

# 水中水産施設物에 작용하는 流體力 및 地盤舉動의 動的解析

柳青魯\*, 李益孝\*\*, 金鉉周\*, 鄭鎮好\*

## 1. 序 論

최근 沿·近海 水産資源의 管理 및 漁場造成을 통한 資源管理型 水産業으로의 발상 전환과 養殖漁場의 高度利用 및 生産性 極大化를 위한 技術開發의 필요성이 날로 증대되고 있다. 이와 더불어 세계 연안국들에서는 海洋牧場化시스템의 구상과 相關한 다양한 水中水産施設物의 建設·이용·관리가 빈번해지고 있다. 이에 따라 다양한 水産 増殖施設(魚礁 등), 養殖施設, 漁場 管理施設 및 附帶施設(海底 取·排水管 등)로 구성되는 水中構造物의 종류도 다양하다(D'Itri, 1985).

그러나 魚礁 및 着底式 水中水産施設物의 設計에 필요한 波力의 解析은 주로 海洋構造物 設計와 相關한 流體力(波力) 算定方法을 준용하고 있으며, 着底式 構造物의 底面效果에 의한 流體力의 변화는 심도있게 논의된 바 없다. 또한 牧場化 시스템의 구성을 위해서는 해저에 시설물을 건설하는 경우가 많으나 그 地盤의 舉動과 相關된 設計 指針은 미비한 형편이어서, 이의 개선 및 개발은 沿岸 增·養殖 漁場施設의 機能極大化 및 災害防止, 沿岸漁場 牧場化를 위하여 중요하고 시급한 연구과제이다(加藤, 1984; Ryu, 1992). 또한, 기존의 魚礁漁場 海底地盤의 動的舉動과 相關한 局部洗掘, 沈下, 埋沒 등에 의한 機能低下 및 災害가 많이 있으나 그 실태는 정확히 파악되지 못하고 있는 실정이다. 뿐만 아니라, 魚礁의 沈下 및 埋沒의 정량적 예측방법과 그 대책이 수립되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 魚礁와 파이프 등 다양한 형태의 重力式 水中水産施設物에 미치는 流體力을 계산하고, 着底式 構造物 설치해역에서 波浪에 의한 構造物 周邊地盤의 液狀化 여부의 예측방법을 개발정리하고, 液狀化에 의한 局部洗掘, 沈下, 埋沒 등과 相關한 施設物의 機能低下·災害 防止技術 개발의 방향을 제시하여 水産施設物의 효율적·과학적 機能 最適化 設計의 基礎指針을 마련코자 하였다.

## 2. 本 論

### 2.1. 水理實驗 裝置 및 流體力과 地盤 舉動의 解析

魚礁 및 水中 파이프라인에 대한 流體力-地盤舉動을 조사하기 위하여 우리나라 魚礁漁場 海域의 外力環境 및 底質 특성을 기준으로 하여 2차원 造波水槽내에 水中水産構造物을 설치하여 模型實驗을 실시하였다. 構造物은 魚礁의 대표적인 형태인 4角魚礁와 取水·排水用 pipe를 대상으로 하였으며, 기초적인 底質과의 相互作用 특성을 파악하기 위한 기본 형태의 블럭(정육면체)에 대한 單體 및 群體 實驗을 병행하였다. 構造物은 형태 및 單體-群體에 대해 5종을 대상으로 하였다. 또한, 해역별 魚礁漁場의 外力環境 및 底質特性을 고려하고, Sawaragi(1984)의 移動床 模型實驗을 위한 相似率 適用基準을 고려하여 case별로 실험조건을 결정하였다.

流體力 測定에 關한 실험은 單一 構造物이 설치된 경우를 대상으로 하였으며 수로내의 임의 수심 및 저층에 설치하여 施設物에 작용하는 水平 및 鉛直方向 流體力을 측정하였다. 流體力의 測定은 水平方向 및 鉛直方向의 판용수철의 變形을 측정할 수 있는 strain gauge를 사용하였다. 한편, 構造物 周邊 地盤의 動的舉動에 關한 模型實驗을 하기 위하여 流體力 測定과 동시에 지반중에 間隙水壓計를 매설하여 측정한 間隙水壓의 變化 및 地盤의 층별 舉動變化를 해석함으로써 地盤支持力의 變動特性을 규명코자 하였다.

\* 釜山水産大學校 海洋工學科 (Department of Ocean Eng., National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737, Korea)  
\*\* 麗水水産大學 海洋土木工學科 (Department of Ocean & Civil Eng., National Fisheries University of Yeosu, Yeosu 550-180, Korea)

## 2.2. 水中 水産施設物에 作用하는 流體力의 評價

波浪과 흐름이 동시에 존재하는 해역을 가정한 流體力은 Morison식을 이용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다. 全水水平方向 流體力  $F_T$ 는 抗力과 質量力(慣性力)으로 이루어지며, 여기에 微小振幅波理論을 적용하여 波動流 成分  $u$ 를 나타내면 全流體力은 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$F_T = \frac{1}{2} \rho C_D A |U + u_m \cos \sigma_0 t| (U + u_m \cos \sigma_0 t) - \rho C_M V \sigma_0 u_m \sin \sigma_0 t \quad (1)$$

실험에서 얻어진 波形  $\eta_{exp}$ 와 流體力  $F_{exp}$ 를 Fourier級數로 근사시키고 定常項과 卓越 모드로 근사시켜 정리하면 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{exp} \approx F_{mean} + \frac{A_k a_k + B_k b_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}} \cos(2\pi f_k t + \alpha + \phi) + \frac{a_k B_k + A_k b_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}} \sin(2\pi f_k t + \alpha + \phi) \quad (2)$$

식(1)의 각 항과 식(2)의 각 항을 비교하여 정의한 抗力係數  $C_D$  및 慣性力係數  $C_M$ 은 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$C_{DW} = \frac{2(F_{mean} + F_{Dfft})}{\rho A |U + u| (U + u)|_{t=0}} \quad (3)$$

$$C_{MW} = \frac{F_{Mfft}}{\rho V |du/dt|_{t=T/4, 3T/4}} \quad (4)$$

여기서,  $F_{mean}$ 은 平均值,  $F_{Dfft}$ 는 FFT에 의한 實數項,  $F_{Mfft}$ 는 FFT에 의한 虛數項이다. 이로부터 波動場에서의 抗力係數  $C_{DW}$  및 慣性力係數  $C_{MW}$ 의 變化특성을 流體力 測定에 관한 실험결과로부터 규명하여, 水中水産施設物(構造物)의 波力(流體力)計算의 정도를 높이고자 하였다.

### 2.2.1. 着底式 魚礁에 作用하는 無限流體場의 流體力(波力)

波動場에서의 抗力係數  $C_{DW}$  및 慣性力係數  $C_{MW}$ 의 K-C수( $UT/D$ :  $U$ =水粒子 速度,  $T$ =週期,  $D$ =構造物의 單位길이)에 따른 變化특성을 규명하여, 水中水産施設物(構造物)의 波力(流體力)計算의 정도를 높이고자 하였다. 이 波動場에서의  $C_{DW}$  및  $C_{MW}$ 의 變化에 대한 실험결과는 Fig.1의 (a), (b)이며, 波浪과 흐름 共存場의 경우에 대한 抗力係數 및 慣性力係數의 變化특성을 나타낸 것이 Fig.1의 (a), (c)이다. 波浪과 흐름이 공존하는 경우의 抗力係數  $C_{DW}$ 의 평균치는 본 연구의 실험조건하에서 1.01 정도로 나타나 定常流場의 경우와 거의 일치하였다. 慣性力係數는 波動場과 波動과 흐름의 共存場 사이에서 평균치의 경우 큰 차이가 없는 경향을 보이며, 강한 흐름이 공존할 경우 그 分散이 매우 커지는 특성을 보였다. 이로부터 K-C수가 작고, 潮流 등의 흐름이 강한 波動場의 流體力 計算方法의 적용성을 확인할 수 있으며 波動場의 흐름의 강약에 따라 抗力係數와 慣性力係數를 선택적으로 사용함으로써 설계상의 安定性を 효율적으로 고려할 수 있다.

### 2.2.2. 底面效果에 따른 着底式 魚礁에 作用하는 流體力係數의 變化

底面效果에 의한 波力 증대로 부터 계산되어진 K-C수에 따른 抗力係數 ( $C_{DR}$ ), 慣性力係數 ( $C_{IM}$ )를 나타낸 것이 Fig. 2이다. 無限流體 中の 抗力係數 및 慣性力係數와 비교하면, 底面效果에 의한  $C_{DR}$ 와  $C_{IM}$ 의 증대가 크게 나타났다. K-C수 3 이하의 조건에서 無限流體 中の  $C_{DR}$ 는 1.5 정도의 값을 가지나, 착저시에는 4 정도의 값을 갖게 되며, K-C수가 증대됨에 따라 1.5 정도까지 거의 선형적으로 감소하는 특성을 볼 수 있다.  $C_{IM}$ 는 無限流體 中에서 K-C수에 따라 1.6에서 1.4사이의 값을 가지나, 底面效果에 의해 K-C수 10 ~ 12 에서 peak를 보여 3.5 정도의 값을 갖고, 2.5 보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 종래의 設計指針 등에서 사용하는 이들 抗力係數와 慣性力係數는 이 底面效果를 무시한 것이며, 과소평가되었다 할 수 있다. 한편, 單體魚礁일 경우가 抗力係數는 크게 작용하며, 慣性力係數는 單體魚礁의 peak現狀을 찾아 보기 어렵다. 따라서 群體魚礁 설계시는 그 配置間隔에 따라 魚礁에 작용하는 流體力係數를 조정할 필요가 있음을 알 수 있었다.

### 2.2.3. 着底式 파이프에 作用하는 波力

波浪중의 물체에는 일반적으로 抗力, 慣性力 및 揚力이 작용한다. 그러나 海底面 부근에서는 水面 부근에 비해 水粒子運動이 비교적 작을 것으로 추측된다 (吉田·植松, 1982). 따라서, 본 연구에서 대상으로 하는 파이프는 大口徑 파이프에 해당하므로 揚力과 慣性力에 대해서만 논의하기로 한다.

Fig. 3은 波浪에 의한 慣性力係數의 變化를 K-C수에 따라 나타낸 것으로 魚礁構造物에서와 같이 水中 無限流體場에서의 慣性力係數보다 着底式의 慣性力係數가 월등히 크게 나타난 것을 알 수 있으며 이를 波力計算에 고려한다면  $C_{IM}$ 은 3.5~4.0 정도의 값으로 고려해야 될 것이다. 한편, 레이놀드수에 따른 揚力の 變化로부터 계산한 揚力係數  $C_L$ 은 평균적으로 4.5 ~ 5.0 부근의 값을 갖는 것으로 나타났다.

### 2.3. 波浪에 의한 地盤舉動의 動的 特性

海底地盤의 應力狀態를 규명하는 데는 地盤 中の 變動間隙水壓  $P_a$  이 중요한 因子라는 것이 명백하므로,  $P_a$  을 해석적으로 구하기 위한 理論式을 유도하였다. 海底地盤 表面으로부터 깊이  $z$ 인 위치의 斷面積  $A$ , 길이  $\Delta z$  의 土要素를 고려하면, 微小時間  $\Delta t$  동안에 土要素로의 물의 流入量  $\Delta q_v$  는 Darcy 의 法則에 의해 다음 식과 같이 표현된다.

$$\Delta q_v = \frac{k}{r_v} \cdot \frac{\partial^2 P_a}{\partial z^2} \cdot A \cdot \Delta z \cdot \Delta t \quad (5)$$

여기서 間隙水の 流出量  $\Delta q_v$ 을 有效鉛直應力  $\sigma'_v$ 의 變化에 의한 壓縮(間隙水の 流出)成分과 變動間隙水壓  $P_a$ 의 變化에 의한 間隙水の 壓縮(間隙水の 流入)成分으로 가정하고 質量保存의 法則을 적용하면 다음과 같은 變動間隙水壓에 관한 基礎方程式이 유도된다.

$$C_v \cdot \frac{\partial^2 P_a}{\partial z^2} = a \cdot \frac{\partial P_a}{\partial t} - \frac{\partial P_b}{\partial t} \quad (6)$$

이 식은 海底地盤 表面( $z=0$ )에서의 水壓境界條件을 微小振幅波理論에 의해 도입하고, 不透水層( $z=l$ )에서의 境界條件과 初期條件( $t=0$ )을 고려하여 差分法으로 풀 수 있다.

波浪에 의한 地盤內의 變動間隙水壓의 變動特性에 대한 계산 결과, 深度가 증가하면  $P_a/P_0$  의 크기가 감소하는 것으로 나타났고, 또한 深度가 증가할수록 peak 치를 나타내는 位相이 지연되는 현상이 나타났다. 각 位相마다의 變動間隙水壓의 深度에 따른 分布를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 變動間隙水壓의 絶對值가 최대가 되는 位相은  $220^\circ$  정도이며, 이것은 海底面上의 水壓의 變動이 波峯에서

波谷으로 移動하는 과정에서의 淨水面(still water level)을 通過하는 位相보다 늦은 時點에 해당된다. 이 결과로부터 波浪에 의한 海底地盤의 가장 위험한 상태는 波谷의 위상에서 발생한다는 종래의 대부분의 연구와는 달리 海底面의 波壓特性, 排水係數(c), 傳達係數( $\alpha$ ) 등에 의해 그 發生 位相이 波谷 前方으로 변화한다는 것을 지적할 수 있다. 또한, 液狀化 可能 領域은 波壓의 中대 즉 波高의 中대에 따라 깊어지는 경향을 볼 수 있었다.

이 液狀化의 깊이는 魚礁 등 着底式 水中施設物 주변의 국소적인 洗掘 및 魚礁의 沈下에 크게 영향을 미칠 것이므로 그 예측과 대책이 필요하다. 이 地盤의 液狀化의 발생여부는 外力條件과 地盤의 初期條件이 주어지면, 海底面에 미치는 波壓  $P_0$ 를 구할 수 있고, 그로부터 排水係數(c)와 傳達係數( $\alpha$ )를 결정한 후, 基礎方程式으로부터 深度別 變動間隙水壓을 계산하고 그 絶對值와 鉛直有效應力の 크기를 비교하여 液狀化 여부를 판정할 수 있다.

### 3. 結論

着底式 魚礁 및 파이프에 작용하는 流體力 및 海底 地盤의 支持力 特性에 대해 理論的·實驗的으로 고찰하였다. 그 중요한 결과를 항목별로 요약하면 다음과 같다.

- 1) 着底式 魚礁 등 水中水産構造物에 대한 流體力 評價에 있어서 無限 流體場의 流體力보다 着底式의 경우 底面效果에 의한 流體力係數 中대효과를 충분히 고려해야 하며, 單體構造物일 경우와 群體構造物일 경우에 있어서도 그 차이가 현저하므로 그 변화특성의 고려가 중요하다.
- 2) 海底面에 설치된 파이프 構造物에도 1)의 경향이 나타나며 각각의 構造物에 대한 抗力係數, 慣性力係數, 揚力係數 등 流體力係數의 K-C수에 따른 변화특성 등을 信賴區間의 개념으로 정리함.
- 3) 波浪에 의한 地盤의 深度에 따른 變動間隙水壓의 특성을 실험적, 이론적으로 규명함으로써 液狀化 影響因子에 대해 정리하고, 地盤의 液狀化에 의한 着底式 構造物 주변의 局所洗掘, 沈下, 埋沒 등 災害防止의 基本指針을 마련하였고, 이를 통해 着底式 水中水産施設物의 安定性 및 機能最適化 設計의 基礎를 마련함.
- 4) 水中·着底式 魚礁施設 및 파이프 시설 등의 建設시 波力 등 流體力의 합리적인 평가와 波浪에 의한 地盤支持力의 動的特性을 고려함으로써 安定성과 機能 極大化를 위한 基本 設計指針을 제시함.
- 5) 상기 내용은 構造物의 形態, 配置方法, 現地の 底質 및 施工方法에 따라 다양하게 변화될 것으로 예측되며, 금후 더욱 다양한 조건에 부합되는 解析技法의 정리와 地盤의 液狀化방지를 위한 보다 효율적인 대책과 정량적인 指針의 개발이 요구됨.

### 4. 參考文獻

- 1) D'Itri, F.M.(1985): Artificial reefs - Marine and freshwater application - Lewis Publishers Inc., 589 p.
- 2) Ryu, C.R.(1992): Review on marine artificial habitat technology, Proc. of FOID'92, 137-154.
- 3) Sawaragi, T.(1984): Similarity law in a movable bed scale model under wave condition, Lecture Notes of the 20th Summer Seminar on Hydraulics(B), JSCE, B-5-1 ~ B-5-14.
- 4) 류청로, 장선덕, 임기봉(1986): 인공어초의 규모와 배치에 관한 연구, 국립수산진흥원 연구보고, 38, 1-24.
- 5) 이익호(1992): 파랑에 의한 해저지반의 액상화에 관한 연구, 부산수산대학교대학원 해양공학과 박사학위 논문, 100p.
- 6) 上北征男, 明田定滿, 田島 泰(1985): 角型魚礁に作用する流體力の特性について, 海岸工學論文集 第32卷, 643-646.
- 7) 松見吉晴(1991): 着底式魚礁の作用流體力に關する研究, 海岸工學論文集 第38卷, 801-805.
- 8) 吉田常松, 植松幹夫(1982): 任意形狀の水底に置かれたパイプに作用する流體力, 海岸工學論文集 第29卷, 447-451.
- 9) 加藤重一(1984): 水産土木概論, 恒星社厚生閣, 381p.

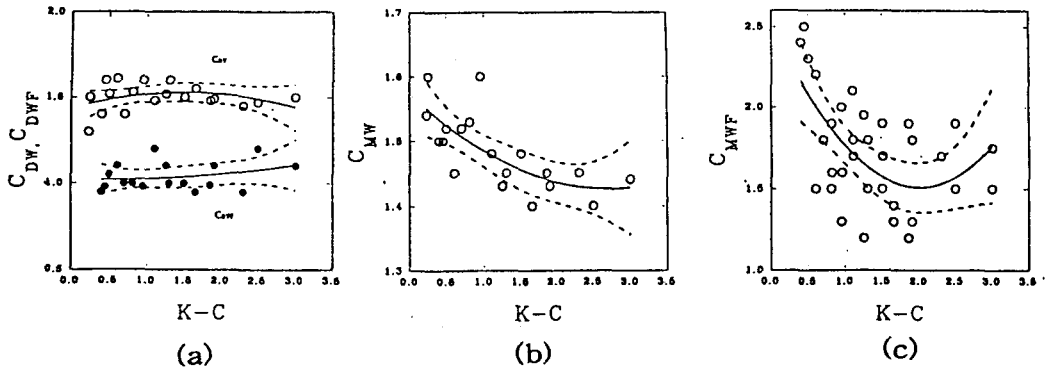


Fig.1. The variation of drag coefficient( $C_D$ ) and inertia coefficient( $C_M$ ) due to K-C number in the wave(w) and wave-flow(FW) field.

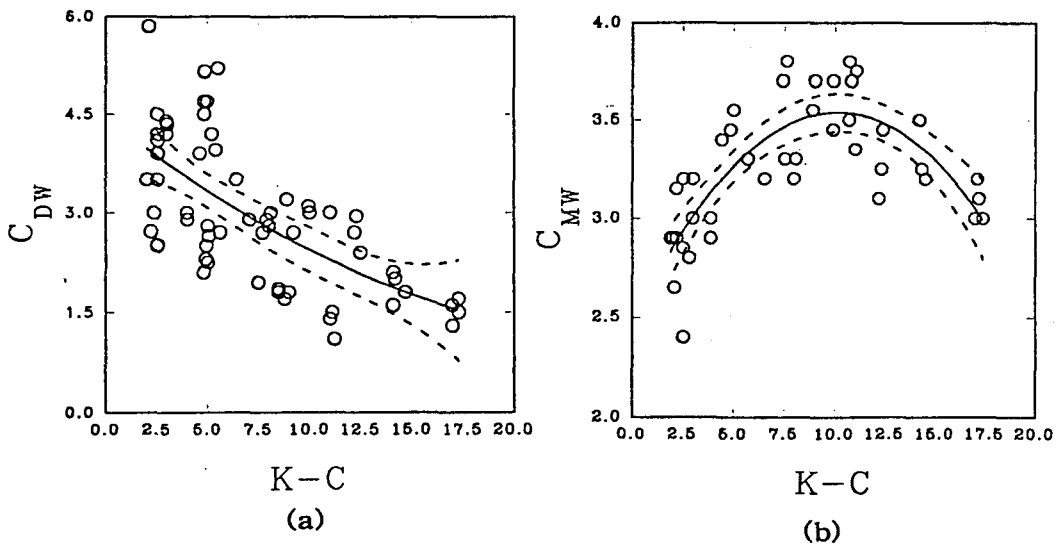


Fig.2. The variation of drag coefficient( $C_D$ ) and inertia coefficient( $C_M$ ) due to K-C number under the condition of bottom located.

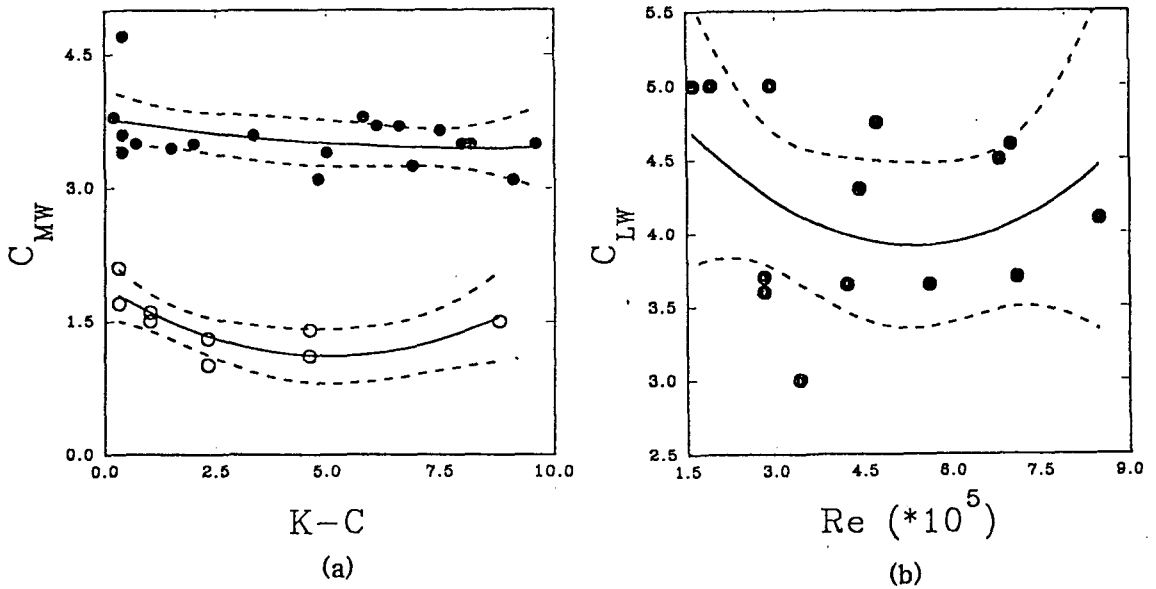


Fig.3. The variation of inertia coefficient( $C_M$ ) due to K-C number, and lift coefficient( $C_L$ ) due to Reynolds number for the pipe structure under the condition of intermediate depth(  $\circ$ ) and sea bottom( $\bullet$ ).

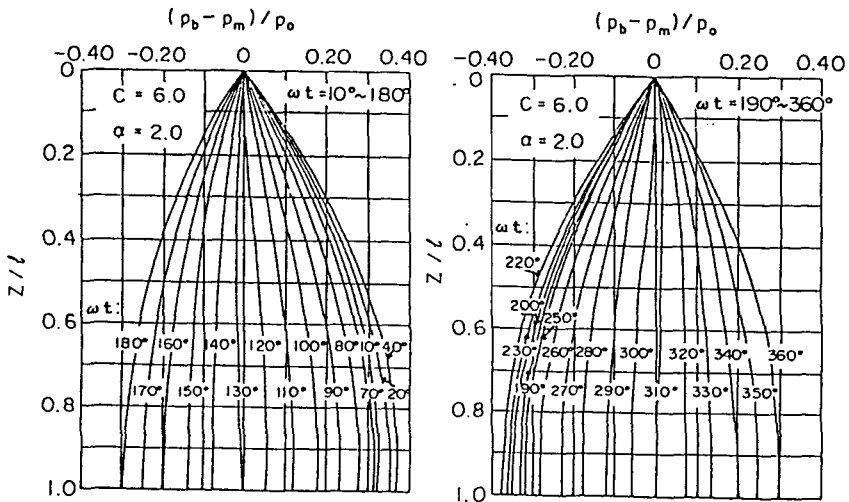


Fig.4. Calculated depth-wise oscillatory pore water pressure distribution by the theory.