

해양 構造物 地盤의 液狀化 可能性에 대한 信賴度 解析

A Reliability Analysis of Liquefaction Potential Induced by Ocean Wave

金	俊	奭*
Kim,	Joon	Seok
李	寅	模**
Lee,	In	Mo

Abstract

A model for predicting the probability of liquefaction induced by the ocean storm-wave is developed. Many uncertainties are encountered in the analysis of liquefaction potential for the foundation of offshore structures: (1) the storm-wave duration, (2) the effect of reconsolidation, (3) the effect of partial drainage, etc. These uncertainties are formulated in probabilistic terms and used to assess the risk of liquefaction for a given offshore site.

The model developed is applied to the Ekofisk oil storage tank in the North Sea installed in 1973. Reasonable comparison is obtained between the probabilities of liquefaction obtained and the results of deterministic models or the field observations. Among the uncertainties encountered, it is revealed that the effect of reconsolidation is the most critical factor.

Since many problems are encountered in the deterministic models developed so far, the probabilistic model developed in this paper might be a reasonable alternative tool and can be used in the design of new offshore structures.

요 지

本 論文에서는 海洋波浪에 의해 誘發되는 液狀化 現象의 發生 可能性을 推定하기 위한 信賴度 解析 모델을 開發하였다. 海洋構造物 基礎地盤의 液狀化 可能性의 解析에는 많은 不確定 要因이 있다. 代表的 要因으로는 (1) 波浪의 持續時間 問題 (2) 작은 波浪으로 인한 土質의 應力經歷 問題 (3) 긴 週기로 인한 部分的 排水의 發生問題 等이다. 이러한 不確定性은 信賴度 解析의 중요한 要素로써, 주어진 海洋現場에 대한 液狀化의 可能性을 推定하는데 使用된다.

開發된 모델을 이용해서 1973年 北海에 설치된 Ekofisk 油類貯藏 탱크에 대해 解析한 結果 合理的인 結果를 얻을 수 있었으며, 提案된 不確定 要因중에 再壓密의 影響이 가장 큰 것으로 나타났다.

많은 問題들이 安全率概念에 의해 解析되어 왔으나 本 研究에서 開發된 信賴度 모델은 여러가지 不確定性을 고려할 수 있는 解析方法으로서 앞으로 새로운 海洋構造物의 設計에 使用될 수 있다.

*正會員 · (株)大宇 建設技術研究所 研究員

**正會員 · 高麗大學校 工科大學 助教授, 土木工學科

1. 序 論

1970年代 初 石油價의 急增으로 海低石油의 開發이 급격히 增加하면서 海洋構造物의 技術의 發展이 크게 要求되었다. 海洋構造物의 種類는 크게 重力式과 Pile 式으로 나눌 수 있는데 重力式 構造物은 海洋에서 發生되는 波浪荷重을 自重에 依해 견딜 수 있도록 設計된다.

그러므로, 重力式 構造物은 基礎地盤의 土質特性에 크게 影響을 받는다. 重力式 海洋構造物의 基礎問題는 크게 두가지로서 하나는 地盤의 安定度(stability) 問題이고, 또 하나는 海洋波浪荷重에 의한 液狀化 現象(liquefaction)의 問題이다. 安定度의 問題는 粘性土地盤에서 특히 問題가 되고 液狀化 現象은 砂質土地盤에서 問題가 된다.

液狀化 現象을 誘發시킬 수 있는 대표적 要因은 地震과 海洋波浪荷重이다. 이중에 地震으로 因한 液狀化 可能性에 대해서는 많은 研究가 遂行되어 왔지만 波浪荷重에 의한 液狀化 可能性에 대해서는 1973年 北海(North Sea)에 490,000 ton의 Ekofisk 油類貯藏탱크의 建設을 계기로, 1975年 Lee와 Focht⁽⁵⁾가 同탱크에 대해 研究分析한 것이 始初이다. 최근에는 1983年에 Nataraja와 Gill⁽⁶⁾이 Simple method를 提案한 바 있다. 海洋波浪荷重에 의한 液狀化 可能性을 推定하는 경우에는 3가지 중요한 불확정 要因이 있다. 첫번째로 波浪의 持續時間(duration)⁽¹²⁾, 둘째로 작은 波浪으로 인한 土質의 應力 經歷(stress history)⁽¹²⁾⁽¹³⁾, 셋째로, 긴 週期(period)로 인한 部分的 排水의 發生問題(partial drainage)⁽¹²⁾ 등이다. 이러한 요소들은 液狀化 可能性에 결정적 구실을 하면서도 推定이 어렵다. Lee와 Focht⁽⁵⁾의 연구에서도 이러한 요소들의 推定을 위하여 많은 실내시험을 행하였으나 궁극적으로 시험오차와 분산의 정도, 解析모델의 妥當性 등을 충분히 반영하지 못하는 解析結果를 提案하였다. 그러므로, 이러한 解析의 信賴性 問題를 극복하기 위해서는 각 요소의 불확정 要因이 반영될 수 있는 信賴度 解析을 시도하는 것이 合理的이다. 本文에서는 이러한 信賴度 解析을 수행할 수 있는 解析 모델의 開發 및 例題解析을 수행하였다.

2. 海洋構造物 液狀化 可能性의 信賴度 解析모델

海洋에서의 液狀化 現象의 發生은 連續的인 波浪으로 인해 基礎地盤에 週期的 應力(cyclic stress)이 發生함으로써 일어난다. 즉, 液狀化 現象의 發生은 週期的 應力의 크기와 發生 回數 그리고, 地盤 土質의 強度에 좌우된다. 그러므로, 信賴度 解析은 불규칙한 週期的 應力의 크기와 發生回數, 이미 언급한 土質의 應力經歷과 部分的 排水의 發生 여부에 큰 影響을 받는 地盤土質強度의 確率의 推定을 통하여 可能하므로 이에 따르는 信賴度 解析모델을 제안하였다.

2.1. 信賴度 解析의 基本理論

一般的으로 構造物의 安全을 위한 信賴度 解析은 가해지는 荷重과 저항하는 強度를 比較함으로써 이루어진다. 一般的으로 安全率은 式 (1)로 表現할 수 있다.

$$FS = C_1 \cdot C_2 \cdots C_m \cdot g(X_1, \cdots, X_n) \quad (1)$$

여기서, FS : 安全率

g : X_1, \cdots, X_n 의 函數

X_1, \cdots, X_n : 無作爲 變數(random variable)

C_1, \cdots, C_m : 影響 要素들에 기인한 安全率 보정계수

安全率에 대한 平均값과 變動係數(coefficient of variation, COV)를 一次近似解法으로 求하면 安全率의 平均값은 式 (2)로, 變動係數는 式 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\mu(FS) = \bar{C}_1 \cdot \bar{C}_2 \cdot \bar{C}_m \cdot \bar{g} \quad (2)$$

$$\Omega^2(FS) = \sum \Omega^2(i) + \frac{1}{g^2} (\sum \alpha_i^2 \cdot \sigma_i^2 + \text{correlation terms}) \quad (3)$$

여기서, $C_1 \cdots C_m$: 보정계수들의 平均값

$\Omega, \Omega(i)$: 變動係數(COV)

g : $X_1 \cdots X_n$ 의 平均값에 대한 g 값

σ_i^2 : X_i 의 分散

α_i : X_i 의 變化에 따르는 g 값의 變化를 나타내는 敏感度 要素(sensitivity factor)

2.2. 信賴度 解析모델

海洋構造物 基礎地盤의 液狀化 現象은 이미 언급했듯이 波浪으로 인해 地盤에 가해지는 불규칙

한 交番應力(cyclic stress)의 크기와 回數 그리고 이에 저항하는 土質의 強度에 의해 결정된다. 그래서 本文에서는 信賴度 解析을 위하여 波浪에 의해 가해지는 불규칙한 交番應力을 규칙적인 交番應力으로 환산하는 等價交番回數(equivalent number)를 변수로 사용한다. 또 土質의 強度도 일반적인 強度개념이 아닌 일정크기의 週期的 交番應力에 저항할 수 있는 최대 交番回數를 변수로 사용한다. 本文에서는 前者를 荷重等價交番回數 後者를 強度等價回數라 칭한다.

海洋構造物 地盤이 液狀化 現象으로 破壞될 確率は 安全率(FS)의 正確한 確率密度函數를 알 수는 없으나 一般的으로 陰의 값을 가질 수 없고 安全率이 큰쪽에서 歪曲度가 있으므로 對數正規分布로 假定한다. 또 強度와 荷重을 각각 對數正規分布로 假定하면 安全率은 對數正規分布가 되므로 破壞確率は 식 (4), (5)로 求할 수 있다.

$$P_f = P(FS \leq 1.0) = P(N_r < N_a) = 1 - \Phi[\beta] \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\bar{N}_r}{\bar{N}_a} \sqrt{\frac{1 + \Omega_a^2}{1 + \Omega_r^2}}\right)}{\sqrt{\ln\{(1 + \Omega_r^2)(1 + \Omega_a^2)\}}} \quad (5)$$

여기서, P_f : 破壞될 確率(Probability of failure)

Φ : standard normal probability

β : 信賴係數

\bar{N}_r : 平均強度等價交番回數

\bar{N}_a : 平均荷重等價交番回數

Ω_a : 荷重等價交番回數의 變動係數

Ω_r : 強度等價交番回數의 變動係數

2.3 荷重等價交番回數의 모델

荷重等價交番回數는 이미 앞에서 說明한 바 있다. 等價交番回數 概念을 사용하는 이유는 海洋地盤에 불규칙하게 작용하는 交番應力을 試驗室에서 再現하기가 어렵기 때문이다. 等價交番回數를 구하는 방법을 예를 들어 說明하면 그림 1에서 交番剪斷應力比(cyclic shear stress ratio) $\tau_i = 0.31$ 이 試料에 9번 가해졌을 때 液狀化 現象으로 破壞되었고, $\tau_i = 0.2$ 가 52번 가해졌을 때 破壞되었다. 이 결과로부터 $\tau_i = 0.31$ 9개와 $\tau_i = 0.2$ 52개는 서로 等價(equivalent)라고 말할 수 있으며 $\tau_i = 0.31$ 1개는 $\tau_i = 0.2$ $\frac{52}{9}$ 개와 같다고 말할 수 있다. 그러므로, 특정한 應力比를 基準으로 불규칙한 交番剪斷應力을

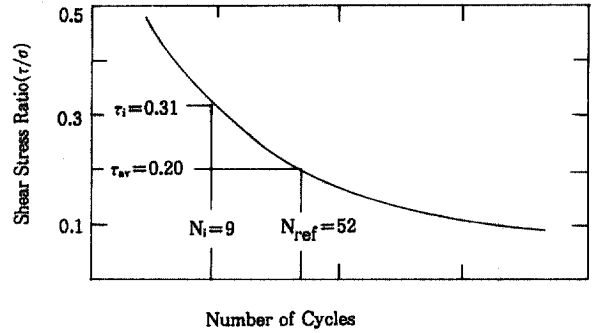


그림 1. Steps in Developing Equivalent Number of Uniform Cycles.

식 (6)을 이용하여 等價交番回數로 轉換할 수 있다.

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \frac{N_{Ci} \cdot N_{ref}}{N_i} \quad (6)$$

여기서, N_{eq} : 等價交番回數

N_{ref} : 특정 剪斷應力에서 破壞될 때까지의 交番應力回數

N_i : τ_i 에서 破壞될 때까지의 交番應力回數

N_{Ci} : 波浪荷重 持續時間 동안의 τ_i 갯수

n : 波浪荷重 持續時間 동안 발생하는 應力의 총갯수

荷重等價交番回數를 求하는 方法을 다음의 4단계로 나누어 說明한다. 첫번째로, 波浪持續時間을 결정하기 위하여 海洋에서 發生하는 波浪의 최대 지속시간과 최소지속시간을 결정한 다음, 두값 사이의 確率密度函數를 假定하여 波浪持續時間의 平均값과 變動係數를 求한다. 두번째로, 앞에서 구한 波浪持續時間에 대한 波浪의 波高(wave height)와 갯수를 결정한다. 세번째로 결정된 波浪資料를 基礎地盤에 傳達되는 應力比(stress ratio)로 바꾸어 준다. 네번째로, 앞에서 求한 불규칙한 應力들을 等價交番回數로 바꾼다.

앞에서 說明한 내용중에 荷重等價交番回數를 결정하는 가장 중요한 要素는 波浪의 持續時間이다. 荷重等價交番回數가 決定되기 위해서 4 단계를 거치게 되므로 식 (7)로 표시할 수 있다.

$$N_a = \prod_{i=1}^4 A_i \cdot f(T) \quad (7)$$

여기서, N_a : 荷重等價交番回數

A_1 : 波浪資料의 誤差에 대한 補正係數

A_2 : 波浪에서 基礎地盤에 傳達되는 剪斷

應力 豫測에 대한 補正係數

A_3 : 等價交番回數 轉換時 發生하는 誤差에 대한 補正係數

A_4 : 平均剪斷應力比에 대한 補正係數

$f(T)$: 持續時間 T 의 函數인 等價交番回數
식 (7)에 一次近似解法을 적용하면 平均값과 變動係數를 식 (8), (9)로 나타낼 수 있다.

$$\bar{N}_a = \prod_{i=1}^4 \bar{A}_i \cdot f(\bar{T}) \quad (8)$$

여기서, \bar{N}_a : 荷重等價交番回數의 平均값

\bar{A}_i : 각 補正係數들의 平均값

$f(\bar{T})$: 平均持續時間(T)에 대한 보정되지 않은 하중등가변동회수

$$\Omega(N_a) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \Omega^2(A_i) + \Omega^2\{f(T)\}} \quad (9-a)$$

$$V_{or}\{f(T)\} = \left\{ \frac{\partial f(T)}{\partial T} \Big|_T \right\}^2 \cdot V_{or}(T) \quad (9-b)$$

$$\Omega\{f(T)\} = \frac{\sqrt{V_{or}\{f(T)\}}}{f(T)} \quad (9-c)$$

여기서, $\Omega(N_a)$: N_a 의 變動係數

$\Omega(A_i)$: 波浪의 持續時間에 대한 分散

$\frac{\partial f(T)}{\partial T} \Big|_T$: $f(T)$ 에 대한 $T=\bar{T}$ 에서의 接線의 기울기

식 (9)에서 $\frac{\partial f(T)}{\partial T} \Big|_T$ 의 값은 $f(T)$ 의 函數式이 정의되기 어렵기 때문에 식 (10)의 수치해석을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{\partial f(T)}{\partial T} \Big|_T \approx \frac{\{f(\bar{T}+\Delta T) - f(\bar{T}-\Delta T)\}}{2 \cdot \Delta T} \quad (10)$$

2.4 強度等價交番回數의 모델

土質試料에 일정한 크기의 균등한 交番應力을 試料가 液狀化 現象으로 破壞될 때까지 가해준 回數가 土質試料의 強度等價交番回數이며 식 (11)로 모델화 하였다.

$$N_r = \prod_{i=1}^6 A_i^* \cdot N \quad (11)$$

여기서, N_r : 強度等價交番回數

N : 補正하지 않은 強度等價交番回數

A_1^* : 再壓密 영향에 대한 補正係數

A_2^* : 部分的 排水의 影响에 대한 補正係數

A_3^* : 試驗方法에 대한 補正係數

A_4^* : 相對密度에 대한 補正係數

A_5^* : 平均剪斷應力比에 대한 補正係數
($=A_4$)

A_6^* : 그 밖의 誤差에 대한 補正係數

각 無作爲 變數를 독립으로 가정하고 一次近似解法을 적용하면 強度等價交番回數에 대한 變動係數와 平均값은 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$\Omega(N_r) = \sqrt{\sum_{i=1}^7 \Omega^2(A_i^*) + \Omega^2(N_r)} \quad (12)$$

$$\bar{N}_r = \prod_{i=1}^7 \bar{A}_i^* \cdot \bar{N}_r$$

여기서, $\Omega(N_r)$: 強度等價交番回數에 대한 變動係數

\bar{N}_r : 平均強度等價交番回數

$\Omega(A_i^*)$: 각 보정계수들에 대한 變動係數

$\Omega(N_r)$: 土質資料의 空間변화에 따르는 變動係數

3. 荷重等價交番回數의 補正係數에 대한 誤差算定

3.1 海洋波浪資料에 대한 誤差

波浪資料에 대한 不確定性은 波浪의 固有한 變動性, 資料의 散布度에 기인한 誤差, 測定과 測定器具의 誤差등에 의하여 기인한다. Wu⁽¹³⁾ 등에 의한 分析을 참고하면 波浪資料에 의한 誤差는 變動係數로 나타내어 0.12가 된다.

3.2 波浪에서 基礎地盤에 전달된 剪斷應力 豫測의 誤差

波浪에서 基礎地盤에 전달되는 應力은 上部에 構造物이 있는 경우와 構造物이 없는 自由領域인 경우로 나누어 생각해야 한다. 여기에서 自由領域 [free-field condition]인 경우란 上部 構造物이 없거나, 있다해도 油類管처럼 地盤과의 접촉면적이 거의 없어서 波浪發生 때에 地盤에 전달되는 應力에 影響을 거의 미치지 못하는 경우를 말한다. 첫 번째로, 構造物이 있는 경우는 應力傳達經路가 매우 복잡하므로 模型試驗을 통한 試驗으로 부터 資料[data]를 얻을 수 있다. 이 경우에는 試驗資料의 散布度에 기인된 誤差와 模型試驗의 相違에 기인된 誤差로 나누어 생각할 수 있다. 前者의 變動係數를 $\Omega(s)$ 라 하고, 後者의 變動係數는 Michols⁽⁷⁾의 論文을 利用하여 0.2를 구했다. 이 두 變動係數들이 獨立 이라고 假定하면 波浪으로 인한 剪斷應力 豫測의 變動係數 [$\Omega(A_2)$]는 식 (13)으로 표시할 수

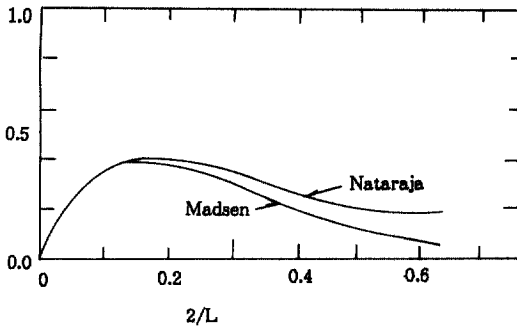


그림 2. Nondimensional Cyclic Shear Stress versus Nondimensional Depth.

있다.

$$\Omega(A_2) = \sqrt{\Omega^2(s) + 0.2^2} \quad (13)$$

식 (13)에서 $\Omega(s)$ 는 Rahmann⁹⁾의 논문을 참고하여 0.1을 구했다. 그러면, $\Omega(A_2)$ 는 0.22가 얻어진다. 두번째로, 자유영역인 경우는 앞의 경우에 비해 덜 복잡하므로 理論的 豫測이 可能하다. Madsen⁶⁾의 研究와 Nataraja와 Gill¹⁰⁾의 연구를 비교해본 결과 最大剪斷力比(maximum shear stress ratio, τ/σ)가 발생하는 0.015 L(L=과장)까지 일치하므로 誤差를 無視하기도 한다(그림 2 참고)

3.3 等價交番回數로 換算하는 過程에서의 誤差

불규칙한 剪斷應力을 等價交番回數로 換算하기 위하여 사용하는 그림 1은 試驗을 통하여 얻은 것이므로 試驗에 대한 不確定性이 있다. 그림 1을 얻기 위하여 交番三軸試驗(cyclic triaxial test)이나 交番剪斷試驗(cyclic shear test)을 한다. 그런데, 交番三軸試驗을 할 경우에 結果치가 交番應力比로 나오므로 剪斷應力比(τ/σ)로 바꾸어 주기 위하여 訂正係數(correction factor, Cr)가 필요하므로 訂正係數에 대한 誤差도 포함시켜야 한다. Haldar와 Tang⁴⁾의 研究를 이용하여 交番三軸試驗, 交番剪斷試驗의 分散은 각각 0.073, 0.007을 구했다. 이 값을 等價交番回數에 대한 變動係數로 각각 바꾸면 0.59, 0.058이다. 또, 訂正係數에 대한 變動係數는 0.02이다.

3.4 平均剪斷應力比에 대한 誤差

平均剪斷應力比는 불규칙한 剪斷應力比들을 等價交番回數로 換算할 때 기준이 되는 應力比이다. 本 研究에서는 Haldar와 Tang⁴⁾의 研究를 이용하여 平均剪斷應力比를 0.75로 하고 모델誤差에 따르는 變動係數($\Omega(A_1)$)를 0.05로 假定한다.

4. 強度等價交番回數의 補正係數에 대한 誤差算定

2.3節에서 제시한 모델에 대한 補正係數 A_i 에 대한 誤差를 제시한다.

4.1 土質의 再壓密 問題

海洋에서는 끊임없이 波濤가 發生하기 때문에 海洋構造物의 基礎地盤에는 크고 작은 過剩間隙水壓이 發生했다가 消滅하는 現象이 일어날 可能性이 높다. 再壓密이 발생하면 土質의 強度는 약 9~12배 정도 增加하게 된다. 그림 3에서 試料에 間隙水壓을 발생 시켰다가 消滅시킨뒤(곡선 A) 다시 荷重을 가한 結果(곡선 B) 10배 정도의 強度增加를 보이고 있다.

本 研究에서는 再壓密의 效果가 매우 크고 또 海洋波浪의 強弱은 1年을 週期로 變하므로 構造物 完공후 1年 동안은 再壓密이 일어나지 않는 것으로 假定하여 補正係數 A_i^* 를 1로, 假定하고 $\Omega(A_i^*)$ 는 0으로 假定한다. 構造物 完공후 1年 이후에는 再壓密이 일어날 것으로 假定하는 것이 타당하다. 一般的으로 再壓密이 發生하면 9~12배의 強度增加가 豫見되므로 本 論文에서는 9~12배의 平均값인 10.5를 A_i^* 로 假定하고 9~12사이의 確率密度函數가 均等하다고 假定하여 A_i^* 의 變動係數($\Omega(A_i^*)$)를 0.082로 假定한다.

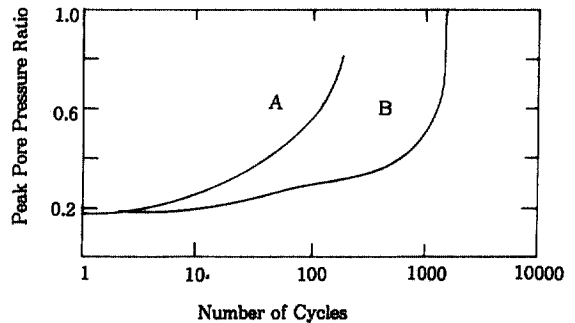


그림 3. Effect of Previous Loading on Liquefaction Potential

4.2 部分的 排水效果의 問題

海洋波浪에 의해 交番荷重이 가해지는 동안 間隙水壓이 增加하게 된다. 그런데, 波浪의 週期가 比較的 길기 때문에 液狀化 狀態까지 도달하는 동안 部分的 排水가 發生할 수 있다. 部分的 排水가 發生하면 이미 生成된 過剩間隙水壓의 일부가 消滅하면서 순간적으로 壓密이 일어나게 되고 強度가

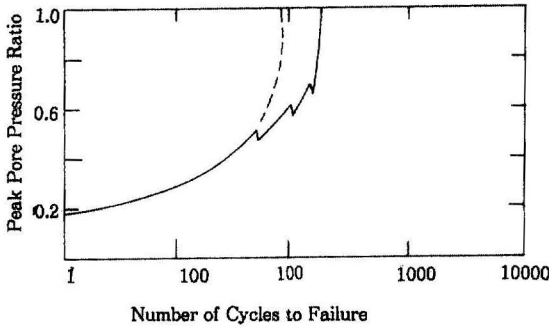


그림 4. Effect of Partial Drainage on the Cyclic Loading Strength.

增加하게 된다. 部分的 排水의 決定要因으로는 透水係數, 波浪의 週期, 排水距離 등이다. 部分的 排水에 의한 強度增加效果는, 一般化된 研究가 없으므로 위의 3가지 要因을 考慮하여 試驗을 통하여 알아내어야 한다. medium dense sand의 경우에 透水係數는 약 1×10^{-3} cm/s, 構造物의 尺幅이 100 m인 경우에 50 cycle(약 500초)마다 10%의 過剩間隙水壓의 減少가 일어난다고 豫想하고 試驗한 결과 그림 4와 같이 強度增加效果를 얻었다. 部分的 排水效果에 의한 強度增加는 임의의 範圍를 形成하게 되므로 適當한 確率密度函數를 假定하여 補正係數 \bar{A}_2^* 와 變動係數 $\Omega(A_2^*)$ 를 구한다.

4.3. 試驗方法的 誤差

試驗의 精密度를 측정하여 結果에 반영해 주어야 한다. 本 論文에서는 2.4.3에서 이미 考察하였다.

4.4. 相對密度에 대한 誤差

現場土質의 相對密度와 試驗室 試料의 相對密度는 一般的으로 다르므로 差異를 補正해 주어야 한다. 本 論文에서는 Haldar와 Tang⁽⁴⁾의 研究를 참고하여 變動係數($\Omega(A_1^*)$)를 0.15로 가정한다.

4.5. 資料의 空間變化에 따르는 誤差

室內試驗이나 現場試驗으로 결정되는 土質의 強度는 土質特性의 空間的 變化에 따라 誤差가 發生한다. 本 論文에서는 基礎面積 또는 垂直 3~4m의 平均強度를 사용할 때 分散값이 작아지게 될 것으로 推測되므로 無視하기로 한다.

4.6. 그밖의 작은 要素들에 대한 誤差

影響을 고려해야 하는 작은 要素로서는 交番荷重의 크기 및 토양, 試料의 입도, 입자의 크기 등이

있다. 이에 대한 각각의 變動係數는 Haldar와 Miller⁽³⁾의 研究를 參考하면 0.058, 0.05, 0.05, 0.069이다. 이 값들이 서로 獨立이라고 假定하면 $\Omega(A_6^*)$ 는 0.152가 된다.

5. 例題解析 및 檢討

本 論文에서 提案한 方法으로 北海(North Sea)에 설치된 Ekofisk 油類貯藏탱크에 대해 例題解析을 했다(그림 5. 참고). 例題解析은 構造物이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 시도했으며 基本資料는 Lee와 Focht⁽⁵⁾의 研究와 Bjerrum⁽²⁾의 研究를 參考했다.

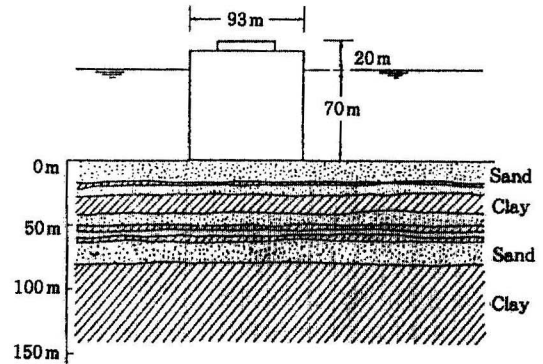


그림 5. Typical Geotechnical Profile from Ekofisk field

5.1. 構造物이 있는 경우의 解析

構造物의 有無가 解析에 미치는 影響은 波浪으로 부터 傳達되는 應力經路의 차이점이 있다.

(1) 荷重等價交番回數의 計算

첫번째로 波浪持續時間을 결정했다. Ekofisk 탱크 지역에 대한 波浪의 最大持續時間을 12시간, 最少持續時間을 3시간으로 정하고 두 값 사이의 確率密度函數를 二等邊三角形으로 假定했다. 계산결과 平均값은 6시간, 분산은 45시간을 얻었다. 두번째로, 波浪資料를 결정했다. Lee와 Focht⁽⁵⁾의 研究資料를 이용하여 持續時間 6, 6.5, 5.5시간에 대해 表 1에 구했다.

세번째로, 표 1의 波浪資料를 가지고 표 2와 그림 1을 이용해 표 3에 等價交番回數를 구했다.

네번째로, 影響要素의 誤差를 계산했다. 波浪決定에 대한 誤差의 變動係數($\Omega(A_1)$)가 0.12, 波浪으로 인한 剪斷應力 豫測의 誤差에 대한 變動係數($\Omega(A_2)$)

表 1. Ekofisk 탱크 지역의 100년 빈도 파랑

Duration(hr) Hight(m)	6.0	6.5	5.5	6.6
24.0	1	1	1	1
22.5	2	2	2	2
21.0	4	4	4	4
19.5	7	8	7	8
18.0	18	19	18	19
16.5	43	44	41	44
15.0	80	82	74	83
13.5	149	153	139	155
12.0	277	283	241	287
10.5	393	406	356	413
9.0	445	491	433	499
7.5	461	519	438	527
6.0	426	493	353	514

표 2. 파고와 해저지반에 가해진 전단응력비와의 관계

Wave Height(m)	Maximum induced Stress Ratio(τ/σ)
11.7	0.130
15.9	0.232
18.4	0.275
23.8	0.397

表 3. 지속시간에 대한 등가교번횟수

지속시간(Duration)	등가변동횟수(N_e)
6.0	184
6.5	190
5.5	176
6.6	192

가 0.22, 試驗誤差에 대한 變動係數 $[\Omega(A_3)]$ 가 0.59, 平均剪斷應力比의 誤差에 대한 變動係數 $[\Omega(A_4)]$ 가 0.05이다. 또 補正하지 않은 荷重等價交番回數 $\{f(T)\}$ 에 대한 變動係數의 계산은 식 (11)을 이용하여 구했다. 여기서, $\Delta T=0.5$ 시간, $f(T+\Delta T)=f(6.5)=190$, $f(T-\Delta T)=176$, 또 $V_w(T)=4.5$ 이므로 $V_w\{f(T)\}$ 는 0.164이다. 보정계수 \bar{A}_i 는 1로 假定한다. 앞에서 구한 각 變動係數를 식 (9)에 대입하면 荷重等價交番回數의 變動係數는 0.663 이고 平均荷重等價交番回數는 波浪持續時間 6시간에 대한 값으로 184이다.

(2) 強度等價交番回數의 計算

완공후 1년을 기준으로 나누어 계산한다. 첫번째로 완공후 1년 이내에는 再壓密 效果를 전혀 고려하지 않는다. $\bar{A}_i=1.0$ 으로 假定하고 Lee와 Focht의 資料를 이용하여 強度等價交番數 200, 變動係數 0.627을 얻었다. 두번째로, 완공후 1년 이후에는 再壓密 效果를 고려하므로 $\bar{A}_i=10.5$, 나머지 \bar{A}_i 는 1로 假定했다. 強度等價交番回數는 1869, 變動係數는 0.63을 얻었다.

(3) 信賴度 計算

앞에서 구한 資料를 가지고 식 (4), (5)를 이용하여 液狀化 現象이 일어날 可能性을 구하면 1년 이내에 發生할 確率이 45.2% 이고 1년 이후에 發生할 確率은 0.27% 이다.

5.2 自由領域인 경우의 解析

構造物이 없는 경우는 應力傳達 經路가 構造物이 있는 경우와 다르고 나머지는 동일하다.

(1) 荷重等價交番回數의 計算

構造物이 없는 경우에 대해 派浪에 의해 基礎地盤에 傳達되는 應力の 추정은 Nataraja와 Gill⁽⁵⁾의 研究와 Madsen⁽⁶⁾의 研究結果를 이용했다. 표 1의 波浪資料를 가지고 荷重等價交番回數를 구하면 33이다. 變動係數는 理論的 모델 誤差를 무시하기로 하면 0.625를 얻는다.

(2) 強度等價交番回數의 計算

構造物이 없는 경우는 構造物로 인한 상재하중이 없으므로 過剩間隙水壓이 消滅할 때 再壓密이 일어나지 않는다. 그러므로 強度等價交番回數의 平均값은 31.2의 結果인 200 과 같으며 變動係數는 0.627이다.

(3) 確率計算

앞으로 나온 結果를 식 (4), (5)에 대입하면 液狀化 現象이 일어날 確率은 1.74%이다.

5.3 敏感度(sensitivity) 研究

液狀化 現象을 일으키는 많은 要素중에 結果에 큰 影響을 주는 波浪의 持續時間(duration), 再壓密(reconsolidation), 部分的 排水(partial drainage)의 要素들이 結果에 끼치는 影響의 정도를 考察한 結果 波浪의 持續時間 10% 增加에 대해 液狀化 可能性이 1.1% 增加했고, 再壓密의 경우는 1번 發生했을때 33.8% 減少했으며 部分的 排水의 경우는 100초당 2% 發生했을 때 7.8% 減少했으며 100초

당 8% 發生했을 때 27.4% 減少했다. 위의 3가지 경우를 定量的으로 비교하기는 어려우나 再壓密의 敏感度가 가장 큰 것으로 判明되었다.

6. 結論 및 提言

本 論文에서는 海洋波浪荷重에 의한 海洋構造物 基礎地盤의 液狀化 可能性의 推定을 위한 信賴度 解析 모델을 提示하였다. 本 研究의 특징으로 強度와 荷重의 確率變數로서 等價交番回數 概念에 의한 信賴度 解析을 試圖하였다.

本 研究結果 다음과 같은 結論 및 提言을 얻었다. (1) 本 모델에 의한 例題解析結果와 Lee와 Focht⁽⁵⁾의 解析結果가 비슷한 決論을 얻었으나 本 研究의 結果가 좀더 合理的인 結果를 提示하고 있다. (2) 敏感度 研究結果 再壓密의 影響이 結果에 가장 큰 影響을 미치게 됨을 알았다. (3) 本 研究에서 提示한 모델에 대한 實用性 및 正確性を 높이기 위하여 再壓密 發生 可能性의 確率의 定量的 研究가 必要하다.

謝 辭

本 研究는 韓國科學財團의 1986年度 後半期 研究費 支援에 의해 이루어졌으며, 이에 財團에 深甚한 感謝의 뜻을 표한다.

參考文獻

1. Benjamin, J. R. and Cornell, C. A., "Probability Statistics and Decision for Civil Engineers," McGraw-Hill, New York, 1970.
2. Bjerrum, L., "Geotechnical Problems involved in Foundations of Structures in North Sea," *Geotechnique* 23, No. 3, pp. 319-358, 1973.
3. Haldar, A. and Miller, F. J., "Statistical Evaluation of Cyclic Strength of Sand," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 110, No. 12, pp. 1785-1802, 1984.

4. Haldar, A. M. and Tang, W. H., "Probabilistic Evaluation of Liquefaction Potential," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 105, No. GT2, pp. 145-163, 1979.
5. Lee, K. L. and Focht, J. A., "Liquefaction Potential at Ekofisk, Tank in North Sea," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 101, No. GT1, pp. 1-18, 1975.
6. Madsen, O. S., "Wave-induced Pore Pressures and Effective Stresses in a Porous Bed," *Geotechnique* 78, No. 4, pp. 377-393, 1978.
7. Michols, K. A., "A Probabilistic Study of Offshore Gravity Platform Foundations," M. S. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1979.
8. Nataraja, M. S. and Gill, H. S., "Ocean Wave-induced Liquefaction Analysis," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 109, No. 4, pp. 573-590, 1983.
9. Rahman, M. S., Seed, H. B. and Booker, J. R., "Pore Pressure Development Under Offshore," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 103, No. GT12, pp. 1419-1436, 1977.
10. Saetre, H. J., "On High Wave Conditions in the Northern North Sea," *Oceanology International* 75, Brighton, pp. 280-289, 1975.
11. Seed, H. B., Mori, K. and Chan, C. K., "Influence of Seismic History on Liquefaction of Sands," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 103, No. GT4, April, 1977.
12. Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, L., "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 109, No. 3, Mar. pp. 458-482, 1983.
13. Wu, T. H., Martinez, R. E. and Kjekstad, O., "Stability of Ekofisk Tank : Reliability Analysis," *Journal of the Geotechnical Eng. Division, ASCE*, Vol. 110, No. 7, pp. 938-956, 1984.

(接受 : 1988. 5. 24)