

斜面の安定解析에 관한 研究

Stability Analysis of the Slopes

姜 义 默* · 趙 成 燮* · 池 仁 澤*
Kang, Yea Mook · Cho, Seong Seup · Chee, In Taeg

Summary

The paper compared the Bishop method to the Fellenius method in the analysis of slope stability. Laboratory model test was carried out in the case of seepage flow considered.

The results obtained from this study were summarized as follows :

1. The slice pieces of 10 were enough to analysis the slope stability.
2. The safety factor by the Fellenius method was lower than the Bishop method by the 96 to 97% in the case of no seepage flow and by the 95 to 96% in the case of seepage flow considered.
3. Besides the parameter of soil and slope, the safety factor of slope was influenced by the height of slope. This phenomena was distinct in the height of slope less than 10 meters.
4. In the case of clay, there was no difference in the safety factor of slope between Fellenius and Bishop method. The safety factors of slope with the seepage flow considered were lower than those with no seepage flow.
5. The influence of cohesion on the safety factor was more significant in the Bishop method than in the Fellenius method.
6. The slope failure of model test of A and B soil samples with high permeability coefficient was taken place slightly in vicinity of toe by the concentration of stress and gradually increased.
7. Under condition of same slope height, the shapper the slope, the shorter the radius and the center of critical circle appered downward and finally failure of slope occured inside the slope.

I. 緒 論

夏節期的 豪雨時에 自然斜面에서의 山沙汰와 切盛土斜面的 崩壞等으로 因한 災害가 每年 增加되고 있는바 그의 理由로서는 最近 氣象狀況의 變化에 의한것도 있고 또 建設裝備의 開發과

더불어 活潑히 進行되고 있는 國土開發事業이 山間地까지도 地勢의 形質을 變更해서 被害對象 區域이 增加한데도 原因이 있다고 할수 있다.

傾斜面은 自然斜面과 人工斜面으로 分類되고 또 人工斜面은 盛土斜面과 切土斜面으로 區分된다. 盛土斜面은 盛土後 時間이 經過함에 따라서

* 忠南大學校 農科大學

強度定數는 一般的으로 增加하는것이 通例이나 切土斜面은 切土後 時間이 經過함에 따라서 風化等에 의해서 二次的인 強度變化를 일으켜서 斜面自體의 強度가 低下하는 例가 많다.

斜面은 雨期の 浸透水에 의해서 흙의 單位重量이 增加하고 또 含水量의 增加로 因하여 内部 摩擦角과 粘着力은 減少하므로 崩壞를 일으키려는 힘은 增加하고 抵抗하려는 힘은 減少하여 破壞하게 된다.

破壞를 일으키는 剪斷應力에 該當되는 土塊의 힘은 比較的 容易하게 求할수 있으나 抵抗力은 흙의 剪斷試驗을 해서 求하는 것으로 空隙水壓, 흙의 不均一性, 試料採取時의 攪亂, 試驗의 精密度等에 따라서 달라지기 때문에 斜面的 安定解析에서는 解析方法보다는 強度定數의 採擇이 結果에 더욱 큰 影響을 미치고 있음을 알수 있다.

斜面的 安定解析은 過去에는 全應力解析法($\phi = 0$ 解析法)이 使用되어왔으나^{11, 13, 14)} 이 方法에서는 흙의 剪斷強度는 Vane剪斷試驗이나 一軸壓縮試驗 또는 非排水剪斷試驗等에 의하여 決定하는 것으로 盛土나 切土에서와 같이 載荷條件이 變하여도 剪斷強度가 一定하다는 假定을 하고 있다. 그러나 剪斷強度는 載荷나 除荷의 影響을 받기 때문에 全應力法은 載荷條件이 있는直後의 短期間에 限하게되고²⁾ 載荷條件의 變化에 의한 影響을 考慮하는 有效應力解析法(c, ϕ 解析法)이 長期間에 걸친 安定解析에 適用되고 있다. 이 方

法에서 使用되는 強度定數는 壓密非排水剪斷試驗에 의하여 求한 有效應力으로 表示되는 粘着力 c' 와 内部摩擦角 ϕ' 를 使用한다.

有效應力解析法에서는 Fellenius法, Bishop法, Janbu法, Spencer法等이 提案되고 있으나 이들 中에서 Fellenius法, 簡易 Bishop法 및 Spencer法은 圓弧滑動面을 假定하였고 Janbu法은 非圓弧滑動面을 假定하고 있다.^{17, 12)} 또 分割片側面에 作用하는 內力의 合力(ΔQ)의 方向이 Fellenius法에서는 滑動面에 平行, 簡易 Bishop法과 Janbu法에서는 水平, Spencer法에서는 水平面에서 δ 만큼 傾斜져 있는것으로 假定하고 있다. 또 土塊全體에 對한 平衡條件은 Table-1과같이 假定하고 있다.¹⁷⁾

以上 論한 安定解析은 二次元平面에서 斜面的 安定計算에 對한 것이다. 그러나 實際의 斜面地形이나 滑動面이 三次元形狀을 하고 있기 때문에 最近 斜面安定解析方法에는 三次元安定計算法이 提案되고 있다. 우리나라에서는 그동안 大部分이 Fellenius法을 適用해서 斜面的 安定檢討를 해왔으나 現在는 Bishop法等이 實用化 段階에 놓이게 되는 것으로 생각된다.

따라서 本 研究에서는 그동안 많이 使用되어 왔던 Fellenius法과 Bishop法에 의한 解析結果를 比較檢討하고 浸透水を 考慮한 경우의 斜面的 崩壞形態와 浸出面의 水位變化 및 斜面₁₎에서 等分布荷重이 作用할 경우의 斜面崩壞等을 檢討하

Table-1. Assumptions of Slice method.

Method	Direction of ΔQ	Equilibrium of total soil slices		
		Horizontal forces	Normal forces	Moment
Fellenius Method	Parallel to the slide plane	×	×	○
Simplified Bishop Method	Horizontal direction	×	○	○
Simplified Janbu Method	"	○	○	×
Spencer Method	Angle of δ to the horizontal direction	○	○	○

기 爲한 室内模型試驗을 하고 解析結果와 比較 檢討하였다.

II. 安定解析

斜面的 安定解析法에서는 不靜定의 問題를 解決하기 爲하여 各分割帶片에 作用하는 힘과 이 힘이 作用하는 着力點의 位置等에 對하여 獨自의 假定을 하고 있으나 未知數와 條件式의 數가 一致하지 않고 있다. 따라서 이 不靜定問題를 處理하는데는 未知數를 줄여서 靜定問題로 만들기 爲하여 假定을 試圖하지 않으면 안된다.

一般 分割法에서 未知數로, 考慮되는것은 分割片數를 n 個로 하면 滑動面上에 剪斷應力과 有效垂直應力(各 n 個), 不靜定內力의 水平合力과 鉛直合力(各 $n-1$ 個), 任意點과 不靜定內力의 着力點과의 距離($n-1$ 個), 安全率(1個)의 總和는 $(5n-2)$ 이다. 이에 對한 條件式은 鉛直方向力의 平衡式(n 個), 水平方向力의 平衡式(n 個) 및 任意點에 對한 moment의 平衡式(n 個)等 各 分割片에 對해서 考慮되는 總數는 $3n$ 個로 된다.

따라서 이 條件式의 不足數($2n-2$)個를 補充하기 爲해서 各 計算法에서는 附加條件을 設定하고 있다.

分割片의 底面에 作用하는 有效垂直應力의 作用位置는 分割片의 中央點(또는 中心)이라고 假定해도 큰 誤差는 일어나지 않는다. 特히 分割片의 數를 많게해서 分割片의 幅이 좁을수록 誤差는 減少한다.^{9, 4)} 이 假定에 의해서 n 個의 未知數가 除去되고 $n-2$ 次의 不靜定問題로 된다. 또 分割片의 側面에 作用하는 垂直應力과 剪斷應力의 合力이 水平과 이루는 傾斜角이나 그의 作用點까지의 距離를 假定하므로써 $(n-1)$ 個의 未知數가 減少되어 未知數의 數는 方程式의 數보다 1個 더 작은것으로 된다.

圓弧滑動面上的의 土塊를 鉛直線에 의하여 分割하고 그 中 1個의 分割片에서 作用하는 힘은 Fig. 1(b)와 같이 나타낼수 있다.

여기서

R : 滑動圓의 반지름

X : 滑動圓의 中心에서 分割片中心까지의

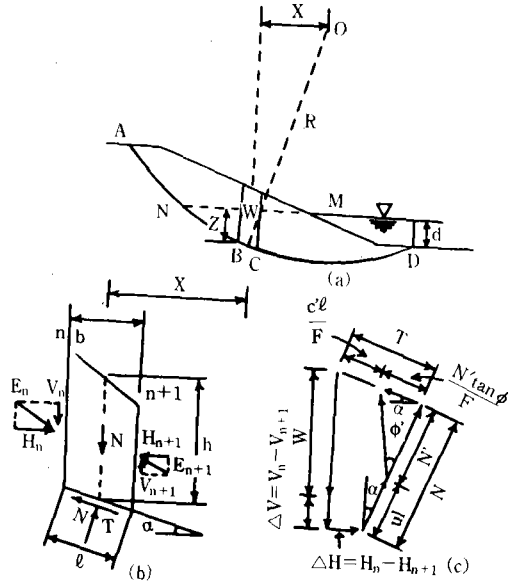


Fig. 1. Forces in the Bishop method.

水平距離

E_n, E_{n+1} : 分割片 $n, n+1$ 에 作用하는 土壓

V_n, V_{n+1} : 힘 E의 鉛直方向分力

H_n, H_{n+1} : 힘 E의 水平方向分力

N : 滑動面에 垂直인 힘

b : 分割片의 幅

α : 水平에 對한 滑動面의 傾斜角

c' : 粘着力(有效應力表示)

W : 土塊의 무게

T : 滑動面에 作用하는 剪斷力

h : 分割片의 높이

l : 滑動面의 길이

u : 空隙水壓

ϕ' : 剪斷抵抗角(有效應力表示)

滑動面 全體로서의 限界平衡條件에서의 安全率은 다음과 같이 表示된다.

$$F_m = \frac{R \sum (c' \ell + N' \tan \phi')}{\sum W \cdot X} \dots \dots \dots (1)$$

$X = R \sin \alpha$ 로 놓으면 (2) 식이 된다.

$$F_m = \frac{\sum (c' \ell + N' \tan \phi')}{\sum W \cdot \sin \alpha} \dots \dots \dots (2)$$

1. Fellenius 法

Fig 1(b)에서 各 分割片 側面에서 作用하는 側力 $E_n = E_{n+1}$ 이 滑動面과 平行으로 作用하고 $E_n = E_{n+1}$ 이라고 假定하고 滑動面과 垂直方向의 힘에 平衡을 考慮하면 有效垂直力은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W \cos \alpha &= N = N' + ul \\ N' &= W \cos \alpha - ul \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式을 (2)式에 代入하면 安全率(F_m)은 다음과 같다.

$$F_m = \frac{\sum \{c' \ell + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi'\}}{\sum W \sin \alpha} \dots\dots\dots (4)$$

空隙水壓 $u=0$ 일 때는 全應力解析의 경우는 c', ϕ' 代身에 C_u, ϕ_u 를 使用하고 $\phi_u = 0$ 이면 安全率은 다음과 같이 된다.

$$F_m = \frac{\sum C_u \cdot \ell}{\sum W \sin \alpha} \dots\dots\dots (5)$$

2. Bishop 法

Fig 1(b)에서 鉛直方向力의 平衡에서 上向力을 正으로하고 下向力을 負로 생각하면 N' 는 다음과 같다.

$$N' = \frac{W + V_n - V_{n+1} - \ell(u \cos \alpha + \frac{c'}{F} \sin \alpha)}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi' \sin \alpha}{F}} \dots\dots\dots (6)$$

(6)의 N' 를 (2)에 代入하면 다음과 같다.

$$F_m = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \left\{ \left[c' \ell \cos \alpha + (W + V_n - V_{n+1} - ul \cos \alpha) \tan \phi' \right] \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F}} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 $V_n - V_{n+1} = 0$ 으로 假定해서 平衡條件을 생각하면 簡易法 또는 修正法이라고 한다.

$$F_m = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \left\{ \left[c' \ell \cos \alpha + (W - ul \cos \alpha) \tan \phi' \right] \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F}} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

Bishop의 式에서는 左右兩邊에 F 를 包含하고 있어서 假定한 任意的 滑動圓에 對해서 繼續해서 $\Delta F \leq |0.01|$ 로 될때까지 반복해서 계산한다. 또 어느 滑動面에 對한 安全率이 求해지면 다른 滑動面을 選定해서 最小安全率이 얻어지는 臨界圓이 될때까지 繼續한다.

Bishop³⁾의 簡便法에서는 分割片側面에서 作用하는 鉛直力을 無視하고 있으나 이 方法으로 求한 安全率은 嚴密解와 아주 近似한 값을 나타낸다고 하였다.¹⁴⁾

이 式에서는 強度를 有效應力으로 表示하고 있으나 全應力法에서는 c', ϕ' 代身에 C_u, ϕ_u 를 代 入하고 空隙水壓 $u=0$ 이면 安全率은 空隙水壓의 影響을 받지 않고 (5)式과 같이 된다.

III. 材料 및 試驗方法

本 試驗에 使用된 材料는 砂質土(A), 花崗岩質 風化土(B) 및 粘性土(C)의 3種類로서 그의 物

Table-2. Physical properties of soil used.

Sample No	Specific Gravity (Gs)	Mech. Analysis			Unif. coeff. (cu)	LL (%)	PL (%)	Soil Class.	OMC (%)	MDD (g/cm ³)	Coeff. of perm k (cm/sec)	Direct shear test		Direct shear test (submersed)	
		2.00-0.05mm (%)	0.05-0.005mm (%)	<0.005mm (%)								C (kg/cm ²)	φ (°)	C (kg/cm ²)	φ (°)
A	2.636	100	-	-	2.05	NP	NP	Sand	3.9	1.592	1.39×10 ⁻²	0.04	34	0.084	29
B	2.670	88	10	2	7.87	NP	NP	Sand	14	1.688	5×10 ⁻⁴	0.084	29	0.037	29
C	2.653	73	14	13	133.33	27.8	13.2	Sand loam	16	1.814	3×10 ⁻⁵	0.09	42	0.040	31

理的 및 力學的 性質은 Table-2와 같고 粒度分布는 Fig. 2와 같다. 단 透水係數와 剪斷強度는 模型試驗과 같은 密度에서 測定하였다.

1. 盛土斜面的 模型試驗

盛土斜面的 破壞에 對한 模型試驗을 하기 爲한 實驗土塊는 Fig. 3과 같이 가로 175cm, 세로 40cm, 높이 78cm로 하여 두께 10mm의 透明아크릴板으로 製作하고 앵글로 補強하였다. 土槽밖으로 연결하여 水位의 變化를 測定하였다.

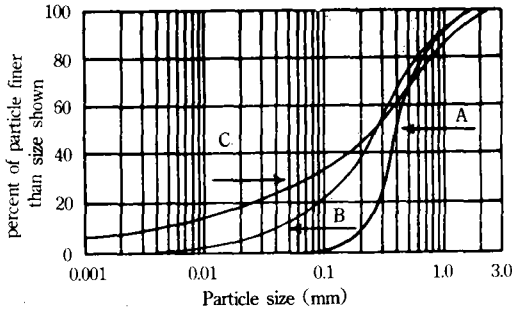


Fig. 2. Grain Size distribution curves.

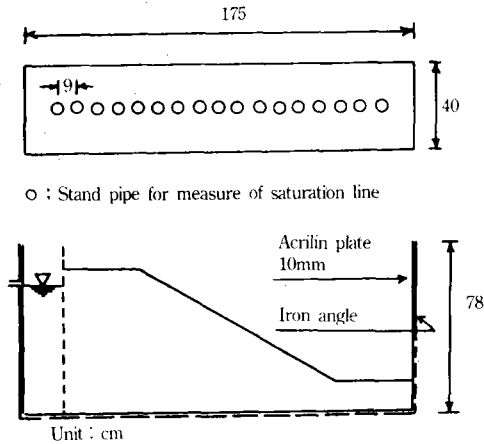


Fig. 3. Schematic diagram of model test for slope stability.

模型試驗을 爲한 盛土斜面的 築造方法은 土槽속에 흙을 均一하게 넣고 한층의 다짐두께를 10cm程度로하고 다짐含水比는 最適含水比로 調節해서 다진 後의 密度가 Table-3과 같다.

盛土斜面은 試料를 넣어서 다진後에 所定의

Table-3. Results of compaction in model test

Sample No	O. M. C (%)	Wet density (g/cm ³)	Dry density (g/cm ³)	Degree of Compaction (%)
A	3.9	1.460	1.405	88.3
B	14	1.623	1.424	84.4
C	16	1.813	1.563	86.2

傾斜面이 되도록 切取해서 만들었다. 또한 盛土斜面的 浸透水面을 調節하기 爲하여 盛土斜面的 上流와 下流의 水位를 一定한 水位로 유지할수 있도록 만들었다. 土槽속에 各各 3種類의 試料로 만든 斜面에 對하여 浸透수가 없는 경우에 斜面 肩에 等分布荷重이 作用했을때 斜面의 崩壞에 關한 實驗을 傾斜別로 實施하였다. 또 浸透流가 있을때 浸潤面의 時間的變化 및 斜面의 崩壞에 對한 實驗을 傾斜別로 實施하였다.

2. 斜面의 安定解析

分割法을 利用하여 斜面安定解析을 할때는 가장 適合한 安全率을 신속하게 求하는것이 重要하다. 그러나 가장 理想的인 安全率을 求하는것은 分割片의 數를 크게 하는것이 바람직하나 所 要되는 時間이 길어진다. 따라서 斜面安定解析에서 가장 適合한 分割數를 求하기 爲해서 分割片의 數와 安全率과의 關係를 檢討하였다. 또 斜面의 傾斜와 土質定數를 一定한 값으로 取했을때 斜面의 높이와 安全率과의 關係를 檢討하여 本 研究의 斜面安定解析에 採擇할 斷面을 決定하였다. 여기서 採擇한 斜面安定解析方法은 Bishop法과 Fellenius法으로서 浸透流가 있는 경우와 없는경우의 盛土斜面에 對하여 安全率을 求해서 比較해보았다. 또 여러가지 기울기를 갖는 盛土斜面에서 等分布荷重을 增加시키므로써 崩壞가 일어날때의 荷重과 崩壞의 形態를 模型試驗으로 實測하고 理論値와 比較하였다.

IV. 結果 및 考察

1. 分割片의 數와 安全率과의 關係

Fig. 4는 傾斜角이 30°이고 斜面의 높이를 22.8m(模型斷面의 40倍)로 固定하고 土質定數(c, φ)

를 變化시키면서 分割片의 數와 安全率과의 關係를 浸透流가 있는 경우와 없는 경우를 같이 나타낸것이다. 分割片의 數가 5에서 10으로 增加함에 따라서 安全率은 급격히 減少하나 10을 초과하면서부터 그의 減少率은 완만하게 나타나서 거의 一定한 값으로 되는 傾向을 나타냈고 이 現象은 粘着力이 작은 경우에 더욱 심하게 나타났다.

勝井⁵⁾는 分割片의 數를 4, 7, 13, 25個로 했을 때의 安定檢討를 하고 分割片의 數가 10이면 精密度는 充分하다고 하였고, Spencer⁶⁾는 分割片의 數를 8, 16, 32, 64, 128個로하여 安定檢討를 한 結果 分割片의 數가 8개일때는 1.36%, 16개일때는 0.48%, 32개일때는 0.16%, 64개以上일때는 0%의 誤差가 나타났다고 하였다.

이들의 研究結果와 本 試驗結果를 綜合할때 分割片의 數는 一般的으로 10~20이면 精密度는 充分한것으로 생각된다. 따라서 本 研究에서는 安全率을 求할때 分割片의 數를 20으로 定했다.

Fig-4 (a)는 粘着力이 없는 모래질의 흙에 對한것으로 Bishop法과 Fellenius法이 거의 같은 安全率을 나타내고 있다. 또한 Bishop法에서는 浸透流가 있는 경우와 없는 경우가 거의 같은 安全率을 나타냈으나 Fellenius法만은 浸透流를 考慮했을때가 安全率은 작은값을 나타냈다. 普通의 흙($c=0, \phi=0$)에서는 一般的으로 Bishop法이 Fellenius法보다 安全率이 큰값을 나타냈고 또 浸透流를 考慮하지 않은경우가 浸透流를 考慮한 경우보다 安全率이 큰 값을 나타냈다.⁵⁾

Fig. 4 (e)는 内部摩擦角이 0인 粘土에 對한것

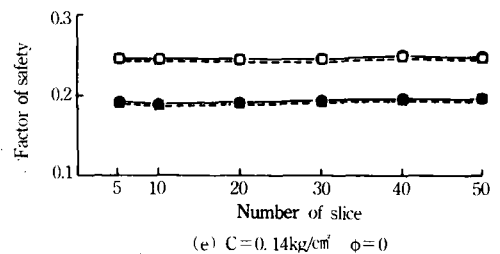
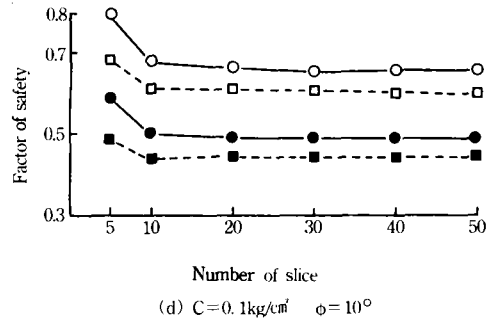
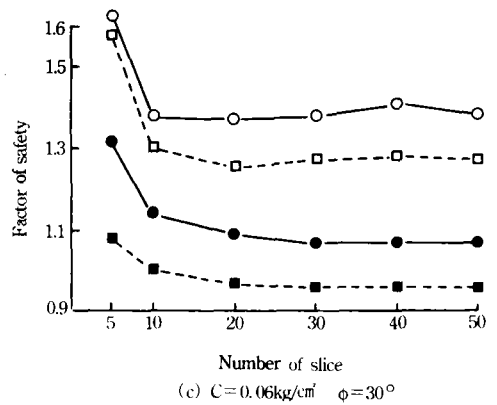
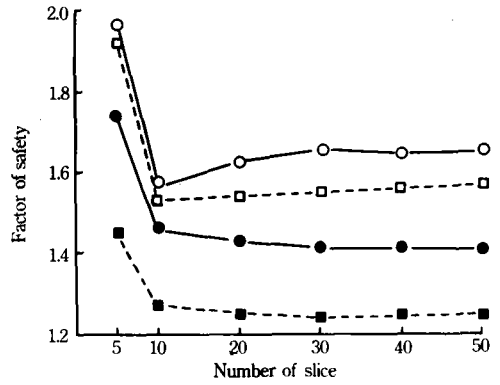
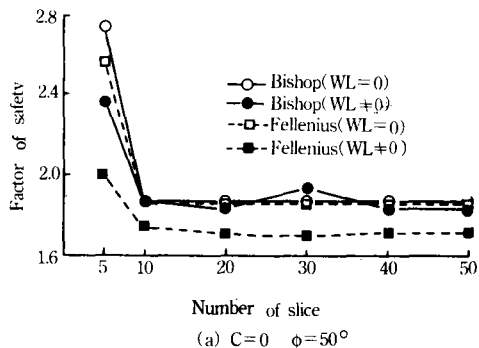
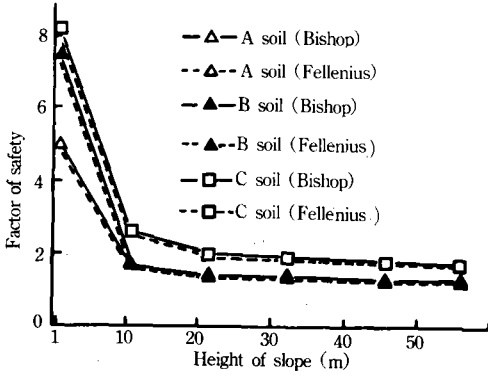


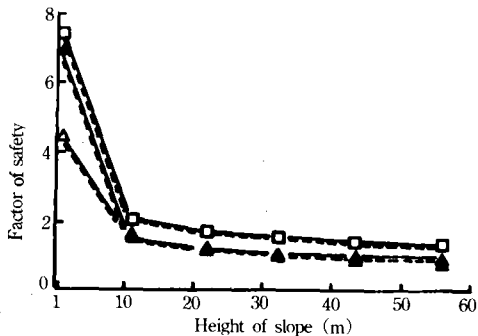
Fig. 4. Relationship between factor of Safety and number of slice.

으로 Bishop法과 Fellenius法은 다같이 安全率은 같은값을 나타내고 있다. 浸透流가 있는 경우는 없는경우보다 安全率은 작은값을 나타내나 역시 Bishop法과 Fellenius法이 같은 값을 나타냄을 알 수있다.

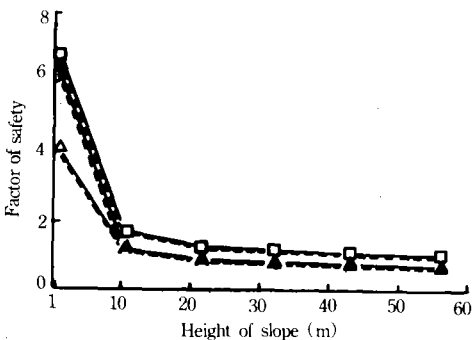
이와같은 現象은 Bishop法과 Fellenius法の 理論式이 다같이 $u=0, \phi_u=0$ 이면 安全率은 (5)式과 같이 나타낼수 있기 때문이라고 생각된다.



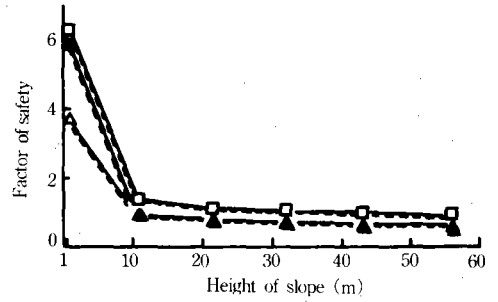
(a) $\theta = 30^\circ$



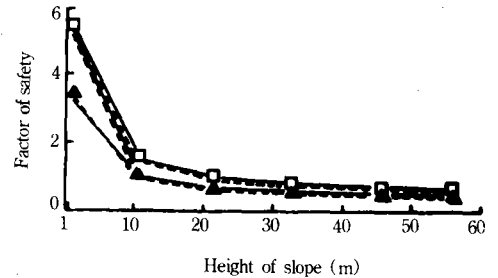
(b) $\theta = 40^\circ$



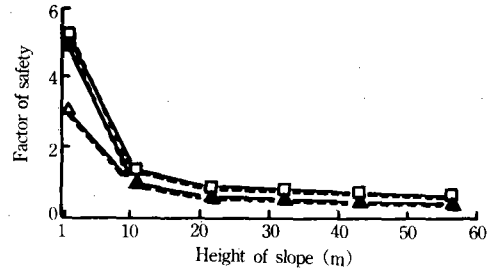
(c) $\theta = 50^\circ$



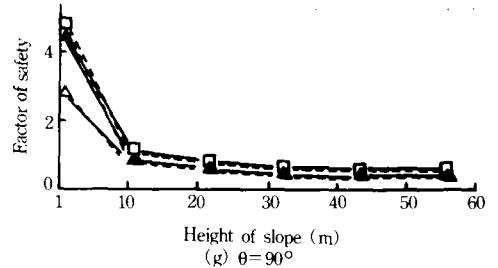
(d) $\theta = 60^\circ$



(e) $\theta = 70^\circ$



(f) $\theta = 80^\circ$



(g) $\theta = 90^\circ$

Fig. 5. Relationship between factor of safety and height of slope.

2. 斜面の 높리와 安全率과의 關係

Fig. 5는 A, B, C, 3種類의 試料에 對해서 分割

片的 數를 20으로 定하고 斜面的 기울기別로 斜面 높이의 變化와 安全率과의 關係를 圖示한것으로 各 傾斜別로 斜面높이가 어느값에 到達할때까지는 安全率が 급격히 減少하는 現象을 나타냈고 이 높이를 超過하면 安全率의 減少現象은 둔화되어서 거의 一定한 값으로 되는 傾向을 나타내고 있다.

Fig 5는 모든 傾斜面에서 斜面的 높이가 10° 程度까지는 安全率が 急激히 減少하는 現象을 나타내고 있다.

그 理由는 斜面높이가 一定值에 到達하면 崩壞의 形態 및 臨界面의 位置가 거의 一定하기 때문에 나타나는 現象으로 盛土斜面的 安定解析에서 臨界面이 下部地盤을 通過하지 않는 경우는 斜面的 높이가 어느값을 超過하면 安全率は 크게 變化하지 않을것으로 생각된다. 即 土質定數(c, ϕ)를 入力해서 安定解析을 할때 斜面的 높이가 작은경우에는 安全率에 크게 影響을 미치

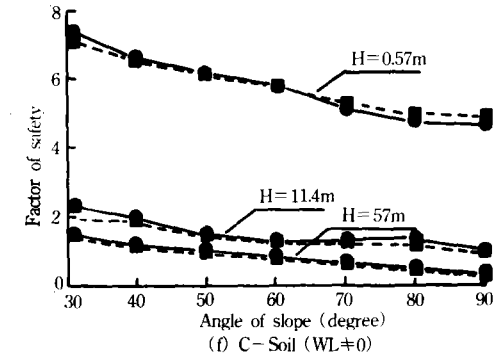
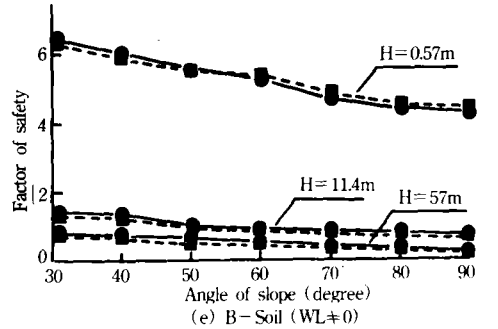
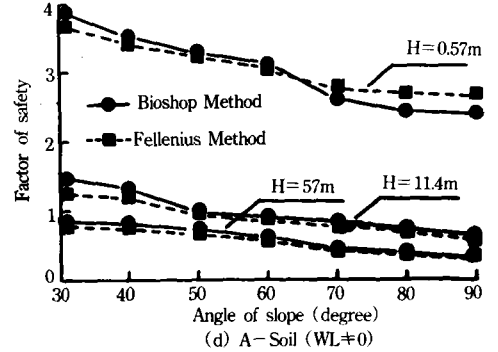
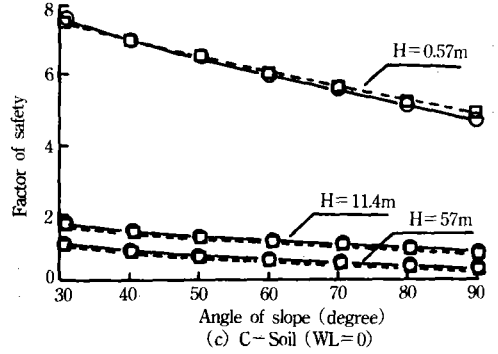
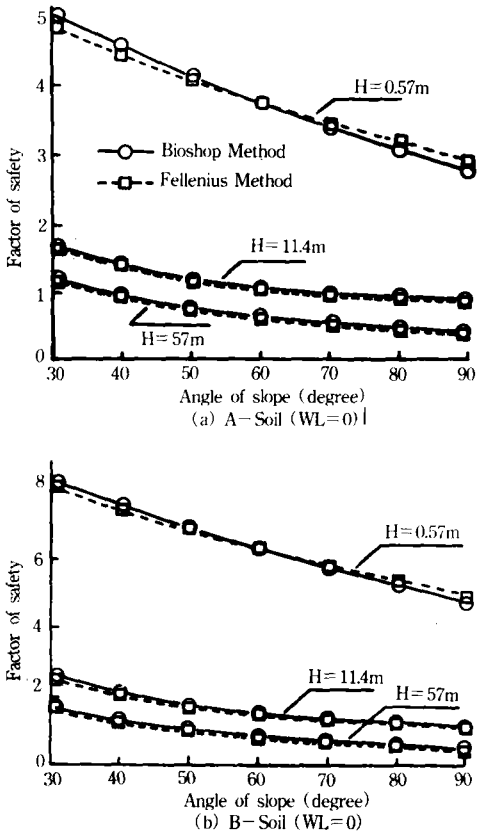


Fig. 6. Relationship between factor of safety and angle of slope.

고 있으나, 斜面的 높이가 큰 경우는 그의 影響이 작게 나타남을 意味한다.

Bishop³⁾의 研究結果에서도 같은 土質定數를 使用해서 斜面높이를 달리 했을 경우에 安全率은 斜面높이가 작을수록 큰 값을 나타낸바 있다.

斜面的 傾斜과 土質에 따라서 差異는 있겠으나 一般的으로 斜面높이 10m 이상에서는 安全率의 減少는 完만하게 나타나서 거의 一定한 값으로 됨을 알수있다.

따라서 斜面的 安定問題는 土質定數와 斜面的 기울기에만 依存하는 것으로 생각하기 쉬우나 斷面의 크기에 影響이 큰것을 알수 있었다.

3. Bishop法과 Fellenius法の 比較

Fig. 6은 A, B, C 3種類의 흙에 對해서 浸透水가 없는 경우(a, b, c)와 있는 경우(d, e, f)에 斜面높이를 달리했을때 傾斜角과 安全率의 關係를 나타낸것이다.

斜面的 높이가 模型實驗에서와같이 57cm로 아주작은 斷面에서는 傾斜角이 60°를 前後해서 이보다 完만한 傾斜에서는 Bishop法에서 安全率이 큰 값을 나타냈으나 이보다 急한 傾斜面에서는 Fellenius法이 오히려 큰 값을 나타냈다. 또한 斜面높이를 20倍인 11.4m, 또는 100倍인 57m로 增大시켰을경우는 恒常 Bishop法에서 큰 安全率을 나타냈다. 浸透流가 있는 경우가 없는 경우보다 安全率이 작은값을 나타내는 現象은 粘性土에서 더욱 현저하게 나타났다.

實際의 切盛土斜面的 傾斜는 大部分이 60°보다 작은 경우이므로 一般的으로 斜面的 安定解析方法은 Bishop法이 Fellenius法보다 큰 安全率의 값을 나타낸다고 할수있다.⁶⁾

簡單한 경우로서 幅이 아주작은 1個의 分割片 으로서는 斷面을 생각할때 浸透水를 考慮하지 않으면 Bishop의 簡便法과 Fellenius法은 같다. 그러나 같은 斷面을 2個以上으로 分割했을때는 Bishop法과 Fellenius法은 같지않고 Bishop法은 分割數와 같은 次數의 方程式이 된다.¹⁵⁾ 이것은 Bisohop法에서 全體의 分割片에 對해서 安全率이 一定하다는 假定下에서 滑動面全體의 安全率을 求하고 있기때문이다. 따라서 分割片의 數가

2個以上の 경우는 2方法은 式으로 比較하기는 困難하므로 몇개의 計算例에 의해서 比較해보았다.

浸透流가 없는 경우 Bishop法과 Fellenius法으로 求한 安全率을 比較한 結果 F_F/F_B 의 平均値는 A試料에서 97%, B試料에서 96%, C試料에서 97%로서 Fellenius法에서 求한 安全率이 Bishop法으로 求한 값의 96~97%程度로 작은 값을 나타냈다. 浸透流가 있는 경우의 安全率을 比較한 F_F/F_B 의 값은 A試料에서 96%, B試料에서 95%, C試料에서 95%로서 浸透流가 없는 경우보다는 약간 작은 傾向을 나타냈으나 大體로 95~96%程度임을 알수 있었다.

勝井⁶⁾는 浸透流가 없을때 Fellenius法은 Bishop法에 의하여 求한 安全率의 85%程度이고 浸透流를 考慮했을때는 74%程度로 작게 나타났다고 하였다. 粘着力이 큰 흙일수록 浸透流를 考慮했을때의 安全率은 더욱 작게 나타날것으로 생각된다.

Fig. 7은 傾斜角이 30°, 斜面的 높이가 11.4m이고 浸透流를 考慮하지 않은경우에 粘着力을 어느값으로 固定하고 内部摩擦角과 安全率의 關係를 나타낸것으로 内部摩擦角이 增加함에따라 安全率은 Bishop法이나 Fellenius法이 다같이 完만한 增加를 나타내고 있다.

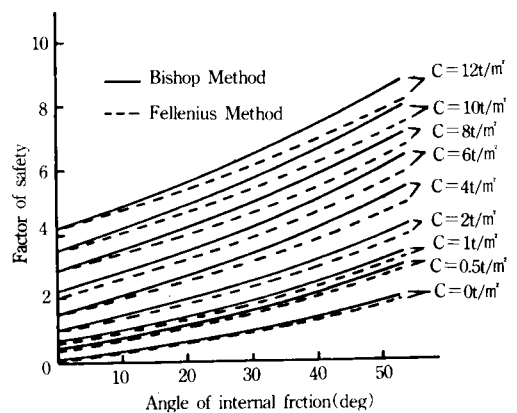


Fig. 7. Relationship between factor of safety and angle of internal friction for various cohesions.

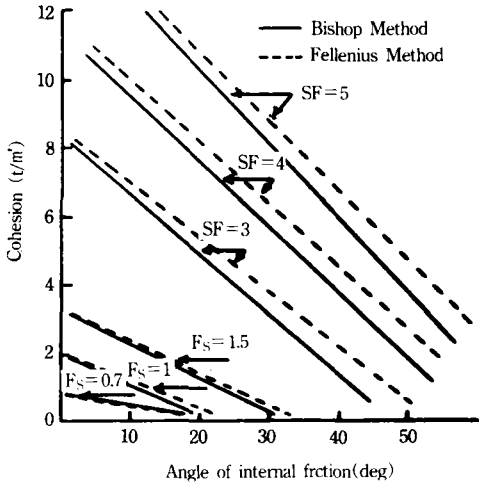


Fig. 8. Relationship between cohesion and angle of internal friction for various factor of safety.

또한 Bishop法과 Fellenius法の 差異는 粘着力이 클수록 크게 나타나고 粘着力이 작은 경우는 그 差가 減少하는 現象을 나타냈다.

Fig. 8은 傾斜角이 30°, 斜面높이가 11.4m이고 浸透流을 考慮하지 않은 경우에 安全率을 0.7, 1.0, 1.5, 3.0 등으로 固定했을때 粘着力과 内部摩擦角의 相互關係를 나타낸 것으로 直線關係가 成立됨을 알수있다. 그러나 그의 기울기는 Bishop法에서 약간 크게 나타나서 Fellenius法보다는 Bishop法이 内部摩擦角보다는 粘着力이 安全率에 큰 影響을 미치고 있음을 알 수 있다.

4. 浸透流量 考慮한 斜面安定試驗

3種類의 試料에 對하여 Fig. 9와같이 30°의 傾斜로 盛土斜面을 만들고 左側에서 물을 浸水시켰을때 經過時間에 따르는 浸潤線의 變化를 測定하였다. 右側의 斜面先에 浸透水の 到達時間은 Fig. 9에서와같이 浸透係數가 큰 A試料에서 2.2時間, B試料에서는 14時間, 透水係數가 작은 C試料에서는 20시간이 所要되었다. 浸透初期에는 凹形으로 始作해서 漸次 直線에 가까운 모양을 하고, 經過時間에 따라서 浸潤線이 上昇해서 斜面先附近의 浸出點에서 一次的으로 崩壞가 일어나면 그 以後에는 浸潤線이 上昇하지 않는다. 그

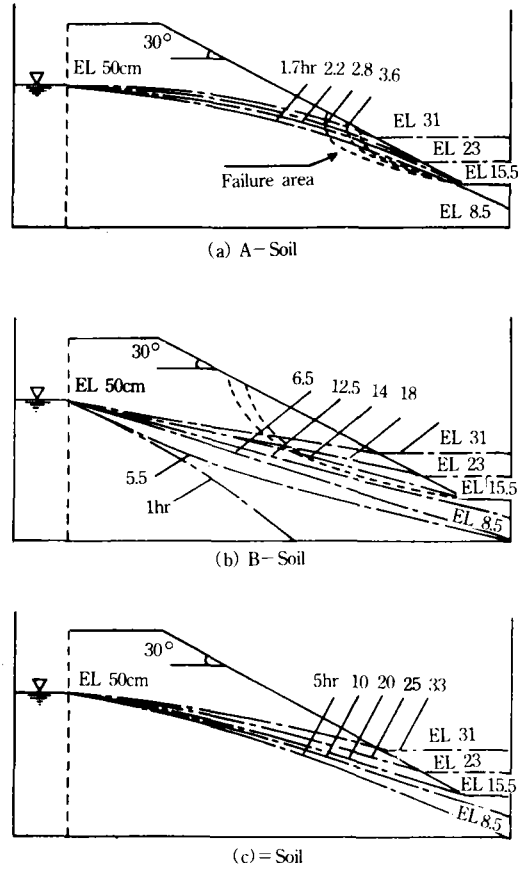


Fig. 9. Saturation line for embankment of model test.

러나 粘着力이 크고 透水係數가 작은 C試料에서는 斜面先에서 崩壞가 일어나지 않았다. 斜面先附近에서 小崩壞가 시작되면 이 崩壞에 뒤이어서 次久 逐次崩壞가 일어나서 斜面全體가 崩壞하게된다.

浸透流에 의한 斜面崩壞는 斜面先附近에서 過大한 空隙水壓이 發生하는것이 主要原因의 하나로 알려져있다.^{18, 19)} 그 외에 粘着力과 内部摩擦角의 低下, 自重의 增加, 斜面先附近에 應力集中, 파이핑, 過剩空隙水壓에 의한 力學的均衡이 破壞되는것 등으로 생각된다.^{8, 20, 7)}

斜面先部가 水浸되어 있는 경우도 浸透水에 의한 過剩空隙水壓이 增加하면 斜面先部の 靜水壓은 거의 0에 가까워지고 斜面는 浸出水에 의

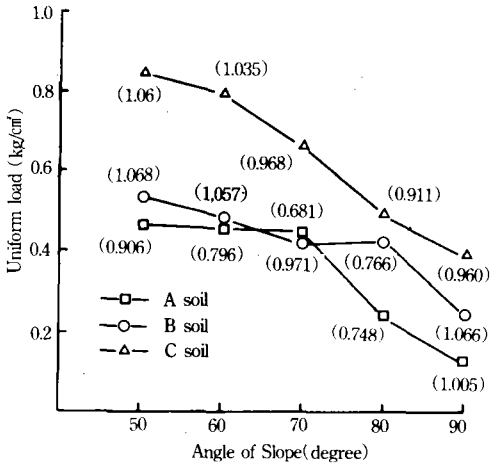


Fig. 10. Slope failure test for uniform load.

하여 崩壞가 始作되고 이어서 二次的으로 逐次 崩壞가 繼續된다.

Fig. 10은 3種類의 試料로서 높이 57cm로 盛土 한 傾斜面에 斜面上端(斜面肩)에서 等分布荷重을 作用시켰을 경우 各 傾斜別로 破壞를 일으키는 等分布荷重과 崩壞形態를 測定하고 破壞時의 斜面傾斜角과 等分布荷重과의 關係를 나타낸 것이다. 그림에서 () 안의 數値는 Bishop法에 의해서 求한 安全率이다. 그림에서 보는 바와같이 傾斜角이 增加함에 따라 破壞를 誘發하는 等分布荷重은 작은값을 나타냈고 理論値와 거의 一致하는 結果를 나타냈다. 또한 破壞가 이러한 等分布荷重은 모든 傾斜面에서 粘着力이 큰 C試料가 가장 컸고 다음에 B試料이고 모래질흙인 A試料가 가장 작은 等分布荷重으로 破壞가 일어났다.

5. 斜面傾斜角과 臨界圓과의 關係

Fig. 11은 3種類의 試料에 對해서 模型實驗斷面에서 傾斜角의 變化와 滑動圓의 位置 및 安全率을 同時에 나타낸 것이다. 斜面의 傾斜角이 急할수록 臨界圓의 반지름은 점점 작아지는 傾向을 나타내고 있다. 특히 各 斜面傾斜에 對한 臨界圓의 中心點을 잇는 線은 거의 直線으로 水平面과 約 50°의 角度를 이루면서 傾斜가 急할수록 臨界圓의 中心點은 下向하는 現象을 나타냈다.

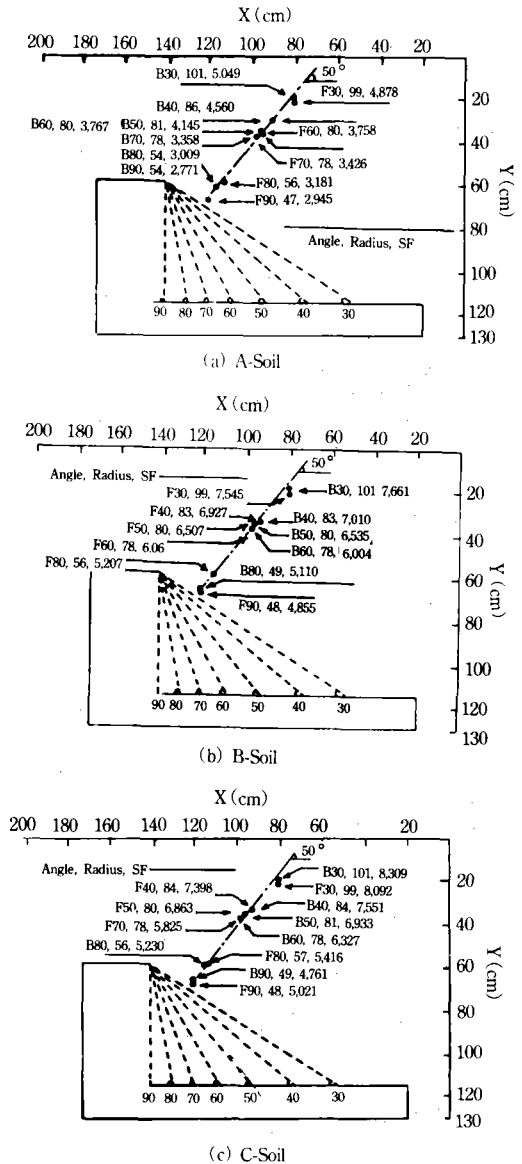


Fig. 11. Slope stability analysis in the model test.

斜面崩壞의 形態는 傾斜角이 완만한 斜面에서는 斜面先崩壞가 일어나고 傾斜가 急할수록 斜面崩壞의 形態로 나타났다. 이와같은 現象은 斜面의 位置와 密接한 關係를 갖고 있는 것으로 切盛土斜面에서와 같이 斜面의 上端을 一定하게 유지시키고 傾斜의 기울기를 調節하는 경우에 臨界圓의 位置를 推定하는데 도움이 될 수 있는

것으로 생각된다.

V. 結 論

斜面の安定解析에서 Bishop法과 Fellenius法을 比較하고 浸透流가 있는 경우의 室内模型實驗을 한 結果를 要略하면 다음과 같다.

1. 斜面の安定解析에서 分割片의 數는 10個程度로서 精密度는 充分하였다.

2. Fellenius法으로 구한 安全率은 Bishop法으로 구한 값보다 浸透流가 없는 경우는 96~96%, 浸透流가 있는 경우는 95~96%로 작은값을 나타냈다.

3. 斜面에서의 安全率은 土質定數와 傾斜外에 斜面높이에도 영향을 받았으며 이는 斜面높이가 10m以下에서는 더욱 현저하게 나타났다.

4. 粘土에서는 Bishop法과 Fellenius法이 같은 安全率을 나타냈고 두 方法 모두 浸透流를 考慮한 경우가 浸透流를 考慮하지 않은 경우보다 安全率이 작은 값을 나타냈다.

5. 粘着力이 安全率에 미치는 영향은 Bishop法이 Fellenius法보다 크게 나타났다.

6. 透水係數가 큰 A, B試料의 模型實驗에서 斜面先附近에서 應力이 集中되어 小崩壞가 일어나고 점차 逐次崩壞되는 傾向을 보였다.

7. 斜面의 높이가 같을때는 傾斜가 急할수록 臨界圓의 半徑은 짧은 값을 나타내고, 中心點은 下向으로 이동하려는 傾向을 나타내면서 崩壞底面이 地表面과 一致하는 斜面崩壞로 된다.

本 研究는 1988年度 文敎部 學術研究造成 費 支援에 의하여 遂行되었음.

參 考 文 獻

1. Anderson, M. G and K. S. Richards, 1987, Slope stability, John Wiley & Sons : 11~75
2. 赤井浩一, 1962, アースダム 斜面および掘削, 土と基礎 特集號, No. 5 : 32~35.
3. Bishop, A. W., 1955, The use of the Slip circle

- in the Stability Analysis of Slopes, Geotechnique Vol. 5 : 7~17.
4. 白榮植, 1988, 斜面安定(II), 大韓土質工學會誌, Vol. 4 No. 2 : 74~104
5. 土質工學會, 1978, 土と基礎の設計計算演習 : 103~130.
6. 勝井三千勇, 大内茂, 1981, 斜面安定解析法の一考察, 第 16回 土質工學研究發表會 發表講演集 : 1078~1076.
7. 勝原東雄, 上俊二, 1982, 降雨による 眞砂土 斜面の安定性, 第 17回 土質工學 研究發表會 發表講演集 : 1145~1148.
8. 勝原東雄, 上俊二, 1983, 降雨によるまさ土 斜面の安定性, 第 18回 土質工學研究發表會 發表講演集 : 1281~1282.
9. 今泉繁良, 山口栢樹, 大橋健二, 1988, 一般分割法による斜面の安定解析, 土と基礎 Vol. 36 No. 5 : 55~60.
10. 姜义默, 趙成燮, 1981, 斜面的安定解析에 관한 研究, 忠南大學校 農業技術研究報告 Vol. 8. No. 2 : 179~184.
11. 金椿浩, 1968, $\phi_u=0$ 解析法에 對한 考察(1), 大韓土木學會誌 Vol. 16. No. 3 : 19~22.
12. Morgenstern, N. R. and V. E. Price, 1965, The Analysis of The Stability of General Slip Surfaces, Geotechnique Vol. 15. No. 1 : 79~93
13. 中瀬明男, 1963, $\phi=0$ 法による 安定計算における抵抗モーメントの計算法, 土と基礎 Vol. 11. No. 4 : 34~36.
14. 野村健司, 長友文昭, 1969, 斜面安定計算におけるピショウプ法とフェレニウス法の比較, 第 4回 土質工學研究發表會 發表講演集 : 459~464
15. 野村健可, 長友文昭, 1969, 斜面安定計算におけるピショウプ法とフェレニウス法の比較, 第 4回 土質工學研究發表會 發表講演集 : 459~464.
16. Spencer, E, 1967, A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming parallel Inter-slice Forces, Geotechnique Vol. 17. No. 1 : 11~26.

17. 鵜飼惠三, 1988, 分割法による 斜面の 三次元安定性の検討, 土と基礎 Vol. 36. No. 5 : 19~24.
18. 八木則男, 1980, 雨水浸透による 斜面崩壊について, 第 15回 土質工學研究發表會 發表講演集, : 1093~1096.
19. 八木則男, 矢田部龍一, 山木浩司, 1982, 雨水浸透による 斜面内空隙水壓分布と安定解析, 第 17回 土質工學研究發表會 發表講演集 : 1281~1282.
20. 八木則男, 榎明潔, 矢田部龍一, 福本恭二, 1984, 雨水浸透時の 斜面安定, 第 19回 土質工學研究發表會 發表講演集 : 1279~1280.