

異質土層斜面の 對數螺線破壞에 대한 安定解析

Stability Analysis of Nonhomogeneous Slopes by Log-spiral Failure Surface

김 영 수*¹
Kim, Young-Su
서 인 식*²
Seo, In-Shik
백 영 식*³
Paik, Young-Shik

Abstract

This paper presents the two and three-dimensional stability analysis of nonhomogeneous, $c-\phi$ soil slopes.

Potential failure surface is assumed as a log-spiral curve refracted in boundaries of layers. In 3-D analysis, rotational soil mass is assumed with a cylindroid central part terminated with plane ends. Seismic force is considered by seismic intensity.

The program developed in this study is compared with the program PCSTABL5. The ratio of three-dimensional minimum factor of safety to two-dimensional case is examined and factor of safety changes are showed for the ratio of cylindroid length to slope height and numbers of slice.

On such bases the following conclusions may be made: (1) The program developed in this program is less conservative than the program PCSTABL5. (2) The value of F_2 of this study shows the larger differences than that of PCSTABL5 with increasing friction angle (3) Factors of safety computed for 3-D geometry differ considerably from ordinary 2-D factors of safety. Since F_b/F_2 exceeds unity, three-dimensional effects tend to increase the factor of safety. (4) As the ratio of three-dimensional failure width of slope height, b/H increase, the value of F_b/F_2 decreases and approaches 1.0 when b/H is 14. (5) In calculating the factor of safety using the developed program, the number of slices is suitable with the ranges of 30-40

*¹ 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

*² 정희원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*³ 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

요 지

본 연구는 이질토층의 $c-\phi$ 흙사면에 대한 2차원 및 3차원 안정해석을 제시한다. 가능파괴면은 층의 경계에서 파괴면이 내부마찰각에 따라 굴절되는 대수나선곡선을 사용하였다. 3차원 해석에서는 회전활동도끼는, 중앙부는 Cylindroid이고 양쪽 끝단은 평면으로 사용하였다. 지진력은 수평 및 수직진도를 고려하였다. 개발한 프로그램을 PCSTABL5와 비교하였고, 2차원 최소안전율에 대한 3차원의 최소안전율의 비를 조사하였고, 사면높이에 대한 Cylindroid 길이의 비에 따른 안전율의 변화를 검토하였다. 그리고 절편의 수에 따른 안전율의 변화도 조사하였다.

이러한 것을 기초로 다음의 결과가 얻어졌다: (1)본 연구에서 개발된 프로그램의 2차원 안전율이 PCSTABL5보다는 더 크게 나타났다. (2) 본 연구의 2차원 안전율은 흙의 내부 마찰각이 증가함에 따라 PCSTABL5보다 더 큰차이를 나타냈다. (3) 3차원 안전율은 2차원 안전율보다 더 크게 나타났다. 따라서 3차원효과는 안전율을 증가시키는 경향이 있다. (4) 사면의 높이에 대한 3차원 파괴도끼의 폭의 비, b/H 가 증가함에 따라 2차원 안전율에 대한 폭, b 를 가진 3차원 안전율의 비, F_3/F_2 의 값은 감소하였고, b/H 가 약 14이상이면 1.0에 근접했다. (4) 2차원 안전율에 대한 폭, b 를 가진 3차원 안전율의 비, F_3/F_2 의 값은 전단강도정수, 지하수위 그리고 수평진도의 값에 매우 민감한 것으로 나타났다. (5) 본 연구에서 개발된 프로그램을 사용하여 안전율을 계산할때, 절편의 수는 30~40개 정도면 적당하였다.

1. 서 론

자연 또는 인공의 흙구조물에서 사면안정은 지반공학에서 중요한 문제이다. 그리고 사면파괴형상이 여러가지 형태로 나타난다는 것은 현장조사와 모형실험에 의하여 밝혀지고 있다. 특히 균질이고 등방성인 사면에서 임계파괴면의 형태는 대수나선이거나 비원호 이고, 여러 층으로 형성된 사면에서도 임계파괴면은 복합 대수나선이거나 복합직선이 된다는 것이 이론적인 해석에 의하여 밝혀지고 있다^(4, 9). 또한 사면 안정해석에 있어서 실용적 목적을 위해 보통 2차원적으로 고려되어져왔다. 즉, 사면이 무한히 길게 파괴된다고 가정하여 3차원 효과는 무시되어 왔다. 그러나 모든 사면 활동은 유한한 크기를 가지기 때문에 3차원 효과가 중요하다. 그러나 2차원 사면안정에 관한 방대한 문헌에 비하여 3차원 해석을 한것은 열

마되지 않는다. 최근에는 Hutchinson, Anagnosti, Baligh & Azzouz⁽²⁾, Hovland⁽⁵⁾ 그리고 Chen & Chameau⁽³⁾가 배수와 비배수 조건에 대해 3차원 사면 안정 해석 방법을 제안하여 왔다. 그리고 Baligh & Azzouz에 의하면, 끝단효과를 고려하면 안전율이 4%~40%까지 증가한다고 한다⁽²⁾.

Leschinsky, Backer & Silver 그리고 Ugai⁽¹³⁾ 등은 3차원 파괴면을 결정하기 위해 변분적 계산법을 사용했다. Azzouz & Baligh가 Cone 과 Ellipsoid로 이루어진 끝단면을 사용하여 같은 형태의 문제를 해석하고 Gens, Hutchinson & Cavounidis⁽⁴⁾가 Hyperbola, Straight line, Exponential, Parabola와 Ellipse형태의 곡선을 가진 끝단으로 해석하였다. Vanmarcke⁽¹⁴⁾는 끝단을 평면으로 하여 확률론적해석도 하였다.

본 연구에서는 서로 다른 성질로 이루어진 이질토층 흙사면에서 가능파괴면을 층의 경계

에서 파괴면이 내부마찰각에 따라 굴절되는 대수나선곡으로 가정하였다. 그리고 3차원 해석에서는 사면파괴체의 형상이 중앙부는 Cylindroid이고 양 끝단은 평면으로 가정하였다. 위와 같은 제반가정하에서 이질토층 흙사면에 대하여 지진을 고려한 안정해석 Program을 개발하였다. 그리고 개발된 프로그램을 사용하여 각종 매개변수들에 따른 안전율의 민감도(sensitivity)를 조사하였다.

2. 해석방법

2.1 가능파괴면의 형태 및 위치

가능파괴면의 모양은 대수나선곡선($r=r_0E^{-Xp(-\theta \tan \phi)}$)이라 가정하고, 파괴면은 한 층에서 성질이 다른 층으로 통과할 때 내부마찰각, ϕ 가 변한다면 층의 경계에서 굴절한다(그림 1).

굴절점(refraction point)의 좌표, $K(y_r, z_r)$ 의 값은 다음식으로 나타난다.

θ_{Hi} 를 포함한 비선형 방정식은 다음과 같다.

$$F(\theta_{Hi}, \theta_0, \tan \phi_2, H_2, H_0) = 0$$

$$H_2 + r_0 \cdot \exp(-\theta_{Hi} \cdot \tan \phi_2) \cdot \cos(\theta_{Hi} - \theta_0) - H_0 = 0 \quad (1)$$

비선형 방정식해법에 의하여 중심각 θ_{Hi} 를 구할 수 있다. 그러면 r_{Hi} 는 다음과 같다.

$$r_{Hi} = r_0 \cdot \exp(-\theta_{Hi} \cdot \tan \phi_2) \quad (2)$$

따라서, 좌표값 y_r 과 z_r 은 다음식으로 된다.

$$\begin{aligned} y_r &= y_0 + r_0 \cdot \sin(\theta_0) + \gamma H_i \cdot \sin(\theta_{Hi} - \theta_0) \\ z_r &= (H_0 + z_0) - r_{Hi} \cdot \cos(\theta_{Hi} - \theta_0) \end{aligned} \quad (3)$$

내부마찰각이 ϕ_m 인 흙에서는 곡선의 식은 $r=f(\phi_m)$ 인데 비하여, 내부마찰각이 ϕ_{m-1} 인 흙에서는 곡선의 식은 $r=f(\phi_{m-1})$ 이다.

내부마찰각이 ϕ_m 인 토층에서 ϕ_{m-1} 인 토층으로 가능파괴면이 진행할 때, 파괴면이 굴절하는 형태는 다음의 그림 2에서 굴절점, $K(y_r, z_r)$ 을 확대하여 나타내었다. 그리고 그림의 $K(y_r, z_r)$ 에서의 접선의 기울기의 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다⁽¹⁾.

$$\alpha_{m-1} = \alpha_m + (\phi_{m-1} - \phi_m) \quad (4)$$

위의 식에서 첨자들은 토층을 의미한다.

윗 식의 관계는 가능파괴면은 층의 경계에서 굴절하여 다른 지층으로 진행하여도 대수나선

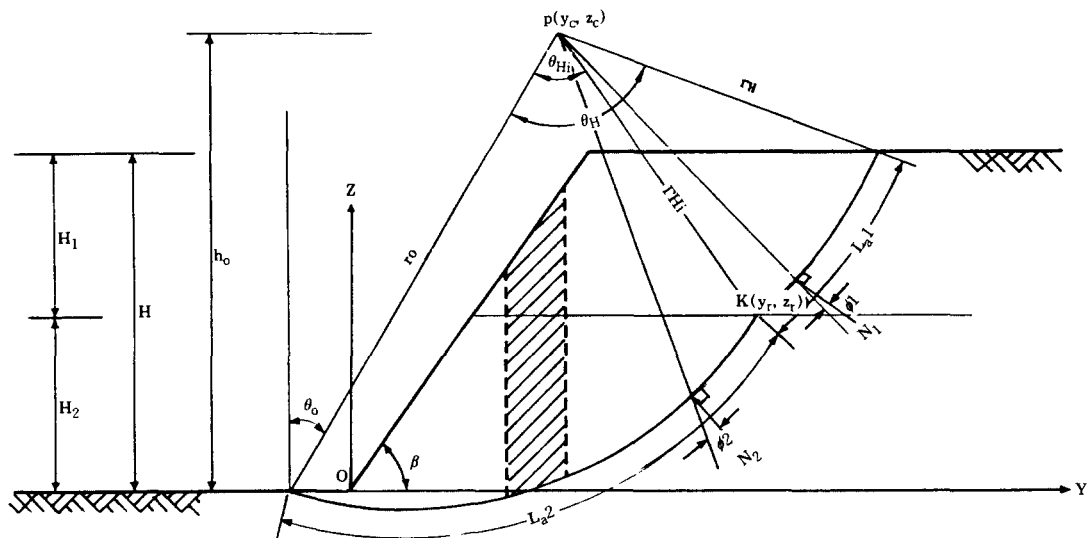


그림 1. 층의 경계에서 굴절하는 가능파괴면

의 극은 불변이라는 것을 의미한다. 왜냐하면 대수나선의 활동면에서 세운 법선과 동경방향은 언제나 그 층의 ϕ 와 같은 각도로 교차하기 때문이다.

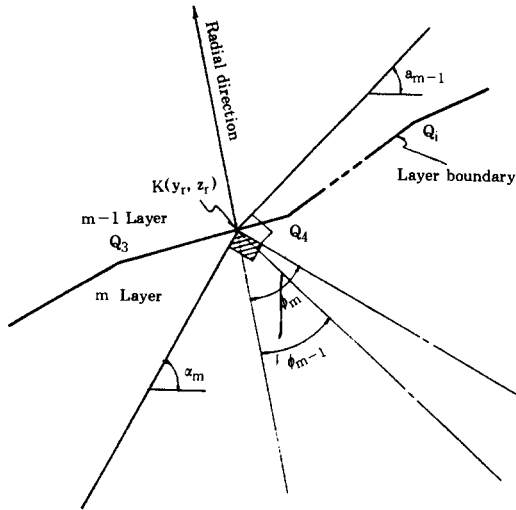


그림 2. 대수나선곡선의 굴절점

절편법으로 해석할 때에는, 먼저 대수나선의 極(y_c, z_c)와 端點(y_0, z_0)를 설정하고, 端點을 통과하는 대수나선의 활동면을 미소각으로 나누어서 동경 r 을 구하고, 대응하는 좌표(y, z)를 구한다. 절편법을 적용했을 때 i 번째 절편의 저면은 직선으로 간주하였다(그림 3).

절편 저면과 수평면이 이루는 각, ϵ_i 는 다음 식으로 나타난다.

$$\epsilon_i = (Z_b - Z_a) / (Y_b + Y_a) \quad (5)$$

3차원 해석에서는 그림 4에서 처럼 평면 끝단을 가진 폭 b 의 Cylinder의 파괴토포를 가정했다.

2.2 지진하중

지진하중을 고려함에 있어서는 진도법(seismic intensity method)을 적용하였다. 진도법이란 지진에 의하여 사면의 토괴는 기초지반과

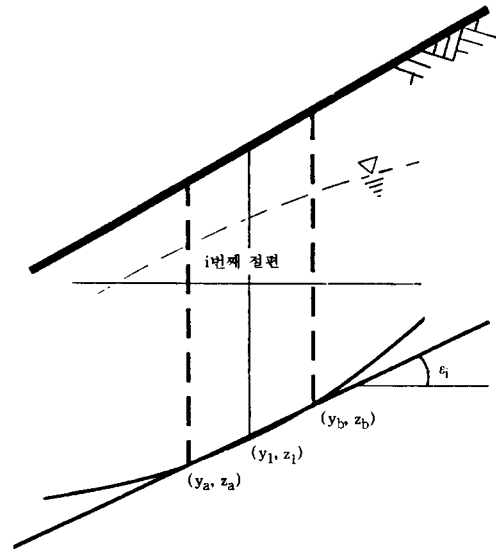


그림 3. i 번째 절편

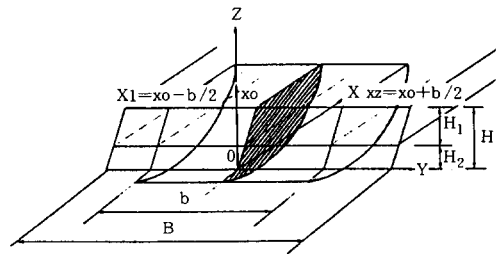


그림 4. 평면끝단을 가진 cylinder모양의 3차원 사면파괴토포

일체로 거동하고, 이 때 지반의 관성력은 지진 가속도의 반대방향으로 토괴질량과 가속도의 상승적의 크기만큼 정적으로 작용한다고 가정하여 사면의 안정성을 검토하는, 실제의 동적인 문제를 정역학적으로 취급하여 해석하는 방법이다. 실제의 여러가지 관측자료에서 지진하중을 받는 흙구조물의 거동에 대하여, 고유진동수, 파괴진도, 증폭률, 감쇄율, 응력분포등을 파악할 수 있는 정보가 많이 있지만, 동적변형 및 강도를 정정으로 추정하는 일은 매우 어려운 문제로서 진도법의 합리성에 대하여 논란의 대상이 되어왔다고 한다. 그러나 이론적 계산의 간편성과 이 방법으로 설계, 시공된 토질구

조물이 지진에 대하여 충분히 안전하다는 것이 경험을 통하여 알려져 있기 때문에 진도법을 많이 적용한다⁽¹⁶⁾.

진도법에 의하여, 지진관성력(seismic inertia force) $F(KN)$ 은 다음식과 같이 표시된다.

$$F = m \cdot \alpha = (W/g) \cdot \alpha = k \cdot W \quad (6)$$

여기서, m = 토괴의 질량(kg), α = 지진가속도(m/sec²), W = 토괴중량(KN), g = 중력가속도(m/sec²), $k = \alpha/g$ 로 표시되는 진도(seismic coefficient or intensity)로서 지진의 강도를 나타내는 무차원의 계수이다. 그런데 지진가속도, α 는 연직성분 α_v 와 수평성분 α_h 로 구분할수 있으므로 연직진도 $k_v = \alpha_v/g$ 와 수평진도 $k_h = \alpha_h/g$ 로 구분하여 고려할 수 있다. 일반적으로 사면안정 해석에서는 k_v 에 대한 지진은 무시되고 k_h 만 고려한다. 본 연구에서는 수평과 수직성분을 모두를 고려하였다.

지진시의 수평과 수직진도를 고려한 절편법에 의한 사면안정 해석에서, i 번째 절편에 대한 힘의 다각형(force polygon)은 다음과 같다.

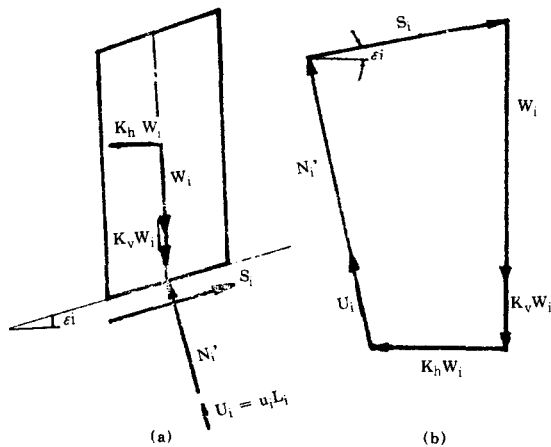


그림 5. i 번째 절편의 힘의 다각형

3. 사면의 안정해석 Model

사면에서 성토, 절토 등의 시공, 침투류의 변화, 지진시의 지진가속도에 의한 관성력 등에

의하여 흙 중의 전단응력이 변화하여, 그 흙의 전단강도를 초과하게 되면 사면의 안정성을 잃어서, 활동파괴가 발생한다. 이러한 파괴에 대하여 안정성을 조사하는 것이 사면의 안정해석이다. 사면의 안정해석에는 활동파괴면의 형상, 안정성의 고려방법, 계산의 수순 등에 의하여 몇 가지의 방법이 제안되어 있으나 본 연구에서는 활동파괴면을 대수나선으로 하고 일반절편법을 적용하여 2차원과 3차원 안정해석의 Model을 제시하려 한다.

3.1 2차원 안전율

어떤 가능파괴면에 대해서, 2차원 안전율은 파괴면을 따라 활동에 저항하는 힘, R 과 활동을 일으키는 힘, S 를 비교함에 의하여 표현되어질 수 있다.

절편법(the ordinary method of slices)을 적용하여 활동파괴토괴를 n 개의 절편으로 나눌 수 있다. 그리고 i 번째 절편에 작용하는 힘들은 다음의 그림 6에 나타나 있다.

그림 6에서 i 번째 절편의 양 측면에 작용하

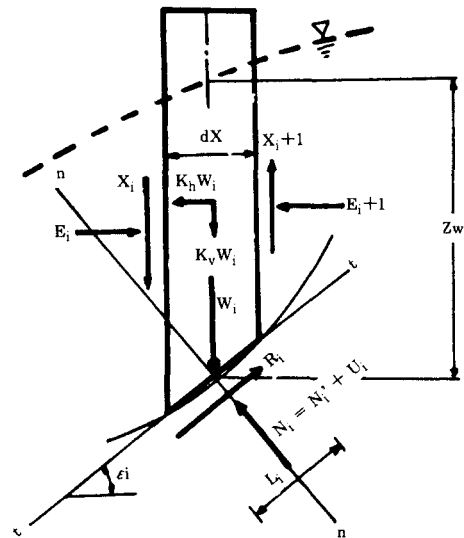


그림 6. i 번째 절편에 작용하는 힘

는 전체 수직력과 전단력은 서로 평형을 이루는 것으로 가정하면,

$$X_i - X_{i+1} = 0 \quad (7)$$

$E_i - E_{i+1} = 0$ 가 된다.

절편 저면에 대해서 수직한 방향(n-n 방향)에 대한 힘의 평형방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum F_n &= 0, \\ W_i \cos \varepsilon_i - N_i' - u_i L_i &= 0 \\ N_i' &= W_i \cos \varepsilon_i - u_i L_i \end{aligned} \quad (8)$$

어떤 위치($x = x_0$)의 단면에서, 파괴면을 따라 활동에 저항하는 힘, $R(x_0)$ 와 활동을 일으키는 힘, $S(x_0)$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} R(x_0) &= \sum_{i=1}^n (c_i + \sigma_i' \tan \phi_i) L_i \\ &= \sum_{i=1}^n (c_i L_i + N_i' \tan \phi_i) \\ &= \sum_{i=1}^n \{c_i L_i + (W_i \cos \varepsilon_i - u_i L_i) \tan \phi_i\} \end{aligned} \quad (9)$$

$$S(x_0) = \sum_{i=1}^n W_i \sin \varepsilon_i \quad (10)$$

윗 식에 지진을 고려하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R(x_0) &= \sum_{i=1}^n \{c_i L_i + [(W_i \cos \varepsilon_i - u_i L_i) \\ &\quad - k_h W_i \sin \varepsilon_i + k_v W_i \cos \varepsilon_i] \\ &\quad + k_v W_i \sin \varepsilon_i\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} S(x_0) &= \sum_{i=1}^n (W_i \sin \varepsilon_i + k_h W_i \cos \varepsilon_i \\ &\quad + K_v W_i \sin \varepsilon_i) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $n =$ 절편의 수

$W_i =$ i번째 절편의 단위중량

$\varepsilon_i =$ i번째 절편저면의 수평면에 대한 경사각

$L_i =$ 파괴면의 i번째 절편 저면의 길이

$u_i =$ 파괴면을 따른 평균간극수압분포로부터 계산된 i번째 절편 저면에 작용하는 간극수압
 $= \gamma_w z_w \cos^2 \varepsilon_i$

$k_h =$ 수평방향에서의 진도

$k_v =$ 수직방향에서의 진도

$c_i =$ i번째 절편의 점착력

$\phi_i =$ i번째 절편의 내부마찰각

따라서, 2차원 안전율, $F_2(x_0)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_2(x_0) &= \frac{R(x_0)}{S(x_0)} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n \{c_i L_i + [(W_i \cos \varepsilon_i - u_i L_i) \\ &\quad - k_h W_i \sin \varepsilon_i + k_v W_i \cos \varepsilon_i] \tan \phi_i\}}{\sum_{i=1}^n (W_i \sin \varepsilon_i + k_h W_i \cos \varepsilon_i + k_v W_i \sin \varepsilon_i)} \end{aligned} \quad (13)$$

3.2 3차원 안전율

3차원 안전율은 3차원 사면파괴토포에서 측면(끝단면)의 고려 때문에 2차원 안전율과는 많이 다르다.

3차원(3-D)해석에 대해서, 본 연구의 안정 해석 Model은 다음의 기본적인 가정을 전제로 한다(그림 4 참조):

(i) 파괴면은 Cylindroid이다.

(ii) 사면파괴토포는 그들의 한계치에 의해서 구속되어 있다.

(iii) 사면파괴토포의 양 끝단은 수직평면(vertical plane)이다.

(iv) 사면의 축(x-axis)을 따라 단면은 일정하다.

즉, 3차원 사면파괴토포는 $x=x_0$ 에 중심을 두고 $x_1=x_0-b/2$ 와 $x_2=x_0+b/2$ 에서 수직평면(vertical plane ends)으로 경계지워져 있는 cylindroid라고 가정되었다.

따라서 3차원 안전율, $F_b(x_0)$ 는 다음과 같이 표현되어진다.

$$\begin{aligned} F_b(x_0) &= \frac{R_b(x_0)}{S_b(x_0)} \\ &= \frac{\int_{x_1}^{x_2} R(x) dx + R_e}{\int_{x_1}^{x_2} S(x) dx} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $R(x)$ 와 $S(x)$ 는 각각 단면의 파괴면을 따르는 활동에 저항하는 힘과 활동을 일으

키는 힘이다. 그리고 Re 는 저항하는 힘에 대한 파괴면의 끝단면의 효과(end effects)인데, 그림 7을 참고하여 다음 식으로 표현되어질 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$Re = 2 \sum s_i' A_i \quad (15)$$

여기서, s_i' = i 번째 절편의 끝단면적의 도심에서의 평균 전단강도

A_i = i 번째 절편의 끝단면적

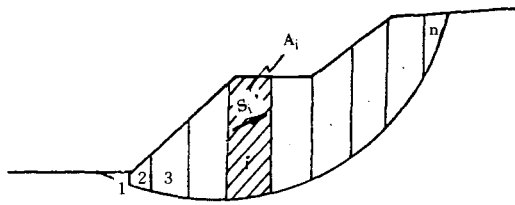


그림 7. 수직평면 끝단에서의 절편의 형상

$R(x)$ 와 $S(x)$ 의 계산에 대해서는 일반절편법(the ordinary method of slices)을 적용하면 2차원의 경우와 마찬가지로 다음과 같다.

$$R(x) = \sum_{i=1}^n \{c_i L_i + [(W_i \cos \epsilon_i - u_i L_i) - k_h W_i \sin \epsilon_i + k_v W_i \cos \epsilon_i] \tan \phi_i\} \quad (16)$$

$$S(x) = \sum_{i=1}^n (w_i \sin \epsilon_i + k_h W_i \cos \epsilon_i + k_v W_i \sin \epsilon_i) \quad (17)$$

따라서, 3차원 안전율, $F_b(x_0)$ 는 다음과 같다.

$$F_b(x_0) = \frac{bR + Re}{bS}$$

$$= \frac{[b \sum_{i=1}^n \{c_i L_i + [(W_i \cos \epsilon_i - u_i L_i) - k_h W_i \sin \epsilon_i + k_v W_i \cos \epsilon_i] \tan \phi_i\} + Re]}{\sum_{i=1}^n b(W_i \sin \epsilon_i + k_h W_i \cos \epsilon_i + k_v W_i \sin \epsilon_i)}$$

$$= \frac{R(b+d_0)}{Sb}$$

$$= F_2 (1+d_0/b) \quad (18)$$

여기서, $F_2(=R/S)$ 는 2차원 안전율, b 는 사

면폭(slope width)이며, d_0 는 확장길이(extension length)로서 다음 식으로 근사적으로 구할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$d_0 = \frac{Re}{R}$$

$$= \frac{2 \sum_{i=1}^n s_i' A_i}{sL}$$

$$= \frac{2s' A}{sL}$$

$$= 2A/L \quad (19)$$

여기서, L = 가능파괴면의 전체길이

$$(=\sum L_i)$$

A = 가능파괴토폴의 끝 단면적

$$(=\sum A_i)$$

4. 프로그램의 구성

본 연구에서 개발된 프로그램은 앞에서 설명된 해석모델에 대한 수치계산을 수행할 수 있다. 이 프로그램의 간략한 흐름도(simplified

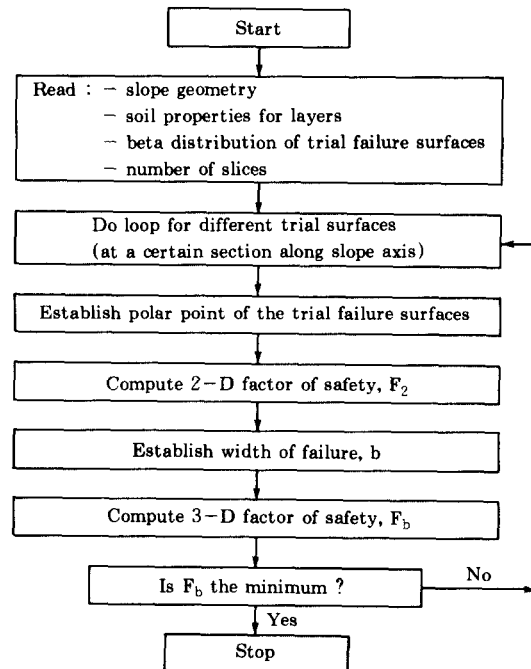


그림 8. Simplified Flow Chart

flow chart)는 그림에 나타내었다. 주요입력자료는 사면의 기하형상과 각 층의 흙특성치들과 지하수위, 사면파괴폭 그리고 수평 및 수직진도(seismic intensity)이다.

주요출력자료는 임계파괴면의 기하형상(slope geometry), 2차원 안전율, F_2 , 사면폭, b 를 가진 3차원 안전율, F_b 이다.

5. 예제적용

5.1 사면의 종단면도와 입력자료의 산정

예제적용은 그림 9과 같은 기하형상을 가지는 2층으로 이루어진 흙 사면에서 대해 개발된 프로그램으로 해석을 하였다.

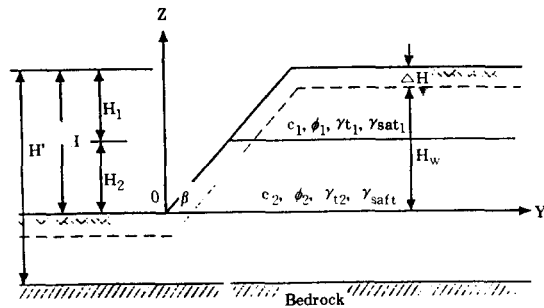


그림 9. 사면의 종단면도

사면의 높이, H 는 15m, 첫번째의 층의 높이, H_1 은 7m, 두번째의 층의 높이, H_2 는 8m, 사면의 경사는 1:1.5로 가정하였다. 그리고 침도계수, $D=H_1/H$ 는 1.33으로 하였고, 3차원 해석에서 사면의 폭, b 는 150m로 하였다.

토층의 특성치들(soil properties)의 산정에서, 첫번째의 흙층의 점착력, $c_1=10 \text{ kN/m}^2$, 내부마찰각, $\phi_1=30^\circ$, 습윤단위중량, $\gamma_{u1}=18 \text{ kN/m}^3$, 포화단위중량, $\gamma_{sat1}=20 \text{ kN/m}^3$, 두번째의 흙층의 점착력, $c_2=8 \text{ kN/m}^2$, 내부마찰각, $\phi_2=35^\circ$, 습윤단위중량, $\gamma_{u2}=19 \text{ kN/m}^3$, 포화단위중량, $\gamma_{sat2}=21 \text{ kN/m}^3$ 으로 가정하였다. 그리고 지하수의 위치는 $\Delta H=2\text{m}$, 절편의

수는 40개, 지진의 수평강도, $k_h=0.1$ 수직강도, $k_v=0.05$ 로 하였다.

5.2 2차원 안전율의 PCSTABL5와의 비교

현장에서 많이 쓰이고 있는 사면안정해석 프로그램인 PCSTABL5와 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용하여, 2차원 안전율, F_2 를 사면의 높이, 흙의 내부마찰각 그리고 사면의 경사에 따라 각각 구하였고, 그 결과는 표 1~3과 그림 10~13에 나타내었다.

먼저 사면의 높이, H 의 증가(H_2 고정, H_1 증가)에 따른 안전율의 비교는 표 1과 그림 10에 나타내었다. 여기에서 사면의 높이는 5.1절의 입력자료산정에서의 $H=15\text{m}$ 를 변경하여 알아 보았다.

표 1과 그림 10에서 보는바와 같이 본 연구에서 개발된 프로그램의 결과는 PCSTABL5의 결과 보다는 안전율이 더 컸다.

표 1. 사면의 높이, H 에 따른 비교

H(m)	11	13	15	17
PCSTABL 5	1.126	1.153	1.123	1.054
본 연구	1.408	1.503	1.271	1.185

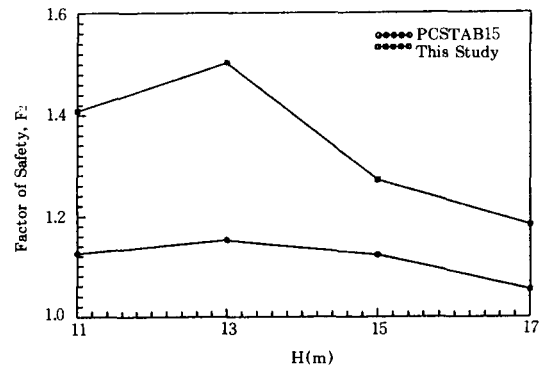


그림 10. 사면의 높이, H 에 따른 안전율의 변화

H 가 13m까지는 안전율이 두 경우 모두 증가하였으나 그 이상에서는 H 가 증가함에 따라

안전율은 감소하였으며, H가 증가함에 따라 두 경우의 안전율의 차이는 감소하였다. 여기서 H의 증가에도 불구하고 안전율이 H=13m 까지 증가한 일은 사면의 하층만을 증가시킨데 따른 우연 또는 일시적인 현상이며 일반적으로 사면의 높이가 증가하면 안전율은 감소한다.

내부마찰각, ϕ 에 대한 안전율의 비교는 표 2와 그림 11에 나타내었는데, 한 층의 ϕ 를 고정시키고 다른 층의 ϕ 를 변화시켜보았다.

표 2와 그림 11에서 보는바와 같이 본 연구의 결과가 PCSTABL5의 결과보다는 안전율이 더 컸으며 ϕ 가 증가함에 따라 두 경우의 차이는 좀 크게 나타났다.

표 2. 흙의 내부마찰각, ϕ 에 따른 비교

$\phi_2 = 35^\circ$	20°	25°	30°	35°	40°
$\phi_1 =$					
PCSTABL5	1.104	1.114	1.123	1.131	1.138
본 연구	1.180	1.228	1.271	1.301	1.327
$\phi_1 = 30^\circ$	20°	25°	30°	35°	40°
$\phi_2 =$					
PCSTABL5	0.696	0.829	0.969	1.123	1.292
본 연구	0.748	0.877	1.041	1.271	1.562

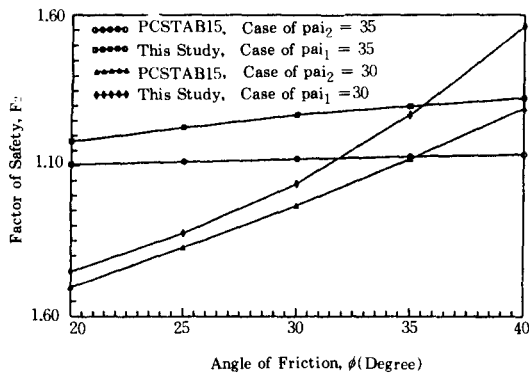


그림 11. 흙의 내부마찰각, ϕ 에 따른 안전율의 변화

사면의 경사에 따른 비교는 표 3과 그림 12에 나타내었는데, 이 또한 5.1절의 1:1.5의 경사를 1:1.5, 1:2.0, 1:1.0으로 변화시켜보았다.

표 3과 그림 12에서 보는바와 같이 경사가 급해짐에 따라 두 경우 모두 안전율은 감소하였고, 두 경우의 차이는 미약하나마 점점 작아졌으며 본 연구의 결과가 역시 안전율이 더 컸다.

위의 결과를 종합하여 볼 때, 본 연구에서 개발된 프로그램의 결과는 PCSTABL5의 결과보다는 안전율이 조금 더 컸다.

표 3. 사면의 경사에 따른 비교

사면 경사	1 : 1.5	1 : 1.2	1 : 1.0
PCSTABL5	1.318	1.139	1.027
본 연구	1.461	1.246	1.113

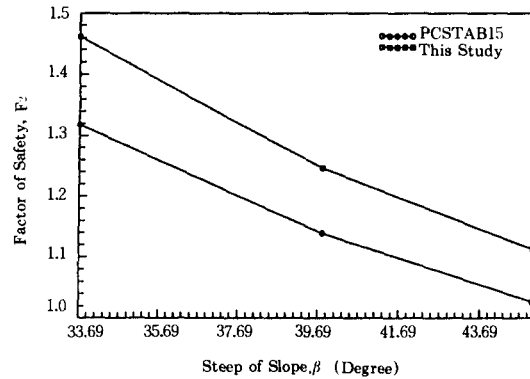


그림 12. 사면의 경사에 따른 안전율의 변화

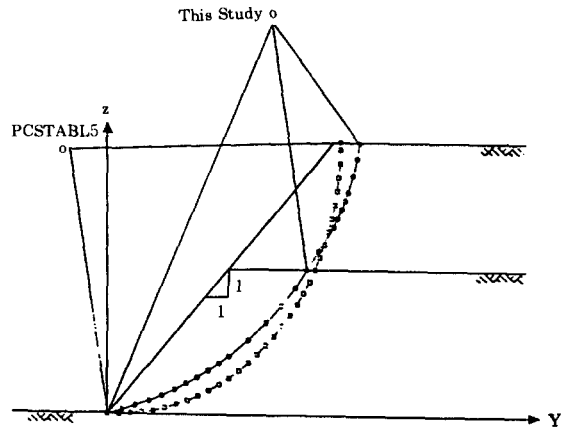


그림 13. PCSTABL5와의 임계파괴면의 비교

그림 13은 사면경사가 1:1 일때 임계파괴면의 비교를 나타낸다.

5.3 민감도 분석

사면안정에 영향을 미치는 사면의 기하형상 계수, 사면의 경사, 토질강도정수, 지하수의 위치, 사면높이에 대한 사면파괴폭의 비, 진도 그리고 절편의 수의 변화에 대한 결과의 민감도를 연구하는 것이 필요하다. 이를 위하여 4.1절에서 산정된 입력자료에서 다른 매개변수들을 고정시켜 두고 하나의 매개변수를 어떤 범위안에서 변화시키면서 개발된 프로그램을 수행시켜 안전율의 변화를 조사했다. 다음의 표 4~6과 그림 14~20은 이러한 민감도 분석의 결과를 나타내고, 그 결과들에 대한 고찰을 항목별로 나타냈다.

(1)사면의 높이, H의 증가(H_2 고정, H_1 증가)에 따른 안전율의 변화를 알아 보았다. 표 4와 그림 14를 살펴보면, H가 높아짐에 따라 2차원 안전율, F_2 및 폭 b를 가진 3차원 안전율, F_b 는 H가 13m까지는 다 같이 증가하다가 그 이상에서는 감소하였는데, 그것은 사면의 윗층만을 변화시킨 결과이며, 일반적으로 H가 증가하면 안전율은 감소하였다.

(2)내부마찰각, ϕ 에 대한 안전율의 변화는 한 층의 ϕ 를 고정시키고 다른 층의 ϕ 를 변화시켜 알아보았다. 표 5와 그림 15를 살펴보면, 하층의 ϕ 를 고정시키고 상층의 ϕ 를 증가시켰을 때에는 2차원 및 3차원 안전율의 증가는 완만하였으나 상층의 ϕ 를 고정시키고 하층의 ϕ 를 증가시켰을 때에는 2차원 및 3차원 안전율은 급격히 증가하였다.

(3)사면의 경사를 1:1, 1:1.2, 1:1.5로 차츰 완만하게 변화시켜보았다. 표 6과 그림 16에서 보는바와 같이 경사가 완만하여짐에 따라 2차원 및 3차원 안전율은 모두 증가하였으며, 2차원과 3차원 안전율의 차이는 미약하나마 점점 감소하였다.

표 4. 사면의 높이, H에 따른 변화

H(m)	11	13	15	17
F_2	1.408	1.503	1.217	1.185
F_b	1.437	1.529	1.304	1.217
F_b/F_2	1.021	1.017	1.026	1.027

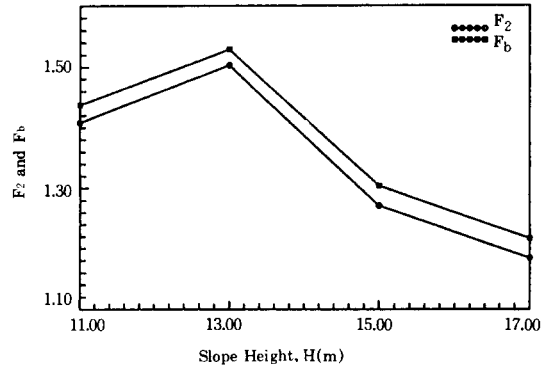


그림 14. 사면의 높이, H에 따른 안전율의 변화

표 5. 흙의 내부마찰각, ϕ 에 따른 변화

$\phi_1 = 35^\circ$					
$\phi_2 =$	20°	25°	30°	35°	40°
F_2	1.180	1.228	1.271	1.301	1.327
F_b	1.212	1.258	1.304	1.334	1.360
$\phi_2 = 30^\circ$					
$\phi_1 =$	20°	25°	30°	35°	40°
F_2	0.748	0.887	1.041	1.271	1.562
F_b	0.784	0.912	1.074	1.304	1.594

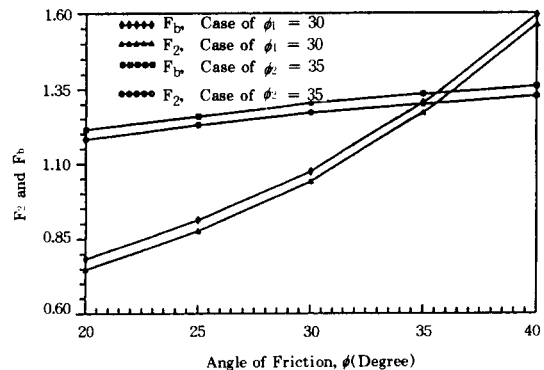


그림 15. 흙의 내부마찰각, ϕ 에 따른 변화

표 6. 사면의 경사에 따른 변화

사면 경사	1 : 1	1 : 1.2	1 : 1.5
F_2	0.930	1.217	1.304
F_b	0.905	1.197	1.271
F_b/F_2	1.028	1.017	1.026

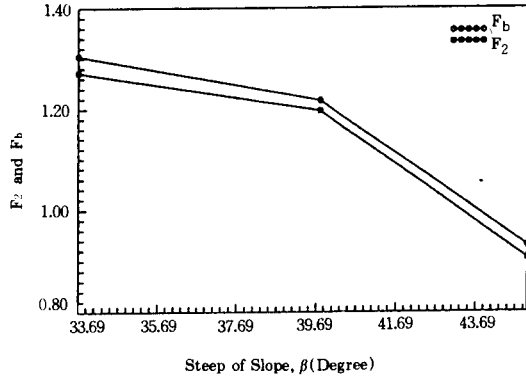


그림 16. 사면의 경사에 따른 변화

(4) 지하수의 위치에 따른 변화를 알아보았다. 그림 17을 살펴보면, H_w/H 의 값이 0.7까지는 지하수의 위치가 높아짐에 따라 2차원 안전율, F_2 및 폭 b 를 가진 3차원 안전율, F_b 는 다 같이 완만하게 감소하다가 그 이상에서는 급격히 감소하는 경향을 보였다. 그리고 지하수위의 증가에 따라 2차원과 3차원의 모든 경우에 안전율의 차이는 점점 약간씩 감소하였다.

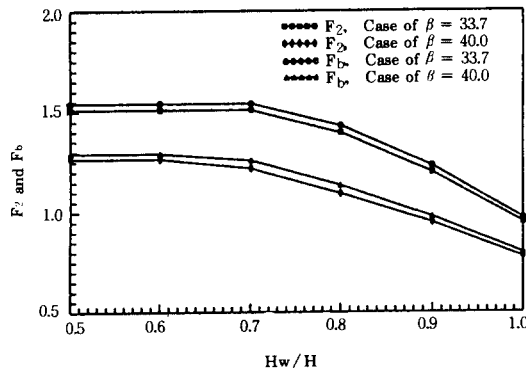


그림 17. 지하수위의 변화에 따른 안전율의 변화

(5) 사면높이에 대한 사면파괴폭의 비에 따른 변화를 알아보았다. 그림 18을 살펴보면, 사면높이에 대한 사면파괴폭의 비에 따라서 내부마찰각을 다르게하여 2차원 안전율, F_2 과 폭 b 를 가진 3차원 안전율, F_b 의 비, F_b/F_2 를 알아보았는데, b/H 가 3.5까지는 안전율의 비는 급격히 감소하다가 그 이상에서는 완만하게 감소하였다. b/H 가 약 14에서 안전율의 비는 1에 가까워졌다.

이것은 Cylindroid의 길이가 길어질수록 3차원 효과가 줄어든다는 것을 나타내며, 만약 Cylindroid의 길이가 무한히 커진다면 2차원 안전율과 같아진다는 것을 의미한다. 그리고 2층으로 사면이 구성되었을 때 하층의 내부마찰각이 더 큰 경우가 상층의 내부마찰각이 더 큰 경우보다 경사가 커짐에 따라 2차원 안전율, F_2 에 대한 폭 b 를 가진 3차원 안전율, F_b 의 비에 대한 차이가 더 컸다.

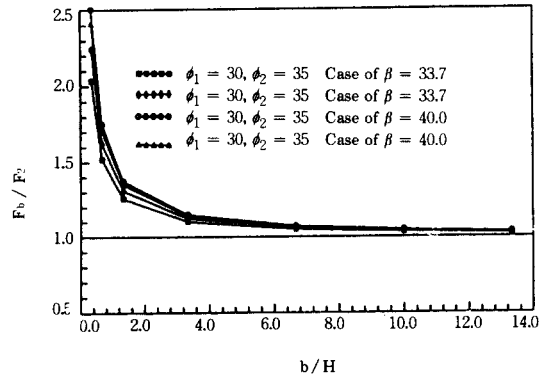


그림 18. b/H 의 변화에 따른 안전율비의 변화

(6) 진도에 대한 영향을 알아보았다. 그림 19를 살펴보면, 수평진도, k_h 및 수직진도, k_v 를 변화시켰을 때, 진도가 증가함에 따라 2차원 안전율, F_2 및 폭 b 를 가진 3차원 안전율, F_b 는 감소했다. 그리고 k_v 가 증가함에 따라 안전율은 완만하게 감소하였으나 k_h 가 증가함에 따라 안전율은 급격하게 감소하였다.

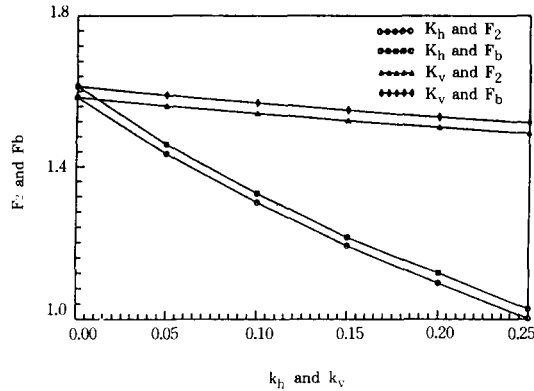
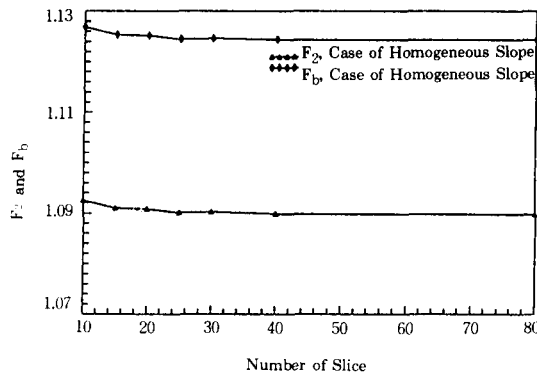
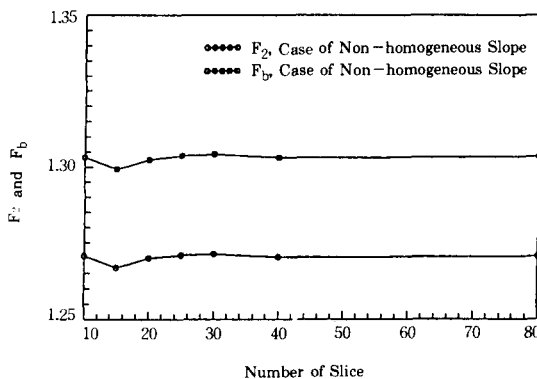


그림 19. 진도, k_h 및 k_v 의 변화에 따른 안전율의 변화



(a)



(b)

그림 20. 절편의 수에 따른 안전율의 변화 :
(a) 균질사면, (b) 이층사면

(7) 절편의 수에 따른 안전율의 변화를 알아 보았다. 그림 20(a), (b)를 살펴보면, 균질사면의 경우와 이층사면의 경우 모두 절편의 수가 약 30까지는 2차원 안전율, F_2 및 폭 b 를 가진 3차원 안전율, F_b 가 감소하다가 그 이상에서는 안전율이 일정하게 되었다.

6. 결 론

본 연구는 흙층의 경계에서 파괴면이 내부마찰각에 따라 굴절되는 대수나선파괴에 대한 이질토층의 $c-\phi$ 흙사면에 대한 2차원 및 3차원 안정해석을 제시한다. 회전활동면의 중앙부는 Cylindroid이고 양쪽 끝단은 평면을 사용하였다. 지진력은 진도법에 의한 수평 및 수직진도에 의하여 고려되었다.

이러한 것을 기초로 다음의 결과가 얻어졌다. (1) 본 연구에서 개발한 프로그램에 의한 2차원 안전율은 PCSTABL5에 의한 2차원 안전율보다는 더 크게 나타났다. (2) 본 연구의 2차원 안전율은 흙의 내부 마찰각이 증가함에 따라 PCSTABL5 보다 더 큰 차이를 나타내었다. (3) 3차원 안전율은 2차원 안전율보다 더 크게 나타났다. 따라서 3차원효과는 안전율을 증가시키는 경향이 있다. (4) 사면의 높이에 대한 3차원 파괴토포의 폭의 비, b/H 가 증가함에 따라 2차원 안전율에 대한 폭, b 를 가진 3차원 안전율의 비, F_b/F_2 의 값은 감소하였고, b/H 가 약 14이상이면 1에 근접했다. (4) 2차원 안전율에 대한 폭, b 를 가진 3차원 안전율의 비, F_b/F_2 의 값은 전단강도정수, 지하수위 그리고 수평진도의 값에 매우 민감한 것으로 나타났다. (5) 본 연구에서 개발된 프로그램을 사용하여 안전율을 계산할 때, 절편의 수는 30~40개 정도면 적당하였다.

참 고 문 헌

1. Baker, R. & Garber, M.(1978), "Theoretical Analysis of the Stability of Slopes", Geot-

- echnique, Vol.28, No.4, pp.395~411.
2. Baligh, M.M. & Azzouz, A.S.(1975), "End effects on Stability of Cohesive Slope", J. Geotech. Eng. Div. ASCE, Vol.101, No.GT11, pp.1105~1117.
 3. Chen, R.H. & Chameau, J.L.(1983), "Three-dimensional Limit Equilibrium Analysis of Slope." Geotechnique, Vol.33, No.1, pp. 31~40.
 4. Gens, A., Hutchinson, J.N. & Cavounidis, S. (1988), "Three-dimensional Analysis of Slides in Cohesive Soils." Geotechnique, Vol. 38, No.1, pp.1~23.
 5. Holvland, H.T.(1977), "Three-dimensional Slope Stability Analysis Method," J. Geotech. Eng. Div. ASCE, Vol. 103, No.GT9, pp. 971~986.
 6. Kim, Y.S.(1988), "Probabilistic Analysis of the Stability of Soil Slopes." Proc. of the Koreans Society of Civil Eng., Vol.8, No.3, Sep., pp.85~90.
 7. Kim, Y.S.(1988), "Probabilistic Analysis of Slope Stability for Progressive Failure," Journal of the Korea Society of Geotechnical Eng., Vol.4, No.2, Jun, pp.5~14.
 8. Lefebvre, G. & Duncan, J.M.(1973), "Three-dimensional Finite Element Analysis of Dams," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.99, No. SM7, Proc, Paper 9857, July, pp.207~212.
 9. Scott, C.R.(1980), Soil Mechanics and Foundations, Third Edition, Applied Science Publishers.
 10. Sherard, J.L., et al.(1963), Earth and Earth-Rock Dams, John Wiley and Sons, inc. New York.
 11. Spencer, E.(1969), "Circular and Logarithmic Spiral Slip Surface," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 95, NO.SM1, Proc. Paper 6361, Jan., pp. 227~234.
 12. Taylor, D.W.,(1948), Fundamentals of Soil Mechanics. John Wiley and Sons. inc. New York.
 13. Ugai, K.(1985), "Three-dimensional Stability Analysis of Vertical Cohesive Slopes," Soils and Foundations, Vol. 25, No.3, pp.41~48.
 14. Vanmarcke, E. H.(1977), "On the Reliability of Earth-slopes," J. Geotech. Eng. Div. ASCE, Vol.103, No.GT11, pp.1247~1265.
 15. Wright, S., Kulhaway, F. & Duncan J.(1973), "Accuracy of Equilibrium Slope Stability Analysis," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 99, No. SM10, Proc. Paper 10097, Oct., pp.783~791.
 16. 황정규(1992), 건설기술자를 위한 지반공학의 기초이론, 구미서관.

(접수일자 1993. 3. 25)