

不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：港池水面振動、等能量波譜分割法、邊界元素法

摘 要

本研究利用等能量波譜分割法、邊界元素法及線形疊加原理解析不規則波對任意形狀、水深、反射率港池的水面波高分佈，藉以探討港池水面振動問題。數值方法首先將不規則入射波的週頻率波譜以等能量方式分割，計算出代表各成分波的週頻率，其次將各成分波視為微小振幅波，利用邊界元素法計算各成分波作用於港池的波高分佈，然後以線形疊加原理求出不規則波作用於港池的波高分佈。經以正方形港池及八斗子漁港現況佈置為計算例，並利用平面水槽進行檢証實驗，結果頗為一致。

OSCILLATIONS INDUCED BY IRREGULAR WAVES IN HARBOURS OF ARBITRARY SHAPE

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, spectral resolution method, boundary element method.

ABSTRACT

The oscillation of unidirectional irregular wave in harbours of arbitrary shape with dissipating quays is studied. The analysis is based on the spectral resolution method by Nagai, where each component wave is known exactly. Based on the assumption that the amplitudes of the incident component waves are small, the oscillation of these regular wave can be investigated using the boundary element method. The water surface oscillation for irregular waves can be obtained by linear superposition. Two specific harbours are investigated: a model of a square harbour and Patosu fishery harbour located in northern part of Taiwan. In both cases, the numerical solutions agree with the experimental ones.

一、前言

波浪由深海入侵港池時，由於防波堤、岸壁等結構物存在，使波浪發生反射現象，當某一特定波浪入侵某一特定港池時，其波能振幅會增大，有時甚至大於入射波高的數倍，使港內水面劇烈起伏，此種現象稱為港池共振。在

港灣工程規劃設計中，如何避免港池水面發生共振是一個很重要的因素，過去學者專家提出了許多避免港池共振的方法，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裡才能得到最佳靜穩度，或應配置多長的消波設施才能得

¹ 國立臺灣海洋大學河海工程學系教授

² 行政院農業委員會技士，前國立臺灣海洋大學河海工程學系博士班研究生

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 和 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 和 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。Lee [3] 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。Berkhoff [4] 利用緩坡方程式解析港內波浪折射及繞射共同效應問題。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。歐等人 [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，綜觀上述有關港池水面振動之數值模式，多無法同時考慮形狀、水深及反射率等因素，作者於 [8,9] 利用邊界元素法建立一數值模式以解析任意形狀、不等水深且防波堤或岸壁具任意反射率之港池在規則波作用下之港池水面振動，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該數值模式之正確性。

由於自然海面波動為複雜多變的不規則波運動，為進一步模擬不規則波引起的港池水面振動，以符合實際海面波動現象，本文延伸作者於 [9] 建立之規則波數值模式，經利用等能量波譜分割法、邊界元素法及線形疊加原理同時考慮任意形狀、不等水深且防波堤或岸壁具任意反射率等諸因素建立一不規則波引起的港池水面振動模式，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，期對港灣工程之規劃設計有所貢獻。

二、規則波理論分析

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、不可壓縮之理想流體的微小振幅波運動，當一定週頻率 $\sigma (= 2\pi/T, T$ 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 $\Phi(x, y, z; t)$

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

式中 g 表示重力加速度， $i = \sqrt{-1}$ 。

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

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

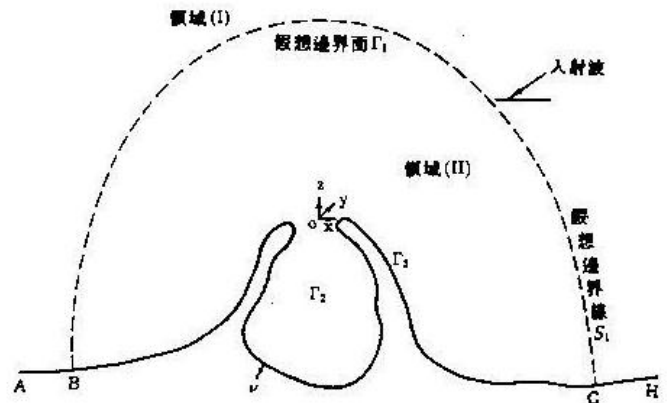


圖 1 定義圖

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，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。

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

式中 k 為 $\sigma^2 h/g = k h \tanh k h$ 的根，而 $f^o(x, y)$ 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、繞射波的勢函數。

當入射波為與 x 軸呈 ω 角度入射，振幅 ζ_0 的簡諧波，水面波形 $\zeta_i(x, y; t)$ 以下式表示時

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

入射波的勢函數 $f^o(x, y)$ 為

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

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面 S_1 、海岸線 \overline{AB} 、 \overline{GH} 及無限遠處的邊界面圍成的封閉領域。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^* 趨近於零；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， $H_0^{(1)}(kR)$ 為第一種 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， $c = 1/2$ 。為了進行數值解析，本研究對上式利用 N 個一定元素將邊界 Γ_1 在 $c = 1/2$ 的情況下加以離散化，並以下列矩陣形式表示。

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

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，其值請參考文獻[9]。

2.2 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。

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

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， $c = 1/2$ 。

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 $\{\phi\}$ 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，其值請參考文獻[9]。

2.3 各邊界面上的邊界條件

(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

$$\partial \phi / \partial \nu = 0 \quad (12)$$

(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：

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

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

(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，假定其反射率為 K ，即消能係數為 α ，依文獻[8-9]， Γ_3 上邊界條件表示如下：

$$\bar{\phi}(\xi, \eta, \zeta) = ik\alpha\phi(\xi, \eta, \zeta) \quad (15)$$

其中

$$\alpha = \sqrt{1 - K^2} \quad (16)$$

2.4 聯立方程式

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。

$$[\phi_i] = [K_{ij}][\bar{\phi}_i] \quad (i, j = 1, 4) \quad (17)$$

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

$$[\phi_i] = [K_{ij}][\bar{\phi}_i] \quad (i, j = 1, 3) \quad (18)$$

將各邊界條件代入上式，整理後得

$$\begin{bmatrix} [K_{11} - CRK^*Q] & \frac{\sigma^2}{g}K_{12} & ik\alpha K_{13} \\ K_{21} & \frac{\sigma^2}{g}K_{22} - I & ik\alpha K_{23} \\ K_{31} & \frac{\sigma^2}{g}K_{32} & ik\alpha K_{33} - I \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\phi}_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R[f^\circ - K^* \bar{f}^\circ] \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中, $C = k/(N_0 \sinh kh)$, $N_0 = 0.5(1 + 2kh/\sinh 2kh)$; $[R]$ 、 $[Q]$ 為係數矩陣, 其值請參考文獻[9]。

解上式矩陣可得 Γ_1 邊界面上的速度勢導函數值 $\bar{\phi}_1$, 及 Γ_2 、 Γ_3 邊界面上的速度勢值 ϕ_2 、 ϕ_3 。

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:

$$K_d = |\phi_2| \quad (20)$$

三、不規則波理論分析

本研究採用永井[10]推導的等能量波譜分割法分割入射波波譜, 將波譜成分波視為微小振幅波, 利用前節邊界元素法解析各成分波引起的港池水面振動, 然後以線形疊加原理求出不規則波引起的港池水面振動。

本文波譜採用 Bretschneider 波譜, 解析時將入射波譜無因次化, 可簡化計算過程。

3.1 等能量波譜分割法

3.1.1 本文有關波浪物理量

(1) 週頻率波譜使用下列只考慮正週頻率波譜

$$m_0 = \int_0^\infty S(f) df \quad (21)$$

式中 f 為頻率, m_0 為波譜全能量。

上述波譜與零上切法 (zero up cross) 求出之有義波高 $H_{1/3}$ 及平均波高 \bar{H} 間有下列關係

$$H_{1/3} = 1.60\bar{H} = 4.00\sqrt{m_0} = 4.00\sqrt{\int_0^\infty S(f) df} \quad (22)$$

波譜與零上切平均週期間有下列關係[11]

$$\bar{T} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty S(f) df}{\int_0^\infty f^2 S(f) df}} \quad (23)$$

而有義波週期 $T_{1/3}$ 與平均週期 \bar{T} 間有下列關係 [12]

$$\bar{T} = 0.9T_{1/3} \quad (24)$$

(2) Bretschneider 波譜

本文以 Bretschneider 波譜為入射波譜, 可表示如下

$$S(f) = 0.432 \frac{\bar{H}^2}{\bar{T}^4 f^5} \exp\left\{-\frac{0.675}{(\bar{T}f)^4}\right\} \quad (25)$$

Bretschneider 波譜滿足式 (22) 與有義波高 $H_{1/3}$ 間的關係, 但不滿足式 (23) 所示與平均週期 \bar{T} 間關係, 若將式 (23) 中平均週期以 \bar{T}_c 表示, 則 Bretschneider 波譜之 \bar{T} 與式 (23) 之 \bar{T}_c 間有下列關係

$$\bar{T}_c = \bar{T} / \sqrt[4]{0.675\pi} = 0.829\bar{T} \quad (26)$$

Bretschneider 波譜之尖峰週頻率 f_{op} 可表示為

$$f_{op} = \frac{1}{\bar{T}} \sqrt[4]{\frac{4}{5} \times 0.675} = 0.857/\bar{T} \quad (27)$$

(3) 波譜無因次化

將週頻率 f 乘以有義波週期 $T_{1/3}$, 可得無因次週頻率 f^* 如下

$$f^* = T_{1/3} f \quad (28)$$

利用下列關係

$$S^*(f^*) = S(f^*)/H_{1/3}^2 = S(f)/(H_{1/3}^2 T_{1/3}) \quad (29)$$

可得無因次 Bretschneider 波譜如下

$$\begin{aligned} S^*(f^*) &= a f^{*-5} \exp[-(b f^{*-4})] \\ a &= b/4 \\ b &= 0.675/0.9^4 = 1.0288 \end{aligned} \quad (30)$$

經計算無因次之尖峰週頻率 f_{op}^* 、波譜能量 m_0^* 、有義波高 $H_{1/3}^*$ 及有義週期 $T_{1/3}^*$ 分別如下

$$f_{op}^* = 0.952 \quad (31)$$

$$m_0^* = \int_0^\infty S^*(f^*) df^* = \frac{a}{4b} = \frac{1}{16} \quad (32)$$

$$H_{1/3}^* = 4.00\sqrt{m_0^*} = 1 \quad (33)$$

$$\begin{aligned} T_{1/3}^* &= \frac{1}{0.9} \sqrt{\frac{m_0^*}{\int_0^\infty f^{*2} S^*(f^*) df^*}} \\ &= \frac{1}{0.9\sqrt[4]{\pi b}} = 0.829 \end{aligned} \quad (34)$$

(4) 無因次波譜分割

利用 m 個分割數將無因次波譜分割, 使各成分波之無因次能量 ΔE 相等, 可決定分割週頻率 f_n^* , $n = 1, 2, \dots, m$, ($f_m^* = \infty$), 因

$$\Delta E = \frac{1}{16m} \quad (35)$$

可得

$$\int_0^{f_n^*} S^*(f^*)df^* = n\Delta E = n/(16m) \quad (36)$$

將式(30)代入上式得

$$f_{cn}^* = \sqrt[4]{b/\ln(m/n)} = 1.0071/\sqrt[4]{\ln(m/n)} \quad (37)$$

各成分波代表週頻率 f_{cn}^* ，可利用成分波的能量 ΔE 對 f_{cn}^* 的二次力矩與無因次波譜 $S^*(f^*)$ 對原點的二次力矩相等的條件求得，即

$$\int_{f_{n-1}^*}^{f_n^*} f^{*2} S^*(f^*)df^* = f_{cn}^{*2} \Delta E = f_{cn}^{*2}/(16m) \quad (38)$$

將式(30)代入上式得

$$f_{cn}^* = \sqrt{\frac{8am\sqrt{\pi}}{\sqrt{b}} \left[\operatorname{erf} \left(\sqrt{2 \ln \left(\frac{m}{n-1} \right)} \right) - \operatorname{erf} \left(\sqrt{2 \ln \left(\frac{m}{n} \right)} \right) \right]} \quad (39)$$

式中 $\operatorname{erf}(x)$ 為下式所示誤差函數

$$\operatorname{erf}(x) = \int_0^x \frac{\exp(-z^2/2)}{\sqrt{2\pi}} dz \quad (40)$$

3.2 不規則波作用時之波高係數 K_D 及週期 K_T

經由第二節求得各成分規則波作用時之港內各點的波高係數 K_d 後，不規則波作用時的波高係數 K_D 及週期 K_T 可分別以下式計算。

$$K_D = \frac{H_{1/3}}{(H_{1/3})_0} = 4.0 \sqrt{\int_0^\infty S_D^*(f^*)df^*} \quad (41)$$

$$K_T = \frac{T_{1/3}}{(T_{1/3})_0} = \sqrt[4]{\pi b} \sqrt{\frac{\int_0^\infty S_D^*(f^*)df^*}{\int_0^\infty f^{*2} S_D^*(f^*)df^*}} \quad (42)$$

其中

$$S_D^*(f^*) = K_d^2 S^*(f^*)$$

$S_D^*(f^*)$ 表示受不規則入射波 $S^*(f^*)$ 作用時，港內各點之波譜，註腳 o 表示外海等水深處的值。

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(15)的條件，必須事先知道消波式結構物的反射率，再由式(16)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

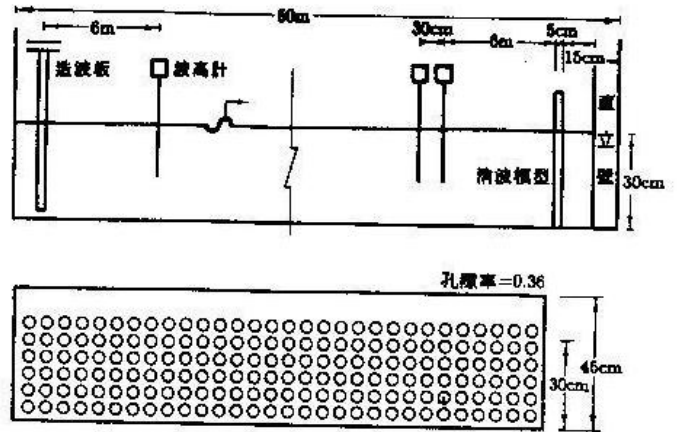


圖2 消波碼頭模型及斷面水槽配置

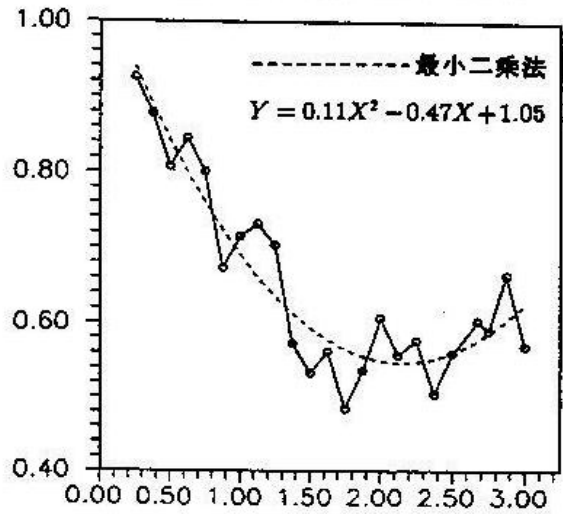


圖3 規則波作用時消波碼頭反射率

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 $\sigma^2 h/g$ ($h = 30 \text{ cm}$)，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

4.1 正方形港池

為證明本研究數值解之妥當性，首先以如圖4所示，邊長 $10h$ ，港口寬度 $5h$ (h 為外海領域等水深)

表1 消波碼頭配置組合

	S_1	S_2	S_3	備註
甲案	×	×	×	× 全反射碼頭 ○ 消波式碼頭
乙案	○	○	○	
丙案	×	○	×	
丁案	○	×	○	

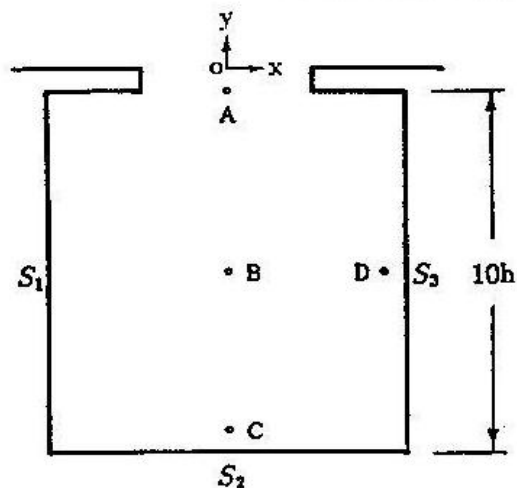


圖4 矩形港池數值計算例

的正方形港池為計算例，港內以表1所示組合，配置與断面實驗相同的消波構造，為方便起見，港內領域水深設為與外海同樣的等水深。入射波無因次有義角週頻率 $(\sigma_{1/3})_0^2 h/g = 1.206, 0.537, 0.302$ ($T_{1/3} = 1.0, 1.5, 2.0$ 秒) 垂直於港口入射，經計算表1所示甲案及乙案配置時港內波高分佈，但 $(\sigma_{1/3})_0 = 2\pi / (T_{1/3})_0$ 。進行數值計算時，其波譜分割數 m 係依據作者[13]證明 $m = 12$ 即可獲得合理之結果，經分別計算各成份波引起之港內各點波高係數 K_d ，然後利用式(41)、(42)計算不規則波作用時的波高分佈及週期分佈。

4.2 八斗子漁港

為進一步證明本解析法之實用性，本文以如圖5所示之八斗子漁港現況佈置為計算例加以說明。計算時首先將計算領域分割成1988個面元素(其中 $N_1 = 152, N_2 = 1329, N_3 = 176, N_4 = 331$)，由於該港防波堤均拋置消波塊，碼頭為萬代福(PERFORCELL)構造之消波碼頭，假設防波堤及碼頭反射率均為0.75，經分別以北北東向(入射角 $\omega = 66.5^\circ$)無因次有義角週頻率 $(\sigma_{1/3})_0^2 h/g = 1.169, 1.611, 2.518$ (有義波週期 $T_{1/3} = 1.2, 1.0, 0.8$ 秒)之不規則波入射，計算時將波譜以 $m = 12$ 個週頻率分割，分別計算各成份波引起之港內各點波高係數 K_d 後，利用式(41)、(42)計算不規則波作用時波高分佈及週期分佈。

五、平面實驗

5.1 正方形港池

本研究在長30m、寬24m、深1m的不規則造波平面水槽，配置正方形港池，水深為30cm，對甲案及乙案配置進行檢證實驗，不規則入射波有義週期 $T_{1/3} = 1.0, 1.5, 2.0$ 秒，經分別量測港內外各點波高及週期，繪製等波高及等週期分佈圖。

5.2 八斗子漁港

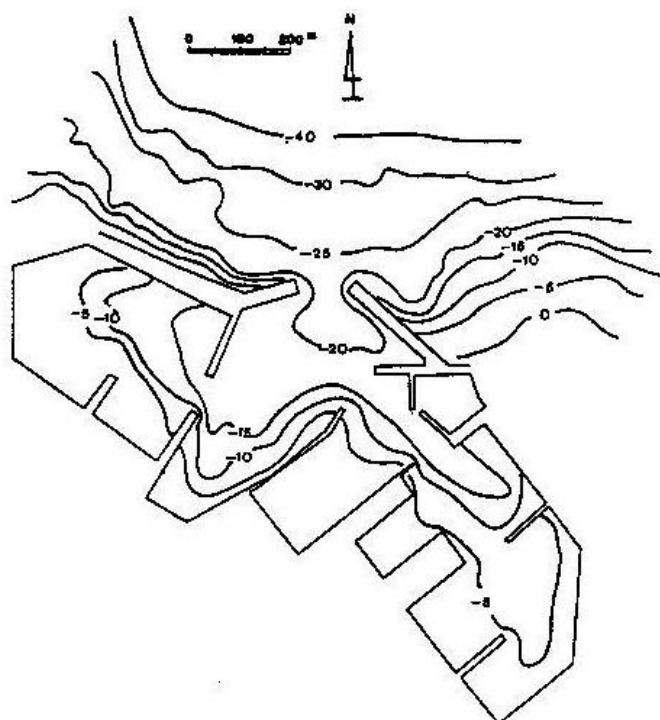


圖5 八斗子漁港現況佈置及水深圖

將八斗子漁港現況以1/100縮尺佈置於平面水槽，波浪條件與數值計算相同，即分別以不規則波無因次角週頻率 $(\sigma_{1/3})_0^2 h/g = 1.169, 1.611, 2.518$ (週期 $T_{1/3} = 1.2, 1.0, 0.8$ 秒)之波浪北北東向入射(入射角 $\omega = 66.5^\circ$)，經分別量測港內外各點波高及週期，繪製等波高及等週期分佈圖。

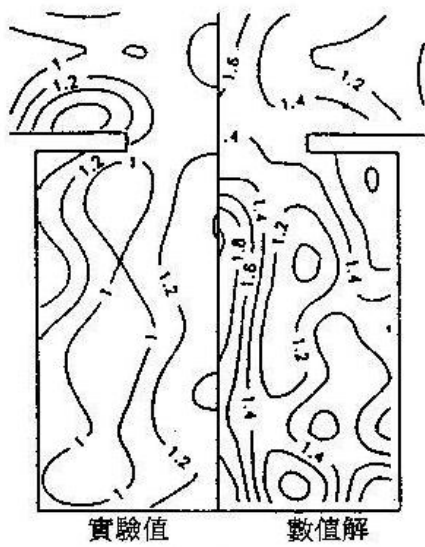
六、結果分析

6.1 正方形港池

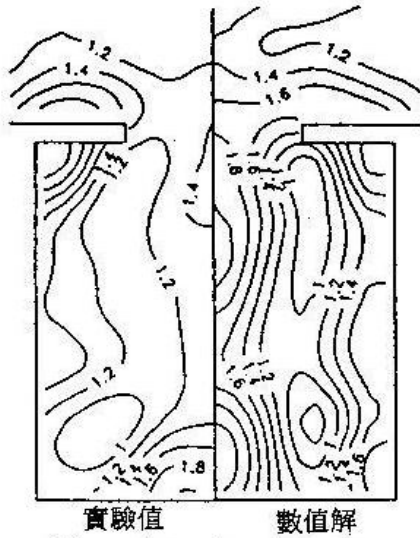
圖6及圖7為不規則波垂直於港口，有義波週期 $(T_{1/3}) = 1.0, 1.5, 2.0$ 秒作用時，甲及乙案配置港內等波高分佈數值解與實驗值比較，圖8及圖9為等週期分佈數值解與實驗值比較，左側為實驗值、右側為數值解。由圖中可發現不論波高分佈或週期分佈，其實驗值與數值解間絕對值雖略有不同，但趨勢相當一致，證明本解析法的可行性。

圖10~12為甲~丁案配置不規則波及規則波作用時港內外等波高分佈比較(數值解)，左側為規則波，右側為不規則波，其中規則波部份係引用文獻[9]中資料。經發現不論那種配置，不規則波作用時港內的波高分佈會變得比較平均化，即港內水面振動會比較穩和，此與不規則波係由許多不同週期波浪組成，其波浪性質有平均化之現象吻合。又港內消波碼頭的配置組合對規則波或不規則波作用都呈同樣趨勢，即碼頭全部配置消波式構造時(乙案)，港內水面靜穩度最佳，其次為丙案或丁案，至於全部為全反射碼頭時(甲案)，港內水面振動最為激烈。此與實際港池配置消波構造物前後之港池振動消滅現象相吻合，由以上分析可證明本解析法之妥適性。

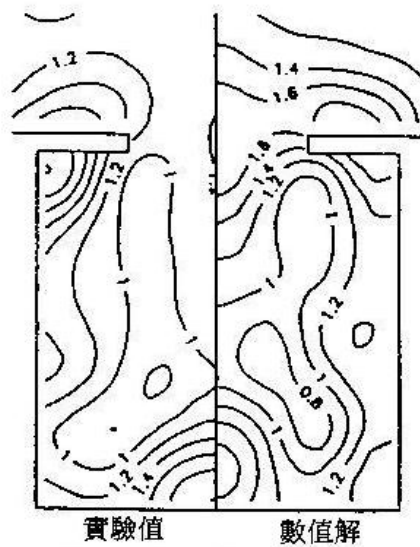
6.2 八斗子漁港



(a) $(T_{1/3})_0 = 1.0$ 秒

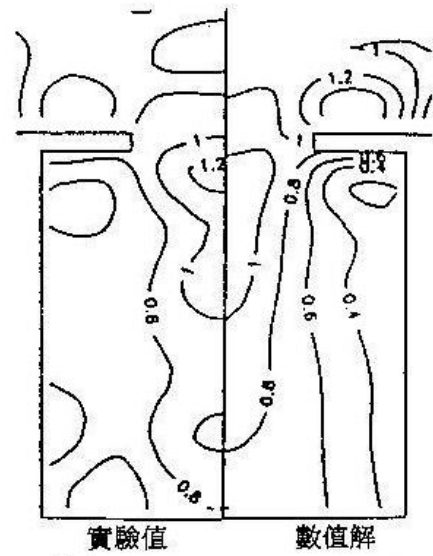


(b) $(T_{1/3})_0 = 1.5$ 秒

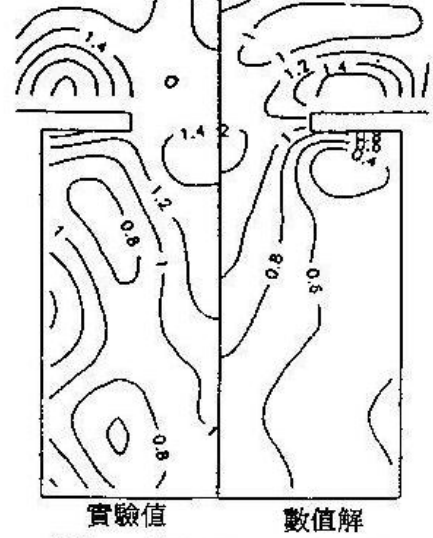


(c) $(T_{1/3})_0 = 2.0$ 秒

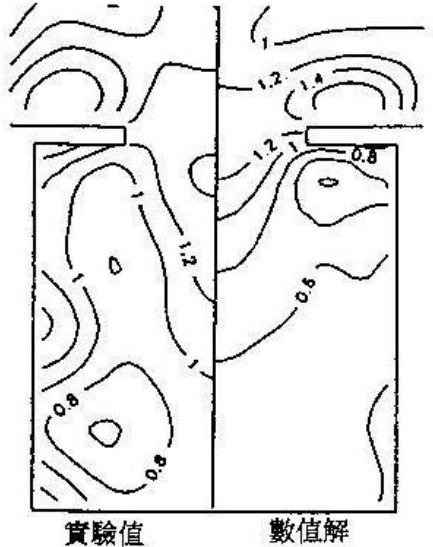
圖 6 甲案配置等波高係數 (K_D) 分佈數值解與實驗值比較
($h = 30\text{cm}$, $\omega = 90^\circ$)



(a) $(T_{1/3})_0 = 1.0$ 秒



(b) $(T_{1/3})_0 = 1.5$ 秒



(c) $(T_{1/3})_0 = 2.0$ 秒

圖 7 乙案配置等波高係數 (K_D) 分佈數值解與實驗值比較
($h = 30\text{cm}$, $\omega = 90^\circ$)

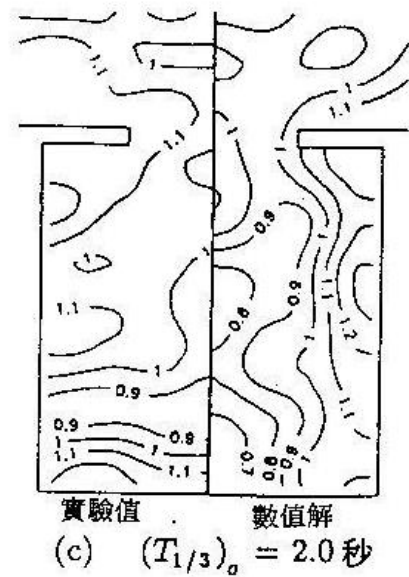
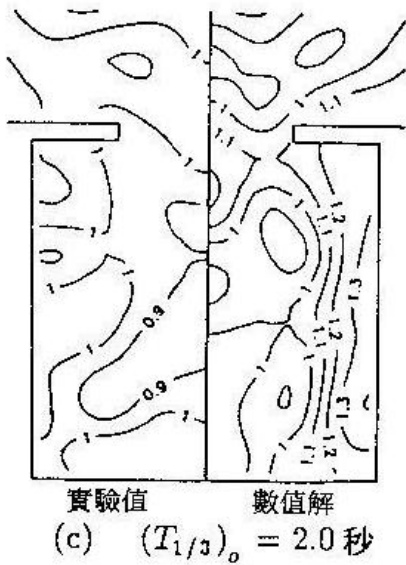
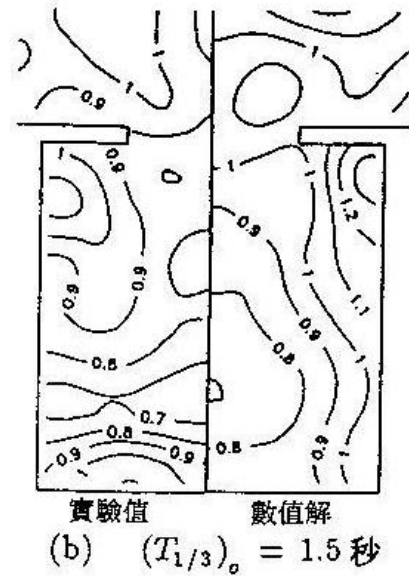
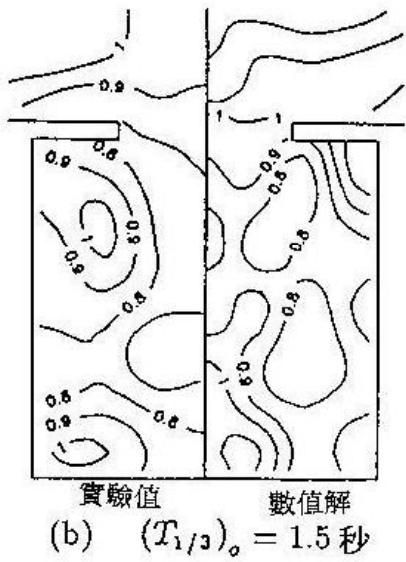
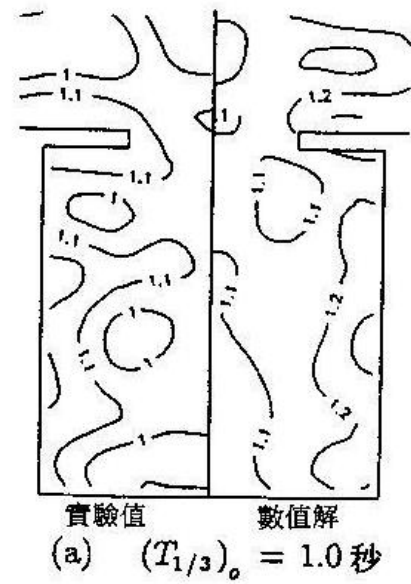
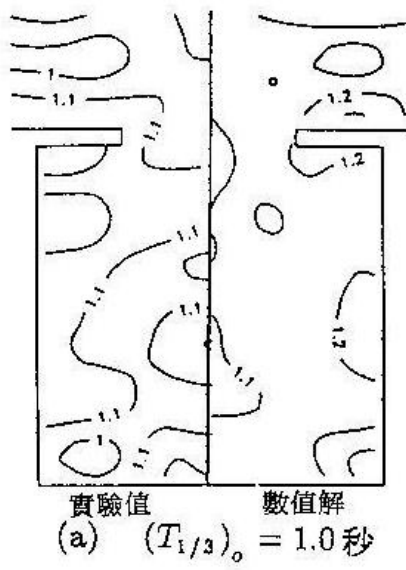


圖 8 甲案配置等週期係數 (K_T) 分佈數值解與實驗值比較 ($h = 30cm, \omega = 90^\circ$)

圖 9 乙案配置等週期係數 (K_T) 分佈數值解與實驗值比較 ($h = 30cm, \omega = 90^\circ$)

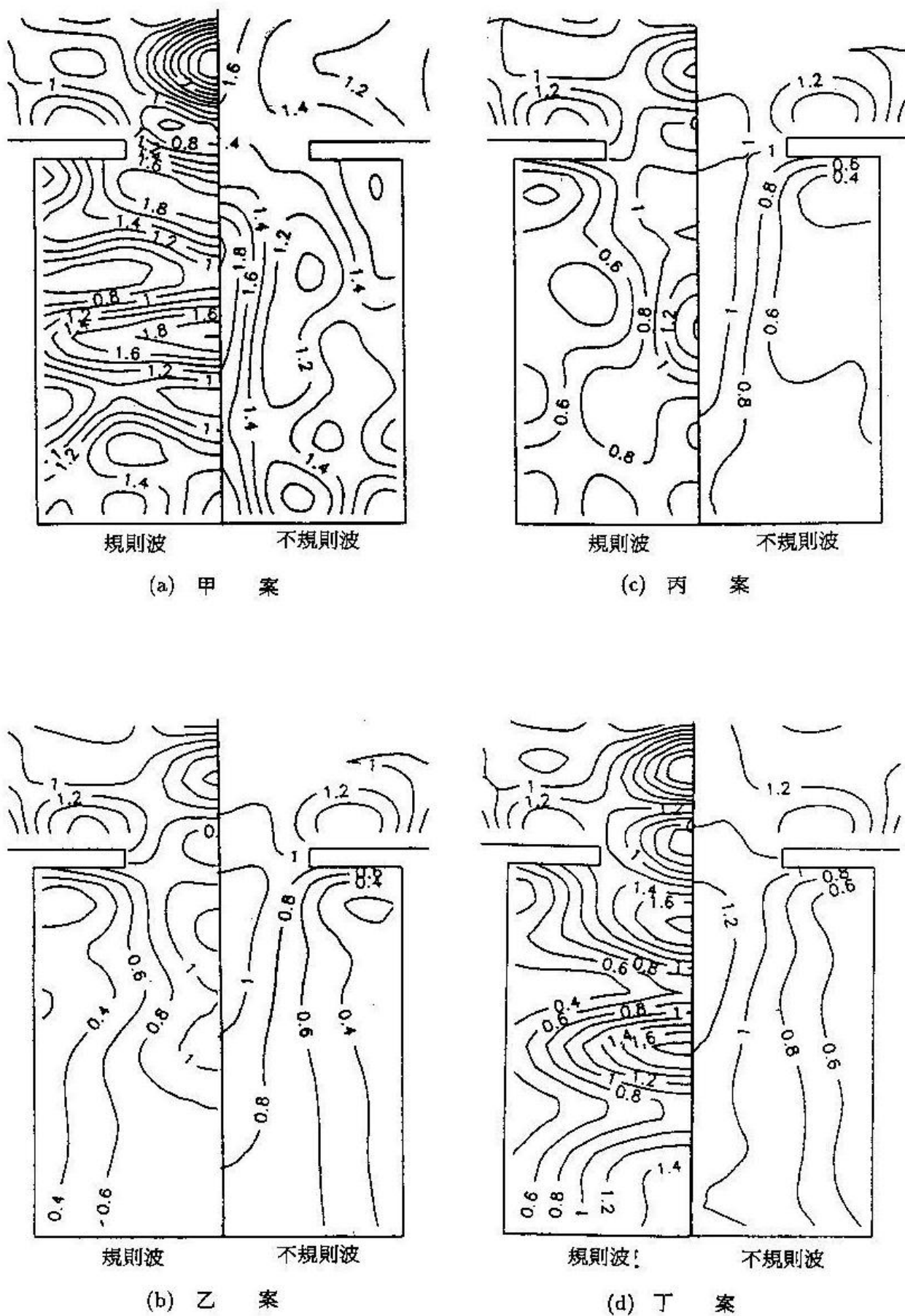


圖 10 不規則波 $T_{1/3} = 1.0$ 秒及規則波 $T = 1.0$ 秒作用於正方形港池等波高係數分佈數值解

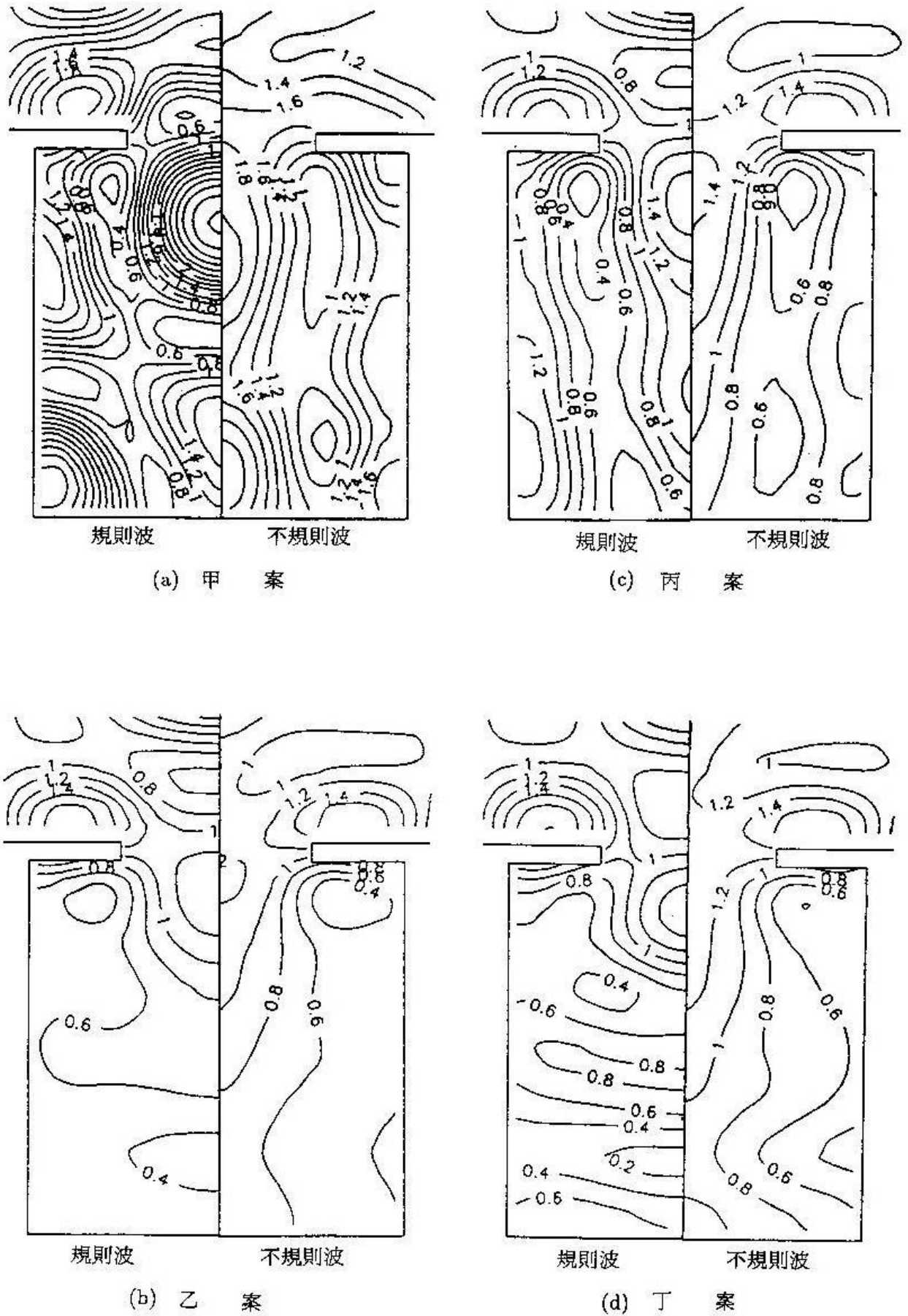


圖 11 不規則波 $T_{1/3} = 1.5$ 秒及規則波 $T = 1.5$ 秒作用於正方形港池等波高係數分佈數值解

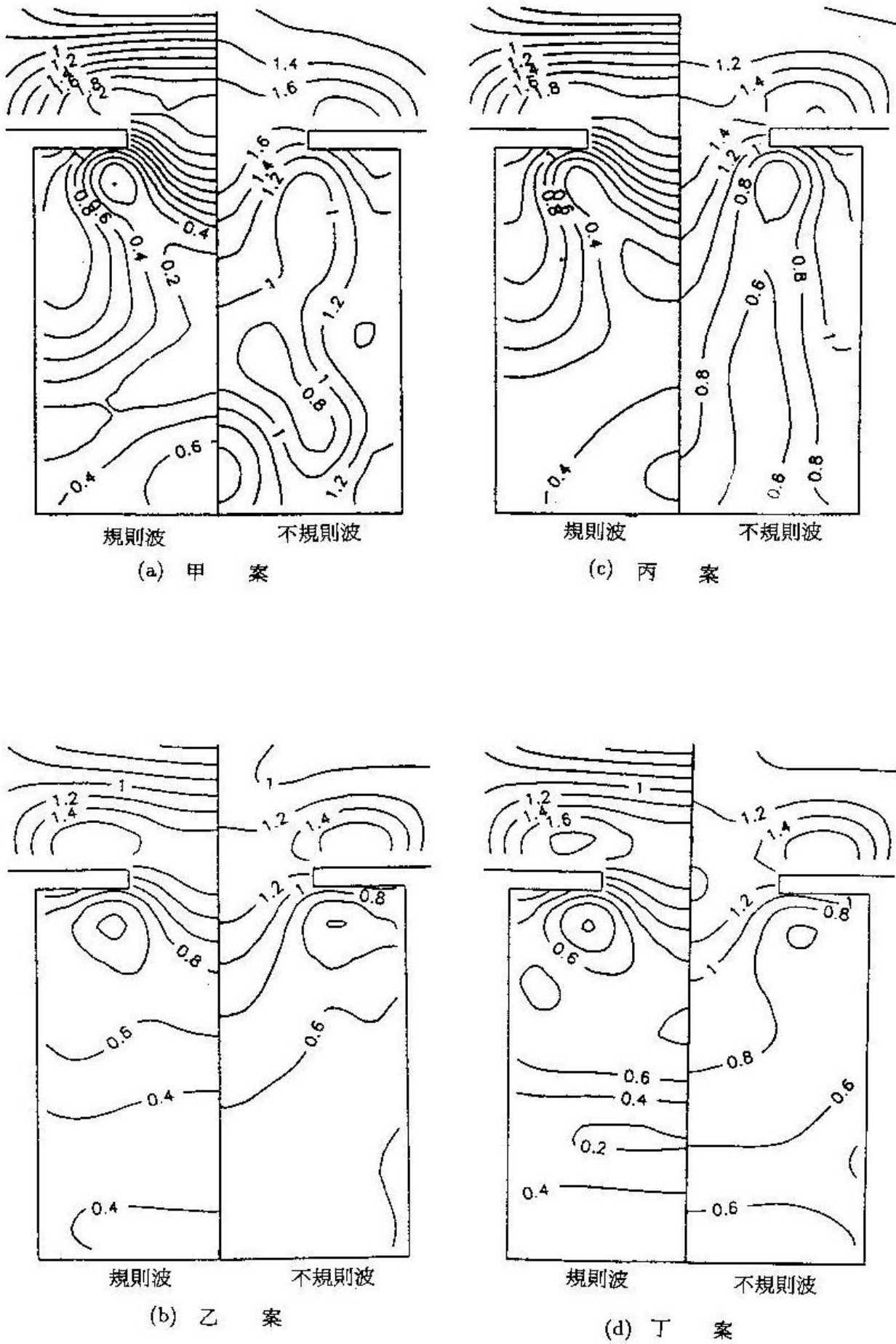


圖 12 不規則波 $T_{1/3} = 2.0$ 秒及規則波 $T = 2.0$ 秒作用於正方形港池等波高係數分佈數值解

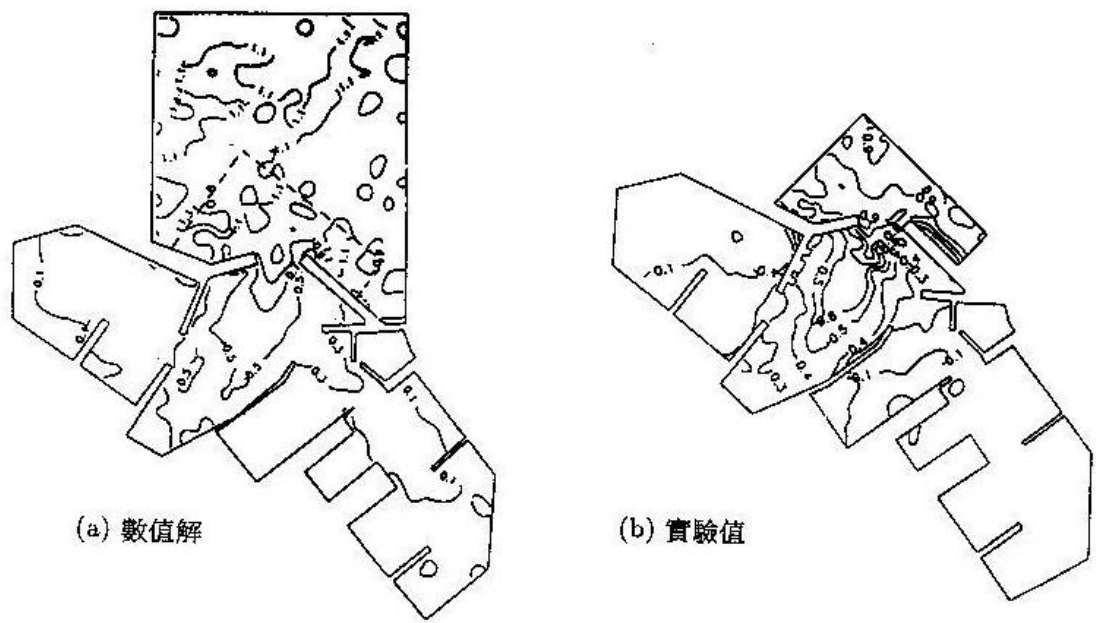


圖 13 不規則波 $T_{1/3} = 0.8$ 秒作用於八斗子漁港等波高係數 (K_D) 分佈圖

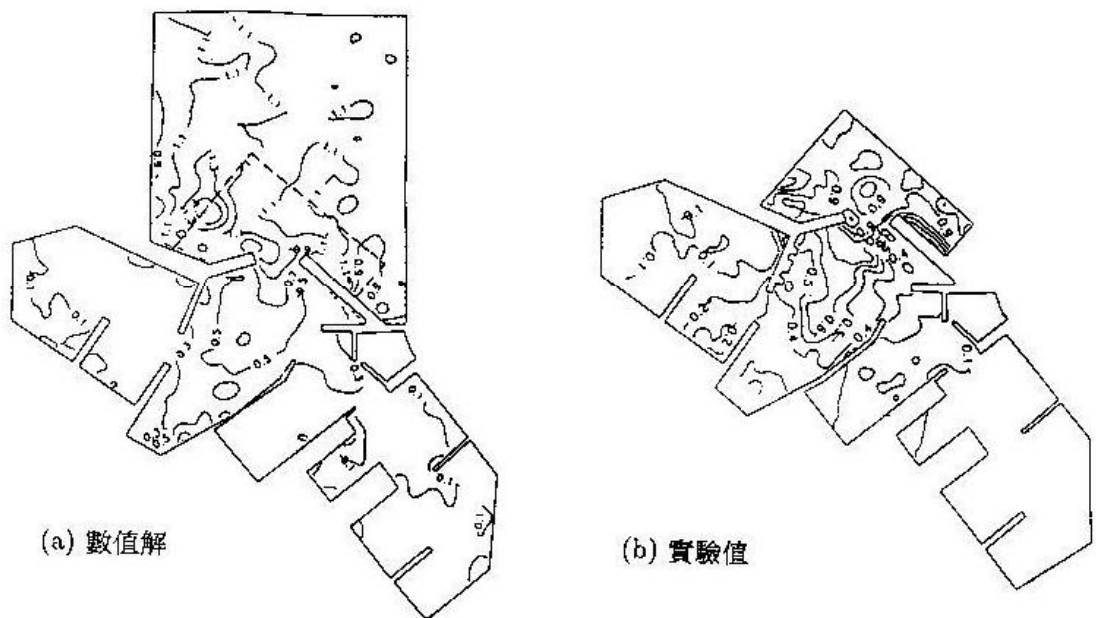


圖 14 不規則波 $T_{1/3} = 1.0$ 秒作用於八斗子漁港等波高係數 (K_D) 分佈圖

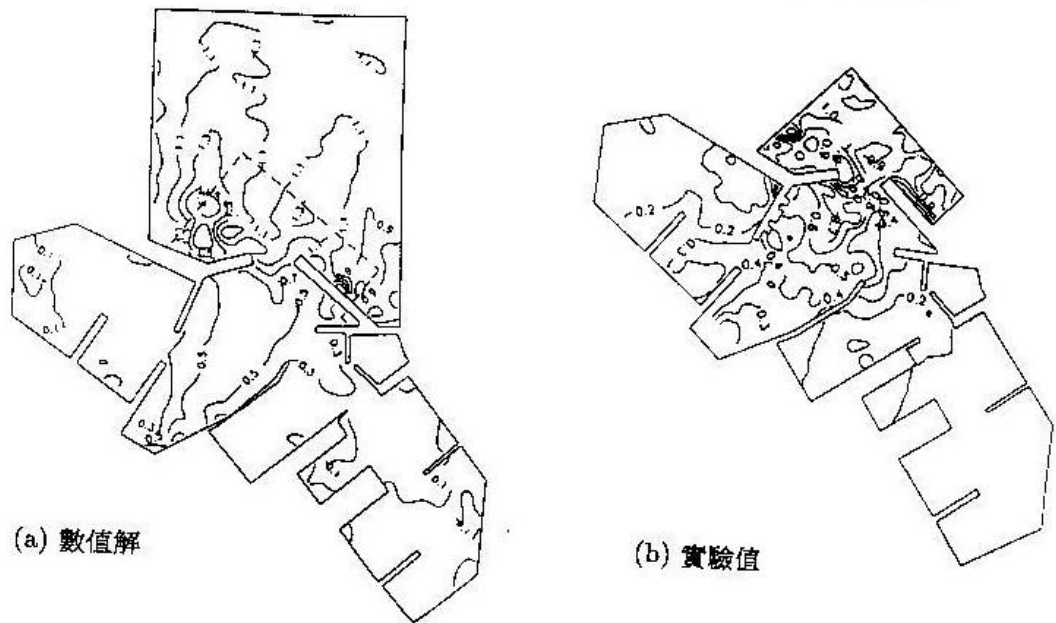


圖 15 不規則波 $T_{1/3} = 1.2$ 秒作用於八斗子漁港等波高係數 (K_D) 分佈圖

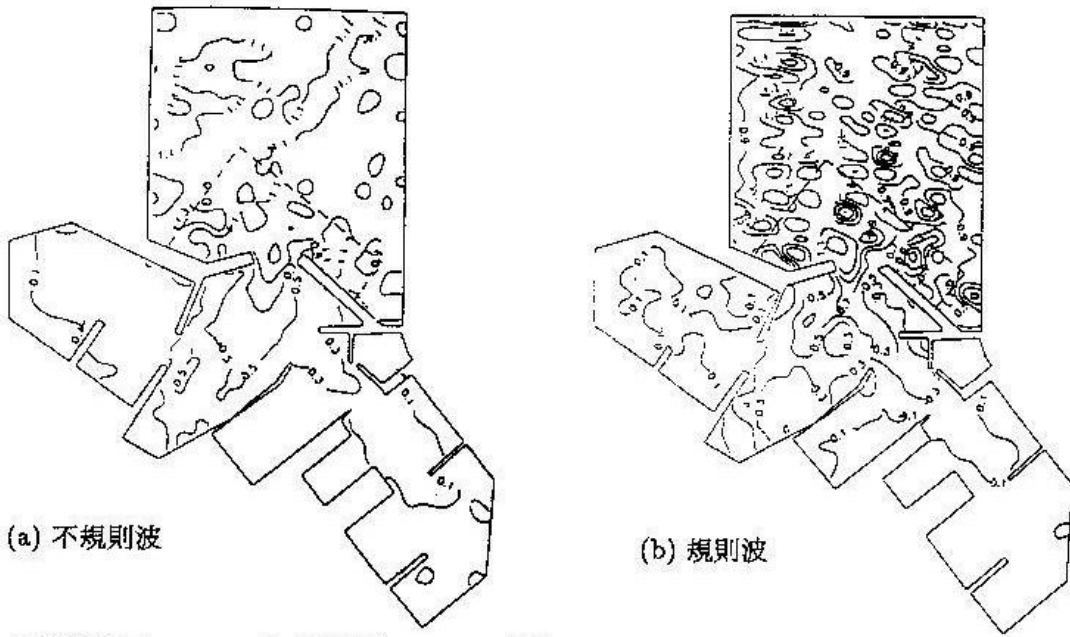


圖 16 不規則波 $T_{1/3} = 0.8$ 秒及規則波 $T = 0.8$ 秒作用於八斗子漁港等波高係數分佈圖 (數值解)

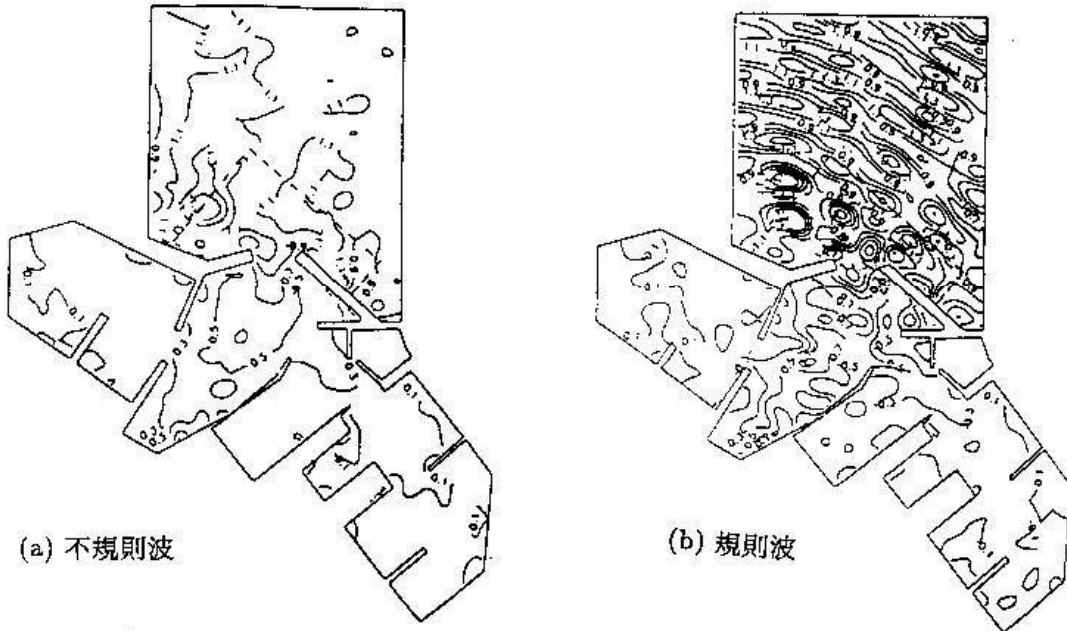


圖 17 不規則波 $T_{1/3} = 1.0$ 秒及規則波 $T = 1.0$ 秒作用於八斗子漁港等波高係數分佈圖 (數值解)

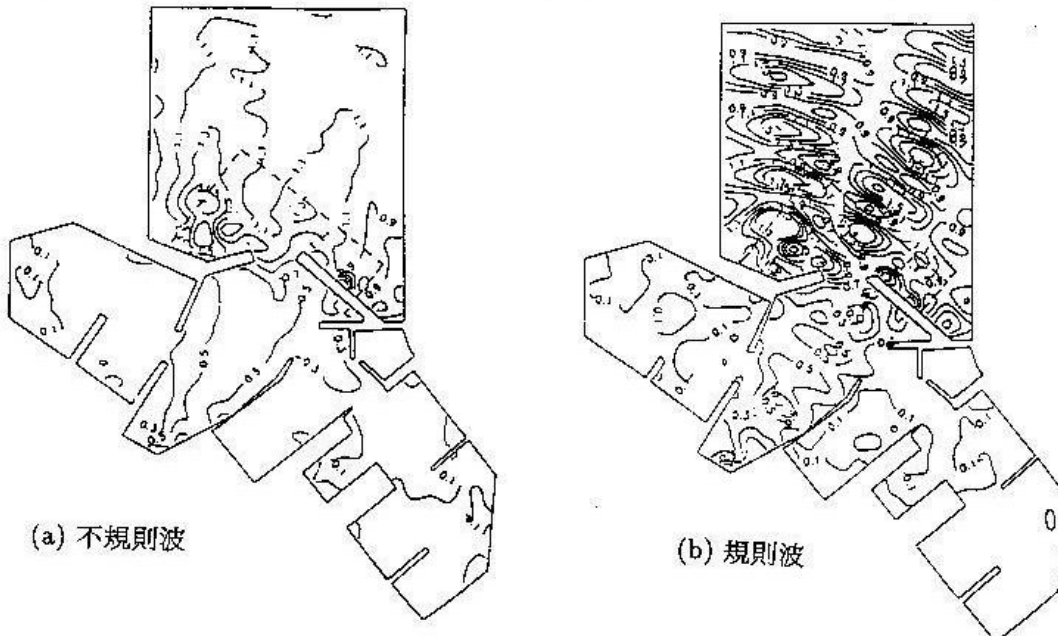


圖 18 不規則波 $T_{1/3} = 1.2$ 秒及規則波 $T = 1.2$ 秒作用於八斗子漁港等波高係數分佈圖 (數值解)

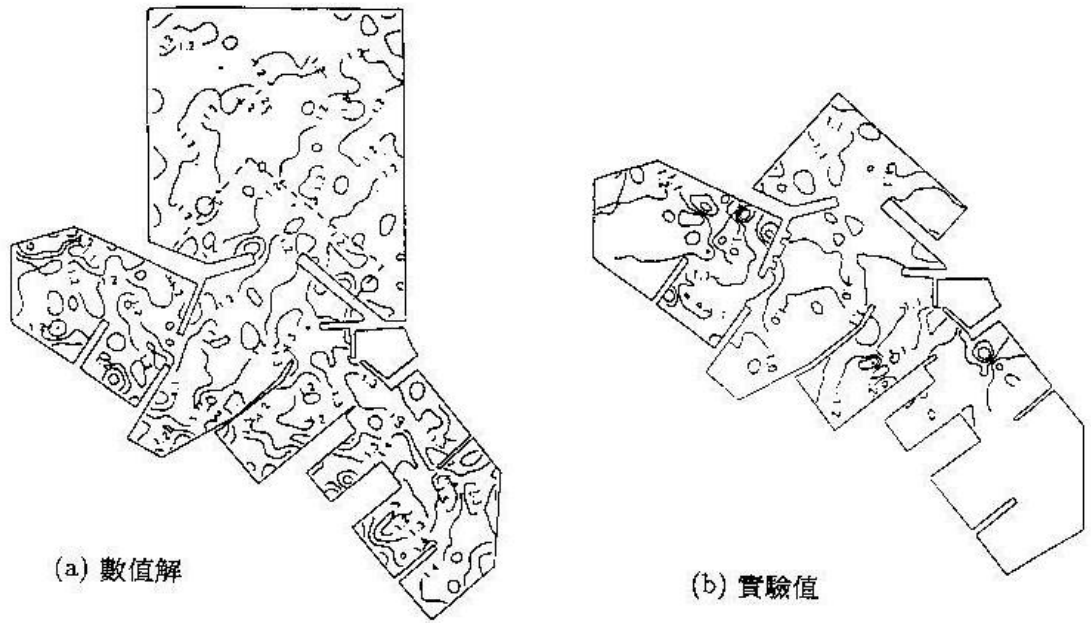


圖 19 不規則波 $T_{1/3} = 0.8$ 秒作用於八斗子漁港等週期係數 (K_T) 分佈圖

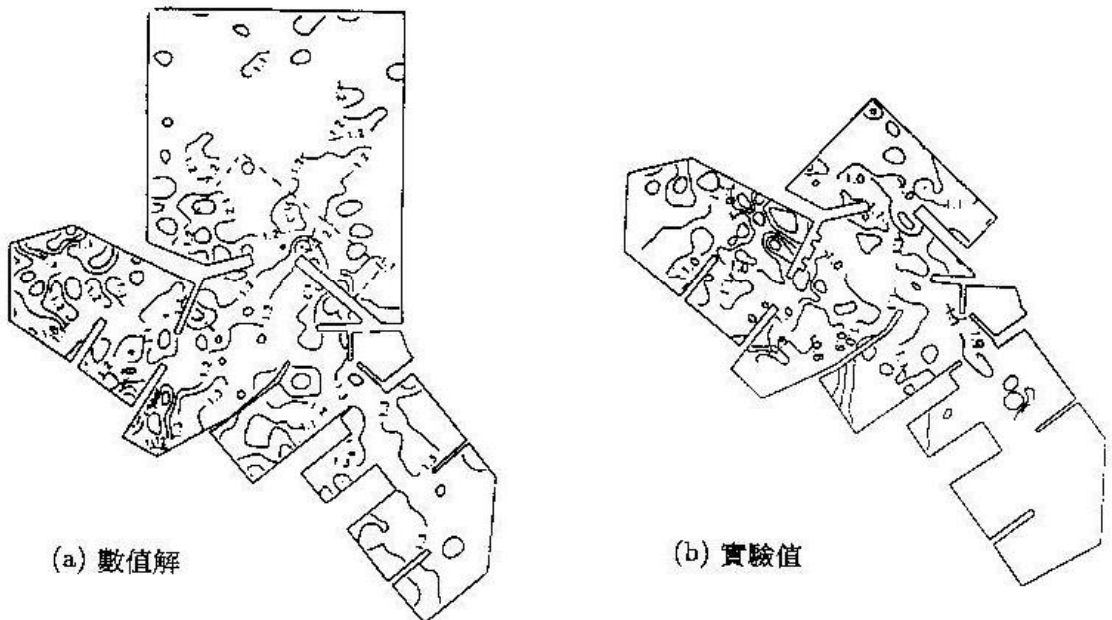


圖 20 不規則波 $T_{1/3} = 1.0$ 秒作用於八斗子漁港等週期係數 (K_T) 分佈圖

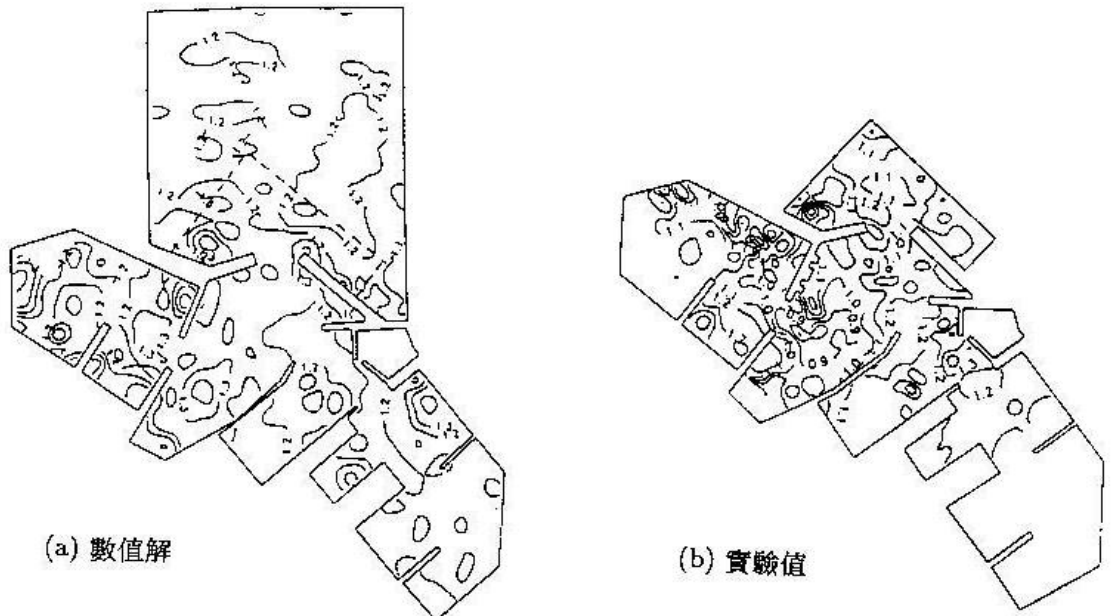


圖 21 不規則波 $T_{1/3} = 1.2$ 秒作用於八斗子漁港等週期係數 (K_T) 分佈圖

對於實際港池的水面振動分析，圖 13 ~ 15 為不規則波作用時的波高分佈數值解與實驗值比較，由圖中可發現數值解與實驗值間絕對值雖略有不同，但趨勢相當一致。

又由圖 16~18 比較不規則波及規則波作用之差異（規則波部分係引用文獻[9]中資料），可知不規則波作用時港內波高分佈較規則波者為穩和，此與上述正方形港池之結果相同，即較接近實際港內水面振動現象。

圖 19~21 為不規則波等週期分佈數值解與實驗值比較，除因內港池由於波動太小無法量測波高值，以致無法獲得 $T_{1/3}$ 之實驗值外，港口外側與外港池之等週期分佈數值解與實驗值趨勢相似。

七、結 論

利用等能量波譜分割法、邊界元素法及線形疊加原理可適當解析不規則波作用於任意形狀、水深、反射率港池的水面振動問題。經由此模式可合理預測港內波高分佈及預測如何配置消波碼頭以獲得最佳靜穩度，而無須經耗時費力的水工模型實驗。

本文僅考量單方向不規則波，對於實際海面各種不同方向傳遞的不規則波應以方向波譜分析，有待後續研究。

謝 誌

本研究承國家科學委員會補助（計畫編號：NSC 81-0209-E-019-3），國立臺灣海洋大學河海工程研究所研究生朱志一先生協助實驗，併此申謝。

參考文獻

1. Miles, J. and W. Munk, "Harbors Paradox," *Journal of Waterways and Harbors Division, 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. Lee, J. J., "Wave Induced Oscillations in Harbors of Arbitrary Geometry," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 45, pp. 375-394 (1971).

4. Berkhoff, J.C.W., "Computation of Combined Refraction and Diffraction," *Proc. 13th International Conference of Coastal Engineering, Part I*, pp. 471-490 (1972).
5. 周宗仁、林焯圭，「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、林焯圭，「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，台中，第 74-94 頁 (1990)。
8. Chou, C. R. and W. Y. Han, "Wave-Induced Oscillations in Harbours with Dissipating Quays" *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 36, No. 1, pp. 1-23 (1993).
9. 周宗仁、韓文育，「規則波對任意形狀水深及反射率港池的水面振動」，中國土木水利工程學刊，第五卷，第四期，第 285-298 頁 (1993)。
10. 永井康平，「不規則な海の波の屈折および回折の計算」，日本運輸省港灣技術研究所報告，第 11 卷，第 2 號，日本 (1972)。
11. Rice, S. O., "Mathematical Analysis of Random Noise," *Journal of Bell System Technology*, Vol. 23, pp. 282-323 (1944).
12. Bretschneider, C. L., "Significant Waves and Wave Spectrum," *Ocean Industry* (1968).
13. 周宗仁、韓文育，「固定海岸結構物消波之研究」，中國土木水利工程學刊，第六卷，第二期，第 169-182 頁 (1993)。

82 年 12 月 7 日	收稿
83 年 3 月 22 日	修改
83 年 3 月 24 日	接受