

폐기물매립장 인공차수재의 접촉마찰특성에 관한 연구

Interface Frictional Characteristics of Artificial Liners in Waste Landfill

신은철⁽¹⁾, 이애영⁽²⁾, 이규홍⁽²⁾, 강호정⁽³⁾

⁽¹⁾시립 인천대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

⁽²⁾시립 인천대학교 대학원 토목공학과 석사과정, M.S. Student, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

⁽³⁾(주) 도화종합기술공사 환경부 부장, P.M. Dept. of Environmental Eng. Dohwa Associated Eng. Services. LTD.

SYNOPSIS : Interface frictional characteristics of the artificial liners are very important factors in the design of waste landfill. This paper focuses on investigating the interface friction angles of various artificial liners through large-scale direct shear tests. The details of friction angles are between geomembrane/granite decomposed soil, geomembrane/geotextile, and geomembrane/various geosynthetic clay liners(GCLs). The GCLs specimens were soaked and unsoaked under surcharge of 17.3kN/m^2 . The test results indicate that the surface roughness, shearing speed, flexibility of HDPE, wet & dry condition of GCLs are greatly influenced on the interface friction angles.

KEYWORDS : Interface friction angle, Direct shear test, Waste landfill, HDPE, GCLs.

1. 서론

폐기물매립장에서 침출수의 누수로 인한 지하수 오염을 방지할 목적으로 미국 환경청이 1982년 지오멤브레인을 활용한 하부 차수시스템을 요구하기 시작하였다. 최근에 들어 우리나라에서는 지오멤브레인과 토목섬유 점토 차수재(GCLs)를 폐기물매립지 하부 차수재로 사용하도록 규정하고 있다. 이러한 매립장 차수체계의 구성요소가 매우 빠르고 복잡하게 개발됨에 따라 환경적으로 안전하고 튼튼한 차수 시스템의 설계는 폐기물 매립장 안정에 매우 중요한 요소로 등장하고 있다. 특히 폐기물 매립장 하부 및 사면부의 차수체계가 높은 지하수위 또는 침출수의 누수로 인하여 포화되었을 경우 각 차수재의 마찰특성은 크게 변화하여 폐기물매립장 안정에 치명적인 악영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 지오텍스타일 및 지오멤브레인, GCLs의 종류와 실험조건에 따른 접촉마찰각을 실내시험을 통하여 고찰하여 보았다.

2. 연구내용 및 범위

토목섬유의 마찰특성은 보통 대형직접전단시험이나 인발시험에 의하여 도출해낸다. 예로서 지오멤브레인이나 돌기없는 띠형 보강재와 같은 토목섬유는 대형직접전단시험에 의해서, 돌기 있는 띠형 보강재나 그리드형보강재와 같은 토목섬유는 인발시험에 의해서 마찰특성을 규명한다. 본 연구에서는 다음 세 가지 범주로 구분하여; (1) 화강풍화토와 각각의 표면경도가 다른 지오멤브레인, (2) 건조상태에서의 지오텍스타일과 지오멤브레인, (3) 건조와 수침상태에서의 GCLs과 지오멤브레인사이의 접촉마찰각을 대형 직접전단시험을 실시하여 각각의 차수재 사이의 접촉마찰각의 변화를 고찰하였다.

3. 실내시험방법 및 시험장치

대형직접전단 시험기를 사용하여 슈이트형 토목섬유의 접촉마찰각을 구하는 방법에는 고정, 비고정, 부분고정방법의 3가지 종류가 있다. 일반적으로 부분고정, 고정, 비고정방법의 순으로 접촉마찰각이 크게 도출된다. 본 연구에서는 각각의 차수재를 더미블록에 완전히 고정하여 전단시키는 고정전단방법을 사용하였으며, 대형직접전단시험기는 전단력 최대 3ton까지 측정가능하며 전단상자의 크기는 30cm×30cm이다. 하부상자의 높이는 10cm, 상부상자의 높이는 9cm이며 상부에는 덮개를 덮어 공기압으로 수직하중을 재하할 수 있다.

4. 마찰특성 시험방법

4.1 지오멤브레인 / 화강풍화토

HDPE 지오멤브레인과 화강풍화토와의 마찰특성은 전단시험장치의 크기 및 시험방법, 토사의 입도, 풍화도, 수직하중의 크기 등 많은 인자의 영향을 받는다. 본 연구에서는 표 4.1과 같은 조건으로 시험을 실시하였다.

표 4.1 지오멤브레인의 표면경도 차이에 따른 시험방법

사용재료	지오멤브레인	다짐도	전단속도
화강풍화토	표면이 단단한 지오멤브레인(A1)	$\gamma_{d(max)}$ 의 90%	1mm/min
	표면이 유연한 지오멤브레인(A2)		

본 실내시험에서는 표면경도 차이에 의한 마찰특성을 비교, 검토하기 위해 두 가지의 HDPE 지오멤브레인을 시료로 사용하였다. 지오멤브레인 A1은 밀도 0.96g/cm³의 고밀도 폴리에틸렌수지(97%)에 카본블랙(2%), 산화방지제(1%)를 첨가하여 혼합, 제조된 칩(chip)을 용융 온도범위가 220~240℃인 압출기를 이용하여 용융시킨 다음 권취, 연신공정을 거쳐 두께 1.5mm로 제조한 시제품이며, A2는 밀도 0.94g/cm³의 고밀도 폴리에틸렌수지에 카본블랙(2.5%)이 첨가된 동일 두께의 시판제품을 사용하였다.

4.2 지오멤브레인 / 지오텍스타일

현재 국내에서 생산되는 HDPE 지오멤브레인과 지오텍스타일(단섬유 부직포)의 전단시험의 조건은 표 4.2와 같다.

표 4.2 지오멤브레인과 지오텍스타일의 직접전단 시험방법

지오텍스타일	지오멤브레인	전단속도
단섬유 지오텍스타일	textured type	1mm/min
	smooth type	

4.3 GCLs / 지오멤브레인

4.3.1 GCLs의 종류

현재 일반적으로 사용되고 있는 GCLs은 크게 3가지 형태로 구분되어진다 : 니들펀칭 GCLs, 스티치본딩 GCLs, 접착제 GCLs.

니들펀칭 GCL은 특별한 바늘을 사용하여 상부 부직포층의 섬유부분을 또 다른 지오텍스타일(직포 또는 부직포)층과 견고하게 부착시키기 위하여 미립분의 벤토나이트층을 통과시키는 과정을 반복한다. 이러한 구조는 벤토나이트를 담아두는 역할뿐만 아니라 벤토나이트를 안정한 상태로 구속시키는 가상의

cell을 생성시켜 전단력에 대한 저항력을 크게한다(그림 4.1참조). 본 논문에서는 니들펀칭 GCLs(B2) 및 접착제 GCLs(B1)을 시험시료로 사용하였다.

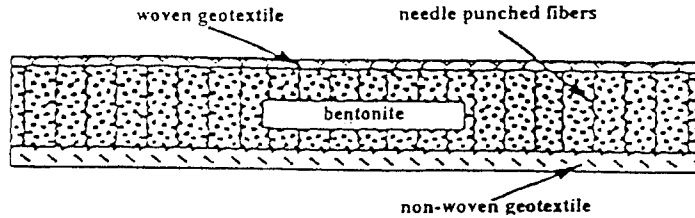


그림 4.1 니들펀칭 GCL의 조직도

스티치 본딩 GCL은 벤토나이트의 유출을 막기 위하여 두 개의 지오텍스타일을 분해되지 않는 실을 사용해 세로방향으로 꿰매 접합시키며, 부직포 사용시 발생하는 투수문제를 막기 위하여 일반적으로 제품생산은 직포를 사용한다(그림 4.2참조). 이것 역시 전단력의 저항은 증가시키지만 지오텍스타일 내부 벤토나이트의 자유로운 유동으로 인해 스티치 본딩 GCL설치시 균질한 두께의 시공이 어려우며, 특히 폐기물매립장 사면에 설치시 중력으로 인해 사면 하단부에 벤토나이트가 축적될 위험이 있다.

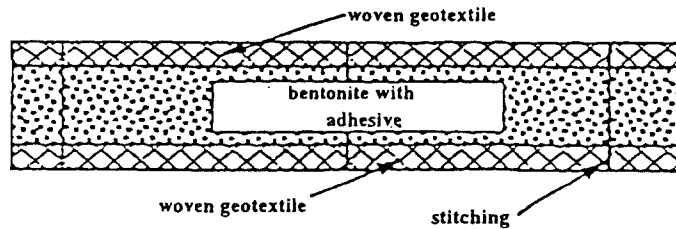


그림 4.2 스티치 본딩 GCL의 조직도

접착제 GCL은 접착제와 벤토나이트를 혼합하여 직포 위에 뿌리고 그것 위에 또 하나의 지오텍스타일을 접합시키는 것으로, 압력을 가해 접착제를 고정시키고 두께를 일정하게 조정하기 위하여 rolling mill을 통과시킨다. 벤토나이트가 팽창하는 성질을 억제하기 위하여 접착제는 물과 미립자사이에 발생하는 상호작용을 억제하며 물에 녹기 쉬운 것이어야 한다. 이것은 응력을 받을 경우 물과의 접촉면에서 접착력이 줄어 구성요소들 사이에 상대적 이동이 발생하여 안정성을 감소시킨다. 이러한 이유로 접착제 GCL이 폐기물매립장 사면에 설치되면 쓰레기의 압력에 의해 상부 지오텍스타일이 수침된 벤토나이트 위로 미끄러져 내릴 위험이 있다.

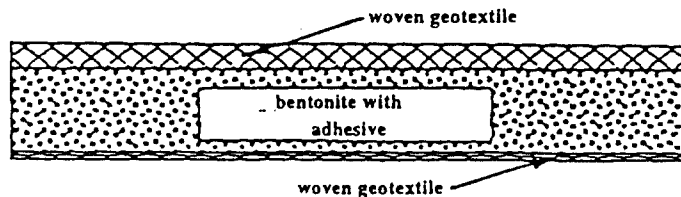


그림 4.3 접착제 GCL의 조직도

4.3.2 시료의 준비

현재 국내에서 사용되고 있는 GCLs(부직포/벤토나이트/직포)을 수침시료로 만들기 위해 더미블록의 크기에 맞게 재단하고 하중 재하에 따라 포화된 벤토나이트의 누출을 막기 위해 GCLs의 4면에서 1cm 정도 벤토나이트를 긁어내고, 상·하부 지오텍스타일을 재봉하였다. GCLs의 제단을 마친 후 투수계수가

$1 \times 10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 정도인 지오텍스타일 포대에 넣어 0.176 kg/cm^2 의 수직응력을 가한 상태에서 10일간 포화시켰다(그림 4.4 참조). GCLs과 지오멤브레인의 전단시험 조건은 표 4.3과 같다.

표 4.3 GCLs과 지오멤브레인의 직접전단 시험방법

사 용 재 료		전단면	전단속도
GCLs(건조상태)	지오멤브레인(textured)	부직포면	1mm/min
	지오멤브레인(smooth)		
GCLs(포화상태)	지오멤브레인(textured)		1mm/min
	지오멤브레인(smooth)		

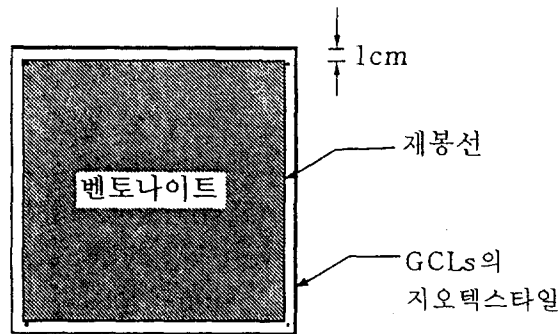


그림 4.4 GCL 시료 준비

5. 시험결과

5.1 시험대상 토사의 토질역학적 특성

지오멤브레인과 접촉토사는 우리나라에 널리 산재되어 있어 주변에서 쉽게 구할 수 있는 화강풍화토를 선정하였다. 본 연구에 사용된 화강풍화토의 대표적인 물성치인 비중, 입경, 건조밀도는 표 5.1에 나타난 것과 같다. 그림 5.1은 화강풍화토의 입도분포곡선이다.

표 5.1 접촉토사의 토질역학적 특성

재 료	비 중	입 경		건조밀도(g/cm^3)	
		균등계수	곡률계수	최대건조밀도	최소건조밀도
화강풍화토	2.721	7.33	0.83	1.90	-

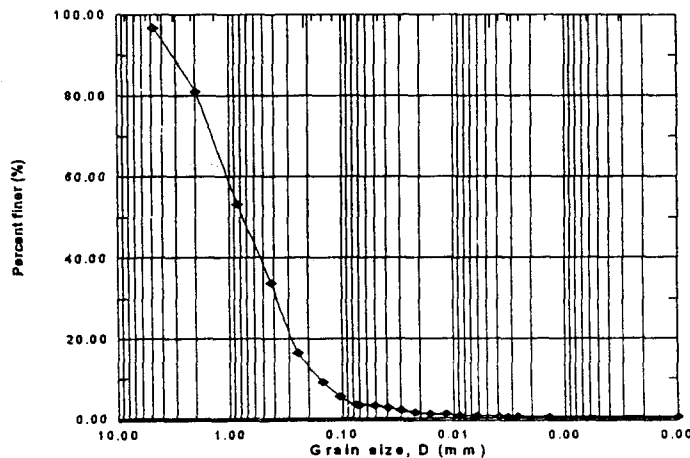


그림 5.1 화강풍화토의 입도분포곡선

5.2 지오멤브레인 / 화강풍화토

지오멤브레인과 화강풍화토와의 접촉마찰정수는 표 5.2에 나타난 것과 같다. 그림 5.2는 지오멤브레인과 화강풍화토와의 Coulomb의 파괴곡선을 나타내며, 그림 5.1은 다짐도가 $\gamma_{d(max)}$ 의 90%일 때, 경도차이에 따른 지오멤브레인의 수평변위에 대한 전단응력곡선을 나타낸 것이다.

표 5.2 지오멤브레인과 화강풍화토의 접촉마찰정수

사용재료	지오멤브레인	다짐도	겉보기 점착력 (kg/cm ²)	내부마찰각 (°)
화강풍화토	표면이 단단한 지오멤브레인(A1)	$\gamma_{d(max)}$ 의 90%	0.01	25.84
	표면이 유연한 지오멤브레인(A2)		-	23.83

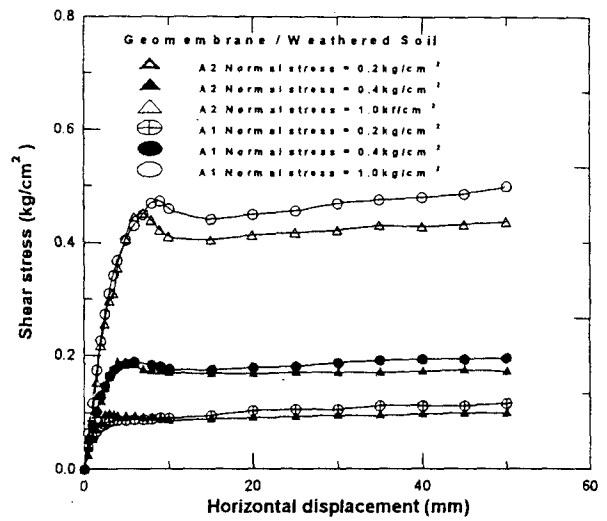
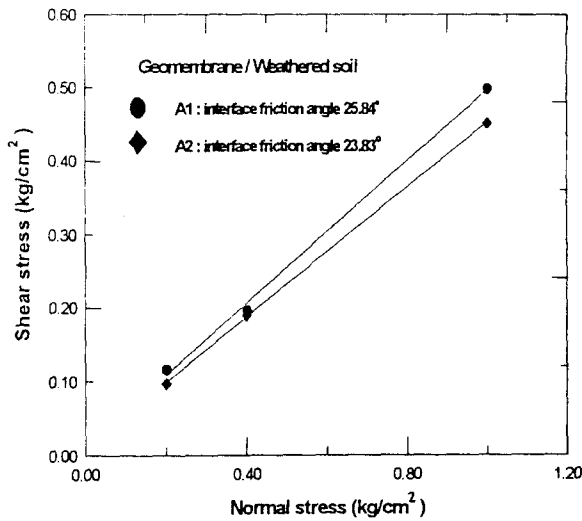


그림 5.2 수직-전단응력곡선(화강풍화토) 그림 5.3 $\gamma_{d(max)}$ 의 90%일 때 수평변위-전단응력곡선

상기의 시험결과를 분석해보면, 지오멤브레인의 표면경도는 접촉마찰각을 결정하는데 있어서 중요한 요소로서 지오멤브레인의 표면경도가 낮을 경우 전단응력이 크게 측정되며 따라서 접촉마찰각도 크게 측정됨을 알 수 있다. 이는 토사입자의 이동 메카니즘이 상대적으로 표면이 단단한 지오멤브레인은 토사입자의 활동을 유도하지만 유연한 지오멤브레인은 토사의 회전을 유발시키기 때문이다.

5.3 지오멤브레인 / 지오텍스타일

지오멤브레인과 지오텍스타일의 접촉마찰정수는 표 5.3에 나타난 것과 같다.

표 5.3 지오멤브레인과 지오텍스타일의 접촉마찰정수

사용재료	지오멤브레인	Peak		Residual	
		겉보기 점착력 (kg/cm ²)	내부마찰각 (°)	겉보기 점착력 (kg/cm ²)	내부마찰각 (°)
단섬유 지오텍스타일	textured type	0.128	22.3	-	-
	smooth type	0.024	6.6	0.029	5.4

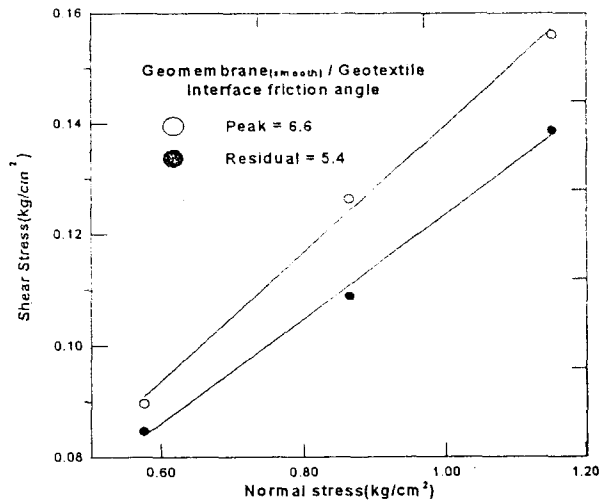


그림 5.4 수직-전단응력곡선(GM_s / GT)

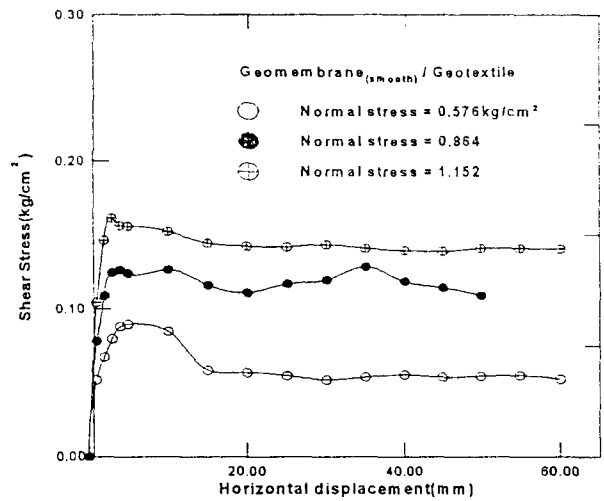


그림 5.5 수평변위-전단응력곡선(GM_s / GT)

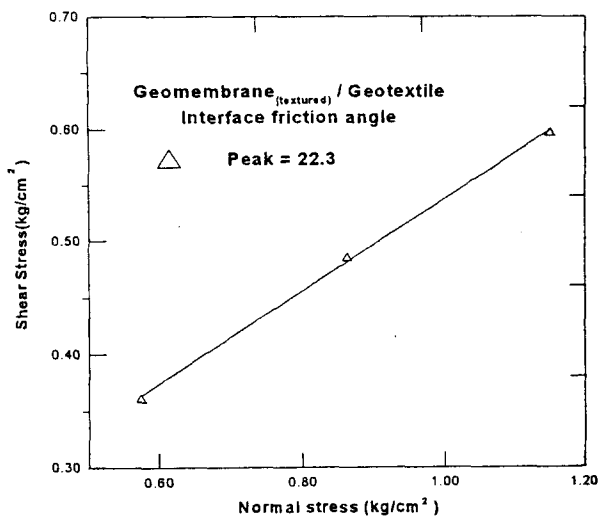


그림 5.6 수직-전단응력곡선(GM_t / GT)

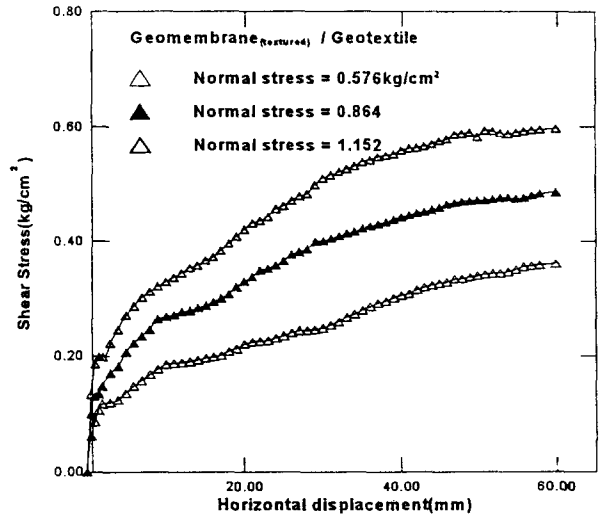


그림 5.7 수평변위-전단응력곡선(GM_t / GT)

상기에 제시된 Smooth type 지오멤브레인과 textured type 지오멤브레인 각각에 대한 단섬유 지오텍스타일의 전단시험결과를 분석해 보면, Smooth type 지오멤브레인보다 textured type 지오멤브레인의 접촉마찰각이 양호한 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 Smooth type 지오멤브레인과 지오텍스타일의 전단시 지오멤브레인 표면에서 활동(sliding)이 주된 메카니즘이나, textured type 지오멤브레인과 지오텍스타일의 전단시는 지오멤브레인 표면의 micro-texture의 찢어짐이나 지오텍스타일 필라멘트의 찢어짐 또는 뽑힘이 주된 메카니즘이므로, 이러한 표면 감도는 지오멤브레인의 표면 거칠기와 정량적인 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서, 접촉마찰각은 표면거칠기에 비례관계를 나타낸다.

5.4 GCLs / 지오멤브레인

GCLs와 지오멤브레인의 접촉마찰정수는 표 5.4에 나타난 것과 같으며, 그림 5.4와 5.5는 표 5.4에 나타난 각각의 시료에 대한 전단시험을 통해 얻어진 수직-전단응력곡선이다.

표 5.4 GCLs와 지오멤브레인의 접촉마찰정수

사용재료	지오멤브레인	Peak		Residual	
		겉보기 점착력 (kg/cm ²)	내부마찰각 (°)	겉보기 점착력 (kg/cm ²)	내부마찰각 (°)
GCL(B1-수침)	smooth type	0.167	9.490	0.156	8.870
GCL(B1-수침)	textured type	0.161	21.49	0.093	16.84
GCL(B2-수침)	smooth type	0.079	5.130	0.080	4.320
GCL(B2-수침)	textured type	0	19.76	0.006	14.96
GCL(B2-건조)	smooth type	0.080	17.42	0.075	11.09

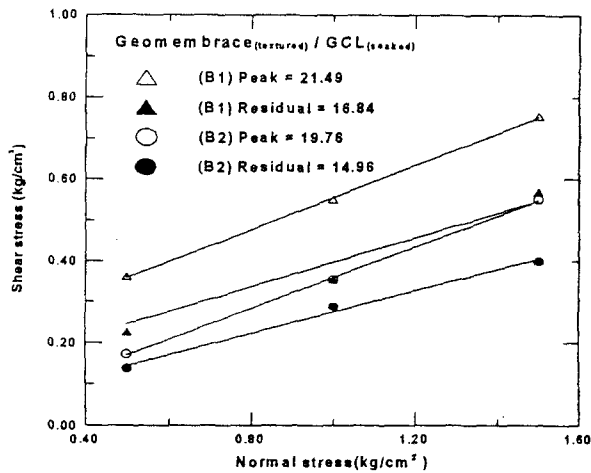


그림 5.8 수직-전단응력곡선(geomembrace/GCLs)

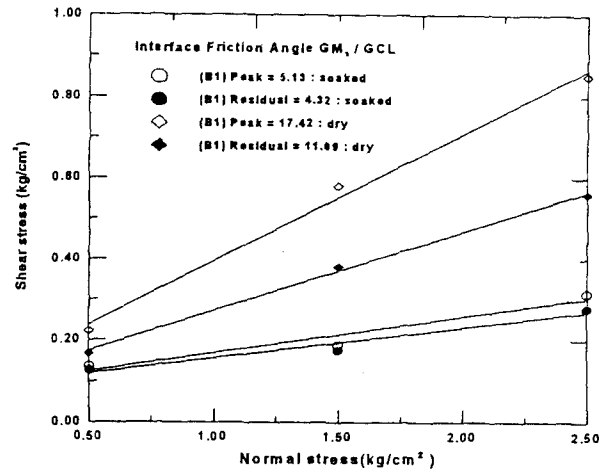


그림 5.9 수직-전단응력곡선(GM/GCL)

상기의 결과를 분석해 보면, 그림 5.5에 나타난 것과 같이 GCLs과 지오멤브레인과 접촉마찰각 도출에 있어서 건조상태의 접촉마찰각이 수침상태의 접촉마찰각 보다 크게 측정됨을 알 수 있었다. 이는 수침상태의 GCLs에서 벤토나이트가 포화된 후 수직응력을 받을 때 지오멤브레인과 전단면인 부직포위로 밀려나와 표면을 더 매끄럽게 만들기 때문이다. 이러한 GCLs이 폐기물매립장의 사면에 설치되었다고 가정하였을 때, 중력으로 인한 쓰레기하중이 단계적으로 작용하여 차수시스템 상의 여러 곳에 응력집중 현상을 발생시킬 것이며, 이러한 응력집중 현상으로 GCLs내부의 벤토나이트가 지오텍스타일의 표면으로 빠져나와 폐기물매립장 하부로 흘러 차수 및 배수체계에 악영향을 미칠 것이다. 이러한 이유로 폐기물매립장 사면 설계시 사용되는 차수재 사이의 접촉마찰각은 건조상태 보다는 수침상태에서의 residual 값을 선택하는 것이 바람직하다.

6. 결론

1. 지오멤브레인의 표면경도가 단단할수록 표면경도효과에 의해 토사입자의 활동이 유발되며 유연한 경우 토사입자의 회전을 유발시켜 표면경도가 유연할수록 접촉마찰각은 크게 나타났다.
2. 표면이 거친 지오멤브레인의 최대 및 잔류 전단강도가 표면이 매끄러운 지오멤브레인보다 더 크게 나타났다.

3. 표면이 매끄러운 지오멤브레인의 표면에서는 지오택스타일의 활동(sliding)이 주된 메카니즘이나, 표면이 거친 지오멤브레인에서는 표면의 거친곳에서 지오멤브레인 micro-texture의 찢어짐이나 지오택스타일 필라멘트의 찢어짐 또는 뿔힘이 주된 메카니즘임을 알 수 있었다.
4. 표면 감도(sensitivity)는 지오멤브레인 표면 거칠기와 정량적인 관계된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 접촉마찰각은 표면거칠기에 비례관계를 나타낸다.
5. 폐기물매립장 사면 설계시 적용되는 차수재 사이의 접촉마찰각은 수침상태에서 도출한 residual값을 선택하는 것이 바람직하다.

감사의 글

“본 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 연구되었음”. 이에 감사를 표합니다.

7. 참고문헌

1. Bressi, G., M. Zinesi, F. Montanelli, P. Rimoldi (1995), "The Slope Stability of GCL Layers in Geosynthetic Lining System," *Sardinia 95 Fifth International Landfill Symposium*, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari. pp. 595~610.
2. Carson, D.A., Bonaparte, R., Daniel, D.E. Koerner, R.M. (1998), "Geosynthetic Clay Liners at Field-Scale: Interanl Shear Test Progress," *Proc. of Sixth International Conference on Geosynthetics*, Vol. 1 pp. 427~432.
3. Eid H.T., Stark, T.D. (1997), "Shear Behavior of an Unreinforced Geosynthetic Clay Liner," '97 Geosynthetic International, Vol.4 No.6, pp. 645~659.
4. 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.
5. 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.
6. Frobel, R.K., Sadlier M.A., Cowland, J.W. (1998), "Shear Strength and Deformation Considerations for Composite Landfill Liners in Hong Kong," *Proc. of Sixth International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, Georgia, USA, Vol. 1, pp. 411~416.
7. 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.
8. Koerner, R.M., Martin, J.P., Koerner G.R. (1986), "Shear Strength Parameters between Geomembranes and Cohesive Soils," *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 4, pp. 21~30.
9. Koerner, R.M. (1994), *Designing with Geosynthetics*, Third Ed., Prentice Hall.
10. Stark, T.D. (1998), "Bentonite Migration in Geosynthetics Clay Liners," *Proc. of Sixth International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, Georgia, USA, Vol. 1, pp. 315~320.