

폐기물매립장의 사면차수체계 안정화 연구

The Slope Stabilization of Solid Waste Landfill Liner System

신은철¹⁾ · 김종인²⁾ · 박정준[†]

Shin, Eun-chul · Kim, Jong-in · Park, Jeong-jun

ABSTRACT : As the natural aggregates such as sand and clay are getting exhausted, the quantity of utilizing geosynthetics is being increased in the solid waste landfill. Especially, the waste landfills have been constructed at the gorge in the mountainous area and reclaimed land from the sea in the Korean Peninsula. Those areas are not favorable for construction of waste landfill in geotechnical engineering aspect. In this study, the frictional characteristics of geosynthetics that used in the waste landfill were estimated. Then, the studies of the behavior of geosynthetics and stability of LDCRS (Leachate Detection, Collection, and Removal System) of side slope were conducted in the waste landfill by means of the pilot test, and numerical analysis. Geocomposite which is combined type or separated type is influenced on the strain itself, and also implicated in the stress and strain of geomembrane at the lower layer. The strain on the combined type of geocomposite is about 50% smaller than that of the separated type at the side slope. The lateral displacement and settlement of top at the slope with the separated type are three times greater than that of the combined type. In the numerical analysis, discontinuous plans in between ground and geosynthetic, geosynthetic and geosynthetic, geosynthetic and waste have been modeled with the interface element. The results gave a good agreement with the field large-scale model test. The relative displacements of geosynthetics were also investigated and hence the interface modeling of liner system is appropriate for analysis of geosynthetics liner system in the waste landfill.

Keywords : Solid waste landfill, Slope stabilization, Geosynthetics, Pilot test, Numerical analysis

요 지 : 폐기물매립장에서 토목합성재료의 사용은 점토, 모래 등 자연골재 수급의 어려움으로 해마다 증가하고 있다. 특히, 우리나라의 폐기물매립지는 곡간지형이나 해안매립지에 건설하는 경우가 많아 지반공학적으로 매우 불리한 조건이다. 따라서, 본 연구는 폐기물매립장에 사용되는 토목합성재료의 마찰특성을 평가하였고, 현장모형실험, 수치해석을 통해 토목합성재료가 사용된 폐기물매립장의 사면안정성에 관하여 연구하였다. 현장실대형 실험을 통한 토목합성재료와 사면의 파괴 거동을 분석한 결과 일체형과 분리형 지오킴포지트는 자체의 변형 뿐만아니라 하부 지오펜브레인의 응력 및 변형율에도 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 일체형이 설치된 사면이 분리형이 설치된 사면에 비해 약 50% 적은 변형을 나타내었다. 사면의 전방변위와 침하량은 분리형이 설치된 사면이 일체형이 설치된 사면에 비해 약 3배 이상의 침하량과 변위를 나타내었다. 토목합성재료와 지반, 토목합성재료와 쓰레기, 토목합성재료사이의 불연속면을 인터페이스요소로 모델링하여 수치해석을 수행한 결과, 현장 실대형실험 결과와 잘 부합되는 것으로 판명되었다. 이는 토목합성재료의 상호간 변위를 확인할 수 있어 인터페이스요소로 모델링하는 것이 토목합성재료가 사용된 폐기물 매립장의 사면안정해석에 적절한 것으로 판단되었다.

주요어 : 폐기물매립장, 사면 안정화, 토목섬유, 모형실험, 수치해석

1. 서 론

1980년대 중반부터 토목합성재료 제품들은 차단과 배수의 기능으로 관리형 위생매립지에 사용되기 시작하였다. 우리나라는 가용용지의 부족과 기존 비위생 매립지에 대한 주민들의 부정적 인식으로 인해 폐기물 매립장은 해안매립지역이나 매립용량이 적고 사면 경사가 급한 산악지역과 같은 열악한 지반조건에 폐기물 매립장을 건설하고 있다. 폐기물 매립장의 증가와 더불어 건설현장의 다양한 외부 조건으로 인해 매립장의 구조적 안정성 확보는 중요

한 문제로 부각되고 있다.

폐기물 매립장 설계시 구조적 안정성 측면에서 가장 문제가 되는 곳은 사면차수체계이다. 매립장 사면차수체계는 보통 점토와 같은 천연재료와 토목합성수지라이너와 같은 인공재료로 구성되어진다. 우리나라의 경우, 폐기물 매립장의 사면부는 토목합성수지라이너로 시공되고 있다. 차수체계의 올바른 기능수행을 위한 사면 안정성은 차수체계의 구성요소인 다양한 토목합성재료들 사이의 접촉전단강도에 의해 좌우된다. 토목합성재료는 특정 용도별로 특화되고 다양화됨에 따라 제품에 사용된 재료, 제품이 설치되

1) 정희원, 인천대학교 토목환경공학과 교수

2) 비희원, 강릉건설(주) 기술연구소 팀장

† 정희원, 인천대학교 토목환경공학과 연구교수(E-mail : frostjun@incheon.ac.kr)

는 환경에 따라 접촉전단강도의 범위가 매우 크다. 따라서, 환경 및 구조적으로 안전한 차수체계설계를 위한 토목합성재료를 사이의 정확한 접촉전단강도의 측정과 평가는 폐기물 매립장 설계 및 시공시 가장 중요한 요소이다.

최근 폐기물 매립장 건설시 설치기준에 적합한 천연재료 수급이 어려운 반면, 토목합성재료 제조기술 발달로 토목합성재료 집수, 배수체계가 보편적으로 이루어지고 있다. 이에 사면차수시스템에 관한 연구는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 사면 차수 및 배수 재료의 역학적 특성 평가를 기초로 한 응력-변형 모델 개발 분야와 재료특성 및 해석 모델을 기초로 한 사면안정해석에 관한 연구이다. 사면안정해석은 한계평형법을 기초로 한 해석과 유한요소 및 유한차분을 이용한 방법으로 나눌 수 있다.

케틀만 힐스 매립지 파괴이후 토목합성재료의 역학적 특성이 중요한 문제로 대두되면서, 여러 연구자들은 토목합성재료와 흙, 토목합성재료 상호간의 접촉강도 측정을 시도하였다(Mitchell et al., 1990; Fishman and Pal, 1994; Briancon et al., 2002; Dixon et al., 2006).

토목합성재료의 특성평가에 있어서 Blumel and Stoewahse (1998)는 시험조건에 따른 접촉전단특성에 대하여 연구하였고, Blumel and Brummermann(1996), 이광열과 김수석 (1998) 등이 토목합성재료와 흙과의 접촉마찰, 차수시스템에 사용되는 토목합성재료 상호간의 접촉마찰에 관하여 매립지의 침출수 등과 같은 현장과 유사한 건조상태 및 포화상태의 환경조건에서 연구하였다. Briancon et al.(2002)은 경사면 전단시험기를 이용하여 공기건조조건과 포화조건에서 접촉전단거동 연구로 사면의 안전을 산정 방법을 제시하였다.

서민우 등(2004)은 여러 가지 시험방법에 의해 토목합성재료의 연직하중과 건조·포화 조건이 전단거동에 미치는 영향과 탄소성 복합모델을 연구하였고, Helwany and Wu(1995)는 보강토에서 보강재의 장기거동 분석을 위한 수학적 모델식을 제안하였다.

폐기물 매립장의 사면안정에 대한 해석은 크게 사면부 토목합성재료의 안정성과 사면전체 안정성을 한계평형해석으로 나누어 수행되고 있다. 사면부 토목합성재료의 안정성은 Giroud and Beech(1989), Koerner and Hwu(1991), Landrum et al.(2000) 등이 제안하였고, 이들 해석법들은 모두 한계평형법에 근거하고 있다.

폐기물 매립장 설계시 응력과 변형관계에 대한 관심이 높아지면서 Wilson-Fahmy and Koerner(1993), Gilbert et al.(1993)은 비선형 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 또한, 박현일 등(2003)은 개별요소법을 사용한 사면 차수시스템의 안정성을 평가하였으며, 장연수와 김홍석(2004)은

복합 경계면요소를 사용하여 매립장의 안정성을 해석하였다. 현재는 전산프로그램의 발달과 차수시스템에 사용되는 재료의 다양화와 구성모델의 한계로 인해 새로운 인터페이스 구성모델을 개발하려는 시도가 진행되고 있다.

따라서, 현재 국내에서 설계, 시공 및 계획되고 있는 폐기물 매립장의 사면체계에 사용되는 집수, 배수용 토목합성재료 사이의 접촉전단특성을 평가하였고, 현장 실험을 통해 폐기물 매립장 사면체계의 응력-변형 거동과 인터페이스요소를 이용한 수치해석을 통해 토목합성재료가 사용된 폐기물 매립장 사면체계의 안정성을 평가하였다.

2. 토목섬유 접촉마찰 저항실험

2.1 시험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 시험시료는 폐기물 매립장에서 인공차수재 및 배수재로 사용중인 대표적 토목합성재료로 HDPE 지오멤브레인, 토목섬유점토차수재, 지오텍스타일이며, 표면마찰이 설계 및 시공에 중요한 인자가 되므로 대형 직접전단시험을 이용하여 접촉마찰특성값을 결정하였다.

Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 것과 같이 전단상자가 상·하부로 분리되어 있으며, 크기는 각각 30cm×30cm이고, 높이는

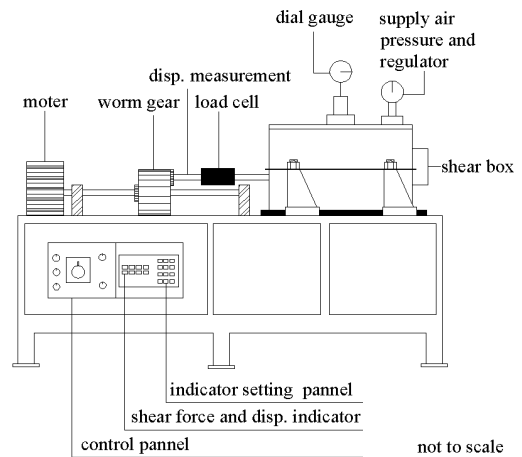


Fig. 1. Large-scale of direct shear test

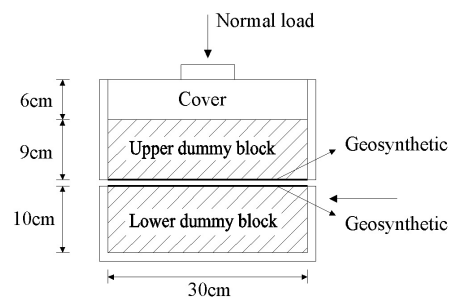


Fig. 2. Component of shear box

9cm, 10cm이다. 이 시험기는 상부상자를 고정시키고 하부 전단상자를 이동시켜 전단력을 측정할 수 있다. 시험기의 구성은 전단상자, 수직하중을 재하할 수 있는 가압장치, 전단력을 측정할 수 있는 로드 셀, 수평변위 측정을 위한 트랜듀서, 전단속도 제어기 등으로 구성되어 있다.

토목합성재료는 자연공기건조상태와 포화상태의 시료로 나누어 준비하였으며, 시험조건에 따라 고정블록의 상부와 하부에 토목합성재료를 부착시키고, 고정블록을 전단상자에 삽입한 후 ASTM D 5321의 시험방법에 의거하여 시험을 실시하였다. 전단시험은 전단속도 1mm/min의 변형을 제어방식으로 수행하였으며, 수직응력은 49kPa, 98kPa, 147kPa의 세 단계로 구분하여 모든 시험을 동일한 조건에서 실시하였다.

2.2 마찰저항시험의 종류

사면체계에 대한 사면안정성 해석에 필요한 전단강도 정수는 각각의 접촉단면에 따라 대형전단시험을 실시하여

도출하였다. 접촉단면은 모래주머니와 지오컴포지트, 지오컴포지트와 지오멤브레인, 지오멤브레인과 토목섬유점토 차수재, 토목섬유점토차수재와 숏크리트로 나누어진다. 대형직접전단시험은 모든 시료에 대해 현장의 건기/우기조건 뿐만아니라 침출수 영향 조건을 재현하기 위하여 건조시료와 포화시료 조건으로 시험을 수행하였다. 또한, 폐기물 매립장 사면 차수 및 집배수층에 대하여 고려하였고, 세부적인 시험조건은 Table 1에 나타내었으며, 총 12조건에 대하여 시험을 수행하였다.

2.3 시험결과 및 분석

Table 1은 집배수층과 차수층에 대하여 자연건조시료와 포화시료로 나누어 실시한 대형직접전단시험 조건이다. Table 2에 나타낸 바와 같이 자연건조시료 조건의 경우, 차수층에 사용되는 거칠은 형태의 지오멤브레인과 토목섬유점토 차수재와의 접촉마찰각이 32.3°로 가장 크게 나타났으며, 포화시료 조건의 경우 접촉마찰각은 집배수층의 지오컴포지트와 거칠은 형태의 지오멤브레인이 28.5°로 나타났다. 또한, 자연건조시료와 포화시료의 접촉력 비교시 포화시료가 자연건조시료에 비해 크게 나타났고, 접촉마찰각은 자연건조시료가 포화시료에 비해 크게 나타났다. 즉, 집배수층에서의 접촉마찰각 비교시 포화시료는 13.8°~28.5°, 자연건조시료는 17.2°~29.6°의 범위로 나타났고, 차수층에서의 포화시료는 5.5°~22.3°, 자연건조시료는 21.3°~32.3°의 범위로 나타나 포화시료가 자연건조시료에 비하여 접촉마찰각이 작아짐을 확인하였다. 주어진 모든 시험조건에서 거칠은 형태의 지오멤브레인이 매끄러운 형태의 지오멤브레인보다 접촉마찰특성값이 모두 크게 나타났다.

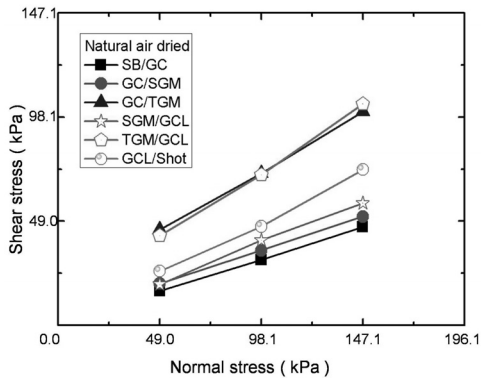
Table 1. Test series of large-scale direct shear test

Liner system	Natural air dried (ASTM)	Saturated (DIN)
Drainage layer	① SB vs. GC	① SB vs. GC
	② GC vs. SGM	② GC vs. SGM
	③ GC vs. TGM	③ GC vs. TGM
Barrier layer	④ SGM vs. GCL	④ SGM vs. GCL
	⑤ TGM vs. GCL	⑤ TGM vs. GCL
	⑥ GCL vs. SHOT	⑥ GCL vs. SHOT

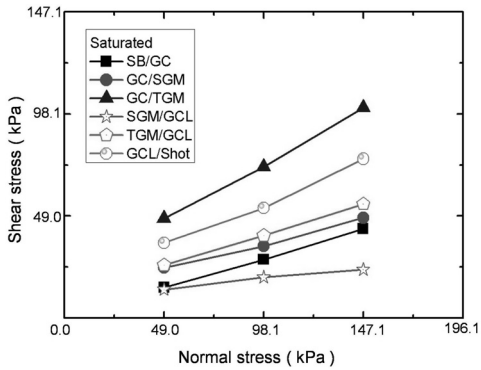
Notes: SB = sand bag; GC = geocomposite; SGM = smooth geomembrane; TGM = textured geomembrane; SHOT = shotcrete

Table 2. Test results of large-scale direct shear test

Slope lining systems	Natural air dried		
	Test series	Cohesion (kPa)	Interface friction angle (°)
Drainage collection layer	① SB vs. GC	0.98	17.2
	② GC vs. SGM	3.92	17.8
	③ GC vs. TGM	16.67	29.6
Barrier	④ SGM vs. GCL	0.98	21.3
	⑤ TGM vs. GCL	10.79	32.3
	⑥ GCL vs. Shotcrete	0.98	26.0
Slope lining systems	Saturated		
	Test series	Cohesion (kPa)	Interface friction angle (°)
Drainage collection layer	① SB vs. GC	0.00	16.1
	② GC vs. SGM	11.77	13.8
	③ GC vs. TGM	20.59	28.5
Barrier	④ SGM vs. GCL	8.83	5.5
	⑤ TGM vs. GCL	10.79	16.7
	⑥ GCL vs. Shotcrete	14.71	22.3

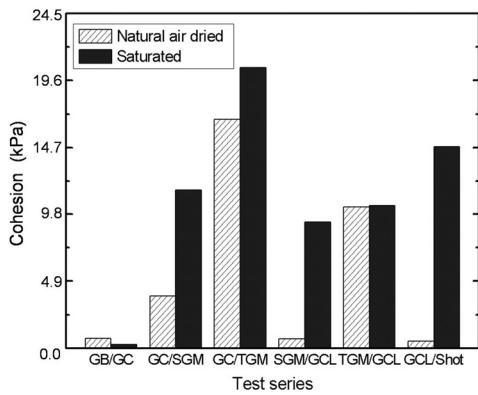


(a) Natural air dried condition

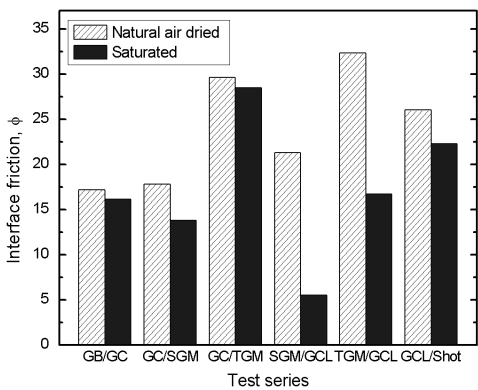


(b) Saturated condition

Fig. 3. Interface friction angle of geosynthetics on natural air dried condition



(a) Interface cohesion



(b) Interface friction

Fig. 4. Comparison of interface shear strength

Fig. 3과 Fig. 4는 전단강도정수에 따른 자연건조상태와 포화상태의 시험결과를 나타낸 것으로서 토목섬유점토차수재와 지오멤브레인의 접촉면에서 지오멤브레인의 종류에 관계없이 자연건조조건과 포화조건에 따른 전단강도의 감소가 가장 크게 나타났으며, 토목섬유점토차수재와 매끄러운 형태의 지오멤브레인 접촉면에서 시험조건에 따른 변화가 가장 크게 나타나는 것으로 평가되었다.

3. 현장 실험

3.1 폐기물매립장의 사면조성

현장 실험형 실험은 일체형 지오컴포지트와 기존 매립장에 사용중인 분리형 지오컴포지트를 구분하여 각각 특성과 변위를 측정하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 폭이 약 3m인 인공사면을 1:1 경사로 하여 첫 번째는 일체형 지오컴포지트 포설, 두 번째는 기존 매립장에 사용되는 분리형 지오컴포지트 차수체계로 나누어 시공하였다.

현장시험 지반은 먼저 굴착으로 사면을 조성하고, 토목합성재료가 포설될 사면과 앵커부위를 진동 콤팩터를 사용하여 다진 후, 토목섬유점토차수재를 포설하였다. 그 위에 스트레인 게이지를 2개를 부착한 HDPE 지오멤브레인을 포설하고, 다시 그 상부에 지오컴포지트를 포설하였다. 하중재하시 지오컴포지트의 변위량을 측정하기 위하여 Fig. 6과 같이 지오컴포지트의 중앙부 및 하단부에 변위측정장치를 설치하였다. 다음 단계로 토목합성재료가 자중과 하중으로 인하여 취성파괴가 발생하는 것을 방지하기 위해 앵커부에 토사를 채워 고정하였다. 토목합성재료 단부 정착방법인 앵커는 트렌치에 충분한 하중을 받는 토사를 채우고 다져서 차수재를 정착시키는 방법으로서 인장강도 내의 힘에 대하여 토목합성재료의 파괴를 방지하는 중요한 역할을 하게 된다.

앵커시공이 끝난 후 계측기기를 설치하였다. 즉, 침하계, 토압계와 전면판 변위 측정을 위한 변형판을 설치하였으

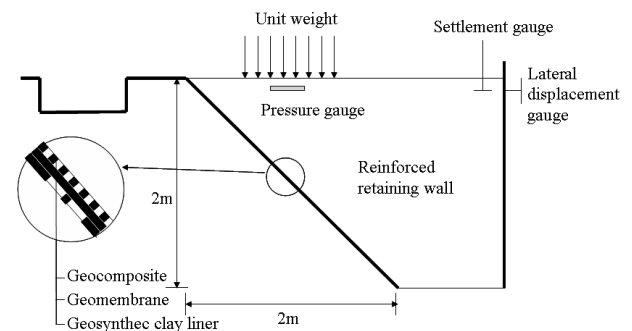


Fig. 5. Cross-section of field model test

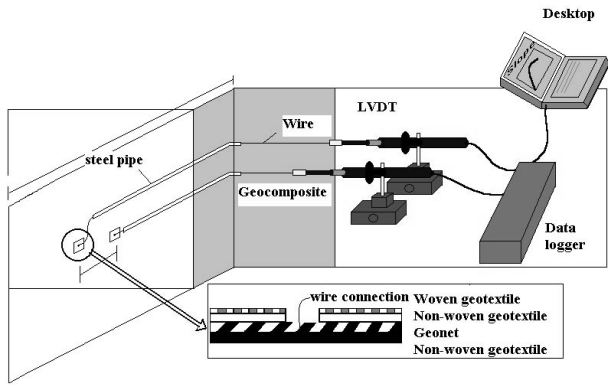


Fig. 6. Measurement equipment for geocomposite displacement

며, 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.

3.2 현장시험 결과 및 분석

상재하중 재하에 따른 토목합성재료의 변위는 Fig. 7에 나타난 바와 같다. 하중재하 초기에는 일체형과 분리형 지오킴포지트 모두 침하가 비슷한 양상으로 미소하게 발생하였으나, 토압이 19.6kPa 이상부터 분리형 지오킴포지트의 침하는 급격히 발생하여 토압이 39.2kPa일 때 분리형 지오킴포지트는 약 39cm, 일체형 지오킴포지트는 약 2cm로 나타났다. 또한, 일체형과 분리형 지오킴포지트 자체 변위 값을 구분하여 살펴보면 중앙에서의 변위가 하부부분보다 약간 더 큰 변위 값을 나타내는 것으로 판명되었다. 이는 폐기물 하중이 중앙부분에 더 많이 작용하고, 이로 인하여 하부에서는 중앙 측정지점 보다 작은 변위 값을 나타낸다고 판단된다.

하중재하에 따른 스트레인이지의 변형율은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 분리형 지오킴포지트와 일체형 지오킴포지트에 비하여 크게 나타나 하중재하에 따른 변위와 유사한 경향을 보였다. 분리형 지오킴포지트의 상재하중에 따른 변형은 하중이 증가함에 따라 거의 비례적으로 나타났으며, 49kPa에서 HDPE 지오펜브레인의 변형이 갑자기 감소한 것은 현장시험 시 토목합성재료의 인위적인 절단 파괴에 기인한 것으로 판단된다. 분리형 지오킴포지트의 변위는 하중 58.8kPa 이상에서는 더 이상 변형이 발생하지 않는 현상을 나타내고 있다. 일체형과 분리형 지오킴포지트의 하중에 따른 전체적인 HDPE 지오펜브레인의 변형율은 0.0002% 미만의 값을 나타내었으며, 이는 전체적인 집배수 체계에서 하중에 따른 변형이 무시될 수 있을 만

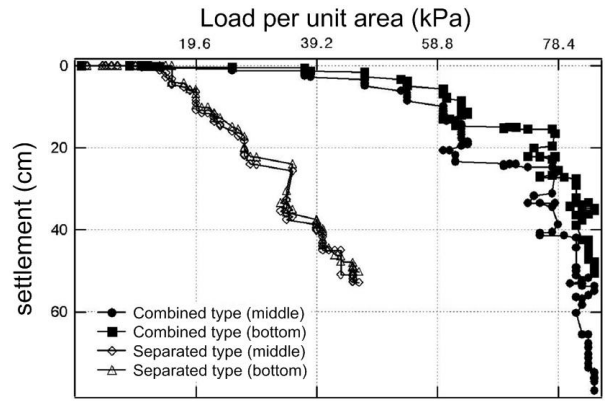


Fig. 7. Settlement of geosynthetic liners system

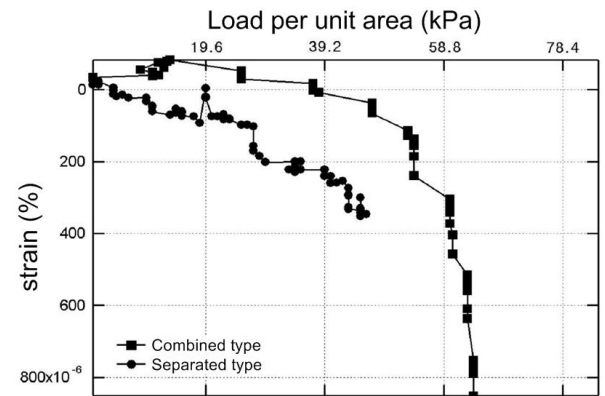


Fig. 8. The strain of HDPE geomembrane against loading

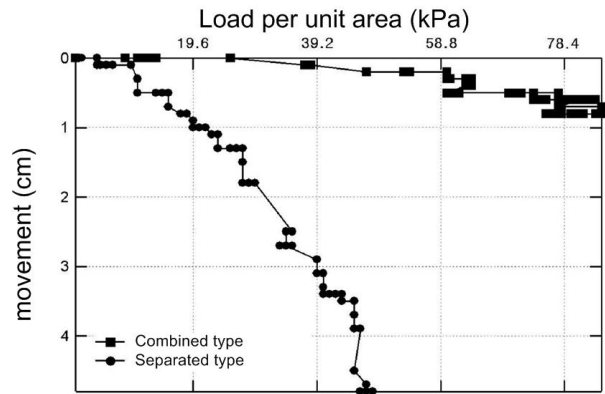


Fig. 9. Lateral movement against loading

큼의 작은 수치라고 판단되며, 이로 인한 집·배수 체계의 영향은 무시할 수 있다고 판단된다.

하중재하에 따른 전반적인 사면의 전방변위는 Fig. 9에 나타난 것과 같다. 전방변위는 전면판에 부착된 수평추의 변위를 측정하였으며, 이 전방변위값은 시공된 전면판의 상부의 수평변위 값을 나타내는 것으로 변위 값은 상부의 벽체의 이동을 의미하는 것이다. 분리형 지오킴포지트가 포설된 사면이 하중재하에 따른 전방변위가 일체형 지오킴포지트가 포설된 사면보다 크게 발생하는 것을 알 수 있

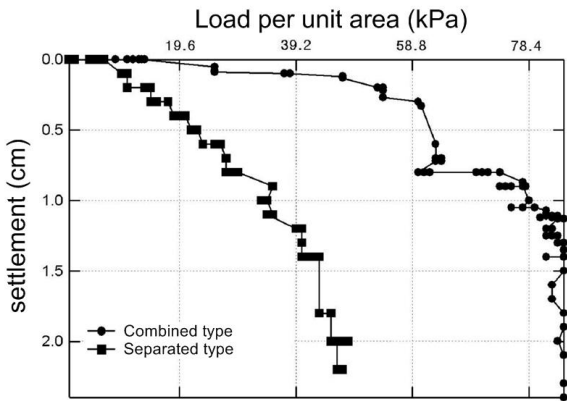


Fig. 10. Settlement against loading

으며, 이는 일체형 지오킴포지트의 특성상 토목합성재료 사이에서의 미끄러짐이 없는 영향으로 판단된다. 침하량은 현장시험시 현장사면 상단부에 침하계를 설치하고, 현장시험시 하중재하에 따라 레벨을 이용해 계측하였다.

Fig. 10은 하중재하에 따른 침하량을 나타내고 있다. 측 정결과 전방변위의 그래프와 유사한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있었으며, 침하량 역시 일체형 지오킴포지 트가 포설된 사면이 2cm 정도의 적은 값을 나타내었다.

4. 사면체계의 수치해석

4.1 현장 실험에 대한 적용

앞장에서 수행된 현장 실험을 모델링하여 실험 결과와 해석결과를 상호 비교, 검토하여 본 수치해석의 유효성을 확인하였다. 모델을 해석하기 위하여 FLAC에서는 유한차분망 요소, 구성모델 및 재료의 물성치, 경계조건 및 초기조건이 정의 되어야 한다. 그리드는 해석하고자 하는 모델의 기하학적 형상을 정의하는 것이고, 구성모델 및 재료의 물성치는 모델의 반응형태를 말하는 것이고, 경계 조건 및 초기조건은 현장 상태를 정의 하는 것이다.

폐기물 매립장의 토목합성섬유 차수체계의 거동 및 안

정성을 평가하고자 실시한 현장 실험에 대하여 동일한 경계조건하에서 수치해석을 실시하였다. 대형직접전 단시험기를 이용하여 실험에 사용된 토목합성섬유의 상호 마찰시험결과 전단에 대하여 가장 취약한 면은 지오킴브 레인의 상·하면 즉, 지오킴포지트/지오킴브레인, 지오킴브 레인/토목섬유점토차수재면으로 나타났다. 따라서 수치해석 에서는 지오킴브레인을 범요소로 모델링하고 각각의 면에 대하여 인터페이스요소를 사용함으로써 이들의 접촉마찰을 모사하였다. 여기에 사용된 인터페이스 모델은 Coulomb 전 단파괴규준을 사용하여 대형직접전단시험에서 구한 실험 값을 사용하였다. 시험에 사용한 물성치는 Table 3과 같다.

지오킴브레인은 단위중량을 주지 않는 것으로 자중을 무시하였으며, 토목합성재료의 상호 마찰은 지오킴브레인 과 지오킴포지트의 경우, 매끄러운 형태의 지오킴브레인에 대한 점착력은 1kN/m^2 , 접촉마찰각은 21.3° 를 사용하였고, 거칠은 형태의 지오킴브레인에 대한 점착력은 17kN/m^2 접 촉마찰각은 29.6° 를 적용하였다. 지오킴브레인과 토목섬유 점토차수재의 경우, 매끄러운 형태의 지오킴브레인에 대한 점착력은 4kN/m^2 접촉마찰각은 17.8° 를 사용하였고, 거칠 은 형태의 지오킴브레인에 대한 점착력은 11kN/m^2 접촉마 찰각은 32.3° 를 적용하였다. 지반에 대한 물성치는 현장실험 후 토질시험을 통해 얻은 값을 사용하였다. 쓰레기를

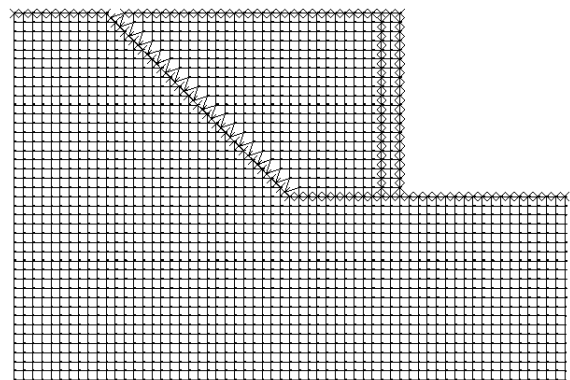


Fig. 11. Model mesh of field model test for waste landfill slope

Table 3. Input parameters for FLAC analysis

Session	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Internal or interface friction angle (°)	Elastic modulus (kN/m ²)	Bulk modulus (kN/m ²)	Shear modulus (kN/m ²)
Waste	18	10	25	18000	15000	6920
Embankment	19	10	30	36000	30000	13850
Geomembrane	-	-		100000		
SGM/GC		1	21.3			
SGM/GCL		4	17.8			
TGM/GC		17	29.6			
TGM/GCL		11	32.3			

모사한 보강토옹벽층은 실제 토사가 사용되었으므로 토사에 대한 물성치를 적용하였다.

모델링 단면은 Fig. 5와 같이 사면높이 2m 사면경사 1:1의 실제 현장실험에 사용된 단면을 사용하였으며, Fig. 11은 해석 모델의 메쉬를 나타낸 것으로 상부지표면은 자유경계 조건, 측면 및 하부는 각 면에 수직인 방향의 변위를 구속하는 변위 경계조건을 적용하였다. 하중조건은 10kN/m²의 단위로 단계하중을 가하여 100kN/m²까지 재하하였다.

4.2 수치해석 결과 및 분석

현장 실험형 실험을 수치해석하여 지오멤브레인의 종류에 따른 축력과 전체 사면의 x축 변위, y변위를 비교하였다. Fig. 12는 지오멤브레인의 축력을 나타낸 것으로서 매끄러운 형태와 거칠은 형태 모두 인장력과 압축력을 동시에 받는 것으로 나타났다. 사면 상부의 경우, 쓰레기층의 침하와 함께 인장력이 발생되고, 하부의 경우에는 상부의 지오멤브레인이 밀려 내려옴으로써 압축력을 받는 것으로 판단된다.

Fig. 13과 14는 각각 현장 실험형 실험과의 적합성을 검토하기 위해 계측지점별로 x축 변위와 y축 변위를 나타낸 것이다. 상부 쓰레기층의 전면변위는 1.5mm, 침하량은 3.0mm로 실험형 실험에서 도출된 전면변위 0.8mm와 침하량 3.5mm와 유사한 결과를 나타내었다.

또한, 지오멤브레인의 형태에 따른 거동특성을 살펴보기 위해 물성치 변화에 따른 해석을 수행하였다. 같은 응력조건하에서 지오멤브레인의 축력은 Fig. 12에서와 같이 매끄러운 형태에 비해 거칠은 형태가 크게 나타났다. 한편,

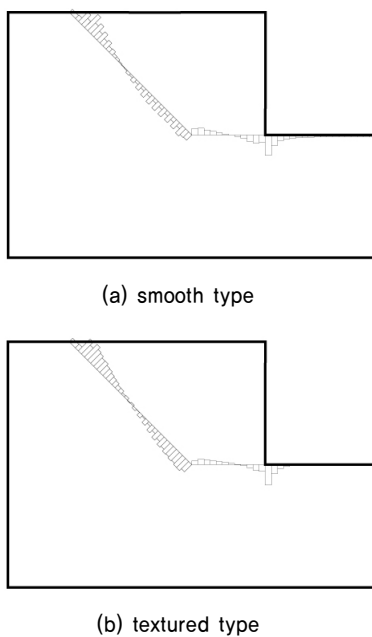
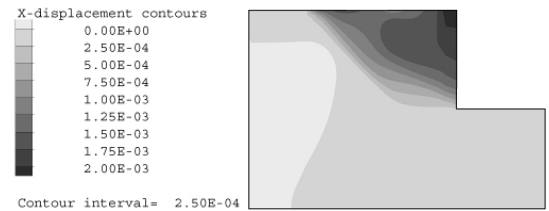


Fig. 12. Axial force on geomembrane of waste landfill slope

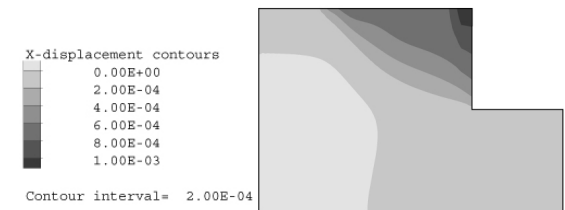
수평변위 및 수직변위에 대해서는 거칠은 형태의 변위가 매끄러운 형태에 비하여 작게 나타내었다. 상대적인 값을 비교하면 축력은 거칠은 형태가 매끄러운 형태보다 약 2배의 축력을 받고, 수직변위 및 수평변위는 매끄러운 형태가 2배정도 큰 값을 나타내었다. 이는 거칠은 형태가 상대적으로 큰 마찰저항으로 인해 상부 쓰레기층의 변위를 억제하는 효과가 있기 때문에 축력은 크게 작용하고 변위량은 작게 나타난 것으로 판단된다.

5. 결론

폐기물 매립장의 문제점으로 가장 많이 대두되는 것이 사면 체계의 안정성이다. 폐기물 매립장 사면체계의 안정성을 평가하기 위하여 대형직접전단시험을 실시하여 토목

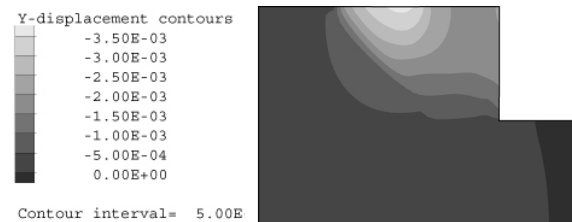


(a) smooth type

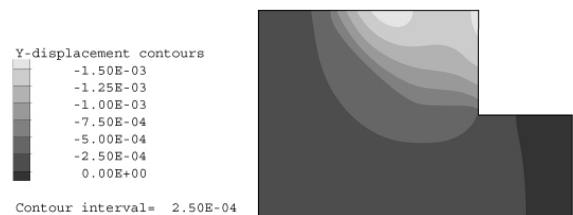


(b) textured type

Fig. 13. X-displacement contours of waste landfill slope



(a) smooth type



(b) textured type

Fig. 14. Y-displacement contours of waste landfill slope

합성재료의 공학적 특성을 평가하였고, 현장 실험실 및 수치해석을 통하여 폐기물 매립장 사면체계의 거동을 분석하였다.

- (1) 대형직접전단시험 결과, 집배수층에서의 접촉마찰각 비교시 포화시료는 13.8°~28.5°, 건조시료는 17.2°~29.6°의 범위로 나타났고, 차수층에서의 포화시료는 5.5°~22.3°, 건조시료는 21.3°~32.3°의 범위로 나타나 포화시료가 건조시료에 비하여 접촉마찰각이 작아짐을 확인하였다.
- (2) 현장 실험실 결과, 하중재하 초기에는 일체형과 분리형 지오킴포지트 모두 침하가 비슷한 양상으로 미소하게 발생하였으나, 토압이 19.6kPa 이상부터 분리형 지오킴포지트의 침하는 급격히 발생하여 토압이 39.2kPa 일 때 분리형 지오킴포지트는 약 39cm, 일체형 지오킴포지트는 약 2cm로 나타났다. 또한, 지오킴포지트의 사면 위치에 따른 변위는 사면 중간부분이 사면 아래 지점의 변위보다 크게 나타났으며, 동일한 하중 조건에서 일체형이 분리형에 비해 작은 변위를 보였다.
- (3) 일체형과 분리형 지오킴포지트의 하중에 따른 전체적인 HDPE 지오멤브레인의 변형을 값은 0.0002% 미만의 값을 나타내었으며, 이는 전체적인 집·배수 체계에서 하중에 따른 변형이 무시될 수 있을 만큼의 작은 수치라고 판단되며, 이로 인한 집·배수 체계의 영향은 무시할 수 있다고 판단된다.
- (4) 토목합성재료와 지반, 토목합성재료와 쓰레기, 토목합성재료사이의 불연속면을 인터페이스요소로 모델링하여 해석한 결과, 축력은 거칠은 형태가 매끄러운 형태보다 약 2배의 축력을 받고, 수직변위 및 수평변위는 매끄러운 형태가 2배정도 큰 값을 나타내었다. 이는 거칠은 형태가 상대적으로 큰 마찰저항으로 인해 상부 쓰레기층의 변위를 억제하는 효과가 있기 때문에 축력은 크게 작용하고 변위량은 작게 나타난 것으로 판단된다. 현장 실험실 시험과의 결과에서 토목합성재료의 변위, 변형율, 사면저면의 침하량에서 잘 부합되는 것으로 나타났고, 토목합성재료의 상호간 변위를 확인할 수 있어 인터페이스요소로 모델링하는 것이 적절한 것으로 판단되었다.
- (5) 현재 마찰형 지오멤브레인에 대한 거칠기의 정량화에 대한 연구가 이루어 지고 있으나 아직 그 결과는 미비한 실정이므로, 향후 마찰형 지오멤브레인에 대한 표면 거칠기와 경도의 정량화와 이의 영향에 따른 마찰저항의 연구가 필요하다.

참고 문헌

1. 박현일, 이승래, 정구영 (2003), 개별요소법을 사용한 매립지 사면 차수 시스템의 안정성 평가, *한국지반공학회 논문집*, 제 19권, 2호, pp. 87~95.
2. 서민우, 박인준, 박준범 (2004), The Influence of Moisture on the Interface Shear Strength Between Geosynthetics, *한국지반공학회 논문집*, 제20권, 3호, pp. 75~85.
3. 이광열, 김수석 (1998), 흙-토목섬유의 마찰특성을 이용한 차수 구조의 설계, *98 Geosynthetics Conference*, Seoul, pp. 832~839.
4. 장연수, 김홍석 (2004), 복합 경계면요소 수치해석에 의한 매립지 안정성 해석, *한국지반공학회 논문집*, 제20권, 4호, pp. 29~38.
5. Blumel, W. and Brummermann, K. (1996), Interface Friction between Geosynthetics and Soils and between Different Geosynthetics, *Geosynthetics: Applications, Design and Construction*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 209~216.
6. Blumel, W. and Stoewahse, C. (1998), Geosynthetic Interface Friction Testing in Germany: Effect of Test Setup, *Proceedings of 6th International Conference on Geosynthetics*, 25-29 March, Atlanta, GA, USA, pp. 209~216.
7. Briancon, L., Girard, H., and Poulain, D. (2002), Slope Stability of Lining Systems-Experimental Modeling of Friction at Geosynthetic Interfaces, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 20, No. 3, pp. 147~172.
8. Dixon, N., Jones, D. R., and Fowmes, G. J. (2006), Interface Shear Strength Variability and Its Use in Reliability-Based Landfill Stability Analysis, *Geosynthetics International*, Vol. 13, No. 1, pp. 1~14.
9. Fishman, K. L., Pal, S. (1994), Further Study of Geomembrane/ Cohesive soil Interface Shears Behaviour, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 13, No. 9, pp. 571~590.
10. Gilbert, R. B., Lona, J. H., and Daly, J. J. (1993), Structural Integrity of Composite Geosynthetic Lining and Cover Systems, *Proceedings of the Geosynthetics '93 Conference*, Vancouver, Canada, pp. 1389~1401.
11. Giroud, J. P. and Beech, J. F. (1989), Stability of Soil Layers on Geosynthetic Lining Systems, *Proceedings of the Geosynthetics '89 Conference*, IFAI, San Diego, CA, pp. 35~46.
12. Helwany, M. B. and Wu, J. T. H. (1995), A Numerical Model for Analyzing Long-Term Performance of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures, *Geosynthetics International*, Vol. 2, No. 2, pp. 429~453.
13. Koerner, R. M. and Hwu, B. L. (1991), Stability and Tension Considerations Regarding Cover Soils on Geomembrane Lined Slopes, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 10, No. 4, pp. 335~355.
14. Landrum, J. M., Bourdeau, P. L., and Deschamps, R. J. (2000), Stability Analysis of Landfill Slopes: A Probabilistic Approach, *ASCE Geotechnical Special Publication*, No. 44, pp. 1020~1034.
15. Mitchell, J. K., Seed, R. B., Seed, H. B. (1990), Kettleman Hills waste landfill slope failure. I: Liner-system properties, *J. of Geotechnical Engrg.*, *ASCE*, Vol.116, No. 4, pp. 647~668.
16. Wilson-Fahmy, R. F. and Koerner, R. M. (1993), Finite Element Analysis of Stability of Cover Soil on Geomembrane lined Slopes, *Proceedings of the Geosynthetics '93 Conference*, Vancouver, Canada, pp. 1425~1437.

(접수일: 2008. 8. 19 심사일: 2008. 9. 5 심사완료일: 2009. 2. 16)