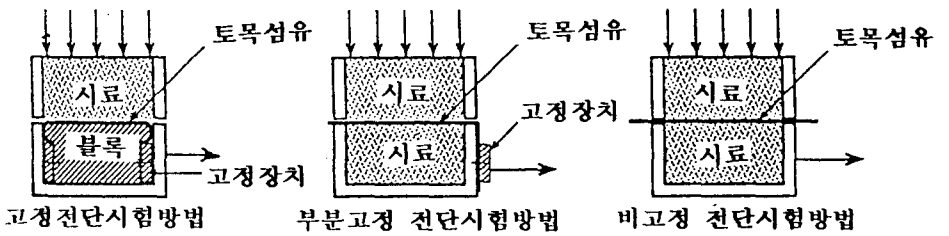


그림 3.1 지오멤브레인의 전단시험방법

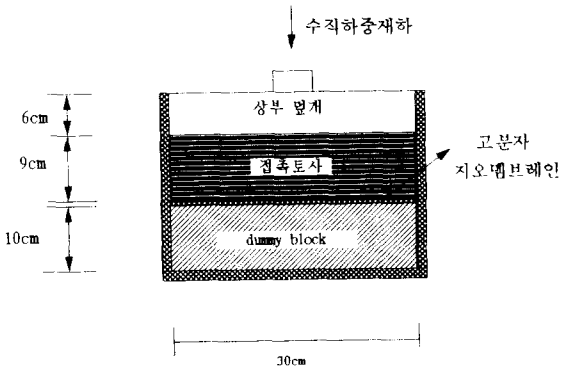


그림 3.2 전단상자의 구성도(고정전단시험)

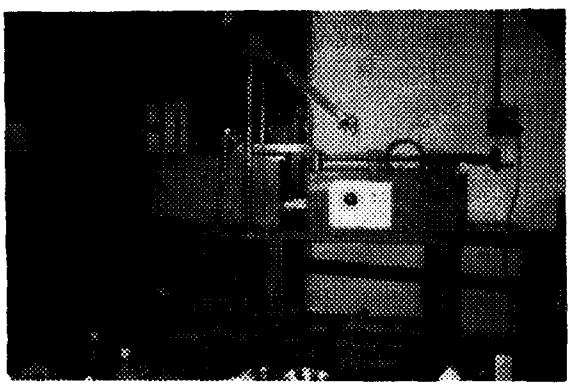


그림 3.3 대형직접전단시험기

4. 마찰특성 시험방법

4.1 마찰특성 영향인자에 따른 시험

지오멤브레인과 접촉토사와의 마찰특성은 전단시험장치의 크기 및 시험방법, 토사의 입도, 포화도, 수직하중의 크기 등의 많은 인자들에 의하여 영향을 받는다. 본 연구에서는 상기 기술한 바와 같이 토목섬유의 종류, 접촉토사의 종류, 다짐도, 전단속도에 따라 전단시험을 실시하였다. 지오멤브레인은 국내생산제품과 1차 개발제품을 사용하였으며 접촉토사는 사질토(주문진 표준사)와 화강풍화토를 사용하였다. 다짐도의 변화는 사질토의 경우 상대밀도(D_r) 80%, 40%로 다짐하였으며, 화강풍화토는 최대건조밀도(γ_{dmax})의 90%, 80%로 다짐하였다. 또한 전단속도는 1mm/min과 3mm/min의 속도로 구분하여 전단시험을 실시하였다. 전체 시험방법은 표 4.1에 나타낸 바와 같다.

표 4.1 마찰특성영향인자에 따른 시험방법

시험구분	사용재료	지오멤브레인	비고
다짐도	사질토	Type 1	D_r = 80%
			D_r = 40%
		Type 2	D_r = 80%
			D_r = 40%
	화강풍화토	Type 1	γ_{dmax}의 90%
		Type 2	γ_{dmax}의 90%
			γ_{dmax}의 80%
전단속도	사질토	Type 2	D_r = 80%
	화강풍화토	Type 2	γ_{dmax}의 90%

주) Type 1 : 국내생산제품, Type 2 : 1단계 개발제품

4.2 개발된 지오멤브레인의 성분 및 제작방법에 따른 시험

성분 및 제작공정에따라 시험에 사용된 지오멤브레인은 2단계 개발제품(Type3)으로 온도, 사출속도, 혼융성분비 등에 의하여 5가지로 분류된다. 개발제품의 성분 및 제작방법에 따른 시험은 마찰특성 영향인자의 변화없이 성분 및 제작방법에 따른 접촉마찰각의 변화를 고찰하기 위하여 직접전단시험을 실시하였다. 접촉토사는 화강풍화토를 사용하였고 다짐도는 최대건조밀도의 90%로 다짐하였으며 전단속도는 1mm/min으로 모든 시험을 동일한 조건에서 실시하였다. 지오멤브레인의 종류는 실린더와 와인더의 온도 및 속도 차이에 의하여 표 4.2와 같이 분류하였으며 저밀도와 고밀도폴리에틸렌의 혼융비는 1:4와 1:1로 제작하였다.

표 4.2 성분 및 제작방법에 따른 지오멤브레인의 종류

생 산 품		온도(℃)		속도(rpm)		혼용비 (LDPE:HDPE)
		실린더	와인더	실린더	와인더	
Type 3	Product-11	216	65	4	50	1 : 4
	Product-12	244	65	1	50	1 : 4
	Product-13	244	65	3	50	1 : 4
	Product-16	217	65	3	50	1 : 1
	Product-18	217	85	3.2	45	1 : 1

5. 시험결과

5.1 시험대상 토사의 토질역학적 특성

지오멤브레인과의 접촉토사는 사질토(주문진 표준사)와 우리나라에 널리 산재되어 있어 주변에서 쉽게 구할 수 있는 화강풍화토를 선정하였다. 본 연구에 사용된 사질토와 화강풍화토의 대표적 물성치인 비중, 입경, 건조밀도는 표 5.1에 나타낸바와 같다. 그림 5.1과 5.2는 주문진 표준사와 화강풍화토의 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

표 5.1 접촉토사의 토질역학적 특성

재료	비중	입경		건조밀도(g/cm^3)	
		균등계수	곡율계수	최대건조밀도	최소건조밀도
사질토(주문지 표준사)	2.65	1.61	1.10	1.78	1.39
화강풍화토	2.58	8.06	0.85	1.83	-

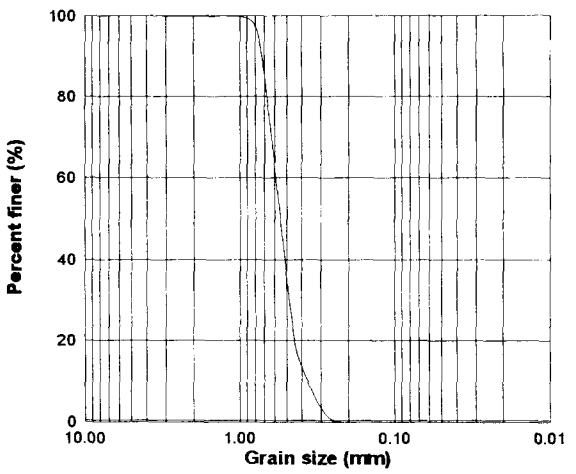


그림 5.1 사질토 시료의 입도분포곡선

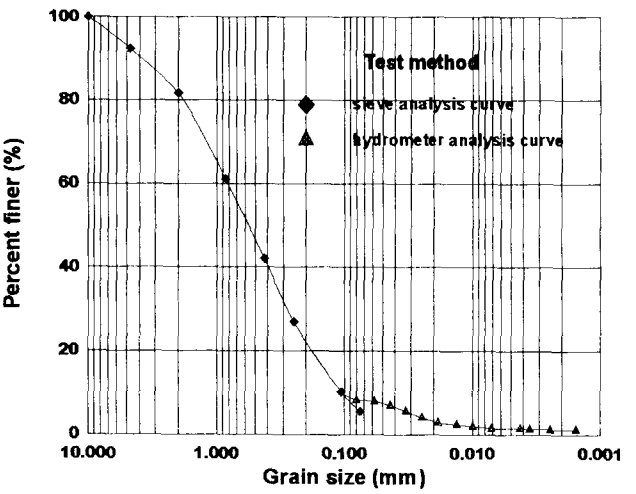


그림 5.2 화강풍화토의 입도분포곡선

5.2 마찰특성 영향인자에 따른 시험결과 및 분석

5.2.1 지오멤브레인과 사질토와의 접촉마찰특성

지오멤브레인과 사질토의 마찰시험결과는 표 5.2에서 보는 바와 같이 지오멤브레인의 종류에 따라서는 큰 차이를 보이지 않고 있으나 다짐도의 변화에는 큰변화를 나타내었다. 그림 5.3에서 보는 바와같이 동일 다짐도에서는 Type1에 비하여 Type2의 접촉마찰각이 크게 나타났다. 이 결과는 지오멤브레인의 표면경도에 기인된 것으로 Type2제품이 흙과 접촉하였을 때 더 큰 구속응력이 유발되었기 때문이라 판단된다. 또한 동일 Type의 경우 다짐도가 큰 경우가 접촉마찰각이 크게 측정되었다. 그림 5.4는 상대밀도 40%일 때 Type1과 Type2의 전단변위에 대한 전단응력곡선을 나타낸 것으로 동일 수직응력상에서 Type2의 전단응력이 Type1의 전단응력보다 크게 발생되었다.

표 5.2 지오멤브레인과 사질토의 접촉마찰각

지오멤브레인의 종류	다짐도	접촉마찰각
Type 1	D_r = 80%	29.19°
	D_r = 40%	19.65°
Type 2	D_r = 80%	29.44°
	D_r = 40%	21.84°

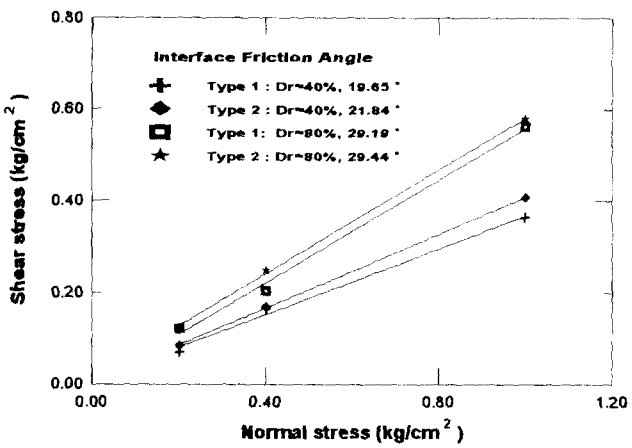


그림 5.3 수직-전단응력곡선 (Type1, Type2)

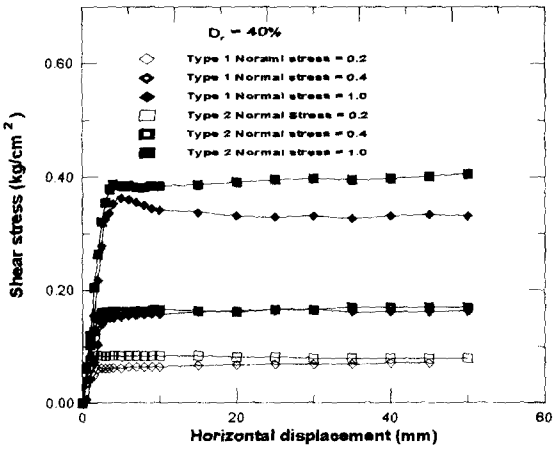


그림 5.4 상대밀도 40%일 때 수평변위-전단응력곡선

5.2.2 지오멤브레인과 화강풍화토와의 접촉마찰특성

표 5.3에서 보는 바와 같이 사질토에 대한 실험결과와 비슷한 경향으로 지오멤브레인 Type2의 접촉마찰각이 크게 나타났으며, 동일 다짐도에서 Type2의 전단응력이 크게 측정되었다. 그림 5.5와 5.6은 지오멤브레인과 화강풍화토와의 Coulomb의 파괴곡선과 다짐도가 $\gamma_{d(max)}$의 90%일 때, 지오멤브레인 TypeI과 Type2의 수평변위에 대한 전단응력곡선을 나타낸 것이다.

표 5.3 지오멤브레인과 화강풍화토의 접촉마찰정수

지오멤브레인 종류	다짐도	접촉마찰정수	점착력(kg/cm^2)
Type 1	$\gamma_{d(max)}$의 90%	23.83°	-
Type 2	$\gamma_{d(max)}$의 90%	25.84°	0.01
	$\gamma_{d(max)}$의 80%	21.60°	0.009

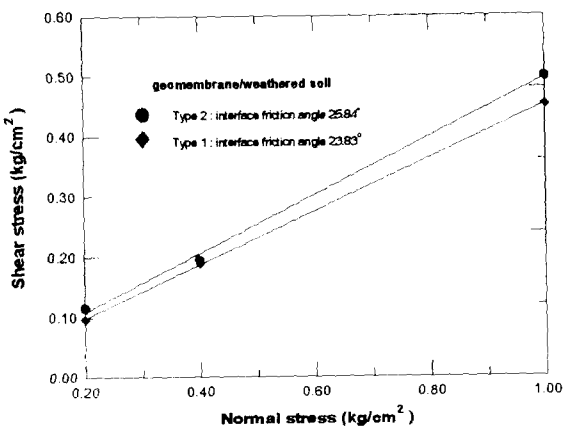


그림 5.5 수직-전단응력곡선 (화강풍화토)

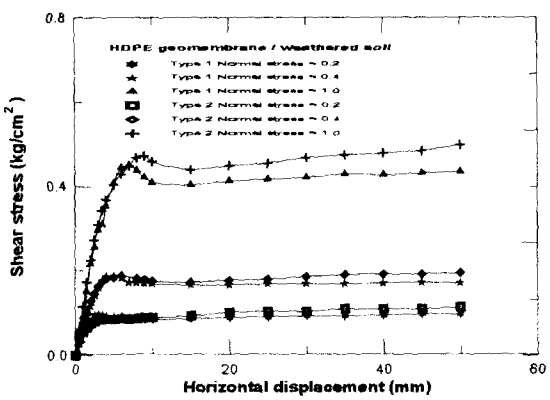


그림 5.6 $\gamma_{d(max)}$의 90%일 때 수평변위-전단응력곡선

5.2.3 전단속도에 따른 접촉마찰특성

지오멤브레인 Type2에 대하여 전단속도 1mm/min과 3mm/min으로 전단속도를 증가시켜 접촉마찰각을 고찰한 결과 일반적인 토사의 마찰특성과는 상이한 결과를 얻었다. 토사의 내부마찰각의 경우 전단속도가 증가하면 마찰각도 증가하지만 지오멤브레인과 토사의 접촉마찰각은 전단속도가 증가함에 따라 접촉마찰각이 감소하였다. 이러한 요인은 흙입자사이의 마찰각보다 흙과 지오멤브레인 표면의 접촉마찰각이 적어 미끄럼파괴가 유발되었기 때문이라 생각된다. 접촉마찰각은 표 5.4에 나타낸 것과 같으며 Coulomb의 파괴곡선과 수평변위-전단응력곡선은 그림 5.7과 5.8에 나타낸바와 같다.

표 5.4 전단속도에 따른 접촉마찰각

지오멤브레인 종류	접촉토사	전단속도	접촉마찰각
Type 2	사질토(D_r = 90%)	1mm/min	29.44°
		3mm/min	27.03°
	화강풍화토 ($\gamma_{d(max)}$의 90%)	1mm/min	25.84°
		3mm/min	24.63°

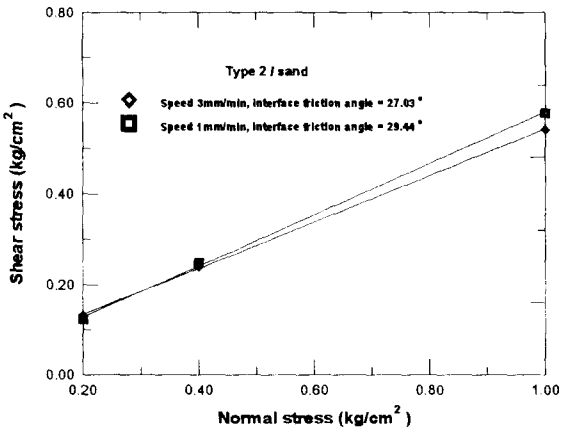


그림 5.7 전단속도에 따른 수직-전단응력곡선

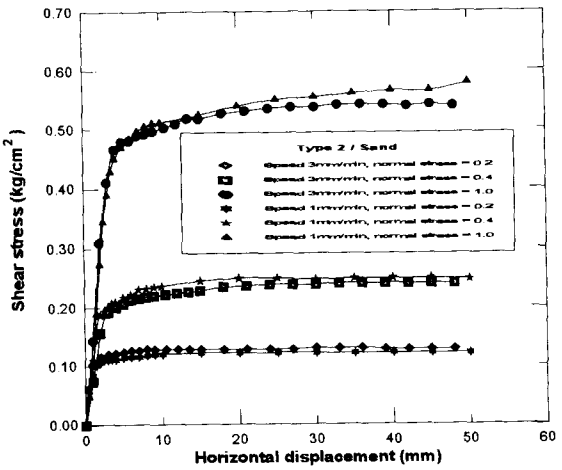


그림 5.8 전단속도에 따른 수평변위-전단응력곡선

5.3 성분 및 제조방법에 따른 지오멤브레인과 화강풍화토와의 접촉마찰정수

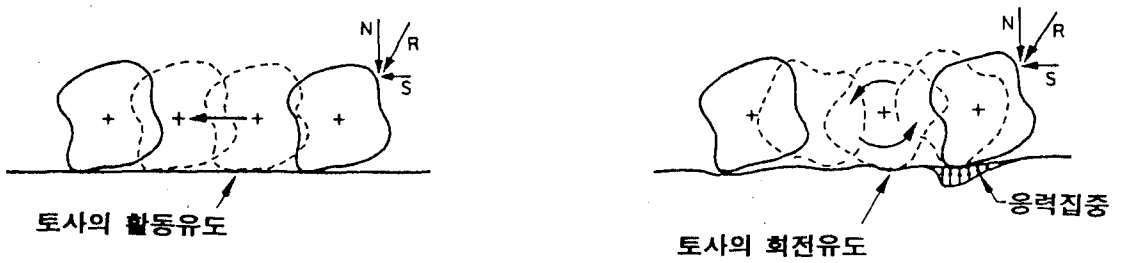
성분 및 제조방법에 따른 지오멤브레인(Type3)의 화강풍화토에 대한 대형전단시험결과를 바탕으로 도출된 접촉마찰각은 표 5.5에 나타낸 바와 같다. 혼융비에 따른 접촉마찰각은 HDPE의 혼융비가 높을수록 접촉마찰각은 작게 측정됨을 알 수 있으며 Product 12와 13을 비교하여 보면 실린더 및 와인더의 속도에 거의 영향을 받지않는 것을 알 수 있다. 반면 온도의 영향은 Product 11과 12, 13을 비교하여 보면 실린더의 온도는 미소하지만 영향을 미치는 것을 알 수 있으며 와인더 온도의 영향은 Product 16과 18을 비교해 보면 알 수 있듯이 상대적으로 큰 영향을 미치고 있다. 즉, 와인더의 온도가 높은 상태에서 제조된 제품이 접촉마찰각이 크게 도출되는 것으로 나타났다.

표 5.5 성분 및 제조방법에 따른 지오멤브레인과 화강풍화토와의 접촉마찰계수

지오멤브레인의 종류		다짐도	접촉마찰각
Type 3	Product-11	$\gamma_{d(max)}$의 90%	21.31°
	Product-12	$\gamma_{d(max)}$의 90%	21.50°
	Product-13	$\gamma_{d(max)}$의 90%	21.49°
	Product-16	$\gamma_{d(max)}$의 90%	21.83°
	Product-18	$\gamma_{d(max)}$의 90%	22.39°

5.4 지오멤브레인의 표면경도효과

지오멤브레인의 표면경도는 접촉마찰각를 결정하는데 있어서 중요한 요소이다. 상대적으로 단단한 경도를 가진 지오멤브레인은 토사입자의 활동을 유도하지만 약한 경도를 가진 지오멤브레인은 토사의회전을 유발한다. 토사입자의 이동 메카니즘은 그림 5.9에 나타낸 바와 같다.



(a) 단단한 지오멤브레인 / 토사입자 (b) 유연한 지오멤브레인 / 토사입자

그림 5.9 지오멤브레인과 토사입자사이의 이동 메카니즘(O'Rourke, 1990)

지오멤브레인의 표면경도가 낮을 경우 전단응력이 크게 측정되며 따라서 접촉마찰각도 크게 측정된다. 상기 시험 결과를 분석해 보면 지오멤브레인 Type1과 Type2의 표면경도를 비교해 보면 Type2의 표면경도가 낮음을 알 수 있다. 또한 Type2가 와인딩 과정을 거치치 않은 제품으로 Type3에 비하여 표면경도가 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 Type3의 접촉마찰각이 Type2에 비하여 작게 나타났다.

5.5 마찰효율, E_ϕ(friction efficiency)

표 5.6은 대형직접전단시험 결과를 흙의 내부마찰각과 고분자 지오멤브레인/토사의 접촉마찰각을 시료별로 비교 정리한 것이다. 각 시료별 마찰효율(E_ϕ)은 다음과 같이 정의된다.

$$E_\phi = \frac{\tan\delta}{\tan\phi} \quad (1)$$

여기서 E_ϕ : 마찰효율 , $\tan\delta$: 접촉마찰계수, $\tan\phi$: 내부마찰계수

즉 고분자 지오멤브레인/토사의 접촉마찰계수와 흙의 내부마찰계수의 비로 정의되어 접촉마찰각이 증가할수록 마찰효율도 증가한다. 표 5.6에서 보는 바와 같이 사질토에 대하여 Type2가 Type1보다 마찰효율이 크며 화강풍화토에 대해서는 제품의 표면경도가 클수록 마찰효율이 작아짐을 알 수 있다.

표 5.6 지오멤브레인과 토사간의 마찰효율

토사의 종류	다짐도	지오멤브레인의 종류		마찰효율, E_ϕ (°)	접촉마찰각, δ (°)	내부마찰각, ϕ (°)
사질토	D_r = 40%	Type 1		0.55	19.65	ϕ_{av} = 32.93
		Type 2 (1차개발 제품)		0.62	21.84	
	D_r = 80%	Type 1		0.72	29.19	ϕ_{av} = 37.62
		Type 2 (1차개발 제품)		0.73	29.44	
화강 풍화토	$\gamma_{d(max)}$의 90%	Type 3	Product 11	0.69	21.31	ϕ = 29.56
			Product 12	0.69	21.50	
			Product 13	0.69	21.49	
			Product 16	0.71	21.83	
			Product 18	0.73	22.39	

6. 결론

본 연구에서 대형 직접전단시험을 통하여 지오멤브레인과 토사와의 마찰특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 지오멤브레인과 토사간의 접촉마찰각은 다짐도가 클수록, 전단속도가 작을수록 접촉마찰각은 증가하였다.
2. 토사의 종류에 따른 접촉마찰각은 토사의 입자가 둥근입자보다 사질토와 같은 모난 입자에 대한 접촉마찰각이 크게 측정되었다.
3. 성분 및 제조방법에 따른 지오멤브레인과 화강풍화토와의 접촉마찰시험 결과 HDPE의 혼용비가 큰 경우, 지오멤브레인 내부 밀도의 증가에 의하여 접촉마찰각이 작게 측정된다.
4. 지오멤브레인의 표면경도가 단단할수록 표면경도효과에 의해 토사입자활동이 유발되며 유연한 경우 토사입자의 회전을 유발시켜 표면경도가 유연할수록 접촉마찰각은 크게 나타났다.
5. 지오멤브레인/접촉토사의 접촉마찰계수와 접촉토사의 내부마찰계수의 비로 정의되는 마찰효율(E_ϕ)은 다짐도가 클수록, 전단속도가 작을수록, 표면경도가 작을수록 증가한다.

본 연구의 시험과정에서는 지오멤브레인의 표면경도효과에 대하여 정확하게 실험적 규명을 하지 못하였다. 향후 표면경도시험(ASTM D2240-85) 및 각종 실험을 통하여 표면경도효과에 대한 연구를 필요로 한다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 환경기술개발사업(G-7프로젝트)중 인공차수재 및 복토재 개발 연구과제로 수행된 연구입니다. 연구를 수행하는 과정에서 협조하여 주신 한국건설기술연구원 그리고 지오멤브레인을 개발하여 제공해 주신 전남대 섬유공학과 토목섬유연구팀의 적극적인 협조와 편달에 감사드립니다.

참고문헌

1. 조삼덕, 김진만 (1995), "토목섬유 보강토 구조물의 합리적인 해석과 설계(흙/토목섬유 마찰특성평가)", 한국건설기술연구원, KICT/95-GE-1101, **연구보고서.**
2. Eigenbrod, K.D., Locker, J.G. (1987), "Determination of Friction Values for the Design of Side Slopes Lined or Protected with Geosynthetics", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, pp. 509~519.
3. Farrag, K. (1995), "Evaluation of the Effect of Moisture Content on the Interface Properties of Geosynthetics", *Proc. of Geosynthetics '95*, Vol. 3, pp. 1031~1042.
4. Gilbert, R.B. (1996), "Shear Strength of Reinforced Geosynthetic Clay Liner", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122 No. 4, pp. 259~266.
5. Gilbert, R.B., Liu, C.N., Wright, S.G., Trautwein, S,J. (1995), "A Double Shear Test Method for Measuring Interface Strength", *Proc. of Geosynthetics '95*, Vol 3, pp. 1017~1030.
6. Ingold, T.S. (1982), "Some Observations on the Laboratory Measurement of Soil-Geotextile Bond", *Geotechnical Testing Journal*, Vol 5, No. 3/4, pp. 57~67.
7. Jewell, R.A., Wroth, C.P. (1987), "Direct Shear Tests on Reinforced Sand", *Geotechnique*, Vol 37, No. 1, pp. 53~68.
8. Koerner, R.M. (1994), "*Designing with Geosynthetics*", Third Edition, Prentice Hall.
9. Masada, T., Mitchell, F., Sargand, S.M., Shashikumar, B. (1994), "Modified Direct Shear Study of Clay Liner-Geomembrane Interfaces Exposed to Landfill Leachate", *Geotextile and Geomembranes 13*, pp. 165~179.
10. Negussey, D., Wijewickreme, W.K.D., Vaid, Y.P. (1989), "Geomembrane Interface Friction", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 26, pp. 165~169.
11. O'Rourke, T.D. (1990), "Shear Strength Characteristics of Sand-Polymer Interfaces", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 3, pp. 451~469.
12. Takasumi, D.L., Green, K.R., Holtz, R.D. (1991), "Soil-Geosynthetics Interface Strength Characteristics : A Review of State-of-the Art Testing Procedures", *Proc. of Geosynthetics '91*, Atlanta, Georgia, USA, pp. 87~100.