

# 多重舉動函數에 의한 T형 옹벽의 信賴度 解析

Reliability Analysis of Cantilever Retaining Wall  
Using Multiple Failure Modes

朴 春 洙\*

Park, Choon-Soo

宋 容 善\*\*

Song, Young-Sun

金 龍 弼\*\*\*

Kim, Yong-Phil

---

## Abstract

To identify the stability of cantilever retaining wall in safe state by the deterministic method, these potential modes of such geotechnical failures as bearing capacity, horizontal sliding and overturning are analysed using Advanced First Order Second Moment (AFOSM) method. All design variables are assumed of the normal distribution and to be statistically independent. Considering the correlations between the single modes, structural system reliability index is 2.05.

Even if the safety factors are larger than the required value in the codes' by the conventional deterministic method, the system reliability of this structure may not be judged to be safe state since the system reliability index is much lower than general value of 3.

## 要 旨

確定論的 방법으로 安定條件을 만족하는 T형옹벽을 대상으로 支持力, 滑動, 轉倒의 單一破壞類型에 대해 設計變數를 統計的 獨立이고 正規分布로 가정하여 AFOSM 방법으로 信賴度 解析을 하였다. 이를 바탕으로 각 破壞모드 사이의 相關性을 고려한 구조물 전체적인 信賴度는 信賴指數로 2.05이었다.

그러므로, 確定論的 설계법에 의해 安全狀態로 판단된다 할지라도 信賴度개념으로는 일반적인 目標信賴指數(Target reliability index) 3보다 훨씬 낮기 때문에 安定狀態로 판단하기는 곤란하다.

---

\* 正會員, 忠南大 工大, 副教授

\*\* 正會員, " 大學院

\*\*\* 正會員, 蔚山工專大, 副教授

## 1. 序 論

옹벽구조물은 地盤이 高低差가 있을 경우 양쪽의 地表面을 유지하기 위해 설치하는 土留構造物의 하나이다.

이 구조물의 安定解析에 있어 현재의 確定論的인 방법으로는 荷重이나 地盤條件(強度定數, 土性等)을 單一值로 사용하여 각각의 許容安全率(轉倒, 滑動에 대하여는 1.5, 支持力에 대하여는 3)이상이 되도록 試行錯誤法으로 설계하고 있다. 이 安全率방법은 설계자의 경험이나 기술 선례, 구조물의 중요도등에 의해서 좌우되며 그 規準決定과 精度에 논리적 근거가 모호하다. 그리고 荷重이나 地盤條件은 單一值가 아닌 確率變數(Random variable)이므로 統計的인 방법으로 이러한 문제점 해결이 모색되고 있다. 옹벽의 安定解析에 있어 統計的 접근방법으로 백<sup>13)</sup>의 연구에서는 Monte Carlo Simulation 방법, 조<sup>19)</sup>에서는 平均 2次 모멘트법, Höeg et al.<sup>11)</sup>에서는 誤差傳達法을 이용하였으며 그 외 Grivas<sup>9)</sup>, Smith<sup>14)</sup>등의 연구가 있으나 이들 연구에서는 대부분 單一破壞類型에 대해 信賴도를 구한 것이다.

그런데, 信賴度解析의 경우라 하더라도 T형 옹벽과 같은 경우에는 어느 하나의 破壞類型(Single failure mode)이 가장 크게 지배될 수는 있으나, 다른 破壞모드와 관계없이 독립적으로 작용하는 것은 아니다. 그러므로 破壞類型을 따로 따로 분리해서 각 破壞類型별 安全率로 그 安定性を 검토하는 방법은 별 의미가 없다.

따라서, 본 연구에서는 옹벽의 安定度를 支持力, 滑動, 轉倒에 국한시켜 AFOSM 기법을 이용하여 해석하고 또한 각 破壞모드 사이의 共分散(Covariance)을 고려한 시스템 信賴도를 산정하고자 한다.

## 2. 옹벽의 破壞類型

T형옹벽에 대한 破壞類型은 支持力, 滑動, 轉倒등이며 이 구조물이 콘크리트인 경우에는 휨, 전단, 비틀림, 부착 따위의 破壞舉動을 들

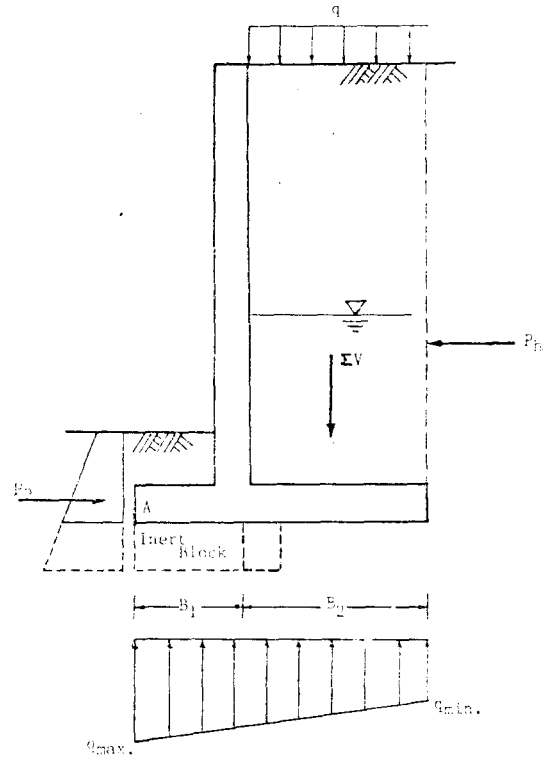


Fig. 1 Cantilever retaining wall

수 있는데, 일단 외적인 安定조건중에서 支持力 滑動, 轉倒의 安定조건이 만족되어야 한다.

### 2.1 支持力에 대한 安定

폭  $B$ 인 帶狀基礎에 偏心荷重의 작용으로 생기는 接地壓分布에서 最大反力( $q_{max}$ )이 極限支持力( $q_{ult}$ )이하가 되어 地盤의 剪斷破壞가 일어나지 않도록 설계한다. 이 支持力에 대한 破壞類型(Bearing-Capacity failure mode; BFM)을 Meyerhof(1963)가 제안한 공식을 써서 安全率로 나타내면 다음과 같다.

$$F_s = \frac{cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + \bar{q} N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B' N_r F_{rs} F_{rd} F_{ri}}{\frac{\Sigma V}{B} \left( 1 + \frac{6e}{B} \right)} \quad (1)$$

여기서  $c$ ; 粘着力

$\bar{q}$ ; 근입깊이에서의 有効應力( $=\gamma D_f$ )

$B'$ ; 基礎의 有効幅( $=B-2e$ )

$$e; \text{偏心} \left( = -\frac{B}{2} - \frac{M_{\text{net}}}{\Sigma V} \right)$$

$N_c$ ,  $N_r$ ,  $N_q$ 는 支持力係數이고,  $F$ 에 添子が 붙은 것은 基礎의 形狀, 깊이, 傾斜에 따른 係數이다. 그 중 單位重量에 대한 支持力係數( $N_r$ )는 Vesic(1973), 깊이에 따른 係數( $F_{ca}$ ,  $F_{qd}$ ,  $F_{rd}$ )는 Hansen(1970)의 公式를 적용하였다.<sup>5)</sup>

## 2.2 滑動에 대한 安定

壁體에 작용하는 土壓의 水平力( $P_h$ )이 底板에서의 摩擦抵抗과 앞굽에서의 受動土壓( $P_p$ )의 합보다 작아야 한다. 만일 滑動에 대한 抵抗力이 부족한 경우 shear key를 설치하여 水平抵抗力을 증가시킨다. 이때 Inert Block의 개념<sup>17)</sup>에 의해 Inert Block에서는 粘着力과 內部摩擦角이 완전히 발휘되고 그 이외에서는 적절한 계수( $k = \frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ )를 고려하여 총 抵抗力을 구한다. 다한가지로 滑動에 대한 破壞類型(Sliding failure mode; SFM)에 대해서는

$$F_s = \frac{P_p + B_1 C + B_2 k C + \Sigma V \tan(k\phi)}{P_h} \quad (2)$$

여기서  $B_1$ ,  $B_2$ 는 底板에서 shear key의 前面까지의 거리와 그 이외에서의 거리이며,  $\Sigma V$ 는 基礎地盤에 작용하는 鉛直力의 합이다.

## 2.3 轉倒에 대한 安定

Fig. 1의 A점에 대한 轉倒모멘트가 抵抗모멘트보다 작아야 한다. 같은 방법으로 轉倒에 대한 破壞類型(Overturning failure mode; OFM)에 대해서는

$$F_o = \frac{\Sigma W_i y_i}{\Sigma P_i x_i} \quad (3)$$

여기서  $\Sigma W_i y_i$ 는 A점에 대한 抵抗모멘트의 합

$W_i$ ; 각 요소의 自重 및 受動土壓

$y_i$ ; A점에서 그 요소의 圖心까지의 거리

$\Sigma P_i x_i$ 는 A점에 대한 轉倒모멘트의 합

$P_i$ ; 壁體에 작용하는 主動土壓

$x_i$ ; A점에서 土壓의 圖心까지의 거리

## 3. 安定度 解析

### 3.1 確定論의 方法

옹벽의 安定度 解析에 있어 관련된 土性を 實測으로 구한 單一值를 이용하여 作用土壓, 地盤의 極限支持力, 水平抵抗力 등이 소정의 安全率 이상이 되도록 단면을 변화시키면서 반복계산에 의해 그 단면을 결정한다. 이와같은 確定論의 方法(Deterministic method)에서 가장 중요한 요소인 安全率은 경험이나 선례를 바탕으로 정한 것으로 일관된 논리적 근거가 없다. 이러한 설계법에서는 설계자의 경험이 부족하거나 설계例가 없는 새로운 구조물인 경우에는 당황하게 된다. 또한 중요한 점은 각기의 安定條件에 맞는 安全率이상을 갖는다 할지라도 구조물 전체적인 安定度를 산정할 수 없는 결점이 있다.

### 3.2 信賴度 解析論에 의한 方法

전술한 確定論의 설계법의 단점을 보완하고 설계과정에 보다 논리적인 근거를 제시한 것이 確率論의 접근방법(Probabilistic Approach Method)이다. 이는 종래의 구조물의 安定性을 판단하는 安全率대신 破壞確率로 그 安定性을 나타내는 방법이다. 즉 安定解析에 입력되는 基本設計變數를 確率變數로 취함으로써 不確實性을 해소시켜 체계적이고도 논리적인 破壞確率을 산정하는 방법으로 Freudenthal<sup>8)</sup>에 의해 제창되었다.

이러한 信賴度解析論에서 우리가 목표로 하는 破壞確率は 매우 작은 값이므로 변수들의 分布形態를 보편 타당하게 檢定하려면 (특히 꼬리부분의 推定) 매우 많은 자료가 필요하다. 그런데 실제로 얻을 수 있는 자료로서는 平均이나 分散 정도가 비교적 정확하고 쉽게 얻을 수 있다. 그래서 이와같은 꼬리부분의 예민성문제(Tails sensitivity problem)를 개선하기 위해서 모든 不確實量을 1차 및 2차 모멘트만 이용하는 2차 모멘트 信賴度論이 Cornell<sup>9)</sup>에 의해 처음으로 제창되었다. Cornell의 1계약산법(First Order Approximation)은 Hasofer and Lind<sup>10)</sup>에 의해 不變量 문제(Invariant problem)가 제기되어 보

다 발전된 AFOSM이 제시되었다. 최근에는 Ditlevsen<sup>6,7)</sup> Shinozuka<sup>13)</sup> Ang and Tang<sup>2)</sup> 등에 의해 연구가 활발히 진행되고 있다.

設計變數들이 相互獨立이고 正規分布인 경우 AFOSM 방법에 의한 單一舉動函數의 信賴指數는 다음과 같다.

$$\beta = \frac{-\sum_i x_i^* \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^*}{\sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2}} \quad (4)$$

여기서  $x_i^*$ ; 基本設計變數의 Check point

$X_i$ ; 基本設計變數의 標準正規化變數

$$X_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad i=1, 2, \dots, n$$

$\mu_{X_i}$ ; 基本設計變數의 平均

$\sigma_{X_i}$ ; 基本設計變數의 分散

$g$ ; 單一破壞類型의 舉動函數

$\left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^*$ ; Check point에서의 Gradient

벡터  $\left( = \sigma_{X_i} \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right) \right)$

또는 방향코사인  $\alpha_i^* = \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^* / \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2}$ 로 나타내면

$$x_i^* = \mu_{X_i} - \sigma_{X_i} \alpha_i^* \beta; i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

위 식에서  $\beta$ 가 구해지면 單一舉動函數에 대해 破壞確率は

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (6)$$

$\Phi(-)$ ; 累積確率密度函數

### 3.3 구조물의 전체적인 安全度

옹벽의 안정검토시 2장에서 살펴본 3개의 單一破壞類型에 대해 주어진 地盤條件으로 각 破壞類型이 안정되도록 단면의 크기가 결정된다. 그런데, 폭(B) 하나만 보더라도 BFM에서는 옹벽 底板의 크기로 接地壓分布에 큰 영향을 주게 되며, OFM에서는 土壓 및 自重의 모멘트 팔과 직접적인 관계가 있고, SFM에서는 單位길이당 地盤과 底板간의 마찰력 계산에 중요한 設計變數중 하나이다. 이와같이 어떤 設計變數들은 각 單一破壞類型 사이에 공통으로 관련된 경우가 많다. 따라서, 각각의 破壞類型끼리는 작을지라도

서로 相關性을 갖게 된다. 그러므로 破壞모드간의 相關性을 고려한 구조물 전체적인 安全度를 해석해야 타당하다.

이와같이 破壞類型들이 서로 얽혀서 작용할 경우에 確率論에 의한 시스템의 破壞確率 산정 방법으로는 Uni-modal Bounds, Bi-modal Bounds 등이 있다. 즉

○ Uni-modal Bounds

$$\max_i p_{F_i} \leq p_F \leq 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_{F_i}) \approx \sum_{i=1}^k p_{F_i} \quad (7)$$

○ Bi-modal Bounds

$$p_F \leq \sum_{i=1}^k p_{F_i} - \sum_{i=2}^k \max p(F_i \cap F_j) \quad (8.1)$$

$$p_F \geq p_{F_1} + \sum_{i=2}^k \max \{0, p_{F_i} - \sum_{j=1}^{i-1} p(F_i \cap F_j)\} \quad (8.2)$$

여기서  $F_i, F_j$ ; 事象  $i, j$ 의 破壞狀態

$p_{F_i}$ ; 破壞事象  $F_i$ 의 確率

$p_F$ ; 구조물의 전체적인 破壞確率

$k$ ; 시스템 설계내에서 입력된 舉動函數의 개수

그런데, 식 (8)의 산정에는 각 破壞類型사이의 相關係數( $\rho_{g_i, g_j}$ )가 필요하며 이는 다음식으로 구한다.

$$\rho_{g_i, g_j} = \sum_{k=1}^n \alpha_{ik}^* \alpha_{jk}^* \quad (9)$$

여기서  $\alpha_{ik}^*$ 와  $\alpha_{jk}^*$ 는 舉動函數  $g_i(X)$  및  $g_j(X)$ 에 대한 破壞狀態에서의 방향코사인이며 이는 基本設計變數에 대한 Gradient 벡터에서 얻어진다.

## 4. 대상구조물의 信賴度解析

### 4.1 設計變數의 가정

Fig. 1에서 높이(H)를 6m로 일정하게 하고 뒷면에 地下水位가 있는 일반적인 경우로 뒷채움 흙을 두 층으로 가정하였다. 그리고 基礎地盤은 뒷채움 흙보다 強度가 약한 흙으로 가정하였다. 여기서 確率變數로 취한 設計變數들은 서로 獨立이고 正規分布로 가정하였으며 각 變數들의 記述統計學的 수치는 Table 1과 같고 그 變數들의 기호는 Fig. 2와 같다.  $\alpha$ 는 壁體의

Table 1 Input data

Design variables	Mean	C.O.V
1) $H_1$ (m)	3.5	0.15
2) $B$ (m)	3.5	0.05
3) $d_1$ (m)	0.4	0.05
4) $d_2$ (m)	0.6	0.05
5) $\alpha$	0.4	0.085
6) $D_f$ (m)	1.35	0.05
7) $D.L.$ (t/m <sup>2</sup> )	0.35	0.15
8) $L.L.$ (t/m <sup>2</sup> )	0.65	0.35
9) $\gamma_c$ (t/m <sup>3</sup> )	2.45	0.065
10) $\gamma_1$ (t/m <sup>3</sup> )	1.85	0.08
11) $\phi_1$ (rad)	0.576(33°)	0.085
12) $c_1$ (t/m <sup>2</sup> )	0.15	0.18
13) $\gamma_2$ (t/m <sup>3</sup> )	0.95	0.08
14) $\phi_2$ (rad)	0.524(30°)	0.13
15) $C_2$ (t/m <sup>2</sup> )	0.35	0.21
16) $d_3$ (m)	0.65	0.05
17) $N_1$	1.0	0.1
18) $N_2$	1.0	0.1
19) $\gamma_3$ (t/m <sup>3</sup> )	0.95	0.085
20) $\phi_3$ (rad.)	0.454(20°)	0.16
21) $c_3$ (t/m <sup>2</sup> )	1.27	0.27
22) $N_3$	1.0	0.1

위치를 정해주는 係數이며  $N_1, N_2, N_3$  는 공식에 대한 不確實性 係數이다. Table. 1에서 흙에 관한 자료는 Briaud and Tucker<sup>23)</sup>로부터 그리고 단면의 제원은 시행착오법으로 3가지 안정조건을 만족하는 값을 취한 것이다.

4.2 Gradient 벡터

식 (4)에 의해 信頼指數를 구하는 방법은 Rackwitz의 알고리즘<sup>24)</sup>을 이용하여 구하는데 Gradient 벡터를 구하는 것이 중요한 요소이다. 여기서 支持力의 安定性에 대한 식 (1)을 舉動函數로 나타내면 다음과 같다.

$$g_1(X) = N_3(C_3 N_c F_{c1} F_{c2} + \gamma_2 D_f N_q F_{qd} F_{qi}) + 0.5 \gamma_3 B' N_r F_{rd} F_{ri} - \left( \frac{4 \Sigma V}{B} - \frac{6 M_{net}}{B^2} \right) \quad (10)$$

여기서  $\circ B' = B - 2e = 2M_{net} / \Sigma V$  (11.1)

$\circ N_c = (N_q - 1) \cot \phi_3$  (11.2)

$\circ N_r = 2(N_q + 1) \tan \phi_3$

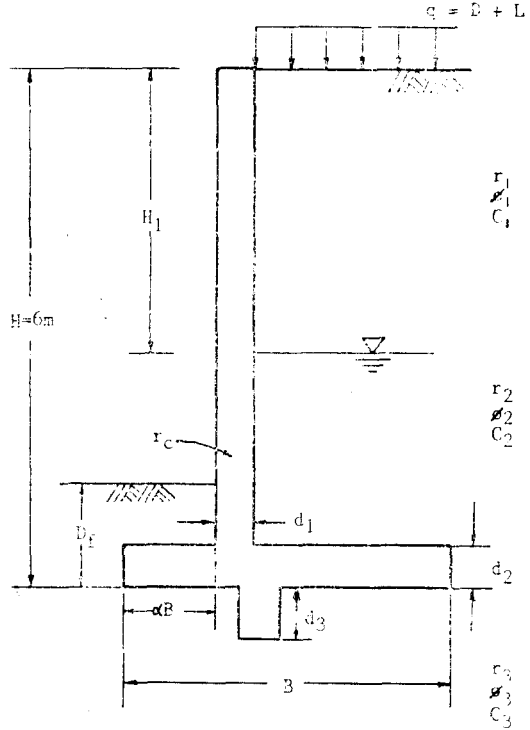


Fig. 2 Variables of retaining wall

vesic(1973) (11.3)

$\circ N_q = \tan^2(45 + \phi_3/2) \exp(\pi \tan \phi_3)$  (11.4)

$\circ F_{cd} = 1 + 0.2 D_f \Sigma V / M_{net}$

Hansen(1970) (11.5)

$\circ F_{ci} = F_{qi} = \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(P_a / \Sigma V) \right\}^2$  (11.6)

$\circ F_{qd} = 1 + \tan \phi_3 (1 - \sin \phi_3)^2 D_f \Sigma V /$

$M_{net}$  Hansen(1970) (11.7)

$\circ F_{ri} = \{ 1 - \tan^{-1}(P_a / \Sigma V) / \phi_3 \}^2$  (11.8)

$\circ F_{rd} = 1$  Hansen(1970) (11.9)

식 (11)에서  $M_{net}$  는 抵抗모멘트의 합 ( $M_R$ )과 轉倒를 일으키는 모멘트의 합 ( $M_D$ )과의 차이이며  $\Sigma V$  는 基礎地盤에 작용하는 鉛直力의 합이다. 그리고  $P_a$  는 壁體에 작용하는 水平力의 합이다.

식 (10)에 대한 Gradient 벡터는  $\sigma_{x_i} BK(i)$ 의 형태로 표시하여  $H_1$  및  $\phi_3$ 에 대한 것만 살펴보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
BK(1) = & N_3 \{C_3 N_c (F_{ci} A_1 + F_{cd} A_2) \\
& + \gamma_2 D_f (F_{qi} A_3 + F_{qd} A_4) \\
& + 0.5 \gamma_3 N_r (F_{ri} A_4 + B' A_5)\} \\
& - \left( \frac{4}{B} \frac{\partial}{\partial H_1} \Sigma V - \frac{6}{B^2} \frac{\partial}{\partial H_1} M_{net} \right)
\end{aligned} \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned}
A_1 = & \frac{\partial}{\partial H_1} F_{cd} = 0.2 D_f \frac{\partial}{\partial H_1} (\Sigma V / M_{net}) \\
= & 0.2 D_f \left( M_{net} \frac{\partial}{\partial H_1} \Sigma V \right. \\
& \left. - \Sigma V \frac{\partial}{\partial H_1} M_{net} \right) / (M_{net})^2 \quad (13.1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_2 = & \frac{\partial}{\partial H_1} F_{ci} \\
= & -\frac{4}{\pi} \sqrt{F_{ci}} \frac{\partial}{\partial H_1} \tan^{-1}(P_a / \Sigma V) \quad (13.2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_3 = & \frac{\partial}{\partial H_1} F_{qd} = \tan \phi_3 (1 - \sin \phi_3)^2 \\
& D_f \frac{\partial}{\partial H_1} (\Sigma V / M_{net}) \quad (13.3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_4 = & \frac{\partial}{\partial H_1} B' = 2 \frac{\partial}{\partial H_1} (M_{net} / \Sigma V) \\
= & 2 \left( \Sigma V \frac{\partial}{\partial H_1} M_{net} - M_{net} \frac{\partial}{\partial H_1} \Sigma V \right) (\Sigma V)^2 \quad (13.4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_5 = & \frac{\partial}{\partial H_1} F_{ri} \\
= & -\frac{2}{\phi_3} \sqrt{F_{ri}} \frac{\partial}{\partial H_1} \tan^{-1}(P_a / \Sigma V) \quad (13.5)
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial H_1} \Sigma V = (\gamma_1 - \gamma_2) T_1 \quad (13.6)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial H_1} M_{net} = & \frac{1}{2} (\gamma_1 - \gamma_2) T_1 T_2 - 2 C_2 \sqrt{k_a} T_3 \\
& + \frac{1}{2} (k_a \gamma_1 - k_a \gamma_2 - 1) T_3^2 \quad (13.7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial H_1} \tan^{-1}(P_a / \Sigma V) \\
= & \frac{\Sigma V \frac{\partial}{\partial H_1} P_a - P_a \frac{\partial}{\partial H_1} \Sigma V}{(\Sigma V)^2 + P_a^2} \quad (13.8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial H_1} P_a = & 2 C_2 \sqrt{k_a} + (k_a \gamma_1 - k_a \gamma_2 - 1) T_3 \\
& (13.9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_1 = & B - \alpha B - d_1, \quad T_2 = B + \alpha B + d_1, \\
T_3 = & H - H_1
\end{aligned}$$

$$k_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi_1}{2} \right), \quad k_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi_2}{2} \right)$$

$$\begin{aligned}
BK(20) = & N_3 \{C_3 F_{cd} F_{ci} B_1 \\
& + \gamma_2 D_f F_{qi} (F_{cd} B_2 + N_q B_3) \\
& + 0.5 \gamma_3 B' (F_{ri} B_4 + N_r B_5)\} \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_1 = & \frac{\partial}{\partial \phi_3} N_c = Y_2 \cot \phi_3 - (N_q - 1) \csc^2 \phi_3 \\
& (15.1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_2 = & \frac{\partial}{\partial \phi_3} N_r = \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi_3}{2} \right) \exp(\pi \tan \phi_3) \\
& \left\{ \sec^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi_3}{2} \right) + \pi \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi_3}{2} \right) \sec^2 \phi_3 \right\} \\
& (15.2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_3 = & \frac{\partial}{\partial \phi_3} F_{cd} = (1 - \sin \phi_3) \{ \sec^2 \phi_3 (1 - \sin \phi_3) \\
& - 2 \tan \phi_3 \cos \phi_3 \} D_f \Sigma V / M_{net} \quad (15.3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_4 = & \frac{\partial}{\partial \phi_3} N_r = 2 \{ Y_2 \tan \phi_3 + (N_q + 1) \sec^2 \phi_3 \} \\
& (15.4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_5 = & \frac{\partial}{\partial \phi_3} F_{ri} = 2 \sqrt{F_{ri}} \tan^{-1}(P_a / \Sigma V) / \phi_3^2 \\
& (15.5)
\end{aligned}$$

나머지 변수에 대한 Gradient 벡터와 滑動 및 轉倒에 대한 것은 생략한다.

### 4.3 信賴度解析 結果

#### 4.3.1 單一破壞類型

Table 1의 基本設計變數 조건으로 각 單一破壞類型에 대해 信賴度解析을 하여 收斂된 것은 Table 2. a와 같으며 참고로 確定論的 方法에 의한 安全率은 Table 2. b와 같다.

#### 4.3.2 시스템 信賴度の 산정

식 (8)에 의한 Bi-modal 방법으로 구조물 전체적인 信賴度を 구하고자 Table 2. a의 방향 코사인으로 식 (9)에 의해 계산된 각 破壞類型間 相關係數 행렬은 Table 3과 같다.

Table 3 Correlation matrix

	BFM	SFM	OFM
BFM	1	0.8626	0.5186
SFM		1	0.6798
OFM		sym.	1

식 (7), (8)에 의한 대상구조물의 전체적인 破壞確率 범위는 다음과 같다.

**Table 2. a** Results of reliability analysis for all failure modes

Failure modes Variables	BFM		SFM		OFM	
	Failure point	Direction cosine	Failure point	Direction cosine	Failure point	Direction cosine
1) $H_1(m)$	3.273	0.190	3.054	0.356	2.282	0.414
2) $B(m)$	3.427	0.191	3.451	0.119	2.954	0.575
3) $d_1(m)$	0.400	$1.348 \times 10^{-3}$	0.400	$6.977 \times 10^{-3}$	0.398	0.018
4) $d_2(m)$	0.600	$2.020 \times 10^{-3}$	0.600	0.012	0.595	0.032
5) $\alpha$	0.397	0.037	0.404	-0.050	0.414	-0.089
6) $D_f(m)$	1.331	0.164	1.330	0.124	1.336	0.034
7) $D.L(t/m^2)$	0.353	-0.026	0.354	-0.029	0.362	-0.036
8) $L.L.(t/m^2)$	0.706	-0.112	0.717	-0.125	0.866	-0.156
9) $\gamma_c(t/m^3)$	2.451	$-1.411 \times 10^{-3}$	2.432	0.048	2.334	0.126
10) $\gamma_1(t/m^3)$	1.893	-0.132	1.911	-0.172	1.958	-0.112
11) $\phi_1(rad.)$	0.543	0.306	0.531	0.386	0.460	0.464
12) $c_1(t/m^2)$	0.147	0.055	0.146	0.062	0.135	0.092
13) $\gamma_2(t/m^3)$	0.940	0.067	0.940	0.055	0.925	0.067
14) $\phi_2(rad.)$	0.514	0.062	0.490	0.211	0.503	0.056
15) $c_2(t/m^2)$	0.337	0.080	0.319	0.179	0.303	0.110
16) $d_3(m)$	0.650	$9.728 \times 10^{-4}$	0.644	0.075	0.648	0.011
17) $N_1$	1.066	-0.297	1.103	-0.434	1.235	-0.435
18) $N_2$	0.998	0.010	0.943	0.239	0.986	0.021
19) $\gamma^3(t/m^3)$	0.950	$2.155 \times 10^{-4}$	0.949	$7.065 \times 10^{-3}$	—	—
20) $\phi_3(rad.)$	0.354	0.646	0.387	0.386	—	—
21) $C_3(t/m^2)$	0.942	0.458	0.941	0.400	—	—
22) $N_3$	0.956	0.205	—	—	—	—
Reliability	$\beta$	$P_f(\%)$	$\beta$	$P_f(\%)$	$\beta$	$P_f(\%)$
Iteration No.						
1.	2.227	1.301	2.402	0.818	5.900	$1.0 \times 10^{-6}$
2.	2.138	1.629	2.379	0.871	5.431	$1.0 \times 10^{-6}$
3.	2.140	1.620	2.379	0.871	5.424	$1.0 \times 10^{-6}$

**Table 2. b** Safety factors of deterministic check

Failure modes	Demand	Capacity	$F_s$
BFM( $t/m^2$ )	12.03	36.42	3.03
SFM(ton)	12.01	19.70	1.64
OFM(t-m)	22.75	63.91	2.81

○ Uni-modal Bounds

$$1.62 \times 10^{-2} \leq p_f \leq 2.49 \times 10^{-2} \quad (16)$$

○ Bi-modal Bounds

$$1.88 \times 10^{-2} \leq p_f \leq 2.12 \times 10^{-2} \quad (17)$$

이를 信賴指數 ( $\beta$ )로 나타내면

$$2.08 \geq \beta \geq 2.03 \quad (18)$$

### 5. 고 찰

確定論的 설계법으로 주어진 조건에서 支持力 滑動, 轉倒에 대해 각기 그 安全率이 3.03, 1.64, 2.81 로써 許容安全率 이상의 값을 보이나 信賴度解析 결과 OFM 인 경우에만 破壞確率  $10^{-6}\%$  정도로 안정하다 할 수 있고 BFM 및 SFM 에서는 대략  $\frac{16}{1000}$ ,  $\frac{9}{1000}$  로 나타났다. 支持力에 대한 安全率이 비교적 높음에도 불구하고 破壞確率이 상당히 큰 값을 보이며 이러한 점은 중력식 옹벽에 대해 地盤條件이 사질토이며 信賴度 해석 방법이 誤差傳達法인 Høeg et

al.,의 연구<sup>11)</sup>와 비교하면 본 연구는 다른 조건으로 시작되었으나 같은 경향임을 알 수 있다.

**Table 4** Results for retaining wall by Höeg et al.

모 드		안 전 율 ( $F_t$ )	파괴 확률 ( $P_f$ )
전	도	1.89	0.7/10,000
지	지	3.67	126/10,000
활	동	1.60	26/10,000

즉 응력의 安定解析에 있어 支持力에 대한 破壞모드가 가장 주요한 破壞모드(Predominant failure mode)이며 각 모드간의 相關性을 고려한 구조물 전체적인 信賴度는 破壞確率로서 대략 2% 정도로 신뢰성 높은 구조물에서 취하는 허용 파괴확률  $\frac{1}{1000}$ 에<sup>15)</sup> 비해 훨씬 높은 값으로 安定度를 信賴할 수 없다. 許容破壞確率에 대해서는 본 연구에서 고려되지 않은 조건의 확장과 많은 사례 연구를 통해 규명되어야 할 것이며 참고적으로 Meyorhof<sup>14)</sup>가 제안한 基礎에 대한 最大 許容破壞確率は Table 5와 같다.

**Table 5** Acceptable maximum  $P_f$  for geotechnical engineering

		최 대 $P_f$ 값	상응하는 $\beta$ 값
토	공	$10^{-2}$	2.33
토	류 구조물	$10^{-3}$	3.10
해	양 기초	$10^{-3}$	3.10
육	상 기초	$10^{-4}$	3.80

각 모드끼리의 相關性은 SFM 및 BFM의 相關係數가  $\rho_{g_1, g_2} = 0.863$ 으로 다른 모드간의 相關性보다 크게 나타났으며 이는 두 모드의 舉動函數를 구성하고 있는 基本設計變數가 OFM에 비해 공통으로 작용하는 것이 많기 때문이다. 따라서 이러한 共分散을 고려한 구조물 전체적인 信賴度를 구해야 한다.

여기서 취한 地盤條件은 基礎地盤이 礫층보다 연약한 경우인데, 支持力에 대한 信賴度가 어느 規準(Criteria) 이상으로 만족되면 다른 破壞모드도 역시 信賴도가 그 規準值 이상이 된다. 그러므로, 응력의 안정문제에는 轉倒나 滑動에 대한 것보다 支持力을 우선적으로 검토하는 것이 효과적이라 할 수 있으며 흔히 地盤의 支持力을 일정한 상수인 許容支持力으로 놓고

설계하는 방법은 별 의미가 없다. 또한 BFM의 舉動函數에서 地盤의 거동양상을 全般剪斷破壞로 간주한 安全率이 3.03인데 비해서 이 모드의 信賴指數는 2.16으로써 매우 낮다. 따라서 局部剪斷破壞인 경우에는 그 信賴度가 더욱 낮아질 것이므로 支持力에 대한 許容安全率 3은 不確實性이 많이 개재되어 있고 地盤을 과대평가한 것임을 알 수 있다.

## 6. 結 論

確定論的인 방법으로 安定條件을 만족하는 T형 응벽을 AFOSM 방법으로 信賴度解析을 한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 본 연구 대상구조물에서는 支持力에 대한 破壞類型이 시스템 信賴度에 가장 큰 영향을 미치는 破壞모드이며 이 모드가 만족되면 다른 安定條件도 만족된다.

2) 確定論的인 방법으로는 각기의 安定條件을 만족한다 할지라도 信賴度解析에 의하면 전체적인 信賴指數가 일반적인 目標信賴指數, 3.0보다 낮은 2.05로서 安定狀態로 보기는 곤란하다.

3) 確定論的인 방법으로 구조물 전체적인 安定度를 해석할 수 없으므로 각 破壞類型끼리의 相關性을 고려한 信賴度論으로 解析을 해야 할 것이다.

4) 본 연구에서 고려되지 않은 조건의 확장(다양한 토압론, 지지력, 내적 안정조건의 고려등)과 보다 실제에 가까운 통계적특성을 보완하여 궁극적으로 許容破壞確率에 대한 규명 노력이 경주되어야 하겠다.

## 參 考 文 獻

1. Ang, A. H-S and Cornell, C.A., "Reliability Bases of Structural Safety and Design," J. of Structural Div., ASCE, Vol. 100, No. ST9, 1974, pp. 1755-1769.
2. Ang, A. H-S and Tang, W.H., Probability concepts in Engineering Planning and Design, Vol. II, John Wiley and Sons Inc., 1984, pp. 333~470.



3. Briaud, J.L. and Tucker, L., "Coefficient of Variation of in situ Test Results in sand" Probabilistic Characterization of Soil Properties: Bridge between Theory and Practice(ASCE Proceeding of a Symposium), 1984, 119-139.
4. Cornell, C.A., "A Probability-based Structural Code," ACI J., Vol.66, No.12, 1969, pp.974-985.
5. Das, B.M., Principles of Foundation Engineering, Brooks/Cole Engineering Div., 1984, pp.236-266.
6. Ditlevsen, O., "Generalized Second Moment Reliability Index," J. of Struct. Mech., Vol.7, No.4, 1979, pp.435-451.
7. Ditlevsen, O., "System Reliability Bounding by Conditioning," J. of Engrg. Mech., ASCE, Vol.108, 1982.
8. Freudenthal, A.M., "Safety and the Probability of Structural Failure," ASCE Transactions, Vol.121, 1956, pp.1337-1397.
9. Grivas, D.A., "Conventional and Probabilistic Seismic Safety Analysis of Rigid Retaining Walls," Proceedings of ICOSSAR' 85; Structural Safety and Reliability.
10. Hasofer, A.M. and Lind, N.C., "An Exact and Invariant First-Order Reliability Format," J. of Engrg. Mech., ASCE, Vol.100, No.EM1, 1974, pp.111-121.
11. Høeg, K. and Murarka, Probabilistic Analysis and Design of a Retaining Wall, J. of Geotechnical eng. Division, ASCE, Vol.100, No.GT3, 1974 pp.349-366.
12. Rackwitz, R. and Fiessler, B., "Structural Reliability under Combined Random Load Sequences," Comput. Struct., Vol.9, 1978 pp.489-494.
13. Shinozuka, M., "Basic Analysis of Structural Safety," J. of Structural Div., ASCE, Vol.109, No.3 1983, pp.721-738.
14. Smith, G.N., "The use of Probability Theory to Asses the Safety of Propped Embedded Cantilever Retaining Walls," Geotechnique 35, No.4, 1985, pp.451-460.
15. Thoft-Christensen, P., Reliability Theory and Its Application in Structural and Soil Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, 1983, pp.1-55.
16. Vanmarcke, E.H., "Matrix Fomulation of Reliability Analysis and Reliability Based Design," Computer and Structures, Vol.13 1971, 757-770.
17. Wang, C.K. and Salmon, C.G. Reinforced Concrete Design, 4th Ed., Harper and Row, 1985, pp.374-399.
18. 백영식, 이용일, "중력식 옹벽의 신뢰도에 관한연구" 대한 토목학회논문집, 제3권, 제2호, 1983, pp.127-135.
19. 조태승, 조효남, 전재명, "신뢰성 이론에 의한 R. C. 옹벽의 안정해석 및 설계규준" 대한 토목학회 논문집, 제3권, 제3호, 1983, pp.71-86.
20. 김용필, 임병조, 임충모, "유상관 파괴유형에 의한 얇은 기초의 신뢰도 해석" 대한 토질공학회지 제2권, 제3호, 1986, pp.67-75.

(접수일자 1988. 5. 19)