

斜面安定의 2次元解析과 土質定數에 關한 研究

(Study on Soil Parameters and Two
Dimensional Analysis in Slope Stability)

慶熙大學 經營大學院 講師 金 慶 鎮*
全州工業專門大學 專任講師 金 奎 文
前群山實業專門大學 助教授 朴 一 哲

Abstract

Earthen mass located beneath a sloping group surface, whether natural or man-made, have a tendency [to move downward and outward under the influence of gravity. Unless this tendency is suitably counteracted by the Shearing resistances within the mass, a landslide occurs. Avoiding such instabilities is a major concern of the geotechnical engineer. The shearing behavior of a soil is determined empirically, i.e., by field tests or laboratory tests. This results are applied to the slope stability analysis. The factor of safty for slope stability analysis is much more sensitive to the choice of strength Parameters as interpreted from soil tests than to the choice of the computational method of analysis.

This paper was investigated the influence of the change in the factor of safty due to a change in one of the parameters, relative to the total change in the factor of safty due to change in all parameters. A conclusion may be reached with respect to the required precision definition of the different variables to limit uncertainties in the factor of safty to tolerable levels.

I. 序 論

斜面安定解析方法에는 平衡方程式을 利用한 解法과 彈性理論이 通用한 解法, 確率統計的인 方法이 있으나 실제적으로 활용되고 있는 대부분은 平衡方程式으로 解析한 方法이다.

解析方法에 대한 研究는 Coulomb(1776年)가 흙을 摩擦的인 것으로 「解析」하면서 시작되었으려 1846年 Collin 이 粘土斜面에는 曲線的인 滑動에 근거가 있음¹⁾을 소개하면서 구체화되었다. Petterson(1916)은 摩擦圓法²⁾을 소개하였는데 이 方法은 Taylor³⁾와 Skempton(1907年, 1946年)에 의하여 더욱 발전되었다. 1926年

* 安全管理技術士(建設安全)

Fellenius는 內力(inter slice force)의 크기와 방향을 무시하고 圓形의 滑動面을 分割하여 解析⁶⁾하였다 Bishop(1955年)은 水平 및 垂直의 內力(Vertical and Horizontal Inter slice force)이 分割片에 作用한다고 假定한 解法⁶⁾을 개발하였으나 實際적으로 활용되고 있는 方法은 垂直의 內力을 零으로 假定하고 解析한 簡便式이다 Spencer는 內力의 合力方向을 결정하므로써 安全率을 計算하는 解法⁷⁾을 援示하였으며 Janbu(1954年, 1957年, 1973年)는 滑動面을 不規則하게 假定하여 實際活動에 접근된 方法을 研究⁶⁾하였고 Carter는 Bishop과 Janbu의 簡便式을 절충한 解法⁸⁾을 개발하였다. 이와 같은 解析 方法은 힘의 平衡方程式으로 解析한 方法으로써 土性에 관한 定數와 幾何定數들로 解析된다. 土性定數들은 同一한 試料라고 하더라도 試驗機具와 試驗者의 숙련도에 따라서 다르며 現場狀態와 同一한 條件으로 試料를 보존하고 試驗하기가 어려우므로 誤差가 발생된다. 이와같은 誤差는 解法에 적용되는 독립변수의 變化를 의미하므로 종속변수인 安全率도 변화하게 되어서 신뢰성 있는 分析을 할 수 없게된다.

이와 같은 단점을 보충하기 위하여 本研究에서는 幾何定數와 土質定數로 구성된 모델을 설정하고 定數의 크기에 따라 變化되는 安全率을 Carter의 解法으로 구하고 圖表化 하였으며 試驗時 발생되는 定數들의 變化가 斜面의 安全率에 미치는 影響을 分析하기 위해서 分析코자 하는 定數이외의 것은 일정한 값으로 고정하고 變化前後의 安全率 差異값을 求하여 定數와 安全率 相互變化關係를 比較分析하였다. 研究의 結果는 斜面安定解析의 設計 初期資料로 이용할 수 있으며 土質定數의 誤差와 安全率 變化關係가 圖表化되었기 때문에 斜面安定에 대한 신뢰성 있는 豫測資料가 될 것이다.

II. 適用 解法

定數와 安全率의 相互變化關係의 信賴性 있는 分析을 하기 위해서는 既存解法 中에서 精度가 높고 一般의인 條件의 斜面에 適用할 수 있는 解法이 선택 되어야 한다. Carter의 解法은 分

割片에 作用하는 垂直內力을 零으로 假定한 Bishop의 理論과 一般의인 條件의 斜面에 適用이 가능한 Janbu의 解法을 절충하여 平衡方程式으로 解析한 方法이다. 이 方法은 精度가 높으며 Bishop의 解法보다 약간 낮은 값을 나타내고 있어서 신중한 分析을 할 수 있고 計算過程이 간편하므로 本研究에 이용하였다.

1. Carter의 解法

Fig. 1에서 임의점 0에 대한全體모우멘트는 다음과 같다.

$$\int_0^x \Delta N'(\bar{y} \sin \alpha - \bar{x} \cos \alpha) + W\bar{x} - \Delta Sr$$

$$(\bar{x} \sin \alpha + \bar{y} \cos \alpha) = 0 \dots\dots\dots(1)$$

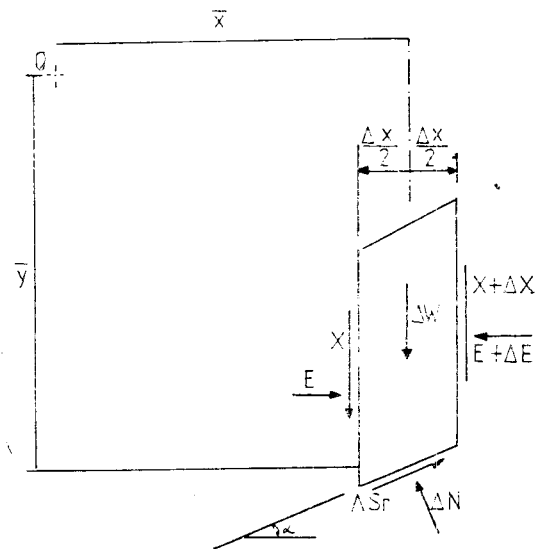


Fig. 1. Slice Forces to an Arbitrary Point.

여기에서

- Δx : 分割片의 幅
- α : 滑動面의 傾斜角
- ΔN : 有效 垂直力

分割片 底面에 작용하는 剪斷抵抗力 은 다음과 같다.

$$\Delta Sr = \frac{\Delta C' + \Delta N' \tan \phi'}{F} \dots\dots\dots(2)$$

分割片 底面에 작용하는 有效垂直力 ΔN'는

$$\Delta N' = \frac{W + \Delta x - \Delta C' \sin \alpha / F}{\cos(1 + \tan \phi' \tan \alpha / F)} \dots\dots\dots(3)$$

式(2), (3)을 式(1)에 代入하고 整理하면 다음과 같다.

$$\sum_1^n \bar{y} \frac{\Delta C' / \cos \alpha + \Delta W (\tan \phi' - F \tan \alpha)}{F + \tan \alpha \tan \phi'}$$

$$= \sum_1^n \bar{y} \Delta x \left[\frac{F \tan \alpha - \tan \phi'}{F + \tan \alpha \tan \phi'} - \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \right] \dots (4)$$

式(4)에 Bishop의 簡便式 假定 $\Delta x=0$ 를 適用하고 整理하면

$$\sum_1^n \bar{y} \frac{\Delta C' / \cos \alpha + \Delta W (\tan \phi' - F \tan \alpha)}{F + \tan \alpha \tan \phi'}$$

$$= 0 \dots (5)$$

\bar{y} 는 各分割片의 Y座標이며 無限大가 될 때 全體모우멘트를 만족한다. 따라서 各分割片의 \bar{y} 는 相對的으로 그 差異가 미소 하므로 式(5)는 式(6)이 된다.

$$\sum_1^n \frac{\Delta C' / \cos \alpha + \Delta W (\tan \phi' - F \tan \alpha)}{F + \tan \alpha \tan \phi'}$$

$$= 0 \dots (6)$$

式(6)이 Carter의 方程式이다.

III. 모델의 設定

本研究에서는 모델을 斜面의 높이와 傾斜角, 흙의 單位重量과 粘着力 및 摩擦角으로 하였다. 斜面의 높이는 30m로 固定하고 斜面의 傾斜角(β)은 90° (垂直), 63.4° (1/0.5), 45° (1/1), 26.6° (1/2), 18.4° (1/3)로 하였다. 흙의 單位重量은 $1.6t/m^3$, 粘着力은 $4 \sim 15t/m^2$ 摩擦角은 $0^\circ \sim 50^\circ$ 인 均質土이다.

IV. 分析方法

定數(x^i)의 變化量(Δx^i)으로 인하여 발생되는 安全率의 變化量 $\Delta F(\Delta x^i)$ 를 구하기 위해서는 해당 定數 以外の 定數는 一定한 값으로 固定하고 $x + \Delta x^i$ 에 대한 $F(x + \Delta x^i)$ 를 計算한다. $\Delta F(\Delta x^i)$ 는 $F(x + \Delta x^i)$ 와 $F(x^i)$ 의 差로부터 구하며 Δx^i 와 $\Delta F(\Delta x^i)$ 의 관계는 Fig. 7~13에 나타난 바와같이 2次元의인 表現을 하였다. 結果를 간편하게 表現하기 위하여 粘着力과 單位重量 및 斜面의 높이를 安定數($c'/\gamma h$)로 表現하면 分析해야 할 定數는 $c'/\gamma h, \beta, \phi$ 이다. 定數의 變化範圍는 統計學的인 誤差檢定方法에 의하여

결정하는 것이 일반적이나 本研究에서는 美國道路局에서 제시한 資料(摩擦角 5° , 粘着力 20%)

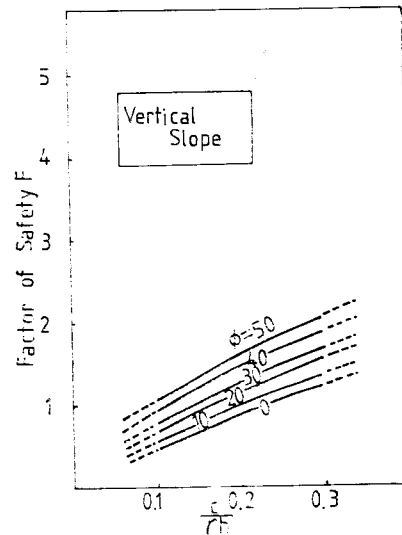


Fig. 2. Fator of Safety for Vertical Slope.

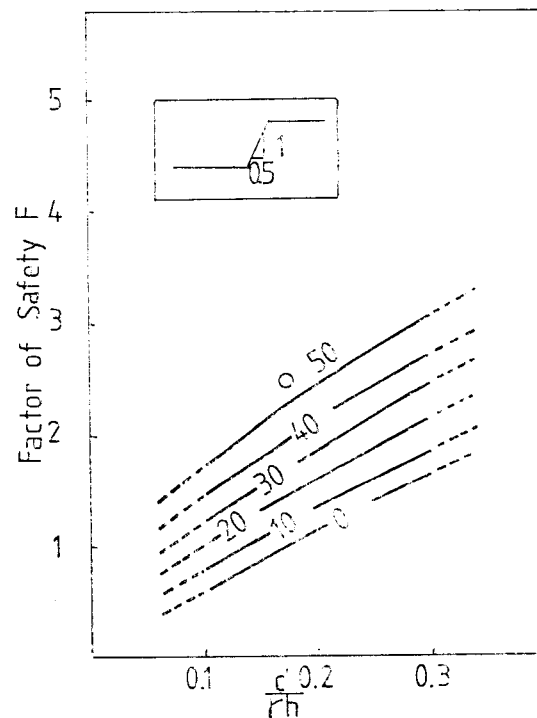


Fig. 3. Factor of Safety for Slope 1/0.5.

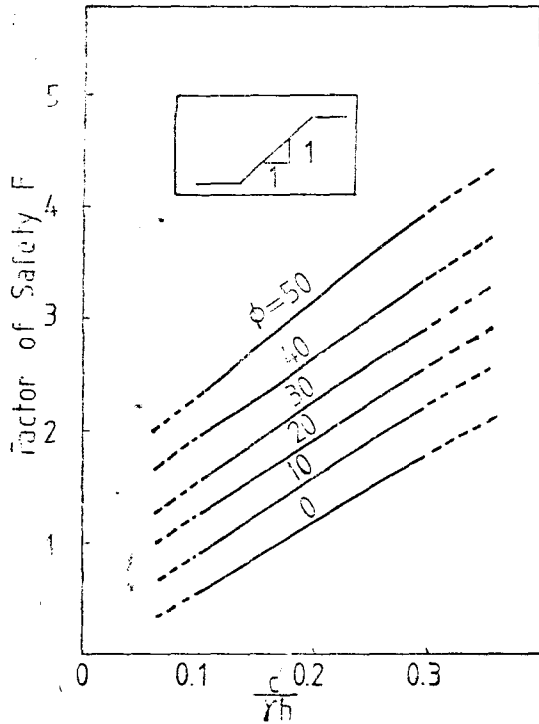


Fig. 4. Factor of Safety for Slope 1/1.

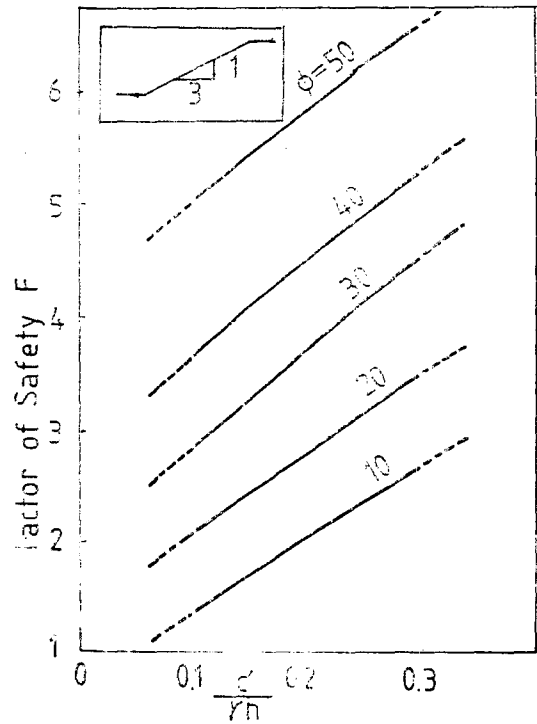


Fig. 6. Factor of Safety for Slope 1/3.

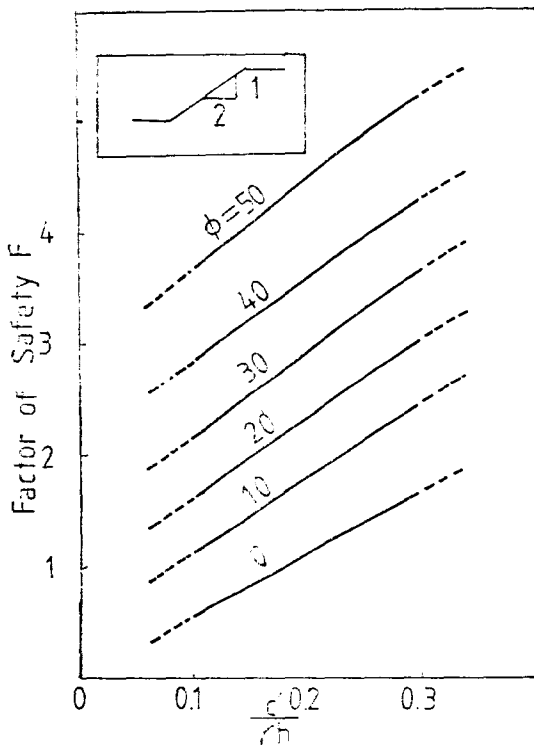


Fig. 5. Factor of Safety for Slope 1/2.

單位重量 5%, 斜面的 水平距離 및 높이 5%)를 이용하였다. 斜面的 傾斜變化率($\Delta \cot \beta / \cot \beta$)은 斜面的 높이와 水平距離에 의하여 결정되므로 合成하여 計算하면

$$\begin{aligned} \cot \beta &= \frac{b - \Delta b}{h + \Delta h} = \frac{b}{h} = \frac{b - 0.05b}{h + 0.05h} = \frac{b}{h} \\ &= -0.1 \frac{b}{h} = -0.1 \cot \beta \end{aligned}$$

따라서 $\frac{\Delta \cot \beta}{\cot \beta} = -0.10$, (-10%).

$\frac{\Delta h}{c}$, $\frac{\Delta h}{h}$, $\frac{\Delta \gamma}{\gamma}$ 를 合成하여 安定係數와 變化率을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \left(\frac{c'}{\gamma h} \right) &= \frac{c'}{\gamma h} \left(\frac{1 - 0.2}{1.05^2} - 1 \right) \\ &= -0.274 \frac{c'}{\gamma h}, (-27\%) \end{aligned}$$

粘着力 20%와 斜面的 높이 및 水平距離의 5% 變化에 대한 安定係數의 變化率은 -30% 보다 적은 -27%이었고 斜面傾斜에 대한 變化率은 -10%로 계산되었다. 斜面的 傾斜과 安定係數

變化量이 陰數인 경우 安全率은 감소하며 陽數 일 때에는 증가한다. 모든 定數의 變化가 安全率감소에 영향을 나타내지는 않으나 設計時에는 가장 위험한 局面이 고려되어야 하므로 本研究에서는 安全率 감소에 대한 定數 變化만을 고려하였다.

V. 計算結果 및 考察

本研究에 이용된 土質 및 幾何모델에 대한 安全率은 Table 1에 나타난 바와 같다. Fig. 2~6은 Table.1의 資料를 傾斜角別로 圖表化한 것이며 이 資料는 單純斜面의 設計時 安定數($c'/\gamma h$)가 0.1에서 0.3범위내에 있을 경우에는 斜面의 높이 傾斜角등의 斷面決定에 이용할 수 있다. 斜面의 安全率은 Fig.7,8에 나타난 바와 같이

Table. 1. Factors of Safty for Homogenpous Slopes.

$\frac{c'}{\gamma h}$	$\cot \beta$					
	ϕ'	0	0.5	1.0	2.0	3.0
0.1	0					0.757
	10		0.787	0.936	1.152	1.388
	20	0.677	0.987	1.210	1.618	2.087
	30	0.792	1.196	1.534	2.184	2.871
	40	0.915	1.431	1.883	2.808	3.806
	50	1.057	1.719	2.331	3.642	5.011
0.2	0	0.801	1.088	1.106	1.129	1.143
	10	0.967	1.347	1.575	1.817	2.039
	20	1.120	1.577	1.891	2.366	2.819
	30	1.264	1.818	2.230	2.928	3.620
	40	1.598	2.426	3.115	4.519	4.582
	50	1.598	2.426	3.115	4.519	5.879
0.3	0	1.202	1.633	1.658	1.707	1.714
	10	1.368	1.886	2.232	2.437	2.674
	20	1.521	2.144	2.541	3.024	3.490
	30	1.683	2.406	2.888	3.631	4.354
	40	1.860	2.701	3.303	4.327	5.331
	50	2.075	3.066	3.901	5.232	6.627

傾斜가 완만한 斜面이 土質 및 幾何定數의 變化에 대해서 銳敏하였다. 安定係數의 變化量($\Delta c'/\gamma h$)에 대한 安全率 變化量(ΔF)은 傾斜角(β)의 크기에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있으며 45° 이상에서 더욱 분명하였다.

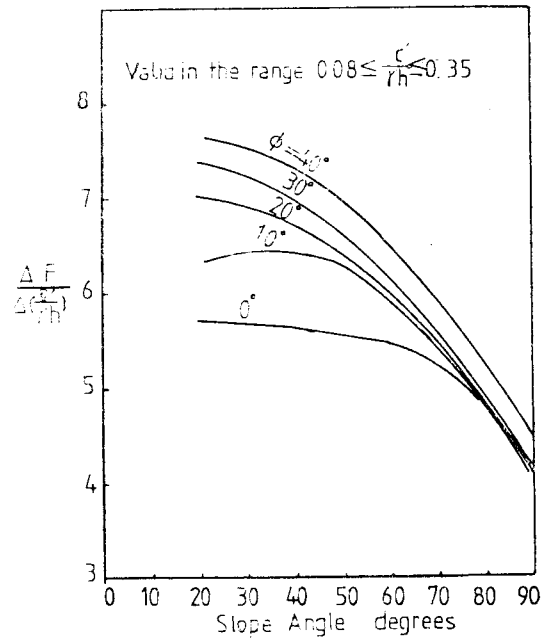


Fig. 7. $\frac{\Delta F}{\Delta\left(\frac{c'}{\gamma h}\right)}$ VS. Slope Angle β for Various ϕ' .

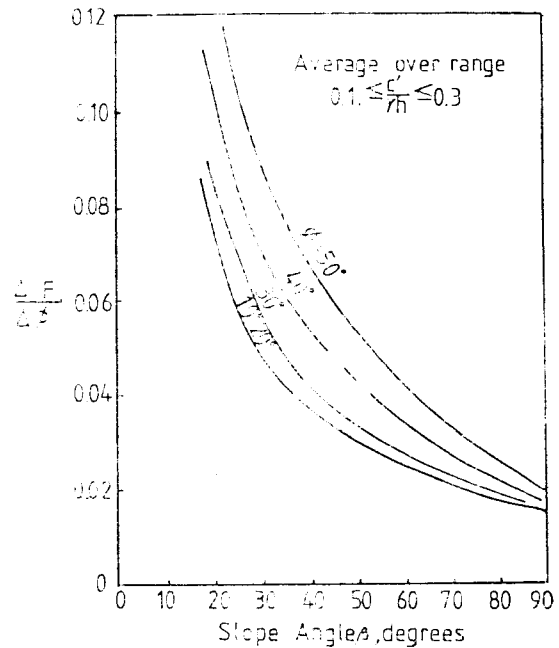


Fig. 8. $\frac{\Delta F}{\Delta\phi}$ VS Slope Angles β for Variou ϕ'

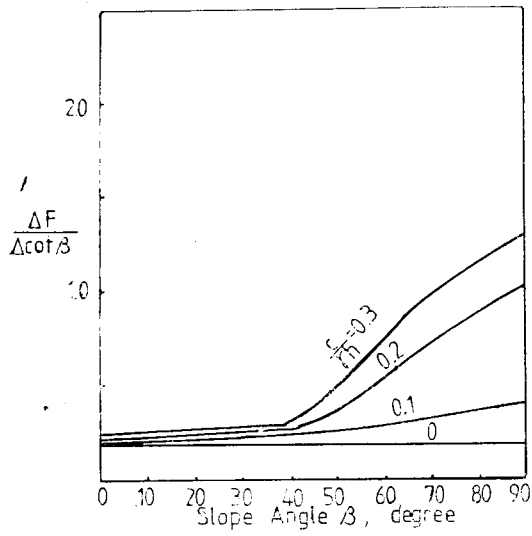


Fig. 9. $\frac{\Delta F}{\Delta \cot \beta}$ VS. β for $\phi' = 10^\circ$.

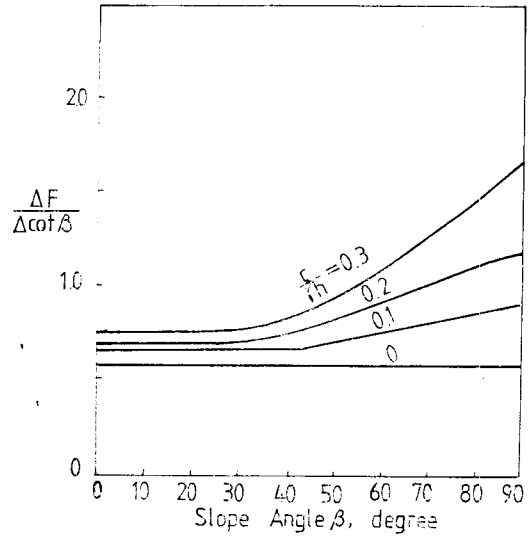


Fig. 11. $\Delta F \Delta \cot \phi = 30^\circ$.

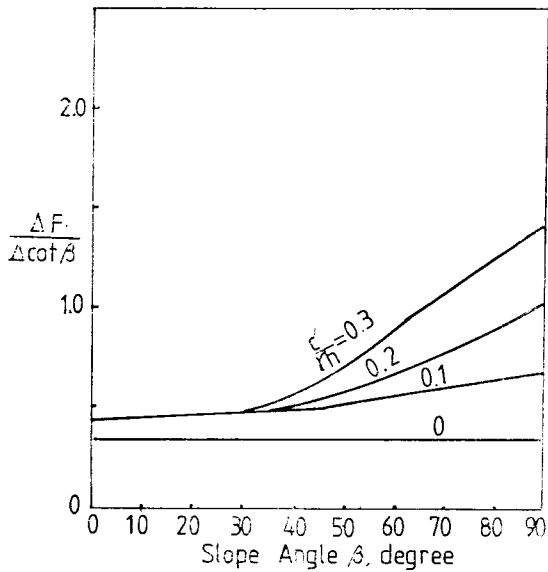


Fig. 10. $\frac{\Delta F}{\Delta \cot \beta}$ VS. β for $\phi' = 20^\circ$.

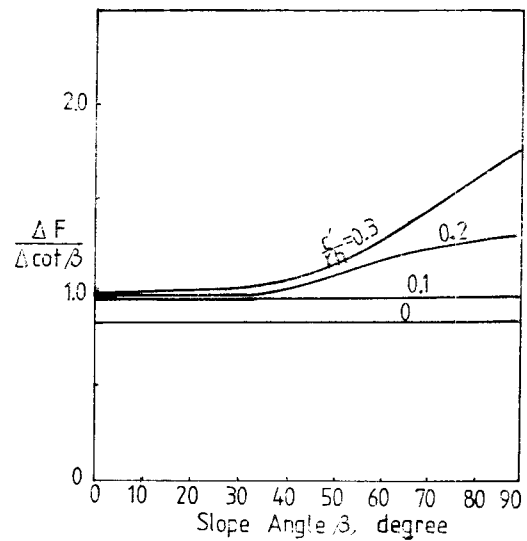


Fig. 12. $\frac{\Delta F}{\Delta \cot \beta}$ VS. β for $\phi' = 40^\circ$.

摩擦角에 대한 안전률의 변화량($\Delta F/\Delta \phi$)은 傾斜角의 크기에 反하여 감소하였으며 $45^\circ \sim 50^\circ$ 를 경계로 감소비율은 낮아진다. Fig. 8과 Fig. 10은 幾何定數($\cot \beta$)와 안전률과의 관계를 나타내고 있다. 안전係數가 0.1보다 크고 傾斜

角이 45° 보다 완만한 斜面에서의 $\Delta F/\Delta \cot \beta$ 는 안전係數의 영향이 적고 摩擦角의 크기에 따라 증가하였으며 45° 이상에서 더욱 큰 증가를 나타내었다.

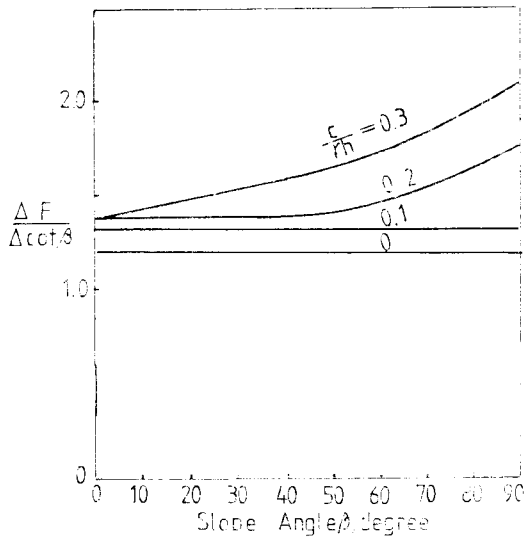


Fig. 13. $\frac{\Delta F}{\Delta \cot \beta}$ VS. β for $\phi' = 50^\circ$.

V. 結 論

斜面の安定解析에 이용되는 定數의 變化量이 安定率에 미치는 影響을 分析한 結果 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

1. 土質定數인 摩擦角과 粘着力은 斜面の 傾斜가 相對적으로 완만한 경우 安全率에 더 큰 影響을 미친다.

2. 安定係數가 0.1 보다 크고 傾斜角이 45° 보다 완만한 斜面에서의 傾斜角과 安全率과의 變化比는 安定係數의 影響이 적고 摩擦角의 크기에 따라 증가하였으며 45° 이상에서 더욱 큰 증가를 나타내었다.

(References)

1. Coulomb, C.A. "Essai sur une dpplication des regles des maximis et minimis a quelques pro

blemes de sdatique" Memories Academies Royale des Sciencer, Vol. 7 Paris, 1776.

2. Collin, A. "Landslide in clay" Translated by W.R. Schriever University of Toronto Pres, 1846.
3. Petterson, K.E. "Kajraset Gotebarg den Mars 1916", Teknisk Tids Krift, Vol. 46, 1916. pp. 281~287, 289~291.
4. Taylor, D. W. "Stability of Earth Slopes", Centributions to Soil Mechanics 1925~1940, Boston Society of Civil Engineers, Boston. 1937.
5. Fellenius, W. "Erastatische Berechnungen mit Reibung und Kohasion" Ernst und Sohn Berlin. 1926.
6. Bishop, A.W. "The use of the slip Circle in the Stability Analysis of slopes", Geotechnique, Vol. 5, No.1 pp.7~17. 1955.
7. Spencer, E. "A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-slice Forcer," Geotechnique, Vol. 17, No.1, 1967. pp.11~26.
8. Janbu, N. "Stability Analysis of Slice With Dimensionless Parameters," Harvard soil Mechanics Series, No. 46. 1954.
 "Earth Pressures and Bearing Capacity Calculations by Generalized Procedure of Slices", Proceedings of the Fourth Indernational Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol. 2, pp.207~212, 1957.
 "Slope Stability Computations" Embankment-Dam Engineering, R.C. Hirschfeld and S.J. Poulos, ed, Casagrande Volume, John Wiley & Sons, New York pp.47~86, 1973.
9. Cater, R.K. "Computer Oriented Slope stability Analysis by Method of Slices" MSCE Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana. 1971.