

Geocomat를 활용한 폐기물매립장의 사면안정성 검토

Slope Stability Analysis of Waste Landfill Using Geocomat

신은철¹⁾, Eun Chul Shin, 이성근²⁾, Sung-Keun Lee, 이영재²⁾, Young-Jae Lee

¹⁾ 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, University of Incheon

²⁾ 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 석사과정, M.S. Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, University of Incheon

(SYNOPSIS) : In this study, slope stability analysis of LCRS(Leachate Collection Removal System) in waste landfill was performed by large scale field test. Geocomat is new type of geocomposite product. Geocomat is a sort of Geocomposite product. It is composed of nonwoven geotextiles, woven geotextile, and geonet. Large scale field tests were performed on the slope of different two LCRS sections with static loading condition. One is LCRS section with consist of GCL, HDPE and Geocomat, another is GCL, HDPE, and woven type geocomposite. The behavior of geosynthetics lined slope was monitored by incorporating instrumentation including vertical soil pressure meter, settlement plate, strain gauges, potential meter, displacement pin.. Based on the field monitoring, the Geocomat LCRS section is less sliding than the conventional geocomposite LCRS section.

Key words : Geocomat, LCRS, Large scale field test, Slope stability.

1. 서 론

현재 국내 소각시설의 부족으로 인하여 많은 양의 생활쓰레기와 산업폐기물들이 매립방법으로 처리되고 있으며, 폐기물 매립장의 시설 기준은 폐기물 관리법에 의해 규정된다. 폐기물 매립, 처리에 관한 규정은 환경에 대한 일반의 인식이 높아짐과 더불어 엄격해 지는 추세이다. 반면, 폐기물 매립시설의 설계/감리/시공의 수준은 꾸준히 발전하고 있으나, 여전히 개선의 여지가 있으며, 최근 과거에 단순매립되었던 여러 매립지들을 다시 위생매립지로 변환, 또는 재시공하는 공사가 활발히 진행되고 있다. 1980년대 중반부터 토목섬유 제품들은 차단과 배수의 기능으로 위생매립지에 사용되기 시작하였다. 이중 두가지 이상의 토목섬유를 복합하여 만든 토목섬유를 총괄하여 지오펜트(Geocomposite)라 하며, 위생폐기물 매립장의 침출수 집·배수시스템, 매립장 사면의 차수시설보호 등에 사용되고 있다. 이러한 폐기물 매립장 사면에 있어 토목섬유로 인해 불연속면이 형성되는 차수시설과 집배수 시설은 사면의 안정성 측면에 가장 중요한 영향인자이다. 사면의 전반적인 안정성과 토목섬유의 보존성은 차수 및 집배수체계의 구성요소인 여러재료들 사이의 접촉전단강도에 의해 좌우된다. 따라서 본 연구에서는 각종 토목섬유를 활용한 폐기물 매립장 사면의 차수 및 집배수 시설에 대한 모형 site를 조성하여 정적 재하 시험을

실시하였다. 정적 재하시험시 전반적인 사면에서의 거동과 토목섬유간의 상호 작용을 분석하였으며, 특히, Geocomat와 기존 폐기물 매립장의 집배수시스템으로 사용되고 있는 복합토목섬유 제품과 비교, 분석하였다.

2. 폐기물 매립장의 사면안정

2.1 폐기물 매립장의 구조

그림 2.1은 미국 EPA에서 권장하는 2중 차수 및 침출수 집배수 시설을 포함한 폐기물 매립장 사면 구조를 나타낸 그림이다. 그림 우측 상단에서 최상부 GT, GC, 그리고 GT에 직포를 부친 것이 Geocomat이다. 침출수 차수체계에 있어 점토차수층을 설치하는 것을 원칙으로 하나 사면의 경사가 급하여 차수층의 설치가 어려운 경우 토목섬유 점토차수재를 설치할 수 있다. 또한, 집수체계에 있어 평지에는 자갈을 설치하나 사면에는 복합토목섬유를 사용하여 시공하여 침출수를 집배수 한다.

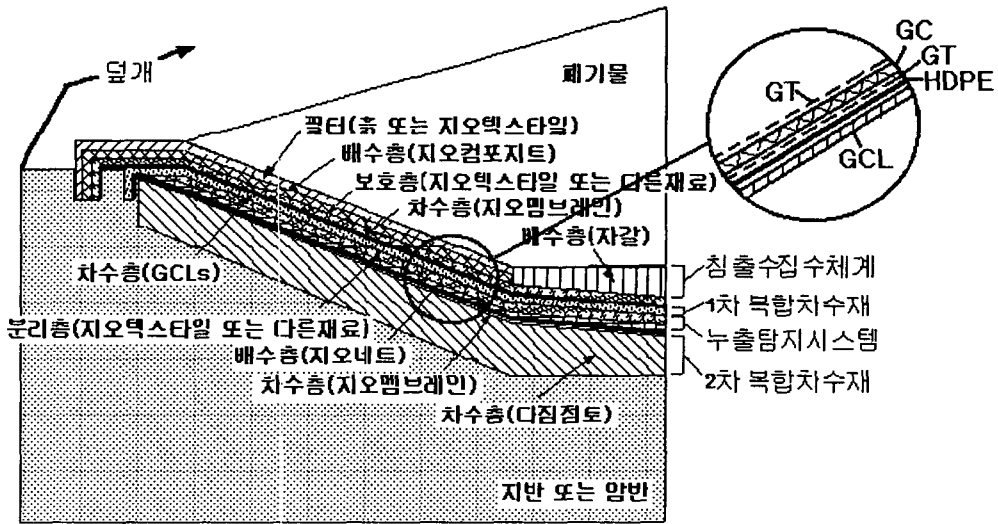


그림 2.1 폐기물 매립장 사면 구조도(U.S EPA 1990)

2.2 폐기물 매립장의 사면파괴 형태

폐기물 매립지에서 발생할 수 있는 사면 파괴 유형을 파괴면이 발생한 위치에 따라 그림 2.2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2.2(a)는 토목섬유 차수 및 집배수 시설로 형성된 불연속면을 따라 파괴가 일어나는 형태로 공간 매립시설이 흔한 국내에서 빈번하게 발생되며, 극단적인 경우 토목섬유 재료의 인장파괴가 일어날 수 있다. 그림 2.2(b)는 사면파괴면이 폐기물의 내부를 통과하여 토목섬유 불연속면을 따라 진행되는 형태이며, 그림 2.2(c)는 매립중 혹은 종료후 폐기물이 파괴되는 유형으로서, 매립쓰레기의 경사가 급할 때 발생할 가능성이 크며, 매립된 폐기물이 강우로 인해 물이 차거나, 지하수위에 의하여 토목섬유 차수 및 집배수 시설이 포화될 경우 사면 안정성이 현저하게 떨어지게 된다.

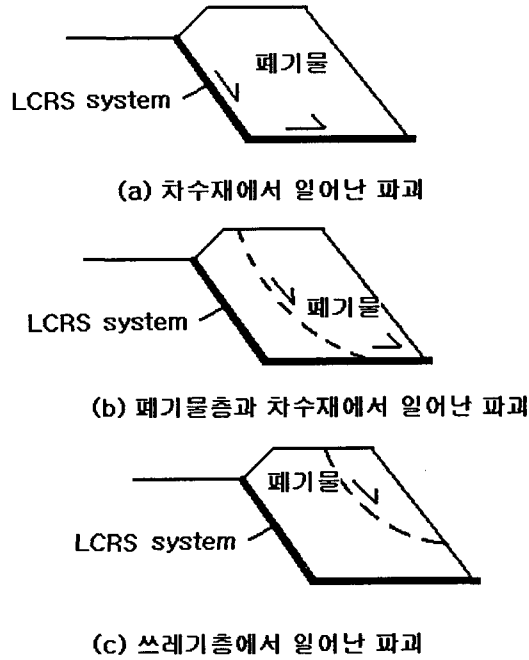


그림 2.2 폐기물 매립지의 파괴 형상

2.3 폐기물 매립지의 사면안정 검토

일반적으로 흙의 전단강도는 다음과 같은 식으로 정리될 수 있다.

$$T_{soil} = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

여기서, T_{soil} : 흙의 전단강도, c : 흙의 점착력 ϕ : 흙의 마찰각이다.

같은 방법으로 이를 폐기물 매립장 사면에 적용하면 아래 식으로 정리할 수 있다.

$$T_{GS} = c_s + \sigma_n \tan \delta \quad (2)$$

여기서, T_{GS} : 토목섬유의 전단 저항력, c_s : 접촉되는 재질과 차수재 사이의 겉보기 점착력, σ_n : 전단면에 작용하는 하중, δ : 접촉 마찰각이다.

이 이론을 이용하여, 그림 2.3에 나타낸 매립장 사면 차수 및 집배수 시스템의 안정성을 검토할 수 있다. 폐기물의 중량이 일차적으로 Geocomat층에 전달되어 HDPE 하부와의 접촉 마찰력만큼 감소되어 Geocomat에 인장력을 발생시키고, 동일한 방법으로 그 다음 HDPE에는 GCL의 마찰력만큼 감소되어 GCL에 인장력을 발생시킨다. 이러한 순차적으로 원지반까지 힘이 미치게 되며, 각 부재에 미치는 전단력은 접촉 마찰력만큼 감소되어 인장력으로 발생된다. 각각의 차수 및 집배수재의 안정성은 실제 각 부재에 발생하는 인장력과 항복 인장강도를 비교하여 판정할 수 있다. 또한, 차수 및 집배수 시설에서 사면파괴가 발생된다는 것은 마찰력이 가장 작은 부분에서 발생하게 되므로, 상기의 방법을 이용하여 각 자재가 보유하여야 할 인장강도를 파악해 낼 수 있다.

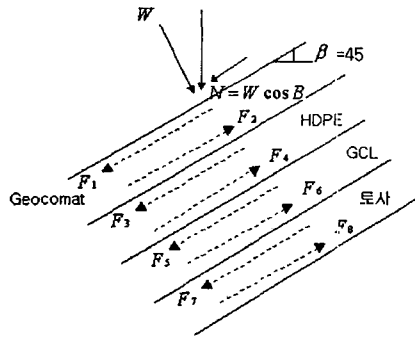


그림 2.3 사면에서 힘의 분포

표 2.1 사면 안전을 계산 결과

	공식	안전율
W	$W_w - F_w$	$FS = \frac{F_y}{F_{act}}$ $= 1.2 \sim 2.4$
N	$W \cos \beta$	
F_1	$N \tan \delta_a$	
F_2	$N \tan \delta_b$	
F_y	$4.4 t/m$	

2.4 폐기물 매립장에 사용되는 재료들 간의 상호마찰 특성

1988년 3월 미국 캘리포니아주 케틀만힐(Kettleman Hill)에 위치한 매립지가 붕괴되면서 매립지의 사면안정 문제가 크게 주목받기 시작하였다. 주요 붕괴원인은 지오멤브레인과 다점점토, 지오네트, 지오텍스타일의 낮은 접촉 마찰각으로 판명되었다. 이와 같이 폐기물 매립장의 사면안정에 커다란 영향인자인 접촉 마찰각을 각각의 재료에 따라 정리하면 표 2.2에 나타난 바와 같다.

표 2.2 여러재료들간의 마찰특성

토목섬유-흙 마찰		토목섬유-토목섬유 마찰	
조건	마찰각 ϕ (°)	조건	마찰각 ϕ (°)
HDPE - 모래	15~28	지오네트-HDPE	6~10
HDPE - 점토	5~29	HDPE-지오텍스타일	8~18
지오텍스타일-모래	22~44	지오텍스타일-지오네트	10~27
GCL-모래	20~25	GCL-Textured HDPE	15~25
GCL-점토	14~16	GCL-HDPE	8~16
Textured HDPE-다진점토	7~35	GCL-GCL	8~25
Textured HDPE-콩자갈	20~25	Textured HDPE-지오네트	10~15
Textured HDPE-모래	30~45	Textured HDPE-지오텍스타일	14~45
지오텍스타일-점토	15~35		

3. 실대형 현장 모형 시험

3.1 사용재료

3.1.1 Geocomat

Geocomat란 기존의 매립지 집수시스템에서 사용해오던 지오네트+부직포 복합섬유제품과 달리 구성재료를 분리해 보면 그림 3.1과 같이 4가지로 구성되어 있으며, 최상부에 직포형 지오텍스타일과 그 아래층의 부직포는 하부 부직포와 구별하기 위하여, 흰색(White)부직포이므로 부직포(W)라고 그림 3.1에 표기하였다. 부직포(W)의 두께는 약 4mm 정도이며 니들펀칭 결합법을 이용하여 제조되었다. 지오네트는

약 5mm 정도의 두께를 가지며 최하부 부직포는 검정색(Black)으로 부직포(B)로 표시하였고 역시 니들 편칭에 의한 방법으로 제조되었으며, 두께는 약 3mm 정도이다.

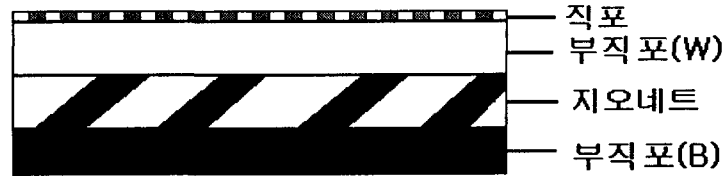


그림 3.1 Geocomat 단면도

3.2.2 HDPE와 GCL

현장 모형시험에 사용된 HDPE와 GCL 기본 물성치는 표 3.1과 같다.

표 3.1 HDPE와 GCL의 물성치

항 목	시험 방법	HDPE	시험 방법	GCL
단위 중량	ASTM D 1505	0.94 g/cm^3	ASTM D 5993	5000 g/cm^2
인장 강도	ASTM D 638	180 g/cm^2	ASTM D 4595	15 KN/m
인장신도	ASTM D 638	700%(파괴시)	ASTM D 4595	20%
흡수성	ASTM E 946	600%		

3.2 모형 폐기물 매립장의 사면 조성

실대형 현장모형 시험은 그림 3.2와 같이 인공사면을 조성하고 사면의 경사를 1:1로 시공하고, 1공구와 2공구 두 개의 공구로 나누어 실시하였다. 1공구에는 Geocomat를 포설하고, 2공구는 기존에 매립장에 사용하는 지오폴리머 차수체계를 시공하였다.

현장시험 지반은 먼저 굴착으로 사면을 조성하고, 토목섬유가 포설될 사면과 앵커부위를 진동 콤팩터를 사용하여 다진 후, GCL을 포설하였다. 그 위에 스트레인 게이지를 부착한 HDPE를 포설하고 다시 그 상부에 Geocomat를 포설하였다. 하중재하시 Geocomat의 변위량을 측정하기 위하여 그림 3.3과 같이 중앙부 및 하단부에 변위측정장치를 설치하였다. 다음 단계로 토목섬유가 자중과 사하중으로 인하여 취성과 파괴가 발생하는 것을 방지하는 앵커부에 토사를 채워 고정하였다.

토목섬유 단부 정착방법인 앵커는 트랜치에 충분한 하중을 받는 토사를 채우고 다져서 차수재를 정착시키는 방법으로, 이로 인해 토목섬유는 인장강도내의 힘에 대하여 토목섬유의 파괴를 방지하는 중요한 역할을 하게 되는 것이다.

앵커시공이 끝난 후 계측기기를 설치하였다. 계측기기로는 침하계, 토압계와 전면판 변위 측정을 위한 변형판을 설치하였으며, 보강토 응력 개념을 사용하여 단계별로 복토하였다. 그 후 철재 토조 2개를 사면 상단부에 맞추어 폐기물 하중을 대신하여 설치하고 안에 토사를 채워 단계별 하중에 따른 변위와 침하량을 측정하였다.

2공구는 1공구와 모든 조건을 동일하게 설치하고 Geocomat 대신에 지오네트+부직포 지오폴리머를 사용하여 시험시공을 실시하고 그 결과를 계측, 정리하였다. 현장시험 부지의 토사의 기본 물성치는 다음 표 3.2와 같다.

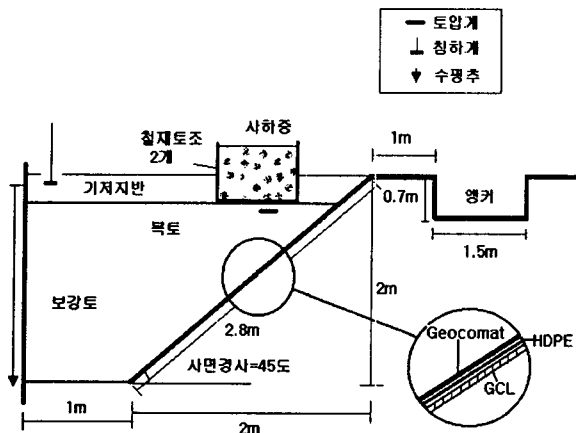


그림 3.2 실험 부지 단면도

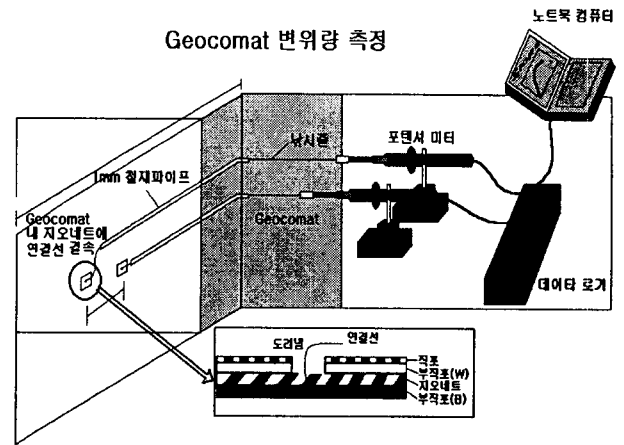


그림 3.3 Geocomat 변위량 측정 장치

표 3.2 현장 토사의 물리적인 특성

흙의 분류	자연함수비 $w_n(\%)$	비중 G_s	균등계수 C_u	곡률계수 C_g	최적함수비(%) w_{opt}
SP-SM	14%	2.71	6.5	1.27	12.5

3.3 시험 결과

3.3.1. 하중재하에 따른 집배수 시설의 변위

상재하중 재하에 따른 토목섬유의 변위는 그림 3.4에 나타난 바와 같다. 토압 0.2 kg/cm² 이상에서 지오클포지트의 변위가 Geocomat의 변위보다 확연히 큰 값을 나타내고 있다. 또한, 지오클포지트 자체의 변위값을 보면 중앙이 하부부분보다 약간 더 큰 변위값을 나타내는 것으로 판명되었다.

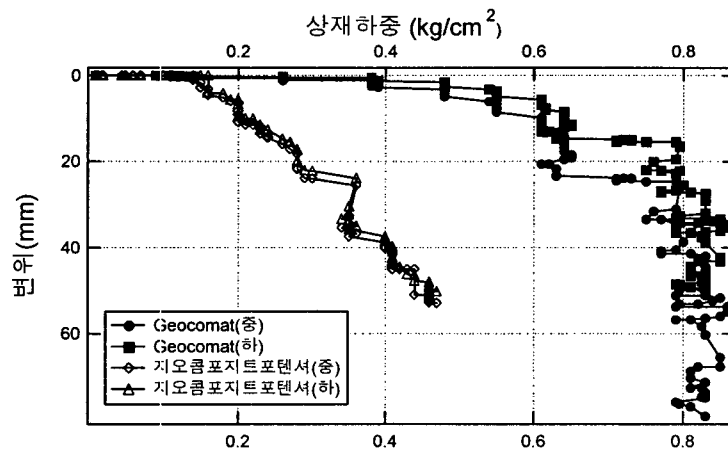


그림 3.4 하중재하에 따른 집배수 시설의 변위

3.3.2. 하중재하에 따른 HDPE 변형율

하중재하에 따른 스트레인이지의 변형율은 그림 3.5에서 보는 바와 같이 지오폴리머가 Geocomat 비하여 크게 나타나 하중재하에 따른 변위와 유사한 경향을 보였다. 상재하중 0.5 kg/cm²에서 HDPE의 스트레인이 갑자기 감소한 것은 인위적인 파괴에 기인한 것으로 판단된다.

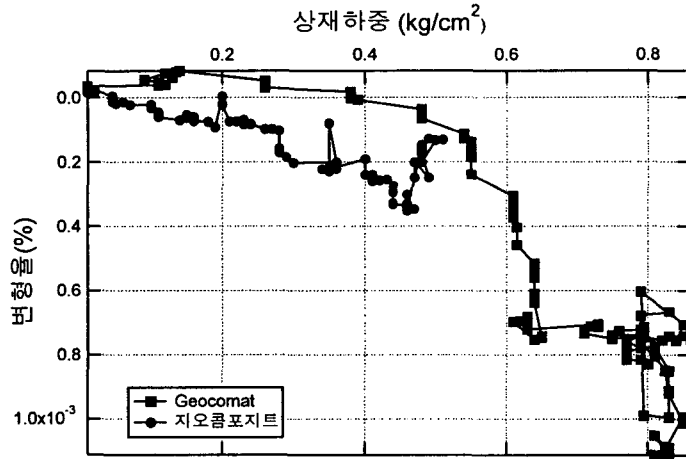


그림 3.5 하중재하에 따른 HDPE 변형율

3.3.3 하중재하에 따른 사면의 전반적인 거동

하중재하에 따른 전반적인 사면의 침하량과 전방변위 변화는 그림 3.6과 그림 3.7에 나타난 것과 같다. 그림 3.6과 3.7에서 도시된 바와 같이 지오폴리머가 포설된 사면이 하중재하에 따른 침하량이 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 전방변위 또한 유사한 경향을 나타내었다.

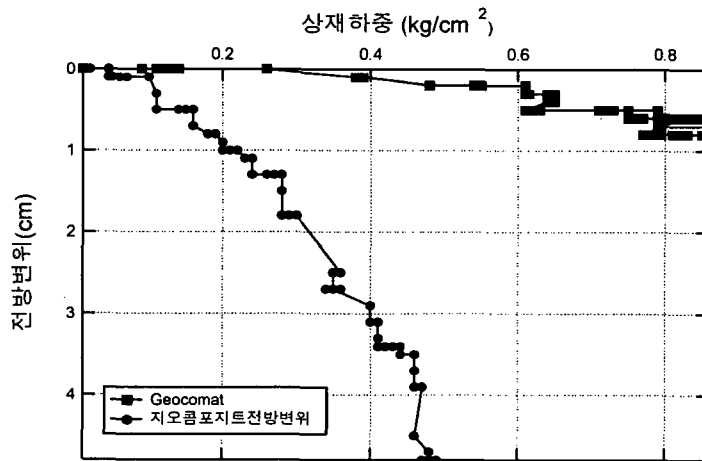


그림 3.6 하중재하에 따른 전방변위

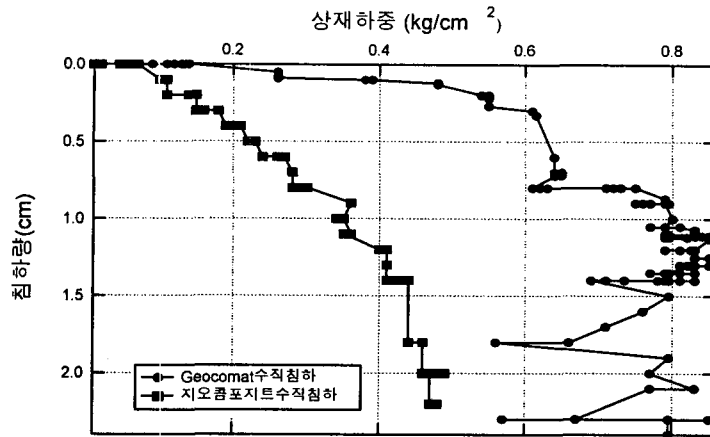


그림 3.7 하중재하에 따른 침하량

4. 결론

폐기물 매립장의 차수 및 집배수 시스템에 사용되는 복합토목섬유에 대하여 현장실험을 실시하고 하중재하에 따라 여러 가지 계측치를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. Geocomat와 지오폴리머트를 시험 시공한 후 하중재하에 따른 토목섬유의 변위는 지오폴리머트가 Geocomat에 비해 크게 발생되었다. 위치에 따른 변위는 토목섬유의 사면 중간부분이 사면 중간 아래 50cm 지점의 변위보다 크게 나타났으며, 하중 0.4 kg/cm²서 Geocomat는 약 5mm의 변위를 보였으나 지오폴리머트는 약 40mm로 크게 발생되었다. 이는 Geocomat의 구성재료인 직포의 영향이라고 생각된다.
2. 하중재하에 따른 HDPE의 변형율을 비교해 볼 때 Geocomat가 지오폴리머트에 비하여 상당히 작은 변형을 나타내었다. 하중 0.4 kg/cm²에서 Geocomat는 거의 변형이 없었으나, 지오폴리머트는 0.0002% 정도의 변형율을 보였다.
3. 하중재하에 따른 전체적인 사면거동은 지오폴리머트 포설사면이 Geocomat 포설 사면에 비해 침하량과 전방변위를 비교해 볼 때, 지오폴리머트는 Geocomat의 약 3배 이상의 침하량과 변위를 나타내었다. Geocomat가 지오폴리머트보다 우수함이 판명되었다.

감사의 글

본 연구는 2000년 인천환경센터 연구비지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 신은철, 오영인(2000) “폐기물 매립장에 사용되는 토목섬유의 마찰특성 및 안정성 해석에 관한 연구”, 대한폐기물학회지, 제 17권, 제 7호, pp.862~874
2. 신은철, 오영인, 허열(2000) “온심모형 시험을 통한 폐기물 매립장 사면 안정성 평가”, 한국지반공학회학회지, 제 16권, 제2호 pp.145~154
3. Korner R.M.(1994), “Designing with geosynthetics” Prentice-Hall, 3rd ed., Englewood Cliffs, pp 67~327
4. U.S EPA(1989), “Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction, and Closure” Seminar Publication, pp.1~87