

복합 경계면요소 수치해석에 의한 매립지 안정성 해석

Stability Analysis of Waste Landfill Using Multi-interface Element Numerical Method

장 연 수¹ Jang, Yeon-Soo

김 홍 석² Kim, Hong-Seug

Abstract

A finite element nonlinear stress-deformation model with multi-interface element is applied to the stability analysis of waste landfill slope. Strength parameters of waste and geosynthetic materials are obtained from the triaxial test of waste and the direct shear test of geosynthetics, respectively. The landfill models used for the numerical models are fit to regulations of the Korean waste management law. The results of the strength tests showed linear behavior for the waste and nonlinear behavior for the geosynthetic materials. The stability analysis with multi-interface element for the geosynthetic materials in the liner system showed large shear stress and slippage at the boundary of the foundation and the slope of the waste fill. This analysis verified the necessity of multi-interface analysis for waste landfills with composite liners.

요 지

본 연구에서는 복합 경계면요소를 이용한 비선형 응력-변형 모델을 이용하여 쓰레기 매립지의 안정성해석을 수행하였다. 쓰레기 매립층의 응력-변형 거동 특성은 국내의 쓰레기의 삼축압축 강도시험 수행결과로써 결정하였고, 경계면 요소의 모델 변수 값은 여러 가지 차수재의 전단시험 결과를 적용하였다. 해석방법에 대한 검증은 위하여 국내 폐기물 관리법에 준하는 매립지 모델을 선정하여 안정성해석을 실시하였다. 쓰레기에 대한 삼축압축시험과 토목섬유재에 대한 응력-변형 특성을 분석한 결과 쓰레기는 선형거동을 그리고 토목섬유는 비선형거동을 나타내는 것으로 나타났다. 경계면요소를 이용한 복합차수층 매립지의 안정성 해석결과 매립지 바닥면과 사면의 경계부에서 응력집중과 차수재의 전단변위가 크게 나타나 토목섬유라이너가 포설된 복합차수층의 경우는 복합 경계면 요소가 적용된 해석이 필요함을 알 수 있었다.

Keywords : Geosynthetic materials, Korean waste management law, Multi-interface element, Nonlinear stress-deformation model, Stability analysis of waste landfill

1. 서 론

매립지의 차수층은 침출수에 의한 토양 및 지하수오염을 방지하기 위하여 설치되며, 지오멤브레인 등 두께

가 얇고 서로 다른 물성을 가진 토목섬유재와 점토차수재를 복합적으로 사용하고 있다. 이러한 복합적인 구조로 인해 차수층의 거동은 차수재간의 미끌림 등과 같은 매우 복잡한 전단거동을 보이며, 매립지 안정성

1 정회원, 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongguk Univ., ysjang@dongguk.edu)

2 정회원, 동국대학교 대학원 토목환경공학과 박사수료 (Member, Doctoral Candidate, Dept. of Civil Engrg., Dongguk Univ.)

에 불안정한 요소로 작용한다(Mitchell et al., 1990).

일반적으로 매립지의 안정성해석은 매립지 전반에 대한 응력-변형해석과 차수층의 안정성해석의 이원화된 방법을 사용하고 있다. 기존의 매립지의 응력-변형해석은 쓰레기 매립층과 매립지 바닥 기초부는 토질정수를 대입한 연속체로 간주하고 흙의 물성치를 대입하는 방식으로 해석하였다. 쓰레기 매립지 차수시스템의 안정성해석은 주로 Giroud and Beech(1989), Koerner and Hwu(1991), Landrum et al.(2000), Littlemore and Rogers(1997), Bourdeau et al.(1993)이 한계평형법에 근거한 해석기법들을 사용하였으며, Wilson-Fahmy and Koerner(1993), Gilbert 등(1993)은 비선형 유한요소법을 이용하였다. 또한 Cundall(1971)은 사면차수 및 덮개 시스템의 힘평형과 변위의 적합성을 동시에 고려할 수 있는 개별요소법을 사용하기도 하였다.

매립지의 구성요소를 연속체의 개념으로 응력-변형 해석을 할 경우 매립지 쓰레기층을 탄성해석에 의존하여 해석하는 경우가 많으며, 대체로 흙 요소의 물성치는 체적탄성계수(elastic bulk moduls, K), 밀도(density), 내부마찰각(internal angle of friction) 및 전단탄성계수(elastic shear moduls, G) 등을 사용하고 흙 요소의 응력-변형 곡선을 선형 또는 비선형 모델을 이용하여 해석을 수행한다. 그러나 매립지 쓰레기층은 일반적인 흙 요소의 응력-변형 곡선과 다소 다른 거동(Grisolia et al., 1995)을 보이고 있으며, 차수재간의 전단거동은 매립지 안정성에 매우 중요한 요소이므로 매립지쓰레기의 비선형 거동모델을 필요로 한다.

매립지 사면부의 차수층 안정성 해석은 일반적으로 한계평형법을 통하여 수행되고 있는데, 한계평형법에서는 매립쓰레기의 하중으로 인한 차수재 상하부의 전단마찰력의 차이만큼 발생하는 인장력과 허용 인장력에 대한 안정성만을 평가하고 있기 때문에 차수재 접촉면의 전단강도 특성에 의한 변위 및 안정성 예측에는 미흡하다. 유한요소법의 경우 안정성해석을 위하여 재료의 정확한 구성모델을 필요로 하며, 동시에 모델 변수 값들에 대한 정교한 적용을 위하여 차수재 접촉면의 공학적 특성시험이 요구된다. 최근 Villard et al.(1999)의 연구에서는 경계면 요소로 차수재간의 응력-변형 거동을 표현함은 물론 차수재에 작용하는 인장력을 유한요소법에서 해석할 수 있도록 Geomembrane 등의 차수재를 강성이 낮은 bar 요소로 표현하여 모델링하는 기법이 적용되고 있다.

본 연구에서는 상기와 같은 해석의 복잡성과 해석결과에 대한 불확실성을 감소하기 위하여 국내의 쓰레기에 대한 실내시험 결과를 고찰하고 쓰레기 매립층의 응력-변형 이력모델을 제안하였으며, 이를 유한요소해석 프로그램에 삽입·수정하였다. 차수재간의 응력-변형 거동모델은 경계면 요소(interface element)를 사용하고, 차수재간의 전단시험 결과로부터 얻은 공학적 특성값을 대입하여 쓰레기 매립지의 거동을 보다 정확히 예측하고자 하였다. 본 연구의 해석방법의 검증을 위하여 먼저 토목섬유차수재를 사용하지 않은 매립지에 대한 해석을 수행 상용 프로그램인 FLAC의 해석결과와 비교한 후 토목섬유재가 있는 경우의 해석을 수행하였다.

2. 매립지의 거동해석 프로그램과 모델

2.1 흙의 응력-변형 이력모델

유한요소해석 프로그램은 Duncan et. al.(1980)이 제안한 비선형 거동모델인 hyperbolic 모델을 사용하였다. 모델은 흙의 응력-변형 곡선을 그림 1과 같은 포물선으로 가정하였고, 응력-변형 곡선의 접선경사(tangent modulus, E_t)는 식 (1)과 같이 구속응력 (σ_3')과 응력레벨(SL, stress level)과의 함수로 정의 하였다.

$$E_t = (1 - R_f \cdot SL)^2 \cdot K \cdot P_a \cdot (\sigma_3' / P_a)^n \quad (1)$$

여기서, $SL = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 은 파괴시의 축차응력, K 는 구속응력 (σ_3')의 작용시 초기 접선계수의 상수로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$E_i = K P_a \cdot (\sigma_3' / P_a)^n \quad (2)$$

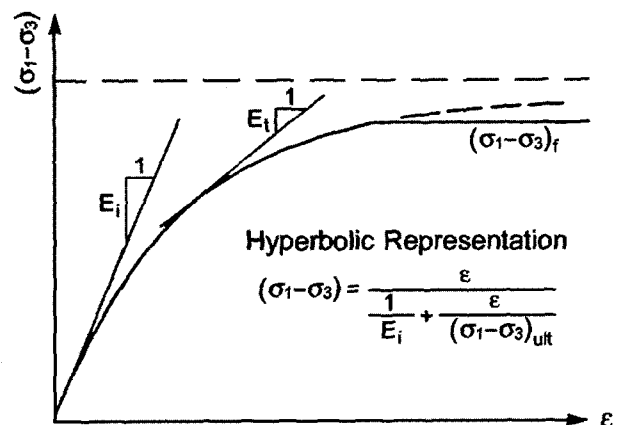


Fig. 1. Hyperbolic Representation of Stress-Strain Curve

여기서, R_f : 대부분의 흙에 적용되는 상수(0.6~0.9),
 P_a : 대기압 이다.

2.2 쓰레기의 응력-변형 거동모델

쓰레기의 거동모델은 비선형인 흙의 거동모델과 달리 큰 입자간의 공극을 메우거나 분해와 같은 화학적 작용, 지하수 유입으로 인한 용해성 물질의 이동, 크리프 및 시간에 따른 변형특성의 변화 등 여러 가지 요인에 의하여 복잡하게 나타난다. 이러한 특성을 반영하기 위해 국내 쓰레기의 성분별 조성비를 조사하여 실내 인공쓰레기 시료를 제작한 뒤 삼축압축 강도시험 결과와 국외 시험결과(Grisolia et. al., 1995)를 종합하여 쓰레기의 응력-변형에 대한 이력모델을 결정하였다(그림 2(a), (b) 참조).

삼축압축시험에 사용한 실내 제작 시료는 1998년 수도권에서 발생한 생활쓰레기의 성상별 발생량을 바탕으로 하여 시료의 성분비를 결정하였으며, 자세한 성상비가 나타나지 않은 기타성분은 1997년도 수도권매립지에 유입된 생활폐기물 성상비 자료를 참고로 하여 각각의 성분이 전체 쓰레기 발생량에서 차지하는 비율을 고려하여 음식물이 27.9%, 종이류 27%, 플라스틱·비닐류 14.4%, 유리 8%, 섬유류 5.1%, 금속류 4.6%, 나무류 1.5%, 고무·가죽류 1.1%, 흙 7.8%로 결정하였다.

성형시료의 크기는 직경 10cm(단면적 : 78.5cm²), 높이 20cm로 제작하였으며, 성형시료의 단위중량은 양호한 다짐이었을 때 쓰레기의 단위중량인 0.9~1.1t/m³범위 안에 들도록 하였다. 쓰레기 시료의 함수비는 여러 문헌들에 나타난 쓰레기의 함수비들을 참고로 하여 현장에서의 평균 함수비인 40%로 결정하였으며, 제작된 공시체의 단위중량은 1.08t/m³이었다.

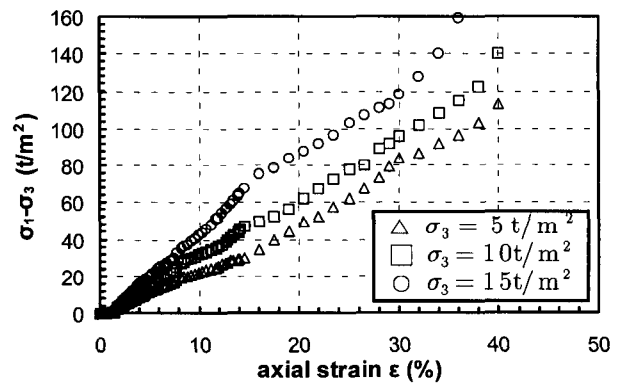
국내 쓰레기의 삼축압축 강도시험은 매립고 4, 8, 12m에 대응하는 각기 다른 세 가지 구속압력 0.5, 1.0, 1.5 kg/cm²에 대하여 시험하였다(그림 2(a)). 세 가지 축압에 따른 응력-변형률 곡선은 유사한 경향을 나타내었는데, 초기에는 쓰레기의 큰 압축성으로 하중의 증가 없이 거의 수평을 이루다가 점차 증가하여 변형률 40%까지는 거의 직선적인 변화를 보였다. 국외 쓰레기 삼축압축 강도시험결과는 그림 2(b)와 같이 변형률 30%까지는 선형적인 응력-변형 관계를 나타내지만 이후 응력증가에 따른 변형량의 감소양상이 두드러지게 나타났다. 국내외 매립쓰레기의 삼축압축 시험결과를 비교하면 두 경우 모두 일정 변형률 30%까지는 거의 직선거동

형태를 보이다가 이후 변형률에서 차이를 보인다. 이는 국내의 매립지를 구성하는 쓰레기의 성분의 차이로 인한 것으로 판단된다.

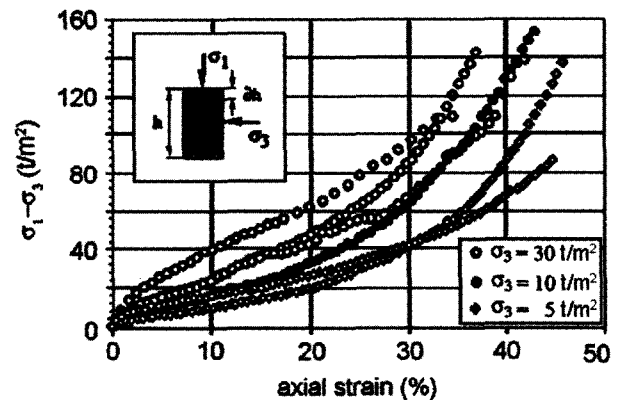
본 연구에서는 초기의 응력-변형은 매립 시 즉시침하로 간주하여 이력모델 적용 시 즉시침하 변형 이후의 응력-변형 거동을 쓰레기 거동모델로 적용하였다. 그림 2(a)에 나타난 바와 같이 국내 쓰레기의 응력-변형 거동 형태를 직선적 볼 수 있으므로 흙의 거동모델의 변수인 쓰레기의 응력-변형 모델의 접선경사(Tangent Modulus, E_t)는 구속응력(σ_3')과 상수(K)를 적용한 흙의 초기탄성계수(E_i)와 같은 형태를 보인다. 따라서 흙의 탄성계수식 식 (1)은 식 (3)과 같이 단순해지며, 식 (3)을 그림 2(a)의 응력-변형 거동에 적용한 결과 $K = 33$, $n = 0.6$ 의 값을 갖는 것으로 나타났다.

$$E_t = K \cdot P_a \cdot (\sigma_3' / P_a)^n \quad (3)$$

여기서, K : 구속응력 σ_3' 의 작용시 초기 접선계수의 상수, P_a : 대기압, n : 상수 이다.



(a) Domestic Waste



(b) Grisolia et. al.(1995)

Fig. 2. Stress-Strain Behavior of Waste by Triaxial Compression Test

2.3 경계면 거동모델

일반적인 유한요소해석은 격자점에서의 변위의 적합성(compatibility)과 서로 다른 물성을 가진 인접요소간의 이동을 허용하지 않는다. 하지만 실제로 응력을 받을 때 서로 다른 물성을 가진 요소는 매우 미소한 이동을 하게 된다. Goodman et. al.(1968)은 제한조건방정식을 이용한 경계면 요소(interface element)란 개념을 도입하여 물성이 다른 인접한 요소의 전단이동을 표현하였으며, 이후 Clough와 Duncan(1969)은 그림 3(a)와 같이 경계면 요소를 구성하고, 비선형 2차원 전단응력-변위 거동모델을 표현할 수 있는 경계면 모델로 확장하였다.

경계면 요소의 성질은 수직스프링으로 표현된 수직강성(normal stiffness, K_n)과 전단스프링으로 표현된 접선의 전단강성(tangent shear stiffness, K_s)으로 식 (4)와 같이 구성된다.

$$K_n \Delta_n = \sigma_n \quad (4a)$$

$$K_s \Delta_s = \tau \quad (4b)$$

경계면 요소의 전단거동은 전단응력-변위 곡선(그림 3(b))으로부터 식 (5)와 같은 관계식을 유추할 수 있으며, 흙의 응력-변형과 마찬가지로 비선형 방정식으로 유추하고 있다.

$$K_s = k_s \gamma_w \left[\frac{\sigma_n}{P_a} \right]^n \left[1 - \frac{R_f \tau}{\tau_f} \right]^2 \quad (5)$$

여기서, k_s : shear spring coefficient, n, R_f : 경험적으로 결정된 상수, P_a : 대기압

$\tau_f = c + \sigma_n \tan \delta$, δ : 경계면 마찰각, c : 경계면 점착력

σ_n, τ : 경계면에 작용하는 수직응력과 전단응력

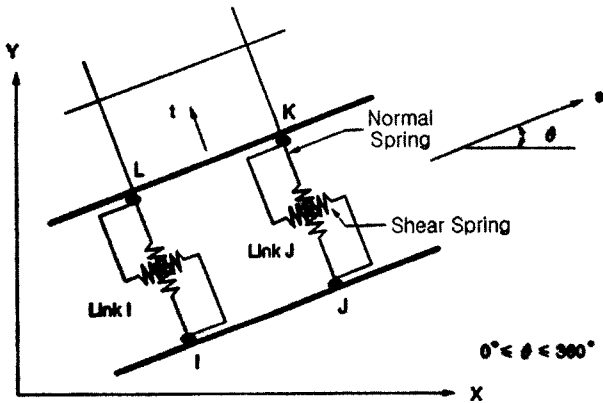
2.4 매립지 차수층간의 경계면 응력-변형 거동모델

매립지 차수층은 여러 개의 차수재로 구성되어 있으며, 각 차수재는 상호 다른 전단거동을 보인다. 이러한 전단거동을 모델링하기 위하여 비선형 유한요소 프로그램에서 흙과 구조물간의 경계면 거동모델을 기본으로 각 차수재간의 전단시험결과를 이용, 차수층의 응력-변형 거동모델을 결정하였다.

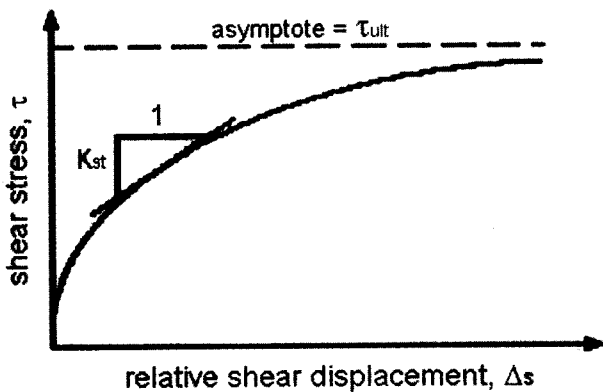
차수재간의 경계면 요소에서 수직 거동은 무한히 큰 강성을 주어 경계면의 수직변형은 발생하지 않도록 하였으며, 전단 거동만이 발생하도록 하였다. 차수재간 경계면 요소의 전단거동은 전단응력-전단변위의 곡선으로부터 식 (5)와 같은 흙-구조물의 전단 경계면 거동모델 관계식에서 각 차수재간의 전단시험을 통해 매립지 차수층의 거동모델을 표현 할 수 있도록 수정하였다.

2.4.1 HDPE-모래

HDPE와 모래간의 직접전단시험결과 전단응력-변형 거동은 그림 4(a)와 같이 불규칙하게 나타났으며, 점착력(c)은 $0.1t/m^2$, 내부마찰각은 약 26° 로 문헌(Sharma and Lewis, 1994)에서 보이고 있는 $17 \sim 28^\circ$ 에 속하는 것으로 측정되었다. 또한 구속응력이 증가함에 따라 연성 거동을 보이고 있으나 경계면 모델에서는 표현의 어려움이 있어 최대정점 이후의 변형은 파괴변형으로 간주하여 모델링하였다. 이로부터 추정된 HDPE-모래간 경계면의 전단강성을 식 (6)과 같이 나타냈다.



(a) Components of an Interface Element



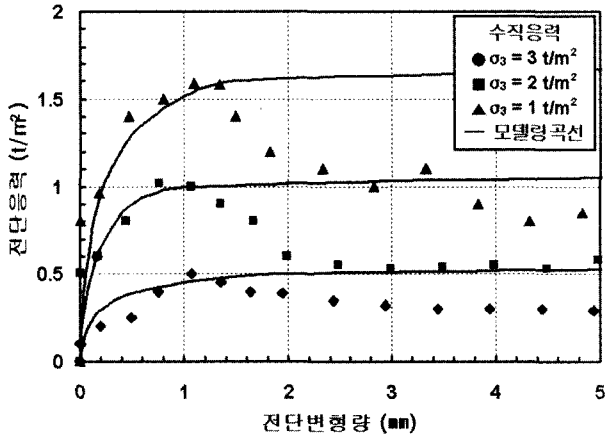
(b) Hyperbolic Shear Stress-Relative Shear Displacement Relationship

Fig. 3. Components of Interface Element and Hyperbolic Shear Stress-Relative Shear Displacement Relationship

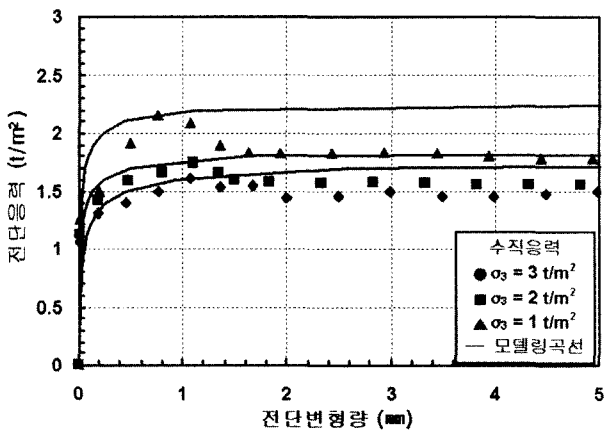
$$K_s = 50000 \gamma_w \left[\frac{\sigma_n}{P_a} \right]^{1.0} \left[1 - \frac{0.8 \tau}{\tau_f} \right]^2 \quad (6)$$

2.4.2 HDPE-점토

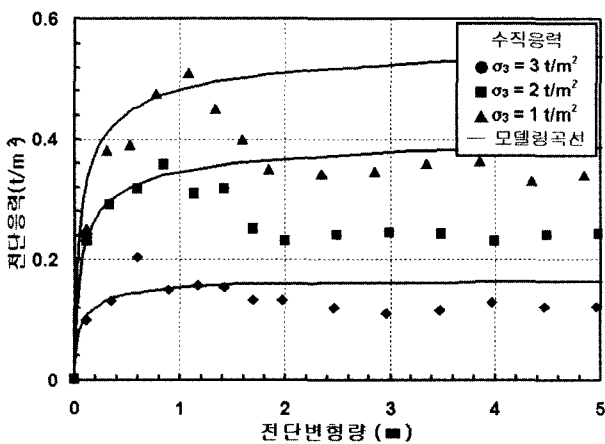
HDPE와 최적함수비 13.5%인 점토간의 직접전단시



(a) HDPE-Sand



(b) HDPE-Clay



(c) HDPE-Geonet

Fig. 4. Shear Stress-Relative Shear Displacement Relationship of Landfill Liner Systems

험 결과 전단응력-변형의 거동은 그림 4(b)와 같이 나타났다. 수평변형량 0.8~1.0mm에서 최대전단응력은 2.2 t/m², 내부마찰각은 약 11°로 측정되었으며, 전단강성은 식 (7)과 같다.

$$K_s = 90000 \gamma_w \left[\frac{\sigma_n}{P_a} \right]^{0.8} \left[1 - \frac{0.4 \tau}{\tau_f} \right]^2 \quad (7)$$

2.4.3 HDPE-Geonet

그림 4(c)는 HDPE와 Geonet 간의 전단응력-변형 거동으로 수평변형량 0.6~1.1mm에서 최대전단응력은 수직응력에 따라 0.2, 0.4, 0.5t/m²으로 측정되었다. 세 가지 수직응력상태에 따른 각각의 응력-변형 곡선은 대체로 비슷한 경향을 보였으며, 파괴점 이후에 일정한 전단응력으로 감소하여 유지되고 있음을 보였다. 경계면 모델링에서는 최대전단응력 이후의 변형을 파괴변형으로 간주하여 모델링 하였으며, 식 (8)에 전단강성을 나타내었다.

$$K_s = 50000 \gamma_w \left[\frac{\sigma_n}{P_a} \right]^{1.0} \left[1 - \frac{0.95 \tau}{\tau_f} \right]^2 \quad (8)$$

3. 매립지 모델선정과 안정성 해석

매립지 안정성해석을 위하여 국내 폐기물 관리법에 준하는 매립지 모델을 선정하고 점토·점토광물 혼합토 차수층을 이용한 단순매립지에 대한 거동해석을 FLAC의 해석결과와 비교, 분석함으로써 수정된 비선형 유한요소해석 프로그램을 검증하였다. 그리고 차수재간의 전단거동을 모사하기 위하여 토목합성수지라이너가 설치된 매립지에 대한 모델을 설정하였으며, 이를 경계면 모델을 이용하여 매립지 거동해석을 실시하였다.

3.1 매립지 차수층에 대한 폐기물 관리법 기준

개정된 폐기물 관리법(99.8.9)에서는 침출수의 유출을 방지하기 위하여 매립시설의 바닥 및 측면은 폐기물의 성상, 매립높이 및 지형조건 등을 고려하여 점토·점토광물 혼합토 등 점토류 라이너, 고밀도폴리에틸렌 또는 이에 준하는 재질의 토목합성수지라이너를 사용하여 차수시설을 설치하도록 되어 있다. 고밀도폴리에틸렌 또는 이에 준하는 재질의 토목합성수지라이너를 사용하는 경우에는 두께 2.0밀리미터 이상의 것

을 1겹 이상 포설하여야 하고, 토목합성수지라이너 하부에는 점토·점토광물 혼합토 등 점토류를 다져 투수계수가 10^{-7}cm/sec 이하이고 두께가 50cm 이상인 라이너를 설치하여야 한다. 점토·점토광물 혼합토만을 사용하여 차수시설을 설치한 경우는 두께가 1m 이상이어야 한다.

3.2 점토차수재를 이용한 매립지의 안정성해석

3.2.1 매립지 모델링 및 입력정수

폐기물 관리법에 의한 매립지의 형태를 그림 5(a)와 같이 시공할 경우에 대한 개념모델을 설정하였다. 매립지 형태는 2단 쓰레기 매립으로 각 단에 매립고는 4m이며 차수층은 그림 5와 같이 바닥부와 사면부 모두 1m 높이의 점토혼합토만을 사용하였다. 하부지반은 사질토층으로 구성되어 있으며, 점토차수층 위에 30cm의 배수층을 설치하였다. 그리고 매립층과 배수층, 점토광물 혼합토 차수재, 사질토층의 토질정수는 일반적인 값으로 가정하여 표 1과 같이 입력하였다.

그림 5(b)는 점토차수층을 이용한 단순 매립지의 개념모델을 기하학적 모델(해석 격자망)로 나타낸 것으로

풍화사질토층은 상부층에 비하여 거동이 미미할 것으로 예상하여 조격자로 분할하였으며, 주 관심 대상이 되는 매립층과 점토차수층은 세격자로 모델링 하였다.

3.2.2 해석결과

비선형 유한요소해석으로부터 계산된 수직 및 수평방향 변위는 매립층은 좌측방향으로 최대 13cm 정도 발생하였으며, 최대 수직변위는 약 24cm로 나타났다. 제방부의 최대 수직변위는 약 10cm가 발생하는 것으로 나타났다(그림 6). FLAC 해석결과로부터 수평방향변위를 검토한 결과(그림 7(a)) 매립층은 사면부 점토차수층을 경계로 하여 쓰레기 매립물에서는 사면의 경사를 따른 좌측방향의 이동이 중간부분에서 최대변위로 약 12cm 발생하였으며, 사면부 바깥부분에서는 미세하게 우측방향으로의 이동이 나타났다. 매립지 원지반층의 수평변위는 거의 없는 것으로 나타났다. 수직변위를 검토한 결과 최대 수직변위는 약 18cm의 침하가 쓰레기층내에서 발생한 것으로 나타났고 매립층의 하중으로 말미암아 제방부 사질토층 최대 수직변위는 약 7cm가 발생되었다(그림 7(b)).

FLAC과 수정된 유한요소해석 프로그램의 해석결과

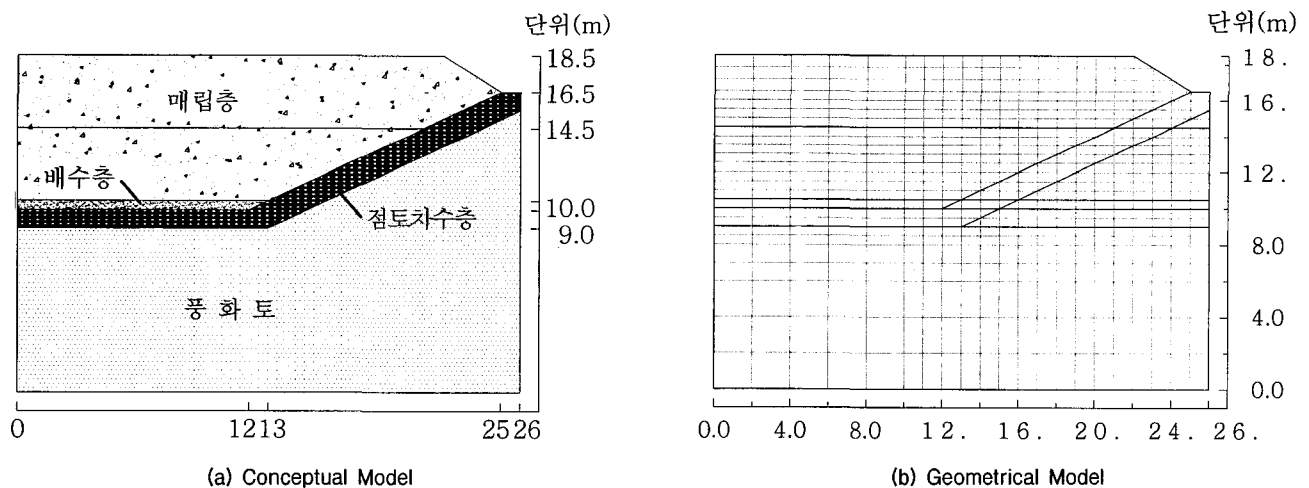
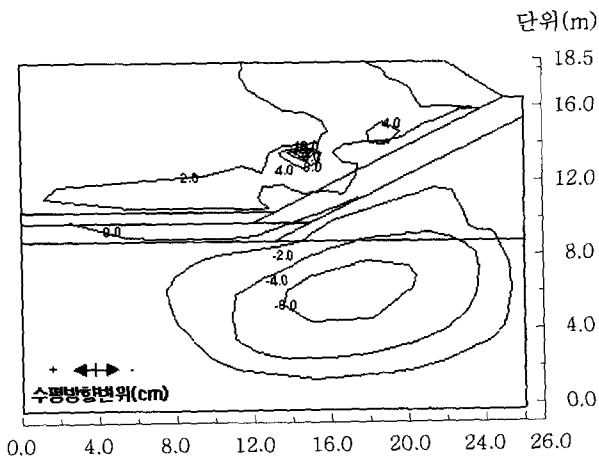


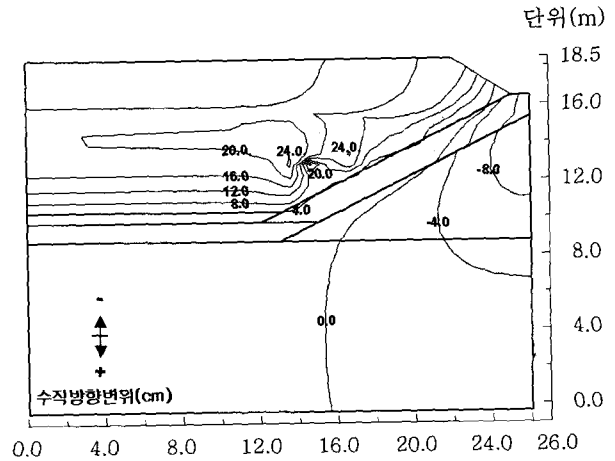
Fig. 5. Waste Landfill Model with Single Clay Liner

표 1. 점토차수층 모델의 입력정수

구 분	단위중량 γ_t (t/m^3)	점 착 력 c (t/m^2)	전단저항각 ϕ ($^\circ$)	체적탄성계수 K (t/m^2)	전단탄성계수 G (t/m^2)	상 수		
						K	R_f	n
사 질 토 층	1.90	0.5	35	16,672	7,689	1,667	0.7	0.45
매 립 층	1.30	0.7	20	330	150	33	-	0.50
배 수 층	1.88	0.0	30	2,680	1,631	268	1.0	0.45
점토차수층	1.82	1.1	10	1,667	816	167	0.6	0.40

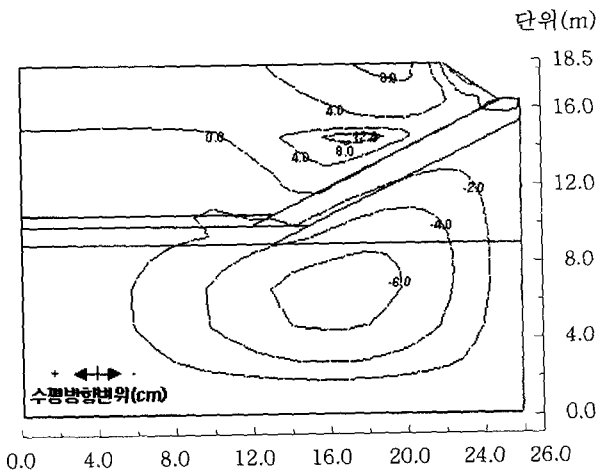


(a) Horizontal Displacement

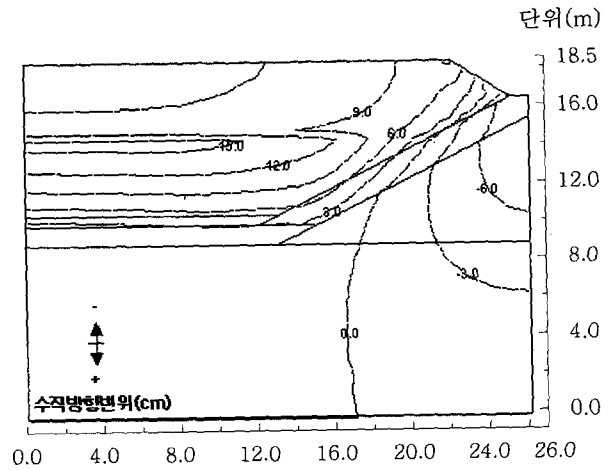


(b) Vertical Displacement

Fig. 6. Horizontal and Vertical Displacement of Waste Landfill by Nonlinear Finite Element Method



(a) Horizontal(x-coord.) Displacement



(b) Vertical Displacement

Fig. 7. Horizontal and Vertical Displacement of Waste Landfill by FLAC Analysis

원지반의 거동양상은 유사하게 나타났으나, 매립 쓰레기의 경우에는 각 프로그램의 입력변수의 접근방법과 프로그램 내의 응력-변형 거동모델이 다르므로 거동양상과 변위에 있어서 약간의 차이를 보였다.

3.3 복합차수재를 이용한 매립지의 안정성해석 결과

3.3.1 매립지 모델링 및 입력정수

그림 8은 토목합성수지라이너 시스템을 이용한 복합차수층 매립지로 원지반의 지층은 지표면으로부터 토질특성의 뚜렷한 변화를 보이는 상·하부 해성퇴적층과 그 하부에 풍화토층, 연암층 순으로 구성되어 있다. 해석대상 매립지는 일반폐기물 매립지로서 최종매립고는 8m로 2단계로 나누어 4m씩 매립된다. 매립지 차수

층은 바닥면에 50cm의 점토-벤토나이트 혼합차수재를 포설하였으며, 그 위에 HDPE sheet, 부직포 순으로 포설하였다. 매립지 사면부는 지반면 위에 벤토나이트 매트를 깔고 그 위에 HDPE sheet, 부직포 순으로 시공하였다. 매립지를 구성하는 재료의 입력정수는 표 2와 같으며, 복합차수층의 차수재간 경계면 요소의 입력정수는 표 3과 같이 입력하였다.

복합차수층은 두께가 없는 경계면 요소를 바닥부와 사면부에 각각 적용하였으며, 차수재는 강성이 낮은 Bar 요소로 모델링하여 해석하였다. 또한 바닥부와 사면부 차수층이 접하는 지점에서는 변위의 적합성을 따르기 위해 차수재간의 경계면 요소를 nodal link로 제어하여 해석하였다.

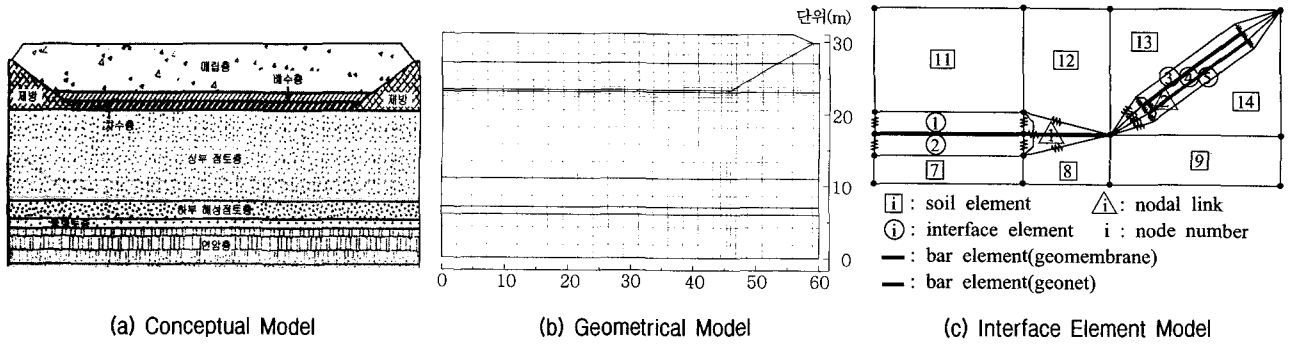


Fig. 8. Waste Landfill Model with Composite Liner

표 2. 복합차수층의 입력정수

구 분	단위중량 γ_t (t/m ³)	점 착 력 c (t/m ²)	전단저항각 ϕ (°)	체적탄성계수 K (t/m ²)	전단탄성계수 G (t/m ²)	상 수		
						K	R_f	n
매 립 층	1.30	0.7	20	330	150	33	-	0.50
배 수 층	1.88	0.0	30	2,680	1,631	268	1.0	0.45
점토차수층	1.82	1.1	10	1,667	816	167	0.6	0.40
제 방	1.88	0.0	30	-	-	300	0.7	0.60
상부점토층	1.75	2.9	0	-	-	38	0.8	0.40
하부점토층	1.80	0.0	35	-	-	45	0.8	0.40
풍 화 토 층	1.90	0.5	35	-	-	450	0.6	0.80
연 암 층	2.20	5.0	45	-	-	1,600	0.6	0.80

표 3. 경계면 요소의 입력정수

경계면 요소	K_n	K_s	R_f	n
HDPE - 모 래	1.0×10^7	5.0×10^4	0.80	1.0
HDPE - 점 토	1.0×10^7	9.0×10^4	0.40	0.8
HDPE - Geonet	1.0×10^7	5.0×10^4	0.95	1.0

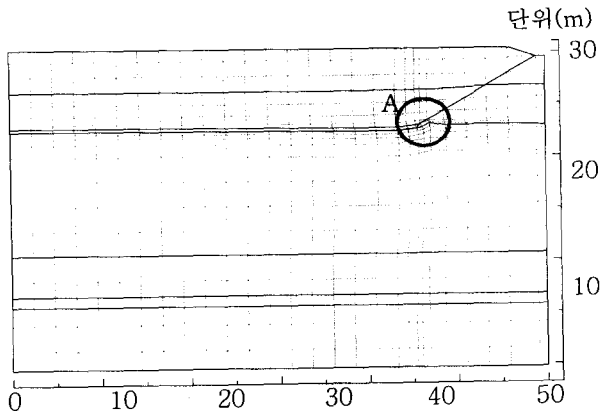
3.3.2 해석결과

상부점토층 최대수직변위는 약 22cm, 점토차수층 자체의 최대수직변위는 약 6cm이며 매립쓰레기의 최대수직변위는 37cm, 최대수평변위는 16cm, 제방부는 최대수직변위가 상향으로 약 7cm 발생하는 것으로 나타났다. 사면부 쓰레기는 사면부 차수층을 따라 미끌림이 발생하여 바닥부와 사면부가 만나는 지점에서 바닥부쪽에서 응력집중을 야기하며 이러한 응력집중으로 말미암아 원지반인 상부점토층과 하부점토층의 비교적 큰 수직변위를 발생시키는 것으로 나타났다. 특히 이러한 응력집중으로 인해 바닥부와 사면부 차수층의 접합지점(A지점) 부근의 일부 차수재간의 전단변위는 커지는 것으로 나타났다(그림 9).

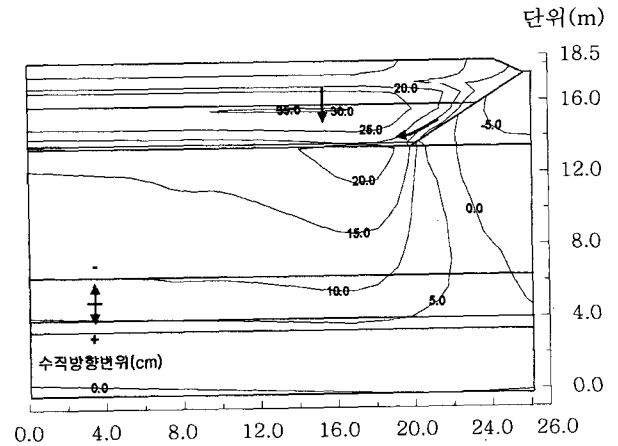
Bar 요소로 모델링된 차수재인 지오멤브레인과 지오네트에 작용하는 힘을 보면 지오멤브레인의 경우 A지

점의 일부구간에서 약간의 압축이 발생하는 것으로 나타났으며, 이후 구간은 전반적인 인장력이 발생하며 최대인장력은 1.48 t/m으로 나타났다. 이는 한계평형법에 의한 수계산 결과인 1.3 t/m보다 약간 크게 나타났지만 지오멤브레인의 최대 허용인장력인 3.0 t/m 보다는 적게 나타났다.

경계면 요소를 사용하여 차수층을 모델링하여 매립지 안정성 해석을 수행한 결과 경계면 요소를 사용하지 않은 단순매립지의 해석결과와 비교하면, 차수층의 미끌림으로 인해 바닥부와 사면부가 만나는 부근에 큰 응력을 야기하며 이러한 응력집중은 사면부 차수층 일부구간의 전단미끌림 파괴를 발생시키고 원지반인 상부점토층에 큰 변형을 발생시켜 바닥부 차수층 안정성에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.



(a) Nodal Displacement



(b) Vertical Displacement

Fig. 9. Nodal and Vertical Displacement of Waste Landfill with Composited Liner System

4. 결론

본 연구에서는 유한요소법을 이용한 Duncan 등(1980)에 의해 개발된 비선형 유한요소해석 프로그램에 매립지 쓰레기와 토목섬유차수재의 거동모델을 삽입하여 보완하고, 단순 점토차수의 경우와 복합차수층의 경우에 대한 매립지 안정성해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 매립지 쓰레기의 삼축압축 강도시험과 관계문헌을 통하여 응력-변형 거동모델의 접선경사(E_t)는 흙의 초기탄성계수(E_i)와 같은 형태를 보이는 것을 알 수 있었다. 이를 이용하여 거동모델의 초기 접선계수 ($K=33, n=0.5$)를 산정하였다.
- (2) 비선형 유한요소해석 프로그램을 이용하여 단순매립지에 대한 안정성해석을 수행한 결과 매립지 쓰레기의 거동양상은 상용 지반거동 해석프로그램 FLAC과 유사한 거동양상을 나타내었으나, 매립지 쓰레기의 경우에는 각 프로그램의 입력변수의 접근방법과 프로그램 내의 응력-변형 거동모델이 다르므로 최대변위지점의 위치나 크기 등은 다소 다르게 나타났다.
- (3) 경계면 요소를 이용한 차수층을 모델링하여 매립지의 안정성 해석을 수행하고, 경계면 요소를 사용하지 않은 단순매립지의 해석의 경우와 비교 검토한 바, 전자의 경우에는 차수층의 미끌림으로 인해 바닥부와 사면부가 만나는 부근에 큰 응력이 발생됨을 알 수 있었다. 이러한 응력집중이 발생한 사면부

차수층 일부 구간에서는 전단미끌림 파괴가 발생하는 것으로 나타나 복합차수층을 이용한 매립지에서는 경계면요소를 적용하여 해석하는 것이 더 정밀한 해석을 할 수 있는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Bourdeau, P. L., Ludlow, S. J., and Simpson, B. E. (1993), "Stability of Soil-Covered Geosynthetic-Lined Slopes: A Parametric Study", *Proceedings of the Geosynthetics '93 Conference*, Vancouver, Canada, pp.1511-1521.
2. Clough, R. W. and Duncan, J. M. (1969), *Finite Element Analysis of Port Allen and Old River Locks*, Contract Report S-69-6, September, US Army WES, Vicksburg, Miss.
3. Cundall, P. A. (1971), "A Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movements in Blocky Rock Systems", *Proceedings of the International Symposium on Rock Fracture*, Nancy, France, Vol.1, pp.8-17.
4. Duncan, J. M., Bryne, P., Wong, K. S., and Mabry, P. (1980), Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Soil Masses, *Geotechnical Engineering Research Report No. UCB/GT/80-01*, University of California, Berkeley.
5. 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.
6. 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.
7. Goodman, R. E., Taylor, R. L., and Brekke, T. L. (1968), "A Model for the Mechanics of Jointed Rock", *ASCE, SM3*, Vol.94, pp.637-659.
8. Grisolia, M., Napoleoni, Q. and Tancredi, G. (1995), "The Use of Triaxial Tests for the Mechanical Characterization of MSW", *Proceedings of Fifth International Landfill Symposium*, S.

- Margherita di Pula*, Cagliari Italy, Vol.2, pp.761-768.
9. Koerner, R. M. and Hwu, B. L. (1991), "Stability and Tension Considerations Regarding Cover Soils on Geomembrane Lined Slopes", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.10, pp.335-355.
 10. Landrum, J. M., Bourdeau, P. L., and Deschamps, R. J. (2000), "Stability Analysis of Landfill Slopes: A Probabilistic Approach", *Geoenvironment 2000*, Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environment Geotechnics, Geotechnical Special Publication, No.44, ASCE, pp.1020-1034.
 11. Littlemore, D. S. and Rogers, K. S. (1997), "The Slope Stability of Geomembranes in Landfill Facilities", *Geoenvironmental Engineering Conference 97*, Louisiana, USA, pp.105-109.
 12. Mitchell, J. K., Seed, R. B., and Seed, H. B. (1990), "Kettleman Hills waste landfill slope failure I: liner-system properties", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.116, No.4, pp.647-668.
 13. Sharma, H.D. and Lewis, S.P. (1994), *Waste Containment System, Waste Stabilization and Landfills : Design and Evaluation*, John Wiley & Sons, Inc.
 14. Villard, P., Gourc, J. P., and Feki, N.(1999), "Analysis of Geosynthetic Lining Systems(GLS) Undergoing Large Deformations", *Geotextile and Geomembranes*, Vol.17, pp.17-32.
 15. 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.

(접수일자 2004. 1. 26, 심사완료일 2004. 6. 10)