

荷重의 分散性を 고려한 對數螺線斜面 破壞의 確率論的 解析

A Probabilistic Analysis on Logarithmic-Spiral
Failure of Slope in Consideration of Load Variance

鄭 聖 寬*

Jung, Sung-Gwan

權 武 男**

Kwon, Moo-Nam

Abstract

Until now, most probabilistic approaches to the slope stability analysis have been accomplished on the arc failure surface without load.

In this study, the relationships between the probability of failure and the safety factor are investigated when the shape of failure is logarithmic spiral on the homogeneous slope with ground water level, the probability distributions of the load and the strength parameter of soil being assumed as normal distribution, log-normal distribution and beta distribution.

The results obtained are as follows;

1. For the same safety factor, the design of slope is more reasonable by using the probability of failure than by the safety factor because the probability of failure is increased as the coefficient of variation is increased.

2. The safety factor is more reasonably determined by the coefficient of variation of the strength parameter than by the field condition when the safety factor is applied to design of slope.

要 旨

현재까지 斜面의 安定解析은 거의 決定論的 方法에 의해서 圓弧斜面을 대상으로 연구가 수행되어 왔다. 그러나 실제적으로 斜面의 破壞形狀은 對數螺線, 複合直線, 橢圓形, Cycloid 曲線 등의 다양한 형태를 나타내고 있다.

따라서 本 研究은 地下水位를 고려한 均質한 斜面의 破壞形狀을 對數螺線으로 하고 荷重과 흙의 強度定數의 確率變數分布를 正規分布, 對數定規分布 및 베타分布로 가정하여 斜面의 破壞確率을 구했다. 그리고 斜面安定設計에 이용되고 있는 安全率과 破壞確率과의 관계를 분석하여 許容安全率에 대한 信賴度를 판단하기 위하여 수행되었다.

그 결과로 同一한 安全率에 대해서 變異係數가 증가함에 따라서 破壞確率이 증가하므로 斜面設計에 있어서 安全率보다 破壞確率을 이용하는 것이 합리적이라고 생각된다. 또한 許容安全率은 현장 조건을 고려하여 결정하는 것보다는 강도정수의 變異係數에 의하여 결정하는 것이 더 타당하다고 판단된다.

* 正學員, 慶北大學校 農科大學 造景學科, 助教授

** 正會員, 慶北大學校 農科大學 農工學科, 教授

1. 序 論

斜面安定解析에 있어서 破壞形狀은 實際의으로 對數螺線, 複合直線, 圓弧, 橢圓形, Cycloid 曲線, 複合曲線 等の 形態를 나타내고 있으나 主로 圓弧破壞面에 對해서 많은 研究가 수행되어 왔다. 그러나 斜面安定問題에 對數螺線破壞面을 安全率 計算에 導入한 것은 1937年 Taylor¹⁴⁾이고, 그 후 Spencer,¹¹⁾ Huang et. al.,⁴⁾ Chen²⁾ 等に 의하여 발전되어 왔다.

그리고 斜面安定을 解析하는데 있어서 安全度의 尺度로서 安全率 概念을 사용하고 있으며 주어진 斜面의 安全率을 구하기 위하여 사면의 기하학적 諸要素와 함께 사면의 物理的, 力學的定數 특히 강도정수의 代表值를 결정하여 이용하고 있다. 그러나 이러한 값들은 사면내의 각 점마다, 그리고 시간에 따라 많이 변화하고 있으며, 실험실에서 발생하는 각종 誤差의 原因에 의하여 동일한 값을 얻을 수 없는 경우가 많다. 따라서 실험실에서 얻은 실험치에 의해서 現場強度를 推定한다는 것은 많은 不確實性을 내포하게 된다. 더구나 사면내의 空隙水壓, 荷重 그리고 사면안정해석의 이론적인 模型을 實際解析的인 模型으로 바꾸는데 필요한 假定에도 많은 不確實性이 내포되어 있어서 安全率이 1 이상되어도 사면파괴가 일어나는 많은 예들을 볼 수 있다.^{1,12)}

따라서 이러한 確率變數中에서 어느 特定한 單一值를 使用해서 구한 안전율은 不確實性을 내포하기 때문에 수치적 기준이 될 수 없다.^{6,15)} 이 안전율은 사면을 安全과 破壞로 구분할 수는 있으나 安全의 程度인 信賴度를 판단할^{6,18,19,27)} 수는 없다. 그래서 안전율에 대치할 수 있는 새롭고 합리적인 信賴度解析方法으로 確率論的 接近方法의 定立이 필요하게 되어 破壞確率의 개념이 導入되었다. 그리고 破壞確率理論을 더욱 발전시키면 사면의 파괴를 예측할 수 있으며⁸⁾ 破壞時 費用을 산출하여 斜面의 最適設計도 가능하게 된다.⁹⁾

土質定數, 空隙水壓 等に 대한 統計學的 確率分布가 Meyerhof,²⁷⁾Schultze,^{28,29)}Lumb,⁵⁾Wu¹⁷⁾에 의하여 발표됨으로서 토질공학분야에서도 破

壞確率理論이 도입되기 시작하였다. 土質定數의 分散性을 합리적으로 고려하여 사면의 破壞確率에 적용한 것은 Alonso,¹³⁾ Singh,¹⁰⁾ Veneziano,¹⁶⁾ Tobott,¹⁵⁾ Minoru^{7,8,9)}인데 이외에도 많은 연구가 있다.

그러나 이제까지 발표된 사면의 파괴확률은 거의 원호파괴면에서 하중의 분산성을 고려하지 않고 수행되었다.

그러나 본 연구는 지하수위를 고려한 均質한 사면의 破壞形狀을 對數螺線으로 하고 흙의 強度定數와 荷重의 確率變數分布를 正規分布, 對數正規分布, 그리고 베타分布로 가정하여 사면의 파괴확률을 구하기 위한 Program을 Monte-Carlo Simulation 方法에 의하여 개발하였다.

그리고 사면안정설계에 이용되고 있는 안전율과 하중 및 강도정수의 分散性을 합리적으로 고려한 파괴확률과의 관계를 분석하고, 사면설계에 이용되는 許容安全率과 破壞確率과의 관계를 究明하여 許容安全率에 대한 信賴度를 판단하기 위하여 수행되었다.

2. 破壞確率에 관한 不確實性 要素

2.1. 土質定數

흙의 土質定數를 알기 위하여 공사 규모나 지질학적 資料를 기초로 보링, 사운딩, 試料採取 등에 의한 현장실험과 실내실험을 한다. 그러나 시료교란, 공시체의 크기, 剪斷率, 試料採取方向, 非等方性, 平面變形破壞 및 進行性破壞 等の 실험실 시험조건과 현장조건이 다르고 토질의 空間的 變化性, 試驗方法 및 한정된 시료의 수와 시험의 숙련도 등에 따라 같은 흙일지라도 동일한 결과를 얻는다는 것은 불가능하다. 따라서 모든 土質定數는 본질상 單一值로 취급할 수 없는 確率變數이다.^{5,12,28,29)} 이러한 토질의 不確實性 要素들을 줄이기 위해서는 많은 수의 시료와 大型試料에 대한 시험이 실시되어야 하지만 시간적·경제적 制約이 따르게 된다.

그래서 Lee et. al.²⁴⁾은 여러 학자들의 연구자료를 정리하여 각 토질정수의 變異係數(coefficient of variation)를, Harr²¹⁾는 여러가지 흙에 대한 強度定數의 平均, 標準偏差, 變異係數를

발표했다.

그리고 많은 학자들은 흙의 강도정수를 確率變數로 취급할 경우 그의 確率分布는 일반적으로 正規分布나 對數正規分布를 한다고 발표했다.^{3,7,10,15,28} 그러나 정규분포는 $-\infty \leq x \leq +\infty$, 대수정규분포는 $0 \leq x \leq +\infty$ 사이에 분포하므로 강도정수의 표현에는 문제가 있다고 하였다. 즉 강도정수는 陰의 값을 가질 수 없고 有限한 범위의 값임에도 불구하고 정규분포는 無限大의 값을 가지며 確率變數의 분포가 대칭이 아닌 데도 대칭으로 표현되는 약점을 가지고 있다.²⁰

그래서 Lumb⁵⁾은 강도정수의 분포가 정규분포 보다는 베타분포에 의하여 적합하게 표현될 수 있다는 것을 Chi-Square test에 의하여 확인하였다. 이러한 정규분포의 결점은 分布模型이 다양한 베타분포를 채택함으로써 제거시킬 수 있고 베타분포는 任意區間에 分布密度를 局限시킬 수 있으며, 非對稱의 分布密度를 가지고 있기 때문에 강도정수의 분포는 베타분포로 보는 것이 합리적이라고 하였다.

2.2. 荷 重

사면의 破壞確率에 영향을 주는 確率變數 중에서 하중요소는 사하중, 활하중, 파도하중, 풍하중 및 지진하중이 있는데 본 논문에서는 死荷重의 不確實性에 대해서만 言及하기로 한다.

사하중은 구조용재료, 기하학적 조건과 고정된 설비 등의 조건을 안다면 비교적 정확하게 크기를 구할 수 있다. 그러나 Tang¹³⁾에 의하면 사하중은 재료의 不均質性, 건축설비의 可變性, 설계와 시공의 不一致 때문에 不確實性이 존재하므로 確率變數로 취급되어야 한다고 하였다. 따라서 사하중의 確率分布도 강도정수의 確率分布만큼 중요한 의미를 가진다고 볼 수 있다.

Hart²²⁾는 사하중의 確率分布는 정규분포나 대수정규분포를 나타내고 變異係數는 보통 6~13%의 범위에 있으나 10%를 채택하는 것이 좋다고 했다.

3. 解析 및 研究方法

3.1. 對數螺線에 의한 斜面解析

3.1.1. 理論 展開

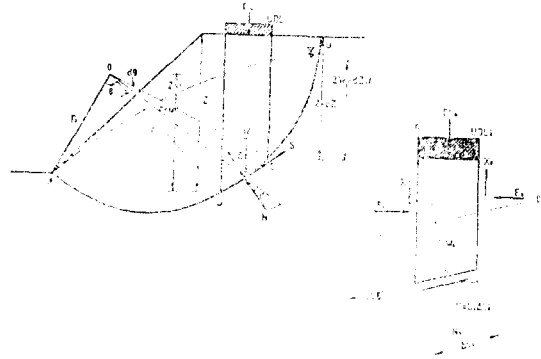


Fig. 1 Forces on the slice along the rupture surface

Fig.1에서 切片의 양측에 작용하는 힘의 합을 0이라 가정하면

$$X_1 - X_2 = 0, \quad E_1 - E_2 = 0$$

가 된다.

切片의 저면에 수직한 방향의 합력은

$$\sum F_n = 0$$

$$(W_i + CL_i + UDL_i) \cos \epsilon_i = N_i + U_i \cdot \Delta L_i$$

$$N_i = [(W + CL + UDL) \cos \epsilon - U \cdot \Delta L]_i \dots \dots (1)$$

$$F \cdot S = \frac{\text{Resisting force}(R \cdot F)}{\text{Driving force}(D \cdot F)} \dots \dots (2)$$

여기서

$$R \cdot F = \sum_{i=1}^n S_i$$

$$= \sum_{i=1}^n (\bar{C}_i + \bar{\sigma}_i \cdot \tan \bar{\phi}_i) \cdot \Delta L_i$$

$$= \sum_{i=1}^n \bar{C}_i \cdot \Delta L_i + \sum_{i=1}^n [(W + CL + UDL) \cos \epsilon - U \cdot \Delta L] \cdot \tan \bar{\phi}_i \dots \dots (3)$$

$$D \cdot F = [(W + CL + UDL) \cdot \sin \epsilon]_i \dots \dots (4)$$

(3), (4)式을 (2)式에 代入하면 안전율

$$F \cdot S = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{C}_i \cdot \Delta L_i + \sum_{i=1}^n [(W + CL + UDL) \cos \epsilon - U \cdot \Delta L] \cdot \tan \bar{\phi}_i}{\sum_{i=1}^n [(W + CL + UDL) \sin \epsilon]_i} \dots \dots (5)$$

이다.

3.1.2. 解析方法

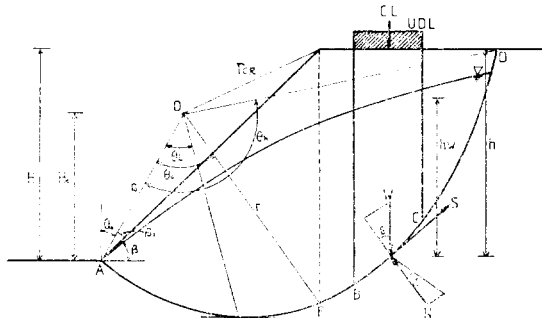


Fig. 2 Method of analysis

대수나선 파괴가 斜面部分 또는 水平部分에서 발생하는지를 Fig. 2에서 검토하면 다음과 같다.

$$r_{CR} = \sqrt{(H_0 \tan \theta_0 - H / \tan \beta)^2 + (H_0 - H)^2} \quad (6)$$

$$r = r_0 e^{\phi \cdot \tan \delta} \quad (7)$$

(6), (7)에서 $r_{CR} \geq r$ 이면 斜面部分에서, $r_{CR} < r$ 이면 水平部分에서 파괴가 발생한다.

非線型方程式의 解法에 의하여 斜面部分에서 파괴될 경우

$$F(\theta_H, \theta_0, \tan \phi, \beta) = 0$$

즉,

$$e^{\theta_H \cdot \tan \delta} \cdot \cos(\theta_H - \beta - \theta_0) - \cos(\beta + \theta_0) = 0 \quad (8)$$

한편 水平部分에서 發生할 때는

$$F(\theta_H, \theta_0, \tan \phi, H_0, H) = 0$$

즉,

$$H + \frac{H_0 \cos(\theta_H - \theta_0)}{\cos \theta_0} \cdot e^{\theta_H \cdot \tan \delta} - H_0 = 0 \quad (9)$$

으로 각각 中心角 θ_H 를 구할 수 있다.

그리고 Crest 의 中心角 θ_C 도 非線型方程式에 의해서

$$F(\theta_C, \theta_0, \tan \phi, \beta, r_0, H) = 0$$

즉,

$$r_0 \cdot \tan \beta (\sin \theta_0 + \sin(\theta_C - \theta_0)) \cdot e^{\theta_C \cdot \tan \delta} - H = 0 \quad (10)$$

로부터 구하고 가장 낮은 地點의 中心角 θ_i 는 다음과 같다.

$$\theta_i = \theta_0 + \phi \quad (11)$$

따라서 中心角 $\theta_H, \theta_C, \theta_i$ 를 각각 等分하여 切片法으로 해석하였다.

이때 파괴면으로부터 斜面部分까지의 높이

$$h = \frac{r_0}{\sin(\beta_1 + \theta_0)} \{e^{\theta \cdot \tan \delta} \cdot \sin(\beta_1 + \theta) - \sin \beta_1\} \quad (12)$$

또한 水平部分까지 높이는

$$h = \frac{r_0}{\sin(\beta_1 + \theta_0)} \{e^{\theta \cdot \tan \delta} \cdot \sin(\beta_1 + \theta) - \sin \beta_1\} - r_0 \tan \beta \cdot \{e^{\theta \cdot \tan \delta} \cdot \sin(\theta - \theta_0) - e^{\theta_C \cdot \tan \delta} \cdot \sin(\theta_C - \theta_0)\} \quad (13)$$

로 된다.

그리고 파괴면에서 지하수면까지의 높이는 空隙水壓係數를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$R_u = \frac{u}{\gamma \cdot h}$$

$$h_w = \frac{u}{\gamma_w} = \frac{\gamma \cdot R_u \cdot h}{\gamma_w} \quad (14)$$

그리고 절편의 中心에서 鉛直方向合力과 파괴면에 수직인 방향이 이루는 각 ϵ 는 다음과 같다.

$$\epsilon = \tan^{-1} \left[\frac{\tan(\theta - \theta_0) - \tan \phi}{1 + \tan \phi \cdot \tan(\theta - \theta_0)} \right] \quad (15)$$

3.2. Monte-Carlo Method 에 의한 斜面破壞 確率

Monte-Carlo method 는 亂數를 사용한 시뮬레이션 방법으로 모델에 포함된 確率的인 변화를 적당한 분포를 가지는 確率變數의 변화로 바꾸어 실험적으로 해결하는 방법이며 주로 다음의 두가지 경우에 사용한다.²³⁾

① 母集團의 分布를 모르거나 복잡하여 직접 이론적으로 導出하기에 곤란한 경우

② 어떤 集團의 분포를 알고 있어도 그것을 실제로 관찰하는 것이 전혀 불가능한 경우

따라서 본 연구에서는 강도정수와 하중분포의 평균치에 의하여 사면의 안전율을 계산하고 이에 따른 最小中央安全率(minimum central factor of safety)의 파괴면을 기준으로 각각의 분포에서 均等分布變換方法을 이용하여 確率變數를 生成한 후 斜面安定解析을 하였다. 이 때 Resisting force 와 Driving force 의 크기를 비교하면 매번 安全과 破壞로 判明될 것이다.²⁰⁾ 이때 破壞란 Driving force 가 Resisting force 를 超過하는 것을 의미한다. 즉 각 분포에서 N개의 確率變數를 生成하여 사면해석을 한 결과 M

개가 파괴되었다면 사면의 파괴확률 $PF = \frac{M}{N}$ 이고, 이때의 信賴度는 $1 - PF$ 로 정의할 수 있다.

그리고 Hahn et. al.²⁰⁾은 標本의 크기와 Error bands 에서 標本의 最小單位는 약 100개이지만 표본의 크기는 클수록 정확한 결과를 얻을 수 있고, 信賴度를 論할 때는 800개 이상이 되어야 한다고 했다.

3.3. 入力 Data

대수나선 파괴면에 대한 사면의 破壞確率을 구하기 위하여 사면의 높이는 6m로 가정하고

사면경사각은 Chen²¹⁾ et. al.의 연구결과 底部崩壞가 발생하지 않는다는 50°로 하였다.

Lee,²⁴⁾ Minoru et. al.^{7,8)}에 의하면 흙의 단위중량은 점착력이나 내부마찰각보다 分散性이 작기 때문에 破壞確率에 큰 영향을 미치지 않는다고 하였다. 따라서 본 연구에서도 습윤단위중량 1.8t/m³, 포화단위중량 2.0t/m³으로 一定하게 가정하였다. 그리고 강도정수와 하중의 變異係數는 Table 1에서와 같이 여러 학자들이 발표한 統計的 資料를 참고로 하여 점착력 35%, 내부마찰각 15%, 등분포하중과 집중하중은 각각 10%로 가정하였다.

Table 1. Coefficient of variation (%)

Source	Cohesion	I.F. Angle	Unit Weight	Dead load
Lee, I.K.	20~50	5~56	1~10	—
Harr, M.E.	—	6~14	—	—
Lumb, P.	17~32	14~23	—	—
Grivas, D.A.	35.9	26.7	—	—
Matsuo, M.	40	20	—	—
Hart, G.C.	—	—	—	6~13
Ang and Tang	—	—	—	10
Biernatowski	—	—	2~7	—
Assumption	35	15	—	10

그리고 각각의 標準偏差는 平均値에 變異係數를 곱하여 구했다. 또한 正規分布의 信賴度를 99.73%로 하여 信賴區間은 最大値($\mu + 3\sigma$)와 最小値($\mu - 3\sigma$)로 限定하고 確率變數의 最小値는 零으로 했다. 對數正規分布와 베타分布의 確率變數生成 區間은 正規分布와 동일하게 設定하였다. 물의 단위중량은 1t/m³, 공극수압계수는 0.1, 등분포하중과 집중하중은 하중값이 사면의 안전율과 파괴확률계산에 고려될 수 있도록 하기 위하여 사면의 Crest 부분에 위치하도록 設定하였다. 점착력, 내부마찰각, 등분포하중, 집중하중의 確率變數는 信賴度를 높이기 위하여 1,000개씩 發生시켜 破壞確率을 구했다. 그리고 사면의 안전율과 파괴확률의 관계를 분석하기 위하여 점착력의 평균치는 0.2~2.2t/m², 내부마찰각은 30~44°, 등분포하중 1~20t/m, 집

중하중은 2~30t으로 다양하게 가정하였고, 동일한 안전율에 대한 變異係數의 변화에 따른 파괴확률을 알기 위해서 Table 1을 참조하여 점착력 10~50%, 내부마찰각 8~30%, 등분포하중 및 집중하중은 각각 6~13%의 變異係數을 이용하였다.

4. 結果 및 考察

破壞確率理論을 導入하여 흙의 강도정수와 하중의 確率分布를 정규분포, 대수정규분포 및 베타분포로 가정하여 사면의 파괴확률에 관하여 연구된 결과를 분석하면 다음과 같다.

4.1. 強度定數의 變化에 따른 破壞確率과 安全率

Fig. 3 및 Fig. 4는 흙의 점착력, 내부마찰각, 등분포하중 및 집중하중의 값을 일정하게 하고 이들에 대한 變異係數도 각각 35%, 15%, 10% 및 10%로 일정하게 하여 구한 破壞確率과 강도정수 및 하중의 分散性을 고려하지 않은 安全率과의 관계를 나타내고 있다. Fig. 3은 점착력의 변화에 따라서 강도정수와 하중의 確率分布를 정규분포, 대수정규분포, 베타분포로 가정하여 구한 사면의 파괴확률은 서로 거의 차이가 없음을 나타내고 있다. 그리고 사면안정설계에 사용되는 안전율의 값을 1.3이라고 할때 그 이하에서는 곡선의 기울기가 매우 급하고 그 이상에서는 완만해지는 경향을 보이고 있다. 이것은 Minoru et. al.⁷⁾이 원호파괴면에 대한 안전율과 파괴확률의 관계를 연구한 결과와 비슷하다. 안전율을 1.3으로 할 경우 파괴확률은 10~11.3%이고, 1.5일때 4~5.2%의 값을 나타내고 있다. 이것은 사면의 안전율을 1.5로 설계한다고 하더라도 1,000개의 사면 중에서 40~52개는 강도정수와 하중의 不確實性 때문에 파괴될 가능성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 따라서 5%의

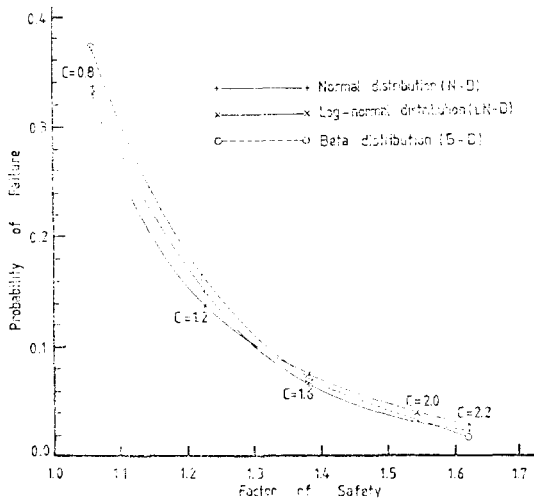


Fig. 3. Relationships between probability of failure and factor of safety. (C: Variables, $\phi=34^\circ$ (15%), U.D.L=2t/m(10%), C.L=7T(10%))

破壞可能性을 勘案하여 사면을 설계한다면 안전율은 1.44~1.5의 값으로 하는 것이 타당하다고 생각된다.

Fig. 4는 내부마찰각의 변화에 따른 사면의 안전율과 파괴확률의 관계인데, 점착력의 경우와 마찬가지로 각 分布別 差異는 미소한데 안전율이 1.3 이상일 때 곡선의 기울기는 점착력의 경우보다 더 완만해져 안전율 1.8일 때 거의 파괴확률이 없음을 나타내고 있다. 이것은 사면의 파괴형상이 對數螺線破壞面인 경우에 내부마찰각의 函數²⁵⁾가 되어 파괴확률 계산에 점착력보다 더 중요한 요소가 되고 있는 것으로 판단된다.

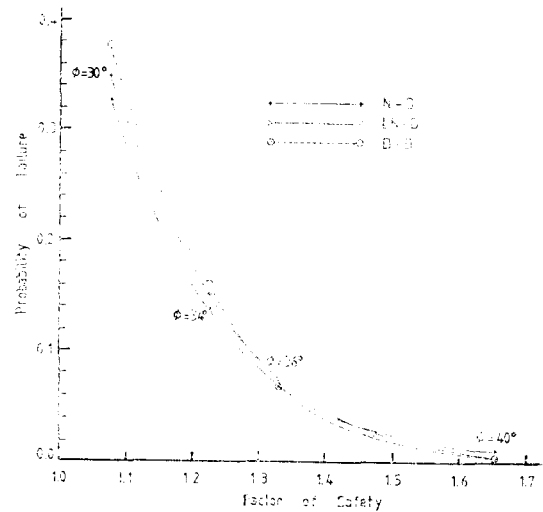


Fig. 4. Relationships between probability of failure and factor of safety. (ϕ : Variables, C=1.2t/m²(35%), U.D.L=2t/m(10%), C.L=7T(10%))

4.2. 荷重의 變化에 따른 破壞確率과 安全率

荷重의 不確實性은 강도정수에 비해서 미소하기 때문에 變異係數를 10%로 가정하여 구한 파괴확률과 안전율의 관계는 Fig. 5 및 Fig. 6과 같다.

Fig. 5에서 등분포하중의 변화에 따른 파괴확률과 안전율의 관계는 점착력의 경우와 비슷한 관계를 나타내고 있으며, 각 분포별 차이도 미소하다. 안전율을 1.3으로 할 경우 파괴확률은 11.2~12%이고, 파괴확률 5%인 경우의 안전

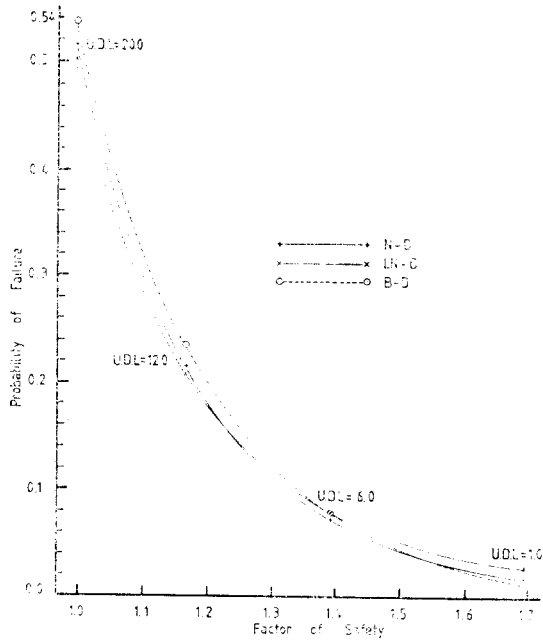


Fig. 5. Relationships between probability of failure and factor of safety. (U.D.L : Variables, $C=2.0t/m^2(35\%)$, $\phi=34^\circ(15\%)$, $C.L=5T(10\%)$)

율은 1.48~1.53 으로 나타났다.

Fig. 6에서 집중하중의 변화에 따라서도 접촉력과 유사한 관계를 보이고 있다. 사면의 안전율을 1.3으로 할 경우 파괴확률은 10.6~12.5%이고, 파괴확률 5%인 경우의 안전율은 1.445~1.455로 나타났다.

4.3. 空隙水壓 및 흙의 單位重量의 變化에 따른 破壞確率과 安全率

確率變數로 취급하지 않은 공극수압과 단위중량의 변화에 따른 파괴확률과 안전율의 관계를 알아보기 위하여 공극수압계수를 0.0~0.4까지 변화시키고, 습윤단위중량이 $1.7t/m^3$ 과 $1.8t/m^3$ 인 경우에 대하여 구한 결과는 각각 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다.

Fig. 7에서 습윤단위중량이 $1.7t/m^3$ 인 경우에 공극수압의 변화에 따른 파괴확률과 안전율의 관계는 접촉력과 비슷하다. 안전율을 1.3으로 할 경우 파괴확률은 12.2~13.55%이고, 파괴확률 5%인 경우의 안전율은 1.465~1.48로 나타

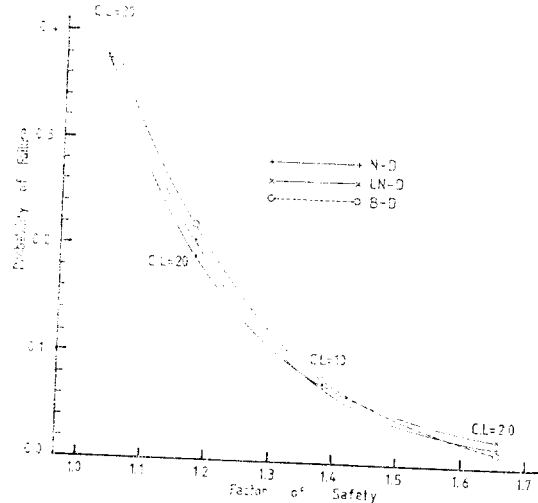


Fig. 6. Relationships between probability of failure and factor of safety. (C.L : Variables, $C=1.8t/m^2(35\%)$, $\phi=34^\circ(15\%)$, U.D.L= $2t/m(10\%)$)

났다.

Fig. 8에서 습윤단위중량 $1.8t/m^3$ 인 경우에도 파괴확률과 안전율의 관계는 접촉력과 類似한 경향을 나타냈다. 안전율을 1.3으로 할 경우 파괴확률은 11.4~12.55%이고, 파괴확률 5%인 경우의 안전율은 1.45~1.475로 나타났다.

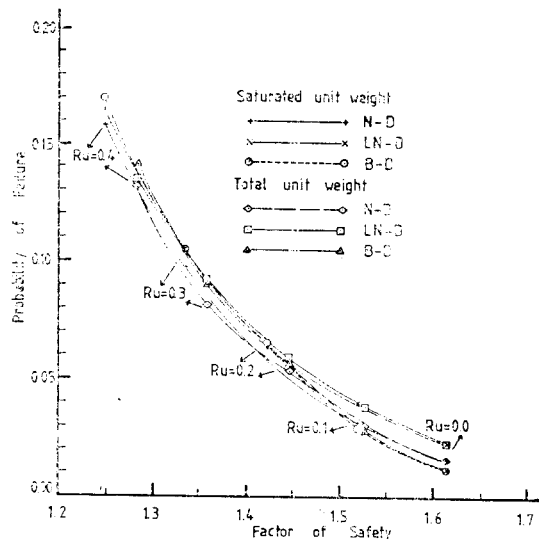


Fig. 7. Relationships between probability of failure and factor of safety. (Ru : Variables, $\gamma_s=1.7t/m^3$, $C=1.6t/m^2(35\%)$, $\phi=34^\circ(15\%)$, U.D.L= $2t/m(10\%)$, $C.L=3T(10\%)$)

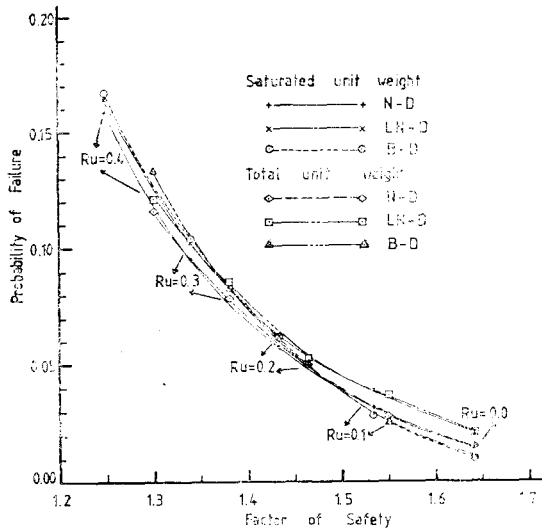


Fig. 8. Relationships between probability of failure and factor of safety. (Ru: Variables, $\gamma_s=1.8t/m^3$, $C=1.6t/m^2$ (35%), $\phi=34^\circ$ (15%), U.D.L=2t/m(10%), C.L=3T(10%))

따라서 하중을 고려한 사면해석에서 접착력, 내부마찰각, 하중, 공극수압 및 흙의 단위중량의 변화에 따른 파괴확률과 안전율은 거의 일정한 관계를 나타내고 있으며 각 분포간의 차이도 미소하다. 내부마찰각의 변화에 따라서는 파괴확률이 쉼에 수렴하는 속도는 다른 경우보다도 빠르게 나타났다. 그리고 안전율을 1.3으로 할 경우 파괴확률은 8.8~13.55%이고, 5%의 파괴확률에 대한 안전율의 범위는 1.375~1.5 정도로 추정할 수 있다.

4.4. 荷重을 고려하지 않은 狀態의 破壞確率과 安全率

일반적으로 사면설계에 적용되는 안전율은 하중 등 현장조건이 불리한 경우에 더 큰 값을 사용하고 있으나 이러한 사면설계방법의 妥當性을 검토해 보기 위해서 하중을 고려하지 않은 상태에서 접착력과 내부마찰각의 변화에 따른 파괴확률과 안전율의 관계를 분석한 결과는 Fig. 9 및 Fig. 10 과 같다. Fig. 9는 접착력이 변화하는 경우에는 하중을 고려한 상태에서와 마찬가지로 각 분포별로 파괴확률의 차이는 미소하며, 안전

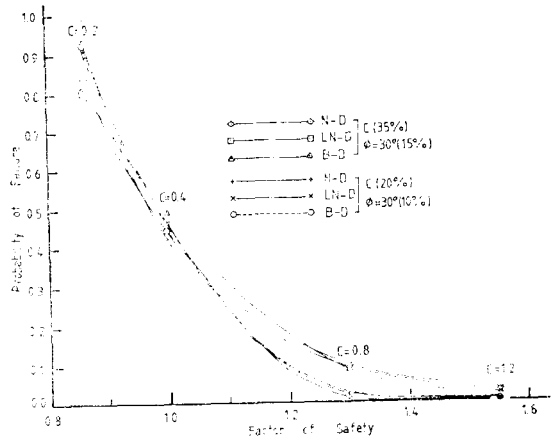


Fig. 9. Relationships between probability of failure and factor of safety. (C: Variables)

율 1.3 이하에서 파괴확률은 급격히 감소하고, 그 이상에서는 완만한 감소현상을 나타내고 있다. 안전율을 1.3으로 할 경우 파괴확률은 9~10.5%이고, 파괴확률 5%인 경우의 안전율은 1.375~1.44로 나타났다. 이것은 하중을 고려한 상태보다 동일한 안전율에서 파괴확률이 조금 작게 나타난 것이다.

Fig. 10은 내부마찰각이 변화하는 경우에 하중을 고려한 상태와 마찬가지로 안전율 1.3부근에서 파괴확률의 쉼에 수렴속도는 접착력의 경우보다 빠르게 나타나고 있다. 이것은 대수나선과

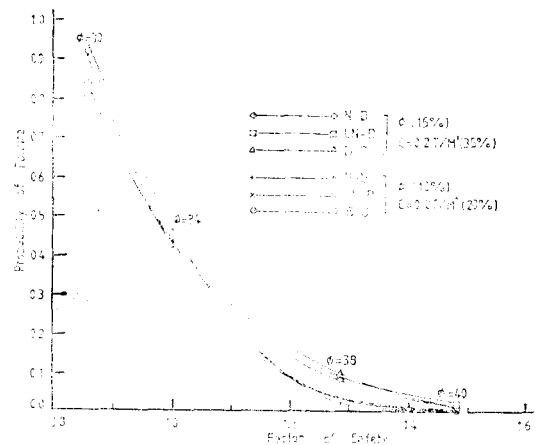


Fig. 10. Relationships between probability of failure and factor of safety. (ϕ : Variables)

괴면이 내부마찰각의 函數²⁵⁾가 되어 斜面安定計算에 중요한 요소가 되는 것을 再確認하고 있다 안전율을 1.3으로 할 경우 파괴확률은 7~10%이고 파괴확률 5%인 경우의 안전율은 1.37~1.42로 나타났다.

따라서 하중을 고려하지 않은 狀態에서 파괴확률과 안전율의 관계는 하중을 고려한 상태와 거의 비슷한 결과를 나타내고 있어서 決定論的 接近方法인 안전율에 의한 斜面設計法은 不合理性이 내포되어 있는 것으로 판단되어 이에 대해서는 더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

이것은 Minoru et. al.⁷⁾이 안전율은 강도정수의 分散性を 합리적으로 고려할 수 없기 때문에 構造物의 安定을 정확하게 설명할 수 없다고 한 것과 같은 결론이다.

4.5. 變異係數의 變化에 따른 破壞確率

사면의 파괴확률에 관계되는 요소중에서 점착력, 내부마찰각 및 하중의 分散性이 破壞確率에 미치는 영향을 검토하기 위하여 一定한 안전율에 대해서 각각의 變異係數를 다르게 하여 파괴확률을 구한 결과는 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 14 및 Fig. 15와 같다.

Fig. 11은 안전율 1.384에 대한 점착력의 變異係數와 破壞確率의 관계를 나타낸 것으로 점착력의 變異係數가 10% 이하인 경우는 동일한 안전율에 대해서 파괴확률은 거의 변화가 없으며 변이계수가 증가함에 따라서 파괴확률이 크게 증가하고 있다. 이것은 Meyerhof,⁶⁾ Alonso,¹⁾ Minoru et. al.⁷⁾ 등이 원호사면에 대해서 파괴확률과 변이계수의 관계를 연구한 결과와 같은 결론이다.

그리고 변이계수가 40% 이하에서 정규분포, 베타분포의 파괴확률의 차이는 각각 1% 이하로 미소하나 그 이상이 되면 각 分布間 파괴확률의 差는 상당히 크게 나타났다.

Fig. 12는 안전율 1.384에 대한 내부마찰각의 변이계수에 대한 파괴확률의 관계를 나타낸 것으로 변이계수가 10%인 경우 파괴확률은 5~5.7%, 20%인 경우 8.5~9.3%, 30%인 경우에 12.1~14.2%로서 점착력의 변이계수를 변화시킨 경우보다도 내부마찰각의 변이계수를 변화

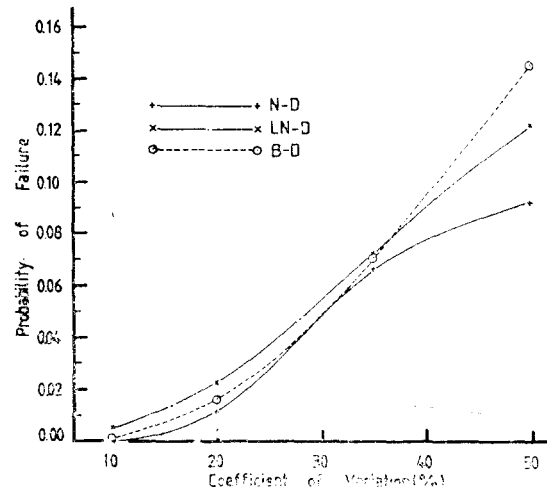


Fig. 11. Relationships between probability of failure and coefficient of variation for cohesion. (C.F.S=1.384, $C=1.6t/m^2$, $\phi=34^\circ(15\%)$, U.D.L=2t/m(10%), C.L=7T(10%))

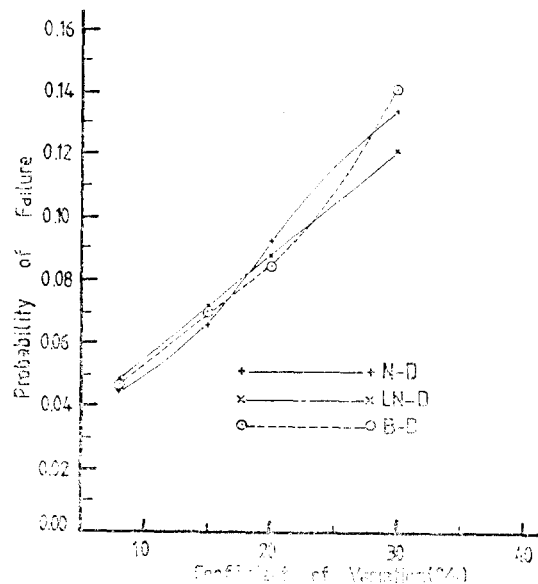


Fig. 12. Relationships between probability of failure and coefficient of variation for I.F. angle. (C.F.S=1.384, $\phi=34^\circ$, $C=1.6t/m^2(35\%)$, U.D.L=2t/m(10%), C.L=7T(10%))

시킨 경우가 곡선의 기울기가 크기 때문에 파괴확률이 더 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 金²⁶⁾이 원호사면에 대한 파괴확률의 연구에서 점착

력의 변이계수가 내부마찰각의 변이계수보다 파괴확률에 더 큰 영향을 미친다고 한 것과는 정반대의 결론이다.

이는 對數螺線破壞面이 내부마찰각에 의하여 파괴면이 결정되기 때문에 内部摩擦角의 函數²⁵⁾가 되어 내부마찰각의 변이계수가 점착력의 변이계수보다는 파괴확률계산에 더 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다.

그리고 實際적으로 同一한 안전율에 대해서 점착력과 내부마찰각의 分散性이 커짐에 따라서 파괴확률이 증가하는 것을 알아보기 위해서 Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 13 에서 점착력의 變異係數를 35%, 20%, 내부마찰각의 變異係數를 15%, 10%로 할 경우에 파괴확률과 안전율의 관계는 현저한 차이를 보이고 있다. 즉, 점착력, 내부마찰각의 변이계수가 각각 20%, 10%인 경우는 안전율 1.3으로 할 때 파괴확률은 1~2%인데, 변이계수가 각각 35%, 15%인 경우에는 7~10.5%로 크게 나타났고, 안전율을 1.5로 할 경우에 前者는 0%인데 비해서 後者는 2~4.3% 정도의 값으로 큰 差異를 나타냈다.

그리고 변이계수가 적은 쪽이 파괴확률 降에 수렴하는 속도는 훨씬 빠르게 나타났다. 이것은 Meyerhof,⁶⁾ Alonso,¹¹⁾ Minoru et. al.⁷⁾이 원호사면에 대한 연구에서와 같은 결론이다.

따라서 강도정수의 分散性을 고려하지 않은 決定論的 接近方法인 안전율에 의해서 사면을 설계하는 것은 많은 問題點이 있을 것으로 사료된다.

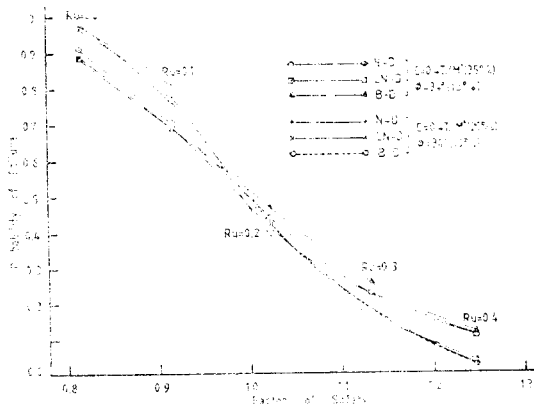


Fig. 13. Relationships between probability of failure and factor of safety (Ru : Variables)

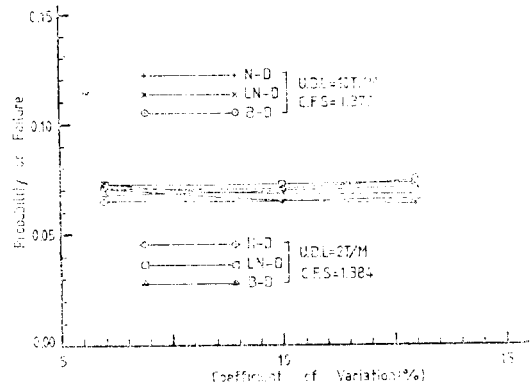


Fig. 14. Relationships between probability of failure and coefficient of variation for U.D. load

Fig. 14에서 등분포하중의 값이 2t/m로 작거나 10t/m로서 큰 값을 가지는 경우에 同一한 안전율에 대해서 등분포하중의 변이계수가 6~13%인 경우에 파괴확률의 차이는 1% 이하로 적게 나타났다.

Fig. 15에서 집중하중의 값이 7t, 25t인 경우에도 同一한 안전율에 대한 집중하중의 변이계수가 6~13%인 경우에 파괴확률의 차이는 등분포하중과 같이 1% 이하이다. 이것은 死荷重의 크기에 관계없이 변이계수가 적기 때문에 同一한 안전율에 대한 파괴확률의 차이는 무시할 정도이다.

따라서 내부마찰각을 除外하고 점착력과 死荷重의 변이계수가 10% 이하이면 파괴확률에 큰 영향을 미치지 않는다고 생각된다.

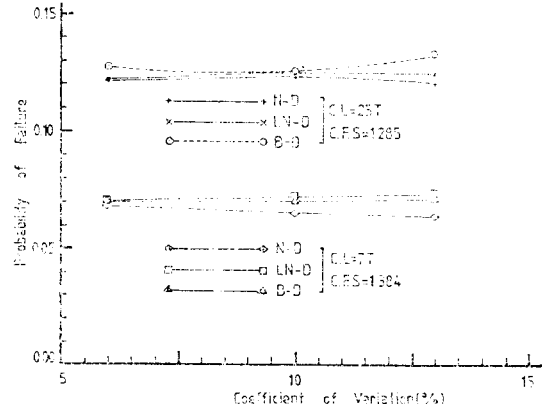


Fig. 15. Relationships between probability of failure and coefficient of variation for concentrated load

5. 結 論

地下水위를 고려한 均質한 斜面의 破壞形狀을 對數螺線으로 가정하고 흙의 強度定數와 荷重의 確率分布를 正規分布, 對數正規分布 및 베타分布로 가정하여 斜面의 破壞確率과 安全率의 關係를 연구한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 同一한 안전율에 대해서 變異係數가 증가함에 따라 破壞確率이 증가하므로 斜面設計에 있어서 안전율 보다 破壞確率을 이용하는 것이 합리적임을 알 수 있다.

2. 安全率에 의한 사면설계시 許容安全率은 현장조건을 고려하여 결정하는 것보다는 強度定數의 變異係數에 의하여 결정하는 것이 더 妥當하다고 판단된다.

3. 흙의 강도정수와 하중의 確率分布를 正規分布, 對數正規分布 및 베타分布로 가정하여 사면의 破壞確率을 구한 결과 각 分布間의 차이는 거의 없었다.

4. 對數螺線破壞面인 경우 내부마찰각의 分散性이 점착력의 分散性보다 破壞確率에 더 큰 영향을 미쳤다.

5. 강도정수, 하중, 흙의 단위중량 및 공극수압의 변화에 따른 破壞確率과 安全率은 거의 一定한 函數關係를 나타냈으며, 점착력, 등분포하중, 집중하중의 變異係數가 약 10% 이하 일때는 破壞確率에 거의 영향을 미치지 않았다.

6. 斜面安定解析에서 對數螺線破壞面에 대한 흙의 강도정수와 하중의 分散性을 고려한 破壞確率을 구하는 Program 을 개발하였다.

參 考 文 獻

1. Alonso, E.E., "Risk Analysis of Slopes and Its Application to Slopes in Canadian Sensitive Clays," *Geotechnique*, Vol.26 No.3, 1976, pp. 453~472.
2. Chen, W.F. and Giger, M.W., "Limit Analysis of Stability of Slope," *ASCE*, Vol.97, No.1, 1971, pp.19~26.
3. Grivas, D.A., "Probabilistic ' $\phi=0$ ' Stability

Analysis in Strain-Softening Soil," *Structural Safety*, Netherlands, 1983, pp.199~210.

4. Huang, Y.H. and Craig, M.A., "Stability of Slopes by Logarithmic-Spiral," *ASCE*, Vol.102, No.1, 1976, pp.41~49.
5. Lumb, P., "Safety Factors and the Probability Distribution of Soil Strength," *Canadian Geotechnical Jour.*, Vol.7, No.3, 1970, pp.225~242.
6. Meyerhof, G.G., "Safety Factor in Soil Mechanics," *Canadian Geotechnical Jour.*, Vol.7, No.4, 1970, pp.349~355.
7. Matsuo, Minoru and Kuroda, K., "Probabilistic Approach to Design of Embankments," *Soils and Foundations*, Vol.14, No.2, 1974, pp.1~17.
8. Matsuo, Minoru and Makoto Yueno, "Mechanical Significance of Probability of Failure as an Index for Prediction of Slope Failure," *Soils and Foundations*, Vol.21, No.2, 1981, pp.19~34.
9. Matsuo, Minoru and Kunio Kawamura, "A Design Method of Deep Excavation in Cohesive Soil Based on The Reliability Theory," *Soils and Foundations*, Vol.20, No.1, 1980, pp.61~75.
10. Singh, A., "Shear Strength and Stability of Man-made Slopes," *ASCE*, Vol.96, No.6, 1970, pp.1879~1892.
11. Spencer, E., "Circular and Logarithmic Spiral Slip Surfaces," *ASCE*, Vol.95, No.1, 1969, pp.227~234.
12. Tang, W.H. and Yucemen, M.S. and Ang, A.H., "Probability based Short Term Design of Soil Slopes," *Canadian Geotechnical Jour.*, Vol.13, 1976, pp.201~215.
13. Tang, W.H., "Probabilistic Evaluation of Loads," *ASCE*, Vol.107, No.3, 1981, pp.287~304.
14. Taylor, D.W., "Stability of Earth Slope," *Journal of the Boston Society of Civil Engineering*, Vol.24, No.3, 1937, pp.227~234.
15. Tobott, D.C. and Richards, E.A., "The Reliability of Earth Slopes," *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.3, 1979, pp.323~354.
16. Veneziano, A.M. and Antonio, J., "Reliability Analysis of Slope; Frequence-Domain Method," *ASCE*, Vol.105, No.2, 1979, pp.165~182.

17. Wu, T.H., "Uncertainty, safety and Decision in Soil Eng.," ASCE, Vol.100, No. 3, 1974, pp. 384~392.
18. Ang, A.H. and Tang, W.H., Probability Concepts in Engineering Planning Design, Vol. II, John Wileys, 1984, pp.274~298.
19. Benjamin, J.B. and Cornell, C.A., Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill, 1970, pp.32~188, 249~290.
20. Hahn, G.J. and Shapiro, S.S., Statistical Models in Engineering, John Wiley and Sons, 1967, pp.225~257.
21. Harr, M.E., Mechanics of Particulate Media, McGraw-Hill, U.S.A., 1977, pp.363~448.
22. Hart, G.C., Uncertainty Analysis, Loads and Safety in Structural Engineering, Prentice-Hall, 1982, pp.55~202.
23. Law, A.M. and Kelton, W.D., Simulation Modeling and Analysis, McGraw-Hill Co. New York, 1982, pp.240~273.
24. Lee, I.K. and White, W. and Ingles, O.G., Geotechnical Engineering, Pitman, 1983, pp.57~88.
25. Scott, C.R., An Introduction to Soil Mechanics and Foundations, 3rd ed., Galliard Ltd., England, 1980, pp.282~284.
26. 金泳壽, 斜면의 三次元 破壊의 確率에 關한 研究, 高麗大學校大學院, 博士學位論文, 1982.7.
27. Meyerhof, G.G., "Partial and Total Safety Factors," Transactions, Pro. of 9th Geotechnical Eng., pp.503~505.
28. Schultze, E., "Frequency Distributions and Correlations of Soil Properties," Transactions, 1st ICASP, Hong Kong, pp.371~388.
29. Schultze, E., "The Probabilistic Approach to Soil Mechanics Design," Proceeding, 9th Int. Con. on S.M. and F. Eng., pp.389~424.

(접수일자 1988. 11. 8)