'97 Geosynthetics Conference / 28 November, 1997 / Seoul / Korea

매립지 사면차수구조에서의 HDPE 인장강도특성에 관한 연구
The Study on The Tensil Strength of HDPE on A Side-slope Liner System of Waste Landfills

이광열[1], Kwang-Yeol Lee, 김수석[2], Soo-Seok Kim

1)동서대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept of Civil Eng. Dongseo Univ.
2)동서대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept of Civil Eng. Dongseo University

SYNOPSIS : The purpose of this study is to analize the variations of tesil strength of HDPE in a liner system on side slope of waste landfills. In this study, theoretical analysis of stability of liner systems in a side slope are presented considering the interface frictions and height of waste piles, the shear force acting on a side slope of liner systems is determined utilizing a height of waste piles and an interface friction between liner materials. In order to analize the variation of required tensil strength of HDPE in a liner system, interface friction angles of materials are obtained from the direct shear interface friction test. In all cases, the results illustrated that the required tensil strength of HDPE exponentially increases with increase of a hight of embankment and a slope.
It is proved that the liner system installing geotextiles above the geomembrane(HDPE) underling compacted clays is the most effective for the stability of tensil failures on a side slope.
KEYWORDS : Landfill, LIner system, Slope stability, Interface friction

1. 서 론

차수시스템을 구성하는 각 요소들은 개별적 기능을 중심으로 폐기물의 매립고, 지반의 조건, 지역적 기후 및 주변환경 그리고 사후관리계획 및 토지이용 등을 고려하여 공학적으로 설계하고 크기와 규모를 결정하여야 한다.[(1),(2)] 그러나 현재까지 차수시스템을 설계하는 방식은 일정한 크기 및 재질로서 일괄적으로 사용하여 왔다. 이와 같은 공학적 안정설계를 무시한 설계로 인하여 매립완료후는 물론 매립중에도 차수시스템이 파괴되어 침출수가 매립장외로 누출되는 사고가 많이 발생되고 있다.
매립지의 제방의 사면부에서 차수시스템의 구조적 안정성 분석이론은 90년 Landreth와 Carson에 의해서 접촉마찰력에 의한 부재의 안정성 문제가 제기되었고 91년 Quinn과 Chandler에 의해서 이론적 분석이론이 제안되었으며 현재 일반적으로 적용되고 있다. 이 안정성 분석이론에서는 폐기물 매립고가 제방의 높이와 동일한 경우에 대하여 차수시스템을 구성하는 각 부재들의 인장강도에 대한 안정성을 분석하였다. 즉, Quinn과 Chandler의 분석이론에서는 제방의 높이보다 높은 위치에 매립된 폐기물에 의한 하중은 차수시스템의 안정성 분석에서 고려하지 않고 있다.

2. 이론적 고찰

2.1 사면부 차수시스템의 설계모델

사면의 차수시스템은 바닥의 것과 동일한 기능을 수행하지만 시공 및 안정성 유지에 어려움이 있기 때문에 배수층의 경우는 Geo-grid 등의 토목섬유로서 대용하거나 배수층을 없애고 보호층 및 여과층을 두는 경우도 있다[4]. 또한 점토차수층의 시공에서 다짐시공이 어려우며 다짐시공시 일정층두께의 유지가 곤란하고 시공후에도 앞에서 설명한 바와 같은 층분리 또는 sliding현상이 발생되어 차수시스템의 파괴로 이어진다. 이와같은 문제점을 보완하기 위해서는 배수층 설계에 Geogrid와 같은 토목섬유를 사용할 수도 있다. 사면의 법면에 작용하는 연직하중은 폐기물 매립이 완료된 경우 최대가 되고 매립의 증가에 따라 즉 매립고가 증가하면서 연직하중은 증가되며 따라서 사면에 작용하는 인장력도 증가하게된다. 그러나 현재까지의 분석이론은 폐기물 매립고가 제방의 높이와 같다는 가정하에서 사면부 차수시스템의 임의점에서 Force System에대한 평형이론을 적용하였다[3]. 일반적으로 매립폐기물의 사면경사를 1:3정도로 하며 제방사면의 경사는 1:1로 하는데 이러한 경우 제방사면의 Toe에서 제방높이의 1/3정도가 현재의 이론에서는 무시되고 있는 것이다.

매립이 완료(종료)된 폐기물 매립지의 제방 사면부 단면을 단순화시킨 설계모델은 Fig. 1-(a)와 같으며, 여기서 사면부에 적용하는 상재하중은 사면의 Toe에서 연직으로 작용하는 선을 경계면으로한 사면측에 해당하는 매립 폐기물의 하중이 된다. 그림에서 사면의 법면구조는 차수시스템을 구성하는 서로 다른 부재 또는 재료로서 조합을 이루며 부재 또는 재료의 양면에 접촉하는 마찰저항에 의해 평형상태를 이루고 있다. 여기서 한 부재를 채책 고려하여 Force System을 작도하면 Fig. 1-(b)와 같이 표현된다.

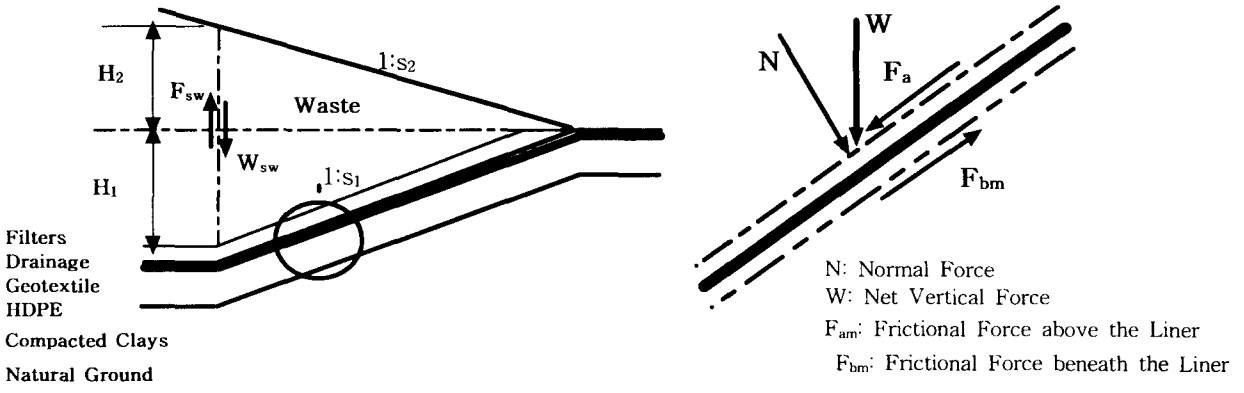


Fig. 1 Standard Model of Liner System at a Slope(a) and Force System at a Slope Surface(b)(Koerner, 1992)

2.2 HDPE 소요인장강도

차수시스템을 구성하는 부재 또는 재료의 자중은 무시하고 사면에 연직으로 작용하는 매립폐기물에 의한 연직하중 (W_{sw})은 다음의 식에 의해 계산된다.

$$W_{sw} = (0.5)\gamma_{sw}\{s_1 H_1^2 + s_2 H_2^2\} \quad \text{----------} \quad (1)$$

제체의 Toe에서 연직면을 따라 발생되는 하중 경계면에 작용하는 마찰저항력을 고려하면 이 마찰저항

력 (F_{sw})은 사면에 작용하는 연직하중과는 반대방향으로 작용하게 되며 정지토압으로 가정하고 토압계수 (K_0)를 적용하여 연직마찰 저항력 (F_{sw})을 계산하면 다음의 식과 같다.

$$F_{sw}=(0.5)\cdot\gamma_{sw}\cdot(H_1+H_2)^2\cdot K_0\cdot\tan(\phi_{sw}) \quad \text{---------} \quad (2)$$

여기서, H_1 = 제방높이 [L]　　γ_{SW} = 매립 폐기물의단위중량 [M/L^3]

H_2 = 제방높이 이상의매립고 [L]　　ϕ_{SW} = 매립폐기물의 내부마찰각

s_1 = 사면경사도　　K_0 = 정지 토압계수

s_2 = 매립체의 사면경사도

사면의 경사도(s_1)와 제체 Toe에서의 매립폐기물의 높이(H_1, H_2)간의 관계식은 $H_2=\frac{H_1 s_1}{s_2}$가 되는데 이 관계식을 이용하여 식(1)과 식(2)를 변형하면 제방높이 이상의 매립고인 H_2가 소거되어 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$W_{sw}=(0.5)\cdot\gamma_{sw}\cdot s_1\cdot H_1^2\,(1+\frac{s_1}{s_2}) \quad \text{----------} \quad (3)$$

$$F_{sw}=(0.5)\cdot\gamma_{sw}\cdot K_0\cdot\tan(\phi_{sw})\cdot H_1^2\,(1+(\frac{s_1}{s_2})^2) \quad \text{-----} \quad (4)$$

사면의 차수시스템(liner system)에 전달되어 부재의 인장력을 발생시키는 순수하중은 매립폐기물에 의한 연직하중에서 마찰저항력 (F_{sw})를 제외한 하중(net 하중)이 되며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$W=W_{sw}-F_{sw} \quad \text{----------} \quad (5)$$

따라서 법면에 직각으로 작용하는 주하중(normal force)은 매립 폐기물의 하중에 의해 발생하는데 사면의 경사각을 β라고 할 때 다음과 같이 표현된다.

$$N=W\cos(\beta) \quad \text{----------} \quad (6)$$

여기서, $\beta=\tan^{-1}(1/s_1)$

Fig.1-(b)에서 도시한 바와같이 차수시스템을 구성하는 하나의 개별 부재만을 고려할 때 그 부재의 상부층표면에서는 상재하중인 매립 폐기물에 의한 전단력이 작용하게되며 하부층표면에서는 전단저항력이 작용하게된다. 이 전단력(F_{am})과 전단저항력(F_{bm}:마찰저항력)은 인접한 재료간의 접촉마찰각(Interface friction angle)과 주응력에 의한 관계식으로서 나타낼 수 있는데 다음의 식과 같다.

$$F_{am}=N\tan(\delta_{am}) \quad \text{----------} \quad (7)$$

$$F_{bm}=N\tan(\delta_{bm}) \quad \text{----------} \quad (8)$$

여기서 δ_{am} = 상부층접촉재간의 마찰각

δ_{bm} = 하부층접촉재간의 마찰각

부재에 작용하여 인장파괴를 유발할 수 있는 인장력은 식(7)과 식(8)사이의 관계에서 알 수 있다. 부재에 인장파괴가 발생하는 조건은 결과적으로 $F_{am}>F_{bm}$ 이다. 따라서 부재에 작용하는 인장력은 다음 식과 같다.

$$F_{act}=F_{am}-F_{bm} \quad \text{----------} \quad (9)$$

부재의 인장강도를 F_y라 할 때 인장파괴에 대한 안전율은 다음식에 의해 구해진다.

$$FS=\frac{F_y}{F_{act}} \quad \text{----------} \quad (10)$$

차수시스템을 구성하는 각 부재들의 설계는 식(10)에 의해서 가능하며 이를 이용한 부재의 소요 인장강도는 식(7), 식(8), 식(9)를 식(10)에 대입하여 구해지는데 안전율을 1.3으로 하면 다음의 식과 같이 정리된다.

$$F_y \geq (1.3) \cdot N(\tan\delta_{am} - \tan\delta_{bm})$$

또는,

$$F_y \geq (1.3) \cdot (W_{sw} - F_{sw})\cos\beta(\tan\delta_{am} - \tan\delta_{bm}) \quad \text{-------} \quad (11)$$

3. 실험 및 방법

3.1 실험장치

두가지의 재질간의 접촉마찰각에 대한 실험은 전단시험 장치를 응용한 것으로 80년대초에 토목섬유(geosynthetics)의 활용이 시작되면서 시험장치가 고안되기 시작 하였으며 이 당시에는 흙의 전단시험장치를 많이 이용하였다. Richards와 Scott (1985)[6]는 흙의 전단시험기구를 이용하여 흙과 토목섬유(geosynthetics)에 대한 접촉마찰각의 특성을 연구하였는데 연구결과 전단상자의 크기, 전단상자간의 마찰, 토목섬유(하부상자)의 고정상태, 전단속도등에 따라서 접촉마찰각(interface friction angle)이 달라짐을 확인하였다. Bemben과 Schulze(1993)[1]은 흙과 표면이 거칠은 토목섬유 사이의 접촉마찰각은 수평변형량이 0.8인치~2.7인치의 범위에서 잔류응력의 영향이 적게 나타나기 때문에 이때의 측정값으로 시험결과를 결정하는 것이 타당하며,지오네트(geonet),지오그리드(geogrid)등에대한 시험은 전단상자의 크기가 클수록 정확한값이 결정된다고 제안하였다.

최근에 와서는 많은 연구결과를 토대로하여 접촉마찰각에 대한 시험기준이 제정되었는데 ASTM D5321에서 시험기준을 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 ASTM시험기준을 적용하여 상부 및 하부상자의 내부치수를 가로 30.5cm 세로 30.5cm로 하고 깊이를 5.0cm로하여 제작하였다. 본 연구에서 사용된 시험장치의 단면구조는 다음의 Fig. 2와 같다.

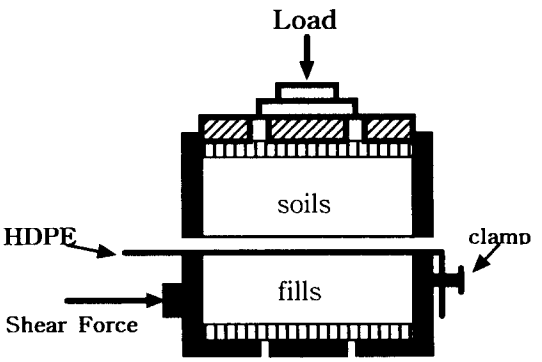


Fig. 2 Direct Shear Interface Friction Test Apparatus

3.2 시험방법

접촉마찰각을 구하기위한 시험방법은 흙의 직접전단시험의 방법과 동일하다. 시험방법은 직접전단시험의 경우와 마찬가지로 응력제어시험과 변형율제어시험법이 있는데 본 연구에서는 변형율제어시험방법을 적용하였다. 연직응력(normal force)은 0.033Kg/cm^2, 0.056Kg/cm^2, 0.089Kg/cm^2 의 3단계의 다른 하중

을 적용하였으며, 전단속도는 1~2mm/min을 적용하였다. 시험순서는 우선 상부상자에 적당한 정도의 밀도를 갖도록 흙 또는 시험대상폐기물을 채워 다지고 하부상자에는 흙 또는 상자내부크기 정도의 나무를 채워 다진다. 다음으로 하부상자의 표면에 시험대상인 토목섬유를 덮어 고정핀으로 고정시킨다. 마지막으로 상부와 하부상자를 시험대에 장착시키고 수평변위게이지와 연직변위게이지를 부착하고 수직하중을 걸어준다. 하중을 재하한 후 상자내의 흙 또는 시험대상 폐기물을 24시간동안 압밀시킨다. 다음단계로 전단력을 작동시키고 수평변위와 연직변위를 측정한다. 이때의 전단속도는 1~2mm/min로 고정시키고 수평변위가 10cm이상되었을 때 시험을 마치고 시험이 끝나면 다시 전단상자의 내용물과 HDPE를 교환하고 이와 같은 시험을 3단계 이상의 연직하중을 재하하여 실시한다. 시험결과의 정리는 흙의 직접전단시험(ASTM D3080)의 결과정리방법과 동일하다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 구성 재료의 접촉마찰각

시험은 2.0mm 두께 HDPE의 모래와 점토에 대한 접촉마찰각을 구하고자 실시 되었다. 모래는 낙동강의 상류인 양상에서 채취하였으며 비중이 2.71, 입자의 크기는 체분석을 실시하여 #20체를통과하고 #200체에 잔류하는 건조한 모래이다. 점토는 해성점토로서 부산의 남해안지역에 분포하는 점토를 녹산에서 채취하였는데 비중이 2.68, #200체통과량은 98.2%, 액성한계 52, 소성지수는 29.0 이다.
시험은 각각의 시료에 대하여 3회씩 실시하였으며 시험결과 이 두가지의 흙과 HDPE의 접촉마찰각은 Table 1과 같다

Table 1. Interface Friction Angle for HDPE

Materials	Sands	Clays
HDPE	23	8

두 개의 서로다른 재질이 인접할 때 발생하는 접촉마찰각에 대한 연구는 다양한 재료를 대상으로 많은 실험적 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 폐기물 매립장의 차수시스템을 구성하는 재료를 중심으로 기존의 연구 및 실험결과에서 나타난 접촉마찰각의 범위는 Table 2 에서 Table 4에 제시한 바와 같다.

Table 2. Interface Friction Angle for Soil-Geotextile (Koerner,1992; Quinn and Chandler, 1991)

Geotextiles	Friction Angle(degree)	
	Sands	Clays
woven	23-42	16-26
Nonewoven Needle-punched	25-44	15-28
Nonewoven, Resin or Heated bonded	22-40	17-33

Table 3. Interface Friction Angle for Soil-Geomembrane(Quinn and Chandler, 1991)

Geomembrane	Friction Angle(degree)	
	Sands	Clays
PVC	20-30	6-15
HDPE	17-25	5-10
Textured HDPE	30-40	9-15

Table 3. Interface Friction Angle for Geotextile- Geomembrance (Somasundaram and Khilnan, 1991)

Geotextile	Friction Angles(degree)			
	PVC	HDPE	Texture HDPE	Geonet
Woven Geotextile	10~28	7~11	9~17	9~18
Nonwoven, Needle-punched	16~26	8~12	15~33	10~27
Nonwoven, Res in or Heat-bonded	18~21	9~11	15~16	17~21
Geonet	11~24	5~19	7~25	-

4.2 차수시스템 의 구조적모델 선정

폐기물의 매립고와 제방의 높이(H_1) 그리고 접촉마찰각으로인한 HDPE의 인장강도의 범위와 Liner system의 적합성을 분석하기 위하여 일반적으로 많이 이용되는 3가지의 차수시스템의 구조를 선정하였다. 또한 매립폐기물은 도시폐기물로서 수도권 매립지의 폐기물, 소각재로서 부산시 생곡매립지 반입폐기물을 이용하였다. 다짐도는 배수상태의 다짐(Drained and compacted)의 조건을 적용했으며, 도시폐기물 및 소각재의 밀도와 내부마찰각(ϕ_{sw})는 평균값을 이용했는데 결과는 Table 5.에 제시 하였다.

Table 5. Physical Characteristics of Selected Waste

Wastes	Unit Weight(γ_{sw})	Interface Friction(ϕ_{sw})	Remarks
Municipal Wastes	0.88 t/m^3	38 °	Drained Compacted
Incineration Ashes	1.30 t/m^3	37 °	Drained Compacted

Table 6. Upper and Lower Interface Friction For Liner Systems

Liner Systems	Upper(δ_{am})	Lower(δ_{bm})	remarks
GHC	13	8	case 1
SHF	23	10	case 2
FHC	10	8	case 3

※ Order of liner systems is top to bottom; see Fig. 5

차수시스템을 구성하는데 사용되는 일반적 재료는 모래(S), 부직포(F : Nonwoven Needle-Punched Fabrics), Geonet(G), HDPE(H) 그리고 점토(C)등 이다. 이러한 재료를 이용하여 3가지의 표준 차수사스템 구조를 Fig. 3와 같이 선정하였으며 이에대한 상부층의 접촉마찰각(δ_{am})과 하부층 접촉마찰각(δ_{bm})은 Table 6.과 같다. 부직포(Nonwoven Needle-punched Geotextile)와 HDPE 사이의 접촉마찰각은 기존 문헌의 범위중에서 중간값을 적용 하였다.

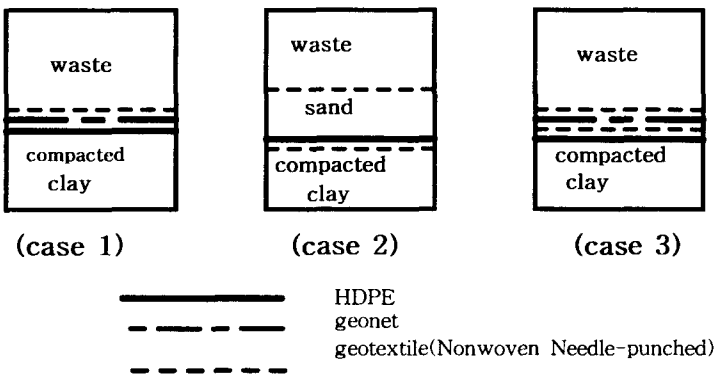


Fig. 3 Selected Liner Systems for Municipal Waste Landfills

4.3 HDPE의 소요인장강도

4.3.1 제방의 높이에 따른 HDPE의 소요인장강도 변화

부재의 소요인장강도와 제체구조 및 부재의 접촉마찰력간의 관계식(식(11))에서 전단력에 대한 안전률(FS)을 1.3 으로 하고 매립폐기물의 사면구배를 1:3, 제체의사면 구배를 1:2 로 가정했을 경우 " N "은 제방높이(H_1) 만의 관계식으로 되며 따라서 식(11)은 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$F_y \geq \frac{1.3}{\sqrt{5}} \gamma_{sw}\left[\left(\frac{10}{3}\right) - \left(\frac{5}{3}\right)^2 (1-\sin\phi_{sw})(\tan\phi_{sw}) \right] [\tan(\delta_{am}) - \tan(\delta_{bm})] H_1^2 \quad \text{----------(12)}$$

Table 5.와 Table 6.에서 제시한 값들을 식(12)에 대입하여 제방높이(H_1)에 따른 세가지 라이너 시스템의 HDPE의 소요인장강도(F_y)의 범위를 일반폐기물 매립장인 경우에 대하여 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 지오네트(geonet), HDPE 그리고 다짐점토층으로 구성된 차수시스템인 Case 1(GHC)과 부직포(Nonwoven Needle-punched Geotextile), HDPE 그리고 다짐점토층으로 구성된 차수시스템인 Case 3(FHC)의 두가지 차수시스템에서의 HDPE 소요인장강도(F_y)가 HDPE와 다짐점토층 사이에 부직포(Nonwoven Needle-punched Geotextile)를 설치하는 차수시스템인 Case 2(SHF)에서의 HDPE소요인장강도(F_y)가 아주 크게 나타났다. 또한 Case 1(GHC)과 Case 3(FHC)의 두가지 차수시스템을 비교하여보면 Case 3(FHC) 차수시스템에서의 HDPE인장강도가 가장 작은값을 보이고 있다. 세지의 경우 모두 제방의 높이(H_1)가 증가함에 따라서 부직포의 소요인장강도는 지수함수관계로 증가함을 보이고 있다.

4.3.2 제방의 사면경사에 따른 HDPE의 인장강도 변화

식(11)에서 매립폐기물층의 사면경사를 1:3으로하고(s_2=3) 제방의 높이가 10.0m일 때 제방의 사면경사의 증가에 따른 각 차수시스템에 대한 HDPE의 인장강도의 변화를 비교분석하여 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서도 각 차수시스템에서의 HDPE인장강도의 크기는 Case 2(SHF)의 경우가 가장크게 나타났고 Case 3(FHC)의 경우 HDPE의 소요인장강도가 가장 작게 나타났으며, Fig. 4에서와 유사한 결과를 보이고 있다. Fig. 5에서 특히 주목할 사항은 일정한 제방의 높이에서 사면의 경사가 완만할수록 차수시스템에서의 HDPE 인장강도는 증가하고 있다는 것이다.

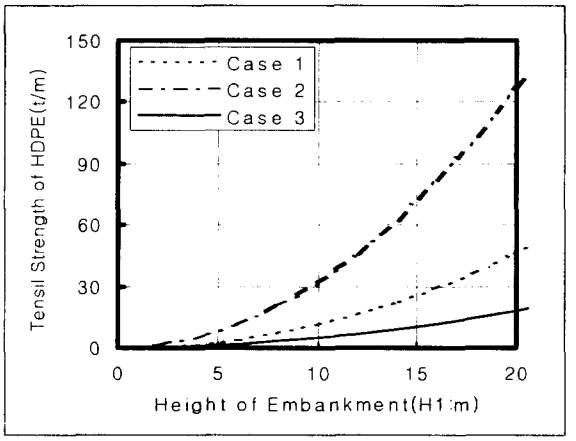


Fig. 4 Variations of Required Tensil Strength of HDPE Versus Height of Embankment

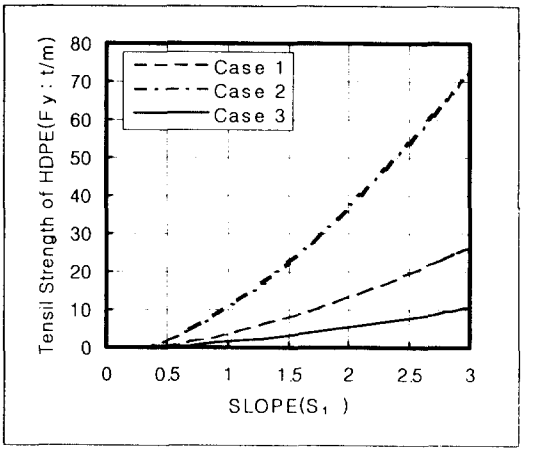
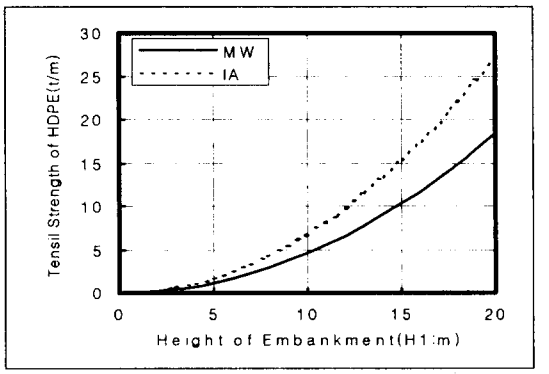


Fig. 5 Variations of Required Tensil Strength of HDPE Versus Side Slope

4.3.3 매립폐기물의 종류에 따른 HDPE의 인장강도 변화

HDPE의 인장강도는 매립폐기물의 하중에 따라서 많은 영향을 받고 있는데 그의 영향을 분석하기 위하여 매립폐기물이 도시폐기물인 경우와 소각재인 경우에 대하여 Fig.3과 Table 6.의 Case 3(FHC) 차수시스템에서 HDPE의 인장강도를 제방의 높이변화에 대하여 분석 하였다. 분석결과는 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 시사하는 바와 같이 소각재를 매립하는 매립장의 차수시스템에서 더 큰 HDPE인장강도가 요구됨을 알 수 있다.



MW: municipal waste
IA: incineration asher

Fig. 6 Required Tensil Strength of HDPE for Different Waste Materials on Case 3

종합적인 분석결과로는 HDPE의 상부에 부직포를 설치 하고 하부에는 다짐점토층을 설치하므로서 HDPE의 소요인장강도를 크게 감소시킬수 있음을 알 수 있다. 이와 같이 차수시스템의 구조와 사용재료 그리고 매립폐기물의 종류에 따라서 제방 높이에 따른 재료의 소요인장강도(F_y)는 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구의 수행결과로서 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

1) 차수시스템에서의 HDPE의 소요 인장강도는 제방높이와 사면경사의 증가에 따라 지수함수관계를 가지고 증가한다.

2) 매립폐기물이 소각재인 경우 차수시스템의 HDPE소요 인장강도는 도시폐기물인 경우보다 제방높이가 증가함에 따라 더욱 크게 요구된다.

3) 폐기물매립장의 사면부 차수시스템은 다짐점토층위에 HDPE를설치하고 그 상부에 부직포를 설치한 후 배수층을 설치하는 차수시스템구조(case 3; FHC)가 차수재의 안정성 확보에 적합한 것으로 판단되며 인접부재간의 접촉마찰각은 HDPE의 안정설계에 중요한 역할을 한다.

참고문헌

1. Bemben,S.M., and Schulze,D.A.: The Influence of Selected Testing Procedures od Soil/Geomembrane Shear Strength Measurements, in Geosynthetics '93, Conference Proceedings, IFAI, Vancouver, British Columbia, Canada,(1993)
2. Koerner, R.M.: Preservation of the Environment via Geocynthetic Containment, *in Geotextiles, Geomembranes, and Related Products, G. Den Hoedt*, Ed., A.A. Balkema, Notlerdam, The Netherland,(1992)
3. Koerner, R.M., Martin, J.P., and Koerner G.R.: Shear strength parameters between geomembranes and Cohesive soils, *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol.4 No. 1,pp.21-31,(1986)
4. Martin, I.P., Koerner, R.M. and Whitty, J.E.: Experimental friction evaluation of slippage between geomembranes, geotextiles and soils, *Proc. International Conference on geomembranes*, Denver:IFAI, pp191-196,(1984)
5. Quinn, M., and Chandler, M.: Landfill Liner Side Slope Design to Minimize Geomembrane Tensile Stress, *Geosynthetics '91, IFAI*, Atlanta, Ga.,(1991)
6. Richards,E.A.,and Scott,J.D.: Soil Geotextile Frictional Properties, in Proceedings of the 2nd Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembranes, Edmonton, Alberta, Canada,(1985)