

유한요소법에 의한 사면붕괴 거동해석에 미치는 영향분석

Analysis for Effects of Slope Failure Behavior by Finite Element Method

김 영 민*
Kim, Young-Min

Abstract

In this paper, an application of finite element procedure for the analysis of slope failure behavior has been studied. The most widely accepted methods in analyzing the slope stability problems are mostly based on limit equilibrium method. And the finite element method is widely accepted to analyze stress and displacements. This paper shows how the factor of safety calculated in the finite element method can be systematically incorporated into slope stability. In analyzing the slope failure behavior by finite element method, the effects of computational method and the results have been discussed. And several computations of slope stabilities were carried out to compare the finite element analysis results with those obtained by methods of slices based on the limit equilibrium analysis.

요 지

본 논문에서는 사면붕괴해석에 대한 유한요소법의 적용에 대하여 검토하였다. 사면안정문제에 대해 가장 일반적으로 사용되는 방법은 한계평형이론에 의한 절편법이다. 또한 유한요소법은 지반의 응력, 변형률을 분석하는 방법으로 널리 인식되어 있다. 본 논문에서는 유한요소법으로 사면안정해석시, 요구되는 최소안전율 계산방법을 효율적으로 고려하는 방법에 대하여 검토하였다. 그리고 유한요소법으로 사면의 붕괴해석을 하는 경우에, 적용되는 해석방법 및 그 결과에 미치는 요인에 대하여 검토하였다. 또한, 여러 사면의 경우에 대하여 기존의 한계평형법에 의한 절편법과 유한요소 해석결과를 비교, 검토하였다.

Keywords : Slope stability, FEM, Limit equilibrium, Factor of safety, Dilatency, Progressive failure

* 정회원, 전주대학교 토목환경공학과 조교수

1. 서론

성토사면, 굴착사면의 안정해석은 토질공학에서 가장 빈번하게 다루어지는 문제들 중에 하나이다. 이러한 전형적 문제를 해석하는 경우, 변형과 안정성을 분리시켜 각각의 해석법에 의하여 적용, 분석되어 왔다(Duncan, 1984 ; Huang, 1983 ; Brunsden 등, 1984). 그러나 실제의 지반의 붕괴 현상은 서서히 변형이 증대되어 국부적인 영역에 대변형이 발생되며, 변형과 붕괴과정은 분리되지 않고 진행적인 파괴에 이르는 과정을 거치는 것을 알 수 있다(Chowdhury, 1978; Griffiths, 1993; 김영민, 1997). 따라서 지반의 안정해석에 있어서 초기변형부터 붕괴에 도달할 때까지 연속적으로 추적할 수 있는 해석법의 확립이 중요하다. 사면안정 해석법으로는 한계평형이론(limit equilibrium theory)에 의한 절편법(slice method)과 강소성론에 의한 극한해석법(limit theory), 탄소성이론에 의한 유한요소법(finite element method) 등이 제안되어 있다(小林, 1990, Chen, 1975). 이들 방법 중에서 절편법은 가장 먼저 1950대 및 1960대에 제안되어 있으며, 이 방법들은 각 파괴활동면의 모양과 절편간의 상호 작용력에 대한 가정에 의하여 여러 가지 방법으로 나누어진다. 그 중에서 가장 일반적으로 사용되는 방법은 Fellenius, Bishop (1955), Janbu(1957), Morgenstern & Price(1965), Spencer(1967)법 등이다(Anderson, 1987). 그러나 이러한 기존 절편법에 의한 최소안전율 계산 방법에는 다음과 같은 제약조건이 있다. 1) 사면의 활동면이 미리 결정되어야 한다. 2) 초기응력상태, 응력이력 및 지반의 비선형 거동을 고려할 수 없다. 3) 절편의 상호 작용력에 대한 가정에 따라 계산된 안전율 및 파괴활동면의 추정이 다르다.

현장에서 사면에 대한 안전관리를 위해서는 위와 같은 사면의 최소안전율에 대한 계산뿐만 아니라 사면의 붕괴거동에 대한 분석이 필요하며, 사면의 진행적파괴에 대한 적절한 계측위치 및 계측관리값

을 사전에 파악하여 관리할 수 있도록 해야 한다. 유한요소방법은 이러한 계측관리방법에 대하여 적절한 해석결과를 줄 수 있으며, 사면의 진행성 파괴 거동을 분석할 수 있는 방법이다(Anderson 등, 1987; Duncan, 1996).

컴퓨터의 발달로 유한요소법이 지반의 변형 및 응력, 간극수압 등을 산정할 수 있도록 구조물의 거동해석을 위해 주로 사용되어 왔으나, 최근에 들어 단순히 지반의 거동분석에만 한정시키지 않고, 사면의 붕괴거동에 대한 안정성을 평가하는 수단으로 확장 시키려는 연구가 활발히 진행중이다(김주용, 1977).

본 논문은 사면의 안정해석을 하기 위해서, 더 정밀하고 다양한 결과를 계산할 수 있는 유한요소법에 의한 적용되는 해석방법 및 해석결과에 미치는 요인에 대하여 분석하고, 기존의 절편법과 비교, 검토하고자 한다.

2. 사면안정해석 기법

유한요소법에 의한 사면의 최소안전율산정에 있어서 일반적으로 두 가지 방법으로 대별되는데, 첫번째 방법은 유한요소법의 해석결과인 각 지점의 응력값을 이용하여 아래와 같이 지역 안전율(local factor of safety)을 계산한다.

$$LF_s = \tau_f / \tau_m$$

여기서 τ_f 는 진단강도, τ_m 는 발휘되는 진단 응력을 표시한다.

전체사면의 최소안전율은 최적화기법 등을 이용하여 사면의 안전율이 최소가 되는 한계활동면을 추정하여 다음과 같이 정의한다(Takuo 등, 1988, Mihail 등, 1982).

$$F_s = \sum (c + \sigma \cdot \tan \phi) \cdot dL / \sum \tau dL$$

여기서, c 는 점착력, σ 는 수직응력, τ 는 진단

응력, φ 는 마찰각을 나타내며, dL 은 임계활동면의 길이를 나타낸다. 이러한 첫번째 방법은 다소 복잡한 최적화기법을 사용하게 되고, 최적화 가정에 의해 안전율과 파괴활동면의 추정치에 차이를 나타내는 어려움이 있다.

두번째 방법으로는 전단강도($c, \tan \varphi$)를 서서히 저하시켜 가면서 사면의 파괴상태까지 반복하여 해석을 수행하여 계산이 수렴되지 않는 시점을 파괴로 간주하고, 그 때의 최대 강도 저하율을 가지고 사면의 안전율로 본다(Zienkiewicz, 1975). 두번째 방법에 의한 해석에서는 파괴거동에 대한 안정해석을 하기 위해서는 계산수법을 선택하는 경우에 충분히 안전성 있는 방법을 이용하지 않으면 안 되는 어려움이 있으나 일관성 있게 계산이 수행되고, 첫번째 방법보다 사면의 실제적인 파괴거동을 표현하는 것이 가능하다.

본 논문에서는 유한요소법으로 사면의 붕괴해석을 수행하는 경우, 최소안전율의 정의는 두번째 방법을 이용하며, 계산방법으로는 매우 안정성이 높은 가상적 점탄소성이론에 의한 모아 쿨롱 항복기준의 탄소성모델을 이용하여 계산을 수행하였다.

3. 가상적 점탄소성 이론

점탄소성이론에서는 탄소성이론과 달리, 항복기준면을 초과하여 발생하는 초과응력상태를 일정시간동안 허용하는 방법으로서, 수치해석상 탄소성이론보다 안정된 해석결과를 나타낸다. 또한, 점탄소성이론에 의한 정상상태(steady state condition)의 해석결과는 탄소성이론의 해석결과에 일치하는 것으로 알려져 있다(Zienkiewicz 등, 1975).

점탄소성모델에 대하여 점탄소성변형 속도는 응력과 점소성변형률의 함수관계로 식(1)과 같이 표현될 수 있다(Zienkiewicz 등, 1974).

$$\dot{\epsilon}^{vp} = d\epsilon^{vp}/dt = \gamma \cdot G \cdot \partial Q/\partial \sigma \quad (1)$$

여기서 γ 는 단위시간당 점성도의 크기를 나타내는 값으로 가상적 점탄소성법에서는 단위크기로 간주한다. G 는 초과응력, Q 는 소성포텐셜함수이다.

전변형률 ϵ 는 탄성변형률과 점소성변형률에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{vp} \quad (2)$$

점탄소성모델에 있어서 어느 시간 $t=t_m$ 일때의 기저의 값에 대하여, 다음의 시간 $t_{m+1}=t_m+dt$ 에 대한 값을 구하는 작업을 반복하는 것이 된다. 따라서 dt 시간에 따른 응력증분은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta \sigma = \sigma_{m+1} - \sigma_m \quad (3)$$

점소성변형률은 가상의 시간간격과 변형률속도의 곱으로 표현될수 있으며, 시간간격에 발생하는 점소성변형률증분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \epsilon^{vp} = \Delta t [(1-\theta)\epsilon_{m+1}^{vp} + \theta \epsilon_m^{vp}] \quad (4)$$

여기서 $\theta=0$ 는 점진차분법, $\theta=1$ 은 후진차분법, $\theta=0.5$ 는 Crank-Nicolson법으로 불려진다. 여기서, $\dot{\epsilon} = b_{m+1}^{vp}$ 에 대하여 Taylor급수로 근사시키면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{m+1}^{vp} = \dot{\epsilon}_m^{vp} + \frac{\partial \dot{\epsilon}^{vp}}{\partial \sigma} \Delta \sigma_m \quad (5)$$

응력증분량은 Hooke의 법칙에 의하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta \sigma = D \cdot \Delta \epsilon_m^e = D(\Delta \epsilon_m - \Delta \epsilon_m^{vp}) \quad (6)$$

여기서 D 는 탄성매트릭스를 나타낸다. 또한, 전변형률의 증분은 변형률-변위 매트릭스 B 에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta \epsilon = B_m \Delta d \quad (7)$$

윗식을 식(6)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 응력-변형률 구성식을 얻는다.

$$\Delta \sigma_m = \bar{D}_m (B_m \Delta d - \dot{\epsilon}_m^{vp} \Delta t) \quad (8)$$

여기서, $\bar{D} = (D^{-1} + \Theta \Delta t \frac{\partial \dot{\epsilon}^{vp}}{\partial \sigma})^{-1}$ 이다.

또한 시간증분에 대한 무조건적 안정조건 Δt 가 Mohr-Coulomb 항복조건에 대하여 다음과 같이 유도되었다(Zienkiewicz 등, 1974).

$$\Delta t = \frac{4(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-2\nu + \sin^2 \phi)} \quad (9)$$

여기서, E는 탄성계수이며, ν 는 포아슨비이다.

4. 유한요소법에 의한 사면안정해석

본 논문에서 우선, 유한요소법의 적용에 대하여 검토한 사면은 균일한 지층으로 구성된 단순사면의 경우이다. 해석에 사용한 유한요소는 파괴해석 시 비교적 좋은 결과를 나타내는 8절점의 저감적분한 요소를 사용하였으며, 항복조건으로는 모아쿨롱항복기준을 이용하며, 해석방법으로는 Initial stiffness method를 이용하였다(Smith 등, 1988).

4.1 해석방법의 차이에 의한 영향검토

본 논문에서 사면안정에 대한 최소안전율 계산 방법으로 전단강도를 서서히 저하시켜 가면서 사면을 파괴시키는 강도 저하율개념을 이용하였다. 프로그램상에서 강도 저하율을 모사하기 위해서 다음과 같이 3가지방법으로 나누어 적용하였다. 첫번째 방법으로 사면에 증력에 의한 자중을 가하고 다음과 같이 지반의 강도를 안전율로 나누고 감소된 지반강도값에 대응하여 다음과 같이 최소

안전율을 정의하였다.

$$\varphi_r = \arctan(\tan \varphi / F_s) \quad (10)$$

$$c_r = c / F_s$$

여기서 c, φ 는 각각 점착력 및 내부마찰각, F_s 는 최소안전율이다.

사면의 최소안전율은 계산된 변위가 수렴되지 않는 조건에 해당되는 강도정수값에 의하여 결정되는 안전율로 정의하였다. 그리고 두번째 방법으로 증력에 의한 자중에 식(11)과 같이 안전율을 곱한 증분중력하중을 가하여 변형거동을 해석하고, 변위가 수렴되지 않는 최대 증분 중력하중에 대하여 그 때의 하중증분율을 최소안전율로 정의하였다.

$$g_f = F_s \times g_m \quad (11)$$

여기서 g_m 은 실제 중력가속도, g_f 는 증분중력가속도

세번째 방법으로는 진행성 파괴거동해석에 이용되는 점착강도의 변형률연화(strain softening) 현상에 대한 영향을 모사하기 위하여 지반강도정수 중 점착강도만 안전율로 나누어 감소시켜 사면 안전을 해석하여 변위가 수렴되지 않을 때의 안전율을 최소안전율로 하였다. 또한, 사면의 파괴활동면의 추정은 계산과정중 수렴되지 않는 상태의 발생하는 최대전단변형률 분포에 의하여 판단한다. 우선, 각 방법에 의한 사면의 안정해석에 대한 영향을 조사하기 위해서 그림1과 같은 단순사면에 대하여 수치해석을 행하였다. 경계조건으로는 수직경계 및 바닥경계는 roller지지로 가정하였다. 단순사면에 대한 지반정수는 탄성계수값은 $10000t/m^2$ 이고, 단위중량은 $2.0t/m^3$, 포아슨비는 0.3으로 가정하였다. 또한, 사면의 기울기는 1:2이며, 사면높이는 10m이다. 예제해석으로 지반이 점성토(마찰각이 제로인 경우)와 사질토(마찰각이

존재하는 경우)의 경우에 대하여 각각 해석하였다. 유한요소모델은 가로,세로 10×10메쉬를 이용하였다.

4.1.1 마찰각 $\phi=0$ 인 경우

점착력 $4t/m^2$ 으로 가정하여 첫번째 방법과 두번째 방법에 의하여 사면안정해석을 계산하였다. 그 결과 각 해석방법에 의한 최소안전율은 1.6으로 동일하였으며, 그림2에 표시한 바와 같이 파괴거동에서도 동일한 결과를 나타내었다.

4.1.2 마찰각 $\phi \neq 0$ 인 경우

여기서는 점착력 $1t/m^2$, 마찰각은 20° , 다일러턴시각도는 0° 로 가정하였다. 유한요소 해석결과, 각 방법에 의한 안전율과 변위관계는 그림3과 같다. 또한 각 방법에 의한 사면의 파괴거동은 그림4에 표시하였다. 그림3에서 보는 바와 같이 각 방법에 의해 해석한 최소안전율값은 첫번째 방법인 경우, 1.36으로 나타났으며, 두번째, 세번째 방법인 경우는 각각 3.0으로 나타나, 기존의 절편법인 Bishop방법으로 구한 1.38값과 큰 차이를 나타냈다. 이 결과를 분석하여 보면, 안전율의 정의에서 분자에 나타나는 전단강도는 점착력과 마찰력성분으로 마찰력성분은 수직응력에 의존하므로, 기존의 절편법과 같이 정의한 첫번째방법은 기존의 절편법과 유사한 결과를 나타내며, 두

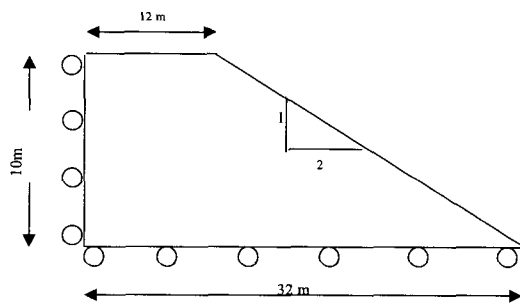
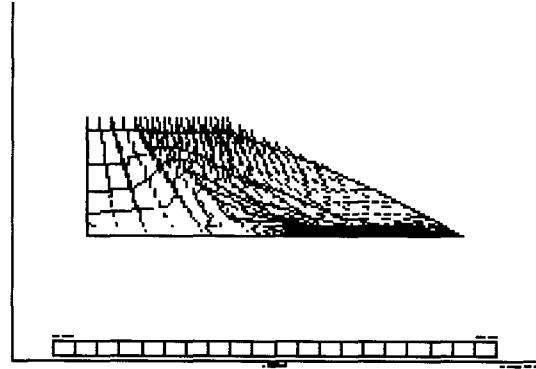
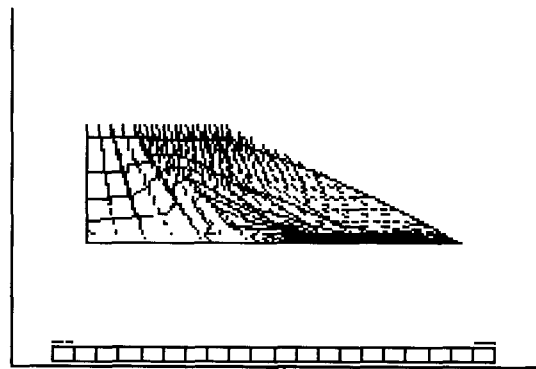


그림 1. 단순사면 모델도



(1) 첫번째 방법에 의한 변형도



(2) 두번째 방법에 의한 변형도

그림 2. 사면의 전단 변형을 분포도

번째 방법에서는 중력이 증가함에 따라 전단강도의 마찰력성분이 동시에 커지므로 안전율이 기존의 값보다 큰 결과를 나타낸 것을 알 수 있다. 또

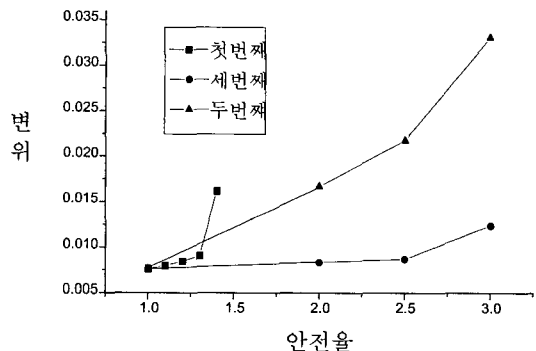
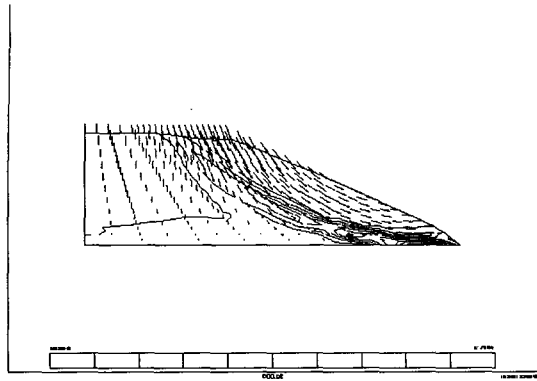
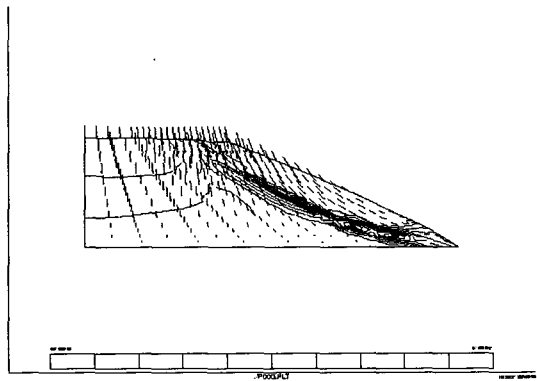


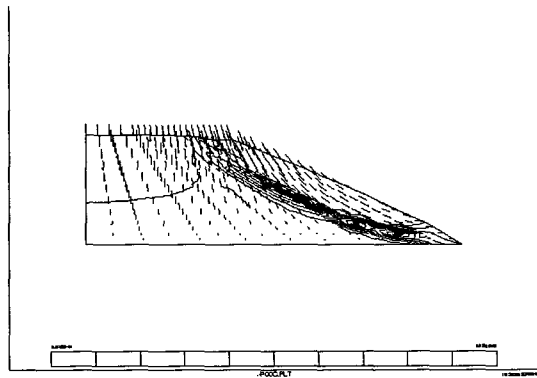
그림 3. 변위-안전율관계 곡선



(1) 첫째 방법에 의한 변형도



(2) 두번째 방법에 의한 변형도



(3) 세번째 방법에 의한 변형도

그림 4. 각 방법에 의한 변형거동

한, 각 방법에 의한 사면의 파괴거동을 살펴보면, 첫번째 방법의 해석결과는 기존의 절편법의 결과

와 같은 원호형태의 파괴활동면을 가지며, 두 번째, 세번째 방법의 경우는 첫번째 경우보다 사면의 얕은 깊이에서 파괴활동면이 발달되는 형태를 나타내었다(그림 4참조). 그리고 점착강도만 감소시켜 변형률연화현상을 고려한 세번째 경우는 증력의 증가계수로 안전율을 정의한 두번째 방법의 해석결과와 매우 유사한 결과(최소안전율 및 파괴활동면)를 나타내는 것으로 나타났다.

이후 사면붕괴거동계산에서는 사면의 안정해석결과(최소안전율 및 파괴활동면)가 기존의 절편법과 유사하게 나타내는 첫번째 방법에 의하여 계산을 수행하였다.

4.2 탄성계수 및 포아슨 비의 영향

그림 1과 같은 단순사면에 대하여 지반의 탄성계수와 포아슨 비의 영향을 분석하기 위해서 표 1과 같이 크게 변화시켜서 최소안전율을 계산하여 표시하였다. 표 1에서 알 수 있듯이 최소안전율은 탄성계수에 의하여 전혀 영향을 받지 않으며, 포아슨 비는 0~0.45범위에서는 영향을 받지 않으나, 포아슨비가 0.5에 가깝게 되면, 크게 영향을 받게 된다.

4.3 다일러턴시영향

표 1. 탄성계수 및 포아슨비의 영향

탄성 계수(E)	포아슨 비(ν)	최소안전율(F_s)
100	0.3	1.4
10,000	0.3	1.4
1,000,000	0.3	1.4
10,000	0.1	1.4
10,000	0.45	1.4
10,000	0.49	1.2

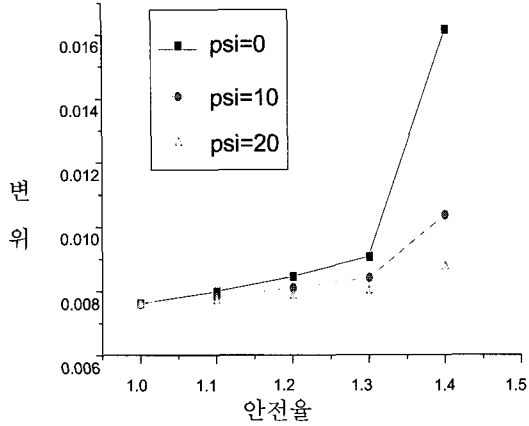


그림 5. 변위와 안전율 관계곡선

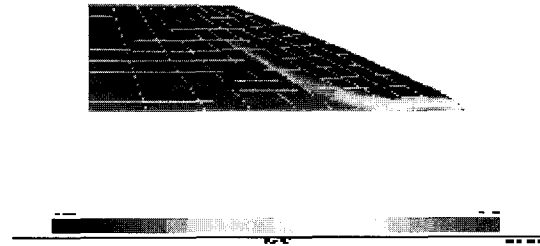
여기서는 사면파괴거동에 미치는 다일러턴시 영향을 분석하기 위해서 다일러턴시각도를 0°, 10°, 20°로 변화시켜 사면에 대하여 최소안전율을 계산하였다. 그림 5에 계산된 안전율과 사면의 어깨부 수평변위에 대하여 표시하였다. 또한 각 경우의 사면의 파괴거동에 대하여서도 그림 6에 표시하였다. 그림 5에 보듯이 최소안전율에 대하여서는 다일러턴시의 영향이 거의 없으나, 파괴거동에 대하여서는 상당한 차이를 나타내고 있으며, 사면의 붕괴거동은 다일러턴시각도 제로인 경우가 기존의 절편법에 의한 원호파괴거동을 보다 적절하게 묘사하는 것으로 나타났다(그림 6(3)참조).

4.4 사면 기울기에 대한 검토

그림 1의 단순사면모델에 대하여 기울기를

표 2. 절편법과 유한요소법에 의한 결과

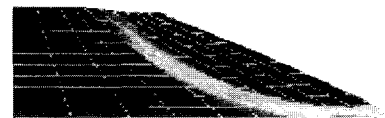
사면의 기울기(수직:수평)	유한요소법에 의한 최소안전율	Bishop방법에 의한 최소안전율
1 : 1	0.9	0.96
1 : 2	1.36	1.38
수직사면	0.46	0.52



(1) psi = 20° 경우



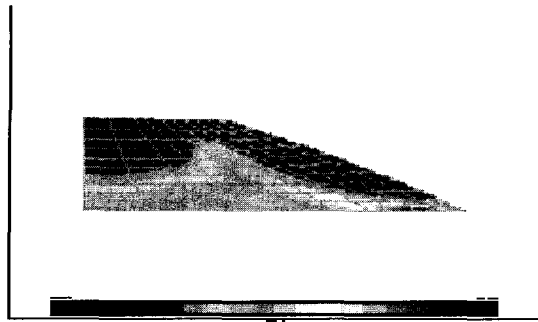
(2) psi = 10° 경우



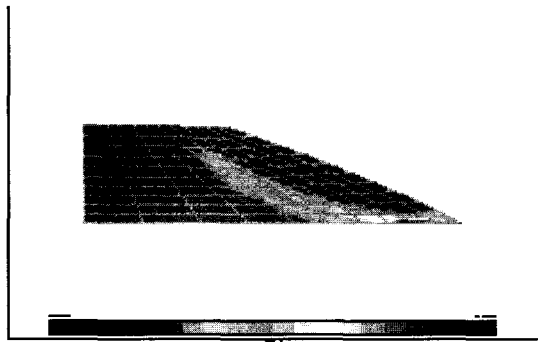
(3) psi = 0° 경우

그림 6. 각 경우의 전단변형률선도

1:1, 1:2, 수직사면으로 변화시켜 최소안전율을 계산하고, Bishop절편법(PCSTABL5M)(1987)의 최



(a) 초기 변형시



(b) 파괴면 발달



(c) 완전파괴

그림 7. 사면의 진행성 파괴과정 (전단변형률 분포도)

소안전율과 비교검토를 하였다. 표 2에 표시하듯이 유한요소법에 의한 최소안전율 계산값은 절편법에 의한 계산값에 비하여 상대적으로 작은 값을 나타내며, 수직사면의 경우에는 Bishop방법에 비해 유한요소법의 결과값의 차이는 최대($F_s(\text{Bishop}) - F_s(\text{FEM}) / F_s(\text{Bishop}) = (0.52 - 0.46) / 0.52 = 11.5\%$)이다.

4.5 사면의 진행성 파괴거동 분석

사면의 진행성 파괴거동을 분석하기 위해서 각 변형 단계상에 발생하는 전단변형률 분포도를 조사하였다(사면의 기울기 1:2, 다일러턴시각도 제로인 경우). 그림 7에서 보듯이 초기의 사면의 활동은 사면저부에서 발달되기 시작하여 점진적으로 사면의 어깨부로 진행되어 가는 파괴과정을 거치는 것을 알 수 있다.

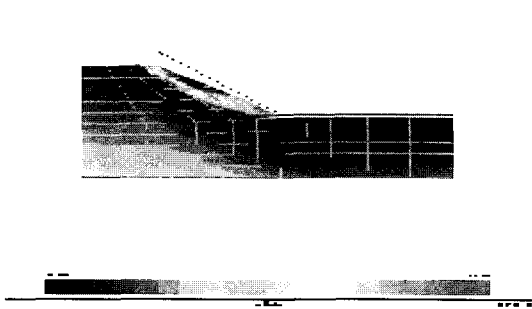
4.6 사면형성에 따른 응력이력의 영향

사면안정에 미치는 응력이력의 영향을 고려하기 위하여 동일한 지반에 대하여 성토사면과 굴착사면으로 형성되는 단순사면을 모사하여 사면붕괴거동을 수행하였다. 성토사면은 사면의 형상을 설정하고 동시에 중력의 영향에 의한 하중을 가하여 형성된 것으로 가정한다. 굴착사면은 지반에 초기지중응력을 계산하고 그 이후에 굴착경계면에 작용하는 이완하중을 가하여 모사한다. 해석모델은 높이 10m, 사면기울기 1:2이며, 해석영역은 가로 60m, 세로 20m를 10×10메쉬로 나누어 계산을 수행하였다. 또한 점착력은 $1\text{t}/\text{m}^2$, 내부마찰각은 40° 로 고려한다.

해석결과 최소안전율값은 성토사면의 계산 경우($F_s=1.84$)가 굴착사면($F_s=1.86$)에 비하여 다소 작게 나타났으며, 각 사면의 파괴변형거동을 살펴보면, 성토사면의 경우가 다소 얇은 파괴에 가까운 파괴형태를 나타내는 결과를 보이며 변위양상은 상당한 차이를 나타냈다(그림 8참조).

4.7 다층지반의 사면안정해석

본 절에서는 다층지반의 사면안정해석에 미치는 영향을 검토하기 위해서 그림 9와 같은 사면의 기울기 1:2이고 지반이 2층으로 구성된 경우에 대하여 안정해석을 실시하였다. 해석과정은 성토 및 굴착에 의한 사면형성과정에 대하여 각각 조사하

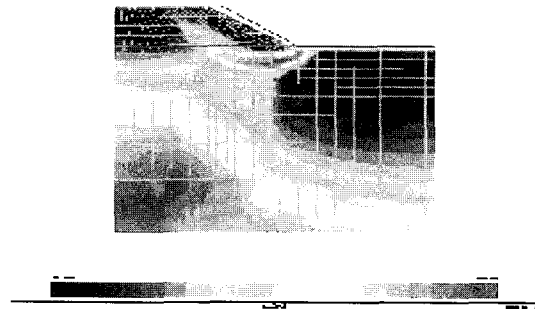


(a) 성토사면의 경우

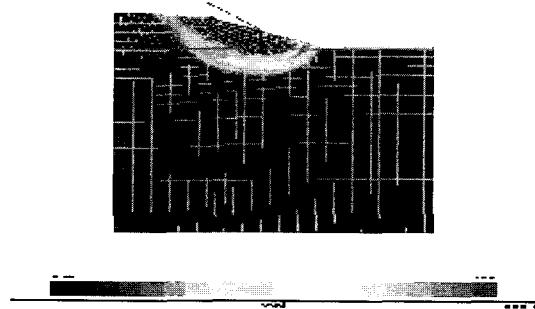


(b) 굴착사면의 경우

그림 8. 사면의 전단변형률 분포도



(a) 성토사면의 경우



(b) 굴착사면의 경우

그림 10. 사면의 전단변형률 분포도

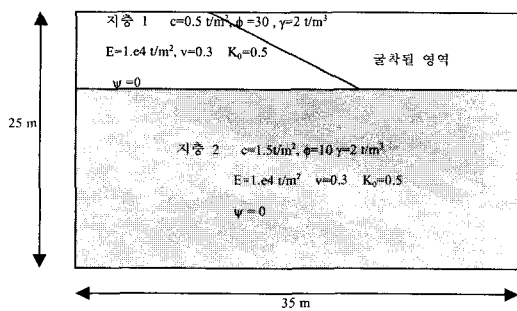


그림 9. 다층지반의 사면해석 모델도

였다. 해석모델은 높이 5m, 사면기울기 1:2이며, 해석영역은 가로 35m, 세로 25m를 35×14 메쉬로 나누어 계산을 수행하였다. 또한 점착력은 1t/m²,

내부마찰각은 40°로 고려한다. 본 사면에 대한 절편법의 Bishop 해석 결과치는 안전율 1.75이다. 다층지반의 사면에 대한 사면파괴해석결과치는 단일층으로 구성된 단순사면의 경향과 거의 유사한 결과를 나타내었다. 즉, 사면의 안전율은 성토사면의 경우가 $F_s=1.71$ 로 굴착사면의 경우 $F_s=1.72$ 보다 다소 작게 나타났으며, 변위양상은 상대적으로 큰 차이를 나타내었다(그림 10참조).

5. 결론

유한요소법으로 단순사면에 대한 안정해석문제를 수치 시뮬레이션하여 사면안정해석에 미치

는 영향에 대하여 검토하였다. 그 결과 유한요소법에 의한 방법으로도 충분히 사면의 최소안전을 및 사면의 붕괴거동에 대하여 일괄적으로 분석할 수 있다는 것을 보여 주었다. 사면의 최소안전을 계산할 때에 유한요소법으로 계산한 경우가 기존의 절편법(Bishop방법) 계산값에 비하여 안전측으로 계산되며(최고 11.5%차이 발생), 안전율정의에 의해 사면안정해석결과에 영향이 크게 미치며, 사면의 파괴거동은 재료정수인 다일러턴시각도가 제로인 경우에 보다 적절한 사면의 붕괴거동을 나타낸다. 또한 사면의 활동은 사면저부에서 발달되기 시작하여 점진적으로 사면의 어깨부로 진행되어 가는 파괴과정을 거치는 것을 알 수 있다. 그리고 유한요소법에서는 성토사면과 굴착사면의 응력이력에 대한 영향을 검토할 수 있으며, 해석결과 최소안전을값은 성토사면의 경우가 굴착사면에 비하여 다소 작게 나타났으며, 사면의 파괴변형거동을 살펴보면, 성토사면의 경우가 다소 얕은 파괴에 가까운 파괴형태를 나타내는 결과를 보이며 변위양상은 상당한 차이를 나타낸다.

감사의 글

이 논문은 1999년도 전주대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음을 밝히며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김영민(1997), "기초지반의 지지력 및 진행성 파괴에 대한 수치해석", 한국지반공학회논문집, Vol.13, pp.139-146
2. 김주용(1997), 유한요소법을 이용한 사면안정해석, 한국과학기술원 박사학위논문
3. 小林正樹(1990), 지반의 안정, 침하해석에 관한 유한

요소법 적용에 관한 연구", 동경공업대 박사학위논문

4. Anderson, M.G. and Richards, K.S.(1987), "Slope stability", John Wiley
5. Brunsten, D. and Prior, D.B.(1984), "Slope Instability", John Wiley.
6. Chen, W.F.(1975), "Limit analysis and soil plasticity", Elsevier
7. Chowdhury R.N.(1978), "Slope Analysis", Elsevier Scientific Publishing Company.
8. Duncan J. Michael (1996), "State of art: limite equilibrium and finite-element method analysis of slope", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 7 pp.577~596
9. Griffiths, D.V. and Li, C.O.(1993), "Analysis of delayed failure in sloping excavations", J. Geotechnical Engineering, ASCE, 119, pp.1360-1378
10. Huang, Y.H.(1983), "Stability Analysis of Earth Slope", VAN Company.
11. Mihail, E.P.(1982), Stability analysis of deep excavations in expansive clays, Int. Sym. On Numerical Models in Geomechanics, pp.660.~667
12. Smith, I.M. and Griffiths, D.V.(1988), "Programming the finite element method", 1988, John Wiley
13. Takuo Yamagami and Yasuhiro Ueta(1988), "Search for Critical Slip Lines in Finite Element Stress Fields by Dynamic Programming", Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck pp.1335~1339
14. Zienkiewicz, O.C. and Corneau, I.C., (1974), "Viscoplasticity and creep in elastic solids - unified numerical solution approach", Int. J. Num. Meth. Eng. Vol.8
15. Zienkiewicz, O.C., Humpheson, R. and Lewis, R.W.(1975), Associated and nonassociated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics, Geotechnique, Vol 25, pp.671~689
16. Program FEADAM84 developed in Department of Civil Engineering, University of California Berkeley by J.M. Duncan
17. Program PCSTABL5M developed in Department of Civil Engineering, Purdue University

(접수일자 1998. 11. 26)