

模型縮尺對水工試驗影響研究

計畫主持人：	張	金	機
研究人員：	何	良	勝
	朱	金	元
	李	勇	榮
助	理：	廖	慶
		林	柏
技	工：	蔡	金
		張	富
		何	炳
		陳	正
		蔡	瑞
		李	永

模型縮尺對水工試驗影響研究

目 錄

摘要	1
第一章 前言	3
第二章 往昔之研究	4
第三章 波浪溯上	11
一、概述	11
二、往昔研究	11
三、理論分析	17
四、試驗經過	21
五、試驗結果	23
六、結論與建議	51
第四章 傳遞波	53
一、概述	53
二、往昔研究	53
三、試驗經過	55
四、試驗結果	57
五、結論	61
第五章 不等縮尺水工模型試驗	63
一、概述	63
二、理論分析	63
三、試驗設備	66
四、試驗模型	67
五、試驗條件	70
六、試驗結果	71
七、結論	79

第六章 綜合結論與建議	81
一、結論	81
二、建議	83
參考書籍	85
附錄 I 波浪溯上、溯下試驗資料	87
附錄 II 傳遞波試驗資料	103
附錄 III 不等縮尺港池波高分佈試驗資料	107

模型縮尺對水工試驗影響研究

摘 要

本研究辦理防波堤斷面溯上、溯下、傳遞波與港池波浪分佈試驗分別受模型縮尺影響。試驗結果顯示，相對溯上、溯下，隨碎波參數 (Surf parameter) $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ ，增加而略為增大，而與波浪尖度 H/L_0 ，成良好之線性關係。模型縮尺對溯上影響較溯下顯著。三種試驗坡度以 1 : 1.5 受模型縮尺影響最大，隨坡度減緩而縮尺影響漸減。由迴歸曲線之趨勢顯示縮尺大於 1/16 時，溯上、溯下受縮尺影響甚小。傳遞波係數 (Transmitted wave coefficient) 與相對胸牆高 (H_c/H_i) 在試驗範圍內有良好之線性關係，其大小為試驗週期之函數。傳遞波受模型縮尺影響與溯上、下有相同之趨勢。港池形狀一定，其可能發生共振週期隨不等縮尺比 (或水深) 而改變。考慮折射為主之時間縮尺模型律，港池內波高係數偏大，且成不規則散亂分佈。綜合試驗結果建議斷面試驗最理想之模型縮尺為 1/16，平面試驗除非對波動力現象極為了解，否則應避免採用不等縮尺模型。

第一章 前 言

港灣工程水工模型試驗，一般均根據福祿德模型律 (Froude model law) 建造與原型 (Prototype) 幾何相似之等縮尺或不等縮尺模型 (Undistorted or distorted model) 。因模型縮尺 (指模型與原型之比) 大都小於 $(10)^{-1}$ ；在此種情況下，無法正確模擬波浪受底床摩擦、內摩擦，表面張力及黏滯性等因素所造成之減衰現象。其對防波堤斷面試驗，波浪作用於堤面後造成溯上 (Run-up) 與傳遞波 (Transmitted waves) 之影響如何？此為本研究重點之一。

海岸工程水工模型平面試驗所包括範圍往往超過一、二十公里海岸。試驗場地又因經濟考慮而受限制。太小之模型縮尺使底床摩擦力，表面張力等因素所造成之影響更為顯著。而且因模型縮尺太小使模型上水深，波高等相對減小造成量測不易。在不得已的情況下，經常採用不等縮尺模型，增加垂直方向縮尺。因水平與垂直方向縮尺不相等，波浪動力改變，其對港池平面遮蔽試驗影響如何？波浪由外海進入港池內受淺化、折射及繞射等多重影響，時間縮尺究應如何考慮？此為本研究重點之二。

研究計畫首先針對以往研究加以探討；辦理模型試驗，分析試驗結果，以瞭解試驗縮尺對水工模型試驗之影響，作為未來辦理試驗之參考。

第二章 往昔之研究

Engelund(1953) 建議將水流通過均勻沙之水力梯度 (Hydraulic gradient) I ，分爲層流與亂流兩種，即 $I = au + bu^2$ 。當雷諾數 (Reynold number)， $R = Ud / \nu$ ，(d 爲沙粒直徑， ν 爲流體動態黏滯力；而雷諾數相當大時，黏滯力影響逐漸減小，而爲慣性力與重力所取代。Engelund 證明水力梯度可以寫成

$$I = \alpha_0 \frac{(1-n)^3}{n^2} \frac{\nu}{gd^2} U + \beta_0 \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{gd} U^2 \quad (2-1)$$

上式中 α_0 ， β_0 爲常數， n 爲孔隙率， U 爲流速， g 爲重力加速度。海岸工程水工模型試驗通常採用福祿德模型律 (Froude model law)。設線性縮尺爲 S ，則時間縮尺爲 \sqrt{S} 。(2-1) 式第一項，模型與原型之 n ， ν 及 g 相同，則層流項需依據 U/d^2 選定縮尺。 $U/d^2 = \sqrt{S}/S^2 = S^{-3/2}$ 。亂流項則以 U^2/d 計算縮尺， $(\sqrt{S})^2/S = 1$ ，由上述可知，依據福祿德模型律製作模型，層流項無法在模型上重現。

當雷諾數 R 較小時，亂流項可以忽略。(2-1) 式爲符合福祿德模型律，原型 U_p/d_p^2 與模型 U_m/d_m^2 必需相等。即

$$\frac{d_p^2}{d_m^2} = \frac{U_p}{U_m} \quad d_m = d_p / \sqrt[3]{S} \quad (2-2)$$

足標 p 及 m 分別代表原型與模型。

層流試驗爲達成水力梯度重現，試驗模型所採用之塊石粒徑需以較大之縮尺模擬。

一般水力問題常同時受層流與亂流作用，爲能夠評估其界限，了解層流與亂流在試驗中所佔重要性，Engelund 定其比值爲：

$$\varepsilon = \frac{\beta_0 \frac{(1-n)}{n^3} \frac{U^2}{gd}}{\alpha_0 \frac{(1-n)}{n^2} \frac{\nu}{gd^2} U} = \frac{\beta_0}{\alpha_0} \frac{1}{(1-n)^2} R \quad (2-3)$$

Engelund 發現不均勻顆粒， $\alpha_0 \geq 1500$ ， $\beta_0 \geq 3.6$ ， $n \approx 0.4$ ，則 $\varepsilon = R/60$ 。層流上限為 $\varepsilon_c = 0.07$ ，此即亂流項佔層流項之 7%。臨界雷諾數 $R = R_c \approx 60$ ， $\varepsilon_c \approx 4.0$ 。亂流最低界限為 $\varepsilon > 100$ ， $R > 6000$ 。此值較 Dai 及 Kamel (1969) 及 Thomson et al (1972) 經由試驗所得結果 R 介於 3×10^4 至 10^5 略小。

防波堤斷面試驗模型縮尺都採用 1 : 30 左右。護坡塊特徵長 (Characteristic length) 約為 5cm，其溯上時流速約為 1m/sec；則當諾數 $R \approx 50,000$ ，但其次層塊石粒徑及水流速度較表面層小。為達成正確模擬效果，使模型與原型水力梯度相等；模型上塊石粒徑必需較依據福祿德模型律所求得之粒徑略大。

$$\frac{I_m}{I_p} = \frac{\alpha_0 \frac{(1-n)^3}{n} \frac{\nu}{g d_m^2} U_m + \beta_0 \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{g d_m} U_m^2}{\alpha_0 \frac{(1-n)^3}{n} \frac{\nu}{g d_p^2} U_p + \beta_0 \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{g d_p} U_p^2} = 1 \quad (2-4)$$

設原型與模型塊石粒徑比為 $d_p / d_m = K$ ，將 (2-3) 代入 (2-4) 整理後得

$$K = \frac{\varepsilon_p}{\sqrt{S}} \left[\sqrt{1 + 4S^{\frac{3}{2}} \frac{(1 + \varepsilon_p)}{\varepsilon_p^2}} - 1 \right] \quad (2-5)$$

(2-5) 式繪如圖 2-1 所示。當 $\varepsilon_p \rightarrow 0$ ， $K = \sqrt{S}$ ；而 $\varepsilon_p \rightarrow \infty$ ， $K \rightarrow S$ 。Le Mehaute 利用不同方法各獲得類似結果。但在實際應用上，最大困難為如何決定 ε_p 。

Keulegan (1950) 認為根據福祿德模型律製作幾何相似模型，因受波浪表面張力，內摩擦力及底床摩擦力而減衰，使試驗產生誤差。由圖 2-2 可知表面張力對流速之影響。

波高受內摩擦影響，可以下式表示

$$\frac{H_t}{H_{t=0}} = \exp(-s\pi^2 \nu t / \lambda^2) \quad (2-6)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \exp(-\alpha x_p) \quad (2-7)$$

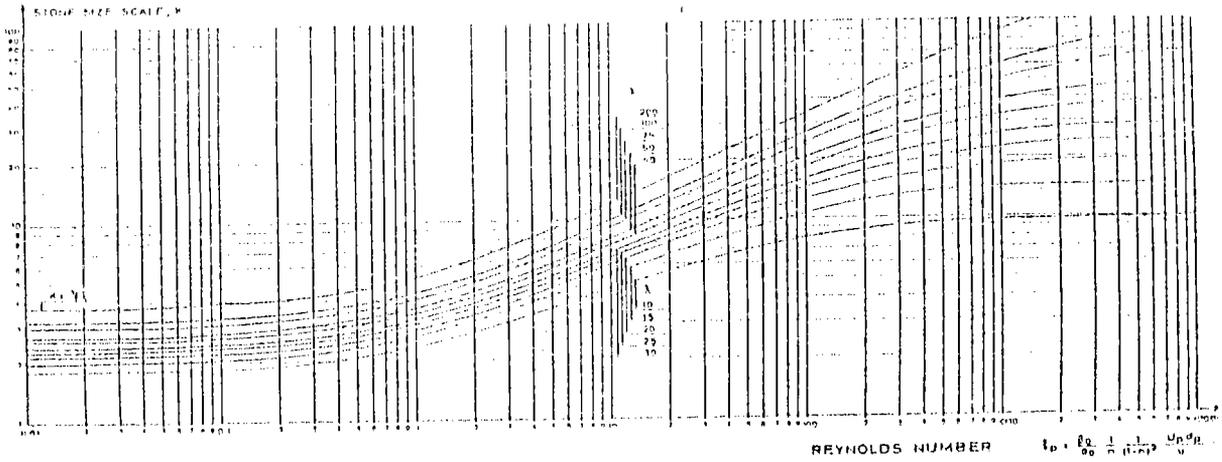


圖 2 - 1 層流模型試驗決定塊石大小圖表

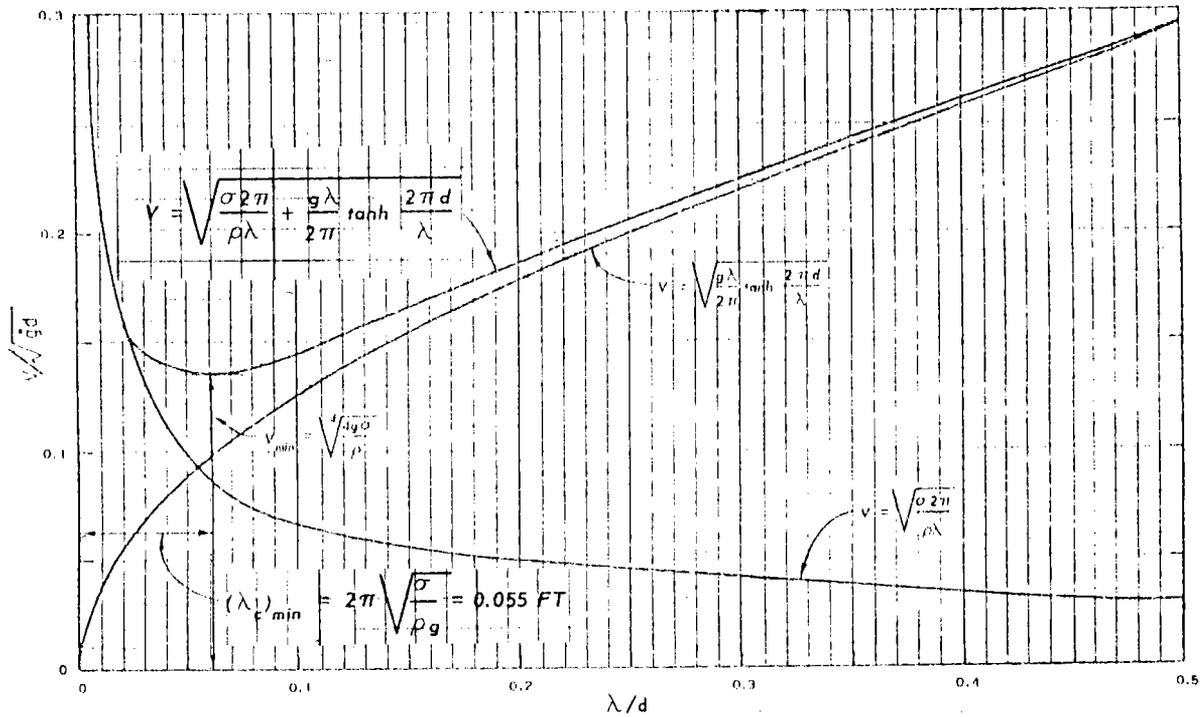


圖 2 - 2 表面張力在波浪模型設計之影響

上式中 t 為波浪傳播時間， λ 為波長， x_1 為 $x_p = 0$ 處波高， H_2 為波浪傳播距離 x_p 處之波高。

$$\alpha = \frac{2}{VB} \left(\frac{\pi \nu}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\lambda \operatorname{Sinh} \frac{4\pi d}{\lambda} + 2\pi B}{\lambda \operatorname{Sinh} \frac{4\pi d}{\lambda} + 4\pi d} \right] \quad (2-8)$$

上式中 V 為波速， B 為水槽寬度。平面水池中 $B \gg d$ 則 (2-8) 式改寫成：

$$\alpha = \frac{4\pi^{\frac{3}{2}} \nu^{\frac{1}{2}} T^{\frac{1}{2}}}{\lambda^2 \left(\operatorname{sinh} \frac{4\pi d}{\lambda} + \frac{4\pi d}{\lambda} \right)} \quad (2-9)$$

Eagleson 及 Dean (1966) 認為 Keulegan 所提 α 值應增加 25%，即

$$\alpha = \frac{5\pi^{\frac{3}{2}} \nu^{\frac{1}{2}} T^{\frac{1}{2}}}{\lambda^2 \left(\operatorname{sinh} \frac{4\pi d}{\lambda} + \frac{4\pi d}{\lambda} \right)} \quad (2-10)$$

圖 2-3 為 (2-10) 式不同模型縮尺測點波高與減衰距離關係斷面試驗表面張力在拋石堤模型試驗影響並不大，可以予以忽略。但模型上縮尺太小時，要消除滯性剪力之影響是不可能的事。Dai 及 Kamel (1969) 利用美國海岸工程研究中心 (Coastal Engineering Research Center) 大型水槽研究防波堤塊石安定係數， N_s 與雷諾數 R 之關係如圖 2-4。當試驗波高達 4 呎以上，塊石重量 162 磅，滯性影響可以忽略；此時 R 值在 3.0×10^4 至 1.0×10^6 之間，其安定係數平均值可當作原型安定係數。

Le Mehaute (1965) 指出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，因縮尺所造成之滯性影響可以忽略。拋石堤反射係數與傳透係數受縮尺之影響為雷諾數之函數，模型上塊石之大小如採用下式計算，則減小縮尺對反射係數及傳透係數之影響。

$$\frac{d_m}{d_p} = K \frac{L_m}{L_p} \quad (2-11)$$

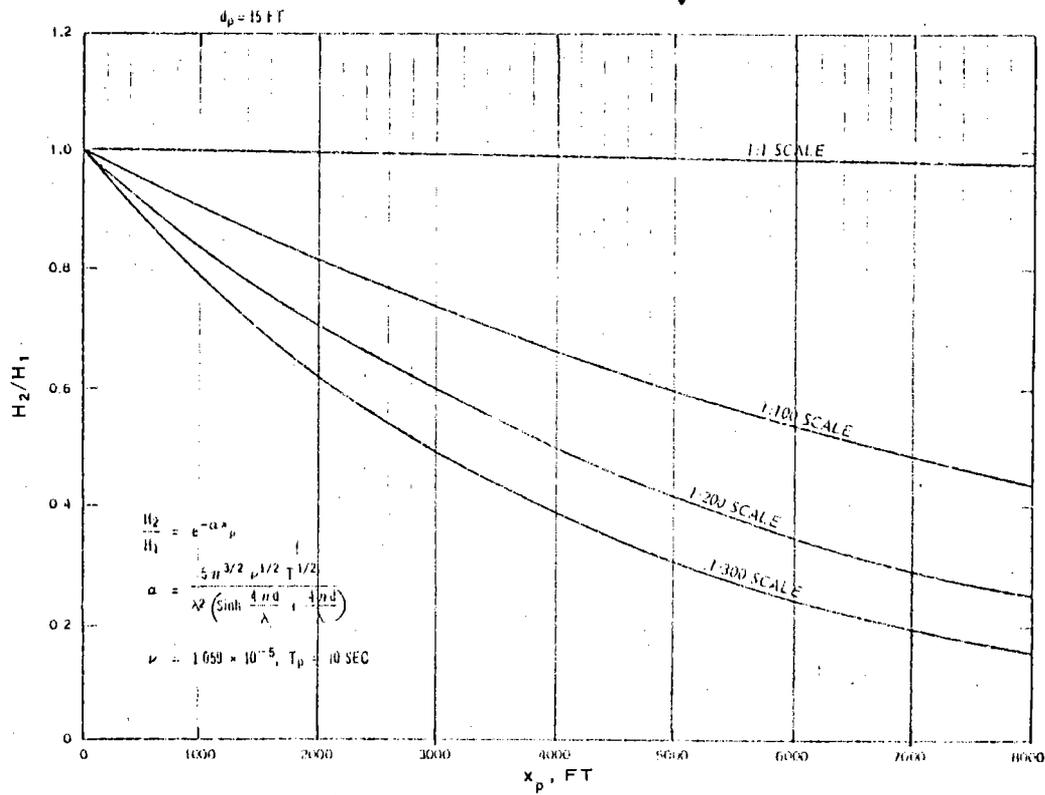
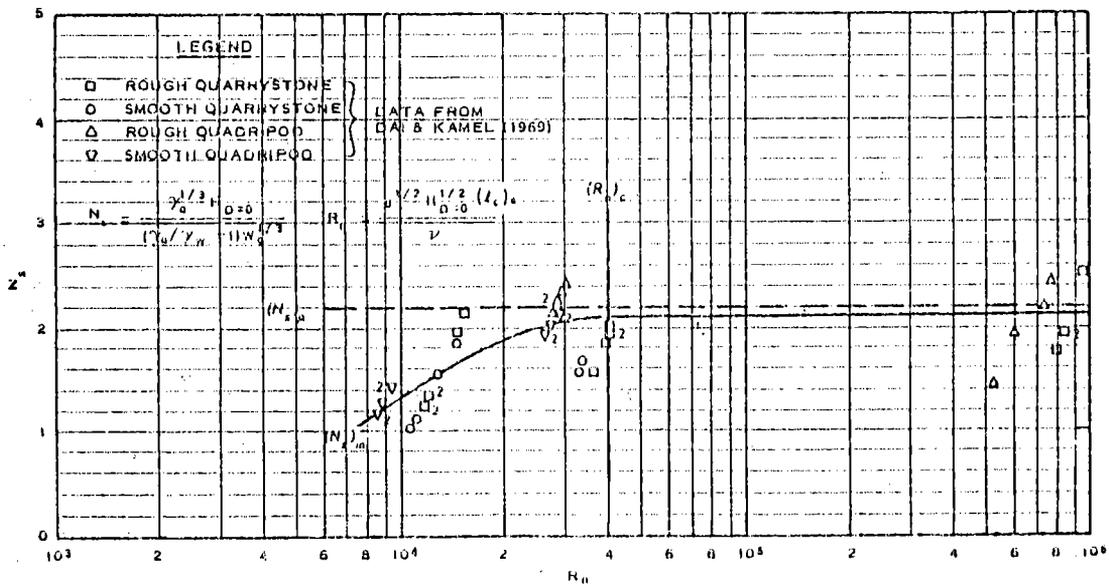


圖 2 - 3 模型試驗波高受縮尺影響



Scale effects of rubble-mound stability models (after Dai and Kamel, 1969).

圖 2 - 4 拋石堤安定模型試驗縮尺影響 (Dai & Kamel 1969)

K 值大於 1，護面層與內層 K 值不等。等縮尺 K 之近似值為波浪在堤前所造成水力梯度 $\Delta H / \Delta L$ ，原型塊石有效粒徑 d_p 及築堤料孔隙率 P_p 之函數可由圖 2 - 5 求得。Keulegan (1973) 研究所得 K 值較 Le Mehaute 為小，大約為 0.7 至 0.8 倍。

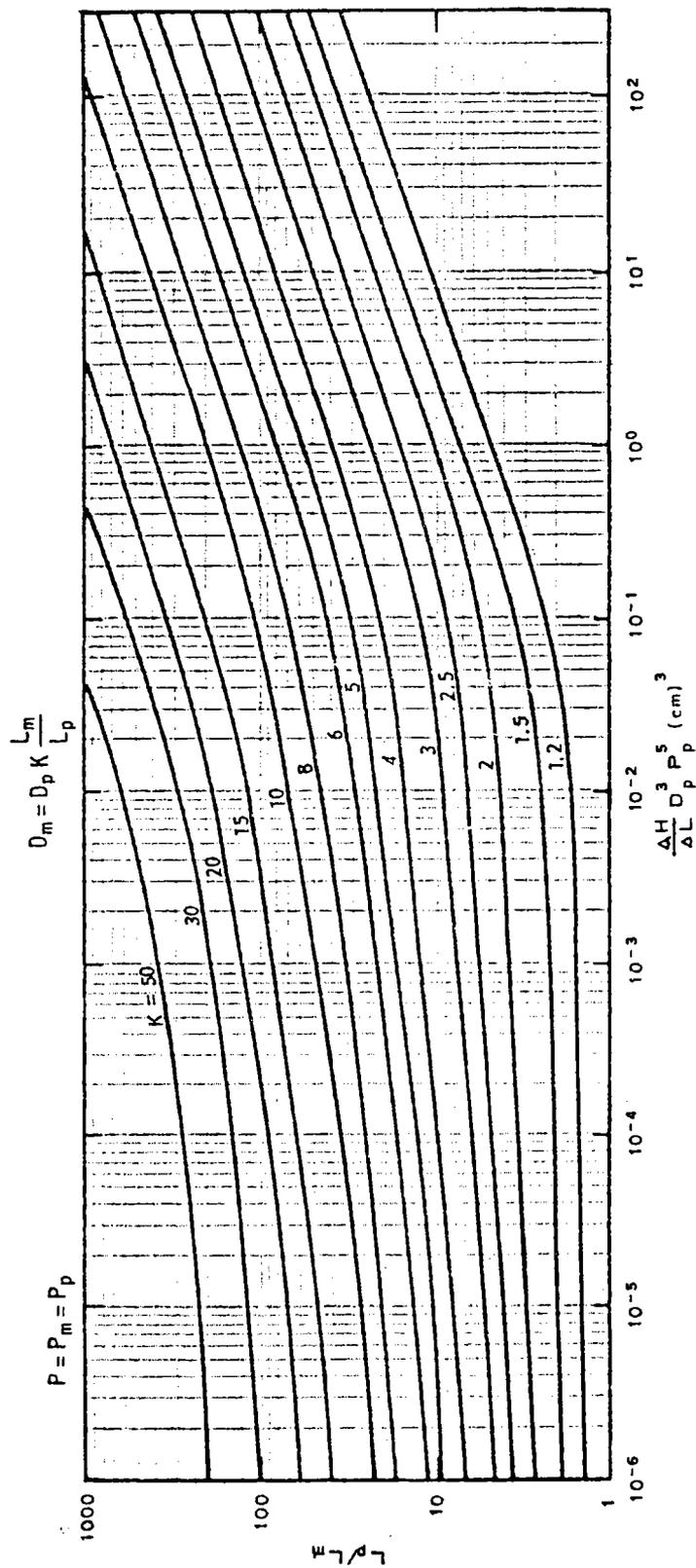


圖 2 - 5 $\frac{L_p}{L_m} \frac{\Delta H}{\Delta L} D_p^3 P_p^5$ 關係

第三章 波浪溯上

一、概 述

規則波在斜坡上所造成之溯上，以往在荷蘭、西德、日本及美國等曾作過許多試驗研究。但大部份試驗研究均著重於變數較容易控制之光滑不透水斜坡溯上。實際上堤防設計，則都採用粗糙且透水性斷面，以減少反射，消殺部份入射波能，減低溯上。為符合實際需要，六十年代部份學者從事粗糙表面溯上修正係數。利用規則之人工粗糙元素，如木條、方塊、磚塊等，研究各種相對粗糙高度（粗糙高度／波高）以期獲得粗糙面溯上修正係數。

拋石堤面溯上研究 Battjes (1974) 整理美國海岸工程研究中心 (C. E. R. C.)、荷蘭德福地水工試驗所 (H. L. Delft)、英國威靈福德水力研究所 (H. R. S. Wallingford) 及 Shankin 等試驗結果顯示，採用河床石料或開採塊石之拋石堤面溯上與光滑堤面溯上之比值約在 0.5 與 0.6 之間。

拋石斷面波浪溯上試驗研究，除模型上粗糙參數難以控制外，辦理試驗所採用之模型縮尺直接影響堤面粗糙元素高度。太小的縮尺使顆粒間孔隙減小降低透水性。為了解各種不同縮尺對拋石堤溯上之影響，本研究採用三種不同縮尺，三種不同堤面坡度及三種堤趾水深，利用各種入射波浪條件加以試驗，茲將試驗經過與結果敘述如后。

二、往昔之研究

未碎波在斜坡上溯上，Keller (1961) 應用線性長波理論研究平面斜坡與較大水深連接波浪運動，導出相對溯上關係為：

$$\frac{R}{H} = \frac{1}{K_s} \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} \quad (3 - 2 - 1)$$

上式中 R, H 分別爲溯上高與波高, K_s 爲波浪淺化係數 (Shoaling coefficient) α 爲斜坡角度, 若以深水波高表示

$$\frac{R}{H_0} = \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} \quad (3-2-2)$$

(3-2-2) 式與 Pocklington (1921) 綜合其他學者研究結果相同。Keller 同時將上述步驟應用於 Carrier 及 Greenspan (1958) 之非線性理論亦獲相同之結果。

Keller 及 Keller (1965) 考慮平面斜坡與水平前灘連接, 應用於線性長波理論, 獲得結果爲

$$\frac{R}{H} = \left[J_0^2 \left(\frac{4\pi}{\alpha T} \sqrt{\frac{d}{g}} \right) + J_1^2 \left(\frac{4\pi}{\alpha T} \sqrt{\frac{d}{g}} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3-2-3)$$

上式中 J_0 及 J_1 分別爲貝瑟函數 (Bessel function) 第 0 及 1 階。d 爲水深, T 爲波浪週期。

Le Mehaute et al (1968) 考慮非線性作用所造成之水位抬高

$$\frac{R}{H} = \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} + \Delta \quad (3-2-4)$$

上式中 Δ 爲非線性作用相對水位抬高, 根據 Miche (1944) 展開至二階爲:

$$\Delta = \frac{1}{2} k H \left(1 + \frac{3}{4} \sinh^{-2} kd - \frac{1}{4} \cosh^{-2} kd \right) \coth kd \quad (3-2-5)$$

(3-2-5) 式 $k = 2\pi / L$

前述理論顯示, 未碎波波浪溯上隨斜坡角度減小而增加; 但當斜坡角減至臨界值時, 入射波浪可能在斜坡上發生碎波, 則波浪尖度 (Wave steepness) 爲影響溯上之主要之參數。

波浪碎波後所造成之溯上, 許多研究理論學者, 均應用非線性長浪理

論，研究激浪 (Bore) 在斜坡靜水中前進現象，忽略前面波浪交互作用影響，所得結果不實用。

美國海岸工程研究中心 (C. E. R. C.) 根據 Saville (1956) 辦理規則波溯上試驗所得資料分析結果顯示影響相對溯上 R/H 之因素主要為波浪尖度 H_0/gT^2 及坡度 $\cot\alpha$ 。Franzius (1965) 處理 C. E. R. C. 試驗資料，將 R/H 歸納為斜坡角度 α ，相對波高 H/d 及波浪尖度 H/L 等之函數。但因公式太複雜，而實用性不高。Hant (1959) 考慮碎波情形處理 C. E. R. C. 試驗資料發現 R/H 與 $\tan\alpha$ ， $(H/L)^{-\frac{1}{2}}$ 及 $\tanh(2\pi d/L)^{-\frac{1}{2}}$ 成正比。

$$\frac{R}{H} = C \tan \alpha \left(\frac{H}{L} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[\tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3-2-6)$$

Hunt 利用試驗資料決定常數 $C = 1$ 。但其最後公式並非等因次。經簡化後：

$$\frac{R}{H} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} \quad (3-2-7)$$

(3 - 2 - 7) 式雖缺乏理論基礎，但溯上 R 可以展開為 g ， H ， T 及 α 之函數。即

$$R \doteq 0.4 T \sqrt{gH} \tan \alpha \quad (3-2-8)$$

Delft 水工試驗所試驗所得資料與 Hunt (1 - 2 - 8) 式比較，誤差大都在 $\pm 10\%$ 以內。

Hall 及 Watts (1953)，Kaplan (1955) 與 Kishi 及 Saeki (1966) 從事孤立波在平面斜坡溯上試驗結果為：

$$\frac{R}{d} = K \left(\frac{H}{d} \right)^\beta \quad (3-2-9)$$

(3 - 2 - 9) 式中 K 及 β 為斜坡角度之函數。

Shuto (1972) 將整個流場分為均勻水深及等坡度兩個區域，分別求得兩個區域之長浪駐波 (Standing long wave) 解，再利用兩個區域之水平及垂直運動必須連續，應用長浪一階近似值求得與 Keller 型式相似之溯上為：

$$\frac{R}{H} = \left[J_0^2 \left(4\pi \frac{\ell}{L} \right) + J_1^2 \left(4\pi \frac{\ell}{L} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3 - 2 - 10)$$

上式中 ℓ 為靜水位下斜坡水平長度

實際上堤防規劃設計大部份採用粗糙且透水之斷面以減小反射，消殺部份波能，降低溯上。為了解粗糙與光滑表面在波浪溯上所產生之差異，Wassing (1957)，Jelgerhuis Swildens (1957)，Franzuis (1965) 根據 Jelgerhuis Swildens (1957) 研究結果顯示修正係數 r 為粗糙元素間距與高度比之函數。最小值約為 0.5。但溯上時，表面粗糙元素之高度直接影響溯上水舌，因此 Swildens 試圖尋求相對粗糙度 (粗糙元素高與波高比) 之關係，發現其他因素不變，相對粗糙元素高度增加，使修正係數降低。

Franzius 辦理各種不同粗糙元素高度影響，結果顯示，各種不同坡度修正係數隨相對粗糙度 (k/H) 而變化。當 H/L 介於 0.08 與 0.053 之間； $\cot\alpha$ 介於 2.7 與 5.0 間；相對粗糙度大於 0.1 時，修正係數漸趨近於一定常數。如圖 3 - 2 - 1

Shankin (1965) 根據俄國原始資料分析獲得修正係數如表 3 - 2 - 1。Pishkin (1965) 從試驗結果，導出最大溯上為：

$$R_{\max} = \frac{0.565}{\sqrt{n}} H \tan\alpha \quad (3 - 2 - 11)$$

上式中 n 介於 0.010 與 0.035 之間； H/L 介於 0.05 至 0.10 之間。Wagner (1969) 認為修正係數隨斜坡角度減小或 H/L 增大而減小，提出修正係數為：

$$r = 1 - K_F \left(\frac{k_s}{H} \sqrt{\frac{H}{L}} \right)^{0.4} (\sin \alpha)^{-\frac{1}{3}}$$

(3 - 2 - 12)

上式中 K 隨粗糙體形狀而改變，自然之粗糙度 $K_F = 0.73$ ， k_s 可依據 Nikuradse 粗糙因子求得：

$$k_s < 0.033 \sqrt{HL} \quad \cot \alpha < 5.0$$

	r
SMOOTH, IMPERMEABLE REVETMENT	1
CONCRETE SLABS	0.9
SET STONE	0.75 - 0.8
ROUND STONES	0.6 - 0.65
RUBBLE	0.5 - 0.55

表 3 - 2 - 1 湖上修正修數 (Shankin 1965)

英國 Wallingford 水力研究中心 (1965) 研究拋石堤斜坡度 1 : 2 ; H/L 大於約 0.03 時，相對湖上為：

$$\frac{R}{H} = 0.27 / \sqrt{H/L_0} \quad (3 - 2 - 13)$$

光滑斜坡，坡度為 1 : 2，根據 Hunt 湖上公式計算修正修數 r 為：

$$\begin{aligned} r &= 0.27 \sqrt{H/L_0} / \sqrt{H/L_0} \tan \alpha \\ &= 0.54 \end{aligned} \quad (3 - 2 - 14)$$

試驗結果與計算值如圖 3 - 2 - 2。

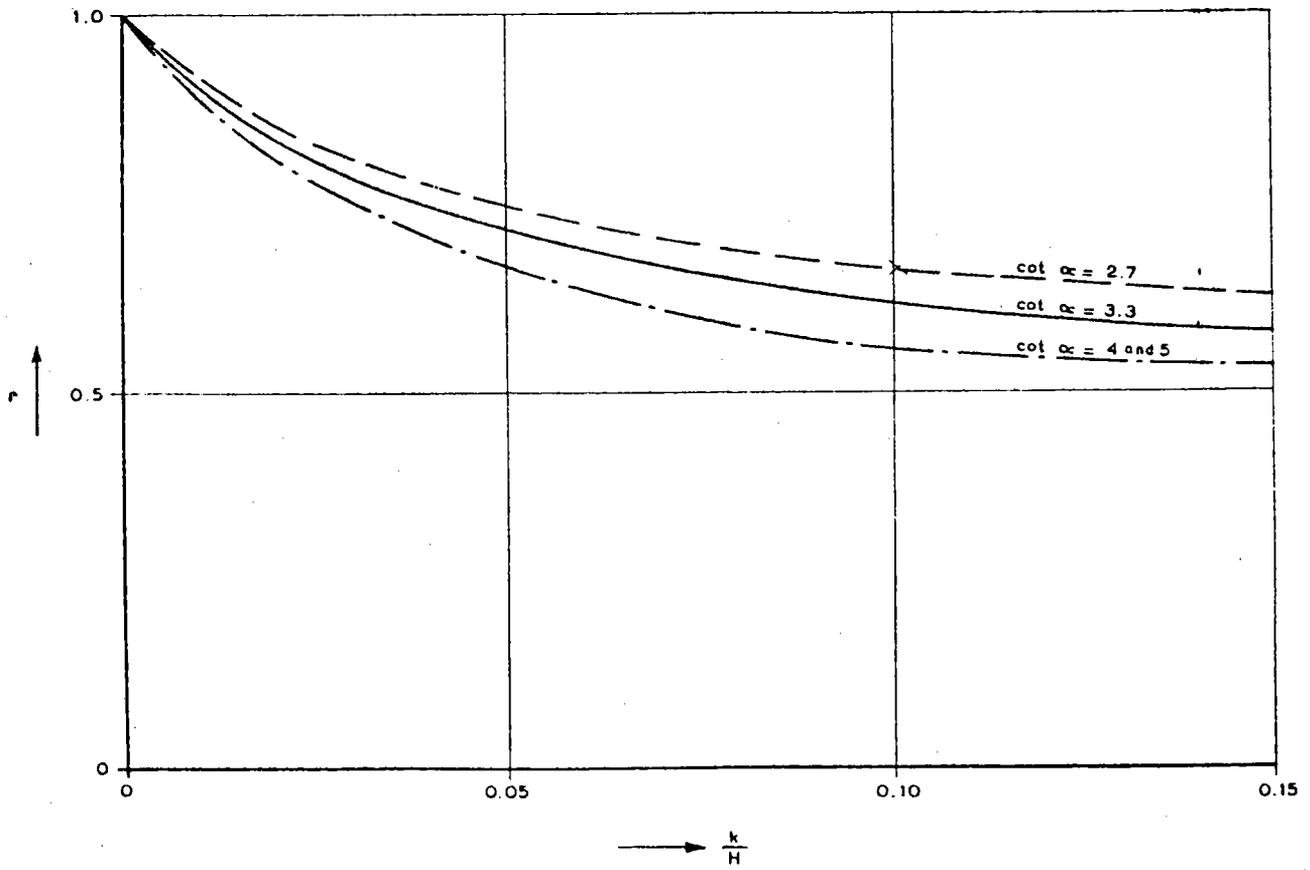


圖 3 - 2 - 1 相對粗糙度與修正係數關係

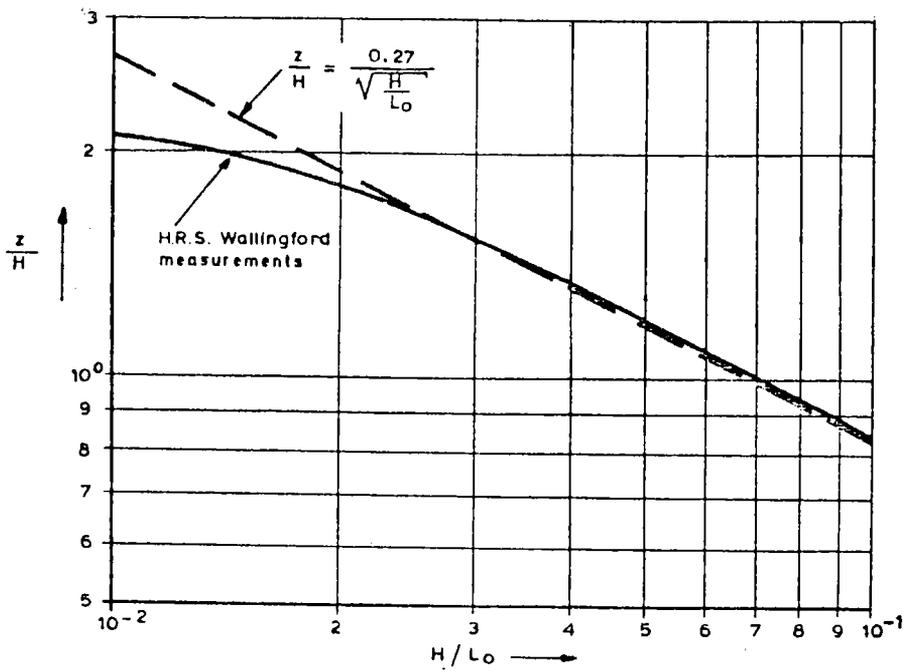


圖 3 - 2 - 2 試驗值理論值之比較

三、理論分析

C. K Sollitt 及 R. H. Cross (1971) 假設波浪作用于結構物上所形成的波浪溯上 (run-up) 的波形如圖 3 - 3 - 1 所示：

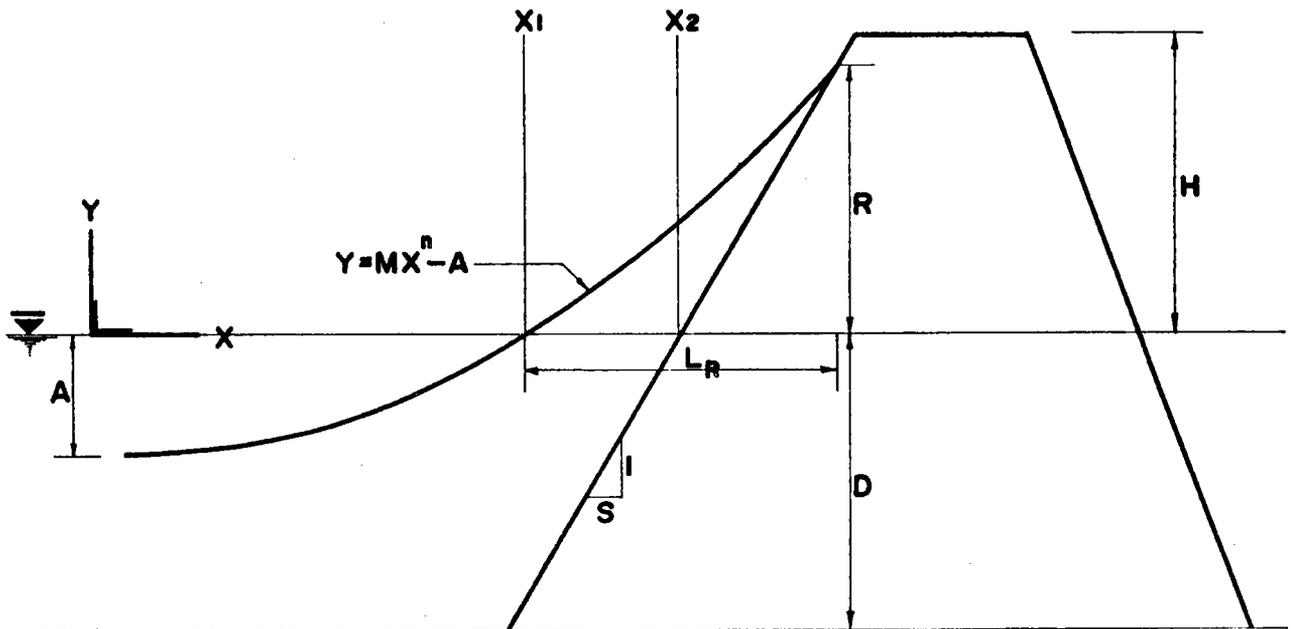


圖 3 - 3 - 1 Run-up 示意圖

圖中波浪溯上的波形以下列曲線方程式表示

$$Y = MX^n - A \quad (3-3-1)$$

式中 M , n 為參數 , A 相當于波谷振幅

(3-3-1) 式兩邊同除以 A 可得

$$\frac{Y}{A} = \frac{ML_R^n}{A} \left(\frac{X}{L_R} \right)^n - 1 \quad (3-3-2)$$

當 $Y = R$ 時 , $X = L_R$, 故得

$$ML_R^n = R + A$$

代入 (3-3-2) 式可得

$$\frac{Y}{A} = \frac{R + A}{A} \left(\frac{X}{L_R} \right)^n - 1 \quad (3-3-3)$$

為方便計算採用下列之無因次參數如下 :

$$\left. \begin{aligned} y, r, d, d_b, l &= \frac{Y}{A}, \frac{R}{A}, \frac{D}{A}, \frac{H}{A}, \frac{A}{A} \\ x, s, l &= \frac{X}{L_R}, \frac{AS}{L_R}, \frac{L_R}{L_R} \end{aligned} \right\} (3-3-4)$$

因此 (3-3-3) 式可簡化為 :

$$y = (r + 1)x^n - 1 \quad (3-3-5)$$

根據 (3-3-4) 及 (3-3-5) 兩式 , 圖 3-3-1 可改為如圖 3-3-2 所示 :

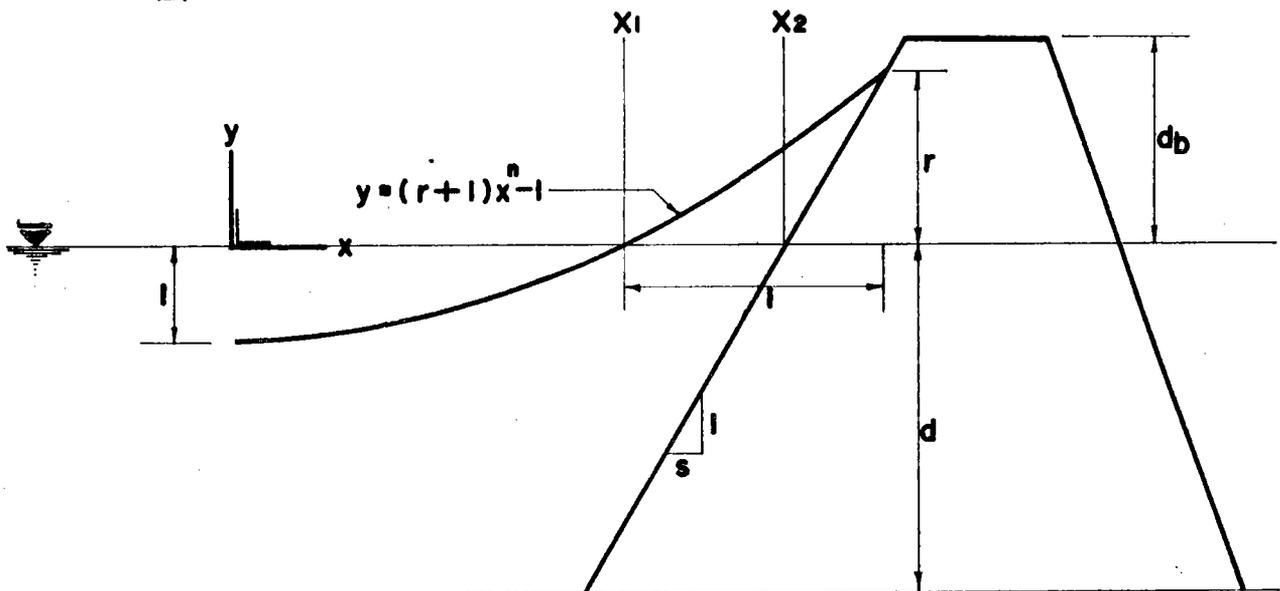


圖 3-3-2 無因次Run-up示意圖

由圖 3 - 3 - 2，根據質量守恒定律 (mass conservation)，由 $x = x_1$ 至 $x = 1$ 部份須等於由 $x = 0$ 至 $x = x_1$ 的部份，即是如下式所示：

$$\int_0^1 y dx - \frac{sr^2}{2} = 0$$

代入 (3 - 3 - 5) 可解得為：

$$s = \frac{2}{r^2} \frac{r - n}{n + 1} \quad (3 - 3 - 6)$$

式中 $r = \frac{R}{A}$ ， R ：溯上高度 A ：堤前波振幅

$$s = \frac{AS}{L_R}$$

S ：結構物坡度

根據能量守恒定律 (energy conservation) 並考慮圖 3 - 3 - 3 控制體 (control volume)，則可得：

$$C_g E_i - C_g E_r = \frac{PE \cdot K_1}{T} \quad (3 - 3 - 7)$$

式中 E_i ：入射波能量 $E_i = \frac{\gamma}{8} H_i^2$ γ ：水單位重 H_i ：入射波高

E_r ：反射波能量 $E_r = \frac{\gamma}{8} K_r^2 H_i^2$ K_r ：反射率

C_g ：群波速

PE ：水面上溯上部份之勢能 (potential energy)

K_1 ：能量損失係數 (energy loss coefficient)

T ：週期， $T = \frac{L}{C}$

利用無因次化，並令 $P_e = \frac{PE}{\left[\frac{\gamma}{4} H_i (1 + K_r) \right]}$ ，則 (3 - 3 - 7)

) 式可化為：

$$P_e = \frac{C_g}{C} \frac{L}{L_R} \frac{1}{2K_1} \frac{(1 - K_r^2)}{(1 + K_r)^2} \dots \dots \dots (3 - 3 - 8)$$

反射率 K_r ，可利用 Miches 反射係數求得：

$$K_r = K_m \frac{(d + d_b)}{(d + r)} \dots \dots \dots (3 - 3 - 9)$$

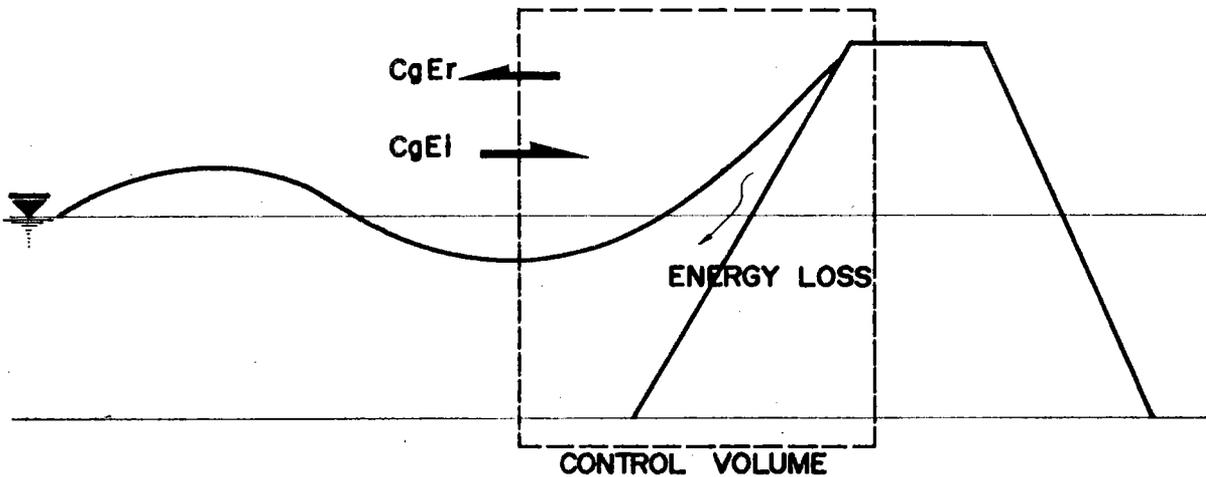


圖 3 - 3 - 3

再由圖 3 - 3 - 2 可求得 P_e 為

$$P_e = \int_{x_1}^1 \frac{y^2}{2} dx - \frac{sr^3}{6} \dots \dots \dots (3 - 3 - 10)$$

而 $x = x_1$ ， $y = 0$ 時由 3 - 3 - 5 式求得 $x_1 = \left(\frac{1}{r+1}\right)^{\frac{1}{n}}$

代入 (3 - 3 - 10) 可求得：

$$P_e = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(r+1)^2}{2n+1} \left[1 - \frac{1}{(r+1)^{(2+\frac{1}{n})}} \right] \right. \\ \left. - \frac{2(r+1)}{n+1} \left[1 - \frac{1}{(r+1)^{(1+\frac{1}{n})}} \right] \right\} \\ + \left[1 - \frac{1}{(r+1)^{\frac{1}{n}}} \right] - \frac{sr^3}{3} \dots \dots \dots (3 - 3 - 11)$$

將(3-3-11)式代入(3-3-8)可得：

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left\{ \frac{(r+1)^2}{2n+1} \left[1 - \frac{1}{(r+1)^{\left(2+\frac{1}{n}\right)}} \right] \right. \\ & \left. - \frac{2(r+1)}{n+1} \left[1 - \frac{1}{(r+1)^{\left(1+\frac{1}{n}\right)}} \right] \right. \\ & \left. + \left[1 - \frac{1}{(r+1)^{\frac{1}{n}}} \right] - \frac{sr^3}{3} \right. \\ & \left. = \frac{C_g L}{C L_R} \frac{1}{2K_1} \frac{(1-K_r^2)}{(1+K_r)^2} \right. \quad \dots \quad (3-3-12) \end{aligned}$$

在(3-3-6)式與(3-3-12)式中，若波浪因素C, C_g, L, A, K_r與試驗條件S, D, H等為已知條件時，則僅餘L_R, R, n, K₁, 為未知數。因此，若能決定n, K₁時，則可求得理論值L_R與R。若利用試驗R值代入，並假設能量損耗則可求得L_R與n值。

四、試驗經過

(一)試驗設備

本試驗在100公尺長，1.5公尺寬，1.5公尺深風洞水槽，如圖3-4-1，辦理主要設備為英國Armfield公司出品之油壓式造波機、鼓風機、環流系統量測儀器及資料處理系統，如圖3-4-2。

(二)試驗佈置

防波堤斷面佈置如圖3-4-1，堤前海底坡度為1:30，拋石堤護坡面覆蓋兩層依模型縮尺選定之塊石，次層則鋪放碎石。波高計分別佈置於結構物前約30m及2m處，分別測量入射波浪與堤前波浪。波浪溯上與溯下則利用第三隻波高計量取。模型堤面坡度可以任意調整。

(三)試驗條件

1. 試驗縮尺：採用1/36, 1/25, 1/16三種模型縮尺。

2. 試驗水深：造波機水深分別採用 60cm，70cm 及 80cm 三種，堤趾水深則分別為 30cm，40cm 及 50cm。
3. 試驗週期：採用 0.95，1.23，1.7 及 2.3 秒四種。
4. 試驗波高：試驗所採用波高，由小逐漸增大，至堤前碎波或大量塊石滑落為止，每一試驗採用四種波高。

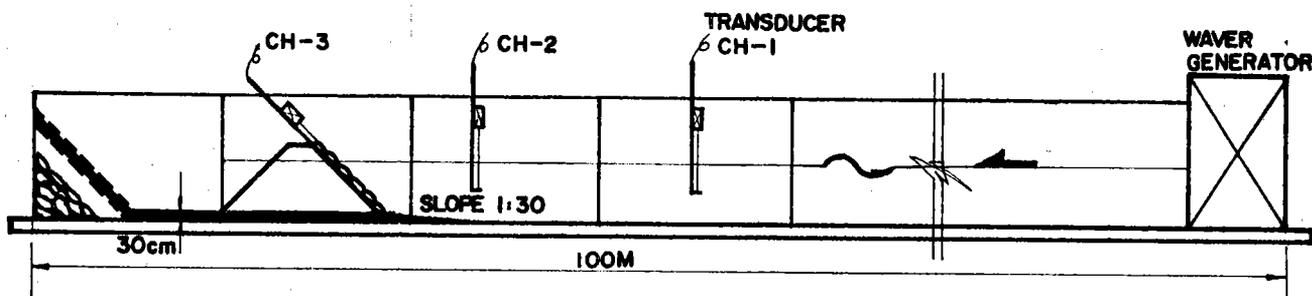


圖 3 - 4 - 1 風洞水槽佈置

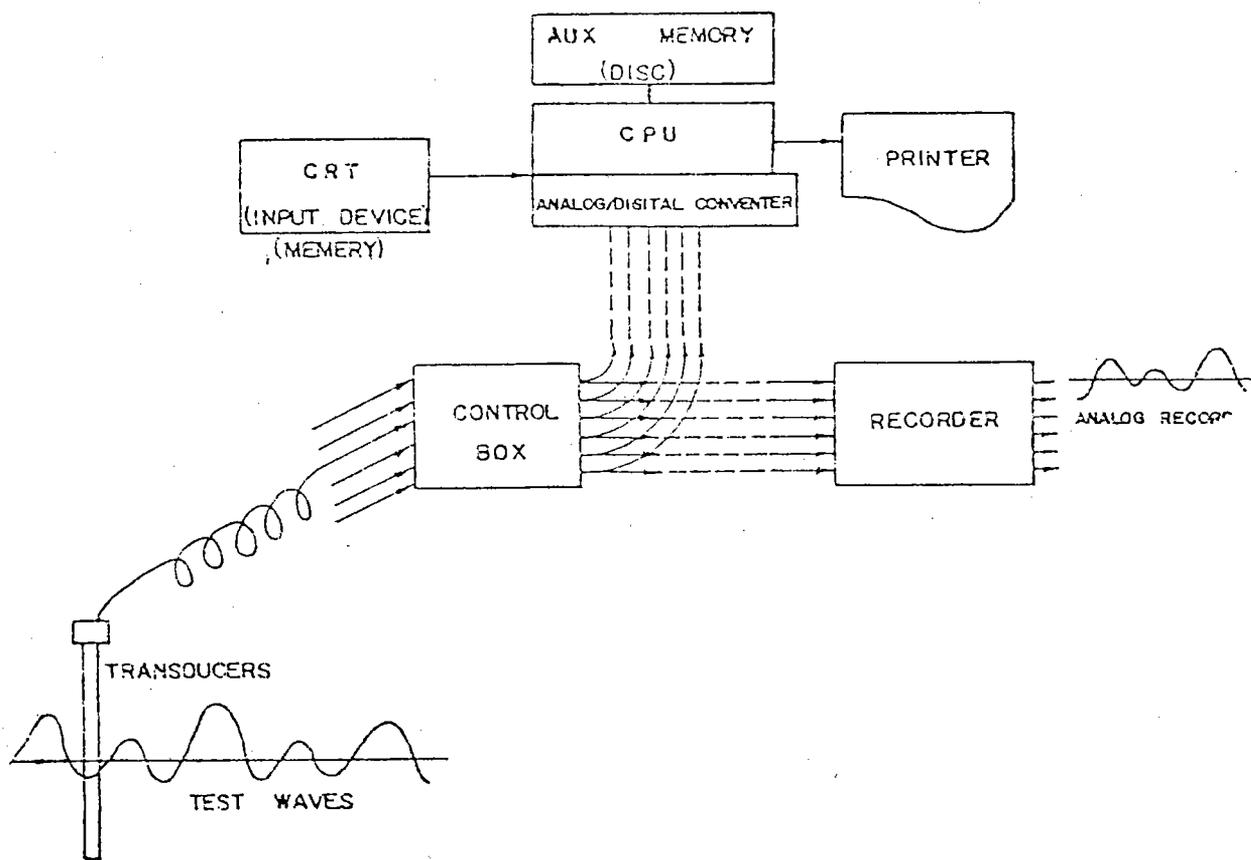


圖 3 - 4 - 2 資料處理系統

5. 模型護坡塊石：原型 4 至 4.5 噸塊石，依不同之試驗縮尺，模型上塊石特徵長度分別約為 4cm，6cm 及 9cm。

四、試驗步驟

1. 首先選擇一種模型縮尺，篩取合格塊石，佈置防波堤試驗模型。
 2. 每選擇一種模型縮尺，堤防坡度由 1 : 2.5 逐次增大至 1 : 1.5。
 3. 每選擇一種堤防坡度，水深由 60cm 逐漸增至 80cm。
 4. 每選擇一種試驗水深，試驗波浪週期由 0.95 秒漸次增加至 2.3 秒。
 5. 每一種試驗週期，試驗波高由 4cm 左右逐漸增大至堤前碎波或斜坡上塊石大量滑落為止。
- 全部試驗情況共計 432 種。

五、試驗結果

採用三種模型縮尺 S，三種堤防坡度 L，三種試驗水深 D，四種波浪週期 T，及波高 H 所獲得試驗資料，波浪溯上 R_u ，溯下 R_d 週期 T_i 及波高 H_i 均以五種變化參數 $R_u(S, L, D, T, H)$ ， $R_d(S, L, D, T, H)$ ， $T_i(S, L, D, T, H)$ 及 $H_i(S, L, D, T, H)$ 以五維排陣鍵入 VAX-780 電腦作為基本資料檔，全部資料整理後如附錄 I。

分析縮尺、坡度，水深及波浪週期等對相對溯上 (R_u / H) 及溯下 (R_d / H) 影響，僅需選擇對應變數，將滿足條件之所有資料予以處理後，繪製關係圖，並求取線性或二次最佳符合曲線 (Best fitting curves)。茲將分析結果敘述如后。

(一) 相對溯上、下與碎波參數之關係：

根據 Hunt (1959) 利用試驗資料推導相對溯上 (Relative run-up) R / H ，與碎波參數 (Surf parameter) $\tan \alpha \sqrt{H / L_0}$ 之關係式為 $R / H = \tan \alpha / \sqrt{H / L_0}$ 。

爲了解相對溯上、下與碎波參數關係，分別將三種不同之試驗縮尺所得資料分開處理。圖 3 - 5 - 1 爲三種縮尺 R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 之關係，其線性最佳符合線分別爲：

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_u}{H} &= 0.939 + 0.044 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}}, S = \frac{1}{36} \\ \frac{R_u}{H} &= 0.941 + 0.080 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}}, S = \frac{1}{25} \\ \frac{R_u}{H} &= 0.946 + 0.085 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}}, S = \frac{1}{16} \\ \frac{R_d}{H} &= 0.380 + 0.089 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}}, S = \frac{1}{36} \\ \frac{R_d}{H} &= 0.295 + 0.125 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}}, S = \frac{1}{25} \\ \frac{R_d}{H} &= 0.386 + 0.113 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}}, S = \frac{1}{16} \end{aligned} \right\} (3-5-1)$$

試驗資料顯示，三種不同縮尺相對溯上分佈較散亂，而相對溯下則甚一致，相對溯上、下均隨碎波參數增加而略微增大。此種結果與 Per Brum (1977) 利用開採塊石 (Quarry stone) 爲防波堤模型護面塊試驗結果如圖 3 - 5 - 2，非常一致。Per Brum 認爲 Hunt 公式僅適用於較小碎波參數之光滑坡度。

爲了解不同之三種模型縮尺，在試驗上所造成之差異，將三種縮尺試驗資料最佳符合線性公式 (3 - 5 - 1) 繪如圖 3 - 5 - 3。由圖 3 - 5 - 3 顯示縮尺 1/36 時，相對溯上、下偏低，且隨碎波參數增加而有更偏低之趨勢。而 1/25 與 1/16 兩種縮尺所求得最佳符合公式非常接近。

三種不同模型縮尺線性最佳符合線方程式繪製相對溯上、下與縮尺關係如圖 3 - 5 - 4。由此圖顯示波浪溯上受縮尺影響較溯下稍大；而碎波參數增加縮尺影響增大。縮尺由 1/36 增爲 1/25，對相對溯上、下變化曲線較陡，表示此區間試驗結果受縮尺影響較顯著。當縮尺由 1/25 增爲 1/16 時，對

相對溯上、下影響已趨平緩。根據試驗條件縮尺採用 $1/16$ 時，模型上防波堤護面塊平均特徵長度約為 9cm 。試驗週期 $T_m = 0.93\text{sec}$ 至 2.7sec ，此情況下溯上、下附近流場流速應在 $1\text{m}/\text{sec}$ 以上， $\nu = 0.01\text{cm}^2/\text{sec}$ ，則雷諾數 $R \doteq 100 \times 9 / 0.01 \doteq 90,000$ 。因此可認定此處流場已屬於紊流 (Turbulent flow)，滯性影響可以忽略。因缺乏縮尺大於 $1/16$ 之試驗資料，無法作進一步迴歸分析，但由三個資料點趨勢顯示，縮尺大於 $1/16$ ，模型縮尺影響已可忽略。碎波參數 $\xi = 6$ 時，採用 $1/36$ 縮尺所造成之縮尺影響誤差可達 20% 左右。

相對溯上、下與碎波參數二次最佳符合曲線如圖 3 - 5 - 5；三種縮尺最佳符合曲線方程式比較如圖 3 - 5 - 6。縮尺 $1/16$ 及 $1/25$ 顯示，當碎波參數大於 7 至 9 時，相對溯上、下已不再隨碎波參數增加。此值較 Per Brum 根據較少資料研判 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0} \doteq 4$ ，偏大。

試驗雖採用規則波，但因波浪作用於防波堤後，因相位組合不同，而產生溯上、下亦有大、小之分。每一次試驗選取最大溯上、溯下與碎波參數最佳符合線性方程式，比較如圖 3 - 5 - 7。最大相對溯上、下與平均溯上、下最佳符合線趨勢相同，偏大約 12% 至 15%

(一) 相對溯上、下與 ℓ/L 之關係

Shuto (1972) 推導光滑斜坡與水平底床連接，相對溯上， R/H 為水下堤面水平長度與波長比 ℓ/L 之貝瑟函數 (Bessel function)，當 $\ell/L < 0.1$ 時， $R/H = 1 + 2\pi^2 (\ell/L)^2$ ；而 $\ell/L > 0.3$ 時， $R/H = \sqrt{2}\pi (\ell/L)^{\frac{1}{2}}$ 。但試驗資料分析結果如圖 3 - 5 - 8，不論何種縮尺， R/H 隨 ℓ/L 增加而略為減小。三種不同模型縮尺最佳符合線方程式比較如圖 3 - 5 - 9。 ℓ/L 較小時， R/H 隨縮尺增加而加大；但 ℓ/L 大於 1.0 以後，較小之縮尺反而造成較大之溯上、下。

(二) 相對溯上、下與波浪尖度 H/L 之關係

三種模型縮尺試驗所得相對溯上、下與波浪尖度 (Wave steepness) 之關係如圖 3 - 5 - 10。 R/H 隨 H/L 增加而減小

；且 H/L 增加，影響相對溯下之程度較溯上為大。研判此種現象仍因較大之波浪尖度屬於較短波波形較不穩定，遇結構物後容易造成碎波，損耗大部份能量。波浪尖度較小時，($H/L < 0.015$) 屬於長浪，能量不易減衰，試驗結果溯上、下較大，且較為離散分佈； $H/L > 0.02$ 後，試驗資料甚為一致。三種縮尺試驗結果均可以利用線性方程式代表，最佳符合線方程式分別為：

$$\left. \begin{aligned} \frac{Ru}{H} &= 1.187 - 2.967 H/L_0, S = \frac{1}{36} \\ \frac{Ru}{H} &= 1.355 - 4.422 H/L_0, S = \frac{1}{25} \\ \frac{Ru}{H} &= 1.449 - 6.771 H/L_0, S = \frac{1}{16} \\ \frac{Rd}{H} &= -0.928 + 7.644 H/L_0, S = \frac{1}{36} \\ \frac{Rd}{H} &= -1.027 + 9.844 H/L_0, S = \frac{1}{25} \\ \frac{Rd}{H} &= -1.086 + 10.165 H/L_0, S = \frac{1}{16} \end{aligned} \right\} (3-5-2)$$

上述線性方程式繪如圖 3 - 5 - 11，當 H/L_0 較小時，縮尺影響較大；而 H/L_0 大於 0.05 後，三種縮尺試驗結果漸趨於一致。由三種縮尺最佳符合線，繪製 H/L_0 、 R/H 與縮尺關係曲線如圖 3 - 5 - 12。由此圖更可顯示各種 H/L_0 ， R/H 受縮尺影響。不論何種波浪尖度，當縮尺大於 1/16 後，對試驗 R/H 影響趨於平緩；而當波浪尖度 H/L 大於 0.03 時，模型縮尺大於 1/25，對 R/H 影響已不顯著。但當 $H/L = 0.01$ 時，採用 1/36 縮尺可能造成 20% 之相對溯上誤差。

(四) 相對溯上、下與防波堤波度關係

將試驗資料分三種不同坡度繪製相對溯上、下與碎波參數關係如圖 3 - 5 - 13。三種坡度二次最佳符合曲線方程式比較如圖 3 - 5 -

14。因碎波參數隨坡度變緩而減小，故大部資料隨坡度減緩而逐漸集中於圖之左側碎波參數較小處，呈散亂分佈現象。最佳符合曲線不能很理想的描述相對溯上、下受坡度影響。

圖 3 - 5 - 15 為忽略縮尺影響，將相對溯上、下分三種坡度繪製與波浪尖度關係。因試驗資料在橫軸 (H/L) 分佈較為均勻，線性方程式尚能描繪相對溯上、下受波浪影響趨勢。相對溯上、下仍隨 H/L 增加而減小，且三種坡度趨勢極為一致。相對溯下受 H/L 影響較相對溯上顯著；此點前述相對溯上、下與縮尺關係所得結果相同。比較三種坡度最佳符合線如圖 3 - 5 - 16。由此圖可知波浪溯上、下受堤防坡度影響趨勢。坡度 1 : 1.5 ($\cot\alpha = 1.5$)，溯上、下最大，坡度減緩為 1 : 2.5 ($\cot\alpha = 2.5$) 溯上、下最小，此種趨勢與前面 R/H 與 l/L 所得關係一致。

三種坡度 R/H 與 H/L 關係，分三種縮尺比較如圖 3 - 5 - 17。三種坡度模型縮尺影響仍存在，且趨勢相近。比較三種坡度模型縮尺影響，可以很明顯看出三種坡度相對溯上、下受模型縮尺影響以坡度 1 : 1.5 最大，1 : 2.0 次之，1 : 2.5 最小。此種趨勢與 Stoa (1978) 所獲得溯上模型縮尺影響修正係數，如圖 3 - 5 - 18 相同。

(五) 相對溯上、下與試驗水深關係

三種模型縮尺，三種試驗水深相對溯上、下與波浪尖度關係如圖 3 - 5 - 19。試驗水深 70cm， H/L 較小時，產生較大之相對溯上、下。

(六) 相對溯上、下與試驗週期關係

三種模型縮尺，相對溯上、下與波浪尖度關係受試驗週期（近似週期）影響如圖 3 - 5 - 20，由此圖顯示，三種縮尺都有相同之趨勢，週期增長波浪尖度變小，相對溯上、下增加。

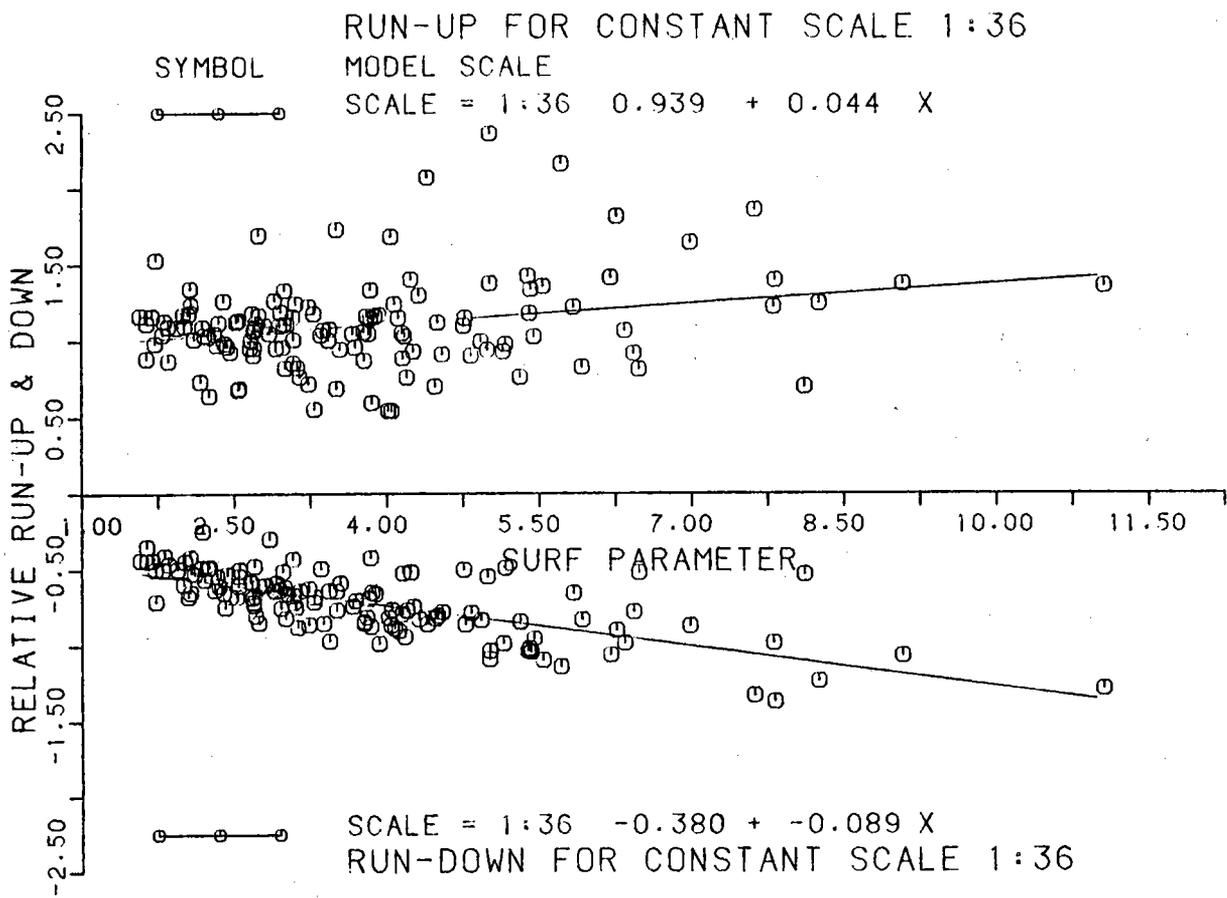


圖 3 - 5 - 1 (a) R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 關係 ($S=1/36$)

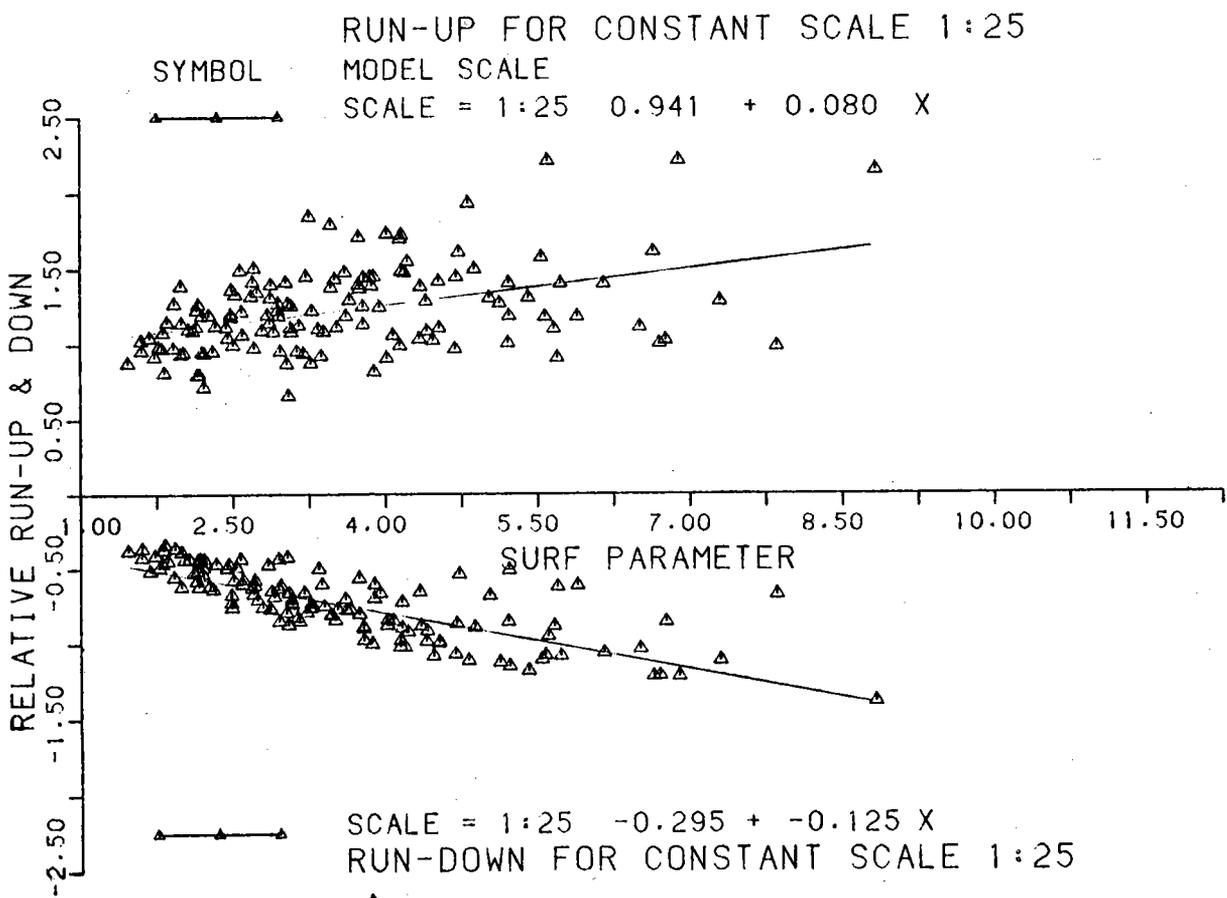


圖 3 - 5 - 1 (b) R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 關係 ($S=1/25$)

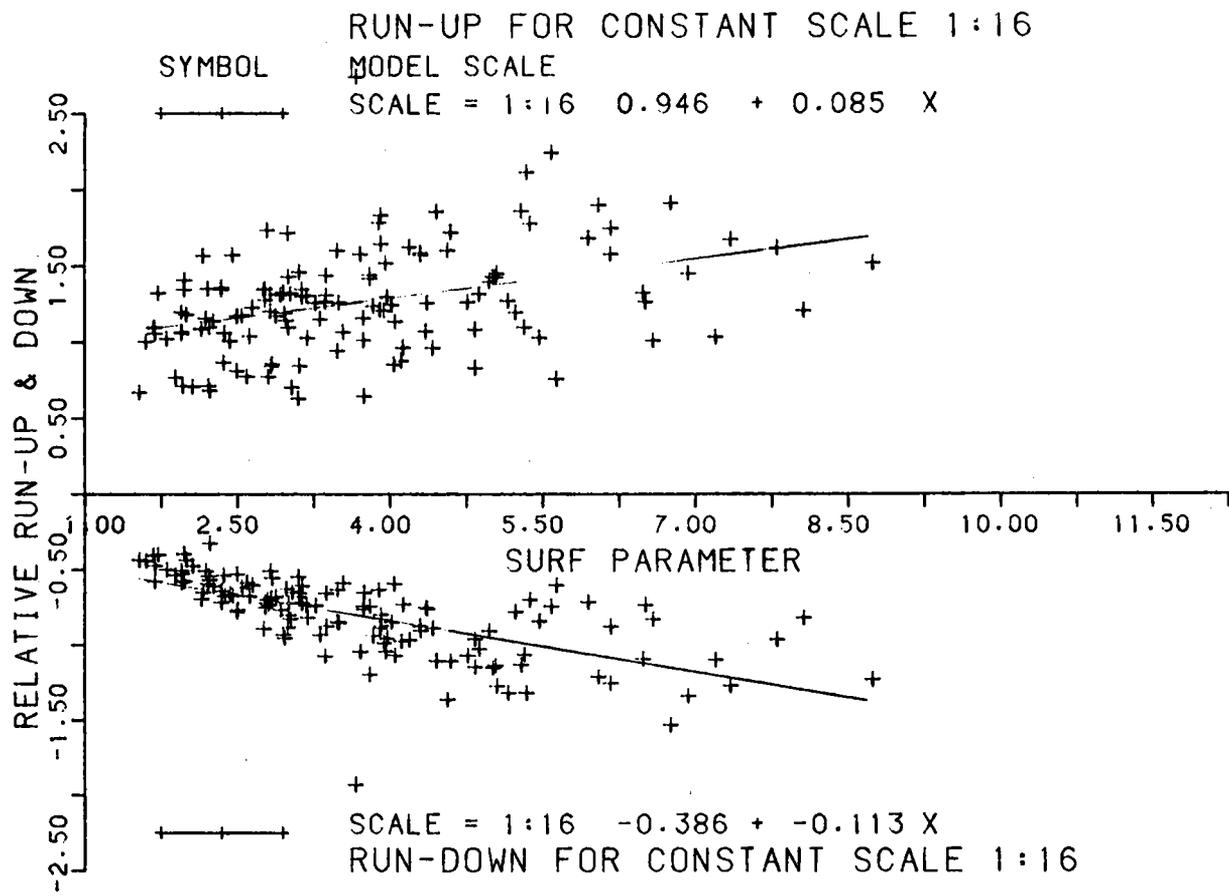


圖 3 - 5 - 1 (c) R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 關係 ($S=1/16$)

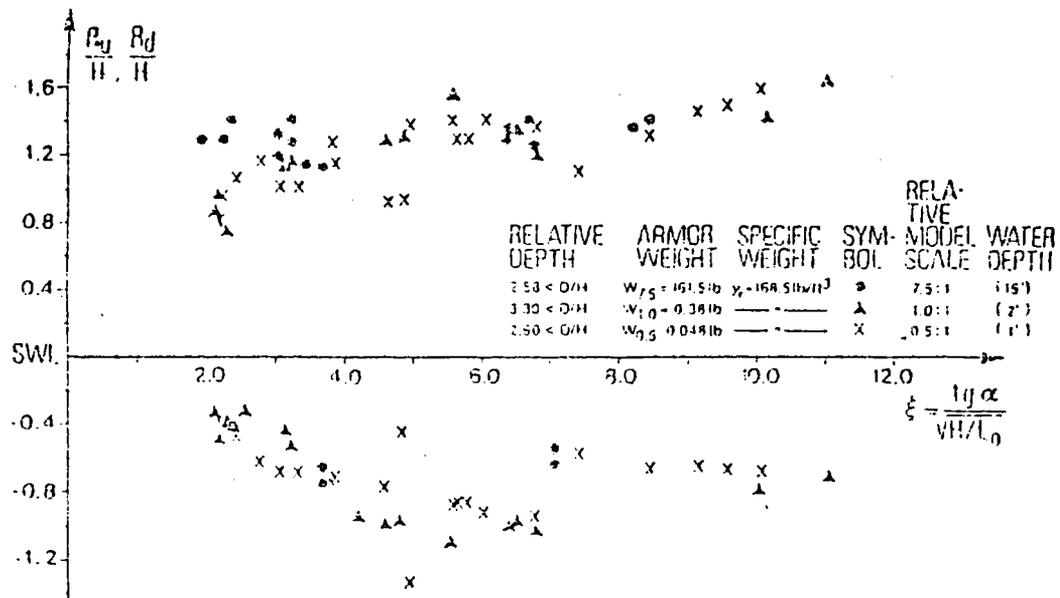


圖 3 - 5 - 2 R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 關係 (Per Brum 1977)

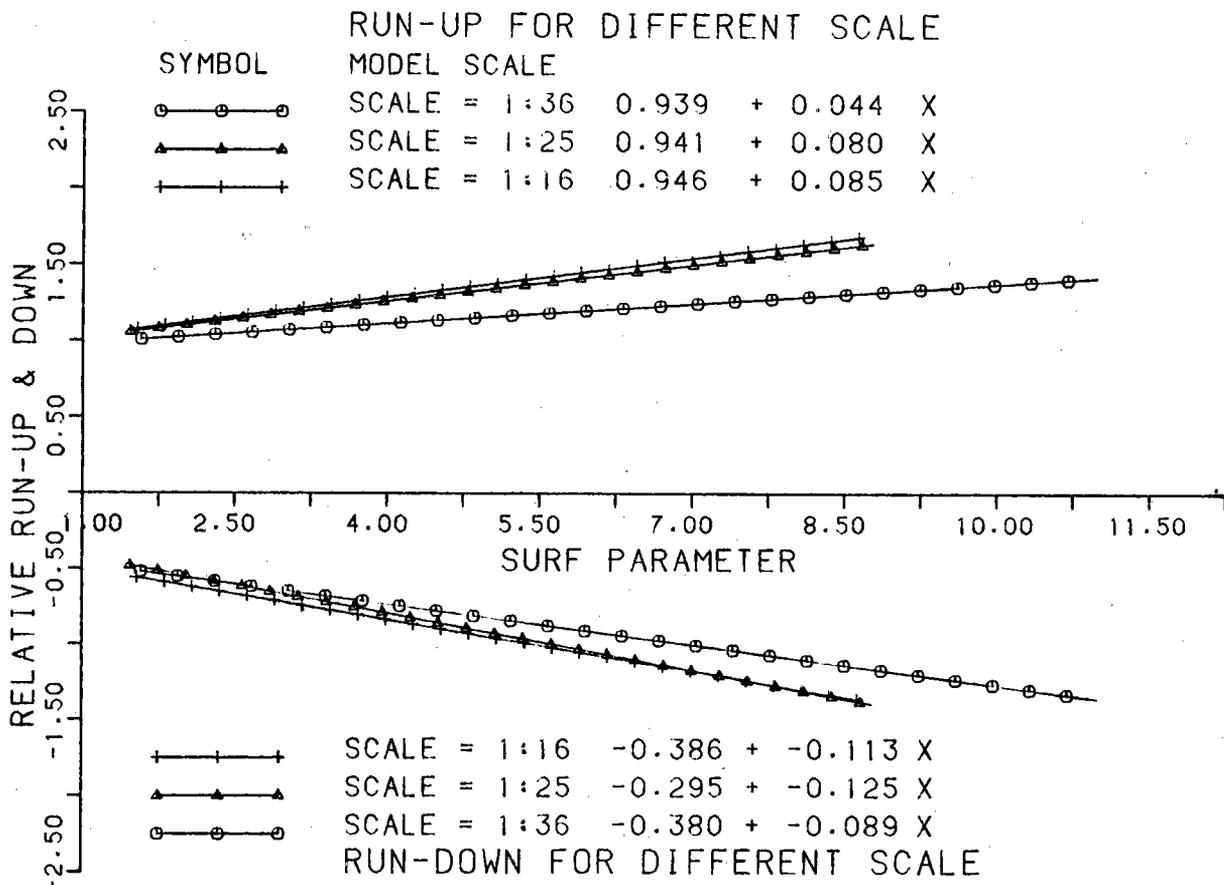


圖 3 - 5 - 3 三種縮尺 R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L}$ 關係比較

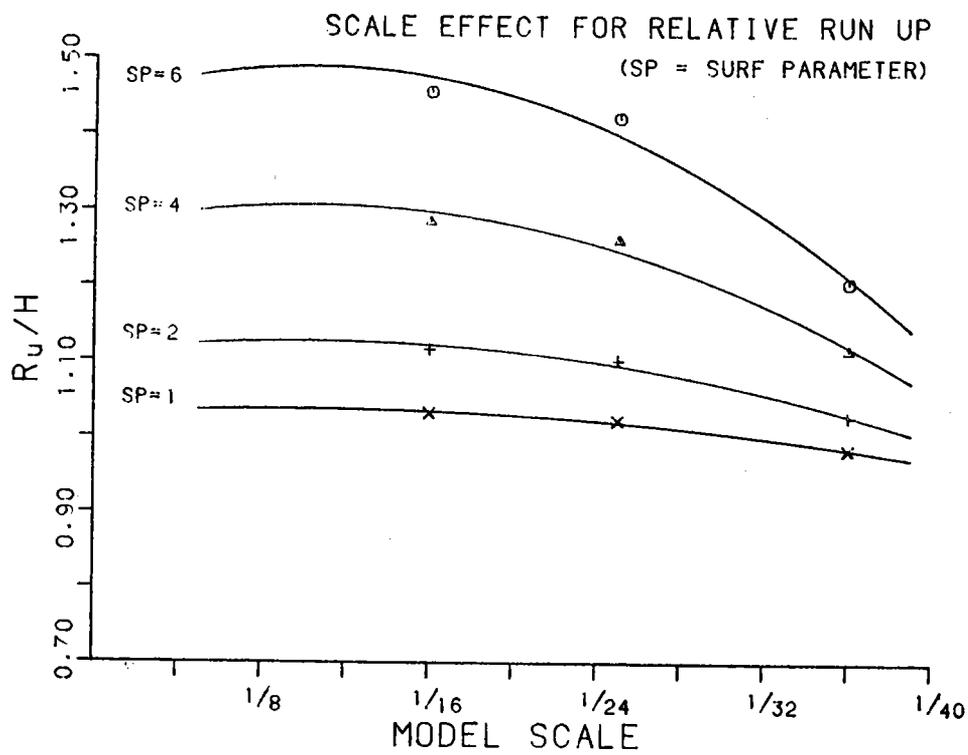


圖 3 - 5 - 4 (a) R_u/H 受模型縮尺影響

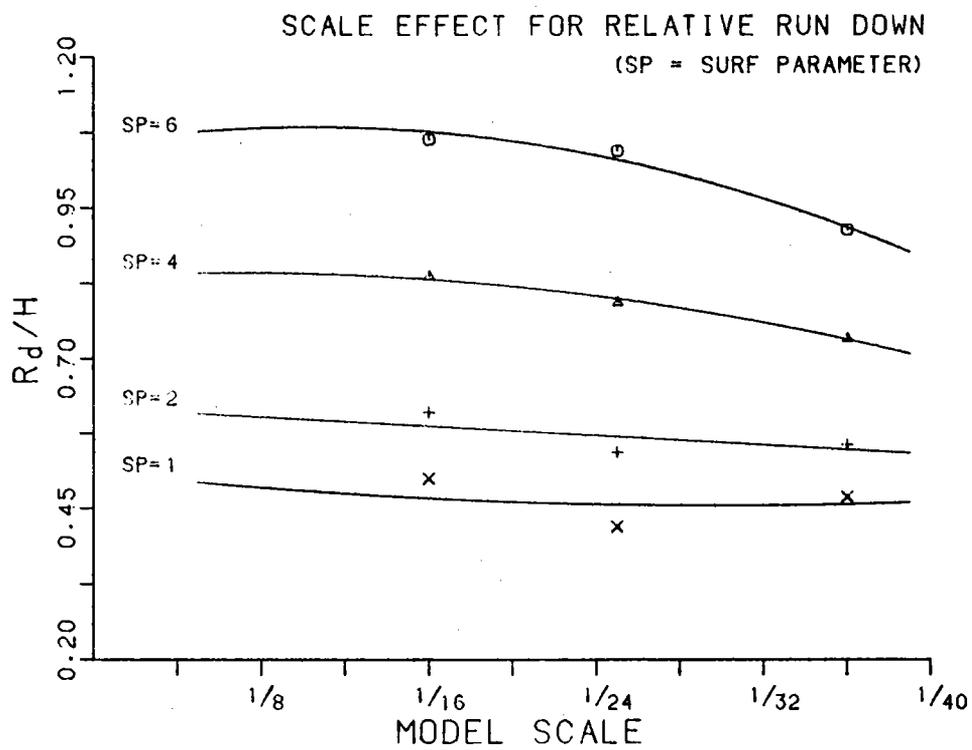


圖 3 - 5 - 4 (b) R_d/H 受模型縮尺影響

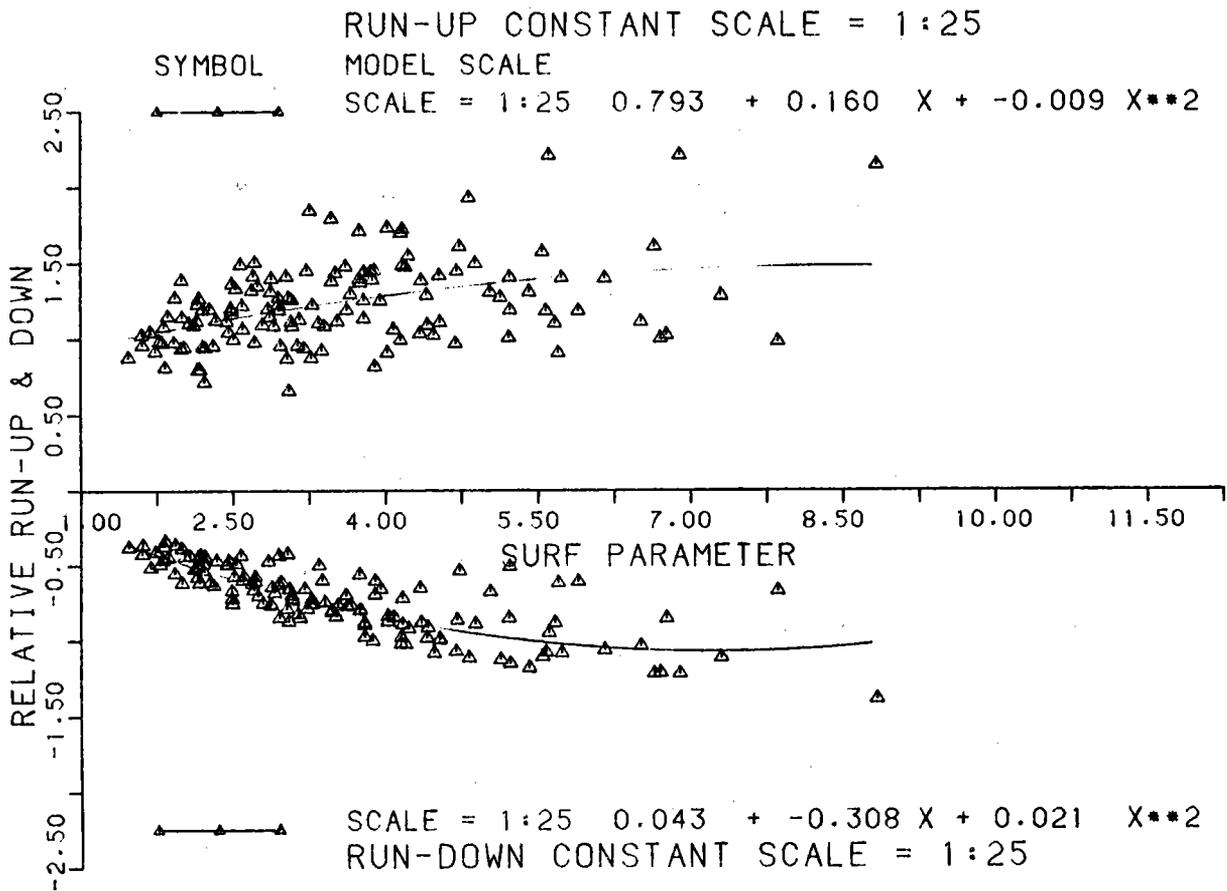
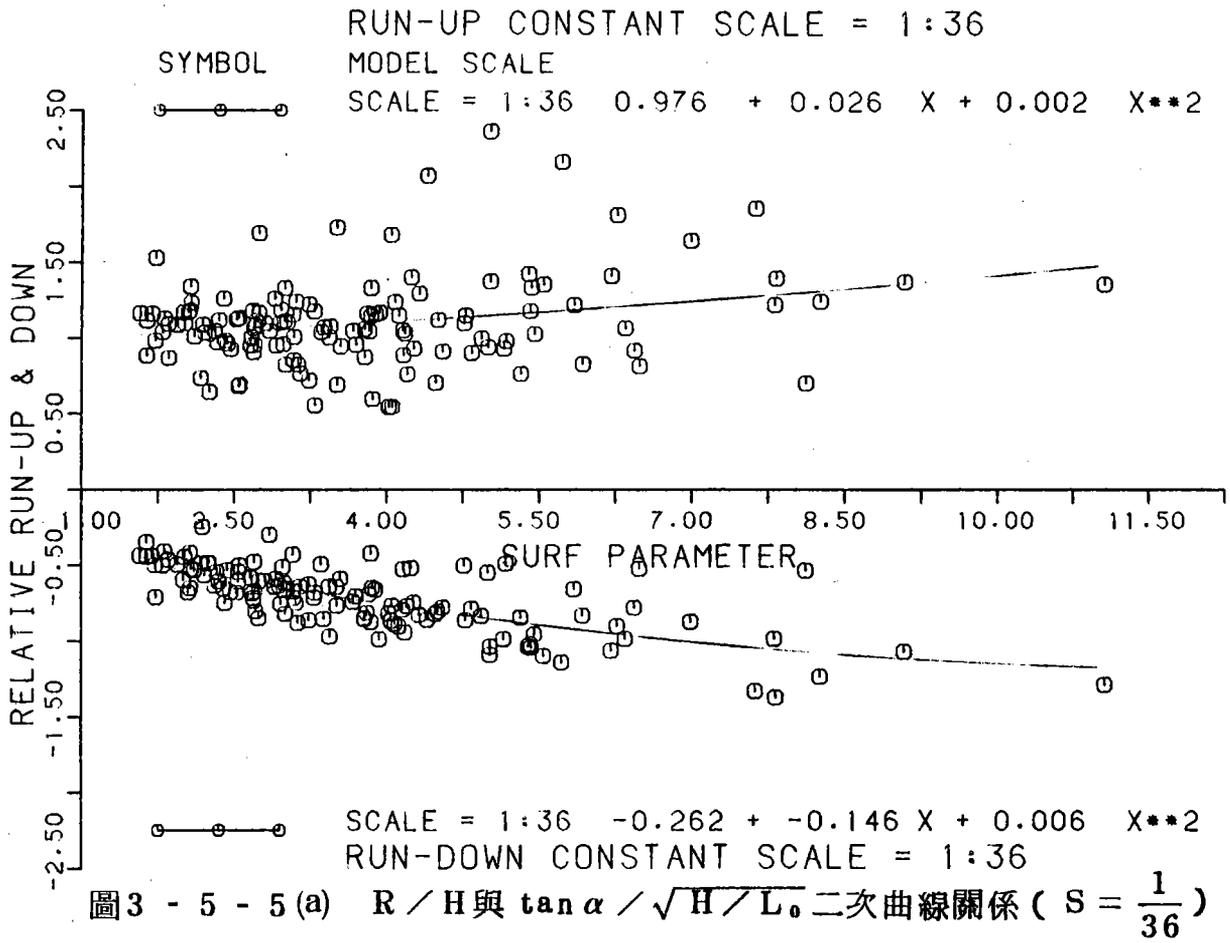


圖 3 - 5 - 5 (b) R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 二次曲線關係 ($S = \frac{1}{25}$)

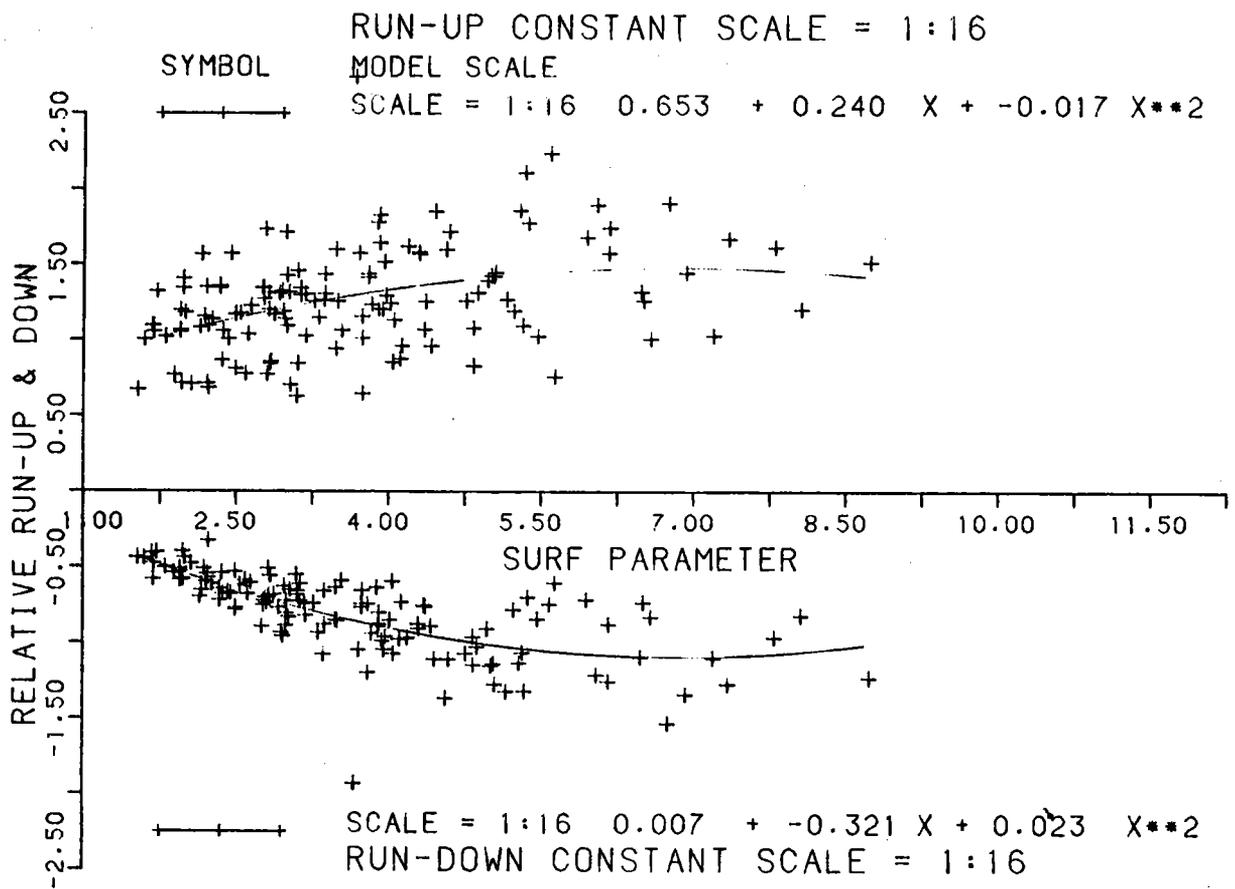


圖 3 - 5 - 5 (c) R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 二次曲線關係 ($\frac{1}{16}$)

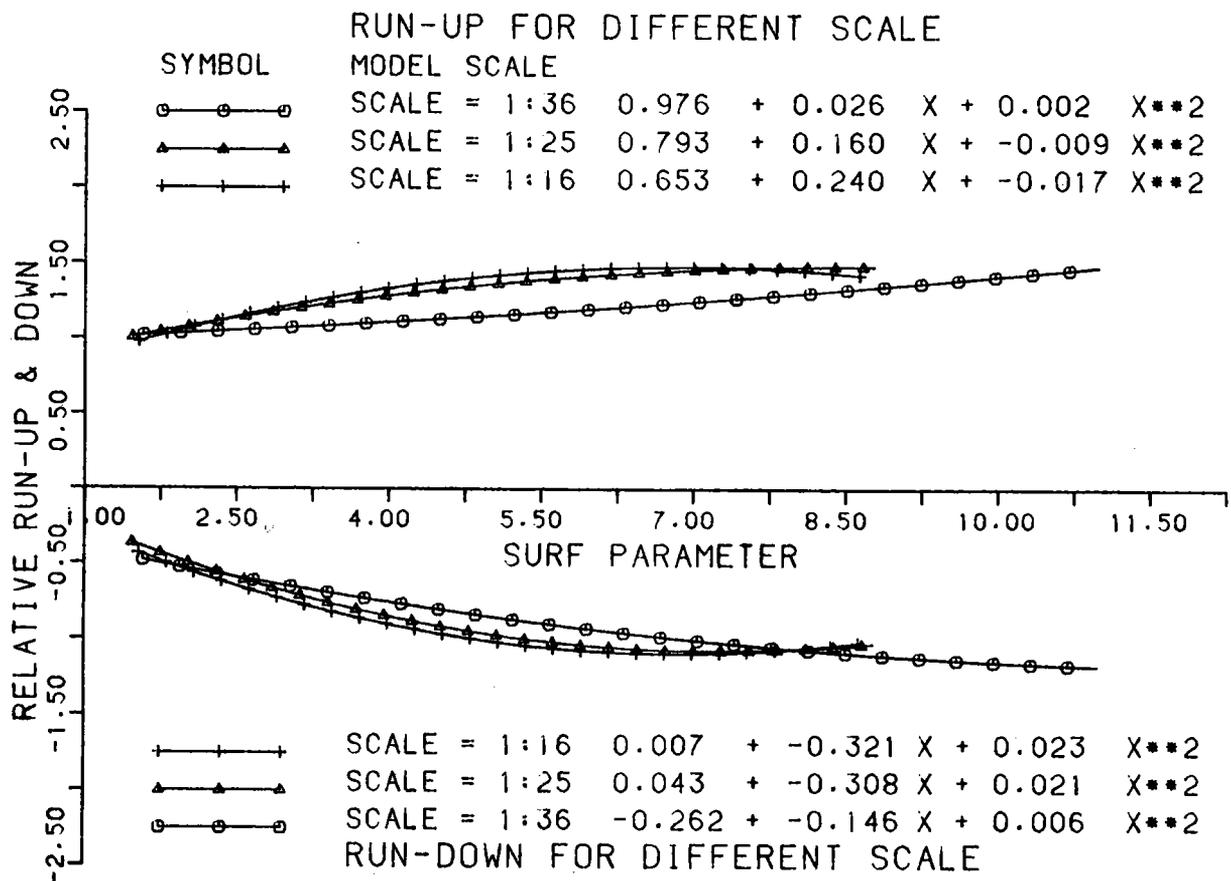


圖 3 - 5 - 6 R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 二次曲線比較

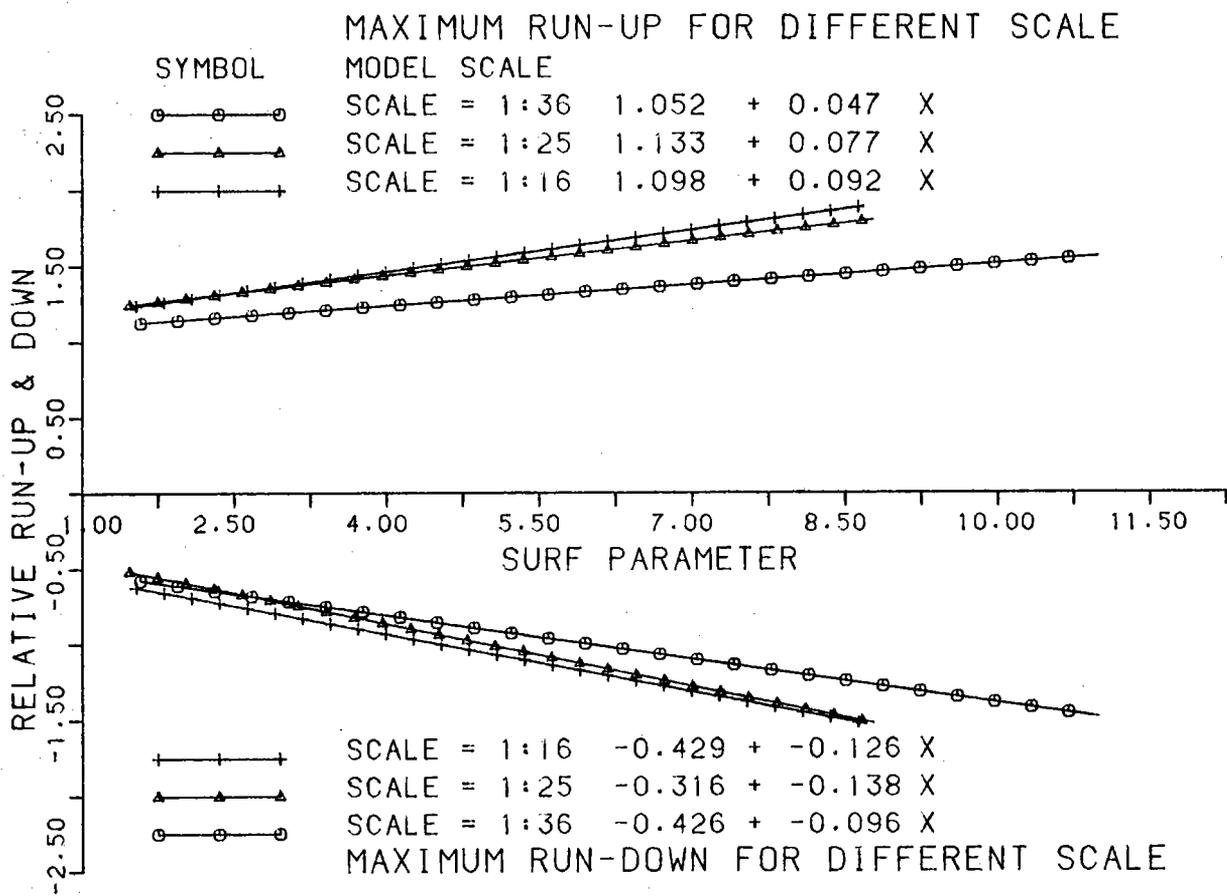


圖 3 - 5 - 7 R_{max} / H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H / L_0}$ 線性方程式比較

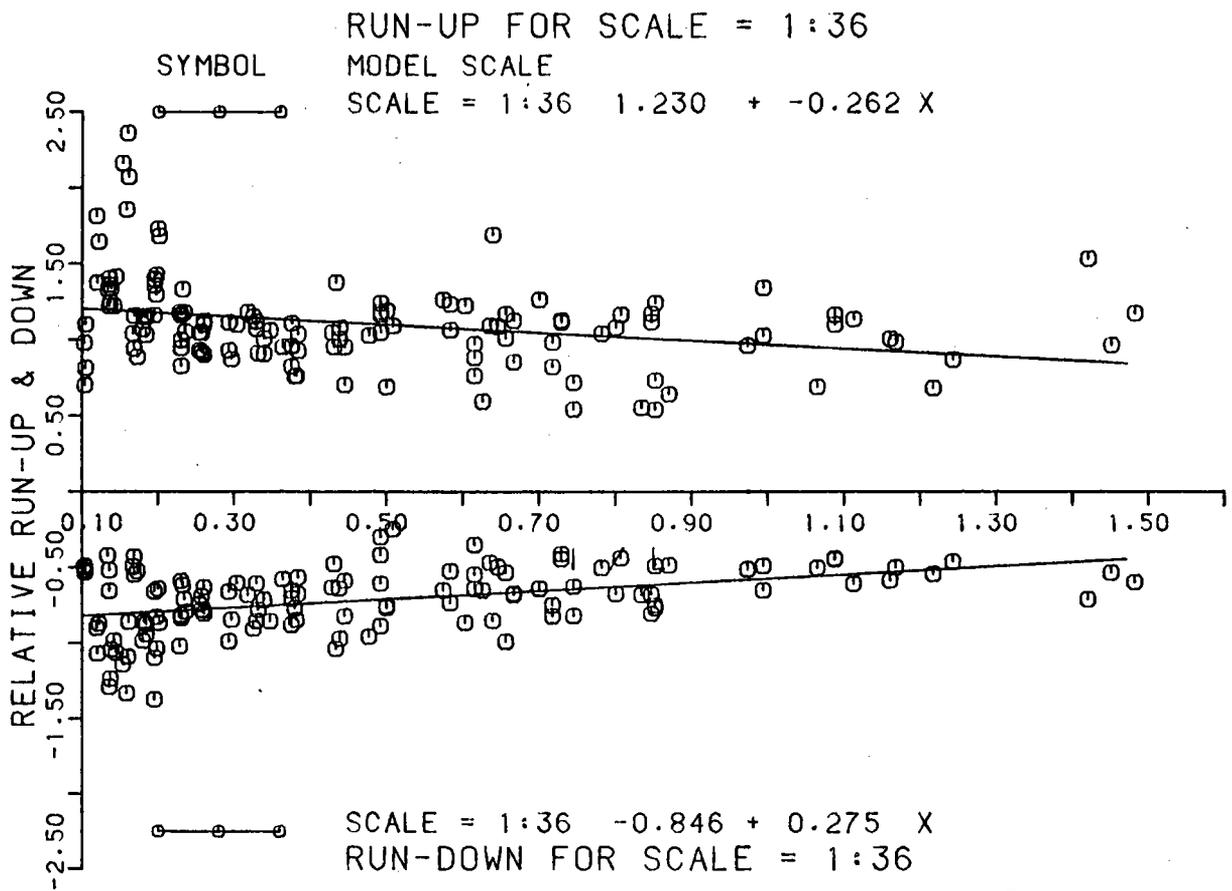


圖 3 - 5 - 8 (a) R/H 與 l/L 之關係 ($S = \frac{1}{36}$)

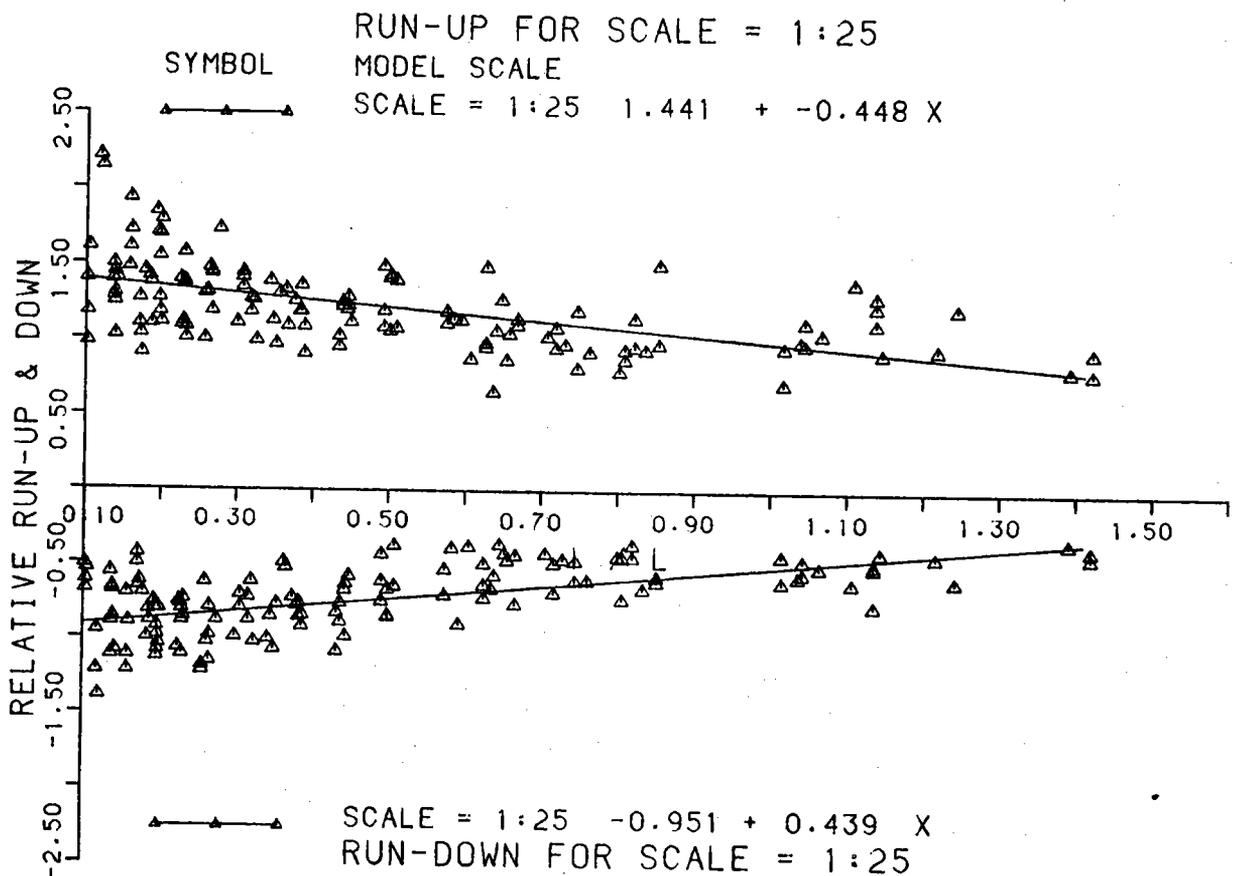


圖 3 - 5 - 8 (b) R/H 與 l/L 之關係 ($S = \frac{1}{25}$)

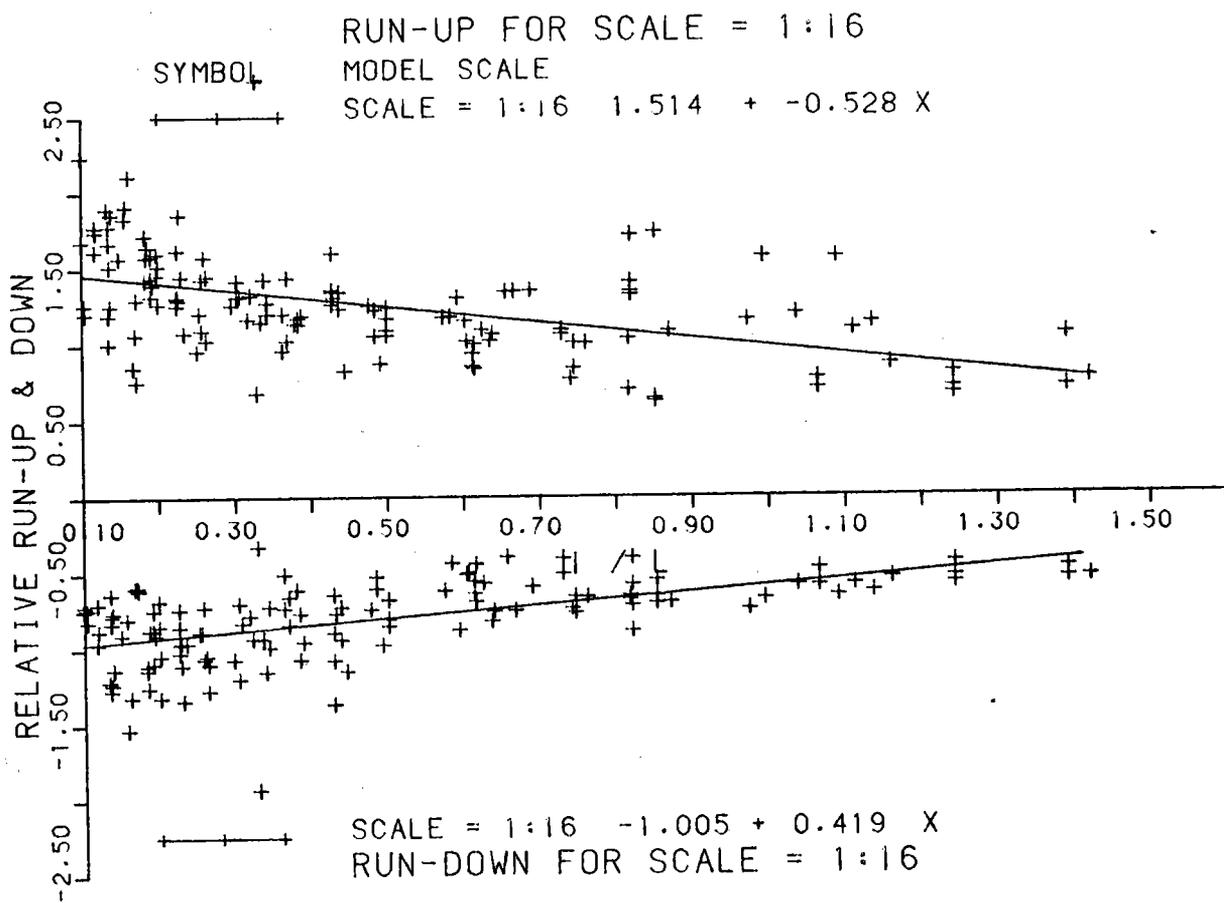


圖 3 - 5 - 8 (c) R/H 與 l/L 之關係 ($S = \frac{1}{16}$)

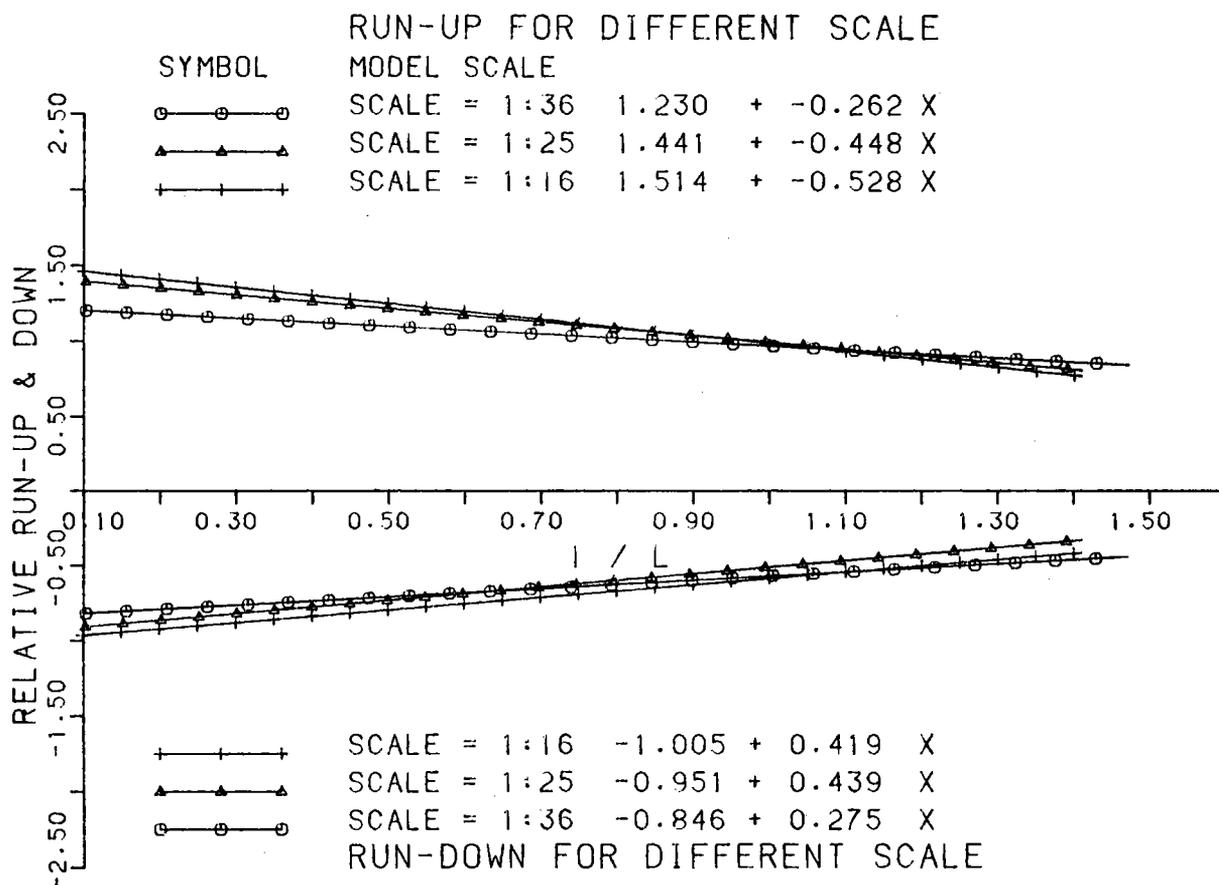


圖 3 - 5 - 9 三種縮尺 R/H 與 l/L 最佳線性方程式比較

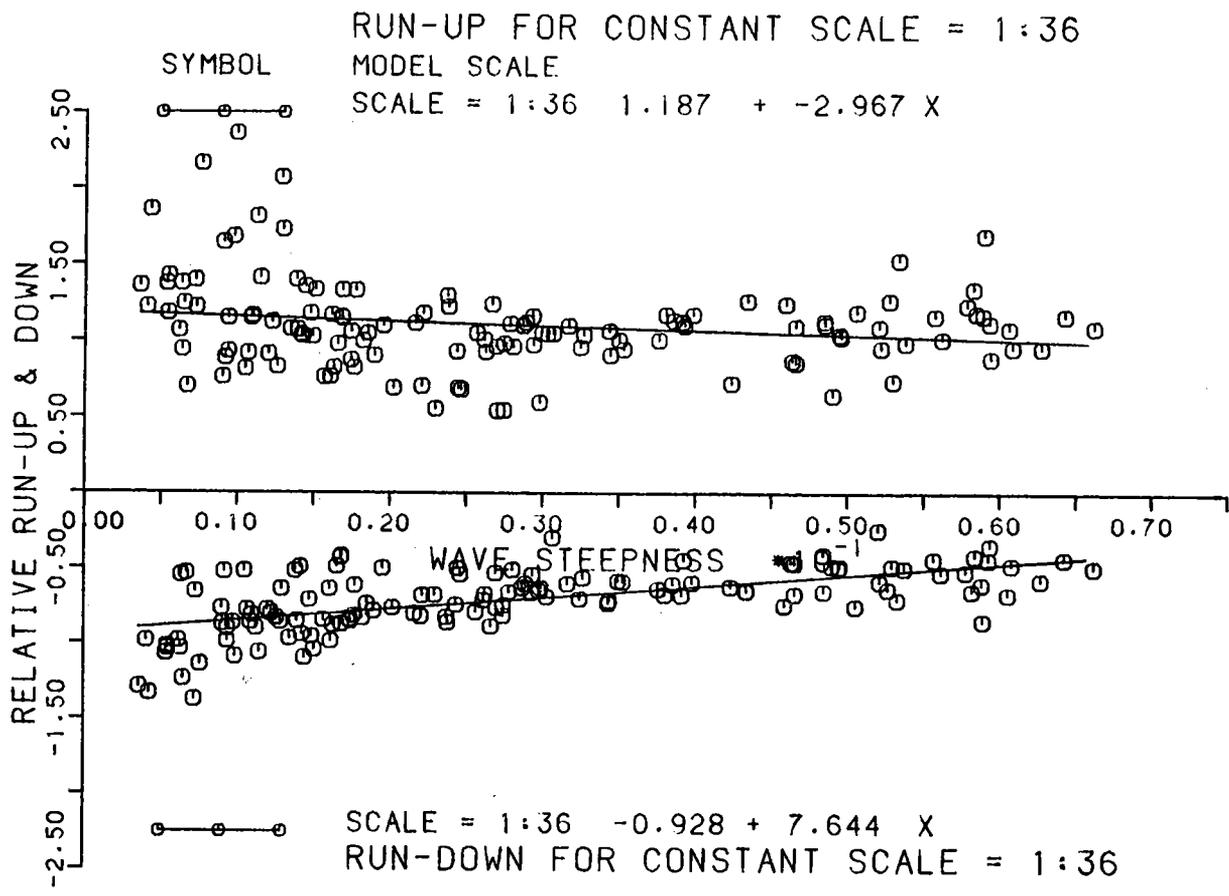


圖3 - 5 - 10(a) R/H 與 H/L_0 之關係 ($S = \frac{1}{36}$)

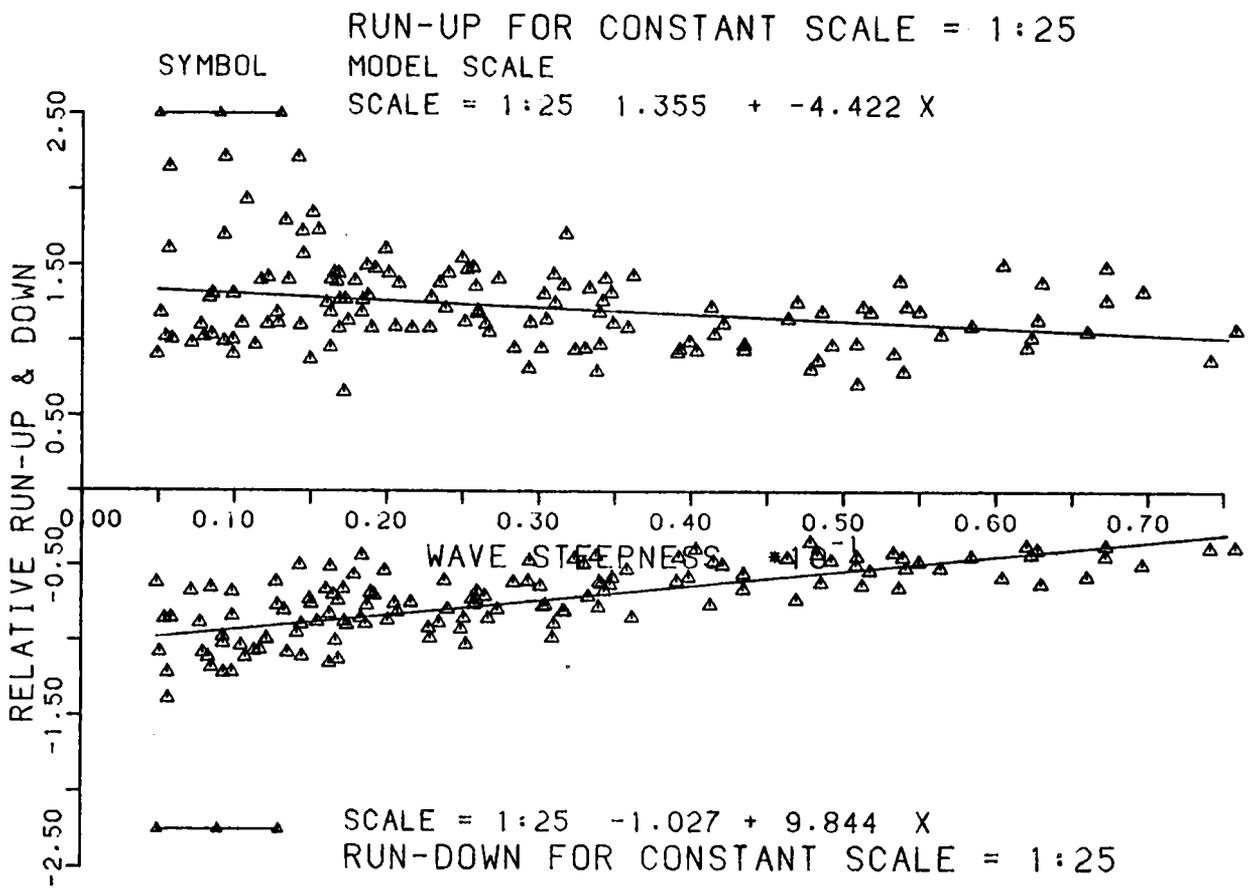


圖3 - 5 - 10(b) R/H 與 H/L_0 之關係 ($S = \frac{1}{25}$)

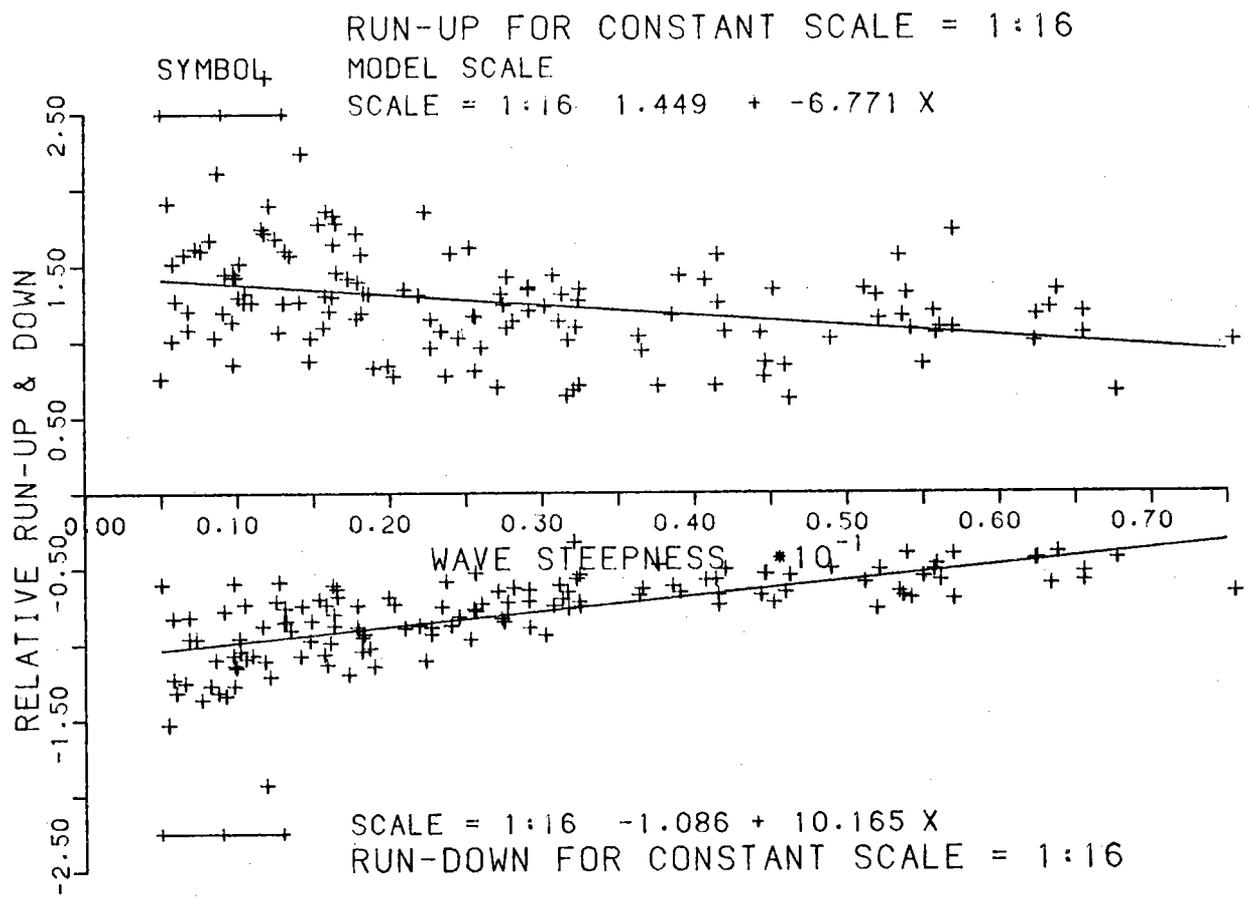


圖3 - 5 - 10(c) R/H 與 H/L_0 之關係 ($S = \frac{1}{16}$)

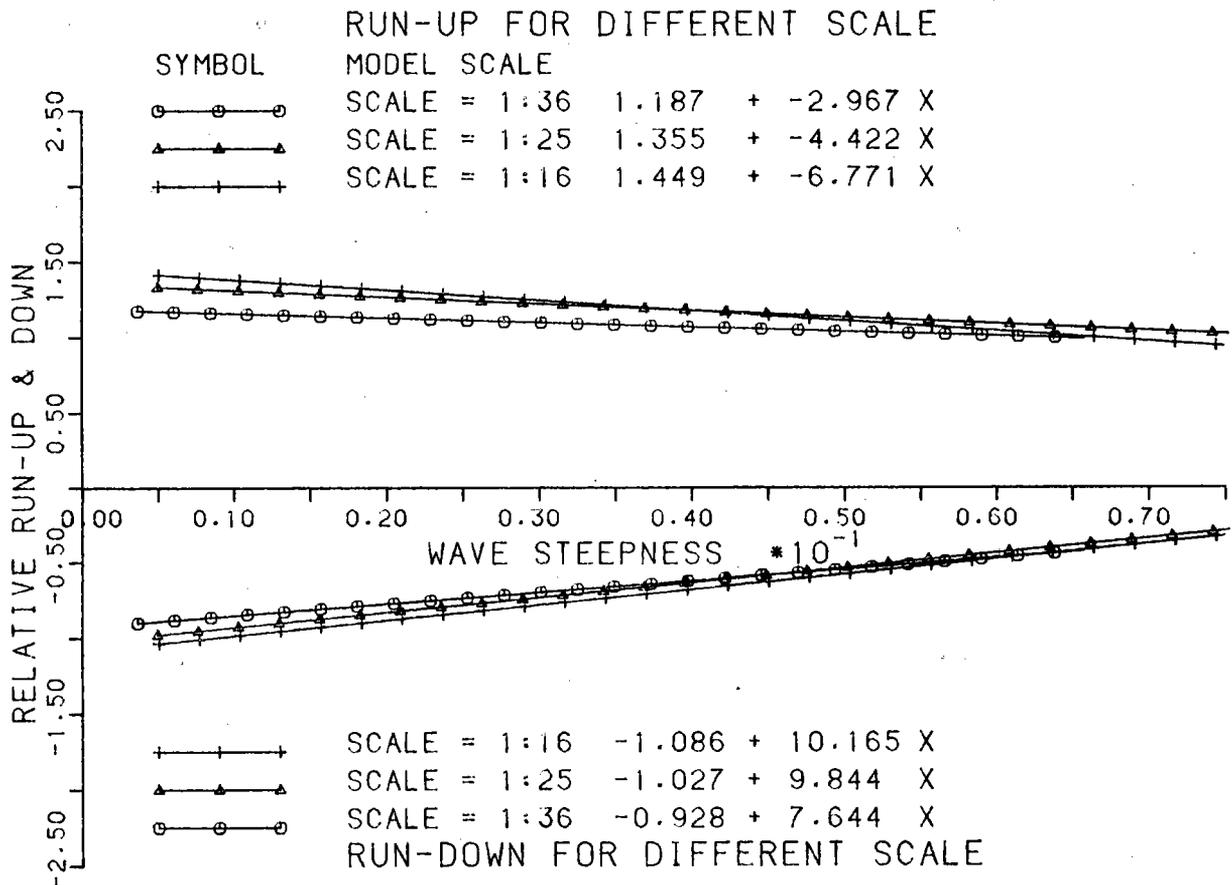


圖3 - 5 - 11 三種縮尺 R/H 與 H/L_0 最佳線性方程式比較

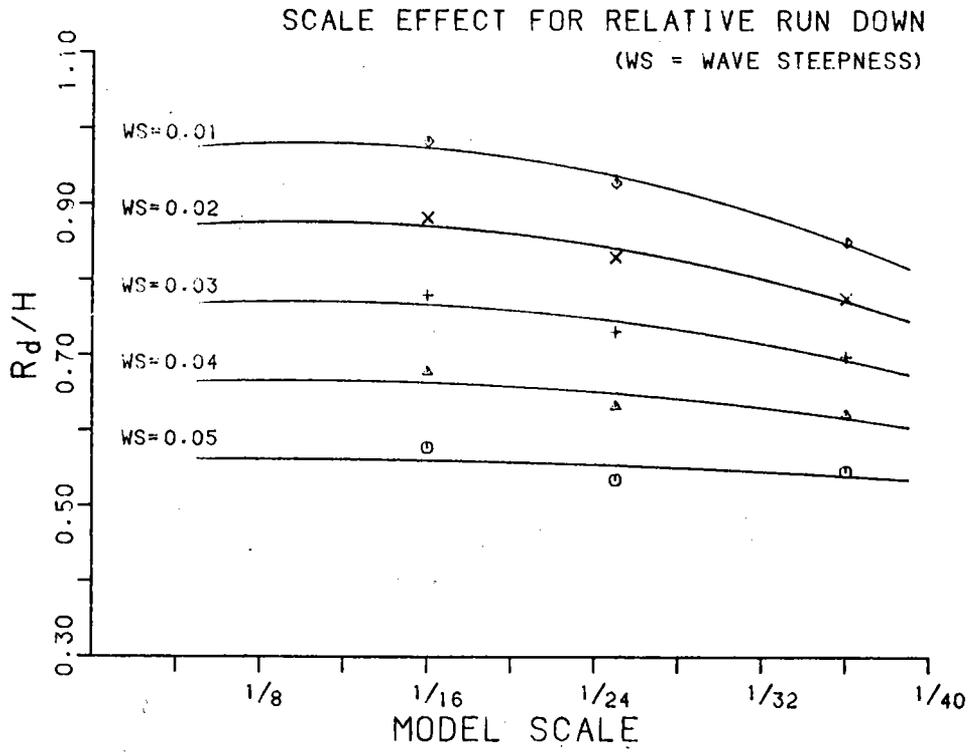


圖3 - 5 - 12(a) R_d / H , H / L 與模型縮尺關係

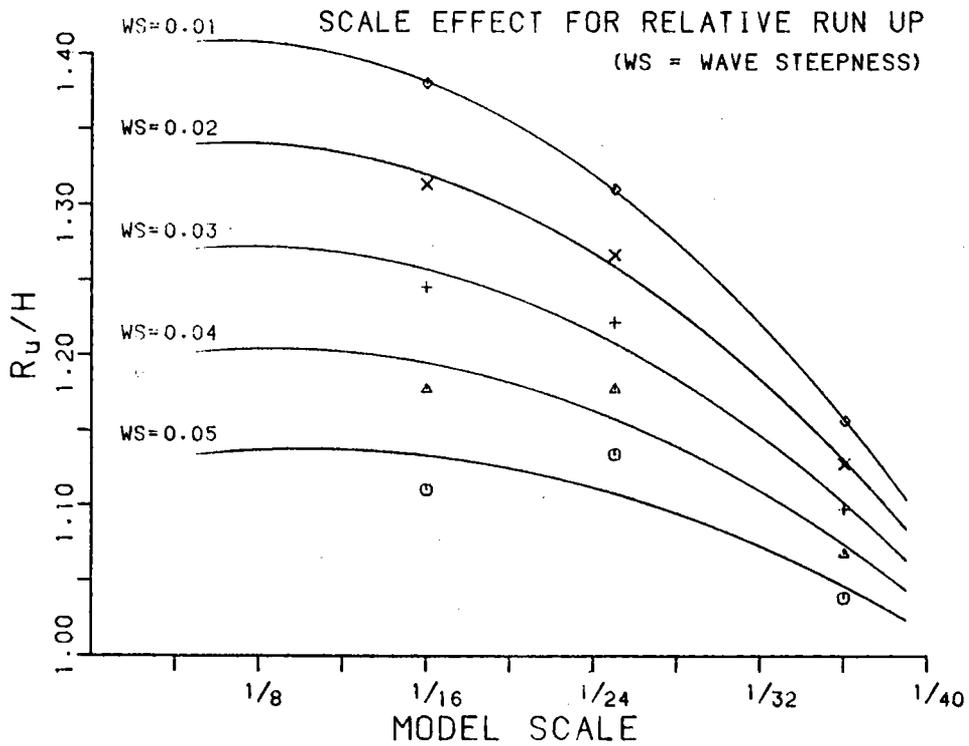


圖3 - 5 - 12(b) R_u / H , H / L 與模型縮尺關係

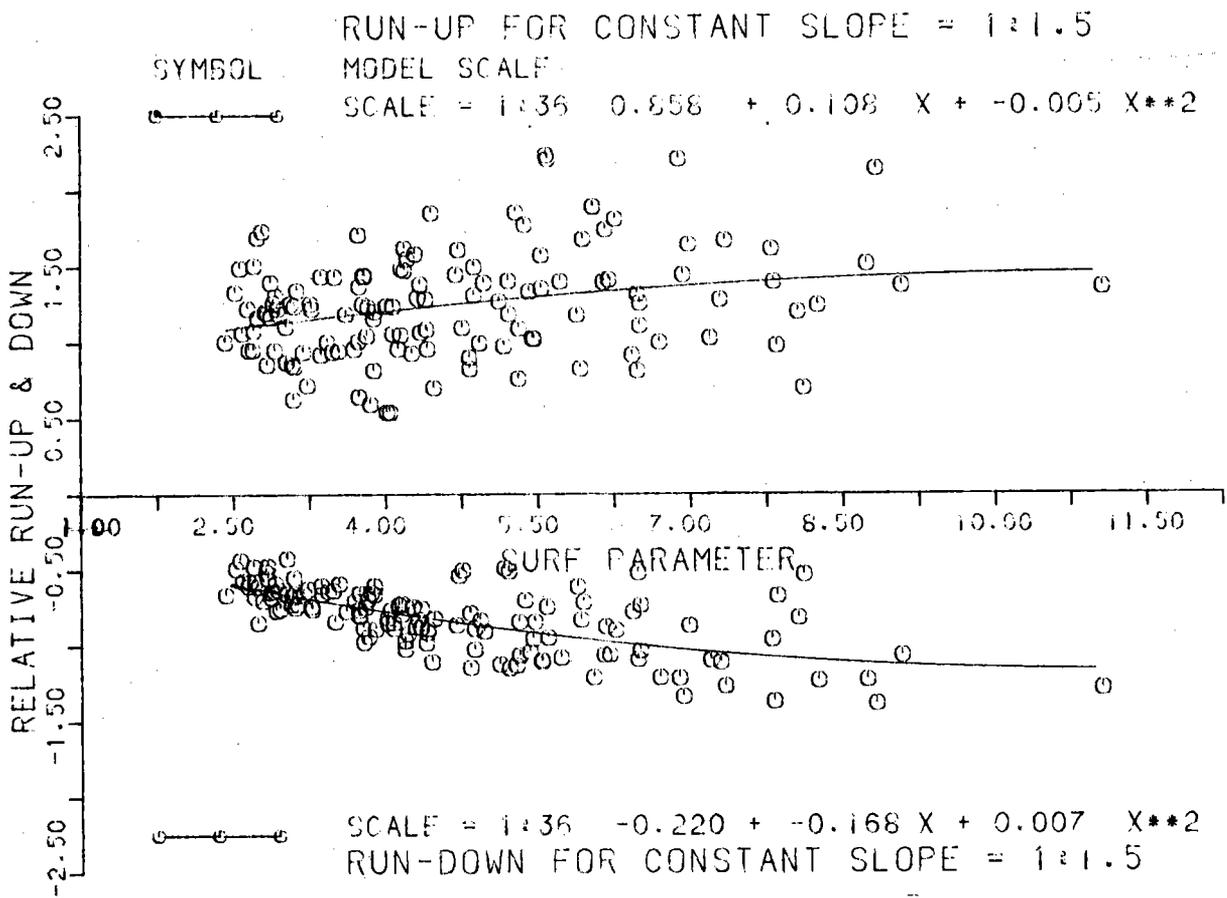


圖3 - 5 - 13(a) R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 關係 ($\cot \alpha = 1.5$)

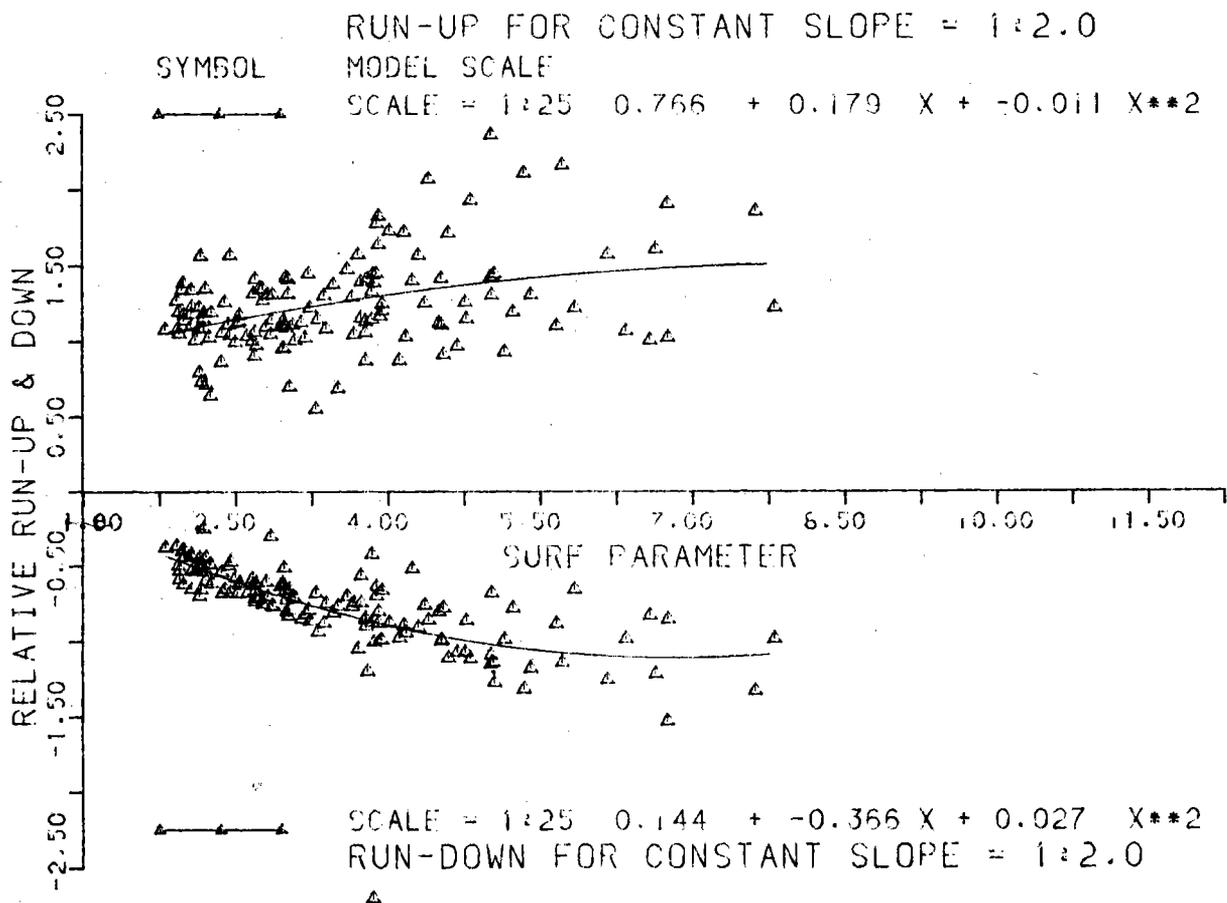


圖3 - 5 - 13(b) R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 關係 ($\cot \alpha = 2.0$)

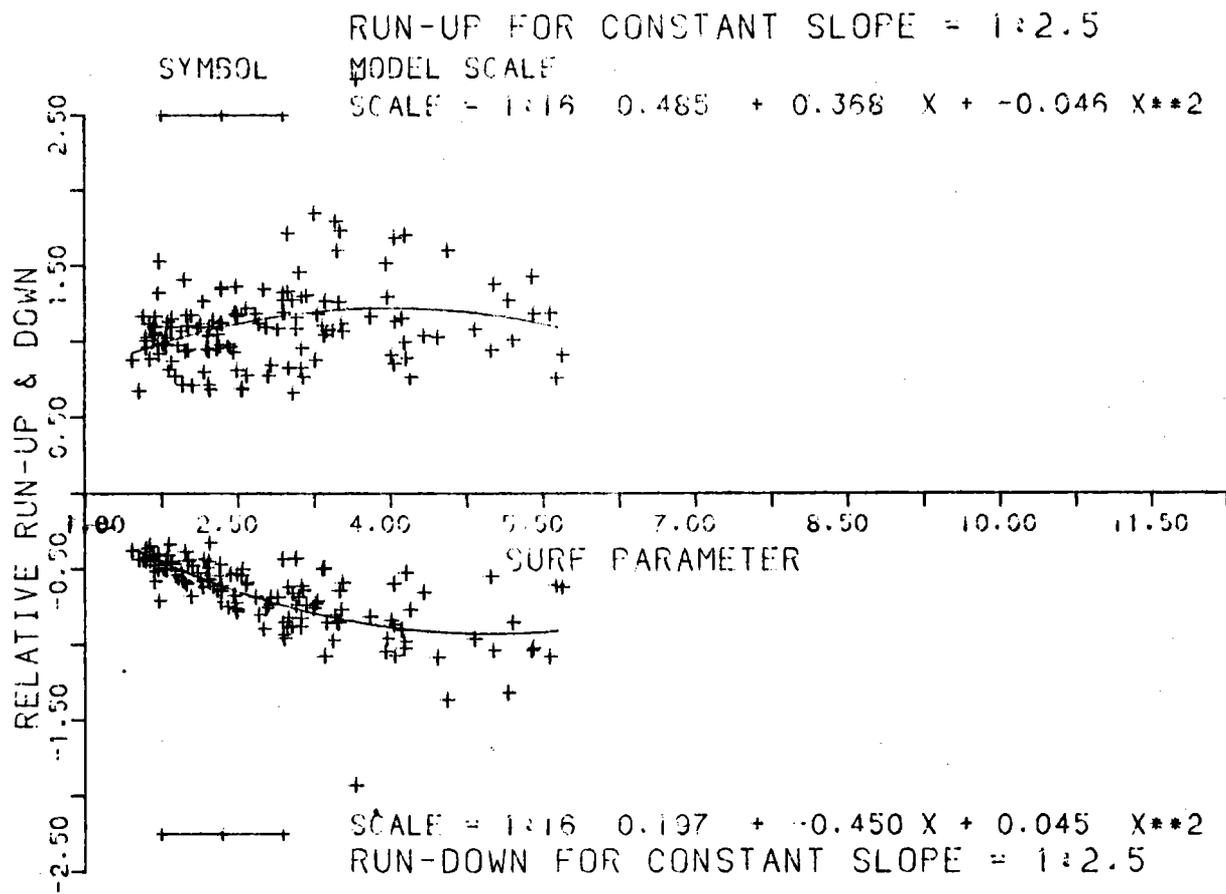


圖 3 - 5 - 13(c) R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 關係 ($\cot \alpha = 2.5$)

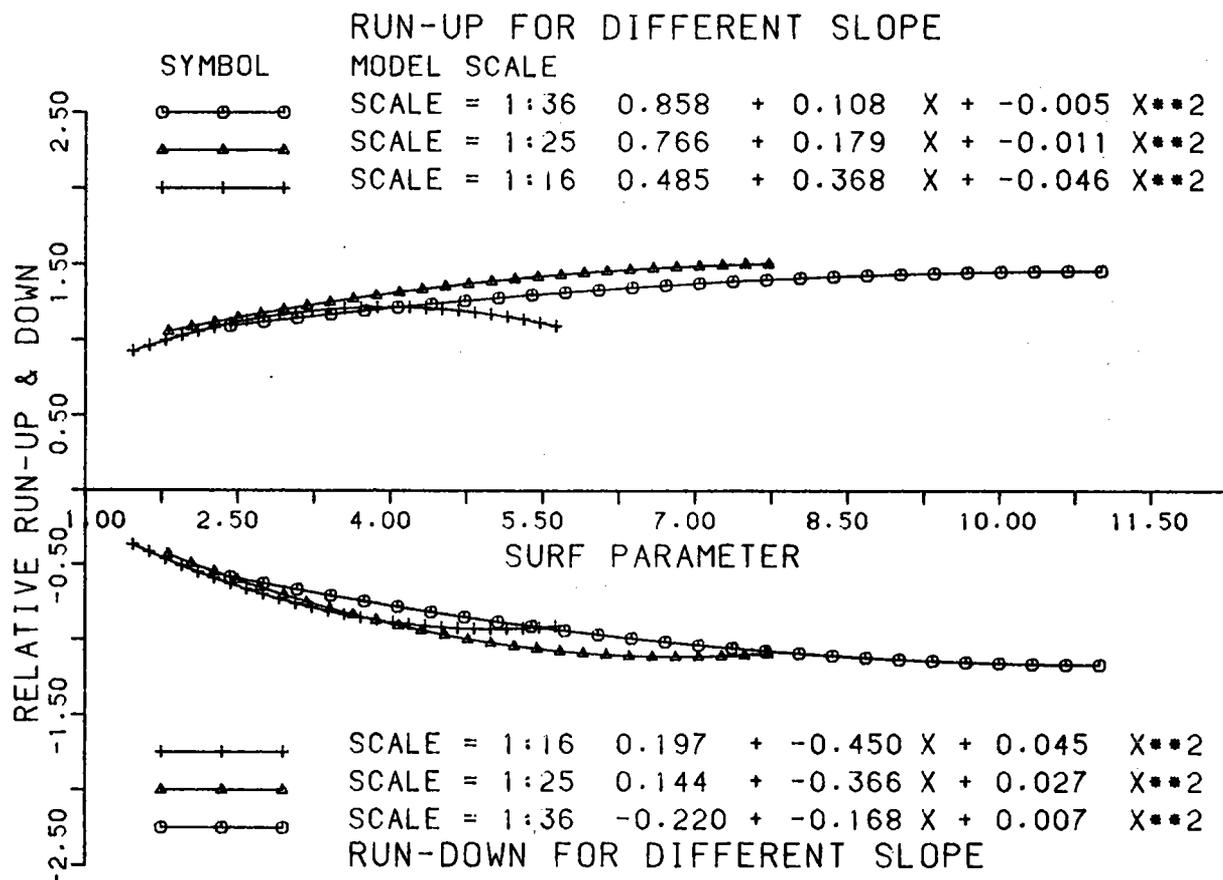


圖 3 - 5 - 14 三種坡度 R/H 與 $\tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ 最佳符合曲線比較

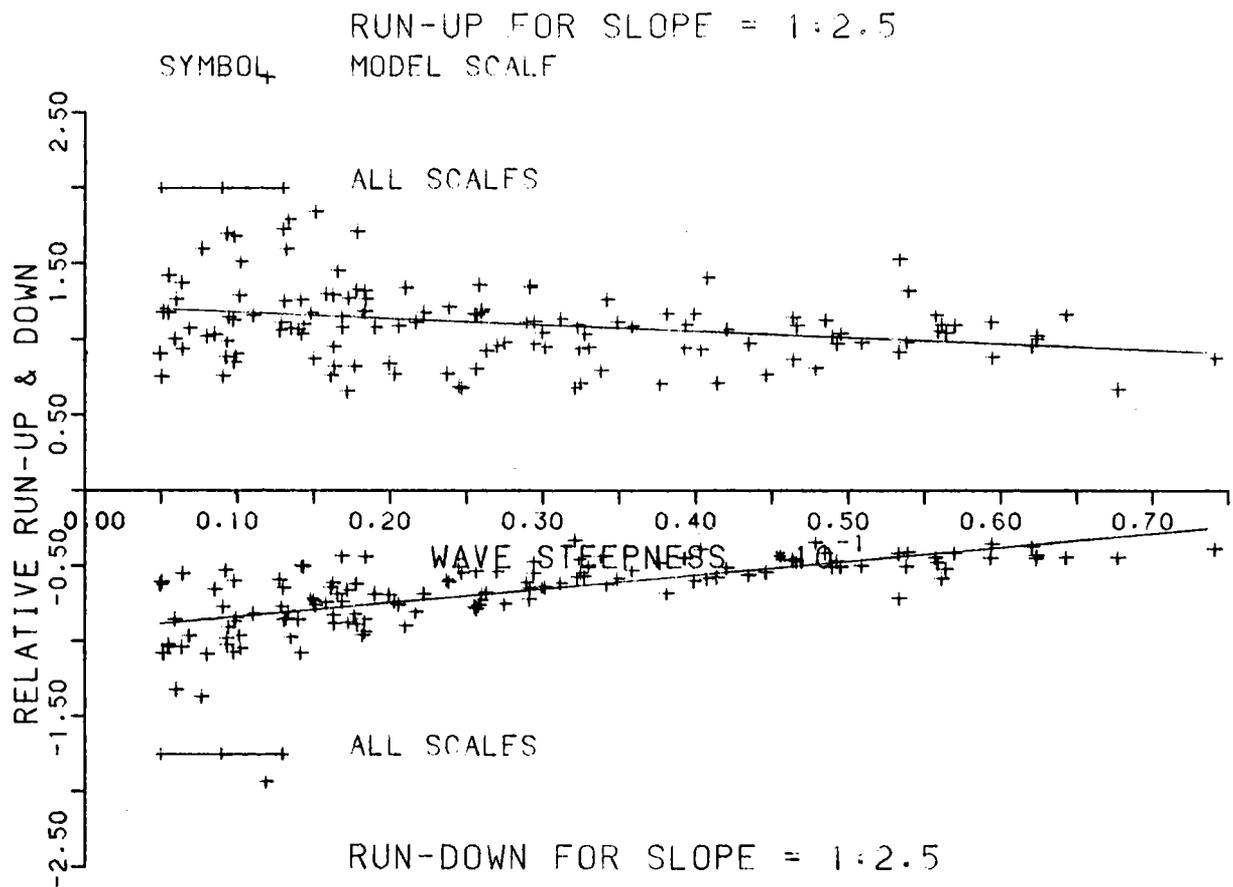


圖 3 - 5 - 15(c) R/H 與 H/L_0 關係 ($\cot \alpha = 2.5$)

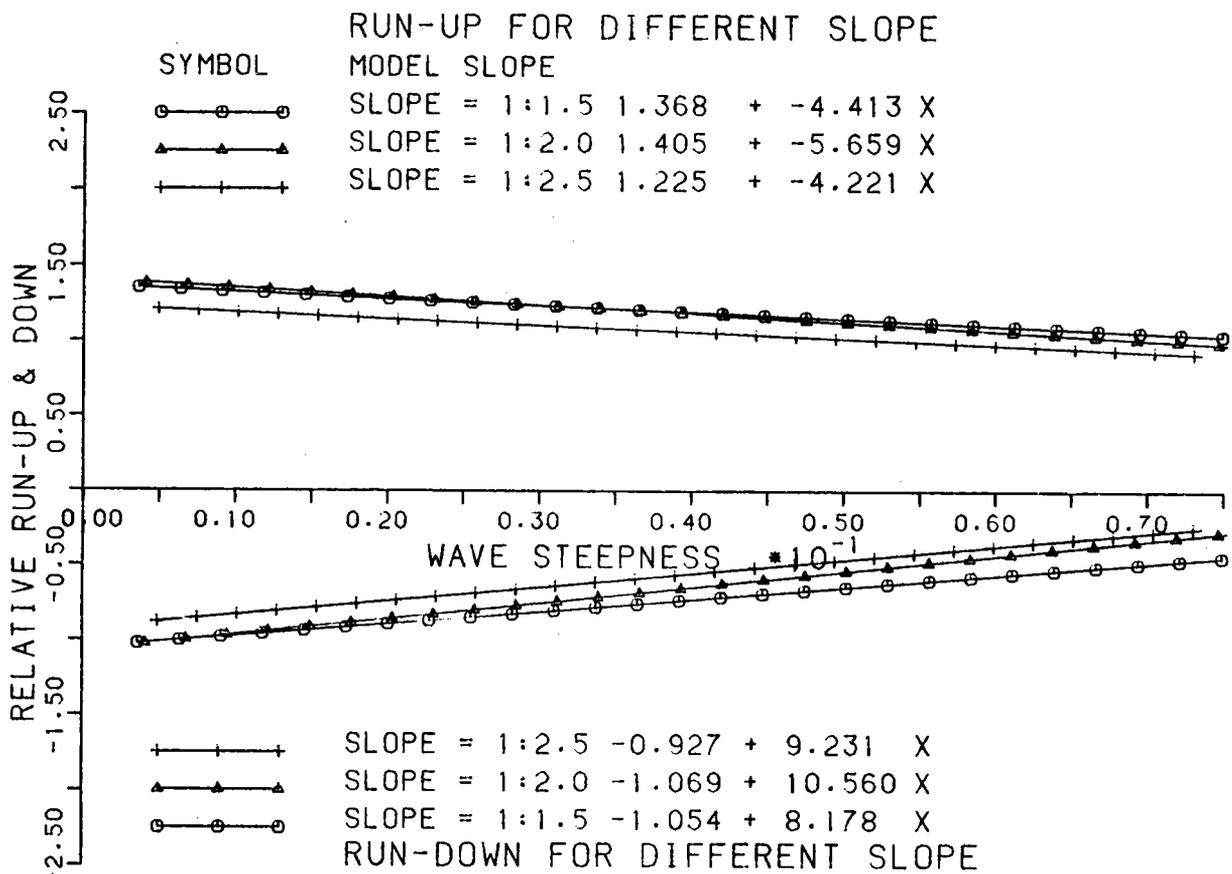


圖 3 - 5 - 16 三種坡度 R/H 與 H/L_0 最佳符合線比較

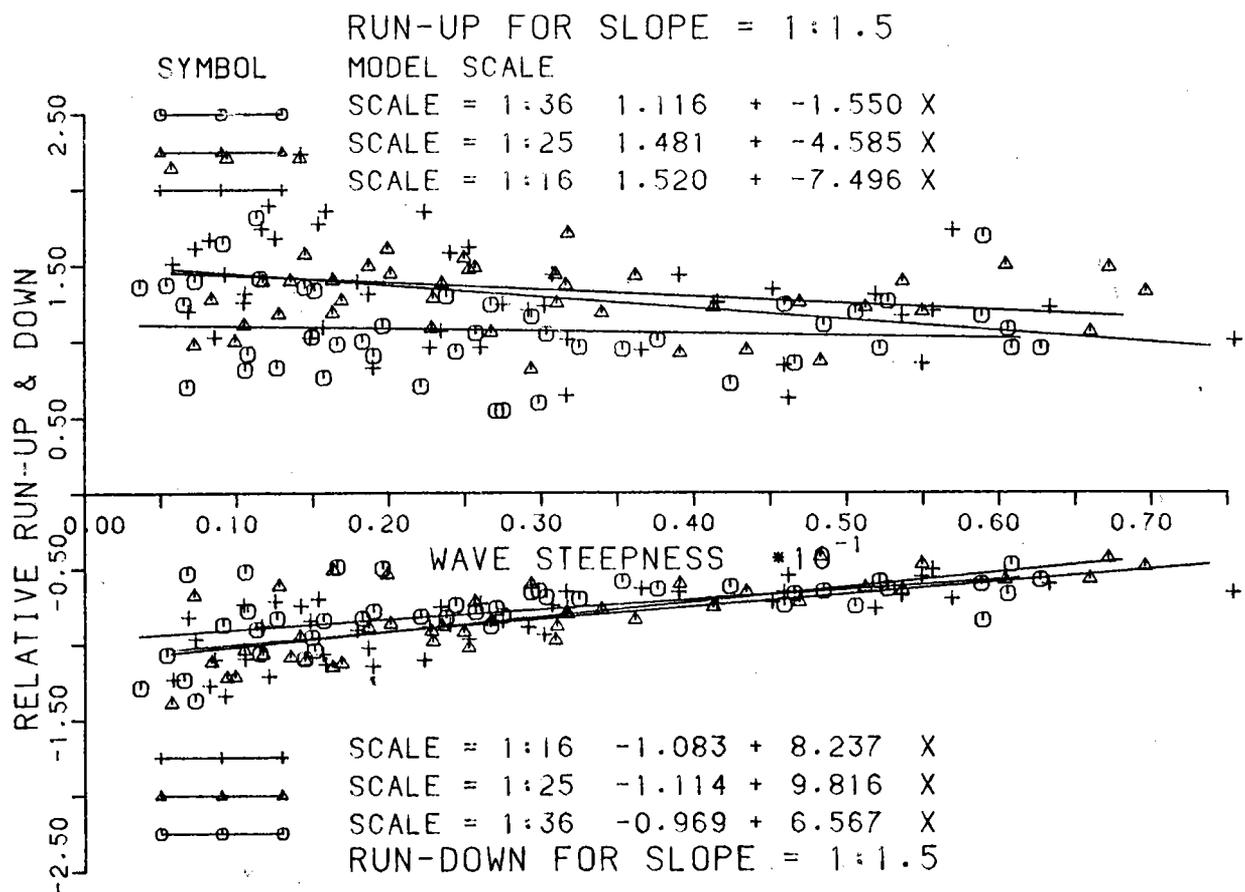


圖 3 - 5 - 17(a) 坡度 1 : 1.5 , R/H 與 H/L 關係受縮尺影響

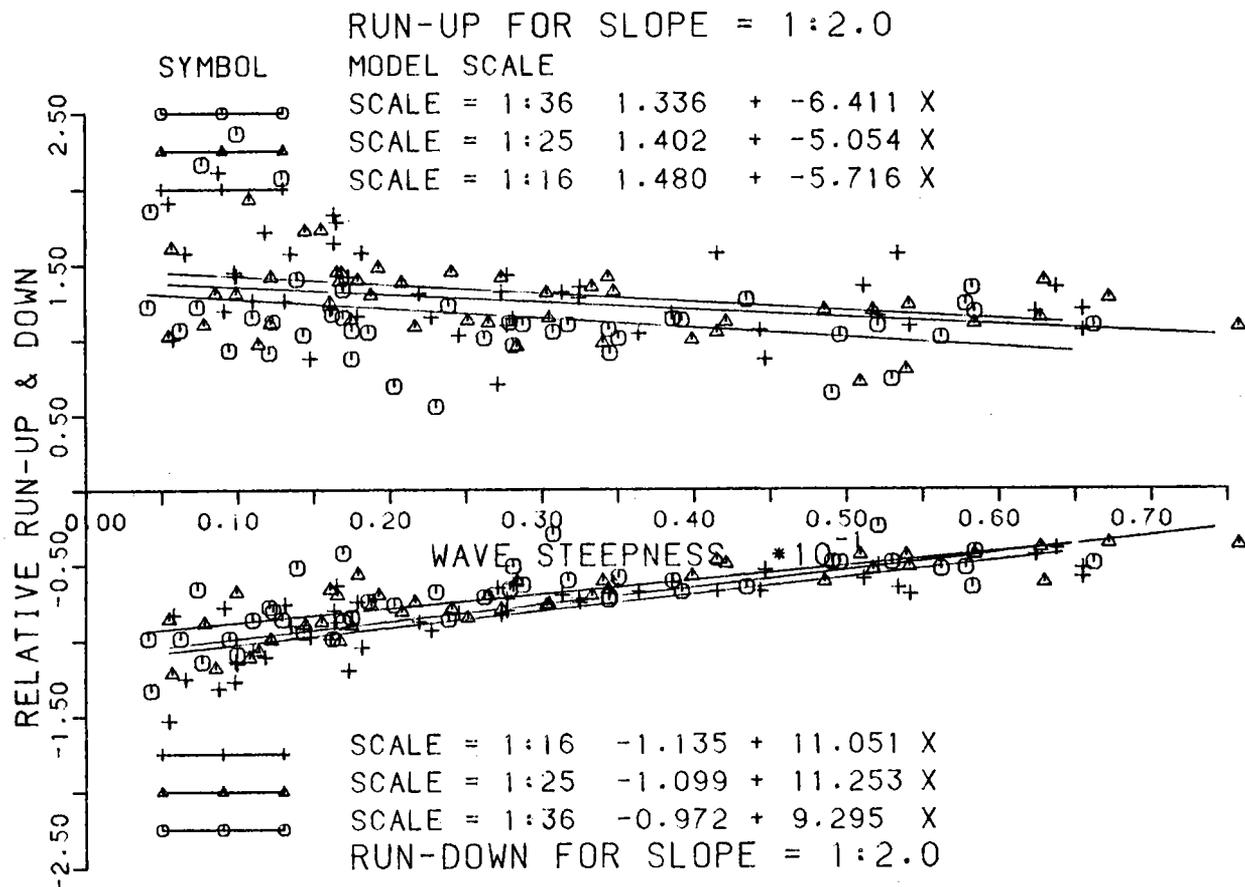


圖 3 - 5 - 17(b) 坡度 1 : 2.0 , R/H 與 H/L 關係受縮尺影響

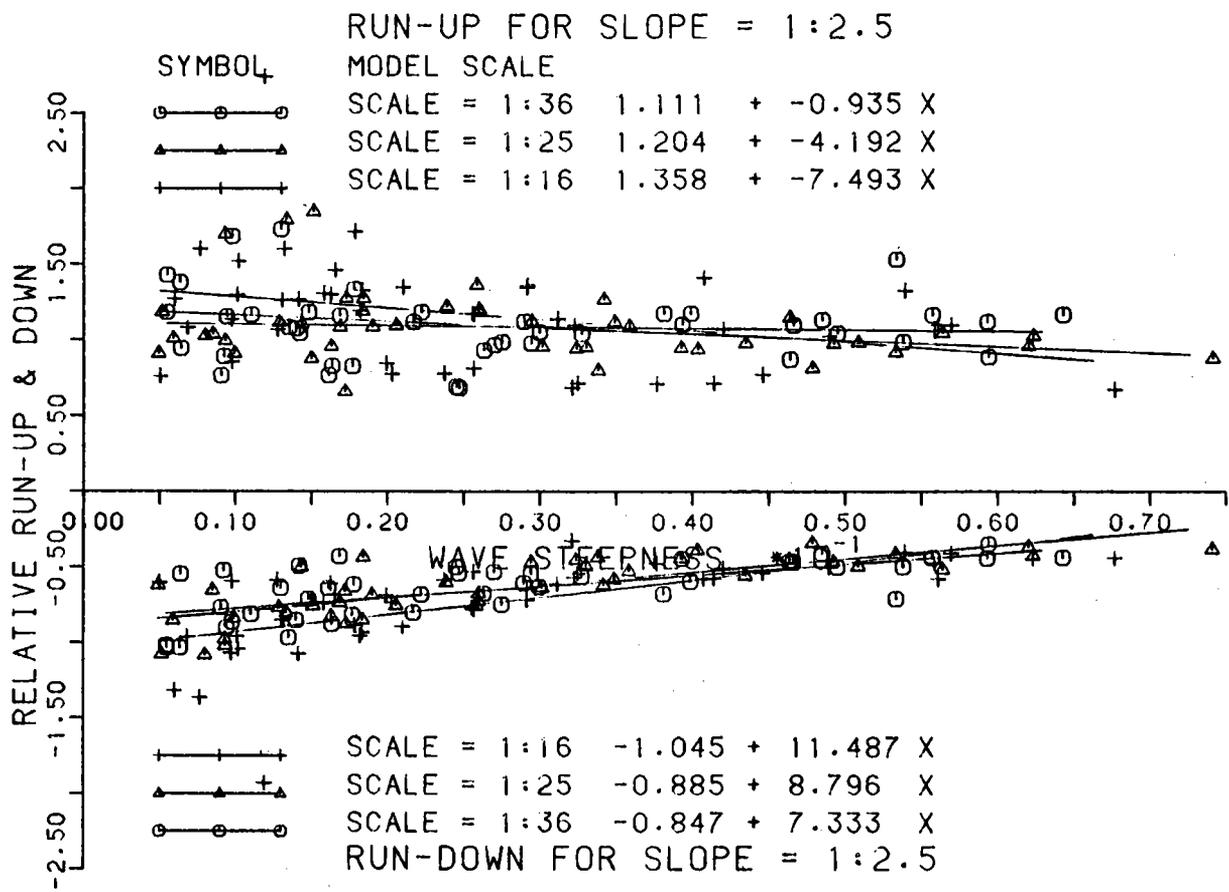


圖3 - 5 - 17(c) 坡度 1 : 2.5 R / H 與 H / L。關係受縮尺影響

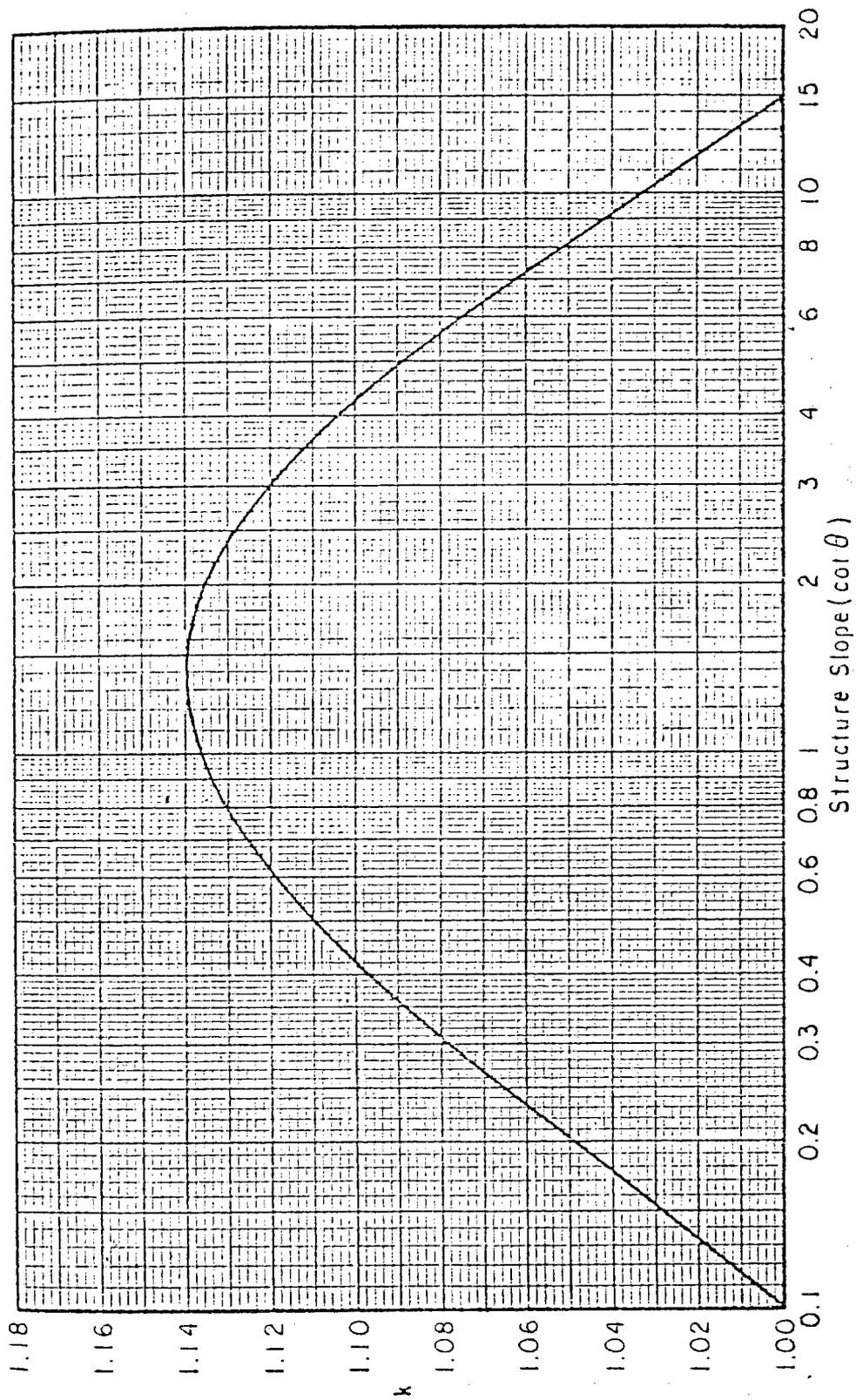


圖 3 - 5 - 18 湖上模型縮尺影響修正係數 (Stoa, 1978)

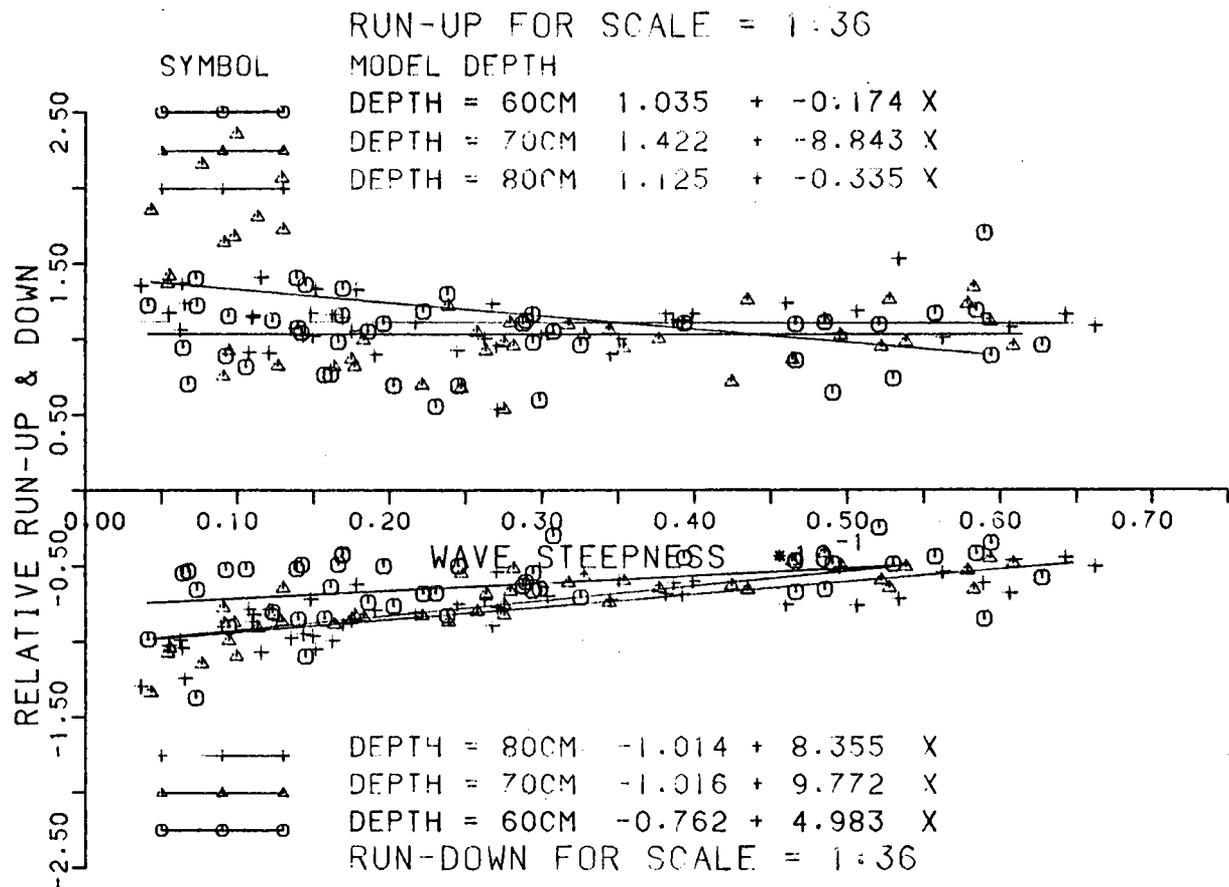


圖3 - 5 - 19(a) 縮尺 $\frac{1}{36}$, R/H 與 H/L 關係受水深影響

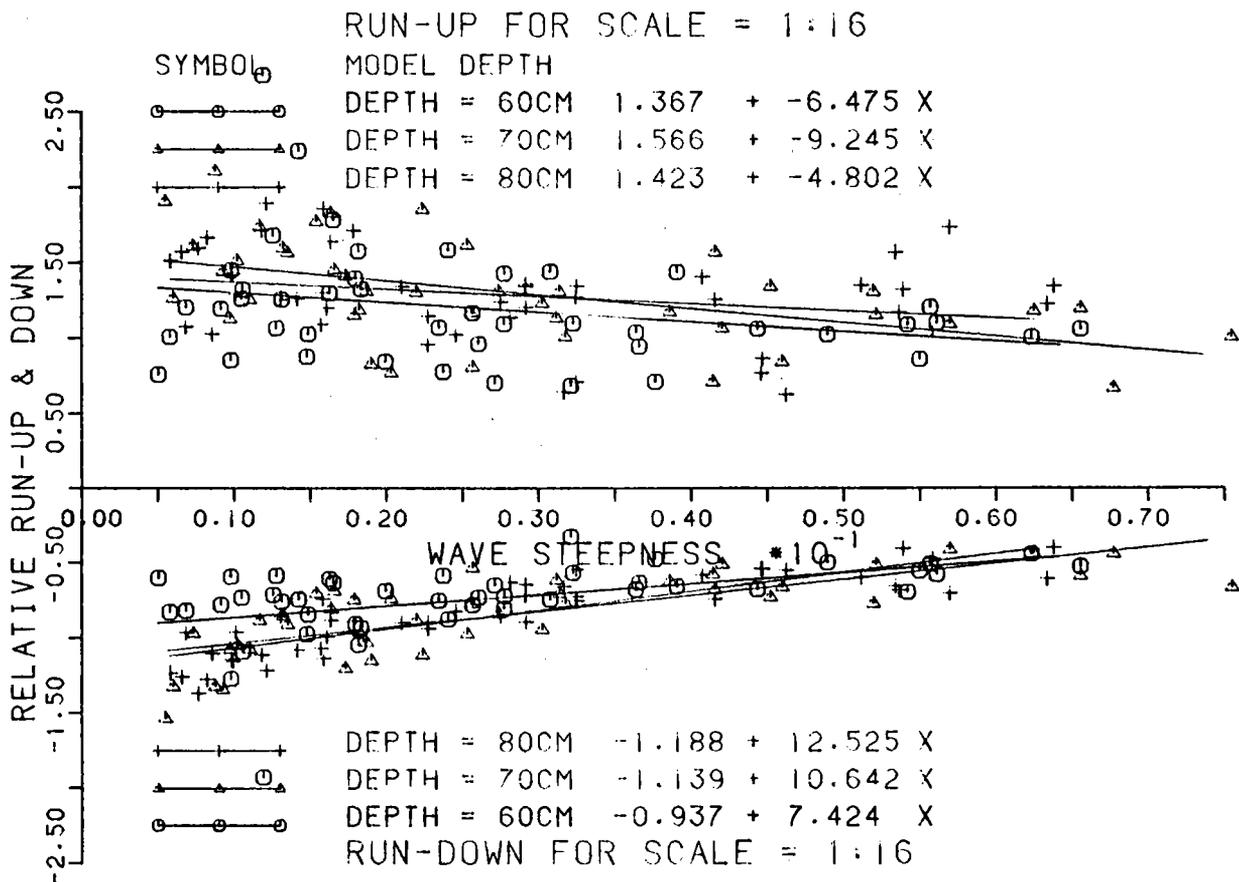


圖3 - 5 - 19(b) 縮尺 $\frac{1}{25}$, R/H 與 H/L 關係受水深影響

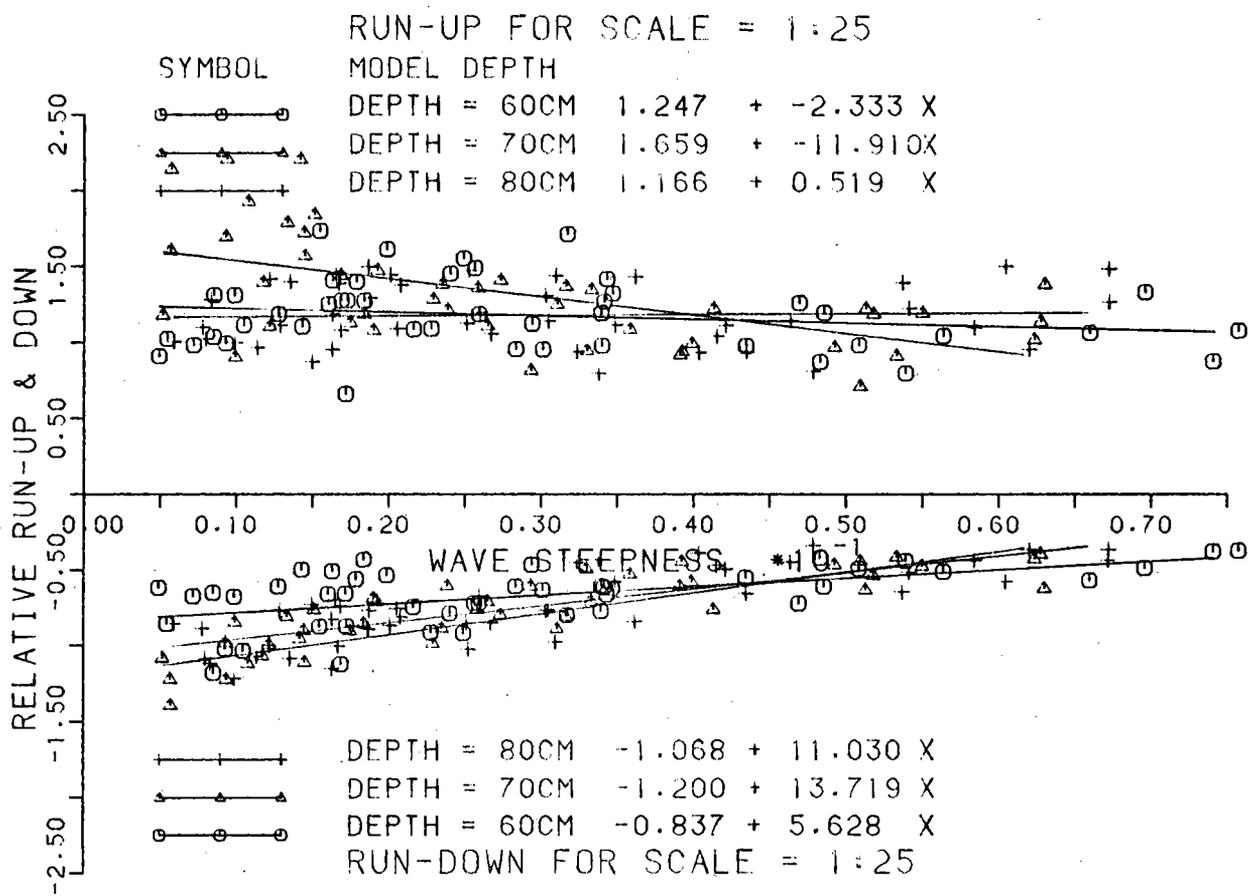


圖3 - 5 - 19(c) 縮尺 $\frac{1}{16}$, R/H 與 H/L 關係受水深影響

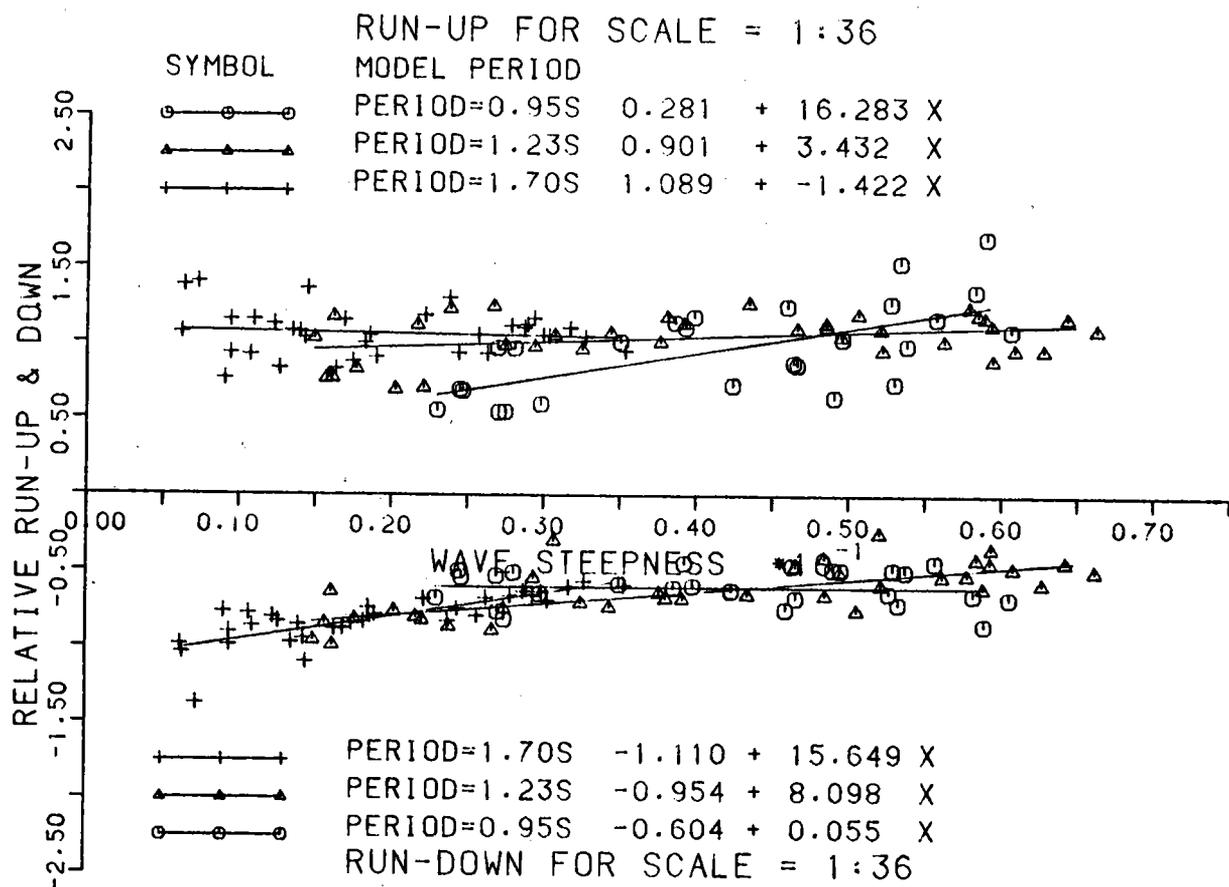


圖3 - 5 - 20 (a) 縮尺 $\frac{1}{36}$, R/H與H/L。關係受週期影響

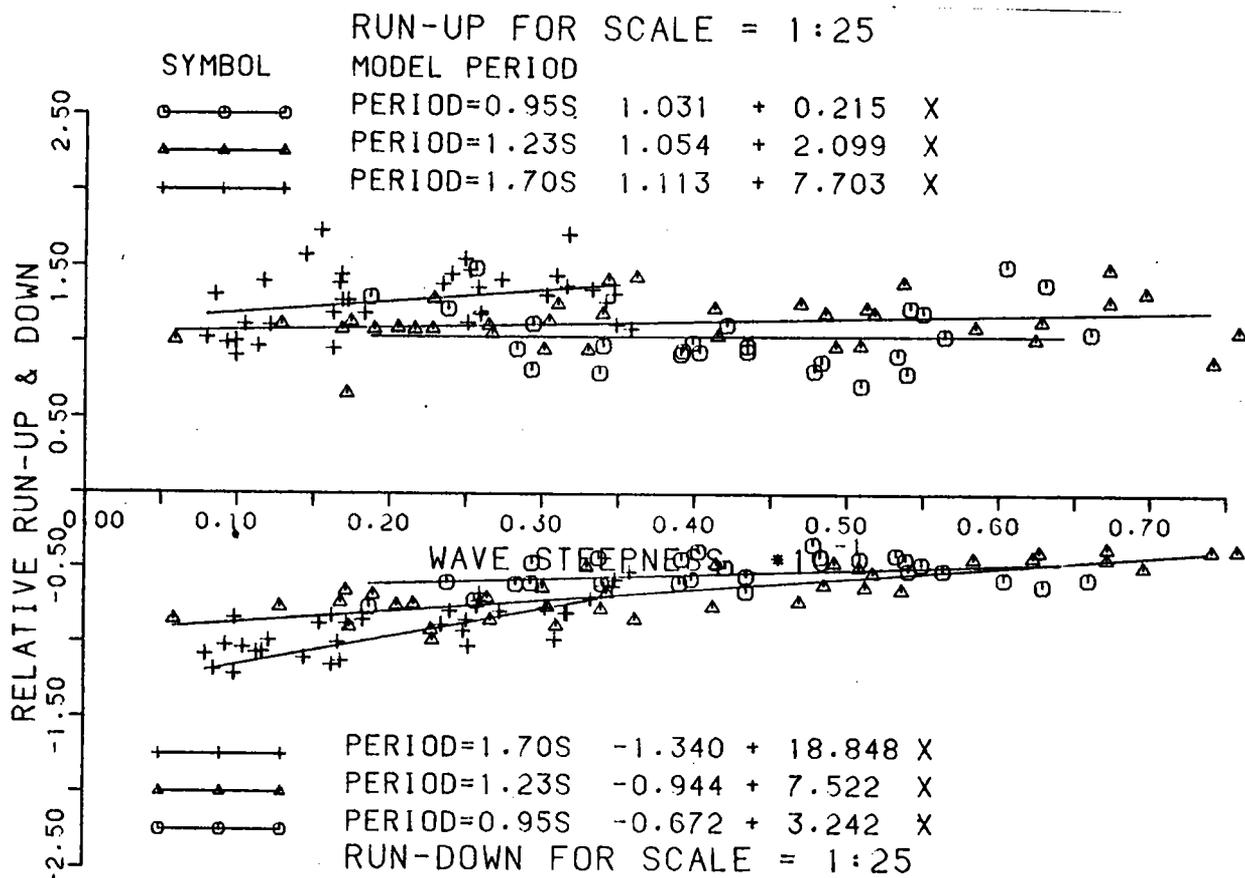


圖3 - 5 - 20 (b) 縮尺 $\frac{1}{25}$, R/H與H/L關係受週期影響

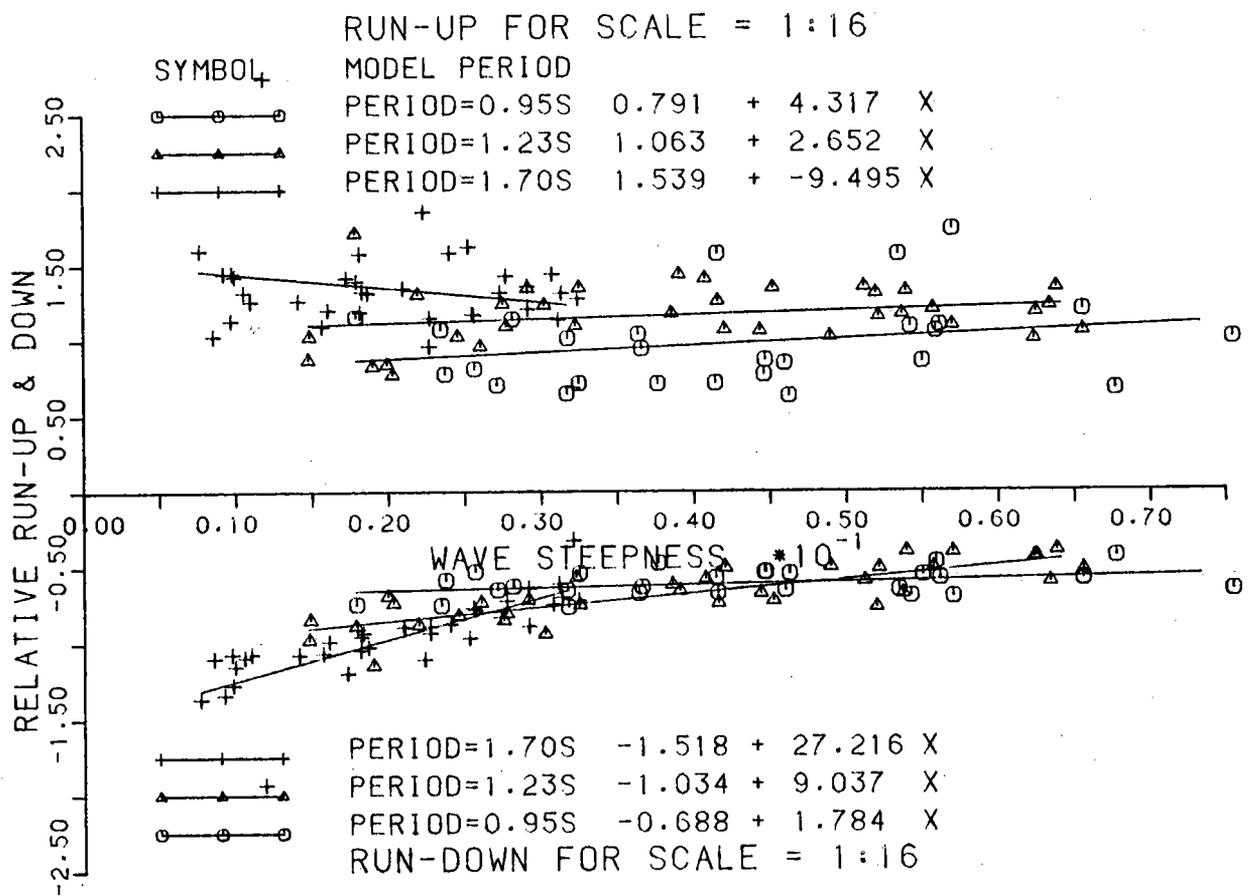


圖 3 - 5 - 20(c) 縮尺 $\frac{1}{16}$, R / H 與 H / L 關係受週期影響

六、結論與建議

- (一)相對溯上、下隨碎波參數 $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L}$ 增加而略為增加。相對溯上增加率在 0.085 以下，而相對溯下則在 0.125 以下。此結果與 Per Brum 試驗所得結果有一致趨勢，Per Brum 認為 Hunt 公式僅適用於碎波參數較小之光滑斜坡溯上。
- (二)二次迴歸曲線顯示，當碎波參數 ξ 約增加至 7 或 9 時，相對溯上、下，不再隨 ξ 增加而增大而保持一定值。而 Per Brum 認為 ξ 約為 4 時，溯上漸成一定值。
- (三)相對溯上、下受縮尺影響隨 ξ 值增加而更形顯著。縮尺對溯上影響較溯下為大。當模型縮尺由 1/25 增加為 1/16 時，縮尺影響已漸平緩。由迴歸曲線顯示，縮尺超過 1/16 後，相對溯上、下受縮尺影響極為有限，蓋因模型縮尺採用 1/16 時，則原型 4 至 4.5 噸塊石在模型上之特徵長度約為 9 cm，而模型試驗波浪週期為 0.95 秒至 2.7 秒；溯上、下附近流場流速應大於 1 m/sec。此時之雷諾數 $R \geq 90,000$ ，屬於紊流。故滯性力在此情況下應可予以忽略。當 $\xi = 6$ 時，採用 1/36 縮尺可能造成約 20% 誤差。
- (四)本研究所採用之三種防波堤坡度試驗結果顯示相對溯上、下隨坡度減緩（或 l/L 增大）而減小。三種坡度相對溯上、下受模型縮尺影響，以 1:1.5 最大，坡度減緩而影響亦隨之減小。此結果與 stoa 所獲得溯上，模型縮尺修正係數相同。
- (五)相對溯上、下與波浪尖度成良好之線性關係。除 H/L 較小時， R/H 分佈較為散亂外，其餘試驗資料甚能符合一次線性方程式。相對溯上、下隨波浪尖度增加而減小。此乃因 H/L 較大之波浪遇防波堤後，碎波時間提前，損耗部份能量。
- (六)相對溯上、下受模型縮尺影響隨波浪尖度 H/L 增加而減緩，且對溯上影響較溯下為大。當 $H/L \geq 0.05$ ，而縮尺大於 1/25 時，縮尺影響已可忽略，但當 $H/L = 0.01$ 時，縮尺 1/36 模型縮尺影響約達 20%。
- (七)根據分析，相對溯上、下與波浪尖度之關係為最理想之迴歸線。若採

用縮尺影響最小之 1/16 模型，其相對溯上、下之方程式分別為

$$\frac{R_u}{H} = 1.449 - 6.771 H/L。$$

$$\frac{R_d}{H} = -1.086 + 10.165 H/L。$$

採用上述公式其上、下限約為

$$\frac{R_u}{H} = (1.449 \pm 0.5) - 6.771 H/L。$$

$$\frac{R_d}{H} = (-1.086 \pm 0.25) + 10.165 H/L。$$

(六)根據本研究結果建議辦理波浪溯上、下試驗，最理想之模型縮尺應為 1/16 左右。如果因試驗設備受限制則應考慮大於 1/25 之縮尺，而避免採用小於 1/36 之模型縮尺。

第四章 傳遞波

一、概 述

波浪能量越過防波堤沖擊堤後水域，造成堤後波浪，稱之為傳遞波 (Transmitted waves)，有時被稱為再生波。影響傳遞波主要之因素有入射波特性，防波堤坡度表面粗糙度，孔隙率，堤頂寬度，胸牆高度，堤趾水深等。因影響參數甚多，且波浪作用於防波堤後能量損耗無法估算，理論公式很難正確求得傳遞波高，而有賴於辦理模型試驗。水工模型試驗經常是用以解決複雜水力問題，但如採用較大之模型縮尺則不經濟，而過小之模型縮尺，則可能受縮尺影響，可靠性堪虞，為了解傳遞波受模型縮尺影響，根據上章波浪溯上試驗結果採用 1 / 36 及 1 / 16 兩種模型縮尺辦理試驗。謹將試驗經過與結果敘述如後。

二、往昔之研究

Jeffreyz (1944) 利用線性微小振幅波理論推導波浪越過寬度潛堤所造成之能量傳遞，獲得波高傳遞係數為

$$\frac{H_t}{H_i} = \frac{1}{\left\{ 1 + \left[\left(\frac{0.25}{d_s - h} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{0.25 d_s - 0.25h}{d_s} \right) \right]^2 \sin^2 \left[\frac{2\pi b}{\sqrt{gT}} \left(\frac{1}{d_s - h} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}$$

, $d_s > h$ (4 - 2 - 1)

上式中 d_s 為堤趾水深， h 為堤頂高度， b 為堤頂寬度。

Fuchs (1951) 根據線性波浪理論，考慮能量傳遞推導越過鋼性薄直立堤所產生之波浪傳遞。但此公式不適用於越波所造成之波浪傳遞。

$$\frac{H_t}{H_i} = \left\{ 1 - \frac{\left(\frac{4\pi h}{L}\right) + \sinh\left(\frac{4\pi h}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{4\pi ds}{L}\right) + \left(\frac{4\pi ds}{L}\right)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4-2-2)$$

Seelig (1976) 分析 Goda, Takeda 及 Mriya (1967) 與 Goda (1969) 辦理不透水直立堤，各種情況下傳遞波試驗結果，獲得一般性公式為

$$\frac{H_t}{H_i} = 0.5 \left\{ 1 - \sin \left[\frac{\pi}{2\alpha} \left(\frac{h-ds}{H_i} + \beta \right) \right] \right\} \quad (4-2-3)$$

上式中 α , β 為試驗係數，決定於結構物之特性， $h-ds$ 為靜水面上堤頂高度。

Sollitt 及 Cross (1971) 假設溯上水面曲線為拋物線，以波谷為其頂點。

$$Y = MX^n - A \quad (4-2-4)$$

上式中， Y 為靜水位上橫軸 X 之水位高， A 為波谷振幅， M 及 n 為常數。

假設最大溯上發生在部份駐波剖面之極值。利用線性波浪理論描述海側第一波谷之運動。考慮質量守恆，分析一個週期入射波、反射波、越波能量與斜坡上能量損耗；計算越波量及越波波能。假設防波堤前後水深相等，波浪傳遞係數為。

$$K_t^2 = 2e_0 \frac{C}{C_g} \frac{L_R}{L} (1+K_r)^2 (1-K_l) \quad (4-2-5)$$

上式中 C 及 C_g 分別為相位速度及羣波速度， L 及 L_R 分別為波長及溯上為 R 時之橫坐標； K_l 為波浪能量損耗係數， K_r 為結構物在越波情況下波浪反射係數，可由 Miche 無越波結構物反射係數 K_m 以線性中插法求得。

$$K_r = K_m \frac{(h+hc)}{(h+r)} \quad (4-2-6)$$

$$e_0 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(r+1)^2}{2n+1} \left[1 - \left(\frac{hc+1}{r+1} \right)^{2+\frac{1}{n}} \right] - \frac{2(r+1)}{n+1} \left[1 - \left(\frac{hc+1}{r+1} \right)^{1+\frac{1}{n}} \right] \right\}$$

$$+(1-h_c^2)\left[1-\left(\frac{h_c+1}{r+1}\right)^{\frac{1}{n}}-\frac{s}{3}(r-h_c)^2(r+2h_c)\right] \quad (4-2-7)$$

上式中 $r = \frac{R}{A}$, $h_c = \frac{H_c}{A}$, $h = \frac{H}{A}$, $s = \frac{AS}{L_R}$, S 為斜面坡度

, H_c 為靜水位上堤頂高, Sollitt 及 Cross 利用試驗資料求得波浪傳遞係數之包絡線為

$$K_t = 0.65 \left(1.10 - \frac{H_c}{R} \right) \quad , \quad \frac{H_c}{R} < 1.0 \quad (4-2-8)$$

Hamer (1981) 利用不透水光滑防波堤斷面試驗獲得

$$K_t = 0.69 \left(0.84 - \frac{H_e}{R} \right) \quad (4-2-9)$$

三、試驗經過

(一) 試驗設備 (與第三章波浪溯上相同)

(二) 試驗佈置

防波堤斷面佈置如圖 4-3-1, 堤前海底坡度為 1:30, 拋石堤表面覆蓋兩層依模型縮尺選定之塊石, 次層鋪放碎石。波高計分別佈置於堤前約 30m 及 2m 處以測取入射波與堤前波, 傳遞波則以第三, 四兩波高計佈置於堤後約一個及兩個波長處。

(三) 試驗條件

1. 模型縮尺: 採用 1/36 及 1/16 二種模型縮尺。
2. 模型水深: 造波機前水深為 92 cm, 87 cm 及 83 cm 三種。
3. 試驗週期: 採用 1.2 sec, 1.7 sec 及 2.2 sec 三種波浪週期。
4. 防波堤坡度: 採用 1:2.5, 1:2.0 及 1:1.5 三種坡度。
5. 試驗波高: 每一種防波堤佈置, 每一種試驗週期波高由小逐次增大, 至少選擇三種波高加以試驗。

(四) 試驗步驟

1. 先擇一種模型縮尺, 篩取合格塊石, 佈置防波堤試驗模型。
2. 每選擇一種模型縮尺, 堤防坡度由 1:2.5 逐次調整至 1:1.5。

3. 每選擇一種坡度，試驗波浪週期由 1.2sec 逐次增加至 2.2sec。
 4. 每選擇一種試驗波浪週期，波高逐次由小增大。
- 重複 2 至 4 步驟，完成一種縮尺後再改變模型縮尺重複上述步驟。

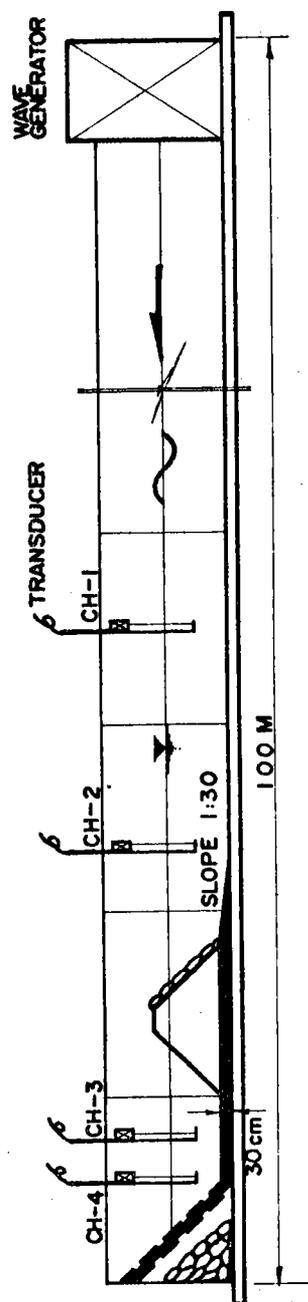


圖 4 - 3 - 1 傳遞波試驗佈置

四、試驗結果

(一) 傳遞波係數與波浪尖度關係

兩種模型縮尺、三種試驗週期、三種防波堤坡度試驗所得資料如附錄 II。兩種模型縮尺傳遞波係數 (Transmitted wave coefficient) $K_t = H_t / H_i$ ，與波浪尖度 H/L_0 關係如圖 4 - 4 - 1。二次最佳符合曲線顯示，當 H/L_0 較小時，樣型縮尺 1/16 試驗所得 K_t 值較 1/36 所得 K_t 值大。 H/L_0 增加至 0.035 附近，即 $T_p \doteq 10 \text{ sec}$ ，兩種模型縮尺所得結果趨於相等。 H/L_0 再增加，則 1/16 縮尺試驗所得 K_t 值反而較 1/36 模型縮尺為小。傳遞波係數除隨波浪尖度變化外，亦為波浪週期之函數。相同之入射波週期，傳遞係數隨 H/L_0 增加而增加，如圖 4 - 4 - 2。入射波週期較大時 ($T_p = 12 \text{ sec}$)，1/16 縮尺試驗所得 K_t 值較縮尺 1/36 為大。當入射波週期減小 ($T_p \doteq 10 \text{ sec}$)，模型縮尺 1/16 與 1/36 試驗結果近乎相等。週期再減小時，($T_p \doteq 8 \text{ sec}$) 則有相反之趨勢。

(二) 傳遞波係數與相對入射波高 (H_i/H_c) 關係

三種試驗週期傳遞波係數 K_t ，與相對入射波高 H_i/H_c ， H_e 為胸牆高度，關係如圖 4 - 4 - 3。最佳符合線比較如圖 4 - 4 - 4。三種入射波週期， K_t 均隨 H_i/H_c 增加而比例增加。模型縮尺影響與前述 K_t 與 H/L_0 相一致。採用 1/16 模型縮尺，三種試驗週期最佳符合線方程式分別為

$$K_t = -0.065 + 0.060 H_i / H_c, \quad T_p \doteq 8 \text{ sec}$$

$$K_t = 0.052 + 0.040 H_i / H_c, \quad T_p \doteq 10 \text{ sec} \quad (4 - 4 - 1)$$

$$K_t = 0.142 + 0.059 H_i / H_c, \quad T_p \doteq 12 \text{ sec}$$

將 (4 - 4 - 1) 繪製成傳遞係數 K_t ，入射波週期 T_p 與 H_i/H_c 關係曲線如圖 4 - 4 - 5。由此圖可求得任何入射波週期與 H_i/H_c 之傳遞波係數。

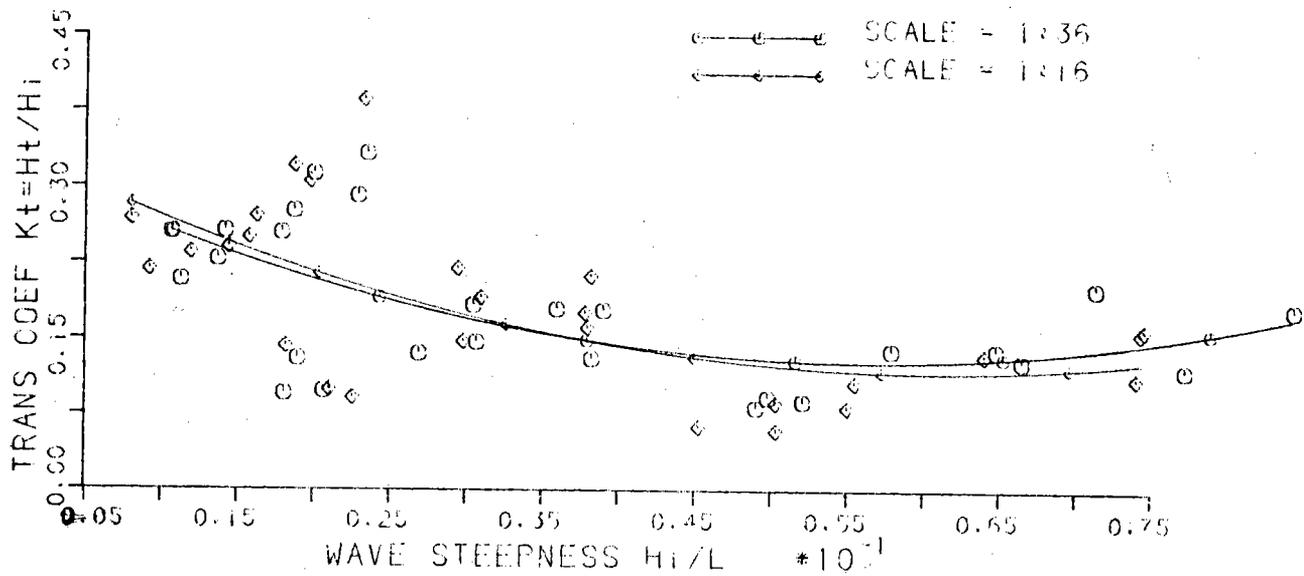


圖 4 - 4 - 1 K_t 與 H_i/L_0 關係

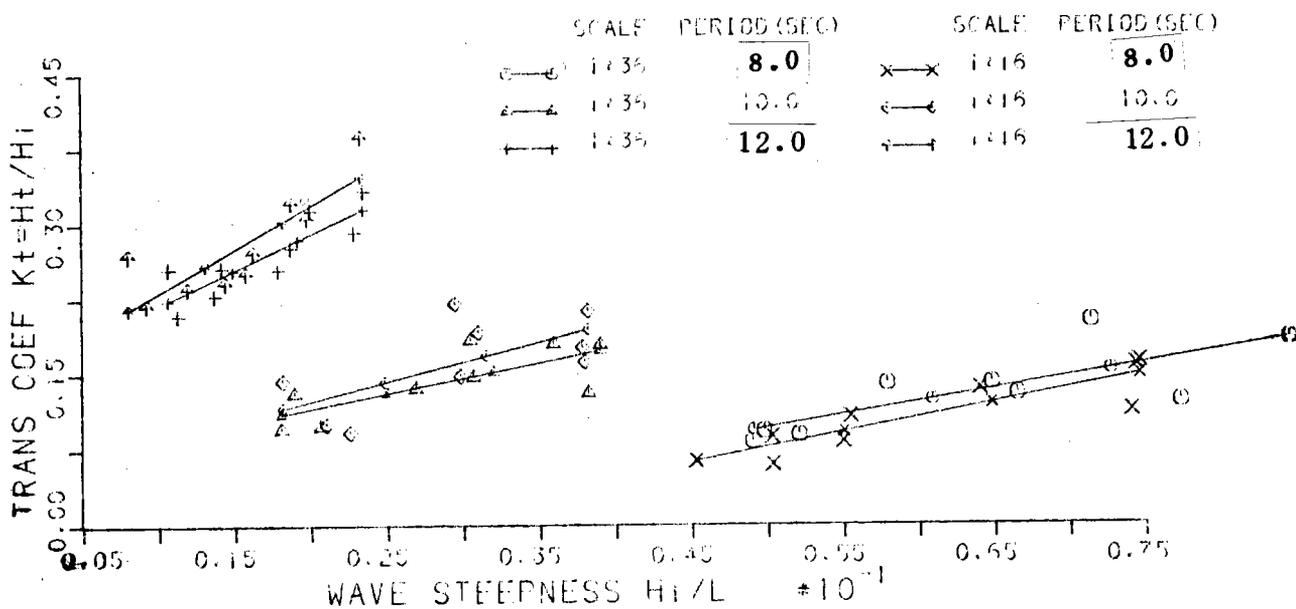


圖 4 - 4 - 2 K_t 與 H_i/L_0 及 T_i 之關係

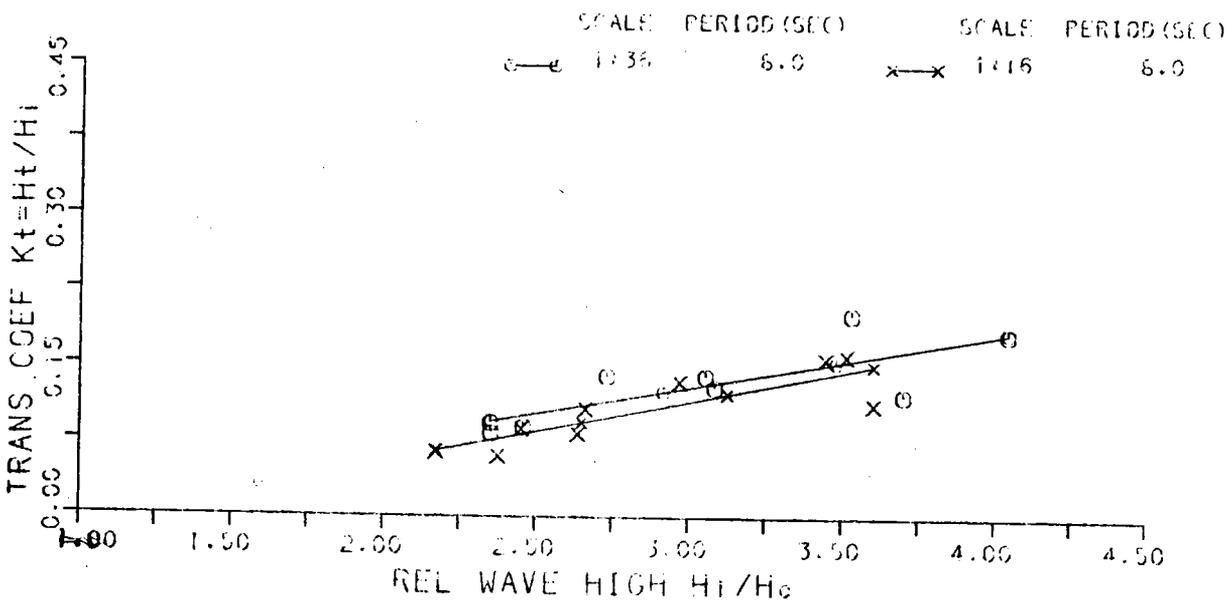
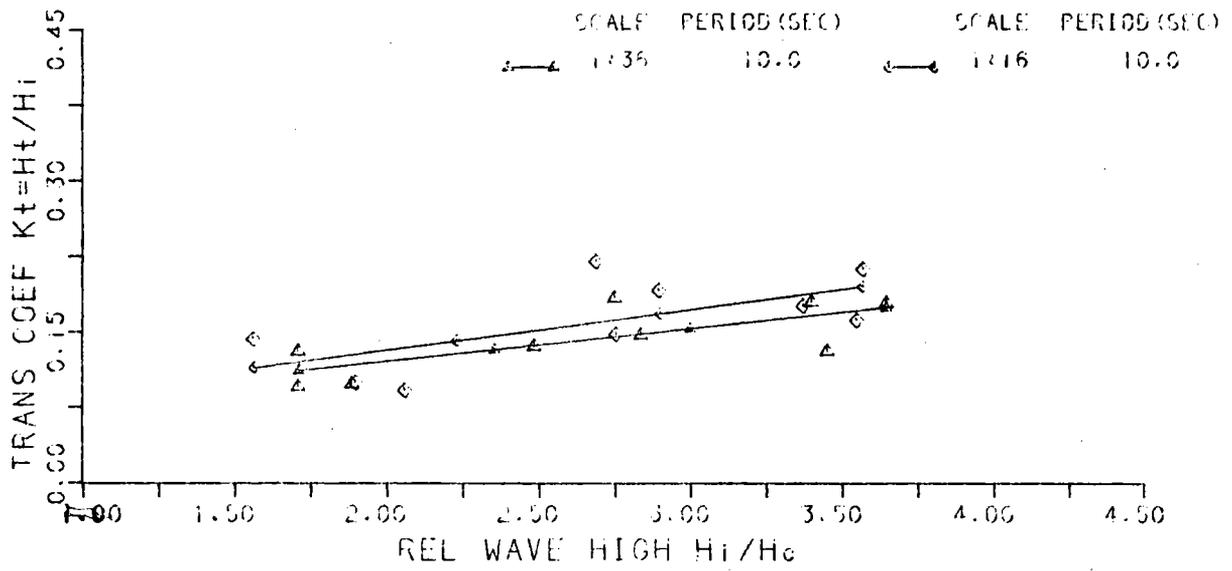
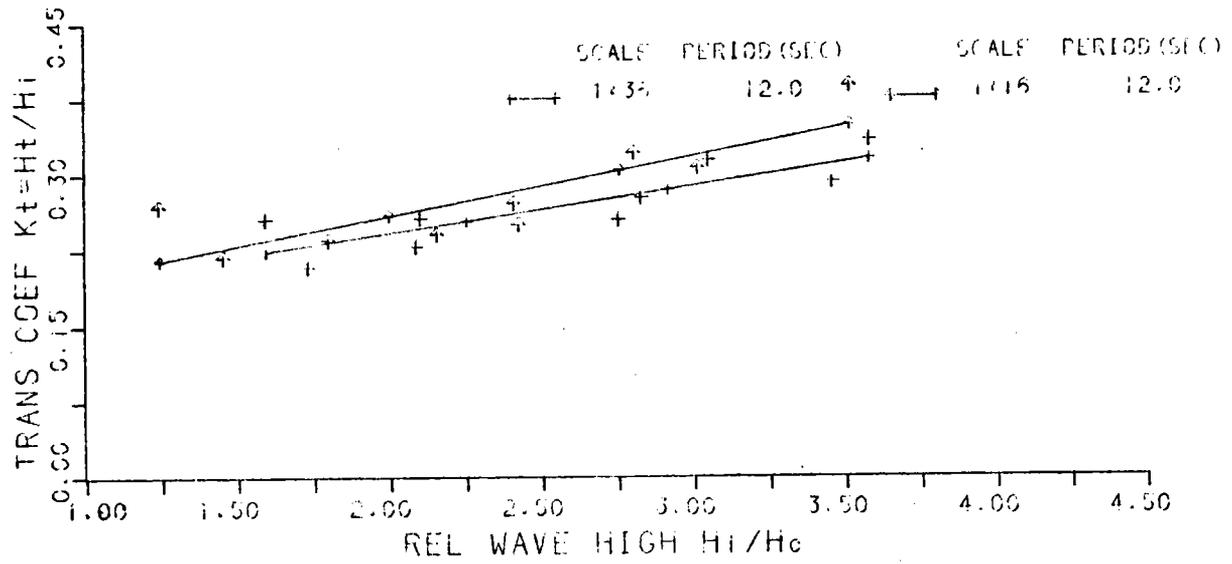


圖 4 - 4 - 3 K_t 與 H_i/H_c 之關係

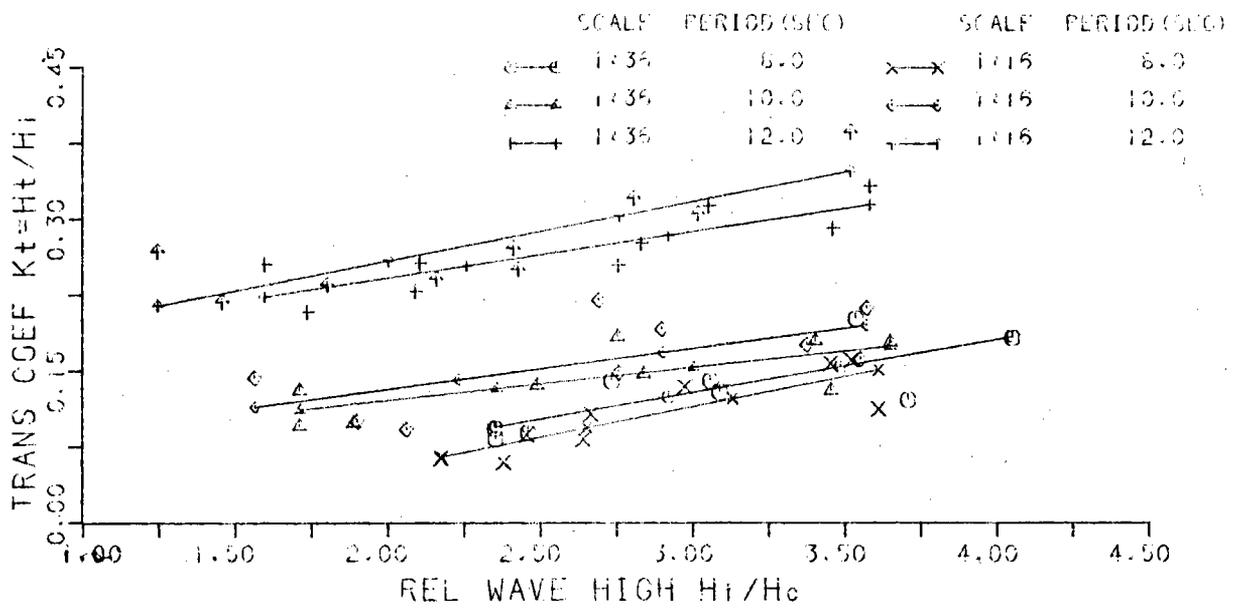


圖 4 - 4 - 4 K_t 與 H_i/H_c 及 T_i 關係

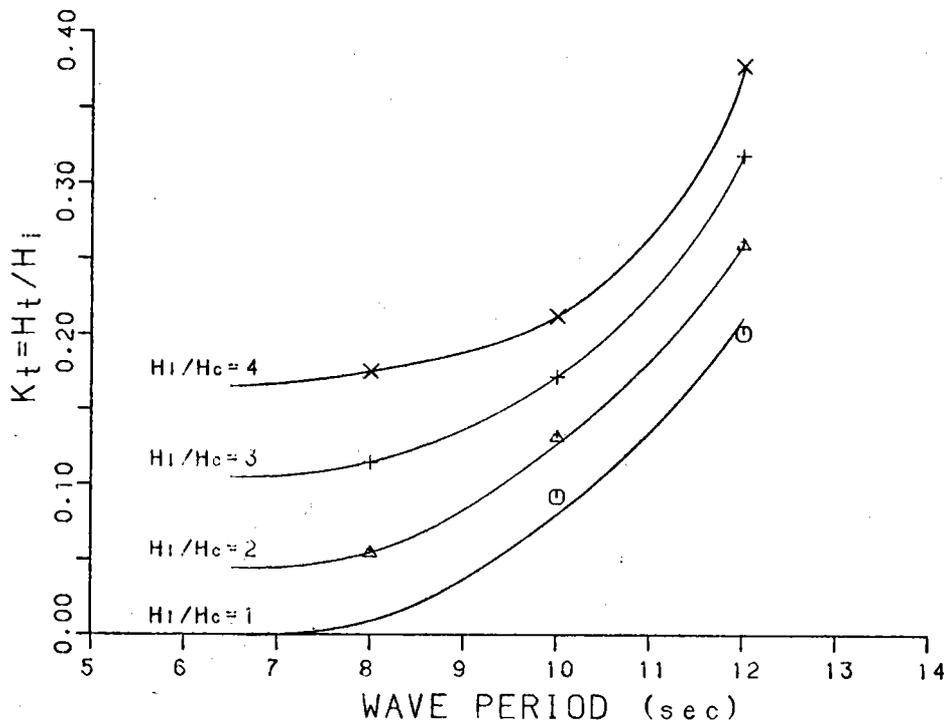


圖 4 - 4 - 5 K_t 與 T_i 及 H_i/H_c 關係

五、結論

傳遞波高係數 $K_t = H_t / H_i$ ，隨入射波高與胸牆高度比 (H_i / H_c) 及入射波週期增加而比例增加，且成線性關係。採用 1 / 16 模型縮尺，傳遞係數 K_t 與 H_i / H_c 關係最佳符合線方程式分別為：

$$K_t = -0.065 + 0.060 H_i / H_c, \quad T_p \doteq 8 \text{ sec}$$

$$K_t = 0.052 + 0.040 H_i / H_c, \quad T_p \doteq 10 \text{ sec}$$

$$K_t = 0.142 + 0.059 H_i / H_c, \quad T_p \doteq 12 \text{ sec}$$

利用上述公式，繪製 T_p 與 H_i / H_c 關係曲線，可求得任何入射波週期與 H_i / H_c 之傳遞波係數。

試驗資料傳遞係數 K_t 與 H / L 。最佳符合線顯示，傳遞波受模型縮尺影響隨 H / L 。改變。 H / L 。較小時，1 / 16 模型縮尺所得傳遞波係數較 1 / 36 為大，而當 H / L 。增加至 0.04 以上，1 / 36 縮尺試驗所得傳遞係數反比 1 / 16 縮尺大。

第五章 不等縮尺水工模型試驗

一、概述

水工模型試驗往往因受經費及試驗場地限制無法建造大縮尺而能涵蓋廣闊海域範圍。在平面遮蔽及漂沙試驗所採用之模型線性縮尺大都在 1 : 100 ; 有些試驗因所涵蓋範圍較大必需採用較小之模型縮尺，水深相對減小，增加底床摩擦力影響。另一方面在波高量測上也造成困難。為減小底床摩擦力影響，水工模型試驗經常採用不等縮尺模型。但水深為影響波浪流體運動最重要之因素，縮尺不等很難完全重現原型動力狀況，其影響如何？至今尚未有任何研究文獻。

本研究主要辦理四種不等縮尺遮蔽試驗模型試驗，考慮變形、折射及繞射因素，計算時間縮尺，分析港池波浪分佈狀況，以探討縮尺影響。

二、理論分析

根據福祿德模型律 (Froude model law) 製作模型水平線性縮尺為 $S_h = (L_h)_m / (L_h)_p$ ，垂直縮尺為 $S_v = (L_v)_m / (L_v)_p$ ，則不等縮尺係數 (Distorted factor) D_f 為

$$D_f = \frac{(L_v)_m / (L_v)_p}{(L_h)_m / (L_h)_p} = \frac{(L_v)_r}{(L_h)_r} \quad (5-2-1)$$

設波浪為淺水波，相對水深， d/L 甚小時，依微小振幅波理論，波速 $V = \sqrt{gd}$ ， d 為水深，波速之縮尺為

$$V_r = \left(\frac{d_m}{d_p} \right)^{\frac{1}{2}} = (L_v)_r^{\frac{1}{2}} = (L_h)_r^{\frac{1}{2}} D_f^{\frac{1}{2}} \quad (5-2-2)$$

足標 r 表示縮尺，即 $\frac{(\quad)_m}{(\quad)_p}$ 。

時間縮尺為

$$T_r = V_r = (L_h)_r^{\frac{1}{2}} D_f^{\frac{1}{2}} \quad (5-2-3)$$

當相對水深較大時，波速為水深及重力加速度之函數

$$C = \left[\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{\lambda} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5-2-4)$$

模型上波長縮尺 λ_r 與水平縮尺 $(L_h)_r$ 相等，波速縮尺為

$$C_r = \frac{C_m}{C_p} = (L_h)_r^{\frac{1}{2}} \frac{\left[\tanh \frac{2\pi d_m}{\lambda_m} \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5-2-5)$$

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

$$\frac{d_m}{\lambda_m} = D_f \frac{d_p}{\lambda_p}, \text{ 上式可改寫為}$$

$$C_r = (L_h)_r^{\frac{1}{2}} \frac{\left[\tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p} D_f \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5-2-6)$$

$$\text{時間縮尺 } T_r = (L_h)_r / C_r$$

$$T_r = (L_h)_r^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\tanh(2\pi d_m / D_f \lambda_m)}{\tanh(2\pi d_m / \lambda_m)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5-2-7)$$

(5-2-6) 式中間水深 (d/λ 介於 0.05 至 0.5 之間) 波浪其波速及時間縮尺為相對水深與模型不等縮尺比之函數。因之波浪折射及繞射現象與原型或等縮尺模型相較，產生變形現象。在此情況下，辦理模型試驗所得結果，僅可供參考。

在若干情形下，模型製作範圍受試驗水池限制必須採用不等縮尺模型時，則可根據試驗性質適當地選擇模型縮尺。

當模型以重現原型折射現象時，則時間縮尺應選用垂直，即水深縮尺之平方根，因波浪折射現象為波浪傳播經過不同水深，其傳播速度不同所引起。根據微小振幅波理論

$$C = \left[\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{\lambda} \right]^{\frac{1}{2}}$$

原型與模型波速相似，則折射現象相似

$$\frac{C_m}{C_p} = \frac{\left[\frac{g\lambda_m}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d_m}{\lambda_m} \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\frac{g\lambda_p}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5-2-8)$$

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{\lambda} \quad \text{因之 (5-2-7) 式可改寫成}$$

$$\frac{C_m}{C_p} \cdot \frac{T_p}{T_m} = \frac{\tanh \frac{2\pi d_m}{\lambda_m}}{\tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p}} \quad (5-2-9)$$

當水深 d 與波長 λ 之比很小時

$$\frac{\tanh \frac{2\pi d_m}{\lambda_m}}{\tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p}} = \frac{2\pi d_m}{\lambda_m} \Big/ \frac{2\pi d_p}{\lambda_p} = \frac{d_p \lambda_m}{d_m \lambda_p}$$

(5-2-9) 式可改寫為

$$\frac{C_m}{C_p} \cdot \frac{T_p}{T_m} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_m} = \frac{d_p}{d_m} \quad (5-2-10)$$

在等縮尺模型中

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_m} = \frac{\lambda_{op}}{\lambda_{om}} = \frac{T_p^2}{T_m^2} \quad (5-2-11)$$

利用此關係式代入 (5-2-10) 整理後得

$$\frac{T_p}{T_m} = \left(\frac{d_p}{d_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5-2-12)$$

(5-2-12) 式係利用等縮尺波長與週期關係，考慮以波浪折射

為主時，時間縮尺與水深關係。

如果模型以重現繞射現象為主時，因波浪之繞射為波浪在平行波峰方向之能量擴散，為使繞射現象獲得相似，其波長必須相似。

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_m} = \frac{g T_p^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d_p}{\lambda_p} \Big/ \frac{g T_m^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d_m}{\lambda_m} \quad (5-2-13)$$

將 $\frac{\lambda}{\lambda_0} = \tanh \frac{2\pi d}{\lambda}$ 代入 (5-2-13) 式，可得。

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_m} = \frac{T_p^2 \lambda_p}{\lambda_{0p}} \Big/ \frac{T_m^2 \lambda_m}{\lambda_{0m}}$$

$$\text{故 } \frac{T_p}{T_m} = \left(\frac{\lambda_{0p}}{\lambda_{0m}} \right)^{\frac{1}{2}} \doteq \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5-2-14)$$

根據上述分析不等縮尺模型試驗，除利用不等縮尺製作物理模型外，試驗波浪週期，則需考慮試驗性質選擇時間縮尺模型律。

考慮不等縮尺

$$T_r = (L_h)_r^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\tanh(2\pi d_m / D_f \lambda_m)}{\tanh(2\pi d_m / \lambda_m)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5-2-7)$$

考慮折射為主

$$T_r = (d_m / d_p)^{\frac{1}{2}} \quad (5-2-12)$$

考慮繞射為主

$$T_r \doteq (\lambda_m / \lambda_p)^{\frac{1}{2}} \quad (5-2-14)$$

三、試驗設備

本試驗利用第一試驗場棚長 60 公尺，寬 43 公尺，深 1 公尺之試驗水池辦理，水池內主要設為四台自走式規則波造波機，每台長 10 公尺，可並聯作同步造波，亦可分離使用，試驗波高與週期均可在控制箱上遙控調整。造波機可移動至水池任意地點，製造試驗所需波浪。潮汐自動控制儀，可以抽取蓄水池中之試驗用水調節試驗水位。試驗所採用量測儀器主要為容量型波高計。

四、試驗模型

試驗模型水平縮尺 L_r 採用 1 : 100，製作正方形港池，每邊長 10 公尺，港口寬度 4 公尺，港池模型四周用磚牆砌成。海側防波堤外側及港口堤頭拋放雙 T 塊，以消滅堤防所造成之反射，垂直方向縮尺分別採用 1 : 100，1 : 50，1 : 33 及 1 : 20 四種，其不等縮尺比 D_f 則為 1，2，3 及 5。模型上港池內為等水深，其水深依序為 6cm, 12 cm, 18 cm 及 30cm。原型港池前海底坡度為 1:100，則根據不等縮尺比，模型上堤前海底坡度分為 1 : 100，1: 50，1 : 33.3 及 1 : 20。模型佈置如圖 5 - 4 - 1 及 5 - 4 - 2。

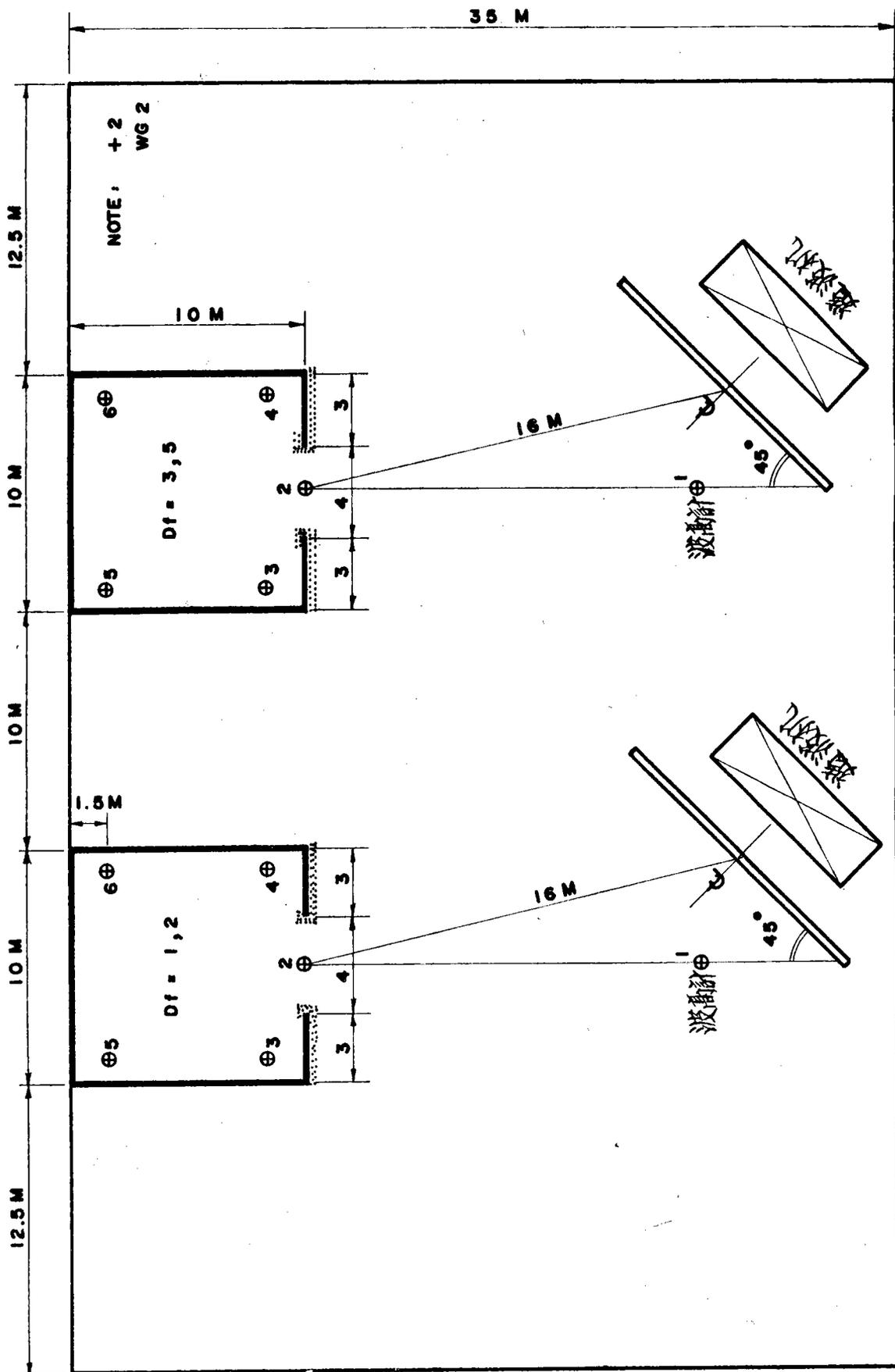
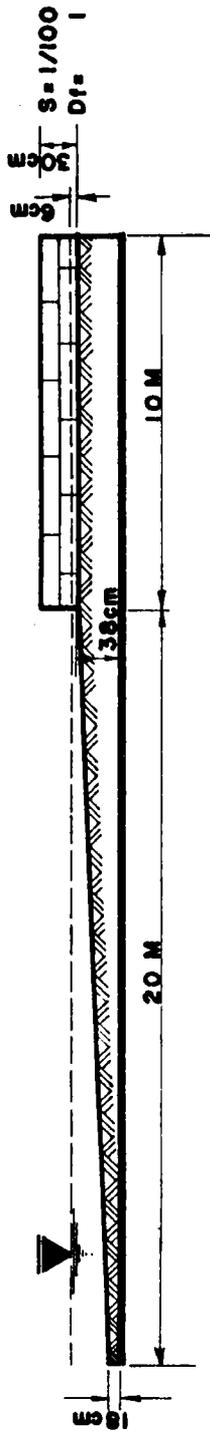
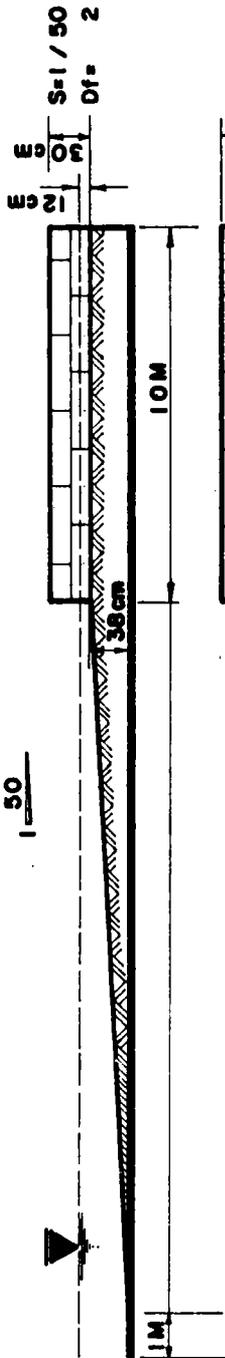


圖 5 - 4 - 1 造波機、波高計、港池佈置平面圖

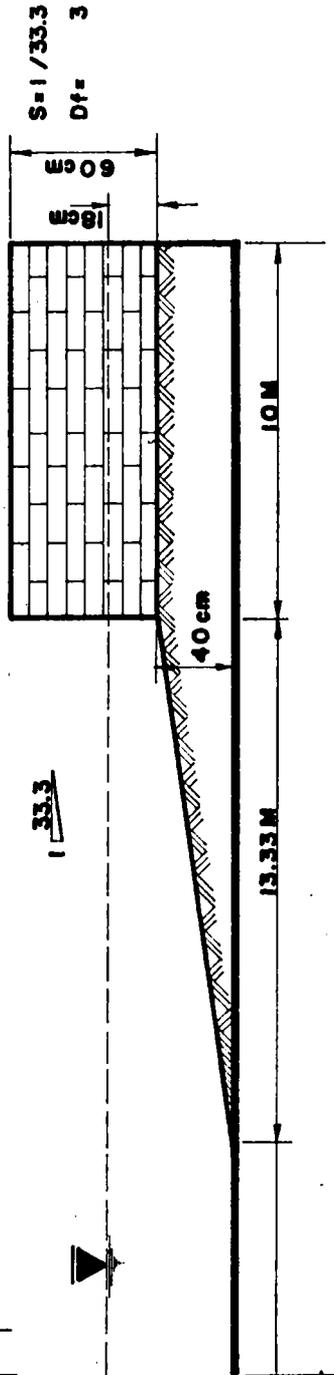
1/100



1/50



1/33.3



1/20

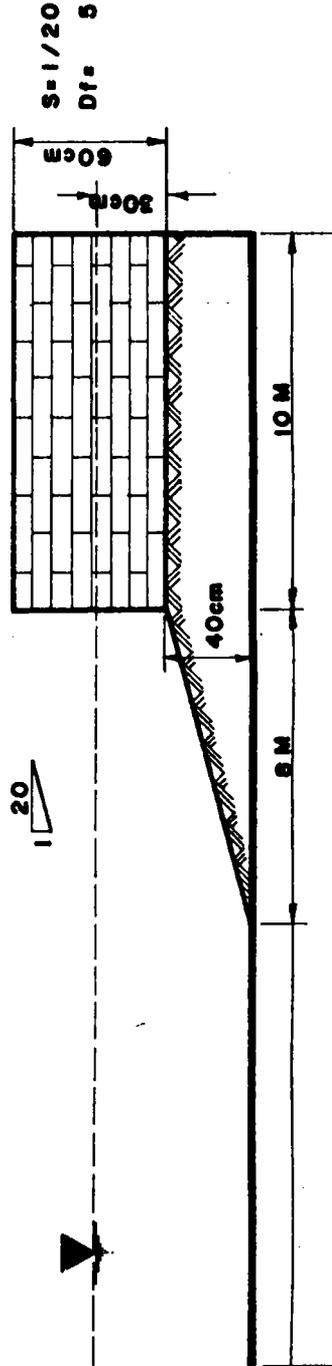


圖 5 - 4 - 2 模型側視圖

五、試驗條件

試驗採用三種不同之原型波浪週期，分別為 8sec，10sec 及 12sec。根據不等縮尺模型律分別考慮變型 (Distorted)，折射 (Refraction) 及繞射 (Diffraction) 為主，求得模型上試驗波浪週期分別如表 5 - 5 - 1 至 5 - 5 - 4。

表 5 - 5 - 1 等縮尺 ($D_f=1$) 試驗波浪週期

原型週期 T_p (sec)	模型週期 T_m (sec)			備註
	變形 ML=1	折射 ML=2	繞射 ML=3	
8	0.8	0.8	0.8	$d_m=40\text{cm}$
10	1.0	1.0	1.0	$d_p=44\text{m}$
12	1.2	1.2	1.2	

表 5 - 5 - 2 不等縮尺比 $D_f=2$ ，試驗波浪週期

原型週期 T_p (sec)	模型週期 T_m (sec)			備註
	變形 ML=1	折射 ML=2	繞射 ML=3	
8	0.77	1.13	0.80	$d_m=50\text{cm}$
10	0.92	1.41	1.00	$d_p=25\text{m}$
12	1.06	1.70	1.20	

表 5 - 5 - 3 不等縮尺比 $D_f=3$ 試驗波浪週期

原型週期 T_p (sec)	模型週期 T_m (sec)			備註
	變形 ML=1	折射 ML=2	繞射 ML=3	
8	0.75	1.39	0.80	$d_m=58\text{cm}$
10	0.88	1.73	1.00	$d_p=19.3\text{m}$
12	0.99	2.03	1.20	

表 5 - 5 - 4 不等縮尺比 $D_r=5$ 試驗波浪週期

原型週期 T_p (sec)	模型週期 T_m (sec)			備註
	變形ML=1	折射ML=2	繞射ML=3	
8	0.72	1.79	0.80	$d_m=70$ cm
10	0.82	2.24	1.00	$d_p=14$ m
12	0.92	2.68	1.20	

試驗波高在試驗週期選定後，調整造波機控制箱之振幅 (Amplitude)，先製造較小之波浪，再逐次調大，至入射波在港口前碎波時為止。

六、試驗經過與結果

試驗波浪週期根據上節所述考慮各種不同模型律選定後，調整造波機動力齒輪轉數 (R.P.M.)，及振幅 (Amplitude) 製造試驗所需入射波浪。

波高計佈置如圖 5 - 4 - 1，WG1 所測得波浪代表入射波高 H_i 。測取深海入射波受地形淺化、折射、繞射及港池岸壁反射後在港口及港池內四個測點之波高 H_p ， p 代表測點位置。測點波高係數定義為 $K=H_p/H_i$ 。每一試驗週期，逐次增加波高；當港口前產生碎波時，再改變週期。

試驗採用規則之正方形港池，且四邊均為垂直岸壁，波浪受重複反射影響，客易造成共振現象。各測點波高延時變化甚大，因此波高分析必需根據測點與造波板之距離。計算波浪成熟所需時間，參考波浪紀錄分析測點波高，經整理後如附錄 III

就波浪成熟時間所測得波浪資料分析結果顯示，測點波高係數 $K=H_p/H_i$ 與波浪尖度 (Wave steepness) H/L 之關係如圖 5 - 6 - 1。除港口測點 (WG2) 外，等縮尺模型因垂直縮尺太小，港池內水深極淺，因此波高係數偏低，且隨 H/L 增大而有減小之趨勢。試驗入射波高稍大，即產生碎波。港口測點在 H/L 較小時發生極大波高係數，可能是由於淺化所造成。

港池前段水域測點 WG3 及 WG4 處，各種不同不等縮尺比 D_r ，對波高係

數 K 與 H/L 間之關係影響較小。 K 值分佈較為一致性，相同之不等縮尺比，測點 K 值受入射波週期影響亦較不顯著。週期縮尺考慮變形模型律 ($ML=1$) 及繞射模型律 ($ML=3$) 時，此兩測點波高係數大部份小於 0.3。

港池後段測點WG 6，直接受入射波浪侵襲及垂直岸壁重複反射影響，波高係數較其他測點大，最大波高係數達 1.0 以上。各種不等縮尺比 D_f ，波高係數成散亂分佈，且有不規則跳動現象，相同之 D_f ，因試驗所採用週期不等，波高係數成離散現象，如圖 5 - 6 - 1 (WG 6)。測點WG 5，波高係數雖較WG 6小，但與前段測點 (WG 3, 4) 比較仍稍偏大，研判是受垂直岸壁重複反射影響造成全部或部份共振現象，而且位於港池後段波浪能量不容易經由港口消散的緣故。

模型時間縮尺分別考慮變形 (Distorted)， $ML=1$ ，折射 (Refraction) $ML=2$ ，及繞射 (Diffraction)， $ML=3$ 三種模型率加以試驗，試驗結果顯示，考慮折射為主之時間縮尺模型律 ($ML=2$) 波浪週期縮尺 $T_r=T_m/T_p$ ，等於水深縮尺 $d_r=d_m/d_p$ 之平方根。因 d_m/d_p 隨不等縮尺比 D_f 增加而比例增加。故模型上所採用之試驗波浪週期較其他兩種時間縮尺模型律 ($ML=1$ 及 3) 為長。因試驗港池為等水深，波浪到達港口後，只有繞射及反射現象不受折射現象影響。比較圖 5 - 6 - 1， $ML=2$ 與 $ML=1, 3$ ，可知各種不等縮尺比 D_f ， $ML=2$ 情況下波高係數較大，且成不規則散亂分佈，而 $ML=1$ 及 3 波高係數較為一致性。

此種現象至少顯示，在本試驗港池模型佈置，時間縮尺考慮以折射為主時，可能造成港池內波浪極不穩定。

繞射現象主要受港池平面佈置及入射波週期 (或波長) 影響。模擬以繞射為主 ($ML=3$)，模型波浪週期縮尺為水平縮尺平方根。而考慮以變形 (Distorted) 為主 ($ML=1$)，模型上週期縮尺與水平縮尺平方根成正比。不等縮尺比 D_f 對模型上採用之試驗週期影響較小。試驗結果顯示考慮繞射與變形兩種時間縮尺模型律 ($ML=1$ 及 3)，波高係數分佈趨勢較一致，如圖 5 - 6 - 1 ($ML=1, 3$)。

由圖 5 - 6 - 1 顯示，不等縮尺模型，各測點波高係數試驗結果，雖無法完全相同，但除WG 6及時間縮尺以考慮折射為主 ($ML=2$) 外，大都在同階。測點WG 6對週期變化極為敏感，試驗所得波高係數差距高達數倍

。時間模型律以折射為主時（ $ML=2$ ），波高係數感應 D_f 及週期變化最為顯著。

試驗所採用港池形狀為正方形，因此極易造成部份共振現象。各測點波浪延時變化如圖 5 - 6 - 2。除根據成熟時間量取波高，分析波高分佈特性外，再就每次試驗所造成最大波高予以分析，如圖 5 - 6 - 3。波高係數大部份較成熟波大一倍以上，尤其是 $D_f=3$ 及 5 有普遍偏大之趨勢。若以時間縮尺模型律而言，仍以考慮折射現象為主（ $ML=2$ ）時，波高係數較大，並且成不規則散亂分佈。

由圖 5 - 6 - 1 及 5 - 6 - 3，可以歸納一個共同現象，當波高係數 K 值偏低時，不論採用何種不等縮尺比 D_f ，及時間縮尺模型律 ML ， K 值受 H/L 變化影響甚小；而當 K 值較大時，則 K 值受 H/L 影響起伏幅度極大，此種現象表示在某些週期（或波長）在港池造成共振或部份共振現象。

理論上，相同之入射波高，長週期波應較短週期波不容易發生碎波，但試驗結果顯示，長週期波在 D_f 較小之情況下，因水深受限制，極容易發生碎波， H/L 之值偏小如圖 5 - 6 - 4。港口測點WG2，可能受地形淺化，港口波浪平面幅射（Planewave radiation at harbor entrance）效應，波高係數較其他短週期波偏大或同階。

各種不同之不等縮尺比 D_f ，波高係數與試驗週期關係如圖 5 - 6 - 5。測點WG2, 3及4，波高係數隨試驗週期增長而有增大之趨勢。各測點，尤其是WG5及6，波高係數與週期關係充分顯示下列不等縮尺比，及其所考慮之時間縮尺模型律試驗週期波高係數有顯著之尖峰值，此種情形至少表示，在此種條件下港池可能發生共振或部份共振現象。不同之 D_f 有不同之共振週期。

不等縮尺比 D_f	時間縮尺模型律 ML	模型波浪週期 T_m (sec)	原型波浪週期 T_p (sec)
2	1	1.0	10
3	1	0.88	10
	2	2.03	12
5	2	0.8	8
	3	1.8	8

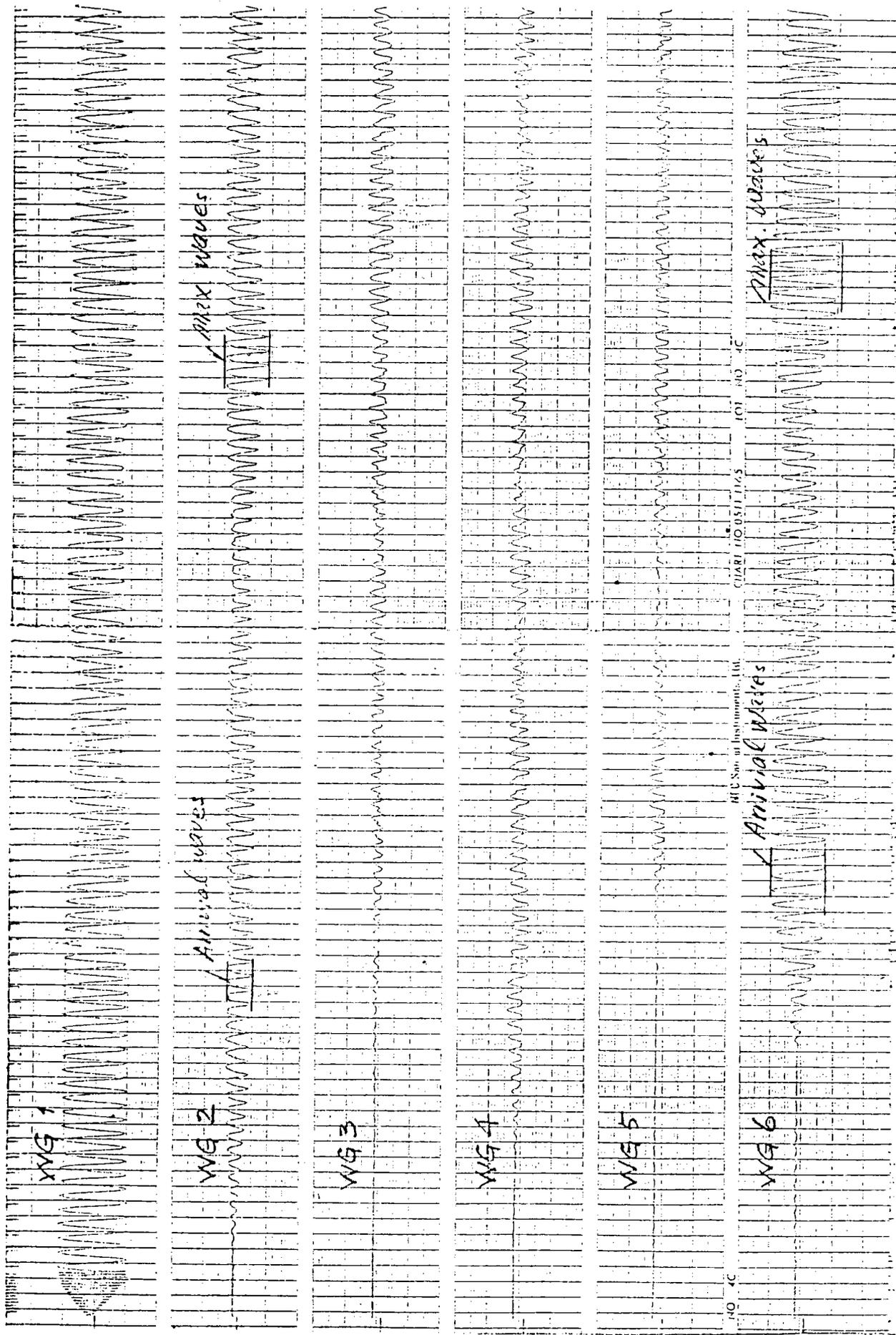


圖 5 - 6 - 2 波浪延時紀錄

七、結論

- (一)本研究佈置造波板與港口間距離不長，無法顯現波浪折射現象。不等縮尺時間縮尺模型律考慮模型變形 (Distorted)，折射，繞射等因素而差異甚大。而遮蔽試驗幾乎涵蓋所有現象，孰重孰輕甚難決擇。就本試驗所採用模型而言，考慮折射為主之時間縮尺模型律 ($ML=2$)，試驗週期隨不等縮尺比 D_f 增大而增長，港池波高係數偏大，且分佈極為散亂。考慮變形及繞射為主之時間縮尺模型律 ($ML=1, 3$) 波浪週期縮尺均為水平縮尺之函數，試驗結果波高係數較一致。
- (二)港池前段波高係數較低，分佈較一致；後段波高係數偏高，且成不規則散亂分佈。研判係因港池內缺乏消波設施，港池後段部份共振所產生之能量很難經由港口擴散。
- (三)不等縮尺模型，港池水深隨所選用之不等縮尺比 D_f 而增減，由試驗所得波高係數與週期關係充分顯示，一定形狀之港池，其可能發生共振週期隨不等縮尺比 (或水深) 而變化，模型試驗結果，不足以代表原型現象。
- (四)取最大波高分析，波高係數較成熟波高出一倍以上，但具有相同之趨勢。

第六章 綜合結論與建議

一、結論

- (一)相對溯上、溯下 (Relative run-up and run-down) R/H ，隨碎波參數 (Surf parameter) $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ ，增加而略為增大。 R/H 受模型縮尺影響亦隨 ξ 增加而更顯著。
- (二)模型縮尺對溯上影響較溯下顯著。當縮尺由 $1/25$ 增大為 $1/16$ 時，縮尺影響已趨平緩。由迴歸曲線顯示，縮尺大於 $1/16$ 後，相對溯上、溯下受縮尺影響極為有限。蓋因在此情況下，溯上、下附近流場雷諾數 R ，超過 $90,000$ 屬於紊流範圍。
- (三)波浪溯上與溯下，受模型縮尺影響，隨防波堤坡度減緩而減小，三種試驗坡度以 $1:1.5$ 最大， $1:2.0$ 次之， $1:2.5$ 最小，此種趨勢與Stoa試驗結果相同。
- (四)相對溯上、溯下隨波浪尖度 H/L_0 增加而減小，且成良好之線性關係。
- (五)相對溯上、溯下受模型縮尺影響隨波浪尖度增大而減小， $H/L_0 \geq 0.05$ 時，大於 $1/25$ 之模型縮尺影響已可忽略。縮尺採用 $1/36$ ， $H/L_0 < 0.01$ 時，試驗結果受縮尺影響約達 20% 。
- (六)根據試驗結果，採用 $1/16$ 模型，其受縮尺影響已可忽略，相對溯上與溯下與波浪尖度關係最佳符合線 (Best fitting line) 方程式為

$$\frac{R_u}{H} = 1.449 - 6.771 H/L_0$$

$$\frac{R_d}{H} = -1.086 + 10.165 H/L_0$$

考慮試驗資料分佈，其包絡線分別為

$$\frac{R_u}{H} = (1.449 \pm 0.5) - 6.771 H/L_0$$

$$\frac{R_d}{H} = (-1.086 \pm 0.25) + 10.165 H/L_0$$

(七) 傳遞波高係數 $K_t = H_t/H_i$ 隨入射波高與胸牆高度比 (H_i/H_c) 及入射波週期增加而比例增加，且成線性關係。採用 1/16 模型縮尺，傳遞係數 K_t 與 H_i/H_c 關係最佳符合線方程式分別為：

$$K_t = -0.065 + 0.060 H_i/H_c, \quad T_p \doteq 8 \text{ sec}$$

$$K_t = 0.052 + 0.040 H_i/H_c, \quad T_p \doteq 10 \text{ sec}$$

$$K_t = 0.142 + 0.059 H_i/H_c, \quad T_p \doteq 12 \text{ sec}$$

利用上述公式，繪製 K_t ， T_p 與 H_i/H_c 關係曲線，可求得任何入射波週期，與 H_i/H_c 之傳遞波係數。

(八) 試驗資料傳遞係數 K_t 與 H/L 。最佳符合線顯示，傳遞波受模型縮尺影響隨 H/L 改變。 H/L 較小時 1/16 模型縮尺，所得傳遞波係數較 1/36 為大；而當 H/L 增加至 0.04 以上，1/36 縮尺試驗所得傳遞係數反比 1/16 縮尺大。

(九) 港池波浪分佈受入射波折射、淺化、繞射及反射等影響，孰重孰輕甚難決定。就本規則試驗港池而言，因造波機與港口距離不長，且港池為等水深受折射影響不顯著。

(十) 考慮以折射為主之時間縮尺模型律，模型週期隨不等縮尺比 D_f 比例增加，因此較變形或繞射時間縮尺模型律為長。試驗結果港池波高係數偏大，且極散亂。變形及繞射為主時間縮尺模型律，均為水平縮尺之函數，因此試驗結果波高係數分佈較為一致。

(十一) 試驗所採用之模型為方型等水深港池，因內部缺乏消波設施，港池後段波浪能量不易經由港口擴散，波高係數偏大，且成不規則散亂分佈。港池前段波高係數較低，且成一致性。

(十二) 不等縮尺模型，港池水深隨所隨用之不等縮尺比 D_f 比例增加，由試驗波高係數與試驗週期關係充分顯示，共振週期隨所採用之不等縮尺比（或水深）變化。因此不等縮尺模型共振現象，不足以代表原型現象。

二、建議

- (一)根據本研究結果，建議辦理防波堤溯上、溯下及傳遞波試驗最理想之模型縮尺應為 $1/16$ 。如果因試驗設備限制，則亦應考慮 $1/25$ 縮尺；而避免採用小於 $1/36$ 模型縮尺。
- (二)不等縮尺模型，不能重現原型折射、繞射、反射現象，試驗所得結果因不等縮尺比而有差異。除非對波浪動力現象極為了解，確實掌握折射、繞射及反射等現象在原型的重要性，否則，應避免採用不等縮尺辦理試驗。

參考書籍

1. J. William Kamphuis and Nazir Mohamed, Runup of Irregular Waves on Plane Smooth Slope, ASCE Vol. 104 No. WW2, May, 1978.
2. Technical Advisory Committee on Protection against Inundation, Wave Run-up and Overtopping, Jan., 1972.
3. Philip N. Stoa, Revised Wave Runup Curves for Smooth Slopes, CERC, July, 1978.
4. Philip N. Stoa, Wave Runup on Rough Slopes, CERC, July 1979.
5. Jhon Ahrens, Prediction of Irregular Wave Runup, CERC, July, 1977.
6. Per Brum and Ali Riza Günbak, Risk Criteria in Design Stability of Sloping Structure in Relation to $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$, Symposium on Design of Rubble Mound Breakwaters, 1977.
7. U. S. Army, CERC, Shore Protection Manual, 1977.
8. U. S. Army, CERC, Coastal Hydraulic Models, May, 1979.
9. S. C. Mehrotra, Scale Effect in Model Tests of Rock-Protected Structures, Univ. of California, Los Angeles.
10. O. Juul Jensen & P. Klinting, Evaluation of Scale Effects in Hydraulic Models by Analysis of Laminar and Turbulent Flows. DHI, Denmark.
11. Arthur T. Ippen, Estuary and Coastline Hydrodynamics. McGraw-Hill, Inc., 1966.

附錄 I 波浪溯上、溯下試驗資料

 * SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 1.5 DEPTH = 60.0 CM CASE # 1 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
2.55	0.59	2.78	0.65	4.29	0.96	0.0298	3.86
5.38	0.85	4.22	0.67	6.29	0.93	0.0466	3.09
14.05	1.69	7.04	0.85	8.30	0.95	0.0590	2.75
2.83	0.76	3.13	0.84	3.71	1.23	0.0157	5.32
7.47	0.96	5.50	0.70	7.80	1.24	0.0325	3.70
12.89	1.11	7.61	0.65	11.64	1.24	0.0485	3.03
14.80	0.95	8.98	0.58	15.54	1.26	0.0627	2.66
4.68	1.40	4.60	1.37	3.35	1.72	0.0073	7.82
9.06	1.36	7.33	1.10	6.68	1.72	0.0145	5.54
14.06	1.30	8.97	0.83	10.85	1.71	0.0238	4.32
15.73	1.16	8.95	0.66	13.55	1.72	0.0294	3.89
4.11	0.70	3.12	0.53	5.86	2.36	0.0067	8.12
7.41	0.81	4.74	0.52	9.10	2.35	0.0106	6.49
14.24	0.98	7.12	0.49	14.55	2.37	0.0166	5.17
18.56	1.10	8.47	0.50	16.88	2.35	0.0196	4.76

 * SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 1.5 DEPTH = 70.0 CM CASE # 2 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
2.10	0.54	3.16	0.82	3.87	0.95	0.0275	4.02
4.29	0.72	3.73	0.62	5.97	0.95	0.0424	3.24
9.97	1.26	5.05	0.64	7.90	0.98	0.0527	2.90
3.67	0.70	4.29	0.82	5.22	1.23	0.0221	4.48
9.07	1.00	5.77	0.64	9.03	1.24	0.0376	3.44
11.72	0.95	7.24	0.59	12.32	1.23	0.0522	2.92
14.15	0.95	7.07	0.48	14.83	1.25	0.0608	2.70
4.78	0.83	4.80	0.83	5.77	1.71	0.0126	5.93
8.31	1.00	6.94	0.83	8.33	1.71	0.0183	4.93
12.05	1.05	9.07	0.79	11.46	1.69	0.0257	4.16
15.24	0.95	9.51	0.59	16.12	1.71	0.0353	3.55
6.48	1.37	5.05	1.07	4.72	2.37	0.0054	9.08
12.89	1.64	6.84	0.87	7.84	2.35	0.0091	6.99
18.14	1.81	9.01	0.90	10.00	2.38	0.0113	6.27

* SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 1.5 DEPTH = 80.0 CM CASE # 3 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
2.06	0.54	2.92	0.77	3.81	0.95	0.0271	4.05
8.03	1.24	4.83	0.75	6.47	0.95	0.0460	3.11
9.81	1.08	6.11	0.67	9.08	0.98	0.0606	2.71
3.87	1.03	3.59	0.96	3.76	1.27	0.0149	5.45
8.07	1.24	5.77	0.89	6.51	1.25	0.0267	4.08
14.43	1.19	9.14	0.75	12.14	1.24	0.0506	2.96
16.73	1.17	8.69	0.61	14.35	1.25	0.0589	2.75
4.60	0.92	3.91	0.78	5.01	1.73	0.0107	6.44
7.92	0.90	6.89	0.79	8.77	1.72	0.0190	4.84
10.73	0.93	8.59	0.74	11.53	1.74	0.0244	4.27
14.82	1.05	9.80	0.69	14.17	1.73	0.0303	3.83
4.37	1.36	4.14	1.29	3.21	2.38	0.0036	11.06
7.11	1.25	7.06	1.24	5.71	2.37	0.0065	8.26
13.57	1.41	10.20	1.06	9.60	2.31	0.0115	6.21
17.56	1.34	13.70	1.04	13.14	2.36	0.0151	5.42

* SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 2.0 DEPTH = 60.0 CM CASE # 4 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
1.83	0.55	2.25	0.68	3.31	0.96	0.0230	3.30
4.34	0.64	3.27	0.48	6.76	0.94	0.0490	2.26
5.47	0.73	3.63	0.49	7.46	0.95	0.0530	2.17
3.35	0.69	3.72	0.77	4.86	1.24	0.0203	3.51
7.85	1.05	2.24	0.30	7.49	1.25	0.0307	2.85
13.39	1.09	3.03	0.25	12.29	1.23	0.0521	2.19
16.84	1.18	5.95	0.42	14.24	1.25	0.0584	2.07
6.36	1.12	4.57	0.80	5.58	1.72	0.0123	4.51
9.19	1.05	6.50	0.74	3.77	1.74	0.0186	3.67
14.58	1.10	8.39	0.63	13.26	1.72	0.0287	2.95
4.24	1.22	3.42	0.98	3.47	2.33	0.0041	7.81
7.89	1.22	4.25	0.66	6.47	2.38	0.0073	5.84
17.20	1.40	6.36	0.52	12.27	2.39	0.0139	4.24
20.24	1.33	6.41	0.42	15.19	2.40	0.0169	3.85

* SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 2.0 DEPTH = 70.0 CM CASE # 5 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
3.88	0.96	2.07	0.51	4.04	0.96	0.0281	2.98
7.16	1.03	3.41	0.49	6.98	0.95	0.0496	2.25
11.00	1.34	5.33	0.65	8.20	0.95	0.0582	2.07
6.78	1.22	4.78	0.86	5.54	1.22	0.0239	3.24
8.78	1.06	6.05	0.73	8.25	1.24	0.0344	2.70
13.35	1.26	6.89	0.65	10.59	1.25	0.0434	2.40
17.10	1.23	7.25	0.52	13.87	1.24	0.0578	2.08
4.18	0.93	4.44	0.99	4.50	1.75	0.0094	5.15
7.20	0.87	6.97	0.84	8.25	1.74	0.0175	3.78
14.81	1.11	8.80	0.66	13.32	1.75	0.0279	2.99
16.08	1.10	8.84	0.60	14.64	1.72	0.0317	2.81
7.06	1.86	5.06	1.33	3.80	2.38	0.0043	7.62
15.10	2.16	7.96	1.14	6.98	2.42	0.0076	5.72
20.55	2.36	9.49	1.09	8.70	2.37	0.0099	5.02
23.23	2.07	9.63	0.86	11.21	2.36	0.0129	4.40

* SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 2.0 DEPTH = 80.0 CM CASE # 6 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
4.86	1.01	2.82	0.58	4.83	0.94	0.0350	2.67
6.29	1.13	3.36	0.61	5.55	0.96	0.0386	2.54
4.62	1.17	3.90	0.99	3.95	1.25	0.0162	3.93
10.58	1.13	6.39	0.68	9.40	1.24	0.0392	2.53
13.85	1.01	7.29	0.53	13.70	1.25	0.0562	2.11
17.85	1.09	8.11	0.49	16.40	1.26	0.0662	1.94
5.90	1.07	5.44	0.98	5.53	2.39	0.0062	6.35
11.14	1.15	8.34	0.86	9.68	2.38	0.0110	4.78
12.82	1.03	11.71	0.94	12.43	2.36	0.0143	4.18
16.86	1.15	12.85	0.87	14.69	2.36	0.0169	3.85
5.32	0.91	4.54	0.78	5.83	1.76	0.0121	4.55
8.56	1.06	6.89	0.85	8.07	1.72	0.0175	3.78
12.48	1.01	8.84	0.71	12.38	1.74	0.0262	3.09
14.76	0.91	11.64	0.71	16.28	1.74	0.0345	2.69

* SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 2.5 DEPTH = 60.0 CM CASE # 7 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
2.38	0.69	1.73	0.50	3.45	0.95	0.0245	2.56
5.96	1.10	2.41	0.44	5.42	0.94	0.0393	2.02
8.92	1.16	3.37	0.44	7.68	0.94	0.0557	1.69
3.00	0.76	2.51	0.64	3.93	1.25	0.0161	3.15
6.98	0.97	3.90	0.54	7.17	1.25	0.0294	2.33
12.03	1.09	5.13	0.47	11.00	1.23	0.0466	1.85
12.80	0.88	5.04	0.35	14.48	1.25	0.0594	1.64
5.00	1.15	3.93	0.90	4.35	1.72	0.0094	4.12
6.83	1.07	5.44	0.85	6.38	1.71	0.0140	3.38
12.38	1.18	7.16	0.68	10.49	1.74	0.0222	2.68
14.77	1.12	7.99	0.61	13.20	1.71	0.0289	2.35
5.37	0.94	3.13	0.55	5.71	2.39	0.0064	5.00
7.12	0.89	4.21	0.52	8.02	2.36	0.0092	4.16
13.28	1.04	6.29	0.49	12.76	2.40	0.0142	3.36
17.36	1.16	6.46	0.43	15.02	2.39	0.0169	3.08

* SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 2.5 DEPTH = 70.0 CM CASE # 8 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
2.42	0.68	1.92	0.54	3.55	0.96	0.0247	2.55
5.67	0.87	3.00	0.46	6.53	0.95	0.0464	1.86
7.93	0.98	4.01	0.50	8.06	0.98	0.0538	1.72
3.55	0.82	3.53	0.82	4.31	1.25	0.0177	3.01
6.58	0.98	5.01	0.75	6.70	1.25	0.0275	2.41
13.13	1.13	4.75	0.41	11.63	1.24	0.0485	1.82
15.87	1.12	6.29	0.44	14.23	1.24	0.0593	1.64
3.18	0.76	3.21	0.77	4.18	1.72	0.0091	4.20
6.29	0.82	6.70	0.88	7.63	1.73	0.0163	3.13
11.14	0.93	8.10	0.68	12.00	1.71	0.0263	2.47
15.48	1.04	8.43	0.56	14.93	1.71	0.0327	2.21
6.93	1.43	5.03	1.04	4.86	2.38	0.0055	5.39
14.29	1.68	7.36	0.87	8.50	2.36	0.0098	4.04
19.68	1.73	7.30	0.64	11.38	2.37	0.0130	3.51

* SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 2.5 DEPTH = 80.0 CM CASE # 9 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
3.58	0.96	1.98	0.53	3.72	0.94	0.0270	2.43
6.30	1.17	3.20	0.60	5.38	0.93	0.0399	2.00
11.48	1.53	5.32	0.71	7.51	0.95	0.0533	1.73
5.71	1.12	4.11	0.80	5.12	1.23	0.0217	2.72
10.53	1.17	6.09	0.68	8.99	1.23	0.0381	2.05
13.17	1.04	6.33	0.50	12.65	1.28	0.0495	1.80
18.53	1.16	6.95	0.44	15.92	1.26	0.0643	1.58
4.03	1.38	3.03	1.04	2.93	1.72	0.0063	5.02
6.64	1.08	5.97	0.97	6.16	1.71	0.0135	3.44
14.65	1.05	8.85	0.63	13.99	1.73	0.0300	2.31
5.66	1.18	4.88	1.02	4.79	2.37	0.0055	5.41
11.15	1.16	7.81	0.81	9.59	2.36	0.0110	3.81
14.90	1.18	9.00	0.71	12.64	2.34	0.0148	3.29
20.39	1.33	9.45	0.62	15.32	2.35	0.0178	3.00

* SCALE = 1/ 25. SLOPE = 1: 1.5 DEPTH = 60.0 CM CASE # 10 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
5.49	1.49	2.66	0.72	3.69	0.96	0.0257	4.16
5.80	0.87	2.81	0.42	6.66	0.94	0.0483	3.03
9.89	1.06	5.31	0.57	9.29	0.95	0.0660	2.60
5.77	1.09	4.85	0.91	5.30	1.22	0.0228	4.41
9.54	1.19	6.21	0.77	8.02	1.23	0.0340	3.62
14.16	1.26	8.15	0.72	11.26	1.24	0.0469	3.08
22.95	1.33	8.43	0.49	17.24	1.26	0.0696	2.53
5.26	1.11	4.90	1.04	4.73	1.70	0.0105	6.51
9.82	1.27	8.68	1.13	7.71	1.71	0.0169	5.13
17.63	1.55	10.48	0.92	11.38	1.71	0.0249	4.22
25.08	1.71	11.76	0.80	14.66	1.72	0.0318	3.74
6.19	0.98	4.25	0.67	6.31	2.37	0.0072	7.86
13.26	1.18	6.86	0.61	11.21	2.37	0.0128	5.89
20.27	1.41	7.35	0.51	14.43	2.38	0.0163	5.22
27.60	1.61	9.21	0.54	17.15	2.35	0.0199	4.73

* SCALE = 1/ 25. SLOPE = 1: 1.5 DEPTH = 70.0 CM CASE # 11 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
3.38	0.82	2.50	0.60	4.13	0.95	0.0293	3.89
4.98	0.92	3.24	0.60	5.39	0.94	0.0391	3.37
9.27	1.20	3.66	0.47	7.74	0.95	0.0550	2.84
6.96	1.29	5.31	0.98	5.41	1.23	0.0229	4.40
9.34	1.25	6.59	0.88	7.45	1.24	0.0311	3.78
12.14	1.22	7.51	0.76	9.91	1.24	0.0413	3.28
14.83	1.23	7.60	0.63	12.10	1.23	0.0513	2.94
7.66	1.40	5.83	1.06	5.48	1.73	0.0117	6.15
10.40	1.57	7.31	1.11	6.61	1.71	0.0145	5.54
14.83	1.38	9.44	0.86	10.72	1.71	0.0235	4.35
19.78	1.37	11.55	0.80	14.43	1.71	0.0316	3.75
10.62	2.15	6.87	1.39	4.95	2.36	0.0057	8.83
18.45	2.21	10.16	1.22	8.34	2.39	0.0094	6.89
27.90	2.21	11.98	0.95	12.62	2.39	0.0142	5.60

* SCALE = 1/ 25. SLOPE = 1: 1.5 DEPTH = 80.0 CM CASE # 12 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
5.87	0.94	4.11	0.66	6.25	0.96	0.0435	3.20
12.81	1.51	4.89	0.57	8.51	0.95	0.0604	2.71
6.80	1.05	5.44	0.85	6.41	1.24	0.0267	4.08
12.44	1.43	7.29	0.84	8.68	1.24	0.0362	3.50
17.69	1.40	8.17	0.64	12.67	1.23	0.0537	2.88
24.40	1.49	7.11	0.43	16.38	1.25	0.0672	2.57
4.63	1.00	5.61	1.21	4.62	1.73	0.0099	6.70
8.74	1.19	8.45	1.15	7.35	1.70	0.0163	5.22
17.01	1.48	11.80	1.02	11.53	1.71	0.0253	4.19
20.11	1.44	13.63	0.98	13.96	1.70	0.0310	3.79
9.37	1.28	8.15	1.11	7.31	2.37	0.0083	7.30
16.08	1.40	12.42	1.08	11.47	2.33	0.0135	5.73
24.50	1.50	14.56	0.89	15.36	2.37	0.0187	4.88
25.30	1.45	15.13	0.87	17.48	2.36	0.0201	4.70

* SCALE = 1/ 25. SLOPE = 1: 2.0 DEPTH = 60.0 CM CASE # 13 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
3.20	0.95	2.05	0.61	3.35	0.87	0.0284	2.97
4.68	0.98	2.91	0.61	4.79	0.95	0.0340	2.71
6.44	0.80	3.58	0.44	8.08	0.98	0.0539	2.15
5.73	1.09	3.94	0.75	5.28	1.25	0.0217	3.40
11.65	1.41	5.49	0.67	8.24	1.24	0.0344	2.70
14.14	1.19	7.25	0.61	11.84	1.25	0.0486	2.27
19.29	1.08	6.69	0.37	17.88	1.23	0.0758	1.82
5.22	1.31	4.71	1.18	3.99	1.73	0.0085	5.41
11.67	1.73	5.90	0.88	6.74	1.67	0.0155	4.02
15.72	1.45	8.56	0.79	10.85	1.70	0.0241	3.22
21.15	1.32	10.00	0.62	16.03	1.72	0.0347	2.68
4.83	1.02	4.03	0.86	4.71	2.35	0.0055	6.76
11.24	1.31	5.84	0.68	8.60	2.36	0.0099	5.03
17.43	1.25	9.22	0.66	13.95	2.36	0.0161	3.95
22.06	1.40	8.90	0.56	15.81	2.38	0.0179	3.74

* SCALE = 1/ 25. SLOPE = 1: 2.0 DEPTH = 70.0 CM CASE # 14 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
5.37	1.00	3.09	0.58	5.38	0.93	0.0399	2.50
5.02	0.72	3.07	0.44	7.02	0.94	0.0509	2.22
11.05	1.39	4.92	0.62	7.96	0.90	0.0630	1.99
4.67	1.13	3.69	0.90	4.12	1.23	0.0175	3.78
7.18	1.11	4.54	0.70	6.46	1.25	0.0265	3.07
15.04	1.19	6.72	0.53	12.62	1.25	0.0518	2.20
17.18	1.14	5.87	0.39	15.05	1.24	0.0627	2.00
6.30	1.11	5.62	0.99	5.68	1.73	0.0122	4.53
11.10	1.45	20.74	2.70	7.68	1.71	0.0168	3.85
17.61	1.41	9.87	0.79	12.47	1.71	0.0273	3.02
20.49	1.35	10.70	0.70	15.19	1.71	0.0333	2.74
8.06	1.61	6.10	1.22	5.01	2.38	0.0057	6.64
18.39	1.93	10.59	1.11	9.52	2.38	0.0108	4.82
21.81	1.72	11.31	0.89	12.65	2.37	0.0144	4.16
25.34	1.48	12.02	0.70	17.15	2.39	0.0192	3.60

* SCALE = 1/ 25. SLOPE = 1: 2.0 DEPTH = 80.0 CM CASE # 15 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
3.42	1.30	2.03	0.77	2.64	0.95	0.0188	3.65
6.61	1.11	2.94	0.50	5.93	0.95	0.0421	2.44
9.36	1.23	3.92	0.51	7.62	0.95	0.0541	2.15
8.36	1.14	5.56	0.76	7.31	1.24	0.0305	2.86
10.57	1.04	4.76	0.47	10.12	1.25	0.0415	2.45
15.44	1.10	6.10	0.44	14.01	1.24	0.0584	2.07
21.17	1.27	6.05	0.36	16.65	1.26	0.0672	1.93
5.03	0.97	5.55	1.07	5.19	1.71	0.0114	4.69
10.84	1.39	7.81	1.00	7.80	1.73	0.0167	3.87
13.08	1.13	9.85	0.85	11.60	1.72	0.0251	3.15
17.91	1.31	10.49	0.77	13.67	1.70	0.0303	2.87
7.34	1.10	5.89	0.88	6.66	2.34	0.0078	5.66
15.02	1.42	10.55	0.99	10.60	2.36	0.0122	4.53
21.55	1.45	10.36	0.70	14.86	2.40	0.0165	3.89
24.69	1.38	14.49	0.81	17.91	2.35	0.0208	3.47

* SCALE = 1/ 25. SLOPE = 1: 2.5 DEPTH = 60.0 CM CASE # 16 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
4.74	1.12	1.98	0.47	4.23	0.96	0.0294	2.33
6.09	0.98	3.47	0.56	6.25	0.96	0.0435	1.92
8.29	1.04	4.09	0.51	7.94	0.95	0.0564	1.68
2.68	0.66	2.67	0.66	4.06	1.23	0.0172	3.05
6.89	0.95	4.59	0.63	7.23	1.24	0.0301	2.30
11.98	0.98	6.02	0.49	12.20	1.24	0.0509	1.77
16.09	0.88	6.95	0.38	18.35	1.26	0.0741	1.47
4.27	0.99	4.39	1.02	4.30	1.72	0.0093	4.14
10.39	1.27	7.13	0.87	8.16	1.74	0.0173	3.04
14.51	1.18	8.86	0.72	12.26	1.74	0.0260	2.48
20.19	1.26	9.86	0.62	15.96	1.73	0.0342	2.16
3.86	0.91	2.63	0.62	4.25	2.35	0.0049	5.70
7.65	1.04	4.83	0.65	7.39	2.36	0.0085	4.34
13.86	1.10	6.27	0.50	12.56	2.37	0.0143	3.34
20.49	1.27	7.00	0.43	16.13	2.37	0.0184	2.95

* SCALE = 1/ 25. SLOPE = 1: 2.5 DEPTH = 70.0 CM CASE # 17 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
4.09	1.22	2.02	0.60	3.36	0.95	0.0239	2.59
5.33	0.95	2.48	0.44	5.64	0.96	0.0392	2.02
7.47	0.92	3.36	0.41	8.15	0.99	0.0533	1.73
5.02	1.08	3.17	0.69	4.63	1.25	0.0190	2.90
7.65	0.95	3.95	0.49	8.05	1.25	0.0330	2.20
11.50	0.97	5.47	0.46	11.81	1.24	0.0492	1.80
15.82	1.02	6.54	0.42	15.44	1.26	0.0623	1.60
4.06	0.91	3.75	0.84	4.47	1.70	0.0099	4.02
9.94	1.19	7.11	0.85	8.37	1.71	0.0183	2.95
16.04	1.36	8.91	0.76	11.78	1.71	0.0258	2.49
18.67	1.09	8.97	0.52	17.12	1.75	0.0358	2.11
5.38	1.18	4.91	1.08	4.55	2.38	0.0051	5.57
13.97	1.70	8.04	0.98	8.22	2.38	0.0093	4.15
20.94	1.79	9.37	0.80	11.68	2.37	0.0133	3.46
25.28	1.85	10.36	0.76	13.69	2.41	0.0151	3.25

* SCALE = 1/ 25. SLOPE = 1: 2.5 DEPTH = 80.0 CM CASE # 18 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
3.80	0.80	2.06	0.43	4.76	0.95	0.0338	2.18
5.31	0.94	2.20	0.39	5.68	0.95	0.0403	1.99
5.59	0.81	2.33	0.34	6.88	0.96	0.0479	1.83
5.12	1.01	4.33	0.85	5.08	2.35	0.0059	5.21
12.58	1.12	8.66	0.77	11.28	2.37	0.0129	3.53
15.74	1.08	10.69	0.74	14.53	2.35	0.0169	3.08
19.86	1.09	13.70	0.75	18.17	2.38	0.0206	2.79
3.78	1.03	4.00	1.08	3.69	1.72	0.0080	4.47
7.19	0.96	6.19	0.82	7.52	1.72	0.0163	3.13
14.08	1.20	7.88	0.67	11.72	1.70	0.0260	2.48
17.36	1.12	9.00	0.58	15.54	1.69	0.0349	2.14
3.25	0.87	2.70	0.73	3.71	1.26	0.0150	3.27
7.55	0.94	3.62	0.45	8.02	1.26	0.0324	2.22
12.97	1.15	5.06	0.45	11.30	1.25	0.0464	1.86
14.49	0.96	5.51	0.36	15.12	1.25	0.0620	1.61

* SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 1.5 DEPTH = 60.0 CM CASE # 19 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
3.53	1.07	2.49	0.75	3.30	0.95	0.0234	4.35
5.05	0.94	3.41	0.63	5.37	0.97	0.0366	3.49
6.91	0.86	4.48	0.56	8.07	0.97	0.0550	2.94
3.71	1.03	3.06	0.84	3.62	1.25	0.0149	5.47
6.20	0.96	4.72	0.73	6.45	1.26	0.0260	4.13
13.67	1.44	6.27	0.66	9.52	1.25	0.0391	3.37
16.56	1.20	7.02	0.51	13.79	1.26	0.0557	2.83
6.58	1.32	5.46	1.09	4.99	1.74	0.0106	6.49
11.68	1.39	7.60	0.91	8.38	1.73	0.0179	4.98
17.97	1.58	9.95	0.88	11.36	1.74	0.0241	4.30
20.90	1.44	10.82	0.74	14.53	1.74	0.0308	3.80
7.14	1.20	4.87	0.82	5.94	2.36	0.0068	8.06
11.58	1.26	6.76	0.74	9.19	2.37	0.0105	6.51
19.09	1.63	8.14	0.72	11.37	2.41	0.0125	5.95
29.08	2.24	9.69	0.75	13.00	2.42	0.0142	5.59

* SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 1.5 DEPTH = 70.0 CM CASE # 20 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
4.52	1.01	3.42	0.76	4.47	0.95	0.0317	3.74
5.46	0.84	4.25	0.66	6.47	0.95	0.0460	3.11
10.47	1.01	6.89	0.66	10.40	0.94	0.0754	2.43
3.71	0.83	5.14	1.15	4.48	1.23	0.0190	4.84
8.95	1.23	6.81	0.94	7.25	1.24	0.0302	3.83
14.57	1.34	7.25	0.72	10.84	1.24	0.0452	3.14
16.56	1.31	9.71	0.77	12.66	1.25	0.0519	2.93
6.10	1.45	5.65	1.34	4.22	1.71	0.0093	6.93
11.45	1.31	8.95	1.03	8.72	1.73	0.0187	4.89
19.13	1.85	11.43	1.11	10.32	1.72	0.0224	4.46
19.13	1.62	11.43	0.97	11.81	1.73	0.0253	4.19
10.59	1.61	6.32	0.96	6.56	2.40	0.0073	7.80
18.13	1.74	9.14	0.88	10.40	2.39	0.0117	6.17
24.53	1.78	9.68	0.70	13.82	2.40	0.0154	5.38

* SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 1.5 DEPTH = 80.0 CM CASE # 21 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
2.87	0.64	2.92	0.65	4.46	0.95	0.0317	3.75
4.08	0.63	3.57	0.55	6.51	0.95	0.0462	3.10
13.90	1.73	5.63	0.70	8.02	0.95	0.0570	2.79
8.20	1.24	5.61	0.85	6.60	1.24	0.0275	4.02
13.15	1.26	7.74	0.74	10.46	1.27	0.0416	3.27
15.05	1.17	8.75	0.68	12.87	1.24	0.0537	2.88
19.23	1.23	9.47	0.60	15.69	1.26	0.0634	2.65
4.02	1.03	4.30	1.10	3.91	1.71	0.0086	7.20
8.02	1.09	7.80	1.06	7.33	1.73	0.0157	5.32
10.42	0.96	9.67	0.89	10.86	1.75	0.0227	4.42
16.62	1.21	12.26	0.89	13.78	1.74	0.0292	3.90
7.79	1.52	6.32	1.23	5.14	2.38	0.0058	8.74
12.25	1.67	9.34	1.27	7.34	2.39	0.0082	7.35
20.85	1.90	13.34	1.21	11.00	2.41	0.0121	6.05
25.64	1.86	15.63	1.13	13.80	2.36	0.0159	5.29

* SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 2.0 DEPTH = 60.0 CM CASE # 22 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
2.79	0.70	2.59	0.65	3.98	0.97	0.0271	3.04
5.54	1.04	3.61	0.68	5.34	0.97	0.0364	2.62
8.10	1.08	5.20	0.70	7.47	0.94	0.0542	2.15
3.15	0.87	3.51	0.98	3.60	1.25	0.0148	4.11
7.27	1.09	5.34	0.80	6.65	1.24	0.0277	3.00
11.27	1.06	7.20	0.68	10.64	1.24	0.0444	2.37
17.12	1.06	8.54	0.53	16.23	1.26	0.0655	1.95
6.47	1.45	5.69	1.27	4.47	1.71	0.0098	5.05
13.20	1.57	8.77	1.05	8.38	1.72	0.0182	3.71
18.47	1.43	9.36	0.72	12.95	1.73	0.0277	3.00
5.17	1.01	4.26	0.83	5.14	2.39	0.0058	6.58
9.70	1.19	6.35	0.78	8.13	2.39	0.0091	5.23
14.42	1.26	8.74	0.76	11.49	2.37	0.0131	4.37
26.19	1.78	9.35	0.64	14.71	2.39	0.0165	3.89

* SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 2.0 DEPTH = 70.0 CM CASE # 23 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
2.97	1.16	1.91	0.74	2.57	0.96	0.0179	3.74
9.19	1.57	3.94	0.67	5.85	0.95	0.0416	2.45
10.58	1.20	5.17	0.58	8.84	0.93	0.0655	1.95
6.76	1.31	4.54	0.88	5.18	1.23	0.0219	3.37
11.06	1.18	5.80	0.62	9.40	1.25	0.0386	2.55
13.98	1.15	6.17	0.51	12.10	1.22	0.0521	2.19
17.69	1.18	6.55	0.44	14.98	1.24	0.0625	2.00
6.55	1.26	5.57	1.07	5.20	1.74	0.0110	4.77
11.30	1.42	9.56	1.20	7.98	1.72	0.0173	3.80
16.42	1.32	10.35	0.83	12.48	1.71	0.0274	3.02
18.99	1.31	10.12	0.70	14.47	1.72	0.0314	2.82
9.32	1.91	7.47	1.53	4.88	2.39	0.0055	6.76
16.05	2.11	10.04	1.32	7.61	2.36	0.0088	5.34
20.00	1.57	11.54	0.91	12.74	2.46	0.0135	4.30
26.87	1.83	11.77	0.80	14.68	2.40	0.0163	3.91

* SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 2.0 DEPTH = 80.0 CM CASE # 24 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
4.51	1.14	2.49	0.63	3.96	0.95	0.0281	2.98
5.33	0.87	3.31	0.54	6.16	0.94	0.0447	2.37
12.28	1.57	5.12	0.65	7.84	0.97	0.0534	2.16
6.34	1.03	5.06	0.82	6.18	1.27	0.0246	3.19
10.51	1.35	5.85	0.75	7.80	1.24	0.0325	2.77
16.05	1.35	7.05	0.59	11.88	1.22	0.0512	2.21
20.89	1.34	6.18	0.40	15.55	1.25	0.0638	1.98
6.70	1.43	5.41	1.15	4.70	1.74	0.0100	5.01
9.03	1.20	7.42	0.99	7.51	1.73	0.0161	3.94
12.48	1.15	10.15	0.93	10.87	1.75	0.0228	3.31
19.31	1.27	10.92	0.72	15.15	1.73	0.0324	2.78
8.99	1.57	7.16	1.25	5.71	2.36	0.0066	6.17
12.28	1.42	9.82	1.14	8.63	2.37	0.0098	5.04
17.79	1.72	11.49	1.11	10.36	2.37	0.0118	4.60
23.13	1.64	12.36	0.88	14.08	2.35	0.0163	3.91

* SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 2.5 DEPTH = 60.0 CM CASE # 25 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
2.59	0.78	1.96	0.59	3.34	0.95	0.0237	2.60
3.75	0.71	2.52	0.48	5.30	0.95	0.0376	2.06
8.30	1.10	4.38	0.58	7.57	0.93	0.0561	1.69
4.09	0.84	3.35	0.69	4.86	1.25	0.0199	2.83
8.48	1.10	4.40	0.57	7.74	1.24	0.0323	2.23
12.38	1.02	6.06	0.50	12.12	1.26	0.0489	1.81
15.24	1.00	6.72	0.44	15.19	1.25	0.0623	1.60
14.87	2.74	10.48	1.93	5.43	1.71	0.0119	3.67
11.32	1.32	7.99	0.93	8.56	1.73	0.0183	2.95
14.15	1.17	9.46	0.78	12.12	1.74	0.0257	2.50
10.00	0.68	4.78	0.33	14.65	1.71	0.0321	2.23
3.34	0.76	2.66	0.60	4.41	2.37	0.0050	5.64
7.48	0.85	5.23	0.60	8.79	2.40	0.0098	4.04
12.01	1.06	6.64	0.59	11.28	2.38	0.0128	3.54
18.48	1.30	8.69	0.61	14.25	2.37	0.0163	3.14

* SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 2.5 DEPTH = 70.0 CM CASE # 26 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
2.92	0.81	1.92	0.53	3.61	0.95	0.0256	2.50
4.15	0.71	3.34	0.57	5.83	0.95	0.0414	1.97
6.39	0.67	4.16	0.44	9.53	0.95	0.0677	1.54
3.70	0.77	3.52	0.74	4.79	1.23	0.0203	2.81
10.76	1.07	5.12	0.51	10.08	1.24	0.0420	1.95
14.95	1.09	5.57	0.41	13.66	1.24	0.0569	1.68
5.02	1.13	4.76	1.07	4.44	1.71	0.0097	4.05
9.75	1.19	7.84	0.96	8.20	1.70	0.0182	2.97
13.66	1.17	8.94	0.77	11.65	1.71	0.0255	2.50
16.35	1.14	8.78	0.61	14.38	1.72	0.0312	2.27
6.67	1.27	6.94	1.32	5.26	2.37	0.0060	5.16
13.56	1.52	9.34	1.05	8.94	2.37	0.0102	3.96
18.65	1.50	9.88	0.85	11.66	2.38	0.0132	3.48
21.32	1.46	10.00	0.68	14.63	2.38	0.0166	3.11

* SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 2.5 DEPTH = 80.0 CM CASE # 27 *

RUNUP (CM)	RU/H	RUNDOWN (CM)	RD/H	HI (CM)	TI (SEC)	H/L	SURF PAR
3.32	0.71	2.53	0.54	4.67	0.96	0.0325	2.22
4.83	0.77	3.37	0.54	6.28	0.95	0.0446	1.89
8.48	1.06	3.80	0.47	8.03	0.96	0.0559	1.69
7.45	1.71	3.85	0.89	4.35	1.25	0.0178	2.99
9.55	1.34	5.09	0.72	7.10	1.25	0.0291	2.34
13.98	1.41	5.74	0.58	9.93	1.25	0.0407	1.98
17.36	1.32	5.29	0.40	13.14	1.25	0.0539	1.72
5.73	1.60	4.89	1.37	3.58	1.73	0.0077	4.57
8.35	1.26	7.10	1.08	6.60	1.73	0.0141	3.36
13.18	1.34	8.76	0.89	9.81	1.73	0.0210	2.76
18.48	1.36	8.74	0.64	13.61	1.73	0.0292	2.34
6.30	1.08	5.62	0.96	5.84	2.34	0.0068	4.84
11.58	1.29	8.59	0.96	8.95	2.38	0.0101	3.97
14.63	1.26	9.94	0.85	11.64	2.39	0.0131	3.50
18.37	1.30	10.41	0.74	14.09	2.39	0.0158	3.18

附錄 II 傳遞波試驗資料

 SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 1.5 DEPTH = 92.0 CM

INCIDENT WAVE (CM)	TRANS WAVE (CM)	H/L	KT = HT/HTI
11.8	1.0	0.0491	0.08
13.7	1.9	0.0579	0.14
17.7	3.6	0.0713	0.20
8.6	0.8	0.0181	0.10
12.4	1.7	0.0270	0.14
17.3	2.3	0.0383	0.13
8.7	1.8	0.0113	0.21
13.8	3.5	0.0179	0.25
17.3	5.0	0.0229	0.29

 SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 2.0 DEPTH = 87.0 CM

INCIDENT WAVE (CM)	TRANS WAVE (CM)	H/L	KT = HT/HTI
12.3	1.1	0.0521	0.09
15.4	2.0	0.0665	0.13
18.5	2.3	0.0773	0.12
9.4	0.9	0.0207	0.10
14.2	2.1	0.0307	0.15
17.0	3.1	0.0360	0.18
8.0	2.0	0.0107	0.26
10.5	2.7	0.0142	0.26
15.3	4.8	0.0200	0.31

 SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 2.0 DEPTH = 87.0 CM

INCIDENT WAVE (CM)	TRANS WAVE (CM)	H/L	KT = HT/HTI
11.9	0.7	0.0504	0.06
13.2	1.1	0.0550	0.08
18.0	2.0	0.0740	0.11
10.3	0.9	0.0226	0.09
14.5	2.8	0.0310	0.19
17.7	2.9	0.0380	0.16
6.2	1.7	0.0080	0.27
10.8	2.6	0.0144	0.24
14.0	4.5	0.0187	0.32

 SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 2.5 DEPTH = 82.0 CM

INCIDENT WAVE (CM)	TRANS WAVE (CM)	H/L	KT = HT/HTI
12.3	1.1	0.0503	0.09
14.9	2.0	0.0640	0.13
17.3	2.7	0.0743	0.16
7.8	1.1	0.0192	0.14
13.4	3.0	0.0295	0.22
17.8	3.8	0.0382	0.21
9.0	2.1	0.0119	0.24
12.1	3.0	0.0158	0.25
15.1	4.6	0.0198	0.31

 SCALE = 1/ 36. SLOPE = 1: 2.5 DEPTH = 82.0 CM

INCIDENT WAVE (CM)	TRANS WAVE (CM)	H/L	KT = HT/HTI
11.8	1.1	0.0498	0.09
15.3	2.1	0.0648	0.14
20.2	3.7	0.0844	0.18
8.6	1.1	0.0190	0.13
13.8	2.5	0.0305	0.18
18.2	3.3	0.0390	0.18
10.4	2.4	0.0137	0.23
14.1	3.9	0.0187	0.28
17.9	6.0	0.0235	0.33

 SCALE = 1/ 16. SLOPE = 1: 1.5 DEPTH = 92.0 CM

INCIDENT WAVE (CM)	TRANS WAVE (CM)	H/L	KT = HT/HTI
10.9	0.7	0.0453	0.06
13.3	1.4	0.0555	0.11
17.6	2.8	0.0745	0.16
9.5	0.9	0.0211	0.10
13.8	2.0	0.0299	0.15
16.9	3.0	0.0378	0.18
7.3	1.6	0.0092	0.22
12.1	3.3	0.0163	0.27
17.6	6.8	0.0233	0.39

附錄Ⅲ 不等縮尺港池波高分佈試驗資料

表Ⅲ—1 等縮尺模型 (Undistorted model) 測點波高

Tp (sec)	Tm (sec)	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆
8	0.8	0.448	0.170	0.155	0.164	0.143	0.215
		1.534	0.519	0.177	0.205	0.204	0.858
		2.471	1.037	0.199	0.552	0.408	1.094
		*3.792	0.756	0.243	0.552	0.245	0.987
10	1.0	1.278	0.540	0.221	0.368	0.204	0.644
		1.960	1.210	0.088	0.430	0.367	0.730
		*2.876	1.210	0.111	0.512	0.204	0.601
12	1.2	1.342	0.648	0.221	0.205	0.163	0.665
		1.789	2.506	0.221	0.368	0.592	0.751
		*2.343	1.447	0.221	0.512	0.225	0.644

* : 表示碎波時之波高記錄

表Ⅲ—2 $D_f = 2$, $ML = 1$ 測點波高

T_p (sec)	T_m (sec)	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6
8	0.77	3.199	1.883	0.242	0.470	0.223	0.685
		6.598	3.642	0.548	0.854	0.508	1.556
		*7.165	1.716	0.987	0.854	0.427	1.038
		*8.831	2.728	1.250	1.003	0.732	1.349
10	0.92	2.833	1.883	0.329	0.385	0.610	2.801
		3.666	2.469	0.395	0.534	1.424	3.735
		4.232	2.762	0.439	0.640	1.728	4.253
		5.365	3.557	0.614	0.748	2.236	5.561
		6.332	4.269	0.723	0.854	2.236	6.059
		*7.332	3.725	0.460	0.662	2.012	4.565
		*7.998	3.139	0.658	0.576	2.154	4.814
12	1.06	3.266	2.218	0.356	0.448	1.220	2.573
		3.999	2.720	0.419	0.555	1.423	3.797
		4.066	2.720	0.460	0.598	1.626	3.528
		5.099	3.139	0.500	0.854	1.809	3.818
		*5.365	3.553	0.680	1.025	1.220	3.320

表Ⅲ—3 $D_f = 2$, $ML = 2$ 測點波高

Tp	Tm	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆
8	1.13	3.266	2.344	0.657	0.683	0.895	2.054
		3.899	2.950	0.877	0.747	1.118	2.490
		5.299	2.406	0.570	0.961	1.220	2.739
		*5.599	2.448	0.482	0.875	1.484	2.511
10	1.41	1.900	1.674	0.745	0.555	0.325	1.453
		2.699	2.344	1.029	0.705	0.447	1.453
		2.933	2.616	1.162	0.747	0.508	1.411
		3.832	3.557	1.491	0.897	0.569	1.702
		4.232	3.767	1.359	1.068	0.732	1.204
		*4.166	3.767	1.272	0.961	0.670	1.204
12	1.70	1.700	1.779	0.438	0.534	0.202	1.038
		2.000	2.093	0.548	0.641	0.305	1.245
		2.999	3.034	0.767	1.068	0.407	1.660
		3.699	3.453	0.876	1.110	0.427	1.868
		3.766	3.976	0.876	1.281	0.610	2.283
		*3.832	2.930	0.876	1.068	0.610	2.075

表Ⅲ—4 $D_f = 2$, $ML = 3$ 測點波高

Tp	Tm	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆
8	0.80	4.199	1.988	0.711	0.854	0.305	0.830
		5.832	2.825	1.214	1.110	0.428	1.141
		6.498	3.348	1.360	1.238	0.467	1.287
		6.665	3.242	1.883	1.474	0.508	1.349
		*7.665	2.574	1.674	1.537	0.610	1.141
10	1.00	3.033	2.470	0.628	0.534	1.728	3.424
		4.166	3.348	1.118	0.662	2.033	4.420
		5.065	3.515	0.900	0.384	2.032	4.275
		*5.399	2.930	0.526	0.641	1.646	4.046
		*6.232	2.720	0.636	1.174	1.484	4.046
12	1.20	2.999	2.929	0.942	0.875	0.508	1.038
		3.666	3.243	0.858	0.897	0.813	1.141
		3.999	3.557	1.172	0.897	0.833	1.660
		*4.865	3.139	1.256	1.069	0.813	1.453

表Ⅲ—5 $D_f = 3$, $ML = 1$ 測點波高

T_p	T_m	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6
8	0.75	4.729	2.462	0.441	0.409	1.632	1.673
		6.433	3.456	0.441	1.104	1.224	3.818
		8.946	4.406	1.588	1.268	3.631	5.148
		10.394	5.227	0.794	1.677	3.631	5.148
		*9.415	3.888	1.058	1.227	4.039	5.577
10	0.88	4.430	2.203	0.926	1.472	0.857	4.719
		6.390	2.592	0.882	1.963	1.632	6.221
		9.244	3.197	1.676	2.086	1.714	7.379
		10.607	5.054	1.191	2.781	2.856	9.095
		*11.928	3.888	1.852	2.250	2.081	8.065
12	0.99	4.004	2.160	1.230	1.513	0.979	2.317
		5.708	3.375	0.882	1.800	0.816	3.861
		7.711	4.234	2.205	2.045	1.102	4.934
		8.776	3.370	2.426	2.904	1.632	4.719
		*11.204	6.696	2.690	4.704	2.040	2.574

表Ⅲ—6 $D_f = 3$, $ML = 2$ 測點波高

T_p	T_m	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6
8	1.39	2.471	1.296	0.441	0.777	1.306	1.030
		3.919	1.728	0.926	1.554	2.366	1.459
		5.069	2.635	1.499	1.636	2.856	2.231
		6.177	3.758	1.676	2.004	2.938	2.660
		7.498	5.702	2.558	2.372	3.998	4.204
		8.009	6.523	1.764	3.409	4.325	3.861
		*8.605	6.739	1.455	3.599	4.896	3.861
10	1.73	2.087	1.858	0.441	1.432	1.515	0.729
		3.451	2.506	1.499	2.700	2.366	1.587
		4.004	3.326	1.676	3.272	3.101	1.716
		4.771	4.147	1.985	3.722	3.672	2.059
		5.538	4.536	2.117	4.499	4.080	1.759
		5.708	5.400	1.985	4.908	4.366	1.716
		6.475	6.826	3.440	4.867	5.304	2.360
		7.285	7.344	3.572	5.522	5.630	3.218
		*8.222	8.208	3.528	6.835	4.692	3.218
12	2.03	2.939	2.506	0.884	1.595	0.571	2.617
		3.493	3.283	1.367	1.759	0.775	3.260
		4.345	3.499	2.955	6.035	2.040	5.234
		4.729	4.147	3.572	4.744	2.040	5.577
		5.581	4.320	3.475	4.458	1.918	5.920
		5.921	4.666	3.528	4.908	2.366	6.864
		6.518	5.098	4.410	4.499	2.774	7.293
		*7.199	7.344	6.615	7.117	4.080	6.435

表Ⅲ—7 $D_f = 3$, $ML = 3$ 測點波高

T_p (sec)	T_m (sec)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H_3 (cm)	H_4 (cm)	H_5 (cm)	H_6 (cm)
8	0.8	4.899	2.938	0.441	1.227	2.978	3.861
		6.475	3.586	0.573	1.718	1.795	4.848
		8.051	3.024	0.882	1.636	4.570	6.435
		8.563	4.234	0.882	1.636	2.774	8.151
		9.926	5.184	1.279	2.454	4.896	8.022
		*10.096	5.228	0.750	1.554	2.693	7.379
10	1.0	4.090	2.117	0.794	1.595	0.530	2.145
		6.305	2.765	0.884	1.759	0.369	3.003
		8.051	4.320	1.808	2.290	0.857	3.904
		9.202	5.141	2.117	2.781	0.775	3.947
		10.650	5.962	2.734	3.926	1.876	3.346
		*11.545	8.208	2.293	4.581	3.672	2.574
		*12.823	5.270	1.764	3.722	2.040	3.604
12	1.2	3.493	0.864	0.485	0.409	1.428	2.145
		4.643	1.728	0.441	0.450	1.632	3.003
		6.007	1.858	0.132	0.736	1.632	3.218
		7.540	3.326	4.101	1.023	1.958	5.019
		7.668	4.752	1.455	1.636	4.284	5.405
		*9.159	5.962	2.293	2.250	4.651	5.363
		*9.755	5.270	1.764	1.759	3.305	5.577

表Ⅲ—8 $D_f = 5$, $ML = 1$ 測點波高

T_p (sec)	T_m (sec)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H_3 (cm)	H_4 (cm)	H_5 (cm)	H_6 (cm)
8	0.72	3.627	3.892	0.523	0.792	0.435	2.101
		6.118	4.347	0.804	1.148	0.711	3.214
		8.565	9.108	1.206	1.505	0.909	5.438
		*9.396	6.003	0.804	1.386	0.909	5.150
10	0.82	3.715	2.691	0.563	1.188	0.593	3.172
		5.244	3.974	0.804	1.742	1.869	4.491
		8.085	6.334	1.085	2.455	1.264	7.004
		9.527	8.611	1.286	3.128	1.343	8.405
		*11.100	9.191	2.492	2.495	2.094	11.454
12	0.92	3.889	2.608	1.206	1.307	0.790	1.730
		5.331	3.685	1.729	1.861	1.304	2.472
		8.259	5.796	2.653	2.653	1.896	3.708
		11.755	8.694	3.739	2.772	2.568	4.656
		*12.542	11.840	4.422	2.455	3.160	6.304

表Ⅲ—9 $D_f = 5$, $ML = 2$ 測點波高

Tp (sec)	Tm (sec)	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	H ₃ (cm)	H ₄ (cm)	H ₅ (cm)	H ₆ (cm)
8	1.79	2.666	1.242	1.085	1.584	0.830	1.195
		5.637	2.277	2.010	3.208	1.778	2.390
		8.784	7.908	3.779	4.752	2.568	5.356
		13.634	13.248	10.532	11.722	4.503	11.206
		17.043	19.872	10.613	12.593	4.977	12.442
		*20.539	21.363	7.236	12.197	6.162	13.926
		*21.675	16.643	4.181	10.658	5.923	13.514
10	2.24	1.879	1.242	0.523	0.950	0.474	0.206
		4.589	2.857	1.648	2.495	1.343	0.412
		6.555	4.223	1.970	3.287	1.738	0.707
		9.575	5.216	3.417	4.000	2.528	1.360
		11.799	5.589	4.824	5.702	2.844	2.678
		14.334	8.156	6.593	7.286	3.081	4.244
		17.393	9.853	7.316	8.356	3.595	3.873
		19.927	12.503	8.723	10.138	4.740	7.251
		*21.763	20.038	9.045	13.900	9.836	10.465
12	2.68	1.573	0.869	0.080	0.475	0.198	0.247
		3.190	1.987	0.121	1.030	0.119	0.618
		5.244	3.312	0.844	1.901	1.225	1.236
		6.468	5.796	1.528	2.693	2.370	1.978
		8.390	6.831	1.809	2.772	2.410	2.060
		9.308	9.853	2.412	3.168	3.674	3.049
		11.056	14.904	4.020	4.673	5.293	3.296
		13.066	15.939	4.985	6.098	6.162	5.768

表Ⅲ—10 $D_f = 5$, $ML = 3$ 測點波高

T_p (sec)	T_m (sec)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H_3 (cm)	H_4 (cm)	H_5 (cm)	H_6 (cm)
8	0.8	3.409	2.981	0.804	1.188	0.514	2.060
		4.938	3.892	1.206	1.663	0.790	4.697
		8.041	7.038	2.090	2.534	1.659	8.982
		10.488	9.398	2.090	2.772	1.185	10.012
		*11.012	8.694	2.412	2.574	2.568	7.540
10	1.0	4.894	3.478	0.804	0.792	1.383	1.236
		6.599	5.175	1.246	1.346	2.094	1.483
		9.614	7.369	1.608	1.940	2.844	2.225
		10.838	8.528	4.100	1.346	5.372	2.472
		14.334	11.385	5.909	1.742	6.320	2.966
		*14.421	13.828	5.789	2.693	6.241	3.131
12	1.2	5.375	3.312	1.286	1.624	1.975	0.824
		6.162	3.850	1.688	1.822	2.054	0.989
		7.866	4.720	2.412	2.970	2.923	1.236
		9.527	9.067	2.291	3.168	3.397	1.236
		11.537	10.971	1.769	3.208	3.713	1.277
		13.110	12.586	2.090	4.000	4.148	2.060
		14.246	13.000	5.226	3.841	4.740	2.142
		*15.994	16.560	2.412	4.594	4.740	2.637