

港灣多孔岸壁消波特性和試驗研究

蘇 青 和

港灣技術研究所數學模式組研究員

歐 善 惠

國立成功大學水利及海洋工程研究所教授兼所長

章 梓 雄

香港大學機械工程學系教授兼主任

Experimental Investigation on the Wave Dissipation of Porous-Wall Harbors

Ching-Bo Su
Institute of Harbor & Marine Technology
Wuchi, Taiwan 43501, R.O.C.

Shan-Hwei Ou
Department of Hydraulics and Ocean Engineering
National Cheng Kung University
Tainan, Taiwan 70101, R.O.C

and

Allen T. Chwang
Department of Mechanical Engineering
University of Hong Kong
7-17, Haking Wong Building Pokfulam Road Hong Kong

目 錄

摘 要	I
ABSTRACT	II
符號說明	III
圖目錄	V
表目錄	VI
照片目錄	VII
一、前 言	1
二、理論背景	5
三、試驗設備方法及步驟	11
四、試驗結果與數值計算比較	14
五、結 論	17
六、參考文獻	18
誌 謝	21
附錄 A—照片	22
附錄 B—附圖	26

摘 要

本文以模型試驗探討多孔岸壁及多孔岸壁港池之消波特性，針對多孔岸壁之多孔雷諾數、多孔影響參數及壁前反射係數，試驗觀測結果顯示與理論解析結果尚稱吻合。同時本文針對多孔岸壁設計之圓形及矩形港池，於波浪作用下觀測港內波高之共振特性，並與數值計算結果做合理之印證。

ABSTRACT

Wave dissipation in the laboratory of porous-wall and porous-wall harbors was investigated. Experimental results of porous-effect parameter, porous Reynolds number, and reflection coefficient by a porous-wall are in accordance with the results obtained by theoretical method. For a rectangular porous-wall harbors and a circular porous-wall harbors, the numerical solutions were verified by the experimental results.

符 號 說 明

- a : 入射波振幅
 a_1 : 不透水壁圓形港池半徑
 a_2 : 多孔岸壁圓形港池半徑
 b : 多孔板特性常數
 b_0 : 係數
 C : 無因次波浪參數
 C_r : 反射係數
 d : 多孔岸壁消波室寬度
 d_1 : A型多孔岸壁消波室寬度
 d_2 : B型多孔岸壁消波室寬度
 g : 重力加速度
 G_0 : 多孔影響參數
 h : 平均水深
 h_p : 消波室高度
 H : 入射波波高
 i : $\sqrt{-1}$
 k : 波數
 $H_0^{(1)}$: 第一類零階漢克函數
 l_1 : 不透水壁矩形港池長度
 l_2 : 多孔岸壁矩形港池長度
 L : 入射波波長
 P_1 : 壁前波壓
 P_2 : 消波室內波壓

R	: 擴大率
R_e	: 多孔雷諾數
R_0	: 阻尼係數
U	: 垂直通過多孔板流速
W	: 水單位重量
Φ_0	: 入射波流速勢
Φ_1	: 多孔岸壁前流速勢
Φ_2	: 消波室內流速勢
Φ_r	: 反射波流速勢
ϕ_0	: 入射波函數
ϕ_1	: 水域 I 波函數
ϕ_2	: 水域 II 波函數
ϕ_r	: 反射波函數
ϕ_s	: 散射波函數
ΔP	: 多孔板前後波壓差
ΔP_h	: 壓水力頭
α	: 阻抗係數
α_1	: 自由水面型態多孔岸壁之阻抗係數
α_2	: 剛性表面型態多孔岸壁之阻抗係數
μ	: 水動力滯性係數
ρ	: 水密度
σ	: 入射波週頻率

圖 1 多孔岸壁設計示意圖	27
圖 2 港池分割示意圖	28
圖 3 試驗水槽示意圖	29
圖 4 資料蒐集系統流程圖	30
圖 5 定水頭箱設計示意圖	31
圖 6 反射係數觀測點波高安置示意圖	32
圖 7 多孔岸壁矩形港池及 10° 開口圓形港池安置示意圖	33
圖 8 A型多孔岸壁無因次波數 kd_1 與反射係數 C_r 理論相關曲線和試驗比較圖	34
圖 9 B型多孔岸壁無因次波數 kd_2 與反射係數 C_r 理論相關曲線和試驗比較圖	35
圖10 A型多孔板 ($R_e=0.532$) 在不同消波室寬度 d/h 之無因次波數 kd 與反射係數 C_r 理論值相關曲線	36
圖11 消波室寬 $d/h=1.25$ 在不同多孔雷諾數 R_e 之無因次波數 kd 與反射係數 C_r 相關曲線理論值	37
圖12 B型多孔岸壁矩形港池(不透水直立壁港池)底端中央點A無因次波數 $kl_2(kl_1)$ 與擴大率 R 數值相關曲線與試驗比較圖	38
圖13 B型多孔岸壁矩形港池(不透水直立壁港池)中部中央點B無因次波數 $kl_2(kl_1)$ 與擴大率 R 數值相關曲線與試驗比較圖	39
圖14 B型多孔岸壁矩形港池(不透水直立壁港池)開口處中央點C無因次波數 $kl_2(kl_1)$ 與擴大率 R 數值相關曲線與試驗比較圖	40
圖15 B型多孔岸壁圓形港池(不透水直立壁港池)底端點A無因次波數 $ka_2(ka_1)$ 與擴大率 R 數值相關曲線與試驗比較圖	41
圖16 B型多孔岸壁圓形港池(不透水直立壁港池)中心點B無因次波數 $ka_2(ka_1)$ 與擴大率 R 數值相關曲線與試驗比較圖	42
圖17 B型多孔岸壁圓形港池(不透水直立壁港池)港口內側點C無因次波數 $ka_2(ka_1)$ 與擴大率 R 數值相關曲線與試驗比較圖	43

表 目 錄

表 1	多孔板材料係數表	14
表 2	自由水面型態多孔岸壁種類表	14

照 片 目 錄

照片 1	多孔不銹鋼板	23
照片 2	多孔岸壁配置	24
照片 3	多孔岸壁港池配置	25

一、前言

任何港池皆可能存在對某些特定週期之波浪產生港內水位突然增大之現象，此即所謂港池共振或稱港池盪漾 (harbour resonance or seiches)，港池共振現象不但防礙船舶碇靠及貨物裝卸，甚至可能造成船舶斷纜，進而使港灣構造物之破壞，在港灣規劃時若能掌握港池配置之共振週期範圍或設法降低共振幅度，則可使共振現象減到最低，是一項極為重要的工作。

Merian's 公式 (Wilson, 1972) 提出封閉式矩形港池長度 (l) 遠大於寬度之自然共振週期為

$$T_n = \frac{2l}{n\sqrt{gh}}, \quad n = 1, 2, \dots$$

式中 h = 水深， g = 重力加速度

對開放式狹長一維矩形港池 Merian's 修正公式 (Wilson, 1972) 可表示為

$$T_n = \frac{4l}{(2n+1)\sqrt{gh}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

以上公式其固定邊界 (港池內壁及海底底床) 均假設為不透水之全反射體，開口處產生共振之條件為駐波節點 (開口處水位為零)。

McNown (1952) 探討小開口圓形港池，Kravtchenko and McNown (1955) 探討狹長形小開口之矩形港池，皆引用上述的假設邊界條件，此種在開口處預作強迫式的邊界條件，與封閉式港池之自然共振現象完全相同。

Miles and Mumk (1961) 探討矩形港池開口連接外海，同時考慮由港口傳至外海之輻射效應，應用積分方程方法解析，其理論上可解任意形狀之港池，但積分方程以 Green's 函數表示。Green's 函數對

不規則港池甚難決定，其應用範圍僅討論矩形港池問題。並由解析結果，提出港池開口縮小反使港內共振情形加劇之港口矛盾論(harbour paradox)。

Ippen and Goda (1963) 以富利葉轉換法及變數分離法分別處理矩形港池外海與港內之水位解，至於在港口處做二解之連續交接條件，其理論並與小型矩形港池模型試驗結果比較甚為吻合。

林、王(1982)引用 Ippen and Goda(1963) 之方法同樣探討矩形港池共振問題，並考慮堤頭的摩擦損失及港口處的水流因收縮及擴張作用而引起的水頭損失，由理論與實驗證明Miles and Munk(1961)提出之港口矛盾論，在某些情形並不成立。

一般數學解析方法所能得到之共振正確解(exact solution)，僅局限於某些特殊之港池一如矩形或圓形，對任意形狀不規則之港池共振解，則需仰賴數值方法求得近似解。一般較常使用數值方法為有限差分法(FDM)，有限元素法(FEM)及邊界元素法(BEM)等，邊界元素法或稱邊界積分方程法(BIEM)，或 Green's公式法。

Berkhoff(1972)由微小振幅波導得緩坡方程式(mild-slope equation)作為控制方程式，並引用 Tong et al.(1973)所提出之混合元素法(hybrid element method)做數值方法。由於外海為一範圍無限之領域，而有限元素法卻只能適用在有限之領域，Mei and Chen(1975)採用混合元素法，在港內取有限元素，外海則取超元素(super element)混合使用。Tsay and Liu(1983)根據 Berkhoff(1972)所提出之緩坡方程式，並仿 Mei and Chen(1975)之模式而獲得一類似定態泛函數(stationary functional)，其適用性更加寬廣。

Hwang and Tuck (1972) 將港池之邊界視為有限個源點(source)組成，這些點在數學上即表奇異點，利用超點積分求得點源強度，進而求得港內及港外之波高分佈，其模式適用等深，任意不規則港池。

Lee(1971)應用 Welber's 解由 Helmholtz方程式(等深條件)解得一積分方程，將邊界分割為有限個邊界元素，因而化積分方程式為

一矩陣方程式，以在港口處之振幅及振幅法線方向變數，對港內及外海之解必須滿足連續條件，而求得港內波高分佈解。其模式可適用任意形狀，等深之港池，數值計算結果與小型圓形港池模型試驗結果比較甚為吻合。

周(1980)利用三次元之 Green's 公式，將港池分割成有限個領域，交接處流速勢(velocity potential)及流速勢之法線方向導數滿足連續條件，而求得任意水深及地形之港池波高分佈。周、林(1985)引用同樣方法，再考慮波浪在水深方向之變化，而對水深方向進行分割，以提高精確度，數值計算與矩形港池模型試驗比較，結果大致吻合。

以上學者所討論之共振問題，在固定邊界皆假設完全反射直立體，但事實上海岸結構物或海岸線，因具部分透水性或斜坡效應，邊界常有部分能量消散，而且在港灣工程常使用具有穿透性之孔隙物體以減低波浪之反射效果，如多孔牆、孔隙體或消波異形塊。穿透性物體主要藉具有部分能量消散、部分反射或部分穿透等特性以降低波浪作用。

Chwang(1983)探討薄均勻多孔板水平振動產生之重力自由波特性，考慮多孔板造波機放置於等水深無限長水槽中央之情況，解析結果指出，其波浪特性與一般不透水造波板產生之波浪，不但在水位變化不同，板前波壓分佈狀況也不相似。多孔板之重要特性為滿足達西定律(Darcy's law)，通過多孔板之流速與薄板兩側壓力差成正比關係。

Chwang and Li(1983)應用上述線性多孔板造波機理論，解析放置於半無限長水槽末端之活塞式多孔板造波機所產生之小振幅波特性，並提出波浪捕捉(wave-trapping)現象及描述多孔板特性之多孔影響參數 G_0 (porous-effect parameter)。

Chwang and Dong(1984)進一步探討波浪捕捉現象，在考慮上述多孔板放置於半無限長水槽近末端處，他們發現在多孔板與槽端不透水直立壁間之距離等於四分之一波長加上半波長倍數時，板前反射係數最小，此時若多孔影響參數 G_0 等於 1 時，反射係數為零，反射波

完全消失，此研究顯示多孔板及直立壁形成之消波室具有消波特性。

Chwang、Ou and Su(1989) 推廣消波室之消波功能，提出近似封閉式消波室之剛性表面多孔岸壁(porous-wall)，假設消波室為靜水區(動壓力視為零)之剛性表面型態條件下，他們發現在垂直入射波作用下，壁前之反射係數甚小，而與消波室寬度無關，僅與多孔影響參數 G_0 之值有關；當多孔影響參數 G_0 等於 1，即入射波波速等於特徵波速時，反射波完全消失。

Chwang、Ou and Su(1990) 引用剛性表面型態多孔岸壁之新觀念於港池內壁，分析比較多孔岸壁和一般不透水直立壁設計之圓形港池及矩形港池，因波浪引起之共振現象，顯示此類型多孔岸壁設計之港池減振效果甚佳。

蘇、章和歐(1991)探討自由表面及剛性表面二種不同型態多孔岸壁在斜向波浪作用之反射及波壓特性，在引用修正多孔影響參數，他們更週延描述不同方向波浪作用效應，並且在不假設消波室內動壓力為零之條件下，修正 Chwang ,Ou and Su(1989)之剛性表面多孔岸壁反射及波壓特性。

蘇、歐和章 (1991) 進一步比較以自由水面型態多孔岸壁及剛性表面型態多孔岸壁設計之港池波能消散特性。他們發現自由水面型態多孔岸壁在改變不同的多孔影響參數值，不但改變共振率大小，而且改變共振點發生之位置；而剛性表面型態多孔岸壁港池之共振點位置改變並不明顯。

在本計劃裡我們擬由實驗室對自由表面型態多孔岸壁消波特性，做進一步的分析及印證，並對自由表面型態多孔岸壁設計之圓形港池及矩形港池，取用不同的參數值進行模型試驗，以便對數學解析之結果做進一步之印證。

二、理論背景

(一) 多孔岸壁受波浪作用之反射特性

本研究主要目的是以試驗方法驗證Chwang, Ou and Su(1989, 1990), 蘇、章和歐(1991)及蘇、歐和章(1991)所提出之多孔岸壁及多孔岸壁港池(porous-wall harbors)之消波特性。多孔岸壁由多孔板(porous-plate), 不透水直立壁(板與壁水平距離 d), 及上下不透水平行壁(垂直距離 h_p)所組成一近似封閉消波室, 其設計如示意圖 1。多孔板假設滿足線性達西定律(Darcy's Law), 即通過板之垂直速度 U 與板兩側壓力差成正比關係(Chwang, 1983)

$$U = \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} = \frac{b}{\mu} (P_1 - P_2), \text{ 在 } x=0 \dots\dots\dots(1)$$

式中 Φ_1, Φ_2 分別為板前及板後之流速勢

P_1, P_2 分別為板前及板後之波壓

μ 為流體動力滯性係數

b 為多孔板材料係數, 與板孔隙率及材料特性有關。

根據Chwang, Ou and Su (1989)及蘇、章和歐(1991)探討多孔岸壁於置於半無限長水槽中受正向波浪作用, 壁前反射係數 C_r (反射波振幅與入射波振幅比值), 因消波室內在低平均水位及高平均水位分別有自由水面及剛性表面兩種不同效應。

當在平均低水時($h+H/2 < h_p$), 反射係數 C_r 為

$$C_r = \frac{[G_o^2 + \tan^2(kd)(1-G_o^2)^2 + 4\tan^2(kd)G_o^4]^{1/2}}{G_o^2 + \tan^2(kd)} \dots\dots(2a)$$

當在高平均水位時($h+H/2=h_p$)，且假設消波室動態壓 P_z 趨近於零，反射係數 C_r 為

$$C_r = \left| \frac{1 - G_o}{1 + G_o} \right| \dots\dots\dots(2b)$$

式中 k 為入射波波數， h 為水深， H 為波高， h_p 為消波室高度，
 d 為消波室寬度， G_o 為多孔影響參數。

G_o 描述多孔岸壁消波特性之重要參數定義為

$$G_o = \frac{\rho b \sigma}{k \mu} \dots\dots\dots(3)$$

而 G_o 也可表示如下式

$$G_o = R_e \cdot C \dots\dots\dots(4)$$

式中 $R_e = \frac{\rho b \sqrt{gh}}{\mu} \dots\dots\dots(5)$

$$C = \sqrt{\tanh(kh)/kh} \dots\dots\dots(6)$$

R_e 稱無因次多孔雷諾數 (dimensionless porous Reynolds number) 與波浪作用條件無關， σ 為入射波頻率， ρ 為水密度， C 稱為無因次波浪參數 (dimensionless wave parameter)。在定水深的條件下，雖然在不同週期的波浪條件下，若多孔材料係數 b 為已知，則多孔雷諾數 R_e 仍為定值。

自由水面型態多孔岸壁反射係數 C_r 之量測並且與(2)式計算值比較為我們試驗之第二項目，多孔岸壁反射係數 C_r 之試驗部份，我們將在斷面水槽中進行，採用Goda(1976)之反射波分離推定法求得。

經上述二項多孔板及多孔岸壁重要特性試驗量測，我們可求得多

孔板之材料特性係數 b ，多孔雷諾數 Re ，多孔岸壁之多孔影響參數 G 。及多孔岸壁之反射係數 C_r 。

最後我們引用上述自由水面型態多孔岸壁設計於矩形港池及圓形港池，並觀測在不同週期入射波作用下，港內波高分佈變化，及不同週期與擴大率關係之共振曲線變化，並且與蘇、歐及章(1991)多孔岸壁港池數值計算之結果做一比較及驗證。

為進一步比較多孔岸壁港池與不透水直立壁式港池之港內波高分佈，及共振曲線之差異，我們也比較Lee(1971)不透水直立壁矩形及圓形港池之港內波高試驗觀測值，以進一步了解多孔岸壁港池波能消散之影響程度。

(二)港池波場數值計算原理

考慮線性規則波理論，假設流體滿足不可壓縮，無黏性及非旋轉性，海域為等水深，則波場滿足荷姆茲方程式(Helmholtz equation) (蘇、歐及章，1991)：

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

式中 $\phi(x, y)$ 為波函數(wave function)。

k 為入射波波數，滿足下列分散關係式(dispersion relation)

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad \dots\dots\dots(7)$$

假設海底不透水，則

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \text{ 在海底 } z = -h \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中 n 為向上之垂直單位方向分量

假設港壁側邊界為多孔岸壁，則在考慮能量損失條件下，可表示為

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \alpha \phi \dots\dots\dots (9)$$

式中 α 為阻抗係數 (impedance coefficient), n 為邊界向外垂直分量。

若正向規則波作用於剛性水面型態多孔岸壁, 則其阻抗係數 α_1 , 滿足下列關係式 (蘇、歐及章, 1991)

$$\alpha_1 = ikG_0 \dots\dots\dots (10a)$$

式中 G_0 為多孔影響參數

當港壁為完全反射體, 即 $G_0=0$, 則 $\alpha_1=0$, $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$ 。

若正向規則波作用於自由水面型態多孔岸壁, 則其阻抗係數 α_2 滿足下列關係式 (蘇、歐及章, 1991)

$$\alpha_2 = \frac{ikG_0 \tan(kd)}{\tan(kd) - iG_0 k} \dots\dots\dots (10b)$$

式中 d 為多孔岸壁消波室之寬度。

波浪在外海無窮遠處應滿足 Sommerfeld 輻射條件, 即

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_s}{\partial n} - ik\phi_s \right) = 0 \dots\dots\dots (11)$$

式中 ϕ_s 為散射波 (scattered wave)。

數值模式計算港池波場變化, 為方便引用輻射條件, 常將計算海域分為港內及外海二個區域, 其介面處滿足水位及水位法線方向導數連續條件, 例如 Lee(1971), Chwang, Ou and Su(1990) 及蘇、歐及章 (1991) 解荷姆茲方程式, 皆取如圖 2 示意圖之區分法。因假設計算區域為等水深, 港內 (區域 II) 波函數 ϕ_2 及外海 (區域 I) 波函數 ϕ_1 皆分別滿足荷姆茲方程式 (6), 又因外海海岸線假設為不透水直立壁並且平

直半無限向兩側延伸 (如圖 2), 則外海波函數 ϕ_1 可分入射波 ϕ_o , 反射波 ϕ_r 及散射波 ϕ_s 等三種成份波, 入射波與反射波為已知, 而散射波滿足幅射條件(11)。以荷姆茲方程式之 Weber 解可表示為下列積分方程(蘇、歐及章, 1991):

$$\phi_s(\bar{x}) = b_0 \int_{\partial B_1} \left[\phi_s(\bar{x}_0) \frac{\partial}{\partial n_1} (H_0^{(1)}(kr)) - H_0^{(1)}(kr) \frac{\partial \phi_s}{\partial n_1}(\bar{x}_0) \right] ds \dots\dots\dots (12a)$$

$$\phi_z(\bar{x}) = b_0 \int_{\partial B_z} \left[\phi_z(\bar{x}_0) \frac{\partial}{\partial n_z} (H_0^{(1)}(kr)) - H_0^{(1)}(kr) \frac{\partial \phi_z}{\partial n_z}(\bar{x}_0) \right] ds \dots\dots\dots (12b)$$

式中 ∂B_1 , ∂B_z 分別為外海區及港內區各別之半封閉及完全封閉邊界

$$b_0 = \begin{cases} -\frac{i}{4}, & \text{當 } \bar{x} \text{ 在區域內部} \\ -\frac{i}{2}, & \text{當 } \bar{x} \text{ 在平滑區域邊界上} \end{cases}$$

$H_0^{(1)}$ 為第一類零階漢克函數 (Hankel function)

$r = |\bar{x}_0 - \bar{x}|$ 為 $\bar{x}_0$ 與 $\bar{x}$ 兩點距離

n_i 為各區域向外之垂直單位向量, $i = 1, 2$

而外海區與港內區介面 ∂A 連續條件為

$$\phi_1 = \phi_2, \quad \text{在 } \partial A \quad \dots\dots\dots (13a)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n_1} = - \frac{\partial \phi_2}{\partial n_2}, \quad \text{在 } \partial A \quad \dots\dots\dots (13b)$$

根據蘇、歐及章(1991)在引用邊界元素法，使用常數元素，即假設未知數 ϕ 及 $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ ，在每個元素上為常數，以線段 ϕ 點代表其值， $H_o^{(1)}$ ， $\frac{\partial H_o^{(1)}}{\partial n}$ 在局部元素之積分則由高斯法直接計算。最後化積分方程式(12)為二個矩陣方程式，再利用介面連續條件(13)式，即可求得港內波場。

港內擴大率(amplification factor) R ，定義為

$$R = \left| \frac{\phi_z}{\phi_o + \phi_r} \right| \quad \dots\dots\dots (14)$$

表示港內波高與入射波加反射波高和之比值。

三、試驗設備方法及步驟

(一)試驗水槽，造波系統及量測儀器

本試驗在港灣技術研究所第一試驗場棚之小型試驗水池及斷面水槽進行(示意圖如附圖3)，小型試驗水池長37.5米，寬10米、深1米，斷面水槽長28米，寬1米，深1米，水槽之一側置透明玻璃觀測段，以利試驗中各種現象觀測，水槽與小型水池共同使用一部30Hp翼板式造波機，藉調整變速齒輪及偏心距，可以產生各種週期及波高之規則波。本試驗皆在等水深之條件進行，水池及水槽底部及側面皆以水泥抹面，尚稱平滑，海底及邊界摩擦之影響忽略不計。

量測儀器包括日製KENEK CH-306型之容量型波高計。試驗水池各測點水位變化，經由波高計感應，輸入增幅器轉成電壓後傳入個人電腦(PC-AT)，再由個人電腦內之類比/數位轉換器(analog-digital converter)，轉換成數位訊號，儲存於個人電腦記憶體或硬碟，再做進一步之資料處理，詳細資料蒐集系統如圖4流程圖。

(二)多孔板材料係數b測定

本試驗多孔板採用均勻孔隙率之不銹鋼板(如照片1)，材料係數b為首先要量測之項目，在一定水頭箱(如附圖5)中進行。

根據達西定律(1)式，兩邊同時除以水之單位重量W可得

$$\frac{U}{W} = \frac{b}{\mu} \frac{\Delta P}{W} \dots\dots\dots(15a)$$

或

$$b = \frac{U \mu}{W \Delta P_h} \dots\dots\dots(15b)$$

式中 U 爲出水口處平均流速

ΔP 爲板兩側波壓差

$$\Delta P_h = \frac{\Delta P}{W} \text{ 爲壓力水頭}$$

假設忽略水箱中水頭損失，則 ΔP_h 即爲定水頭箱中之水頭差。

方程式(15)式又可表示爲

$$U = \frac{\Delta P}{R_o} \dots\dots\dots(16a)$$

式中 R_o 爲一阻尼係數，與材料係數成反比關係，而與水滯性係數 μ 成正比，表示爲

$$R_o = \frac{\mu}{b} \dots\dots\dots(16b)$$

材料係數 b 與多孔板之材料特性，孔隙率大小相關，由(16b)式顯示 b 愈大，阻尼係數 R_o 愈小，透水性愈佳。

材料係數 b 測定之步驟如下，將多孔板固定在出水口外側，待水箱溢流，測定出水量，再轉換成平均流速 U ，水之相關物理量 μ ， W 在物理環境已知條件下，可獲知其標準值， ΔP_h 則表示定水頭箱之水頭差。由上述所測得之資料代入(15b)式，即可求得多孔板材料係數 b 。

多孔岸壁之多孔雷諾數 Re ，在已知水深 h 的條件下，可由(5)式求得，而多孔影響參數 G_o 值，在已知入射波波數 k 及週頻率 σ 作用下，同時由(3)式可求得其值。

(三) 多孔岸壁反射係數 C_r 測定

反射係數測定採用 Goda(1976) 提出之反射波分離推定法，此方法

之優點爲不須移動波高計以求量得最大最小波高，僅須將使用二支波高計間格 Δd 及多孔岸壁與較近波高計之距離 Δx 安置於適當位置即可，Goda(1976)反射波分離推定法詳細理論，本文不再敘述。

多孔岸壁安置於斷面水槽底端，如示意圖6及照片2，我們取用孔隙半徑爲0.06米之多孔板，多孔岸壁之消波室寬度則取寬0.1米(A型)及0.5米(B型)二種條件。我們將觀測自由水面型態之孔岸壁港池之反射係數，而試驗水位平均水深約0.40米，週期範圍1秒至4秒，波長範圍1.2米~7.8米，波高範圍0.08米~0.38米。

入射波高由最接近造波板之波高計測定，在波形穩定後電腦開始存取水位資料，放置於觀測多孔岸壁反射係數之二支波高計間格 Δd ，根據Goda(1976)建議應避免選定爲二分之一波長之整數倍。反射係數則由此二支波高計之水位記錄推算，分析水位記錄資料，在反射波到達造波板所造成之再反射波送達記錄波高計後之水位記錄，即不可採用。

(四)多孔岸壁港池內波高測定

以鐵板設計長1.2米，寬0.3米，高0.6米之多孔岸壁矩形港池，取用之B型多孔岸壁之消波室寬爲0.1米，多孔板孔徑0.06米。其次取B型多孔岸壁設計半徑爲0.6米之 10° 開口多孔岸壁港池，如附圖7及照片3。

試驗平均水深0.40米，入射波週期範圍1秒~4秒，試驗與斷面水多孔岸壁反射係數 C_r 量測同時進行，波高計位置Ch1, Ch2爲入射波觀測點，Ch3, Ch4二點爲斷面多孔岸壁反射係數推算之記錄位置Ch5爲壁前參考點(位置如附圖6)，而A, B及C三點爲矩形港池內之觀測點(位置如附圖7)，同理取A, B及C三點爲圓形港池內之觀測點(位置如附圖7)。

四、試驗結果與數值計算比較

(一) 多孔材料係數 b ：

本試驗採用孔隙不銹鋼板做多孔板，經水頭箱測定結果如下表：

表一 多孔板材料係數

多孔板型號	孔隙半徑(米)	多孔材料係數 b (米)
A 型	0.06	0.232×10^{-6}

[註]： b 值當做數值計算之已知值，若平均水深為0.40米，室溫 25°C ，標準氣壓之條件下，多孔雷諾數值為 $Re=0.532$ 。

(二) 多孔岸壁分類

本試驗採用之自由水面型態多孔岸壁計有下列2種，分類如下表：

表二 自由水面型態多孔岸壁種類

多孔岸壁型號	多孔板型號	消波室寬度 d (米)	消波室高度 h_p (米)
A 型	A 型	$d_1=0.5$	0.6
B 型	A 型	$d_2=0.1$	0.6

(三) 反射係數 C_r

自由水面型態多孔岸壁在規則波正向作用下之反射係數 C_r ，滿足方程式(2a)，圖8實線部分為A型多孔岸壁 ($R_e=0.532$ $d_1/h=1.25$) 在不同週期之入射波作用下，無因次波數 kd_1 與反射係數 C_r 理論值相關曲線，圓點則為試驗結果，圖中顯示，二者趨勢大略一致，不過實驗值顯些略小於理論值，圖9為B型多孔岸壁 ($R_e=0.532$ $d_2/h=0.25$)，在不同週期波浪正向作用下，無因次波數 kd_2 與反射係數 C_r 理論值與試驗值之比較圖。粗略而言，理論值與試驗值趨勢尚稱一致，但因試驗所產生波浪週期範圍甚為窄小，無法做較完整之驗證。

圖10為A型多孔板 ($R_e=0.532$) 在不同消波室寬度 d/h ，入射波無因次波數 kd 與反射係數 C_r 之相關曲線理論值，圖中顯示曲線為週期變化，週期為 π ，而隨 d/h 值之略增，極小值減小。而 kd 值較小時 C_r 減小率，遠較 kd 值大時減小速度為快。

圖11則為消波室寬度 $d/h=1.25$ ，在考慮不同多孔雷諾數 R_e ，入射波數 kd 與反射係數 C_r 之相關曲線理論值，圖中也顯示曲線為週期變化，週期為 π ，隨多孔雷諾數 R_e 之增大而 C_r 值減少，但 R_e 再增大時則 C_r 值遞減，呈週期變化。

(四) 多孔岸壁矩形港池及 10° 開口圓形港池

1. 多孔岸壁矩形港池

在不同週期波浪作用下，針對多孔岸壁矩形港池底端中點A，中部中點B、開口處中點C等三點處，圖12～圖14分別為三點無因次波數 kl_z 與擴大率 R 相關曲線理論與試驗比較結果。虛線部分為A型多孔岸壁港池(長 l_2) 數值模式計算結果，實線部分則為不透水壁港池(長 l_1) 之數值計算結果，圓點實心部分則為多孔岸壁之

試驗量測結果，圓點空心則為 Lee(1971)不透水港池(長 l_1)之試驗值。Lee(1971)不透水港池試驗值共振點發生位置，與理論比較尚稱吻合，僅試驗值較數值計算點為小。多孔岸壁港池共振點發生位置，較不同大小不透水港池有右移的現象發生，顯示多孔岸壁不僅改變擴大率之大小而且改變共振發生之位置。但試驗值之位置與理論值位置相差甚明顯，試驗共振發生之位置介於理論不透水港池與多孔岸壁港池之間，顯示試驗值之共振發生位置右移的現象，不如數值計算強烈。

2. 多孔岸壁 10° 開口圓形港池

同多孔岸壁矩形港池一樣，在考慮不同入射波週期作用下，選取 10° 開口圓形港內底部A點，中心點B及港口內側C點等三點，圖15～圖17分別表示三觀測點，不同無因數波數 ka_2 與擴大率R相關曲線數值計算與試驗觀測比較結果。虛線部分為 A型多孔岸壁港池(半徑 a_2)之數值計算結果，實線部分為不同大小不透水壁港池(半徑 a_1)之數值計算結果，圓點部分則為多孔岸壁試驗觀測值。而多孔岸壁圓形港池之共振點發生處比較不透水壁圓形港池也有右移偏小之現象，但數值計算結果與試驗值共振位置仍有相差存在。

五、結 論

本文以模型試驗探討自由水面型態多孔岸壁在斷面水槽受不同週期波浪作用下，反射係數 C_r 與多孔雷諾數 Re 、多孔影響參數 G_0 、消波室寬度 d 等參數之關係，並與蘇、章和歐(1991)及蘇、歐和章(1991)之理論解做一合理驗證，針對以孔隙大小為0.06米多孔不銹鋼板設計之多孔岸壁，試驗之結果與理論值尚稱吻合。而在多孔板假設滿足線性達西定律之條件下，如孔隙增大是否還滿足，有待進一步之印證。

最後引用 B型多孔岸壁設計之矩形港池及 10° 開口圓形港池，根據數值計算結果，顯示自由水面型態多孔岸壁設計之港池不但減小港內共振點之擴大率，而且會改變其發生位置。而模型試驗結果，則顯示共振點擴大率更顯著的減小，且共振點也有平移的現象。

六、參考文獻

1. Berkhoff, J. C. W. , "Computation of combined refraction -diffraction", Proceeding of the 13th Coastal Engineering Conference, Vol.1, pp.471-490 (1972).
2. Chwang, A.T., "A porous-wavemaker theory ", J. Fluid Mech. , Vol.132, pp.395-406 (1983).
3. Chwang, A.T. and W. Li, "A piston-type porous wave-maker theory", J. Eng. Math., Vol.17 , pp.301-313 (1983).
4. Chwang, A.T. and Z. Dong, "Wave-trapping due to a porous plate", Proc.15th ONR Sym. on Naval Hydrodynamics Hamburg ,Germany, pp.407-417 (1984).
5. Chwang, A.T., S.H. Ou, and Su, C.H., "Dissipation of wave energy by a porous wall ", CKHORT-89-005 ,Dept. of Hydraulic and Ocean Eng., National Cheng Kung Univ. ,Taiwan, R.O.C. (1989).
6. Chwang , A.T., S.H. Ou and Su, C.H., "Wave oscillations inside porous-wall harbors" , Proc. of 5th Conference on Hydraulic Eng. , Taiwan, R.O.C. pp.853-868 (1990).
7. Goda, Y. and Y. Suzuki, "Estimation of incident and reflected waves in random waves experiments" ,Proc. 15th Coastal Eng. conf., pp.628-650 (1976).
8. Hwang, L. S. and E. D. Tuck, "On the oscillations of harbors of arbitrary shape", J. Fluid, Mech, Vol. 42, part 3, pp.447-464 (1972).
9. Ippen, A.T. and Goda, Y., "Wave induced oscillations in harbors:the solution for a rectangular harbour connected to the open-sea", Hydrodynamics Lab., M.I.T. T.R. No. 59 (1963).

10. Kravtchenko, J. and J. S. McNown, "Seiche in rectangular ports", Part, Appl. Math. 13, pp.19-26 (1955).
11. Lee, J. J., "Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary Geometry.", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 45, pp.375-394 (1971).
12. McNown, J. S., "Wave and Seiche Idealized Ports", Gravity Wave Symposium, National Bureau of Standards Circular Region pp.521 (1952).
13. Mei, C.C. & H.S. Chen, "Hybrid element method for water waves", Symposium on Modeling Techniques 2nd Annual Symposium of the Waterways Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol.1, pp.63-81 (1975)
14. Miles, J. and W. Munk, "Harbor pordors", J. Waterways and Harbors Division, ASCE, WW 3, pp.111-130 (1961).
15. Tong, P. T. H. H. Pion, and S. J. Lasry, "A hydrid-element approach to crack problems in plane elasticity", International J. Numerical Methods in Engineering, Vol.7, pp.297-308 (1973).
16. Tsay, T. K. and P. L-F Liu, "A finite element model for wave refraction and diffraction", Applied Ocean Res., Vol.5, No.1, pp.30-37 (1983).
17. Wilson, B.W. "Seiches", Advances in Hydro-science, Vol.8, pp.1-94 (1972).
18. 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", 中華民國第十二屆海洋工程研討會論文集, PP.74-94 (1990)。
19. 蘇青和, 章梓雄, 歐善惠, "多孔岸壁受斜向波浪作用之反射及波壓特性", 力學期刊, 中華民國力學學會, (已接受) (1991)。

20. 蘇青和, 歐善惠, 章梓雄, "多孔岸壁港池之波能消散", 港灣技術研究所專刊70號 (1991)。
21. 林銘崇, 王武俊, "矩形港池共振特性之研究", 國立海洋學院河海工程學系, 河海研究第 13 號 (1982)。
22. 周宗仁, "應用有限領域法解析港池水面波動問題", 國立海洋學院河海工程學系, 河海研究第 3 號 (1980)。
23. 周宗仁, 林炤圭, "應用邊界元素法數值解析任意地形及水深之港池水面波問題", 第八屆海洋程研討會論文集, pp. 111-129 (1985)。

誌 謝

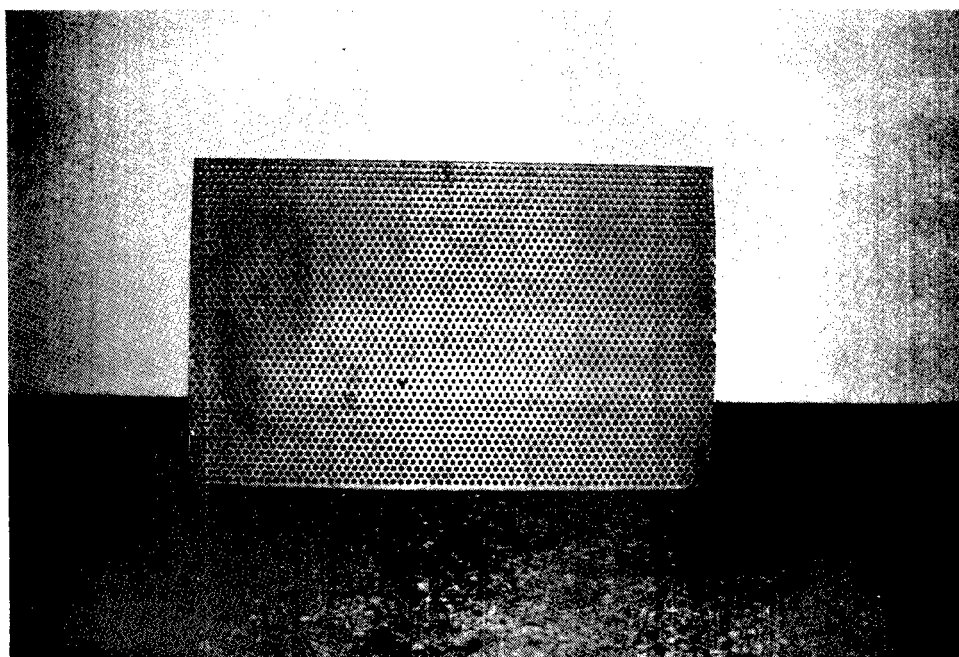
本計畫承國家科學委員會補助，計畫編號：NSC79-0410-E124-01，謹此誌謝。

承本所同仁陳明宗、莊文傑、廖慶堂、江中權、曾文傑等試驗過程之協助，陳毓清小姐之論文繕打，一併於此致謝。

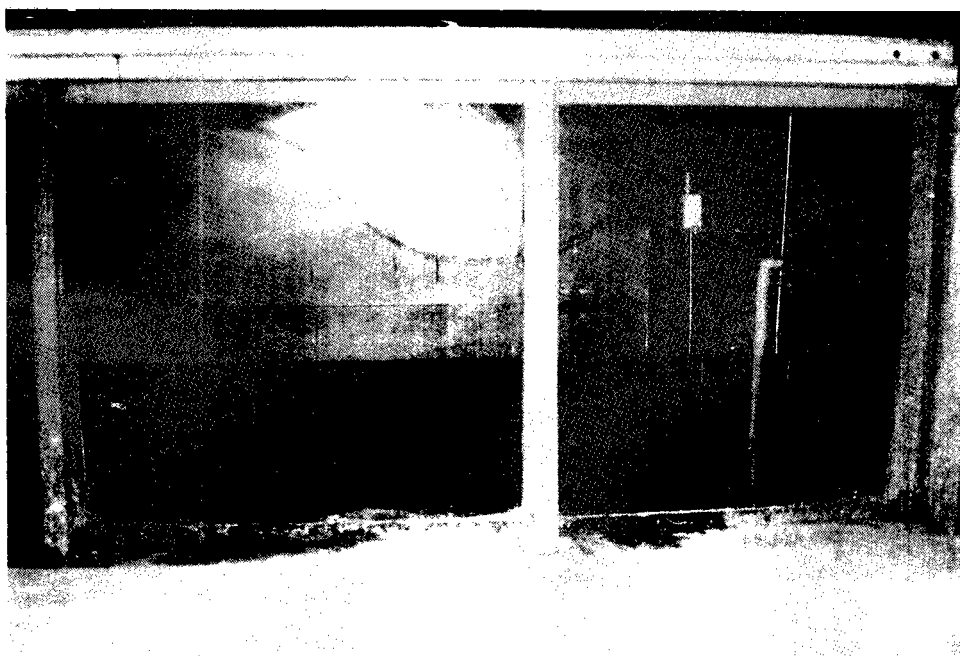
附
錄
A

—

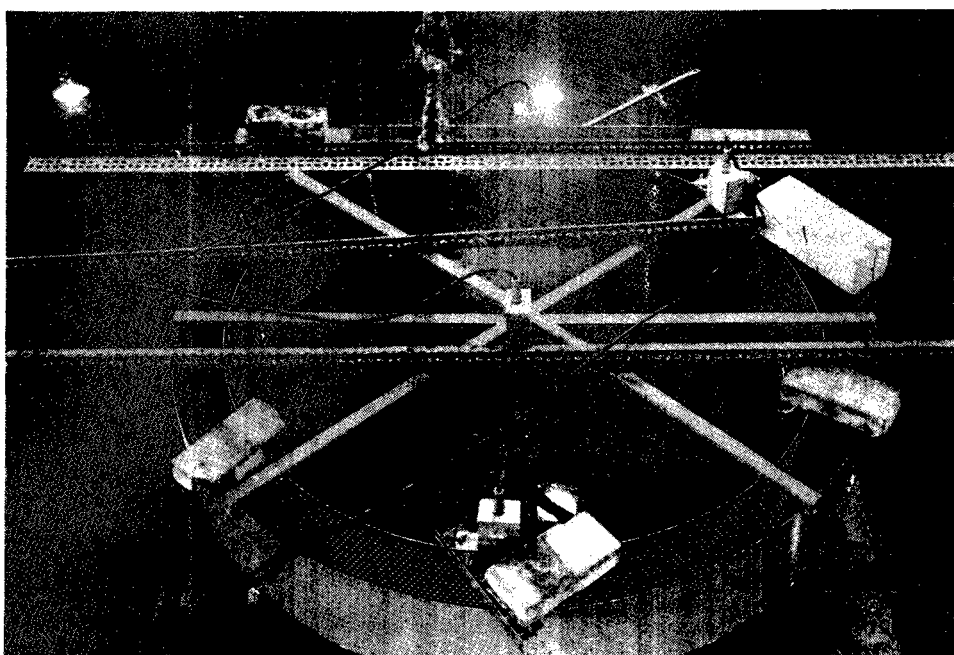
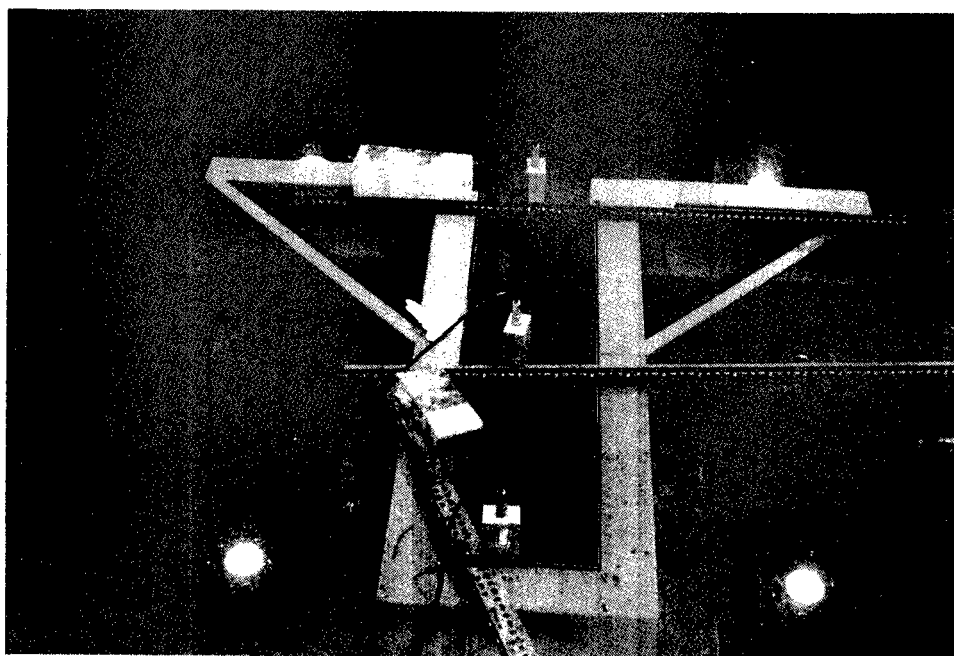
照
片



照片 1 多孔不銹鋼板



照片 2 多孔岸壁配置

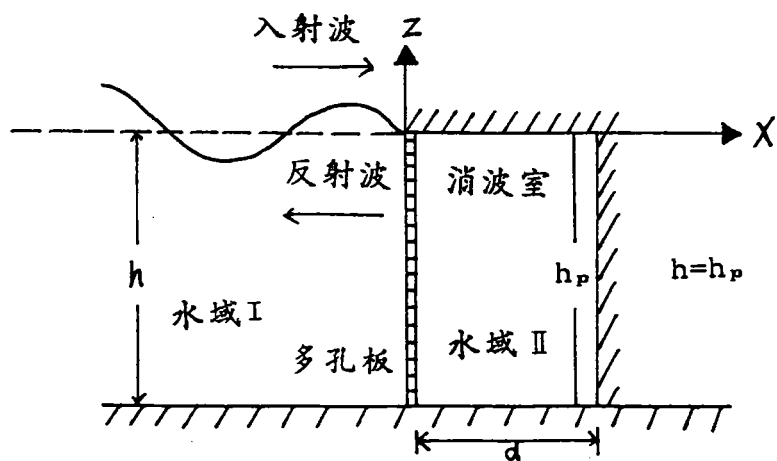


照片 3 多孔岸壁港池配置

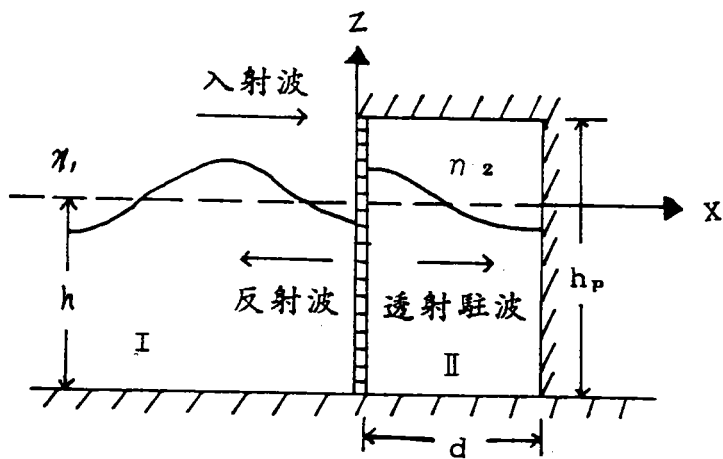
附
錄
B

|

附
圖



高平均水位多孔岸壁受波浪作用示意图



低平均水位多孔岸壁受波浪作用示意图

圖 1 多孔岸壁設計示意图

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_s}{\partial n} - ik \phi_s \right) = 0$$

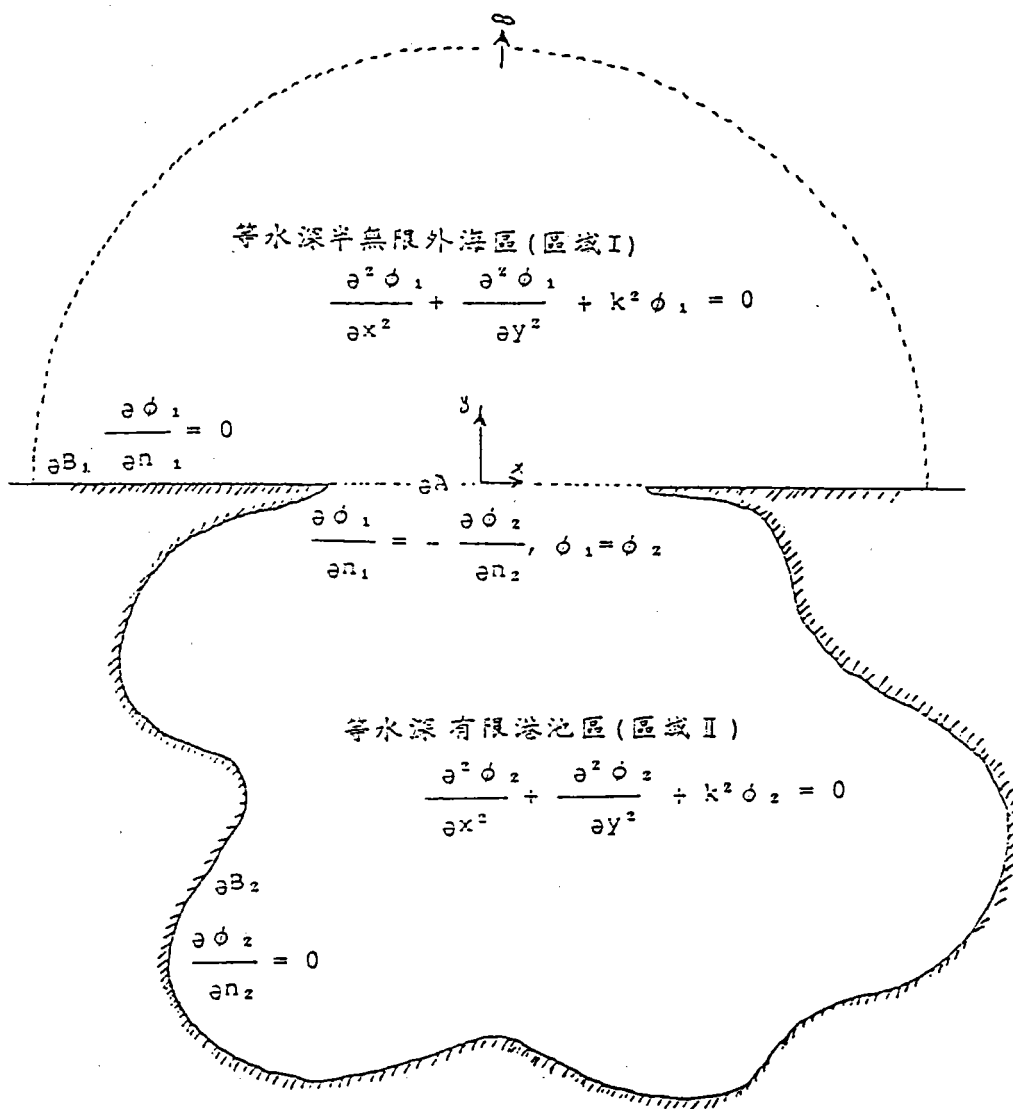


圖 2 港池分割示意圖

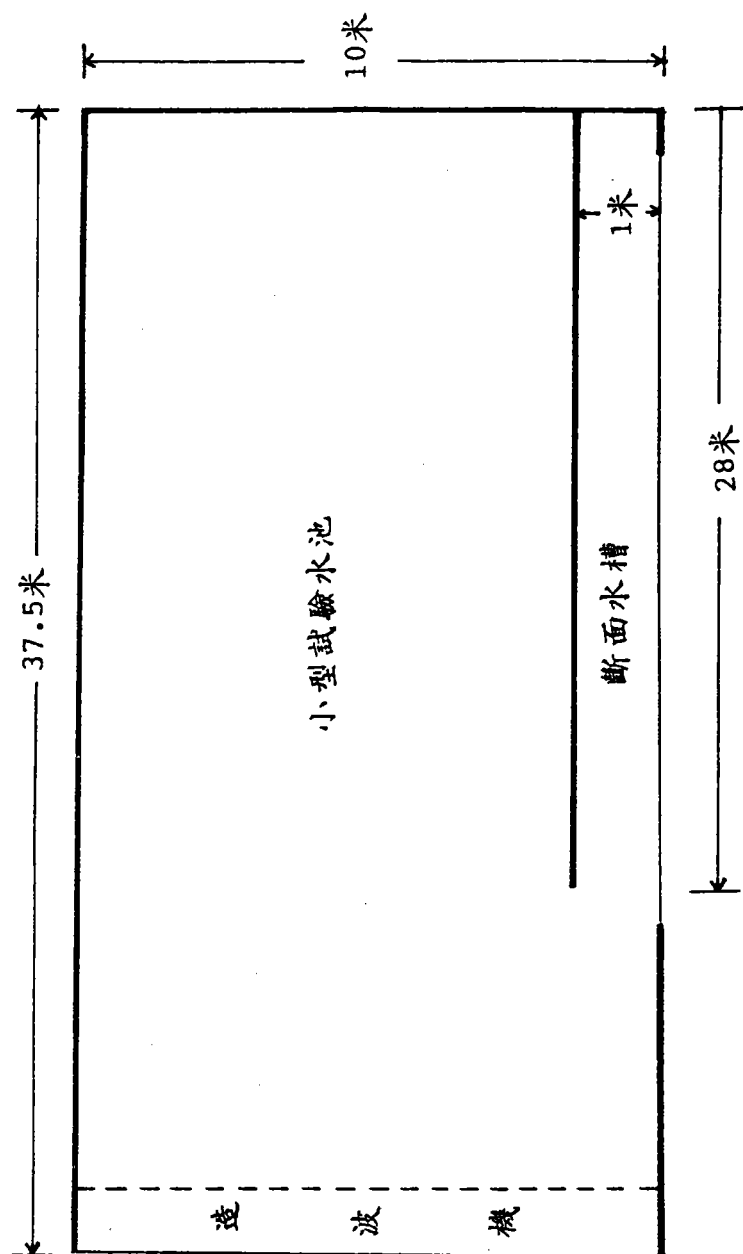


圖 3 試驗水槽示意圖

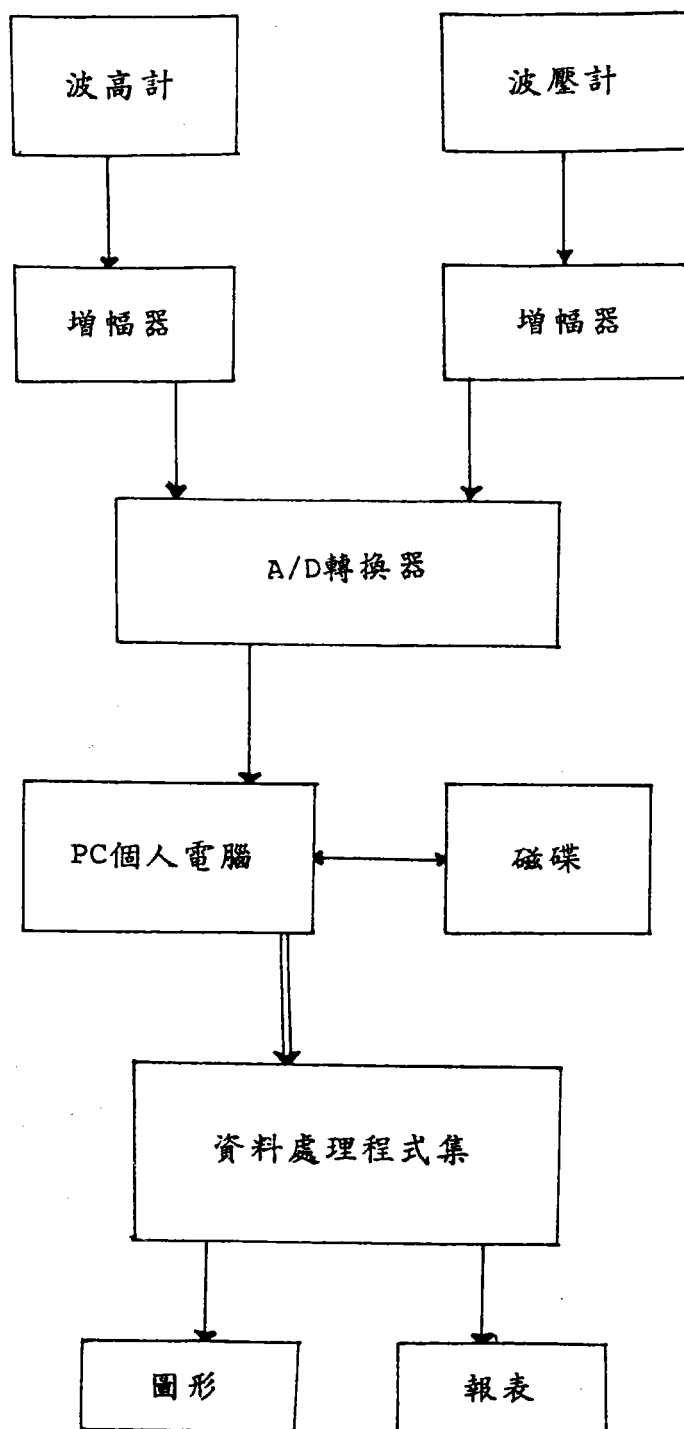
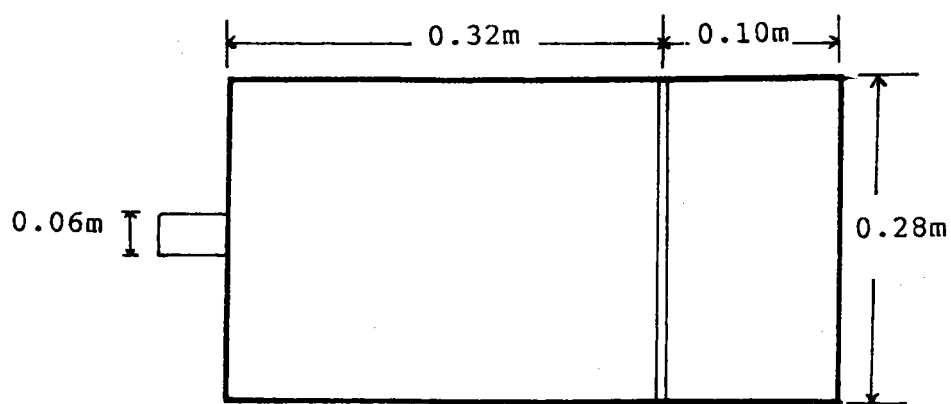
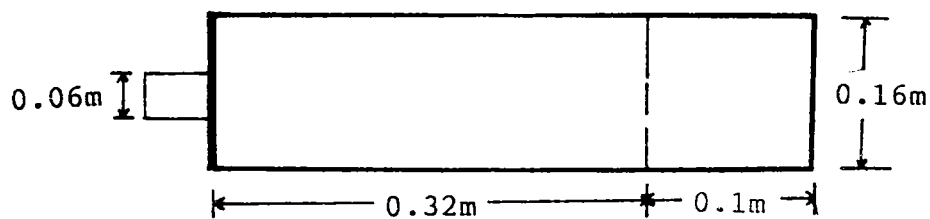


圖 4 資料蒐集系統流程圖



上視圖



側視圖

圖 5 定水頭箱設計示意圖

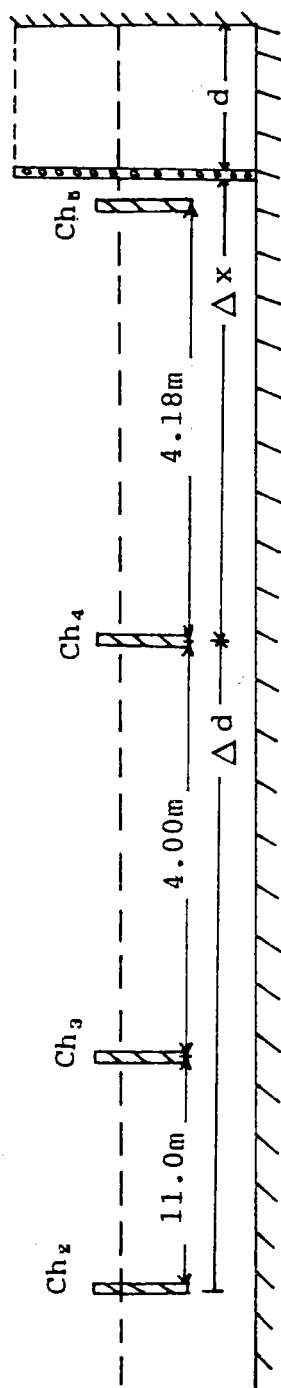


圖 6 反射係數觀測點波高安置示意圖

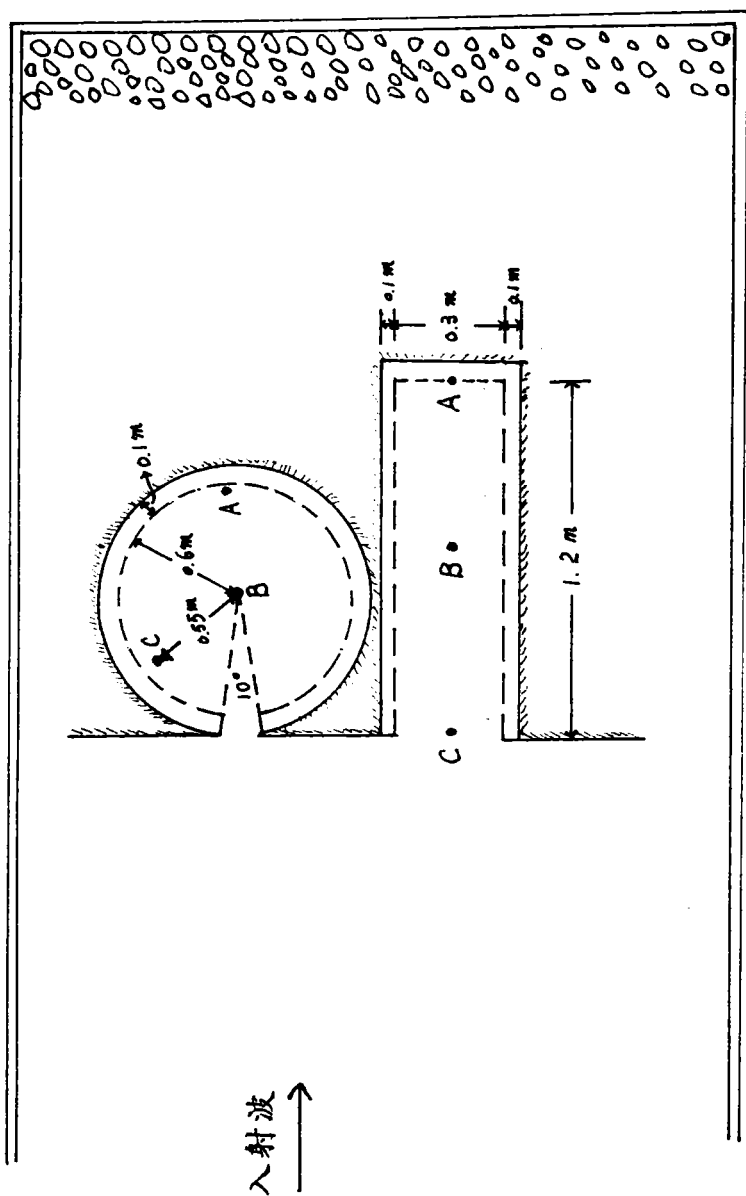


圖 7 多孔岸壁矩形港池及10°開口圓形港池安置示意圖

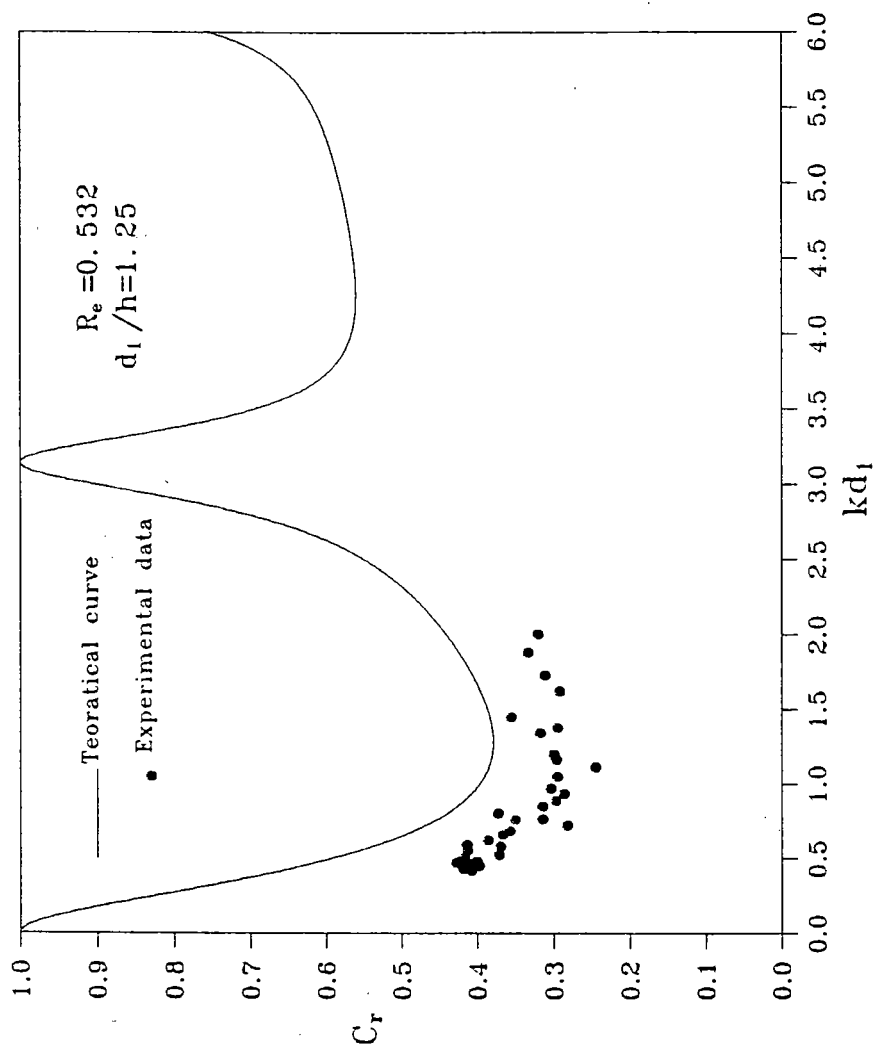


圖 8 A型多孔岸壁無因次波數 kd_1 與反射係數 C_r 理論相關曲線和試驗比較圖

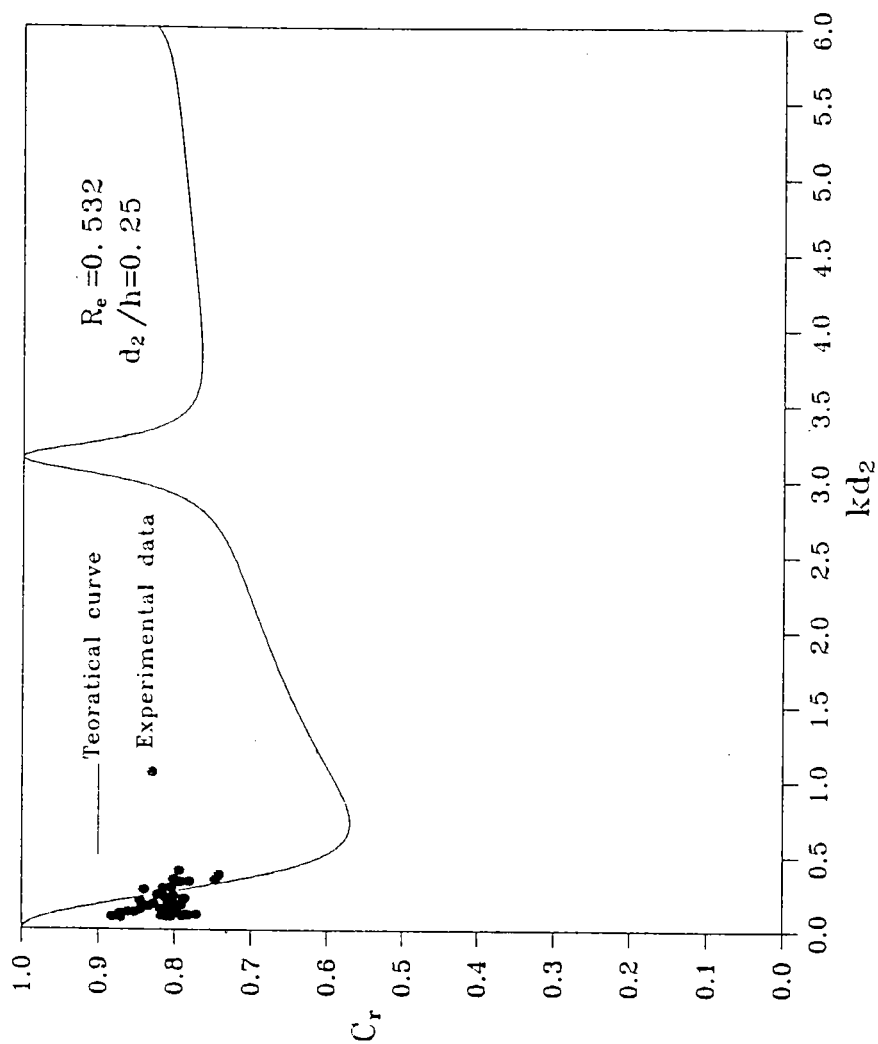


圖 9 B型多孔岸壁無因次波數 kd_2 與反射係數 C_r 理論相關曲線和試驗比較圖

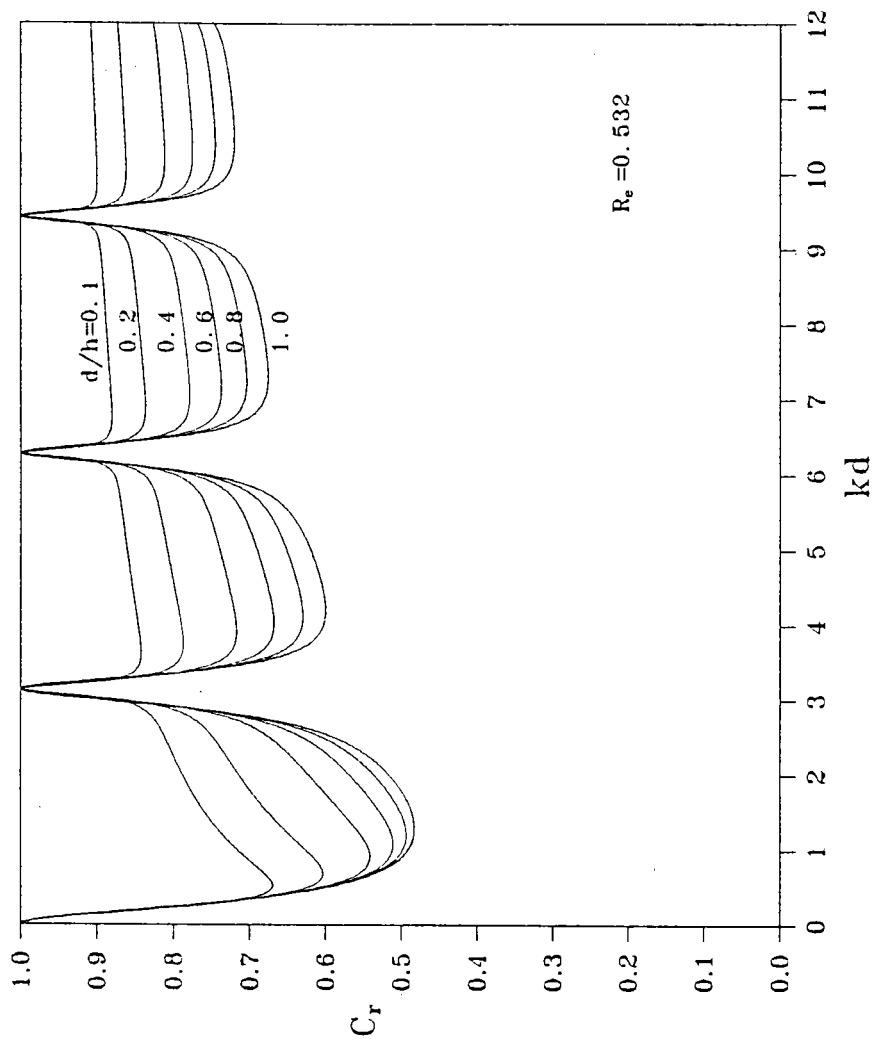


圖 10 A型多孔板 ($R_e=0.532$) 在不同消波室寬度 d/h 之
無因次波數 kd 與反射係數 C_r 理論值相關曲線

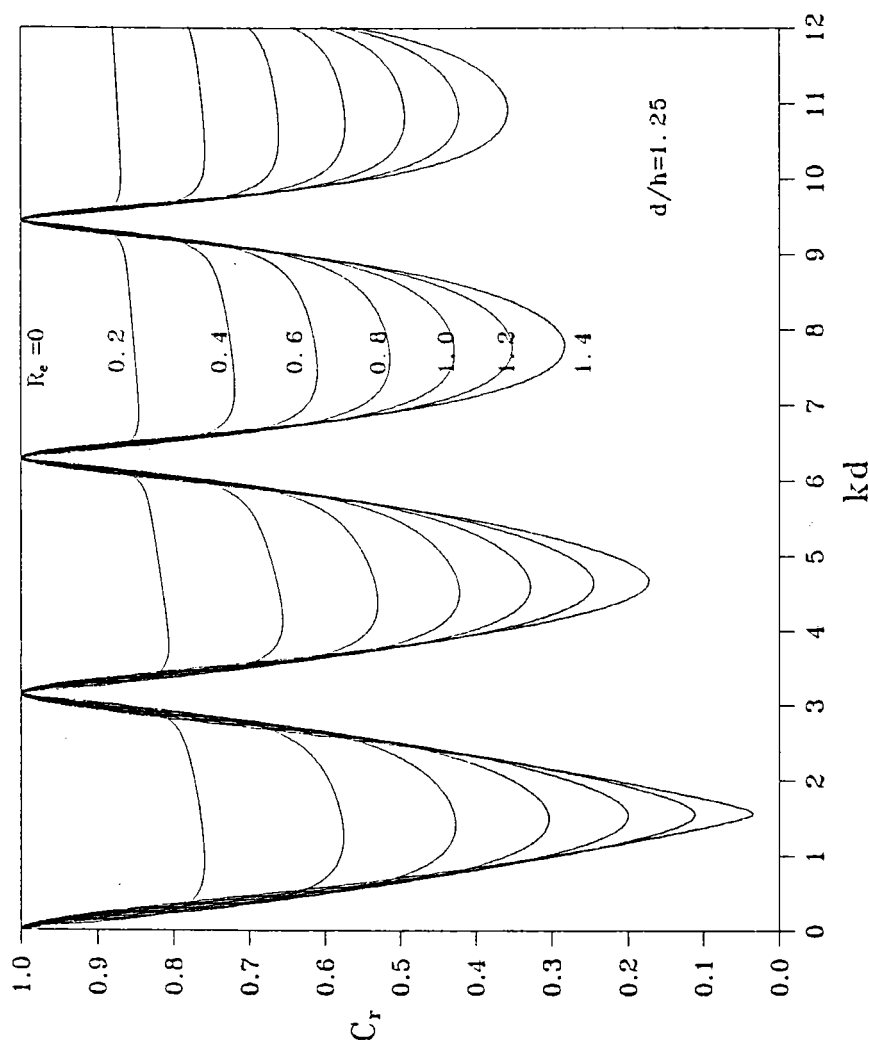


圖11 消波室寬 $d/h=1.25$ 在不同多孔雷諾數 R_e 之
無因次波數 kd 與反 射係數 C_r 相關曲線理論值

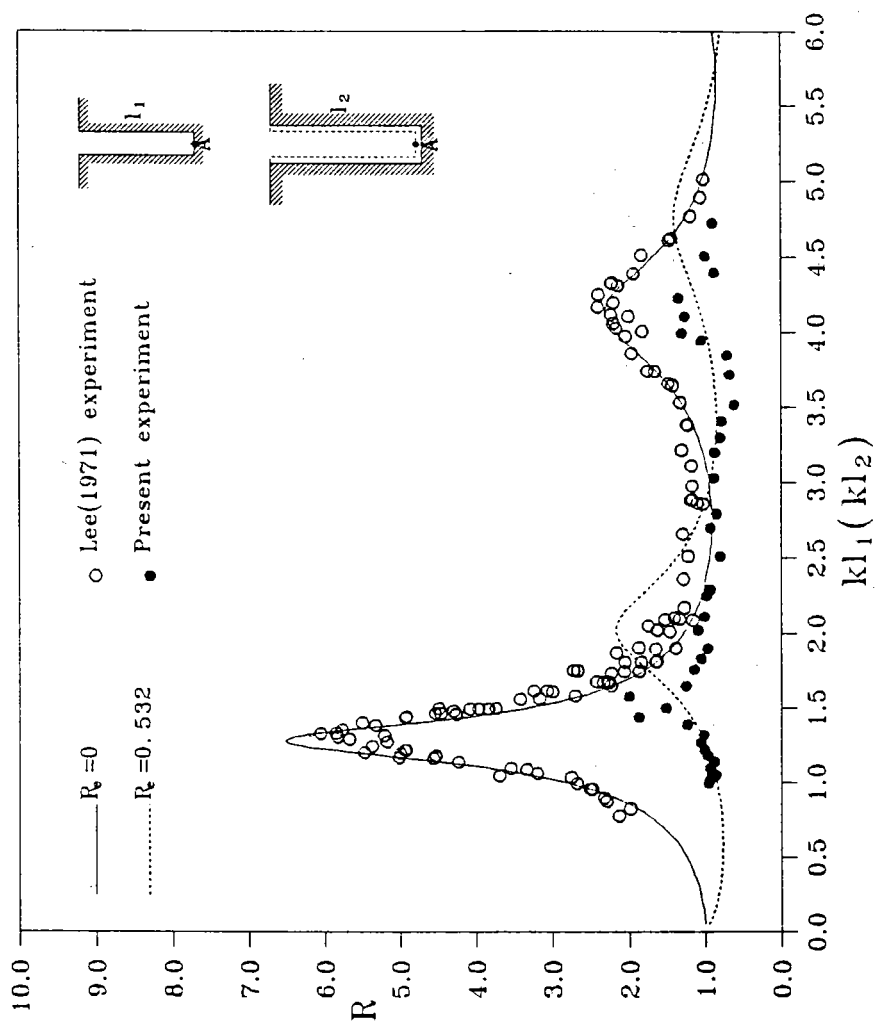


圖12 B型多孔岸壁矩形港池(不透水直立壁港池)底端中央點A之無因次
波數 $kl_2(kl_1)$ 與擴大率 R 數值相關曲線與試驗比較圖

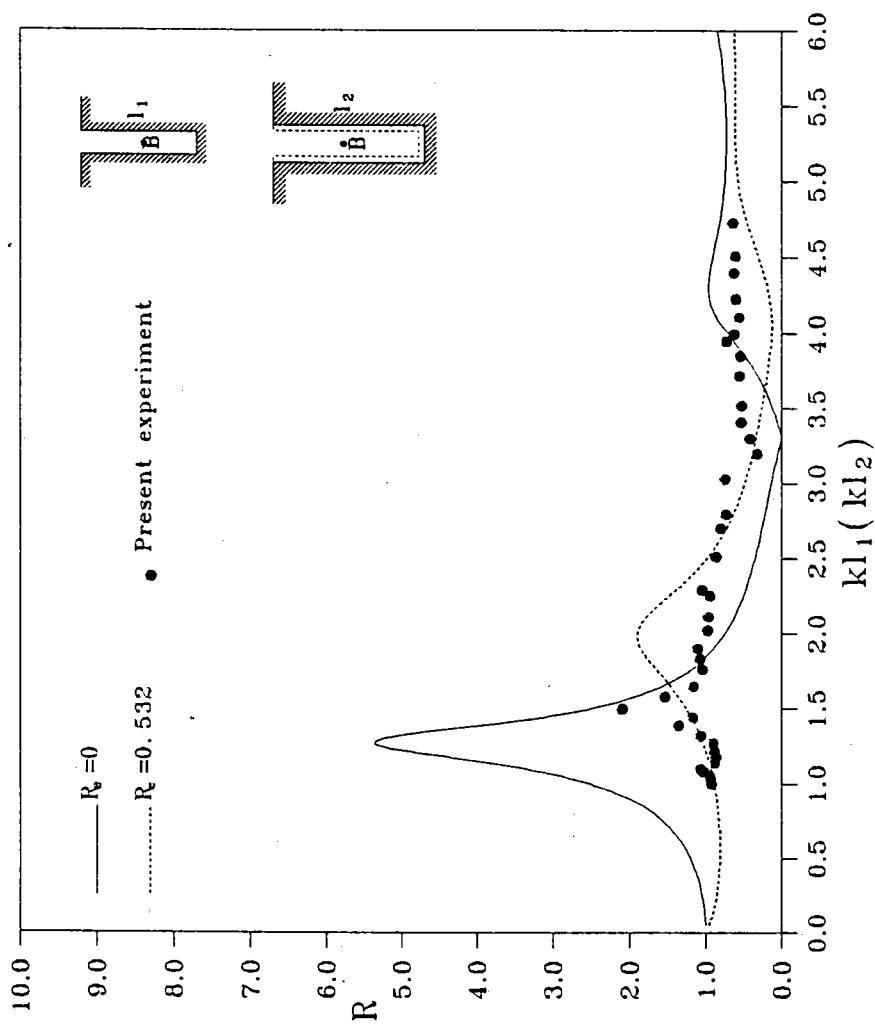


圖13 B型多孔岸壁矩形港池(不透水直立壁港池)中部中央點B之無因次
波數 $kl_2(kl_1)$ 與擴大率 R 數值相關曲線與試驗比較圖

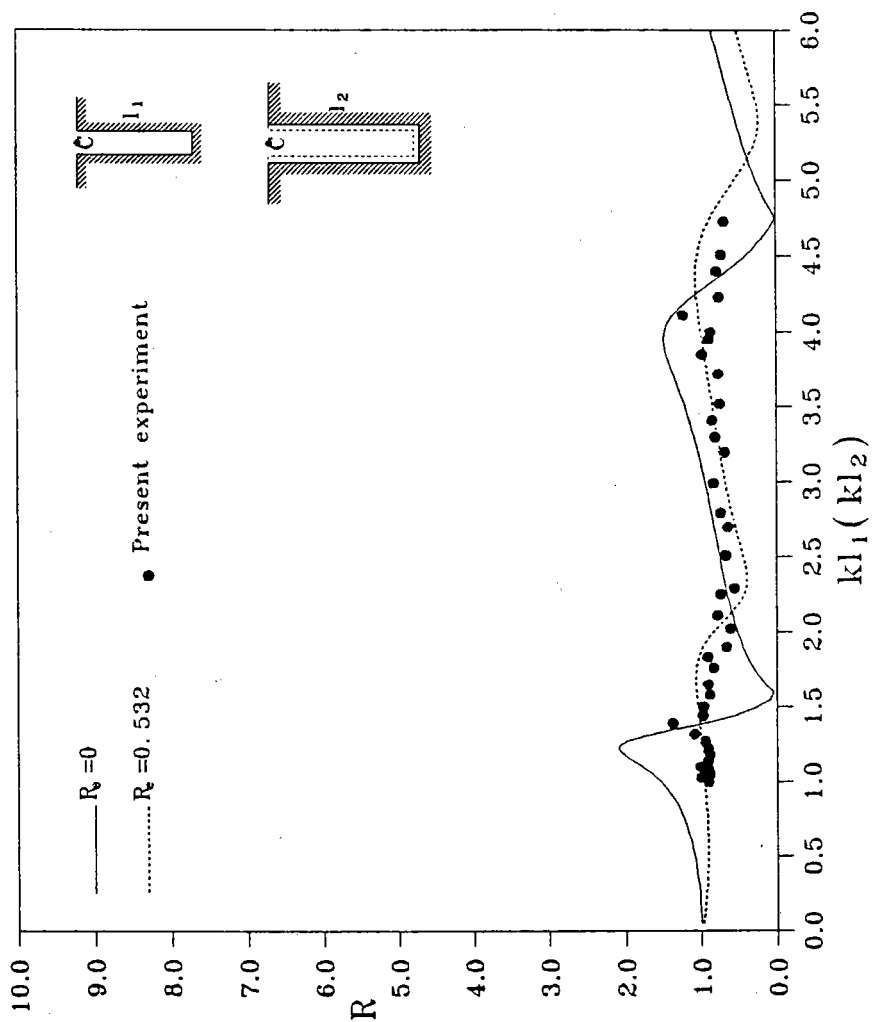


圖14 B型多孔岸壁矩形港池(不透水直立壁港池)開口處中央點C之
無因次波數 $kl_2(kl_1)$ 與擴大率 R 數值相關曲線與試驗比較圖

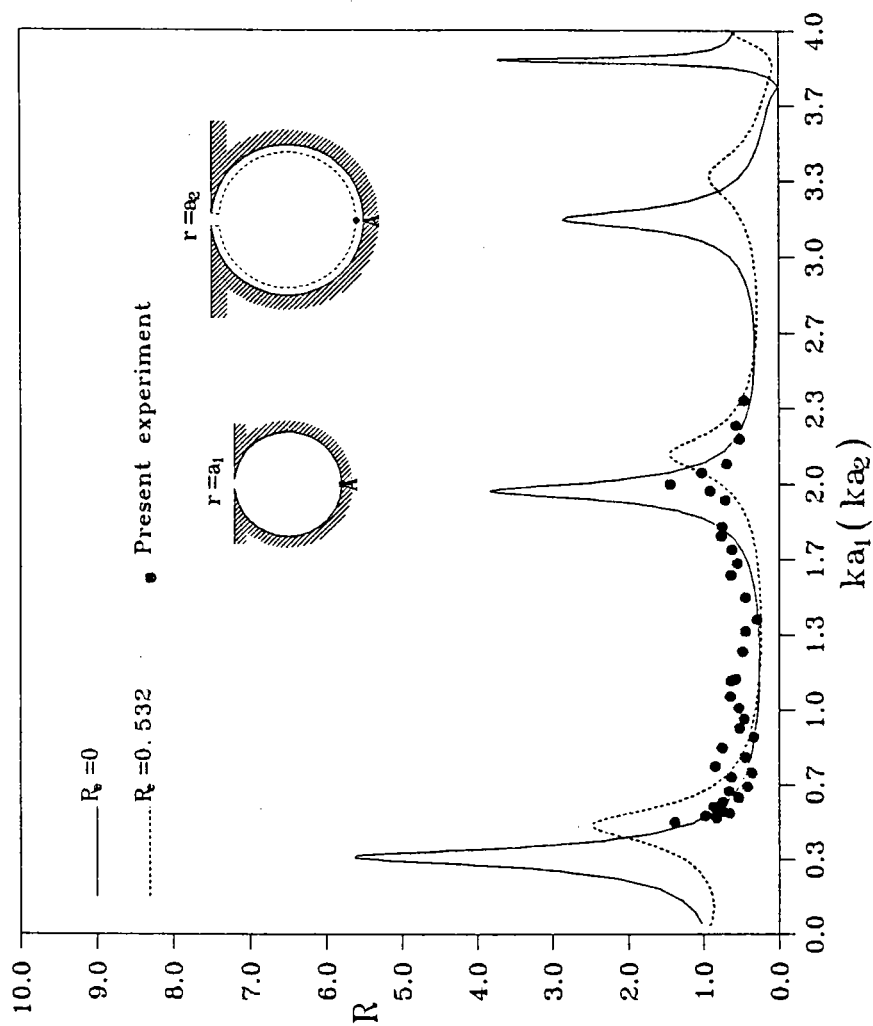


圖15 B型多孔岸壁圓形港池(不透水直立壁港池)底端點A之無因次
波數 $ka_2(ka_1)$ 與擴大率 R 數值相關曲線與試驗比較圖

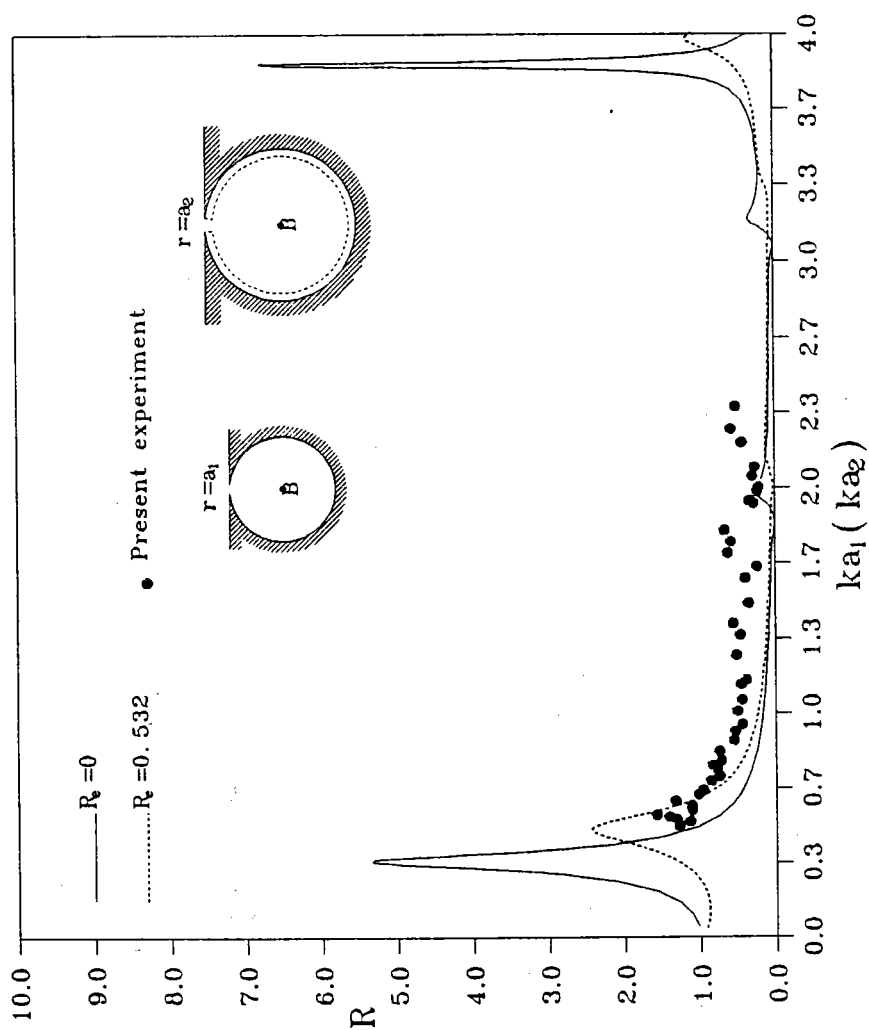


圖16 B型多孔岸壁圓形港池(不透水直立壁港池)中心點B之無因次
波數 $ka_2(ka_1)$ 與擴大率 R 數值相關曲線與試驗比較圖

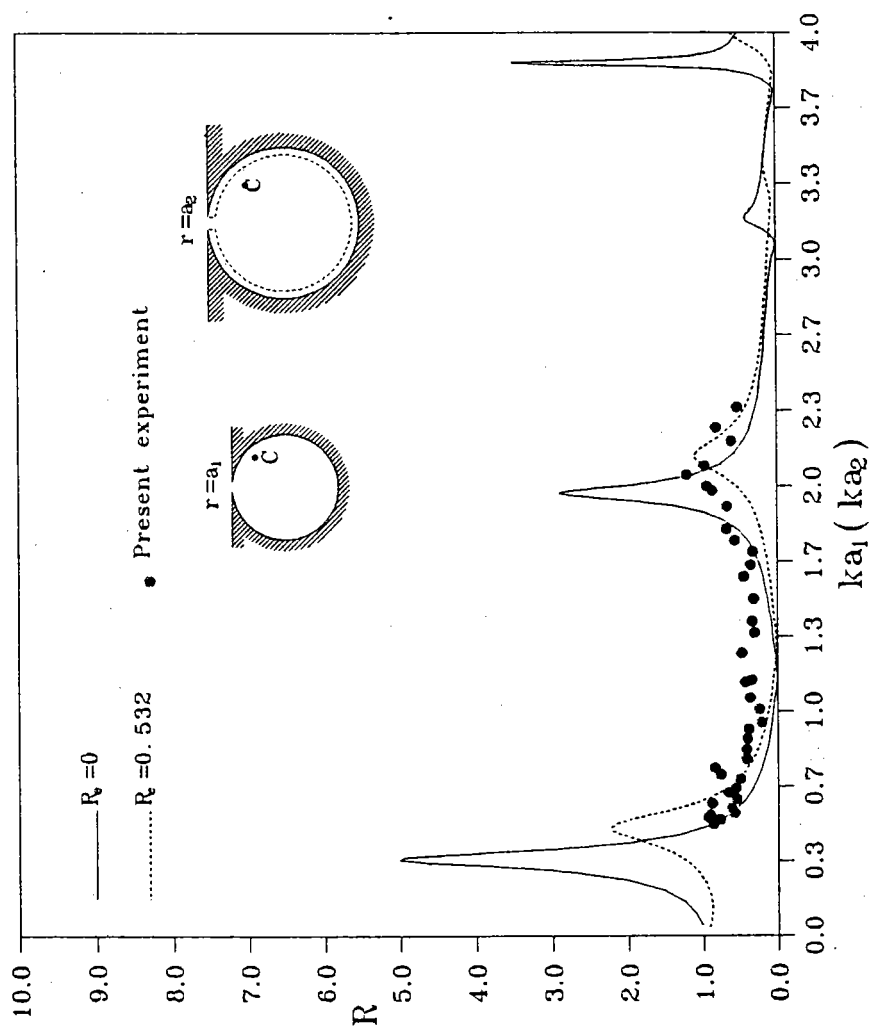


圖 17 B 型多孔岸壁圓形港池(不透水直立壁港池)港口內側點 c 之無因次
波數 $ka_2(ka_1)$ 與擴大量 R 數值相關曲線與試驗比較圖