

波浪에 의한 海底地盤의 液狀化에 관한 現地觀測과 解析 Field Observation on Wave Induced Liquefaction in Sea-bed and its Analysis

李益孝* 善功企**

Ik Hyo Lee* and Kou Ki Jen**

要 旨 : 本 研究는 實際의 海域에서 液狀化 現象을 確認함과 동시에 筆者 등이 提案하는 液狀化 理論을 檢證하는 것을 目的으로 한다. 本 研究의 內容 波浪에 의한 液狀化에 대한 現地觀測 및 理論解析의 두 部分으로 되어있다. 現地觀測에서는 2年間に 걸쳐서 波高, 海底地盤表面의 水壓變動, 海底地盤中の 變動間隙水壓 등을 觀測하였으며, 理論解析에서는 筆者 등이 提案하고 있는 液狀化 理論에 根據하여 解析을 實施한 후 現地觀測 자료와 比較 檢討하였다.

Abstract □ The purposes of this study are 1) to observe the wave-induced liquefaction in the oceanic seabed, 2) to verify the liquefaction theory proposed by the Authors. The study consists of the field observation and theoretical analysis on the wave-induced liquefaction. In the field observation, the sea bottom pressures, the fluctuating pore pressures and stresses in the seabed and the changes of the water depth were observed for two years. The liquefaction theory proposed by the Authors is verified by the comparing the calculated fluctuating pore pressures with those observed in the field.

1. 序 論

近年, 모래地盤위에 設置된 離岸堤 및 異形 Block 등이 海底地盤 속으로 埋沒되는 事例가 報告되고 있다 (Okusa *et al.*, 1984). 이 原因이 波浪에 의한 海底地盤의 洗屈 및 모래의 吸出 등에 의한 것으로 說明되고 있지만, 반드시 이와 같은 解析으로는 Block의 埋沒狀況을 說明할 수 없다. 筆者 등은 이와 같은 原因이 地盤의 波浪에 의한 液狀化와 그것에 따른 地盤의 支持力 不足에 起因한다는 假說을 基本으로 室內實驗을 實施하여, 異形 Block 등의 重量構造物이 모래地盤속에 侵入되어가는 現象을 確認했다(西田 등, 1985).

液狀化를 일으키는 重要한 要因이 地盤 中の 間隙水壓에 대해서는 지금까지 實際의 海域 및 水槽實驗에 있어서 몇몇의 觀測, 實測例가 報告되고 있다(Maeno

and Hasegawa, 1985 ; 清水 등, 1986).

그러나 이들 報告에서는 地盤 中の 有效應力變動과 液狀化 現象의 相關性에 대해서는 그다지 明確히 되어 있지 않고, 특히 實際海域에서의 液狀化 現象에 대해서는 아직 確認되지 않고 있는 實情이다.

이와 같은 背景에서, 波浪의 作用을 받는 海底地盤의 土質工學的 問題를 大別하면 첫째, 波에 의한 外力이 海洋構造物을 통해서 間接적으로 海底地盤에 傳達되는 경우와 둘째, 海底地盤이 직접 波의 作用을 받는 경우의 問題로 分類할 수 있지만, 本 研究는 主로 後者に 속하는 問題로서 現地에서 海底地盤속에 過剩間隙水壓, 應力變動 등을 觀測하여, 實際海域에서 液狀化 現象을 確認함과 동시에, 筆者 등이 提案하는 液狀化 理論(善 등, 1987, 1989)의 妥當性을 檢證하는 것을 目的으로 實施한 것이다.

* 麗水水産大學 海洋土木工學科(Department of Ocean Civil Engineering, Yosu National Fisheries College, Yosu, 550-749 Korea)

** 日本國 運輸省港灣技術研究所 動土質研究室(Soil Dynamics Laboratory, Port and Harbor Research Institute, Yokusuka, Japan)

2. 波浪에 의한 液狀化 理論

海底地盤의 液狀化 現象을 解析할 경우, 우선 海底地盤속의 有效應力을 구할 必要가 있다. 任意의 狀態에서 有效鉛直應力 σ'_v 는, 海底地盤 表面에 作用하는 水壓의 靜穩時에서의 變動量을 P_b , 海底地盤 속의 變動間隙水壓을 P_m 이라 하면 식 (1)과 같이 表現된다.

$$\sigma'_v = \sigma'_{v0} + (P_b - P_m) \quad (1)$$

여기서, σ'_{v0} 은 靜穩時 有效上載荷重이다. 式 (1)에서 $-(P_b - P_m)$ 은 地盤속의 過剩間隙水壓을 의미하여, 여기서는 變動過剩間隙水壓으로 정의한다. $P_b = P_m$ 의 경우에는 變動過剩間隙水壓은 0으로 되고, 水壓의 變動에 의한 有效鉛直應力 σ'_v 의 變動은 보이지 않지만, $P_b \neq P_m$ 의 경우 σ'_v 는 變動過剩間隙水壓에 依存하여 變動한다.

海底地盤의 液狀化는 上記 有效鉛直應力 σ'_v 가 0 또는 (-)로 되는 경우에 發生하는 것으로 생각되기 에 液狀化 發生條件은 式 (2)와 같이 表現된다.

$$\sigma'_{v0} \leq -(P_b - P_m) \quad (2)$$

따라서, 液狀化 現象을 支配하는 要因은 靜穩時 有效上載荷重 σ'_{v0} , 海底地盤表面에 作用하는 水壓의 變動量 P_b , 海底地盤속의 變動間隙水壓 P_m 의 3가지로 생각된다. 海底表面의 上載荷重에 의한 地盤속의 有效應力을 σ'_v , 地盤속의 水中單位體積重量을 γ' , 地盤表面의 深度를 z 라 하면, 式 (2)의 σ'_{v0} 는 式 (3)으로 표현된다.

$$\sigma'_{v0} = \gamma'z + \sigma'_v \quad (3)$$

海底地盤속의 變動間隙水壓 P_m 에 대해서는 式 (4)와 같은 Biot의 基礎方程式이 提案되고 있다.

$$C_v \cdot \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} = \alpha \cdot \frac{\partial P_m}{\partial t} - \frac{\partial P_b}{\partial t} \quad (4)$$

여기서, C_v : 壓密係數 $(= \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v})$

α : 傳達係數 $(= 1 + \frac{n \cdot m_w}{m_v})$

k : 透水係數

m_v : 흙의 體積壓縮係數

γ_w : 물의 單位體積重量

n : 間隙率

m_w : 間隙水の 壓縮率

t : 時間

z : 深度方向의 座標(海底表面에서의 깊이)

初期條件 및 境界條件은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} t=0 \text{에서} & \quad P_m = 0 \\ z=0 \text{에서} & \quad P_m = P_b \\ z=1 \text{에서} & \quad \partial P_m / \partial z = 0 \end{aligned}$$

式 (4)에서 P_b 의 波形은 任意이니까, 不規則한 海底表面의 水壓變動에서도 適用可能하다. 不規則 波形에 대한 本 理論의 適用에 관해서는 4장에서 설명하겠지만, 理論的 取扱을 簡單히 하기 위해서, 微小振幅波를 假定하면 P_b 는 式 (5)로 表現된다.

$$P_b = P_0 \cdot \sin(\lambda x - \omega t) \quad (5)$$

여기서,

$$P_0 : \text{海底面上의 水壓變動 振幅}(= \frac{\gamma_w \cdot H}{2 \cosh(\lambda \cdot h)})$$

H : 波高

h : 水深

ω : 角 振動數 $(= 2\pi/T)$

λ : 波數 $(= 2\pi/L)$

T : 週期

L : 波長

x : 水平方向 座標

一次元의 경우에는 式 (5)의 λx 항은 考慮하지 않아도 좋다.

이 경우 式 (4)를

$$C = \frac{C_v \cdot T}{l^2}, \quad \bar{z} = \frac{z}{l}, \quad \bar{T} = \frac{t}{T}, \quad \bar{P} = \frac{P_m}{P_b}$$

으로 놓으면 式 (6)과 같이 無次元化 된다.

$$C \cdot \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{z}^2} = \alpha \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{T}} + 2\pi \cos(2\pi \bar{T}) \quad (6)$$

初期條件 및 境界條件은 다음과 같다.

$$\bar{T}=0 \text{에서} \quad \bar{P}=0$$

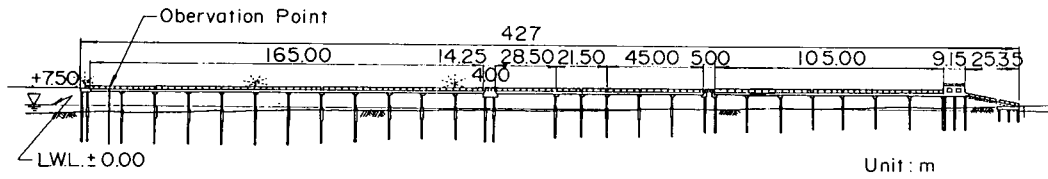


Fig. 1. Facilities of HORF.

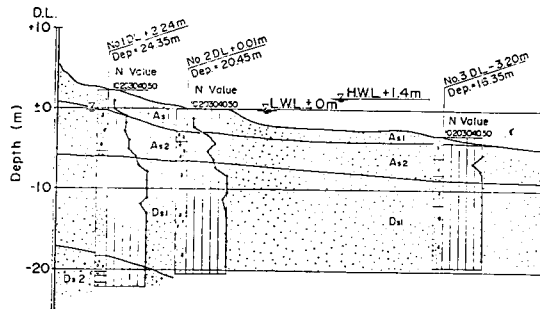


Fig. 2. Soil profile of the field.

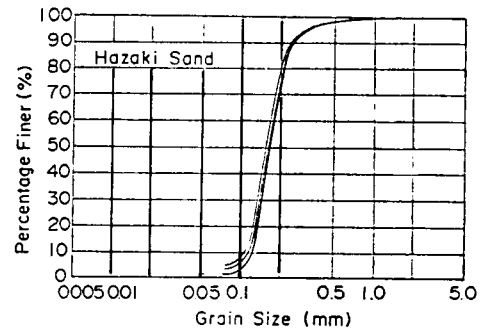


Fig. 3. Grain size accumulation curve.

$$\bar{Z}=0 \text{에서 } \bar{P}=\sin(2\pi \bar{T})$$

$$\bar{Z}=1 \text{에서 } \partial \bar{P} / \partial \bar{Z}=0$$

여기서, C는 排水係數라 부르며, 排水의 難易를 表示하는 無次元 定數이다. 식 (6)에서 \bar{P} 는 傳達係數 α 와 排水係數 C에 의해서 支配된다. 그러므로 係數 α 와 C를 實驗으로 구하면, 어떠한 波浪條件과 地盤條件에서도 液狀化 判定이 可能하다. 實際, 現地觀測에서 식 (3)으로 表現되는 σ'_{vo} 와 $-(P_b - P_m)$ 을 測定하여 식 (2)를 사용하여 液狀化 判定을 하고 있다. 또 식 (4)를 이용해서 變動間隙水壓의 現地觀測結果와 理論值를 比較 檢討한다.

3. 現地觀測

3.1 觀測場所

現地觀測은 日本 茨城県 鹿島郡 田浜의 港灣技術 研究所 「波崎海洋研究施設(HORF)」에서 實施했다.

이 HORF는 Fig. 1과 같이 海岸에서 427 m 길이의 棧橋構造의 施設이다. 觀測地點은 이 棧橋의 先端附近 水深 약 4 m 地點이다. 2장에서 說明한 것처럼 波浪에 의한 液狀化 現象이 海底表層部에서 豫想되므로, 觀測은 海底面에서 약 2 m 이내의 깊이 부분을 對象으로 했다.

3.2 觀測地點의 地盤

觀測地點의 地盤은 Fig. 2와 같고, 標準貫入試驗值 N은 A_{s1} 에서 6~8(가는 모래) A_{s2} 에서($z=4\sim 8$ m 附近) 21~50(中間程度 모래) 이었다(Fig. 2). 觀測對象인 모래層은 海底表層附近인 A_{s1} 이다. 이 모래層은 Fig. 3의 粒徑加積曲線과 같이 一般의인 海岸모래와 같이 粒徑이 均質한 모래로 되어 있었다. 원 위치에서의 水中單位體積重量 $\gamma' = 0.969 \text{ g/cm}^3$, 比重 G는 2.689 였다.

3.3 觀測方法

3.3.1 項目 및 計器

觀測項目은 波高, 流速, 海底地盤表面의 水壓變動 및 地盤 中の 間隙水壓變動이다. Fig. 4에 觀測用 計器設置位置를 表示했다.

3.3.2 器機의 設置方法

器機를 支持할 수 있는 강관지주(외경 216.3 mm, 길이 5.5 mm)를 海底地盤 5 mm까지 타입하여 강관지주 上部에는 H강을 부착해서 棧橋 PC형강에 볼트너트를 이용부착했다. 그리고 Fig. 4와 같이 지주에는 1 m까지 수평 pipe를 連結하여 土壓係, 間隙水壓計 등의 計器를 固定하였다.

3.3.3 Data 取得 및 記錄

Data 取得은 計器設置 後 地盤의 攪亂이 定着될

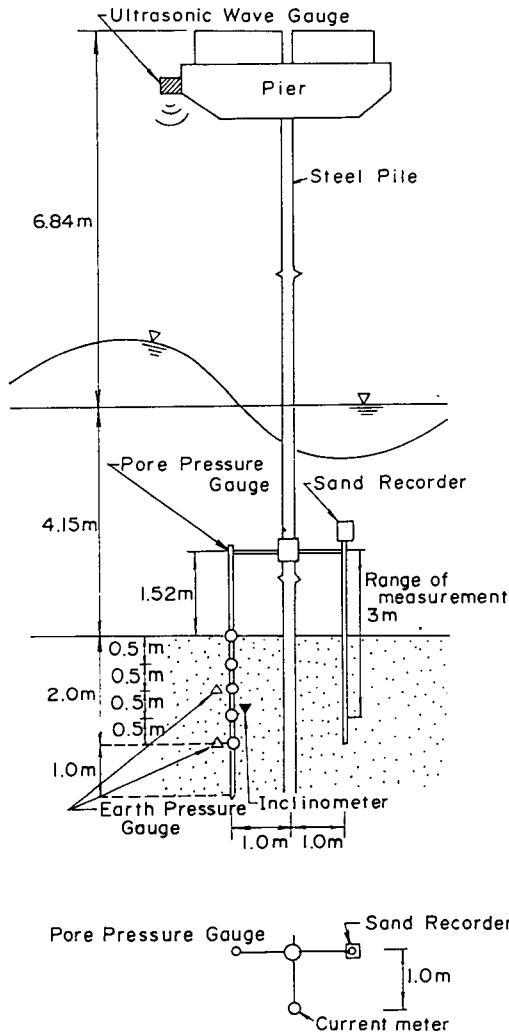


Fig. 4. Situation of instrumental establishment.

때 까지 一定期間 放置한 後 波高가 큰 時期를 기다려 20分間을 1單位로 2時間마다 24時間 계속 觀測하였다. Data recorder와 Personal computer에 記錄된 자료는 研究室에서 解析處理 하였다.

3.4 室內實驗

液狀化 現象을 室內에서 確認할 目的으로 現地觀測과 並行하여 現場에서 取得한 波崎砂를 利用하여 透水試驗과 一次元壓密試驗을 實施하였다.

3~4種類의 密度에 대하여 透水係數 k 와 體積壓縮係數 m_v 를 測定한 結果, $k=2.24 \times 10^{-2}$ cm/sec, $m_v=1.945 \times 10^{-3}$ cm²/kg, $C_v=11.517 \times 10^3$ cm²/sec로 나타

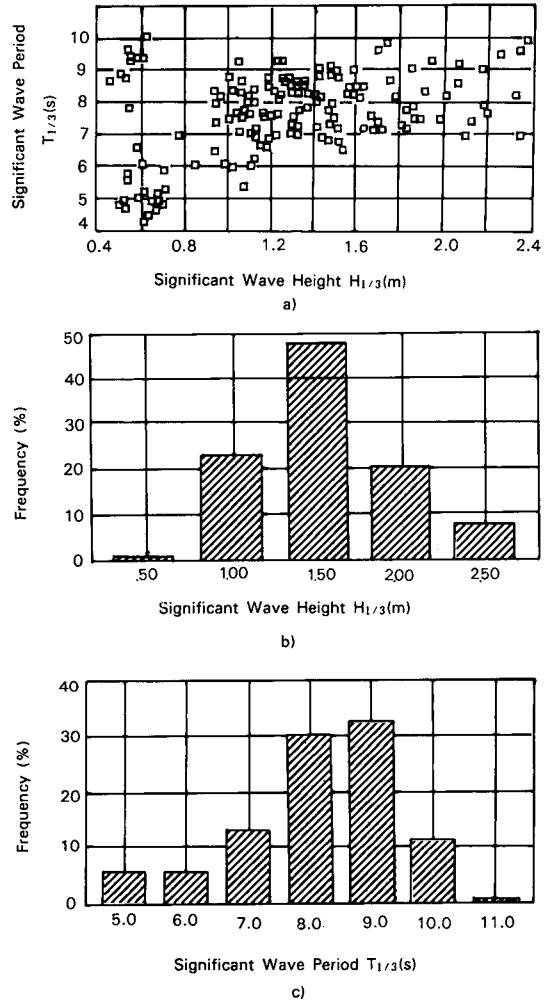


Fig. 5. Wave characteristics.

- a) Significant wave height $H_{1/3}$ (m)
- b) Significant wave height $H_{1/3}$ (m)
- c) Significant wave height period $T_{1/3}$ (s)

났다. 한편, 現地의 乾燥密度 1.54 g/cm³에 대한 $C_v=7.18 \times 10^3$ cm²/sec 였다.

4. 現地觀測結果 및 考察

4.1 波浪特性

觀測期間中 1988年 5月 9日 18:00부터 記錄(觀測 Series No. 1), 5月 11日 20:00부터 記錄(觀測 Series No. 2), 1989年 4月 25日 02:00부터 記錄(觀測 Series No. 3)의 波浪特性에 대해서 $H_{1/3}$ 과 $T_{1/3}$ 의 關係를 그린 것이 Fig. 5이다. Fig. 5에 의하면 有意波

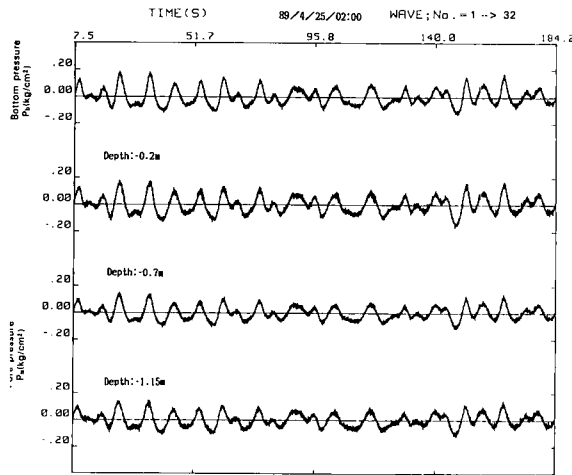


Fig. 6. Example of observed bottom and pore pressures.

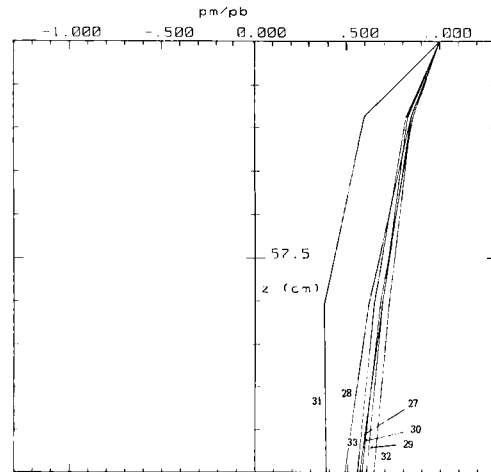


Fig. 8. Hydraulic pressure ratio distribution.

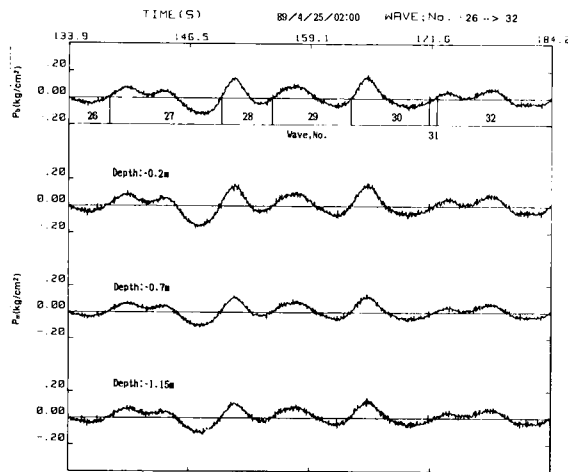


Fig. 7. Large scale of observation data example.

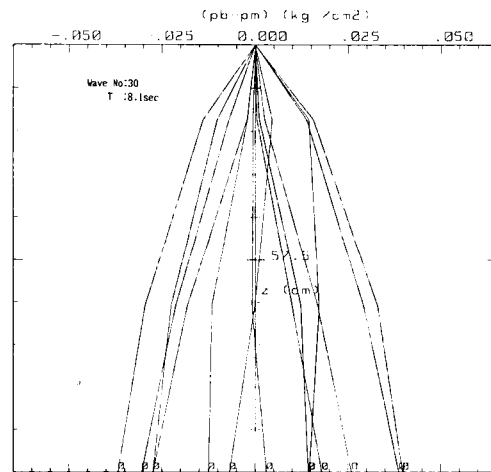


Fig. 9. Vertical effective stress oscillatory.

高가 1 m 以上인 波의 有義波 週期는 6~10 sec 程度인 것을 알 수 있다.

4.2 觀測記錄 例

現地觀測에서 얻은 結果의 一例를 Fig. 6에 表示했다. Fig. 6은 1989年 4月 25日 02時부터의 記錄(Series No. 3) 中에서 約 3分間의 자료이다. Fig. 6에서 比較的 큰 波高가 觀測된 133.9~184.2 sec까지의 자료를 擴大한 것이 Fig. 7이다. Fig. 6, 7에서 알 수 있는 것은 海底地盤中의 變動間隙水壓의 變動은 海底表面의 水壓變動에 대해서 어느 程度의 振幅減衰와 位相差를 가지고 變動하여 $P_b \neq P_m$ 이라는 것을 確認할

수 있다.

本 研究에서는 Fig. 7에서 이들 代表的인 7개의 波(wave No. 26~32)에 대해서 詳細히 考察하기로 한다.

4.3 變動間隙水壓

Fig. 8은 Fig. 7에서 各 番號의 波에 該當하는 變動間隙水壓 P_m 와 海底面의 水壓變動 Peak時의 P_b 와의 比 P_m/P_b 에 대해서 表示했다. 이 結果에서 P_m/P_b 은 1.0 以下로 되고 있어서 $P_b \neq P_m$ 이라는 것이 明白하다. 이와 같은 경우, 식 (1)에서 表示한 것처럼 地盤中의 鉛直有效應力도 變動하고 있다고 생각된다.

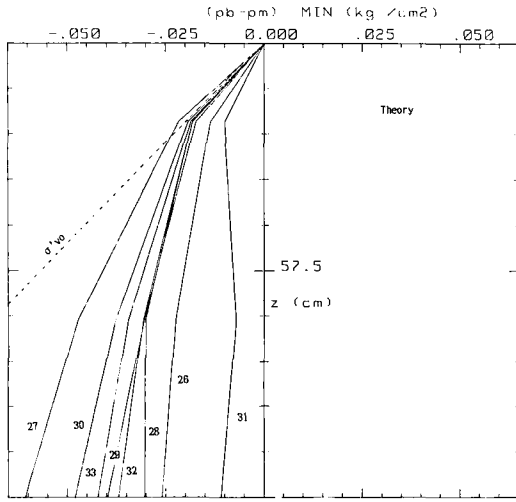


Fig. 10. Minimum vertical effective stress distribution.

4.4 海底地盤中の 應力變動과 液狀化

海底地盤中の 有效鉛直應力の 變動은 $(P_b - P_m)$ 으로 구해진다. Fig. 9는 wave No. 30에 대해서 $(P_b - P_m)$ 의 深度分布를 表示한 것이다. Fig. 9에 의하면, $(P_b - P_m)$ 은 $P_b - P_m = 0$ 에 대해서 + 및 - 측으로 變動하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 7에 表示한 7개의 波에 대해서 $(P_b - P_m)$ 이 最小로 되는 時の 深度分布를 그린 것으로서 海底地盤表層部에서 -20 cm, -70 cm, -115 cm의 3점에서의 理論值를 直線으로 連結한 것이다. 또 地盤의 靜穩時의 有效鉛直應力 $\sigma'_{vo} = 0.969 \times 10^{-3} z$ (kg/cm²)에 대해서도 파선으로 표시하였다. 여기에서 알 수 있는 것은 深度 약 25 cm 以內의 地盤에서는 液狀化가 發生한다는 것이다. 이것은 식 (2)에서 明白히 된 것처럼, 海底地盤의 表層附近에서 液狀化가 發生하는 것을 意味한다.

4.5 不規則波에 대한 理論值와 觀測值의 比較

現地觀測에 의해서 얻어진 海底面의 水壓變動은 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 微小振幅波에 의해서 表現되는 것이 아니고, 不規則 波形을 하고 있다. 그러나 筆者 등이 提案하는 海底地盤中の 變動間隙水壓에 관한 基礎方程式 (5)는 이와 같이 不規則한 波에 대해서도 適用되므로 提案式에 의한 理論解를 現地觀測結果와 比較함으로써 理論의 妥當性을 檢證하기로 한다.

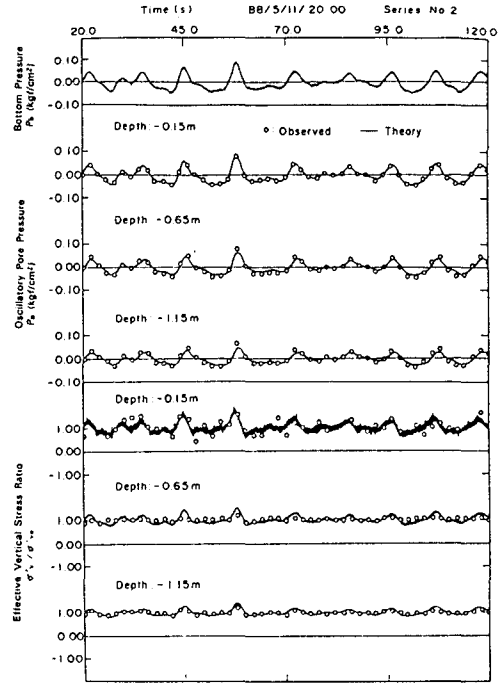


Fig. 11(a). Comparisons between the theory and observation value of the oscillatory pore pressure and effective vertical stress ratio (series No. 2).

異論解析에 必要한 壓力定數 C_v 와 α 에 대해서는 室內實驗結果, $C_v = 7.18 \times 10^3$ cm²/sec, $\alpha = 2.0$ 을 利用했으며, 解析은 差分法에 의해서 實施했다. 境界條件으로는 海底表面(深度 $z=0$)의 水壓變動 P_b 의 觀測值를 利用했다.

Fig. 11(a)는 89年 5月 11日 20時부터(Series No. 2)의 觀測結果와 理論解析結果를 比較한 것으로서, 有效鉛直應力比가 0 또는 (-)값을 보이지 않으므로 液狀化는 發生하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 11(b)는 Fig. 7에 表示한 88年 4月 25日 02時부터(Series No. 3)의 觀測結果와 理論解析結果를 表示한 것으로서 有效鉛直應力比가 특히 波의 谷부분에서는 0 또는 (-)값을 보이고 있다. 이것은 Fig. 10의 結果에서 指摘했듯이 深度 약 25 cm 以內에서 液狀化가 發生하는 것을 確認하는 結果라고 할 수 있다. 또한 Fig. 11(a), (b)를 보면 觀測值와 理論值는 잘 一致하는 것을 알 수 있다.

Fig. 12, 13은 wave No. 30에 대한 水壓比 P_m/P_b 및 有效應力의 減少量 $(P_b - P_m)$ 의 深度分布를 比較한 것인데, 여기서 理論值는 거의 妥當한 값을 보여주고

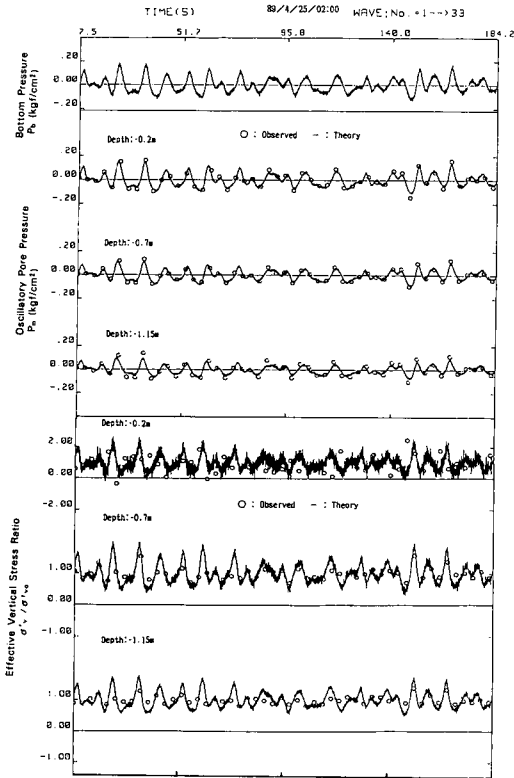


Fig. 11(b). Comparisons between the theory and observation value of the oscillatory pore pressure and effective vertical stress ratio (series No. 3).

있는 것을 알 수 있다. 이는 前述한 筆者 등의 理論의 適用性和 妥當性を 證明한 것이라고 생각한다.

5. 結 論

本 研究는 海底地盤의 液狀化 現象을 現地觀測에 의하여 實際로 檢證한 結果로서, 提案理論의 妥當性を 確認했다. 重要한 結論으로는

- (1) 波浪의 作用을 받는 海域의 海底地盤中에는 有效鉛直應力이 波의 變動에 따라 變動하고 있다.
- (2) 有效鉛直應力의 變動量은 海底地盤表面의 水壓變動과 海底地盤中の 變動間隙水壓의 差에 의해서 表現된다.
- (3) 現場의 海域에서도 波浪의 作用에 의해서 海底地盤中の 有效鉛直應力이 0으로 될 수 있다. 즉 海底地盤이 液狀化하는 領域이 存在한다.
- (4) 海底地盤中の 變動間隙水壓 및 有效鉛直應力의 變動에 대한 現地觀測結果와 異論解析 結果를 比較한

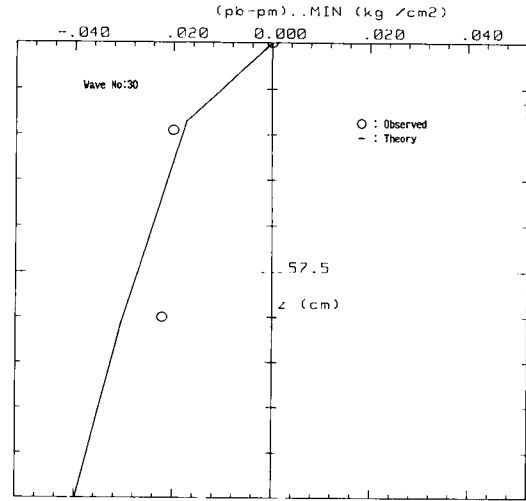


Fig. 12. Distribution of $(P_b - P_o)_{min}$.

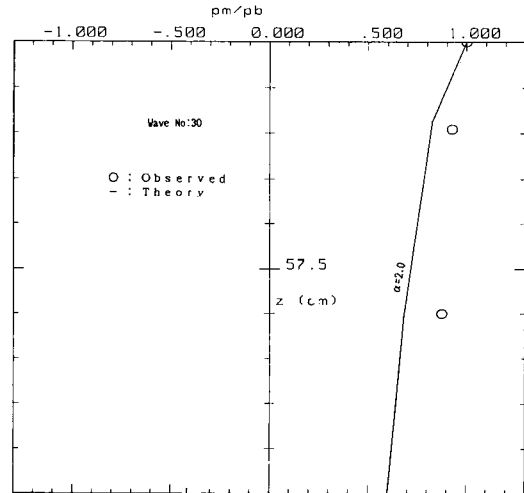


Fig. 13. Distribution of hydraulic pressure ratio.

結果 兩者는 잘 一致했다. 그러므로 筆者 등이 提案하고 있는 基礎方程式의 妥當성이 碎波帶內의 不規則波에 대해서도 檢證되었다.

謝 辭

現地觀測 자료 取得을 위해 運輸省 港灣技術研究所의 波崎海洋研究施設(HORF)을 활용함에 있어서, 水工部 加藤室長 외 同研究室 研究員 여러분들의 助言과 協力에 깊은 感謝를 드립니다. 또한 本 研究를 위한

日本國 科學技術廳의 研究費 支援에 대해서도 깊은 謝意를 表합니다.

參考文獻

Maeno, Y. and Hassegawa, T., 1985. Evaluation of wave-induced pore pressure in sand layer by wave steepness, *Coastal Engineering in Japan*, **28**: 31-44.
 Okusa, S., Nakamura, T. and Fukue, M., 1984. Measurements of wave-induced pore pressure and coefficient of permeability of submarine sediments during rever-

sing flow, Proc. IUTAM'83 Symposium, Seabed Mechanics, 113-122.
 西田仁志, 山口 豊, 近藤豊次, 清水謙吉, 1985. 孔間彈性波法による離岸堤の埋設狀況に關する考察, 第32回 海岸工學講演論文集, 365-369.
 善功企, 山崎造之, 渡邊篤, 1987. 海底地盤の波浪による液相化 高密度化, 港灣技術研究所報告, 第26券, 第4號, 125-180.
 善功企, 河崎尚弘, 佐藤 泰, 1989. 海底地盤中變動間隙水壓 現地觀測, 第24回 土質工學研究發表會, 土質工學會.
 清水正喜, 河崎尚弘, 岩成敬介, 野田英明, 1986. 海底砂層内の間隙水壓の擧動, 鳥取大學工學部研究報告, 第17券, 第1號, 111-119.