

사면의 파괴형태 및 그 안정해석에 관한 연구

Slope Stability Analysis

임	종	석*
Lim,	Jong	Seok
김	명	모**
Kim,	Myoung	Mo

Abstract

There are two different methods in the stability analysis of slopes depending upon the locations and the types of assumed failure planes, which are the infinite slope analysis and the finite slope analysis. The infinite slope analysis is simple and easier in its application. However, since the method neglects the end effects and assumes the failure plane to be located at the shallow depth and parallel to the slope, the slopes to be analyzed by the method should be limited to a certain range. Thus, it is intended in this paper to define the infinite slopes whose stability may be analyzed by the infinite slope analysis. As a result, it is obtained that the method of infinite slope analysis may be applied to the slopes which have the ratio of the slope height to the depth of the failure plane of 9 or bigger.

요 지

사면의 안정 해석방법은 사면의 제반 조건 및 파괴면의 형태에 따라 유한사면법과 무한사면법 등으로 나눌수 있는데 무한사면법은 그 해석 방법이 단순 명료하여 사용이 간편한 반면에, 단영향을 무시하고 경사면에 평행한 파괴면을 가정하는 등 대략적인 면이 있어서 그 적용범위에 한계성을 내포하고 있다. 본 논문에서는 무한사면법을 적용하여 공학적으로 허용할 수 있는 범위내의 오차를 주는 사면을 정의하기 위하여 가상사면을 다양하게 설정하고 각 사면에 대한 유한 사면법과 무한사면법의 안정해석 결과를 안전률을 이용하여 비교 분석하였다.

그 결과로 무한사면법은 무한사면파괴가 예상되는 한계높이에 대한 사면높이의 비가 대략 9보다 같거나 클때 적용 가능하다고 판단되었다.

1. 서 론

도로, 제방, 흙땀, 운하 또는 산 등을 이루고 있는 사면은 중력이나 외부하중의 작용을 받아 하향으로 무너지려는 경향이 있다. 따라서, 자연 사면을 깎거나 인공사면을 만들 때에는 안정

이 유지될 수 있는가에 대한 검토가 대단히 중요하다.

사면은 일반적으로 파괴면의 깊이와 사면높이 간의 상관관계에 따라 무한사면(infinite slope)과 유한사면(finite slope)으로 나눌 수 있는데, 주어진 사면을 고려할때 그것을 어떤 종류의 사면으로 보는가에 따라 해석 방법이 달라

*서울대학교 대학원 박사과정

**정회원 · 서울대학교 공과대학 조교수, 토목공학과

진다. 그리고 해석방법에 따라 안정성에 대한 평가가 달라질 수 있으므로 공학적으로 판단해서 적절한 방법으로 그 사면의 안정성을 평가하여야 한다. 그런데 무한사면 해석법은 그 방법이 단순 명료하여 사용이 간편한 반면에, 단영향(end effect)을 무시하고 경사면에 평행한 파괴면을 가정하는 등 대략적(rough)인 면이 있어서 그 적용 범위에 한계성을 내포하고 있다.

현재까지 출판된 문헌중에서 무한사면과 유한 사면을 구분한 것을 보면 “무한사면은 파괴면의 깊이가 사면의 높이에 비하여 비교적 작은 사면이다”^(1,2). “파괴면의 깊이가 사면 높이에 접근하면 유한사면으로 해석하여야 한다.”⁽³⁾ 또는, “사면의 규모가 유한해지면 파괴면은 휘어진다”⁽⁴⁾ 고 하는 등 사면의 규모나 혹은 파괴면의 깊이 등으로 무한사면과 유한사면을 구분해 놓았기 때문에 실제 문제에 당면하였을 때 적절한 방법의 선택이 어려울 때가 있다.

이에 본 논문에서는 무한 사면법의 적용이 가능한 무한사면의 정의를 분명히 할 목적으로 가상 사면을 다양하게 설정하고 각 사면에 대한 유한 사면 해석법과 무한 사면 해석법의 안정 해석 결과를 안전율을 기준하여 비교 분석하고자 한다.

2. 가상사면의 설정

사면의 안정 해석에 있어서 사면의 생성이 자연 발생적인가 인공적으로 만들어진 것인가 하는 문제와 공사의 진행이 굴착인가 성토인가 하는 문제, 그리고 사면을 이루는 물질의 특성, 지질학적 요인 등에 따라 그 해석 방법에 얼마간의 차이가 있을 수 있으나 본 논문에서는 그림 1에 보인 바와 같이 암반층이 일정한 깊이에 경사면과 평행하게 위치하는 사면을 대상으로 한다. 동 그림의 경사면에 평행한 점선은 암반층의 위치를 나타내며 동일한 외부조건을 갖는 사면을 암반층의 위치에 따라 두 종류의 사면으로 나누었다. 제 1 사면은 사면을 구성하는 흙의 강도정수와 경사각에 의해서 결정되는 무한사면법에 의한 한계 높이(H_c)를 따라 그 아래에 암반층(그림 1의 점선①)이 위치하는 사면이고, 제 2 사면은 주어진 사면을 균질한 사면으로

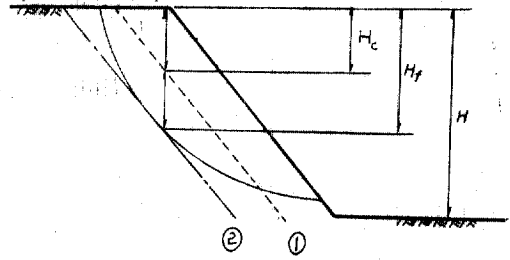


그림 1. Slope for explanation

보고 유한사면 해석을 하여 결정된 최소안전율을 갖는 원호 파괴면에 접하고 경사면에 평행한 선을 따라 그 아래에 암반층(그림 1의 점선 ②)이 위치하는 사면이다. 이때 표층의 두께는 H_f 가 되며 이를 파괴 깊이라고 정의 하였다.

3. 유한사면 해석

유한사면의 안정해석 방법으로는 극한 평형법(limit equilibrium method), 극한해석법(limit analysis), 그리고 유한요소법(finite element method) 등이 있는데, 비교적 단순한 지형의 사면 안정해석에 있어서는 극한 평형법이 가장 손쉽고 능률적인 방법으로 알려져 있다.

극한 평형법에서는 주어진 사면내에 시험파괴면을 정하고, 그 파괴면에서 Coulomb의 파괴이론이 성립한다는 가정 아래 파괴면 위의 흙덩이를 자유물체(free body)로 간주하여 그 자유물체에 대한 힘의 평형을 고려한다. 이때 평형을 고려하는 과정에서 자유물체를 하나로 보느냐 혹은 여러개의 수직 절편으로 나누어 보느냐에 따라서 각각 마찰원법과 절편법 등으로 나뉜다.

본 논문에서는 주어진 사면을 유한사면으로 해석하기 위하여 절편법을 사용하였는데, 특히 절편법 중에서도 가장 널리 쓰이는 Bishop의 간편법(simplified Bishop's method)을 사용하였다. 또 Bishop의 간편법에 의한 사면안정 해석을 위하여 전산 program SNOB(Stability-New York and Bishop)⁽⁵⁾을 사용하였다. 전산 program SNOB에서는 최종 안전율을 결정하기 위하여 다음과 같은 식을 이용한다.

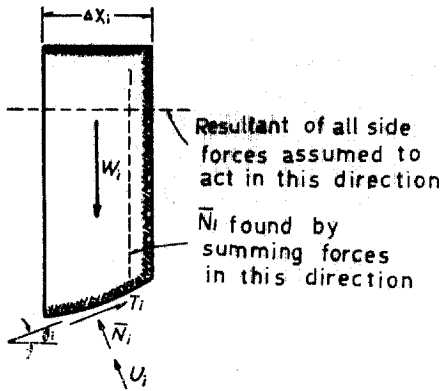


그림 2. Forces considered in simplified Bishop method of slices

$$FS - FS_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \{ \bar{c} \cdot \Delta x_i + (W_i - u_i \Delta x_i) \}}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \tan \bar{\phi} \{ 1 / \bar{M}_i(\theta) \} = 0 \quad (1)$$

여기서, $\bar{M}_i(\theta) = FS_0 \cos \theta_i + \sin \theta_i \tan \bar{\phi}$ 이고,

\bar{c} : 유효점착력,

$\bar{\phi}$: 유효내부마찰각,

Δx_i : i 번째 절편폭,

W_i : 절편무게,

u_i : 간극수압,

θ_i : 절편기울기

등(그림 2)을 나타낸다. 식(1)에서 후기 안전율 FS 와 초기 안전율 FS_0 가 점차적으로 같아지게 하기 위하여 식(1)을 Newton-Raphson 방법으로 처리하면⁽⁶⁾,

$$FS_2 = FS_1 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i - \sum_{i=1}^n \{ \bar{c} \cdot \Delta x_i + (W_i - u_i \Delta x_i) \tan \bar{\phi} \} (1 / \bar{M}_i(\theta))}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i - \sum_{i=1}^n \{ \bar{c} \cdot \Delta x_i + (W_i - u_i \Delta x_i) \tan \bar{\phi} \} (\tan \bar{\phi} \cdot \tan \theta_i) (1 / \bar{M}_i(\theta))} \right]$$

을 얻는다. 여기서 FS_2 는 구하려는 안전율이고 FS_1 은 지나간 마지막 시행에서 얻어진 안전율이다. Program SNOB에서는 이들의 차가 0.001 이하로 되면 그때의 값 FS_2 를 고려하고 있는 파괴면의 안전율로 결정한다. Program SNOB은 또 자체내에서 시험 파괴면을 연속하여 선정하는데, 이때 시험파괴 원호의 중심의 위치와 파

괴 원호의 반경을 체계적으로 변화시킨다.

4. 무한사면 해석

무한사면으로 사면을 해석하는 경우, 파괴면은 지표면에서 일정한 깊이에 지표면과 평행하게 존재한다고 가정하고 단영향(end effect)은 무시한다. 그림 3에 보인 바와 같이 단위 길이의 폭을 갖는 한 절편의 힘의 평형을 고려하면 바닥면에서의 전단응력은

$$\tau = T / \sec i = W \sin i / \sec i = \gamma H \sin i \cos i$$

가 되고, Mohr-Coulomb 식에 의한 전단 강도는

$$s = \bar{c} + \bar{\sigma} \tan \bar{\phi} = \bar{c} + (N / \sec i) \tan \bar{\phi} = \bar{c} + \gamma H \cos^2 i \tan \bar{\phi}$$

이므로, 전단 강도에 대한 안전율은

$$FS = \frac{s}{\tau} = \frac{\bar{c} + \gamma H \cos^2 i \tan \bar{\phi}}{\gamma H \sin i \cos i} \quad (2)$$

이 된다.

그리고 일반적인 경우($\bar{c} \neq 0$, $\bar{\phi} \neq 0$), 전단강도를 그림 4의 점선과 같이 나타낼 수 있으며, 전

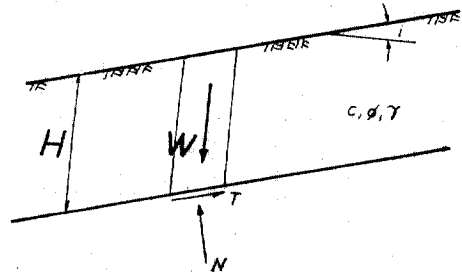


그림 3. Analysis of infinite slope

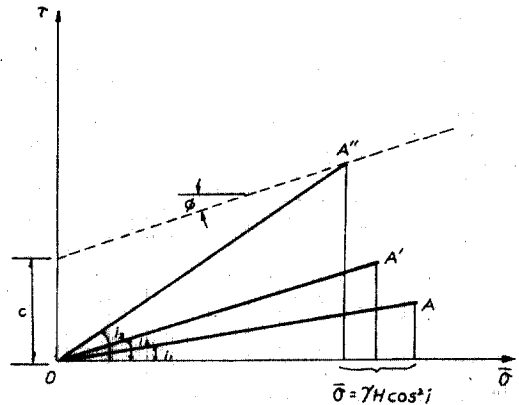


그림 4. Shear stress and shear strength

단응력은 사면의 경사각 i 에 따라 동 그림에 보인 실선과 같이 표시할 수 있다. 이때 i 가 내부마찰각 ϕ 보다 작거나 작으면 그 사면은 항상 안전하다. 그러나 동 그림에 보인대로 $i=i_s$ 일 경우에는, 사면의 깊이가 일정한 값보다 작으면 안전하지만 그보다 더 커지면 불안정하게 된다. 한편 점착력이 없는 흙($c=0$)에서는 사면의 경사각이 내부마찰각보다 클때 그 사면은 높이에 관계없이 불안정한 상태에 있게 되고 사면의 경사각 i 가 내부마찰각보다 작을 때에는 사면의 높이에 관계없이 안정하게 된다. 따라서, 점착력이 없는 흙의 사면안정해석에 있어서는 무한사면해석방법이 의미를 갖는다고 할 수 있다.

그림 4에서 보면 점 A''의 횡축 좌표값을 주는 H 에서 전단강도에 대한 안전률은 1이 될 것이고, 그때의 깊이를 H_c 라고 하면, 식(2)에 $FS=1$ 을 대입해서

$$H_c = \frac{\bar{c}}{\gamma \cos^2 i (\tan i - \tan \phi)}$$

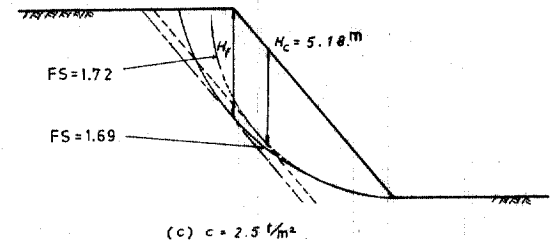
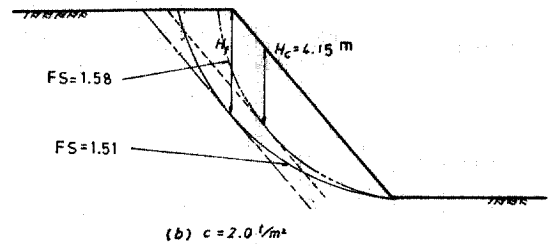
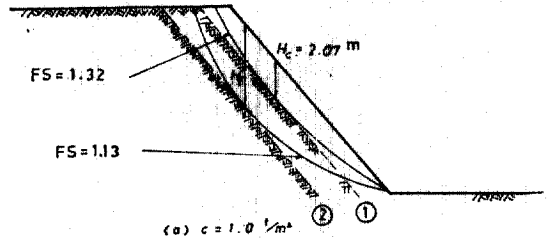
을 얻는다. 이때 구한 H_c 를 한계높이(the critical height)라고 하며 사면의 경사면에서 이 깊이까지는 안전률이 1보다 크고 이 깊이 아래에서는 안전률이 1보다 작다. 즉, 무한사면법에 의하면 암반층위에 위치한 흙의 두께가 H_c 보다 작으면 이 사면은 안정하고 그 흙의 두께가 H_c 보다 크면 불안정하다고 할 수 있다.

이상에서 설명한 무한사면법은 사용이 간편한 반면에 사면의 단영향을 무시하고 무한한 파괴면을 가정하는 등 대략적인 면이 있어서 그 적용 범위에 한계성을 내포하고 있다.

5. 사면 안정해석의 결과 및 비교

사면의 높이(H), 경사각(i), 사면흙의 점착력(c), 내부마찰각(ϕ), 그리고 단위중량(γ) 등 5개의 변수 중에서 사면 높이는 10m, 단위중량은 1.9 t/m^3 로 고정시키고 나머지 3개의 변수를 변화시키면서 앞에서 설정한 두 종류의 사면에 대하여 각각 유한사면법에 의한 안전률과 무한사면법에 의한 안전률을 구하여 비교하고자 한다.

각 변수의 변화에 따른 가상사면에 대한 유한사면법에 의한 원호파괴면과, 무한사면법에 의한 한계높이(H_c), 그리고 원호 파괴면의 파괴

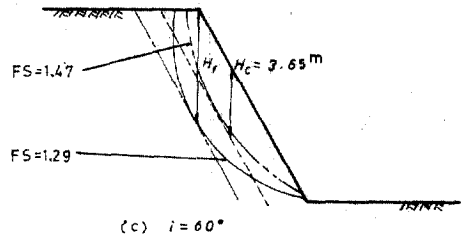
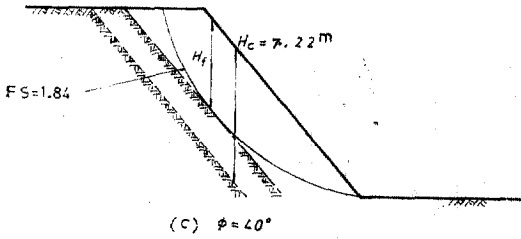
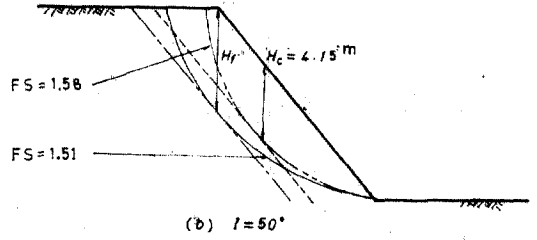
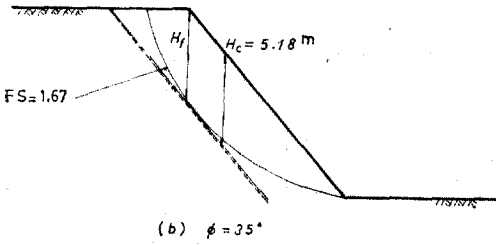
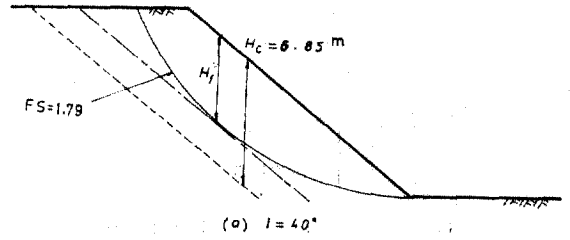
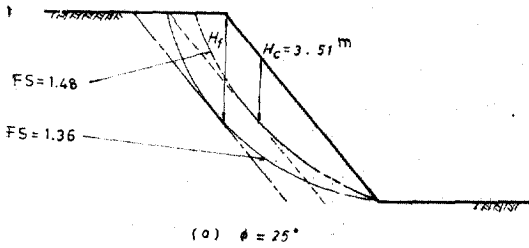


$$\begin{pmatrix} \phi = 30^\circ \\ \gamma = 1.9 \text{ t/m}^3 \\ i = 50^\circ \\ H = 10 \text{ m} \end{pmatrix}$$

그림 5. Variation by cohesion (c)

깊이(H_f)가 각각 그림 5.6,7에 나타나 있다. 동 그림에서 2점쇄선으로 나타낸 원호가 제 1 사면에서의 유한파괴면이고 점선그림 5(a)의 선 ①으로 표시한 것이 한계높이(H_c)에서의 무한파괴면이다. 또 제 2 사면에서의 유한 파괴면은 실선으로 나타내었고 이 파괴면에 접하는 경계면은 일점쇄선(그림 5(a)의 선 ②)으로 나타내었다.

그림 5.6,7에서 보면 무한사면법에 의한 안전률은 예상한 대로 유한사면법에 의한 안전률보다 항상 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 즉 그림 5



$$\begin{pmatrix} c = 2.0 \text{ t/m}^2 \\ \gamma = 1.9 \text{ t/m}^3 \\ i = 50^\circ \\ H = 10 \text{ m} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c = 2.0 \text{ t/m}^2 \\ \phi = 30^\circ \\ \gamma = 1.9 \text{ t/m}^3 \\ H = 10 \text{ m} \end{pmatrix}$$

그림 6. Variation by friction angle(ϕ)

그림 7. Variation by slope angle(i)

(a)를 예로 들면, 제 1 사면의 경우 표층의 깊이가 H_c 와 같으므로 무한사면법에 의한 안전율은 암반층과의 경계면에서 1.00인데 비하여, 동일한 사면에서 유한사면법에 의한 최소 안전율은 1.32다. 또 제 2 사면의 경우 유한사면법에 의한 최소 안전율이 1.13 인데 비하여 무한사면법에 의한 안전율은 경계면(그림 5 (a)의 선②)에서 0.73에 불과하다. 다시말해서 그림 5 (a) 사면의 경우 무한사면법에 의하면 표층의 깊이가 2.07 m 보다 깊어지면 불안정하고 제 2 사면과 같이 표층의 깊이가 4.35 m 가 되면 강도정수의 측정에 커다란 오차가 없는 한 필히 파괴

되어야 한다. 반면에 유한사면법에 의하면 동사면은 주어진 조건에서 안전하다. 또 그림 6(c)에서와 같이 원호파괴면이 한계높이(H_c)보다 높은 위치에 있는 경우에도 파괴깊이(H_f)에 따르는 면의 무한사면 안전율이 1.14인데 비하여 동 사면(제 2 사면)의 유한사면 안전율은 1.85이다. 이러한 경향들을 좀더 자세히 관찰하기 위하여 유한사면 안전율이 1인 경우와 파괴깊이가 한계 높이와 일치하는 경우, 그리고 한계 높이가 사면의 높이와 일치하는 경우 등에 대한 사면 안정해석 결과를 그림 8, 9, 10에 나타내었다. 동 그림들에서 보는 바와 같이 모든

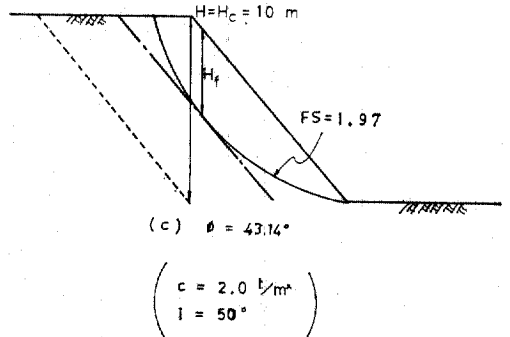
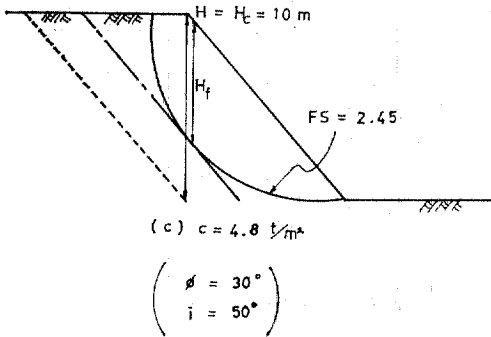
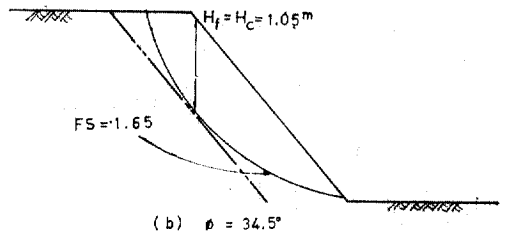
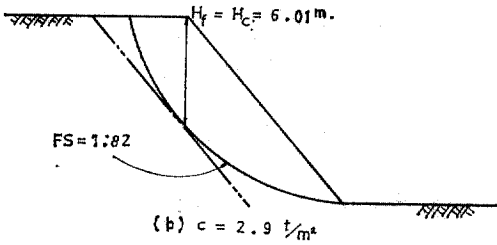
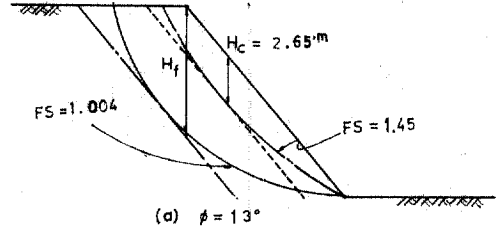
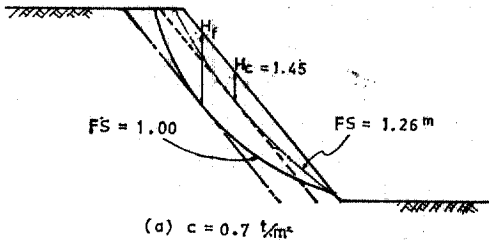


그림 8. Variation by cohesion(c)

그림 9. Variation by friction angle(phi)

경우에 있어서 무한 사면법에 의한 안전율은 유한사면법에 의한 안전율보다 항상 보수적인 값을 가진다.

이상의 결과들을 종합하여 표 1에 유한사면법과 무한사면법에 의한 안전율을 수록하였으며, 그림 11에는 본 연구에서 얻은 제 1사면에서의 안전율의 비(y 축)와 한계높이(H_c)에 대한 사면 높이의 비(x 축)를 표시하였다. 또 동 그림에는 각 데이터 점들의 $x-y$ 축에 대한 상관 관계를 대표하는 최적 곡선을 나타내었다. 동

최적 곡선은 최소 자승법(least square method)에 의하여 결정되었으며 곡선 관계식은

$$y = 1 + \frac{1.10}{x^{0.78}} \quad (3)$$

이다.

6. 토의 및 결론

그림 11에서 보면 한계높이(H_c)에 대한 사면 높이의 비(H/H_c)가 작을수록 무한사면 안전율에 대한 유한사면 안전율의 비는 커지고, 그 비

표 1. Factor of Safety from Slope Stability Analysis

$H = 10 \text{ m}, = 1.9 \text{ t/m}^3$

그림 No.	i deg.	c t/m^2	ϕ deg.	Slope No. 1		Slope No. 2	
				$H_c(H/H_c)$	circular	plane(H_f)	circular
5. a	50	1.0	30	2.07(4.83)	1.32	0.73(4.35)	1.13
	b	2.0	30	4.19(2.41)	1.58	0.87(5.60)	1.51
	c	2.5	30	5.18(1.93)	1.72	0.94(5.90)	1.69
6. a	50	2.0	25	3.51(2.85)	1.48	0.76(5.85)	1.36
	b	2.0	35	5.18(1.93)	1.67	1.01(5.10)	1.67
	c	2.0	40	7.22(1.39)	1.84	1.14(4.95)	1.84
7. a	40	2.0	30	6.85(1.46)	1.79	1.13(4.80)	1.79
	b	2.0	30	4.15(2.41)	1.58	0.87(5.50)	1.51
	c	2.0	30	3.65(2.74)	1.47	0.73(3.85)	1.00
8. a	50	0.7	30	1.45(6.90)	1.26	0.75(3.85)	1.00
	b	2.9	30	6.01(1.66)	1.82	0.93(6.01)	1.82
	c	4.8	30	10.0(1.00)	2.45	1.27(6.50)	2.45
9. a	50	2.0	13	2.65(3.77)	1.45	0.59(6.90)	1.00
	b	2.0	34.5	5.05(1.98)	1.65	1.10(5.05)	1.65
	c	2.0	43.14	10.0(1.00)	1.97	1.26(4.50)	1.97
10. a	75	2.0	30	4.98(2.01)	1.40	0.68(6.85)	1.00
	b	45	30	4.98(2.01)	1.64	1.00(4.98)	1.64
	c	36.5	30	10.0(1.00)	1.92	1.24(4.80)	1.92

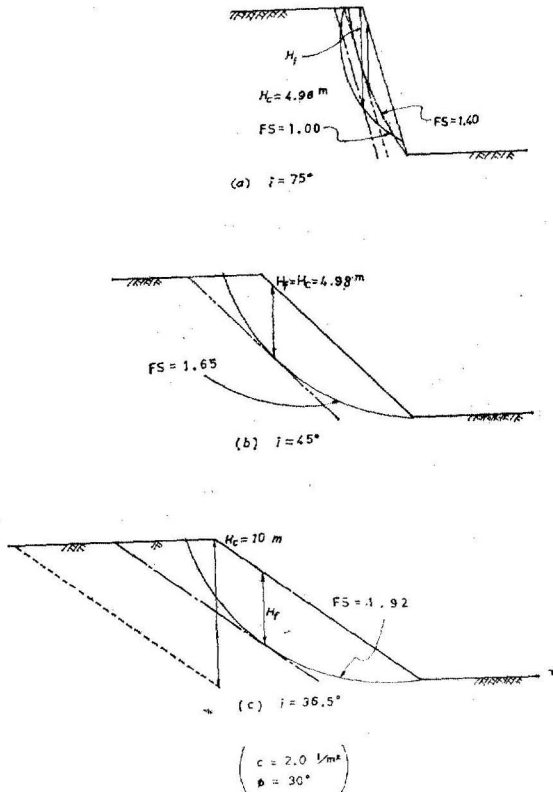


그림 10. Variation by slope angle(i)

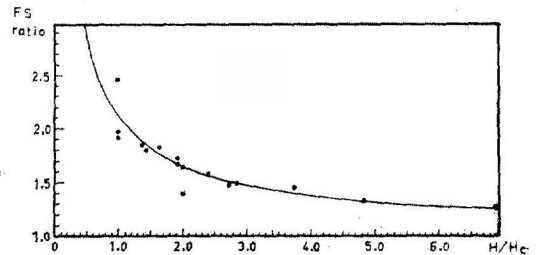


그림 11. H/H_c vs. FS-ratio relationship

(H/H_c)가 클수록 안전률의 비는 작아진다. 동 그림에 보인 최적 곡선은 안전률의 비가 1.20 일 때 H/H_c 가 8.90 임을 나타내는데, 이는 바꾸어 말하면 한계높이에 대한 사면높이의 비가 8.90 보다 크면 무한사면법에 의한 안전률은 유한사면법에 의한 안전률에 비하여 20% 이내의 오차를 갖는다고 할 수 있다.

따라서, 공학적 견지에서 안전한 쪽으로 20% 내외를 최대 허용오차라고 한다면 무한사면법을 적용할 수 있는 사면은 한계높이에 대한 사면높이의 비(H/H_c)가 대략 9보다 같거나 커야 한다고 판단된다.

후 기

본 연구는 1983년도 문교부 학술연구조성비의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 심심한 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. 정인준, 김상규, "토질역학", 동명사, 1978.
2. Taylor, D.W., "Fundamentals of Soil Mechanics", John Wiley & Sons, Inc., 1948.
3. Lambe, T.W., Whitman, R.V., "Soil Mechanics"

John Wiley & Sons, Inc., 1979.

4. Bowles, J.E., "Physical and Geotechnical Properties of Soils", McGraw-Hill, New York, 1979.
5. Hasselquist, S.J., Schiffman, R.L., "A Computer Program for Slope Stability: New York State and Simplified Bishop Method", Report No. 74-5 Computing Center, University of Colorado, Boulder, 1974.

(接授: 1984. 2. 29)