

# 重力式 海洋構造物の 滑動에 대한 信賴度解析

A Reliability Analysis on Sliding of Offshore Gravity Platform.

李 寅 模\*

Lee, In-Mo

李 命 宰\*\*

Lee, Myung-Jae

---

## Abstract

The uncertainties encountered in the stability analysis for the foundation of offshore structures on clay are formulated in probabilistic terms and used to evaluate the reliability of the foundation design. The major sources of uncertainty are: soil properties, wave loads, and methods of analysis. The major part of the uncertainty in safety factor is contributed by the uncertainty in the undrained shear strength. All sources of uncertainties that affect the shear strength of clay are modeled and systematically analyzed.

The in situ undrained shear strengths are evaluated by laboratory tests and cone penetration tests. The undrained shear strengths from the laboratory test and CPT, respectively at Statfjord B site in the North Sea, are used as an example in risk analysis. Using the CPT alone, the failure probability on sliding of gravity platform at Statfjord B is much larger than the failure probability using the laboratory undrained shear strengths. The major uncertainty of using the CPT as the estimate of the undrained shear strength of clay results from the correlation between the cone resistance and the undrained shear strength.

## 要 旨

海洋構造물은 土質特性, 波浪荷重, 解析方法 등의 不確定性으로 인해 確率論의인 方法으로 信賴度解析을 하는 것이 바람직하다. 粘土地盤에 설치된 海洋構造물의 基礎設計에서 가장 큰 不確定性은 非排水剪斷強度에 基因한다. 따라서 粘土地盤의 剪斷強度 算定에 影響을 끼치는 모든 不確定性을 調査하여 安定解析에 適用한다.

또한 室內試驗과 現場貫入試驗을 이용한 粘土地盤의 剪斷強度 算定方法의 不確定性을 調査하고 北海의 Statfjord B에 位置한 重力式 海洋構造물의 滑動에 대한 信賴度解析에 각각 適用한다. 現場貫入試驗을 이용하여 非排水剪斷強度를 算定하여 구한 滑動에 대한 波壞確率は 室內試驗을 이용한 경

---

\* 正會員. 韓國科學技術院 助教授

\*\* 韓國科學技術院 碩士課程

우보다 크다. 現場貫入試驗을 이용한 非排水剪斷強度 算定方法에 큰 不確定성이 존재하는 것은 經驗的인 方法으로 결정된  $N_k$  값의 不確定성에 주로 基因한다.

## 1. 序 論

1975年以後로 北海에 많은 重力式 海洋構造物이 建設되어 왔다. 이와같은 重力式 海洋構造物은 lifetime(보통 30年)동안 各種 荷重에 견딜 수 있도록 設計되어야 한다. 그러나 設置經驗이 적고 土質特性, 波浪荷重, 解析 model의 不確定性 등으로 인해 經濟的인 安全率 算定이 어려우므로, 信賴度解析 方法을 이용하는 것이 바람직하다.

海洋構造物 基礎의 安全率에 대한 不確定性(uncertainty)은 基礎地盤이 粘土로 되어 있는 경우, 그 不確定性的 약 80%가 粘土의 非排水剪斷強度的 不確定성에 基因한다. 이러한 原位置 非排水剪斷強度的 不確定성은 土質特性的 空間的 變化(Spatial Variation), 測定誤差, 不充分的 資料, 實驗室과 現場의 差異로 인한 model 誤差 等に 基因한다.

本 研究에서는 三軸試驗(Triaxial Test), 直接簡便剪斷試驗(Direct Simple Shear Test) 等の 室內試驗을 이용한 剪斷強度 算定方法과 現場貫入試驗(Cone Penetration Test, 약칭 CPT)을 이용한 剪斷強度 算定方法의 不確定성을 調査하고, 北海에 位置한 重力式 海洋構造物 Statfjord B(Fig. 1. 참고)의 安定에 대한 信賴度解析에 각

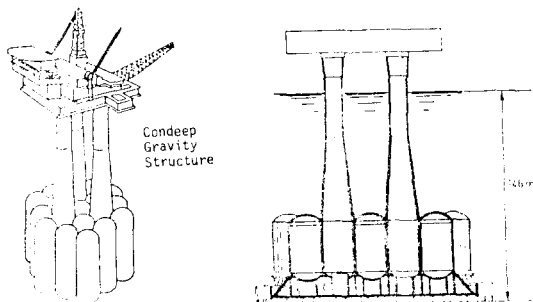


Fig. 1. Statfjord B Condeep platform. (ref ; 21)

각 適用하여 妥當성을 검토한다.

## 2. 信賴度解析 方法의 考察

### 2.1. 平均과 變動係數의 決定

粘土地盤에서 測定된 非排水剪斷強度는 測定 誤差로 인해 原位置強도와 偏差를 가지며, 그 關係를 나타낸 것이 (1)式이다.

$$S = \prod_{j=1}^n N_j \cdot S_r \dots \dots \dots (1)$$

여기서,  $S_r$ 는 測定된 非排水剪斷強度이고,  $N_j$ 는  $j$ 번째 偏差를 補正하는 補正係數이고,  $S$ 는 不偏(unbiased) 原位置 非排水剪斷強度이다.

測定된 強度, 原位置 強度, 補正係數를 無作爲變量(random variable)으로 고려하고, 그것의 平均(mean), 分散(variance), 變動係數(coefficient of variation)를  $E[\cdot]$ ,  $\text{Var}[\cdot]$ ,  $\Omega[\cdot]$ 로 定義한다.

誤差傳播(propagation of error)의 計算은 一次近似(1st order approximation)에 따른다.<sup>1)</sup> 原位置 強度的 平均值와 變動係數를 一次近似에 의해 算定하면 (2), (3)式으로 나타낼 수 있다.<sup>2)</sup>

$$E[S] = \prod_{j=1}^n E[N_j] \cdot E[S_r] \dots \dots \dots (2)$$

$$\Omega[S] = \left\{ \sum_{j=1}^n \Omega^2[N_j] + \Omega^2[S_r] \right\}^{1/2} \dots \dots (3)$$

### 2.2. 土質特性的 空間的 變化(Spatial Variation)

粘土地盤의 非排水剪斷強度는 각각의 한 點에서 測定된 값이나, 設計에 適用하는 값은 基礎面積에서의 平均強度를 사용하게 된다. 그러므로, 設計에 사용되는 面積  $A$ 를 갖는 平均強度  $S_{r,A}$ 의 分散은 각각의 點에서 測定된 強度  $S_r$ 의 分散보다 작아지게 된다.

각각의 한 點에서 測定된 값을 面積으로 換算할 때 強度의 平準化 效果를 고려하면 (4)式으로 나타낼 수 있다.<sup>3)</sup>

$$\text{Var}[S_{r,A}] = I^2[A] \cdot \text{Var}[S_r] \dots \dots \dots (4a)$$

길이  $l$ , 幅  $y$  인  $X-Z$  平面의 한 Segment 를 고려하면

$$F[A]=F[l] \cdot F[y] \dots\dots\dots(4b)$$

$$F[l]=[\delta_l/l]^{1/2}, \quad l > \delta_l \dots\dots\dots(4c)$$

$$=1, \quad l \leq \delta_l$$

$$F[y]=[\delta_y/y]^{1/2}, \quad y > \delta_y \dots\dots\dots(4d)$$

$$=1, \quad y \leq \delta_y$$

$$\delta_l=l/\sqrt{(X/\delta_x)^2+(Z/\delta_z)^2} \dots\dots\dots(4e)$$

여기서  $\text{Var}[S_i]$ 는 試驗資料의 分散이고,  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 는  $X, Y, Z$  方向의 correlation distance 이고,  $F$ 는 分散減少係數(variance reduction factor)이다.

### 2.3 波浪荷重과 抵抗

基礎安定에 대한 주된 不確定性은 波浪荷重(wave load)과 基礎의 抵抗(resistance)에 基因한다. 基礎의 安定에 대한 定全率의 平均值와 分散은 抵抗과 荷重의 平均值와 分散으로부터 얻을 수 있다.

波浪荷重(wave load) : 一般적으로 波浪荷重은 波高와 週期の 函數로 決定되며, 한예로 北海에서 設計에 사용되는 波浪荷重은 100年 頻度の 颱風이고 設計最大波高가 31 m, 設計最大週期가 16 sec 이다. <sup>4, 12, 21)</sup>

波浪荷重의 週期가 重力式 海洋構造物의 基本週期보다 길기 때문에 波浪荷重을 靜的(static) 荷重으로 假定할 수 있다. <sup>12)</sup>

또한, 20年과 1年 頻度の 颱風으로 인한 水平荷重과 전도모멘트는 波高와 週期の 不確定性과 주어진 波高와 週期에서 決定된 荷重의 不確定性을 갖는 無作爲變量이며, 100年 頻度の 颱風에 單一荷重係數(single load factor)를 곱하여 구한다. 北海에서 사용되는 20年과 1年의 單一荷重係數는 0.85, 0.57이며 變動係數는 0.24 이다. <sup>4)</sup>

抵抗(Resistance) : 海洋構造物의 滑動에 대한 破壞斷面은 圓形이 아니므로(Fig. 2, 참고), 假定된 滑動破壞斷面을 여러개의 slice 로 나누어, 각 slice 에 作用하는 힘의 平衡을 이용하여 安全率을 算定하는 generalized slip surface 方法을 사용한다. <sup>5)</sup> 또한 slip surface 方法은 quasi-static 解析이므로, 破壞시의 剪斷強度도 static 試驗으

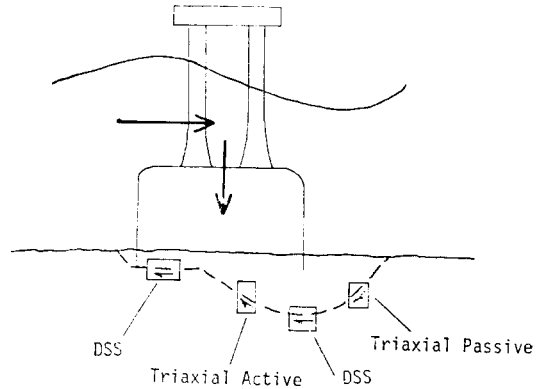


Fig. 2. Typical elements along a potential failure surface beneath an offshore gravity platform. (ref ; 21)

로 구한다. 基礎抵抗(foundation resistance)의 가장 큰 不確定性은 粘土의 非排水剪斷強度의 不確定性에 基因하며, 原位置 非排水剪斷強度의 不確定性은 土質特性的 空間的 變化, 測定誤差, 不充分한 資料, 實驗室과 現場의 差異로 인한 model 誤差 등을 그 원인으로 한다.

室內試驗을 이용하여 非排水剪斷強度를 算定하는 方法은 3章에서, 現場貫入試驗을 이용하여 非排水剪斷強度를 算定하는 方法은 4章에서 각각 언급한다.

### 2.4 信賴度

一般적으로 滑動에 대한 安全率은 (5)式으로 구한다.

$$F_s=R/L \dots\dots\dots(5)$$

여기서,  $R$ 은 抵抗이고  $L$ 은 荷重이다.

滑動에 대한 破壞確率은 (6)式으로 정의된다.

$$P_f=P(F_s < 1) = \int_0^1 f_{F_s}(F_s) \cdot dF_s \dots\dots\dots(6)$$

여기서,  $f_{F_s}(F_s)$ 는 安全率의 確率密度函數(probability density function)이다.

一般적으로 安全率의 精確한 確率密度函數는 알 수 없으나, 陰(negative)의 값을 가질 수 없고 일반적으로 安全率이 큰 쪽에서 歪曲度(skewness)가 있으므로 對數正規分布로 假定한다. <sup>4, 12)</sup> 安全率의 分散은 一次近似에 의해 (7)式으로 算定한다.

$$\text{Var}[F_i] = \frac{\text{Var}[R]}{E^2[L]} + \Omega^2[L] \frac{E^2[R]}{E^2[L]} \dots (7)$$

安全率을 對數正規分布로 假定했을 때 信賴指數와 破壞確率은 (8), (9)式으로 구할 수 있다.

$$\beta = \frac{\ln \left\{ \frac{E[R] * \sqrt{1 + \Omega^2[L]}}{E[L] * \sqrt{1 + \Omega^2[R]}} \right\}}{\sqrt{\ln \{ (1 + \Omega^2[R]) (1 + \Omega^2[L]) \}}} \dots (8)$$

$$P_f = 1 - \phi(\beta) \dots (9)$$

### 2.5. 滑動에 대한 安全率 計算

Fig. 3에 나타낸 破壞斷面의 剪斷抵抗에 관한 分析은 Lauritzsen 과 Schjetne<sup>15)</sup>의 slip surface 方法을 이용한다. 각 slice의 水平方向合力은 (10)式으로 나타낼 수 있다.

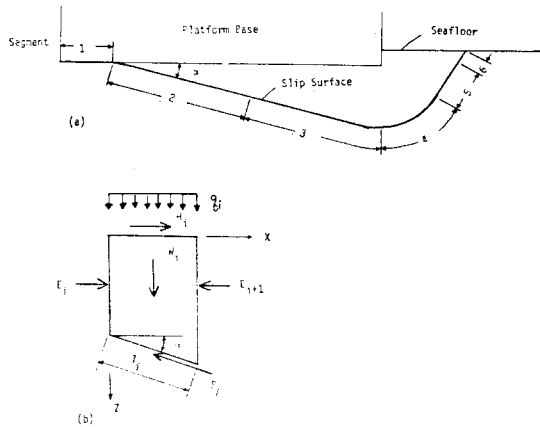


Fig. 3. Slip Surface (a) Segments that compose the slip surface, (b) Forces on an element of the sliding mass. Y axis is perpendicular to paper.

$$\frac{S_i l_i y}{\cos \alpha_i F_i} - W_i \tan \alpha_i + \Delta E_i - H_i - q_i l_i y \sin \alpha_i = 0 \dots (10a)$$

여기서,  $l_i = X-Z$  平面의 slip surface의 segment  $i$ 의 길이

$y = Y$  方向의 slip surface 幅

$S_i = i$  번째 segment의 平均 原位置剪斷強度

$V_i, H_i =$  element에 作用하는 垂直, 水平方向 힘

$$\Delta E_i = E_i - E_{i+1}$$

$q_i =$  전도모멘트로 인해 Segment에 발생하는 平均應力도

$$\sum_i \Delta E_i = 0 \dots (10b)$$

윗 式을 정리하면,

$$F_i = \frac{\sum_i (l_i y S_i / \cos \alpha_i)}{\sum_i (W_i \tan \alpha_i + H_i + q_i l_i y \sin \alpha_i)} \dots (10c)$$

(10c)式에서 荷重과 抵抗은 (10d), (10e)로 나타낼 수 있다.

$$L = P_H + \sum_i (W_i \tan \alpha_i + q_i l_i y \sin \alpha_i) \dots (10d)$$

$$R = \sum_i l_i y S_i / \cos \alpha_i \dots (10e)$$

抵抗(resistance)의 平均值와 分散은 (11), (12)式에 의해 算定한다.

$$E[R] = \sum_i l_i y E[S_i] / \cos \alpha_i \dots (11)$$

$$\text{Var}[R] = \sum_i \text{Var}[l_i y S_i / \cos \alpha_i] + \sum_{i,j} \text{Cov}[l_i y S_i / \cos \alpha_i; l_j y S_j / \cos \alpha_j] \dots (12)$$

## 3. 室內試驗을 이용한 海洋粘土의 非排水剪斷強度 Model

### 3.1. 不偏 原位置 非排水剪斷強度

한 點의 不偏 原位置 非排水剪斷強度는 (2), (3)式으로 구할 수 있고, 面積  $A_i$ 에서의 平均強度와 變動係數는 資料의 scatter와 不充分한 資料, model error 등을 고려하여 (13), (14)式으로 나타낼 수 있다.

$$E[S_i] = \prod_{j=1}^m E[N_j] E[S_i] \dots (13)$$

$$\Omega[S_i] = \sqrt{\frac{\{F[A_i] \cdot \Omega[S_i]\}^2}{\{ \Omega[S_i] / \sqrt{n} \}^2 + \sum \Omega^2[N_j]}} \dots (14)$$

여기서  $A_i$ 는  $i$ 번째 segment의 slip surface 面積이고,  $n$ 은 資料의 個數이고,  $S_i$ 는 測定된 等方壓密非排水(CIU)剪斷強度이다.

### 3.2. 原位置強度와 測定強度의 偏差

粘土의 不偏 原位置 非排水剪斷強度를 算定하기 위해서는 測定된 값의 偏差를 補正해 주어야 한다.

原位置 強度와 實驗室 強度의 偏差를 일으키는 影響因子들에 관하여 研究된 문헌들을 調査하여 補正係數  $N_j$ 의 範圍를 구한다.<sup>2)</sup> 補正係數

$N_j$ 의 정확한 分布를 알 수 없으므로, 分布를 假定하여 補正係數  $N_j$ 의 平均值 및 變動係數를 決定한다.

原位置 強度와 實驗室 強度의 偏差는 試料攪亂, 應力狀態, 試料크기, 漸進的인 破壞, 交番荷重 等に 基因한다.

· 試料攪亂( $N_1$ ): 海洋粘土의 Sampling 方法에 따라서 시료를 hammer sample 과 push sample 로 나눌 수 있다. hammer 와 push sample 의 強度를 比較하면, 粘土의 強度는 試驗方法과 試料取扱技術 等に 따라 變한다.<sup>6)</sup> 過壓密 海洋粘土(overconsolidated marine clay)의 경우에 實驗室에서 試料를 봉해서 保管하다가 試驗하게 되면 hammer 와 push sample 의 三軸強度는 거의 같다. 試料攪亂은 上載壓力下에서 再壓密되었을 때의 體積變化로부터 測定한다. 試料攪亂 補正係數는 體積變化가 약 2%일 때 0.95~1.40 정도이며 變動係數는 0.08 이다.<sup>2)</sup>

· 應力狀態( $N_2$ ): 三軸試驗은 軸對稱狀態이므로 原位置 條件과 다르다. 이 效果에 의한 強度차이는 Tang<sup>2)</sup>, Vaid<sup>7)</sup>, Ladd<sup>8)</sup> 等に 의해서 調査되었다. 主動三軸試驗(triaxial active test)은 1.02—1.15, 受動三軸試驗(triaxial passive test)은 1.19—1.26의 補正係數를 갖는다.

海洋構造物의 滑動에 대한 破壞斷面은 Fig. 2에 주어진다. 그림에서와 같이 滑動破壞解析時 破壞斷面은 變形特性에 따라서 主動, 剪斷, 受動狀態의 強度를 각각 適用하여야 하며, 이 方法을 “ADP(Active, Direct simple shear, Passive) method”라고 한다.<sup>9)</sup> 破壞斷面의 傾斜部分(inclined portion)의 強度  $S$ 는 (15)式으로 구한다.

$$S = (S_a + S_p) / 2 + [\sin(\phi + 2\alpha) / \cos\phi] \cdot (S_a - S_p) / 2 \dots (15)$$

$$\phi = \tan^{-1} [(2S_d - S_a - S_p) / (S_a - S_p)]$$

여기서,  $S_a$ 는 主動剪斷強度,  $S_d$ 는 直接簡便剪斷強度,  $S_p$ 는 受動剪斷強度,  $\alpha$ 는 破壞斷面과 水平面이 이루는 角度이다.

· 試料크기( $N_3$ ): 一般的으로 試料크기는 3.8 cm

× 7.6 cm 이므로, 設計斷面의 強度는 龜裂(fis-sure)로 인해 試料強度보다 減少한다. 龜裂이 거의 없는 Intact clays 의 補正係數는 0.85~1.0 정도이다.<sup>2)</sup>

· 漸進的인 破壞( $N_4$ ): Potential slip surface 에 따른 變形度分布는 均等하지 않으며, 荷重이 增加하면 變形이 가장 큰 點에서 破壞가 시작된다. 漸進的인 破壞는 變形이 增加함에 따라 初期破壞領域의 強度가 減少하여 破壞가 擴張되는 것이다.<sup>10)</sup> 이 效果는 peak strength에서의 變形度보다 큰 變形度에서 破壞되는 것을 나타내는 것으로, strain-softening 舉動을 하는 粘土에서 效果가 커진다.<sup>11)</sup> strain-softening 舉動을 나타내지 않는 粘土의 補正係數는 0.9~1.0 정도이다.<sup>2)</sup>

· 交番荷重(cyclic loading)의 效果( $N_5$ ): Quasi-static 解析에서는 static 荷重에 의해 剪斷強度를 算定하므로 以前(previous)交番荷重에 의한 強度減少效果를 고려해 주어야 한다. 補正係數  $N_5$ 는 交番荷重 後의 強度와 剪斷變形度 사이의 關係에서 類推할 수 있다. 剪斷變形度の 다른 不確定性 效果는 剪斷變形度が 작을 때 無視할 수 있다.<sup>12)</sup>

#### 4. 現場貫入試驗을 이용한 海洋粘土의 非排水剪斷強度 Model

##### 4.1. $N_k$ 값의 Model 誤差

現場貫入試驗을 이용하여 粘土地盤에서 非排水剪斷強度를 決定하는 方法은 다른 剪斷強度試驗과의 經驗的인 關係에 依存하며 (16)式으로 나타낼 수 있다.

$$S_u = (q_c - \gamma Z) / N_k \dots \dots \dots (16)$$

여기서,  $q_c$ 는 cone resistance,  $\gamma Z$ 는 全上載壓力,  $N_k$  값은 粘土의 應力—變形度 特性에 의한 變數이며 經驗的으로 決定된다.

Kjekstad<sup>13)</sup> 等이 北海에서 stiff, overconsolidated non-fissured clay 에 대하여 調査한  $N_k$  값의 平均值와 變動係數는 17.9 와 0.34 이다(Fig. 4

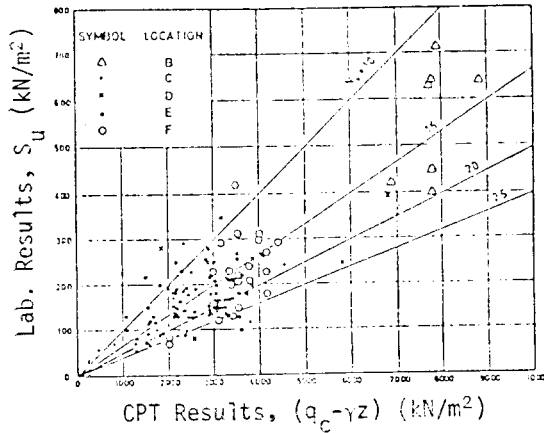


Fig. 4. Laboratory strength vs. cone resistance for all samples :  $kN/m^2 = kPa$ . (ref ; 13)

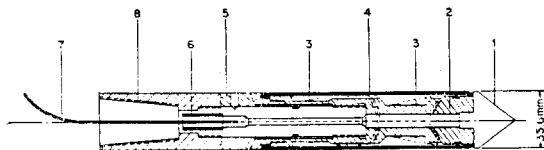
참고). 本 研究에서는 Kjekstad 가 北海의 다섯 장소에서 행한 等方壓密非排水(CIU) 三軸試驗과 現場貫入試驗의  $N_k$  關係를 北海 全體의 代表值로 假定하고, 偏差를 고려해 주기 위하여 補正係數  $M_j$  를 도입한다.

$N_k$  값의 平均值와 變動係數는 (17), (18) 式으로 얻을 수 있다.

$$E[N_k] = \prod_{j=1}^n E[M_j] \cdot E[N_k'] \dots\dots\dots(17)$$

$$\Omega[N_k] = \sqrt{\frac{\Omega[N_k']^2}{+ \{ \Omega[N_k'] / \sqrt{n} \}^2 + \sum \Omega^2(M_j)}} \dots\dots\dots(18)$$

여기서  $N_k'$  는 北海의 代表值이고  $N_k$  값은 不偏(unbiased)값이고  $n$  은 試料의 個數이다. 北海의 다섯장소와 Statfjord B에서 사용된 現場貫入試



1. Conical point(10 cm<sup>2</sup>)
2. Load cell
3. Strain gages
4. Friction sleeve(150 cm<sup>2</sup>)
5. Adjustment ring
6. Waterproof bushing
7. Cable
8. Connection with rods

Fig. 5. Electric Friction-Cone Penetrometer Tip.

驗은 Fig. 5 에 나타낸 Fugro Electric Friction-Cone Penetrometer 이다.

$N_k$  값에 影響을 끼치는 因子는 非排水剪斷強度와 cone resistance 의 두가지로 나눌 수 있다. cone resistance 에 가장 큰 影響을 끼치는 因子는 貫入시에 發生하는 間隙水壓인데 tip 形態, tip 의 貫入方法, soil dilatancy, 透水性, 貫入率, 過壓密比 等に 큰 影響을 받는다. <sup>14,15,16,18)</sup>

本 研究에서는 지금까지 調査된  $N_k$  값의 影響 因子들을 문헌조사하여,  $N_k$  값의 範圍를 決定하고, 그 範圍內的  $N_k$  값의 分布를 가정하여 平均值와 變動係數를 算定했다.

- 比較強度試驗의 形態( $M_1$ ) :  $N_k$  값을 정하기 위한 試驗에는 三軸(triaxial), 直接簡便剪斷(direct simple shear), 一軸(unconfined compression), field vane 等이 있으나 本 研究에서는 等方壓密非排水 三軸主動試驗과 現場貫入試驗의 關係를 이용한다. 不偏 原位置 非排水剪斷強度를 얻기 위해서 3章에서 구한 補正係數를 이용하여, 補正係數  $M_1$  의 平均值와 變動係數를 구한다.

- 貫入率( $M_2$ ) : 貫入率은  $q_c$  값 뿐만 아니라 試驗동안에 發生하는 間隙水壓에도 影響을 끼친다. <sup>14)</sup> 貫入率을 낮출수록  $q_c$  는 작아지며, 높게 할수록 增加하나 秒當 10~30 mm 정도면 별 影響이 없다. <sup>15)</sup> 貫入率에 變化가 있을때 補正係數  $M_2$  는 0.93~1.07 의 값을 갖는다.

- 貫入方法( $M_3$ ) : Fugro 形態의 electrical tip 은 100 cm 를 基本單位로 2 cm/sec 의 一定한 速度로 連續的으로 貫入시키나, mechanical tip 은 20 cm 를 基本單位로 不連續的인 方法에 의해 貫入시킨다. <sup>16)</sup> 貫入方法에 따른 補正係數  $M_3$  는 electrical tip 과 mechanical tip 의 偏差를 補正하는 것으로,  $N_k$  값을 算定할 때와  $q_c$  값을 算定할 때에 같은 形態의 現場貫入試驗을 사용하면 無視할 수 있다.

- 貫入 Tip 의 形態( $M_4$ ) : cone 은 10 cm<sup>2</sup> 의 面積과 60°의 角을 갖는 것이 標準이고, friction cylinder 는 150 cm<sup>2</sup> 의 面積이 標準이다. <sup>17)</sup> 貫入

Tip의 形態에 의한 補正係數  $M_4$ 는 electrical tip과 mechanical tip, 過壓密粘土와 正規壓密粘土에 따라 變化한다.<sup>18)</sup>

· 水平有效應力 혹은 過壓密比( $M_5$ ) : cone의 貫入으로 인하여 흙의 水平方向膨脹이 發生하고 水平有效應力은  $q_c$  값에 큰 影響을 끼친다.<sup>18)</sup> 또한, 過壓密比값은 間隙水壓에 影響을 끼치고 間隙水壓은 有效應力에 影響을 주므로  $q_c$  값에 影響을 끼친다.<sup>19)</sup> 補正係數  $M_5$ 는 0.82~1.18 정도이다.

· Rigidity Index( $M_6$ ) : rigidity index는 非排水 剪斷係數( $G$ )와 非排水 剪斷強度의 比로서 나타내며, Baligh<sup>20)</sup>에 의하면 rigidity index의 增加에 따라  $N_k$  값이 增加한다.

式 (17), (18)과 Table 3을 이용하여 北海에서 구한 不偏  $N_k$  값은 平均值가 16.1이며, 變動係數가 0.38이다.

#### 4.2. 異方性(Anisotropy)

現場貫入試驗과 等方壓非排水 三軸試驗의 關係에서 決定된 非排水剪斷強度는 主動狀態에서 구한 값이다. 海洋構造物의 滑動에 대한 解析을 하기 위해서는 主動, 直接簡便剪斷, 受動狀態의 剪斷強度를 알아야 한다(Fig. 2). 主動, 剪斷, 受動狀態의 相對的인 크기를 調查하여 Table 1에 收錄했다. 위의 結果를 토대로 相對的인 크기를 結定하면, 直接簡便剪斷強度는 主動狀態強度의 78% 정도이고, 受動狀態強度는 主動狀態強度의 53%이며, 각각의 變動係數는 0.09, 0.20이다.<sup>8, 11, 19, 21, 22)</sup>

위의 結果를 토대로 非排水直接簡便剪斷強度, 非排水受動剪斷強度를 (19), (20)式으로 나타낼 수 있다.

$$S_d = (q_c - \gamma Z) / 1.28 N_k \dots \dots \dots (19)$$

$$S_p = (q_c - \gamma Z) / 1.89 N_k \dots \dots \dots (20)$$

#### 4.3 不偏 原位置 非排水剪斷強度

現場貫入試驗으로 不偏 原位置 非排水剪斷強

**Table 1.** Triaxial Active, Passive, Direct Simple Shear의 크기

clay의 종류	TA/TA	DSS/TA	TP/TA
Atlantic Generating Station (Koutsoftas & Ladd, 1985)			
N.C. clay	1	0.85	0.43
O.C. clay (OCR=6)	1	0.79	0.70
Drammen Plastic Clay (Bjerrum, 1973)	1	0.75	0.38
N.C. Boston Blue Clay (Ladd & Foott, 1974)	1	0.61	0.47
Porto Tolle-Young N.C. silty clay in Italy (Wroth, 1984)	1	0.82	0.61
Panigaglia-Soft clay in Italy (Wroth, 1984)	1	0.80	0.60
Norway Troll Field (O. Eide, 1984)	1	0.81	0.52

度를 算定하기 위해서는 資料의 scatter와 不充分한 資料,  $N_k$  값의 model error, 異方性에 대한 誤差 等의 效果를 고려하여야 한다. 不偏 原位置 非排水剪斷強度의 平均值와 變動係數는 (21), (22)式으로 算定한다.

$$E[S_i] = E[M'] \cdot E[q_c - rZ] / E[N_k] \dots \dots (21)$$

$$\Omega[S_i] = \sqrt{\{F[A_i] \cdot \Omega[q_c]\}^2 + \{\Omega[q_c] / \sqrt{n}\}^2 + \sum \Omega^2[M_j] + \Omega^2[M']} \dots \dots (22)$$

여기서,  $M'$  = 異方性 補正係數

$A_i$  =  $i$  번째 segment의 slip surface面積

$n$  = 資料의 個數

### 5. 例題解析—Statfjord B의 重力式 海洋構造物

#### 5.1. 荷重

本研究에 使用된 것은 北海에 位置한 Statfjord B의 重力式 海洋構造物이다(Fig. 1 참조). 2章에 나타낸 北海의 設計波高와 週期를 使用하여 design wave method로 NGI<sup>23)</sup>에서 구한 Statfjord B의 重力式 海洋構造物에 作用하는 100年 頻度の 最大水平荷重은  $E[P_{H,100}] = 803 MN$  이고, 전도모멘트는  $E[M_{100}] = 28100 MN - m$ 이다.

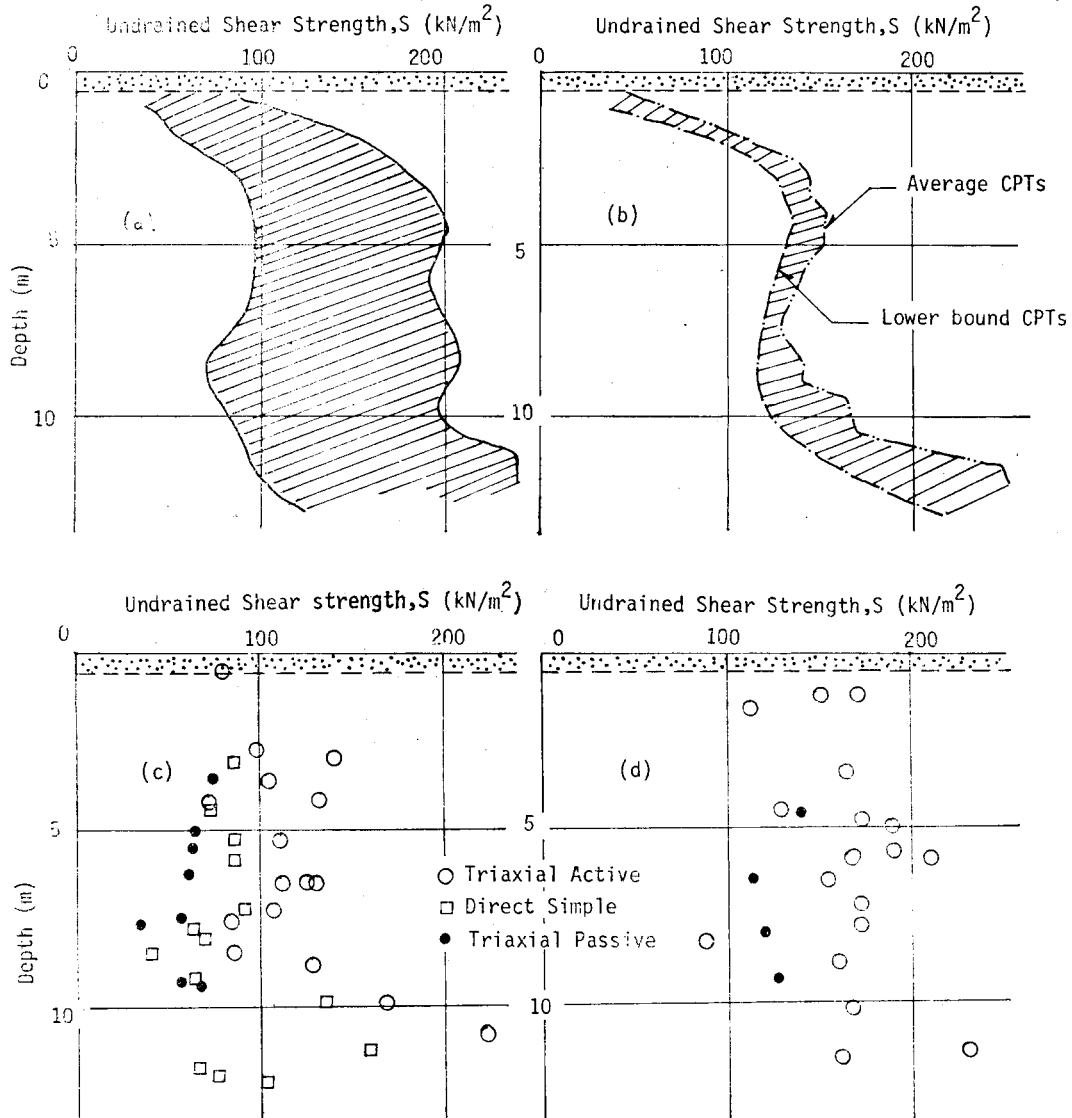
또한, 20年과 1年 頻度の 水平荷重은 2章에 나타낸 單一荷重係數를 곱하여 구할 수 있으며,  $E[P_{H,20}] = 683 MN$ ,  $E[P_{H,1}] = 458 MN$ 이고, 變動係數는 0.24 이다.

滑動시에 作用하는 設計荷重은 앞에서 구한 波浪水平荷重에 波浪에 의한 전도모멘트 및 構造物의 水平方向分力을 더하여 구할 수 있으며

그 結果를 Table 5에 收錄했다.

## 5.2. 現場條件과 非排水剪斷強度의 算定

Statfjord B 地域의 地盤은 얇은 모래층의 表面을 제외하고는 stiff clay 로 이루어 졌다. 各種 室內試驗과 現場貫入試驗에서 구한 剪斷強度를 Fig. 6에 收錄했다. Statfjord B에서 適用할



**Fig. 6.** Shear strength of Clay at Statfjord B (a) Range in shear strength from unconfined compression, laboratory vane, and pocket penetrometer tests, (b) Range in shear strength from cone penetration tests, (c) Triaxial and simple shear tests on samples consolidated to overburden pressure, (d) Triaxial and simple shear tests on samples consolidated to overburden pressure plus vertical stress due to tank weight.



室內試驗의 補正係數( $N_j$ )와 現場貫入試驗의  $N_k$  에 收錄했다.  
값의 補正係數( $M_j$ )를 각각 Table 2. 와 Table 3.

**Table 2.** Correction factor for undrained shear strength

Factor	Triaxial active		Type of Test NGI simple shear		Triaxial passive		Comments
	$E[N_j]$	$\Omega[N_j]$	$E[N_j]$	$\Omega[N_j]$	$E[N_j]$	$\Omega[N_j]$	
Disturbance( $N_1$ )	1.18	0.08	1.18	0.08	1.18	0.08	
Stress State( $N_2$ )	1.08	0.03	1.00	0.03	1.23	0.03	
Specimen Size( $N_3$ )	0.93	0.05	0.93	0.05	0.93	0.05	
Progressive Failure( $N_4$ )	0.95	0.03	0.95	0.03	0.95	0.03	
Cyclic Loading( $N_5$ )	0.99	0.06	0.99	0.06	0.99	0.06	100 yr storm
	1.00	0.06	1.00	0.06	1.00	0.06	20 yr and 1 yr storm
TOTAL	1.11	0.12	1.04	0.12	1.28	0.12	

**Table 3.** Correction Factor for  $N_k$ -value

Factor	$E[M_j]$	$\Omega[M_j]$
strength test type ( $M_1$ )	0.90	0.12
rate of penetration ( $M_2$ )	1	0
method of penetration ( $M_3$ )	1	0
shape of tip ( $M_4$ )	1	0
$K_0$ or OCR ( $M_5$ )	1	0.07
rigidity index ( $M_6$ )	1	0.05

### 5. 3. 原位置 非排水剪斷強度와 基礎抵抗 (Foundation Resistance)

重力式 海洋構造物의 圓形基礎는 같은 面積의 正四角形基礎로 바꾸어 解析하고, 이 基礎를 均等化基礎(equivalent foundation)라 한다. 이 均

等化基礎의 slip surface를 Fig. 7에 나타냈으며, 이 경우 Y方向의 幅은 135m이다.

Statfjord B의 correlation distance는  $\delta_x=0.1$  7m,  $\delta_x, \delta_y=53$ m이다.<sup>4)</sup>  $x_i, l_i$  그리고  $y=135$ m를 갖는 Segmenti의  $\delta_i$ 값은 (4e)式으로 計算되고,  $F[y], F[l]$ 과  $F[A]$ 는 (4d), (4c)와 (4b)式으로 計算된다. Statfjord B의 slip surface의  $l_i$ 와  $\delta_{ii}, F[l], F[A]$ 의 값을 計算하여 그 結果를 Table. 4에 收錄했다. 또한 주어진 slip surface에서  $l_i, y, \alpha_i$ 값을 (13), (14)式과 (21), (22)式에 代入하여 平均非排水剪斷強度를 決定하고, (11), (12)式으로 抵抗의 平均值와 分散을 算定했다. Statfjord B에서 室內試驗과 現場貫入試驗으로 算定한 非排水剪斷強度와 抵抗을 Table 4에 나

**Table 4.** Shear Strength along Slip Surface

(a) Segment	Depth $m$	Lab. Test		CPT		$l_i$ (m)	$\delta_i$ (m)	$F(l_i)$	$F(A_i)$
		$E[s_i]$ (kPa)	$\text{Var}[S_i]$ (kPa) <sup>2</sup>	$E[s_i]$ (kPa)	$\text{Var}[S_i]$ (kPa) <sup>2</sup>				
1	2.5	88.9	147	115	2116	14	53	1.0	.63
2	2.5-6.5	91.5	142	118	4524	52	.90	.13	.08
3	6.5-10.5	74.0	158	114	4222	69	2.9	.20	.13
4	"	71.0	146	75	1040	8.0	.25	.17	.11
5	"	86.1	125	77	1096	6.0	.09	.12	.08
6	"	52.5	47	55	640	3.5	.09	.16	.10
(b) Slip surface with model error									
By Lab. Test		$\bar{R}=1.94 \times 10^3$ MPa		$\text{Var}[R]=6.36 \times 10^4$ (MPa) <sup>2</sup>					
By CPT		$\bar{R}=2.33 \times 10^3$ MPa		$\text{Var}[R]=6.23 \times 10^5$ (MPa) <sup>2</sup>					

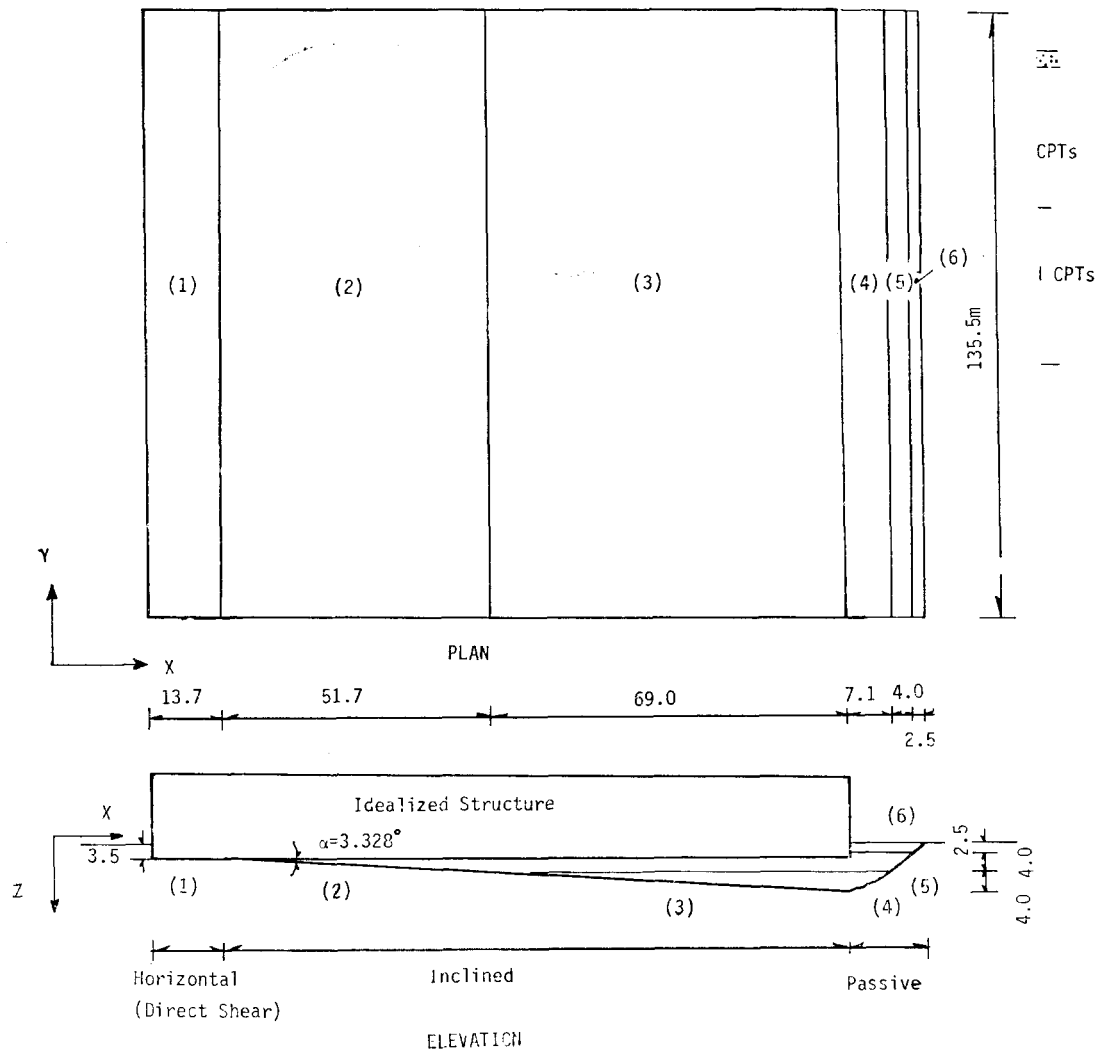


Fig. 7. Elements on Statfjord B Slip Surface

타냈다.

Slip surface의 抵抗은 quasi-static解析을 사용했으므로 波浪荷重을 靜的荷重으로 假定한데서 發生하는 偏差를 補正해 주어야 한다. 이 偏差에 대한 補正係數는 平均値가 1.0이고 變動係數가 0.1이다.<sup>24)</sup>

#### 5.4. 滑動에 대한 破壞確率

Statfjord B에 位置한 重力式 海洋構造物의 滑動에 대한 破壞確率は 2章에서 제안한 荷重과 Table 4에 나타난 抵抗을 (5), (6), (7), (8), (9)

式에 代入하여 얻을 수 있다.

20年, 1年 頻度の 颱風으로 인한 重力式 海洋構造物(Statfjord B)의 滑動에 대한 破壞確率을 計算하여 그 結果를 Table 5에 收錄했다.

本 研究에서 구한 滑動에 대한 破壞確率は Table 5.에서 보는 바와 같이 室內試驗을 이용한 方法이 現場貫入試驗을 이용한 方法보다 작다. 그 이유는 室內試驗은 ADP 方法을 이용하여 變形特性에 따른 應力狀態를 비교적 正確하게 고려한 Advanced Test이기 때문에 破壞確率が 적다. 반면 現場貫入試驗은 主動狀態이므

Table 5. Foundation Reliability

Criteria	Resistance		Load			Safety $E[F_s]$	Factor $\Omega[F_s]$	Reliability	
	$E[R]$ (MN)	$\Omega[R]$	storm	$E[L]$ (MN)	$\Omega[L]$			$\beta$	$P_f$
Undrained Shear Strength by Laboratory Test	1940	0.130	1yr.	723	0.21	2.68	0.25	4.08	$2.26 \times 10^{-5}$
			20yr.	949	0.24	2.04	0.27	2.72	$3.26 \times 10^{-3}$
Undrained Shear Strength by CPT	2330	0.339	1yr.	723	0.21	3.22	0.41	2.85	$2.19 \times 10^{-3}$
			20yr.	949	0.24	2.46	0.42	2.10	$2.1 \times 10^{-2}$

로 變形特性에 따른 應力狀態를 正確하게 나타낼 수 없고, 比較強度試驗과 cone resistance의 相關性에 存在하는 不確定性으로 인해 破壞確率 이 큰 것으로 思料된다.

謝辭: 本研究은 1986年度 韓國科學技術院의 研究費支援에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 표한다.

## 6. 結 論

本 研究에서는 室內試驗과 現場貫入試驗을 이 용한 剪斷強度算定 方法에 대한 不確定性이 각 각 調査되었고, 이 結果를 이용하여 重力式 海洋 構造物의 滑動에 대한 信賴度解析이 수행되었다.

本 研究의 結論은 다음과 같다.

- (1) 室內試驗의 不確定性은 試料攪亂, 應力狀態, 試料크기, 漸進的인 破壞, 交番荷重 등에 基 因한다.
- (2) 現場貫入試驗의 不確定性은 比較強度試驗의 形態, 貫入率, 貫入方法, 貫入 tip의 形態, 水平方効應力, rigidity index 등에 基因한다.
- (3) 現場貫入試驗으로 剪土地盤에서 非排水剪斷 強度를 決定하는 方法은  $N_k$  값이 큰 不確定性 ( $\Omega[N_k]=0.38$ )을 가지므로 慎重하게 適用해 야 한다.
- (4) Meyerhof<sup>25)</sup>가 제안한 海洋構造物의 許容破 壞確率의 範圍( $10^{-2} \sim 10^{-3}$ )와 比較해 볼때, 現場貫入試驗만을 이용한 非排水剪斷強度 算定 方法의 適用은 그 信賴도가 낮으므로, 室內試 驗(壓密非排水)을 並行하는 것이 필요한 것으 로 思料된다.
- (5) 現場貫入試驗으로 粘土地盤에서 非排水剪斷 強度를 算定할 때,  $N_k$  값의 큰 不確定性을 줄 이기 위해 現場貫入試驗과 現場배인試驗(field vane test)의 關係(correlation)을 이용하거나, 現場貫入試驗의 結果를 理論的으로 解析할 수 있는 方法이 講究되어야 한다.

## 참 고 문 헌

1. Ang, A.H.-S. and Tang, W.H. (1975), "Probability Concepts in Engineering Planning and Design," Vol. 1. John Wiley and Sons, Inc., New York.
2. Tang, W.H., Yucemen, M.S., and Ang, A.H.-S. (1976), "Probability-based short term design of soil slopes", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 13, pp. 201~215.
3. Vanmarcke, E.H. (1977), "Probabilistic modeling of soil profiles", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT11, pp. 1227~1246.
4. Höeg, K. and Tang, W.H. (1978), "Probabilistic considerations in the foundation engineering for offshore structures", Proceedings of the International Conference on Structural Safety and Reliability, also Pub. No. 120, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
5. Lauritzsen, R. and Schjetne, K. (1976), "Stability calculations for offshore gravity structures", Proceedings, 8th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1976, also, Pub. No. 130, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
6. Schjetne, K. and Brylawski, E. (1979), "Offshore sampling in the North Sea", Proceedings, International Symposium on Soil Sampling, Singapore, 1979, pp. 139~156, also Pub. No. 130, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.

7. Vaid, V.P., and Campanella, R.G. (1974), "Triaxial and plane strain behavior of natural clay", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. GT3, pp. 207~224.
8. Ladd, C.C. and Foott, R. (1974), "New design procedure for stability of soft clays", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. GT7, pp. 763~786.
9. Larsson, R. (1980), "Undrained shear strength in stability calculation of embankments and foundations on soft clays", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, pp. 591~602.
10. Terzaghi, K., and Peck, R.B. (1967), "Soil Mechanics in Engineering Practice", Wiley, New York.
11. Bjerrum, L. (1973), "Problems of soil mechanics and construction on soft clays", NGI, Publ. 100.
12. Michols, K.A. (1979), "A probabilistic study of offshore gravity platform foundation", M.S. Thesis, University of Illinois, Urbana.
13. Kjekstad, O.T., Lunne, T. and Clausen, C.J.F. (1978), "Comparison between in situ cone resistance and laboratory strength for overconsolidated North Sea clays", Marine Geotechnology, Vol. 3, No. 1, pp. 23~36.
14. Campanella, R.G. and Robertson, P.K. (1981), "Applied cone research", Symposium on Cone Penetration Testing and Experience, Geo. Engng. Div., ASCE, 1981, pp. 343~362.
15. De Ruiter, J. (1981), "Current penetrometer practice", Symposium on Cone Penetration Testing and Experience, Geo. Engng. Div., ASCE, 1981, pp. 1~48.
16. Schmertmann, J.H. (1975), "Measurement of in-situ shear strength", Proceedings of the Speciality Conference on in-situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Raleigh, Vol. 2, pp. 57~138.
17. ASTM (1985), American Society for Testing and Materials Standard D3441 : Standard Method for Deep Quasi-Static, Cone and Friction-Cone Penetration Tests of Soil.
18. Schmertmann, J.H. (1978), "Guidelines for cone penetration test, performance and design", Federal Highway Administration, report FHWA-TS-78-209, Washington, 145p.
19. Wroth, C.P. (1984), "The interpretation of in situ soil tests", Twenty-Fourth Rankine Lecture, Geotechnique, pp. 447~489.
20. Campanella, R.G. and Robertson, P.K. (1983), "Interpretation of cone penetration tests", Canadian Geo. Jour., Vol. 20, pp. 718~745.
21. Eide, O. and Andersen, K.H. (1984), "Foundation engineering for gravity structures in the Northern North Sea", NGI, Publ. 154.
22. Koutsoftas, D.C., Ladd, C.C. (1985), "Design strengths for an offshore clay", Geo. Engng. Div., ASCE, Vol. 111, pp. 337~355.
23. NGI (1980), Norwegian Geotechnical Institute, Private Communication.
24. Lacasse, S. (1982), "Platform movements due to foundation overloading", International Conference on Numerical Methods, Edmonton, Canada.
25. Meyerhof, G.G. (1976), "Concepts of safety in foundation engineering ashore and offshore", Proceedings, First International Conference on the Behavior of Offshore Structure, Vol. 1, pp. 900~911.

#### 記 號

- CIU : isotropically consolidated undraind(condition)  
Cov : covariance  
DSS : direct simple shear test  
 $E[\cdot]$  : mean of ( $\cdot$ )  
 $F_s$  : factor of safety  
 $M_i$  : correction factor of  $N_k$ -value  
 $M_j'$  : correction factor of anisotropy  
 $n$  : number of samples  
 $N_j$  : correction factor of lab. test  
 $N_k$  : cone factor  
 $N_k'$  : cone factor in North Sea  
 $P_f$  : failure probability  
 $S, S_u$  : in-situ undrained shear strength  
 $S_a$  : active shear strength  
 $S_d$  : direct shear strength  
 $S_p$  : passive shear strength  
 $S_t$  : measured shear strength

$S_i$  : shear strength of segment  $i$   
 $TA$  : triaxial active test  
 $TP$  : triaxial passive test  
 $\text{Var}[\cdot]$  : variance  
 $\alpha$  : angle of slip surface

$\beta$  : reliability index  
 $F$  : variance reduction factor  
 $\delta$  : scale of fluctuation  
 $\Phi$  : standard normal probability  
 $Q[\cdot]$  : coefficient of variation