

規則波對任意形狀水深及反射率港池的水面振動

周宗仁¹ 韓文育²

關鍵詞：港池共振、邊界元素法、消能係數。

摘 要

本文利用邊界元素法建立一個解析港池水面振動模式，其優點係能適用於任意形狀、不等水深及具任意反射率港池因受規則波作用引起的水面振動解析。本研究首先以矩形港池為計算例，經將計算結果與文獻中的理論解比較，發現兩者相當吻合，其次以正方形港池及八斗子漁港現況佈置為計算例進行解析，並利用平面水槽進行檢證實驗，得到頗為一致的結果。

WAVE-INDUCED OSCILLATION IN THE HARBOUR OF ARBITRARY SHAPE WITH VARIABLE WATER DEPTH AND DISSIPATING QUAYS

Chung-Ren Chou and Wen-Yu Han

*Department of Harbour and River Engineering
National Taiwan Ocean University
Keelung, Taiwan 20224, R.O.C.*

Key Words: harbour oscillation, boundary element method, energy dissipating coefficient.

ABSTRACT

Wave-induced oscillation in a harbour is analyzed numerically using boundary element method. The harbour under consideration has arbitrary shape and dissipating quays; the depth of the water is assumed variable. The reflection coefficient of the dissipating quays is first determined by experiments with two-dimensional wave flumes. The numerical results are compared with those from experiments carried out in a three-dimensional wave basin. The harbour used in the experiments has a square basin and the dissipating quays same as those used in the experiments of two-dimensional wave flumes. Comparisons of calculated distributions of wave stature with experimental results for a model of an existing fishery harbour with variable depth of water are presented. The numerical results of the distributions of wave stature compare satisfactorily with those from experiments.

¹ 國立臺灣海洋大學河海工程研究所教授

² 國立臺灣海洋大學河海工程研究所博士班研究生

一、前言

在港灣工程規劃設計中，避免港池水面發生共振是一個很重要的考慮因素，港池水面發生共振現象時，由於水面劇烈起伏，不但妨害船舶碇泊、裝卸，若共振嚴重造成船舶斷續時，更影響船舶及港埠設施的安全。為避免上述現象之最佳方法為在港內保留部分水域作為自然消波區，然由於實際需要，大部分港灣多幾經擴建而無多餘水域可供自然消波，尤以國內漁港更為嚴重。為解決港池水面振動現象，過去學者專家提出了許多解決方法，諸如檢討港口開口大小、方向、港灣形狀及港內設置消波性構造物等，其中消波性構造物在國內及日本已有相當多的應用實例，但如何預知消波性構造物應配置在那裏才能得到最佳靜穩度，或應配置多長的消波設施才能得到設計要求的靜穩度，目前仍多以水工模型試驗為之。

有關波浪引起港池水面振動問題，過去有不少學者專家發表過相關論文，Miles & Munk [1] 考慮由港口傳至外海的輻射效應，利用 Green 函數解析矩形港池水面共振現象，並提出港口矛盾論。Ippen & Goda [2] 以 Fourier 轉換及變數分離法解析矩形港池水面振動，其理論解並經試驗驗證極為吻合。Berkhoff [3] 利用緩坡方程式 (mild-slope equation) 解析港內波浪折射及繞射問題。Lee [4] 應用 Weber 解，由 Helmholtz 方程式分析任意形狀等水深港池的波高分佈。周和林 [5] 利用邊界元素法解析任意形狀、不等水深但防波堤或岸壁之反射率為 1 的港池波高分佈，並於 [6] 對等水深任意形狀但防波堤或岸壁具任意反射率的港池進行數值解析。歐等 [7] 利用有限元素法，在考慮海底摩擦的條件下進行港池共振分析。

一般港池多為不規則形狀，港內外水深亦不等，且防波堤或岸壁的反射率均依構造物型式而異。綜觀過去有關港池水面振動之數值模式，多無法同時考慮上述形狀、水深及反射率等因素。本文主要目的係利用邊界元素法提出一種能夠同時考慮這些因素的數值模式，用以模擬港池的水面振動現象，經以正方形港池及八斗子漁港現況佈置為計算例，並以平面水槽試驗驗證本數值法的可行性與實用性。

二、理論分析

如圖 1 所示，將座標原點定於 O 點，在水平面內設 $X-Y$ 平面， Z 軸以垂直向上為正。在遠離港口的地方設置一個假想邊界面 Γ_1 ，而將海域分為等水深 h 的外海領域 (I) 及任意水深領域 (II) 等兩領域。假設 (I) 及 (II) 兩領域的流體運動均為非黏性、無回轉性、不可壓縮理想流體的微小振幅波運動，當一定週頻率 σ ($=2\pi/T$, T 為波浪週期)、振幅為 ζ_0 的簡諧波從外海入射時，兩領域的流體運動均應持有如下式所示的速度勢 $\phi(x, y, z; t)$:

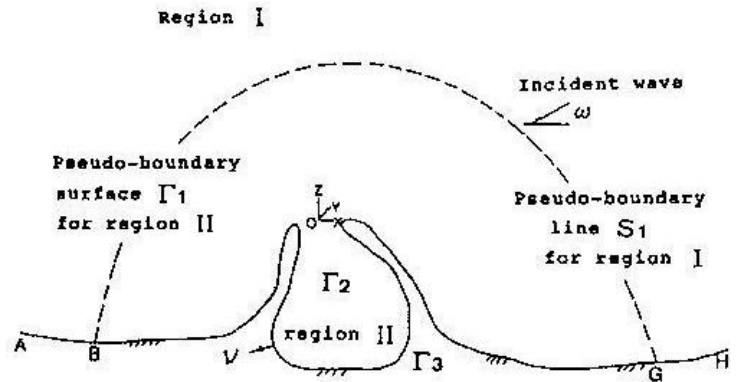


圖 1 定義圖。

$$\phi(x, y, z; t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \cdot \phi(x, y, z) \cdot \exp(-i\sigma t) \quad (1)$$

式中 g 表示重力加速度。

式 (1) 中之 $\phi(x, y, z)$ 應滿足下列 Laplace 方程式。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

1. 等水深外海領域速度勢

如圖 1 所示，在距離港口極遠，已不受港口及防波堤散射影響處 (通常為入射波波長的一半以上即可)，設置一假想邊界面，而將流體領域分成等水深 h 的外海領域 (I) 及包含防波堤、港口等的任意水深領域 (II)。在外海領域 (I) 內由於假設水深為一定的關係，可利用變數分離法將該領域的速度勢 $\phi_0(x, y, z)$ 分離成與水深 z 有關的已知函數及與平面位置有關的未知函數。

$$\phi_0(x, y, z) = \{f^0(x, y) + f^*(x, y)\} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad (3)$$

式中 k 為 $\sigma^2 h/g = kh \tanh kh$ 的根，而 $f^0(x, y)$ 及 $f^*(x, y)$ 分別為外海領域的入射波及因港口及防波堤存在所引起反射、繞射的勢函數，當入射波為與 X 軸呈 ω 角度入射、振幅 ζ_0 的簡諧波，其水面波形 $\zeta_1(x, y; t)$ 以下式表示時：

$$\zeta_1(x, y; t) = \zeta_0 \cos [k(x \cos \omega + y \sin \omega) + \sigma t], \quad (\pi \leq \omega \leq 0) \quad (4)$$

入射波的勢函數 $f^0(x, y)$ 為：

$$f^0(x, y) = -i \cdot \exp[-ik(x \cos \omega + y \sin \omega)] \quad (5)$$

將式 (3) 代入式 (2) 得 $f^*(x, y)$ 為滿足下列 Helmholtz 方程式的未知函數。

$$\frac{\partial^2 f^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f^*}{\partial y^2} + k^2 f^* = 0 \quad (6)$$

外海領域係由假想邊界線 S_1 、海岸線 \overline{AB} 、 \overline{GH} 及無限遠處的邊界面圍成的封閉曲線。對外海領域而言，由於將假想邊界面設置於遠離港口的地方，位於外海領域的海岸線 \overline{AB} 、 \overline{GH} 可假設已不會對港口有影響而視其反射波的勢函數值 f^* 為零，對無限遠處的邊界面，由於必須滿足 Sommerfeld 的輻射條件，因此反射波的勢函數值 f^* 亦可視為零。因此利用 Green 函數，外海領域內任意一點反射波的勢函數可以用下列積分方程式表示：

$$cf^*(x, y) = \int_{s_1} \left\{ \left[\frac{i}{4} H_0^{(1)}(KR) \right] \frac{\partial}{\partial \nu} f^*(\xi, \eta) - f^*(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial \nu} \left[\frac{i}{4} H_0^{(1)}(KR) \right] \right\} ds \quad (7)$$

式中 $f^*(\xi, \eta)$ 為幾何邊界上的勢函數值，而 $\partial f^*(\xi, \eta)/\partial \nu$ ($=\bar{f}^*$) 表示對法線方向的一次導函數， $H_0^{(1)}(KR)$ 為第 1 種 0 次 Hankel 函數， ν 為邊界上的法線，以向外為正，而 $R = [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]^{1/2}$ 。當任意點 (x, y) 在領域內時， $c=1$ ，而當 $(x, y) \rightarrow (\xi, \eta)$ 時，由於 Hankel 函數的特異性而使 $c=1/2$ ，為了進行數值解析，本研究對上式利用 N 個一定線元素將邊界 Γ_1 在 $c=1/2$ 的情況下加以離散化，而以下列的矩陣形式表示。

$$\{F^*\} = [K^*]\{\bar{F}^*\} \quad (8)$$

其中

$$[K^*] = [H^*]^{-1}[G^*]$$

$$\{F^*\} = f_j^*, \quad (j=1, M)$$

$$\{\bar{F}^*\} = \bar{f}_j^*, \quad (j=1, M)$$

$$[H^*] = H_{ij}^*$$

$$H_{ij}^* = \begin{cases} H_{ij}, & (i \neq j), \\ H_{ij} + \frac{1}{2}, & (i = j), \end{cases} \quad (i, j=1, M)$$

$$[G^*] = G_{ij}^*$$

$$H_{ij}^* = \int_{\Gamma_j} \frac{\partial}{\partial \nu} \left[\frac{i}{4} H_0^{(1)}(KR) \right] ds$$

$$G_{ij}^* = \int_{\Gamma_j} \frac{i}{4} H_0^{(1)}(KR) ds$$

其中 $\{F^*\}$ 及 $\{\bar{F}^*\}$ 分別為邊界上的勢函數值及其導函數值，而 $[K^*]$ 為與邊界形狀有關的係數矩陣。

2. 任意水深領域速度勢

領域 (II) 係為由外海假想邊界面 Γ_1 ，自由水面 Γ_2 ，任意反射率防波堤或岸壁邊界面 Γ_3 及不透水任意地形固定海底面 Γ_4 包圍的封閉三次度領域。利用 Green 函數，領域 (II) 內任意一點的速度勢 $\phi(x, y, z)$ 可由上

述封閉邊界面上面的速度勢值 $\phi(\xi, \eta, \zeta)$ 及其在法線方向的一次導函數 $\bar{\phi}(\xi, \eta, \zeta) = \partial \phi(\xi, \eta, \zeta)/\partial \nu$ (向外為正)，以下列積分方程式計算之。

$$c\phi(x, y, z) = \iint \left[\frac{\partial \phi(\xi, \eta, \zeta)}{\partial \nu} \left(-\frac{1}{4\pi R} \right) - \phi(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial}{\partial \nu} \left(\frac{1}{4\pi R} \right) \right] dA \quad (9)$$

式中 $R = [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2]^{1/2}$ 當任意點 (x, y, z) 在領域內時， $c=1$ ，而 $(x, y, z) \rightarrow (\xi, \eta, \zeta)$ 時，由於特別解的特異性而使 $c=1/2$ 。

為進行數值計算，本研究將邊界面 $\Gamma_1 \sim \Gamma_4$ 分別以 $N_1 \sim N_4$ 個一定面積元素在 $c=1/2$ 的情況下加以離散化，而以下列矩陣形式表示。

$$\{\phi\} = [K]\{\bar{\phi}\} \quad (10)$$

其中

$$[K] = [H]^{-1}[G]$$

$$\{\phi\} = \phi_j$$

$$\{\bar{\phi}\} = \bar{\phi}_j, \quad (j=1, N_1+N_2+N_3+N_4)$$

$$[H] = H_{ij}, \quad (i, j=1, N_1+N_2+N_3+N_4)$$

$$H_{ij} = \begin{cases} H_{ij}, & (i \neq j) \\ H_{ij} + \frac{1}{2}, & (i = j) \end{cases}$$

$$[G] = G_{ij}$$

$$H_{ij} = \int_{\Gamma_j} \frac{\partial}{\partial \nu} \left(\frac{1}{4\pi R} \right) ds$$

$$G_{ij} = \int_{\Gamma_j} \frac{1}{4\pi R} ds$$

其中 $\{\phi\}$ 及 $\{\bar{\phi}\}$ 分別為邊界上的勢函數值及其導函數值，而 $[K]$ 為與邊界形狀有關的係數矩陣。

3. 各邊界面上的邊界條件

各領域的邊界條件為：

(1) 自由水面的邊界條件

由於自由水面 Γ_2 上的大氣壓力一定及運動學邊界條件可得：

$$\bar{\phi} = \frac{\sigma^2}{g} \phi, \quad z=0 \quad (11)$$

(2) 不透水海底的邊界條件

由於假定海底 Γ_4 為不透水，其法線方向的流速為 0，即：

$$\frac{\partial \phi}{\partial \nu} = 0 \quad (12)$$

(3) 外海邊界 Γ_1 的邊界條件

在等水深領域與任意水深領域的相接邊界面 Γ_1 上，由於兩領域的流體運動所引起的質量及能量流束必須連續，可得下列條件：

$$\bar{\phi}_0(\xi, \eta, z) = \bar{\phi}(\xi, \eta, z) \quad (13)$$

$$\phi_0(\xi, \eta, z) = \phi(\xi, \eta, z) \quad (14)$$

將式(3)代入式(13)後，對兩邊各乘以 $\cosh k(z+h)$ 再對水深方向作積分得：

$$\int_{-h}^0 \bar{\phi}(\xi, \eta, z) \cosh k(z+h) dz = \int_{-h}^0 [\bar{f}^0(\xi, \eta) + \bar{f}^*(\xi, \eta)] \frac{\cosh^2 k(z+h)}{\cosh kh} dz$$

若將外海假想邊界面 Γ_1 對水深方向分割成 N 層，水平方向分割成 M 個面元素，即將 Γ_1 面分割成 $M \times N$ 個面元素時，可將上式以下列離散化形式表示。

$$\bar{f}^*(\xi_i, \eta_i) = \frac{k}{N_0 \sinh kh} \sum_{j=1}^N \bar{\phi}(\xi_i, \eta_i, \zeta_j) \cosh k(z_j+h) \Delta z_j - \bar{f}^0(\xi_i, \eta_i) \quad (15)$$

其中 $(i=1, 2, \dots, M), N_0=0.5(1+2kh/\sinh 2kh)$ 。

$$Q = \begin{bmatrix} \cosh k(z_{11}+h)\Delta z_1 & \dots & \cosh k(z_{1n}+h)\Delta z_n & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & & & & & \\ \cosh k(z_{m1}+h)\Delta z_1 & \dots & \cosh k(z_{mn}+h)\Delta z_n & & & \end{bmatrix} \quad (19)$$

式(17)表示在外海假想界面 Γ_1 上的速度勢與其導函數間的關係式。

(4) 任意反射率防波堤或岸壁 Γ_3 上的邊界條件

在防波堤或岸壁 Γ_3 上，由於假定其反射率為 K ，即消能係數為 α 的結構物，而得：

$$\bar{\phi}(\xi, \eta, \zeta) = i\alpha\phi(\xi, \eta, \zeta) \quad (20)$$

其中

$$\alpha = \sqrt{1-K^2} \quad (21)$$

4. 聯立方程式的建立

為了便於將各邊界面的邊界條件代入式(10)，將式(10)依各個邊界面以下列部分矩陣表示。

$$[\phi_i] = [K_{ij}] [\bar{\phi}_j], \quad (i, j=1, 4) \quad (22)$$

由於式(12)的邊界條件，我們可先求解邊界面 $\Gamma_1 \sim \Gamma_3$ 的未知函數矩陣，即：

$$[\phi_i] = [K_{ij}] [\bar{\phi}_i], \quad (i, j=1, 3) \quad (23)$$

將式(2)代入式(14)得：

$$\phi(\xi_i, \eta_i, z) = [f^0(\xi_i, \eta_i) + f^*(\xi_i, \eta_i)] \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}, \quad (i=1, 2, \dots, M \times N) \quad (16)$$

將式(8)及式(15)代入式(16)整理後，並以矩陣形式表示如下：

$$\{\phi_1\} = [R] \{F^0 - K^* \bar{F}^0\} + C[R][K^*][Q] \{\bar{\phi}_1\} \quad (17)$$

式中 $C = k/(N_0 \sinh kh)$ ，腳註 "1" 表示邊界面 Γ_1 ， $[R]$ ， $[Q]$ 為下列係數矩陣。

$$R = \begin{bmatrix} \frac{\cosh k(z_{11}+h)}{\cosh kh} & & & & & & 0 \\ & \vdots & & & & & \\ & & \frac{\cosh k(z_{1n}+h)}{\cosh kh} & & & & \\ & & & \dots & & & \\ & & & & \frac{\cosh k(z_{m1}+h)}{\cosh kh} & & \\ & & & & & \vdots & \\ & & & & & & \frac{\cosh k(z_{mn}+h)}{\cosh kh} \\ & & 0 & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix} \quad (18)$$

將式(11)、式(17)及式(20)代入上式，整理後得：

$$\begin{bmatrix} [K_{11} - CRK^*Q] & \frac{\sigma^2}{g} K_{12} & i\alpha K_{13} \\ K_{21} & \frac{\sigma^2}{g} K_{22} - I & i\alpha K_{23} \\ K_{31} & \frac{\sigma^2}{g} K_{32} & i\alpha K_{33} - I \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ [R[F^0 - K^* \bar{F}^0]] \\ \vdots & 0 \\ \vdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\phi}_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

解上式矩陣可得 Γ_1 邊界面上的速度勢導函數值，及 Γ_2 、 Γ_3 邊界面上的速度勢值。

領域 (II) 水面上各點的波高與入射波高比值 K_d ，可以下式計算：

$$K_d = |\phi_2| \quad (25)$$

三、消波式碼頭反射率

進行數值分析時在消波式防波堤或碼頭的邊界上採用式 (20) 的條件，即須事先知道消波式結構物的反射率，再由式 (21) 求出消能係數，因此必須先在斷面水槽進行消波碼頭反射率測定實驗，確定消波碼頭的反射率，以供數值計算使用。然後在平面水槽使用同樣型式、縮尺的消波碼頭進行檢證實驗。

本研究使用如圖 2 所示的消波碼頭進行反射率測定實驗，消波碼頭空隙率為 0.36，測定結果示於圖 3，其橫軸表示無因次角週頻率 $\sigma^2 h/g$ ($h=30$ cm)，縱軸表示反射率 K_r ，虛線為利用最小二乘法求得的實驗式，進行數值計算時利用此實驗式決定不同週期作用時消波碼頭的反射率。

四、計算例

本文首先以 Ippen & Goda [2] 之計算例為例，計算矩形港池內的水面振動情形，用以證明本模式解析港池共振的妥適性；又為證明消波碼頭處邊界條件假定的妥適性，本研究以如圖 4 所示，邊長 $10h$ (h 為外海領域等水深)，港口寬度 $5h$ 的正方形港池為計算例，並在港內以表一所示組合，配置與斷面實驗使用同樣的消波碼頭，其反射率以圖 3 為依據，為方便起見，港內領域水深設為與外海同樣的等水深。計算時將計算領域分割成 1,056 個面元素 (其中 $N_1=104$, $N_2=720$, $N_3=53$, $N_4=180$)，首先計算港內 A、B、C、D 四點 (座標分別為 $(0.25h, -0.25h)$ 、 $(0.25h, -5.25h)$ 、 $(0.25h, -9.75h)$ 、 $(4.75h, -5.25h)$) 在不同入射波週期時之波高變化，其次計算規則波無因次角週頻率 $\sigma^2 h/g=1.206$ 、 0.537 、 0.302 (週期 $T=1.0$ 、 1.5 、 2.0 秒) 垂直於港口入射時港內外的波高分佈。

為進一步證明本解析法之實用性，本文另以如圖 5 所示之八斗子漁港現況佈置為計算例。計算時將計算領域分割成 1,988 個面元素 (其中 $N_1=152$, $N_2=1,329$, $N_3=176$, $N_4=331$)，並假設防波堤及碼頭反射率均為 0.75，分別計算北北東向 (入射角 $\omega=66.5^\circ$) 規則波無因次角週頻率 $\sigma^2 h/g=2.518$ 、 1.611 、 1.169 (週期 $T=0.8$ 、 1.0 、 1.2 秒) 入射時港內外的波高分佈。

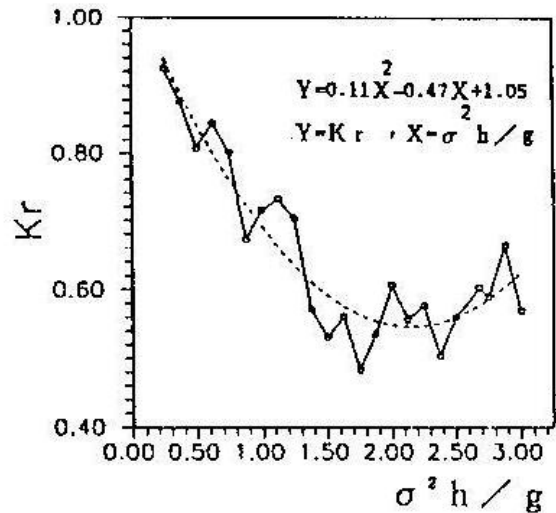


圖 3 規則波作用時消波碼頭反射率。

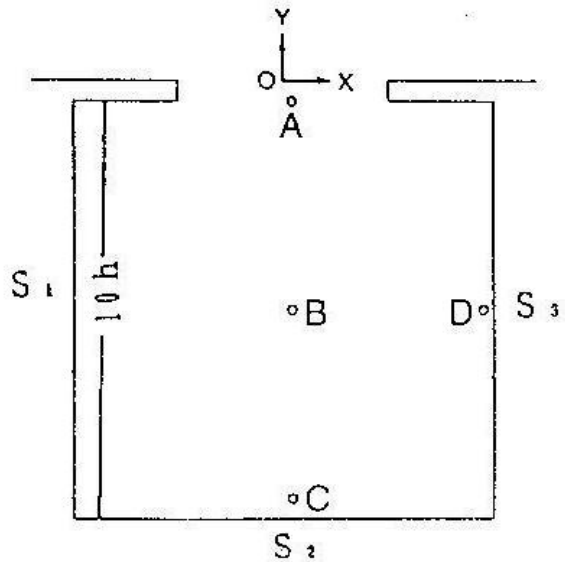


圖 4 矩形港池數值計算例。

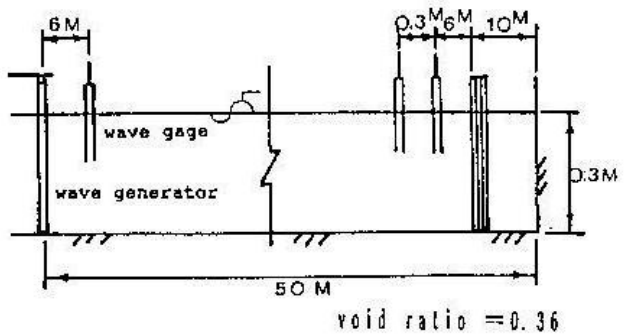


圖 2 消波碼頭模型及斷面水槽配置。

表一 消波碼頭配置組合

		S ₁	S ₂	S ₃
甲	案	×	×	×
乙	案	○	○	○
丙	案	×	○	×
丁	案	○	×	○

備註：× 全反射碼頭 ○ 消波式碼頭

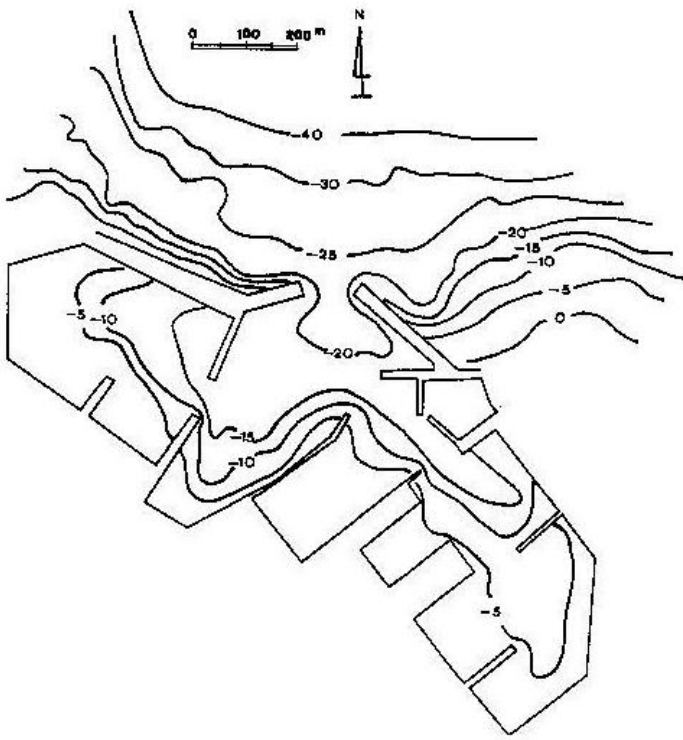


圖 5 八斗子漁港現況佈置及水深圖。

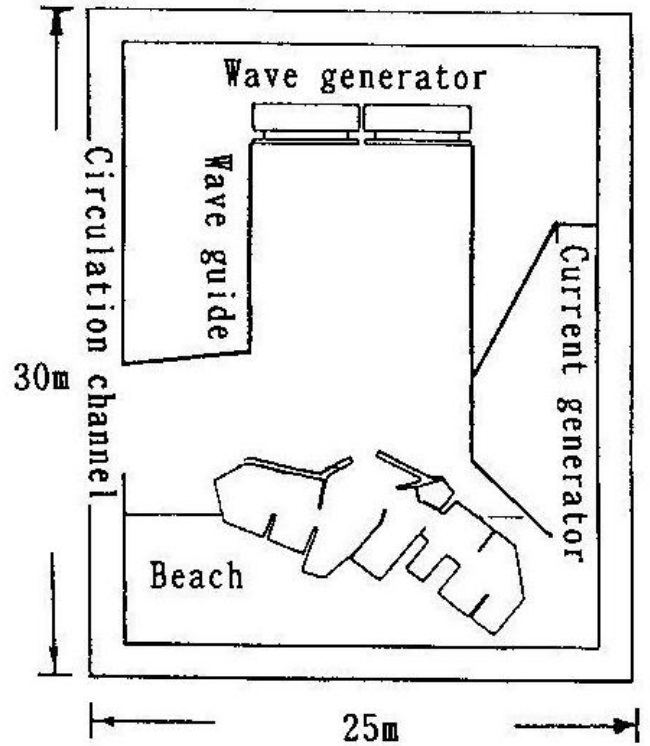


圖 6 平面水槽配置。

五、平面實驗

在長 30 m、寬 24 m、深 1 m 的平面水槽，實驗水深為 30 cm，首先就計算例中正方形港池乙案配置對應於數值計算的 A、B、C、D 四個測定點，在無因次規則波角週頻率 0.25~3.0 間，量測各點的最大水位週期變化，並對甲~丁案規則入射波無因次角週頻率 $\sigma^2 h/g = 1.206$ 、0.537、0.302 (週期 $T = 1.0$ 、1.5、2.0 秒) 作用時，量測港內各點的最大水位值，並將各測定點所得最大水位值除以入射波 (進行波) 波高，繪出等波高分佈圖。

其次將八斗子漁港現況以 1/100 縮尺佈置於平面水槽中如圖 6，以規則波無因次角週頻率 $\sigma^2 h/g = 2.518$ 、1.611、1.169 (週期 $T = 0.8$ 、1.0、1.2 秒) 之波浪由北北東向入射 ($\omega = 66.5^\circ$)，量測港內各點的最大水位值，並將各測定點所得最大水位值除以入射波 (進行波) 波高繪出等波高分佈圖。

六、結果分析

圖 7 表示矩形港池數值解與 Ippen & Goda [2] 解的比較，由圖中可發現二者相當吻合，可知本模式用於解析港池共振具相當妥適性。

圖 8 表示正方形港池乙案配置，即港內碼頭均配置消波碼頭時，A、B、C、D 四測點最大水位數值解與實驗值的比較。由圖中可發現數值解與實驗值二者趨勢相同，若將值數解與實驗值二組資料以偏差 $V = \sqrt{\sum(X_{num} - X_{exp})^2 / (N-1)}$ (式中 X_{num} 表示數值解， X_{exp} 表示實驗值， N 表示實驗次數) 之方式分析其相關性，則可求得偏差 V 分別為 18.98、17.15、19.25、14.84%。由於數值解與實驗值間偏差均低於 20%，可證

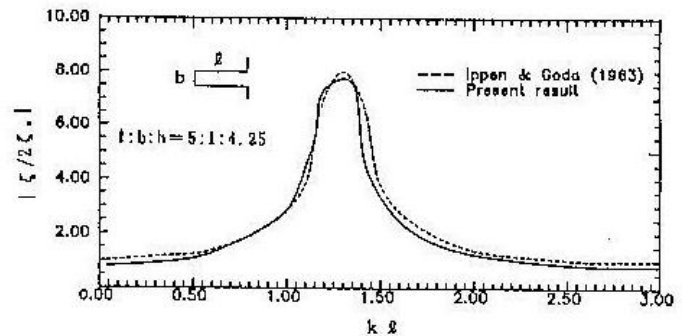


圖 7 矩形港池數值解與 Ippen & Goda 解的比較 (h 為外海水深)。

明本解析法採用消能係數條件的妥適性。

圖 9 表示規則波數值計算 A、B、C、D 四測點在甲~丁案四種不同消波碼頭配置情形下的最大水位週期變化圖，由圖中可發現，甲案配置即港內碼頭全部為全反射碼頭時，水面有明顯的共振現象發生。當配置有消波碼頭時，共振現象會變小，尤其是乙案，即港內全部配置消波碼頭時，港內水面幾無共振現象。丙案及丁案配置亦均有改善港內水面靜穩的效果。

圖 10 至圖 12 分別表示 $\sigma^2 h/g = 1.206$ 、0.537、0.302 時，甲~丁案實驗值與數值解等波高分佈比較圖，由圖中可明顯發現，當配置有消波碼頭時，港內波高較小，同時可發現實驗值與數值解間絕對值雖略有不同，但趨勢相當一致，可證明本解析法的妥適性。

圖 13 至圖 15 分別表示八斗子漁港受 $\omega = 66.5^\circ$ ， $T = 0.8$ 、1.0、1.2 秒之規則波作用時之波高分佈數值解及實驗值比較圖，由圖中可發現，二者間絕對值雖略有不同但趨勢相似，可知本數值模式對解析實際港池水面振動問題確有實用價值。

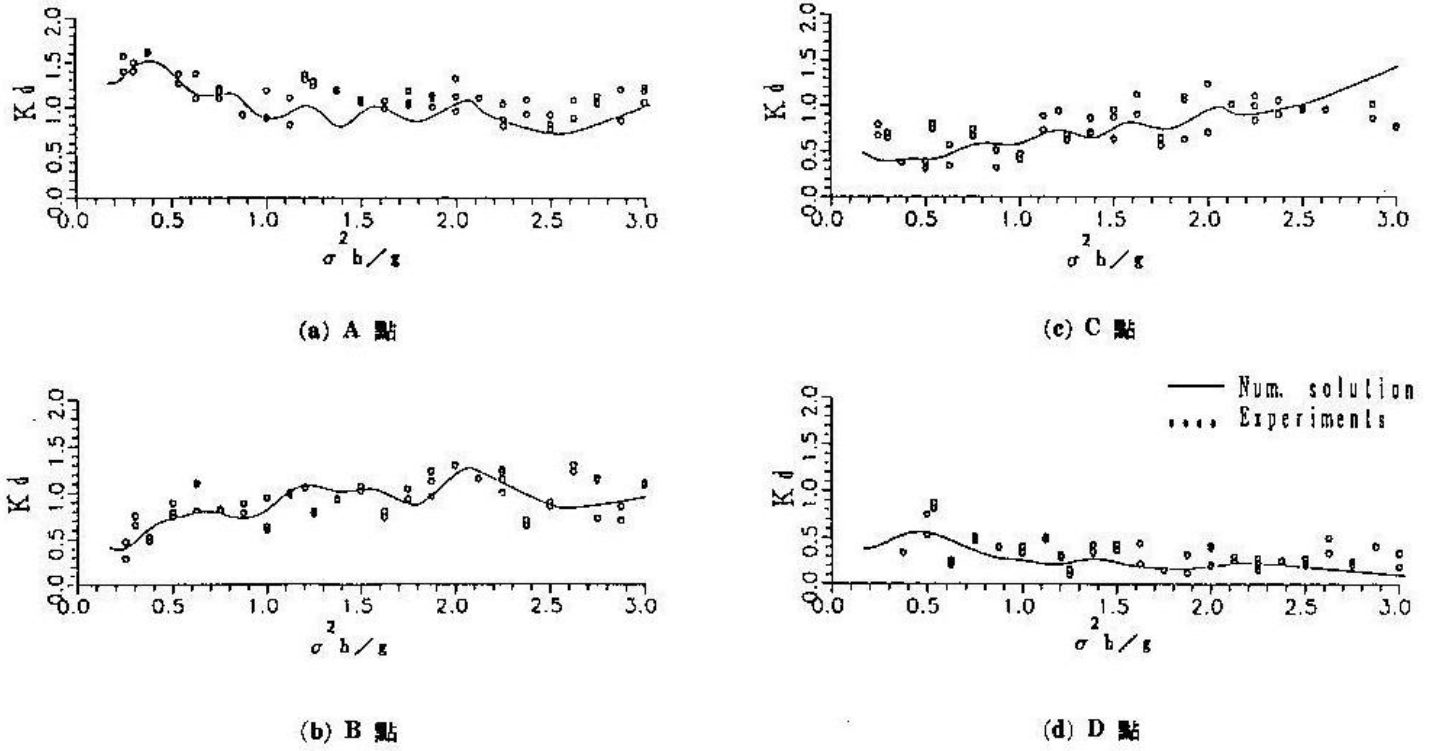


圖 8 乙案配置各點水面振動數值解與實驗值比較。

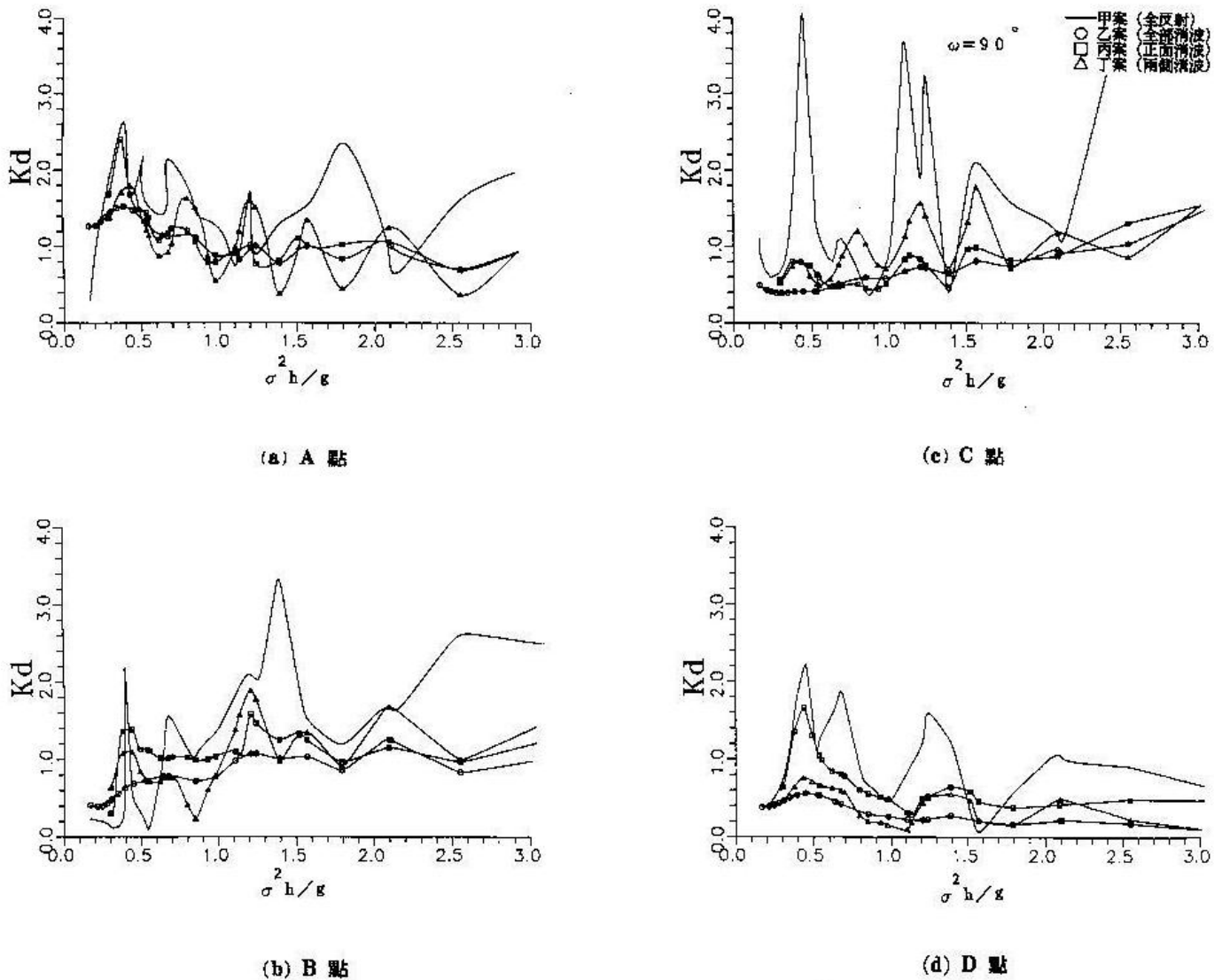
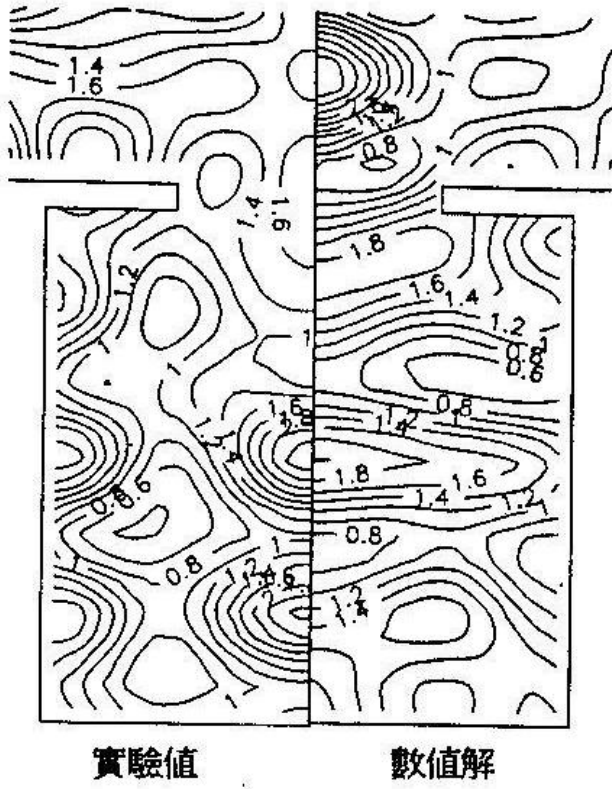
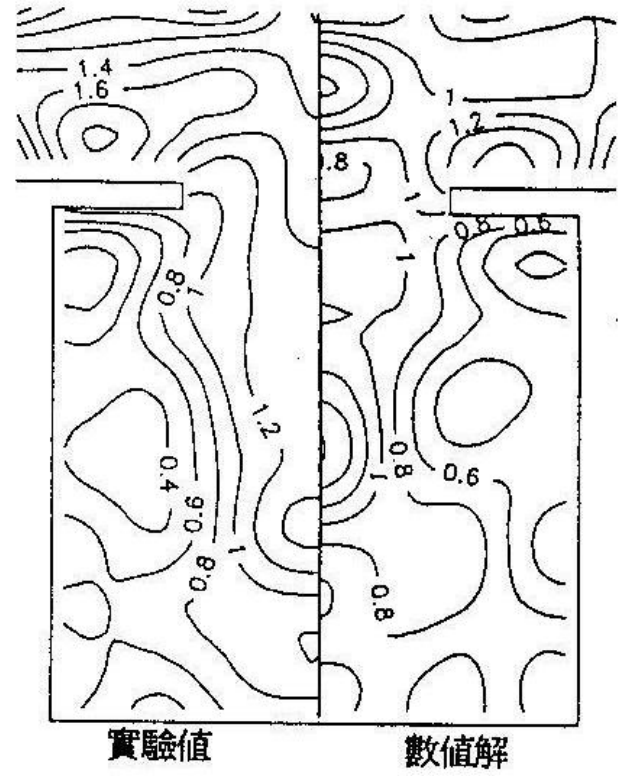


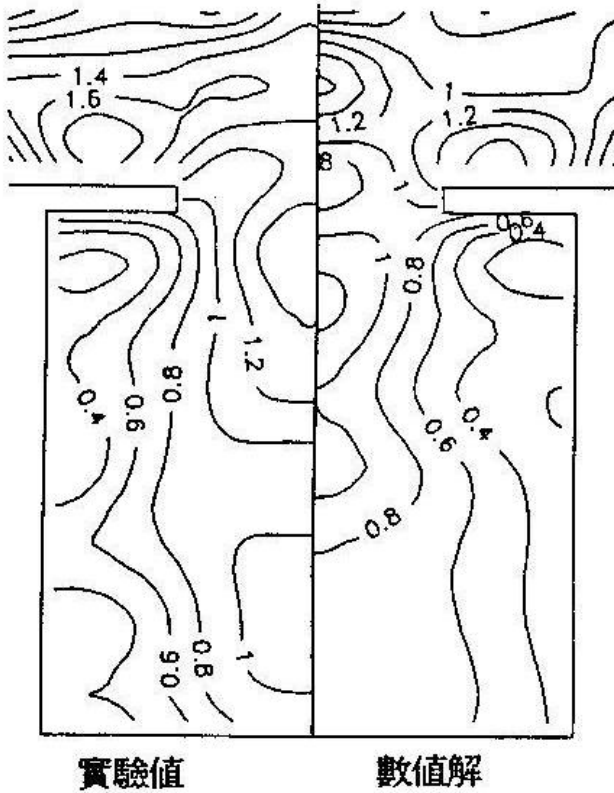
圖 9 各配置案特定點波高比較 (數值解)。



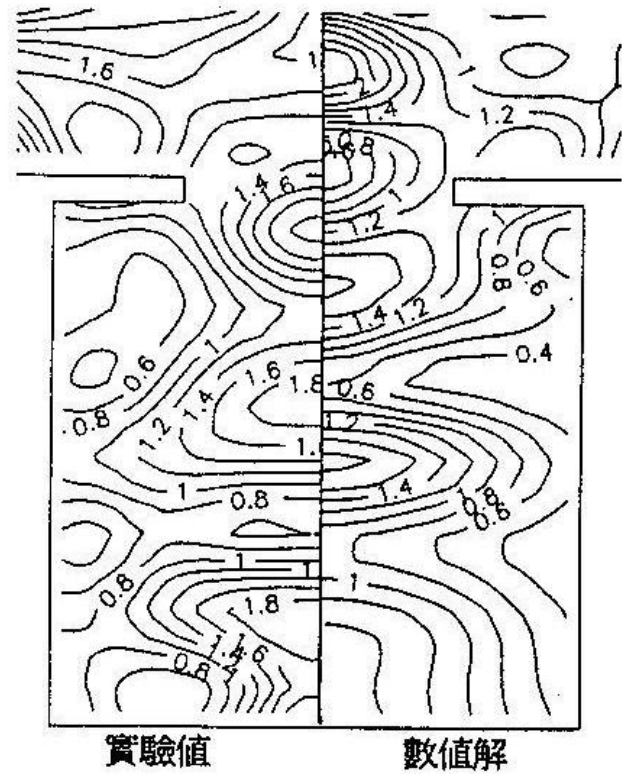
(a) 甲案



(c) 丙案

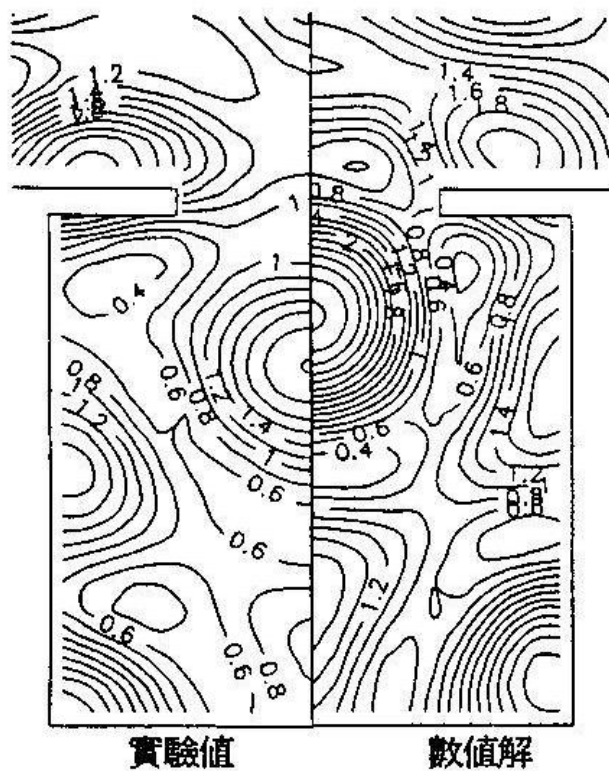


(b) 乙案

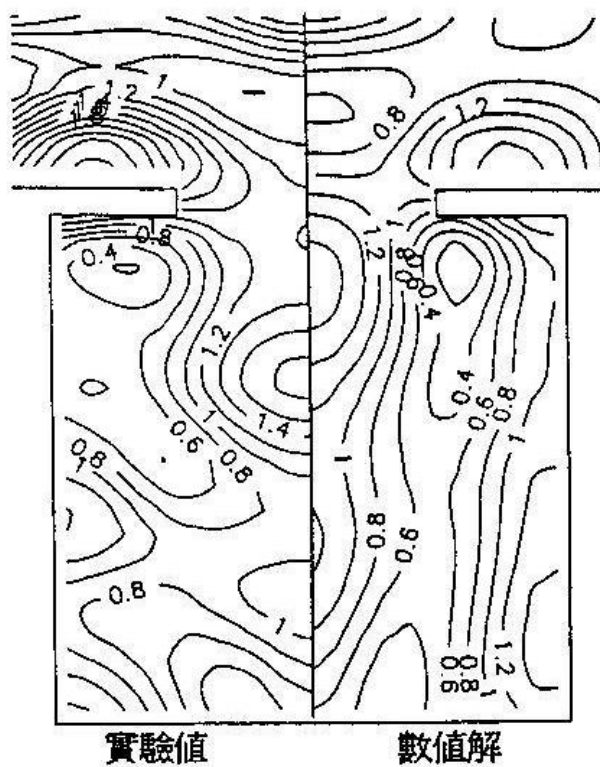


(d) 丁案

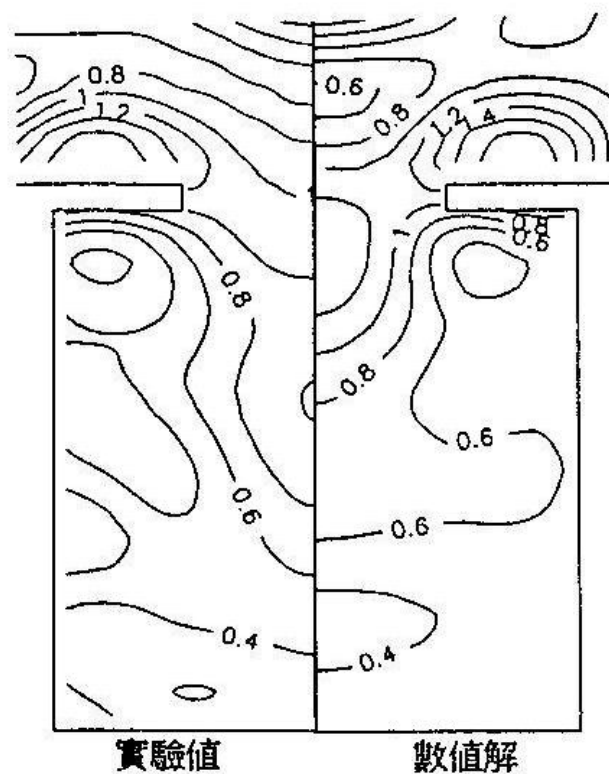
圖10 $\sigma^2 h/g=1.206, T=1.0$ 秒, $h=30$ cm, $\omega=90^\circ$, 各配置案港內外等波高分佈數值解與實驗值比較



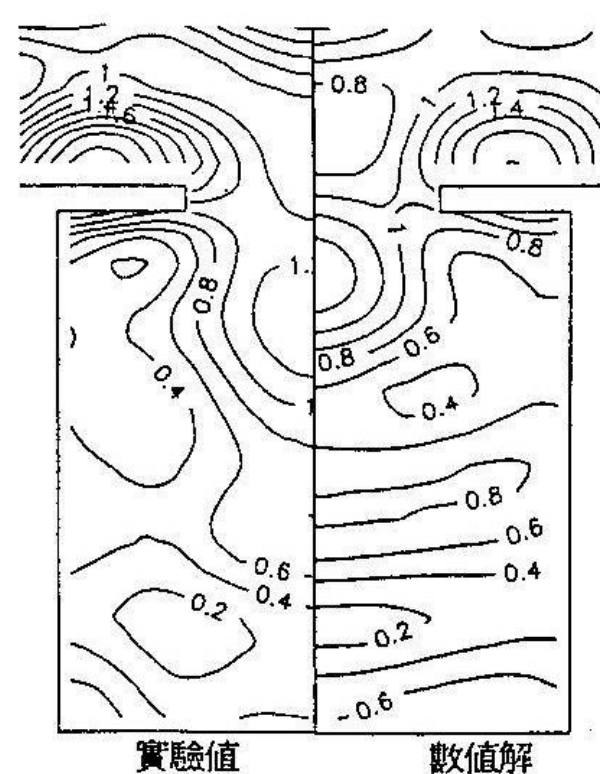
(a) 甲案



(c) 丙案

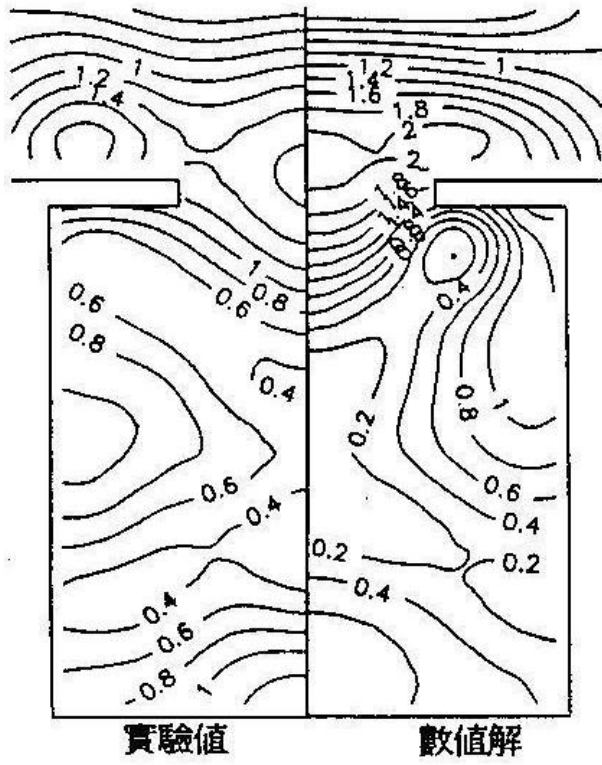


(b) 乙案

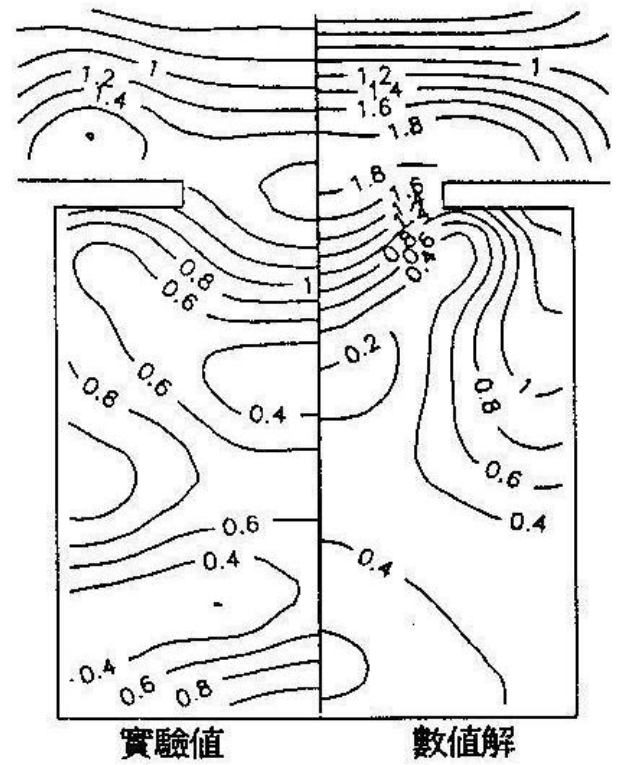


(d) 丁案

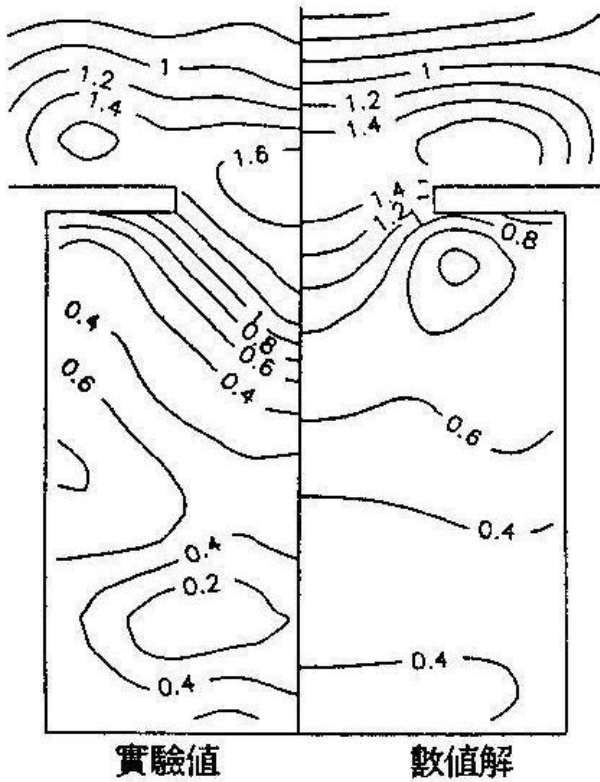
圖11 $\sigma^2 h/g=0.537$, $T=1.5$ 秒, $h=30$ cm, $\omega=90^\circ$, 各配置案港內外等波高分佈數值解與實驗值比較。



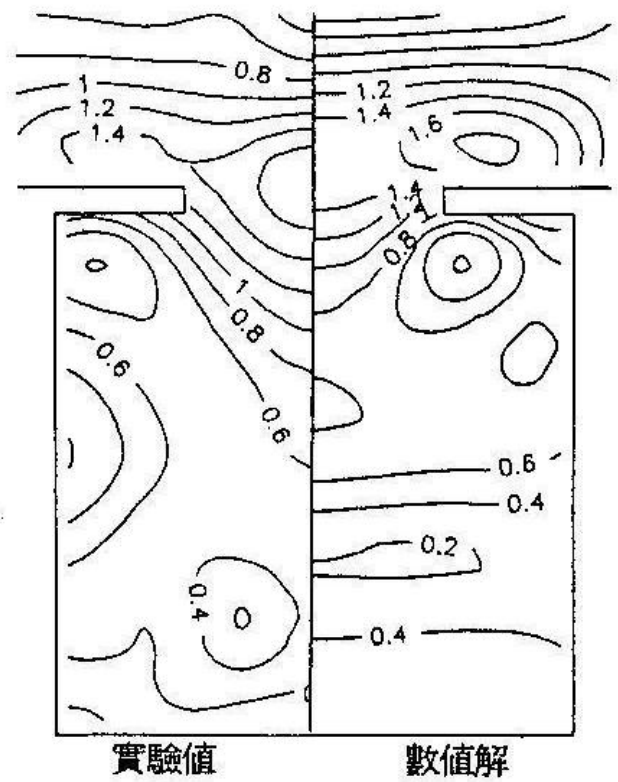
(a) 甲案



(c) 丙案



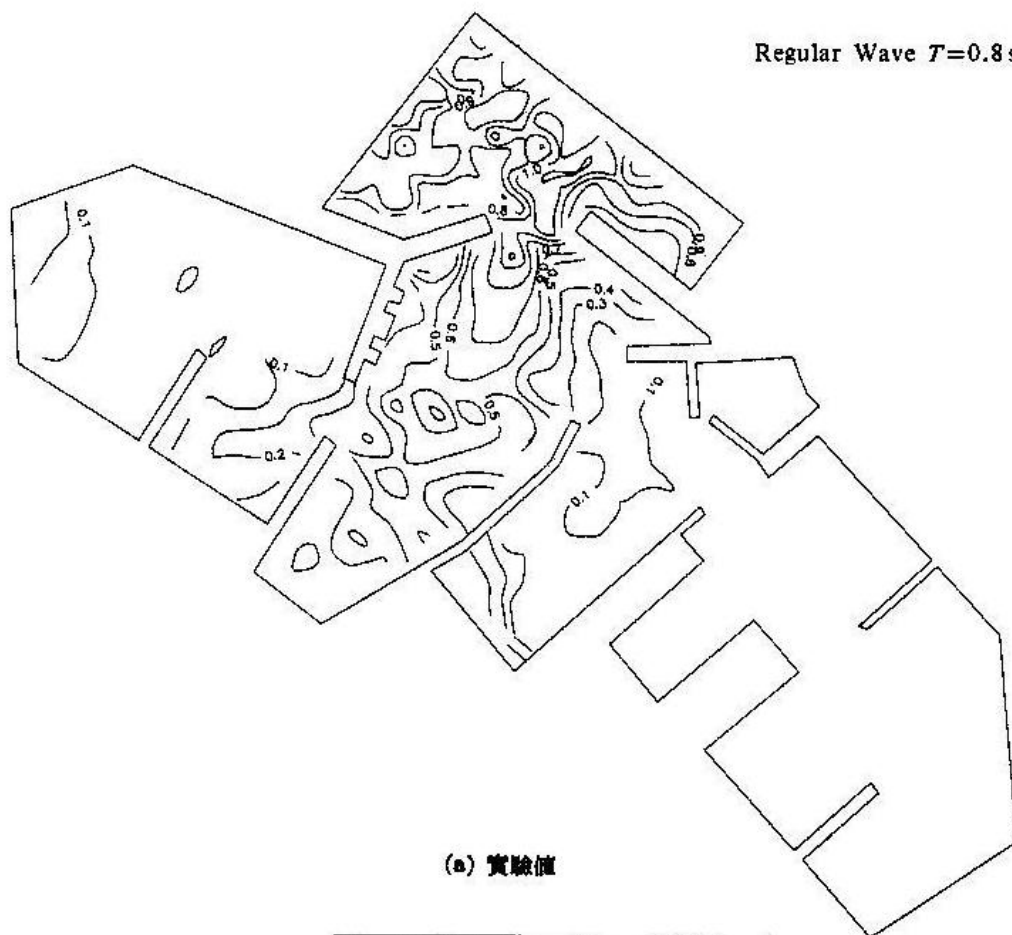
(b) 乙案



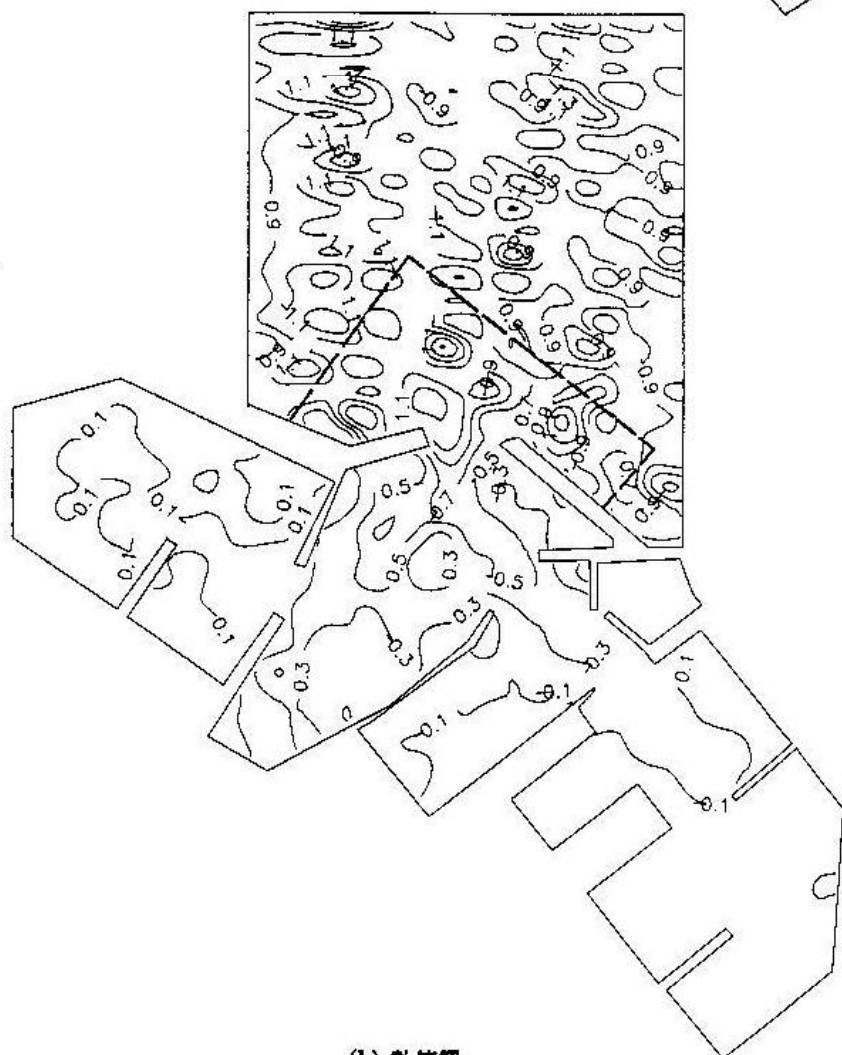
(d) 丁案

圖12 $\sigma^2 h/g=0.302$, $T=2.0$ 秒, $h=30$ cm, $\omega=90^\circ$, 各配置案港內外等波高分佈數值解與實驗值比較。

Regular Wave $T=0.8$ sec



(a) 實驗值



(b) 數值解

圖13 規則波 $T=0.8$ 秒作用於八斗子漁港等波高分佈圖。

Regular Wave $T=1.0$ sec

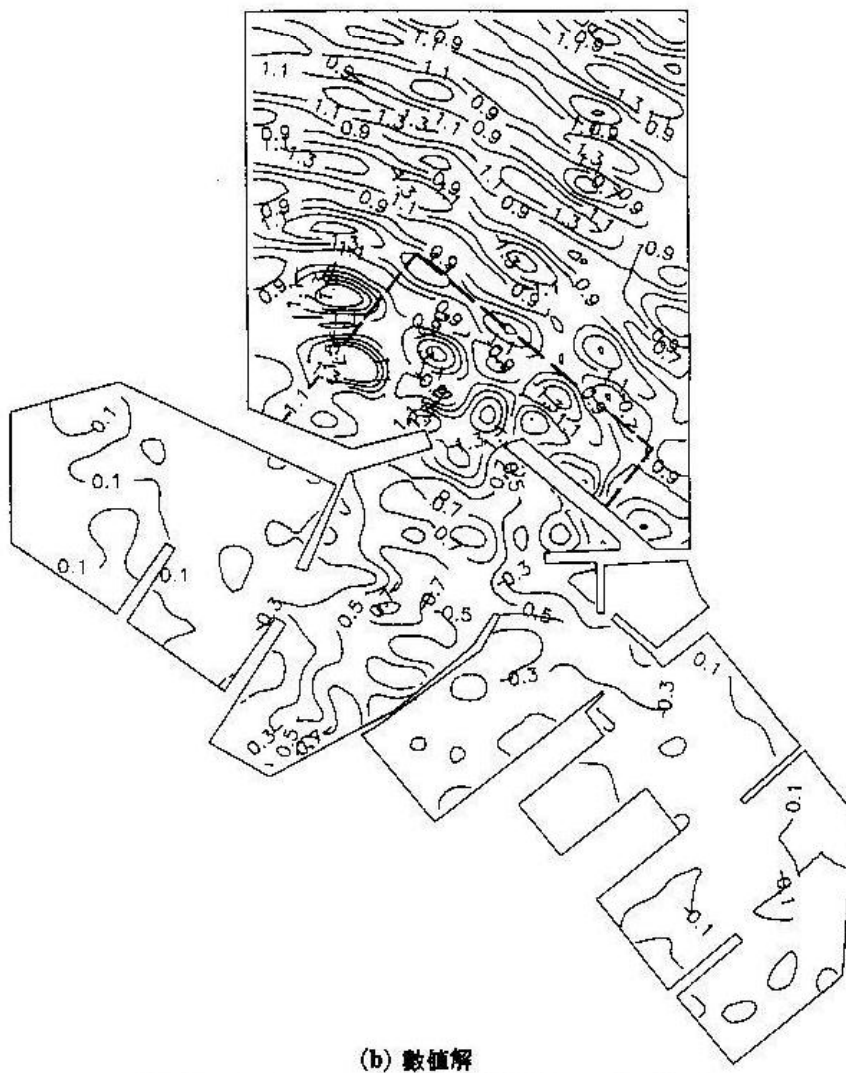
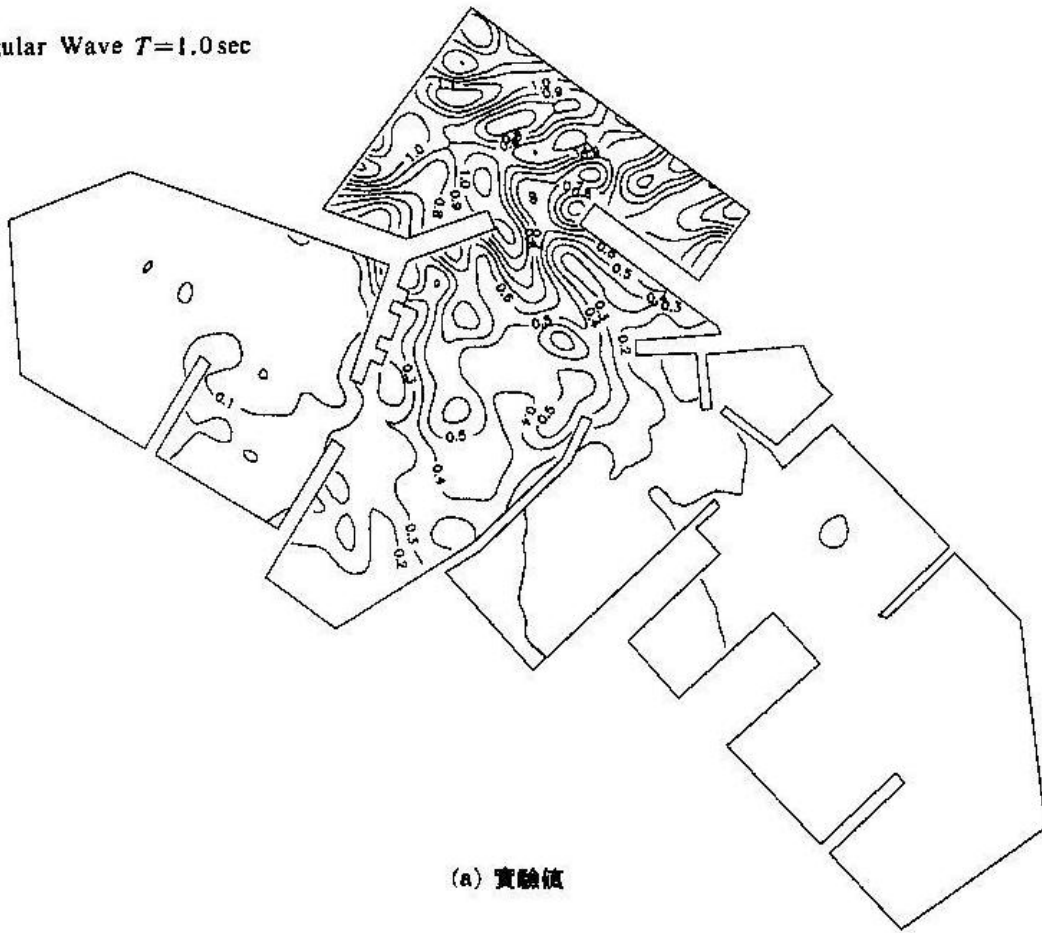
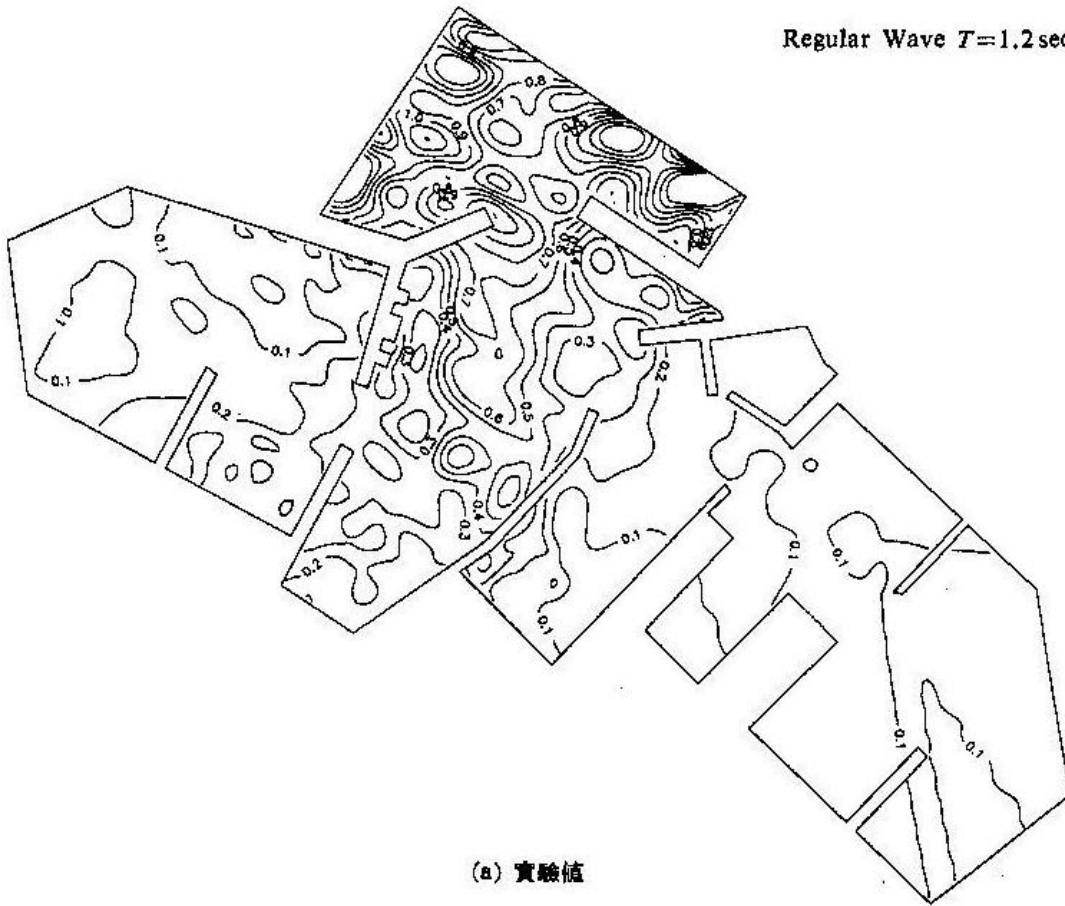
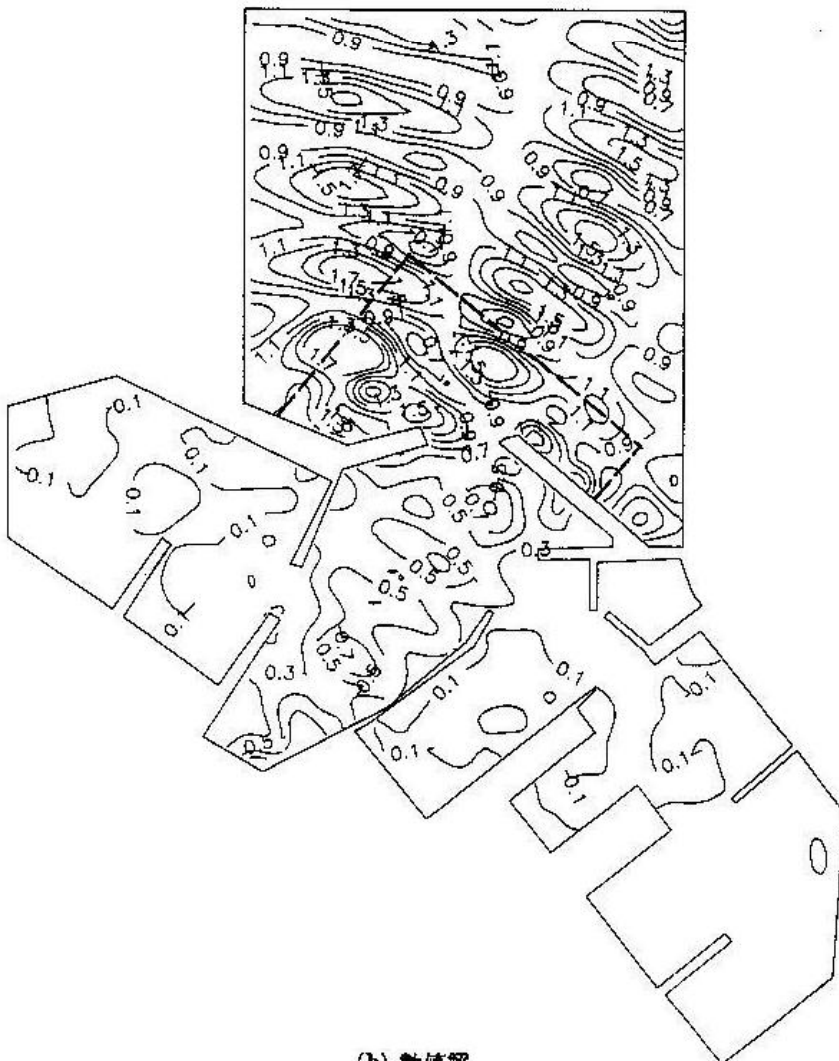


圖14 規則波 $T=1.0$ 秒作用於八斗子漁港等波高分佈圖。

Regular Wave $T=1.2\text{sec}$



(a) 實驗值



(b) 數值解

圖16 規則波 $T=1.2$ 秒作用於八斗子漁港等波高分佈圖。

七、結 論

由以上所述可得下列結論：

- (1) 本模式可適當解析任意形狀、不等水深及具任意反射率港池的水面振動情形，對解析實際港池水面振動問題相當實用。
- (2) 規劃港池配置時，利用本解析法可合理的預測港內波高分佈，及預測如何配置消波碼頭可得到最佳靜穩度，而無須經耗時費力的水工模型實驗。
- (3) 本文只考量規則波，對實際海面的波動問題應進一步以不規則波解析，是項研究將於下次機會提出報告。

參 考 文 獻

1. Miles, J. and W. Munk, "Harbors Paradox," *J. Waterways and Harbors Div., ASCE*, Vol. 87, No. WW3, pp. 111~130 (1961).
2. Ippen, A.T. and Y. Goda, "Wave Induced Oscillation in Harbors: The Solution for a Rectangular Harbor Connected to the Open Sea," MIT Hydrodynamics Laboratory Report

No. 59 (1963).

3. Berkhoff, J.C.W., "Computation of Combined Refraction and Diffraction," *Proc. 13th Int. Conf. Coastal Engng., Part I*, pp. 471~490 (1974).
4. Lee, J. J., "Wave Induced Oscillations in Harbors of Arbitrary Geometry," *J. Fluid Mech.*, Vol. 45, pp. 375~394 (1971).
5. 周宗仁、林昭圭，「應用邊界元素法解析任意地形及水深之港池水面波動問題」，第八屆海洋工程研討會論文集，新竹，第 111~129 頁 (1986)。
6. 周宗仁、林昭圭，「任意反射率防波堤或岸壁的港池水面振動數值分析」，第十一屆海洋工程研討會論文集，基隆，第 365~381 頁 (1989)。
7. 歐善惠、林西川、林火旺、蘇青和，「不等水深多孔岸壁港池之共振模式」，第十二屆海洋工程研討會論文集，臺中，第 74~94 頁 (1990)。

本文討論意見將在本刊後期討論欄中刊出，請將意見於六個月內寄交總編輯。

80年1月15日 收稿

82年4月8日 修改

82年4月15日 接受