

# 港灣的水面振動研究

周宗仁\* 韓文育\*\* 張景程\*\*\*

## 摘 要

本研究係利用邊界元素法 (Boundary element method) 建立一個解析港灣水面振動模式，本模式可適用於任意形狀、不等水深及具任意反射率防波堤或岸壁之港池，因受規則波浪引起的水面振動分析；其中引用一消能係數  $\alpha$  來表示消波性結構之消波特性，計算結果與 Ippen & Goda 的理論解比較，發現兩者相當吻合；本文並利用矩形港池進行模型試驗比較，其趨勢與數值計算結果大致吻合。

## 一、前 言

在港灣工程規劃設計中，港池水面共振是一個很重要的考慮因素。港池水面發生共振時，港內水面劇烈起伏，影響船舶裝卸貨物及碇泊作業，甚至使泊港船舶斷纜，嚴重影響港池泊船安全。爲了避免上述情形發生，學者專家們提出了各種的解決方法，如有關港灣開口大小、方向及港灣形狀、水深等佈置設計方面，堤防、碼頭或港口的消波形式設計等等。諸如此類的規劃設計，其目的就是爲了求得港內、外靜穩度的增加，有利於船舶進出與泊船安全。其中消波性防波堤或岸壁之研究，除了可以降低港池共振效應，提高港池靜穩度外，並可減少設計結構物之設計斷面，符合經濟效益。

有關港池水面振動的研究，過去已有不少學者發表過相關論文。Miles & Munk<sup>(1)</sup>

---

\* 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系碩士

(1961)探討矩形港池，考慮由港口傳至外海的輻射效應，用Green 函數解析任意形狀港池的水面共振現象，並提出港口矛盾論。Ippen & Goda(1963)<sup>(2)</sup>以Fourier 轉換法及變數分離法解析矩形港池水面振動，其理論解並經試驗證極為吻合。Berkhoff (1974)<sup>(3)</sup>利用緩坡方程式(mild-slope equation)以Green函數及有限元素法，解析港內漸變地形的波浪折射及繞射問題。Lee(1971)<sup>(4)</sup>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。

作者之一於(1975)<sup>(5)(6)</sup>以 Green 函數解析岸壁為完全消波之自然海岸時港池水面波動現象，而且在(1985)<sup>(7)</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>(8)</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。其中，提出消波性結構之消波特性和一個消能係數 $\alpha$ 來表示，用來決定消波性結構物邊界上之邊界條件，此一係數與反射率有關。歐(1990)<sup>(9)</sup>利用有限元素法，針對緩坡方程式，探討多孔岸壁港池，在深度等斜率下之港池共振影響。

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。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分析模式，以模擬實際港灣的水面振動現象。

## 二、理論分析

如圖一所示，將座標原點定於 0 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  $\Gamma_1$ ，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  $\sigma$  ( $=2\pi/T$ ,  $T$  為波的週期)、振幅為  $\zeta$  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  $\Phi$ ：

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

式中  $g$  表示重力加速度。

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

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2)$$

### 2-1 等水深外海領域速度勢的表示

如圖一所示，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  $\phi_0(x, y, z)$  分離成如下式，依自由水面邊界條件而定且與水深  $z$  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  $\sigma^2/g = k \tanh(kh)$  的根，而  $f^0$  及  $f^*$  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  $\omega$  角度入射、振幅  $\zeta_0$  的簡諧波，其水面波形  $\zeta_i(x, y; t)$  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  $f^0(x, y)$  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  $\overline{AB}$ 、 $\overline{GH}$  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  $\overline{AB}$ 、 $\overline{GH}$  可假設已不會對於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 的幅射條件，因此反射波的勢函數值  $f^*$  亦可視為零。因此利用 Green 函數<sup>(10)</sup>，外海領域內任意一點的反射波的勢函數  $f^*(x$

， $y$ ) 可以下列的積分方程式表示之

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

式中  $f^*(\xi, \eta)$  為幾何邊界上的勢函數值，而  $\frac{\partial f^*(\xi, \eta)}{\partial \nu} (= \bar{f}^*(\xi, \eta))$  表示對法線方向的一次導函數， $H_0(kR)$  為第 1 種 0 次 Hankel 函數， $\nu$  為邊界上的法線，以向外為正，而

$$R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$$

任意點  $(x, y)$  在領域內時， $c=1$ ，而  $(x, y) \rightarrow (\xi, \eta)$  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，用  $N$  個一定線元素將邊界  $\Gamma_1$  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<sup>(10)</sup>。

## 2-2 任意水深領域速度勢的表示

領域 (II) 係為由外海假想邊界面  $\Gamma_1$ ，自由水面  $\Gamma_2$ ，任意反射率防波堤或岸壁邊界面  $\Gamma_3$  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，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  $\bar{\phi}(\xi, \eta, \zeta) = \frac{\partial \phi(\xi, \eta, \zeta)}{\partial \nu}$  (向外為正)，以下列積分方程式計算之。

$$c\phi(X, Y, Z) = \int_A \left[ \bar{\phi}(\xi, \eta, \zeta) \left( \frac{1}{4\pi r} \right) - \phi(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial}{\partial \nu} \left( \frac{1}{4\pi r} \right) \right] dA \quad (9)$$

式中，

$$r = \sqrt{(X-\xi)^2 + (Y-\eta)^2 + (Z-\zeta)^2}$$

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<sup>(10)</sup>。

### 2-3 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  $\Gamma_2$  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，其法線方向的流速為 0，

$$\phi = 0 \quad (12)$$

#### ③ 外海邊界 $\Gamma_1$ 的邊界條件

在等水深領域與任意水深領域的相接邊界面  $\Gamma_1$  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：

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

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

將(3)式代入(13)式後，對兩邊各乘以  $\cosh k(z+h)$  對水深方向作積分得

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

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。

$$\bar{f}^*(\xi_i, \eta_i) = \frac{k}{N_0 \sinh(kh)} \sum_{j=1}^n \bar{\phi}(\xi, \eta, \xi) \cosh(k \cdot (z_j + h)) \Delta z_j - \bar{f}^0(\xi_i, \eta_i) \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$



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

其中，  $\alpha = \sqrt{1 - Kr^2}$  ( $0 \leq kr \leq 1$ )

#### 2-4 邊界元素法模式的建立

綜合以上三次元形狀係數矩陣及各邊界面之邊界條件，我們可以建立一個邊界元素法數值模式的矩陣式，用來解析各領域邊界面上的勢函數或其導函數值。

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

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

由於(12)式的邊界條件，我們可先求解邊界面1~3的未知函數矩陣，即

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

將(11)、(17)、(20)式代入上式，整理後得

$$\begin{bmatrix} [k_{11} - cRK^*Q] & \frac{\sigma^2}{g}k_{12} & iakk_{13} \\ k_{21} & \frac{\sigma^2}{g}k_{22} - I & iakk_{23} \\ k_{31} & \frac{\sigma^2}{g}k_{32} & iakk_{33} - I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\phi}_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(F^o - k^*\bar{F}^o) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

解上式矩陣可得任意水深領域 (II) 的  $\Gamma_1$  邊界面上的速度勢導函數值，領域 (II) 的邊界面  $\Gamma_2, \Gamma_3$  上的速度勢值。

領域 (II) 水面上各點的波高與入射波高比值  $kd$ ，可以下式計算。

$$kd = |\phi_2|$$

(24)

### 三、計算例

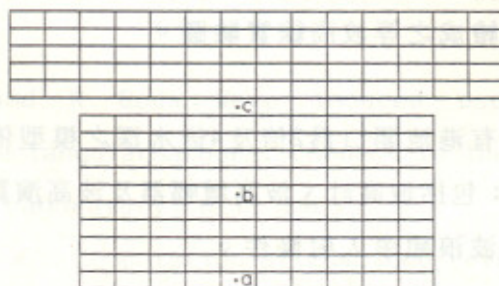
本文首先以 Ippen & Geda (1963) 的計算例為例，計算矩形港池內的水面振動情形，如圖二所示，發現本模式的結果與其結果相當吻合。

其次，以邊長  $L=10h$  ( $h$  為水深) 的正方形港池，並在港池的中央開口，港口寬度  $b=2h, 4h$  時為計算例。

圖三、四為取防波堤及岸壁的反射率  $kr=1, 0.75$  等兩種情形，而波浪垂直作用於港池時，港澳中央處的水面振動圖，其中  $\sigma^2 h/g$  的討論範圍由  $0.05 \sim 2.0$ 。而圖五~八  $\sigma^2 h/g=1/0, kr=1, 0.75$ ，中央開口  $4h, 2h$ ，入射角為  $45^\circ$  及  $90^\circ$  時，港池內的等波高分佈圖。圖九~圖十二為  $\sigma^2 h/g=0.5, 1.0, kr=0.5$ ，中央開口  $2h, 4h$ ，入射角為  $45^\circ$  及  $90^\circ$  時，港池內的等波高分佈數值解。

圖十三~十八為港口寬度四倍及二倍水深 ( $h$ )，入射波角度  $\omega = 90^\circ$ ， $kr=0.75, 1.0$  時，正方形港池中，A, B, C 點之數值解水面共振圖。其中無因次週頻率的討論範圍在  $0.025 \sim 2.0$  之間。圖十九~二十四為入射波角度  $\omega = 45^\circ$ ，其它條件相同時，正方形港池中，A, B, C 點之數值解水面共振圖。

港口寬度  $4h$  時， $\sigma^2 h/g-kd$  數值解計算點位置圖





港口寬度 $2h$ 時， $\sigma^2 h/g-kd$ 數值解計算點位置圖



#### 四、模型實驗

本模型實驗乃使用 $30m \times 24m \times 1m$ 之平面水槽來進行水工模型實驗，造波機為懸臂自走式造波機，波高計乃採用容量式波高計來測定，而以波高增幅器處理所測得之訊號，經波高演算裝置計算並記錄所測得之波高值。

實驗時，針對不同的無因次週頻率入射波條件，對外海入射波、港池內外及港澳中心進行波高量測。為使波況不致消散，如圖二十五所示，在造波機之兩側裝置導流板，而在港池兩側鋪置斜坡，模擬自然海灘之消波狀況。本實驗水深為40公分，港池大小為10倍水深之矩形港池，其中心開口分別為2倍及4倍水深，造波頻率為無因次週頻率等於0.5及1.0。實驗入射波高取在3~5公分內，以垂直於海岸線之方向入射，港池內外及港澳中心所量得之波高乃於波浪入射港池經反射形成重複波後才開始量測。

所量得結果除以入射波高以 $kd$ 值表示。圖三、圖四以（·）表示實驗港澳中心水面共振圖，甚縱座標為港澳中心之 $kd$ 值，橫座標為無因次週頻率。圖二十六~圖二十八之左側為 $\sigma^2 h/g=0.5$ 、 $1.0$ ， $kr=1.0$ ，中央開口為 $2h$ 、 $4h$ ，入射角為 $90^\circ$ 時，每隔 $0.5h$ 量測量一點所繪成之等波高線實驗圖。

模型實驗之步驟：

1. 港池模型之佈置；分別有港池開口為2倍及4倍水深之模型佈置。
2. 實驗儀器之校正及率定；包括波高計、波高增幅器及波高演算裝置之校正、率定。
3. 造波；其中包含不同之波浪頻率入射條件。
4. 資料分析及繪圖。

其中，步驟 2之波高計率定，乃取實驗波高值量測範圍內，波高計呈線性變化

之率定值，約水平面上下10公分。步驟 3之造波作用，為不同頻率之微小振幅規則波。

## 五、結 論

由圖三、四可發現防波堤及岸壁為消波性的結構物時，港池的水面共振現象迅速消失，此現象亦可由圖五～八獲得佐證，此現象說明在港內配置消波性結構物對港內水面的靜穩度會有相當的助益。

其中圖三、圖四的第一共振峰處，由於波浪為長週期波，試驗時之實際波長為5~6公尺以上，試驗無法作出。

圖九～十二中可發現，當反射率降至某範圍時，港內的消波結構物之消波特性趨於緩和，即消波效能無法繼續提高。

由圖三、圖四及圖二十六～圖二十八中可發現數值解與實驗值間，其趨勢大致吻合。因試驗時，實際上含有摩擦效應與其它能量損失，故試驗值較理論數值解小。

經由以上計算驗證，本模式可簡易而適當的解析出，在不等水深的地形，具有任意反射率防波堤及岸壁的任意形狀港池的水面振動情形。由於只需輸入港池的形狀、地形及防波堤或岸壁的反射率，且可依不同位置輸入不同的反射率，對實際的港池水面共振分析相當適用。

對於不透水港壁，本文結果與前人研究相當吻合，且本文亦針對某些計算例進行模型實驗，其結果與理論數值解之趨勢相當符合。

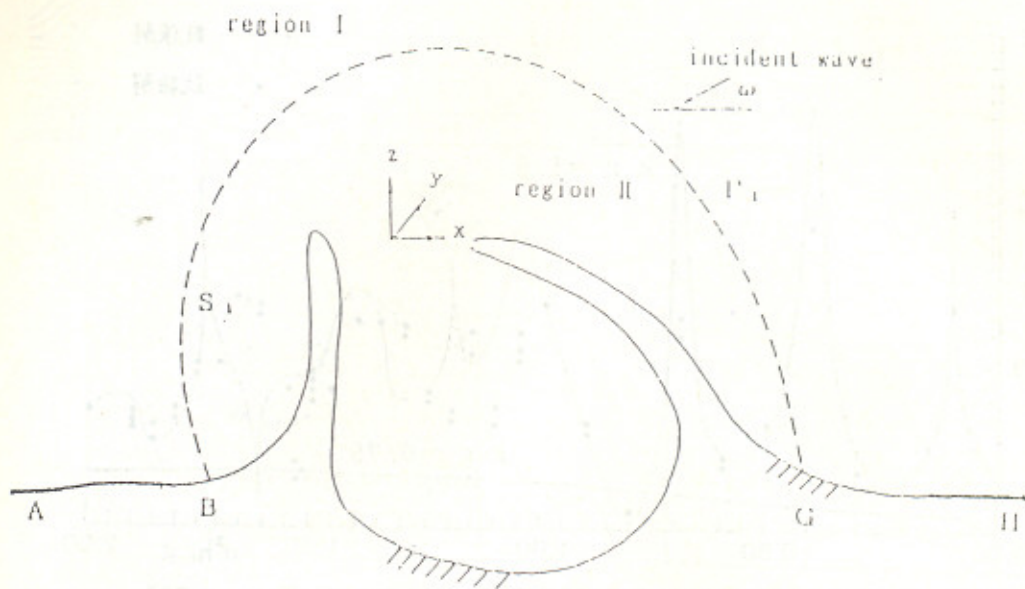
## 六、參考文獻

1. Miles, J. and W. Munk: Harbors paradox, J. Waterways and harbors Div., ASCE, 1961.
2. Ippen, A. T. and R. Goda: Wave induced oscillation in harbors the solution for rectangular harbors, connect to the open sea, Rept. No.59, Hydrodynamics Laboratory, MIT, 1963.
3. Berkoff, J. C. W.: Computation of combined refraction and diffraction, Pro. 13th, Intern. Con. Coastal Eng., 1974.

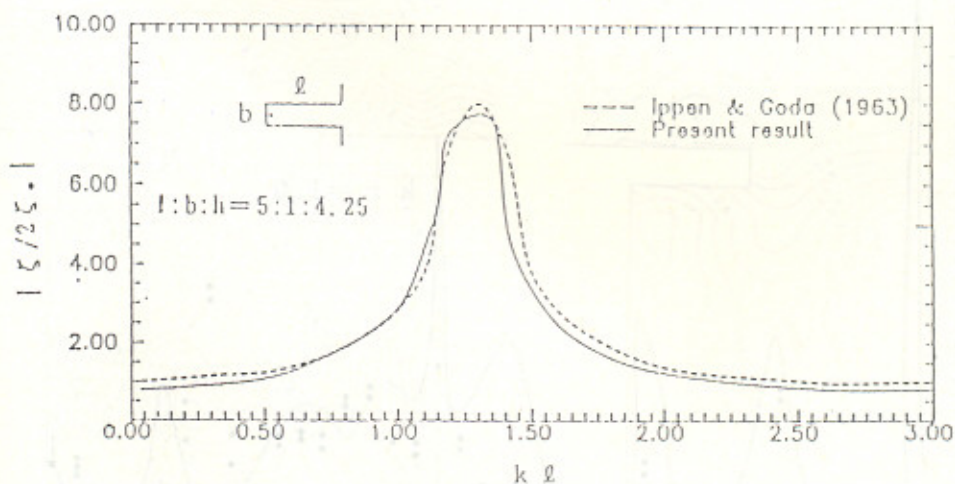
4. Lee, J. J. : Wave induced oscillations in harbors of arbitrary shape, J. Fluid Mech., 45. 1971.
5. Takeshi Ijima and C. R. Chou " Wave-Induced Oscillations in Harbours with Various BoundaryConditions "日本九州大學工學集報第48卷，第5號，第1報，1975。
6. Takeshi Ijima and C.R. Chou " Wave-Induced Oscillations in Harbours with Various BoundaryConditions "日本九州大學工學集報第48卷，第5號，第2報，1975。
7. 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，中華民國75年11月。
8. 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，中華民國78年11月。
9. 歐善惠等：不等水深多孔壁港池之共振模式，第十二屆海洋工程研討會，中華民國79年11月。
10. 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。

## 参考文献，六

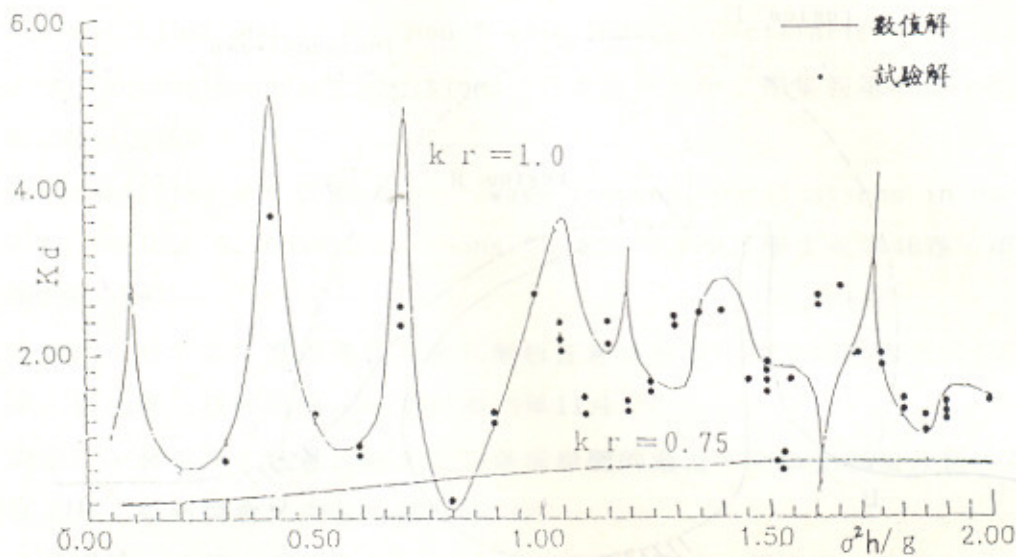
1. Miles, J. and W. Munk: Harbors paradox. J. Waterways and Harbors Div. ASCE, 1961.
2. Ijima, A. T. and R. Goda: Wave induced oscillation in harbors: the solution for rectangular harbors connect to the open sea. Rep. No. 59, Hydrodynamics Laboratory, MIT, 1963.
3. Bereski, J. C. W.: Computation of combined refraction and diffraction. Proc. Intern. Conf. Coastal Eng., 1974.



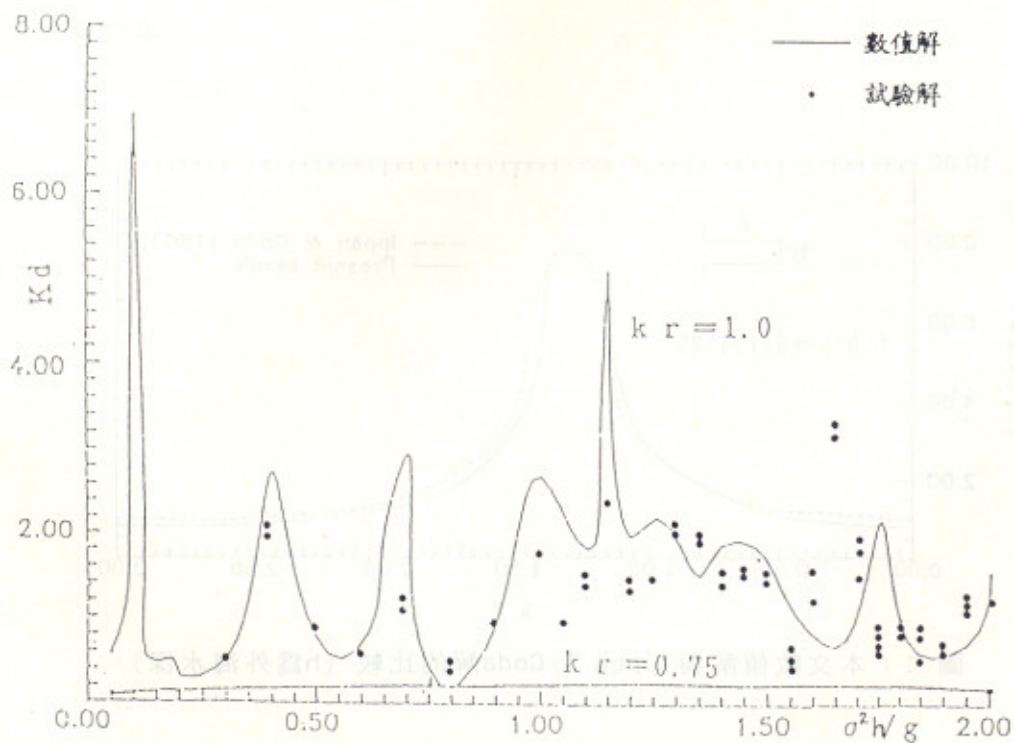
圖一：領域定義圖



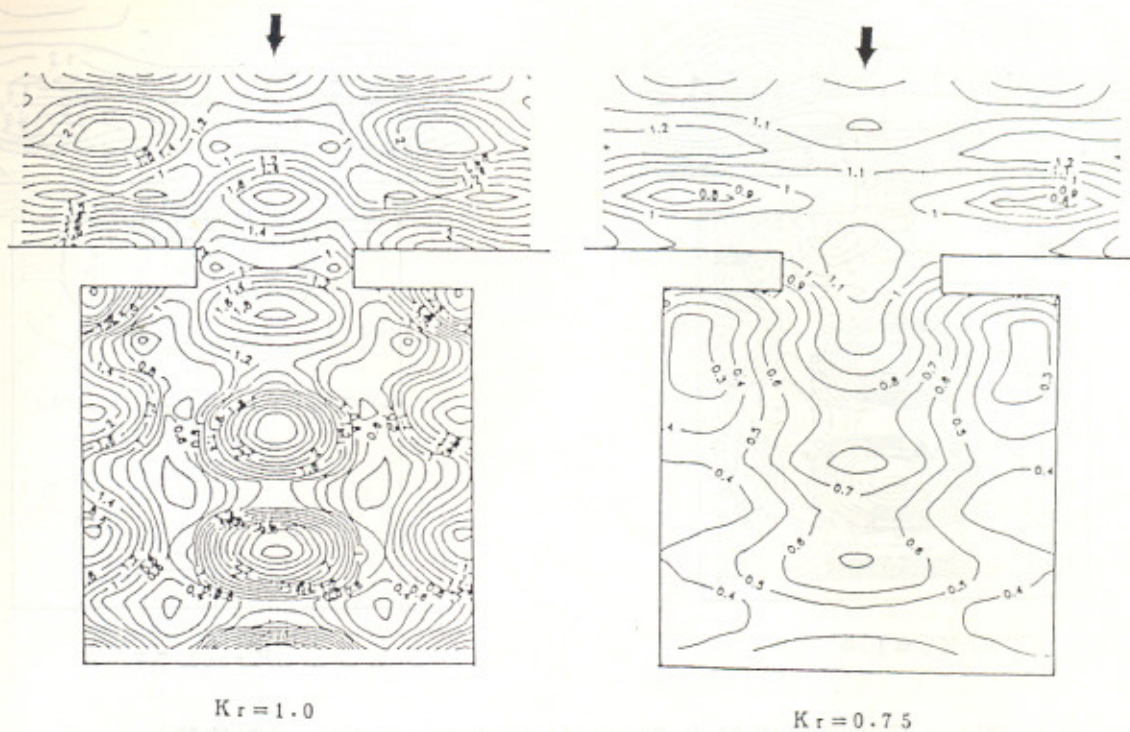
圖二：本文數值解與Ippen & Goda解的比較 (h為外海水深)



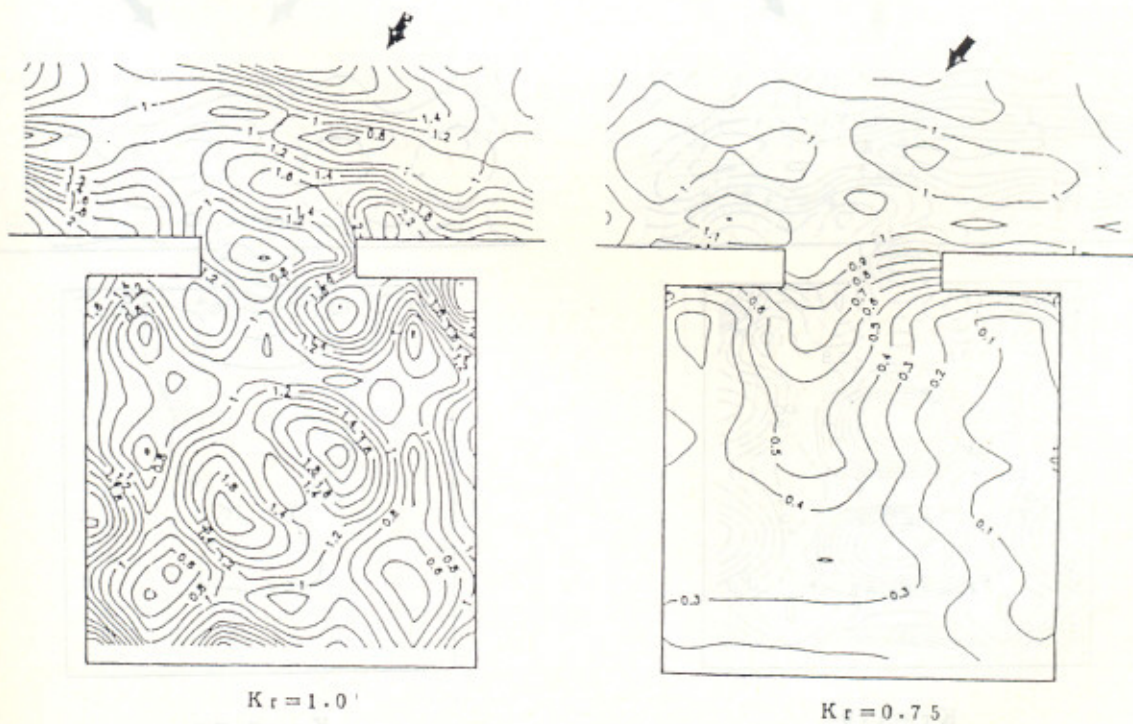
圖三：正方形港澳中央處水面共振圖， $b=4h$ ， $L=1h$ ， $\omega=90^\circ$



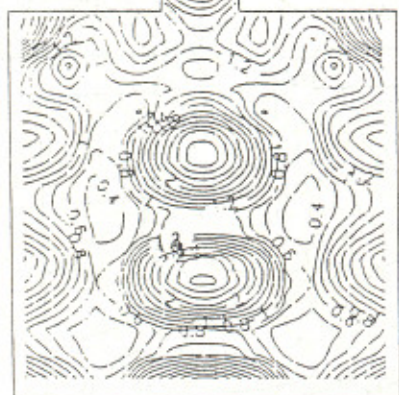
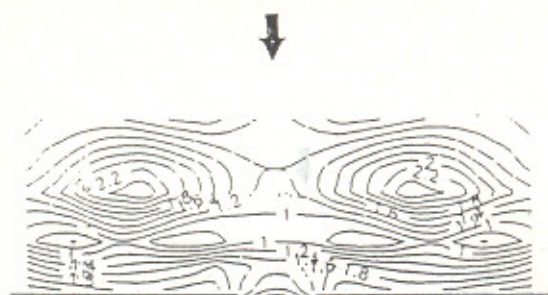
圖四：正方形港澳中央處水面共振圖， $b=2h$ ， $L=1h$ ， $\omega=90^\circ$



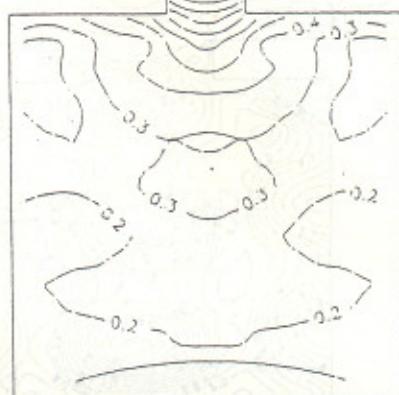
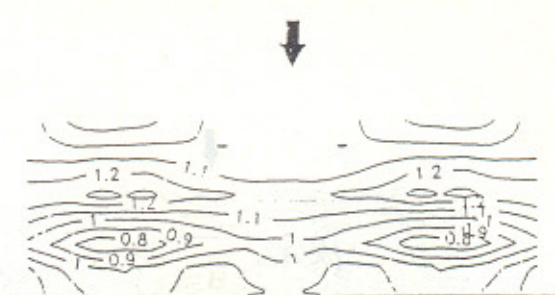
圖五：等波高分佈圖  $b=4h$ ,  $\sigma^2 h/g=1.0$ ,  $\omega=90^\circ$  (數值解)



圖六：等波高分佈圖  $b=4h$ ,  $\sigma^2 h/g=1.0$ ,  $\omega=45^\circ$  (數值解)

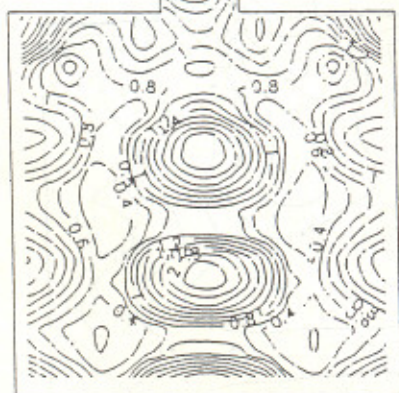
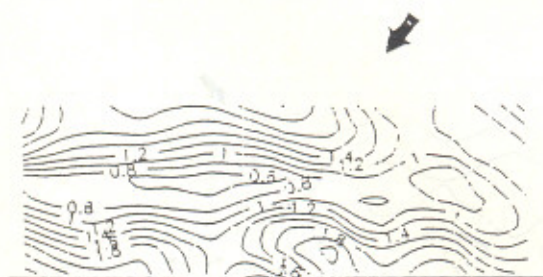


$Kr=1.0$



$Kr=0.75$

圖七：等波高分佈圖  $b=2h$ ,  $\sigma^2 h/g=1.0$ ,  $\omega=90^\circ$  (數值解)

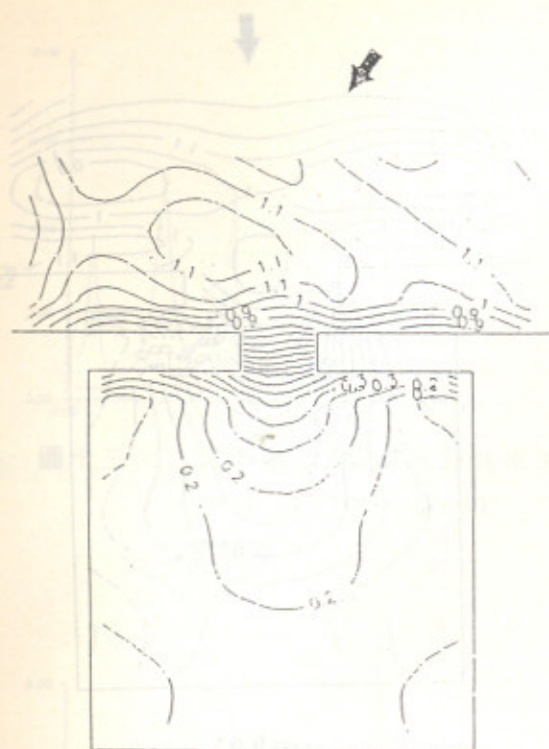


$Kr=1.0$

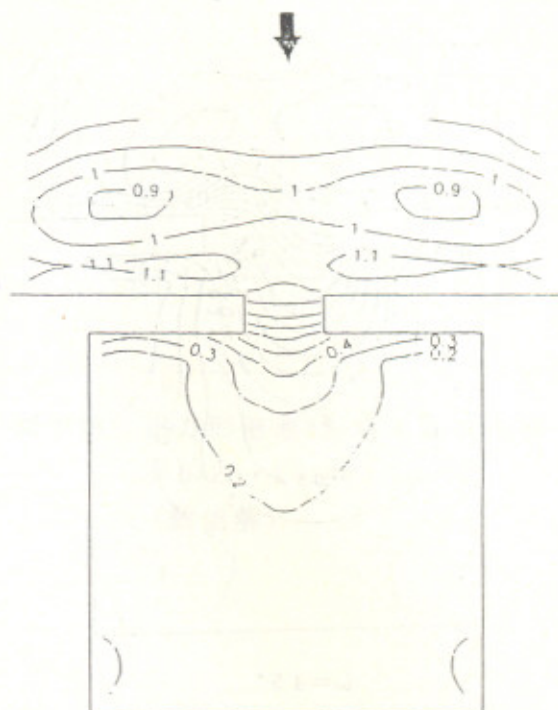


$Kr=0.75$

圖八：等波高分佈圖  $b=4h$ ,  $\sigma^2 h/g=1.0$ ,  $\omega=45^\circ$  (數值解)

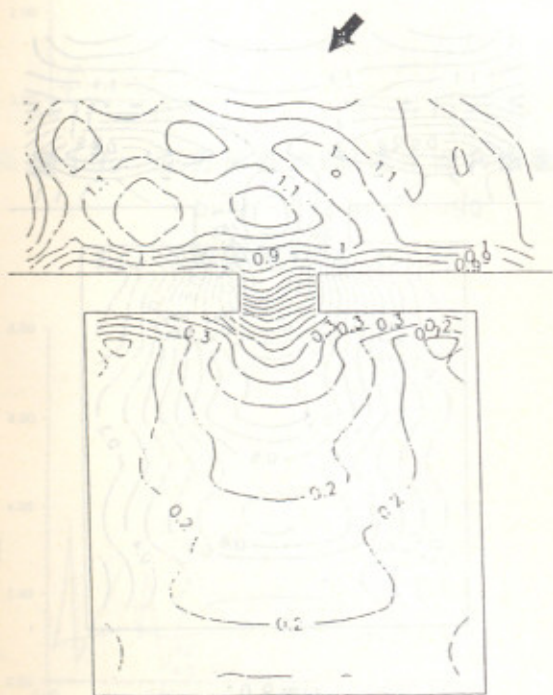


$\omega = 45^\circ$

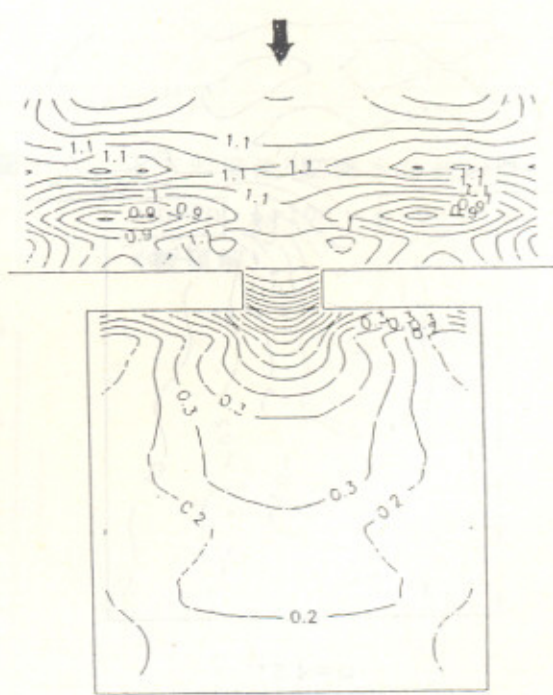


$\omega = 90^\circ$

圖九：等波高分佈圖  $b=2h$ ,  $\sigma^2 h/g=0.5$ ,  $Kr=0.5$  (數值解)



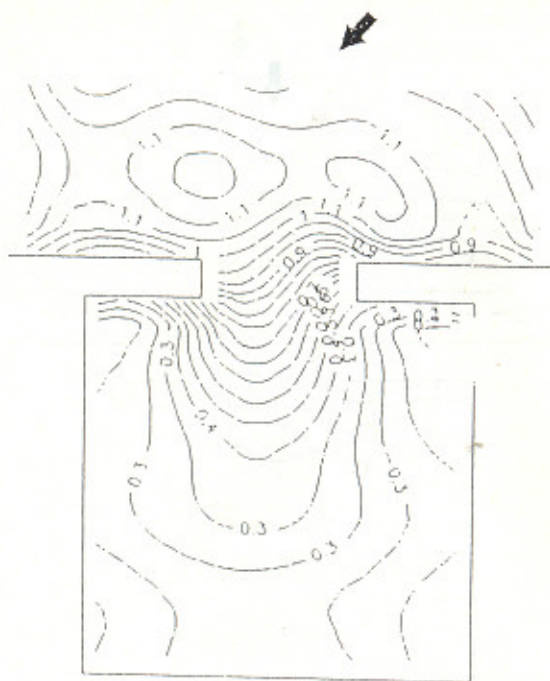
$\omega = 45^\circ$



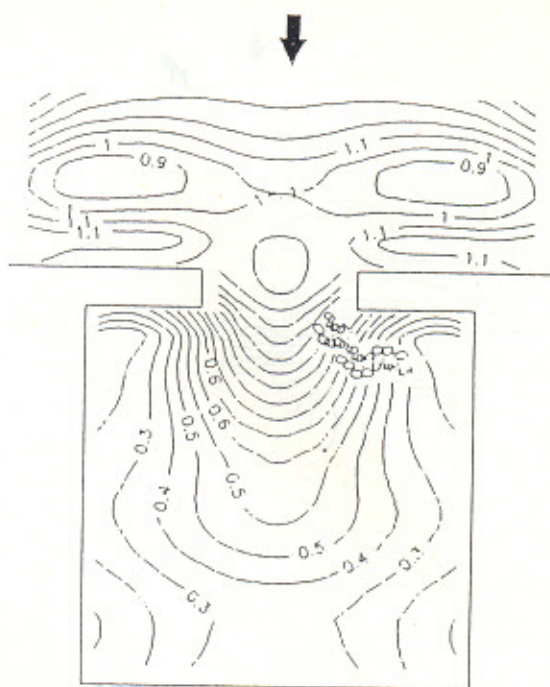
$\omega = 90^\circ$

圖十：等波高分佈圖  $b=2h$ ,  $\sigma^2 h/g=1.0$ ,  $Kr=0.5$  (數值解)



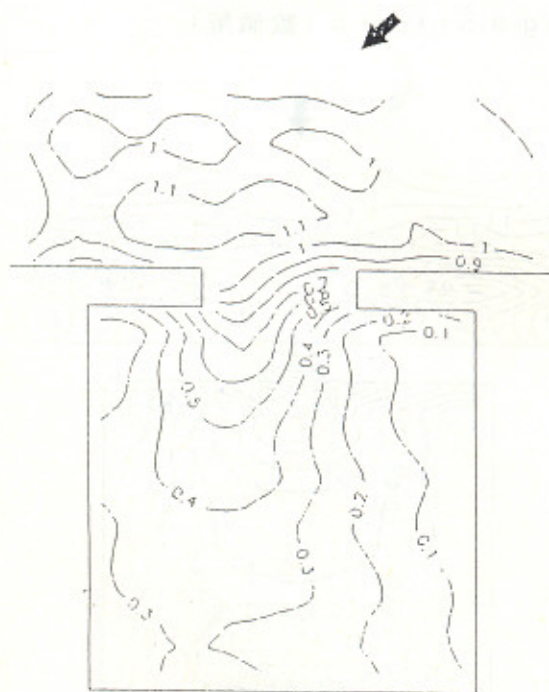


$\omega = 45^\circ$

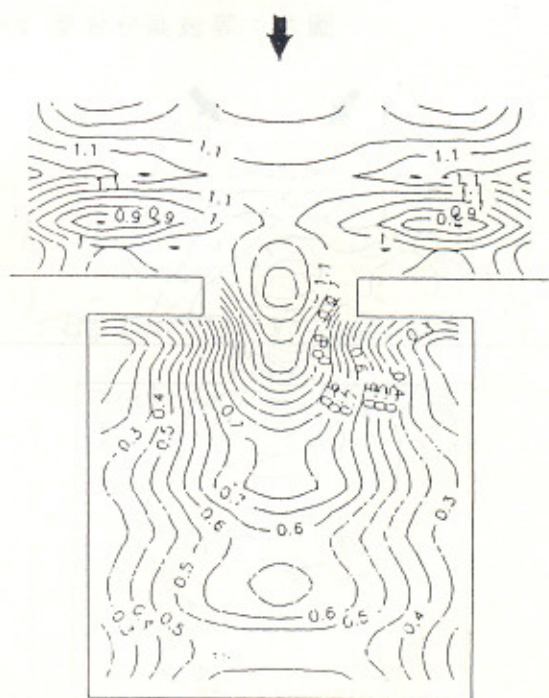


$\omega = 90^\circ$

圖十一：等波高分佈圖  $b=4h$ ,  $\sigma^2 h/g=0.5$ ,  $Kr=0.5$  (數值解)

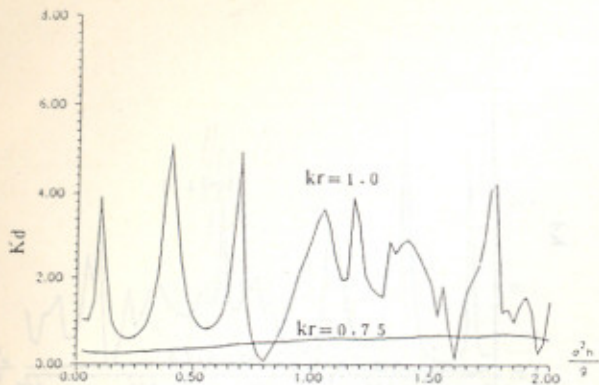


$\epsilon = 45^\circ$

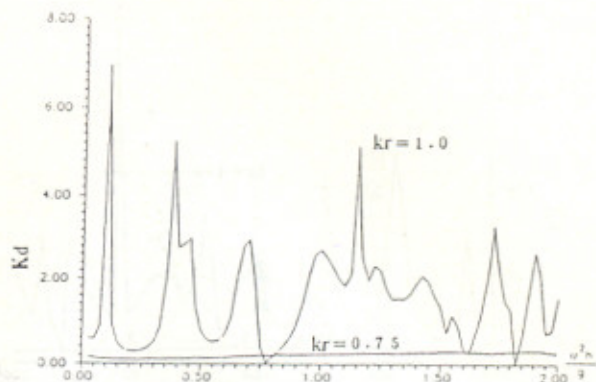


$\epsilon = 90^\circ$

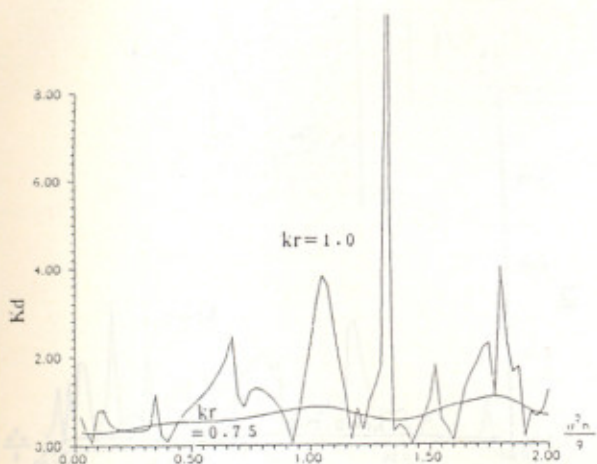
圖十二：等波高分佈圖  $b=4h$ ,  $\sigma^2 h/g=1.0$ ,  $Kr=0.5$  (數值解)



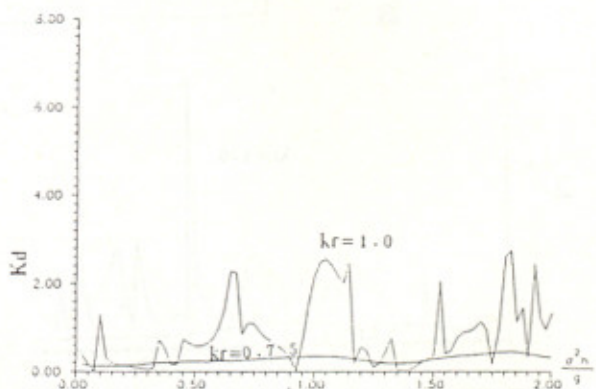
圖十三：正方形港池A點處水面共振圖  
 $b=4h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=90^\circ$   
 (數值解)



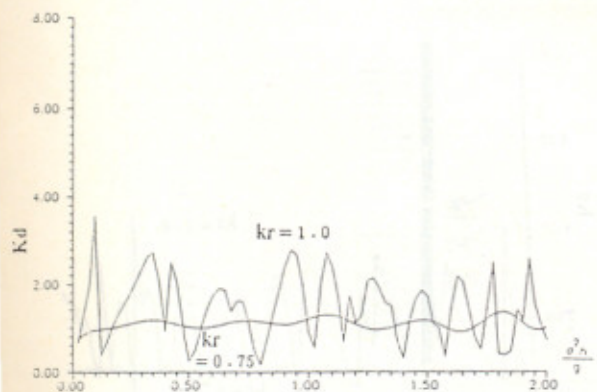
圖十四：正方形港池A點處水面共振圖  
 $b=2h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=90^\circ$   
 (數值解)



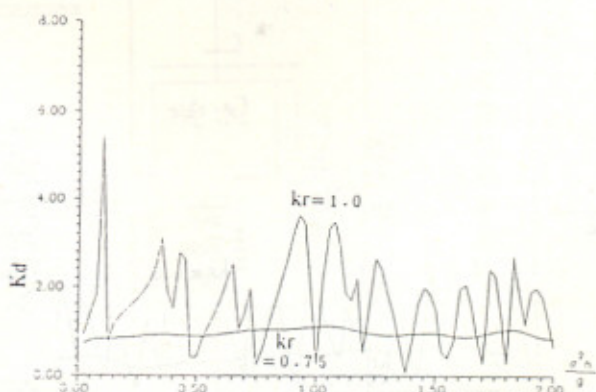
圖十五：正方形港池B點處水面共振圖  
 $b=4h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=90^\circ$   
 (數值解)



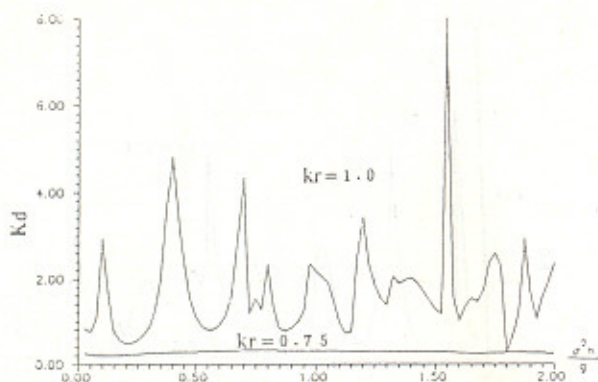
圖十六：正方形港池B點處水面共振圖  
 $b=2h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=90^\circ$   
 (數值解)



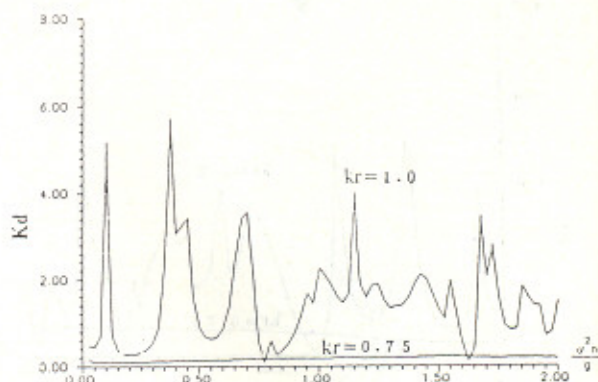
圖十七：正方形港池C點處水面共振圖  
 $b=4h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=90^\circ$   
 (數值解)



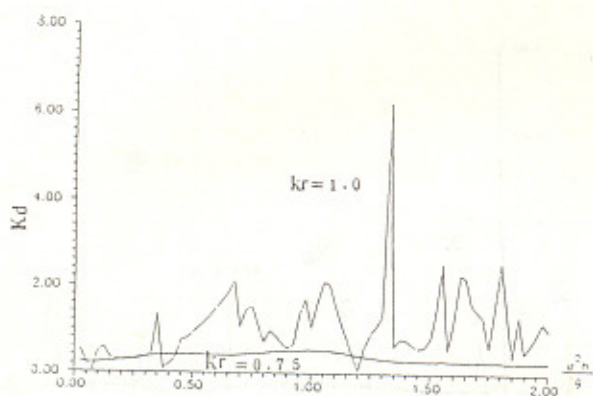
圖十八：正方形港池C點處水面共振圖  
 $b=2h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=90^\circ$   
 (數值解)



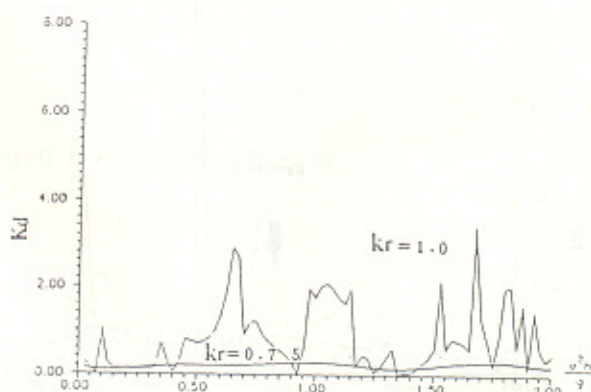
圖十九：正方形港池A點處水面共振圖  
 $b=4h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=45^\circ$   
 (數值解)



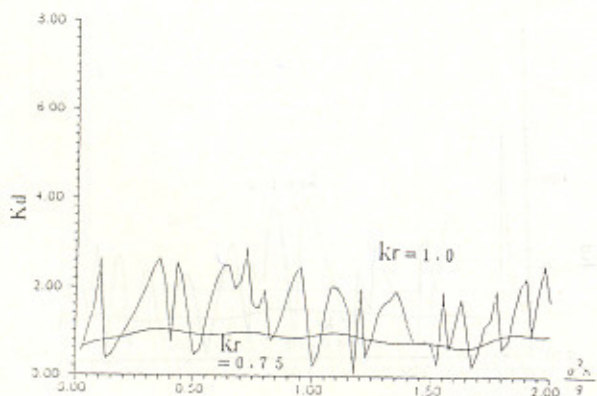
圖二十：正方形港池A點處水面共振圖  
 $b=2h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=45^\circ$   
 (數值解)



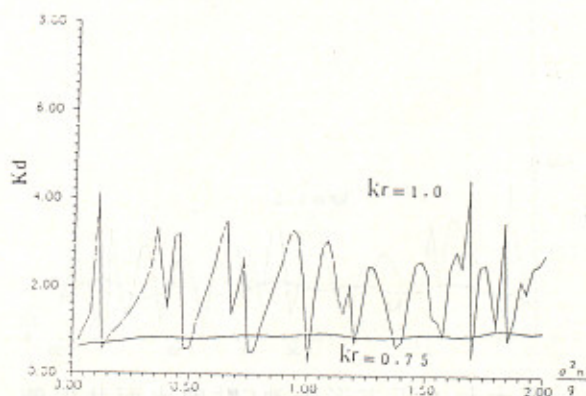
圖廿一：正方形港池B點處水面共振圖  
 $b=4h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=45^\circ$   
 (數值解)



圖廿二：正方形港池B點處水面共振圖  
 $b=2h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=45^\circ$   
 (數值解)



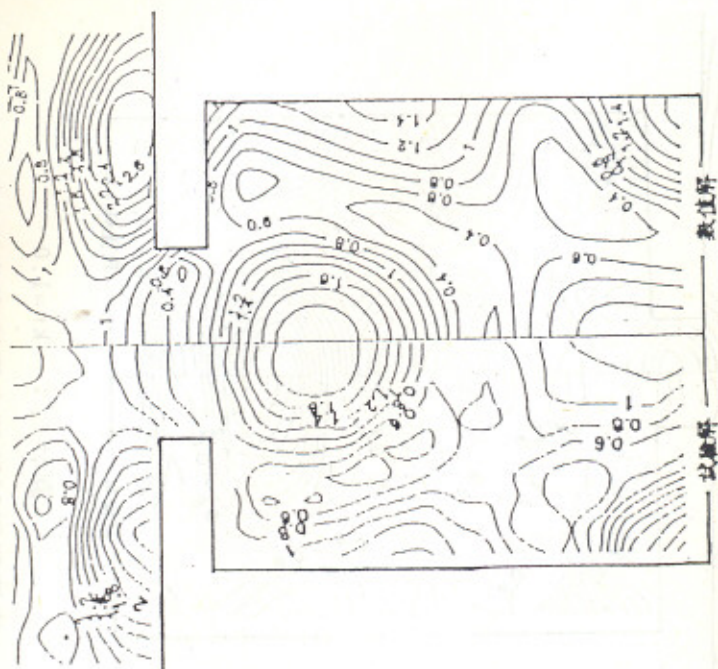
圖廿三：正方形港池C點處水面共振圖  
 $b=4h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=45^\circ$   
 (數值解)



圖廿四：正方形港池C點處水面共振圖  
 $b=2h$ ,  $L=10h$ ,  $\omega=45^\circ$   
 (數值解)

$p=4h, \sigma^2 h/g=0.5, \omega=90^\circ$

寫實解與試驗解之等波高分佈比較圖



圖廿六:  $kr=1.0$

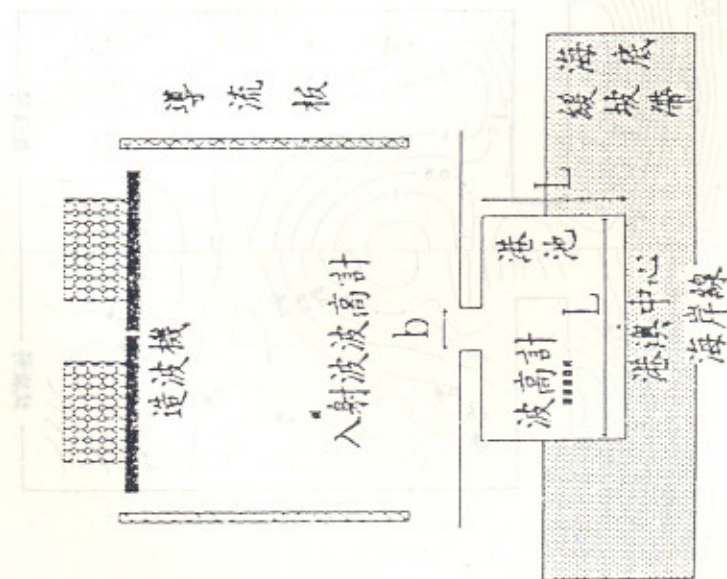
數值解與試驗解之等波高分佈比較圖

$b=4h, \sigma^2 h/g=0.5, \omega=90^\circ$

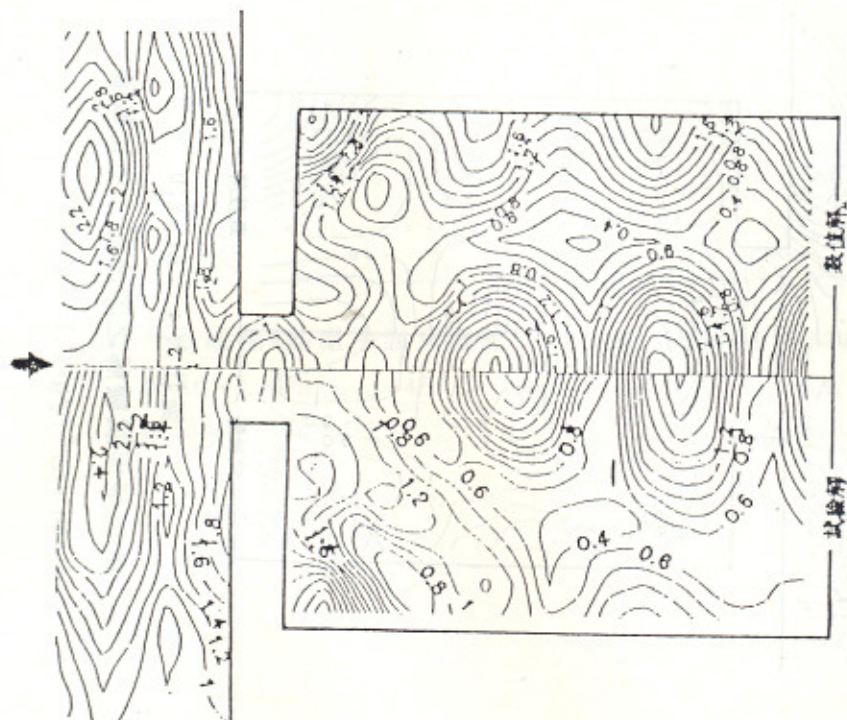
$p=5h, \sigma^2 h/g=0.5, \omega=90^\circ$

平面水槽試驗佈置示意圖

圖廿五: 平面水槽試驗佈置示意圖



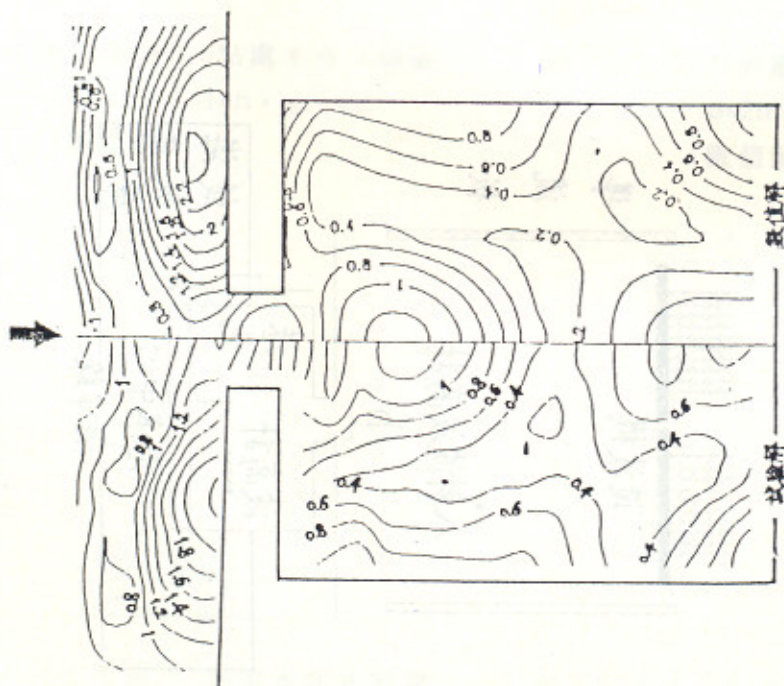
圖廿五: 平面水槽試驗佈置示意圖



圖廿八：  $kr=1.0$

數值解與試驗解之等波高分佈比較圖

$b=4h$ ,  $\sigma^2 h/g=1.0$ ,  $\omega=90^\circ$



圖廿七：  $kr=1.0$

數值解與試驗解之等波高分佈比較圖

$b=2h$ ,  $\sigma^2 h/g=0.5$ ,  $\omega=90^\circ$