

地震係數를 考慮한 堤防의 斜面安定에 關한 研究

A Study on the Slope Stability of Embankment in Consideration of Seismic Coefficient

姜 义 默* · 池 仁 澤* · 李 達 遠*
Kang, Yea Mook · Chee, In Taeg · Lee, Dal Won

Summary

This study was performed to investigate the minimum safety factor of embankment in consideration of seismic coefficient by the pseudo-static analysis. The variables were cohesion, the internal friction angle, angle of slope, height of seepage, height of embankment, depth of replacement. The results obtained were compared with those by Fellenius method, simplified Bishop method and Janbu method.

The results were summarized as follows :

1. The increasing rate of the minimum safety factor with the increasing of cohesion appeared larger in Fellenius method and Bishop method than in Janbu method. And that with the increasing of the internal friction angle appeared the lowest value in Janbu method. The minimum safety factor was influenced larger on the internal friction angle than on cohesion.
2. The variation of the minimum safety factor with the height of seepage at 0m and 5m was nearly similar to Fellenius method, Bishop method and Janbu method. On the other hand, it was decreased suddenly at 25m.
3. The minimum safety factor with the height of embankment was decreased remarkably under 10m with the increasing of seismic coefficient. But, it was decreased slowly more than 10m. As the height of embankment was low, the influence of cohesion appeared larger.
4. In higher case of the depth of replacement, the phenomenon of reduction of the

* 忠南大學校 農科大學

키워드 : 斜面安定, 假靜的分析, 地震係數, 最小安全率, 土質定數, Fellenius方法, 簡易 Bishop方法, Janbu方法.

minimum safety factor appeared remarkably with seismic coefficient increased. And in lower case of the depth of replacement, the minimum safety factor was similar in Fellenius method and Bishop method. But it appeared larger in Bishop method and Janbu method than in Fellenius method with the depth of replacement increased.

5. As the cohesion and the internal friction angle were large, the phenomenon of reduction of the minimum safety factor with the increasing of seismic coefficient appeared remarkably. Also, the influence of seismic coefficient in minimum safety factor appeared larger with the soil parameter increased.

6. When the seismic coefficient was considered, investigation of the structural body on the slope stability appeared profitably in Fellenius method and Janbu method than in Bishop method.

I. 緒 論

斜面滑動에 대한 安定 解析을 할 때 댐, 防潮堤, 道路 등의 構造物이 地震活動地域에 築造될 때에는 盛土斷面의 활동과괴에 대한 安定性 檢討는 더욱 重要視 되어야 한다. 斜面安定解析을 할 때 安定度의 尺度로써 安全率의 개념을 사용하는데, 주어진 斜面의 安全率을 구하기 위해서는 斜面의 形態, 斜面높이, 斜面의 傾斜角, 활동면의 位置와 形狀, 그리고 地形, 地質 등의 幾何學的 要素와 함께 盛土材料와 基礎地盤의 粘着力, 内部摩擦角, 單位重量등의 強度定數, 흙의 不均一性, 引張龜裂, 地震, 浸潤線의 位置, 應力-變形特性, 空隙水壓의 分布, 進行性 破壞 등을 考慮해야 한다.^{2,5,6,8,17)}

그 중에서도 地震發生時 斜面에 作用하는 荷重은 地盤運動의 加速度와 關聯되어 誘發되는 慣性力과 關係되는 重要한 要素이다. 地震이 發生하는 地域에서 斜面安定을 檢討할 때 地盤의 水平加速度는 地震의 크기를 나타내는 중요한 尺度가 된다.^{4,9,14,26)} 堤防이나 댐의 設計에 사용되는 地震係數의 적절한 選擇과 分析方法은 Seed 等³⁸⁾에 의하여 發表되었다. 그는 滑動斷面에 대한 慣性力을 계산하였고, Sliding-Wedge 形態로 Pseudo-Static 分析에 의하여 California

의 Oroville Dam에 대한 地震安定의 研究를 하였다. Newmark³³⁾는 滑動이 시작될 때 加速度의 常數를 決定하기 위하여 強性-塑性材料를 非粘着性土의 變位豫測에 대하여 研究하였다.

Clough 等⁹⁾은 有限要素分析을 사용하여 堤防의 剪斷應力과 地盤運動의 垂直, 水平 變形을 分析하였고, Ambraseys¹⁾와 Sarma³⁷⁾는 서로 다른 높이 堤防에 대하여 振動時의 最大地震係數를 決定하기 위한 式을 提案하였고, 周波數特性에 따른 加速度의 分布를 比較 分析하였다. 1980年代부터는 Dam에 대한 3次元 振動에 관한 解析을 有限要素法에 의해 實施하고, 그 結果를 shaking table과 같은 模型實驗을 통하여 理論値와 實測値를 比較하였다.^{7,18,28)}

松村²⁹⁾는 堤防을 삼각형 彈性斷面體로 보고 水平方向의 地震力에 대하여 研究하였다. 그 후로도 여러 研究者들에 의하여 cyclic test, 液狀化 現象에 대한 模型實驗 등 動力學的인 側面에서 계속 研究가 進行되어 왔으며,^{17,22,25,32)} 또 Cook¹⁰⁾와 山田 等⁴³⁾은 斜面形態를 有限要素法에 의하여 地震時의 應答解析을 實驗하였고, 地盤運動의 增幅特性에 미치는 影響에 대하여 研究하였다.

國內에서도 斜面安定解析에 관한 最小安全率의 評價는 Fellenius方法, Bishop方法, Janbu

方法, Spencer方法 및 Morgenstern-Price方法 등을 比較分析한 많은 研究가 進行되어 왔다. 그러나, 이들 대부분의 分析方法은 斜面安定에 영향을 줄수 있는 靜的인 研究에 局限되어 왔으므로 地震과 같은 動的인 面에서 發生하는 斜面의 應力-變形 特性에 대해서도 많은 理論的 分析과 模型實驗이 이루어져야 할 것이다. 특히 우리나라도 과거의 歷史地震과 機械地震에 의한 地震發生 횟수만도 AD 2년부터 지금까지 2,929회에 달하고 있는 것으로 보아,²⁶⁾ 현재의 낮은 地震活動에도 불구하고 결코 地震의 危險에서 제외된 地域이 아니라는 것을 말해주므로, 特定한 地域의 核發電所, 高層아파트, 大·中規模댐, 防潮堤와 같은 危險한 施設에 대해서 動力學的인 應力-變形 特性에 관한 구체적인 對策이 강구되어야 할 것이다.

本 研究는 韓半島의 各 地域別 最大水平加速度의 資料²⁶⁾를 基礎로 한 Psuedo-Static方法^{17, 19)}에 의해서 堤防의 形態와 土質定數등을 變化시키면서 地震係數를 考慮할 最小安全率을 全應力法에 의해서 Fellenius方法, 簡易 Bishop方法, Janbu方法으로 구하여 比較하고, 또 堤防의 幾何學的 要素와 土質定數의 相互作用이 地震時 盛土斜面의 安定에 미치는 影響을 比較 分析하였다.

II. 研究方法

1. 基本理論

斜面安定解析에서 地震으로 인한 활동과괴는 堤防에 커다란 影響을 미치게 된다. 本 研究에서는 地震에 의한 動的인 影響을 慣性力을 가진 加速度를 媒介變數로 하여 靜的인 荷重으로 變化시킨 Psuedo-Static方法에 의하여 分析하였다. 地震係數를 考慮한 安全率은 各 slice의 側面에서 作用하는 힘과 moment 平衡式을 假定하면 다음과 같이 구해진다.^{19, 34)}

① Fellenius方法

$$F_s = \frac{R \sum [cl + \{W \cdot \cos \alpha - ul - C_s W \sin \alpha\} \tan \phi]}{\sum \{W \cdot R \cdot \sin \alpha + C_s \cdot W \cdot y\}} \dots (1)$$

② 簡易 Bishop方法

$$F_s = \frac{1}{\sum \{W \cdot R \cdot \sin \alpha + C_s \cdot W \cdot y\}} \times R \sum \left[\frac{cl + \{W \cdot \sec \alpha - ul\} \tan \phi}{1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi / F_s} \right] \dots (2)$$

③ Janbu方法

$$F_s = \frac{1}{\sum W \cdot \tan \alpha + C_s \cdot W} \times \sum \left[\frac{cl + \{W \cdot \sec \alpha - ul\} \tan \phi}{\cos \alpha (1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi / F_s)} \right] \dots (3)$$

여기서, F_s : 安全率

c : 粘着力(t/m^2)

l : 分割片의 底面길이(m)

W : 分割片의 重量(t)

α : 分割片의 저면과 水平面과의 角度($^\circ$)

R : 活動面의 半徑(m)

C_s : 地震係數

ϕ : 内部摩擦角($^\circ$)

y : 모멘트 길이(m)

u : 空隙水壓(t/m^2)

이다. 地震力 $C_s \cdot W$ 는 抵抗 모멘트나 垂直力에 影響을 받지 않고, 활동력 모멘트에 의해서만 影響을 받는다고 假定하고, 또 各 slice에서의 慣性力이기 때문에 重心에 작용한다. 地震係數 C_s 는 Trifunac 등³⁹⁾이 提案한 式에 의해서 구한 韓半島의 最大 水平加速度를 基礎로 하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_s = \frac{\log^{-1}(0.3 I_{MM} + 0.014)}{980} \dots (4)$$

Table-1. Stability analysis by pseudo-static method

Method	Limit equilibrium	Fellenius, simplified Bishop, Janbu
Pseudo-static force	Seismic coefficient	0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20
Soil parameter	Cohesion(c)	0.0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 t/m ²
	Internal friction angle(ϕ)	0°, 10°, 20°, 30°, 40°
Application fields	Angle of slope(β)	20°, 30°
	Water level(W _L)	0, 5, 25m
	Height of embankment(H _E)	5, 10, 20, 30m
	Depth of replacement(D _R)	5, 10, 15m

여기서, $I_{MM} = 1.05 M - 2.56 \log D - 0.01 D + 4.19^{26)}$ 이고, M은 規模(magnitude), D는 震源距離(hypocentre)이다.

2. 解析資料

地震係數를 基礎로 하여 盛土높이 30m, 斜面傾斜角을 20°와 30°로 變化시킨 후, 盛土斜面內에 있는 흙의 parameter를 地震係數를 適用할 수 있는 Computer Program인 REAME¹⁹⁾와 PCSTABLE 5에 의하여 最小安全率의 變化를 考察하였고, 適用된 盛土斷面과 흙의 parameter는 Table-1 및 Fig. 1과 같다.

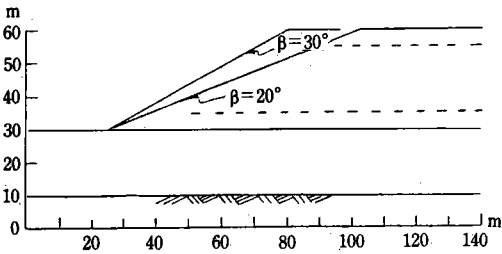


Fig. 1. Cross section of embankment

III. 結果 및 考察

1. 粘着力 및 内部摩擦角과 安全率과의 關係

粘着力(c) 및 内部摩擦角(ϕ)이 最小安全率(F_s)에 미치는 影響을 糾明하기 위하여 堤防높

이가 30m일때 粘着力과 内部摩擦角을 각각 5段階로 變化시켰을 때 Fellenius方法, Bishop方法 및 Janbu方法으로 구한 最小安全率은 Fig. 2(a), (b)와 같다. Fig. 2(a)는 傾斜角이 20°이고 堤體內에 浸潤面을 考慮하지 않았을 경우로서 内部摩擦角이 0°이고 粘着力만이 變化할 때의 安全率은 Fellenius方法과 Bishop方法에서는 같은 값을 나타내고 Janbu方法에서는 이보다 큰 값을 나타냈다. 그러나 内部摩擦角이 30°를 超過하면 Bishop方法에서 구한 安全率が 가장 큰 값을 나타냈다. 그리고 内部摩擦角이 增加함에 따라 最小安全率의 增加率도 Bishop方法에서 가장 크고 Janbu方法에서 가장 작은 값을 나타냈으며 安全率에 미치는 影響은 粘着力보다는 内部摩擦角이 더 크게 나타났다.

Fig. 2(b)는 斜面傾斜角이 20°이고 堤防의 높이가 30m일때 堤防底面에서 높이 25m에 浸潤面이 위치해 있을 경우의 粘着力 및 内部摩擦角과 最小安全率과의 關係를 나타낸 것이다. 最小安全率은 内部摩擦角이 작을 때는 Fellenius方法과 Bishop方法보다 Janbu方法에서 더 큰값을 나타내고, 内部摩擦角이 增加함에 따라 Bishop方法에서 더 큰 安全率을 나타냈다. 또한 粘着力이 增加함에 따라 最小安全率은 增加하나, 그의 增加現像은 内部摩擦角이 0°일때는 增加率が 직선모양을 나타내고 内部摩擦角이 10~30° 사이에서의 增加率은 Janbu方法보다는 Fellenius方法과 Bishop方法에서 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 또 内部摩擦角이 40°에서는

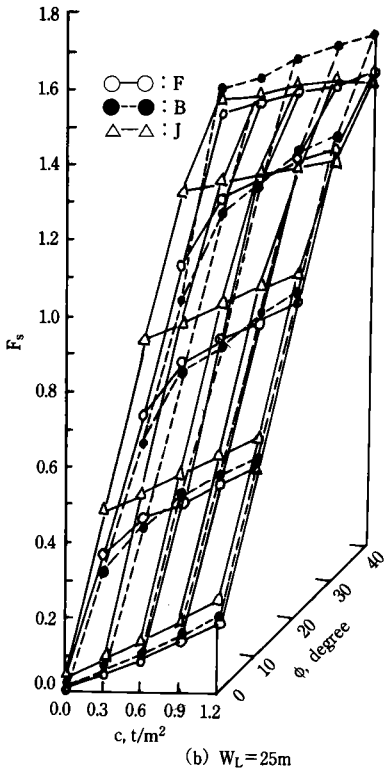
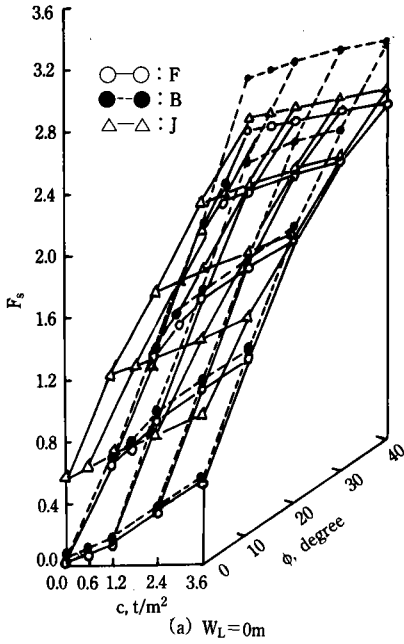
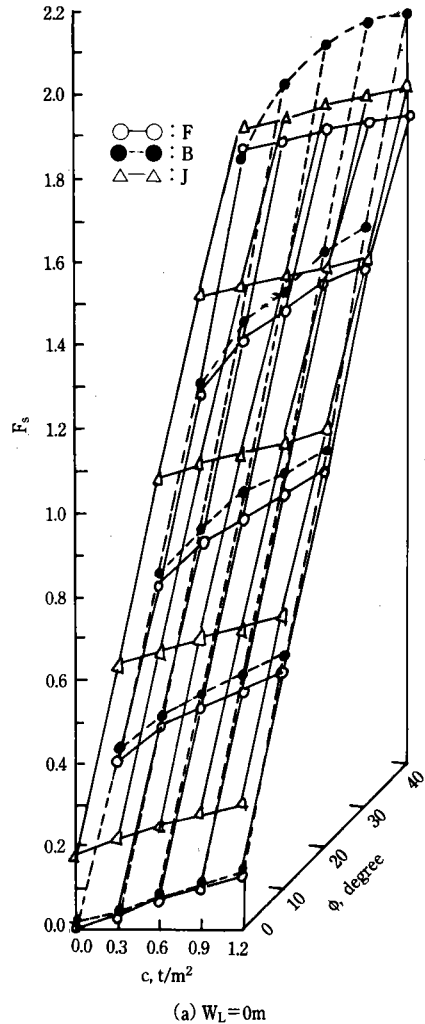


Fig. 2. Variations of F_s with c and ϕ from the three different methods. ($\beta=20^\circ$, $H_E=20m$)

세 方法 모두 類似한 增加率을 나타냈다.

Fig. 3(a), (b)는 斜面 傾斜角이 30° 이고, 堤防높이가 30m일때 浸潤面을 考慮하지 않은 경우와 堤防底面에서 높이 25m에 浸潤面이 위치해 있을 경우의 粘着力 및 内部摩擦角과 最小安全率과의 關係를 나타낸 것으로, 여기에서도 粘着力이 작을때는 Fellenius方法과 Bishop方法이 Janbu方法보다 安全率의 增加率이 크게 나타났고, 内部摩擦角의 增加에 따라서 세 方法 모두 類似한 增加現象을 나타냈다.

今泉 等²¹⁾은 破壞幅과 높이의 比가 4이고



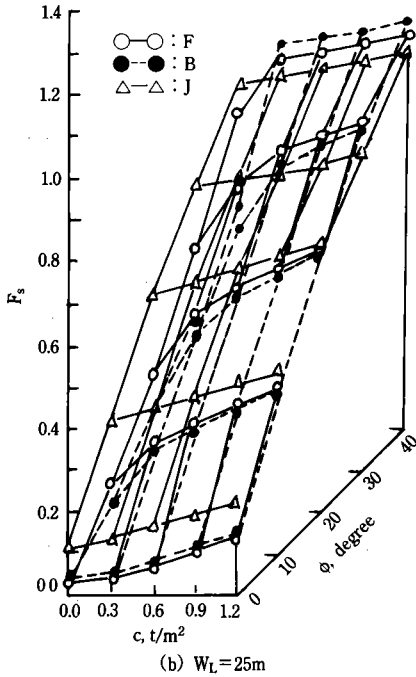


Fig. 3. Variations of F_s with c and ϕ from the three different methods ($\beta=30^\circ$, $H_E=30m$)

기울기가 30° , 粘着力이 $1.2t/m^2$, 内部摩擦角 30° , 單位重量이 $1.92t/m^3$, 斜面높이가 $25m$ 로 假定한 單純斜面을 各種分割法에 의하여 2次元 安全率을 계산한 결과, 簡易 Bishop方法이 Janbu方法이나 Spencer方法보다 약 6% 정도 크게 나타났다고 하였다.

玉田¹¹⁾는 斜面활동형태는 여러가지 要因에 의하여 發生되므로, 全般的으로 활동면에 共通되는 事項은 없다고 하였고, 安定解析時에 存在하는 層의 形態, 특히 土層과의 境界面에 存在하는 얇은 地下水層과 隆起, 沈降 등의 斜面運動 및 壓縮, 引張의 水平變位 등을 檢討해야 한다고 하였다.

斜面傾斜角이 20° 와 30° 인 경우를 比較해보면 浸潤面을 考慮하지 않았을 경우의 安全率은 傾斜角이 30° 일때 보다 20° 에서 $0.4\sim 0.6$ 정도 더 크게 나타났고, 堤防底面에서 높이 $25m$ 에 浸

潤面이 位置해 있을 경우는 傾斜角이 30° 보다 20° 에서 $0.2\sim 0.3$ 정도 더 큰 安全率값을 나타냈다.

2. 浸潤率과 安全率과의 關係

Fig. 4는 内部摩擦角이 30° , 斜面傾斜角이 30° , 堤防높이 $30m$, 浸潤面의 위치(W_L)가 堤防底面에서 $0m$, $5m$, $25m$ 에 있을 경우 Fellenius方法, Bishop方法 및 Janbu方法에 의하여 구한 最小安全率의 變化를 나타낸 것이다. 浸潤面이 없을 경우는 安全率은 세 方法에서 유사한 값을 나타냈으나, 浸潤面을 고려하면 세 方法에서 구한 安全率은 차이가 나타났다. 그리고 安全率은 浸潤面이 없을 경우와 堤防底面에서 $5m$ 에 浸潤面이 위치해 있을 경우는 Bishop方法에서 크게 나타났고, 浸潤面의 높이가 增加해서 堤防底面에서 $25m$ 에 浸潤面이 위치해

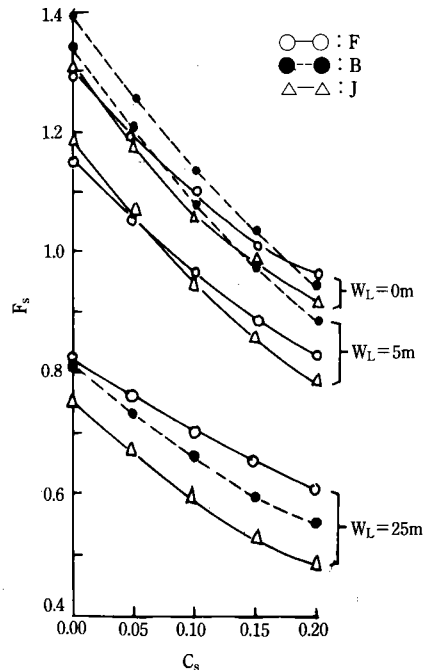


Fig. 4. Variations of F_s and c_s for the water level ($C=1.2t/m^2$, $\phi=30^\circ$, $\beta=30^\circ$, $H_E=30m$)

있을 경우는 Fellenius方法에서 크게 나타났다.

斜面安定의 尺度로서 安全率값을 1.2를 基準 했을때, Fig. 4에서 보는 바와같이 浸潤面을 考慮하지 않을 경우는 粘着力이 $1.2t/m^2$ 일때 最小安全率인 1.2가 되는 地震係數값의 範圍는 Fellenius方法과 Janbu方法에서는 0.00~0.05 사이에서 나타났고, Bishop方法에서는 0.05~0.10 사이로 나타났다. 또 堤防底面에서 높이 5m에 浸潤面이 位置해 있을 경우는 粘着力이 $1.2t/m^2$ 일때 最小安全率인 1.2가 되는 地震係數값의 範圍는 Bishop方法에서는 0.05~0.10사이에서 나타났고, Fellenius方法과 Janbu方法에서는 모든 地震係數에 대하여 最小安全率인 1.2以下로 나타났다. 堤防底面에서 높이 25m에 浸潤面이 位置해 있을 경우는 세 方法 모두에서 安全率인 1.2以下로 나타났다.

이와같은 現象은 盛土内の 浸潤面의 높이가 커질수록 土塊重量이 增加해서 활동 moment가 커지게 되고, 흙속의 過剩空隙水壓이 增加함으로써 剪斷強度가 減少되기 때문이라고 생각된다.

久樂²⁷⁾과 玉田¹¹⁾는 雨水의 浸透力에 대한 盛土内の 自由水面의 變化를 浸透流 解析方法에 의해서 考察하고, 降雨가 오랫동안 지속되면 浸透水가 不透水層에 도달하여 空隙水壓이 上昇되므로 斜面崩壞가 發生한다고 하였다.

宇野⁴²⁾은 河川堤防, 自然斜面, 盛土등은 一般的으로 不飽和土의 狀態로 安定을 維持하고 있으나, 豪雨나 洪水 등에 의하여 浸透가 發生할 경우에는 흙의 飽和度가 上昇해서 흙의 強度低下를 誘發하기 때문에 斜面崩壞가 發生한다고 하였다.

田中¹²⁾는 豪雨에 起因되는 崩壞는 表流水의 集中流河에 의한 것과 활동면에 作用하는 空隙水壓分布가 問題가 된다고 하였고, 특히 活動면 보다 위에 있는 土塊 또는 岩塊에 浸透流나, 地下水流가 存在하는 경우는 精確한 空隙水壓의 分布와 크기를 求해야 한다고 하였다.

盛土斜面의 崩壞는 대부분 豪雨時에 雨水의 浸透에 의해서 砂質土系 斜面에서 表層崩壞 形態로 나타나며 活動면의 깊이는 흙의 透水性, 降雨條件 등을 考慮해서 1~5m 사이로 推定했다. 또 地震에 의한 盛土崩壞 原因은 表層崩壞보다는 주로 盛土内の 活動面과외에 의한 것으로 5배정도 많이 發生한다고 하였다.³⁴⁾

3. 斜面 높이와 安全率과의 關係

Fig. 5(a), (b), (c)는 内部摩擦角이 30° , 傾斜角이 30° . 斜面높이(H_E)가 5m, 10m, 20m일 경우 세 方法으로 구한 最小安全率을 나타낸 것이다. 세 方法 모두 地震係數의 增加에 따라서 그리고 堤防의 높이가 增加함에 따라 最小安全率은 減少하였으나, 堤防높이 10m를 基準로 해서 그 以下에서는 堤防높이의 增加에 따른 最小安全率의 減少가 顯著하게 나타났고, 10m以上에서는 堤防높이의 增加에 따른 最小安全率의 減少가 완만하게 나타났다. 堤防높이가 낮은 경우는 粘着力의 增加에 따르는 最小安全率의 增加率이 컸고, 堤防높이가 높은 경우는 粘着力의 增加에 따른 最小安全率의 增加率이 작게 나타났다. 따라서 最小安全率에 미치는 粘着力의 影響은 堤防의 높이가 낮을수록 크게 나타났다.

그리고 세 方法中에서 Janbu方法은 粘着力의 影響이 적게 나타났으나, Fellenius方法과 Bishop方法에서는 粘着力의 影響이 크게 나타나서 堤防 높이 變化에 의한 安全率의 變化幅이 컸다. 따라서 堤防높이가 5m인 경우는 Fellenius方法과 Bishop方法에 의한 安全率이 Janbu方法보다 컸고, 堤防 높이가 25m에서는 반대로 Janbu方法에 의한 安全率이 크게 나타났다.

姜²³⁾도 傾斜面의 높이를 0~60m까지 變化시켜 본 結果, 斜面높이가 10m정도 까지는 斜面높이가 增加함에 따라 安全率이 급격히 減少한다고 하였고, 그 原因은 斜面높이가 일정치에 도달하면 崩壞의 形態 및 臨界圓의 位置가

거의 일정하기 때문에 나타나는 現象이라고 하였다. Bishop³⁾도 斜面的 높이가 낮은 경우는 安全率에 크게 影響을 미치지만 斜面的 높이가

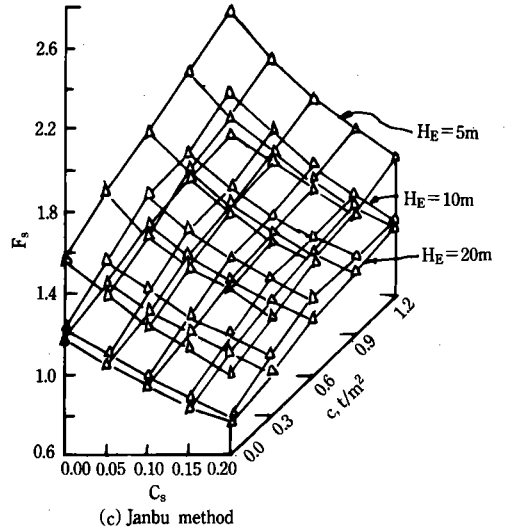
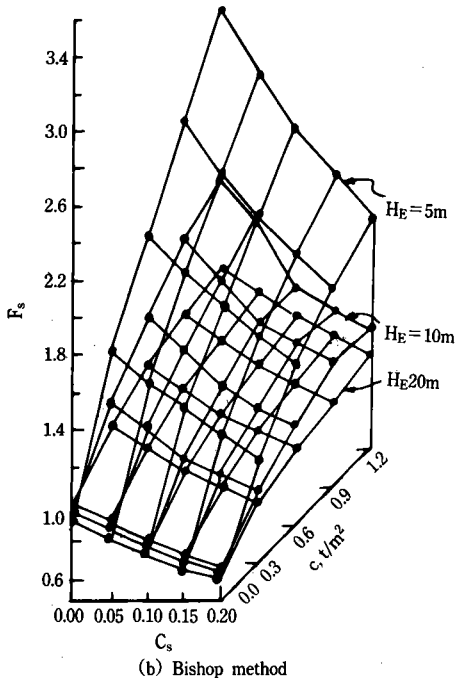
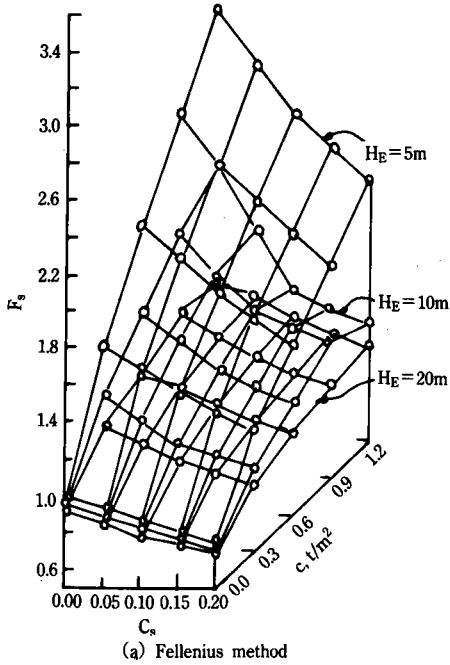


Fig. 5. Variations of F_s with C_s and c for the height of embankment ($\beta=30^\circ$, $\phi=30^\circ$, $W_L=0m$)

높은 경우는 그의 影響이 작게 나타난다고 하였다.

4. 置換 깊이와 安全率과의 關係

基礎 地盤이 軟弱할 때 이 部分을 砂礫土로 置換하여 堤防의 安定度를 높게 하는데 이를 위하여 單位重量이 $1.8t/m^3$, 内部摩擦角이 30° , 粘着力이 $0.0t/m^2$ 인 모래로 置換할 경우 置換 깊이(D_R)와 最小安全率(F_s)과의 關係를 糾明하기 위하여 傾斜角이 20° 와 30° 이고, 置換 깊이가 5m, 10m, 15m일 때 세 方法으로 求한 最小安全率의 關係는 Fig. 6(a), (b)와 같다. 置換 깊이가 클수록 급격한 安全率의 增加를 나타냈고, 置換 깊이가 작은 경우는 地震係數가 增加함에 따라 安全率의 減少幅이 작았지만, 置換 깊이가 큰 경우는 地震係數가 增加함에 따라 급격하게 安全率이 減少함을 보여주고 있다. 그리고 最小安全率은 Fellenius方法보다는 Bishop方法과 Janbu方法에서 약간 더 큰 값을 나타냈다.

野村³⁶⁾는 軟弱地盤上의 斜面安定解析을 할 때

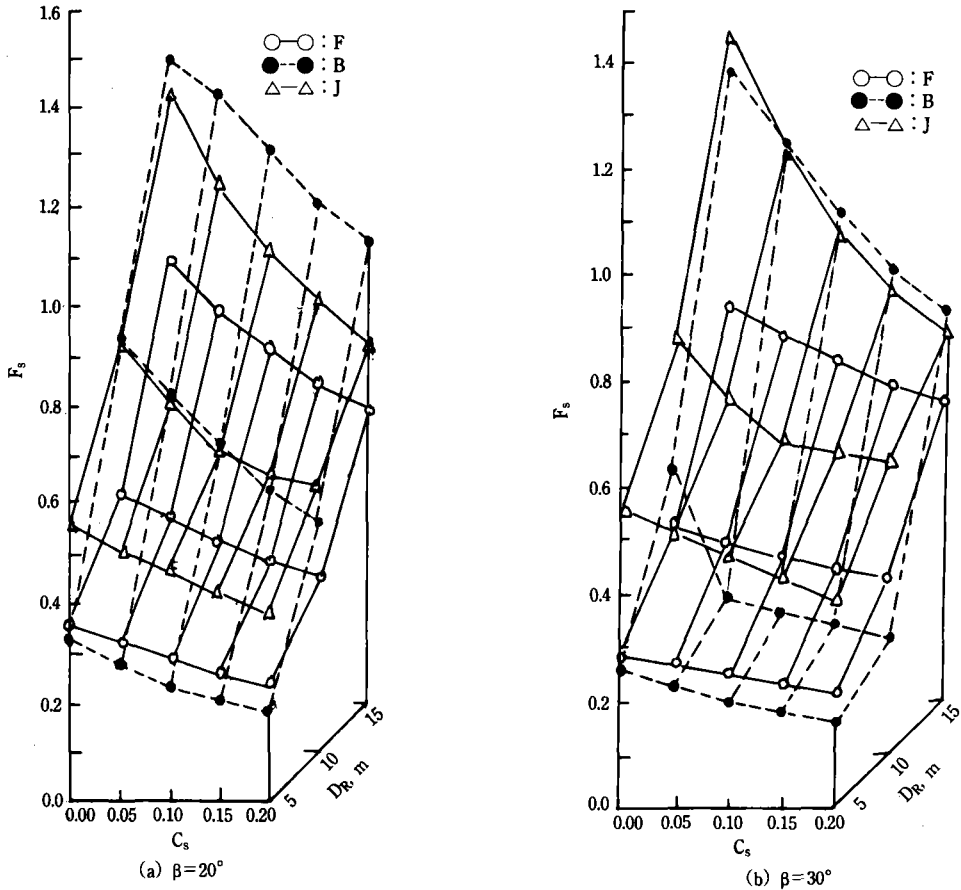
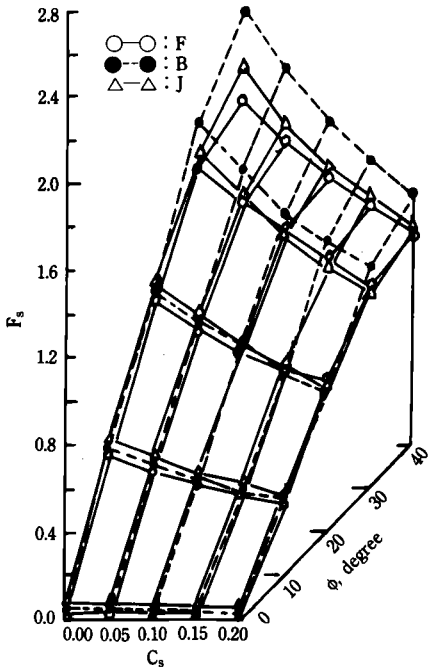


Fig. 6. Variations of F_s with C_s and D_R from the three different method ($W_L=0m$, $H_E=30m$)

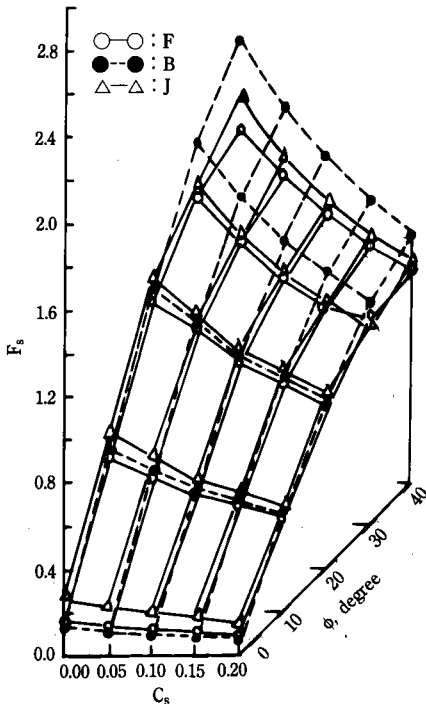
활동면의 位置 및 形狀은 盛土高, 軟弱層의 두께 排水層의 位置, 基礎의 變位등에 의해 다르게 나타나는데 연약층의 두께가 두껍고, 過剩空隙 水壓이 클 때는 깊은 원호 활동면으로 나타난다고 했고, 모래로 粘土層을 置換할 경우 置換깊이가 增加함에 따라 安全率의 增加도 크며, 置換깊이가 0m 일때는 Fellenius方法과 Bishop方法이 같은 安全率을 나타냈으나 置換깊이가 增加함에 따라 Fellenius方法보다는 Bishop方法에서 더 큰 安全率을 나타낸다고 하여 Fig. 7의 地震係數가 0.00일때와 같은 結果를 나타냈다.

5. 地震係數 및 内部摩擦角과 安全率과의 關係

Fig. 7(a), (b)는 傾斜角이 20° , 堤防높이 30m, 堤防底面에서 浸潤面의 높이가 5m, 粘着力이 $0.3t/m^2$ 와 $1.2t/m^2$ 일때 地震係數와 内部摩擦角의 變化에 따른 最小安全率을 세 方法으로 구한 것이다. 内部摩擦角이 작은 경우는 安全率에 미치는 地震係數의 영향은 적었으나 内部摩擦角이 커질수록 地震係數의 增加에 의한 減少現象이 크게 나타났으며 이와같은 現象은 세 方法에서 모두 類似하게 나타났다. 따라서 内部摩擦角이 큰 흙일수록 地震係數의 影響이



(a) $c=0.3t/m^2$



(b) $c=1.2t/m^2$

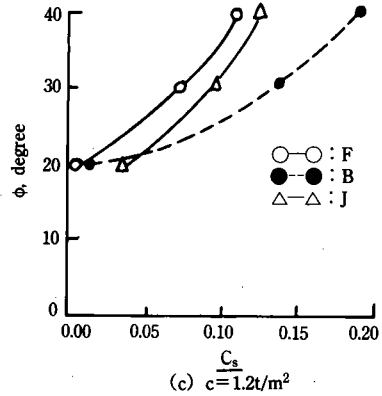


Fig. 7. Variations of F_s with C_s and ϕ from the three different methods ($\beta=20^\circ$, $W_L=5m$, $H_E=30m$)

음을 알 수 있다.

Fig. 7(c)는 斜面安定의 尺度로써 安全率값을 1.2를 基準으로 했을때, 内部摩擦角이 變化하면서 最小安全率이 1.2가 되는 地震係數의 값도 變化되지만 大體의으로 보면, 粘着力이 $1.2t/m^2$ 일 경우 内部摩擦角이 20° 일때는 세 方法 모두 地震係數값의 範圍는 0.00~0.05사이로 나타났다. 内部摩擦角이 30° 일때는 Fellenius方法和 Janbu方法에서는 0.05~0.10사이에서 나타났고, Bishop方法에서는 0.10~0.15사이에서 나타났다. 또 内部摩擦角이 40° 일 경우에 地震係數값의 範圍는 Fellenius方法和 Janbu方法에서는 0.10~0.15사이에서 나타났고, Bishop方法에서는 0.15~0.20사이에서 最小安全率이 1.2로 되었다.

Fig. 8(a), (b)는 傾斜角이 30° , 堤防底面에서 浸潤面의 높이가 5m이고, 粘着力이 $0.3t/m^2$ 와 $1.2t/m^2$ 일때 Fellenius方法和 Bishop方法 및 Janbu方法으로 구한 最小安全率의 變化를 나타낸 것이다. 安全率은 초기에는 Janbu方法에서 약간 크게 나타났으나, 内部摩擦角이 40° 에서는 Bishop方法으로 구한 값이 더 크게 나타났다.

菊澤²⁴⁾은 剛塑性有限要素解析을 斜面安定計算에 적용한 結果, 地震應答加速度가 0.12g 정

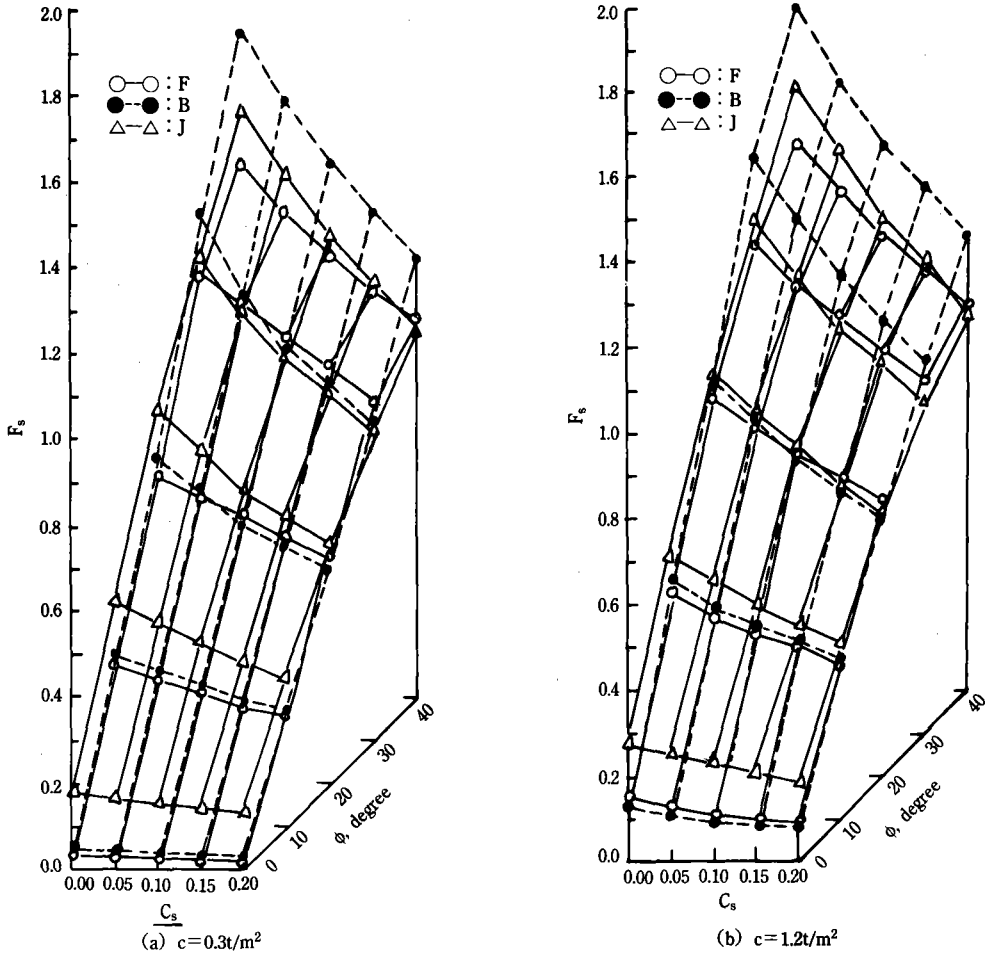


Fig. 8. Variations of F_s with C_s and ϕ from the three different methods ($\beta=30^\circ$, $W_L=5m$, $H_E=30m$)

도일때 堤頂部에서 활동이 일어났고, 그 경우 rock材料의 内部摩擦角과 core재료의 粘着力은 堤의 安定性에 중요한 因子가 된다고 하였다. 또, 崩壞地와 非崩壞地에서 2次元 安定解析을 한 결과, 動的強度는 靜的強度 보다 약간 크며 地震係數의 增加에 따라서 安全率은 다 같이 減少하지만, 崩壞地에서는 地震係數값이 0.15, 非崩壞地에서는 地진계수값이 0.29~0.4정도로 나타났다고 하였다.

谷口 等¹³⁾은 崩壞된 斜面(崩壞깊이 35m, 崩壞 幅 150m, 崩壞길이 250m)에 대하여 地震

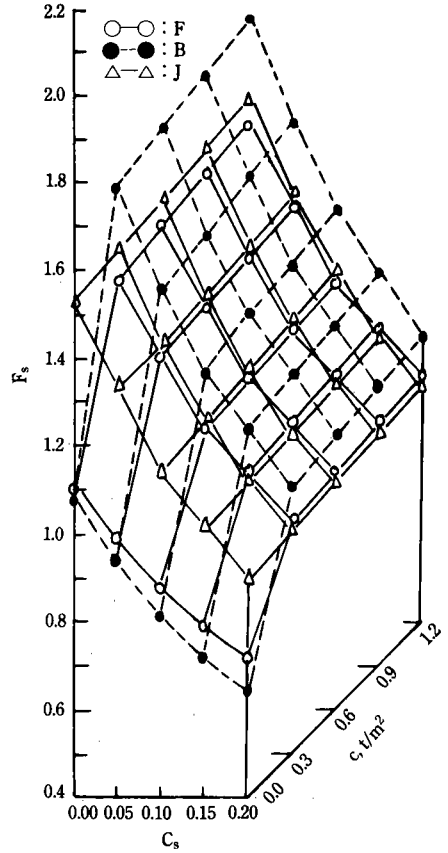
應答解析을 한 결과, 表層地盤에서 應答加速度가 크게 발생하고 崩壞土塊의 内部에서는 200 gal이상의 水平加速度가 발생되었다. 특히 上下의 견고한 層에 軟弱한 風化硬岩層이 존재할 경우는 水平加速度가 300gal 以上으로 增幅되어 사면이 崩壞되는 原因이 된다고 하였다.

6. 地震係數 및 粘着力과 安全率과의 關係

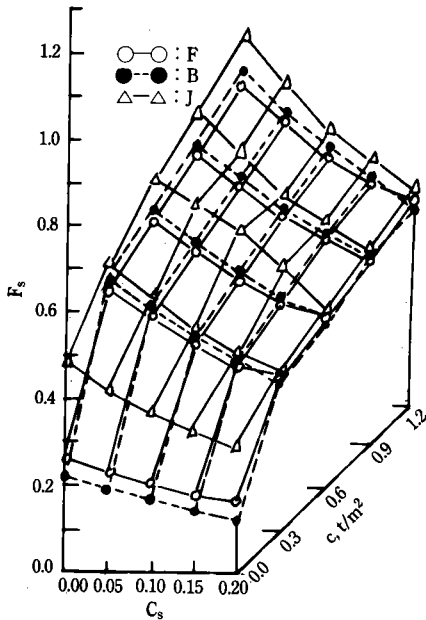
Fig. 9(a), (b)는 傾斜角이 20° , 堤防底面에서 浸潤面의 높이가 5m, 内部摩擦角이 10° 와

30°일때 세 方法으로 구한 最小安全率의 變化를 나타낸 것이다. 地震係數의 增加에 따라서 세 方法 모두 安全率은 일정한 減少現象을 나타내고 있고, 粘着力은 0.0~0.3t/m²에서 最小安全率의 增加率이 약간 큰 變化를 보였지만 그 이후는 일정하게 增加하는 現象을 나타냈다. Fig. 9(a)에서 内部摩擦角이 10°일 경우 粘着力이 0.0~1.2t/m²에서는 모든 地震係數에 대하여 安全率이 1.2以下로 되었다. Fig. 9(c)에서 内部摩擦角이 30°일 경우 粘着力이 1.2t/m²에서 最小安全率이 1.2가 되는 地震係數값의 範圍는 Fellenius方法과 Janbu方法에서는 0.05~0.10사이에서 나타났고, Bishop方法에서는 0.10~0.15 사이로 나타났다.

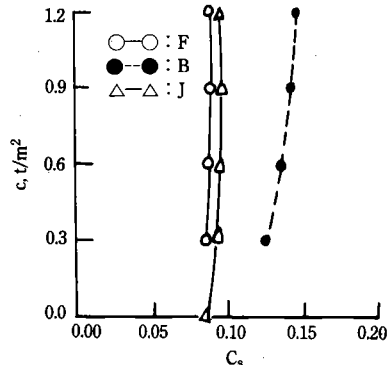
Fig. 10(a), (b)는 傾斜角이 30°, 堤防底面에서 浸潤面의 높이가 5m이고, 内部摩擦角이 10°와 30°일때 Fellenius方法과 Bishop方法 및 Janbu方法으로 구한 最小安全率의 變化를 나타낸 것이다. 地震係數의 增加에 따라서 세 方法 모두 安全率은 일정한 減少를 나타내고 있고,



(b) $\phi=30^\circ$



(a) $\phi=10^\circ$



(c) $\phi=30^\circ$

Fig. 9. Variations of F_s with C_s and C from the three different methods ($\beta=20^\circ$, $W_L=5m$, $H_E=30m$)

또 粘着力의 增加에 따라서도 最小安全率은 일정하게 增加함을 보여주었다. Fig. 10(a)에서 内部摩擦角이 10°일 경우 粘着力이 0.0~1.2t/m² 에서는 모든 地震係數에 대하여 安全率이 1.2 以下로 되었다. Fig. 10(b)에서 内部摩擦角이 30°일 경우 粘着力이 0.0~1.2t/m²에서는 Fellenius方法과 Janbu方法에서 모든 地震係數에 대

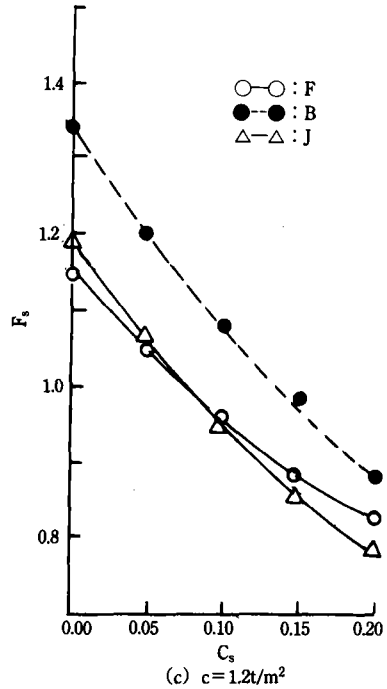
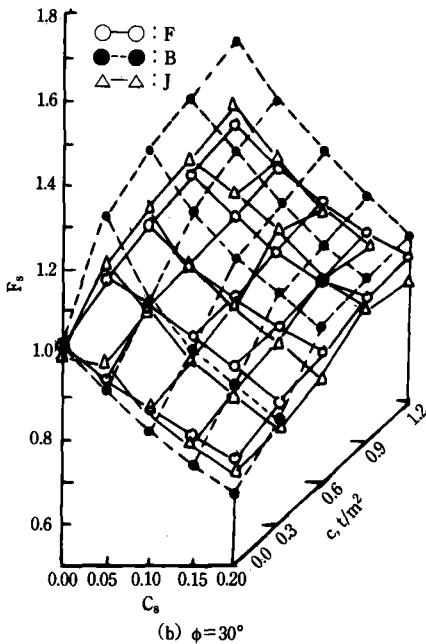
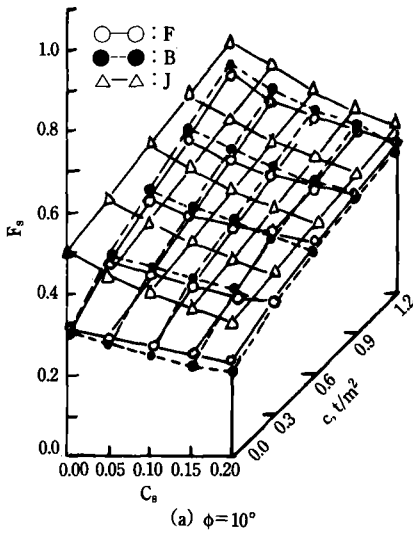


Fig. 10. Variations of F_s with C_s and c from the three different methods ($\beta=30^\circ$, $W_L=5m$, $H_E=30m$)

하여 最小安全率이 1.2以下로 나타났다. 또 Fig. 10(c)에서보는 바와 같이 Bishop方法에서는 粘着力이 1.2t/m²일때 安全率이 1.2가 되는 地震係數값의 範圍은 0.00~0.05사이로 나타났다.

古架 等¹⁵⁾은 有效應力強度와 全應力強度에 의한 地震係數와 最小安全率의 關係를 考察해 본 結果, 有效應力強度를 이용한 場合의 最小安全率은 어떤 限界를 지나면 급격히 低下하는 데 이는 液狀化抵抗係數에 크게 依存되기 때문 이라고 하였다. 그리고 全應力強度를 이용했을 場合의 最小安全率은 地震係數에 크게 依存되며 最小安全率이 1.0이 될때의 地震係數는 有效應力強度에서는 0.05~0.10, 全應力強度에서는 0.10~0.15사이에서 나타났다.

이들 解析方法을 比較한, 結果, 雨水浸透에 의한 單位重量의 變化, 空隙水壓의 分布, 強度 定數의 變化, 浸潤面의 變化와 斜面의 形態,

斜面높이, 斜面傾斜角, 활동면의 位置等の 幾何學的條件, 흙의 不均一性, 應力-變形 特性等을 考慮한 正確한 入力資料의 選定이 解析方法보다 安定解析의 結果에 더욱 큰 影響을 주는 것으로 생각된다.

IV. 結 論

地震係數를 基礎로 하여 堤防의 形態와 土質 定數등을 變化시키면서 Fellenius方法과 Bishop方法 및 Janbu方法으로 最小安全率을 구해서, 比較分析한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 粘着力이 增加함에 따라 Janbu方法보다는 Fellenius方法과 Bishop方法에서 安全率의 增加率이 컸으며, 内部摩擦角이 增加함에 따라서 最小安全率의 增加幅은 Janbu 方法에서 가장 작은 값을 나타냈다. 그리고 最小安全率에 미치는 影響은 粘着力보다는 内部摩擦角에서 더 크게 나타났다.

2. 浸潤面의 높이 變化에 따라서는 Fellenius方法, Bishop方法 및 Janbu方法 모두 0m, 5m에서는 거의 비슷한 最小安全率을 나타냈고, 25m일때는 급격한 最小安全率의 減少를 나타냈다.

3. 盛土높이 變化는 Fellenius方法, Bishop方法 및 Janbu方法 모두 地震係數가 增加함에 따라 10m以下에서는 盛土높이가 增加함에 따라 급격한 最小安全率의 減少를 나타냈으며, 10m以上에서는 最小安全率은 緩慢한 減少를 나타냈다. 또 最小安全率에 미치는 粘着力의 影響은 堤防의 높이가 낮을수록 크게 나타났다.

4. 地震係數가 增加함에 따라서 最小安全率의 減少現象은 置換깊이가 큰 경우에 더욱 顯著하게 나타났다. 그리고 置換깊이가 작을때는 Bishop方法과 Fellenius方法은 같은 安全率을 나타내나, 置換깊이가 增加함에 따라 Fellenius方法보다는 Bishop方法과 Janbu方法에서 구한 最小安全率이 더 큰 값을 나타냈다.

5. 粘着力과 内部摩擦角이 클수록 地震係數의 增加에 따른 最小安全率의 減少現象은 顯著하게 나타났다. 또 흙의 強度定數(c, ϕ)가 클수록 最小安全率에 미치는 地震係數의 影響은 크게 나타났다.

6. 地震係數를 考慮했을 때는 Bishop 方法보다는 Fellenius方法과 Janbu方法으로 安定度를 檢討하는 것이 構造物 安定에 유리하다.

이 論文은 1990年度 文敎部支援 韓國學術 振興財團의 地方大育成 學術研究助成費에 의하여 研究되었음.

參 考 文 獻

1. Ambraseys, N. N., 1960, On the Seismic behavior of earth dams, Proc. 2nd, World Conf. Earthquake Engng, Vol. 1, pp. 331-358.
2. Baligh, M. M., and A. S. Azzouz, 1977, End effects on stability of cohesive slopes, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. GT11, November, pp. 1105-1117.
3. Bishop, A. W., 1955, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, Geotechnique Vol. 5, pp. 7-17.
4. Brunnsden, D. and D. B. Prior, Slope Instability, John Wiley and Sons.
5. Cakmak, A. S., 1984, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, C. M. L. Publications.
6. Cakmak, A. S., 1987, Soil Structure Interaction, Developments in Geotechnical Eng. No. 43, Elsevier.
7. Chen, R. H., 1981, Three-Dimensional Slope Stability Analysis, Purdue University.
8. Chen, W. F., and M. W. Giger, 1971, Limit analysis of stability of slopes, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,

- ASCE, Vol. 97, No. SM1, January, pp. 19-27.
9. Clough, R. W. and A. K. Chopra, 1966, Earthquake Stress analysis in earth dams, ASCE. 92, EM2, pp. 97-211.
 10. Cook, R. D., 1973, Concepts and applications of finite element analysis, John Wiley and Sons.
 11. 玉田, 1987, 地すべり面における c, ϕ の考 え方, 土と基礎, Vol. 35, No. 11, pp. 9-14.
 12. 田中 茂, 1988, 豪雨時 山腹斜面安定解析上の 問題點, 土と基礎, Vol. 36, No. 5, pp. 7-12.
 13. 谷口榮一, 久保田哲也, 1985, 長野縣西部地 震による松越地區の斜面崩壊, 土と基礎, Vol. 33, No. 11, pp. 59-65.
 14. 福佳隆一, 木村薫, 1961, 施工時 盛土地盤 強さに 關する考察(その 1, 2, 3), 土と基礎, Vol. 11, No. 2, 4, 6.
 15. 古架泰之, 松尾 修, 1988, 地震時斜面安定解 析に用いる土の強度に關する考察, 土と基 礎, Vol. 36, No. 5, pp. 37-42.
 16. Güdehus, G., 1977, Finite Elements in Geo- mechanics, John Wiley and Sons.
 17. Hirschfeld, R. C., 1973, Embankment Dam Engineering, Cassagrande Volume, John Wiley and Sons.
 18. Hovland, H. J., 1977, Three-dimensional slope stability analysis method, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT9, September, pp. 971-986.
 19. Huang, Y. H., 1983, Stability Analysis of Earth Slopes, Van Nostrand Reinhold Company Inc.
 20. Huang, Y. H., and M. Craig, 1976, Stability of slopes by logarithmic spiral, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT1, January, pp. 41-50.
 21. 今泉, 山口, 大橋, 1988, 一般分割法による 斜面の安定解析, 土と基礎, Vol. 36, No. 5, pp. 55-60.
 22. Kane, T. R. and D. A. Levinson, 1985, Dynamic Theory and Applications, McGraw-Hill Book Company.
 23. 姜义默, 趙成燮, 池仁澤, 1989, 斜面の 安定 解析에 關한 研究, 韓國農工學會誌, Vol. 31, No. 1, pp. 58-70.
 24. 菊澤正裕, 1987, 大地震時における ロック ファイルダムの安定解析, 土と基礎, Vol. 35, No. 11, pp. 15-20.
 25. Kiyoo Mogi., 1989, Earthquake Prediction, Academic Press.
 26. 韓國動力資源研究所. 1983, 韓半島의 地震 危險分布圖.
 27. 久樂勝行, 石塚廣史, 1982, 雨水の浸透と盛 土の安定性, 土と基礎, Vol. 30, No. 9, pp. 37-43.
 28. Lefebvre, G. and J. M. Duncan, 1973, Three- dimensional finite element analysis of Dam, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol. 99, No. 7, pp. 495-507.
 29. 松村孫治, 1934, 地震動による 土堰堤の 變 形, 内務省土木試驗報告, Vol. 28, pp. 1-67.
 30. Matsuo, S., K. Nishica, and S. Yamashita, 1968, Weathering of the granite soils and its influence on stability of slope, Memoirs of the Facu. Eng. Kyoto Univ., Vol. 30, Part 2, pp. 85-93.
 31. Meyerhof, G. G., 1970, Safety factor in soil mechanics, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 349-354.
 32. Mohan, A., 1972, Computerized slope stabi- lity analysis, A sliding block model, Purde University.
 33. Newmark, M., 1971, Fundamentals of Ear-

- thquake Engineering, Prentice-Hall, Inc.
34. 日本土質工學會, 1989, 斜面安定解析.
 35. 日本土質安定材料委員會編, 1990, 斜面安定工法, 昌宇出版.
 36. 野村健可他, 1968, 斜面安定計算におけるピシュツブ法とチエボタリオフ法の比較, 港灣技術研究所報告, Vol. 7, No. 4, pp. 133-175.
 37. Sarma, S. K., 1973, Stability analysis of embankments and slopes, Geotechnique, vol. 23, pp. 423-433.
 38. Seed, H. B. and G. R. Matin, 1966, The seismic coefficient in earth dam design, J. Soil Mech. Found. Divi., ASCE, 92, SM3, pp. 25-28.
 39. Trifunac, M. D. and A. G. Brady, 1975, On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strog ground motion, Bull. of Seismol. Society of Am., Vol. 65, No. 1, pp. 139-162.
 40. Uchida, I. and T. Hiruta, 1977, Failure of embankment slope of silty and Masa, Proc. of the 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 161-164.
 41. 内田一郎, 鬼塚克忠, 平田登基南, 1973, マサ土の盛土斜面の崩壊に関する實驗的研究, 第18回土質力學シンポジウム, pp. 59-66.
 42. 宇野尙雄, 宮下高昭, 1981, 浸透による不飽和土の強度低下について, 土と基礎, Vol. 129, No. 6, pp. 41-47.
 43. 山田嘉昭, 臭村季人, 吉永寛, 1980, 有限要素法による應力解析とそのマイクロコンピュータ化, 生産研究, Vol. 32(3), pp. 98-105.
 44. 安中正實, 1989, フィールダムの三次元振動に関する研究.