

비위생 폐기물 매립지 사면의 안정성에 관한 영향인자 분석

Analysis of Factors Affecting the Slope Stability of Uncontrolled Waste Landfill

유한규* · 최봉혁**

Yoo, Han-Kyu · Choi, Bong-Hyuck

Abstract

The effects of ground water level, shear strength parameters of refuse, and geological condition of ground on the slope stability of uncontrolled waste landfill were studied. The Janbu method of slices based on the limit equilibrium method was used to calculate the minimum factor of safety with respect to slope stability of landfill. The analytical results showed that the factor of safety for a fully dried condition of landfill increased 2.4~2.8 times as great as that for a fully saturated condition of landfill. Under the condition of actual ground water level, the factor of safety linearly increased with increasing both cohesion and internal friction angle of refuse. Also, when the potential failure surface passed through the underlying layer, the factor of safety and shape of potential failure surface were found to depend on geological conditions of underlying layer.

Keywords : Waste landfill, Slope stability analysis, Limit equilibrium method

요 지

본 연구에서는 지하수위, 폐기물의 전단강도 정수 그리고 지층 조건이 비위생 매립지 사면의 안정성에 미치는 영향을 검토하였다. 사면의 안정성 해석은 한계평형방법에 근거한 Janbu의 절편법을 사용하였다. 해석 결과 매립지가 완전건조 상태에 있는 경우가 완전포화 상태에 있는 경우에 비해 안전율이 약 2.4~2.8배 정도 증가되었다. 관측된 지하수위 상태 하에서 폐기물의 점착력과 내부마찰각이 증가할수록 사면의 안전율은 선형적으로 증가하였으며, 예상파괴면이 하부지층까지 도달할 경우 하부지층의 조건에 따라 안전율과 예상 파괴면의 형상이 변화한다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 폐기물 매립지 건설 시에는 지반조건이 양호한 지반을 선택하고, 지하수위 감소를 위한 차수 및 배수 시스템을 설치하는 것이 사면의 안정성 향상에 도움을 줄 것으로 판단된다.

주요어 : 폐기물 매립지, 사면안정해석, 한계평형방법

* 정희원 · 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 조교수

** 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

1. 서론

국내에서 건설된 폐기물 매립지중 80년대 후반 이전의 매립지는 대부분이 차수재를 설치하지 않은 비위생매립(단순매립, 불량매립, Open Dumping) 형식의 매립지로서 이러한 비위생 매립지는 환경적인 측면에서 폐기물에서 발생하는 침출수에 의해 주변 지반의 지하수 및 토양을 오염시키고 유해가스 발생에 따른 악취 및 대기오염으로 인하여 주변 주민들의 민원의 대상이 되고 NIMBY 현상을 일으키기도 한다. 지반공학적인 측면에서는 매립시 다짐의 불량과 침출수 차집시스템의 미설치로 인하여 사면의 붕괴 가능성이 높으며 가스의 분출이나 폐기물층의 압축성에 의해 매립층이 침하하는등 매우 불안정한 상태에 놓여있다. 또한 최근 건설부지가 부족해짐에 따라 도심지 부근의 매립지는 매립완료 후 건설부지로 활용되는 경우가 증가하고 있으며 이러한 경우 매립지 상부사면에 건설되는 구조물로 인하여 매립지 사면의 붕괴가능성은 더욱 더 커지고 있는 실정이다. 따라서 매립지 사면의 붕괴로 인하여 매립지와 매립지 인근에 있는 구조물과 인명 및 재산상의 피해를 최소화하기 위하여 사면안정 해석이 반드시 선행되어야 하며 사면안정해석 결과 불안정하다고 판단될 경우 적절한 대책 공법을 마련하여야 한다.

폐기물 매립지 사면의 안정성은 Landva(1987), Siegel(1990)과 Singh(1990)등 많은 학자들에 의해 연구 및 조사가 수행되었는데 연구 결과를 살펴보면 폐기물 매립지 사면의 안정성은 사면내에 분포되어 있는 지하수위의 위치와 사면아래에 있는 지층의 구성상태 및 폐기물의 전단강

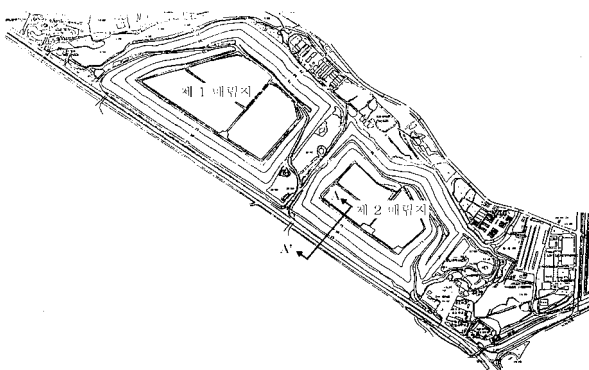
도 등에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있으며, 이러한 영향요소들 중 비위생매립지 사면의 안정성은 주로 폐기물의 전단강도 특성에 영향을 받으며, 위생매립지(Sanitary Landfill)의 경우 차수재와 접촉되는 지층사이의 접촉면마찰각에 의해 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

따라서, 본 논문에서는 우리나라 폐기물 매립지의 상당수를 차지하고 있는 비위생 매립지를 대상으로 지반조건 및 지하수위 그리고 폐기물의 전단강도 정수가 사면의 안정해석에 미치는 영향을 검토하기 위하여 한계평형방법에 근거한 Janbu의 방법을 이용하였으며, 반복해석을 통한 사면의 최소 안전율을 산정하기 위하여 사면안정 해석 프로그램인 PC STABLE5M을 이용하여 안정해석을 실시하였다.

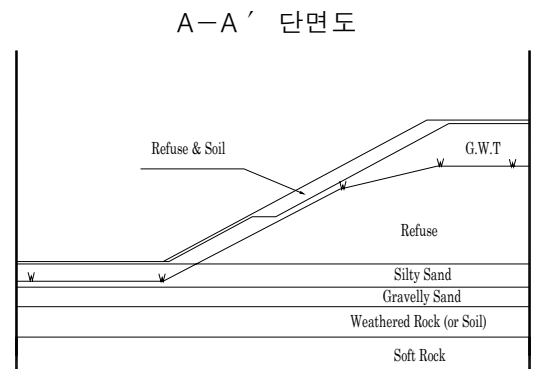
2. 한계 평형 해석

2.1 해석 단면

본 논문에서는 비위생 폐기물 매립지의 지반공학적 특성이 사면의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 서울특별시 마포구 상암동 일대에 위치한 난지도 매립지를 대상으로 사면안정해석을 실시하였다. 본 매립지는 제 1매립지와 제 2매립지로 구분되어 있으며, 사면안정해석을 실시한 단면은 그림 1(a)에 표시된 A-A' 단면으로써 사면의 높이는 약 90m 정도이며, 사면의 경사는 약 1:3 정도이고, 단면 형상은 그림 1(b)와 같다.



(a) 대상 매립지 평면도



(b) A-A' 단면의 형상 및 지하수위

그림 1. 난지도 매립지 평면도 및 단면도

2.2 지층 조건

2.2.1 일반 지층

본 논문에서 사면안정 해석에 이용된 지반의 토질 정수 및 지층조건은 난지도 매립지 안정화 공사를 위한 지반조사 및 대형 직접전단 시험에 의해서 얻어진 결과에 의하면 대상 단면 중 폐기물층을 제외한 일반토사층에 대한 전단강도정수와 단위중량은 아래의 표 1과 같다.

표 1. 폐기물층을 제외한 일반 토사층의 물성치
(서울특별시, 1994)

구 분	점착력 (t/m ²)	마찰각 (°)	단위중량(t/m ³)	
			γ_t	γ_{sat}
폐기물-토사 혼합층	1.6	32	1.8	1.9
실트질 모래층	0.0	32	1.8	1.9
자갈-모래 혼합층	0.0	40	1.9	2.0
풍화토 및 풍화암	1.5	40	2.0	2.1
연 암	2.5	45	2.1	2.1

2.2.2 폐기물층

(1) 폐기물층의 단위중량

지표면으로 3~4m 하부 폐기물층의 총 7개소에서 현장 들밀도 시험이 수행되었으며 그 결과 1.27~1.80t/m³ 사

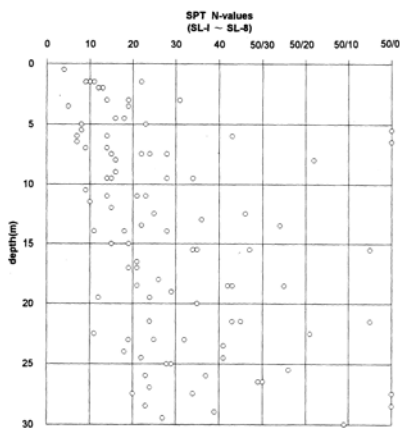
이의 단위중량값을 얻었으며 그 분산정도가 매우 크다는 것을 알 수 있지만 조사 심도 이하에 분포하는 폐기물층은 상당기간 상재하중의 영향으로 다짐이 되었고 연탄재등의 성분이 섞여있을 것으로 추정되므로 사면안정 해석에서는 대표값으로 1.80t/m³을 사용하였다.

(2) 폐기물층의 전단강도 정수

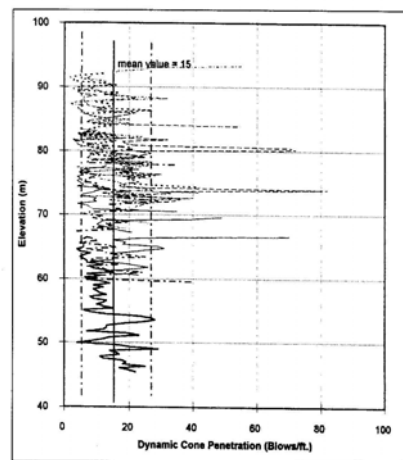
대형 직접전단시험(가로 30cm, 세로 30cm, 높이 20cm)을 수행한 결과 점착력은 0.4~3.8 t/m² 정도의 값을 얻었으며, 내부마찰각은 30.5~41.6° 정도의 값을 얻었다. 또한 지층의 구성성분 파악과 실내시험용 시료채취를 목적으로 매 1.5m 및 지층 변화구간에 대해 KS F 2318의 규정에 따른 표준관입시험을 실시한 결과를 종합하면 그림 2(a)와 같다. 표준관입시험의 결과로 매립지 폐기물의 평균 N치는 약 7~40 정도의 값을 갖는 것으로 사료되는데 이 값을 1954년에 Dunham에 의해 제안된 경험식 중 다음의 식 (1)을 이용하여 내부마찰각으로 환산하면 약 24~37° 정도의 범위를 갖는다.

$$\phi = \sqrt{12N + 15} \quad (1)$$

사면부와 대지(Plateau: 정상부의 평탄한 부분)등 총 7개소에서 동적 콘 관입시험이 실시되었는데 폐기물 매립층의 불규칙성으로 인해 콘 관입저항치의 변화폭이 심하지만 대개 5~25 사이이며 평균 15 정도의 값을 취할 수 있다. 이 값을 Dunham의 제안식에 의해 제안된 경험식을 이용



(a) 표준관입시험의 결과



(b) 콘 관입시험의 결과

그림 2. 심도에 따른 표준관입시험과 콘 관입시험의 결과 (서울특별시, 1994)

하여 내부마찰각으로 환산하면 약 28°정도의 값을 갖는다. 그림 2(b)는 조사지점의 표고에 따른 콘 관입저항치를 보여주고 있다.

2.2.3 지하수위

매립지의 지하수위 조사는 전기탐사법과 관측정의 설치에 의해 실시되었으며 사면안정 해석 대상매립지의 지하수위는 앞에서 보인 그림 1(b)에 나타내었다.

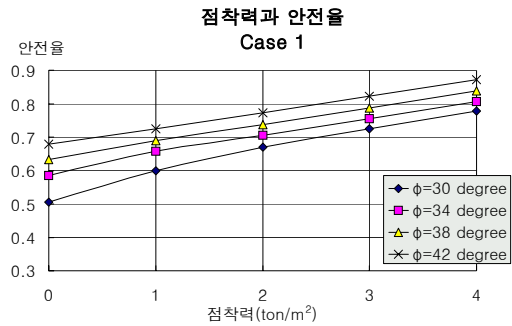
2.3 해석 방법

본 논문에서는 사면의 안정성에 미치는 비위생 폐기물 매립지의 특성에 대해 조사하기 위한 영향인자로서 폐기물의 전단강도 정수와 침출수에 의한 지하수위 그리고 사면 하부지층의 지반조건을 선택하였으며, 매립지의 폐기물 성상이 비균질하기 때문에 파괴면의 형상을 비원호 파괴로 보고 한계평형방법에 근거를 둔 Janbu의 간편법을 사용하였다. Janbu의 간편법은 절편상호간에 작용하는 수평력을 '0'으로 보고 절편의 저부에 작용하는 힘을 구하여 안전율을 구하는 방법으로서 비원호 파괴면에 적합한 해석방법이다(Janbu et al., 1956; Nash, 1986). 또한 반복해석을 실시하기 위하여 Siegel(1975)에 의해 개발되어 J. R Carpenter(1986)에 의해서 보완된 PC STABL5M 사면안정해석 프로그램을 이용하였다.

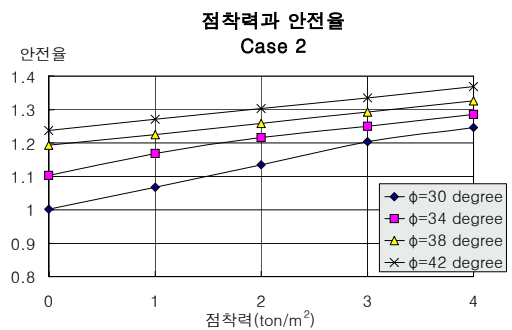
3. 해석 결과 및 분석

3.1 지하수위의 영향

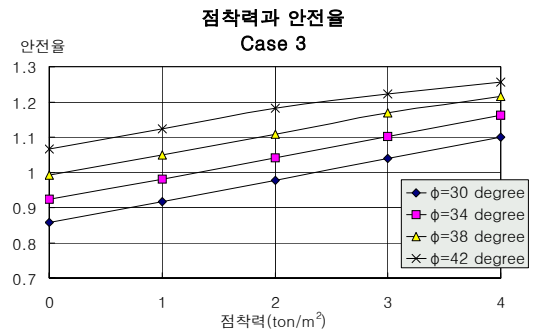
매립지 폐기물의 침출수에 의해 형성된 지하수위가 사면 안정 해석에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 3에 나타난 바와 같이 5가지 경우에 대하여 해석을 실시하였으며 그 결과를 각각의 지하수위에 대한 점착력과 안전율로 정리하였다. 안정해석에 이용된 점착력은 0.0t/m², 1.0 t/m², 2.0t/m², 3.0t/m², 4.0t/m²이며, 내부 마찰각은 30°, 34°, 38°, 42°이다.



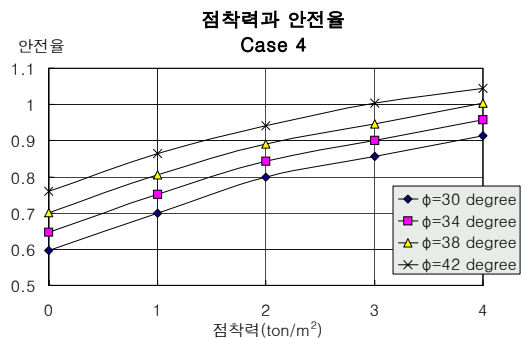
(a) 사면전체가 완전포화된 경우



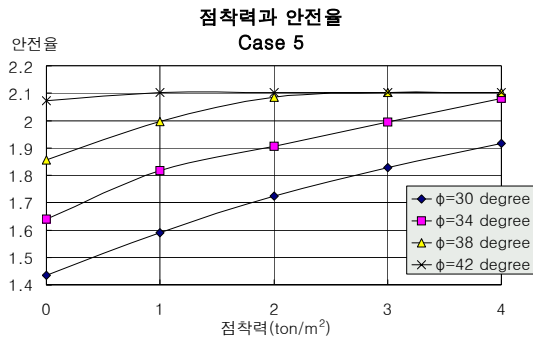
(b) 실측에 의해 관측된 경우



(c) 사면전단에서의 용출



(d) 사면내에서의 용출



(e) 사면전체가 완전건조된 경우

그림 3. 지하수위 변화에 따른 안정 해석의 결과

해석결과를 살펴보면 일반적인 사면과 마찬가지로 폐기물 매립지 사면 또한 지하수위가 높게 형성될수록 안정성이 감소하는 경향을 보였다. 특히, 실측에 의해 관측된 경우의 안전율은 1.5이하로 나타나 계측시점에서 해석대상 사면은 불안정한 상태로 판단된다. 또한, 사면이 완전포화상태인 경우에 비해 완전히 건조되어 있는 경우의 안전율은 거의 2.4~2.8배 정도의 증가를 보였으며, 완전포화상태의 경우 안전율이 1.0미만으로 불안정하던 것이 건조상태의 경우 대부분이 1.5이상으로 안정한 상태를 보였다. 이러한 정도의 안정성의 증가량은 폐기물층의 전단강도 정수의 변화에 의한 안정성의 증가량보다 큰 것이다. 따라서 폐기물 매립지 건설시 차수 시스템과 배수 시스템을 설치하여 강우나 지하수의 매립층으로의 침투를 막아 지하수위 상승을 막고, 침출수를 배제시켜 지하수위를 저하시키는 것이 폐기물 매립지 사면의 안정성 향상에 큰 도움을 줄 것으로 보이며, 또한 합리적인 사면의 안정성 해석을 위하여 정확한 지하수위의 측정이 필요할 것으로 보인다.

최소 안전율 2.103

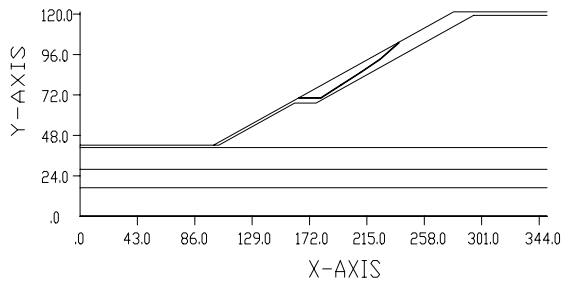


그림 4. 복토층에서 파괴가 발생하는 경우의 예상 파괴면

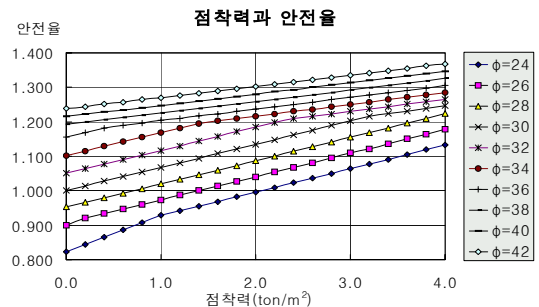
또한 사면이 완전건조 상태인 그림 3(e)를 살펴보면 점착력 3.0t/m²이상이고 내부마찰각이 38°이상인 경우와 내부마찰각이 42°인 경우에 안전율이 2.103으로 모두 동일하게 나오는데, 이것은 폐기물층의 전단강도에 비해 표 1에 나타난 바와 같이 폐기물-토사 혼합층인 복토층의 전단강도가 약하기 때문에 그림 4에서 나타난 바와 같이 사면의 예상 파괴면이 폐기물층을 통과하지 않고 복토층에서만 파괴가 발생하기 때문이다. 그러나 이 경우 최소안전율이 2.103으로 사면의 안정성에 대한 허용안전율인 1.5에 비해 상당히 크므로 사면은 안정한 상태로 판단된다.

3.2 폐기물 전단강도 정수의 영향

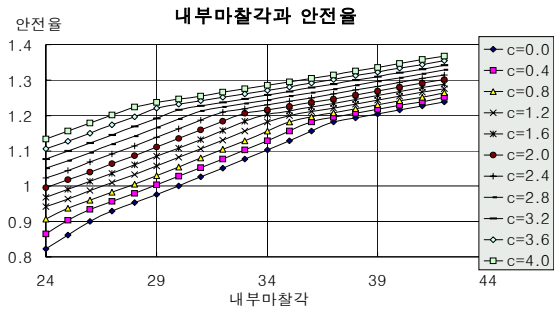
지하수위를 실제 측정된 지하수위로 고정시킨 후 점착력 c와 내부마찰각 φ에 따른 안전율의 변화를 살펴보았으며, 여기서 이용된 점착력 및 내부마찰각의 변화 범위는 c=0.0~4.0t/m²이고 φ=24~42°이다.

그림 5에 나타난 바와 같이 안정해석에 이용한 전단강도 정수의 범위 내에서 점착력이 1.0t/m² 증가할 경우 안전율은 약 0.033~0.105 정도의 증가를 보였고 내부마찰각이 5°증가할 경우 안전율은 약 0.042~0.178 정도의 증가를 보였다.

그림 5를 살펴보면 해석에 이용된 전단강도 정수의 범위 내에서 안전율의 증가 곡선은 각각의 변수에 대해 거의 선형적으로 증가하다가 1회 내지 2회에 걸쳐 곡선의 기울기가 감소하는 경향이 나타나는데 이것은 그림 6에 나타나 있는 바와 같이 예상파괴면의 형상의 변화에 기인한 것으로 생각된다. 여기서 그림 6은 점착력을 0.0t/m²으로 고정시키고 내부마찰각을 24~42°까지 변화시키는 경우 예상되는 파괴면을 나타낸 것이다.



(a) 점착력과 안전율



(b) 내부마찰각과 안전율

그림 5. 전단강도 정수의 변화에 따른 안정 해석의 결과

사면의 예상 파괴면

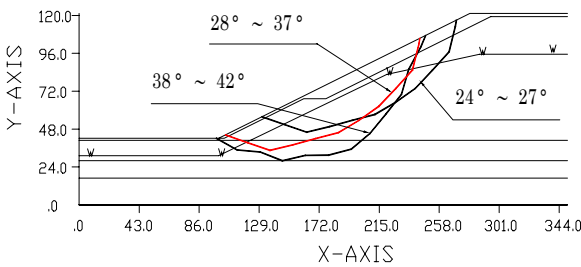


그림 6. 점착력이 0.0t/m²인 경우의 예상 파괴면

예상파괴면이 보다 깊은 곳으로 이동하게 되는 이유는 본 연구에서 실시한 사면안정 해석에서 이용한 Janbu의 방법에서 전단강도 정수의 값이 증가함에 따라 이전의 예상파괴면에 대해서는 안정한 결과를 얻게 되기 때문에 보다 불안정한 파괴면을 찾아 계산을 수행하기 때문이다. 그림 6에서 27°와 28° 그리고 37°와 38°의 예상파괴면을 살펴보면 전자의 것은 예상 파괴면이 폐기물층 내에 존재하고 후자의 것은 폐기물층을 지나 Silty Sand층까지 도달하는 것을 볼 수 있다. 이때 후자의 경우에 예상 파괴면은 보다 깊은 층까지 도달하게 되어 Janbu의 방법에 이용되는 간극수압(u)이 증가하게 되고 따라서 사면의 안정성에 부정적 요인이 보다 커지기 때문에 안전율의 증가분이 이전의 것에 비해 감소하게 되는 것이다. 이것을 알아보기 위하여 완전건조 상태로 가정된 후 해석을 실시해본 결과 안전율의 증가치는 다음의 그림 7에서 나타난 바와 마찬가지로 거의 직선형태의 증가를 보이는 것을 확인하였다. 여기서 전단강도 정수가 증가할 경우 안전율이 2.103

에서 더 이상 증가하지 않았는데 이것은 복토층에서의 파괴를 의미하는 것으로서 앞에서 이미 설명한 바와 같다.

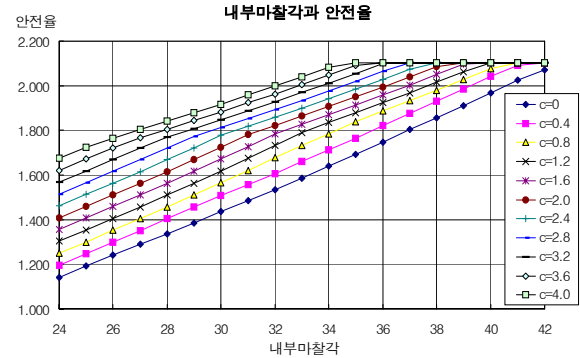
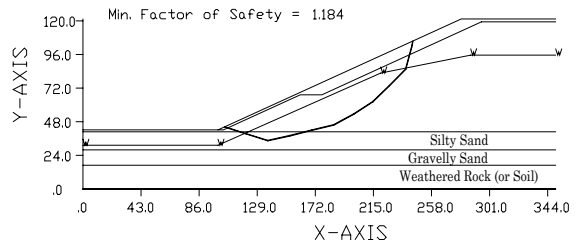


그림 7. 완전건조 상태인 경우의 내부마찰각과 안전율

3.3 사면 하부 지층조건의 영향

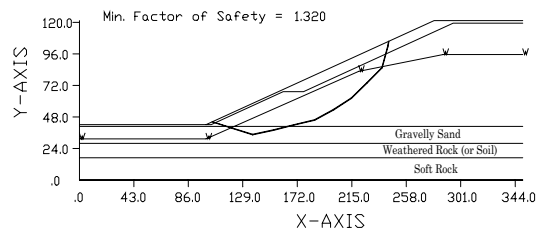
지층조건의 변화에 따른 매립지 사면의 파괴면의 형상과 안정성을 검토하기 위하여 점착력은 2.0t/m², 내부마찰각은 28°의 값을 사용하여 다음의 4가지 지반조건에 대해 검토해 보았다.

지반 조건 변화 Case 1



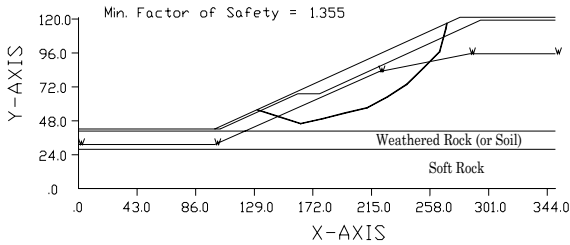
(a) 실측된 지반조건을 사용한 경우

지반 조건 변화 Case 2



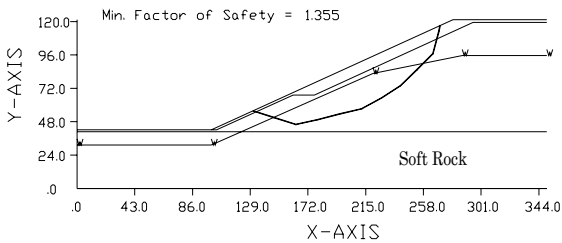
(b) Silty Sand 층을 제외한 경우

지반 조건 변화 Case 3



(c) Gravelly Sand 층을 없앤 경우

지반 조건 변화 Case 4



(d) 기반암을 Soft Rock으로 본 경우

그림 8. 지반조건 변화에 따른 안정 해석의 결과

그림 8에 나타난 바와 같이 Case 1과 Case 2의 경우 동일한 예상파괴면에서 안전율이 Case 1의 경우 1.184이고 Case 2의 경우 1.320으로 증가하였는데 그 원인은 폐기물층의 하부지층이 Silty Sand층에서 Gravelly Sand층으로 바뀌면서 하부지층의 물성치가 변화하였기 때문이다. 표 1을 보면 두 층 모두 $c=0.0t/m^2$ 이지만 내부마찰각은 Silty Sand층의 32° 이던 것이 Gravelly Sand층의 40° 로 증가하였다. 그런데 Case 1, 2와 Case 3, 4는 예상파괴면의 형상이 달라지게 되는데 그 이유는 Case 3와 Case 4의 경우 하부지반의 전단강도 정수가 폐기물층의 전단강도 정수에 비하여 매우 크므로서 예상파괴면이 하부지층으로 발달하지 않고 폐기물층에만 머물게 되는 것이다. 이와 같이 지반조건에 따라서 안전율의 변화 및 예상파괴면의 변화가 발생하기 때문에 지반조건에 대한 정확히 하는 것은 폐기물 매립지의 사면 안정 해석에 큰 영향을 미치게 되며, 폐기물 매립지의 설계시 지반조건이 양호한 지반을 선택하는 것이 향후 폐기물 매립지의 안정성 향상에 도움이 될 것으로 사료된다.

에 도움이 될 것으로 사료된다.

그러나 일반적으로 폐기물 매립지는 침출수의 유출을 막기 위하여 점토질 지반 위에 건설하는 경우가 많은데 이 경우에도 지반의 강도를 개량하는 방법을 택하는 것이 좋을 듯 하며, 사질토 지반이나 암반의 경우에 차수 시스템과 배수 시스템을 설치하여 폐기물 매립지를 건설한다면 침출수의 누수를 막을 수 있으며 비교적 안정된 상태를 유지할 수 있는 매립지를 건설할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 비위생폐기물 매립지 사면의 안정성에 대한 지하수위와 폐기물의 전단강도 그리고 지층조건의 영향에 대해 연구하기 위하여 비위생 매립지로 건설된 난지도 매립지를 대상으로 사면안정 해석 프로그램인 PC STABLE5M을 이용 사면안정 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 매립지내의 지하수위는 폐기물 매립지 사면의 안정성에 있어서 완전건조 상태가 완전포화 상태에 비해 약 2.4~2.8배 정도의 증가를 보일 정도로 사면의 안정성에 매우 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 따라서, 합리적인 폐기물 매립지 사면안정 해석을 위해서는 정확한 지하수위의 측정이 필요하며, 매립지 건설시에는 차·배수 시스템을 설치하는 위생매립형태의 매립지가 사면의 안정성 측면에서 보다 안전하며, 비위생매립지로 건설된 경우에도 강우의 침투를 막기 위한 차수 시스템과 지하수위를 감소시키기 위한 배수 시스템의 설치가 사면의 안정성 향상에 도움을 줄 것으로 사료된다.
2. 폐기물의 전단강도 정수는 지하수위가 없는 경우 사면의 안정성을 선형적으로 증가시키며, 지하수위가 있는 경우 전단강도 정수의 변화에 따라 예상파괴면의 변화를 더욱 촉발시켜 전단강도 정수가 커질수록 안전율의 증가곡선의 기울기가 감소하였다.
3. 예상파괴면이 하부지층을 통과할 경우 하부지층의 전단강도의 변화에 의해 안전율의 변화가 발생한다. 이때, 하부지층의 전단강도 정수가 폐기물층의 전단강도 정수

와 비교하여 큰 경우 파괴면은 하부지층으로 발달하지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 폐기물 매립지의 설계 시 지반조건이 양호한 지반을 선택하는 것이 향후 폐기물 매립지의 안정성 향상에 도움이 될 것으로 사료된다.

4. 폐기물 매립지 사면의 안정성 해석에 이용되는 폐기물층의 전단강도 정수를 결정하는 방법은 폐기물층을 여

러층으로 구분하여 각각의 전단강도 정수를 결정하거나 폐기물의 압축성과 분해성을 파악하여 전단강도 정수의 변화를 예측하여 결정하는 방법 등이 보다 합리적으로 보이며 이에 대해서는 앞으로 더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

(접수일자 : 2001. 10. 29)

참 고 문 헌

1. 서울특별시(1994), "난지도 매립지 안정화 공사 지반조사 보고서", 서울특별시.
2. 지반공학회(1998), "지반조사 결과의 해석 및 이용", 지반공학 시리즈 제1권, 구미서관, pp. 52~133.
3. David Nash(1986), "A Comparative Review of Limit Equilibrium Method of Stability Analysis", Slope Stability, John Wiley & Sons, pp. 11~76.
4. Landva, A. O. and Clark, J. I.(1987), "Geotechnical Testing of Wastefill", Report Submitted the London Institution of Civil Engineers.
5. Janbu, N., Bjerrum, L. and Kjaernsli, B.(1956), "Soil Mechanics Applied to Some Engineering Problems" Norwegian Geotechnical Institute, Publ. No. 16., pp. 689~711.
6. Oweis, I. S., and Khera, R. P.(1990), "Geotechnology of Waste Management", Butterworth and Company Ltd., Sevenoaks, Kent, England, p. 273.
7. R. A. Siegel, R. J. Robertson, and D. G. Anderson(1990), "Slope Stability Investigations at a Landfill in Southern California", Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice, ASTM STP 1070, Philadelphia, pp. 256~284.
8. S. Singh and B. J. Murphy(1990), "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills", Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice, ASTM STP 1070, Philadelphia, pp. 240~258.