波 壓 試 驗 研 究

主 持 人：張 金 機

參與人員：李勇榮　黃清和　簡仲璟
何良勝　陳明宗　廖慶堂
何炳紹　蔡金吉　陳正義
李永勝　蔡瑞成　陳肇興

交 通 處 港 灣 技 術 研 究 所
中 華 民 國 七 十 六 年 六 月

波壓試驗研究

摘　要

波壓力爲防波堤最主要之外力，雖然近年來對直立式防波堤設計已有相當之研究，但對不規則波所引起之外力仍未能提出可靠之計算方法。本研究旨在利用模型試驗以了解不規則波波壓分佈統計特性。

本研究結果顯示，直立堤受不規則波作用，入射波與反射波適當之相位組合，在堤前臨界距離發生碎波造成衝擊波壓。平均而言，重複波波壓隨入射波高增大而加大，但最大波高並不一定產生最大波壓，而是幾個較大之波群入射與反射組合所造成。試驗波高成理萊分佈，發生衝擊波壓時，波壓成均勻分佈；重複波未發生衝擊波壓時，波壓成理萊分佈。

當 $0.05 \leqq h/L_0 \leqq 0.3$，$p/wH$ 與 H/h 及 h/L_0 之關係相當一致，其值約在 0.7 與 0.9之間，隨 H/h 增加而略微減小。$\bar{p}/wH$ 隨 h/L_0 增加而減小，隨 H/h 增大而稍增加，其值介於 0.45 與 0.65之間。p/wH 及 $\bar{p}/wH$ 之值不因統計概率不同而有顯著差異。$p_{1/10}/p_{1/3}$ 與 $H_{1/10}/H_{1/3}$ 及 $p_{max}/p_{1/3}$ 與 $H_{max}/H_{1/3}$ 資料點成扇形分佈，迴歸線斜率接近 1 : 1。水深較大時波峯最大波壓發生在水面附近，隨水深減小最大波壓有往水面下移之趨勢。當 $h/L > 0.175$ 時，波谷與波峯最大波壓力比值 $p_1'/p_1 > 1.0$。

Sainflou, Nagai 及 Goda等波壓計算公式均不能涵蓋所有試驗條件所得之試驗值。

EXPERIMENTAL STUDIES OF WAVE PRESSURE

ABSTRACT

Wave pressure is the most important external force for the design of breakwater. During recent years, there has been considerable development in the technology of vertical face breakwater; however, there is no reliable method to compute wave forces induced by irregular waves. The purpose of this study is to obtain statistical characteristics of irregular wave pressure distribution from model tests.

The results of this study show that vertical face breakwater under the action of irregular waves, some waves are reflected, so that the next wave breaks a critical distance resulting a rapidly rising shock pressure on the breakwater. On the average, the wave pressure increases with the increase of incoming wave height, but the maximum wave force does not necessarily occur for the largest wave height. It can be occurred for serval larger wave group in an appropriate phase composition. In the model tests wave height follows Rayleigh distribution, the test results show that wave pressure are uniform distribution for the occurance of shock pressure, and Rayleigh distribution for standing wave without shock pressure.

For $0.05 \leq h/L_0 \leq 0.3$, the relationship between p/wH and H/h, h/L_0 are quite consistancy, the value of p/wH ranges from 0.7 to 0.9, slightly decreases with increase of H/h. The value of $\bar{p}$/wH are between 0.45 and 0.65, which decreases with increase of h/L_0, and slightly increases with the increment of H/h. By using different probabilities, the values of p/wH and $\bar{p}$/wH don't have much difference. The relationship between $p_{1/10}/p_{1/3}$ and $H_{1/10}/H_{1/3}$ as well as $p_{max}/p_{1/3}$ and $H_{max}/H_{1/3}$ have fan shape scattering; the slopes of fitting curve are about 1:1. For larger water depth, the maximum pressure occurs at the vicinity of water surface, and the maximum tends to move down word with the decreasing of water depth. When $h/L > 0.175$, the maximum pressure ratio of wave trough and creast, p_1'/p_1 greater than 1.0.

Wave pressures calculated by Sainflou, Nagai and Goda formula can not satisfy test data in all test conditions.

波 壓 試 驗 研 究

目 錄

摘要 …… ii

ABSTRACT …… iii

圖名 …… vi

符號 …… ix

一、前 言 …… 1

二、試驗設備 …… 6

(一)風洞水槽 …… 6

(二)鼓風機 …… 6

(三)不規則波造波機 …… 6

(四)資料處理系統 …… 6

三、試驗條件 …… 8

(一)模型縮尺 …… 8

(二)試驗模型 …… 8

(三)試驗波浪 …… 8

四、第一階段試驗結果 …… 11

(一)波浪 …… 11

(二)傳遞波浪 …… 11

(三)波壓力 …… 16

五、第二階段試驗結果 …… 28

㈠試驗資料分析…… 28
㈡波壓統計特性…… 36
㈢最大波壓統計分析特性…… 64
六、討論…… 81
㈠衝擊波壓…… 81
㈡波壓累積概率分佈…… 81
㈢波壓計使用方法之探討…… 81
七、結論與建議…… 83
八、參考書籍…… 85

圖　　名

圖 1 — 1　水平衝擊波壓力與累積概率關係(Lundgren 1974)

圖 1 — 2　垂直與傾斜斷面波壓力比較 (Lundgren)

圖 1 — 3　衝擊波壓與拋石基礎寬度之關係(Takahashi, 1983)

圖 1 — 4　直試防波堤與佈置消波塊防波堤波壓比較 (Tanimoto, 1984)

圖 1 — 5　試驗波壓與 Goda 及 Ito 公式計算值比較 (Tanimoto, 1984)

圖 2 — 1　風洞水槽

圖 3 — 1　第一階段試驗防波堤斷面

圖 3 — 2　第二階段試驗防波堤斷面

圖 3 — 3　第二階段試驗波高計及波壓計佈置

圖 4 — 1　第一階段試驗波浪能譜

圖 4 — 2 (a)　波高累積超過率關係(I:入射波，B：堤前波 T:試驗入射波)

圖 4 — 2 (b)　波高累積超過率關係(I:入射波，B：堤前波 T:試驗入射波)

圖 4 — 3 (a)　波壓與堤前波高延時變化

圖 4 — 3 (b)　波壓與堤前波高延時變化

圖 4 — 4　水平總壓力試驗值分佈與計算值比較

圖 4 — 5　水平測點波壓強度累積概率關係

圖 4 — 6　水平總壓力累積概率關係

圖 4 — 7　各試驗情況水平總壓力概率迴歸比較

圖 4 — 8　波壓試驗值與計算值比 p_e/p_c 與 h_c/H_i 之關係

圖 4 — 9　水平總壓力試驗值與計算值比 F_e/F_c 與 h_c/H_i 之關係

圖 4 — 10　試驗值 p/wH 與 H/h 之關係

圖 5 — 1 (a)　波壓及波浪試驗延時變化圖

圖 5 — 1 (b)　波壓及波浪試驗延時變化圖

圖 5 — 1 (c)　波壓及波浪試驗延時變化圖

圖 5 — 1 (d)　波壓及波浪試驗延時變化圖

圖 5 — 1 (e)　波壓及波浪試驗延時變化圖

圖 5 — 1 (f)　波壓及波浪試驗延時變化圖

圖 5 — 2 (a)　波浪及波壓能譜分析圖

圖 5 — 2 (b)　波浪及波壓能譜分析圖

圖 5 — 3 (a)　波高，水面點波壓及斷面平均波壓之累積概率

圖 5 — 3 (b)　波高，水面點波壓及斷面平均波壓之累積概率

圖 5 — 3 (c)　波高，水面點波壓及斷面平均波壓之累積概率

圖 5 — 4　p/wH 與 h/L 之關係

圖 5 — 5　$\overline{p}/wH$ 與 h/L 之關係

圖 5 — 6　p/wH 與 H/h 之關係

圖 5 — 7　$\overline{p}/wH$ 與 H/h 之關係

圖 5 — 8　$p_{1/10}/p_{1/3}$，$p_{max}/p_{1/3}$ 與 h/L_o 之關係

圖 5 — 9　$p_{1/10}/p_{1/3}$，$p_{max}/p_{1/3}$ 與 H/h 之關係

圖 5 — 10　$\overline{p}_{1/10}/\overline{p}_{1/3}$，$\overline{p}_{max}/\overline{p}_{1/3}$ 與 h/L_o 之關係

圖 5 — 11　$\overline{p}_{1/10}/\overline{p}_{1/3}$，$\overline{p}_{max}/\overline{p}_{1/3}$ 與 H/h 之關係

圖 5 — 12　$\overline{p}_{1/10}/\overline{p}_{1/3}$ 與 $H_{1/10}/H_{1/3}$ 之關係

圖 5 — 13　$\overline{p}_{max}/\overline{p}_{1/3}$ 與 $H_{max}/H_{1/3}$ 之關係

圖 5 — 14　F/wd^2 與 H/d 試驗值與 Nagai 計算值比較

圖 5 — 15　F/wd^2 與 H/d 試驗值與 Sainflou 計算值比較

圖 5 — 16 (a)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

圖 5 — 16 (b)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

圖 5 — 16 (c)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

圖 5 — 16 (d)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

圖 5 — 16 (e)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

圖 5 — 16 (f)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

圖 5 — 16 (g)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

圖 5 — 16 (h)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

圖 5 — 16 (i)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

圖 5 — 16 (j)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

圖 5 — 17　p_1 / wH_{max} 與 h / L 之關係

圖 5 — 18　p_2 / p_{max} 與 h / L 之關係

圖 5 — 19　R / H_{max} 與 h / L 之關係

圖 5 — 20　R' / H_{max} 與 h / L 之關係

圖 5 — 21　p'_1 / wH_{max} 與 h / L 之關係

圖 5 — 22　p_2' / p_1' 與 h / L 之關係

圖 5 — 23　p_1' / p_1 與 h / L 之關係

圖 5 — 24　合成式防波堤物理量示意圖

符　號

符　號	說　明
B	拋石堤頂水平寬度
d	拋石堤拋石頂部水深
F_3	發生概率爲 10^{-3} 時之波力
Fg	Goda 公式計算水平總波力
F_n	Nagai 公式計算水平總波力
F_m	Miche—Rundgren 公式計算水平總波力
F_r	模型波力縮尺
F_e	水平總波力試驗值
F_c	水平總波力計算值
$F_{1\%}$、$F_{10\%}$	累積概率 1％及 10 ％水平總壓力
h	拋石堤基水深
hc	水面上堤頂高度
H	波　高
$H_{1/3}$、H_s	示性波高
$H_{1/10}$、H_{10}	最大十分之一波高
H_{max}、H_m	最大波高
$H_{13.6}$	累積概率 13.6 ％之波高
L、L_0	波　長
Lr	模型線性縮尺
P	波　壓
$P_{1/3}$、P_s	最大三分之一波壓
$p_{1/10}$、p_{10}	最大十分之一波壓
p_{max}、P_m	最大波壓
$\overline{P}$	斷面平均波壓
$\overline{p}_{1/3}$、$\overline{p}_s$、p_{sb}	最大三分之一斷面平均波壓
$\overline{p}_{1/10}$、$\overline{p}_{10}$、p_{10b}	最大十分之一斷面平均波壓

$\overline{p}_{max}$、$\overline{p}_m$、p_{mb}	最大斷面平均波壓
P_1	波峯時靜水面最大波壓
P_1'	波谷時最大波壓
P_2	波峯時直立堤拋石基礎頂部波壓
P_2'	波谷時直立堤拋石基礎頂部波壓
P_r	模型波壓縮尺
P_g	Goda 公式波壓力
P_n	Nagai 公式波壓力
P_m	Miche－Rungren 公式波壓力
P_e	波壓試驗值
P_c	波壓計算值
$P_{1\%}$、$P_{10\%}$	累積概率 1 %及 10 %波壓
R	波峯時堤面水位高
R′	波谷時堤面水位高
T_r	模型時間縮尺
T	週　期
T_z	平均週期
W	水之單位體積重量
a_1、a_2、a_3、a_1'、a_2'、a_3'	係　數

波壓試驗研究

一、前言

近年來合成式防波堤經常被應用於水深較大基礎承載力較小之港灣工程上，但合成式防波堤受外海不規則波作用，在堤面上所造成之壓力分佈究竟如何？由於影響因素太複雜，時至今日尚無一可靠之計算方法，1928 年Sainflou根據Gerster 之 橢圓餘擺波理論，加以簡化後提出Sainflou 重複波 波壓計算公式。因其計算簡單曾被廣泛採用，1958 年Rundgren根據試驗結果發現Sainflou 公式應用於波浪尖度（Wave steepness ）較大情況有偏大之趨勢，因此他採用Miche（1944）之較高階理論，並考慮反射係數而提出Miche-Rundgren未碎波波壓計算方法，除考慮反射係數外，此種方法與Sainflou公式相同。日本永井在1968年根據微小振幅波理論及試驗結果提出三種不同之相對水深波壓計算公式，伊藤認爲除示性波浪所造成波壓對防波堤滑動及傾倒安全需加以考慮外，對異常波高所造成之外力亦應加以檢討，因此提出期待滑動量之觀念，並建議採用最大波高計算滑動界限之波壓，使重複波與碎波波壓得以連續。合田（Goda ）根據有系統之波壓試驗及其他實際資料分析研究後提出Goda 波壓計 算公式。1974 年H.Lundgren 利用不規則波研究不同幾何形狀直立堤，以減小其可能產生之衝擊波壓（Shock pressure ），認爲直立式防波堤堤面所受之水平壓力與其發生之累積超過率成半對數直線分佈如圖 1－1。

丹麥水工試驗所（DHI ）Helge 及 Lundgren 研究垂直及傾斜防波堤波力時，考慮波力機率成指數分佈，分析試驗及現場實測波力資料，結果顯示垂直斷面與傾斜斷面所受波壓力相差極大如圖 1－2。圖中F_3 爲發生機率 $P = 10^{-3}$ 時之波力，LSF_3 爲F_3 附近波力對數斜率（Logarithmic Slope around F_3 ）。

日本港灣技術研究所高橋重雄等人（1983 ）研究衝擊波壓力，其結果顯示相同之h/L_0，H/h及堤前海底坡度$\tan\theta$，直立式防波堤所受之平均波壓無因次參數$\overline{p}/wH$，隨直立壁前拋石基礎水平距離無因次參數B/h成

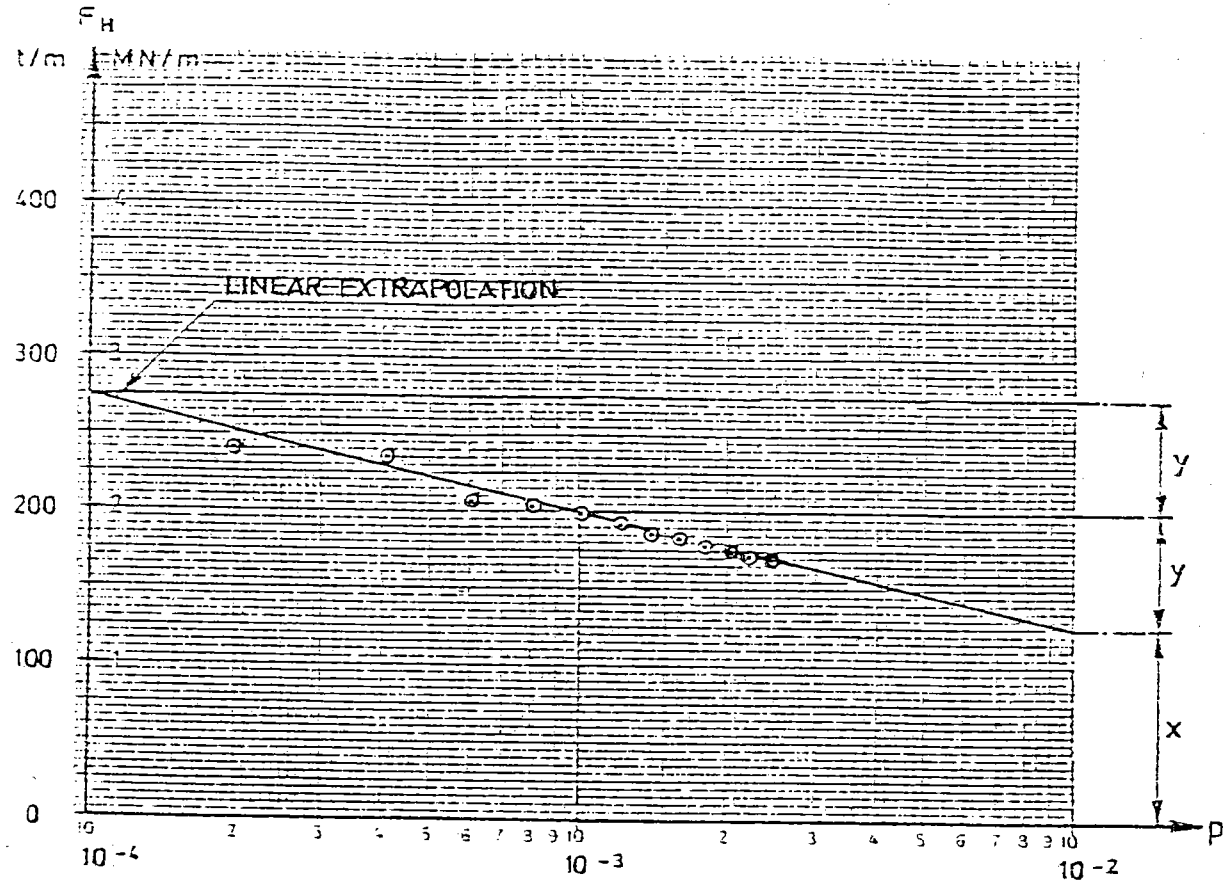


圖 1 — 1　水平衝擊波壓力與累積概率關係 (Lundgren 1974)

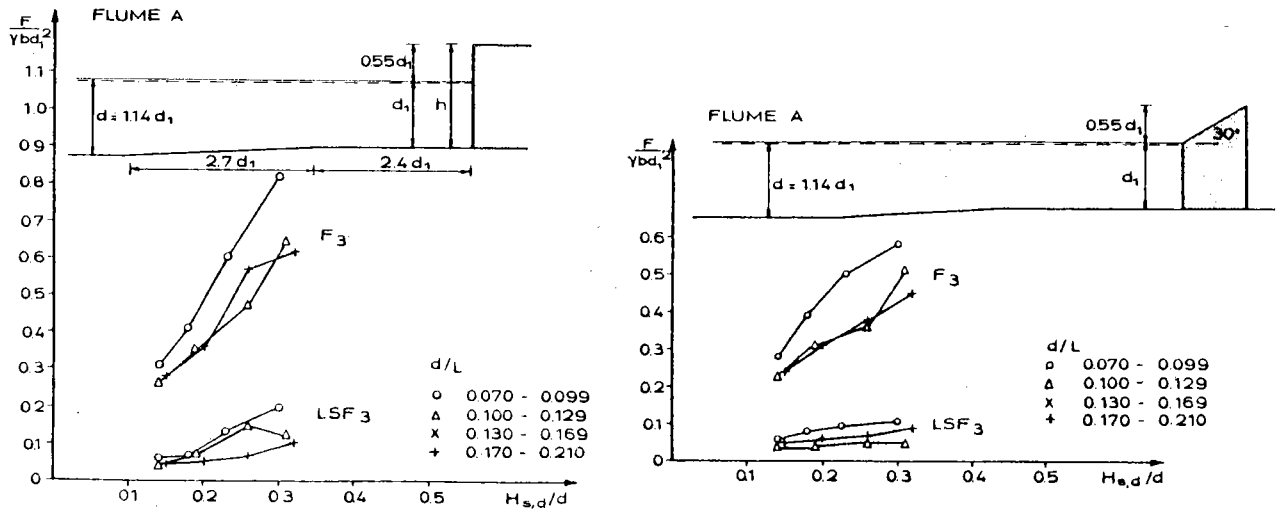


圖 1 — 2　垂直與傾斜斷面波壓力比較 (Lundgren)

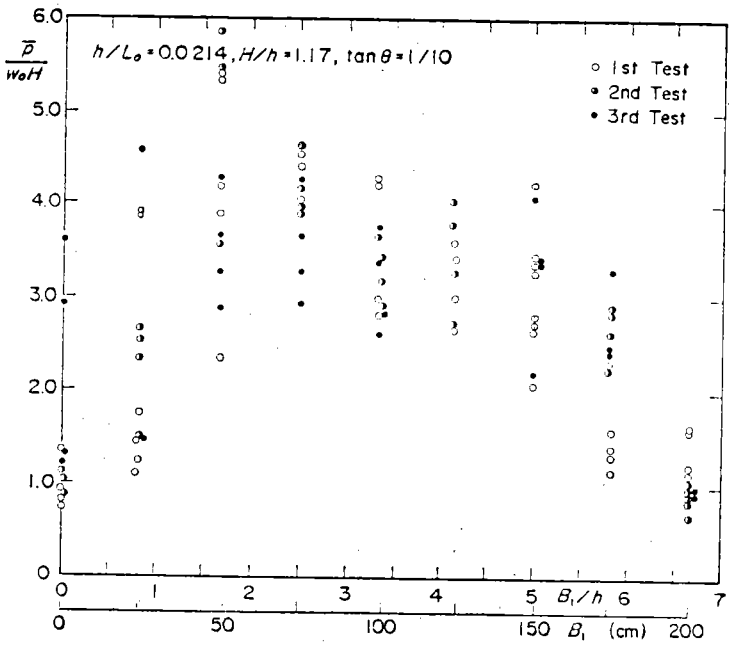
顯著變化如圖 1 — 3 。

谷本勝利等（ 1981 ）研究防止合成式防波堤發生衝擊波壓對策時，所得結果顯示，傳統式沉箱堤所受平均波壓力無因次參數 $\overline{p}$ ／ w H 隨 d ／ h （ h 爲堤基水深，d 爲沉箱放置水深）及 H ／ h 變化可能產生極大之衝擊波壓力。若在堤前佈置消波塊，則可使衝擊波壓力完全消除，如圖 1 — 4 。利用規則波與不規則波試驗結果與 Goda 公式計算值比較比值分別爲 0.4 至 0.9 及 0.7 至 0.9 ，不規則波試驗所獲得結果較爲一致。

谷本勝利等（ 1984 ）辦理直立式防波堤不規則波試驗研究。當 H ／ d 約小於 0.7 時，試驗波壓與 Goda 公式計算值相當一致，如圖 1 — 5 。但當 H ／ d 增加，產生衝擊波壓時，則 Goda 公式計算結果完全不符合試驗值。未碎波所造成之尖峯波壓（ Peak Pressure ）可以波高分佈相對應之最大波高利用 Goda 公式求得；其餘各種機率波壓亦可由波浪分佈中相對應機率之波高計算。但是當碎波發生時，其所產生之波壓遠超出 Goda 公式計算值。

近年來，隨著國內經濟發展，並爲因應世界航運船舶巨型化，專業化及貨櫃化。深水港需要有更深，延伸更長的防波堤保護。防波堤若水深超過 20^m，波力計算大都在重複波範圍，國內所採用之重複波波壓計算公式並不一致，早期大都採用 Sainflou 公式，再以 Ito 期待滑動量加以檢核；後來認爲深水時，可能產生部份碎波，對 Sainflou 公式加以修正 ，水面上、下一個波高採用 Hiroi 碎波波壓，合稱爲部份碎波波壓公式或 Sainflou 波壓修正公式。而 Goda 公式則常被應用於計算最大波浪可能造成之波壓力，以檢核構造物之安全性。

波壓力計算，究竟採用重複波波壓公式或碎波波壓公式，大都決定於防波堤設置水深 h 是否大於或等於 2 倍波高 H 。因此常由於一線之隔使整個斷面波壓力減少 30.% 以上。採用太大波壓力，過份安全，造成浪費；但若設計波壓力太小，則堤防可能被破壞，發生大災難，造成更大的損失。過猶不及實有待更多更可靠之研究，本研究旨在利用試驗了解不規則波作用於合成堤所產生之波壓特性。



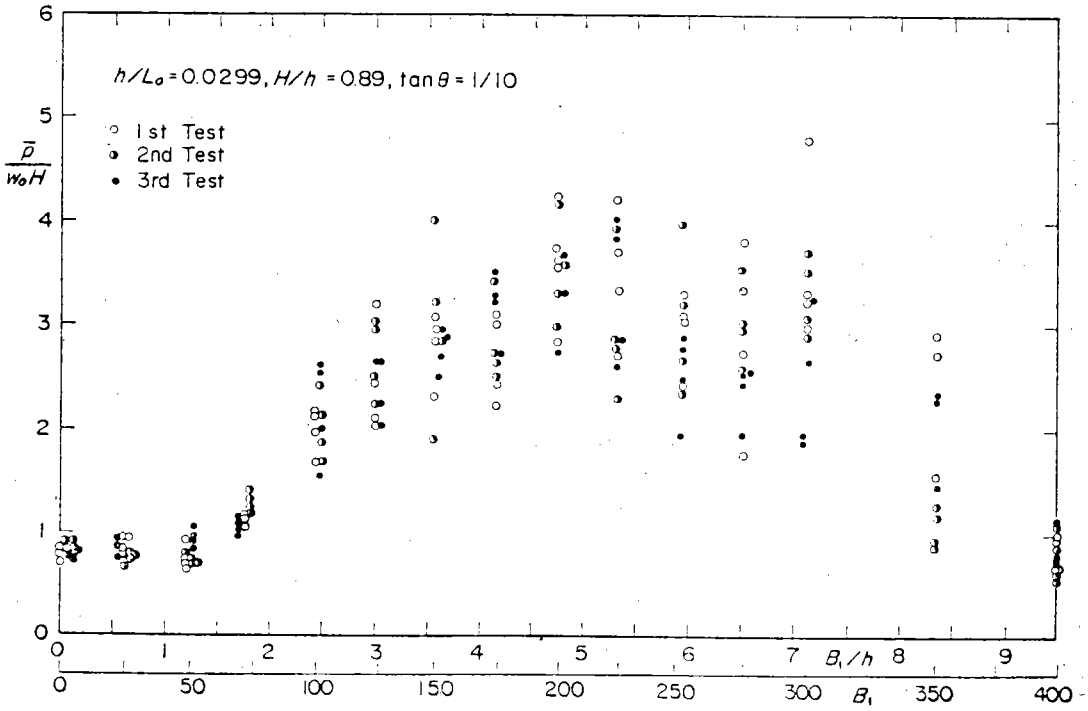


圖 1 － 3　衝擊波壓與拋石基礎寬度之關係 (Takahashi, 1983)

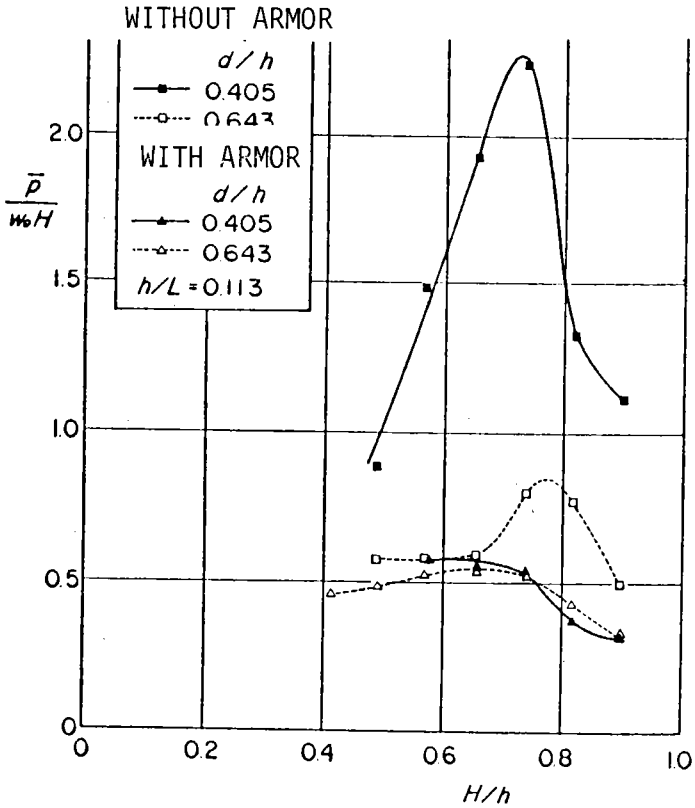


圖 1 － 4　直試防波堤與佈置消波塊防波堤波壓比較

(Tanimoto, 1984)

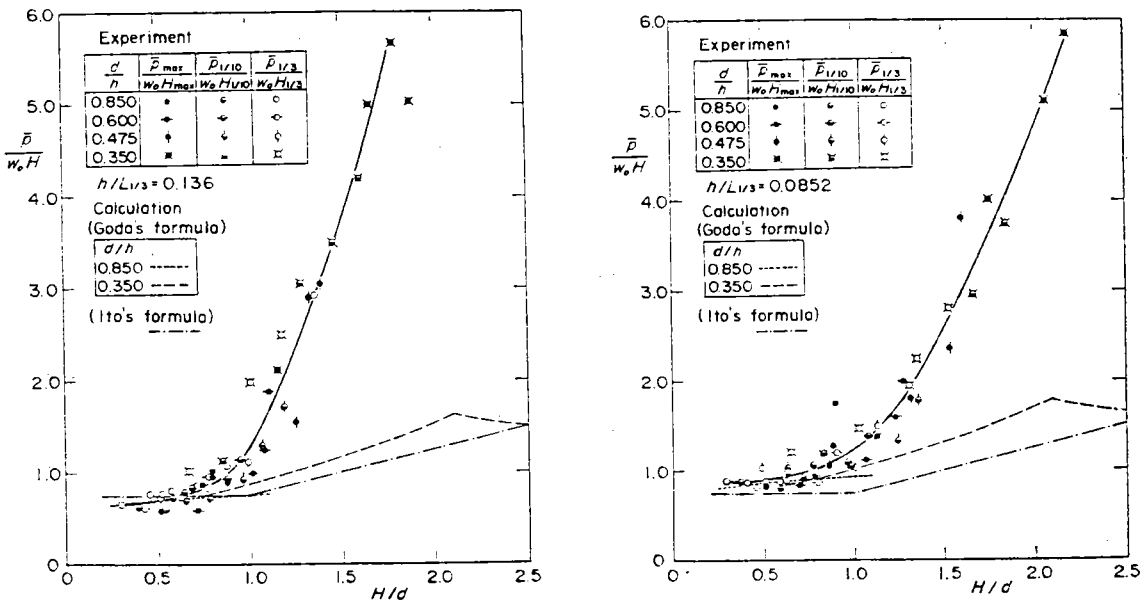


圖 1 － 5　試驗波壓與 Goda 及 Ito 公式計算值比較 (Tanimoto, 1984)

二、試驗設備

本試驗在港灣技術研究所風洞水槽辦理。主要設備爲：

㈠風洞水槽：長 100 公尺，寬 1.5 公尺，高 1.5 公尺，首端安裝鼓風機及不規則波造波機。在距首端 35 公尺及 75 公尺處分別設置長各 15 公尺之玻璃觀測段，以利試驗現象之觀測，如圖 2－1。

㈡鼓風機：裝設於水槽首端，利用 75Hp 馬達帶動變速齒輪，以調節風速，最大風量可達 $30m^3/sec$ 以上，在水深一公尺時，風速可達 20m／sec以上。

㈢不規則波造波機：英國 Armfield 公司出品之 S－26 型油壓式造波機。安裝於水槽首端鼓風機下方，可根據輸入參數製造所需試驗波譜。

㈣資料處理系統（Data Acquisition System）第一階段試驗時所有試驗資料，經由感受器，增幅器後輸出測點物理量之電壓變化，利用類比／數據轉換器（A／D Convertor）掃瞄每隔一定間距之數值資料，並將資料儲存於電腦 Hp—1000 之 CPU，再依實際需要分析處理。

第二階段試驗時，採用八個波壓計，六組波高計。第 1 至第 8 頻道爲波壓計，第 9 至14 頻道爲波高計。試驗資料改用個人電腦加 A／D 轉換介面紀錄，取樣速度爲 $200H_z$ 同時錄取 14 頻道波壓及波浪資料，儲存於磁碟上。資料處理時，經由個人電腦傳入 VAX—780 電腦再作必要之分析。

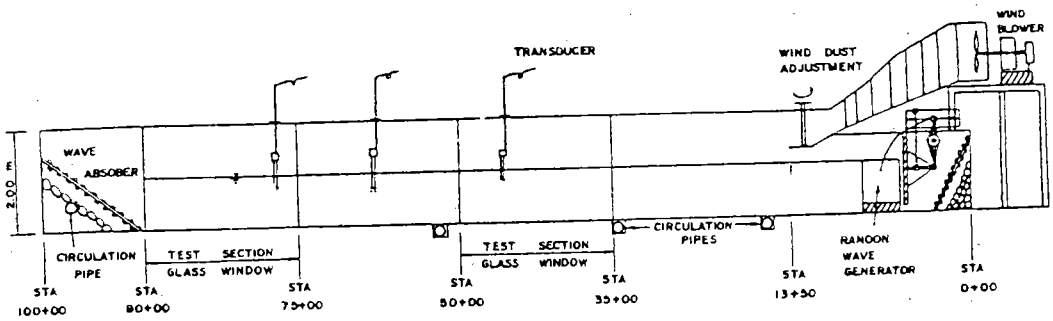
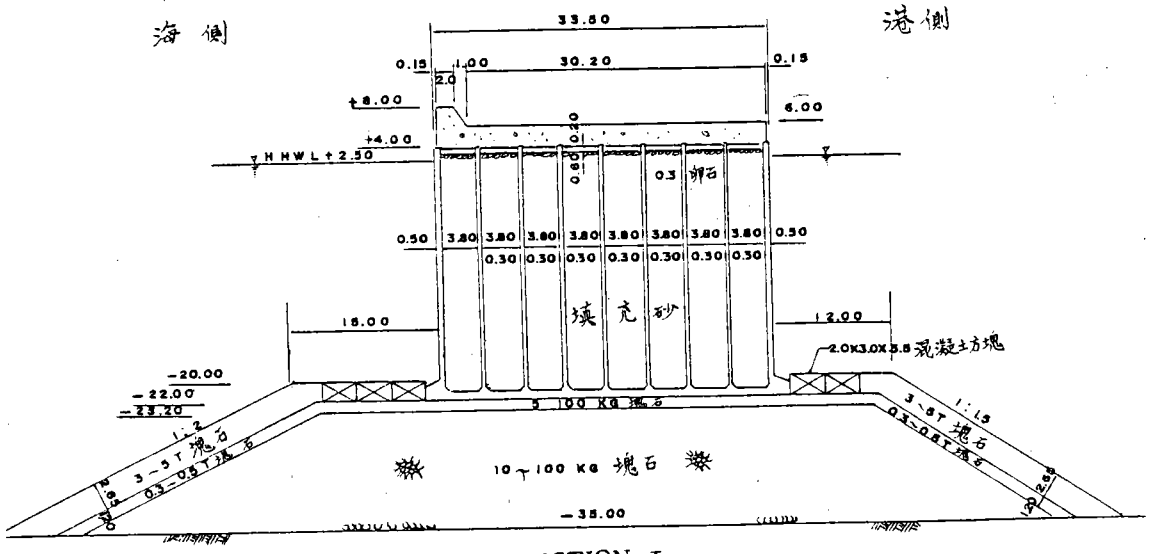
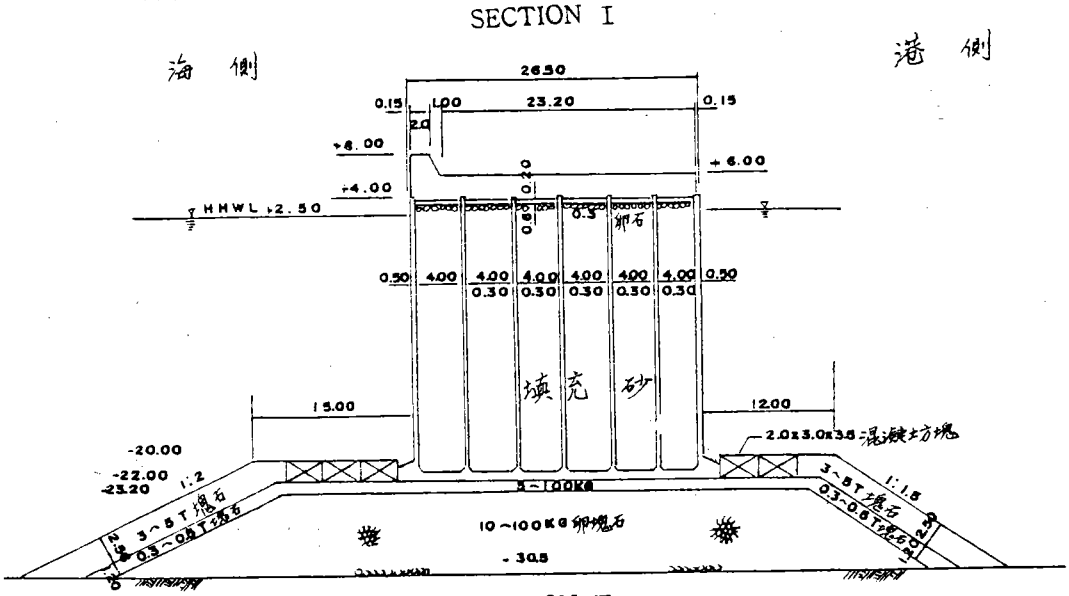


圖 2 — 1　風洞水槽



SECTION I



SECTION II

圖 3 — 1　第一階段試驗防波堤斷面

三、試驗條件

㈠模型縮尺

本試驗主要外力爲重力，依據福得模型律（Froude Model Law）製作模型。兩階段試驗所採用之模型縮尺分別爲：

第一階段：　$L_r=1/49$，$T_r=1/7$，$p_r=1/49$，$F_r=1/49^3$

第二階段：　$L_r=1/25$，$T_r=1/5$，$p_r=1/25$，$F_r=1/25^3$

㈡試驗模型

第一階段試驗斷面如圖3－1，拋石基礎及直立部份之沉箱尺寸均按1/49模型縮尺比例製作。沉箱內部按重量，重心塡沙及鐵塊。堤基前海底坡度1：30製作，試驗水位採用高水位＋2.50^m。波壓計分別安裝於水位＋8.0＋2.5及－4.0^{m}處，波高計佈置於堤前50^m，4^{m}及堤後2^{m}處。

第二階段試驗斷面如圖3－2，模型上合成堤拋石高度爲18cm，海側坡度1:3，港側1:2，海底坡度爲1：30。本階段試驗採用三種堤前水深，分別爲73、61及49cm，波高計及波壓計佈置如圖3－3。

㈢試驗波浪

第一階段兩種斷面，試驗波浪爲

斷　面	編號	波高（cm）	週期(sec)	備　註
I	C1～C5	16 －28	1.7－1.9	週期爲示性週期$T_{1/3}$
II	C6～C9	19 －34	1.7－1.9	

第二階段一種斷面三種試驗水位，試驗波浪爲

水　位	沉箱放置水深d（cm）	堤前水深h（cm）	造波機水深（cm）	波　高（cm）	週　期（sec）
高水位	55	73	100	2.51－18.30	1.25－2.81
中水位	43	61	88	1.75－18.6	1.22－1.96
低水位	31	49	76	4.86－15.33	1.18－1.88

註：週期爲平均週期

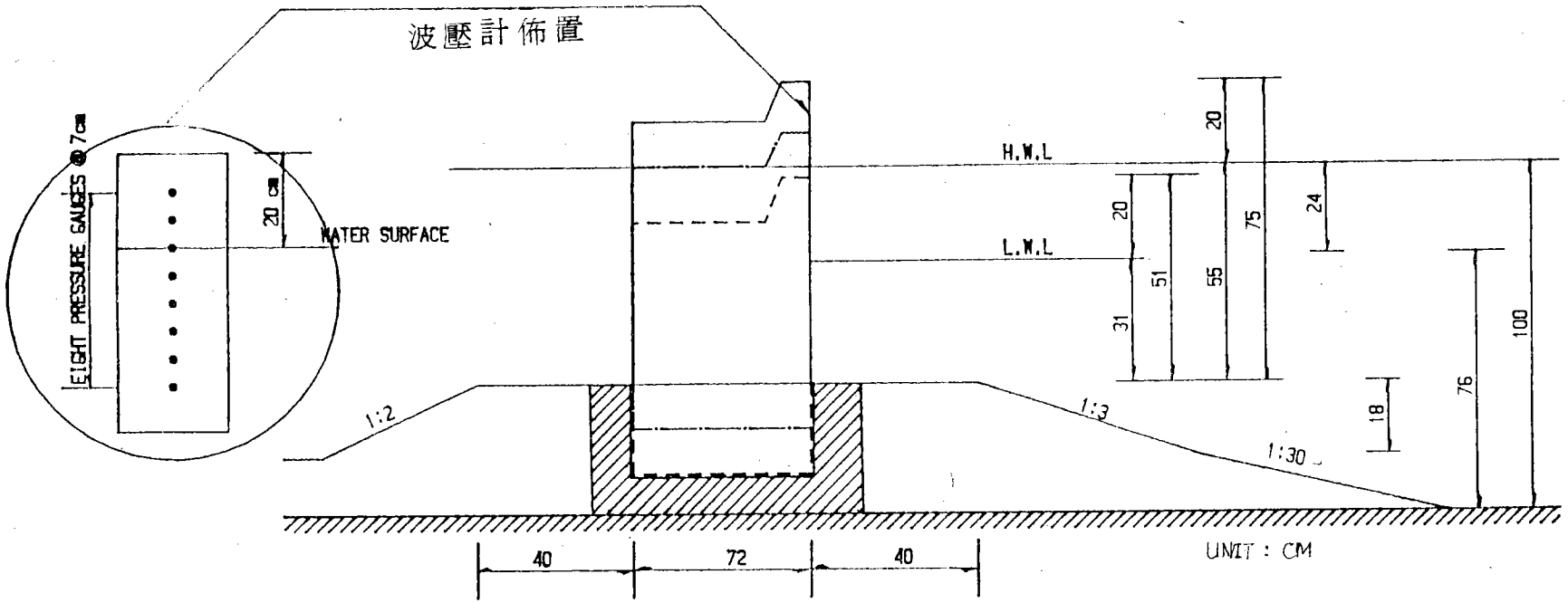


圖 3 － 2　第二階段試驗防波堤斷面

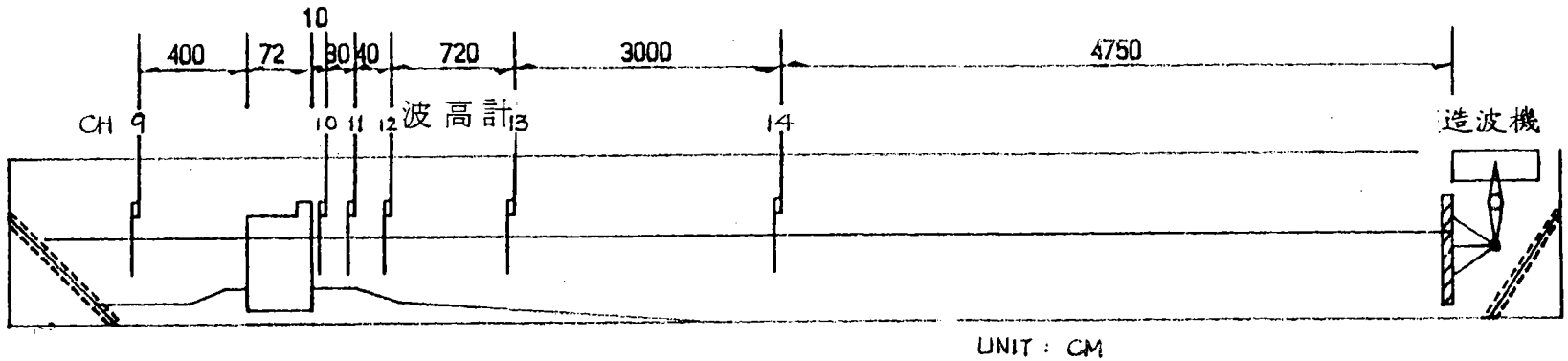


圖 3 － 3　第二階段試驗波高計及波壓計佈置

四、第一階段試驗結果

㈠波浪

波浪量測係由波高計感應水位變化，經由A／D轉換器，每隔0.1秒掃瞄一次，取得試驗過程水位變化，再利用程式分析逐時波高，週期與波譜。各種試驗情況入射波浪波譜如圖4－1。入射波、堤前波與波壓試驗時之堤前波高累積超過率及波高理萊分佈(Rayleigh Distribution)曲線如圖4－2；圖中顯示入射波較堤前波更能符合理萊分佈。以累積超過率p = 13.6 % 代表示性波高(Significant Wave Height)H_s 。試驗前率定約100個波所求得之入射波高$(H_s)_i$；及堤前波高$(H_s)_B$ 。但波壓試驗時，因僅測取其中30 個堤前波，具示性波高爲$(H_s)_{BT}$ 。因此試驗入射波高需按率定與試驗時堤前波高比例關係修正。各種試驗情況示性波高如表4－1。

㈡傳遞波浪

各種試驗情況，試驗結果歸納如表4－2。第Ⅰ斷面除C－1外，C－2至C－5均發生較大之越波；波浪傳遞係數在0.23與0.279之間。第Ⅱ斷面越波量均甚小，C－9試驗情況因在堤前產生部份碎波，越波量更小。波高傳遞係數除C－9外，在0.133與0.143之間。第Ⅰ斷面波高傳遞係數有隨相對堤頂高度(h_o/H_i)增加而減小之趨勢。

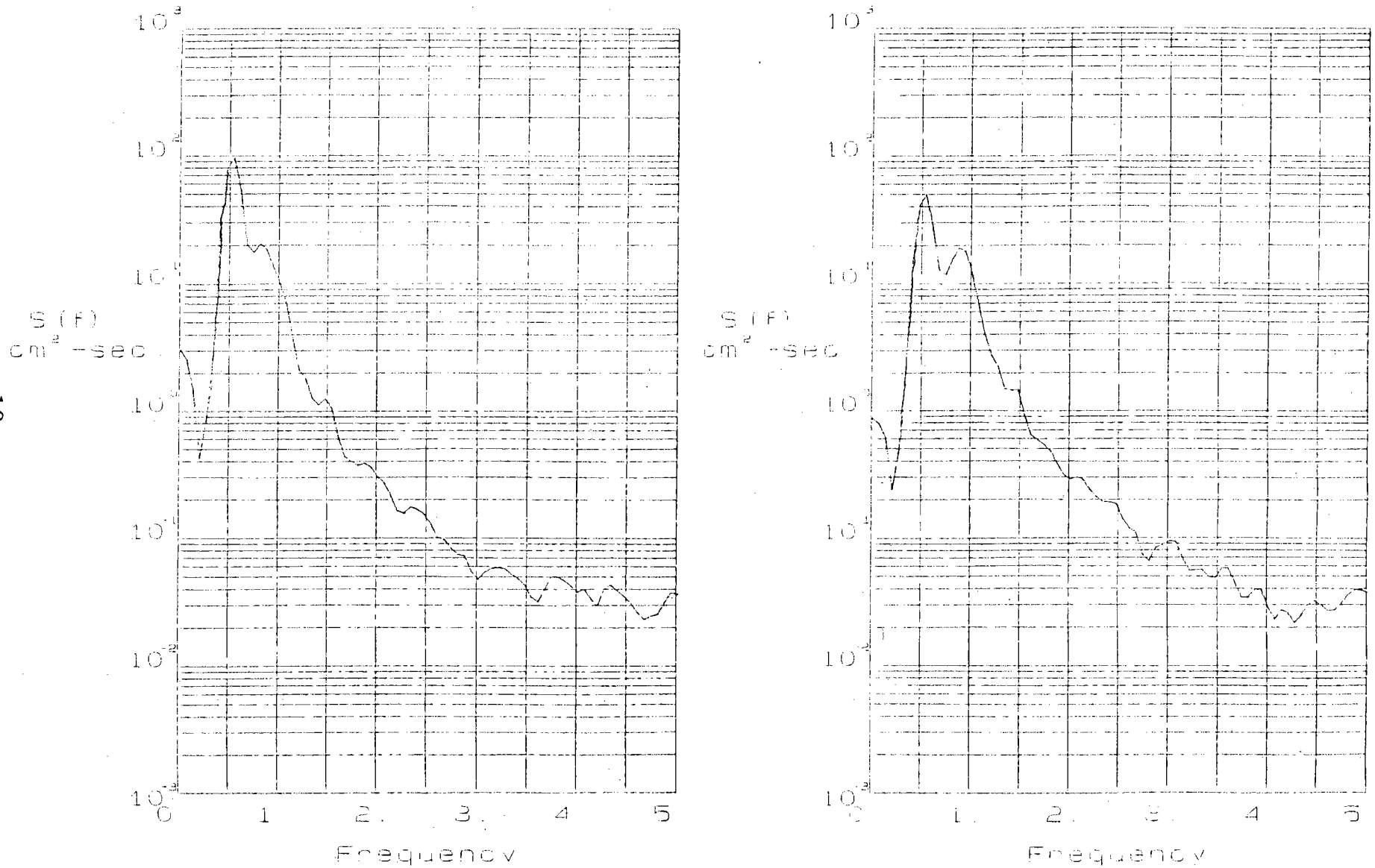


圖 4 － 1　第一階段試驗波浪能譜

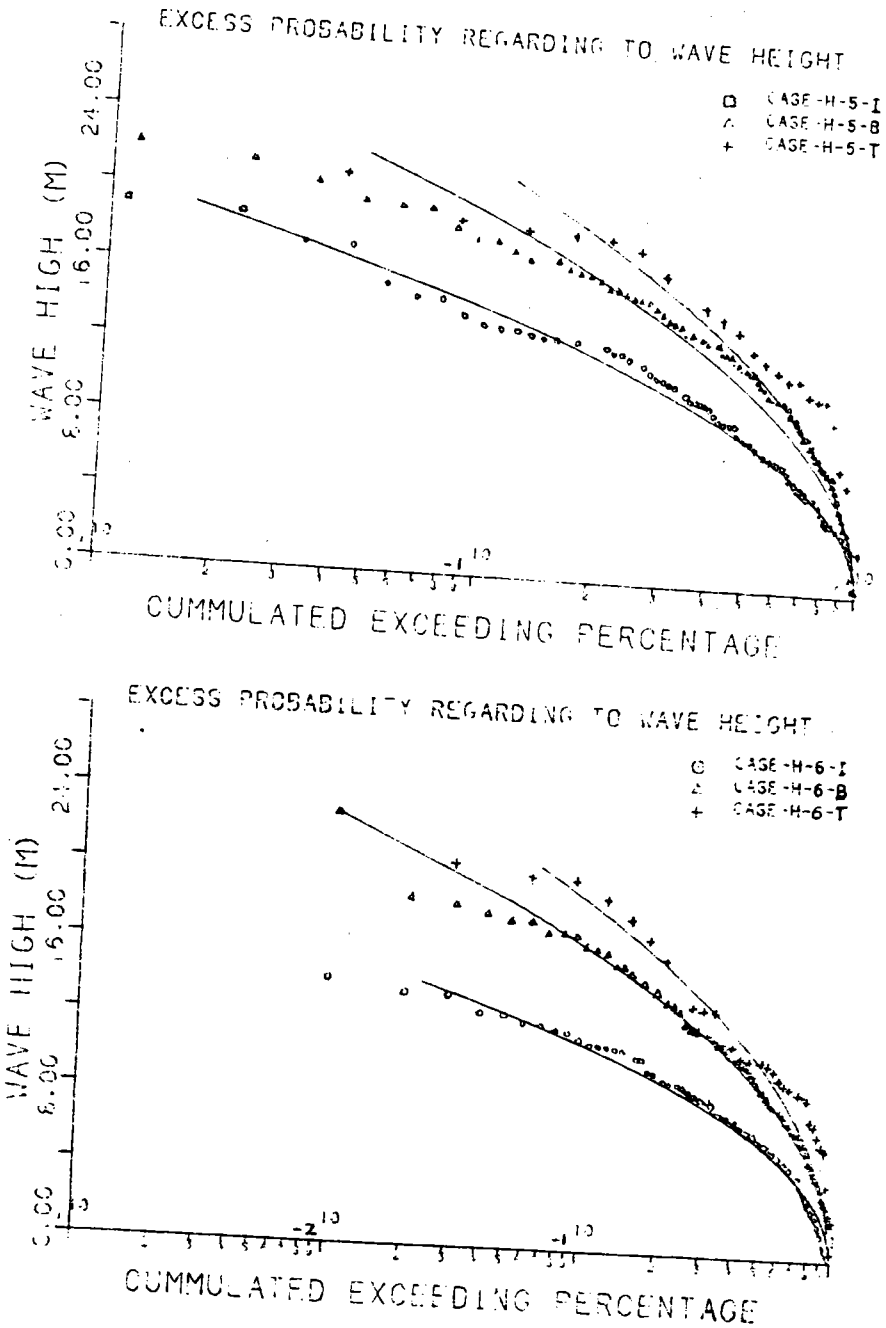
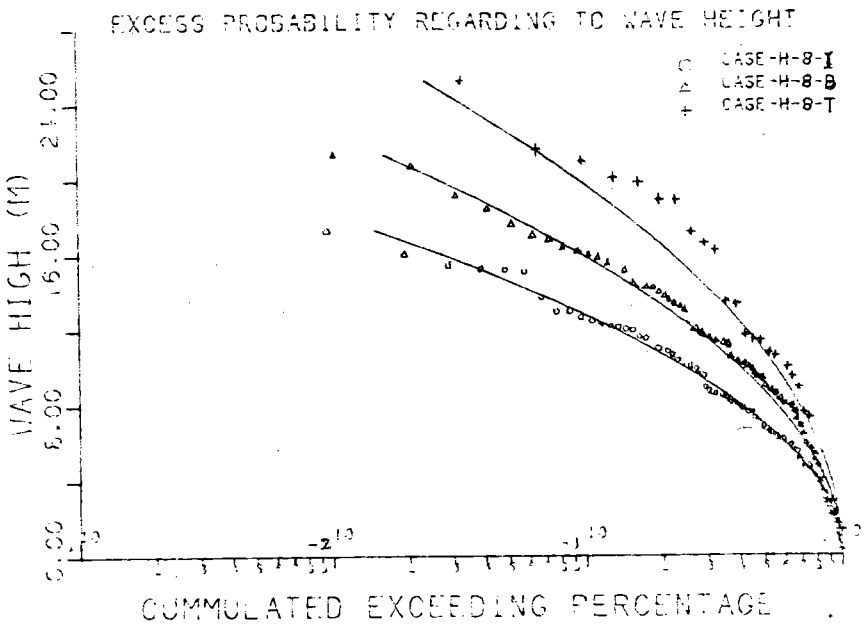


圖 4 — 2 (a)　波高累積超過率關係（I：入射波，B：堤前波 T:試驗入射波）



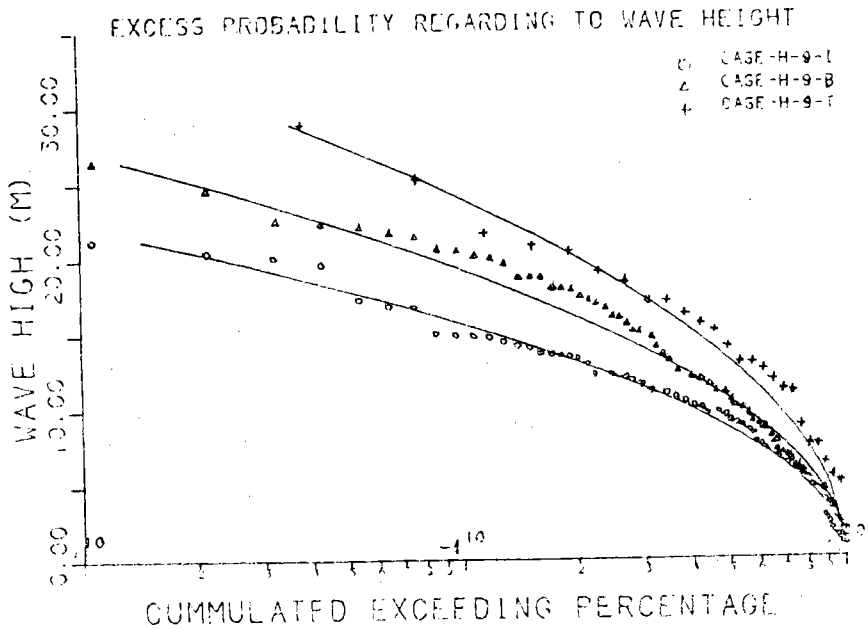


圖 4 － 2 (b)　波高累積超過率關係（I: 入射波，B：堤前波 T:試驗入射波）

表4－1　各種試驗情況波高

斷面編號	試驗編號	週期 (sec)	波壓試驗前率定值		波壓試驗	波壓試驗入射波高	
			入射波高 $(H_S)_I$ (m)	堤前波高 $(H_S)_B$ (m)	堤前波高 $(H_S)_{BT}$ (m)	修正值 $(H_S')_I=\frac{(H_S)_B}{(H_S)_{BT}}\times(H_S)_I$(m)	推算深水波高 $(H_S')_{I0}$ * (m)
I	C-1	11.97	9.30	12.85	11.82	8.55	7.81
	C-2	13.09	10.47	13.41	14.85	11.59	10.60
	C-3	13.16	10.99	15.25	17.16	12.37	11.32
	C-4	13.16	11.57	16.72	18.40	12.73	11.65
	C-5	13.51	13.24	17.83	20.14	14.96	13.71
II	C-6	11.55	10.14	15.03	17.28	11.66	10.65
	C-7	11.69	9.42	14.36	15.47	10.15	9.27
	C-8	12.88	11.91	14.81	18.39	14.79	13.57
	C-9	13.16	14.59	17.90	22.32	18.19	16.73

*推算深水波高 $(H_S')_{I0}$= 修正入射波 $(H_S')_I$ ／淺化係數 Ks

表 4 － 2　各種情況試驗結果

斷面編號	試驗編號	波浪條件		傳遞波波高 (m)	概述
		波高 (m)	週期 (sec)		
I	C-1	9.30	11.97	1.90	護基塊石安定，僅產生少量越波
	C-2	10.47	13.09	2.45	護基塊石少量滑落，傳遞波增大
	C-3	10.99	13.16	2.90	護基塊石滑落，產生大量越波
	C-4	11.57	13.16	3.25	— 〃 —
	C-5	13.24	13.51	3.55	— 〃 —
II	C-6	10.14	11.55	1.45	護基塊石安定，越波量甚少
	C-7	9.42	11.69	1.25	護基塊石安定，越波量甚少
	C-8	11.91	12.88	1.70	護基塊石少量滑動，少量越波
	C-9	14.59	13.16	0.80	護基塊石少量滑動堤前部份碎波越波量甚少

㈢波壓力

1.不規則波試驗波壓力特性

入射波在堤面所產生之波壓變化，由波壓感受器感應後，經增幅器輸出電壓類比信號，再由A／D轉換器每隔0.03 秒掃瞄一次，取得波壓變化之數據值，本試驗所採用之增幅器放大倍數太小，且A／D轉換器能存記之最小電壓爲 5^{mv}；使得測試波壓成階段變化。每階段間隔爲原型波壓1.2 ton/m^2。若取其中值分析，則所造成誤差應小於0.6 ton/m^2。

波壓試驗所測得之波壓強度與堤前波高延時變化如圖4－3。由堤前波高與波壓延時變化資料顯示波高雖未達碎波條件，因受群波反射影響，亦可能產生極大之衝擊波壓(Shock Pressure)。波壓決定於入射波與反射波組合，最大之入射波高並不一定造成最大波壓，而幾個較大之入射波與其反射波組合可能產生最大波壓。因此堤面波壓不能決定於不規則波群中之單一入射波高。試驗過程中，即使採用相同之不規則波，由於相位稍有差別，使堤面波壓絕無重現機會。

2. 試驗波壓強度分佈

水面及其上下三個波壓測點，所量測之壓力強度若每一試驗情況取其中三個最大波壓與利用三種波壓公式計算值比較顯示，除衝擊波壓外，水深較大之第Ⅰ斷面試驗值與計算值相當吻合。但水深較淺時，雖水面測點試驗波壓尚能符合計算結果，但水面上(EL＝＋8.0^m)及水面下(EL＝－4.0^m)兩點之試驗波壓有急遽減小之趨勢，對應之波壓計算值偏大。

兩種不同斷面，靜水位附近(高程自－4.0^{m}至＋8.0^m)水平總壓力試驗值分佈如圖4－4。除C－5及C－6試驗造成較大衝擊波壓外，計算所得波壓力大都能涵蓋試驗值。

3. 試驗波壓累積概率分佈

水面測點試驗所得波壓力強度累積概率關係如圖4－5。靜水位附近水平總壓力與累積概率關係如圖4－6。不規則波作用下，直立堤堤面上所受之波壓力成均勻分佈(Uniform Distribution)；即波壓力與累積概率成直線關係。第一階段兩種試驗斷面靜水位附近試驗所得水平總壓力累積概率一次迴歸線比較如圖4－7。顯然的，相同之防波堤斷面波壓力隨入射波浪增高，而加大。

4. 波壓試驗值與計算值之比較

波壓試驗值累積概率成線性分佈，利用迴歸所得直線中，分別取超過率p＝1％及10％求得對應水面波壓強度試驗值p_e，分別為$p_{1\%}$及$p_{10\%}$。波壓計算方法採用Goda, Nagai及Miche—

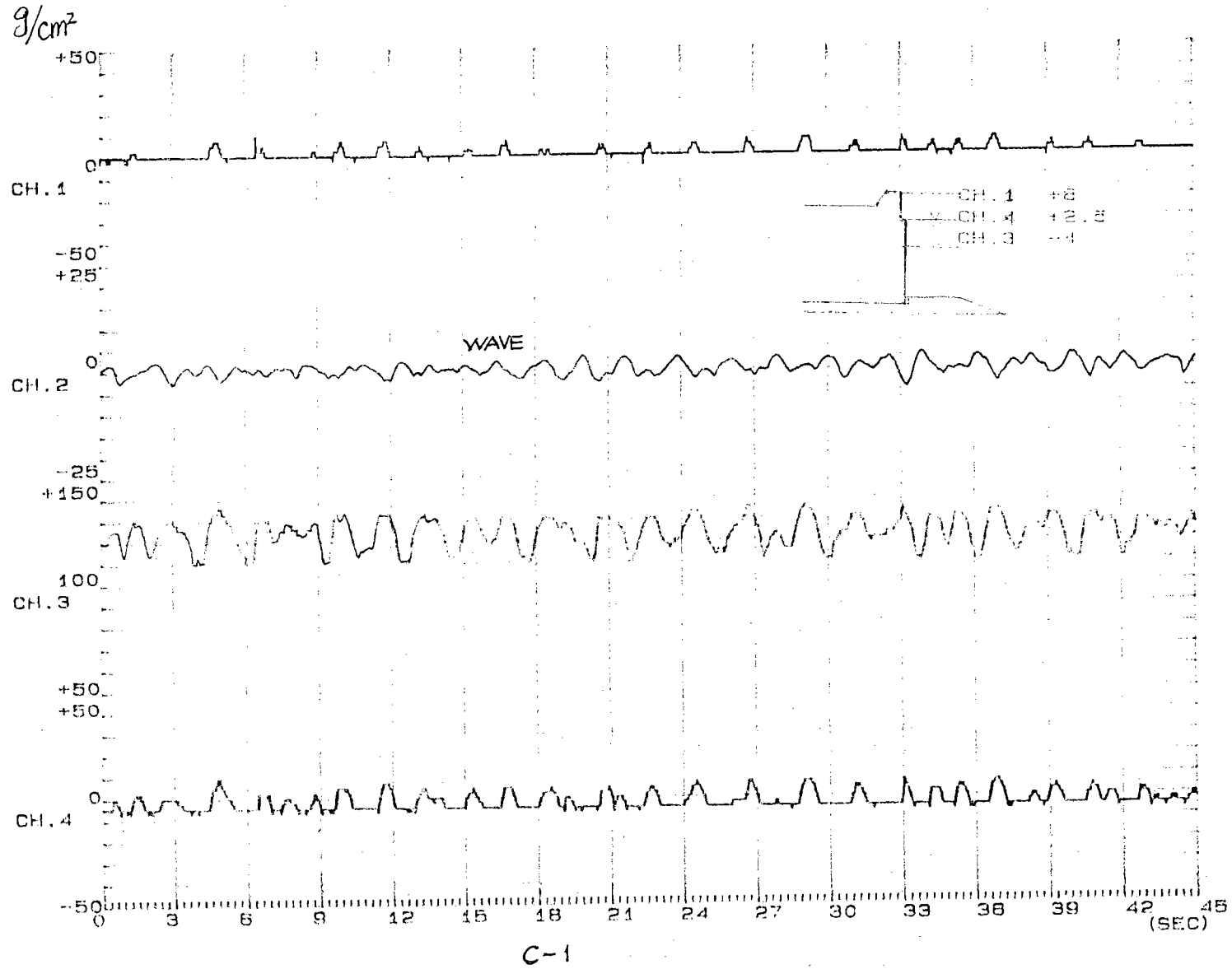


圖 4 — 3 (a)　波壓與堤前波高延時變化

圖 4 — 3 (b)　波壓與提前波高延時變化

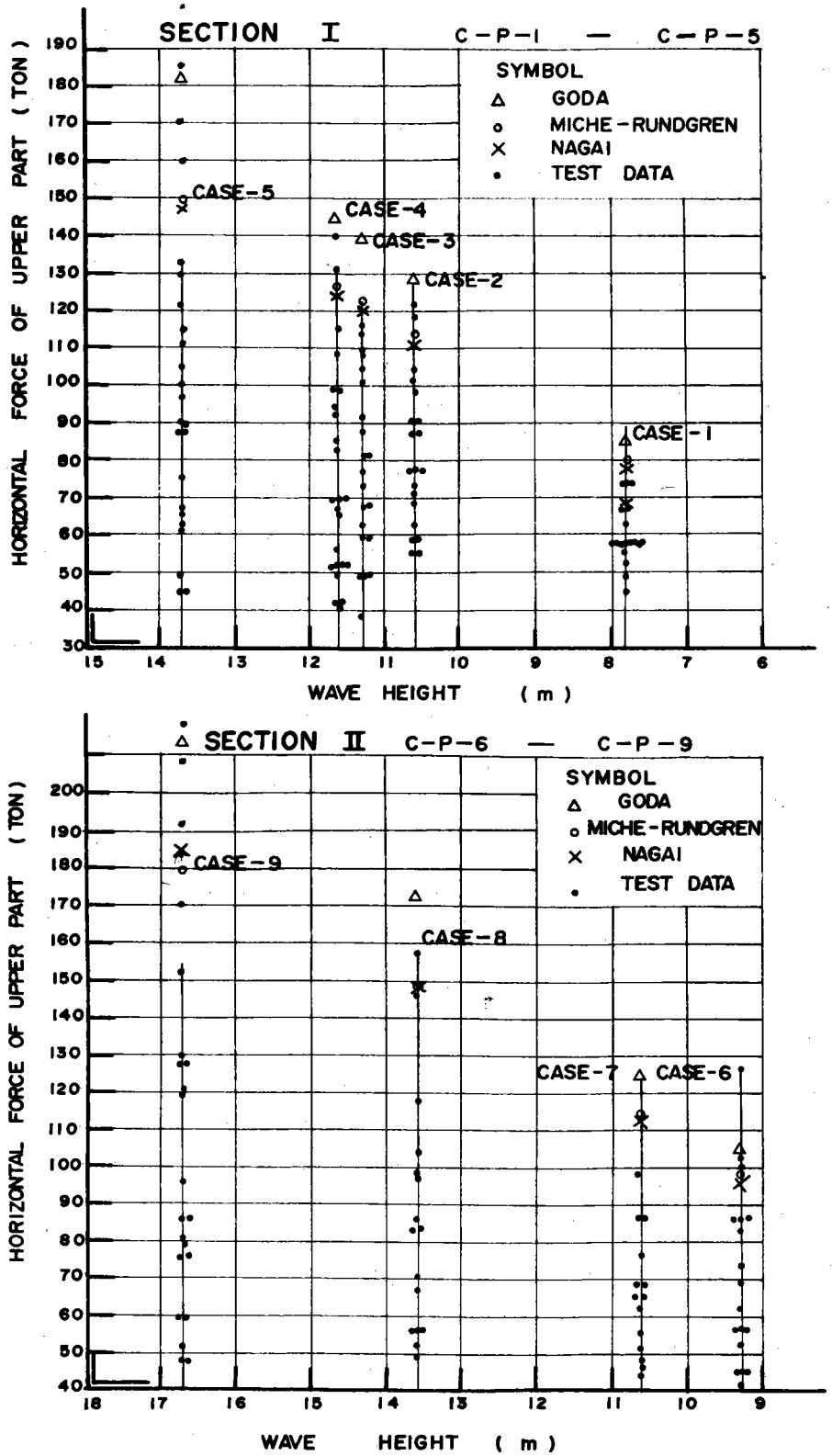


圖 4 — 4　水平總壓力試驗值分佈與計算值比較

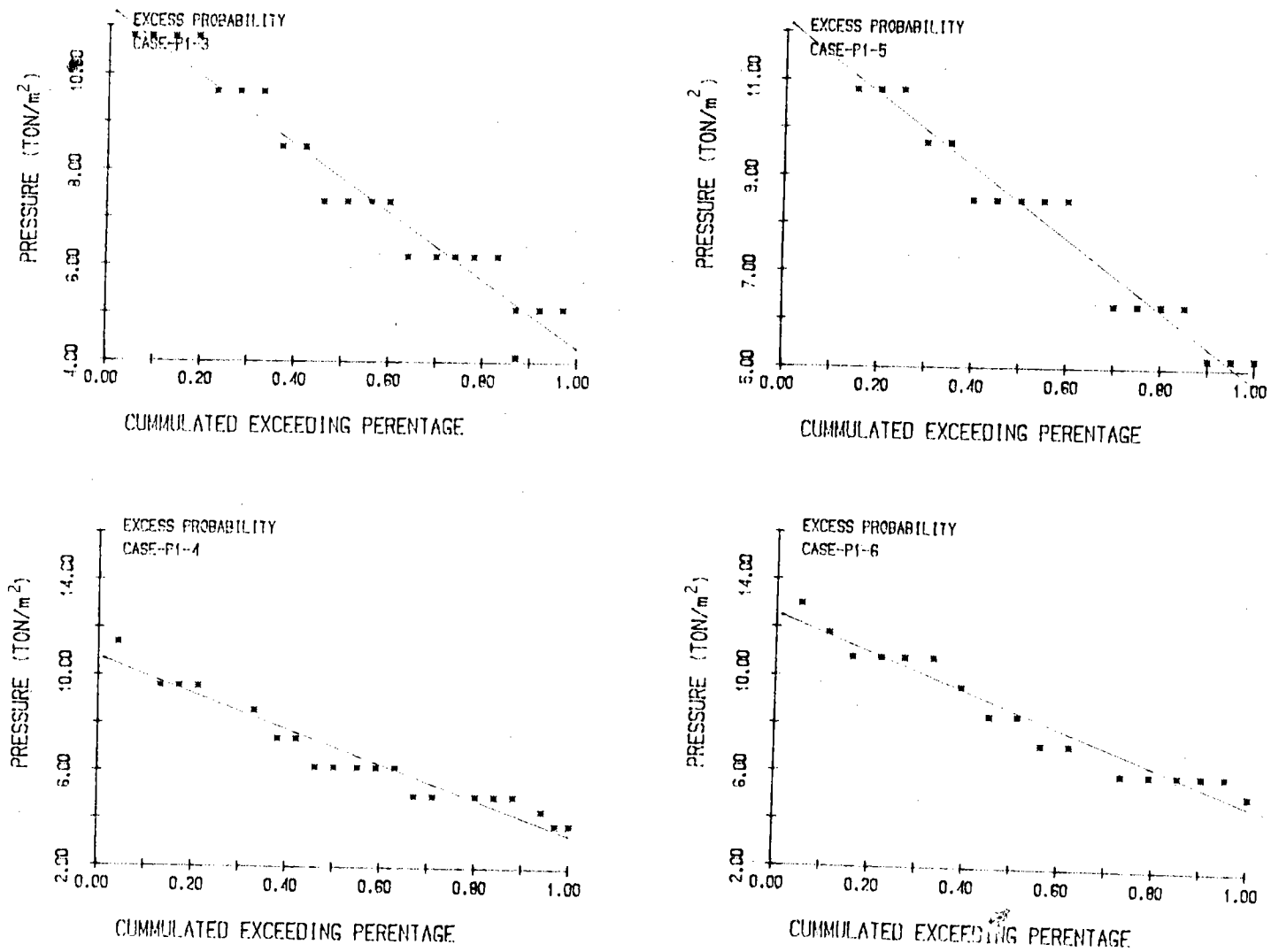


圖 4 — 5　水平測點波壓強度累積概率關係

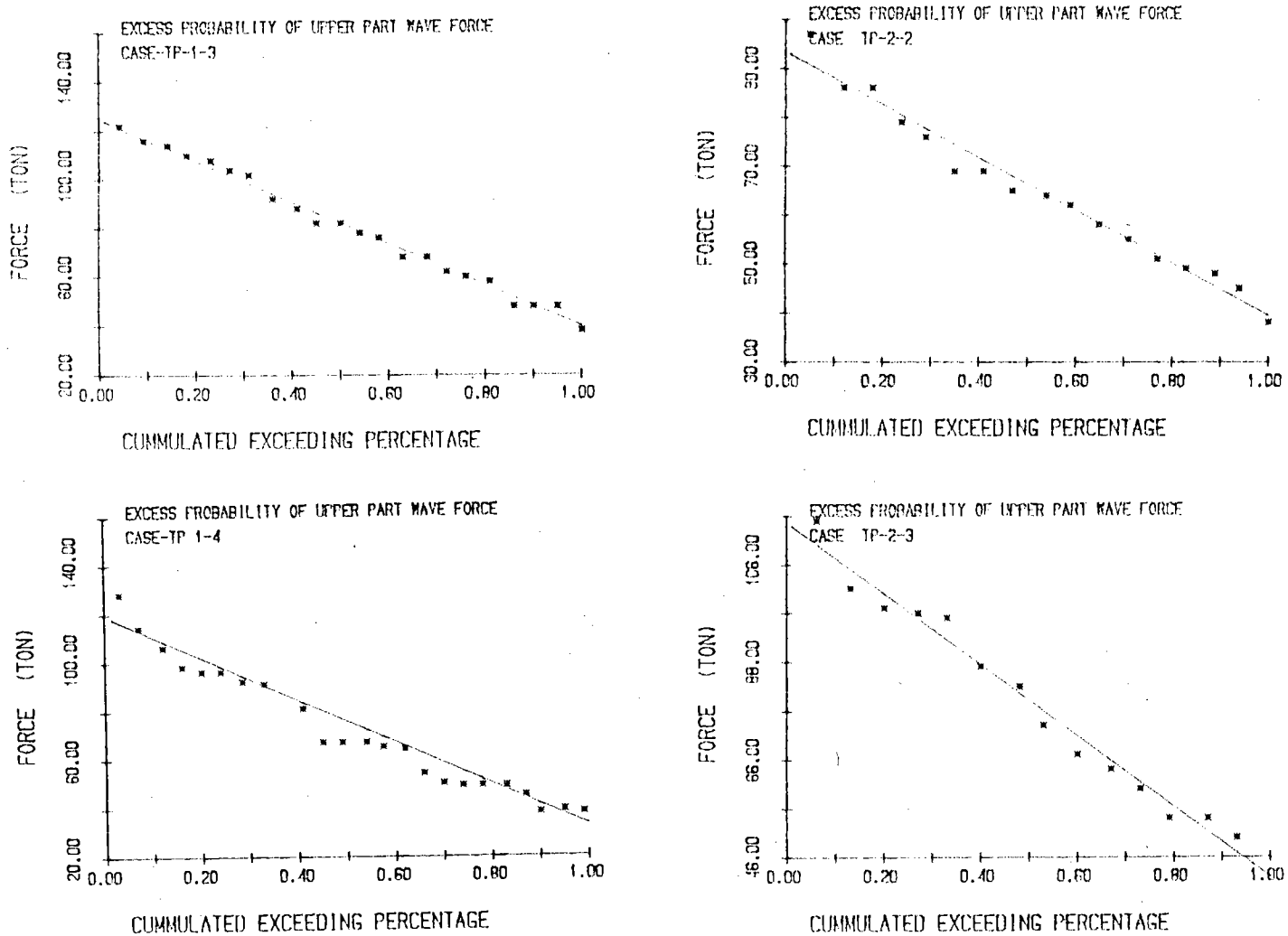
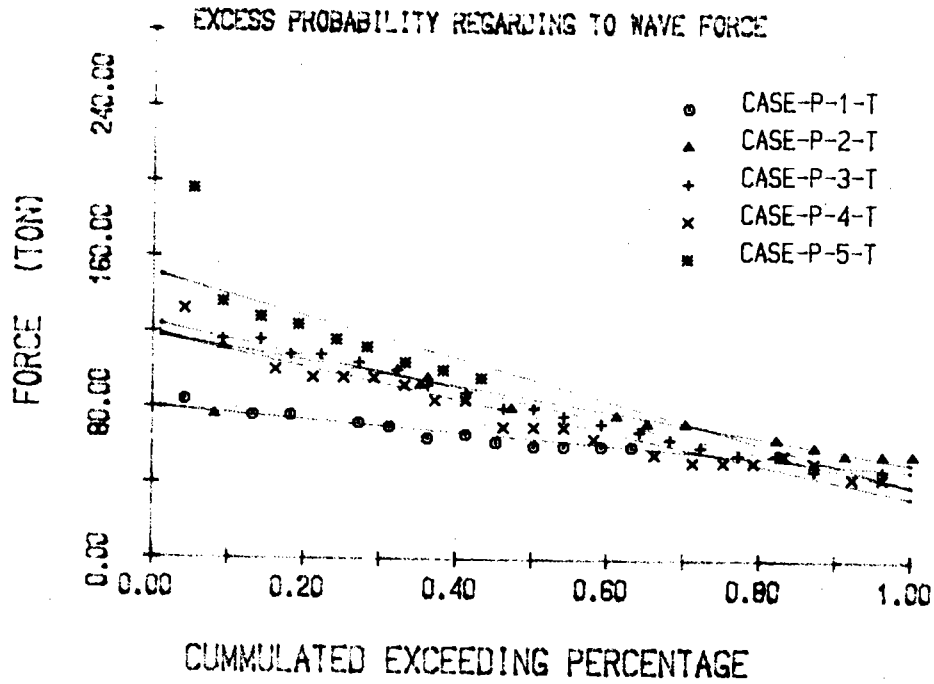


圖 4 － 6　水平總壓力累積概率關係



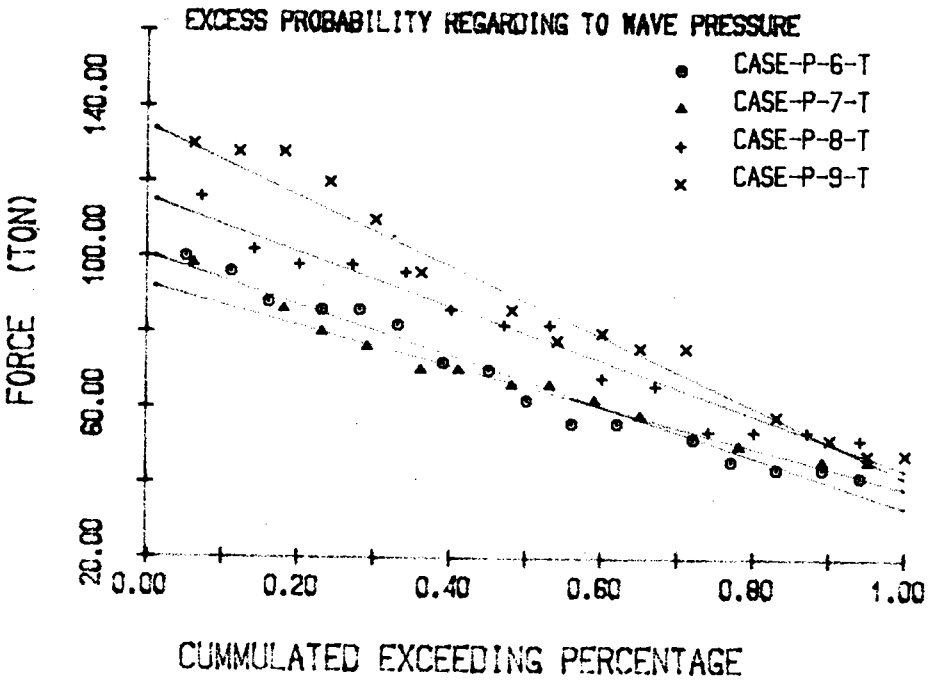


圖 4 － 7　各試驗情況水平總壓力概率迴歸比較

Rundgren 三種計算所得波壓分別爲 p_g，p_n 及 p_m。Goda 公式採用最大波高計算波壓，因此試驗值選用 $p_{1\%}$ 比較，其餘兩種方法則以 $p_{10\%}$ 比較，其比值分別爲 $p_{1\%}/p_g$，$p_{10\%}/p_n$ 及 $p_{10\%}/p_m$，計算結果如表 4－3。分析試驗波壓與計算波壓比值顯示，靜水面試驗波壓隨越波量增加而減小。此種現象在所有波壓計算公式均未予考慮。靜水面以上堤頂高度 h_c 與入射波高 H_1 之比值 h_c/H_1 可視爲越波指標。水面測點波壓試驗值與計算值之比（p_e/p_c）與 h_c/H_1 之關係如圖 4－8。水面測點之 p_e/p_c 值隨相對堤頂高度 h_c/H_1 減低而減小。第Ⅰ斷面 p_e/p_c 均小於 1.0；而第Ⅱ斷面除 C－9 外均大於 1.0。兩種斷面相同，只有試驗水深不同，所得 p_e/p_c 值却有顯著差異。

靜水位附近（EL＝－4.0^m 至＋8.0^m）水平總壓力試驗值 F_e 線性迴歸取累積概率 p=1％及10％之水平總壓力分別爲 $F_{1\%}$ 及 $F_{10\%}$，與 Goda，Nagai及 Miche-Rundgren等三公式計算所得水平總壓力 F_g，F_n 及 F_m 之比值爲 $F_{1\%}/F_g$，$F_{10\%}/F_n$ 及 $F_{10\%}/F_m$。試驗與計算水平總壓力比值（F_e/F_c）與相對堤頂高度（h_c/H_1）之關係如圖 4－9，除第Ⅱ斷面 C－8 及 C－9 兩試驗情況外，其餘各試驗條件水平總壓力試驗值與計算值之比（F_e/F_c）均介於 0.8 與 1.0 之間。此種結果顯示深水防波堤受不規則波作用時，雖可能產生較大之衝擊波壓，但其水平總壓力利用線性迴歸後，與計算值尚能符合。

靜水位波壓力無因次參數 $p_{10\%}/wH_{1/3}$ 與 $H_{1/3}/h$ 之關係如圖 4－10。$p_{10\%}/wH_{1/3}$ 隨 $H_{1/3}/h$ 增加而略爲減小而且第Ⅰ斷面較第Ⅱ斷面偏低。推究其原因主要係 H／h 增加時，越波量隨之增大，靜水位測點波壓因而有減小之趨勢。$p_{1/10}/wH_{1/3}$ 之值介於 0.9 與 1.1 之間，如採用 $p_{1/3}/wH_{1/3}$ 則其值將在 0.9 以下。

表 4 − 3　試驗波壓力與計算波波力比較

SECTION	CASE No.	WATER SURFACE PRESSURE (TON/m²)								TOTAL FORCE OF UPPER PART(TON)								$\frac{hc}{Hi}$
		EXPERIMENT p_e		Computed p_c			p_e/p_c			EXPERIMENT Fe		Computed Fc			Fe/Fc			
		$p_{1\%}$	$p_{10\%}$	p_g	p_n	p_m	$p_{1\%}/p_g$	$p_{10\%}/p_n$	$p_{10\%}/p_m$	$F_{1\%}$	$F_{10\%}$	F_g	F_n	F_m	$F_{1\%}/F_g$	$F_{10\%}/F_n$	$F_{10\%}/F_m$	
I	C - 1	7.9	7.6	8.06	7.81	8.00	0.98	0.97	0.95	80	76	86.5	78.2	80.3	0.92	0.97	0.95	0.70
	C - 2	10.4	9.9	11.65	10.60	10.80	0.89	0.93	0.92	118	110	127.7	111.6	114.1	0.92	0.99	0.96	0.52
	C - 3	11.5	10.7	12.65	11.32	11.49	0.91	0.95	0.93	125	116	139.2	120.1	122.3	0.90	0.97	0.95	0.49
	C - 4	10.8	10.0	13.12	11.65	11.79	0.82	0.86	0.85	119	110	144.6	124.1	126.0	0.82	0.89	0.87	0.47
	C - 5	12.4	11.5	16.35	13.71	13.69	0.76	0.84	0.84	152	140	181.7	148.8	148.9	0.84	0.94	0.94	0.40
II	C - 6	12.5	11.8	11.42	10.65	10.77	1.09	1.11	1.10	101	94	124.3	112.2	113.5	0.81	0.84	0.83	0.52
	C - 7	11.4	10.8	9.70	9.27	9.47	1.18	1.17	1.14	94	88	104.7	95.7	97.9	0.90	0.92	0.90	0.59
	C - 8	15.5	14.6	15.67	13.57	13.56	0.99	1.08	1.08	117	109	173.2	147.2	147.3	0.68	0.74	0.74	0.41
	C - 9	17.0	15.9	21.03	16.73	16.17	0.81	0.95	0.98	144	135	234.5	185.0	178.9	0.62	0.73	0.76	0.33

Fe

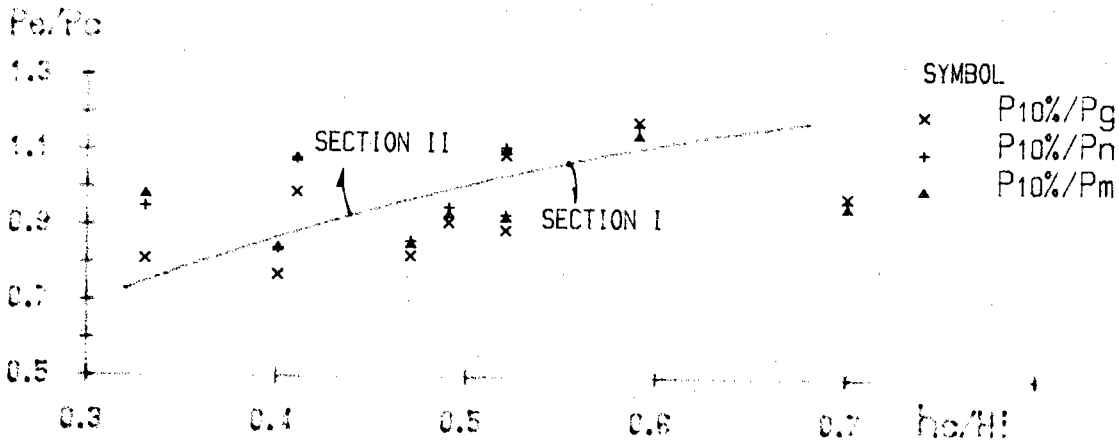


圖 4 － 8　波壓試驗值與計算值比 p_e ／p_c 與 h_c ／H_1 之關係

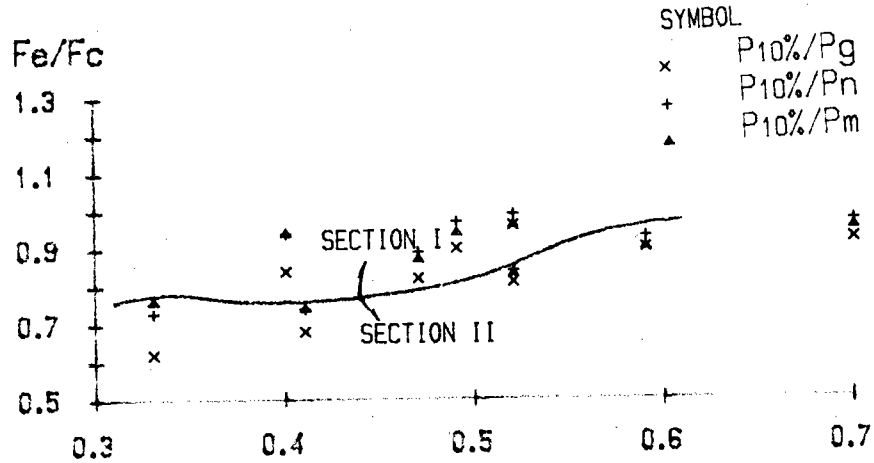


圖 4 － 9　水平總壓力試驗值與計算值比 F_e ／F_c 與 h_c ／H_1 之關係

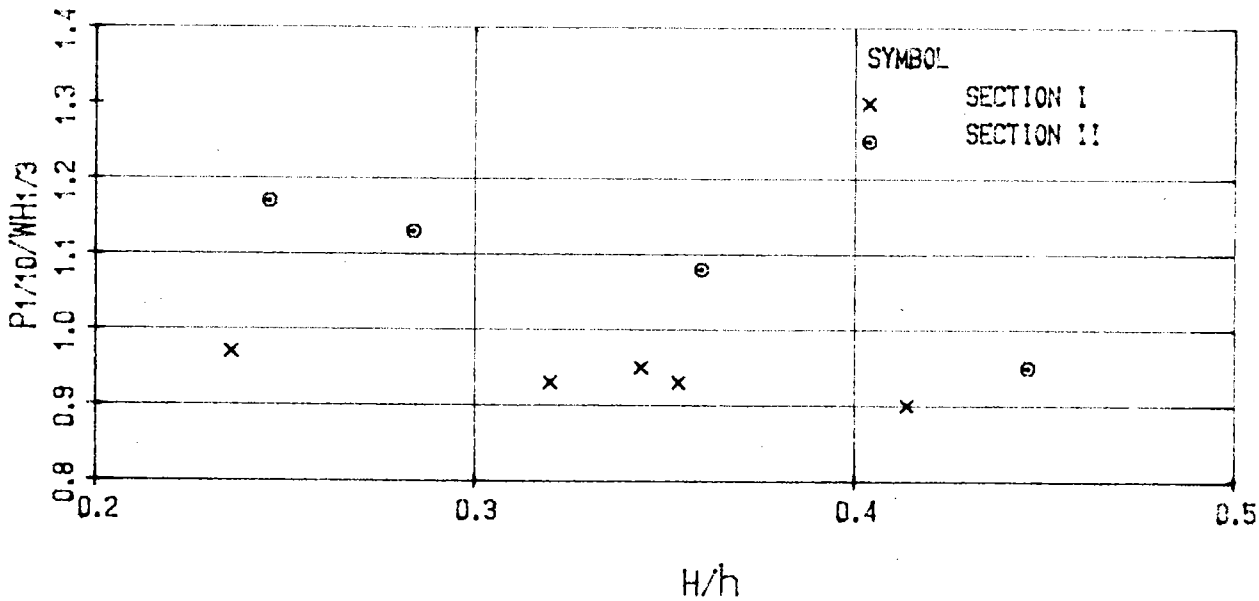


圖 4 — 10　試驗值 p ／ wH 與 H／h 之關係

五、第二階段試驗結果

㈠試驗資料分析

本試驗利用個人電腦加A／D轉換介面，每秒鐘每頻道錄取200個數據點。每次試驗共紀錄45.秒，每個頻道共有9,000個數值資料，14.個頻道共計有126,000個資料。因此資料處理時需先輸入VAX－780電腦，以便從事各種統計分析。

1. 試驗波壓、波浪延時關係

試驗資料輸入電腦後，經由繪圖機繪製十四頻道波壓與波高延時變化，如圖5－1。由延時關係圖顯示，波壓與波浪關係極為一致。水面以上三個波壓測點，（Ch.1至Ch.3）僅在波峯時感受壓力，而水面下波壓測點（Ch.4至Ch.8）在波峯時，作用時為正壓力；波谷時呈現負壓力。所有試驗，越波情況均極輕微而可以忽略。堤後波高計（Ch.9）所紀錄波高均甚小，在試驗範圍內，在低水位，最大波高時，雖可能發生碎波造成衝擊波壓，但在本試驗中，並未獲得碎波衝擊波壓。從試驗中發現，當波高較大發生碎波時，均再以較小之完整波形前進；因此，可以研判此種碎波形態只是水面上部份碎波。

2. 波壓資料分析

波壓資料分析，將波峯時正波壓與波谷時負波壓分開。不論正負波壓（負波壓採用絕對值），其統計方法均採用波浪統計方法，將波壓大小依序排列選取最大波壓為 p_{max}。自最大選取1／10個及1／3個波壓值，平均分別為 $p_{1/10}$ 及 $p_{1/3}$ 或 p_s。

平均波壓 $\overline{p}$ 之統計則係將8個波壓計所測得波壓作算術平均，即 $\overline{p}=\frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8}p_i$，再依上述波浪統計方法分析。因此整個防波堤斷面所受水平總壓力F，可以視為波壓平均值乘以防波堤高度。

波峯及波谷所造成波壓統計如表5－1。

3. 波浪資料分析

波浪紀錄資料為水位變化值，取其平均為靜水位。利用零線相交，追踪每個波浪波高及相對週期。按波高大小排列，選取最大波高，並統計最

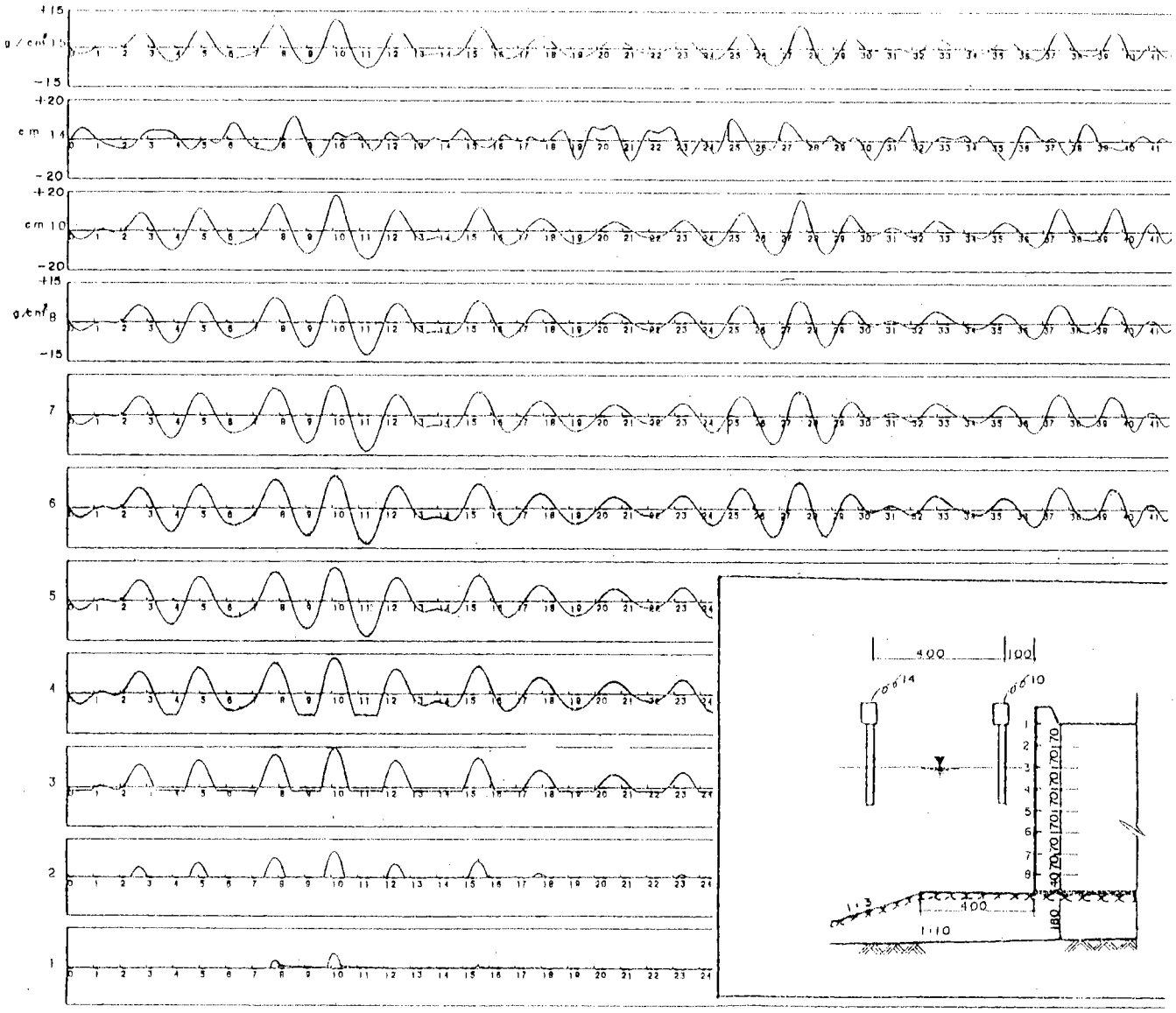


圖 5 — 1 (a)　波壓及波浪試驗延時變化圖

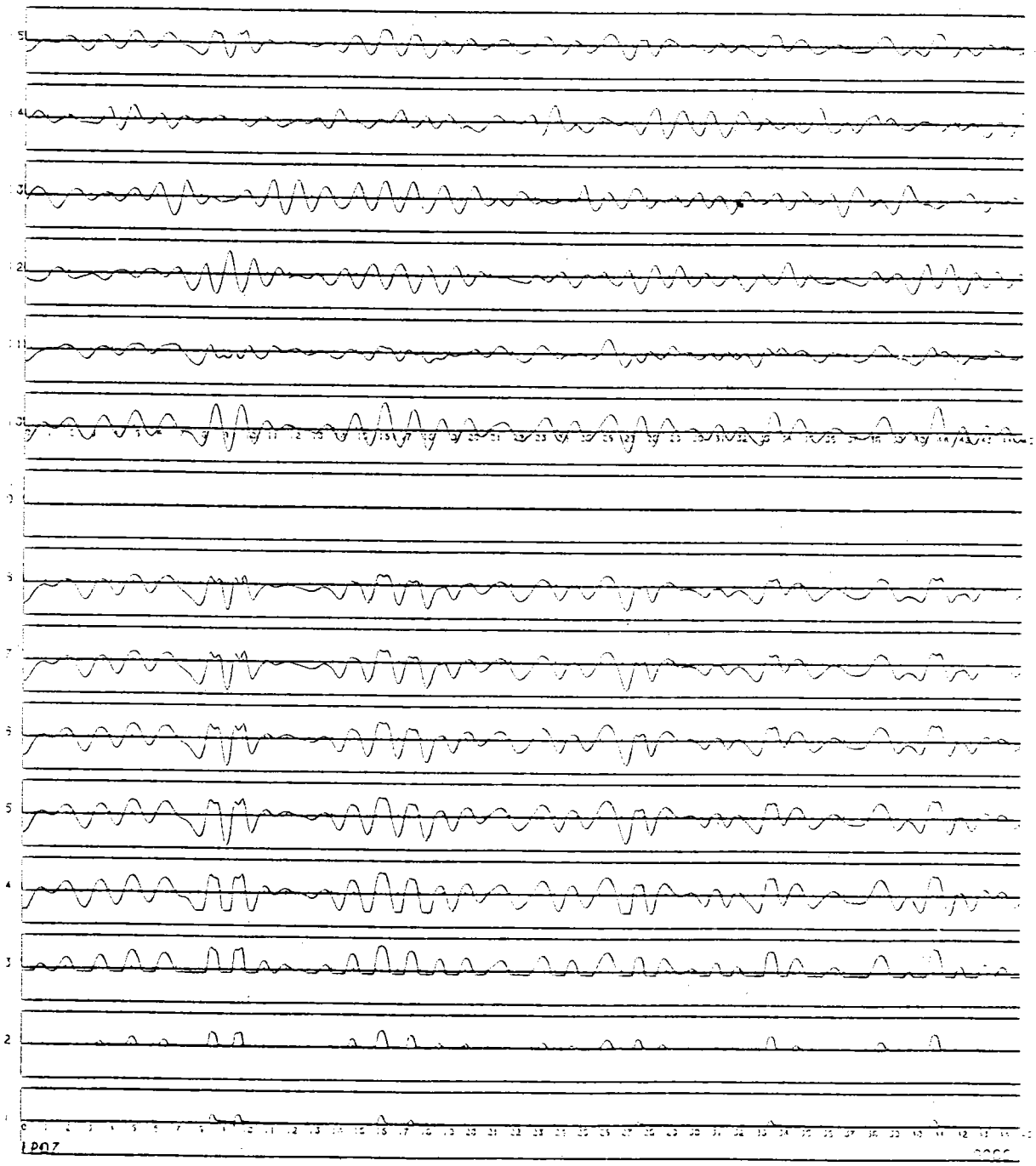


圖 5 － 1 (b)　波壓及波浪試驗延時變化圖

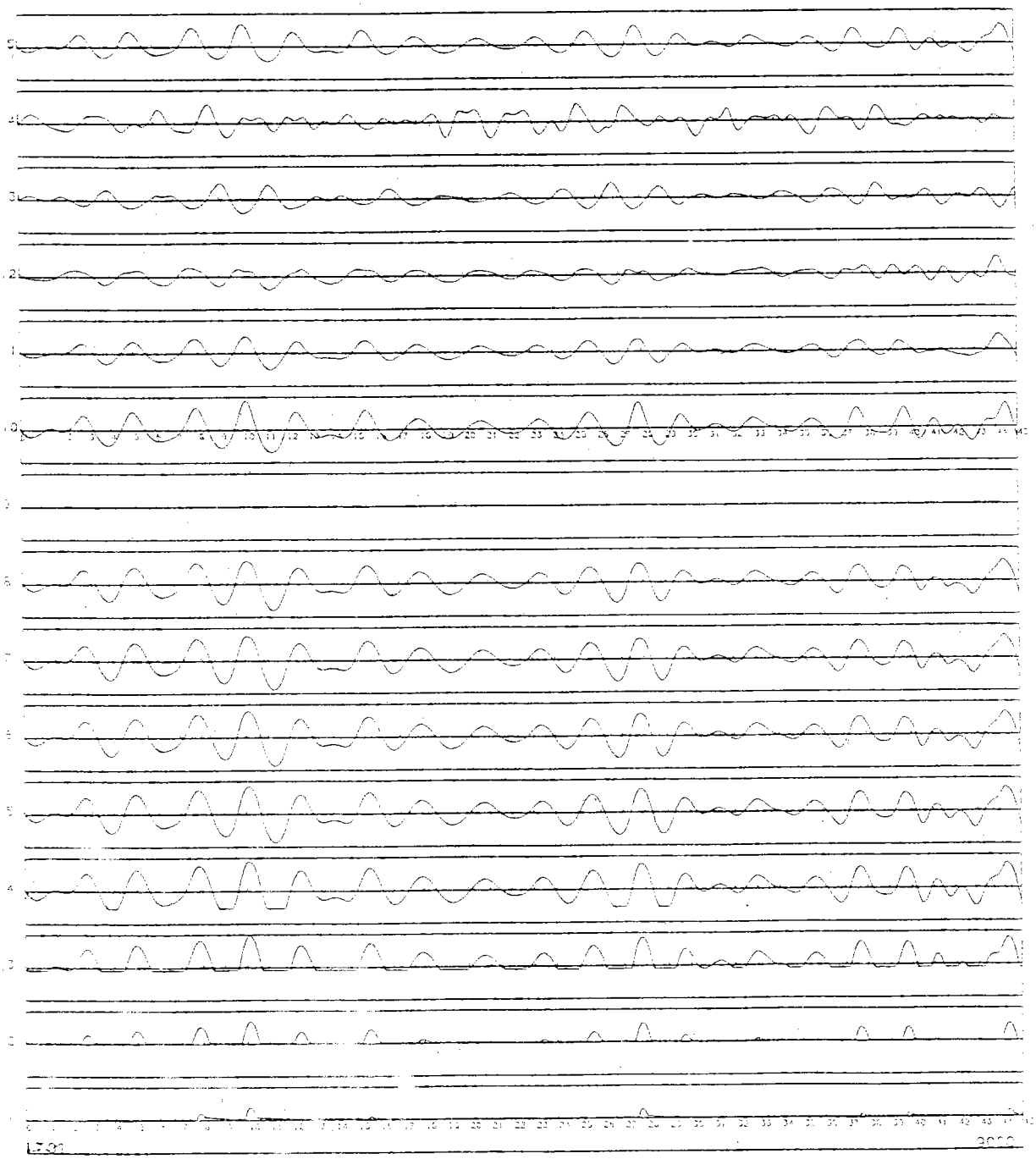


圖 5 － 1 (c)　波壓及波浪試驗延時變化圖

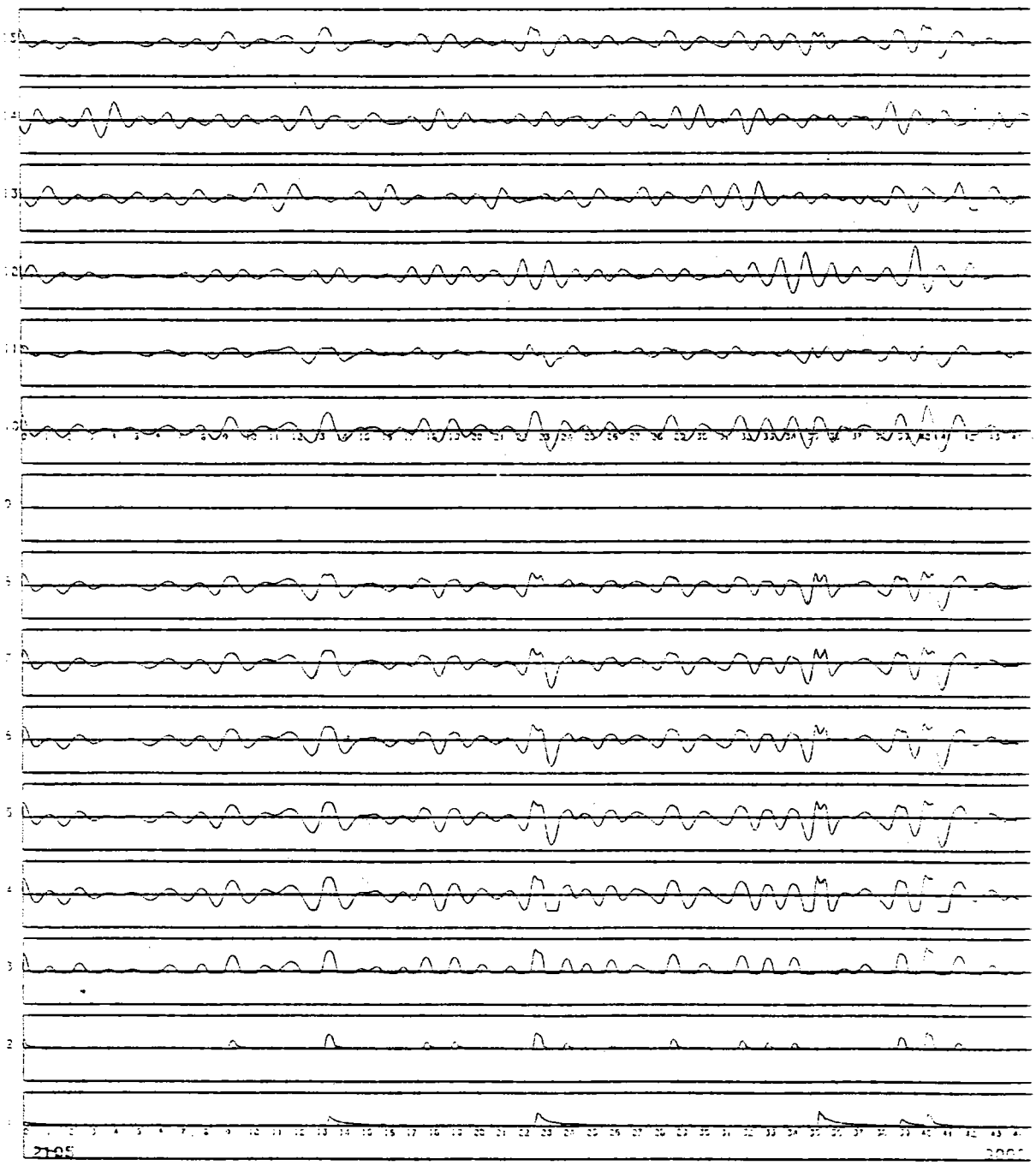


圖 5 － 1 (d)　波壓及波浪試驗延時變化圖

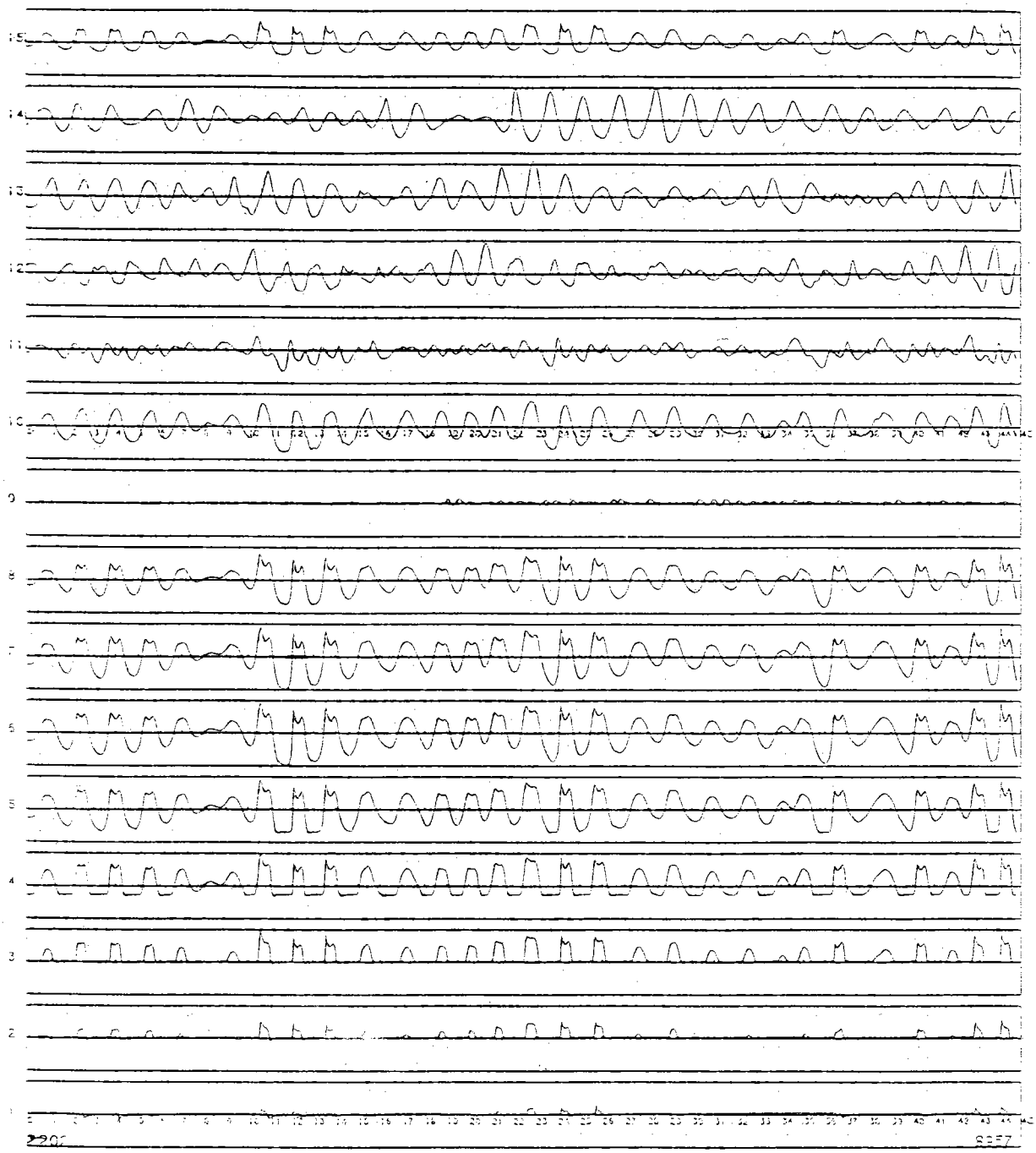


圖 5 － 1 (e)　波壓及波浪試驗延時變化圖

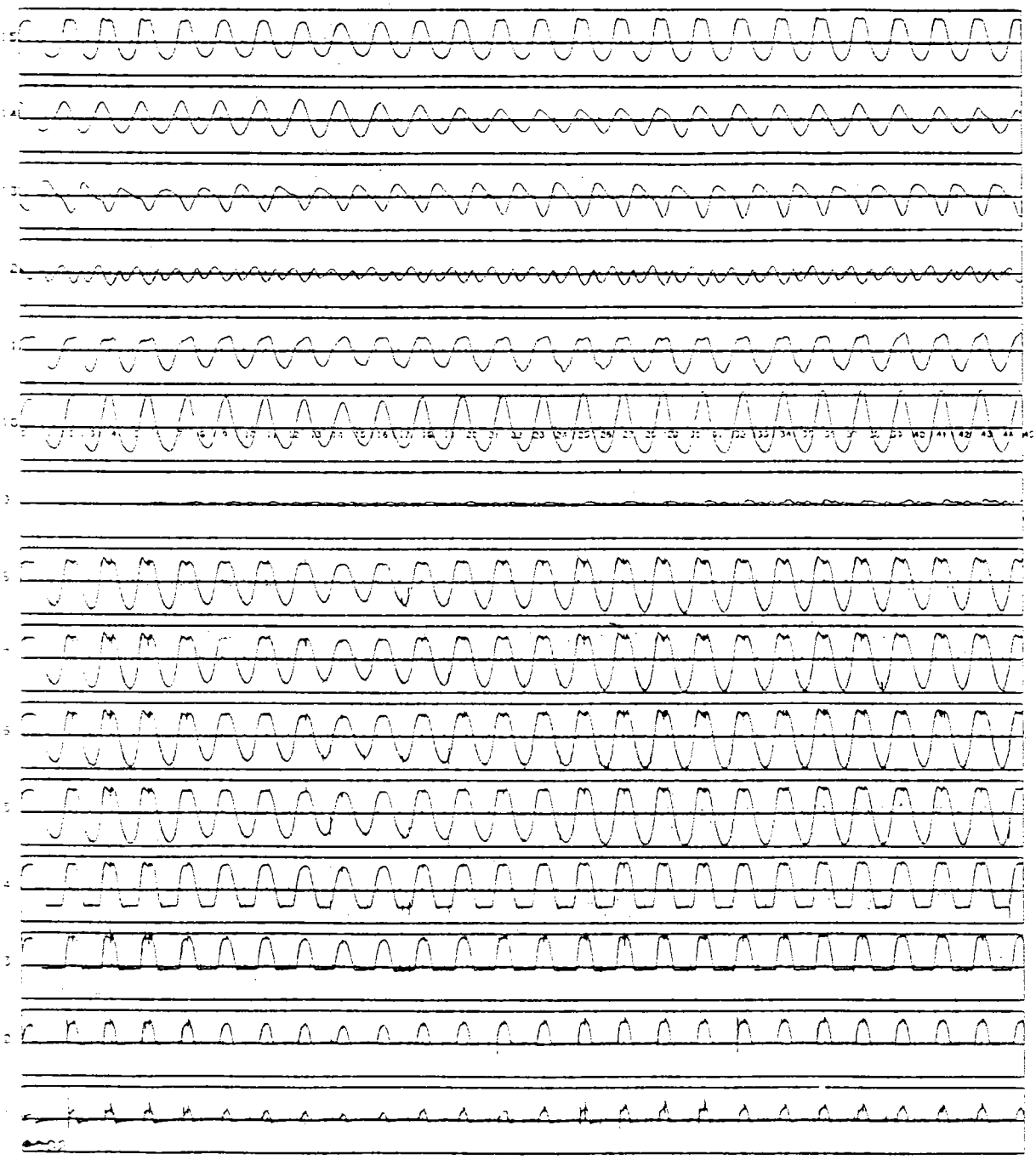


圖 5 － 1 (f)　波壓及波浪試驗延時變化圖

表 5 — 1　波峯及波谷波壓統計表

_OJA1:CIHMT11305.OUTC:1　　5-JUN-198

CASE :: 1305　　------- CREST AMPLITUDE

CHANNEL	NW	N1/3	T1/3	MAX	1/10	1/3	1/2	9000 MIN
1	8	2	3.99	2.96	********	2.84	2.52	0.94
2	25	8	3.69	7.12	7.09	6.30	5.91	1.47
3	31	10	1.54	10.00	9.74	9.18	8.81	2.66
4	31	10	1.40	8.41	8.16	7.71	7.45	2.21
5	31	10	1.39	7.41	7.09	6.66	6.41	1.73
6	31	10	1.40	6.89	6.35	5.90	5.68	1.30
7	31	10	1.58	5.70	5.44	4.97	4.74	0.59
8	31	10	1.35	5.21	5.02	4.55	4.34	0.51
9	0	**********	**********	**********	**********	**********	**********	**********
10	31	10	1.43	17.16	16.94	15.00	14.03	4.80
11	30	10	1.76	6.28	6.15	5.06	4.45	1.19
12	35	11	1.30	10.87	10.42	7.97	6.87	0.73
13	31	10	1.34	15.44	13.39	10.29	9.16	0.67
14	32	10	1.41	18.77	15.22	11.36	9.60	1.04
15	31	10	1.76	6.80	6.49	5.96	5.70	1.19

_OJA1:CIHMT11305.OUTT;1　　5-JUN-198

CASE :: 1305　　------- TROUGH AMPLITUDE

CHANNEL	NW	N1/3	T1/3	MAX	1/10	1/3	1/2	9000 MIN
1	8	2	3.99	1.13	********	1.03	0.90	0.56
2	25	8	3.69	1.23	0.87	0.53	0.47	0.26
3	31	10	1.54	2.93	2.91	2.89	2.89	2.82
4	31	10	1.40	9.85	9.63	9.53	9.50	2.96
5	31	10	1.39	13.66	13.05	11.26	10.47	2.45
6	31	10	1.40	12.83	12.34	10.64	9.91	2.25
7	31	10	1.58	12.48	12.19	10.51	9.81	2.46
8	31	10	1.35	11.35	11.04	9.54	8.98	1.96
9	0	**********	**********	**********	**********	**********	**********	**********
10	31	10	1.43	13.18	12.70	10.91	10.07	2.03
11	30	10	1.76	8.14	7.85	6.75	6.25	1.44
12	35	11	1.30	10.57	9.59	7.61	6.80	1.31
13	31	10	1.34	11.00	10.31	9.29	8.57	1.76
14	32	10	1.41	11.21	10.54	8.31	7.43	1.49
15	31	10	1.76	8.19	7.97	7.12	6.75	2.04

大十分之一波高 $H_{1/10}$，最大三分之一波高 $H_{1/3}$ 或 H_s 等，平均週期爲試驗時間除以波數，波高統計如表 5－2。全部試驗資料統計分析結果如表 5－3。

4. 波浪波壓能譜分析

試驗波浪及波壓能譜分析結果如圖 5－2。尖峯能量週期 T_P，約爲平均週期 T_Z 之一半。波壓能譜尖峯週期接近波浪尖峯週期。長週期波壓能量所佔比例較長週期波浪顯得大些。

㈡波壓統計特性

試驗所測得之波壓，除水面以上測點爲間斷性感應外，水面下測點均隨入射波水位變化。爲使不規則波所產生之波壓力時能與波浪統計特性作比較，波壓統計採用波浪統計方法。

1. 波高與波壓力分佈

試驗波高，水面測點波壓力（Ch.3），及垂直斷面平均波壓力之累積超過率如圖 5－3。圖中顯示各種試驗情況，不論波高，水平點波壓及斷面平均波壓，均甚符合理萊分佈（Rayleigh distribution）。

2. 波壓無因次參數 p/wH 與堤前相對水深 h/L_0 之關係

深水直立式防波堤所受波壓力與入射波高成正比，入射波高是影響波壓最重要之因素。當波峯作用於堤面時，平均水位附近所受靜壓力約爲 wH，w 爲水之單位體積重量。因此試驗波壓與入射波高所產生之靜水壓之比 p/wH 爲衡量波壓常用之無因次參數。

(1)水平測點波壓無因次參數 p/wH 與相對水深 h/L_0 之關係

直立式防波堤受波浪作用時，理論上靜水面附近所受波壓力最大。試驗中所得靜水面測點(Ch.3)波壓強度與相對應之波高無因次參數分別爲 $p_{1/3}/wH_{1/3}$，$p_{1/10}/wH_{1/10}$ 及 p_{max}/wH_{max}。圖 5－4 爲 p/wH 與 h/L_0 之關係。本試驗採用三種水深所得資料顯示在試驗範圍內，p/wH 受堤前水深 h 影響不顯著。$p_{1/3}/wH_{1/3}$，$p_{1/10}/wH_{1/10}$ 及 p_{max}/wH_{max} 三者與 h/L_0 之關係極爲一致。當 $h/L_0 < 0.1$ 時，p/wH 隨 h/L_0 減小而增大；而 $h/L > 0.2$ 時，p/wH 則隨 h/L_0 增加而稍微加大。h/L_0 約爲 0.15 時，p/wH 之值最低。p/wH 值大多介於 0.7 與 0.9 之間，顯示波峯作用於堤

表５－２　波高、週期統計表

_DJA1:CIHMT31305.DUT;1　　5-JUN-1987

CASE :: 1305　　------- FULL RANGE

CHANNEL	NW	N1/3	T1/3	MAX	1/10	1/3	1/2	9000 MIN
1	[illegible]	2	3.99	3.82	********	3.64	3.34	1.60
2	25	8	3.69	7.43	7.42	6.72	6.29	1.92
3	31	10	1.54	12.88	12.62	12.06	11.68	5.54
4	31	10	1.40	17.88	17.67	17.14	16.81	5.16
5	31	10	1.39	20.72	20.05	17.54	16.67	4.18
6	31	10	1.40	19.17	18.56	16.20	15.39	3.55
7	31	10	1.58	17.82	17.45	15.13	14.36	3.06
8	31	10	1.35	16.32	15.83	13.77	13.08	2.57
9	0	********	********	********	********	********	********	********
10	31	10	1.43	30.34	29.01	25.55	23.83	6.83
11	30	10	1.76	13.57	12.53	11.23	10.48	2.68
12	35	11	1.30	20.14	18.69	15.33	13.46	2.58
13	31	10	1.34	25.26	23.70	19.33	17.54	3.27
14	32	10	1.41	29.50	25.86	19.23	16.89	3.03
15	31	10	1.76	14.70	14.37	12.77	12.28	3.23

_DJA1:CIHMT31206.DUT:1　　5-JUN-1987

CASE :: 1306　　------- FULL RANGE

CHANNEL	NW	N1/3	T1/3	MAX	1/10	1/3	1/2	9844 MIN
1	10	3	0.90	11.81	11.81	8.64	7.55	2.31
2	15	5	2.30	15.39	15.39	13.02	12.62	2.81
3	19	6	1.96	21.33	21.33	19.54	19.95	3.46
4	18	6	2.13	26.60	26.60	24.39	24.24	3.83
5	18	6	2.19	32.38	32.38	30.45	28.62	3.05
6	18	6	2.47	33.34	33.34	30.69	28.58	2.63
7	17	5	2.01	32.37	32.37	30.87	29.31	2.25
8	17	5	2.01	31.35	31.35	29.26	27.70	1.85
9	6	2	0.82	3.20	********	3.06	2.99	1.44
10	19	6	1.90	41.66	41.66	36.25	34.30	4.18
11	14	4	2.57	32.14	32.14	30.12	28.64	3.52
12	15	5	3.04	23.52	23.52	21.01	20.20	4.99
13	21	7	2.59	32.39	30.40	25.63	23.55	2.56
14	20	6	1.25	29.85	29.82	24.48	21.21	1.21
15	18	6	1.88	25.17	25.17	23.31	22.10	2.48

表 5—3(a)　試驗資料分析統計結果

[illegible] 7-JUL-1987 12:10

CASE NO	WATER DEPTH(CM)	PERIOD (SEC)	H1 (CM)	H10 (CM)	HMAX (CM)	HS GW/CM*CM	H10 GW/CM*CM	HMAX GW/CM*CM	HS GW/CM*CM	H10 GW/CM*CM	HMAX GW/CM*CM
1201	73.00	1.41	5.17	7.19	9.90	5.41	6.56	7.31	2.71	3.30	4.38
1202	73.00	1.45	4.79	6.81	7.54	4.67	7.18	7.16	3.05	3.27	3.74
1203	73.00	1.25	7.41	9.12	9.47	5.93	8.51	7.03	3.27	3.35	4.06
1204	73.00	1.41	9.24	11.36	12.10	9.60	12.29	14.73	4.74	6.03	7.39
1205	73.00	1.45	10.52	11.64	12.78	8.42	9.44	9.73	4.74	5.71	6.11
1206	73.00	1.41	11.03	13.10	14.09	9.05	10.29	10.86	5.74	7.01	7.23
1207	73.00	1.45	11.29	13.25	14.36	9.15	10.51	11.11	5.53	7.34	7.44
1302	73.00	1.29	6.43	7.86	9.29	5.72	6.53	6.90	3.23	3.86	4.06
1303	73.00	1.30	14.41	18.11	18.52	10.19	12.52	12.80	5.32	6.49	6.79
1304	73.00	1.32	11.05	13.89	16.76	8.16	10.38	11.42	5.33	6.92	7.54
1305	73.00	1.45	12.77	14.51	15.17	9.15	9.74	10.00	5.36	6.45	6.80
1306	73.00	1.45	15.61	18.69	21.30	11.23	12.77	14.39	7.26	9.26	10.39
1307	73.00	1.25	3.95	4.91	5.09	3.67	4.40	4.52	2.00	2.39	2.46
1401	73.00	1.41	3.79	4.41	4.56	3.50	4.49	4.52	2.16	2.68	3.04
1402	73.00	1.61	10.07	14.48	15.93	6.66	11.28	11.61	5.54	6.02	8.51
1403	73.00	1.65	16.45	20.55	22.30	11.11	13.41	13.74	6.16	9.36	9.46
1404	73.00	1.41	19.00	21.13	21.31	13.31	15.12	15.85	10.58	12.26	13.22
1405	73.00	1.55	7.20	9.54	10.07	5.69	7.88	8.44	3.50	5.21	5.60
1501	73.00	1.35	14.37	14.81	14.82	11.55	11.70	11.82	3.77	6.40	5.55
1502	73.00	1.36	21.85	22.29	22.33	16.19	16.41	16.50	12.77	13.24	13.70
1503	73.00	1.96	7.36	7.53	7.56	5.34	6.18	6.18	4.10	4.27	4.12
1504	73.00	1.69	16.05	16.75	17.01	12.14	12.55	12.61	5.12	5.25	5.37
1601	73.00	1.67	3.45	5.31	5.74	3.29	4.47	4.47	1.65	2.75	2.75
1602	73.00	2.09	5.30	6.46	6.50	4.65	5.60	5.82	2.35	2.76	3.03

表 5—3(b)　試驗資料分析統計結果

DJA1:[COMLEW.PETRPRESAST.DOT;]　　7-JUL-1987 18:10

CASE NO	WATER DEPTH(CM)	PERIOD (SEC)	HS (CM)	H10 (CM)	HMAX (CM)	PS GW/CM*CM	P10 GW/CM*CM	PMAX GW/CM*CM	PSS GW/CM*CM	P10S GW/CM*CM	PMAXS GW/CM*C
1603	73.00	1.41	5.07	6.61	7.95	4.93	5.92	6.16	2.33	2.95	3.14
1604	73.00	1.32	6.41	9.31	12.35	5.82	8.97	12.58	3.44	4.46	5.95
1605	73.00	1.36	7.80	11.40	13.14	7.11	9.93	9.61	4.55	5.50	6.22
1701	73.00	2.25	11.76	14.36	18.56	11.52	14.45	14.45	9.26	11.60	11.60
1702	73.00	2.37	16.15	20.27	20.27	14.54	17.86	17.86	11.56	14.57	14.57
1601	73.00	2.31	16.87	19.51	19.51	15.13	17.20	17.20	12.62	14.42	14.42
1602	73.00	2.50	3.48	4.55	4.55	3.39	4.17	4.17	2.32	2.54	2.54
1603	73.00	2.50	7.55	10.10	10.10	7.73	10.21	10.21	5.56	8.01	8.01
1604	73.00	2.37	11.26	13.76	13.76	10.23	13.33	13.33	8.22	10.76	10.76
1606	73.00	2.37	16.13	20.85	20.93	15.97	17.50	17.50	13.17	14.86	14.86
1601	73.00	2.50	2.51	3.66	3.66	2.50	4.15	4.15	2.02	3.00	3.00
1602	73.00	2.50	5.52	6.63	6.63	6.39	7.86	7.86	4.97	6.05	6.05
1603	73.00	2.41	8.84	10.92	10.92	9.63	13.21	13.21	7.74	10.64	10.64
1604	73.00	2.61	14.40	18.53	18.53	13.02	15.91	15.91	11.34	13.00	13.00
1605	73.00	2.11	17.76	21.26	21.26	16.35	17.75	17.75	13.70	14.65	14.65
2101	61.00	1.25	2.71	3.13	3.22	3.36	3.65	3.66	1.46	1.43	1.63
2102	61.00	1.22	5.64	6.65	7.13	5.62	6.75	7.50	2.39	3.66	4.28
2103	61.00	1.25	6.16	7.78	8.51	6.11	7.05	8.15	3.55	4.20	5.08
2104	61.00	1.30	7.95	9.30	10.45	6.64	7.87	8.05	3.99	4.41	4.54
2105	61.00	1.41	9.06	11.90	14.32	7.04	10.02	10.73	5.37	6.33	7.41
2201	61.00	1.35	6.39	8.20	8.03	5.17	7.37	7.78	3.43	4.20	4.37
2205	61.00	1.35	12.48	17.29	19.90	10.37	14.38	15.57	7.05	9.33	10.93
2301	61.00	1.30	5.57	7.38	8.27	4.11	7.66	5.34	3.96	5.34	5.29
2302	61.00	1.21	9.91	12.61	13.47	9.35	11.30	11.55	6.28	8.05	8.76

表 5—3(c)　試驗資料分析統計結果

[illegible]　　7-JUL-1997 18:10

CASE NO	WATER DEPTH(CM)	PERIOD (SEC)	HS (CM)	H10 (CM)	HMAX (CM)	PS GW/CM*CM	P10 GW/CM*CM	PMAX GW/CM*CM	PSS GW/CM*CM	P10S GW/CM*CM	PMAXS GW/CM*CM
2303	61.00	1.66	13.15	15.74	16.17	11.64	13.96	14.26	6.02	10.71	11.15
2304	61.00	1.61	15.40	17.93	15.03	12.24	13.66	13.90	6.04	10.43	10.86
2402	61.00	1.25	4.59	6.05	6.11	5.47	6.83	7.31	2.64	3.55	3.55
2403	61.00	1.25	5.15	5.82	6.07	5.71	6.21	6.36	2.51	3.26	3.31
2404	61.00	1.30	5.35	6.00	6.47	6.12	7.56	7.70	3.42	4.15	4.53
2405	61.00	1.65	8.42	10.65	10.97	7.07	6.27	6.36	4.50	5.76	6.11
2501	61.00	1.33	2.58	3.11	3.73	3.43	3.97	4.07	1.64	1.81	1.91
2502	61.00	1.32	7.07	8.42	9.33	7.41	9.40	11.16	4.03	5.40	6.30
2503	61.00	1.22	6.43	9.79	10.55	8.07	9.46	10.49	4.66	5.36	5.44
2504	61.00	1.36	5.04	10.35	10.71	6.05	6.96	6.05	4.64	5.46	5.96
2505	61.00	1.67	10.15	12.03	12.49	9.72	10.06	10.12	5.69	7.03	7.26
2602	61.00	1.35	14.59	15.73	18.89	14.28	14.42	14.42	11.02	11.37	11.45
2603	61.00	1.96	6.04	8.26	8.27	6.70	8.99	6.04	6.21	6.37	6.35
2604	61.00	1.36	3.63	4.32	4.60	3.36	3.82	4.44	1.64	1.46	2.23
2605	61.00	1.25	11.44	13.33	14.35	9.57	10.64	10.64	6.27	7.15	7.47
3101	46.00	1.14	4.65	5.73	6.36	4.37	5.33	5.74	2.85	3.47	3.59
3102	46.00	1.36	6.38	8.19	9.67	4.45	6.11	5.33	3.43	4.13	5.12
3201	46.00	1.61	10.20	12.10	10.38	8.69	9.56	10.12	6.67	8.13	8.14
3301	46.00	1.67	11.81	14.64	14.65	9.95	11.93	11.86	8.54	10.00	10.29
3401	46.00	1.80	4.67	5.02	5.05	6.04	5.98	6.86	3.34	4.53	5.40
3401	46.00	1.35	15.34	15.64	15.85	12.31	12.42	12.42	6.53	5.45	5.59
3402	46.00	1.45	3.36	3.86	4.06	2.37	2.52	2.52	1.74	1.56	2.01

表 5—3（d） 試驗資料分析統計結果

CASE NO.	LO (CM)	D/LO	HS/D	PS/WHS	P10/WH10	PMA/WHMA	PSF/WHS	P10F/WH10	PMAF/WHMA	P10/PS	PMA/PS	P10/PS	HMA/HS
2303	374.79	0.16	0.22	0.98	0.98	0.98	0.51	0.49	0.49	1.20	1.23	1.20	1.23
2304	404.97	0.15	0.25	0.79	0.77	0.77	0.59	0.60	0.60	1.12	1.14	1.15	1.17
2402	243.75	0.25	0.03	1.17	1.13	1.23	0.56	0.59	0.65	1.25	1.37	1.29	1.30
2403	249.75	0.25	0.08	1.10	1.07	1.05	0.56	0.54	0.55	1.09	1.11	1.12	1.17
2404	271.91	0.22	0.10	1.07	0.94	0.91	0.57	0.52	0.48	1.24	1.26	1.34	1.58
2405	274.79	0.16	0.14	0.96	0.98	0.92	0.53	0.54	0.56	1.29	1.37	1.24	1.29
2501	271.91	0.22	0.04	1.39	1.08	1.09	0.54	0.55	0.51	1.16	1.19	1.21	1.45
2502	271.91	0.22	0.12	1.05	1.07	1.19	0.57	0.41	0.67	1.27	1.51	1.25	1.33
2503	232.19	0.04	0.14	0.96	0.97	0.99	0.56	0.55	0.52	1.17	1.30	1.16	1.25
2504	248.34	0.21	0.15	0.93	0.87	0.85	0.55	0.53	0.52	1.12	1.12	1.14	1.18
2505	439.07	0.14	0.17	0.94	0.84	0.79	0.59	0.53	0.56	1.15	1.16	1.19	1.29
2902	551.37	0.11	0.30	0.77	0.77	0.77	0.55	0.41	0.61	1.01	1.01	1.01	1.01
2903	593.29	0.10	0.15	0.96	0.97	0.99	0.69	0.49	0.69	1.03	1.04	1.02	1.02
2904	257.54	0.21	0.06	0.90	0.88	0.93	0.45	0.45	0.47	1.17	1.36	1.19	1.32
2905	249.79	0.25	0.20	0.90	0.79	0.76	0.53	0.53	0.52	1.11	1.13	1.12	1.20
3101	217.21	0.23	0.10	0.90	0.92	0.90	0.59	0.60	0.61	1.22	1.31	1.19	1.31
3102	238.54	0.17	0.13	0.71	0.42	0.55	0.55	0.50	0.53	1.15	1.20	1.31	1.54
3201	404.37	0.12	0.21	0.95	0.79	0.82	0.58	0.67	0.66	1.10	1.16	1.16	1.21
3201	435.07	0.11	0.24	0.84	0.91	0.91	0.72	0.65	0.70	1.19	1.19	1.24	1.24
3301	509.44	0.10	0.14	0.89	1.11	1.10	0.59	0.61	0.67	1.47	1.47	1.17	1.17
3401	551.37	0.09	0.31	0.90	0.79	0.79	0.56	0.61	0.61	1.01	1.01	1.02	1.02
3402	327.93	0.15	0.07	0.71	0.65	0.62	0.52	0.51	0.50	1.06	1.06	1.15	1.21

表 5—3(e)　試驗資料分析統計結果

CASE NO.	LO (CM)	D/LO	HS/D	PS/WPS	P10/WP10	PMA/WPMA	PSE/WPS	P10E/WP10	PMAB/WPMA	P10/PS	PMA/PS	P10/PS	PMA/PS
1201	310.14	0.24	0.08	0.88	0.86	0.74	0.44	0.49	0.44	1.37	1.35	1.29	1.60
1202	327.39	0.22	0.07	0.98	1.10	0.95	0.43	0.50	0.49	1.54	1.54	1.36	1.59
1203	242.73	0.30	0.10	0.80	0.75	0.74	0.44	0.44	0.43	1.13	1.19	1.23	1.28
1204	310.14	0.24	0.13	1.07	1.08	1.22	0.51	0.53	0.61	1.24	1.49	1.23	1.31
1205	327.99	0.22	0.14	0.80	0.81	0.76	0.45	0.45	0.48	1.12	1.16	1.11	1.21
1206	310.14	0.24	0.15	0.82	0.79	0.77	0.52	0.54	0.51	1.14	1.20	1.15	1.28
1207	327.99	0.22	0.15	0.82	0.79	0.77	0.53	0.54	0.52	1.15	1.21	1.15	1.28
1301	242.73	0.30	0.09	0.89	0.85	0.84	0.51	0.51	0.49	1.14	1.21	1.15	1.28
1303	351.00	0.21	0.20	0.89	0.89	0.87	0.56	0.52	0.52	1.23	1.24	1.22	1.28
1304	271.91	0.27	0.14	0.70	0.65	0.68	0.46	0.44	0.47	1.27	1.40	1.36	1.44
1305	327.99	0.22	0.17	0.72	0.67	0.66	0.47	0.45	0.48	1.08	1.09	1.14	1.19
1306	327.99	0.22	0.21	0.72	0.68	0.68	0.50	0.50	0.51	1.14	1.30	1.20	1.33
1307	242.73	0.30	0.09	0.85	0.90	0.79	0.52	0.48	0.40	1.30	1.31	1.28	1.58
1401	310.14	0.24	0.09	0.92	1.02	1.05	0.57	0.61	0.65	1.28	1.41	1.17	1.24
1402	404.37	0.18	0.14	0.68	0.73	0.74	0.59	0.55	0.53	1.30	1.36	1.44	1.58
1403	374.73	0.19	0.23	0.68	0.85	0.82	0.30	0.46	0.43	1.21	1.24	1.28	1.35
1404	404.37	0.18	0.26	0.73	0.72	0.74	0.56	0.59	0.62	1.09	1.14	1.11	1.12
1405	374.73	0.19	0.13	0.82	0.79	0.84	0.54	0.52	0.56	1.32	1.41	1.38	1.40
1501	551.37	0.13	0.20	0.79	0.79	0.80	0.60	0.60	0.61	1.01	1.02	1.01	1.02
1502	551.37	0.13	0.30	0.74	0.74	0.74	0.59	0.55	0.61	1.01	1.03	1.02	1.02
1503	503.28	0.12	0.10	0.81	0.82	0.82	0.56	0.57	0.57	1.04	1.04	1.02	1.03
1504	551.37	0.13	0.22	0.76	0.75	0.74	0.57	0.55	0.55	1.03	1.04	1.04	1.05
1601	435.07	0.17	0.05	0.85	0.81	0.79	0.47	0.50	0.48	1.36	1.38	1.42	1.46
1602	559.59	0.11	0.07	0.88	0.84	0.86	0.42	0.42	0.45	1.20	1.24	1.22	1.28

表 5—3(f) 試驗資料分析統計結果

CASE NO.	LO (CM)	C/LO	MS/D	PS/WMS	P10/WP10	PMA/WPMA	PSF/WMS	P10E/WP10	PMAE/WPMA	P10/PS	PMA/PS	M10/MS	MMA/MS
1603	310.14	0.24	0.07	0.91	0.90	0.77	0.46	0.45	0.39	1.29	1.23	1.30	1.58
1604	271.61	0.27	0.09	0.92	0.88	0.88	0.54	0.48	0.46	1.52	2.13	1.45	2.01
1605	268.54	0.25	0.11	0.91	0.78	0.73	0.59	0.51	0.47	1.26	1.35	1.46	1.68
1701	780.75	0.09	0.16	1.01	1.01	0.93	0.79	0.81	0.75	1.22	1.22	1.22	1.32
1702	876.24	0.08	0.22	0.90	0.88	0.88	0.72	0.72	0.72	1.23	1.23	1.26	1.26
1801	1231.75	0.06	0.23	0.90	0.88	0.86	0.75	0.74	0.74	1.14	1.14	1.16	1.16
1802	975.00	0.07	0.05	0.95	0.92	0.92	0.67	0.65	0.65	1.27	1.27	1.31	1.31
1803	975.00	0.07	0.10	1.02	1.01	1.01	0.79	0.79	0.79	1.32	1.32	1.34	1.34
1804	876.24	0.08	0.15	0.91	0.87	0.87	0.73	0.78	0.76	1.30	1.30	1.22	1.22
1805	876.24	0.08	0.25	0.88	0.85	0.85	0.73	0.71	0.71	1.11	1.11	1.15	1.15
1901	975.00	0.07	0.03	1.12	1.13	1.13	0.80	0.81	0.81	1.48	1.48	1.47	1.47
1902	975.00	0.07	0.06	0.98	0.91	0.91	0.75	0.70	0.70	1.23	1.23	1.32	1.32
1903	1231.75	0.06	0.12	1.09	1.21	1.21	0.83	1.00	1.00	1.37	1.37	1.24	1.24
1904	1231.75	0.06	0.20	0.96	0.85	0.85	0.79	0.70	0.70	1.15	1.15	1.25	1.29
1905	1231.75	0.06	0.24	0.92	0.83	0.83	0.77	0.70	0.70	1.02	1.02	1.20	1.20
2101	243.75	0.25	0.04	1.24	1.17	1.14	0.54	0.52	0.51	1.09	1.10	1.15	1.15
2102	232.19	0.26	0.06	0.99	0.98	1.09	0.51	0.53	0.60	1.20	1.39	1.22	1.26
2103	243.75	0.25	0.10	0.95	0.91	0.92	0.58	0.54	0.58	1.15	1.33	1.26	1.43
2104	271.81	0.22	0.13	0.86	0.85	0.77	0.49	0.47	0.43	1.15	1.18	1.17	1.31
2105	310.14	0.20	0.15	0.88	0.84	0.77	0.55	0.59	0.53	1.25	1.33	1.31	1.54
2201	243.75	0.25	0.10	0.97	0.90	0.86	0.54	0.51	0.43	1.19	1.26	1.28	1.41
2202	374.76	0.16	0.22	0.79	0.81	0.79	0.54	0.54	0.55	1.35	1.47	1.32	1.48
2301	351.00	0.17	0.10	1.02	0.96	1.00	0.66	0.67	0.64	1.25	1.38	1.34	1.40
2302	404.37	0.15	0.16	0.95	0.88	0.89	0.63	0.63	0.65	1.20	1.28	1.29	1.35

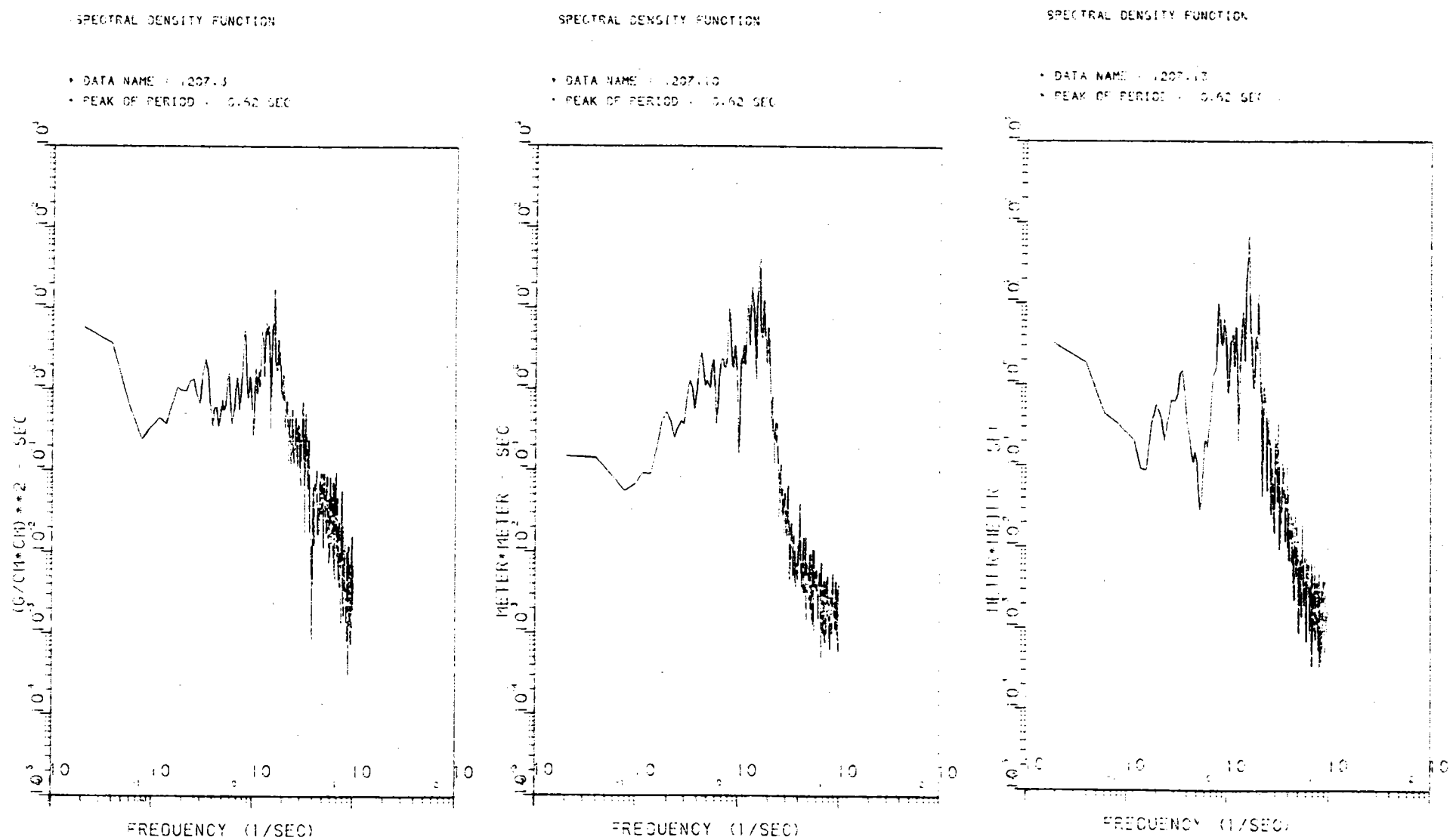


圖 5 — 2 (a)　波浪及波壓能譜分析圖

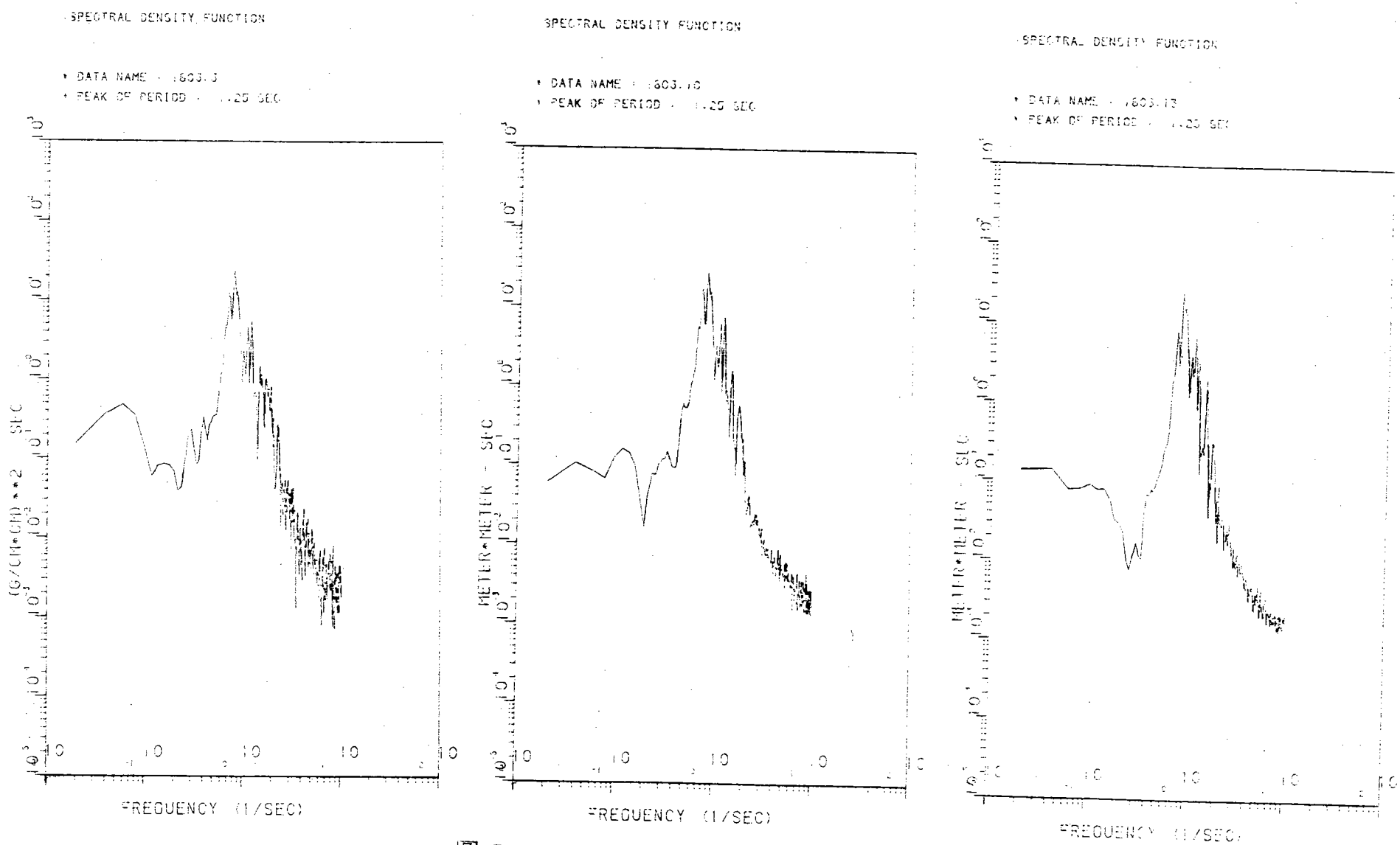


圖 5 － 2 (b)　波浪及波壓能譜分析圖

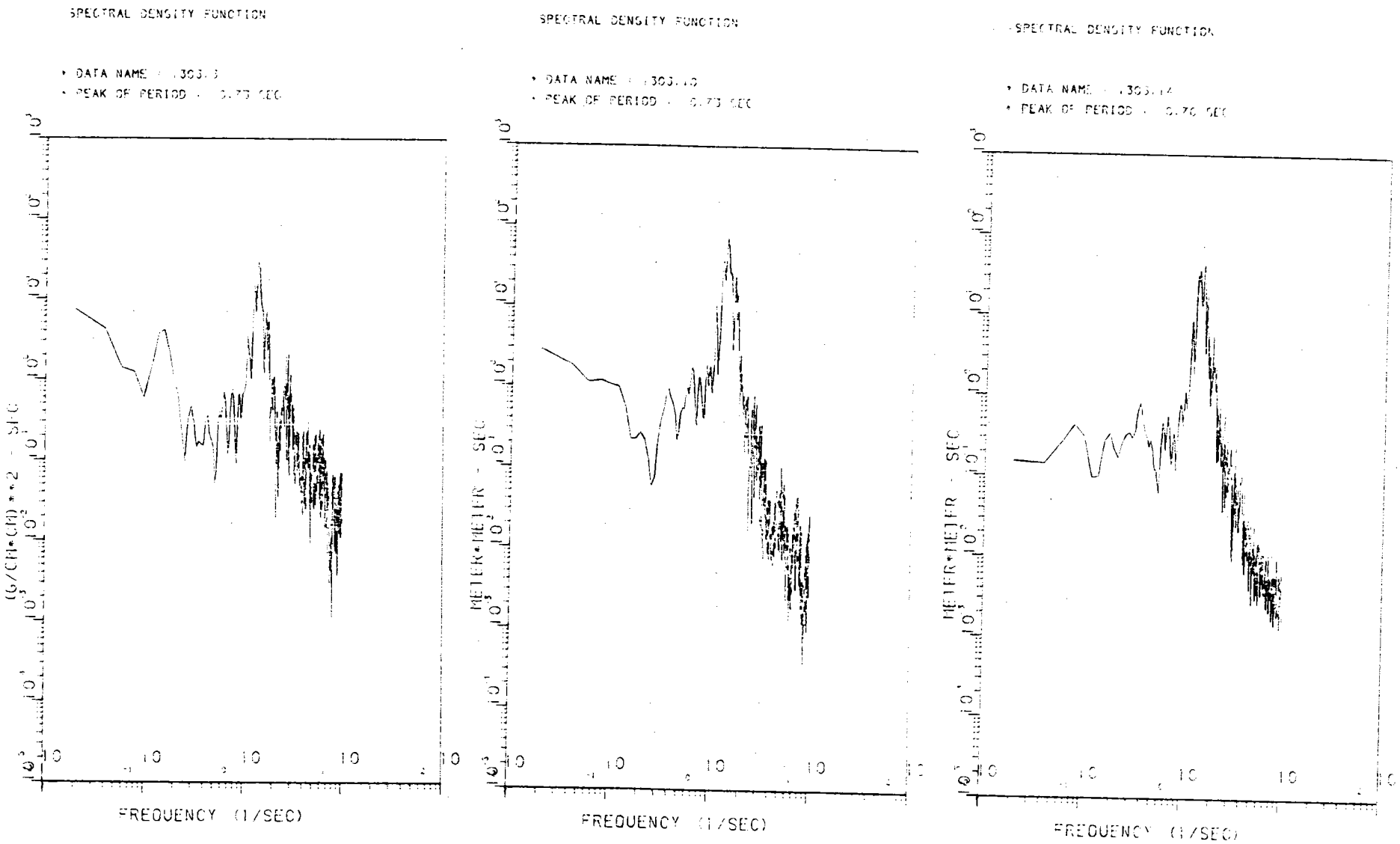


圖5—2(C) 波浪及波壓能譜分析圖

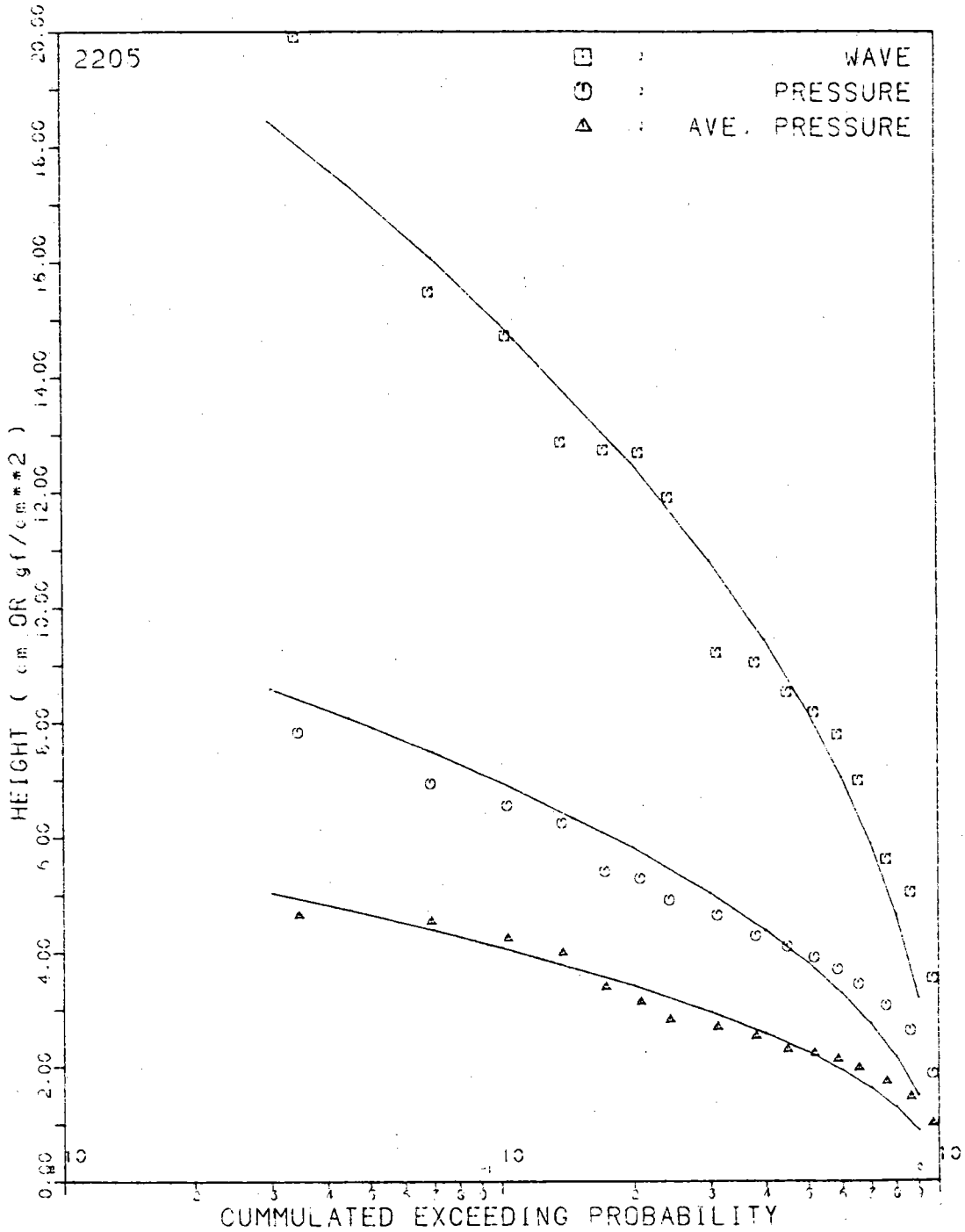


圖 5 — 3 (a)　波高，水面點波壓及斷面平均波壓之累積概率

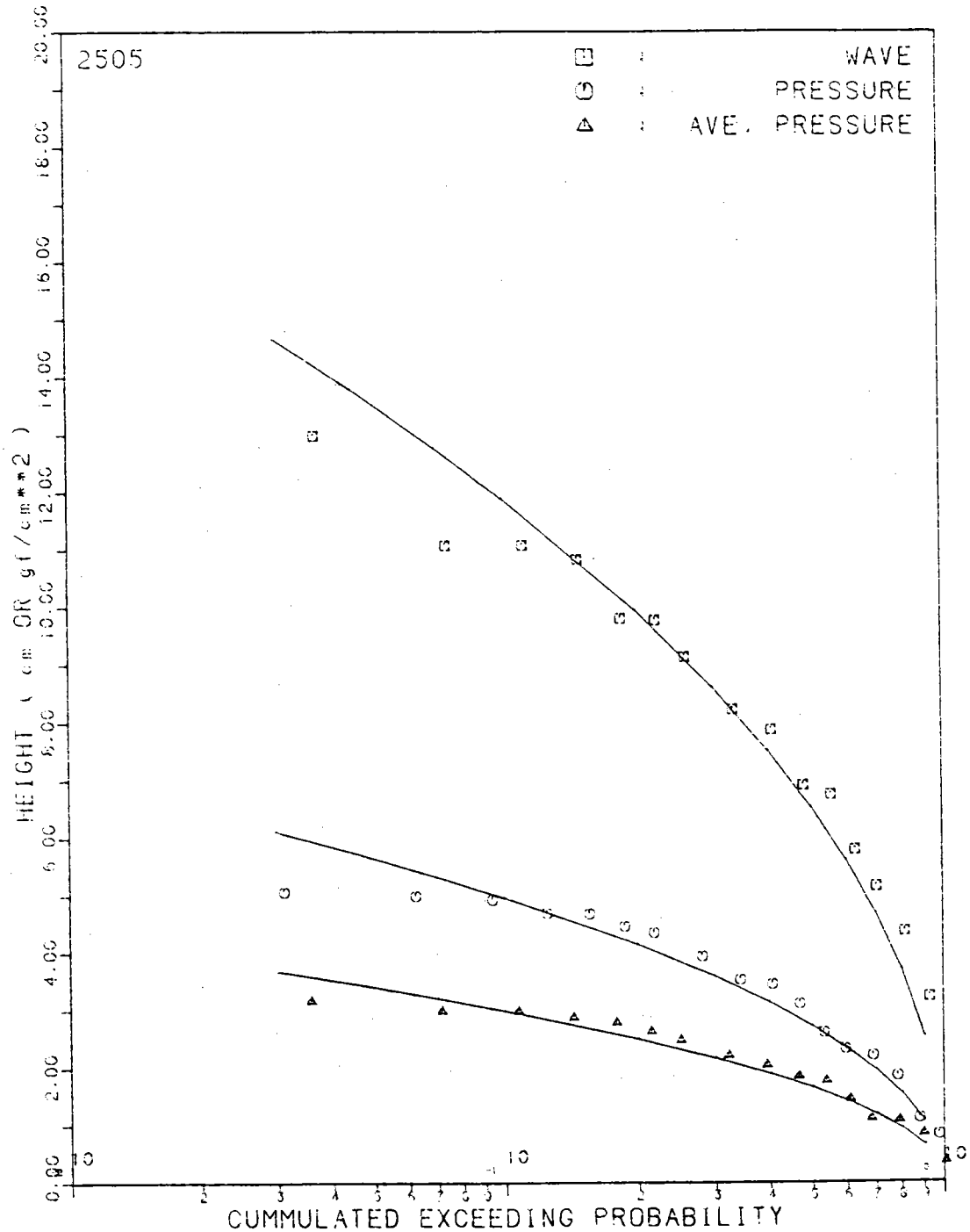


圖 5 — 3 (b)　波高，水面點波壓及斷面平均波壓之累積概率

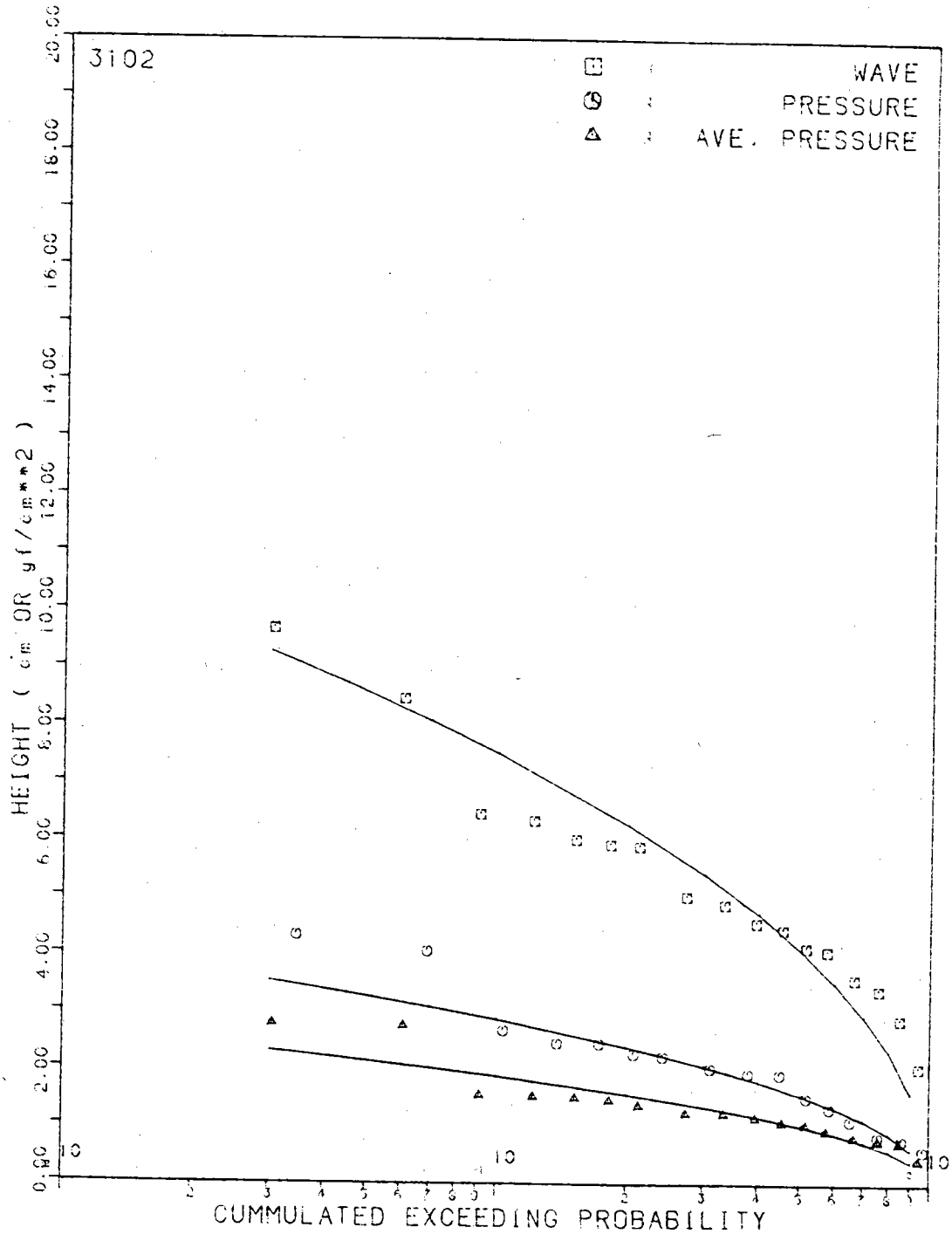
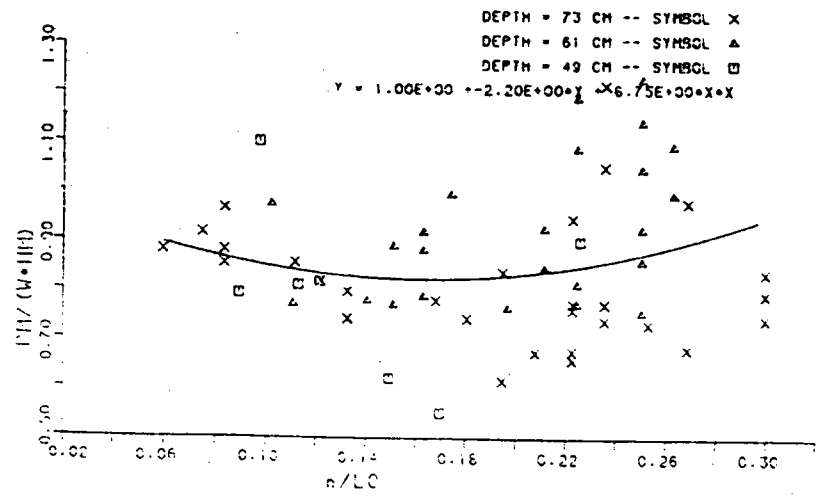
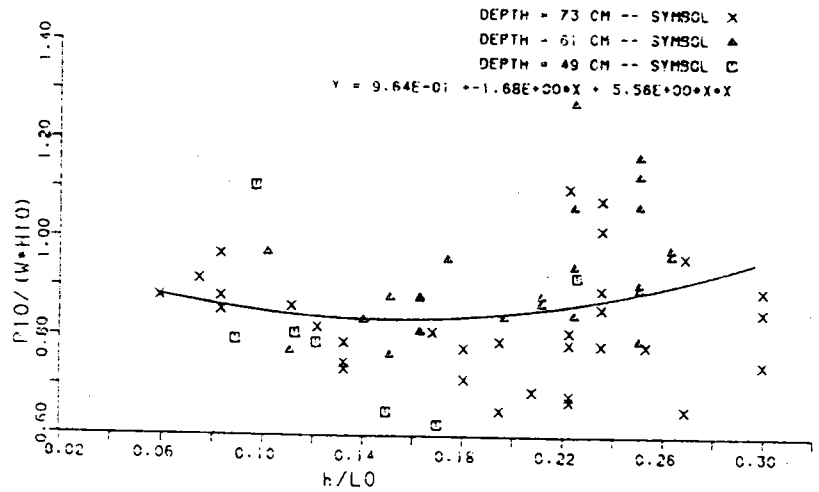


圖 5 － 3 (c)　波高，水面點波壓及斷面平均波壓之累積概率





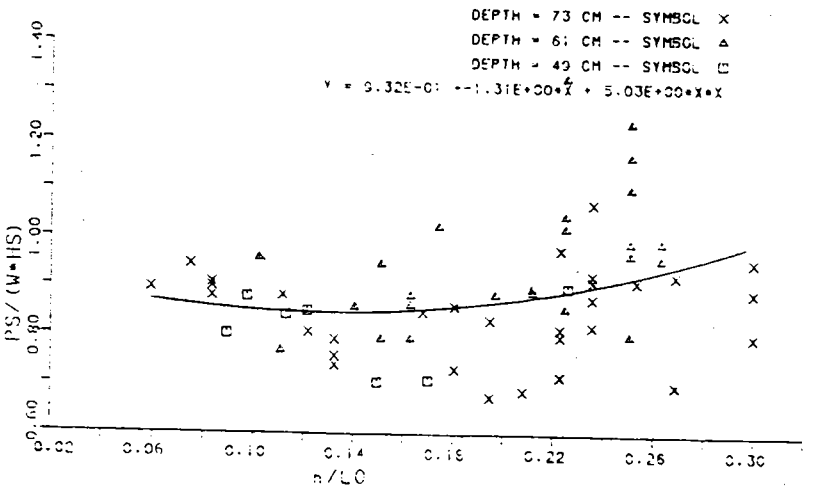


圖 5 — 4　p/wH 與 h/L 之關係

面時，水面點所產生之波壓力小於波峯點之靜水靜力。p／wH與h／L_o利用二次迴歸所得代表方程式分別爲：

$$P_{1/3} / wH_{1/3} = 0.932-1.31(h/L_o)+5.03(h/L_o)^2$$

$$P_{1/10} / wH_{1/10} = 0.964-1.68(h/L_o)+5.56(h/L_o)^2$$

$$P_{max} / wH_{max} = 1.00-2.20(h/L_o)+6.75(h/L_o)^2$$

(2)斷面平均波壓無因次參數$\bar{p}$／wH與h／L_o之關係

斷面平均波壓，$\bar{p}$與相對應波高無因次參數$\bar{p}_{1/3}/wH_{1/3}$、$\bar{p}_{1/10}/wH_{1/10}$及$\bar{p}_{max}/wH_{max}$與h/L_o之關係如圖5—5。試驗資料顯示，$\bar{p}$／wH與h／L_o之關係相當良好。$\bar{p}_{1/3}/wH_{1/3}$，$\bar{p}_{1/10}/wH_{1/10}$與$\bar{p}_{max}/wH_{max}$均隨h/L_o增加而略爲減小。換言之，當水深h相同時平均波壓隨波長減小而略爲減小；在h／L_o小於0.1時較爲顯著。此種趨勢與波壓理論相符合。

$\bar{p}$／wH之值大多介於0.45與0.70之間，二次迴歸曲線分別爲：

$$\bar{p}_{1/3}/wH_{1/3} = 0.827-2.32(h/L_o)+4.35(h/L_o)^2$$

$$\bar{p}_{1/10}/wH_{1/10} = 0.830-2.23(h/L_o)+3.83(h/L_o)^2$$

$$\bar{p}_{max}/wH_{max} = 0.834-2.18(h/L_o)+3.43(h/L_o)^2$$

3. 波壓無因次參數p／wH與相對波高H／h之關係

相對波高H/h爲影響碎波重要參數。理論上H/h小於0.5時，屬於未碎波(Non-breaking wanes)，波壓受H／h之影響不顯著。

(1)水面測點波壓無因次參數p／wH與相對波高H／h之關係

試驗所得水面測點波壓無因次參數p/wH與相對波高H/h之關係如圖5－6。圖中橫坐標，波高H爲$H_{1/3}$。無因次關係圖顯示，p／wH與H／h之關係極爲一致，p／wH隨H／h增加而略微減小。受試驗水深影響不明顯。二次迴歸曲線分別爲：

$$p_{1/3}/wH_{1/3} = 1.12-2.42(H_s/h)+4.31(H_s/h)^2$$

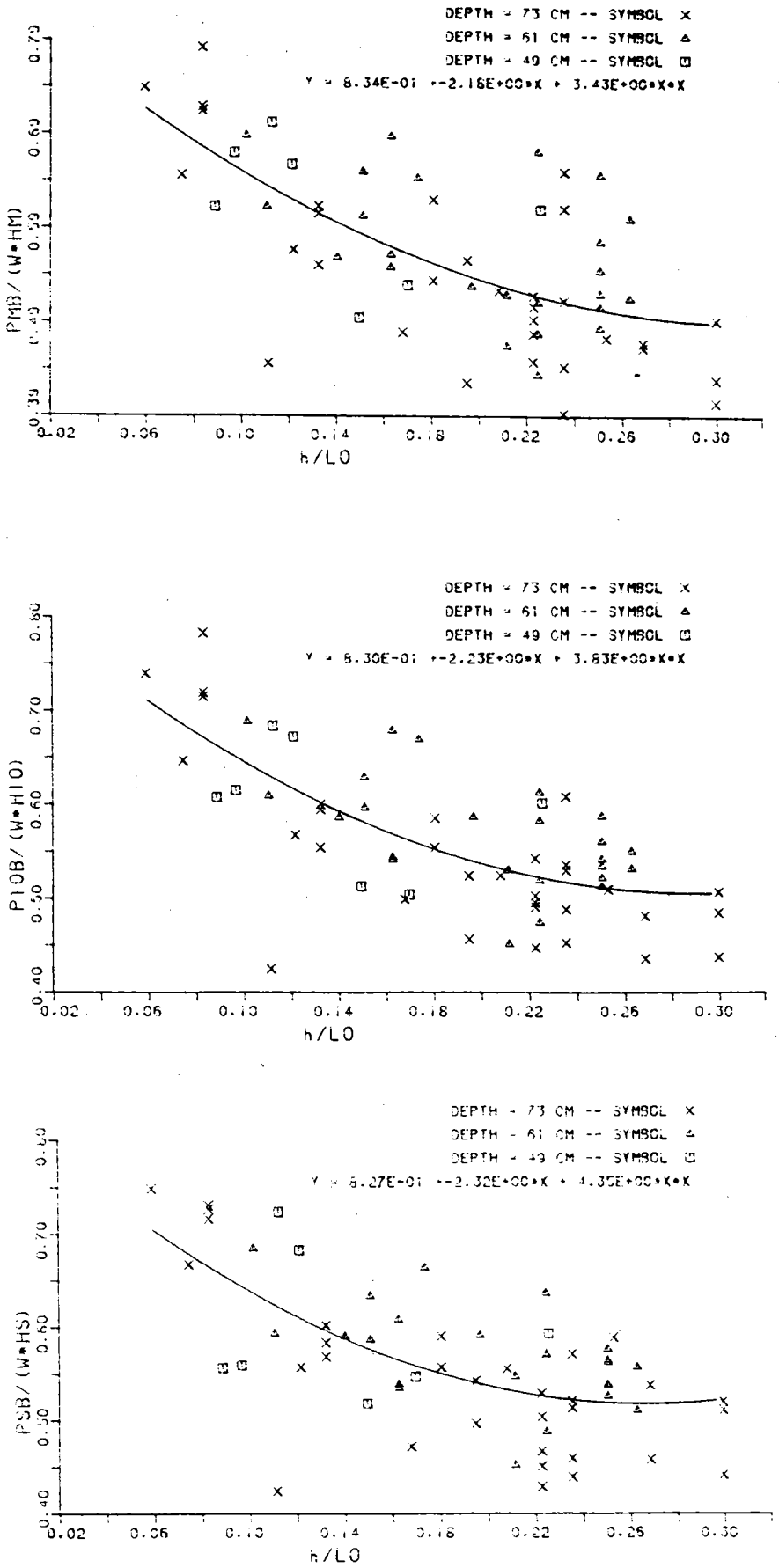
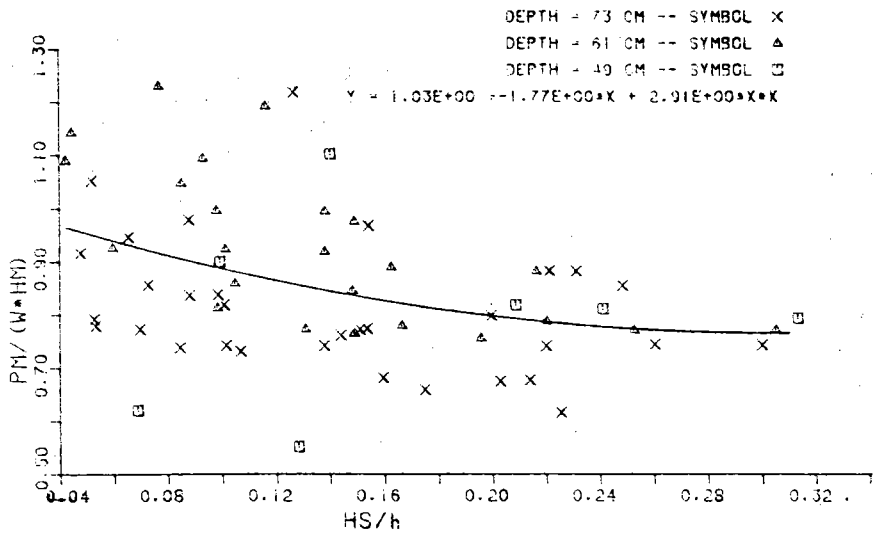
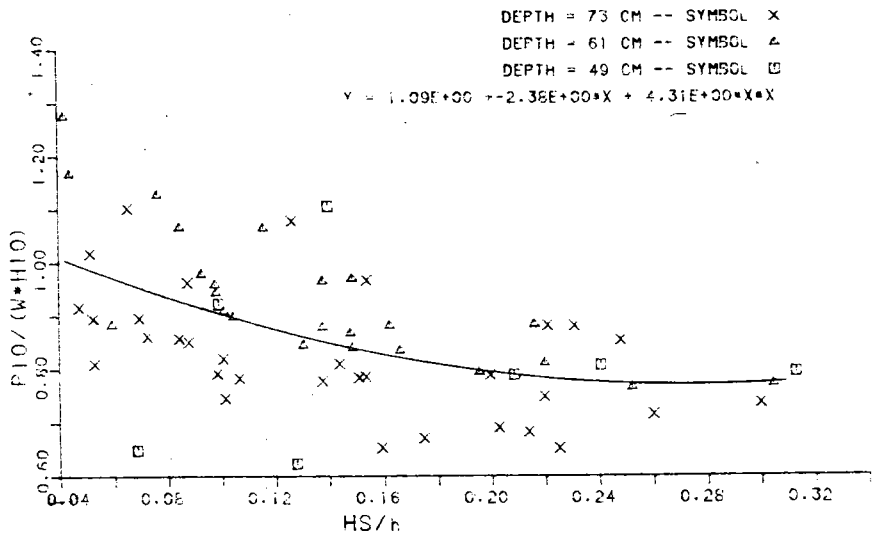


圖 5 － 5　$\overline{p}$/wH 與 h/L 之關係





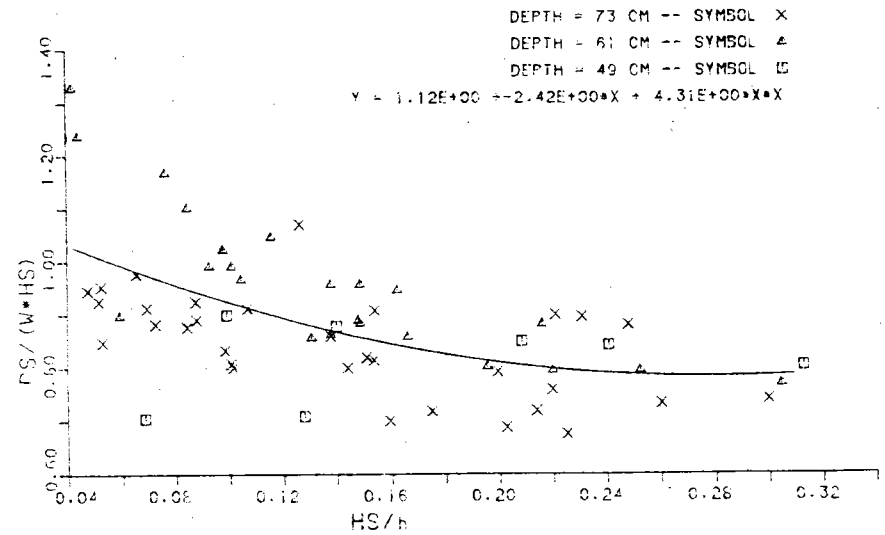


圖 5 — 6　p/wH 與 H/h 之關係

$$p_{1/10}/wH_{1/10}=1.09-2.38(H_s/h)+4.31(H_s/h)^2$$

$$p_{max}/wH_{max}=1.03-1.77(H_s/h)+2.91(H_s/h)^2$$

(2)斷面平均波壓無因次參數 $\bar{p}/wH$ 與相對波高 H/h 之關係

三種統計值斷面平均波壓無因次參數 $\bar{p}_{1/3}/wH_{1/3}$，$\bar{p}_{1/10}/wH_{1/10}$ 及 $\bar{p}_{max}/wH_{max}$ 與相對波高 H/h 之關係如圖 5－7。圖中橫坐標 H 爲 $H_{1/3}$。$\bar{p}/wH$ 與 H/h 之關係較爲散亂。在試驗範圍內，$\bar{p}/wH$ 隨 H/h 增加而略微增大，此種趨勢與理論值一致。二次迴歸曲線分別爲：

$$\bar{p}_{1/3}/wH_{1/3}=0.491+0.57(H_s/h)-0.524(H_s/h)^2$$

$$\bar{p}_{1/10}/wH_{1/10}=0.496+0.419(H_s/h)+0.096(H_s/h)^2$$

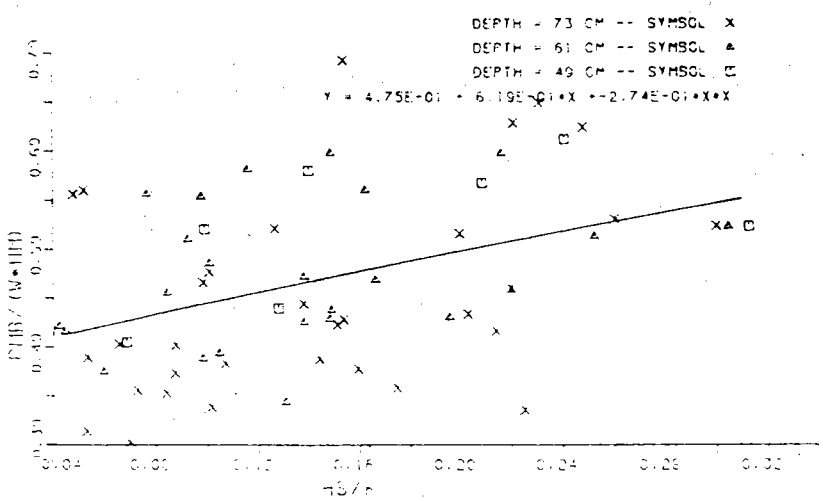
$$\bar{p}_{max}/wH_{max}=0.475+0.619(H_s/h)-0.274(H_s/h)^2$$

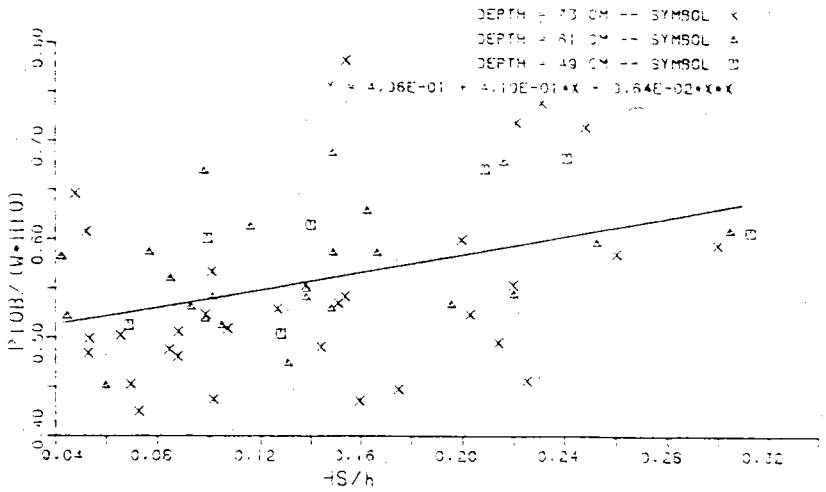
4. 波高與波壓各種概率平均值間之關係

本次試驗爲避免二次反射影響，每次試驗僅錄取其中45.秒鐘之資料，波浪數約爲30.個。以示性波高 $H_{1/3}$ 爲參考值，最大波高 H_{max} 及最大十分之一波高 $H_{1/10}$ 與 $H_{1/3}$ 之比值分別爲 $H_{max}/H_{1/3}$ 及 $H_{1/10}/H_{1/3}$。$H_{1/10}/H_{1/3}$ 之值大多介於 1.1 與 1.4 之間，分佈較爲集中，而 $H_{max}/H_{1/3}$ 之值則因波數不足，分佈較爲散亂。有些試驗 H_{max} 與 $H_{1/10}$ 相等，其比值大多在 1.1 與 1.6 之間。

水面測點波壓以概率三分之一 $p_{1/3}$ 爲參考值，$p_{1/10}/p_{1/3}$，$p_{max}/p_{1/3}$ 之分佈範圍分別爲 1.1 至 1.3 及 1.1 至 1.5 間。$p_{1/10}/p_{1/3}$、$p_{max}/p_{1/3}$ 與 h/L_o 及 $p_{1/10}/p_{1/3}$，$p_{max}/p_{1/3}$ 與 H_s/h 之關係分別如圖 5－8 及 5－9。斷面平均波壓力各種概率平均值之比 $\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}$ 及 $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$ 則分別介於 1.1 至 1.35 及 1.1 至 1.5 之間。$\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}$ 及 $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$ 隨 h/L_o 變化情形如圖 5－10.，$\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}$ 及 $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$ 與 $H_{1/3}/h$ 之關係如圖 5－11.。

各種概率斷面平均波壓比值 $\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}$ 及 $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$ 與相對應概率波高比值 $H_{1/10}/H_{1/3}$ 及 $H_{max}/H_{1/3}$ 之關係分別如圖 5－12.及 5－13.。





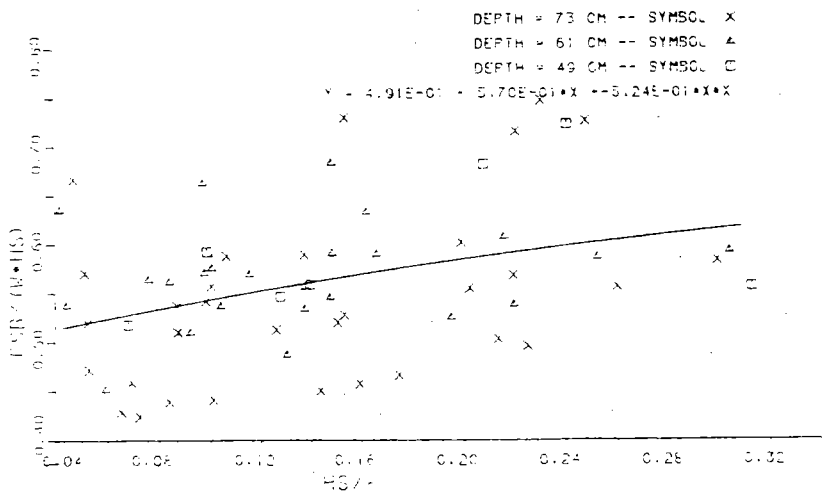
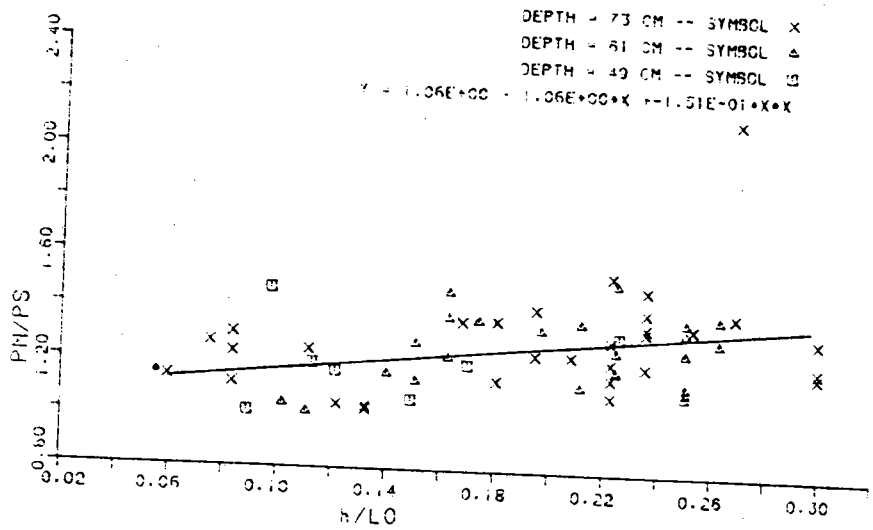


圖 5 — 7　$\bar{p}/wH$ 與 H/h 之關係



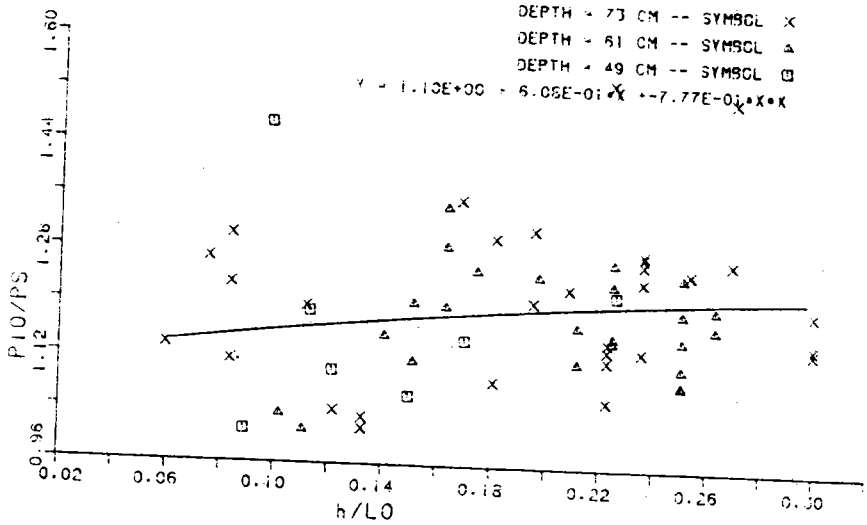
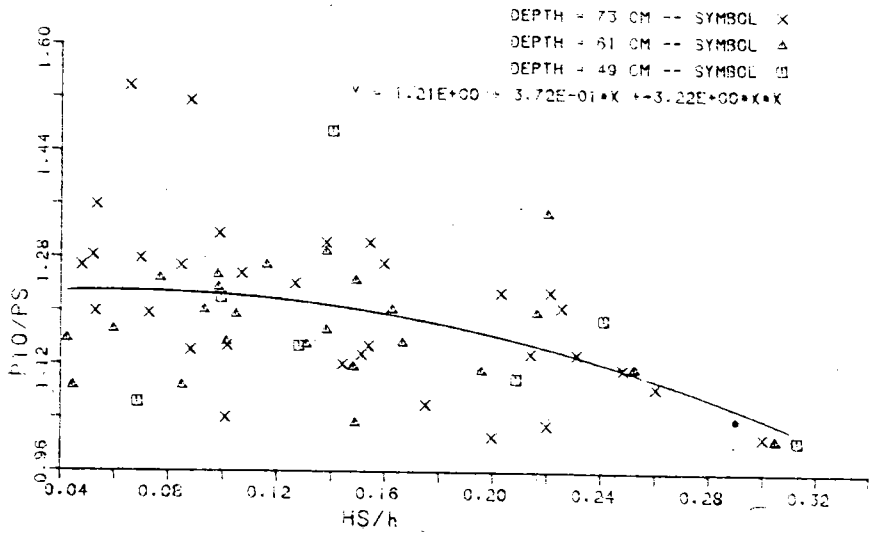


圖 5 — 8　$p_{1/10}$ ／ $p_{1/3}$ ， p_{max} ／ $p_{1/3}$ 與 h/Lo 之關係



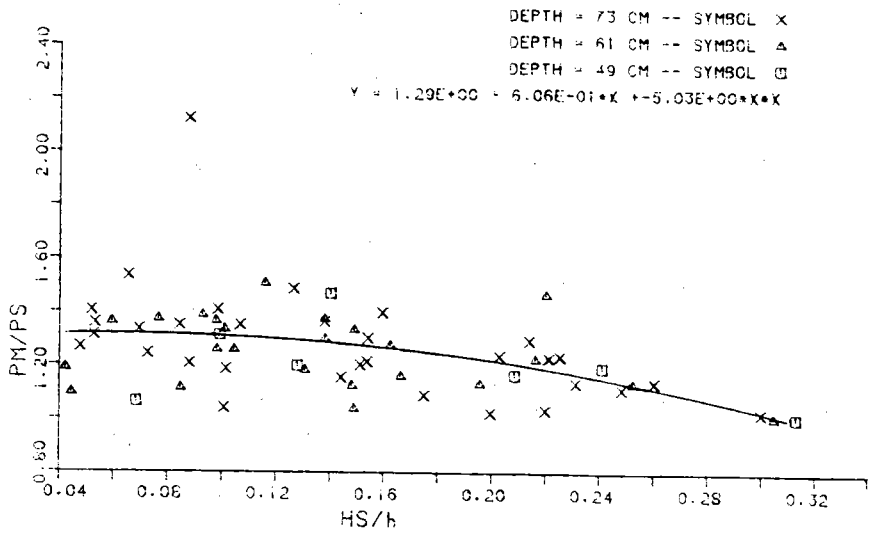
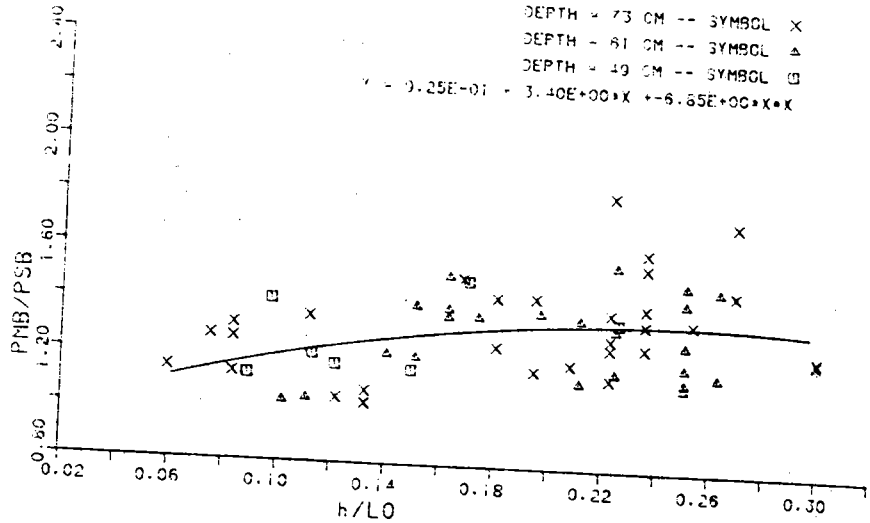


圖 5 — 9　$p_{1/10}/p_{1/3}$，$p_{max}/p_{1/3}$ 與 H/h 之關係



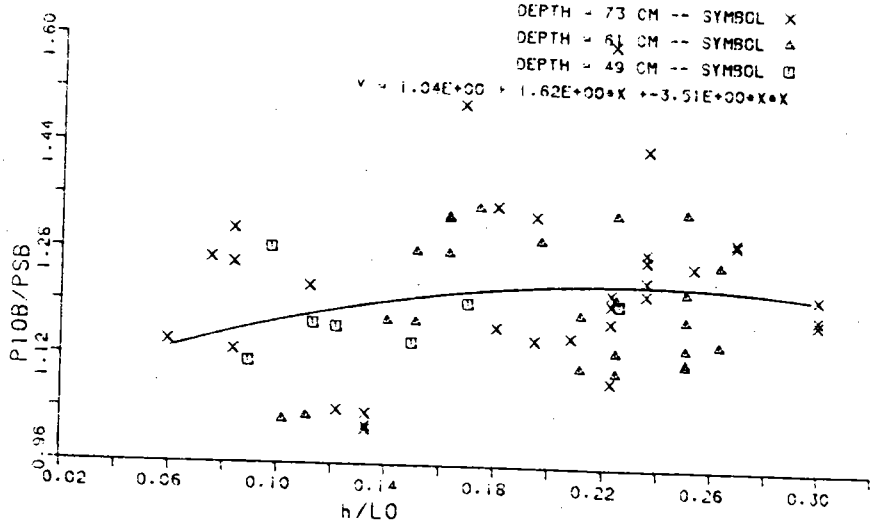
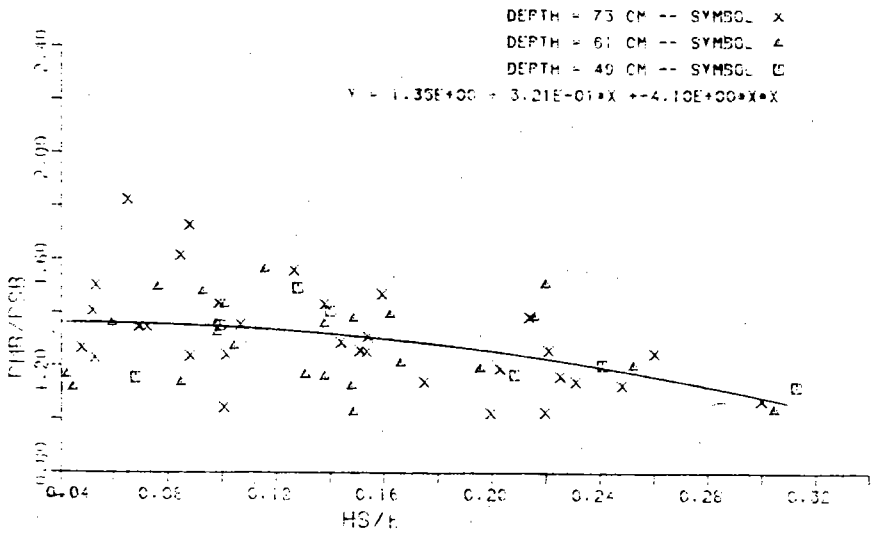


圖 5 — 10　$\overline{p}_{1/10}/\overline{p}_{1/3}$，$\overline{p}_{max}/\overline{p}_{1/3}$ 與 h/L_0 之關係



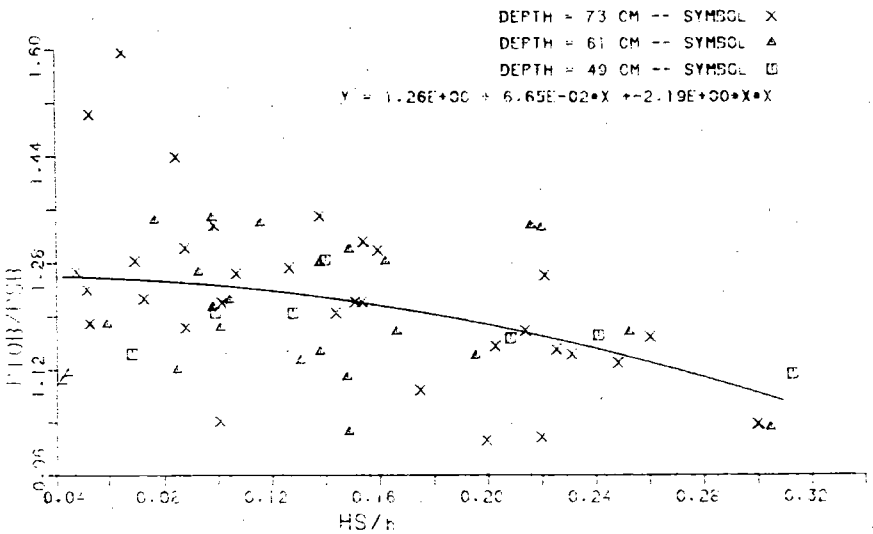


圖 5 — 11　$\overline{p}_{1/10}/\overline{p}_{1/3}$，$\overline{p}_{max}/\overline{p}_{1/3}$ 與 H／h 之關係

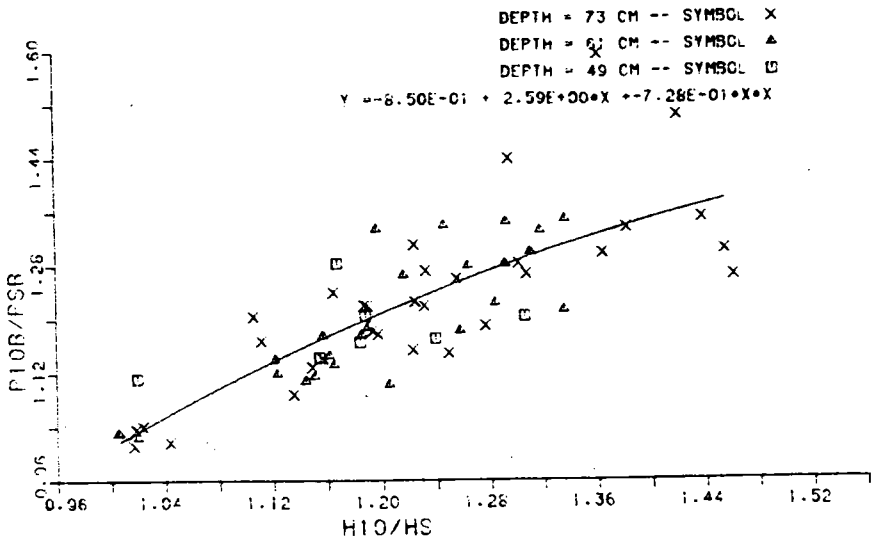


圖 5 — 12　$\bar{p}_{1/10}$ ／$\bar{p}_{1/3}$ 與 $H_{1/10}$ ／$H_{1/3}$ 之關係

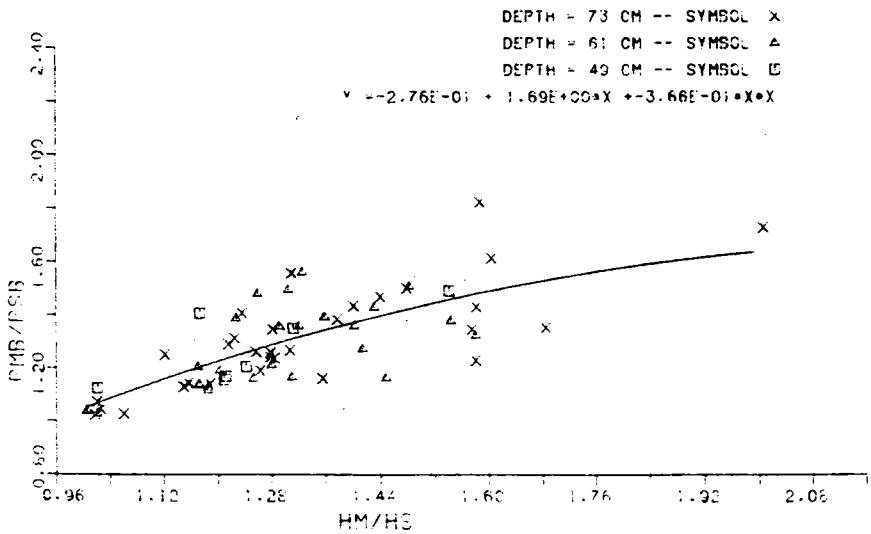


圖 5 — 13　$\bar{p}_{max}$ ／$\bar{p}_{1/3}$ 與 H_{max} ／$H_{1/3}$ 之關係

兩無因次參數間資料成扇形分佈，迴歸線斜率接近 1 ： 1。此種現象顯示，在統計上不規則波群中，較大的波高造成較高波壓之趨勢，但如果利用波群中，統計上慣用之示性波高 $H_{1/3}$ 所得之波壓力 $\bar{p}_{1/3}$ 推估 $\bar{p}_{1/10}$ 及 $\bar{p}_{max}$，則隨 $H_{1/10}/H_{1/3}$ 或 $H_{max}/H_{1/3}$ 之值增加而產生較大之偏差。

5. 水平總壓力試驗值與計算值之比較

作用於合成堤直立部份之水平總壓力 F，與靜水壓力之比 F/wd^2，d 爲防波堤直立部份之水深，隨堤前相對水深 h/L_o 及相對波高 H/d 增加而加大。因爲試驗所採用之相對水深並未固定，爲便於與波壓計算公式比較，將 h/L 按大小歸併成四組，分別爲 $0.10 \leq h/L \leq 0.139$，$0.160 \leq h/L \leq 0.200$，$0.220 \leq h/L \leq 0.259$，$0.260 \leq h/L \leq 0.280$。波壓計算爲 Nagai 公式及 Sainflou 公式兩種，h/L 值依次分別爲 0.120、0.180、0.240 及 0.270。

圖 5－14 爲不同之 h/L 值 F/wd^2 與 H/d 關係試驗值與 Nagai 公式計算值之比較。當 $h/L < 0.135$ 時，Nagai 波壓計算公式歸爲淺水，計算所得 F/wd^2 隨相對波高 H/d 增加而急遽加大，$h/L = 0.120$ 時，Nagai 公式計算值與試驗值之差異隨 H/d 增加而更顯著。試驗資料 F/wd^2 與 H/d 呈現近似 1 ： 1 之增加趨勢。$0.135 \leq h/L \leq 0.35$ 時 Nagai 公式列爲中水深，當 h/L 增爲 0.180 時，Nagai 公式計算值與試驗值差異已顯著減小，但所得 F/wd^2 仍較試驗略大。h/L 增加爲 0.24 時，計算值更接近試驗值，但仍稍微偏大。當 h/L 增爲 0.27 時，試驗值均較計算值大。由此可知利用 Nagai 公式計算波壓，在淺水時（$h/L < 0.135$）顯著偏大，且隨 H/d 增大而與試驗值差異愈大。h/L 增至 0.27 接近深水界限線（$h/L \geq 0.35$），計算值較試驗值有偏小之趨勢。

上述比較試驗水平總波壓力 F 係採用概率最大三分之一斷面平均波壓 $\bar{p}_{1/3}$ 計算。因此，試驗波壓力 F，若採用 $\bar{p}_{1/10}$ 或 $\bar{p}_{max}$ 計算，則 Nagai 公式在計算中水深（$0.135 \leq h/L < 0.35$）波壓力所造成差異將更大。

F/wd^2 試驗值與 Sainflou 公式計算值比較如圖 5－15。當 $h/L = 0.120$ 時，Sainflou 公式所求得波壓力與試驗值相當符合。Sainflou 公式計算值，隨 h/L 增加

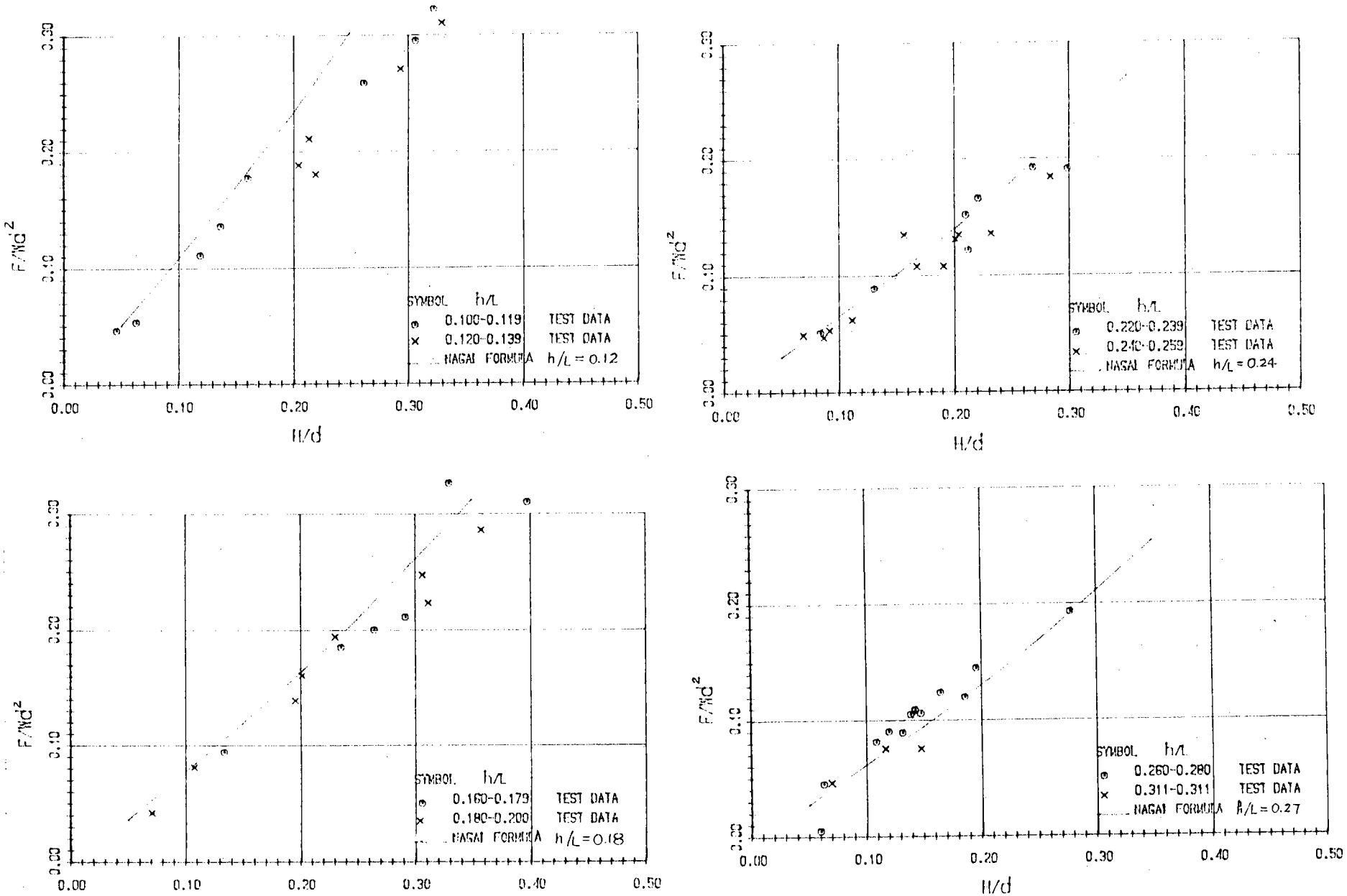


圖 5 — 14　F ／ wd²與 H ／ d 試驗值與 Nagai計算值比較

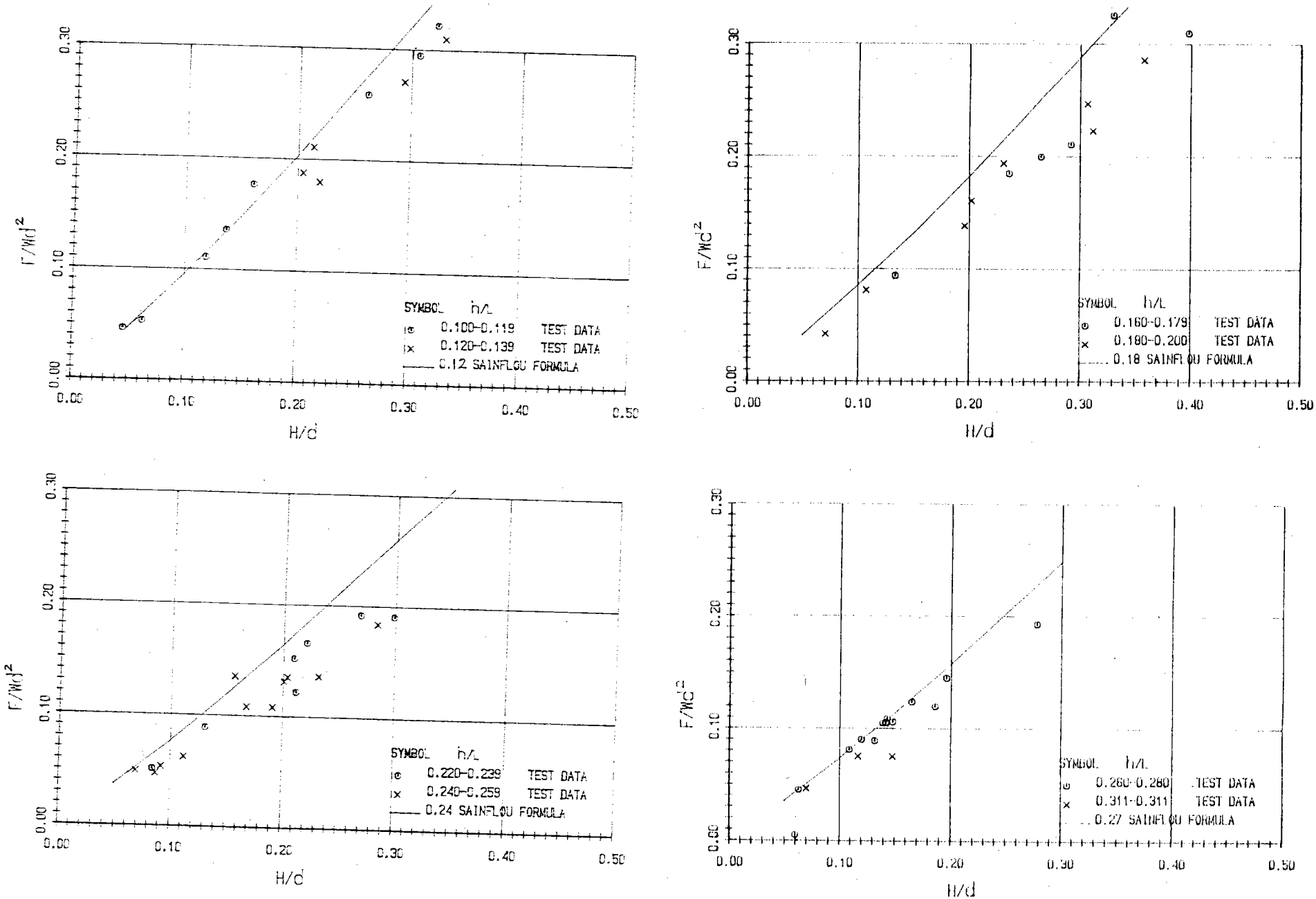


圖 5 — 15　F／wd² 與 H ／ d 試驗值與 Sainflou 計算值比較

而漸大於試驗值。但若試驗值採用 $\overline{p}_{1/10}$ 計算水平總壓力，則計值較試驗值有偏小之趨勢。

(三)最大波壓統計分析特性

本次試驗共完成三種試驗水位，共計 72 個試驗情況。試驗最大波高 H_{max} 由 3 cm 至 22 cm，示性週期 $T_{1/3}$ 由 0.8sec 至 2.5sec，涵蓋範圍甚廣。其中有 32 個試驗最大波高已達碎波(Breaking Wave)界限 $H_{max}/d \geq 2.0$（其中含 10 個越波試驗情況），另外 40 個試驗屬於重複波範圍。本節僅就重複波試驗情況，加以討論其最大波壓統計特性及垂直分佈狀況。

1. 波壓試驗值與計算值垂直分佈

試驗資料經整理後，各試驗情況最大波壓垂直分佈與 Sainflou 公式及 Goda 公式計算值比較如圖 5－16。根據本試驗研究所推導之波壓計算公式計算值亦標示於圖中。

計算公式所採用波高為試驗波群中最大波高 H_{max}。週期為示性週期 $T_{1/3}$。當相對水深 h／L 值較小時，Goda公式計算值遠較 Sainflou公式計算值為大。隨著相對水深值之增加，二種波壓公式之計算值則趨於一致。壁面受波峯作用時，試驗波壓分佈顯示，最大動壓力值大部發生在水面測點；但當拋石基礎面上水深 d 值減小時，發生最大動壓力值之位置則有往水面下移之趨勢，如(S)及(t)圖之最大動壓力試驗值均在水面下。相對波高 H_{max}/h 較大時，兩種公式之計算值均較試驗值為大。Goda 公式所求得波壓較 Sainflou計算波壓值大。H_{max}/h 隨著入射波高之減小而減低，試驗值與計算值則逐漸趨於一致。Sainflou及 Goda 二種公式之計算值亦相當接近。

2. 波峯時波壓特性

當壁面為波峯時，水面測點之最大動壓力 $\overline{p}_1$ 與入射波群之最大波高 H_{max} 無因次參數 p_1/wH_{max} 與合成堤堤基相對水深 h／L 之關係如圖 5－17。p_1/wH_{max} 之值介於 0.7 與 1.0 之間，受 h／L 影響不顯著。p_1/wH_{max} 值較前節所得結果略高，主要係本節分析採用最大波高為第 13 頻道波浪，較前節所採用波高略低。波峯時沈箱底部波壓力 p_2 與最大波壓之比值 p_2/p_{max} 隨堤基相對水深 h／L

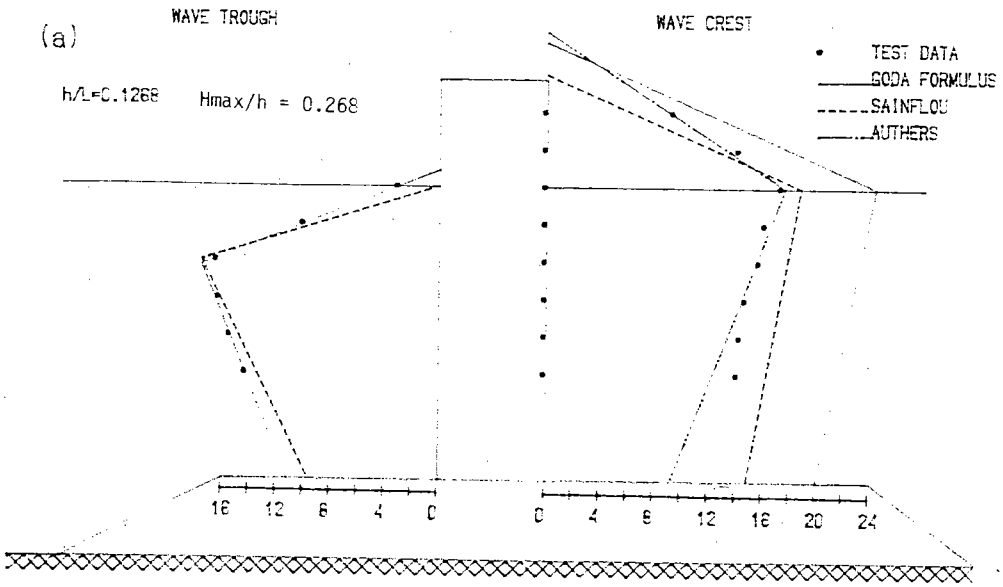


圖 5 — 16 (a)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

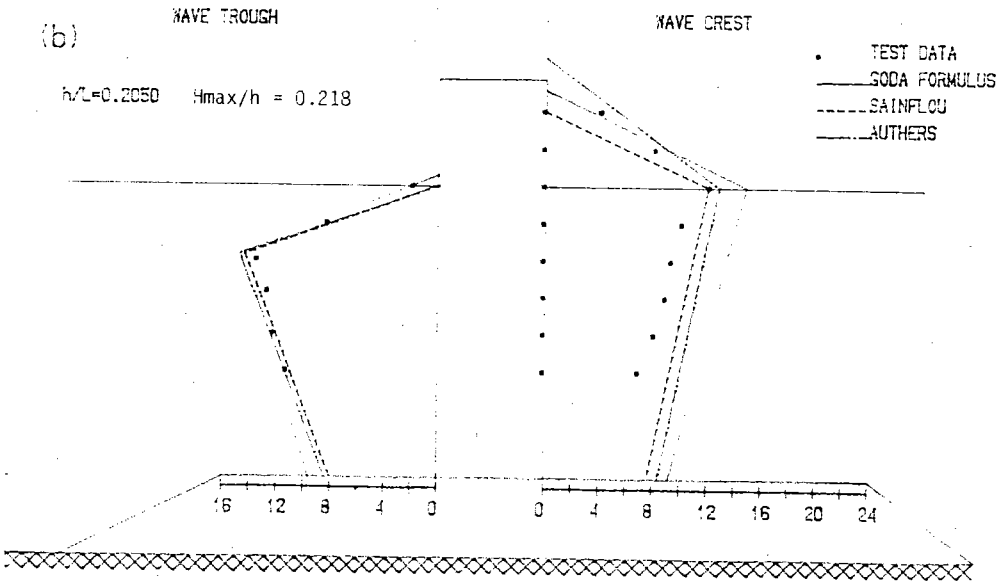


圖 5 — 16 (b)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

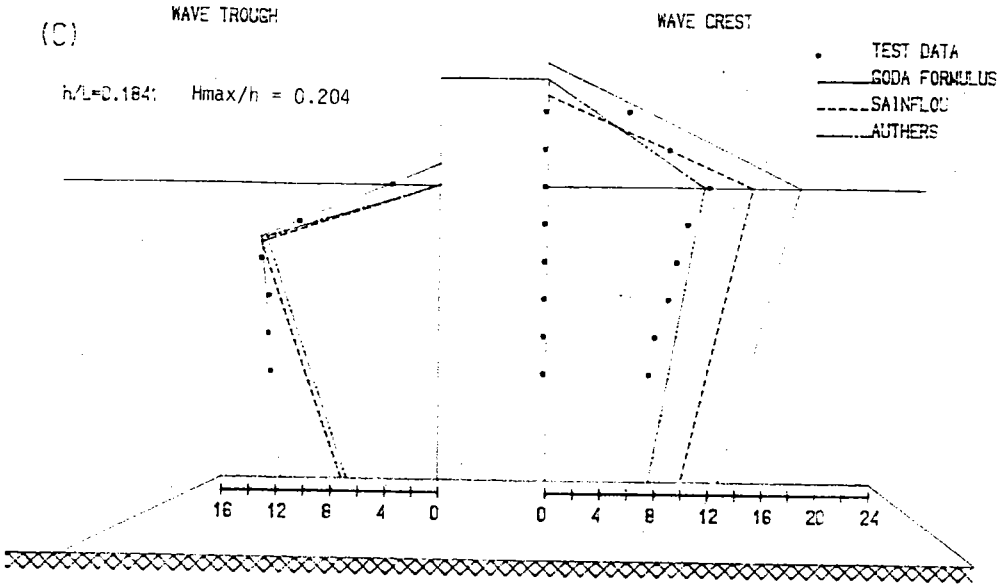


圖 5 — 16 (c)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

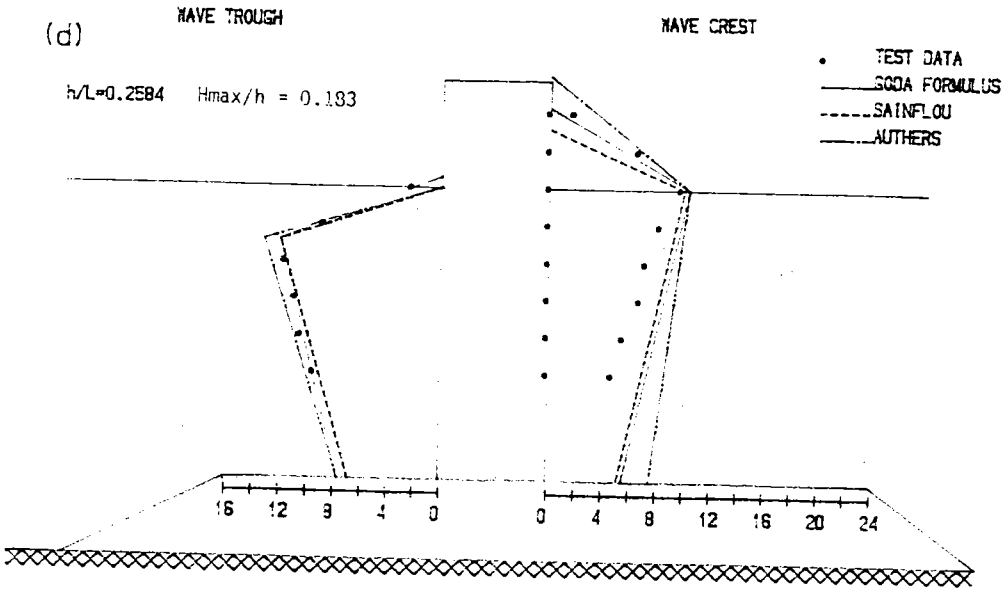


圖 5 — 16 (d)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

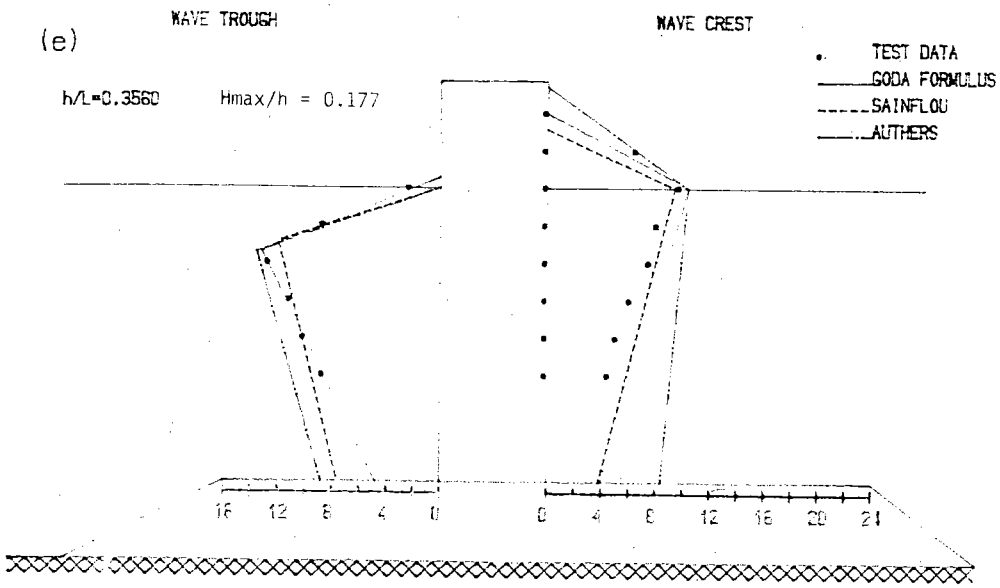


圖 5 — 16 (e)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

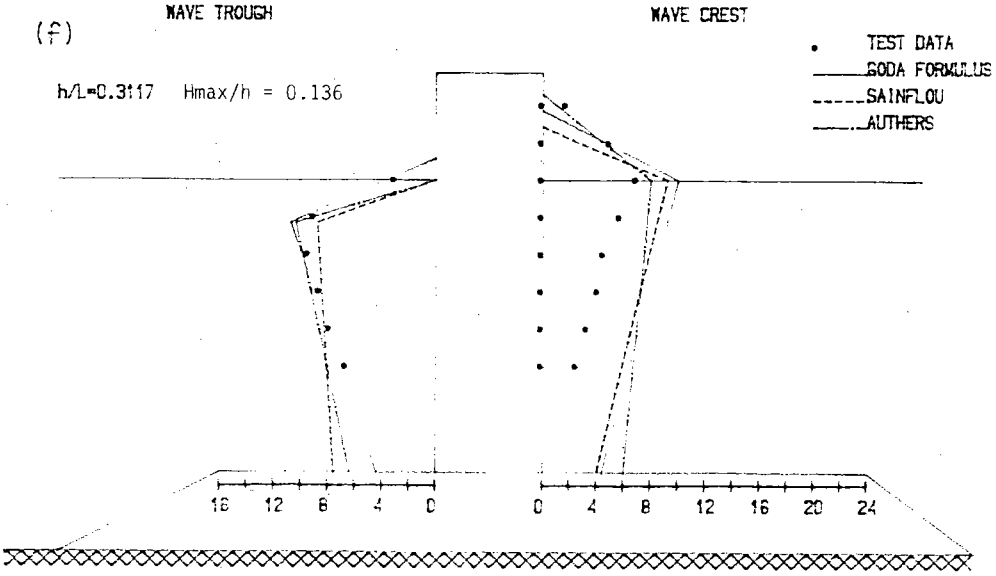


圖 5 — 16 (f)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

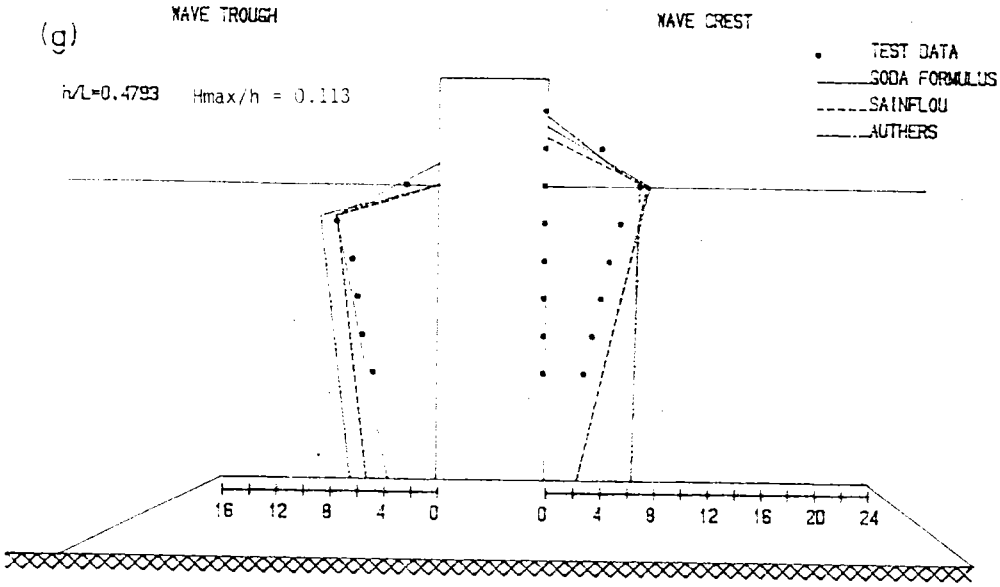


圖 5 — 16 (g)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

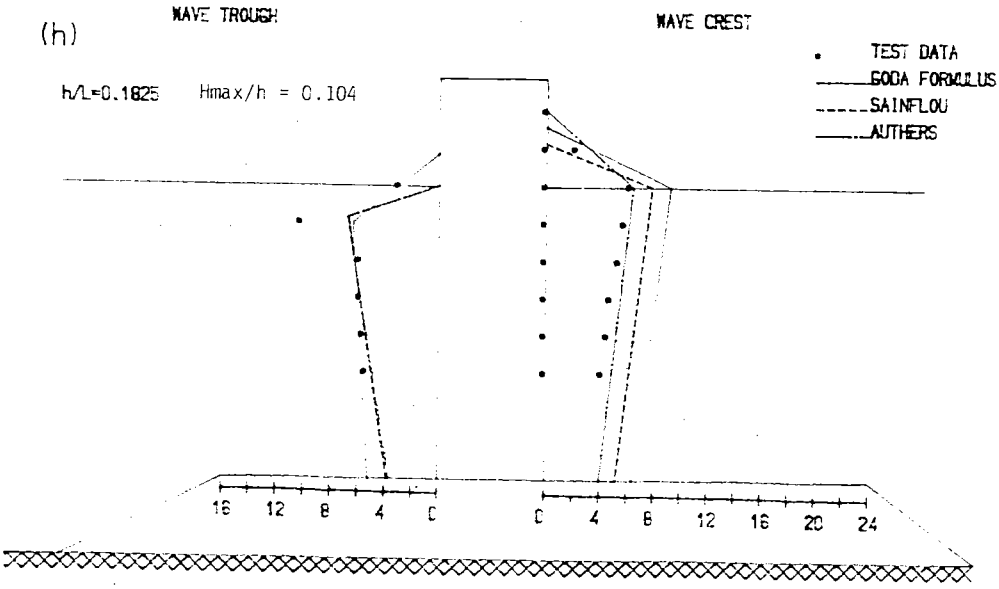


圖 5 — 16 (h)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

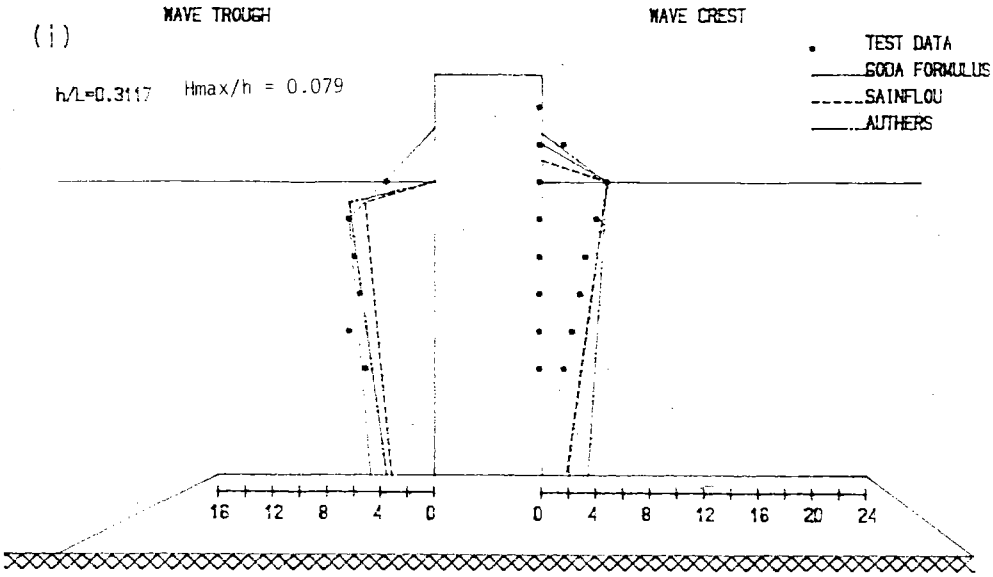


圖 5 — 16 (i)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

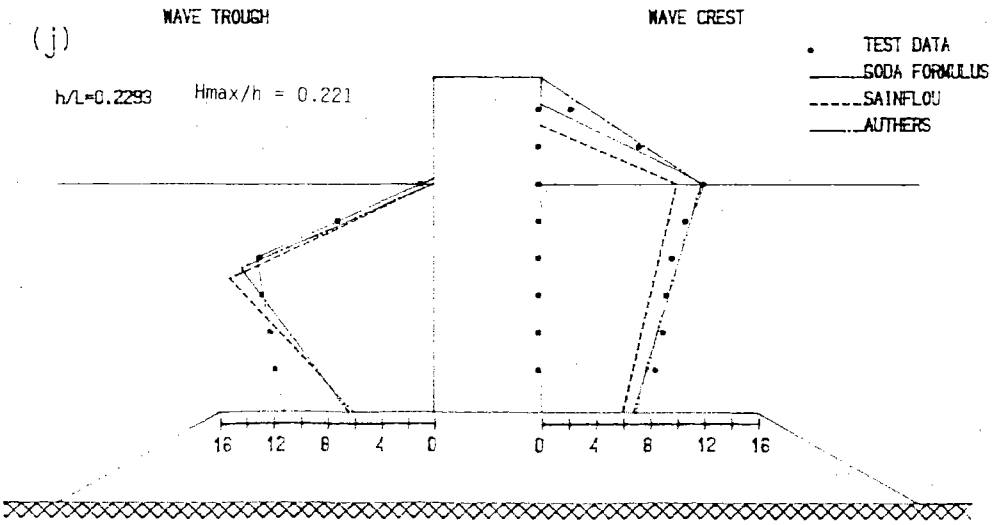


圖 5 — 16 (j)　最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

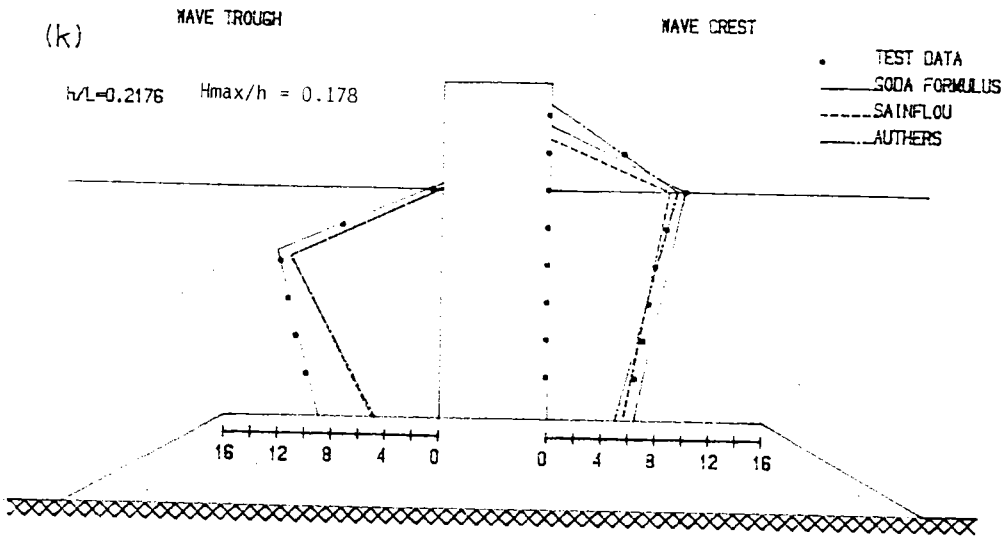


圖5—16(k) 最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

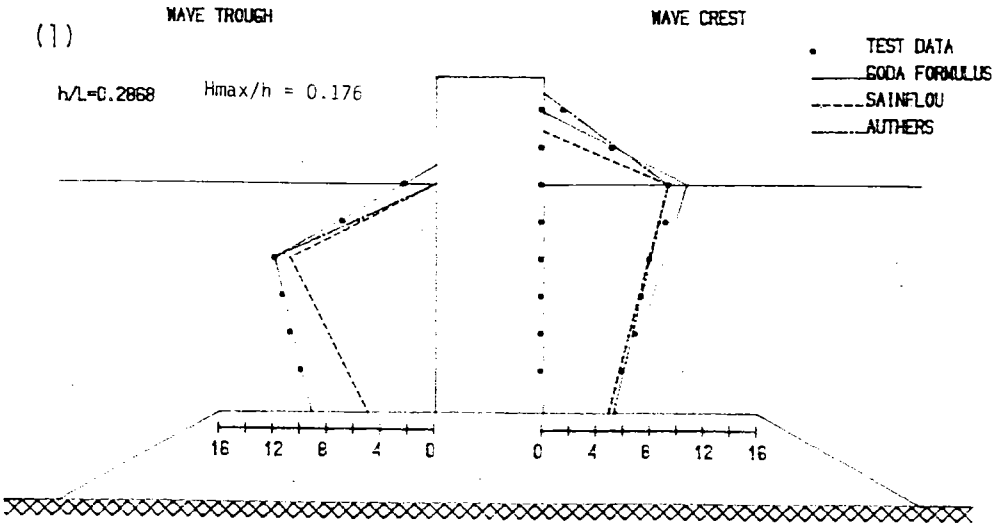


圖5—16(l) 最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

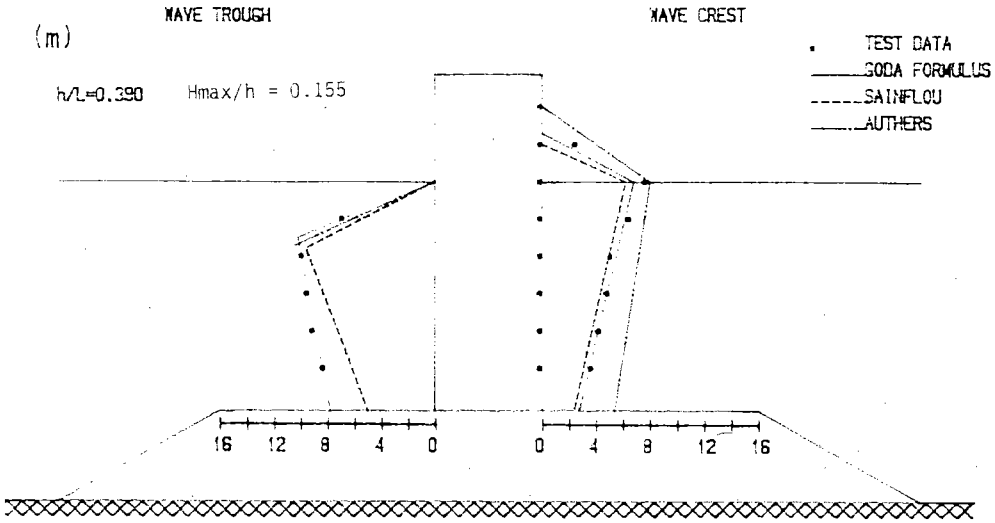


圖 5—16(m) 最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

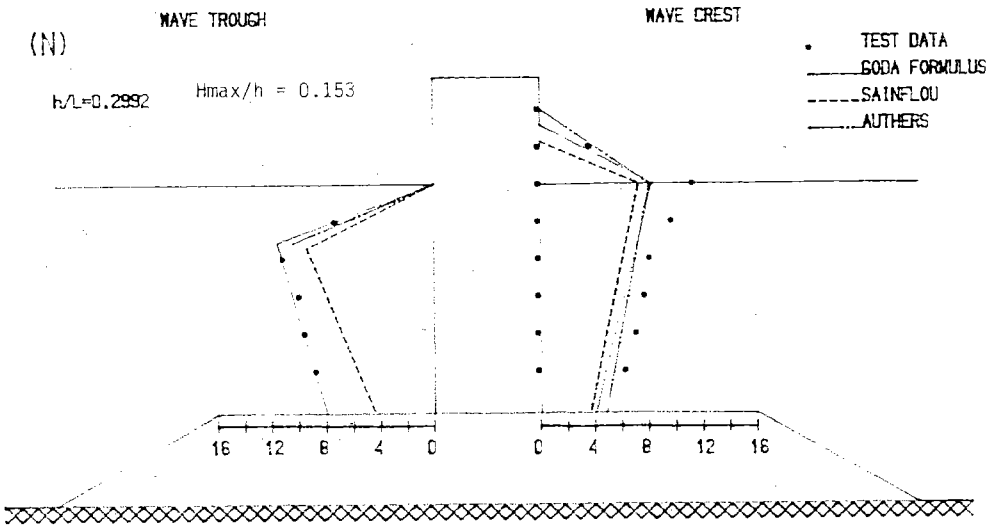


圖 5—16(n) 最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

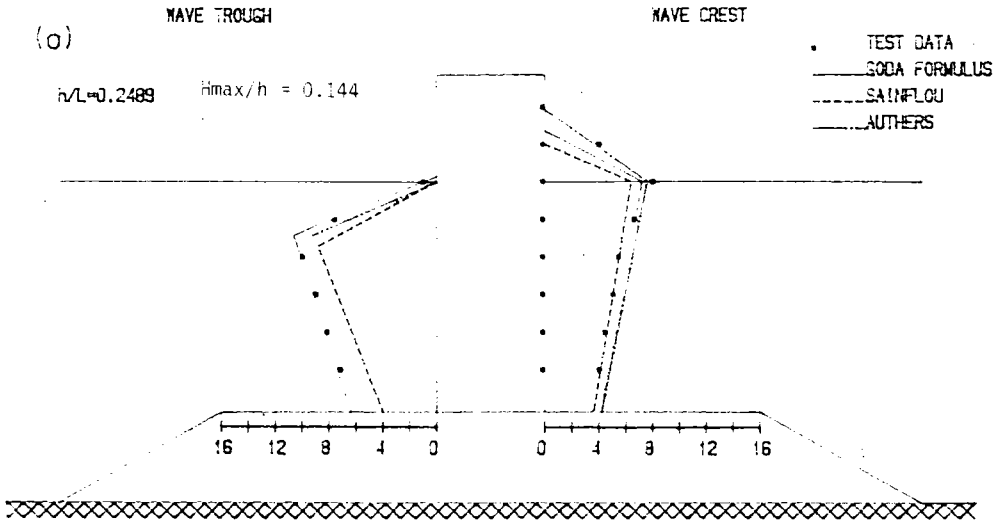


圖 5—16(o) 最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

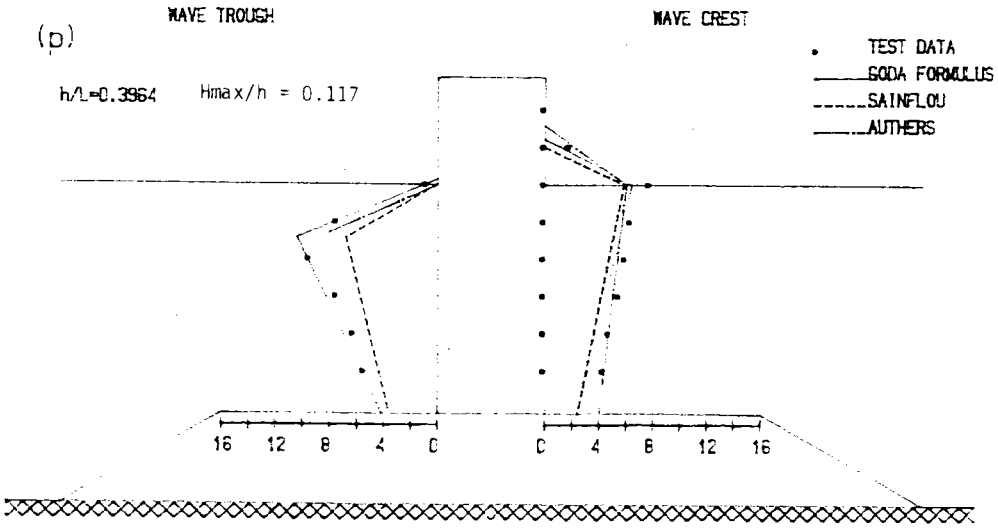


圖 5—16(p) 最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

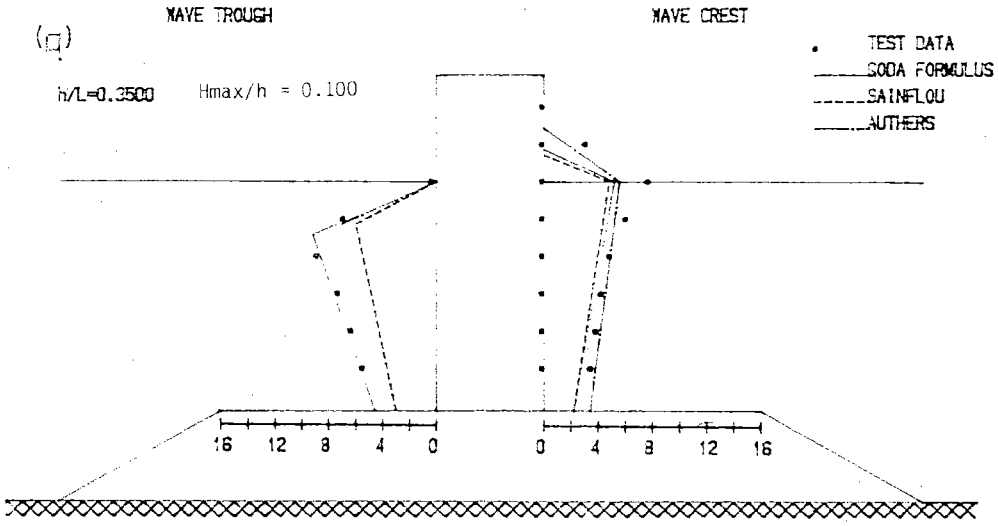


圖 5—16(Q) 最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

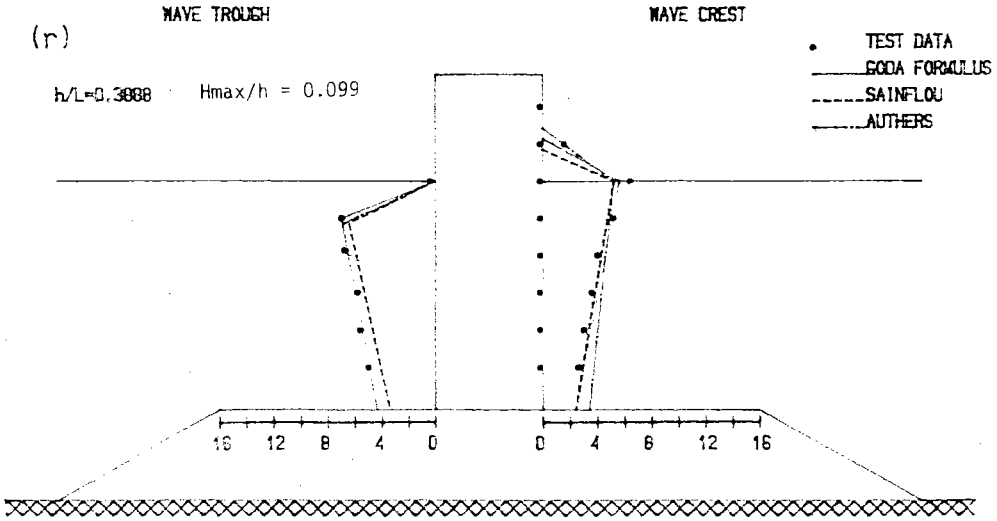


圖 5—16(r) 最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

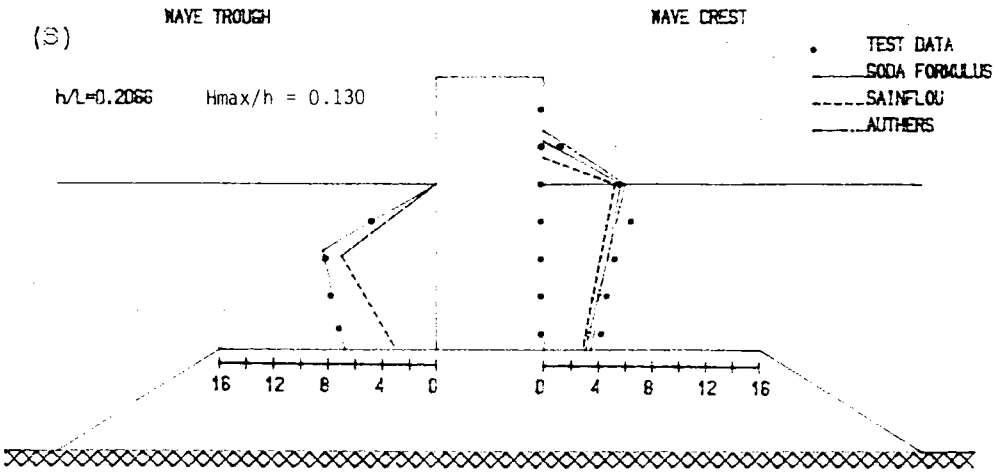


圖 5—16(s) 最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

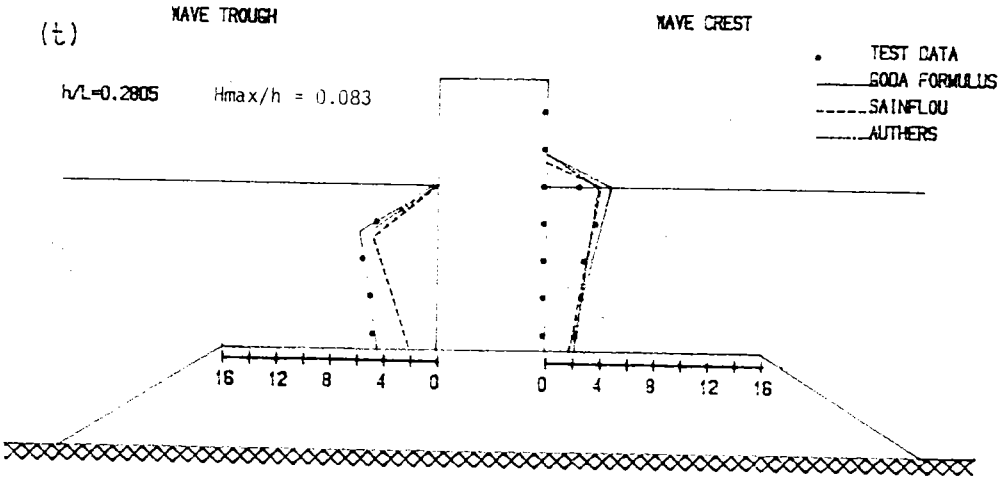


圖 5—16(t) 最大波壓斷面分佈試驗與計算值比較

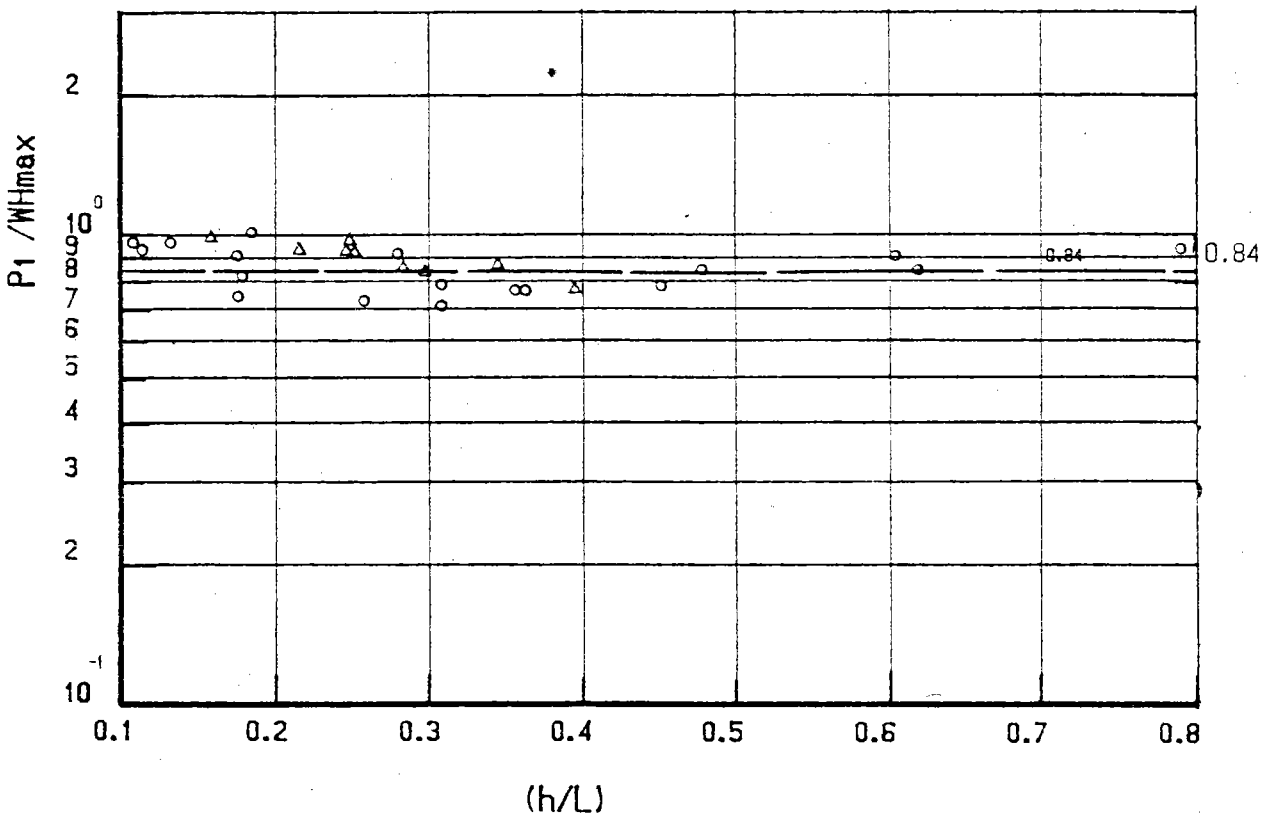


圖 5 — 17　p_1 / wH_{max} 與 h ／ L 之關係

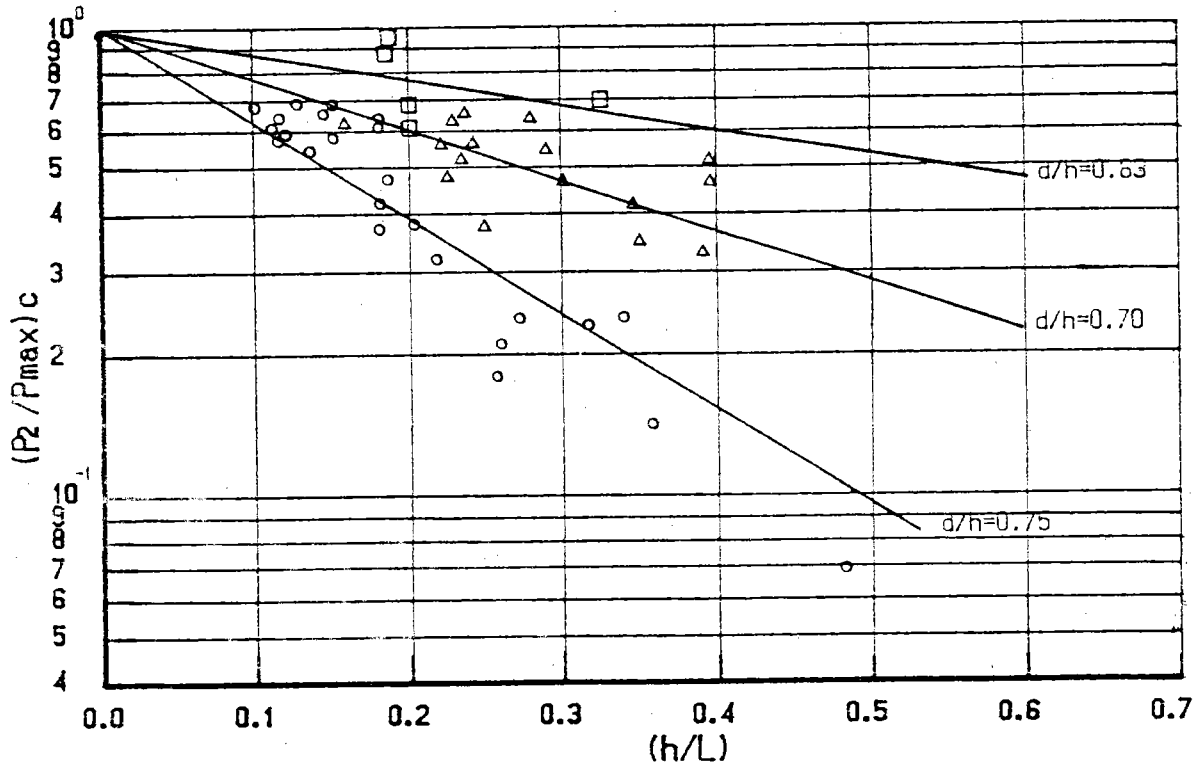


圖 5 — 18　p_2 / p_{max} 與 h ／ L 之關係

增加而減小，如圖 5 － 18。同一相對水深 p_2值隨著拋石基礎面上水深 d 增加而成指數分佈減小。當 h ／ L ＝ 0 時 p_2 等於 p_{max} 。

垂直堤面上波峯時水位上升值 R 與入射波群最大波高 H_{max}，比值 R/H_{max} 與 h ／ L 關係如圖 5 － 19。R/H_{max} 值不隨 h ／ L 增減而改變;與試驗水深亦無直接關係。R/H_{max} 之值介於 1.1 至 1.9 之間，大部份集中於 1.5 即 R ≐ 1.5 H_{max} 。

3. 波谷時波壓特性

當壁面爲波谷時，其發生最大動壓力 p_1' 距離水面下之位置 R' 與入射波群之最大波高 H_{max} 比值 R'/H_{max} 與堤基相對水深 h／L 關係如圖 5 － 20。h ／ L 相同時，R'值隨著 d ／ h 值之增加而相對減小，此意謂著，當 h 固定時，拋石基礎面上之水深 d 增加時，R' 值有減小趨勢。圖 5 － 21 爲防波堤直立壁面爲波谷時，其最大動壓力值與入射波群最大波高 H_{max} 比值 p'_1/wH_{max} 與 h ／ L 之關係，圖中顯示 p'_1/wH_{max} 隨著拋石基礎面上水深 d 之增加而減小。圖 5 － 22 爲壁面爲波谷時，合成堤拋石基礎面上最大動壓力 p'_2 與整個垂直斷面發生最大動壓力 p_1' ，比值 p_2'/p_1' 之分佈隨著相對水深 h ／ L 以及 d ／ h 比值增加而減小。堤基相對水深 h ／ L ＝ 0 時 p_1'/p_2' 值趨近於 1.0 。

4. 波峯、波谷時水面波壓比較

波谷時，堤前動壓力最大值 p_1' 與波峯時動壓力最大值 p_1之比 p_1'/p_1與 h ／ L 之關係如圖 5 － 23。試驗資料顯示相對水深 h ／ L ＞ 0.175 時，則壁面爲波谷時，其最大動壓力值 p_1' 遠較壁面爲波峯時所發生之最大動壓力值 p_1 爲大。此種結果顯示，深水防波堤最大動壓力值並非絕對發生在壁面爲波峯作用時，而可能發生在壁面爲波谷時。此時最大動壓力方向與波浪前進方向相反。

5. 根據試驗資料推導波壓公式

根據本次研究各種試驗所得資料，推導重複波波壓公式如下：

堤面受波峯作用時

$$p_1 = \alpha_1 w H_{max}$$

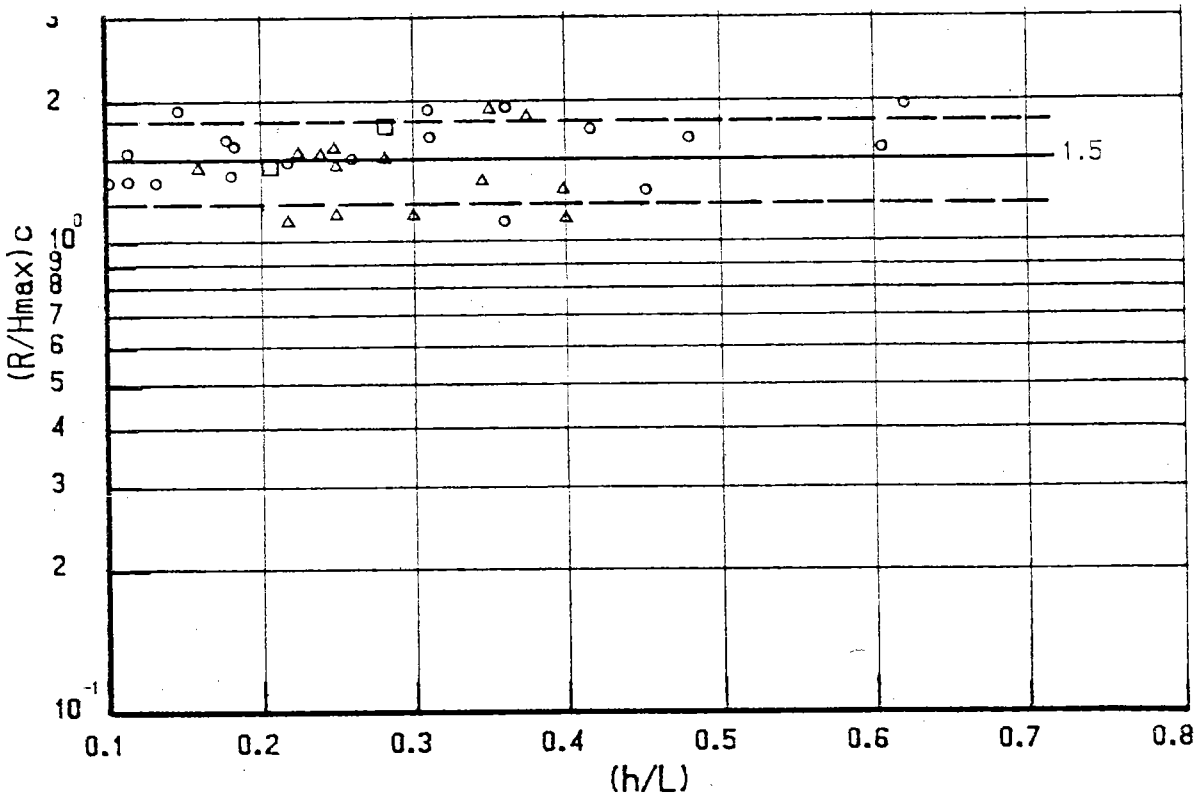


圖 5 — 19　R ／ H_{max} 與 h ／ L 之關係

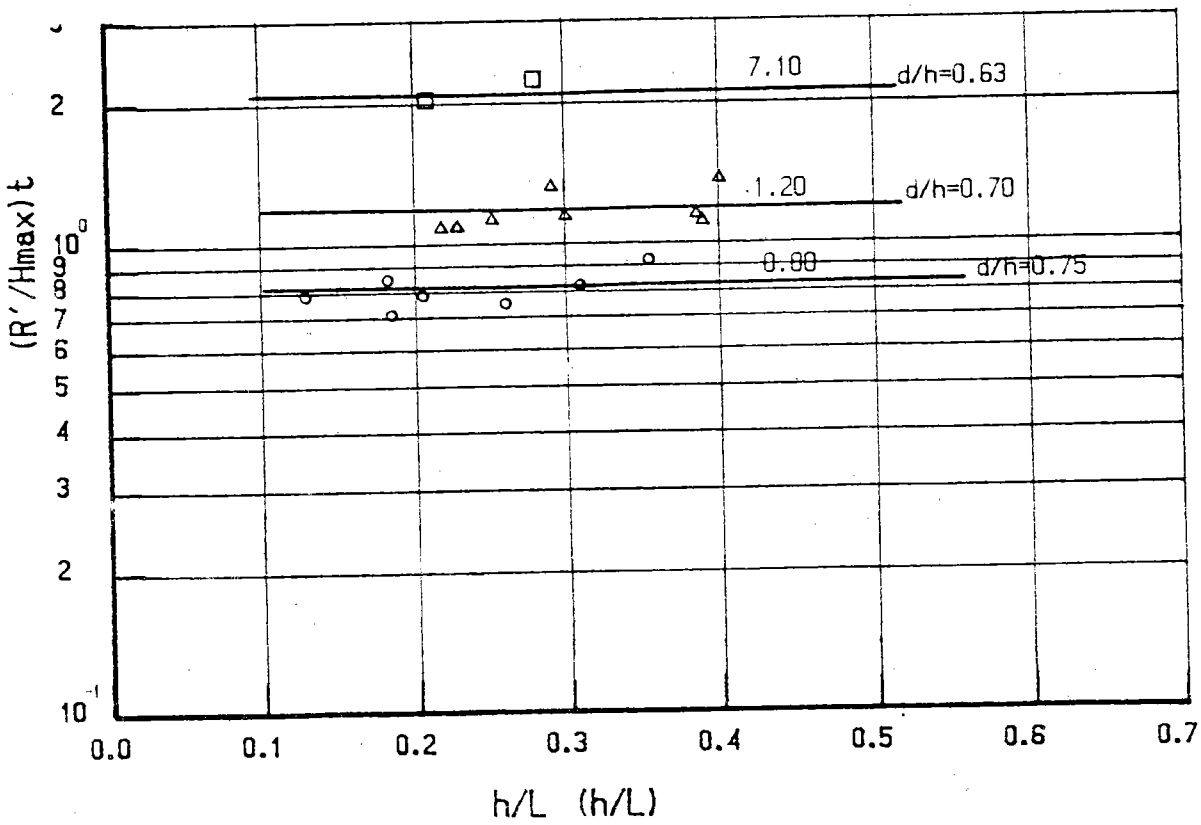


圖 5 — 20　R′ ／ H_{max} 與 h ／ L 之關係

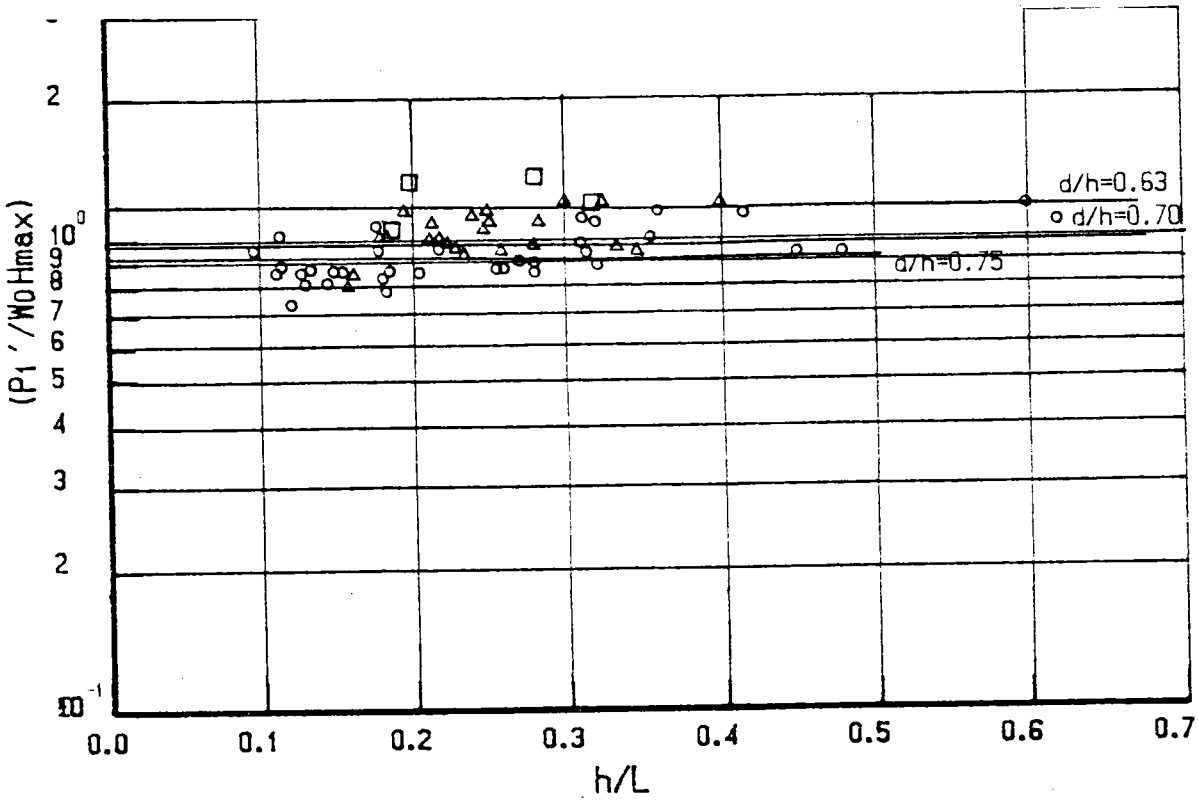


圖 5 － 21　p'_1 ／ wH_{max} 與 h ／ L 之關係

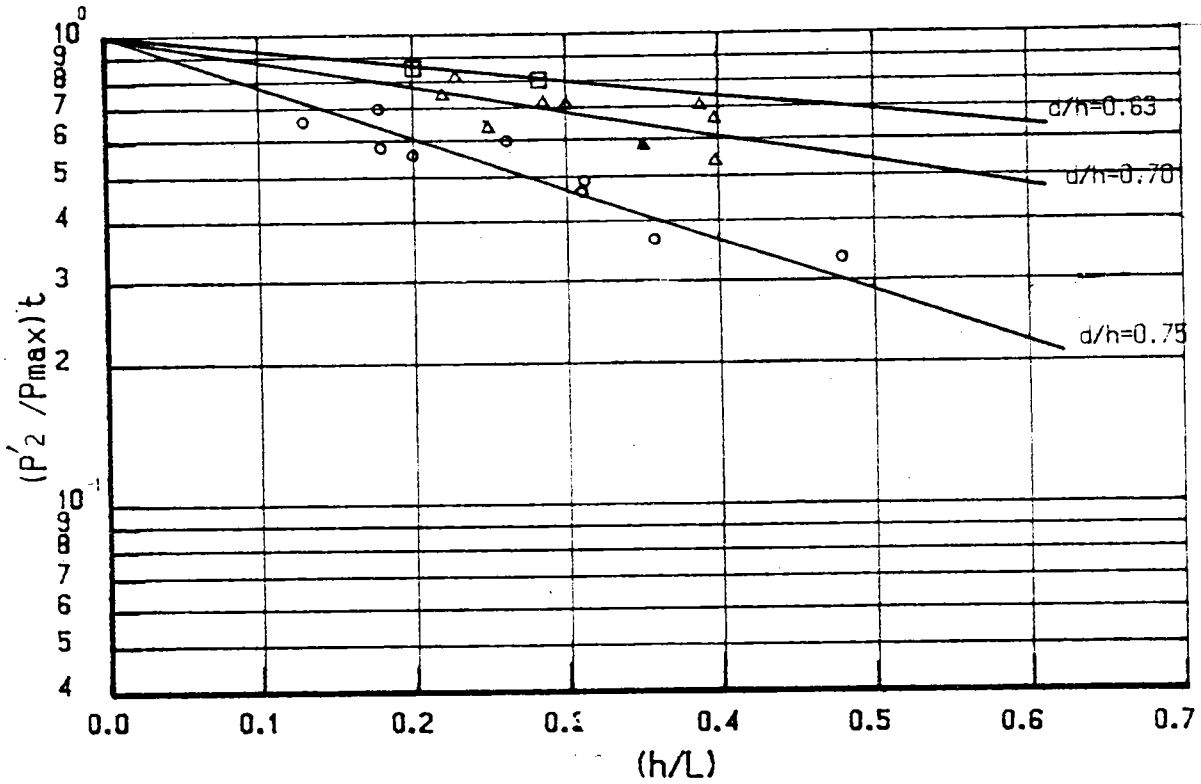


圖 5 － 22　p_2' ／ p_1' 與 h ／ L 之關係

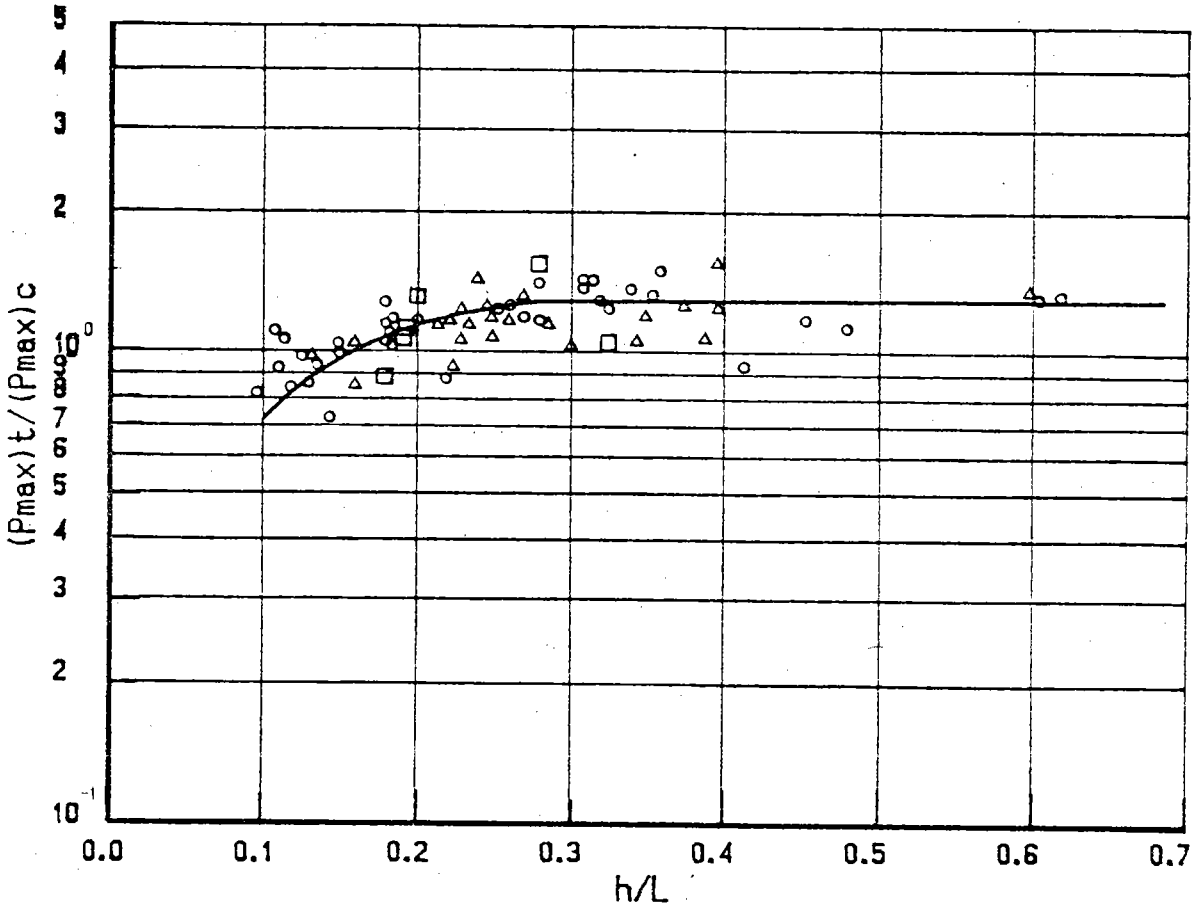


圖 5 — 23　p_1'／p_1 與 h／L 之關係

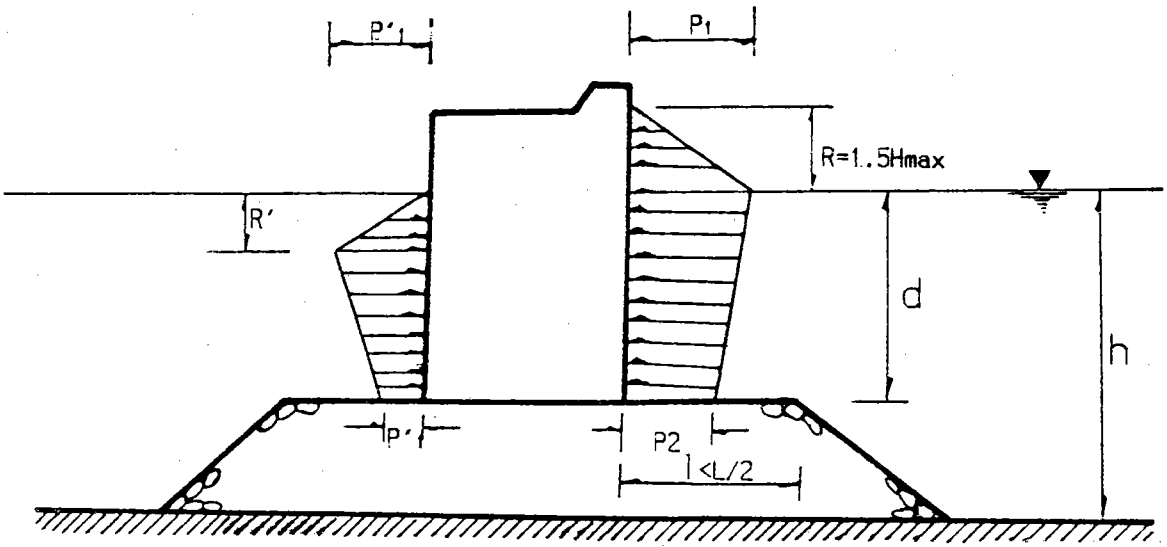


圖 5 — 24　合成式防波堤物理量示意圖

$$p_2 = p_1 e^{\alpha_2 (h/L - \alpha_3)}$$

$$R = 1.5\ H_{max}$$

其中 $\alpha_1 = 1.7 - 1.2\frac{d}{h}$，$\alpha_2 = 4.67\frac{d}{h} - 2.1$

$$\alpha_3 = 4 - 4.67\frac{d}{h}$$

堤面受波谷作用時

$$p_1' = \alpha_1' w H_{max}$$

$$p_2' = p_1' e^{\alpha_2' (h/L - \alpha_3')}$$

$$R' = \alpha_4' H_{max}$$

其中 $\alpha_1' = 2.4 - 2.0\frac{d}{h}$，$\alpha_2' = 3.80\left(\frac{d}{h} - 0.48\right)$

$$\alpha_3' = -8.64\left(\frac{d}{h} - 0.84\right),\ \alpha_4' = -11\left(\frac{d}{h} - 0.82\right)$$

根據推導公式計算所得波壓繪於圖 5－16 。計算值較符合試驗值。

p_1，p_1'，p_2，p_2'，R，R′，d，h 等物理量如圖 5－24 所示，w 爲水之單位體積重量。

六、討論

(一)衝擊波壓

第一階段及第二階段試驗，入射波高均未達碎波界限（$2H_{1/3}<d$），僅部份最大波高 H_{max} 達到碎波界限。爲何第一階段試驗時，水面附近出現衝擊波壓，第二階段則未發生。推究其原因可歸納如下：

第一階段試驗時，部份試驗情況$2H_{max}\geq h$；以C－5爲例入射波高 $H_{max}=13.71^{m}$，最大波高 H_{max} 以1.5 $H_{1/3}$ 估計（波數較少），$H_{max}=20.57^{m}$。堤前水深爲 33^{m}。當然可能造成碎波產生衝擊波壓。第二階段試驗 $2H_{max}<h$，雖二倍 $H_{max\,1/3}$大於拋石基礎上水深 d（$2H_{max}>d$），但太接近堤面產生衝擊波壓機會甚小。

日本港灣技術研究所 Takahashi 等辦理衝擊波壓研究發現衝擊波壓隨拋石基礎寬度 B 與堤前水深 h 之比 B／h 成顯著變化，如圖1－3。衝擊波壓之發生爲一種概率，有必備的條件，加上適當之相位組合才能形成。

(二)波壓累積概率公佈

第一階段試驗結果波壓累積概率成均勻公佈（ Uniform Distribution）；而第二階段試驗結果波壓累積分佈却爲理萊分佈（ Reyleigh Distribution ）。主要原因爲：

重複波所造成波壓大小隨波高比例增加。波高累積概率爲理萊分佈，波壓累積概率亦應爲理萊分佈。第一階段試驗結果發生衝擊波壓，此時波壓值可能爲未發生衝擊波壓之數倍。因此波壓累積概率不可能再符合理萊分佈。此外第一階段試驗時，因A／D存記最小值爲 5^{mv}，增幅器放大倍數不足，最小計量相當於原型 1.2 ton/m^2。小波浪所產生之波壓無法取得，使波壓與波高分佈有所差異。

(三)波壓計使用方法之探討

本試驗之波壓感應方式採開放式感應。所購波壓感應計說明書中並未說明感應面裸露程度與其適合之應用情況，前所做之大部分試驗皆比照其保護罩方式，故設一留有小孔之套帽罩之，甚至使套子無法平整於量測面，本裸露式控制其螺孔厚度而使感應面與堤面平整，此兩種方式優缺點析之如下：

1. 以一小孔量測時，在實驗之初必需將其內之空氣排除，往往必需加以打針注射，且難以確知其空氣是否排除乾淨，另一方面，此一狀況對於在水面以上之波壓計似無妥善之解決方法，蓋因水面波動範圍內之波壓計，因水面起伏是否會產生殘留空氣，而空氣是良好之壓縮體，在受突然較大之衝擊將形成一種 Cushion作用，緩衝了量測壓力。

2. 留孔式量測是點量測，測得者近似點壓力，裸露式量測是較大面積量測，測得者是近似平均壓力。因爲感受面之大小，可預期的是點量測應具有較佳之穩定性（輸出電流或電壓），裸露式量測則將有較多之鉅齒起伏。本試驗資料記錄爲數位記錄，實際上當將各波壓計、波高計連接於類比記錄器當場繪出波動圖形時，因爲儀器本身是爲機械性及其反應時間之延滯，所得波動均爲非常光滑之線，更看不出會有突變衝擊壓。但若將記錄得之數位資料輸入大電腦再將其波動繪出，則爲一明顯非光滑之鋸齒狀波動，水面以上之波壓會偶現突變壓。因此在計數波數，週期等需將之光滑化。至於衝擊壓之問題，從實驗記錄圖形中及現場觀測可發現，其發生是爲機率問題且必爲局部微小區域上之受力，亦即波壓計感知此衝擊壓與波高等關係並無規律可尋，其產生大抵受飛濺破碎之水的撞擊而生，而水面下均無所謂之甚大衝擊突變壓力，另一方面此異常壓雖或可爲正常壓力之倍數但亦僅見於Ch 1 及Ch 2 ，而水面的Ch 3 就甚小了。綜觀之，對於探討堤面之受力情形，點量測或裸露量測均無礙，較有實質意義是其壓力分佈，而非在於一些高頻量測（如有人主張數千赫茲之量測異常壓力）。蓋堤面本身是一個面而非波壓計一個點。

3. 孔量測因設有罩子故可降低波壓計受損之概率。本實驗中未發生波壓計受水中異物（如石粒）損毀之狀況。

七、結論與建議

(一)第一階段試驗結果顯示，入射波高(H_s) 雖未達碎波條件，但在不規則波群入射波與反射波適當相位組合下，亦可能產生極大之衝擊波壓力。最大入射波浪不一定造成最大波壓。幾個較大之入射波與反射波組合後，作用於堤面可能產生最大波壓力。

(二)第一階段試驗所得波高成理萊分佈；波壓成近似均勻分佈，第二階段所得波高與波壓均成理萊分佈。

(三)堤面波壓力試驗值與計算值之比隨相對堤頂高度 h_c / H_1 降低而比例減小之趨勢。越波時，堤頂部份波壓力計算值較實際情形偏大。

(四)在試驗範圍內 $0.05 < h / L_0 \leq 0.3$ 時，水平測點波壓無因次參數 p/wH 與 h/L_0 及 H/h 二者關係均極為一致，不因使用統計概率改變而有顯著差異。不論 $p_{1/3} / wH_{1/3}$，$p_{1/10} / wH_{1/10}$ 及 p_{max} / wH_{max}，其值大都介於0.7至0.9間。p/wH 隨 H/h 增加而略微減小。

(五)斷面平均波壓，無因次參數 $\bar{p} / wH$ 隨 h/L_0 增加而有減小，隨 H/h 增加而略微增大，此與波壓理論相符合。$\bar{p} / wH$ 之值介於 0.45 與 0.65 之間，不因使用統計概率而有太多差異。

(六) $\bar{p}_{1/10} / \bar{p}_{1/3}$ 與 $H_{1/10} / H_{1/3}$ 及 $\bar{p}_{max} / \bar{p}_{1/3}$ 與 $H_{max} / H_{1/3}$ 無因次關係中資料成扇形分佈。迴歸線斜率接近 1 : 1。此種現象顯示，統計上不規則波群中較大的波高造成較大波壓；但如果利用波群中慣用之示性波高 $H_{1/3}$ 所得平均波壓 $\bar{p}_{1/3}$，推估 $\bar{p}_{1/10}$ 或 $\bar{p}_{max}$ 則隨 $H_{1/10} / H_{1/3}$ 或 $H_{max} / H_{1/3}$ 之值增加而產生較大之偏差。

(七)在中水深 ($0.135 < h / L < 0.35$) 時，利用Nagai公式計算水平總波壓力 F 與試驗值最大三分之一波壓趨勢一致且甚為接近。Nagai公式計算所得水平總波壓力與試驗值最大三分之一總壓力比較，在淺水時 ($h / L < 0.135$) 計算值偏大，且隨 H / d 增加而差異愈大。中水深時 ($0.135 < h / L < 0.35$) F / wd^2 計算值與試驗值趨勢一致且相當吻合。隨 h/L 增為深水中，計算值有偏小之趨勢。 Sainflou 公式則在 h/L 較小時計算值與試驗值相當接近，隨 h/L 增加，計算值較試驗值偏大，但仍較最大十分之一總壓力為小。因之 Nagai 及 Sainflou 兩公式應用在未碎波之波壓力計算時，所得結果，未能

涵蓋最大波壓；且因 h/L 不同計算所得之波壓與試驗值差異甚大。

(八)當堤面爲波峯時，最大動壓力發生在水面上，惟當拋石基礎面上水深 d 值減小時，試驗結果顯示，最大動壓力位置則可能發生在水面下。

(九)試驗結果顯示，相同入射波浪條件，合成堤堤基相對水深 $h/L>0.175$ 時，則壁面波谷時之最大動壓力值 p_1'，較壁面波峯時所發生之壓力 p_1 值爲大。即最大動壓力值並非絕對發生在壁面爲波峯情況，當壁面爲波谷時，有可能造成與入射波相反方向之最大動壓力。但波谷時，受壓面積較小，力臂較低，所造成之水平總壓力及傾倒力矩一般均較波峯時爲小。

(十)根據試驗所推導公式，較Sainflou 公式及Goda 公式簡單，且能充分描述試驗範圍內之波壓垂直分佈特性。惟試驗所涵蓋範圍稍嫌不夠，如能再作更多試驗研究作爲印證，將可導出一個能適用於各種條件之波壓計算公式。

(十一)本研究係針對合成式防波堤波壓分佈特性辦理試驗，涵蓋範圍相當有限（H／h 值在0.1與0.5間），對可能發生碎波之較大H／h未能作有計畫之試驗研究，建議再針對碎波波壓及開孔胸牆防波堤等作有系統之試驗研究。

(十二)本所初次辦理波壓試驗，人員經驗不足，經本試驗研究計畫後，參與研究人員已獲得相當之經驗，往後從事類似研究計畫將有極大之助益。

八、參考書籍

1. Nagai, S., "Pressure of Standing Waves on Vertical Wall", Journal of Waterways and Harbour Division, ASCE, Vol.95, No. WW1, pp.53-76.

2. Goda, Yoshimi, "New Wave Pressure Formula for Composite Breakwaters", Coastal Engineering, Chap.100, ASCE, 1974.

3. H. Lundgren and H. Gravesen, "Vertical Face Breakwaters", KVIV, Int. Havenknogres, 1974.

4. H. Gravesen and H. Lundgren, "Forces on Vertical and Sloping Face Breakwater", International Association for Hydraulic Research.

5. K. Tanimoto et al.,"Experimental Study of Impact Breaking Wave Forces on a Vertical - Wall Caisson of Composite Breakwater", Report of the Port and Harbour Research Institute, Japan. Vol.20, No.2, 1981.

6. K. Tanimoto et al., "A Model Experiment of Irregular Wave Action on a Caisson Breakwater armored with Wave Dissipating Concrete Block", Report of the Port and Harbour Research Institute, Japan, Vol.32r, 1979.

7. S. Takahashi et al., "Generation Mechanism of Impulsive Pressure by Breaking Wave on a Vertical Wall", Report of the Port and Harbour Research Institute, Japan, Vol.22, No.4, 1983.

8. K. Tanimoto et al., "Experimental Study of Random Wave Forces on Upright Section of Breakwater", Report of the Port and Harbour Research Institute, Japan, Vol.23, No.3, 1984.

9. CERC, Shore Protection Manual, 1984.

10. Y. Ito, Stability of Mixed-type breakwater - A Method of Probable Sliding Distance", Coastal Eng. in Japan, Vol.14, JSCE, 1971.

11. G. Sainflou, "Essai sur les Digues Maritimes Verticals Annales des Ports et Chausees", Vol.98, No.4, 1928.

12. I.Tadjbakhsh and J.B. Keller, "Standing Surface Waves of Finite Amplitude", JFM, Vol.8, 1960.

13. H. Mitsuyasu, "Experimental Study on Wave Force Against a Wall", Coastal Eng. in Japan, Vol.5, JSCE, 1962.