

## 消波式碼頭對港內水面振動之影響

周宗仁\* 韓文育\*\* 朱忠一\*\*\*

### 摘 要

本文目的係探討配置消波式碼頭對港內水面振動之影響。首先利用邊界元素法數值解析任意水深、海底地形及形狀港池的水面波動，本文特徵是在消波性防波堤或碼頭的邊界條件中引用一與消波結構反射率有關的消能係數，表示消波性結構物的消波特性。

為證明引用消能係數的妥當性，本文首先在斷面水槽配置一消波性碼頭，了解其消波特性，即測定不同週期波浪作用時的反射率。爾後將實測所得反射率代入數值解析，求得相對的消能係數，再進行水面振動分析，求出港內波高分布數值解。

其次在平面水槽內配置一個正方形港池，在各種不同位置配置與斷面水槽實驗相同型式的消波碼頭，即其反射率一樣，對港內若干特定點測定不同入射波週期作用時的波高，與數值解比較發現兩者相當一致，證明本解析法的正確性，又對特定波浪週期量測港內波高分布，與數值解比較亦得到良好的結果。

### 一、前 言

在港灣工程規劃設計中，如何保持港池水面靜穩是一件很重要的事，在港內保留部份水域作為自然消波區為最佳方法，然由於實際需要大部分港灣經過擴建後已無多餘水域可供自然消波用，尤其是漁港更為嚴重。為滿足實際需要並保持水面靜穩，採用消波式直立碼頭為一可行方法，在國內及日本已有相當多的實例，但如何預知應將消波碼頭配置在那裏才能得到最佳靜穩效果，或應配置多長的消波碼頭才能得到要求的靜穩度，目前大多以水工模型實驗為之。作者之一(1985)<sup>(1)</sup>利用邊界元素法解析任意形狀、不等水深但為全反射率防波堤或岸壁之港池，並於(1989)<sup>(2)</sup>對等水深的任意形狀港池，其防波堤或岸壁可為具有任意反射率的條件下，進行數值分析。又於(1991)<sup>(3)·(4)</sup>對任意形狀，港內外水深不等，且防波堤或碼頭為任意反射率的條件下進行數值分析，並對碼頭為不透水全反射結構的條件進行水工驗證實驗，發現數值解與實驗值非常一致。本文主要目的首先在於證明本解析所提出的消能係數邊界條件的妥當性，並了解配置消波碼頭對港內水面靜穩的影響。

### 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 $\Gamma$ ；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

\* 國立臺灣海洋大學河海工程學系教授  
\*\* 行政院農業委員會技士  
\*\*\* 國立臺灣海洋大學河海工程研究所研究生

設兩領域的流體運動均為非壓縮性非粘性非回轉性理想流體的微小振幅波運動，當一定週頻率  $\sigma$  ( $= 2\pi/T$ ,  $T$  為波的週期)、振幅為  $\zeta_0$  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  $\Phi(x, y, z; t)$ 。

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

式中  $g$  表示重力加速度， $\phi(x, y, z)$  應滿足下列 Laplace 方程式。

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

### 2. 1 等水深外海領域勢函數

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勢函數  $\phi_0(x, y, z)$  分離成下式。

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

式中  $k$  為  $\sigma^2 h/g = kh \tanh kh$  的根，而  $f^0$  及  $f^*$  分別為外海領域的入射波及包含因港口、防波堤存在引起反射、繞射波的勢函數。當入射波為與  $x$  軸呈  $\omega$  角度入射、振幅  $\zeta_0$  的簡諧波，其水面波形  $\zeta_0(x, y; t)$  以下式表示時

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

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 (3) 式代入 (2) 式得  $f^*(x, y)$  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  $AB$ 、 $GH$  及無限遠處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  $AB$ 、 $GH$  可假設已不會對港口有影響而視勢函數值  $f^*$  為零，對無限遠處的邊界面，由於必須滿足 Sommerfeld 的輻射條件，因此勢函數值  $f^*$  亦可視為零。因此利用 Green 函數<sup>(5)</sup>，外海領域內任意一點的勢函數  $f^*(x, y)$  可以下列積分方程式表示。

$$c f^*(x, y) = \int_{S_1} \left[ f^*(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial \nu} \left( -\frac{i}{4} H_0^{(1)}(KR) \right) - \left( -\frac{i}{4} H_0^{(1)}(KR) \right) \frac{\partial}{\partial \nu} f^*(\xi, \eta) \right] ds \quad (7)$$

式中  $f^*(\xi, \eta)$  為幾何學邊界上的勢函數值，而  $\partial f^*(\xi, \eta) / \partial \nu (= \bar{f}^*(\xi, \eta))$  表示對法線方向的一次導函數值， $H_0^{(1)}(KR)$  為第 1 種 0 次 Hankel 函數， $\nu$  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,  $c = 1$ ,  $(x, y) \rightarrow (\xi, \eta)$  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  $S_1$  在  $c = 1/2$  的情況時, 加以離散化而以下列的矩陣形式表示。

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

$\{F^*\}$  及  $\{\bar{F}^*\}$  分別為邊界上的勢函數值及其導函數值, 而  $[K^*]$  為與邊界的幾何學形狀有關的係數矩陣, 其值請參考文獻(5)。

## 2. 2 任意水深領域勢函數

領域(II)係由外海假想邊界面  $\Gamma_1$ 、自由水面  $\Gamma_2$ 、任意反射率防波堤或碼頭邊界面  $\Gamma_3$  及不透水任意地形固定海底面  $\Gamma_4$  包圍的封閉三次度領域。利用 Green 函數<sup>(5)</sup>, 領域(II)內任意一點的勢函數  $\phi(x, y, z)$  可由上述封閉邊界面上的勢函數值  $\bar{\phi}(\xi, \eta, \zeta)$  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。

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

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,  $c = 1$ ,  $(x, y, z) \rightarrow (\xi, \eta, \zeta)$  時, 由於特別解的特異性使  $c = 1/2$ 。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  $c = 1/2$  的情況時, 加以離散化, 並以下列矩陣形式表示。

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

$\{\phi\}$  及  $\{\bar{\phi}\}$  分別為邊界上的勢函數值及其導函數值, 而  $[K]$  為與邊界的幾何學形狀有關的係數矩陣, 其值請參考文獻(5)。

## 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  $\Gamma_2$  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  $\Gamma_4$  為不透水, 其法線方向流速為 0, 即

$$\bar{\phi} = 0 \quad (12)$$

### ③ 外海邊界面 $\Gamma_1$ 上的邊界條件

在等水深領域與任意水深領域的相接邊界面  $\Gamma_1$  上, 由於兩領域的流體運動所引起的質量及能量

流束必須連續的條件，可得下列的條件

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

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

將(3)式代入(13)式後，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  $\Gamma_1$  對水深方向分割成  $n$  層，水平方向分割成  $m$  個面元素，即將  $\Gamma_1$  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之。

$$\bar{f}^*(\xi_i, \eta_i) = \frac{k}{N_0 \sinh kh} \sum_{j=1}^n \bar{\phi}(\xi_{i,j}, \eta_{i,j}) \cosh k(z_i+h) \Delta z_j - f_0(\xi_i, \eta_i) \quad (15)$$

( $i=1, 2, \dots, m$ )

$N_0 = 0.5(1+2kh/\sinh 2kh)$ 。將(3)式代入(14)式得

$$\phi(\xi_{i,j}, \eta_{i,j}, \xi_i) = [f_0(\xi_i, \eta_i) + f^*(\xi_i, \eta_i)] \frac{\cosh k(\xi_i+h)}{\cosh kh} \quad (i=1, 2, \dots, m \times n) \quad (16)$$

將(8)、(15)式代入(16)式整理後，並以矩陣形式如下。

$$[\phi_i] = [R] [F_0 - K^* \bar{F}_0] + c [R] [K^*] [Q] [\bar{\phi}_i] \quad (17)$$

$c = k/N_0 \sinh kh$ ，腳註“1”表示邊界面  $\Gamma_1$ ， $[R]$ ， $[Q]$  為周等<sup>(3)</sup>、<sup>(4)</sup>所示係數矩陣。

(17)式表示外海假想邊界面  $\Gamma_1$  上，任意水深領域速度勢與其導函數間的關係式。

#### ④ 任意反射率防波堤或碼頭 $\Gamma_2$ 上的邊界條件

在防波堤或碼頭  $\Gamma_2$  上，由於假定為反射率為  $K_r$ ，即消能係數為  $\alpha$  的結構物而得

$$\bar{\phi}(\xi, \eta, \zeta) = i k \alpha \phi(\xi, \eta, \zeta) \quad (18)$$

$$\alpha = \sqrt{1 - K_r^2} \quad (19)$$

### 2. 4 一次連立方程式

為了便於將各邊界面的邊界條件代入(10)式，將(10)式依各邊界面以下列部份矩陣表示

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\phi}_1 \\ \bar{\phi}_2 \\ \bar{\phi}_3 \\ \bar{\phi}_4 \end{bmatrix} \quad (20)$$

由於(12)的條件，我們可先求解邊界面 1 ~ 3 的未知函數，即

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\phi}_1 \\ \bar{\phi}_2 \\ \bar{\phi}_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

將(11)、(17)、(18)式代入上式，整理後得

$$\begin{bmatrix} [k_{11} - cRk^*Q] \frac{\sigma^2}{g} & k_{12} & ik\alpha k_{13} \\ k_{21} & \frac{\sigma^2}{g} k_{22} - I & ik\alpha k_{23} \\ k_{31} & \frac{\sigma^2}{g} k_{32} & ik\alpha k_{33} - I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\phi}_1 \\ \bar{\phi}_2 \\ \bar{\phi}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R[F_0 - k^*F_0] \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

解上式可得任意水深領域  $\Gamma_1$  邊界面上的速度勢導函數值及  $\Gamma_2$ 、 $\Gamma_3$  邊界面上的速度勢值。領域  $\Pi$  水面上各點的波高與入射波高比值  $K_d$ ，可以下式計算。

$$K_d = |\phi_2| \quad (23)$$

### 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(18)式的條件，即須事先知道消波式結構物的反射率，再由(19)式求出消能係數，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，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証實驗。

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，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 2 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 1 所示組合，配置與斷面實驗使用同樣的消波碼頭，又因本研究的主要目的為證明消波碼頭處邊界條件假定的妥當性，為方便起見，港內領域水深亦設為與外海同樣的等水深。首先對港內 A、B、C、D 四點 (座標分別為  $(0.25h, -0.25h)$ ,  $(0.25h, -5.25h)$ ,  $(0.25h, -9.75h)$ ,  $(4.75h, -5.25h)$ )，當波向垂直於港口時，計算各種配置時的波高與波浪週期關係。其次對入射波無因次角週頻率  $\sigma^2 h/g = 1.206, 0.537, 0.302$ ，計算各種配置的港內波高分佈。

### 五、平面實驗

在長 30 m、寬 24 m、深 1 m 的平面水槽，配置模型港池如圖 5 所示，水深為 30 cm，首先對乙案對應於數值計算的 A、B、C、D 四個測定點，無因次造波角週頻率在 0.23 至 3.0 間，量測各

點的最大水位週期變化。

其次對甲~丁案入射波無因次角週頻率  $\sigma^2 h/g = 1.206, 0.537, 0.302$  (週期  $T = 1.0, 1.5, 2.0$ )，以  $20\text{ cm}$  間隔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 6 表示乙案配置，即港內碼頭均配置消波碼頭時，各量測點最大水位值數值解與實驗值的比較，○為實驗值，實線為數值解。由圖可知兩者相當一致，證明本解析法採用消能係數條件的妥當性，又對甲案配置已在前論文<sup>(3)</sup>、<sup>(4)</sup>對實驗值及數值解作過比較，亦得到相當一致的結果。

圖 7 表示利用數值計算所得 A、B、C、D 量測點在四種不同消波碼頭配置的最大水位的週期變化圖，由圖發現，甲案配置即港內碼頭全部為全反射碼頭時，水面隨入射波週期作複雜變化，同時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，港內水面會變得很靜穩，同時對不同的入射波週期水位變化亦很小。丙案及丁案配置亦均有改善港內水面靜穩的效果，就週期變化而言，丙案 (港口正面配置消波碼頭時) 的靜穩效果大體上優於丁案 (港池兩側配置消波碼頭)，但隨位置及週期的不同丁案也有優於丙案者。

圖 8 ~ 10 為無因次角週頻率  $\sigma^2 h/g = 1.206, 0.537, 0.302$  (週期  $T = 1.0, 1.5, 2.0$ ) 波浪垂直於港口方向作用時，甲~丁案配置的港內外等波高分佈圖，左側為實驗值，右側為數值解。比較數值解及實驗值可知兩者大致相同，亦可證明本解析法的正確性。又從等波高分佈圖也可發現配置消波碼頭時，港內水面會變得靜穩，全部配置全反射碼頭 (甲案) 時港內水面盪漾的現象會減少，尤其是全部配置消波碼頭時改善效果最佳。

## 七、結 論

經由以上說明，從實驗值與數值解的一致，可證明本解析法的正確性。其次從計算例了解在港內適當配置消波式碼頭會有效改善港內水面靜穩度。規畫港池配置時，可不經過水工模型實驗而利用本解析法預測如何配置消波碼頭可得到最佳港池配置。

## 八、參考文獻

- (1) 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，中華民國 75 年 11 月。
- (2) 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，中華民國 78 年 11 月。
- (3) 周宗仁，韓文育，張景程：港灣的水面振動研究，第十三屆海洋工程研討會，中華民國 80 年 11 月。
- (4) CHOU, C. R., W. Y. Han: "Wave-induced oscillation in harbor of arbitrary shape with arbi-

trary reflection coefficient in uneven sea bed", Computer Modelling in Ocean Engineering 91, 1991, 9.

(5) 周宗仁：邊界元素法在波浪力學之應用，國立臺灣海洋大學河海工程學系，中華民國 72 年。

### 謝 誌

本研究獲行政院國家科學委員會專題研究計畫補助，計畫編號 NSC 81-0209-E-019-3，特表謝意。

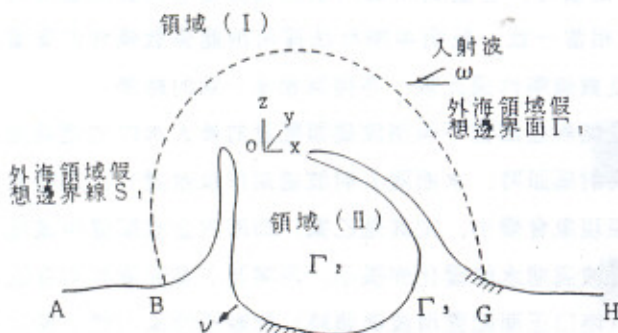


圖 1 定義圖

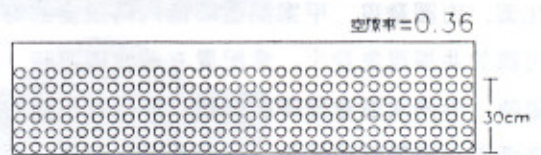
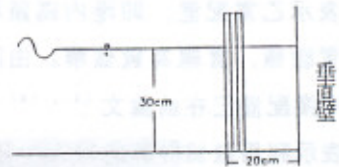


圖 2 消波碼頭模型及断面水槽配置

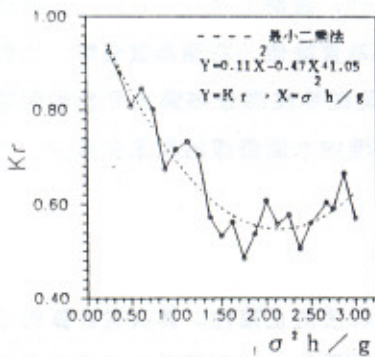


圖 3 規則波作用時消波碼頭反射率

表 1 消波碼頭配置組合

	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	備註
甲案	×	×	×	○消波式碼頭 ×全反射碼頭
乙案	○	○	○	
丙案	×	○	×	
丁案	○	×	○	

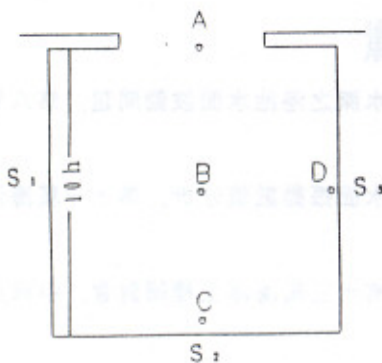


圖 4 數值計算例

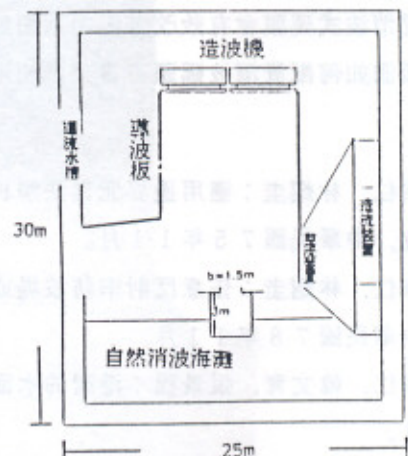
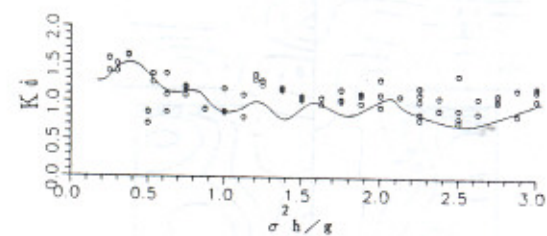
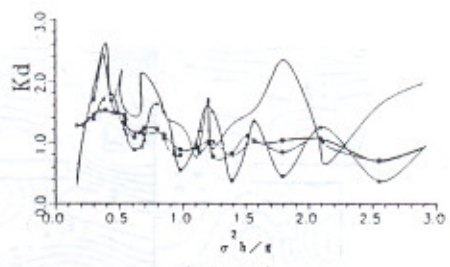


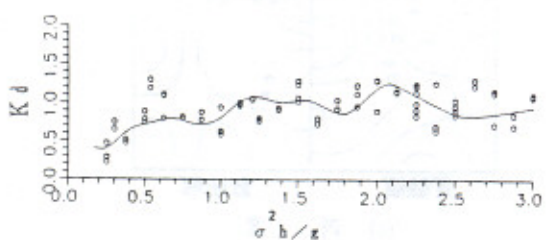
圖 5 平面水槽配置



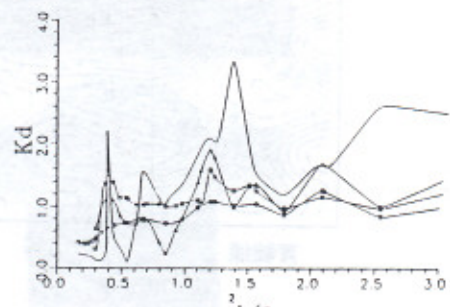
(a) A點



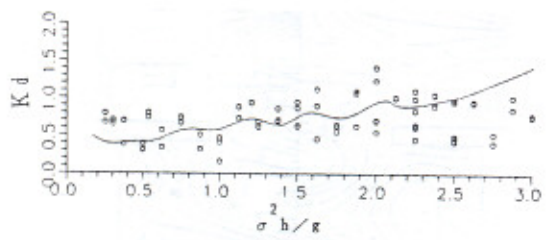
(a) A點



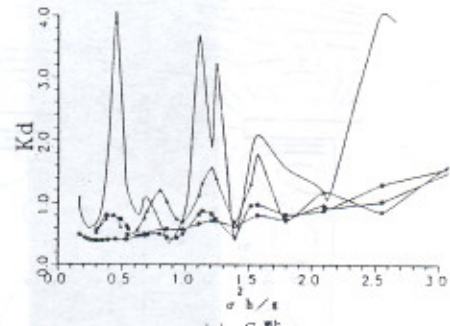
(b) B點



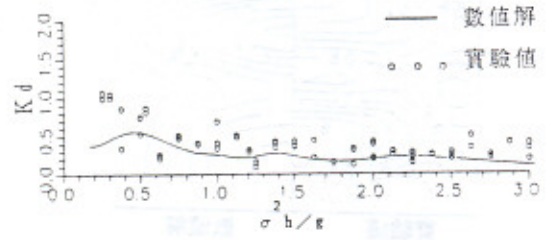
(b) B點



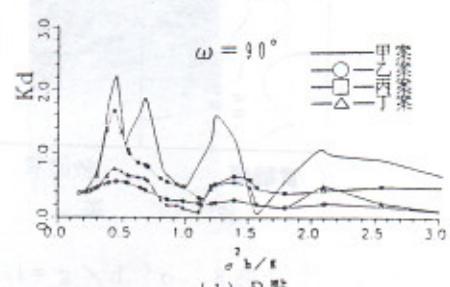
(c) C點



(c) C點



(d) D點

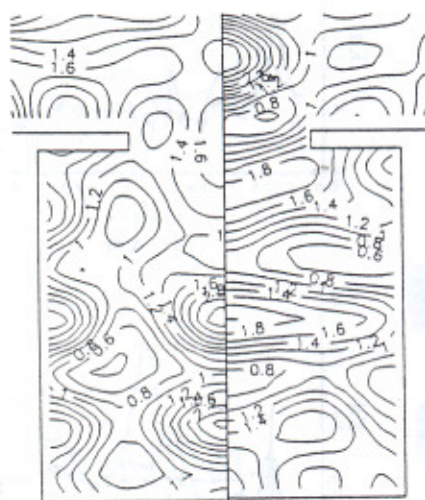


(d) D點

圖 6 乙案配置各點水面振動數值解與實驗值比較

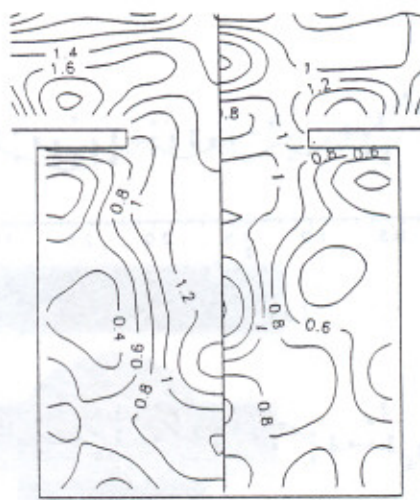
圖 7 各配置案特定點波高比較 (數值解)





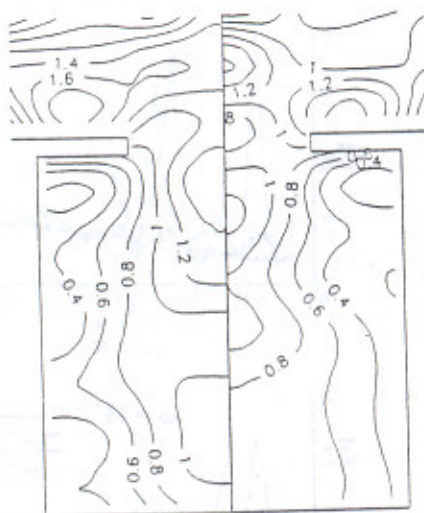
實驗值 數值解

(a) 甲 案



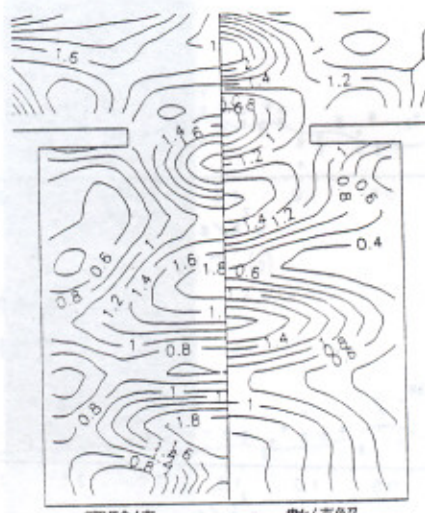
實驗值 數值解

(c) 丙 案



實驗值 數值解

(b) 乙 案



實驗值 數值解

(d) 丁 案

圖 8  $\sigma^2 h / g = 1.206$ ,  $T = 1.0$  秒,  $h = 30$  cm,  $\omega = 90^\circ$   
各配置案港內外等波高分布數值解與實驗值比較

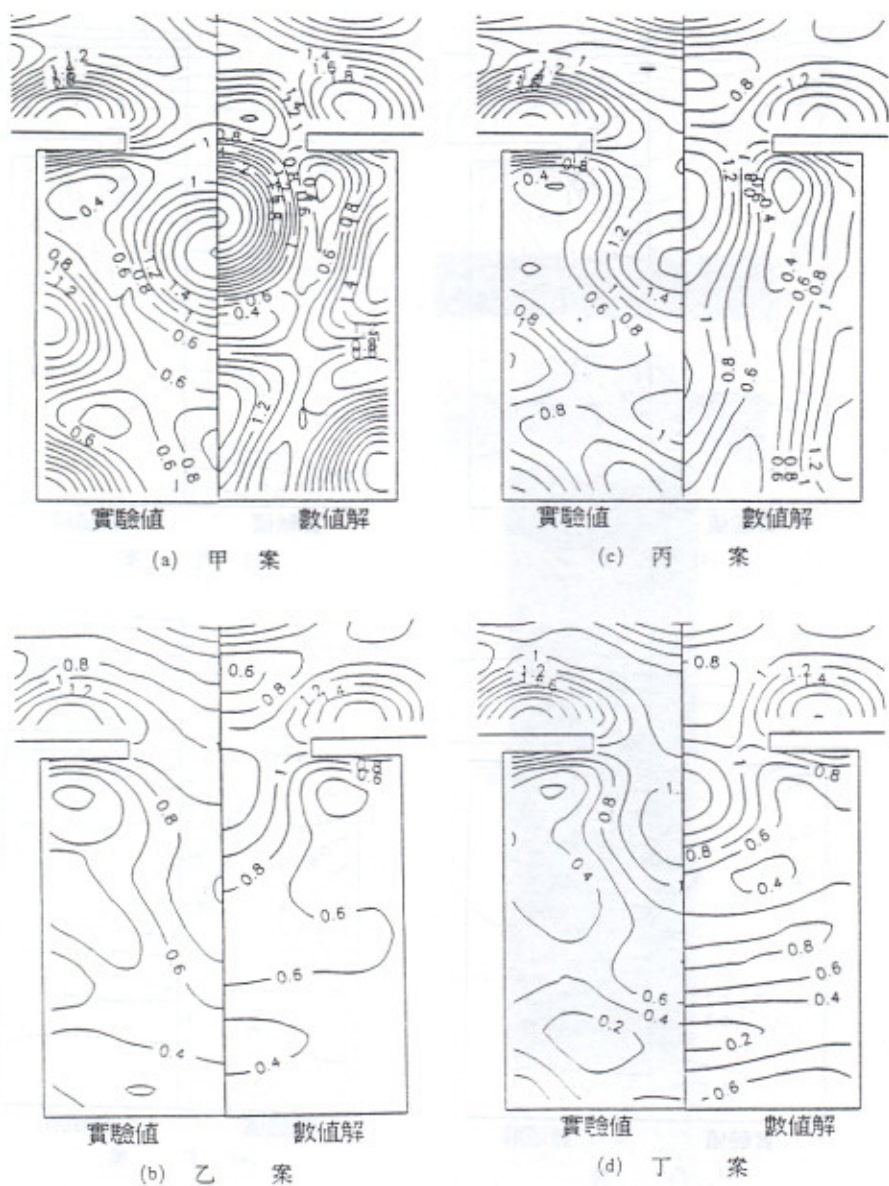


圖 9  $\sigma^2 h / g = 0.537$ ,  $T = 1.5$  秒,  $h = 30$  cm,  $\omega = 90^\circ$   
 各配置案港內外等波高分布數值解與實驗值比較

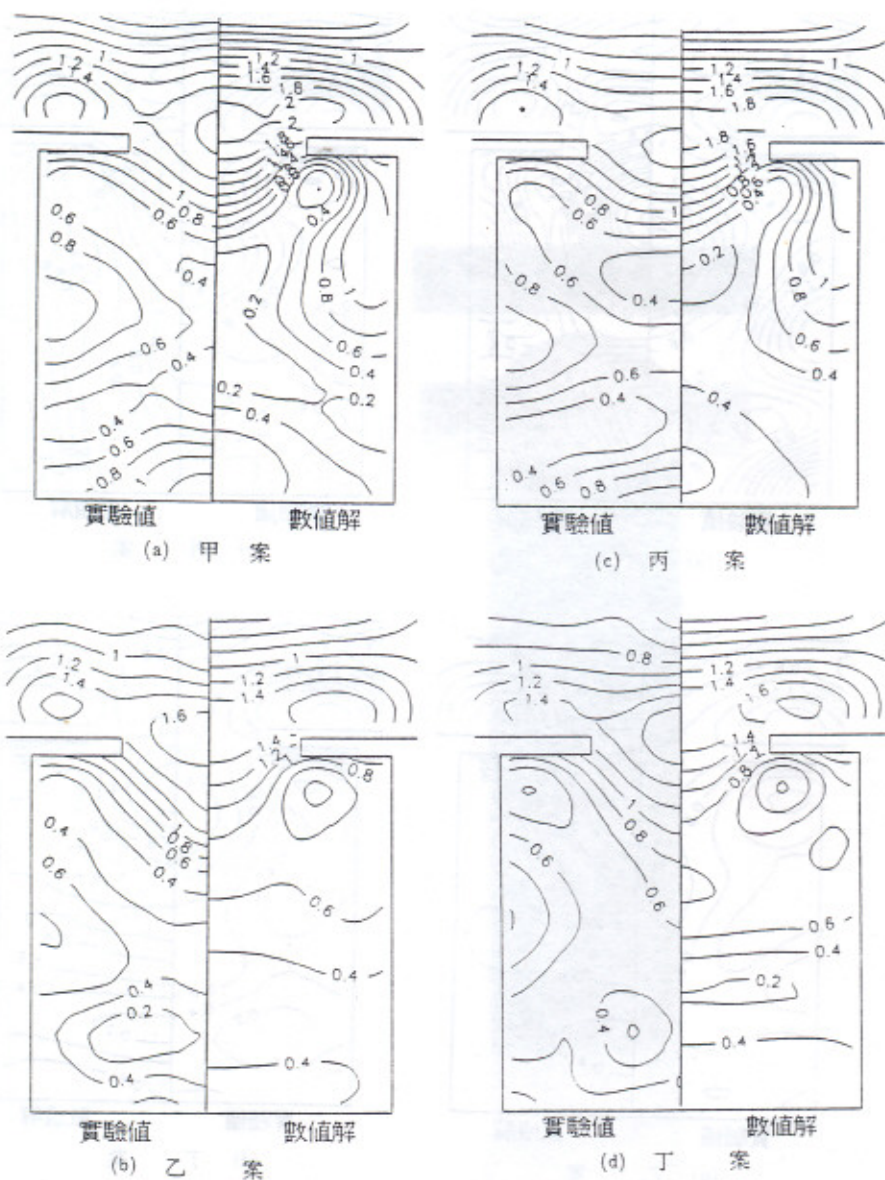


圖10  $\sigma^2 h / g = 0.302$ ,  $T = 2.0$ 秒,  $h = 30$ cm,  $\omega = 90^\circ$

各配置案港內外等波高分布數值解與實驗值比較

# WAVE-INDUCED OSCILLATION IN HARBOR WITH DISSIPATION QUAYS

C. R. CHOU<sup>\*</sup> W. Y. HAN<sup>\*\*</sup> & IC. I. CHU<sup>\*</sup>

## ABSTRACT

Wave induced oscillation in harbor is analyzed numerically using boundary element method. the harbor is assumed to have an arbitrary shape with dissipating quays.

Reflection coefficient of the dissipating quays is first determined through 2-D wave flume experiments. It is then used as coefficient for energy dissipation in the numerical scheme and wave height distributions are calculated.

Numerical results are compared with experiments carried out in a 3-D wave basin. The harbor used in the 3-D experiments has a square basin, and the same dissipating quays as those in 2-D wave flume experiments.

The results of the wave height distributions obtained numerically compared satisfactorily with experiments. It is concluded that the numerical model presented here in this paper is suitable for analyzing water surface oscillation in harbors having dissipative quays.

---

\* National Taiwan Ocean University, Dept. of River and Harbor Engineering

\*\* Council of Agriculture, Executive Yuan