

흙-토목섬유의 마찰특성을 이용한 차수구조의 설계 Design of Liner Systems Using Interface Friction of Soil-Geosynthetics

이광열¹⁾, Kwang-Yeol Lee, 김수석²⁾, Soo-Seok Kim

¹⁾ 동서대학교 건설공학부 토목공학과 조교수, Assistant Professor Dept. of Civil Engineering, Dongseo Univ.

²⁾ 동서대학교 건설공학부 토목공학과 교수, Professor Dept. of Civil Engineering, Dongseo Univ.

SYNOPSIS : In this study, interfacial angles for two adjacent materials are investigated for the design of geosynthetics in earthen structures specially a liner systems of waste landfills. The purpose of the study is to determine interface friction angles of geosynthetics to various soil types and to examine the tensile strength of geosynthetics in a side slope of waste landfills.

To determine interface friction angles, the direct shear testing apparatus have been modified in accordance with ASTM D5321. Three different types of soils and four geosynthetics are applied for the test to determine the interface friction angles. Equilibrium analysis have been conducted to estimate the required tensile strength of geosynthetics using a model of liner systems in a side slope.

From this study it is found that the textured type of HDPE is more efficiency than smooth type of HDPE and using soil-bentonite liners is more stable than using compacted clay liners underlying the HDPE sheet.

KEYWORDS : Waste landfill, Geosynthetics, Liner system, Tensile strength, Soil-bentonite.

1. 서론

토목섬유를 이용한 토공구조의 설계기술은 1980년대 후반부터 지속적인 연구와 개발이 시작되었으며 90년대 이후부터는 우리 나라에서도 활성화되기 시작하였다. 토목섬유를 토공구조물에 이용하는데 있어서 핵심적인 역학적 요소는 토목섬유의 인장강도이다. 토공구조물 내에서 토목섬유의 인장강도의 발현은 재하 하중과 토목섬유와 인접한 흙과의 마찰력에 의해 큰 영향을 받으며, 마찰력은 토목섬유의 재질과 흙의 공학적 특성에 의해 영향을 받는다. 따라서 토목섬유 토공구조물을 설계하는데 있어서 토목섬유와 흙간의 접촉마찰 특성은 중요한 요소이다. 현재까지의 여러 연구자들에 의해 흙과 토목섬유간의 접촉마찰에 관한 연구가 수행되어오고 있으나, 접촉 마찰각의 범위가 너무 크기 때문에 실제로 설계에 반영하기에는 많은 무리가 있다.(Rechard and Scott: 1985³⁾, Motan et. al: 1993⁴⁾)

Koerner(1987)⁵⁾에 의하면 HDPE(high density polyethylene)와 모래 사이의 접촉 마찰각은 17도에서 25도, HDPE와 점토 사이의 접촉 마찰각은 5도에서 10도, Textured-HDPE와 모래는 30도에서 40도, Textured-HDPE와 점토는 9도에서 15도, 부직포와 모래는 25도에서 44도, 그리고 부직포와 점토는 15도에서 28도의 범위로 연구결과에서 보고된 바 있다.

이와 같이 서로 다른 부재간의 접촉 마찰각은 흙의 종류와 성질에 따라서 아주 큰 범위를 나타내므로 설계에 반영할 값을 임의로 선정하는 것은 합리적인 설계가 될 수 없다. 또한 최근에 와서는 기초지반을 조성하는데 있어서 인위적으로 제조한 성토재와 매립재를 많이 사용하는 추세에 있는데 현재까지의 연구로는 이들에 대한 접촉마찰특성에 대한 적정 값을 아직 구명하지 못하고 있는 실정이다. 또한 토목섬유를 이용하여 시공한 후에 함수비, 생물학적 작용, 클로깅(clogging) 등의 공학적 특성변화에 의해 접촉마찰각이 변화할 수 있는 소지가 충분히 존재한다(이광열, 1997)⁽²⁾.

이와 같이 토목섬유 이용률의 증가와 기술적 환경을 고려하면 토목섬유를 이용한 토공구조물의 설계에서 중요한 요소인 접촉 마찰각에 관한 연구가 시급한 실정이다(Holtz, 1995)⁽⁶⁾. 본 연구에서는 폐기물매립지의 차수구조에서 토목섬유와 인접재료간의 접촉마찰특성과 그로 인한 설계인장강도에 미치는 영향을 분석하였다. 토목섬유는 지오텍스타일, 지오멤브레인, 그리고 지오폴리머를 이용하였으며, 사질토, 점성토, 흙-벤토나이트 혼합토 사이의 접촉마찰 특성을 파악하기 위하여 직접전단시험을 수행하고 각 재료간의 접촉마찰각을 제시하였다. 접촉 마찰각은 직접전단시험을 이용하였으며 시험방법은 ASTM D5321의 방법을 적용하였다.

2. 재료의 물성시험

본 연구에서 사용한 재료 중에서 모래와 흙-벤토나이트는 인위적으로 제조한 것이며 점성토는 자연상태의 흙으로서 #4 체를 통과한 시료를 사용하였다. 접촉마찰 전단시험을 위하여 폐기물매립지의 차수구조의 시공에 많이 사용되는 흙을 선정하였고, 차수구조에서 배수층은 모래 또는 지오폴리머를 사용하고 차수층은 흙 차수층 위에 HDPE를 설치하는 일반적인 차수구조를 모델로 하였다. 차수층의 시험에 사용한 흙은 사질토, 점성토 그리고 흙-벤토나이트의 세 가지종류이다.

사질토로서 사용한 모래는 표준사로서 주문진산이며 최대 입경이 2.0mm이고 세립의 성분을 비교적 많이 함유한 흙이다. 모래의 비중은 2.645, 입자의 분포는 #20체를 모두통과하고 #40체 통과율은 16%이며 #60, 140, 200체의 통과율은 0%로서 #20체와 #40체 사이에 84%가 잔류하였으며 #40체와 #60체 사이에는 16%가 잔류하고 있는 가는 입자의 모래이다.

점성토는 황색의 산토로서 #200체 통과율이 68%이며, 통일분류법에 의한 분류는 CL에 해당되며, 평균 함수비는 24.1%로서 비교적 높은 편이고 입도분포는 양호한 것으로 시험결과 나타났다. 다짐시험결과 최대건조밀도가 1.65t/m³이고 최적함수비가 20%이다. 액성한계가 43%, 소성한계는 26%이며 소성지수는 17%로 비교적 연약하고 압축성이 작은 흙으로 나타났다.

본 연구에 사용된 흙-벤토나이트 혼합토는 앞에서 기술한 점토를 모토로 하여 벤토나이트의 혼합비 7%(건조중량비율)를 적용하여 혼합토를 제조하였다. 흙의 균질도를 높이기 위하여 #4체를 통과한 시료를 사용하였다. 흙-벤토나이트 혼합토의 통일분류법상 CL에 속하는 흙으로 나타났다. 벤토나이트는 팽윤도가 23cc/2g, 분말도는 #250체 통과율이 87%, 건조 분말상태의 함수비가 9.6%이었다. 혼합비(p)는 점성토와 벤토나이트의 건조중량에 대한 벤토나이트의 건조중량으로써 계산하여 적용하였다. 식으로 나타내면 다음의 식과 같다.

$$p = \frac{\text{벤토나이트의 건조중량}}{\text{자연토의 건조중량} + \text{벤토나이트의 건조중량}}$$

각 시료의 물성시험 결과는 Table 2.1 요약하여 나타내었다. 토목섬유는 G사의 제품을 사용하였으며, HDPE의 인장강도는 57.14kg/cm이며, 두께는 2.0mm, 카본블랙(carbon black)의 함량은 2~3% 정도이다. 지오텍스타일은 니들펀치한 제품을 사용하였다.

Table 2.1 Selected Soil Properties

Pro. Soils	Water content (%)	Specific Gravity	Compaction(A)		Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	#200 Pass (%)	USCS
			γ_{dmax} (t/m ³)	OMC(%)				
Sand	-	2.645	-	-	NA	NA	0	-
Clay	24	2.50	1.65	20	44	17	68	CL
S/B	-	-	1.53	23	116	35	75	CL

3. 직접전단 접촉마찰시험

3.1 시험장치

접촉마찰시험에 일반적으로 많이 이용하는 시험장치는 인발시험장치와 직접전단시험장치가 있는데 본 연구에서는 직접전단시험장치를 이용하였다. 두 가지 재질간의 접촉 마찰각에 대한 실험은 전단시험장치를 응용한 것으로 1980년대 초에 토목섬유(geosynthetics)의 활용이 시작되면서 시험장치가 고안되기 시작하였으며, 이 당시에는 흙의 직접전단시험장치를 많이 이용하였다. 최근에 와서는 많은 연구결과를 토대로 하여 접촉 마찰각에 대한 시험기준이 제정되었는데 직접전단시험을 이용한 접촉마찰시험은 ASTM D5321에서 시험기준을 규정하고 있다.

본 연구에서는 ASTM D5321의 시험기준을 적용하여 상부 및 하부상자의 내부치수를 가로 10cm, 세로 10cm로 하고 깊이를 2.5cm로 하여 제작하였다. 본 연구에서 사용된 시험장치의 단면구조는 다음의 Fig. 3.1과 같다.

3.2 실험방법

접촉 마찰각을 구하기 위한 시험방법은 흙의 직접전단시험의 방법과 동일하다. 시험방법은 직접전단시험의 경우와 마찬가지로 응력제어 시험과 변형율제어 시험법이 있는데 본 연구에서는 변형율제어 시험방법을 적용하였다.

연직응력(normal force)은 0.04Kg/cm², 0.08Kg/cm², 0.161Kg/cm² 의 3단계의 다른 하중을 적용하였으며, 전단속도는 사질토인 경우 1.08mm/min, 점성토 및 혼합토인 경우 1.0~1.5mm/min을 적용하였다. 시료조성은 최대 건조단위중량의 95%이상 이 되도록 다지고, 함수비는 최적 함수비 보다 2% 증가된 함수비를 사용하여 조성하였다. 여기서, 사질토의 경우는 표준사로서 건조상태의 시료를 그대로 사용하였다.

시험순서는 첫째 하부상자에 상자내부크기와 일치하도록 나무판을 제작하여 조립하고 둘째로 하부상자의 표면에 시험대상인 토목섬유를 덮어 고정핀으로 고정시킨다. 셋째로 상부와 하부상자를 시험대에 장착시키고 상부상자에 준비된 흙 시료를 채워 다짐을 한다. 상부상자에 채우는 흙의 밀도는 다짐시험(A방법; 표준다짐시험)결과로부터 얻은 최대건조밀도의 95%이상 이 되도록 하였으며 함수비는 최적함수비를 사용하였다.

마지막으로 수평변형 게이지와 수직변형 게이지를 부착하고 수직하중을 걸어준다. 시험은 수직하중이 상부상자의 흙을 통하여 토목섬유표면에 충분히 전달되도록 하중 재하 후 24시간동안 압밀시킨 다음 전단시험을 시작한다. 시험결과 정리하는 흙의 직접전단시험(ASTM D3080)의 경우와 동일한 방법으로 전단력과 수직응력의 관계로부터 점착력과 접촉 마찰각을 산정 한다.

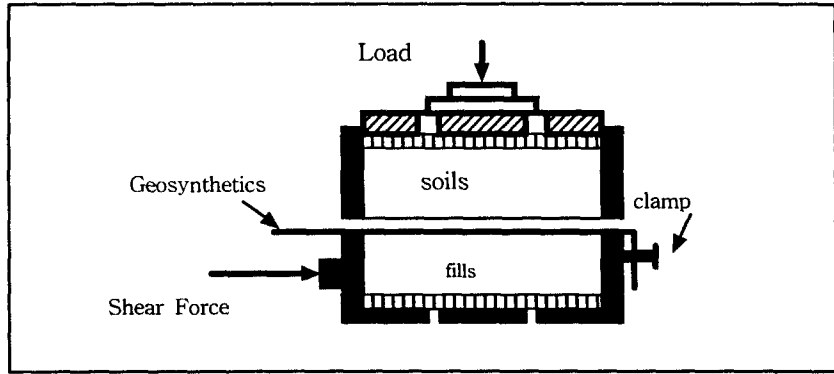


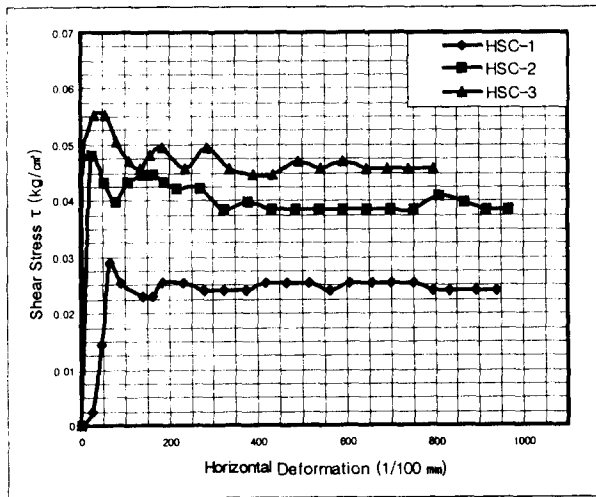
Fig. 3.1 Direct Shear Interface Friction Test Apparatus

4. 결과 및 분석

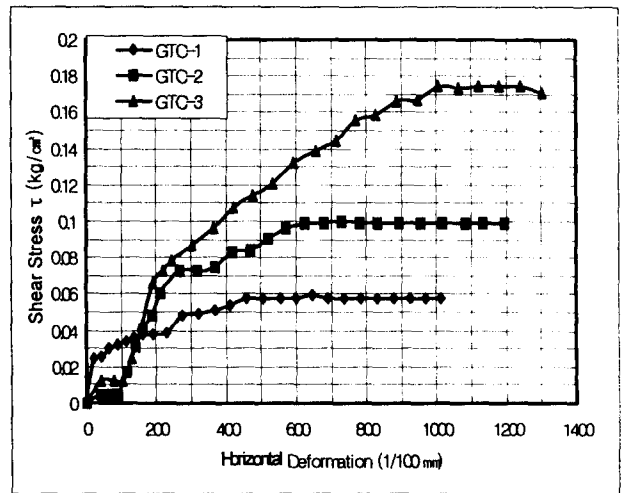
4.1 전단응력-변형특성

HDPE와 Geotextile의 전단응력-변형률 특성을 분석하였다. 인접부재간에 전단력이 작용할 때 부재의 변형특성에 대한 분석은 직접전단시험으로부터 전단응력-변형률 관계곡선을 도시함으로써 알 수 있다. 본 연구에서는 시험결과 중에서 대표적으로 인접재료가 점성토인 경우에 대하여 분석하였다. 연직응력을 0.161kg/cm^2 로 했을 때 시험결과를 분석한 결과 HDPE와 점성토 사이에서는 변형률이 0.03%일 때 최대 전단응력 0.055kg/cm^2 이고 부직포(geotextile)과 점성토 사이에서는 변형률이 1.0%일 때 최대 전단응력 0.175kg/cm^2 로 측정되었다. 두 가지의 시험결과를 다음의 [Fig. 4.1]에 나타내었다.

[Fig. 4.1]-(a)에서는 HDPE의 전단응력-변형률 관계를 나타낸 그림이다. 그림에 의하면 전단력을 가한 후 급격히 항복응력에 도달했다가 감소하여 변형의 증가에 따라 일정한 전단응력 상태를 유지하고 있다. [Fig. 4.1]-(b)는 지오텍스타일의 전단응력-변형률 관계인데, 변형의 증가에 따라 전단응력이 서서히 증가하면서 항복응력에 도달하는 특성을 보이고 있다



(a) HDPE-Clay



(b) Geotextile-Clay

[Fig. 4.1] Shear-Deformation Curves

4.2 접촉마찰각

직접전단 접촉마찰시험은 Fig. 3.1에 도시한 것과 같이 ASTM D5321에서 규정하는 장치를 이용하였으며, 시험결과는 연직응력과 전단응력의 관계로부터 마찰각을 산정하였다. 토목섬유-흙간의 접촉마찰 직접전단시험 결과 접촉 마찰각은 HDPE-모래 사이에는 22.6도, HDPE-점토 사이는 11.2도, HDPE-혼합토 사이는 16.5도로 HDPE에 대한 모래와 점토의 접촉마찰각은 모래인 경우가 약 11도 정도 크게 나타났으며, HDPE에 대한 점토와 혼합토의 접촉 마찰각은 혼합토가 약 5도 정도 크게 나타나는 경향을 띠고 있다. 또한, 표면이 거칠은 고밀도폴리에틸렌(Textured-HDPE)과 모래, 점토, 혼합토의 접촉 마찰각은 각각 36.6도, 46.5도, 45.1도로 나타났으며, Textured-HDPE에 대한 흙의 접촉마찰특성은 점토의 경우가 모래인 경우일 때 보다 약 10도, 혼합토인 경우일 때 보다 약 1.4도 정도 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 여기서, 인접재료가 점토인 경우의 HDPE와 Textured-HDPE의 접촉 마찰각은 HDPE일 때 11.2도, Textured-HDPE일 때 46.5도로써 Textured-HDPE일 때가 HDPE일 때보다 약 35도 정도 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 시험종료 후 Textured-HDPE의 표면(흙과의 접촉면)의 상태는 많은 부분에 손상이 있었는데 특히, 모래질토와의 시험종료 후 표면상태는 거칠음 처리부분이 전체적으로 긁혀 있었다. 이러한 결과는 Textured-HDPE를 사용함으로써 큰 마찰력을 발현시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

지오컴포지트(geocomposite)와 모래, 점토, 혼합토 사이의 접촉 마찰각이 각각 38.4도, 29.2도, 25.6도로 나타났으며 부직포(geotextile)과 모래, 점토, 혼합토 사이의 접촉 마찰각이 각각 40.2도, 43.3도, 41.2도로 측정되었다. 토목섬유와 모래, 점토, 혼합토의 접촉 마찰각시험 결과를 Table 4.1에 요약하여 제시하였다.

Table 4.1 Interface Friction Angle Between Geosynthetic and Soil

	Sands(표준사)	Clays	Soil-Bentonite	Geonet
	Friction Angle (degree)	Friction Angle (degree)	Friction Angle (degree)	
HDPE(Smooth)	22.6	11.2	16.5	15
HDPE(Textured)	36.6	46.5	45.1	-
Geocomposite	38.4	29.2	25.6	-
Geotextile	40.2	43.3	41.2	21

4.3 토목섬유의 소요인장강도

사면차수구조에서 법면에 작용하는 하중은 토목섬유에 인장력으로서 전달되는데, 이 인장력은 인접부재 또는 재료와 토목섬유사이의 접촉 마찰각에 의해 큰 영향을 받는다. 구체적으로 설명하면 설계대상의 토목섬유를 중심으로 상부와 하부에서 인접재료간의 마찰저항력과 상재하중에 의한 인장력에 의해 토목섬유의 소요인장강도가 결정된다(이광열, 1997)⁽²⁾. 본 연구에서는 현재 일반폐기물 매립지의 사면부차수구조로 많이 이용하는 차수구조에서 HDPE 하부 차수층이 다짐점토(Case I), GCL(Case II), Soil-Bentonite 혼합토(Case III)에 대하여 HDPE의 소요인장강도의 범위를 제방높이변화에 따라 분석, 비교하였다. 또한, 차수구조를 구성하는 개별요소에 대한 소요인장강도의 범위를 제방높이를 변화하면서 비교하였다. 본 연구에 적용한 구조는 폐기물매립지 사면의 경사는 1:2(수직거리:수평거리)이며, 매립폐기물의 단위중량(γ_{sw})이 1.0 t/m³, 매립폐기물의 내부마찰각(ϕ_{sw})이 30° 그리고 단일 차수층의 사면부차수구조는 상부층으로부터 폐기물/부직포/지오컴포지트/HDPE/흙 차수층의 순으로 가정하였다. 각 모델은 Fig. 4.2에 도시하였다. 본 연구에서 적용한 설계이론은 사면부 마찰-인장 평형모델(이광열, 1997)을 적용하였으며, 토목섬유간의 접촉마찰각은 다음의 Table 4.2의 값을 적용하였다.

Table 4.2 Interface Friction Angle Between Geosynthetics

	Geotextile	Geocomposite	Geonet	GCL
HDPE(smooth)	12	13	12	10.7
HDPE(Textured)	29	-	-	31.8
Geotextile	-	21	16	-

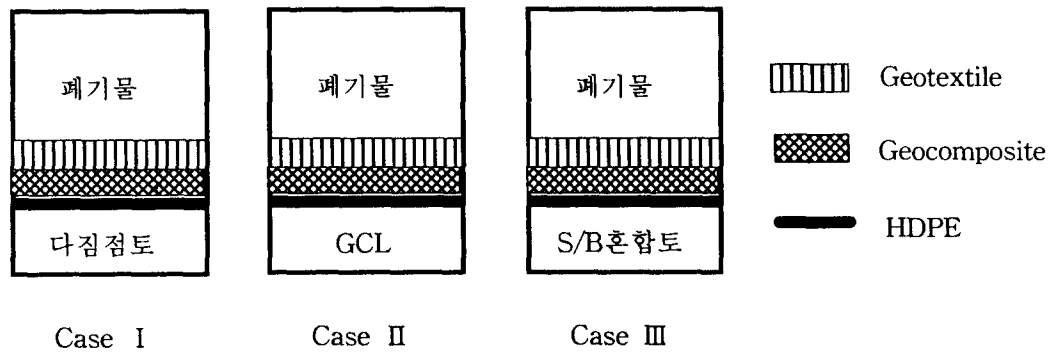


Figure 4.2 Various Liner Systems on a Slope

단일 차수층의 사면부 차수구조에서 HDPE 하부 차수층의 종류와 마찰특성에 따라 폐기물 매립 후 고밀도폴리에틸렌(HDPE)의 소요인장강도가 달라지는데 여기서는 차수층이 다짐점토, 토목섬유-점토 차수재(GCL), Soil-Bentonite 혼합토인 경우에 대하여 HDPE의 소요인장강도를 계산하여 Fig. 4.3에 나타내었다. Fig. 4.3에서 확인된 바와 같이 HDPE 하부 차수층이 GCL인 경우 HDPE의 소요인장강도가 약 4.8t/m, 다짐점토인 경우 3.7t/m 그리고 Soil-Bentonite 혼합토인 경우는 HDPE에 인장력이 작용하지 않고 HDPE 상부면에서 미끄러짐이 발생하는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 설정한 사면부 단일 차수구조에서 HDPE 하부 차수층을 GCL로 사용했을 때 차수구조 구성요소의 개별 소요인장강도를 제방의 높이 증가에 따라 산정 하였으며 그 결과를 Fig. 4.4에 나타내었다. 그림에서와 같이 H=5m 일 때 각 구성요소의 소요인장강도는 폐기물과 인접한 지오텍스타일(Geotextlie)의 경우 7.0t/m로 가장 크고 지옴포지트(Geocomposite)의 경우는 4.0t/m, 그리고 HDPE의 경우는 2.0t/m로서 소요인장강도의 크기는 Geotextile > Geocomposite > HDPE 의 순으로 나타났다. 미국의 GRI에서 제안한 차수재(HDPE)의 재질기준에 따르면, 두께 2.0 mm 고밀도폴리에틸렌(HDPE)의 최소 항복인장강도는 30kg/cm(3.0t/m)이다. 본 연구에서는 Fig. 4.2의 차수구조 모델에서 차수재 및 차수구조를 구성하는 토목섬유의 인장파괴에 대한 안전율을 최소 재질기준(항복인장강도 30kg/cm(3.0t/m))을 적용하여 제방높이의 관계로서 Fig. 4.5에 나타내었다. Fig. 4.5에 따르면 제방의 연직높이가 2m 이상이면 안전율이 6이하로서 HDPE의 인장파괴에 대하여 불안한 것으로 나타났다.

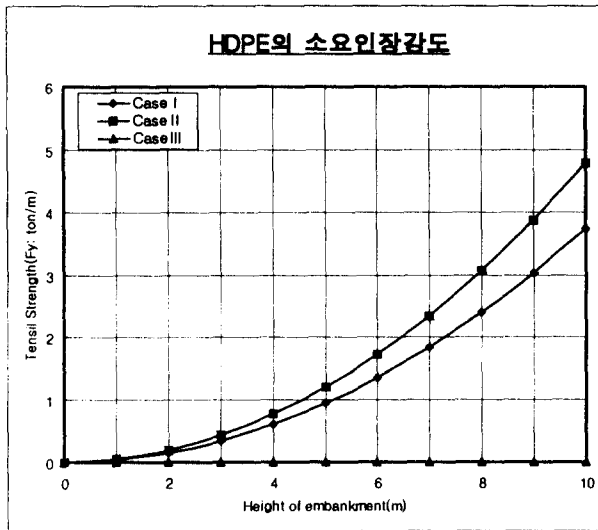


Fig. 4.3 Required Tensile Strength of HDPE underlying different Liners

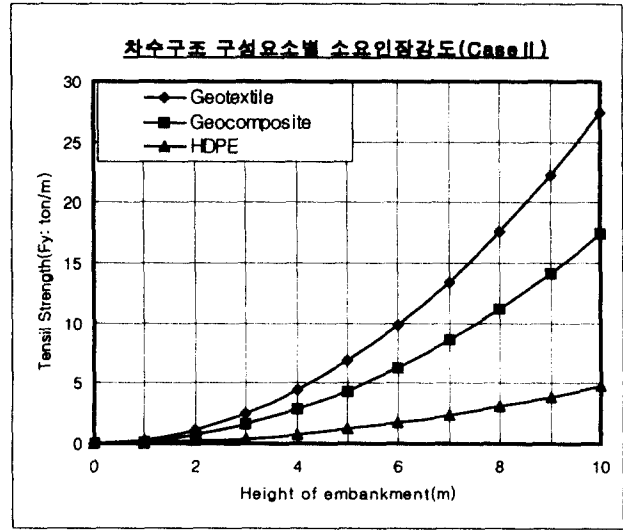


Fig. 4.4 Individual Tensile Strength of Geosynthetics in a Liner System(Case II)

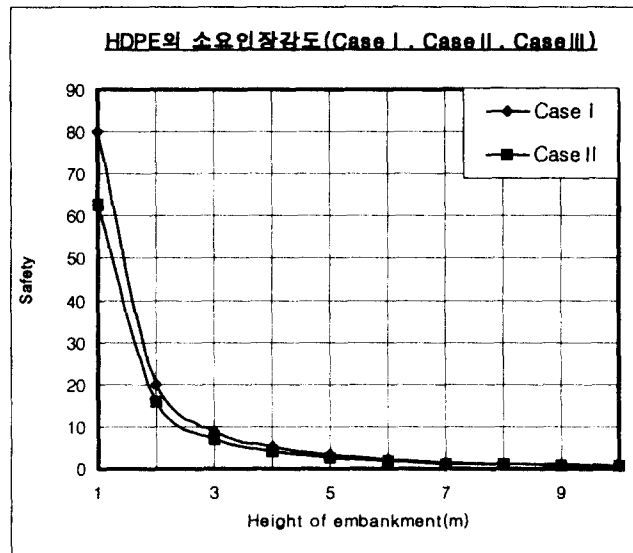


Fig. 4.5 The Safety against Tensile Failure for HDPE underlying different Liners

5. 결론

토목섬유의 접촉 마찰각은 법면에 하중이 재하될 때 법면 차수구조에서 인접한 두 부재간에 발생하는 마찰력과 그로 인한 설계대상 토목섬유의 인장저항력을 결정하는데 중요한 설계인자이다. 본 논문에서는 폐기물매립장의 사면차수구조에서 구성요소들의 인장저항력에 상응하는 소요인장강도의 크기와 인장파괴에 대한 안전율의 범위를 상호비교 하였다. 직접전단 마찰시험결과를 차수구조의 사면부 마찰-인장 평형모델에 적용하여 분석한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 접촉마찰에 의한 응력-변형 특성에서 점토-HDPE은 초기의 변형률에서 항복 전단응력이 나타나고, 점토-Geotextile의 경우는 서서히 파괴가 진행되면서 항복 전단응력이 나타난다.
2. 사면부 차수구조에서 구성재료의 안정성은 인접재료간의 접촉마찰특성에 의해 지배되기 때문에 접촉마찰시험을 통하여 토목섬유의 규격을 결정하여야 한다.
3. 차수구조의 설계는 여러 차수시스템을 선정하고, 각 구성요소에 작용하는 마찰력과 매립하중을 고려하여 인장파괴에 대한 안정성을 개별적으로 검토한 후 결정하여야 한다. (그림 4.4 참조)
4. 제방의 높이에 따라 인장파괴에 대한 안전한 범위 내에서 소단을 설치하여야 한다.

감사의 글

본 연구논문은 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제번호:97-10-08-99-B-1)에 의하여 연구되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 신은철, 심재범, 최찬용 (1996), “ 토목섬유를 활용한 쓰레기매립장 설계 및 시공”, ‘96 *Geosynthetics Conference*, 서울,
2. 이광열, 김수석.(1997), “ 폐기물매립지 사면부 차수구조의 HDPE 인장강도에 관한 연구”, 한국폐기물학회 논문집, 제14권 7호, pp.832
3. Richards,E.A.,and Scott,J.D.,(1985) “ Soil Geotextile Frictional Properties”, in *Proceedings of the 2nd Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembranes*, Edmonton, Alberta, Canada
4. Motan, E.S., et al.(1993), “Geomembrane protection by Nonwoven Geotextiles”, *Geosynthetics '93, IFAI*, Vancouver, British Columbia, Canada
5. Koerner, R.M. (1992). “Preservation of the environment via geosynthetic containment.” in *Geotextiles, Geomembranes, and Related Products. G. Den Hoedt. Ed., A.A. Balkema, Notlerdam, The Netherland.*
6. Holtz, R.D, and Kovacs, W.D., (1981). “An Introduction to Geotechnical Engineering”, *PrenticeHall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.,*
7. Koerner, R.M., Martin, J.P., and Koerner G.R,(1986) “Shear strength parameters between geomembranes and Cohesive soils”, *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol.4 No. 1,pp.21-31
8. Landreth, R.E., and Carson,D.A.,(1990) “RCRA Cover Systems For Waste Management Facilities”, *Proceedings of the 4th GRI Seminar on the Topic of Landfill Closures: Geosynthetics, Interface friction, and New Developement*, Philadelphia
9. Martin, I.P., Koerner, R.M. and Whitty, J.E.,(1984) “Experimental friction evaluation of slippage between geomembranes”, geotextiles and soils, *Proc. International Conference on geomembranes*, Denver:IFAI, pp191-196
10. Quinn, M., and Chandler, M.,(1991) “Landfill Liner Side Slope Design to Minimize Geomembrane Tensile Stress”, *Geosynthetics '91, IFAI*, Atlanta, Ga.
11. Somasundaram,S., and Khilnani, K.,(1991) “Stability of High Refuse Slopes on Synthetic Lining Systems at The Bee Canyon Landfill”, *Geosynthetics '91, IFAI*, Atlanta, Ga.
12. Von Pein, R.T., and Prasad, S.,(1990) “Composit Lining System Design Issues”, *Proceedings of the 4th GRI Seminar on the Topic of Landfill Closures: Geosynthetics, Interface friction, and New Developement*, Philadelphia