

花蓮港港灣設施改善計畫之研究

第二子計畫 水工模型試驗

研究工作人員

計畫主持人：研究員 簡 仲 璟

共同主持人：研究員 邱 永 芳

協同主持人：助研員 江 金 德

副研員 洪 憲 忠

研究人員：助研究員 廖 慶 堂

助 理 徐 如 娟

參與人員 楊 怡 芸

何 炳 紹

蔡 瑞 成

陳 進 冰

李 江 澤

A 部份	平面水工模型試驗	1-1
第一章	計畫背景與目的.....	1-2
第二章	平面水工模型試驗設備與佈置.....	1-2
2-1	試驗設備.....	1-2
2-2	試驗範圍與模型縮尺.....	1-3
2-3	試驗波浪條件與佈置.....	1-5
2-4	試驗方法與佈置.....	1-9
第三章	平面試驗資料分析結果與討論.....	1-9
3-1	波高、週期統計分析.....	1-11
3-2	波連分析.....	1-11
3-3	波能移動平均分析.....	1-12
3-4	長週期水位變動分析.....	1-13
3-5	波譜分析.....	1-15
3-6	水體位移分析.....	1-18
第四章	結論與建議.....	1-20
附圖	.....	1-22

B 部份	斷面模型試驗—(I)潛堤之消波特性的研究	
第一章	前言.....	2-1
1-1	研究目的.....	2-1
1-2	前人研究.....	2-2
第二章	理論背景.....	2-4
2-1	理論架構.....	2-4
2-2	數值方法.....	2-6
2-3	反射率與透過率之計算.....	2-12
第三章	試驗說明.....	2-13
3-1	試驗設備與儀器.....	2-13
3-2	試驗佈置.....	2-14
3-3	試驗條件.....	2-15
3-4	試驗數據之處理與分析.....	2-16
第四章	數值結果與試驗結果之比較討論.....	2-19
4-1	反射率之比較分析.....	2-19
4-2	透過率之比較分析.....	2-20
4-3	不同位置的波高比值之比較分析.....	2-21
4-4	波形比較分析.....	2-22
第五章	潛堤消波特性的探討.....	2-24
5-1	潛堤堤寬影響.....	2-24
5-2	潛堤堤頂水深影響.....	2-26

5-3	潛堤透水性之影響.....	2-27
5-4	波浪通過潛堤後之非線性波動特性.....	2-28
5-5	以頻譜分割法求不規則波透過率之可行性討論	2-31
第六章	結論.....	2-34
參考文獻	.....	2-36
附圖	.....	2-39

C 部份	斷面模型試驗--(II)噴水浮式防波堤之消波特 性及繫纜受力探討	
第一章	前言.....	3-1
第二章	各種消波式防波堤之回顧與比較.....	3-3
第三章	試驗說明.....	3-5
	3-1 試驗設備與儀器.....	3-5
	3-2 試驗佈置.....	3-6
	3-3 試驗條件.....	3-6
	3-4 試驗數據之處理與分析.....	3-7
第四章	試驗結果分析.....	3-10
	4-1 表面流速對波形與頻譜特性之影響.....	3-10
	4-2 表面流速對堤前波高比之影響.....	3-11
	4-3 表面流速對透過率影響.....	3-12
	4-4 最大繫纜受力分析結果.....	3-15
第五章	結論.....	3-16
	參考文獻.....	3-18
	附圖.....	3-19
	附表.....	3-47

花蓮港港灣設施改善計畫之研究

第二子計畫 水工模型試驗

摘要

花蓮港在颱風季節期間，常發生港池不穩靜而造成港內泊靠船隻斷纜的現象。該現象根據國內、外專家學者指出，可能係颱風期間的長波所引致的港池不穩靜。為解決此一現象，可能採用的方式為設法破壞入射波浪使其入射波的週期變短，再將短週期波浪消掉；另一方式即改變港池的形狀，使得波浪在港內無法形成振盪，而引致長週期盪漾，減緩港內的不穩靜情況。依以上的觀點，本試驗研究提出各種不同的港池形狀，並配合組合式的噴水浮式防波堤之消波觀念，藉由試驗的分析結果，期望能得到改善花蓮港在颱風期間船隻無法於港內安全靠泊之問題。

港池形狀的改變係針對花蓮港現有港池形狀作合適的調整變更，主要是改變東防波堤的堤線佈置，而對現有碼頭仍保持原狀避免影響該港的港埠作業。東防波堤堤線的選擇考量是希望使進入港內的波浪能有較廣闊的港池水面空間，以降低其波高，同時將現有內、外港池可能產生的相互振盪現象加以排除。此外利用現有東堤外側的淺礁區，使入射波浪於該區域產生消波，而達到降低港內波浪不穩靜的情況。

組合式噴水浮式防波堤係由潛堤、噴水式防波堤及浮式防波堤三種

消波方式之組合。潛堤具有消滅波能及迫使長週期波形成強制的短週期波之效應。花蓮港在颱風期間之波向大致上為西南向，因此波浪沿南濱海岸而進入港內，同時將該海岸沙源帶至港口附近形成南濱海岸的侵蝕及港口附近的淤積，故擬將潛堤設置在南濱海岸與海岸線略成垂直，使得西南向較長週期之波浪能受潛堤之影響，消滅其波能減少帶動漂沙移動的能力達到保護南濱海岸之目的，同時波浪受潛堤之作用而迫使較長週期的波浪強制形成短週期波浪，如此進入港內之波浪的週期較短，較易於消能。因顧及港內船舶的航行故無法在港內構築固定式的消波結構物，因此臨時性的浮式防波堤便成為本計劃採用方式。花蓮港在內港與外港間有一較窄的水道，故此段航道為設置一個暫時性可迅速移動的消波構造物相當理想的地點。本組合式消波構造係利用浮式防波堤的觀念加上噴水式防波堤和空氣式防波堤的觀念，選取各式消波裝置的優點組合而成。先利用噴水造成表面水流使得表面流速與波浪作用形成波流交互作用，其一，可消滅部份波能，其二可改變入射波浪的組成，或許能借由表面水流破壞港池的共振模態，而達到改善港池不穩靜的現象。噴水式消能後通過的波浪再由浮筒組合而成的浮式防波堤再一次的消滅其波能，更可保證整體消波效能。

試驗研究即針對本港池形狀變更調整及波能的消滅與波能分散特性做為改善港池不穩靜考量，提出四種港池變更形狀及潛堤與噴水浮式防波堤二種消波構造物。根據上述各方案，本研究分別進行平面與斷面水工模型試驗以進行各改善方案的優劣比較及學理上的探討。本報告共分

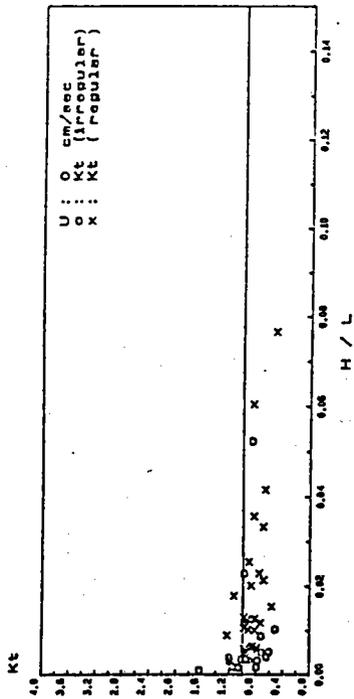
1. 平面水工模型試驗
2. 斷面模型試驗—潛堤之消波特性研究
3. 斷面模型試驗—噴水式防波堤之消波特性及繫纜受力探討

三部份，其詳細說明與討論如後。

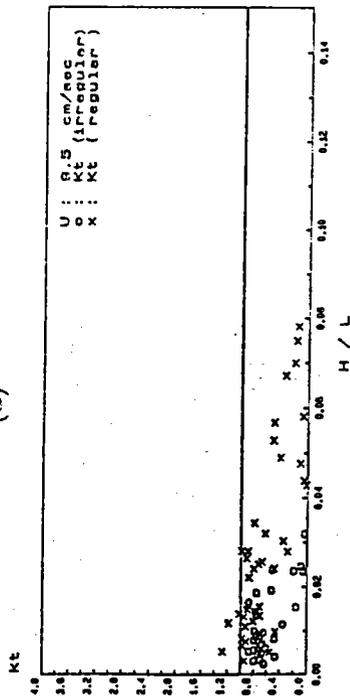
A 部份

平面水工模型試驗

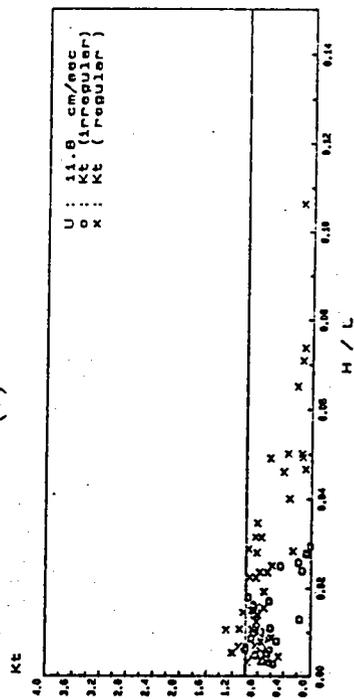
A 部份	平面水工模型試驗	1-1
第一章	計畫背景與目的.....	1-2
第二章	平面水工模型試驗設備與佈置.....	1-2
2-1	試驗設備.....	1-2
2-2	試驗範圍與模型縮尺.....	1-3
2-3	試驗波浪條件與佈置.....	1-5
2-4	試驗方法與佈置.....	1-9
第三章	平面試驗資料分析結果與討論.....	1-9
3-1	波高、週期統計分析.....	1-11
3-2	波連分析.....	1-11
3-3	波能移動平均分析.....	1-12
3-4	長週期水位變動分析.....	1-13
3-5	波譜分析.....	1-15
3-6	水體位移分析.....	1-18
第四章	結論與建議.....	1-20
	附圖	1-22



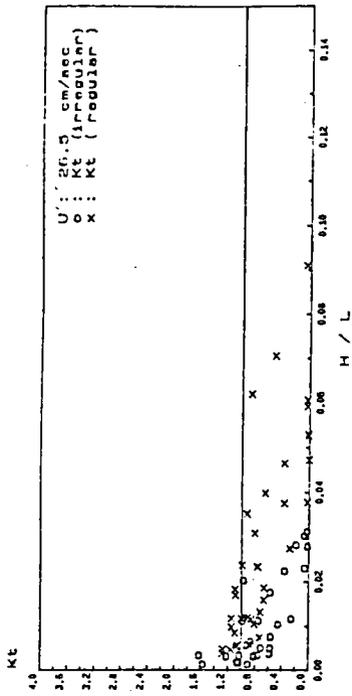
(a)



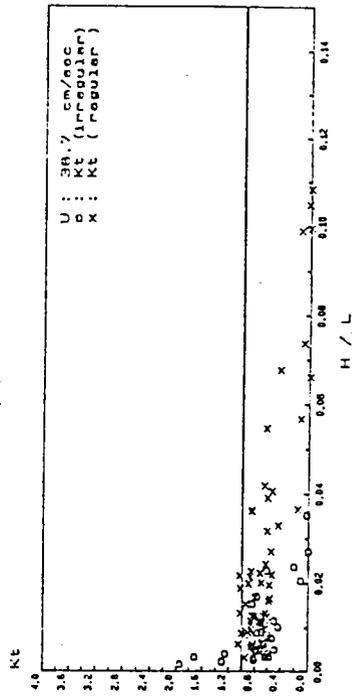
(b)



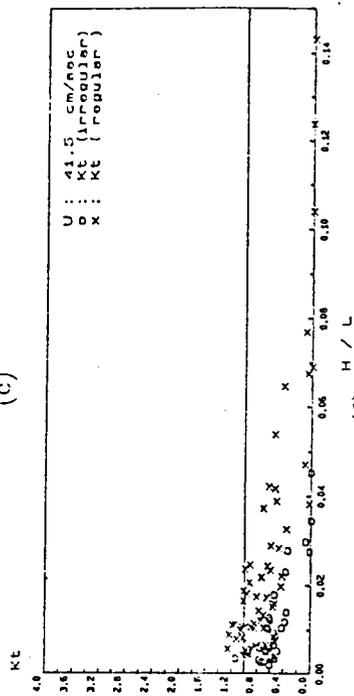
(c)



(d)



(e)



(f)

圖十 不同表面流速下，規則波與不規則波之透過率與尖銳度間之關係比較圖

第二章 平面水工模型試驗設備與佈置

本試驗於港灣技術研究所第二試驗場棚進行，其相關設備，模型製作與佈置及試驗方法說明如後。

2-1 試驗設備

- (1) 試驗水池長62公尺，寬57公尺，深1公尺。位本所第二試驗場棚。
- (2) 可移動推移式造波機：丹麥水工所(D.H.I)製不規則造波系統一套。可模擬各種波譜形態之不規則波及變換造波方向。
- (3) 容量型波高計及增幅器：試驗用波浪測定儀器。
- (4) 電磁式流速計及增幅器：二維流速測定儀器。
- (5) 資料擷取處理系統：32通道的試驗資料讀取，儲存及分析。
- (6) 導波板：於造波板兩端沿波浪進行方向平行佈置，以引導波浪於設定方向，避免試驗波浪能量擴散。
- (7) 地下蓄水池：長60公尺，寬14公尺，深2.65公尺，蓄水量約2200公噸，經抽水機抽取注入試驗水池。另鑿深水井兩口，以補注蓄水池儲水量。

2-2 試驗範圍與模型縮尺

本試驗模型範圍採花蓮港及鄰近海域如圖2-1所示。考慮較具影響該港的入射波浪方向及離結構物12倍試驗波長以上之造波距離條件，故模型範圍北起花蓮港七號碼頭，南至南濱海岸吉安溪出口之南500公尺，水深則至50公尺。

本試驗在考慮各種波浪條件，水池尺寸及試驗精確性要求，因而模型之水平縮尺比例為1/150，垂直縮尺比例為1/100。由於試驗波浪

仍屬重力波範圍，故粘滯性的影響可以忽略，而僅以重力為考慮因素。因此，模型律採用福祿數(Froude No.)，其長度與時間之關係如下：

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

上式L與T分別表長度與時間尺度， p 與 m 分別表原型與模型。

2-3 試驗波浪條件與儀器佈置

本試驗採三種入射波方向，即S、SSE及SE方向。波浪條件則採用1990年6月之歐菲莉(OFELIA)颱風實測波浪，共取颱風登陸花蓮前之3組資料，其分別是6月22日12時；6月23日1時及6月23日9時。三個時段波浪資料的波高、週期如表2-1。

表2-1 颱風波浪試驗條件

	模 型				原 型				波浪 條件 編名
	最大波		示性波		最大波		示性波		
	H_{max} (cm)	T_{max} (sec)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (sec)	H_{max} (cm)	T_{max} (sec)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (sec)	
A (06/22/12:00)	5.98	1.23	3.44	1.10	8.97	15.06	5.16	13.47	0A
B (06/23/00:47)	9.35	1.19	6.10	1.11	14.03	14.57	9.15	13.59	0B
C (06/23/08:43)	10.55	1.22	6.82	1.25	15.83	14.94	10.23	15.31	0C

此外，為了能充分瞭解於不同波浪條件下，港池波浪的不穩靜特性，故選擇JONSWAP型之理論波譜作為模擬之不規則試驗波浪，其中分別含3種不同示性週期與3種不同示性波高如表2-2。

表2-2 JONSWAP波譜試驗波浪條件

	模 型		原 型		波浪條件 編 名
	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (sec)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (sec)	
1	6.90	1.27	10.35	15.55	HH
2	5.36	1.27	8.03	15.55	MH
3	3.49	1.24	5.24	15.19	LH
4	5.20	1.07	7.80	13.10	HM
5	3.76	1.06	5.64	12.98	MM
6	2.67	1.07	4.01	13.10	LM
7	3.92	0.86	5.88	10.53	HL
8	2.78	0.85	4.17	10.41	ML
9	1.57	0.84	2.36	10.29	LL

本試驗共使用20支容量式波高計分別佈置於港內及港外。港內波高計安置地點除了考慮可能發生港池共振的地點外，另配合以往曾發生船隻斷纜的碼頭位置。另外於8號碼頭及內航道處分別安置2支電磁式流速計(量測水深為靜水面下4公分)，用以觀測港內水體的流動。觀測儀器佈置如圖2-2。

2-4 試驗方法與步驟

根據花蓮港務局提供之83年10月港內水深圖及80年10月港外水深圖，依縮尺比例縮小佈置於平面水槽中，並以水泥沙漿鋪設5公分厚之表面，而製作為固定床之花蓮港及鄰近海域模型。

考慮港內水面的不穩靜情況，可能是由於港池盪漾所造成，因此本試驗的資料觀測時間為410秒，換算原型約5000秒。由於花蓮港港池形狀過於狹長，因此造波時間為500秒，其中前90秒為波浪未成熟時段。觀測儀器所測得之訊號由增幅器放大後經A/D轉換存入電腦裡，其中波浪資料取樣頻率為20Hz，流速資料取樣頻率同為20Hz。每次試驗資料蒐集完畢後，隨即將各波高計所測得之水位變化資料以向上零切法進行分析，以求得各測點之波高與週期，並據此研判入射之試驗波浪是否符合設定值，及查核其他測點是否運作功能正常，否則該試驗重做。對於某些試驗情況另以照相及V8錄影機同時作記錄，以供日後觀察之用。試驗過程之步驟流程圖如圖2-3。

本試驗分前後兩階段第一階段為預備試驗，其目的為探討依花蓮港現有港形，其港內波浪不穩靜情況及發生原因。第二階段為改善試驗是根據第一階段的試驗結果及配合本所八十三年度基本研究「台灣四周海象調查研究」花蓮港南濱近岸海域波浪場的模型試驗結果，

及八十年中華港埠服務社「花蓮港東防波堤延長工程規劃報告」的研究結果，研擬可行的各種改善方案，共四種配置進行改善試驗，並將結果與第一階作一比較。各階段的模型佈置如圖2-4~2-8。各圖說明如表2-3。本次試驗對不同模型佈置、入射波波高週期及入射波波向共進行120次試驗，彙整如表2-4。

表 2-3 各試驗階段模型佈置說明

試驗階段	佈置說明	參照圖號	佈置編名
預備試驗	<p>花蓮目前港池與防波堤佈置。本佈置的試驗結果將與現場觀測或數值模式計算結果進行對照，以明瞭預備試驗的模型佈置，是否能適當的反映出原型的真實情況。同時也作為改善試驗的效果評比之用。</p>	圖 2-4	A
改善試驗	<p>於南濱海岸，吉安溪出口以北，佈置一垂直海岸的拋石潛堤，長度約 600 公尺，堤頭水深約 18 公尺。</p>	圖 2-5	B
改善試驗	<ol style="list-style-type: none"> 1. 新東堤南-北向段約 500 公尺拆除，並延長東北-西南向堤約 750 公尺。 2. 於新、舊東堤間佈置一條拋石潛堤長約 300 公尺，並在該潛堤北側約 300 公尺再平行佈置一條拋石堤長約 320 公尺。 3. 南濱海岸之拋石潛堤保留。(同上) 	圖 2-6	C
改善試驗	<p>同上述改善佈置。但另外參考民國八十年中華港埠服務社「花蓮港東防波堤延長工程規劃報告」將東堤往南延伸約 800 公尺。</p>	圖 2-7	D
改善試驗	<ol style="list-style-type: none"> 1. 將舊東堤與部份新東堤拆除，並在外海側水深 10 ~ 18 公尺處配置新防波堤。 2. 南濱海岸之拋石潛堤保留(同上)。 	圖 2-8	E

表2-4 試驗編名表

波浪條件編號		OA	OB	OC	HM	MM	LM	HH	HL	MH	ML	LH	LL
波向編名	佈置編名												
SXX	A	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
SSE	A	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
SEX	A	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
SXX	B	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
SSE	B	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
SEX	B	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
SXX	C	√	√	√	√	√	√	---	---	---	---	---	---
SSE	C	√	√	√	√	√	√	---	---	---	---	---	---
SXX	D	√	√	√	√	√	√	---	---	---	---	---	---
SSE	D	√	√	√	√	√	√	---	---	---	---	---	---
SEX	D	√	√	√	√	√	√	---	---	---	---	---	---
SXX	E	√	√	√	√	√	√	---	---	---	---	---	---
SSE	E	√	√	√	√	√	√	---	---	---	---	---	---
SEX	E	√	√	√	√	√	√	---	---	---	---	---	---

備註：√記號表已作試驗。---記號表未作試驗

第三章 平面試驗資料分析結果與討論

利用試驗所得之資料，進行各項分析，以期望瞭解港內水域不穩靜的情況及其可能發生原因。各項分析方法及各種改善佈置的效果比較說明與討論如後。

3-1 波高、週期統計分析

將波高計所測得之水位變化，經由向上零切法可求得統計波高與週期，如 H_{\max} 、 T_{\max} 、 $H_{1/10}$ 、 $T_{1/10}$ 及 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$等。另外根據探詢花蓮港港務人員及碼頭作業人員發現船隻斷纜時，其船體水平移動的距離往往大於其下、下振動的幅度。一般波高較大，週期較短的波浪可能僅造成船體水平較小的振幅，但波高較小，週期較長的波浪卻可能造成船體水平較大的振幅，此或許是船隻斷纜的原因。基於上述的考量則一般波浪統計之 T_{\max} 因其是對應 H_{\max} 所求得，故無法表示真正的最長週期波(其對應波高不一定是 H_{\max})。因此本研究有別一般的波浪統計(以波高為觀點)，而另外以週期為觀點求得最長波週期及其對應的最長波波高。

對於某一入射波條件(波高、週期及波向)及某一模型佈置，各波高計的各項統計結果進行整理。由於波高計測點數目眾多無法逐一針對不同波浪條件及模型佈置方式進行比較。因此為了方便說明，選取較具代表性的某些測點如代表入射波的測點編號18、代表外港的編號28(#22號碼頭)及代表內港的編號9(#12號碼頭)等觀測點的波高、週期統計結果繪於圖3-1~圖3-12。圖中黑實斜線為縱橫座標值1:1之線。由圖3-1、3-3、3-5的右下圖及圖3-7、3-9、3-11的右下圖可分別看出外港及內港的示性波高與入射波示性波高比較。圖中顯示無論

內、外港的波浪效果以佈置C最佳，佈置D、E次之，佈置B再次之，而佈置A(花蓮港目前港池佈置)最差。此表示本次所提的四種改善佈置(B、C、D、E)其波浪遮蔽效果皆有改善。佈置C改善效果最佳的原因，是由於外港的波浪能量部份由東堤所闢缺口洩漏出去，而造成內、外港的波高大幅減小。不過與佈置C相似，但東堤堤頭再延伸的佈置D效果反而較佈置C為差，因此東堤的往南延伸之波浪遮蔽效果仍值得商榷。入射波向對各佈置的波浪遮蔽效果雖沒有明顯的差異，但還是以SE入射方向較佳，而S入射方向較差。

外港及內港的波浪週期與入射波週期比較可分別參照圖3-1、3-3、3-5及圖3-7、3-9、3-11。上述圖中的左上圖為內、外港最長波之最大週期與入射波示性週期之比較，圖中顯示，外港的長波抑制效果在S及SSE入射波向時以佈置C最差，其他佈置則相近；SE入射波向時則各佈置間無明顯差異。另外以不同入射波向比較而言，S及SSE的長波抑制效果相近，而SE較佳。至於內港的長波抑制效果則與外港明顯不同而是以佈置C、D及E較佳，不過其效果受入射波向的影響不明顯。內、外港最長波之示性週期及內、外港示性週期與入射波示性週期之比較可分別參考上述圖中的右上及左右圖。其分析結果大致與前述相同。

綜合上述分析結果可大致歸納如下：

- ◆ 依波浪遮蔽效果而言，本試驗所擬之四種改善佈置皆較目前港池配置為佳，其中以佈置C最佳，佈置D、E次之，佈置B再次之。入射波向以SE較佳，S則較差，但差異不大。
- ◆ 依長週期波抑制效果而言，外港以佈置C較差，其他佈置則相近。不過對內港而言，則以佈置C、D及E有明顯的效果。

3-2 波連分析

一般港池繫泊的船隻或浮動物體，常因長週期的水面振盪而斷纜，此種振盪又常因連續的大波浪而發生，而這種一系列連續的大波浪，稱之為群波(Wave Groups)。Goda(1970)定義波高大於某一界限高度， H_c ，之一系列連續的大波浪為波連(Wave Run)，其波高大於界限高度之連續波浪的個數， $j(H_c)$ ，稱之為連長(Run Length)，而相鄰兩波連間，所有波浪的個數， $l(H_c)$ ，則稱之為全連長(Total Run Length)。

在本文中以示性波高 $H_{1/3}$ 作為界限高度而求得平均連長及平均全連長與對應之平均連長週期(T_r)，據此考察波浪的群波特性。

由圖3-2、3-4、3-6及圖3-8、3-10、3-12的下圖可分別發現外、內港的平均連長週期與入射波平均連長週期之比較。由圖中可發現兩者相關性不大，由資料點的分佈來檢視，在S方向的入射波時大部份的資料點落在縱橫座標值1:1之黑直斜線附近，但在SSE及SE方向的入射波時則大部份落在黑直斜線之上，此顯示在這兩個方向上內、外港的平均連長週期較入射波稍大。也就是對於平均連長週期的降低SSE及SE入射方向有負面效果。若比較不同佈置間的平均連長週期降低效果則無法獲得確切的歸納結果。此外由資料點大部份落在平均連長週期約10秒(原型約120秒)附近來看，則與現場觀測所得之長波相近。

根據上述分析說明，不同的佈置或入射波向無法明顯的改變入射波群波特性，換句話說對於內、外港的平均連長週期的降低效果無法得到一致性的明確趨勢。

3-3 波能移動平均分析

當波浪歷時記錄出現大波浪的群波時，該時段內的波浪能量較大，而出現小波浪的群波時，該時段內的波浪能量較小。因此Funke及Mansard(1980)提出平滑化瞬時波能歷程(Smoothed Instantaneous Wave Energy History, 簡稱SIWEH)的概念，即以水位平方的移動平均做為SIWEH，移動平均的範圍為 $T_p = 1/f$ (f_p 為波譜尖峰對應頻率)。在本文中SIWEH以 $E_s(t)$ 表示如下式

$$E_s(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t+\tau)^2 W(\tau) d\tau$$

其中 $\eta(t)$ 為水位變化， τ 為延時， $W(\tau)$ 平滑函數為Bartlet Window如下式

$$W(\tau) = \begin{cases} 1 - |\tau|/T_p & |\tau| < T_p \\ 0 & |\tau| \geq T_p \end{cases}$$

$E_s(t)$ 對其平均值 \bar{E}_s 之變動係數定義為群波因子(Groupiness Factor)，GF，如下式

$$GF = \frac{1}{\bar{E}_s} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [E_s(t) - \bar{E}_s]^2 dt}$$

Rye(1982)將 $E_s(t)$ 的變化曲線，以向上零切法決定 $(E_s(t) - \bar{E}_s)$ 之週期， T_E ，做為群波再現週期。將 T_E 以 T_p 正規化做為群波長度， l_s ，如下式

$$l_s = T_E / T_p$$

由圖3-2、3-4、3-6及圖3-8、3-10、3-12的上圖與中圖可分別看出外、內港的群波因子和群波再現週期與入射波之比較。先由上述圖中的上圖來考察群波因子的變化，由圖可發現外、內港的群波因子與入射波群波因子間雖然相關性不明顯，但仍有些微的正比關係。依資料點的分佈情形檢視，大部份是落在1:1黑直斜線之下，此顯示外、內港的群波因子較入射波為小，此情況在內港更明顯。不過群波因子的減小效果無法由不同佈置或不同入射波向得到明確的歸納結果。

次由上述圖中的中圖來考察群波再現週期的變化。圖中顯示外、內港的群波再現週期與入射波群波再現週期兩者相關性不明顯。依資料點的分佈情形檢視，則大部份落在1:1黑點直斜線之上，此顯示外、內港的群波再現週期較入射波為大。此與前小節平均連長週有相似的結果。不過群波再現週期的降低效果同樣無法由不同佈置或不同入射波向的評比獲得明確的歸納結果。

綜合以上說明顯示港內波浪的群波因子減小及群波再現週期降低，無法由不同的模型佈置或入射波向的比較而得到明確結果。換句話說，藉由波能移動平均的分析無法對不同佈置的優劣作出明確的評比。

3-4 長週水位變動分析

考慮連續大波浪進入長葫蘆形狀的花蓮港池，可能造成水量壅積，而連續小波浪時，則水量消退，如此大波浪，小波浪成群交互作用下，將造成港池的盪漾。為了探討這個可能的現象，本文分析港內各測點的靜水位變化特性。

利用波高計所測得8,200點水位變化資料，將其作滑動平均處理，涵蓋範圍50點，即涵蓋時間為2.5秒。求出靜水位值的時間歷程，再由向上零切法求得其波高 MH_s 與週期 MT_s ，藉此來考察港內是否有長週期波存在。

由圖3-13、3-14、3-15可以檢視內港長週期波之波高與對應週期。圖中顯示內港的測點27及測點9在週期比較上有明顯不同，如測點27的長週期水位變動在佈置C、D及E有負面效果，即長週期水位變動的現象變得更明顯，也就是存在著較長的長週期波，但測點9在佈置C、D及E則有正面效果。再由波高比較上則發現兩測點也是不同，如測點27的長週期波波高與測點18(入射波)相較在各改善佈置中沒有減小(甚至有增大現象)，但測點9在改善佈置C、D及E中則有明顯的減小。此外不同的入射波向對波高或週比較上的結果沒有明顯的影響，不過對於改善佈置B而言，其內港長週波波高隨S、SSE及SE入射方向而有漸小的趨勢。

由圖3-16~圖3-18可以檢視外港長週期水位變動的情形。圖中顯示外港的測點28及測點29在佈置C、D及E存在著較入射波為長的長週期波，同時在長週波波高的減小方面效果也不明顯。這種情形在不同入射波向大致相同。

綜合以上在長週期水位變動分析的結果顯示，除了內港的測點9在佈置C、D及E中有降低長週期波之週期與波高的效果，其他測點(27、28及29)其效果不明顯，甚至有負面效果。此情形不受不同的入射波向而有明顯差異。

3-5 波譜分析

試驗資料擷取時間為410秒，擷取頻率20Hz，故每支波高計有8,200點的數位數據。取4,096點為一樣本故計有2樣本。以傅立葉轉換法(Fourier transform method)求得各樣本之波浪能譜，再以兩樣本之平均值為最終能譜，頻率解析度為0.00488Hz。此頻率解析度已符合港內長週期波(低頻波)的檢出精確性需求。因此根據本所於花蓮港港內實測波浪分析發現長波主能量大約分佈在150秒，換算成本試驗模型則約12秒(0.08Hz)。

經由上述分析可求得港內各測點的波浪頻譜形態，進而研判港內長週波是否存在及其分佈特性。由於測點數目眾多，無法逐點計算其波譜，故選取某些較具代表性的測點(部份參照以往較常發生斷纜的碼頭位置)如內港的測點9、26及27；內航道的測點10；外港的測點28及29；港外的測點17與代表入射波的18。將上述測點在不同入射波浪條件及不同佈置的波譜圖繪製整理。

在此為了方便說明，故只取入波浪條件為0C的情況探討內港測點9及外港測點28的波譜與入射波譜(測點18)在不同佈置與不同入射方向的比較變化情形，如圖3-19~圖3-32中的(A)與(E)。

(1)入射波向S

由圖3-19~圖3-23可比較在入射波向為S時不同佈置的內、外港波浪的波譜變化情形。先由內港測點9於佈置A時檢視圖3-19(A)，圖中顯示該測點波譜(以紅實線表示)於低頻區域(0.05Hz~0.4Hz)的波浪能量較入射波測點18(以黑虛線表示)大80~100倍

(換算成波高約9~10倍)。以頻率0.08Hz(對應週期12.5秒)的兩測點能譜值相較，經換算成原型後可發現在該頻率處內港測點9的波高較入射波高大10倍，而其對應週期為153秒，此與現場實測的分析結果非常相似，這表示本次研究的預備試驗(佈置A)能確切的描述與重現花蓮港目前的港池波浪特性。測點9在其他佈置的波譜圖可參照圖3-20~圖3-23的(A)圖。圖中顯示在上述低頻區的波浪能量降低程度與佈置A相較以佈置C最佳(測點9能譜值較測點18為小)，佈置D、E次之(測點9能譜值與測點18相近)，而佈置B較差(測點9能譜值較測點18為大)。外港測點28的波譜可先由圖3-19(E)檢視，圖中顯示該測點當佈置A時於低頻區域(0.05Hz~0.4Hz)的波浪能量較入射波大4~25倍(換算成波高約2~5倍)，此放大倍數比內港測點9小，此表示對於低頻成份波進入港池後的能量放大現象內港較外港明顯，不過在高頻區(0.7Hz以上)的波浪能量降低則以內港較明顯。測點28於其他佈置的波譜圖可參考圖3-20~圖3-23的(E)圖。圖中顯示在上述低頻區的波浪能量降低程度與佈置A相較並不明顯，在某些低頻區(0.07Hz~0.15Hz)甚至有放大的現象。不過在高頻區的能量降低則以佈置C最明顯，其原因是外港的高頻成份波可由東堤缺口處洩漏出去。

(2) 入射波向SSE

由圖3-24~圖3-28可比較當入射波向為SSE時不同佈置的內、外港波浪的波譜變化情形。內港測點9的波譜圖如上述圖中之(A)圖，圖中顯示該測點於低頻區的波浪能量降低程度與佈置A相較以佈置C、D及E較優，佈置B較劣。此與入射波向S的情況相似，即在佈置C、D及E內港波浪能量於低頻區沒有放大現象，也就是低頻的長週期波成份不明顯。至於外港測點28的波譜圖可參考圖3-24~圖3-28的(E)圖。由圖中可發現該測點於低頻區的波浪能量降低程

度與佈置A相較並不明顯，在某些低頻區域甚至有更加放大的負面情形，此與入射波向S的情況相似。雖然各改善佈置對於降低外港低頻波的能量效果不很理想，但其中以佈置B較佳，而高頻區的能量降低以佈置C較佳。

(3) 入射波向SE

由圖3-29～圖3-32可比較當入射波向為SE時，不同佈置(佈置C的試驗資料損壞無法讀取，故不計)的內、外港浪的波譜變化情形。內港測點9於低頻區的波浪能量降低程度與佈置A相較以佈置E最優，佈置D次之，而佈置B較劣。其中佈置E的內港波浪能量於各頻率皆較入射波能量小10倍以上，換句話說佈置E對於內港的港池穩靜改善於入射波向為SE時效果最明顯。至於外港測點28波浪能量於低頻區的降低程度與佈置A相較，也是以佈置E最優，佈置D次之，佈置B較劣。此與前述兩個入射波向外港波浪在低頻區的波浪能量降低效果不明顯的情況有些不同，即對於降低外港低頻波的能量於入射波向為SE時，佈置E及D才看出其效果。

雖然在本節的波譜分析僅以一個波浪條件來比較不同佈置，不同入射波向內、外港的長週期波(低頻波)的能量降低或放大情形，但其他波浪條件下的歸納結果，大致與本節相似(參考附錄E)。綜合波譜分析的結果可歸納成以下幾點：

- ◆ 佈置A(預備試驗)的內、外港波浪頻譜形態顯示該佈置能確切描述與重現花蓮港目前港池的波浪特性。
- ◆ 在佈置A時，長週期成份波進入港池後的能量放大現象內港較外港明顯，此表示花蓮港現有港池以內港較易發生長週波的不穩靜現象。

- ◆ 內港長週期波的能量降低，以佈置C、D及E較佳，其中佈置E在SE入射波向時效果顯著。
- ◆ 外港長週期波的能量降低在S及SSE方時，各改善佈置的效果不明顯，甚至有負面效果。在SE方向時則佈置D及E則有正面效果，其中又以佈置E效果較佳。

3-6 水體位移分析

將測得之流速、流向資料扣除因波浪而造成之水粒子運動成份後繪成行進向量圖(P.V.D)，藉此來探討水體的位移量，並考察內港、外港兩港池間是否有相互振盪而造成兩港池水量往復的長週期流動，並求出水體位移量的振幅、週期，以及在某一作用時間下之水體累積位移量，與水體平均位移速度。

本試驗於8號頭(測點編號31)及內航道中段處(測點編號24)分別安置電磁式流速計，以量測其水體運動情形。今以入射波浪條件為0C的情況探討上述兩測點的水體累積位移量，藉此明瞭長週期之水流運動情形，如圖3-33~3-38。

首先考察測點24如圖3-33~圖3-35，圖中顯示在入射波向S時以佈置E的水體累積位移量最大，佈置B及D次之，而佈置A最小。其中佈置E的水體平均位移速度約3cm/sec，換算成原型約為37cm/sec。

入射波向SSE時，以佈置A的水體累積位移量最大，佈置B、D次之。佈置C、E最小，其中佈置A的水體平均位移速度約7cm/sec，換算成原型約為86cm/sec。入射波向SE時以佈置A及B的水體累積位移量最

大，佈置D及E較小，其中佈置A的水體平均位移速度約4cm/sec，換算型約為49cm/sec。由上述分析若以較小的水體平均位移速度表示較佳的佈置而言，則以佈置C及E最理想。

再者考察測點31如圖3-36～圖3-38，圖中顯示水體累積位移量在入射波向S時以佈置A最大，佈置B次之，而佈置C、D及E皆很小；在入射波向SSE時仍以佈置A最大，佈置B次之，佈置C、D及E皆很小；在入射波向SE時則與SSE也有相同的情形。同樣若以能得到較小的水體平均位移速度來考量，則C、D及E是理想的佈置。

綜合以上分析對水體的平均位移速度而言，以佈置C及E較佳，不過由於最大的水體平均位移速度約僅1.5節而流向又與碼頭岸壁平行，在此條件下對已靠泊碼頭的船隻而言，其纜繩的受力應不至於太大。

第四章 結論與建議

本試驗研究針對所提出的四種池形狀變更方案進行多種入射波浪條件的水工模型試驗。完整的試驗資料經由各種分析方法所得之結果，以探討各方案的優劣比較及可行性而獲致以下幾點結論與建議：

1. 依波浪遮蔽效果而言，本試驗所提四種改善佈置皆較目前港池配置為佳，其中以佈置C最佳，佈置D、E次之，佈置B再次之。
2. 依長週期波抑制效果而言，外港以佈置C較差。但對內港則以佈置C、D及E有明顯效果。
3. 波連之平均連長週期與群波再現週期的降低效果無法由不同佈置或不同入射波條件的評比獲得明確的歸納結果。
4. 長週期水位變動分析顯示，內港在佈置C、D及E中有降低長週期波之週期與波高的效果，但外港則可能發生負面效果。
5. 佈置A的內、外港波浪頻形態顯示該佈置能確切描述與重現花蓮港目前港池的波浪特性。因此利用該佈置試驗結果作為其他改善佈置的效果評比是合適恰當。
6. 當佈置A時長週期波成份進入港池後的能量放大現象，內港較外港明顯，此表示花蓮港現有港池以內港較易發生長週期的不穩靜現象。
7. 依頻譜分析而言，內港長週期成份波的能量降低以佈置E較佳，尤其是在SE入射波向；至於外港在S及SSE入射波向時，各改善佈置效果不佳，但在SE入射波向時則佈置D及E有正面效果，尤其是佈置E效果最明顯。

8. 根據水體位移分析，以獲得較小的水體平均位移速度為較佳的佈置作考量，則佈置C及E較佳。不過由於較差的佈置(如佈置A)其最大的水體平均位移速度換算成原型後約僅1.5節，而流向又與碼頭岸壁平行，在此情況下對已靠泊碼頭的船隻而言，其纜繩的受力應不致於太大。
9. 依各種改善佈置其對港池內波浪的不穩靜皆具有或多或少的改善效果，其中又以佈置E最佳。此外由於該佈置是將舊東堤拆除而往外海另建新東堤，如此除了改善港池不穩靜現象，同時也解決了舊東堤因年代久遠而產生的老化問題，並且也一併解決了內港航道寬度不足的安全顧慮。另外南濱海岸的潛突堤對於該區的海岸侵蝕與港口的淤積也有正面助益。因此該改善佈置方案可謂一舉四得，故初步建議採用之。
10. 佈置E的新東堤堤線位於水深10~18公尺處，因此在建造上除了海底地盤的岩礁整平較不易外，其他工程技術應不困難，施工經費也不致於太龐大。在施工工程步驟上建議第一階段先依佈置C的方案進行，以獲得初步港池不穩靜改善效果，同時作為實際成效的考核參考。第二階段再延續佈置C而成為佈置E的港池形狀，以獲得更佳的改善效果。
11. 本報告所建議採用的佈置E對於內港的不穩靜雖有明顯的改善效果，但對外港而言則較不明顯，因此該佈置針對改善港池不穩靜的問題，僅是一初步的最適方案，因此建議應施行更進一步的各種可行方案的試驗研究，期望獲得更佳或最佳的方案以有效解決該港颱風期間所發生的港內靠泊船隻斷纜的問題。

附

圖

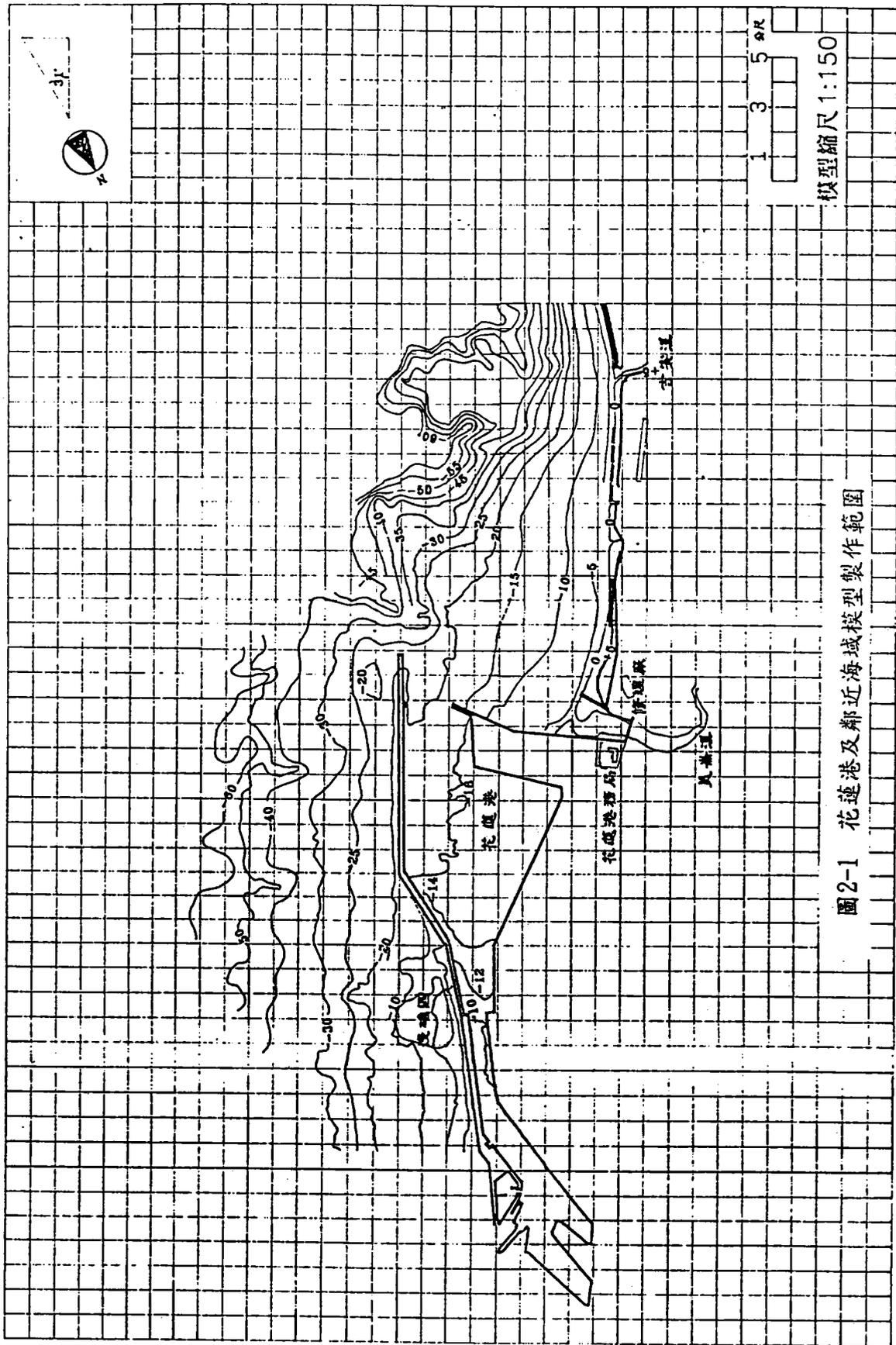
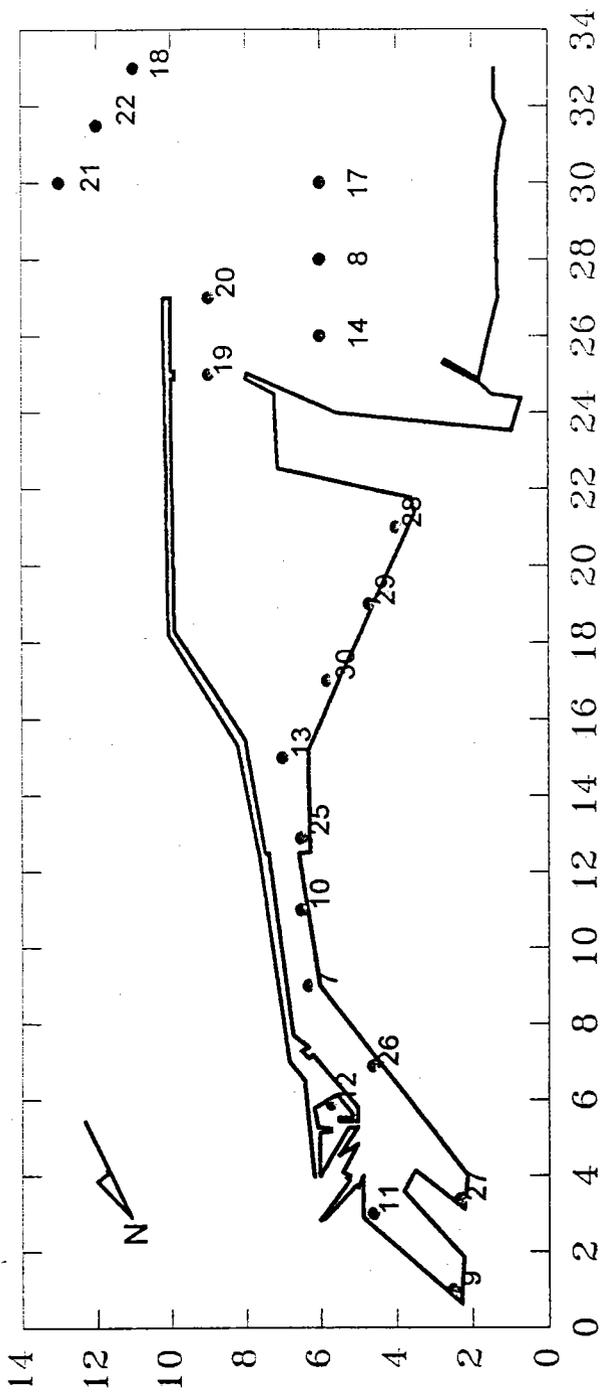


圖2-1 花蓮港及鄰近海域模型製作範圍

模型縮尺 1:150



測點位置對照

測點編號 :	7	9	11	25	26	27	28	29	30
碼頭編號 :	1	12	15	17	3	8	22	21	19

圖 2-2 試驗觀測儀器佈置圖

NECK.GRF

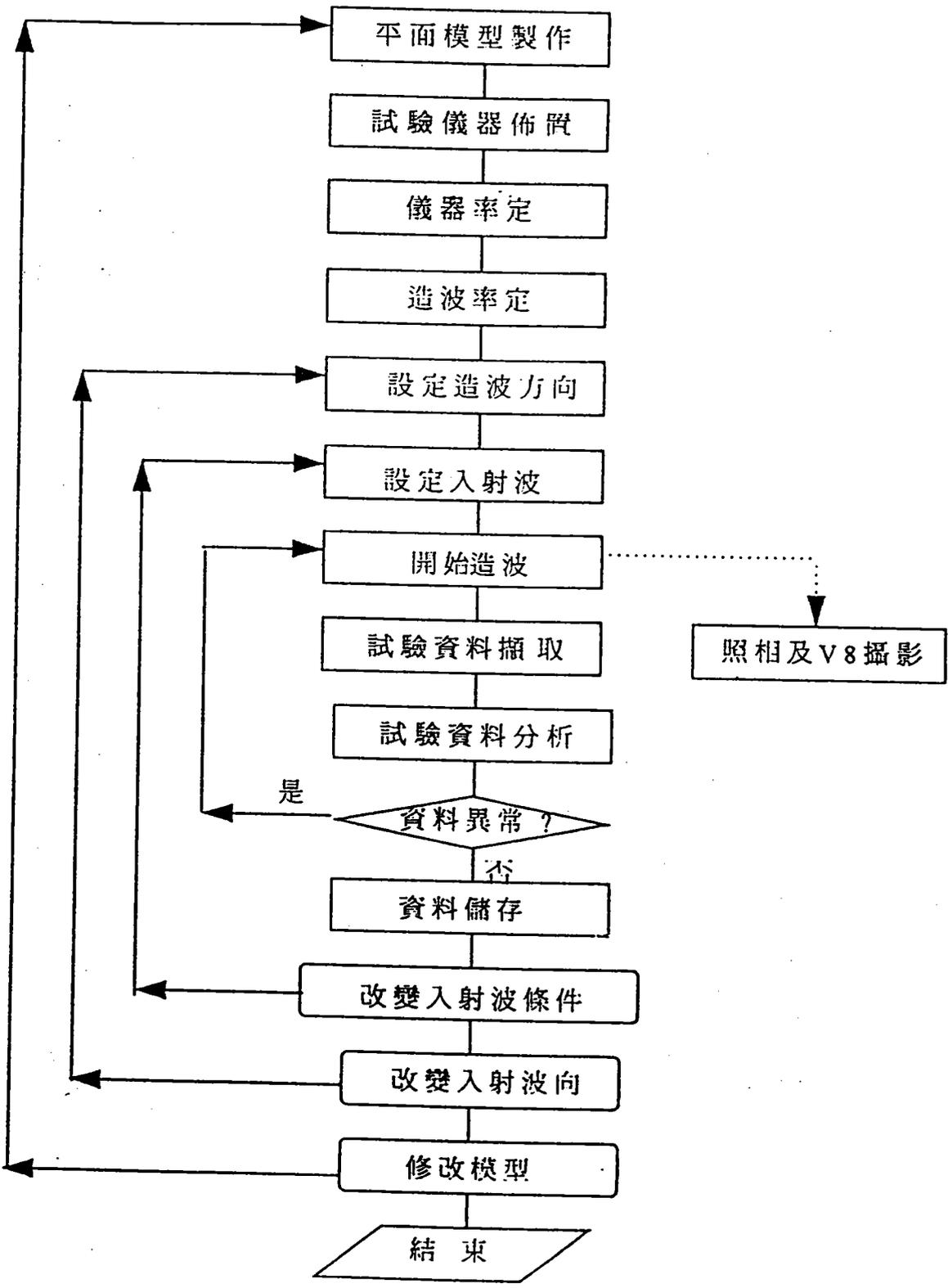


圖2-3 試驗步驟流程圖

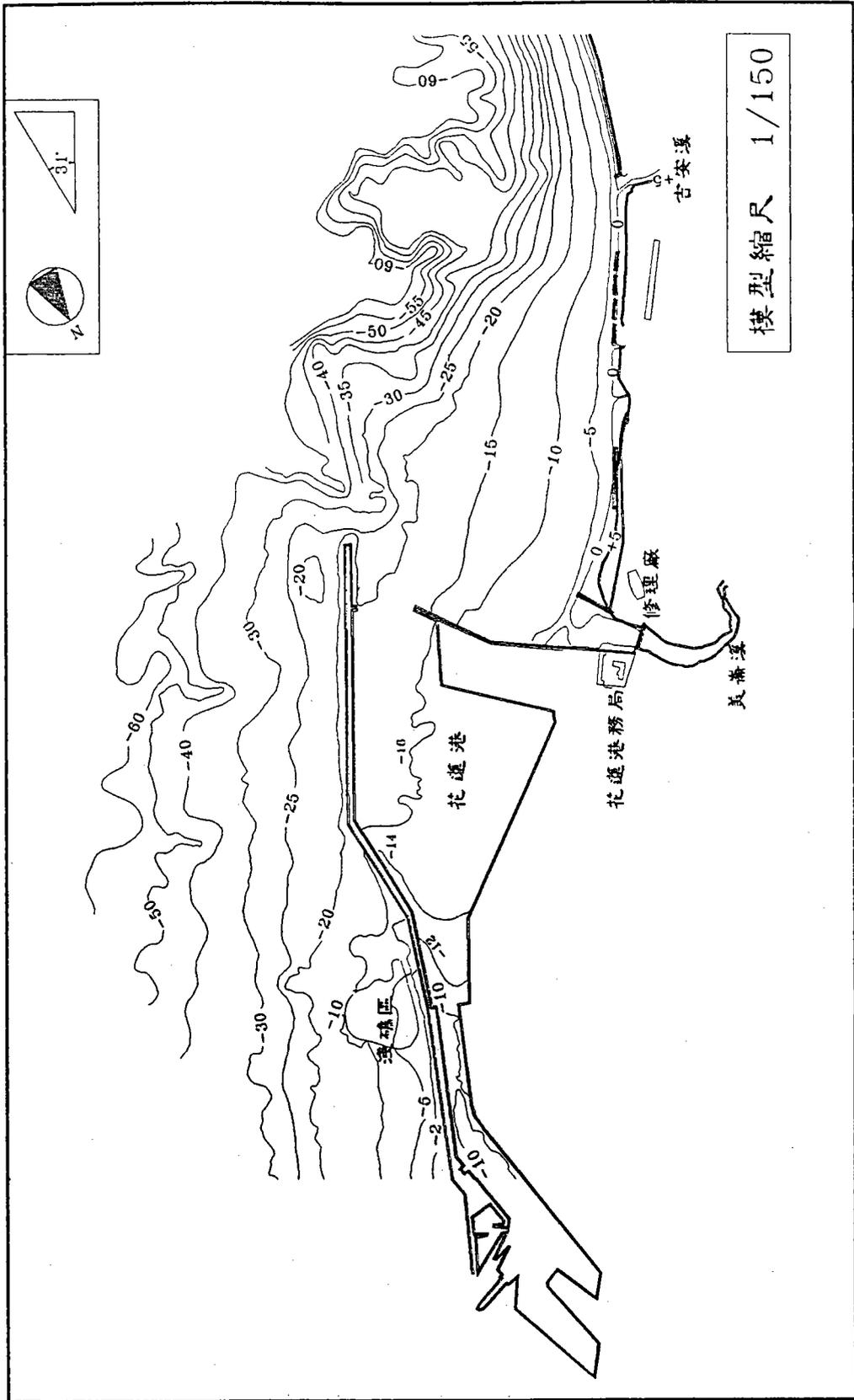


圖2-4 模型試驗佈置圖(方案A)

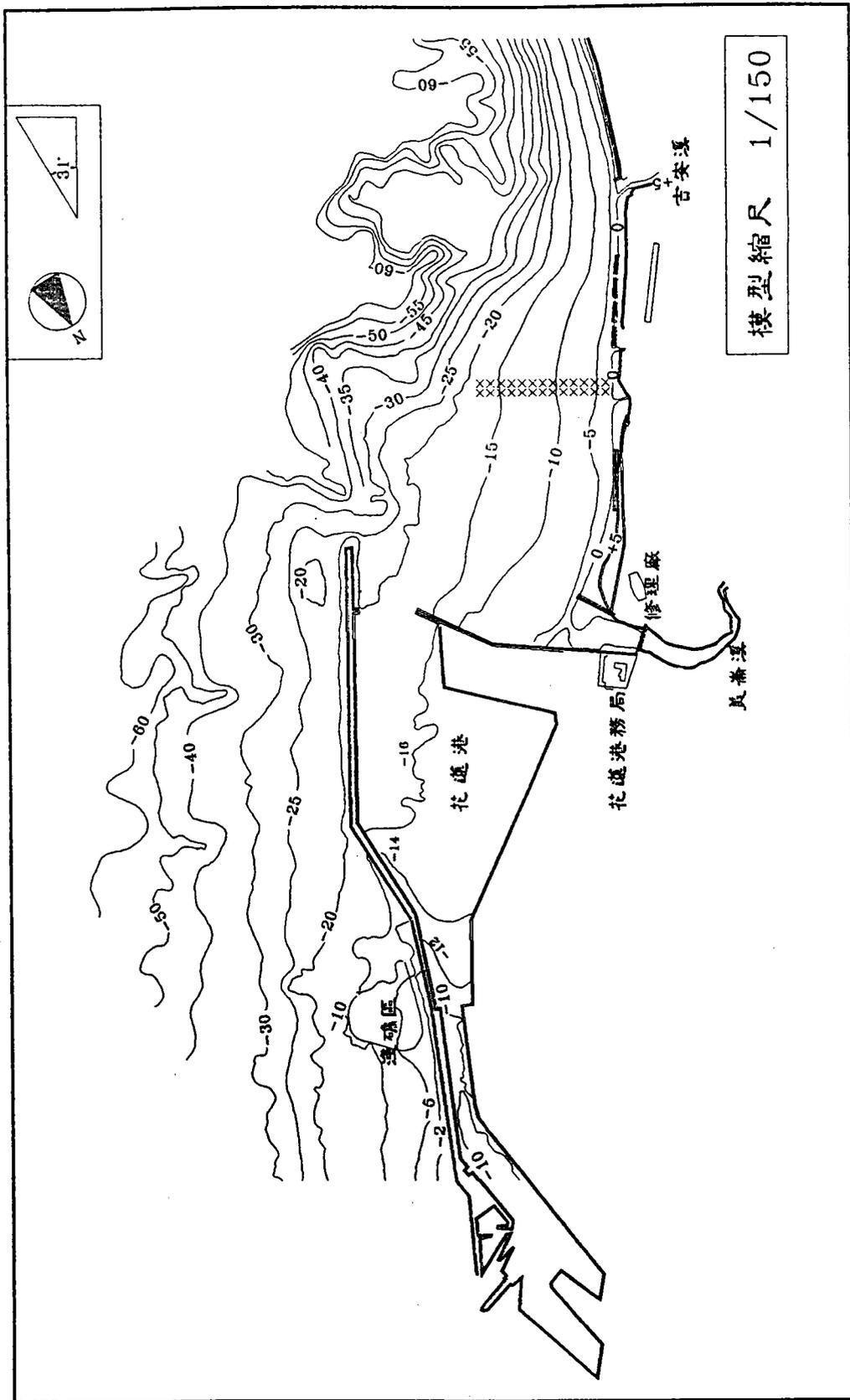


圖2-5 模型試驗佈置圖(方案B)

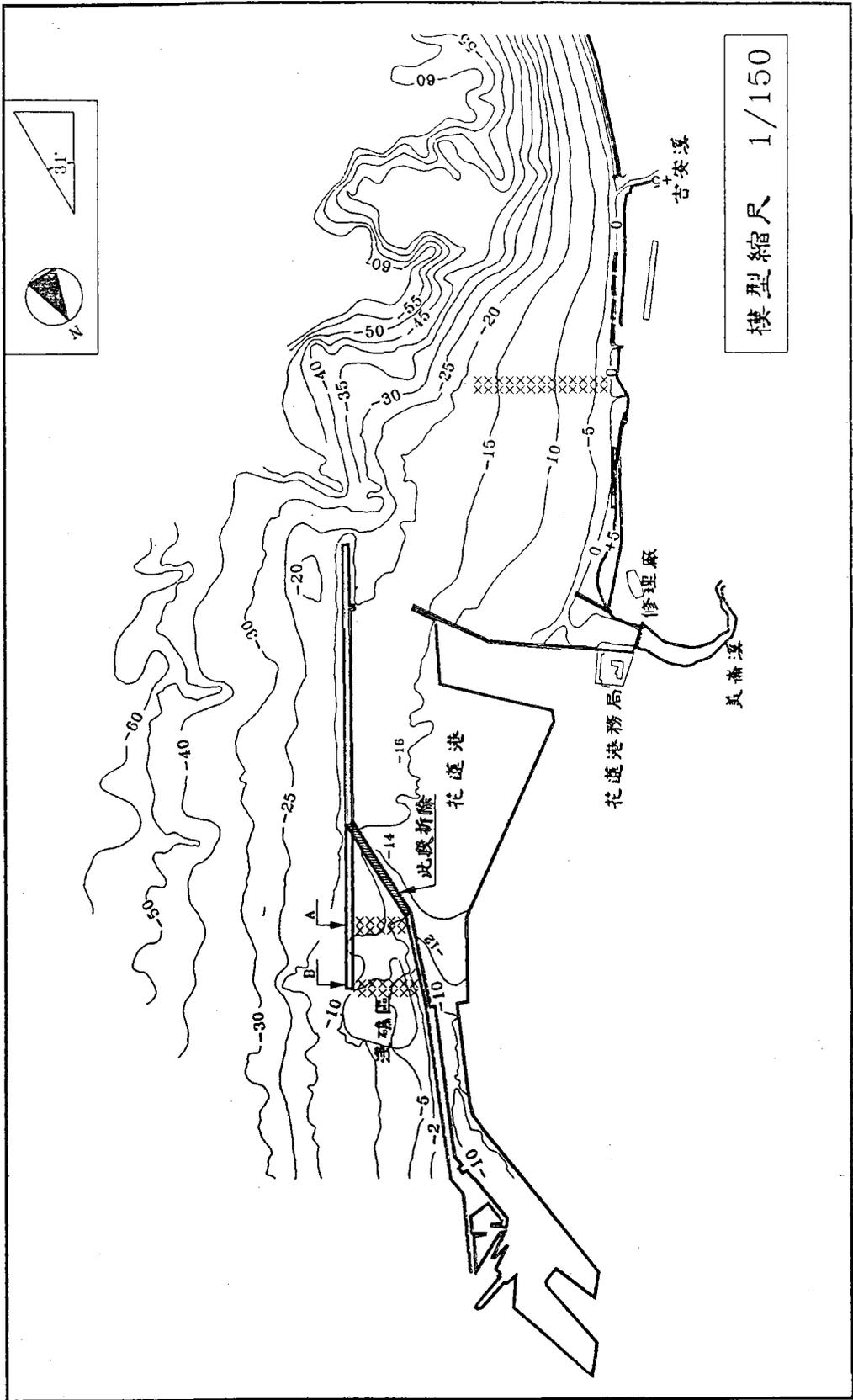


圖2-6 模型試驗佈置圖(方案C)

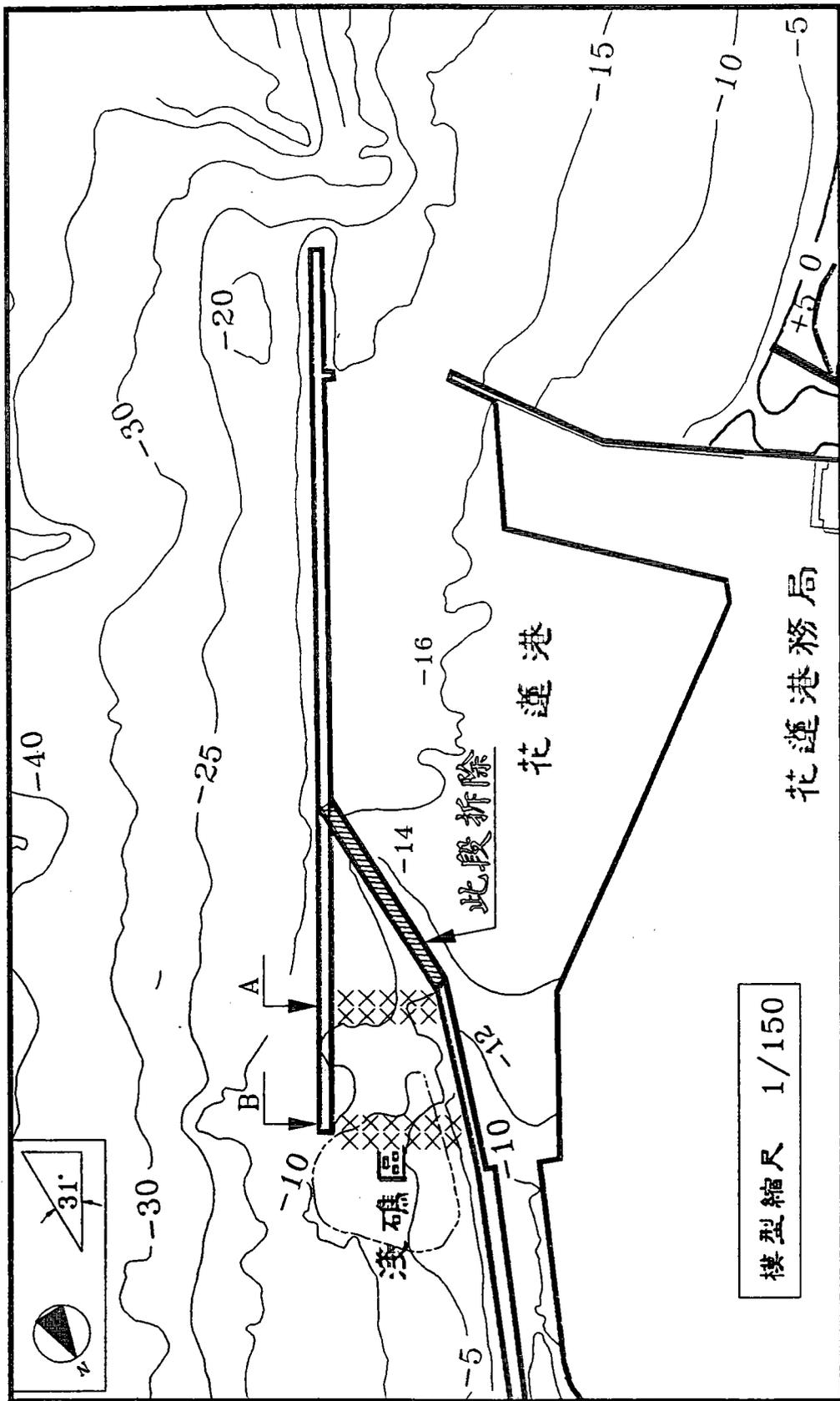


圖2-6(續) 模型試驗佈置圖(方案C)

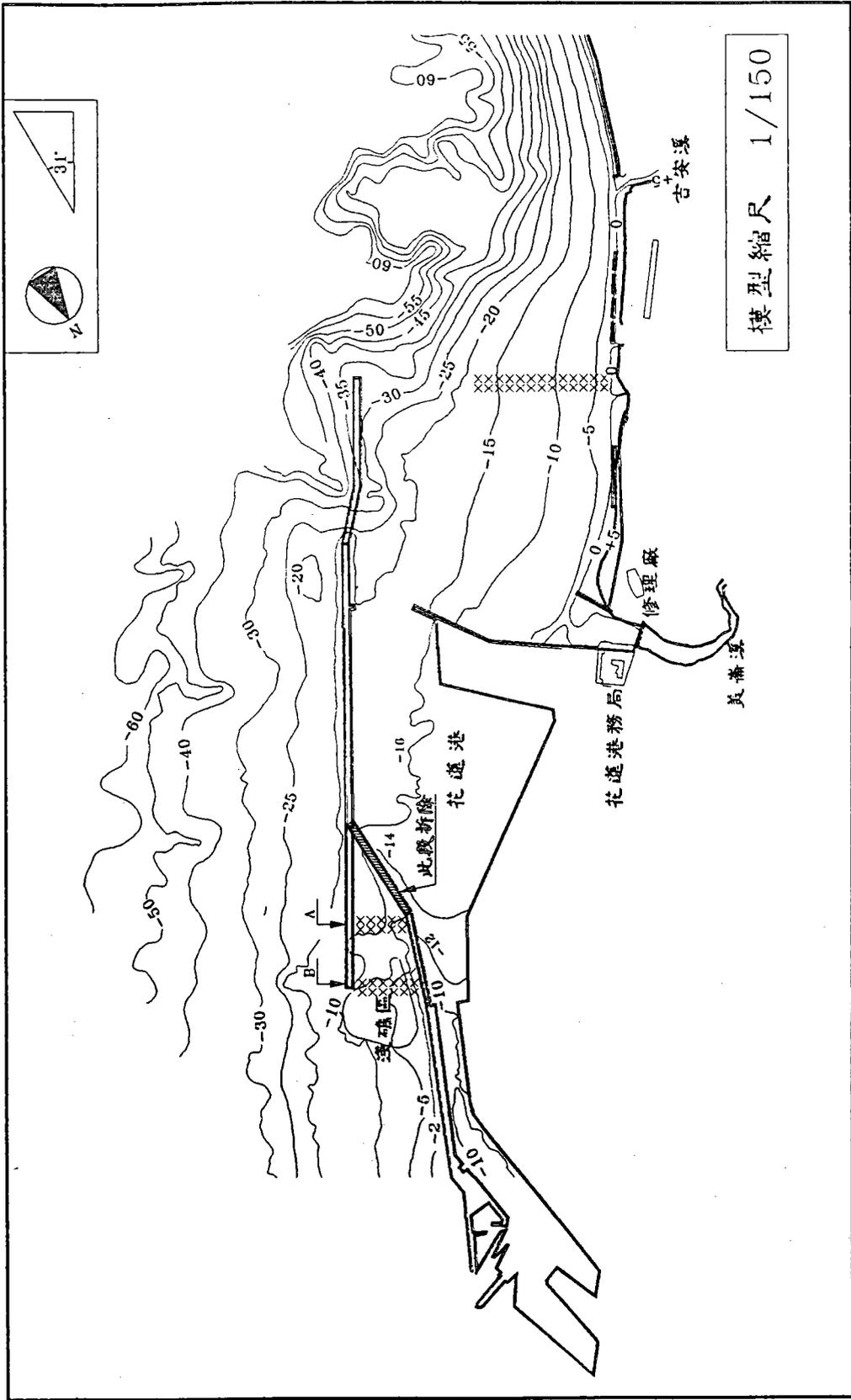


圖2-7 模型試驗佈置圖(方案D)

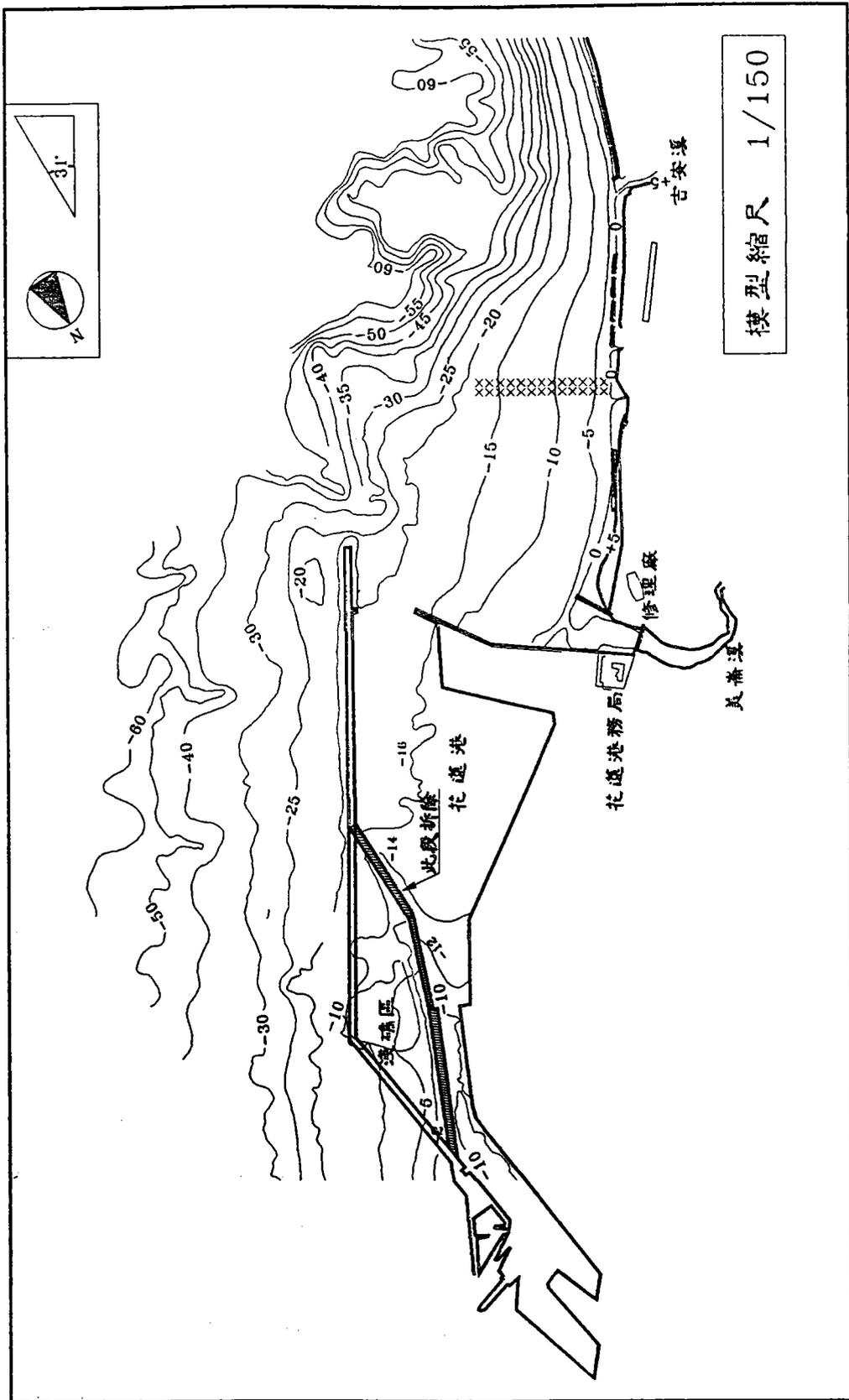


圖2-8 模型試驗佈置圖(方案E)

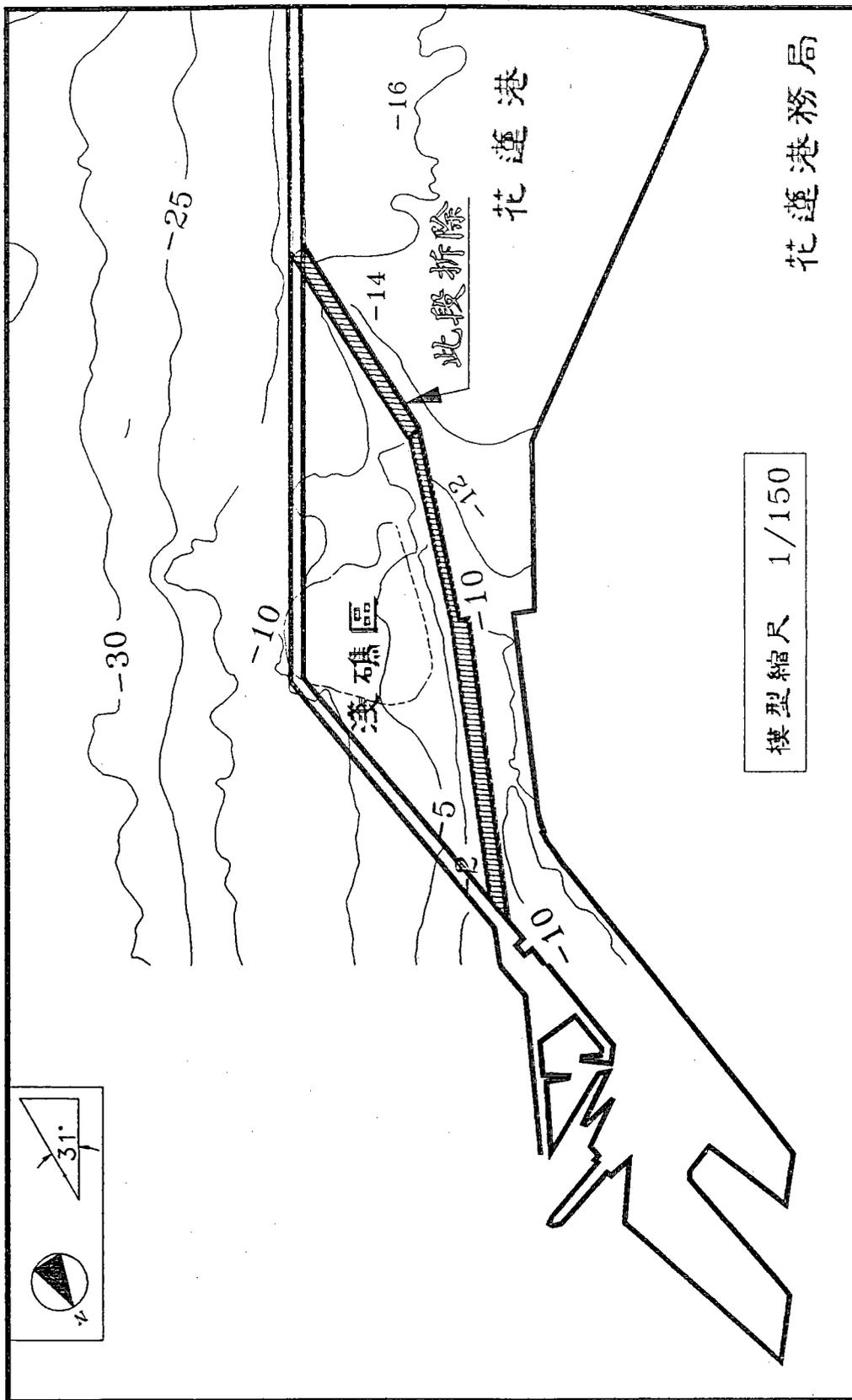


圖2-8(續) 模型試驗佈置圖(方案E)

Incident Wave Direction : S , CH : 28

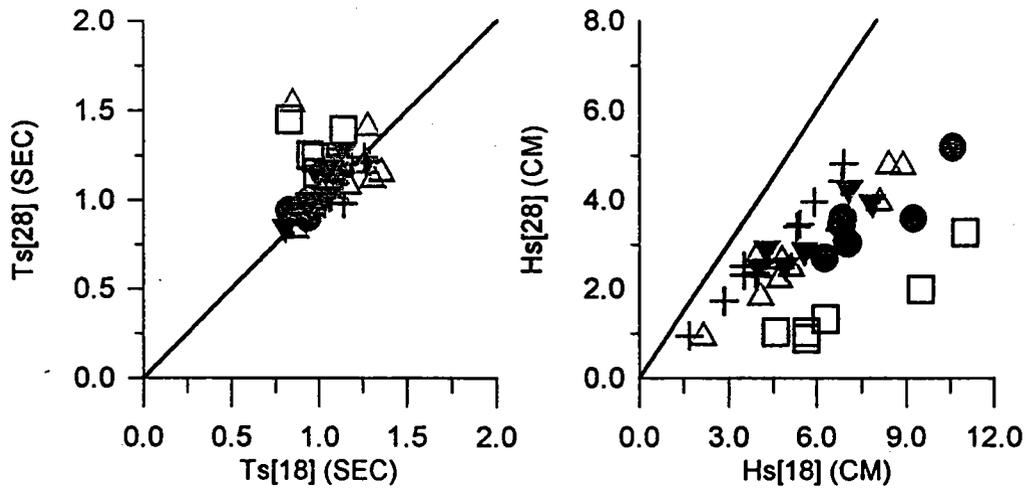
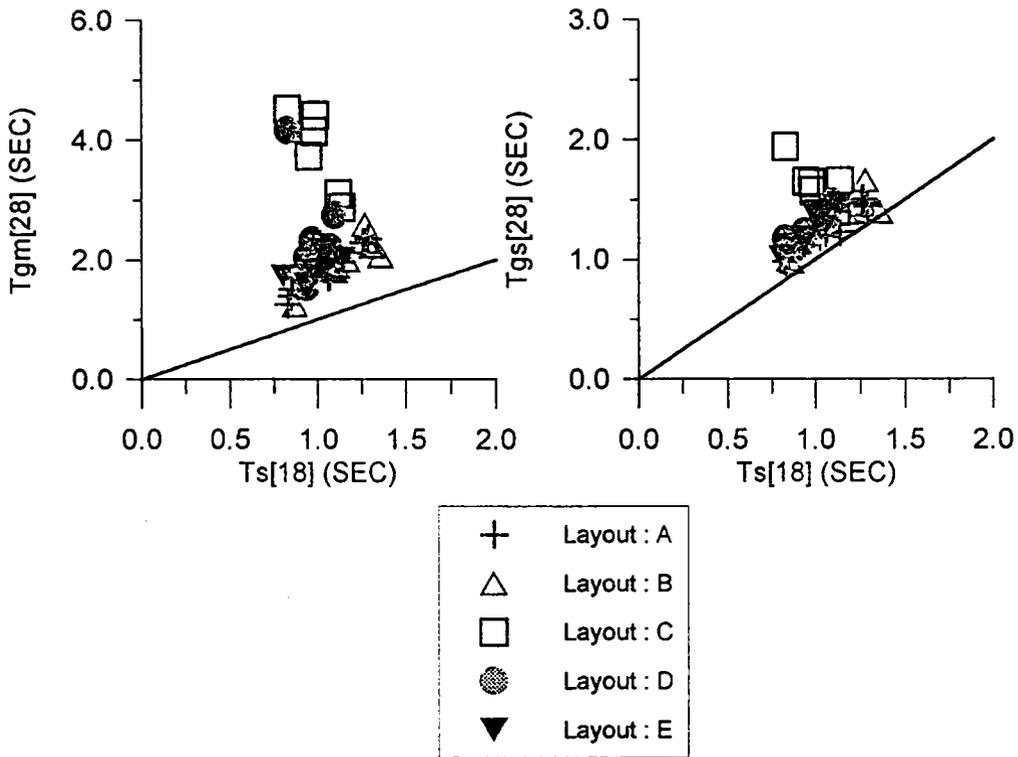


圖3-1 外港測點28之波高、週期評比圖(入射波向S)

28-1SXX.GRF

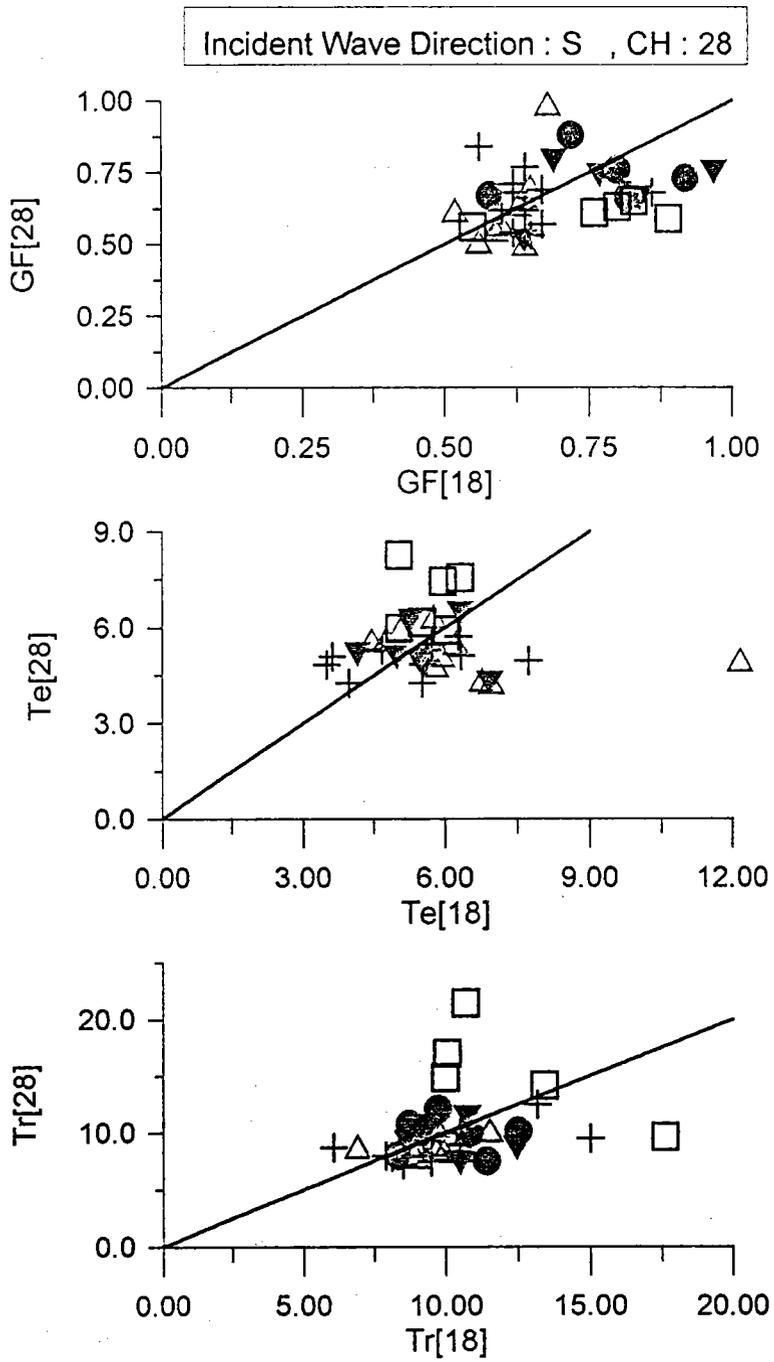


圖3-2 外港測點28之波連與群波評比圖(入射波向S)

28-2SXX.GRF

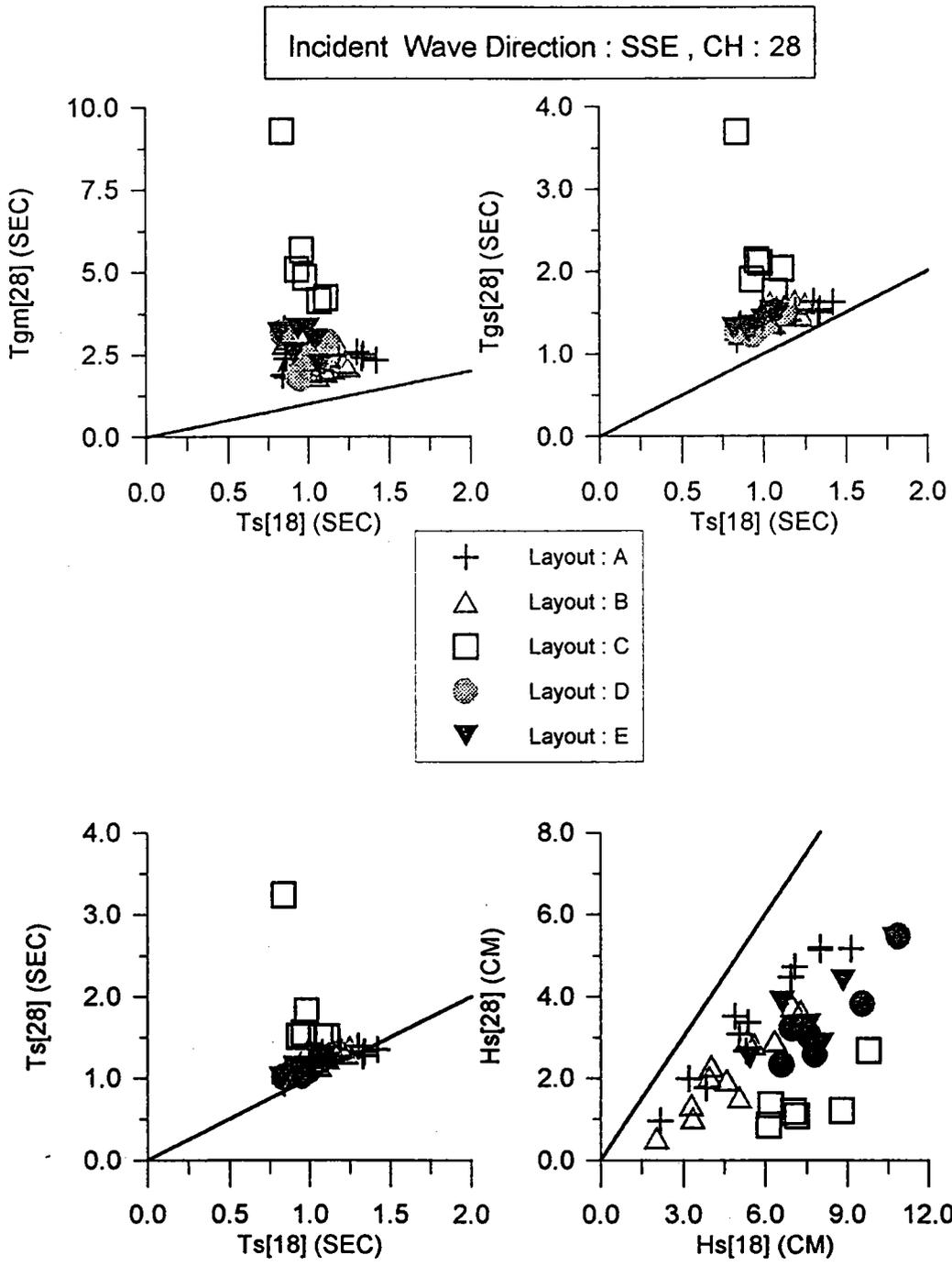


圖3-3 外港測點28之波高、週期評比圖(入射波向SSE)

28-1SSE.GRF

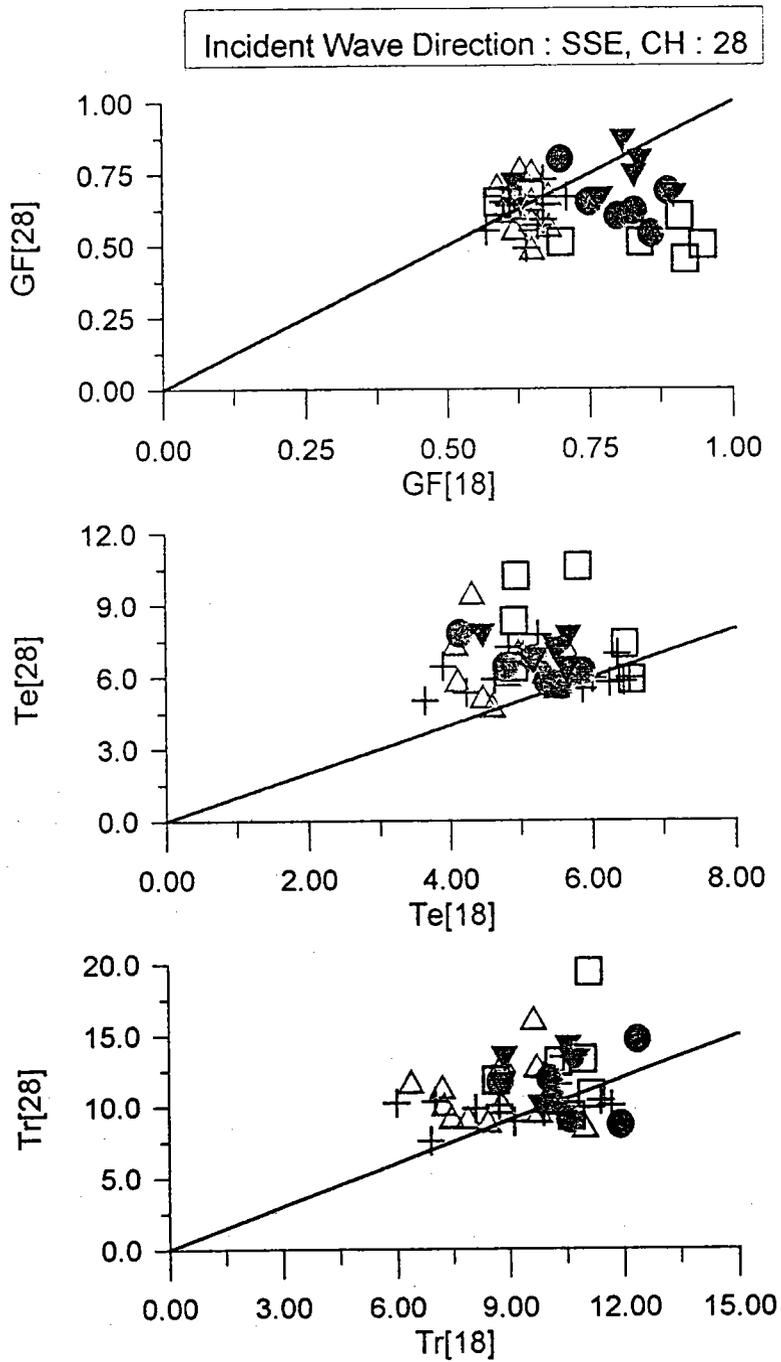


圖3-4 外港測點28之波連與群波評比圖(入射波向SSE)

28-2SSE.GRF

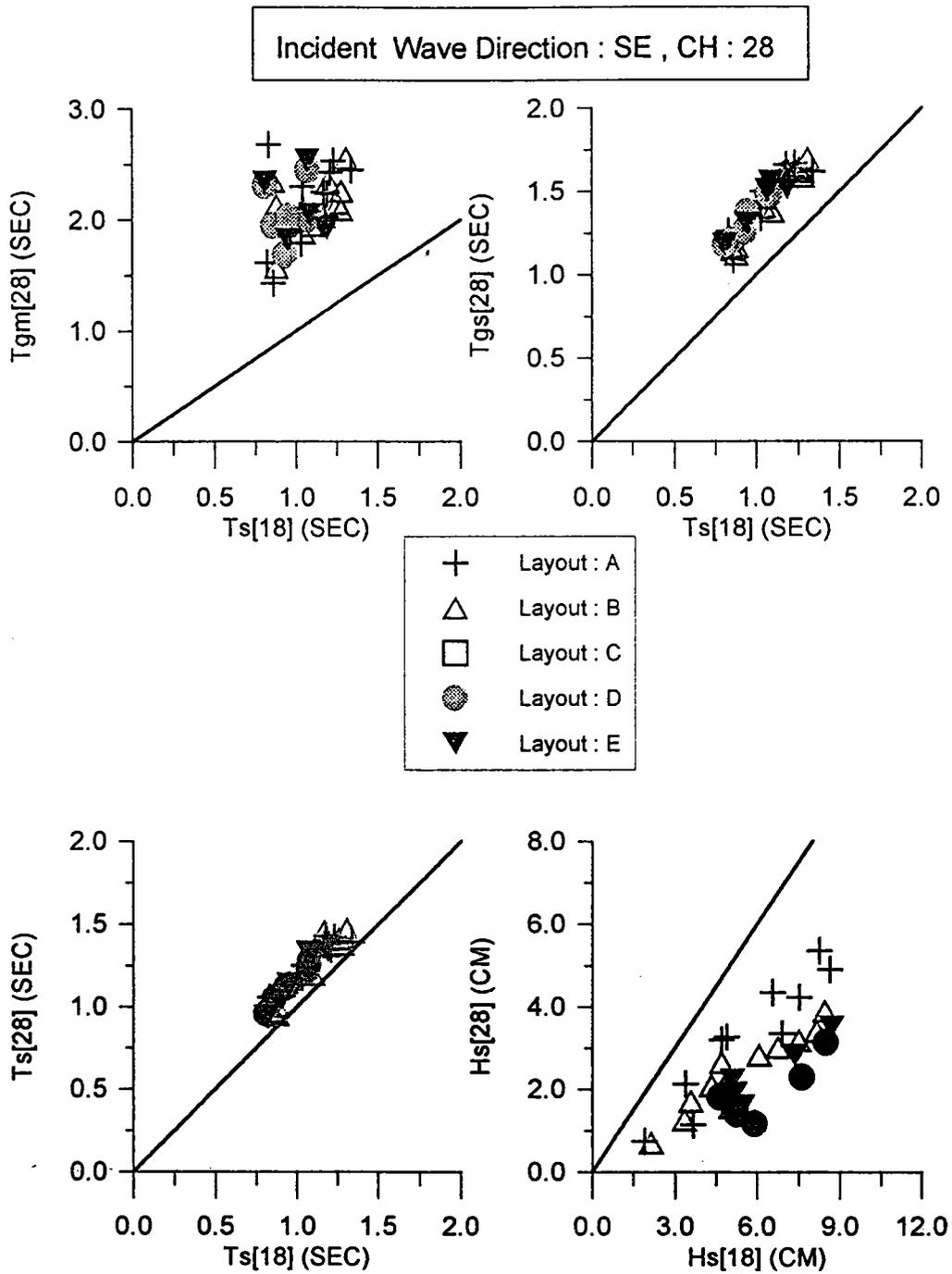


圖3-5 外港測點28之波高、週期評比圖(入射波向SE)

28-1SEX.GRF

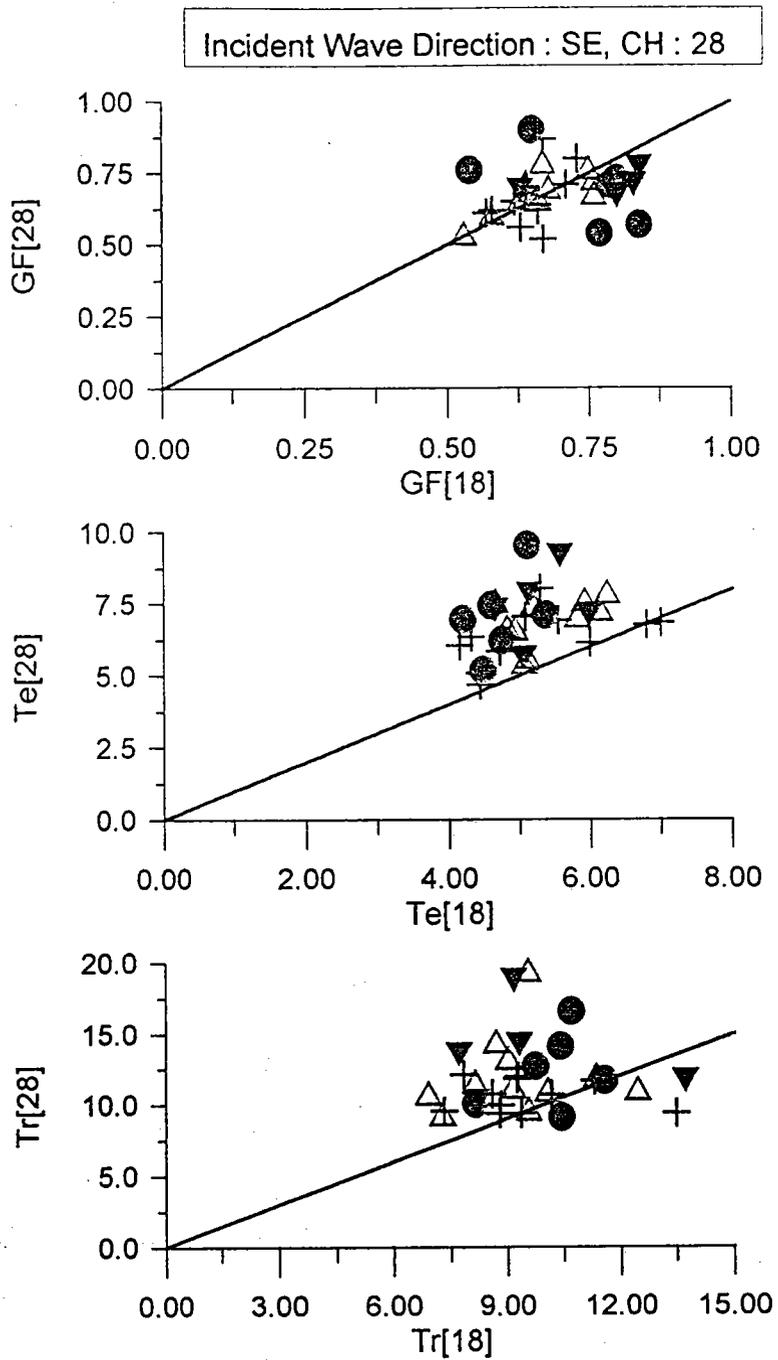


圖3-6 外港測點28之波連與群波評比圖(入射波向SE)

28-2SEX.GRF

Incident Wave Direction : S , CH : 09

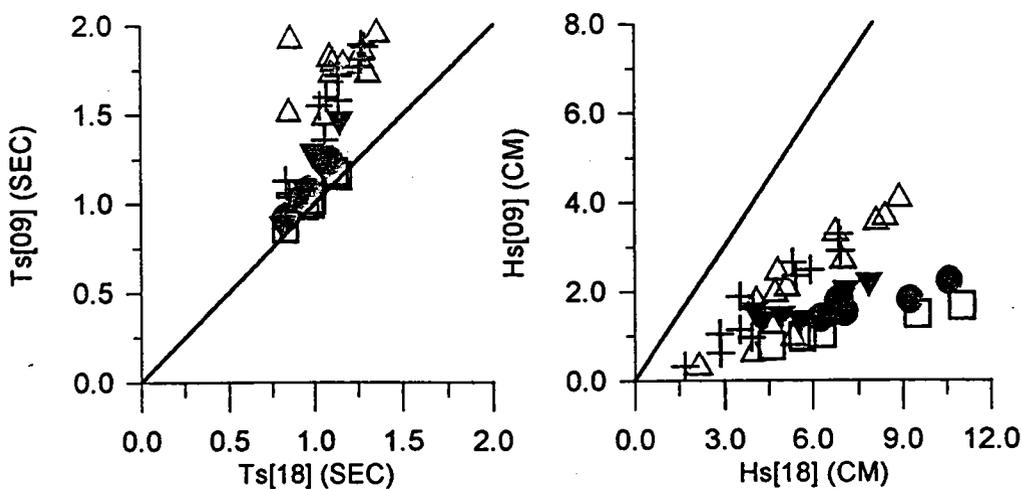
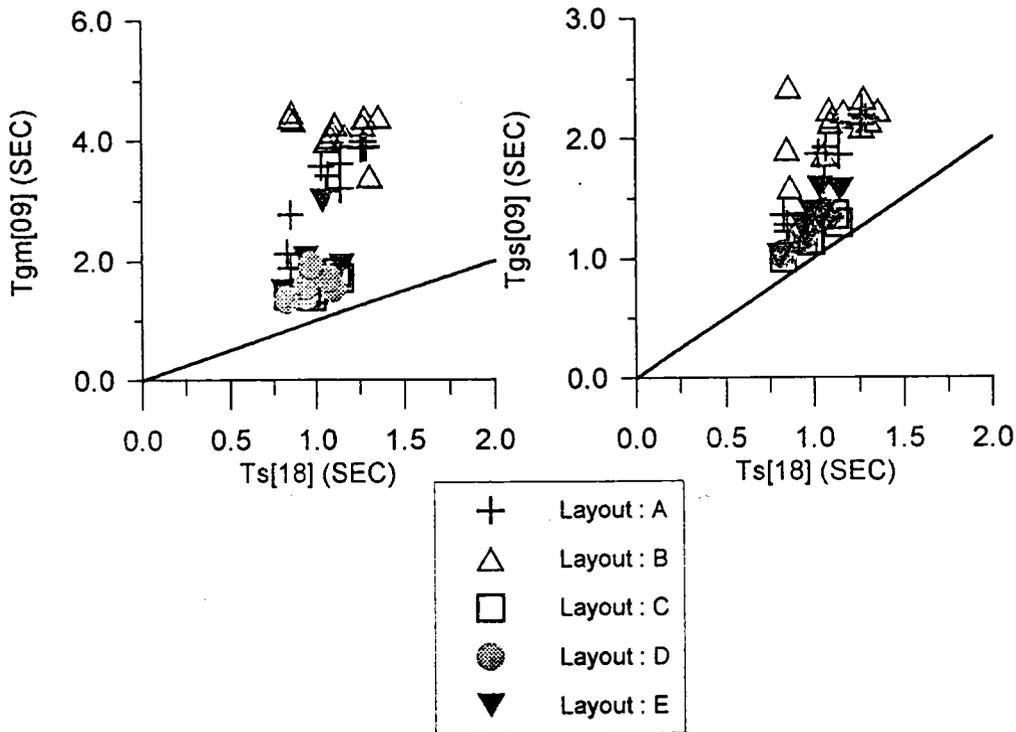


圖3-7 內港測點9之波高、週期評比圖(入射波向S)

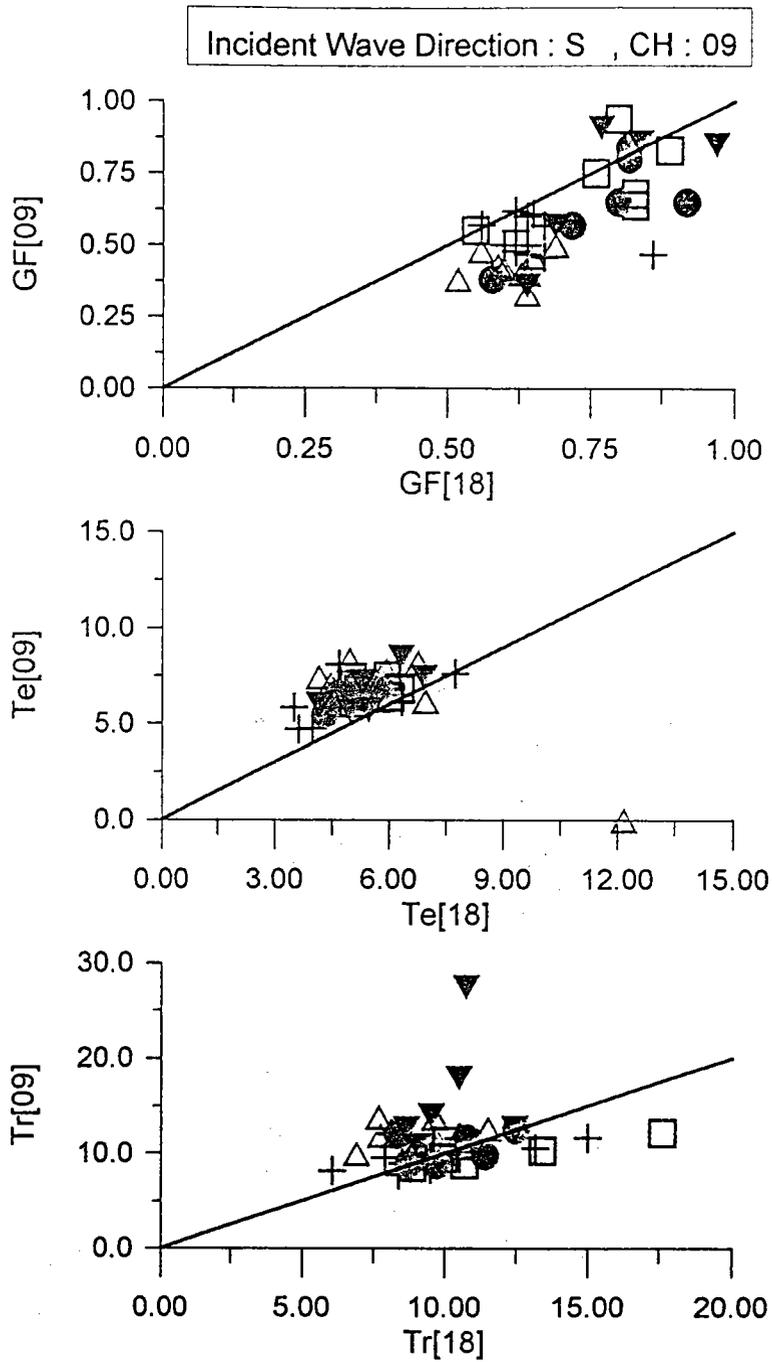


圖3-8 內港測點9之波連與群波評比圖(入射波向S)

09-2SXX.GRF

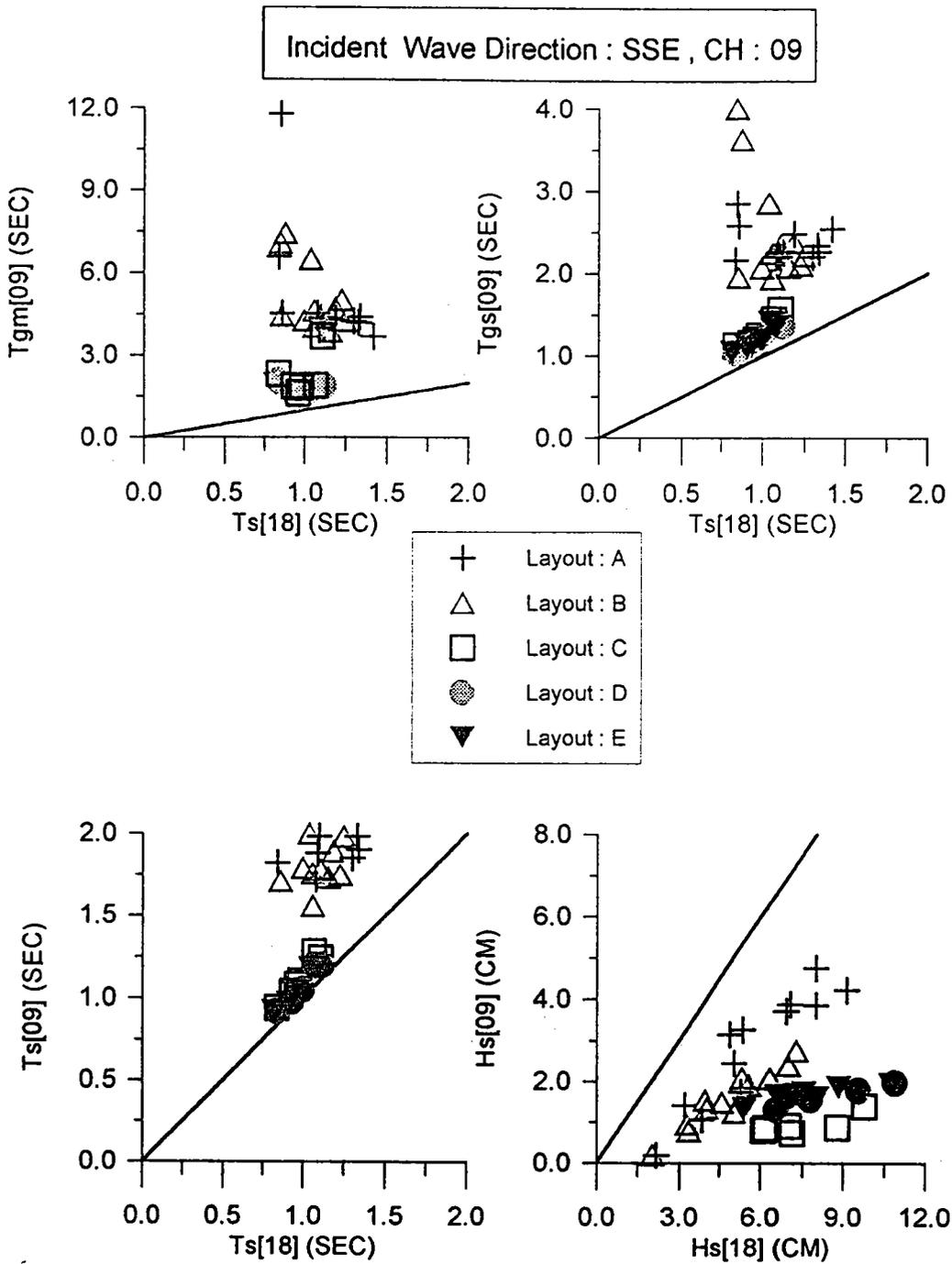


圖3-9 內港測點9之波高、週期評比圖(入射波向SSE)

09-1SSE.GRF

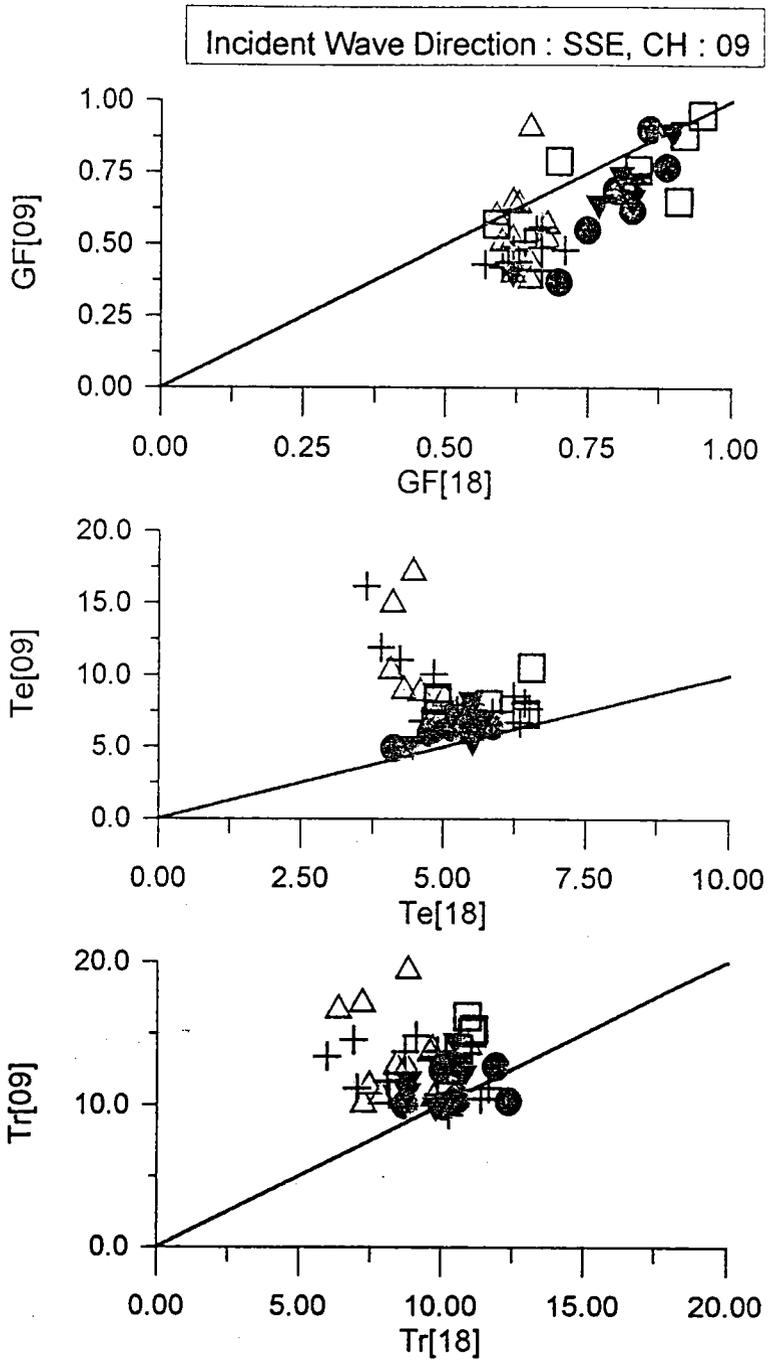


圖3-10 內港測點9之波連與群波評比圖(入射波向SSE)

09-2SSE.GRF

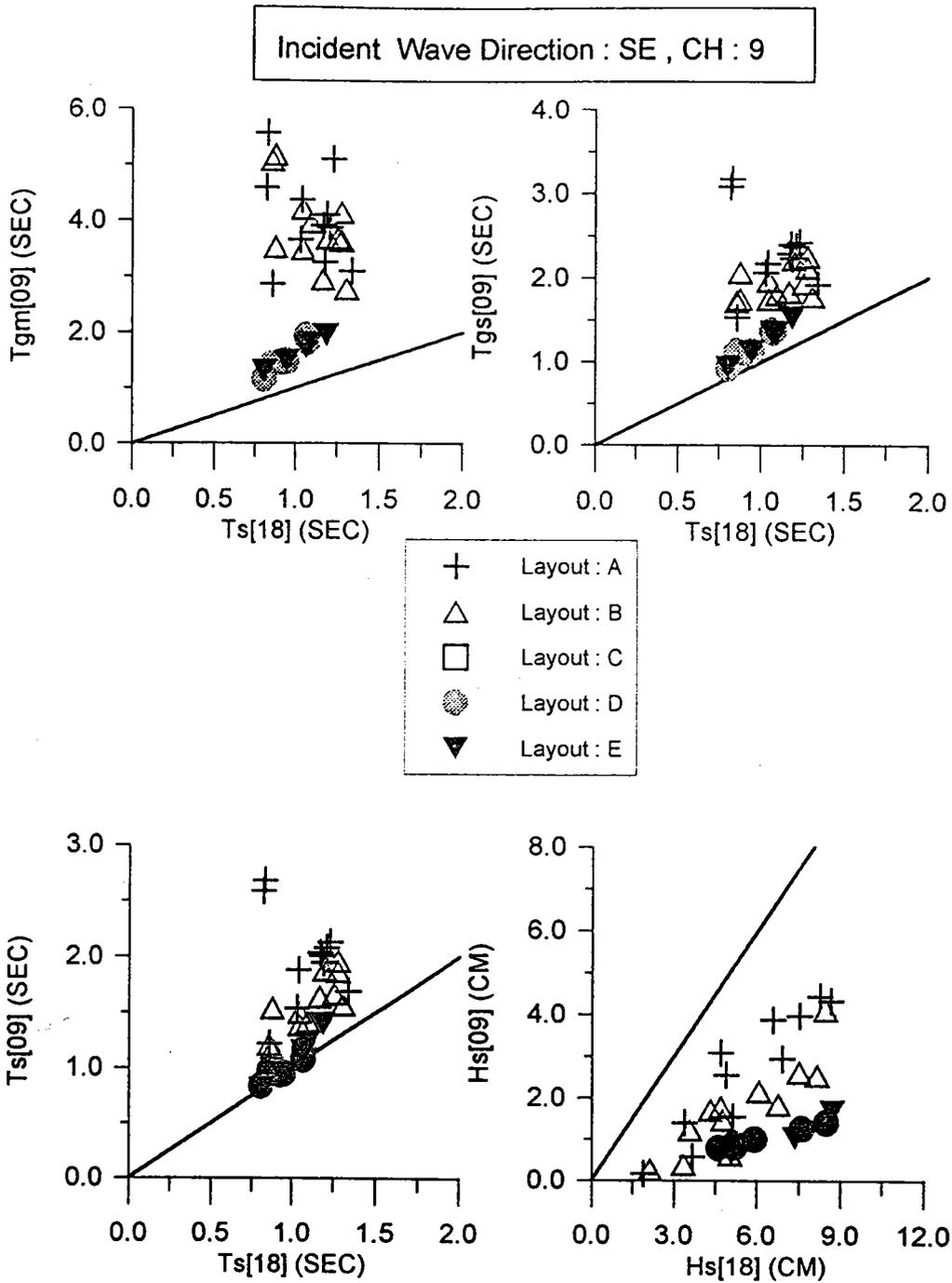


圖3-11 內港測點9之波高、週期評比圖(入射波向SE)

09-1SEX.GRF

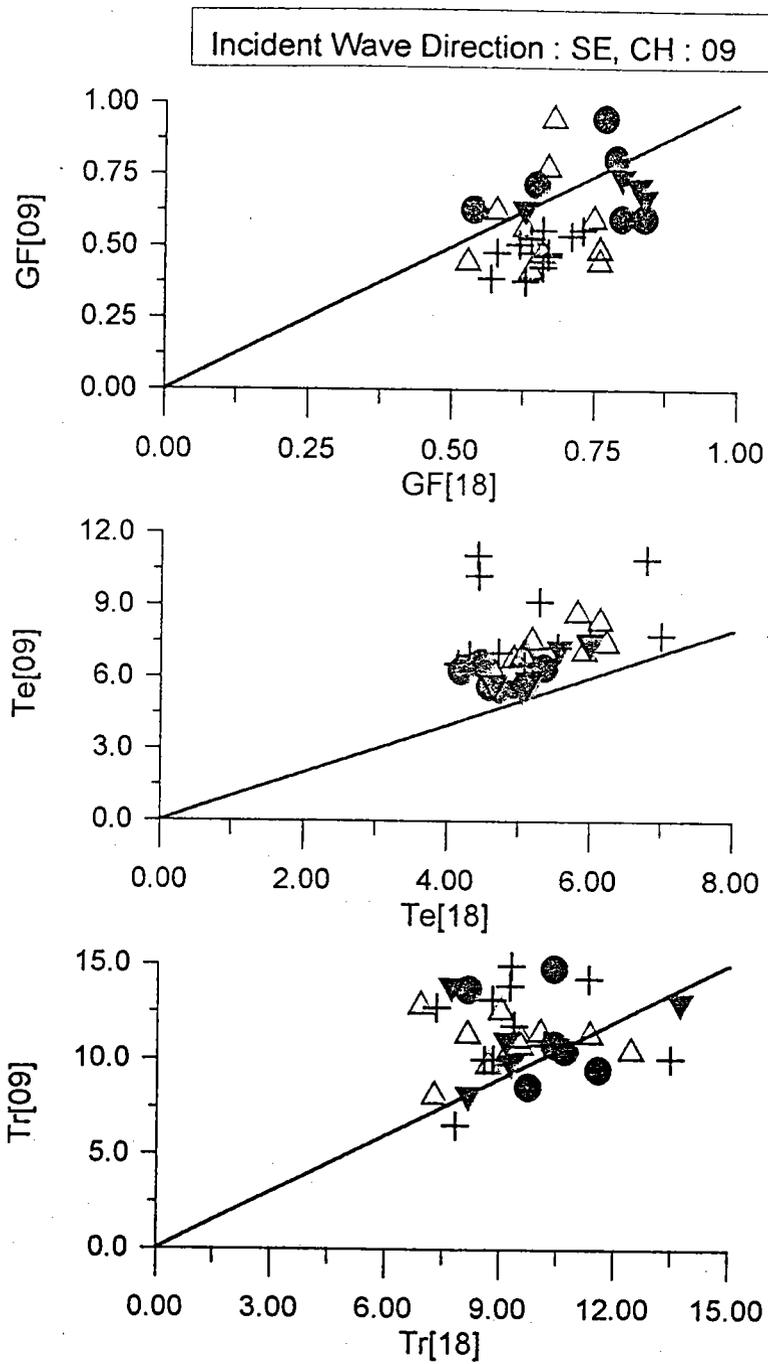


圖3-12 內港測點9之波連與群波評比圖(入射波向SE)

09-2SEX.GRF

Incident Wave Direction : S CH : 27,09

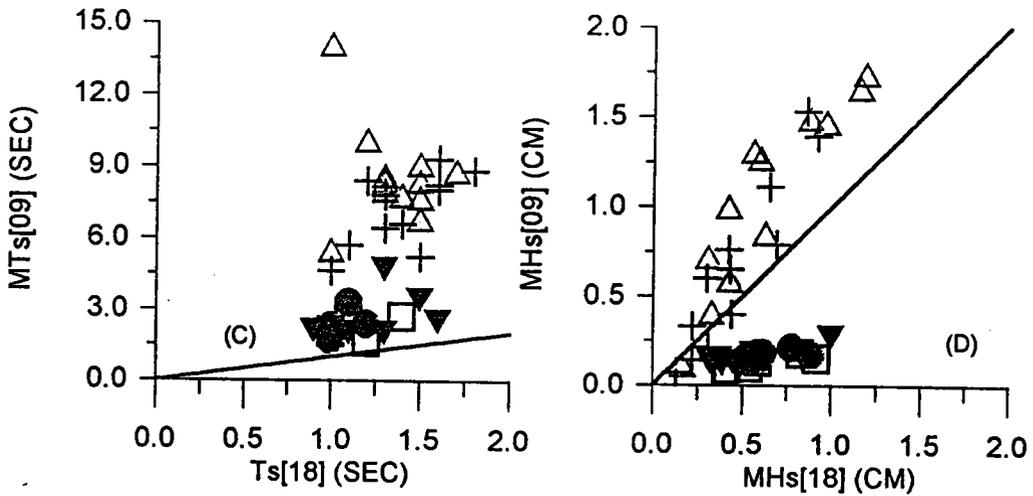
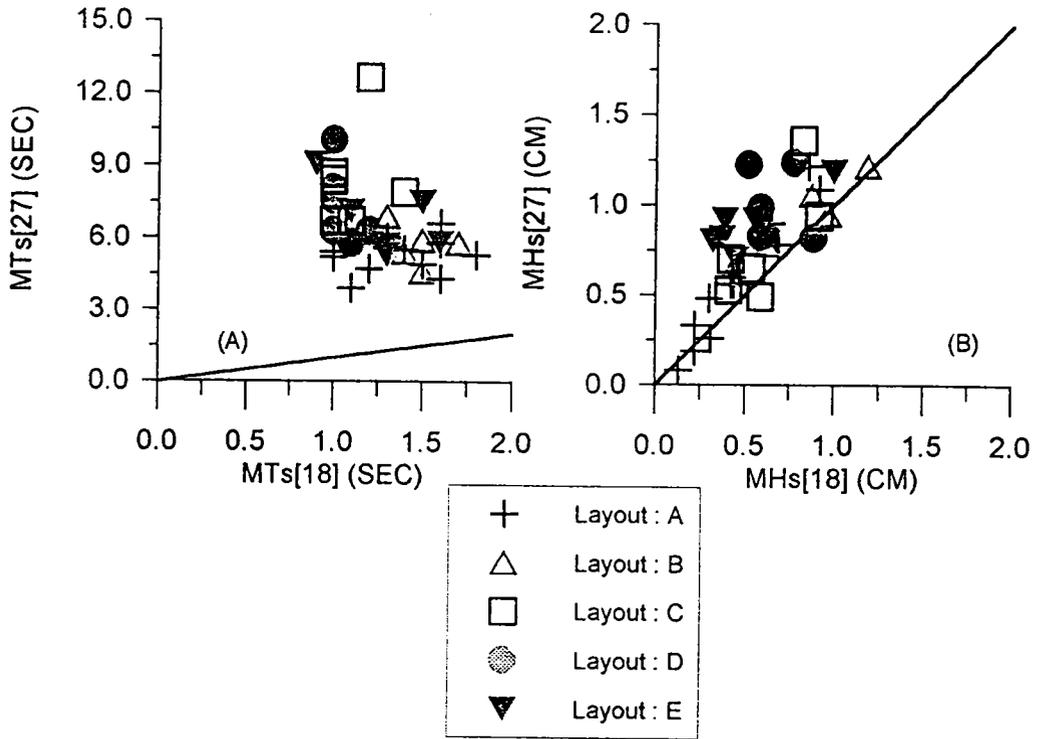


圖3-13 內港測點9及測點27之長週期波評比圖(入射波向S)

2709SXX.GRF

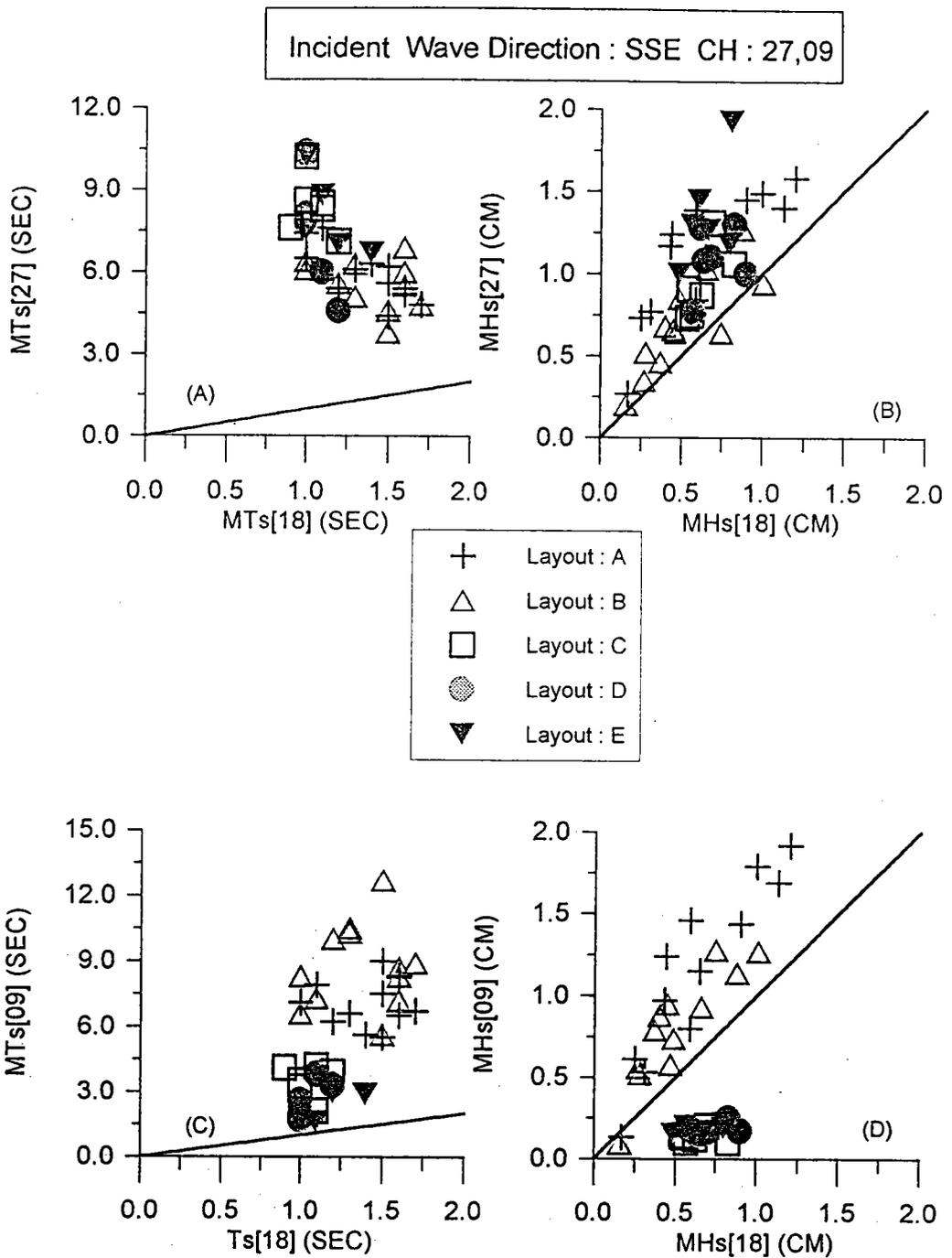


圖3-14 內港測點9及測點27之長週期波評比圖(入射波向SSE)

2709SSE.GRF

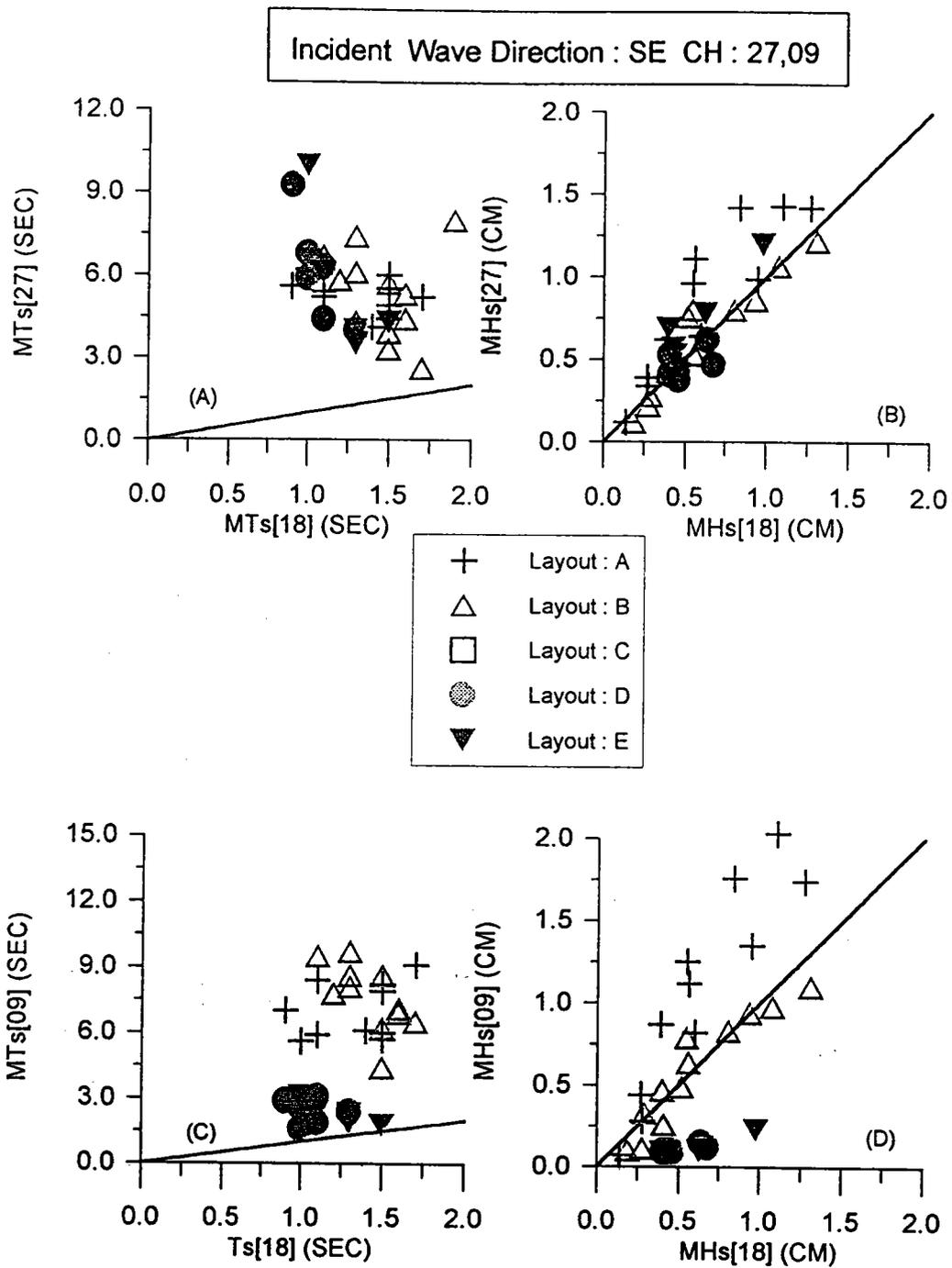


圖3-15 內港測點9及測點27之長週期波評比圖(入射波向SE)

2709SEX.GRF

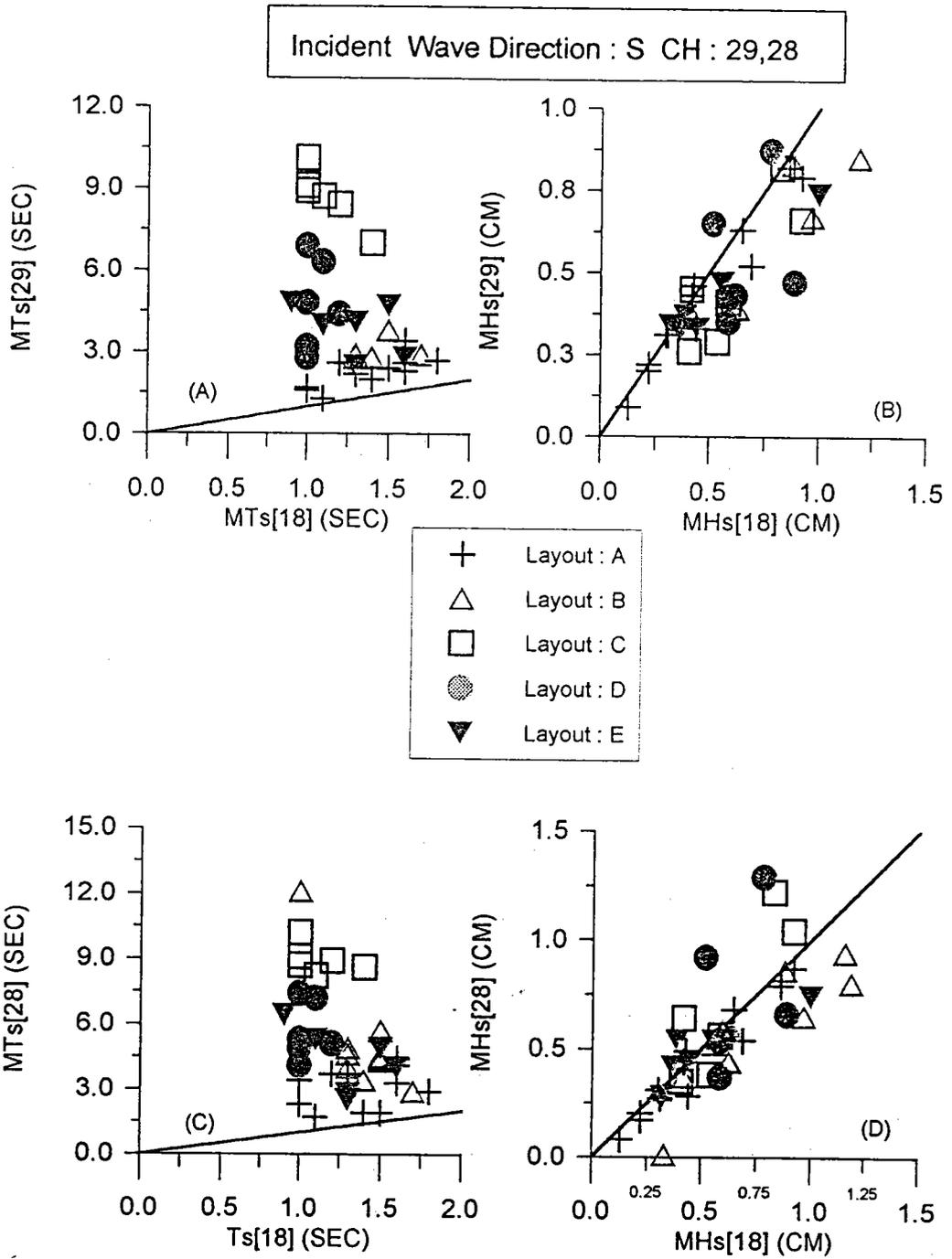


圖3-16 外港測點28及測點29之長週期波評比圖(入射波向S)

2928SXX.GRF

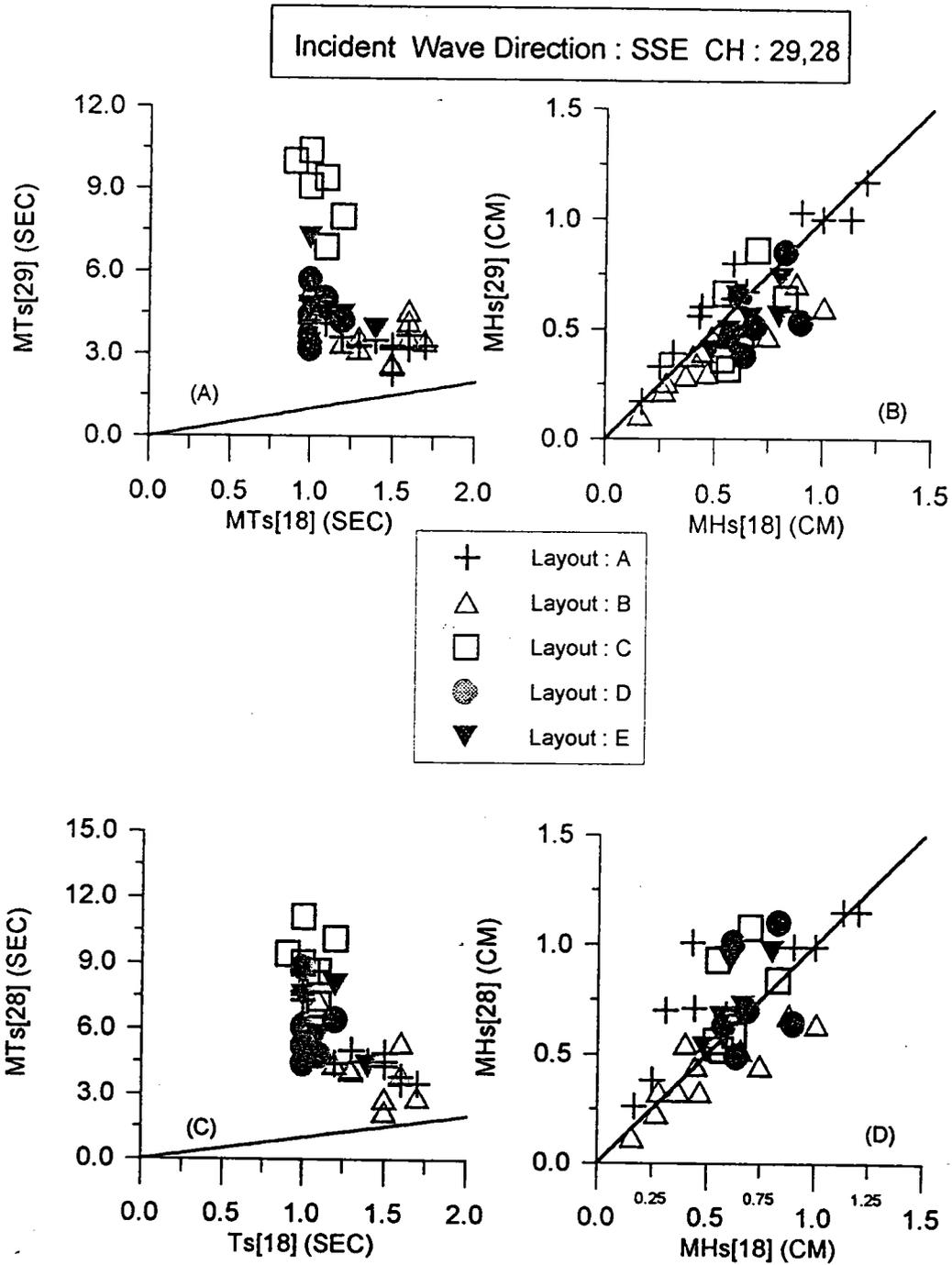


圖3-17 外港測點28及測點29之長週期波評比圖(入射波向SSE)

2928SSE.GRF

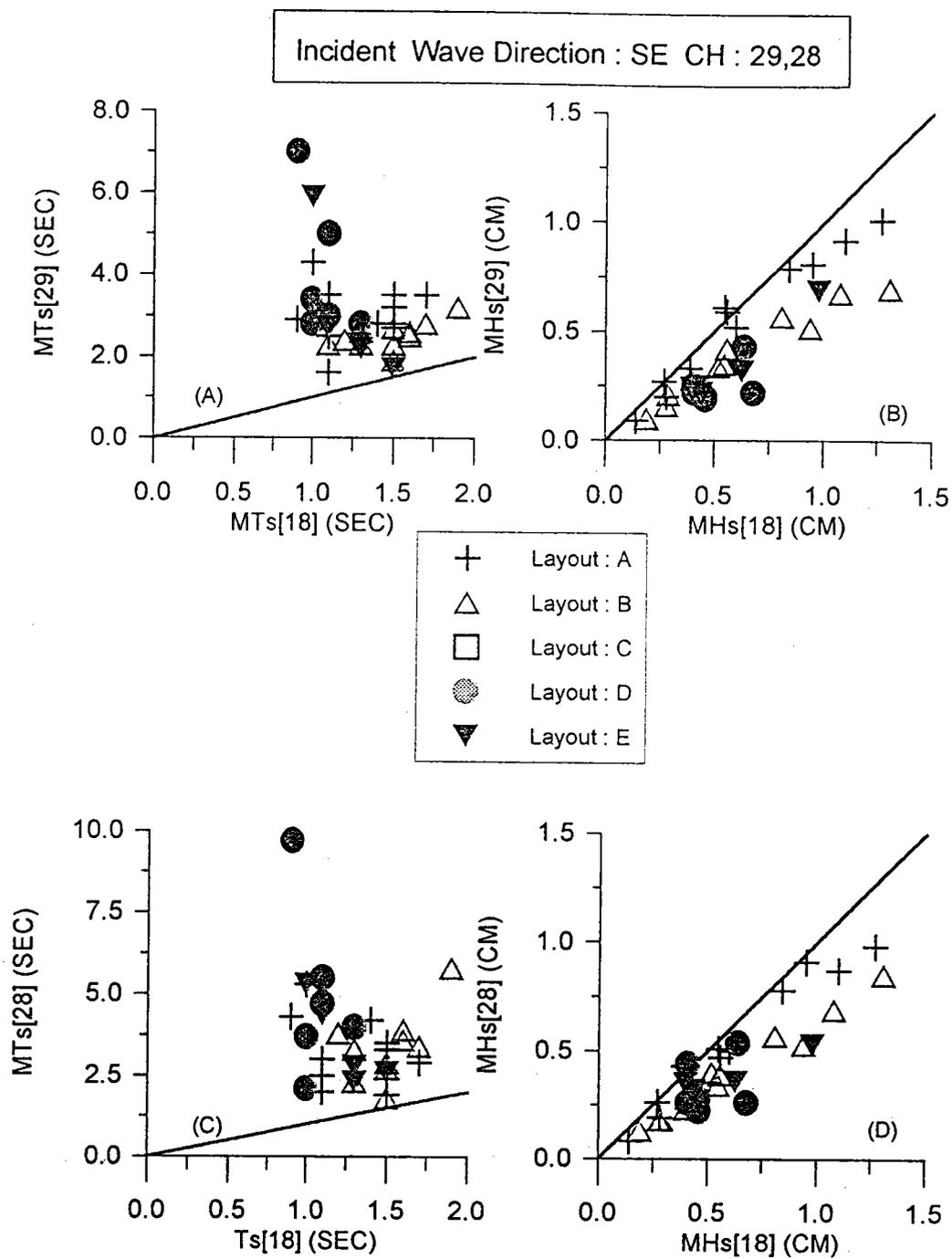


圖3-18 外港測點28及測點29之長週期波評比圖(入射波向SE)

2928SEX.GRF

Wave Condition : OC , Wave Direction : S , Layout : A

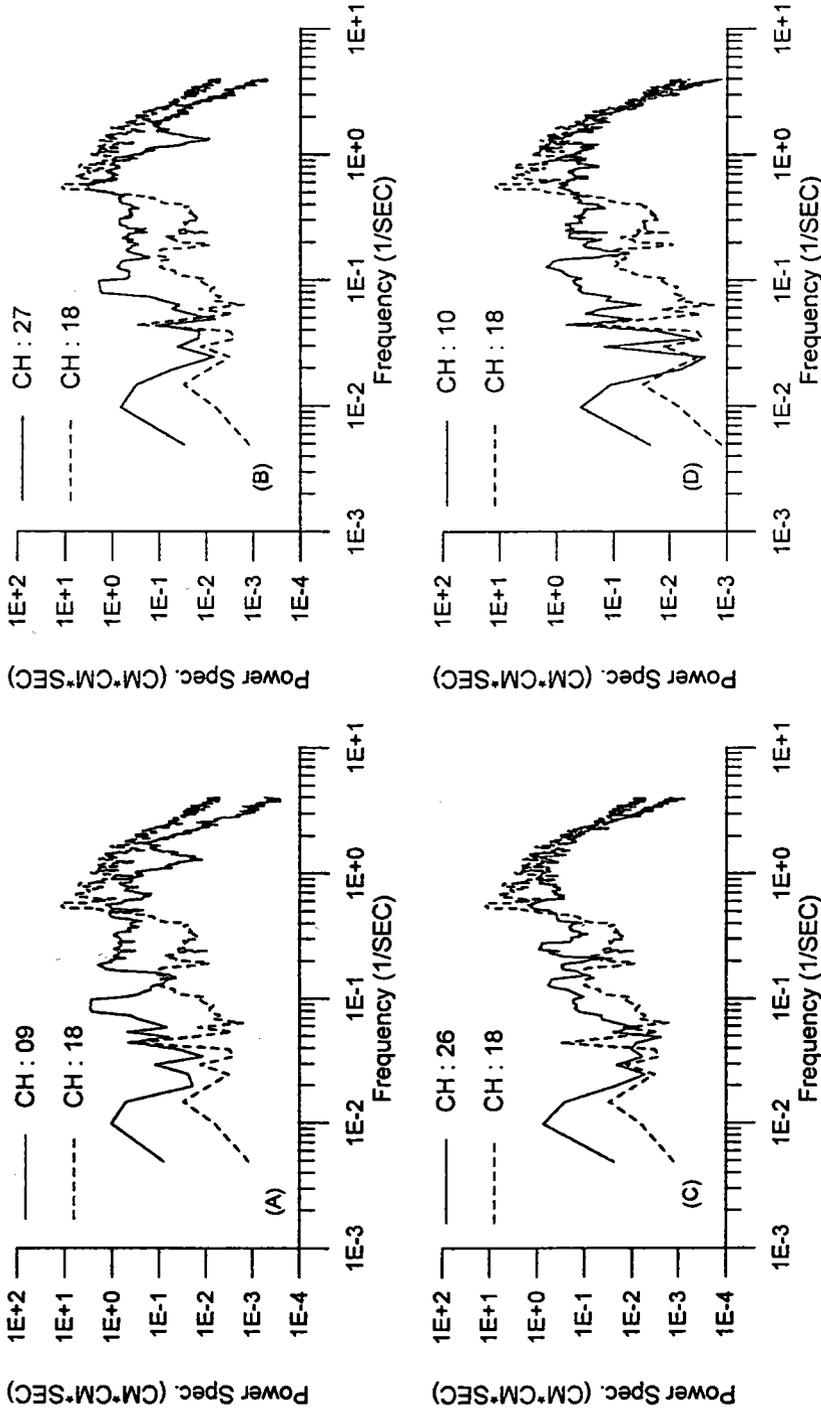


圖3-19 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:A;入射波向:S)

Wave Condition : OC , Wave Direction : S , Layout : A

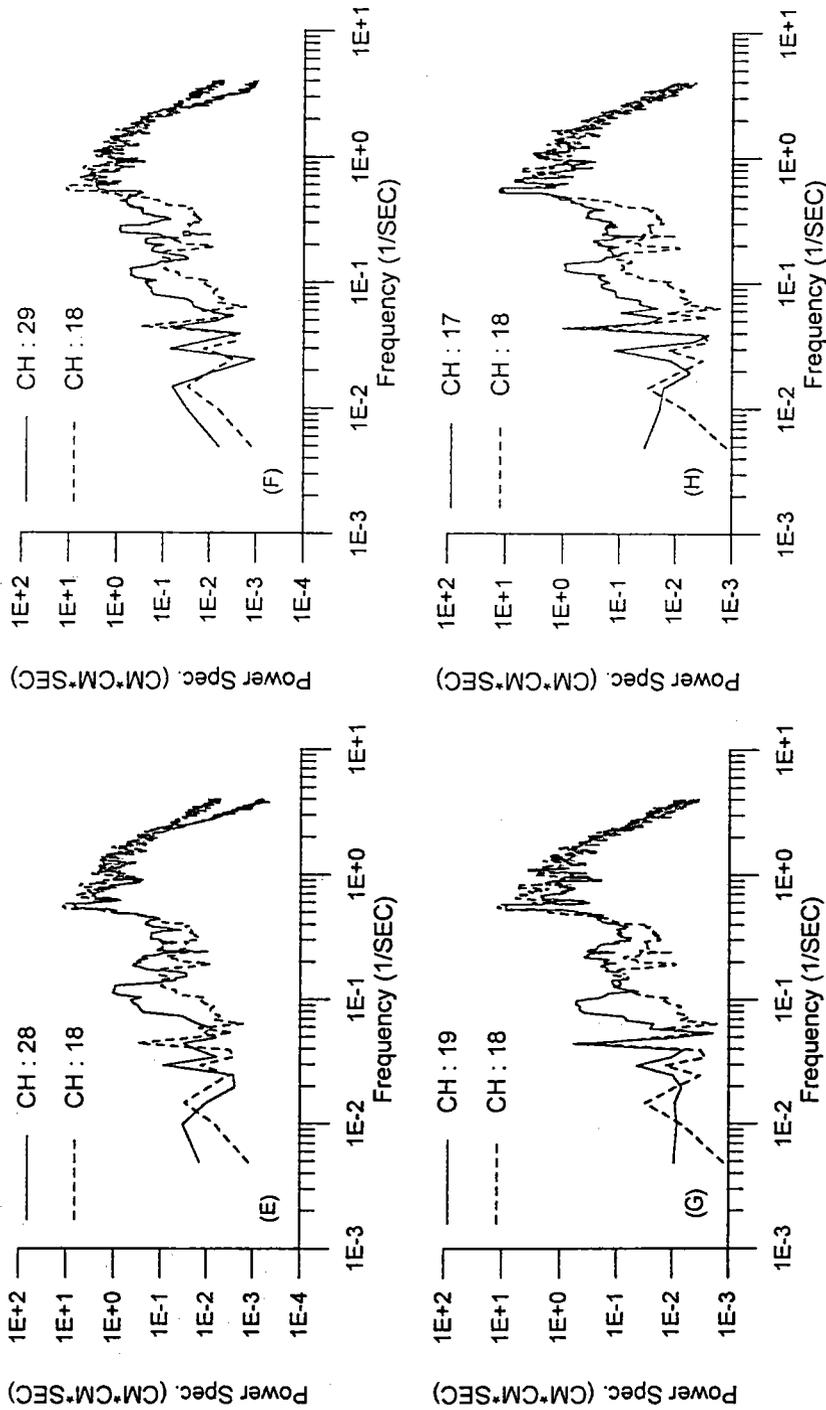


圖3-19(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: A; 入射波向: S)

Wave Condition : OC , Wave Direction : S , Layout : B

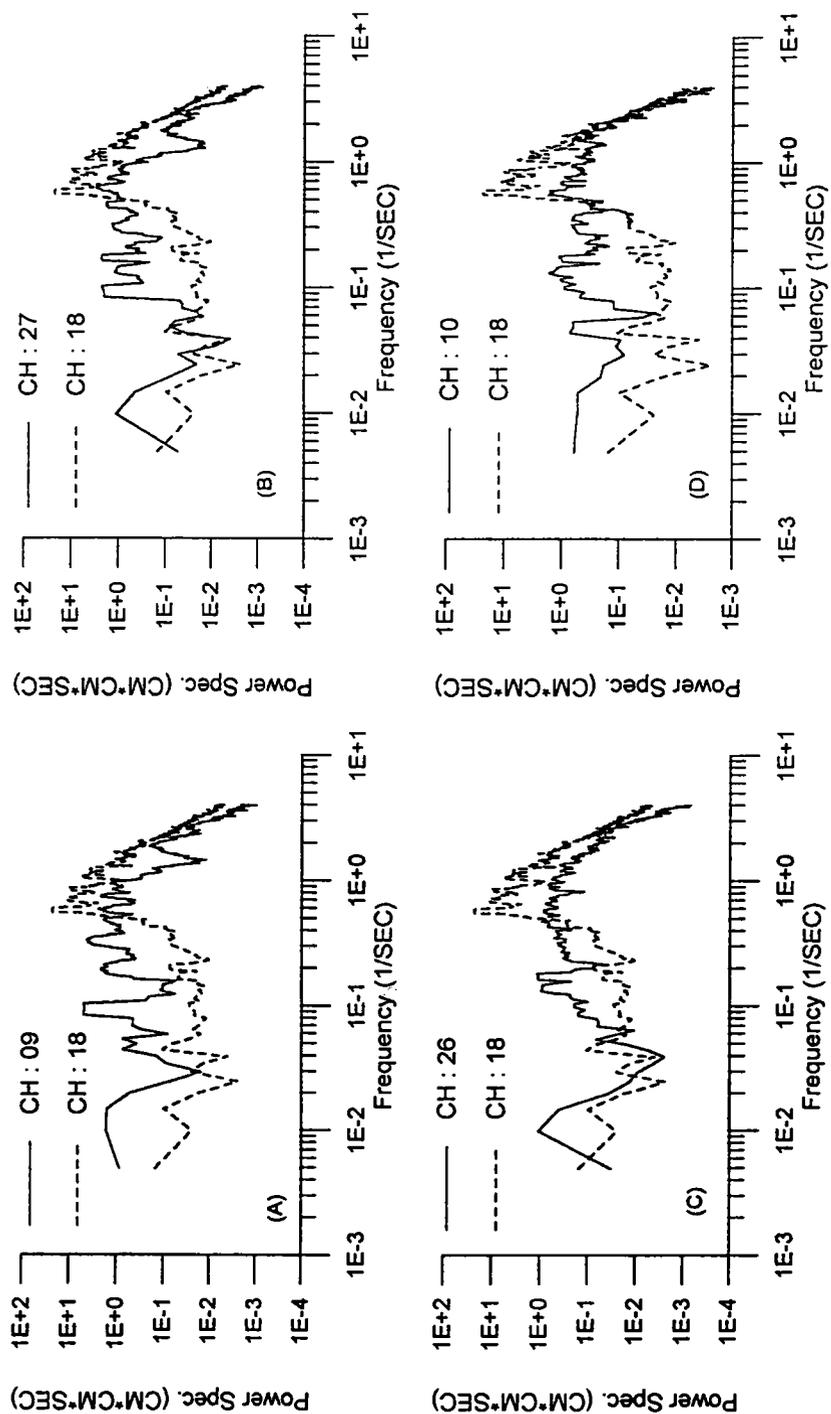


圖3-20 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:0C;佈置編名:B;入射波向:S)

Wave Condition : OC , Wave Direction : S , Layout : B

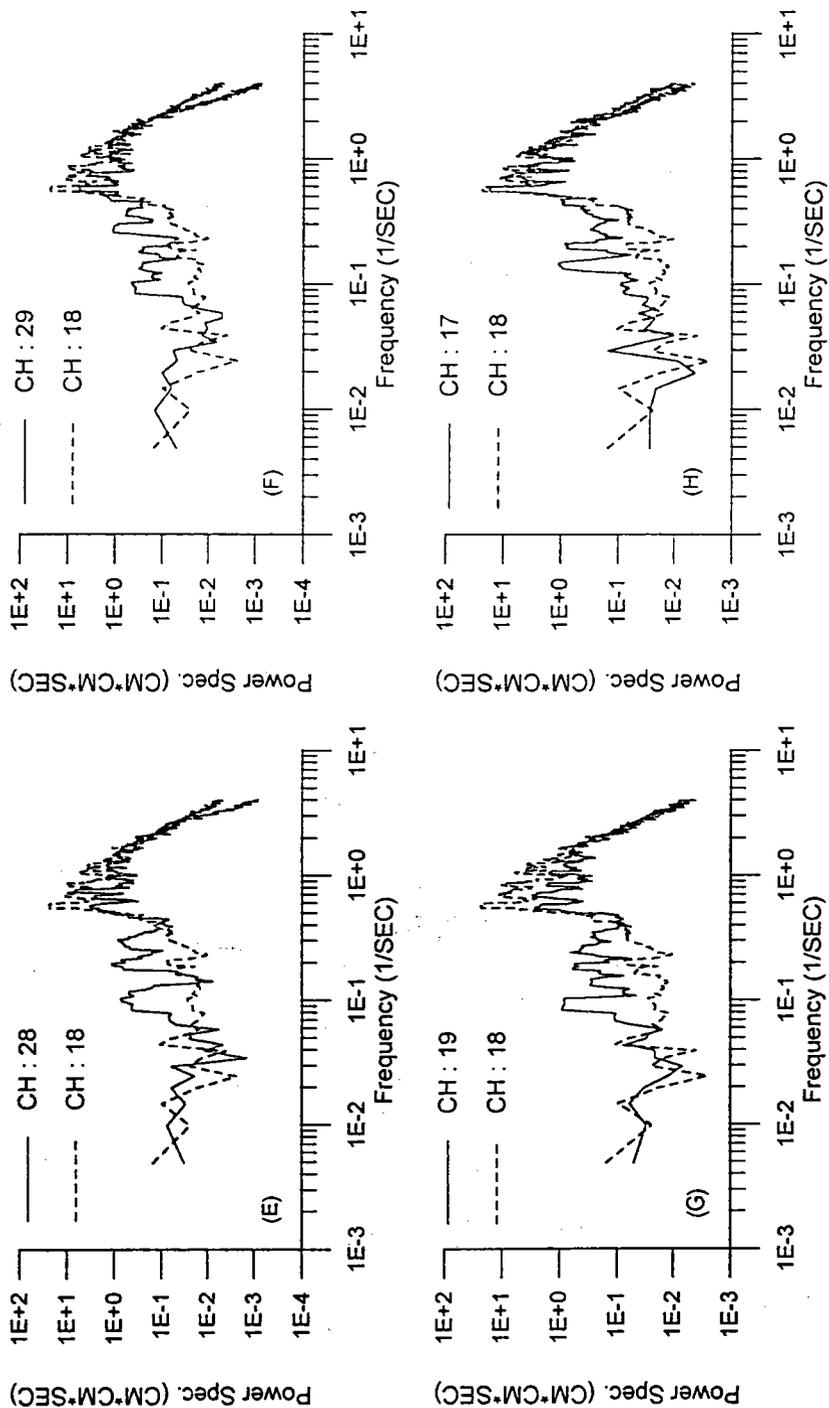


圖3-20(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: B; 入射波向: S)

Wave Condition : OC , Wave Direction : S , Layout : C

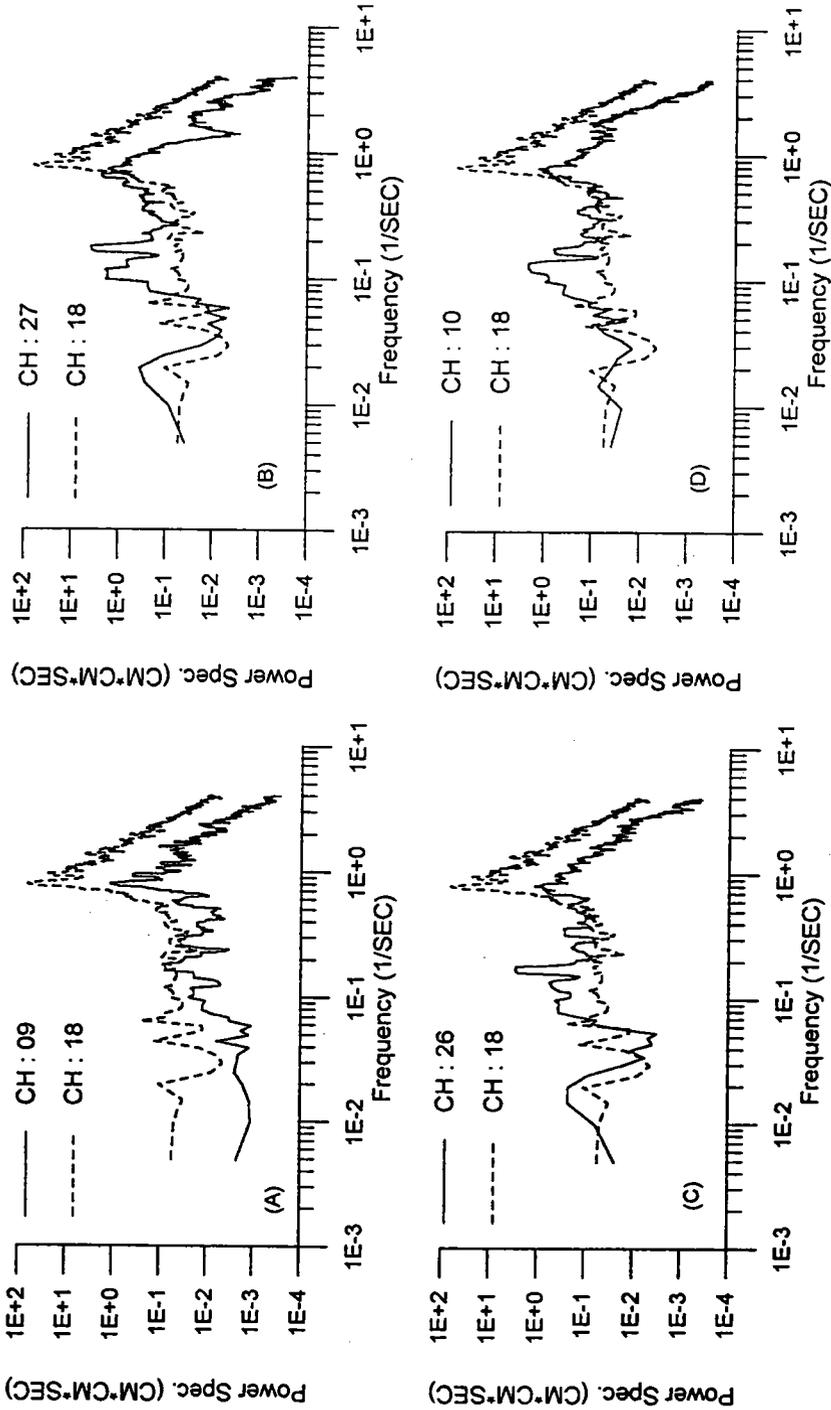


圖3-21 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: C; 入射波向: S)

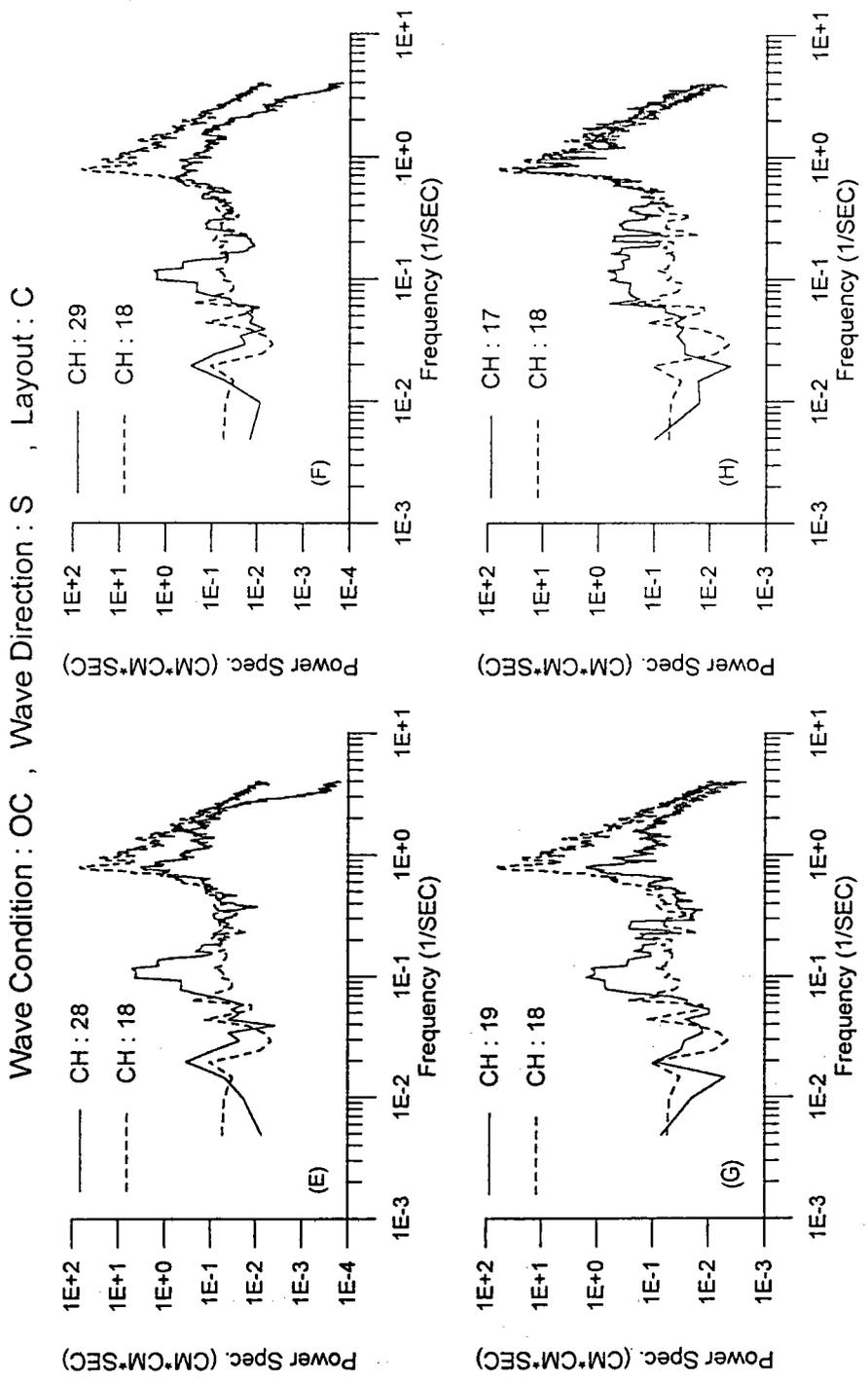


圖3-21(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:C;入射波向:S)

Wave Condition : OC , Wave Direction : S , Layout : D

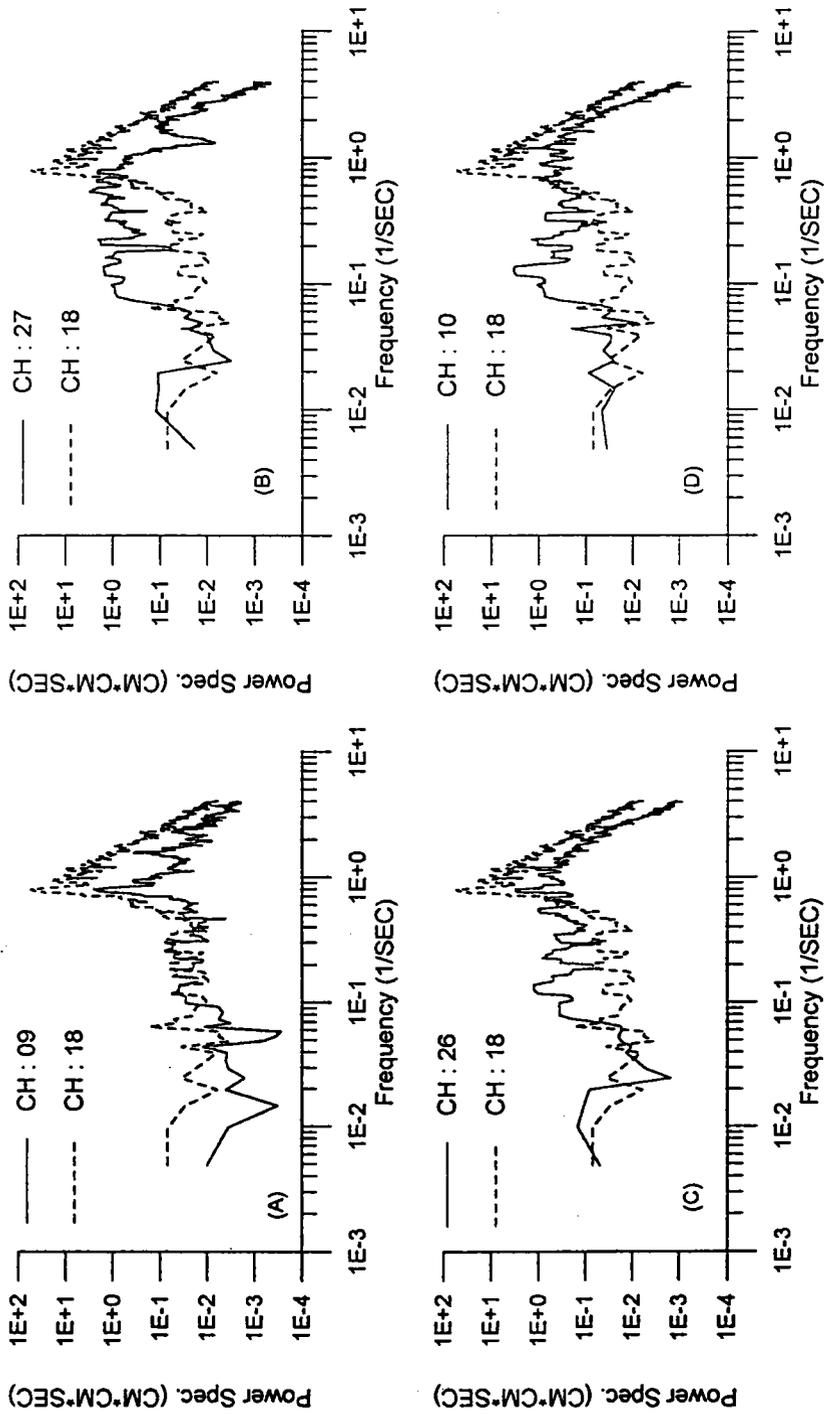


圖3-22 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:D;入射波向:S)

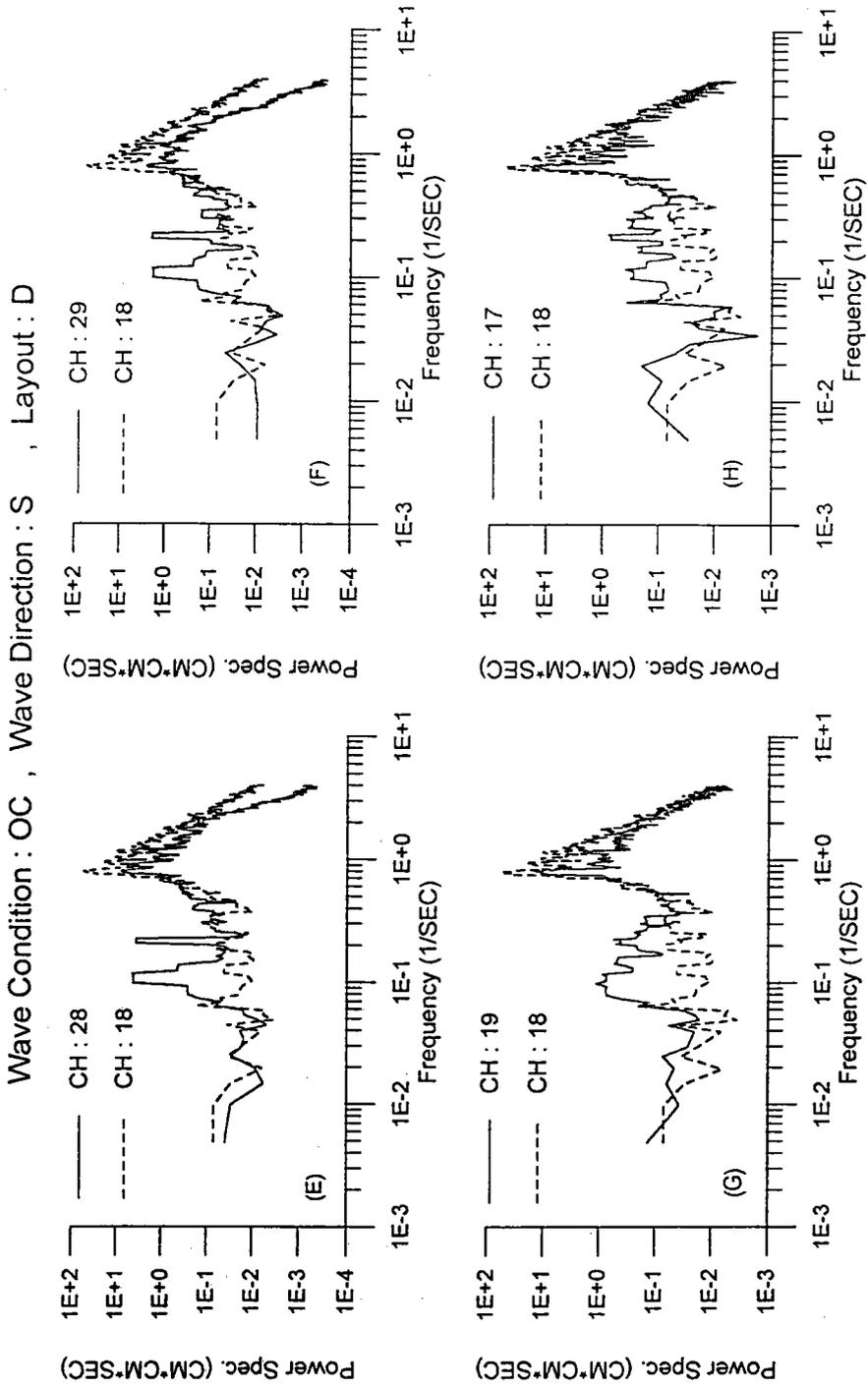


圖3-22(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:D;入射波向:S)

Wave Condition : OC , Wave Direction : S , Layout : E

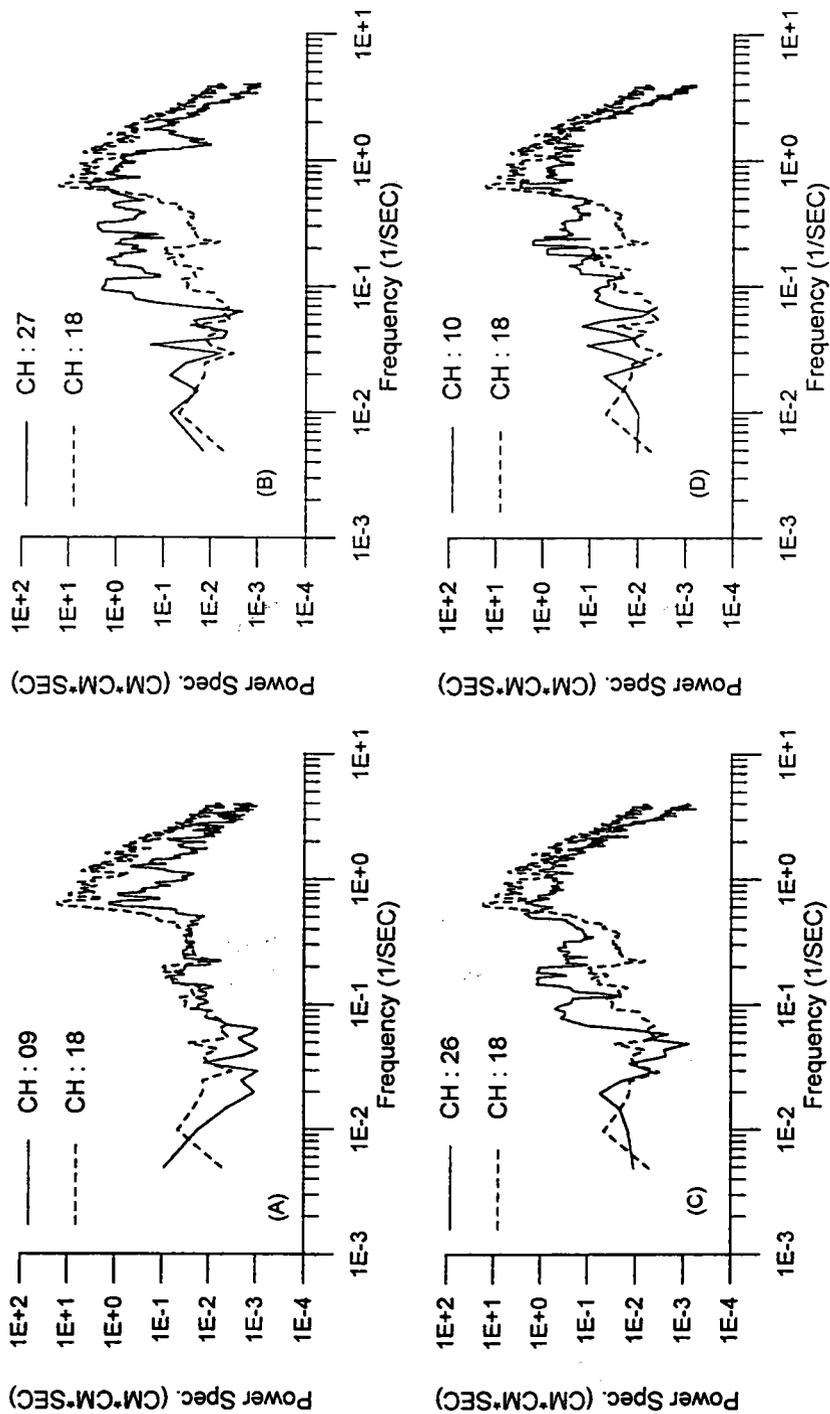


圖3-23 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:E;入射波向:S)

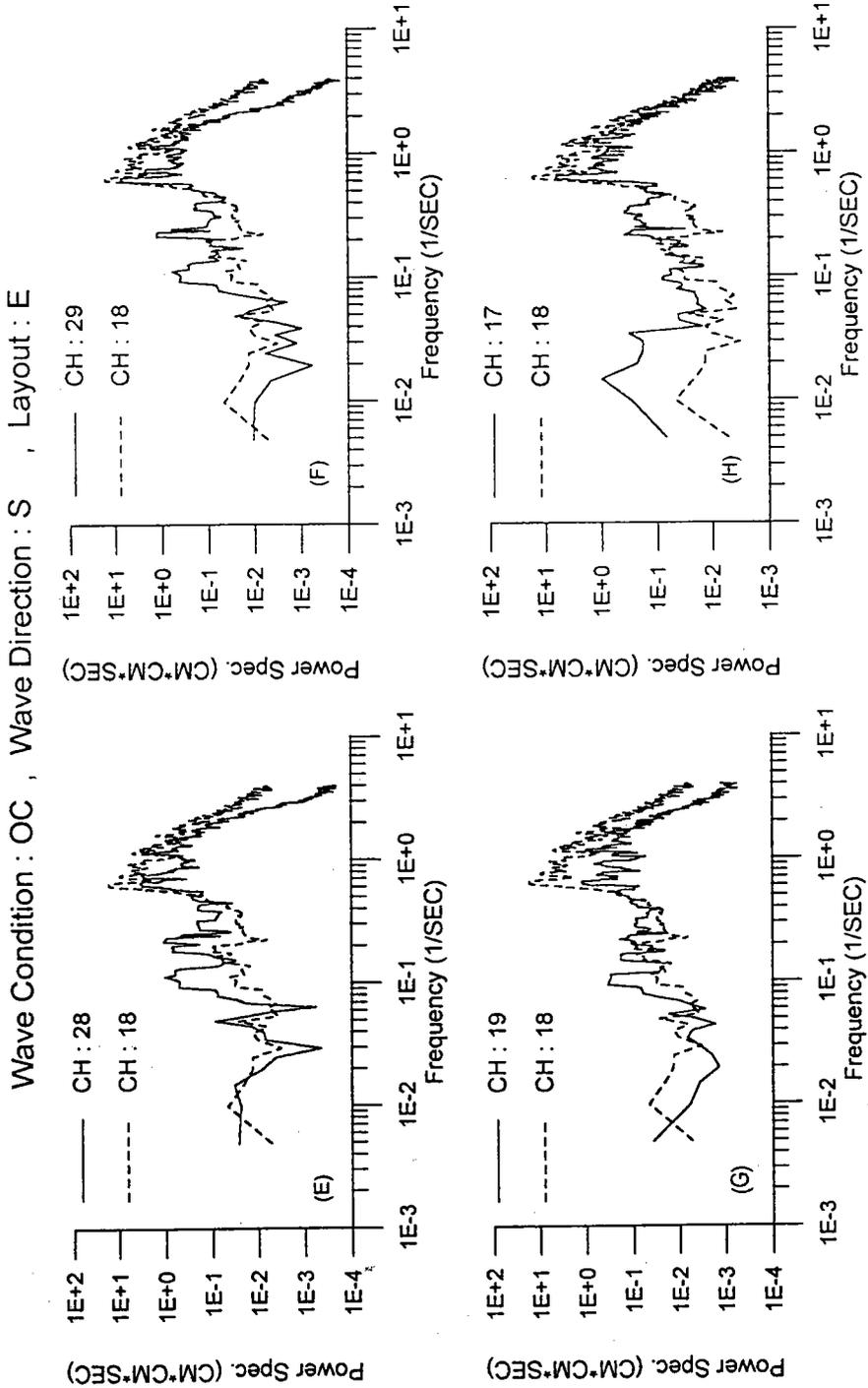


圖3-23(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:E;入射波向:S)

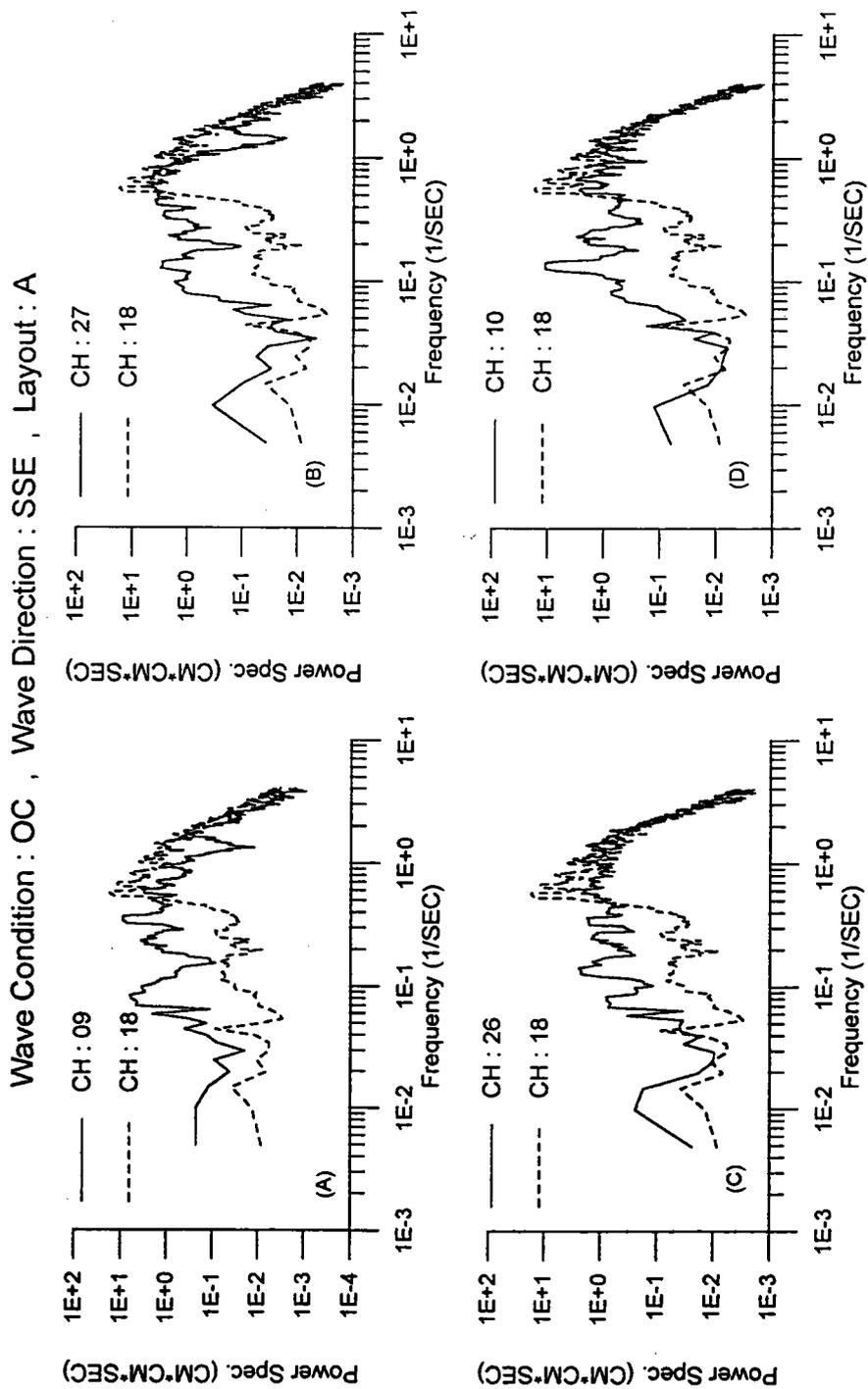


圖3-24 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: A; 入射波向: SSE)

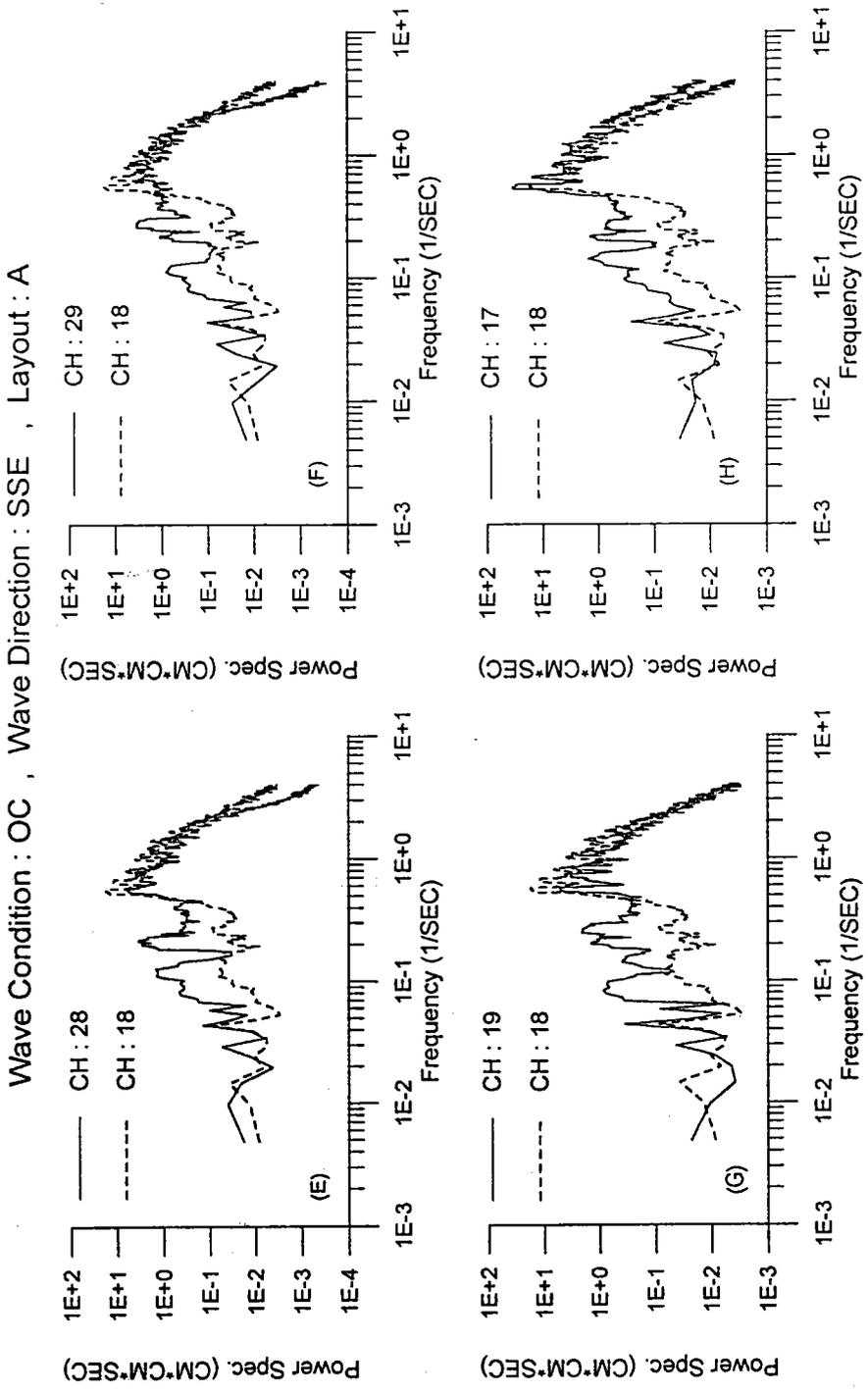


圖3-24(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:A;入射波向:SSE)

Wave Condition : OC , Wave Direction : SSE , Layout : B

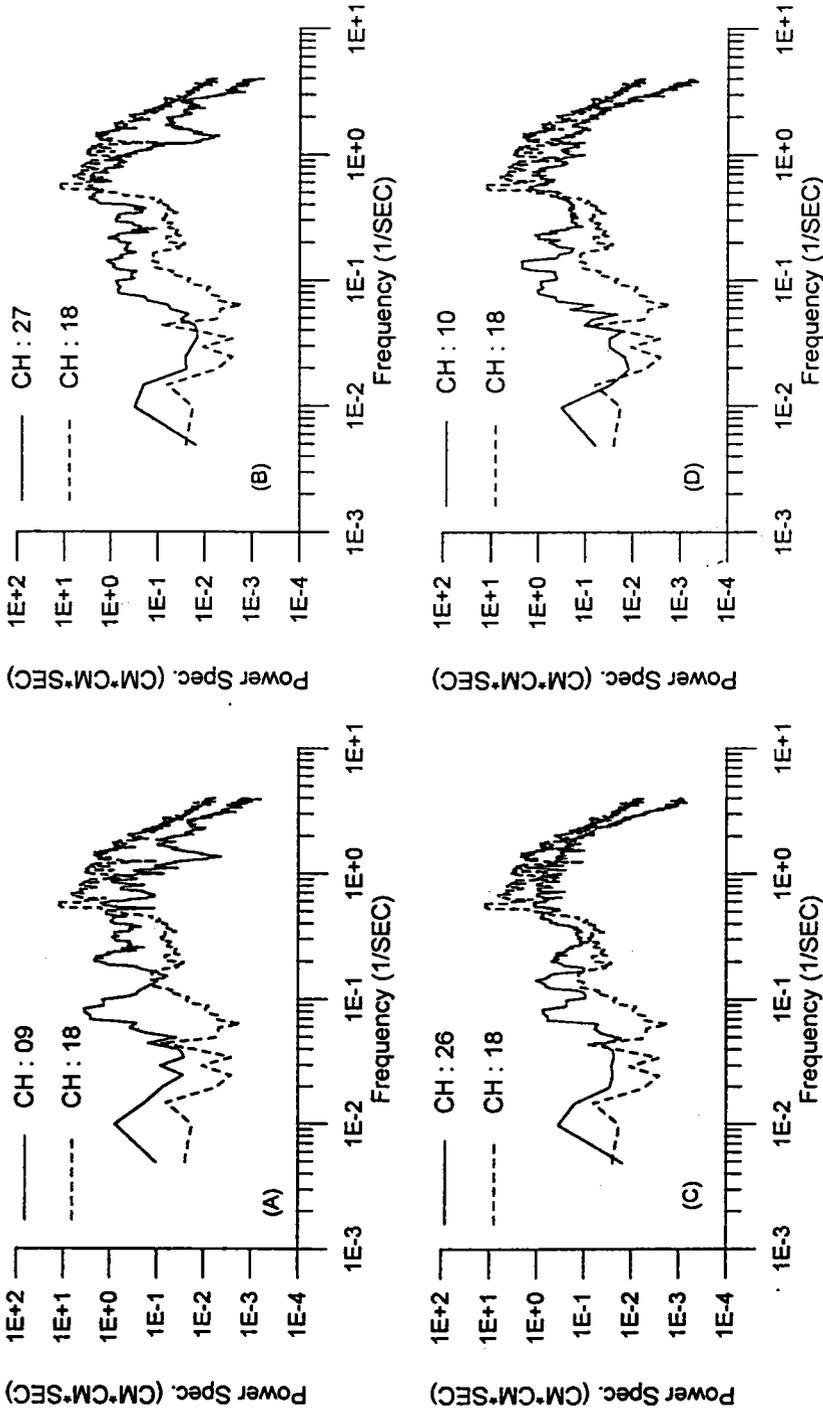


圖3-25 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:B;入射波向:SSE)

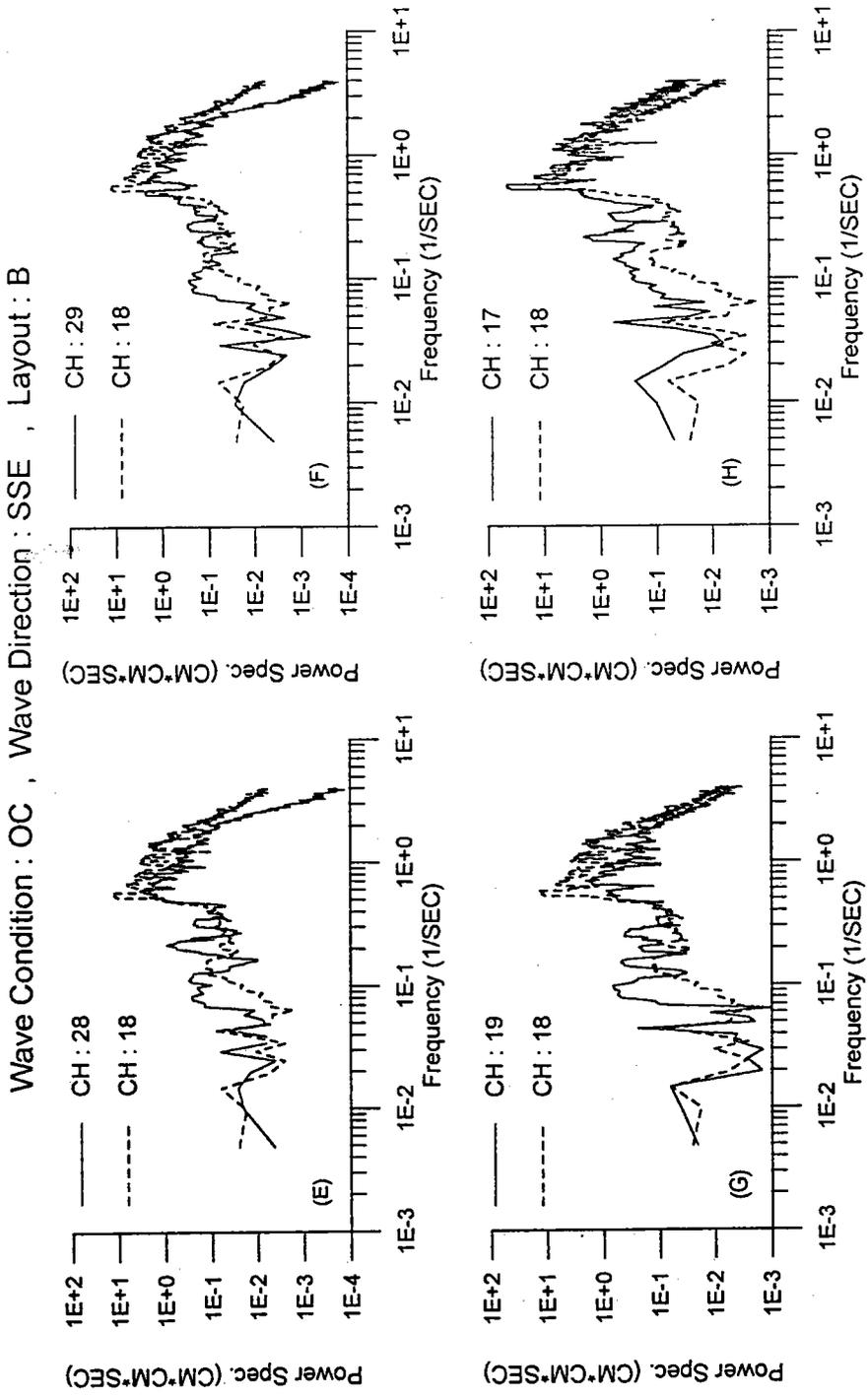


圖3-25(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: B; 入射波向: SSE)

Wave Condition : OC , Wave Direction : SSE , Layout : C

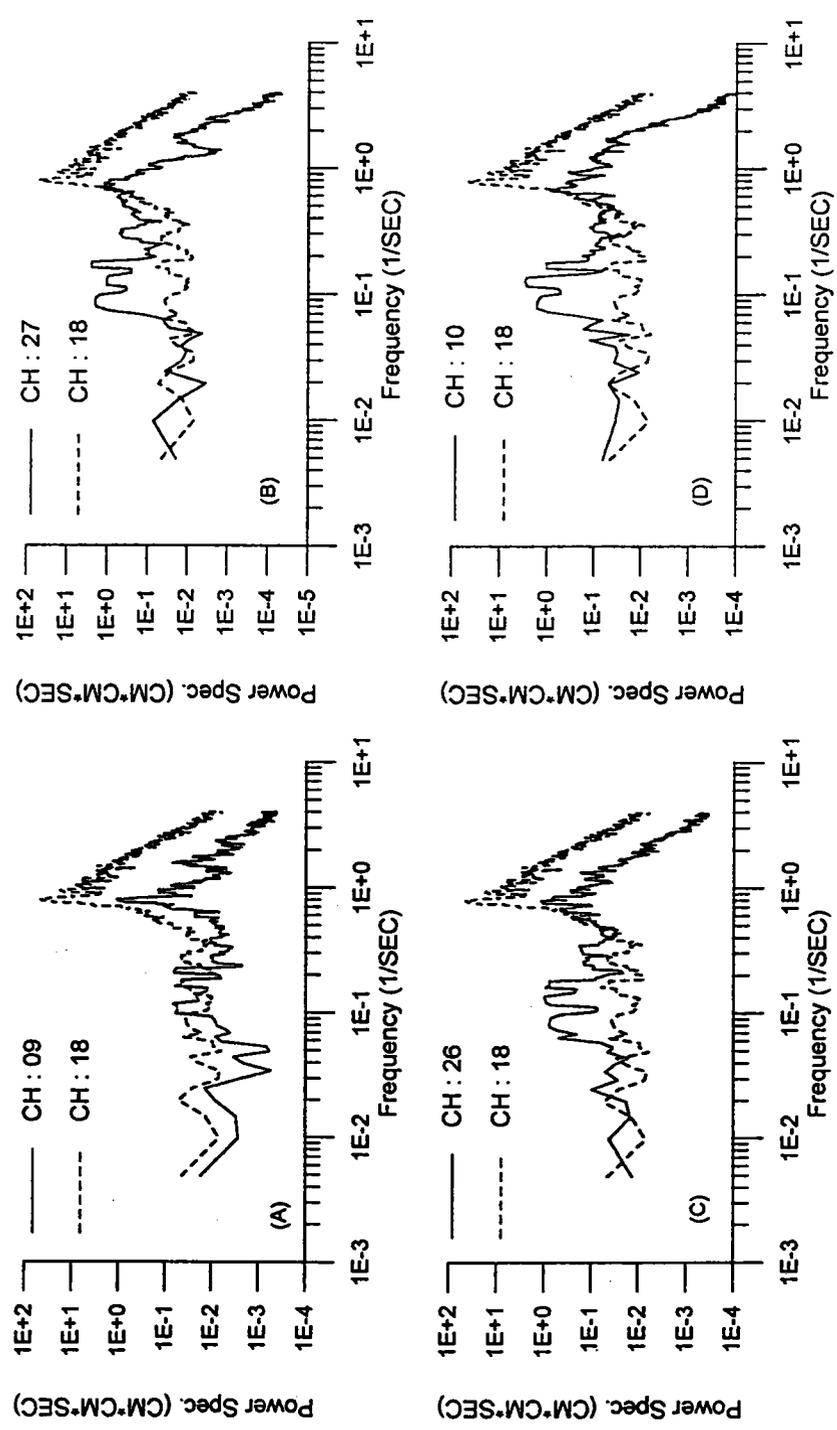


圖3-26 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:C;入射波向:SSE)

Wave Condition : OC , Wave Direction : SSE , Layout : C

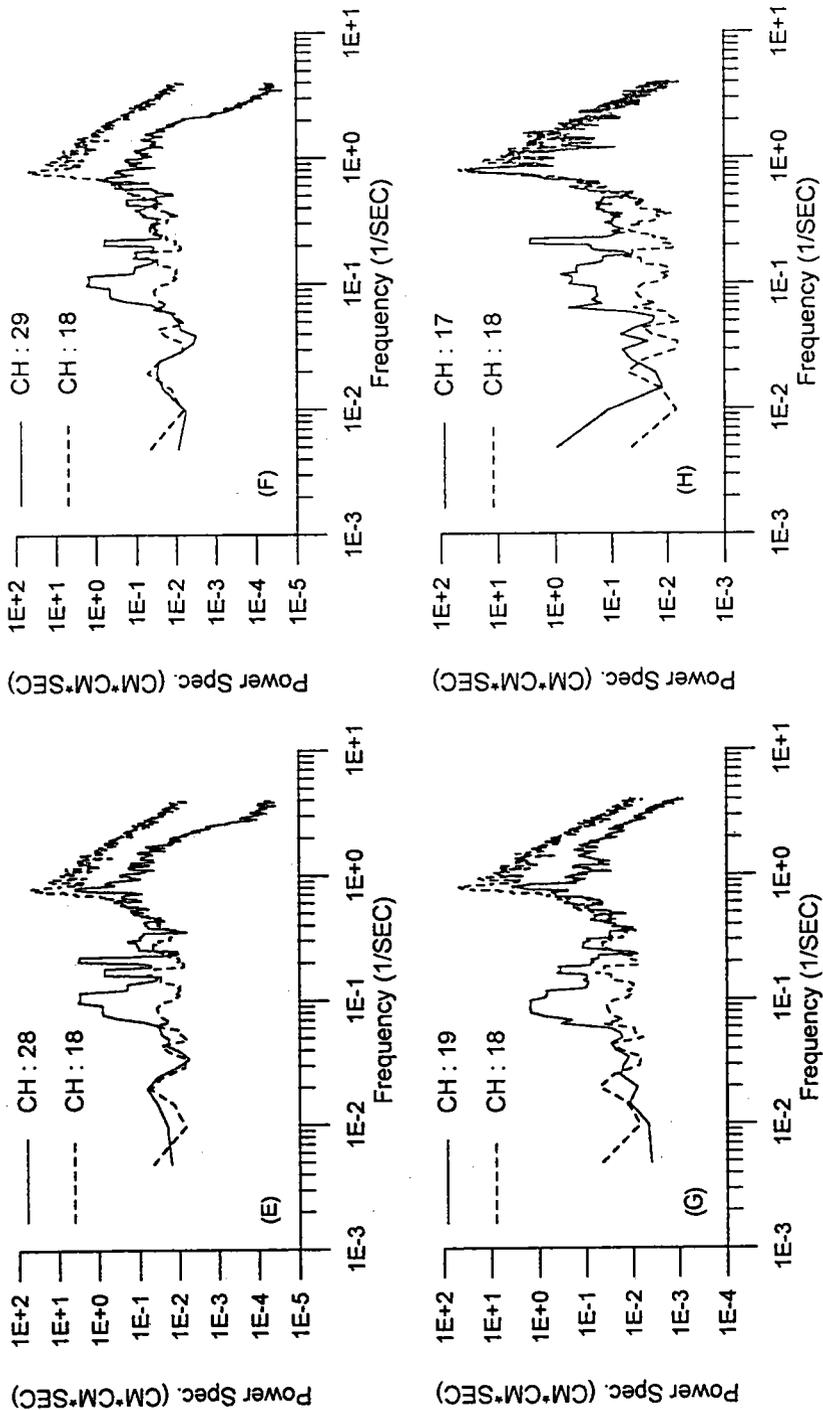


圖3-26(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:C;入射波向:SSE)

Wave Condition : OC , Wave Direction : SSE , Layout : D

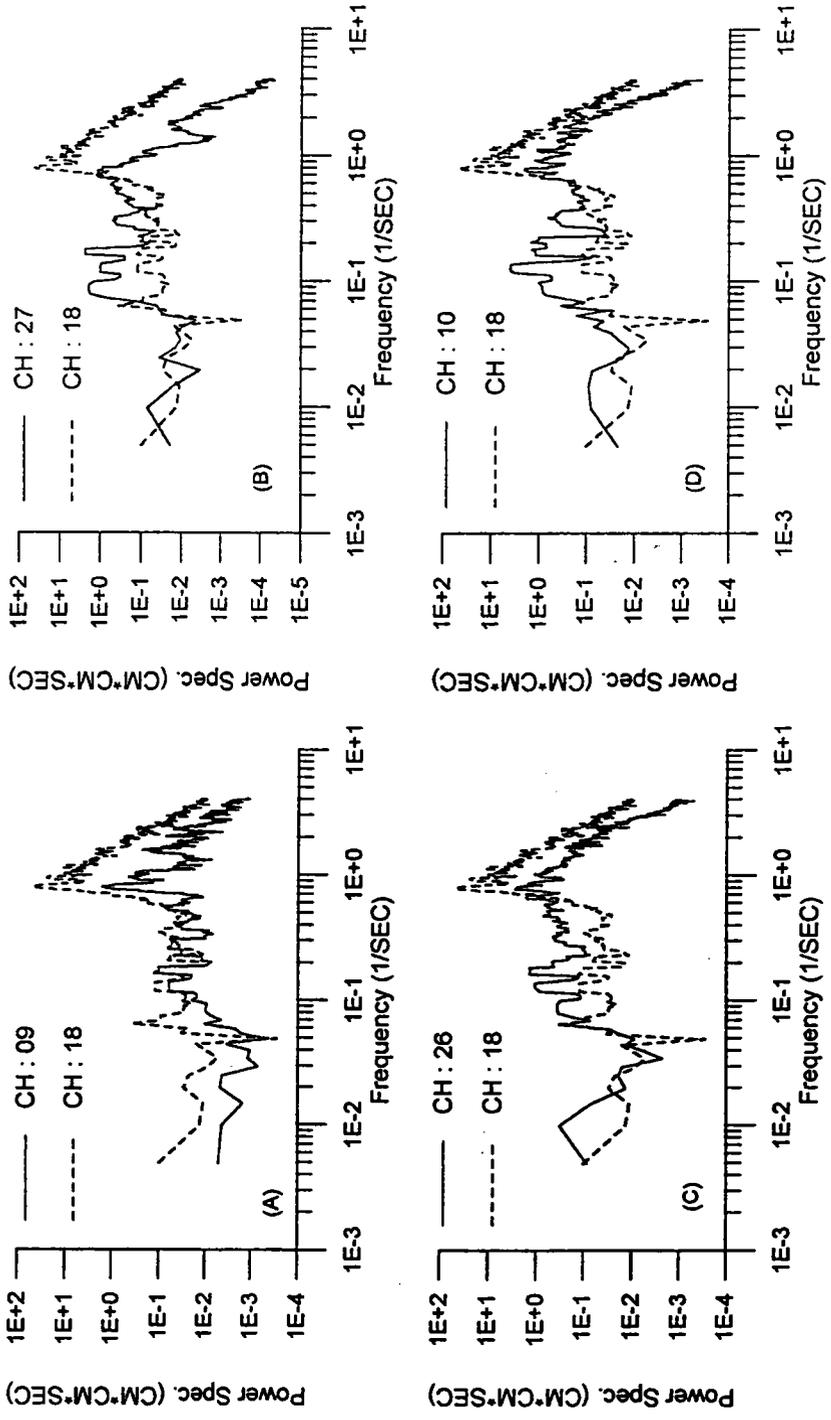


圖3-27 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: D; 入射波向: SSE)

Wave Condition : OC , Wave Direction : SSE , Layout : D

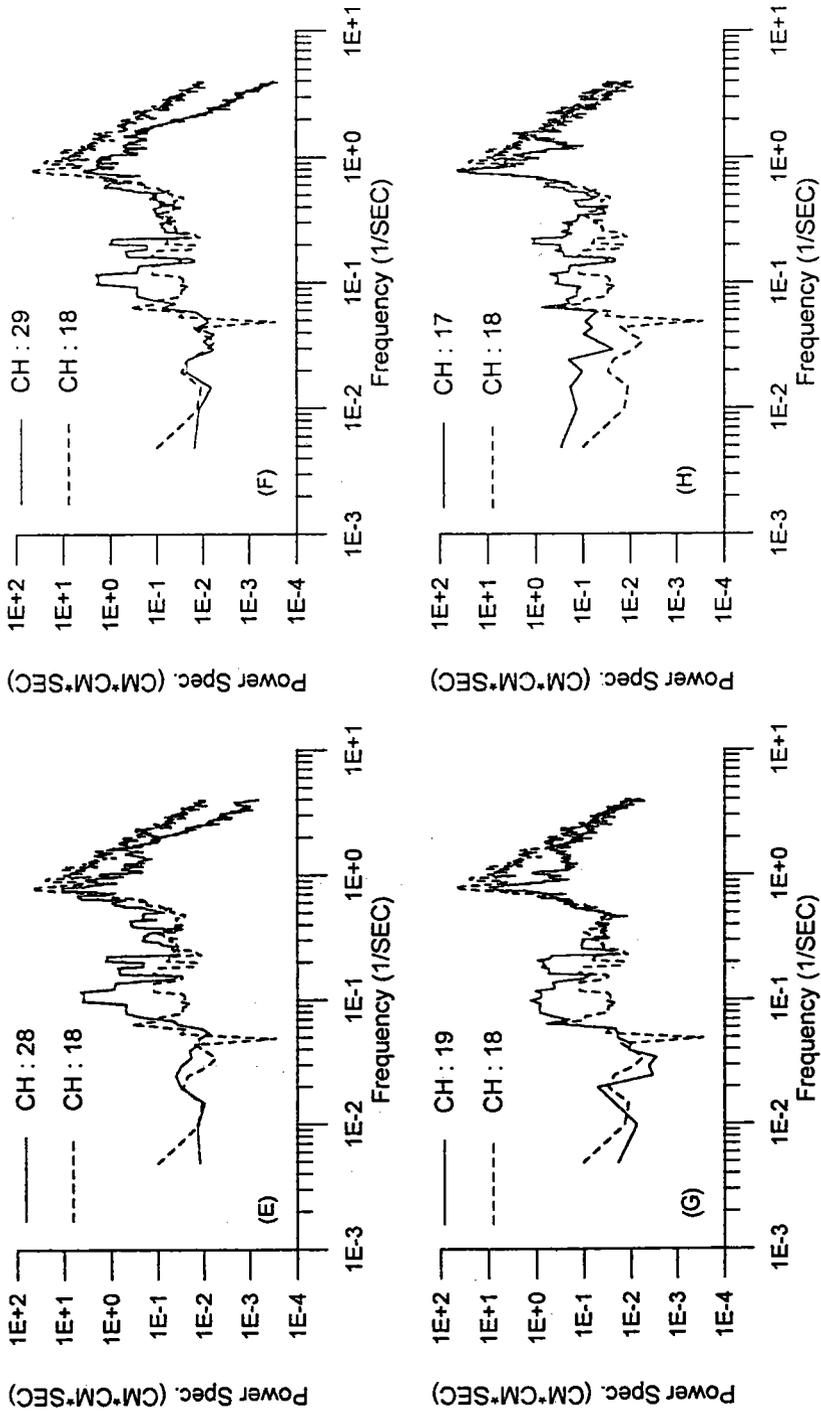


圖3-27(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: D; 入射波向: SSE)

Wave Condition : OC , Wave Direction : SSE , Layout : E

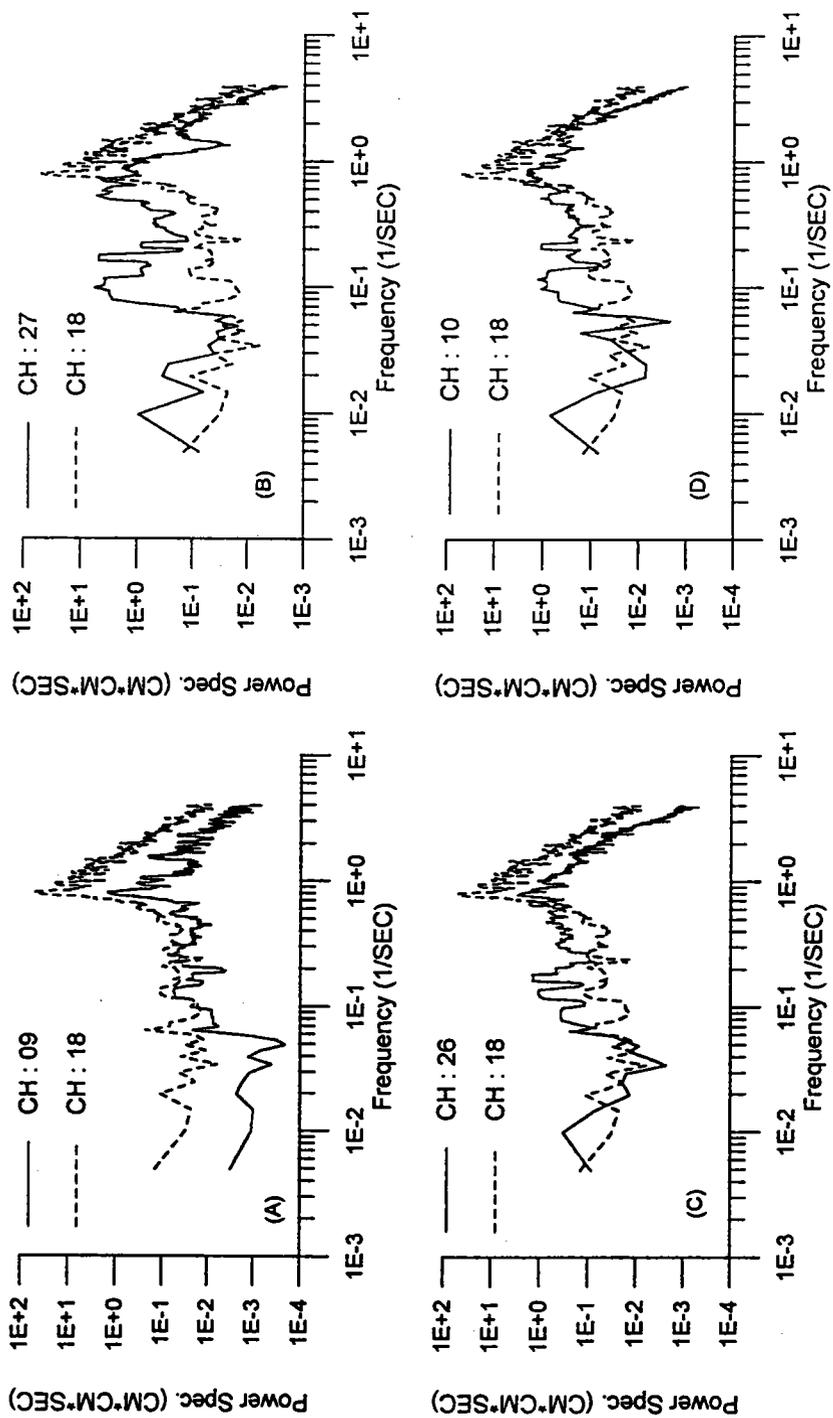


圖3-28 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:E;入射波向:SSE)

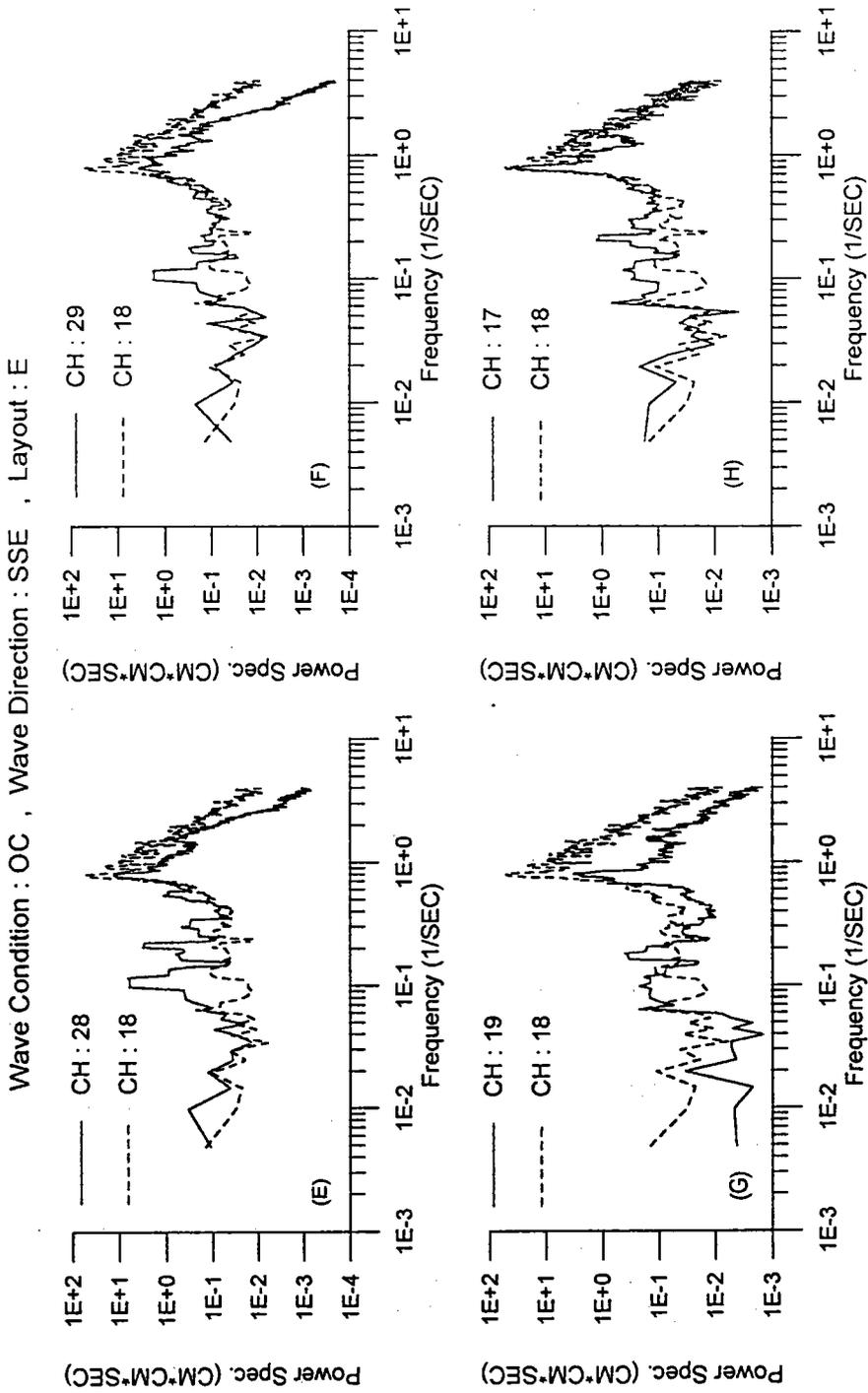


圖3-28(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: E; 入射波向: SSE)

Wave Condition : OC , Wave Direction : SE , Layout : A

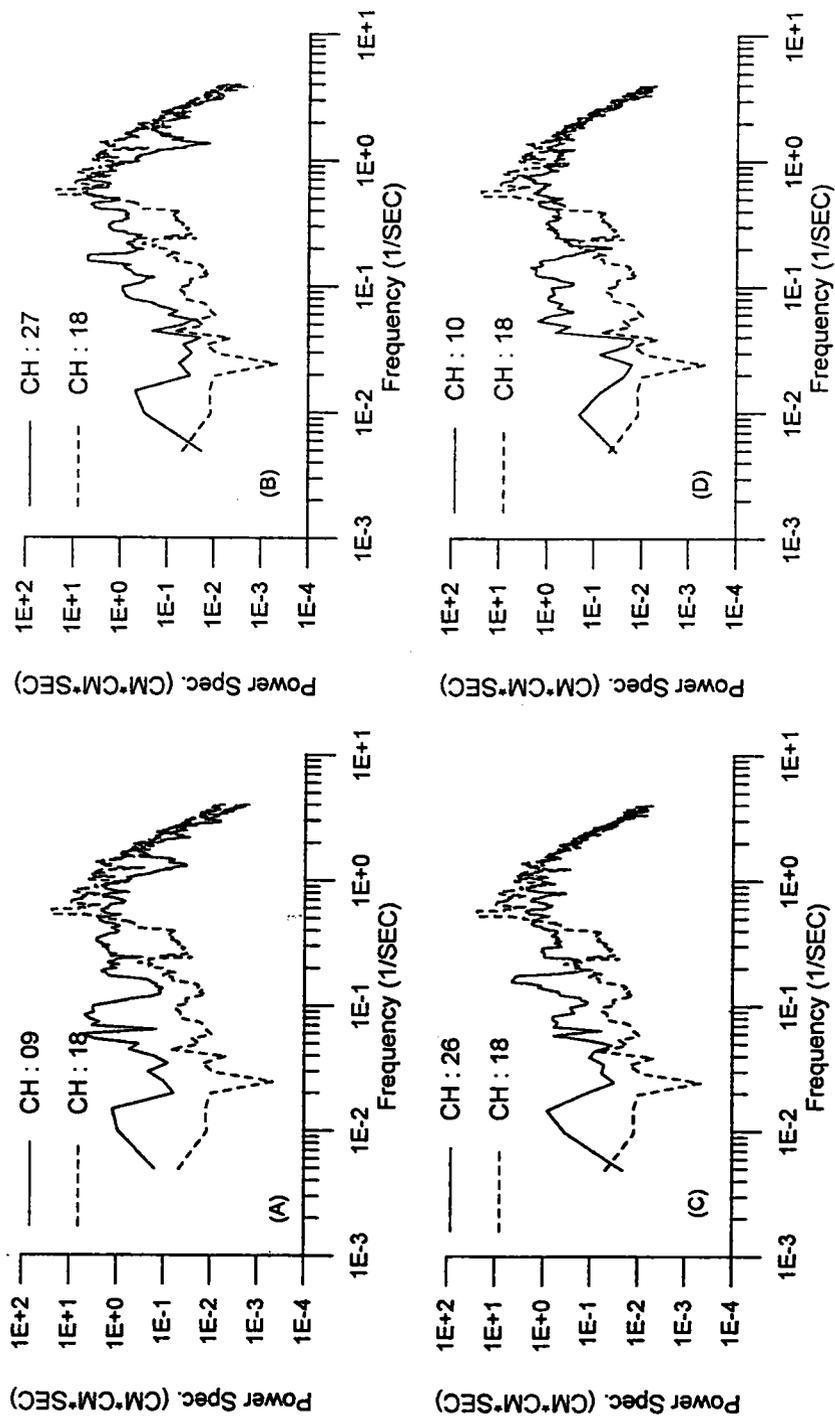


圖3-29 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:A;入射波向:SE)

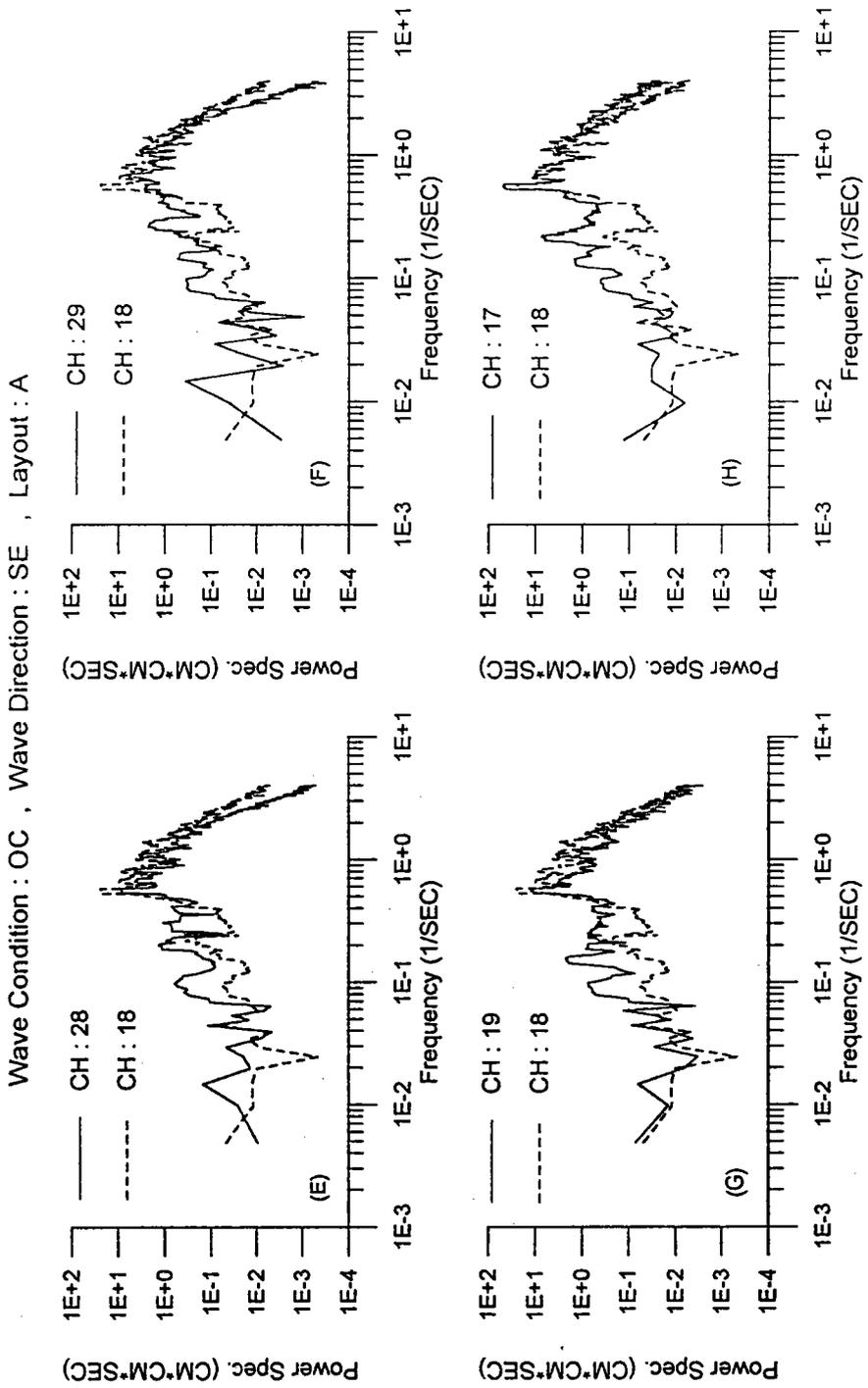


圖3-29(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: A; 入射波向: SE)

Wave Condition : OC , Wave Direction : SE , Layout : B

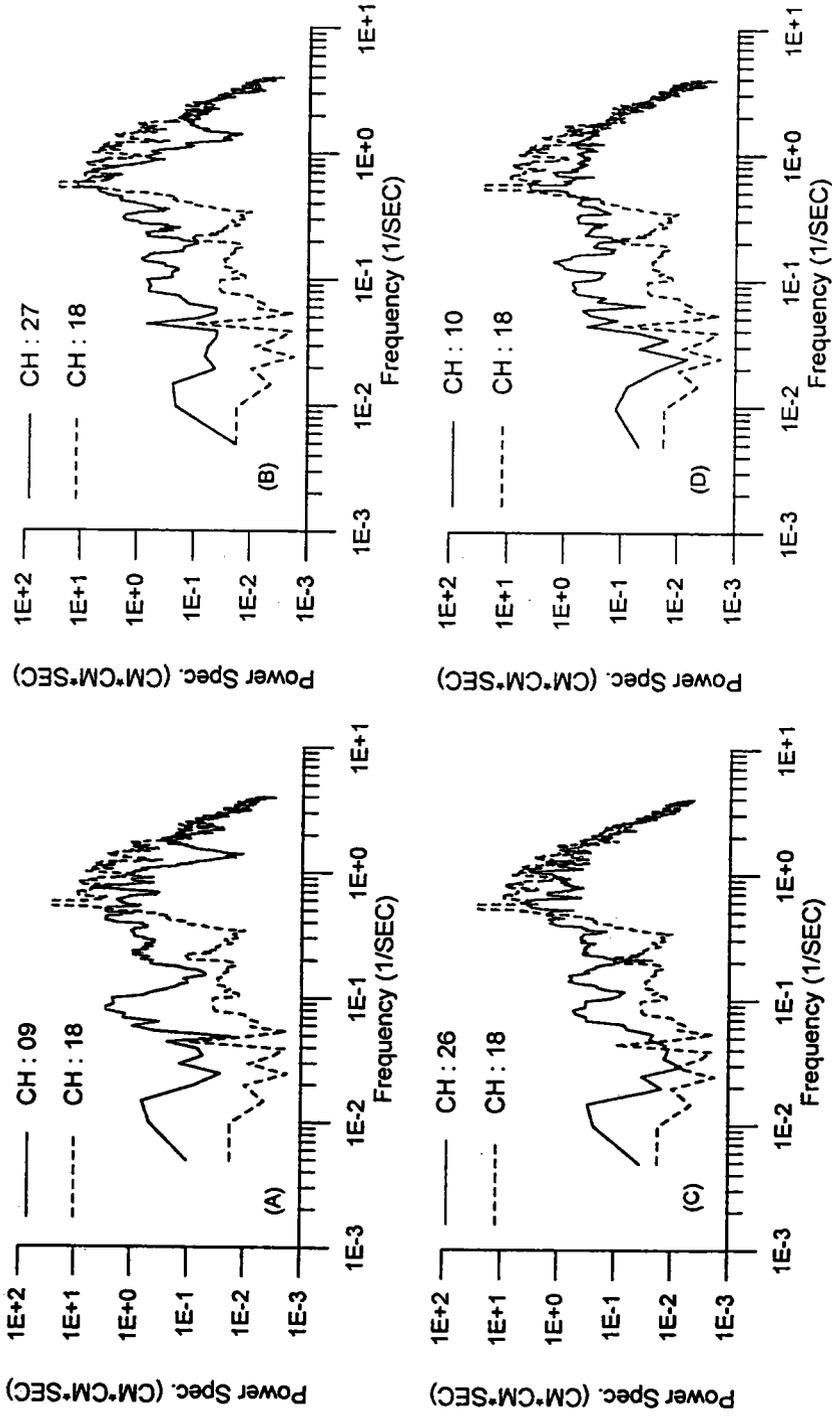


圖3-30 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:B;入射波向:SE)

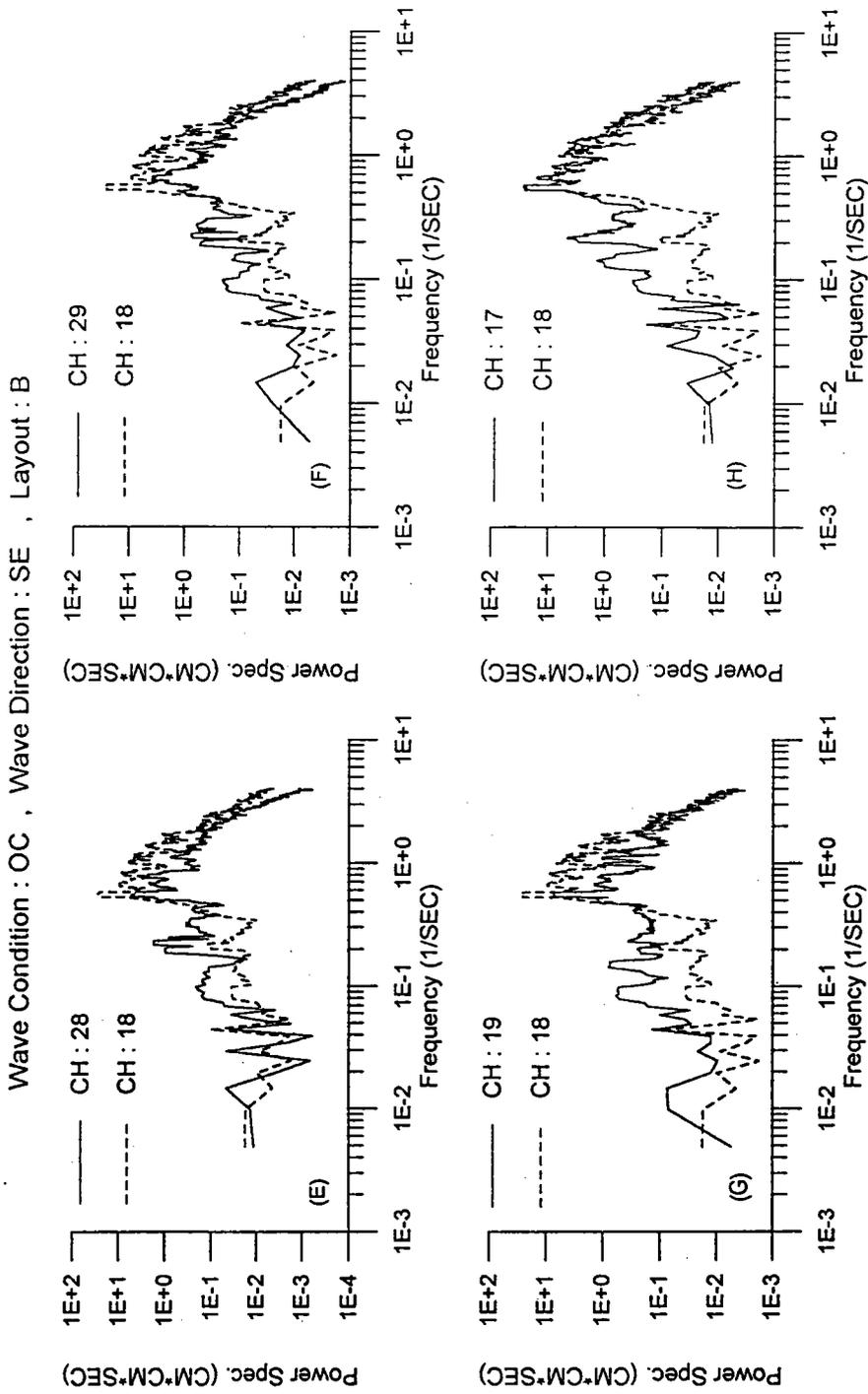


圖3-30(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: B; 入射波向: SE)

Wave Condition : OC , Wave Direction : SE , Layout : D

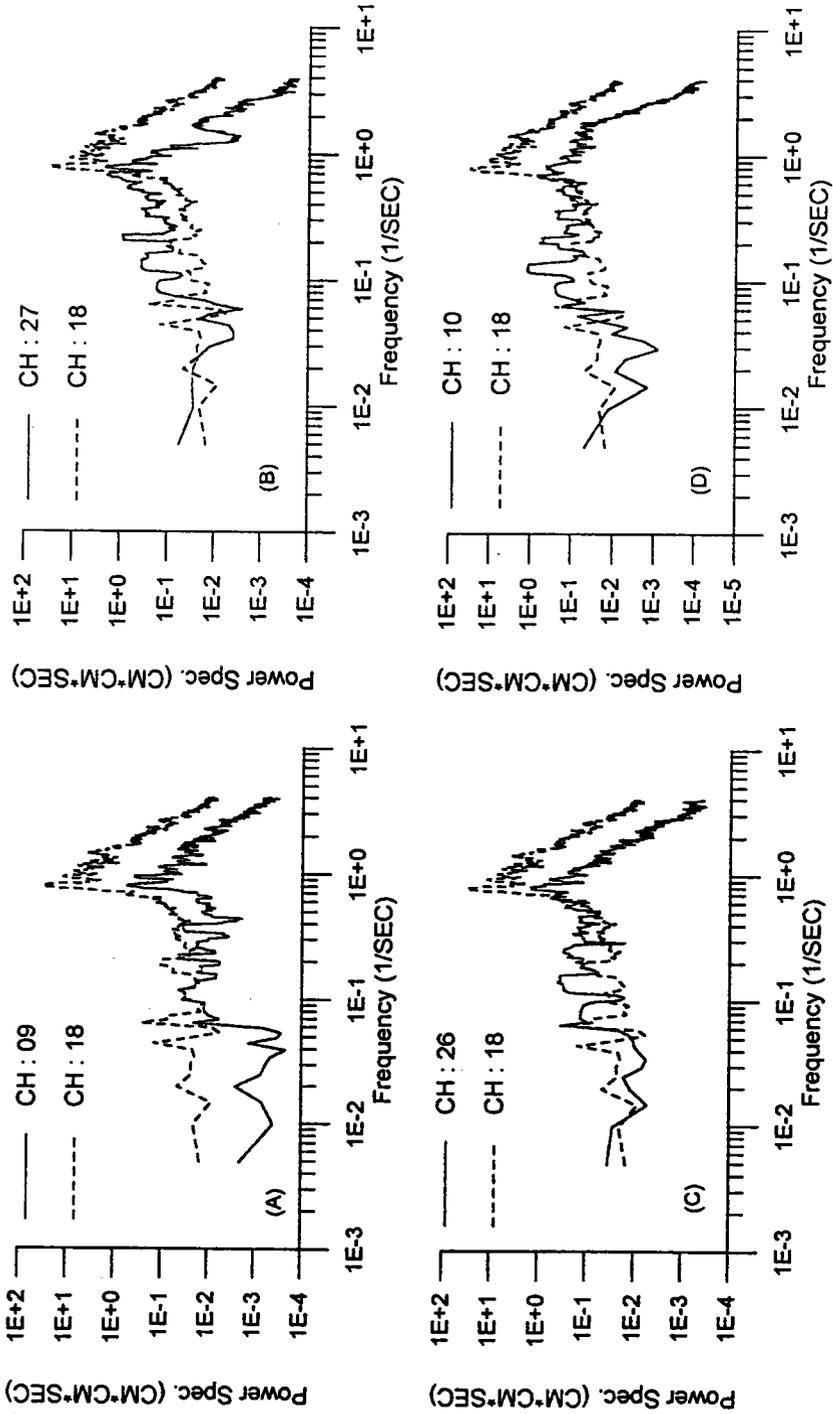


圖3-31 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:D;入射波向:SE)

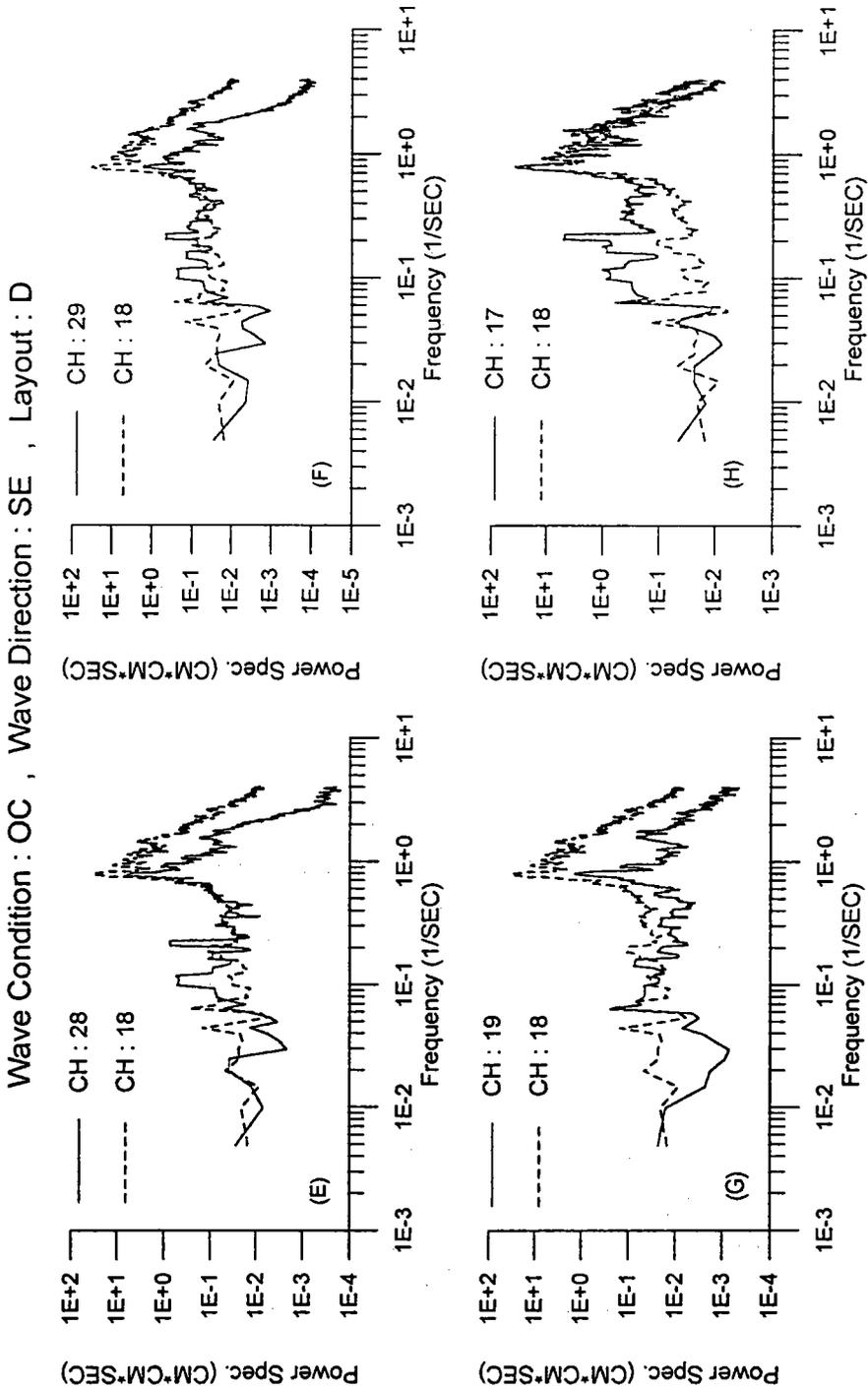


圖3-31(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: D; 入射波向: SE)

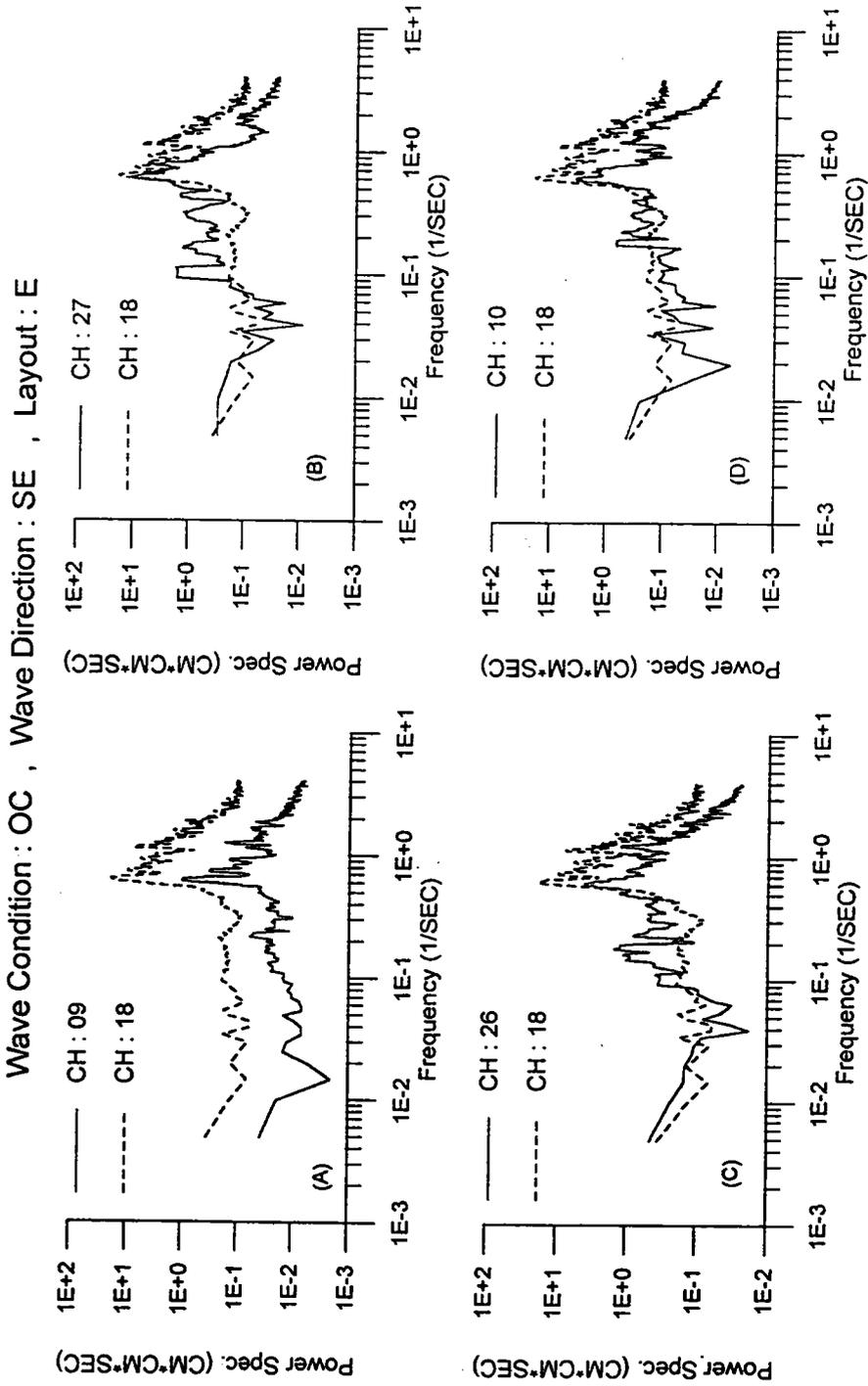


圖3-32 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名:OC;佈置編名:E;入射波向:SE)

Wave Condition : OC , Wave Direction : SE , Layout : E

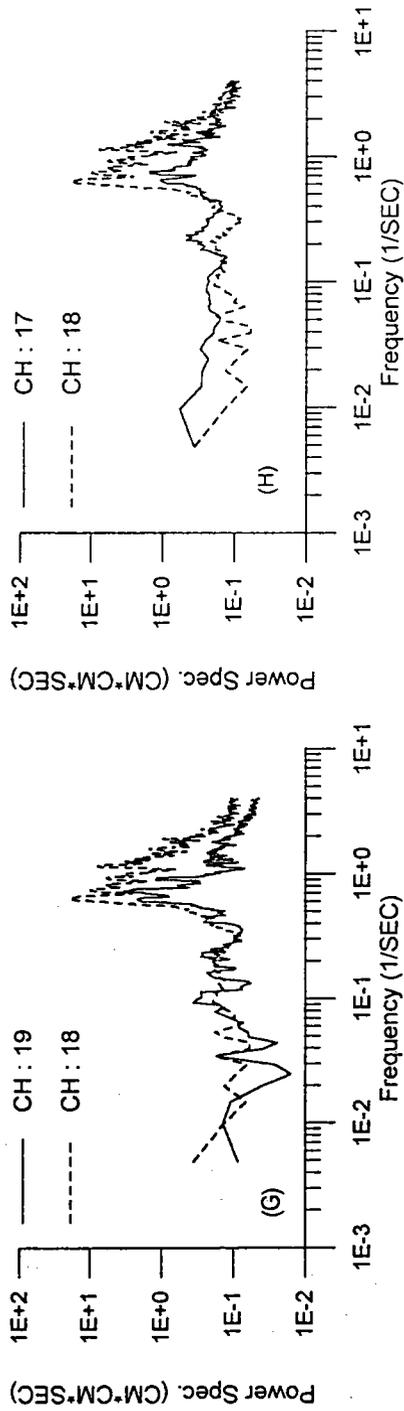
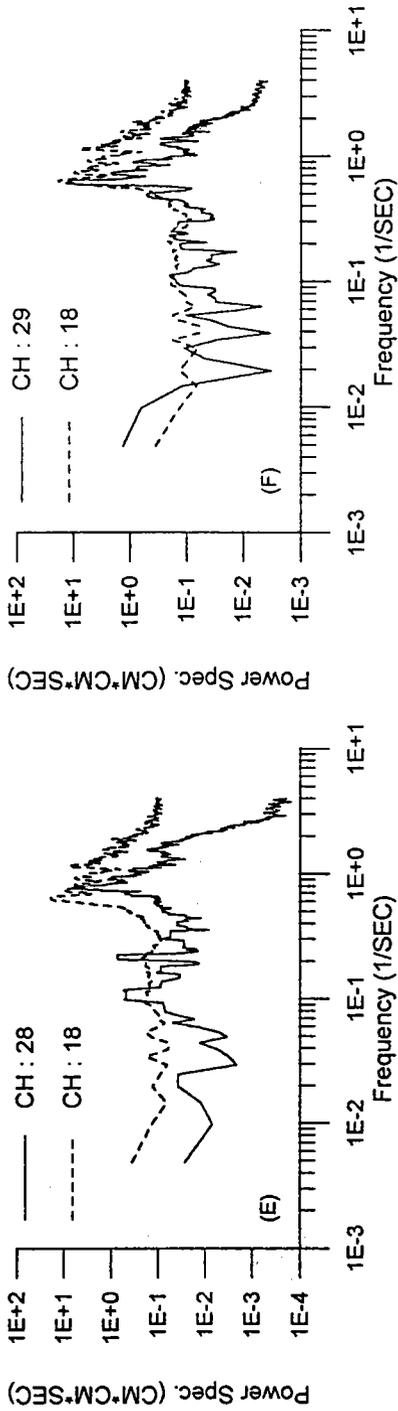


圖3-32(續) 內、外港各測點波譜比較圖(波浪條件編名: OC; 佈置編名: E; 入射波向: SE)

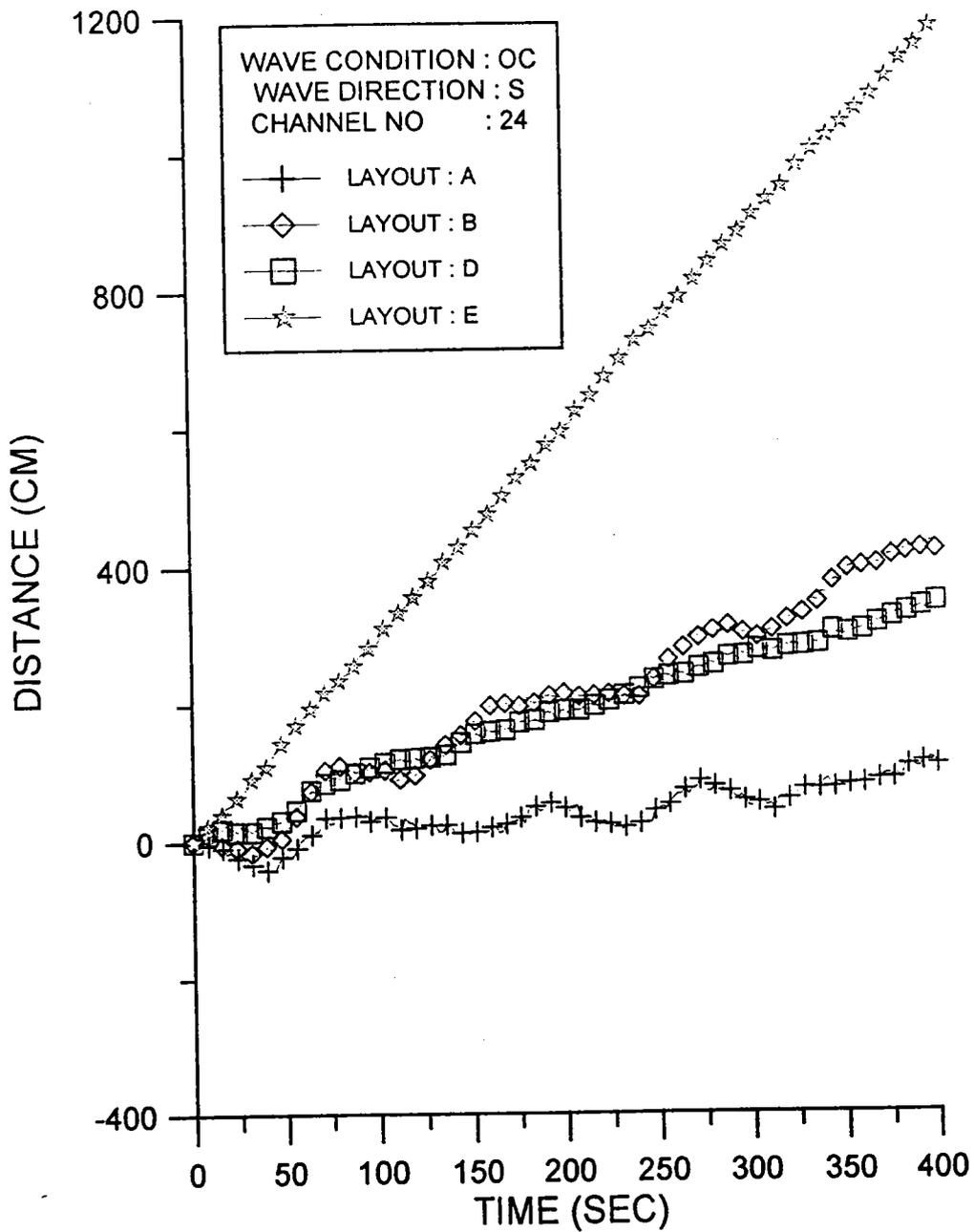


圖3-33 測點24水體累積位移量(波浪條件編名：OC；入射波向：S)

OCSXX24.GRF

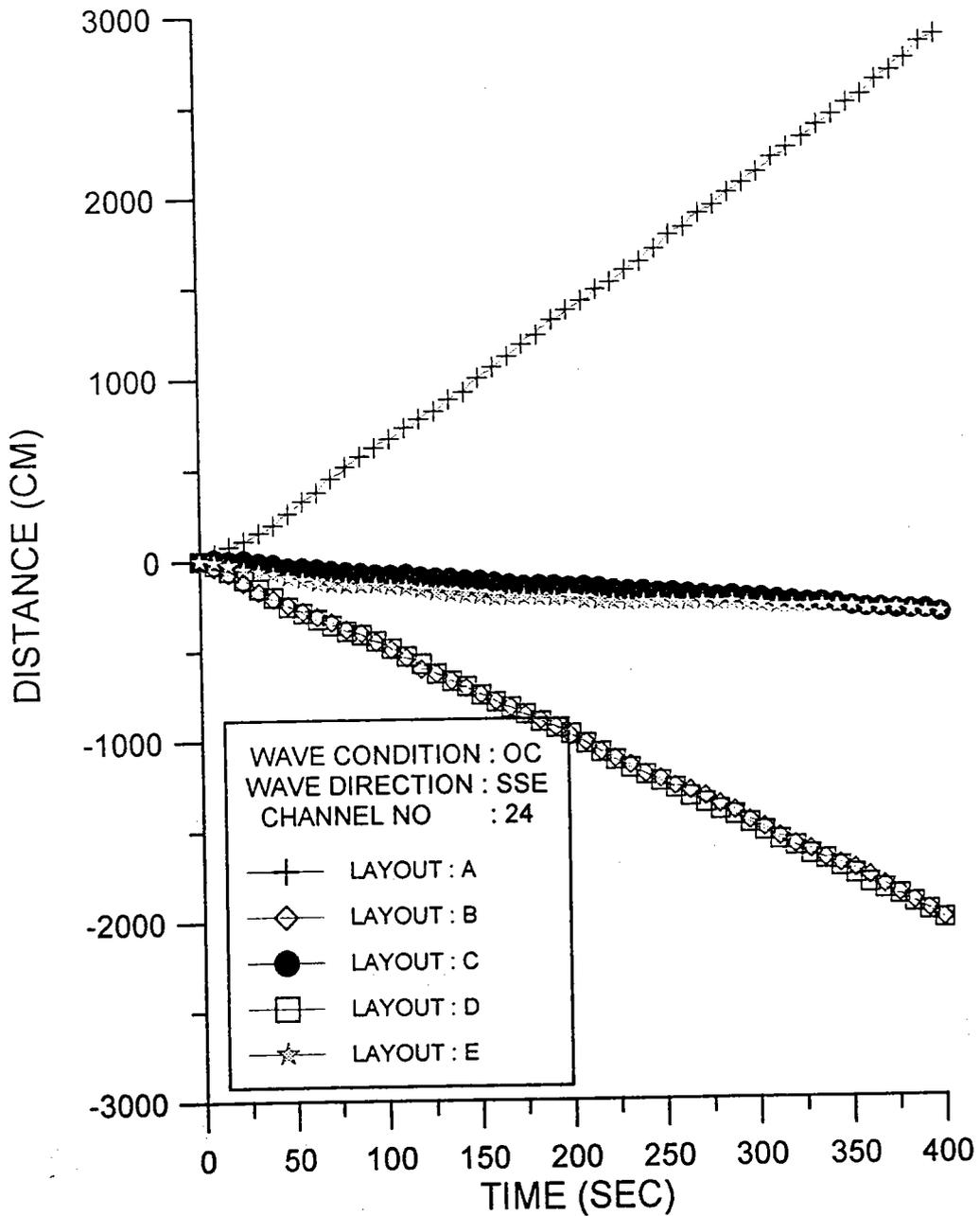


圖3-34 測點24水體累積位移量(波浪條件編名：OC；入射波向：SSE)

OCSSE24.GRF

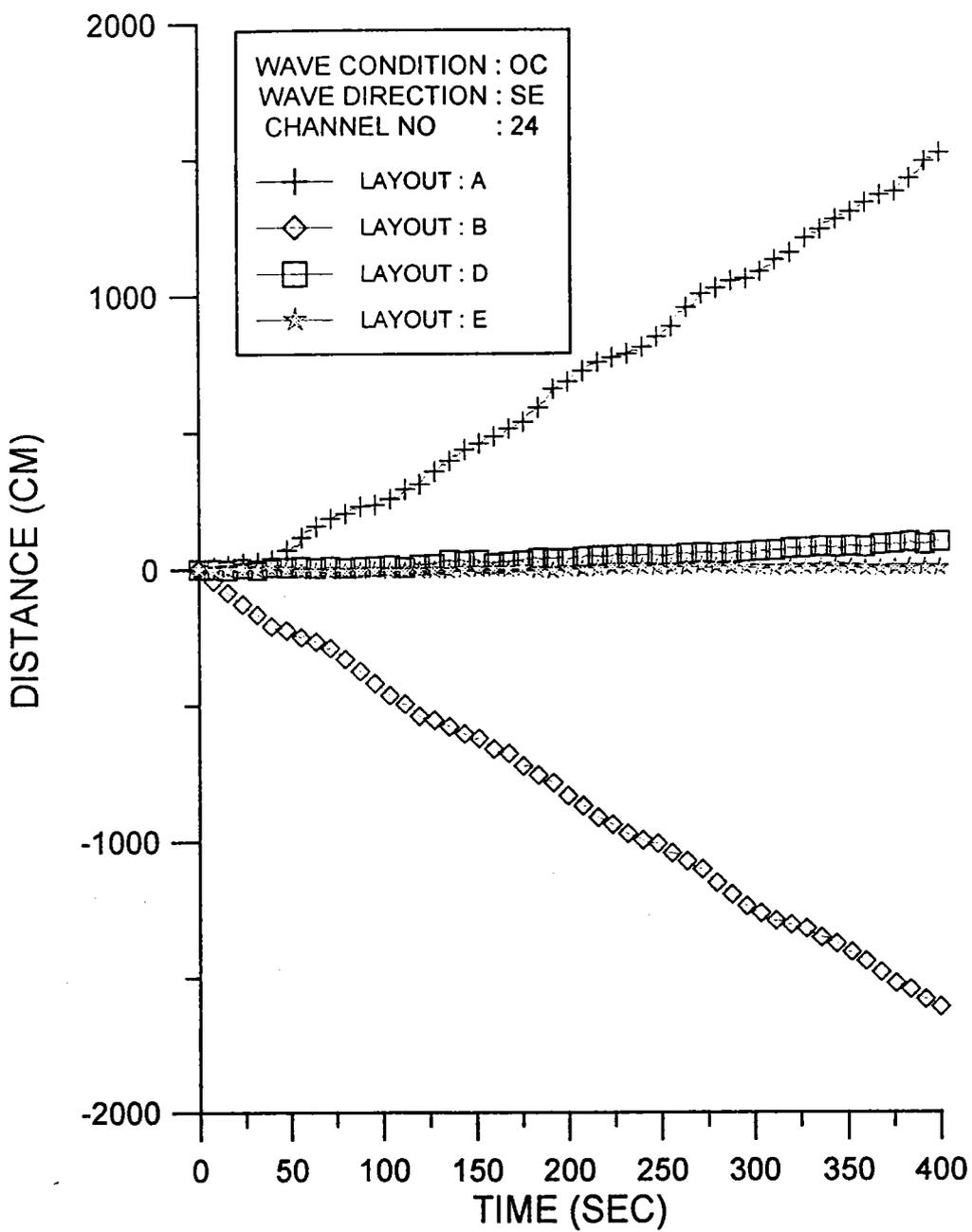


圖3-35 測點24水體累積位移量(波浪條件編名：0C；入射波向：SE)

OCSEX24.GRF

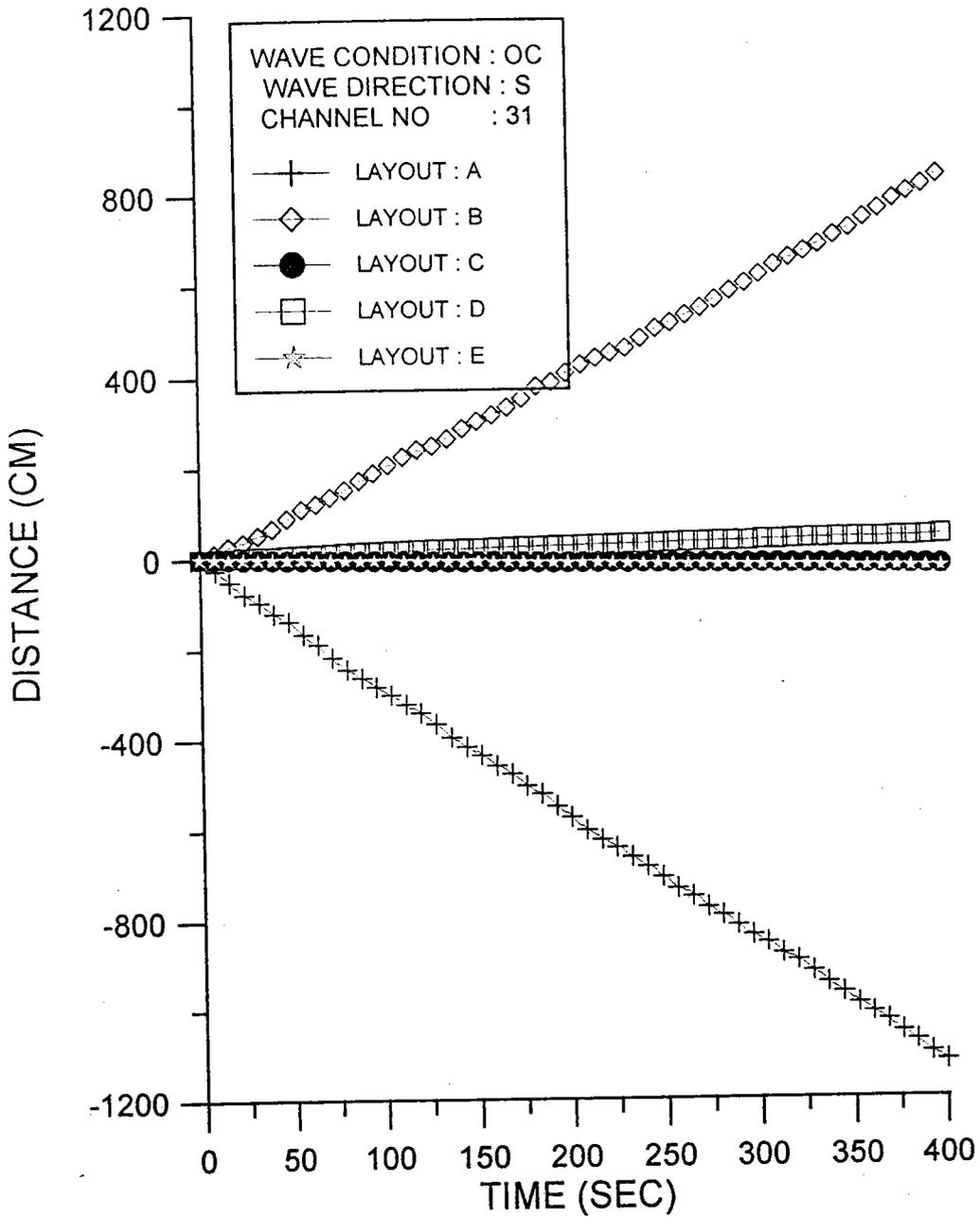


圖3-36 測點31水體累積位移量(波浪條件編名：OC；入射波向：S)

OCSXX31.GRF

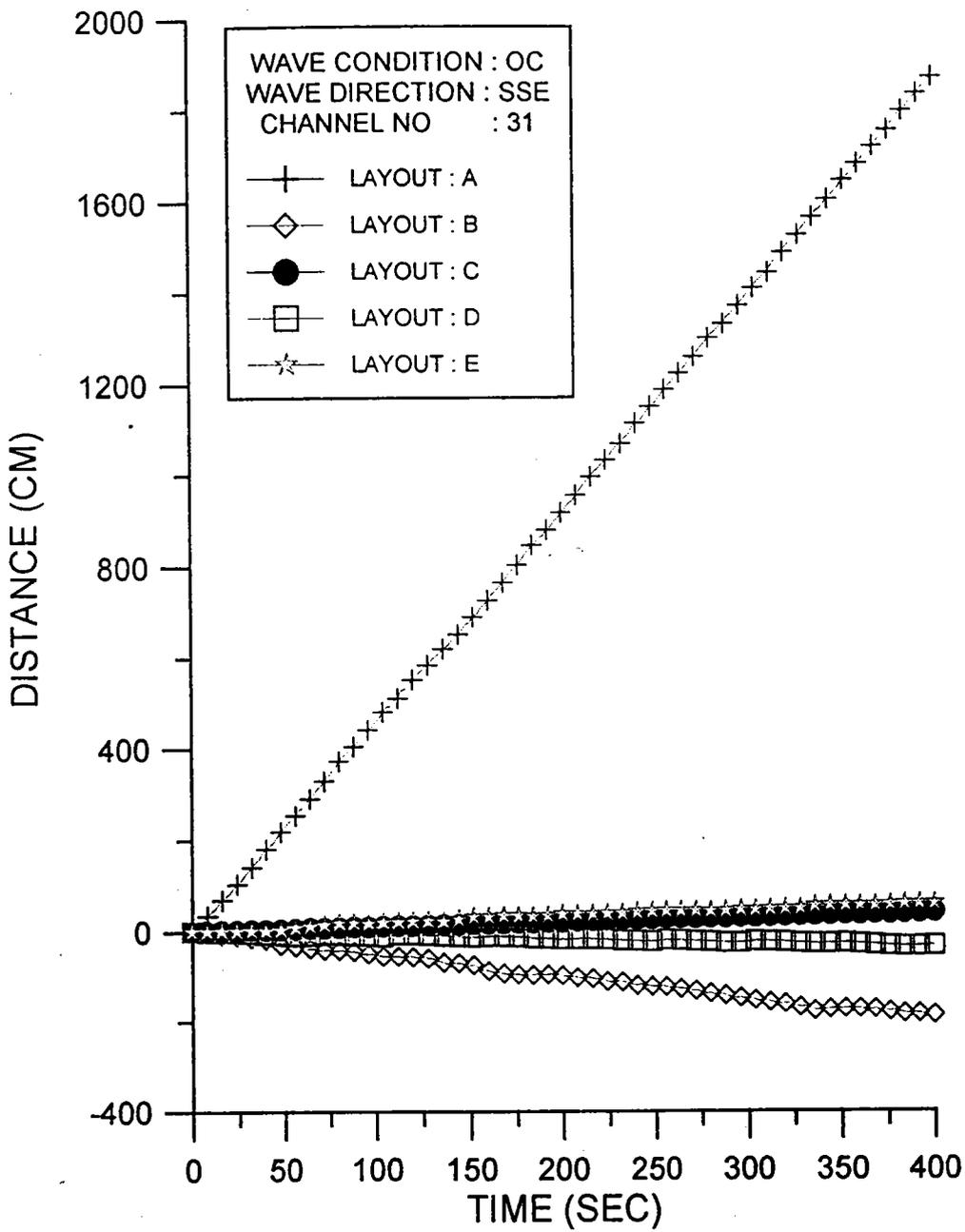


圖3-37 測點31水體累積位移量(波浪條件編名：OC；入射波向：SSE)

OCSSE31.GRF

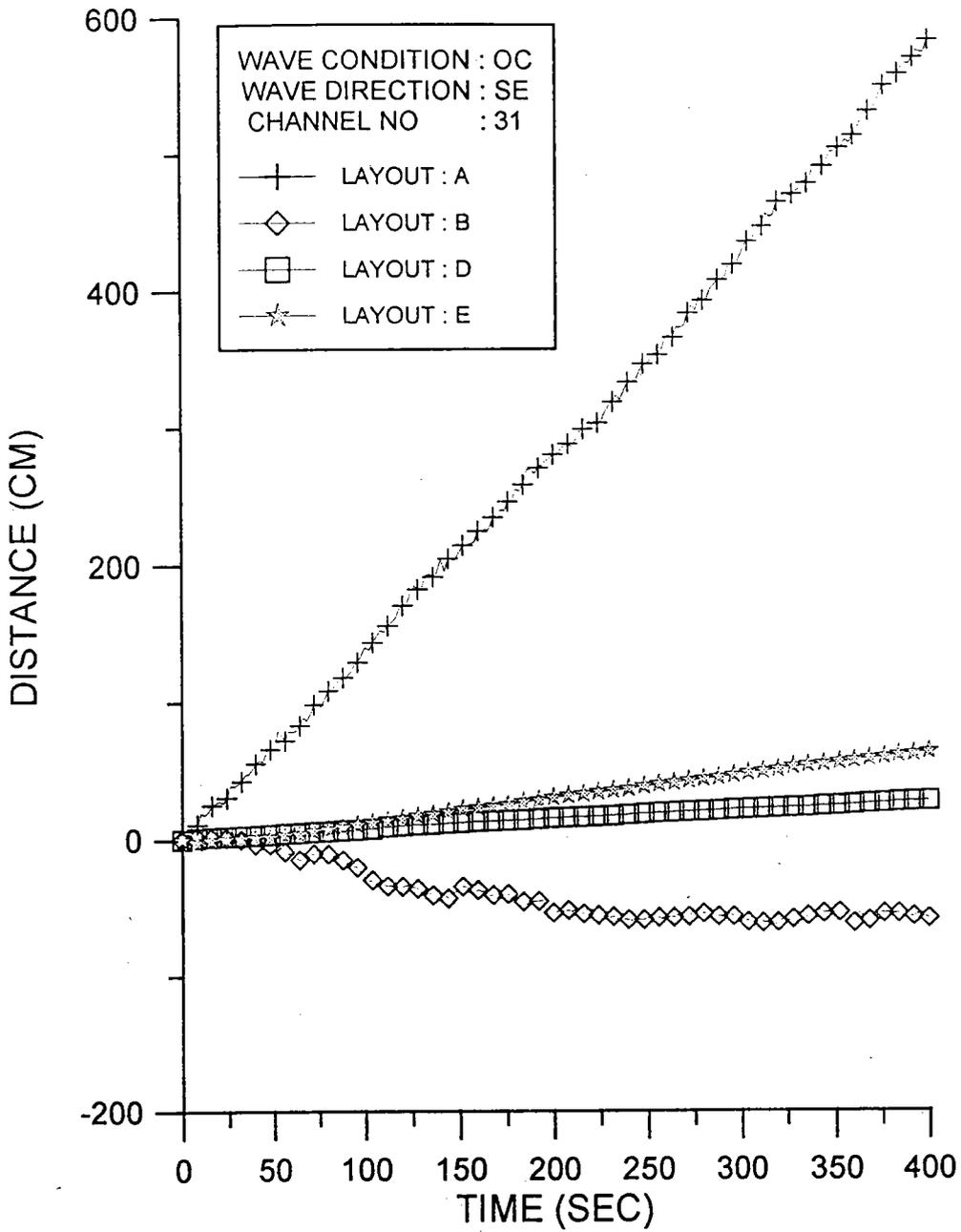


圖3-38 測點31水體累積位移量(波浪條件編名：OC；入射波向：SE)

OCSEX31.GRF

B 部份

斷面水工模型試驗

(1) 潛堤之消波特性的研究

B 部份	斷面模型試驗—(I)潛堤之消波特性研究	
第一章	前言.....	2-1
1-1	研究目的.....	2-1
1-2	前人研究.....	2-2
第二章	理論背景.....	2-4
2-1	理論架構.....	2-4
2-2	數值方法.....	2-6
2-3	反射率與透過率之計算.....	2-12
第三章	試驗說明.....	2-13
3-1	試驗設備與儀器.....	2-13
3-2	試驗佈置.....	2-14
3-3	試驗條件.....	2-15
3-4	試驗數據之處理與分析.....	2-16
第四章	數值結果與試驗結果之比較討論.....	2-19
4-1	反射率之比較分析.....	2-19
4-2	透過率之比較分析.....	2-20
4-3	不同位置的波高比值之比較分析.....	2-21
4-4	波形比較分析.....	2-22
第五章	潛堤消波特性之探討.....	2-24
5-1	潛堤堤寬影響.....	2-24
5-2	潛堤堤頂水深影響.....	2-26

5-3	潛堤透水性之影響.....	2-27
5-4	波浪通過潛堤後之非線性波動特性.....	2-28
5-5	以頻譜分割法求不規則波透過率之可行性討論	2-31
5-6	潛堤應用於花蓮南濱海岸對減低波能之影響..	2-33
第六章	結論.....	2-34
參考文獻	.....	2-36
附圖	.....	2-39

B 部份 斷面模型試驗

(1) 潛堤之消波特性的研究

第一章 前 言

1-1 研究目的

花蓮港在颱風期間之波向大致上為西南向，因此波浪沿南濱海岸而進入港內，同時將海岸沙源帶到港口附近形成南濱海岸的侵蝕，又由於西南向波浪沿著南濱海岸前進而形成較長週期的浪，如何將沿南濱海岸前進的長浪讓其週期變短，並消滅其波能，以達減少帶動漂沙移動的能力達到保護南濱海岸之目的，同時使得進入港內之波浪的週期變短，較易於消能，並減小港池振盪之可能性，此乃本研究之目的。往昔對於海岸保護工法的研究皆著重於突堤群，離岸堤，護岸等設施，直接與海相做正面的防護。由以往經驗獲知，硬性抵抗外力作用的結果，往往在某些區域得到保障，必也在另一區域造成危害，同時對於海岸自然景觀亦有某種程度的破壞，減少觀光遊憩的價值。有鑑於此，近來對於海岸防護工法，即改以較軟性抵抗波力的潛堤或人工岬灣來做為海岸保護與利用的構造物，使入射波能產生部份反射，部分穿透，而避免完全反射所造成的堤基沖蝕及堤頭渦漩刷深，並於堤後造成地形變化較大的部份侵蝕及部份淤積的現象。由於潛堤可以促使波浪提早碎波而有效消滅入射波能，對堤後之水域產生穩靜的效用，且可箝制碎波帶內因沿岸流所引起的向外海移動的漂沙，對受侵蝕嚴重的海域，無疑提供

了較佳的海岸保護工法，同時由於潛堤潛沒於水中，其構築斷面自然較離岸堤為小，所需構築材料與工程費亦可較省，又非直接穿透水面，便不會造成視覺景觀上的障礙，達到海域自然景觀保護的目的。

為達到潛堤的預期功效，潛堤堤頂上之水深必然較小，因此於潛堤堤頂上往往屬於淺水區域，波浪經過此區域後受到水深突然變小的影響，而造成波形的擾動，以致波浪形成較高階的非線性現象。於此，緩坡方程式是否仍能被運用於潛堤堤後受水深變化所擾動的波場之波動特性的預測及使用緩坡方程式的限界水深條件為何，應再深入探討。

潛堤在近岸海域的保護上有其效果存在，但至今與潛堤相關的理論與試驗之研究，仍無法有效掌握波浪通過潛堤後其堤後波場與流場之分布及堤後地形變化等特性。因此本文擬以模型試驗來探討並檢核，目前較常用於推算潛堤堤後波流場的緩坡方程式(mild - slope equation)，其被運用於此類波動特性數值解析之可行性與準確性。同時討論波浪經過潛堤時受潛堤長度之影響及波浪受突變地形而引致之非線性效應。期由本研究之成果提供找出潛堤的邊坡形狀，潛堤高度，潛堤堤寬對消波與改變、波能分佈特性之機制，以利爾後設計潛堤時之參酌。

1-2 前人研究

前人對於潛堤這一類的水下結構物的研究非常多，試驗方面則以找出潛堤形狀與反射率、透過率等參數的關係為主，如Dick和Brebner[1]、Dattatri等人[2]、AbdulKhader和Rai[3]、Baba[4]等學者。若以純數學來處理波浪經過階梯地形、單薄板障礙、潛

堤、浮體等，只有在特殊地形下才可能有解析解，而在數學解析方面多以特徵函數表示速度勢函數，利用正交特性或變分法求得解析解，如Miles[5]處理單梯地形，Mei和Black[6]在有限水深的情況下處理對稱潛堤。Dalrymple等人[7]則利用特徵函數法解出斜向波浪入射至直立的多孔潛堤。在相關的數值解析方面有Liu[8]、Deguchi等人[9]。關於利用緩坡方程式推算波場方面，由Berkhoff[10]提出橢圓型態的緩坡方程式，隨後的學者，如Radder[11]所提出的拋物線近似法之緩坡方程式，皆無法有效的解決波場之反射問題。於是，Booij[12]、Copeland[13]、Watanabe和Maruyama[14]將緩坡方程式改變為兩個一階偏微分方程式，來解決波場中含有結構物的反射問題。往昔學者利用新導出的緩坡方程式求得的波浪通過潛堤的數值解之堤上相對水深皆為中間性波的範圍，如Rojanakamthorn等人[15]。故在堤上相對水深為淺水波範圍時，緩坡方程式的適用性仍需加以探討。近來，大部份的學者則以波浪與潛水矩形障礙物或階梯狀地形之非線性交互作用為主，或以非線性邊界條件來求得數值解之波流場，如Massel[16]、Ohyama和Nadaoka[17]、Beji和Battjes[18]。

以上研究係針對規則波浪，然而實際海面波浪是不規則的，根據Vincent和Briggs[19]的試驗結果顯示，規則波及不規則波在橢圓形潛體背後之波浪大小差距頗大，相差可達50~100%。有關不規則波浪通過潛堤後變形之理論研究，近來有不少成果提出，如Isobe[20]、Izumiya[21]、Panchang等人[22]、Suh和Dalrymple[23]，大致是假設波浪為各種不同的線性組合，採用波譜分割的方式及各種數值模式，計算潛堤後的不規則波浪。故這種線性疊加理論的處理方式，是否能適用於所有週期的波浪及潛堤形式，仍需加以探討。

第二章理論背景

本文應用緩坡方程式之數值方法來探討波浪通過潛堤時波場的變化，其理論架構與計算方法詳述如下：

2-1 理論架構

本文應用於波浪通過潛堤之波場計算的數值模式的基本控制方程式乃引用 Booij[12] 推導出之漸變性緩坡方程式，其可將 Berkhoff[10] 推導出定常波場(stationary wavefield)之橢圓型緩坡方程式改變為非穩定波場之偏微分方程式：

$$\nabla \cdot (cc_g \nabla \eta) + (k^2 cc_g - \omega^2) \eta - \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (2-1)$$

式中 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 為梯度運算因子， c 為波速， c_g 為群波速度， η 為水位變動量， k 為週波數， ω 為角頻率， t 為時間， (x, y) 為卡氏座標，與海岸線垂直且向海為 x 軸正方向，與沿海岸線一致則為 y 性化水位變化量可表為

$$\eta(x, y, t) = a(x, y) \exp(-i\omega t) \quad (2-2)$$

其中 $a(x, y)$ 為水位振幅， $i = \sqrt{-1}$ 。若將式(2-2)代入式(2-1)，可得

$$\nabla \cdot (cc_g \nabla \eta) - \frac{c_g}{c} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (2-3)$$

如考慮波浪底床能量或碎波能量消散，Watanabe 和 Maruyama[14] 將式(2-3)改寫為

$$\nabla \cdot (cc_g \nabla \eta) - \frac{c_g}{c} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \nabla \cdot (f_d Q) = 0 \quad (2-4)$$

式中Q為水粒子流速在水深方向自底部至水面的積分，即質量通率，而 f_d 則為能量消散係數。式(2-3)及式(2-4)均為雙曲線型偏微分方程式。式(2-4)可轉換為一組一階偏微分方程式：

$$\nabla \cdot Q + \frac{c_g}{c} \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (2-5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + cc_g \nabla \eta + f_d Q = 0 \quad (2-6)$$

其中

$$f_d = \alpha_d \tan \beta \sqrt{\frac{g}{h} \left(\frac{\bar{Q}}{Q_r} - 1 \right)} \quad , \quad Q_r \leq \bar{Q} \quad (2-7)$$

$$\bar{Q} = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \quad (2-8)$$

$$Q_r = \gamma' \sqrt{gh^3} \quad (2-9)$$

Q_x ：Q在x方向的分量

Q_y ：Q在y方向的分量

上式中g為重力加速度，h為平均水深， \bar{Q} 為平均水粒子質量通率， Q 為再生波後之水粒子質量通率， $\tan \beta$ 為平均海床坡度， α_d 及 γ' 為係數，依Watanabe和Maruyama[14]之提議，本文取 $\alpha_d = 2.5$ ， $\gamma' = 0.25$ 。上述之波動方程式可利用蛙跳法(leapfrog method)寫成差分式，計算整個波動場之水位變化。

2-2 數值方法

1. 差分方程式

本文應用蛙跳法(Leapfrog Method)將式(2-5)及式(2-6)的波動方程式表示成差分方程式為

$$\eta_{i,j}^{t+\Delta t/2} = \eta_{i,j}^{t-\Delta t/2} - \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{c}{c_g} \right)_{i,j} \left[\frac{Q_{x_{i+1,j}}^t - Q_{x_{i,j}}^t}{\Delta x} + \frac{Q_{y_{i,j+1}}^t - Q_{y_{i,j}}^t}{\Delta y} \right] \quad (2-10)$$

$$Q_{x_{i,j}}^{t+\Delta t} = Q_{x_{i,j}}^t - \Delta t (cc_g)_{i,j} \left[\frac{\eta_{i,j}^{t+\Delta t/2} - \eta_{i-1,j}^{t+\Delta t/2}}{\Delta x} \right] - f_d Q_{x_{i,j}}^t \quad (2-11)$$

$$Q_{y_{i,j}}^{t+\Delta t} = Q_{y_{i,j}}^t - \Delta t (cc_g)_{i,j} \left[\frac{\eta_{i,j}^{t+\Delta t/2} - \eta_{i,j-1}^{t+\Delta t/2}}{\Delta y} \right] - f_d Q_{y_{i,j}}^t \quad (2-12)$$

式(2-10)至(2-12)中，下標*i*代表x軸方向的第*i*個格點，下標*j*代表y軸方向的第*j*個格點，上標*t*表示時間， Δt 為差分時間段， Δx 、 Δy 分別為x、y軸之差分間距。波場差分網格圖，如圖2-1所示。

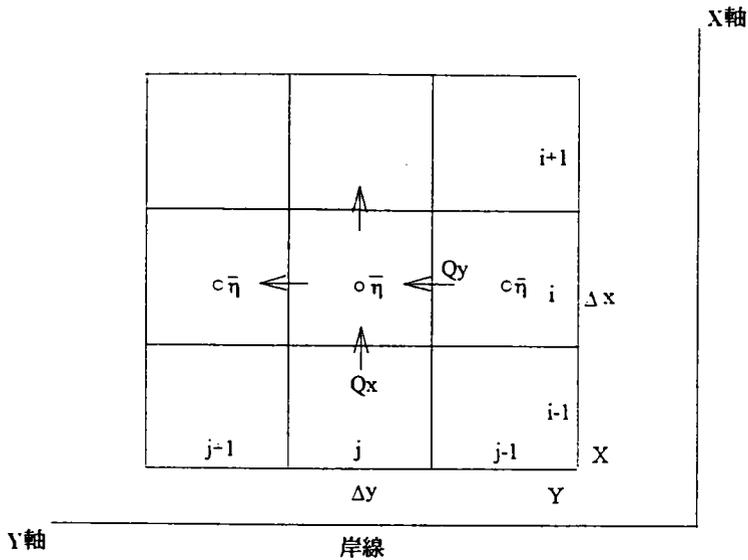


圖2-1波場模式差分網格示意圖

2. 起始條件

起始值可用水平底部的情況來估算，其表示為

$$\begin{aligned}
 \eta &= a_i \sin(kx \cos\theta + ky \sin\theta - \omega t) \\
 Q_x &= c_g \eta \cos\theta \\
 Q_y &= c_g \eta \sin\theta
 \end{aligned}
 \tag{2-13}$$

一般使用式(2-13)之起始值，可減少計算時間。

3. 邊界條件

邊界條件包含內部邊界條件、無反射邊界條件及外海邊界條件。如果計算波場內有結構物位於 $x=i$ 格網處，其反射率為 C_r ，欲求在 $x=i$ 之 Q_x 值，可用前一網格點上 τ 延時前之值表示之(Tanimoto和Kobune[24]、Copeland[13]、Watanabe和Maruyama[14]等)。

$$Q_{x_{ij}}^t = A Q_{x_{i-1,j}}^{t-\tau} \quad (2-14)$$

$$A = \frac{1 - C_r}{\left[(1 + C_r)^2 \sin^2(k\Delta x \cos\theta) + (1 - C_r)^2 \cos^2(k\Delta x \cos\theta) \right]^{1/2}} \quad (2-15)$$

$$\tan\omega\tau = \frac{1 + C_r}{1 - C_r} \tan(k\Delta x \cos\theta) \quad (2-16)$$

式(2-16)為 $\tan\omega\tau$ 與 C_r 之關係。

其中， θ 為波浪在各格點上進行方向與 x 軸之夾角， τ 為延時時間。
若反射率 $C_r = 1$ (全反射的情況)， $Q_{x_{ij}}^t = 0$ 。

當結構物位於 $y=j$ 格網處，則 $Q_{y_{ij}}^t$ 可表示為

$$Q_{y_{ij}}^t = A Q_{y_{i,j-1}}^{t-\tau} \quad (2-17)$$

$$A = \frac{1 - C_r}{\left[(1 + C_r)^2 \sin^2(k\Delta y \cos\theta) + (1 - C_r)^2 \cos^2(k\Delta y \cos\theta) \right]^{1/2}} \quad (2-18)$$

$$\tan\omega\tau = \frac{1 + C_r}{1 - C_r} \tan(k\Delta y \cos\theta) \quad (2-19)$$

式(2-19)為 $\tan\omega\tau$ 與 C_r 之關係。

在本計算中並無任何結構物的存在，潛堤的設置是視為一突變的地形變化。

無反射開放邊界條件在實際情況下，處理的邊界若為開放的，即無反射 ($C_r = 0$)，則將式(2-14)及式(2-17)改為下列二式

$$Q'_{x,j} = Q'_{x-1,j}$$

$$\tau = \frac{\Delta x \cos \theta}{c} \quad (2-20)$$

$$Q'_{y,j} = Q'_{x,j-1}$$

$$\tau = \frac{\Delta y \cos \theta}{c} \quad (2-21)$$

在外海的開放邊界因包含入射波及反射波的合成，所以外海的開放邊界不能只考慮入射波作用，否則將會產生不連續的現象，而導致計算發散。故Engquist和Majda[25]提出一階的吸收邊界條件(absorbing boundary condition)為

$$\left. \frac{\Delta Q_x}{\Delta x} - \frac{\cos \theta}{c} \frac{\Delta Q_x}{\Delta t} \right|_{x=0} = 0 \quad (2-22)$$

入射波相對於式(2-22)的型式，可以表示為

$$\left. \frac{\Delta Q_{ix}}{\Delta x} - \frac{\cos \theta_i}{c} \frac{\Delta Q_{ix}}{\Delta t} \right|_{x=0} = 0 \quad (2-23)$$

其中， θ_i 為入射波的進行方向， Q_{ix} 為入射波質量通率在x方向的分量，可以表示為

$$Q_{ix_{i,j}}^{t+\Delta t} = (ac_g)_i \cos \theta_i \sin [k_i \Delta x \cos \theta_i - \omega(t + \Delta t) + \varepsilon] \quad (2-24)$$

式中 ε 為位相角。

反射波在 $i=1$ 及 $i=2$ 的成份波為

$$Q_{ix_{1,j}}^{t+\Delta t} = (ac_g)_{1,j} \cos \theta_{1,j} \sin [-\omega(t + \Delta t) + \varepsilon]$$

$$Q_{ix_{2,j}}^{t+\Delta t} = (ac_g)_{2,j} \cos \theta_{2,j} \sin [k \Delta x \cos \theta_{2,j} - \omega(t + \Delta t) + \varepsilon] \quad (2-25)$$

估算下時刻的反射波在外海邊界的 Q_x 量為

$$\begin{aligned} EQ_{x_{1j}}^t &= Q_{x_{1j}}^t - Q_{I_{x_{1j}}}^t \\ EQ_{x_{2j}}^t &= Q_{x_{2j}}^t - Q_{I_{x_{2j}}}^t \\ EQ_{x_{1j}}^{t+\Delta t} &= EQ_{x_{1j}}^t + \left(EQ_{x_{2j}}^t - EQ_{x_{1j}}^t \right) \frac{c\Delta t}{\Delta x \cos\theta} \end{aligned} \quad (2-26)$$

故下時刻合成的外海邊界 $Q_{x_{1j}}^{t+\Delta t}$ 為

$$Q_{x_{1j}}^{t+\Delta t} = Q_{I_{x_{1j}}}^{t+\Delta t} + EQ_{x_{1j}}^{t+\Delta t} \quad (2-27)$$

關於岸邊的封閉邊界條件，岸邊的封閉邊界以水位變動 $\eta=0$ 為其邊界條件。

4. 數值穩定條件

線性顯式差分法的穩定條件，本文引用Courantnumber，其表示式如下

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c_{\max}} \quad (2-28)$$

c_{\max} 以長波波速表示為 $c_{\max} = \sqrt{gh_{\max}}$ ，其中 h_{\max} 為最大水深。

5. 疊代計算

波場控制方程式(2-5)及式(2-6)，主要用來計算格網點上的波浪特性：振幅、波向及波速。每週期疊代之值由下列公式計算，直至收斂為止。

$$c_{i,j}^2 = \frac{1 - \cos \omega \Delta t}{\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right)^2 [1 - \cos(k_{i,j} \Delta x \cos \theta_{i,j})] + \left(\frac{\Delta t}{\Delta y}\right)^2 [1 - \cos(k_{i,j} \Delta y \cos \theta_{i,j})]} \quad (2-29)$$

$$a_{i,j} = (2\overline{\eta_{i,j}^2})^{1/2} \quad (2-30)$$

$$\theta_{i,j} = \tan^{-1} \left(\frac{\overline{Q_{y_{i,j}}^2}}{\overline{Q_{x_{i,j}}^2}} \right)^{1/2} \quad (2-31)$$

6. 收斂條件

依每週期計算所格網點上的波速、振幅及進行方向，在二前後週期的相對差值於要求的精度下，即為收斂條件，則停止計算。本文定義收斂條件為相對誤差小於0.01以下，如下式：

$$\frac{\left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (c_{i,j}^n - c_{i,j}^{n-1})^2 \right]^{1/2}}{c_0} < 0.01 \quad (2-32)$$

$$\frac{\left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (a_{i,j}^n - a_{i,j}^{n-1})^2 \right]^{1/2}}{a_0} < 0.01 \quad (2-33)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |\theta_{i,j}^n - \theta_{i,j}^{n-1}|}{\theta_0} < 0.01 \quad (2-34)$$

c_0 ：深海入射波波速

a_0 ：深海入射波振幅

θ_0 ：深海入射波角度

2-3 反射率與透過率之計算

本文利用一雙曲線型偏微分方程式，推算波浪受潛堤影響所產生的反射率與通過潛堤後整個波動場的波動特性。計算整個波浪運動過程時，係將模式中提出的二維計算模式，將側邊界與向岸邊界設為無反射，而退化成一維模式。計算方案共分為三種不同潛堤堤長，分別為2公尺、1公尺、0.05公尺，堤前水深亦採三種不同水深，分別為0.4公尺、0.5公尺、0.6公尺，潛堤型式為不透水等腰梯形潛堤，因此本文之計算方案共九類，數值計算係以試驗室所測得的規則波波高為計算之起始條件，水深變化和試驗佈置相同。利用數值模式求出整個計算範圍的波高變化，與試驗所佈置的波高計相同位置的波形變化，每一計算點共計算1024點水位變動值，再依據Mansard和Funke[26]的入反射波分離法計算出數值解的反射率(如3-4-2節所述)。而透射率(如3-4-3節所述)的決定則是與計算試驗值的相同方法計算出數值的透射率。

第三章 試驗說明

在往昔文獻中潛堤皆視為一突變之地形，然而在水深變化劇烈的情況下，緩坡方程式是否能應用於推測波浪通過潛堤的波場，其精確性為何？為了使潛堤消波的功效卓著，潛堤堤頂上之水深必然較小，因此於潛堤堤頂上往往屬於淺水區域，即堤上相對水深(d_s/L)較小的情況下，以緩坡方程式為主的數值計算在波浪條件為淺水波時，由於水深過小造成數值計算不易收斂的情況，及波浪在淺水區域內非線性現象是否可用線性理論來加以描述，其可行性為何？為了檢核數值方法之精確度與可行性，利用一水工模型試驗結果與數值計算加以比較，試驗的設備與佈置及數據的處理方法如下：

3-1 設備與儀器

本試驗乃是利用港灣技術研究所風洞試驗室中的斷面水槽進行，其試驗設備與儀器如下：

1. 斷面水槽

槽長100公尺，寬1.5公尺，高2公尺，右端設置一造波機，左端為消波設備。而造波板前約35公尺為透明玻璃水槽，以便觀察波浪進行時的變化。

2. 造波機

丹麥DHI公司出品之直推式油壓式造波機，置於水槽右端，可由電腦控制，依試驗需求造出各種不同波浪條件的規則波與不規則波。

3. 容量式波高計、增幅器、資料擷取系統

試驗共設置16支容量式波高計，由波高計感應水位訊號，藉由增幅器放大水位訊號，再經由電腦做A/D轉換完成記錄水位資料。

3-2 試驗佈置

3-2-1 潛堤形式

1. 等腰梯形潛堤

利用木板組合裝訂而成不透水式等腰梯形潛堤，堤頂寬分為2公尺、1公尺、0.05公尺三種，堤高30公分，邊坡斜率為垂直1比水平1.5，如圖3-1所示。

2. 邊坡曲面形潛堤

前後邊坡皆為拋物曲面形的不透水式潛堤，堤頂寬分為2公尺、1公尺、0.05公尺三種，堤高30公分，如圖3-2所示。

3. 透水式等腰梯形潛堤

透水式等腰梯形潛堤，由小型消波塊亂拋組合而成，堤寬1公尺，堤高30公分，孔隙率為0.82，如圖3-3所示。

3-2-2 試驗佈置

水槽可分為三部份，一為深水段，此段放置兩支波高計用以計算入射波之物理性質。二為淺化段，底床斜率為水平30比垂直1。三

為淺水段，試驗潛堤放置於距傾斜底床12.8公尺處。堤前0.5公尺處放置五支波高計各距離0.5公尺，用以量測波浪遇潛堤之反射現象，距潛堤1公尺處後放置七支波高計，間距為1公尺，用以觀察波浪之透射現象。其詳細佈置圖如圖3-4中所示。

本試驗共有三種不同形式之潛堤，兩種不透水式潛堤之堤頂寬分別為2公尺、1公尺、0.05公尺，透水式潛堤堤頂寬為1公尺，而每種佈置分別進行堤前水深0.6公尺、0.5公尺、0.4公尺三種不同水深之試驗，故可得21種不同的試驗佈置。

3-3 試驗條件

規則波試驗的條件為每種試驗佈置之規則波入射波浪的試驗條件由週期0.8秒到5.0秒，每隔0.2秒做試驗一次，共做22次。堤前水深為0.4公尺的入射波高約為4~4.5公分，相對水深為0.04~0.4，水深0.5公尺的入射波高約為5~7公分，相對水深為0.04~0.5，水深0.6公尺的入射波高則為12公分左右，相對水深為0.05~0.6。如表3-1所示。

表3-1規則波試驗條件

水深(cm)	週期(sec)	波高(cm)	相對水深(d/L)
40	0.8~5	4~4.5	0.04~0.4
50	0.8~5	5~7	0.04~0.5
60	0.8~5	12	0.05~0.6

關於不規則波波浪試驗的條件，入射波譜型式為JONSWAP型式，主頻分佈由 0.18秒^{-1} 至 1.3秒^{-1} ，示性波高約為2~12公分，每一種試驗佈置共作8次。如表3-2所示。

表3-2不規則波試驗條件(JONSWAP)

水深(cm)	相對水深(d/L)	主頻頻率(sec ⁻¹)
40	0.4~0.08	0.2~1.0
50	0.625~0.0625	0.2~1.3
60	0.7~0.07	0.18~1.2

3-4 試驗數據之處理與分析

本試驗將波高計之連續電壓訊號藉增幅器放大，經由A/D卡以30Hz的取樣頻率轉換成水位變動之數位資料，然後以電腦記錄並分析。同時為避免試驗準確性受水槽後方反射波的影響，取樣時間為70秒。

3-4-1 波浪頻譜之計算

本試驗水位訊號取樣時間為70秒，取樣頻率為30Hz，因此對於各測點之水位訊號分析採1024個資料點為一樣本空間。對每個樣本進行FFT轉換，同時取7個數據之移動平均作為本試驗之水位訊號能量頻譜的基本資料。假設經由傅立葉轉換後，水位訊號 $x(t)$ 之振幅頻譜為 $X(F)$ ，其中 t 代表時間， F 表頻率，則水位訊號之能量頻譜定義如下：

$$S_{xx}(F) = E[X(F)\bar{X}(F)] \quad (3-1)$$

其中 $S_{xx}(F)$: 水位訊號之能量頻譜
 $E[]$: 期望值
 $\bar{X}(F)$: $X(F)$ 之共軛複數

3-4-2 反射率之決定

波浪通過潛堤時產生部份反射與部份穿透，因此潛堤前之波浪為入射波與反射波之合成波，為了將合成波分離成入反射波，本文利用Mansard和Funke[26]提出的最小二乘法分離入反射波的方法來計算反射率。本計算法係利用設置於潛堤前之三支不同位置的波高計所量測的水位訊號記錄將合成波浪加以分離。反射率之定義如下式所示：

$$K_R = \frac{H_R}{H_I} \quad (3-2)$$

此處 K_R : 反射率
 H_R : 反射波高
 H_I : 入射波高

本試驗於潛堤前不同位置共佈置了五支波高計，同時量測潛堤前不同位置同時間的水位變化，而Mansard和Funke[26]之波形分離法中只需任三個波高計即可計算反射率，因此由本試驗的五支波高計訊號共可取得10種不同佈置，亦即同一試驗可取得10組反射率，取反射率偏差在5%以內之計算值的平均值為試驗所得之反射率，故取得之反射率可消除因試驗或計算所得的偶然誤差與系統誤差。在水位訊號資料的採用方面，則以波浪通過潛堤之後堤前產生反射作用之水位訊號來計算反射率。

3-4-3 透射率之決定

1. 規則波

由於波浪受到水深突變，在通過潛堤堤頂時波浪受到潛堤影響而發生擾動變形，出現較高階非線性現象，即波峰形狀變尖，波谷發生跳動，Goda[27]和Dick與Brebner[1]亦在試驗中發現相同的波動現象。分析透過率時則利用堤後6支波高計所量測到的水位訊號之均方根值與入射波之均方根值兩者之比值，為堤後不同位置之透射率的試驗結果，透射率之定義如下：

$$K_T = \frac{(\sqrt{\eta^2})_T}{(\sqrt{\eta^2})_I} \quad (3-3)$$

此處 K_T : 透過率
 $(\sqrt{\eta^2})_T$: 穿透波水位訊號之均方根值
 $(\sqrt{\eta^2})_I$: 入射波水位訊號之均方根值

2. 不規則波

本文不規則波的透過率定義為一堤前波高訊號之能量頻譜與堤後能量頻譜比的轉換函數(TF)，其轉換函數的定義如下：

$$TF(F) = \sqrt{\frac{S_{XX}(F)_T}{S_{XX}(F)_I}} \quad (3-4)$$

其中 $S_{XX}(F)_T$: 透過波浪之能量頻譜
 $S_{XX}(F)_I$: 入射波浪之能量頻譜
 F : 波浪頻率

第四章數值結果與試驗結果之比較與討論

本章針對等腰梯形潛堤之規則波入射波浪的反射率、透射率、波高比與波形等數值計算與試驗結果做比較分析來探討數值計算之可行性與精確度，詳述如下：

4-1 反射率之比較分析

圖4-1為堤寬為2公尺、1公尺、0.05公尺的試驗值反射率與數值解反射率之比值和堤前相對水深(d/L)的關係比較圖。圖4-1中各小圖中 C_R 值(試驗與數值解反射率之比值)如為1，即表示試驗反射率與數值解反射率相同，試驗條件由堤前相對水深0.5至0.05左右，表示堤前入射波浪條件為中間性波。由圖中可知，在堤前相對水深小於0.15時 C_R 值大部份分佈在0.2至2.0之間，平均誤差約為25%。堤前相對水深大於0.15時，數值反射率明顯大於試驗反射率。由此推論無論潛堤長度為何，在波浪通過潛堤時所產生的反射波，無法精確的利用緩坡方程式來預測，數值解與試驗值的平均誤差約為25%。

圖4-2為堤寬2公尺、1公尺、0.05公尺之 C_R 值與入射波浪尖銳度的關係圖。在圖中入射波浪尖銳度大於0.03時， C_R 值皆小於0.8，故入射波浪尖銳度大於0.03時由緩坡方程式所推算出的反射率誤差大於20%且有高估的現象。在入射波浪尖銳度小於0.03， C_R 值分佈於0.4至1.8之間，則表示緩坡方程式在波浪尖銳度小於0.03時，亦無法精確的推算反射率。

圖4-3為 C_R 值與堤上之波高水深比(堤上相對波高)之關係圖。本文試驗條件在堤前並不會碎波，由圖中可明顯發現不論相對波高為

何， C_R 值皆分佈於0至2之間，如此可知波浪在堤前未碎波時，相對波高並不是利用緩坡方程式推算反射率時的重要參數。

4-2 透過率之比較分析

圖4-4為堤寬2公尺堤後不同位置之試驗透過率與數值解透過率比值和潛堤堤頂水深與入射波長比值(d_s/L)的關係圖。圖4-4-(a)、圖4-4-(b)、圖4-4-(c)分別表示第10號、第13號、第16號波高計之位置，即是距堤後1公尺、4公尺、7公尺處的試驗值與數值解之透過率比值。在潛堤上的相對水深約為0.01至0.2之間，則通過潛堤上方時波浪條件為淺水波。由圖中，在堤上相對水深大於0.1時， C_T 值(試驗透過率與數值解透過率之比值)約為1，即表示在潛堤上相對水深大於0.1時，數值解與試驗值透過率的誤差在5%左右。堤上相對水深小於0.1時， C_T 值分佈在1.5至0.3之間，此即說明利用緩坡方程式預測波浪通過潛堤後的透過率，在堤上相對水深小於0.1時誤差大於25%，無法精確的描述潛堤後的波浪運動。

圖4-7到圖4-9是堤寬1公尺不同位置之 C_T 值與堤上相對水深、入射波浪尖銳度、堤上相對波高之關係圖。堤寬1公尺與堤寬2公尺大致上類似。圖4-10為堤寬0.05公尺之 C_T 值與堤上相對水深關係圖。由圖4-10中可發現在相對水深大於0.05時試驗透過率與數值解透過率之誤差約在5%以內，圖4-4堤寬2公尺之方案與圖4-10堤寬0.05公尺之方案的比較可知，在堤寬2公尺與堤寬0.05時，緩坡方程式能精確的預測堤後透過率的堤上相對水深分別為0.1與0.05，故堤寬是影響透過率計算的參數，堤寬愈長，緩坡方程式能精確描述堤後波動的相對水深界限就愈大。

圖4-5為堤後不同位置的 C_T 值與入射波浪尖銳度之關係圖。圖中入射波浪尖銳度大於0.03時， C_T 值皆比1小，則數值計算結果有高估的趨勢，在入射波浪尖銳度小於0.03時， C_T 值散亂分佈於0.4至1.3之間成帶狀分佈。表示數值解在波浪尖銳度小於0.03時，預測堤後透過率誤差在20%，且有高估的現象。由於入射波浪尖銳度愈小波長愈長，在堤上水深固定情況下，波浪條件愈接近淺水波的範圍，則堤後波浪的非線性愈強，數值解愈不易精確的描述波浪之透過率。

圖4-6為堤寬2公尺不同位置之 C_T 值與堤上波高水深比(堤上相對波高)之關係圖。由堤上相對波高的範圍為0.15~0.7，在相對波高範圍內的波浪，依碎波水深與碎波波高關係的經驗式來判斷並不會碎波，這與試驗時所觀察的結果是一致的。由圖中的資料點呈傾斜帶狀分佈，且 C_T 值分佈的範圍約為0.2至1.5之間，圖中堤上相對波高愈大，數值解高估現象愈明顯，表示在堤上波浪未碎波的條件下，波高愈大受水深影響愈顯著，數值解愈不能精確的表示堤後的波動情況。圖中資料點呈傾斜帶狀分佈，且分佈範圍略寬，顯示 C_T 值與堤上相對波高之相關性並不高，故堤上相對波高在堤上波浪未碎波的範圍內並不是影響數值計算的重要參數。

4-3 不同位置的波高比值之比較分析

為了進一步探討反射率與透射率的數值解與試驗值之差異，圖4-13為堤寬2公尺不同位置之數值解與試驗值的當地波高與入射波高比值的比較關係圖。圖中以細線代表直接由緩坡方程式的差分解中求得的波高比值，而試驗的波高比值係以各測點所量測到的波高除以入射波高而求得各測點之試驗值的波高比。橫軸以潛堤正上方第九號波高計位置為原點，向岸方向為正、離岸方向為負。圖4-13-(a)為

堤上相對水深等於0.02的方案，在堤上的波浪條件為淺水波。圖中堤前同位置的數值與試驗波高比值誤差約為15%，且試驗值之圓黑點的波高比值皆大於1，比圖4-13-(b)與圖4-13-(c)堤上相對水深為0.05與0.07方案的波高比值大，表示長波反射率較大。比較三圖在橫軸為0處，即潛堤上方所量測到的試驗結果的波高比值以堤上相對水深為0.02的方案為最大，因為長週期波浪容易受潛堤擾動，通過潛堤後各不同堤上相對水深的試驗值波高比值皆小於1，而堤前相對水深為0.02、0.05、0.07之數值解與試驗值比較的誤差分別是15%、6%、5%，堤上相對水深愈小試驗值與數值解的在堤後波高比的差別就愈大。

4-4 波形之比較分析

進一步探討對數值計算與試驗結果之主要差異，取一個週期之計算結果與實測數據做比較，圖4-14到圖4-16中之各圖分別表示不同量測點之不同相對水深時，潛堤前與潛堤後之數值解波形與實測波形之比較，圖中粗虛線為數值計算結果，細實線為試驗值。由圖4-14-(a)、圖4-15-(a)與圖4-16-(a)可發現在堤前第3號、第7號波高計位置處，堤上相對水深較小的情況下，數值計算結果與試驗所量測的波形尚稱吻合，且堤後之試驗波形並無劇烈變化。圖4-14-(b)、圖4-15-(b)與圖4-16-(b)中可知，在堤上相對水深為0.026時，堤上波浪條件為淺水波，堤後第15號波高計所量測之試驗值波形明顯的受潛堤作用而擾動，造成波形的變化的現象，數值解對此種波形的變化已無法精確的描述。如此可知，堤上相對水深愈小，數值解愈無法精確的描述通過潛堤後波形劇烈變化的情況。

由以上四節所論述，堤寬與堤上水深影響著波浪通過潛堤時波形的變化，在堤上相對水深小於0.1時，緩坡方程式預測堤後波場的誤差可達25%以上。堤寬愈長時，波浪通過潛堤後所產生非線性量隨之增加，以緩坡方程式所發展的數值模式則不適用於此種非線性較強的情況。

第五章 潛堤消波特性之探討

本章以試驗資料來探討規則入射波浪作用於各種型式的潛堤時，反射、透過率與潛堤型式的關係。及討論影響數值計算精確度的非線性效應與潛堤堤寬與堤上水深之間的關係，並將往昔學者應用頻譜分割來計算不規則波中各個成份波之透過率的可行性加以討論。

5-1 潛堤堤寬之影響

5-1-1 對反射率的影響

圖5-1為等腰梯形潛堤之不同堤寬的堤前反射率與相對水深($\omega^2 d/g$)之關係圖。圖中圓黑點、三角空心點、十字點分別表示堤寬為2公尺、1公尺、0.05公尺的堤前反射率，由圖中可知堤上水深與堤前水深比(d_s/d)相同時，不同堤寬的反射率並無明顯大小差異，不同堤寬的反射率之相對極大值與相對極小值隨著相對水深呈週期性的轉替出現，不同堤寬則此週期性亦不同，且反射率隨著波浪相對水深的增加而遞減。這現象是波浪能量分佈的特性，相對水深小的，其能量分佈由水面到底床較均勻，所以受潛堤影響顯著，反射較大。而相對水深大的為深水波，波浪能量分佈在波浪表面，則受地形與潛堤影響較小，反射率較小。圖5-2為潛堤邊坡為曲面型式的不同堤寬之堤前反射率與堤前相對水深($\omega^2 d/g$)之關係圖。反射率的分佈與等腰梯形潛堤有相同的趨勢，但反射率之相對極大值與相對極小值週期性出現的情形並不明顯。

圖 5-3 為等腰梯形與曲面邊坡形潛堤在堤寬2公尺反射率與相對水深的比較關係圖。各小圖中在不同堤上水深堤前水深比 (d_s/d)為0.25、0.4、0.5的情況下，三角空心點代表曲面邊坡式潛堤的反射率，其值明顯的比代表等腰梯形式潛堤反射率的圓黑點大，圖5-4與圖5-5分別是堤

寬1公尺與0.05公尺的方案。在相同堤上水深與堤前水深比的情況下，曲面邊坡式潛堤的反射率大於等腰梯形潛堤反射率約6%。因為曲面邊坡式潛堤的斜率大於等腰梯形潛堤(斜率為1:1.5)，故潛堤的邊坡斜率愈大所造成的堤前反射率則愈大，而堤寬對於反射率相對極大值與極小值轉替出現的週期性變化有決定性的影響。

5-1-2 對透過率的影響

圖5-6至圖5-8為等腰梯形潛堤之相同堤上水深與堤前水深比(d_s/d)、不同堤寬、不同堤後位置的透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s/g$)的關係圖。圖5-6中 d_s/d 等於0.25，圓黑點、三角空心點、十字點分別表示堤寬2公尺、1公尺、0.05公尺的試驗方案。波浪透過率隨著相對水深有週期性變化的趨勢，這與反射率有相同的變化。圖5-6(a)、圖5-6(b)與圖5-6(c)分別表示第10號、第13號、第16號波高計之位置，即距潛堤後1公尺、4公尺、7公尺處不同堤後位置的透過率，由此可發現，距堤後1公尺、4公尺、7公尺的透過率大約為1.0、0.6、0.5左右，即透過率會隨著堤後距離有明顯遞減而成為一定值的趨勢。由以上敘述可知，波浪通過潛堤上方時，水深變淺造成波峰變尖波谷變平緩的淺化現象，此時波浪能量集中於表面附近，且有其他頻率的波浪產生，代表了非線性量的出現，離開潛堤後由於水深再度變大，波浪能量在水深方向再度向下傳遞，波峰變平緩，通過潛堤時所產生的非線量隨著距離而遞減，如此推測波浪愈行愈遠時則可能成為另一種波動型態。

圖5-6(c)、圖5-7(c)與圖5-8(c)分別第16號波高計處所量測的試驗值，在堤上水深與堤前水深比(d_s/d)為0.25、0.4、0.5的方案。圖5-6(c)中堤寬2公尺的透過率明顯的小於堤寬1公尺、0.05公尺的透過率，圖5-7(c)與圖5-8(c)中不同堤寬的透過率大小並不明顯。但是由圖5-6(c)、圖5-7(c)、圖5-8(c)的比較中發現堤上水深與堤前水深比愈小時，堤寬愈長對透過率的影響愈顯著。再由圖4-14到圖4-16數值解波形與試驗值波形之比較圖發現在第16號波高計處，堤寬愈寬對波浪通過潛堤波浪的

擾動程度愈大。圖5-9到圖5-11為邊坡曲面形潛堤之相同堤上水深與堤前水深比、不同堤寬、不同堤後位置的透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)的關係圖。其透過率的變化與等腰梯形潛堤的透過率變化大致相同。

圖5-12到圖5-14為堤寬1公尺堤後不同位置的邊坡曲面形潛堤與等腰梯形潛堤透過率之關係比較圖。由圖中發現曲面型式潛堤的透過率比等腰梯形式潛堤之值略小，假設兩種不透水式潛堤造成波浪能量損失的差異並不大，曲面邊坡式潛堤的堤前反射率較大，則透過率較小，這推論與圖中所示一致。由以上討論得知，潛堤邊坡斜率愈大反射率愈大，透過率愈小。

5-2 潛堤堤頂水深之影響

5-2-1 對反射率的影響

圖5-1(a)、圖5-1(b)與圖5-1(c)分別表示堤上水深與堤前水深比(d_s/d)為0.25、0.4、0.5的不同堤寬反射率與相對水深($\omega^2 d/g$)之關係圖。由5-1-1節所述，堤寬與反射率大小間無明顯關係。在比較不同 d_s/d 時，圖5-1(a)中 d_s/d 等於0.25的反射率約分佈在0.5至0.1間。圖5-1(b)中 d_s/d 等於0.4時反射率約介於0.5至0.07間，圖5-1(c)中 d_s/d 等於0.5時反射率分佈於0.4至0.02之間，由以上比較，堤上水深與堤前水深比愈小時，波浪能通過的截面積比愈小，則反射率愈大。圖5-2為邊坡曲面形潛堤與等腰梯形潛堤有著相同的趨勢。

5-2-2 對透過率的影響

比較圖5-6(c)、圖5-7(c)與圖5-8(c)為第16號波高計(堤後7公尺處)在 d_s/d 為0.25、0.4、0.5及不同堤寬時的透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)

關係時發現，在 d_s/d 等於0.25時透過率約界於0.4至1.25之間， d_s/d 等於0.4時透過率界於0.6至1.4之間，在 d_s/d 等於0.5時則分佈於0.7至1.45之間，由各圖中比較得知在堤上水深與堤前水深比愈大時透過率愈大，表示波浪能通過的截面積愈大。在圖5-9(c)、圖5-10(c)與圖5-11(c)為曲面邊坡形潛堤在第16號波高計(堤後7公尺處)之堤上水深與堤前水深比為0.25、0.4、0.5時不同堤寬的透過率與堤上相對水深的關係，由圖中可知曲面邊坡型潛堤與等腰梯形潛堤有相同的趨勢。

由以上5-1與5-2節之討論可推知，波浪經過突變地形時，在固定波浪條件下，反射與透射機構由堤上水深與堤寬決定，水深變化大者造成的堤前反射率的平均值就愈大。另外，波浪通過潛堤時在堤上的淺水區域內產生反射機構，淺水區域的距離與波長則影響反射波的相位角，入射波與反射波相位角的差值若使得反射波與入射波在堤前產生相疊加的效果時，反射率就會出現相對極大值，透過率就小；反之，反射波與入射波產生相減時反射率則出現相對極小值，透過率就大。

5-3 潛堤透水性之影響

5-3-1 對反射率的影響

圖5-15為堤寬1公尺相同堤上水深與堤前水深比的透水潛堤與不透水潛堤的反射率與相對水深($\omega^2 d/g$)之比較關係圖。透水潛堤是由小型消波塊亂拋而成，孔隙率為0.82，其反射率以三角空心點代表，圓黑點代表不透水式潛堤，圖中透水式與不透水式的反射率的相對極大值與相對極小值變化一致，但透水潛堤的反射率小於不透水潛堤。在相同斜率的邊坡下，透水潛堤的反射率小於不透水潛堤。

5-3-2 對透過率的影響

圖5-16為第16號波高計(距堤後7公尺處)在堤寬1公尺時不同堤上水深與堤前水深比的透水式潛堤與不透水式潛堤之透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)之比較關係圖。三角空心點與圓黑點分別代表透水與不透水潛堤，以圖中三角點與圓黑點的變化趨勢一致的現象，可推論透水式與不透水式潛堤的透過率有相同的性質，但透水式潛堤的透過率略小於不透水式潛堤。以能量消散的觀點來討論透水性與透過率的關係，在堤上水深一定，波浪能通過潛堤上方的截面積一定，波浪通過透水潛堤時，由於透水潛堤中的流體運動是以類似滲流的方式通過透水潛堤，故考慮堤體中紊流與摩擦效應的影響，則必需注意波浪能量的消散。以Gu和Wang[23]提出潛堤的透水性與波浪能量消散的關係，能量消散愈多透過率愈小的關係來推論，當波浪通過透水潛堤時由於堤體內產生紊流與摩擦現象會損失波浪能量，故透過率較小，這與試驗結果是相吻合的。透水堤的反射率較不透水堤為小，故透水堤的透過率應比不透水堤為大，但在圖5-16中透水堤的透過率卻比不透水堤為小，表示在相同潛堤形狀的條件下，透水堤有消散較多波浪能量的作用。

5-4 波浪通過潛堤後之非線性波動特性

圖5-19表示在堤上相對水深(d_s/L)為0.06，不同位置之頻譜與波形訊號的比較圖，各測點之位置(頻道號碼)與距離如圖3-4所示。由波形頻譜形狀皆可發現，所造出的入射波形相當良好，即造波條件控制的相當良好。再由第8號波高計之測點的波形可得知潛堤前之波形變化很小，且第8號(CH8)波高計的頻譜圖並無明顯的變化，無其它頻率波浪的產生，此明白表示在堤前的波浪並無明顯的非線性量。

在潛堤上方如第9號(CH9)波高計所量測的波形所示，波形有波峰變尖的現象，通過潛堤之後，如第10號、第14號、第16號波高計的波形亦受到較大的擾動。圖5-20為堤頂上相對水深(d_s/L)為0.12，即波浪在潛堤前已達深水波之條件，由各測點之波形可明顯發現入射波保持良好的規則波形。由以上得知在堤頂上之相對水深如大於0.1時即堤前入射波浪已達深水波條件，則潛堤對波浪的變形與消滅波能之效果不佳。

在圖5-21中堤上相對水深(d_s/L)為0.04，潛堤前由於潛堤反射的影響使得波形呈現波腹較寬波峰較尖之現象，頻譜圖並未出現其它的能峰，表示在相對水深較小的情況下，堤前無非線性量的產生。在潛堤上(第9號波高計處)，波峰變尖波谷變平緩。波浪通過堤後，波形在波谷出現另一個小波，而波峰部份即變成更尖之形態，能譜圖亦在主頻約2倍處明顯出現第二主頻的非線性情況，即能譜圖出現二倍主頻處的能量加大。離潛堤愈遠，波形趨向波峰較尖，波谷出現二個較大的變動，繼後前進波則呈現出大波變小，小波變大，波譜能量在2倍、3倍主頻處出現三個能量相似的能峰之情形，即表示非線性再往高階出現。離潛堤愈遠大波再變小，二個小變動再合成一個較大的小波。

以上描述即在試驗中發現了潛堤之後的波形和正弦波有明顯的不同，在波峰處變得較尖，在波谷處則有二次波的產生。二次波在Goda[22]於均勻水深的水槽中已有發現。二次波的傳遞速度較主波為慢，當二次波在波谷處產生時，會漸漸的被後來的主波波峰趕上而消失於波浪剖面之中，當波再前進時則又出現於下一個波谷處。對於堤後的非線性影響量，Massel[16]提出對稱潛堤的非線性影響量，其結果顯示非線性量在堤前較小，而在堤後的的影響較大，這與本試驗的結果一致。

圖5-22為堤寬2公尺、1公尺、0.05公尺之潛堤後的不同位置之第二主頻與第三主頻之能量與主頻能量比值的比較圖。各圖中三角空心點表示

在第二主頻處之能量與第一主頻之能量比，十字點表示第三主頻能量與第一主頻能量比值。由圖5-22-(a)中可得知堤上相對水深(d_s/L)在0.03時，第二主頻與第一主頻之能量比大約在0.35為左右，第三主頻與第一主頻之能量比大約在0.3為左右。而以堤寬2公尺之比值較大，堤寬0.05公尺為最小。堤寬2公尺之第二尖峰頻率與主頻率之能量比值平均在0.35左右，第三尖峰頻率與主頻率之能量比均在0.3左右。堤寬1公尺時，能量平均比值均在0.2與0.15左右。堤寬0.05公尺時，能量平均比值約在0.1與0.05左右。此即說明堤寬對於波浪變形後的非線性應有影響性。

圖5-23為堤寬1公尺時不同堤上相對水深的情況，由圖中可明顯發現第二主頻與第一主頻之能量比隨著堤上相對水深的增加而遞減的趨勢，在堤上相對水深為0.03時第三主頻能量與第一主頻能量比值為最大，此即表示了更高階的非線性量的增加，由此可得知在相對水深達到淺水波條件時潛堤後波浪之非線性量大增，同時亦出現更高階的非線性，而其量與潛堤堤寬有密切的關係，且第二主頻能量與第一主頻能量比值與第三主頻能量與第一主頻能量比值隨著距離潛堤愈遠而有遞減的趨勢。

綜合以上之討論可得潛堤堤後之穿透波在堤上相對水深達到淺水波條件時，波浪通過潛堤所產生的非線性量增加，會有更高階的非線性情況出現，若以線性理論的緩坡方程式來預測描述堤後的波動特性則有欠理想。同時堤寬愈寬時，則波浪受潛堤的擾動更劇烈，非線性現象更顯著，線性理論更無法加以精確的描述。此外，通過潛堤後規則波浪所產生的第二主頻與第三主頻能量有隨著距離而遞減的趨勢，故波浪的非線性量有隨著潛堤的距離而遞減的趨勢，所以推測波浪離堤愈遠而可能成為另一種波動形態。由於試驗水槽的限制，無法觀察離堤較遠的波動現象，而且潛堤放置於欲保護海岸的距離不應該太遠的考慮下，實際波動現象為何還有需探討。

5-5 以頻譜分割法求不規則波透過率之可行性討論

利用一不規則波轉換函數TF(式3-4)與規則波透過率 K_T (式3-3)來探討，往昔學者利用頻譜分割來計算不規則波透過率方式的可行性。

5-5-1 等腰梯形潛堤之不規則波轉換函數與規則波透過率之關係

圖5-24為堤寬0.05公尺時不同堤上水深之不規則波轉換函數TF與規則波透過率 K_T 之比較關係圖。不規則波轉換函數與規則波透過率皆採用第16號波高計(堤後7公尺處)所量測的水位訊號來計算，不規則波轉換函數為透過波的能量頻譜除以入射波的能量頻譜之平方根，其轉換函數的意義為某一頻率的入射波浪能量經過潛堤後的能量變化率，取其平方根則與規則波透過率的因次相等。由圖中之可發現，在堤寬0.05公尺堤上水深為0.1公尺、0.2公尺、0.3公尺，堤寬與堤上水深比(B/d_s)為0.5、0.25、0.17，波浪頻率界於0.2至1.0之間時，圓黑點之規則波透過率與不規則波轉換函數之細實線的變化一致，兩者相差約5%-10%左右，表示某頻率的規則波入射波浪與存在於不規則波內相同頻率的成份波有著相同的變化，故在此潛堤堤寬、堤上水深與波浪頻率的範圍內，以頻譜分割法來計算不規則波之各個成份波之透過率是可行的。

圖5-25為堤寬1公尺堤上水深為0.1公尺、0.2公尺、0.3公尺，堤寬與堤上水深比(B/d_s)為10、5、3的方案。堤上水深為0.2公尺與0.3公尺和堤寬0.05公尺時有相同的結果。在堤寬1公尺，堤上水深0.1公尺，堤寬與堤上水深比(B/d_s)為10時，轉換函數與透過率相差就較大。

圖5-26為堤寬2公尺的方案。由圖中可知，隨著堤上水深與波浪頻率的遞減，不規則波轉換函數與規則波透過率之值的關係愈不吻合，在堤上水深為0.3公尺，堤寬與堤上水深比(B/d_s)為6，波浪頻率小於0.6時，兩者相差達15%左右。在堤上水深為0.1公尺，堤寬與堤上水深比(B/d_s)為20時，兩者相差達25%左右。以5-4節之結果推論，在堤寬較大、堤上水深較小、入射波浪週期頻率較小的情況下，堤後之非線性量影響非常顯著，以此推論在潛堤堤寬較大堤上水深較小時，不規則波通過潛堤時所產生的非線量使得各個成份波間有非線性的交互作用產生，使得以一對一方式來計算各成份波的透過率無法有效的應用。故在以數值計算方式來分割頻譜，計算各成份波的透過率時必須考慮其應用範圍。

5-5-2 曲面邊坡形潛堤之不規則波轉換函數與規則波透過率之關係

圖5-27為堤寬0.05公尺之曲面邊坡形不透水潛堤，不同堤上水深之不規則波轉換函數(TF)與規則波透過率(K_T)之比較關係圖。不規則波轉換函數與規則波透過率皆採用第16號波高計(堤後7公尺處)所量測的水位訊號來計算，圖中與等腰梯形潛堤堤寬為0.05公尺時類似。

圖5-28為堤寬1公尺之曲面邊坡形不透水潛堤，由圖中堤上水深為0.3公尺與0.2公尺時之不規則波轉換函數(TF)與規則波透過率(K_T)相當吻合，但在堤上水深為0.1公尺時兩者相差約在20%左右，表示在此堤寬與堤上水深的情況下，以頻譜分割法來計算不規則波之各個成份波之透過率是不可行的。曲面邊坡與等腰梯形潛堤之不規則波轉換函數(TF)與規則波透過率(K_T)在堤寬較寬堤上水深較小時的關係有著相同的趨勢，時此即說明了，在應用頻譜分割法時與潛堤之形狀較無相關性。

5-5-3 透水式潛堤之不規則波轉換函數與規則波透過率之關係

圖5-29為透水潛堤堤寬1公尺時堤上水深為0.1公尺、0.2公尺、0.3公尺之不規則波轉換函數(TF)與規則波透過率(K_T)之比較關係圖。不規則波轉換函數與規則波透過率皆採用第16號波高計(堤後7公尺處)所量測的水位訊號來計算，圖中之不規則波轉換函數(TF)與規則波透過率(K_T)相當吻合，表示在此堤寬與堤上水深的情況下，則不規則波中各個頻率之成份波之透過率對應至相同頻率之規則波波浪的透過率，此種一對一的關係在透水潛堤堤寬1公尺與堤上水深的範圍內，以頻譜分割法來計算不規則波之各個成份波之透過率是可行的。不規則波轉換函數與規則波透過率之關係，在透水潛堤與5-5-1節中等腰梯形潛堤堤寬1公尺時的關係是一致，此即說明了，在應用頻譜分割法時與潛堤之透水性無關，而與潛堤堤寬和堤上水深有著密切的關係。

綜合以上3節所述，堤寬與堤上水深(B/d_s)之比值大於6時，即堤寬2公尺堤上水深0.3公尺時，成份波波浪頻率大於0.6Hz時，堤後波浪的非線性效應顯著，如此應用頻譜分割法來計算不規則波中各個成份波之透過率就有較大的誤差。

5-6 潛堤應用於花蓮南濱海岸對減低波能之影響

潛堤應用於南濱海岸係以結構物來逼使波浪產生變形而達減低波動週期及消滅能量為其目的，促使其沿南濱海岸產生的長週期波變成較短週期波使其進入港內時不再發生振盪。同時利用潛堤減低波能直接的保護南濱海岸，減小其沿岸輸沙防止部份區域的侵蝕及港口區域的淤積，基於以上之觀點所設置之潛堤其位置與型式對其功能之發揮具有關鍵性的影響，本研究係以斷面水工模型試驗來檢討潛堤的最佳斷面亦即探討斷面因子對波動特性之影響情況，至於設置位置應以平面水工模型試配合現地現況來決定。

基於以上各章對於潛堤的基本特性之討論，可得到堤頂寬度、堤頂深度與水深比、斜面型態、透水性等皆對潛堤之波動具有影響性。其中更以週期特性對各影響因子的影響形更顯著。由本計畫之現場調查資料顯示，進入港內呈現長週期的150秒左右變動，外港港池呈現波浪週期約20秒，但平均水位亦成長週期變動。因此由本研究得到的結果，潛堤堤頂寬度應以超過四分之一波長為佳，堤頂深度與水深比應小於0.1，採透水性結構物以此佈置應可消滅2成左右之波能，稍具達到保護南濱海岸之目的，另潛堤佈置之位置與長度應由平面水工模型試驗來決定。

第六章 結 論

本文利用物理模型試驗，來檢核緩坡方程式運用到潛堤前後波動特性之可行性與精確性，進一步以試驗資料討論波浪通過各式潛堤的物理現象，和影響線性數值計算理論精確度的堤後波浪之非線性特性做一檢討，以及利用一不規則波轉換函數驗證應用頻譜分割法來計算各成份波透過率之可行性得到以下結論：

1. 波浪經過突變地形時，在固定波浪條件下，反射與透射機構由堤上水深與堤寬決定，水深變化大者造成的堤前反射率的平均值就愈大。另外，波浪通過潛堤時在堤上的淺水區域內產生反射機構，淺水區域的距離與波長則影響反射波的相位角，入射波與反射波相位角的差值若使得反射波與入射波在堤前產生相疊加的效果時，反射率就會出現相對極大值，透過率就小；反之，反射波與入射波產生相減時反射率則出現相對極小值，透過率就大。
2. 當波浪通過透水潛堤時由於堤體內產生紊流與摩擦現象會損失波浪能量，故透過率較小，這與試驗結果是相吻合的。透水堤的反射率較不透水堤為小，故透水堤的透過率應比不透水堤為大，但由實驗結果卻顯示透水堤的透過率卻比不透水堤為小，表示在相同潛堤形狀的條件下，透水堤有消散較多波浪能量的作用。
3. 緩坡方程式應用於潛堤堤上相對水深為0.1以下之數值計算的結果，無論從反射率、透過率、波高比值與波形比對，與試驗結果是否不甚吻合，即緩坡方程式無法精確與可信的去預測波浪通過潛堤時之波動特性。此可能的原因為相對水深過小，或地形突變已不符合緩坡方程式的基本假設，或是在數值處技巧上有缺失。
4. 潛堤寬度大小對反射率影響甚微，但對通過潛堤後之波形則造成某種不同程度的擾動。
5. 潛堤之斜面傾斜角度愈大，反射率愈大，潛堤之透水性會損失較大的波浪能量。通常，潛堤上方之水深愈小則透過率愈小，則潛堤之功效愈顯著。

6. 波浪通過潛堤後如堤上相對水深較大時，其非線性量之出現會受潛堤堤長之影響，堤長愈長則非線性量愈大。堤上相對水深較小達成堤上為淺水波條件時，在高頻處有第二及第三主頻出現，即有較高階的非線性產生，其非線性量受潛堤堤長之影響較大，一般亦以堤長愈長非線性量愈大。通過潛堤後，離堤愈遠非線性量愈小，而出現另一種形態之波動。
7. 堤寬與堤上水深(B/d_s)之比值大於6、波浪頻率小於0.6Hz時，應用頻譜分割法來計算不規則波中各個成份波之透過率就有較大的誤差。則應用頻譜分割法在計算不規則波通過潛堤之透射率的數值解時，必須考慮波浪非線性效應的影響。

參考文獻

1. Dick, T.M. and Brebner, A., "Solid and Permeable Submerged Breakwaters," *Proc. 11th Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, London, pp. 1141-1158 (1968).
2. Dattatri, J., Raman, H. and Shankar, N.J., "Performance Characteristics of Submerged Breakwaters," *Proc. 16th Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, Hamburg, pp. 2153-2171 (1978).
3. Abdul Khader, M.H. and Rai, S.P., "A Study of Submerged Breakwater," *J. Hydr. Res.*, Vol. 18, pp. 113-121 (1980).
4. Baba, M., "Computation of Wave Transmission over a Shore Protecting Submerged Breakwater," *Ocean Eng.*, Vol. 13, No. 3, pp. 227-237 (1986).
5. Miles, J., "Surface-Wave Scattering Matrix for a Shelf," *J. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 755-767 (1967).
6. Mei, C.C. and Black, J.L., "Scattering of Surface Waves by the Rectangular Obstacles in Water of Finite Depth," *J. Fluid Mech.*, Vol. 38, pp. 499-511 (1969).
7. Dalrymple, R.A., Losada, M.A. and Martin, P.A., "Reflection and Transmission from Porous Structures under Oblique Wave Attack," *J. Fluid Mech.*, Vol. 224, pp. 625-644 (1991).
8. Liu, P.L.F., "Damping of Water Waves over Porous Bed," *J. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol. 99, pp. 2263-2271 (1973).
9. Deguchi, I., Sawaragi, T. and Shiratani, H., "Applicability of Non-Linear Darcy Law to the Analysis of Wave Deformation on a Permeable Bed," *Proc. 35th Japanese Conf. on Coastal Eng.*, pp. 487-491 (1988). (In Japanese)
10. Berkhoff, J.C.W., "Computation of Combined Refraction-Diffraction," *Proc. 13th Conf. on Coastal Eng.*, Vancouver, ASCE, Vol. 1, pp. 705-720 (1972).
11. Radder, A.C., "On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 95, No. 1, pp. 159-176 (1979).
12. Booij, N., "Gravity Waves on Water with Non-Uniform Depth and Current," *Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Report No. 81-1* (1981).

13. Copeland, G. J. M., "A Practical Alternative to the Mild-Slope Wave Equation," *Coastal Eng.*, Vol. 9, pp. 125-149 (1985).
14. Watanabe, A. and Maruyama, K., "Numerical Modelling of Nearshore Wave Field under Combined Refraction, Diffraction and Breaking," *Coastal Eng. in Japan*, Vol. 29, pp. 19-39 (1986).
15. Rojanakamthorn, S., Isobe, M. and Watanabe, A., "A Mathematical Model of Wave Transformation over a Submerged Breakwater," *Coastal Eng. in Japan*, Vol. 32, No. 2, pp. 209-234 (1989).
16. Massel, S. R., "Harmonic Generation by Wave Propagating over a Submerged Step," *Coastal Eng.*, Vol. 9, pp. 357-380 (1983).
17. Ohya, T. and Nadaoka, K., "Modeling the Transformation of Nonlinear Waves Passing over a Submerged Dike," *Proc. 23rd Internl. Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, Venice, pp. 526-539 (1992).
18. Beji, S. and Battjes, J. A., "Experimental Investigation of Wave Propagation over a Bar," *Coastal Eng.*, Vol. 19, pp. 151-162 (1993).
19. Vincent, C. L. and Briggs, M. J., "Refraction-Diffraction of Irregular Waves over a Mound," *J. Waterways, Ports, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 115, No. 2, pp. 269-284 (1989).
20. Isobe, M., "A Parabolic Equation Model for Transformation of Irregular Waves due to Refraction, Diffraction and Breaking," *Coastal Eng. in Japan*, Vol. 30, No. 1, pp. 33-47 (1987).
21. Izumiya, T., "Extension of Mild Slope Equation for Waves Propagating over a Permeable Submerged Breakwater," *Proc. 22nd Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp. 306-315 (1990).
22. Panchang, V. G., Wei, G., Pearce, B. R., and Briggs, M. J., "Numerical Simulation of Irregular Wave Propagation over Shoal," *J. Waterways, Ports, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 116, No. 3, pp. 324-340 (1990).

23. Suh, K. D. and Dalrymple, R. A., "Application of Angular Spectrum Model to Simulation of Irregular Wave Propagation," *J. Waterways, Ports, Coastal and Ocean Eng.* Vol. 119, No. 5, pp. 505-520 (1993).
24. Tanimoto, K. and Kobune, K., "Computation of Waves in a Harbor Basin by a Numerical Wave Analysis Method," *Proc. 22nd Japanese Conf. on Coastal Eng.*, JSCE, pp. 249-253 (1975).
25. Engquist, B. and Majda, A., "Absorbing Boundary Conditions for the Numerical Simulation of Waves," *Math. Comput.*, Vol. 31, pp. 629-651 (1977).
26. Mansard, E. P. D. and Funke, E. R., "The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method," *Proc. 17th Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp. 154-172 (1980).
27. Goda, Y., "Travelling Secondary Wave Crests in Wave Channels," *Rep. of Portland Harbour Res. Inst.*, No. 13, pp. 32-38 (1967).
28. Gu, Z. and Wang, H., "Numerical Modeling for Wave Energy Dissipation within Porous Submerged Breakwaters of Irregular Cross Section," *Proc. 23rd Internl. Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, Venice, Italy, pp. 595-596 (1992).

附

圖

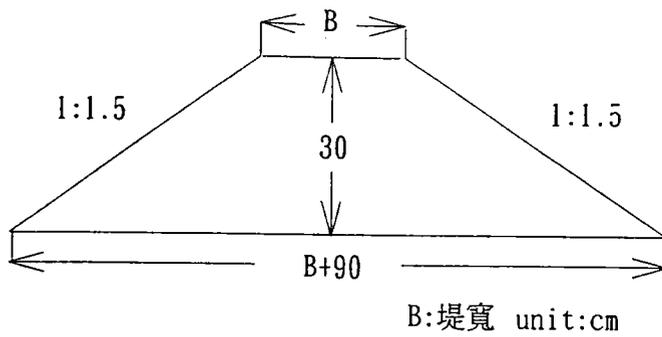


圖 3-1 不透水式等腰梯形潛堤示意圖。B=200cm、100cm、5cm。

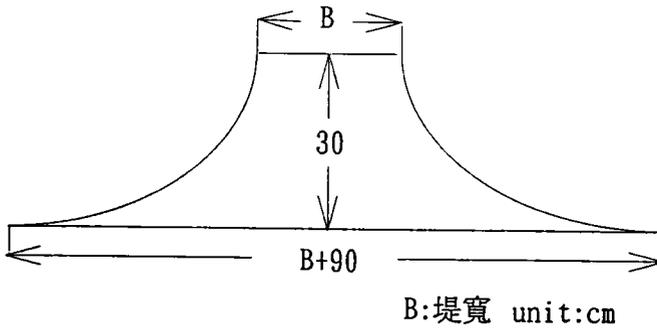


圖 3-2 不透水式邊坡曲面形潛堤示意圖。B=200cm、100cm、5cm。

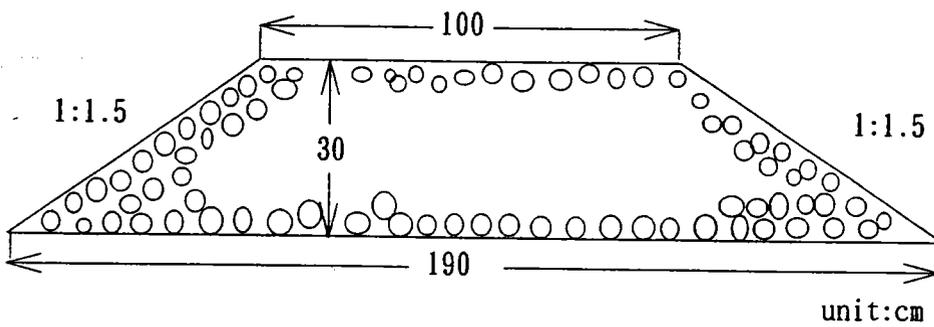


圖 3-3 透水式等腰梯形潛堤示意圖。

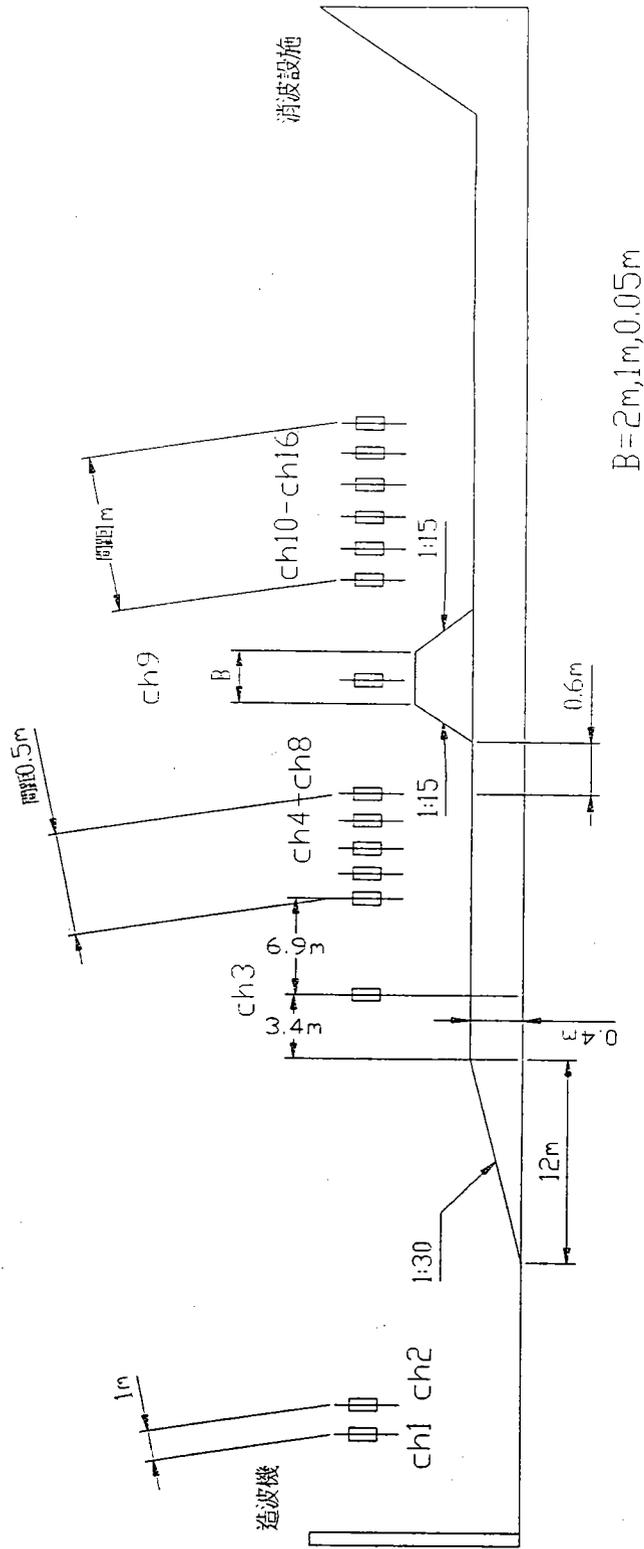


圖 3-4 水平底床佈置圖。

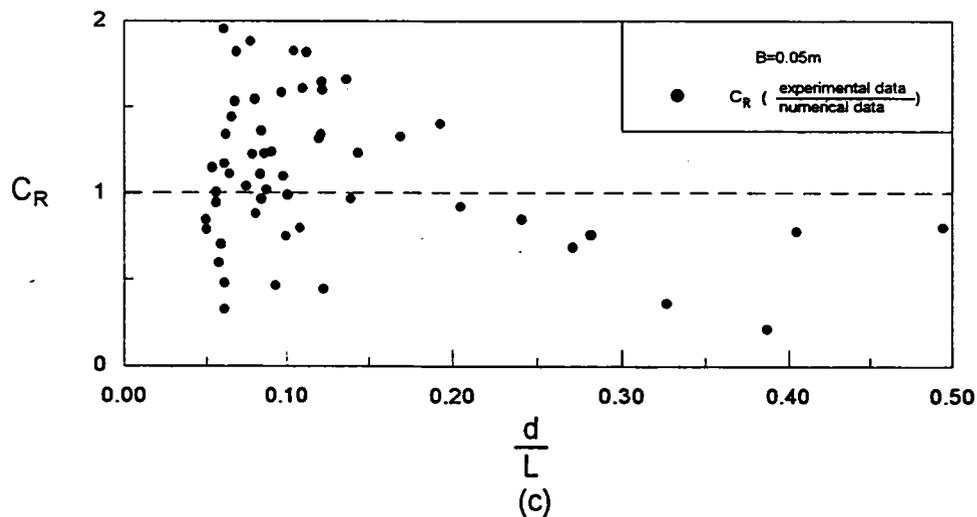
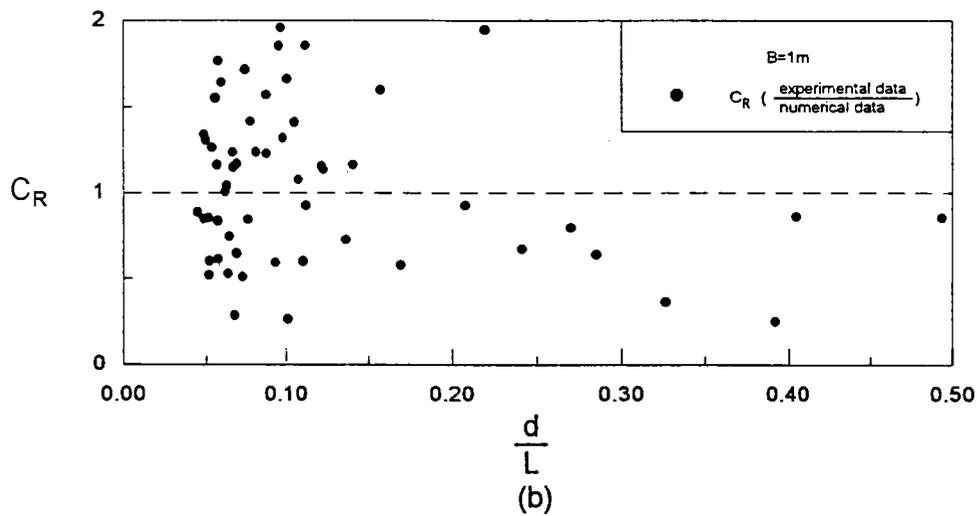
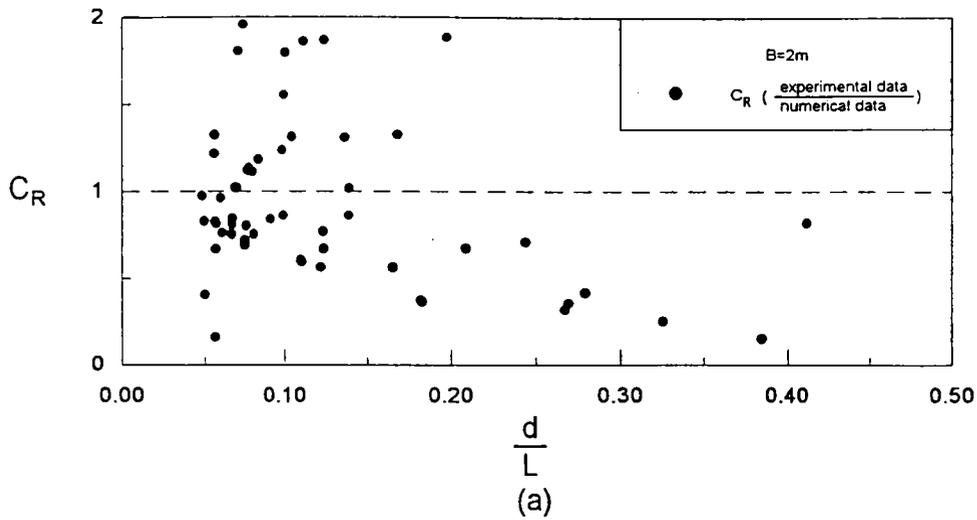


圖 4-1 不同堤寬的試驗值反射率與數值解反射率之比值和堤前相對水深之關係圖。(等腰梯形潛堤)。

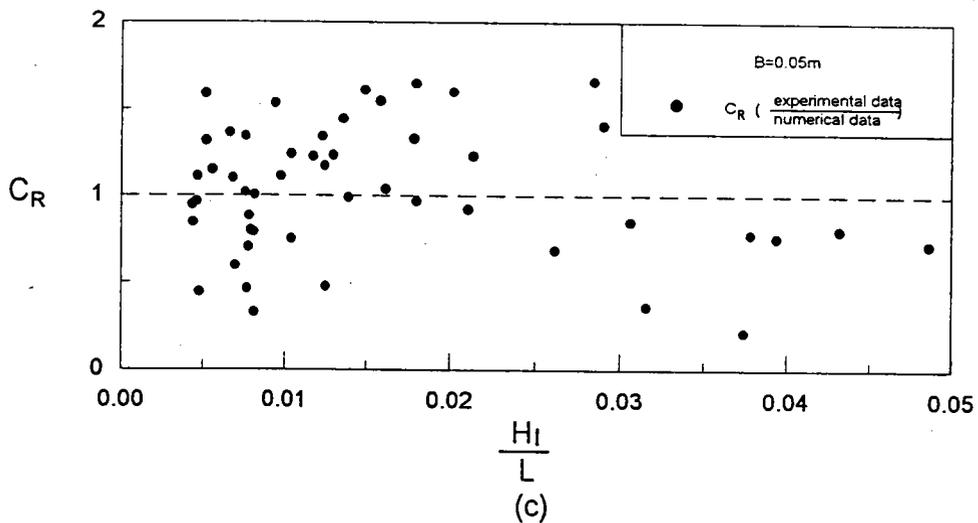
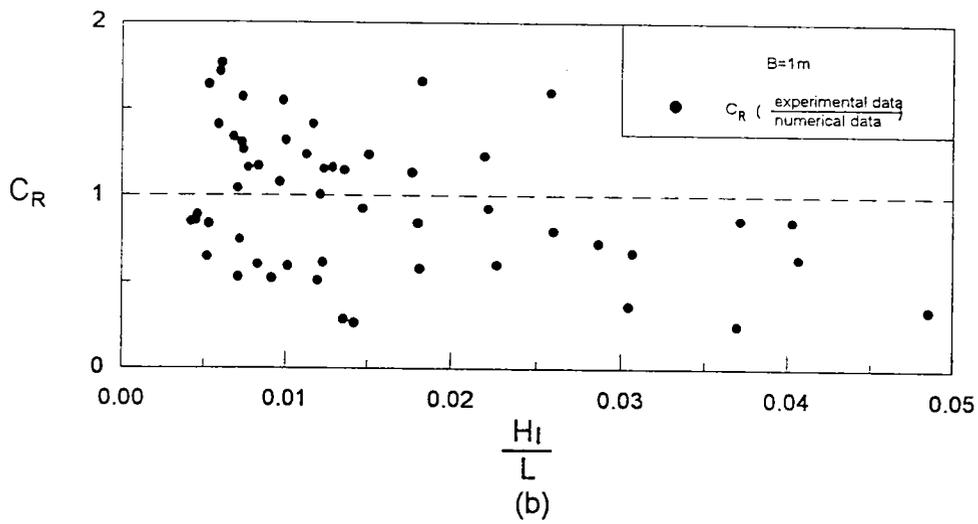
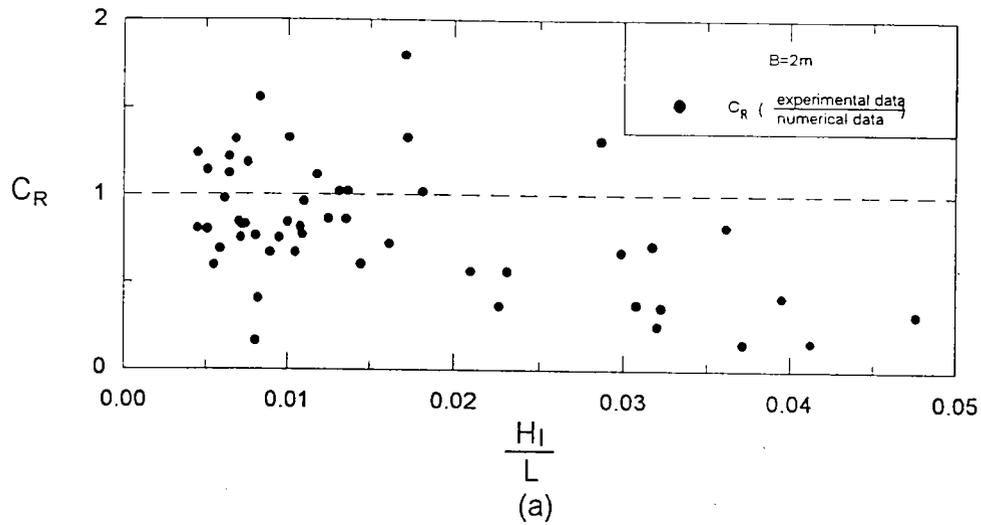


圖 4-2 不同堤寬之試驗值反射率與數值解反射率之比值與入射波浪尖銳度之關係圖。(等腰梯形潛堤)。

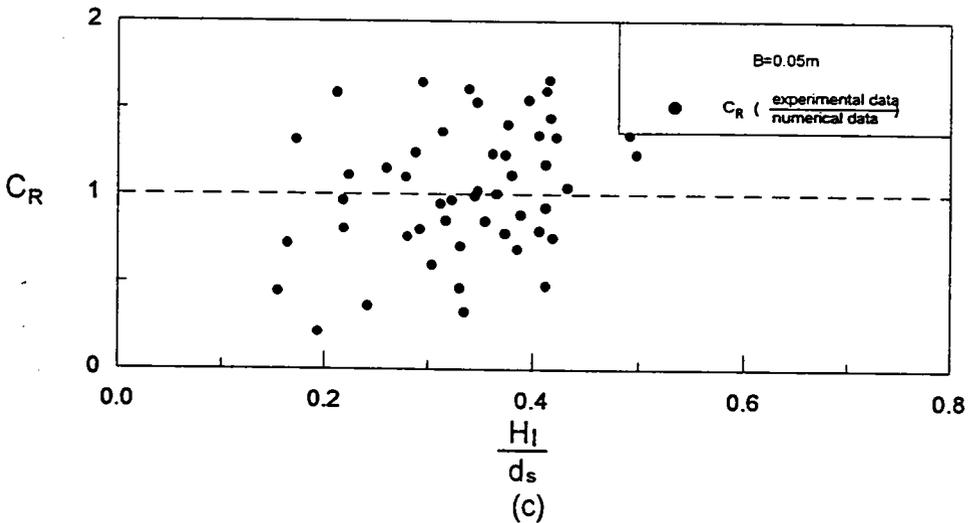
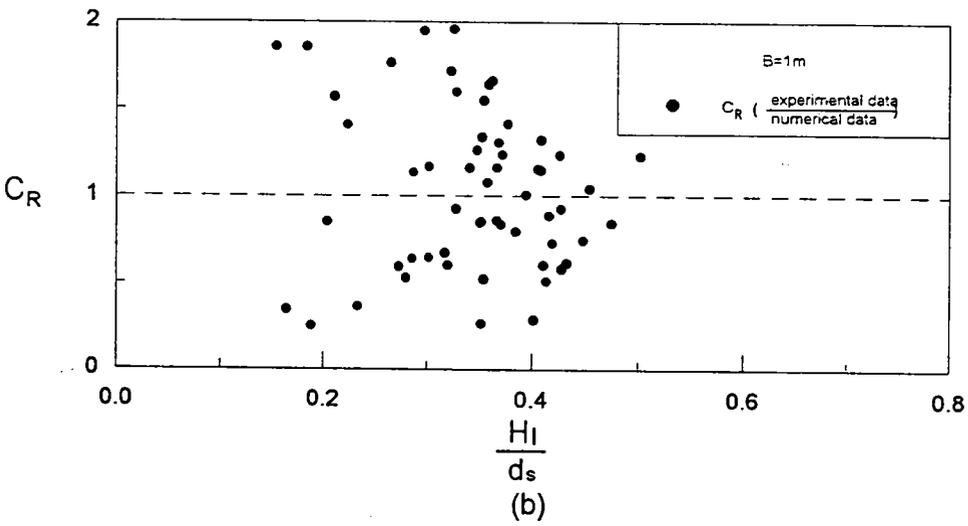
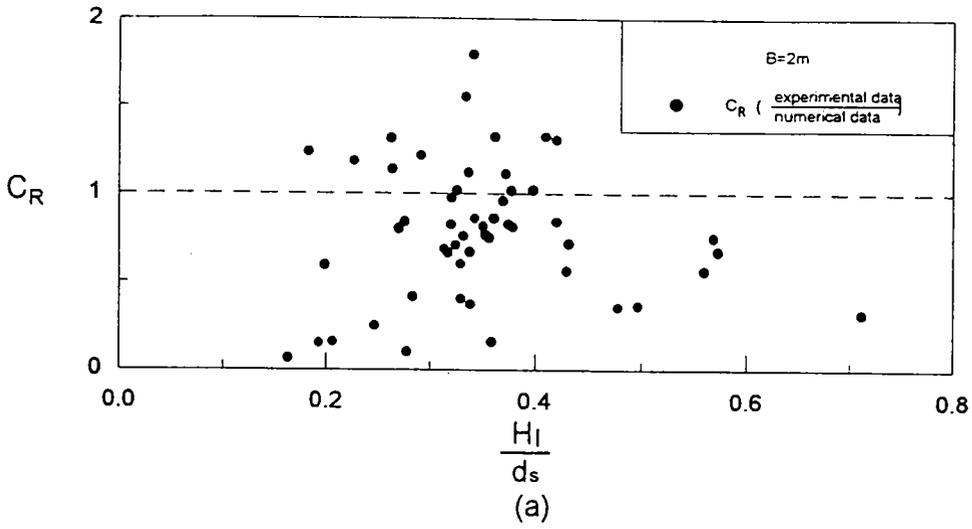


圖 4-3 不同堤寬之試驗值反射率與數值解反射率之比值與堤上相對波高之關係圖。(等腰梯形潛堤)。

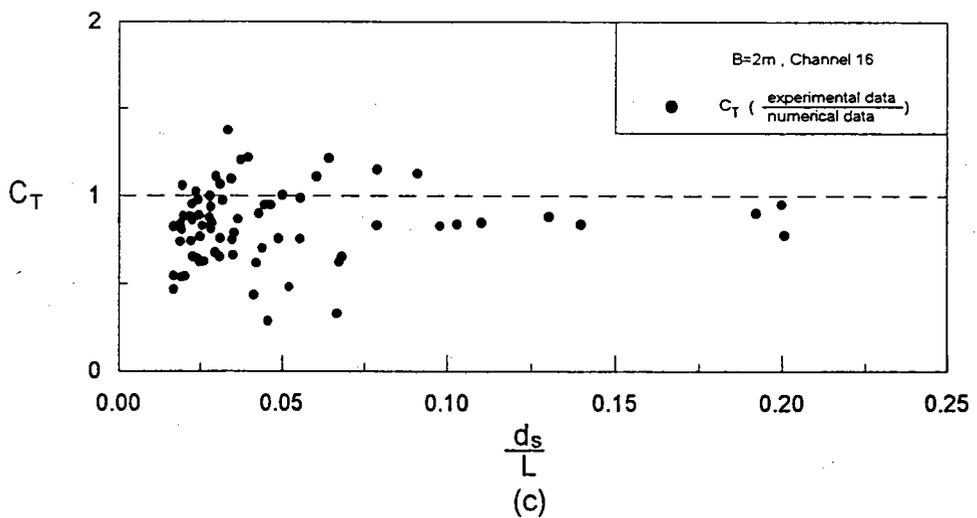
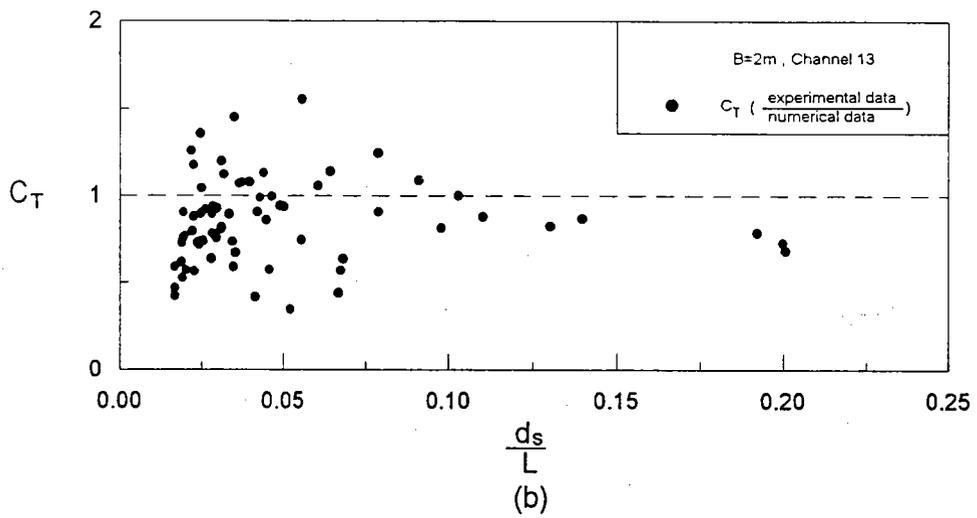
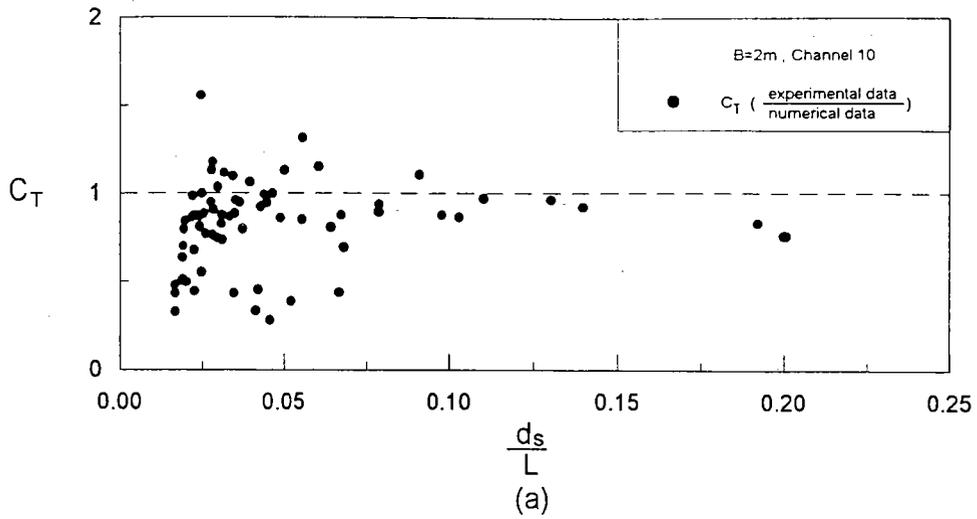


圖 4-4 等腰梯形潛堤、堤寬2公尺之堤後不同位置的試驗透過率與數值解透過率比值和潛堤上水深與入射波長比之關係圖。

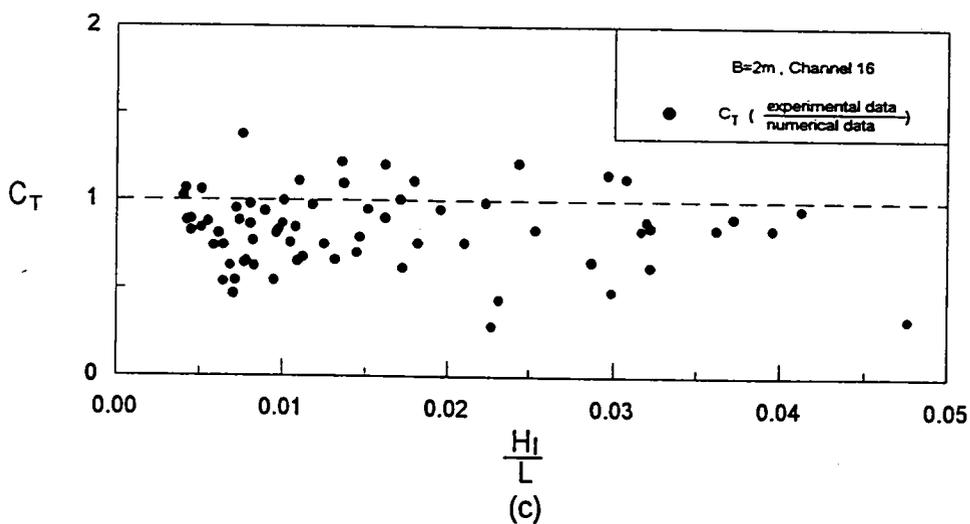
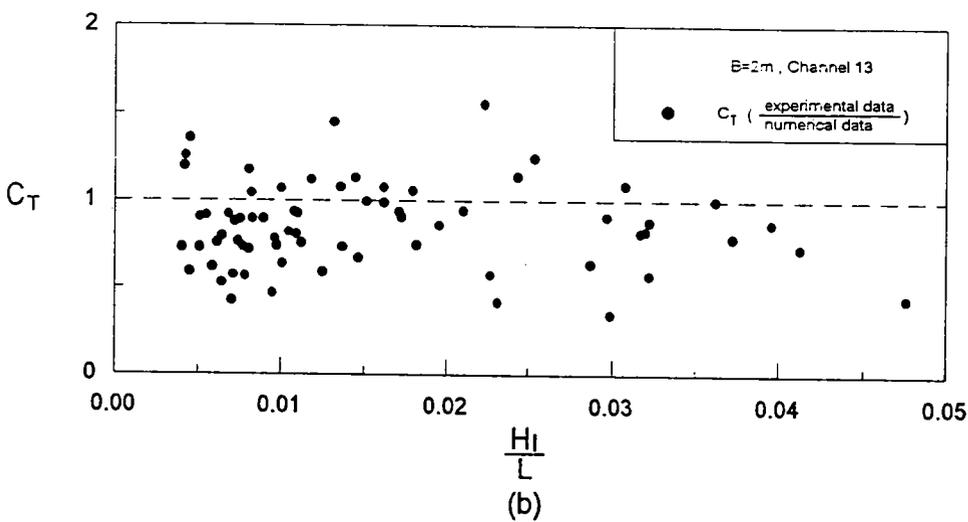
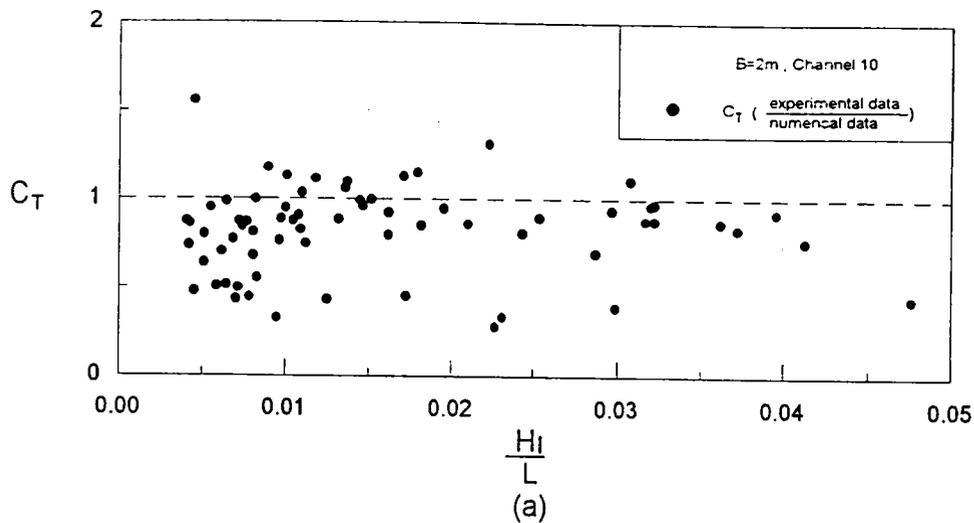


圖 4-5 等腰梯形潛堤、堤寬2公尺之堤後不同位置的試驗透過率與數值解透過率比值和入射波浪尖銳度之關係圖。

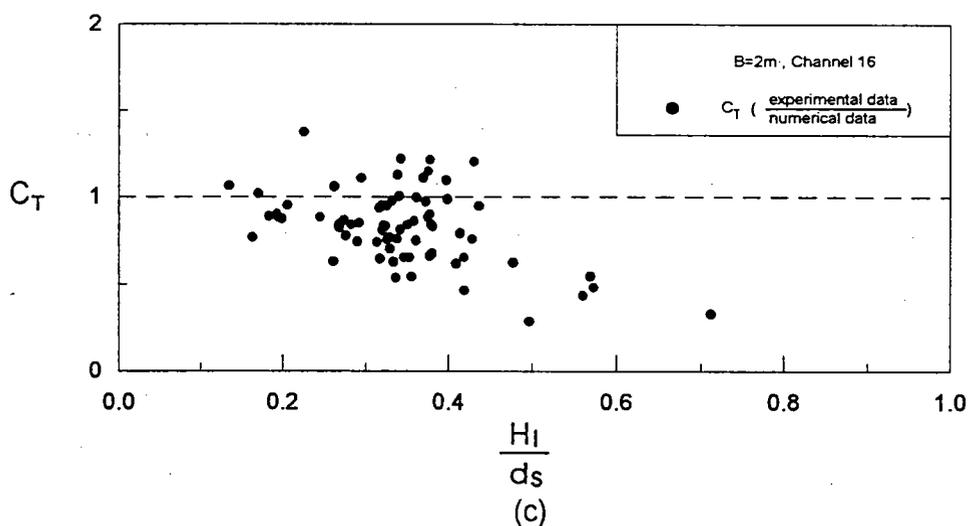
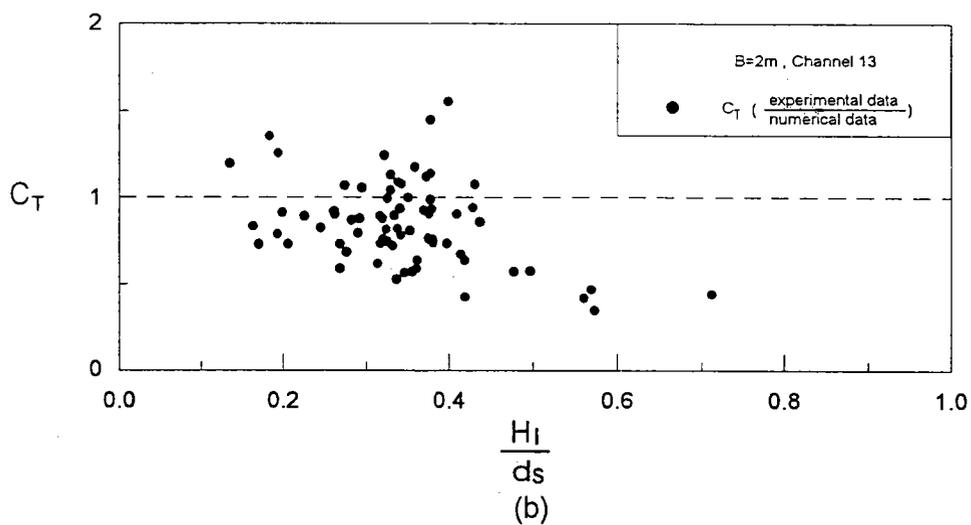
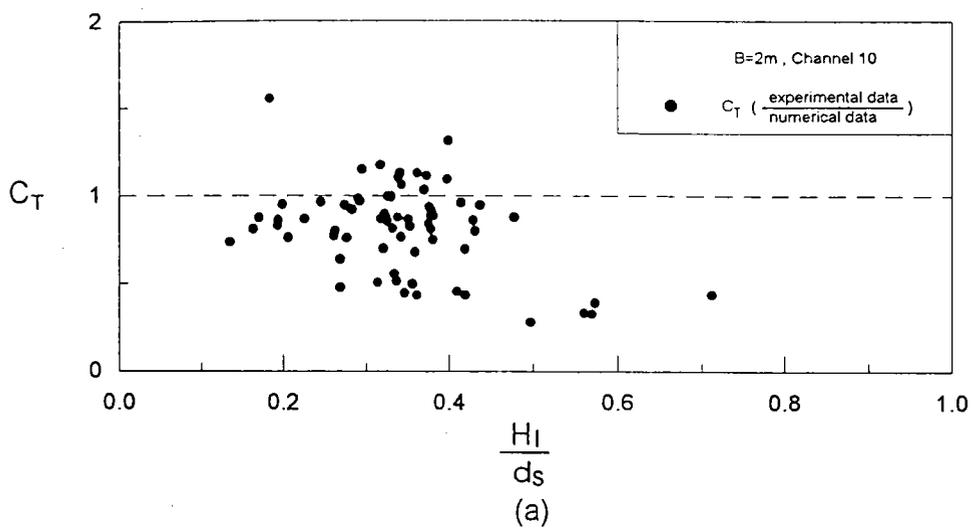


圖 4-6 等腰梯形潛堤、堤寬2公尺之堤後不同位置的試驗透過率與數值解透過率比值和堤上相對波高之關係圖。

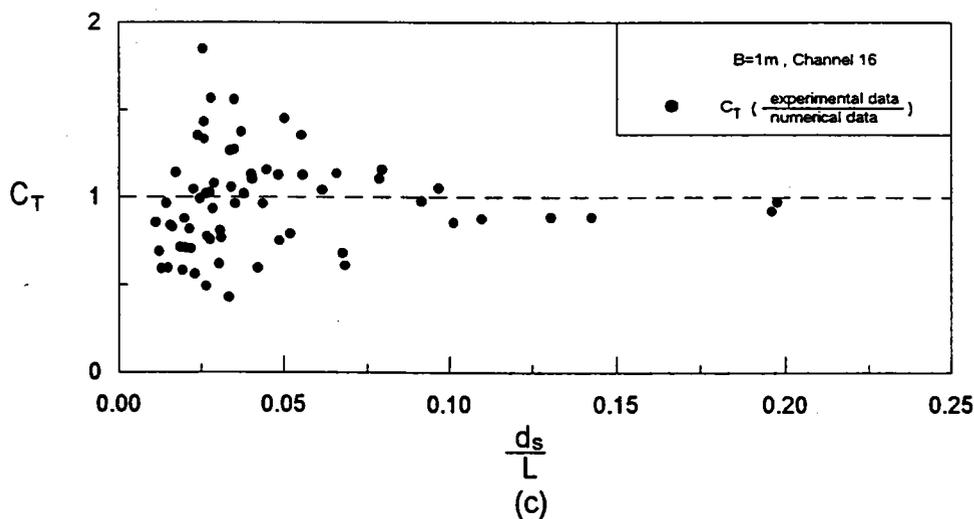
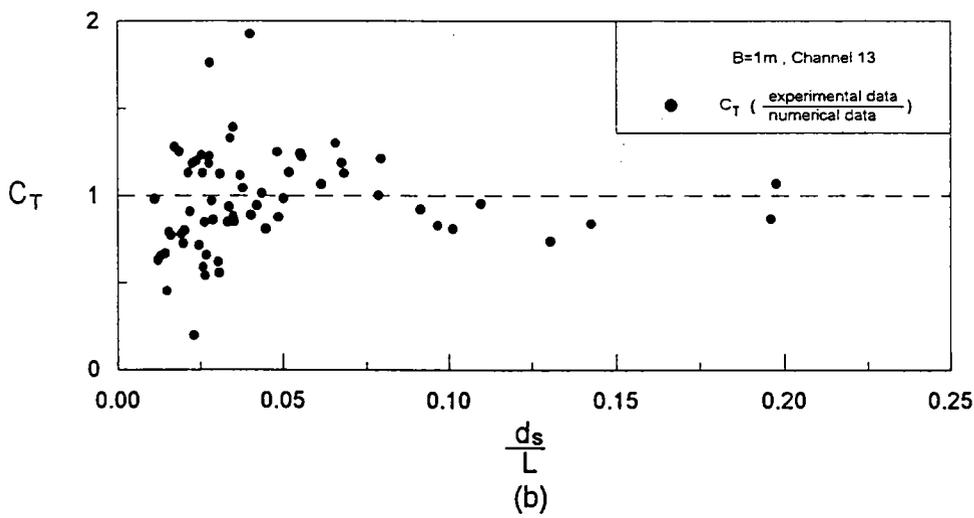
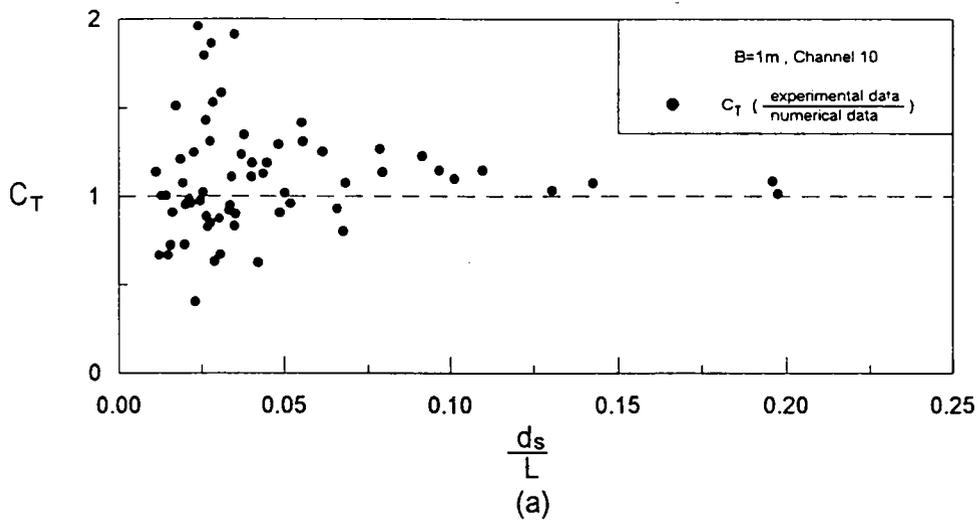


圖 4-7 等腰梯形潛堤、堤寬1公尺之堤後不同位置的試驗透過率與數值解透過率比值和潛堤上水深與入射波長比之關係圖。

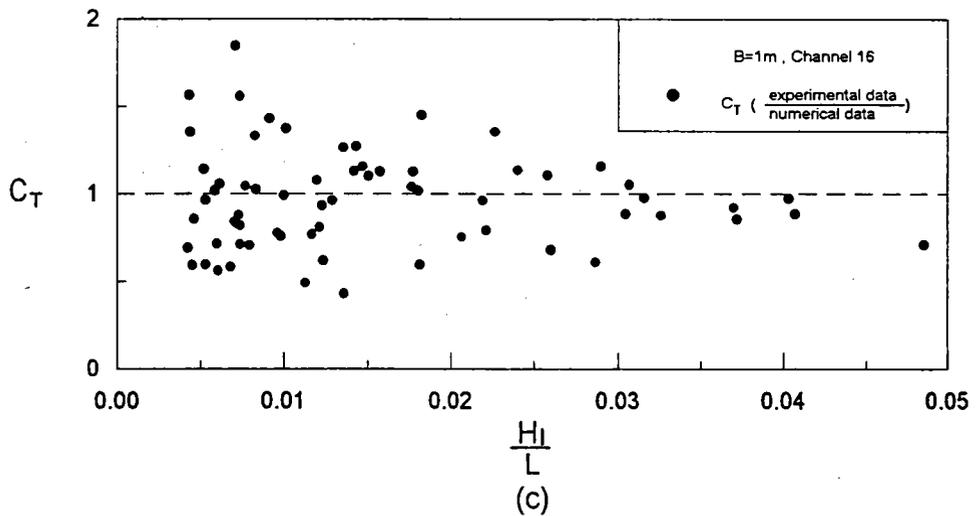
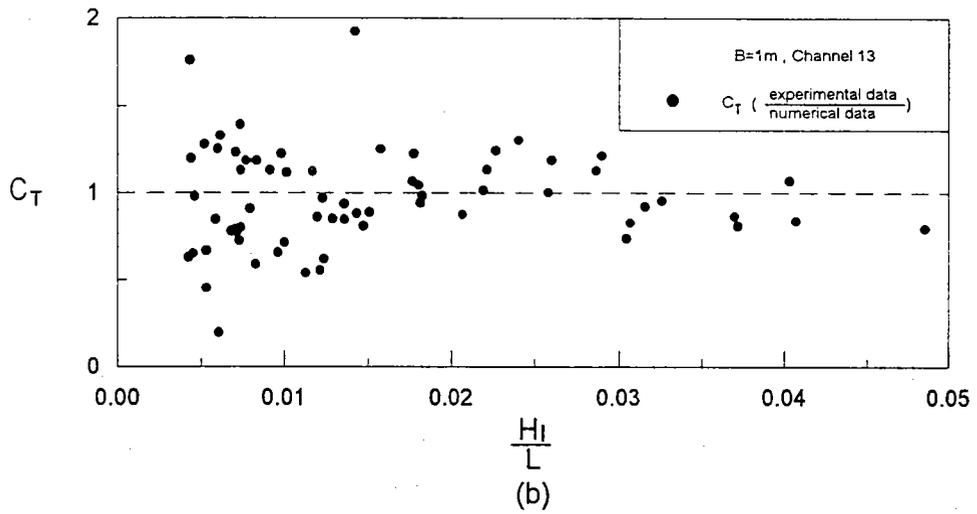
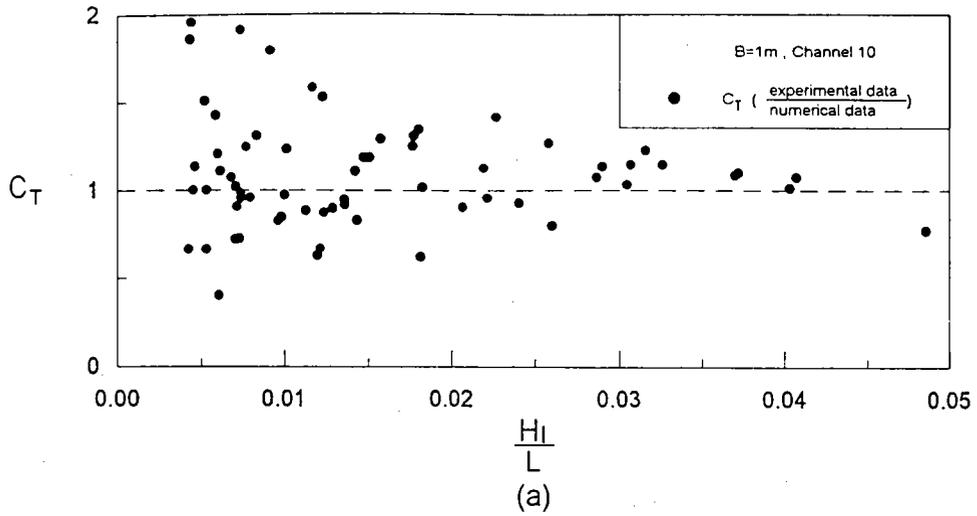


圖 4-8 等腰梯形潛堤、堤寬1公尺之堤後不同位置的試驗透過率與數值解透過率比值和入射波浪尖銳度之關係圖。

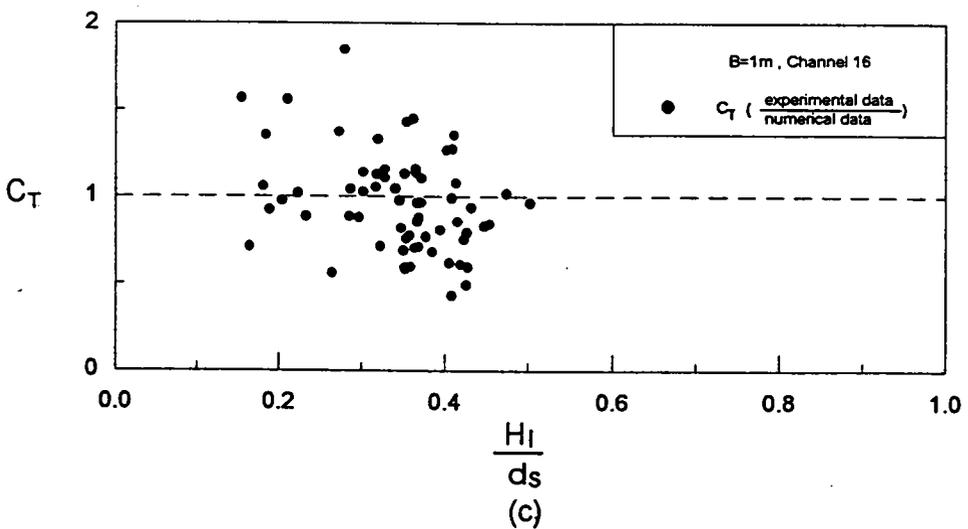
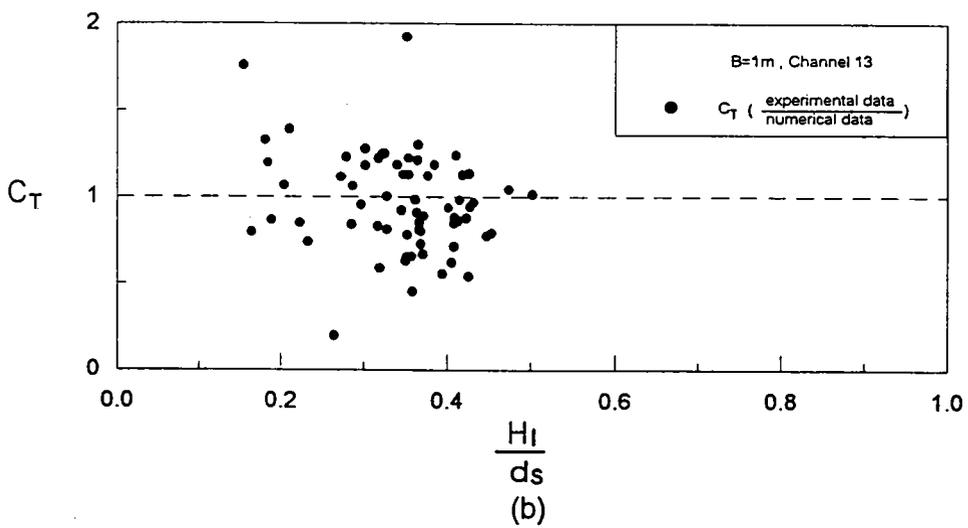
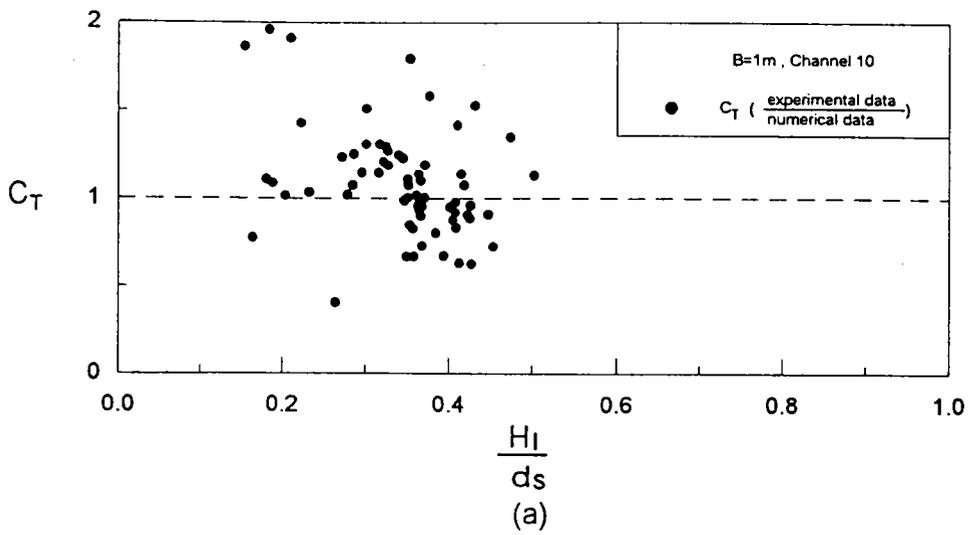


圖 4-9 等腰梯形潛堤、堤寬1公尺之堤後不同位置的試驗透過率與數值解透過率比值和堤上相對波高的關係圖。

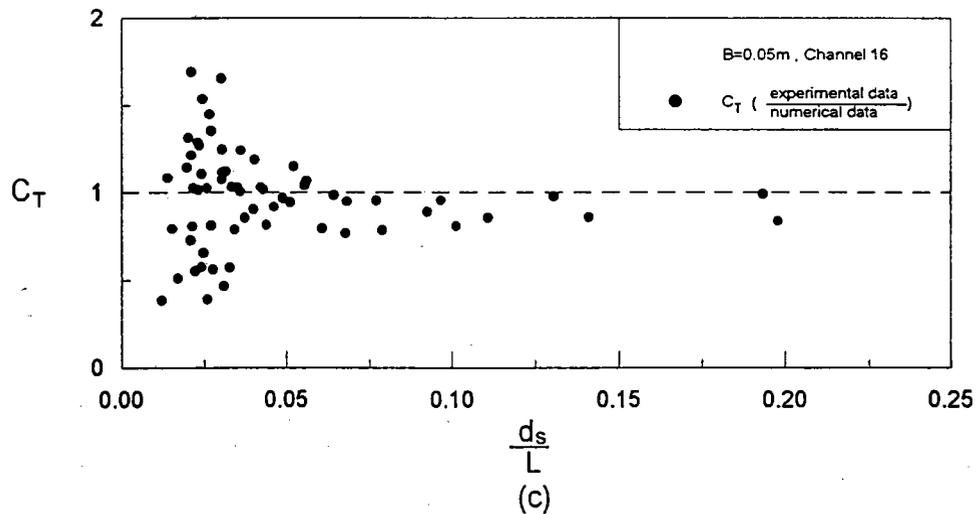
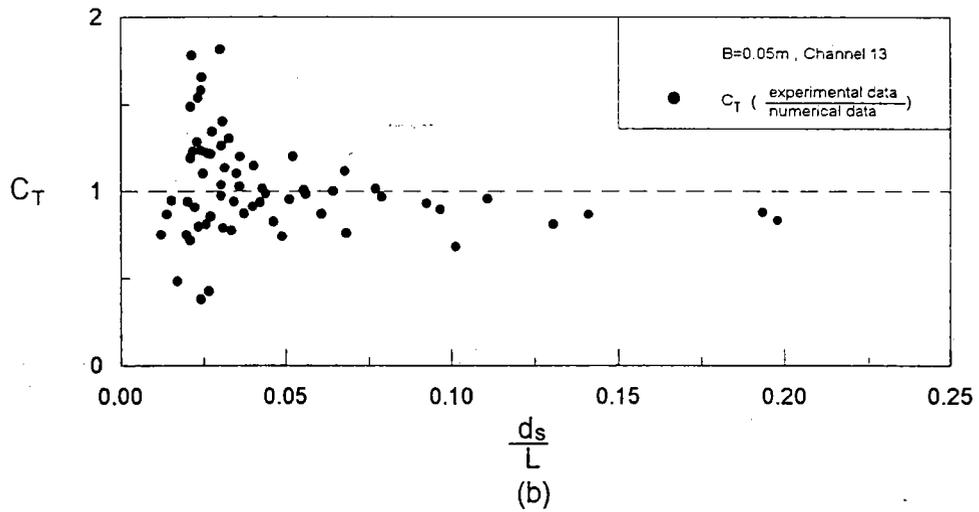
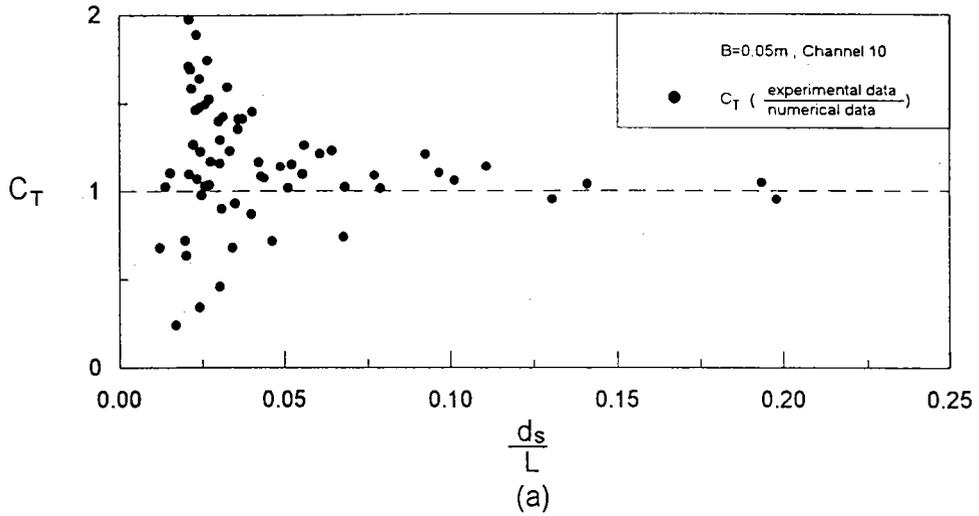


圖 4-10 等腰梯形潛堤、堤寬0.05公尺之堤後不同位置的試驗透過率與數值解透過率比值和潛堤上相對水深與入射波長比之關係圖。

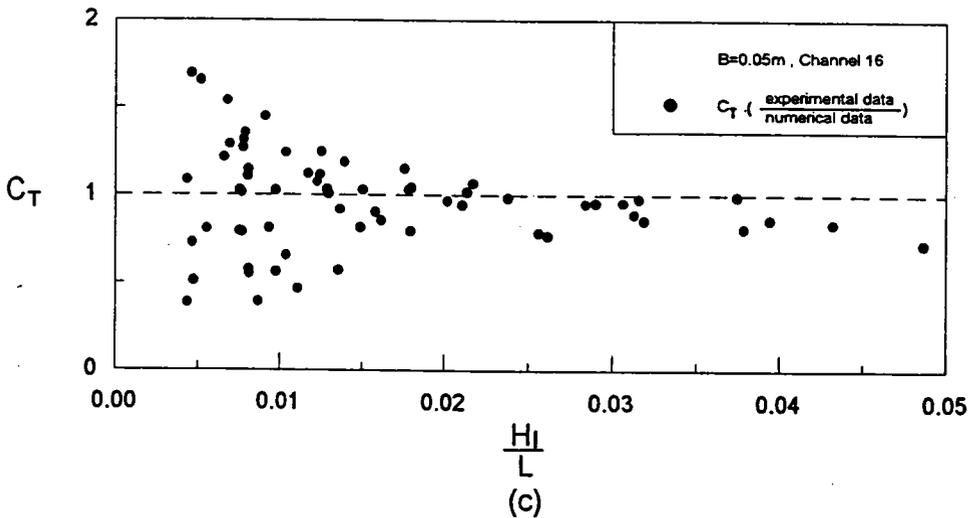
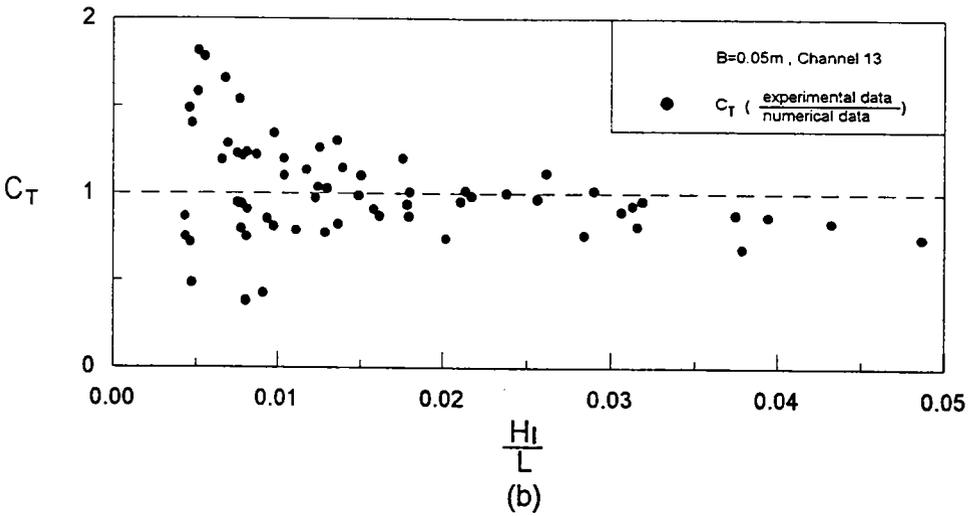
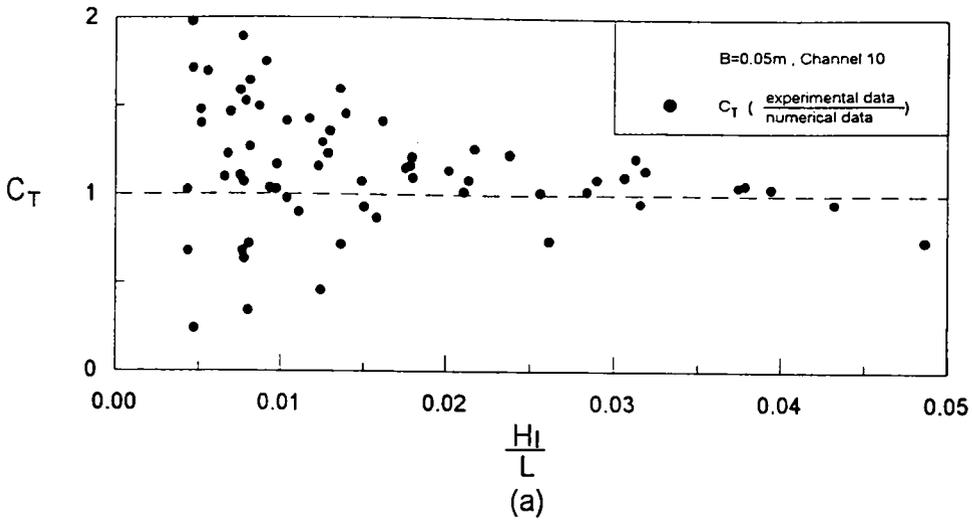


圖 4-11 等腰梯形潛堤、堤寬0.05公尺之堤後不同位置的試驗透過率與數值解透過率比值和入射波浪尖銳度之關係圖。

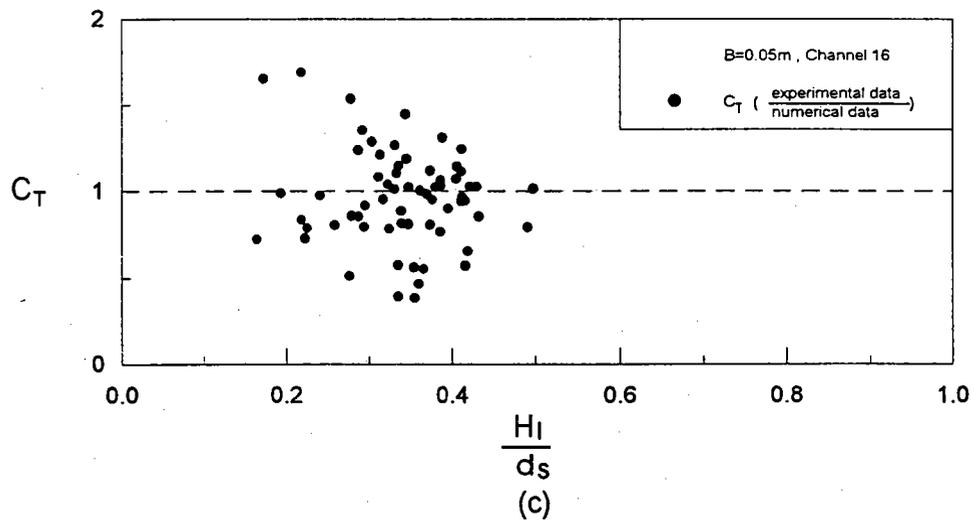
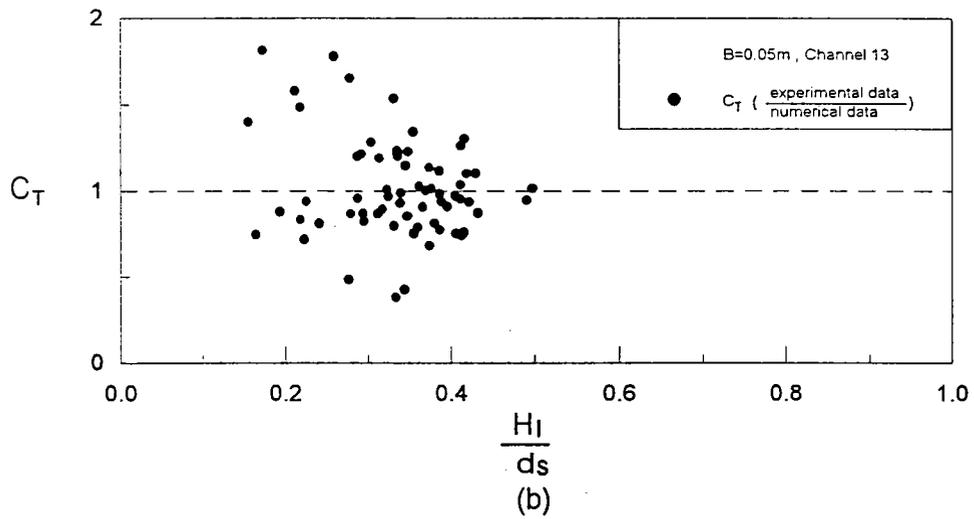
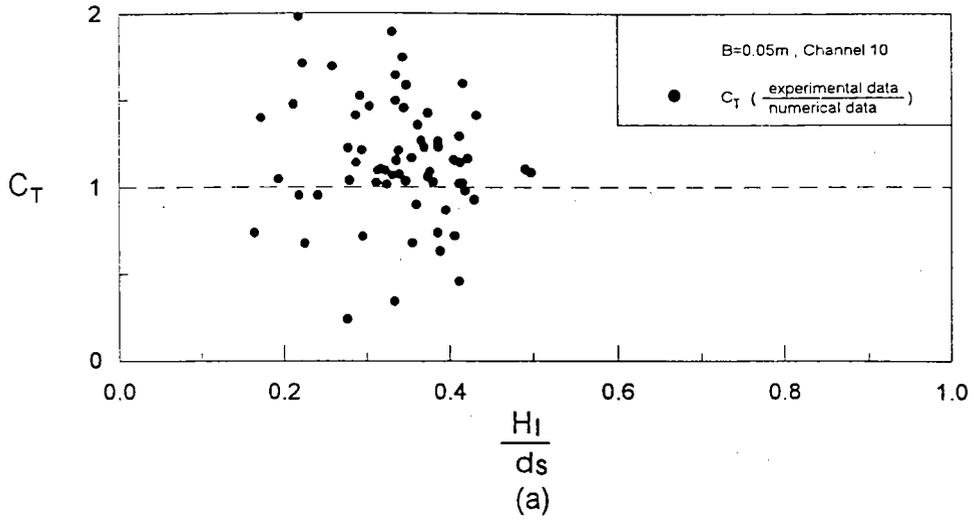


圖 4-12 等腰梯形潛堤、堤寬0.05公尺之堤後不同位置的試驗透過率與數值解透過率比值和堤上相對波高之關係圖。

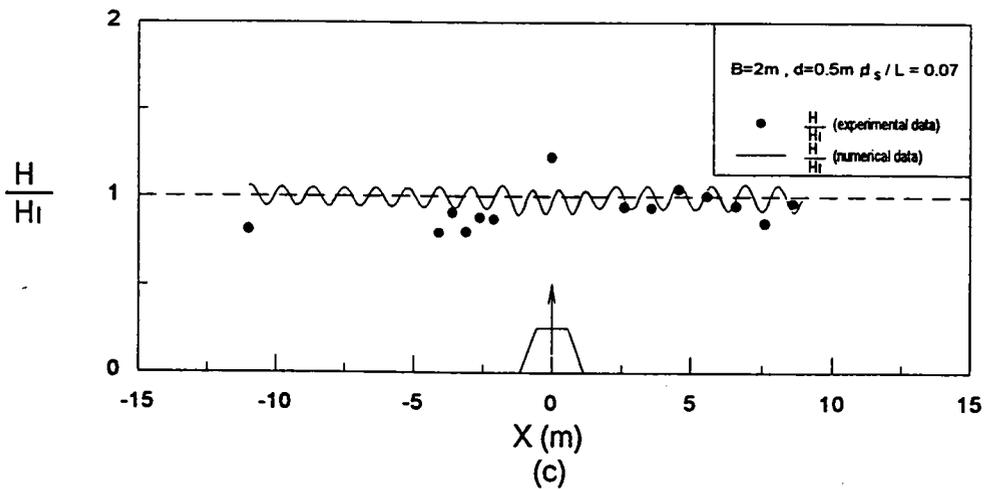
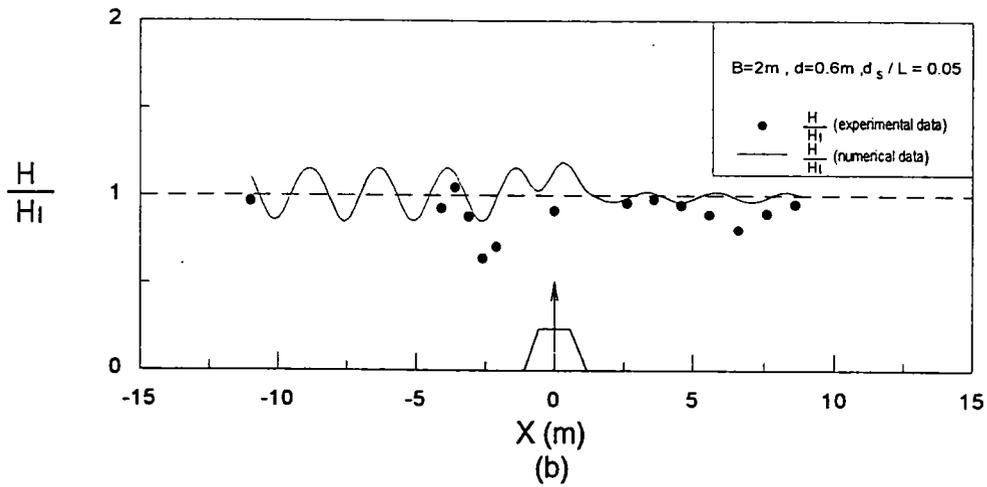
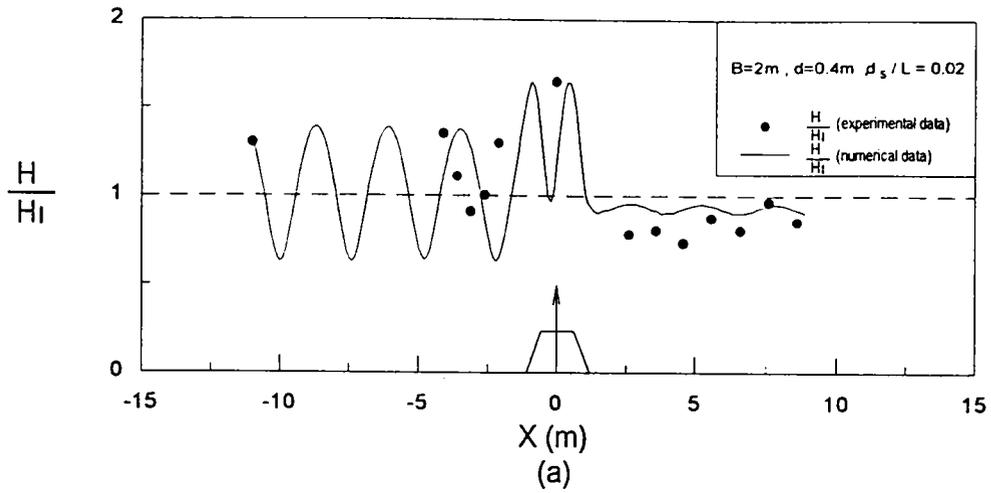


圖 4-13 堤寬2公尺不同位置之數值解與試驗值的當地波高與入射波高比值的比較關係圖。(等腰梯形潛堤)

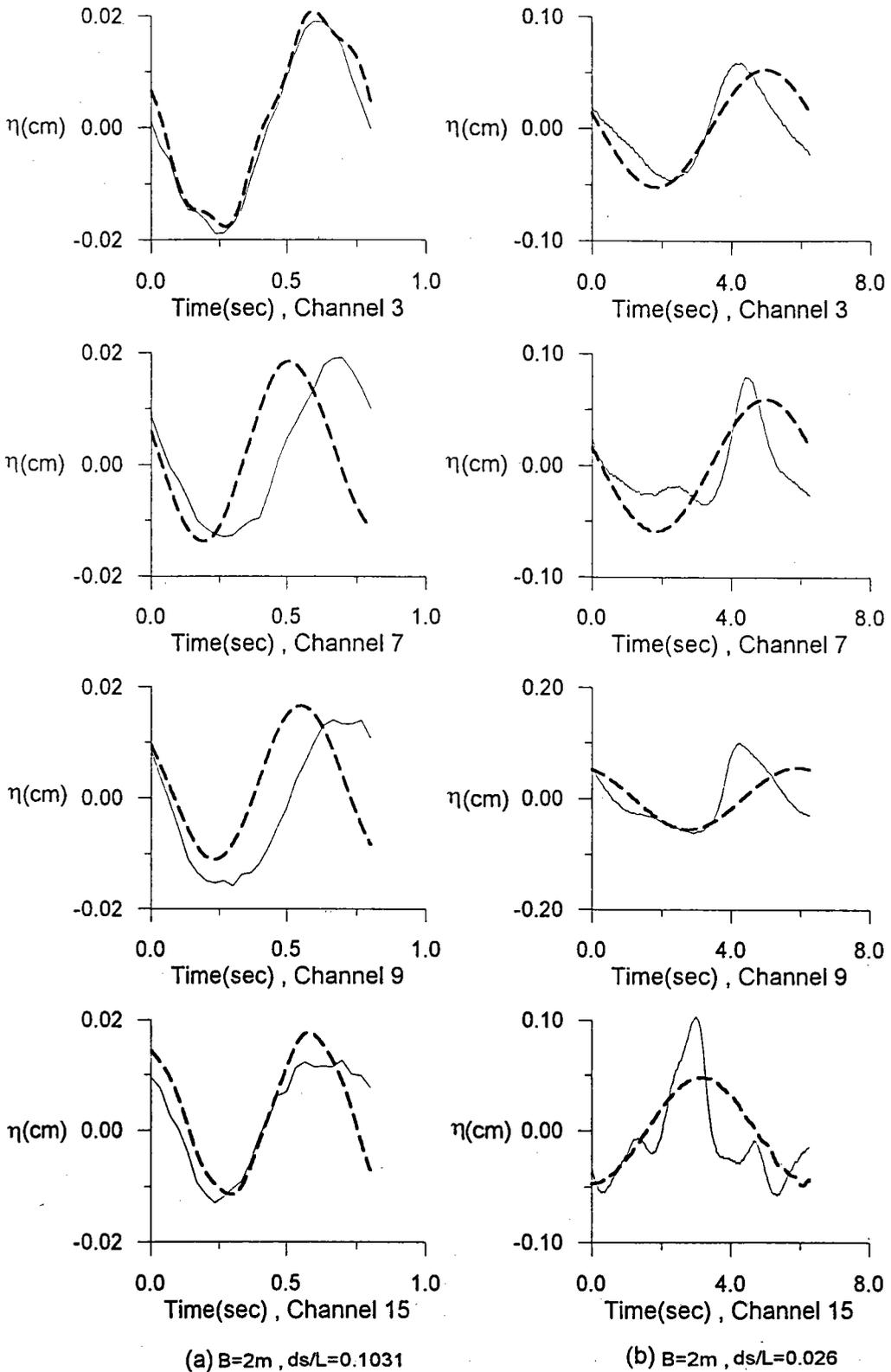


圖 4-14 不同量測點之不同相對水深時潛堤前與潛堤後之數值解波形與實測波形之比較圖。堤寬2公尺、-----數值解、——試驗值。

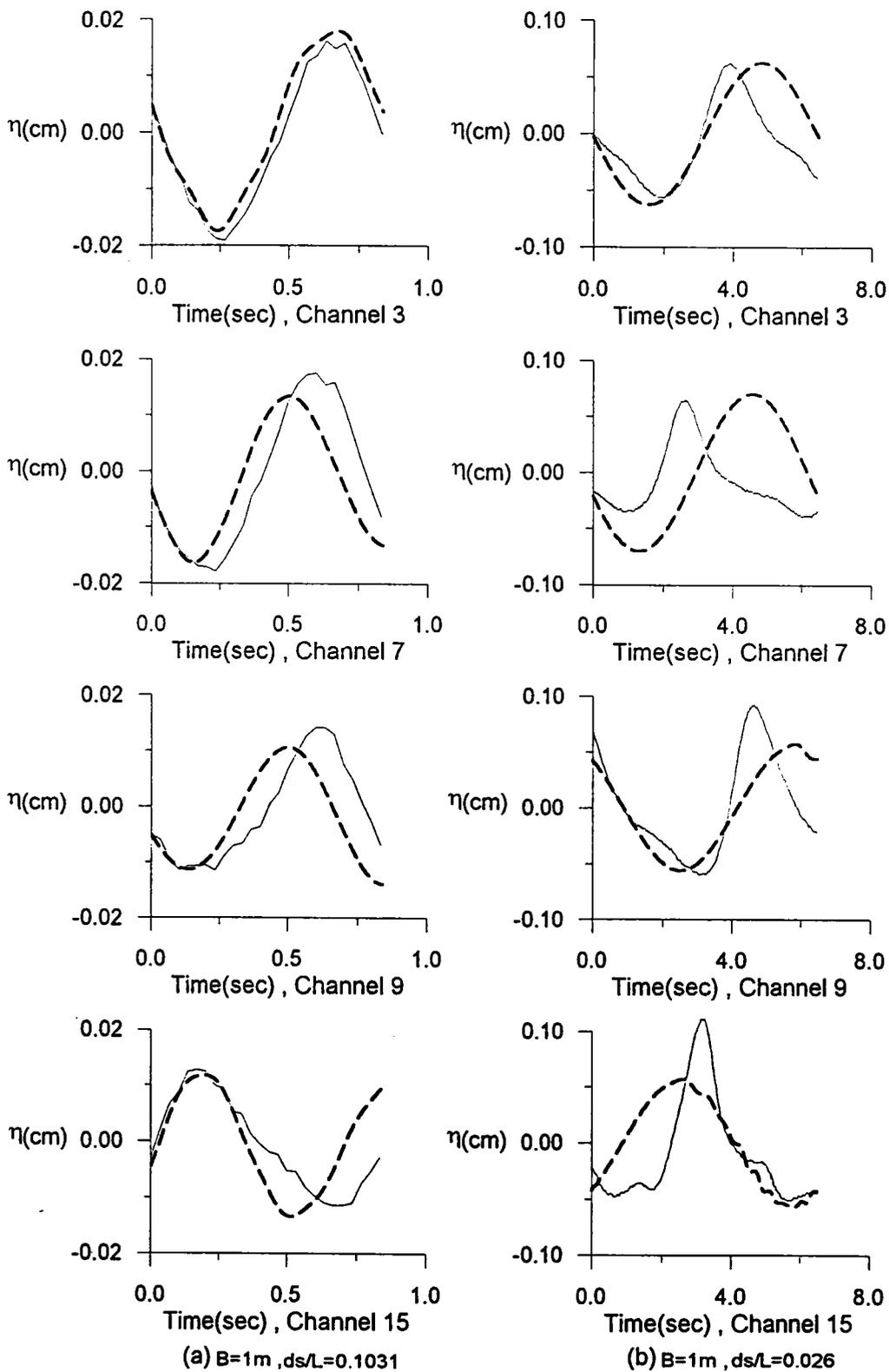


圖 4-15 不同量測點之不同相對水深時潛堤前與潛堤後之數值解波形與實測波形之比較圖。堤寬1公尺、-----數值解、——試驗值。

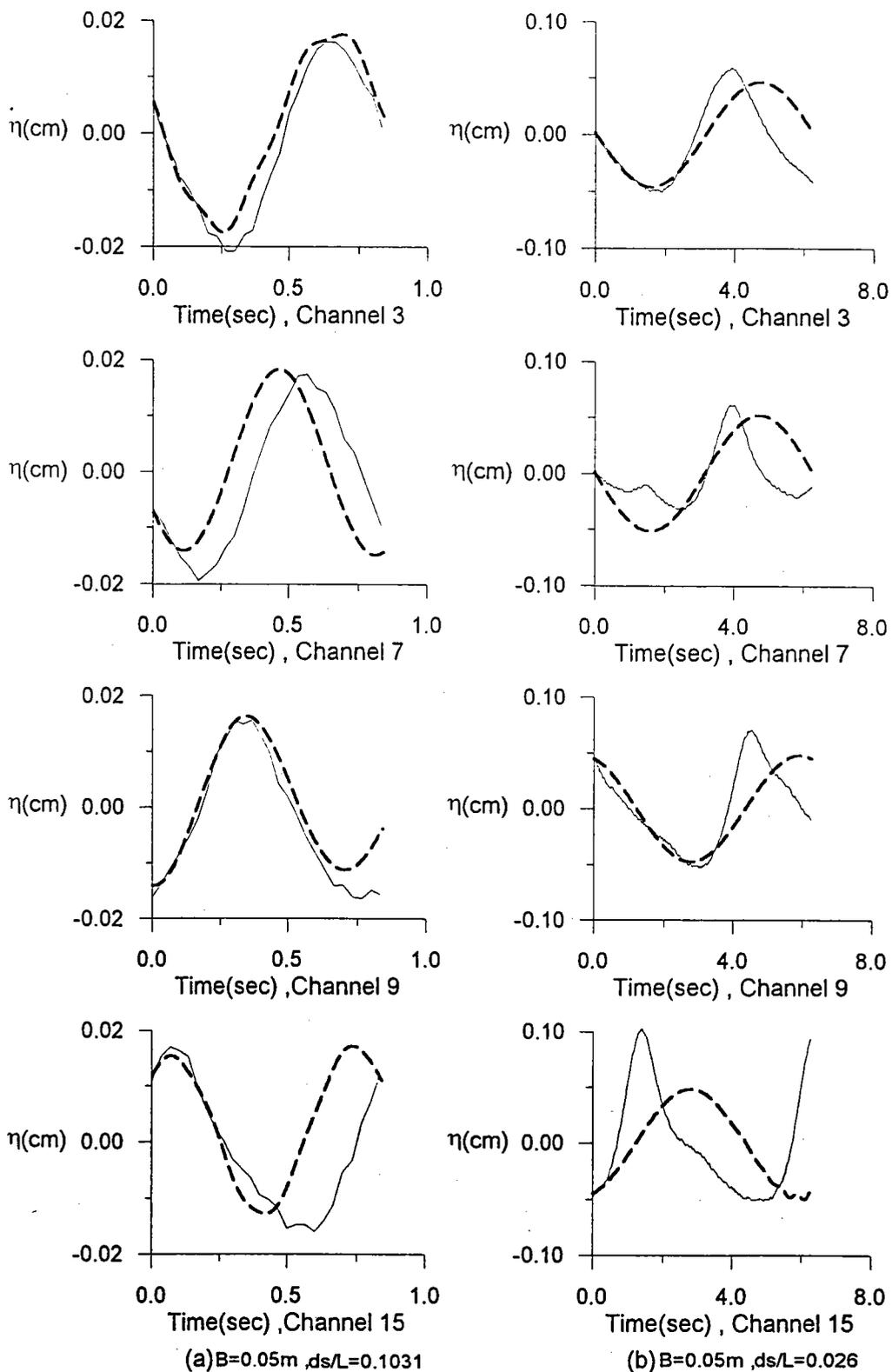


圖 4-16 不同量測點之不同相對水深時潛堤前與潛堤後之數值解波形與實測波形之比較圖。堤寬0.05公尺、-----數值解、——試驗值。

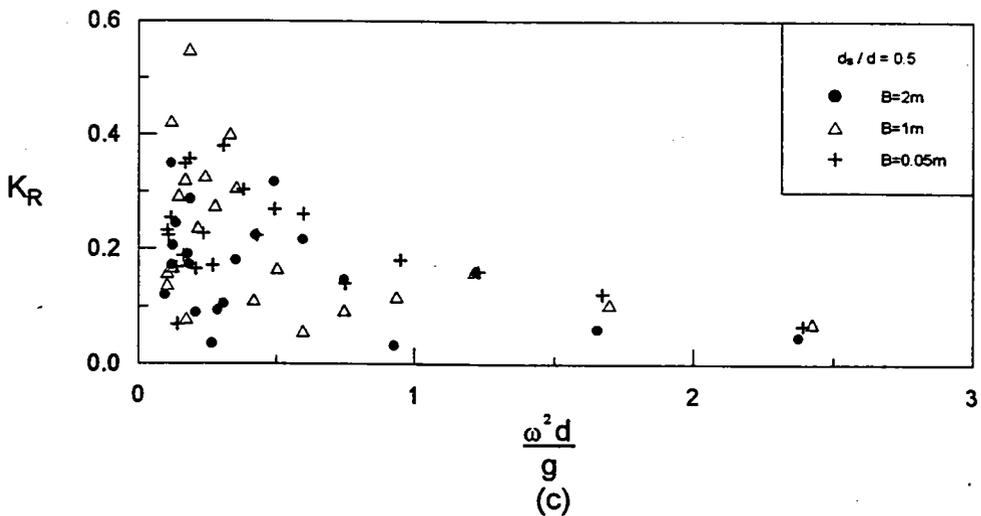
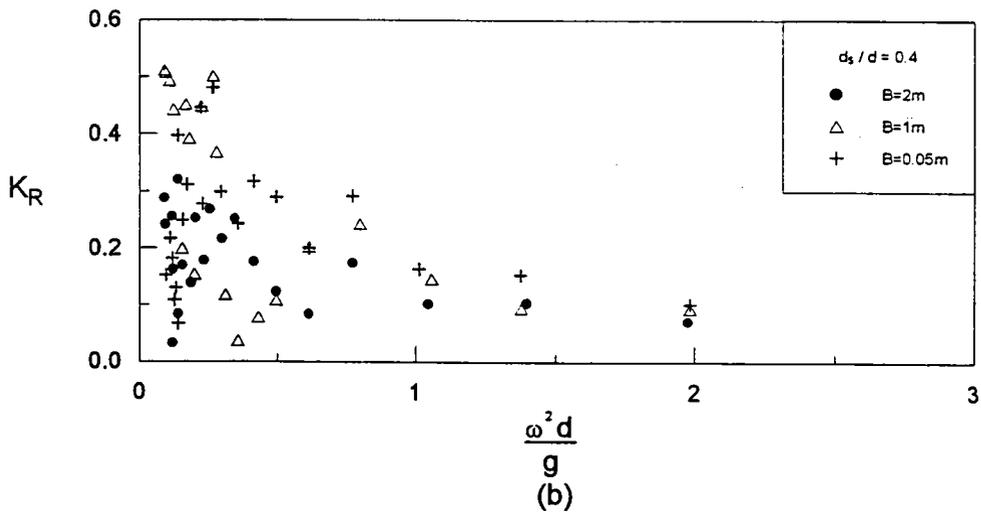
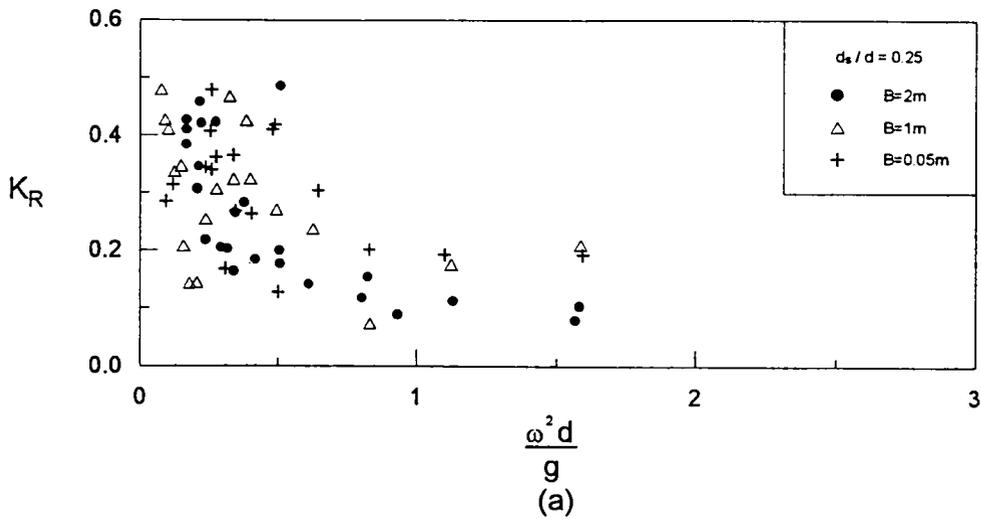


圖 5-1 等腰梯形潛堤之不同堤寬的堤前反射率與相對水深($\omega^2 d/g$)之關係圖。

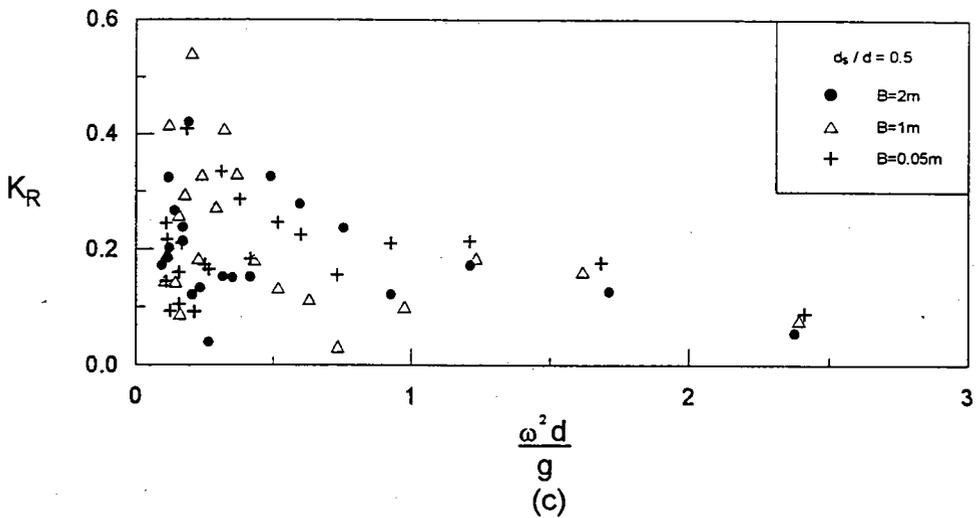
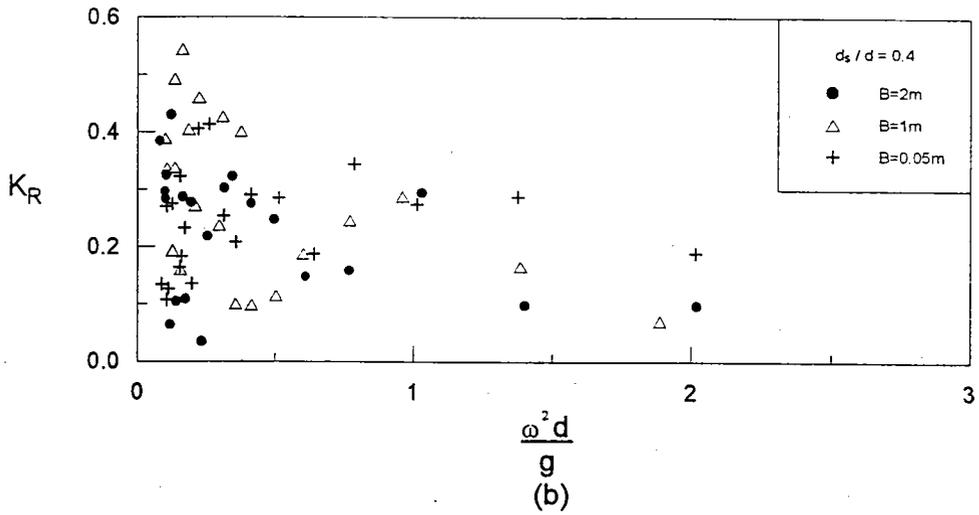
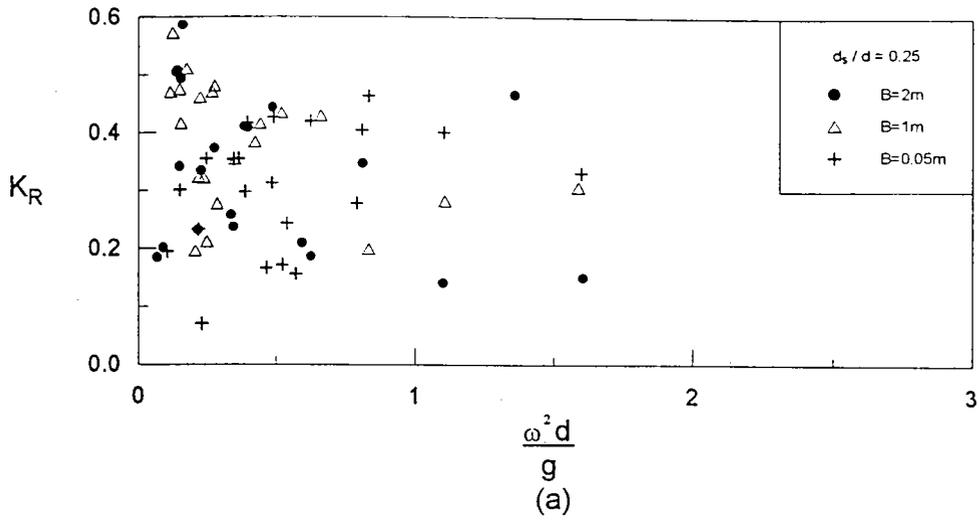


圖 5-2 曲面邊坡形潛堤之不同堤寬的堤前反射率與相對水深($\omega^2 d/g$)之關係圖。

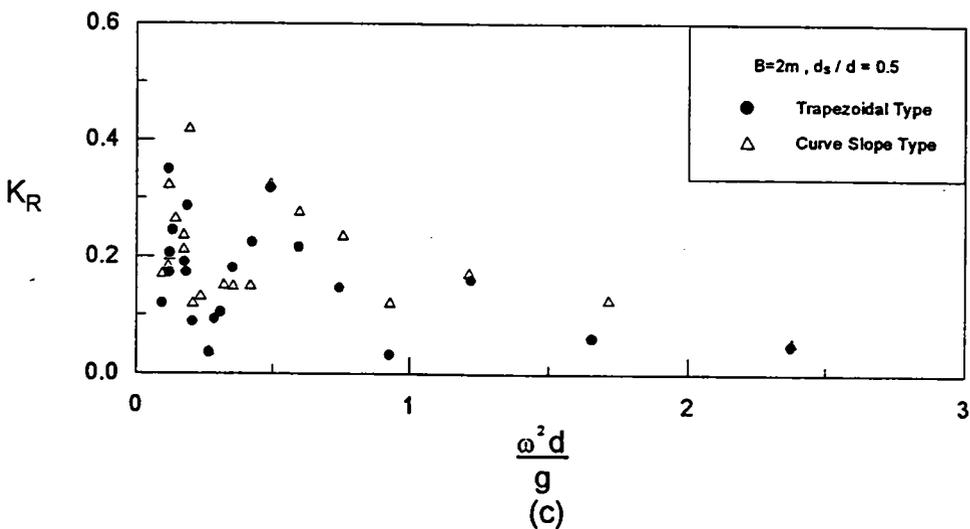
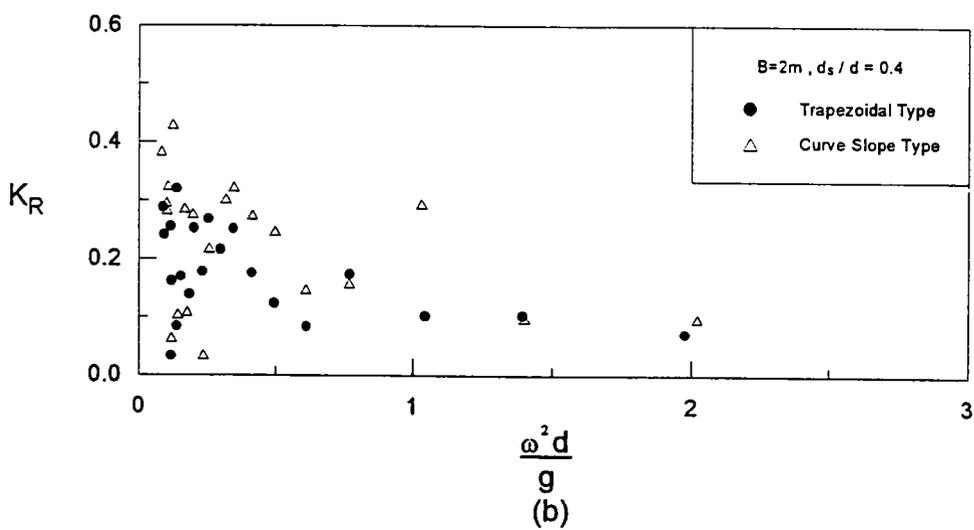
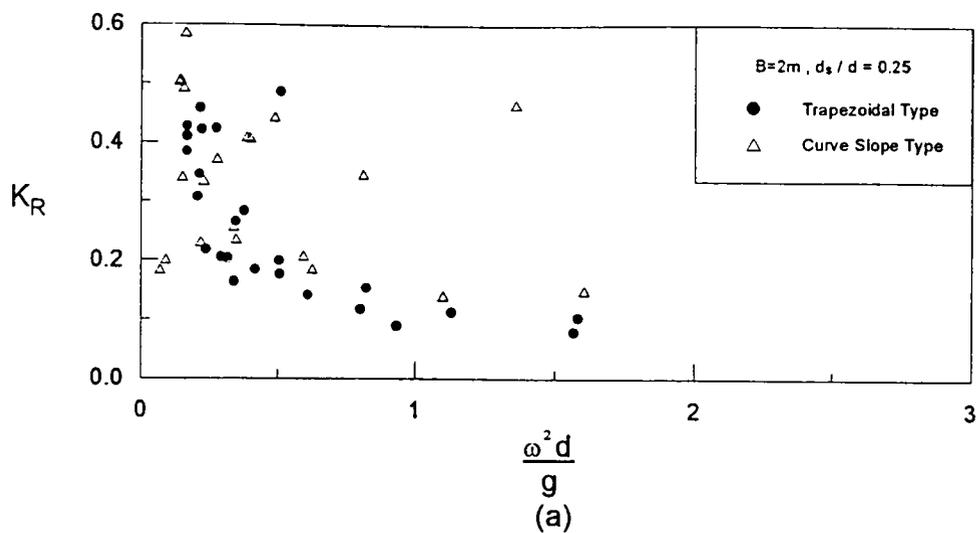


圖 5-3 等腰梯形與曲面邊坡形潛堤於堤寬2公尺之反射率與相對水深之關係圖。

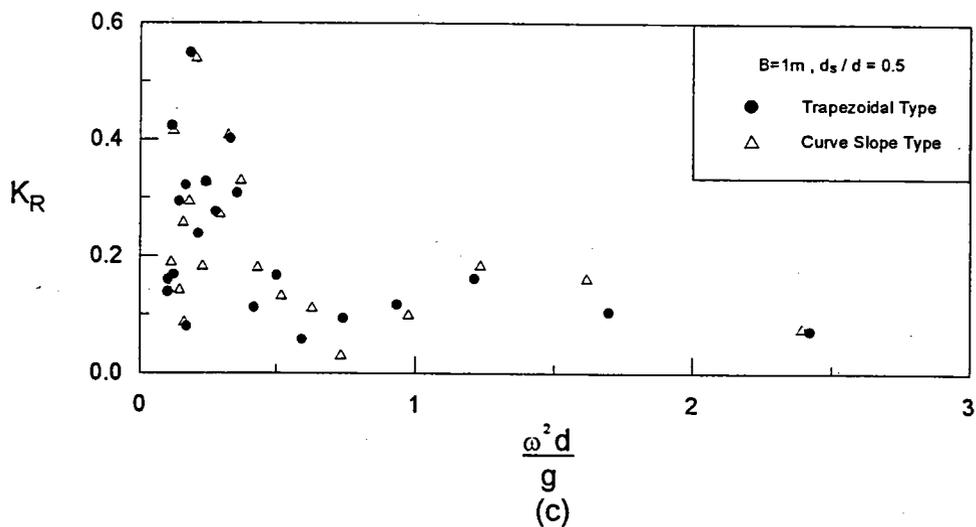
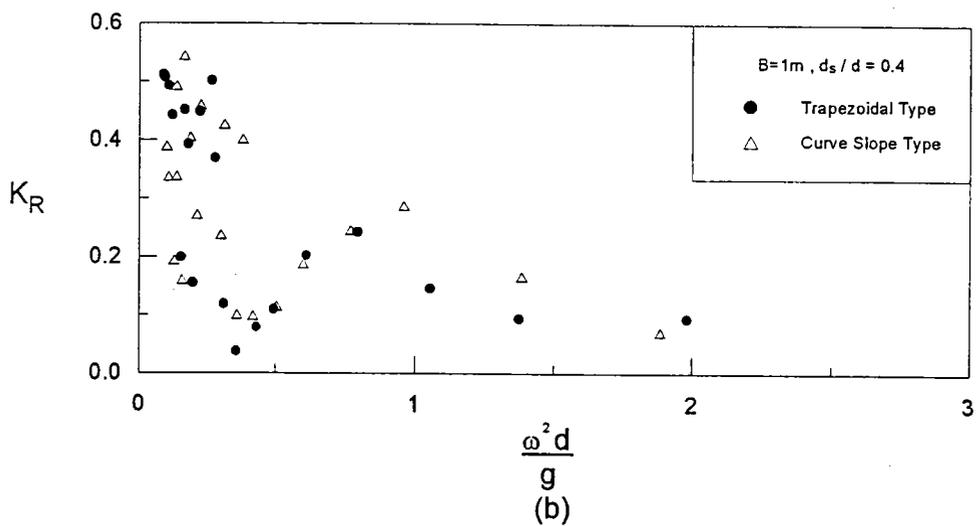
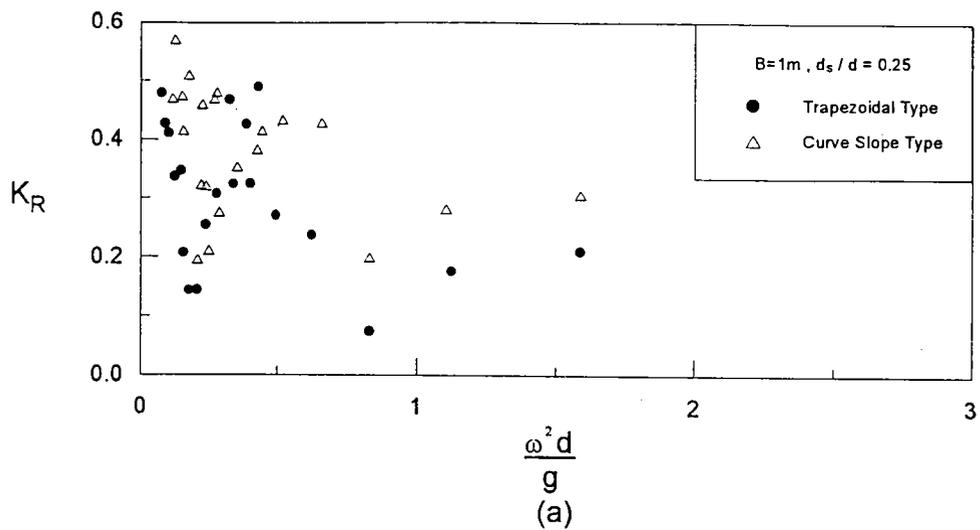


圖 5-4 等腰梯形與曲面邊坡形潛堤於堤寬1公尺之反射率與相對水深之關係圖。

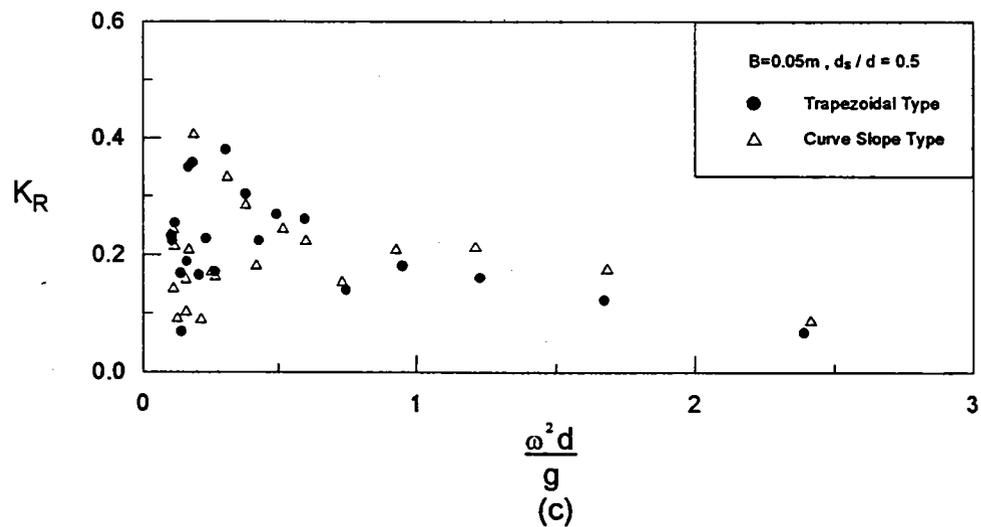
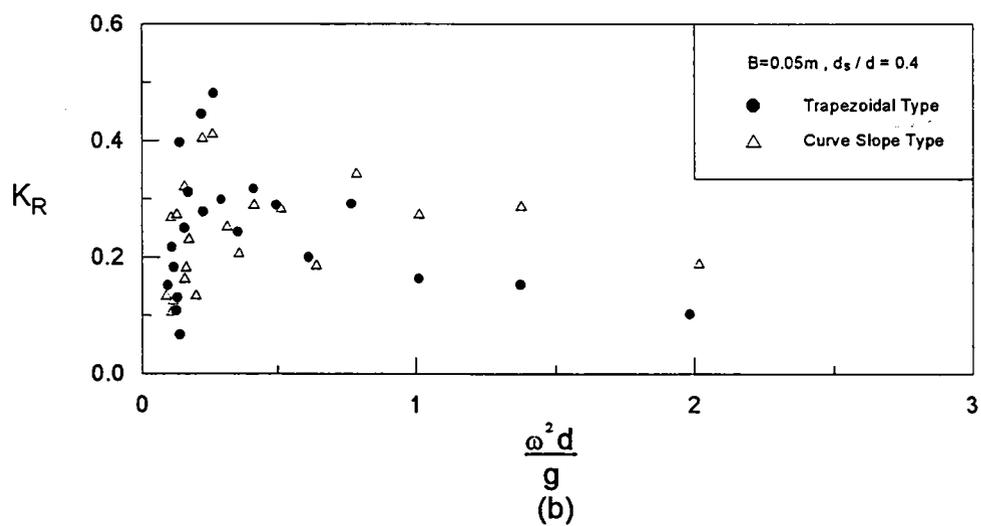
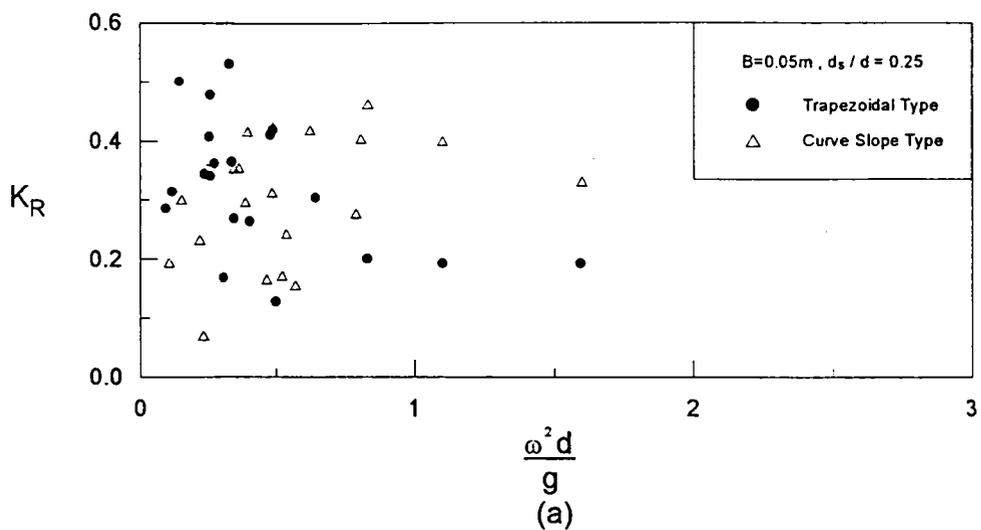


圖 5-5 等腰梯形與曲面邊坡形潛堤於堤寬0.05公尺之反射率與相對水深之關係圖。

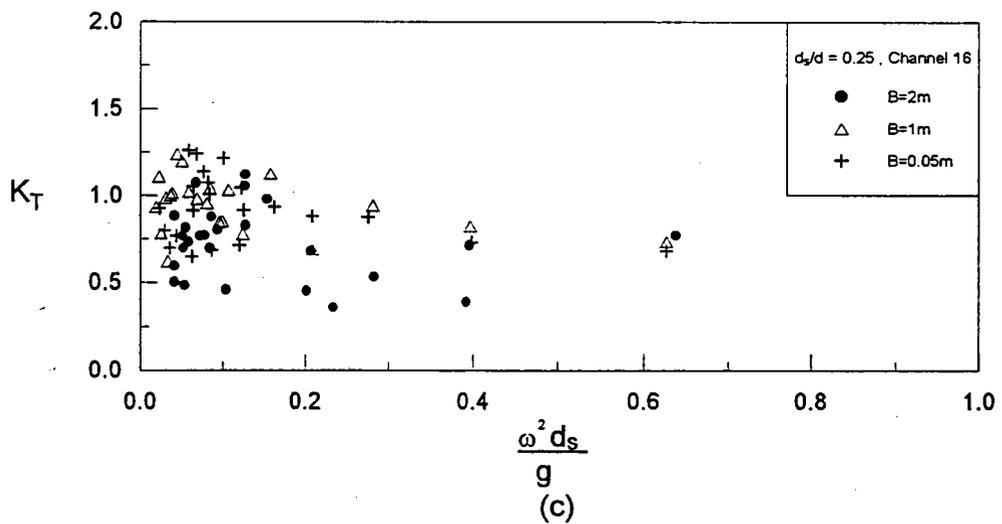
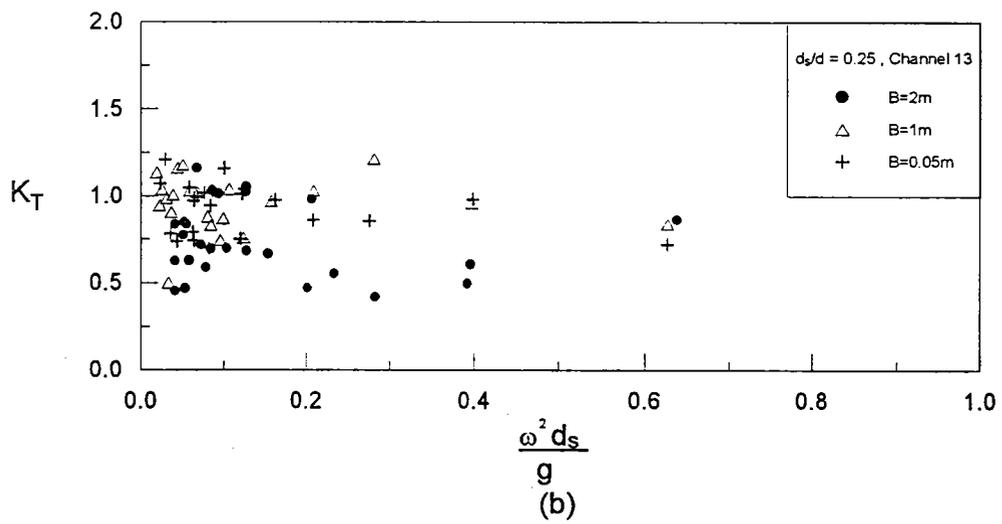
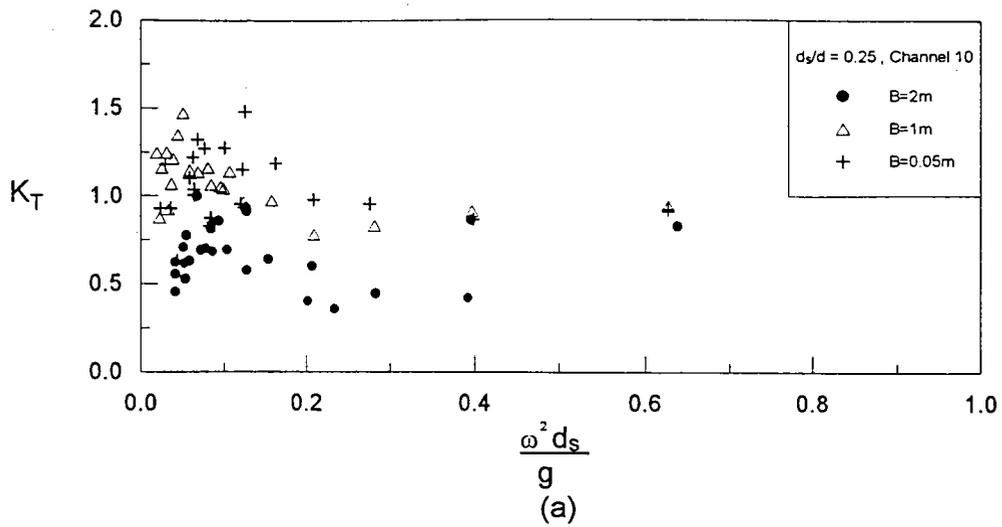


圖 5-6 等腰梯形潛堤之堤上水深與堤前水深比為0.25、不同堤寬、不同堤後位置的透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)之關係圖。

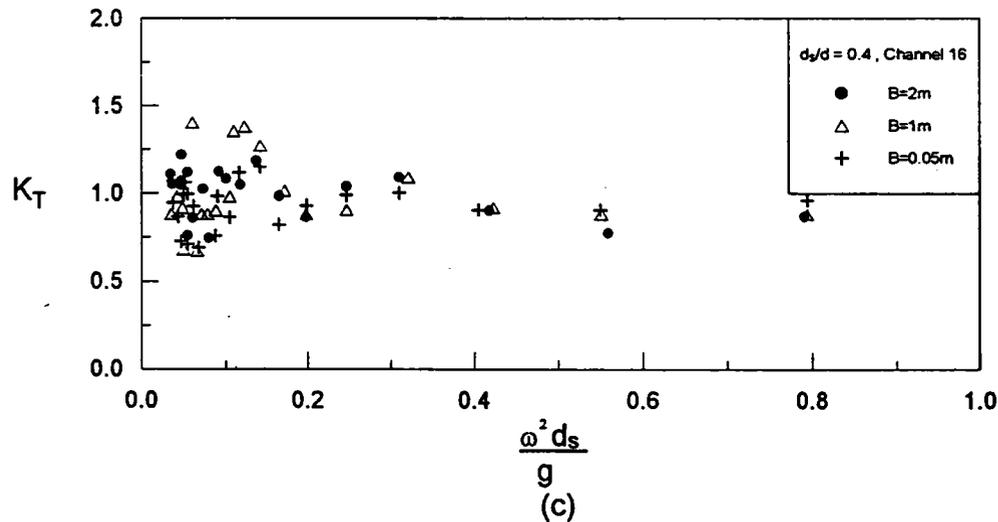
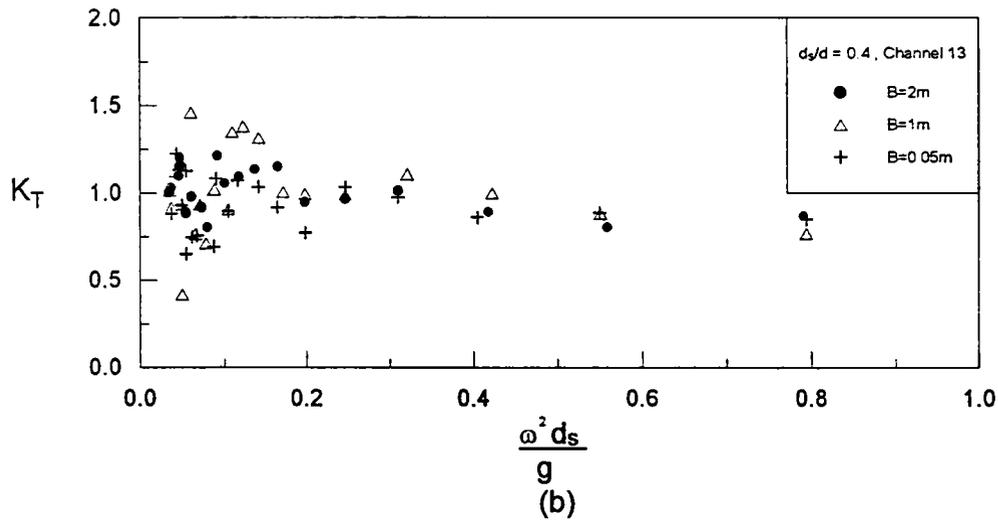
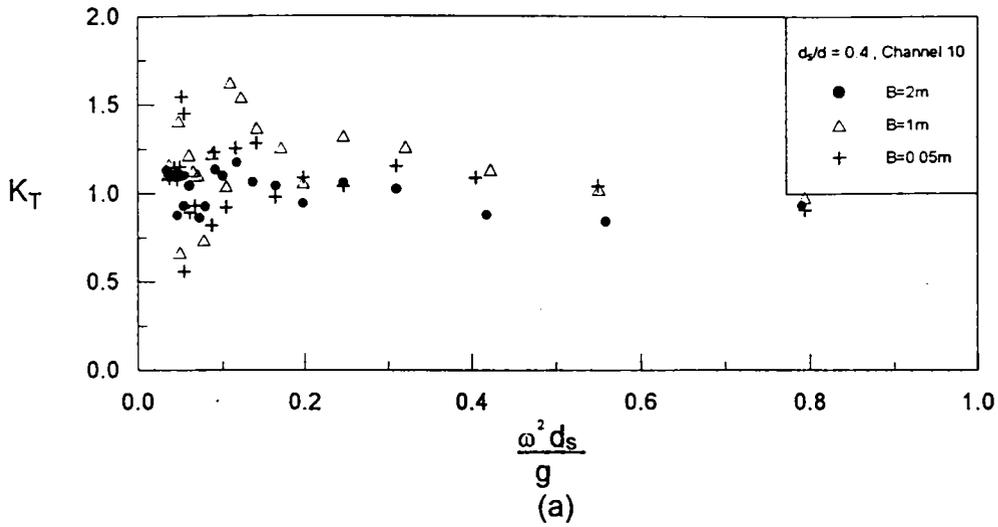


圖 5-7 等腰梯形潛堤之堤上水深與堤前水深比為0.4、不同堤寬、不同堤後位置的透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)之關係圖。

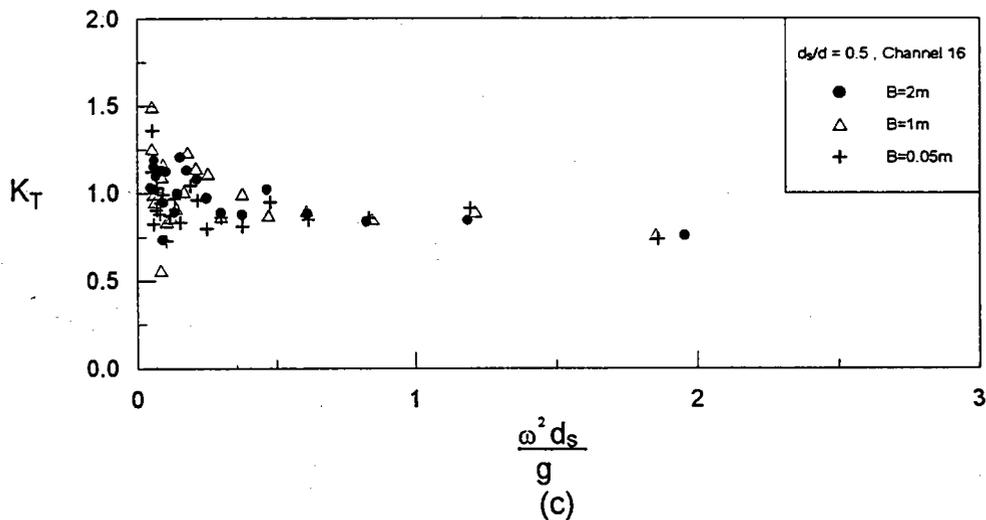
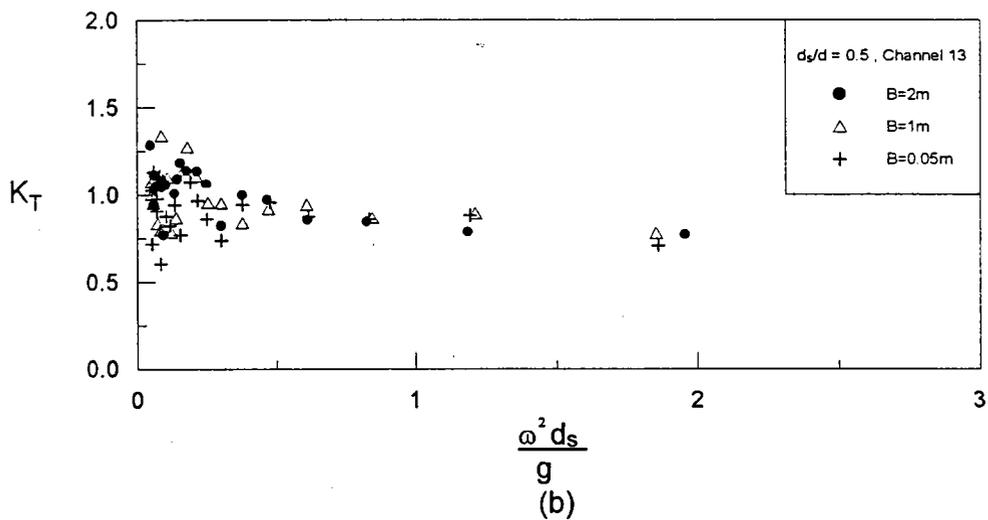
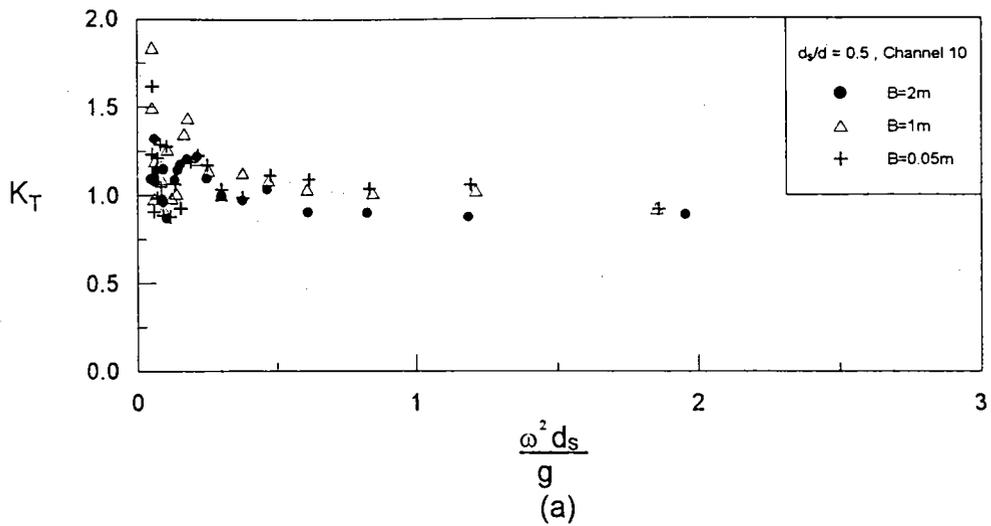


圖 5-8 等腰梯形潛堤之堤上水深與堤前水深比為0.5、不同堤寬、不同堤後位置的透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)之關係圖。

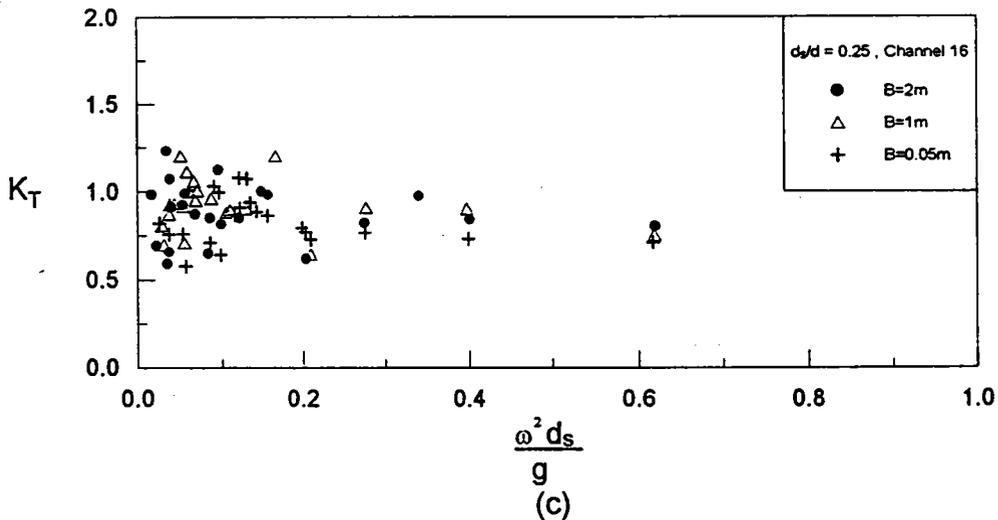
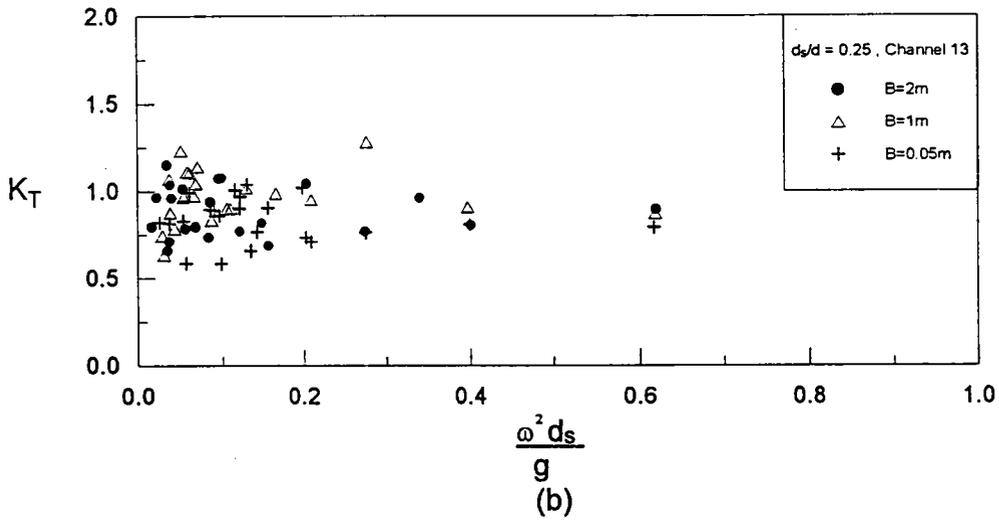
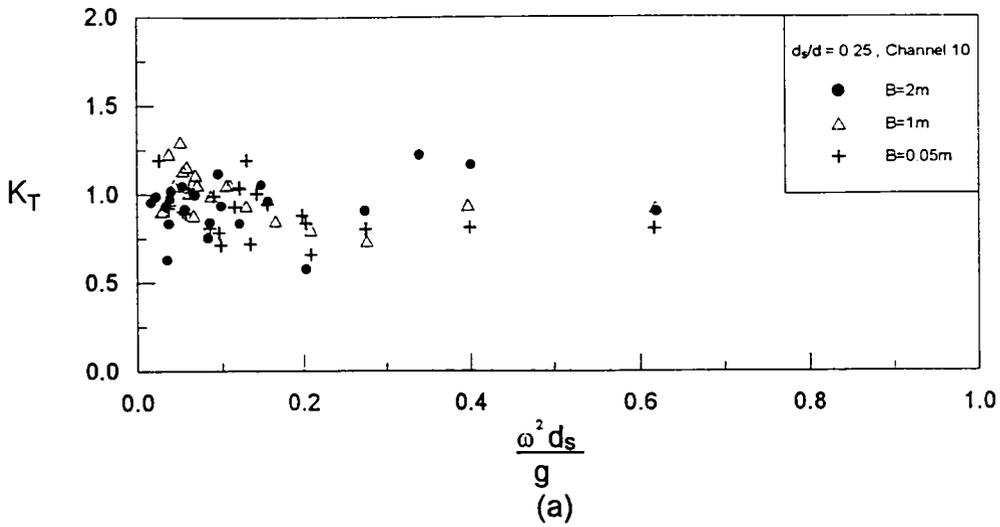


圖 5-9 邊坡曲面形潛堤之堤上水深與堤前水深比為0.25、不同堤寬、不同堤後位置的透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)之關係圖。

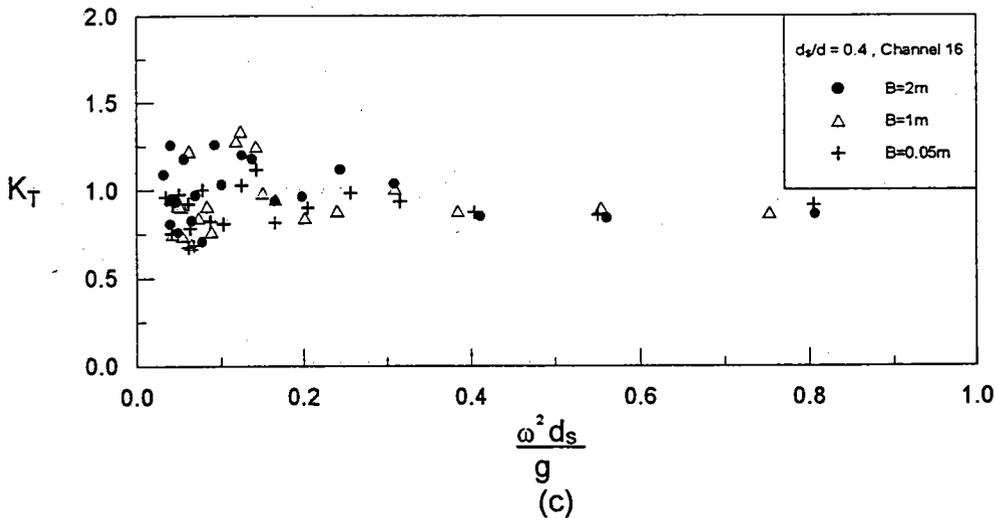
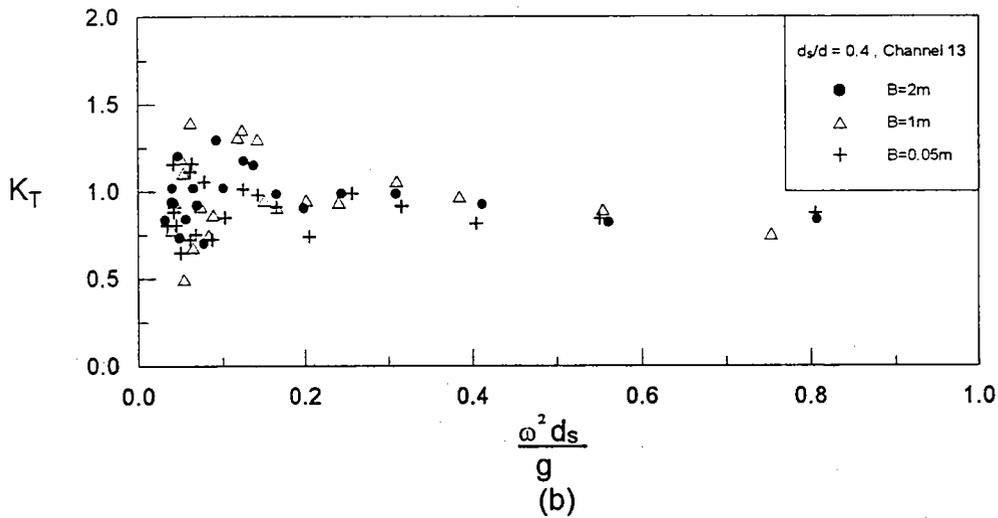
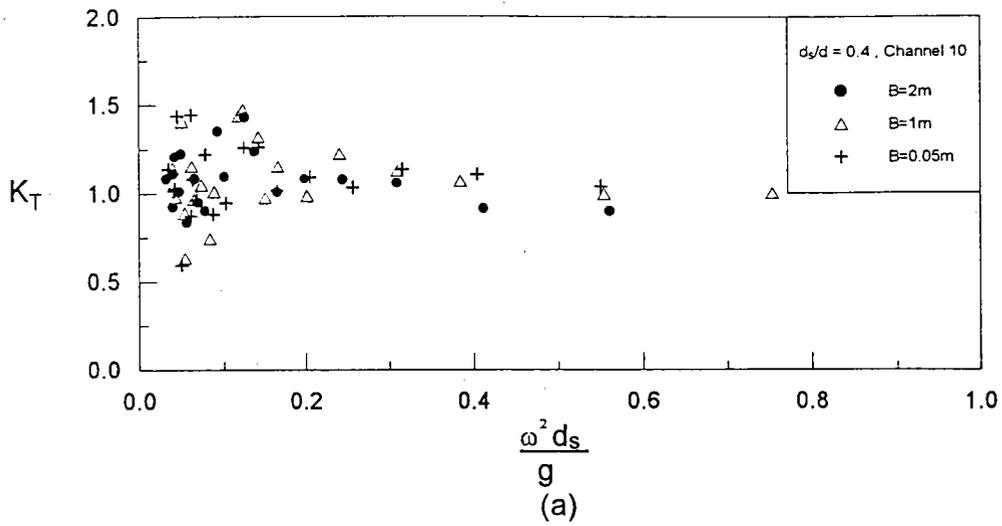


圖 5-10 邊坡曲面形潛堤之堤上水深與堤前水深比為0.4、不同堤寬、不同堤後位置的透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)之關係圖。

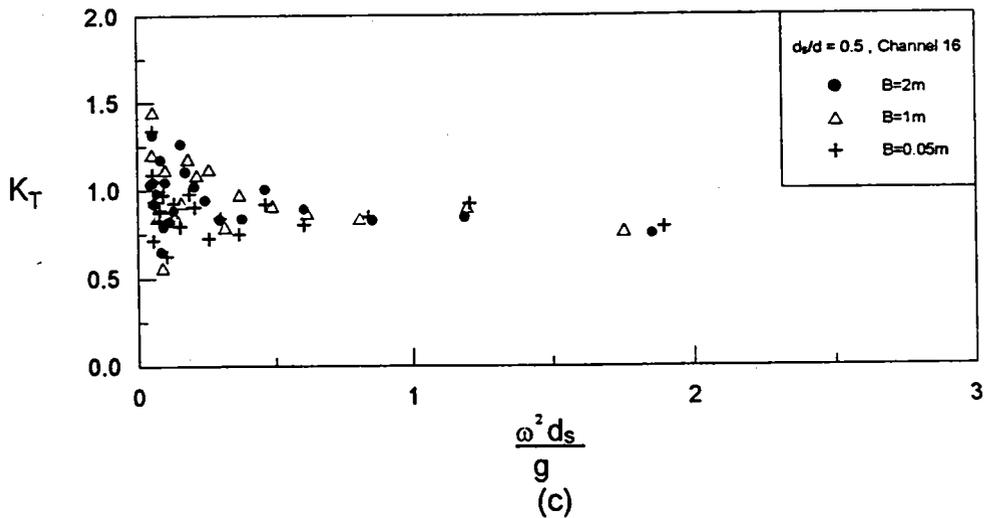
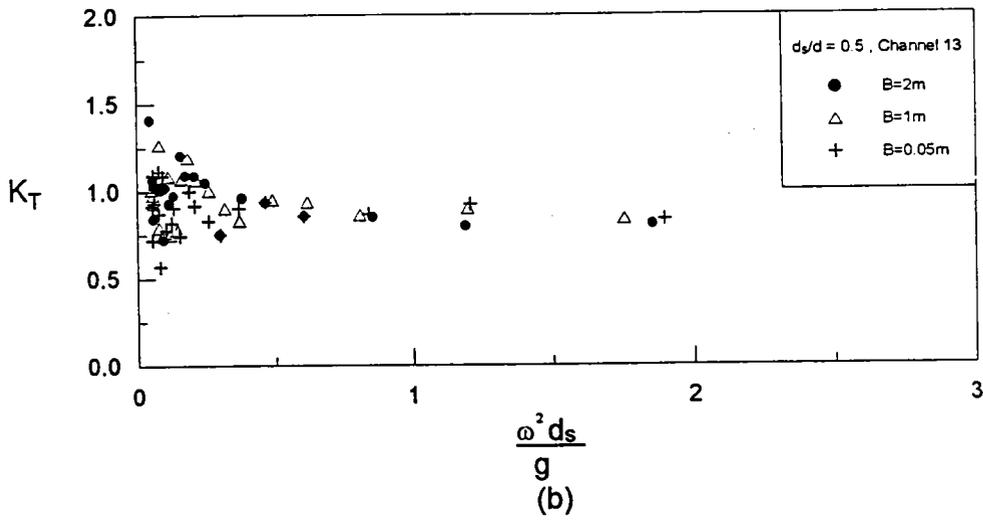
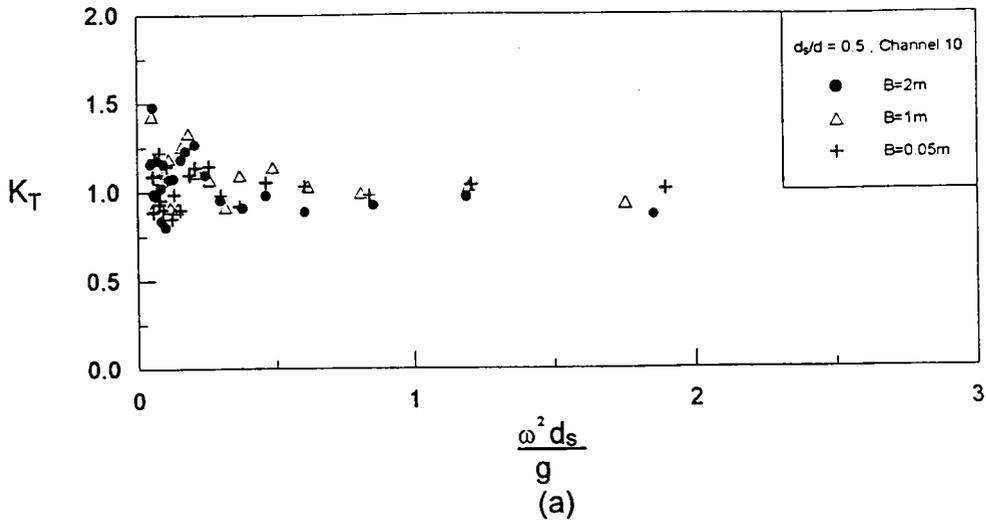


圖 5-11 邊坡曲面形潛堤之堤上水深與堤前水深比為0.5、不同堤寬、不同堤後位置的透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)之關係圖。

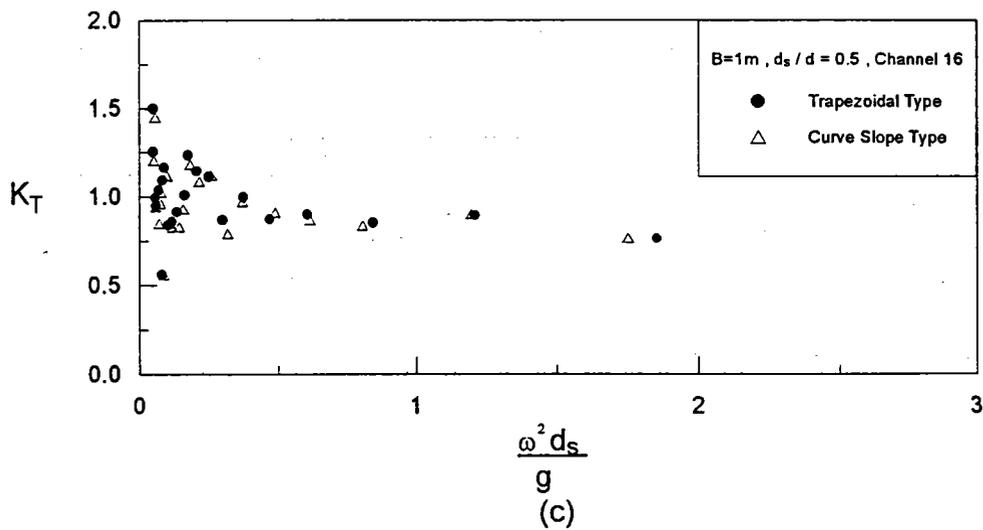
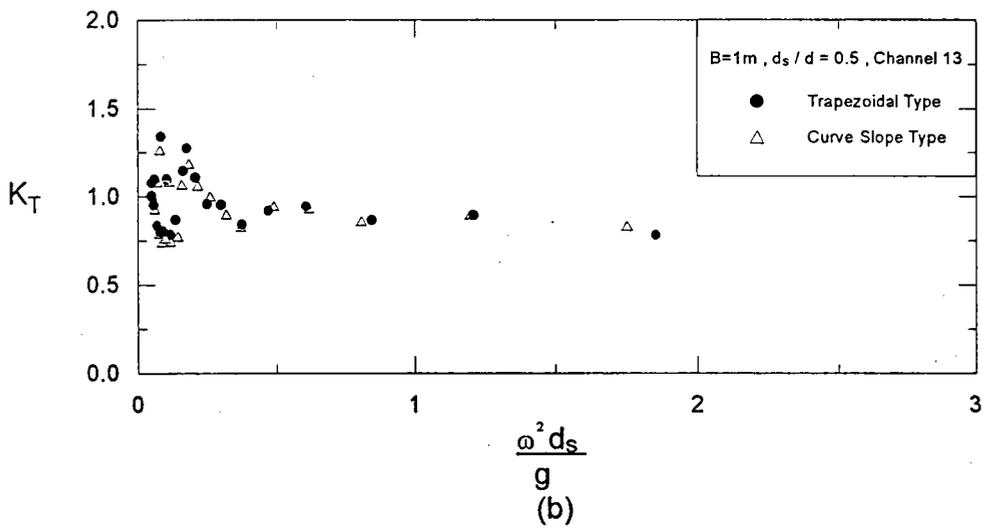
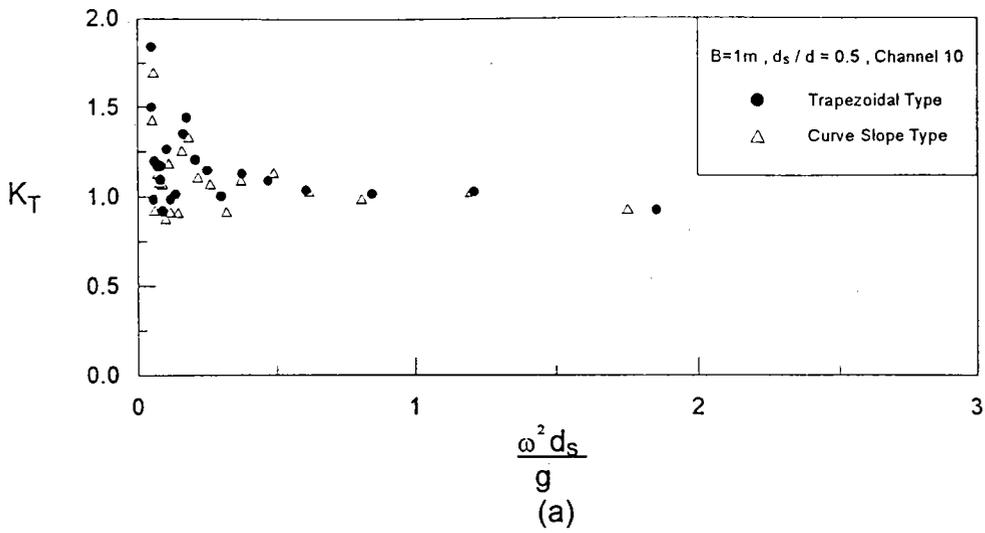


圖 5-12 堤寬1公尺、堤上水深與堤前水深比為0.5、堤後不同位置的邊坡曲面形潛堤與等腰梯形潛堤透過率之關係圖。

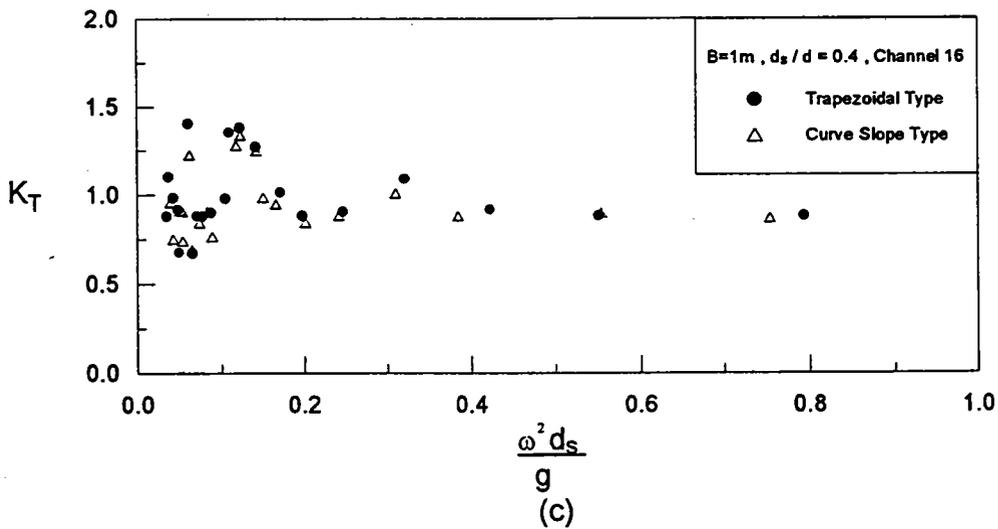
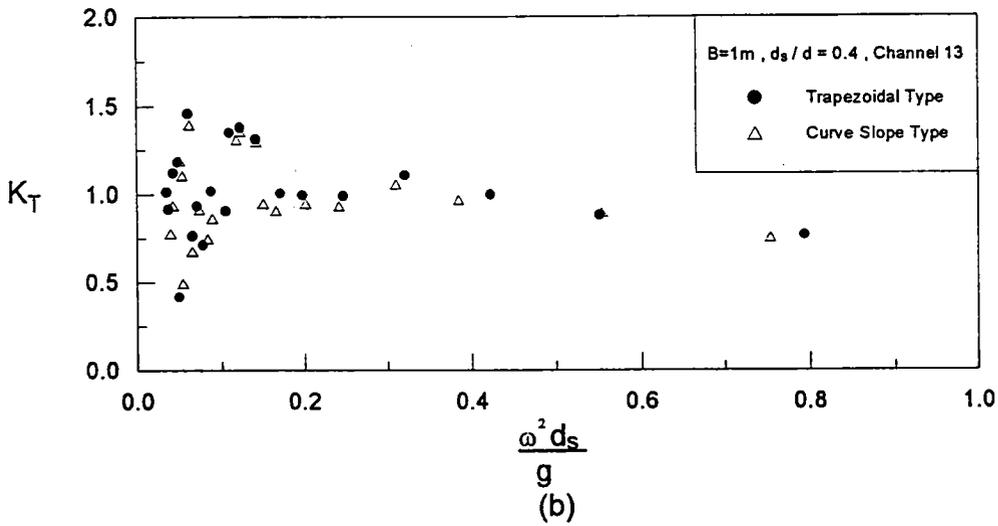
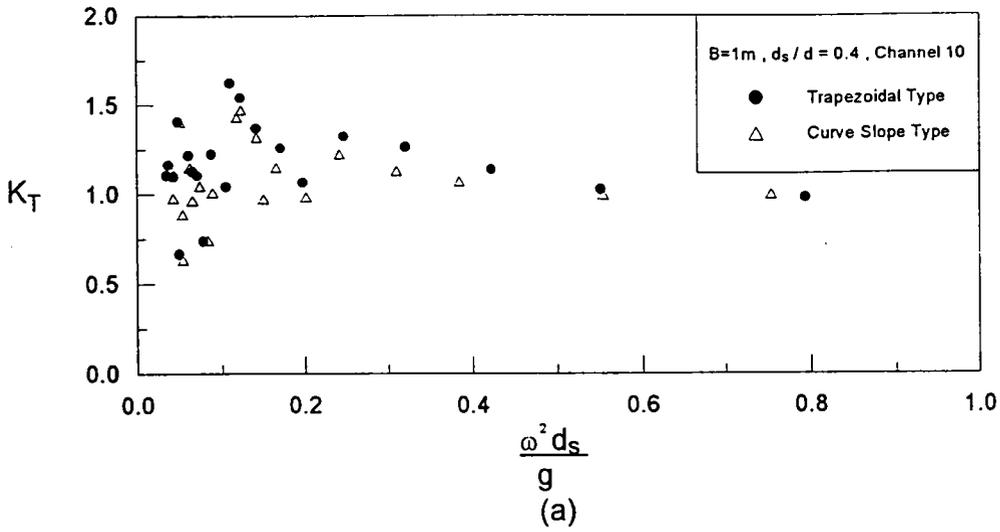


圖 5-13 堤寬1公尺、堤上水深與堤前水深比為0.4、堤後不同位置的邊坡曲面形潛堤與等腰梯形潛堤透過率之關係圖。

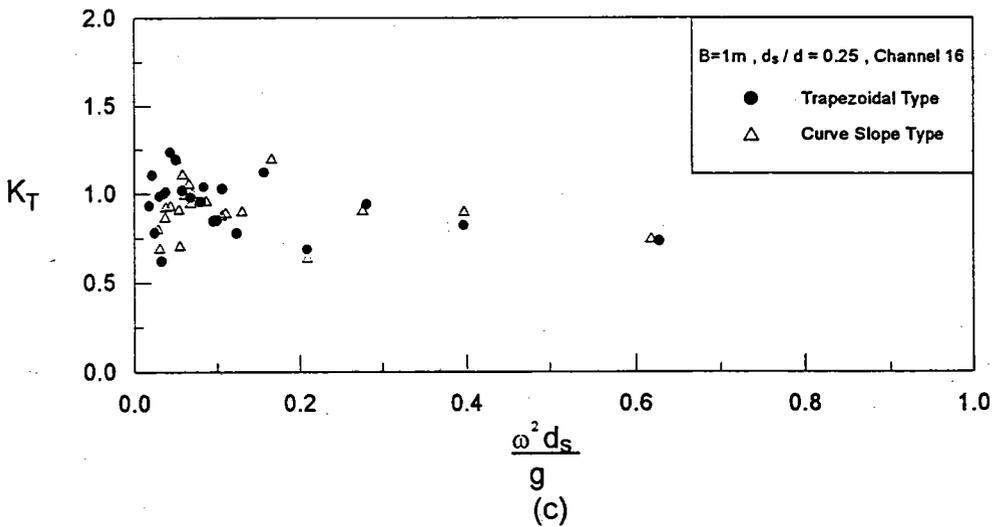
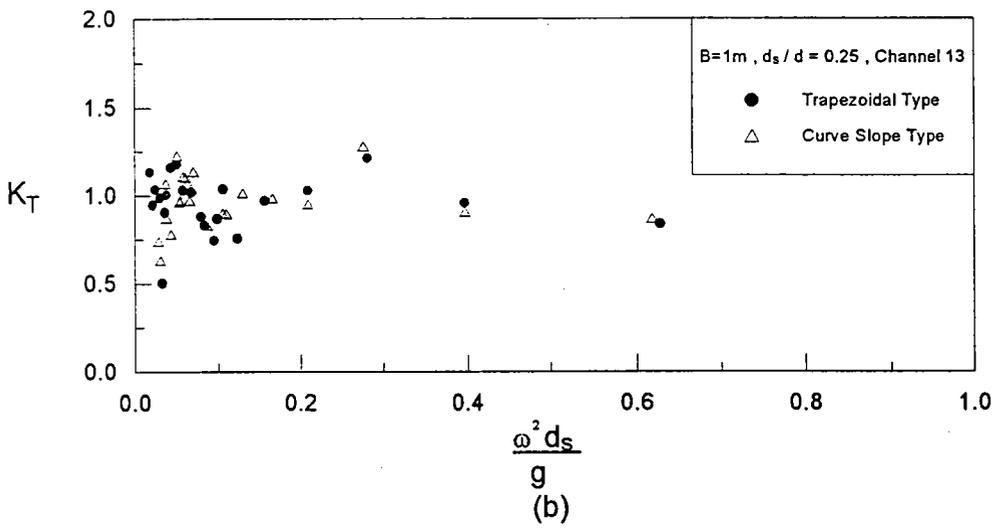
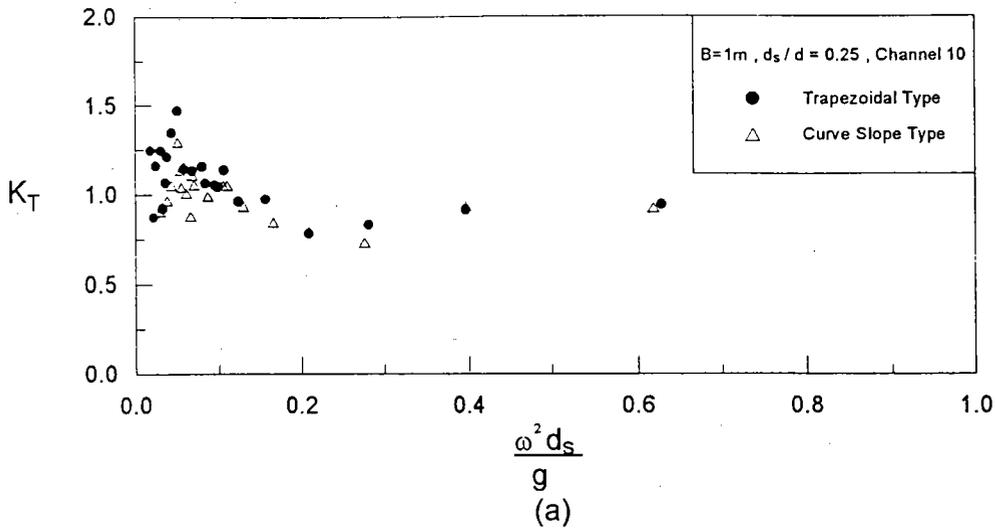


圖 5-14 堤寬1公尺、堤上水深與堤前水深比為0.25、堤後不同位置的邊坡曲面形潛堤與等腰梯形潛堤透過率之關係比較圖。

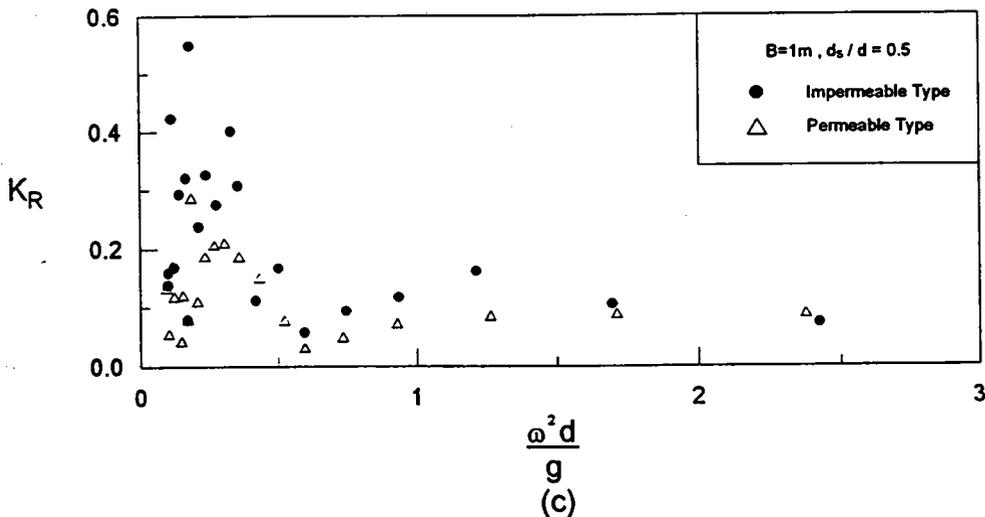
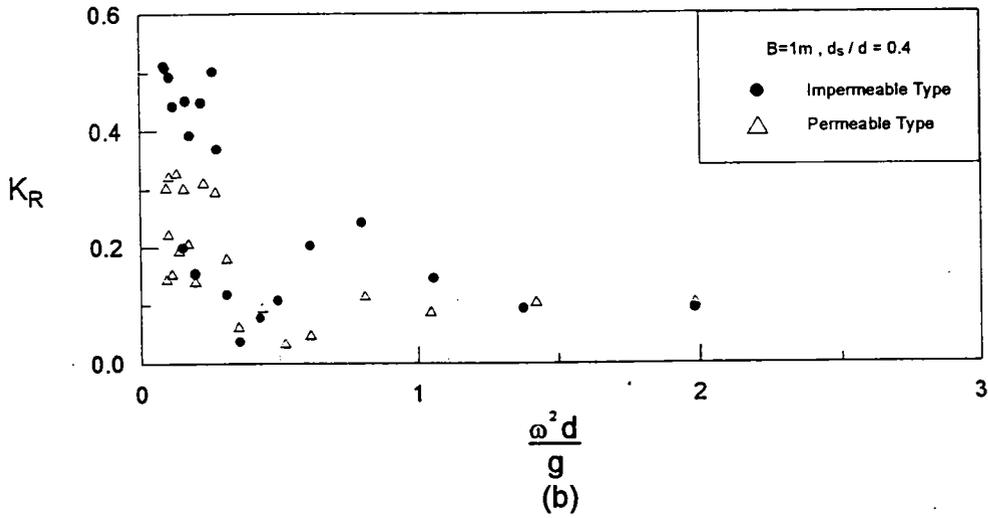
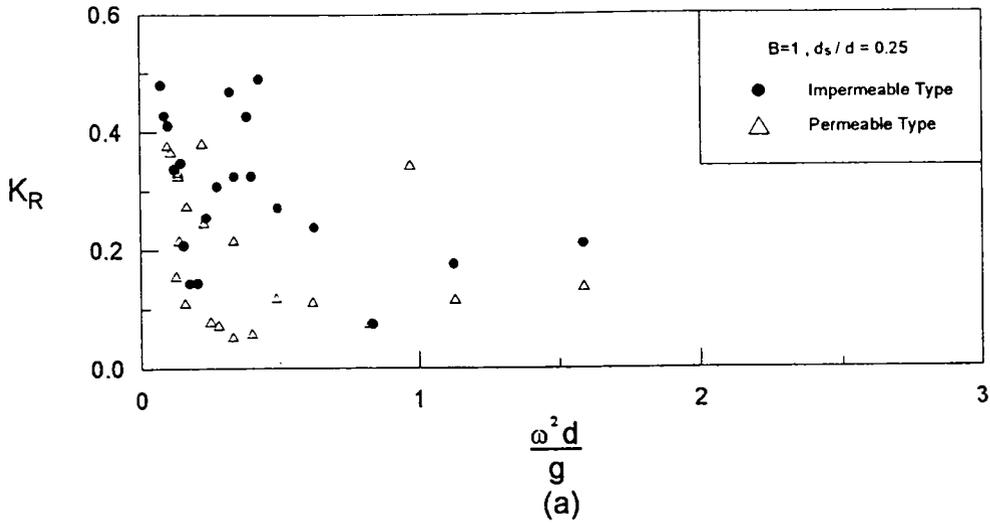


圖 5-15 堤寬1公尺、相同堤上水深與堤前水深比的透水潛堤與不透水潛堤的反射率與相對水深($\omega^2 d/g$)之關係圖。

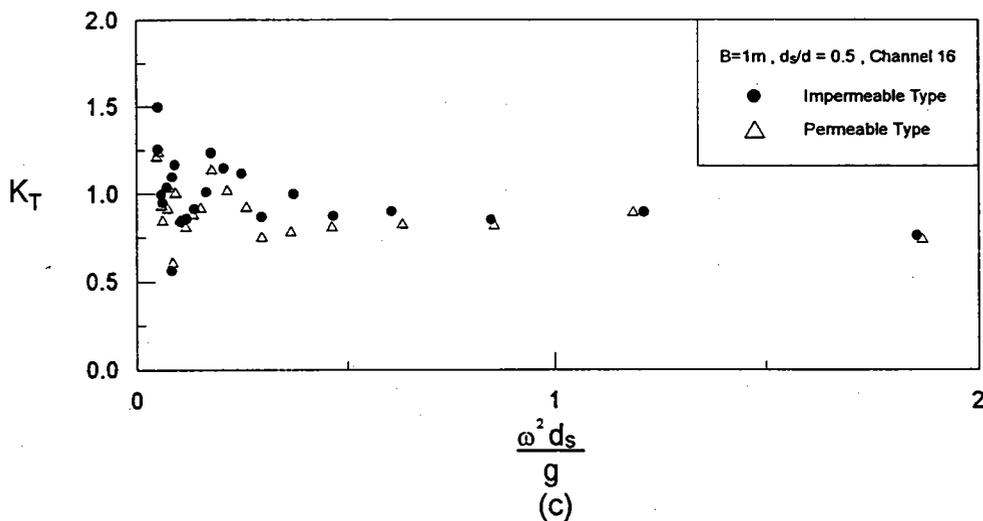
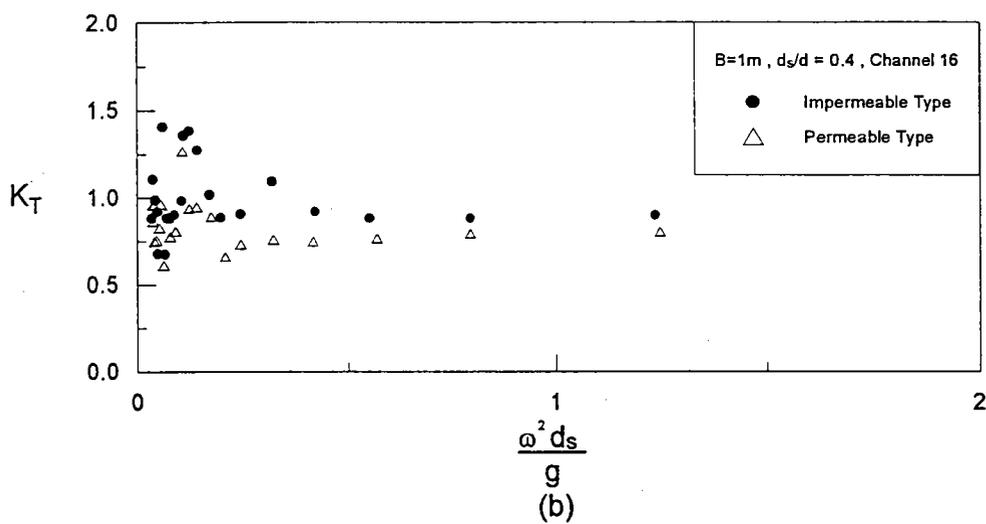
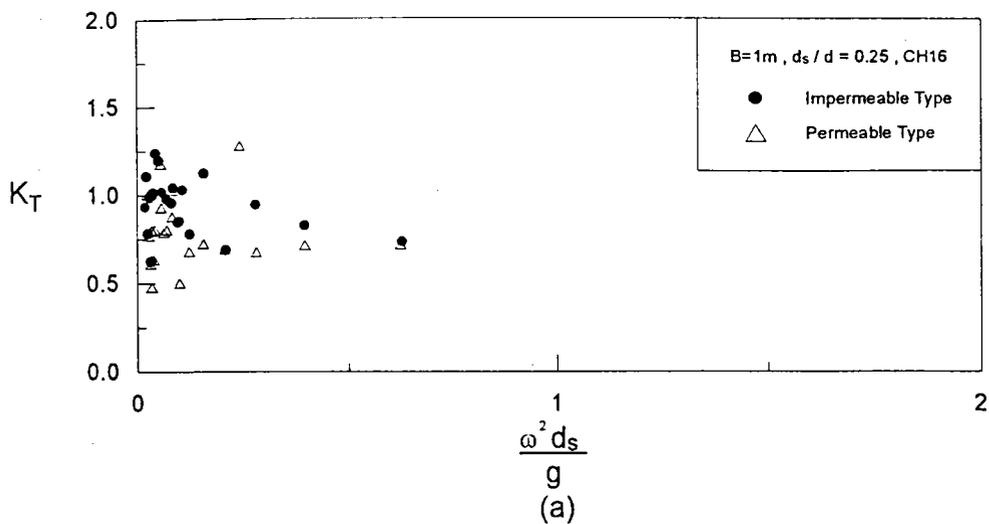


圖 5-16 堤寬1公尺、第16號波高計處不同堤上水深與堤前水深比的透水式潛堤與不透水式潛堤之透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)之關係圖。

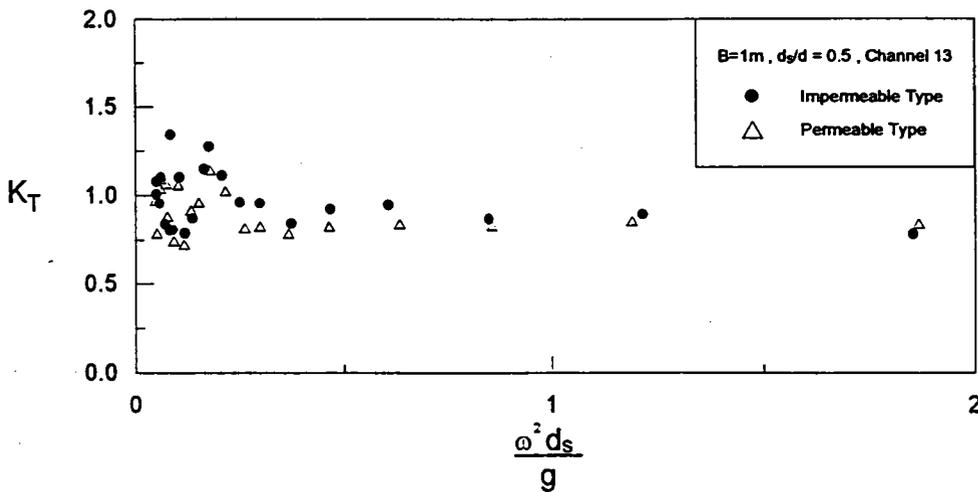
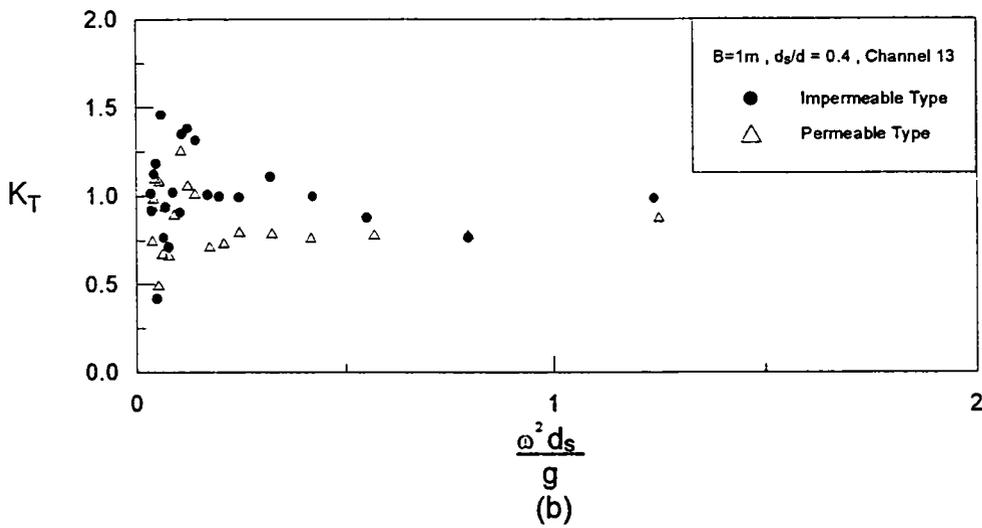
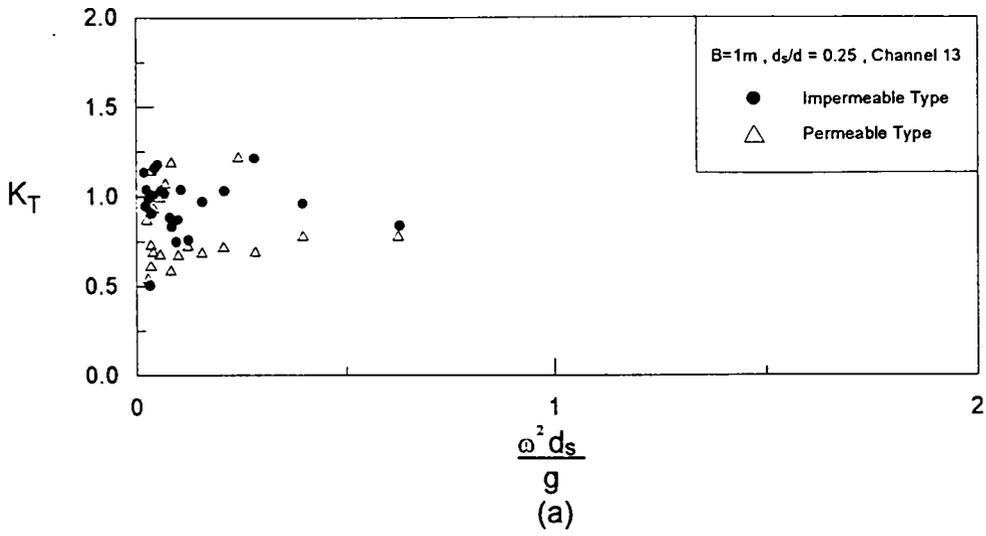


圖 5-17 堤寬1公尺、第13號波高計處不同堤上水深與堤前水深比的透水式潛堤與不透水式潛堤之透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)之關係圖。

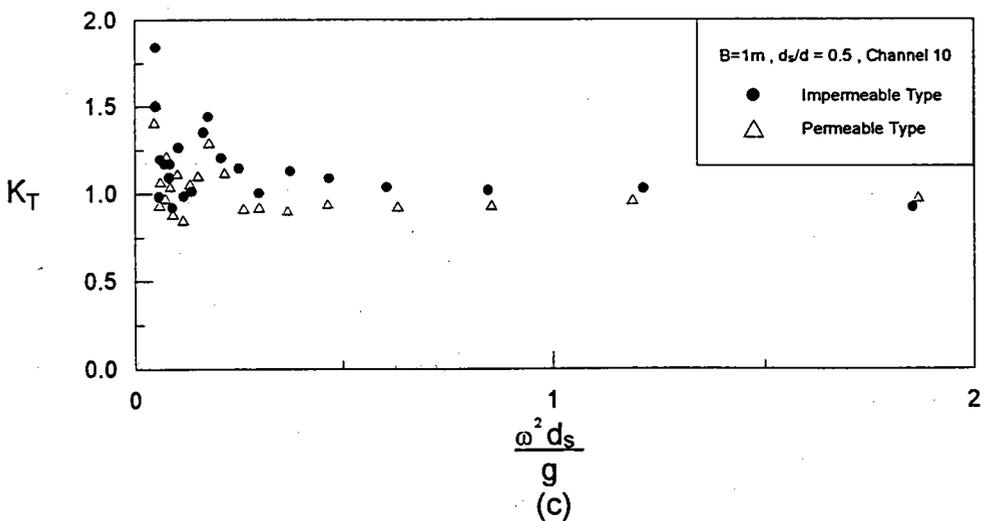
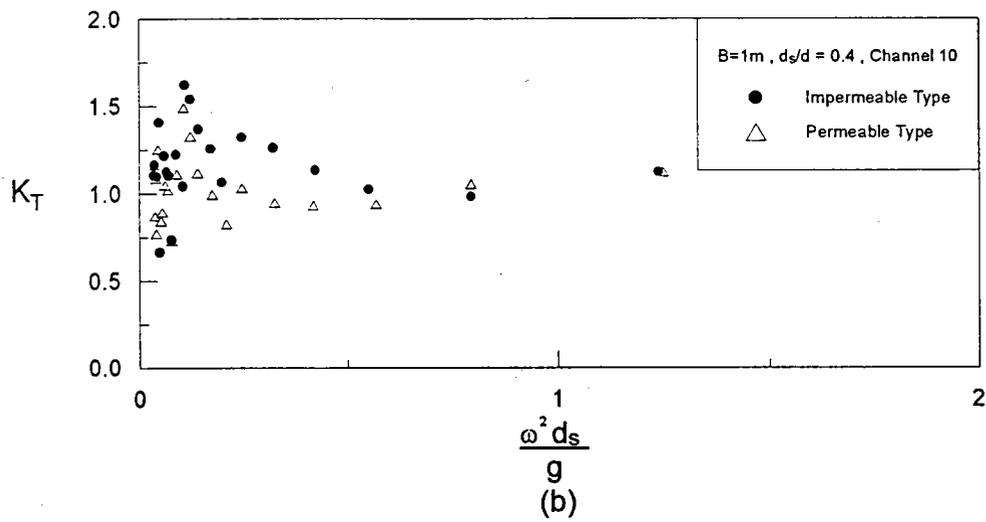
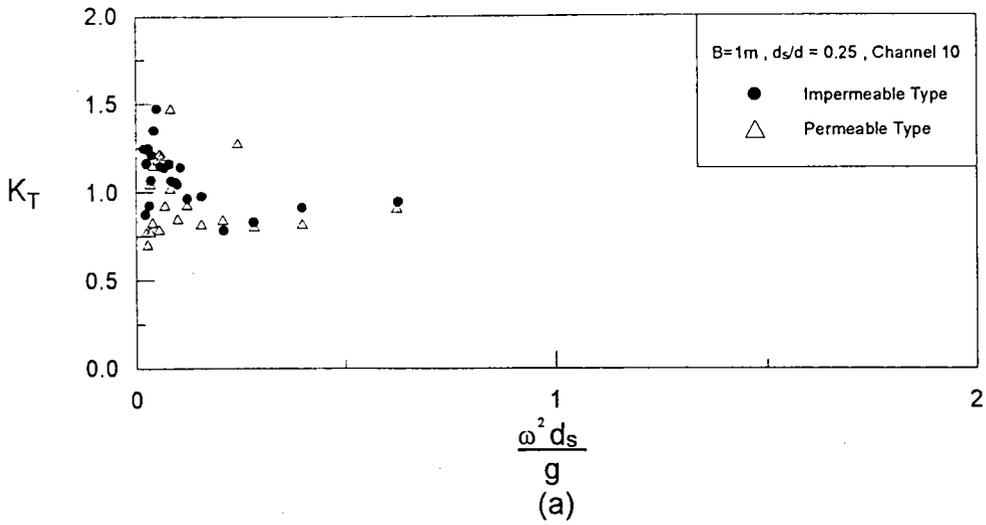


圖 5-18 堤寬1公尺、第10號波高計處不同堤上水深與堤前水深比的透水式潛堤與不透水式潛堤之透過率與堤上相對水深($\omega^2 d_s / g$)之關係圖。

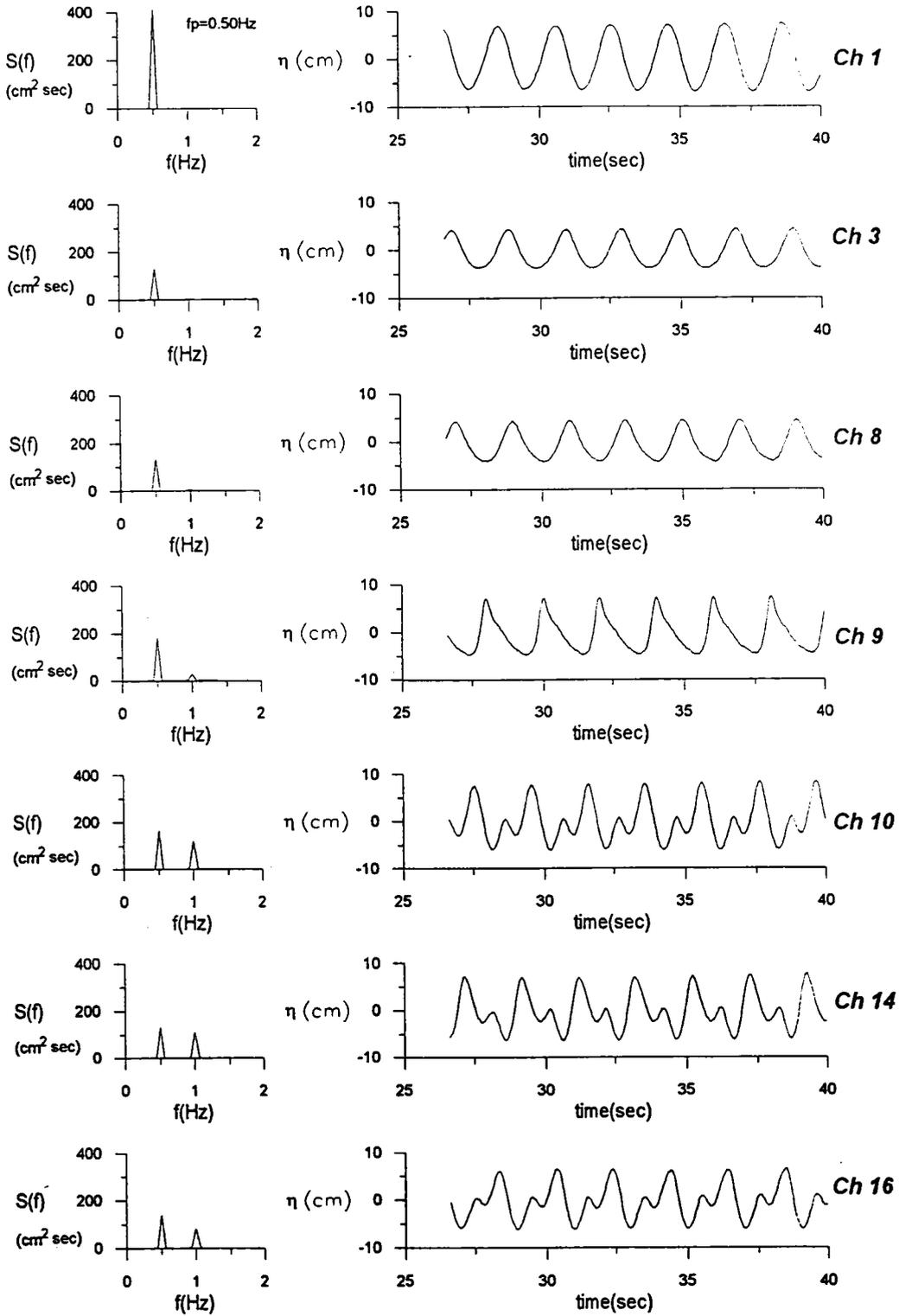


圖 5-19 試驗值之不同位置之頻譜與波形訊號的比較圖。(等腰梯形潛堤、 $d_s/L=0.06$ 、 $B=2\text{m}$ 、 $d_s=0.3\text{m}$)。

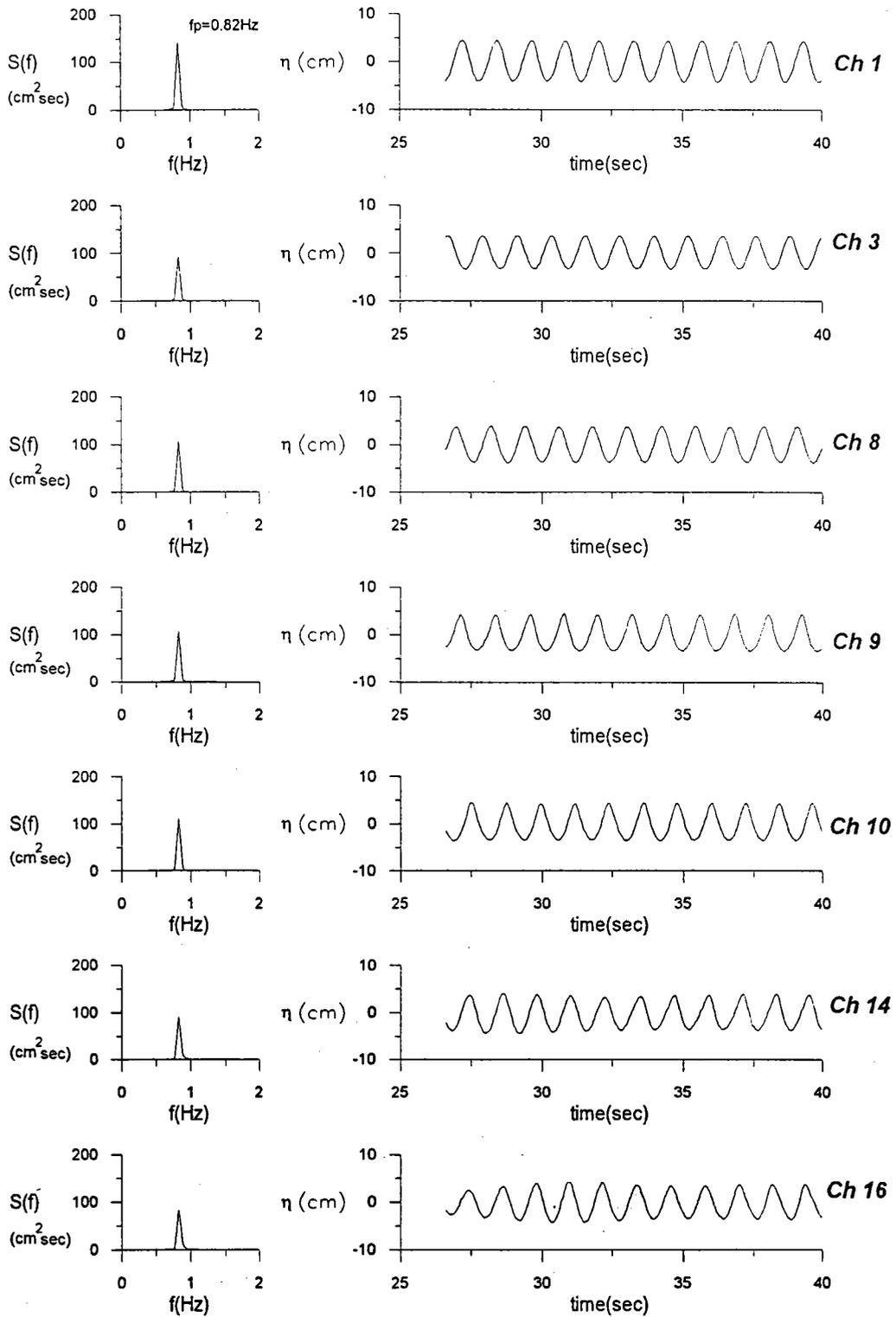


圖 5-20 試驗值之不同位置之頻譜與波形訊號的比較圖。(等腰梯形潛堤、 $d_s/L=0.12$ 、 $B=2\text{m}$ 、 $d_s=0.3\text{m}$)。

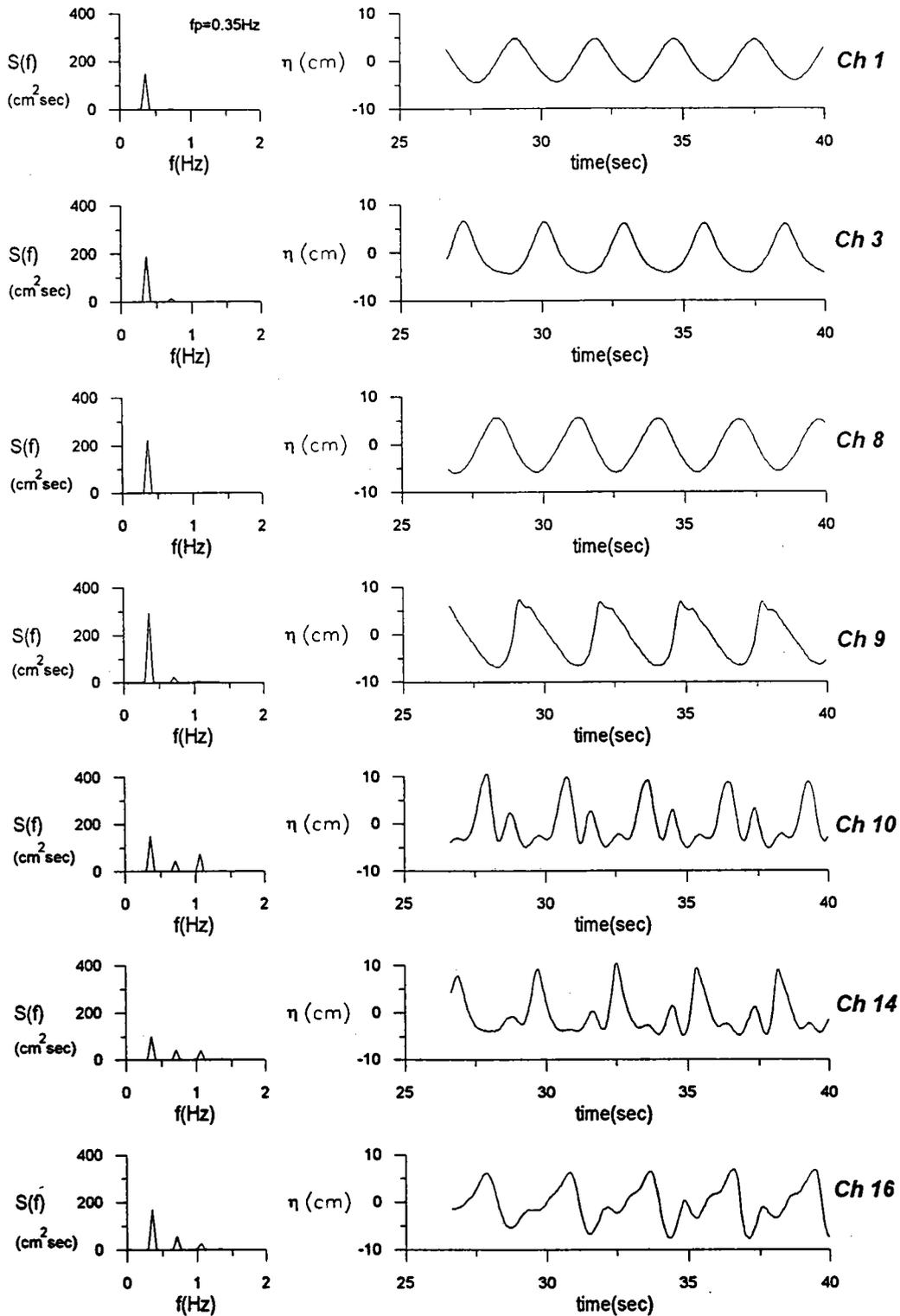


圖 5-21 試驗值之不同位置之頻譜與波形訊號的比較圖。(等腰梯形潛堤、 $d_1/L=0.04$ 、 $B=2\text{m}$ 、 $d_s=0.3\text{m}$)。

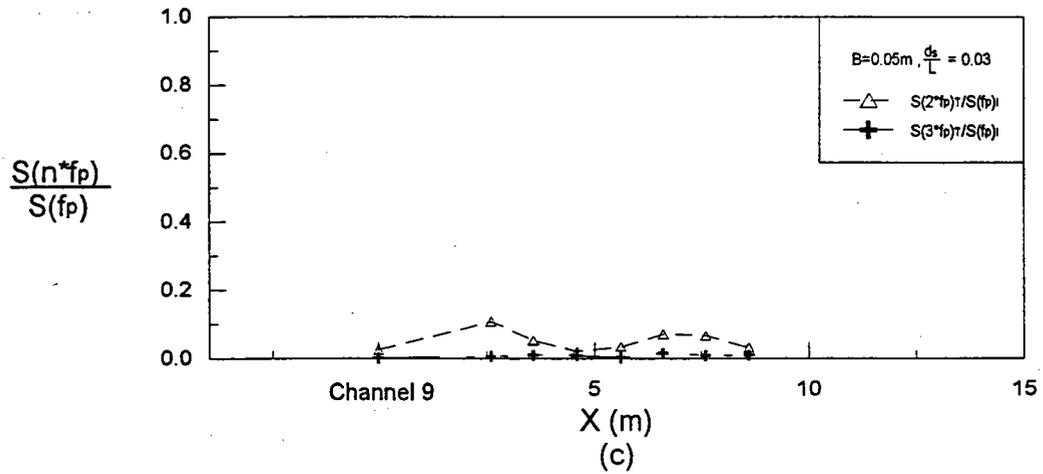
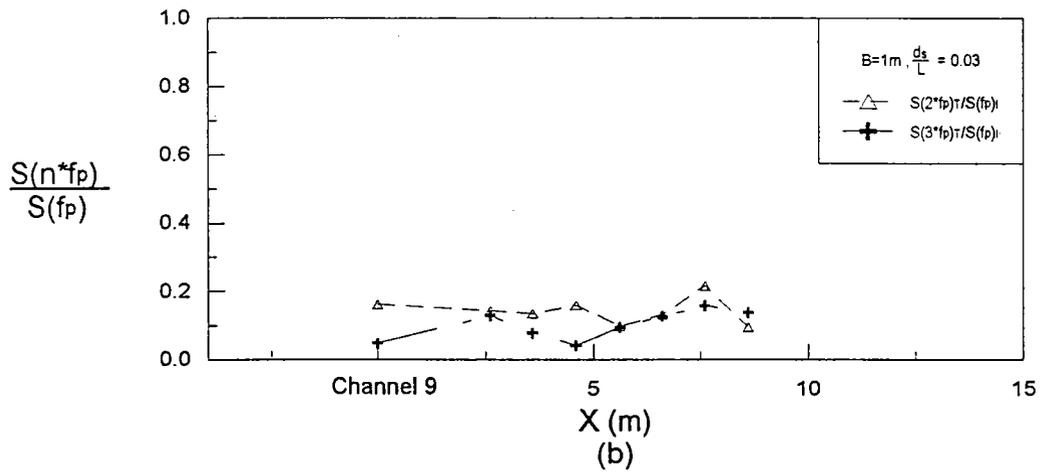
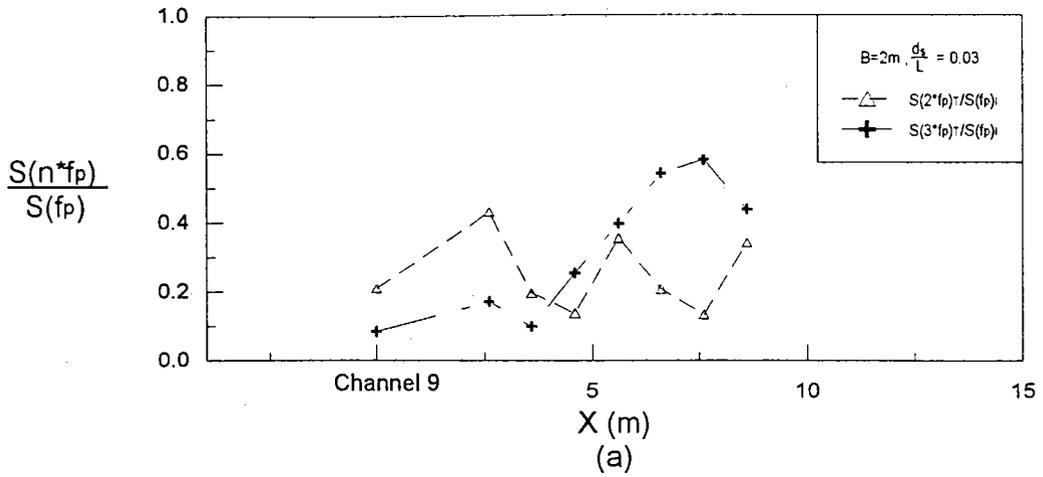


圖 5-22 堤寬2公尺、1公尺、0.05公尺潛堤後的不同位置之第二主頻與第三主頻之能量與主頻能量比值的比較圖。(等腰梯形潛堤)。

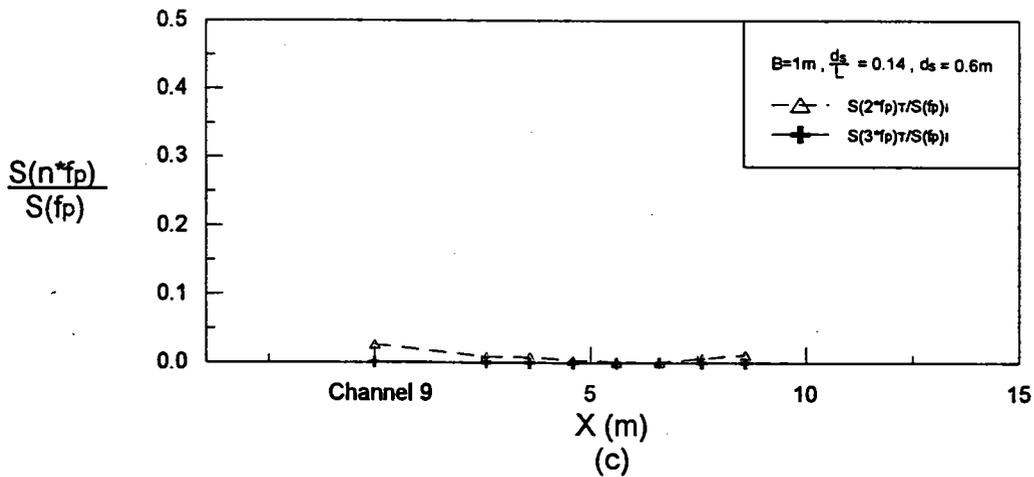
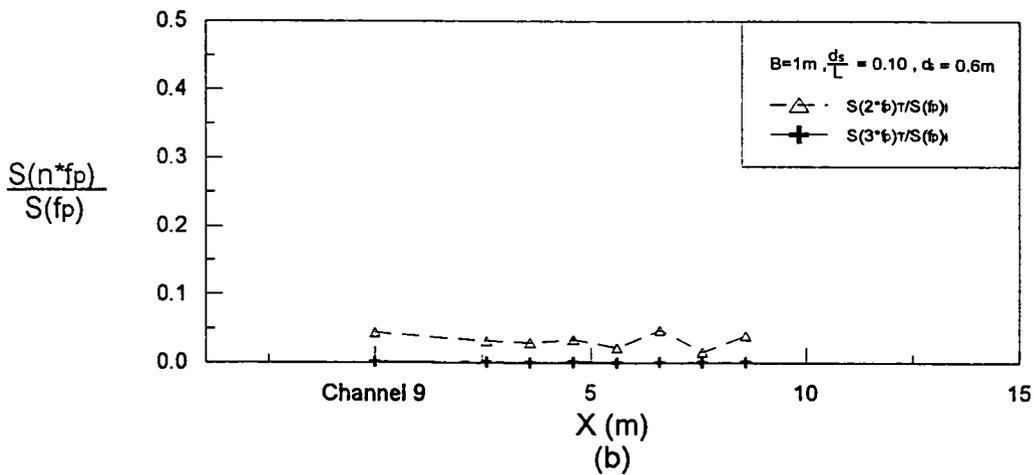
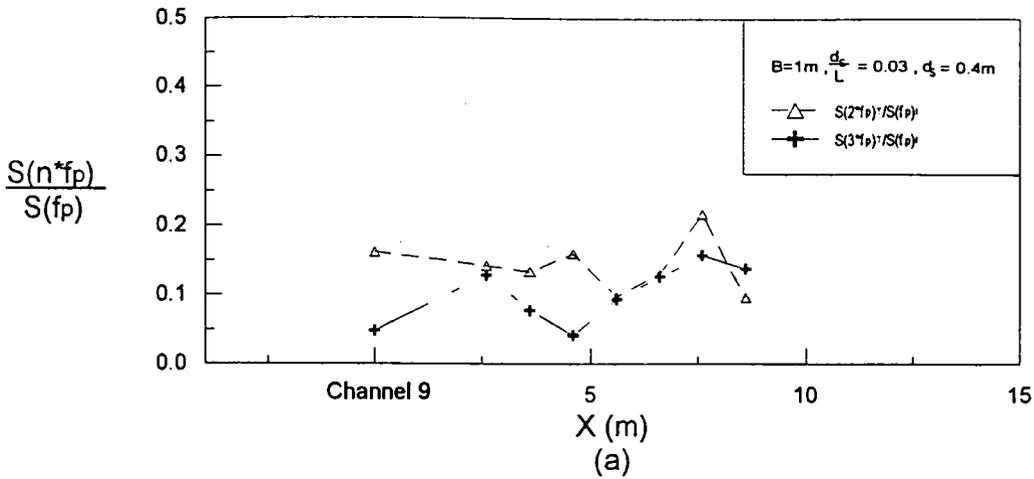


圖 5-23 堤寬1公尺潛堤後不同堤上相對水深、不同位置之第二主頻與第三主頻之能量與主頻能量比值的比較圖。(等腰梯形潛堤)。

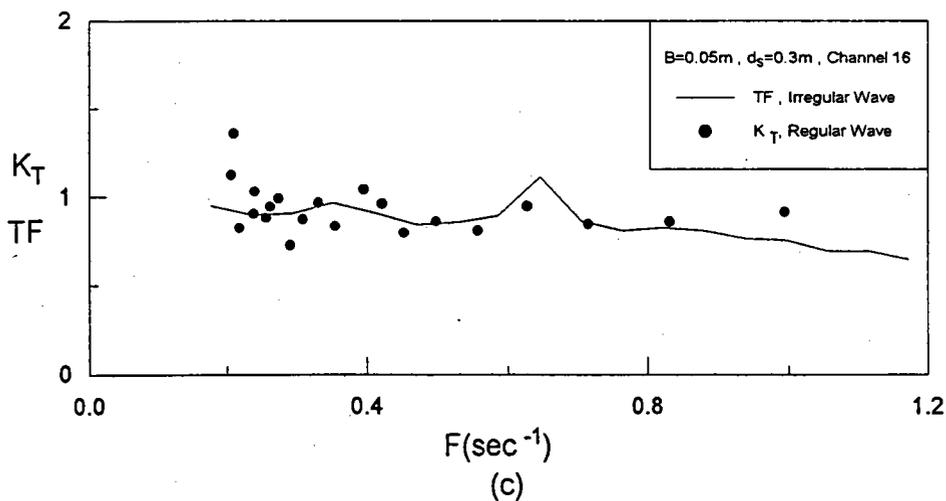
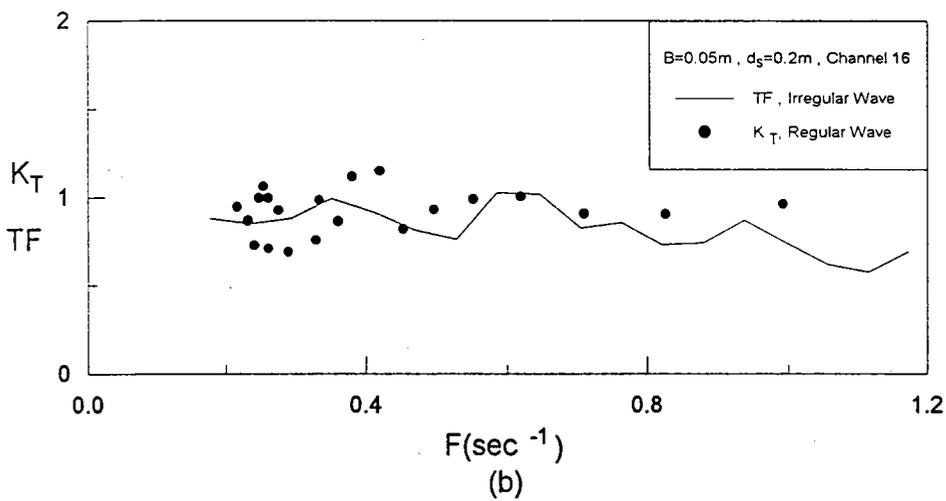
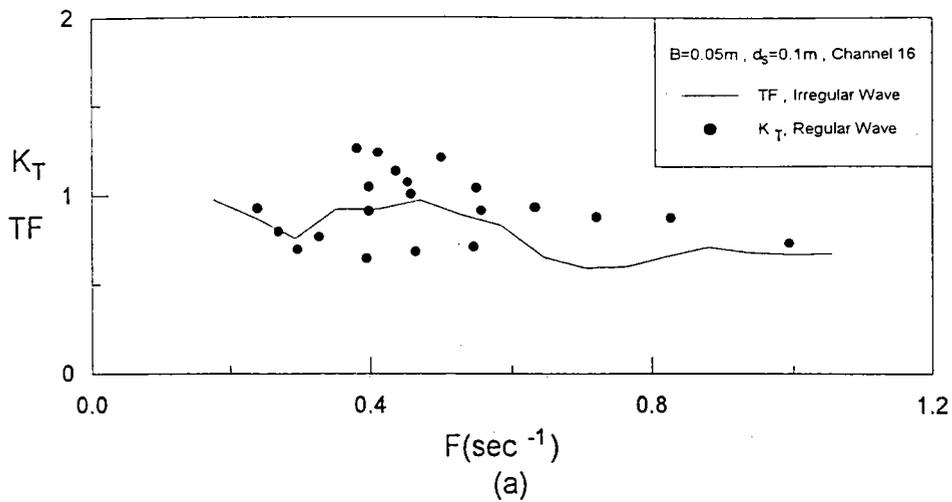


圖 5-24 等腰梯形潛堤、堤寬0.05公尺時不同堤上水深之不規則波轉換函數 (TF)與規則波透過率(K_T)之比較關係圖。

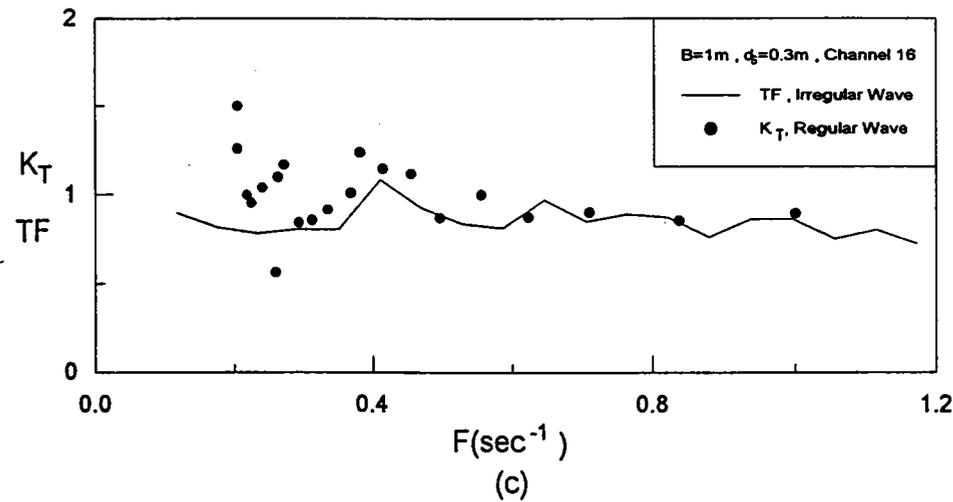
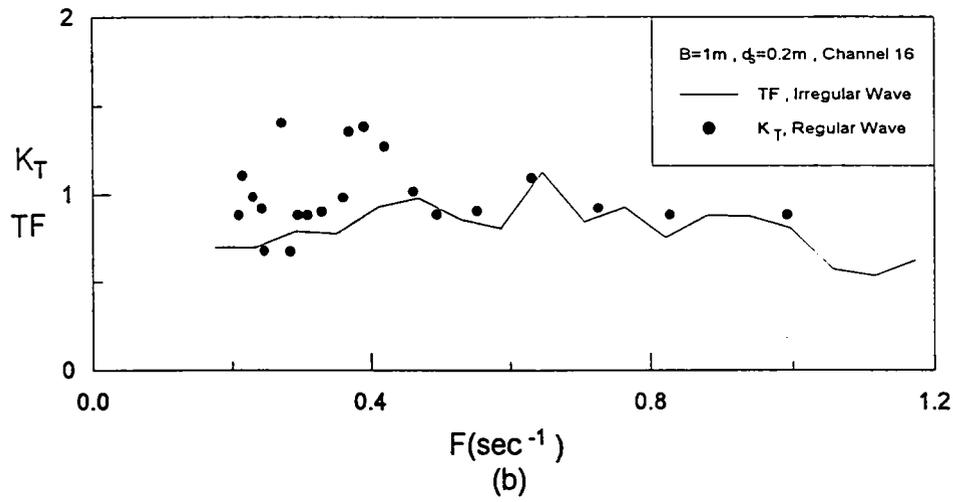
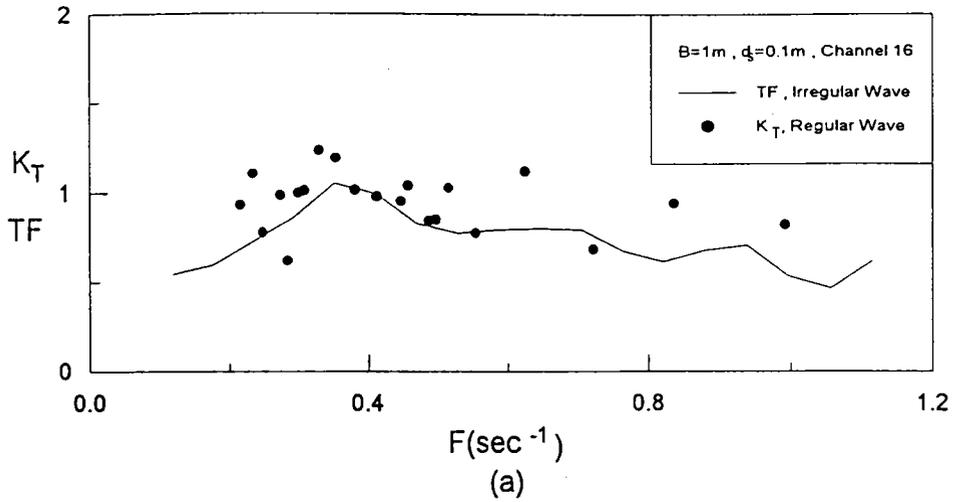


圖 5-25 等腰梯形潛堤、堤寬1公尺時不同堤上水深之不規則波轉換函數(TF)與規則波透過率(K_T)之比較關係圖。

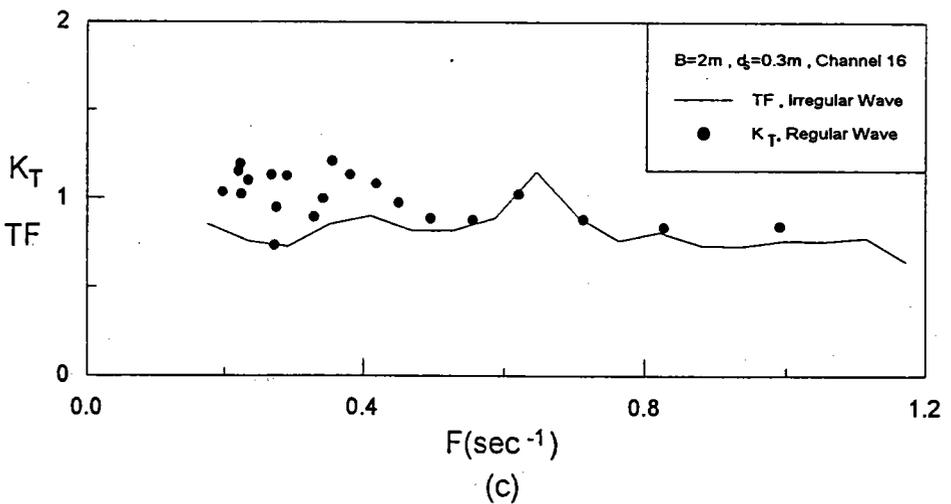
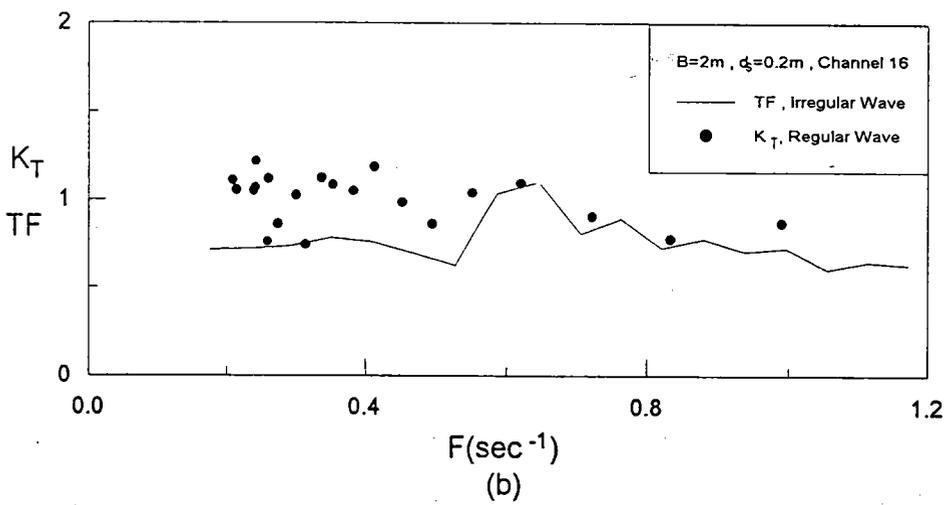
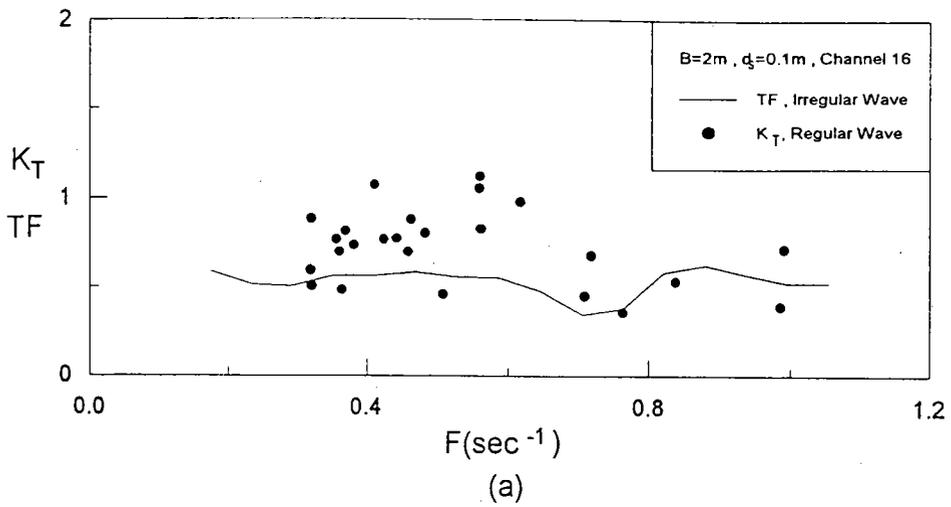


圖 5-26 等腰梯形潛堤、堤寬2公尺時不同堤上水深之不規則波轉換函數(TF)與規則波透過率(K_T)之比較關係圖。

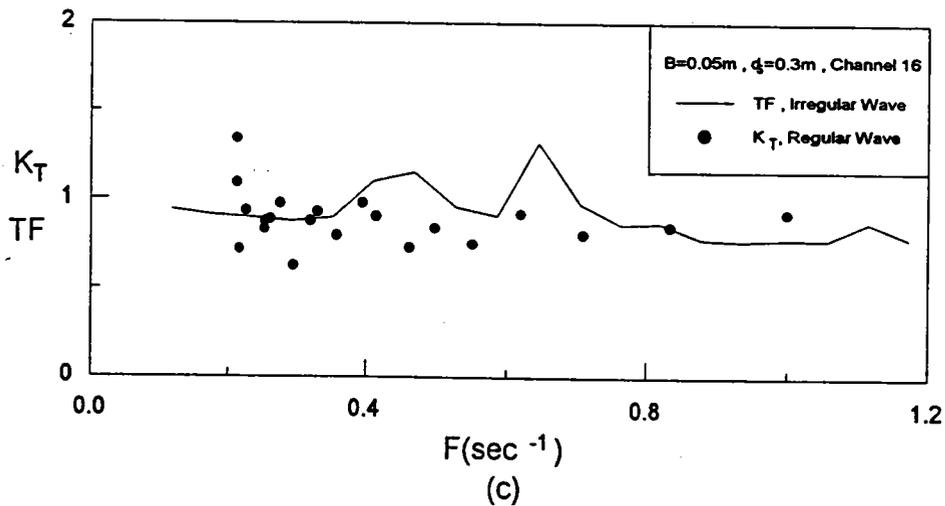
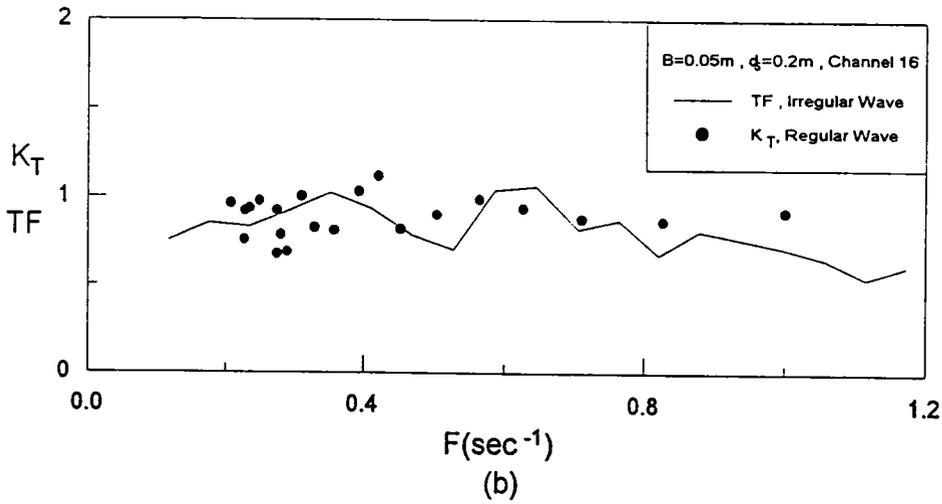
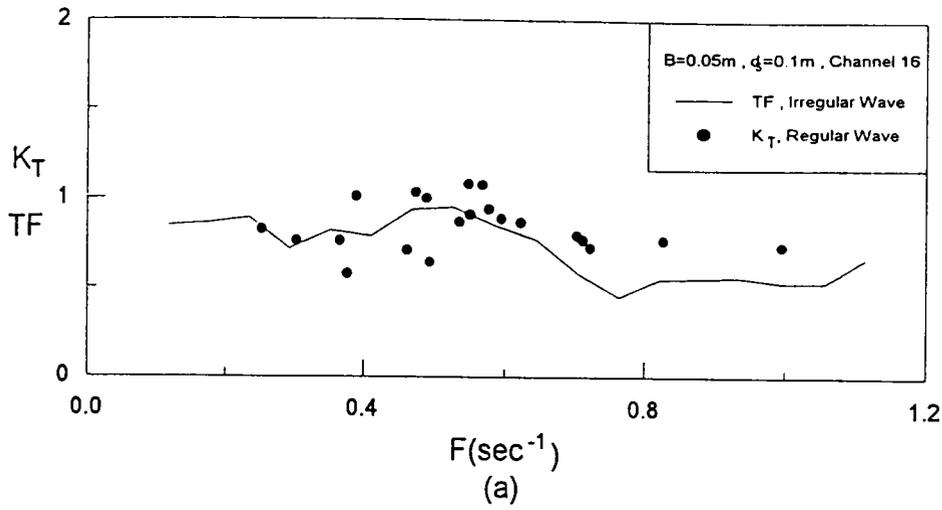


圖 5-27 堤寬0.05公尺之曲面邊坡形不透水潛堤，不同堤上水深之不規則波轉換函數(TF)與規則波透過率(K_T)之比較關係圖。

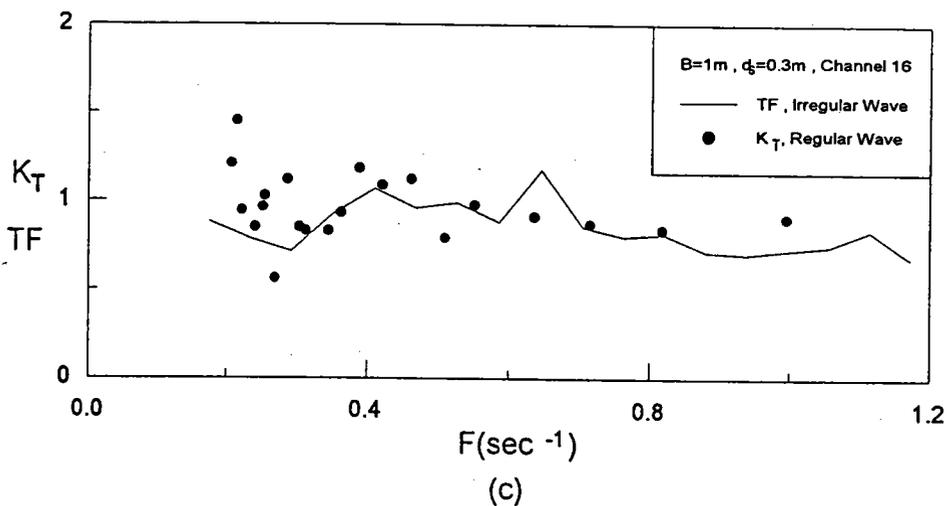
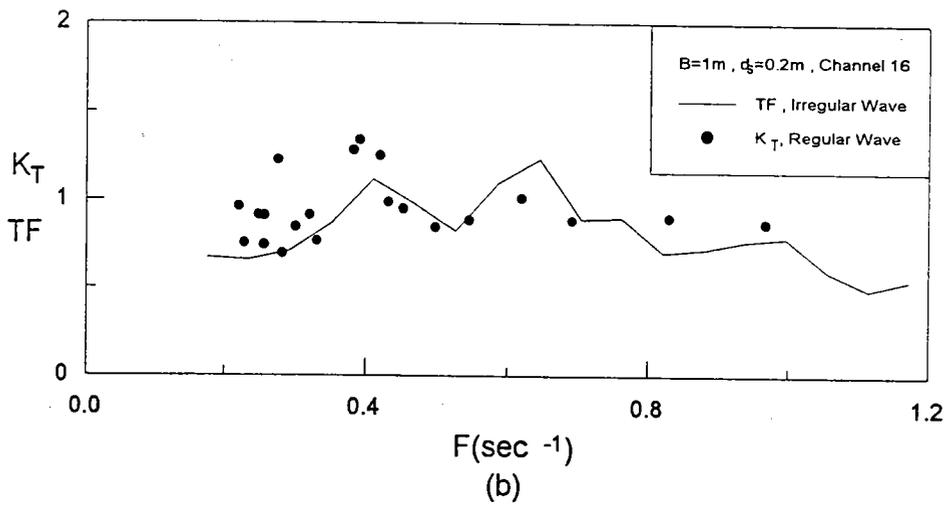
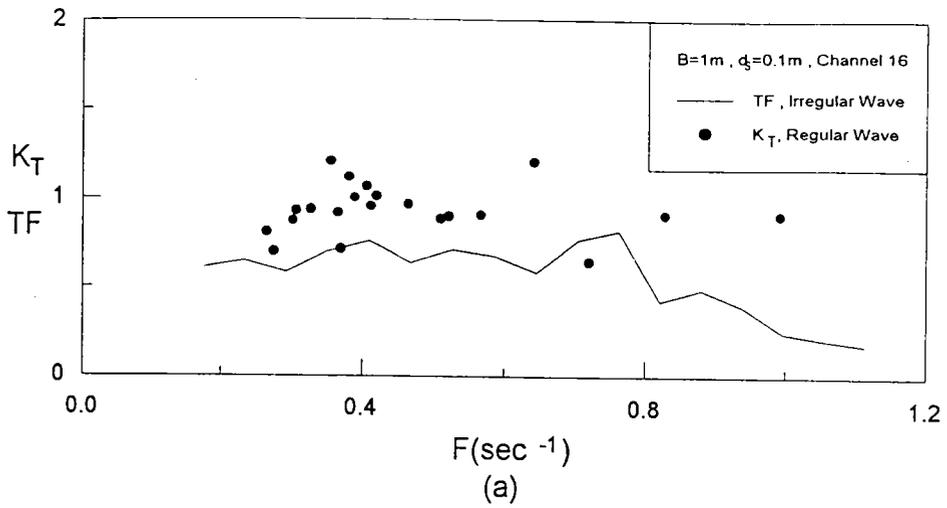


圖 5-28 堤寬1公尺之曲面邊坡形不透水潛堤，不同堤上水深之不規則波轉換函數(TF)與規則波透過率(K_T)之比較關係圖。

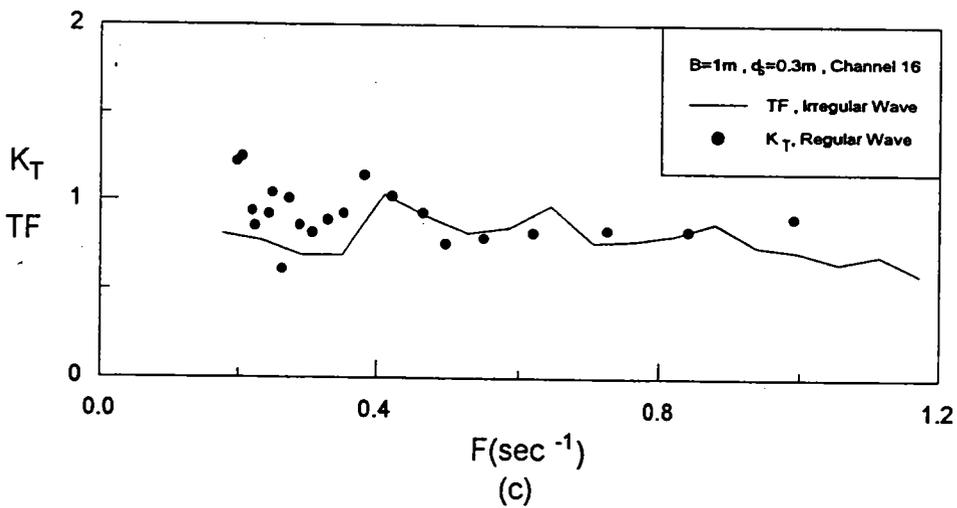
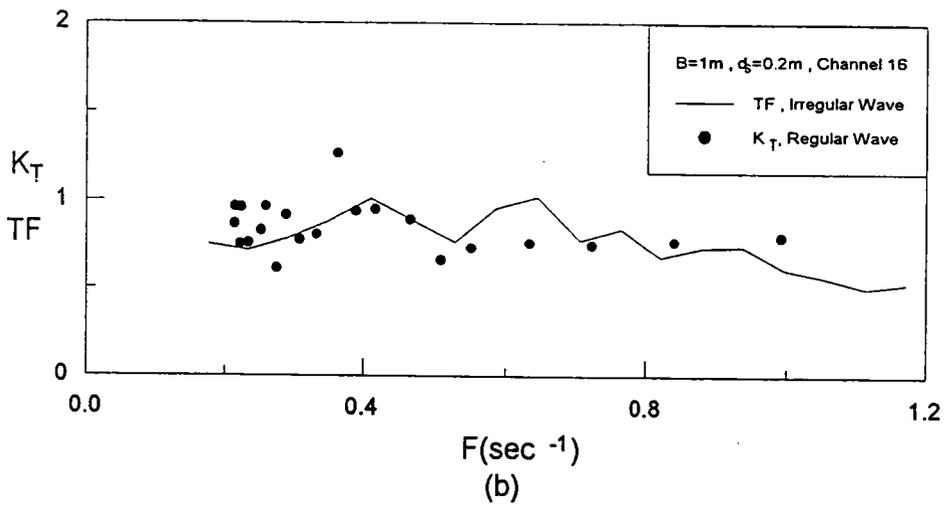
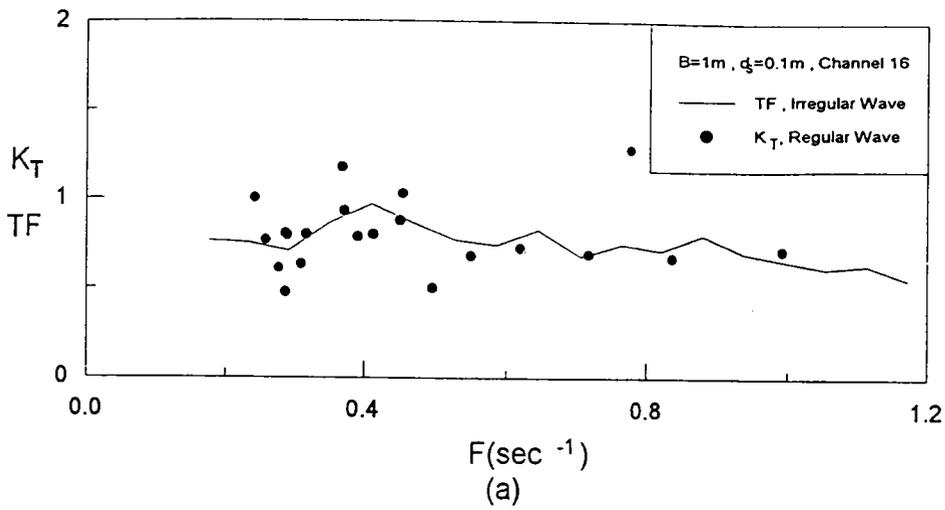


圖 5-29 透水潛堤、堤寬1公尺時不同堤上水深之不規則波轉換函數(TF)與規則波透過率(K_T)之比較關係圖。

C 部份

斷面模型試驗

(II) 噴水浮式防波堤之消波
特性及繫纜受力探討

C 部份	斷面模型試驗—(II)噴水浮式防波堤之消波特性及繫纜受力探討	
第一章	前言.....	3-1
第二章	各種消波式防波堤之回顧與比較.....	3-3
第三章	試驗說明.....	3-5
3-1	試驗設備與儀器.....	3-5
3-2	試驗佈置.....	3-6
3-3	試驗條件.....	3-6
3-4	試驗數據之處理與分析.....	3-7
第四章	試驗結果分析.....	3-10
4-1	表面流速對波形與頻譜特性之影響.....	3-10
4-2	表面流速對堤前波高比之影響.....	3-11
4-3	表面流速對透過率影響.....	3-12
4-4	最大繫纜受力分析結果.....	3-15
4-5	噴水浮式防波堤應用於花蓮港內之消波.....	3-16
第五章	結論.....	3-17
	參考文獻.....	3-18
	附圖.....	3-19
	附表.....	3-47

C 部份 斷面模型試驗

(II) 噴水浮式防波堤之消波特性及繫纜受力探討

第一章 前 言

花蓮港在颱風時的西南向入射波浪依南濱海岸前進，如依本文 B 部份規劃設置突堤式潛堤來逼迫入射波浪之能量往高頻部份傳遞使得進入港內之能量分佈頻寬增大，降低可能產生港池振盪的成份波能量使得進入港內之各成份波能，借由消波式構造物來阻擋其波能傳遞進入花蓮港內港，即可避免因港型所產生的振盪模態。因顧及港內船舶航行故無法在港內構築固定式的消波構造物，因此臨時性的浮式防波堤便形成本計劃搜尋的目標。花蓮港正好在內港與外港間有一較寬的水道，此航道為設置暫時性且可迅速移位的消波構造物的理想地點。

傳統的消能設計以構築防波堤來阻斷波浪的入侵，減緩入射波浪直接對海域構造物之衝擊，獲致保護海域設施與靜穩水域之目的。而傳統的消波構造如潛堤、傳統式重力防波堤、離岸堤等設施，直接與海相做正面的防護，阻絕波浪的侵襲，同時在堤後提供一極佳的遮蔽區域，相對使海水流通性變得很差，而變成水質劣化，對近海養殖漁業亦產生相當嚴重的問題，又直接硬性抵抗外力作用的結果，往往在某些區域得到保障，必也在另一區域造成危害，同時對於海岸自然景觀亦有某種程度的破壞，減少觀光遊憩的價值。鑑於傳統重力式構造物的缺失，近期更有對許多學者致力於新型浮式消波構造物的開發與研究，如以產生氣泡簾

(Bubbles Curtain)來消浪的氣體防波堤，增加表面流速之水力防波堤，水中或水面設置平板逼使波浪分裂消能的壓波板，廢輪胎組合而成的輪胎式浮堤，水面彈性薄膜的消波構造，中空型剛性繫留浮體....等等浮式構造物，以上各型構造物之消波特性係依構造物本身對水域所佔的尺度比來消浪或以增加水流速度來造成波流交會消去波能等二種主要機制來消能，因此往往造成實際上尺度無法達到足夠大或水流速度無法破壞入射波而失去其消能特性。

基於以上之討論獲知，傳統式重力防波堤及浮式防波堤皆存在有使用上之限制與消波功能無法彰顯之問題，本研究基於此，提出利用三個圓形柱體，同時由圓形防波堤上噴出水流造成表面均勻流的噴水浮式防波堤之新型消波堤構想。其主要消波機制係組合傳統的構造尺度效應及波流交互作用來消浪之雙重特性，達到阻絕入射波浪入侵又可達到水質交換之目的，本研究提出之噴水浮式防波堤之設計具有簡單設置及配合各種波浪條件來改變其水流速度，使得消浪範圍增大之特性。其可做為海埔地在圍堤封口時的臨時阻波設施，減小工程施工危險性，並減低對天候的依賴性，增長海岸施工之工期，減低不規則波各成份波之能量，減少因某頻率能量而引起共振的機會，漁港在颱風期間內常受漁船回港避風造成港內漁船受颱風影響之相互碰撞，如於適當地點設置噴水浮式消波堤可簡易避免此碰撞之可能，減低漁船之損壞，增加西部海岸每年可開放海水浴場之使用時間，提供更長休閒遊憩時間，保護箱網養殖....等等之臨時構造物。由於噴水浮式防波堤為柔性體具有噴水構造，理論分析尚未有有效之解析方式，因此本文以模型試驗的方式來探討其消波特性，期望提供花蓮港在阻止或減少產生振盪的成份波進入港內時的消能構造設計，並供規劃時之參酌。

第二章 各種消波式防波堤之回顧與比較

近年來各專家學者曾致力於各種消波式防波堤之研究，而各種構造物之使用原理及其效益，試分述如下：

1. 潛堤

為消波式防波堤的前身，係一種潛沒於水中具有消波效果，但允許部份波浪透過之防波堤，但隨著防波堤設置水深增加，勢必增加潛堤高度，築堤材料及經費，消波潛堤便逐漸失去其重要地位，但近期又因景觀考量及發現硬性抵抗會生另一區域的破壞，因此潛堤近期又重新加以再討論其軟性抵抗的效用。但潛堤本身尚屬於固定式結構物，無法靈活的變動其設置位置。邱廖(1990)，吳、吳、徐(1992)，歐、邱、廖(1995)曾提出潛堤的實驗與理論之研究。

2. 氣體式防波堤

氣體防波堤主要係利用一沉設於水底之打孔管線藉壓入空氣使其於管線上之水底產生一氣泡簾構成，而氣泡簾的消滅波能因子並非來自氣泡簾本身，而是氣泡自孔管中被壓出並上昇至水面時，因其在水面散逸而於表面某一深度內造成表面流速所致。在 Evans(1957)之實驗得知，在深水情況下，完成阻滯波浪之平均表面流速約與入射波長之平方根成正比例，但其比例仍會隨波高之不同而各異，但波長愈長欲完全阻滯特定波高之平均表面流速亦須愈大。

3. 水力式防波堤

應用噴嘴於水體表面附近噴水產生表面流速藉以造成防浪效果之配置。在水深固定下欲阻滯之波浪波長愈長，其所噴水之流量即需愈大。J. A. Williams (1963) 以不規則波試驗確定水力式防波堤之消波功能。

4. 繫留平板消波堤

當波浪通過平板時，因水深變化使波浪分成上下二種不同波長之波浪，通過平板上方波浪因水深變淺而使波長變短，此上下二種波浪於通過平板後會生重疊作用合成另一較短週期波能有效分散波能。周、黃(1995)，岳、郭、周(1993)之實驗與理論解析結果，發現水平板長度及強性係數可調整其有效的消波條件範圍。

5. 輪胎式防波堤

輪胎其本身材質具有柔韌性、耐久性，不易受海水沖蝕及不易風化，外形中空，有一定的尺寸，可利用不同的排列組合方式，作成一消波結構物，利用其孔洞的特性來增加對波浪的消波效果。陳、余、周等(1994)，郭、張、陳(1996)的試驗結果顯示，輪胎模型長度越長及入水越深消波效果較佳，輪胎組合問題會對長波短波具有較接近的消波效果。

6. 薄膜式防波堤

利用彈性膜隨入射波運動產生阻尼而獲消能之目的，陳、施(1995)，周、方(1995)之理論與實驗研究，發現彈性膜張力越大時，透過率特性與固定平板相似，對較長周期波以配置小張力消波效果較佳，對較短周期波則比較大張力消波效果較佳，彈性薄膜消波在實際施工上如何保持彈性膜之張力為最主要應克服之問題。

7. 噴水浮式防波堤

基於以上各種浮式防波堤的基本原理與特性，綜合運用其優點，而採用直接於水面噴水造成表面流速，同時利用三個圓柱浮筒來阻絕剩餘通過的波浪，使得其消浪不僅在短週期有明顯的效果，對長周期波亦有相當程度的功效。

第三章 試驗說明

3-1 試驗設備與儀器

本試驗乃是利用台中港灣技術研究所風洞實驗室中的斷面水槽進行，其試驗設備與儀器如下：

1. 斷面水槽

槽長 100 公尺，寬 1.5 公尺，高 2 公尺，右端設置一造波機，左端為消波設備，而造波板前約 35 公尺為透明玻璃水槽，以便觀察波浪進行時的變化。

2. 造波機

丹麥 DHI 公司出品之油壓式造波機，置於水槽右端，可由電腦控制，依試驗需求造出各種不同波浪條件的規則波與不規則波。

3. 容量式波高計、增幅器、電腦

經波高計感應水位訊號，藉由增幅器放大水位訊號，再由電腦完成記錄水位資料。

4. 噴水浮筒

浮筒四分之一均勻的開直徑 1.4 公分之圓形，噴嘴如圖一所示，浮筒由二個同心圓構成，由浮筒中央注入水，並由外圓均勻將水噴出造成均勻水流。

5. 流速計

電磁式 XY 二方向流速計

6. 張力計(Load Cell)

張力計之額定負荷為 20 公斤，最大受力可達 30 公斤，精確度為 1/3000。藉著張力計感應張力訊號，經由增幅器放大張力訊號，再經類比/數位訊號轉換器轉換成數位訊號後儲存於個人電腦內。

3-2 試驗佈置

由噴水浮筒與二個副浮筒組合成噴水浮式防波堤，每個浮筒之直徑為 20 公分，水深採用 100 公分之等深，各細部尺寸如圖一所示，實驗結構物前設置 4 根波高計測堤前波高變化，距浮筒前約 16m 處設置二根波高計量測入射波，結構物後設置 4 根波高計量透過波，距離 1.5 公尺之水下 5 公分處設置一支垂直與水平向之流速計量測流速。主、副浮筒兩端共以 4 條繫纜加以拉住定位，其中 2 條繫纜在向波側，另 2 條繫纜則在另一側。4 條繫纜之底端各別先與張力計連結，張力計再以接環(shackle)與水槽底固定。而繫纜之上端則先與彈簧連接，彈簧再與浮筒連結。向波側之 2 條繫纜，每條長度 185 公分，其中包含長度 5.5 公分之彈簧。彈簧之彈性係數為 69.3kg/cm。彈簧以外之繫纜部份，在張力計之額定負荷作用下，長度不會有所伸長。因此繫纜之伸長量將全部來自彈簧之貢獻。

3-3 試驗條件

本實驗採用不規則波與規則波實驗，噴水造成之表面流速採用 6 種不同流速，水深僅採 100 公分等深試驗。每種流速實驗的波浪實驗條件由週

期 0.8 秒到 5 秒每隔 0.2 秒做實驗一次，規則波共做規則波 274 次實驗，不規則波共 192 次實驗，其條件如表一、表二所示。

3-4 試驗數據之處理與分析

1. 規則波實驗

本實驗之取樣頻率為 30Hz，取樣時間為 60 秒，其穿透率係採入射波連續 5 個波之平均波高和穿透結構物後連續 5 個波高之平均值之比值和式一所示

$$K_r = \frac{H_L}{H_i} \quad (1)$$

K_r ：為透過率

H_L ：連續 5 個當地波高之平均值

H_i ：連續 5 個入射波高之平均值

2. 不規則波試驗

水位訊號之採樣效率為 30Hz，取樣時間為 120 秒，分析透過率時取離浮筒較近之第 7 支和 8 支波高計所量測到的水位訊號之波譜能量之開平方值與入射波之頻譜能量的開平方法之比值為透過率的實驗結果，其定義下式：

$$K_T = \frac{\sqrt{m_0 L}}{\sqrt{m_0 i}} \quad (2)$$

此處 K_T ：透射率

$m_0 L$ ：當地頻譜之總能量

$m_0 i$ ：入射頻譜之總能量

3. 平均流速

噴水浮筒噴出之水流速度之量測位置採浮筒前 1.5 公尺之斷面，水下 5 公分處之流速共取同一斷面 5 個同水深不同位置之流速，再取其平均值為平均流速。

4. 不規則波試驗

本實驗水位訊取樣時間為 120 秒，取係頻率為 30Hz，因此對噴水浮筒後各測點之水位訊號分析採 1024 個資料點為一樣本空間，對每個樣本進行 FFT 較換，同時取 7 個數據之移動平均作為本實驗之波高頻譜 (power spectrum) 的基本資料。假設經由傅立葉轉換後，水位訊號 $x(t)$ 之傅立葉係數 $x(f)$ ，其中 t 代表時間， f 表頻率，則水位訊號之能量頻譜定義如下：

$$S_{xx}(f) = e[x(f)\bar{x}(f)] \quad (3)$$

其中

S_{xx} : 水位訊號之能量頻譜

$E[]$: 期望值

$\bar{x}(f)$: $x(f)$ 之共軛複數

5. 最大繫纜受力分析方法

本文只分析向波側 2 條繫纜之總受力時間序列，其乃由此 2 條繫纜各別量測之受力，在同一時間予以線性相加而得。經把表一及表二中之各試驗條件下所得之向波側繫纜總受力之最大值加以分析，同時在不同噴水流速之試驗條件下，將試驗所得資料依下列三組不同尖銳度

- a. $0.025 < H/L$
- b. $0.008 < H/L \leq 0.025$
- c. $H/L \leq 0.008$

分類，各別以 $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 作圖加以分析，

式中

F_{MAX} : 向波側 2 條繫纜總受力之最大值(kg)

GAM : Weight Density= $0.98\text{kg}/\text{cm}^2\text{s}^2$

D : 主浮筒直徑(cm)

BL : 主浮筒長度(=140cm)

H : 入射波之有義波高(significant wave height , cm)

T : 入射波之有義周期(sec)

L : 相對 T 之波長(cm)

$F_{MAX}/GAM/D^2/BL$, H/L 及 L/D 均為無因次參數。

第四章 實驗結果分析

4-1 表面流速對波形與頻譜特性之影響

圖 2-(a)~圖 2-(g)為規則入射波經由不同表面流速作用下，入射波穿越浮式防波堤後之水位變化歷時圖。圖 2-(a)為入射波水位歷時圖，由圖 2 之各圖可發現在沒有表面流速作用時波浪僅受三個浮筒作用時水位變化遞減相當有限，而其波浪之周期似乎沒有改變，僅波峰與波谷處有變尖之趨勢。加入表面流速後通過浮筒之水位變化立即明顯的變小，其變化隨表面流速之增加而減小，而其波峰處稍而變平之趨勢，但週期尚保持原來入射時之周期，圖 3 各圖表示在浮筒前之水位歷時變化，其入射波之水位歷時圖如圖 2-(a)所示，由圖 3 各圖可明顯得知，在表面流速為零時浮筒前之水位變化與入射波之水位變化幾乎相同，表示浮筒之反射作用相同小，幾乎沒有反射現象，但表面流速由小加大時可得知在小流速時，浮筒前之波能水流之影響而有明顯的減小，但表面流速大到某程度時，浮筒前之波浪受水位阻滯而產生明顯的水位增大同時發生群波現象，波群之周期隨表面流速之增加而減小，而此波浪以阻滯效應使得穿透波能相形減少甚多。

圖 4 和圖 5 分別表示不規則波其主頻不同，而波浪在各種不同表面流速作用下之入射頻譜，堤前頻譜與堤後頻譜之比較圖，而各圖中實線表示入射頻譜點線表示堤前頻譜，○ 號表示堤後頻譜。由圖 5 各圖中可得知，入射頻譜之主頻較高時，在低表面流速時，其堤前頻譜能量與形狀皆與入射頻譜相似，流速增加時明顯的堤前頻譜能量增加到入射頻譜能量 1.5 倍之以上，甚至高達 3 倍，但頻譜形狀尚稱相似。堤後頻譜能量無

論表面流速大小皆較入射頻譜能量為小，而其能量減小部份皆發生在頻率皆高的成份波上，而低頻部份之能量便甚減低，因此使得堤後頻譜向低偏之趨勢，表面流速愈大時此現象更明顯。由圖 5 各獲知，在入射頻譜主頻較低時，堤前頻譜之能量無論表面流速大小皆有消能的現象，其能量損耗亦為較高頻之成份波，堤後頻譜能量亦有相同之趨勢，惟其能量遞減較大。

由以上規則波與不規則波之討論得知，表面流速造成阻滯波能前進之效應與入射波之波速有相當密切的關係，週期愈長之波浪需愈高之表面流速來阻止其波能前進。表面流速不夠大無法阻止波能時亦有部份消能之能力，因此可得知噴水浮式防波堤對於任何頻率之波皆有其消能之作用，亦即可降低各成份波之能量。

4-2 表面流速對堤前波高比之影響

1. 與頻率之關係

圖 6 之各圖中空心圓表示在不同表面流速，頻率與堤前波高比之比較關係圖。圖 6-(a)表示在無流速之情況，主頻在 0.25 以下時其堤前波高比大於 1，此係因浮筒隨波浪運動而有類似造波機造波之現象，使得堤前之波高增大。表面流速增加到足以阻滯波能時堤前波高比大於 1，而流速如不足以阻滯波能時雖然波浪為短週期波，亦僅能消除部份高頻成份波的能量，在本研究中發現主頻低於 0.4Hz 以下，其表面流速即需相當大才能阻隔波浪前進，否則其波高比約在 0.7 ~ 1 之間平均約可消滅 2 成之波能。而主頻率愈高愈容易產生阻隔波浪前進減少波浪傳遞達到保護堤後之目的。

2. 與尖銳度之關係

圖 7-(a)~圖 7-(f)各圖中之空心圓分別表示不同表面流速作用下堤前波高比與尖銳度之關係，尖銳度為主頻波長與示性波長之比值。圖 7-(a)表示表面流速為零時尖銳度愈小受浮筒群之反射愈大。表面流速由小增大後可明顯的由各圖發現尖銳度愈大時對表面流速敏感度愈大，愈造成阻滯現象波高甚至加大到 2~3 倍，而小尖銳度及小表面流速時其堤前波高比值愈小。

3. 與 $\frac{dh}{L}$ 入水深度與波長比之關係

圖 8 各圖中之空心圓表示入水深度 z 波長之之比值與堤前波高之關係比較圖，圖 8(a)無表面流速僅為浮筒消能的情況，在 dh/L 值愈小，由於浮筒隨波運動而有造波現象發生，故堤前波高有增大趨勢， sh/L 愈大時其堤前波高比值愈小，消能效果約在 3 成左右。當表面流速約在 10cm/sec 時， dh/L 由大增到 0.2 時堤前波高比由 0.5 增到 1.0，而 dh/L 由小增到 0.2 時堤前波高比由 0.5 增到 1.0，而 dh/L 再增大時堤前波高比反而下降，表面流速大時， dh/L 值愈大時，堤前波高比快速增大，故可得知表面流速愈大時欲得到較大的阻滯效能時，不需有很大的入水深度，反之表面流速愈小時需有大的入水深才能得到較佳的阻滯效果。

4-3 表面流速對透過率之影響

1. 與頻率之關係

圖 9-(a)~圖 9-(f)中空圓表示為規則波實驗，在不同表面流速下透過率與頻率之關係比較圖，圖 9-(a)為表面流速為零時，透過率與頻率之關係圖，由圖中發現在沒有表面流速來做波流交互作用時，其透過率隨頻率略有頻率增加而透過率減小之趨勢，惟其變化量相當小，而其透過率大多集中在 0.9 左右，依頻率關係變化不大，其顯示三個放置

在不同水深之浮筒所產生的消能效果約為 10\%~ 20\%之間，依波浪頻率增加而消能力遞增，由圖 9-(b)~圖 9-(f)各圖可明顯發現，頻率在 0.6Hz 以上之波浪其透過率在不同表面流速下皆隨頻率之增加而遞減，而其遞減率隨表面流速增加而增加，在本實驗之條件頻率約在 0.4Hz 以下時其透過率較大，平均在 0.8 左右。

圖 9-(a)~ 9-(f)中 x 號表示為不規則波實驗在不同表面流速下之透過率與頻率之關係圖，由圖 9 之各圖中以規則波與不規則波實驗結果比較，獲知不規則波與規則波實驗所得的透過率隨頻率變化的趨勢相似，但不規則透過率較小於規則波之透過率。圖 6 中各圖之 x 號表示不規則波實驗之透過率與頻率之關係，由各不同表面流速情況下堤前波高比與透過率隨頻率變化之比較中可發現如堤前發生表面流速足以阻絕波能前進時，其透過率便變成相當低。而在低頻(小於 0.4Hz)時無論表面流速為大，其堤前波高比亦透過率約在 0.8 左右。

基於以上之討論獲知，透過率隨表面流速之增加，在較高頻(大於 0.5Hz)處，透過率隨頻率增加而遞減其遞減率與表面流速成正比。而遞減率愈大其堤前阻絕波能之能力愈強。

2. 與尖銳度(H/L)之關係

圖 10(a)~圖 10(f)，各圖中之空心圓表示規則波實驗在不同表面流速下之透過率與尖銳度間之關係圖，在無表面流速僅靠三個浮筒來消浪之情況下，其透過率雖隨尖銳度之增加而稍有下降之趨勢，但甚不明顯，但尖銳度 0 到 0.02 之間透過率約為 0.9 左右，0.02 到 0.04 間其透過率約在 0.8 左右，由此可知浮筒本身消浪能力約在 2 成左右。在表面流速由小到大遞增(由圖 10(b)~圖 10(f))，其透過率皆隨尖銳度之

增加而遞減，其遞減率隨表面流速的加大而增加，但由各圖亦可明顯發現雖透過率隨尖銳度增加而減少，而其分布雖有序但相當散亂。由透過率隨頻率增加而遞減的結論來推斷，入射波高應為影響其散亂以另一原因，本研究之三個浮筒之組合係個別連接可分別運動，對波高的阻絕有任其通過的特性。圖 10(a)~圖 10(f)各圖中之*號表示不規則波由實驗在不同表面流速下之透過率與尖銳度間之關係圖，由各圖中之規則波與不規則波之實驗結果比較，可明顯發現，不規則實驗在各條件下透射率與尖銳度間變化之趨勢和規則波相似，但其透過率低於規則波的實驗結果。

圖 7a ~圖 7(f)各之 x 號表示不規則波在不同表面流速下透過率與尖銳度之關係圖。由各圖之堤前波高比和透過率與尖銳度之比較得知堤前波高比愈大透過率愈小，亦即波浪受阻滯後傳遞到堤後便相當有限，因此達到消浪之目的。

3. 與 dh/L (入水深度與波長比)之關係

圖 8(a)到圖 8(f)各圖中之 x 號表示不規則波試驗在不同表面流速下 dh/L 值(dh 為入水深度， L 表頻處之波長)與透過率之關係圖，由圖 8(a)中得知在表面流速為零時， dh/L 值在小範圍內變化其透過率變化便相當大。表面流速增加時入水深度與波長比愈大其透過率愈低， dh/L 約在 0.1 左右，其透過率愈大，但 dh/L 比 0.1 小時其透過率隨 dh/L 愈小而遞減。再與圖 8(a)~圖 8(f)中空心圓比較得知透過率愈小，其堤前波高比愈大表示阻滯效果愈好，能量無法有效通過噴水及浮筒體積的阻擋。由以上討論可得知，如噴水造成表面流速無法提高時，應改以較大的入水深度來補足表面流速阻滯波能之功效。

4-4 最大繫纜受力分析結果

根據分析表一及表二全部試驗條件下之結果，在不同之無因次參數 H/L 及 L/D 下，無因次參數 $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 均小於 0.00055，亦即向波側繫纜最大總受力小於 $0.00055 \times GAM \times D^2 \times BL$ (公斤)，由此關係，即可據以估算噴水浮筒向波側繫纜之最大總受力。

當估算此最大總受力之後，經適當考量尺度效應(Scale Effect)後，即可據此擬定原型(Prototype)噴水浮式防波堤之其他可行佈置方式，並估算所須繫纜之大小，以有效地固定此噴水浮式防波堤。

根據 Harms(1979)，其針對輪胎式防波堤所做之試驗分析得知， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 隨著 L/D 之增加而增加。

圖 11 到圖 16 為表一及表二中流速為 26.5cm/sec 時，在不同尖銳度下，噴水浮式防波堤向波側繫纜最大受力 $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之趨勢。圖 11 ~ 13 為規則波試驗結果，圖 14 ~ 16 則為不規則波之試驗結果。圖 11 及 14 之入射波尖銳度 H/L 均大於 0.025，圖 12 及 15 之尖銳度為 $0.008 < H/L \leq 0.025$ ，而圖 13 及圖 16 之尖銳度則為 $H/L \leq 0.008$ 。由圖 11 及圖 14 可知，在入射波尖銳度大於 0.025 之條件下， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 有隨 L/D 增加而增加之趨勢，此現象與 Harms(1979)對輪胎式防波堤試驗結果類似。但在圖 12、13、15 及 16 等波浪尖銳度小於 0.025 之條件下， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 而言，則顯得散亂，而無規律性存在。其它流速下之結果，如圖十七至圖四十六所示。

4-5 噴水浮式防波堤應用於花蓮港內之消波

於港內設置消波構造物同時方便於船隻航行應以浮式構造物為主，本研究係以浮式構造物加入噴射水流來造成表面流而與入射波做波流交互作用來達到阻滯波能前進而避免港池產生振盪之效果，據本研究之現調查結果，港內發生 150 秒左右之長週期波，如針對此長週期之波浪本研究提出之噴水浮式防波堤似乎無法滿足消浪的功能，應另謀其他導引波浪消散的方式。

依據本研究之結果，如噴水速度採 40cm/sec 防波堤直徑為 2 公尺應可消除 15 秒以內之長週期之能量 30%至 40%，但依據波譜之頻率域之觀點，可得知其消能之頻率點範圍局限於高頻對於低頻之波動消滅能力有限。由以上討論得知如欲消除較短週期的入射波設置此浮式噴水防波堤應有相當良好的成果，但對於長週期波其消能效果有限，至於繫纜力如加強其結構張力應可以克服較長週期波之作用力。

第五章 結 論

本文利用模型試驗來探討噴水浮式防波堤的消浪特性，經由討論分析後得到以下結論：

1. 噴水造成的表面流速愈大時，其對短週期波之阻浪效果相當明顯，其堤前波高比因波流交互作用的結果，其波高可能高達3倍的入射波高。
2. 噴水造成表面流速如無法滿足經濟條件下提高時，應改以較大的入水深度來補足表面流速阻滯波能之效。
3. 不規則波實驗結果無論是堤前波高比或透過率，皆比規則波驗結果來得小。
4. 表面流速由小加大時，在小流速時堤前之波能受水流之影響而有明顯的減小，但表面流速加大某程度時，浮筒到波浪受水流阻滯而產生明顯的水位增大同時發生群波現象，群波之周期隨表面流速之增加而減小，而此波浪的阻滯效應，使得穿透波能相減小甚多。
5. 不規則波受到表面流速作用和浮筒的反射下，其透過波之能量損耗為高頻成份波擁有的能量。
6. 在本文的試驗條件下，向波側繫纜總受力之最大值均小於 $0.00055 \times GAM \times D^2 \times BL$ ，經適度考量尺度效應後，可用以估算原型噴水浮式防波堤之繫纜受力，並據以估算所須繫纜大小。

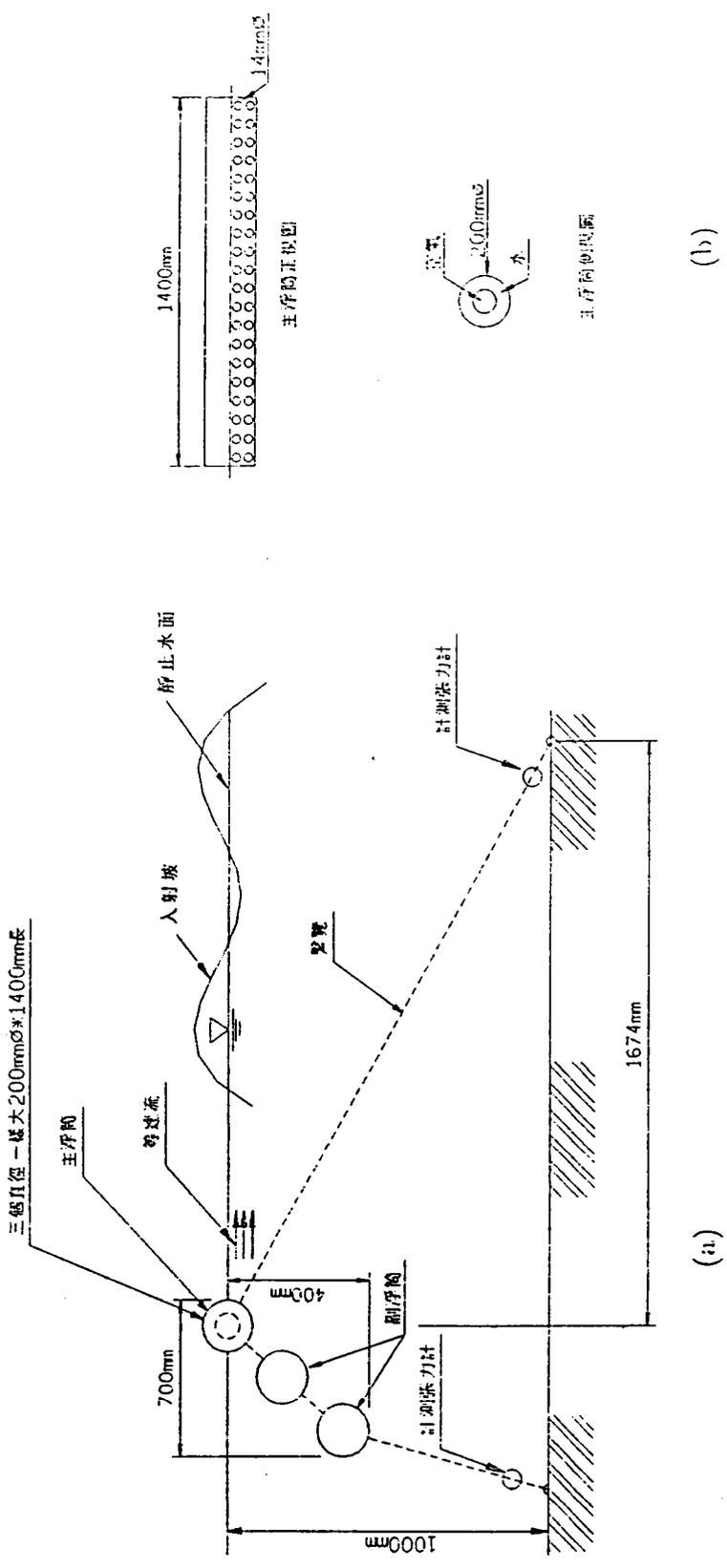
7. 在噴水浮式防波堤具有噴水流速且入射波尖銳度大於 0.025 之條件下，向波側繫纜總受力之最大值 $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 有隨 L/D 增加而增大之趨勢。
8. 在噴水浮式防波堤沒有噴水或雖噴水但入射波尖銳度小於 0.025 之條件下， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係顯得散亂。

參 考 文 獻

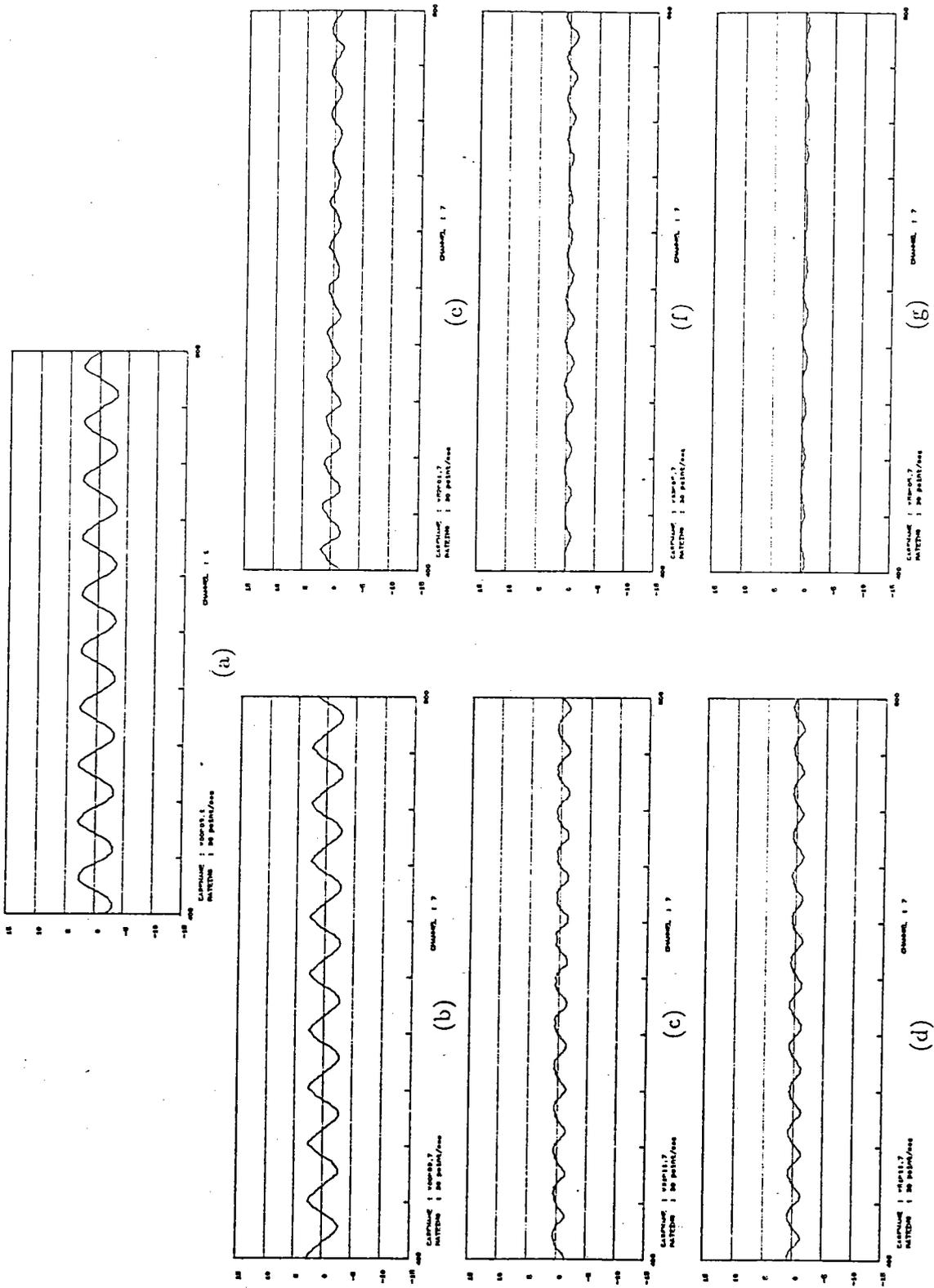
1. Evans, J. T., "Pneumatic and Similar Breakwaters", Proc. Royal Soc., A. Vol. 231, PP. 457-466.
2. Williams, J.A. & R.L. Wiegel (1963), "Attenuation of Wind Wave by a Hydraulic Breakwater", Proc. 8th Conf. on Coastal Eng. pp.500-520.
3. 郭一羽，張瑞欣，陳進昇(1995)，「輪胎式浮堤之消波效果與繫纜力之研究」，港灣技術第十一卷第一期，PP.89～111.
4. 邱永芳，廖慶堂(1990)，「潛堤後直立壁面上波壓特性之研究」，第五屆水利工程研會，PP.935-946。
5. 周宗仁、方惠民(1995)「水面彈性膜消波特性之研究」第十七屆海洋工程研討會，PP.443～458。
6. 岳景雲(1993)「潛堤式平板對海岸結構物消波減壓效果之研究」博士論文。
7. Harms, V.W.(1979), "Design Criteria for Floating Tire Breakwaters", Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division.

附

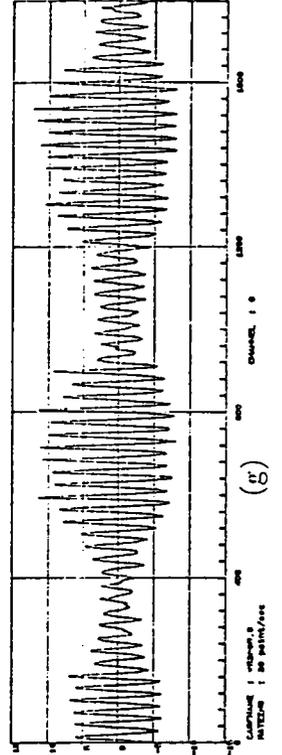
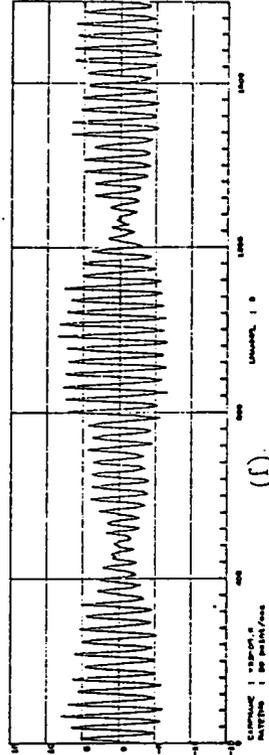
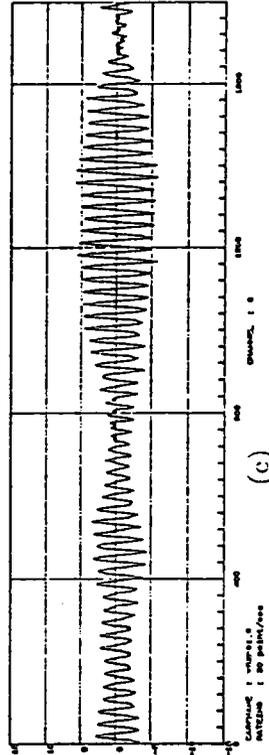
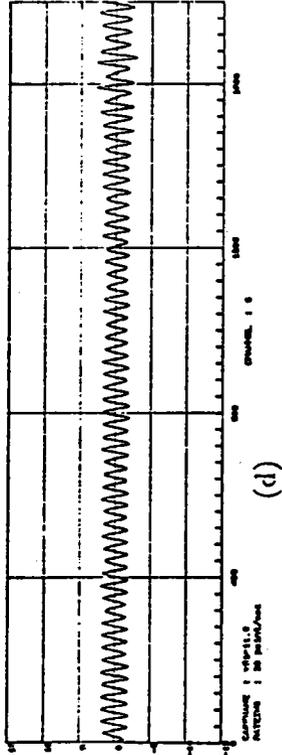
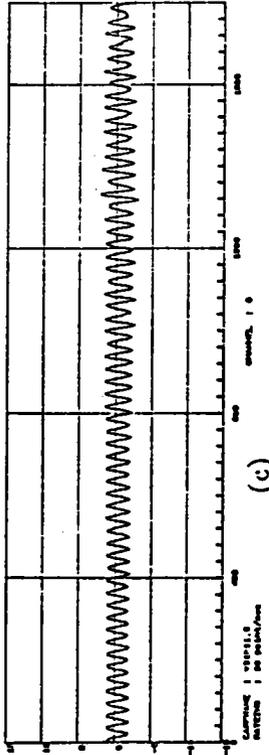
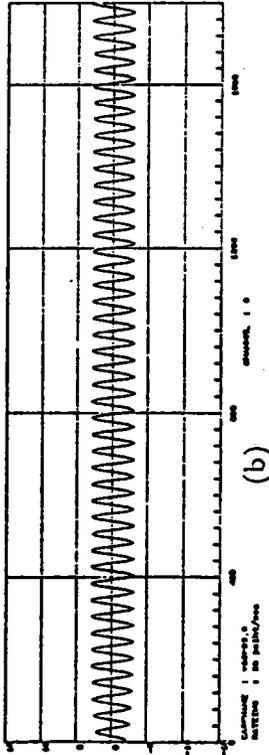
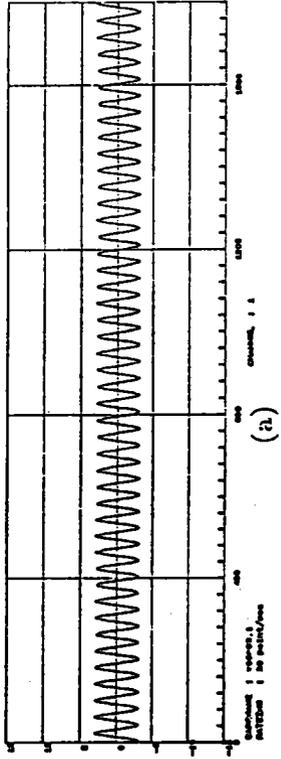




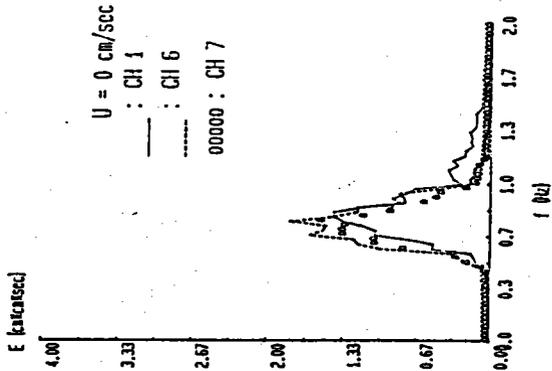
圖一 實驗佈置圖



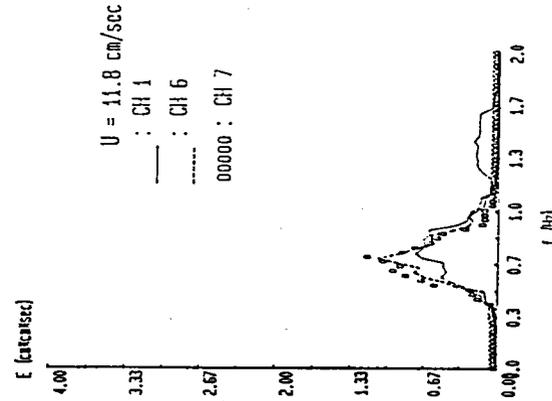
圖二 不同表面流速下，透過波之水位變化歷時圖



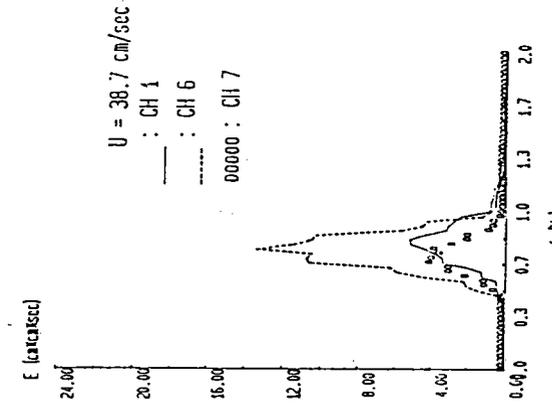
圖三 不同表面流速下，堤前水位變化歷時圖



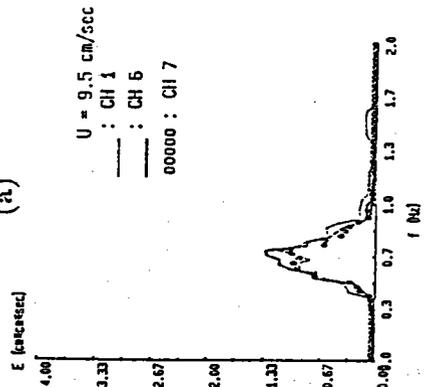
(a)



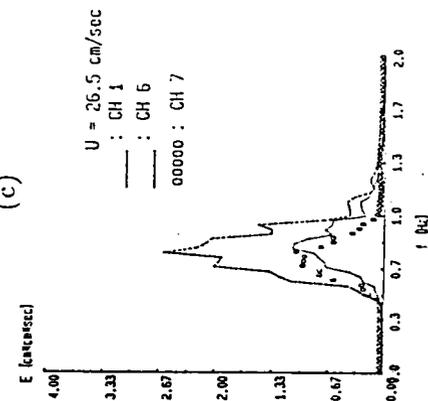
(b)



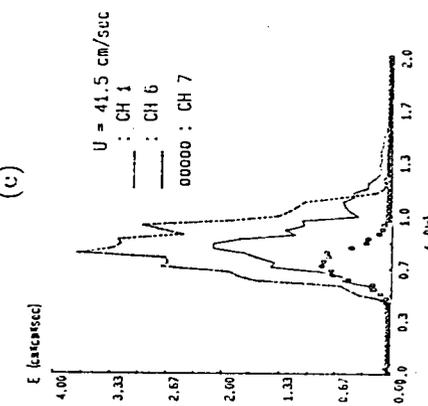
(c)



(d)

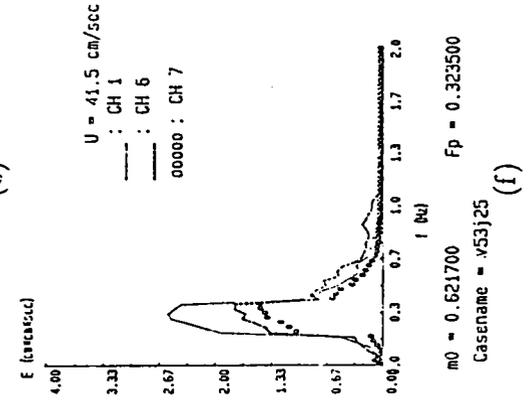
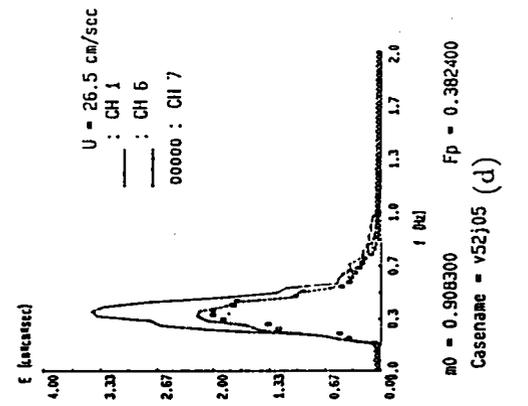
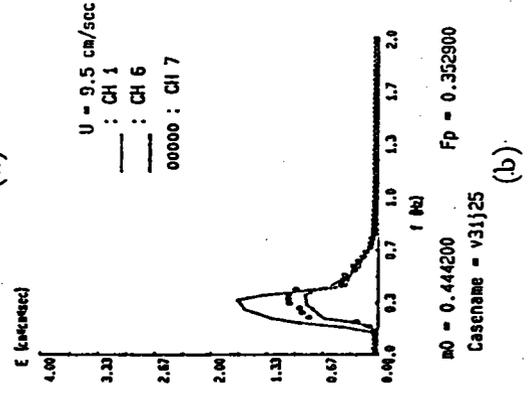
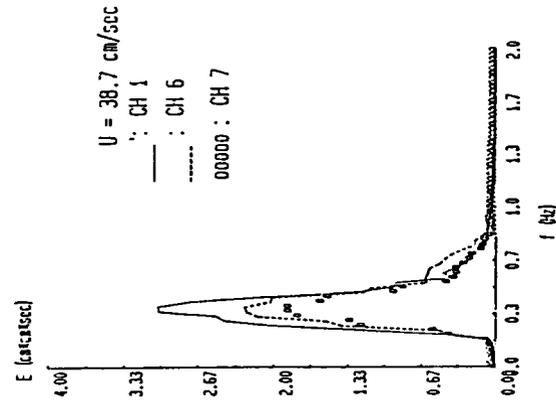
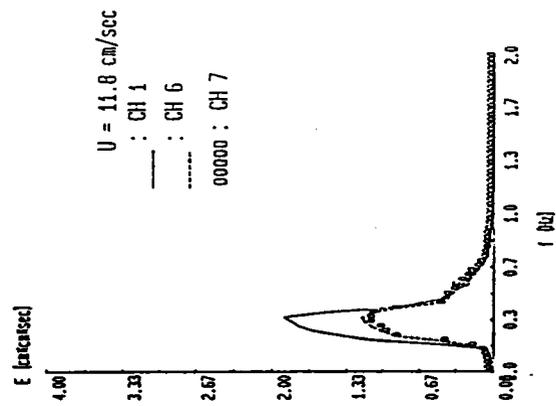
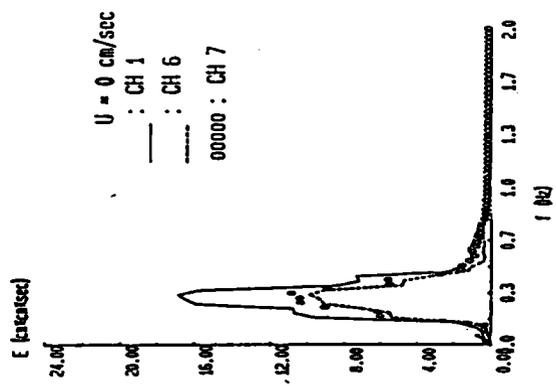


(e)

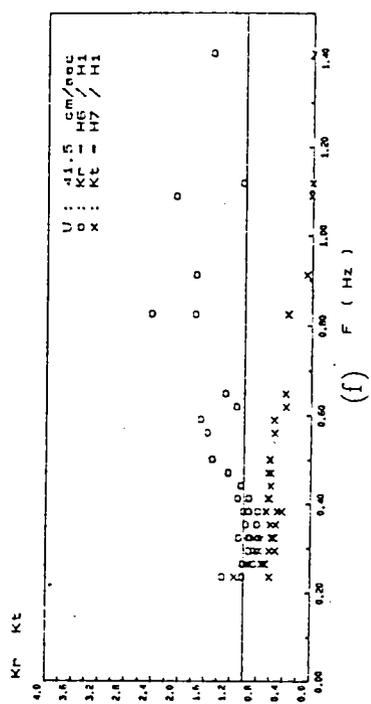
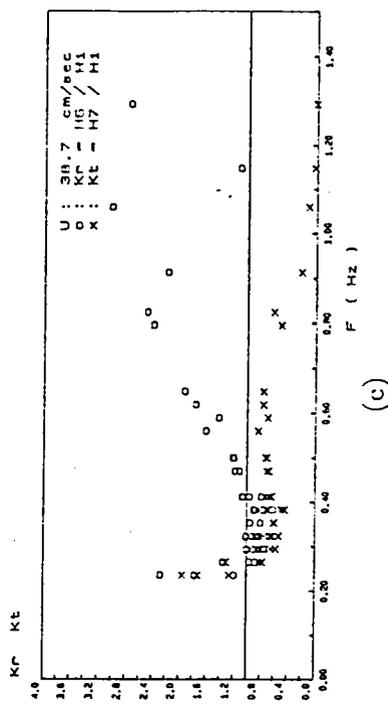
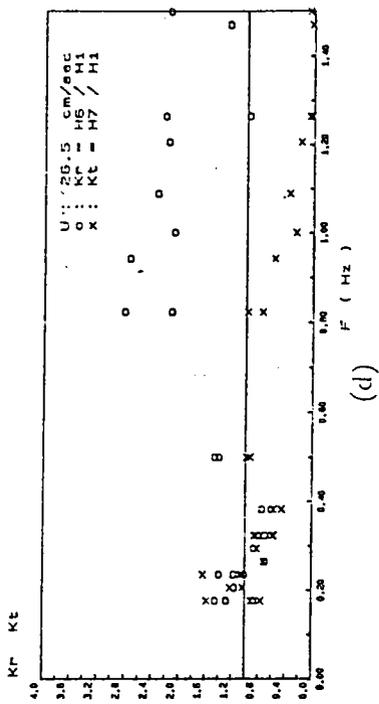
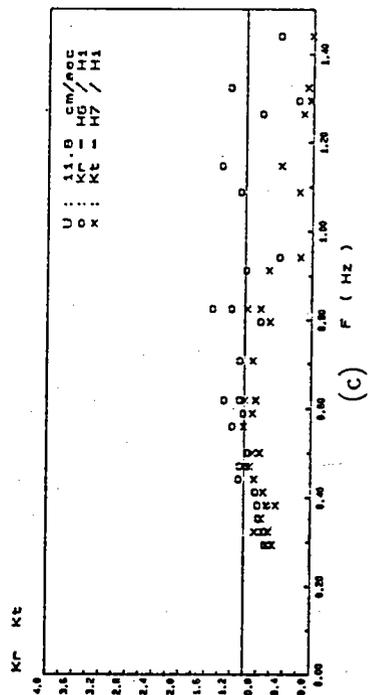
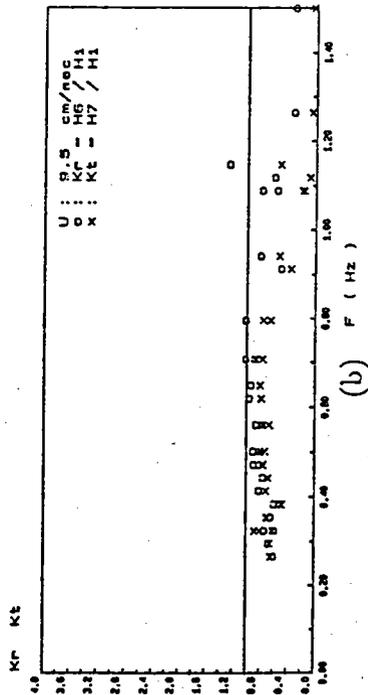
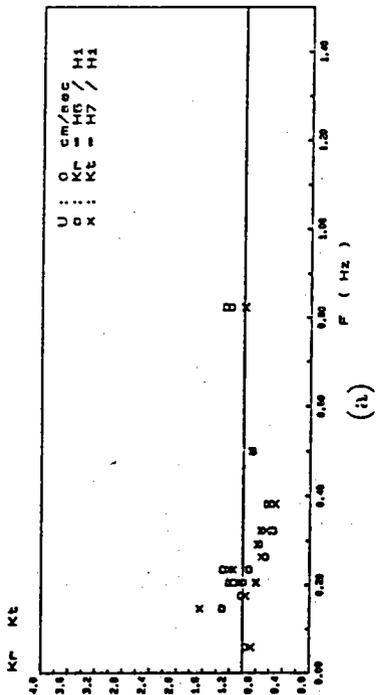


(f)

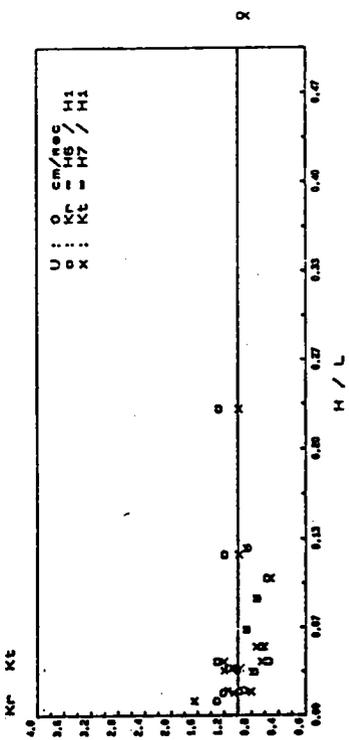
圖四 不同表面流速下，水位頻譜比較圖



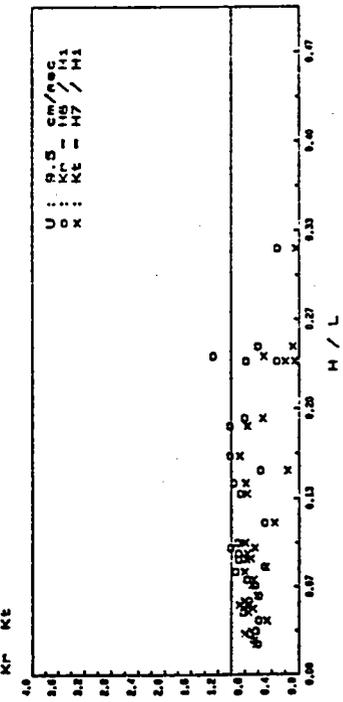
圖五 不同表面流速下，水位頻譜比較圖



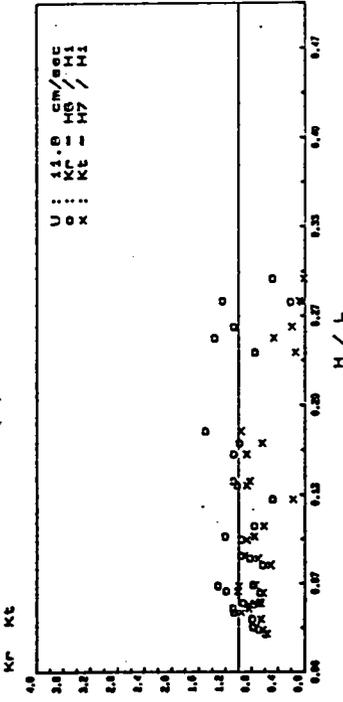
圖六 不同表面流速下，透過率與提前波高比與頻率之關係比較圖



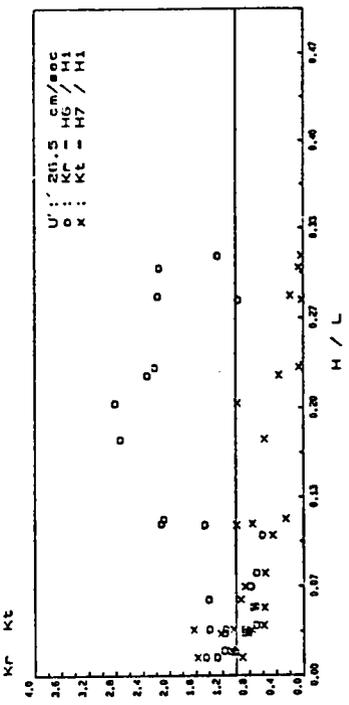
(a)



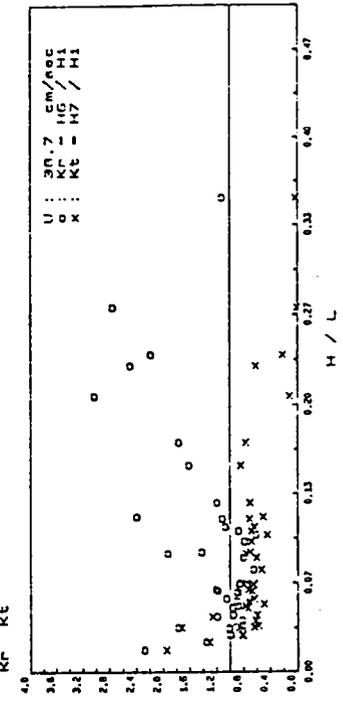
(b)



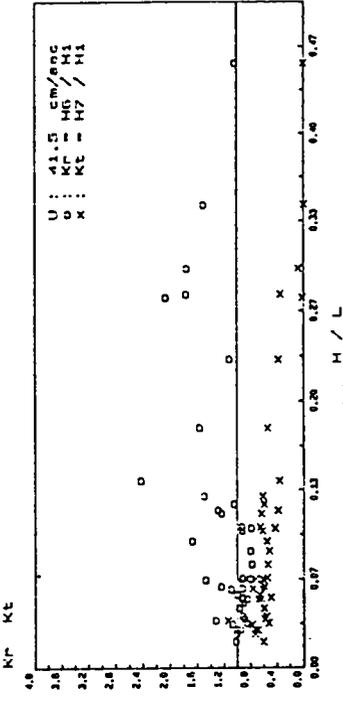
(c)



(d)

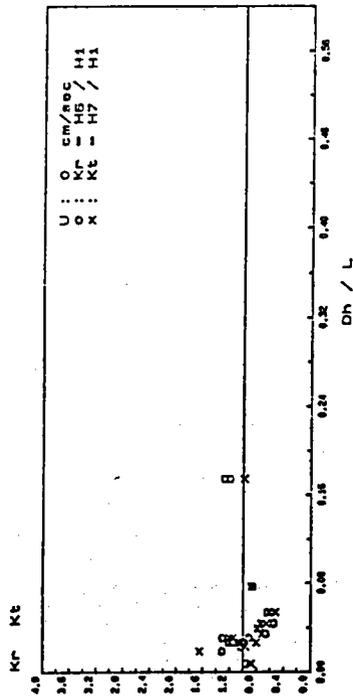


(e)

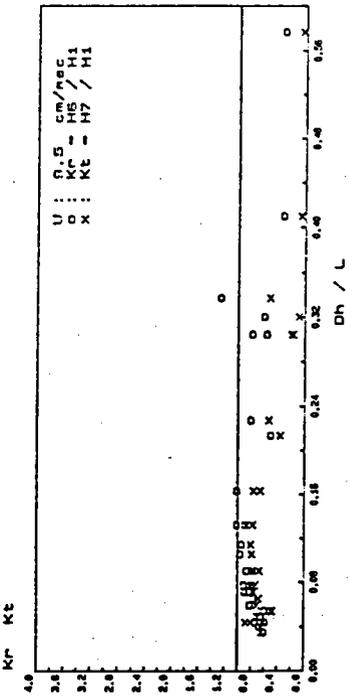


(f)

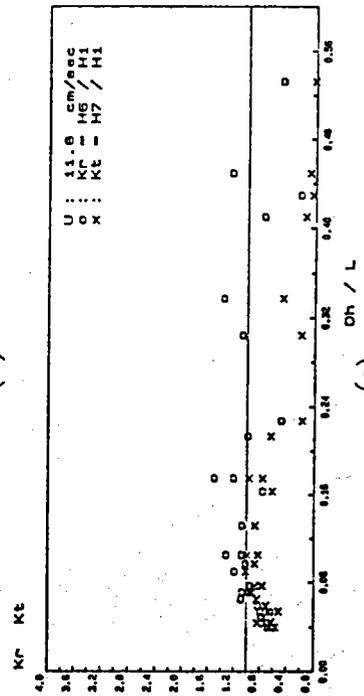
圖七 不同表面流速下，透過率與尖銳度關係比較圖



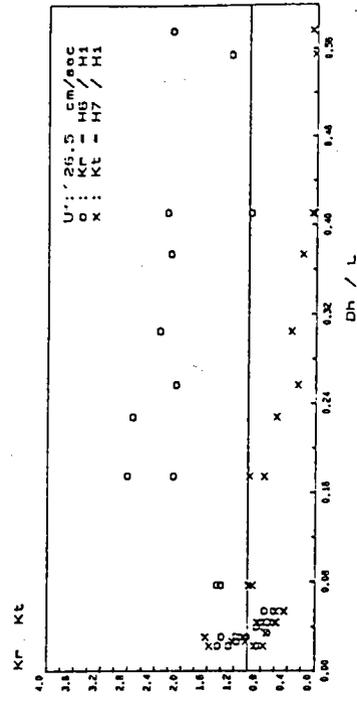
(a)



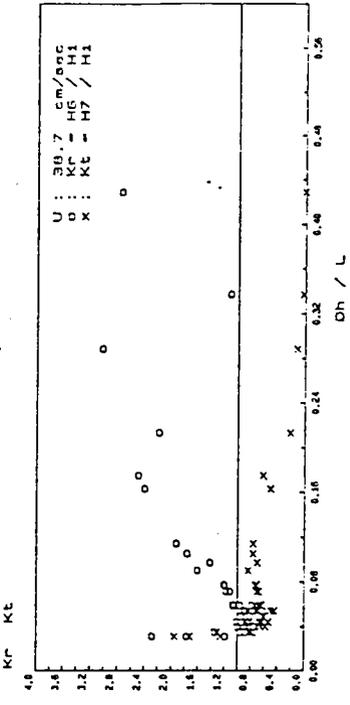
(b)



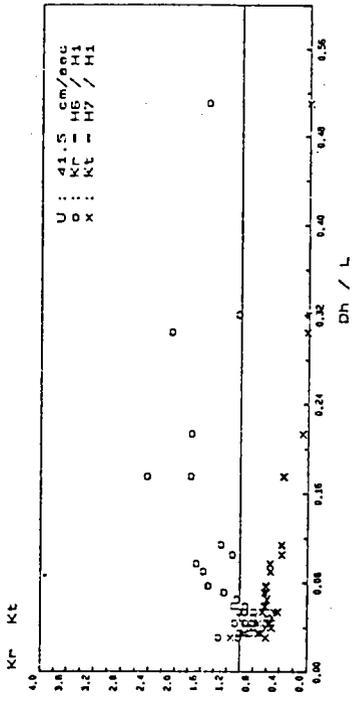
(c)



(d)

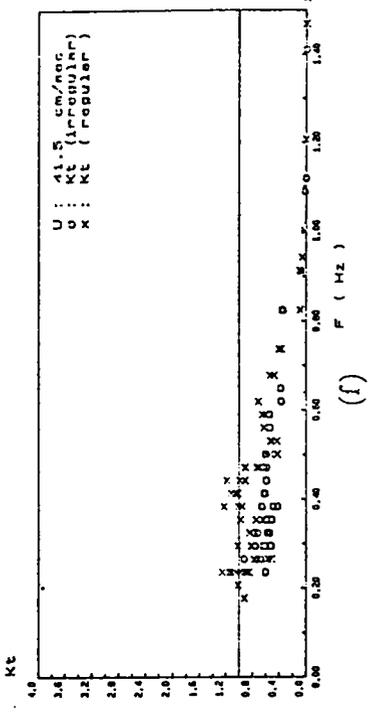
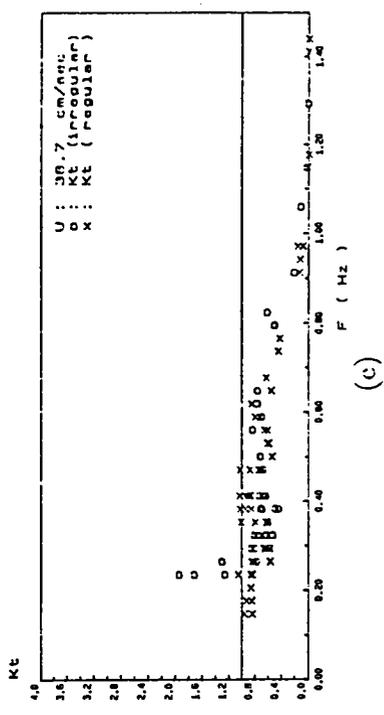
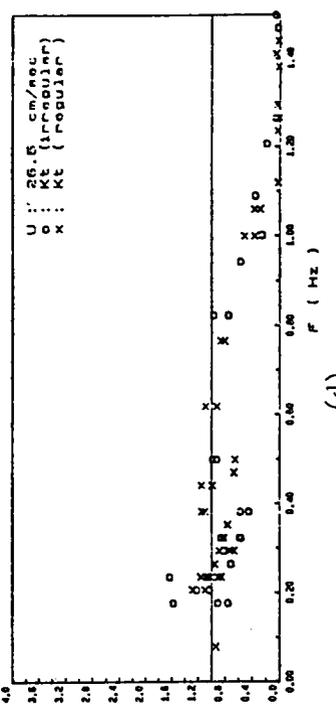
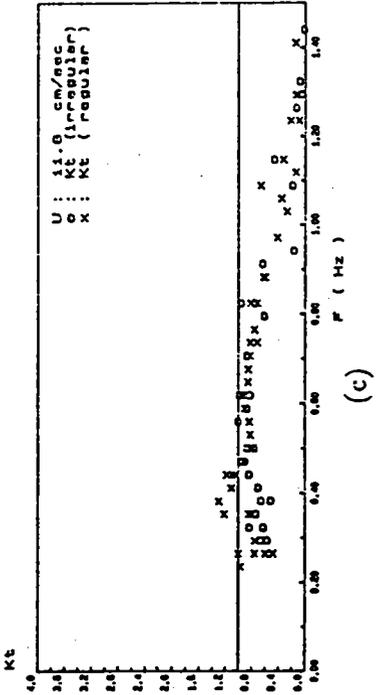
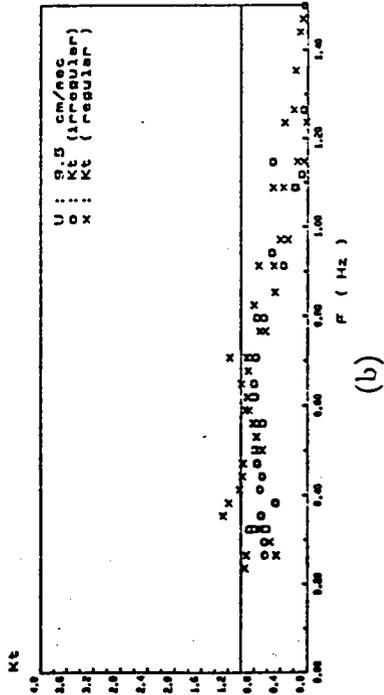
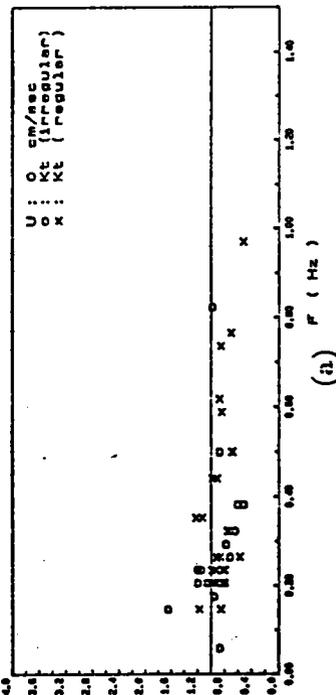


(e)

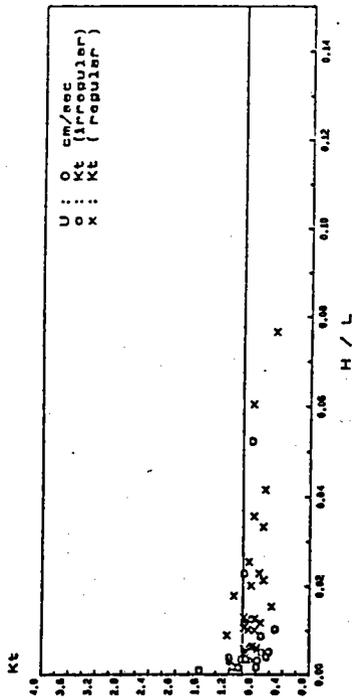


(f)

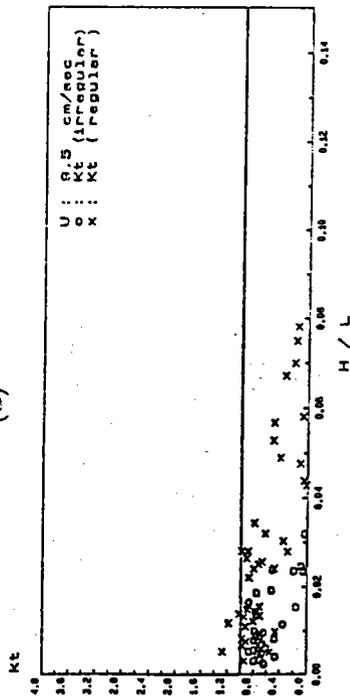
圖八 不同表面流速下，透過率與堤前波高比 dh/L 之關係比較圖



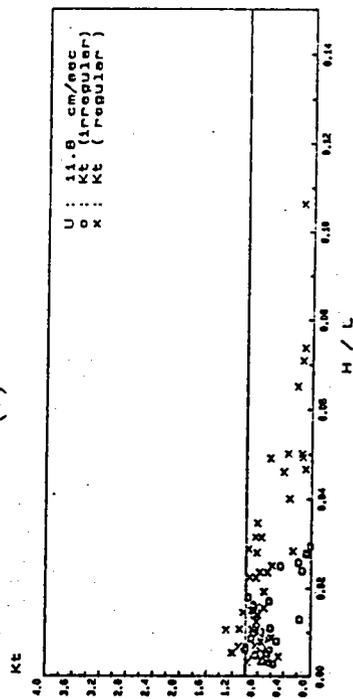
圖九 不同表面流速下，規則波與不規則波之透過率與頻率間之關係比較圖



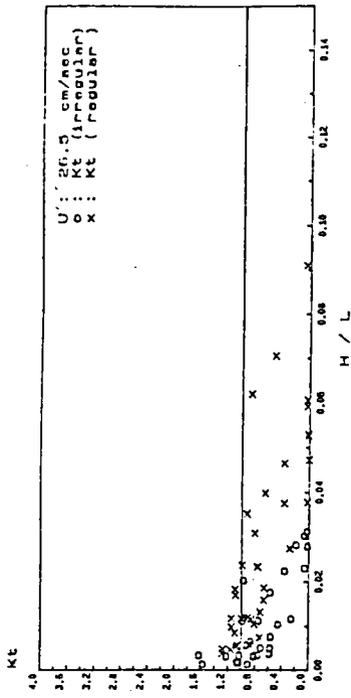
(a)



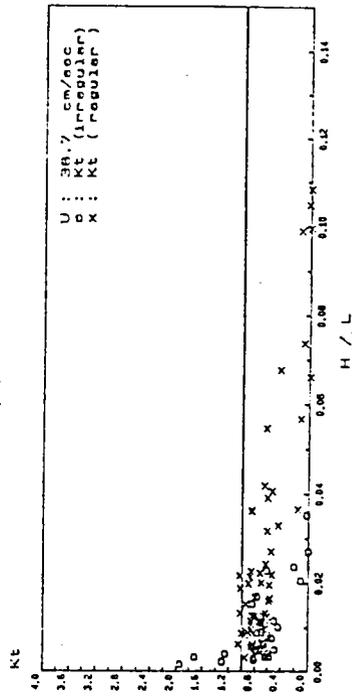
(b)



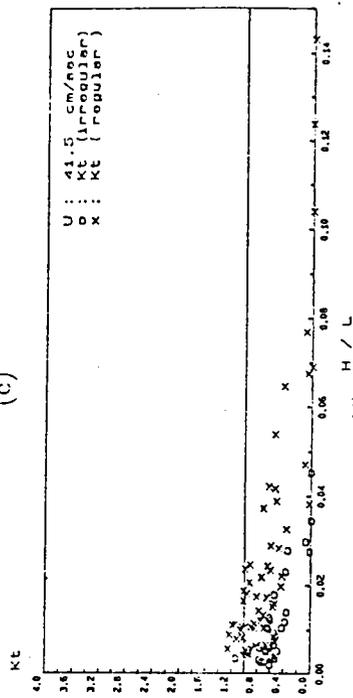
(c)



(d)

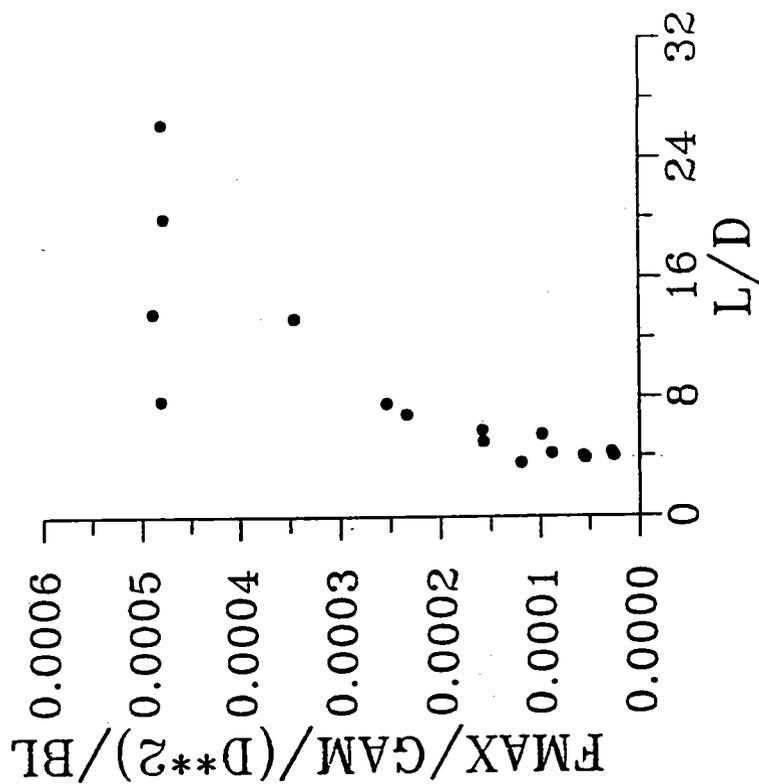


(e)

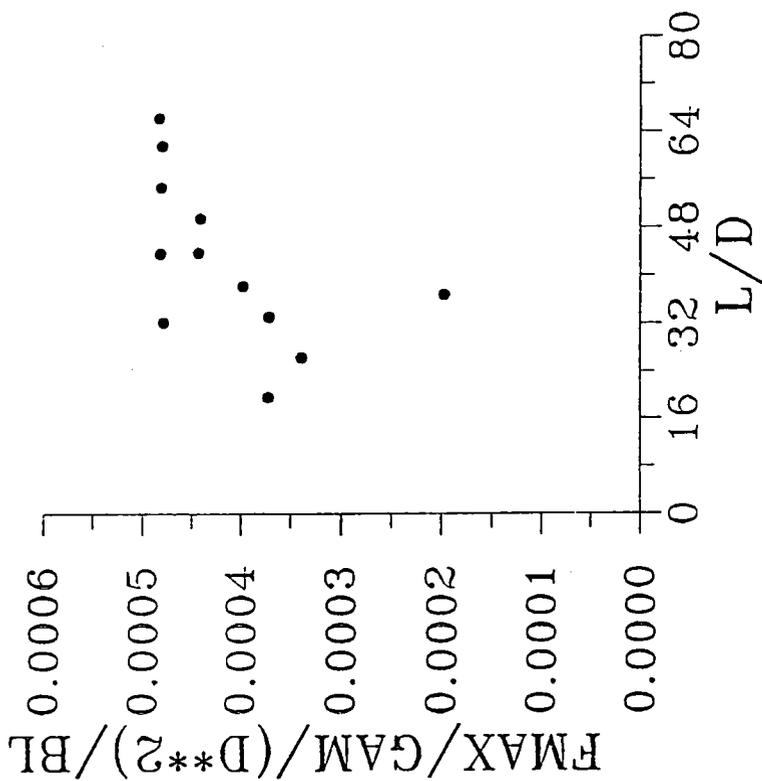


(f)

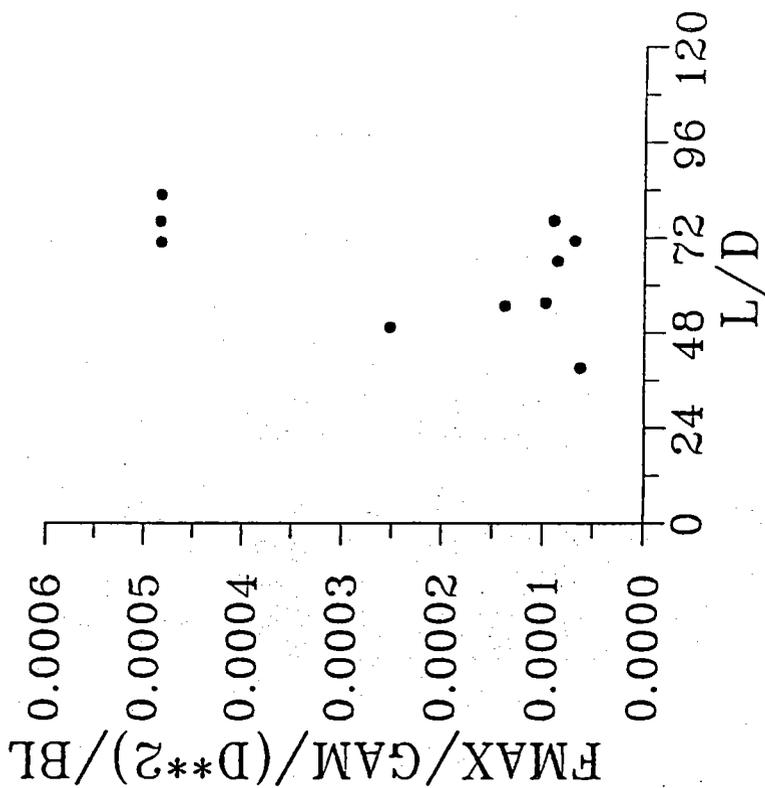
圖十 不同表面流速下，規則波與不規則波之透過率與尖銳度間之關係比較圖



圖十一 尖銳度($H/L > 0.025$)規則波入射下，噴水速度
26.5cm/sec 時， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係圖

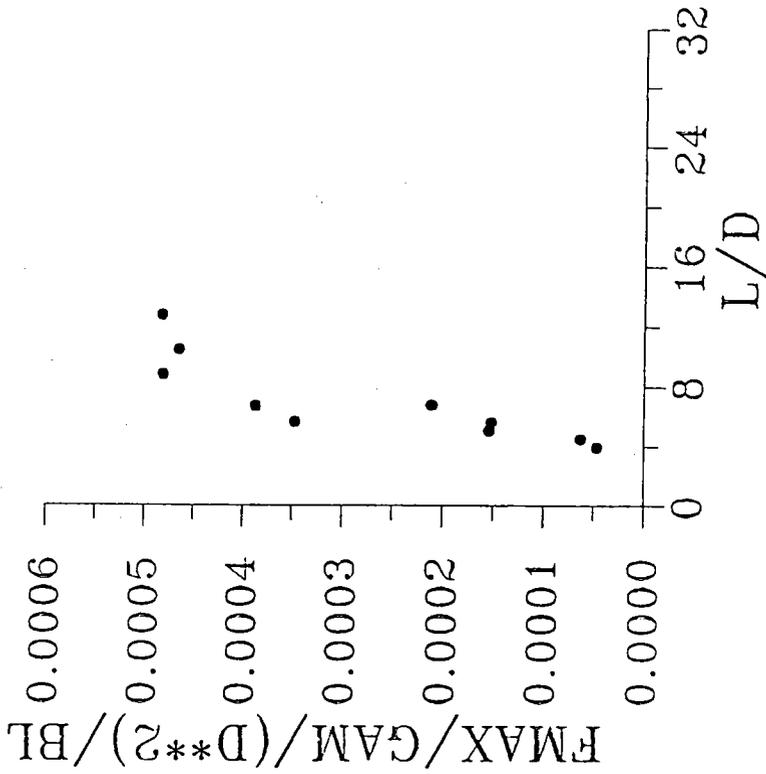


圖十二 尖銳度($0.008 < H/L \leq 0.025$)規則波入射下，
噴水速度 26.5cm/sec 時， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對
 L/D 之關係圖



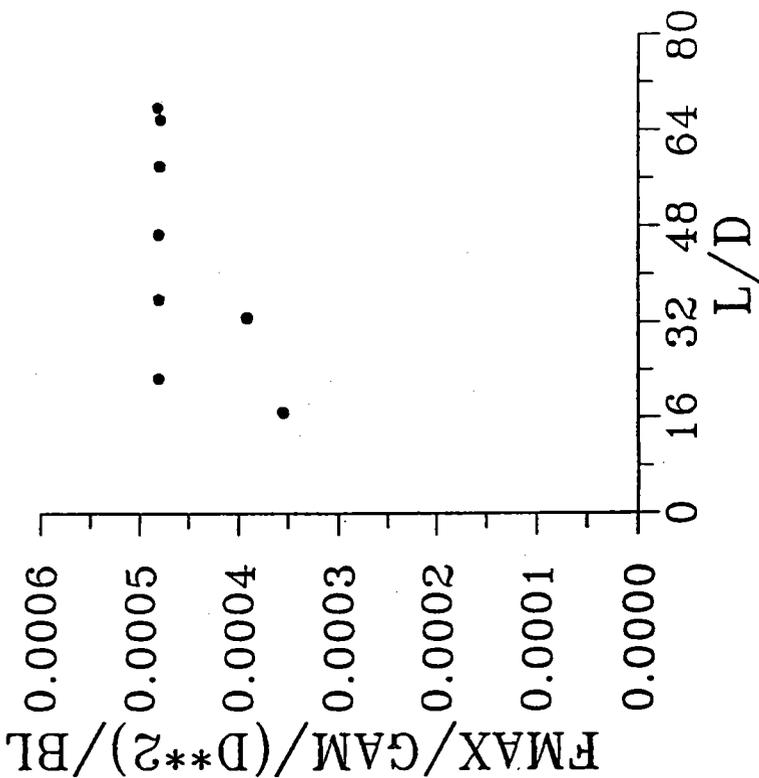
圖十三 尖銳度($II/L \leq 0.008$)規則波入射下，噴水速度

26.5cm/sec 時， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係圖

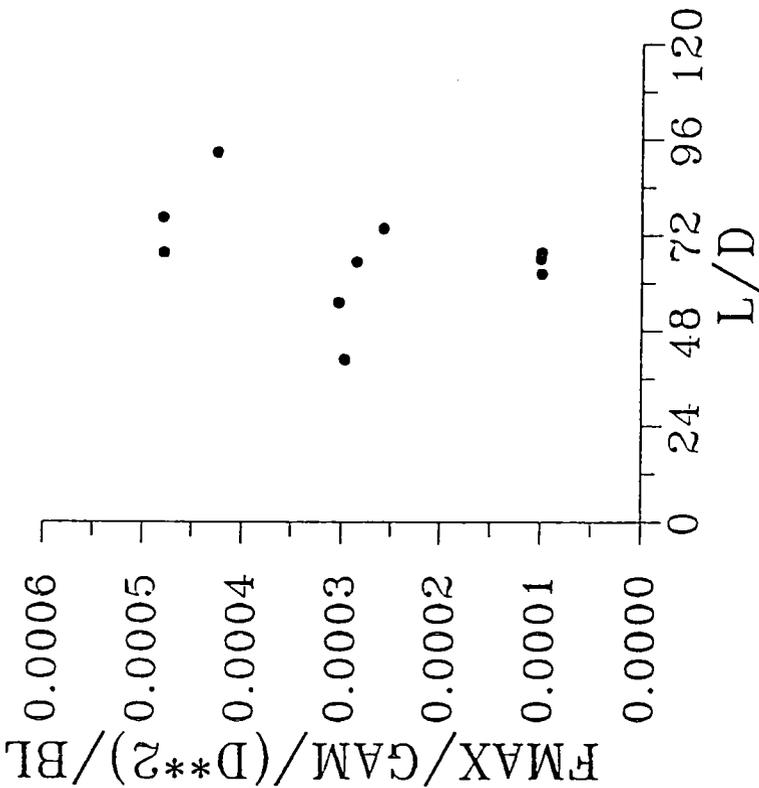


圖十四 尖銳度($II/L > 0.025$)不規則波入射下，噴水速度

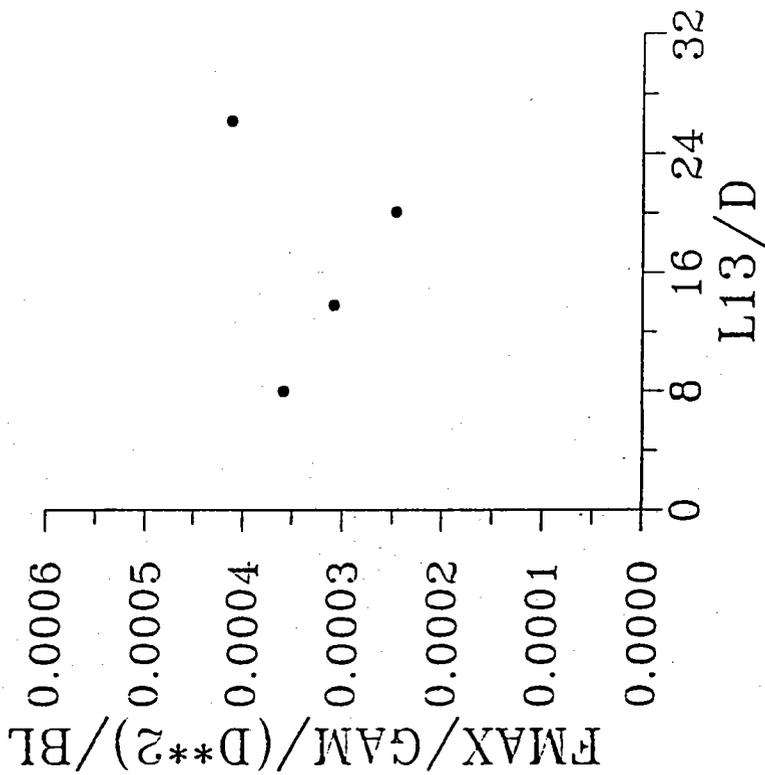
26.5cm/sec 時， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係圖



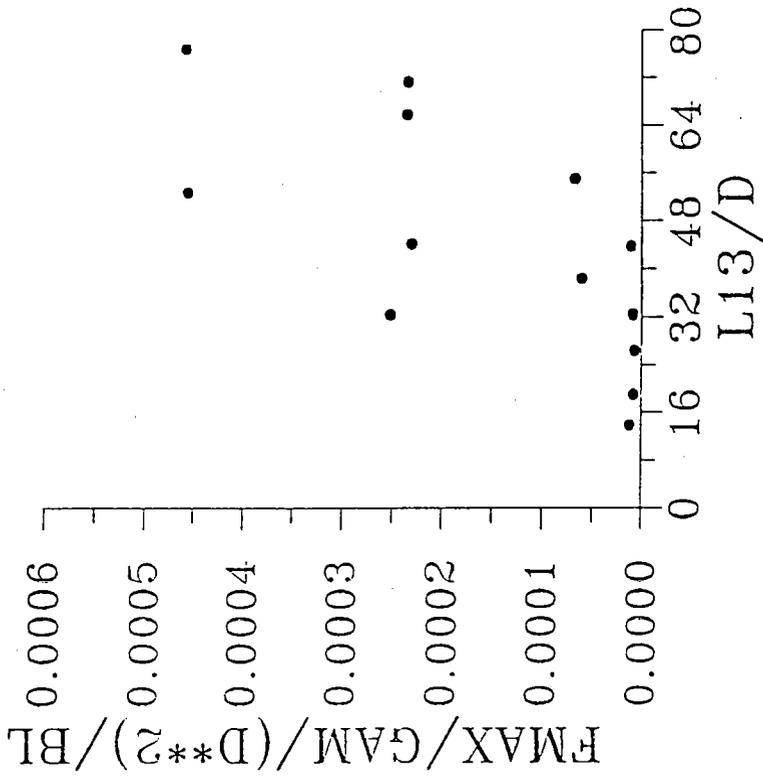
圖十五 尖銳度(0.008 < H/L ≤ 0.025)不規則波入射下，噴水速度 26.5cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對 L/D 之關係圖



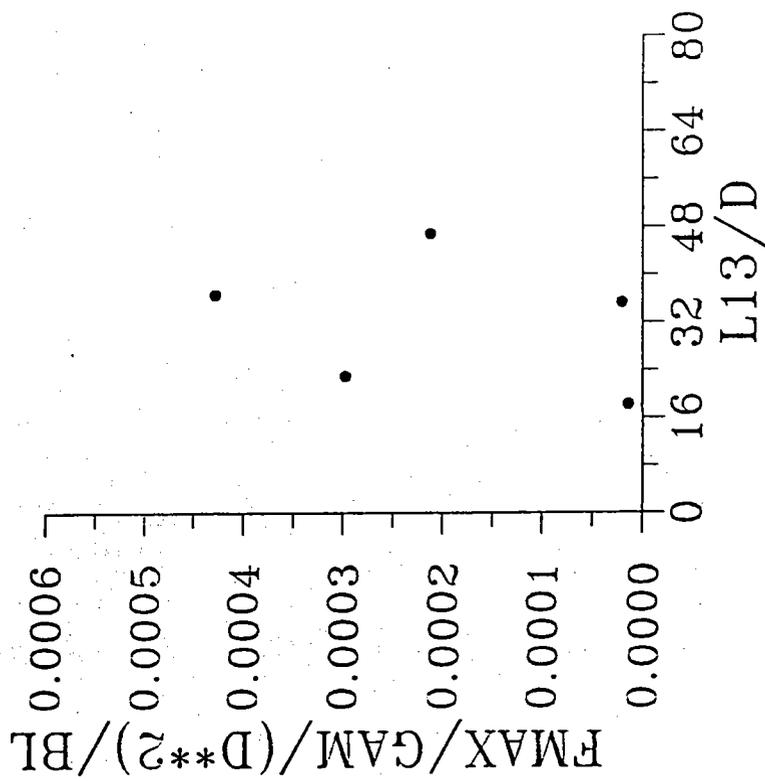
圖十六 尖銳度(H/L ≤ 0.008)不規則波入射下，噴水速度 26.5cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對 L/D 之關係圖



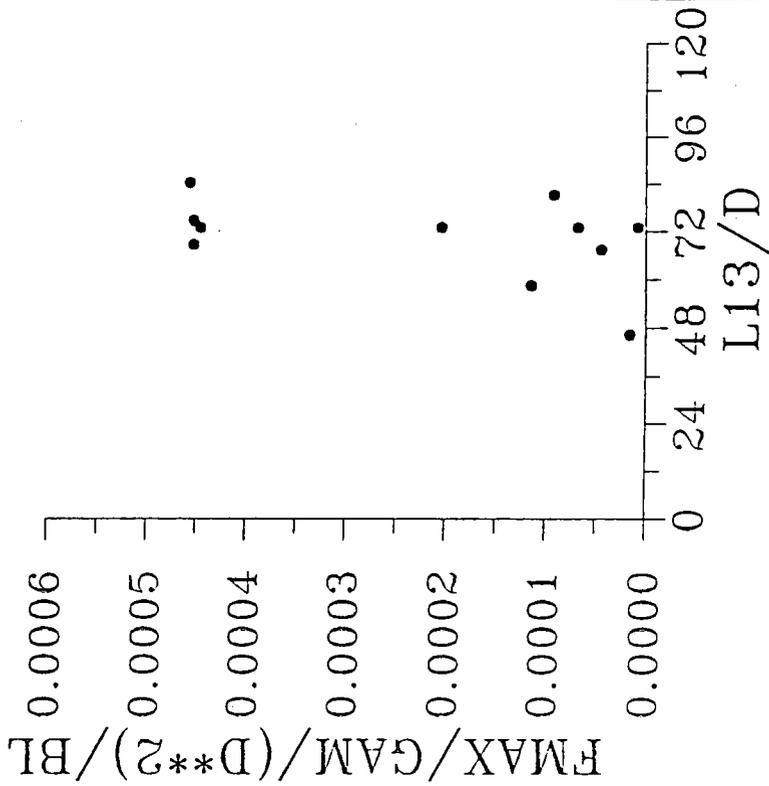
圖十七 尖銳度($II/L > 0.025$)規則波入射下，無噴水速度時， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係圖



圖十八 尖銳度($0.008 < II/L \leq 0.025$)規則波入射下，無噴水速度時， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係圖

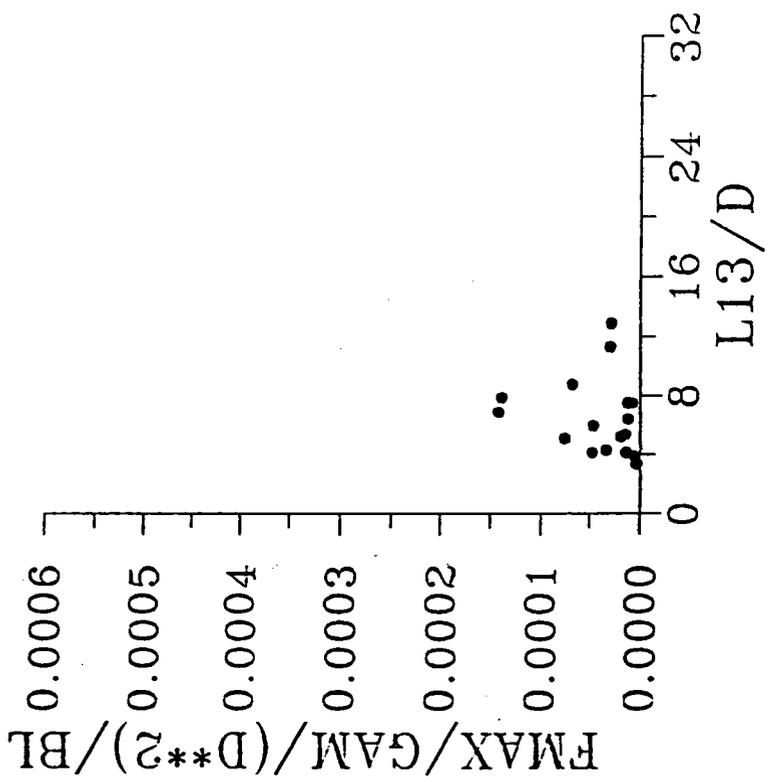


圖二十一 尖銳度($0.008 < I/L \leq 0.025$)不規則波入射下，
無噴水速度時， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係圖

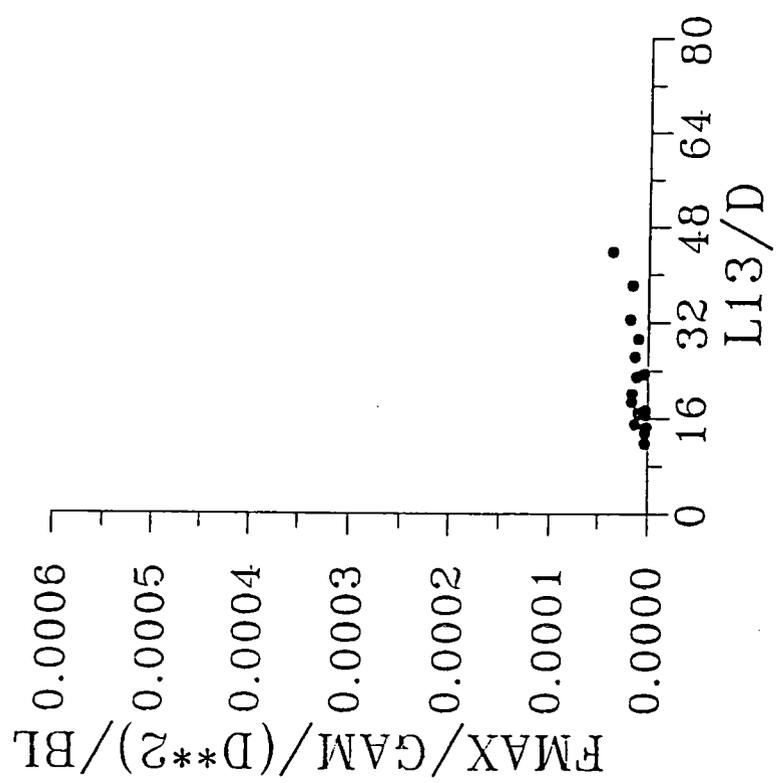


圖二十二 尖銳度($I/L \leq 0.008$)不規則波入射下，

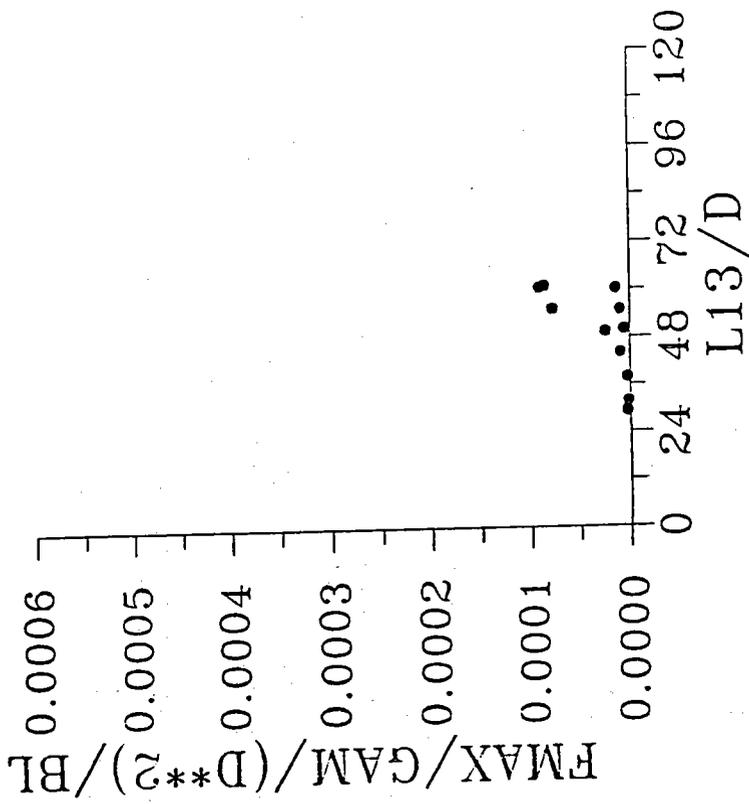
無噴水速度時， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係圖

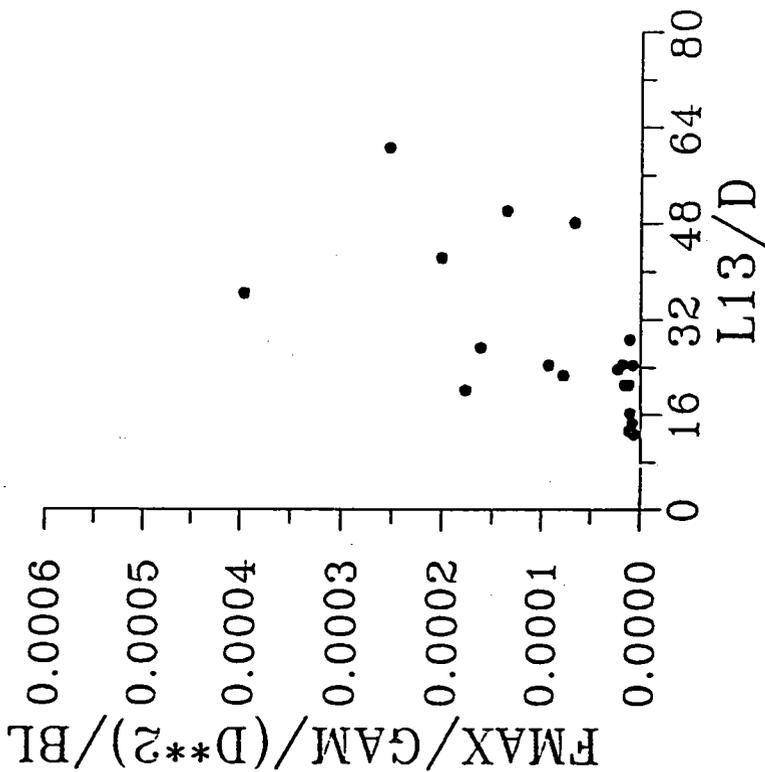


圖二十三 尖銳度(H/L > 0.025)規則波入射下，噴水速度 9.5cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對 L/D 之關係圖

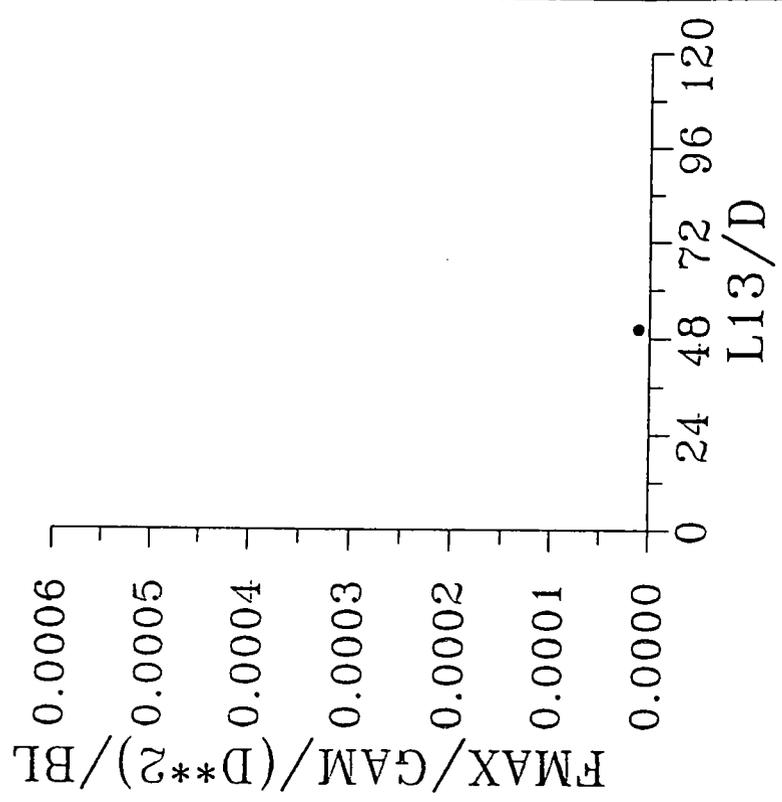


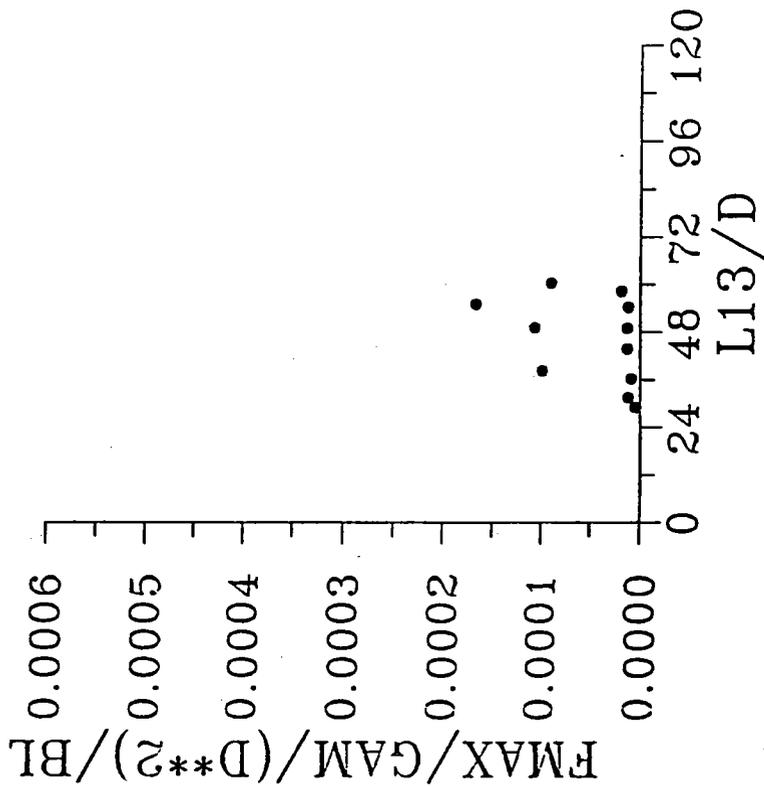
圖二十四 尖銳度(0.008 < H/L ≤ 0.025)規則波入射下，噴水速度 9.5cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對 L/D 之關係圖



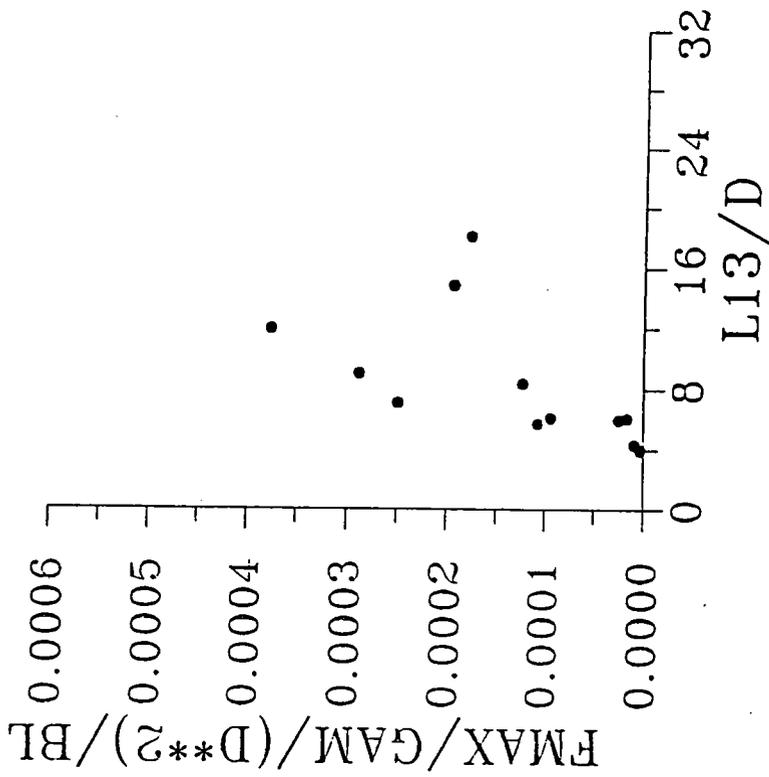


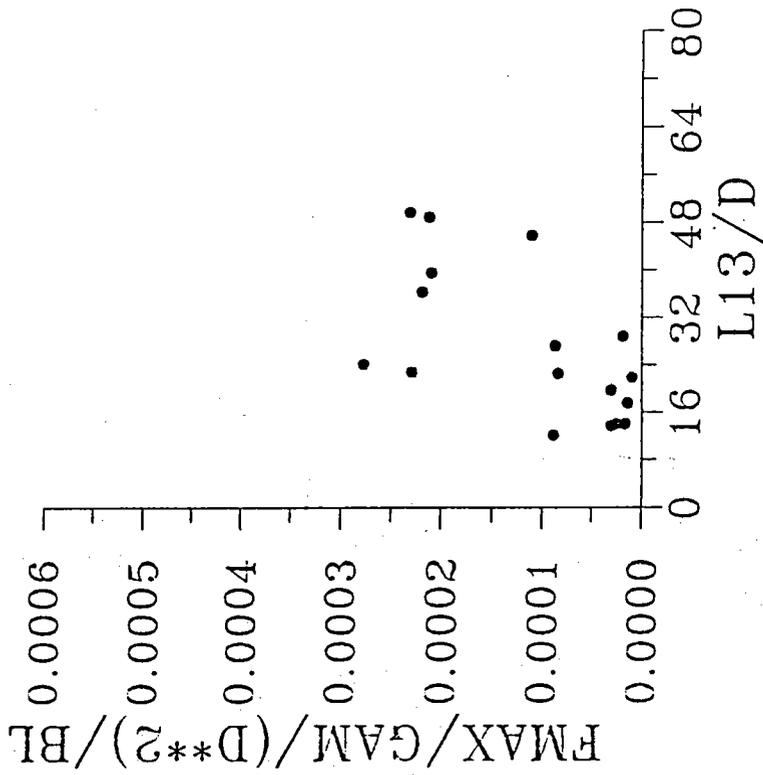
圖二十七 尖銳度(0.008 < H/L ≤ 0.025)不規則波入射下，
噴水速度 9.5cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對
L/D 之關係圖





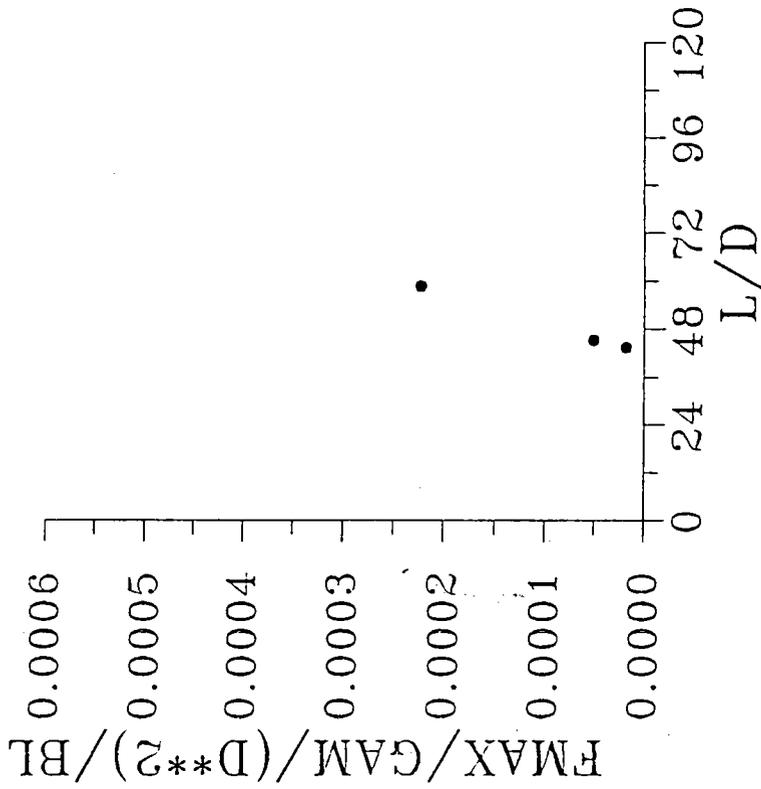
圖三十一 尖銳度($H/L \leq 0.008$)規則波入射下，噴水速度 11.8cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對 L/D 之關係圖





圖三十三 尖銳度(0.008 < H/L ≤ 0.025)不規則波入射下，
噴水速度 11.8cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對

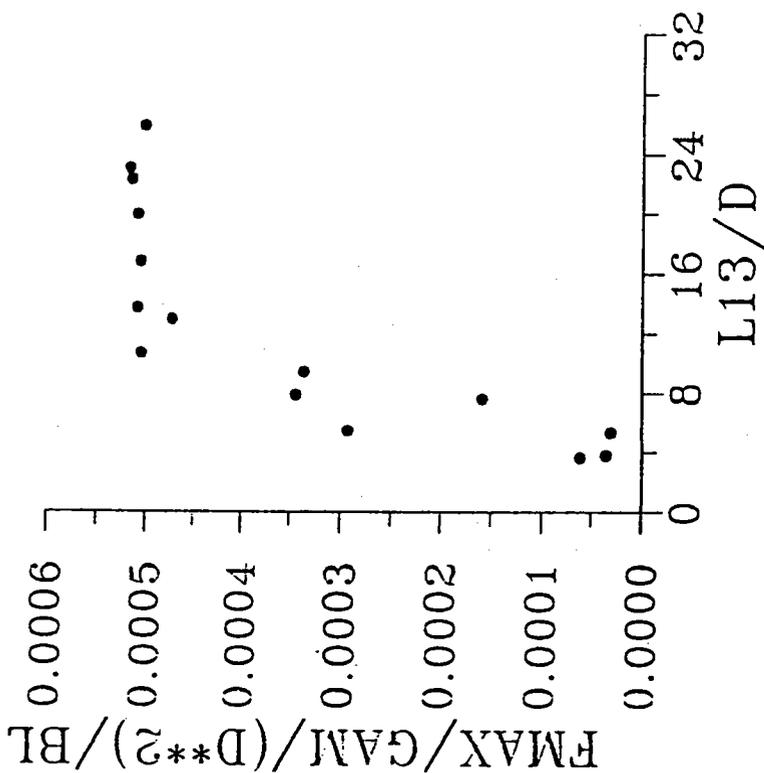
L/D 之關係圖



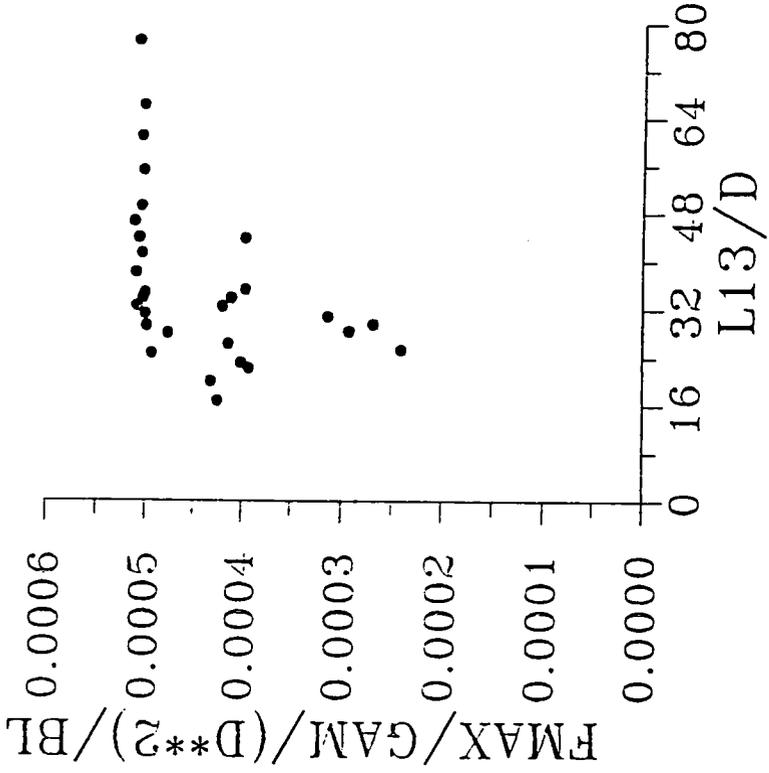
圖三十四 尖銳度(H/L ≤ 0.008)不規則波入射下，

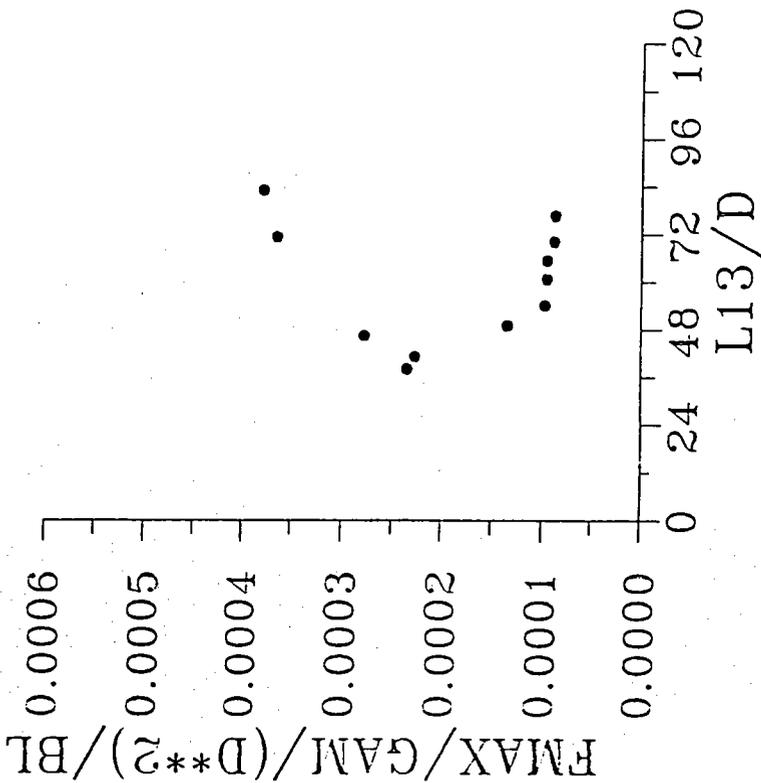
噴水速度 11.8cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對

L/D 之關係圖

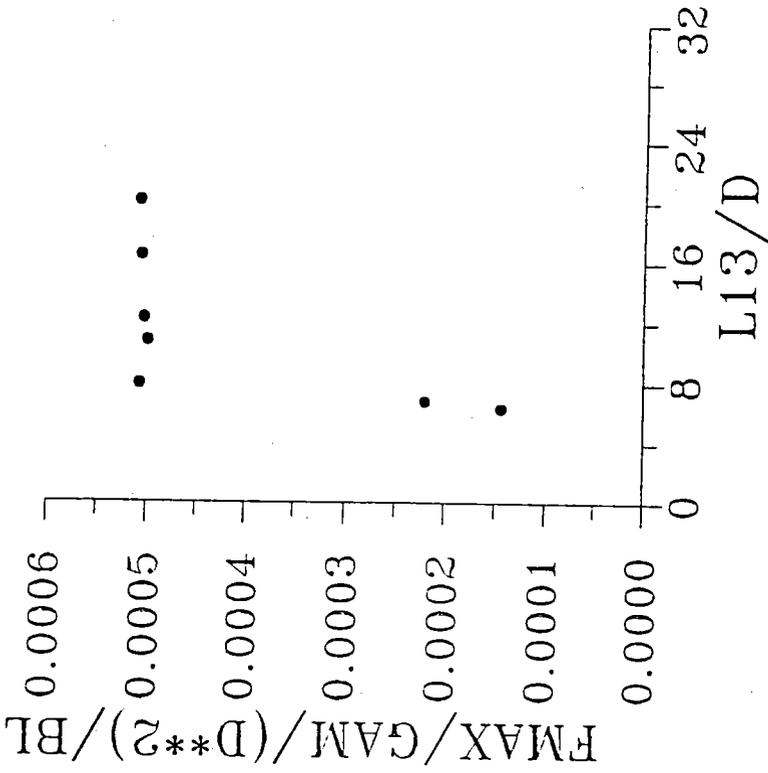


圖三十五 尖銳度(I/L > 0.025)規則波入射下，噴水速度 38.7cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對 L/D 之關係圖

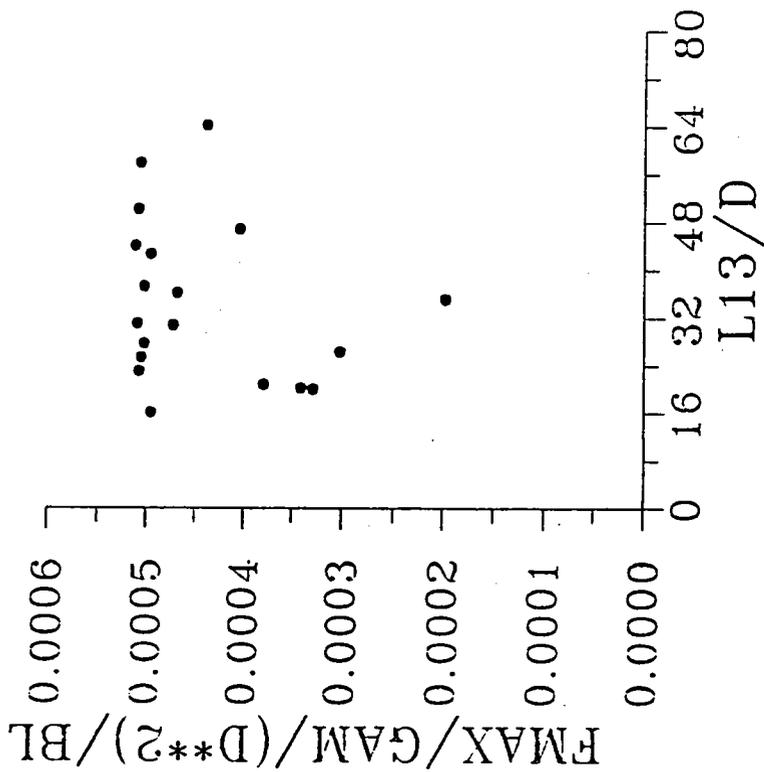




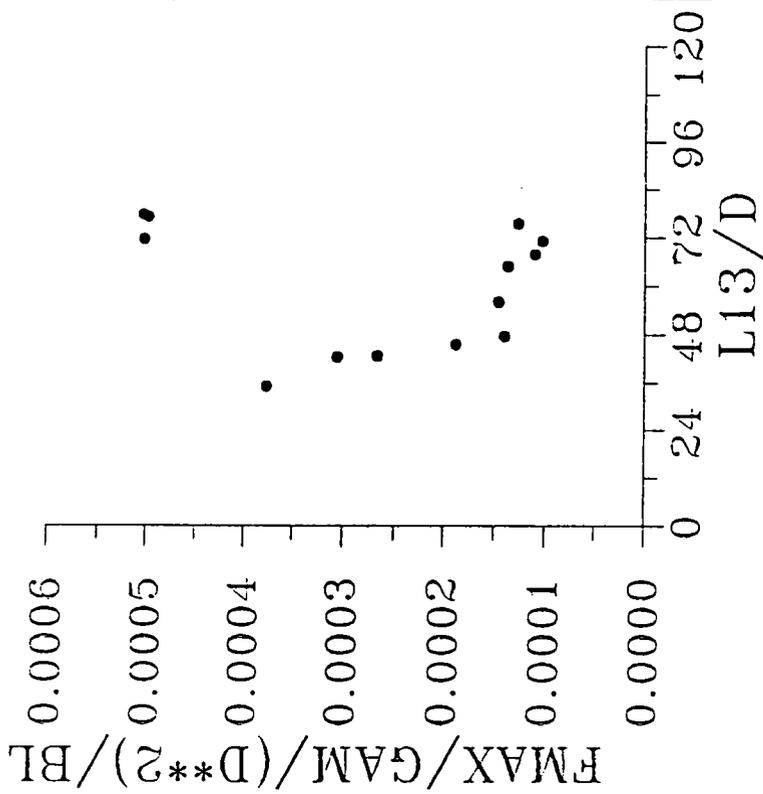
圖三十七 尖銳度($H/L \leq 0.008$)規則波入射下，噴水速度 38.7cm/sec 時， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係圖



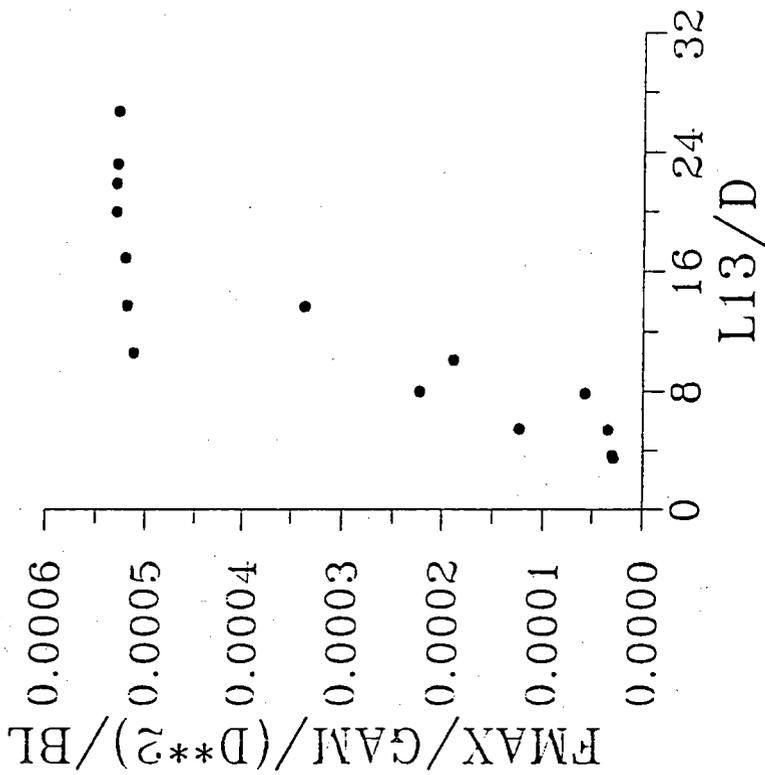
圖三十八 尖銳度($H/L > 0.025$)不規則波入射下，噴水速度 38.7cm/sec 時， $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係圖



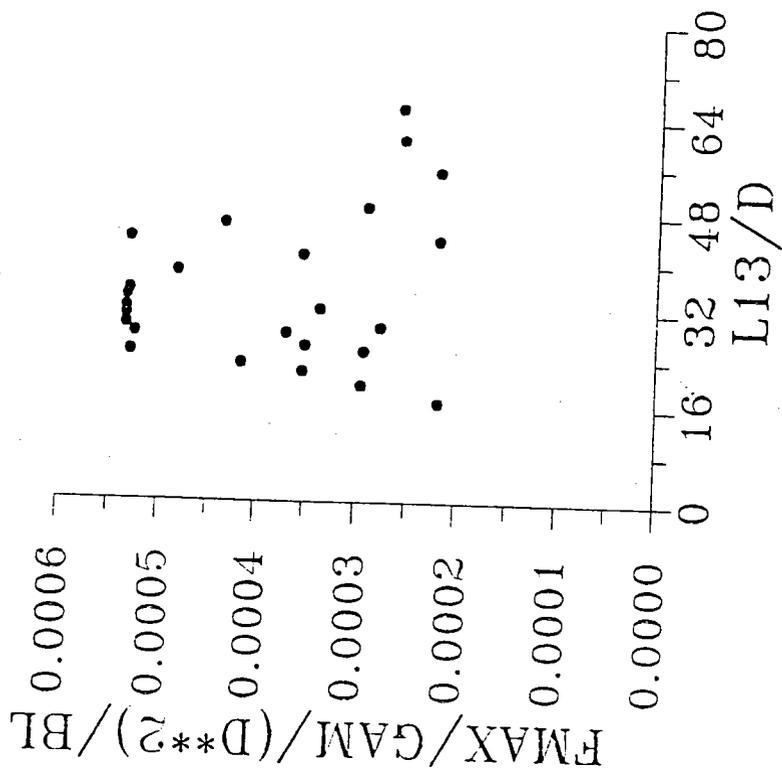
圖三十九 尖銳度(0.008 < W/L ≤ 0.025)不規則波入射下，
噴水速度 38.7cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對
L/D 之關係圖



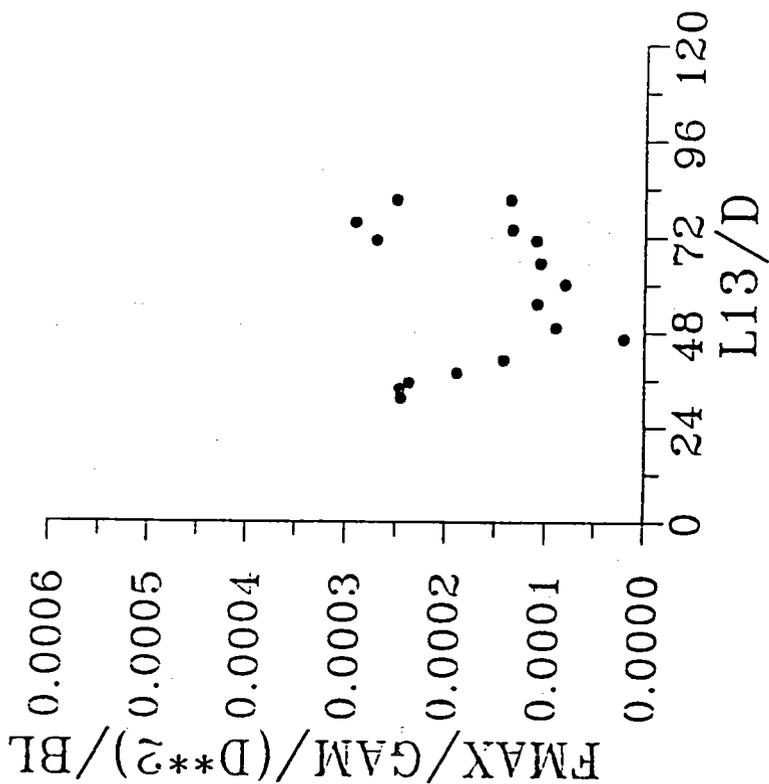
圖四十 尖銳度(W/L ≤ 0.008)不規則波入射下，
噴水速度 38.7cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對
L/D 之關係圖



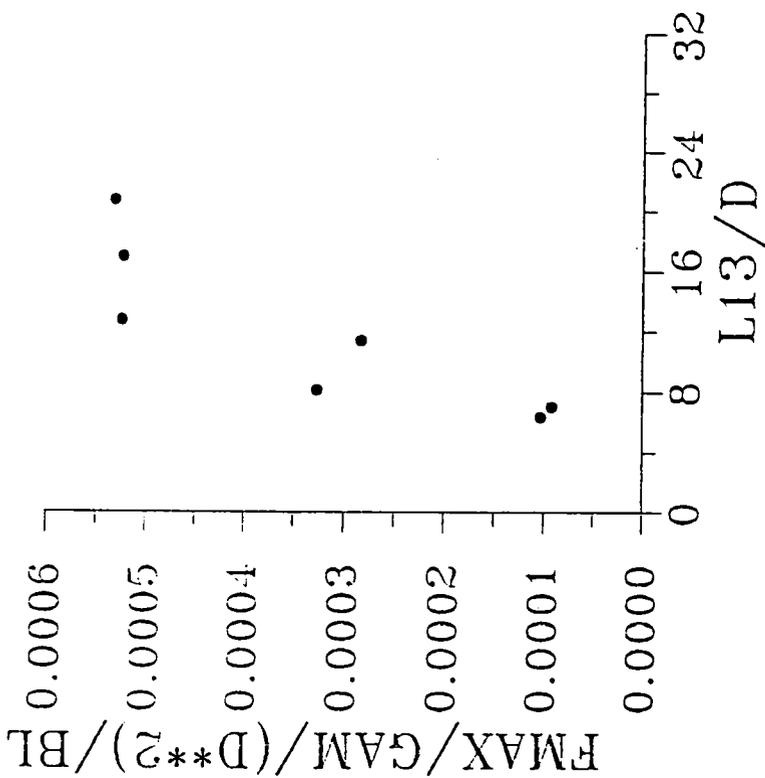
圖四十一 尖銳度($l/l > 0.025$)規則波入射下, 噴水速度 41.5cm/sec 時, $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係圖



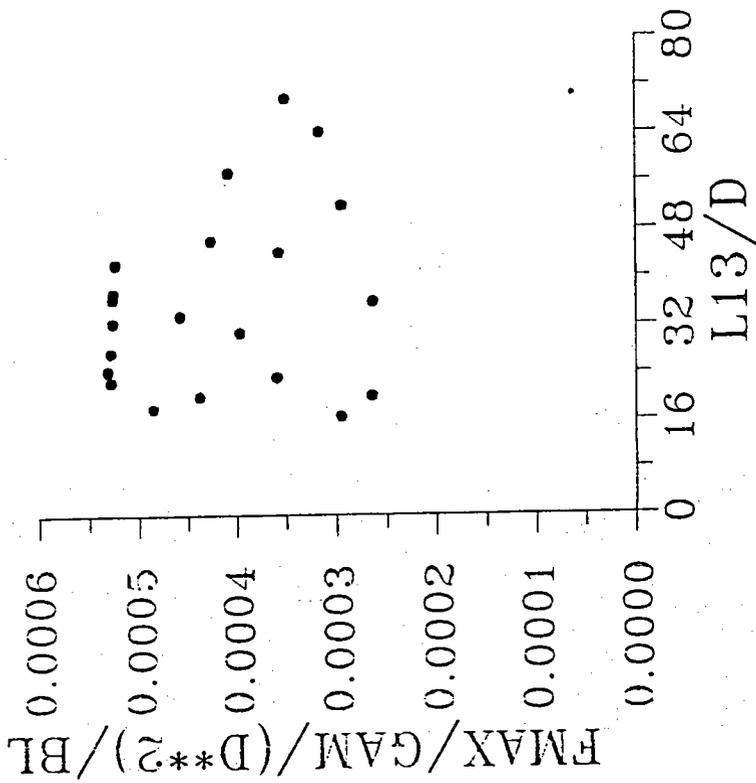
圖四十二 尖銳度($0.008 < l/l \leq 0.025$)規則波入射下, 噴水速度 41.5cm/sec 時, $F_{MAX}/GAM/D^2/BL$ 對 L/D 之關係圖



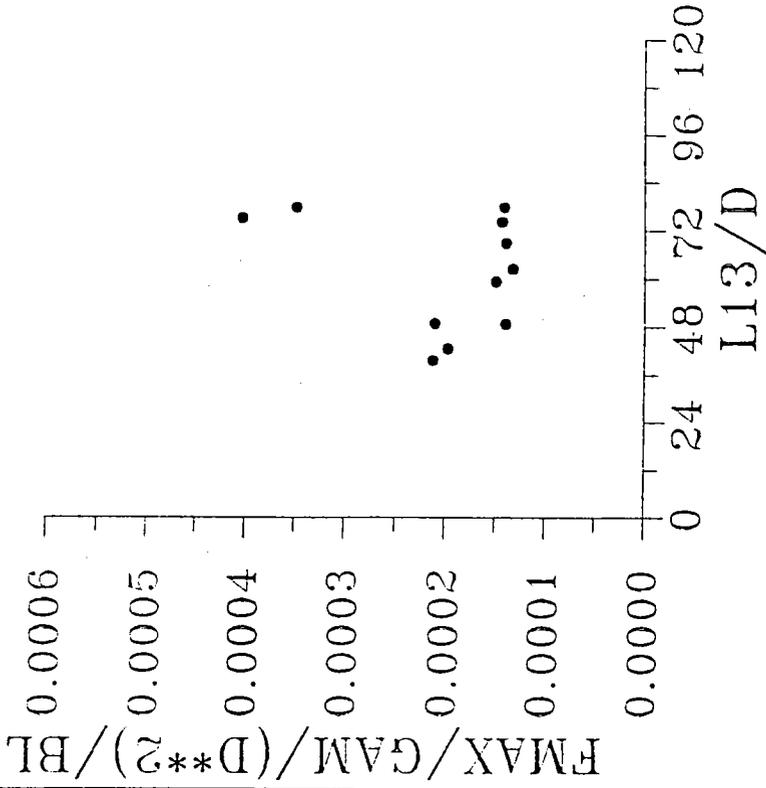
圖四十三 尖銳度($II/L \leq 0.008$)規則波入射下，噴水速度
41.5cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對
L/D 之關係圖



圖四十四 尖銳度($II/L > 0.025$)不規則波入射下，噴水速度
41.5cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對
L/D 之關係圖



圖四十五 尖銳度(0.008 < I/L ≤ 0.025)不規則波入射下，
噴水速度 41.5cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對
L/D 之關係圖



圖四十六 尖銳度(I/L ≤ 0.008)不規則波入射下，噴水速度
41.5cm/sec 時，FMAX/GAM/D²/BL 對
L/D 之關係圖

附

表

表一 試驗條件 (規則波實驗)

流速 cm/sec	頻率 (Hz)	相對水深	尖銳度	實驗 次數
0	0.1471 ~ 0.9706	0.0477 ~ 0.6041	0.0052 ~ 0.0767	36
9.5	0.2353 ~ 1.4706	0.0781 ~ 1.3866	0.0032 ~ 0.0782	44
11.8	0.2353 ~ 1.2941	0.0781 ~ 1.2778	0.0033 ~ 0.01064	44
26.5	0.2058 ~ 1.4412	0.0677 ~ 1.3316	0.0040 ~ 0.0706	38
38.7	0.1471 ~ 1.4412	0.0477 ~ 1.3316	0.0033 ~ 0.1085	56
41.5	0.1765 ~ 1.5294	0.0576 ~ 1.4997	0.0044 ~ 0.1239	56

表二 試驗條件 (不規則波實驗)

流速 cm/sec	頻率 (Hz)	相對水深 (d/l)	尖銳對 (H/L)	實驗 次數
0	0.1471 ~ 0.8235	0.0477 ~ 0.4379	0.0011 ~ 0.0524	20
9.5	0.2647 ~ 1.5000	0.0887 ~ 1.4426	0.0023 ~ 0.0320	32
11.8	0.2941 ~ 1.4412	0.0989 ~ 1.3316	0.0029 ~ 0.0295	32
26.5	0.1765 ~ 1.5000	0.0576 ~ 1.4426	0.0014 ~ 0.0313	28
38.7	0.2353 ~ 1.2941	0.0781 ~ 1.0737	0.0017 ~ 0.0354	40
41.5	0.2353 ~ 1.4118	0.0781 ~ 1.2778	0.0026 ~ 0.0454	40