

海岸水工模型試驗

編著者：張金機*

第一章 概論

第二章 相似性因次分析及模型律

- 一、動力相似性
- 二、因次分析與相似性
- 三、微分方程與相似性

第三章 海港工程水工試驗

- 一、概述
- 二、相似性
- 三、模型設計
- 四、模型製作與試驗
- 五、模型試驗實例

第四章 海岸結構物斷面試驗

- 一、概述
- 二、相似性
- 三、模型設計
- 四、模型試驗
- 五、模型試驗實例

第五章 海岸沖淤試驗

- 一、概述
- 二、相似性
- 三、模型設計

*張金機 港灣技術研究所研究員兼組長

四 模型試驗及試驗限制

五 定床追蹤模型

第六章 河口水工模型試驗

一 概述

二 模型相似性關係

三 模型範圍及現場資料

四 模型製作

五 潮汐製造

六 其他重要試驗設施

七 縮尺模型之應用

八 模型試驗實例

第七章 試驗室資料處理系統

一 概述

二 資料處理程式設計

三 電腦資料處理系統應用實例

四 結論

參考書籍

附 錄

附錄 I 港灣技術研究所現有及擴建試驗設備

附錄 II 加拿大國家科學院對世界各國著名水工試驗室調查報告

第一章 概 念

水力問題往往因為其邊界條件極為複雜，時至今日仍有許多問題不能利用數學求得解答，而必須辦理水工模型試驗以取得所需資料，作為規劃設計之參考，故水工模型試驗在海岸工程規劃設計上佔極重要地位。

模型試驗技術在過去幾年已有相當之進展，根據許多試驗研究對試驗模型律的選擇，縮尺之影響已有相當之認識，加以試驗設備及試驗儀器之改善，對於一般性水力問題之模擬已經可以做得相當成功，配合工程師的經驗及解析使得工程規劃設計能夠圓滿的達成。許多複雜的海岸工程問題，如考慮經濟、穩定等因素，必須結合設計工程師及試驗人員的經驗、智慧，利用水工模型試驗方能獲得最佳佈置與經濟有效之設計。設計工程師必須與試驗人員保持連絡，瞭解試驗結果與試驗所發生之問題，隨時提出解決辦理及改善建議，方能使試驗結果更臻理想。

本報告分(一)相似性因次分析及模型律，(二)海港工程水工試驗，(三)海岸結構物斷面試驗及(四)海岸沖淤試驗等四個單元。除第一單元對模型試驗動力相似條件，因次分析在模型試驗之應用及等縮尺與不等縮尺模型之適用範圍分別加以討論外，其餘各單元分別就辦理各種試驗之一般概念，所應解決問題、應考慮之相似條件、模型律之選擇、縮尺影響、模型設計及製作、試驗步驟、資料分析、試驗前應搜集資料、如何決定試驗條件及試驗應注意事項等分別加以討論。

正確可靠之現地資料為辦理模型試驗成敗的關鍵，在辦理試驗之前必須作長時間之資料搜集，經過整理研判後決定試驗條件。但是愈是重要的資料，往往愈難取得，而且長期間之觀測資料往往不易做到

，因此必須利用氣象資料加以追算，以補不足。辦理各種試驗所需資料分別於各章中討論。

海岸冲淤動床試驗，以今日科技僅能作定性而不能獲得定量結果。但如果能有正確足夠之現地資料，而且在等縮尺模型上又能充分的重現現地資料，則試驗所得結果可信度極高，不失為解決冲淤問題有效途徑。至於模型時間縮尺、沙粒經分佈及碎波帶內外不同水理特性等問題，仍待日後繼續研究。如何應用各種假設選定較可靠之模型律，是一項極為困難的任務，試驗人員必須具備豐富經驗且需時時研討方不會導致錯誤。海岸冲淤問題有時利用已有之定床模型，以少量染色液追蹤流向，作為沿岸冲淤定性研判之參考，是經濟可得之方法。

模型試驗所得結果其精度如何？設計時安全係數應為多少，往往是設計工程師最關切的問題。因試驗條件、試驗方法及試驗資料之取得均不同，祇能利用過去經驗加以研判。必要時可以利用數值模式求得數值解答加以校核，以瞭解試驗結果之可信度。

第二章 相似性、因次分析及模型律

水工模型與原型之間可以根據下列三種特性獲得相似性，即動力相似、因次分析及微分方程。水工模型係利用水力相似律使模型與原型具有相同之水力特性，但在物理模型中，除非模型率（通常為模型與原型之比）非常大（接近 1 : 1）否則不可能獲得完全相似，因為在模型中所採用之試驗液體不可能按模型率獲得完全相似之滯性，表面張力及彈性係數等。雖然已知完全相似性不可能獲得，但根據經驗辦理水工模型試驗將所有相似因素均加以考慮並非必要。做為一個水工試驗工程師最重要的是如何判斷那些因素不重要，可以忽略而不影響試驗結果，有時利用數值解析作比較以補試驗之不足。

一、動力相似性 (*Dynamic similarity*)

模型與原型之動力相似性包括幾何相似 (*Geometric similarity*) 運動相似 (*Kinematic similarity*) 及牛頓運動定律 (*Newton law of motion*)，如果模型與原型有相同之形狀，謂「幾何相似」，則下列線性因次關係成立

$$L_m = L_r \cdot L_p \quad (2-1)$$

上式中足碼 m 及 p 分別代表模型與原型， L_r 為模型縮尺。模型縮尺或稱模型率，為模型與原型之比，經常採用小縮尺模型 (*Small scale model*)

運動相似與時間、空間有關，運動相似表示模型與原型之間，兩相對應點有相似之運動軌跡，模型與原型兩對應點運動所需時間之比為一常數，即

$$T_m = T_r \cdot T_p \quad (2-2)$$

在幾何相似模型中，運動相似為達成動力相似之條件。

模型與原型之質量與力均相似，則為動力相似，

$$M_m = M_r \cdot M_p \quad (2-3)$$

$$F_m = F_r \cdot F_p \quad (2-4)$$

在海岸及河口水力問題，所包含之力有慣性力（ F_i ），重力（ F_g ），滯性剪力（ F_μ ），表面張力（ F_{st} ），彈性壓縮力（ F_e ），壓力（ F_{pr} ），根據牛頓運動定律，作用力之向量合等於慣力（或稱反應力）

$$F_i = F_g + F_\mu + F_{st} + F_e + F_{pr} \quad (2-5)$$

相似性中，慣力之比等於作用力向量合之比

$$\frac{(F_i)_m}{(F_i)_p} = \frac{(F_g + F_\mu + F_{st} + F_e + F_{pr})_m}{(F_g + F_\mu + F_{st} + F_e + F_{pr})_p} \quad (2-6)$$

達成上式動力相似之條件為

$$\begin{aligned} \frac{(F_i)_m}{(F_i)_p} &= \frac{(F_g)_m}{(F_g)_p} = \frac{(F_\mu)_m}{(F_\mu)_p} = \frac{(F_{st})_m}{(F_{st})_p} = \frac{(F_e)_m}{(F_e)_p} \\ &= \frac{(F_{pr})_m}{(F_{pr})_p} \end{aligned} \quad (2-7)$$

上式中除壓力外各力之比例均可視為獨立量，壓力通常視為因變數，在決定縮尺時不予考慮。但亦有極少數流體問題，壓力為決定縮尺關係之主要變數。

模型試驗所採用流體均不可能滿足（2-7）式中之滯性、表面張力及彈性模數等相似性，然而有些外力對水流之影響非常微小而可以忽略。模型中流體運動主要受重力及滯性剪力影響，而慣性力在各種流體運動中均需予以考慮，將（2-7）式中各力用長度（ L ），速度（ V ），質量（ M ），重力加速度（ g ），密度（ ρ ），黏滯度（ μ ），彈性模數（ E ），表面張力（ σ ），壓力（ p ），等物理量表示

$$F_i = \text{質量} \times \text{加速度} = (\rho L^3)(V^2/L) = \rho L^2 V^2 \quad (2-8a)$$

$$F_g = \text{質量} \times \text{重力加速度} = \rho L^3 g \quad (2-8b)$$

$$F_\mu = \text{黏滯係數} \times \text{速度} \times \text{長度} = \mu V L \quad (2-8c)$$

$$F_s = \text{單位面表面張力} \times \text{長度} = \sigma L \quad (2-8d)$$

$$F_e = \text{彈性模數} \times \text{面積} = E L^2 \quad (2-8e)$$

$$F_{pr} = \text{單位壓力} \times \text{面積} = p L^2 \quad (2-8f)$$

(一) 福祿得數 (Froude Number) : 根據 (2-7) 及 (2-8a)

當重力為主要外力時

$$\frac{(F_i)_m}{(F_i)_p} = \frac{(F_g)_m}{(F_g)_p} \quad \text{或} \quad \frac{(\rho L^2 V^2)_m}{(\rho L^2 V^2)_p} = \frac{(\rho L^3 g)_m}{(\rho L^3 g)_p}$$

$$\left(\frac{V^2}{g L}\right)_m = \left(\frac{V^2}{g L}\right)_p \quad (2-9)$$

以足碼 r 表示模型與原型之比則 (2-9) 式可寫成

$$\left(\frac{V}{g L}\right)_r = 1 \quad (2-10)$$

無因次量 $V / \sqrt{g L}$ 稱之為福祿得數 (Froude Number, F) ,

福祿得模型律 (Froude Model Law) 為模型與原型中慣力與重力之比相等。

(二) 雷諾數 (Reynold Number) : 當滯性力為主要時

$$\frac{(F_i)_m}{(F_i)_p} = \frac{(F_\mu)_m}{(F_\mu)_p} \quad \text{或} \quad \frac{(\rho L^2 V^2)_m}{(\rho L^2 V^2)_p} = \frac{(\mu V L)_m}{(\mu V L)_p}$$

即
$$\left(\frac{V L}{\nu}\right)_m = \left(\frac{V L}{\nu}\right)_p \quad (2-11)$$

上式中 $\nu = \mu / \rho$ 為運動黏滯度 (Kinematic Viscosity)

$$\left(\frac{V L}{\nu}\right)_r = 1 \quad (2-12)$$

無因次量 $V L / \nu$ 稱為雷諾數 (Reynold Number, R) , 雷諾模型律

(Reynold Model Law) 為模型與原型之黏滯力與重力之比相等。

(三)韋伯數 (*Weler's Number*) 及馬奇、高奇數 (*Mach, Cauchy Number*) : 當表面張力為主時, 表面張力與慣力之比為

$$\left[\frac{V}{(\sigma/\rho L)^{1/2}} \right]_r = 1 \quad (2-13)$$

$V / (\sigma/\rho L)^{1/2}$ 稱之為韋伯數 (*Weler's Number, W*)

若除彈性力外, 其餘作用力均可忽略時, 彈性力與慣力之比為

$$\left[\frac{V}{(E/\rho)^{1/2}} \right]_r = 1 \quad (2-14)$$

$V / (E/\rho)^{1/2}$ 稱之為馬奇數或高奇數 (*Mach or Cauchy Number, M*)。

一般而言, 海岸及河口水力問題表面張力影響很少予以考慮。但在模型試驗中, 當模型縮尺減小時, 表面張力之影響愈顯著。有時由於縮尺太小而影響試驗結果, 馬奇或高奇數對水力工程之影響甚少加以考慮。其主要應用於氣體試驗或流速大於音速及彈性力為主要設計外力時。

(四)相似率 (*Similitude Ratios*)

各種不同之流況 (流速、時間、力等) 模型與原型間之關係可直接由 (2-10) 至 (2-14) 之無因次式求得, 例如模型與原型之福祿得數相等

$$\frac{V_m^2}{g_m L_m} = \frac{V_p^2}{g_p L_p} \quad (2-15 a)$$

$$g_m = g_p, \quad \frac{V_m^2}{L_m} = \frac{V_p^2}{L_p}$$

$$V_r = L_r^{1/2} \quad (2-15 b)$$

因 $L = VT$ 所以

$$T_r = L_r^{1/2} \quad (2-16)$$

作用力為質量與加速度乘積

$$F_r = M_r \frac{dV_r}{dT_r} = \frac{L_r^3 \rho_r}{T_r} = L_r^2 \rho_r V_r^2$$

$$= L_r^3 \gamma_r V_r / g_r \quad (2-17 a)$$

將 (2-15 b) 及 (2-16) 代入， $g_r = g_m / g_p = 1$

$$F_r = L_r^3 \gamma_r \quad (2-17 b)$$

福祿得律其他比率及其餘雷諾數、韋伯數等需加以考慮之各種現象，可以用上述同樣方法求得，海岸及河口水力以重力及黏滯力為主，其有關流況各因素如表 2—1

表 2—1 相似率

項 目	因 次	福 祿 得 數	雷 諾 數
幾何			
長度	L	L_r	L_r
面積	L^2	L_r^2	L_r^2
體積	L^3	L_r^3	L_r^3
運動			
時間	T	$(L \rho \gamma^{-1})_r^{1/2}$	$(L^2 \rho \mu^{-1})_r$
速度	LT^{-1}	$(L \gamma \rho^{-1})_r^{1/2}$	$(\mu L^{-1} \rho^{-1})_r$
加速度	LT^{-2}	$(\gamma \rho^{-1})_r$	$(\mu^2 L^{-3} \rho^{-2})_r$
流量	$L^3 T^{-1}$	$(L^{5/2} \gamma^{1/2} \rho^{-1/2})_r$	$(L \mu \rho^{-1})_r$
動力滯度	$L^2 T^{-1}$	$(L^{3/2} \gamma^{1/2} \rho^{-1/2})_r$	$(\mu \rho^{-1})_r$
動力			
質量	M	$(L^3 \rho)_r$	$(L^3 \rho)_r$
力	MLT^{-2}	$(L^3 \gamma)_r$	$(\mu^2 \rho^{-1})_r$
密度	ML^{-3}	ρ_r	ρ_r

比重	$ML^{-2}T^{-2}$	γ_r	$(\mu^2 L^{-3} \rho^{-1})$
滯度	$ML^{-1}T^{-1}$	$(L^{3/2} \rho^{1/2} \gamma^{1/2})_r$	μ_r
表面張力	MT^{-2}	$(L^2 \gamma)_r$	$(\mu^2 L^{-1} \rho^{-1})_r$
壓力強度	$ML^{-1}T^{-2}$	$(L \gamma)_r$	$(\mu^2 L^{-2} \rho^{-1})_r$
動量	MLT^{-1}	$(L^{3/2} \rho^{1/2} \gamma^{1/2})_r$	$(L^2 \mu)_r$
能量及功	ML^2T^{-2}	$(L^4 \gamma)_r$	$(L \mu^2 \rho^{-1})_r$
功率	ML^2T^{-3}	$(L^{3/2} \gamma^{3/2} \rho^{-1/2})_r$	$(\mu^3 L^{-1} \rho^{-2})_r$

(五) 福祿得數與雷諾數之重要性

一般流體之流況受壓縮性及表面張力影響均可以忽略，除幾何相似外，根據福祿得數及雷諾數可獲得模型與原型所需之動力相似性，故在水工模型試驗上福祿得數及雷諾數相當重要。如果在模型與原型中雷諾數相等，對滯力與慣力而言達到動力相似，此種模型可以用以辦理滯力為主，而重力不影響，表面張力可以忽略之各種水流試驗，如流體通過壓力管，深水物體運動（表面及內部不產生波浪之情形下）及水流經過柱體等之流況（流速低不產生孔蝕現象）。在海岸及河口水力問題中，僅有極少數可以用雷諾模型律達成相似性。

海岸及一般水力問題均以重力為主，模型與原型之福祿得數相等即可獲得相似性。如溢洪道、明渠水流、水閘、靜水池及波浪現象。但在模型中必需盡量設法減小滯力之影響。例如在港岸波浪試驗中，床底摩擦在原型上非常小，可以忽略，而在模型上其影響可能相當顯著。因此在波浪水工試驗中，應盡量避免波浪通過淺水而距離又相當長，如果有上述情形時，波高必需利用理論值加以修正。水工試驗中，如能同時考慮福祿得及雷諾模型律時，大部份之海岸與一般水力問題均可獲得相當準確之相似性，而不需作縮尺影響之修正。欲達成此要求下式需成立

$$\frac{V_r}{(g_r L_r)^{1/2}} = \frac{L_r V_r}{\nu_r} \quad (2-18 a)$$

因 $g_r = 1$ 上式可寫成

$$\frac{L_r^{3/2}}{\nu_r} = 1 \quad (2-18 b)$$

上式關係可知，當模型液體或長度縮尺選定後，則其他值不能改變。因此，如果模型上選定合理之長度縮尺，則導致所需之流體不可能存在。例如，長度縮尺尺 $1/10$ ，則所需滯性縮尺約為 $1/30$ ，原型流體為水，滯性為水之 $1/30$ 之流體不可能獲得。水流中作用於物體之作用力依曳力公式為

$$F = C_D A \rho V^2 \quad (2-19)$$

$$C_D = f(R, \text{Shape})$$

物體形狀一定時， C_D 值隨 R 變至相當程度即為常數。因此，如 C_D 為常數，在模型上曳力可利用福祿得模型律獲得，由 (2-17 b)， $F_r = \rho_r V_r^2 L_r^2 = L_r^3 \gamma_r$

無需再作縮尺校正。

二、因次分析與相似性

因次分析處理一般自然現象問題，其主要理論為方程式中各項必須同次元，任何運動數學公式，如果物理定義正確時，必須滿足同次元之要求。將方程式每項均化成物理基本量即質量、長度及時間 ($M L T$) 或力、長度及時間 ($F L T$)，則其中每項含有相等之質量 (或力)、長度及時間指數，質量、長度、時間 ($M L T$) 系統與力、長度、時間 ($F L T$) 系統，可根據牛頓定律 $F = Ma$ 或 $F = ML/T^2$ 互相轉換。

因次分析應用於工程上特殊現象主要是根據下列假設：在一工程問題中，含有某些獨立變數，其餘除為因變數外均為多餘或不重要之

函數。除較簡易問題外，因次分析必需充分瞭解自然現象，有時在應用上非常複雜，但一般而言，在解析與試驗上有甚大之助益，舉例如下：

- (一)幫助記憶公式
- (二)校核方程式中因次平衡
- (三)系統改變中決定轉變因素
- (四)由某些水流現象無因次參數，導出通用公式
- (五)由複雜問題中獲得部份解
- (六)使試驗計畫有系統，試驗結果表達更濃縮
- (七)求得無因次關係式，作為決定模型設計縮尺依據，並可據以解釋試驗結果。

因次分析方法早在 *Rayleigh* (1899)、*Buckingham* (1914) 及 *Bridgman* (1922) 即開始應用，後再經 *Van Driest* (1946)，*Birkhoff* (1950) 及 *Langhaar* (1951) 作更進一步之推展。

解析水流之方法最好能直接求得數學解。然而在海岸及河口所遭遇之工程問題往往非常複雜，微分方程式中含有甚多之變數，利用數學直接求得解答事實上不可能。因次分析對解此類問題有相當之助益。*Rayleigh* (1899) 所發展之方法與 *Buckingham* (1914) 推出之方法並無多大差別，但後者較容易被接受。*Buckingham* 定理（一般稱為 π 定理）為同次元方程式（或在一物理問題中）含有 n 個變數，其中含有 k 個基本因次（即 M 、 L 、 T 或 F 、 L 、 T ）則可組成 $n - k$ 個無因次項（ π 項）。令 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 為變數，如壓力、速度、滯度等，則

$$F(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = 0 \quad (2-20)$$

若 $\pi_1, \pi_2, \dots$ 為上述變數所組成之無因次項， $A_1, A_2, \dots$ 中含

有 k 個因次，則

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-k}) = 0 \quad (2-21)$$

決定 π 參數之方法為，在 n 個變數中選定 k 個含有各種基本因次之變數，此 k 個變數中含有 k 種因次。利用此 k 個變數作為重複變數 (Repeating Variables)，加上另一個變數組成一組 π 參數。例如 A_1, A_2, A_3 三個變數中含有 L, M, T 三個因次 (不必每個變數均含 L, M, T 因次，而是全部可以組合成含有 L, M, T 因次)，則第一個 π 參數為

$$\pi_1 = A_1^{x_1} A_2^{y_1} A_3^{z_1} A_4 \quad (2-22 a)$$

第二個 π 參數為

$$\pi_2 = A_1^{x_2} A_2^{y_2} A_3^{z_2} A_5 \quad (2-22 b)$$

除此類推

$$\pi_{n-k} = A_1^{x_{n-k}} A_2^{y_{n-k}} A_3^{z_{n-k}} A_n \quad (2-22 c)$$

上式方程式中，將各變數所含因次代入，含每一 π 參數各基本因次 (L, M, T) 之指數為零，求得 $n - k$ 組無因次式。

例如：水平毛細管之流量 Q 為壓力比降 $\Delta p / \ell$ ，直徑 D ，及滯度 μ 之函數

$$F(Q, \Delta p / \ell, D, \mu) = 0$$

各變數之因次為

$$Q : L^3 T^{-1}, \quad \Delta p / \ell : M L^{-2} T^{-2}$$

$$D : L \quad \mu : M L^{-1} T^{-1}$$

因此 $Q, \Delta p / \ell, D$ 及 μ 四個變數含有 L, M, T 三個因次，選定 $Q, \Delta p / \ell$ 及 D 為重複變數，則 π 參數為

$$\pi = Q^{x_1} (\Delta p / \ell)^{y_1} D^{z_1} \mu$$

將各因次代入

$$\pi = (L^3 T^{-1})^{x_1} (ML^{-2} T^{-2})^{y_1} L^{z_1} ML^{-1} T^{-1} = M^0 L^0 T^0$$

由 L 因次得 $3x_1 - 2y_1 + z_1 - 1 = 0$

同理 M 及 T 得 $y_1 + 1 = 0$

$$-x_1 - 2y_1 - 1 = 0$$

解以上聯立方程式得 $x_1 = 1$, $y_1 = -1$, $z_1 = -4$ 則

$$\pi = \frac{Q\mu}{D^4 \Delta p / \ell}$$

$$Q = C \frac{\Delta p}{\ell} \frac{D^4}{\mu}$$

因次分析可以求得上述無因次關係式，常數 C 可由試驗或解析方法求得。

Rouse (1938) 認為一般流體之流況現象受下列諸因素影響；
即(1)幾何形狀之線性因次 (a , b , c , d 等)，(2)動運及力學特性
(流速、流量、時間、壓力差、阻力)，及流體性質(密度、比重、
滯度、表面張力、彈性模數)。

故 $f(a, b, c, d, V, \Delta p, \rho, \gamma, \mu, \sigma, E) = 0$ (2-24)

上式含 11 個變數， L, M, T 三個基本因次，可組成 8 個 π 參數。
選定重複變數為長度 a ，速度 V ，及密度 ρ ，其餘 8 個變數分別在 8
個 π 參數中，此 8 個變數指數選定為負數(負指數所得結果為正指數
之倒數，因係無因次式，故不影響)

$$\phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_8) = 0 \quad (2-25)$$

$$\pi_1 = a^{x_1} V^{y_1} \rho^{z_1} b^{-1}$$

$$\pi_2 = a^{x_2} V^{y_2} \rho^{z_2} c^{-1}$$

$$\pi_3 = a^{x_3} V^{y_3} \rho^{z_3} d^{-1}$$

$$\pi_4 = a^{x_4} V^{y_4} \rho^{z_4} \Delta p^{-1}$$

$$\pi_5 = a^{x_5} V^{y_5} \rho^{z_5} \gamma^{-1}$$

$$\pi_6 = a^{x_6} V^{y_6} \rho^{z_6} \mu^{-1}$$

$$\pi_7 = a^{x_7} V^{y_7} \rho^{z_7} \sigma^{-1}$$

$$\pi_8 = a^{x_8} V^{y_8} \rho^{z_8} E^{-1}$$

將各變數因次代入上列各式，即可求得

$$\pi_1 = a/b, \quad \pi_2 = a/c, \quad \pi_3 = a/d, \quad \pi_4 = V^2 / \Delta p / \ell$$

$$\pi_5 = V^2 / ag, \quad \pi_6 = Va/\nu, \quad \pi_7 = V^2 a / \sigma / \rho, \quad \pi_8 = V^2 / E / \rho$$

π_4 為 Euler 數，其含有流體運動重要特性設為因變數，其餘 π_5 ， π_6 ， π_7 及 π_8 分別為 Froude, Reynold, Weber, 及 Mach-Cauchy 數，而 π_1 ， π_2 ， π_3 為幾何形狀無因次式，因此

$$\frac{V^2}{\Delta p / \ell} = CF' \left(\frac{a}{b}, \frac{a}{c}, \frac{a}{d}, F, R, W, M \right) \quad (2-26 a)$$

$$V = C' F'' \left(\frac{a}{b}, \frac{a}{c}, \frac{a}{d}, F, R, W, M \right) \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right)^{1/2}$$

(2-26 b)

C ， C' 為常數。

上述分析並未能解析常數 C' 及函數 F'' ，但 π 定理已經將重要項歸納出來，而且獲得與因次無關之參數。各種水力問題，其常數 C' 及函數 F'' 可由解析或試驗求得，(2-26) 式亦可用作建立模型相似性之依據。由 (2-26) 式對模型試驗影響較大的或可以忽略的均可比較後作決定。

三、微分方程式與相似性

水力問題之微分方程式若為已知，則可獲得較因次分析更進一步之相似律。因為因次分析只知某些變數為影響水力問題之函數，其程度如何，無所知。尤其想瞭解使用不等縮尺 (Distorted Scale) 所產生之影響更為重要。如果一個微分方程能夠很正確表達水力問題之現

象，此公式經過轉變為無因次型式後，可作為模型與原型間決定轉換參數之依據。由此方法所得之轉換參數，可以顯示不等縮尺是否可以採用。一般物理公式可根據各種不同方法獲得無因次式，如擺動公式

$$\ell \frac{d^2 \theta}{dt^2} + g \sin \theta = 0 \quad (2-27 a)$$

式中 ℓ 為擺長， g 為重力加速度， θ 為擺與垂線夾角，(2-27 a)

各項均除以 g ，無因次式為

$$\frac{\ell}{g} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \sin \theta = 0 \quad (2-27 b)$$

令 $\tau = t/T$ ， T 為擺之週期， τ 為無因次式，則 $dt = T d\tau$ 代入上式即得

$$\frac{\ell}{g T^2} \frac{d^2 \theta}{d\tau^2} + \sin \theta = 0 \quad (2-27 c)$$

(2-27 c) 式為無因次式，任何兩個擺其控制方程式為 (2-27 a) 則其 θ 之解相等 $\theta_m = \theta_p$

$$\text{則} \quad \frac{\ell_m}{g_m T_m^2} = \frac{\ell_p}{g_p T_p^2} \quad (2-28)$$

如兩個擺在同一地點 $g_m = g_p$ ，則可得 (2-16) 式，即

$$\frac{T_m}{T_p} = \left(\frac{\ell_m}{\ell_p} \right)^{1/2}$$

港口波浪試驗固定床模型為例，說明如后：

(一) 等縮尺模型 (*Undistorted Model*) — 中間水深波 ($0.05 < d/\lambda < 0.5$)

中間水深，微小振幅波理論，模型與原型之相似性可由下列微分方程式求得，假設摩擦對原型之影響甚小，故在模型中可以忽略，而流況為非旋性流。在 X ， Y ， Z 三次度中，存在有流速勢 (*Velocity*

potential) ϕ , $\phi = \phi(x, y, z, t)$ 各方向之速度分量為

$$U = -\frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad V = -\frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad W = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2-29)$$

流速勢 ϕ , 必須滿足 Laplace 方程式

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2-30)$$

模型與原型流速在法線上之分量其邊界條件為

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (2-31 a)$$

即邊界之垂直速度等於零。

令 x_0, y_0, z_0 為邊界上一點, l, m, n 為該點上法線在直角座標上三個軸之餘弦值, 則 (2-31 a) 可改寫成

$$l \frac{\partial \phi}{\partial x} + m \frac{\partial \phi}{\partial y} + n \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (2-31 b)$$

若邊界幾何形狀可以下式表示

$$f(x, y, z) = 0 \quad (2-32)$$

則 (2-31 b) 可改寫成

$$\frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (2-33)$$

流速勢需滿足力學與運動方程式, 假設水面靜力為零, 則力學條件為

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0, \quad z = 0 \quad (2-34)$$

假設二次項 $u \frac{\partial \eta}{\partial x}$ 極小可以忽略, 水面運動條件為

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0, \quad z = 0 \quad (2-35)$$

η 為自靜水面起算之高程， z 軸垂直向上為正，模型與原型之相似性關係，可將 (2-29) 至 (2-35) 改為無因次後求得，為將上述為無因次式，以時間 T_c ，長度 L_c 及水深 d_c 等為特徵 (Characteristic) 時間，水平長度及水深。遮蔽試驗可以入射波週期為 T_c ，而港池共振試驗則應以可能引起港池共振之自然週期為 T_c ， L_c 通常為港池重要位置之寬度，如港口寬度等， d_c 為港口外平均水深，或港口水深。則長度、水深、時間及流速勢之無因次為

$$X = \frac{x}{L_c}, \quad Y = \frac{y}{L_c}, \quad Z = \frac{z}{d_c}$$

$$\tau = \frac{t}{T_c}, \quad \eta' = \frac{\eta}{d_c}, \quad \bar{\Phi} = \frac{\phi T_c}{L_c^2}$$

床底地形可以下式表示

$$f\left(\frac{x_0}{L_c}, \frac{y_0}{L_c}, \frac{z_0}{d_c}\right) = 0 \quad (2-36 a)$$

$$\text{或 } F(X, Y, Z) = 0 \quad x = x_0 \quad (2-36 b)$$

令 $N = L_c / d_c$ ，則 (2-30)，(2-33)，(2-34)，及 (2-35) 可改寫成

$$\frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial Y^2} + N^2 \frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial Z^2} = 0 \quad (2-37)$$

$$\frac{\partial F}{\partial X} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial X} + \frac{\partial F}{\partial Y} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial Y} + N^2 \frac{\partial F}{\partial Z} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial Z} = 0 \quad (2-38)$$

$$\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial Z} + \frac{\partial \eta'^2}{\partial \tau} = 0 \quad Z = 0 \quad (2-39)$$

$$\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \tau} + N^{-2} K \eta' = 0 \quad (2-40)$$

上式中

$$K = g T_c^2 / d_c \quad (2-41)$$

化為無因次後，波浪之流速勢及水面變化為

$$\Phi = \Phi(X, Y, Z, N, K, \tau) \quad (2-42)$$

$$\eta' = \eta'(X, Y, Z, N, K, \tau) \quad (2-43)$$

(2-42) 及 (2-43) 為建立模型與原型相似性之基本公式，其相對時間縮尺為

$$\tau_m = \tau_p \quad (2-44)$$

同理 $N_m = N_p \quad (2-45)$

$$K_m = K_p \quad (2-46)$$

(2-45) 可知，僅有在長度縮尺不變不情況下，方可獲得模型與原型相似性，(2-44) 可知 $(t/T_c)_m = (t/T_c)_p$ ，(2-46) 模型與原型之 K 值相等，從 (2-41) 式得

$$\left(\frac{g T_c^2}{d_c}\right)_m = \left(\frac{g T_c^2}{d_c}\right)_p \quad (2-47)$$

$g_m = g_p$ ，則

$$\frac{(T_c)_m}{(T_c)_p} = \left[\frac{(d_c)_m}{(d_c)_p} \right]^{1/2}$$

此即為 *Froude* 模型律關係式，如等縮尺模型水平縮尺為 L_r ，

則

$$(d_c)_m = L_r (d_c)_p \quad (2-48)$$

$$(T_c)_m = L_r^{1/2} (T_c)_p \quad (2-49)$$

(2-43) 可以應用於模型內任意點，因此在入射線 η_1 為水面高度，則

$$(\eta'_1)_m = (\eta'_1)_p \quad (2-50)$$

或 $(\eta_1/d_c)_m = (\eta_1/d_c)_p \quad (2-51)$

(2-49) 及 (2-51) 二式為模型與原型相似之兩個條件，流速

可由 $X = x/L_c$ 及 $\Phi = \phi T_c/L_c^2$ 兩無因次變數組合求得

$$\frac{UT_c}{L_c} = \frac{\partial \Phi}{\partial X} \quad (2-52)$$

$$\left(\frac{UT_c}{L_c}\right)_m = \left(\frac{UT_c}{L_c}\right)_p \quad (2-53a)$$

等縮尺模型

$$\left(\frac{UT_c}{d_c}\right)_m = \left(\frac{UT_c}{d_c}\right)_p \quad (2-53b)$$

由 (2-47) 與 (2-53b) 可得

$$\left(\frac{U}{g^{1/2} d_c^{1/2}}\right)_m = \left(\frac{U}{g^{1/2} d_c^{1/2}}\right)_p \quad (2-54)$$

上述結果係根據微小振幅波理論 (即水粒子速度與波浪尖銳度均甚小) 推導而得, 但實際應用時並不受此限制, 其惟一限制為底層摩擦甚小, 可以忽略。在模型中, 水平縮尺 L_r 甚小時, 在海岸附近之摩擦值可能相當大, 則波浪邇上 (Run up), 反射等將不可能在模型上重現。此外流速勢亦可能應用於碎波。上述各式所求得模型比值只能應用於入射線至碎波線間區域, 因此有關波浪邇上、反射等試驗在模型上臨界區需作適當之調整。

(二) 不等縮尺模型 (Distorted Model) — 長波 ($0 < d/\lambda < 0.05$)

長波各因素在模型與原型之間關係亦可由微分方程式獲得。長波其波長遠比水深大, 水粒子之垂直加速度甚小可以忽略, 流體壓力呈靜壓分佈。

$$p = \rho g (\eta + z) \quad (2-55)$$

水粒子速度分量 u 及 v 為 x , y 及 t 之函數, 而與 z 無關, 水面力學條件為

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} ; \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (2-56)$$

上式與等縮尺(2-34)式相當，水面方程式為

$$F(x, y, z, t) = z - \eta, \quad z = \eta \quad (2-57)$$

水面運動條件(設在水面之水粒子運動後仍維持在水面)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0 \quad (2-58)$$

上式二次項忽略後與(2-35)式相當，固定床底面方程式為

$$F(x, y, z) = z + d, \quad z = -d \quad (2-59)$$

在床底水粒子運動沿床面移動

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0 \quad (2-60)$$

上式與(2-33)式相當，流體運動連續方程式為

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-61)$$

上式與(2-30)式相當，將(2-61)式乘 d ，後由 $z = -d$ 積分至 $z = 0$ ，將邊界條件(2-58)及(2-60)代入，省略二次項得

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u d) + \frac{\partial}{\partial y} (v d) = 0 \quad (2-62)$$

由(2-56)與(2-62)式水面移動方程式為

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - g \frac{\partial}{\partial x} \left(d \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - g \frac{\partial}{\partial y} \left(d \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) = 0 \quad (2-63)$$

另一邊界條件為入射波在某一選定線之方程式為

$$\eta = \eta_1(t), \quad x = x_1, \quad y = y_1 \quad (2-64)$$

海岸邊界條件可分為兩種，其一為垂直之固定邊界，其條件為

$$\ell \frac{\partial \eta}{\partial x} + m \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (2-65)$$

上式中 ℓ 及 m 分別為邊界面上任一點在 x 及 y 軸之餘弦值，至於變化中之海岸其邊界條件非常複雜，一般假設海岸線上在 x 及 y 方向上最大位移時其邊上分別為 S_{11} 及 S_{12}

$$S_{11} = \int_0^{T/4} u_2 dt ; \quad S_{12} = \int_0^{T/4} v_2 dt \quad (2-66)$$

上述 u_2 及 v_2 為水粒子在邊界之速度分量，假設與海底面之坡度無關，故其與水粒子通過垂直斷面之速度相等。

總結上述重要方程式為

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2-56 a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (2-56 b)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - g \frac{\partial}{\partial x} \left(d \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - g \frac{\partial}{\partial y} \left(d \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) = 0 \quad (2-63)$$

上述微分方程式必須化為無因次式，令 L_c ， d_c 及 T_c 分別為長度、深度及時間之特徵值 (Characteristic values)，此特徵值大都依試驗環境選定。例如，津波 (Tsunamis) 試驗 L_c 可採用港池長度， d_c 可採用港口寬度， T_c 則用港池共振臨界週期，其無因次為

$$X = x/L_c, \quad Y = y/L_c, \quad Z = z/d_c$$

$$u' = \frac{u}{(g d_c)^{1/2}}, \quad v' = \frac{v}{(g d_c)^{1/2}}, \quad \eta' = \eta/d_c$$

$$\theta = d/d_c, \quad \tau = t/T_c$$

上述變數可知水粒子速度以 $(g d_c)^{1/2}$ 表示，垂直距離用 d_c 表示，水平距離用 L_c 表示，而時間則以 T_c 表之。將此無因次變數代入 (2-56) 及 (2-63) 得

$$\frac{d^2 \eta'}{d\tau^2} - \frac{\partial}{\partial X} \left(\theta \frac{\partial \eta'}{\partial X} \right) - \frac{\partial}{\partial Y} \left(\theta \frac{\partial \eta'}{\partial Y} \right) = 0 \quad (2-64)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial \tau} + K' \frac{\partial \eta'}{\partial X} = 0 \quad (2-65)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial \tau} + K' \frac{\partial \eta'}{\partial Y} = 0 \quad (2-66)$$

$$\text{上式 } K' = \frac{(g d_c)^{1/2} T_c}{L_c} \quad (2-67)$$

波浪問題無因次解可寫成

$$\eta' = \eta' (X, Y, \tau, K', \theta) \quad (2-68)$$

$$u' = u' (X, Y, \tau, K', \theta) \quad (2-69)$$

$$v' = v' (X, Y, \tau, K', \theta) \quad (2-70)$$

不等縮尺模型與原型相似性可根據 (2-68), (2-69) 及 (2-70) 求得, 若模型與原型之 K' 值相等, 且模型上港口之輸入條件與原型相同, 則上述方程式可獲得模型與原型之相似性, 其時間關係為

$$\tau_m = \tau_p \quad (2-71)$$

對應地點為

$$X_m = X_p, \quad Y_m = Y_p \quad (2-72)$$

$$\eta'_m = \eta'_p \quad (2-73)$$

$$u'_m = u'_p \quad (2-74)$$

$$v'_m = v'_p \quad (2-75)$$

$$\text{其先決條件為 } K'_m = K'_p \quad (2-76)$$

模型上入射線 (或港口) 任意點 $f(x_i, y_i = 0$

$$(\eta'_i)_m = (\eta'_i)_p \quad (2-77)$$

由 (2-67) 及 (2-76) 得

$$(T_c)_m = \frac{(L_c)_m (d_c)_p^{1/2}}{(T_c)_p (d_c)_m^{1/2}} (T_c)_p \quad (2-78)$$

設水平長度縮尺為 $(L_h)_r$ ，不等縮尺比 (*Distortion factor*) 為 D_f 則

$$(L_h)_m = (L_h)_r (L_h)_p \quad (2-79)$$

$$(d_c)_m = D_f (L_h)_r (d_c)_p \quad (2-80)$$

$$(T_c)_m = (L_h)_r^{1/2} D_f^{-1/2} (T_c)_p \quad (2-81)$$

上式為模型與原型長週期相似性之關係式，模型上港口入射波水面高程度化為週期性

$$\eta_1 = a_1 \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (2-82)$$

上式 T 為試驗波之週期，由 (2-77) 式得

$$\left(\frac{\eta_1}{d_c}\right)_m = \left(\frac{a_1}{d_c} \cos 2\pi \frac{\tau T_c}{T}\right)_m \quad (2-83a)$$

$$\text{及} \quad \left(\frac{\eta_1}{d_c}\right)_p = \left(\frac{a_1}{d_c} \cos 2\pi \frac{\tau T_c}{T}\right)_p \quad (2-83b)$$

由 (2-83) 式

$$\left(\frac{a_1}{d_c}\right)_m = \left(\frac{a_1}{d_c}\right)_p \quad (2-84)$$

$$\text{及} \quad \left(\frac{T_c}{T}\right)_m = \left(\frac{T_c}{T}\right)_p \quad (2-85)$$

上述公式 (2-81)，(2-84)，(2-85) 為長週期波作用下，達成不等縮尺模型與原型相似之必要條件，其相時間及位置之水位變化及流速可由 (2-73)，(2-74) 及 (2-75) 獲得

$$\left(\frac{\eta}{d_c}\right)_m = \left(\frac{\eta}{d_c}\right)_p \quad (2-86)$$

$$\left(\frac{u}{g^{1/2} d_c^{1/2}}\right)_m = \left(\frac{u}{g^{1/2} d_c^{1/2}}\right)_p \quad (2-87)$$

$$\text{及} \quad \left(\frac{v}{g^{1/2} d_c^{1/2}} \right)_m = \left(\frac{v}{g^{1/2} d_c^{1/2}} \right)_p \quad (2-88)$$

第三章 海港工程水工試驗

一、概述

海港 (Harbour) 係一水域利用天然地形或防坡堤等防止外海波浪入侵，以獲得水面穩靜，適於船隻停泊，錨碇及裝卸貨物。海港依天然條件可分為天然港與人工港。天然港口通常位於海灣或海岸凹進處，可利用其天然地勢防止全部或部份外海暴風浪之侵襲，如天然地形不能有效遮蔽外海波浪入侵，則仍需建築防波堤以保持港池穩靜。人工港則完全無天然遮蔽效果，需建防波堤以防止外海波浪入侵。根據用途海港又可分為避難港、漁港、軍港、商港及小型遊艇港等，其用途不同，大小相差懸殊，設備亦不同。

以往港口大都設置於河口，近年來商港都設於海岸地區，是遠洋航行起點，內陸有河道、鐵路、公路系統連接。除上述條件外，海港需要有足夠之水域及水深以碇靠往來船隻。因之海岸工程師對此類港口規劃必須做到下列三點。

1. 規劃航道及迴船池使船隻容易進出港口。
2. 佈置及設計必要之碼頭及繫船樁。
3. 佈置及設計防波堤以保護停泊船隻免受外海波浪侵襲。

近年來海岸工程知識已有長足進步，設計工程師所擔負任務更趨複雜。船隻噸位吃水深在過去數年不斷增加，選擇一理想港址能有足夠水深，且接近現有航線，又有廣大腹地誠屬不易。地點選定後，設計建造港工構造物防止波浪侵襲以利船隻碇泊、裝卸等更是複雜。

海岸工程師於設計港灣構造物時必須考慮下述三種波浪之侵襲。

1. 暴風或季節風吹風區所引起之風浪，其週期約為 1 秒至 25 秒，波高在數十公分至十餘公尺（一般稱吹風區所引起之波浪為風浪（

Sea)，而吹風區之風浪傳播到近海稱之為湧浪 (Swell)。

2. 中間週期波浪，其週期自 25 秒至 2 分鐘。

3. 長週期波浪，週期約為 2 分鐘至 1 小時。中間週期及長週期波浪引起港池共振，嚴重者造成斷錨，船隻互撞、損毀，輕者船隻進出港口困難。此種波浪產生原因尚未完全清楚，一般認為是由於大氣壓力差、風物、湧浪節奏 (beats)，緣波 (edge waves)、津波 (Tsunamis) 等原因所造成。中間週期及長週期波之波高約為數公分至 1 公尺，津波所造成之共振則高達 10 公尺或更大。潮汐亦為長週期波，但在模型上不作波浪考慮，而選擇高水位或低水位對吹風區造成之風揚及暴風產生湧浪加以試驗。

Eagleson 及 Dean (1966) 將微小振幅波根據相對水深 (水深與波長之比) 分類如表 3—1。

表 3—1 微小振幅波之分類

相對水深 d/λ 值	波 浪 型 態
0 ~ 0.05	淺水波 (Shallow-water waves)
0.05 ~ 0.5	中間水深波 (Intermediate-depth waves)
0.5 以上	深水波 (Deep-water waves)

淺水波及深水波有時分別稱為長波及短波。波浪根據週期分類其優點為港池船隻之運動 (搖擺、顛簸等) 均與週期有關，船隻繫纜於繫船柱上對入射波週期最為敏感，而港池共振亦與波浪週期息息相關，Wilson (1967) 認為普通噸位船隻以彈性索錨繫於商港內，其臨界共振週期約為 25 秒至 2 分鐘。Raichlen (1968) 指出普通噸位船隻錨繫於小型船渠內，其臨界共振週期約為 10 秒或更短。波浪依相對水深分類優點為波速、波浪折射、繞射等均為相對水深之函數。

港池週圍牆壁是主要之波浪反射帶，其反射係數隨週期之增長而

增加。中間週期及長週期波在港池邊界上幾乎是全反射，形成港內駐波，底床摩擦可消滅其水數之能量，如此所產生之港池共振現象稱之為「盪漾」(*Seiches*)。 *Seiches* 原為法國名詞，其意義為在閉合之水域，吹風引起風域下游水位堆高 (*Wind set up*)，當風速驟減時，由於重力作用造成盪漾現象。但目前盪漾一詞已普遍應用於封閉或半封閉港池，由於入射波引起之共振 (*Resonance*)，而甚少視為自然共振現象。共振現象主要由於入射波週期與港池水域自然週期互相調和時所造成。長週期駐波雖其波高僅數公分至數十公分，但節點 (*Nodal*) 附近之水平運動距離甚大，船隻以彈性索錨繫於港池節點或其附近，容易導致斷纜及船隻或岸壁撞毀。輕者使裝卸貨物發生困難。船隻共振主要為其質量、長度及其繫纜狀況，如繩數、位置、繩之彈性等之函數。因之，在港池無共振之情況下，船隻本身亦可能發生共振現象。然而入射波使港池水域及繫纜船隻同時發生共振現象將造成最嚴重之損毀。

綜合上述討論可知海岸工程師在設計港灣時面臨極艱巨之任務，一方面要能使大型船隻進出港口容易，有穩靜之港池可供船隻碇靠、裝卸。另方面又要防止外海較長週期波浪入侵以避免港池共振現象。從經驗而言，設計工程師首先需要分析外海波浪能譜，然後選定港池形狀、大小及水深以減小較長週期尖峯能量入侵。但因港池形狀、大小及水深往往決定於航行於各港間之船隻，迴船池大小、水深等均依進出口港口船隻需要作決定。因之，設計工程師最大的任務是設法消滅外海入侵波浪進入港池可能引起共振現象，以獲得船隻最佳碇泊條件。利用外海波浪最低能譜決定港池水深、形狀，可以減少外海波浪所造成自然共振。更進一步，海岸工程師如能對各型船隻裝卸情況，繫纜系統加以研究，決定各種情況下之繫纜方法，則可以有效減少共

振所帶來之損害。不幸的是有關這方面的知識目前仍非常貧乏。理論及試驗之研究將有助於解決港池設計與船隻繫纜問題。

理論上小型港口設計與大型商港所遭遇問題相同，所不同者為短週期波能量為設計小型船渠所需考慮之最重要因素。波浪資料可由實測或追算（*Hindcast*）獲得。

根據水深圖紙上作業，佈置防波堤、碼頭等，如有足夠空間則在一些重要位置建立消波海岸將非常有助於改進港池穩靜狀況。

二、相似性

(一)等縮尺模型（*Undistorted*）—幾何相似（*Geometrically Similar*）模型：

對一港口而言，為獲得港內水域穩靜以利船隻碇靠最好採用模型與原型幾何相似之模型試驗，以決定防波堤最佳佈置。一般港口模型試驗所需含蓋之範圍、水深及入射波波高、週期等試驗條件均容許採用等縮尺模型。

重力波作用於港口之模型試驗，模型製作採用福祿得模型律，使模型與原型幾何相似。設模型與原型長度縮尺為 L_r ，依福祿得模型律，模型上各種縮尺關係如下表：

表 3—2 福祿得模型律模型縮尺

項 目	因 次	模 型 縮 尺
長 度	L	L_r
面 積	L^2	$A_r = L_r^2$
體 積	L^3	$V_r = L_r^3$
時 間	T	$T_r = L_r^{1/2}$
速 度	T^{-1}	$V_r = L_r^{1/2}$
流 量	$L^3 T^{-1}$	$Q_r = L_r^{5/2}$

力	F	$F_r = L_r^3 \gamma_r$
重 量	F	$W_r = L_r^3 \gamma_r$
壓 力	$F L^{-2}$	$p_r = L_r \gamma_r$
能 量	$F L$	$E_r = L_r^4 \gamma_r$

註 $g_m = g_p$

(二) 不等縮尺模型 (*Distorted Model*) — 幾何不相似 (*Geometrically Dissimilar*) 模型：

模型上水平縮尺與垂直縮尺不相等稱之為幾何不相似模型，此種模型通常應用於長週期波作用下，模型所需含蓋範圍極大，或採用等縮尺導致模型上水深極小而底床摩擦產生顯著之影響。除此之外，長週期波原型波高極小時，採用不等縮尺模型在試驗上便於量測。不等縮尺模型應用於試驗上均有其特殊目的。試驗結果之準確性決定於水平與垂直縮尺比例 (*Degree of scale distortion*) 波長及相對水深等，故在試驗前必需詳細檢討試驗縮尺之影響。

微小振幅波理論，淺水波當 $0 < d/\lambda < 0.05$ 時，其波速為

$$V = (gd)^{1/2} \quad (3-1)$$

在上述情況下不等縮尺模型波浪折射、繞射及共振等現象在模型上可以獲得相當正確之重視。任何型態波浪底床摩擦所產生之影響，不等縮尺模型較等縮尺為小。但反射波之影響則不等縮尺成比率增加且非常顯著。長波波速由 (3-1) 得

$$\frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{g_m d_m}{d_p g_p} \right)^{1/2}$$

因 $g_m = g_p$ ，設垂直長度為 L_v ，則

$$V_r = \left(\frac{d_m}{d_p} \right)^{1/2} = \left[\frac{(L_r)_m}{(L_v)_p} \right]^{1/2} = (L_v)_r^{1/2} \quad (3-2)$$

設水平長度為 L_h ，其縮尺為 $(L_h)_r = (L_h)_m / (L_h)_p$ ，不等縮尺比 D_f (*Distorted factor*， $D_f > 1$)

$$D_f = \frac{(L_v)_r}{(L_h)_r} \quad (3-3)$$

由上述可得時間比例為

$$T_r = \frac{(L_h)_r}{V_r} = \frac{(L_h)_r}{(L_v)_r^{1/2}}$$

$$\therefore T_r = \frac{(L_h)_r^{1/2}}{D_f^{1/2}} \quad (3-4)$$

當相對水深極大時，波速為水深及重力加速度之函數，根據微小振幅波理論波速為

$$V = \left(\frac{g \lambda}{2 \pi} \tanh \frac{2 \pi d}{\lambda} \right)^{1/2} \quad (3-5)$$

$$\left(\frac{V_m}{V_p} \right)^2 = \frac{\lambda_m}{\lambda_p} \frac{\tanh \frac{2 \pi d_m}{\lambda_m}}{\tanh \frac{2 \pi d_p}{\lambda_p}} \quad (3-6)$$

因波長為水平長度

$$\therefore \frac{V_m}{V_p} = (L_h)_r^{1/2} \frac{\left(\tanh \frac{2 \pi d_m}{\lambda_m} \right)^{1/2}}{\left(\tanh \frac{2 \pi d_p}{\lambda_p} \right)^{1/2}} \quad (3-7)$$

由 (3-3) 式

$$D_f = \frac{(L_v)_r}{(L_h)_r} = \frac{d_m / d_p}{(L_h)_m / (L_h)_p} = \frac{d_m}{d_p} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_m}$$

(3-7) 式可改寫成

$$V_r = (L_h)_r^{1/2} \frac{\left(\tanh \frac{2 \pi d_p}{\lambda_p} D_f \right)^{1/2}}{\left(\tanh \frac{2 \pi d_p}{\lambda_p} \right)^{1/2}} \quad (3-8)$$

$$T_r = (L_h)_r / V_r$$

$$\therefore T_r = (L_h)_r^{1/2} \frac{(\tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p})^{1/2}}{(\tanh \frac{2\pi d_m}{\lambda_m})^{1/2}} \quad (3-8)$$

$$= (L_h)_r^{1/2} \frac{(\tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p})^{1/2}}{(\tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p} D_f)^{1/2}} \quad (3-9)$$

上述公式顯示在中間性水深波浪，波速及時間縮尺為相對水深、水平縮尺及不等縮尺比之函數。因之水深與波長之比 d/λ 為 $0.05 < d/\lambda < 0.5$ 時，由於不等縮尺影響其折射與原型或等縮尺模型比較，將產生變形 (*Distortion*) 現象。利用不等縮尺模型辦理此類型波浪在港內所造成之共振現象，其結果決不可信。

不等縮尺模型與原型折射現象在下述條件可獲得相似，即

$$\frac{d_m}{\lambda_m} = \frac{d_p}{\lambda_p} \quad (3-10)$$

或
$$\frac{d_p}{\lambda_p} = \frac{(L_v)_r d_p}{\lambda_m} \quad (3-11)$$

$$\lambda_p = \frac{1}{(L_v)_r} \lambda_m \quad (3-12)$$

因為
$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{\lambda} \quad (3-13)$$

$$\frac{gT_p^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p} = \frac{1}{(L_v)_r} \frac{gT_m^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d_m}{\lambda_m} \quad (3-14)$$

由 (3-10) 式

$$\tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p} = \tanh \frac{2\pi d_m}{\lambda_m} \quad (3-15)$$

因此 (3-14) 可寫成

$$T_p^2 = \frac{1}{(L_v)_r} T_m^2 \quad (3-16 a)$$

為獲得不等縮尺模型與原型折射相似

$$T_m = T_p (L_v)_r^{1/2} \quad (3-16 b)$$

三、模型設計

(一)現地資料：為辦理港灣波浪有關之模型試驗，必需搜集下列資料。

1. 波浪統計資料

2. 潮汐資料

3. 正確之港區水深測量圖，港外需測至足夠水深以便由海繪製各入射方向之波浪折射圖。

4. 詳細之港區及鄰近地區地形及水深圖，此種圖需能顯示岸線構造物、航道及迴船池現有水深與興建計畫浚挖深度等。

5. 詳細之興建計畫圖，包括現有及計畫興建之防波堤、海堤、消波設施、繫船樁及碼頭等。

6. 停泊之各類型船隻在港池內可能發生之平行碼頭面之首尾擺動 (Surge) 或垂直碼頭面之側向搖擺 (Sway) 共振週期。並需考慮各型船隻在不同繫纜條件下之共振週期。

7. 各類型船隻裝卸或碇靠容許波浪。

上述 1. 至 5. 項為模型設計、建造與決定試驗波浪、水位所需資料，第 6. 及 7. 項係用以決定最佳港池及防波堤佈置，有效防止外海波浪入侵以獲得各類型船隻碇靠與裝卸所需條件。最理想之港口為在任何波浪作用下停泊於港池之船隻可免受入侵波浪干擾。然而海面波浪非常複雜，由各種不同週期波浪組成群波，而港池形狀、大小、水深又往往決定於船型、噸位等，因此港池無法避免各種不同週期波浪可能

引起之共振，而各類型繫纜船本身亦無法免於入射波造成不正常之共振，而各類型繫纜船本身亦無法免於入射波造成不正常之共振。但潮位變化纜繩必需隨時調整，實無法做到。

各方向深水示性波高與週期通常被採用為試驗波浪。必須利用波浪折射圖求得造波機位置之波高。但近海地形變化甚大，對波浪折射與淺化影響非常複雜，尋求改精確可靠方法以決定試驗波大小與方向是試驗前最重要工作。

導致港池共振之中間波及長週期波浪其波高甚小，故試驗波高均採用港口附近或港池內波高。而試驗量測重點為垂直運動最大之奏點（*Antinodal*）位置。

簡單之長型港池，若其岸邊均不透水易產生二次度駐波型共振現象，奏點位置靠近岸邊。各種週期作用下奏點波高容易量得。奏點波高與入射波高之比為共振增幅比。形狀較複雜之港池，其節奏與奏點位置為波浪週期之函數，甚難決定。波高測點往往需要借助於數學分析結果。

津波（*Tsunami*）常被認為是共振之主要波浪，其在深水海洋中波長甚長，波高極小，此種資料需有長時間不間斷紀錄始可獲得。

（二）線性縮尺之決定

1. 短週期波：港工模型遮蔽試驗，目的在保護碇靠船隻，免受外海短週期風浪侵擊。根據福祿得模型律製作與原型幾何相似模型。線性縮尺之選定必需使內摩擦及表面張力之影響極小與重力相較可以忽略。模型上底床滯性摩擦力對波高影響不大，可以不予考慮，或可用解析、試驗等方法校正模型與原型滯性摩擦之不相似性。為使波浪作用產生沿岸流在模型上重現，模型製作範圍必需含蓋港區兩岸相當距離。而其向外海亦需延伸至相當水深，使造波機與港口間之波浪折射

現象重現。試驗上希望採用較大模型率以減小縮尺影響，又想含蓋較大港區範圍使沿岸流與折射現象重現，但由於試驗設備及經費限制往往無法達到上述要求。經驗得知，模型線性縮尺必需考慮港區大小、水深、波高、測量儀器、波浪遮蔽情形及試驗所要求精度等因素後決定，一般採用縮尺範圍為 $1/75$ 至 $1/150$ 。最重要的是模型內波高不能太小，以利測量，水深不能太小以避免底床滯性剪力影響。

2. 中間性及長週期波：此種波浪作用於港口週期約為 20 至 25 秒 ~ 2 至 3 分鐘，而其波高甚小。商船利用普通彈性纜索週期約為 20 秒至 2 分鐘。近年來油輪噸位增大，港池水深亦隨之增加，除非對錨繫非常歷練，否則臨界週期亦隨之增大。但一般選擇線性縮尺及模型設計均不考慮錨繫問題。

中間性及長週期波模型線性縮尺之選擇較短週期風浪困難。主要原因為長週期波之深海波長隨週期平方增加，為重現原型現象，模型製作範圍亦相對增大。波浪尖度甚小，海岸及港池岸壁均呈全反射，消波非常不易。模型內反射岸壁與造波機間之距離需相當大，否則岸壁反射波到達造波板後再反射，使入射波高增大現象。另一可能產生之現象是波長較長之浪容易在試驗水池內造成共振現象。

基於上述現象，考慮經濟與實際因素，一般採用不等縮尺模型。僅有極少數採用等縮尺模型，其線性縮尺約為 $1/100$ 。大多數均採用不等縮尺模型，垂直縮尺約為 $1/50$ 至 $1/100$ ，不等縮尺比約為 3 至 5。如波速為長波波速關係，即 $V = (gd)^{1/2}$ ，則水平縮尺可以減小，不等縮尺比可以增加。若波速為水深 d 及週期 T 之函數，相同之不等縮尺比其折射誤差隨週期之減小而增大。

(三) 縮尺影響：

1. 短週期波一等縮尺模型：

港工模型遮蔽試驗主要係防止短週期波干擾港池穩靜，採用福祿得模型律建造與原型幾何相似模型，但底床摩擦力等不能正確的在模型上重現，故不能達到完全相似條件。試驗波浪因內摩擦、表面張力及底層摩擦而減衰。同時摩擦亦導致透水性防波堤傳遞波能量之減低。

上述現象構成短週期波浪模型試驗主要之縮尺影響。如線性縮尺 L_r 甚小，表面張力可能影響波速，導致折射誤差，內摩擦亦可使波高減低。波速受表面張力影響，如圖 3—1 所示。Keulegan (1950) 指出受內摩擦影響，波高隨時間變化之關係式為

$$\frac{H_t}{H_{t=0}} = \exp \left[-8\pi^2 \nu t / \lambda^2 \right] \quad (3-17)$$

設 t' 為波高減為原波高之 50 % 時所需時間

$$t' = 0.0088 \lambda^2 / \nu \quad (3-18)$$

設溫度為 $21^\circ C$ ，($\nu = 1.059 \times 10^{-5}$)，在 t' 時間波浪運動距離為 X_p ，以波浪週期表示則 (3-18) 式可寫成

$$X_p = 111.750 T^5 \left(\tanh \frac{2\pi d}{\lambda} \right)^3 \quad (3-19)$$

週期較短時，波高因內摩擦而減低情形如圖 3—2。由該圖可知水深太小，週期又短之情況下，波高衰甚快。因之，港工模型試驗為避免內摩擦及表面張力影響，必須審慎選擇模型線性縮尺。根據 Keulegan (1950) 研究結果顯示，在勻寬之長型水槽前進波受滯性邊界層摩擦影響，波高與運動距離之關係為

$$\frac{H_2}{H_1} = \exp(-\alpha X_p) \quad (3-20)$$

上式中

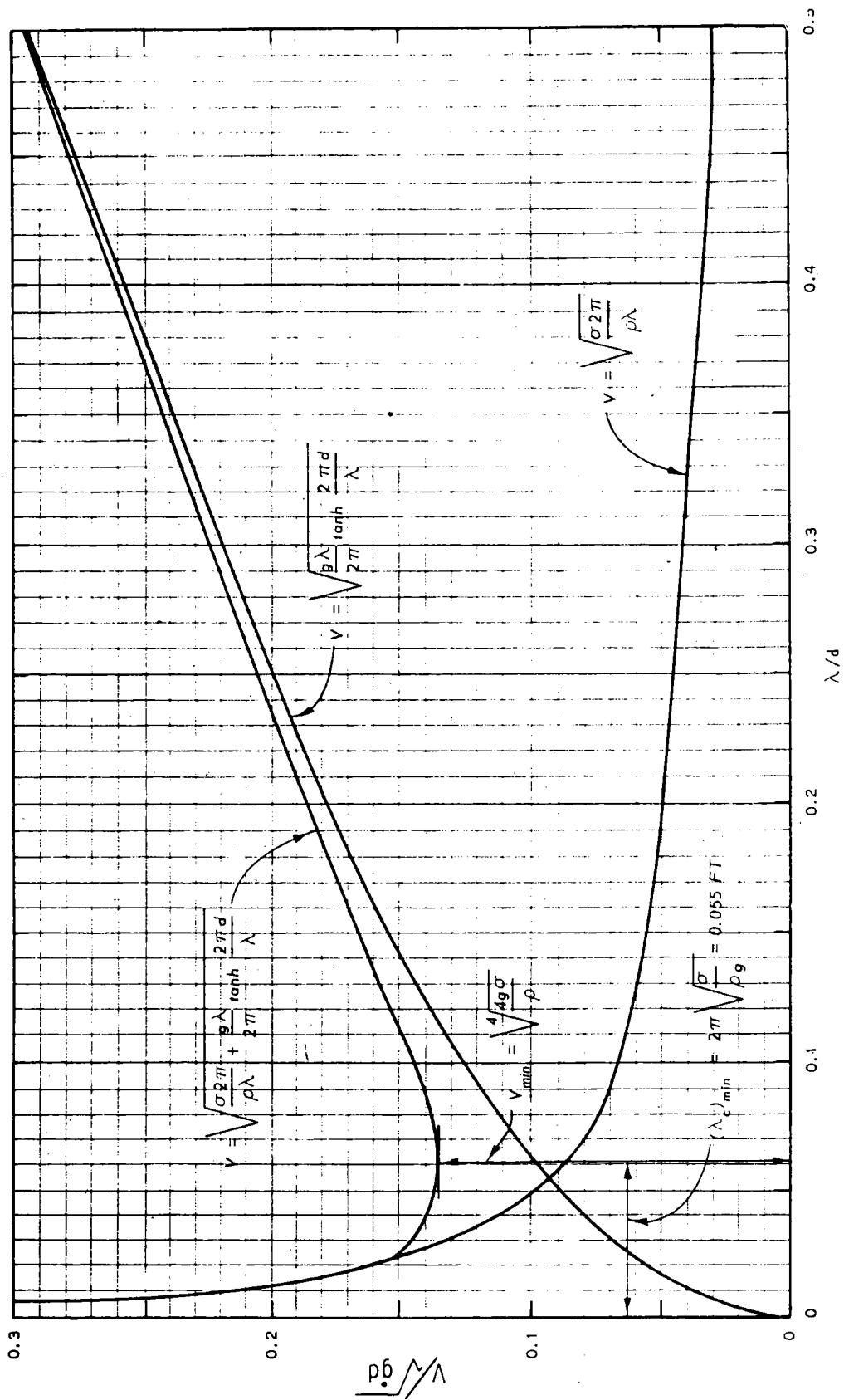


圖 3—1 表面張力對波浪模型之影響 (Keulegan 1950)

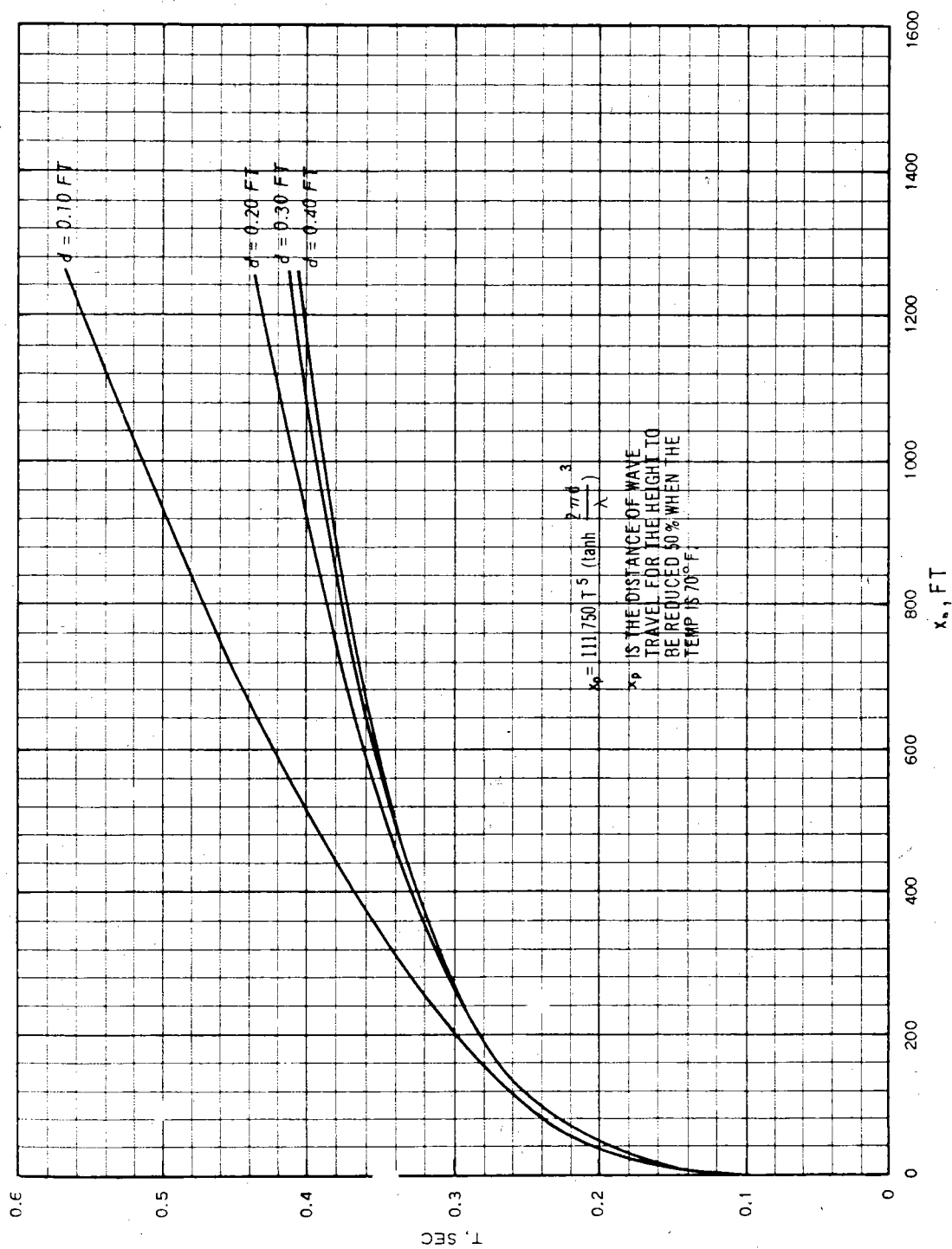


圖 3—2 內摩擦對波浪模型試驗之影響 (Keulegan 1950)

$$\alpha = \frac{2}{VB} \left(\frac{\pi \nu}{T} \right)^{1/2} \left[\frac{\lambda \sinh \frac{4\pi d}{\lambda} + 2\pi B}{\lambda \sinh \frac{4\pi d}{\lambda} + 4\pi d} \right] \quad (3-21)$$

V = 波速

B = 水槽寬度

$H_1 = X_0 = 0$ 時波高

H_2 = 水深 d 處，運動距離 X_p 之波高

如水槽寬度與水深之比甚大時，(3-21) 式可寫為

$$\alpha = \frac{4\pi^{3/2} \nu^{1/2} T^{1/2}}{\lambda^2 \left(\sinh \frac{4\pi d}{\lambda} + \frac{4\pi d}{\lambda} \right)} \quad (3-22)$$

Keulegan (1977) 認為實際上由於水面污染等影響，利用上式所求 α 值約需增加 25%，即

$$\alpha = \frac{5\pi^{3/2} \nu^{1/2} T^{1/2}}{\lambda^2 \left(\sinh \frac{4\pi d}{\lambda} + \frac{4\pi d}{\lambda} \right)} \quad (3-23)$$

港工模型試驗底床摩擦對波浪之影響如圖 3-3 及 3-4，由上圖可獲下列結論：

- (1) 原型中 (縮尺 1:1) 底床摩擦在試驗模型範圍內可以忽略。
- (2) 縮尺小於 1/100 之模型，由於摩擦影響甚大，應儘量避免採用。
- (3) 水深越小時，底床摩擦所產生之能量損失非常大。
- (4) 由於摩擦所造成之縮尺影響，故試驗波高必需利用 (3-20) 及 (3-23) 予以校正，使其影響減至最小。

模型上防波堤與消波設施等結構物如與原型幾何相似，則由於滯性摩擦影響，模型上反射較原型為大，而其傳透波則較原型為小。一

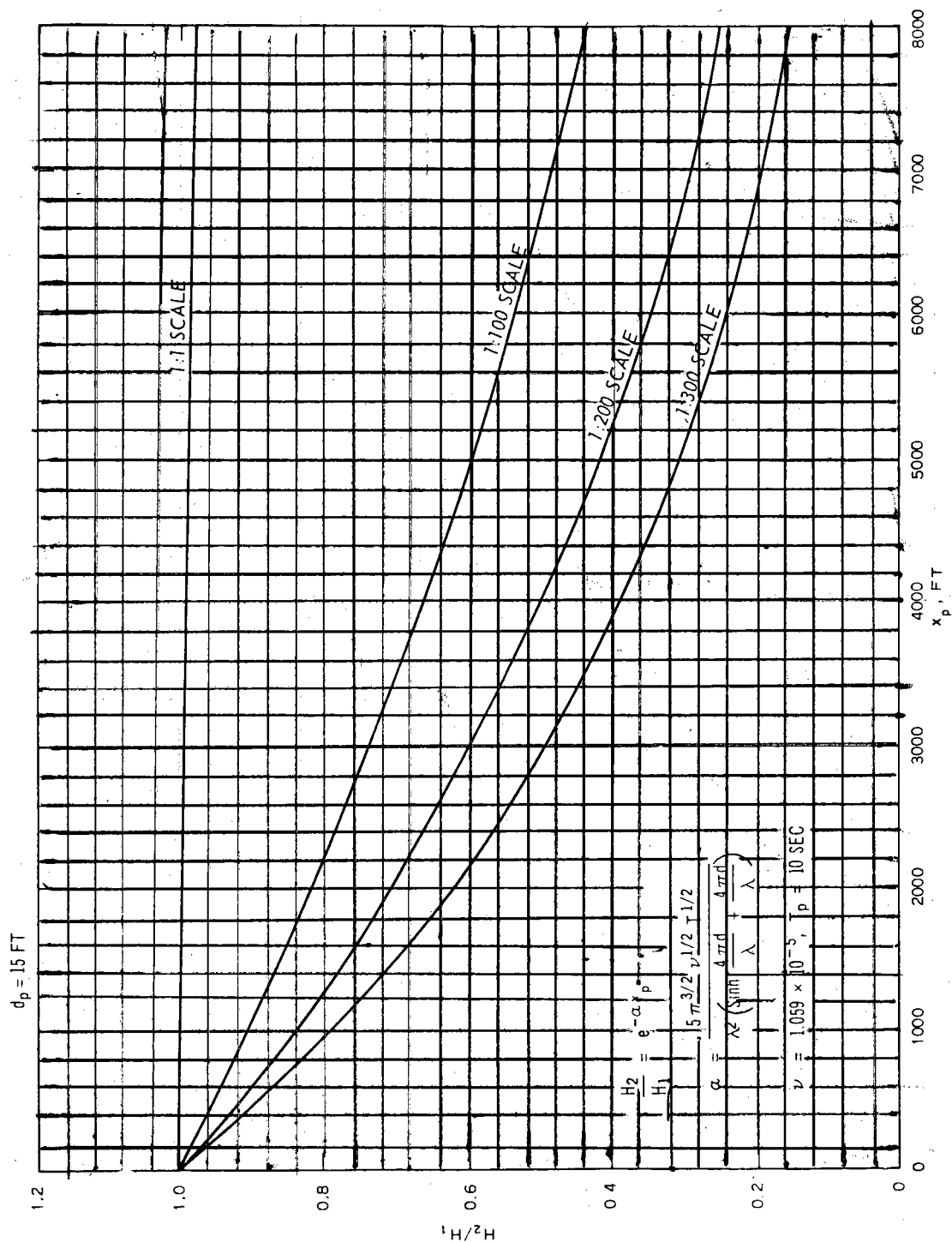


圖 3—3 底床摩擦對波浪模型試驗之影響 (Keulegan 1950)

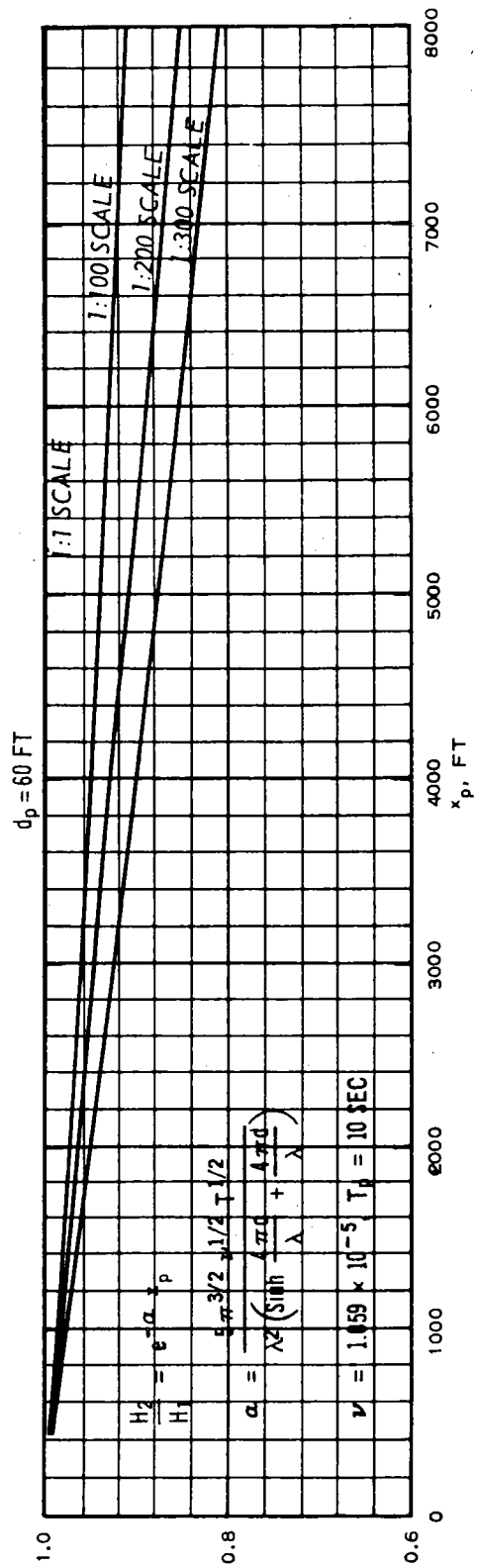
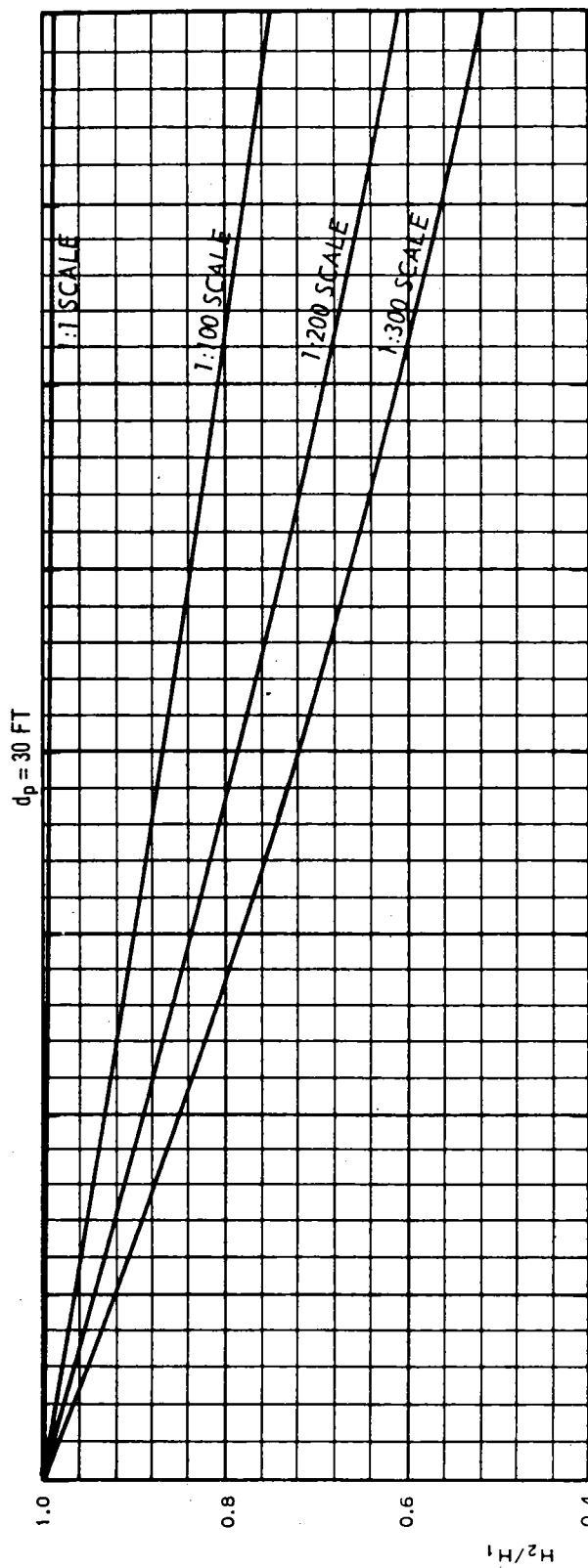


圖 3—4 底床摩擦對波浪模型試驗之影響 (Keulegan 1950)

般而言，港工遮蔽模型試驗線性縮尺均甚小，縮尺對波浪反射及傳透影響甚大，如何消除上述縮尺影響及瞭解構造物反射與傳透係數必須辦理構造物斷面試驗，詳於第四章斷面模型試驗討論。

2. 中間性及長週期波—不等縮尺模型。

當中間性或長週期等盪漾型波作用於港灣模型時，因波長甚長，在模型上靠海側所產生之反射波需要有廣濶之空間以便安裝消波及濾波設施以消除反射波。除非有廣濶之空間以設置消波器，否則甚難消滅長週期小振幅波浪。為合理選擇線性縮尺減小縮尺影響，需製作非常廣濶範圍之試驗模型，此種要求往往受經費限制。但太小之模型又會導致底床摩擦等影響，因之經常採用不等縮尺模型（*Distorted Model*）以減小摩擦影響，增加消波器設置空間。不等縮尺模型水平縮尺（ L_h ），較垂直縮尺（ L_v ），為小，容許採用較大波高，使模型試驗波高更容易測量。等縮尺模型主要之縮尺影響為底床摩擦及拋石堤或消波設施波浪傳透及反射特性。不等縮尺模型由於水深增大，運動距離減短，波浪因運動距離所受底床摩擦影響較等縮尺模型為小。但底床坡度及海岸構造物之坡度（如拋石堤、海堤等）則較原型或等縮尺模型更陡，因此而導致模型上反射波增大。波浪折射及繞射所受不等縮尺模型影響，其程度視不等縮尺比與相對水深（ d/λ ）而定。總能量損失（含底床摩擦、內摩擦及進口損失等）亦受不等縮尺影響。因此，採用不等縮尺模型必須盡量設法減少不等縮尺產生之影響。

不等縮尺底床摩擦影響通常予以忽略。海灘及反射面之反射係數因縮尺所造成之影響，可利用波浪變形而減小，即將波高任意加大些，使波浪尖度 H/λ 增加，反射係數將因波浪尖銳度增加而減小。港工構造物（如拋石堤或棧橋式碼頭等）之反射係數受不等縮尺影響是

試驗重要關鍵，其反射係數常較現地情況更為誇張。可利用尼龍網覆蓋於邊坡上，同時稍為加大表面層塊石，以減小反射係數。構造物反射係數需辦理二次度斷面試驗決定之。

決定反射係數之斷面試驗首先應選用較大縮尺模型，採用較大雷諾數，使造成亂流現象以瞭解原型反射係數。然後利用相同模型以決定尼龍網（或其他消波器材）與不等縮尺塊石之最佳組合以獲相似係數。

不等縮尺模型中，當波長與水深相較甚大時，即流速 $V = (gd)^{1/2}$ 時，波浪折射現象可以維持與原型相似。Bicset及 Le Mehaute (1955) 證明當下式成立時，誤差約在 5 % 以內。

$$d < 0.2 T^2 \quad (3-24)$$

上式 d 及 T 單位分別為呎及秒，在不等縮尺模型其原型水深 d_p 及週期 T_p 與不等縮尺比關係為

$$d_p < \frac{0.2 T_p^2}{D_f^2} \quad (3-25)$$

上式主要應用於模型設計，大部份不等縮尺港工模型在長波作用下，試驗主要目的在獲得最佳港池與防波堤佈置，以滿足船隻碇靠及進出港口。此類問題波浪週期約為 20 秒至 200 秒。若波浪折射是試驗重要項目時，根據 (3-25) 式可求得模型重現最大容許水深。表 3-3 為各種不同週期及不等縮尺比，利用 (3-25) 式求得最大水深。

表 3—3 各種 T_p 及 D_f 最大容許水深

T_p (Sec)	D_f			
	2.0	3.0	4.0	5.0
	$(d_p)_{max} \quad (ft)$			
20	20.0	8.9	5.0	3.2
25	31.2	13.9	7.8	5.0
30	45.0	20.0	11.3	7.2
45	101.0	45.0	25.3	16.2
60	180.0	80.0	45.0	28.8
75	281.0	125.0	73.0	45.0
90	405.0	180.0	101.0	64.8
120	720.0	320.0	180.0	115.0
180	1,620.0	720.0	405.0	259.0
210	2,205.0	980.0	551.0	353.0
240	2,880.0	1,280.0	720.0	461.0

註：上表最大容許水深係以折射相似為主。

由上述可知，波浪折射為主之不等縮尺模型不可能選定一種縮尺滿足各種週期相似性。折射誤差是否在容許範圍內，可以比較等縮尺及不等縮尺模型計算結果決定之。流速及時間縮尺按（3—2）及（3—4）式設計。

$$V_r = (L_v)_r^{1/2} \quad (3-2)$$

$$T_r = \frac{(L_h)_r^{1/2}}{D_f^{1/2}} \quad (3-4)$$

在特殊情況下，相對水深 d/λ 甚小時，波速 $V = (gd)^{1/2}$ ，而一般情形則用（3—5）計算

$$V = \left(\frac{g \lambda}{2 \pi} \tanh \frac{2 \pi d}{\lambda} \right)^{1/2} \quad (3-5)$$

波速模型縮尺按 (3-8) 及 (3-9) 式計算，分別為

$$V_r = (L_h)_r^{1/2} \frac{\left(\tanh \frac{2 \pi d_p}{\lambda_p} D_f \right)^{1/2}}{\left(\tanh \frac{2 \pi d_p}{\lambda_p} \right)^{1/2}} \quad (3-8)$$

$$T_r = (L_h)^{1/2} \frac{\left(\tanh \frac{2 \pi d_p}{\lambda_p} \right)^{1/2}}{\left(\tanh \frac{2 \pi d_p}{\lambda_p} D_f \right)^{1/2}} \quad (3-9)$$

相對水深 d/λ 不夠小時，流速不能以 $V = (gd)^{1/2}$ 正確求得，利用上述公式設計模型，並未能達成折射現象相似，但可以獲得波長與水平縮尺相似，如此則可確決定波長與港池尺寸相對間之相似現象，進一步正確模擬各種共振週期，獲得正確之共振現象可能發生週期。

四、模型製作與試驗

(一) 製作：

港池波浪試驗模型大都建在蔽風雨之場棚內，如建在室外必須避免受風吹造成微波影響試驗精度，一般而言場棚高度約需十公尺左右以利照相。港池模型製作方法大致可分為兩種：

1. 斷面法：依水深圖繪製斷面圖，用鋁片剪成相似斷面，將鋁片置於模型適當位置，先鋪沙壓實，上層預留三至五公分漫以水泥沙漿，斷面間距隨地形變化而定，簡單平坦地形每公尺一斷面，複雜地形則數十公分一斷面。

2. 方格法：按測量水深圖利用中插法計算每方格點之高程，在模型上定方格，並標示每點之高程，鋪沙壓實，頂部預留三至五公分漫

水泥沙漿。方格點之距離隨地形簡單或複雜而定，平坦地形方格約為一公尺見方，複雜地形則酌量減小。

模型上波高隨運動距離而減小，主要由於能量消失於底床邊界層滯性剪力，如果粗糙度不超過滯性邊界層時，則糙度不影響能量損耗，故是否用漫刀磨平依實際需要決定。模型地形誤差範圍視試驗精度而定，一般要求在 $\pm 0.1\text{ cm}$ 以下。

試驗最好使用淡水以保持模型乾淨，增加設備壽命，除此之外須設法減少水池漏水現象。

(二) 試驗

1. 短週期波浪模型試驗

模型試驗之前原型上所考慮採用之深水波須利用折射方法轉換為試驗水池外圍界限水深之波高及波向。選用之波向、波高對規畫及設計模型試驗必須具代表性以真正獲得最佳佈置。一般而言，遮蔽模型試驗潮汐變化不必在模型上重現，採用靜水位辦理各種試驗即可。選擇試驗水位時應注意水深所產生之波浪變化現象，必須在模型上重現。較重要的如港區波浪折射、構造物越波、波浪遇防波堤等構造物產生之反射波及傳遞波。選擇最佳模型靜水位之重要因素為

(1) 颱風侵襲時適逢最高水位，造成最大波浪能量傳遞。

(2) 颱風向岸移動時，伴隨而產生之風場現象及質量傳輸。相反的，離岸移動可能使水位降低。

(3) 模型上採用較高之靜水位有利於減小因縮尺太小在淺水區所造成之底床摩擦影響。

考慮上述靜水位對試驗所造成之影響及各因素所佔重要性，模型試驗通常希望偏向較安全方，故對試驗靜水位之選擇均採最大颱風侵襲時可能造成之最高水位。試驗之前必須先搜集過去所發生之最高水

位紀錄。

試驗時所需紀錄資料包括港池各點之波高量測，利用照相攝取波型概況，如圖 3—5，利用浮子量測碎波帶附近流況型態以及觀察試驗時波浪作用狀況。

2. 中間性及長週期波浪模型試驗：

中間性及長週期波浪模型試驗方法，除港池共振現象為試驗重點外，大致與短週期波模型試驗相似。週期變化所造成之波浪放大率是試驗重點，試驗時週期變化間隔儘可能減小，以獲得準確之港池共振週期，繪製週期變化波高感應曲線。航道開口及港池特定區域之流況亦為辦理此項試驗量測重點。

五、模型試驗實例

(一)計畫名稱：屏東大鵬灣外廓堤防遮蔽檢核試驗

(二)試驗單位：交通處港灣技術研究所

(三)試驗報告：屏東大鵬灣外廓堤防遮蔽檢核試驗研究報告

張金機、黃清和

(四)試驗期間：民國 71 年 5 月至 71 年 8 月

(五)試驗目的：對漂沙試驗結果所提外廓堤防修正方案辦理檢核試驗，以期獲得防浪防沙俱佳之佈置。

(六)試驗條件：潮汐採用大潮平均高潮位 + 1.5 m，颱風波浪及湧浪分別如下表。



圖 3—5 遮蔽試驗波浪型態 (*Hudson et al 1963*)

分 類	波 向	波 高 (m)	週 期 (sec)
颶 風 波 浪	W S W	6.0	11.5
	S W	6.0	11.5
	S S W	6.0	11.5
	S	6.5	11.8
	S S E	8.0	12.2
湧 浪	S W	3.0	14.0
	W S W	3.0	14.0

(七)試驗模型縮尺：採用不等縮尺模型，垂直縮尺為 $1/100$ ，水平縮尺則為 $1/200$ 。

(八)試驗經過與結果：

本試驗模型因受試驗水池限制，採用不等縮尺模型，因此模型上週期縮尺分別考慮下列三種情況。

1. 以折射現象為主 $T_m = T_p / \sqrt{(L_v)_r}$

2. 以繞射現象為主 $T_m = T_p / \sqrt{(L_h)_r}$

3. 不等縮尺模型縮尺

$$T_m = T_p \sqrt{(L_h)_r} \left[\frac{\tanh \frac{2\pi (L_v)_m}{\Omega (L_h)_m}}{\tanh 2\pi \frac{(L_v)_m}{(L_h)_m}} \right]^{1/2}$$

上式中 $\Omega = (L_v)_r / (L_h)_r$ 。

利用三種不同時間縮尺，對漂沙試驗所獲致最佳防沙佈置進行試驗，試驗結果顯示，港內波浪狀況非常紊亂，如圖 3—6 及 3—7，部份水域發生明顯之共振現象，推究其原因主要為內港港池狹長，入口航道及碼頭岸壁均採用垂直岸壁，無法消滅入侵波能，更由於其反射

而造成共振現象。經研究後在不影響防沙效果條件下提出修正佈置一種，將外港岸邊及航導拋放塊石，面對港口直接受入射波作用之碼頭改為棧橋式，以消殺部份入射波浪能量，以威脅港池最嚴重之 WSW 向颱風波浪及湧浪進行試驗，其結果如圖 3—8 及 3—9 所示。港內波浪狀況已有明顯改善，可以符合船隻碇靠要求。

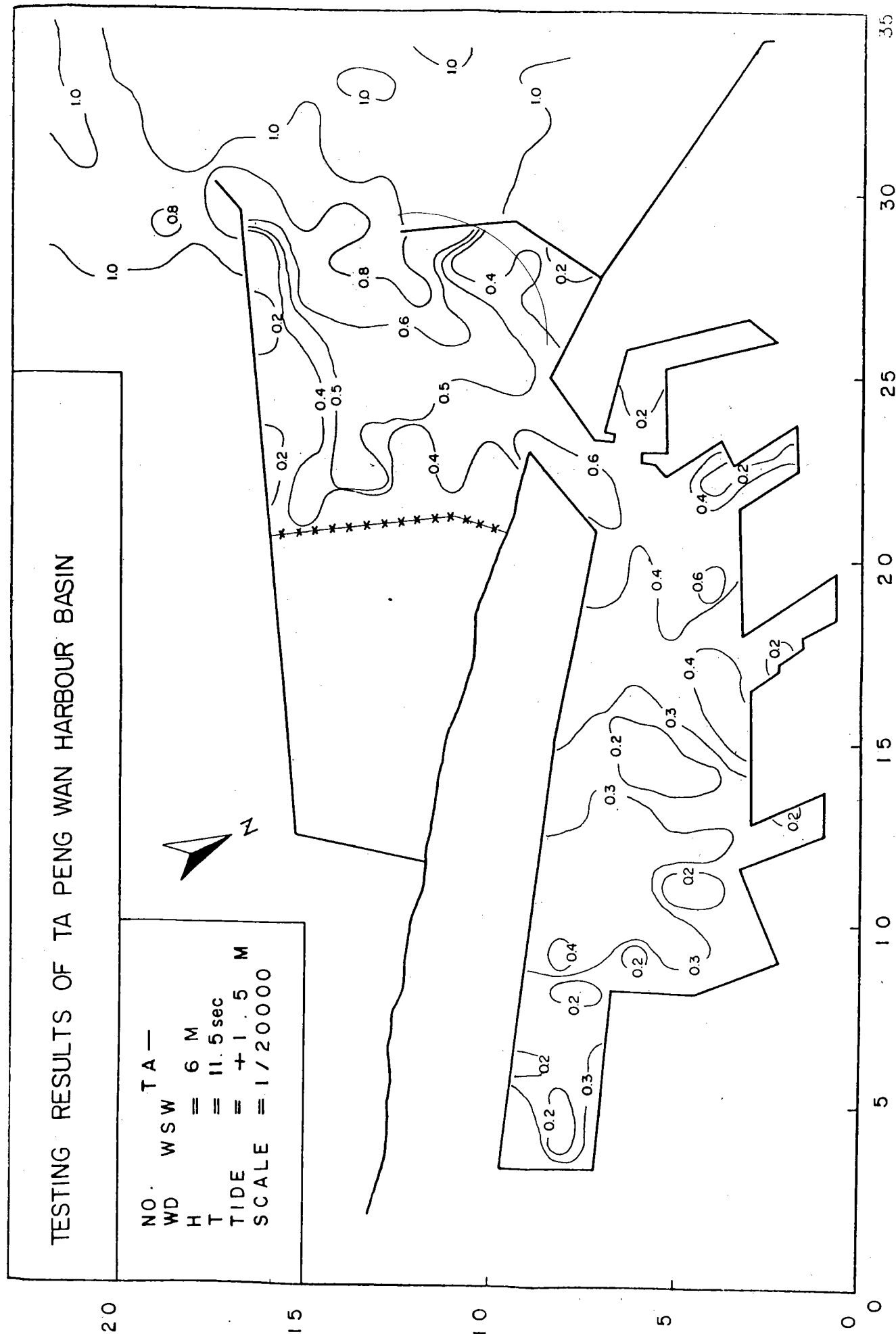


圖 3—6 佈置 A 受 WSW 向颱風波浪作用後港池波浪情況

TESTING RESULTS OF TA PENG WAN HARBOUR BASIN

NO TA —
 WD = 3 M
 H = 14.0 sec
 TIDE = +1.5 M
 SCALE = 1/20000

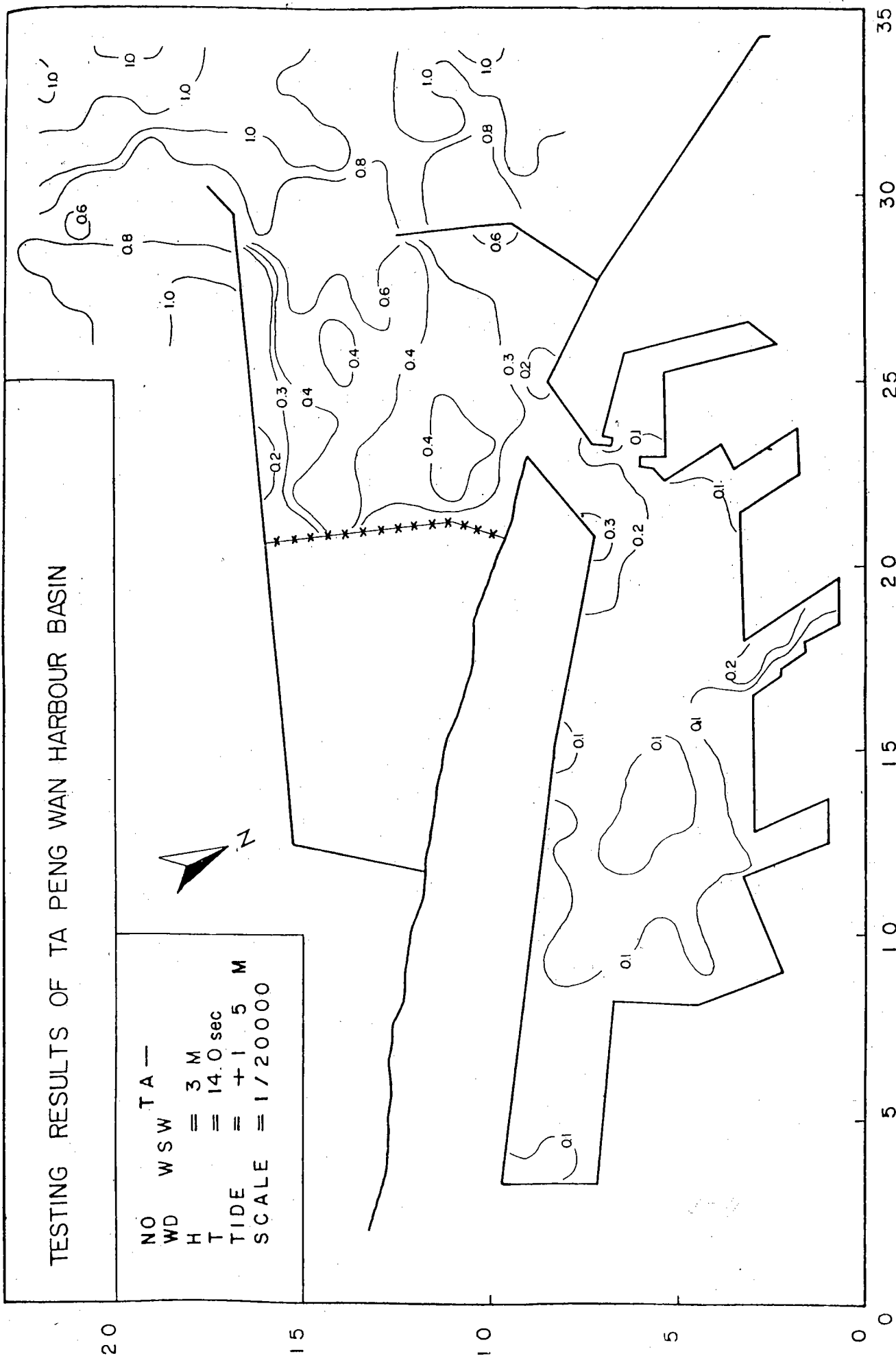


圖 3—7 佈置 A 受 WSW 向湧浪作用後港池波浪情況

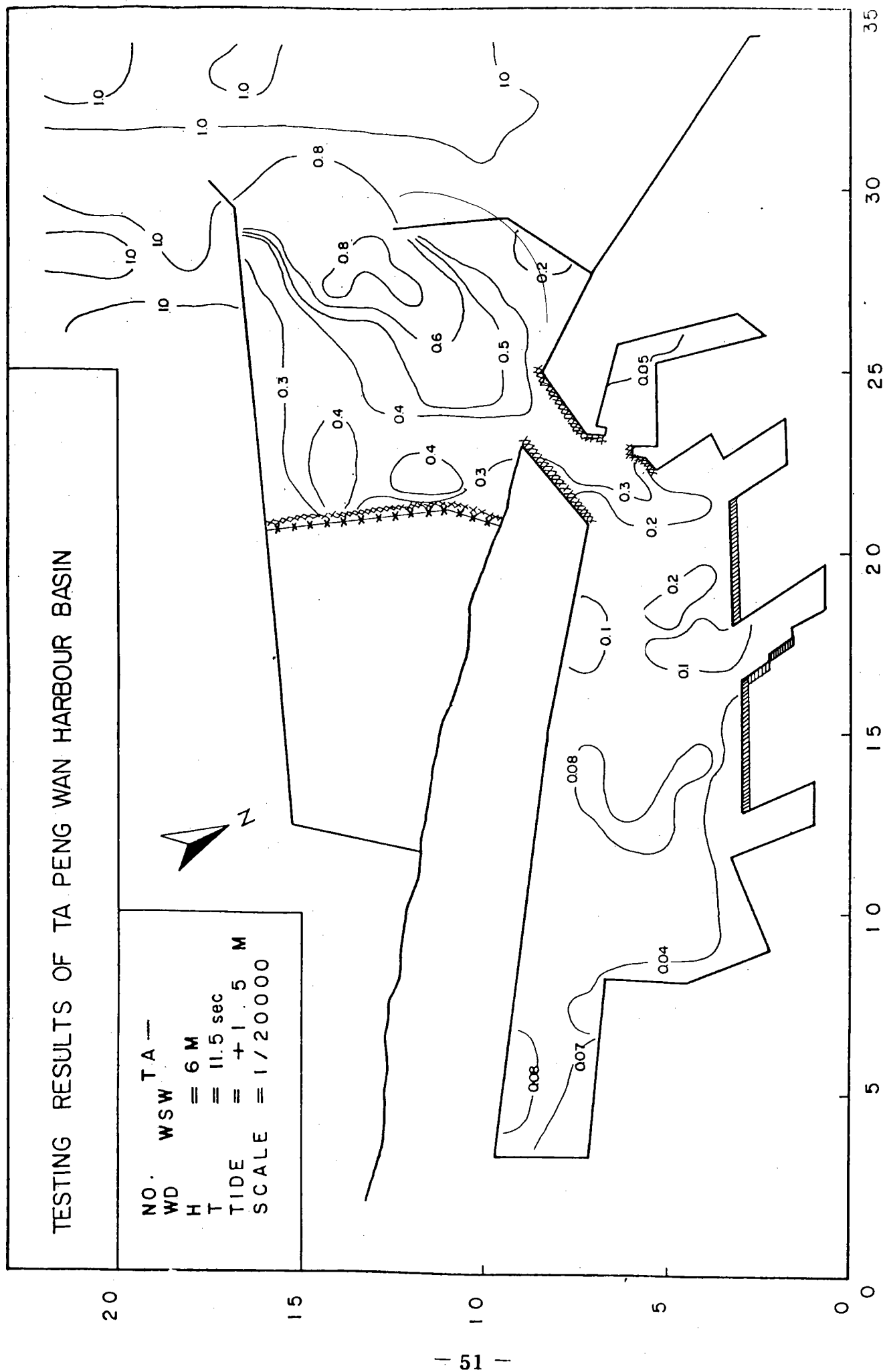


圖 3—8 修正佈置 B 受 WSW 向颱風波浪作用港池波浪情況

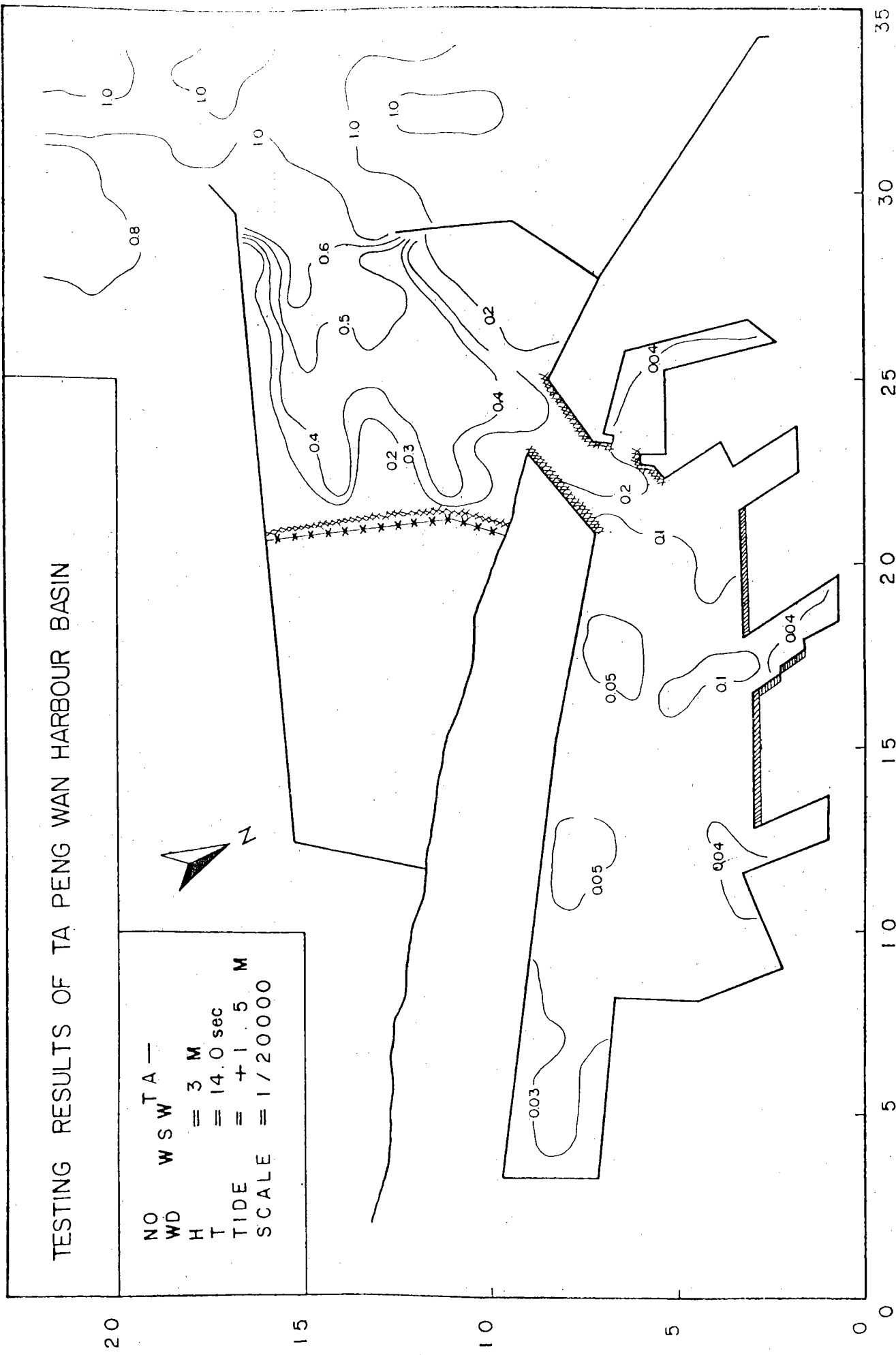


圖 3—9 修正佈置 B 受 WSW 向湧浪作用港池波浪情況

第四章 海岸結構斷面試驗

一、概述

海岸工程構造物所受波浪作用非常複雜，故設計經濟穩定斷面誠屬不易。作用於海岸構造物之波浪，其一為暴風浪，週期約為1秒至25秒，波高由數公分至十餘公尺。另一為地震引起之津波，週期為數分鐘至三、四十分鐘；近海波高可達十公尺或更高。構造物所受波壓及波壓分佈情形為構造物幾何形狀、提前水深、水位及波浪大小等之函數。除在深水條件下簡單斷面形狀外，波力均無法用數學計算求得，故利用水工試驗獲得設計所需之正確資料，以幫助工程師作決定為一般之途徑。

本章討論項目為模型設計、操作、正確性及如何利用試驗結果設計最佳防波堤斷面。構造物形式分為(1)拋石堤及消波岸壁，(2)直立(沉箱)式防波堤，(3)合成式防波堤，(4)海堤，(5)浮式防波堤，(6)氣壓式防波堤及(7)水壓式防波堤。

拋石堤一般使用於水深較淺，且挾石容易取得地方，或海岸基礎承载力不夠，不能使用垂直式防波堤地區。有時海岸基礎不良時，拋石堤可以分期施工，減小基礎沉陷影響。拋石消波岸壁係用以消殺港內部份波消能量，使港池水面更穩靜，消波岸壁構造與拋石堤相似，但其波度較平緩，孔隙較大，岸壁後大部為垂直之擋土牆。

如基礎堅固，均勻且不容易被冲刷，直立式防波堤(或碼頭)是最經濟斷面。而且直立式防波堤如果頂寬足夠，又可防止越波，可充當臨時碼頭。但一般而言，甚少有基礎不需作特殊整理而可將重力型直立式防波堤直接放置其上。因之在基礎先鋪上拋石，增加承载力，然後將垂直斷面堤身放置其上，謂之合成堤，此堤適用於深水基礎不

海堤是用以將陸地與海水分隔之構造物，其型式亦可分為垂直堤、拋石堤及合成堤。

浮式防波堤是利用浮體結構物以錨索固定於海面上，以減少波浪能量通過。浮式防波堤必須建築於較大水深，以增加其效用。浮式防波堤之自然共振週期必須遠較設計波週期大，否則因入射波本身產生共振將導致極大波浪。浮式防波堤僅適用於水深較大，波浪週期較小地方，因其消波效能不大，尚未能被廣泛應用。但浮式防波堤有其優點，如可以隨時移動、容易安裝、可以減少海岸淤沙或冲刷困擾，不必顧慮基礎問題等，其建造及維護費均較固定式低廉。

氣壓式防波堤係利用壓縮空氣從潛在海面之鑽孔管路系統噴出氣泡，升至水面成為空氣泡幕。當空氣泡上升時，產生垂直流，及至水面附近變為上下游方向之水平流。與波浪傳播方向相反之水平流使波浪減衰。

水力式防波堤與氣壓式防波堤所用之原理相似，唯其使用壓力使孔管（或噴嘴）使水噴出水面造成表面流。氣壓式及水力式防波堤與浮式防波堤一樣較適用於水深較大，波浪週期較短之情況。

拋石堤、直立式防波堤等堤前基礎受波浪及水流作用造成冲刷現象，不在本章討論範圍，此種問題必要時可以辦理波浪冲刷試驗。根據經驗，堤前基礎冲刷常導致構造物損毀。冲刷區域可以先鋪一層尼龍網，上部拋石防止。拋石之安定試驗與拋石堤相同。

二、相似性

（一）拋石堤及消波岸壁

拋石堤或消波岸壁其頂寬、頂高、塊石大小、層數、不透水層高度、護面層等幾何形狀為已知時，受重力波作用下，護波塊石之安定為下列諸因素之函數。

d : 堤前水深

D : 護坡塊損害率(%)，護坡塊移動數目與總數之比

g : 重力加速度

H : 入射波高

V_w : 受損塊石附近水流

α : 海側方向邊坡坡度(與水平夾角)

β : 波浪入射角

Δ : 護波塊形狀

θ : 堤前海床坡度(與水平夾角)

λ : 波長

μ : 水之滯度

ρ_a : 護坡塊之密度

ρ_w : 水之密度

$(\ell_c)_a$: 護坡塊之特徵長度

$(\xi_c)_a$: 護波塊表面糙度之特徵長度

由 Buckingham π 定理

$$f[V_w, g, \rho_a, \rho_w, \omega, H, \lambda, d, (\ell_c)_a, (\xi_c)_a, \alpha, \beta, \Delta, \theta, D] = 0 \quad (4-1a)$$

無因次式為

$$f' \left[\frac{V_w}{g^{1/2}(\ell_c)_a^{1/2}}, \frac{V_w(\ell_c)_a}{\mu/\rho_w}, \frac{\rho_w}{\rho_a}, \frac{(\ell_c)_a}{d}, \frac{H}{\lambda}, \frac{d}{\lambda}, \frac{(\xi_c)_a}{(\ell_c)_a}, \alpha, \beta, \Delta, \theta, D \right] = 0 \quad (4-1b)$$

入射波形成水流，作用於護坡塊有慣力、形狀曳力、表面曳力(滯性剪力)，慣力係由壓力差造成。重力為主要作用力，因此拋石堤

模型設計根據福祿得定律，利用福祿得模型律慣力與重力可以正確的在模型上重現，形狀曳力與重力有關相似性大致可獲得，其程度決定塊石形狀、重量及波浪大小。但滯性剪力則不可能由福祿得模型律獲得。在模型試驗上，雷諾數相當大則滯性剪力可以忽略。但拋石堤次層塊石往往均甚小，選擇縮尺很難，達到滯性剪力可以忽略程度。

(4-1 b) 將福祿得數及密度比組合後可知護坡塊石之安定大部份決定於形狀曳力及水中重量。(4-1 b) 式可改寫成

$$\frac{V_w}{g^{1/2}(\ell_c)_a^{1/2}} \frac{(\rho_w)^{1/2}}{(\rho_a - \rho_w)^{1/2}} = f'' \left[\frac{V_w(\ell_c)_a}{\mu/\rho_w}, \frac{(\ell_c)_a}{d}, \frac{H}{\lambda}, \frac{d}{\lambda}, \frac{(\xi_c)_a}{(\ell_c)_a}, \alpha, \beta, \Delta, \theta, D \right] \quad (4-1 c)$$

(4-1 c) 式為拋石堤及消波岸壁等穩定試驗，模型設計及資料分析之重要係據。

模型與原型損害率相等 $D_m = D_p$ ，則模型與原型之相似性可由無因次式獲得，由 (4-1 c) 得

$$\left[\frac{V_w}{(\ell_c)_a^{1/2} g^{1/2}} \right]_m = \left[\frac{V_w}{(\ell_c)_a^{1/2} g^{1/2}} \right]_p \quad (4-2 a)$$

$$\left[\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w} \right]_m = \left[\frac{\rho_w}{\rho_a - \rho_w} \right]_p \quad (4-2 b)$$

$$\left[\frac{V_w(\ell_c)_a}{\mu/\rho_w} \right]_m = \left[\frac{V_w(\ell_c)_a}{\mu/\rho_w} \right]_p \quad (4-2 c)$$

$$\left[\frac{(\ell_c)_a}{d} \right]_m = \left[\frac{(\ell_c)_a}{d} \right]_p \quad (4-2 d)$$

$$\left(\frac{H}{\lambda} \right)_m = \left(\frac{H}{\lambda} \right)_p \quad (4-2 e)$$

$$\left(\frac{d}{\lambda} \right)_m = \left(\frac{d}{\lambda} \right)_p \quad (4-2 f)$$

$$\left[\frac{(\xi_c)_a}{(\ell_c)_a} \right]_m = \left[\frac{(\xi_c)_a}{(\ell_c)_a} \right]_p \quad (4-2 g)$$

$$\alpha_m = \alpha_p \quad (4-2 h)$$

$$\beta_m = \beta_p \quad (4-2 i)$$

$$\Delta_m = \Delta_p \quad (4-2 j)$$

$$\theta_m = \theta_p \quad (4-2 k)$$

拋石堤安定試驗依據福祿得數設計之等縮尺模型，上述條件除(4-2 c)雷諾數及(4-2 g)塊石表面粗糙度外，只要其中任一組無因次數滿足，則其餘可同時獲得相似。天然塊石或混凝土型塊之表面粗糙度可以忽略，模型上如採用較光滑之型塊，則其粗糙度亦可不計。模型上線性縮尺採用 L_m/L_p ，則流速及護坡塊模型均甚小，縮尺所造成之滯性影響不可忽略。拋石堤波浪反射及傳透受縮尺影響為雷諾數之函數。Le Mehaute (1965) 研究指出模型上塊石大小採用下式計算，可減小縮尺對反射及傳透波之影響。

$$\frac{D_m}{D_p} = K \frac{L_m}{L_p} \quad (4-3)$$

上式 D 為塊石有效直徑， K 值大於 1。護面層與內層之 K 值不等，最好能根據試驗決定，等縮尺模型 K 值之近似值可由圖 4-1 求得，圖中 $\Delta H/\Delta L$ 為防波堤斷面水頭損失坡降。 ΔH 為入射波高 H_i ， ΔL 為波之平均寬度， D_p 為塊石有效直徑（採用 D_{10} ）， P 為堤心料之孔隙率。

Keulegan (1973) 研究所得 K 值約為 Le Mehaute (1965) 之 0.7 至 0.8 倍。兩種方法何者較正確目前尚無定論，折衷方法可採用其平均值，即由圖 4-1 所得值乘 0.9。

不等縮尺模型（一般使用於平面試驗）中， D_m 與 D_p 之關係為

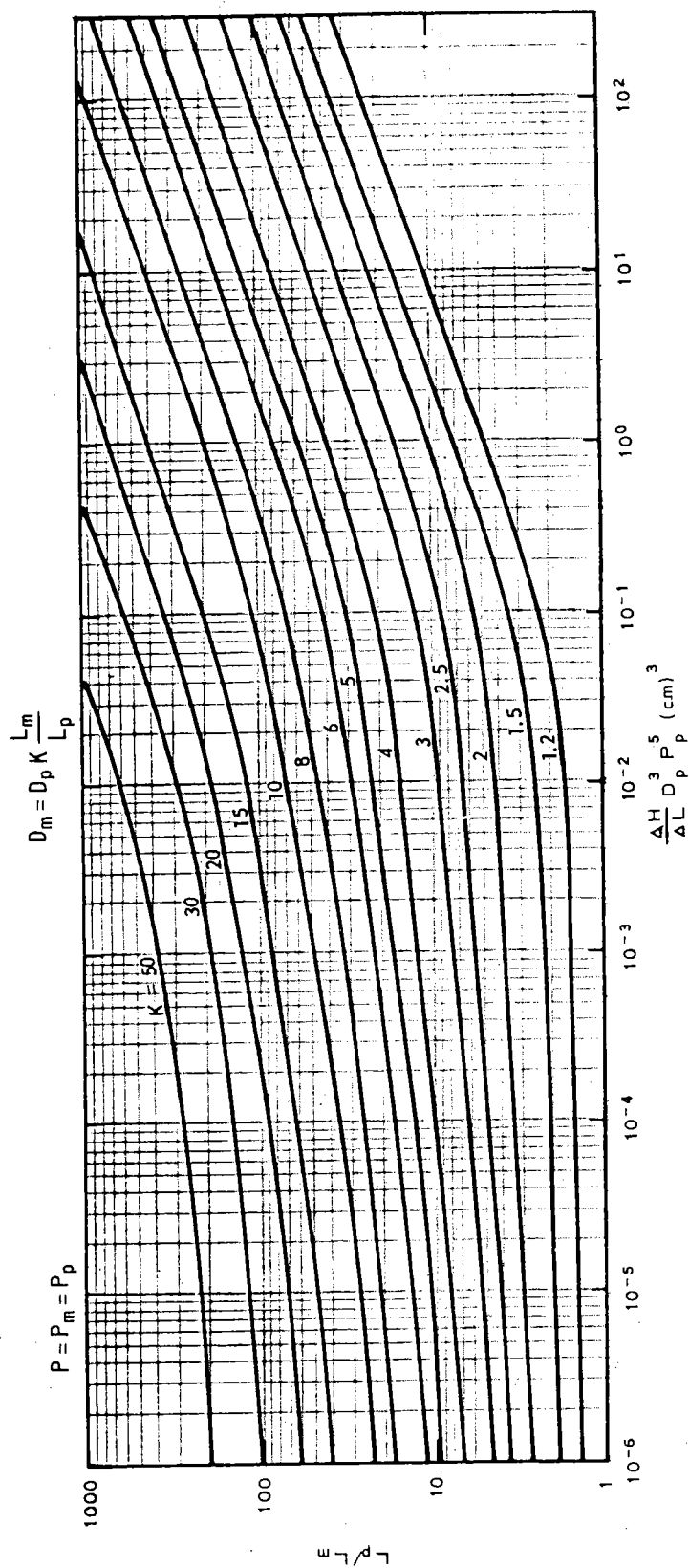


圖 4—1 等縮尺模型堤心料傳透係數之相似性 (*Le Mehaute 1965*)

$$\frac{D_m}{D_p} = K (L_h) \quad (4-4)$$

K 值可由圖 4—2 求得，*Keulegan* (1973) 研究所得不等縮尺模型 K 值僅為由圖 4—2 所得值之 0.4 至 0.6 倍。兩種方法所得之 K 值相差甚大，目前亦不知何種方法較正確，故建議採用兩者之平均值。

波浪作用於護坡塊時，水分子速度為 V_w ，在防波堤安定試驗中甚難測得，(4—1c) 式中 V_w 可用 $f(gH)^{1/2}$ 代入消去，而 $\nu = \mu / \rho_w$ ， $\gamma = \rho_a g$ 及 $(\ell_c)_a = K_v (W_a / \gamma_a)^{1/3}$ 代入 (4—1c) 式得

$$\frac{\gamma_a^{1/3} H}{(\gamma_a / \gamma_w - 1) W_a^{1/3}} = f'' \left[\frac{g^{1/2} H^{1/2} (\ell_c)_a}{\nu}, \frac{(\ell_c)_a}{d}, \frac{H}{\lambda}, \frac{d}{\lambda}, \frac{(\xi_c)_a}{(\ell_c)_a}, \alpha, \beta, \Delta, \theta, D \right] \quad (4-5a)$$

上式中 ν = 動滯度

γ_a = 護坡塊比重

W_a = 護坡塊重量

K_v = 護坡塊形狀係數， $W_a = K_v^3 \gamma_a (\ell_c)_a^3$

假設構造物模型與計畫中之原型幾何相似，並且模型上之雷諾數甚大，使滯性剪力可以忽略，護坡塊模型表面與原型相較甚為光滑。構造物之安定試驗所需考慮因素為護坡塊形狀 Δ ，護坡塊排法 P_t ，(護坡塊排法在幾何相似上非常重要，排法稍微改變，則安定性變化極大) 及影響造價與安定之海側坡度 α 。試驗所依據公式為

$$\frac{\gamma_a^{1/3} H}{(\gamma_a / \gamma_w - 1) W_a^{1/3}} = f''' \left(\frac{H}{\lambda}, \frac{d}{\lambda}, \alpha, \Delta, \theta, P_t, D \right) \quad (4-5-b)$$

上述公式與 *Hudson* (1958) 試驗一般性防波堤所用公式相同。

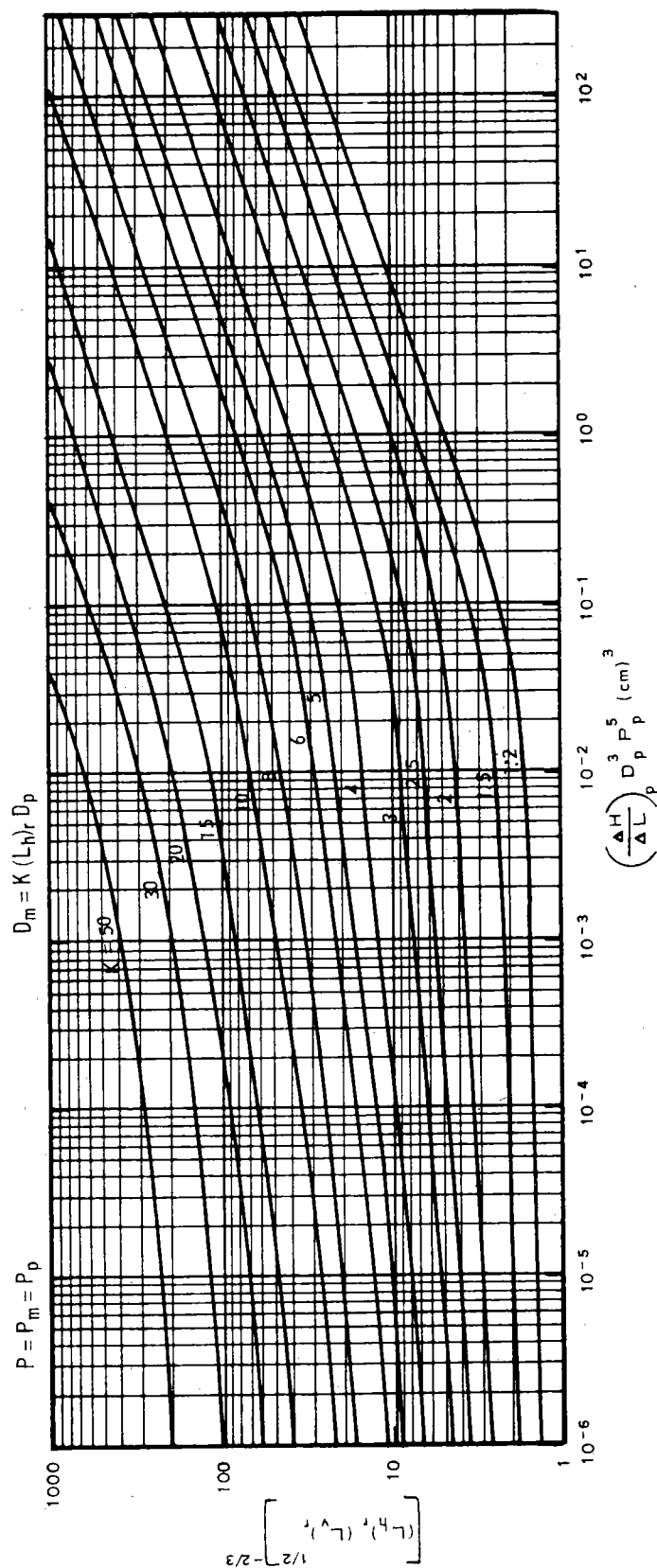


圖 4—2 不等縮尺模型是心料傳透係數相似性 (K 值) (Le Mehaute 1965)

防波堤堤面為亂拋之護波決，設置於較大水深，受入射角 $\beta = 90^\circ$ 之未碎波作用，不產生越波時，影響穩定度之變數為 H/λ ， d/λ ， α 及 D ，(4-5 b) 式等號左邊之無因次式為安定係數 N_s ，根據試驗

$$N_s = (K \cot \alpha)^{1/3} \quad (4-6 a)$$

因之

$$W_a = \frac{\gamma_a H^3}{K \left(\frac{\gamma_a}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad (4-6 b)$$

式中 $K = f(\Delta, P_t, D)$

入射角 $\beta = 90^\circ$ ，受碎波直接作用於防波堤之斜波面時，同樣可以應用 (4-5 b) 式，但 K 值為

$$K = f\left(\frac{H}{\lambda}, \frac{d}{\lambda}, \Delta, P_t, D\right)$$

上述為防波堤及消波岸壁之初步試驗，其目的係提供初步設計之參考。定案設計斷面需根據現地條件，構造物用途等設計，通常需要作進一步模型試驗以獲得最佳之斷面。

(二) 直立式 (不透水) 防波堤

直立式 (或稱垂直式) 重力型防波堤，設置於深水受垂直入射之未碎波作用，越波量甚小時，在海側方向因反射波產生駐波 (Standing Waves) 一般稱之為 "Clapotis" (法語)，其堤面壓力強度為高程之函數，可以用 Sainflou (1928) 之方法計算壓力一次近似值，或用 Miche (1944)，Kamel (1968) 之方法計算二次近似值。Sainflou 公式計算所得波壓較為保守，修正後之計算方法已可滿足各種情況設計需要。但如果防波堤堤面較為複雜或產生越波現象等情況時，則需辦理試驗以瞭解波力作用於構造物斷面。模型設計及試驗以

福祿得模型律為依據。

直立式防波堤設置於有坡度之海床上，其水深較波高稍大，入射波不能發生全反射，部份水粒子軌跡受到干擾，而在構造物上碎波，產生較駐波波壓強度更大，而歷時較短之震動波壓。在此種複雜之情況下，不可能用解析方法求得解答，而祇能靠模型試驗作為設計依據。碎波所造成之震動波壓與其接觸堤面之形式變化甚大，影響碎波作用於防波堤波壓大小，歷時，特性之主要因素如下。

1. 波浪大小、入射角、堤前水深、海側坡度及波浪接觸構造物時所產生之反射特性。

2. 波浪撞擊構造物表面時，水中含空氣情形及空氣泡所產生壓力。

3. 波峯面與堤面接觸時，夾於其間之空氣袋。

4. 波峯面與堤面接觸時，容許空氣向上或縱向逸出之氣墊。

由以上所述，水流現象可歸為下列各項因素之函數

d : 海側堤前水深

E_w : 水之彈性模數

E'_{bm} : 構造物建材之體積模數 (*Bulk Modulus*)

g : 重力加速度

H : 作用於構造物之碎波波高

k : *Adiabatic Constant of Air*

p : 直立壁之壓力強度

P_{at} : 大氣壓力

T : 波浪週期

β : 波浪入射角

θ : 海側底床坡度

λ : 碎波水深處之波長

μ : 水之滯度

ρ_{bm} : 築堤材料之密度

ρ_w : 水之密度

σ : 水之表面張力

根據 π 定理可寫成

$$f(d, g, H, T, \theta, \beta, \mu, \sigma, \rho_w, E_w, E'_{bm}, \rho_{bm}, p, p_{at}, k) = 0 \quad (4-7a)$$

上式可改寫成

$$\frac{p - p_{at}}{p_{at}} = f'(d, g, H, T, \theta, \beta, \mu, \sigma, \rho_w, E_w, E'_{bm}, \rho_{bm}, k) = 0 \quad (4-7b)$$

利用 Buckingham 方法因次分析後得

$$\begin{aligned} \frac{p - p_{at}}{p_{at}} = f'' \left[\frac{H}{d}, \theta, \beta, \frac{(gH)^{1/2} T}{d}, \frac{dH}{T\mu/\rho_w}, \right. \\ \left. \frac{\sigma T^2}{\rho_w H d^2}, k, \frac{T}{d} \left(\frac{E_w}{\rho_w} \right)^{1/2}, \frac{T}{d} \left(\frac{E'_{bm}}{\rho_{bm}} \right)^{1/2}, \right. \\ \left. \frac{\rho_w}{\rho_{bm}} \right] \quad (4-7c) \end{aligned}$$

模型與原型幾何相似，試驗條件相似，同時模型與原型中滯性剪力甚小，與重力、壓力、彈性力相較可以不予考慮。因此試驗所依據之公式為

$$\begin{aligned} \frac{p - p_{at}}{p_{at}} = f''' \left[\frac{H}{d}, \frac{(gH)^{1/2} T}{d}, \frac{\sigma T^2}{\rho_w H d^2}, k, \left(\frac{E_w}{\rho_w} \right)^{1/2} \frac{T}{d}, \right. \\ \left. \frac{E'_{bm}}{\rho_{bm}} \frac{T}{d}, \frac{\rho_w}{\rho_{bm}} \right] \quad (4-7d) \end{aligned}$$

綜上述討論可知，碎波作用於直立式防波堤時，水、壓縮空氣及毛細力間之關係非常複雜，想以一公式將試驗結果正確的轉換成原型量，使其誤差減少至最低程度是相當難之事，然而一般均認為試驗需根據福祿得模型律，試驗結果轉變為原型量時，須將縮尺影響減至最小後用近似方法求得。Lundgren (1969)，認為碎波造成震動式波壓，其壓力大於重複波 (Clapotis) 可分為通氣型、壓縮型及水錘型三種，如圖 4—3。一般試驗採用上述分類概述如下：

1. 通氣型震動壓 (Ventilated Shock) 一入射波作用於直立壁時，介於波峯面與壁體間空氣可以逸出，雖然含有少數縮尺影響，但其主要作用力為慣力及重力，故模型中衝力及壓力利用福祿得模型律轉換，可獲得相當正確之原型值。

2. 壓縮型震動壓 (Compression Shock) 一當波峯接近場面時，成向內凹，峯面頂端先接觸場面，使空氣袋夾於其間產生壓縮型震動。此種現象非常複雜，祇能用福祿得模型律將模型中衝擊力轉換為原型值。Lundgren (1969) 建議採用 (Mitsuyasu) (1966) 所推導公式

$$\left(\frac{p_{max}}{p_{at}}\right)^{2/7} + 0.4 \left(\frac{p_{max}}{p_{at}}\right)^{-5/7} - 1.4 = K \frac{\rho_w g H}{p_{at}} \quad (4-8)$$

上式中 p_{max} 為壓縮型震動所造成最大波壓， K 為模型與原型相等之無因次常數，Lundgren 建議用下述步驟將模型值轉換成原型值。

(1) 由 (4—8) 式計算 p_{max} ，以 $(p_{max} - p_{at}) / p_{at}$ 為縱軸，波高之無因次式 $\rho_w g H / p_{at}$ 為橫軸繪關係圖。

(2) 將試驗所得 $(p_{max})_m$ 及波高無因次式 $(H_{dim})_m$ 繪入圖中。

(3) 將模型上波高無因次式 $(H_{dim})_m$ 乘以 L_p / L_m 得原型上波高無因次式。

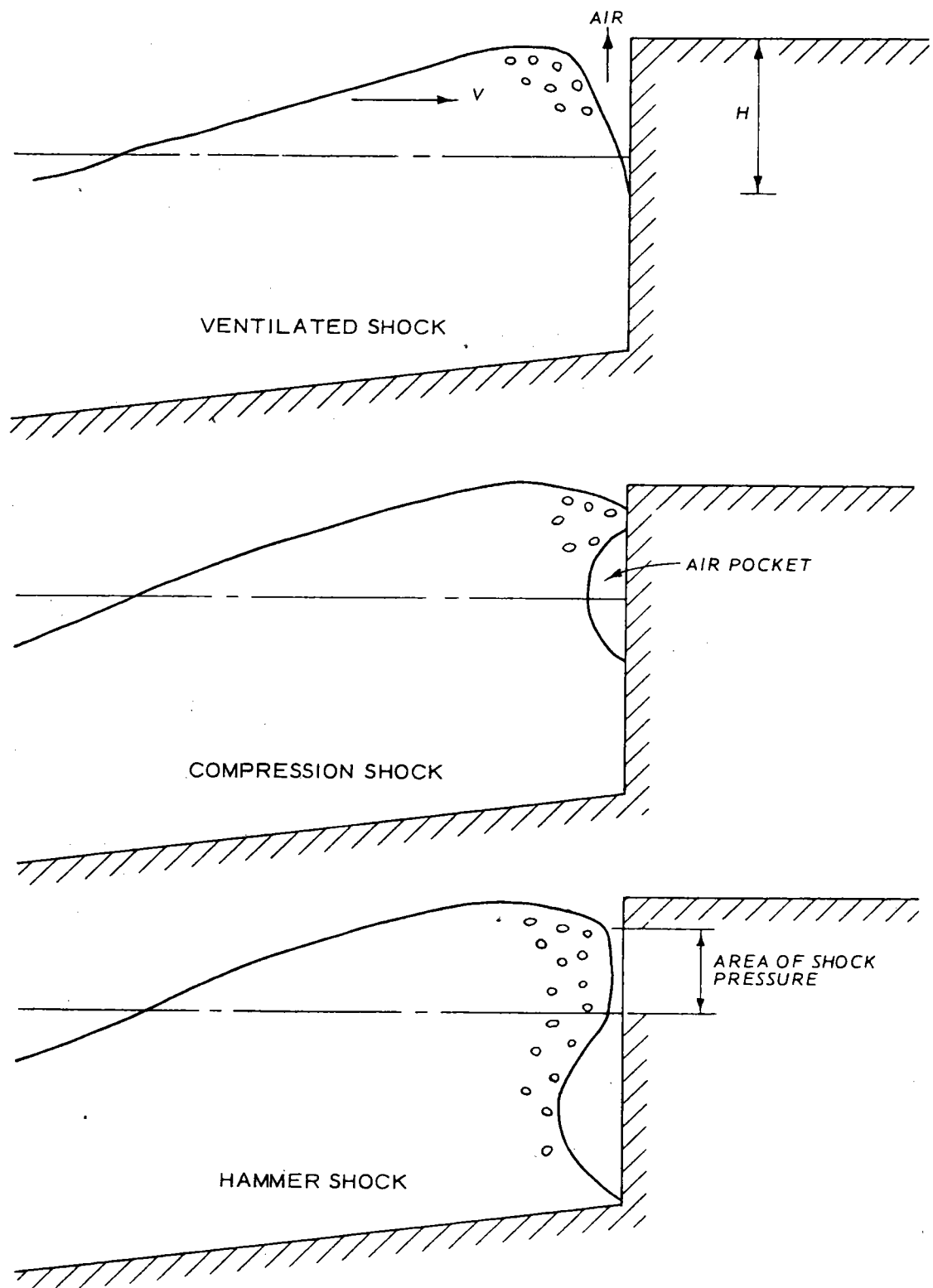


圖 4—3 直立式防波堤震動波壓之類型 (*Lundgren 1969*)

(4)以 $(H_{dim})_p$ 由圖上得 $[(p_{max} - p_{at}) / p_{at}]_p$ ，即可求得原型上 $(p_{max})_p$ 值。

3. 水錘型震動壓 (*Hammer Shock*) — 上述壓縮型震動壓因波浪與壁體接觸時，部份空氣產生氣墊效應，故不致發生最大波壓，但在極少數情形下，與壁體接觸之波浪峯面成為平面時，可能形成水錘型震壓，此種情況下最大波壓為構造物材料彈性係數及水之壓縮性之函數，而忽略其所含氣體之影響，*Kamel* (1968) 研究結論為

$$p_t = \frac{\rho_{bm} C_{bm}}{\rho_w C_w + \rho_{bm} C_{bm}} \rho_w C_w V_w \quad (4-9)$$

上式中 P_t ：理論上最大壓力

ρ_{bm}, ρ_w ：分別為築堤材料及水之密度

C_{bm}, C_w ：分別為築堤材料及水傳聲速

V_w ：波浪衝擊構造物時之速度

Kamel 利用各種不同形狀之金屬鈹分別投入平靜及擾動水中作特別試驗，紀錄其產生壓力。在瞬間投入時，鈹與水面間空氣來不及逸出之情形下，其壓力不超過理論值之一半。而原型防波堤體面必較試驗所用金屬鈹粗糙，且碎波含有大量氣泡，故原型波壓一般認不超過 $0.5 p_t$ 。利用模型試驗獲得最大震動壓力並無需要。但以福祿得模型律辦理各種不同幾何形狀防波堤試驗，以瞭解各形狀之水錘震壓相對大小是值得做的。

4. 波壓線之形狀：各類型波壓可由波壓紀錄變化曲線判斷，通氣型及壓縮型之波壓變化曲線形狀相類似，惟其波壓上升段及最大波壓不同。水錘型震動波壓上升極快且最大壓力較通氣型或壓縮型為高。圖 4—4 為 *Lundgren* (1969) 在波浪試驗水槽所紀錄之壓縮型及水錘型波壓形狀。

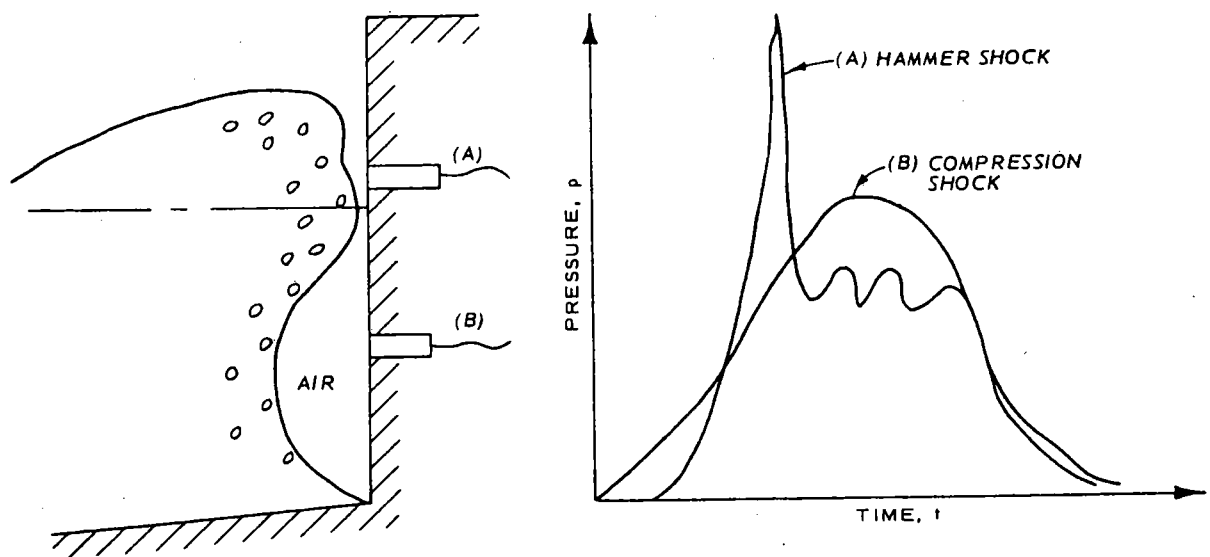


圖 4—4 壓縮型及水錘型波壓紀錄曲線 (*Lundgren 1969*)

(三) 合成式防波堤

合成式防波堤有時底層基礎拋石高度與水深相較甚高，如圖 4—5。則拋石部份可能消殺部份入射波浪能量。但往往因水深變淺而使波浪在靠近直立部份發生碎波。拋石厚度影響波壓甚大。合成式防波堤試驗可參考前述拋石堤及直立堤辦理。

(四) 海堤

海堤可以是拋石堤、直立堤或合成堤。有時與直立堤相似，但海側是台階型或向海側成凹型以減少越波。作用於堤身波力與前述拋石堤、直立堤相同，可分為未碎波與碎波。試驗方法與前述拋石堤及直立堤相同。

(五) 浮式防波堤

浮式防波堤係利用波浪反射、碎波、相位阻尼、干擾水粒子運動及滯性阻尼等作用以減小入射波高，獲得穩定水域而利停泊。

浮式防波堤因其防波效果並不十分理想，尚未達實用價值。一般而言，此種防波堤在較大水深，波浪週期較小波高不大時較為有效。在上述環境下，此種防波堤可以反射部份入射波能量，再經過相位阻尼作用使傳透波浪減低。另外一部份入射波能量由於在構造物頂部發生碎波產生亂流而消失。為有效達成上述目的，浮式防波堤構造物必須有較大質量，產生較大之質量慣性力矩及較小之回復力以獲得構造物顛簸、擺動、起伏等之週期較入射波週期更長。達成上述條件及經濟有效之錨碇纜以符合當地需要，是構造物設計最困難之一環。

三種相位阻尼之浮式防波堤如圖 4—5，第一種為長方形，第二種為十字形或稱 *Bombardon*（二次大戰法國海軍使用），第三種為 *A* 構架形，為 *Brebner* 及 *Ofuga*（1968）試驗提出者。

重力加速度、慣力、彈性力、表面張力及滯性剪力等均存在錨碇

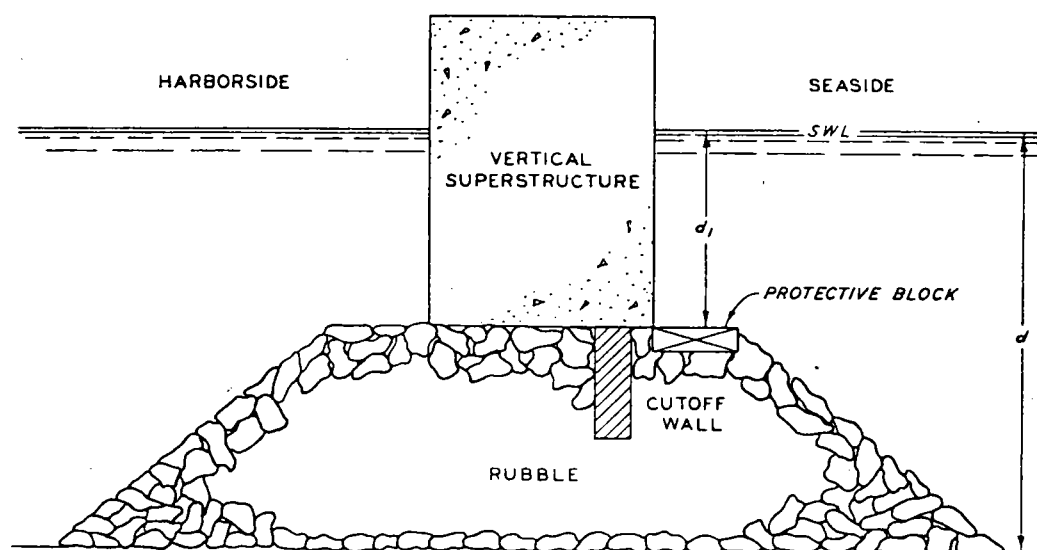


圖 4—5 合成堤斷面圖（拋石基礎極高）

之浮式防波堤。但事實上模型動力相似不需要考慮所用作用力。波浪及防波堤構造物依據福祿得模型律建造。構造物除幾何相似外，其重量及質量分佈均應與原型相似以獲得正確之浮力及質量慣性力矩。為消除滯性剪力及表面張力影響，波浪及構造物線性縮尺選擇時越大越好。時間及流速縮尺為

$$\frac{T_m}{T_p} = \frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{1/2} \quad (4-10)$$

波力及構造物與錨繫索之重量根據福祿得模型律為

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{W_m}{W_p} = \frac{(\gamma_w)_m}{(\gamma_w)_p} \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^3 \quad (4-11)$$

錨繫索之彈性依 *Mach-Cauchy* 模型律為

$$\frac{F_m}{(EA)_m} = \frac{F_p}{(EA)_p} \quad (4-12 a)$$

上式中 A 為索之斷面積， E 為索之彈性模數

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{(EA)_m}{(EA)_p} = \frac{(\gamma_w)_m}{(\gamma_w)_p} \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^3 \quad (4-12 b)$$

錨鏈較重時其彈性影響可以忽略，但單位長度重量必需與原型相似，如錨索為甚輕之彈性索，其重量可用近似值，但其柔軟性必須相似。

(六) 氣壓式防波堤

氣壓式防波堤係利用水平表面水流與入射波水粒子軌跡速度相反以減低入射波高。水平表面水流由壓縮空氣孔管噴出氣泡。試驗主要目的為減低重力波，故模型製作仍採用福祿得模型律。但因上升氣泡產生水流而使波高降低故滯性剪力、表面張力亦應加以考慮。氣壓式防波堤所需考慮因素計有慣力、重力、滯性力、表面張力及壓力等，其影響變數為

$$f(H_i, H_t, \lambda, d, g, Q_{air}, \rho_{air}, \rho_w, p_{at}, \mu, \sigma) = 0$$

(4-13 a)

H_i : 入射波高

H_t : 傳遞波高

Q_{air} : 每單位長度自噴孔管噴出之空氣量，大氣中自壓縮器排出量為

$$(Q_{air})_{at} = Q_{air} \frac{(p_{at} + \rho_w g d)}{p_{at}}$$

ρ_{air} : 空氣密度

ρ_w : 水之密度

p_{at} : 大氣壓力

利用 Buckingham π 定理因次分析後得

$$\frac{H_t}{H_i} = f' \left(\frac{H_i}{\lambda}, \frac{d}{\lambda}, \frac{\rho_{air}}{\rho_w}, \frac{\rho_w g d}{p_{at}}, \frac{g^{1/3} d}{Q_{air}^{2/3}}, \frac{Q_{air}}{\nu}, \frac{\sigma d}{\rho_w Q_{air}^2} \right) \quad (4-13 b)$$

如上式中模型上每一 π 項與原型相等則

$$\left(\frac{H_t}{H_i} \right)_m = \left(\frac{H_t}{H_i} \right)_p \quad (4-14)$$

(4-13 b) 式等號右邊前五項可以同時獲得滿足，因此模型上最大問題為如何在原型上 H_i/λ 及 d/λ 之範圍內處理最後兩項以減少模型上縮尺影響。

線性縮尺採用等縮尺模型，利用空氣與水做試驗則 (4-13 b)

第三項模型與原型相等，第四項為

$$\left(\frac{\rho_w g d}{p_{at}} \right)_m = \left(\frac{\rho_w g d}{p_{at}} \right)_p \quad (4-15 a)$$

$$(\rho_w)_m = (\rho_w)_p, \quad g_m = g_p$$

$$\therefore \frac{(p_{at})_m}{(p_{at})_p} = \frac{d_m}{d_p} = \frac{L_m}{L_p} \quad (4-15 b)$$

第五項

$$\left(\frac{g^{1/3} d}{Q_{air}^{2/3}}\right)_m = \left(\frac{g^{1/3} d}{Q_{air}^{2/3}}\right)_p \quad (4-16 a)$$

$$\frac{(Q_{air})_m}{(Q_{air})_p} = \left(\frac{d_m}{d_p}\right)^{2/3} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{2/3} \quad (4-16 b)$$

除此之外壓力關係為

$$\frac{(p_w)_m}{(p_w)_p} = \frac{(p_{at})_m + (\gamma z)_m}{(p_{at})_p + (\gamma z)_p} \quad (4-17)$$

上式中 $\gamma = \rho_w g$, p_w = 任意水深 z 處之壓力

(七) 水力式防波堤

水力式防波堤之原理與氣壓式相似，所不同者水力式係自接近平均水面處孔管噴嘴噴出水，形成表面水流。水流方向與入射波波速相反干擾入射波水粒子運動造成亂流消滅部份能量。模型上重要作用力為慣力、重力、滯性力等，其影響變數為

$$f(H_i, H_t, \lambda, d, g, Q_w, \rho_w, \mu) = 0 \quad (4-18 a)$$

因次分析得

$$\frac{H_i}{H_t} = f' \left(\frac{H_i}{\lambda}, \frac{d}{\lambda}, \frac{g^{1/3} d}{Q^{2/3}}, \frac{Q_w}{\nu} \right) \quad (4-18 b)$$

上式中前三個 π 參數模型與原型之比可利用福祿得模型律獲得常數，第四個 π 參數之縮尺影響必須利用雷諾數加以檢討。流量與壓力之比與氣壓式相同，即

$$\frac{(Q_w)_m}{(Q_w)_p} = \left(\frac{d_m}{d_p}\right)^{2/3} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{2/3}$$

$$\frac{(p_w)_m}{(p_w)_p} = \frac{(p_{at})_m + (\rho_w g z)_m}{(p_{at})_p + (\rho_w g z)_p}$$

三、模型設計

(一) 現地資料

水工模型試驗最重要的是足夠的現地資料，能讓試驗人員充分瞭解設計工程師所面臨之問題。對試驗之範圍及目的首先作成決定，根據全盤問題設計模型，研擬試驗計畫。

海岸構造物斷面模型試驗所需重要資料為

1. 構造物之幾何形狀及建築材料
2. 構造物位置基礎情形
3. 堤線之等深線及堤前水深詳圖
4. 作用於堤防之波浪統計資料

雖然正確之現場波浪資料為構造物設計最重要之因素，但此種資料經常是欠缺。即使有資料，紀錄時間均不甚長，因之必須以預算或追算方法以補資料之不足。深水波浪資料須考慮折射、繞射及淺化等作用，計算到達堤前波向、週期及波高。構造物模型試驗波浪資料通常採用示性波高及週期。

如使用較能代表海面風浪特性之不規則波試驗，則現場波浪能譜為辦理試驗所必需。作用於海岸構造物最大之波力為波浪尖度 H/λ ，相對水深 d/λ ，堤前海底坡度，幾何形狀及孔隙率等之函數。

浮式、氣壓式及水力式防波堤除在短週期波，水深較大之處較有效外，其餘情況並不實用。辦理此項試驗不需等深線資料，波高、週期、波向及發生頻率為試驗主要資料。使用材料，錨繫系統等亦為試驗所需資料。

辦理拋石堤、海堤、消波岸壁及合成堤等模型試驗，對構造物詳細設計圖必須充分瞭解。在試驗之前對塊石來源、大小、強度先作調查，然後決定是否採用混凝土型塊。對海岸構造物損害而發生之生命

、財產損失是決定試驗及設計波浪最大因素，建造費、修補維護費及使用壽命等都應包括在試驗研究項目。

構造物正常水深及潮汐或風揚等所造成之水位變化是海岸構造物設計及模型試驗決定試驗波高最重要因素。

(二)線性縮尺之決定

海岸構造物模型設計之基本原則為採用最經濟方法，能獲得動力相似以辦理試驗，將試驗所得結果提供設計工程師作為設計參考。縮尺直接影響試驗費用與試驗結果之準確性，但決定縮尺時必須避免滯性剪力及表面張力之影響，在可能範圍內採用較經濟斷面而不影響試驗結果。

1. 拋石堤、消波岸壁及海堤

拋石堤等之斷面安定試驗採用福祿得模型律，儘可能加大模型縮尺以減小縮尺影響，增加試驗之可靠性。試驗縮尺通常根據現有護坡塊模型大小，試驗水槽水深及造波機造波大小與現場資料研判後決定，儘可能選擇較保守條件，根據美國陸軍工程師團水工試驗室以往經驗，試驗縮尺可採用 1 : 5 至 1 : 70，主要決定於現地條件與試驗水槽設備。美國海岸工程研究中心 (CERC) 現有最大水槽為 15 呎寬，20 呎深，635 呎長造波機可製造最大波高為 6 呎，此種設備可辦理較大縮尺 (如 1 : 5 或 1 : 10) 之試驗，但試驗費用相當龐大，一般用以作基本研究及特殊問題試驗，如決定縮尺影響校正係數等。一般而言線性縮尺約為 1 : 20 至 1 : 40 較為理想。

2. 直立堤及合成堤

直立式防波堤如設置於足夠水深，使波浪不在堤前發生碎波現象，且入射角接近 90° ，則作用於堤面之波壓可利用 $Sainflou$ 及 he 等公式計算，而不需辦理模型試驗。但如發生碎波或大量越波或

堤面不規則，模型試驗通常用以決定防波堤佈置及波壓強度，越波量

模型上縮尺通常決定於水槽設備及量測儀器之敏感度，感應特徵與壓力感受器所能紀錄之範圍等。如果採用壓力感受器 (*Pressure Transducers*) 則在構造物受力面須同時施測若干點以瞭解壓力分佈情形，獲得最大總壓力。另外尚可利用應變器 (*Strain gage*) 測量傾倒力矩及水平、垂直分力、進而計算滑移及傾倒力矩。模型縮尺範圍宜採用 1 : 20 至 1 : 50 視實際情形而定。

3. 浮式、氣壓式及水力式防波堤

此類防波堤縮尺主要決定於水深、波浪大小、構造物大小及試驗水槽設備。通常浮式防波堤構造物並非太大，故可採用較大之縮尺。錨繫索一般採用彈性索，試驗縮尺介於 1 : 5 至 1 : 25 間。氣壓式及水力式防波堤雖有不少試驗報告，也曾在美國緬因州及麻州等地使用過，但試驗結果不盡相同。其縮尺影響如何所知不多。最重要的辦理此項波浪傳遞試驗，決定傳遞係數時必須考慮相對水深 (約 0.05 ~ 0.5) 及波浪尖度 H_s / λ (約 0.01 ~ 0.1) 之影響，傳遞波高測量位置須避免亂流干擾。

(三) 縮尺影響

模型與原型動力相似，則其慣力比需等於合力比。除非大縮尺模型否則不可能達成上述相似條件，試驗所得結果與原型產生若干誤差。海岸工程構造物模型試驗其主要作用力為重力。模型設計與試驗均根據福祿得模型律、滯性剪力、表面張力及彈性力等影響試驗結果及資料分析。

除上述由於流體相似性造成誤差外，由於模型設計及試驗過程而影響試驗結果計有下列因素：

1. 造波機型式及造波機與試驗構造物間之距離。

2. 水槽構造物與岸邊消波設施之距離。
3. 消波設施之反射係數。
4. 試驗波型式、大小及作用時間。
5. 試驗水位。
6. 拋石堤決定損害率之方法。
7. 波高量測之精度。
8. 根據現地資料及已往經驗，試驗人員選擇之試驗條件。

表面張力及彈性力在拋石堤之原型與模型影響不大均可忽略，但在模型上當縮尺太小時，即應考慮其影響。實際上在模型中要消除滯性剪力之影響是不可能的事，因此必需根據福祿得模型律辦理各種不同縮尺試驗，以決定縮尺影響校正係數。*Hudson* 及 *Jackson* (1953) 曾對加州 *San Pedro Bay* 拋石堤斷面(如圖 4—6)根據福祿得模型律作 1:30, 1:45, 1:60 三種不同縮尺之試驗，其結果除互相比較外並與現地暴風浪損害情形作比較，如圖 4—7 及 4—8。上述試驗證明拋石堤斷面試驗，利用福祿得模型律其準確性已足供設計參考。

此外 *Dai* 及 *Kamel* (1969) 利用海岸工程研究中心 (*CERC*) 大型水槽研究安定係數 N_s 與雷諾數 R 之關係如圖 4—9。試驗波高達 4 呎，塊石重量 162 磅，滯性影響可以忽略，其安定係數平均值可當做原型之安定係數。當 R 值在 3.0×10^4 至 1.0×10^6 時， $(N_s)_p / (N_s)_m$ 之比值接近常數。

未碎波作用於不透水之直立堤時，模型上縮尺影響甚小，在試驗水槽內可用現代儀器測得相當準確之波壓，作為設計之用。

當入射波在堤前發生碎波，作用於堤面產生震動壓力發生縮尺影響。此種影響難以得知。波壓隨歷時變化可用電子壓力計測得。但由

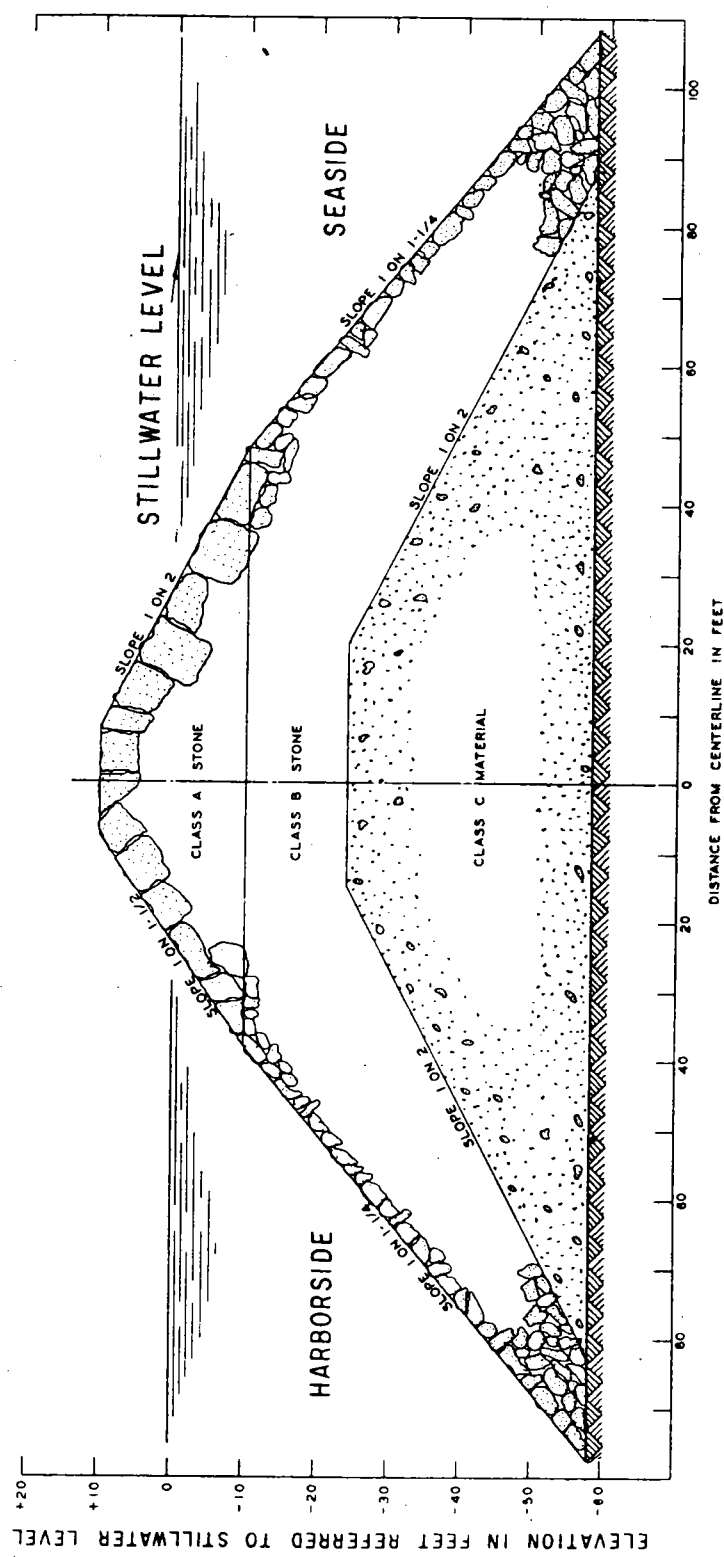


圖 4—6 深水 (58 ft) 拋石堤試驗斷面 (Hudson & Jackson 1953)

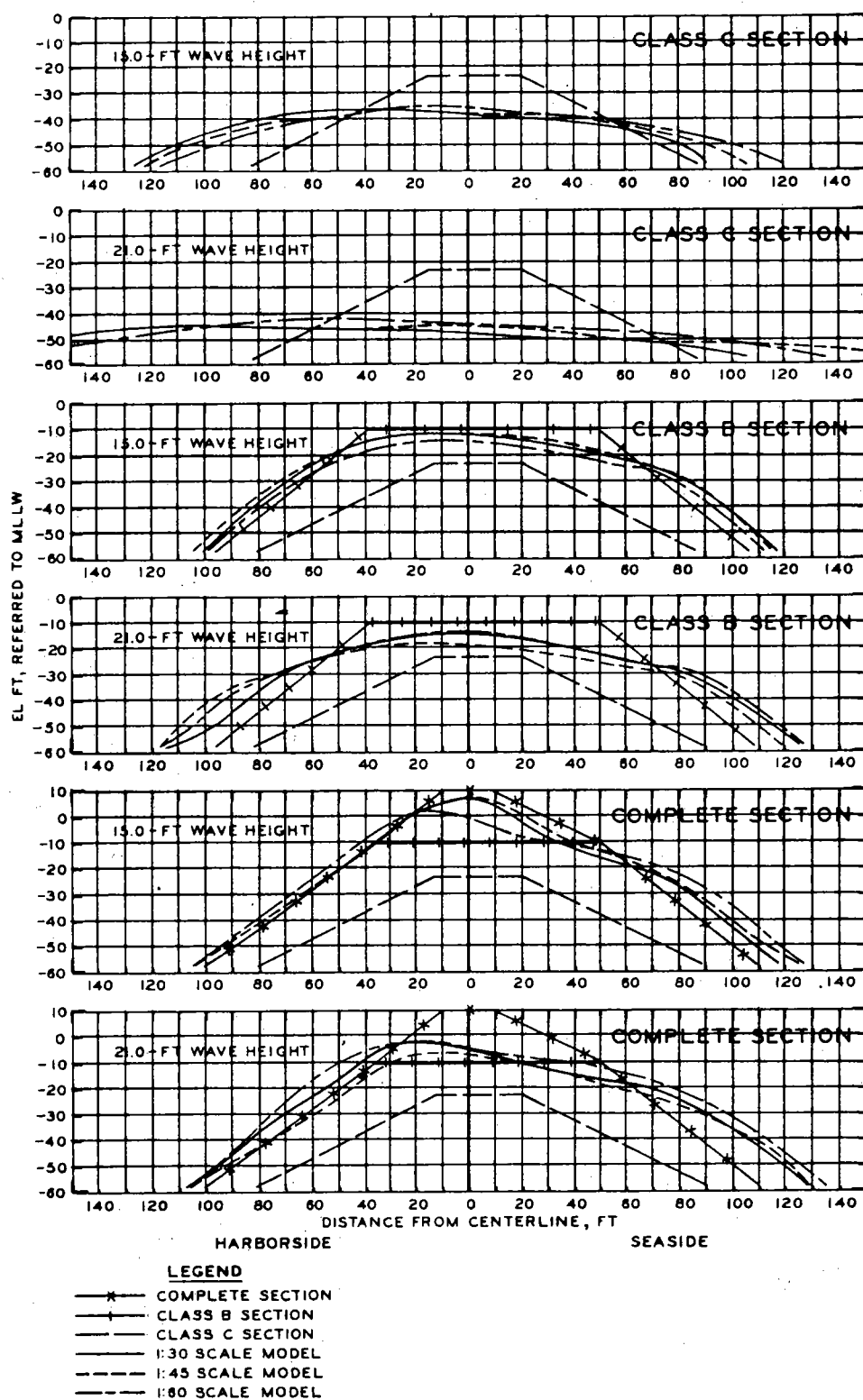
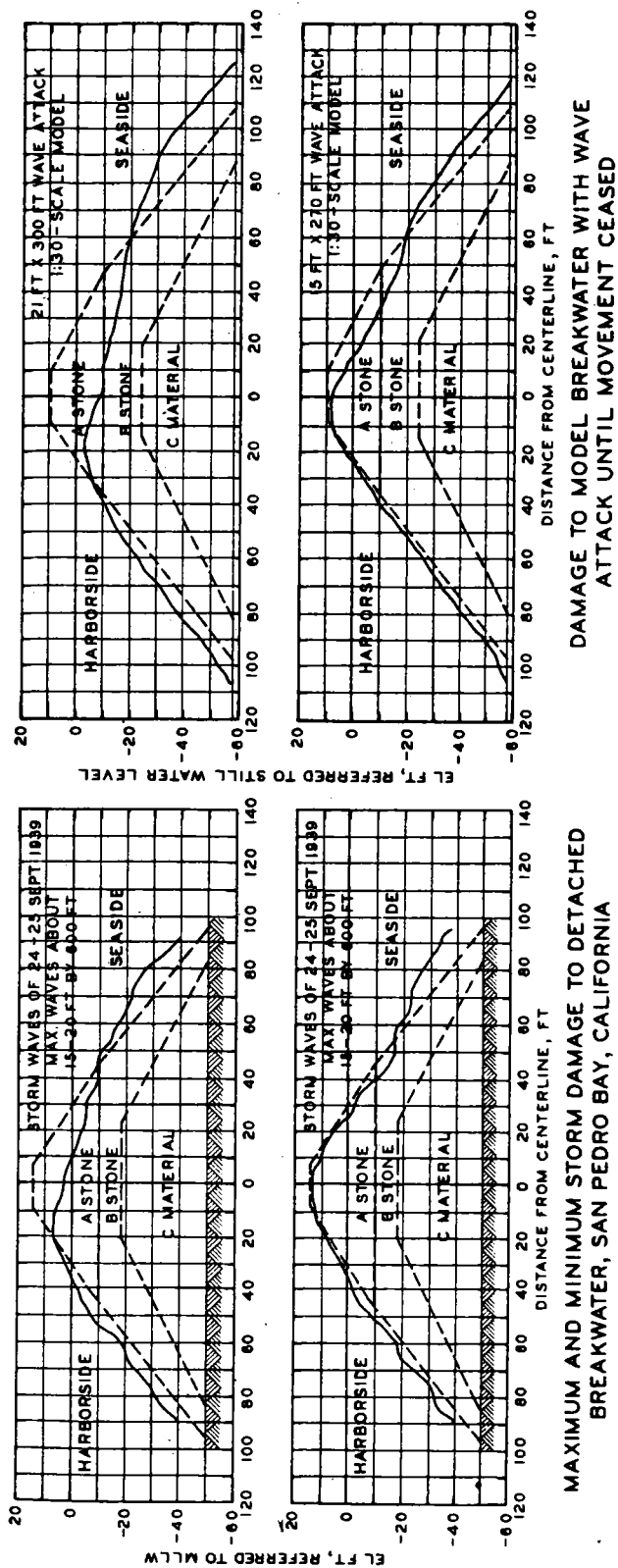


圖 4—7 拋石堤安定試驗縮尺影響 (穩定後斷面)

(Hudson & Jackson, 1953)



MAXIMUM AND MINIMUM STORM DAMAGE TO DETACHED BREAKWATER, SAN PEDRO BAY, CALIFORNIA

SPECIFICATIONS OF BREAKWATER MATERIALS

SAN PEDRO BREAKWATER

CLASS A STONE. QUARRY RUN, WEIGHING NOT LESS THAN 160 LBS PER CU FT (SOLID DRY), IN PIECES OF NOT LESS THAN ONE TON, OF WHICH NOT LESS THAN 50 PER CENT BY WEIGHT TO BE IN PIECES OF TEN TONS OR MORE EACH.

CLASS B STONE. QUARRY RUN, WEIGHING NOT LESS THAN 120 LBS PER CU FT (SOLID DRY), OF WHICH NOT MORE THAN 25 PER CENT BY WEIGHT TO BE IN PIECES OF LESS THAN 20 LBS EACH, AND AT LEAST 40 PER CENT BY WEIGHT TO BE IN PIECES OF ONE TON OR MORE EACH.

CLASS C MATERIAL. A MOUND OF DREDGED SAND SURMOUNTED BY A MOUND OF DREDGED CLAY.

MODEL BREAKWATER

CLASS A STONE. SELECTED STONE FROM QUARRY (STONE FROM QUARRY UNDER CONSIDERATION WEIGHS 165 LBS PER CU FT (SOLID DRY), OF WHICH NOT LESS THAN ONE TON, AND AT LEAST 75 PER CENT BY WEIGHT TO BE IN PIECES WEIGHING TEN TONS OR MORE EACH.

CLASS B STONE. QUARRY RUN, OF WHICH NOT MORE THAN 25 PER CENT BY WEIGHT TO BE IN PIECES OF LESS THAN 20 LBS, AND NOT LESS THAN 40 PER CENT BY WEIGHT TO BE IN PIECES OF ONE TON OR MORE EACH.

CLASS C MATERIAL. ALL RESIDUAL MATERIAL FROM QUARRY OPERATIONS, SIMILAR MATERIAL OBTAINED IN THE VICINITY OF THE QUARRY, OR DREDGED MATERIAL.

圖 4-8 拋石堤安定試驗損害之比較 (Hudson & Jackson 1953)

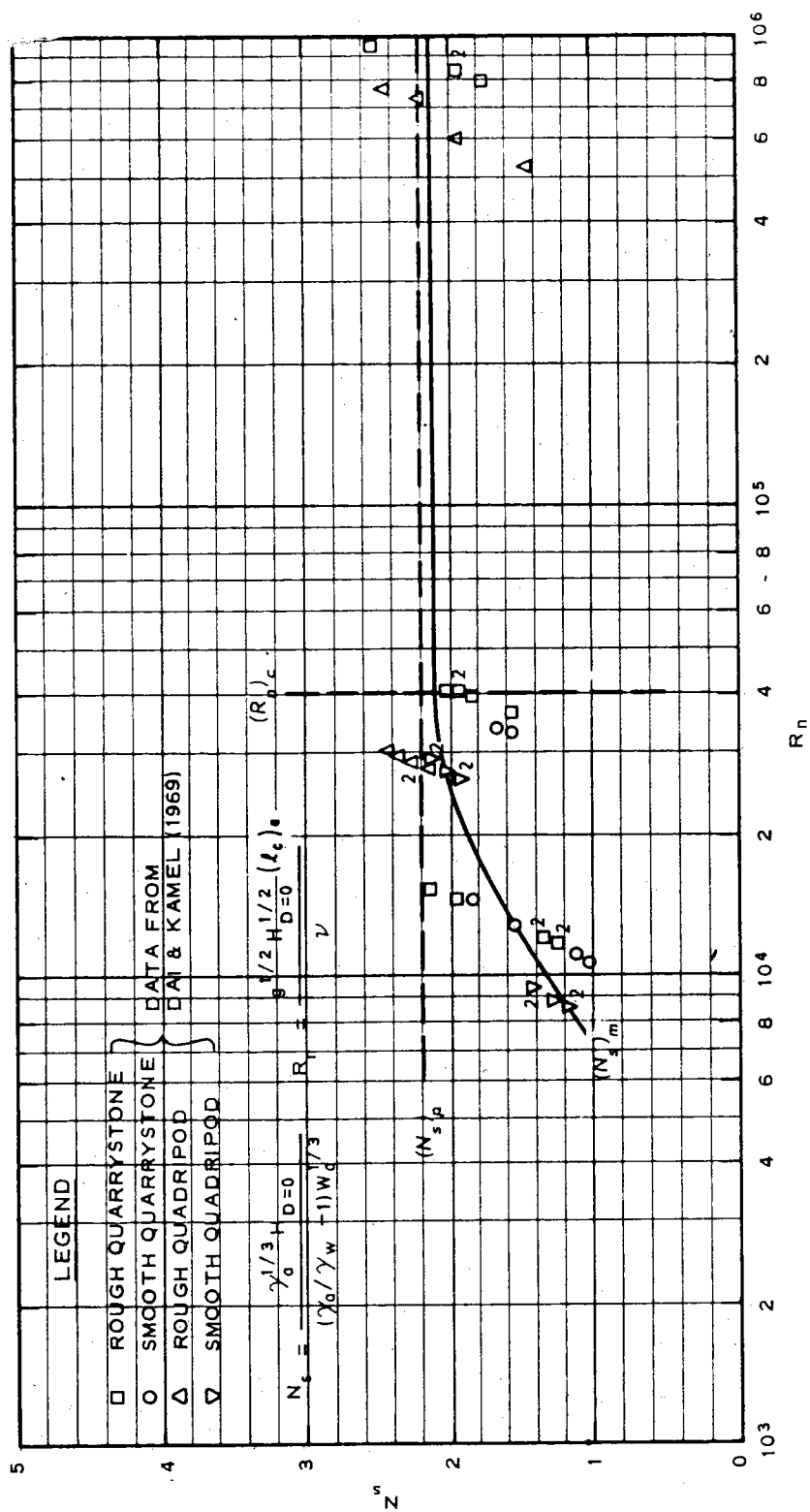


圖 4—9 拋石堤安定模型試驗縮尺影響 (Dai & Kamel 1969)

於模型中無法製造與原型相似之複雜波譜，尤其在碎波中所含空氣量變化所造成縮尺影響，故無法與原型作比較。試驗所得波壓變化甚大，如何轉換成原型值仍是一大困難。

模型上利用二次度規則波代替現地三次度不規則波試驗，是浮式防波堤模型試驗造成誤差主要因素。

氣壓式防波堤雖已有不少模型試驗，但所考慮因素不夠週全，現場試驗資料未能含蓋主要變數變化範圍（即 d/λ 與 H_c/λ ）模型縮尺影需作進一步之研究。

水力式防波堤縮尺影響亦未作有系統之研究。進一步之試驗研究可參照前述模型縮尺辦理。

四、模型試驗

（一）試驗條件之選擇

海岸工程構造物安定性模型試驗，決定試驗條件之因素為構造物型式、試驗之目的與範圍、波浪統計資料及波浪作用之嚴重性、損害程度等。根據現場調查資料及以往研究與經驗，在初步設計前決定是否需要試驗，構造物最佳形態，試驗範圍與目的。如果初步設計對構造物之型式不能作決定，則試驗範圍需包括兩種以上之型式以便選擇最佳斷面。一般而言，試驗計畫包括設計工程師所提之原始斷面及試驗過程中研判而修改之斷面。

影響構造物造價及安全因素等變數在試驗中均應列入考慮。重要因素包括(1)構造物形狀、大小及採用之材料，(2)護面塊之類型，(3)堤前水深及海側坡度，(4)氣象潮之潮差及風揚等可能產生之水位變化。浮式防波堤試驗計畫通常包括錨繫條件。水深、海底坡度、潮位、風揚等對浮式、氣壓式及水力式防波堤試驗不甚重要，可以不予考慮。拋石堤、直立堤、合成堤及海堤等之試驗所選用波高較最大暴風產生

之波高為小，故防波堤在最大風浪侵襲下遭致破壞，試驗人員必須分析比較受損後修補費與採用較大波高設計以保構造物免於受損兩者之得失情形。

對拋石堤及直立堤而言，最大且最具破壞性波浪為下列各因素之函數。(1)深水波浪大小，(2)水深及構造物設置地點之等深線，(3)堤趾水深及海側底床坡度，(4)構造物海側坡度、頂高及孔隙率等。

(二) 試驗波浪製造

海岸構造物安定模型試驗主要作用力為短週期之風浪，試驗波浪係在水槽內使水產生週期性位移。造波方式可分為錘擊式、拍擊式、活塞式及氣壓式等。氣壓式造波機通常使用於長浪製造如盪漾、津波。造波機又可分為製造相等波高、週期之規則波造波機及根據輸入資料利用程式控制製造波高、週期隨時間變化之不規則波造波機。不規則波亦可在風浪水槽中，利用吹風起浪或用風與機器或氣壓合併造波。

瞭解各種造波機之造波性能，對設計造波機，決定試驗縮尺及現有造波機之率定等都有很大之助益。Ross 及 Bowers (1953) 根據線性造波機理論推導活塞式及拍擊式造波機造波公式。但不適用於錘擊式造波機。Ursell, Dean 及 Yu (1958) 證明當波浪尖度較大時 (0.045 ~ 0.048) 用水平位移式造波機所造波浪較微小振幅理論約小 10%，而波浪尖度較小時 (0.002 ~ 0.03) 試驗值較理論值約小 3.4%。一台造波機所能製造波高可根據簡單造波機理論求得所需之近似值。在半週期內由造波機所產生之水體積位移等於正弦波半波長水位抬高體積。即

$$H = \frac{2\pi}{\lambda} \bar{V}_w \quad (4-19)$$

上式中 $\bar{V}_w$ 為在半週期內單位長度水體積位移。設造波板位移距離為 S ，造波機線性特徵長度為 $(\ell_c)_a$ 。由底部及兩旁之漏水體積 $\Delta \bar{V}_w$ （長度平均值），則 $\bar{V}_w = S \cdot (\ell_c)_a - \Delta \bar{V}_w$ ， $\Delta \bar{V}_w$ 如底部及兩旁較緊密時可以忽略。

$$H = \frac{2\pi}{\lambda} [S \cdot (\ell_c)_a - \Delta \bar{V}_w] \quad (4-20)$$

Galvin (1964) 研究得 $(\ell_c)_a$ 之值如下表

	$(\ell_c)_a$
活塞式 (Piston)	d
拍擊式 (Flap)	d
圓筒形錘擊式 (Cylindrical plunger)	γ
錐形錘擊式 (Prismatic plunger)	$b + h \tan \alpha$

上表中 S ， d ， γ ， h 及 α 如圖 4-10。試驗證明除拍擊式外，試驗值與理論值相當吻合。拍擊式可能因漏水或非簡諧擺動而發生誤差。

上述計算波高機造波公式雖可獲得相當準確之波高，但海岸工程構造物，試驗波高率定仍需辦理，以求較準確之試驗波浪。

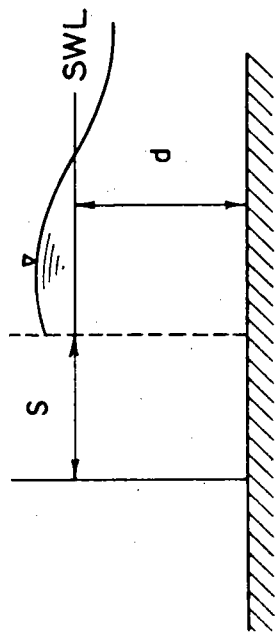
試驗室必須具備足夠動力以驅動造波機，製造各種試驗波浪。由理論計算波浪動力為

$$\text{波浪動力} = \frac{\text{群波速度} \times \text{波浪能量}}{\text{波長}}$$

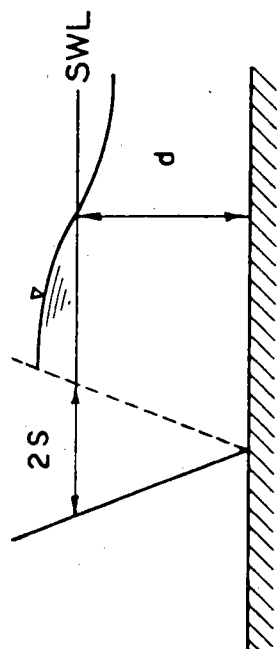
造波機每呎長波浪動力馬力數為

$$WHP = \frac{k}{550} \frac{1}{16} \gamma_w H^2 V \left(1 + \frac{4\pi d / \lambda}{\sinh \frac{4\pi d}{\lambda}} \right) \quad (4-21)$$

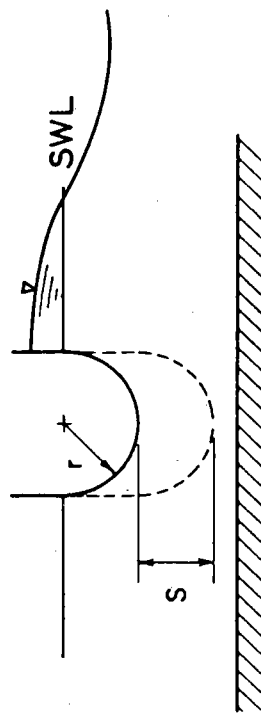
上式中 γ_w 為水之單位重量， V 為波速



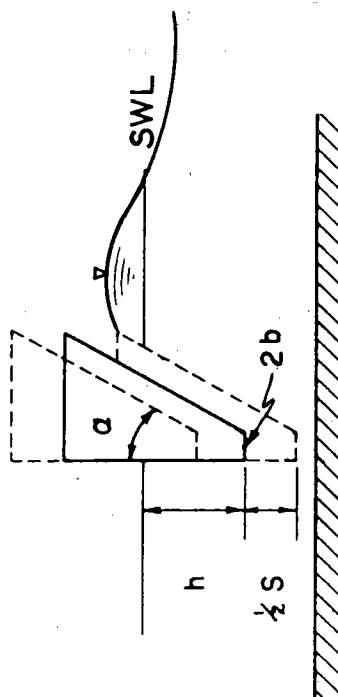
PISTON



FLAP



CYLINDRICAL PLUNGER



PRISMATIC PLUNGER

圖 4—10 造波機類型圖

$$V = \left(\frac{g \lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{\lambda} \right)^{1/2} \quad (4-22)$$

k 為一係數，因造波機之形狀而定，活塞式、拍擊式及圓筒錘擊式， $k = 2$ 。錐形錘擊式 k 值隨 b 之大小而定，約為 1.5。(4-21) 式所求馬力數僅對波浪動力而言，馬達所需馬力與波浪馬力 (WHP) 之比決定於造波機之慣性、波浪週期、摩擦、飛輪慣性等，其範圍甚大。根據現有造波機 MHP/WHP 之值介於 2.5 ~ 41.6，一般採用 10 至 20。

(三) 模型建造

拋石堤、海堤、消波岸壁通常是由堤心材料，一至二層中間層保護塊及外表一層護面塊所構成。中間保護層之保護塊必須能足以保護堤心材料及底床砂石免於被波浪刷出。次層塊石重量約為表面層之十分之一。拋石堤現地施工方法因構造物、水深及護坡塊大小、施工期波浪情況及施工機械而異。一般而言，水深較大時，堤心材料及中間層均採用拋石船，中間層可用工作船以抓斗拋放。如高於水面則可用推土機等施工。護面塊則用工作船或由陸地拋放。除非在水面上施工，可將護坡塊以長軸排放增加安定係數，但施工非常費時，故護坡塊通常採用亂拋。護坡塊若採用混凝土型塊，規則排列增加安全係數。排列方法由試驗人員與施工單位研究決定，試驗所採用之模型必需盡量與現地情況相似。堤心採用砂或碎石料浸濕製造模型並加壓實，中間層用篩過碎石以鏟子鋪築不加壓實，護面層則以手拋放。護面塊拋放時不可用力使塊石間互相卡緊，正式作試驗之前先造波使產生必需之震動及沉陷以符合現場施工時所受波浪作用。

護坡塊原型如用開採塊石，模型上可按縮尺篩取碎石。中間層如用河床滾石，模型上按縮尺篩取河床卵石，混凝土型塊灌製非常費時

，利用鋁等金屬材料灌制雖較簡便，且不易破損，但縮尺影響較大，費用亦高。最理想方法是利用 78 % 之硫化矽 (*Sulfur-Silicon Compound*) 及 23 % 砂混合灌製，硫化矽加溫至攝氏 110° 至 116° 與砂混合比重約為 140 lb / ft³ 。模型設計時，已有之混凝土型決常作為考慮模型縮尺因素之一。

直立式防波堤模型大都採用木板建造，中間按比例填以砂石，使其重量能滿足相似律。壓力計與波高計安裝位置可用銅板製作。

四波浪及波壓力之測量

1. 波浪測量

海岸工程構造物安定試驗中，波高與週期均應測量。已知週期及水深，則根據前進波線性理論波長為

$$\lambda = \frac{g T^2}{2 \pi} \tanh \frac{2 \pi d}{\lambda} \quad (4-23)$$

波高雖可以肉眼由標尺讀取近似值，但最可靠的方法是利用電子波高計以紀錄器磁帶紀錄波高。如試驗需要波形時，可用波高計紀錄之。週期可用馬錶讀取。如辦理其他研究，需要碎波作用於構造物之波形時，可用高速照相機拍攝。波浪使沉積物產生運動，可能冲刷堤基影響構造物穩定。堤前水粒子運動必須加以研究，可拋放比重與水相等之浮球，利用高速攝影機拍取運動軌跡。其他測量水粒子速度方法尚有熱膜型感受器、熱線型風速計等。

試驗室波高計包括電源、感受器、增幅器、控制箱、紀錄器（或磁帶）等。利用感受器感應水位變化產生電阻或電容變化紀錄水位隨時間變化情形。

各類型波高計之優劣點分述如下：

(1) 階段電阻式波高計：優點為率定線（水位與電阻）成線性關係

，構造強硬，操作簡便。缺點為造價昂貴，感受器使波峯面受阻，影響水位，不能達到完全防水，精度較差。

(2)電容式波高計：優點為率定線（水位與電容）成線性關係。波峯面不致受阻，造價低廉，操作簡便。缺點為電容線容易斷，需要有電橋等組合造價較貴，對溫度變化較敏感。

以今日電子技術進步而言，波高計原理並不難，但因使用數量極少，廠商均不願生產，試驗室為本身需要均設有專門人員負責試驗儀器之研究發展。

(3)波壓力測量

早期海岸構造物如防波堤等之設計、施工對入侵波浪所產生之波壓大小、分佈等均無所知。巨大之波力作用於堤面造成極大之損害，設計者有鑑於此，乃著手於波壓測量。根據 *Gaillard* (1904) 稱最早之波壓測量為 *Thomas Stevenson* 在 1842 年辦理。

應用於測量作用於堤面碎波波壓之壓力感受器必須配合波壓特性，因波壓尖峯感應極短，故感受器之頻率感應約在 1000 H_z 以上。雖試驗波高僅數呎，其感應壓力強度約為 100 至 1000 lbs/m^2 。除此之外，選擇波壓計必須不影響構造物試體之硬度及形狀。波壓測量必須同時測得整個構造物受力面與歷時之變化，方能瞭解受力面總壓力。祇測一點或小面積之波壓與歷時關係不足以作為設計之參考。

(五)試驗資料分析與解說

試驗過程中，隨時分析並解說試驗所得資料是件非常重要的事。根據已有試驗結果，作為變更試驗條件或著加入必要之補助試驗之依據。試驗過程中，並須經常與設計工程師連繫，隨時作設計上必要之修正，惟有如此方可使試驗次數減至最少而獲得理想之斷面。

試驗報告需包括試驗目的、試驗條件、相似性分析、模型製作、

試驗過程、資料分析及結論與建議等。試驗結果儘可能用無因次繪製成圖表，一方面可消除試驗所發生之偶然誤差，另方面可用已有試驗推廣應用。

五、模型試驗實例

實例一

(一)計畫名稱：未碎波拋石堤試驗，*Burns Waterway Harbor, Indiana*。

(二)試驗單位：*W E S*。

(三)試驗報告：*Jackson (1967) Stability of Proposed Breakwater*

(四)試驗期間：1966年4月至7月

(五)試驗目的：本試驗主要目的為

1. 決定試計斷面穩定情況，視實際需要加以必要之修正。
2. 研擬減低設計斷面越波能量有效途徑。

(六)試驗條件：波高13呎，週期11秒，水深低水位下43呎，試驗水位+4呎。

(七)試驗模型：

1. 防波堤斷面分為鼎型塊護面及開採塊石護面兩種，如圖4—11。

2. 模型縮尺：按福祿得模型率採用1/35。

3. 試驗水槽長119呎，寬5呎，深4呎，配置如圖4—12。

(八)試驗結果：

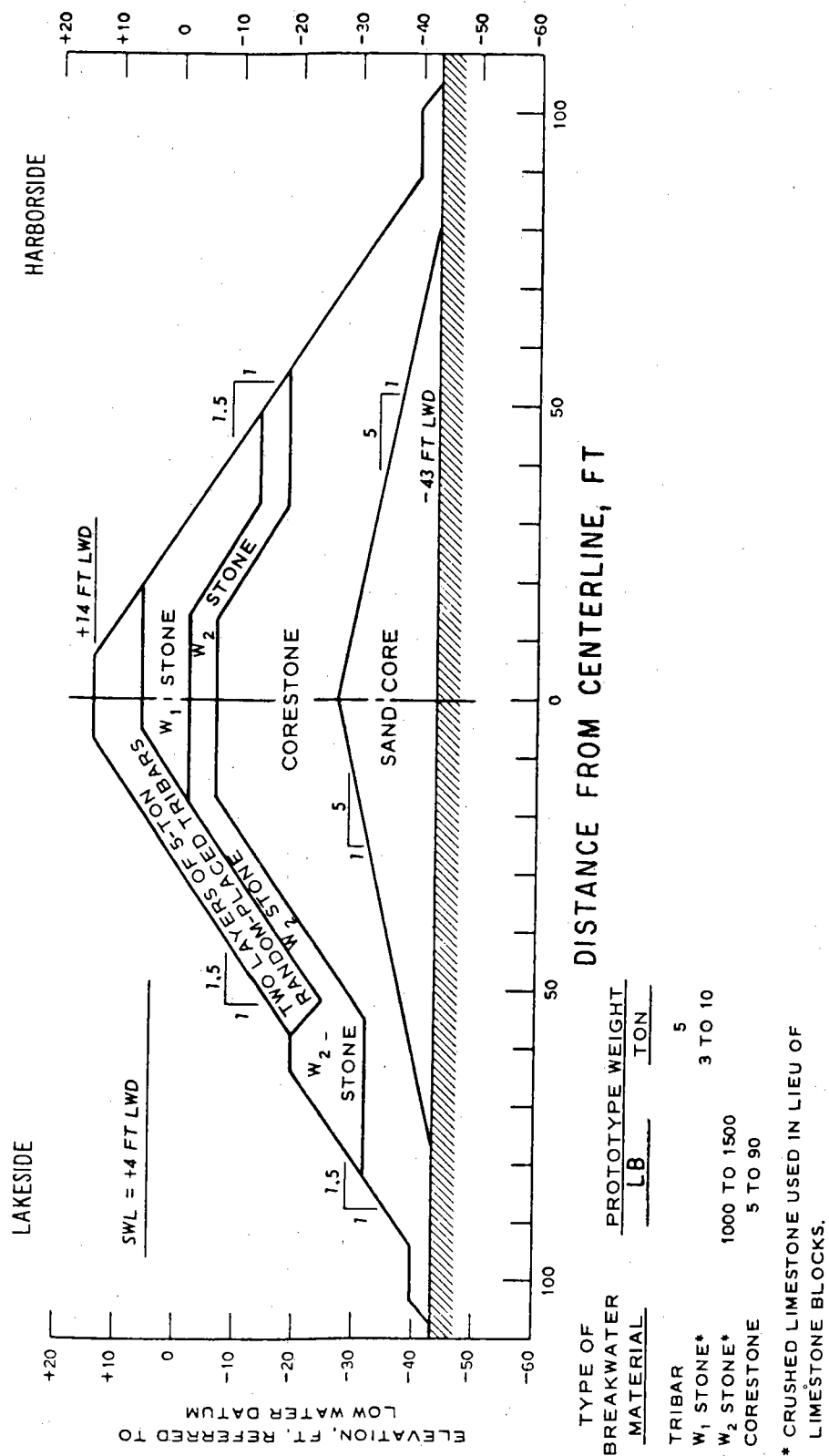
1. 圖4—11(a)鼎形塊護坡斷面，試驗波高達16呎時仍能保持穩定，但在波高14呎時，部份 $W/2$ 石塊產生位移現象。因此將此種石塊重量增加50%。試驗結果顯示此種斷面鼎型塊Hudson公式之安

定係數 K 為 14.9。

2. 越波所產生之傳遞波高如圖 4—13，傳遞波高隨週期增長而增大，在 130 呎設計波浪侵襲下，傳遞波高為 3 呎，尚能符合船隻進出要求。

3. 圖 4—11(b) 塊石護波斷面，當塊整拋時，越波量甚大，改為亂拋後，試驗水位 + 4 呎時，*Hudson* 公式之安定係數 $K = 14$ ，若水位降低為 0 時， K 值減為 8。

14. 越波所產生之傳遞波高如圖 4—14。在 13 呎設計波作用下，當試驗水位為 + 4 呎及 0 呎時，越波波高分別為 3 呎及 2 呎。



4-11 (a) 防波堤設計断面 (鼎型块)

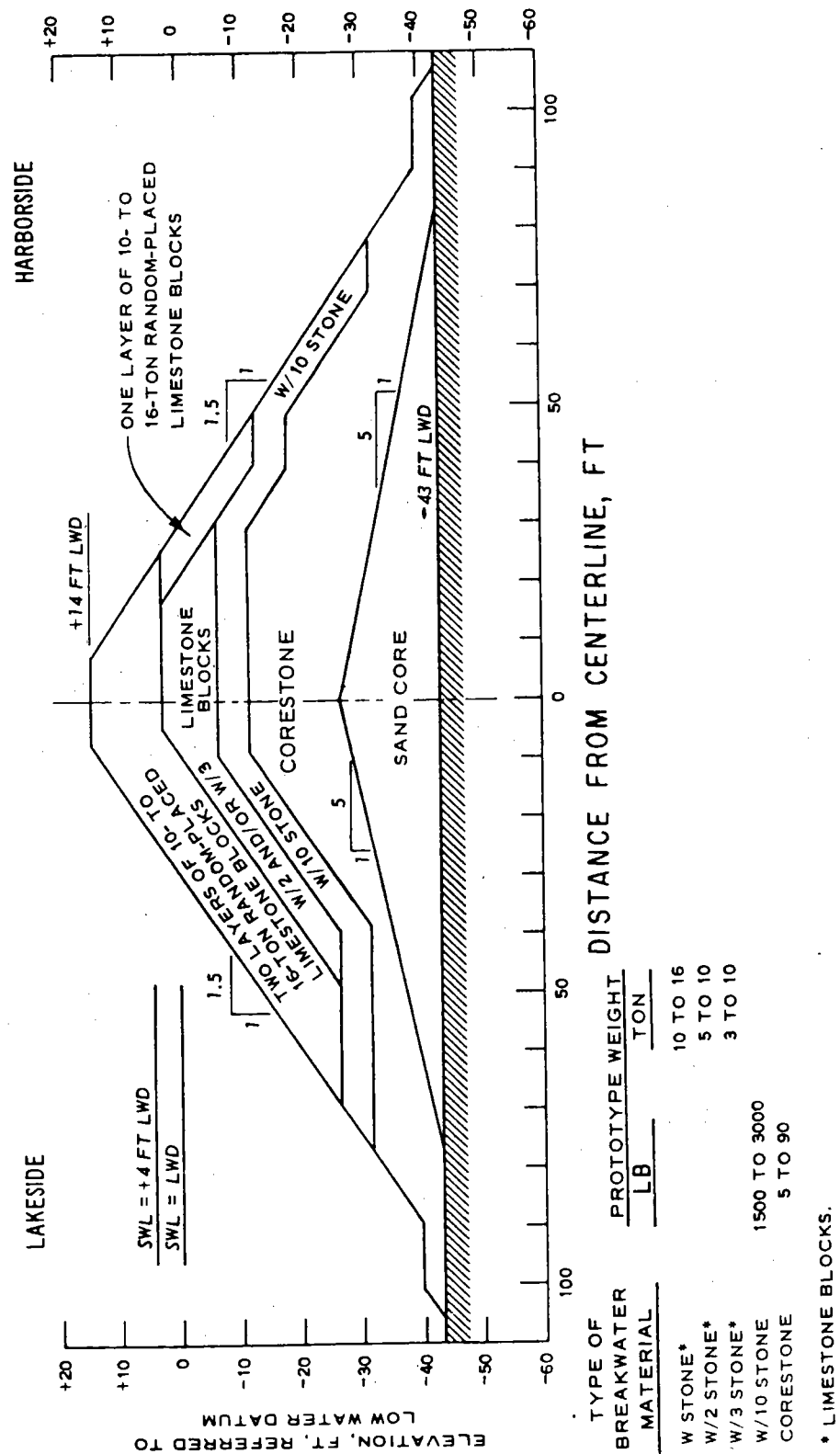
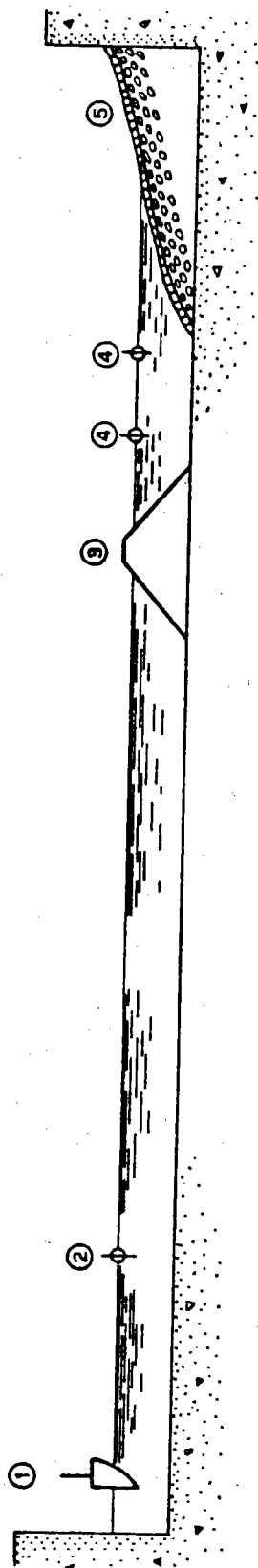
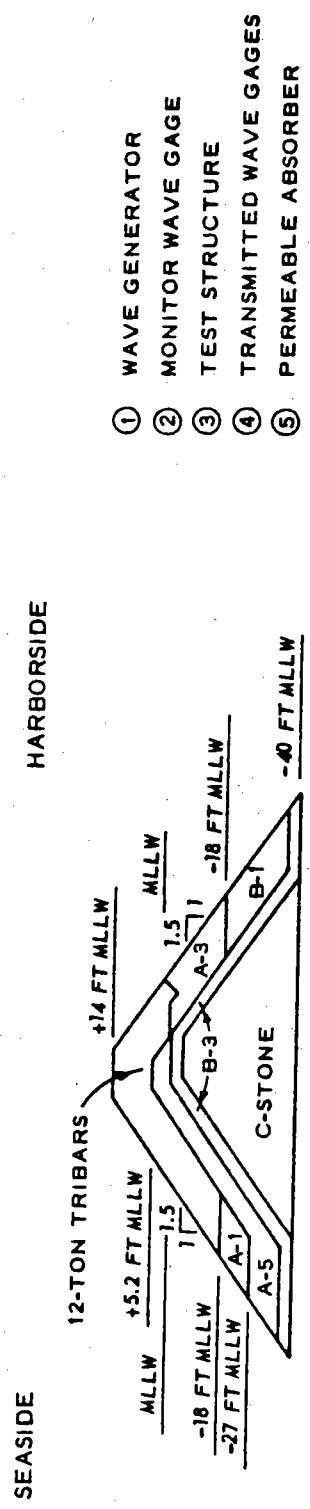


圖 4-11 (b) 防波堤設計斷面 (块石護面) (Jackson 1967)



ELEVATED VIEW OF TEST FLUME



BREAKWATER TEST SECTION PROPOSED FOR
MONTEREY HARBOR, CALIF.
STATION 18+60 TO 31+60

圖 4 — 12 試驗水槽佈置 (After Jackson 1969)

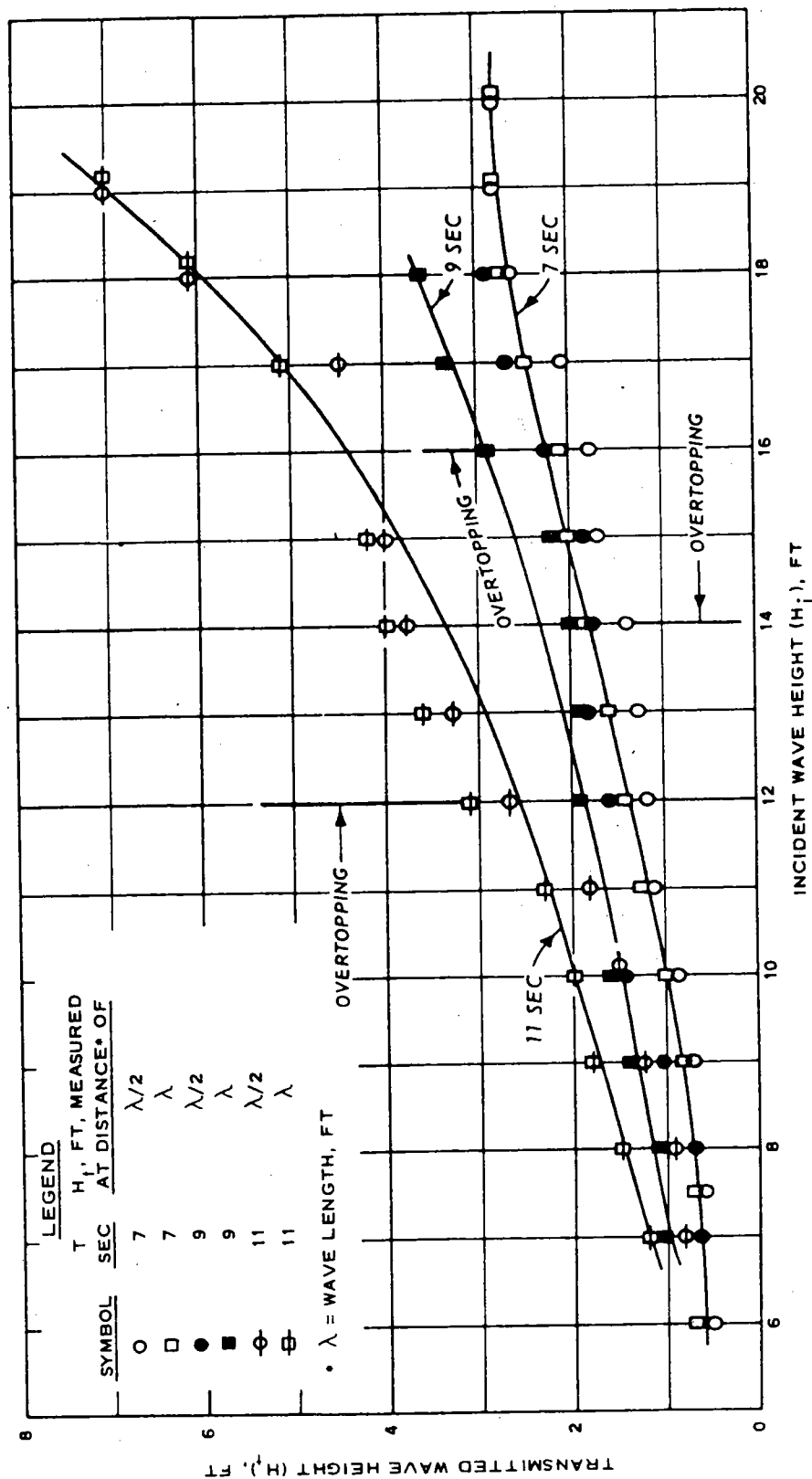
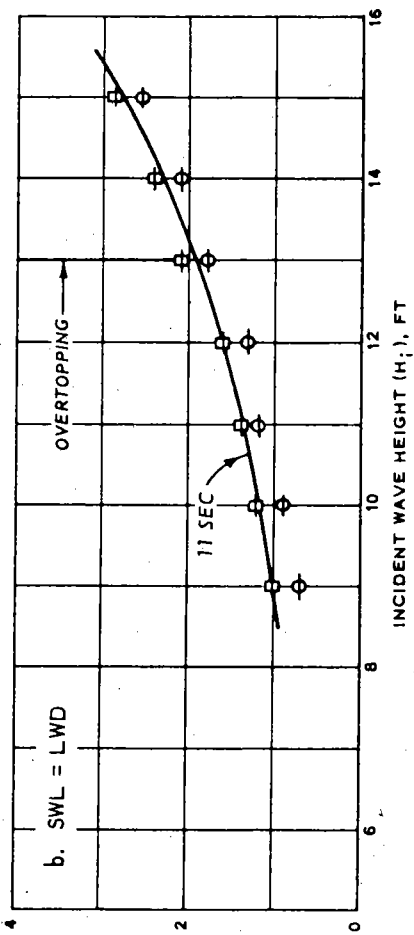
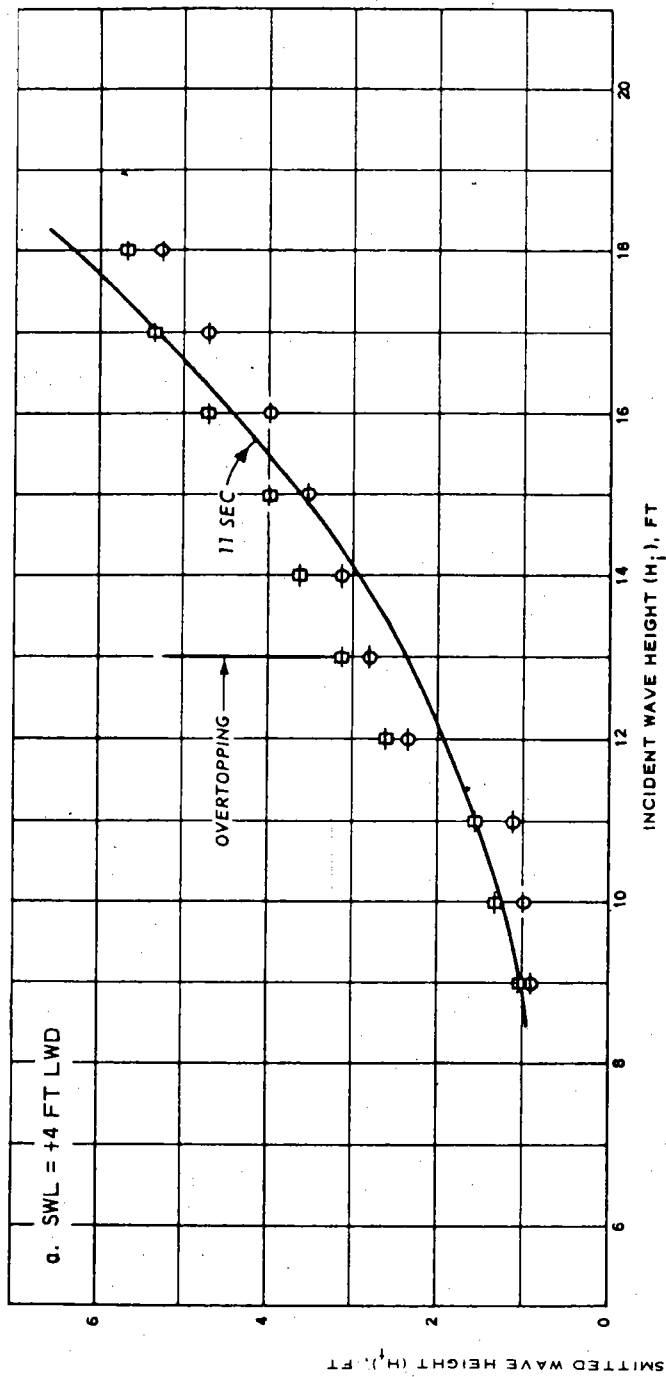


圖 4—13 鼎型塊護面防波堤傳遞波高 (Jackson 1969)



LEGEND

SYMBOL	T SEC	H_t , FT, MEASURED AT DISTANCE OF
○	11	$\lambda/2$
⊕	11	λ

* λ = WAVE LENGTH, FT

圖 4—14 拋石護面防波堤傳遞波高 (Jackson 1969)

實例二

(一)計畫名稱：防波堤越波傳遞波高。

(二)計畫內容：決定減少越波傳遞波高之最佳沉箱式防波堤斷面。

(三)試驗單位：台中港務局港灣試驗室。

(四)試驗報告：花蓮港第四期擴建防波堤斷面試驗報告，台中港務局編印，69年2月。

(五)試驗條件：波高8～11.5公尺，週期採用11.2秒及12秒，水深分別為15，20及22.5公尺，水位採用±2.55公尺及+2.5公尺。

(六)試驗模型：試驗模型佈置於長28公尺，寬及深各一公尺之試驗水槽，水槽上10公尺長玻璃觀測段，依福祿得模型律 (*Froude Model Law*)，模型線性縮尺採用1/45。

(七)試驗結果：

- 1.三種不同斷面防波堤分別如圖4—15(a)～(c)，試驗結果距沉箱100公尺處越波傳遞波高如圖4—16。
- 2.胸牆越寬，越波所產生之傳遞波高越小，一般而言，胸牆上有隔牆較無隔牆在減小傳遞波效果較佳。

附註：本試驗資料太少。

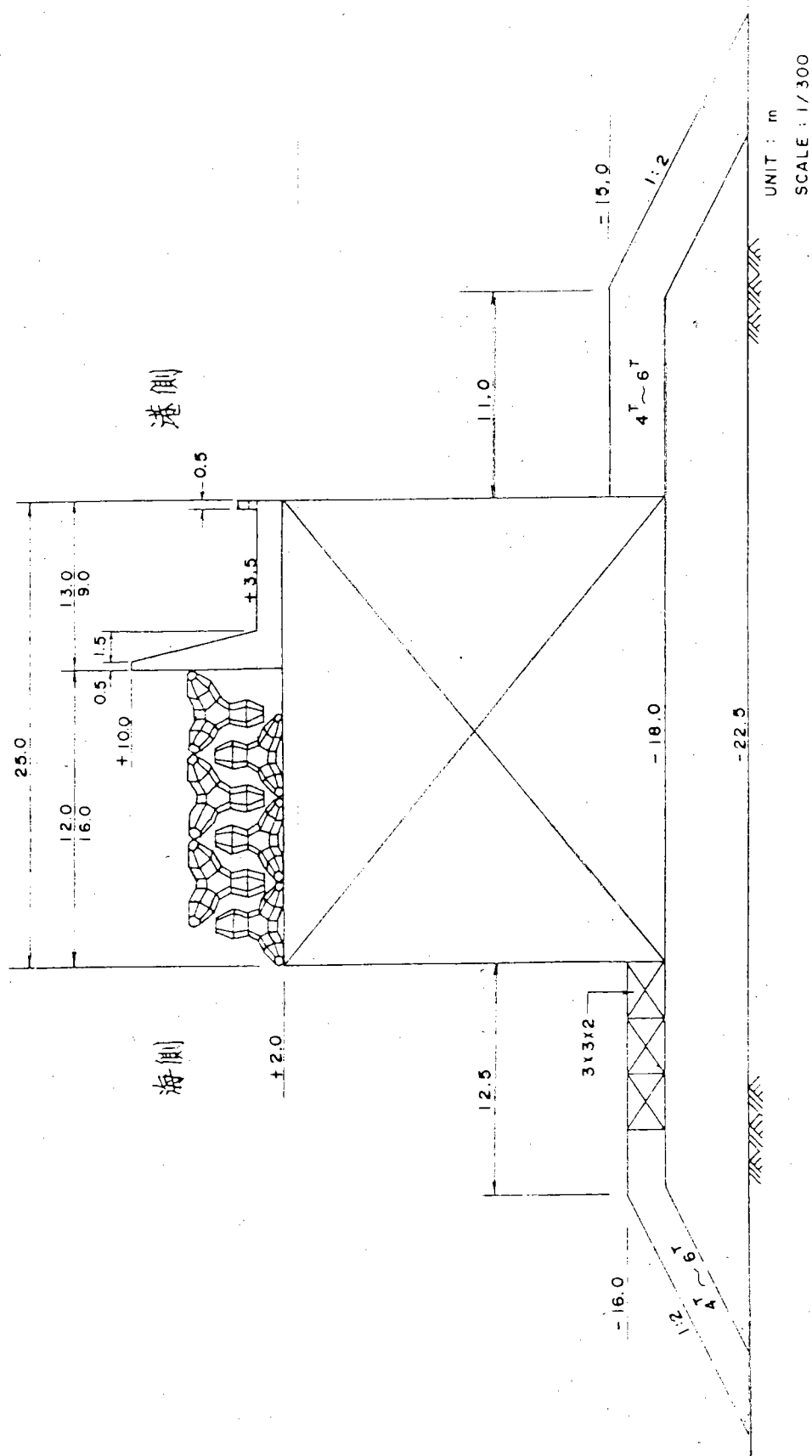


圖 4—15 (a) 防波堤斷面 (花港案)

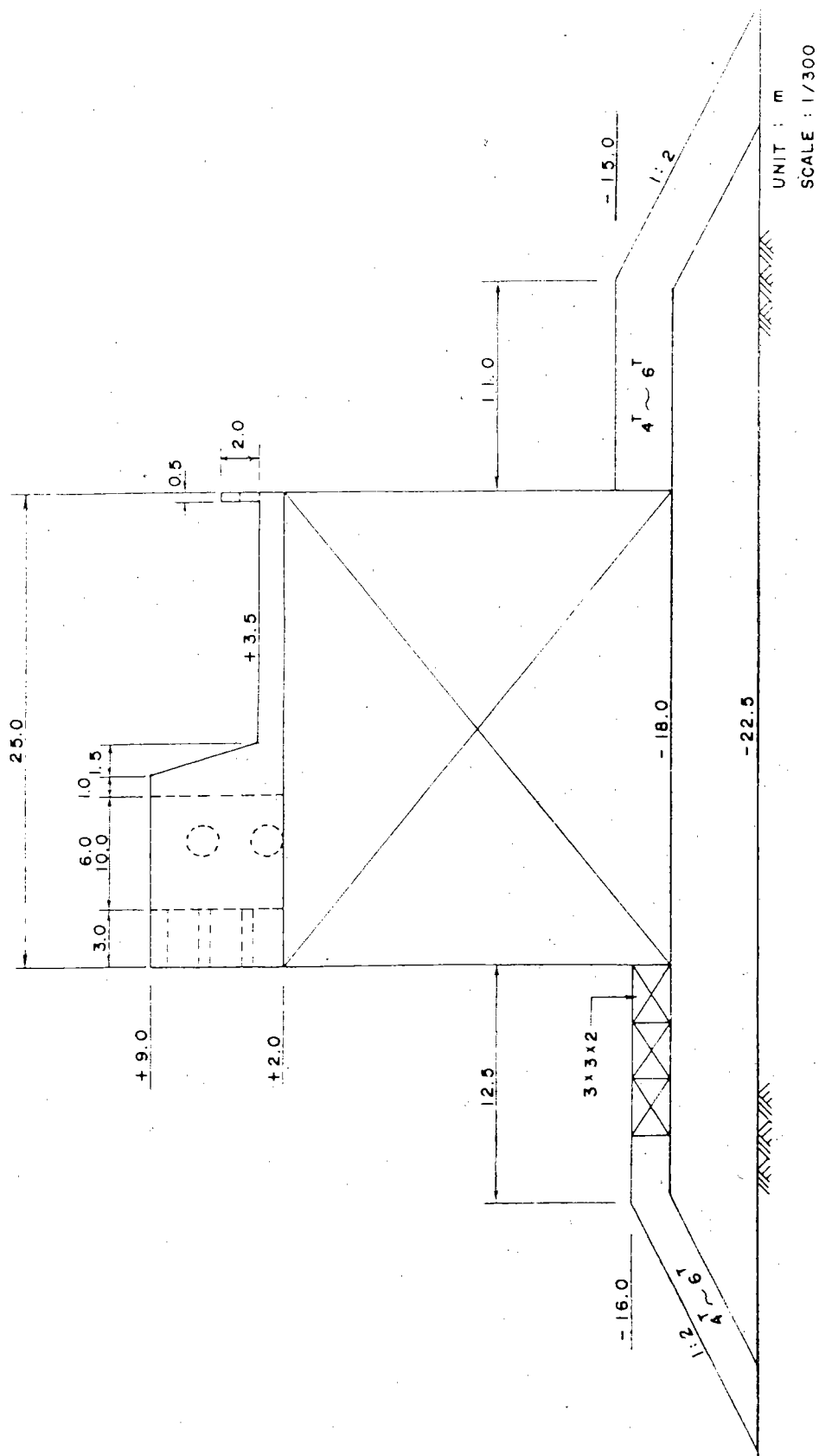


圖 4—15 (a) 防波堤斷面圖 (中華案)

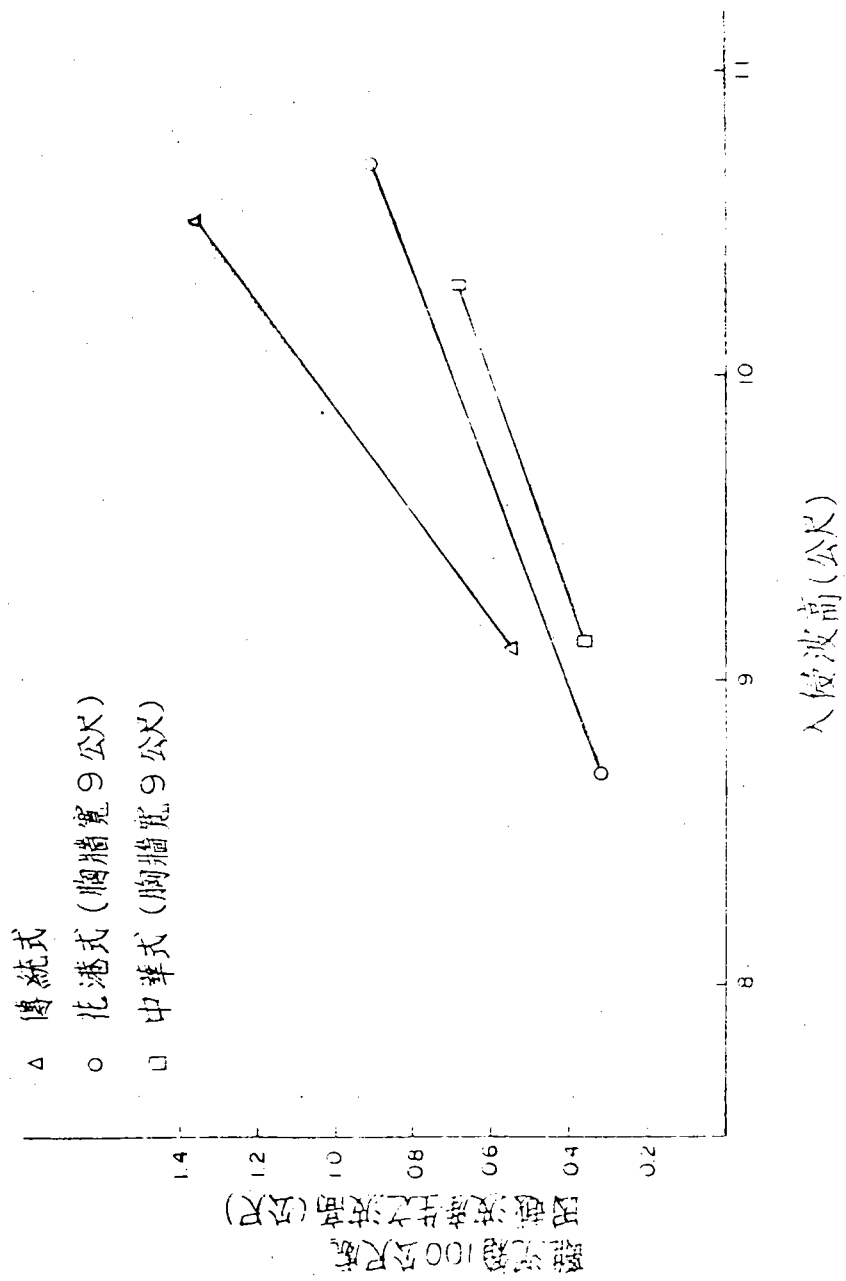


圖 4-16 防波堤傳遞港試驗結果

第五章 海岸冲淤試驗

一、概述

本章所討論海岸冲積是一種三次度試驗，包括沿岸漂沙、向岸及離岸漂沙及構造物基礎之冲刷與淤積。造成海岸冲積主要外力為海洋中之風浪。辦理此項研究主要目的在瞭解構岸構造物冲淤狀況作為設計規畫之參考。試驗必須採用動床模型。*Bagnold* (1940)，*Keulegan* (1945)，*BEB* (1954)，*Shinohara* (1958)，*Le Mehaute* 及 *Brehner* (1961)，*Inman* (1965)，*Eagleson* (1965)，*Caldwell* (1966)，*Ippen* (1966)，*Johnson* (1919, 1956, 1957, 1959, 1966)，*Komar* (1968)，*Bijker* (1969)，*Saville* (1969)，*Einstein* (1948, 1971)，*Yalin* (1972)，*Silvester* (1959, 1974) 等均曾辦理此項研究。

目前為止利用動床模型試驗以研究海岸冲淤情形尚未能做到定量階段，然而利用動床模型試驗研究海岸冲淤問題，獲得正確有用資料提供設計參考是非常可行的。如果有足夠之現地資料，且在試驗室又能使現原型重現，則試驗結果可信度極高。

所有水工模型試驗中，動床模型試驗可以說是最複雜困難的一種，尤其是波浪作用所引起之海岸冲淤試驗更是困難重重。碎波帶以外沉積物移動與碎波帶內沉積物移動之水力特性不同，在模型上建立一種動力相似不可能同時滿足上述兩種情況之物理作用。（即用相同之模型律及模型流體—水，使碎波帶以外及碎波帶內兩種狀況之波浪、水流及底質材料重現是不可能），其他影響因素如邊緣波 (*Edge Waves*)，激流 (*Rip currents*)，長波，現地沉積物大小分佈情形

等，此外模型縮尺影響及試驗技術等都是辦理海岸動床模型試驗所面臨之困難問題。

一種變通辦法是利用定床模型以少量之染色顏料追蹤色液流動軌跡，此種試驗可以說是海岸沖淤定性試驗，其所需費用較動床試驗低廉。尤其是在已有之定床模型上採用此種染色液瞭解水流情況更是可行。

目前為止海岸沖淤動床模型試驗尚未達到科學理想境界。雖然其仍存有某種困難，但利用等縮尺模型試驗仍可獲得相當有用資料。下節所述一些動床模型試驗相似律。每一種相似律均有其基本假設及限制，推導方法有的是由經驗，而有的則是純數學理論。辦理此項試驗者，一開始即面臨困難抉擇，在這許多選擇中也許僅有一、兩種方法可獲得正確可靠之試驗結果。因之，海岸沖淤方面之研究必須再接再厲。而目前辦理此項試驗研究者，必須格外小心。最重要的是辦理此種試驗必須時間充裕，經費充足，匆忙辦理此種試驗，考慮欠週往往導致失敗最大原因。

二、相似性

動床模型其流體運動及邊界條件非常複雜，不可能在模型上重現原型複雜之動力現象。因而，一般研究者均放棄上述物理現象之相似性，而着重於海岸剖面及沿岸漂沙量方面之相似性。

根據 Noda (1972) 所作研究，針對非黏性沙加以分析，（目前對黏性沉積物之漂移現象尚無研究）。

影響海岸剖面模型律主要參數為水平縮尺 $\lambda (=X_m/X_p)$ ，垂直縮尺 $\mu (=Y_m/Y_p)$ ，漂沙粒徑 D_{50} ，及漂沙比重 $\gamma [(=\gamma_s - \gamma_f)/\gamma_f]$ ， γ_s 及 γ_f 分別為漂沙及水之比重。就上述四個影響因素檢討其平衡條件。海岸變化之時間縮尺無法同時予以考慮。

下列為達成模型縮尺關係之物理現象及其所推導出條件：

條件 1：海岸水流現象主要為重力及慣力，福祿得數為

$$F = U / (g d)^{1/2} \quad (5-1)$$

$$\eta_F = (F)_m / (F)_p = 1 \quad \text{則}$$

$$\eta_U = U_m / U_p = \mu^{1/2} \quad (5-2)$$

根據一些學者研究，深海波浪尖度 (H_o / L_o) 對海岸剖面影響甚大，其縮尺與垂直縮尺相同

$$\eta_L = L_m / L_p = \mu \quad (5-3)$$

$$\eta_T = T_m / T_p = \mu^{1/2} \quad (5-4)$$

波長縮尺採用與垂直縮尺相同可獲得折射相似，但模型上波長較長，其變形為 $\Omega = \mu / \lambda$ 。

條件 2：摩擦剪力福祿得數 F_*

$$F_* = \frac{U_*}{(g \gamma' D)^{1/2}} \quad (5-5)$$

$$U_* = (\tau / \rho)^{1/2}$$

$$\eta_{\gamma'} \eta_D = \frac{(\gamma' D)_m}{(\gamma' D)_p} = \eta_{U_*}^2 = \left[\frac{(U_*)_m}{(U_*)_p} \right]^2 \quad (5-6)$$

條件 3：根據沙粒徑及底床剪力模型與原型雷諾數相等得

$$\eta_{U_*} \eta_D = \frac{(U_* D)_m}{(U_* D)_p} = 1 \quad (5-7)$$

式中 $\eta_{U_*} = (U_*)_m / (U_*)_p$

條件 4：亂流穩定情況下，底床剪力速度以摩擦因素 f 表之

$$U_* \propto \bar{f}^{1/2} U \quad (5-8)$$

U 為穩定流流速，在亂流情況下底床剪力速度之縮尺為

$$\eta_{U_*} = \frac{(U_*)_m}{(U_*)_p} = \mu^{1/2} \eta_{\bar{f}}^{1/2} = \mu^{1/2} \left[\frac{(\bar{f})_m}{(\bar{f})_p} \right]^{1/2} \quad (5-9)$$

式中 $\eta_f = \bar{f}_m / \bar{f}_p$

條件 5：摩擦因素與 Chezy 係數關係為

$$C = \left(\frac{8g}{\bar{f}} \right)^{1/2} \quad (5-10)$$

流速及幾何性質得

$$\eta_f = \frac{(\bar{f})_m}{(\bar{f})_p} = \mu / \lambda \quad (5-11)$$

$$\eta_{\lambda^2} = \left(\frac{C_m}{C_p} \right)^2 = \lambda / \mu \quad (5-12)$$

條件 6：根據 *Le Me'haute* 研究海岸漂沙移動之運動條件之水平及垂直位移在模型與原型應維持相同。

$$\frac{U}{W} = \frac{x}{y} \quad (5-13)$$

$$\frac{U_m}{U_p} / \frac{W_m}{W_p} = \frac{\lambda}{\mu} \quad (5-14)$$

條件 7：漂沙之流體動力特性可以其降落速度 W 表之，粒徑為 D 。當雷諾數 $WD/\nu < 0.1$ 時，*Stokes'* 解

$$W = \frac{1}{18} \frac{D^2 g \gamma'}{\nu} \quad (5-15)$$

原型海岸及模型漂沙降落速度較慢，雷諾數通常大於 0.1，其範圍為 $10 \leq R < 400$ ，故上式僅供參考用，其模型律為

$$\eta_w = \frac{W_m}{W_p} = \eta_D^2 \eta_{\gamma'} = \left(\frac{D_m}{D_p} \right)^2 \frac{\gamma'_m}{\gamma'_p} \quad (5-16)$$

Noda 利用上述七種相似條件組合成八種可能之模型律如表 5—1。表中“X”為考慮該相似條件，所得模型律為最右一行，其相似性尚有甚多未確定，故加一行假設條件。*Noda* 首先利用原型材料，即 $\eta_{\gamma'} = \eta_D = \eta_w = 1$ 根據表 5—1 進行一連串之試驗，以獲得適用

表 5—1 海岸動床模型律 (Noda 1972)

Case No.	Similitude conditions							Assumed condition	Result when	Coastal movable-bed model laws
	Condition 1 $n_F = 1$ $n_b = \mu^{1/2}$ $n_T = \mu$ $n_L = \mu$	Condition 2 $n_F = 1$ $n_b = 1$ $n_T n_D = n_b^2$	Condition 3 $n_{R_s} = 1$ $n_b n_D = 1$	Condition 4 Turbulent flow $n_b = \mu^{1/2} n_L^{1/2}$ $n_b = \mu^{1/2} n_T^{1/2}$	Condition 5 Friction factor $n_b = \frac{\mu}{\lambda}$	Condition 6 $\frac{n_b}{n_w} = \frac{\lambda}{\mu}$ $n_w = \frac{\mu^{3/2}}{\lambda}$	Condition 7 Stokes velocity $Re \leq 1$ $n_w = n_D n_T$			
1	X	X	X	X	X				$n_T = n_D = 1, n_w = 1$ $\lambda = \mu^2$ $(\mu = \lambda^{1/2})$	$n_D = \frac{\lambda^{1/2}}{\mu}, n_T = \frac{\mu^2}{\lambda^{3/2}}, n_T n_D^3 = 1,$ $n_w = \frac{\mu}{\lambda^{1/2}}$ Proposed by Fan and Le Mehaute (1969)
2	X	X	X	X				$n = \frac{\mu^m}{\lambda^n}$	$\lambda = \frac{1+m}{\mu}$	$n_D = \lambda^{m/2} \mu^{-(1+m)/2}, n_T = \mu^{3(1+m)/2} \lambda^{-3a/2}$ $n_T n_D^3 = 1, n_w = \mu^{(1+m)/2} \lambda^{-a/2}$
3	X	X	X					$n_b = \mu^p \lambda^{-q}$	$\lambda = \mu^{p/q}$	$n_D = \frac{\lambda^q}{\mu^p}, n_T = \left(\frac{\mu^p}{\lambda^q}\right)^3, n_T n_D^3 = 1, n_w = \frac{\mu^p}{\lambda^q}$
4	X	X		X	X	X	X		$\lambda \equiv 1, \mu \equiv 1$: using prototype materials, a model is not valid	$n_D = \frac{1}{\mu^{1/2}}, n_T = \frac{\mu^{5/2}}{\lambda}, n_w = \frac{\mu}{\lambda^{1/2}}$
5	X	X		X		X	X	$n = \frac{\mu^m}{\lambda^n}$	$\lambda = \mu^{3/2}$ $m = 1$ $n = 2$	$n_D = \frac{\lambda}{\mu^{1/2}}, n_T = \frac{\mu^{5/2}}{\lambda^3}, n_T = \frac{\mu}{\lambda^2},$ $n_T n_D^3 = \mu, n_w = \frac{\mu^{3/2}}{\lambda}$
6	X	X				X	X	$n_b = \frac{\mu^p}{\lambda^q}$	$\lambda = \mu^{3/2}$ $p = 3$ $q = 2$	$n_D = \lambda^3 \mu^{-9/2}, n_T = \mu^{21/2} \lambda^{-7}, n_T n_D^3 = 1,$ $n_w = \frac{\mu^3}{\lambda^2}, \lambda = n_D^{1/2} \mu^{3/2}$
7	X	X	X			X	X		$\lambda = \mu^{3/2}$	$n_D = \frac{\lambda}{\mu^{3/2}}, n_T = \frac{\mu^{9/2}}{\lambda^3}, n_w = \frac{\mu^{3/2}}{\lambda},$ $n_T n_D^3 = 1$
8	X	X	X	X		X	X		$\lambda = \mu^{3/2}$	$n_D = \frac{\lambda}{\mu^{3/2}}, n_T = \frac{\mu^{9/2}}{\lambda^3}, n_T n_D^3 = 1,$ $n_w = \frac{\mu^{3/2}}{\lambda}, n_T = \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^2$

於碎波帶沿岸及離岸一向岸漂沙動床試驗模型律。

$$\eta_D \eta_r'^{1.85} = \mu^{0.55} \quad (5-17)$$

$$\lambda = \mu^{1.32} \eta_r'^{-0.386} \quad (5-18)$$

(5-17) 及 (5-18) 繪如圖 5-1，圖中四種參數為水平縮尺 λ ，垂直縮尺 μ ，模型與原型漂沙粒徑比 η_D 及相對比重比 η_r' 。其中試驗人員決定兩種參數，另兩種則為定值。

Le Mehaute (1970) 歸納動床模型律如表 5-2。各種模型律均有其存在條件，使用時必須注意其假設，方不致發生重大誤差。

三、模型設計

(一) 現地資料

現地資料搜集是辦理海岸沖淤試驗重要的一環。應用此項現地資料使其在模型上重現，必須謹慎求證。一般而言辦理試驗需搜集下列現地資料。

1. 試驗範圍內沙之來源及沙之粒徑分佈情形。

2. 估計每年、或每月沿岸輸砂量。利用波浪統計資料及折射、淺化與碎波等估計漂沙量。選用適當公式估算沿岸輸沙量是不容易，因而通常採用二、三種公式估算再加以判斷。此項沿岸輸沙估計有助於下列現象之瞭解：

(1) 影響沿岸輸沙之主要波浪。

(2) 沿岸輸沙之主要季節（或月份）。

(3) 沿岸輸沙淨量之方向。

(4) 顯示颱風侵襲時之輸沙量。

3. 沿岸地形及水深測量資料，此項資料有助於對現有問題的瞭解，並判斷構造物興建後可能產生之影響。

4. 波浪及沿岸輸沙之同時測量資料，此項整體資料作為模型上驗

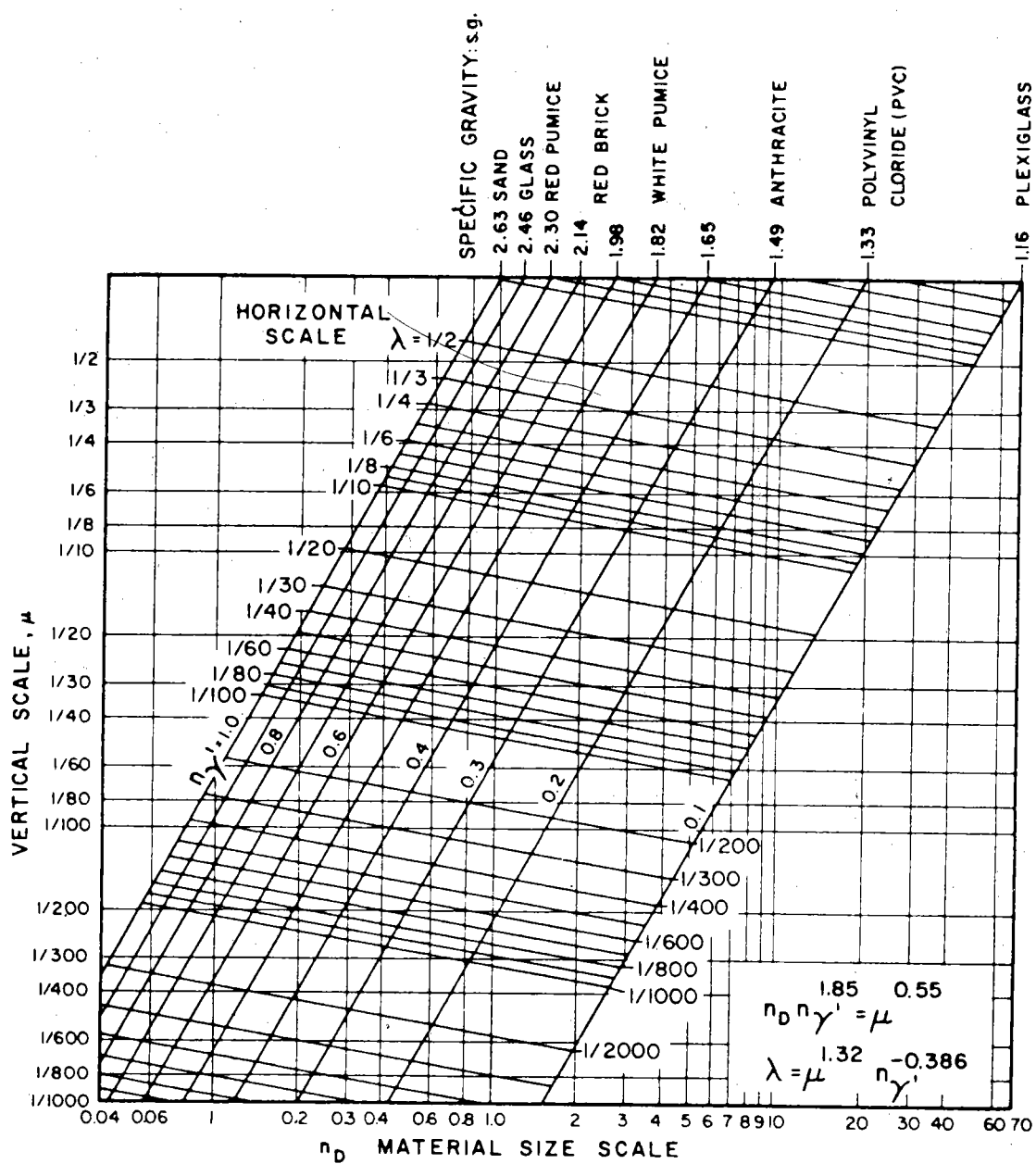


圖 5—1 模型律關係圖 (Noda 1972)

表 5 — 2 各種不同方法決定海岸動床模型律基未縮尺之比較

Source	Basic relations	Method of derivation
Goddet and Jaffry (1960)	$n_D = \mu^{17/20} \Omega^{8/5}$ $n_{\gamma'} = \mu^{3/20} \Omega^{-3/5}$	Sediment motion due to combined action of waves and currents
Valembouris (1960)	$\Omega = n_{\gamma'}^{-1}$ $n_{\gamma'} n_D^3 = 1$ $\mu = n_{\gamma'}^3 n_D \left(\frac{n_H}{\mu} \right)^4$	Kinematics of motion of suspended sediments Similitude of D_* Modified relation of initiation of sediment motion: $D_* = KR_*^{8/9}$
Yalin (1963)	$n_D = \mu^{3/4} \lambda^{1/2}$ $n_{\gamma'} n_D^3 = 1$	Dimensional analysis
Bijker (1967)	$n_{\gamma'} n_D \Omega^{-1} = \mu n_{\mu r}$ $\Omega \leftarrow$ equilibrium beach profiles	Similitude of F_* SEE NOTE:
Fan and Le Mehaute (1969)	$n_{\gamma'} n_D^3 = 1$ $n_{\gamma'} = \mu^3 \lambda^{-3/2}$ or $n_D = \lambda^{1/2} \mu^{-1}$ $\Omega \leftarrow$ equilibrium beach profiles	Similitude of sediment transport characteristics, i.e., F_* and R_*
Noda (1971)	$n_D n_{\gamma'}^{1.84} = \mu^{0.55}$ $\lambda = \mu^{1.32} n_{\gamma'}^{-0.386}$ $\Omega \leftarrow$ equilibrium beach profiles	Similitude of sediment transport characteristics; i.e., F_* and R_*

Note: Although this basic relation was noted to be in error, it was not corrected.

證用，故必需正確可靠。

一般而言，同時獲得上述正確資料誠為不易，但必須盡力而為，否則應用錯誤資料將導致試驗失敗。波浪及沿岸輸沙資料測量必須含蓋冲刷與淤積期間，同時也應包含最大及最小輸沙期間。利用波浪估計輸沙情況可以決定最佳測量期間，波浪資料最好能包括波向。

測取現地離岸及沿岸輸沙量以驗證模型非常困難，而且輸沙測量之正確與否亦難以判斷。因此這種調查必須先有詳盡可得計畫，測量海灘及碎波帶以外區域地形斷面，斷面間距越近越好，測量時間間隔越短越好。

(二) 模型縮尺及使用材料

前節所述，辦理海岸動床輸沙試驗無法達到完全動力相似。黏性沉積物更是無法在模型上重現。本節所討論者為非黏性沉積物之模型縮尺及使用材料。某些動力作用因素決定模型與原型間之線性比，材料性質及其他作用力。因之，目前為止，辦理此種試驗尚無固定可靠之模型律可資遵循。表 5—1 所示各種模型律均有其特殊應用地方。針對問題，選擇適當之模型律試驗人員必須對模型律有研究且具有經驗。

對某一特殊問題決定動床模型律必須作下列分析：

1. 現地波浪資料分析，包括每月統計資料，颱風侵襲時波浪狀況。
2. 利用各種方法計算現地沿岸輸沙量。
3. 沙之來源及粒徑分析、分佈情況。
4. 模型試驗設備、大小及容量，可用之材料。
5. 模型試驗所要求之精度、預算及時間。
6. 參與試驗之人力與素質。

上列各項因素在人力、經費允許下儘量獲得準確資料。然後辦理預備試驗決定模型縮尺，首先利用水槽辦理二次度海岸剖面試驗，借這種試驗利用各種模型律及底質材料瞭解現存向岸及離岸輸沙特性。然後選擇一兩種較適合之模型律及底質材料。應用所得模型律及底質材料再以較大縮尺模型試驗，以確定模型縮尺關係（至少向岸及離岸輸沙）。

如上述試驗模型上重現效果良好，則三次度動床模型縮尺及底質材料可以作進一步決定。在着手辦理主試驗之前，須再利用現地水深測量圖建造模型，使入射波與海岸成夾角，測量沿岸輸砂及模型地形變化。比較試驗結果與現地資料（短期）。如果上述模型試驗結果與現地測量互相吻合時，則可以辦理模型驗證。

四、模型驗證及試驗限制

（一）模型驗證

前述動床模型只能作定性試驗，而不能作定量試驗。若想利用動床試驗概估沿岸沖淤量，則模型驗證工作是決定試驗成敗最重要之一環。辦理模型重現驗證必須具備準確、充份之現地資料。因之現地之地形變化（沖刷、淤積及輸沙量）及入侵波浪（波高、週期及波向）等必須準確。地形變化測量之時間間隔越短越好，暴風波作用前後最好能有詳細測量資料。

初期驗證着重於短期間較嚴重之現地沖淤現象之重現，最好選擇波浪較大，波高、週期及波向變化不大之短期間海象及地形資料。如試驗之主要目的在瞭解現地沖刷率及漂沙量，則必須驗證模型上短期沖淤特性。但試驗並不那麼單純，一些料想不到之問題隨時都會發生。調整試驗條件（如波高、波向、週期或加沙量）均會產生極大之沖淤感應。驗證時，模型上波浪與地形變化關係須維持與現地相似，不

可變化太大。現地資料不準確或模型感應過快均會造成模型變化與現地資料不符，則模型縮尺及底質材料需重新考慮。

經過短期驗證後，需以較大縮尺模型驗證海岸沖淤情形，此種驗證需時較長。有時變換波浪條件亦可能造成短期沖淤現象。驗證過程必須儘可能使現地波浪潮汐等重現，其最終目的在使現地沖淤情況可以重現。

模型內測量之漂沙量與同期間現地測量漂沙量作比較。次一步驟為選定一段期間，現地波浪方向與海岸線成某一夾角，以驗證模型上漂沙量是否重現現地資料。

經過上述各種驗證後，歸納試驗條件作整個試驗範圍現地測量資料模型驗證。如果模型上能重現實地資料，則對主試驗結果應具有信心。

以上所討論模型驗證試驗甚為簡單，其不包括試驗過程裏隨時發生之各種問題。試驗者僅能靠經驗、研討作最有利之決定。總之辦理動床模型試驗者經常是一開始便站在十字路口，如何作最佳之判斷需要時間、經費及豐富之經驗。

(二) 試驗應注意問題

任何模型試驗均有其應注意問題，但動床模型試驗應注意問題則遠超過其他任何試驗，下列為辦理此項試驗應注意之一般事項：

1. 模型邊界：

任何模型均有其人工邊界，此種人工邊界在動床模型產生不少問題，模型在須在漂沙上游適當地點注入沙源，而下游則需移走漂沙。模型邊界截斷沿岸流（或沿岸輸沙），沿岸流可在邊界上裝設消能設施或利用環流渠道由下游迴流至上游減小其影響，亦可採用上游給水下游排水解決環境問題，但因給排水量未能確定故並不能解決問題

。模型上海側邊界亦可能造成不利之影響，造波機後側產生之波浪必須以消波器完全消除。模型上岸邊或海底地形可能產生不可忽視之反射波，經過波板再反射，此種再反射現象必須消除。在造波機前裝置濾波器可以有效的減低波浪再反射現象。

漂沙試驗含蓋範圍相當廣闊，採用不等縮尺模型可減小底床摩擦影響，但岸線之反射係數較實際為誇張，此種現象有時可以底床粗糙所增加之摩擦損耗相互抵消。

邊界另一種影響為增加邊緣波（*Edge Waves*）之強度，進而增加模型上激流（*Rip Current*）強度。又因不等縮尺及底床材料等對激流影響非常錯綜複雜，目前對此問題研究非常缺乏。

2. 造波機特性：

造波機造波範圍受限制，在某一週期範圍內，如不調整齒輪則波高變化非常有限，調整齒輪及變換波向通常都需停止造波機。一般造波機僅能製造規則波，其與海洋中波浪能譜關係尚待進一步研究。

3. 模型地形改建：

經過一次完全試驗後，因模型上地形已經改變，故全區必須校核重建。底床所採用之沙（或煤碴等）粒經原為不均勻，經過試驗波浪篩分作用後，模型上粒經分佈產生極大之變化，故模型上改建時，沙料（或煤碴等）必須重新混合。

(三) 試驗條件：

試驗前決定試驗條件需辦理下列兩項工作

1. 利用氣象資料追算試驗地區波浪。
2. 根據波浪資料計算每段期間漂沙量，此種計算不可能得到準確之數值，但最少可以獲得波浪與漂沙關係之構圖（即何種波浪會產生

多大漂沙)。

上述所得資料，並參考現地調查分析資料可以決定試驗條件。每一段期間在正常波浪情況下，所可能產生各方向年漂沙量必須加以試驗。試驗波浪視現地要求及試驗設備而定，可利用不規則波造機模擬海上波譜，或利用規則波造波機造規則波，變換主要方向。

(四) 模型測量

動床模型試驗最主要目的為瞭解底床受入射波浪、潮汐等作用而產生變化。因此，冲刷、淤積、底床剖面及沿岸漂沙量為模型上所需測量項目。入射波高及潮位測量必須準確（尤其是驗證試驗）。淺水及碎波帶內側之波高及水流亦需測量。模型上地形測量是最重要且複雜之工作，人工測量需非常小心，否則往往會造成相當大之誤差。最新之測量方法是利用音響或雷射（*Raser*）等儀器測量，以磁帶等自動紀錄。

模型上測量離岸一向岸及沿岸漂沙量與現地一樣是一項非常困難工作。利用螢光沙或雷射追蹤器輔以自動計數儀可以獲得良好結果。如果缺少上述儀器，則可使用沉積井（*Sediment Traps*）。當海岸線平衡時，由模型一端加入沙源量與另一端移走沙源量可以獲得相當正確之沿岸漂沙。

(五) 試驗結果分析

雖然海岸輸沙水工模型試驗尚有許多複雜而未能解決之問題，辦理此種試驗不一定能成功，但仍是研究解決海岸輸沙可行之方法。試驗結果是否可以採信，完全決定於現場資料可靠性，試驗水池大小及設備，模型驗證更是決定試驗成敗之主要關鍵。

五、定床追蹤模型

定床模型長久以來被認為是研究海岸工程構造物受波浪、潮汐及

海流等作用極有效之工具。近年來認為採用定床模型用少量之追蹤材料研究海岸受波浪及潮汐等作用產生漂沙移動情況，是經濟可靠之方法。實際上這種研究屬於定性試驗而決非定量試驗。

六、模型試驗實例

(一)計畫概述：中國石油公司考慮以台中港作為液化天然氣，以下簡稱 *LNG*，轉運站，為配合 *LNG* 特種船舶進出港口，除辦理船模試驗（委託荷蘭船模試驗室辦理）及遮蔽試驗外，為了解防波堤佈置變更後，對漂沙沖淤影響進行漂沙檢核試驗，以獲致防浪、防沙俱佳之佈置。

(二)試驗單位：港灣技術研究所。

(三)試驗報告：台中港外廓堤防漂沙模型檢核試驗研究報告，民國 71 年 5 月，張金機、黃清和。

(四)試驗期間：70 年 5 月 1 日至 70 年 10 月 31 日。

(五)試驗內容：此項檢核試驗主要包括下列三個項目：

1. 佈置 *A* 試驗：如圖 5—2，初期地形採用 60 年水深測量圖，此種佈置為原台中港漂沙試驗佈置 I 及 II 之折衷，除以 $N 15^{\circ} E$ 波試驗外，針對 *N* 向波浪再進行試驗。

2. 佈置 *B* 試驗：佈置如圖 5—3，採用現有外廓堤防佈置，北防波堤沿航道方向延長 600 公尺，*LNG* 碼頭設於港內，地形採用 68 年水深測量圖。

3. 佈置 *C* 試驗：外廓堤防佈置如圖 5—4，北防波堤沿斜線方向延長 600 公尺，南防波堤向南平移 750 公尺，*LNG* 碼頭設於港外，試驗初始地形採用 68 年水深測量圖。

(六)試驗模型：試驗水池長 60 公尺，寬 43 公尺，設有 30 公尺長造波機一台，潮汐自動控制儀一台，以模擬海上波浪、潮汐現象。模

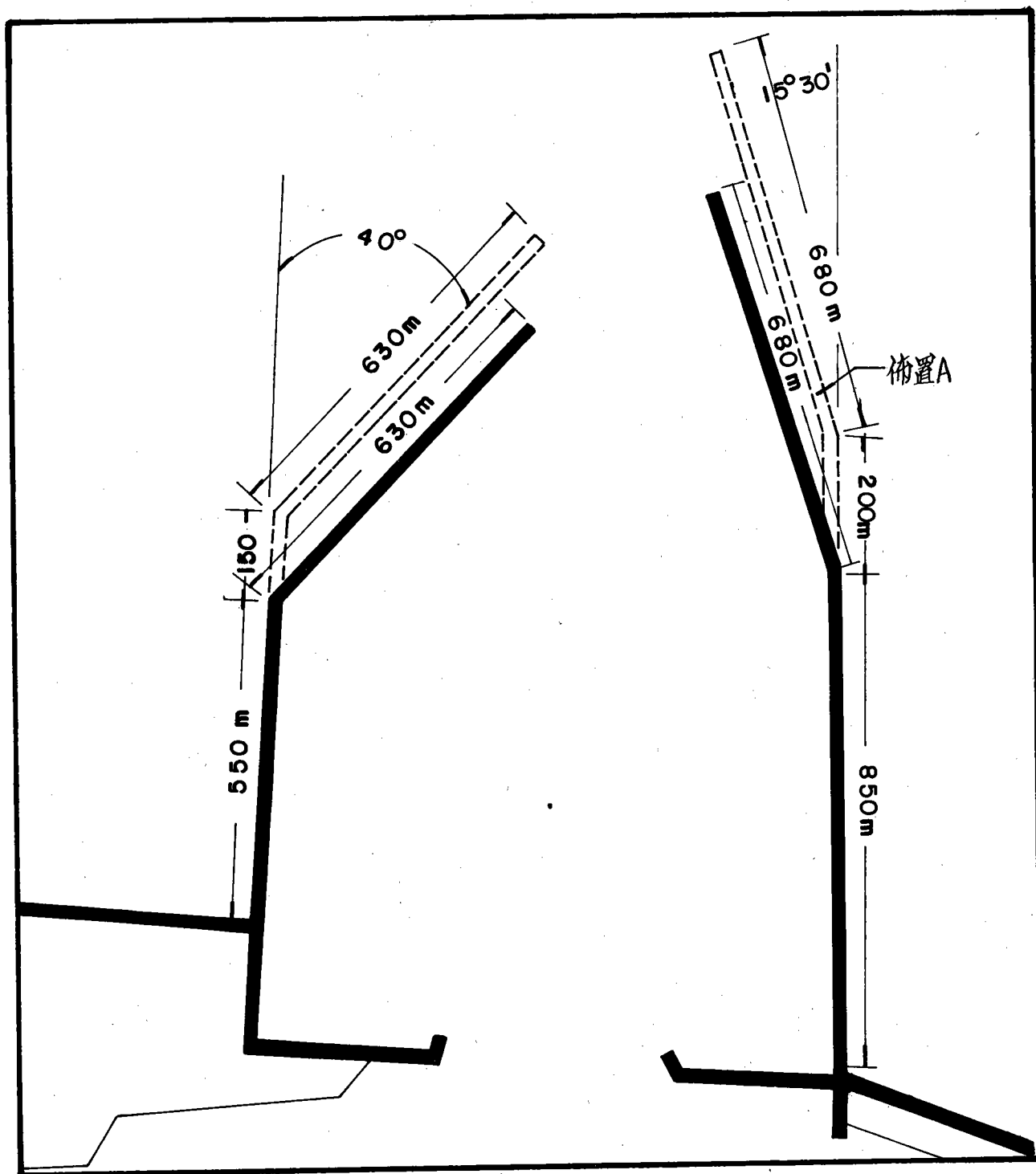


圖 5-2 佈置A外廓提防佈置

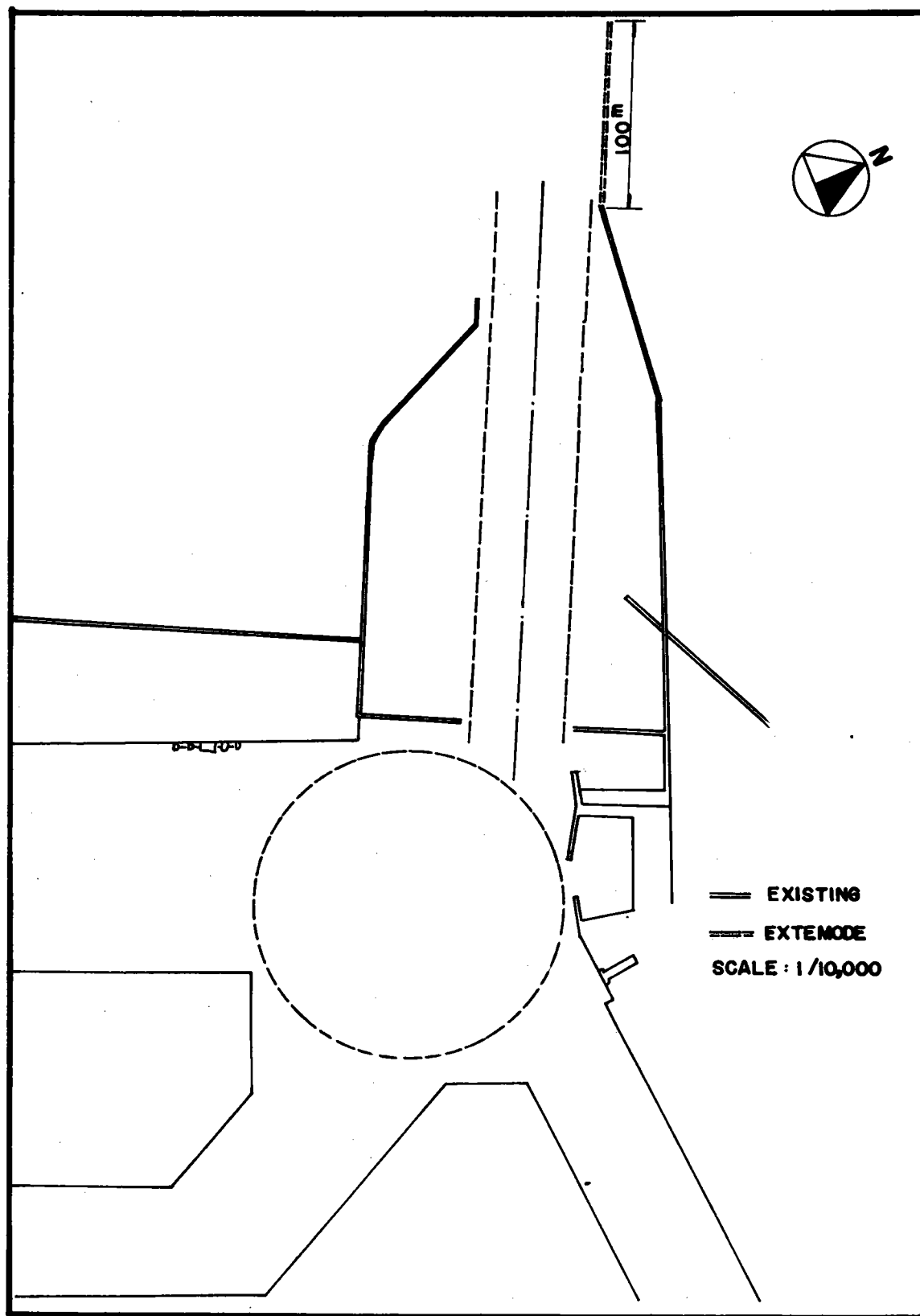


圖 5—3 佈置 B 外廓堤防佈置

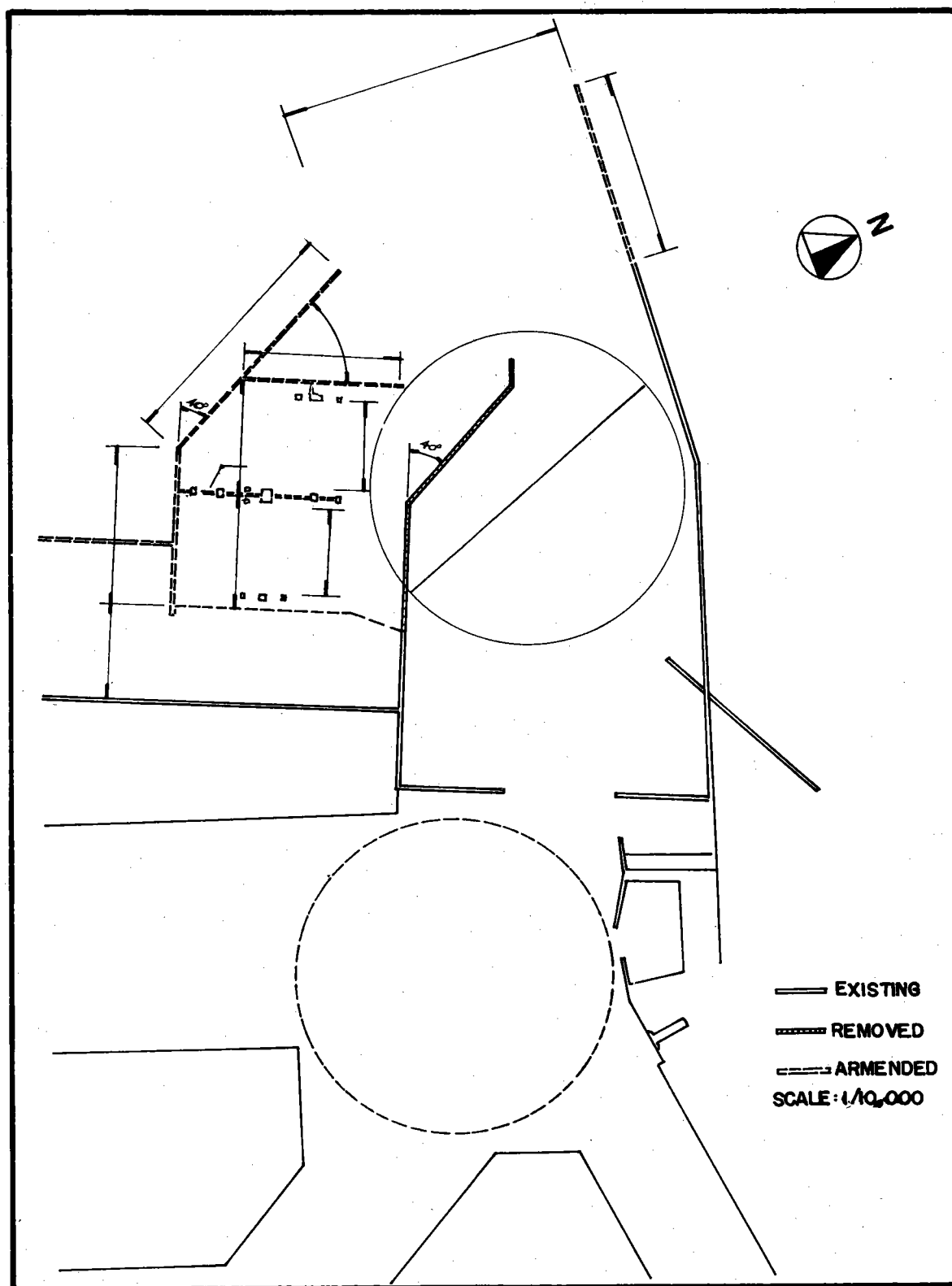


圖 5-4 佈置 C 外廓堤防佈置

型垂直縮尺採用 1/100，水平縮尺為 1/500，潮汐時間縮尺為

$\frac{1}{100} / \sqrt{\frac{1}{500}}$ 。模型範圍北自大甲溪口北岸，南至大肚溪口南岸，涵

蓋約 15 公尺海岸，西至水深 25 公尺處。除陸地外全採動床模型。

(七)試驗結論：綜合上述三種佈置將試驗結果摘要列表如表 5—3

表 5—3 各種佈置試驗結果

佈置	A	A	B	C
初期地形	60 年	60 年	68 年	68 年
波向	N 15° E	N	N	N
模型定值漂沙增加率 (m^3/hr)	115×10^4	230×10^4	260×10^4	300×10^4
換算實地量漂沙增加率 (m^3/yr)	67×10^4	92×10^4	104×10^4	120×10^4
港口淤積顯著時間(分)	1920 以上	1560	1440	1440
土沙增加呈穩定時間(分)	800	480	120	240
換算年數(年)	32 以上	45	55	50
備註	試驗未完			

由上表可得結論如下：

1. 佈置 A，N 15° E 及 N 向波浪試驗結果分別如圖 5—5 及 5—6，N 向波浪較能符合台中港現場漂沙量。

2. 佈置 B 及 C 試驗結果，土沙堆積情形分別如圖 5—7 及 5—8，北防波堤沿航道方向延長 600 公尺，可增加港口壽命 18 年。佈置 C，北防波堤沿斜線方向延長 600 公尺，增加壽命 13 年。

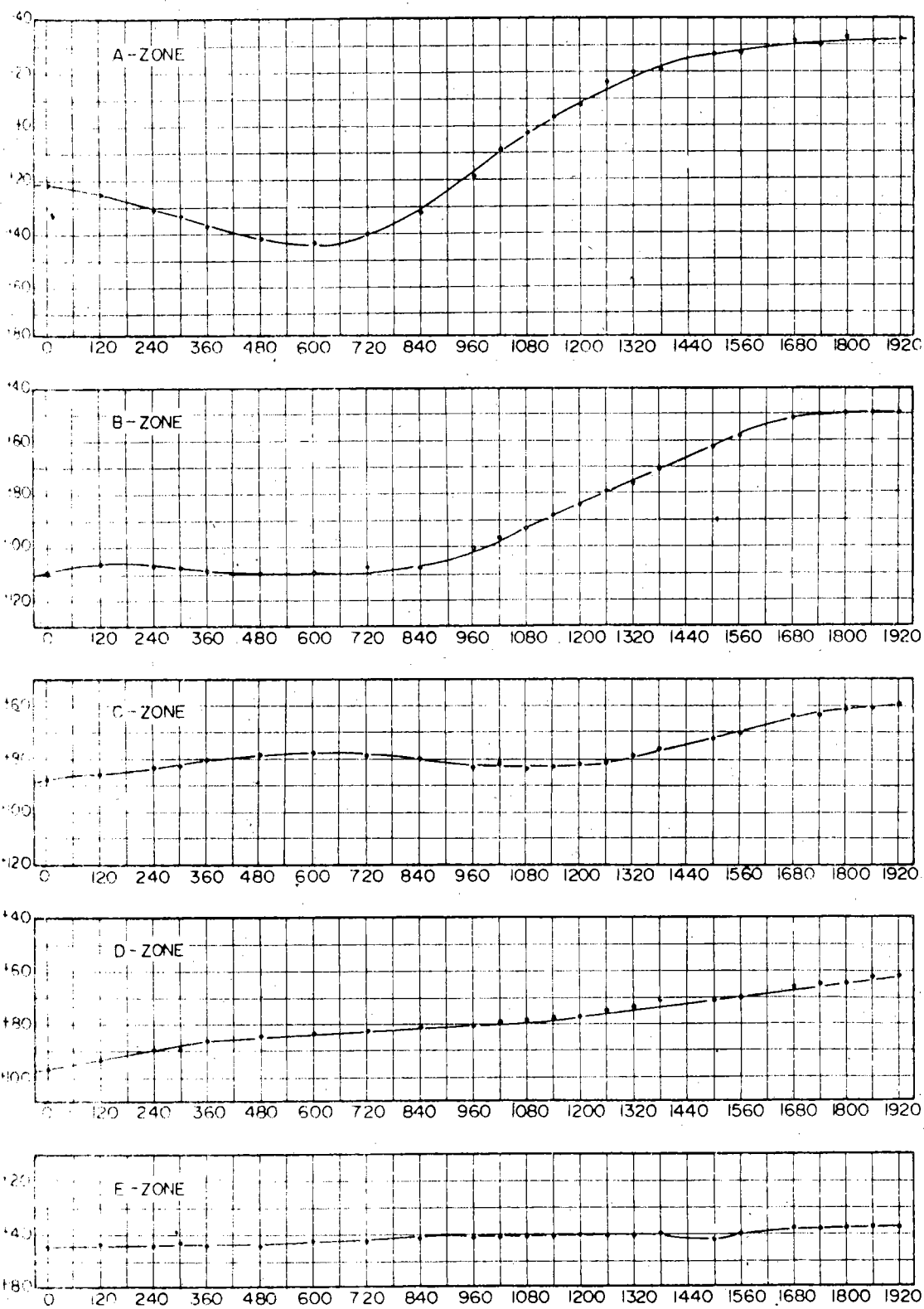
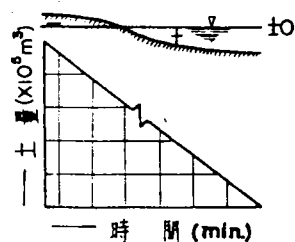
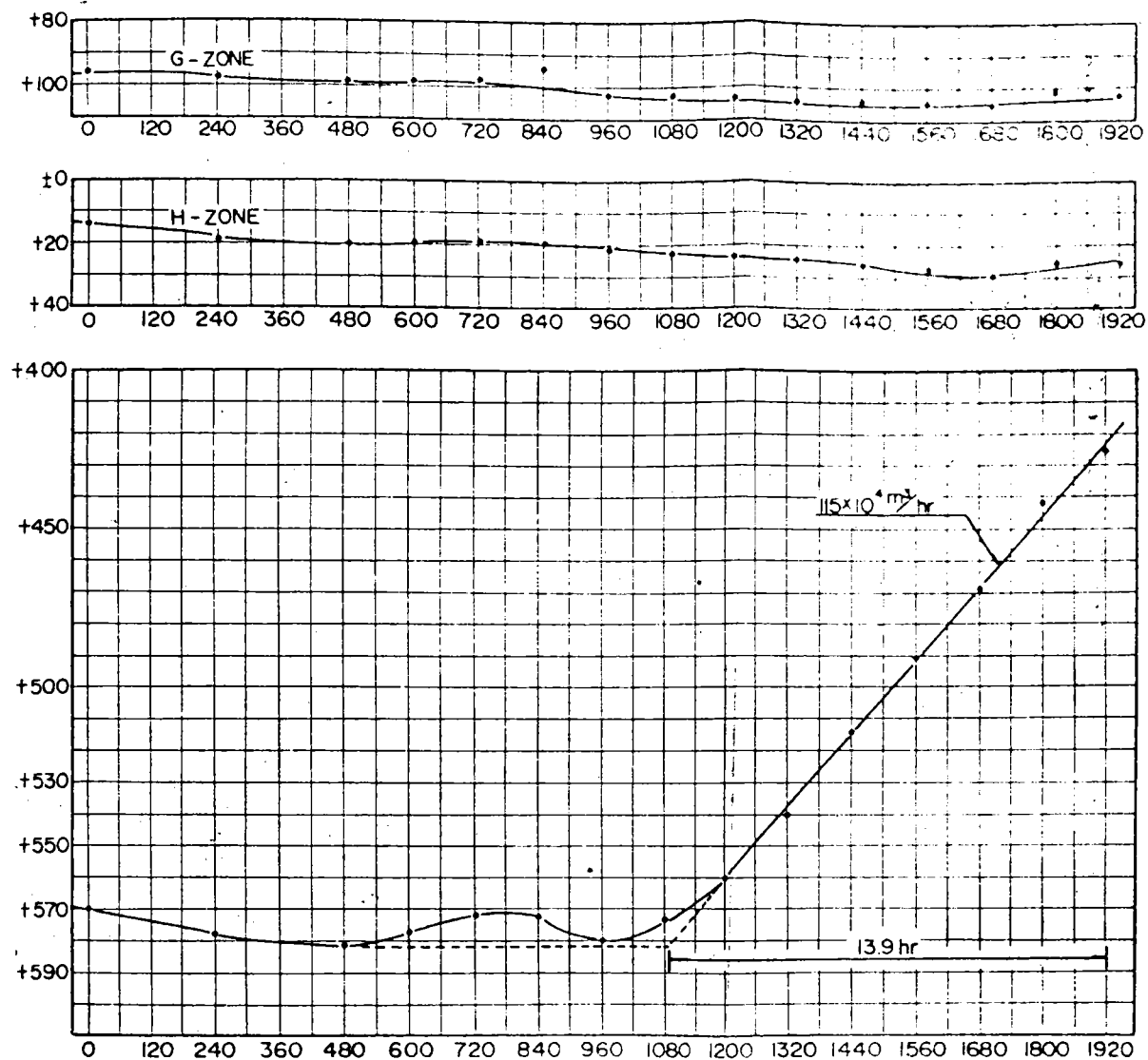


圖 5—5 (a) 佈置 A $N15^{\circ}E$ 向波浪防波堤附近各區土沙堆積量



波浪作用時間：1920min.
 波高：5m.
 週期：12Sec
 波向：N15°E
 潮位：潮望平均潮位

圖 5—5 (b) 佈置 A N15° E 波浪防波堤附近土沙堆積總量

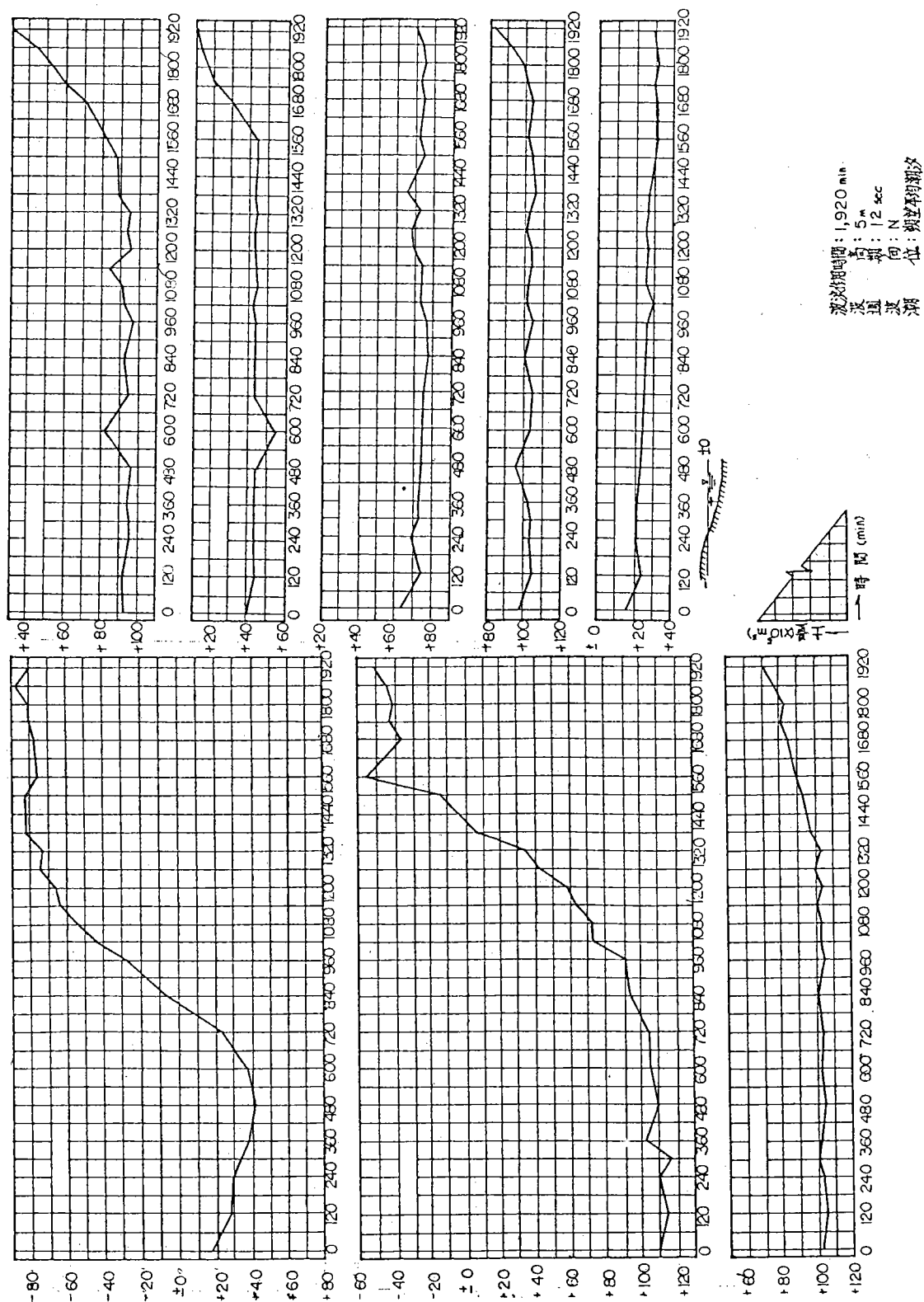


圖 5—6 (a) 佈置 A N 向波浪防波堤附近各區土沙堆積量

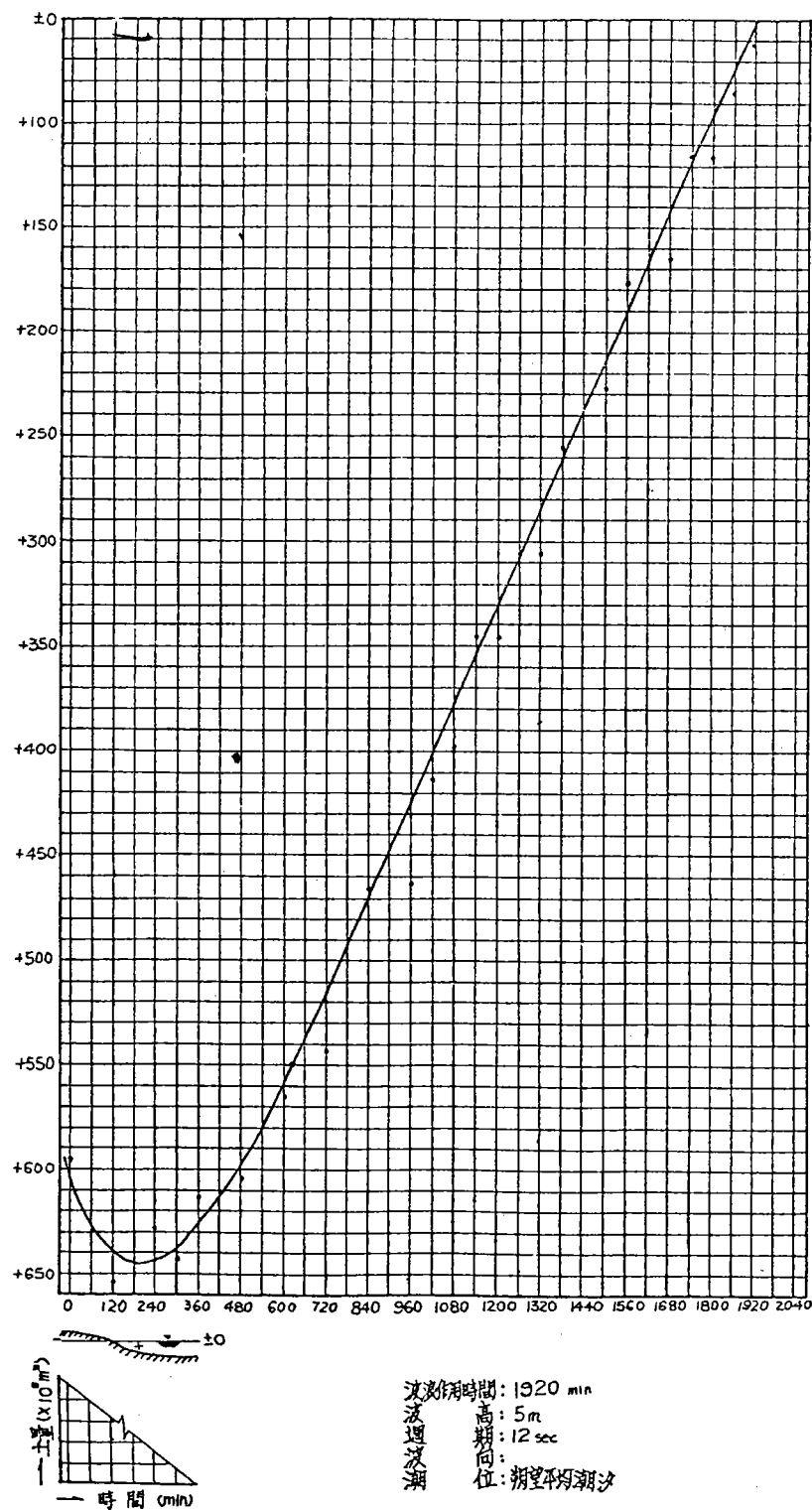


圖 5—6 (b) 佈置 A N向波浪防波堤附近土沙堆積總量

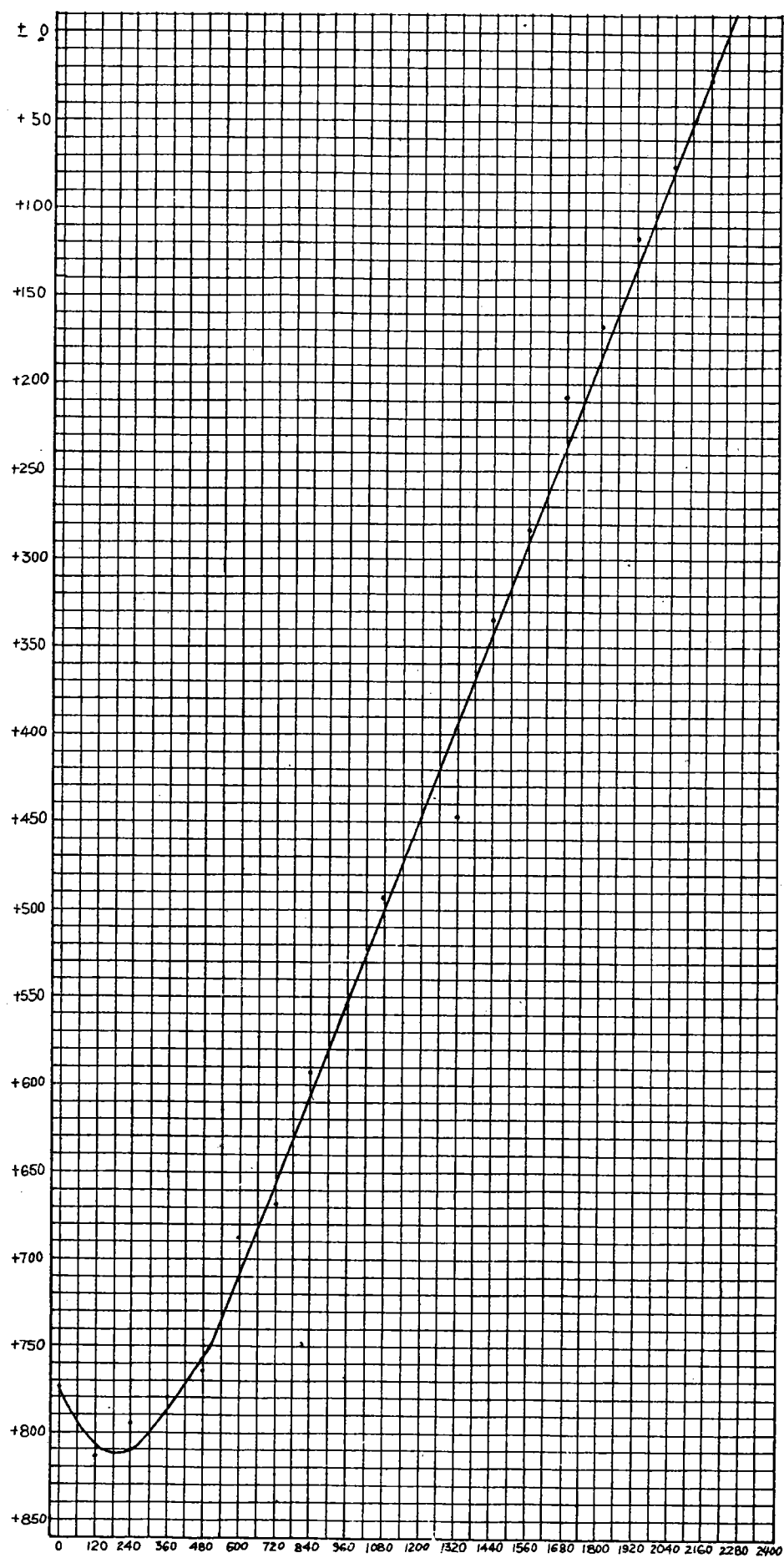


圖 5—7 (b) 佈置 B N 向波浪防波堤附近土沙堆積總量

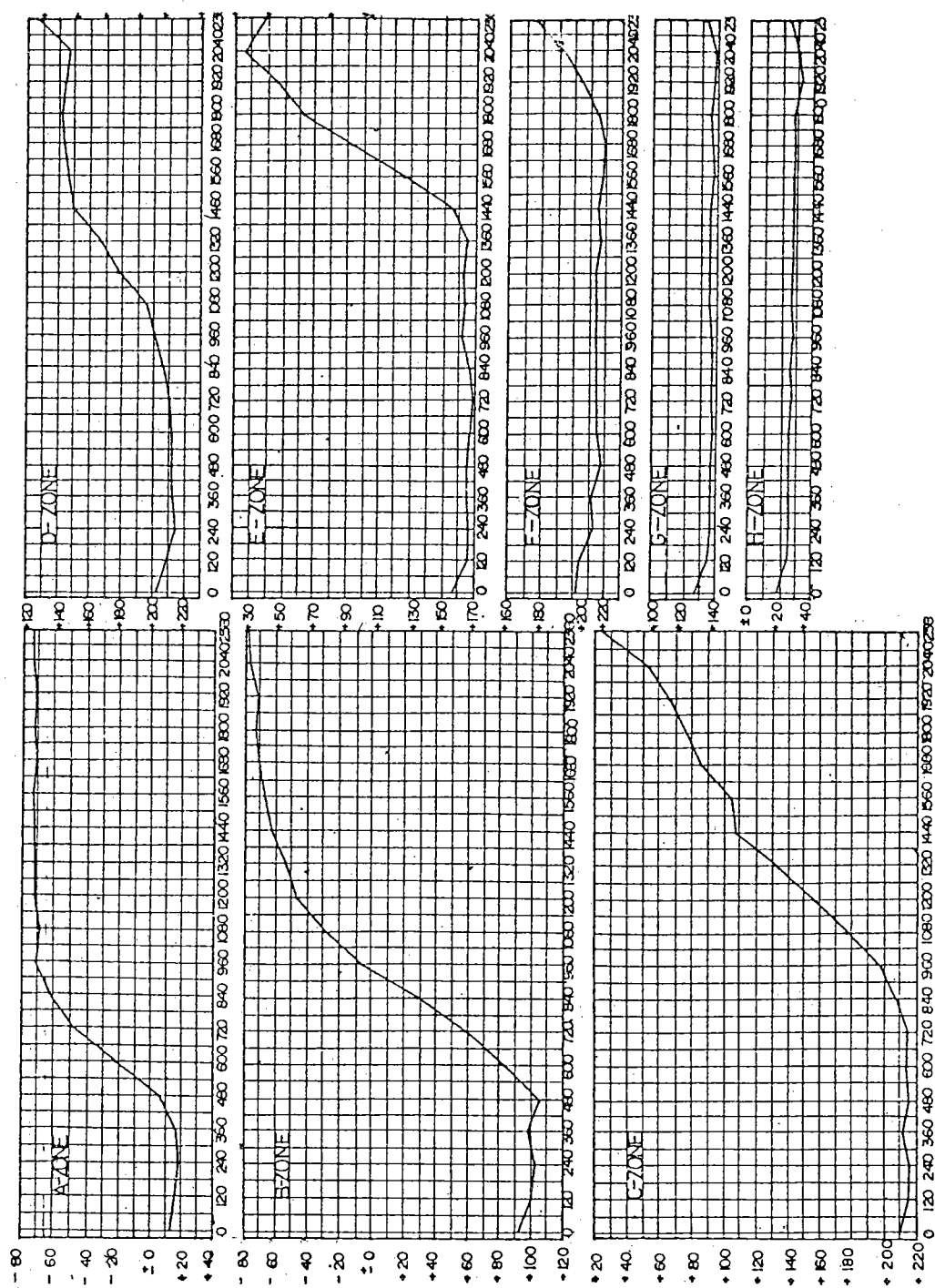


圖 5—8 (a) 佈置 C N 向波浪防波堤附近各區土沙堆積量

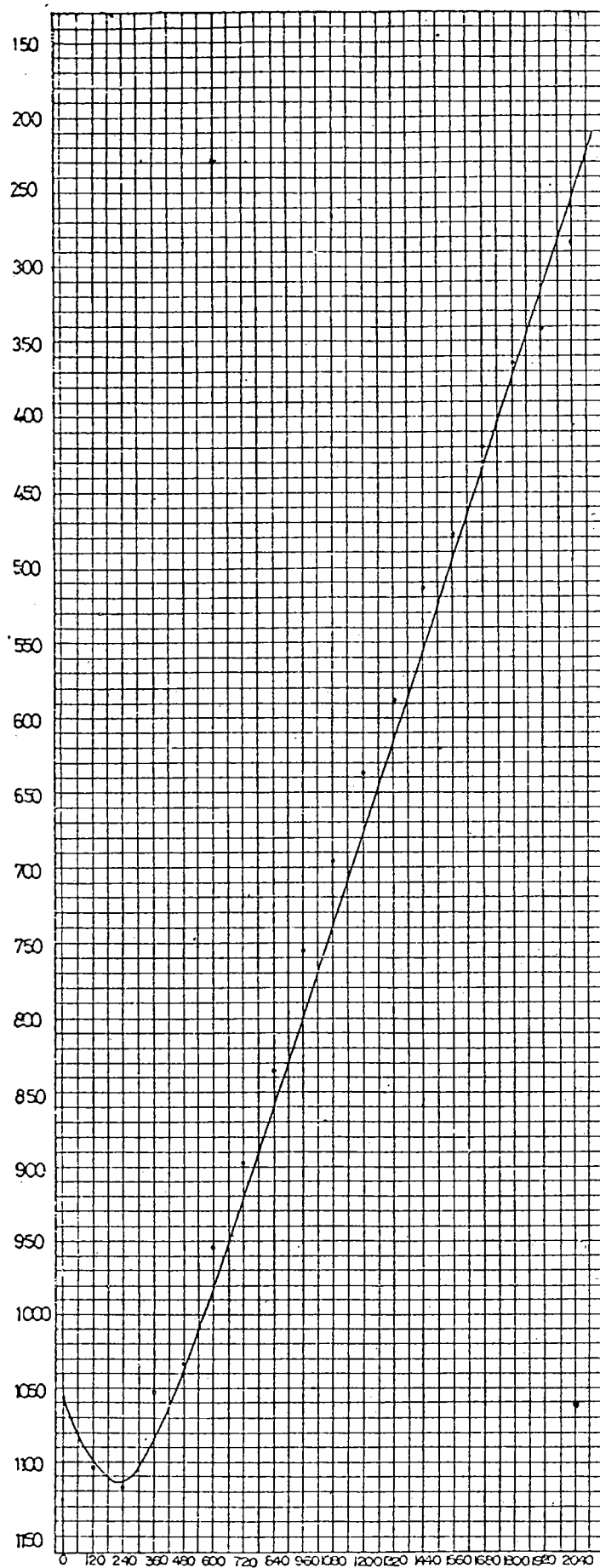


圖 5—8 (b) 佈置 C N向波浪防波堤附近土沙堆積總量

第六章 河口水工模型試驗

一、概述

河口係指河川受潮汐漲落影響之下游段，廣義之河口則包括海灣、河川、海港引道、海峽及三角洲地帶蜿蜒河道等。河口附近均具有極豐富之資源，如何保護河口資源且善用河口水力而不導致任何水患成為今日水利工程上重要之課題。由於河口水力問題所涵蓋範圍極廣，邊界條件複雜，純理論解析困難，而水工模型試驗不失為解決這種問題之有效途徑。

將河口原型依據模型律製作成相似模型，經過驗證、試驗，以瞭解原型上各種現象，作為規劃設計之參考。雖然模型上縮尺的影響，不可能重視原型各種水力特性，但最少可以獲得設計上所需之參考資料。故模型試驗可以說是規劃設計之輔助工具。

河口水工模型問題中，潮汐作用為主要外力。除此之外，河川水流、風浪、暴風湧浪亦為重要之因素。所有的河口模型均不能完全模擬整個潮汐漲落所引起之複雜現象。模擬原型使模型上重現原型水力特性，須注意下列幾種重要因素。

(一)水位高度

(二)水流大小及方向

(三)含鹽度

(四)沉積質物理特性，沖淤及輸送現象

(五)水質參數如含氧量、溫度、黏滯度、污染擴散等

(六)風揚、波浪及水流混合、擴散等影響

(七)河口淡水及海水紊流引起之混合現象

在模型上無需模擬上述全部現象，有些因素對所要研究之水力問

題影響不顯著，而可忽略。設計此類模型，首先應選擇重要因素加以模擬。因尚無數學公式足以涵蓋河口模型中極複雜之相互關係變數，故在模型完成後必須利用所搜集之原型資料加以驗證，使製之模型能達到所需之精度。

物理模型經過驗證修改後，在河口上計畫興建構造物所造成影可以獲得相當準確之定量結果。可行性較高之河口水工模型試驗可分為下列類型。

- (一) 航行需要興建新渠道或浚挖原有河道
- (二) 為解決漂沙問題，興建河堤，導流堤、沉沙井及排沙引導 (*Sand Bypassing*) 等設施所引起之影響。
- (三) 興建水庫、水壩以減少洪水損害，解決給水問題。
- (四) 浚挖感潮水道或改善原有水道以利船隻航行。
- (五) 興建攔柵控制暴潮所引起之洪患。

二、模型相似性關係

重力為潮流主要外力，福祿得數相等為達成模型與原型相似之必要條件，即

$$\frac{V_m^2}{g_m L_m} = \frac{V_P^2}{g_P L_P}$$

不等縮尺模型，水深為線性特徵長度 (*Characteristic Length*) 如果河道較狹窄則可以水力半徑 (*Hydraulic Radian*) R 代替水深。

$$\frac{V_r}{(g_r L_{vr})} = 1 \quad (6-1)$$

根據 *Harleman* (1971) 對一維河口潮汐運動之連續及動量公式為

$$b \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} - q = 0 \quad (6-2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + U \frac{\partial Q}{\partial X} + Q \frac{\partial U}{\partial X} + g \frac{\partial h}{\partial x} A + g \frac{Q |Q|}{A C_h^2 R} = 0 \quad (6-3)$$

將 (6-3) 式化為無因次，則上式每一項無因次關係式模型與原型必須相等。Harleman(1971)證明上式第四、五兩項無因次係數分別為

$$\frac{1}{F} \quad \text{及} \quad \frac{g L_h}{C_h^2 L_v}$$

C_h 為 Chezy 係數，模型與原型係數必須相等

$$V_r = (L_v)_r^{1/2} \quad (6-4)$$

$$Q_r = (L_h)_r (L_v)_r^{3/2} \quad (6-5)$$

$$T_r = (L_h)_r (L_v)_r^{-1/2} \quad (6-6)$$

由第二組係數

$$\frac{g_r (L_h)_r}{(C_h)_r^2 (L_v)_r} = 1$$

$$(C_h)_r = \left[\frac{(L_h)_r}{(L_v)_r} \right]^{1/2} \quad (6-7)$$

由曼寧公式 (Manning Formula) 其粗糙度係數

$$n_r = \frac{(L_v)_r^{2/3}}{(L_h)_r^{1/2}} \quad (6-8)$$

不等縮尺比

$$D_f = (L_v)_r (L_h)_r \quad \text{則}$$

$$n_r = \frac{(L_v)_r^{2/3} (L_h)_r^{2/3}}{(L_h)_r^{2/3} (L_h)_r^{1/2}} = D_f^{2/3} (L_h)_r^{1/6} \quad (6-9)$$

不等縮尺比 D_f ，對曼寧粗糙度 (Manning roughness) 之影響如圖

圖 6-1，主要縮尺列如下表

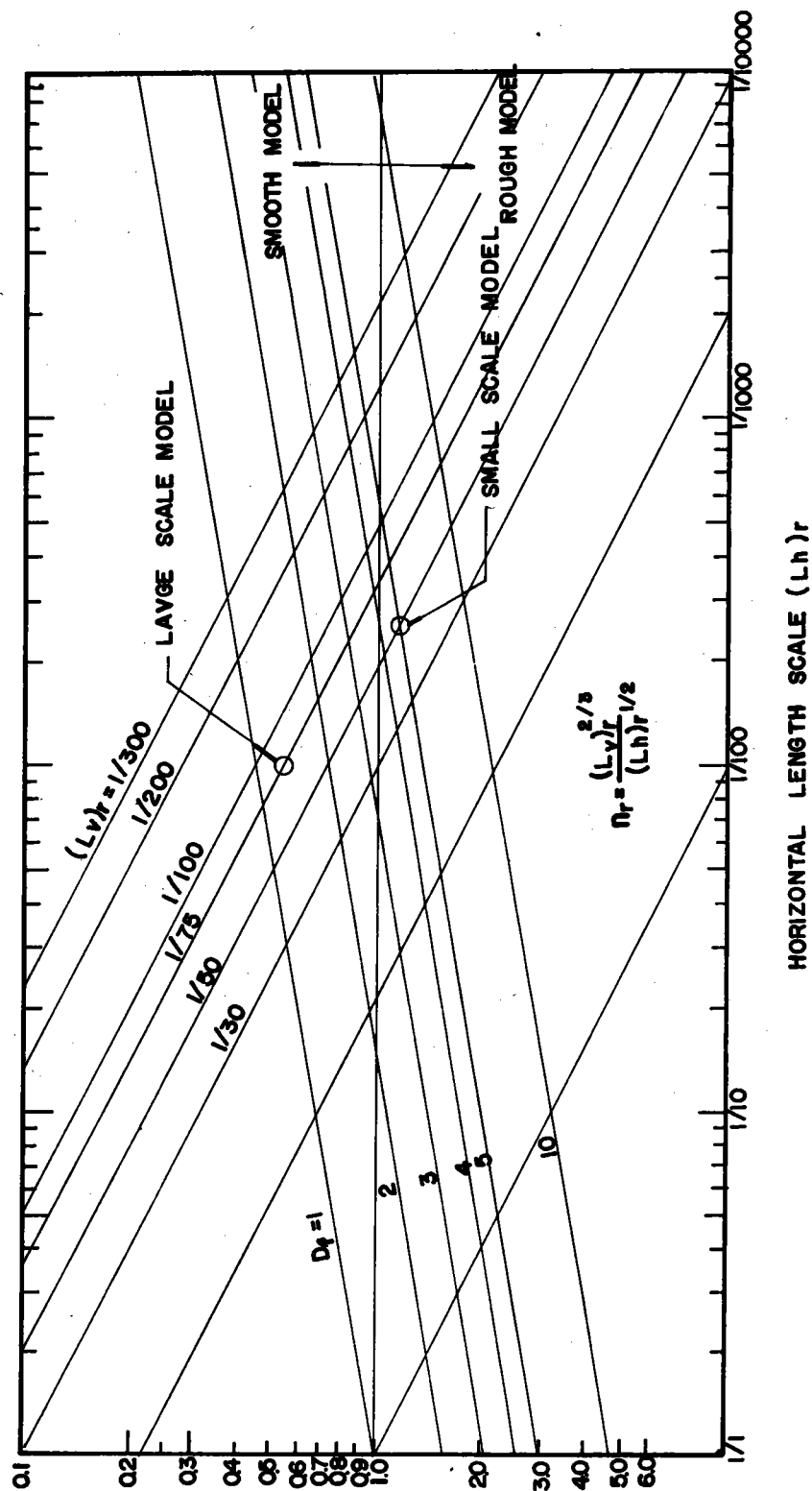


圖 6-1 水平縮尺, 粗糙度比及 n_r 之關係

$(L_v)_r$	$(L_h)_r$	D_f	n_r
1/100	1/100	1	0.464
1/100	1/1000	10	1.47
1/100	1/2000	20	2.08

因上述關係可知模型上不等縮尺比愈大，則模型上粗糙度亦需增大。較大之不等縮尺比模型上邊界粗糙度往往不足，必須利用鐵片增加其所需粗糙度。

不等縮尺模型，混合式河口之含鹽度（或密度）比，*Keulegan* (1951.1966) 曾證明應採用 1.0，即

$$S_r \text{ (or } \rho_r) = 1.0 \quad (6-9)$$

但 *Harleman* (1971) 則建議，較明顯之層時時，含鹽度縮尺採用 1.0，否則可依據理查遜數 (*Richardson Number*) 求得

$$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_r = 1.0 \quad (6-10)$$

上述條件當密度比為 1.0 時，可同時獲得。

Harleman (1971) 根據一維質量傳輸公式

$$\frac{\partial s}{\partial t} + U \frac{\partial s}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(A E' \frac{\partial s}{\partial x} \right) \quad (6-11)$$

上式 E 為擴散係數，在顯著之垂直比降地區，擴散係數縮尺 (*Dispersion Coefficient Scale*) 可利用觀察分析無因次係數 $E/U L$ 求得。則擴散係數比為

$$\begin{aligned} E'_r &= U_r (L_h)_r = V_r (L_h)_r \\ E'_r &= (L_v)^{1/2} (L_h)_r \end{aligned} \quad (6-12)$$

在含鹽度引起密度比降地區，利用現場觀測資料，校證模型上含

塩度，可以在模型上獲得相當正確之擴散重現。然而，在均勻密度地區（無縱向及垂直向含塩度比率），*Harleman* (1971)，*Fischer* 及 *Holly* (1971) 利用上述觀察方法決定所需擴散係數，與垂直及水平分佈情相抵觸。由 *Taylor-Elder* 公式

$$E_L = 5.9 d (g R S_E)^{1/2} \quad (6-13)$$

上式中 d 為水深， R 為水力半徑， S_E 為能量比降。*Harleman* (1971) 證明此種情況擴散係數比為

$$(E_L)_r = (L_v)^{1/2} / (L_h)_r^{1/2} \quad (6-14)$$

設模型上水平縮尺為 1/1000，垂直縮尺為 1/100，則由 (6-12) 式 $E'_r = 1/10,000$ ，而由 (6-14) 式 $(E_L)_r = 1/316$ 。

上述分析並未考慮不等縮尺模型經常使用之土工粗糙度。該人工粗糙鐵片產生之旋渦相當於現場上 30 至 40 公尺直徑所製造之大型混合。*Fischer* 及 *Hanamura* (1975) 證明粗糙鐵片對動量變化造成之影響遠較模型上邊界剪力為大。從模型試驗所得結果，可以證明粗糙鐵條對流速分佈之影響極大。因之擴散係數可以視為粗糙鐵片之函數。模型與原型間橫向混合可利用人工粗糙條及配合流速獲得相當滿意之結果。但要達到此目的，必須根據現場資料與模型製作調整。

近場 (*Near field*) 熱量排放主要控制於排放區附近動量注入，噴嘴慣性遠較密度差重要。三度空間噴嘴在不等縮尺模型上無法模擬，如果垂直向擴散極為重要時，不等縮尺模型在近場不能直接重現原型。

遠場 (*Far field*) 熱擴散決定於水面所受水流之影響，不定常狀態下，熱對流能量守恒公式為

$$U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (E_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (E_z \frac{\partial T}{\partial z})$$

(6-15)

上式中 U , V , W 分別為 X , Y , Z 向之流速

T 為熱流

E 為擴散係數

利用觀察法

$$(E_x)_r = (E_y)_r = U_r (L_h)_r = (L_v)_r^{1/2} (L_h)_r \quad (6-16)$$

$$(E_z)_r = \frac{V_r (L_v)_r^{1/2}}{(L_h)_r} = \frac{(L_v)_r^{5/2}}{(L_h)_r} \quad (6-17)$$

不等縮尺流速縮尺通常採用 $V_r (L_v)_r^{1/2}$

在均勻混合之水中，自由水面熱量損失 *Stozenlach* (1971) 及 *Zitta* 與 *Douglas* (1975) 均建議採用

$$\rho C V \frac{\partial T}{\partial t} = -KA(T - T_e) + H$$

式中 ρ 為水之密度， C 為水之比熱， V 為體積， K 為水表面熱量交換係數， T_e 為等值溫度 (*Eguilibrium Temperature*) H 為輸入水中熱量。

表面熱量交換係數縮尺為

$$K_r = \frac{(K_v)_r^{3/2} (\Delta \rho / \rho)_r^{1/2}}{(L_h)_r} \quad (6-19)$$

因 $(\Delta \rho / \rho)_r$ 通常採用 1.0，故上式寫成

$$K_r = \frac{(L_v)_r^{2/3}}{(L_h)_r} \quad (6-20)$$

如模型上 $(L_h)_r = 1 / 1,000$ ，而 $(L_v)_r = 1 / 100$ ，則 $K_r = 1.0$

根據水平縮尺製作，則樁間開孔變小，水流直接受樁表面張力影響。

根據以往美國陸軍工程師團水工試驗室 (*WES*) 經驗，此種結構物採用垂直縮尺製造較為適當。

短週期波浪作用不能正確的重現在不等縮尺河口水工模型上。在模型上製造短週期波主要在模擬波浪能量在模型上對沉積物浮游及移動之影響。模型上製造波浪特性則需根據試驗調整而獲得，而原型波浪資料僅供作參考而已。

河口水工模型試驗無法模擬吹風所造成之影響，對污染物擴散試驗中因時間所造成之減衰亦無法加以考慮。因此，辦理此種試驗所獲得之結果必須利用解析法，考慮各種因素加以校正。此外熱擴散係數亦無法在模型上模擬，亦需用解析法加以調整。

四、模型範圍及現場資料

(一) 模型範圍

河口水工模型製作範圍，首先需考慮的是河口上游及海洋對此試驗研究有效地區。因此對上游（河川）及下游（海洋）邊界點之選定，可能是一個辦理試驗者最困難處。而任何人亦無法預估模型上邊界點之潮汐、水流及含鹽度等。因此模型範圍之選定往往較實際影響範圍為大，以便利用原型資料核核。

(二) 現場資料

河口水工模型因受縮尺及模型上人工粗糙度影響，要精確的重現原型現象必須利用大量之現場調查資料校核、印證。試驗過程中，原形各種現象之重現校核工作，較之模型製作更為重要。例如，沉積現象是根據試驗調整（*Trial & Error*）方法，以便在模型上重現堆積或冲刷之型態，而非曾有人嘗試求得沉積物之實際縮尺，或利用解析方法求得沉積物試驗之時間縮尺。

原型測量根據河口及研究問題之特性而不盡相同，但大部份河口模型所需現場資料包括水深測量，陸地測量、潮汐、流況、含鹽度、淡水流量、淤淺率及型態等。此外波浪分佈、色液及熱之擴散情形等

亦經常列入調查事項。

為證實模型試驗結果對各種潮位及淡水流量均屬有效，在各種潮位及淡水流量等均需列入調查測量，茲將各種調查概述如下：

1. 水深測量：模型製作範圍內辦理水深測量以作為製作模型之依據，水深至少測至 20 公尺，平緩地形測線間距採用 100 公尺，地形變化較大地區則視需要增加測線，測量結果繪製等深線圖。

2. 地形測量：地形測量最主要地區為平均高潮位附近地形。一般可測至平均高潮位以上 3 - 5 公尺，如研究之主要目的在於暴潮引起之淹水防治，則可能受淹水地區均需施測。

3. 潮汐觀測：主河道及重要支流均需選定適當地點辦理潮汐觀測，河口站最好能設在較深之海洋中，以瞭解河口是否發生阻流現象，通常潮汐觀測時間需較流速、含鹽度為長。

除上述三種最基本之現場資料外尚有

4. 流速及流向觀測

5. 含鹽度觀測

6. 淡水流入量觀測

7. 色素擴散調查

8. 熱擴散調查

9. 沉積物調查

四、模型製作

(一) 製作步驟

模型製作方法有好幾種，通常採用方法有斷面法、等高線法及網格點高程控制法。

斷面法係依水深測量圖在模型上每隔 50 公分至一公尺。

河口沉積物輸送過程非常複雜，至今這方面知識仍非常貧乏，模

型試驗上沉積物相似性未能獲得，因此模型上沉積物傳輸之相似性必須根據經驗及重複試驗以獲得原型資料重視。

雖然模型縮尺可利用解析方法求得，但如不能比較模型與原型資料，至今仍不能肯定縮尺模型重現原型流況之可靠性，故辦理水工試驗，模型驗證是重現原型資料最重要的一環。

(二) 選定模型縮尺

辦理各種不同之模型試驗研究，所採用之「理想」或「理論」縮尺，經常與實際情況抵觸。例如，一般解析與經驗證實表面熱量變化擴散研究之理想縮尺，水手為 $1/1000$ 垂直為 $1/100$ 。然而在動床試驗中採用最大不等縮尺比通常為五倍。因之模型設計者必須具備相當程度之判斷面，方能選擇最佳之模型縮尺。

一般而言，模型縮尺之選擇，係依據經驗獲得。垂直縮尺最小必須足以正確的量測水位外，並需考慮有足夠水深以便在各點測量流速，含塩度等。水平縮尺則需考慮模型造價，以及現有試驗水池能容納之最大模型。不等縮尺模型必須考慮原型現象能在模型上重現而不能太大。

美國陸軍工程師團 (W E S) 辦理水工模型試驗垂直縮尺通常採用 $1/100$ ，在此種模型縮尺下，利用目前市面上試驗儀器可以測定原型 ± 3 公分水面變化。更重要的是此種垂直模型縮尺在模型上可以獲得亂流之最小縮尺。因此垂直縮尺小於 $1/100$ ，甚少被使用。利用 $1/100$ 縮尺，對水深極淺之河口，常導致模型上水深極小而受毛細現象影響。而且流速太小，亦無法利用一般流速計測量。在此情況下只有將垂直縮尺增加至 $1/60$ 或 $1/80$ 。

水平縮尺通常採用 $1/300$ 至 $1/2000$ ，主要決定於試驗研究問題之特性，可使用水池大小及造價等，因模型所佔面積與縮尺成平方關

係，如加倍模型縮尺則所需面積增加為四倍。

選定模型縮尺先定垂直縮尺，水平縮尺則根據容許不等縮尺比決定，最常採用之模型不等縮尺比為3、5、10甚至20。增大不等縮尺比，可以減少建造費用。如果部份模型可能改為動床時，不等縮尺比採用3或5較為適當。河口水工模型試驗，有時附帶辦理波浪定性試驗，則需採用較小之不等縮尺比模型。定床模型用以辦理潮汐、水流、含鹽度滲入淺水區分佈情形，色液分佈等，不等縮尺比一般採用10，可獲得合理之結果。但在辦理淺水區動床試驗，對波浪定性要求較高，最好採用較小之不等縮尺比。而如果模型試驗純是用以研究不受限制水道之潮汐，環流型態，含鹽度入滲等，則不等縮尺比高達20亦可採用。但根據過去美國陸軍工程師團水工試驗室(WES)經驗，在此種條件下，即使是規則之渠道，亦難以獲得原型流速及含鹽度分佈在模型上重現。

當垂直縮尺選定後，必須檢查模型上潮汐循環中各部位是否均能產生亂流。在模型上如雷諾數(*Reynolds Number*) $R = Vd/\nu$ ，以上大致可以產生紊亂。模型上垂直縮尺需大於1/150，而水平縮尺則基於經濟考慮甚少採用大於1/300以上者。一般而言水平縮尺在1/500至1/1000。

(三) 縮尺之影響

河口水工模型試驗可能發生數種顯之縮尺影響，由(6-7)及(6-8)式可知線性不等縮尺比直接影響模型上所需粗糙度。不等縮尺模型中，粗糙度比隨不等縮尺比增大而增加。大量之人造粗糙體常被用於不等縮尺比較大之模型，如此將破壞整個流況，而不能獲適當之混合現象。但在寬濶、水深較淺、潮差較小之海灣，因水流較小

，混合現象主要是由風所引起，則不等縮尺比影響較不顯著。

水流通過基樁結構，同樣受到縮尺影響，如果模型係先繪製斷面高程變化，利用薄鋁片或厚紙板依斷面剪成模型，將此薄片固定於相關位置，填砂、澆加水、搗實後，上面漫以二至三公分水泥砂漿，再將兩斷面粉平。

等高線法與斷面法相似，先定基準面，將等高線依測量圖形狀佈置於水池上，然後填砂、澆水、搗實，再漫以二至三公分之水泥砂漿。

格點高程控制法，係利用測量圖求得網格高程，在模型上佈置相似網格點，填砂至格點高程以下二至三公分，夯實後慢以水泥砂漿。

平緩地形變化較小，模型上通常以一公尺為一斷面，網格距離亦採一公尺，地形變化較大之處可減少斷面距離。模型製作完成後，必須進水利用等高線加以校核。模型上地形誤差視實際需要決定，但以不超過 0.3 公分為度。

在模型中，各種人工粗糙體常被採用，在較深處，邊界粗糙度往往不足以使原型垂直向含塩度重現，此種情況下，垂直向粗糙體元素常被採用，如銅片條、木條等。常被採用的薄銅片或合金片，寬度視實際情形決定，約為 1/4 吋至 1 吋。為避免干擾表面水流，薄片頂面高以不突出低水位高度為原則。薄片密度，開始寧可插植較密些，通常為 $0.1m^2$ 至 $0.5m^2$ 植一根，在模型驗證時，視時實需要將多餘之薄片折彎或拔除，在淺水或流速較緩地區，由垂直向粗糙體所產生之紊亂，常不足以製造足夠之摩擦。此種情況，經常在水泥未凝結前劃線，使表面粗糙度增加，有時可在模型上放置水泥塊或碎石。模型驗證時，視需要而增加或減少粗糙體。

五、潮汐製造

潮汐製造之造潮機器種類甚多，規劃試驗設備人員必須根據實際需要選定所需類型，人工造潮設備隨時代進步已被淘汰，進而取代的是自動潮汐控制儀。其原理分為利用抽水馬達抽進抽出，利用抽水馬達抽進利用重力排出，及利用重力供水、排水等，其中以後者最佳，茲分別介紹如下：

(一)抽水機抽進抽出型（如圖 6-2）

漲潮時，利用氣壓打開 *A*、*B* 兩控制閥，關閉 *C*、*D* 兩控制閥。水由蓄水池利用抽水機至試驗水池。相反的，退潮時開 *C*、*D* 而關 *A*、*B* 則水經抽水機抽回蓄水池。控制閥 *A*、*B*、*C* 及 *D* 開閉大小可在控制箱調整，而其時間則由兩個計時器控制。潮位變化利用感受器紀錄之。

(二)抽水機抽進，重力排水型（如圖 6-3）

漲潮時利用抽水機由蓄水池將水抽至試驗水池，退潮時則利用重力由試驗水池排回蓄水池，此種系統進水排水僅有兩個控制閥。進水時啟動抽水機，關閉排水閥，排水時關閉抽水機，排水閥打開。潮汐變化由潮位儀自動紀錄。

(三)重力供水排水型（如圖 6-4）

利用抽水機將水由蓄水池抽至恒壓水塔上過多之水則溢出回流入蓄水池。漲退潮可藉調節自動控制閥而獲得，水位由自動紀錄器紀錄。整個完全自動控制之潮汐資料處理系統，包括現地資料之輸入，模型水位變化之回饋等如圖（6-5）。

六、其他重要試驗設施

河口水工模型試驗須具備甚多之設備，方能模擬原型各種因素使其重現於模型上。其中較重要的有潮汐、暴潮湧浪、含鹽度、淡水流入、波浪、水流、熱擴散、沉積物等，茲將含鹽度及流況控制概要說

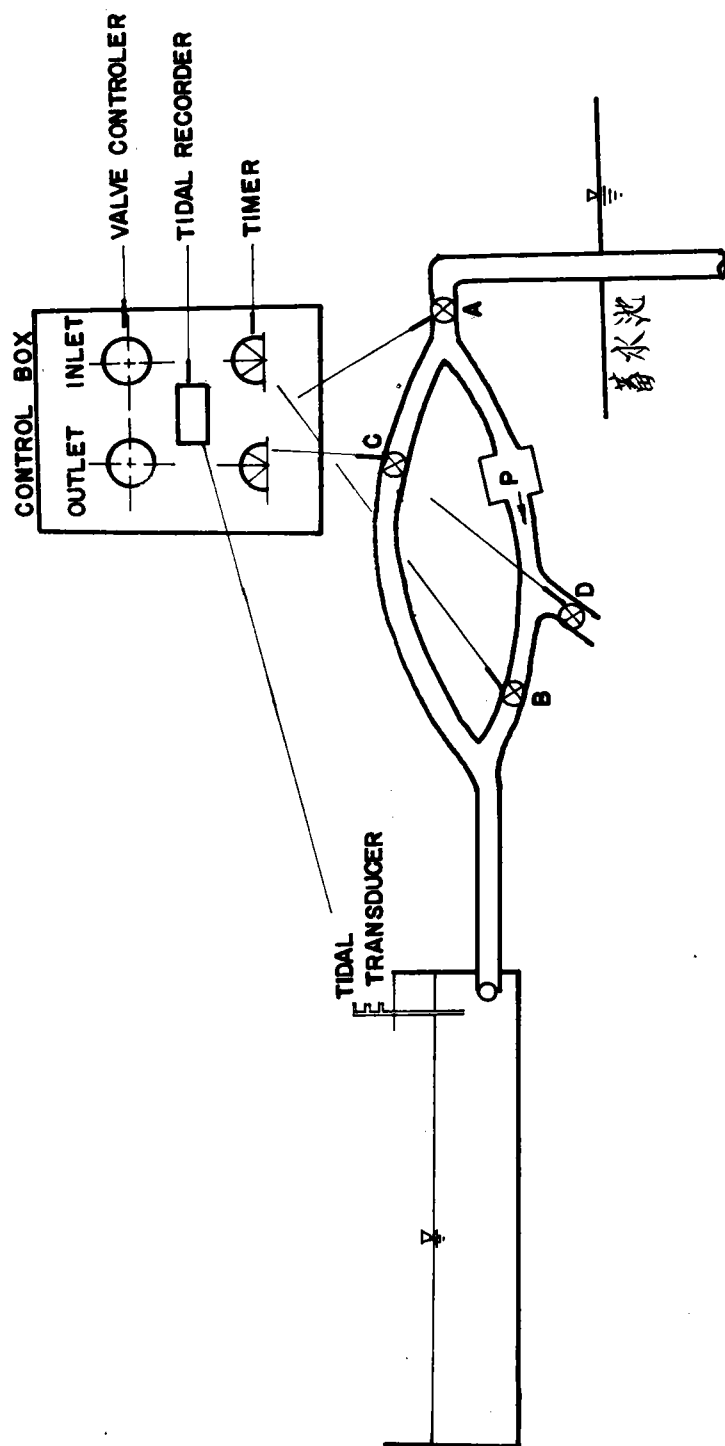
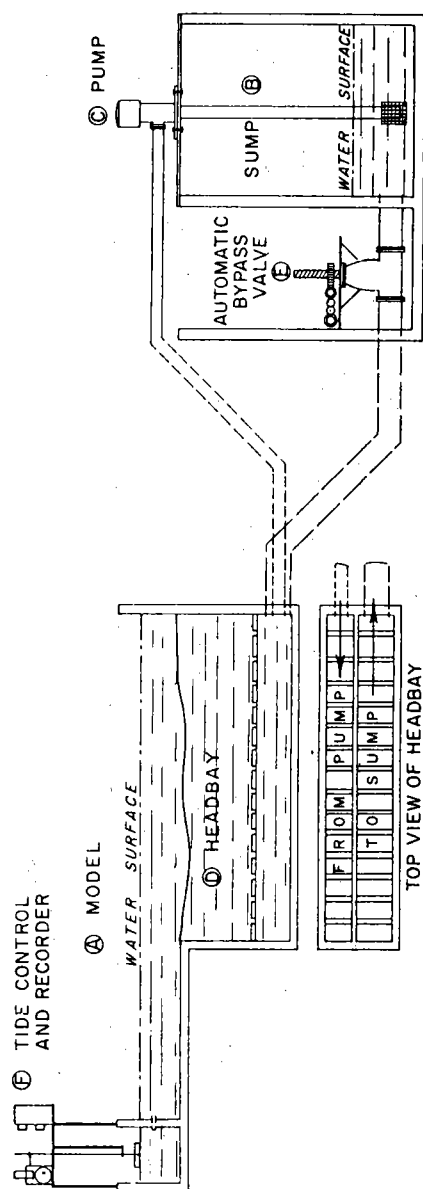


圖 6-2 抽水機抽進抽出型潮汐製遙儀



6—3 抽水機抽進重力排水型潮汐製造儀

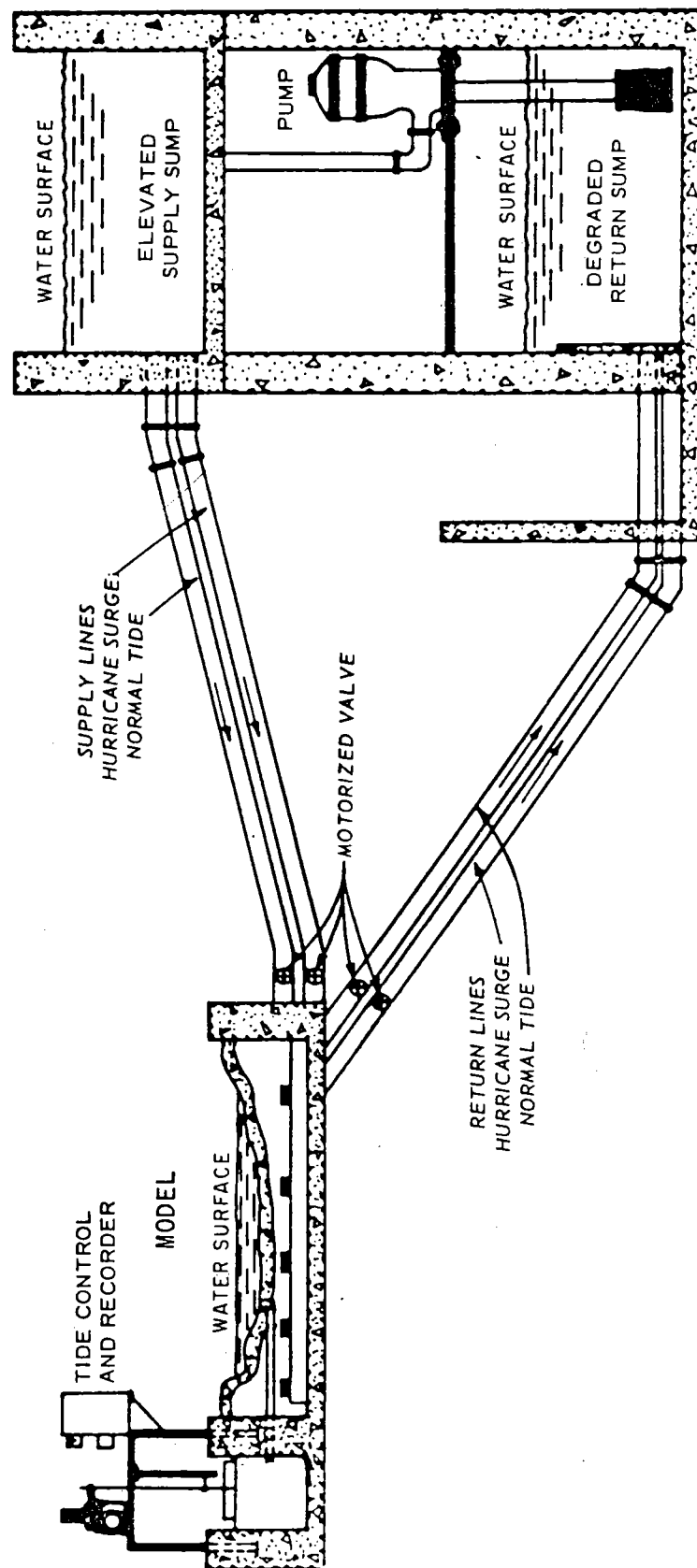


圖 6—4 重力供水排水型潮汐儀

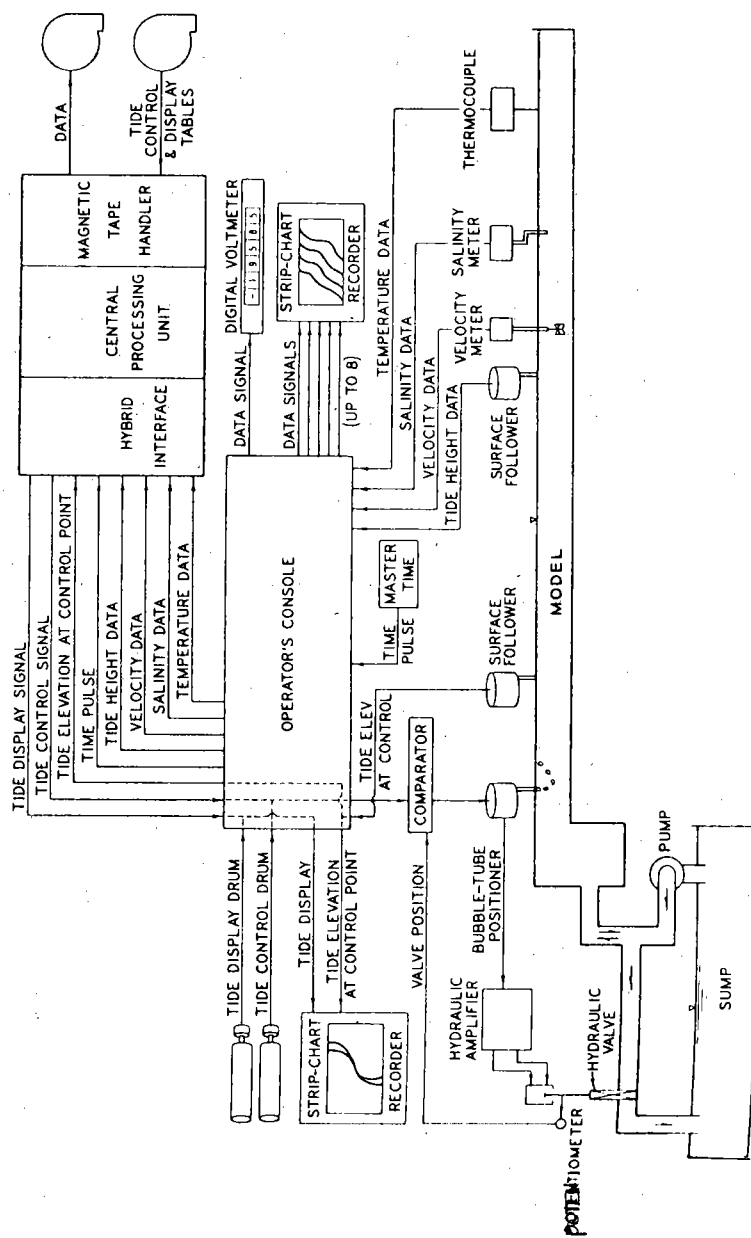


圖 6—5 潮汐自動資料處理系統

明如下。

(一)含鹽度控制

河口試驗淡水須自上游注入，在模型內當其往下流時與海洋交會混合成鹽水。為使試驗水池能保持一定之水量在模型上海洋測須將同等水量排出。因為排出的水含有鹽分不能再使用，故以廢水排掉。如此試驗水池內含鹽度勢必隨淡水加入而逐漸淡化。因之廢水排出之鹽份必須補充。大都數河口淡水流入量甚小，故鹽份補充可拋入結晶鹽或直接加鹽補充。淡水流入較大之河口，可利用國際鹽公司 (*International Salt Company*) 發明之 *Lixator* ④如圖 (6-6)，補充所需鹽份。

(二)水流控制

當河口水工模型採用動床時，則需利用人工製造水流，以模擬原型流況，在水池兩端設置管路，管上依流量分佈情況予以鑿孔，藉調整制水閘可改變水流方向，製造正逆向水流及各種不同流速。如圖 (6-7)。

七、縮尺模型之應用

(一)適合採用縮尺模型之問題

水工模型已被廣泛的應用於河口水力問題之規劃研究上，經過多年之研究發展目前已有極為廣泛之水力問題可以利用模型模型，以重現原型各種現象，但仍有某些問題受到限制，分別討論如下。

可以在水工模型上模擬並能重現原型各種現象之水力問題計有潮汐、潮流、密度流、沿岸流、含鹽度、質量擴散、熱量擴散、淤積、暴風湧浪、津波、吹送流、堆升等，均可很經濟的建造河口模型或在風洞內達成。其他如柯氏力 (*Coriolis force*) 則雖模擬，但對整個河口而言不能迴轉，需利用極小模型縮尺方可達成，一般均採用許多

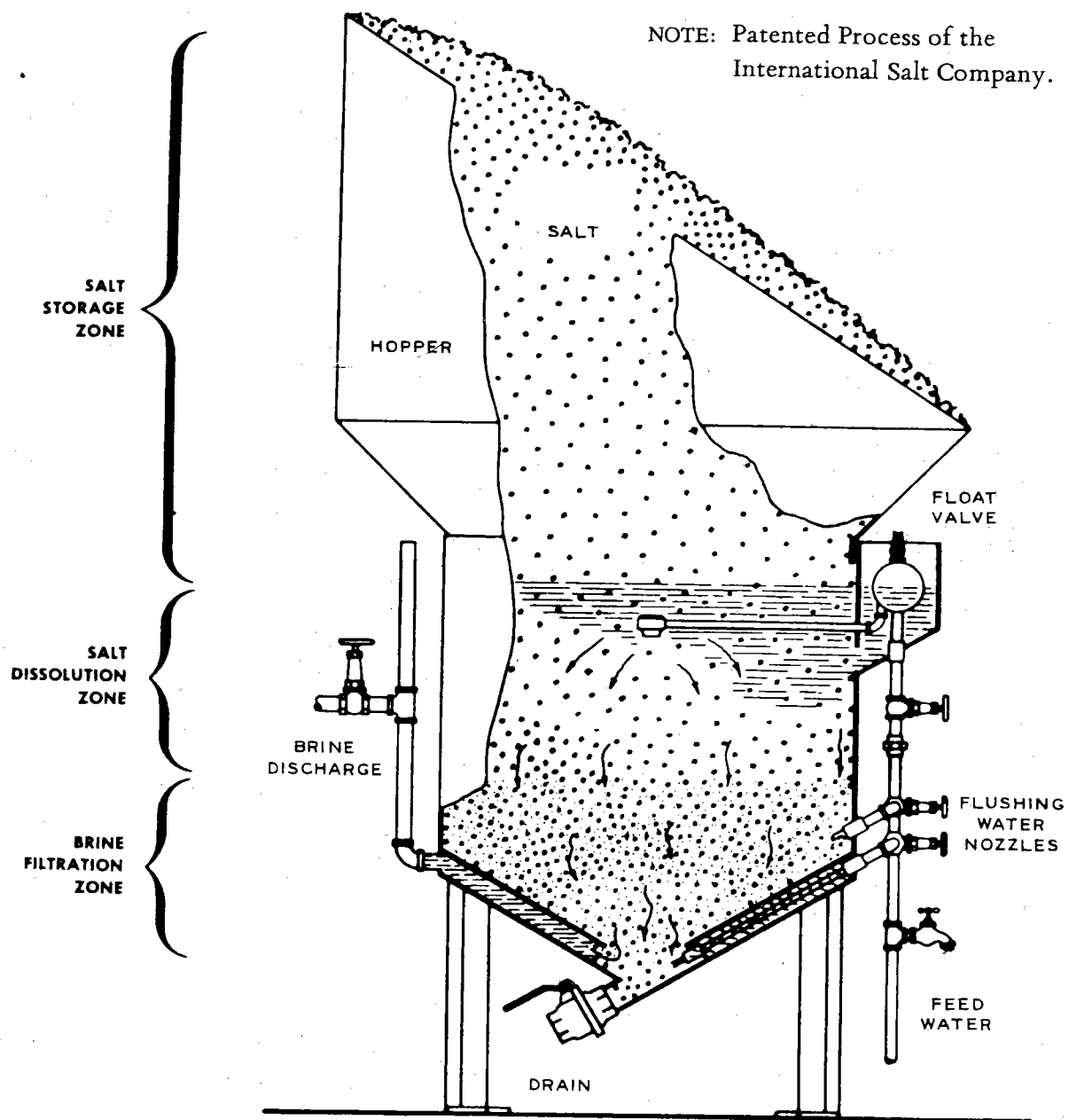


圖 6—6

Lixator R (after International Salt Company, 1965, Patented process of the International Salt Company, copyright 1965).

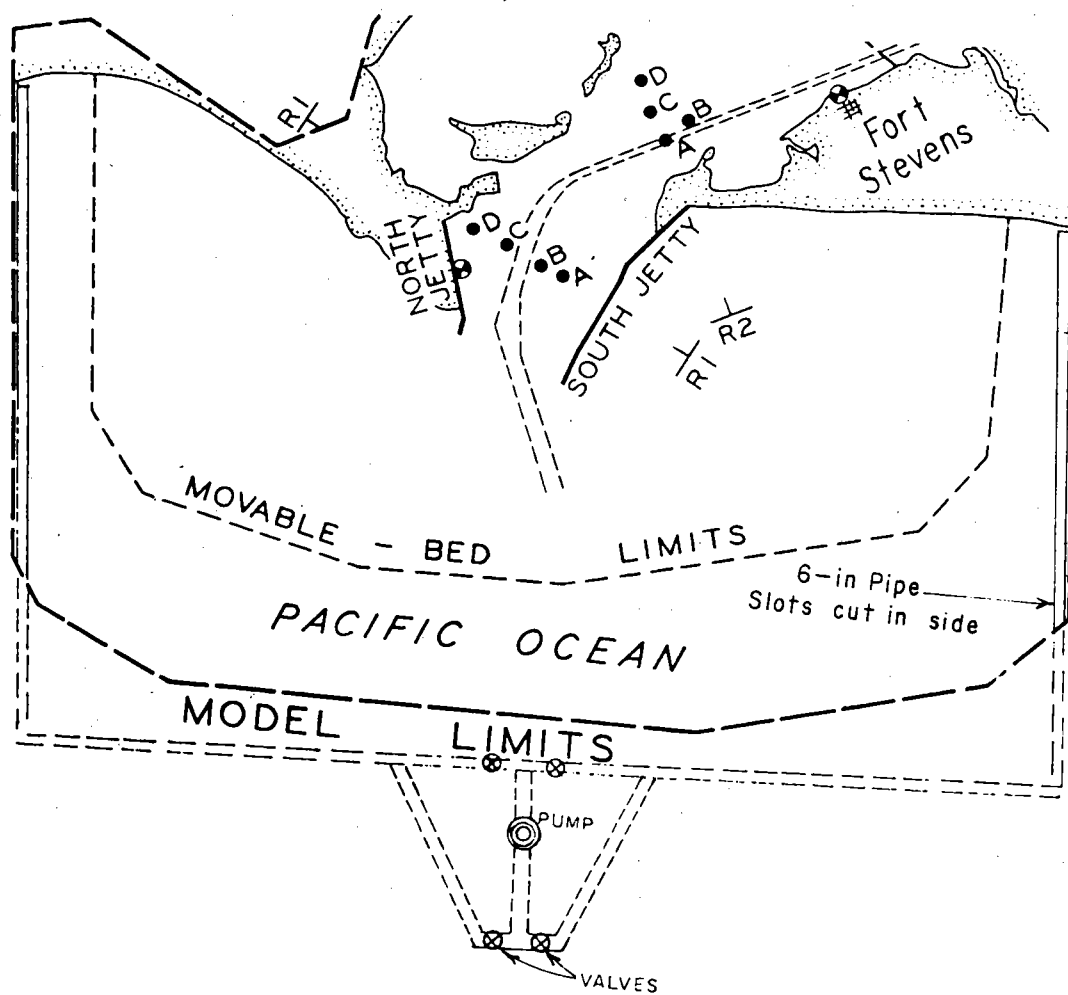


圖 6—7 流向流速控制設備圖

小旋轉馬達安放於河口模型上，使同時向同向旋轉模擬之。

河口潮汐或湧浪之漲落及其向上游前進均可正確的模擬。除可以模擬點外，不論縱向或橫向及時間性之速度分佈亦可重視，同樣的含鹽度亦可正確的模擬。

河口之淤積形狀，分佈可根據經驗及試驗技巧獲得定性重視，但以目前技巧尚無法應用於沉積物之粘性重視。

其他利用定床辦理各種不同問題研究者計有

1. 航道改善（加寬、改道）
2. 航道航行條件（流況、流速）
3. 沉積井及迴船池
4. 保護工事（堤防、防沙堤、突堤等）
5. 港灣規劃、港址調查
6. 海埔新生地
7. 暴風湧浪及津波之保護
8. 海岸侵蝕定性試驗
9. 廢水排放
10. 含鹽度控制構造物等

（二）水工模型之缺點

雖然水工模型能夠正確的模擬某些數學上無法模擬之三度空間問題，尤其是利用水工模型可以見到各種改進方案所顯示之結果，讓決策者能由觀測作決定，但另一方面水工模型所需經費甚大，模型建造、改變模型及試驗條件等均需時甚長，對漂移物、懸移質濃度等均不能模擬，污染物之減衰，底床刷深、海岸沖蝕等亦不能重現。是為模型試驗最大的缺點。

（三）利用數學模式補救

由於近年來電腦快速發展，利用數學方法模擬計算水力問題，已經廣泛被採用，許多已經被證實之數學模式不但可獲得理想佳果，還可以節省極為可觀之經費與時間，而在某些較複雜之問題上，如同時採用物理與數學模型，可以互相驗證，獲得最可靠之佳果。

此外數學模式所得結果常被應用於物理模型之邊界條件。而數學模式上之一些係數，邊界條件及起始條件等則需決定於水工模型試驗結果。因此兩者常相輔相成，其優劣點如表 6 - 1。

表 6 - 1 物理模型與數學模型優劣點比較

模型	優點	劣點
物理模型	1. 模擬三度空間水流較佳 2. 可以由模型看見現象 3. 含塩度模擬結果良好 4. 在同一模型可以重現各種現象	1. 經費高時間長 2. 修改模型困難費時 3. 受縮尺影響 5. 範圍常受限制 5. 量測困難
數學模型	1. 能重複使用，精度高 2. 能爭取時效 3. 容易修改、擴充 4. 驗證簡單 5. 經費低廉 6. 利用已經證實之程式效果極佳	1. 格點大小受容量限制 2. 常遇到收斂及穩定問題 3. 邊界條件難以決定 4. 程式設計費時，人才難求

八、模型試驗實例

(一) 計畫概述：哥倫比亞河口，因南堤復建、改善進口航道，拓

寬已有航道，為了解拓寬後各種水力現象，辦理本試驗。

(二) 試驗單位：W E S

(三) 試驗報告：Herrmann (1968, 1971, 1974)

(四) 試驗期間：1963 年 8 月至 1967 年元月

(五) 試驗內容：哥倫比亞河口如圖 6 - 8，河口處航道寬 0.5 哩，深 48 呎，長約 5 哩，每年維護挖泥量為 2.3 至 2.5 百萬立方碼，為減少進口航道挖泥量，擬興建 5300 呎長河堤 B，如圖 6 - 9。此外距河口後 41 至 45 哩處，該處已不受海水入滲影響，航道寬 500 呎，深 35 呎，每年維護挖泥約為 315,000 立方碼，辦理此次模型試驗時，同時檢討將航道拓寬為 600 呎，加深為 40 呎之水力特性及淤積情形，希望減少挖泥經費至最低，獲得最理想之計畫佈置。

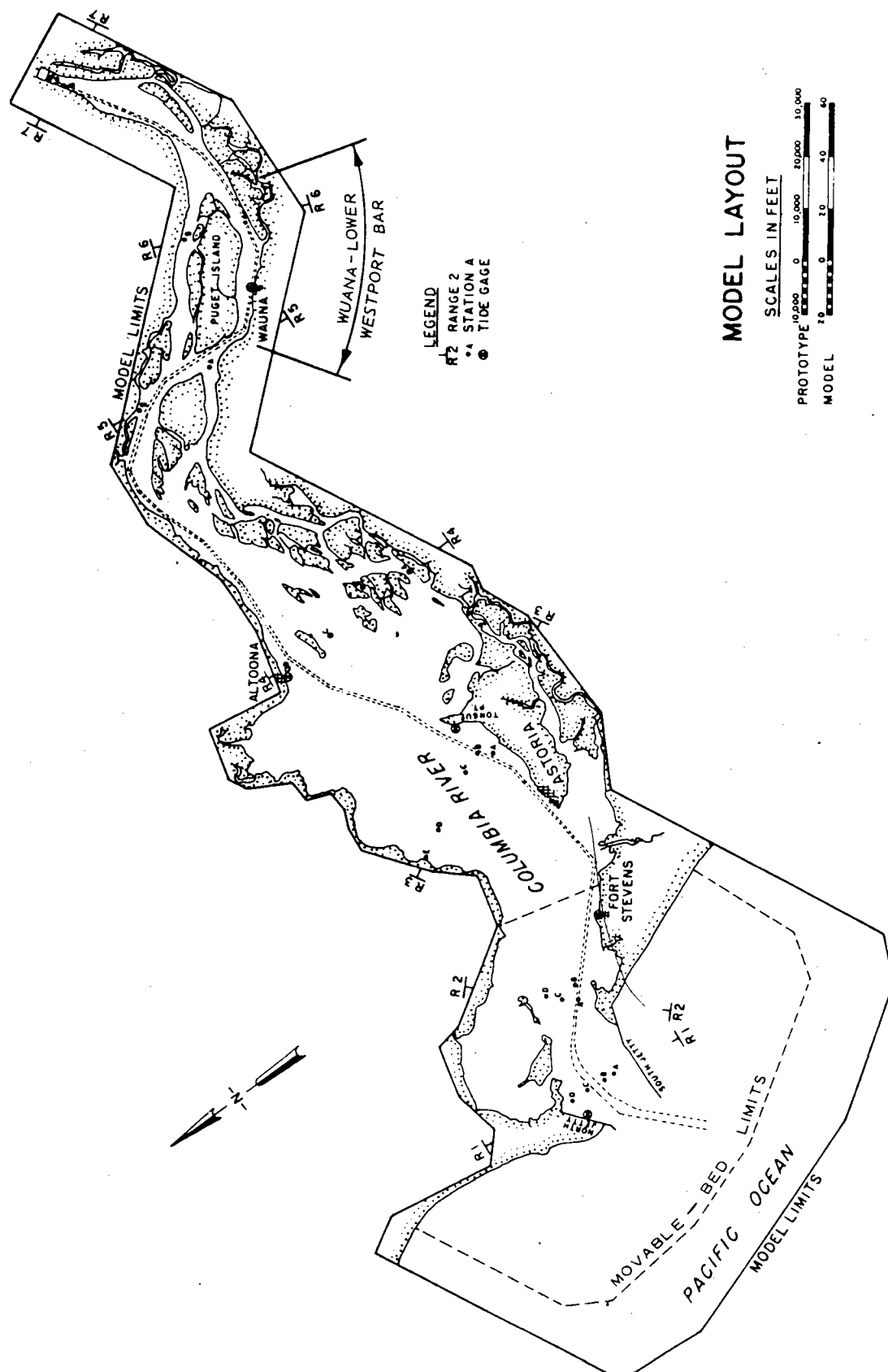
(六) 試驗模型：試驗模型如圖 6 - 8，涵蓋哥倫比亞河下游長的 53 哩，水平縮尺採用 1/500，垂直縮尺為 1/100，模型長 560 呎，最寬處 130 呎，全部面積約 48,000 平方呎，河口部份採用動床，上游則採用定床。

(七) 試驗步驟：採用淡水與塩水試驗，哥倫比亞河口之細砂粒徑主要為 0.15 至 0.3 mm，因之定床試驗中，淤積物採用粒狀物質，淤積試驗技巧則由多次試驗改進方法獲得。對七種問題逐一加以試驗研究，最後選用最適合之合成纖維 ($S.G=1.08$) 當作沉積物。

(八) 綜合試驗結果：本試驗所獲致結果如下：

1. 試驗結果證明南堤外端重建，雖對波浪條件有所改善，有利於進出口船隻，但對整個進口區水力，含塩度及淤淺等性並無裨益。

2. 如圖 6 - 9，南堤海側 1900 呎，如浚挖至平均低潮位下 - 15 呎，則進口航道浚挖量約可減少 21%，如圖 6 - 10。最後採用此種方案，節省美金 4,570,000 元南堤重建費及每年維護挖泥費。



6—8 哥倫比亞河口地形及模型佈置圖 (After Herrmann 1971)

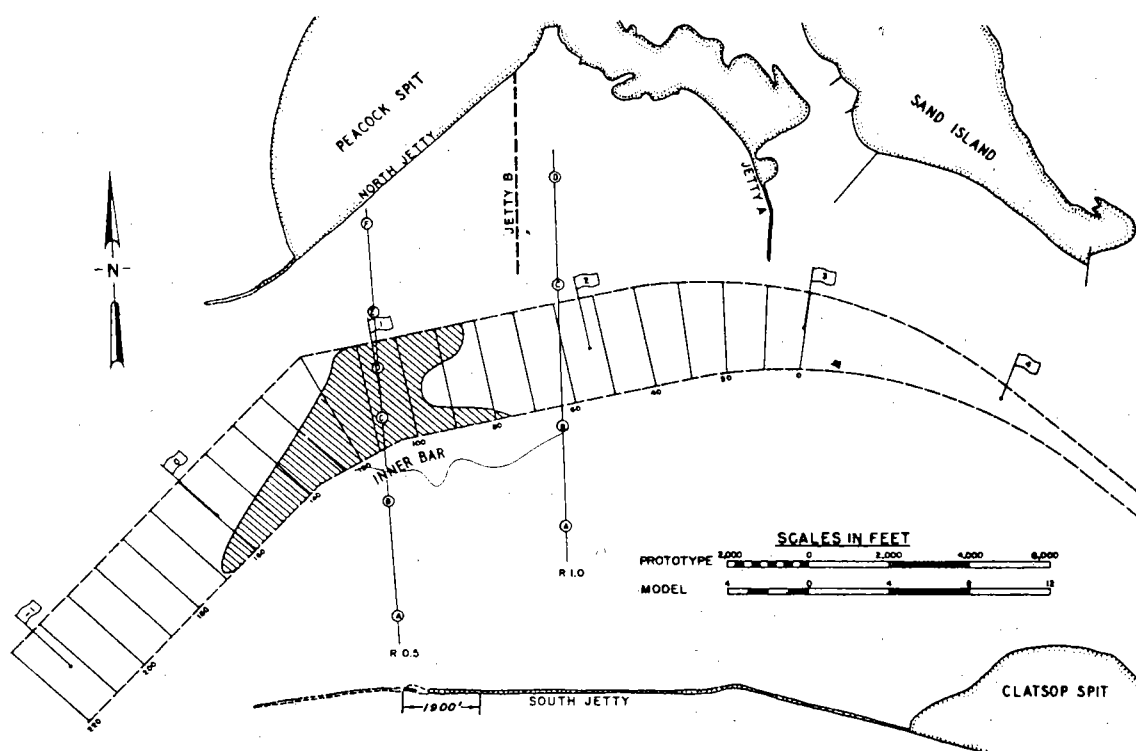


圖 6—9 哥倫比亞河口進口段地形 (After Herrmann 1974)

3. 上游航道拓寬及浚深計畫，試驗結果證實並無濟於事，反而增加約 76 % 之淤積量，及改變淤積分佈型態。改進對策為建築四道 400 呎至 1100 呎之樁堤，及三處淤沙區，試驗結果證實非常有效，可減少約 30 % 之淤積，消除上游 2500 呎淤積砂洲。

4. 由於此項試驗的成功，在 1969 年估計每年可以節省挖泥維護費美金 125,000 元，同時節省南堤重建費美金 334,000 元，南堤 B 興建費美金 12,000,000 元。而本試驗僅花費美金 12200,000 元，如不辦理試驗而盲目規劃損失將不止上述數字，由此可見辦理模型試驗之效益。

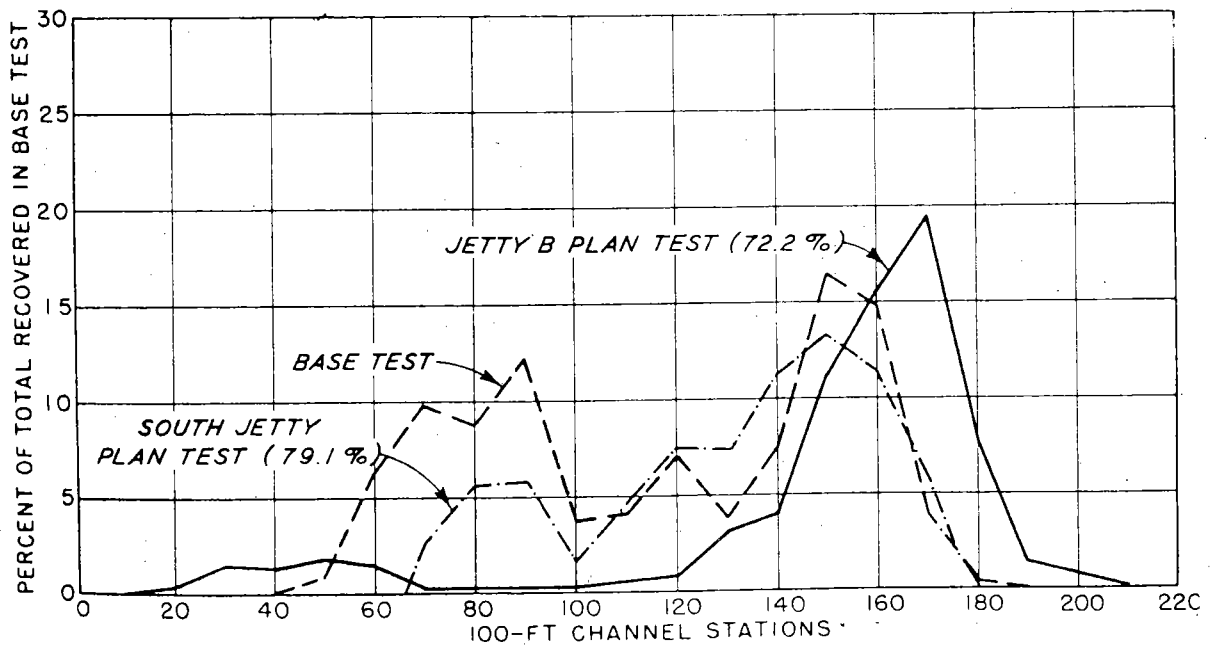


圖 6 - 10 南堤試驗計畫各方案淤積情形

(After Herrmann 1974)

第七章 試驗室資料處理系統

一、概述

一般而言，試驗室試驗資料之蒐集係使用感受器 (*Transducer*)，放置於試體中，感受器因感應水佇、應力、混度等變化而產生不同大小之電流或電阻，以感受器所感應之電流或電阻輸入控制箱 (*Control Box*)，轉變成電壓，將此電壓輸入紀錄器，帶動紀錄筆繪出試驗所需之類比資料 (*Analog Data*)。

電腦資料處理系統，係將控制箱輸出之電壓，改接於類比／數據轉變器 (*Analog/Digital Converter*)，利用類比／數據轉變器量取電壓數據值，儲存於電腦記憶體內，試驗完畢後以電腦分析，計算試驗資料，經由列表機 (*Line Printer*) 輸出計算結果。此系統塊狀圖如圖 7—1。

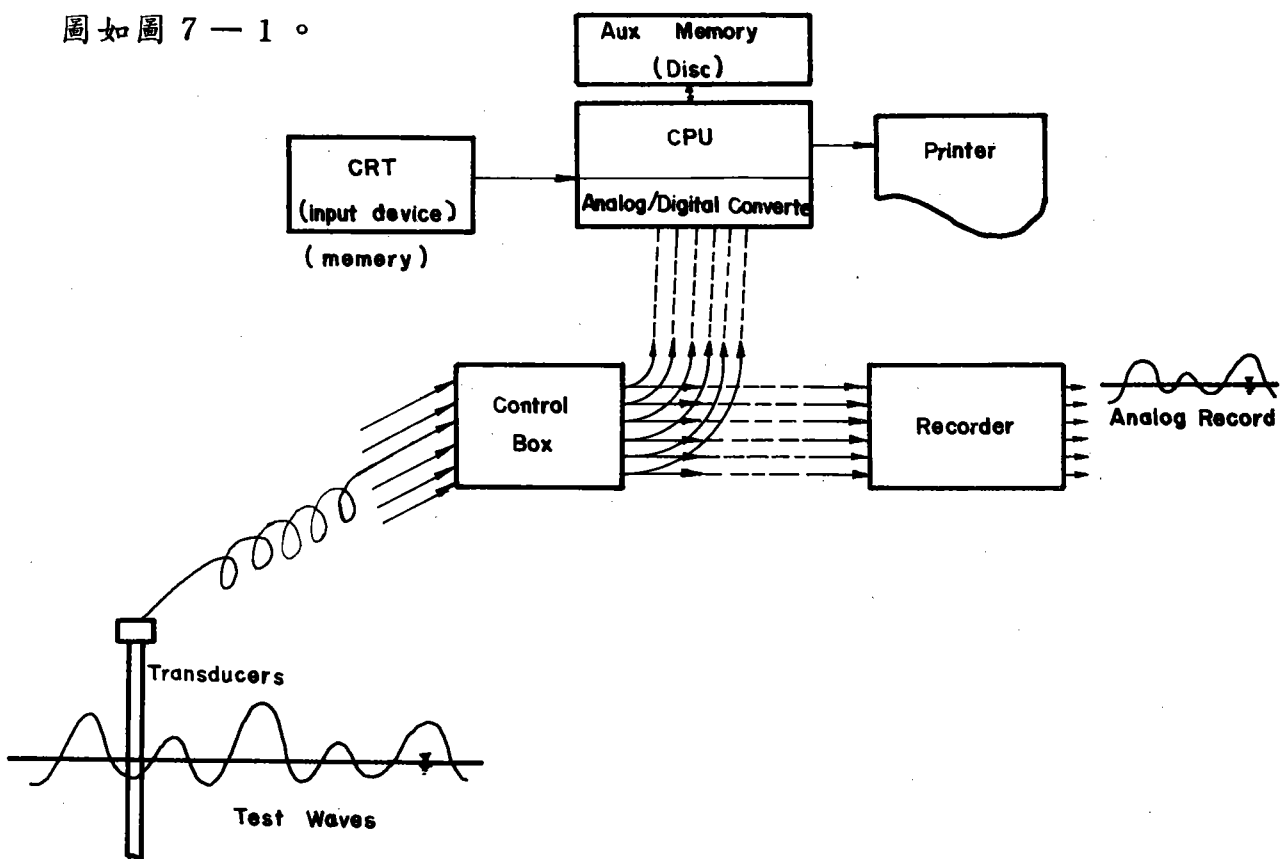


圖 7—1 電腦資料處理系統塊狀圖

目前設置電腦資料處理系統，主要係用於處理風洞水槽及平面遮蔽試驗資料，此系統主要單元如下：

(一)中央處理單元 (*Central Processing Unit*)：採用 *HP 1000 Model 20* 迷你型電腦，記憶體容量為 128 bytes，必要時可擴充至 320^k bytes。可使用 *FORTRAN*，*BASIC* 及 *ASSEMBLER* 等程式語言，並可依優先秩序處理程式。

(二)陰極射管顯示幕 (*CRT*)：採用 *HP 2645*，主要功用為利用鍵盤輸入指令 (*Instruction*) 及資料，並可以顯示幕輸出所需資料。此 *CRT* 具有 4^k bytes 之記憶體，必要時可擴充至 12^k bytes，本身可作程式編譯。內部裝有磁帶機兩組，每組記憶容量為 110^k bytes。

(三)磁碟機 (*Flexible Disc*)：採用 *HP 9885 M* 一台，記憶容量為 500^k bytes，可視需要予以擴充。

(四)類比／數據轉變器 (*Analog/Digital Converter*)：採用 *HP 91000 A* 一組，可以作直流 (*Single End*) 16 波道之輸入或交流 (*Differential*) 8 波道之輸入。其主要功用為將輸入電壓轉變成數據值，以便儲存於電腦記憶體內。

(五)列表機 (*Prinler*)：採用 *Centronics 700* 型，輸出速度為 60 *characteis/sec*，可將資料處理結果印出。

二、資料處理程式設計

類比／數據轉變器 (*A/D Converter*) 之控制系統可利用電腦本身供給附程式 (*Supplied Subprogram*)，使用 *ALGOL*，*ASSEMBLY* 或 *FORTRAN* 等程式語言，由徵集程式 (*Calling Program*) 控制類比／數據轉變器傳輸計畫 (*Driver*) 取得所需資料後再送回徵集程式。必要時可自行設計其他控制系統程式。本節僅介紹如

何利用 *FORTRAN* 程式語言取得所需試驗資料。

類比 / 數據轉變器依輸入交直流電壓可分為 *Single End* (直流) 與 *Differential* (交流) 兩種，資料掃瞄方法可分為下列三種類型。

(一) 單波道 (*Single Channel*)，用以掃瞄一波道感受器輸入信號。

(二) 整體掃瞄 (*Block Scan*)，用以掃瞄多波道感受器輸入信號。

(三) 秩序掃瞄 (*Sequential*)，依序掃瞄多波道感受器輸入信號。

FORTRAN 程式不能直接徵集傳輸計畫 (*Driver*)，所有 *FORTRAN* 徵集程式 (*Calling Program*) 必需經過供給附程式 “ *R 2313 Interface Package Calls* ” 作適當編譯後以適用於傳輸計畫。
“ *R 2313 Interface Package Calls* ” 可依實際需要指令 *A/D* 系統送回資料，其主要附程式如下：

(一) *B 2313 - Queue Buffer Calls* 型式為

DIMENSION IQBUF (n)

CALL B 2313 (IQBUF, LENGTH)

上式中 *IQBUF* = *Buffer Address*

LENGTH = *Queue Buffer Length* = *n*

n = 14 for *Block Scan* and *Sequential Scan*

(二) *S 2313 - Subsystem Normalize Calls* 型式為

CALL S 2313 (LU, IRTN)

上式中 *LU* = *Logical Unit of Subsystem*

IRTN = *Return Code*

(三) *R 2313 Multiplexer Reading Calls* 型式為

$CALL\ R\ 2313\ (LU,\ IRTN,\ IP,\ MD,\ LBF,\$
 $N,\ IBF,\ ID)$

上式中 $IP = Pace\ Mode$

$MD = Scan\ Mode$

$LBF = Channel\ Number\ Buffer$

$N = Number\ of\ Readings\ to\ be\ taken$

$IBF = Input\ Data\ Buffer$

$ID = Single\ End\ or\ Differential\ Inputs$

類比／數據轉換器掃瞄速度高達 20 KHZ，但各部門出入時間（Access Time）實際上不能達到如此高速。在波浪試驗中 A/D 系統主要目的為重複掃瞄多波道（Multi-Channel）每等間隔時間之水位變化值，如圖 7—2，以便分析波浪特性。

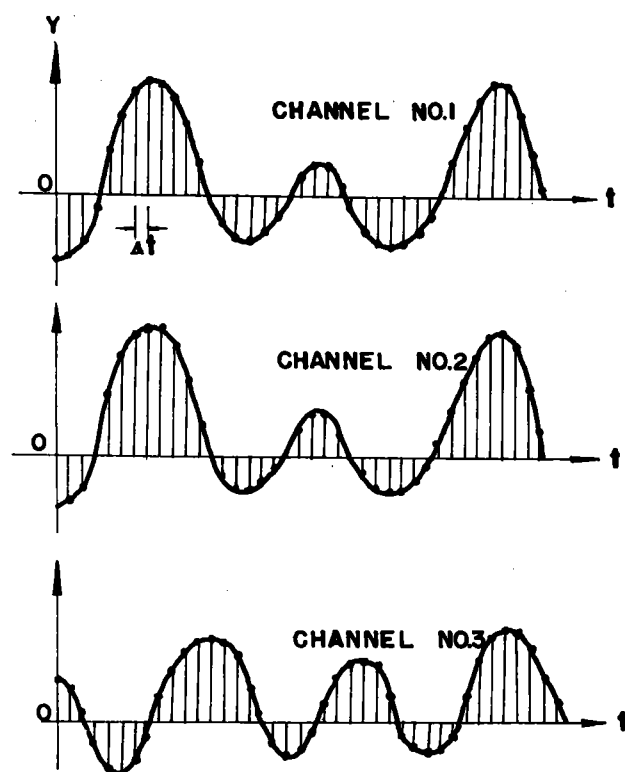


圖 7—2 A/D 系統掃瞄水位變化圖

掃瞄速度越快，即資料錄取時間間隔 (Δt) 越小，則所獲得波形越精密，但波浪採樣個數相對減少，故應依試驗條件如週期、波高，以及電腦容量等調整讀數及 Δt 。一般而言，波浪個數最好能在 100 個以上，但在斷面試驗中，因需考慮有效造波時間，故往往不能達到上述要求。

重複掃瞄類比信號時間間隔可分為操作員指令 (*Operator's Command*) 與程式指令 (*Program Schedule*) 兩種方法。

(一) 操作員指令係利用鍵盤輸入指令，使電腦上程式自指定時間起，每隔等間隔時間自動執行一次，其指令型式為：

* *IT*, *Program*, *R*, *M*[, *HR*, *MI*[, *SC*[, *MS**10
]]]

* *ON*, *Program*, *Now*

上式中 * — *Operator's Command Symbol*.

IT - *Interval Time*

Program - *Program Name*

R = *Resolution Code*, (*R*=1 10/1000 sec, *R*=2,
1 Sec, *R*=3, 1 min, *R*=4, 1 hr)

M - *Multiplier*.

[*HR*, *MI*[,)] — *Initial Time* 省略時表示立即開始。

此種方法由操作員直接由鍵盤指令等時間間隔重複執行程式，程式本身排陣僅能存放一次掃瞄資料。因之多次掃瞄資料只能儲於補助記憶，如磁帶上。不能有效應用電腦本身記憶體，如果掃瞄程式太複雜，每次程式執行時間（包括掃瞄及出入時間）大於預定時間間隔 ($R * M$) 時，部份資料將被遺漏，無法取得連續資料。因此不能作極

短時間間隔掃描。

(二)程式內部指令係利用電腦內部供給之即時執行 (*Real Time Executiction*) 附程式 “ *EXECCALL* ” , 以 *FORTTRAN* 語言 , 指令起始時間及操作時間間隔。指令程式分為停止 (*Terminate*) , 時間表 (*Time Schedule*) 及時間 (*Time*) 三種分別說明如下 :

(1)時間安排附程式型式為

CALL EXEC(ICODE, NAME, IRESL, MTPLE
-IOFST)

上式中 *ICODE*—Executive code = 12

NAME—Program name to be put in time list

NAME=0 for calling program

IRESL—Resolution Code, *IRESL*=1, 10/1000
sec ; *IRESL*=2, Sec ; *IRESL*=3,
Min ; *IRESL*=4, Hour

MTPLE—Executive Interval = *IRESL* * *MTPLE*

-IOFST—Initial Offset = *IRESL* * *IOFST*

(2)控制停止附程式型式為

CALL EXEC(ICODE, NAME, NUMB, IPRM1,
..... IPRM5)

上式中 *ICODE*—Executive Code = 6

NAME—Program name to be terminated

NAME=0 for calling program

NUMB—Type of termination

NUMB=0 for Normal

IPRM1, IPRM5 - Optional Parameters to be

passed to calling program, When it is next
schedule.

(3)時間附程式型式為

CALL EXEC(ICODE, I)

上式中 ICODE—Executive Code = 11

I—Array Which the real current time value is returned.

利用此種方法安排掃瞄時間間隔，可在開始掃瞄前與掃瞄結束時，分別徵集時間附程式，可確知作若干次掃瞄所需時間，每次掃瞄最小時間間隔為 0.01 sec。多次重複掃瞄所得各波道資料可立即儲存之程式本身排陣上，減小出入時間，使掃瞄速度增快。

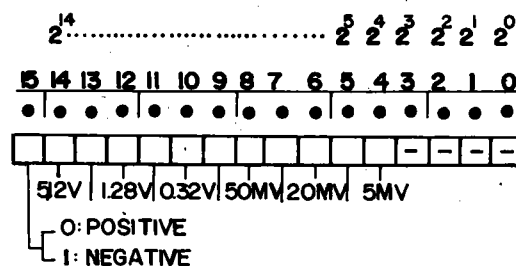


圖 7—3 系統資料量取格式圖

類比／數據轉變器任由傳輸計畫取得每波道資料，每一個資料用一個字 (word)，以圖(四)格式送回 FORTRAN 徵集程式 (Calling Program)。每一個字第 0 至 3 粒 (Bit) 利用 FORTRAN I AND 附程式罩住，A/D 系統掃瞄電壓最小精密為 0.005 V，儲存於第 4 粒，以此類推，5.12 V 存於第 14 粒，第 15 粒為正負號，因之全部容許最大輸入電壓為 $\pm 10.235 V$ ，FORTRAN 電壓值可以下式求得。

$$VOLT(K) = FLOAT(I AND(IBL(K), 177760 B) *$$

$$0.0003125$$

電壓值乘以率定值 (R) 所得瞬間水位

$$Y(K) = VOLT(K) * R$$

綜合上述資料搜集 FORTRAN 程式附表 7-1。

表 7-1

TESTA T=00003 IS ON CR00002 USING 00005 BLKS R=0000

0001	FTN, L	
0002		PROGRAM TESTA
0003		DIMENSION IQBUF(14), IBF(4), LBF(4), IVOLT(4, 1200), I(5)
0004		CALL RMPAR(I)
0005		IF(I(1))2, 1, 2
0006	1	WRITE(1, 103)
0007	103	FORMAT("TYPE NUMBER OF READING I4, MTPLE USE I3")
0008		READ(1, 102)NR, MTPLE
0009	102	FORMAT(I4, I3)
0010		J=1
0011		N=0
0012		DO 11 K=1, 4
0013	11	LBF(K)=K*2-2
0014		LU=3
0015		IRTN=-99
0016		CALL EXEC(11, I)
0017		WRITE(1, 100)(I(K), K=1, 4)
0018	100	FORMAT(4I4)
0019		NAME=0
0020		CALL EXEC(12, NAME, 1, MTPLE, -1)
0021	2	N=N+1
0022		IF(N=NR)3, 3, 4
0023	3	CALL B2313(IQBUF, 14)
0024		I(1)=1
0025		CALL S2313(LU, IRTN)
0026		CALL R2313(LU, IRTN, 0, 1, LBF, 4, IBF(J), -1)
0027		DO 13 IK=1, 4
0028	13	IVOLT(IK, N)=IBF(IK)
0029		CALL EXEC(6, 0, 0, I(1))
0030	4	CALL EXEC(11, I)
0031		WRITE(1, 100)(I(K), K=1, 4)
0032		DO 14 IN=1, NR
0033		WRITE(4, 101)(IVOLT(N, IN), N=1, 4)
0034	101	FORMAT(4I8)
0035	14	CONTINUE
0036		STOP
0037		END
0038		END*

利用上述兩種方法掃瞄最快速度為 0.01 秒，此種速度應用於一般試驗應足足有餘。但在某些試驗需作更快速掃瞄時，可以儘量減少掃瞄過程中某些不必要之陳述 (*Statements*)，利用 *DO loop* 以試值 (*Test Value*) 控制掃瞄個數，在 *DO loop* 前後各加一個時間附程式 (*Time Subprogram*)，*CALL EXEC (ICODE, I)*，測定掃瞄所需時間，可求得掃瞄一次所需時間，利用此法時間間隔並非整數，必要時可在 *DO loop* 中加入多餘陳述 (*Redundant Statements*) 以延長掃瞄速度。

三、電腦資料處理系統應用實例

本局電腦資料處理系統安裝完成後，積極研究將各種試驗納入電腦控制，謹將風洞水槽資料處理及平面水池遮蔽試驗資料處理介紹如下：

(一) 風洞水槽資料處理：最初設立電腦資料處理系統主要目的，係為解決研究航道風揚問題，測取微小水位變化，因此安裝完成後，即着手設計風洞水槽水位連續變化及底層剪力紀錄分析程式，以求得各種水深在不等風速吹送下水面風揚量。並計算各種情況下，所產生之波高、週期及能譜等，其流程圖如圖 7—4，其結果如表 7—2，波譜如圖 7—5。

(二) 平面水池遮蔽試驗資料處理：為使資料處理電腦化，試驗結果更精確，研究完成遮蔽試驗資料搜集、分析程式。輸入試驗資料，及港池邊界條件，利用 *D/A* 掃瞄各測點水位連續變化資料，計算波浪，輸出計算結果，每一試驗情況完成後，利用列表機描繪波浪分佈及等 *K* 值於報表紙上。流程圖如圖 7—6。港池波浪分佈樣式利用列表機輸出如圖 7—7，經繪圖機繪製如圖 7—8。

四、結 論

(一)隨時代進步電腦已漸成為從事試驗研究不可或缺之工具，一般試驗單位並無電腦專業人員編制，故研究人員必須具備使用電腦知識，選擇電腦系統更應注意操作便捷，試驗人員經過短期訓練皆能自行操作。但仍需有專業電腦人員從事電腦維護及系統建立等工作。

(二)電腦資料處理系統除應用於水工試驗外，材料試驗、動力試驗等均可利用此系統掃瞄所需試驗資料。現地觀測資料如外海波浪、潮汐、河川水位、流速等亦可利用此系統蒐集分析資料。本局希望在最近將外海波浪觀測納入電腦資料處理系統。

(三)試驗資料利用紀錄器紀錄類比資料，往往因為紀錄筆機件受摩擦阻力影響，敏感度不夠，造成不可忽視之遲滯誤差，使波峯波谷尖銳度變成較平緩曲線。利用電腦資料處理系統則可依需要決定掃瞄速度，減少紀錄器所造成之誤差。

(四)信號傳輸最好使用具有隔離網（接地線）成對扭撻電腦纜，以消滅外界干擾。

(五)傳輸距離太遠時，宜採用低頻信號，以減低減衰程度。

(六)系統使用前必需作線外測試（*Off-line Test*）及率定工作，以瞭解系統特性及感受器率定值。

(七)電腦資料處理系統，除應用於試驗資料處理外，希望將來能研究發展各種問題數學模式，利用數值解校核試驗結果。

表 7-2

CHANNEL NO. 3 NUMBER OF READINGS 1000 NUMBER OF WAVES 66

ALL WAVE HEIGHTS ARE IN CM. PERIODS ARE IN SEC

LIST OF WAVE HEIGHT

-3.201	14.738	7.157	12.110	7.037	3.896	1.812	15.825	20.234	7.892	10.932	9.755	11.114	3.684	4.077
10.449	19.996	28.589	18.150	15.825	22.378	10.449	4.198	10.097	14.526	25.066	13.318	2.567	11.114	21.714
21.382	21.140	16.278	9.845	9.694	10.600	10.842	11.265	11.778	19.660	29.143	25.972	16.731	20.627	24.522
17.667	10.600	10.842	8.275	6.010	2.748	11.883	8.577	14.556	8.607	5.345	12.201	26.032	17.516	5.829
4.107	7.701	25.006	24.371	7.067	17.667									

LIST OF WAVE PERIOD

.210	1.573	2.072	1.685	.883	.939	.630	2.097	1.431	1.555	1.494	1.840	1.478	.731	1.520
1.706	1.872	1.573	1.463	1.899	1.556	1.884	1.647	1.227	1.620	1.637	1.517	1.145	1.563	1.777
1.771	1.616	1.620	2.682	1.616	1.952	1.897	1.331	1.775	1.977	1.773	1.515	1.875	1.886	1.771
1.726	1.646	1.481	1.557	1.037	.777	1.498	1.854	1.622	1.563	1.222	1.675	1.689	1.303	1.454
.915	1.572	1.614	1.547	1.907	1.779									

AVERAGE OF READINGS 1.41

MAXIMUM WAVE HEIGHT 29.14

AVERAGE WAVE HEIGHT 13.12

SIGNIFICANT WAVE HEIGHT 21.76

MAXIMUM 1/10 WAVE HEIGHT 26.52

MAXIMUM WAVE PERIOD 1.77

AVERAGE WAVE PERIOD 1.56

CORRESPONDING SIGNIFICANT WAVE PERIOD 1.68

MAXIMUM 1/10 WAVE PERIOD 1.64

WAVE SPECTRUM AT TAICHUNG HARBOUR

NX = 1000 M = 50 DT = 10

I	J	F(C/S)	R(I)	R(I)/R(1)	HAN(CM**2-SEC)	F/FUP	S(F)*FUP/MO
1	00	0000	29.944	1.0000	204E+01	0000	407E-01
2	10	1000	27.218	.9089	157E+01	1667	314E-01
3	20	2000	20.124	.6721	966E+00	3333	193E-01
4	30	3000	10.348	.3456	103E+01	5000	206E-01
5	40	4000	-299	-.0100	106E+02	6667	212E+00
6	50	5000	-10.18	-.3400	614E+02	8333	123E+01
7	60	6000	-18.03	-.6020	107E+03	1.0000	215E+01
8	70	7000	-22.97	-.7672	725E+02	1.1667	145E+01
9	80	8000	-24.57	-.8207	201E+02	1.3333	402E+00
10	90	9000	-22.77	-.7603	572E+01	1.5000	114E+00
11	1.00	1.0000	-17.95	-.5996	319E+01	1.6667	636E-01
12	1.10	1.1000	-10.82	-.3612	288E+01	1.8333	574E-01
13	1.20	1.2000	-2.350	-.0785	330E+01	2.0000	659E-01
14	1.30	1.3000	6.222	.2078	224E+01	2.1667	447E-01
15	1.40	1.4000	13.645	.4557	125E+01	2.3333	249E-01
16	1.50	1.5000	18.839	.6291	943E+00	2.5000	188E-01
17	1.60	1.6000	21.090	.7043	662E+00	2.6667	132E-01
18	1.70	1.7000	20.200	.6746	404E+00	2.8333	806E-02
19	1.80	1.8000	16.527	.5519	251E+00	3.0000	501E-02
20	1.90	1.9000	10.789	.3603	264E+00	3.1667	527E-02
21	2.00	2.0000	3.900	.1302	279E+00	3.3333	557E-02
22	2.10	2.1000	-3.073	-.1026	214E+00	3.5000	428E-02
23	2.20	2.2000	-9.068	-.3028	136E+00	3.6667	272E-02
24	2.30	2.3000	-13.33	-.4450	804E-01	3.8333	160E-02
25	2.40	2.4000	-15.46	-.5163	836E-01	4.0000	167E-02
26	2.50	2.5000	-15.43	-.5153	105E+00	4.1667	210E-02
27	2.60	2.6000	-13.43	-.4486	731E-01	4.3333	146E-02
28	2.70	2.7000	-9.807	-.3275	469E-01	4.5000	936E-03
29	2.80	2.8000	-5.067	-.1692	417E-01	4.6667	833E-03
30	2.90	2.9000	124	.0042	403E-01	4.8333	805E-03
31	3.00	3.0000	5.075	.1695	453E-01	5.0000	904E-03
32	3.10	3.1000	9.127	.3048	526E-01	5.1667	105E-02
33	3.20	3.2000	11.692	.3905	506E-01	5.3333	101E-02
34	3.30	3.3000	12.416	.4146	340E-01	5.5000	679E-03
35	3.40	3.4000	11.316	.3779	286E-01	5.6667	571E-03
36	3.50	3.5000	8.667	.2894	303E-01	5.8333	604E-03
37	3.60	3.6000	4.959	.1656	249E-01	6.0000	497E-03
38	3.70	3.7000	.817	.0280	204E-01	6.1667	407E-03
39	3.80	3.8000	-3.035	-.1014	173E-01	6.3333	346E-03
40	3.90	3.9000	-6.078	-.2030	155E-01	6.5000	309E-03
41	4.00	4.0000	-7.974	-.2663	177E-01	6.6667	354E-03
42	4.10	4.1000	-8.691	-.2902	202E-01	6.8333	404E-03
43	4.20	4.2000	-8.383	-.2773	206E-01	7.0000	411E-03
44	4.30	4.3000	-6.936	-.2316	222E-01	7.1667	443E-03
45	4.40	4.4000	-4.829	-.1613	225E-01	7.3333	450E-03
46	4.50	4.5000	-2.291	-.0765	210E-01	7.5000	419E-03
47	4.60	4.6000	.463	.0155	186E-01	7.6667	371E-03
48	4.70	4.7000	3.173	.1060	158E-01	7.8333	315E-03
49	4.80	4.8000	5.512	.1841	138E-01	8.0000	276E-03
50	4.90	4.9000	7.123	.2379	132E-01	8.1667	263E-03
51	5.00	5.0000	7.670	.2561	135E-01	8.3333	270E-03

SQ OF DEV = .7086 DEV = .8418 DIFF = -.103E+00

AVE OF PERIOD = 1.4312 FUP = .6000 UP = .287E+02

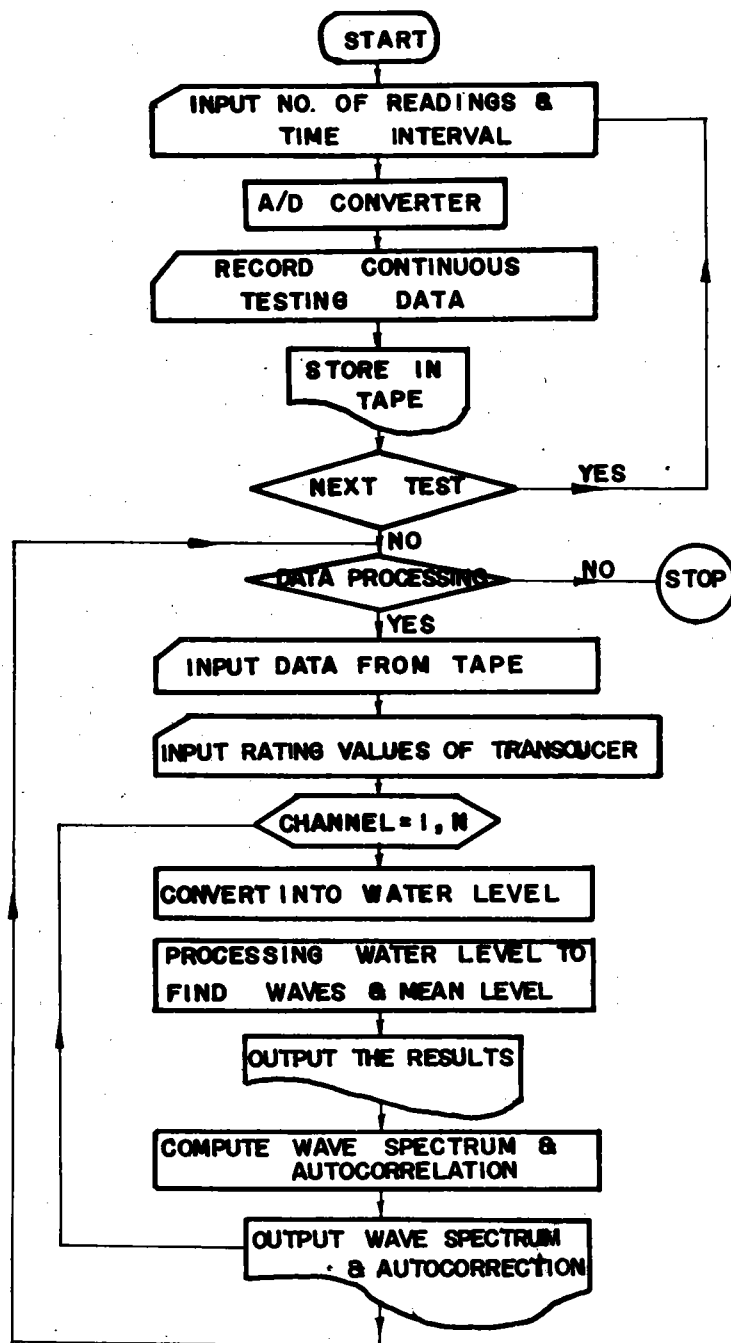


圖 7-4 風洞水槽資料處理流程圖

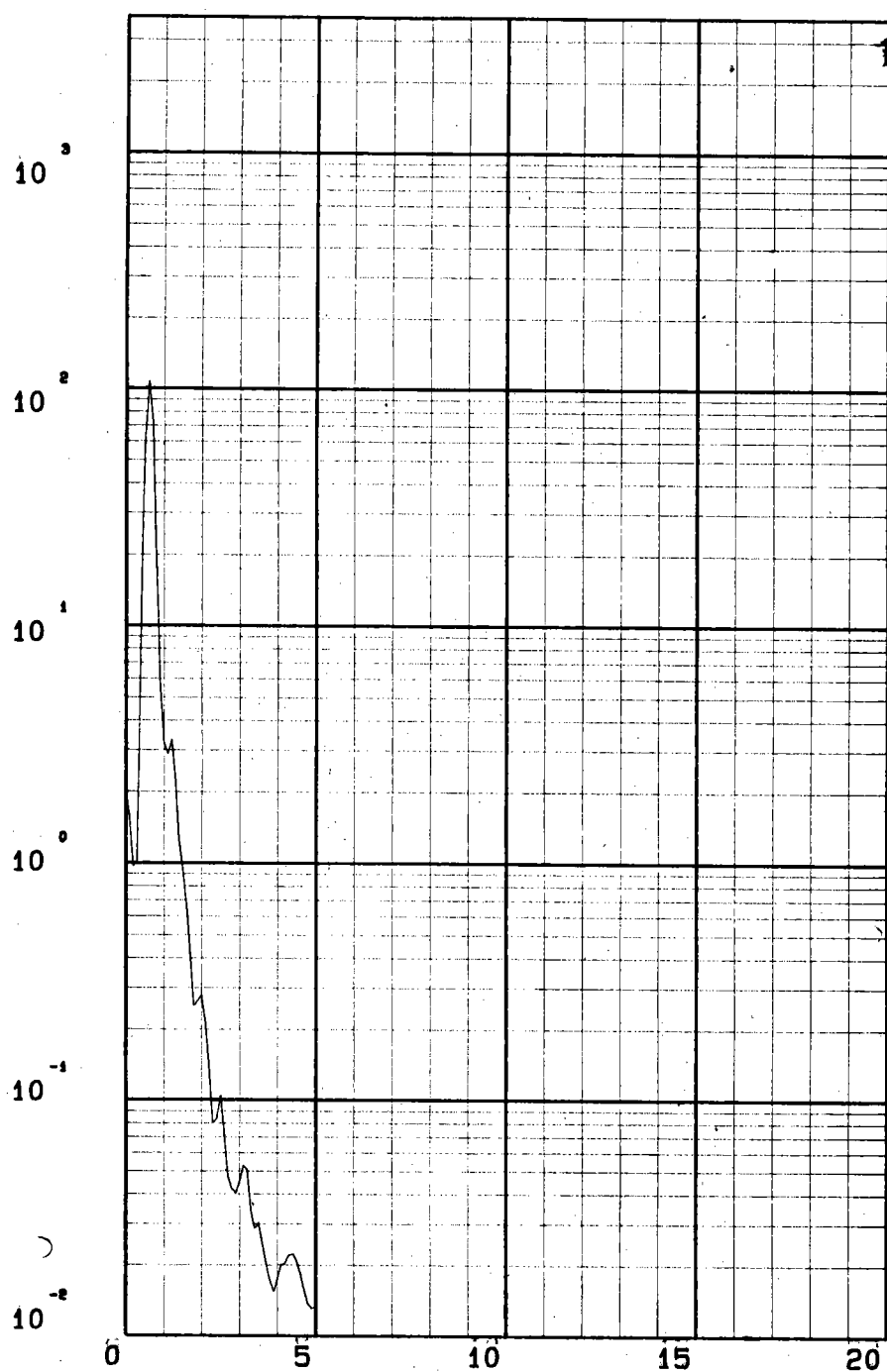


圖 7—5 不規則波波譜

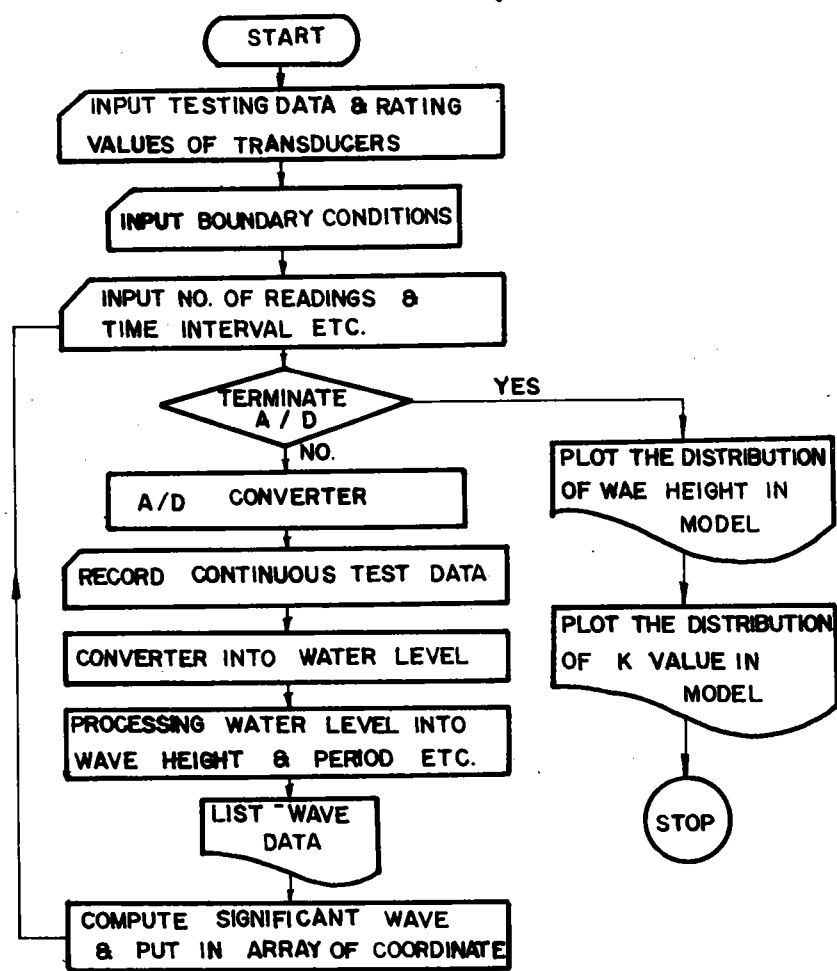


圖 7-6 平面水池遮蔽試驗資料處理流程圖

THE NEW YORK PUBLIC LIBRARY
ASTOR LENOX TILDEN FOUNDATION
1155 6TH AVENUE
NEW YORK 17, N.Y.

TEST DATE = 12/29/1978 TEST NO = 10-1
TEST CONDITIONS: DIRECTION = NE WAVE HEIGHT = 5.00 M WAVE PERIOD = 8.0 SEC
DISTRIBUTION OF WAVE HEIGHT IN MODEL (CM)

[illegible]

表 7-7 遮蔽試驗結果港池波浪分佈

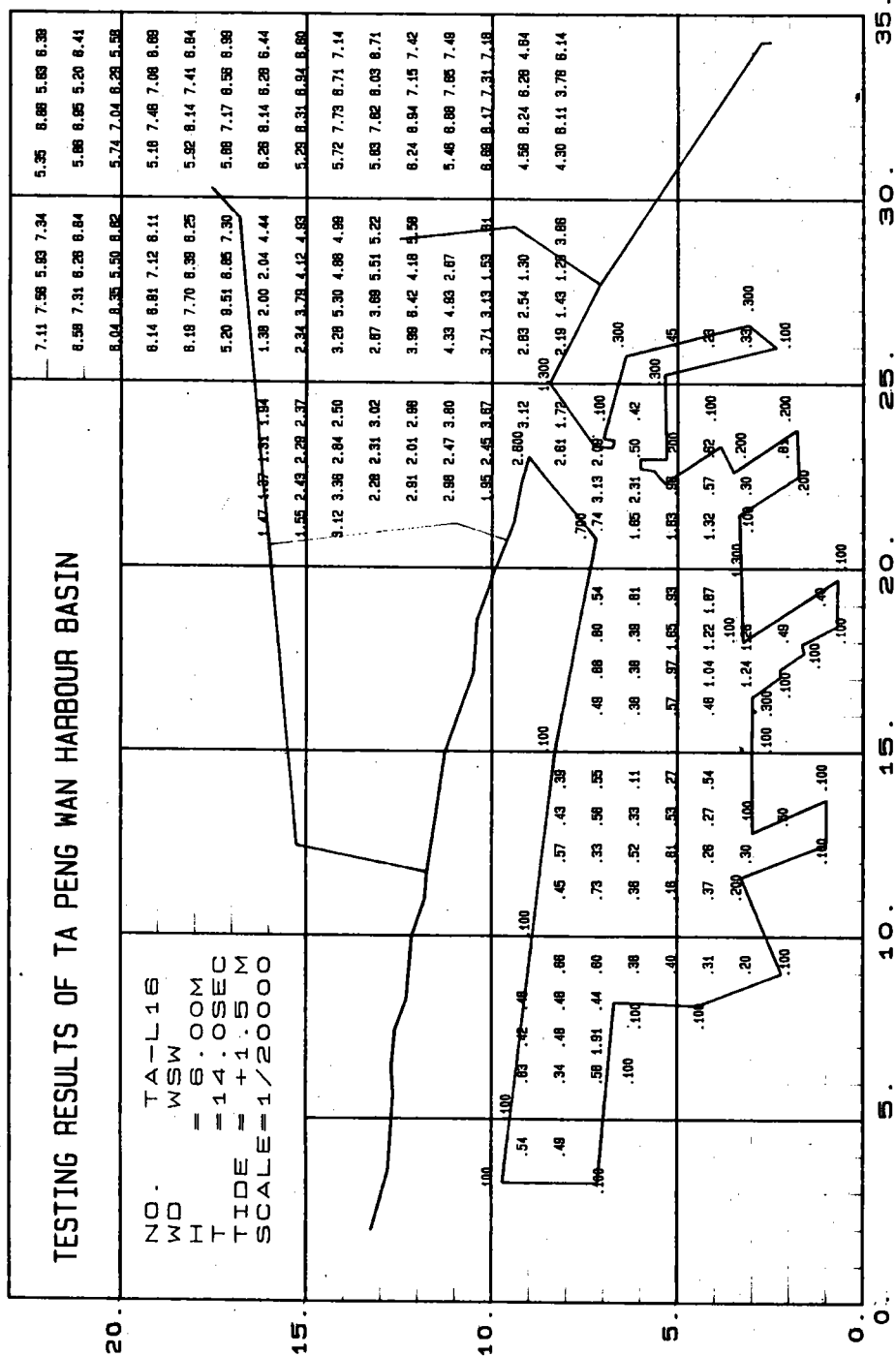


圖 7—8 (a) 波高分布圖

参 考 书 籍

1. R. Y. Hudson ete, Coastal Hydraulic Models, CERC, 1979.
2. Ippen, A. T., Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill, New York.
3. Tiffany, J. B., ed., History of the Waterways Experiment Station, U. S. Army Engineer W. E. S. Vicksburg, Miss., 1968.
4. Rouse, H., Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers, McGraw-Hill, New York.
5. Herrmann, F. A. Jr., Entrance Studies; Jetty A Rehabilitation, Jetty B and Outer Bar Channel Relocation, Model Studies of Navigation Improvements, Columbia River Eotuary, W. E. S. Vicksburg, Miss. July 1974.
6. Fischer, H. B., and Holley, E. R., Analysia of the Use of Distorted Hydraulic Models for Dispersion Studies, Water Resources Research, Vol. 7, No. 1, Feb. 1971.
7. Yalin, M. S., Mechanics of Sediment Transport, 1st ed., Pergamon Press, Oxford, New York.
8. Yalin, S., Theory of Hydraulic Models, The MacMillan Co., London, 1971.
9. Yalin, S., and Russell, R. C. H., "Similarity in Sediment Transport due to Waves, Proceedings of the eighth Conference on Coastal Engineering, ASCE, 1962.
10. Noda, E. K., Equilibrium Beach Profile Scale-Model Relationship, Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, Vol. 98, No. WW4, 1972.
11. Shinohara, K., Sand Transport Along a Model Sandy Beach by Wave Action, Coastal Engineering in Japan, Tokyo, Japan, Vol. 1, 1958.
12. Silvester, R., Coastal Engineering, Vols 1 and 2, Elsevier Scientific

Publishing Co., Amsterdam, London and New York, 1974.

13. Henderson, F. M., Open Channel Flow, The MacMillan Co., New York, 1970.
14. U. S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual 3rd ed., Vol. 1, 2, 3, Washington, D. C., 1977.
15. Dai, Y. B., and Kamel, A. M., Scale Effect Tests for Rubble-Mound Breakwater; Hydraulic Model Investigation, U. S. Army, WES, Vicksburg, Miss., 1969.
16. Hudson, R. Y., Design of Quarry-Stone Cover Layers for Rubble-Mound Breakwaters; Hydraulic Laboratory Investigation, U. S. Army Engineer WES, Vicksburg, Miss., 1958.
17. Hudson, R. Y., and Jackson, R. A., Stability of Rubble-Mound Breakwaters; Hydraulic Laboratory Investigation, U. S. Army Engineer. WES, Vicksburg, Miss., 1953.
18. Lundgren, H., Wave Shock Forces: An Analysis of Deformations and Forces in the Wave and in the Foundation Delft Hydraulics Laboratory. Vol. 11, 1969.
19. U. S. Army Corps Engineers, CERC, Coastal Hydraulic Models, Fort Belvoir, Va., 1979.
20. Le Mehaute, B., Wave Absorbers in Harbors, U. S. Army Engineer. WES, Vicksburg, Miss., 1965.
21. Keulegan, G. H., Wave Motion, Engineering Hydraulics, Wiley, New York, 1950.
22. Keulegan, G. H., The Gradual Damping of a Progressive Oscillatory Wave with Distance in a Prismatic Rectangular Channel, National Bureau of Standard, Washington D. C. 1950.
23. 台中港工程局, 台中港外廓堤防佈置之模型試驗研究 梧棲, 1973

24. 張金機，黃清和，台中港外廓堤防漂沙模型檢核試驗研究報告，台中，
梧棲 71年5月
25. 台中港務局，花蓮港第四期擴建防波堤斷面試驗報告 台中，梧棲 69年
2月
26. 張金機，黃清和，大鵬灣輔助港遮蔽試驗報告，台中，梧棲 71年12
月

附錄 I 港灣技術研究所現有及擴建試驗設備

一、第一試驗場棚

第一試驗場棚長 80 公尺，跨徑 45 公尺鋼管構架建築，內部設有

(一)大型試驗水沈：長 60 公尺，寬 43 公尺，深 1 公尺，用以港灣漂沙、遮蔽及流況試驗，內部設有

1. 錘擊式造波機 (*Plunge type wave generator*)：造波板長 30 公尺，由 30 HP 馬達帶動變速機及偏心輪，可藉調整偏心距及變速齒輪，可製造各種不同大小之波高及週期。整台造波機安放於弧形鐵軌上，藉齒輪傳動可變換位置，製造各種方向試驗波浪。

2. 進排水槽：試驗水槽兩端各設進水排水槽寬 0.42 公尺，深 2 公尺，室外設 40 HP 馬達抽水機一台，以直徑 0.3 公尺輸水管分別通至兩端水槽，利用控制閥調節進排水方向及大小，以模擬海洋中流況。

3. 潮汐自動控制儀：利用兩個電子計時器 (*Timer*) 控制進排水時間，並藉調節自動控制閥門開關大小，以產生週期性進拱水，模擬潮汐漲落變化。

4. 蓄水池：長 60 公尺，寬 14 公尺，深 2.65 公尺，設兩口 120 公尺深水井抽取地下水，經過濾後供給試驗用水。

(二)小型試驗水池：長 37.5 公尺，寬 10 公尺，深 1 公尺，主要用以辦理港灣構造物三度空間穩定試驗，設備有：

1. 翼板式造波機 (*Flap type wave generator*)：長 9.82 公尺，以蝴蝶鉸固定於底槽，利用 30 HP 馬達帶動變速齒輪、及飛輪，藉調動變速器及偏心距可製造各種不同大小之波高及週期。

2. 斷面試驗水槽：長 28 公尺，寬 1 公尺，深 1 公尺，玻璃觀測段 14 公尺，供作海岸斷造物斷面穩定、越波、遡上及傳遞波等試

驗。

3. 進排水及移動台車、吊車等附屬設備。

二風洞水槽

風洞水槽長 100 公尺，寬 1.5 公尺，高 2.0 公尺，中間設有兩處玻璃觀測段，各長 15 公尺。風洞水槽主要是用以辦理結構物斷面之穩定、越波、遡上、傳遞波等試驗與風吹流、堆升及風浪交互作用試驗，主要設備為：

(一) 不規則波造波機：英國 *Armfield* 公司產品，可根據指令製造各種試驗波浪。現地波譜經過電腦特殊程式處理後輸出造波機控制器各種頻率權重，及一些控制參數，根據輸出結果調整控制器權重及參數可模擬現地波浪能譜，製造所需之試驗波浪。

(二) 鼓風機：裝設於水槽首端，由 75 HP 馬達，帶動變速機，藉調整齒輪箱轉速控制風速，風量可達每秒 30 立方公尺以上。即在水深 1 公尺時風速可達 20 公尺/秒以上。

(三) 環流設備：沿水槽東側佈置 30 公分管經環流水路，在水槽底部及側面設置四處進排水口，調整控制閥開關，利用 50 HP 抽水馬達以製造順流或逆流。

(四) 吊車及其他附屬設備。

三第二試驗場棚

港灣技術研究所成立後，積極推動第二試驗場棚興建，本場棚長 84 公尺，寬 60.65 公尺，採鋼架結構，覆蓋金屬折板，已發包施工，主要設備有：

(一) 大型試驗水池：長 62 公尺，寬 51.5 公尺，供作遮蔽、漂沙及流況試驗，主要設備有：

1. 自走式造波機四台，每台長 10 公尺，可在水池內任何方向

或位置，利用搖控裝置製造同步或相位差波浪，供作試驗。

2.環流設備，在試驗水池三邊設環流水槽二道，利用第一道閘門控制流量，再以第二道溢流型水堰調整水流，模型海洋中各種流況。

3.潮汐自動控制儀：利用電子感受器測定水池水位變化，調整自動控制閘，以製造潮汐。

14.恆壓水塔：塔高 3.2 公尺，長 8.85 公尺，寬 6.85 公尺，由 50 HP 抽水機抽水至水塔，再由給水管供水至試驗水池，剩餘水量則經由塔頂自由溢流回蓄水池、水頭固定，給水量可保持不變。

(二)斷面水槽（正設計中）。

計畫斷面水槽長 80 公尺，寬 3.5 公尺，深 2 公尺，設造波機及移動台車各一台。

(三)其他附屬設備：蓄水池、大型水池移動台車等。

附錄II 加拿大國家科學院對世界著名水工試驗室調查報告 1980年2月

DATA REPORT OF QUESTIONNAIRES ON
WAVE GENERATION AND ANALYSIS SYSTEMS

GENERAL

Total number of questionnaires sent out to Hydraulics Labs: 184
Total number of replies received from Hydraulics Labs: 98 (53%)
Total number of questionnaires sent out to Ship Towing Tanks: 74
Total number of replies received from Ship Towing Tanks: 44 (59%)

Number of institutes included in replies which reported not
having wave making facilities: Hydraulics Labs: 15
 Ship Towing Tanks: 9

The 83 Hydraulics Labs with wave making facilities reported a total of:

176 flumes equipped for regular waves
79 flumes equipped for irregular waves
15 flumes equipped for transient waves

112 basins equipped for regular waves
39 basins equipped for irregular waves
7 basins equipped for transient waves.

The 35 Towing Tanks with wave making facilities reported a total of:

51 flumes equipped for regular waves
31 flumes equipped for irregular waves
13 flumes equipped for transient waves

22 basins equipped for regular waves
18 basins equipped for irregular waves
6 basins equipped for transient waves

A. TANKS AND WAVE MACHINES

Note: A distinction was made between wave flumes and wave basins in analyzing the questionnaires. When the length of a tank is larger than 5X the width it was classified as a "Flume"; when the length of a tank is smaller than 5X the width, it was classified as a "Basin". Also, the ranges of tank dimension were set at different limits for Hydraulics Laboratories and Ship Towing Tanks.

HYDRAULICS LABORATORIES

Flumes:

Width		Length		Depth	
Range (m)	Number	Range (m)	Number	Range (m)	Number
≤0.99	85	≤24.9	47	≤0.49	18
1.0-2.99	58	25.0-49.9	79	0.5-0.99	78
3.0-4.99	29	50.0-99.9	40	1.0-1.99	75
≥5.0	13	≥100.0	21	≥2.0	16

HYDRAULICS LABORATORIES (Cont'd)

Type of Wave Machines in Flumes (see Fig. 1):

Types	A	B	C	D	E	F	G	H	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
Number	33	61	5	4	6	0	28	1	3	5	13	7	4	0	7	4	3	4

Other Features of Wave Machines in Flumes:

	Fixed	Movable	X	Y	Z	Air	Water
Number	165	20	6	48	128	18	162

Drive	Electric Motor & Gears	Electronic /Electric Servo	Hydraulic /Electric Servo
Number	109	20	57

Features of Flumes:

	Recirculation in tank		Short-Crested Wave Capability		Wind Capability	
	Yes	No	Yes	No	Yes	No
Number	69	118	26	154	50	136

Basins:

Length + Width		Depth	
Range (m)	Number	Range (m)	Number
≤29.9	27	≤0.49	33
30.0-49.9	34	0.5 -0.74	36
50.0-99.9	50	0.75-0.99	29
≥100.0	8	≥1.0	22

Type of Wave Machines in Basins:

Types	A	B	C	D	E	F	G	H	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
Number	34	44	4	2	0	1	8	0	3	2	9	4	1	0	2	2	1	4

Other Features of Wave Machines in Basins:

	Fixed	Movable	X	Y	Z	Air	Water
Number	51	71	10	28	83	1	115

HYDRAULICS LABORATORIES (Cont'd)

Drive	Electric Motor & Gears	Electronic /Electric Servo	Hydraulic /Electric Servo
Number	77	10	35

Features of Basins:

	Recirculation in tank		Short-Crested Wave Capability		Wind Capability	
	Yes	No	Yes	No	Yes	No
Number	46	73	33	85	11	108

SHIP TOWING TANKS:

Flumes:

Width		Length		Depth	
Range (m)	Number	Range (m)	Number	Range(m)	Number
≤4.9	15	≤99.9	20	≤2.9	21
5.0-9.9	21	100.0-199.9	18	3.0-4.9	18
10.0-14.9	13	200.0-299.9	13	5.0-6.9	12
≥15.0	6	≥300.0	4	≥7.0	4

Type of Wave Machines in Flumes:

Types	A	B	C	D	E	F	G	H	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
Number	1	21	0	2	0	0	2	5	0	0	16	0	0	0	0	7	1	0

Other Features of Wave Machines in Flumes:

	Fixed	Movable	X	Y	Z	Air	Water
Number	48	8	18	1	28	7	39

Drive	Electric Motor	Electronic /Electric Servo	Hydraulic /Electric Servo
Number	23	6	27

SHIP TOWING TANKS (Cont'd)

Features of Flumes:

	Recirculation in tank		Short-Crested Wave Capability		Wind Capability	
	Yes	No	Yes	No	Yes	No
Number	11	43	7	47	14	40

Basins:

Length + Width		Depth	
Range (m)	Number	Range (m)	Number
≤99.0	12	≤0.99	3
100.0-199.0	10	1.0-1.99	4
200.0-299.0	1	2.0-2.99	6
≥300.0	0	≥3.0	10

Type of Wave Machines in Basins:

Types	A	B	C	D	E	F	G	H	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
Number	2	10	0	1	0	0	2	1	0	0	5	0	0	0	0	5	0	0

Other Features of Wave Machines in Basins:

	Fixed	Movable	X	Y	Z	Air	Water
Number	19	6	6	1	17	4	16

Drive	Electric Motor & Gears	Electronic /Electric Servo	Hydraulic /Electric Servo
Number	13	3	9

Features of Basins:

	Recirculation in tank		Short-Crested Wave Capability		Wind Capability	
	Yes	No	Yes	No	Yes	No
Number	4	19	5	20	4	19

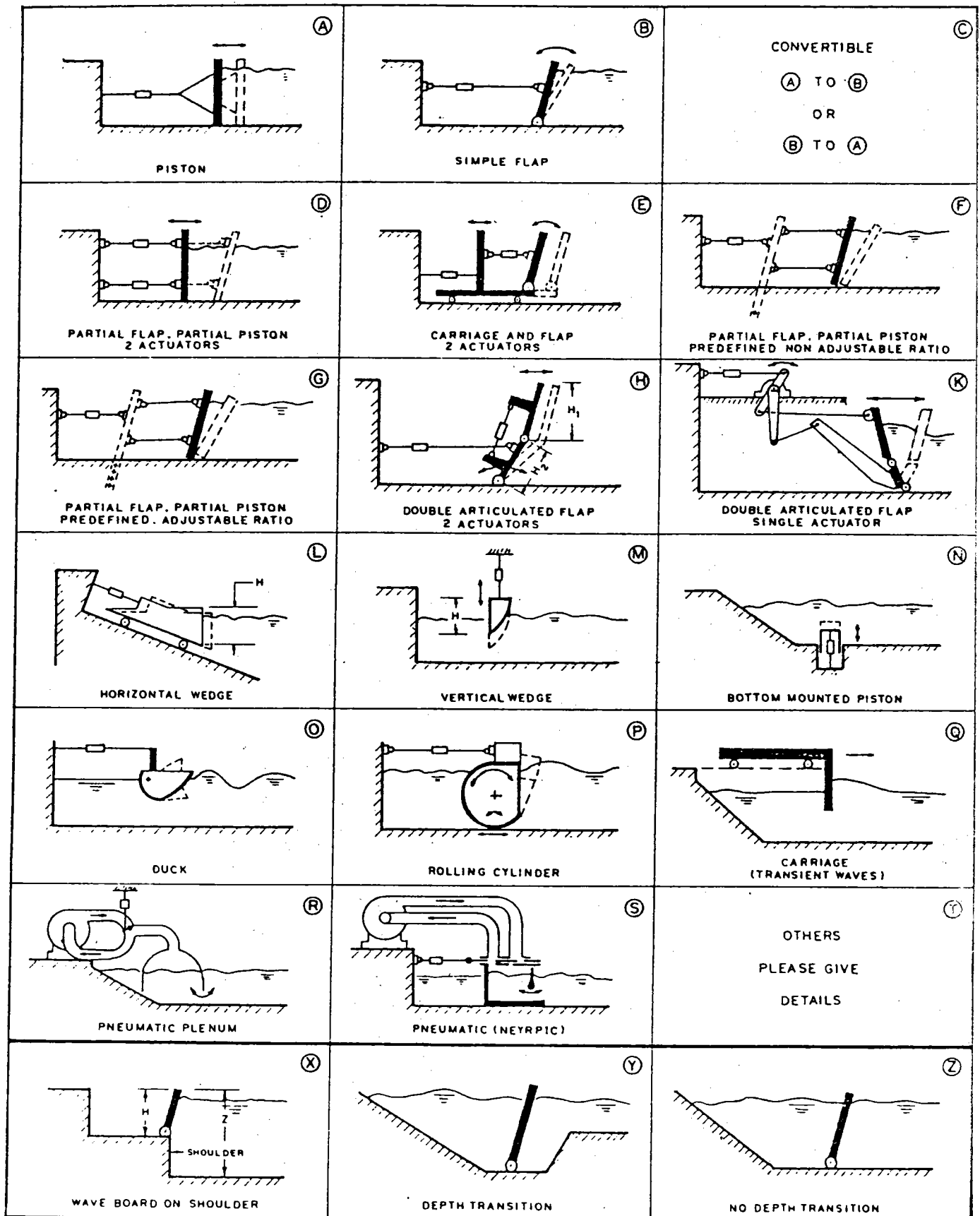


FIG.1 - 179 -

B. IRREGULAR WAVE GENERATION SYSTEMS

B.1 The following information describes which method of irregular wave generation you employ. Please check one or more of the following systems, adding a W if wind is added to the basic method. Please check square ☐ to indicate present practice and/or circle ☐ for anticipated practice in future, where applicable.

(32 Institutes responded in some way)

		Check ☐ Now	or ☐ Future
(a) <u>Harmonic Synthesis:</u>	(i) by mechanical gear system	☐ 3	☐ 1
	(ii) by special purpose electronic device	☐ 11	☐ 4
	(iii) by computer (other than Fourier transform)	☐ 7	☐ 11
(b) <u>True Random White Noise</u> (e.g. Thermal or Cosmic) and analog shaping filters		☐ 4	☐ 1
(c) <u>Pseudo Random Noise:</u>	(i) by on-line computer	☐ 3	☐ 13
	(ii) by special purpose electronic device	☐ 7	☐ 7
(d) <u>Reproduction of Prototype Wave Train:</u>			
	(i) by punched paper tape	☐ 3	☐ 0
	(ii) by analog magnetic tape	☐ 16	☐ 6
	(iii) by digital magnetic tape	☐ 2	☐ 2
	(iv) by on-line computer	☐ 1	☐ 14
(e) <u>Synthesis by Fourier Transform Technique:</u>			
	(i) by on-line computer	☐ 3	☐ 10
	(ii) by off-line computer	☐ 13	☐ 4
(f) <u>Frequency Sweep</u> by varying the speed of the actuator drive motor		☐ 8	☐ 4
(g) <u>Wind Alone</u>		☐ 2	☐ 2
(h) <u>Other</u> (please specify)		☐	☐

B.2 The following information defines some of the details of the systems described in B.1. Please check or give details where applicable.

- (a) For harmonic synthesis, give number of discrete frequencies which participate. *Varies from 6 to 256; node at (20)* _____
- (b) Are these frequencies integer multiples of a fundamental component? *6+* *14-* _____
(+ or -)
- (c) Give range of repetition periods of the irregular wave train *2-300* *20-∞* *90-∞*
(i) minimum (40) sec; (ii) typical (300) sec; (iii) maximum _____ sec.
- (d) Is the test period an integer multiple of the repetition period
(i) always ☐ 4 (ii) sometimes ☐ 11 (iii) never ☐ 8
- (e) Do you use compensation techniques for
(i) the wave board dynamic transfer function (+ or -) *17+* *5-*
(ii) the servo dynamic transfer function (+ or -) *16+* *7-*
(iii) the analog low-pass filter (+ or -) *10+* *6-*
- (f) If you use time discrete driving signals (i.e. involving digital to analog converters), what is the typical step rate? *0.39-1.0; node at (0.1) sec*
- (g) For (f) above, what smoothing do you use?
(i) analog low-pass filter ☐ 7 ☐ 5
(ii) straight line interpolator ☐ 2 ☐ 2
(iii) none ☐ 3 ☐ 0
- (h) Do you attempt to control wave steepness by phase control?
(i) always ☐ 0 ☐ 1 (ii) sometimes ☐ 6 ☐ 10 (iii) never ☐ 14 ☐ 0

C. DATA ACQUISITION SYSTEM

The following information describes your data acquisition system. Please check or give details where applicable. Please check square ☐ to indicate present practice and/or circle ☐ for anticipated practice in future, where applicable.

- | | Never | | Sometimes | | Every Test | |
|---|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | Now | Future | Now | Future | Now | Future |
| (a) What methods of data recording do you employ? | | | | | | |
| (i) Strip-chart recorder | ☐ 1 | ☐ 1 | ☐ 10 | ☐ 12 | ☐ 14 | ☐ 5 |
| (ii) Analog magnetic tape recorder | ☐ 2 | ☐ 1 | ☐ 15 | ☐ 12 | ☐ 10 | ☐ 4 |
| (iii) Digital data logger for off-line analysis | ☐ 7 | ☐ 4 | ☐ 4 | ☐ 8 | ☐ 4 | ☐ 2 |
| (iv) On-line digital computer
(please give computer model no.) | ☐ 6 | ☐ 3 | ☐ 7 | ☐ 9 | ☐ 10 | ☐ 12 |
| (b) How many wave probes do you employ for: | Now | | Future | | | |
| (i) Ship motion studies? | <i>Varies from 1-10; node at (2)</i> | | _____ | | _____ | |
| (ii) Floating structures studies? | <i>Varies from 1-6; node at (2)</i> | | _____ | | _____ | |
| (iii) Fixed structure studies? | <i>Varies from 1-10; node at (2)</i> | | _____ | | _____ | |
| (iv) Others? | _____ | | _____ | | _____ | |

D. DATA ANALYSIS SYSTEM

The following information defines details of the analysis system you use for simulated sea states, as measured in your laboratory tanks. Please check square ☐ to indicate present practice and/or circle ☐ for anticipated practice in future, where applicable. All notations follow the PIANC report of the International Commission for the Study of Waves, of which Appendix no. 1 has been attached.

	Never		Sometimes		Every Test	
	Now	Future	Now	Future	Now	Future
(a) How frequently do you perform wave analysis?	☐ 0	☐ 0	☐ 5	☐ 2	☐ 24	☐ 20
(b) Do you carry out the analysis by the following techniques						
(i) Visual inspection of graphic records?	☐ 0	☐ 0	☐ 11	☐ 7	☐ 12	☐ 8
(ii) Off-line computer?	☐ 1	☐ 1	☐ 11	☐ 10	☐ 12	☐ 6
(iii) On-line computer?	☐ 2	☐ 0	☐ 4	☐ 5	☐ 11	☐ 16
(c) Which time domain analysis do you normally perform:						
(i) Zero-up crossing?	☐ 3	☐ 1	☐ 9	☐ 11	☐ 8	☐ 2
(ii) Zero-down crossing?	☐ 4	☐ 1	☐ 5	☐ 4	☐ 1	☐ 1
(iii) Other (please specify)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
(d) Which time domain parameters do you derive?						
(i) $H_{z,1/3}$	☐ 1	☐ 0	☐ 9	☐ 11	☐ 15	☐ 7
(ii) $H_{z,max}$	☐ 1	☐ 0	☐ 11	☐ 10	☐ 11	☐ 4
(iii) $\overline{T}_z$	☐ 2	☐ 0	☐ 11	☐ 4	☐ 8	☐ 3
(iv) $TH_{z,1/3}$	☐ 5	☐ 2	☐ 4	☐ 7	☐ 4	☐ 2
(v) $TH_{z,max}$	☐ 3	☐ 1	☐ 7	☐ 8	☐ 2	☐ 1
(vi) $\epsilon_T^2 = 1 - (\overline{T}_C/\overline{T}_Z)^2$	☐ 5	☐ 1	☐ 6	☐ 8	☐ 5	☐ 1
(vii) Others (please specify)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
(e) Which frequency domain functions and parameters do you derive:						
(i) Fourier transform (periodogram)	☐ 3	☐ 1	☐ 12	☐ 11	☐ 5	☐ 4
(ii) Power spectral density	☐ 0	☐ 0	☐ 8	☐ 5	☐ 21	☐ 14
(iii) F_p (peak frequency)	☐ 2	☐ 0	☐ 6	☐ 6	☐ 13	☐ 8
(iv) $T_p (= 1/F_p)$	☐ 2	☐ 0	☐ 6	☐ 5	☐ 14	☐ 8
(v) $\sigma = \sqrt{fS(f) \cdot df}$	☐ 0	☐ 0	☐ 8	☐ 4	☐ 18	☐ 12
(vi) $H_{m_0} = 4 \cdot \sigma$	☐ 1	☐ 0	☐ 6	☐ 4	☐ 17	☐ 13
(vii) $T_{m_{0,1}} = m_0/m_1$	☐ 2	☐ 0	☐ 13	☐ 8	☐ 7	☐ 6
(viii) $T_{m_{0,2}} = \sqrt{m_0/m_2}$	☐ 2	☐ 0	☐ 16	☐ 9	☐ 6	☐ 4
(ix) $\epsilon_s = \sqrt{1 - m_2^2/m_0 \cdot m_4}$	☐ 2	☐ 0	☐ 12	☐ 8	☐ 9	☐ 6
(x) Others (please specify)	☐	☐	☐	☐	☐	☐

5 of 5

Institute: Ship Towing Tanks

- | | Never
Now Future | Sometimes
Now Future | Every Test
Now Future |
|---|---|--|--|
| (f) Do you describe groupiness?
(please specify) | ☐ 21 ☐ 1 | ☐ 1 ☐ 13 | ☐ 0 ☐ 4 |
| (g) Do you describe particular wave sequences?
(please specify) | ☐ 14 ☐ 1 | ☐ 5 ☐ 13 | ☐ 0 ☐ 1 |
| (h) Do you derive wave steepness by | | | |
| (i) Calculation? | ☐ 6 ☐ 0 | ☐ 13 ☐ 12 | ☐ 4 ☐ 2 |
| (ii) Measurement? | ☐ 9 ☐ 1 | ☐ 8 ☐ 9 | ☐ 0 ☐ 1 |
| (j) Do you measure structural or beach reflections
in the presence of irregular waves? | ☐ 19 ☐ 5 | ☐ 6 ☐ 9 | ☐ 0 ☐ 0 |

E. Please comment below on how to define the essential parameters of a sea state.

B. IRREGULAR WAVE GENERATION SYSTEMS

B.1 The following information describes which method of irregular wave generation you employ. Please check one or more of the following systems, adding a W if wind is added to the basic method. Please check square ☐ to indicate present practice and/or circle ☐ for anticipated practice in future, where applicable.
(78 Laboratories responded in some way)

		Check ☐ or ☐ +W	
		Now	Future
(a) Harmonic Synthesis:	(i) by mechanical gear system	☐ 15	☐ 4
	(ii) by special purpose electronic device	☐ 8	☐ 6
	(iii) by computer (other than Fourier transform)	☐ 8	☐ 12
(b)	<u>True Random White Noise</u> (e.g. Thermal or Cosmic) and analog shaping filters	☐ 8	☐ 7
(c) <u>Pseudo Random Noise</u> :	(i) by on-line computer	☐ 7	☐ 14
	(ii) by special purpose electronic device	☐ 12	☐ 10
(d)	<u>Reproduction of Prototype Wave Train:</u>		
	(i) by punched paper tape	☐ 10	☐ 7
	(ii) by analog magnetic tape	☐ 15	☐ 9
	(iii) by digital magnetic tape	☐ 4	☐ 5
	(iv) by on-line computer	☐ 9	☐ 22
(e)	<u>Synthesis by Fourier Transform Technique:</u>		
	(i) by on-line computer	☐ 8	☐ 18
	(ii) by off-line computer	☐ 18	☐ 15
(f)	<u>Frequency Sweep</u> by varying the speed of the actuator drive motor	☐ 7	☐ 5
(g)	<u>Wind Alone</u>	☐ 12	☐ 5
(h)	<u>Other</u> (please specify)	☐	☐

B.2 The following information defines some of the details of the systems described in B.1. Please check or give details where applicable.

- (a) For harmonic synthesis, give number of discrete frequencies which participate. *Varies from 2 to 1024; node at (20)*
- (b) Are these frequencies integer multiples of a fundamental component? (+ or -) *5+ 14- _____*
- (c) Give range of repetition periods of the irregular wave train
0.5-3600 5-10800 2-∞
 (i) minimum *(40)* sec; (ii) typical *(300)* sec; (iii) maximum *(1000)* sec.
- (d) Is the test period an integer multiple of the repetition period
 (i) always ☐ 7 (ii) sometimes ☐ 19 (iii) never ☐ 7
- (e) Do you use compensation techniques for
 (i) the wave board dynamic transfer function (+ or -) *28+ 12- _____*
 (ii) the servo dynamic transfer function (+ or -) *22+ 17- _____*
 (iii) the analog low-pass filter (+ or -) *16+ 20- _____*
- (f) If you use time discrete driving signals (i.e. involving digital to analog converters), what is the typical step rate? *0.01-0.2; node at (0.1) sec*
- (g) For (f) above, what smoothing do you use?
 (i) analog low-pass filter ☐ 20 ☐ 14
 (ii) straight line interpolator ☐ 4 ☐ 3
 (iii) none ☐ 11 ☐ 2
- (h) Do you attempt to control wave steepness by phase control?
 (i) always ☐ 1 ☐ 1 (ii) sometimes ☐ 7 ☐ 12 (iii) never ☐ 29 ☐ 5

C. DATA ACQUISITION SYSTEM

The following information describes your data acquisition system. Please check or give details where applicable. Please check square ☐ to indicate present practice and/or circle ☐ for anticipated practice in future, where applicable.

- | | Never | Sometimes | Every Test |
|--|---|--|--|
| | Now Future | Now Future | Now Future |
| (a) What methods of data recording do you employ? | | | |
| (i) Strip-chart recorder | ☐ 5 ☐ 1 | ☐ 30 ☐ 25 | ☐ 26 ☐ 13 |
| (ii) Analog magnetic tape recorder | ☐ 6 ☐ 5 | ☐ 30 ☐ 22 | ☐ 3 ☐ 5 |
| (iii) Digital data logger for off-line analysis | ☐ 12 ☐ 8 | ☐ 10 ☐ 14 | ☐ 4 ☐ 8 |
| (iv) On-line digital computer
(please give computer model no.)
<i>10 H.P.; 9 PDP</i> | ☐ 7 ☐ 2 | ☐ 24 ☐ 21 | ☐ 9 ☐ 13 |
| (b) How many wave probes do you employ for: | Now | Future | |
| (i) Harbour studies? | <i>Varies from 1-120; node (12)</i> | _____ | |
| (ii) Breakwater studies? | <i>Varies from 1-20; node (3)</i> | _____ | |
| (iii) Beach process studies? | <i>Varies from 1-20; node (6)</i> | _____ | |
| (iv) Offshore fixed structures? | <i>Varies from 1-20; node (5)</i> | _____ | |
| (v) Floating structure studies? | <i>Varies from 2-20; node (5)</i> | _____ | |
| (vi) Others? | _____ | _____ | |

D. DATA ANALYSIS SYSTEM

The following information defines details of the analysis system you use for simulated sea states, as measured in your laboratory tanks. Please check square ☐ to indicate present practice and/or circle ☐ for anticipated practice in future, where applicable. All notations follow the PIANC report of the International Commission for the Study of Waves, of which Appendix no. 1 has been attached.

	Never Now Future	Sometimes Now Future	Every Test Now Future
(a) How frequently do you perform wave analysis?	☐ 3 ☐ 0	☐ 23 ☐ 14	☐ 34 ☐ 29
(b) Do you carry out the analysis by the following techniques			
(i) Visual inspection of graphic records?	☐ 5 ☐ 6	☐ 27 ☐ 19	☐ 18 ☐ 7
(ii) Off-line computer?	☐ 8 ☐ 5	☐ 25 ☐ 20	☐ 15 ☐ 10
(iii) On-line computer?	☐ 4 ☐ 1	☐ 20 ☐ 22	☐ 10 ☐ 16
(c) Which time domain analysis do you normally perform:			
(i) Zero-up crossing?	☐ 4 ☐ 2	☐ 21 ☐ 18	☐ 21 ☐ 19
(ii) Zero-down crossing?	☐ 8 ☐ 6	☐ 11 ☐ 10	☐ 5 ☐ 3
(iii) Other (please specify)	☐ ☐	☐ ☐	☐ ☐
(d) Which time domain parameters do you derive?			
(i) $H_{z,1/3}$	☐ 4 ☐ 2	☐ 26 ☐ 15	☐ 24 ☐ 28
(ii) $H_{z,max}$	☐ 5 ☐ 2	☐ 28 ☐ 18	☐ 18 ☐ 20
(iii) $\bar{T}_z$	☐ 7 ☐ 3	☐ 22 ☐ 15	☐ 23 ☐ 21
(iv) $TH_{z,1/3}$	☐ 10 ☐ 3	☐ 14 ☐ 12	☐ 14 ☐ 14
(v) $TH_{z,max}$	☐ 8 ☐ 3	☐ 18 ☐ 16	☐ 9 ☐ 9
(vi) $\epsilon_T^2 = 1 - (\bar{T}_C/\bar{T}_z)^2$	☐ 18 ☐ 10	☐ 9 ☐ 10	☐ 5 ☐ 8
(vii) Others (please specify)	☐ ☐	☐ ☐	☐ ☐
(e) Which frequency domain functions and parameters do you derive:			
(i) Fourier transform (periodogram)	☐ 9 ☐ 2	☐ 24 ☐ 22	☐ 4 ☐ 6
(ii) Power spectral density	☐ 2 ☐ 0	☐ 27 ☐ 19	☐ 21 ☐ 18
(iii) F_p (peak frequency)	☐ 5 ☐ 0	☐ 22 ☐ 19	☐ 18 ☐ 17
(iv) $T_p (= 1/F_p)$	☐ 5 ☐ 0	☐ 23 ☐ 18	☐ 16 ☐ 17
(v) $\sigma = \sqrt{S(f) \cdot df}$	☐ 5 ☐ 0	☐ 19 ☐ 14	☐ 21 ☐ 13
(vi) $H_{m_0} = 4 \cdot \sigma$	☐ 7 ☐ 0	☐ 14 ☐ 15	☐ 16 ☐ 17
(vii) $T_{m_{0,1}} = m_0/m_1$	☐ 11 ☐ 5	☐ 18 ☐ 14	☐ 7 ☐ 7
(viii) $T_{m_{0,2}} = \sqrt{m_0/m_2}$	☐ 12 ☐ 4	☐ 21 ☐ 17	☐ 5 ☐ 6
(ix) $\epsilon_s = \sqrt{1 - m_2^2/m_0 \cdot m_4}$	☐ 12 ☐ 5	☐ 18 ☐ 18	☐ 7 ☐ 8
(x) Others (please specify)	☐ ☐	☐ ☐	☐ ☐

- | | Never
Now Future | Sometimes
Now Future | Every Test
Now Future |
|---|---|--|--|
| (f) Do you describe groupiness?
(please specify) | ☐ 29 ☐ 2 | ☐ 15 ☐ 22 | ☐ 0 ☐ 4 |
| (g) Do you describe particular wave sequences?
(please specify) | ☐ 26 ☐ 2 | ☐ 17 ☐ 26 | ☐ 0 ☐ 3 |
| (h) Do you derive wave steepness by | | | |
| (i) Calculation? | ☐ 16 ☐ 0 | ☐ 24 ☐ 26 | ☐ 6 ☐ 4 |
| (ii) Measurement? | ☐ 17 ☐ 2 | ☐ 18 ☐ 25 | ☐ 3 ☐ 3 |
| (j) Do you measure structural or beach reflections
in the presence of irregular waves? | ☐ 21 ☐ 1 | ☐ 24 ☐ 30 | ☐ 4 ☐ 9 |

E. Please comment below on how to define the essential parameters of a sea state.

Ship Towing Tanks

Bulgarian Ship Hydrodynamics
Centre
Varna, Bulgaria

Shanghai Chiao-Tung University
Shanghai, China

Shanghai Ship Design and
Research Institute
Shanghai, China

China Ship Scientific
Research Center
Kiangsu Province, China

Helsinki University of
Technology
Espoo, Finland

Wartsila Icebreaking Model Basin
Helsinki, Finland

Hiroshima University
Hiroshima, Japan

Korea Research Institute of Ship
Daejeon, Korea

National Research Council
Ottawa, Canada

Ship Research Laboratory
Lyngby, Denmark

Versuchsanst für
Binnenschiffbau
Duisburg, Germany

Hamburg Shipmodel Basin (HSVA)
Hamburg, Germany

Versuchsanstalt für Wasserbau
und Schiffbau
Berlin, Germany

Bassin d'Essais des Carenes
Paris, France

Institut de Recherches de la
Construction Navale
Paris, France

Indian Institute of Technology
Kharagpur, India

Universita degli Studi di Napoli
Napoli, Italy

Universita di Genova
Genova, Italy

Technical Research and
Development Institute
Japan Defence Agency
Tokyo, Japan

University of Tokyo
Tokyo, Japan

University of Osaka
Osaka, Japan

Heavy Industries Ltd.
Yokohama, Japan

Mitsubishi Heavy Industries Ltd.
Nagasaki, Japan

Akashi Ship Model Basin Co., Ltd.
Akashi City, Japan

Shipbuilding Research Centre
of Japan
Tokyo, Japan

Seoul National University
Seoul, Korea

Technological University
Delft, The Netherlands

Norwegian Hydrodynamic
Laboratories
Trondheim, Norway

Page 2
Ship Towing Tanks

Ship Design and Research Centre
Gdanski, Poland

Ministerio de Defensa Marina
Madrid, Spain

Statens Skeppsprovvningsanstalt
Goteborg, Sweden

University of Newcastle
Newcastle-upon-Tyne, U.K.

British Ship Research Assn.
Wallsend, United Kingdom

Admiralty Marine Technology
Establishment
Gosport, United Kingdom

National Maritime Institute
Feltham, United Kingdom

Vosper-Thornycroft Ltd.
Portsmouth, United Kingdom

Massachusetts Institute of
Technology
Cambridge, U.S.A.

Offshore Technology Corporation
Escondido, U.S.A.

Stevens Inst. of Technology
Hoboken, U.S.A.

United States Naval Academy
Annapolis, U.S.A.

University of Michigan
Ann Arbor, U.S.A.

David Taylor Naval Ship Research
and Development Center
Bethesda, U.S.A.

Pennsylvania State University
Pennsylvania, U.S.A.

Hydronautics, Incorporated
Laurel, Maryland, U.S.A.

LIST OF INSTITUTES WHICH PARTICIPATED IN
THE SURVEY OF WAVE GENERATION AND ANALYSIS SYSTEMS

Hydraulics Laboratories

Monash University Victoria, Australia	Queens University Kingston, Canada
University of Adelaide Adelaide, Australia	Ecole Polytechnique Montreal, Canada
State Rivers and Water Supply Commission Victoria, Australia	National Research Council of Canada Ottawa, Canada
University of New South Wales Manly Vale, Australia	National Water Research Institute Burlington, Canada
Department of Public Works N.S.W. Manly Vale, Australia	Université Laval Ste. Foy, Canada
Snowy Mountains Engineering Corporation Cooma, Australia	Arctec Canada Ltd. Kanata, Canada
University of Tasmania Tasmania, Australia	University of Saskatchewan Saskatoon, Canada
University of Melbourne Parkville, Victoria, Australia	Ontario Hydro Toronto, Canada
University of Western Australia Nedlands, W. Australia	Universität Hamburg Hamburg, West Germany
Universiteit te Gent Gent, Belgium	Technical University of Berlin Berlin, Germany
University of Liege Liege, Belgium	Technischen Universität Braunschweig Braunschweig, Germany
COPPE/UFRJ - PENO Rio de Janeiro, Brasil	Technical University of Hannover Hannover, Germany
HIDROESB - Saturnino de Brito Hydraulic Laboratory Rio de Janeiro, Brasil	Technical University München München, Germany
National Institute for Waterways Research Rio de Janeiro, Brasil	Universität Stuttgart Stuttgart, Germany
	Aalborg Universitetscenter Aalborg, Denmark

Page 2
Hydraulics Laboratories

Danish Hydraulic Institute
Horsholm, Denmark

Technical University of Denmark
Lyngby, Denmark

Suez Canal Research Centre
Ismailia, Arab Republic of Egypt

Laboratoire National
d'Hydraulique
Chatou, France

British Hovercraft
Isle of Wight, U.K.

University of Bristol
Bristol, England

Wimpey Laboratories Ltd.
London, Great Britain

British Transport Docks Board
Middlesex, England

Hydraulics Research Station
Wallingford, England

British Hydromechanics Research
Association
Cranfield, England

Research Centre for Water
Resources
Development
Budapest, Hungary

Hydraulic and Hydraulic
Structures Institute
Genova, Italia

Politecnico di Torino
Torino, Italia

Coastal and Marine Engineering
Research Institute
Haifa, Israel

Indian Institute of
Technology, Bombay
Bombay, India

Maharashtra Engineering Research
Institute
Maharashtra State, India

Central Water and Power
Research Station
Poona, India

Irrigation Research Station
Tamil Nadu, India

Karnataka Engineering
Research Station
Krishnarajsagara
Karnataka State, India

Karnataka Regional
Engineering College
Surathkal
Karnataka State, India

Motilal Nehru Regional
Engineering College
Allahabad, India

Land Reclamation, Irrigation and
Power Research Institute
Punjab, Amritsar, India

Jawaharlalnearu Technological
University
Pradesh, India

Maulana Azad College
of Technology
Bhopal, India

Indian Institute of
Technology, Kanpur
Kanpur, India

Indian Institute of Technology
Madras, India

U.P. Irrigation Research
Institute
Roorkee, India

Regional Engineering College
Kashmir, India

Port and Harbour Research
Institute
Ministry of Transport
Yokosuka, Japan

First District Port
Construction Bureau
Ministry of Transport
Niigata, Japan

Central Research Institute of
Electric Power Industry
Abiko City, Japan

Kyoto University
Kyoto, Japan

Disaster Prevention Research
Institute
Kyoto, Japan

Osaka City University
Osaka, Japan

Tohoku University
Sendai, Japan

University of Tokyo
Tokyo, Japan

Public Works Research Institute
Ibaraki-Ken, Japan

River and Harbour Laboratory
Trondheim, Norway

Delft University of Technology
Delft, The Netherlands

Delft Hydraulics Laboratory
Delft, The Netherlands

Ministry of Works & Development
Lower Hutt, New Zealand

National Laboratory of
Civil Engineering
Lisbon, Portugal

Institute of Hydroengineering
Polish Academy of Sciences
Gdansk, Poland

Hydraulic Engineering Research
Institute
Bucuresti, Romania

Hydraulics Laboratory
"Guillermo C. Céspedes"
La Plata, Argentina

Institute of Hydraulic
Engineering
Ministry of Public Works
Bandung, Indonesia

Chalmers University of
Technology
Göteborg, Sweden

Dept. of Water Resources
Engineering
Lunds Universitet
Lund, Sweden

Royal Institute of Technology
Stockholm, Sweden

IVO Hydraulic Laboratory
Helsinki, Finland

Asian Institute of Technology
Bangkok, Thailand

Middle East Technical University
ANKARA, Turkey

University of California
Berkeley, U.S.A.

U.S. Army Engineer Waterways
Experiment Station
Vicksburg, U.S.A.

Civil Engineering Laboratory
Naval Construction Battalion
Centre
Port Hueneme, U.S.A.

University of Florida
Gainesville, U.S.A.

University of Iowa
Iowa, U.S.A.

Page 4
Hydraulics Laboratories

University of Illinois
Urbana, U.S.A.

University of Stellenbosch
Stellenbosch, South Africa

Massachusetts Institute of
Technology
Cambridge, U.S.A.

U.S. Dept. of the Interior
Bureau of Reclamation
Denver, U.S.A.

Water Conservation Structures
Laboratory
U.S. Department of Agriculture
Stillwater, U.S.A.

Hydraulics Laboratory
Ann Arbor, U.S.A.

Saint Anthony Falls Hydraulic
Laboratory
Minneapolis, U.S.A.

Webb Institute of Naval
Architecture
Glen Cove, U.S.A.

Oregon State University
Corvallis, U.S.A.

University of Texas
Austin, U.S.A.

Texas A and M University
Texas, U.S.A.

University of Washington
Seattle, U.S.A.

Coastal Engineering Research
Center
Fort Belvoir, U.S.A.

Chicago Bridge and Iron Co.
Illinois, U.S.A.

University of Witwatersrand
Johannesburg, South Africa

National Research Institute
for Oceanology
Stellenbosch, South Africa