

# 八十八年度港灣技術短期訓練班

## 課程表

八十八年五月十八日(星期二)

時 間	講 題	主 講 人
08:20~09:00	報 到	
09:00~09:50	台灣地區港灣問題之探討(一)	張金機
09:50~10:10	休 息 (供應點心)	
10:10~11:00	台灣地區港灣問題之探討(二)	張金機
11:10~12:00	颱風波浪與暴潮作用於防波堤之合力評估(一)	歐善惠
12:00~13:00	午 餐	
13:00~13:50	颱風波浪與暴潮作用於防波堤之合力評估(二)	歐善惠
14:00~14:50	老舊港區再開發規劃(一)	黃來旺
15:10~16:00	老舊港區再開發規劃(二)	黃來旺

八十八年五月十九日(星期三)

時 間	講 題	主 講 人
09:00~09:50	港灣地層下陷與 GIS 應用(一)	賴聖耀
09:50~10:10	休 息 (供應點心)	
10:10~11:00	港灣地層下陷與 GIS 應用(二)	謝明志
11:10~12:00	近岸結構物基礎沖刷破壞與保全(一)	邱永芳
12:00~13:00	午 餐	
13:00~13:50	近岸結構物基礎沖刷破壞與保全(二)	邱永芳
14:00~14:50	台灣四周海岸侵淤現況(一)	黃清和
15:10~16:00	台灣四周海岸侵淤現況(二)	黃清和

八十八年五月二十日(星期四)

時 間	講 題	主 講 人
09:00~09:50	海岸保護對策與工法(一)	蔡清標
09:50~10:10	休 息(供應點心)	
10:00~11:00	海岸保護對策與工法(二)	蔡清標
11:10~12:00	港灣水理與操航安全(一)	簡仲璟
12:00~13:00	午 餐	
13:00~13:50	港灣水理與操航安全(二)	簡仲璟
14:00~14:50	波浪模式之比較與實例計算(一)	許泰文
14:50~15:10	休 息 (供應點心)	
15:10~16:00	波浪模式之比較與實例計算(二)	許泰文

八十八年五月二十一日(星期五)

時 間	講 題	主 講 人
09:00~09:50	港灣規劃(一)	王慶福
09:50~10:10	休 息 (供應點心)	
10:10~11:00	港灣規劃(二)	王慶福
11:10~12:00	港灣開發環境影響評估(一)	莊甲子
12:00~13:00	午 餐	
13:00~13:50	港灣開發環境影響評估(二)	莊甲子
14:00~14:50	影像雷達(一)	陳繼藩 陳錕山
14:50~15:10	休 息 (供應點心)	
15:10~16:00	影像雷達(二)	陳繼藩 陳錕山

# 八十八年度港灣技術短期訓練班

## 講義集

項目	題 目	講 師	頁 數
1	台灣地區港灣問題之探討	張 金 機	1-1~1-15
2	颱風波浪與暴潮作用於防波堤之合力評估	歐 善 惠	2-1~2-15
3	老舊港區再開發規劃	黃 來 旺	3-1~3-23
4	港灣地層下陷與 GIS 應用	賴 聖 耀 謝 明 志	4-1~4-40
5	近岸結構物基礎沖刷破壞與保全	邱 永 芳	5-1~5-31
6	台灣四周海岸侵淤現況	黃 清 和	6-1~6-30
7	海岸保護對策與工法	蔡 清 標	7-1~7-25
8	國內港灣規劃問題	王 慶 福	8-1~8-18
9	波浪模式之比較與實例計算	許 泰 文	9-1~9-40
10	港灣水理與操航安全	簡 仲 環	10-1~10-40
11	港灣開發環境影響評估	莊 甲 子	11-1~11-27
12	港灣海岸問題之衛星監測應用	陳 繼 藩 陳 錕 山	12-1~12-23

# 台灣地區港灣問題之探討

張金機\*

## 一、國際商港通盤檢討

台灣地區各國際商港早期均由各港務局依本身業務發展需要擬訂整體規畫及發展計畫。因各港定位不清，高估本身角色，各自為政，導致發展目標重疊，投資設施重置，浪費港埠資源現象。

商港主管機關交通處為導正此一現象，責由本所就港埠整體需求辦理『台灣地區港埠整體規劃及未來發展』計畫，作為未來港埠建設及經營管理之依據。

台灣地區除現有基隆、台中、高雄及花蓮四個國際商港與蘇澳輔助港外，尚有淡水、安平與馬公國內商港。為發展環島航運整合港際功能，將淡水(台北)港與安平港分別定位為基隆港與高雄港之輔助港，並將布袋港提升為國內商港。此一整體規劃及未來發展計畫已奉行政院核准，可視為台灣地區港埠建設之上位計畫。

儘管台灣地區港埠整體規劃及未來發展計畫已經核定。台灣只是彈丸之地，且西部平緩沙灘建港面臨漂沙威脅；東部海岸陡峭，暴露於太平洋颱風巨浪直接侵襲，除非掌握充份貨源，否則根本缺乏建港條件，但地方政府、民意代表還是熱衷港埠擴建。本文謹就個人了解的港灣問題提出探討。

---

\*港灣技術研究所所長

## 二、國際商港現況

### 2-1 港埠設施

#### 2-1-1 基隆港

基隆港規劃佈置如圖 1，港口朝 NW，航導寬 280m，水深 20m 至 26m，東、西防波堤長度分別為 560m。港區面積僅 620ha，迴船池直徑 650m，深 10.5m，其中直徑 550m，水深達 14 m。基隆港共有 57 座碼頭，長度 9,860m，但營運碼頭僅 40 座，長度 7,660m，深度介於 1.4m 至 13m 間。主要碼頭設施為三個貨櫃中心碼頭 14 座，散雜貨碼頭 15 座，散裝碼頭 5 座，油類及客運碼頭各 2 座，水泥及穀類碼頭各 4 座。主要營運設施有穀倉一座，容量 50,500 公噸，水泥庫 6 座，油槽 13 座。

#### 2-1-2 台中港

台中港為一人工港，規劃佈置如圖 2，防波堤及海堤長度約 21,000m，港口朝 WNW，航道寬度 300m，水深 13m，計劃浚深至 16m。港區面積 4,300ha，迴航池直徑 1,000m，水深 13m，計劃浚深至 16m。台中港共有 37 座碼頭，長 8,710m(不含興建中)，水深 9m 至 14m。主要碼頭設施為二個貨櫃中心碼頭 6 座，散雜貨碼頭 15 座，石化碼頭 4 座，水泥碼頭 3 座，穀類、煤及大宗散貨各 2 座，礦鐵、油品及液貨各 1 座。主要營運設施有穀倉 2 座，容量 120,000 公噸，水泥庫 21 座，液化儲槽 92 座，化學儲槽 107 座。

#### 2-1-3 高雄港

高雄港規劃佈置如圖 3，第一港口方向為  $W24.3^{\circ}N$ ，第二港口方向為  $W12.3^{\circ}S$ ，水深分別為 11m 及 16m，航導寬度分別為 100m 及 200m。第一港口防波堤長 1,877m，第二港口防波堤長 3,512m。港區面積為 2,670ha，第一港口迴船池直徑 400m，水深 11m；第二港口迴船池直徑 600m，水深

16m。高雄港共有 112 座碼頭，其中營運碼頭 89 座(不含興建中貨櫃碼頭)，總長度約 25,000m。目前有五個貨櫃中心 22 座碼頭，散雜貨碼頭 37 座，石化及穀類碼頭各 3 座，專用及其他碼頭 24 座，最大水深 16m。主要營運設施有穀倉 3 座，容量 220,000 公噸，倉棧 68 座，水泥庫 3 座及台電、中鋼、中油與中船等專用營運設施。

#### 2-1-4 花蓮港

花蓮港規劃佈置如圖 4，港口朝 S23.5°W，外航道寬 240m，水深 17.6m，內航道寬 100m，但水深 10.5m 之有效寬度僅 30m。花蓮港港區面積僅 305ha，建有東防波堤長約 3,167m，西防波堤長 1,050m 保護。

外港迴船池直徑 700m，水深 15m，內外港池共有 25 座碼頭，總長 4,742m，內港池碼頭 16 座，水深 6.5m 至 10.5m，外港碼頭 9 座水深 12m 至 16.5m。主要為散雜貨碼頭及礦石碼頭，營運設施主要為水泥庫 65 座。

#### 2-2 港埠營運量

台灣地區四國際商港民國八十年以後營運量如表 1。除基隆港港區因受限擴建困難，營運呈現逐年衰退現象外，台中港與花蓮港務局均呈倍數成長，高雄港也有超過 50%成長率。

表 1 國際商港八十年後營運量

年期 港別		80	81	82	83	84	85	86	87
裝 卸 量 (萬噸)	基隆港	8,697	8,526	8,640	9,163	9,444	8,941	8,541	7,615
	台中港	2,755	3,467	3,994	4,503	4,917	6,044	6,978	7,080
	高雄港	20,745	21,420	24,361	25,138	26,165	26,693	31,004	32,829
	花蓮港	588	632	808	901	950	974	1,159	1,249
吞 吐 量 (萬噸)	基隆港	2,699	2,615	2,918	2,959	2,992	2,630	2,629	2,396
	台中港	2,101	2,610	3,099	3,398	3,603	3,887	4,483	4,483
	高雄港	7,713	7,950	7,705	7,575	8,093	8,323	9,735	9,823
	花蓮港	557	603	770	865	911	910	1,118	1,216
貨 櫃 量 (TEU)	基隆港	2,008	1,941	1,886	2,047	2,165	2,109	1,981	1,707
	台中港	209	278	303	361	447	695	842	880
	高雄港	3,913	3,961	4,636	4,890	5,053	5,063	5,693	6,271

## 2-3 港埠檢討

### 2-3-1 基隆港

基隆港貨櫃船席最大水深 13.5m，散雜貨船席最大水深 11.5m，依規範可進泊巴拿馬極限級貨櫃輪及 30,000DWT 以下散裝船。但內港貨櫃船席最大水深僅 12m，散雜貨船席最大水深 9m，只能容許 2,000TEU 貨櫃船及 50,000DWT 散雜貨船進泊。迴船池水深 14m，直徑 500m 尚可符合巴拿馬極限型船長 275m 在拖船協助下調頭要求，但不能滿足第四代貨櫃船。進港雜貨船平均噸位約 9,300GT，已接近大部份碼頭可服務船型上限。碼頭岸肩太窄，且長度不足，經常一船佔用兩船席。貨櫃碼頭共線不足，橋式不能互相調配使用。貨櫃場地面積不夠，造成船邊提貨，港區週邊小型貨櫃場林立。倉棧使用率偏低，停車場與露天堆置場不足，軍用碼頭散佈港區，阻隔港區橫向動線。港區鐵路密度卻很少使用，非但設施閒置，更影響整體發展。港、市相鄰區域缺乏緩充空間，聯外交

通瓶頸造成港市不相容。市區污水直接排入港池，污染水質，碼頭鋼板樁嚴重銹蝕。

### 2-3-2 台中港

台中港航道 300m，北迴船池直徑 1,000m 水深 13m，碼頭水深介於 9m 至 14m 間，可以進泊 65,000DWT 貨輪。配合第一港口第二期擴建，航道與迴船池將浚深為 16m。目前貨櫃、雜貨及管道貨三種碼頭規模明顯超過進港船型需求。大部份散雜貨採船邊提貨，倉棧使用率偏低，露置場閒置。鐵路運量如扣除穀類不計，其餘貨物利用鐵路運輸僅佔全港貨物 0.5%，但港區卻到處佈設鐵路，造成閒置，影響發展。冬季強烈東北季風吹襲時，港口橫風、橫流與大浪使領港登輪不易，大型貨櫃船(超過 3,000TEU)進港操航較困難。港口二期擴建延長北防波堤 480m，拆除南外堤 93m，南內堤 50m 後，進港操航問題將可獲大幅改善。

### 2-3-3 高雄港

高雄港設置兩港口，第一港口有效寬度由 228m 縮減至 100m，航道水深 11m。航道寬度勉強符合 30,000DWT 船隻單向航行需求，但水深 11m 未能滿足 30,000DWT 滿載吃水深 11m 貨船進港需求，因此，第一港口現況計畫進港船型應訂為 20,000DWT。第二港口最窄處有效寬度 148m，尚有符合 100,000DWT 貨船單向航行要求，但港口航道水深 16m 不能滿足 100,000DWT 滿載進港需求。目前台電、中鋼等國營事業均藉由船型設計與營運管理配合因應。未作分區使用規劃漁港與石化碼頭散佈港區影響橫向交通動線，無法作分區管理。倉棧老舊且使用率偏低，散雜貨碼頭與市區間缺乏緩充空間，造成港市相鄰土地不相容。市區污水直接排入港池，污染港池內水質。

### 2-3-4 花蓮港

花蓮港港口航道寬度 240m，外港迴船池直徑 700m，水深均為 14m 至 17m，對計畫進泊船型 60,000DWT 而言，除水深略為不足外，港口寬

度與迴船池直徑均可滿足需求。根據花蓮港進港船舶噸位資料顯示，進港船舶噸位超過 40,000GT(約 60,000DWT)每年僅數艘，佔有率均小於 1%，外港碼頭規模大於需求，內港池航道長 1,120m，前段 470m 水深 12m，可符合 15,000DWT 船型進泊需求，後段 650m，水面寬 100m，但水深 10.5m 之寬度僅 30m，水深 9m 之寬度為 50m，不符 15,000DWT 船型進泊需求。港區鐵路及倉棧使用率均偏低，貨源不足造成碼頭設施閒置現象。花蓮港直接暴露於太平洋颱風波浪侵襲，長浪造成港池共振，影響碇泊船隻安全。東防波堤延長與西防波堤興建破壞海岸輸沙平衡，造成南濱海岸侵蝕，美崙溪口淤積現象。

此外，早期花蓮港規劃設計時因缺乏波浪實測資料，防波堤等港灣構造物設計波浪，依據颱風波浪數值模型推算求得，未作實測資料，導致設計波高偏小現象。防波堤受大於設計波高之颱風巨浪侵襲時，試驗結果顯示原本設計為消波設施之開孔胸牆消波艙內產生巨大的衝擊波壓，如圖 5 所示，造成胸牆倒塌。構造物損壞情形如圖 6 所示，港內碼頭為消滅波能在採用消波艙，但碼頭鋼筋混凝土面版則未設通氣孔。在高水位，受較大波浪作用時，波浪與空氣混合所產生之上揚力，使重量超過 250 噸之混凝土面版抬起，支撐柱斷裂傾倒。

### 三、工商綜合港開發之探討

台灣地區除已奉核定之四個國際商港，三個國際商港輔助港及兩個國內商港外，尚有永安(興達)、深澳、麥寮及和平(興建中)等工業港。此外，還有台西、濱南、觀塘、大觀與台塑北部港與桃園港已規劃完成或正規劃中。公民營企業配合濱海工業區開發，興建工業港主要目的為減少陸路運輸成本。但是大規模闢建工業港除造成海岸過度開發破壞海岸自然環境外，各工業港因運量不足無法達成經濟規模，紛紛要求將工業港變更為工商綜合港。

工業港開發係依據『促進產業升級條例』，由公民營企業向經濟部申

請；而國際商港開發則依『商港法』規定執行，由交通部主導。民營企業投資商港建設則採用『獎助民間參與交通建設條例』，引進民間資金、人力及企業經營管理技術，加速推動港埠建設，提升經營效率。由於法源不同，適用範圍也不同。

由於航商、業主在國際港內投資經營專用碼頭，必需遵照商港法規定，其土地及地上固定設施產權歸港務局，並依據投資金額換算免租使用期，期滿後按投資金額計算租金，無論投資金額多少，其免租使用期不太可能超過二十年。部份商港投資案例顯示，航商貨主除需依港埠費率表繳納相關費用外，還需負擔碼頭通過費或管理費。

工業港依『促產條例』申請開發，除享受土地開發優惠擁有土地所有權外，若開放經營商港業務而不必依照商港法之規定或採較優厚之港埠業務費率，對目前在國際商港內租用或投資經營專用碼頭業者而言，勢必造成不公平競爭，對未來淡水、台中港推出新建碼頭計畫可能面臨極大之衝擊。

貨櫃港口具有高度可替代性，運量隨港埠設施、聯外交通、服務效率與港埠費率而變動。因此，工業港若開放為『工商綜合港』，經營貨櫃裝卸業務，則國際商港貨運量將快速流失。長期而言，勢必對商港造成排擠現象，而使政府長期投資港埠建設無法發揮功能。況且，此案例一開，將面臨目前既有之工業港及未來可能闢建之工業港是否比照辦理問題。

台灣地區國際港埠整體規劃，係根據各港地理位置、港埠能量與環境特性，擬訂功能與定位，使港與港間能產生互補功能，而非惡性競爭。

#### 四、結語

台灣西部海岸為平緩沙灘，建港破壞沿岸輸沙平衡，除港口航道受漂沙淤積威脅外，下游海岸則可能發生嚴重侵蝕；而東部則為平直陡峭海岸，腹地狹小，且面對太平洋颱風波浪威脅，又無足夠貨源。但儘管自然環境

惡劣，建港工程投資龐大，港埠營運缺乏可靠貨源，卻仍無法減低民間企業與地方政府或民意代表建港意願。

民間企業配合濱海工業區開發除使有限海岸資源淪為少數企業私有外，大規模闢建工業港，企圖獨佔港埠資源，再以港埠設施閒置，要求政府解除工業專用限制，變更為工商綜合港以便從事商港業務。台灣地區進出口(內需型)運量雖持續成長，但預測未來將逐漸緩和。以貨櫃進出口運量為例，85年進出口量約為550萬TEU，87年約增為553萬TEU，二年僅增三萬餘TEU。因此，未來新增運量大部份為轉口櫃，其選擇港口可替代性極高。台灣地區已有四個國際商港，三個輔助港，工業港若再開放為工商綜合港，則港與港間距離僅數十公里，又無明顯區隔。各港為爭取有限貨源擴大經濟，勢必造成惡性競爭，而使部份設施閒置，浪費整體港埠資源。

近年來部份漁港，因當地民眾交通與民生物資運輸需求，要求政府補助興建客、貨運碼頭，並將港埠設施提供特定業者從事客、貨運服務，而未依商港等規定收取港埠費用。因此，船舶運送業者經營成本較國內商港低廉，使國內海運貨物由商港轉移至漁港之怪異現象，對經營國內商港航線業者形成差別待遇不公平競爭，除使合法業者難以生存外，亦使政府投資港埠建設閒置且部份須依港埠業務費率表繳相關費用，無法收取港埠營運費用。

海岸為國家重要自然資源，其使用權與開發所獲利益，應為全民共享。因此，海岸開放民間依『促產條例』開發為工業區或闢建港口，應依本業需求審慎加以評估；並對環境衝擊全面檢討，而不應讓企業獨佔海岸。政府投資港埠建設應本使用者付費精神，且應將港埠設施平等開放業者使用。

## 參考資料

1. 張金機 『台灣地區國際商港整體規劃及未來發展計畫』, 土木技術, 第 13 期. P35~45, 1999.03.
2. 港灣技術研究所 『基隆港、台中港、高雄港及花蓮港整體規劃及未來發展計畫』 期末報告, 1996.

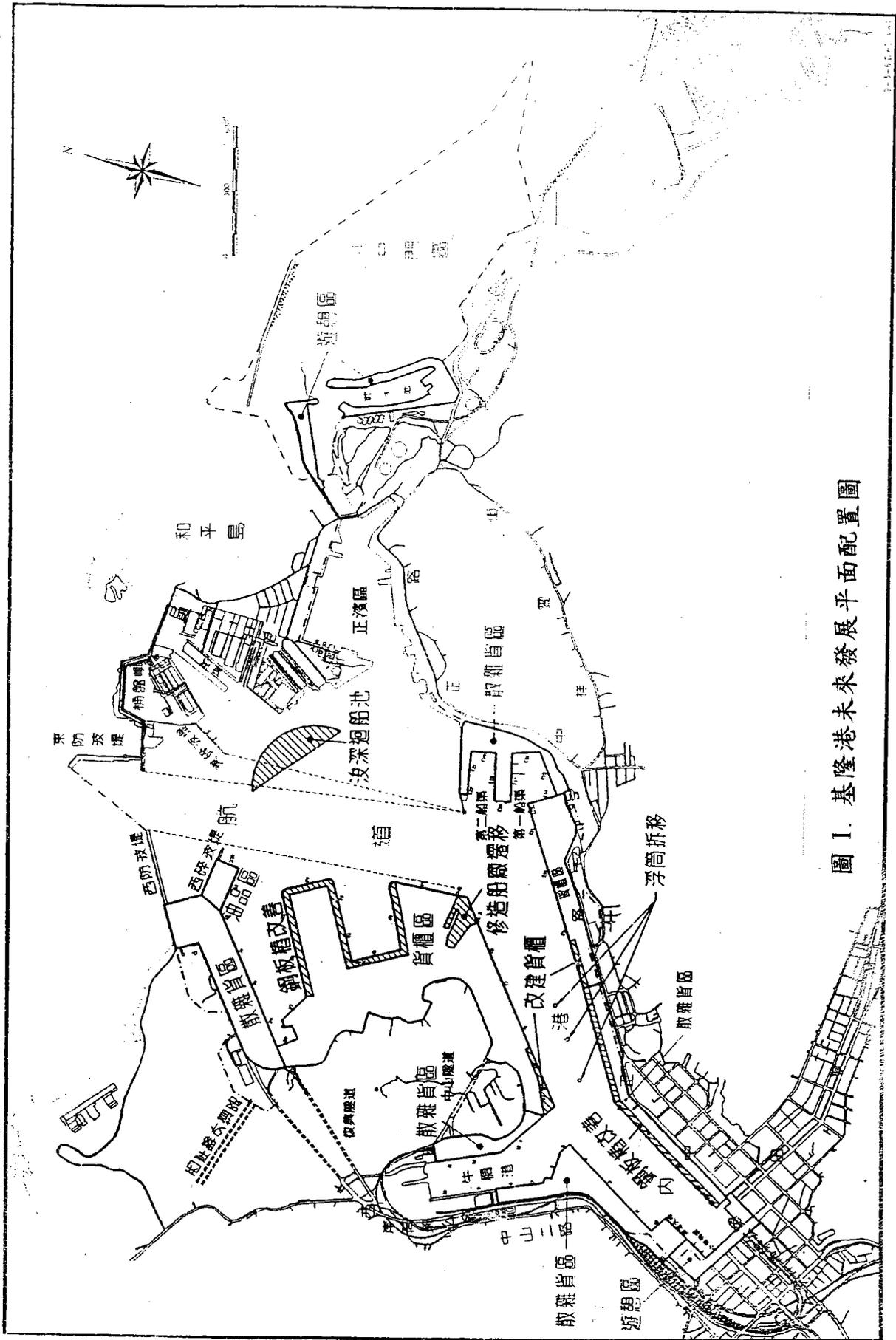
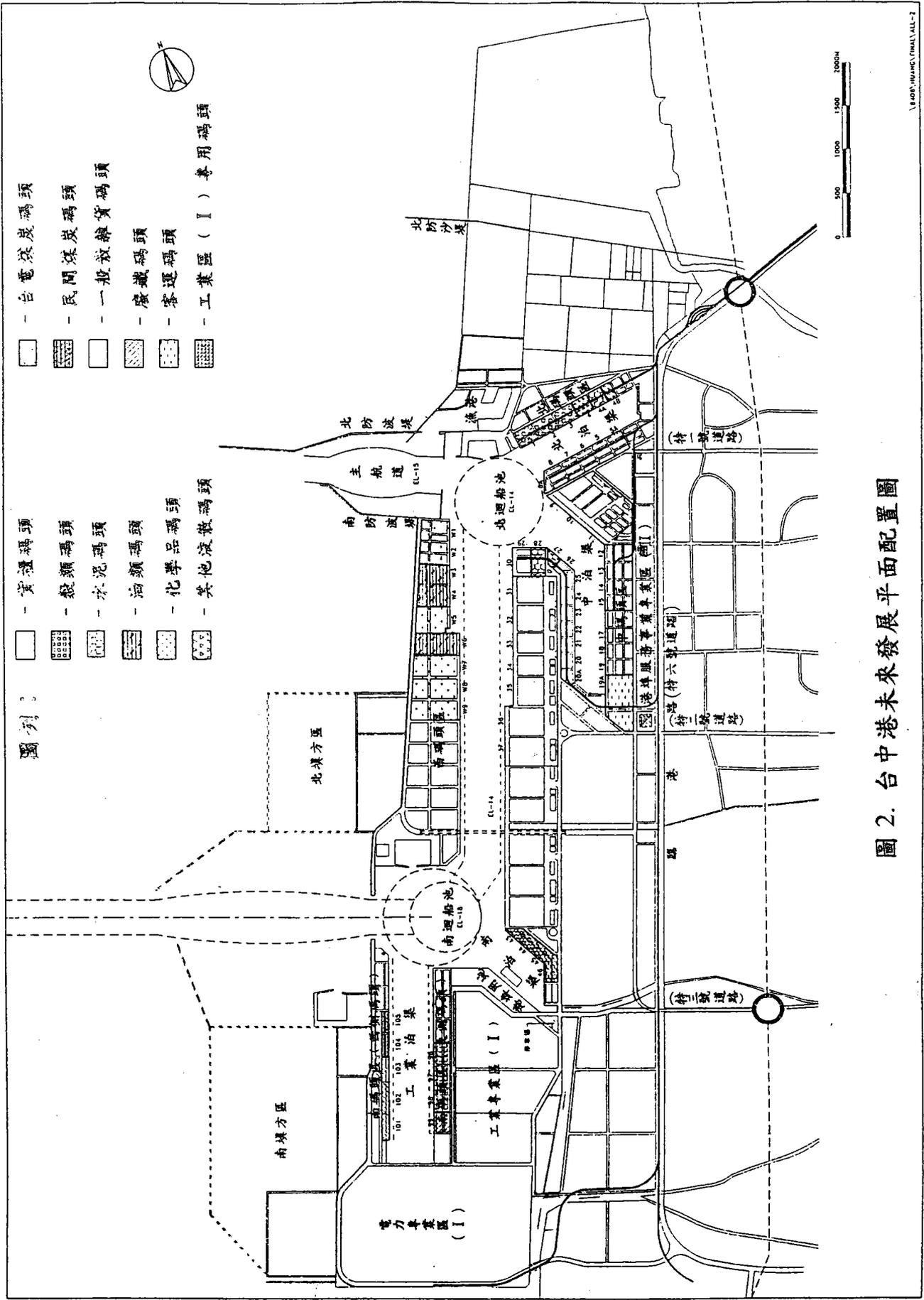


圖 1. 基隆港未來發展平面配置圖



圖列：

- 貨櫃碼頭
- 穀類碼頭
- 冰泥碼頭
- 油類碼頭
- 化學品碼頭
- 其他液散碼頭

- 煤炭碼頭
- 民間煤炭碼頭
- 一般散貨碼頭
- 廢鐵碼頭
- 客運碼頭
- 工業區 (I) 專用碼頭

圖 2. 台中港未來發展平面配置圖

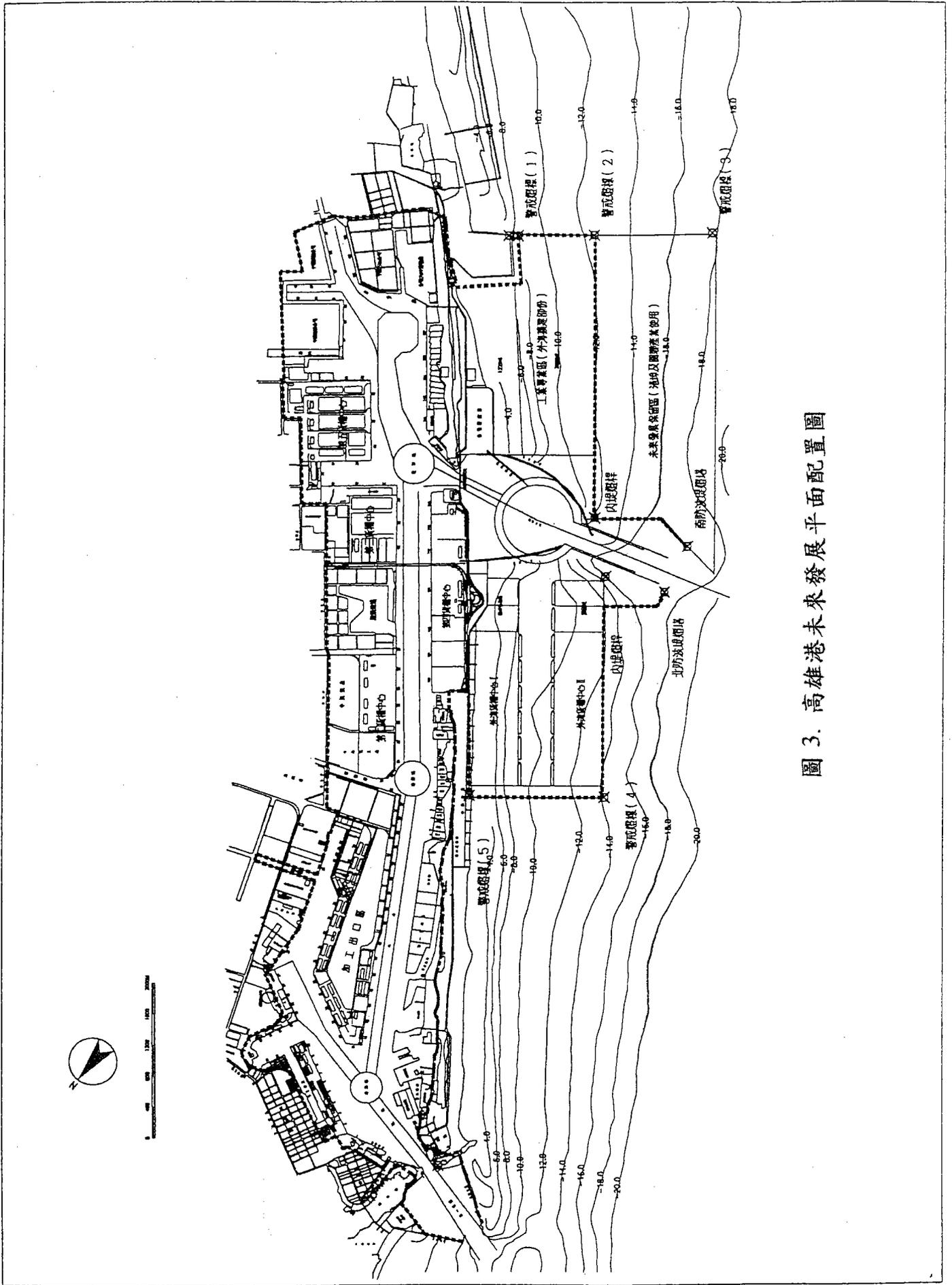


圖 3. 高雄港未來發展平面配置圖

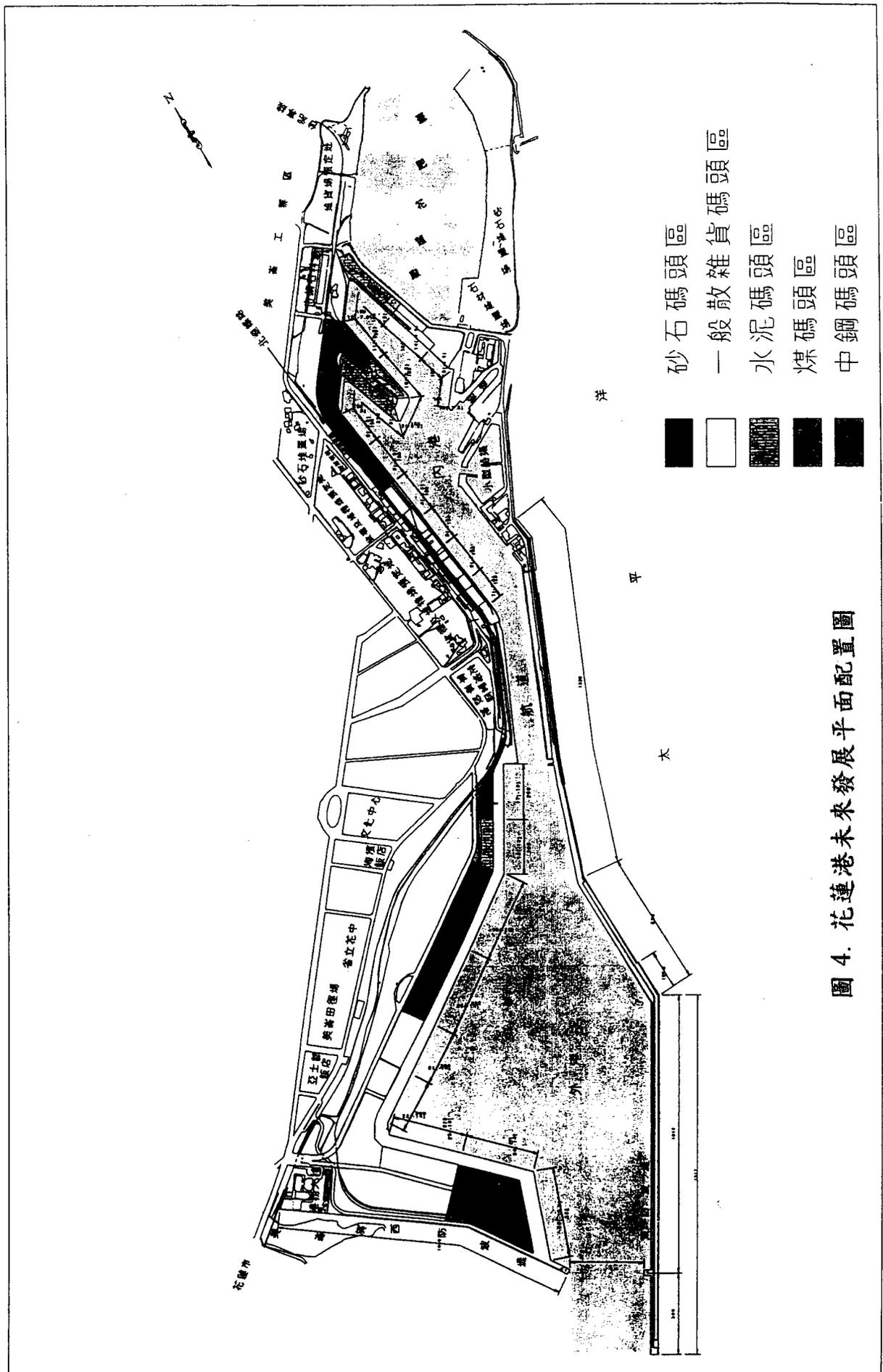


圖 4. 花蓮港未來發展平面配置圖

□ TEST RESULTS

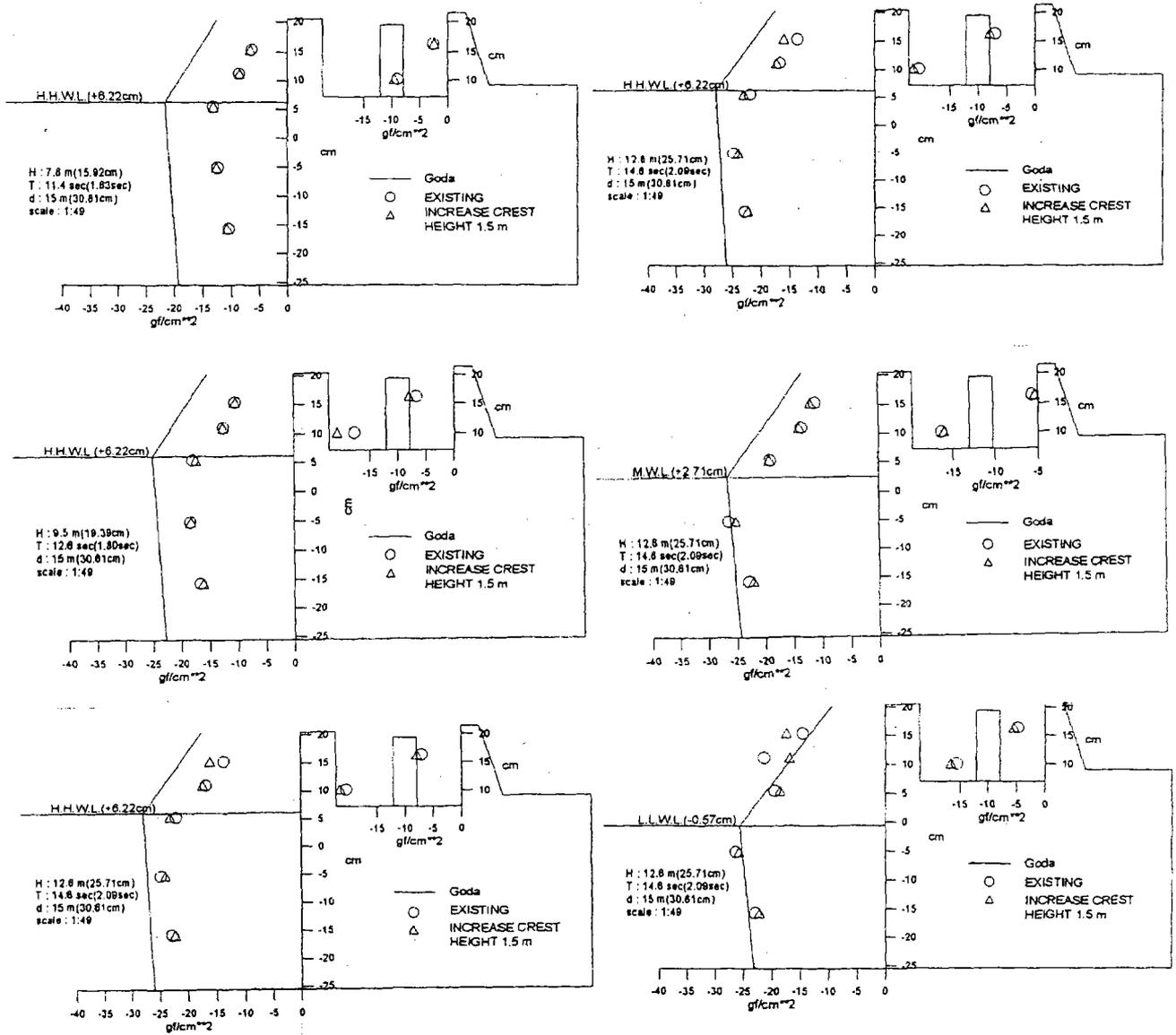
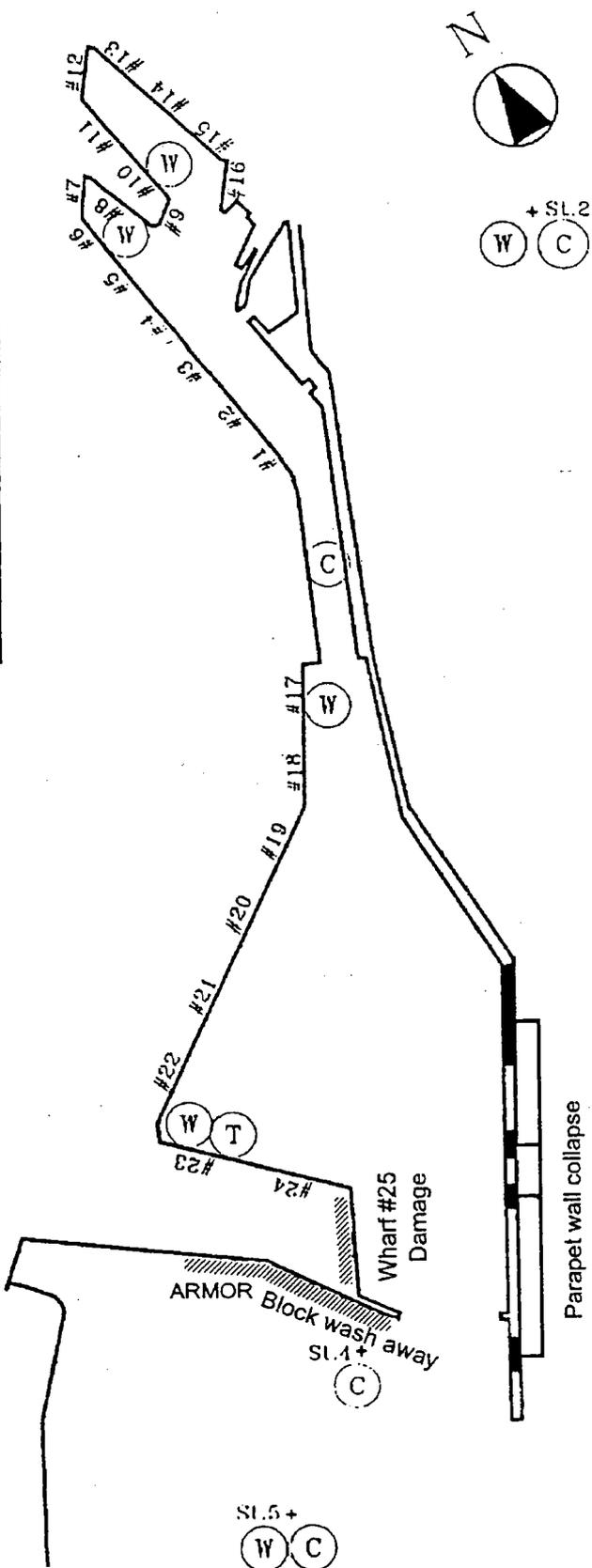
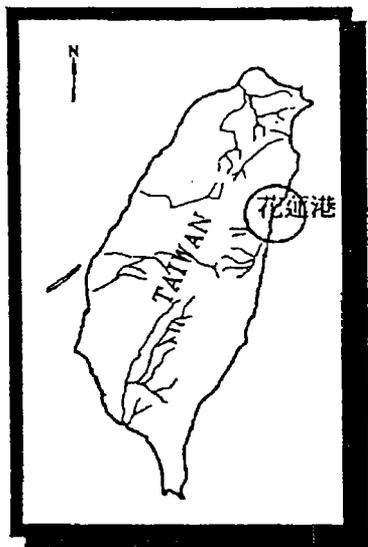


圖 5 試驗結果波壓強度分佈



+ WIND STATION

- (W) : WAVE STATION
- (C) : CURRENT STATION
- (T) : TIDE STATION

圖 6 颱風波浪造成港灣構造物損壞

# 颱風波浪與暴潮作用於防波堤之合力評估

歐善惠\*

## 一、緒 論

### 1-1 研究目的

台灣東北部海岸由於地形陡峭與無良好之遮蔽，在夏秋兩季颱風來襲期間，各港灣結構物需直接承受颱風所引起之強風、波浪與暴潮的多重破壞，造成各港灣結構物的嚴重損失，不僅顯示港灣結構物設計時對颱風作用條件尚無法清楚掌握，且相關波壓力設計公式之適用性也未深入探討。

台灣地區夏季常受颱風侵襲，根據中央氣象局 1896 年至 1992 年共 96 年之颱風資料統計結果顯示，每年平均有 3.5 次颱風侵襲台灣。颱風之低氣壓及強風常導致水位異常上升，此種現象稱為暴潮偏差 (storm surge)。由於近岸水位上升，造成碎波線靠近海岸線，碎波線內移將增加颱風波浪對港灣結構物的破壞力，使防波堤或沉箱因承受巨大波力而有潰堤之危險，海堤也因水位上升使波浪越過堤頂而造成海水倒灌。如民國 83 年道格、提姆颱風造成台灣東北部蘇澳港、基隆港、龍洞遊艇港等港口外廓防波堤的嚴重損壞。民國 85 年賀伯颱風來襲，大潮與暴潮偏差同時發生，潮位的異常上升對上游的洪水產生頂托作用，海水越過現有海堤致使台灣西部沿海地區遭受上游洪水與海水倒灌的雙重災害，造成不小之損失。故如何建立暴潮預測模式，以加強海岸防救措施及災害管理，實為海岸工程規劃的當務之急。

鑑於近來由於大規模之港灣結構物遭受颱風侵襲嚴重破壞之事件屢屢發生，不僅危及港埠營運之安全，也同時對目前港灣結構物之設計準則提出警訊。尤其台灣東北部海岸地區，由於無良好遮蔽而直接暴露於太平洋颱風侵襲

---

\*國立成功大學水利及海洋工程學系教授兼任工學院院長

作用範圍，受颱風波浪與暴潮之合成作用遠較台灣其餘海岸地區為激烈，故破壞之事件更是頻繁。究其原因乃是在於對颱風波浪與暴潮之行進演化不能確切計算，而只依賴傳統之颱風波浪統計模式迴歸深海波浪條件（湯 [1]），再以線性理論計算其在海岸地區之分佈狀況作為設計條件，忽略波浪行進之能量消散與轉換之重要物理機制及隨著低壓中心前進之暴潮於近岸區域之變形影響。因此重新評估颱風波浪與暴潮之前進與在近岸區域之演化及港灣結構物之設計波壓力公式乃是本文之重點。

本文將分別就台灣東北部海域中代表性港灣結構物之颱風災損、颱風波浪與暴潮模式之發展與應用、及設計波力之評估模式等做一探討，據此對台灣東北部海域防波堤之設立與防護方法提出一具體建議。

## 1-2 前人研究

有關暴潮偏差預測之數值模式，大多以有限差分法來模擬，如楊 [2] 所發展的二維模式曾用來預測台灣東北海岸的暴潮行為，其他有關有限差分法的相關文獻 [3、4、5] 則討論在計算暴潮時必須考慮的開放邊界與海岸邊移動邊界的問題。劉 [6] 與中央氣象局發展三合一模式，包括預報簡表、快速二維模式與三維模式，可預測 24 小時之內的暴潮變化，模式準確度較高但計算容量較大，計算需要使用超級電腦，在一般的情況下較不適用於實務單位作簡易的應用。Chien [7] 提出的一維模式考慮風浪在近岸海域處產生輻射應力 (radiation stress) 所衍生的波揚與波降 (wave setup and setdown)，在沿岸地形變化較陡之海底地形情況下具有良好的預測結果，但較不適合於地形水深變化複雜之海域。

關於波浪推算模式方面，大致上包括統計迴歸與數值計算兩種方法，而統計經驗公式中又可分為兩大類，一為示性波法，另一為波譜法。示性波法之概念乃是將紛紜變動之海洋波浪利用統計平均值來描述，將收集到的資料找出示性波高及週期與風速、颱風歷時、吹送距離、水深等參數間的關係。而波譜法以 SWAMP [8] 之歸類可分為 DP 模式 (Decoupled Propagation Model)、CH 模式 (Coupled Hybrid Model) 及 CD 模式 (Coupled Discrete Model) 三種。至於數

值模式之波浪推算、往昔研究均架構於波浪能量平衡方程式，考慮波浪在海面空間上與時間變化均不同，表示波浪中各種頻率及方向的成份波能量密度譜，在時間與空間之總變化與傳入或消散之能源達到平衡。波浪預報數值模式首先是由 Gelic 等人提出，他們利用二維的波浪頻譜傳遞的數值模式，此一方法也是往後學者所採用的基本方法。而由 WAMDI [9] 所提出的第三代風浪模式 (WAM) 則是公認的最佳模式，其基本方程式也是二維的波浪頻譜傳遞方程式，且包含了由風中傳遞至波浪的能量、非線性的影響量、與白沫的消散量等的風浪成長與衰減項，具有預測大規模海域波浪的能力。後來的學者皆以此作為出發，改善數值技巧與加強其中參數的準確性，如 Booij 和 Holthuijsen [10]、Li [11]、Li 和 Zhang [12]。

對於波力的計算大都採用半經驗式，由於防波堤的結構含有拋石堤、護基等，數值計算與理論分析方法較不容易精確計算直立堤以外的方案。首先提出波壓公式為 Hiroi 公式，其在歐洲與日本應用 90 餘年，Sainflou [13] 根據餘擺線重複波理論提出的波壓公式在實際工程應用上非常廣泛，接著是 Minikin 根據現場資料及實驗，針對衝擊波氣袋爆炸現象提出的直立面碎波波壓公式，其後 Rundgren [14] 根據 Miche 之二階理論並考慮反射率提出 Miche-Rundgren 公式。在有限振幅波的理論解方面，Tadjbakhsh 和 Keller [15] 和 Goda [16] 均用攝動法分別得到三階與四階解，但因其公式較為複雜在實際應用上較少採用。再者，國內之相關研究以蔡等人 [17、18] 之數值化傅立葉級數近似解最為代表。Goda [19、20] 提出的波壓公式可以推算碎波前之重複波到碎波後波浪的波壓，提議採用最大波高作為設計波高，解決了規則波公式推算不規則波波壓應採用何種波高當作設計波高的困擾。近年來我國與日本已經廣泛的採用此 Goda 波壓公式來設計防波堤。

## 二、東北海岸港灣結構物之颱風災損

### 2-1 產生災損之颱風路徑與規模

颱風之路徑與規模乃是造成港灣結構物損壞之主要原因，為探討海岸結構

物破壞之成因，乃將近五年來產生災損之颱風路徑繪如圖 2-1 並參照中央氣象局之颱風路徑分類圖如圖 2-2 加以分類，再與中央氣象局歷年颱風警報發佈資料製作颱風概況表如表 2-1。由破壞現象得知，破壞嚴重位置通常有颱風低壓中心通過該地，因此颱風行進路徑應該是造成破壞之主要因素，若時值大潮且颱風正通過該區，如此疊加所得之水位抬升效應，將導致颱風波浪之碎波位置更靠近陸地，碎波後之巨大能量即會嚴重影響海岸結構物之安全。

強烈颱風提姆 (Tim) 於民國八十三年七月十日二十時於在花蓮秀姑巒溪口登陸，時值農曆六月二日，此正值大潮期間。由路徑圖觀之，花蓮港除颱風中心距離近外，更要承受強烈之向岸風，由記錄得知提姆颱風的確造成花蓮港重大災情。

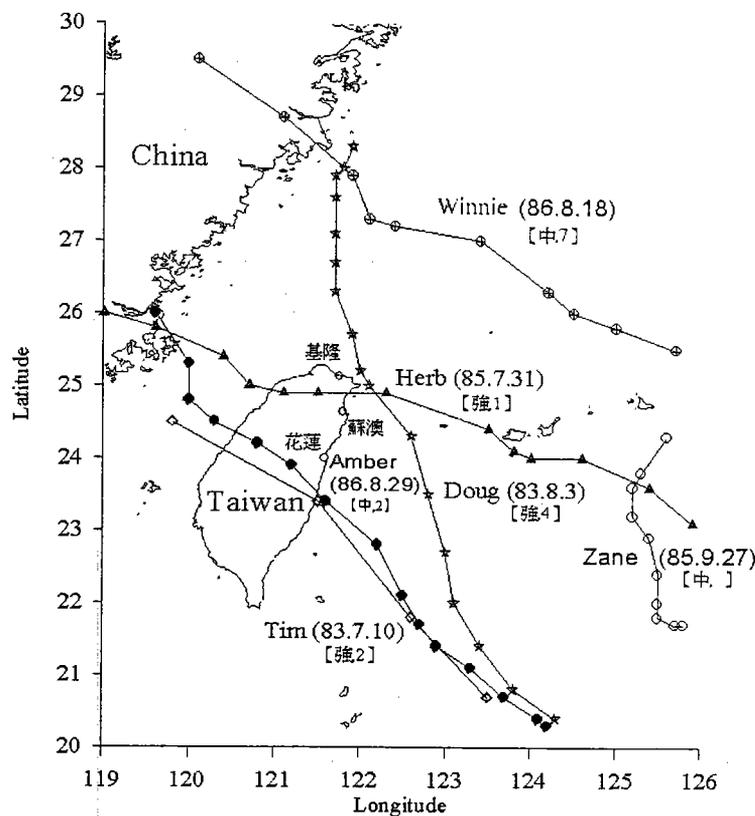


圖 2-1 產生災損之颱風路徑圖

表 2-1 近五年造成東北海岸結構物災損之颱風資料

颱風名稱	生成地點	侵台日期	最大強度	侵台路徑分類	登陸地段	紀 要	
						動 態	災 害
提姆 (Tim)	呂宋島東 方海面	83.7.10 (農曆 6.2)	強烈	2	成功 至台 東間	形成後即以西北方向前進，於 10 日 20 時於花蓮秀姑巒溪口登陸，11 日凌晨在台中附近出海後，仍維持西北方向行進，11 日清晨於大陸福建廈門附近登陸後，強度迅速減弱。	全省各地均出現強風豪雨。東部、東南部地區鐵路交通中斷。宜蘭、花蓮、台東及西南部地區農作物損害，以花蓮災情最嚴重。17 死亡、6 人失蹤、70 人受傷。
道格 (Doug)	呂宋島東 方海面	83.8.3 (農曆 7.2)	強烈	4	未登 陸	自形成後至台灣東部近海之間，大致以西北偏北之方向行進。至台灣東部近海後，強度開始減弱，颱風中心於 8 日 02 時進入彭佳嶼與宜蘭間海面，緩慢通過後向北朝大陸江蘇長江口撲去。	受道格豪雨影響，公路多處坍方，橋樑毀損，鐵路內灣支線竹東橋遭溪水沖斷。鐵、公路及航空交通受阻。電力嚴重損害。南投縣山區山洪爆發，部分地區對外交通中斷，全省各地均有災情
賀伯 (Herb)	呂宋島東 方海面	85.7.31 (農曆 6.16)	強烈	1	基隆 與蘇 澳間	形成後以西北西方向向台灣前進，於 31 日 20 時 44 分在基隆與蘇澳間登陸，強度開始減弱，繼續偏西進行。8 月 1 日 11 時在福建平潭附近登陸大陸。至 8 月 1 日 21 時台灣本島、澎湖、及台灣東部海面始脫離暴風圈之影響。	賀伯颱風帶來強風豪雨，全國各地災情嚴重，航空、鐵路交通全面停飛、停駛，公路坍方、橋樑斷裂，嚴重受損。中南部沿海地區海水倒灌，台北市、縣地區多處嚴重淹水。南投縣水里鄉、信義鄉、鹿谷鄉、山洪爆發，多人慘遭活埋。全台電力、電信受損嚴重。阿里山測站於 7 月 31 日單日降水累計雨量達 1094.5 公釐，創歷史紀錄。花蓮、台東地區於 31 日深夜有焚風發生。有 51 人死亡、22 人失蹤。

資料來源:中央氣象局

表 2-1 (續)近五年造成東北海岸結構物災損之颱風資料

颱風名稱	生成地點	侵台日期	最大強度	侵台路徑分類	登陸地段	紀 要	
						動 態	災 害
薩恩 (Zane)	呂宋島東方海面	85.9.27 (農曆 8.15)	中度			形成後先以西北方向後轉向東北方向前進	未有災情傳出
溫妮 (Winnie)	琉球那霸東南方海面	86.8.18 (農曆 7.16)	中度	7	未登陸	形成後大致以西北西方向前進，暴風圈於 18 日晨進入台灣東部及北部陸地，8 月 18 日 22 時左右在浙江省溫州灣附近登陸。	溫妮颱風挾帶強風暴雨過境台灣北部及東部地區。北部及中部山區豪雨不斷，台北天母、內湖、汐止地區嚴重積水及山崩，汐止林肯大郡房屋倒塌。有 44 人死亡，一人失蹤，84 人輕重傷，房屋全倒 121 間半倒 2 間。
琥珀 (Amber)	呂宋島東方海面	86.8.29 (農曆 7.27)	中度	2	花蓮秀姑巒溪北方附近	形成後即以西北西後轉西北方向前進，於 8 月 29 日 03 時 50 分左右在花蓮秀姑巒溪北方附近登陸後，強度減弱，繼續以西北方向前進，於 8 月 29 日 20 時左右由馬祖附近進入大陸。	公路多處坍方，鐵、公路及航空部分交通中斷，花蓮縣、台東縣及宜蘭縣的農業損失 14.6 億。1 人失蹤，37 人輕重傷，房屋半倒 26 間。

資料來源:中央氣象局

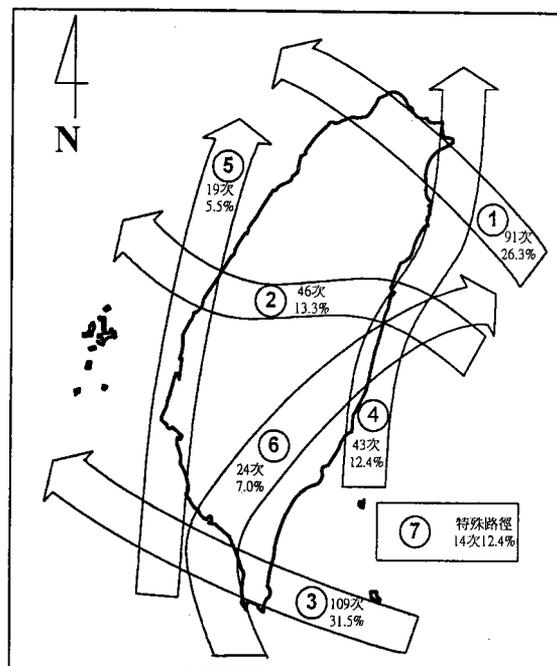


圖 2-2 侵台颱風路徑分類統計圖(1897~1995)

強烈颱風道格 (Doug) 於民國八十三年八月三日近台並未登陸，颱風路徑為中央氣象局七種分類中的第四類路徑，時值農曆七月二日，也是正值大潮期間。從路徑圖觀察，基隆港、龍洞遊艇碼頭及蘇澳港均非常靠近颱風中心，見其實際破壞現象，龍洞遊艇港受道格侵襲，堤頭破損至今仍尚未修復完全，而基隆港、蘇澳港也受到侵襲造成部分防波堤遭破壞。

賀伯 (Herb) 颱風於民國八十五年七月三十一日時在基隆與蘇澳間登陸，屬於七類路徑中之第一類侵台路徑，由路徑圖可看出對基隆港蘇澳港所造成之威脅，比對實際破壞情形，位於上風處之基隆港出現多處之嚴重破壞現象，蘇澳港雖未受到強烈向岸風，亦因強烈颱風之作用造成部分災損。

中度颱風薩恩 (Zane) 於民國八十五年九月二十七日近台時正逢農曆八月十五大潮期間，而薩恩颱風出現於呂宋島東方海面，先以西北西方向後轉向東北方向前進，其並未登陸台灣且行進路徑離台灣尚有一段距離，故不在中央氣象局之七類侵台路徑中的任何一類，雖然颱風並未嚴重影響台灣，然而比對其所造成之暴潮偏差，則仍值得我們注意。

中度颱風溫妮 (Winnie) 於民國八十六年八月十八日近台，時值農曆七月十六日之大潮時期，屬於第七類之特殊侵台路徑，由路徑圖可看出離台灣有一段不小距離。由實際破壞情形看來，基隆附近之防波堤損毀，除了大潮增加颱風波浪之破壞力外，颱風行進期間未受到陸地阻擋之地形因素，使基隆港受到上風處向岸風之影響，都加強了溫妮颱風對東北海岸結構物之破壞力。

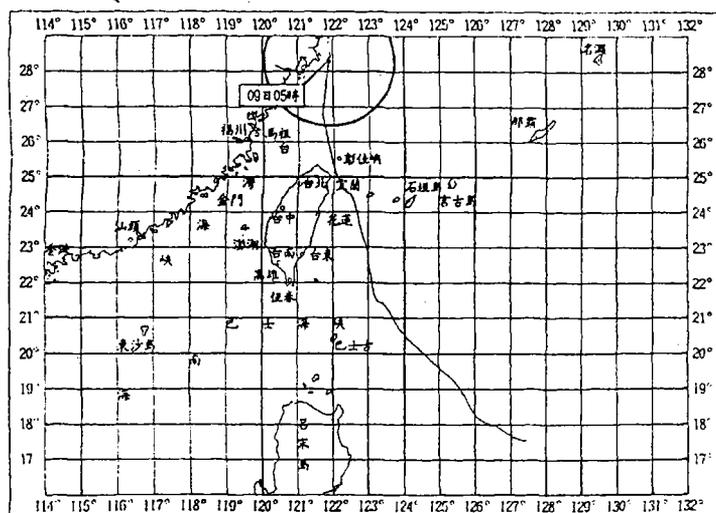
中度颱風安珀 (Amber) 於民國八十六年八月二十九日侵台時值農曆七月二十七日，於花蓮秀姑巒溪北方登陸，屬於侵台路徑之第二類，颱風中心與提姆颱風皆從花蓮港南部通過台灣，因此花蓮皆承受強烈向岸風之影響，造成花蓮港之防波堤破壞。

## 2-2 港灣結構物之破壞分析

為說明本文執行之重要性，將以蘇澳港於民國八十三年夏天所遭受之道格颱風破壞情形做一詳細整理，其行徑按中央氣象局之颱風警報發佈資料如圖

2-3 所示，蘇澳港之防波堤雖早在興建之初即以因地震及颱風作用而有局部毀損，但仍以八十三年之颱風破壞最為嚴重。同樣位於東海岸花蓮港北側，颱風暴潮之直接侵襲均會施加於港灣結構物很大之合成波力。如上述花蓮港之破壞期間，提姆颱風之侵襲也導致蘇澳港南廓防波堤兩座沈箱主體損毀，就在修復工作尚未及時動工前，另一個強烈颱風道格，因移動路徑之低壓中心較提姆颱風接近蘇澳港且強度稍大，致使防波堤之已損毀部分破壞面積加大，造成大量拋石消波塊流失及消波胸牆與堤面塌陷。爾後於民國八十五當強烈颱風賀伯登陸宜蘭重創基隆海岸結構物時，蘇澳港亦難倖免，造成南外廓防波堤中一沉箱在潮線下方出現一高 6 公尺，寬 20 公尺之巨大破洞。圖 2-4 之照片即展示防波堤之破壞情形。從破壞程度與堤址位置可看出外廓防波堤，特別是在水深較大之處所遭受之颱風波浪與暴潮合成作用時，在強烈颱風之路徑臨近之蘇澳港時可以產生相當嚴重之破壞威力。

### 道格(DOUG)



首次警報發布時間：8月6日 9時10分

圖 2-3 道格颱風路徑圖

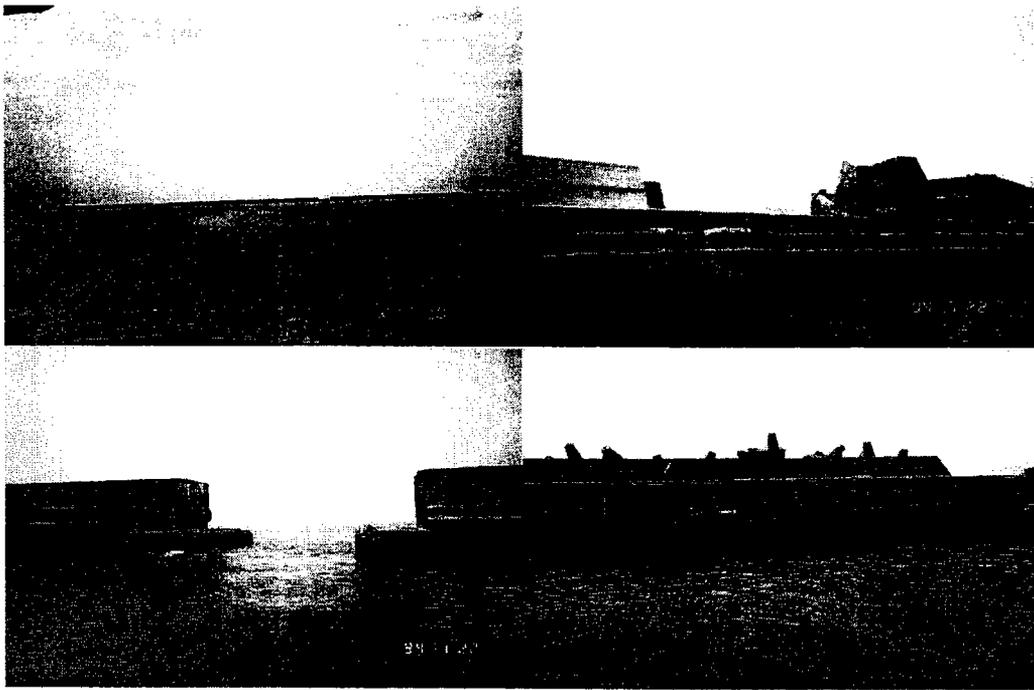


圖 2-4 蘇澳港外廓防波堤受破壞照片

由蘇澳港之防波堤災損資料可看出強度大之颱風所造成之大風浪與暴潮，其合成作用往往對海岸之防波堤結構物產生相當大之波力，而此波力也隨颱風強度與移動路徑、區域水深地形以及天文潮汐而變動，增加其不確定性。故對於颱風波浪與暴潮合成作用在近岸區域之演化，並且模擬已發生之強烈颱風其移動路徑針對蘇澳港之防波堤再深入評估可能之波力大小，即為本文之主要動機。

### 2-3 港灣結構物之現況

蘇澳港先前被破壞之南外廓防波堤段又於安珀颱風侵襲時間遭受連壞。如圖 2-5 所示，安珀颱風造成編號 27 之沈箱從胸牆結構以至水下約 +14 公尺之前面三隔艙破壞，目前以灌漿修復至水線以上。此外，編號 31 沈箱歷經數個颱風作用侵襲連續破壞後，目前正進行水下開炸工程預備修復工作之進行。再者，編號 33 沈箱其胸牆與檔水隔牆亦於安珀侵襲期間被破壞。另外，編號 19 沈箱則於水下有颱風破壞產生之破洞，並且是連續修補又連續破壞。胸牆破壞之成因雖尚未明朗，從安珀颱風之作用條件及花蓮港之深水區域防波堤胸牆破壞事實，亦可推論波浪作用集中於防波堤結構物上部與水位抬升效應必然相關。

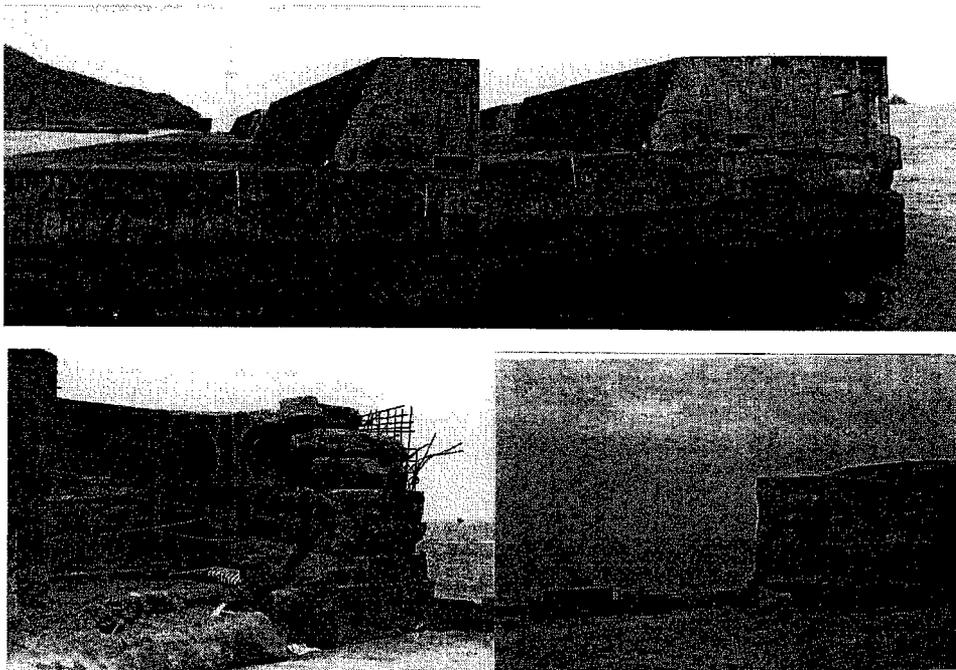


圖 2-5 蘇澳港防波堤現狀

### 三、潮位站實測水位資料分析

#### 3-1 天文潮調和分析

潮汐是由於太陽和月亮與地球之海洋中海水互相吸引而產生的，潮汐能用儀器測得，它顯示出海面，在一定之範圍內，作有規則的起伏，一般是在一天內發生兩次起伏，高水位之間的週期平均是十二小時二十五分鐘。從海岸或港灣所作的觀測顯示，海洋的潮汐受月亮的影響比太陽為大，最明顯的現象，就是每天的高低潮的時間，平均延後約一小時，這與月亮通過同一子午線，每天都延後五十分鐘的現象相符合。潮汐由深海傳播到淺海時，會受到海底地形的影響，因此潮汐問題就變得更複雜。潮汐也受到風以及大氣壓力變化的影響。因此潮汐現象的研究為一相當複雜的問題。

預測潮汐一般採用調和分析法 (**harmonic analysis**)。此法即假設潮汐是由很多分潮 (**partial tides**) 的調和函數相加而成，而每一分潮的振幅

(amplitude) 以及遲角 (phase lag) 隨地點之不同而改變，必須由已測得的潮汐資料來求各分潮之振幅及遲角。潮汐學上的調和分析法為把任何地點觀測到的潮汐分成很多構成此潮汐的分潮，每個分潮之升降視為一簡單的時間調和函數。而潮汐的調和預測就是把這些分潮合在一起，運用到要預測的時間裡，計算潮汐的大小。理論上來講，潮汐是包含有無窮多的分潮，但是只有較少數的分潮在潮汐預測中佔重要的地位。因此在用有限的分潮來預測潮汐時，要包括一些主要的分潮。

### 3-2 暴潮分析

為了分離實際之暴潮偏差，本文收集了台灣東北部之基隆、梗枋、蘇澳等潮位站之實測資料，其資料來源為中央氣象局所有之電腦檔案。所收集之各測站潮位資料的起迄時間均為民國 83 至 85 年，記錄之時間間隔為 1 小時。可能因為潮位計受外力之損壞或人為之疏失，或因颱風來襲造成潮位之異常上升之現象，上述之原因皆可能導致潮位資料中有漏失或不合理之資料，為了獲得較正確之天文潮，確保暴潮偏差之準確性，潮位資料之品質是必需的。

首先查看潮位資料中無記錄之部份者以零代替之，再對照中央氣象局之颱風侵台記錄，扣除颱風來襲前後 2 天之潮位資料以零代替。然後將潮位資料代入調和分析中計算，即可獲得初步之預測值，再將初步之預測值補回無記錄或不合理之潮位資料中做更精確之資料補遺，再利用調和分析計算即可獲得較精確之調和常數與天文潮位。

圖 3-1 為基隆測站在民國 83 年 8 月份道格颱風來襲時之暴潮偏差歷線、天文潮位與實測潮位之比較圖，圖中實線為潮位站之實測潮位，虛線為調和分析後之天文潮位預測值，點虛線為實測潮位減去預測潮位之差值。由圖中可看出在 8 月 2 日至 6 日實測潮位與預測之天文潮位相當吻合，表示本文之調和分析的正確性足以模擬天文潮位的變化，在 8 月 8 日 4 時之暴潮偏差達到最大值，其值約為 0.56 公尺，而發生之時間與颱風靠近台灣東北海岸之時間接近。

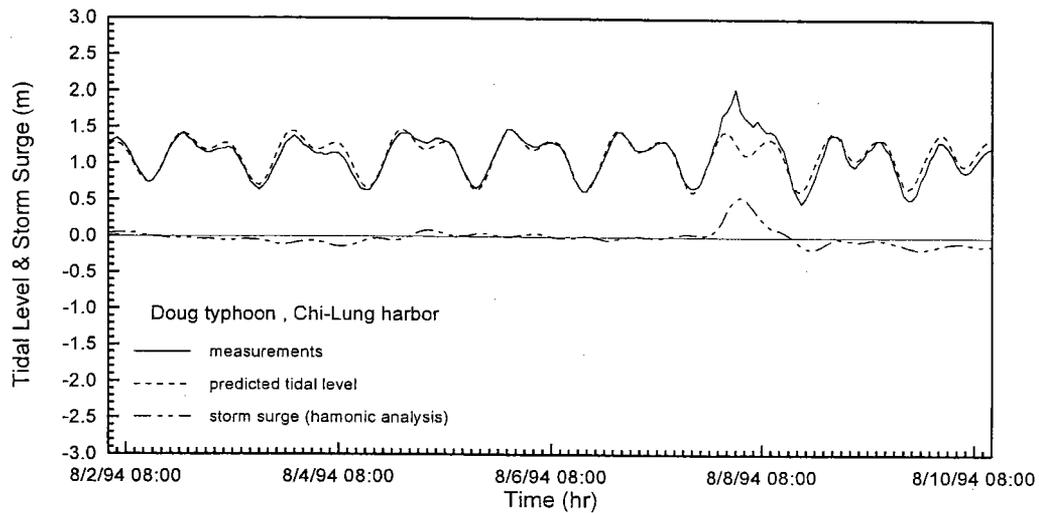


圖 3-1 道格颱風於基隆地區之潮位與暴潮偏差歷線圖

圖 3-2 為梗枋測站於道格颱風來襲時之暴潮偏差歷線、天文潮位與實測潮位之比較圖，比較其結果與圖 3-1 類似，而圖 3-2 之暴潮偏差最大值分別為 0.77 公尺，發生之時間分別為民國 83 年 8 月 8 日 2 時。

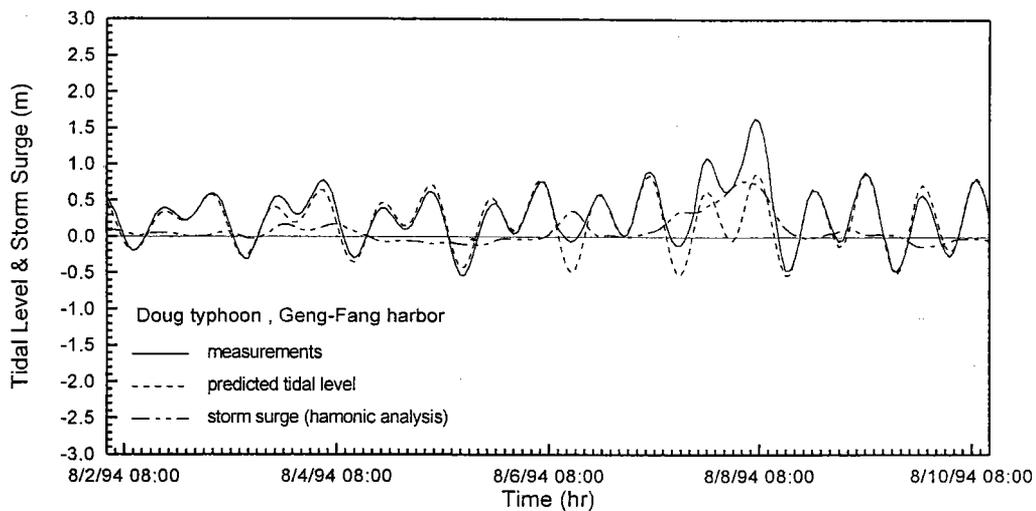


圖 3-2 道格颱風於梗枋地區之潮位與暴潮偏差歷線圖

圖 3-3 與圖 3-4 分別為蘇澳測站於賀伯與溫妮颱風來襲時之暴潮偏差歷線、天文潮位與實測潮位之比較圖，其結果也可看出調和分析之正確性，而圖 3-3 與圖 3-4 之最大暴潮偏差分別為 0.65 公尺與 0.46 公尺，其發生時間分別為民國 85 年 7 月 31 日 21 時與民國 86 年 8 月 18 日 5 時。

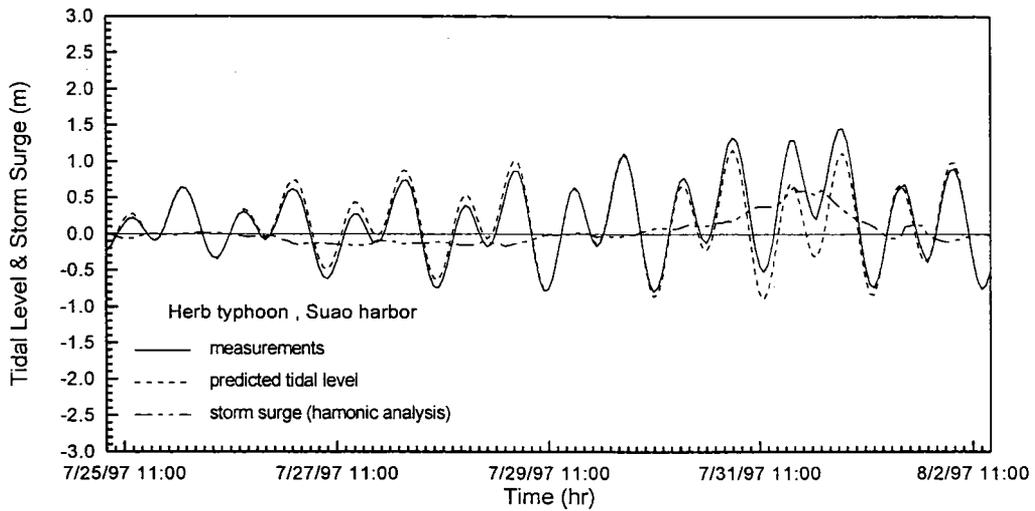


圖 3-3 賀伯颱風於蘇澳地區之潮位與暴潮偏差歷線圖

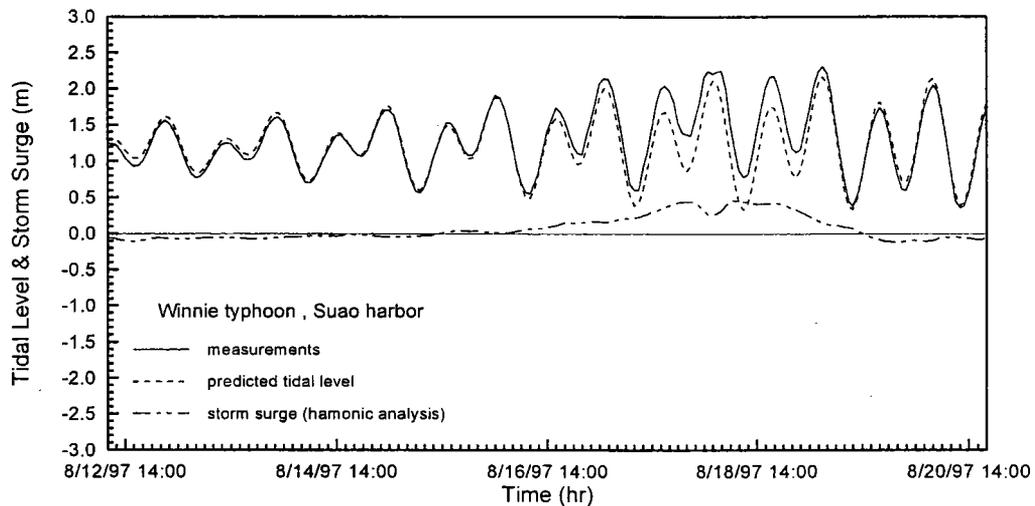


圖 3-4 溫妮颱風於蘇澳地區之潮位與暴潮偏差歷線圖

綜合以上所述，道格颱風來襲時台灣東北海岸之暴潮偏差最大值約為 0.77 公尺，其值大小與颱風路徑與強度有關，如溫妮颱風之路徑偏北所造成之暴潮偏差就比較小。而比較最大暴潮偏差之發生時間則與颱風路徑有相當之關係，如道格颱風是由南往北行進，最大暴潮偏差之時間也由地理位置之由南往北先後出現，而溫妮颱風則是測站位置距颱風中心愈近者愈早發生。若能較多之資料做一統計分析，則應可找出實際之颱風路徑與強度與各地暴潮偏差之間的關係。

## 參考文獻

1. 湯麟武，「淺灘海岸上波浪推算方法之研究」，成功大學土木水利學術彙刊第一期，第 105 頁-164 頁 (1970)。
2. 楊春生，「台灣北岸暴潮推算之研究」，台南水工試驗所土木水利學術彙刊，第 49 頁-63 頁 (1974)。
3. Yen, G. T. and F. K. Chou, "Moving Boundary Numerical Surge Model," *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, ASCE, Vol. 105, No. WW3, pp. 247-263 (1979).
4. Harper, B. A. and R. J. Sobey, "Open-Boundary Conditions for Open-Coast Hurricane Storm Surge," *Coastal Engineering*, Vol. 7, pp. 41-60 (1983).
5. Walton, R. and B. A. Christensen, "Friction Factors in Storm Surges over Inland Areas," *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, ASCE, Vol. 106, No. WW1, pp. 261-271 (1980).
6. 劉肖孔，「台灣海域颱風暴潮及氣象潮數值預報模式」，中央氣象局研究報告第 374 號 (1990)。
7. Chien, C. H., "1-D Modeling of Surges for the Eastern Coast of Taiwan Induced by Typhoons," *Proceedings of 24<sup>th</sup> IAHR Conference*, Tokyo, pp. 40-47 (1994).
8. SWAMP Group (24 Authors), *Ocean Wave Modeling*, Plenum Press, New York (1985).
9. WAMDI Group, "The WAM model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model," *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 18, pp. 1775-1810 (1988).
10. Booij, N. and L. H. Holthuijsen, "Propagation of Ocean Waves in Discrete

- Spectral Wave Models," *Journal of Computational Physics*, Vol. 68, pp. 307-326 (1987).
11. Li, C. W., "A Split Operator Scheme for Ocean Wave Simulation," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 15, pp. 579-593 (1992).
  12. Li, Y. S. and M. Y. Zhang, "Dynamic Coupling of Wave and Surge Models by Eulerian-Lagrangian Method," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 123, No. 1, pp. 1-6 (1997).
  13. Sainflou, G., "Essai Sur les Diques Maritimes Verticales," *Annal Ponts et Chauss.*, Paris, France, Vol. 98, No. 4, pp. 5-48 (1928)
  14. Rundgren, L., *Water Wave Force*, Stockholm (1958).
  15. Tadjbakhsh, I. And J. B. Keller, "Standing Surface Waves of Finite Amplitude," *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 8, pp. 442-451 (1960).
  16. Goda, Y., "The Fourth Order Approximation to the Pressure of Standing Waves," *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 10, pp. 1-11 (1967).
  17. 蔡清標、鄭東生, 「深海重力駐波之數值解析」, 港灣技術, 第四期, 第 11 頁- 25 頁 (1989)。
  18. 蔡清標、鄭東生、涂明裕, 「直立堤面上駐波波壓特性」, 中國土木水利工程學刊, 第四卷, 第四期, 第 289 頁- 295 頁 (1992)。
  19. Goda, Y., "New Wave Pressure Formulation for Composite Breakwaters," *Proceedings of 14<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference*, Copenhagen, pp. 1702-1720 (1974).
  20. Goda, Y., *Random Seas and Design of Maritime Structures*, University of Tokyo Press (1985).

# 老舊港區再開發之規劃

黃來旺\*

## 一、前言

台灣地區四週臨海，經濟發展幾乎仰賴對外之國際貿易，而國際貿易之進出口貨物中，約有 99% 係必須利用海運來運輸，空運僅佔約 1%，顯見目前之五大國際商港擔負著非常重要的運輸任務，不僅為台灣地區重要門戶，更為相鄰之都會區帶來繁榮與進步。

台灣地區五大國際商港中，以基隆港(1886 年營運)、高雄港(1908 年築港)歷史最為悠久，花蓮港(1939 年開港)、台中港(1971 年築港)、蘇澳港(1974 年築港)等則屬於較後期開發之港口。由於較早期開發之老舊港區，在時空環境的快速變遷之下，隨著現今船舶大型化及貨物貨櫃化之趨勢，老化的港埠設施已漸不符運輸的需要；而且因為港區過於封閉的影響，不但使得舊港區鄰近都市地區發展受阻，周遭市容也因而顯現頹敗的景象；同時也犧牲了港都市民臨海的親水空間，造成市民生活與港口之間長期受到隔閡的現象。

以港灣長發展的觀點，為了迎向二十一世紀的來臨，以及拌演著國際交流的重要據點，港埠應具備多元化的機能。因此，除了整建或擴充既有的港埠、物流設施之外，應充實資訊、文化、產業、休閒等都市機能，以促進人員、物資、資訊的交流。對於過去舊港區所忽略的機能空間應加以檢討，重新配合新環境以協調物流、產業、都市、生活並存的觀念來進行再開發，才能為日漸老化的港灣空間注入新生命。

基此，本文擬先闡述港灣與都市發展之互動關係，分析港灣再開發的背景，並援引國外港灣再開發之案例予以解析，最後簡介高雄港舊港區再開

---

\* 宇泰工程顧問公司經理

發計畫之規劃情形，希望以港灣再開發的理念應用在高雄港舊港區再開發之規劃為例，為國內其它港口之老舊港區提供一個未來發展的參考方向。

## 二、港灣與都市發展之互動關係

由港灣之發展來看，較具歷史的老港口大都具有天然的屏障，發展初期大概僅有小規模的繫船護岸，在港灣及都市發展尚未成形或具備規模時，在臨港地區尚有充分的餘裕空間，可以提供都市及港灣充分發展，彼此間自然存在著協調相容的關係。

但港灣與都市的關係，隨著經濟的發展及時代的進步，彼此間產生了很大變化，特別是在經濟高度發展時期，隨著都市需求之逐漸增多，港灣空間亦配合全力擴大使用，而被視同生產空間提供了經濟活動所需要的功能。由於經濟發展的需要，港灣必須不斷強化專業的功能，以及在充份運用港灣空間的發展下，積極提昇港埠貨物之運能及引入相關產業進駐，而使得港灣與都市的衝突關係即逐漸顯現出來；例如港區所產生大量的交通量，使得都市道路難以負荷；引入臨港工業，使得相鄰市區環境品質低落；港灣的發展使得市民能自由出入臨海區域的機會減少；大範圍封閉的港灣導致鄰近市區商業機能的降低及都市發展受阻等。

事實上在先進國家港灣發展的過程亦是類似，但值得注意的是：受到運輸形態與產業結構的變化、都市化的進展、人民生活水準的提昇、社會價值觀念的變化等影響，對港灣空間利用的觀念也起了很大的變化。很明顯的在港埠現代化及物流技術革新之衝擊下，以及都市對港灣不斷要求的同時，許多港埠沿岸域已開放轉變成休閒空間，提供多樣化的功能用地，來改善都市生活的環境，以增進港灣與都市之相容發展。

以日本港灣發展為例，1955年時隨著高度經濟成長的開始，日本政府即制定了港灣建設五年計畫，歷經了八次的五年計畫後，在1996年起開始了第九次的五年計畫。在日本高度經濟成長期間（約第一～第四次港灣建設

五年計畫)，日本港灣建設重點是放在內外貿易港及產業港“量”方面的擴充，但從 1976 年開始的第五次港灣五年建設計畫，則將其大半的重點放在港灣環境的建設，對於與物流相關的建設，則偏重在提高效率及服務品質上的改進。1985 年日本政府發佈的「21 世紀 港灣」的政策中，即提出以港埠長遠發展的觀點，針對在日本經濟高度成長時期所開發的港灣空間，重新探討其發展上所產生的缺點，提倡港埠發展應融合物流、產業、都市、生活等各種機能的觀念，使港灣回歸原有的機能空間，實現一個豐富的水岸地區。

反觀國內港都臨海岸線區的開發情形，幾乎全為物流、產業相關之港埠設施所使用，普遍欠缺都市、生活所需的機能空間，對於整個都市發展及居民生活造成很大之影響，因此，如何周詳考量規劃並積極利用港灣空間資源，來開發與都市協調的港灣地區，將是未來從事港灣規劃者必須特別重視的事。

### 三、老舊港區再開發之背景

舉凡一個港口發展之過程必然與都市發生密切關係，緊臨港區之都市當初因港口發展而興盛，帶動對土地及活動空間之需求，最後因腹地空間不足或開發上之不協調，而引發港、市在發展上之限制。參考國外的作法，常借助港灣再開發的手段來調整港灣空間，重新再造理想環境。茲對老舊港區需要再開發的動機，概括性歸納成下列四項背景因素：

#### 3-1 港灣設施老化

隨著時空環境的變遷，一個港灣的發展同樣地無法避免循著由發生、成長、圓熟、到衰退的循環軌跡。因此，當港灣設施發展到衰退期時，由於無法提供有效的使用時，即應重整進行再開發，以重獲發展的新契機。

### 3-2 港灣與都市土地利用不相容

舉凡一個老舊港區發展之過程必然與都市發生密切關係，隨著港口的蓬勃發展，都市的活動亦會增大，因而帶動對土地及活動空間之需求，最後因空間不足或開發上的不協調，引發港市發展衝突問題。最明顯的是，受到陳舊老化的港區設施觀瞻、污染物資之裝卸運輸、以及進出港區之交通等影響，將造成港區鄰近的都市環境品質低落。就港區而言，緊鄰市區之作業設施易遭居民抗爭，聯外交通亦因都市土地問題而無法暢通。諸如此類之發展上的問題，必須以港灣再開發之方法來解決。

### 3-3 配合都市發展或更新營造整體環境

著都市的不斷成長而土地資源相對減少，與港口接壤的市區土地，往往是一個高度都市化城市最後開發的處女地，也為都市保留了相當的開發潛力。但在都市發展的過程中，或因都市計畫限制、或因港區封閉而造成土地開發落後，常呈現出一片荒涼的景象。但隨著人口的成長、都市活動不斷的增加，都市發展亦隨之向外擴張，最終必然向都市的邊陲地帶延伸，造成對港邊土地重整再利用。因此在具備視野景觀的港區岸線土地，往往被要求開放配合都市更新，以營造整體優質的都市環境，否則難竟其功。因此，港灣再開發對港邊老舊都市更新扮演著重要的角色。

### 3-4 滿足港都市民親水空間的需求

以一個老舊港區的發展歷程而言，在經濟高度發展的時期，必然以配合國家經濟發展為其主軸，較不重視人民生活「親港」、「親海」的訴求，自然就不會積極為後來保留都市發展所需的自然環境及親水空間。此外，在一個城市高度都市化下，人口將更為集中，在都市土地愈發高昂的情形下，市民休閒遊憩場所即愈顯缺乏，如果能適時提供親水性之海岸空間，正可以補足港都市民休閒遊憩的需求。由於經濟快速發展，人民生活水準提高，對於

海洋性休閒遊憩活動需求殷切，因此，爲了因應市民親水的基本需要，針對老舊港區進行再開發，以型塑出一優質的水岸空間來提供市民使用，已是一個現代化港埠必備的元素。

## 四、國外港灣再開發案例

### 4-1 案例解析

國外港灣再開發成功的案例很多，大多數案例再開發的目標不僅著眼於港灣振興而已，同時亦相當重視周邊舊市區的振興。因此，在港灣再開發引入了不少商業設施、觀光、文化休閒遊憩設施，寄望將整個荒廢的港灣及周邊地區加以活化。茲整理三個案例摘要如下：

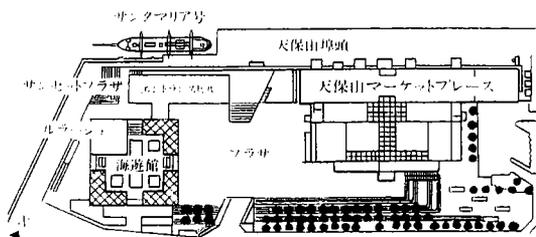
#### 4-1-1 日本大阪港天保山 Harbour village 再開發

天保山 Harbour village 位居大阪港中心，在港埠功能老化後，即根據「港灣再開發 21」計畫進行再開發，除了加強與西日本玄關口『關西機場』間動線的連結，充份結合空港與海港的資源，使商業流、資訊流、物流等更加暢流之外，同時利用老舊港區設置大規模之水族館、國際級休閒購物中心、親水廣場及觀光遊憩碼頭區等，營造出具備觀光、休閒、文化的都市環境，使得天保山成爲一個重要觀光據點，而週邊都市區域亦隨之振興。

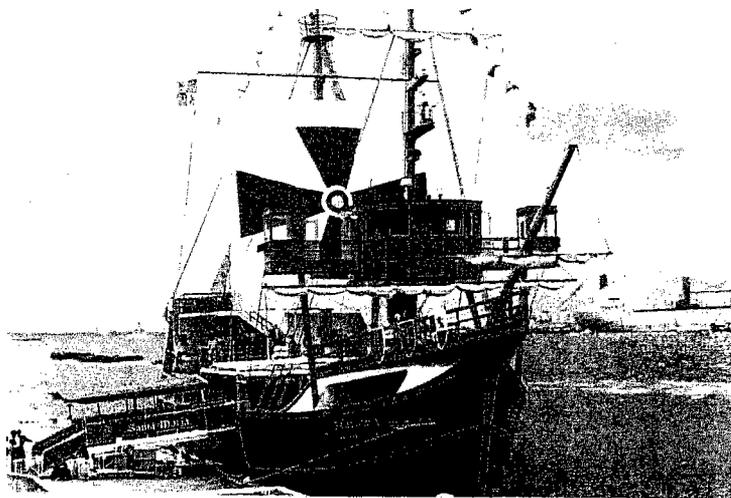
#### 4-1-2 美國巴爾的摩內港再開發

巴爾的摩內港是該港最早發跡的U型港區，1950年代港區充斥著老舊碼頭、倉庫、批發市場、以及鐵路調車場，呈現著破舊、骯髒、交通混亂的現象，許多家庭、工商業和市中心的銷售店，陸續搬出巴爾的摩市到郊外發展。基此，在一些政商界領導人士聯合積極奔走之下，巴爾的摩內港開發計畫終於在1964年開始實施，在公私部門通力合作及妥善的長期規劃之下，從一個被荒廢頹敗的老港區，變成了公園、步道、遊憩碼頭、文化設施、商

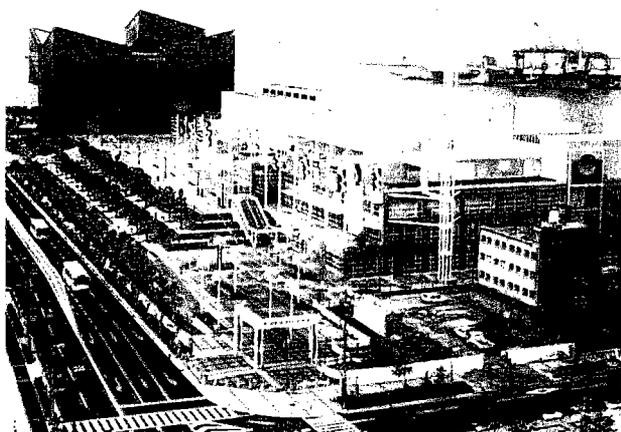
# 案例一：日本大阪港天保山 Harbour Village 再開發



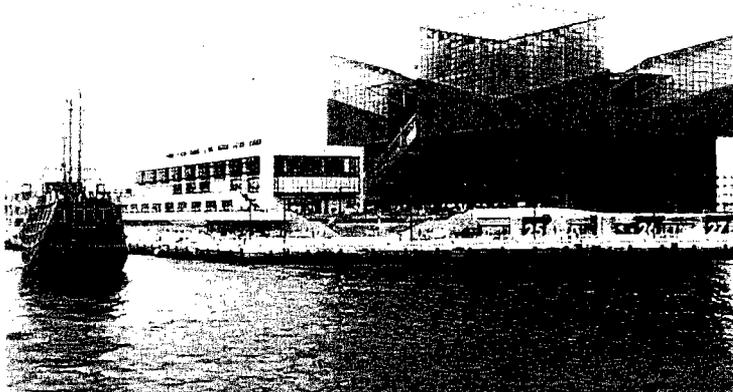
**地區名：**天保山 Harbour Village  
**開發主體：**大阪市，大阪水岸開發(株)  
**開發型式：**再開發  
**開發形態：**文化、教育、商業  
**事業費：**285 億日圓  
**規模：**4 公頃  
**特徵：**依「港灣再開發21」計畫將大阪港天保山老舊倉庫及碼頭區加以再開發。  
**主要設施：**水族館、展示場、餐飲、購物中心、遊覽船、觀光碼頭、親水廣場等



▲ 仿古帆船 Saint Marian 號(遊港)



▲ 水族館及購物中心



▲ 大規模水族館及 Market Place



▲ 臨海的親水空間

## 案例二：美國巴爾的摩內港再開發

地區名：巴爾的摩港

開發主體：查理斯中心／內港管理有限公司

開發型式：再開發

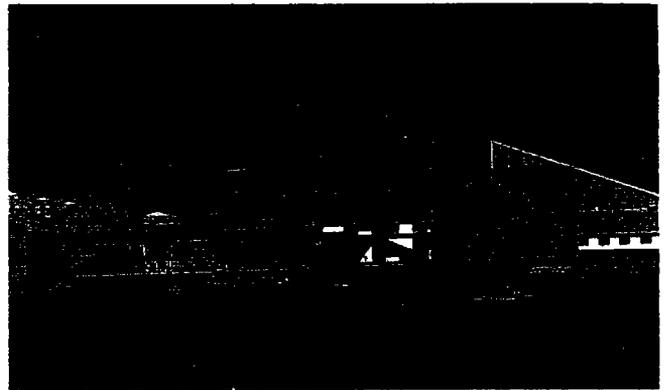
開發形態：文化、休閒、商業

事業費：6億4700萬美元(1967~1984)

規模：38公頃

特徵：利用U型海港沿岸，將荒廢之倉庫區加以更新，引入大型文化休閒設施，創造大規模的公共設施空間，引進商業設施。

主要設施：辦公、旅館、零售、文化休閒設施：水族館、展示船、發電廠(改裝為娛樂中心)、科學中心、市民中心、展演場、博務館、遊艇港等。



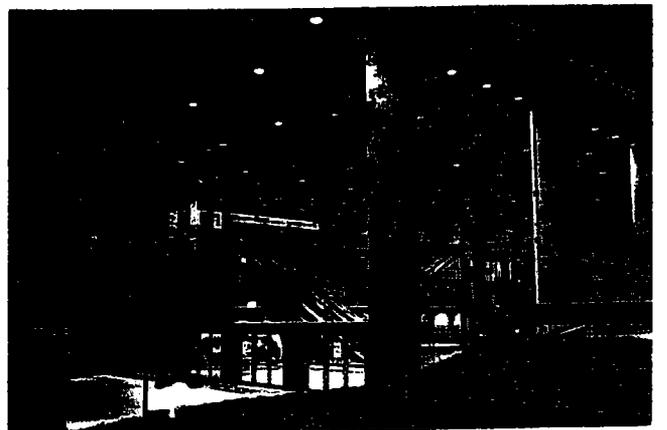
▲ 國家水族館



▲ 古戰艦展示船及內港零售中心



▲ 馬里蘭科學中心夜景



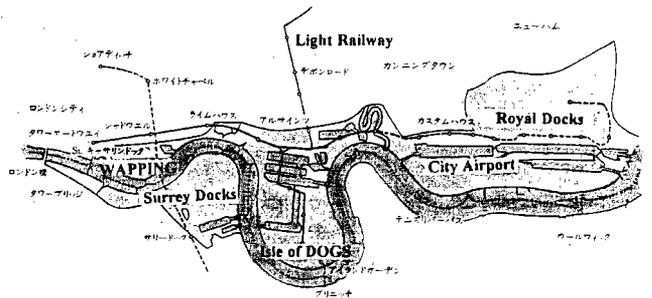
▲ 國際觀光旅館



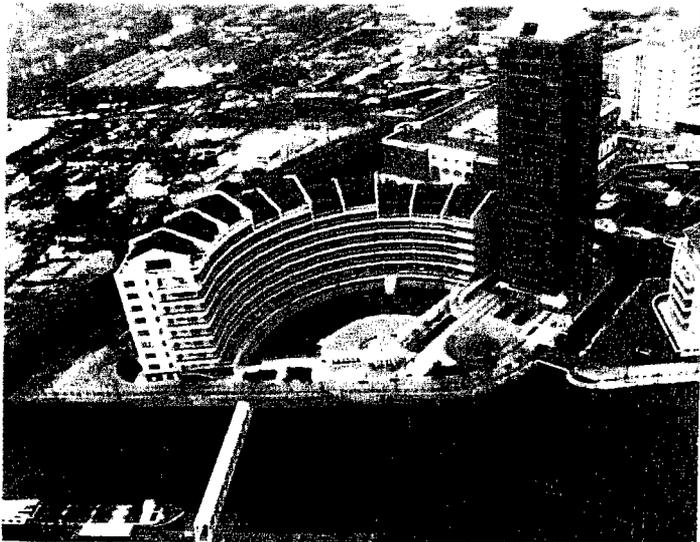
▲ 馬爾的摩內港堤岸鳥瞰

### 案例三：英國倫敦Docklands再開發

**地區名：**倫敦 Docklands  
**開發主體：**倫敦 Docklands 開發公司  
**開發型式：**再開發  
**開發形態：**複合式再開發(都市基盤整備、工業、商業、資訊、通信、住宅、文化休閒、交通)。  
**事業費：**基金5億英鎊、民間50億英鎊。  
**規模：**2,200 公頃  
**特徵：**將老化的港灣設施空間再開發為商業、住宅、工業、文化休閒地區。  
**主要設施：**商務大樓、旅館、住宅、遊艇港、休閒設施、餐廳、展示中心、機場、地鐵、水上新交通系統。



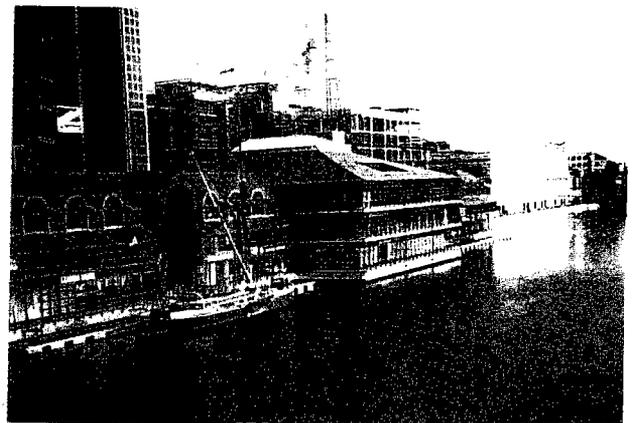
▲ Surrey Docks 全景



▲ Royal Docks 新住宅樓群



▲ Royal Docks 及機場



▲ 老舊倉庫再利用



▲ Wapping 倫敦橋附近再開發



▲ 老舊船渠開發遊艇港

業設施兼具的優質空間。同時由於巴爾的摩內港的再開發計畫，也促使巴爾的摩市舊市區的更新，現在巴爾的摩內港以經成爲美國一處觀光據點，每年爲巴爾的摩市創造不少的觀光收入。

#### 4-1-3 英國倫敦 Docklands 再開發

Docklands 再開發爲一複合式的開發計畫，主要利用泰晤士河(River Times)旁的 Wapping、Surry Docks、Isle of Dogs、及 Royal Docks 等四個廢棄的船渠區進行再開發，引入住宅、辦公、商業、金融、文化休閒、交通等設施。將 Wapping 區內 katharine 船渠四週的倉庫轉換成辦公室、旅館、商業區等，並在岸邊規設一娛樂船碼頭區。Surry Docks 區沿著水岸則發展爲辦公室、商業區及住宅區。Isle of Dogs 發展爲遊艇基地。至於 Royal Docks 則劃分不同使用分區來發展，包括商業中心、停車場、休閒娛樂區、河濱公寓、公園、遊艇港、渡輪碼頭區、機場等。其中遊艇港規模大，附設有海事展覽區、餐廳、旅館、商業、博物館及水面浮動碼頭等設施。

#### 4-2 案例的啟示

從上述三個國外案例中，在港灣再開發之理念上值得吾人效法之處如下：

- (一)活化港灣空間增進土地利用：重新規劃新機能，配置文化休閒及商業活動設施，活化老化設施空間，增進土地的使用效益。
- (二)提昇國際交流機能：臨港交通路網的建設，增加國際貿易交流設施，以增進臨港區域活動的多元化，使得國際間人員、物資、資訊等更加暢流。
- (三)提昇都市商業機能：創造高品質且多樣化之臨港商業空間，激發周邊都市更新，進而帶動地區繁榮。

(四)塑造港埠悠美空間景觀：引入文化休閒設施、及提供優雅閒適的親水空間、建造地標建築、保護自然生態環境，為市民創造悠然生活空間。

(五)運用民間資金：開放民間參與投資經營，引進民間資金、活力、及管理能力。

## 五、高雄港舊港區再開發計畫

### 5-1 舊港區面臨之問題分析

舊港區設施的物理性、功能性日漸老化，加上與人口密度高、商業活動頻繁的市區接壤，衍生了許多問題，茲歸納如下：

#### 5-1-1 舊港區整體土地使用效益低

由於建港歷史悠久，長期逐年之開發結果，舊港區內夾雜著民宅、漁港、修造船廠、辦公廳舍、工業區及不同類別碼頭、倉儲等設施，使得港區顯得老舊零亂，欠缺分區歸類之劃分，形成港區經營管理上之困擾，因此宜就各區位特性及環境，重新定位發展發向及妥善規劃，調整土地使用分區，以創造土地更高的經濟效益。

#### 5-1-2 港、市發展上相互限制

隨著高雄港、市之蓬勃發展，舊港區與市區在空間發展上形成以下之限制：

(一)市區都市發展緊鄰港區，二者之間土地使用混合程度及複雜性提高，在缺乏適當之緩充空間下，因而限制了港市之共榮發展。

(二)市區高昂的地價無法提供市民休閒的公共空間，必須向港區尋求親水休憩空間，進而對港埠營運形成壓力。

(三)緊鄰港區之住宅或商業區，受進出港埠設施觀瞻及周邊交通阻塞等影響，造成環境品質低落。

### 5-1-3 高雄多功能經貿園區對文化休閒功能的要求

目前高雄市政府推動的「高雄多功能經貿園區特定區計畫」對文化休閒商業的機能要求，將促使舊港區必須調整部份碼頭區的機能來配合。

### 5-1-4 欠缺休閒遊憩商業多元化的機能

由於國內經濟快速發展，人民生活水準提高，對於海洋休閒遊憩活動需求殷切，而高雄都會區在高度都市化下，人口更為集中，都市土地愈發高昂，市民休閒遊憩場所愈顯缺乏，尤其是親水性之海岸空間。鑑於高雄港過去發展過於強調專業化之功能，因而造成與都市發展及人民生活日漸遠離。

## 5-2 舊港區再開發方向

舊港區再開發之方向研擬時，應考量舊港區內與市區間之土地使用計畫要相容，以求市港共榮發展；同時對舊港區區內土地使用應朝不同特性發展而有區隔，但整體機能之規劃上應力求互補。茲就各港區開發之環境條件及開發方向概要如下：

### 5-2-1 蓬萊、鹽埕港區

#### (一)區位條件

緊鄰鹽埕、哈馬興舊市街及西子灣、壽山、愛河風景遊憩據點，兼具水岸、陸域觀光資源；擁有寬闊之帶狀水岸空間，視野極佳；屬於「多功能經貿園區」之特定文化休閒區範圍。

#### (二)土地條件

大部份屬於港務局管理之省有地，區內港埠設施及軍營區遷移後，

約可騰空大片土地(約 39 公頃)供再開發利用。

### (三)交通運輸條件

未來都會區快速道路及捷運系統橋線經過附近，將有助於本區對外交通聯繫。

### (四)開發方向

- (1)結合愛河及萬壽山遊憩資源，形成完整而便捷之遊憩系統。
- (2)延續愛河堤岸公園，開闢海濱步道系統及帶狀公園，擴展市民親水空間。
- (3)發展文化休閒遊憩設施，提升為功能完整、多樣化之都市休閒系統。
- (4)開發觀光船遊憩活動，結合岸上購物休閒娛樂設施，創造商機來吸引民間參予投資經營。
- (5)配合港都商業相關活動，提供高層級之觀光旅館、貿易展示、會議中心等場所。

## 5-2-2 苓雅港區

### (一)區位條件

緊鄰苓雅新興之商圈，為典型的都市商業區，新興之大樓多集中在新光路、三多路一帶。將來隨著後線中油儲區之遷移，大片土地轉型再開發後，將帶動鄰近地區更為繁榮；擁有面向港池之帶狀水岸空間，視野極佳；屬於「多功能經貿園區」之特定文化休閒區範圍。

### (二)土地條件

大部份屬於港務局管理之省有地，區內港區內之軍營區、及港埠設施遷移後，約可騰空大片土地(約 16 公頃)可供開發利用。

### (三)交通運輸條件

未來都會區快速道路、捷運棕線完成後，將有助於本區對外交通聯繫。

### (四)開發方向

- (1)規劃海濱公園及步道系統，擴展市民親水性之空間。
- (2)發展現代化客運碼頭及旅客服務中心，促進國際交流及提昇高雄港國際形象。
- (3)延續新光路、三多路商圈發展，引入休閒商業活動，吸引民間參予投資經營。

## 5-2-3 第四船渠東側岸線

### (一)區位條件

第四船渠東側之工業區用地，土地使用效率低，現已劃為多功能經貿園區之「特倉」用地，未來可望朝倉儲轉運區開發。

### (二)土地使用條件

除#22、#25 等二座碼頭外，港區土地僅止於水岸線，並無可利用之土地。

### (三)交通運輸條件

未來都會區快速道路沿著成功路鋪設，並設有多處上下匝道，將有助於本區對外交通聯繫。

### (四)開發方向

- (1)在操航作業許可下，增建多功能碼頭，以補充舊港區轉型親水遊憩商業區所損失之運能。

(2)配合相鄰「特倉」用地之機能，提供便捷之碼頭設施。

(3)檢討第四船渠底部之水域及碼頭配置，以增加船渠底部空間運用之效益。

#### 5-2-4 旗津台機船舶廠區

##### (一)區位條件

位於高雄市邊陲地帶，都市發展受限，但因面臨第一港口，俱備攬景之優勢條件。附近又有旗后山燈塔、炮台古蹟及旗津海岸公園等觀光遊憩資源，具有開發親水遊憩之區為條件。

##### (二)土地使用條件

(1)鄰近區域之民宅、修造船廠接壤雜陳，對土地使用之規劃發展形成障礙。

(2)本區腹地狹小，在靠近曳船道及金泰興造船廠之港區內有不少私有地。

##### (三)交通運輸條件

可利用渡輪站及過港隧道對外聯繫。

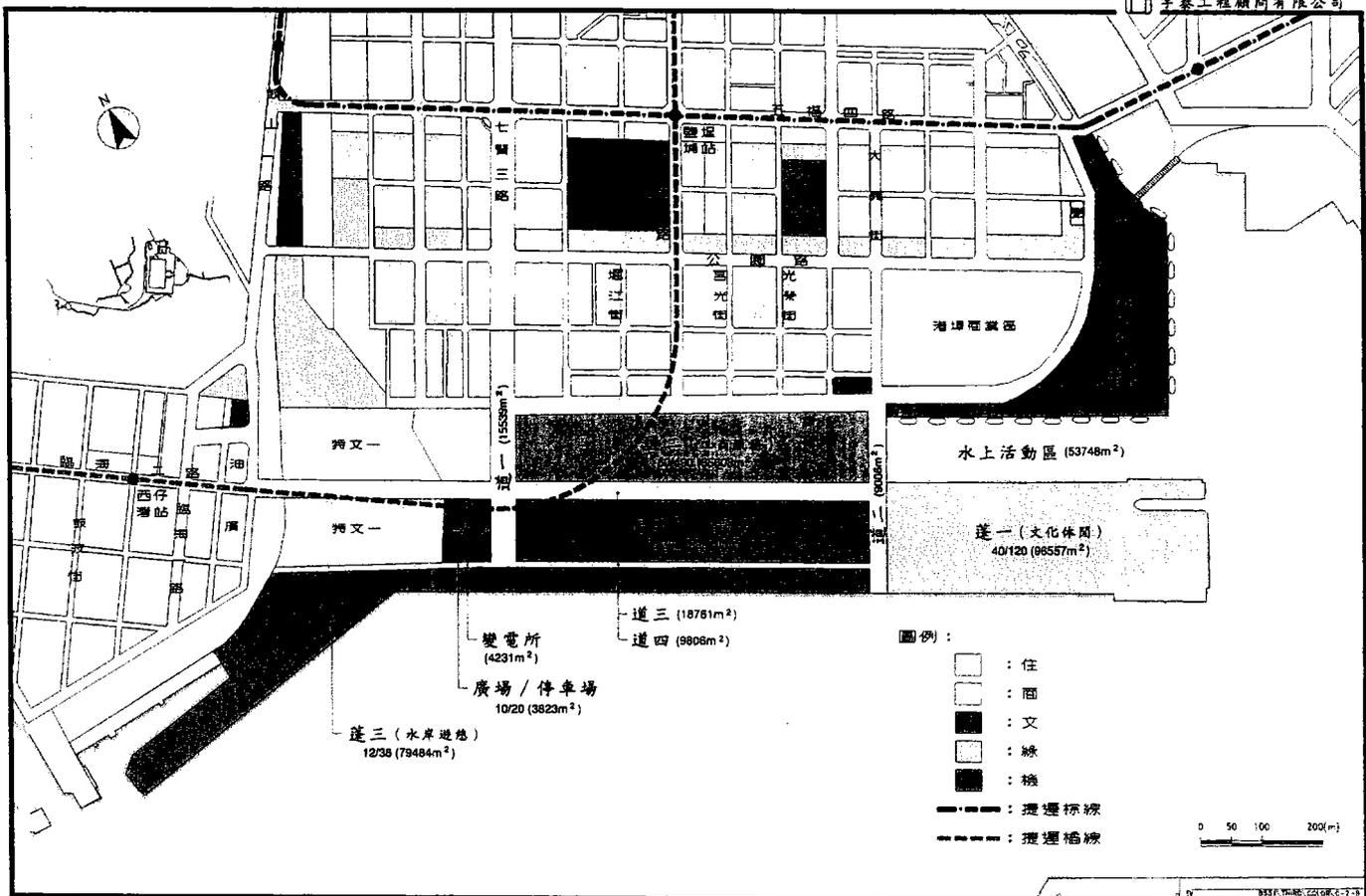
##### (四)開發方向

配合旗后山附近遊憩資源，鼓勵民間參予投資並朝休閒遊憩功能，重新進行整體開發。

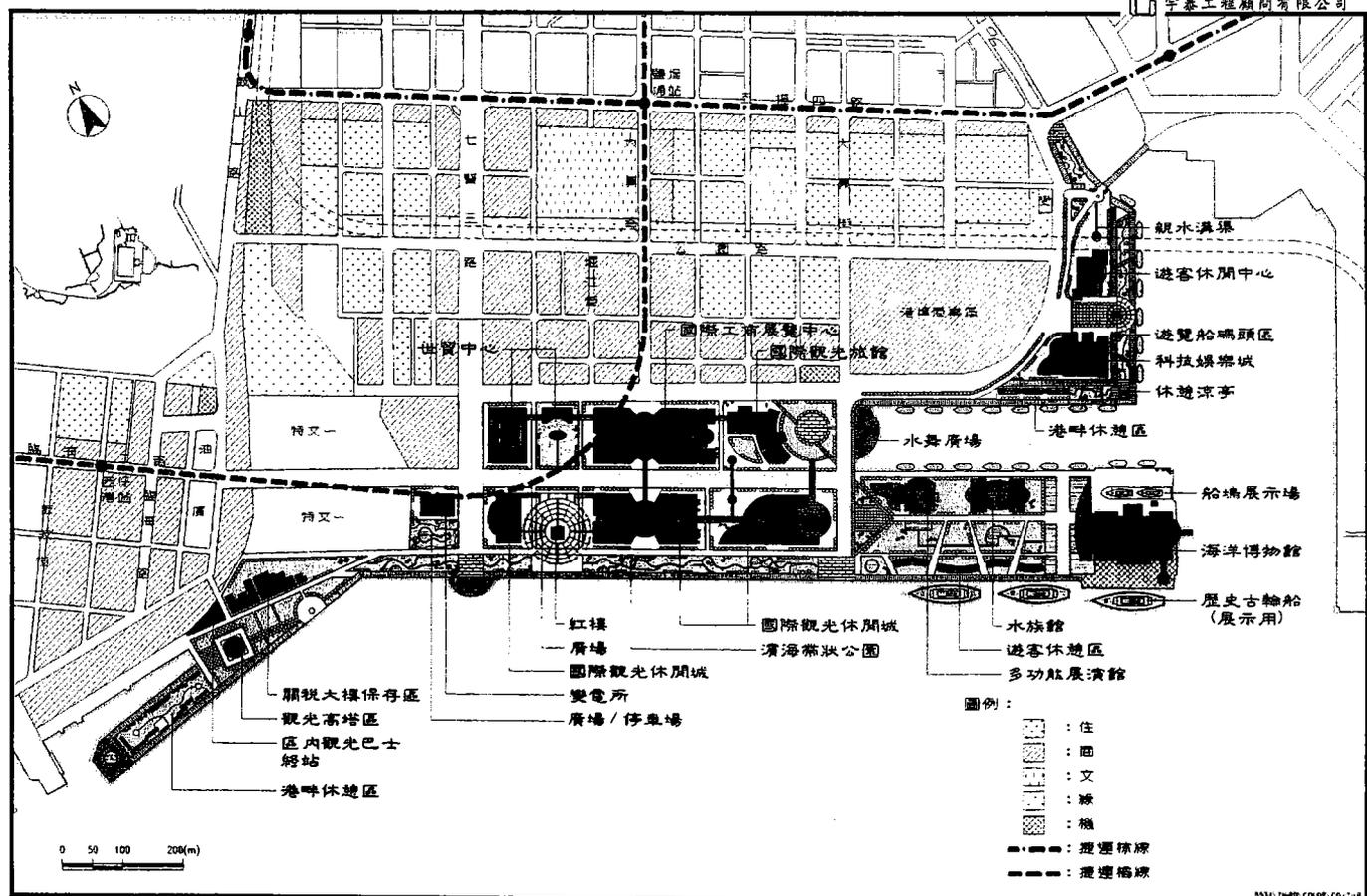
#### 5-3 舊港區再開發之規劃概要

##### 5-3-1 蓬萊、鹽埕港區(如圖一、圖二)

(一)鹽一區：為促進與西鄰之台糖港埠商業區共榮發展，擬藉由臨港親水之優勢，以發展「休閒娛樂及觀光遊憩」活動為主題，開放觀光



圖一 蓬萊、鹽埕港區再開發－土地使用分區



圖二 蓬萊、鹽埕港區再開發－平面配置

遊憩碼頭結合大型科技娛樂等具特色之遊樂設施，藉以帶動遊憩風潮。

- (二)鹽二區：為配合港都商業相關活動，以「工商服務」為主題，為與第三船渠之水上活動聯結，展現親水空間之魅力，在面臨第三船渠之大智街與大義街間規設一處親水廣場，廣場後規劃一處國際觀光旅館，以廣場、步道等與水域連結。其西側規設國際工商展覽中心及世貿中心，提供大型展覽會場及提供便捷的國際商務環境，並利用捷運系統來疏散遊客交通。
- (三)蓬一區：三面臨水，呈一『半島型』地形，擬開發「海洋主題園」，提供文化休閒活動。岸上規設海洋博物館、水族館、展演館等文化設施，並保留船塢規設為修船展示區，兼具教育及休閒功能。在西臨第三船渠之岸線規劃為觀光遊憩碼頭，臨主航道之岸線則規劃輪船展示碼頭，後線並規劃遊客服務區提供遊客休憩、觀覽之空間。
- (四)蓬二區：為提供觀光、休閒、商業等綜合機能，擬發展為「國際觀光休閒城」，除保留紅樓歷史建築及四周廣場空間外，本區擬規設數棟國際城市主題館，提供歷史文化、特產商場、藝術展演、特色餐廳等所需空間，以達到觀光、教育、娛樂、休閒、商業、國際化等多功能之目標。
- (五)蓬三區：為一狹長之帶狀岸線，擁有極佳的視野空間，擬以發展「水岸休憩」為主題。區內之高雄關稅大樓為歷史建築，擬將關稅大樓及相鄰建築劃為保留區。並在新濱營區前規劃具地標性之觀光高塔及廣場，高塔內並提供瞭望、餐飲、販售、休憩等機能。其餘空間則規劃公園、散步道及休憩區。

#### 5-3-2 苓雅商港區(如圖三、圖四)

- (一)苓一區：位在新光路景觀大道路底，而且兼具臨水空間，視野佳，



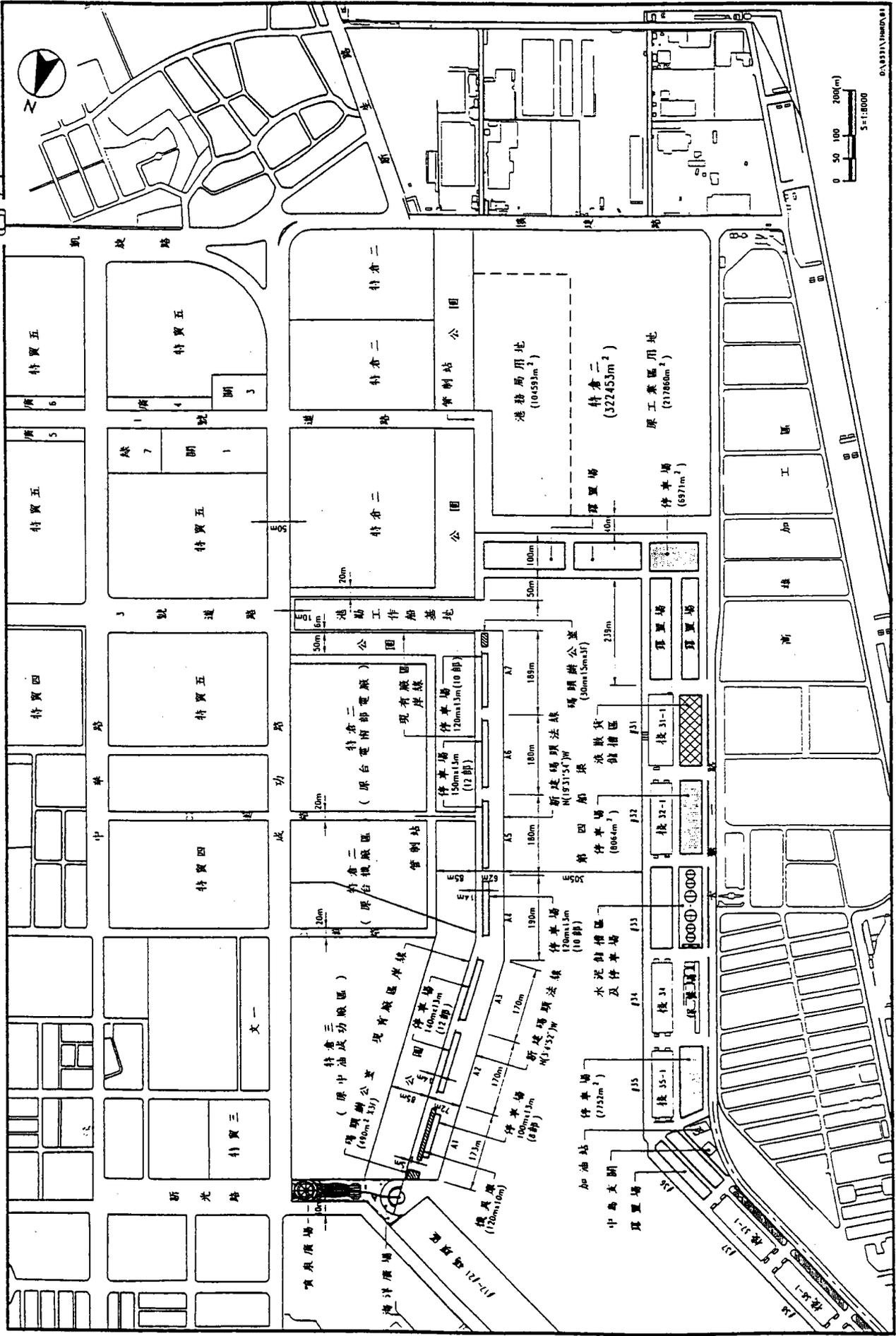
擬延續新光路、三多路間帶狀商業區，在本區規劃一處地標意象之高層級「觀光旅館」。

- (二) 苓二區：隔海邊路與港務大樓預定地相鄰，為凸顯高雄港中樞意象的港務大樓，苓二區規劃為「港景公園」，提供一個完整而寬廣的開放空間，港務大樓直接面向港內，不但坐擁前方的公園綠地，更可環顧整個港區水域，指揮樞紐的角色不言而喻。
- (三) 苓三區：以「旅運服務」機能為主，橫跨兩個開發期程，近程階段先開發基地東側(即#18 碼頭區)規模較小之旅運副樓，待中程開發期程開始，水泥槽搬遷之後，在#16、#17 碼頭區再闢一造形特色之旅運正樓。旅運大樓將來朝兼具旅客服務、港標、展示、觀光、商業等多種機能之綜合性功能來發展。
- (四) 苓四區：腹地狹長之水岸，寬度僅約六十餘公尺，在區位及地形特色的考量下，劃設為低密度開發區，並定位為地域性、本土性、藝術性之「文藝休閒街」，在建築規劃設計上採低矮樓層錯落，在平面配置上則採曲徑通幽、前後交錯的空間趣味，分別劃設跳蚤古董街、手工藝村、藝術品市集等，由一逛遊步道穿梭貫串其間，沿途並規劃數個各具特色的小型廣場與綠地，使本區自成天地，而有別於一般的都市空間。
- (五) 苓五區：愛河在建國橋以下仍屬感潮河段，淡水及海水交融，孕育豐富之生態環境，而本區位在愛河口，擬規劃為「生態公園」，作為生態教育及休閒並具之空間。在不影響愛河行水區之下，將登1、登2碼頭(水深-3~-5公尺)前拋放石塊形成斜坡拋石堤岸，以利於海洋生態棲息，並兼具堤岸之親水性及柔和性。

### 5-3-3 第四船渠底部及東側岸線(如圖五)

#### (一) 第四船渠東側岸線規劃

- (1) 自現岸線向第四船渠水域內增建七座碼頭，其中靠近中油成功區



圖五 第四船渠東側岸線及底部再開發一平面配置

之三座碼頭後線寬 72 公尺，台機、南部電廠旁之四座碼頭後線寬 62 公尺。碼頭設計水深 EL.-10.5 公尺。

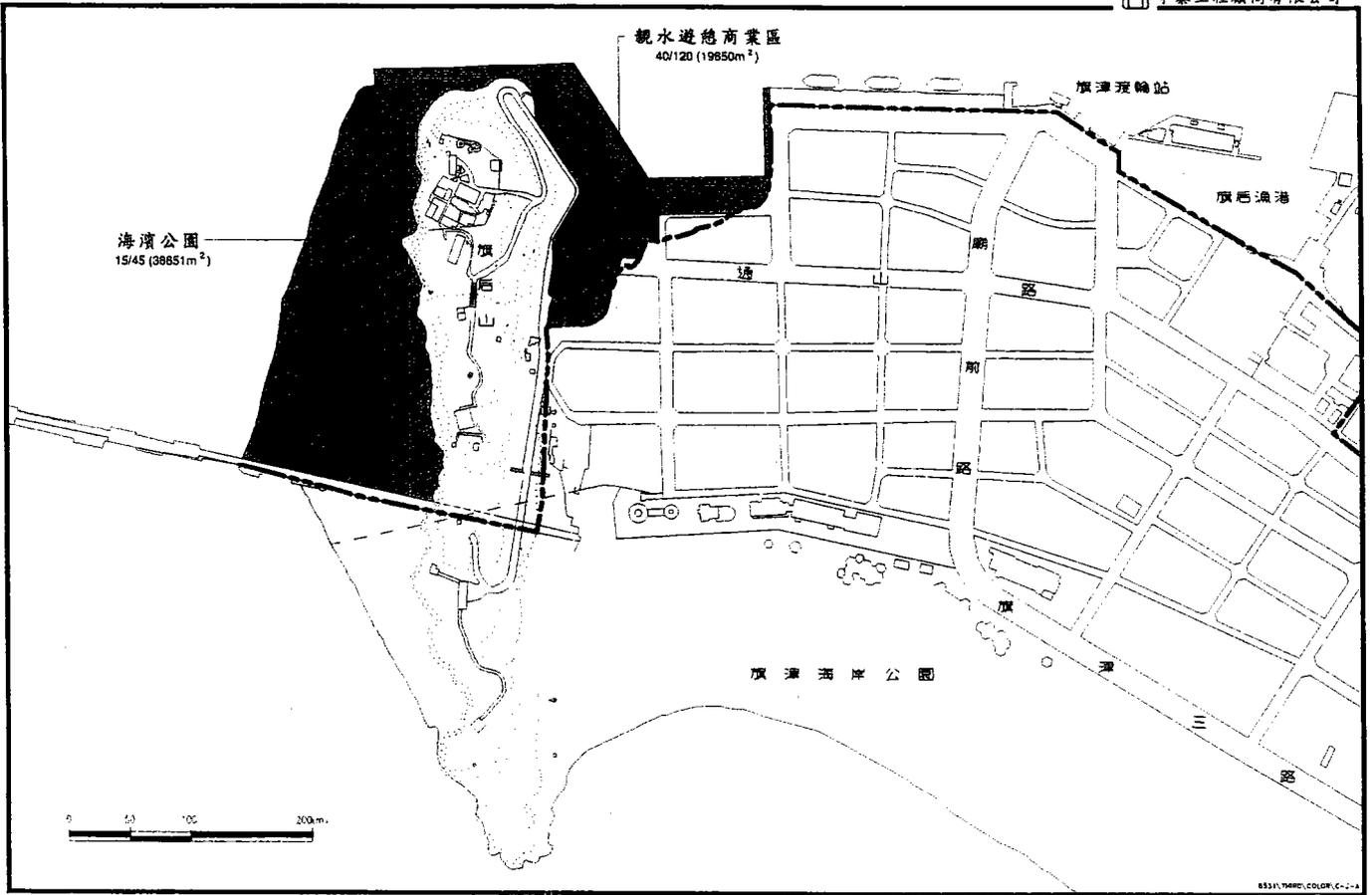
- (2)在碼頭區緊鄰廠區一側，規設一寬 14 公尺之港區集運道路，以供車輛進入港區後藉由此集運道路分散至各碼頭。
- (3)聯外之交通擬利用「多功能經貿園區」內之 C2 道路(路寬 20 公尺)聯接成功路。

#### (二)第四船渠底部規劃

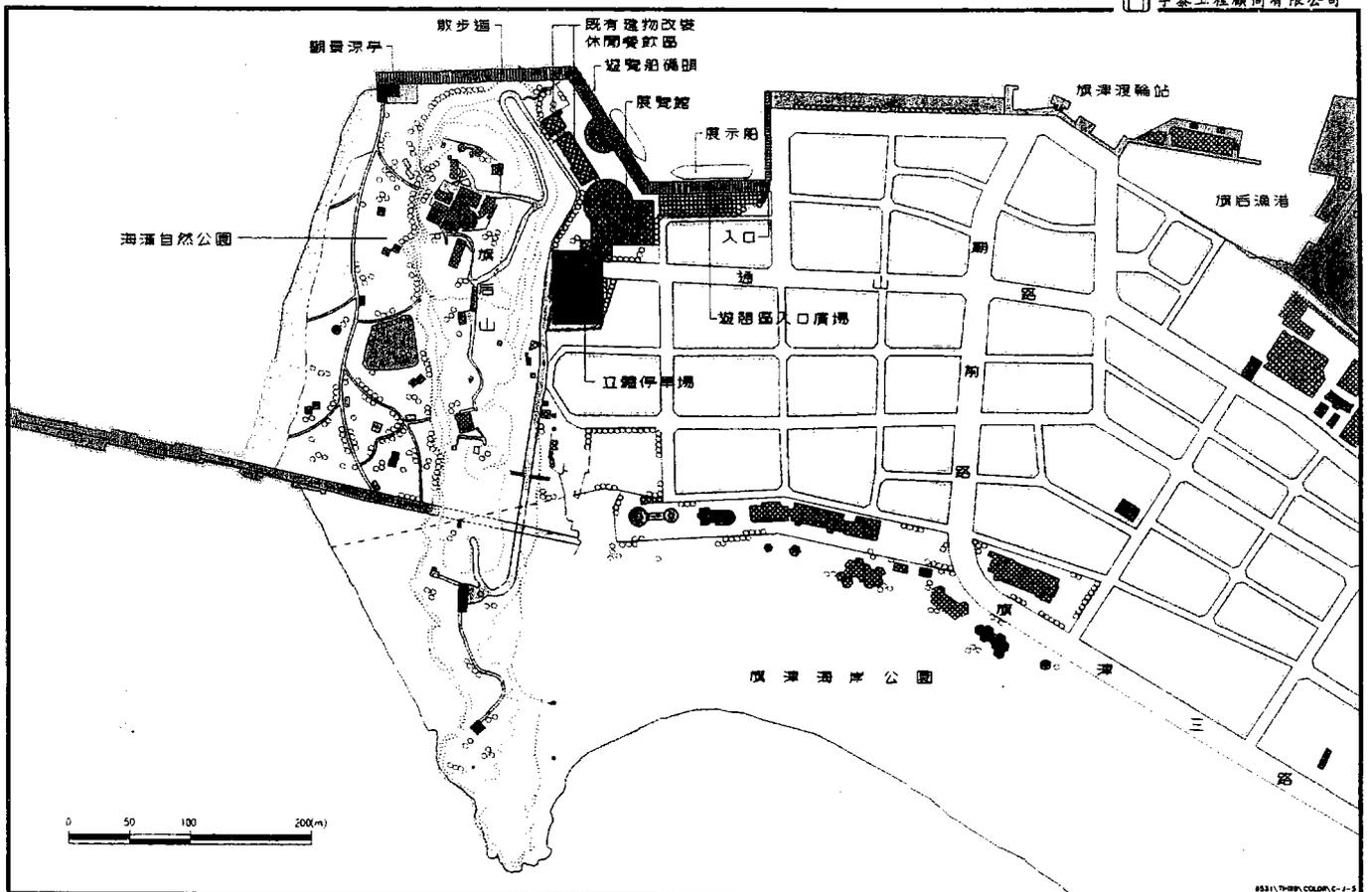
- (1)自第五船渠轉角處起 44 公尺，至第四船渠底止之間約 11.1 公頃水域予以回填，以利與相鄰之倉儲轉運專區整合開發。
- (2)為增加船渠底部操航之便利性及安全性，將#30 碼頭後線部份陸域約 2.35 公頃之土地挖除，並改建三座雜貨碼頭。
- (3)改建後三座碼頭原則上仍按現行道路系統經大華一路、擴建路聯外。將來可視與相鄰倉儲轉運專區整合情形，考量取得新聯外之路權，作為本區及中島商港區之交通另闢一聯外通道。

#### 5-3-4 台機船舶廠區規劃(如圖六、圖七)

- (一)台機船舶廠區具有賞覽港景之優勢地理位置，且緊鄰旗后山及旗津海岸公園，擬將其轉型為親水遊憩商業區，結合附近之地形景觀、古蹟、覽景、海灘戲水等遊憩資源，再開發為一新的觀光遊憩據點。
- (二)徵收台機船舶廠區及相鄰之金泰興造船廠內之私有地(港區內)，利用修造船廠的遺跡，規劃船舶展覽館及相關之休閒商業，提供市民文化休閒活動。
- (三)旗后山與港口間之灘岸規劃為海濱自然公園，減少人工開發至最小程度，保留原生植栽，並凸顯旗后山岩壁壯麗粗獷之美。



圖六 旗津台機船舶廠區再開發－土地使用分區



圖七 旗津台機船舶廠區再開發－平面配置

#### 5-4 再開發效益評估

- (一)促進港埠用地有效運用：利用老化設施及閒置之空間轉型再開發，發揮港灣寶貴資源之效益。
- (二)增加文化設施：規劃海洋博物館、水族館、展演館等設施，提昇市民生活品質。
- (三)增加水岸遊憩空間：佈設廣場、公園、親水性步道、休閒設施，塑造美麗水岸，提供市民最佳休生閒環境。
- (四)促進國際化：設立旅運大樓、集結國際郵輪，促進高雄市國際化。
- (五)增加觀光旅遊：增加海上遊覽船、客運碼頭及觀光旅館，結合鄰近遊憩資源，活絡高雄觀光旅遊產業。
- (六)增加物流機能：第四船渠岸線及底部再開發，與相鄰之經貿園區特定倉儲專用區結合，提供物流所需之港埠設施。
- (七)促進舊市區之振興：相鄰都市土地大幅增值，帶動地方繁榮，促進舊市區更新。

### 陸、結 語

國外老舊港區再開發之成功之案例不少，將原本頹敗老化的港灣空間，經轉型再開發使用後，創造出更燦爛的第二春；反觀台灣地區，長期港埠發展偏重經濟及運輸的機能，並無融合物流、產業、都市、生活並存的多元化發展政策。而影響港埠發展的基本大法「商港法」更限制了非商港設施在港區內開發，加上港務局在營運績效的壓力與固守舊觀念之下，台灣地區實在很難有仿如國外再開發的案例。

高雄港率先推動「舊港區再開發計畫」，是符合新時代潮流的作法，不但可使老化的港埠設施得以活化，更可帶動地區繁榮；文化設施及水岸遊

憩空間的增加，提昇了市民生活品質；水岸的綠美化及多樣化的設施，豐富了高雄觀光資源；現代化的旅運大樓及客運碼頭，促進了港都國際交流；整體而言，舊港區再開發產生的效益是可以預期的。

爲了迎向二十一世紀新時代的來臨，多元化的機能空間已是國際港埠不可或缺的必備條件，而利用港灣再開發正可以來達成港埠多元化的目標。爲了加速台灣港埠成爲一個國際交流的重要據點，推動老舊港區再開發已是刻不容緩的事。

# 港灣地層下陷

賴聖耀\*

## 一、前言

近年來由於地下水大量之開發引致之地層下陷問題，在台灣各地區已是一種普遍現象。而在沿海地區，亦由於養殖業大量開發抽取超額之地下水，導致愈演愈烈之地層下陷，其中以屏東地區累積最大下陷量3.00公尺為最嚴重，雲林、嘉義地區累積最大下陷量約1.5~2.0公尺次之，而彰化濱海地區亦有1.2公尺之下陷量，整個西南沿海地區幾乎均有地層下陷現象，如圖1-1所示。

由於超抽地下水易造成區域性之地下水位下降，西南沿海之台中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港灣地區，其地下水位大多已降到海平面以下，有引發海水入侵之疑，若水位繼續下降，恐會導致地層下陷；因此為維護港區工程及各樣設施之安全，針對各港區地下水位變化與地層下陷長期性之監測研究，極為重要。

國內至目前為止，對於各港區之地層下陷，地下水位變化等地下水文之觀測資料相當缺乏，本研究對目前可能沉陷較嚴重之布袋港、安平港、大鵬灣，選擇適當地點，以無線電波感應式層別沉陷儀進行港區地層分層沉陷之長期監測，並埋設水壓計，水位觀測井，以瞭解地下水位及水壓變化對港區地層下陷之影響，其目的不但可成為維護港區現有工程及各樣設施安全監測之一環，並可做為港區碼頭、堤防等擴建工程規劃設計之參考。

---

\* 港灣技術研究所副研究員

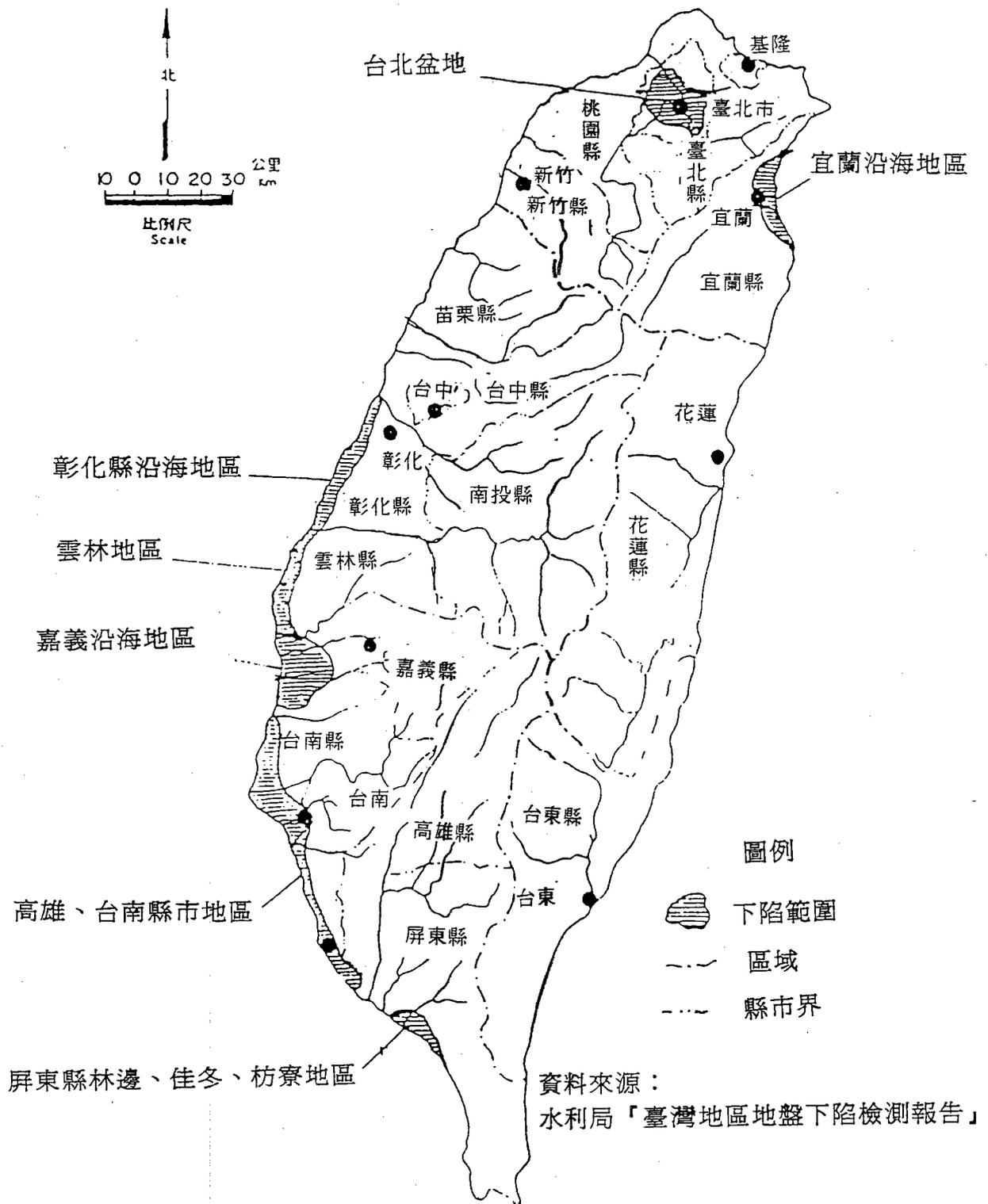


圖 1-1 臺灣地區地層下陷位置圖

## 二、港灣地質及沉陷概況分析

### 2-1 布袋港地質及沉陷概況

布袋港位於本省西南部嘉義縣境內，布袋鎮以西濱海地區，面臨台灣海峽，北及西北側海域有統仙洲、箔子寮汕及外傘頂洲所構成之峽長沙洲，形成天然屏障，在兩沙洲軸線以東之內灘地，除環繞周邊之潮溝兩側低窪地被用於牡蠣養殖外，中央部較高灘地已開發完成海埔新生地約126公頃。

本區海岸線向陸地凹入形成灣澳灘地，由於海岸分別有北港溪、朴子溪、八掌溪及急水溪等四溪在附近海入海裡以及外傘頂洲所帶下之沙量，將會間接對布袋港海岸地形發生影響。

布袋港開發計劃包括南北向之海堤、防波堤及散貨、雜貨、客貨、砂石貨等各項用途碼頭20席外，尚有新生地、防風林、堆貨場等港埠設施。而整個區域地層屬海岸沖積土層，根據本所搜集布袋港10餘孔海上鑽探資料顯示，在深度-30公尺範圍內，綜合其剖面土層(如圖2-1)簡述如下：

- 1.EL.0M ~ EL.-6M：土層分佈以沉泥質細砂(SM)為主，標準貫入試驗N值為6~14間之疏鬆土層，而深度-0.6M~-3M之間偶夾有N值為2-9之軟弱沉泥層(ML)，以內港之第一期海埔新生地較明顯。
- 2.EL.-6M ~ EL.-27M：為一層10~20米厚軟弱至堅硬之粘土質沉泥層(ML)，N值約在4~20之間，但於-13.0M~-21.0M處有一層約3~5米厚之中等緊密沉泥質細砂(SM)，N值在10~30之間，分佈以南海堤較厚並逐漸向外海之航道口尖滅消失。
- 3.EL.-27.0M ~ EL.-30.0M：由地層柱狀圖得知深度-27.0M至-30.0M處為中等緊密到緊密之沉泥質細砂(SM)土層，N值約在20~35間，土層大致分佈在南海堤及外海處。

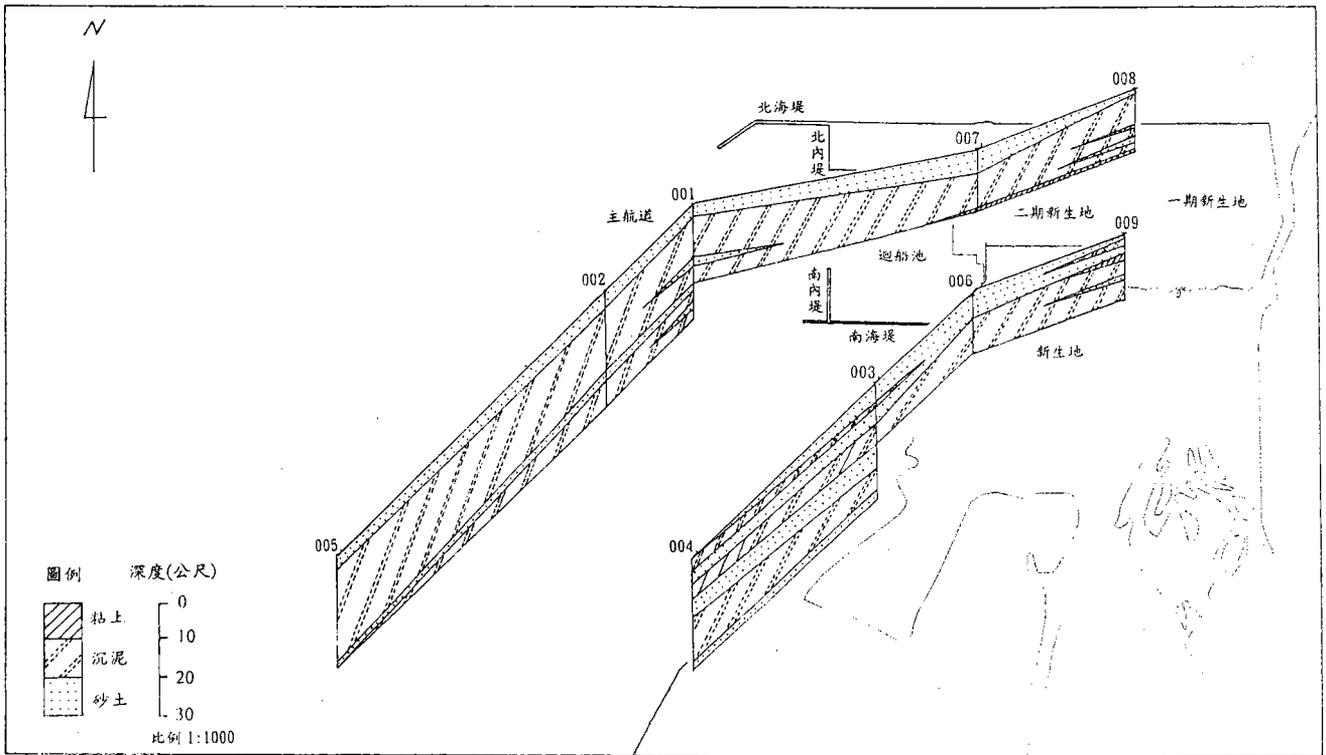


圖2-1 布袋港區之地層柵狀圖

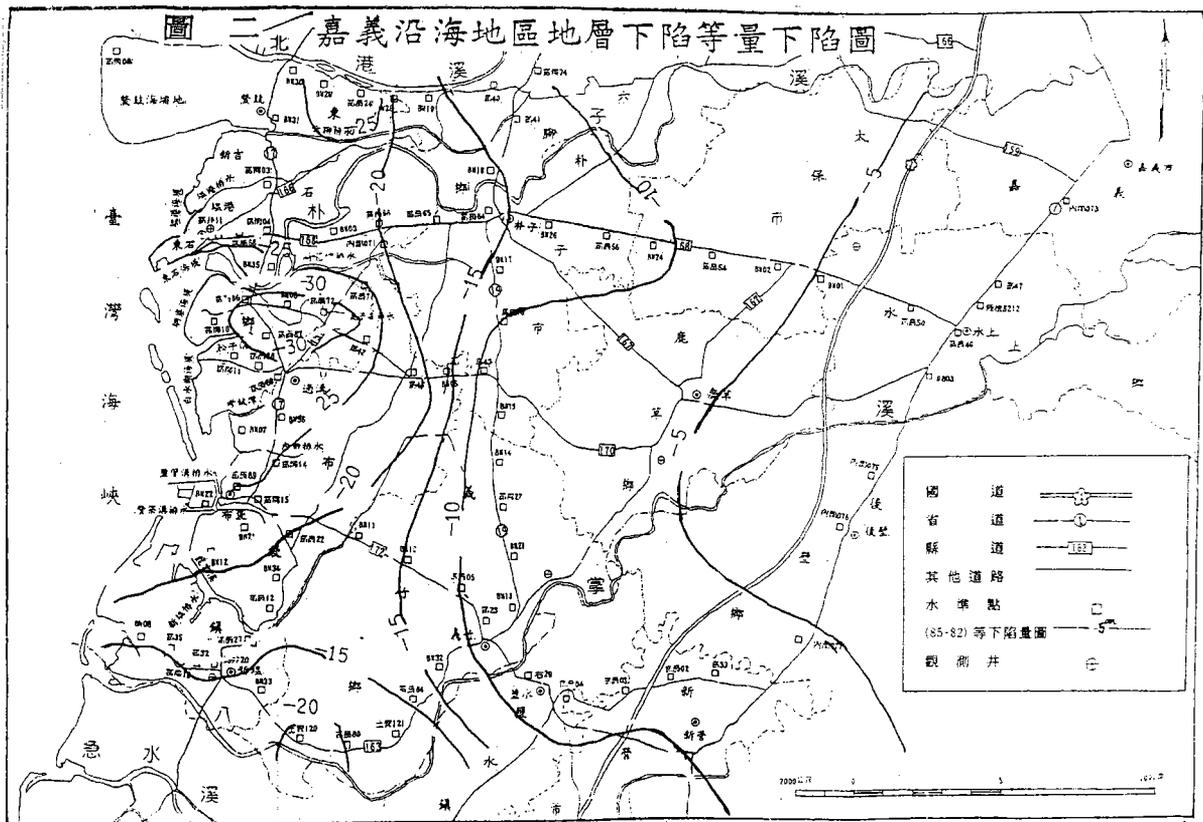


圖2-2 布袋港附近地區之地層下陷圖

根據省水利處於嘉義沿海地區地盤下陷水準檢測報告(如附圖2-2)，自民國77年至83年布袋地區總下陷量約45~70公分，平均每年沉陷量約在7~10公分，而最近三年83~85年之累計下陷量約25公分，其中最嚴重地區為東石鄉，平均每年沉陷約10公分。

## 2-2 安平港地質及沉陷概況

安平港位於台南市西側近鹽水溪出海口南側，此區域屬海岸沖積平原，尚為幼年期，故瀕海地區尚為卑濕之沼澤地，海岸遠而淺，沿海砂洲甚為發達，平原面除有少數新成河與延長河切割成漸淺河溝外，地面尚稱完整，地勢平坦且低窪，地形高度均不超過5公尺屬於相當平坦地區，安平港北側約10公里處為曾文溪之出海口，曾文溪挾帶之沉積物間接影響安平港附近海岸地形。

安平港地區為全新世沉積區，主要以砂嘴與濱海沉積，新瀉湖沉積為主，鄰近周圍尚有台南層，瀉湖及沼澤沉積、三角洲沉積等。

曾文溪挾帶沉積物，部份沿著安平港附近沿岸形成砂嘴與濱海沉砂洲。而鹽水溪則挾帶較細粒沉泥質土壤堆積於砂洲東側較低窪瀉形成了新瀉湖沉積。

規劃之安平港除了主航道之南、北、內、外防波堤外，尚有客貨、散雜貨、水泥及化學品等31席各類用途碼頭，其中#1~#4為散雜貨及客貨碼頭，#5A~#7皆是散雜貨碼頭，#8~#14為環保中心、貨櫃及散雜貨碼頭，#15~#20為水泥專用碼頭，#21~#31大都是散雜貨碼頭，僅#21、#22是化學品及油類使用碼頭。

地質大部分屬於漁塭區之地層，表層含有貝殼之細砂或鬆軟之砂質壤土，下層為泥質壤土之沖積層，砂礫則來自曾文溪、鹿耳門溪、鹽水溪及二仁溪。而根據已搜集105孔之鑽探資料，綜合各區剖面土層(如圖2-3)安平

港在深度-50 公尺範圍內，土層自上而下概述如下：

1. EL.0M~EL.-15M：土層分佈以灰色沉泥質細砂(SM)為主，海床面以下 2~4 米為軟弱之沉泥層(ML)，深度-5M 及-10M 間偶夾有 N 值為 2~10 之軟弱沉泥或黏土薄層。
2. EL.-15M~EL.-20M：具有一層平均為 2~3 米厚之灰色黏土(CL)或沉泥層(ML)，N 值在 6~30 間，屬中等堅實至極堅實稠度土層，其中以外防波堤土層較軟弱。
3. EL.-20M~EL.-35M：大致以緊密之沉泥質砂(SM)居多，但於-28M~-33M 間有一層厚約 2~5 米之沉泥質細砂夾黏土或沉泥層，N 值為 22~60 間之極堅實至堅硬土壤。
4. EL.-35M~EL.-50M：大部分為灰色沉泥質砂土層，但於-45~-50M 間為一層厚約 2~8 米之灰色沉泥質粘土夾細砂土層，N 值約在 22~45 間，此土層分佈以航道之內防波堤較厚。

根據水利處之台南地區地盤下陷檢測報告，台南地區有三個沉陷區，分別為北門海埔地、七股海埔地及台南市之安平區，本研究地點安平港位於安平區內。根據水準測量結果顯示，民國 76 年至 84 年間，安平區之最大沉陷量為 11 公分，安平區沉陷等值線圖，如圖 2-4。

### 三、港灣地區地層下陷行為

港灣地區地層下陷之原因，非常複雜，如大地應力作用所引致地殼之升降，地震作用引致港灣地區沖積砂土層與海埔新生地發生液化而產生嚴重之下陷，防波堤為港灣之重要構造物，大都由大型沉箱連接而成，有極大的荷重，亦會產生嚴重之下陷；另港灣碼頭設施大都由抽砂填土而成，大規模之填土易造成區域性之不均勻沉陷，及港灣附近地區超抽地下水易造成區域性之

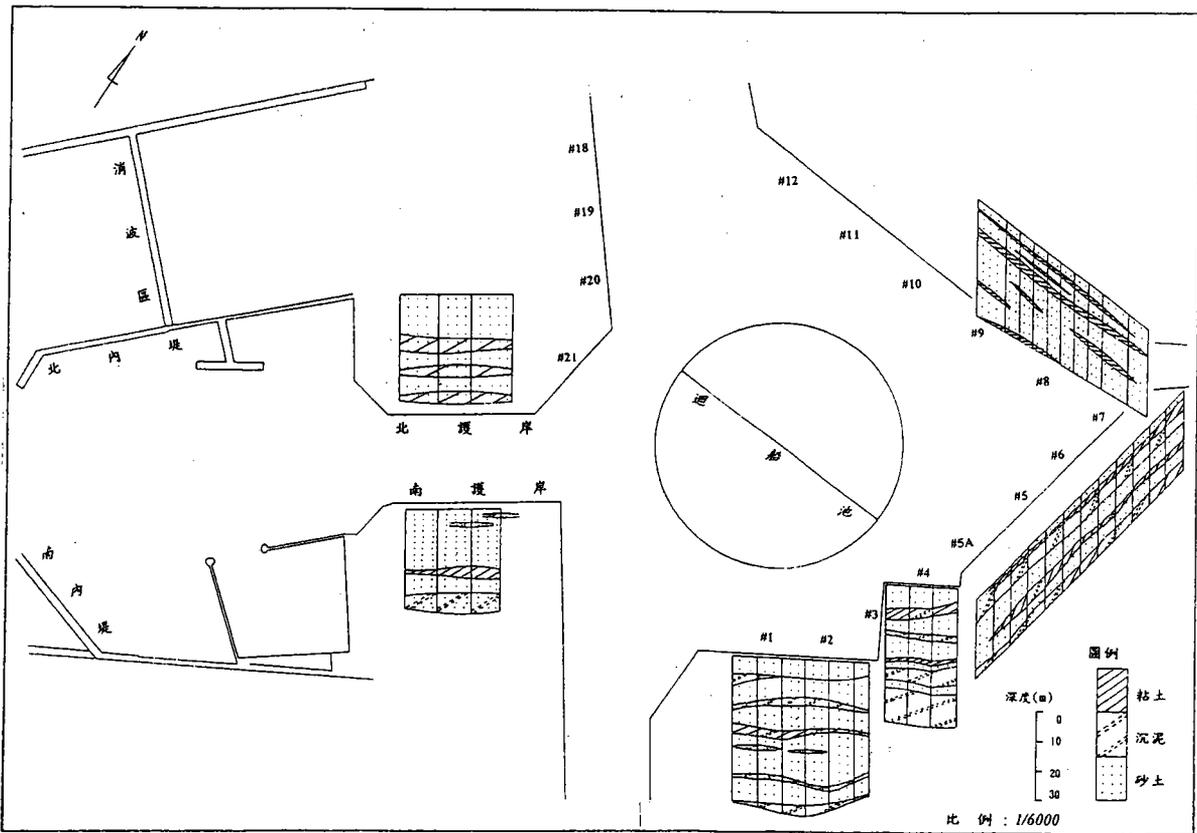


圖2-3 安平港區之地層柵狀圖

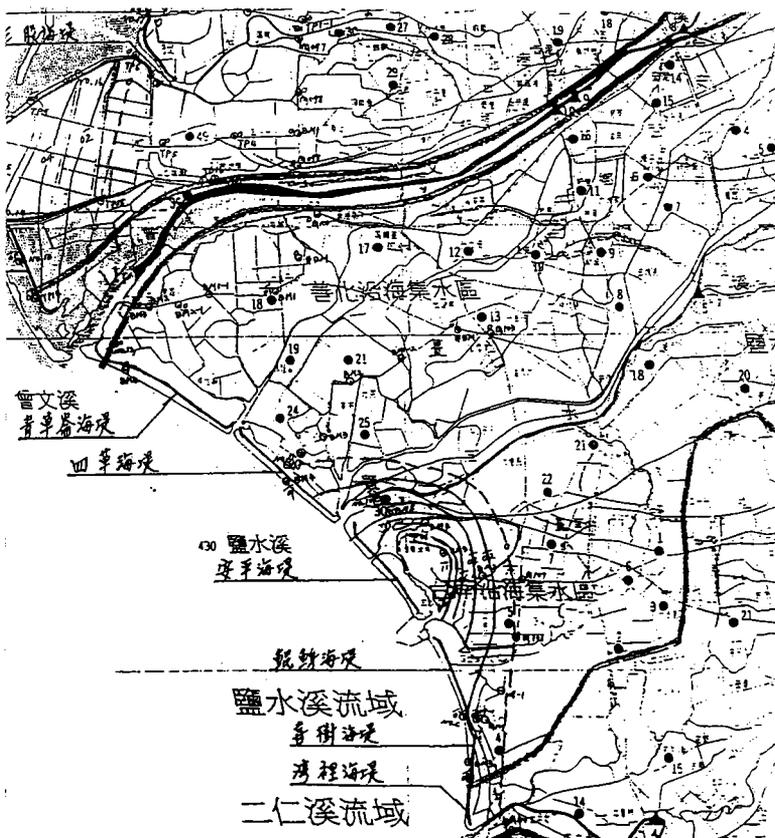


圖2-4 安平港附近地區之地層下陷圖

地下水位下降，導致港區地層下陷等，依據世界各地研究觀察結果，大部分之地層下陷，皆因過量開發地下水資源而產生，台灣西南海岸港灣地區之地層下陷亦然。

一般而言，無論是港灣構造物荷重或超抽地下水造成之地層下陷，大都因土層受到外力而產生壓縮所致，所以欲對地層下陷進行分析之前，首需對整體土層所受有效應力增量之分佈情形，及整體土層之下陷行為與各分層土壤壓縮特性進行瞭解，然後再應用壓密理論進行沉陷分析，如圖 3-1 所示。

從土壤力學中壓密理論的觀點來看，地層下陷的主要原因是土壤受到壓力，使土壤內之孔隙水逐漸排出，體積發生變化導致土壤壓密現象，由於壓密作用，地層表面將有沉陷變形產生。所謂之土壤受到壓力，是指土壤在土層中受到比原來存在土層中有效應力更大之應力，即有效應力增量，亦即有效應力增量存在之土層才有土壤壓密或壓縮現象，而有效應力所指為地層中土壤顆粒之間（即架構）所承受的應力，與孔隙水壓力共同組成地層中的總應力，一般認為只有有效應力的部份才會影響地層的架構，其改變為造成地層下陷的主因，因此對土層內有效應力增量分佈之研判極為重要。

茲就超抽地下水，其所引致有效應力增量之分佈情形、下陷行為等，分述如下：

### 3-1 超抽地下水引致之有效應力增量分佈

超抽地下水引致地層下陷，一般可分為二類，一為自由水位下降引致之淺層沉陷，另一為受壓水位下降引致之深層沉陷。若由於自由水層受到過量抽水，引致自由水位下降，其有效應力增量僅分佈於最淺層自由水層及其下之難透水層(Aquitard)或粘土層，而其他之受壓水層(Aquifer)及粘土層則無有效應力增量產生，其分佈情形如圖3-2所示，由於在有效應力增量存在之土層，才有土壤之壓密或壓縮現象，因此超抽自由水層產生之沉陷屬於淺層沉陷。若由於受壓水層受到過量抽水，而致受壓水位下降，其有效應力增量如

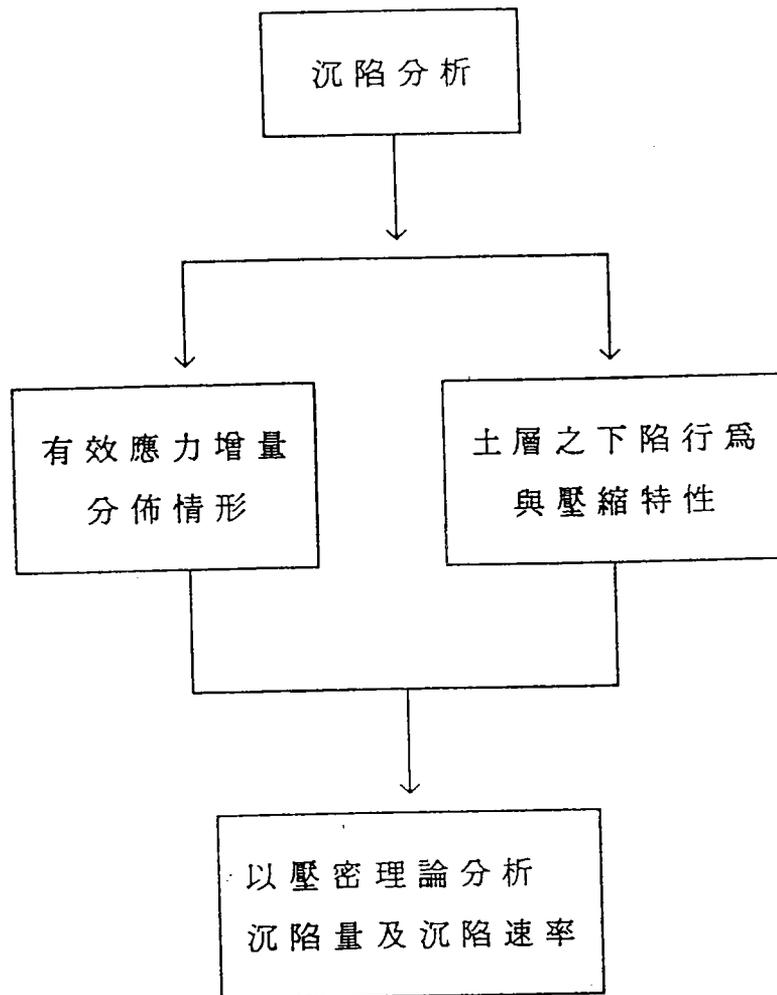


圖 3-1 沉陷分析之流程圖

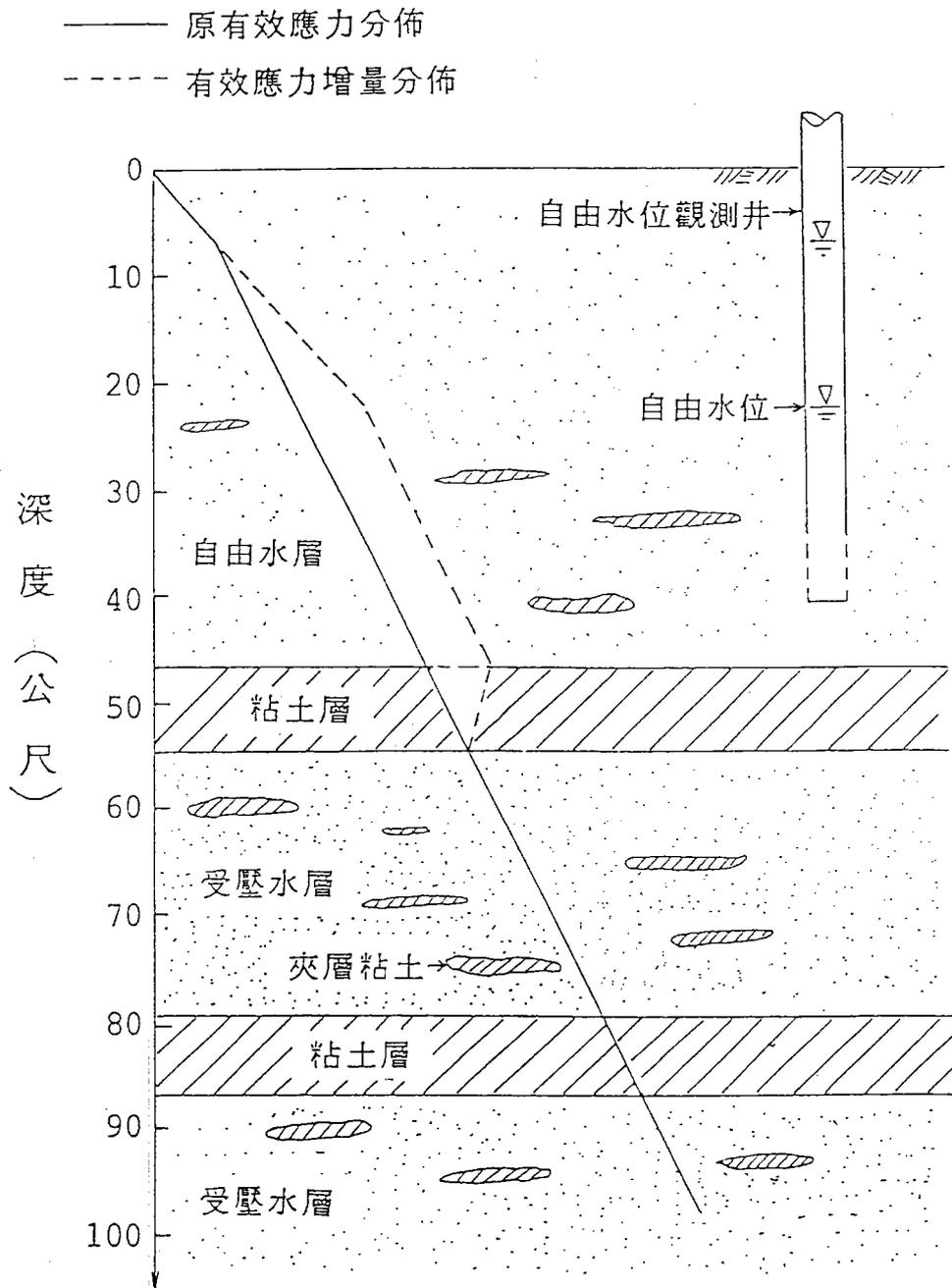


圖 3-2 自由水位下降引致之有效應力增量分佈

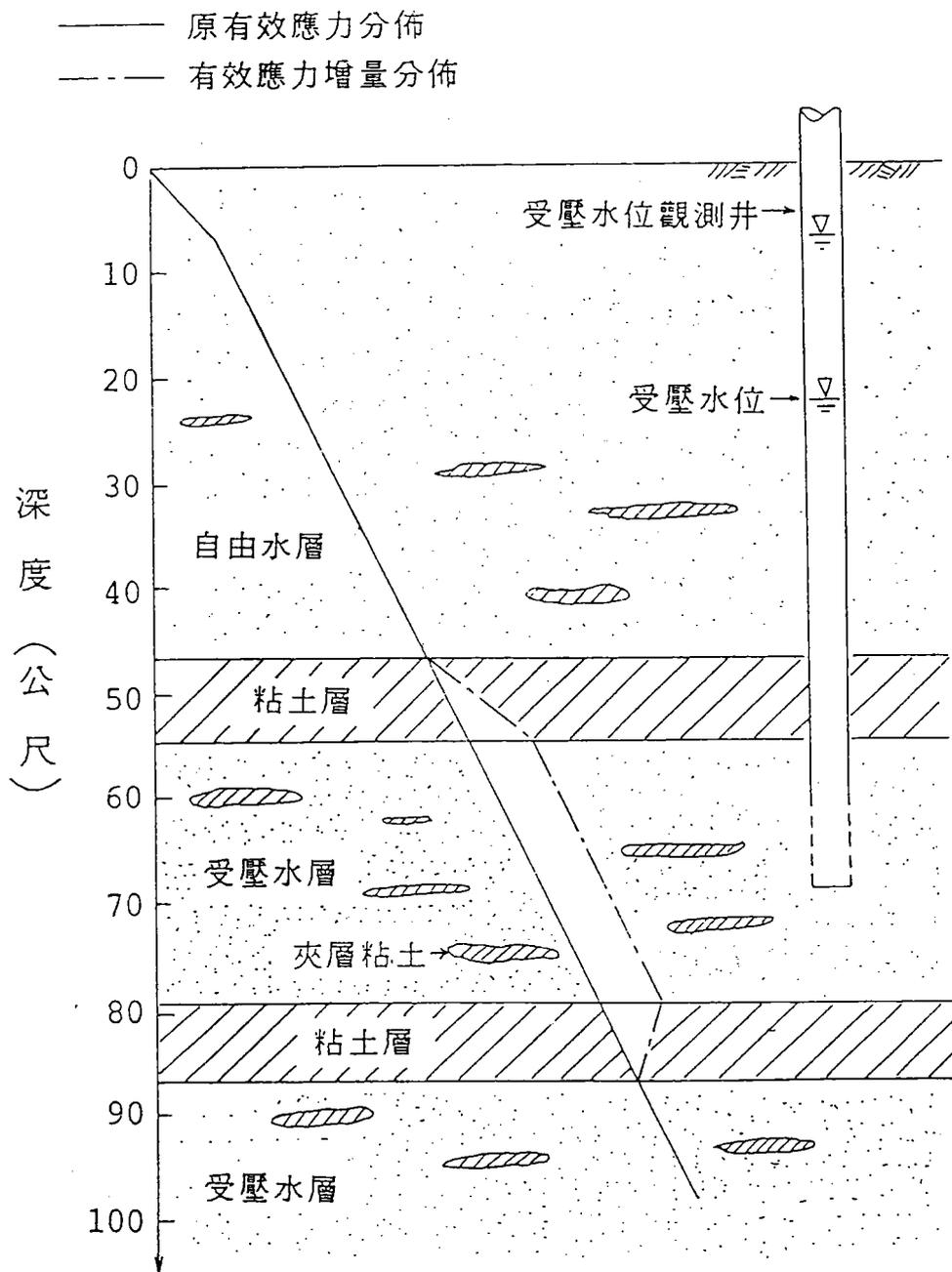


圖 3-3 受壓水位下降引致之有效應力增量分佈

圖3-3所示，除分佈於該超抽受壓水層外，並分佈於其上下之難透水層或粘土層，而最淺層之自由水層及其他之受壓水層與粘土層則無有效應力增量產生，由於超抽受壓水層引致之有效應力增量產生於土層深處，土壤之壓密或壓縮亦發生於深處，因此此種沉陷屬於深層沉陷。

### 3-2 超抽地下水之下陷行為

超抽地下水引致之沉陷，不論是超抽自由水層或受壓水層，由於其影響之區域範圍均很廣大，因此其沉陷特性屬於區域沉陷，亦由於屬於均勻沉陷，且是無聲無息的情況下進行著沉陷，一般均不易察覺，往往等到發生海水倒灌、排水情況惡化等災害時，才察覺到地層下陷。

大部分海岸地層下陷皆因過量抽取受壓含水層中地下水而產生之沉陷，此種沉陷不但其影響達於土層深處，更由於其沉陷主因，是土層深處之受壓含水層及其上下之難透水層或粘土層，受壓縮而產生地層下陷，故稱為深層沉陷(**Deep subsidence**)，此種沉陷行為，相當於一水力起重機(**Hydraulic jack**)將荷重舉高後突然水壓力減少時之情形，此時荷重即漸漸下降。在發生區域沉陷時，主要因受壓含水層中水壓因過度抽取地下水而下降，受壓含水層及其上下之粘土層受到壓縮，此稱為受壓縮土層，而此受壓土層至地表面間之土層並未受到壓縮，只是整體隨受壓縮土層之壓縮而向下移動產生地層下陷，故地面之沉陷與受壓含水層中水壓之減少量成正比。當地下水繼續超抽時所發生之沉陷，在地下水文學裡稱為活性沉陷(**Active subsidence**)。當過量抽水已遏止，地下水壓已趨穩定後，地面之沉陷並不立即停止，而仍將持續一段時間，惟其沉陷速率隨時間而漸趨緩和，最後始停止，此期間所發生之沉陷，在地下水文學裡稱為「稽延沉陷」(**Lag subsidence**)或「殘餘沉陷」(**Residual subsidence**)，通常在活性沉陷後，殘餘沉陷仍將繼續數十年，而後沉陷方可認為全部停止。

在整個壓縮之土層中，受壓含水層中之砂土層為立即壓縮，即在超抽受

水層中亦含有大部分之夾層粘土(Interbeds)，由於含水層之水流是互通的，因此夾層粘土產生全面排水之壓密沉陷，其壓密速率較快，夾層粘土之厚度，雖然很薄，但受壓含水層中有多層夾層粘土，累積之總壓密沉陷量亦很可觀，此夾層粘土之沉陷影響部分之活性沉陷量及大部分初期之稽延沉陷。

受壓含水層上下之難透水粘土層，雖為高壓縮性之土壤，但在受壓含水層過量超抽地下水時，產生單向受壓之壓密沉陷，其總沉陷量為雙向受壓沉陷之一半而已，且其土層較厚，壓密速率極慢，對活性沉陷影響極微，為稽延沉陷之主要來源。

若地層下陷是由於自由水層超抽地下水而引起者，則其沉陷主要來源，為自由水層中砂土之立即壓縮，及自由水層中夾層粘土全面排水之壓密，與自由水層下一層難透水粘土層之單向、受壓之壓密現象。

#### 四、地層下陷與水壓監測系統之規劃

本所分別於台中港、布袋港、安平港、大鵬灣等港灣地區設置地層下陷與水壓監測井，茲以布袋港地層下陷與水壓監測井之設置為例，說明監測系統之規劃，布袋港監測井之設置地點位於布袋港區第二期海埔地之西北角隅之位置，如圖 4-1 所示，監測井共計三孔，1 孔電磁場式分層沉陷觀測井，及 2 孔電子式水壓計觀測井。分層沉陷觀測井深度 200M，安裝磁感式磁環 18 只，水壓計鑽探孔 200M，安裝電子式水壓計 3 只，開口式水壓計孔 180M，安裝開放式水壓計 4 只並於管口內放置電子式水壓計，並採用自動記錄方式其儀器架構流程如圖 4-2 所示，現就其內容概述如下：

- (1)電磁場式分層沉陷觀測井 1 孔：其深度為 200M，於主要土層層次變化之處裝設沉陷環，使量測結果可以顯示個別層次之土層沉陷變化量，沉陷觀測井裝設後將以無線電波層別沉陷儀測量沉陷環之深度變化，以求得各深度土層沉陷之變化情形，沉陷計感應環安裝示意圖如圖 4-3 所示。
- (2)電子式水壓計觀測井 2 孔：地下水壓的大小、水位之深度及變化皆對地層

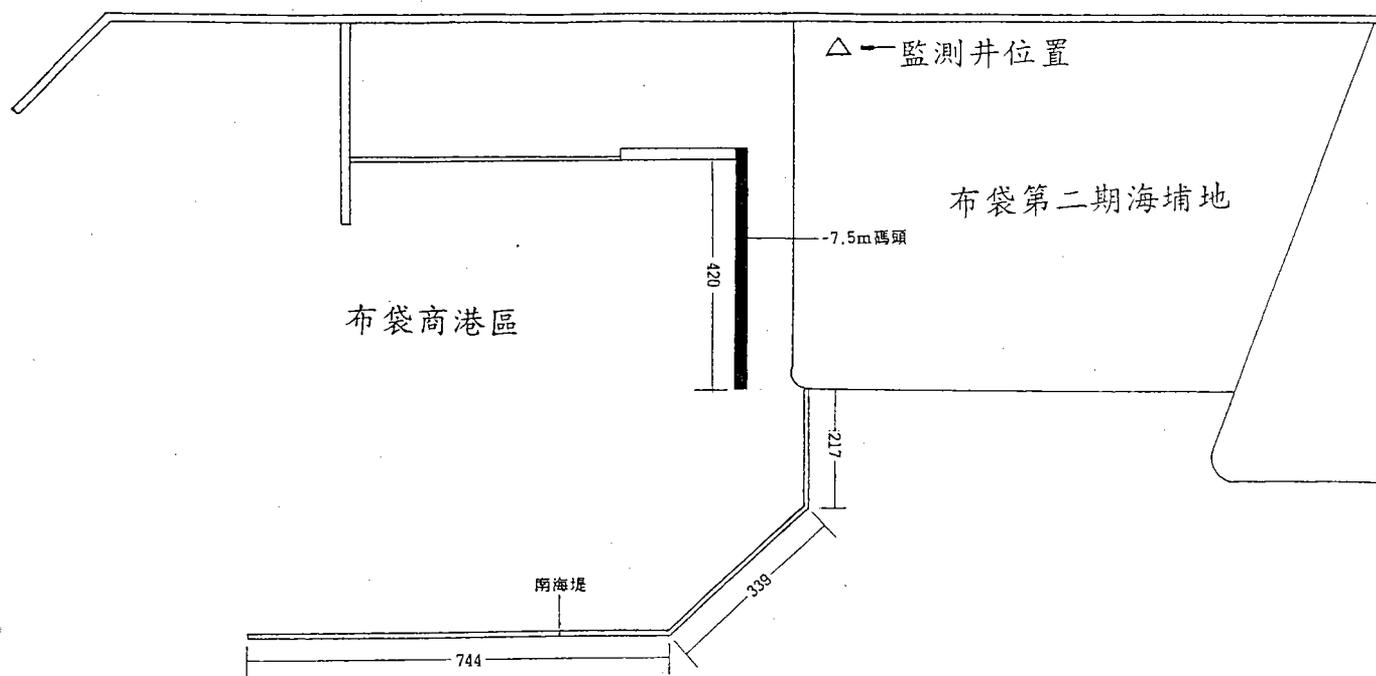


圖 4-1 布袋港地層下陷與水壓監測井位置圖

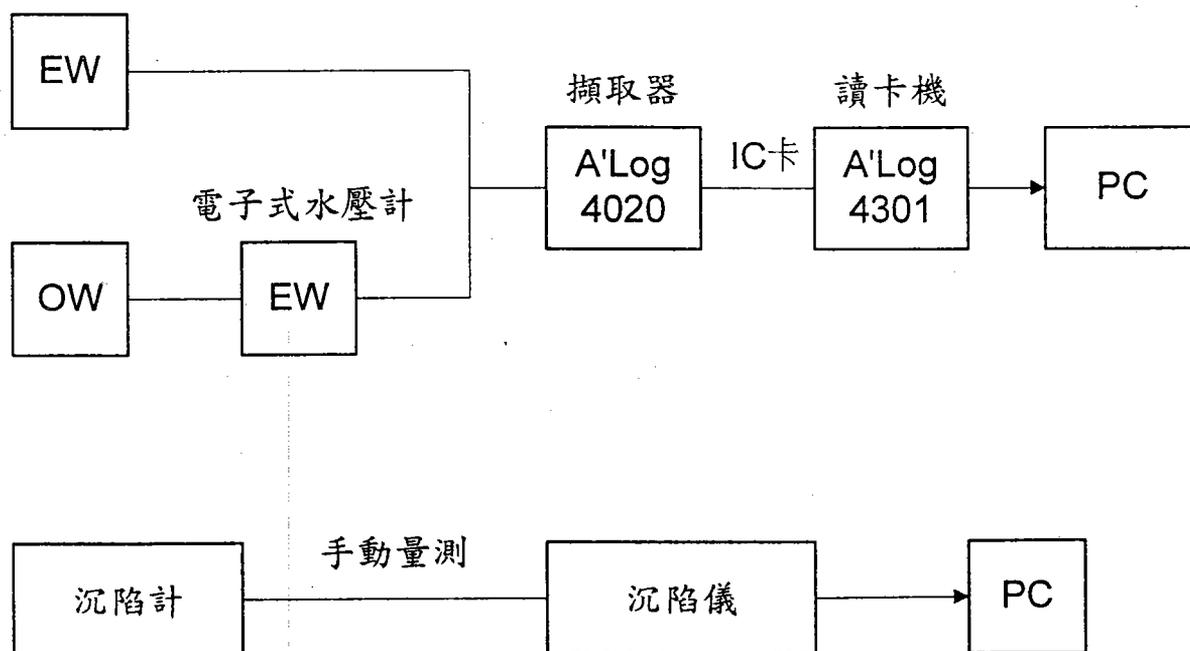


圖 4-2 布袋港之監測儀器架構流程

下陷有極大影響，且水壓計必須埋設在透水性良好之受壓水層裡，並在其上下不透水層以皂土進行封層，才能量得正確水壓，水壓計安裝示意圖如圖 4-4 所示。本水壓監測井共有 7 組電子式水壓計，3 組安裝於鑽探試驗孔內，4 組安裝於開放式水壓計管口內，前 3 組其安裝深度為 131、68、44M，開放式水壓計安裝深度為 178、143.5、105、34M，而電子式水壓計則安裝於壓力水頭下 10M 處，所有電子式水壓計經由配管接至同一個自動記錄器，本觀測井採用 IC 卡自動記錄器地下水位資料每 6 小時自動記錄於 IC 卡上，取回 IC 卡後以讀卡機讀出記憶之資料。

## 五、地層下陷監測結果分析

地下水位變化會引起地層之下陷，而地層之軟硬亦會影響地層下陷量，另雨量及地下水抽取量會引起地下水位及地下水壓之變化，因此雨量、地下水位、地層之狀況、地層下陷等存在著某種相關性，茲分別說明各港區量測結果及其相關性。

### 5-1 布袋港沉陷分析

#### 5-1-1 地層分析

布袋港監測站在深度 200 公尺之地層之狀況，根據現場鑽探資料如圖 5-1 所示。

#### 5-1-2 雨量分析

布袋港位於嘉義沿海地區，其雨量分析乃依據台鹽總廠布袋氣象站記錄，每年降雨量皆集中在 6、7、8 月，其餘月份雨量不大。

而民國 86 年 1 月至 87 年 4 月之每日降雨量如圖 5-2 所示，86 年降雨量較大月份亦集中在 6、7、8 月，其餘月份雨量較少，唯 87 年聖嬰年降雨量從 2 月份開始便增多，整年降雨量皆很充沛。

#### 5-1-3 分層地下水位分析

本水壓計觀測井共埋設 7 支水壓計，其深度分別為 34m、44m、68m、

學行為。本文之地層下陷預測模式是以賴、謝（1995）發展之階段性荷重模式（Step-loading model），並配合大地工程界所熟悉之 Terzaghi（1943）壓密理論，且考慮水位下降、上升、再下降之加壓、解壓、再壓等變形特性，為分析依據。

本文以深度 34m 之地下水位變化資料為第一層(0~41m)沉陷分析之水位資料，並假設預壓密水頭為-3m，以深度 68m 之地下水位變化資料為第二層(41~91m)沉陷分析之水位資料，並假設預壓密水頭為-7m；以深度 105m 之地下水位變化資料為第三層(91~140m)沉陷分析之水位資料，並假設預壓密水頭為-19m；以深度 178m 之地下水位變化資料為第四層(140~200m)之水位資料，並假設預壓密水頭為-15.5m，由上述之各含水層之水位變化資料及圖 5-1 之地層土壤分類，經階段性荷重模式之沉陷分析，得各層及總土層之沉陷歷時變化，如圖 5-7 所示，並與分層地層下陷之觀測資料比較，比較結果極為相近。

## 5-2 安平港沉陷分析

### 5-2-1 地下水位分析

本所曾於安平港於 3 號碼頭後側埋設 150 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 6 支水壓計，其深度分別為 8m、27m、57m、95m、120m、148m，自 85 年 4 月 2 日開始量測，至 86 年 6 月 5 日，因水壓計故障，未能繼續量測，茲將分層地下水壓( $t/m^2$ )正規化為分層地下水位(m)，以利比較，如圖 5-8 所示。由圖 5-8 顯示：8m 之水壓計其地下水位變化介於-0.4~-2m 之間，7、8 月雨季時水位較高，11、12 月旱季時，水位較低，其餘時期水位僅反復震盪，並無多大變化。27m 處之水位介於 0.4~-0.2m 之間，由於量測期間較短，其水位僅在 0.6m 間反復性之震盪，並無多大變化，唯其水位高出地表面，表示此層並無超抽地下水現象。57m 處之水位，最高為-0.8m，最低為-1.8m，水位變化不大，95m 處之地下水位變化較大，最高水位-0.5m，最低水位為-2.5m，7、8 月雨季水位較高，11、12 月旱季水位較低，而且整體地下水位有漸下降之趨勢，表示此層有超抽地下水現象。120m 處之地下水位，最高水位-0.2m，最低水位-1.6m，整體水位無多大變化，僅是反

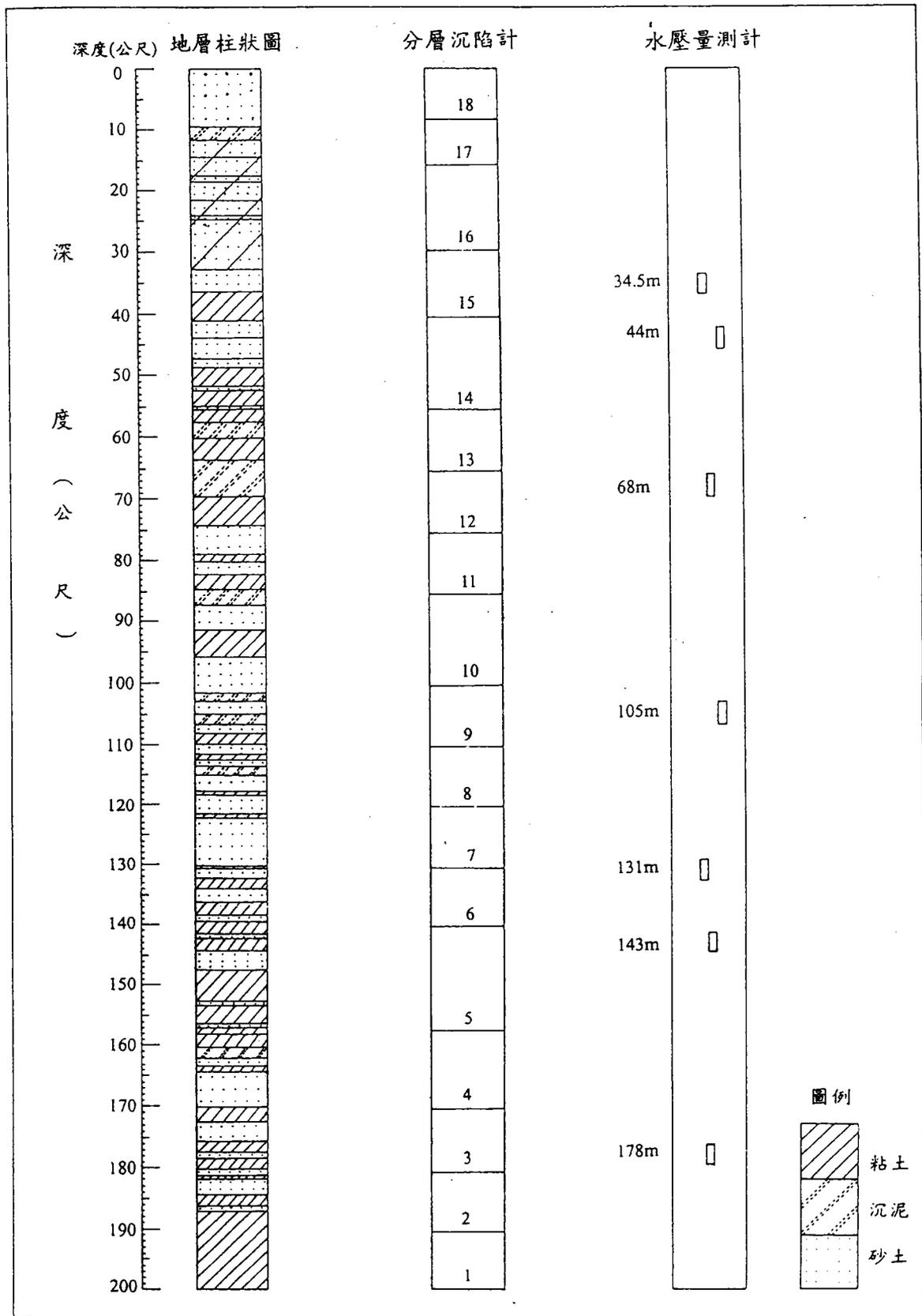


圖 5-1 布袋港監測站之地層柱狀圖

105m、131m、143m、178m，自 86 年 7 月 22 日開始以自動量測系統量測，其中 86 年 8 月 15 日至 9 月 15 日及 87 年 7 月 17 日至 8 月 17 日，因水壓自動量測儀故障，而缺乏資料，茲將分層地下水壓 ( $t/m^2$ ) 正規化為分層地下水水位 (m)，以利比較，分別如圖 5-3 所示。

由於其中 34m、105m、143m、178m 之水壓計為開放式，亦可以手動定期量測，手動量測自 86 年 4 月開始量測，每月量測一次。其量測結果如圖 5-4 所示。

由圖 5-3 及圖 5-4 顯示：34m 處之水位變化介於-3.3~-3.7m 之間反復性之震盪，並無多大變化，僅在 87 年聖嬰年 3 月以後整年降雨量皆充沛，水位稍微上升；44m 處之水位，除了 86 年 10 月旱季時，水位較低為-7.4m 外，其餘時期水位僅在-6~-7m 之間反復震盪，而至 87 年聖嬰年 3 月以後整年降雨量皆充沛，水位稍為上升，至 88 年 2、3、4 月雨量較少，水位繼續下降；68m 之水位介於-8.5~-7m 之間，其中 86 年 7 月水位較低為-8.5m，此可能 86 年 3、4 月時水位更低，而漸升至 86 年 9、10 月，而 86 年 11、12 月及 87 年 1 月旱季時水位稍降，而至 87 年聖嬰年 3 月以後整年降雨量皆充沛，水位稍為上升，至 88 年 2、3、4 月雨量較少，水位繼續下降。

由圖 5-3 及圖 5-4 顯示：105m 處之水位變化極大，最高水位-16.7m，最低水位-24.5m，在 86 年 4、5、11、12 月及 87 年 1、2 月雨量較少時，水位較低，86 年 9 月及 87 年聖嬰年 3 月以後整年降雨量充沛時，水位較高，至 88 年 2、3、4 月雨量較少，水位繼續下降。131m 處之水位變化亦極大，最高水位-16.3m，最低水位可能為-24m，其水位大小及變化與 105m 處水位相當，可見 105m 及 131m 水位是屬於同一含水層。143m 及 178m 水位大小及變化亦很相當，亦屬同一含水層，其最高水位為-18m，最低水位為-25m，其水位變化與 105m、131m 處相似。

綜合各地層之地下水水位資料，如圖 5-3 所示，布袋港水層約可分為 4 個層次，34m 水位為第 1 含水層之水位，44m、68m 水位為第 2 含水層之水位，105m、131m 水位為第 3 含水層之水位，143m、178m 水位為第 4 含水層之水位。由水位變化現象顯示：第 1、2 層水位變化較小，較無超抽地下水現象，第 3、4 層地下水水位低且變化極大，超抽地下水現象明顯，而且 86 年 4、5 月及 11、12 月旱季時，水位相對較低，表示旱季時，超抽地下水更為嚴重。

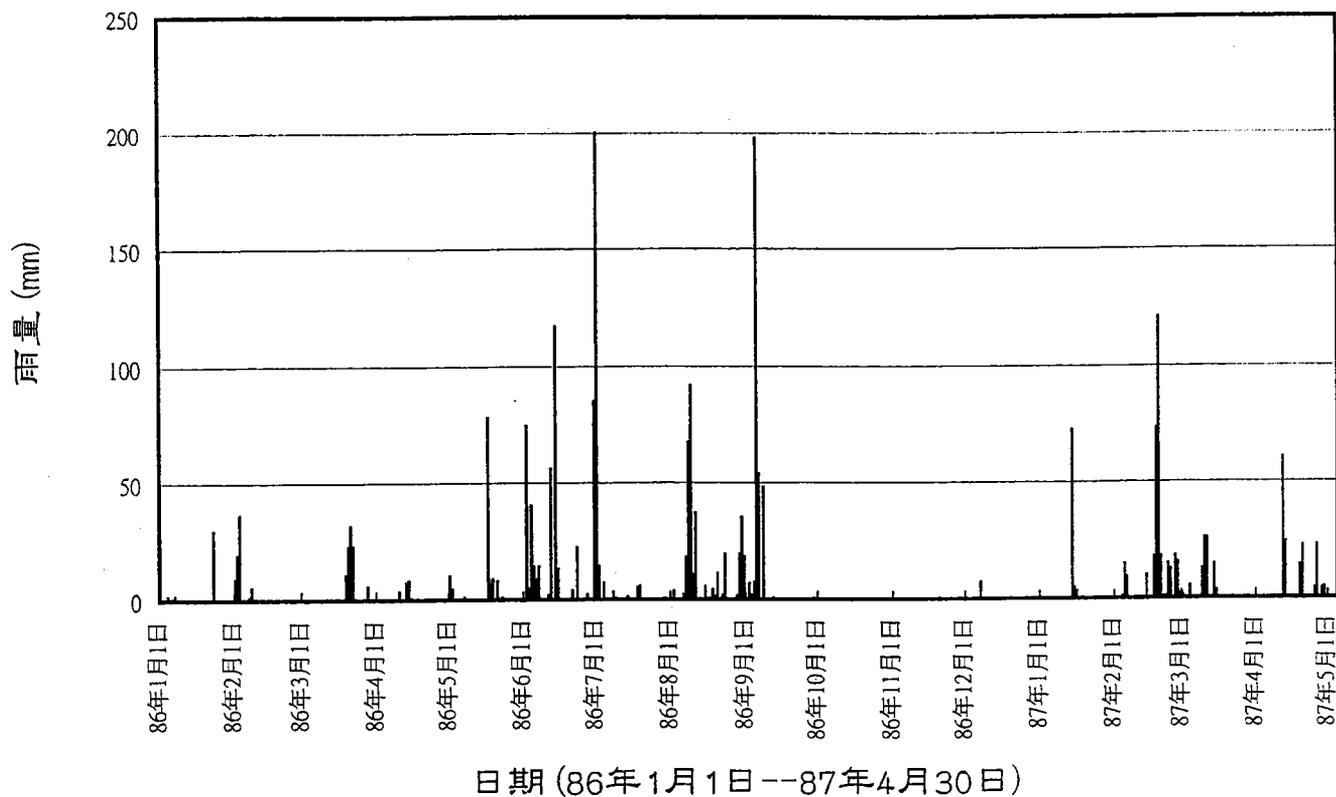


圖 5-2 布袋地區日降雨量統計圖

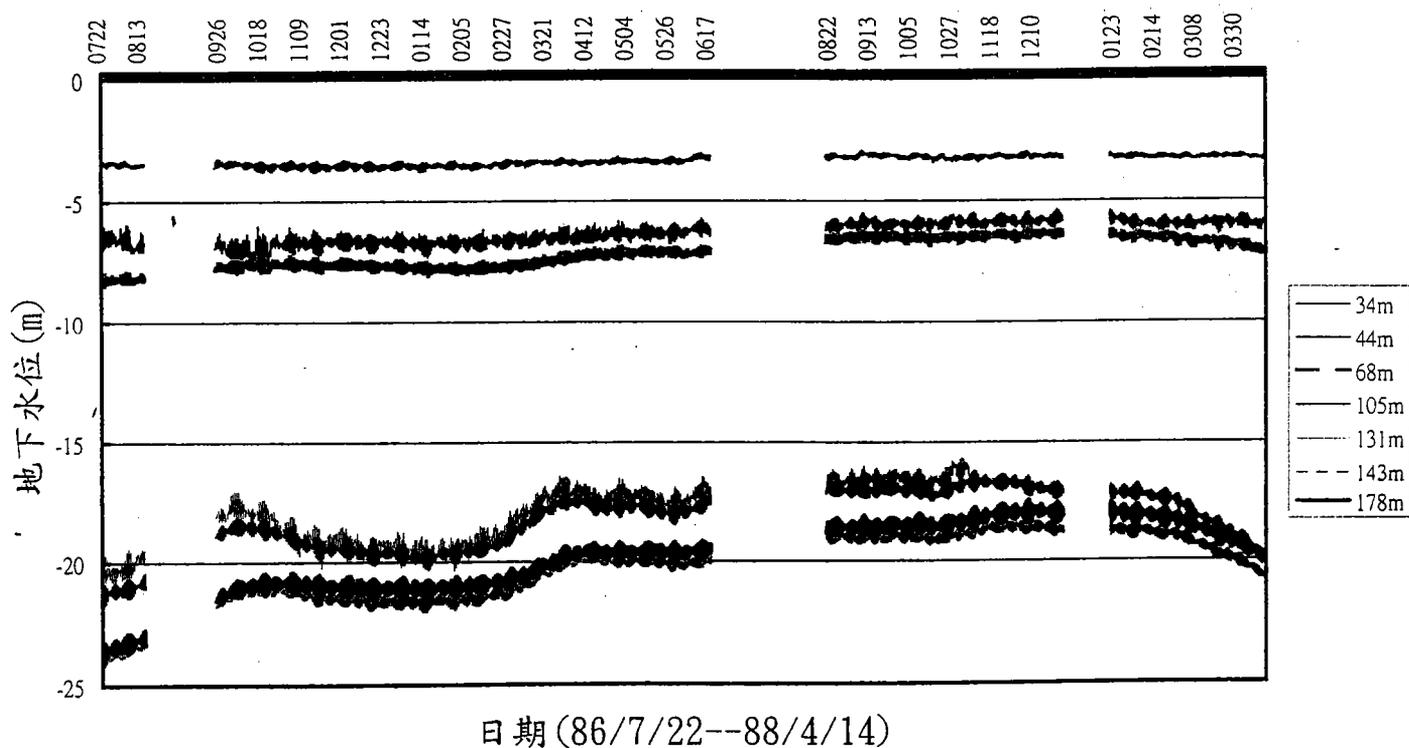


圖 5-3 布袋港分層水位變化(自動量測)

#### 5-1-4 分層地層下陷分析

爲了探討布袋港不同深度之壓縮行爲，本分層地層下陷監測井，分別在深度 8、16、30、41、56、66、76、85、100、110、120、131、140、157、170、181、190、200m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 18 個磁環，每個月之中旬定期以無線電波監測儀量測各沉陷磁環之相對移動變化量，以分析不同深度地層之壓縮量。

圖 5-5 爲至民國 88 年 4 月 14 日，不同深度地層之壓縮量，以柱狀圖形表示，負值表壓縮，正值表回脹，因爲感應磁環之最大深度爲 200 公尺，所以圖中所有的量測數值均以此爲參考點所計算之相對壓縮量，由圖 5-5 可發現較淺之地層壓縮量較小，壓縮量較大之地層爲 140~157m 及 170~180m 之深度，而此地層屬粘土層，且深層超抽地下水較嚴重，因此壓縮量較大。

圖 5-6 爲不同時期不同深度之感應磁環相對於地表感應磁環之累積曲線比較圖，由圖 5-6 顯示，從 86 年 2 月至 88 年 4 月之 26 個月期間，布袋港地表下 8m 至 200 公尺間之沉陷總量爲 82.5 公厘，而其中 140~200m 之沉陷量 44mm，佔總沉陷量之 50% 以上，由此資料顯示，布袋港之沉陷屬於深層沉陷，且較 200m 更深之處仍可能有沉陷發生，因此布袋港之總沉陷量應比監測所量測之壓縮總量還大。

#### 5-1-5 相關性分析

綜合上述地質、雨量、分層地下水位及分層地層下陷之分析，本節簡要之探討其間之相關性。淺層地下水位屬於局部性，其受港區抽水之影響，若是鄰近區域之抽水，則較不影響，而深層之地下水位屬於區域性，港區及附近區域之抽水皆會對其影響，由於港區並無抽水現象發生，淺層水位應無多大變化，但淺層水位除了受漲退潮之潮位影響外，受到雨量之影響最大，7、8 月雨季時，水位上升，11、12 月旱季時，水位下降，因此淺層土層若無抽水引致壓密水位下降之影響，僅受季節性雨量之影響，則淺層土層僅會因水位上升受解壓而微小之膨脹，水位下降時受再壓而微小之壓縮，整體而言不太會有沉陷發生，此可由圖 5-5 及圖 5-6，8m~16m 之土層不但無壓縮，反而稍有膨脹。得到說明，而 34m 之地下水位，雖屬淺層水位，但由於 9.5~11.6m 有沉泥層，14.1~32.8m 有細砂夾多層之薄粘土，因此 34m 之水位已非純自由水位而是半受壓水位，因此附近區域之

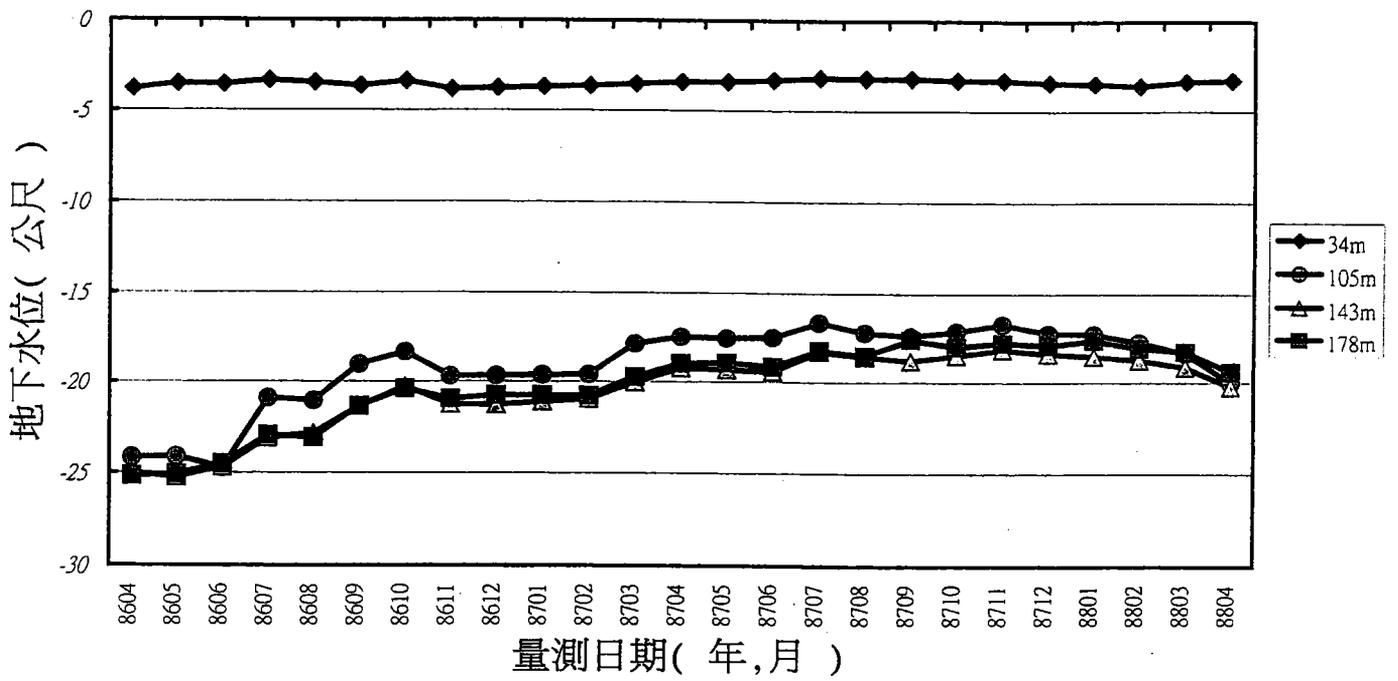


圖 5-4 布袋港分層水位變化(手動量測)

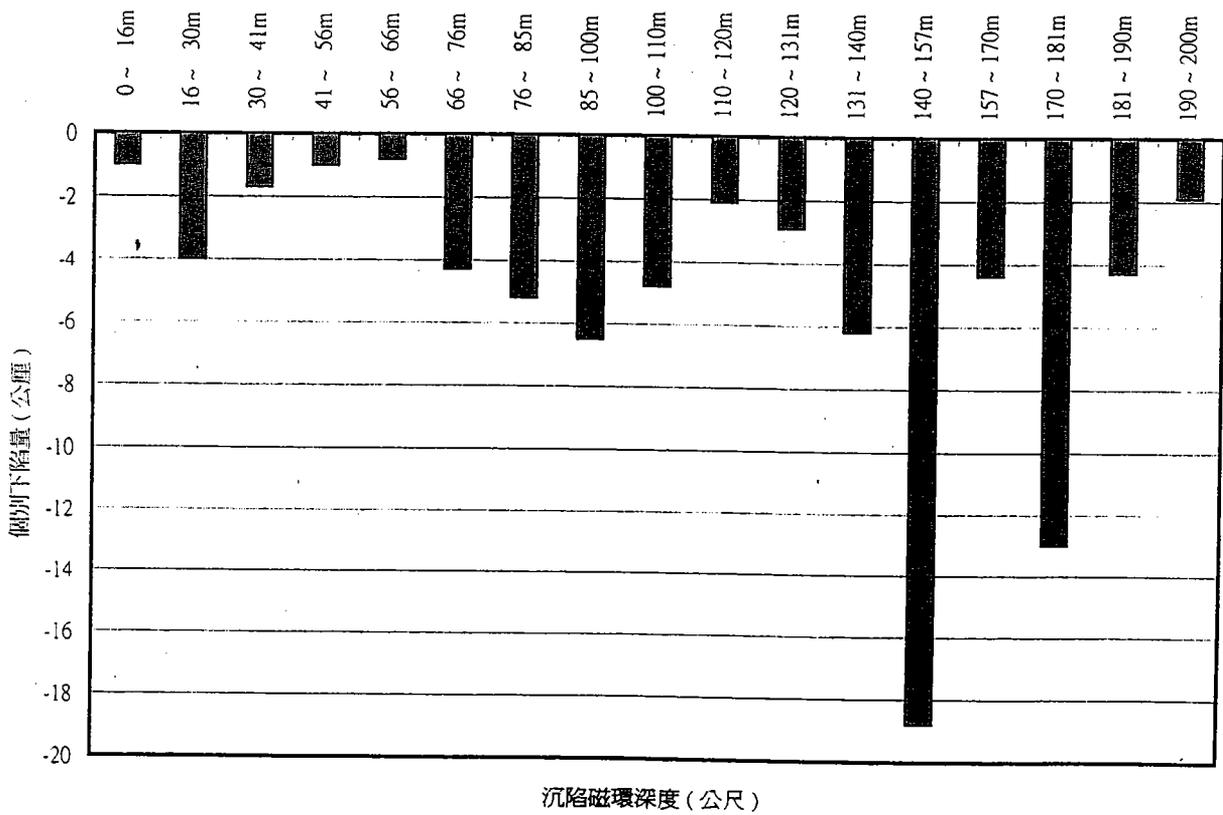


圖 5-5 布袋港不同深度地層之壓縮量

抽水亦會影響其水位變化。

由表 5-1，水井之調查，布袋鎮 10~30m 之水井有 909 口，是淺層抽水之主要深度，故 34m 之水位於 11、12 月旱季時因抽水較多，而水位較低，致使淺層土壤 16~41m 亦有些壓縮量。而深層之地下水位理應較不受到雨量變化之影響，而受到深層抽水之影響較大，其中 44m 之水位無多大變化，雖然 41~66m 土層大多為粘土層或沉泥層，其土層壓縮量亦極小。而 68m 之水位變化較 44m 水位為大，又 66~85m 之土層大多為粘土層或沉泥層其土層之壓縮量較大；105m、131m、143m、178m 處之水位變化極為明顯，因此 85~200m 之土層沉陷亦很明顯，100~200m 之水位屬於較深層之水位，理應不太受雨量分佈之影響，若有受雨量補注之影響亦應有一段延遲現象，但此處深層水位，卻於 7、8 月雨季時水位逐漸上升，11、12 月旱季時水位逐漸下降，其原因何在？依本研究之見解，乃因雨季時地面水源充足，附近工業區或漁塭區減少使用地下水，而較少抽水，故深層水位上升，而旱季時，地面水源缺乏，引起附近工業區或漁塭區，大量抽取地下水，致使深層水位急速下降，亦引發深層之地層下陷。而由圖 5-6 分層沉陷顯示：壓縮量較大之位置，大多發生在抽水層鄰近深度之粘土層，即發生在砂土層厚度較大之鄰近的粘土層，如 131~157m，170~180m 即是抽水層鄰近之粘土層，其壓縮量最大。另由表 5-1 水井之調查，可發現 150m 深以上之水井有 319 口，佔抽水井之比例極高，因此 143m、178m 之水位最低且變化大，因此沉陷量亦大，由分層沉陷資料圖 5-6 顯示，140~200m 之沉陷量佔總沉陷量 50% 以上。

表 5-1 布袋鎮各井深水井數量

井深(m)	10 以下	10 30	30 50	50 80	80 100	100 150	150 以上
數量(口)	312	909	84	21	53	178	319
比例(%)	16.6	48.5	4.5	1.1	2.83	9.5	17

#### 5-1-6 地層下陷模擬預測

地層下陷模擬預測，是根據分層之水位資料及地層之土壤分類，來求地層之沉陷歷線，並與定期量測之沉陷資料比較，以了解地層下陷之力

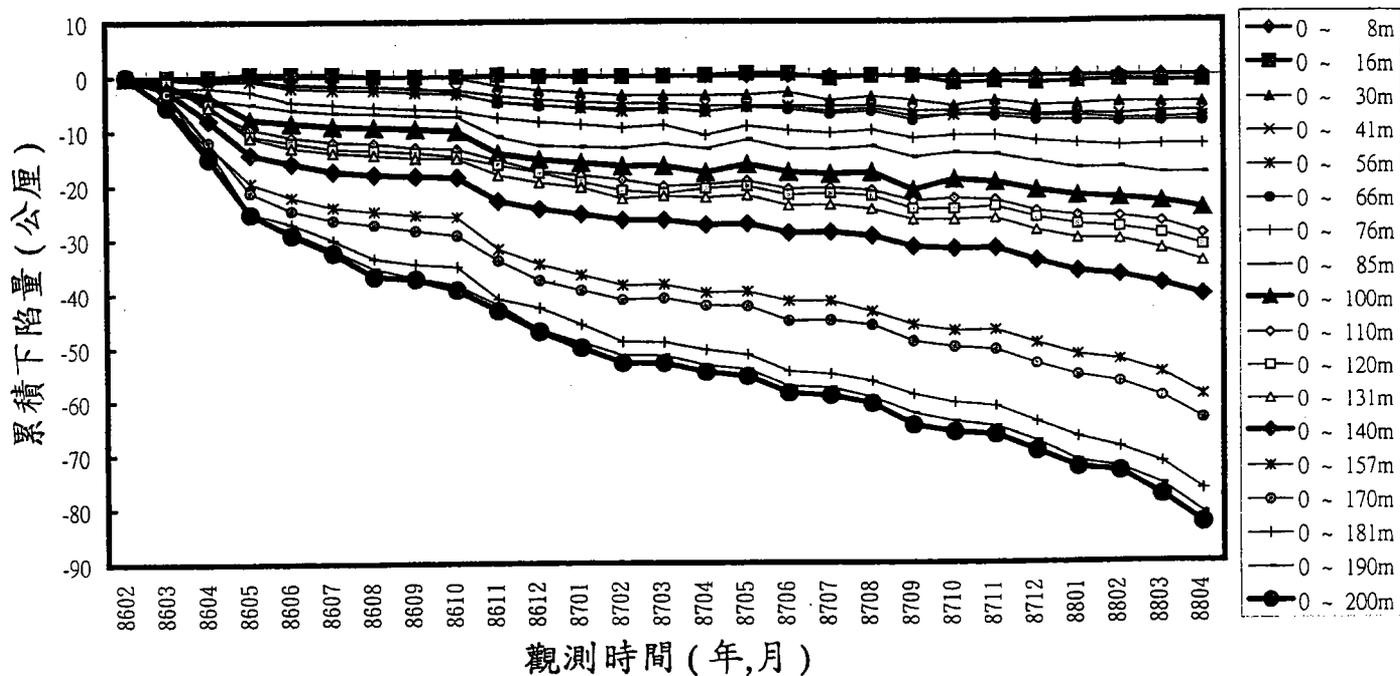


圖 5-6 布袋港地層分層下陷觀測圖

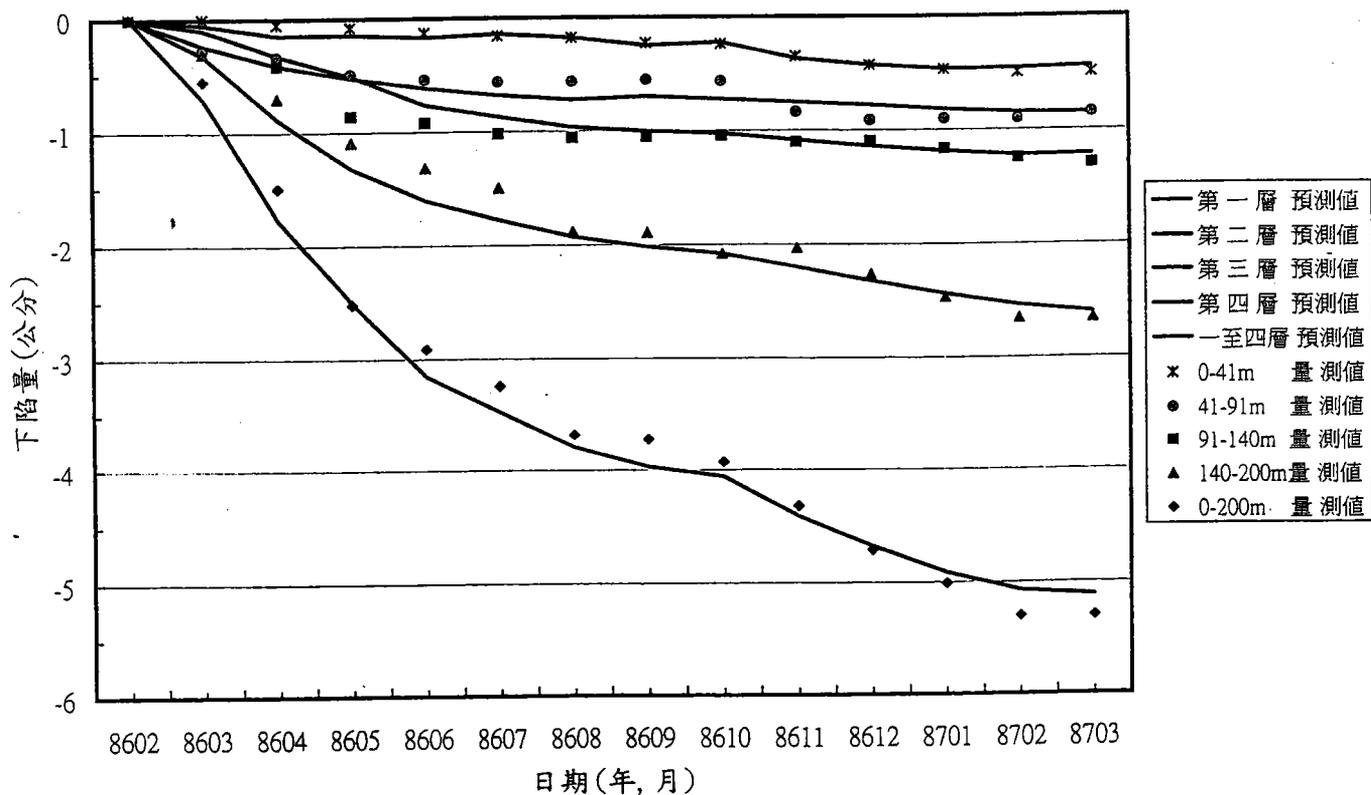


圖 5-7 布袋港地層下陷模擬分析結果

學行為。本文之地層下陷預測模式是以賴、謝（1995）發展之階段性荷重模式（Step-loading model），並配合大地工程界所熟悉之 Terzaghi（1943）壓密理論，且考慮水位下降、上升、再下降之加壓、解壓、再壓等變形特性，為分析依據。

本文以深度 34m 之地下水位變化資料為第一層(0~41m)沉陷分析之水位資料，並假設預壓密水頭為-3m，以深度 68m 之地下水位變化資料為第二層(41~91m)沉陷分析之水位資料，並假設預壓密水頭為-7m；以深度 105m 之地下水位變化資料為第三層(91~140m)沉陷分析之水位資料，並假設預壓密水頭為-19m；以深度 178m 之地下水位變化資料為第四層(140~200m)之水位資料，並假設預壓密水頭為-15.5m，由上述之各含水層之水位變化資料及圖 5-1 之地層土壤分類，經階段性荷重模式之沉陷分析，得各層及總土層之沉陷歷時變化，如圖 5-7 所示，並與分層地層下陷之觀測資料比較，比較結果極為相近。

## 5-2 安平港沉陷分析

### 5-2-1 地下水位分析

本所曾於安平港於 3 號碼頭後側埋設 150 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 6 支水壓計，其深度分別為 8m、27m、57m、95m、120m、148m，自 85 年 4 月 2 日開始量測，至 86 年 6 月 5 日，因水壓計故障，未能繼續量測，茲將分層地下水壓( $t/m^2$ )正規化為分層地下水位(m)，以利比較，如圖 5-8 所示。由圖 5-8 顯示：8m 之水壓計其地下水位變化介於-0.4~-2m 之間，7、8 月雨季時水位較高，11、12 月旱季時，水位較低，其餘時期水位僅反復震盪，並無多大變化。27m 處之水位介於 0.4~-0.2m 之間，由於量測期間較短，其水位僅在 0.6m 間反復性之震盪，並無多大變化，唯其水位高出地表面，表示此層並無超抽地下水現象。57m 處之水位，最高為-0.8m，最低為-1.8m，水位變化不大，95m 處之地下水位變化較大，最高水位-0.5m，最低水位為-2.5m，7、8 月雨季水位較高，11、12 月旱季水位較低，而且整體地下水位有漸下降之趨勢，表示此層有超抽地下水現象。120m 處之地下水位，最高水位-0.2m，最低水位-1.6m，整體水位無多大變化，僅是反

復性之震盪，且不太受季節性影響，顯示此層無超抽地下水現象。148m 處之地下水位變化最大，最高水位-2.4m，最低水位-4.1m，7、8 月雨季時，水位較高，旱季時水位較低，整體地下水位與 95m 水位相似，有漸下降之趨勢，亦表示此層有超抽地下水現象。

綜合各地層之地下水位資料，27m、57m 處之地下水位變化，由於量測時間較短，無法判斷水位變化趨勢，而 8、120m 處之水位幾乎相似，僅在-1~-1.5m 間反復性之震盪，無多大變化，而 95、148m 兩處之水位下降較為明顯，有超抽地下水位現象，而且在 85 年 11、12 月旱季時，水位下降至最低，表示旱季時，超抽地下水更為嚴重。

#### 5-2-2 分層地層下陷分析

爲了探討安平港不同深度地層之壓縮行爲，於 3 號碼頭後側停車場之位置設立 150m 深之分層地層下陷監測井，每隔 10m 安裝一個沉陷磁環，每 1 至 2 個月定期以無線電波監測儀量測各沉陷磁環之相對移動變化量，以量測不同深度地層之壓縮量。圖 5-9 爲不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 152 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖 5-9 顯示：安平港於 85 年 4 月至 86 年 4 月沉陷近 8 公厘，86 年 4 月至 87 年 3 月沒有沉陷，87 年 4 月至 87 年 12 月，因聖嬰年雨量充沛回脹 3.5 公厘，至 88 年 1、2、3、4 月再沉陷 1.5 公厘，因此從 85 年 4 月至 88 年 4 月 3 年期間，安平港地表至 152 公尺間之沉陷總量 6 公厘，而其中 142~152m 之沉陷量 2.2 公厘，佔總沉陷量之 30% 以上，由此資料顯示，安平港之沉陷屬於深層沉陷，且較 152m 更深之處仍可能有沉陷發生，因此安平港之總沉陷量應比監測所量測之壓縮總量還大。

#### 5-3 台中港沉陷分析

根據水利處於梧棲大排之 300m 單管式地盤下陷井，及梧棲海尾 79.6m 水位井之觀測資料，如圖 5-10、圖 5-11 所示，由圖 5-10 顯示：台中港附近地

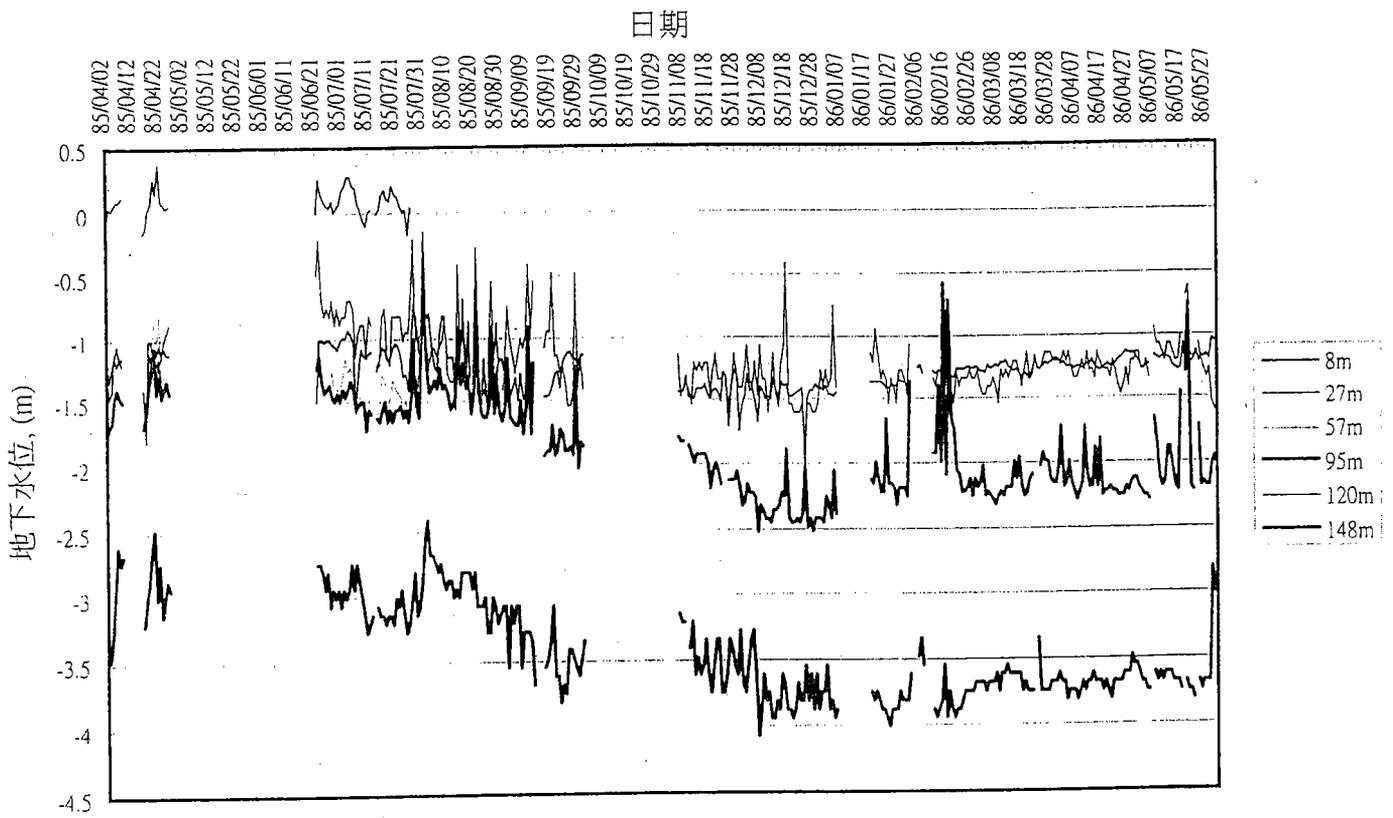


圖 5-8 安平港分層水位變化(自動量測)

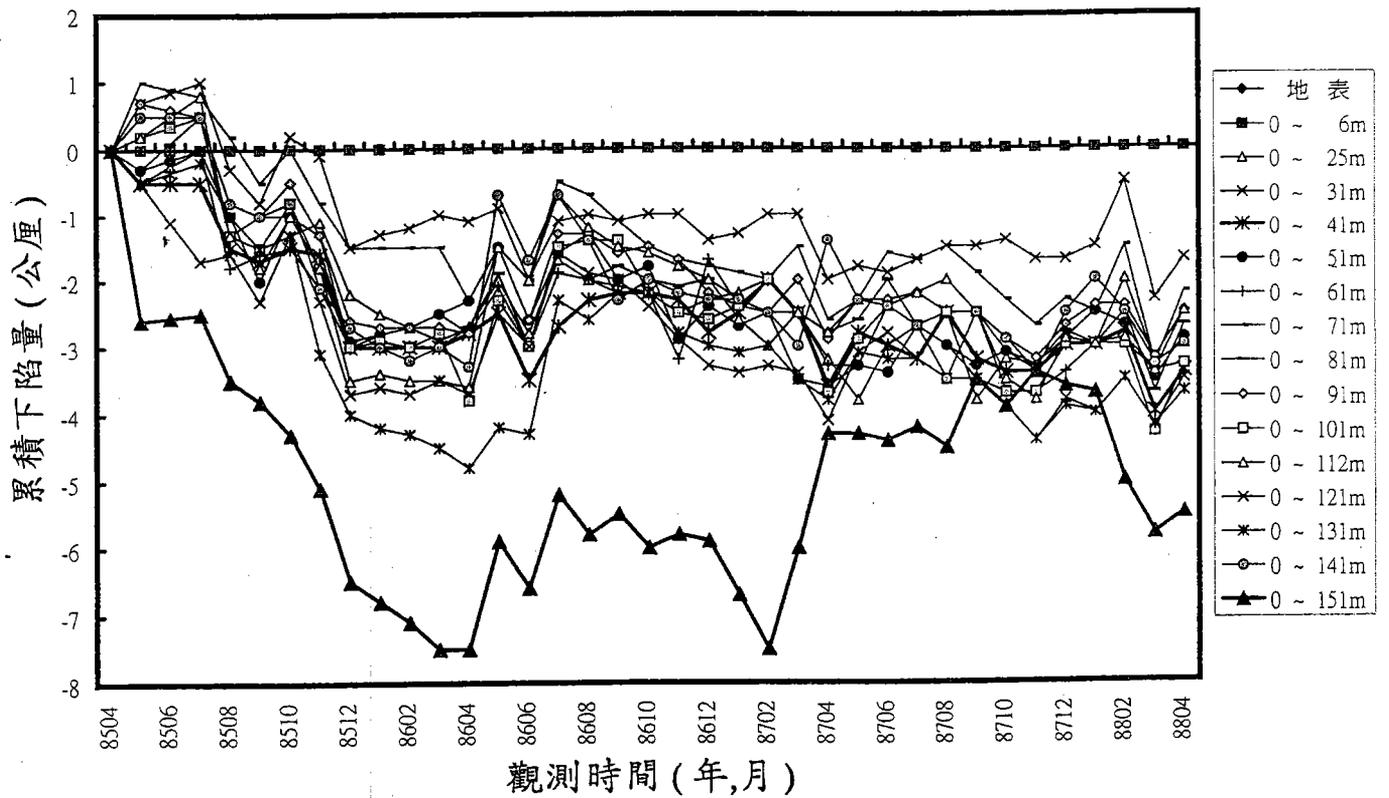


圖 5-9 安平地層分層下陷觀測圖

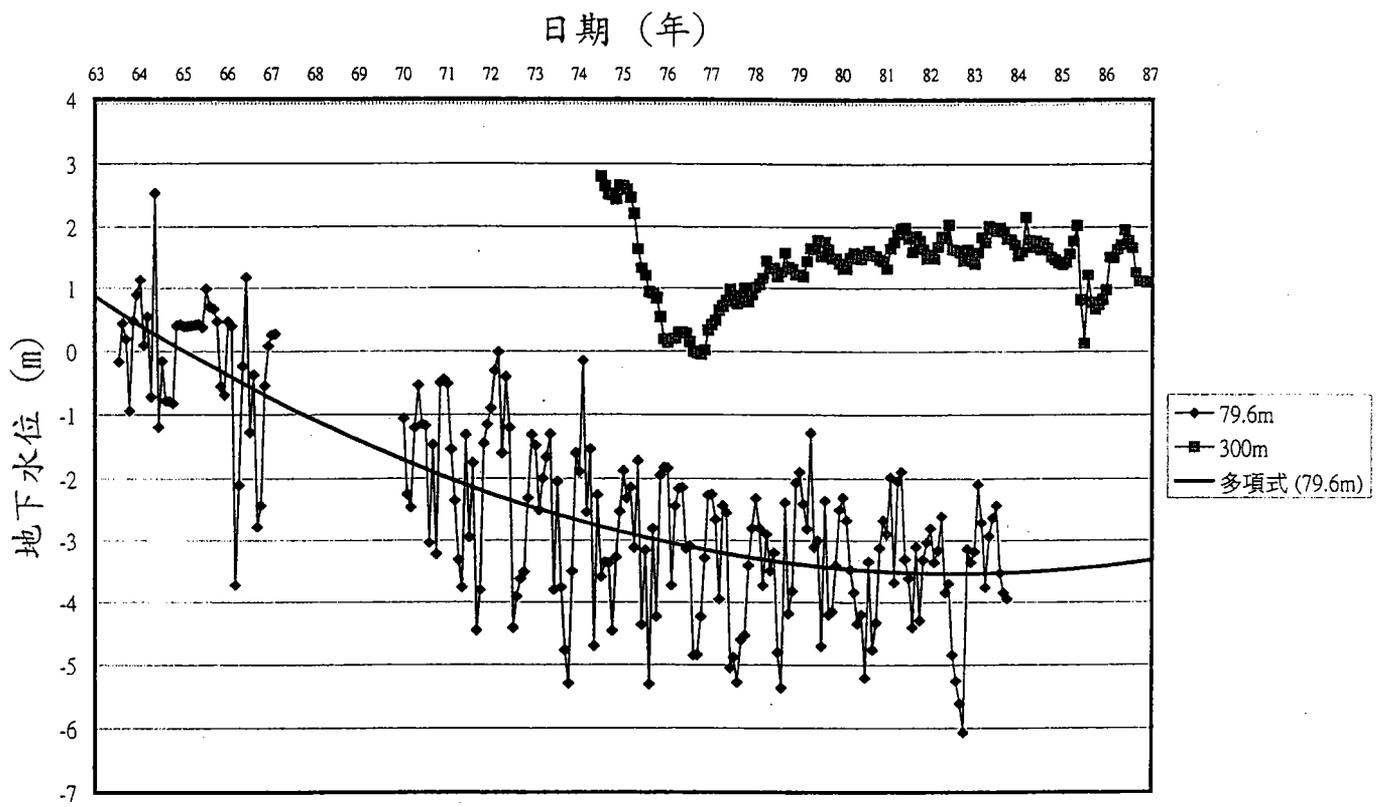


圖 5-10 台中港附近地區地下水位變化

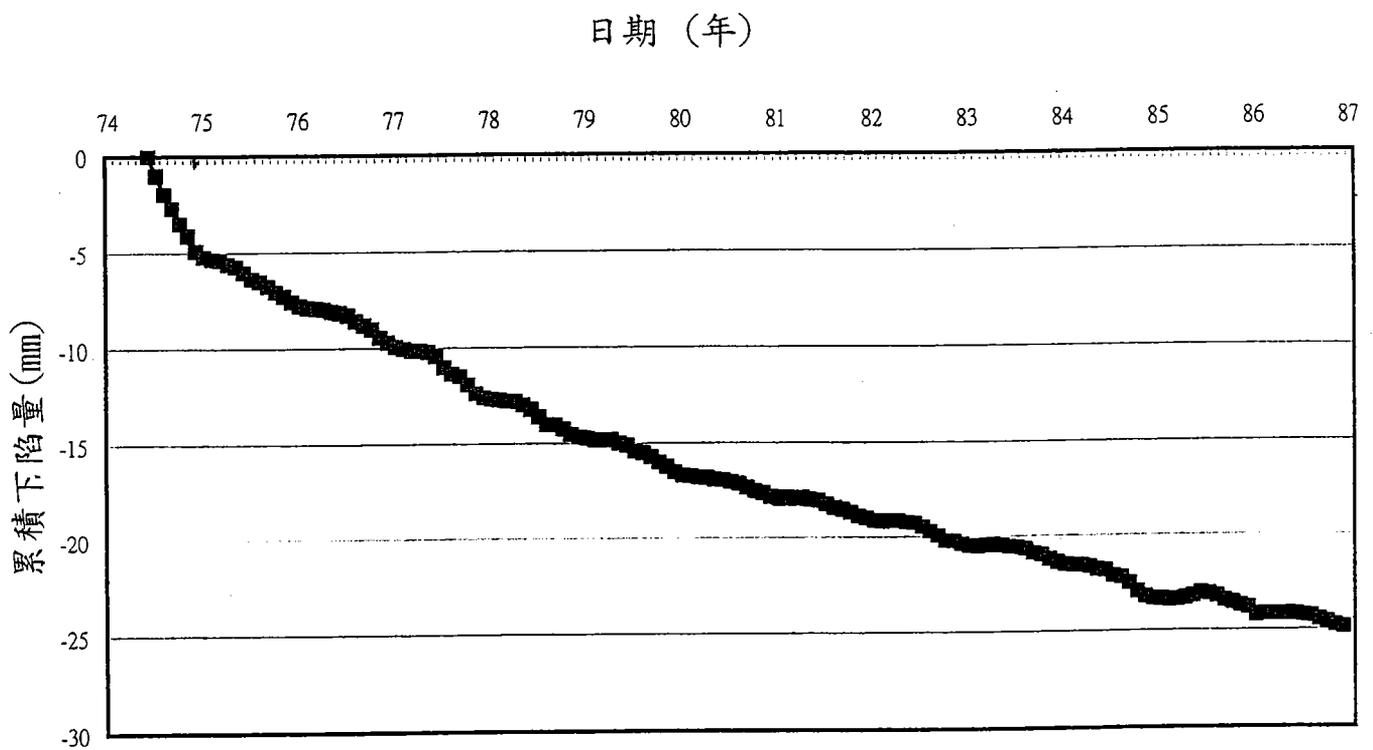


圖 5-11 台中港附近地區地層下陷圖

區，自民國 65 年至 76 年，中層水位(79.6m)由 0m 反復震盪漸漸下降至-5m，而後幾年水位維持反復震盪之穩定，而深層水位(300m) 於 74 年至 76 年由 2.8m 下降至 0m，而後幾年水位維持穩定於 1.7m 附近，於 85 年水位又下降至 0m，由圖 5-11 顯示：台中港附近地區，自民國 74.5 年至 87 年共 12.5 年間，總下陷量 25 公厘，平均每年沉陷量約 2 公厘。

#### 5-4 大鵬灣沉陷分析

大鵬灣位於本省西南沿岸，鄰近高屏都會區，為一處囊狀瀉湖，區內水面廣闊而平靜，為台灣南部極具開發潛力之天然海灣。目前之規劃設計，是以發展為大型風景區及多樣化觀光遊憩為目標。其中遊艇港為水上及海上觀光遊憩之基本工程。目前本地區之累積下陷量約為 0.5m-1.5m，往後會繼續下陷多少量？及其可能之下陷速率？對工程之高程設計極為重要，尤其對遊艇港碼頭、防波堤等工程之高程設計更為重要，因此，本所於大鵬灣埋設 1 組 200 公尺深之地層分層下陷及分層水壓觀測站，其量測結果如圖 5-12、圖 5-13 所示，由圖 5-12 顯示：35m 及 58m 處之淺層水位變化不大，介於-3~-4m 之間，105m 處之中層水位變化亦不大，142m 及 202m 處之深層地下水位變化較大，由於 87 年聖嬰年 3 月以後整年降雨量皆充沛，水位漸漸上升，至 88 年 2、3、4 月雨量較少，水位繼續下降，142m 處之水位由-4.5m 漸漸上升至-3.7m 再下降至-6.9m，202m 處之水位由-7.4m 漸漸上升至-5.7m 再下降至-7m。由圖 5-12 顯示：大鵬灣從 87 年 2 月至 88 年 2 月一年期間，大鵬灣地表至 189.2 公尺間之沉陷總量 40 公厘，而其中地表~51.3m 之沉陷量 35 公厘，佔總沉陷量之 87.5%，由此資料顯示，大鵬灣之沉陷屬於淺層沉陷，另 87 年聖嬰年水位上升，沉陷速率較緩，至 88 年 2、3、4 月雨量較少，水位繼續下降，沉陷速率亦加大。

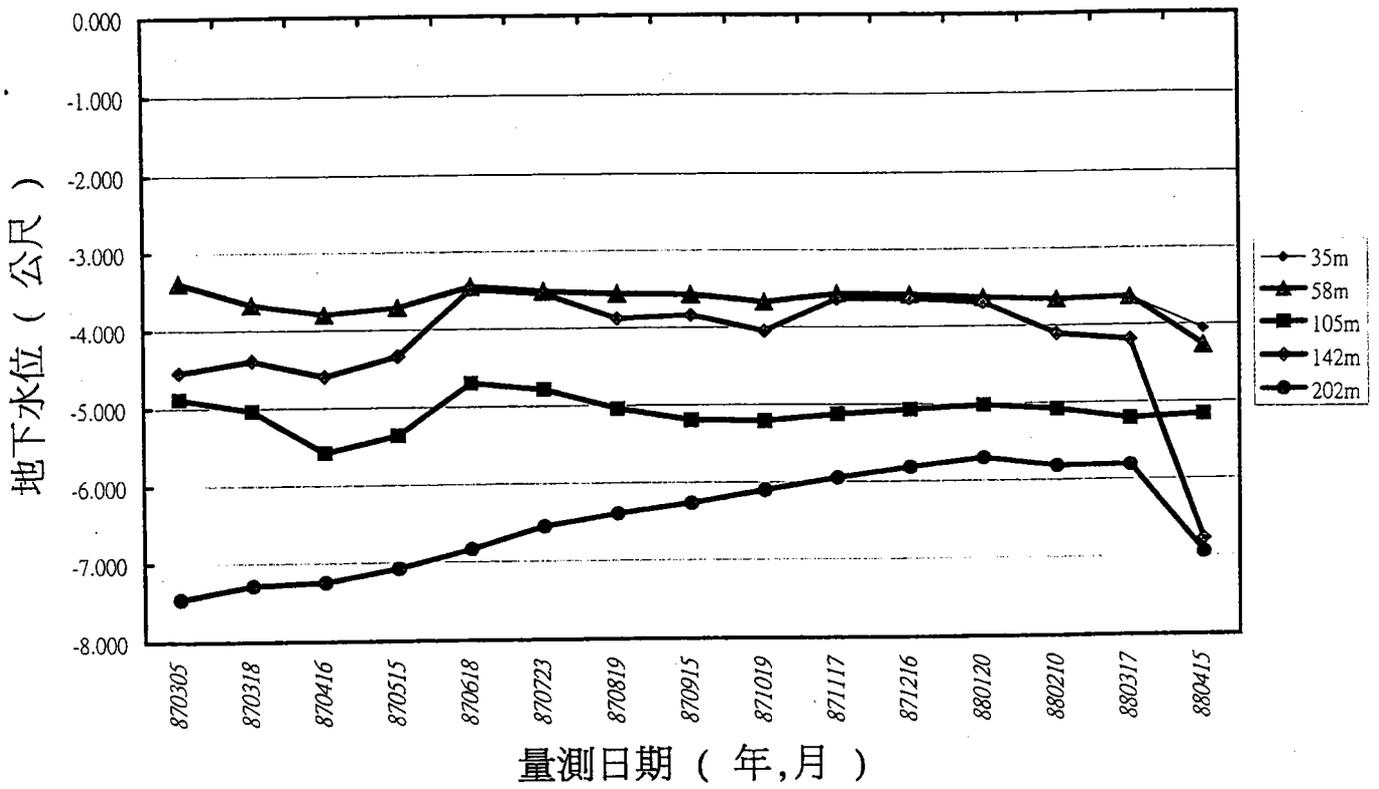


圖 5-12 屏東大鵬灣分層水位變化(手動量測)

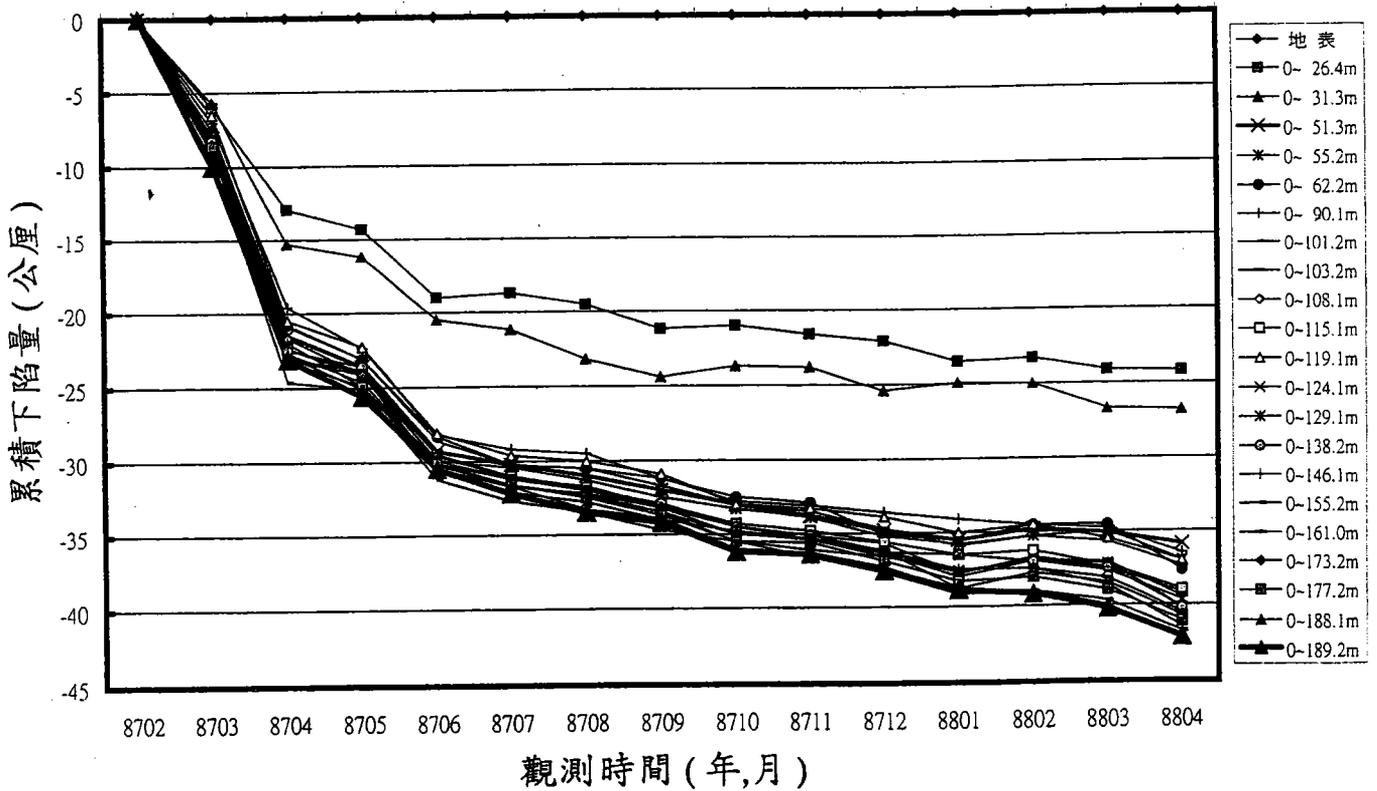


圖 5-13 屏東大鵬灣地層分層下陷觀測圖

## 六、結論與建議

1. 由布袋港之監測結果顯示：淺層地下水位變化不大，淺一層(34m)約在-3.3m~-3.7m間反復振盪，淺二層(68m)約在-6m~-8m間振盪，而深層之105m、131m及143m、178m處之地下水位已分別降至-24.7m及-25m，由此可知，布袋港區內並無超抽地下水之現象，而布袋港附近地區有超抽深層之地下水，致使港區之深層水位受影響而下降。布袋港86年一年之沉陷量約為5公分，87年聖嬰年降雨量充沛，水位較高，一年之沉陷量約為3公分，其中百分之五十以上之沉陷在深度140~200公尺處發生，因此在本監測深度200m之外，即較200m以上更深之處亦可能有沉陷發生，而且大多是深層沉陷。
2. 由安平港之監測結果顯示：8、120m 處之水位幾乎相似，僅在-1~-1.5m 間反復性之震盪，無多大變化，而 95m、148m 兩處之水位下降較為明顯，95m 處之最高水位-0.5m，最低水位為-2.5m，148m 處之最高水位-2.4m，最低水位-4.1m，95m、148m 兩處有超抽地下水位現象，而且在旱季時，水位下降至最低，表示旱季時，超抽地下水更為嚴重。安平港於 85 年一年沉陷近 8 公厘，86 年一年沒有沉陷，87 年因聖嬰年雨量充沛回脹 3.5 公厘，至 88 年 1、2、3、4 月再沉陷 1.5 公厘，因此從 85 年 4 月至 88 年 4 月 3 年期間，安平港沉陷總量 6 公厘，而其中 142~152m 之沉陷量 2.2 公厘，佔總沉陷量之 30%以上，由此資料顯示，安平港之沉陷屬於深層沉陷，且較 152m 更深之處仍可能有沉陷發生，因此安平港之總沉陷量應比監測所量測之壓縮總量還大。
3. 由台中港附近地區之監測結果顯示：台中港附近地區，自民國 65 年至 76 年，中層水位(79.6m)由 0m 反復震盪漸漸下降至-5m，而後幾年水位維持反復震盪之穩定，而深層水位(300m) 於 74 年至 76 年由 2.8m 下降至 0m，而後幾年水位維持穩定於 1.7m 附近，於 85 年水位又下降至 0m，自民國 74.5 年至 87 年共 12.5 年間，總下陷量 25 公厘，平均每年沉陷量約 2 公厘。

4.由大鵬灣之監測結果顯示：35m 及 58m 處之淺層水位變化不大，介於-3~-4m 之間，105m 處之中層水位變化亦不大，142m 及 202m 處之深層地下水位變化較大，142m 處之水位由-4.5m 漸漸上升至-3.7m 再下降至-6.9m,202m 處之水位由-7.4m 漸漸上升至-5.7m 再下降至-7m。87 年一年期間，大鵬灣沉陷總量 40 公厘，而其中地表至 51.3m 之沉陷量 35 公厘，佔總沉陷量之 87.5 %，由此資料顯示，大鵬灣之沉陷屬於淺層沉陷，另 87 年聖嬰年水位上升，沉陷速率較緩，至 88 年 2、3、4 月雨量較少，水位繼續下降，沉陷速率亦加大。

### 參考文獻

- 1.水利局(1996)「嘉義沿海地區地盤下陷檢測報告」。
- 2.賴聖耀、李豐博、陳志芳(1997)「安平港長期性地下水位變化與分層地層下陷監測研究」，港灣技術研究所研究報告86-研(十)。
- 3.賴聖耀、謝明志、李豐博、陳志芳(1998)「布袋港地層下陷監測研究」，第二十屆海洋工程研究研討會。
- 4.賴聖耀、李豐博、謝明志，(1993)「地下水位歷時性變化與地層歷時性下陷之關係研究」，第十七屆全國力學會議。
- 5.Becker,D.E.(1981),Settlements under intermittent loading on a clay subsoil, Ph.D.thesis University of Western Ontario,Canada.
- 6.Biot, M.A. (1941), "General theory of three-dimensional consolidation", J. of applied physics 12(2).
- 7.Lay,S.Y. & Hsieh,M.J.(1995)"The step-loading model of subsidence induced by groundwater level changes with time."Proceedings of the Fifth International Symposiam on Land Subsidence The Hagne.
- 8.Helm, D.C. (1975),"One-Dimensional Simulation of Aquifer -System

Compaction Near Pixley, California, 1, Constant Parameters", Water Resources Research, Vol.11, No.3, PP.465~478.

9. Terzaghi, K. (1943), Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons, New York.

# 地理資訊系統在港灣資料查詢之應用

謝明志\*

## 一、何謂地理資訊系統

地理資訊系統(Geographic Information System)，簡稱GIS，是一套應用電腦來處理地理相關資料的資訊系統，可視為一套電腦資訊的處理軟體。地理資訊系統之父Tomlinson曾說，地理資訊系統並不是一個獨立的研究領域，它是資訊處理與各種空間分析技術運用領域之間共同基礎。也因它涵蓋了多種領域的技術，所以要給予一個明確的定義也相當困難。一般而言，都認為GIS是一種資訊工具或資訊系統，可用來儲存及處理各種類型的空間資料，並給予適當的運用。國內學者施保旭曾表示：GIS的精神，在於它能夠將針對空間個體所得到的各種不同資訊加以整合。他也以軟體工具箱的角度，對GIS提出一個概括性的定義，他認為GIS乃是一組軟體，它可以使我們：

- 1.以數位化型式收集空間資料；
- 2.有效率的存取這些資料；
- 3.分析這些資料以得到衍生的資料；
- 4.以使用者方便有效的方式展現數位化資料。

以及

- 5.前述工具針對特定應用加以組合調適所得的應用系統。

而本定義的描述，從資料收集、整理分析、到需求應用，也正是一般GIS在業務運用上的發展程序。

---

\* 港灣技術研究所副研究員

## 二、地理資訊系統的應用

### 2.1 地理資訊系統能做什麼？

地理資訊系統能幫我們處理什麼業務？帶給我們什麼好處？這是每個使用者最先想要瞭解的。通常，它能為我們處理下列的幾個工作：

1. 圖資製作：將傳統的紙圖資料變成電腦檔案是一件相當吃重的工作，使用地理資訊系統工具，圖資的圖解數值化程序便可加以自動化，省時省力。
2. 資料更新：透過資料管理系統，電腦輔助繪圖工具，影像處理工具可更新貯存的資料，因為全為電腦檔案，修圖、套繪都變得輕鬆而精確。
3. 資料管理：利用電腦的硬碟、光碟、磁帶等貯存媒體可貯存大量的資料，並可利用資料庫來管理及運用這些資料。
4. 查詢分析：地理資料因為結合圖形與屬性資料，故在查詢分析時，要能夠同時針對圖形與屬性資料來進行。就查詢功能而言，主要包含簡單圖形與屬性資料選取、圖形與屬性雙向查詢、組合多重條件、進行複合查詢。就分析功能而言，主要包含有交集、差集、聯集分析、面積周長及距離度量、環框分析、資源偵深、網路分析等功能。
5. 資料展示：查詢分析的結果，可以透過電腦顯示器及繪圖機加以展示，資料展示方式包含有主題圖製作、統計圖表製作、圖形比例輸出控制、圖例製作、及成果配置圖製作等方式。
6. 決策支援：決策者可以利用地理資訊系統，做多種模擬分析，可客觀、公正的產生各種替選方案，以作最佳決策。

## 2.2 地理資訊系統的應用範疇

地理資訊系統因為涵蓋了各種相關部門的研究領域，也因此具備了極為廣泛的應用範疇，舉凡電腦製圖、都市規劃、國土計劃、地籍管理、土地稅徵收、自然資源分析及管理、交通運輸網路規劃、國防應用(如飛彈導引)，警車及消防車路線分派、學區規劃、工程應用、公共設施選址、汽車領航系統等。電信、電力、瓦斯、自來水、油氣等管線規劃與管理、旅遊導遊、山坡地開發規劃設計、商圈分析、及環境監控與管理等，均可以利用地理資訊系統來輔助。任何部門或單位，只要其相關業務中與地理資料有點關聯的，都可以應用地理資訊系統來協助工作的進行。

## 三、港區下陷應用系統之建置

### 3.1 應用系統建置目的

由於地層下陷及地質分佈資料之獲得常需大量的人力、物力、財力及時間，故取得不易，因此須有計劃的統整典藏各有關單位的珍貴資料，以避免因管理不善而造成資料的損毀或遺失。

地理資訊系統能做大量而有系統的資料儲存工作，並可提供快速且有效的查詢作業服務，真正達到資料共用共享的益處，且未來新的資料又可迅速的補充，使資訊的流通更為便捷。港區的地層下陷及土層分佈資料建檔完成後可達到下列目的：

- (1)工程依據：提供爾後港灣規劃、設計及工程研判上的需求。
- (2)學術資料：可供各學術單位從事研究、分析所需的基本資料。

### 3.2 主要建置工具

依據資料建檔工作所需具備之軟體基本功能，本研究採用美國MapInfo

公司所發展的地理資訊系統來作為資料處理之主要軟體，該系統為視窗操作軟體，採用下拉式功能表模式，操作程序層次分明且極具效率，可提供使用者快速搜尋而取得所需要的功能。本研究另外採用MapInfo公司所提供的使用者發展語言環境—MapBasic，來開發港區地盤下陷資料查詢展示系統。

### 3.3 資料庫架構

本系統建置了兩類資料庫表格檔存放標準貫入試驗相關資料，將各鑽孔之座標、高程、試驗公司等抬頭資料存放於Welldata.dbf資料庫表格檔內，此表格檔存有28個欄位，存放於以港區英文名稱命名的目錄下，該表格檔除了存放這些基本資料外，還可利用SQL選取方式，選擇Tag\_Key,Pos\_x,Pos\_y等三個欄位之資料，建置出一新的檔案，再由此新檔案製作出鑽孔位置分佈地圖檔。

另外，以Welldata.dbf的索引標籤(Tag-Key)欄位資料，做為該鑽孔之試驗資料檔案名稱，所建置的資料庫表格檔共具有18個欄位。為了資料庫編輯的作業方便，這兩類資料庫都先用Foxpro或Access建檔，再轉入MapInfo內使用。

本系統另建置一資料庫表格檔存放歷年下陷調查相關資料，(目前建置嘉義沿海地區資料)，該檔案命名為pd\_stl.dbf，共建置13個欄位，內容包含樁號、地點、座標及調查年份等欄位。調查年份欄位資料錄內登錄當時之測樁高程值，單位為公尺，該資料錄若遇有資料遺失或為新增測站站(即早期尚未在該站實施量測調查)則登錄為"None"，以和高程零值有所區別。

### 3.4 查詢規劃及選單設計

本系統利用MapBasic使用者發展語言環境來設計土層下陷資料查詢展示軟體，為求資料查詢的簡易親和，本系統將查詢界面設計成選單選項方式，主選單計有八大項，分別為數(1)地盤下陷資料(2)鑽探資料(3)荷式錐資料(4)

分層觀測資料(5)港口自然條件(6)查詢統計(7)出圖視窗(8)圖層及視窗控制。

其中前五項為下陷及地質條件等資料之查詢選項，後三項為資料統計及視窗控制等功能選項，各主選單可利用滑鼠下拉出次選單。由於次選單項目名稱都儘可能簡潔，為讓使用者能明白各選項之功能，乃設計選項說明輔助功能，當使用者將滑鼠移至次選項欄位內時，相關該選項之說明即會以文字顯示在視窗左下角之輔助說明欄內，如此可讓使用者更容易明白該選項之功能，提升查詢作業之正確性。

### 3.5 程式設計組織架構

本查詢程式分成十一個模組，各模組包含不同的副程式及函式，所有模組分別編譯(Compile)後，再利用MapInfo的專案檔案(Project file)方式，將這些模組聯結(Link)成一個執行檔，即可提供系統作為執行查詢使用。

## 四、系統成果展示

### 4.1 地盤下陷資料查詢

查詢系統第一主選單項目名稱為「地盤下陷資料」，可查詢下陷災害紀錄及下陷圖文資料，此選單計有十個選項，其重要內容及查詢方法如下：

- (1)下拉此選單之後，第一選項為「查詢災害照片」，用滑鼠點選此選項，螢幕左下角會出現一紀錄照片選取視窗，視窗抬頭欄內會有文字提示：請點選下陷災害照片，可用滑鼠在此視窗內連續點選不同編碼之照片選項，相關編碼之記錄照片會依點選順序在螢幕左上、右上、左下方依序顯示出來。
- (2)第五選項為「顯示檢測點位置圖」，點選此選項則螢幕會展繪出嘉義沿海地區歷年下陷檢測樁之位置，此為水利處歷年地表高程檢測資料。若欲查詢相關檢測數據，可點選第七選項「檢測點數據資料表」，若欲查知某一

測點之歷年下陷點積變化，可先由測樁位置圖上點取該測樁，再點選第八選項「展繪檢測點歷年沉陷資料」，則系統會自動開啓一繪圖視窗，繪製該測點之下陷變化圖。使用者可點選其它檢測點，繼續查詢不同檢測點的下陷變化情形。

- (3)系統除了提供單點資料查詢外，使用者若欲查知近幾年來大面積的下陷變化，如何處較嚴重？何處較輕微？使用者可點選第九選項「展繪等量下陷圖」，則系統會展示出近幾年的等量下陷區域圖，由該圖可得知嘉義沿海下陷量最大的地區，是位於布袋及東石之間，若欲結束此項查詢作業，可點選第十選項「關閉等量下陷圖」，則系統隨即結束該項查詢而跳回主畫面。

## 4.2 地質鑽探資料查詢

查詢系統的第二主選單項目名稱爲「鑽探資料」，可查詢港區附近的鑽孔地質資料及強震下之土壤液化分析，此選單之下計有十個選項，其重要內容及查詢方式如下：

- (1)此選單之第一選項爲「顯示鑽孔位置圖」，點選後螢幕主畫面港區地圖上隨即出現各個鑽孔位置之標示符號，該符號爲藍色實心圓點。使用者可用滑鼠點選所欲查詢的鑽孔，來查看該鑽孔的報表資料及展繪該鑽孔的柱狀圖。
- (2)每一鑽孔之鑽探資料，可用文字或圖形方式來展示。文字資料之資料之展示，係設計成一般鑽探資料之報表格式，使用者在鑽孔位置分佈圖上，先利用滑鼠選取所欲查詢的鑽孔，再下拉「鑽探資料」選單，點選第三選項「鑽孔資料」，系統會從資料庫內抓取該鑽孔資料，依循鑽探報表格式在一新開視窗上填註各項資料，使用者可由此查獲該鑽孔之各項試驗數據。
- (3)鑽探結果之圖形展示，係循鑽探深度將各土層按其類別用不同顏色及圖樣繪製成柱狀圖形式，並標示各深度之錘擊強度值(即SPT-N值)。查詢方式仍

須先用滑鼠在鑽孔位置分佈圖上選取所欲查詢的鑽孔，可選單孔作單孔柱狀圖的展繪，也可一次選取多孔作多孔柱狀圖展繪，(使用者只需在選取第一孔後，按住鍵盤<shift>鍵，則可繼續選取其它鑽孔來作多孔展繪)。鑽孔選取完畢，下拉「鑽探資料」選單，點選第四選項「柱狀圖」，再點選柱狀圖展繪排序方式，系統會從資料庫內抓取各鑽孔資料來繪圖製所選鑽孔之柱狀圖。

### 4.3 分層觀測資料查詢

本研究在布袋港區架設了一口深度200m的分層觀測井，在井內各個深度裝置沉陷觀測環，並在井旁埋設不同深度的水壓量測計，工作人員定期前往該處量測下陷環之位移變化並收錄水壓資料，相關資料之查詢方式如下：

- (1)本系統第四主選單「分層觀測資料」內，設計了四個選項，第一選項為「觀測井位置顯示」，點選此選項，觀測井之塔式標誌隨即顯示在地圖上，由該圖得知，該觀測井位置座落在新生地北岸偏西的地方。
- (2)分層觀測資料主要包含水壓資料及沉陷資料，可分別由第三及第四選項選取查得，由於該兩筆觀測資料由現地量測攜回後，在室內都利用微軟公司的Excel軟體進行分析及製圖，故在查詢系統的設計上，也利用程式語言直接叫用Excel，而在Excel上直接展示這兩筆觀測資料的成果。若欲結束分層觀測資料之查詢，可直接關閉Excel，螢幕則會跳回查詢系統之原先畫面。

## 五、結 論

1. 下陷及港區地質水文等相關資料之獲取，常需耗費大量的人力經費及時間，取得極為不易，這些珍貴的資料，值得有系統的加以收集整理，一來避免資料散失，二來可作港區規畫及工程維護之參考依據。
2. 資料除了作有系統的收集整理及建檔貯存之外，更需善加利用暨有資料，如加增分析功能以及提供主事者方便調閱查詢，以達決策支援之功效，故

本系統利用MapInfo地理資訊系統及MapBasic程式語言撰寫查詢分析系統，以提升資料的使用價值。

3. 由布袋港之地層下陷監測結果顯示：布袋港一年之沉陷量約為5公分，其中百分之五十以上之沉陷在深度140~200公尺處發生，因此在本計劃監測深度200m之外，即較200m以上更深之處亦可能有沉陷發生，亦即布袋港每年區域性之沉陷可能大於5公分，而且大多是深層沉陷。
4. 港區資料包函廣泛，目前本計畫僅建置下陷、地質以及概述性的海氣象資料，更細部的風潮波流等特性分析資料，或土地利用、人文景觀、社經條件資料之建置分析，尚待後續計畫之繼續努力。

## 六、參考文獻

1. 水利局(1996)「嘉義沿海地區地盤下陷檢測報告」。
2. 港灣技術研究所(1998)「布袋港地層下陷監測與地質建檔研究」，港灣技術研究所研究報告87-研(八)。
3. 謝明志，單誠基，賴聖耀，李延恭(1997)，「地理資訊系統在港灣工程資料查詢展示之應用」，第十九屆海洋工程研討會，pp.627-632.
4. 謝明志，賴聖耀，李豐博，陳志芳 (1998)，「地理資訊系統在地層下陷及土壤液化分析之應用研究」，1998年中華地理資訊學會學術研討會。
5. 施保旭(1997)，「地理資訊系統」，儒林圖書公司。
6. 邱景升，周宜強(1995)「地理資訊系統入門與應用-MapInfo」，松崗圖書公司。
7. Shan,C.C., M.J.Hsieh and G.Y.Chug (1998),"GIS Approach on Kaohsiung port facilities management", KaoPort 21 ,1998 International Conference on Shipping Development and Port Management, Taiwan, Kaohsiung.

# 近岸結構物基礎沖刷破壞與保全

邱永芳\*

## 一、前言

近十年來常有人們提出往昔從自家門口到海邊至少有二三百公尺以上漂亮的沙灘，至今家門口的沙灘不見了，海水直到家門口，兒時海灘戲水及捕魚的情景只有在記憶中追尋，而為下一代沒有漂亮的沙灘與美麗的海洋可以擁抱嘆息，更恐怕失去海洋民族的性格與特質憂心忡忡，這些嘆息與憂心再再表示台灣海岸逐漸在消失與近岸國土流失的嚴重性，為讓逐漸消失的海岸線不再消失，更期望找回消失的海岸線，探究其發生原由與提出保全對策，應為當前積極從事海岸保全重要的研究課題。

地形水深之改變主要受波浪作用而引起，歷年來的自然海灘會受波浪長期作用而形成較平衡的狀態，常因近岸結構物之構築而破壞其自然平衡形成局部區域的堆積和局部區域的侵蝕，通常在堆積區域由於水深變淺而致使波浪破碎，其碎波線會往外海移動，自然對於近岸的破壞即減少。相反的如發生侵蝕現象時，通常會使得海底坡度變陡。水面線往陸側移動，碎波線亦往陸側移動形成波高因地形變陡突然加大，波能較未侵蝕前增加，即波能與動能皆驟然增加，對海岸線與海岸結構物之破壞自不在話下。

基於以上討論得知近岸漂砂移動在長期波浪作用下自然海灘皆會達到平衡狀態，自然平衡如受外加結構物或加入其他破壞平衡的機制便會形成局部性的不平衡即局部堆積和局部侵蝕出現，或區域性的不平衡，即大區域的地形變化，由於海岸受侵蝕自然對於保護性結構物本身的基礎沖刷，受有破壞性的結果出現。為使得海岸穩定與結構物基礎不受沖刷破壞，局部性保護和全面性保護皆需有良好的對策。本文將針對近岸保全常用結構物之種類，基礎破壞方式原因和目前台灣發生的實例及其及保護方法做一詳述說明。

---

\* 港灣技術研究所海岸工程組組長

## 二、近岸保全常用結構物之種類

保護海岸常用之結構物為(1)海堤(Seawall)，(2)護岸(revetment)，(3)突堤(防沙突堤 groins)，(4)離岸堤(offshore or detached breakwater)，(5)潛堤(submerged breakwater)，各種結構物說明如下：

### 2-1 海堤、護岸

海堤、護岸（圖 1）乃為保護生命財產及陸地被波浪沖蝕，大約平行於海岸與海陸交接處興建之結構物。如結構物背後即為陸地而堤高僅略高於陸地者稱為護岸(revetment)，而海堤(seawall)則為高出地表設立於灘線附近防止海水侵入陸地阻擋暴潮及波浪之結構物。建設海堤或護岸目的在阻止暴潮時海水入侵陸地，同時防止陸地被海浪沖蝕。海堤為廣被採用之防止侵蝕之海岸工法，其原因可能由於海堤、護岸在直接感覺上較有安全感，並可遏阻灘線後退，同時因施工方便且工程費用較其方法低廉。

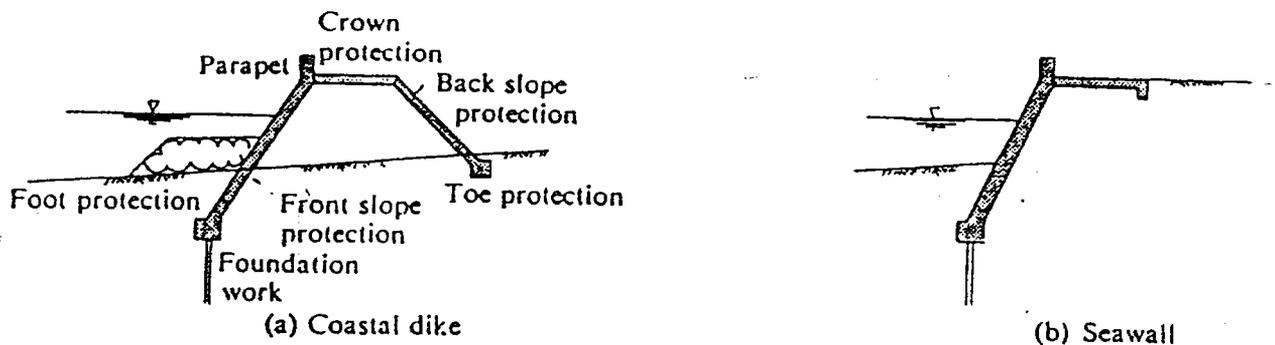


圖 1 海堤與護岸形式

海堤、護岸如依外型分類可分為傾斜堤與直立堤。傾斜堤能將載重分佈於較廣面積，對基礎土壤之要求較不高，施工也較容易，並易於擴建加高維護。直立堤多依賴重力保持安定，除沉箱外亦有方塊，以中、大水深處採用較宜，對施工經驗及技術要求較高。

## 2-2 突堤（如圖 2）

突堤（groins）為大約垂直或垂直於海岸線，由沙灘向海興建突出海岸之結構物，用以攔截沿岸漂沙，控制海灘地形、改變海岸線方向、阻擋沿岸流或壓迫潮流方向，減小海岸侵蝕。

突堤依其機能之不同分為三類：(1) 不透過堤與透過堤；(2) 高堤與低堤；(3) 固定式與調節式。透過堤的優點為 (1) 反射波小、消波效果大；(2) 沿岸波能量小；(3) 堤址沖刷小；(4) 維護容易；(5) 漂沙可輸送至下游側，可獲沙源補給而減少侵蝕。其缺點為 (1) 堤體材料散亂；(2) 攬蓄沿岸漂沙的效果減低。高堤能完全攔截漂沙，低堤則在下流側可獲沙源，減少親蝕發生。突堤使用材料有拋石、混凝土塊、板樁等。

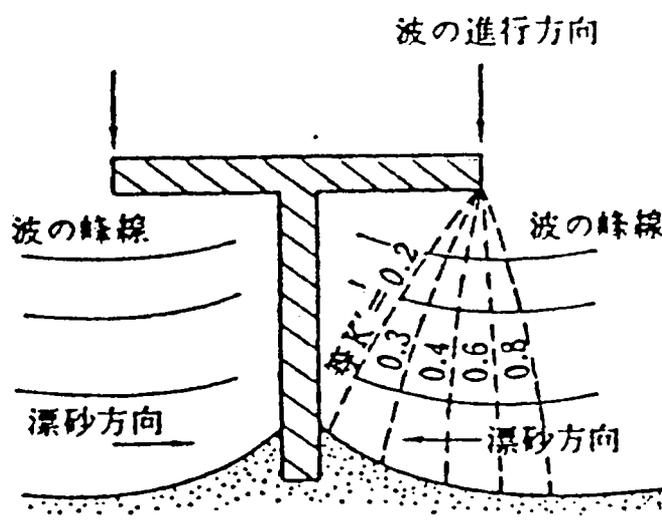


圖 2 T 型突堤

### 2-3 離岸堤（如圖 3）

離岸堤（**detached breakwater**）為一離開陸地，平行海岸線之堤防，能使波浪在堤前減衰，漂沙在堤後堆積，間接發揮安定海灘之功能。一般而言，離岸堤工程費高，施工不易，維護費可觀，以往海岸保護甚少採用離岸堤。

近來來各先先進國家佈設離岸堤之安例已日漸增多，究其原因如下：（1）以往施設離岸堤地區，大部份能發揮防護功能。（2）過去對侵蝕海岸的防護措施以海堤為主，最多再補以突堤，但效果未臻理想，故思代以新工法。（3）海岸地帶因經濟繁榮，大幅開發利用，不宜在該地帶施設防護措施，故設置離岸堤達到安定海灘目的。（4）沿海地區相繼加速開發，人口集中，足以負擔較高工程費；且近年施工技術進步，海中施工已非難事。

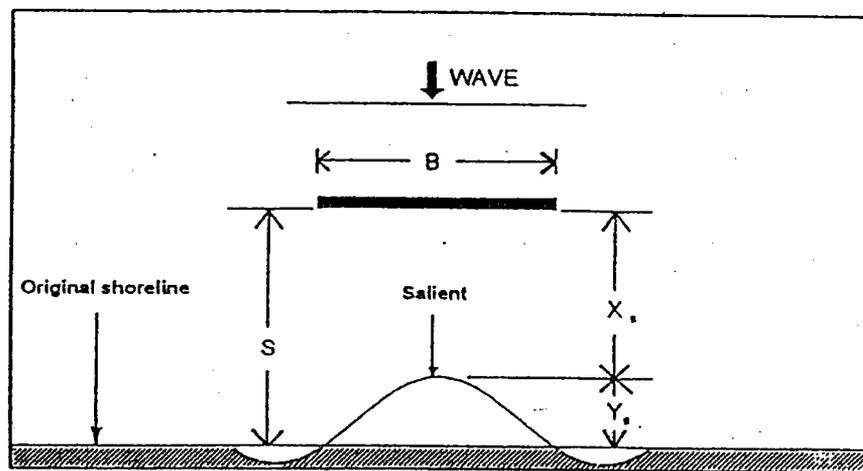


圖 3 離岸堤佈置示意圖

### 2-4 潛堤（如圖 4）

潛堤（**submerged breakwater**）為凡離開陸地，平行或近似平行於海岸線，建造於海中且不露出水面之構結物，亦可稱之為潛礁。

潛堤的種類依其外型可分為線形潛堤及非直線形潛堤；若依堤高可分為

高潛堤及低潛堤；依堤頂寬可分為一般潛堤及寬頂潛堤；如依結構物之可變性可區分為剛性潛堤及柔性潛堤；如依堤列數區分可分為單列式潛堤及複列式潛堤等。

潛堤之消波性能雖然無法與突出水面之離岸堤相比，但其消波性能可因潛沒深度、堤寬、堤群數及位置而異，因此如能予以適當的調整，仍可達到與離岸堤相同的功能。

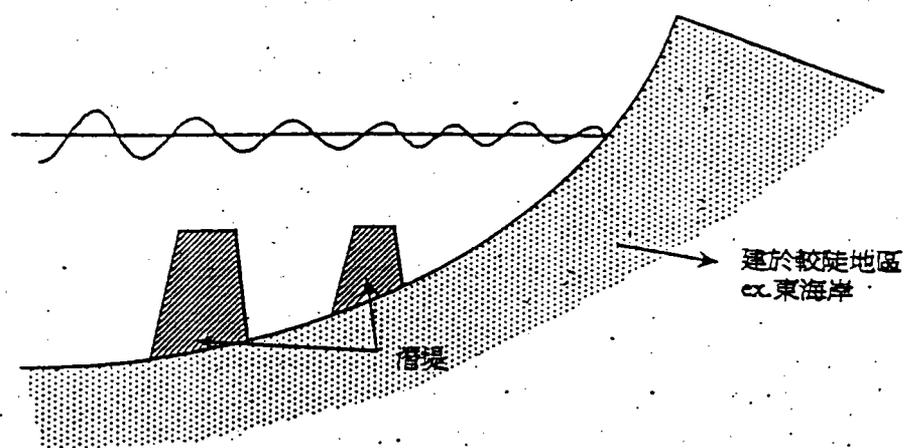


圖 4 複列潛堤示意圖

### 三、基礎破壞方式原因與實例

依以上討論之結構物其建造之型式分成如下點討論：

#### 3-1 沉箱式合成堤破壞機制

由世界上超過 40 座直立式合成堤破壞的經驗再一次分析的結果，歸納其破壞型態的法則如圖 10.7 所示。防波堤破壞的型態主要分成全面破壞與局部破壞二個主要型式，其中全面破壞型態可細分為拋石部的滑動破壞、直立部

的海側傾斜破壞、拋石部的滑動破壞和陸側傾斜破壞等四種主要破壞型態。局部性破壞可細分為海側和陸側邊緣上的沖蝕破壞、沉箱在海陸兩側底座的孔洞破壞、海床沖刷和堤趾沖蝕破壞等三種。從這些破壞的型態欲找出其破壞機制相當困難，因為在整個破壞過程牽涉到水力、大地和結構等機制的交互作用影響，且又無法使用靜力學的觀念做合理而單純化的歸類與解釋，因此提出下列課來進一步探討直立式合成堤在未來做設計時應注意的問題。

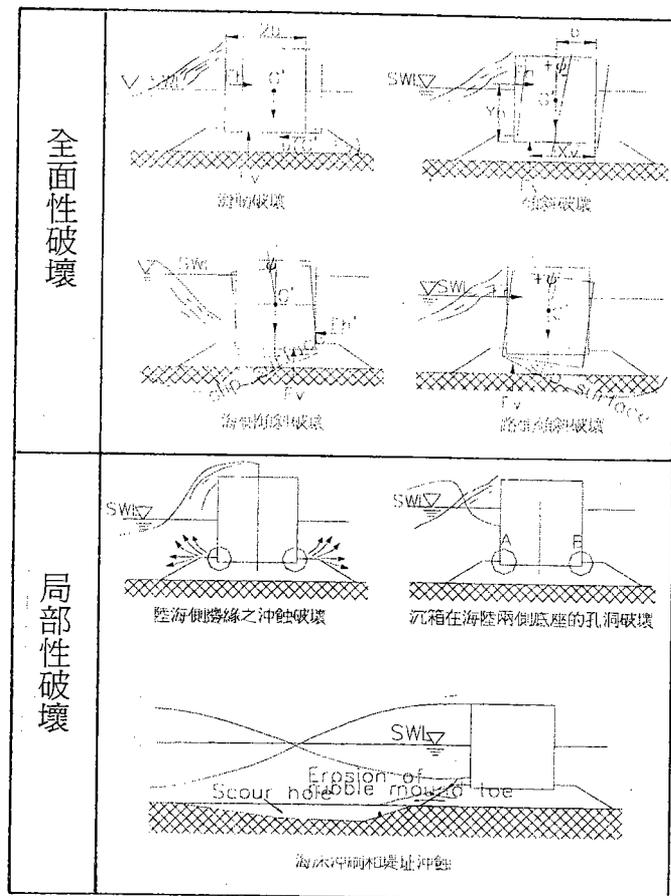


圖 5 合成式防波堤破壞型態

### 3-1-1 以波高做為設計準則

在正當與極端兩條件下的結構行為設計，應放棄以設計波高做為設計準則，應以設計波力做設計準則。其中準則應考慮到由單一最大波所引致的突

然破壞和由經常性的反覆作用力所引起的基礎脆弱性的增加等二個問題。事實上舊的直立式合成堤的破壞經常由超過設計波條件的湧浪所引起的，近期更明白防波堤破壞有些是由於波浪起過設計波條件，而某些即便波浪略小於選定的設計條件亦會發生防波堤破壞。

### 3-1-2 反射式防波堤

即使在深水域亦須經常考慮直立壁面上碎波的可能性。實際上，在引起防波堤破壞的嚴重風暴中經常會發現碎波，而此碎波又具有相當的不規則性和波峰相當短的特徵。碎波衝擊力仍是破壞最重要的原因。

### 3-1-3 越波

從防波堤損壞報告中顯示，所有的倒塌結構物皆有越波，大部份發生嚴重的越波之低胸牆結構物皆向海側傾斜而不是向陸側傾斜，然而引起這種破壞型態的外力和機制至今仍然不清楚。儘管如此，有很清楚的證據顯示，越波現象是結構破壞很重要的原因，故需視為重要的設計條件。

### 3-1-4 底床沖刷，堤趾沖蝕和地層變形

垂直壁面具高反射率的特性，海床沖刷及堤趾沖蝕構成一個很重要的防波堤破壞的原因，必需適當的在設計時加以考量。颱風延時和在極短暫時間內連續發生二次暴風浪，同時在此期間內防波堤無法及時修復的發生機率是設計防波堤時應考慮的重要參數。基礎的動力荷重效應在分析上須做適當的考量，尤其是單一最大衝擊力和反覆作用波力，亦即在地層穩定分析時應不限定於僅使用舊式的基礎承载力靜態分析。例如在討論基礎脆弱性的增加時，必須考量整體性的動態分析。

### 3-1-5 設計方法須整體性考量

由大部分防波堤破壞的型式已經明白顯示，破壞主要與波浪作用力的自然動態和瞬間的水土現象有關。此現象包括水、土壤和結構物間的交互作用。

目前迫切需要有新的設計方式，而此設計須顧水力、土工和結構相互間關聯性。

### 3-2 拋石堤破壞型態

斜坡式防波堤整體穩定包括靜動荷載作用下，結構和基礎的穩定。動荷載是由地震和波浪所引起，其引致防波堤的沉陷和海床沖刷。基礎沉陷會造成整個防波堤的變形，亦會造成某些塊體的斷裂覆面層的破壞。即使不考慮結構的影響，沉陷也會使波浪對胸牆的作用力增大並加大越波量。此類破壞會有相互影響性，其破壞性型態可分為(1)覆面塊體滾落或損壞(2)覆面層滑移(3)胸牆滑移(4)越波造成港側坡面沖刷(5)堤腳沖刷(6)基礎破壞(7)堤心石流出(8)超孔隙水壓引起的滑移(9)海底沖刷，其破壞之各部型態如圖 6 所示：

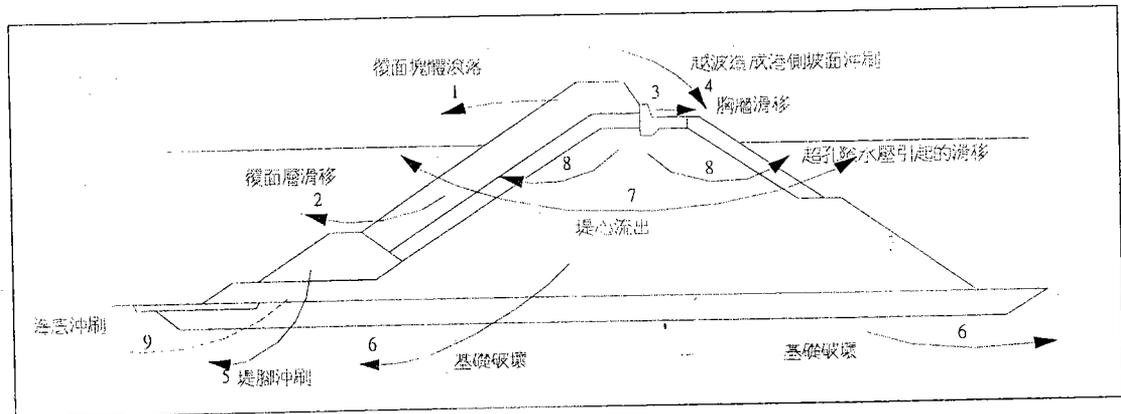


圖 6 拋石堤破壞型態

### 3-3 離岸堤破壞

花蓮海濱海岸經 80 年 6 月建好後一年即產生堤前沖刷基礎破壞如圖 7 為  
 花蓮海岸地理位置與歷年海岸線之變遷，圖 8 到圖 13 為斷面之地形變化圖。

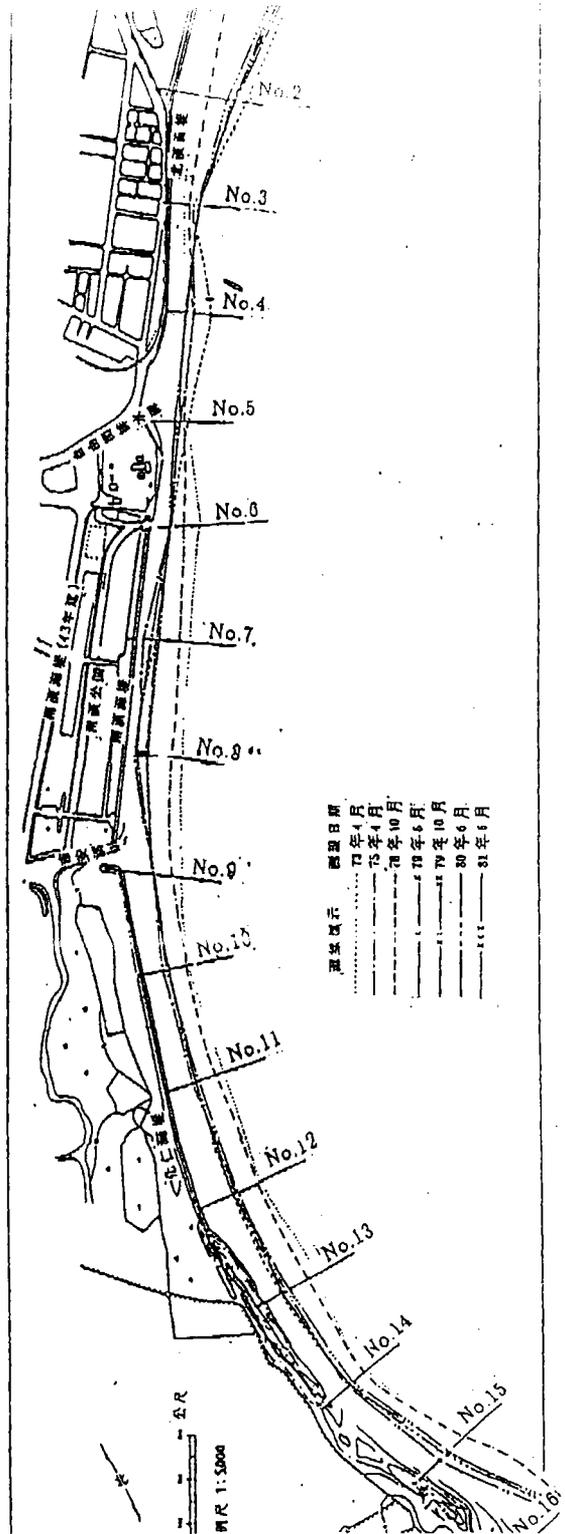


圖 7 花蓮海岸地理位置與歷年海岸線之變遷

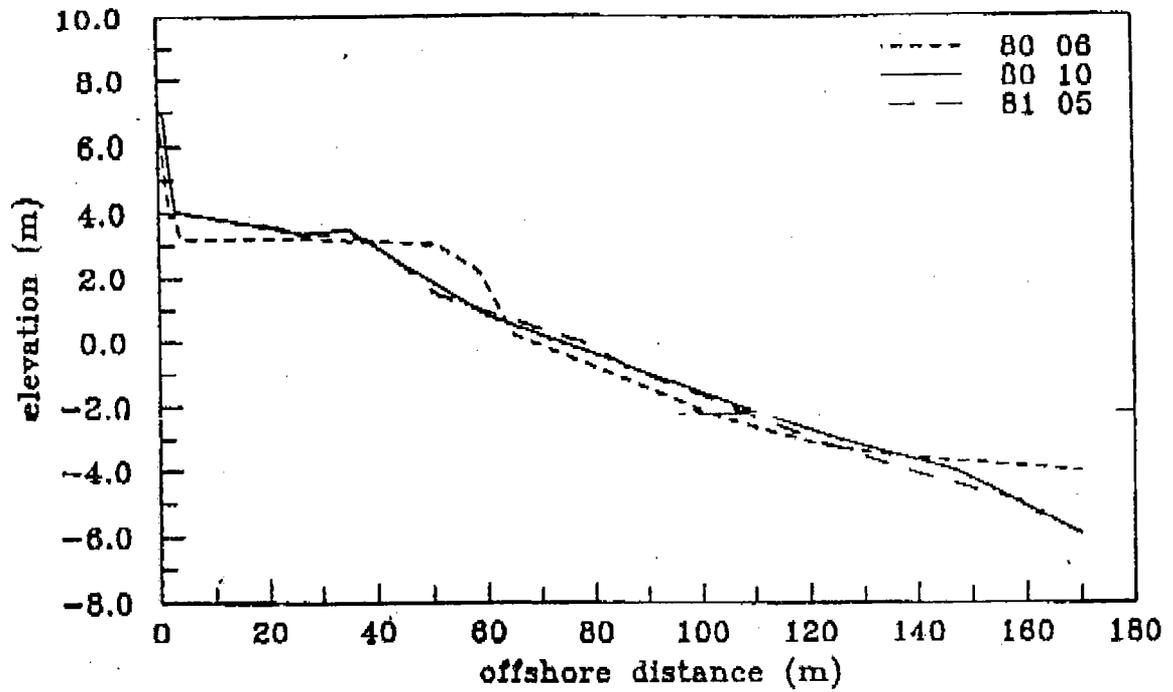


圖 8 No.5 断面之歷時變化

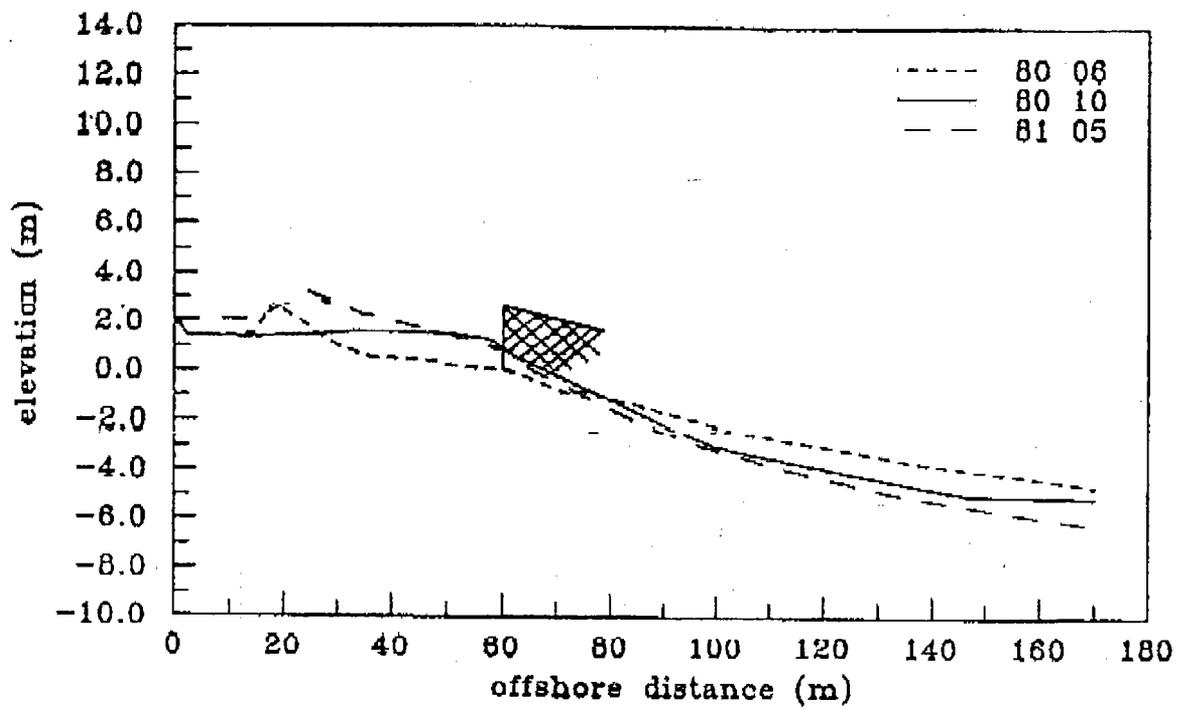


圖 9 No.6 断面之歷時變化

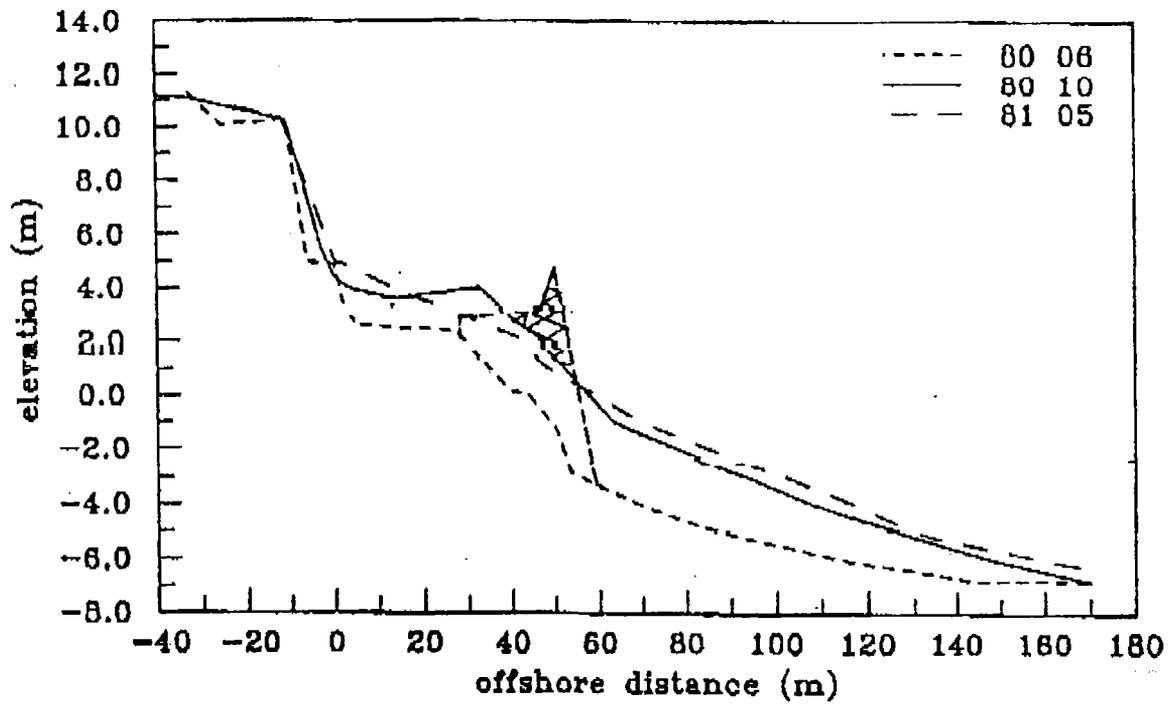


圖 10 No.5 斷面之歷時變化

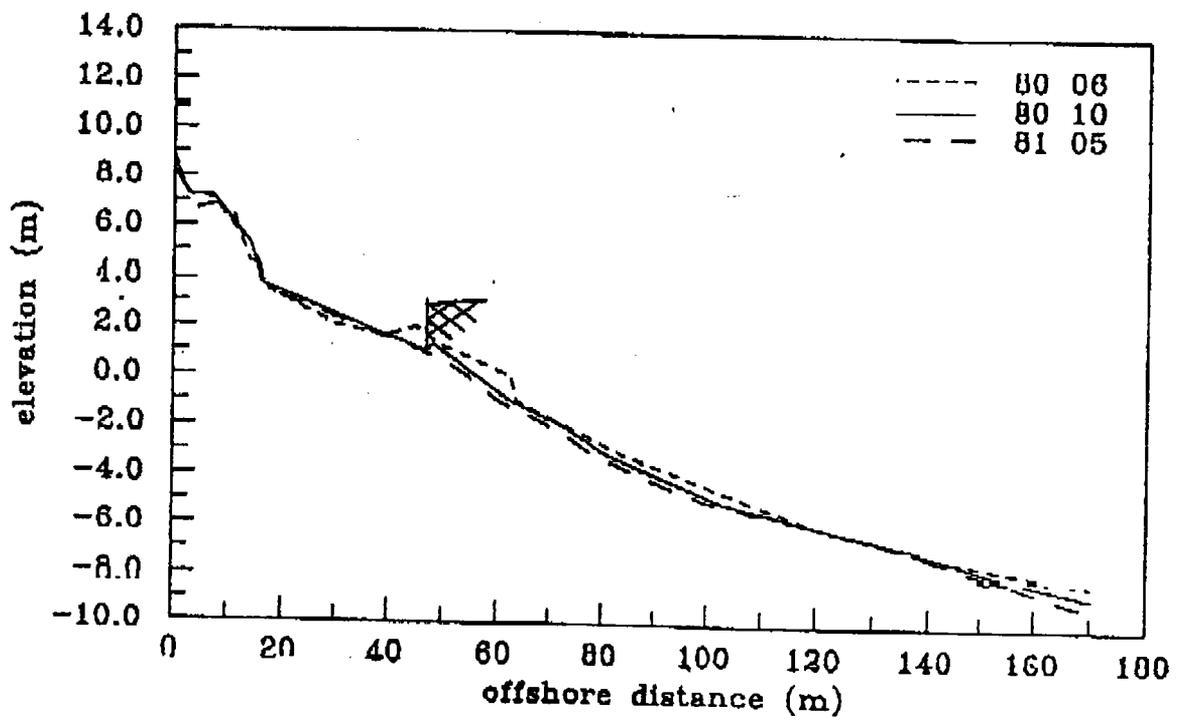


圖 11 No.6 斷面之歷時變化

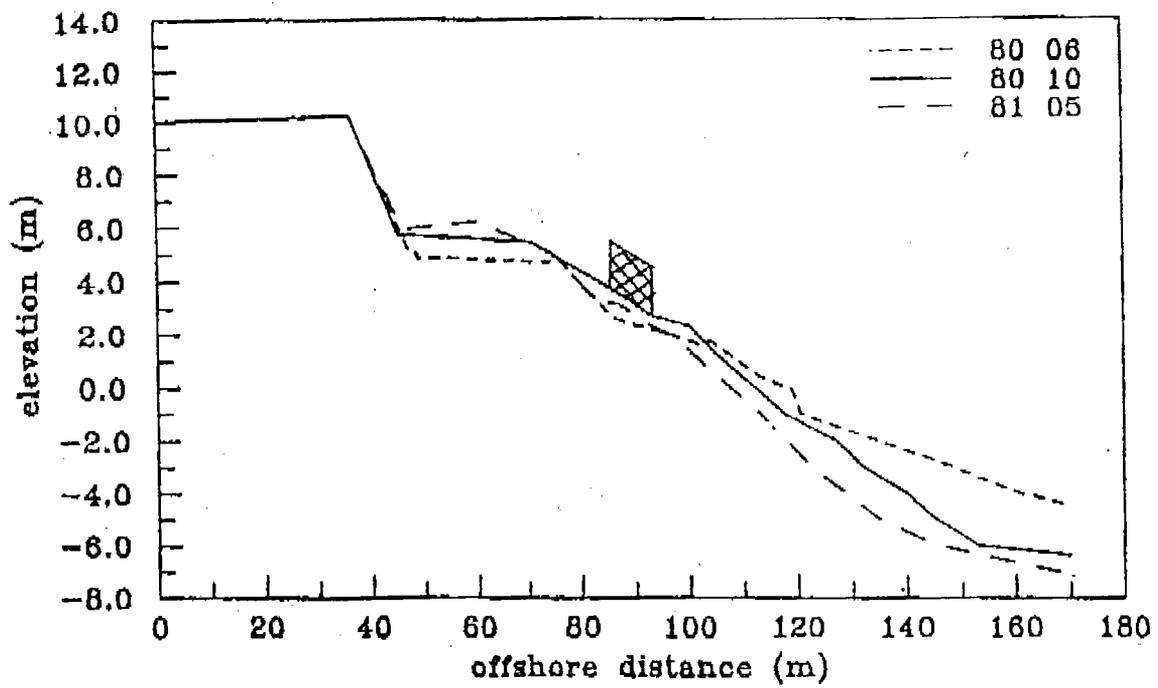


圖 12 No.5 斷面之歷時變化

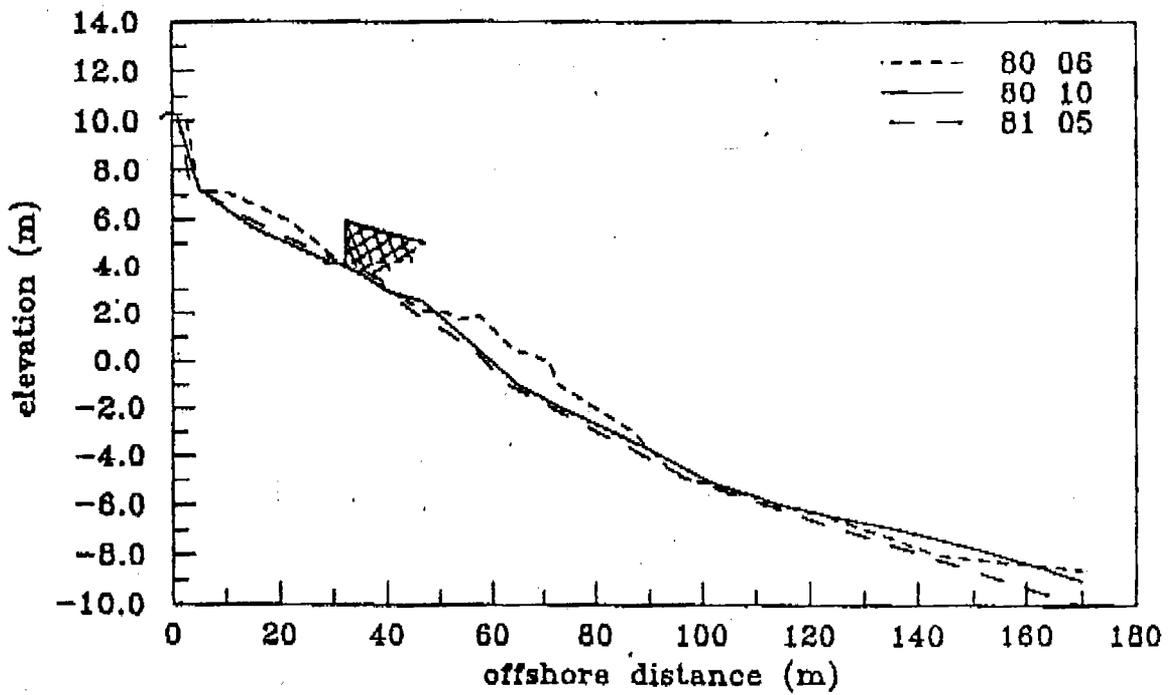


圖 13 No.6 斷面之歷時變化

### 3-4 海岸破壞

圖 14 至圖 19 為花東海岸台十一線海岸受波浪作用而引起的破壞。



圖 14 43k+680 湧浪侵蝕路基情形



圖 15 43k+680 湧浪侵蝕路基情形



圖 16 87.10.27 芭比絲颱風 43k+580~+700 路基受損情形



圖 17 87.10.27 芭比絲颱風 43k+580~+700 路基受損情形

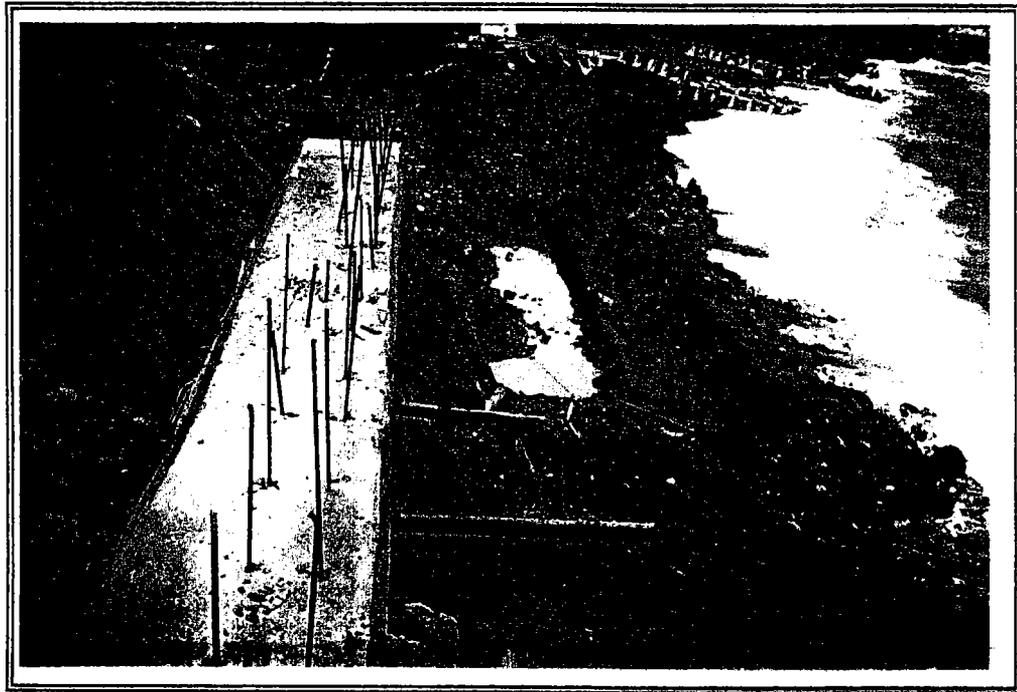


圖 18 43k+680 路基受損及漁港拋放消波塊情形

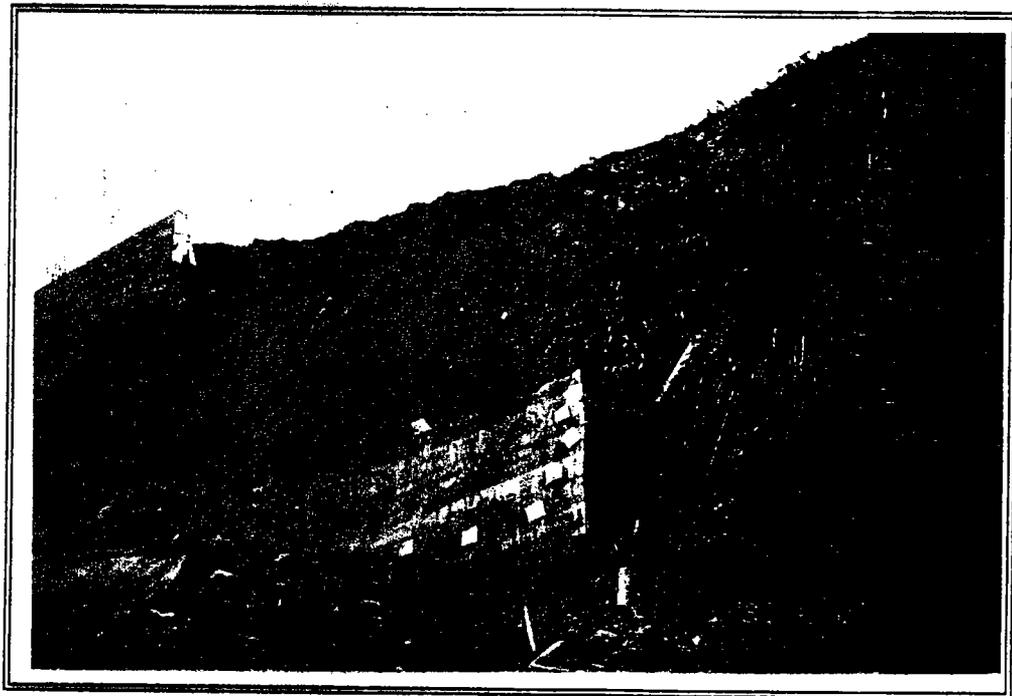


圖 19 43+680 擋土牆崩塌情形

### 3-5 護岸基腳破壞

護岸基腳以消波塊保護，因受侵蝕作用消波塊移位破壞，影響護岸之安全性。



圖 20(a) 護岸基腳破壞



圖 20(b) 護岸基腳破壞

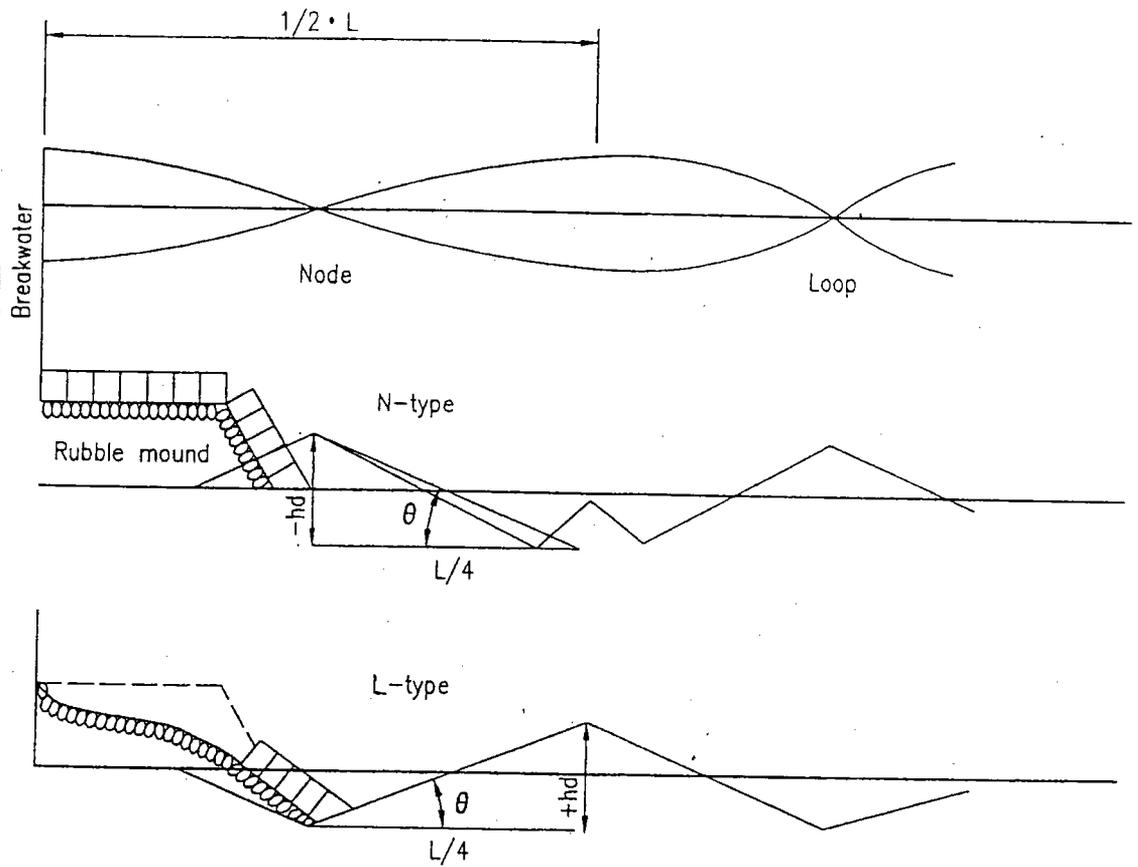


圖 21 堤腳冲刷之型式

### 3-6 堤後破壞

彰濱工業區水防道路受颱風過後，堤後因孔隙水壓力作用，水壓力將堤後地下不透水不織布撐破而形成漏沙，路面凹陷如圖 22 至圖 28 所示。

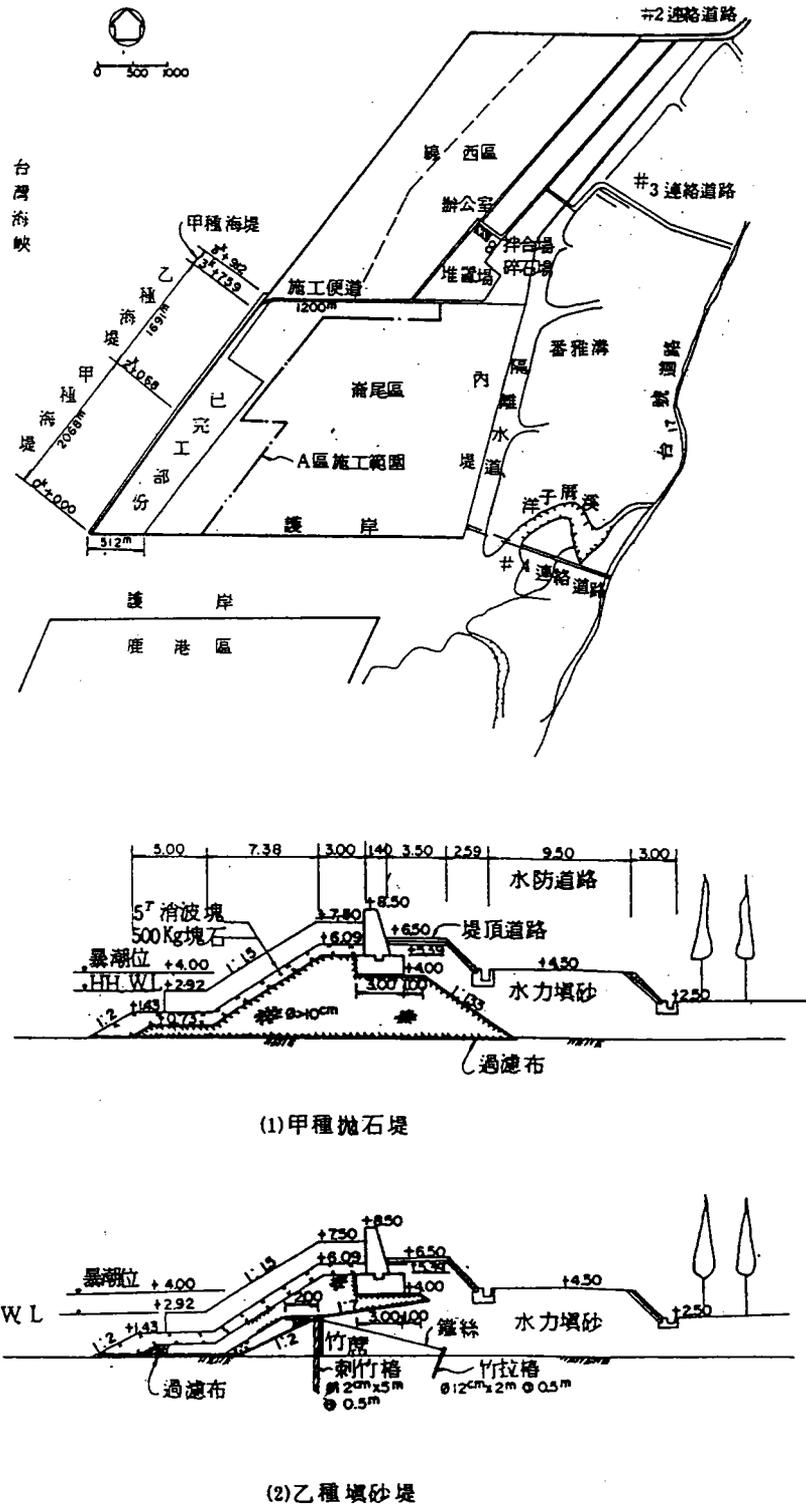


圖 22 崙尾區海堤位置及海堤斷面原設計簡圖



圖 23 A 孔水漬附近之撕裂破損

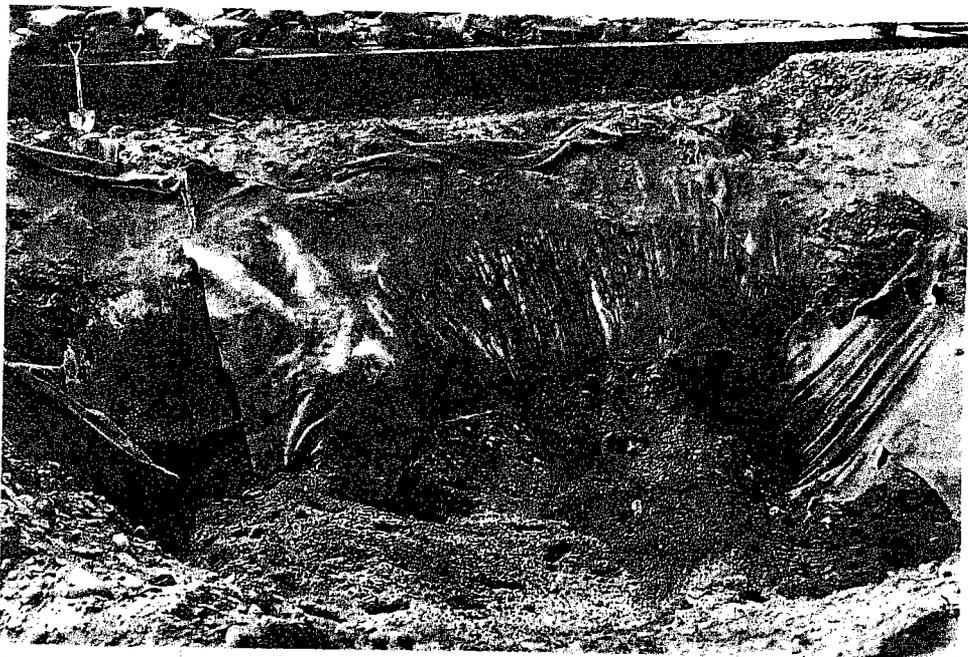


圖 24 B 孔破損狀

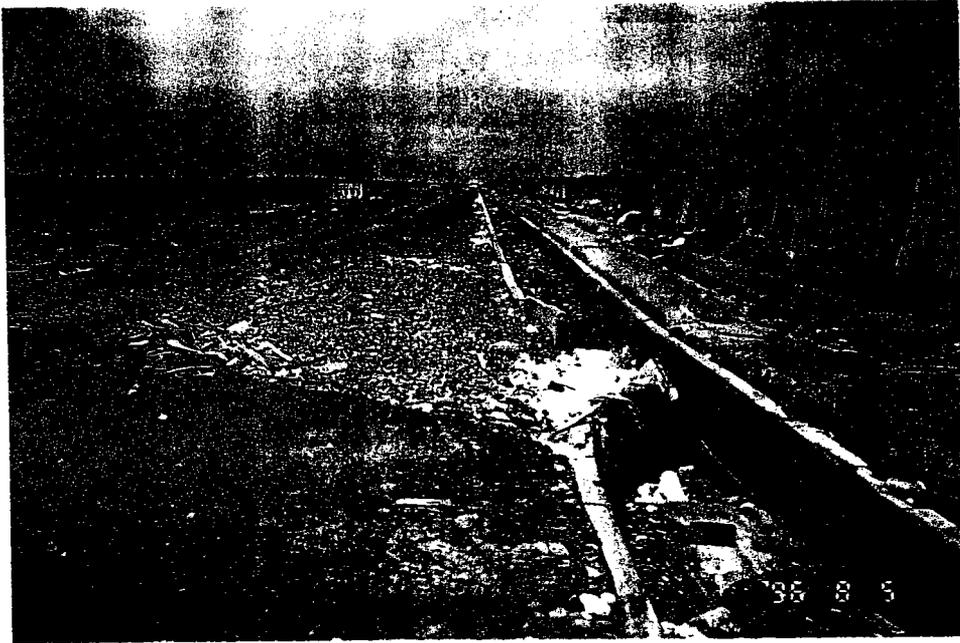


圖 25(a) 賀伯颱風造成 2K+070 邊溝凹陷情形

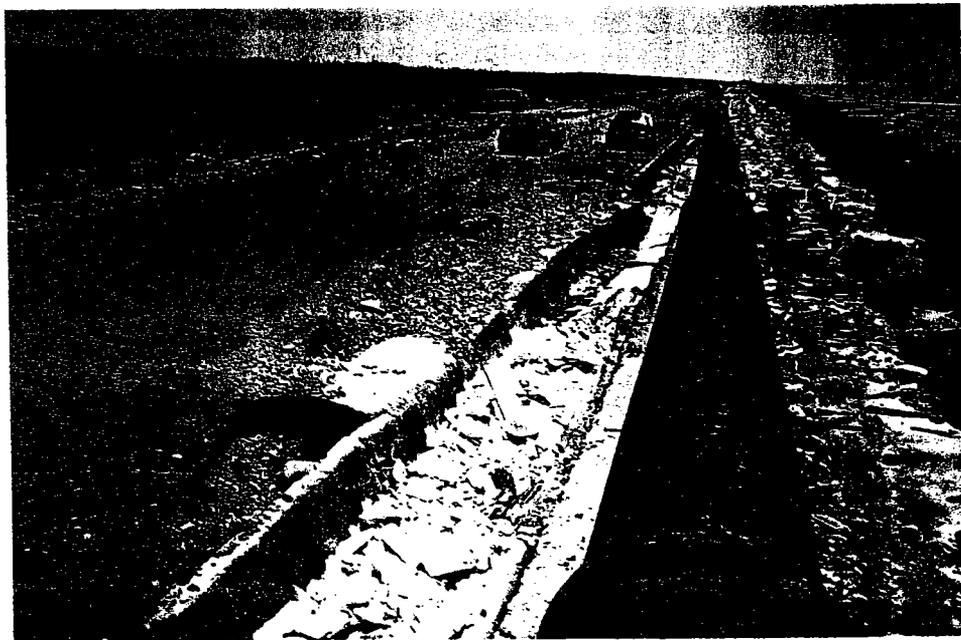


圖 25(b) 賀伯颱風造成 2K+280 邊溝凹陷情形



圖 26(a) 原開挖區 D 孔北側之路面凹陷

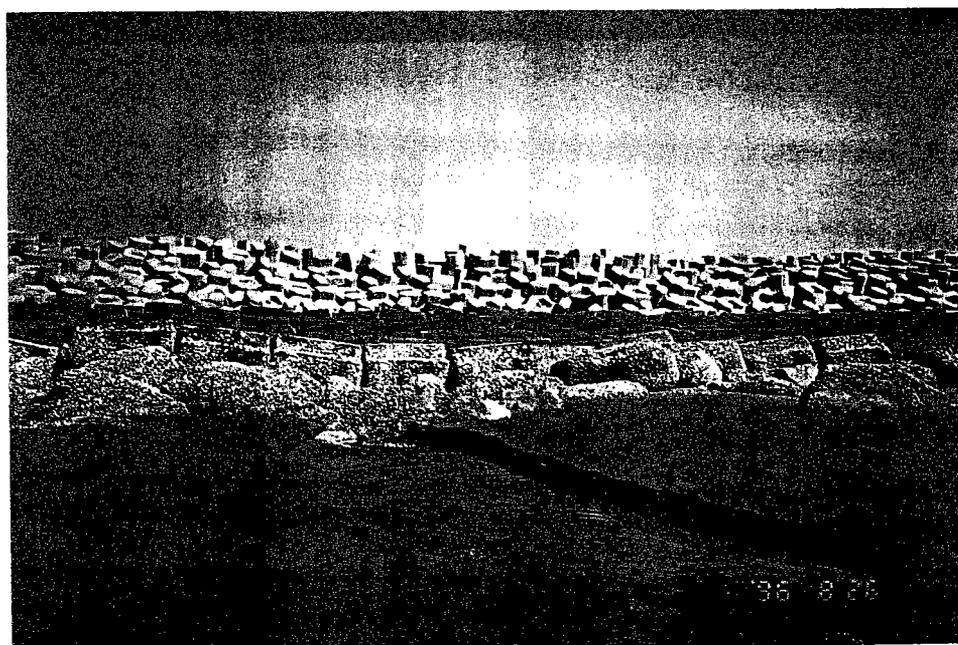


圖 26(b) 堤外之滲流溝渠



(a)



(b)

圖 27 賀伯颱風造成 0K+800 堤趾流失

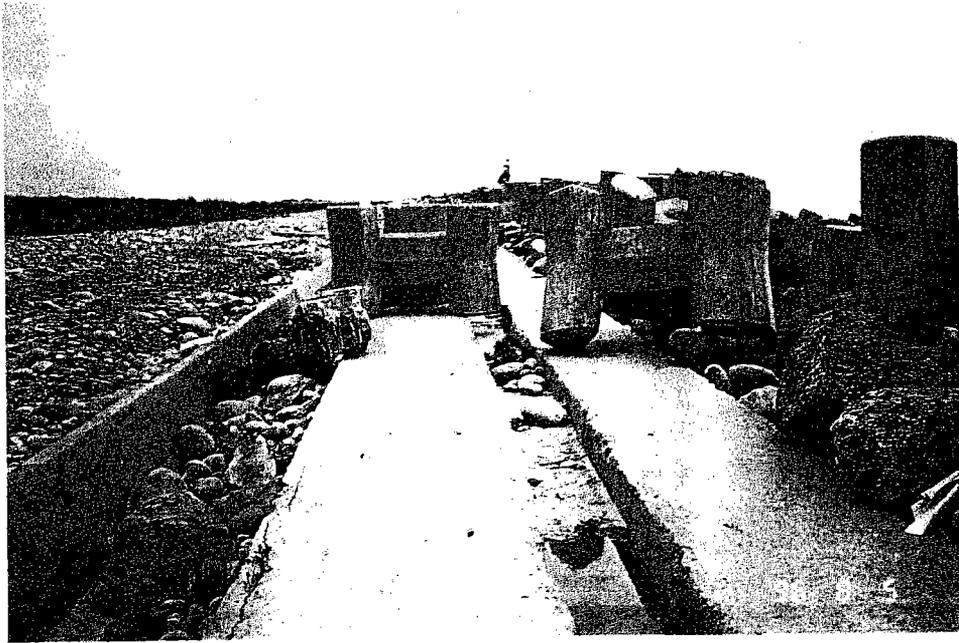


圖 28(a) 賀伯颱風造成 0K+800 消波塊移動情形



圖 28(b) 賀伯颱風造成 0K+800 堤趾流失

## 四、基礎保工法

### 4-1 堤腳保工法

依據英 BS6349 規範保堤腳其型式如下圖所示。

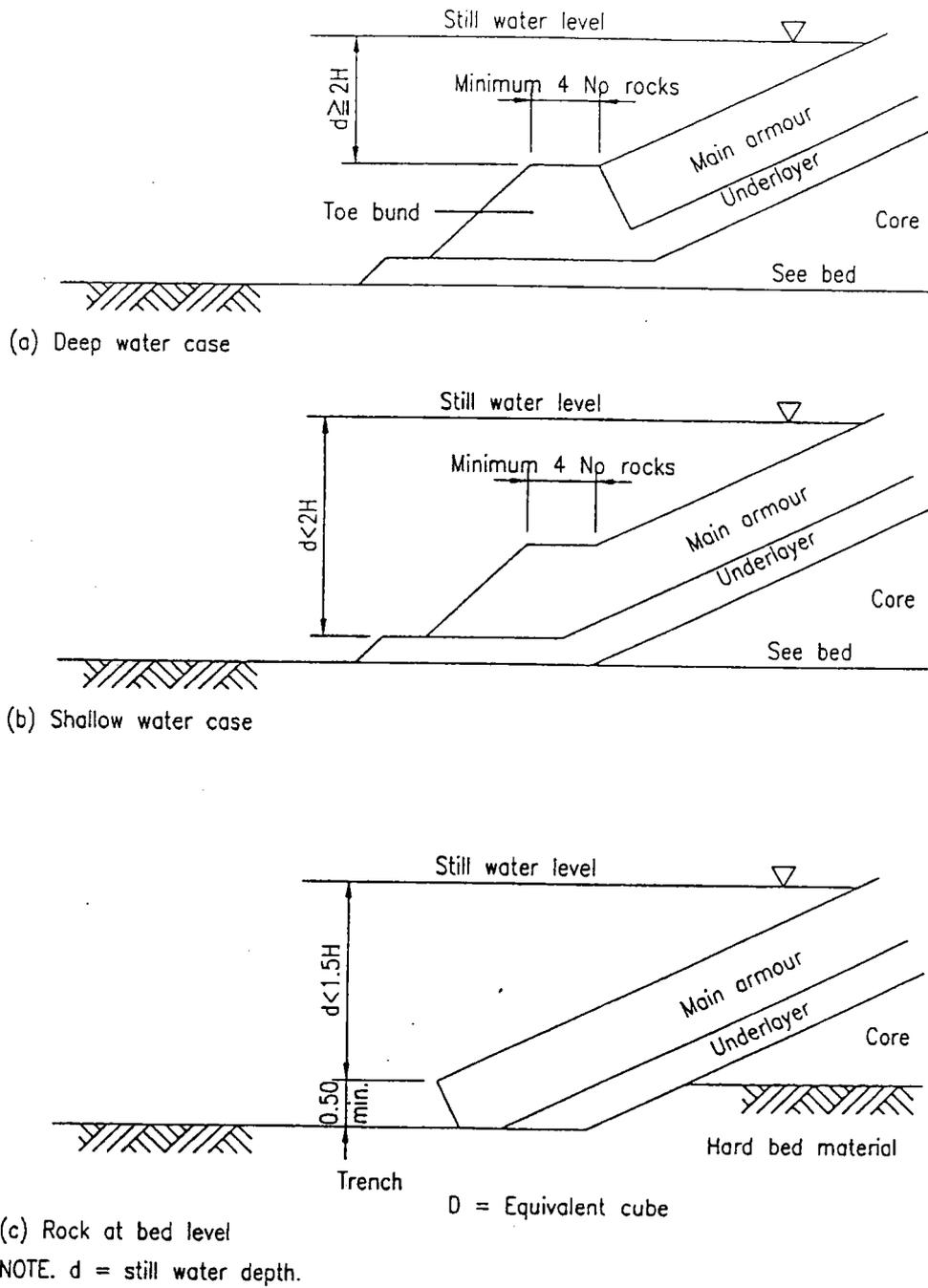
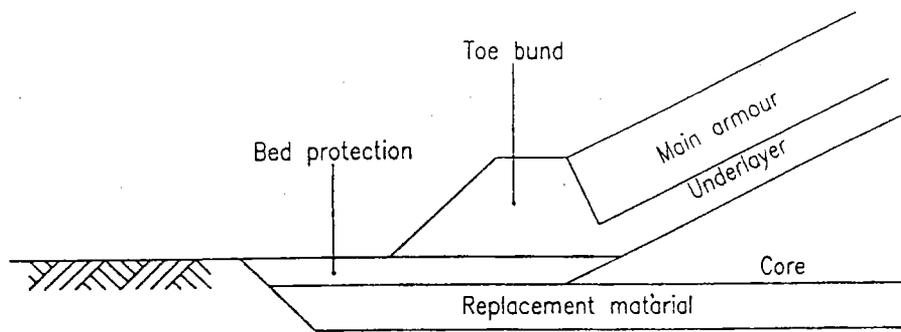
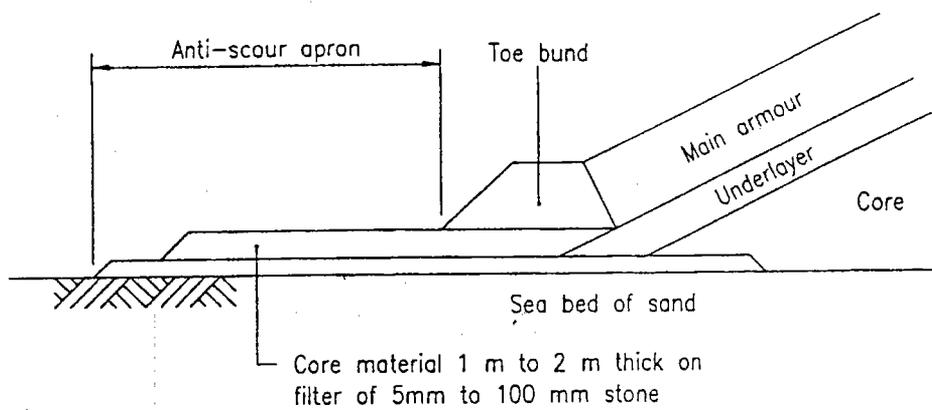


圖 29 堤腳保型式(BS6349 : part 7 : 1991)



(d) Soft material at bed level

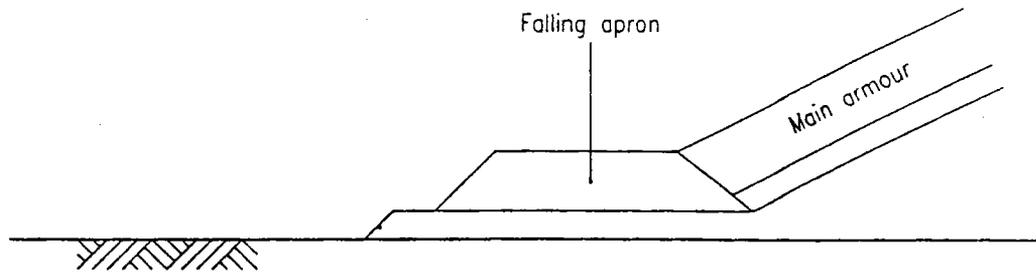


(e) Protective toe apron

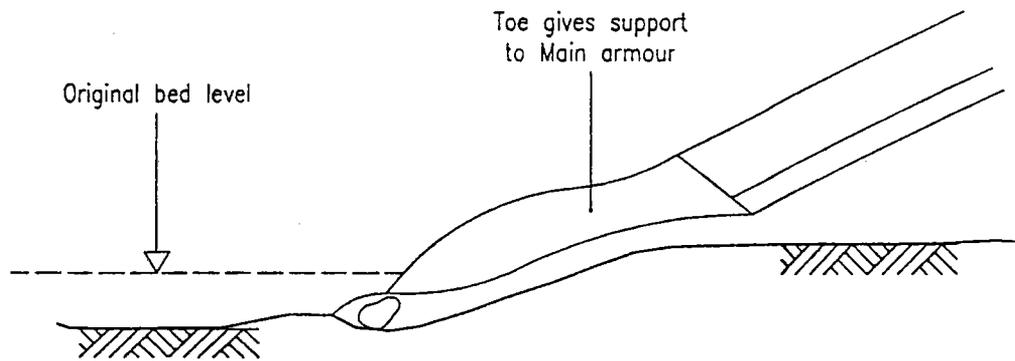
圖 30 堤腳保護型式(BS6349 : part 7 : 1991)(續)

## 4-2 防止陷落之堤腳保法

依據英國規範 BS6349，其保護陷落之堤腳保型式如圖 31 所示。



(a) Original construction



(b) After scour has occurred

圖 31 防止陷落之堤腳保護型式(BS6349 : part 7 : 1991)

### 4-3 衝擊波壓之避免

當衝擊波有可能發生時，原則上以水工模型試驗進行檢討。對於有可能產生強大衝擊波壓的斷面形狀及構造應儘可能避免採用，在海底坡度較陡無法避免之時，應加上適當之消波塊以緩和波力之作用。

衝擊波壓之發生原因很，很難加以確定。由各種試驗結果當結構物法線之垂直與波向之交角 $\beta$ 在 $20^\circ$ 以內，同時又有以下之情況時，則易造成衝擊碎波壓。

#### ※ 海底地形很陡時

當海底坡度較 $1/30$ 為陡時，在直立壁之稍微海側處之相當深海波波形尖銳度在 $0.03$ 以下列（包含碎波時）很容易產生衝擊波壓。

#### ※ 高基礎時

海底坡度雖平緩，但因基礎之形狀亦會導致衝擊波壓，此時除波浪之條件外，若基礎拋石較高，而且前肩寬度相當廣亦或斜坡坡度平緩，在拋石基礎之斜坡面或斜坡肩部附近如有水柱狀之碎波衝擊時會產生衝擊波壓。海底坡度較 $1/50$ 為緩時，若拋石基礎高程上之水深與設置水深比大於 $0.6$ 時，不會產生強大之衝擊波壓。

#### 當衝擊波壓無法避免時之對策工法如下：

若強大之衝擊波壓作用於直立壁時，其前面投入消波塊加以保護，將使作用波力顯著減小。特別為高基拋石基礎時，若有充分之消波塊加以保護可防止衝擊波壓之發生，另外，直立堤採用適宜之消波沉箱，或斜面沉箱等異型沉箱，有時亦可避免衝擊波壓之作用。

#### 4-4 消波護岸保護工法

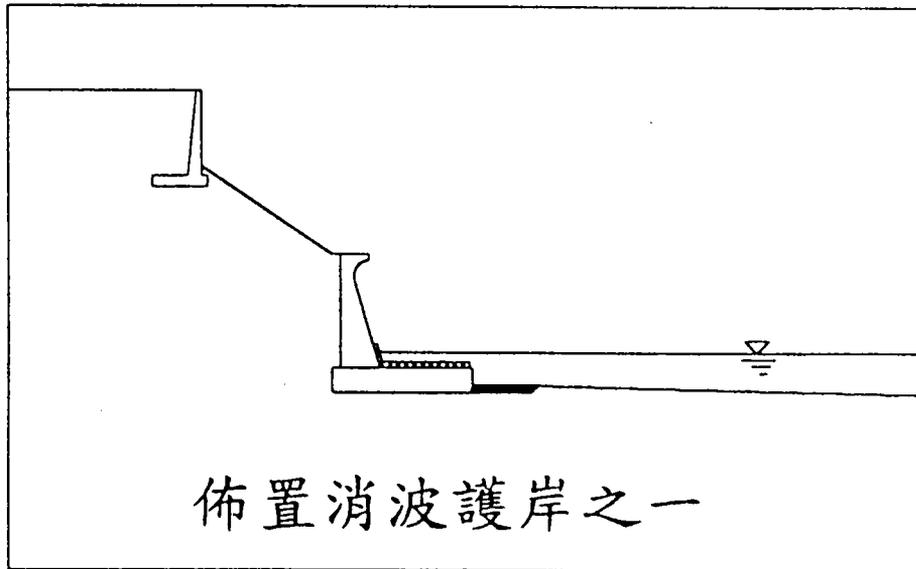


圖 32 消波護岸工法一

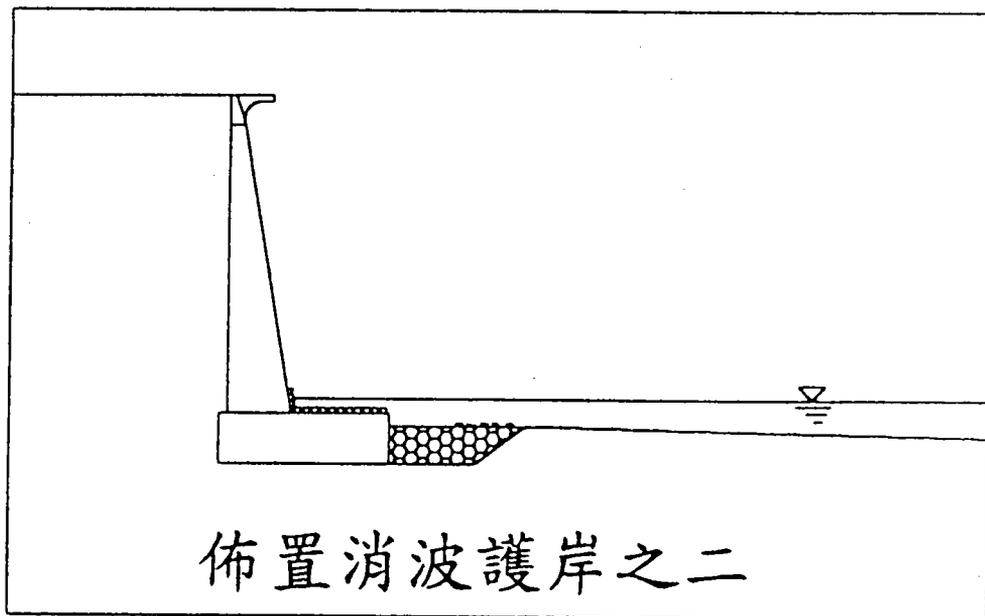


圖 33 消波護岸工法二

#### 4-5 堤後漏沙保護工法

彰濱堤後漏沙保護工法如圖 36 所示。

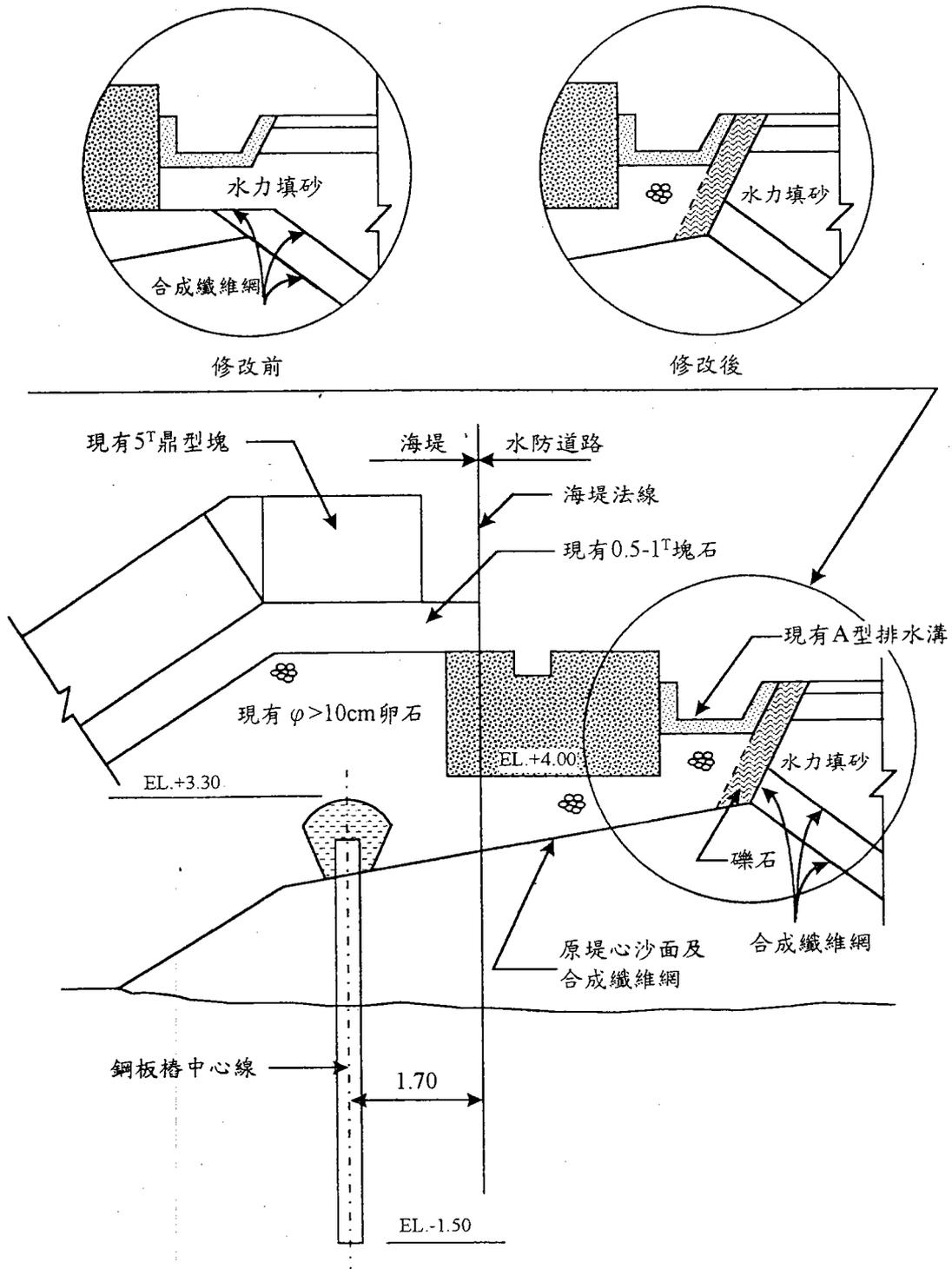


圖 36 建議對填砂填段凹陷進行局部修復之示意圖

## 五、結 論

海岸受侵蝕時皆需靠外來構造物加以保護，但由於在海岸上構築結構物必然破壞其平衡，因此結構物基礎受沖刷破壞或堤後漏沙危及海堤或護岸之安全，是常見的損害事例。一般對於海岸結構物之沖刷而造成滑落、沉陷或堤體崩坍的危害性破壞皆以局部性的防護或改善來處理，往往此一破壞非局部性而是因全面性破壞引起的。由此可見只針對局部性的改善近岸構造物的損壞只能暫時性的解決問題，應從整個平面調整其佈置來保護海岸地形達局部性的防止結構物的破壞。

# 台灣四週海岸侵淤現況

黃清和\*

## 一、前言

台灣爲一海島，海岸線總長度約爲 1,600 公里，其中本島海岸線長 1,250 公里，其餘屬於澎湖等 8 個離島；如除以國土面積則每單位面積擁有海岸線長  $44.4 \times 10^{-3} \text{km/km}^2$ ，較丹麥及日本等國少，卻比美、英荷等國排名尙屬前茅；但如從每人所能擁有之海岸線長而言，則每人僅能分配至 0.76 公尺，僅有日本人之 1/4、美國人之 1/3、英國人之 1/2，仍屬於貧窮國家。因受地理環境影響，沿海地區屢受颱風及東北季風引發潮浪爲害，加以工商經濟蓬勃發展之故，海岸地區開發利用日益殷切，各類之海岸建設與開發陸續進駐海岸地區，由於過去不了解海岸特性及未作好防範措施，以致帶來了一些意想不到的海岸災害，諸如海岸侵蝕、海岸溢淹、海岸資源破壞及海岸自然生態及人文結構之改變等等，尤其目前台灣全島海岸許多地區已產生不等程度之海岸侵蝕現象，海岸侵蝕所引起之海岸線後退、海灘流失問題已成爲目前海岸防治主要工作之一。如何讓海岸國土及資源得以永續利用，將是一全民問題，於台灣島上之每一份子將有義務珍惜與保育海岸環境與資源，讓後世子孫也能享有福爾摩沙燦麗之海岸。

## 二、海岸侵淤現況檢討

### 2-1 台北縣海岸(含基隆市)

台北縣及基隆市海岸起自台灣海峽北西側下寮經台灣最北端之富貴角至東北角三貂角，其中除下寮至淡水河南岸間屬於砂質海岸外，大部份屬於岩

---

\* 港灣技術研究所研究員

石海岸，包括一般所稱之東北角海岸及北部海岸。由於岩石結構硬度鬆硬不一與岩石層走向之關係，此段岩石海岸有突出之岬角如三貂角、鼻頭角、野柳、富貴角等，也有深入之小灣如卯澳、澳底、龍洞、深澳等。野柳、基隆一帶之海岸因砂岩受強烈之海蝕作用形成豆腐岩(千疊敷)、蕈狀石(萬人堆)等奇形怪狀之形像蔚為奇觀，而頁岩岩層走向與海岸平行處，因受長期海浪海蝕作用呈現海蝕平台(wave cut platform)或海蝕崖，存在於海岸上之海蝕洞則因開闢或拓寬公路多已不復見。石門一帶海岸屬於礫石海岸，山麓逼近海岸菱岬之安石岩塊散佈沿岸礫石間，早期無路時都跳石而過俗稱跳石海岸。富貴角突出於最北端與麟山鼻間，沿岸有砂丘飛砂嚴重，海岸有珊瑚礁散佈。存在於海岸上之海蝕洞則因公路開闢或拓寬，多已不復見，而在岬角間零星散佈一些小型砂灘海灣即所謂袋形海灘(pocket beach)，如淺水灣、白砂灣、金砂灣、翡翠灣及福隆等，這些小灣多因溪流注入之輸砂堆積所形成，例如此段海岸中最大之二砂灘中員潭溪之與金砂灣，及雙溪川之與福隆海灘，而若干小型袋形海灘則屬於崩潰之岩石風化堆積而成。此段海岸因地形封閉交通較為不便，人口較稀少，但景觀特殊觀光事業及海上休閒活動發達，同時小型漁港密佈數居全島之首。這些袋形砂灘因有兩側岬角阻擋大致安定無侵蝕現象，且磺港漁港及雙溪川口因河川輸砂而有淤塞問題。本段海岸雖有海堤之建設，但多興建於海水浴場或漁港之鄰近地點，多用為防潮浪而非防侵蝕，雖地勢較高亢，唯颱風浪潮洶湧時有越波，而都依賴消波凝塊發揮保護功能。沙崙北側目前正闢建淡海新市鎮興建圍堤中。三芝淡水間海岸段山丘向海緩傾海岸平直單調，岩礁與狹窄砂灘交互出現，海岸尚稱安定。

淡水河左岸至桃園縣境交界處林口鄉下寮以東屬於砂質海岸。淡水河右岸因有沙崙突出於北岸河口，阻擋河川輸砂向北擴散再加冬季北浪能較夏季能量強勁約四倍，故淡水河之輸砂均偏南堆積，等深線在南岸較北岸寬鬆，河口北岸坡度約在  $1/50$ ，而河口南側則為  $1/200 \sim 1/100$ 。依理淡水口南岸獲得河川豐富之輸砂供應應為堆積性海岸，但因此等排出之土砂大部份堆積於河口至八里間水深  $2 \sim 5\text{m}$  間，形成砂堆促成碎波，以及河口至下罟尾向外海  $5 \sim 10\text{m}$  間。雖年淤砂量約有 20 萬立方公尺，但因  $2\text{m}$  至灘線間卻形成

近岸溝槽，部份河流流量及沿岸流沿此南流，以致海岸線嚴重後退。1904年至1919年間海岸線雖有前進，但1958年起即節節後退，嚴重處至1993年後退200~300m。海岸後退，於石門水庫及翡翠水庫完成後即逐漸明顯以至需建防砂突堤保護海岸，而在1986年淡水河口大量採砂時尤其嚴重，即使在八里污水處理場興建時，八里海水浴以北仍然侵蝕不止，迫使撤遷戶不得再向內陸遷移。往西離淡水河愈遠海岸線後退量逐漸減緩，但侵蝕依然，舊公路已被沖刷迫使17號公路內移，唯此段海岸在河口西側-5~-10m間則有相當量之河川輸砂堆積量，約為200萬立方公尺。位處河口漂砂下游之河岸而發生侵蝕現象頗堪注意。

本縣海岸於1994年在淡水鎮北方開發淡海新市鎮特定區計畫，填海造地工程正在施工中，於南岸則有八里污水處理廠、八仙遊樂區、林口電廠等海岸開利用工程，目前淡水港第一期工程(1993~1997)已完工，目前正進行第二期工程，由於北防波堤之興建其北側之海岸侵蝕已減緩，但港址南側之海岸勢必引起局部侵蝕。

本所自八十六年度起開始辦理淡水八里海域監測計畫，有關淡水八里海域北起淡水河口，南迄林口發電廠，根據不同水深範圍自民國八十二年五月以後歷年侵淤量計算結果分顯示，全區在±0m~-5m水深範圍間，自港期間(82年5月~83年5月)年淤積量約110萬方，逐年遞減到第一期建港北防波堤完工後二年(即84年5月~85年5月)呈年侵蝕約100萬方；在-5m~-10m水深範圍間，則由建港期間之年淤積約68萬方逐年遞減到完工後第二年約79萬方之侵蝕量；惟在-10m~-15m以及-15m~-20m水深範圍則呈沖淤互見；根據分結果顯示，自84年5月到85年5月間在-10m~-20深範圍內侵蝕嚴重，其中約有160萬方係淡水工程處在85年元月到85年4月25日間人為浚挖回填用。

整體而言，自民國82年5月建港開始到民國85年5月三年期間，若考量計算到-20m水深，則淡水、八里海域其沖淤積量分別為-20.5萬方、+244.7萬方以及-823.3萬方等，惟第三年侵蝕量含淡水工程處在北防波堤南側在第三標區域浚挖數量約160萬方，故實際平均每年侵蝕量約為150

萬方；而根據本所在 85 年 5 月以及 85 年 10 月兩次地形監測沖淤量計算結果顯示，同樣考量計算到-20m 水深處，則北防波堤以南侵蝕量約 242 萬方，以北則淤積約 61 萬方，但若考量淡水工程處該期間在北防波堤以南浚挖數量約 330 萬方(按在第三標區域約浚挖 66 萬方，第四標區約浚挖 264 萬方)，則實際上該區海域在民國 85 年 5 月~9 月夏季期間北防波堤南北兩側係分別淤積 88 萬方與 61 萬方，即全區海域在夏季期間共淤積約 150 萬方。

圖 1 為淡水、八里海域地形監測比較圖。

## 2-2 桃園縣海岸

本鄉海岸包括蘆竹鄉、大園鄉、觀音鄉及新屋鄉等四鄉，海岸約有 40km 之海岸線長，大致由東西向漸轉西南西向，海岸坡度約 1/100 平均潮差 240cm，有南崁溪、埔心溪、新街溪、老街溪、大堀溪及社子溪等三次要河川及普通河川數條注入於海。沿岸日治時代於砂丘植有防風林定砂保護海岸，而海灘亦有寬近百米之砂灘消浪，唯此等防風林因受林口電廠影響或疏於保護或被破壞已漸枯萎消失，縣府正積極植林中。海灘亦部份被闢為魚塢。此段海岸大部份屬於中粒徑砂質，砂岸間有局部珊瑚礁出現於海底，唯南崁溪口至大堀溪口竹圍附近海灘則屬礫石，但海灘寬度正萎縮中，有的已不到三十公尺寬。由本縣所有溪口均向西南向偏，顯示漂砂卓越方向係由東北向西南向，永安港南側因防堤阻擋有局部性侵蝕，以及白玉附近海灘呈現侵蝕露出部份礫石。從歷年測量圖之比較分析大部份海岸因海岸隆升及來自中壢台地沖刷之土礫堆積結果平均外海有年 1.5m 之堆積。本縣工業局曾於 1994 年提出桃園縣觀音擴大(外海)工業區計畫，預定自新街溪口至大堀溪南側填海間開發工業區並闢建工業港，目前正在進行環境影響評估過程中，且台電大潭火力電廠即將動工，勢必對海岸局部之衝擊。竹圍漁港及永安漁港曾因漂砂而淤塞，均經擴建延長防波堤而克服。此外另有二處觀音海水浴場及竹圍海水浴場，唯竹圍海水浴場因漁港擴建而納入漁港南堤內，漁港西側海灘亦經大量採砂。

## 2-3 新竹縣市海岸

北起於新豐鄉洋寮溪口南至鹽水港間約 30km 海岸線海岸，海岸線走向大約為東北—西南，平均潮差有 3.25m。由於有鳳山溪及頭前溪二溪，年約 260 萬立方公尺豐富之砂源及大潮差形成極為平緩之海灘，漲退潮露出水面之海埔地(潮間帶)有 1.5 公里遠，往南海埔地寬度漸減。於 1904 至 1987 年間此一帶海灘約生長 0.7km，尤以客雅溪附近生長最快年約 20m，年淤砂量約有 40 萬立方公尺。1959 年退輔會於客雅溪北側至新竹市北側六公里間開發海埔新生地 314 公頃，此後海岸尚稱穩定，但於 1970 年在頭前溪口南岸興建新竹漁港後，由於防波堤伸長達 1.6 公里(含港區)阻擋沿岸漂砂，以至新竹垃圾掩埋場附近之海堤日漸侵蝕，需以消波塊保護堤腳。其南側南濱海水浴場前方之砂灘亦逐漸後退，漲潮時已剩不到 30m，唯香山一帶海岸尚稱穩定，外海尚有潛砂洲存在。鳳山溪以北新豐鄉海岸近年亦逐漸發生侵蝕，須賴海堤保護。1985 年省府提出香山區海埔地造地開發計畫，擬沿-1.0~±0m 築堤 9.6 公里，開發 990 公頃海埔地分三期施工，計畫尚在審議中。如香山開發計畫完成則新竹市自然海岸將消失，而依環境影響評估，將影響竹南海岸之安定。

根據本所收集地形資料，香山一帶僅有民國 67 年以及 81 年兩年之地形變化水深圖，經本所整理繪製如圖 2 所示，再將地形平面切割分成(Ⅰ區~Ⅷ區)等共八個分區，每一分區水平距離長 1,000 公尺，垂直距離範圍涵蓋到水深負 15m 處，以分區計算比較分析歷年之土方量作為漂沙沖淤參考。

計算分析結果顯示，自民國 67 年到 81 年間在新竹香水區附近水域除南、北兩端即第(Ⅰ)區、第(Ⅱ)區、第(Ⅶ)區以及第(Ⅷ)區係屬侵蝕外，中間部份在第(Ⅲ)區~第(Ⅵ)區則屬淤積，尤其是第(Ⅳ)區以及第(Ⅴ)區，即海山船澳以北 2,000 公尺範圍香山地區海岸，在該段期間共淤積 946 萬立方公尺(計算面積 555 萬平方公尺，水深到 15 公尺處)，即每年平均淤積量約為 67.5 萬立方公尺；每單位平方公尺平均每年淤積 12 公分，累計這 14 年期間每年平方公尺平均淤積 1.68 公尺；而該區水域，北端則每年平均約侵蝕 33.5 萬

立方公尺（計算面積為 422 萬平方公尺），推算為每平方公尺平均每年侵蝕約 8 公分；累計 14 年期間每平方公尺平均侵蝕 1.12 公尺，南端則每年平均侵蝕約 43 萬立方公尺（計算面積為 368 萬立方公尺），換算為每平方公尺平均每年侵蝕 11.7 公分，在這 14 年期間每平方公尺平均侵蝕 1.64 公尺；惟考慮整個新竹香山區附近海域之總侵淤積量，在這 14 年期間共淤積 121 萬立方公尺，即平均每年淤積約 8.64 萬立方公尺。

#### 2-4 苗栗縣海岸

包括竹南鎮、後龍鎮、通霄鎮及苑裡鎮等四鄉鎮介於鹽水港至房裡溪之海岸，共約 50 公里長。海岸線走向約成北北東至西南向，計有中港溪、西湖溪、通霄溪、南勢溪、苑裡溪等，中港溪屬於次要河川提供年約 200 萬立方公尺之砂源外，餘均屬集水面積甚小之普通河川，所提供之砂源有限。崎頂至外埔以北間砂丘發達，砂丘頂遍植防風林成為天然屏障；通霄溪至苑裡溪間亦有 +4.0m 高之砂丘，亦已完成造林。此區平均潮差 3.26m，海岸坡度約在 1/500~1/300，故亦有約 1000m 至 500m 寬之海埔地，除於苑裡溪口以南有部份卵石外餘均屬砂質海灘。崎頂及海尾至出口間有若干侵蝕現象外，大至亦相當安定。通霄、苑里一帶雖依地形圖海岸線於 1926~1983 年間有相當之淤積，但至 1994 年已呈明顯後退。通霄電廠取水管曾於颱風通過時被全部破壞而重新修建，可知暴風期此地海底地形變化之激烈。賀伯颱風時，秋茂園至通霄精鹽廠間之海堤曾被波浪嚴重損毀或越波，造成相當之災害。

苗栗縣海岸除建有通霄電廠及精鹽廠外，尚有外埔漁港、通霄船澳、苑裡船澳以及崎頂海水浴場、通霄海水浴場等海岸利用；同時亦於 1994 年由縣府提出通霄南區海埔地開發計畫，欲於通霄溪口至苑裡溪口間，沿 -1.0~±0m 線圍堤開發海埔地 173 公頃之申請案。

#### 2-5 台中縣海岸

北起自房裡溪口南至烏溪口間包括大甲鎮、大安鄉、清水鎮、梧棲鎮及

龍井鄉等五鄉鎮之海岸，海岸線長 41 公里。由於得自大安溪、大甲溪及烏溪三大河川豐富之輸砂沖積，以及平均潮差 3.70m 大潮差所產生水平方向之潮流與強烈之波浪作用，形成寬大之海埔地，台中港未興建之前，梧棲海岸之海埔地亦如鹿港一帶遠達二、三公里之遙。大甲溪口以北砂灘混有卵石而以南則屬砂灘，在 1958 年以前平均海岸線以 3.8m/yr 速度成長，斯後大甲溪開發計畫實施完成一連串水庫，輸砂量大為減少，至 1994 年海岸生長遲鈍，高美一帶反需建堤保護。而台中港完成後，北防波堤阻斷沿岸漂砂其北側形成嚴重之堆積，而南防波堤以南之南海堤原建在  $\pm 0\text{m}$  者，因失去南下砂源之補充，而由烏溪流出向北之輸砂又被台中電廠切斷無法補充，竟被沖刷至 -5m，所幸有堅固之海堤保護得予遏止。本縣海岸除五甲漁港北側有局部性侵蝕外，海岸大致亦相當穩定。由於本縣潮差大，海灘坡度緩，而小排水路紛歧易受暴潮影響，故沿岸均建有防潮堤保護。因有於地形及潮差大，有五甲漁港及松柏漁港利用漲潮進港外，大甲鎮及大安鄉境內並無其他工程，但清水鎮高美以南之海岸則已闕為台中港及台中火力電廠，自然海岸盡失。

## 2-6 彰化縣海岸

北起烏溪南迄濁水溪，涵蓋伸港鄉、線西鄉、鹿港鎮、福興鄉、芳苑鄉及大城鄉，海岸線長約 61 公里，平均潮差 3.21m。在濁水溪未整治前其三大支流之一舊濁水溪自鹿港南側排入海中，此一支流及現濁水溪之西螺溪以及烏溪三大河川沖積成今日之平原與海岸。全縣海灘坡度約 1/1500 極為平緩，再加潮差大，海埔地廣達四公里，底質屬於粉土與粘土極細顆粒之成份，除於各排水溝所形之潮溝略有小變動，海灘平坦極為安定且結實，牛車、鐵牛車可於海灘上行走。海埔地上底棲生物豐富盛產蠔蠣，並於日治時代即已開發鹿港鹽場、漢寶農場海埔地，1968 年以後開發寓埔區、線西區、王功區、永興區等海埔地約 2000 公頃。因大致均沿零米線圍堤，堤前尚留有二、三公里之灘地足以消浪，故海岸仍保持安定。1979 年起又於本縣鹿港以北地區至伸港間開發彰濱工業區，目前繼續開發中，由於崙尾區圍堤沿 -1.0m

興建，潮流之水流斷面縮小以及碎波直接作用於堤腳，使得堤前海灘流失發生嚴重之沖刷，而需以突堤群保護。由於本縣海岸大部份已由開發海埔地圍堤保護，僅剩鹿港—王功、芳苑—大城間未開發但亦建有海堤，故海岸線固定於海堤線而無變化，但因地層下陷及部份海堤已老舊，1996年賀伯颱風中曾發生越波破損，目前正積極改建中。

本縣海岸原屬於豐富砂源區，十七世紀之地形圖上即有寬闊之海灘，海岸成長迅速，昔日海灘已成陸地有滄海桑田之感。未開發海埔地前約以40~50m/yr速度成長，年淤積量約為 $6 \times 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$ 。但據最近幾年之水深測量，淤積速度已大為減緩，甚致於寓埔區外海出現明顯之侵蝕現象，而漢寶、芳苑間外海亦有輕微侵蝕發生。

## 2-7 雲林縣海岸

起自濁水溪口至北港溪口，涵蓋麥寮鄉、台西鄉、四湖鄉及口湖鄉四鄉之海岸線長約58公里。由於濁水溪未整治前，分歧之西螺溪、虎尾溪及北港溪等支流供應豐富之輸砂源來沖積之結果形成平緩之海灘，同時沿岸海岸線曲折富於變化，許多排水路河口形成之潮溝分隔砂灘，並有離岸砂洲或露出或潛沒，斷斷續續分佈於沿岸，離岸距離約3~4公里處。最北之離岸砂洲為海豐島(佐佐木島)，自新虎尾溪口外4公里處，向南西南向延伸約8公里長，島寬漲潮時約500m、退潮時約1000m。海豐島於1970年代消失成潛沒砂洲並逐漸東移，最近又成砂嘴(spit)復現於海面上，與陸地相連但規模已大為縮小。另外在1926年自下崙外海亦有潛沒砂洲向西南延伸，然後發展成統汕洲、外傘頂洲一連串之長約15公里之離岸砂洲群。此等外海砂洲亦徐徐向西南移至金湖外海，60年間南移5公里，以年約80m速度在移動，但其規模亦萎縮甚多。崙背鄉及台西鄉之海岸線亦於60年間向西生長約2000m，唯箔子寮至台子村間則海岸無明顯生長然外海砂洲內移。

雲林縣海岸除麥寮區及台西區海埔地分別由縣政府及土資會圍堤開發外，其餘海岸線亦經水利局整建將海岸線拉直，但部份海堤仍屬簡陋，以致

於賀伯颱風時損毀一部份，而海灘亦因地層下陷而降低內移，碉堡亦陷於水中。砂洲內潮溝或內海亦刷深，而統汕洲、箔子寮洲及外傘頂洲之萎縮將使此一天然屏障失去功能，所幸本鄉海岸已全被規劃為雲林離島工業區，一旦開完成則海岸線外移，自然內陸無直接被波浪侵蝕之憂，但如規劃不當則侵蝕將所難免。本縣之海岸保護不在海岸線，而應在如何確保砂洲及砂嘴不再萎縮。

本所在民國 79 年~82 年間曾在外傘頂洲連續監測海岸線變化，根據連續四年觀測分析結果顯示，該區海岸灘線向陸側內移 300 公尺，即平均每年向陸側侵蝕大約 100 公尺左右，如圖 3 所示。

## 2-8 嘉義縣海岸

北起自北港溪口南至八掌溪口間長約 40 公里，涵蓋東石鄉、布袋鄉及義竹鄉三鄉海岸。因北港溪、朴子溪及八掌豐富之輸砂沖積，又外海有外傘頂洲遮擋波浪，使得本縣海岸線曲折迂迴，砂洲斷續散佈於二溪口間。北港溪口西南灘地已被台糖開發為鰲鼓海埔地，海堤自原海岸西突出約 4 公里。布袋鎮及東石鎮亦由縣府開發新生地成為漁港及社區。網寮、白水湖、新苓寮沿岸開發為鹽田，好美寮闢為養殖場。但這些新生地之圍堤或海堤因開發單位不同，有僅以土堤砌磚，有以乾砌卵石堤興建者強度差異甚大，高度亦參差不齊，常造成決堤或越波，淹水時有所聞為全省海岸害最頻發之區。其他海岸線則由水利局負責修建海堤尚稱穩固。本縣沿海本屬低窪地區，勉力被人為開發利用為鹽地或養殖池。地層年代尚輕應有自然沉陷潛能存在，目前因超量抽取地下水地層下陷頗為嚴重，溢淹潛能更加嚴重。所幸因外傘頂洲南移遮蔽北來波浪，形成穩靜之水域無漂砂能力，但好美寮外已不在外傘頂洲遮蔽區內，故波浪仍可直襲該處海岸，以致砂洲及海灘流失，防風林及海堤受損，為遏止海灘侵蝕於該處海岸建有八座離岸堤保護之。

外傘頂洲為本縣最貴重之海岸防災屏障，但該砂洲目前不僅面積逐漸萎縮，高程亦降低，砂洲上防風林已不見，大潮時波浪已可刷過砂洲頂，如何

確保該砂洲乃本縣海岸保護之關鍵。

## 2-9 台南縣海岸

台南縣海岸北起自八掌溪口南至曾文溪口，包括北門鄉、將軍鄉及七股鄉三鄉，全長約 56 公里。本島外緣有王爺洲、青山洲、網子寮洲、頂頭額洲及新浮崙洲等，一連串外海砂洲成爲屏障，其內側則爲數百至數公里寬之潟湖。

十七世紀時北門至佳里間屬於台江內海之一部份，由於接受八掌溪、急水溪及曾文溪等河川豐富之輸砂內海日漸淤積，而形成今日內陸海岸線，但自 1926 年後乃內陸海岸線已甚少變化，外海砂洲群則日漸內移並稍向南移動，尤以 1925~1958 年間之內移較爲明顯，而後雖潮口位置稍有變遷或砂洲有斷缺外大致相當穩定。此等外海砂洲之內側即潟湖相繼被開發爲新生地，如曾文海埔新生地、七股鹽場、北門漁業專業區等，故目前僅剩網子寮洲與頂頭額洲間之七股潟湖。青山洲自開發鹽場時建築海堤保護新生地後，即徐徐發生侵蝕現象，於 1994 年中心漁港興建後侵蝕加速，目前南防波堤以南約二公里間砂灘已不見，而需以突堤群保護。將軍溪口於開發北門海埔新生地以前頗不穩定，河口淤砂、航道變幻不定，故縣府於河口兩測興建突堤希能穩定之，唯未奏效，但自開闢北門海埔地後航道即穩定，而突堤南側則飛砂淤積，青山洲北端外穩定。網子寮洲與頂頭額洲間之潮口亦有些許移動，常有時相連而於另處形成新潮口，唯仍可免強維持漁船通行，但於闢建中心漁港之際爲確保航行亦建防波堤亦稱共同航道。自曾文溪上游興建曾文水庫之後，河川供應之輸砂量已幾被切斷，因此溪口附近之濕地稍有擴大外海岸有漸被侵蝕之勢。目前七股潟湖有濱南工業區開發案審議中，如日後興建專用港防波堤是否會因之而影響砂洲之安定頗值注意。

## 2-10 台南市海岸

本市海岸北起曾文溪口南至二仁溪口，全長約 22 公里。依十七世紀

之地圖荷蘭人佔領時代，台灣內海南起自二仁溪口北至北門，而東側陸地則在今日鹽行、西港、佳里一帶。於本市部份之海岸外側則有北線尾汕及今日安平之鯤鯓至今日喜樹之七鯤鯓等砂洲群。1904 年之地圖此等砂洲群已連成一線，形成今日之台南海岸線。而台江內海則因曾文溪之一再氾濫與改道而淤積，僅剩今日之安平新港池及安平漁港及遠洋漁港泊地，以及二者間之細長渠道(今日支航道)，其餘則陸化成安南區。曾文溪經整治支流則萎縮成鹿門溪及鹽水溪短促之溪流，而二仁溪口位置則甚少變化大致維持在同一位置。自 1904 年以來台南市海岸線甚少變化保持安定狀態，-7m 以外等深線歷次水深測量幾乎維持在同一位置。昔日舊安平港航道雖建有導流堤，但因僅延伸至砂灘前緣故無法維持而廢除，而漁船另由新港進出，但海岸線迄無變化。安平新港港口亦僅有少量淤積，浚渫量極為有限，沿岸年漂砂量約為 20 萬立方公尺北向優勢。但近年喜樹海岸之砂灘已逐漸萎縮，寬度已僅剩約五十公尺頗值注意。安平新港防波堤北南兩側淤積量亦有限，海岸線僅伸長約 150 公尺至 200 公尺之譜，南側較北側者長，可見由南向北之沿岸漂砂稍多於由北向南者。因曾文溪口起海岸走向轉向東南，與西南夏季之西南向波浪約成垂直方向，故夏季漂砂應以向離岸方向為主，而冬季波浪則因波浪方向擴散關係波高並不大，約與夏季相同，但有若干沿岸成份。

## 2-11 高雄縣市海岸

本段海岸北起自二仁溪口南迄高屏溪口共約 65 公里，涵蓋高雄縣茄萣鄉、永安鄉、彌陀鄉、梓官鄉及高雄市之援中、左營、旗津、中洲及高雄縣林園鄉等鄉市。過去亦由於二仁溪、岡山溪(阿公店溪)及高屏溪豐富之排砂而形成新打、左營及高雄等瀉湖。新打瀉湖已先後開發為鹽田、漁港及電廠用地而萎縮，1993 年起將剩餘者全開闢為遠洋漁港而消失殆盡。左營及高雄二瀉湖則分別開闢為軍港及商港。

本段海岸因係由二仁溪及岡山溪上游泥岩流下之輸砂堆積而成，故粒徑極細屬於細砂及粉土，再加波浪與海岸略成垂直，大浪來襲時易成離岸輸砂

將土砂移向外海。自 1940 年代首由蚵子寮海岸始頻傳海岸侵蝕，1947 年開始築堤保護。蚵子寮昔日百餘公尺海灘已消失，經建設直立式海堤累建累毀，最後以拋放消波塊方不再受損，但堤趾沖刷日深。以後赤崁海岸亦逐漸被侵蝕，同時侵蝕亦逐漸擴大到蚵子寮以南之海岸，援中港砂灘亦已盡失。

原來彌陀以北至茄萣間亦即新打瀉湖外之砂洲，亦有相當發達之砂洲與防風林，然自 1980 年代興建興達電廠、永安 LNG 接收站及濫墾漁塭後逐漸消失，同時海岸侵蝕亦由蚵子寮向北逐漸擴大至南寮、新港、螺底以南海岸幾乎已無砂灘，而完全依賴海堤及離岸堤保護。自興建興達漁港導流堤以後，先則崎漏海岸侵蝕，而在 1992 年之後茄萣海岸亦漸難維持，侵蝕由南向北擴大至喜樹海岸。原來此處海灘約有百餘公尺寬供燒王船盛會活動用，今已剩不到 20m 寬。1996 年賀伯颱風來襲時茄萣砂灘流失波浪直襲涼亭岸壁，涼亭全毀，1997 年取得台電補助修建突堤及離岸堤群保護海岸。

高雄市海岸紅毛港(今二港口)附近之海岸在 1950 年代即有侵蝕現象，乃建簡陋之海堤保護之。鳳鼻頭北側亦於 1970 年代發生相當之侵蝕，這些侵蝕現象於興建中鋼、中船疏浚高雄港南側港地時，將大量土砂排放於海岸後即安定未再侵蝕。而中洲一帶亦由市府興建突堤群保護，林園—中芸海岸於 1970 年代即需以突堤防治侵蝕，而汕尾海灘亦有減少之勢，中芸以北海灘亦然，1995 年曾因西南氣流之暴浪而潰堤。此帶海岸雖在高屏溪河口，理應堆積卻發生侵蝕，諒係輸砂落入河口海溝而無法補充兩岸所致。由以上可知高雄縣海岸乃全省海岸侵蝕最為嚴重之一縣，幾無一處不無發生侵蝕，成為離岸堤、突堤最密集之地。

## 2-12 屏東縣海岸

屏東縣海岸包括東、西海岸，於西岸起自高屏溪口至鵝鸞鼻，東岸起自觀音鼻至鵝鸞鼻，海岸線全線長約 152 公里，為唯一同時面臨台灣海峽、巴士海峽與太平洋之縣，同時海岸特性亦包含砂灘、卵石灘、岩石及珊瑚礁等四種性質迥異之海岸特性。主要河川有高屏溪、東港溪、林邊溪及次要河川

率芒溪、南勢湖溪、枋山溪、楓港溪、四重溪、保力溪、石牛溪及東岸港口溪、旭海溪等。

自車城鄉龜山頭以南至鵝鸞鼻轉至東岸九棚間，僅有港阿鼻至觀音鼻為岩石，以及八瑤灣、港口、南灣等為砂質海灘外餘屬珊瑚礁岸，裾礁發達強迫波浪碎波，再加礁岩較堅硬海岸線殊少變化。

高屏溪雖河長輸砂量多，但因河口有海溝，輸砂大部份流入海溝中，以至無法補充兩岸，故無發達之三角洲。東港海岸尚維持平衡狀態而大鵬瀉湖外之砂洲昔日尚有相當寬度，但目前已大為萎縮，往南水利村附近海岸已嚴重退縮需賴離岸堤保護。圖 4 為本所在 1996 年 10 月在屏東林邊海岸監測之地形水深圖。林邊溪以南佳冬鄉海岸因地層下陷，使砂灘日漸減少亦賴離岸堤保護。枋寮海岸由砂質轉變為卵石，電台一帶曾發生嚴重侵蝕漁港北側亦然，該處民國 60 年代曾賴反波式護岸保護，但因侵蝕依然進行而加拋菱型塊消波猶難遏止，然在漁港興建後趨於安定。楓港海岸因侵蝕碉堡陷入海中，目前亦賴護岸保護。南灣、八瑤灣等袋形海灘大致保持平衡無甚變化。

## 2-13 台東縣海岸

本縣海岸北起於長濱鄉大峰，南迄於達仁鄉南田，涵蓋大武鄉、太麻里鄉、台東市、卑南鄉、東河鄉、成功鄉及長濱鄉，海岸計約 175 公里長，面臨太平洋接受強勁之颱風波浪，除卑南溪形成之台東三角洲，太麻里溪堆積成之太麻里三角洲及大武溪堆積成之小型大武三角洲外，幾乎都或多或少發生侵蝕，唯大武、台東間之斷層崖海岸海岸平直，因岩層堅硬並於崖下有數十公尺砂混礫石灘可消滅部份波能後退速度轉慢，但金崙至大武間沿海公路每於颱風來臨時駁坎即被破壞交通受阻，碉堡滾落海灘消失。

大港口至台東間除於加路蘭附近有珊瑚礁外，屬於東部海岸山脈東麓之海岸砂岩段丘，地質較鬆軟於颱風暴浪作用下侵蝕速度相當快，尤以新港至都蘭間為然，沿海公路於此段亦因海岸侵蝕影響路基而向西遷移，亟待加強

保護。

以上係依有限資料及現場勘查所做之初步分析，各地確實之侵蝕現況尚需更進一步由詳細之測量加以分析，方足以做定量之分析。

## 2-14 花蓮縣海岸

北起和平溪溪口南至靜浦，涵蓋秀林鄉、新城鄉、花蓮市、泰豐鄉及豐濱鄉海岸，海岸線長約 175km，約成北北東走向平直陡急，屬於蘇花大斷層崖之一部份，清水斷崖直逼海岸幾無海灘，花蓮溪口至靜浦間亦因海岸山脈逼近海岸，此段海岸線間雖有和平溪、立霧溪及花蓮溪輸出大量土砂，但因受地形阻隔及海岸坡度陡急之限制，僅於河口形成三角洲無法提供附近海岸砂源。大部份海岸非無砂灘即砂灘寬度狹窄，台 11 號公路瀕海行駛於山麓，飽受颱風波浪威脅。花蓮溪口至水璉之海灘僅一、二十公尺，於大浪來襲時直撲海岸公路駁坎常被摧毀。花蓮市南濱海岸因闢建公園將護岸外移砂灘減小，並因花蓮港擴建東防波堤，波浪因而繞射而發生極為嚴重之侵蝕。

圖 5 為本所辦理花蓮港務局委辦計畫，收集水利局第九工程處提供以及本所現場實測有關北濱、南濱與仁化海岸鄰近海域，歷年± 0m 等水深線比較圖。

## 2-15 宜蘭縣海岸

宜蘭縣海岸起自東北角海岸石刀鼻至東海岸和平溪(大濁水溪)口，包括頭城鎮、壯圍鄉、五結鄉、蘇澳鎮及南澳鄉五鄉鎮，海岸全長約 105km。萊萊鼻至外澳海岸屬於礁溪海崖海岸，長約 22km。海岸呈北東、南西略成小弧形灣，沿海海蝕台發達，砂岩、頁岩、粘板岩等呈緩傾斜，海蝕順岩石節理、斷層面之裂縫進行，被削成岩灘，並由於隆起而成海蝕段丘 wave cut (terrace)，鐵路沿段丘上建設，殊少砂灘存在，僅於梗枋及大溪附近有溪流排出之土砂形成局部砂灘。

外澳以南至蘇澳北方則為由蘭陽溪排出之土砂所形成之宜蘭三角洲，長約 40km 稍向西凹入約成北南走向，沿海岸砂丘發達高達約 14~19m 成為防護鹽害之天然屏障。砂丘內則為濕地，今都已開發為養殖魚塢。宜蘭此部份海岸北南兩端有三貂角及北方澳岬角突出，於此二岬角間形成安定之弧灣弓形海岸，並於此弓形海岸中間蘭陽溪(舊稱濁水溪)口形成向東凸出之尖三角洲(Cuspate delta)。冬山河口形成向北延伸之砂嘴，顯示蘭陽溪豐富之輸砂構成宜蘭海岸地形，海灘亦有近 100m 之寬度足可抵浪，但頭城金面溪以北海岸因無砂源供給有侵蝕現象，港口附近海岸亦可能因北方澳岬使東南向波浪產生之繞射而有局部侵蝕。其他部份之海岸於 1985 年以前均顯示堆積現象，然最近數年則河口以南砂灘漸形消失砂丘亦有部份後退，顯然因過量之河床採砂使砂源短少所引起。按南陽溪正式核定之採砂量為  $6 \times 10^6 \text{M}^3/\text{年}$ ，實際採砂量恐遠超過於此。

蘇澳以南海岸復又屬於蘇花斷層崖海崖聳立於海岸，除於南埤漁港外有局部砂灘，東澳、南澳、漢本等處因東澳溪、南澳溪及和平溪輸砂堆積之三角洲外幾無砂灘可言。

圖 6 則為台灣四週海岸侵淤近況示意圖。

### 三、侵淤現況問題分析

綜合以上台灣四週海岸侵淤現況，可歸納以下數點原因：

#### 3-1 海岸漂砂供輸之失調

海岸自然之平衡乃在海岸漂砂供輸的平衡。但因經濟因素，政府及民間於沿岸地區競相的構架築防波堤來達到填地、築港之目的。此些防波堤除阻擋沿岸漂砂對下游之供應外，亦因其改了當地之海象條件間接亦造成輸砂行為之改變，進而影響了鄰近地區地形之平衡。另一方面，近來河川上游水土保持之加強、河道兩側之整治、水庫、攔砂壩之興建及河川砂石遭受盜採等，

致使河川輸砂之減少，均影響到海岸漂砂供輸之平衡問題，海岸砂灘終於逐漸遭致吞噬流失。

### 3-2 海岸之過度開發

由於經濟發展所需，台灣海岸一直有過度開發之問題，這種大量的海岸開發工程迫使海岸不但造成海岸漂砂之改變而引起海岸侵蝕現象。海岸開發也造成海岸特性之改變，尤其最近許多大型之開發案皆位於地形最敏感且侵蝕嚴重之南部海岸。其圍堤築港抽砂填地將引起地形之不安定性，進而造成更嚴重之海岸侵蝕問題，故為能緩和海岸之人為破壞問題，實有必要對海岸開發建設做適度之管制，以避免侵蝕問題之擴大。最近東部秀麗的海岸景觀也開始受到開發威脅有被破壞之危機，此更突顯開發管制之必要性。

### 3-3 海岸保護不當問題

由於海岸侵蝕或海岸溢淹等問題之持續發生，過去至今政府投入大量之人力、物力於海岸災害之保護上。但由於早期對海岸防護觀念認知之不足，以致部份保護措施純為禦浪防洪，無法防止漂砂之流失及維持海灘之穩定，同時無論堤體之設計或堤址之選定皆不夠嚴謹，以致屢傳災害。再者海岸天災頻繁，部份防護工法迫切性，以致未作詳細之規劃設計及影響評估，致使保護成效不彰反而間接引起當地或鄰旁海岸發生侵蝕問題。另外亦有部份海岸由於過度之保護規劃或保護型式規劃錯誤也造成近旁海岸侵蝕問題之產生。此等實例皆有待民眾及工程人員觀念之提昇來克服。

### 3-4 民眾認知之錯誤

由於台灣地理位置之關係常有颱風暴潮之威脅以致常釀海岸災害，政府於災害海岸地區興建海堤、突堤、離岸堤及其他方式之海岸保護設施，以避免海岸侵蝕及海岸淹水之發生。但目前常因民眾認知上之不足，常常因偶發

性之小災害或發生之災害尚不須以人為方式加以防治，僅以較簡易之工程方法即可解決者時，動輒向民意代表陳情，施壓要求政府或工程單位興建龐大的水泥構造物保護措施來保護其家園。此舉非但浪費公帑外，也常因而引發當地海岸特性及海象條件之改變，導致海岸侵蝕之加劇。

### 3-5 海岸相關基本資料不足

由於海侵蝕問題非複雜，牽涉到波、流、砂粒及結構體間之交互作用問題，要能有效抑制侵蝕現象或設置較佳之保護工法皆須對上述現象有深入的瞭解。而此類問題之探討，首推要有完整且詳實的現場觀測資料。但因國內並無專責海岸管理規劃之機構，故各類海象或海岸地形數據散見各研究機構或顧問公司，且資料觀測數據未見統一，又有殘缺不齊或觀測時間不足或項目不齊之缺點，以致在侵蝕防治之規劃研究上常感力有未逮之現象。

### 3-6 保護與環境生態競合問題

由於民眾親水權益及生態保育觀念之高漲，目前對生活休閒環境品質之要求日益提昇。過去工程單位慣於採用之傳統剛性保護工法已漸被民眾所排斥，甚至也引發環保及觀光團體之抗爭。但部份地區因受侵蝕嚴重威脅，保護工作亟需進行，但受限對新式工法認知之不足及保護地點民眾之無法接受，而無法引用可降低環境衝擊之柔性工法。故類似之競合問題可能持續發生，此一問題在海岸保護工作上應視為一急須研擬克服之問題。

### 3-7 設計單位與工程人員觀念問題

由於海岸侵蝕問題直接威脅國土面積及民眾之生命財產，故一稍有地形之輕微變動或偶發之越波現象時，民眾即發動抗爭或託請民代施壓工程單位興建堤防保護。工程單位為應付民代壓力常常因此而在海岸興建堤防之情形發生，也因此而常引發後遺症；即因而改變當地海岸特性或造成鄰旁海岸之

- simulations - a new approach," *Coastal Engineering*, 7, pp. 285-297.
22. Lee, C., Park, W. S., Cho, Y. S., and Suh, K. D. (1998). "Hyperbolic mild-slope equations extended to account for rapidly varying topography," *Coastal Engineering*, 34, pp. 243-257.
  23. Li, B. (1994a). "A generalized conjugate gradient model for the mild slope equation," *Coastal Engineering*, 23, pp. 215-225,
  24. Li, B. (1994b). "An evolution equation for water waves," *Coastal Engineering*, 23, pp. 227-242.
  25. Li, B., and Anastasiou, K. (1992). "Efficient elliptic solvers for the mild-slope equation using the multigrid technique," *Coastal Engineering*, 21, pp. 245-266.
  26. Maa, J. P. Y. and Wang, D. W. C. (1995). "Wave transformation near Virginia coast: The 1991 Halloween Northeaster," *Journal of Coastal Research*, 11(4), pp. 1258-1271.
  27. Maa, J. P. Y., Maa, M. H., Li, C., and He Q. (1997). Using the gaussian elimination method for large banded matrix equations, Special Scientific Report, No. 135, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA 23062.
  28. Maa, J. P. Y., Hsu, T. W., and Hwung, H. H. (1998). RDE Model: A program for simulating water wave transformation for harbor planing, Special Scientific Report, No. 136, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA 23062.
  29. Madsen, P.A., and Larsen, J. (1987). "An efficient finite-difference approach to the mild-slope equation," *Coastal Engineering*, 11, pp. 329-351.
  30. Massel, S. R. (1993). "Extended refraction-diffraction equation for surface waves," *Coastal Engineering*, 19, pp. 97-126.
  31. Mathews, J. H., 1987, *Numerical methods for computer science, engineering, and mathematics*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 507.
  32. Porter, D., and Staziker, D. J. (1995). "Extensions of the mild-slope equation," *Journal of Fluid Mechanics*, 300, pp. 367-382.
  33. Radder, A. C. (1979). "On the parabolic equation method for water wave propagation," *Journal of Fluid Mechanics*, 95(1), pp. 159-176.
  34. Suh, K. D., Lee, C., and Part, W. S. (1997). "Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography," *Coastal Engineering*, 32, pp. 91-117.

#### 4-3 新式防治工法之研擬

過去慣於海岸侵蝕防治之保護工法如海堤、突堤、離岸堤等，於台灣地區處處可見，顯見該類構造物對台灣海岸溢淹及海岸侵蝕防治上所立下之功勞。雖然上述保護工在海岸侵蝕防治上可能具有一定程度之效益，但不可否認地也產生了某些負面作用，如遮擋漂砂造成下游侵蝕，破壞景觀生態環境等。在今日環境下，此類保護對策須作某一程度之調適，以符目前環保團體及一般民眾之要求，諸如人工養灘、人工岬灣、人工潛礁、海灘抽水、換灘、人工砂丘重建等工法皆為國外常見之保護措施，國內亦可考慮研擬採用。唯受災地點民眾可能無法接受沒有水泥構造物阻擋波浪之保護措施，故除新式工法效益之宣揚外，亦可採用既有工法逐步改良方法進行。諸如離岸堤潛沒化則可避免視野障礙及親水性反礙之缺點，如消能不足則可採複列潛堤或加大堤寬使成潛礁型態等皆可達到衰浪防侵蝕效益。而工業建築廢棄物及水庫淤砂皆可採適當之處理後拋放海岸淺灘作為消浪防蝕之用。

#### 4-4 現有保護措施之檢討與改良

由於時空轉換之故，過去所配置之海岸保護工法在海岸特性、海象條件、漂砂供輸之改變下已有呈漸失保護功效或反呈侵蝕幫手之情形。若未加以檢討並思謀求改善之道，則對海岸資源之永續與發展利用產生大負面之影響，諸如突堤之擋砂效益可能已因上淤漂砂之銳減而漸失功效，但卻持續威脅下游之侵蝕，離岸堤後側砂舌之形成阻擋漂砂及水流對下游之補充等，又如海堤、離岸堤在地層下陷及海水位上升之情形下，其禦浪防溢之效能也可能已降低或失去謀思可行之改善對策，而非一味地再加以拋放消波塊、防波堤或加高堤頂高度等傳統式之工法，如此海岸資源之永續經營與利用可能才有所助益。

#### 4-5 建立流域土砂管理制度

由於海岸侵蝕主因來自輸砂供應之不足，過去因河川上游水庫不多，加

上水土保持工作不受重視，河川輸砂成爲陸域砂石及海域漂砂之主要來源，當時海岸開發不多故沿岸少有會攔阻漂砂之構造物，因此海岸穩定。但近一、二十年來，因爲水庫之興建、河川之整理及水土保持工作之加強，河川輸砂日漸減少；但砂石開採卻日漸增加，再加上阻擋漂砂之防波堤等構造物大量出現於海岸地區，以致海灘大量流失，海岸嚴重侵蝕。故如能從地形安定及海岸漂砂及河川特性等觀點概估地形平衡所須之河川輸砂量，再從水庫積砂排放、砂石開採量管制等著手，以人爲方式輔佐讓河川排放適宜之砂量至海岸，如此海岸侵蝕問題當可有所控制。

#### 4-6 大型海岸地區開發之管制

爲因應工商發展及輔佐大型工業之設廠，近年來政府核准了許多大型之海岸開發案。此類開發案或可帶來經濟之發展，但因其於海岸週邊大興土木，非但引其鄰旁海岸之侵蝕，更對海岸地區之生態環境、民眾生活及親水權益造成嚴重之影響，也引發許多之抗爭。故爲使海岸資源永續發展，政府應對日後之大型經建開發案作適當之裁量與管制，亦可鼓勵企業界作小規模之精緻開發以減緩對脆弱海岸環境之衝擊。

#### 4-7 沿岸地帶土地利用管理

經建開發對台灣而言是一無法避免之重要建設，但因陸域面積之限制，從過去到現在，許多的建設皆是在海岸地區進行開發，如鹽田、魚塢、海埔新生地、港灣、濱海及離島工業區等無不是緊臨海岸開發，耗用廣闊之海岸週邊土地。由於時代背景及經濟轉換問題，上述之開發建設有許多已停擺或縮小規模，因而有大片之荒廢土未予使用。政府如能善於利用，將公有或民間規劃之開發建設視類加以輔導、獎勵於上述適宜之荒廢地區進行開發；如此將可減輕海岸之負擔、避免過多之人爲開發而引發之侵蝕問題，讓我們及後代能多擁有一些自然之海灘。另一方面讓廢棄土地得以有效利用，而能增加國土效益。當然政府單位仍必須有效管理及監督已開發海岸土地之利用與保護，以免過度之濫開發造成海岸之二度傷害。

#### 4-8 事權及資源之整合

爲能達成海岸侵蝕防治及保護之效益，政府主事單位應召集海岸工程防治之負責單位就相關問題加以整合，並分享經驗及建立溝通管道，以免有各自爲政、重覆建設造成資源浪費之情形。另外亦應就目前分散各地之管理單位加以整編並劃分職掌以利災情通報及海岸保護之效率，以免造成互相推拖，延誤工程規劃或搶修之時機。再者負責單位簡化、職權確認後易較有利於各單位在海岸保護與管理上之方便，對海岸保護管理而言是一有效之對策。

#### 4-9 魄力且嚴格之海岸管理執行

台灣目前所發生之各類海岸問題，除天然力量之作用外，人爲力量之破壞是爲最大之元兇。政府、企業界及一般民眾爲了經濟因素或自身利益漫無管制的在海岸週邊地區恣意開發與破壞，導致今日海岸資源日漸匱乏、海岸災害層出不窮之問題，其最大之因素乃在無適當且完善之管制法源及政府無嚴格管制取締之魄力。保護海岸、管理海岸之口號與呼籲雖然人人會喊，在各類相關之會議上，學者、民代與官員也競相提出辦法，可惜爲了利益一切皆淪爲空談。故各階人士皆需再教育，民眾與企業界要懂得珍惜海岸資源、政府單位要有魄力去管制各類之海岸破壞行爲，專家學者要負起教育責任，對任何會影響海岸環境之開發皆應理性的詳加把關，同時協助政府早日制定完善之管理法則，以期對海岸開發建設及海岸資源永續利用能達雙贏之目標。

### 五、結 論

- 一、台灣海岸侵蝕問題雖然部地區已獲控制，但新的侵蝕地段持續出現，而且保護方法常有改變海岸特性、破壞海岸環境之問題，爲保永續發展，工程學者除朝柔性工法研擬外，政府於開發與保護之判斷上須作全盤性

之考量。

- 二、海岸侵蝕問題須朝海岸特性掌握、海象條件充足及土砂平衡管制、舊有工法檢討、新式工法採行等策略同時考量方能收效。同時全民保護海岸觀念之認知、海岸開發之管制及整合性海岸管理之全面配合方能真正達到海岸保護之功能。

## 致 謝

本教材內容部份取自民國 88 年 2 月中華民國永續發展學會之“海岸地區之永續發展研究計畫”期末報告初稿，在此一併致謝。

## 參考資料

1. 黃清和(1991~1995)：“台灣海岸沖淤調查研究”，港研所基本研究。
2. 黃清和(1997~1998)：“屏東林邊沖淤調查研究”，港研所基本研究。
3. 郭金棟(1980)：“台灣海岸地形變化及其未來之開發利用”，國立成功大學水利及海洋研究所。
4. 中華民國永續發展學會(1999.2)：“海岸地區之永續發展研究計畫”，期末報告(初稿)。
5. 許民陽(1999.3)：“花東海岸的侵蝕後退研究”，土木技術 pp.64-89。

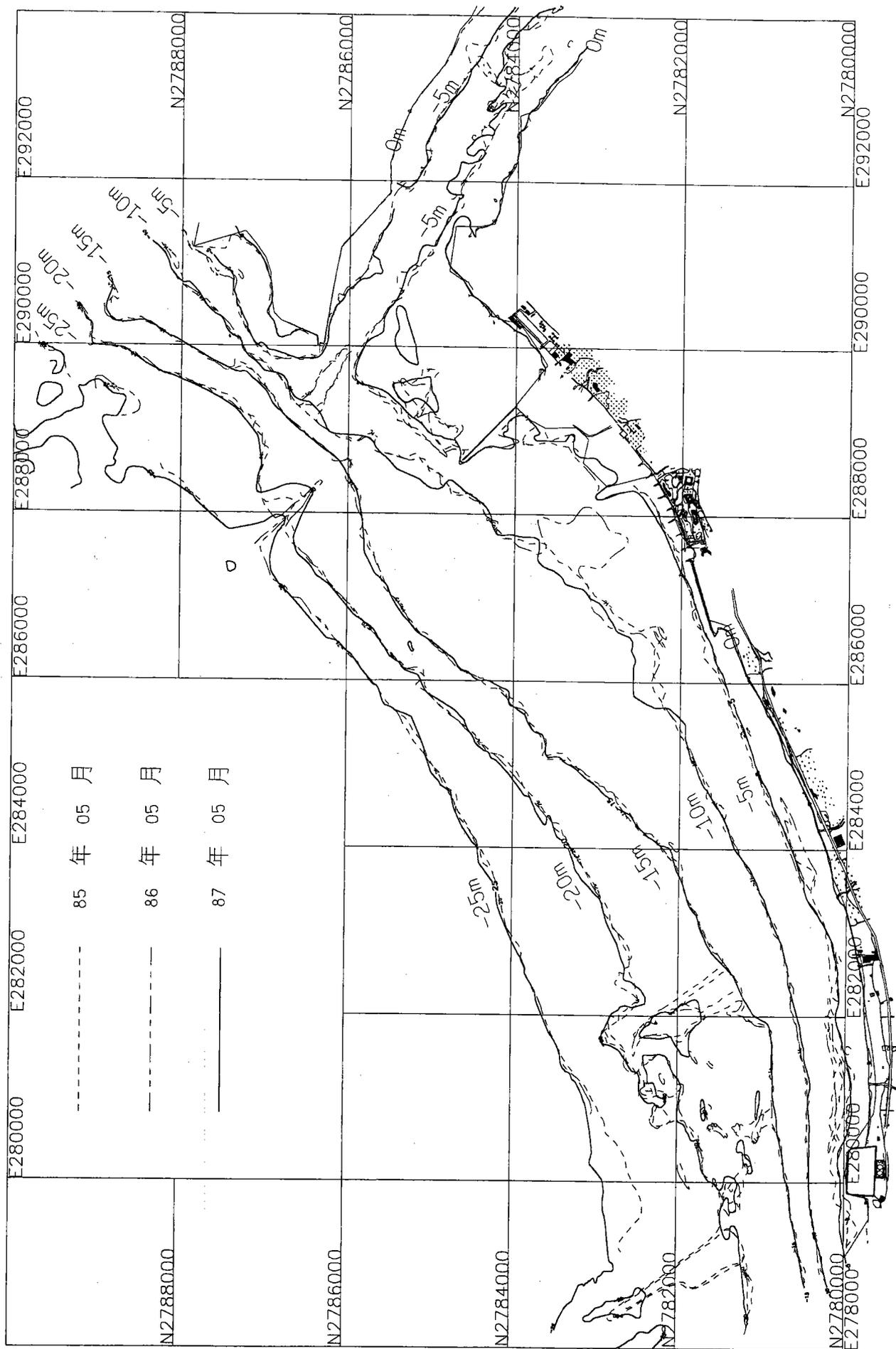


圖 1 淡水八里海域地形監測比較圖

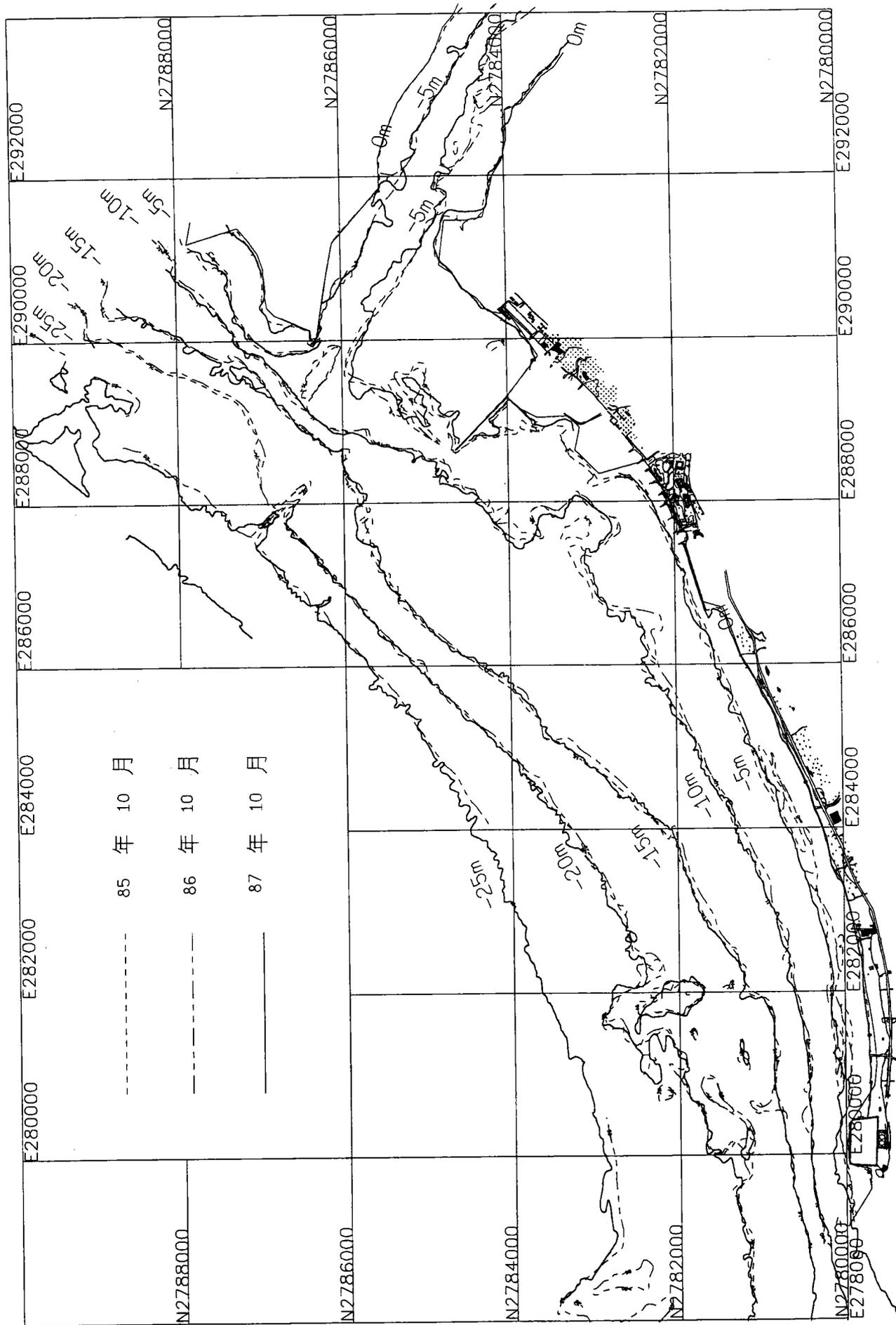


圖1(續)淡水八里海域地形監測比較圖

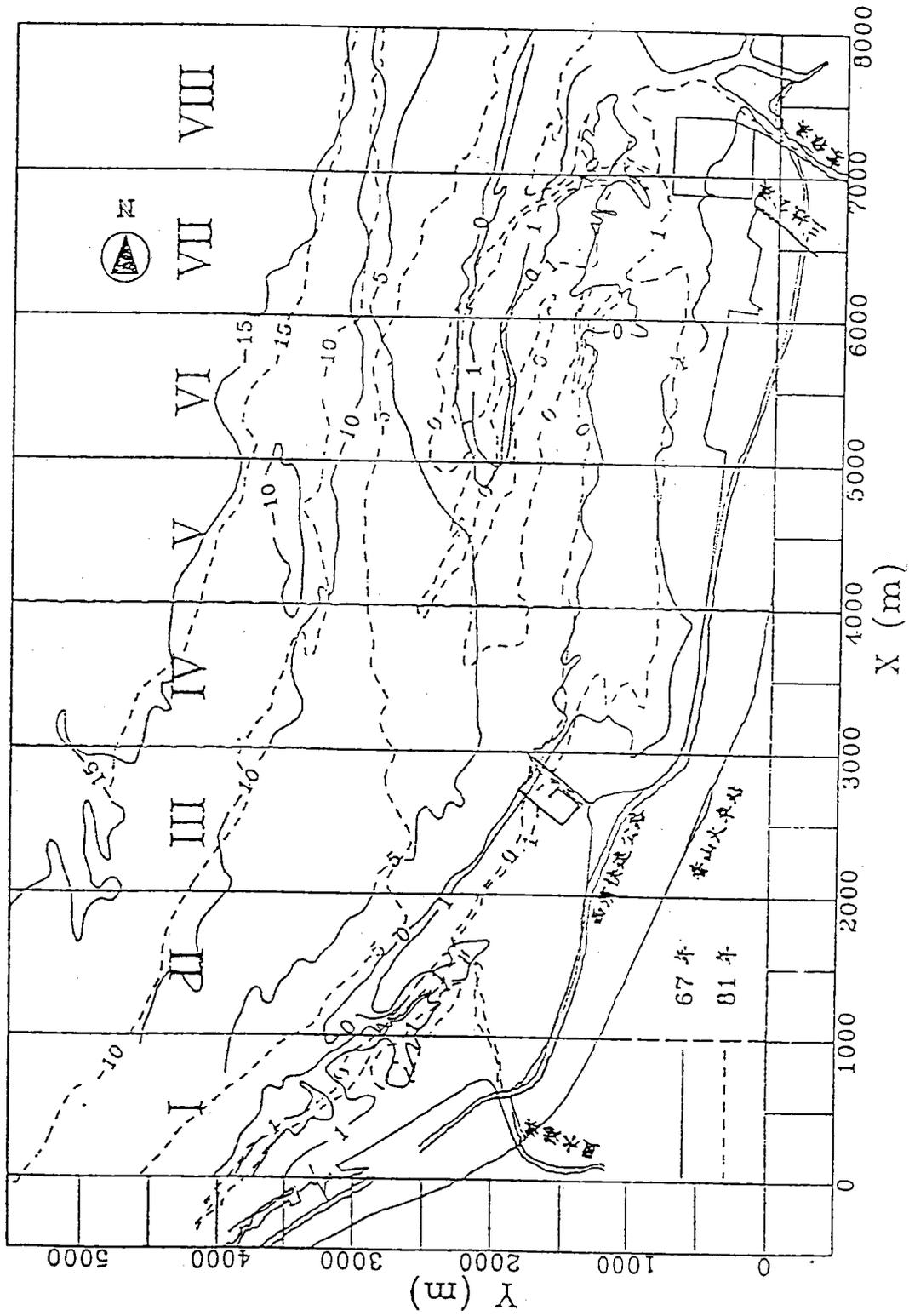


圖 2 新竹香山附近水域 1978 年與 1992 年地形比較圖

152656.8542E  
2608384.7763N

140636.039E  
2596363.961N

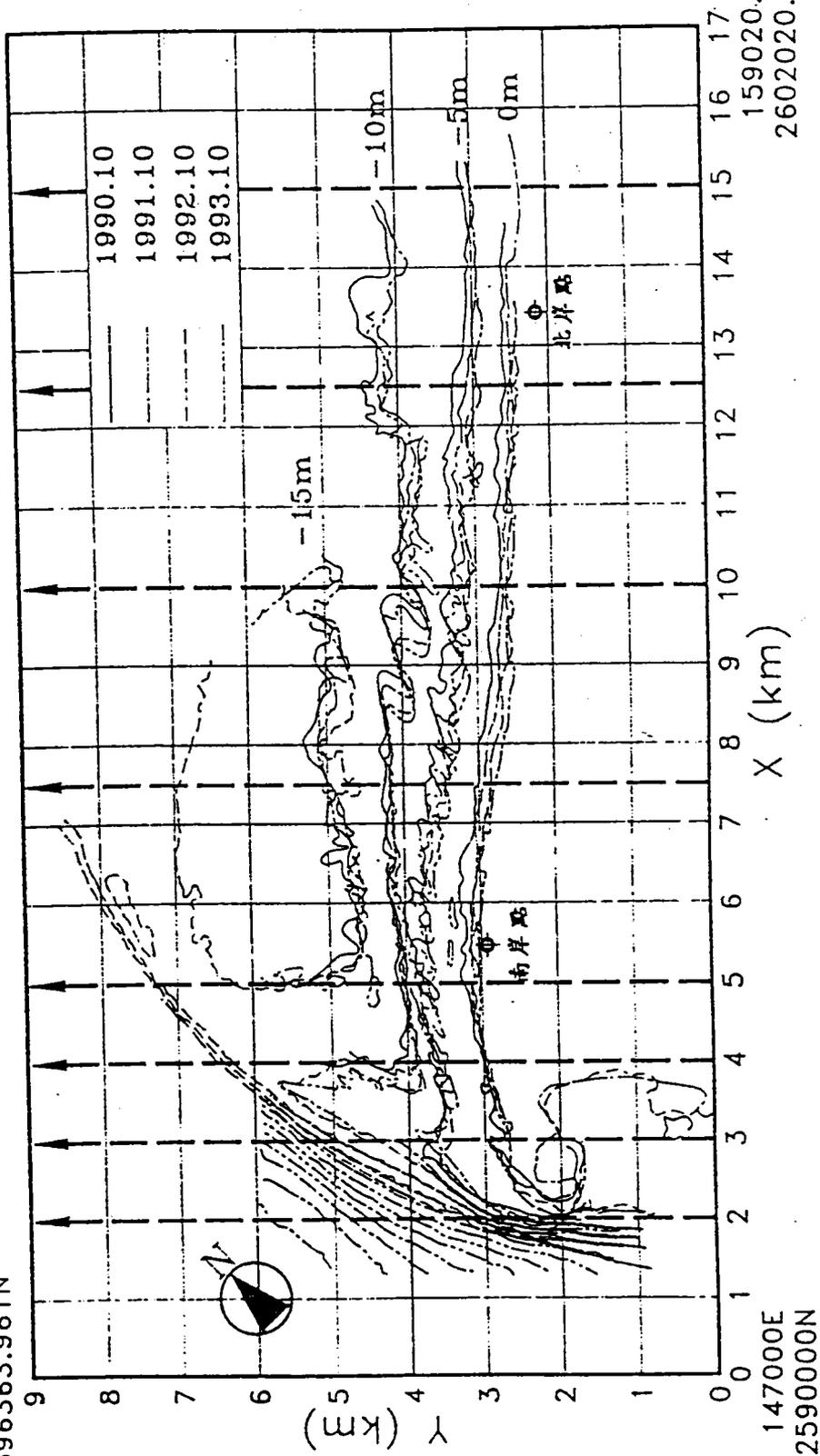


圖 3 外傘頂洲西側地形等深線變化比較圖(1990~1993)

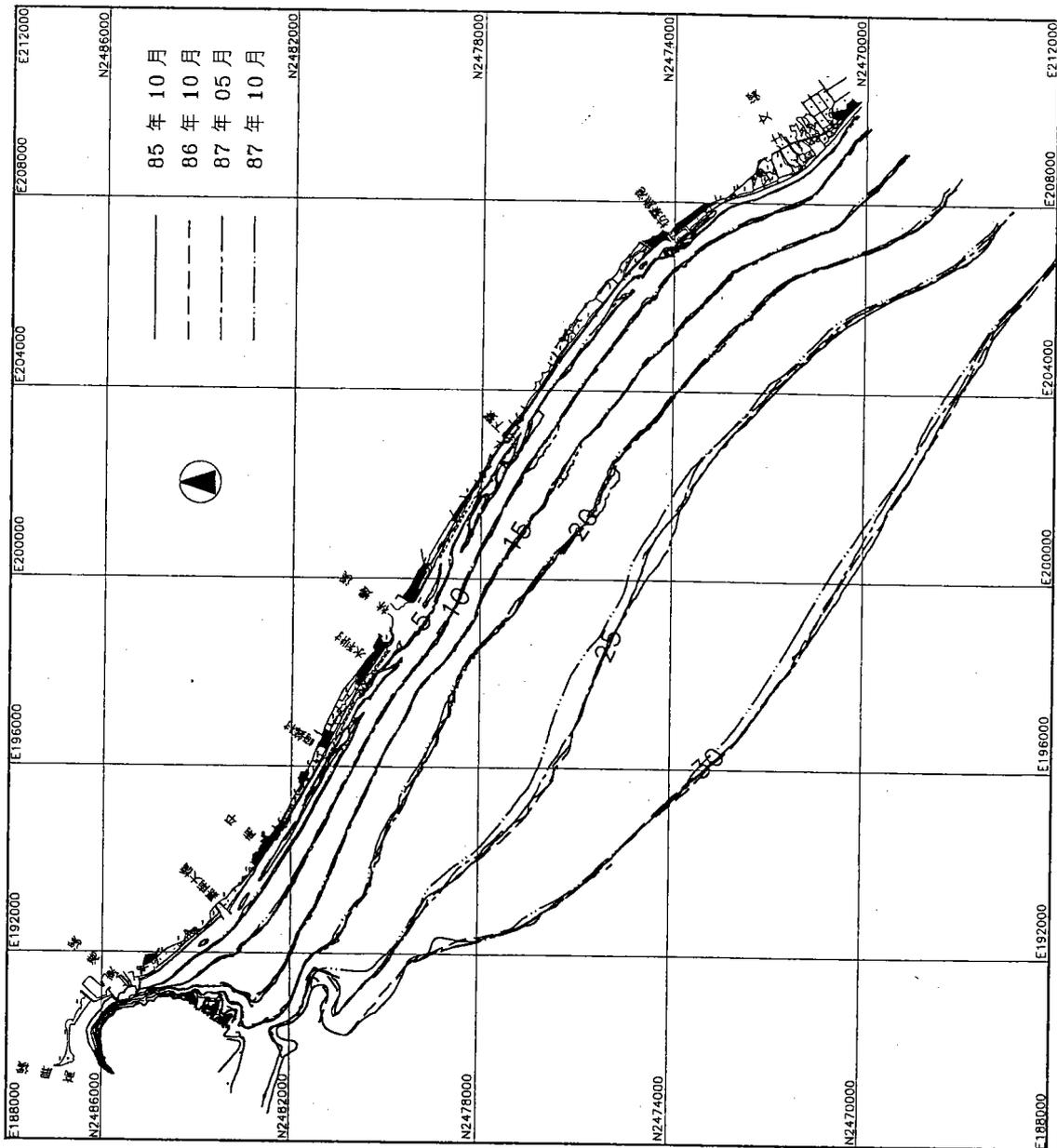


圖 4 屏東林邊海岸地形比較圖



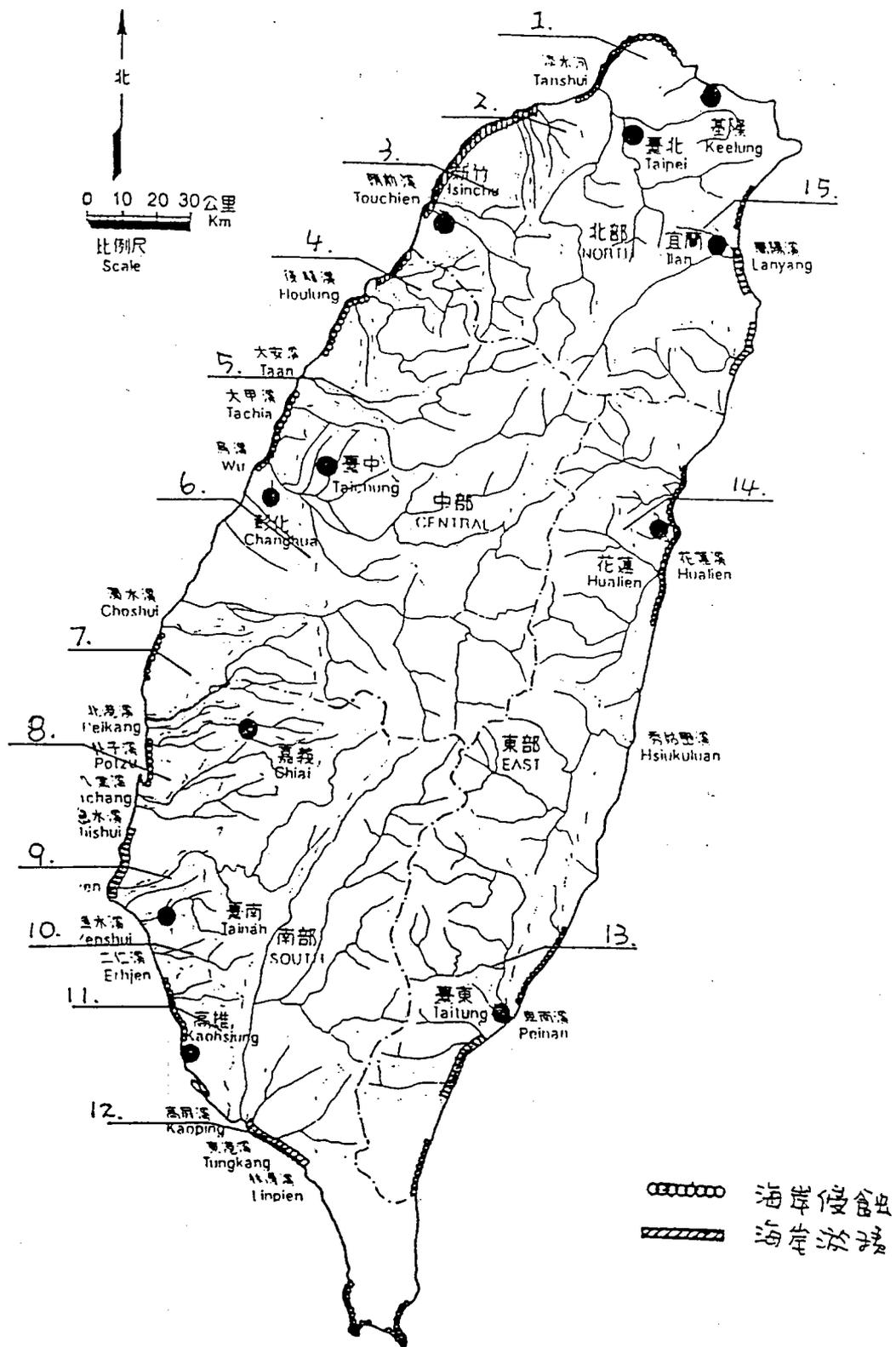


圖 6 台灣四週海岸沖淤近況示意圖

# 海岸保護對策與工法

蔡清標\*

## 一、前言

在國內工業經濟發展的強烈需求，以及海岸資源多元化的發展之下，海岸空間已然成爲開發利用的主要對象之一。而當人類在海岸地區的利用漸趨頻繁時，海岸環境也將承受不可避免的衝擊；除海岸生態環境的改變外，以海岸線的變遷將最爲顯著。台灣海岸線長達一千六百餘公里，大部份爲砂質海岸，由以往的海岸線變遷調查記錄顯示，過去屬於堆積型的海岸多數已演變爲侵蝕型的海岸，而最大的侵蝕幅度甚至達到數百公尺，海岸土地資源流失之速實在驚人。海岸線後退除造成海岸土地資源損失外，海岸地區淹水災害的發生潛能將形增加，對開發或未開發的海岸均構成極大的威脅。目前大家講求資源永續發展的時代，保育海岸地區之水土資源實爲海岸研究應重視的課題。

海岸漂砂的供給失調，是造成海岸線侵蝕後退、海岸土地資源損失之主因，大體上可以分爲自然及人爲因素兩方面。自然因素如斜向波浪的持續侵蝕作用、颱風侵襲、自然地形阻隔漂砂平衡、以及溫室效應使海水面上升等等。而致使海岸侵蝕的人爲因素則有(1)上游河川的整治、水庫興建、山地水土保持措施、河川砂石過渡開採等因素使得海岸砂源減少，(2)大型海岸結構物、港灣防波堤及沿海抽砂造陸工程而阻斷漂砂平衡，(3)海岸地區地下水超抽致使地層下陷，或(4)其他不當之海岸開發行爲等等。

防治自然的海岸災害使減至最低之外，減少人爲的因素，應是海岸保護的最佳策略。海岸侵蝕防治的工法，傳統上以建造硬性結構物如海堤、護岸、突堤群、離岸堤群等爲主要，係藉以改變海岸的波流系統特性，而達到局部性的

---

\* 國立中興大學土木工程學系教授

保護效果。此等傳統方法以日本使用為最多例，由文獻報告，自 1965 年至 1996 年之間，海堤與護岸的總長度達到 8927 km，突堤群共 9387 座、長達 384 km，而離岸堤群共 7371 座、總長 837 km，此等結構物措施的總長約佔了日本海岸線總長度的 1/3，真可謂是「萬里長堤」。國內也大多是因循日本經驗，以建構硬性結構物來保護海岸。而非結構物性(non-structural)的侵蝕防治工法，最常見的則屬人工養灘(beach renourishment)及迂迴供砂(sand bypassing)。

傳統工法常不太講究海岸的親水性與景觀，而且遇到颱風波浪侵襲時，海岸災害依然頻仍發生之例亦到處可見。因此，包括日本在內，正發展以「與自然調和」(Harmony with Nature) 的非傳統性工法來保護及創造永續發展海岸空間。改進的非傳統工法有緩坡海堤(mild-slope seawalls)、人工岬灣(headland control)、人工潛礁(artificial reefs)，甚至也有沙灘地下水位控制(control of beach ground watertable)的方法等。近來，日本建設省(Ministry of Construction)及運輸省(Ministry of Transportation) 提倡以軟硬工法兼施的海岸環境整備計畫，分別如海岸社區計畫(coastal community zone, CCZ)及整體海岸保護系統(integrated shore protection system, ISPS)，除藉以達到海岸的保護以外，並創造親水性的海岸空間。

## 二、海堤與護岸

海堤(seawalls)、護岸(revetments)與駁岸(bulkheads)，基本上是同一體系的海岸結構物，它們幾乎皆平行於海灘線而建造，主要在避免後灘區承受波浪的衝擊，或避免因暴潮而引致海岸淹水，它也有防止海岸線發生侵蝕的作用。海堤或護岸可與水際交接，直接承受波浪的作用；也可設置於後灘區，祇備承受異常水位波浪之用；其堤面可以是直立面、斜面或弧形面，堤面或堤前有時會以消波塊被護。圖 1 為數種不同型式的海堤及護岸示意圖。

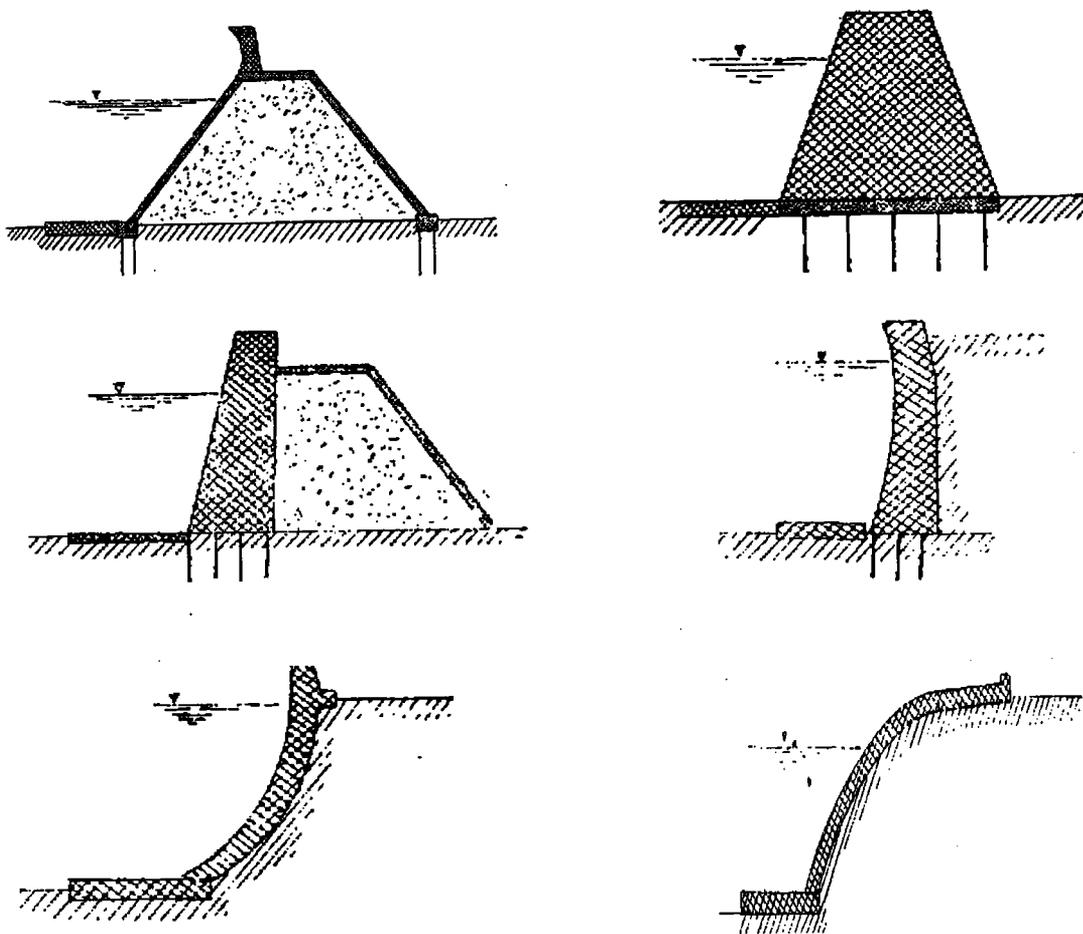


圖 1 不同型式海堤及護岸示意圖

海堤或護岸可以說是存在於海岸最普遍的結構物，然而它們遭受暴風浪襲擊後的災害也最多，每年政府均花費巨額進行復建工作。以 1996 年賀伯颱風過境台灣為例，全台海堤沖毀受損的總長度約達 36.76 公里。如圖 2 為賀伯颱風過境後，苗栗新埔海堤受損及復建後的情形。圖 3 則為護岸受損之實例。

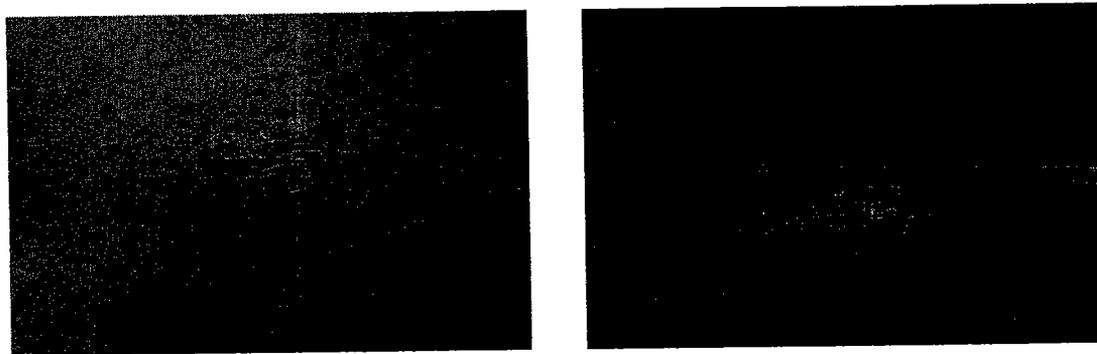


圖 2 苗栗新埔海堤受損及復建後的情形

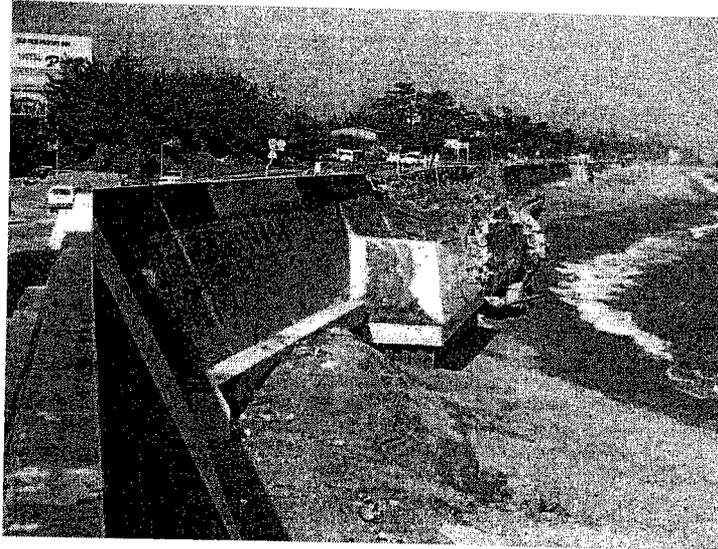


圖 3 護岸受損實例

海堤或護岸的毀損，除本身結構通常較脆弱外，由於波浪的溯升及水流下刷的作用，堤趾遭受沖刷(如圖 4)常是結構物遭毀損的原因之一。另外，當波浪斜向入射作用於海堤時，海堤前形成短峰波(short-crested wave)系統，若上游砂源不繼的情況下，此種波浪系統也會逐漸地沿堤基而產生挖掘的作用，嚴重者有相當深度的刷溝出現，進而影響海堤的安全。如圖 5，海堤在波浪斜向入射作用下，不僅堤基有被沖蝕之虞外，在海堤的下游海岸(G 處)亦常發生被侵蝕的情況；此種現象當海堤愈長，影響就愈大 (Silvester and Hsu 1993)。因此海堤的建造，較適合於堤前有相當寬度的沙灘情況。但是若上游供砂源不足的情況下，平直的沙灘經長時間的斜向波浪作用下，也可能被搬移殆盡，以致海堤直接承受波浪的作用，堤趾沖刷侵蝕現象仍然會發生。因此海堤設計時，堤趾沖刷的現象應特別防治。

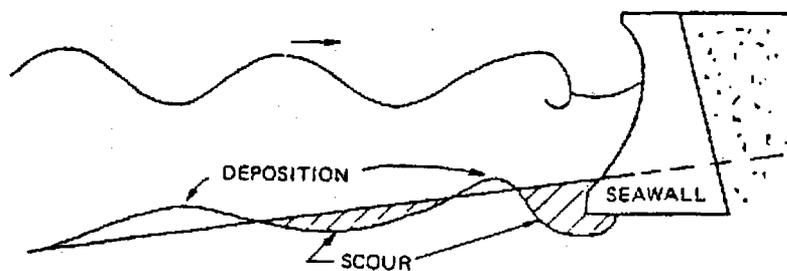


圖 4 堤趾沖刷剖面示意圖

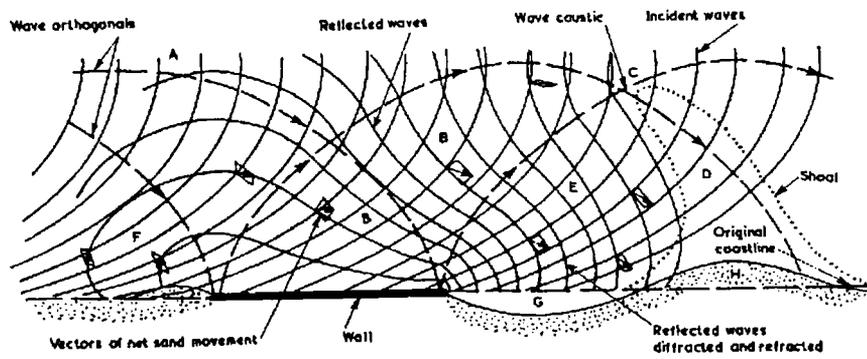


圖 5 海堤下游海岸侵蝕示意圖

### 三、突堤

突堤(groins)的建造主要是爲了攔截碎波帶內活動的沿岸漂砂，通常爲垂直於海岸線的短堤，堤頭通常僅伸至碎波帶內。在斜向入射波浪作用下，突堤前上游區逐漸造成三角形狀的淤砂，但在其下游海岸，則因漂砂源被阻斷，反而造成侵蝕 (如圖 6)。單一突堤的上方攔截沿岸漂砂，但下方卻產生嚴重的侵蝕結果，因此常需建造第二道突堤，進而再逐漸演變爲突堤群，使各個突堤間都有置留漂砂的能力，然而突堤群最下游海岸則承受更嚴重的侵蝕後果，此情況在海岸上游砂源供給失調情況下更形嚴重。

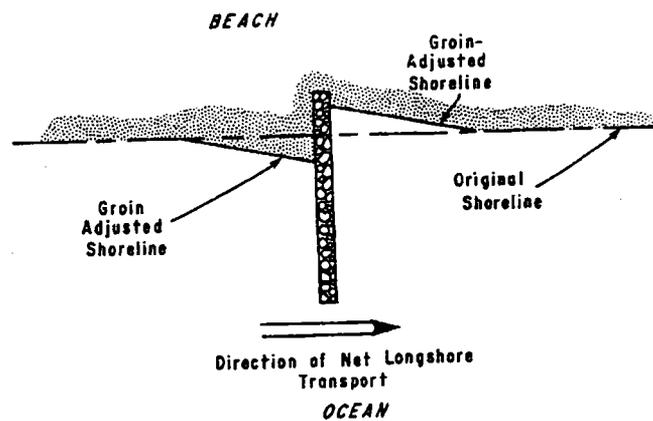


圖 6 單一突堤對海岸線影響示意圖

為減少下游海岸受突堤佈置的影響，美國陸軍工程師兵團建議突堤群之末端設置漸縮段 (transition section)，如圖 7 所示。其中堤長及堤距分別為

$$L_1 = \alpha_1 L_n, \quad \alpha_1 = \frac{1 - \frac{R}{2} \tan 6^\circ}{1 + \frac{R}{2} \tan 6^\circ} \quad (1)$$

$$S_1 = \alpha_2 L_n, \quad \alpha_2 = \frac{R}{1 + \frac{R}{2} \tan 6^\circ} \quad (2)$$

$L_1$  = 漸縮段第一道突堤的長度

$R$  = 突堤系統突堤間距與突堤長之比值

$L_n$  = 突堤系統之突堤長

$S_1$  = 突堤間距

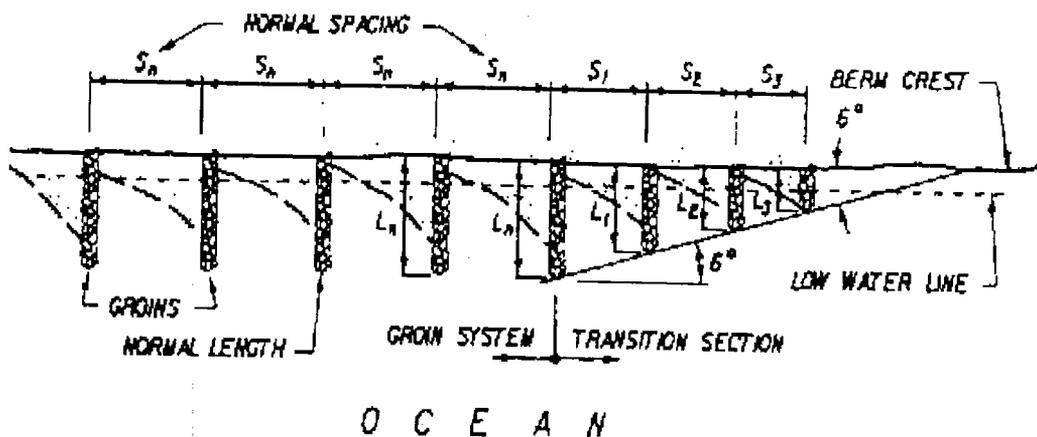


圖 7 突堤群佈置示意圖

最短的突堤應伸至平均最低之水位線。當應用上式計算出  $L_1$  與  $S_1$  後，則可計算  $L_2 = \alpha_1 L_1$ ， $L_3 = \alpha_1 L_2$ ，...，及  $S_2 = \alpha_2 S_1$ ， $S_3 = \alpha_2 S_2$ ，...。圖 8 為美國紐約 Westhampton Beach 以拋石突堤保護海岸之實例。突堤群也有複合形狀的佈置，如 Y 字形、T 字形或倒 L 形等，如圖 9 為日本高知海岸之 T 形突堤群。

突堤群主要在攔截沿岸漂砂，因此在海岸上游砂源缺乏時，突堤群在保護海岸侵蝕的效果較為有限。另外，往往由於暴風浪的作用，突堤之間有強烈的離岸流(rip current)發生，如圖 10 所示，可能將原來堆積在堤間的砂土帶往較遠較深的外海，一去不復返，甚至引起堤間的侵蝕。因此，突堤群常需要配合人工養灘而用。

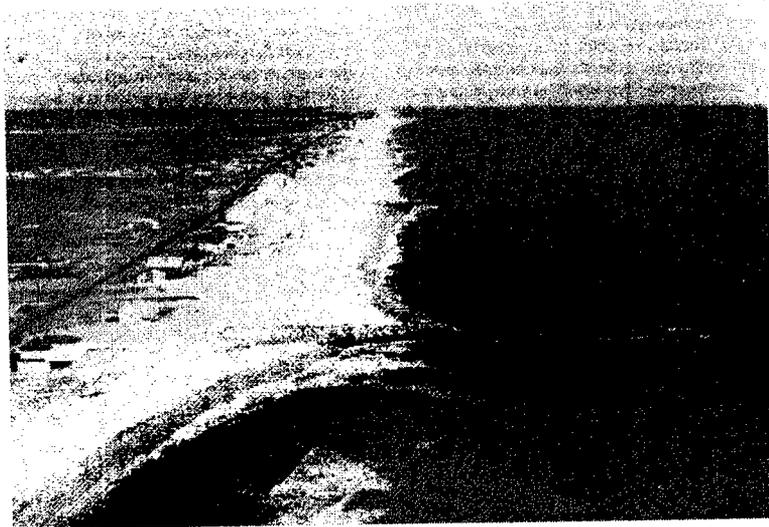


圖 8 美國紐約 Westhampton Beach 之拋石突堤群 (1972)



圖 9 日本高知海岸之 T 形突堤群(1981)

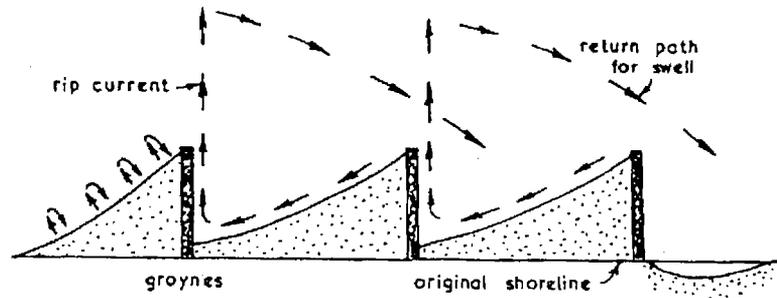


圖 10 突堤間的離岸流示意圖

#### 四、離岸堤

離岸堤(offshore breakwaters; detached breakwaters)是建造於海中，幾乎平行於海岸線的短堤，主要用以消減波浪能量並在堤後產生堆砂，而保護受侵蝕後退的海岸。離岸堤通常以拋石或混凝土塊堆積而成，而且以堤群存在，水深通常設置在 3m 至 5m 的水深中；為常用的海岸保護工法之一。若離岸堤高度低於水面，則成為離岸潛堤 (submerged offshore breakwaters)。

圖 11 為單一離岸堤及離岸堤群背後可能形成砂舌 (salient) 及陸繫砂洲 (tombolo) 之示意圖，在波浪斜向作用下，下游海岸離岸堤的堆砂效果將較差，同時最下游側也會發生較為嚴重的侵蝕。離岸堤背後形成砂舌及陸繫砂洲的條件，與堤的長度  $l$  及離岸距離  $y$  有密切的關係，如表一至表三為形成砂舌及陸繫砂洲條件之實例，很明顯的可以看出， $l/y$  愈小時，形成陸繫砂洲的情況愈低。圖 12 為有名的日本皆生海岸，共有 28 座離岸堤，完成於 1992 年；以離岸堤保護皆生海岸之前，係以海堤及突堤群保護海岸之侵蝕，但未見成效，如圖 13 所示。

離岸堤除了可能有堤趾沖刷的問題外，較大的隱憂，應是颱風波浪作用的問題。當颱風波浪作用時，大量越波的水量經由堤間的狹窄水域出海，由於離岸流速過大，如圖 14，可能將原先堆積在堤後的砂土帶出外海，而使堤後殘存的砂舌底床變陡，堤間水域變深，因而一般的波浪也會直接作用於堤間背後的腹地，故需要再加以施工保護，如圖 15。

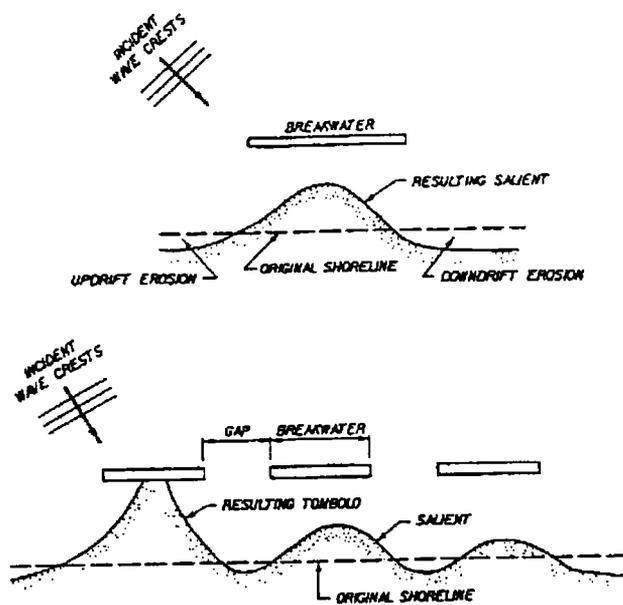


圖 11 離岸堤(群)背後之砂舌及陸繫砂洲示意圖

表一 形成陸繫砂洲條件之實例

Condition	Comments	Reference
$e/y > 2.0$		SPM (1984)
$e/y > 2.0$	Double tombolo	Gourlay (1981)
$e/y > 0.67$ to 1.0	Tombolo (shallow water)	Gourlay (1981)
$e/y > 2.5$	Periodic tombolo	Ahrens and Cox (1990)
$e/y > 1.5$ to 2.0	Tombolo	Dally and Pope (1986)
$e/y > 1.5$	Tombolo (multiple breakwaters)	Dally and Pope (1986)
$e/y > 1.0$	Tombolo (single breakwater)	Suh and Dalrymple (1987)
$e/y > 2 b/e$	Tombolo (multiple breakwaters)	Suh and Dalrymple (1987)

表二 形成砂舌條件之實例

Condition	Comments	Reference
$e/y < 1.0$	No tombolo	SPM (1984)
$e/y < 0.4$ to 0.5	Salient	Gourlay (1981)
$e/y = 0.5$ to 0.67	Salient	Dally and Pope (1986)
$e/y < 1.0$	No tombolo (single breakwater)	Suh and Dalrymple (1987)
$e/y < 2 b/e$	No tombolo (multiple breakwaters)	Suh and Dalrymple (1987)
$e/y < 1.5$	Well-developed salient	Ahrens and Cox (1990)
$e/y < 0.8$ to 1.5	Subdued salient	Ahrens and Cox (1990)

表三 其他佈置條件之實例

Condition	Comments	Reference
$e/y \leq 0.17$ to $0.33$	No response	Inman and Frautschy (1978)
$e/y \leq 0.27$	No sinuosity	Ahrens and Cox (1990)
$e/y \leq 0.5$	No deposition	Nir (1982)
$e/y \leq 0.125$	Uniform protection	Dally and Pope (1986)
$e/y \leq 0.17$	Minimal impact	Noble (1978)



圖 12 日本皆生海岸 (1988)

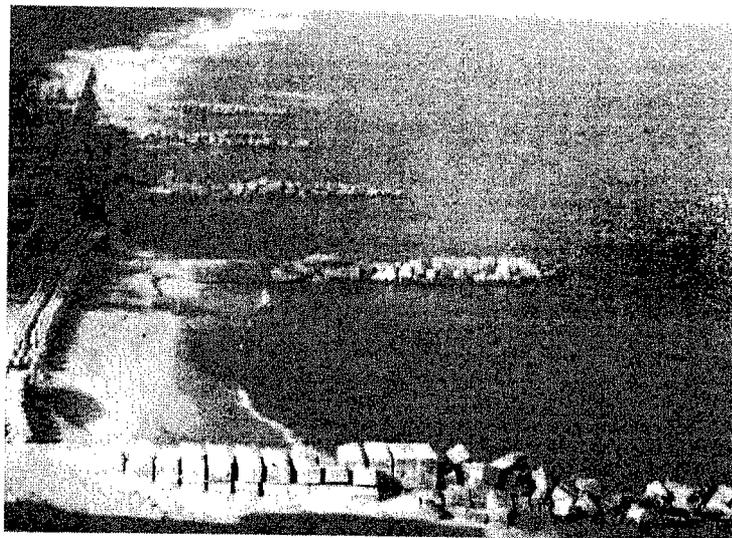


圖 13 日本皆生海岸 (1972)

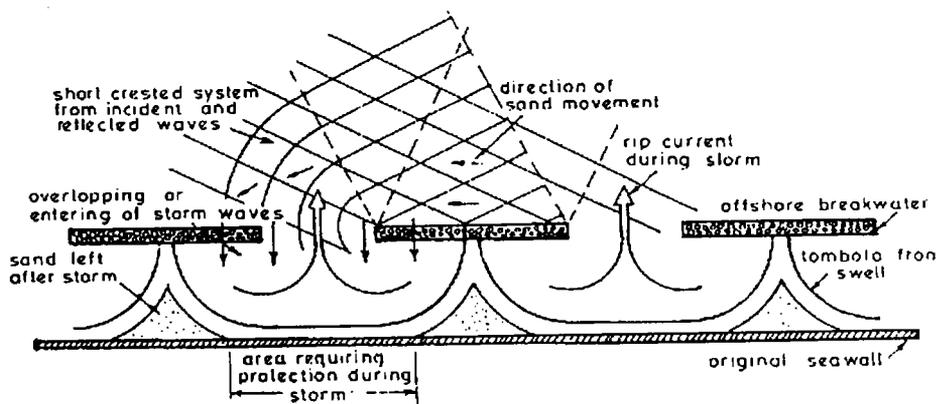


圖 14 離岸堤之間發生離岸流之示意圖



圖 15 離岸堤之間暴風浪引致之離岸流

## 五、消波堤

消波堤(wave absorbing breakwaters)為以消波物體(通常為消波塊)沿著海岸建造的結構物，通常使用於海崖型海岸的保護，如圖 16 所示。消波堤通常極長，猶如設置屏風般保護海岸，堤趾沖刷的防止以及暴風浪越波的問題，是消波堤是否成功的關鍵。

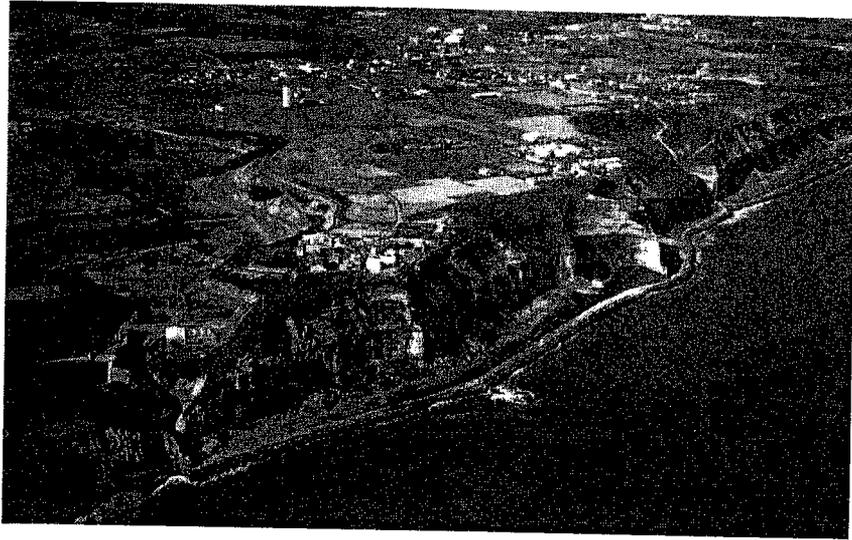


圖 16 消波堤於海崖型海岸的保護

## 六、人工養灘

砂灘，是天然的消波體；利用工程手法在受侵蝕的海岸補給砂源造灘，稱為人工養灘(**artificial renourishment**)，屬於非結構物性的海岸侵蝕防治工法。這種由借土而堆積的人工砂灘，因原來的波浪條件(如波向)並未改變，而又因新堆砂土下游端相對地增加波浪入射角度，使得下游的砂土常先被波浪侵蝕(如圖 17)，最後整個堆砂土方也可能流失殆盡。由施工後的研究報告(Everts at al. 1974)指出，人工養灘完成後的初期，就有 30%至 50%的土砂流失；及三至五年，就需再自別處借土補充被侵蝕的砂。

如有充分的土砂補給來源，並且規畫設計得當，人工養灘其實是一種很好的海岸侵蝕防止工法；應用人工養灘時，必須先瞭解漂砂的優勢方向、補給之土砂量及性質、海灘坡度等特性。較佳的人工養灘策略，應是輔以適當的人工結構物，如人工岬頭、突堤等等，同時創造親水性的海岸空間。如圖 18 為日本岡山縣的沙美海岸，該海岸為一海水浴場，但因為常遭受暴風浪的侵襲而發生侵蝕現象，故於 1989 年以白砂完成人工養灘，並植以青松綠化海岸，創造出親水性的海岸空間。

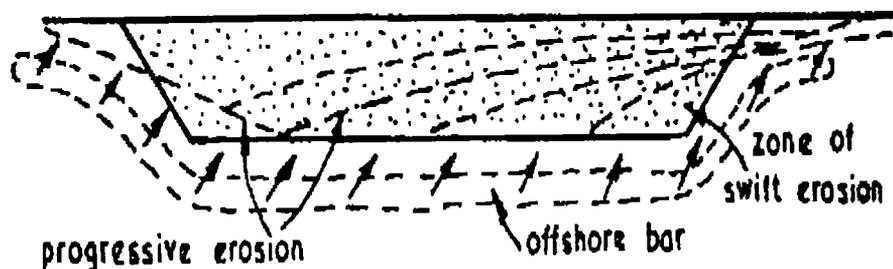


圖 17 人工養灘受斜向波浪作用的侵蝕

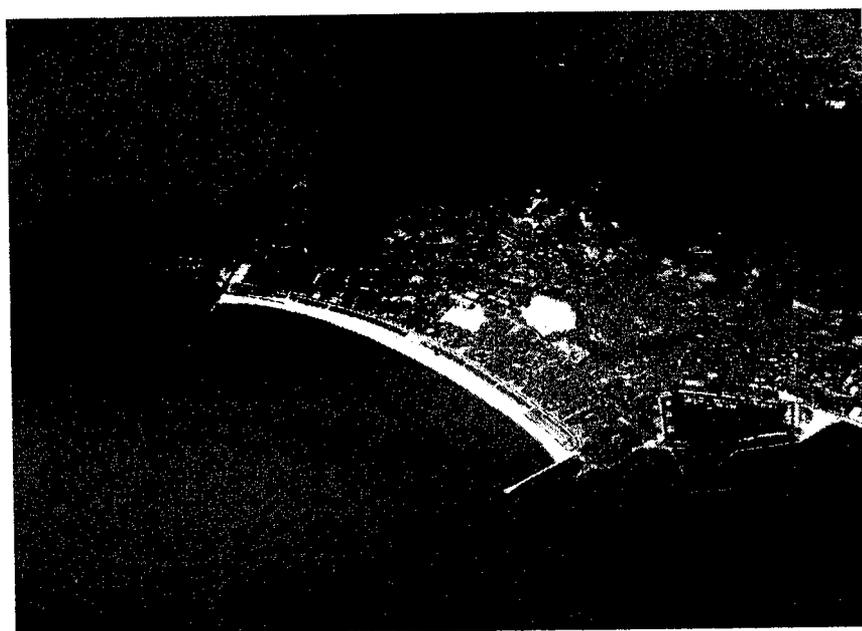


圖 18 日本岡山縣的沙美海岸—人工養灘(1993)

### 七、迂迴供砂

海岸由於天然的潮口(tidal inlet)、河口(river mouth)與人爲的導流堤(jetty)、防波堤(breakwater)及航道(navigation channel)等因素，常使得海岸漂砂之運移發生不連續現象，導致上游海岸發生堆積，而下游海岸則發生侵蝕，於此情況下，以人工方法藉由自然力量或機械抽砂設備，將上游堆積之砂源引導或抽補至下游侵蝕海岸，稱爲迂迴供砂法(sand bypassing)，也稱做旁道供砂。與人工養灘類似，迂迴供砂法最好亦能輔以適當的人工結構物。如圖 19 爲著名的

日本天橋立砂嘴(sandy spit)海岸，係以迂迴供砂法配合突堤結構物保護砂嘴海岸免受侵蝕的成功例子；其迂迴供砂情況如圖 20 所示。而圖 21 則為高雄港為避免港口淤泥，且解決第一及第二港口之間因波浪反射之堤趾沖刷問題，而建議人工岬頭配合迂迴供砂的案例(Silvester and Hsu 1993)。

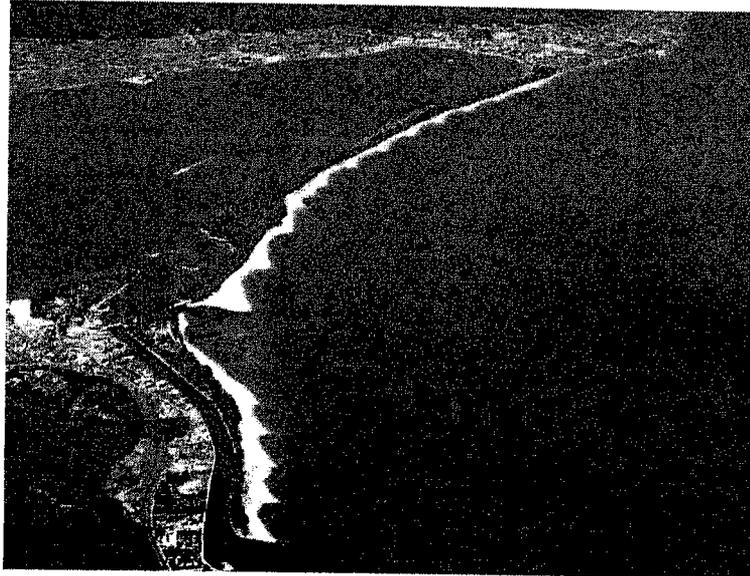


圖 19 日本天橋立砂嘴海岸(1990)

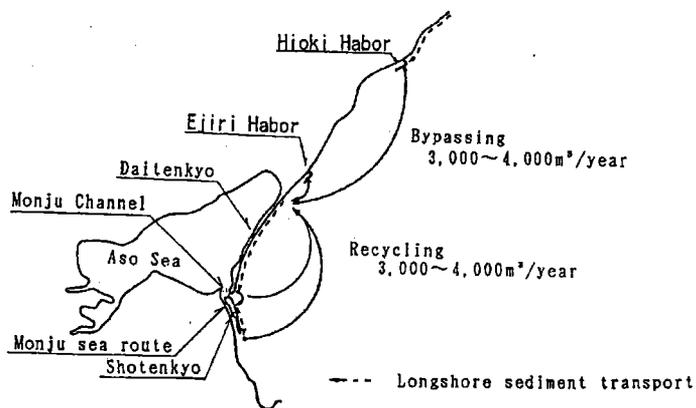


圖 19 天橋立砂嘴海岸迂迴供砂實例

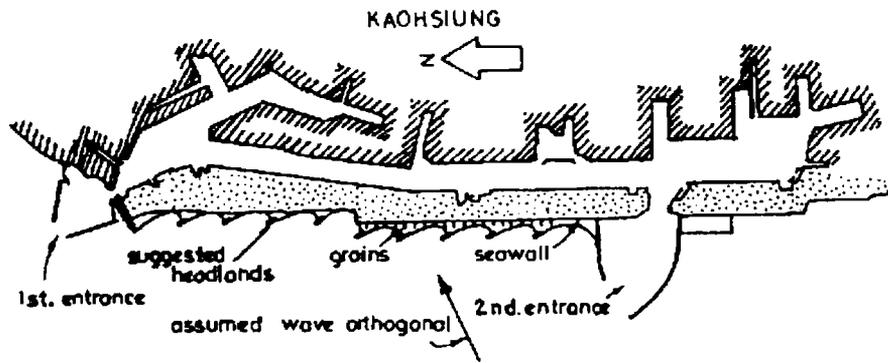


圖 21 高雄港淤泥整治之建議(Silvester and Hsu 1993)

## 八、緩坡海堤

傳統的海堤坡面通常較為陡峭，縱使以消波塊保護坡面，仍然有波浪的反射而產生堤趾沖刷的問題，因而有緩坡海堤(mild-slope seawalls; gentle-slope seawalls)的使用，這種海堤通常不使用消波工，其功用一方面保護海岸的侵蝕，同時配合景觀規畫海岸環境空間。緩坡海堤之坡面通常小於 1/5。如圖 22 及圖 23 為位於日本北海道及大野海岸建構緩坡海堤之實例。

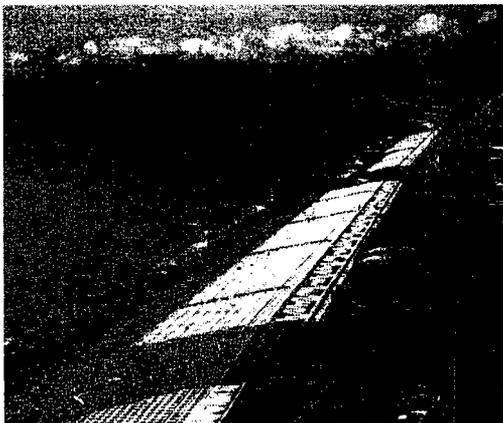


圖 22 緩坡海堤—日本北海道



圖 23 緩坡海堤—日本岩手縣

## 九、人工潛礁

人工潛礁(artificial reefs)，是與離岸潛堤類似的碎波結構物，它們都是令水深變淺，儘可能使波浪在淺礁上碎波，或促進波浪分裂，消滅波浪透過之能量，使得堤後有堆砂或控制沙灘的效果。假如人工潛礁設置於海堤前，可以減緩波浪的溯升、越波，及堤趾的沖刷。人工潛礁與離岸潛堤稍有不同的是，人工潛礁的頂寬(crown)較大許多，通常達到 40 至 50 公尺，因此幾乎可抑制離岸的輸砂。典型的斷面圖如圖 24 所示，由傳統『線』的海岸保護，擴充到『面』的保護層面。由於人工潛礁是低於水面的結構物，對海岸景觀的衝擊影響最小，因此自 1980 年起，日本就漸漸的以人工潛礁取代離岸堤(Asakawa et al 1992)，及至 1992 年，就有 70 個設置人工潛礁的案例，如圖 25 為日本新潟海岸在離岸堤間設置兩座人工潛礁之實例。由於人工潛礁極易與景觀規畫配合，因此它常是海岸環境整備計畫 CCZ 或 ISPS 的一部份。

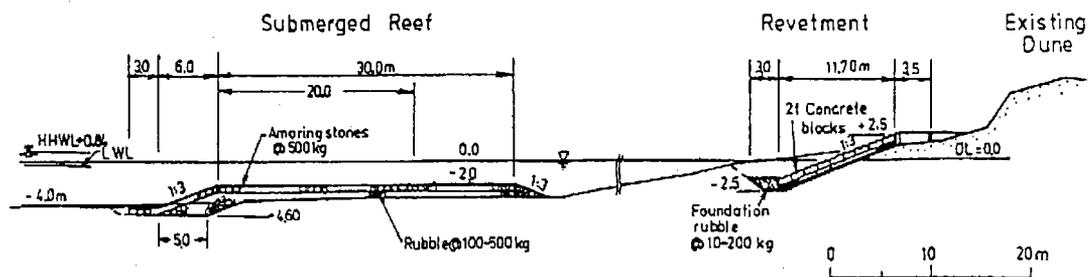


圖 24 典型的人工潛礁斷面圖



圖 25 日本新潟海岸—人工潛礁之實例

#### 十、人工岬灣工法

岬灣(bay)是存在於自然界中常見的一種海岸地形，天然的岬灣在平面上有大小與深淺之別，安定性則依照漂砂進入岬灣的多寡，而有靜態平衡的岬灣與動態平衡的岬灣之分。動態岬灣的兩端有海岸漂砂的流入或流出，岬灣中也可能有河川供給砂石；而靜態的岬灣，其上游則沒有漂砂的流入，下游也沒有顯著的漂砂流出，是一個封閉的漂砂平衡單位。靜態平衡的天然岬灣，是湧浪在常年具有優勢的波浪方向經過岬頭後折繞射作用而形成的，其波浪的折繞射示意如圖 26 所示。圖 27 則為位於澳洲 Cronulla 的天然岬灣。

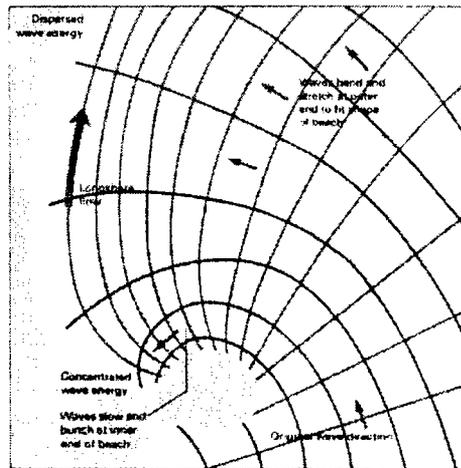


圖 26 岬灣內波浪的折繞射示意圖



圖 27 位於澳洲 Cronulla 的天然岬灣

Hsu et al (1989)以 14 個天然灣岸及 13 個模型灣岸分析，歸納提出一個二階的多項式來描述靜態安定的灣岸形狀。該多項式表示為

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1\left(\frac{\beta}{\theta}\right) + C_2\left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2 \quad (3)$$

式中  $R$ 、 $R_0$ 、 $\beta$ 及 $\theta$ 的定義如圖 28 所示，圖的座標原點定在上游岬頭端點，此點亦為波浪的繞射起始點， $R_0$ 為岬灣的基本控制線，即灣的開口長度，而 $\beta$ 為入射波浪波峰線與控制線間的夾角，稱為基本入射角；而 $(R, \theta)$ 為灣內海岸線的任意點座標。式中係數  $C_0$ 、 $C_1$ 及 $C_2$ 可由下式計算之：

$$\begin{aligned} C_0 &= -0.1333 + 0.0152\beta - 0.003\beta^2 \\ C_1 &= 0.5034 - 0.3046\beta + 0.0013\beta^2 \\ C_2 &= -0.3776 + 0.0312\beta - 0.001\beta^2 \end{aligned} \quad (4)$$

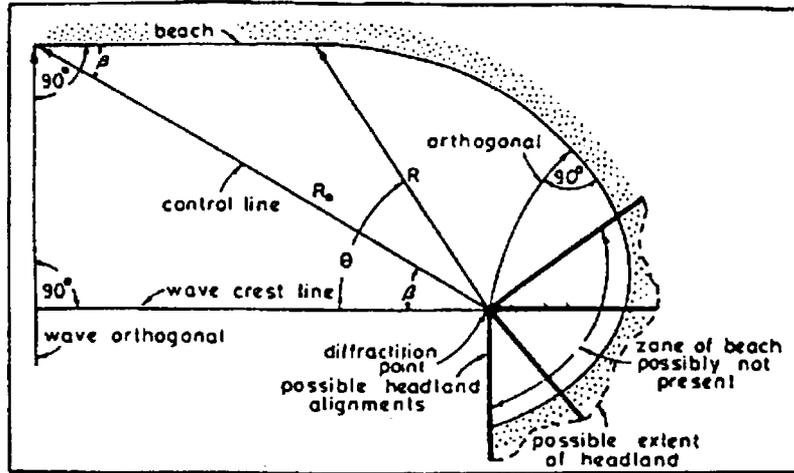


圖 28 岬灣座標示意圖

達到靜態平衡的天然岬灣，波浪經過折繞射後，到達灣岸時，波向幾乎都垂直於灣岸線，而且會沿著灣岸同時碎波，因此幾乎沒有沿岸流及沿岸漂砂的發生。依照侵蝕的海岸的地形地貌特徵，以及波浪的方向特性，規畫設置人工岬頭的位置，以自然的漂砂侵淤平衡方式，或配合人工養灘方式，創造靜態形狀的灣岸，進而達到安定海岸線的目的，稱為「人工岬灣工法」或「岬頭控制工法」(headland control)。靜態的灣岸受到颱風波浪作用時，灘線仍然會呈現短暫的後退，因此設計上必須預留灘線後退的空間。人工岬灣示意如圖 29 所示。

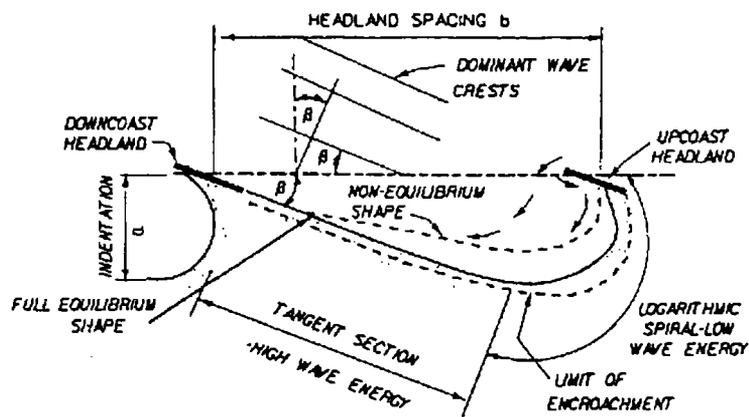


圖 29 人工岬灣示意圖

人工岬頭的設計，應考慮到岬頭的種類、形狀、長度、離岸距、方向、間距、岬頭的保護、和人工岬頭群的施工順序。所需砂土的土方量和砂源的開發，也是決定人工造灣速度的重要因素。依 Silvelster and Hsu (1993)，人工岬灣可以用在受侵蝕的平直海岸，如圖 30；或正在受侵蝕的天然灣中，可以選擇適當的控制點，規畫成數個安定的小灣，如圖 31；或在狹長的砂洲外緣，規畫大小適當的人工岬灣群，利用既有砂洲為砂源，以堆積與侵蝕相平衡的原理，做有效可靠的安排，如圖 32，使該砂洲不因缺乏漂砂源而被侵蝕。既有的突堤群或離岸堤群，也可以加以改裝為安定的人工岬灣，如圖 33 及圖 34。港灣防波堤下方的侵蝕海岸，也可規畫人工岬灣的方式保護之，如圖 35。

人工岬灣，因為波高沿下游直線段到上游岬頭後方，有大小的變化，是最好的人工海水浴場，如圖 36 的一例。圖 18 也可以視為是人工岬灣配合人工養灘的實例。利用人工岬灣的方式，新加坡政府由 1970 年起，已開發出許多新填築的海埔地，成效頗佳，如圖 37。

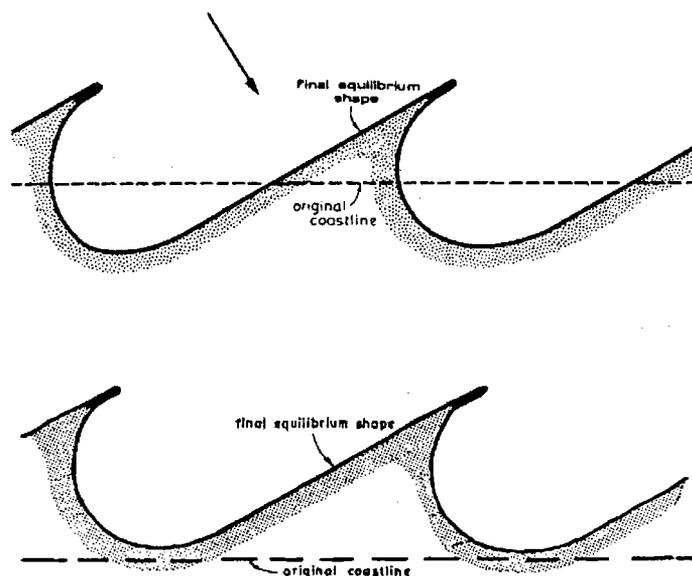


圖 30 以人工岬灣保護平直海岸

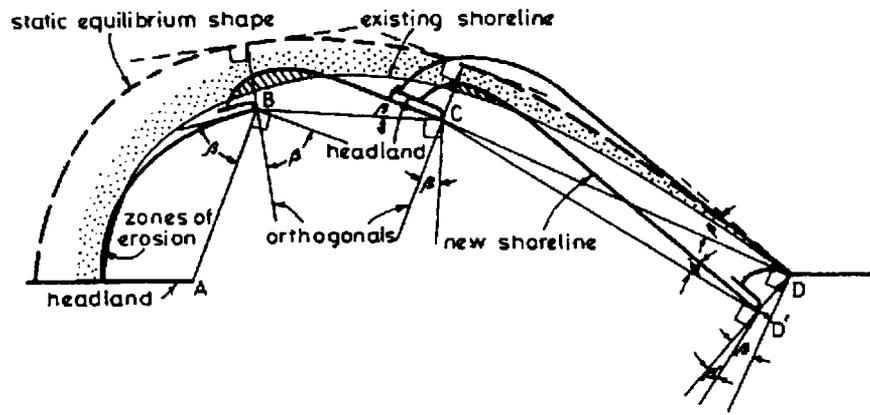


圖 31 受侵蝕的天然灣中規畫成數個小的人工岬灣

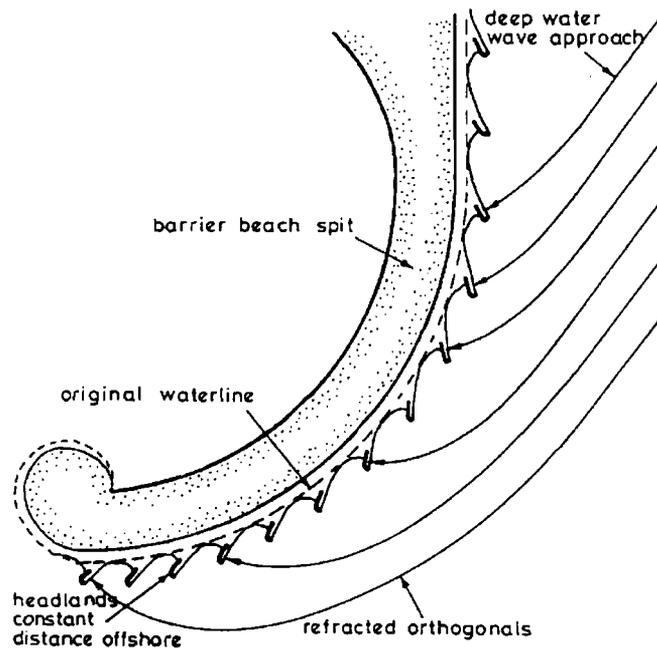


圖 32 以人工岬灣保護受侵蝕的天然砂洲

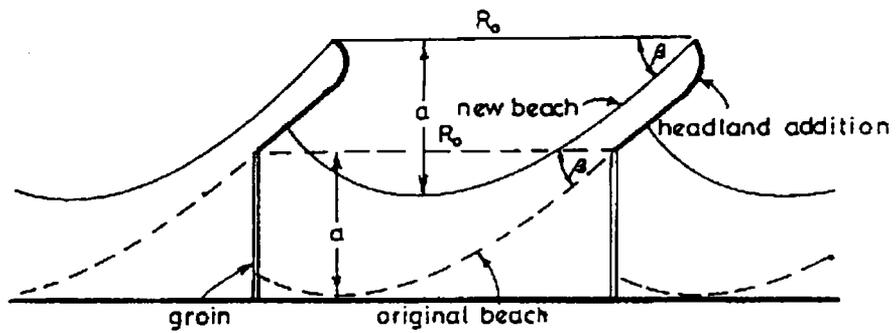


圖 33 突堤群改良為人工岬灣示意圖

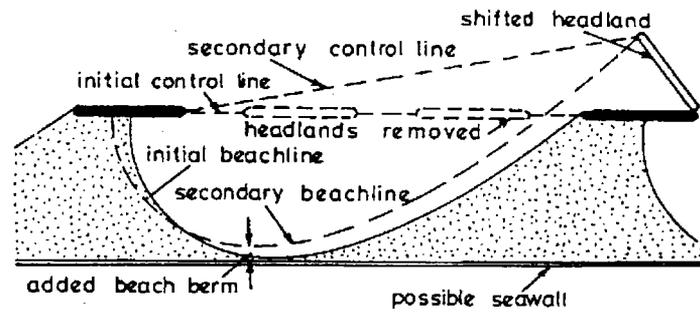


圖 34 離岸堤群改良為人工岬灣示意圖

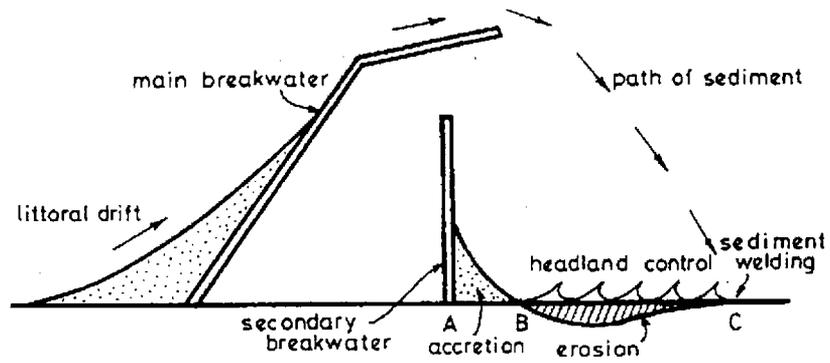


圖 35 以人工岬灣保護防波堤下游方之侵蝕海岸



圖 36 以人工岬灣規畫成海水浴場

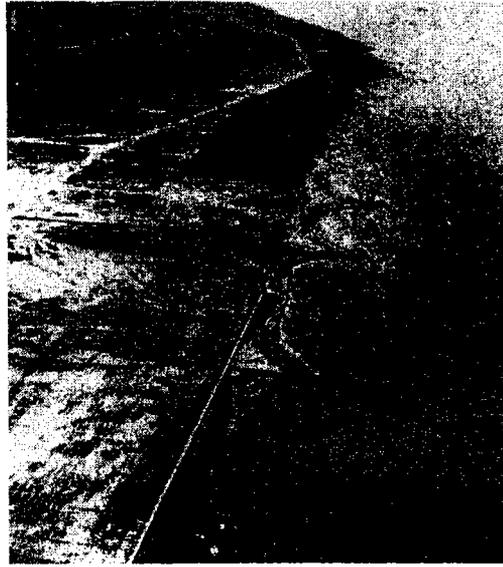


圖 37 新加坡利用人工岬灣的方式規畫新填築的海埔地

### 十一、其他工法

在暴風浪作用時，海灘之地下水位通常較高，當波峰面到達時，極易使得沙灘快速飽和，而且因為波浪之溯升較大，故下刷的力量，容易使沙灘發生侵蝕，如圖 38。Kawata and Tsuchiya (1986) 及 Kato and Yanagishima (1996) 認為降低海灘之地下水位，可以降低波浪溯升，減緩對沙灘的侵蝕。但是這種海灘之地下水位控制方法必須設置抽水設施，並且在暴風期間長時間的抽水。另外也可以設置砂質濾料系統(sub-sand filter system)以增進沙灘的排水。

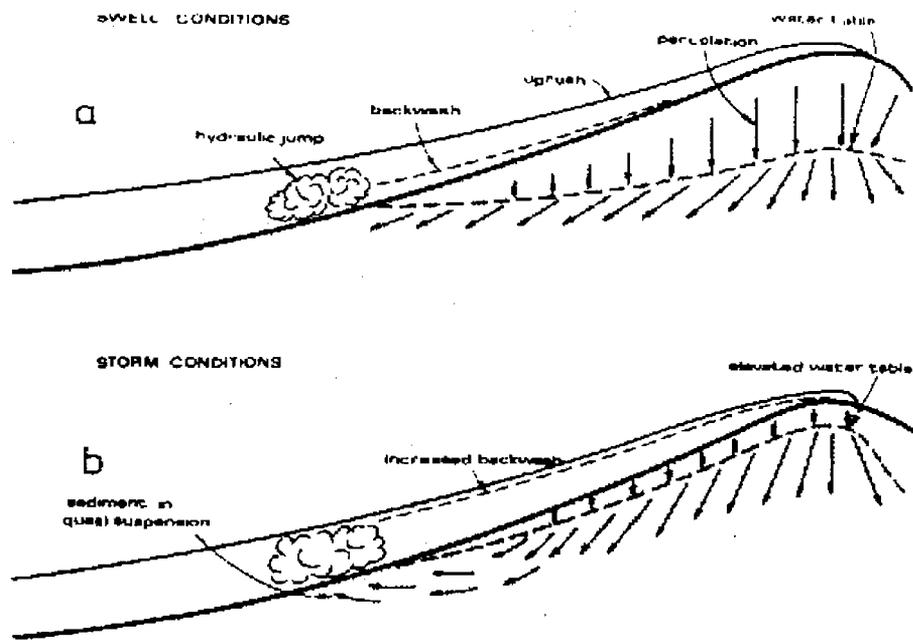


圖 38 湧浪及暴風浪沙灘地下水位比較 (Silvester and Hsu 1993)

## 参考文献

Asakawa, T.W., Hasegawa, M., Sato, H. and Hamaguchi, N.: "Recent developments on shore protection in Japan," (1992).

Everts, C.H., De Wall, A.E. and Czerniak, M.T.: "Behavior of beach fill at Atlantic City, Ner Jersey," *Proc. 14th Intl. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, Vol. 2, 1370-1388 (1974).

Japan Society of Civil Engineers.: *Japanese Coasts and Ports*, No. 2, 218 pp. (1994).

Katoh, K. and Tanagishima, S.: "Field experiment on the gravity drainage system on beach stabilization," *Proc. 25th Intl. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, Vol. 3, 2654-2665, (1996).

Kawata, Y. and Tschia, Y.: "Application of sub-sand system to beach erosion control," *Proc. 20nd Intl. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, Vol. 2, 1255-1267 (1986).

Silvester, R. and John, J.R.C.: *Coastal Stabilization: Innovative concepts*. Englewood Cliff, NJ.: Prentice Hall Inc. 578pp. (1993) (also *Coastal Stabilization*, World Scientific Publ. Co., Singapore, 578pp., 1997)

US Army Corps of Engineers.: *Coastal Groins and Nearshore Breakwaters*. ASCE, 87 pp. (1994).

# 港 灣 規 劃

王慶福\*

## 一、規劃之意義

### 1-1 規劃之概念

依一般國外字典的定義，『規劃為為達成某種目的所需要的亦或有效的許多方法，亦或連續性的階段式組織配置』。

經營學上將規劃定義為『規劃為對未來之事所做現在的意志決定』，所以除了時間問題外，還有人之意志決定問題。

心理學家亦由人們之活動來看，將其定義為『規劃為個人亦或團體，在某個社會中，為達成某種目的所做尋求方法之事』。

國內運輸規劃界先進王慶瑞在其所著運輸系統規劃中，將規劃定義為『規劃是為達到某些預定目標而尋求最佳行動之過程』，而規劃之成果是要提出一些可行的替選方案以供決策者選取一個最佳方案，因此，規劃應包含二種意義，一指問題之解決方法，另一為作決策之思考過程。所以規劃作業包括對問題之認識、問題界定、問題分析、方案研擬、評估、決定等，而此亦即為一般系統分析之過程。

在此過程中，所需相關資料之蒐集、整理、分析統稱為調查(investigation)，而調查對規劃之形成而言，無論在何種階段均為不可或缺的。

通常每個規劃均有其所要達成之目標(objective)與標的(goal)，成功之規劃，大多取決於計畫目標與標的的協調與確立，目標為由人們生活之社

---

\* 港灣技術研究所研究員

會價值所引伸而來，層次較高也較抽象，例如增進國民之福祉，改善南北生活差距等，標的則為目標之具體陳述，可以衡量的，一個目標，可以演繹出一個以上之標的，一個標的也可能解釋一個以上之目標同時規劃為有關人、物、錢等資源在空間、時間之領域的組合，有關人的組合稱為組織，錢的組合稱為預算，材料及構材的組合稱為設計，同時將這些置於空間時稱為配置，置於時間時稱為進度，每一規劃均為針對其中之一亦或其組合加以研究，同時通常規劃之特徵為各個規劃並非獨立存在，每一規劃亦可能為其他規劃之部份，此稱為規劃之階段性構造(hierarchy)，此亦為其重要性質。

綜合而言，規劃可說是以下各項之作業程序：

- 1.分析現有之問題並預測未來之需求
- 2.探討可能之改善對策與限制條件
- 3.研擬各種可行之替選方案並分析其系統優劣
- 4.評估各替選方案達成預設目標之績效
- 5.提供決策者足夠且有用之資訊以便做最佳抉擇

## 1-2 規劃之過程

通常規劃係由構想(Whole Picture)，綱要計劃(Master Plan)，進入到實施計劃(Exeutive Plan)，各階段之特徵如下：

- 1.構想：儘量追求理想創意，可忽視現實之各種可能問題，亦即儘可能將理想表達出來，因此應是富創造性，將 30 年～50 年後之環境下，以甚麼為對象，想作甚麼(目的)，清楚地加以明示，以便作為規劃綱要計劃時之方針。
- 2.綱要計劃(Master Plan)：將為實現構想所須之各種條件，計劃目標，在時間及空間之領域中加以明示，並列出可能發生之問題，以作為實施計

劃之方針。因此綱要計劃可說是一長程計劃，係將構想加以實用化之修正，為 10~20 年後遠景，所以應具相當程度之實施可能性，也因此，必須配合國家整體經建計劃，地區發展計劃，並且須與各相關單位前協調，概算預算規模，聽取居民及使用者之意見。

- 3.實施計劃：此為進入設計前之具體性計劃，亦即為實現綱要計劃，所須之資金、制度、組織等以很具體及現實的加以表示出，較短期(5 年)之概要者為中程計劃，而實施計劃通常均為短期的。構想與實施計劃，雖均為計劃的一個階段，但構想主要為重『質』上之考慮，而實施計劃則重『量』方面

### 構想與實施計劃

	構 想	實 施 計 劃
內 容	創造性 重質(定性)	定常性 重量(定量)
計劃者	高階人員 具各種專長人員	中級以下人員 工程專長者
性 質	調查項目少 架構很重要 概略計算作圖 戰 略 性 以往資料 具很多不確定事	調查項目多 細節很重要 詳細計算作圖 戰 術 性 新得的資料 具有相當信賴性

## 二、港灣之意義

### 2-1 港灣之定義

港灣為由人、物、車、船所集合之水域及陸域所形成國土空間之一部份，以提供水路交通順暢運行為主要功能，並肩負生產及生活活動功能之

地。

通常若以提供船舶安全靠泊之功能為著眼則較屬於港灣(harbor)之概念，亦即港灣為由天然地形或人工築堤圍成之水面，以提供船舶安全靠泊，若著眼於水路交通功能及終站(terminal)之概念則稱為港埠(port)，亦即除提供船舶安全靠泊外，更有裝卸及各種儲轉功能。

## 2-2 港灣之種類

### 1.以成立條件或地理條件之分類

- (1)依自然條件區分：天然港、人工港
- (2)地理條件區分：海港、河口港、河川港、湖港、運河港
- (3)依建設形態區分：回填港、浚深港

### 2.以功能或任務之分類

- (1)以港灣之功能為考量可區分為商港、工業港、漁港、避難港、遊艇港、軍港等。
- (2)以法令來分商港有國際港、輔助港、國內港，漁港有第一、二、三類漁港。

## 2-3 港灣之功能及任務

- (一)對外貿易與港灣
- (二)國內運輸與港灣
- (三)工業開發與港灣
- (四)都市發展與港灣
- (五)海洋遊憩與港灣
- (六)漁業與港灣
- (七)能源問題與港灣

## 2-4 港灣之設施

### 1.基本設施 (infrastructure)

水域設施：航道、泊地

外廓設施：防波堤、防砂堤、導流堤、水門、護岸、堤防等

靠泊設施：碼頭、浮筒、棧橋

臨港交通設施：道路、停車場

### 2.航行輔助設施：航路、標誌、信號台、燈塔、通信

### 3.功能設施：

裝卸設施：固定式裝卸機具、軌道式裝卸機具、堆置場及通棧

旅客設施：乘降設施、行李房、候船室

儲存設施：倉庫堆貨場、貯木、危險品堆置場、儲煤場等

船舶服務設施：給水、供油、修理

港灣公害防止設施：污水處理、廢油回收、垃圾

### 4.管理設施：港務局辦公室、海關、港警等

## 三、港灣規劃

### 3-1 港灣規劃之分類

1.以規劃組織(單位)來區分：國家、地方、港務局、民間。

2.以規劃區域來分：整體國際港發展規劃、各港發展規劃。

整體規劃以國家經濟、交通、產業發展等整體考量，為一長期性、策略性、整體性之規劃，主要在確定港口之定位，規模及發展方向(功能)，以作為港埠分期建設之指導計劃或上位計劃。

3.以規劃階段來分：選址、可行性規劃、細部規畫

4.以計劃屬性來分：新港建設規劃、港埠擴建規劃、港埠改善規劃

5.以規劃內容來分：港埠整體規劃、港埠分期建設規劃、港埠年度建設規劃。

6.以規劃目的來分：設施配置計劃、財務計劃、管理計劃等。

7.以規劃時間來分：長期、中期、短程計劃。

長程:設定容量

中程:實現容量

短期:有效利用容量

8.港灣規劃之性質，大致可分為下列 5 類:

(1)選址規劃：以全國或地區來看，要作何種港、要設於何處、同時港的規模、港的層次、港灣管理者要如何組織等之計劃。

(2)平面配置規劃：為使水域之空間能充分發揮其功能，並提高航路、泊地等之靜穩度，且防止波浪或暴潮來襲時之被害，所作之外廓設施等，即為平面配置規劃之中心，其內容包括航路、防波堤、浚渫、新生地等計劃。

(3)水域、陸域規劃：亦可稱為分區(Zone)計劃。規劃港區之水域及陸域須具何種功能之計劃。水域規劃以決定航路、泊地、檢疫等之錨地，以及港口方向，及供特別目的使用之專用水域，陸域規劃則為與陸域有關者，如碼頭位置、臨港交通設施、港灣關連用地、工業用地及都市功能用地之配置及規模均加以決定。並可依用途加以分區，為防止區域之任意開發，並有效將港灣空間加以利用、保護，因此分區計劃為一很重要之事。

(4)碼頭規劃：決定海陸運輸，人與物之交流等所須之設施種類及規模與配置之計劃。包括各種碼頭設施、臨港交通設施等，此為港灣之基本設施與支援港灣功能之設施的計劃。

(5)財務計劃、經營管理計劃：作為一公共事業或促進地區繁榮之政策而言，能保證其有效之計劃，因此特別重視經濟效益及財務收益。

## 3-2 港灣規劃之發展

### 3-1-1 規劃理念之演變

#### 1. 港灣功能由單純之運輸功能提昇為多功能

單純之運輸功能→轉運功能→倉儲轉運中心→經貿特區

#### 2. 航線軸心化，船舶大型化，各港專業化、區隔化

#### 3. 規劃內容由設施轉為空間

聯外道路系統、港區內道路系統、港埠配置分區化

#### 4. 由重貨流轉為重人流

#### 5. 由規劃之技術層面研究逐漸轉變為決策導向

往昔港灣規劃係以技術層面之研究為主，然而在實務上卻又以複雜之政治層面及制度層面之影響為規畫成敗之關鍵，因此將使得以技術層面為主之傳統規劃逐漸轉變為決策導向之規劃。

### 3-1-2 規劃理論

目前之港灣規劃理論，大致可分類成(1)與全國計劃有關者(2)與設施計劃有關者(3)與空間計劃有關者。

與全國計劃有關者，簡而言之，為配合國土計劃，並依據各港特性，考量未來之可能發展方向，設定港之規模，並規劃陸域之土地使用。此種規劃理論，對目前之港灣規劃而言，發揮了很大的功能。

其次，與設施規劃有關者，在以往主要係以碼頭之裝卸能力為主進行研究。由於裝卸效率隨貨物種類而不同，因此早期曾採用一假設之"標準貨物"，以碼頭單位長度年間換算裝卸能力，以求取所須長度以及所要碼頭數，而在戰後，以長尾博士為中心之研究，即導入各種數理方法，從事港灣設施規劃，並以經濟效益之觀點，求取設施規劃之最適化。近年來更由於數理計劃學，以及電腦之發展，更使得各項模擬法被開發出來。而種種之開發亦即為追求設施計劃之合理化。

至於與空間規劃有關者，主要論點為港灣規劃不應僅是單一的開

發計劃，除了碼頭之增建外，同時為充分發揮港灣功能，整體都市計劃之規劃亦應包含港灣。因此，港灣與都市之關係相當密切，但由於港灣空間規劃所牽涉的範圍相當廣，其具體的規劃方法仍未完全確立。目前，港灣之發展以逐漸由重量改為重質之時代了，因此，港灣之空間規劃將是今後規劃者之主要課題。

綜合而言，目前港灣規劃之方法，若依目的來區分，大致可分為以下幾類(1)採用調查結果之統計方法，(2)利用解析結果，預測未來某指標之方法，(3)設施計劃及建設計劃之設定法，(4)規劃之評估法，若再將此種方法依特性來區分，又可分為以下 4 種，即(1)以統計上之解析，同時又可用在預測上之多變量解析法，(2)主要用於預測之模擬(Simulation)法，(3)計劃設定時之 O.R 法及(4)預測及評估所使用之統計經濟模式法。

此外，隨著港灣之發展，其對自然及社會環境之影響，亦逐漸在港灣規劃中佔一很重要之位置，因此港灣規劃之環境影響評估法，亦是目前規劃作業中所不可缺的。

### 3-1-3 規劃之規範化

由於在港灣規劃中，每個設施使用者立場不同，所要求的內容彼此相互矛盾之處頗多，例如，以港口寬度來說，操船者希望愈寬好，但以港內靜穩度之維持來說，卻是愈狹愈好，對於此種相互矛盾之要求，規劃之規範化，即為解決之道，同時規範化亦可減少因其他行政之不統一所產生之問題，以及可彌補因資料不足所致之影響。

規範之提出，最早為 1950 年日本港灣協會發行了"港灣工程設計規範要覽"，在其中將碼頭設施之長度及水深均加以規範化，而後，倉庫通棧以及航道水深等之規範亦逐漸導入，然後再經多年之研議，並聽取相關者之意見，終於在 1961 年以運輸省港灣局長之命令，發佈了港灣設施之設計規範。近年來隨著港灣之多樣化，為滿足現實之需求，規範亦不斷地修正中。

規範化雖有利於規劃者，但卻往往使得規劃者忽略了各港本身之特性，而採用基準值，因此，規範之使用時，對此應特別留意。

規劃主要之目的為提供決策，且未來之發展為決策之結果，而非計畫之結果。

#### 四、規劃之程序

以系統方法解決問題之流程通常如下：

- (一) 確認問題
- (二) 擬定解決問題之目標及標地
- (三) 研擬解決問題之替選方案
- (四) 替選方案評估
- (五) 方案選擇及實施

#### 五、現有問題點

##### 5-1 以整體而言

1. 上位港埠發展政策不夠明確，國內港、商港、工業港、遊艇港等各港發展定位目標不夠明確。應以國家整體發展及運輸經濟之角度擬訂各港埠適宜發展目標及規模，並以港際整合，以發揮最大效益。
2. 過去港埠建設多偏重於港區內硬體建設工作，而對於港區土地使用、港埠經營管理、各港埠內陸運輸系統、港埠發展定位等均欠缺整體規劃，造成各港埠建設工作之輕重緩急無所依循，各港埠間相互爭取財政資源，並造成設施重疊之市場競爭現象。
3. 未與國土計劃結合，港灣在國土計劃之角色不構明確，影響整體規劃甚巨，以營利為主亦或以振興地方經濟發展為主，並無明確之定義。

#### 4.運量預測

準確之運量預測幾乎是不可得的，因此，最好的結果應是能確實掌握港灣系統與社會經濟變數，以供作最合理之判斷，因此，運量需求模式主要係作為幫助決策之工具，故應重視模式邏輯之合理性，而不在於預測結果之準確性，同時，因不易掌握許多不確定因素之發展，應每隔三～五年作一次通盤檢討，修正各階段運量預測，以為各國際港整體開發規劃之參考。

#### 5.港埠競爭多港政策

整體資源如何有效利用

6.缺乏有效之審議制度，決策品質待提昇。

#### 5-2 各港規劃方面

- 1.基準:以日本基準為藍本，特別是在基礎資料大都參酌日本，但因國情不同應依本土特性作適當之修正。
- 2.不重長期基本資料之調查，造成規劃基本資料之不足，影響規劃成果。
- 3.以設施規劃為主，相關活動、空間未整合。
- 4.與都市間之關係待釐清
- 5.港埠能量
- 6.決策品質

### 六、規劃之評估

規劃之結果係提供決策，加以執行，在日趨複雜的社會，每個人面臨決策的機會日益增多，而決策往往必須在相互衝突的目標中權宜取捨(Trade-Off)，此等問題牽涉到個人價值觀判斷，已非傳統的單評準決策方

法所能解決，此外，不同專業背景的決策者對於同一個問題通常持不同看法，故如何將各不同(泛指與問題密切相關的群體)的意見充分表達於決策過程中，將是一重要課題。由於多目標決策分析(Multiple Criteria Decision Making, 簡稱 MCDM)，秉其合理化的觀念與分析技巧，輔以決策者與規劃者間的密切配合，可將問題作最佳處理，因此目前多目標決策分析已廣泛應用於複雜的資源分配問題，如交通運輸規劃、能源規劃、都市計畫以及水資源分配計畫等各領域。

一般而言多目標決策問題可分成兩類，第一類為多準則評估問題(Multicriteria Evaluation Problems)，第二類為多目標規劃問題(Multiobjectives Programming Problems)。前者為當一個多目標的問題面臨一組可行方案時，為顧及每個目標的期望值，所以採用一個以上的準則進行方案評估，在各目標期望值的權衡取舍下求得各替選方案的優劣次序排比；後者則由一組限制條件形成一可行解區間，並取得決策成員對於各目標達成程度的偏好值，以求得一個或以上的非劣解(Non-inferior Solution)。

一般港灣規劃大多為就有限個替選方案評估其優劣順序，屬於第一類的多準則評估問題，因此以下將就多準則評估方法與步驟加以說明。

一個完善的決策其內涵應包括以下五個方面：

1. 替選方案(Alternative Set)
2. 評估準則(Criteria Set)
3. 偏好結構(Preference Structure)
4. 績效值評估(Outcome)
5. 資訊(Information)

第 5 項「資訊」是影響四個要素的重要條件。以下將分別簡述其內容與意義：

## 6-1 替選方案(活動、功能之替代)

替選方案即為針對決策問題而產生的一組可行方案或可能的行動，故替選方案之產生乃為方案評估之基礎，並為決策四要素中的第一要素。一般而言研擬一組方案需注意各方案的可行性限制條件(Feasibility Constraints)，如方案的適法性、技術可行性、生態破壞性等，若在限制條件外但又無法求得可行解時，則這類方案可先加以排除。方案之提出程序大致可分為兩個階段，第一階段為方案之產生與初步評估、篩選，第二階段為藉由集思廣益之比較、聯想，推斷是否能產生更好的方案。

影響替選方案的變數可分為外生變數與內生變數兩類。外生變數乃為決策者於決策過程中所無法掌握的變數，通常為受周遭環境狀況之影響而改變，此部份的變數於評估其績效表現值時往往相當困難，例如開發新港所衍生的經濟效益、社會活動的變化等。內生變數則是決策者在決策問題中所能掌握的變數，此類變數常為決策問題的屬性、準則，如開發新港的工程成本、規模、技術可行性等。

## 6-2 評估準則

在方案評選的過程中為求得最佳方案，必須根據若干準則進行評估，所以評估準則之研擬為評估工作的一個重要項目，通常評估準則乃為一組集合(準則集合)，為對決策問題的評估所製訂的一組標準或準則，建立評估準則的目的在於反應決策問題的特性，並將決策問題的總目標具體化，使之易於衡量。一個決策問題的準則，一般是由總目標衍生出來的，可說是目標的進一步具體化。以下將釐清數個決策上常用的名詞定義(如標的、目標、準則、屬性等)，以利準則之制定。

### 1. 屬性(Attribute)

屬性是方案的特性(Characteristics)、特質(Qualities)或績效參數(Performance Parameters)，屬性可以是實際的客觀特性或是主觀特性，

例如港址發展優先順序候選地的客觀屬性為地形、海象條件、交通條件等，而主觀條件則為景致吸引力、周遭活動特色等。

## 2. 目標(Objectives)

目標是決策者感認「較佳的」方向，目標之訂定僅提供一個循優的方向，希望極大化(maximum)或極小化(minimum)，而非提供一特定值。例如建港時，希望工程成本能儘量減少(最小化)，此為提供選擇之方向，亦即港埠當局的「目標」。

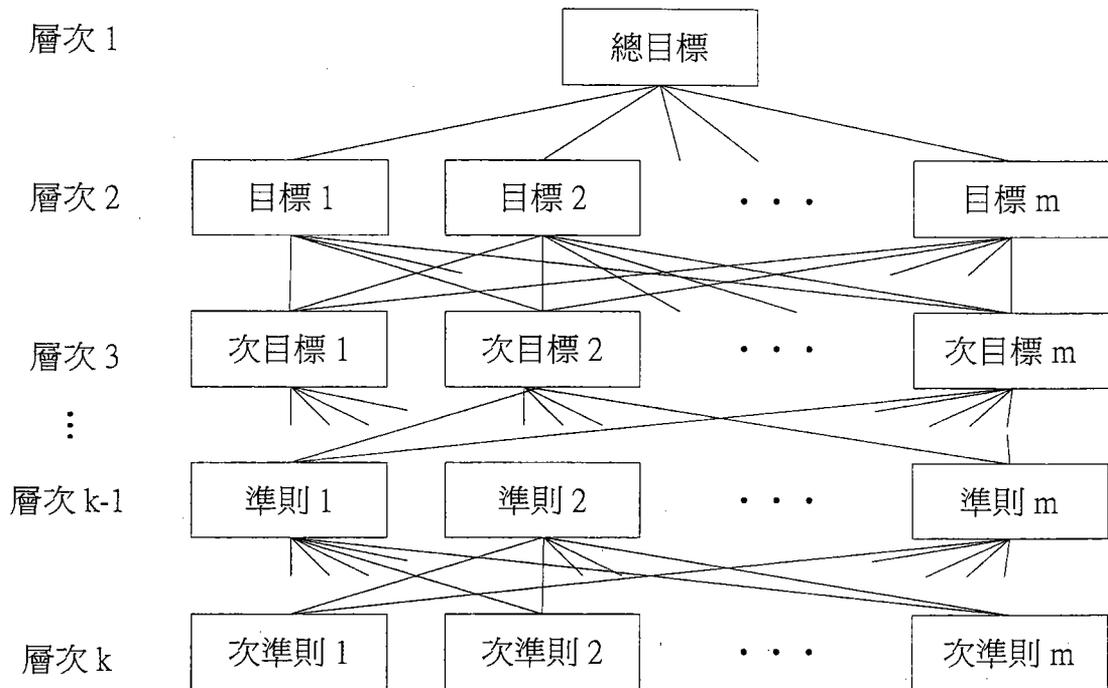
## 2. 標的(Goals/Targets)

標的是依屬性或目標事先決定的特性值，而能完全符合決策者的需求。例如「對海洋環境破壞程度最小化」為開發新港追求的目標之一，而「珊瑚群存在的數量最大化」則為達成目標的標的。

## 3. 準則(Criteria)

準則在字典上的意義為「判斷的標準或測試可接受性的原則」。因此準則是輔助決策的衡量標準。由於決策是由不同的屬性、目標及標的所引導，因此屬性、目標及標的均屬於準則的一種。

當一個決策問題較簡單時，方案少且目標單一，明確具體時，目標與準則常常是一致的；當決策問題相當重要，方案較多，總目標至次目標皆較為複雜抽象時，則需建構從總目標、次目標、準則、次準則的目標階層結構(Objective Hierarchy Structure)，其關係圖如下圖所示。



建立目標階層結構須藉層級分析(Hierarchy Analysis)，此為人類思維的基本工具，包括確立問題的基本要素，將基本要素歸類，以及歸類後不同層級的安排等三個步驟。簡單的層級分析可透過直線處理方式，由高階分解至低階的前進分解方式(Forward Analysis)，或是由低階整合至高階的匯流方式(Backward Analysis)；複雜的層級分析，則須將交互關係的要素以網路結構表示。

根據 H.Voogd 的分類，準則依其類型不同可分為三類：

- (1) 可行性準則(Attainability criteria)：即為評估於現況環境條件下，各替選方案是否可執行的準則。
- (2) 否定性準則(Veto criteria)：評估替選方案是否達到基本的水準(門檻值)，如法規要求等。
- (3) 需要性準則(Desirability criteria)：評估替選方案是否達到社會需求，如設施的可及性、效率性、社會公平性、對周遭住戶生活品質的妨礙性等。

由於準則與目標密切關係，而目標又有遠程與近程、正向與負向之分，因此於選擇準則時也須考慮長期與短期、正面與反面、原有準則與新進準則、自己與他人想法等，然後進行全面性、綜合性分析，然後找出對於遠程目標與近程目標最有利的準則。

一個複雜的決策問題往往牽涉的層面廣泛，須考量的因素眾多，礙於規劃人員無法面面俱到，因此必須藉助專家的專業素養與知識，集合決策問題所牽涉各層面的相關專家共同集思廣益、腦力激盪 (**Brain-storming**)，在大部分的情況下都能獲得預期的效果。一般而言，研擬準則時必須符合下列五項原則：

- (1) 周延性(**Completeness**)：準則要能涵蓋決策問題的所有重要特性。
- (2) 可操作性(**Operational**)：準則對於決策者而言必須有意義，並且容易加以操作、評估，而且可以公開研究。
- (3) 可分解性(**Decomposable**)：可將決策問題經由層級分析的技巧，由高階分解至低階，使問題透明化，同時評估過程也得以簡化。
- (4) 無重複性(**Nonredundancy**)：同屬相同績效的準則應避免重複計算。
- (5) 最小規模性(**Minimal Size**)：評估準則不宜過多，最好不超過七個或八個(一般人能同時清楚比較各準則的數目上限)，以簡化問題，減少評估過程所需人力、時間與成本。

### 6-3 偏好結構

係指決策者對於各評估準則重要程度的感認，因其為一種集合，故稱之為偏好結構。通常不同背景的決策者對於同一組準則會存在對各準則「重要程度」認知上的差異。

例如新港的開發，往往環保人士認為「環境影響程度」此項準則的重要度遠比其他準則來的高，但地方政府卻可能認為「振興地方產業」此項

準則最為重要。偏好結構一般可以用數量化、質化或專業術語表示，也可透過二元關係結構化；根據偏好關係即可評選方案。

#### 6-4 績效值

績效值為每個可行方案，從準則的角度來預測其可能出現的現象、績效或結果，亦即反應各替選方案於各評估準則下表表現的結果。

各準則的績效值衡量尺度可分為五種：

- 1.區間尺度(Interval Scale)
- 2.比例尺度(Ratio Scale)
- 3.順序尺度(Ordinal Scale)
- 4.二元尺度(Binary Scale)
- 5.名目尺度(Nominal Scale)

績效值衡量尺度的選擇與操作，於方案評選的過程中有相當重要的影響。

各準則的績效值給定後，下個階段即為將不同準則的績效值轉為無因次單位以利各種加總計算，並求得最後的方案總績效值，此過程稱為「正規化」(Normalization)或「標準化」(Standardization)。

正規化(標準化)為方案評估中不可或缺的工作，經由正規化(標準化)的步驟可將同一方案中各種不同單位的績效值加以整合，以消除準則單位不同所造成的影響，使各方案易於比較，正規化(標準化)常用的方法主要有三種：

- 1.相對權重法：以額外的限制將績效值轉為 0~1 之間的數值。

$$\text{正規化後的績效值} = \frac{\text{某方案於}A\text{準則下的績效值}}{\text{所有方案於}A\text{準則下績效值之和}}$$

2.比例尺度法：運用「比例尺度」的特性，將各績效值轉為 0~1 之間的數值。

$$\text{正規化後的績效值} = \frac{\text{某方案於A準則下的績效值}}{\text{所有方案於A準則下最大的績效值}}$$

3.區間尺度法—運用「區間尺度」的特性，將各績效值轉為 0~1 之間的數值。

$$\text{正規化後的績效值} = \frac{\text{某方案於A準則下的績效值} - \text{所有方案於A準則下最小的績效值}}{\text{所有方案於A準則下最大的績效值} - \text{所有方案於A準則下最小的績效值}}$$

區間尺度法尤其適合應用於當績效值為成對比較時的評估技巧。經由正規化後，在 A 準則下表現最差的方案將被指定績效值=0，而表現最佳的方案則被指定績效值=1。

## 七、今後之展望

- (一)整合及改進各單位基礎資料之蒐集成果，建立規劃基本資料檔(包括自然、人文、社經、交通等)，以達有效利用資訊之功能，並有利規劃工作之順利進行。
- (二)運量預測影響各港之發展甚劇，應由具公信力之單位建立模式，每年加以修正改良，如此不僅可節省時間人力、更可確實掌握運量變化之因素。
- (三)由於規劃本身即具相當的不確定性，因此應每隔 3~5 年定期予以修正
- (四)今後港灣之發展將由量的擴充轉為質的提昇，為因應此需要所應有的規劃方法應早日確立。
- (五)以往港灣規劃係以設施規劃為主，對於相關的活動、空間規劃較欠缺，今後應以空間之規劃加以因應。

(六)替選方案評估為規劃所不可欠缺之過程，今後應可嘗試建立一標準評估模式，以提昇決策品質。

(七)港灣再開發

- 1.港灣設施老化之對策
- 2.港灣空間內部系統之強化、充實
- 3.港灣空間外部系統之配合

# 波浪模式之比較與實例計算

許泰文<sup>1</sup> 馬平亞<sup>2</sup> 溫志中<sup>3</sup>

## 摘 要

本文針對六種波浪模式: (1) RCPWAVE、(2) REF/DIF-1、(3) RDE、(4) PBCG、(5) PMH 及 (6) MIKE 21's EMS 模式分別檢驗它們對於波浪淺化、折射、繞射、反射及港池共振的模擬能力。文中並以 Berkhoff (1972) 所做波浪通過橢圓淺灘之試驗資料, 進行各種模式之模擬驗證。如預期的, RCPWAVE 及 REF/DIF-1 只能模擬波浪的折射及弱繞射現象, 並在運算上有非常快的計算速度。REF/DIF-1 在波高計算上有著非常好的結果, 但對於波向的計算結果則較差, 而 RCPWAVE 在波浪的波高及波向計算上, 有著良好的準確度。對於其它四種波浪模式, 它們都可以在計算上表現出上述之現象。此外, 文中亦於 PMH 波浪模式中加入底床非線性影響量, 來檢驗波浪通過陡變地形時緩坡方程式的適用性。本文計算結果顯示, 當相對水深  $kh$  為中間性水深時, 底床非線性量對波浪反射率有顯著的影響。

## 一、前 言

對於線性波浪的變形效應 (折射、繞射、淺化、反射及共振), 我們能以橢圓型態的緩坡方程式 (Elliptic Mild-Slope Equation, 簡稱 EMSE, Berkhoff, 1982), 或延伸的緩坡方程式 (extended Mild-Slope Equation) (Massel, 1993; Chamberlain 和 Porter, 1995; Porter 和 Staziker, 1995; Chandrasekera 和 Cheung, 1997; Suh 等人, 1997; Lee 等人, 1998) 來加以描述。近來用來

---

1 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

2 美國維幾尼亞海洋科技研究所副教授

3 國立成功大學水利及海洋工程研究所博士班研究生

解析波浪變形的數值方法可分為四種型態：(1) 拋物線近似法 (Parabolic Approximation Method) 來簡化 EMSE；(2) 雙曲線型緩坡方程式 (Hyperbolic Mild-Slope Equation, 簡稱 HMSE) 來取代 EMSE 及找出穩態的解；(3) 疊代法求解 EMSE 及 (4) 用直接的方式以矩陣求解 EMSE。

第一種方法在計算上，會受到波浪弱反射及弱繞射 (Radder, 1979) 的限制，但對於計算的速度則較快，如 REF/DIF-1 (Kirby and Dalrymple, 1991)；RCPWAVE (Ebersole 等人, 1986)。因此，工程實用上建議在波浪無反射及強繞射效應之海域，使用此種模式。在上述的限制下，於過去 10 年中許多學者曾進行計算 (Kirby, 1986a; 1986b; Dalrymple 等人, 1989; Maa 和 Wang, 1995)。其計算結果主要應用於研究沿岸漂沙傳輸及海岸線變化上。本文主要之研究目的，在於對模式所計算出來的波向進行檢核。上述的數值方法中，除拋物線近似法外，通常都不大能計算大範圍的區域。這是因為在解 EMSE 或 HMSE 時，有著格點間距須要小於 1/10 波長的限制。若計算大區域時，則計算所需的矩陣則相對變大，例如在計算區域在大於 50 個波長情況下。雖然如此，當研究的地形複雜且需要較高的精確度時，求解嚴謹的控制方程式 EMSE 及邊界條件是唯一的選擇。

第二個方法則是解一瞬變的緩坡方程式 (transient mild-slope equation) (Copeland, 1985; Madsen 和 Larsen, 1987) 而得一穩態的解。本文選擇兩種模式加以比較：(1) MIKE 21's EMS 模式及(2) PMH 模式 (Hsu 和 Wen, 1998)。此類模式與其它 EMSE 模式的差異為：(1) 邊界條件的處理，(2) 使用不同的代數方法求解控制方程式。另一方面，利用此方法解控制方程式時應與解 EMSE 有著相同的結果，其計算速度及精確度則依所選擇收斂的誤差值來決定。

其它兩種方法，則是直接對橢圓型態的緩坡方程式直接加以處理。對於處理不規則港池地形，有限元素法 (Behrendt 1985; Chen 和 Houston, 1987) 在過去 10 年中被普遍使用。然而，這類型的模式當格點間距很小時，利用有限差分方法求解可得一良好的結果。當使用疊代法時以有限差分近似，所需的電腦記憶容量為合理時，則在使用上較為普遍，如多格網法 (Multi-Grid

method) (Li 和 Anastasiou, 1992)，共軛梯度法(Conjugate Gradient method) (Li, 1994a) 及先條件雙共軛梯度法 (Preconditioned Bi-Conjugate Gradient (PBCG) method) (Maa 等人, 1998)。通常使用此方法在計算時有良好的收斂率，若其所計算區域為複雜時，則會降低其效果。因為於此類型中，計算速度對於此模式是不必要的，故只選擇 PBCG 模式來加以比較。

最後的方法，則是使用高斯消去法 (Dongarra, 1979) 來直接求解 EMSE。最近此種方法一個 “book-keeping” 過程已被發展來求解高斯消去法 (RDE 模式, Maa 等人, 1997)。利用此方法求解，程式則變為簡單及直接，因此對於程式容易去維持及更新。

為了比較這些方法，對於每一個所選定的模式，我們首先給定一個簡短的敘述，然後以 Berkhoff (1982) 所做的試驗加以驗證其適用性。然而，所選定的試驗資料，並不包含有強的波浪繞射特性，且對於波浪的反射效應也不明顯。

至於波浪受陡變地形影響所產生的非線性影響量，本文選取 PMH 模式 (Hsu 和 Wen, 1998) 及 extended PMH 模式 (Hsu 和 Wen, 1999)，分別針對波浪通過斜坡底床 (Suh 等人, 1997; Lee 等人, 1998) 及波浪通過沙漣底床的反射率 (Davies and Heathershaw, 1984) 來進行比較，由此探討底床非線性影響量對於波浪反射率的影響。

## 二、基本控制方程式

於控制方程式 EMSE 中加入底床非線性項 (Chandrasekera 和 Cheung, 1997)，其中包括有底床曲率項以及底床斜率平方項係數，非線性緩坡方程式如下式所示：

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + CC_g k^2 (1 + if_d) \phi + [f_1(kh)g \nabla^2 h + f_2(kh)(\nabla h)^2 gk] \phi = 0 \quad (1)$$

$$f_1(kh) = \frac{-4kh \cosh(kh) + \sinh(3kh) + \sinh(kh) + 8(kh)^2 \sinh(kh)}{8 \cosh^3(kh) [2kh + \sinh(2kh)]} - \frac{kh \tanh(kh)}{2 \cosh^2(kh)} \quad (2)$$

$$f_2(kh) = \frac{\operatorname{sech}^2(kh)}{6[2kh + \sinh(2kh)]^3} \cdot \{8(kh)^4 + 16(kh)^3 \sinh(2kh) - 9 \sinh^2(2kh) \cosh(2kh) + 12(kh)[1 + 2 \sinh^4(kh)][kh + \sinh(2kh)]\} \quad (3)$$

$f_1$  及  $f_2$  為底床曲率及底床斜率平方項係數， $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$  為水平方向梯度因子，式中  $(x, y)$  為水平座標， $\phi$  為在研究區域內為一簡單的調合速度勢能函數， $i = (-1)^{1/2}$ ， $f_d$  為能量消散係數 (Isobe, 1987)， $g$  為重力加速度， $k = 2\pi/L$  為局部水深下波浪週波數， $L$  為波長， $h$  為水深。

對於邊界條件可依 Behrendt (1985) 所提之幅射邊界條件加以描述。(1) 全反射邊界條件 ( $\phi^s = \alpha = 0$ ,  $m = 0$ )，(2) 部份反射邊界條件 ( $\phi^s = 0$ ,  $m = 0$ ，和  $0 < \alpha < 1$ )，(3) 完全透過邊界條件 ( $\phi^s = 0$ ,  $m = 0$ ，及  $\alpha = 1$ )，或者 (4) 給定邊界條件 ( $\phi^s$  為一給定值， $m = 1$ ，及  $\alpha = 1$ )。其中  $\alpha = (1-R)/(1+R)$ ， $R$  為反射係數， $\phi^s$  為一給定的波浪速度勢。 $\pm x$  及  $\pm y$  方向的邊界條件表示式如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial x} &= \pm (-1)^m i \alpha k_x \phi + 2ik\phi^s && \text{在 } \pm x \text{ 方向} \\ &= \pm (-1)^m i \alpha k \phi \sqrt{1 - \left(\frac{k_y}{k}\right)^2} + 2ik\phi^s && (4) \\ &= \pm (-1)^m i \alpha k \phi + 2ik\phi^s && \text{一階邊界條件在 } \pm x \text{ 方向} \\ &= \pm (-1)^m i \alpha k \left( \phi + \frac{1}{2k^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + 2ik\phi^s && \text{二階邊界條件在 } \pm x \text{ 方向} \\ &= \pm (-1)^m i \alpha k \left( a_0 \phi + \frac{a_1}{2k^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) - \frac{b_1}{k^2} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x \partial y^2} + 2ik\phi^s && \text{三階邊界條件在 } \pm x \text{ 方向} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \phi}{\partial y} &= \pm(-1)^m i \alpha k_y \phi + 2ik\phi^s && \text{在 } \pm y \text{ 方向} \\
&= \pm(-1)^m i \alpha k \phi \sqrt{1 - \left(\frac{k_x}{k}\right)^2} + 2ik\phi^s && (5) \\
&= \pm(-1)^m i \alpha k \phi + 2ik\phi^s && \text{一階邊界條件在 } \pm y \text{ 方向} \\
&= \pm(-1)^m i \alpha k \left( \phi + \frac{1}{2k^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) + 2ik\phi^s && \text{二階邊界條件在 } \pm y \text{ 方向} \\
&= \pm(-1)^m i \alpha k \left( a_0 \phi + \frac{a_1}{2k^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) - \frac{b_1}{k^2} \frac{\partial^3 \phi}{\partial y \partial x^2} + 2ik\phi^s && \text{三階邊界條件在 } \pm y \text{ 方向}
\end{aligned}$$

式中  $k_x = k \cos \beta$  及  $k_y = k \sin \beta$  為  $x$  及  $y$  方向之週波數， $\beta$  為局部波向角，根據 Kirby (1989) 之提議， $a_0 = 0.9945$ ， $a_1 = 0.8901$  及  $b_1 = 0.4516$ 。

由於波浪入射邊界的角度  $\beta$ ，在計算過程中並不能事先加以預知，故  $k_x$  以  $(k^2 - k_y^2)^{1/2}$  來加以替代。式 (4) 及式 (5) 為  $\pm x$  和  $\pm y$  方向的邊界條件，分別由一非線性方程式之一階、二階及三階予以近似。式 (4) 為應用於垂直  $x$  軸的線段，式中正號表示計算的格點在邊界的左側。式 (5) 為應用於垂直  $y$  的線段，式中正號表示計算的格點在邊界的底部。在使用二階近似時，即使設計  $\alpha = 1$ ，當  $\beta$  大於  $30^\circ$  時將會有反射波引入於計算區域內。在計算上為了不受反射波浪的影響，可使用三階近似 (Kirby, 1989) 來計算。Kirby (1989) 之計算結果顯示，如使用三階近似加以計算，則  $\beta$  可增加至  $70^\circ$  而不受反射波浪影響。雖然在格點上的波浪條件為一給定值，但受到散射波浪產生的影響，則計算區域內的勢能函數仍為一未知的值。當散射波浪通過邊界不受到影響時， $\alpha = 1$ 。

對於給定單一調合波浪的波高  $H_g$ 、週期  $T$  及角度  $\theta$ ，所給定的速度勢可表示為 (Behrendt, 1985)

$$\phi^s = Ae^{iS} = \frac{igTH_g}{4\pi} e^{iS} \quad (6)$$

式中  $A$  為波浪振幅函數及  $S$  為位相函數。對於正向入射的波浪，位相於所有入口的格點中為一相等的值。在方便及不漏掉的原則下，在此情況下我們可選擇  $S = 0$ 。對於斜向入射的波浪，位相函數可以下式加以計算：

$$S(x_L) = \frac{2\pi x_L \sin\theta}{L}, \quad 0 \leq S(x_L) \leq 2\pi \quad (7)$$

式中  $x_L$  為一維局部座標， $L$  為邊界位置的波長，而  $\theta$  則為波浪入射方向與邊界法線向量的夾角。

式 (1) 的解為一複數的勢能函數  $\phi$ ，將  $\phi$  取絕對值則可依式 (6) 得一局部波高，及位相  $S$  可由  $S = \tan^{-1}(\phi_i, \phi_r)$  求得，下標  $i$  及  $r$  分別代表複數函數的實部及虛部。而局部波數  $k_x$  及  $k_y$  可分別由  $\partial S / \partial x$  及  $\partial S / \partial y$  計算得到。最後，局部的波向可由  $\theta = \tan^{-1}(k_y, k_x)$  求得。

### 三、模式簡介

對於各模式解 EMSE 的詳細過程簡述如下：

#### 3-1 RDE MODEL

使用有限差分方法來求解，可得一矩陣方程式  $\mathbf{B}\mathbf{X}=\mathbf{G}$ ，其中  $\mathbf{B}$  為一帶寬為  $M \times N$  的矩陣。 $N$  為矩陣的長度， $M$  為矩陣的寬度。 $\mathbf{X}$  為含有未知勢能函數的矩陣，其矩陣寬度為  $N$ ，而  $\mathbf{G}$  則為另一包含有所給定邊界條件的矩陣。帶寬矩陣的方程式可利用節省的高斯消去法 (Maa 等人, 1997)，以節省所需要具大的記憶體及硬碟的空間。

#### 3-2 PBCG MODEL

近似於 RDE 模式，其矩陣方程式為  $\mathbf{A}\mathbf{X}=\mathbf{G}$ ，其中  $\mathbf{A}$  為一  $N \times N$  平方的矩

陣，儲存於 Row Index Square Storage (RISS) 模式中。在此模式中，只儲存非零項於計算記憶體中。其它的部份與 RDE 模式相同。使用 Press 等人 (1992) Preconditioned Bi-Conjugate Gradient method 利用疊代方法加以求解。對於 Generalized Conjugate Gradient method (GCG) (Li, 1994a) 近似 PBCG 模式，但於計算時有較好的收斂率。PBCG 模式疊代所選定的收斂條件，對於格點每次所計算的疊代誤差需少於  $1.0 \times 10^{-7}$ ，模式中所選定的計算條件如表 2 所示，模式之計算時間如亦列於表 2。對於估計 GCG 模式，疊代 2500 次 Li (1994a) 所花的計算時間可加以估算。

### 3-3 PMH MODEL

速度勢能函數  $\phi$  為一時變函數，利用攝動法展開可得一新的時變性拋物線型緩坡方程式 (Li, 1994b; Hsu 和 Wen, 1998)。此方程式與式 (1) 的差異性如下所示：

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + CC_g k^2 (1 + if_d) \phi = 0 \quad (8)$$

式中  $C$  及  $C_g$  分別為波速及群波速度。假設  $\phi$  為一緩變函數，及  $\phi = (CC_g)^{1/2} e^{-i\sigma t} \Phi$ 。他們將式 (8) 雙曲線型緩坡方程式，改變為拋物線型緩坡方程式，並以數值方法加以求解，如下式所示：

$$-\frac{2i\sigma}{CC_g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla^2 \Phi + k_c^2 \Phi = 0 \quad (9)$$

式中  $k_c$  為一等價之週波數。其它的定義及其它的細節可參考 Hsu 和 Wen (1998)。在每一個計算方向  $i$  或  $j$  方向，式 (9) 能形成一個三帶寬之對角矩陣方程式， $CX = H$ ，式中  $C$  為一  $3 \times N$  的帶寬矩陣，及  $N$  為一未知的矩陣欄及  $H$  為另一矩陣其中包含邊界條件。

此法使用交替差分隱式法 (ADI) 進行疊代計算勢能函數  $\Phi$ 。收斂極限選定  $E < 10^{-4}$ ，其中  $E$  為殘差參數。經 Von Neumann's 穩定度分析 (Li, 1994b) 證

明利用此數值方式解拋物線型緩坡方程式，可得一絕對穩定的結果。

在計算區域內，邊界條件特別的處理方法已以被 Hsu 和 Wen (1998) 完成。雖然波浪的入射角度為未知，但他們考慮這些角度可由先前的時間步驟反復疊代得知。隨著疊代過程，在邊界處可得到一近似正確的解，而所得之拋物線型緩坡方程式在邊界處，較一般之展開式含有高階的精確度。

### 3-4 MIKE 21's EMS module

荷蘭水利研究所 MIKE 21 模式(Danish Hydraulic Institute's EMS module for MIKE 21)由 Madsen 和 Larsen (1987) 所建立。此模式將緩坡方程式以水面高程 $\zeta$  (如式 10)，分離成三個一階方程式，如式 (11) ~ 式 (13) 所示，及進一步假設  $P$ ， $Q$  及  $\zeta$  為緩變函數。

$$-\frac{C_g}{C} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \nabla \cdot (CC_g \nabla \zeta) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + CC_g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + CC_g \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{C_g}{C} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

式中  $P$  和  $Q$  為在  $x$  和  $y$  方向的虛擬通量。然而對於高階的計算效能，調合項  $e^{-i\sigma t}$  能從這三個方程式中被移除。藉由產生方程式來包含內部所產生的波浪，他們進一步改變式 (11) ~ 式 (13) 而得另外一種形式，及求解此模式的技巧類似解長波中的動量及連續方程式。最後所求得的穩態解，為原始的橢圓型態坡方程式。在計算的區域內，一個源項所產生的時變性調合波浪，視為一入射波波浪。這個系統的方程式可由變化時間尺度的高效率雙掃法，而得一穩態的解。

計算的技巧使用在 EMS 模式，需要所有的邊界為一全反射的邊界條件。

爲了證明透過邊界條件，這些模式在前面邊界處 (Larsen 和 Dancy, 1983)，採用海棉層使能量能完全或部份的被消散。在這研究中，10 個海棉層設置在西側的邊界，及五個海棉層設置於東側的邊界。因爲東西兩側爲主要的波浪行進方向。沒有海棉層應用在南北兩側邊界，波浪碎波可消散波浪的能量於海灘中。

EMS 模式的輸出，可包含時變及穩態波浪表面高程，水深平均水粒子速度及幅射應力。雖然水深平均水粒子速度，可從加上的兩個虛擬通量 ( $P$  和  $Q$ ) 獲得，並能顯示出波向的趨勢，但此模式不能直接地提供波浪位相、方向。

### 3-5 RCPWAVE

爲了解式(1) (不包含底床非線性項)，Ebersole 等人 (1986) 以  $Ae^{iS}$  取代  $\phi$ ，得到一振幅函數  $A$  的方程式及位相函數  $S$  的方程式。於方程式中他們增加其它限制，如波浪位相函數的梯度爲非旋性： $\nabla \times \nabla S = 0$ 。他們假設反射波浪可被忽略，選定  $x$  方向爲波浪前進方向，並利用有限差分法來模擬波浪的傳遞，方法近似於所給定的 Ref / Dif-1。因爲使用疊代法分別來求解振幅函數、位相函數及波浪角度  $\theta$ ，所以比較沒有效率。

不像 EMSE，此模式只需要格點間距小於  $1/5$  的波長。在此條件下，計算時間可被明顯的縮減，如表 2 所示。括弧內的數字爲使用  $L/5$  格點間距 ( $0.2m \times 0.2m$ ) 的計算時間。假設波向對  $x$  軸超出  $20^\circ$ ，則程式的收斂率將會降低。因爲額外的限制，所計算得的波向線軌跡將不會相互交錯，且經由此模式計算，在海岸區域所得的值將會偏高。這些特徵將在下一個段落中展現。

### 3-6 Ref / Dif-1

Kirby 和 Dalrymple (1991) 所發展的 Ref / Dif-1 模式，在計算無反射波浪及只含有弱繞射情況下，爲一普遍的的波浪模式。在模式中，他們分離速度勢能函數成兩部份：一爲前進波浪；其它爲反射波浪及散射波浪。因爲使用隱式法來解簡單的方程式，計算的速度比 RCPWAVE 快。並且因爲 Kirby 和 Dalrymple (1991) 將此方程式增強，故此方程式在波浪前進方向與  $x$  軸夾

角為  $45^\circ$  時 (Dalrymple 等人, 1984), 仍能穩定的計算。雖然這個模式有許多功能, 如波浪傳遞通過島嶼 (Dalrymple 等人, 1984), 潮流影響波浪變形及非線性波浪的變形 (Kirby, 1986a), 所計算得的波向精確度是此模式主要的重點, 稍後我們將會展現這點於下一個章節。

## 四、結果與討論

### 4-1 波浪模式之比較

本文選定 Berkhoff 等人(1982) 所做的橢圓淺灘試驗, 進行模式計算。量測的計算區域如圖 1 所示。波浪從右手邊入射。在左手側為一海灘, 及部份左側的邊界 ( $0m < y < 17m$ ) 定為完全透過邊界 ( $\alpha = 1$ )。在頂端及底部邊界, 全反射邊界條件 ( $\alpha = 0$ ) 被指定模擬實驗之實際情況。格點的尺寸及其它的資訊則列於表 2。比較 GCG 模式 (Li, 1994a), 選擇另一較小的計算區域, 其結果示於表 2 的 Berkhoff\_2 欄位下。

在此實例中, 因反射波浪很小故可被乎略, 及波浪沒有很強的繞射效應, 故 Ref / Dif-1 及 RCPWAVE 模式可足夠地在此適用。在我們的研究中顯示, Ref / Dif-1 模式在計算波向上有精度的問題; RCPWAVE 模式則是在計算波高及波向上較不正確。對於利用電腦計算的結果都概述於此章節, 正規化的波高及波向線為主要比較的項目。對於相似的結論, 為節省文章篇幅故只有一個被呈現出來。

### 4-2 波高分佈之比較

圖 2 至圖 5 為四種不同模式預測結果所繪之正規化波高等值線。PMH 和 PBCG 模式之預測結果實際上與 RDE 模式相同, 故此處予以省略。RDE 模式之波高分佈顯示, 海灘及淺灘前方均有輕微的反射, 此現象可在圖 2 中之淺灘前方之  $H/H_0 = 1$  值左右看出, 而淺灘之後方則主要為波浪之折射與繞

射所掌控。

圖 3 中，MIKE 21 之 EMS 模式同樣地給與合理的波高分佈，但淺灘前方之反射波則不如 RDE 模式明顯，反射波僅於淺灘前方兩個角落處看出。值得注意的是，此一模式將波浪從計算區域內部引進，因此海棉層在近灘及遠灘處可以明顯看出。

由於 Ref / Dif-1 和 RCPWAVE 模式沒有包括波浪反射，圖 4 及圖 5 之波高等值線在淺灘前方之值大部份均為 1，在淺灘後方則有明顯的不同。圖 4 中 Ref / Dif-1 之結果，相當靠近於 RDE 模式之結果。RCPWAVE 模式則顯示在灘線區域有較大的波高，此波高係由額外之方程式  $\nabla \times \nabla S = 0$  所衍生，使波向線相互間不能交會，此點將於下節詳加說明。

#### 4-3 波向量分佈之比較

波向量繪圖結果顯示每一格點之波高及波向，因此其結果提供海岸工程設計非常有用的資訊。對 Berkhoff 之橢圓形淺灘而言，波向量之改變主要發生於淺灘的後方，因此吾人僅點繪淺灘後方之波向量，及  $0m \leq x \leq 15m$  及  $5m \leq y \leq 15m$ ，(參考圖 1 之點線長方盒之範圍)。由於計算所切網格較密，故展現時不能將每一格點之波向量均予點繪。圖 6 為利用 RDE、PBCG 及 PMH 模式每 4 個格點繪出的波向量圖，而 RCPWAVE (圖 7) 及 Ref / Dif-1 (圖 8) 則每兩個格點繪出。

從波向量圖之比較可知，RDE 等模式在橢圓形淺灘背後於  $9m < x < 10m$  及  $9m < y < 11m$  處，波向線有相交的現象。另外，圖 9 中位相等值線之結果顯示，此一區域仍指出波峰線凸凹之轉換區。此現象為一有興趣且值得進一步研究之題目。

由於程式輸出之流速勢包含透射波 (transmitted wave)，反射波 (reflected wave) 及繞射波 (diffracted wave)，故波向量亦能表現這些變形之綜合影響，因而圖中之波向線也不一定垂直於等深線。

圖 9 中  $x < 8m$  之區域，在靠近  $y = 7$  及  $14m$  處波峰線有明顯的彎曲。這種彎曲在物理上是不合理的，除非在波高很小的情況下。當檢驗圖 6 時發現，在上述的位置波高值非常小。

對於 PBCG 模式及 PMH 模式，實際上可獲得相同的波向量及波峰線。對於 MIKE 21's EMS 模式，則缺少波向量的資料。

對於 RCPWAVE 模式，波向量 (圖 7) 中顯示在淺灘後方，愈向岸線所得的波高值會愈來愈高。這個現象可被解釋為波浪的軌跡沒有互相的交錯，如圖 10 所示。對於外加的控制方程式  $\nabla \times \nabla S = 0$ ，可反應在此結果。最主要關心的是，視這個結果為“是真的嗎?”。所考慮是波浪的軌跡是否被允許相互交錯。舉例來說，在一有限長度直的防波堤背後，波浪的繞射將會讓波浪沿著防波堤的兩端相互交錯。額外的控制方程式提供一個人工的限制，而造成不合理的結果。

Ref / Dif-1 模式結果顯示，所有格點的波向實際上都是相同的。這是一個意外的發現。這個在預測波向不好的結果，將使模式在實際上受到限制，因為波向為研究沿岸漂沙傳輸重要的參數。

對於先前學者確認數值模式，強調於比較各個斷面的波高值。我們將會去證明，只利用這個比較來是不足以判斷模式的適用性。於圖 1，有 8 條中心線及可得沿著這些線所量測的波高值。以不同模式(RDE, RCPWAVE, Ref / Dif-1, 及 EMS 模式) 沿量測線比較的結果顯示，所得的差異並不顯著如圖 11~圖 13 所示。這顯示出在確定模式的適用性，增加額外的檢驗於波向及波浪軌跡上是合理的。

#### 4-4 底床非線性項之探討

將底床非線性項加入緩坡方程式計算前，我們希望先了解非線性項 (底床曲率係數  $f_1(kh)$  及斜率平方項係數  $f_2(kh)$  與相對水深 ( $kh$ ) 間的關係。 $f_1(kh)$  與  $f_2(kh)$  關係圖如圖 14 所示。於圖 14 中，可明顯看出在深水條件下

( $kh > \pi$ )， $f_1$  可被忽略，但在中間性水深及淺水 ( $kh < \pi/10$ ) 情況下，則  $f_1$  表現較為明顯。而  $f_2$  則在中間性水深情況下，表現最為明顯。其最大值發生在  $kh \approx 0.4\pi$ 。

文中將選定波浪通過斜坡底床，及波浪通過人工沙灘的反射率，對底床非線性項進行探討。對於數值計算的模式，我們選定 PMH 模式 (Hsu 和 Wen, 1998) 及 extended PMH 模式 (Hsu 和 Wen, 1999) 來進行數值模擬。

#### 4-4-1 波浪通過斜坡底床的反射率

波浪通過平面斜坡底床的佈置圖，如圖 15 所示。於配置圖中可看到於波浪入射及透過區域，為一等水深的情況。在數值模式中，將改變斜坡的寬度  $b$  來計算波浪通過斜坡底床的反射率。並將計算所得結果與其它數值結果加以比較。在計算區域的兩側，水深分別為  $h_1 = 0.6m$  及  $h_2 = 0.2m$ 。選擇的計算條件為  $T = 2sec$ ， $\Delta x = 0.1m$ ， $\Delta t = 0.01sec$ 。對於計算波浪反射率係數的區域，文中選擇在斜坡底床前  $x = L_1$  及  $2L_1$  ( $L_1$  為在水深  $h_1$  下的波長) 間進行計算。

為避免在計算時，因邊界所產生的反射波回到計算區域中，我們針對計算時所需的適當離岸距離進行測試，測試結果如圖 16 所示。於圖 16 中可看到當邊界離陡變地形到達 4 倍波長時，所測得之反射率將得到一穩定值。

於圖 17 中，同時比較在不同斜坡寬度  $b$  下，extended PMH 模式，PMH 模式，有限元素模式 (Suh 等人, 1997)，extended EMSE (Suh 等人, 1997) 和 extended HMSE (Lee 等人, 1998) 計算所得之反射率。圖 17 中顯示，使用 extended PMH 模式與有限元素模式、extended EMSE 與 extended HMSE 有著相近的結果。即使所計算的坡度很陡時，利用 extended PMH 模式所計算得的結果與 (Suh 等人, 1997) 計算所得之結果有相當的一致性。

在以往 Booij (1983) 提出利用緩坡方程式計算波浪通過緩變斜坡底床，認為斜坡底床的斜率可達到至少 1:3 的精確度。然而 Lee 等人 (1998) 指出 Booij (1983) 所提的結論並不正確。於圖 17 中顯示，利用 PMH 模式計算所得的反射率，即使坡度斜率小於 1:3 的情形下，也會得到一較低的反射率值。

若於模式中加入底床非線性影響項，則坡度可提高至 1:1。圖中亦顯示，利用 **extended MPH** 模式比 **MPH** 模式可得到較佳的結果。

#### 4-4-2 波浪通過人工沙漣的布拉格反射

爲了對底床非線性影響量做更進一步的研究，文中亦選定 **Davies** 和 **Heathershaw (1984)** 所做波浪通過人工沙漣試驗加以比較。關於試驗的配置則列於表 3，於表中  $A$  爲沙漣振幅， $\lambda$  爲沙漣波長， $n$  爲沙漣個數及  $h_c$  爲水平底床水深。水深的配置如下式 (14) 所示。

$$h(x) = \begin{cases} h_c & , x \leq 0 \\ h_c - A \sin(Kx) & , 0 \leq x \leq n\lambda \\ h_c & , x \geq n\lambda \end{cases} \quad (14)$$

對於計算所需之格點間距及時間尺度則爲  $\Delta x = 0.05m$ ， $\Delta t = 0.016sec$  於  $D1$  和  $D2$  以及  $\Delta t = 0.013sec$  於  $D3$ 。計算範圍則是介於 2 倍的波長與沙漣波長比 ( $2k/K$ ) 爲 0.5~2.5 之間。在計算時則是給定固定的沙漣波長，改變波浪的波長進行計算。於圖 18 ~ 圖 20 中，表示在不同沙漣個數下，反射率與  $2k/K$  之關係。圖中實線部份爲利用 **extended PMH** 模式所得之計算結果，虛線部份爲利用 **PMH** 模式所得之計算結果。圖 18 及圖 19 分別表示在底床  $D1$  和  $D2$  下模式計算與實驗結果之比較。圖中顯示，利用 **extended PMH** 模式與 **PMH** 模式計算所得之反射率，並無明顯的差異。然而，於底床  $D3$  時，利用 **PMH** 模式計算所得之反射率與試驗數據及 **extended PMH** 模式則有明顯的差異。於圖中發現，利用 **PMH** 模式計算所得之反射率有明顯偏低的現象，特別是在波浪發生共振的位置下更爲明顯。**extended PMH** 模式因於模式中加入底床非線性影響量，故更能適切的描述波浪通過陡變底床的反射率。

## 五、結 論

本研究各種模式測試的結果顯示，RCPWAVE 及 Ref / Dif-1 模式都為計算速度最快速的模式，但是它們的結果總是不能被接受。使用 Ref / Dif-1 來預測，可得一良好的波高分佈，但所得之波向是無用的。對於 RCPWAVE 模式，都不能將波高分佈及波向精準的預測。因此，在使用這兩種模式時需要特別注意。

在橢圓及雙曲線模式中，所得的結果大多數為相同的，除了 EMS module 對於 MIKE 21。舉例來說，RDE，PBCG，及 PMH 模式都有著相同的波高及波向。其主要的差異在於電腦的速度及所需要的計憶體。相關的資料列於表 2。由於很難從 EMS module 對於 MIKE 21 中得到波向資料，故很難去了解此模式如何使用在沿岸漂沙傳輸。

Li (1994a) 主張 GCG 模式對於所給定的數值試驗，有較高的收斂率 (2500 次疊代)。使用相同的試驗情形，PBCG 模式需要大約 7700 次疊代才會收斂。其可能的原因為：(1) GCG 模式有較高的收斂率，(2) 在 Neuman 邊界條件有不同的近似及 (3) 不同的收斂臨界值。在這三個可能的原因，前兩者細部的討論如下。GCG 模式採用 1 階近似的 Neumann 邊界條件，可是 PBCG 模式採用 2 階近似的 Neumann 邊界條件。在此條件下，若  $\beta$  (視圖 1) 大於  $10^\circ$  則 GCG 模式將不會得到一正確的結果。在另一方面，PBCG 模式在  $\beta < 30^\circ$  時可得到一良好的結果。

對於收斂臨界值的使用在 GCG 模式方面，則為檢核在每次間計算時所有格點的平均差，但 GCG 模式則檢核每次計算每個格點的最大差值。對於此理由，雖然兩者宣稱所選擇的收斂臨界值都選為小於  $1.0 \times 10^{-7}$ ，但實際上 GCG 模式比 PBCG 模式有較低的臨界值。儘管所有的差異，對於 GCG 模式的計算時間 (2500 次疊代，Li 1994a)，能被按比例分配約 1500 秒，及這個數字與其它模式的比較列於表 2 的括弧內。

值得注意的是 Berkhoff 等人 (1982) 所做的試驗，並非最佳的試驗來校

核橢圓型態或雙曲線型態的波浪變形模式，因為缺少了強繞射波浪及反射波浪。因為波向總是幾乎垂直於下游端 ( $x = 0m$  及  $y < 10m$ ) 的透過邊界，而使用一階近似的邊界條件就能加以滿足。事實上，於邊界條件至少 2 階近似是基本的而 3 階近似在某些應用上是需要的。

爲了了解底床非線性項的重要性，選定 PMH 模式 (Hsu 和 Wen, 1998) 及 extended PMH 模式 (Hsu 和 Wen, 1999) 針對波浪通過斜坡底床及週期性沙漣底床所產生的反射率進行探討。計算結果顯示，當波浪行進於中間性水深時，底床非線性項對於波浪反射率方面，有著顯著的影響。傳統的緩坡方程式，並不能精確預測出波浪的反射率；以 extended PMH 模式來計算波浪通過陡變地形，則可得到一良好的預測值。

### 參考文獻

1. Berkhoff, J. C. W. (1972). "Computation of combined refraction-diffraction," Proceeding of thirteenth Conference on Coastal Engineering, Canada, ASCE, pp. 471-490.
2. Berkhoff, J. C. W., Booy, N., and Radder, A. C. (1982). "Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves," Coastal Engineering, 6, pp. 255-279.
3. Booij, N. (1983). "A note on the accuracy of the mild-slope equation," Coastal Engineering, 7, pp. 191-203.
4. Behrendt, L. (1985). A finite element model for water wave diffraction including boundary absorption and bottom friction, Series Paper 37, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark.
5. Chamberlain, P.G., and Porter, D. (1995). "The modified mild-slope equation," Journal of Fluid Mechanics, 291, pp. 393-407.
6. Chandrasekera, C. N., and Cheung, K. F. (1997). "Extended linear refraction-diffraction model," Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 123, pp. 280-286.
7. Chen, H.S. and Houston, J. R. (1987). Calculation of water oscillation in coastal harbors, HARES and HARED User's Manual Instruction Report CERC-87-2, CERC, Dept. of the Army, WES, Corps of Engineers,

Vicksburg, Mississippi 39180-0631.

8. Copeland, G. J. M. (1985). "A practical alternative to the mild-slope wave equation", *Coastal Engineering*, 9, pp. 125-149.
9. Dalrymple, R. A., Kirby, J. T., and Hwang, P. A. (1984). "Wave diffraction due to areas of energy dissipation," *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 110(1), pp. 67-79.
10. Dalrymple, R. A., Suh, K. D., Kirby, J. T., and Chae, J. W. (1989). "Models for very wide-angle water waves and wave diffraction, Part 2, Irregular Bathymetry," *Journal of Fluid Mechanics*, 201, pp. 299-322.
11. Davies, A. G., and Heathershaw, A. D. (1984). "Surface-wave propagation over sinusoidally varying topography," *Journal of Fluid Mechanics*, 144, pp. 419-443.
12. Dongarra, J. J., Bunch, J. R., Moler, C. B., and Stewart, G. W. (1979). *Linpac Users Guide*, SIAM.
13. Ebersole, B. A., Cialone, M. A., and Prater M. D. (1986). "Regional coastal processes numerical modeling system", Department of the Army. Waterway Experiment Station, Corps of Engineers.
14. Hsu, T. W., and Wen, C. C. (1998). "On the radiation boundary conditions and energy dissipation for wave calculation," A paper submitted to *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*.
15. Hsu, T. W., and Wen, C. C. (1999). "A parabolic equation extended for rapidly varying topography," A paper submitted to *Applied Ocean Research*.
16. Isobe, M. (1987). "A parabolic equation model for transformation of irregular waves due to refraction, diffraction and breaking," *Coastal Engineering in Japan*, 30, pp. 33-47.
17. Kirby, J. T. (1986a). "Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves," *Journal of Geophysical Research*, 91 (C1), pp. 933-952.
18. Kirby, J. T. (1986b). "Rational approximations in the parabolic equation method for water waves," *Coastal Engineering*, 10, pp. 355-378.
19. Kirby, J. T. (1989). "A note on parabolic radiation boundary conditions for elliptic wave calculations," *Coastal Engineering*, 13, pp. 211-218.
20. Kirby, J. T., and Dalrymple, R. A. (1991). *User's Manual, combined refraction /diffraction model, REF/DIF-1, Ver 2.3*, Center for Applied Coastal Research, Dept. Of Civil Engineering, Univ. of Delaware, Newark, DE 19716.
21. Larsen, J., and Dancy, H. (1983). "Open boundaries in short-wave

- simulations - a new approach," *Coastal Engineering*, 7, pp. 285-297.
22. Lee, C., Park, W. S., Cho, Y. S., and Suh, K. D. (1998). "Hyperbolic mild-slope equations extended to account for rapidly varying topography," *Coastal Engineering*, 34, pp. 243-257.
  23. Li, B. (1994a). "A generalized conjugate gradient model for the mild slope equation," *Coastal Engineering*, 23, pp. 215-225,
  24. Li, B. (1994b). "An evolution equation for water waves," *Coastal Engineering*, 23, pp. 227-242.
  25. Li, B., and Anastasiou, K. (1992). "Efficient elliptic solvers for the mild-slope equation using the multigrid technique," *Coastal Engineering*, 21, pp. 245-266.
  26. Maa, J. P. Y. and Wang, D. W. C. (1995). "Wave transformation near Virginia coast: The 1991 Halloween Northeaster," *Journal of Coastal Research*, 11(4), pp. 1258-1271.
  27. Maa, J. P. Y., Maa, M. H., Li, C., and He Q. (1997). Using the gaussian elimination method for large banded matrix equations, Special Scientific Report, No. 135, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA 23062.
  28. Maa, J. P. Y., Hsu, T. W., and Hwung, H. H. (1998). RDE Model: A program for simulating water wave transformation for harbor planing, Special Scientific Report, No. 136, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA 23062.
  29. Madsen, P.A., and Larsen, J. (1987). "An efficient finite-difference approach to the mild-slope equation," *Coastal Engineering*, 11, pp. 329-351.
  30. Massel, S. R. (1993). "Extended refraction-diffraction equation for surface waves," *Coastal Engineering*, 19, pp. 97-126.
  31. Mathews, J. H., 1987, *Numerical methods for computer science, engineering, and mathematics*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 507.
  32. Porter, D., and Staziker, D. J. (1995). "Extensions of the mild-slope equation," *Journal of Fluid Mechanics*, 300, pp. 367-382.
  33. Radder, A. C. (1979). "On the parabolic equation method for water wave propagation," *Journal of Fluid Mechanics*, 95(1), pp. 159-176.
  34. Suh, K. D., Lee, C., and Part, W. S. (1997). "Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography," *Coastal Engineering*, 32, pp. 91-117.

表 1 對於各種模式的功能

	RDE	PBCG	MIKE 21'	PMH	Red/Dif-1	RCPWAVE
淺化	有	有	有	有	有	有
折射	有	有	有	有	有	有
繞射	有	有	有	有	弱	弱
反射	有	有	有	有	沒有	沒有
共振	有	有	有	有	沒有	沒有
頻譜	可加入	可加入	可加入	可加入	可加入	可加入
底床摩擦	有	有	有	有	有	有
流的影響	可加入	可加入	沒有	可加入	有	沒有
透過邊界	2 階	2 階	海棉層	高階		

表 2 各模式計算使用之參數及結果之比較

參數	Berkhoff_1	Berkhoff_2
波高 (m)	0.01	0.01
週期 (sec)	1.0	1.0
入射角 (deg)	0	0
水深 (m)	0.04-0.45	0.04-0.45
格點間距 (m)	0.1	0.1
計算區域 (m)	20×25	20×22
計算區域格點	201×251	200×220
總數	49,123	44,000
<b>RDE</b>		
計算時間 (sec)	1056	946
所需記憶體 (MB)	26.20	25.46
<b>PBCG</b>		
疊代次數	10103	7922
計算時間 (sec)	7015	4433
所需記憶體 (MB)	11.48	1072
<b>REF/DIF-1</b>		
疊代次數	12	
計算時間 (sec)	2.0	
所需記憶體 (MB)		
<b>RCPWAVE</b>		
計算時間 (sec)	49	
所需記憶體 (MB)	2.6	
<b>MIKE 21's EMS</b>		
疊代次數	96	68
計算時間 (sec)	661	309
所需記憶體 (MB)	6.87	6.11
<b>PMH</b>		
疊代次數	1200	
計算時間 (sec)	1600	
所需記憶體 (MB)	2.7	

PS. 所使用的計算機為 Pentium 233 Personal computer 含有 64 MB 的記憶體，在 95 系統下計算。

表 3 Davies and Heathershaw (1984) 試驗佈置條件

D	A (cm)	$\lambda$ (K) (cm)	N	$h_c$ (cm)
D1	5.0	100 (0.0628 $cm^{-1}$ )	2	15.6
D2	5.0	100 (0.0628 $cm^{-1}$ )	4	15.6
D3	5.0	100 (0.0628 $cm^{-1}$ )	10	31.3

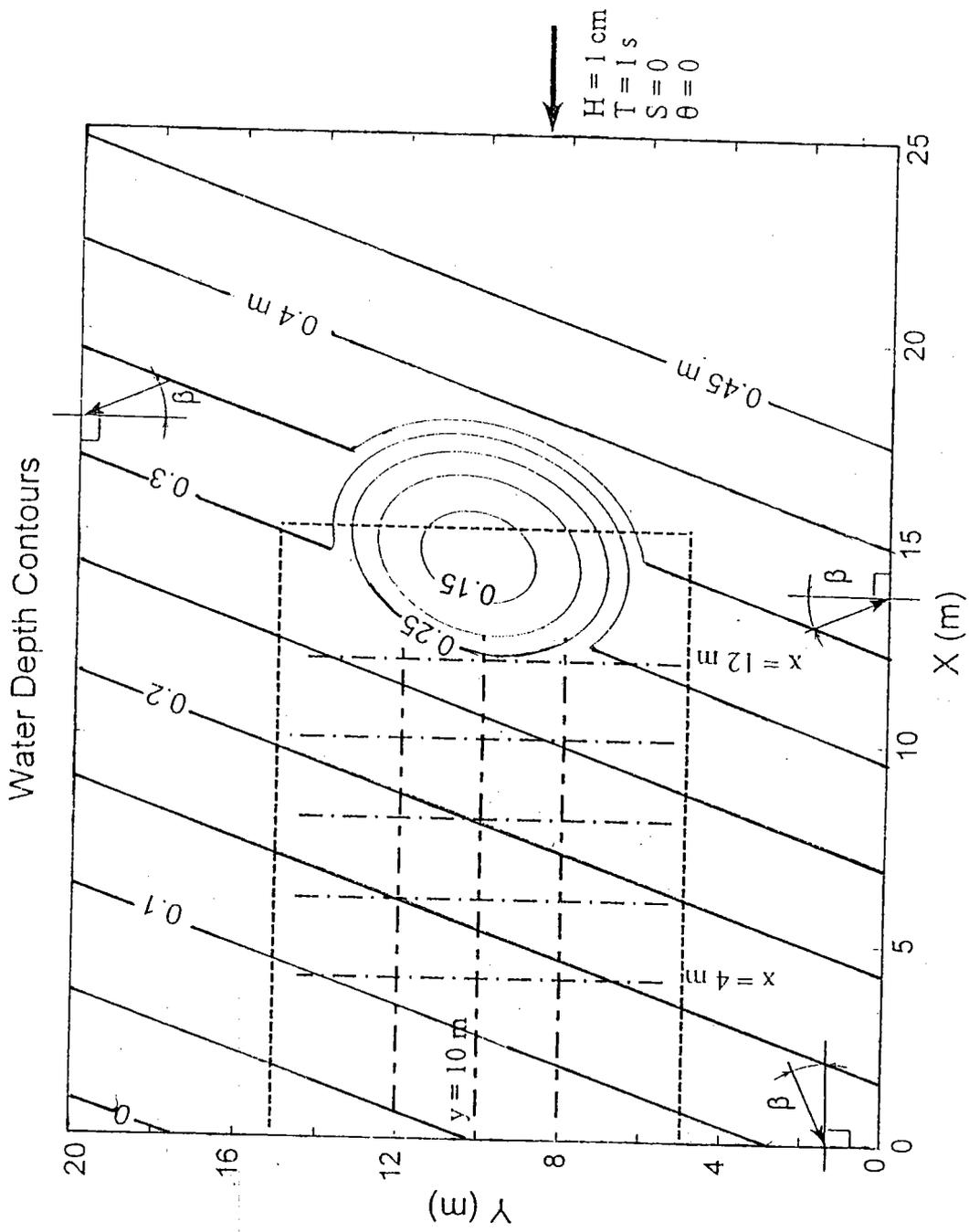


圖 1 橢圓淺灘示意圖 (Berkhoff, 1982)

# Wave Height Contours (RDE)

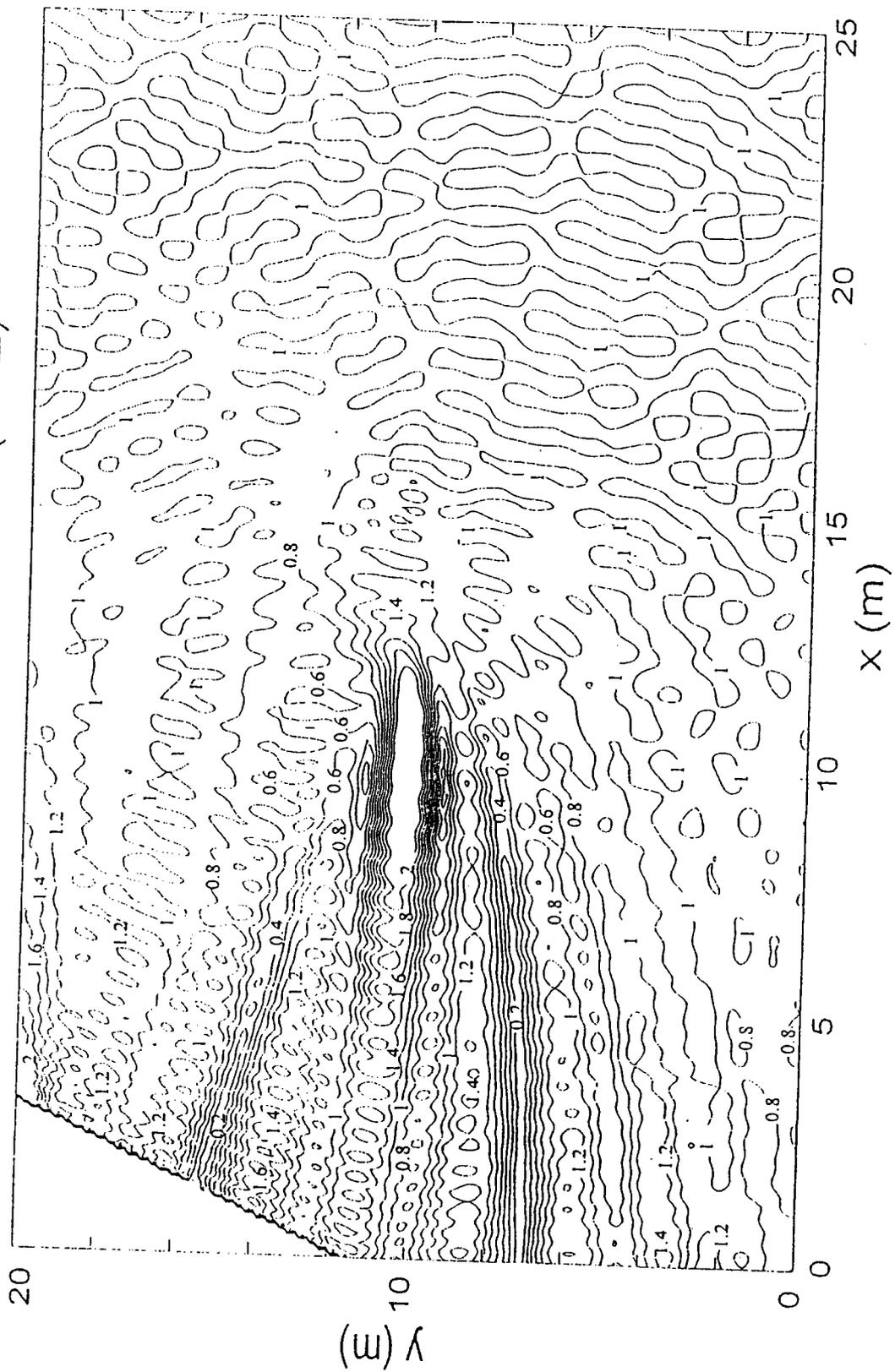


圖 2 使用 RDE、PBCG 及 PMH 模式計算橢圓淺灘，波高分佈圖

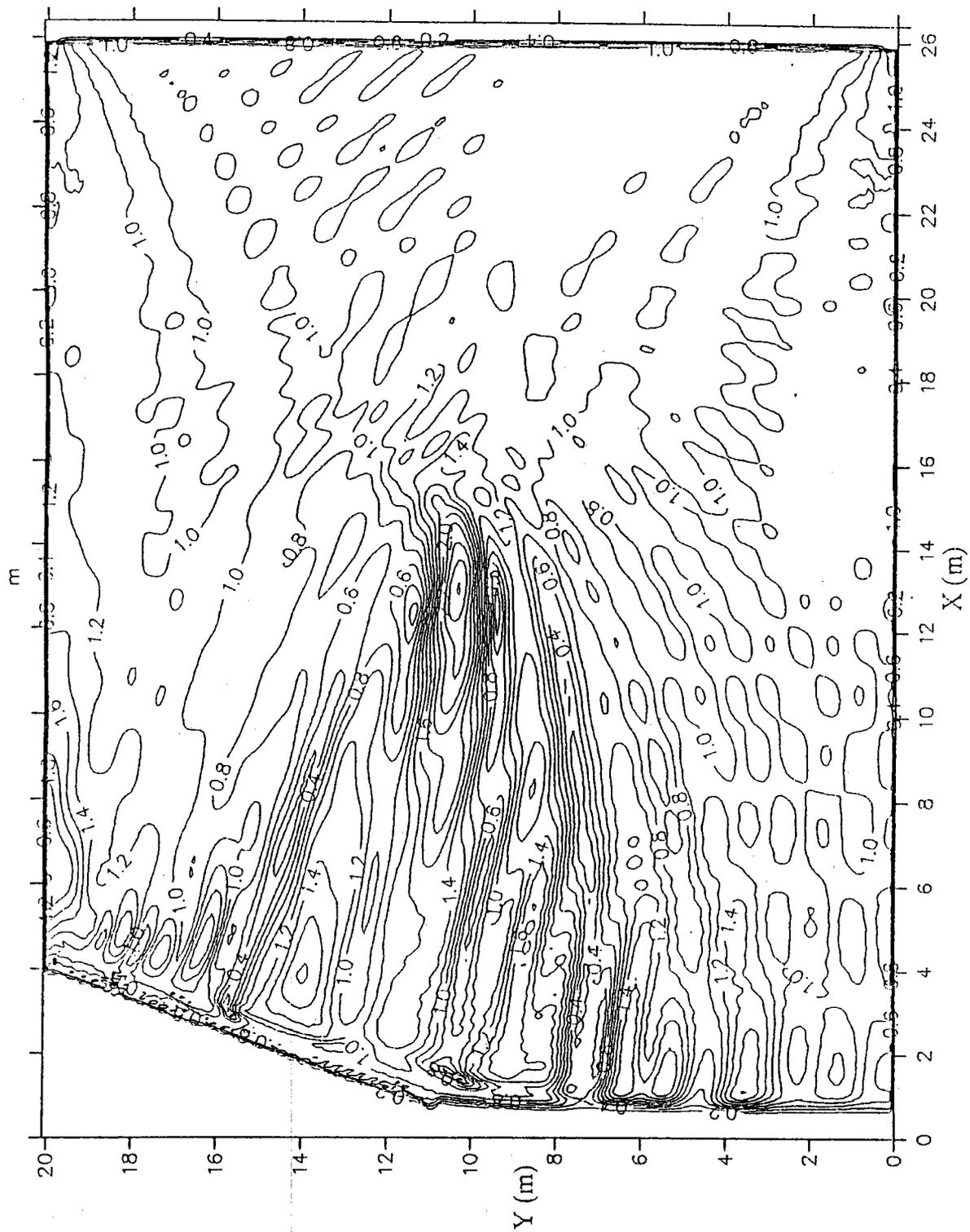


圖 3 使用 EMS module for Mike 21 模式計算橢圓淺灘，波高分佈圖

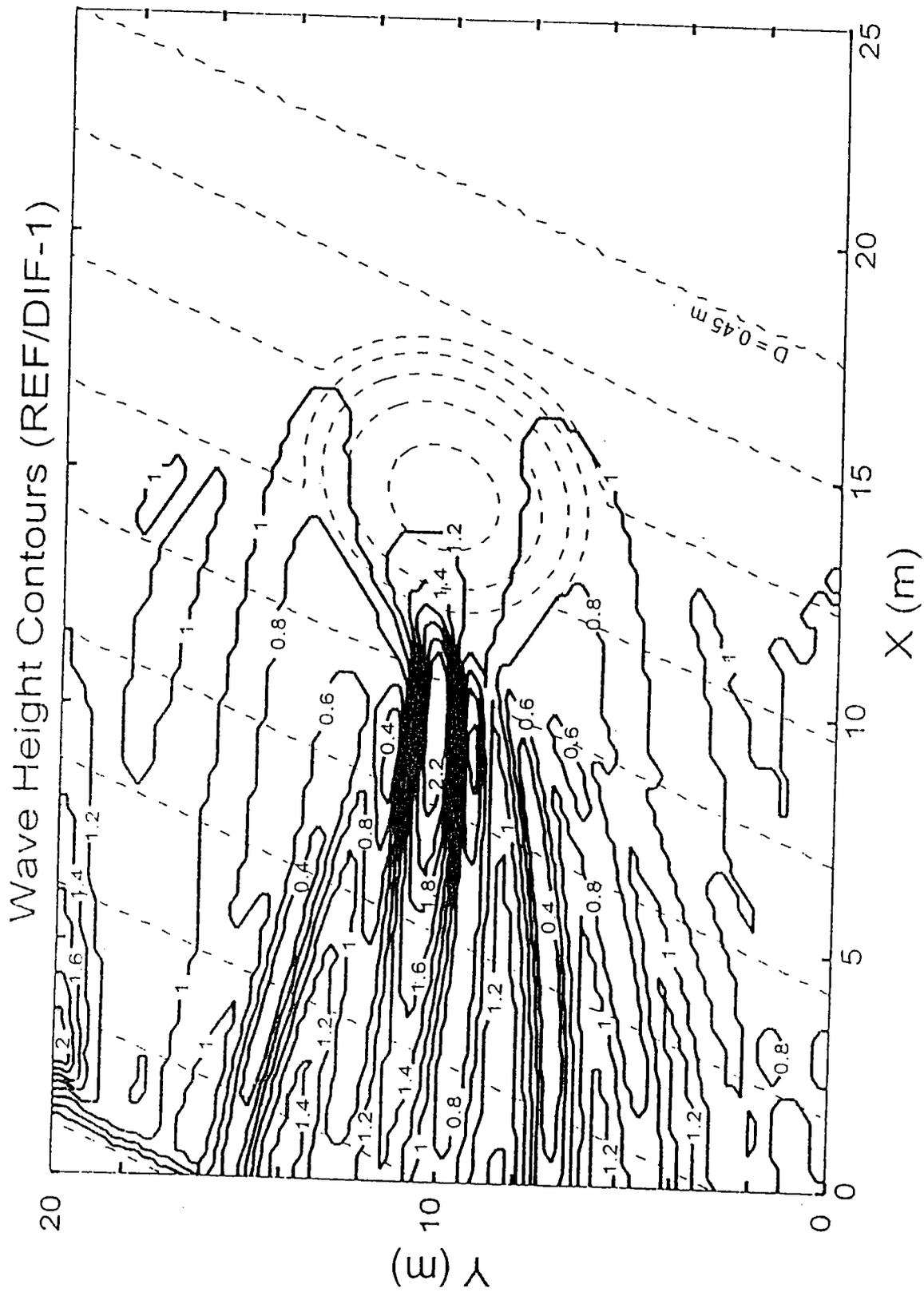


圖 + 使用 Ref/Dif-1 模式計算橢圓淺灘，波高分佈圖

Normalized Wave Height Contours (RCPWAVE)

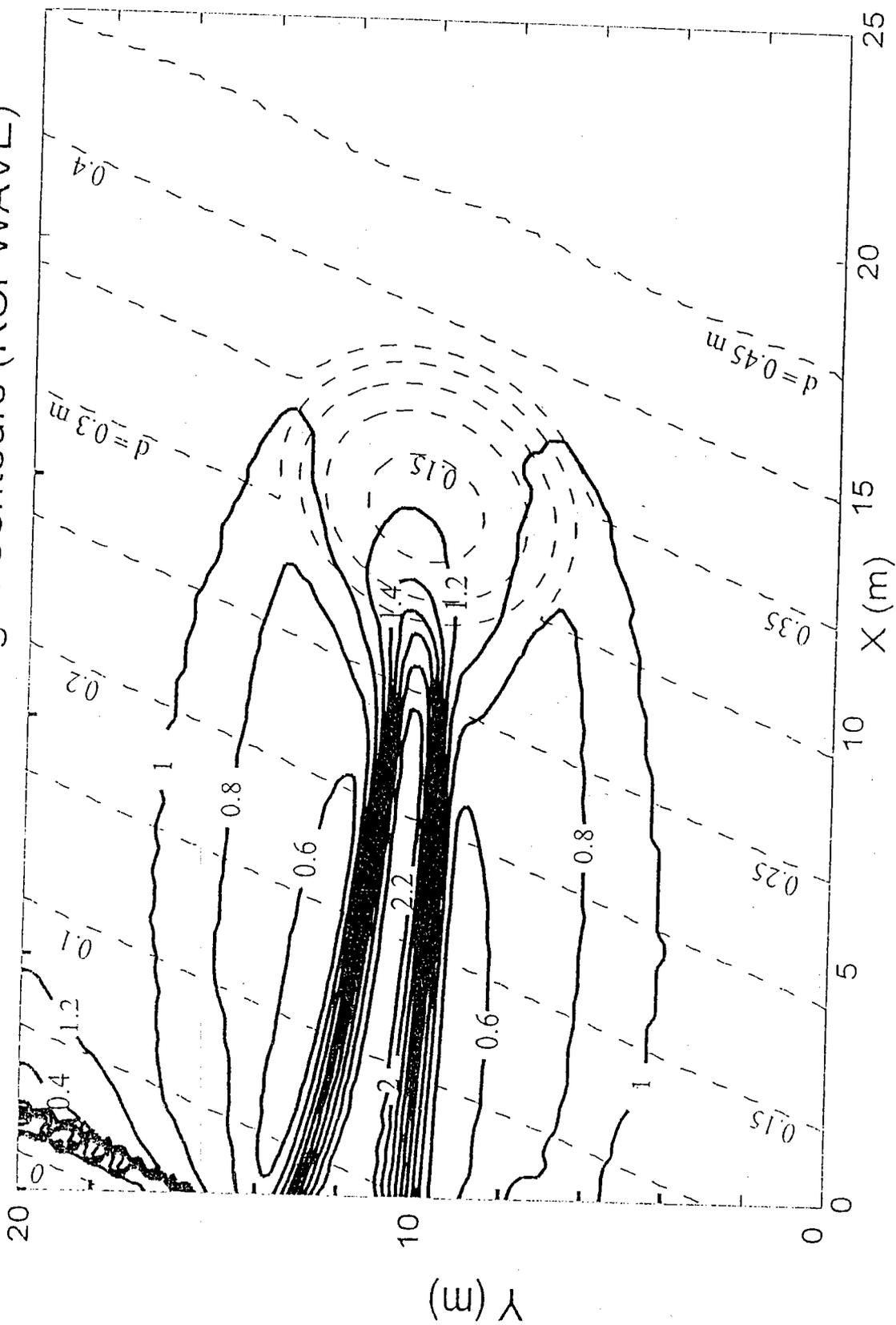


圖 5 使用 RCPWAVE 模式計算橢圓淺灘，波高分佈圖

# RDE Wave Vectors

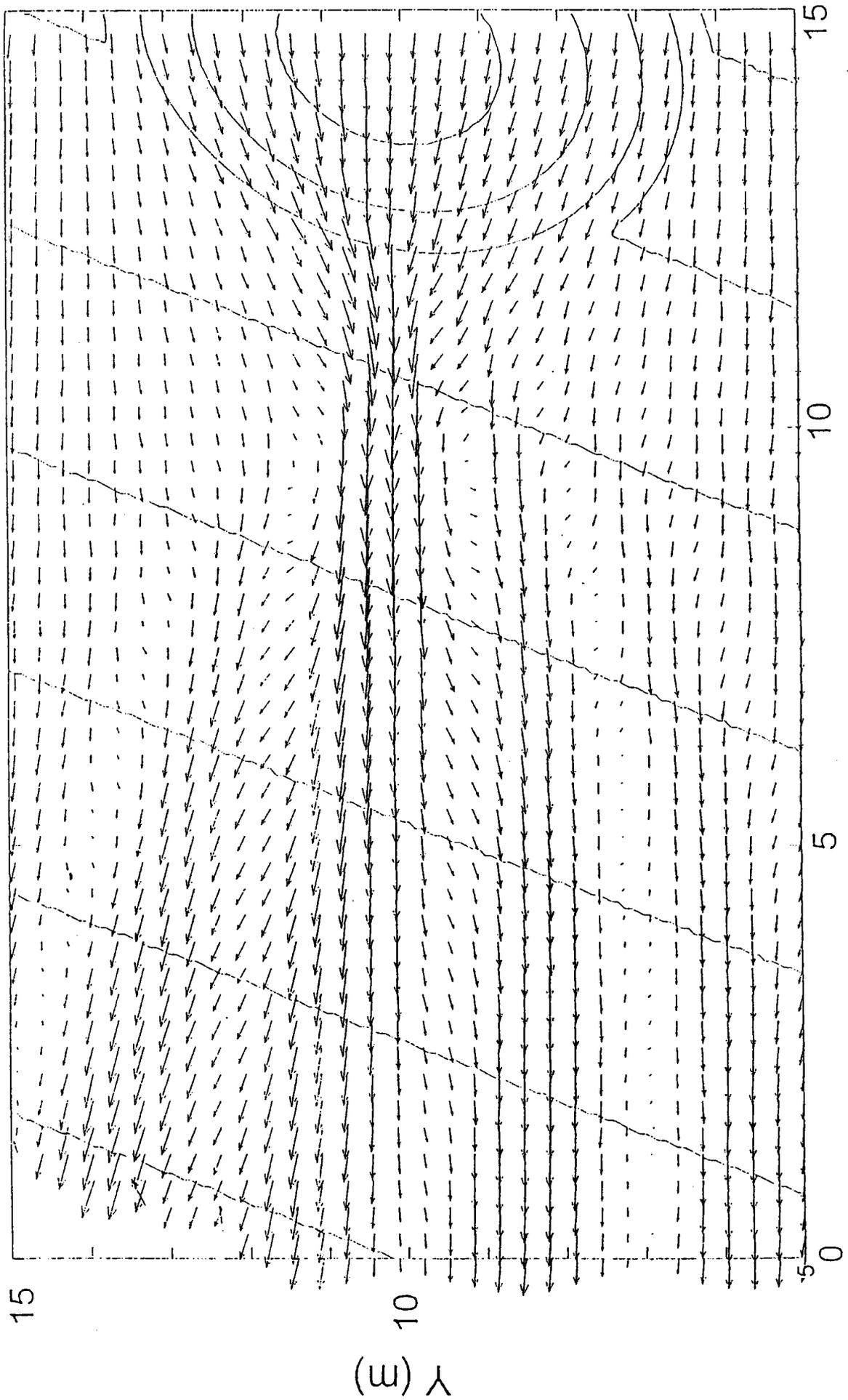


圖 6 使用 RDE、PBCG 及 PMH 模式計算橢圓淺灘，波向分佈圖

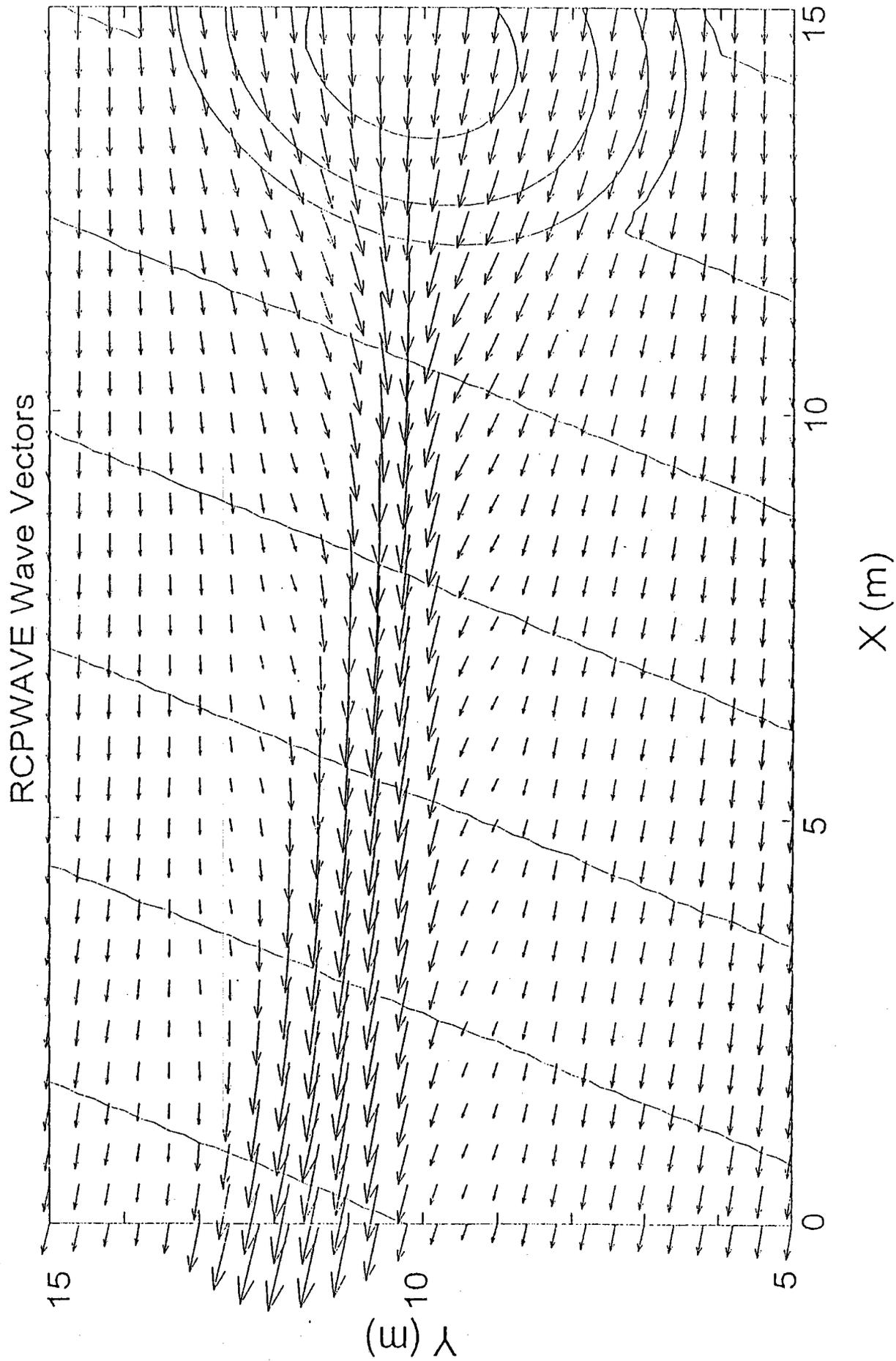


圖 7 使用 RCPWAVE 模式計算橢圓淺灘，波向分佈圖

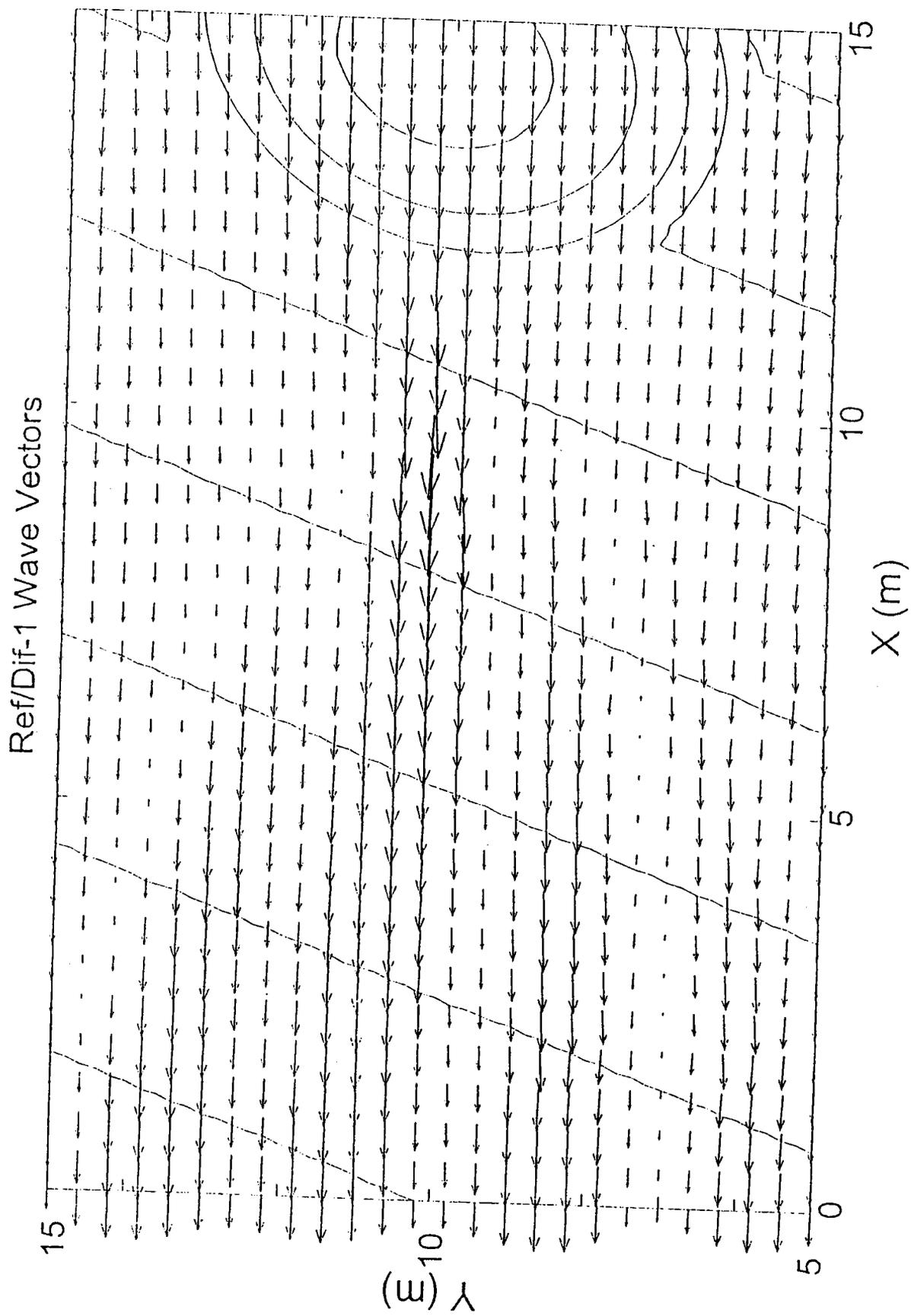


圖 8 使用 Ref/Dif-1 模式計算橢圓淺灘，波向分佈圖

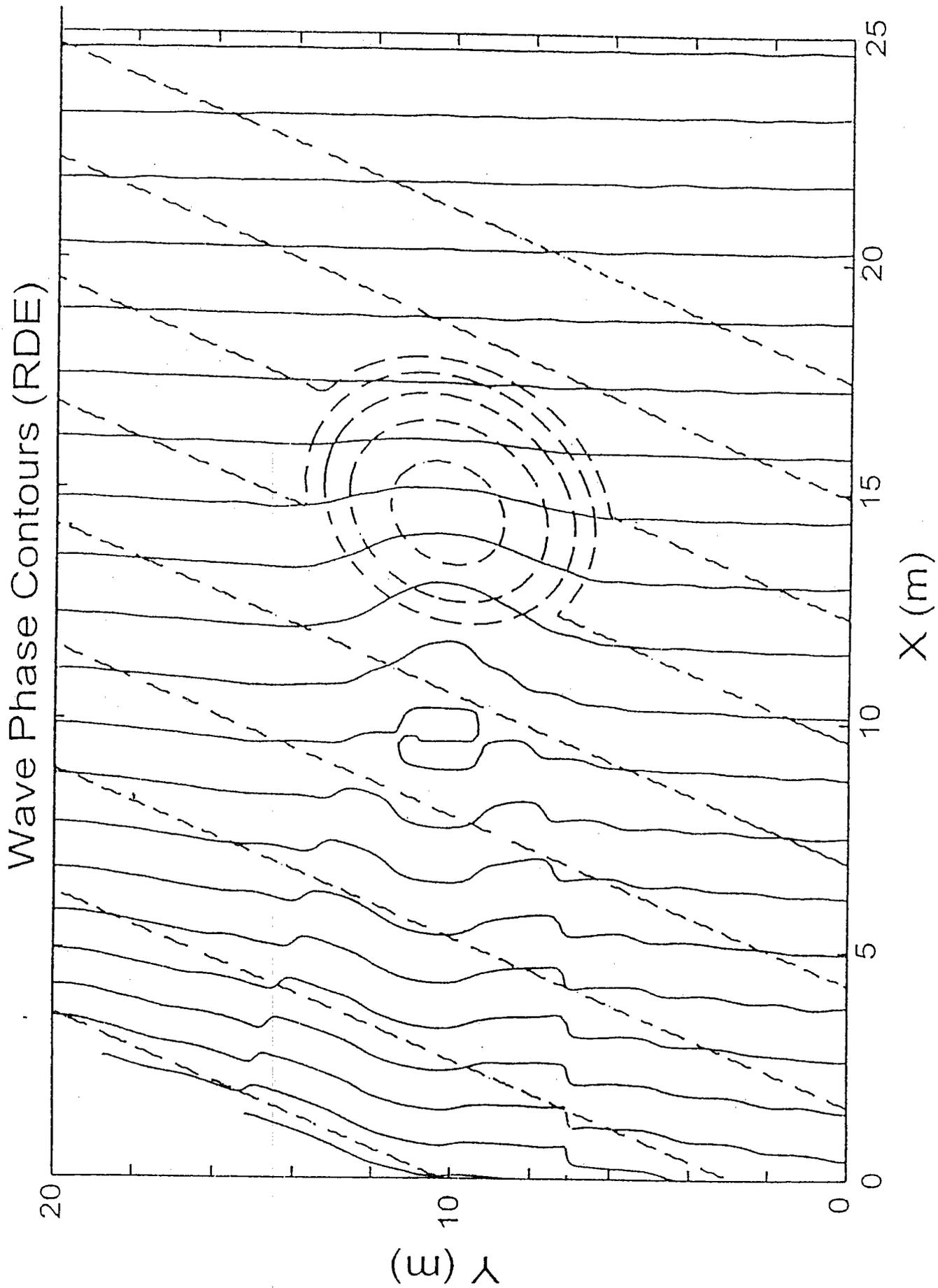


圖9 使用RDE、PBCG及PMH模式計算橢圓淺灘，等位相(沿波峰)分佈圖

Wave Trajectory Plot (RCPWAVE)

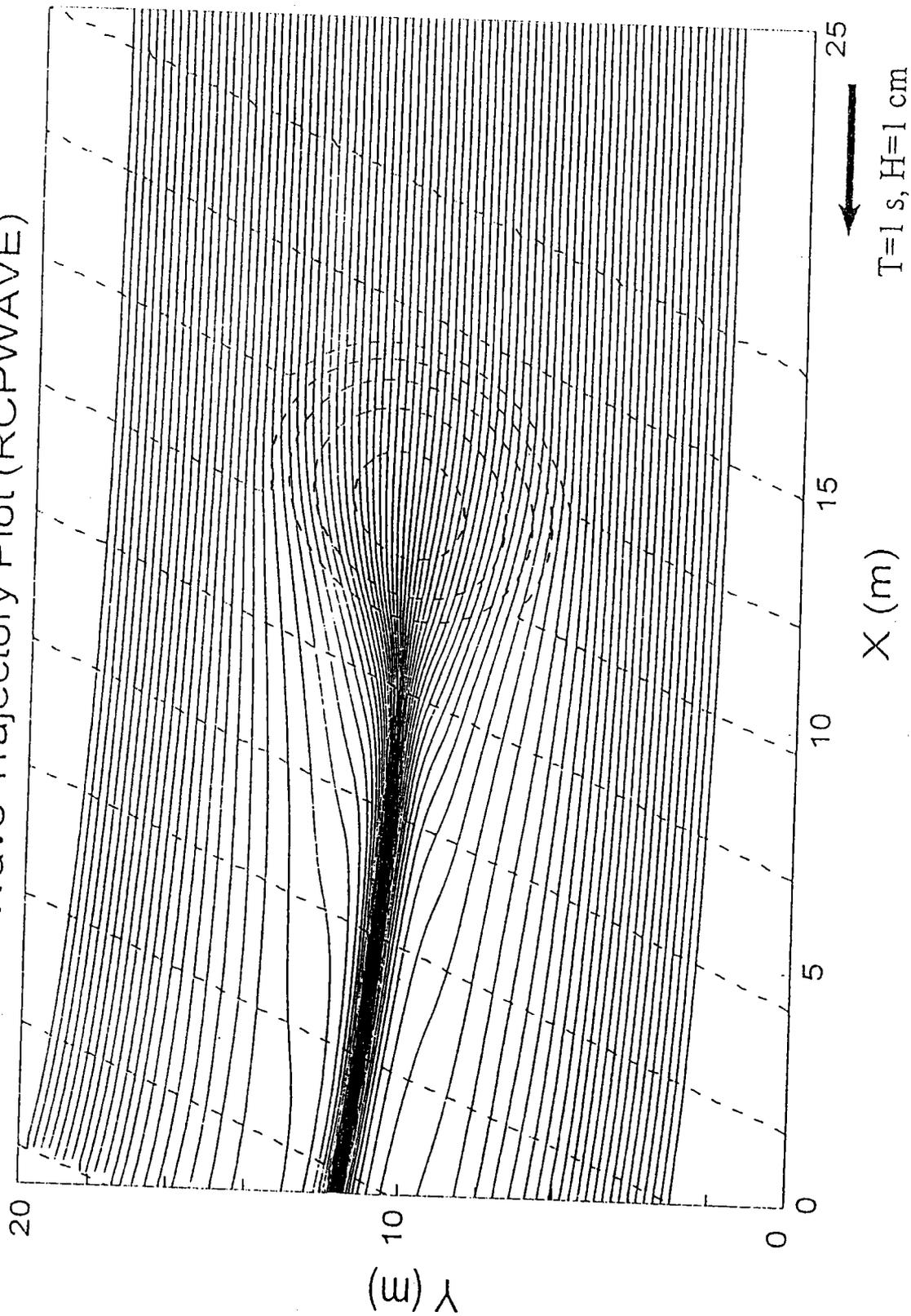


圖 10 使用 RCPWAVE 模式計算橢圓淺灘，波浪軌跡分佈圖

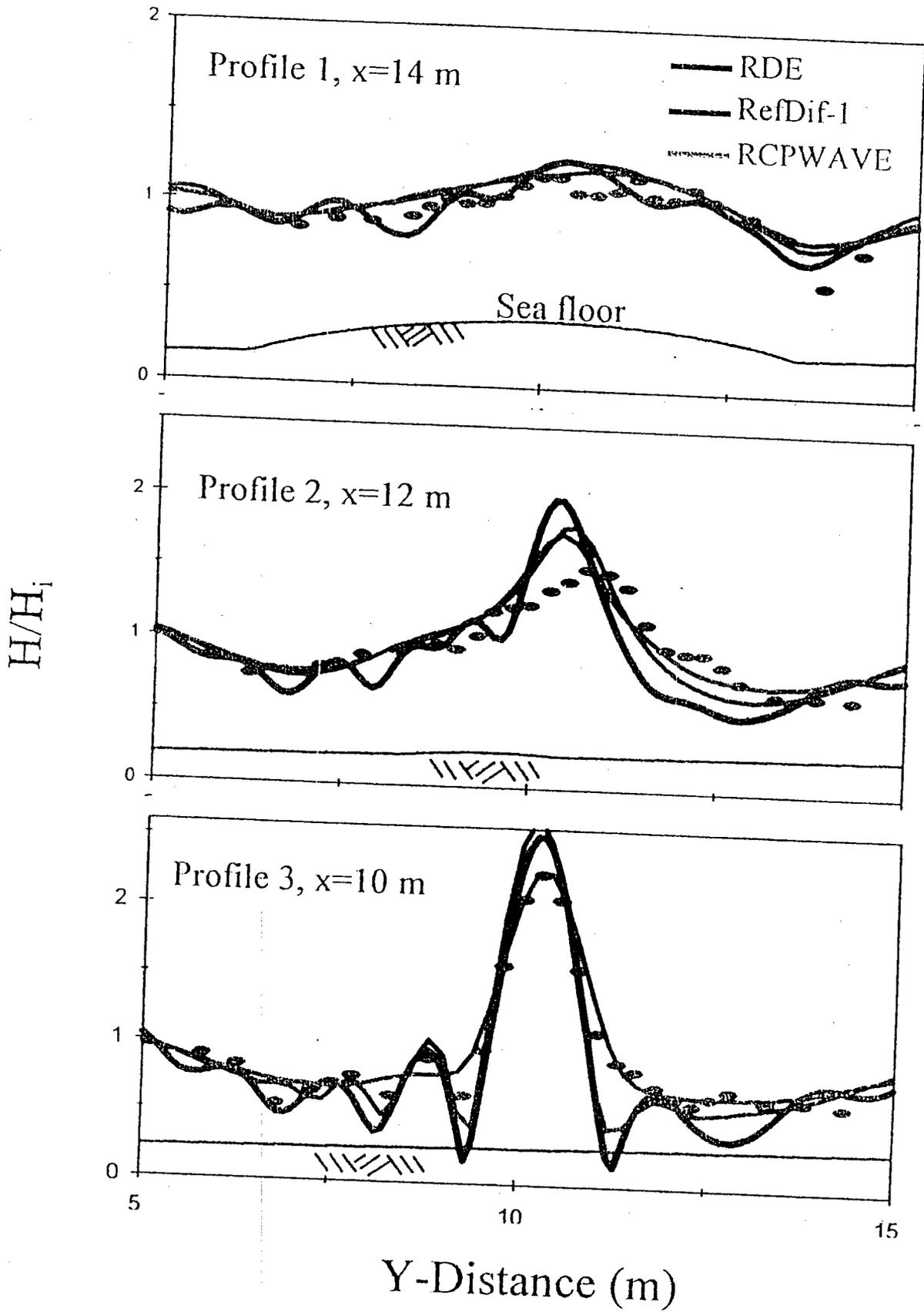


圖 11 對於 RDE、Ref/Dif-1 及 RCPWAVE 模式與 Berkhoff (1982) 波高各斷面試驗資料之比較 (a)  $x=14$ m; (b)  $x=12$ m; (c)  $x=10$ m

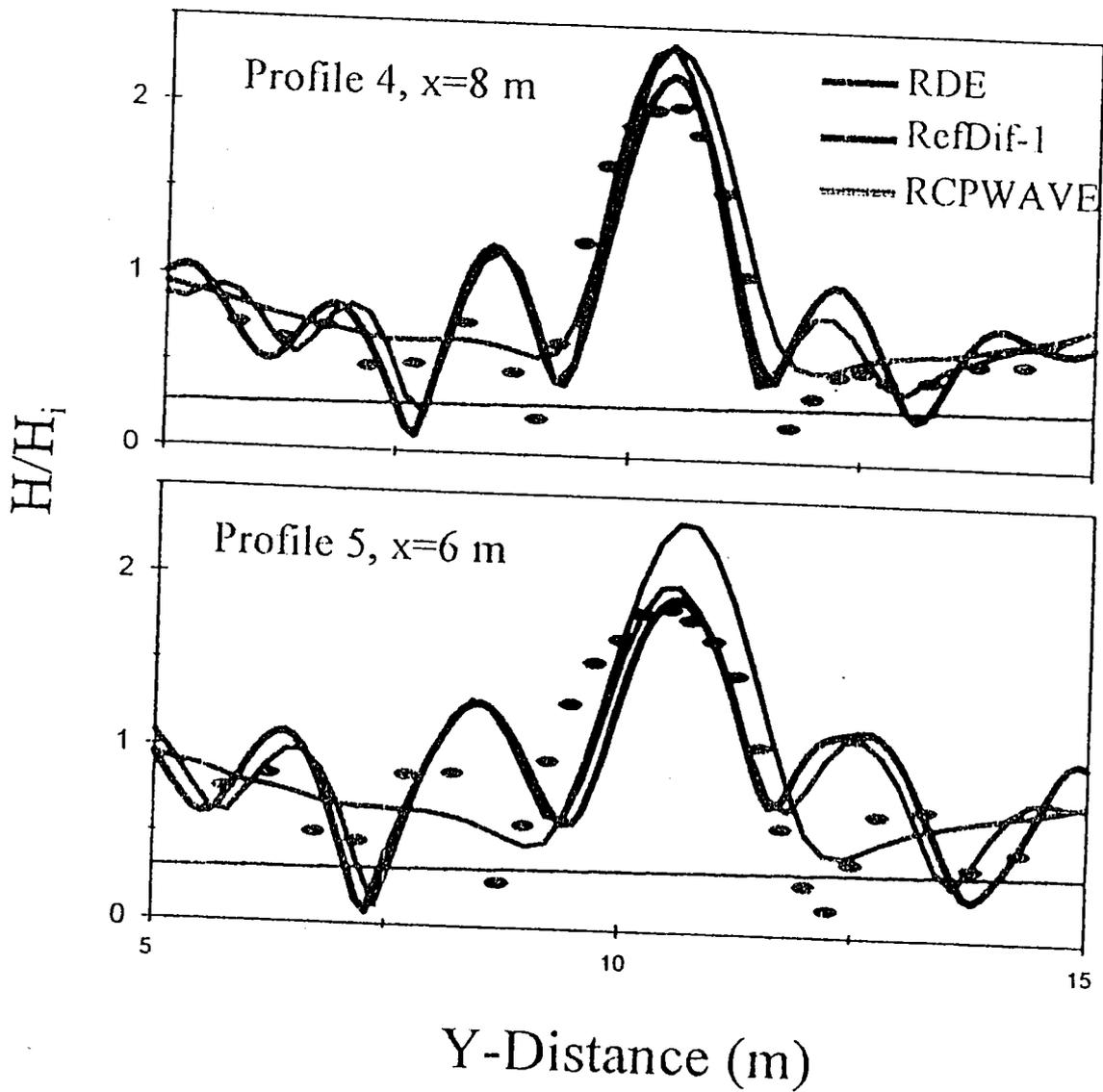


圖 12 對於 RDE、Ref/Dif-1 及 RCPWAVE 模式與 Berkhoff (1982) 波高各斷面試驗資料之比較 (d)  $x = 8\text{m}$ ; (e)  $x = 6\text{m}$

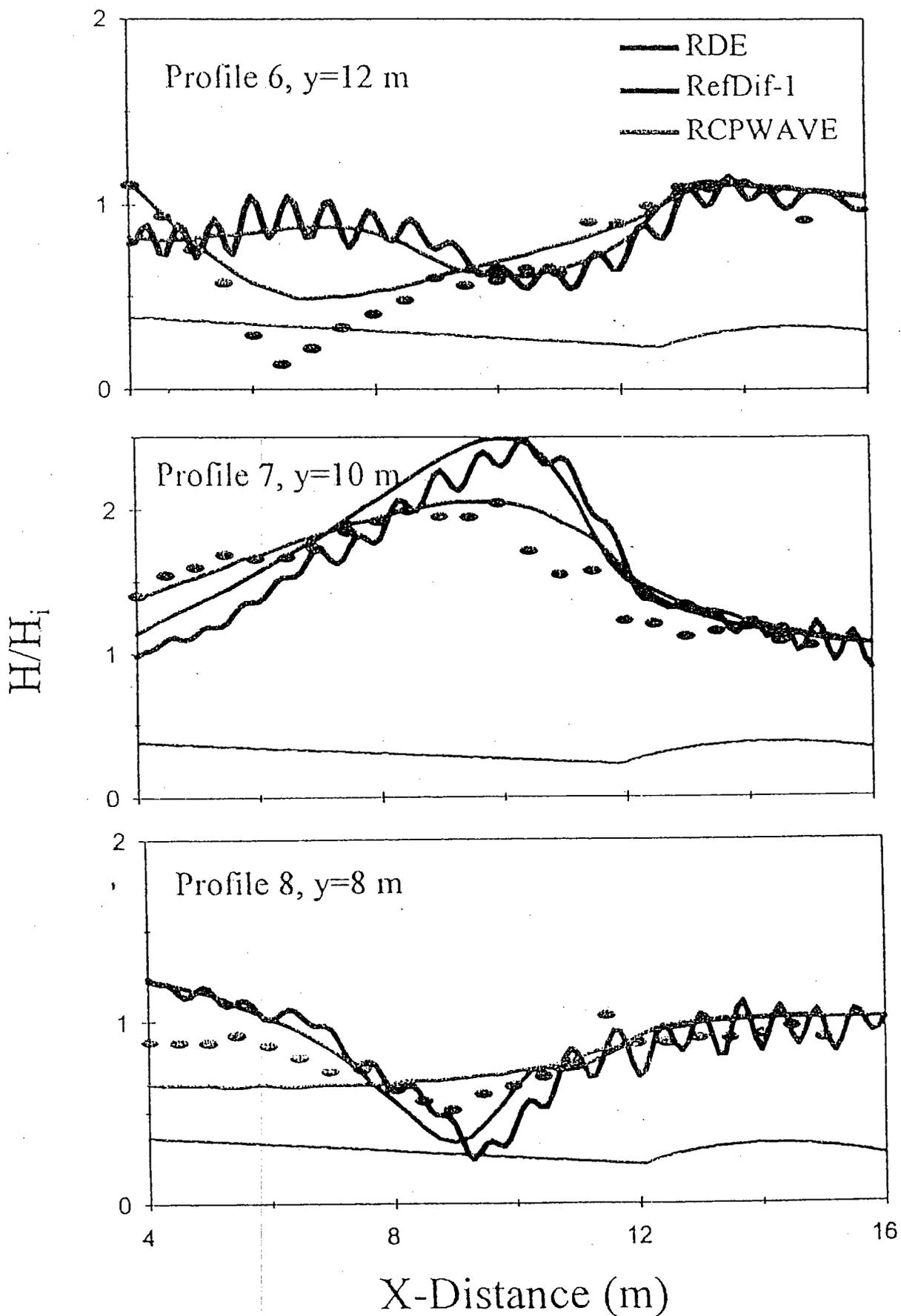


圖 13 對於 RDE、Ref/Dif-1 及 RCPWAVE 模式與 Berkhoff (1982) 波高各斷面試驗資料之比較 (f)  $y = 12\text{m}$ ; (g)  $y = 10\text{m}$ ; (h)  $y = 8\text{m}$ 。

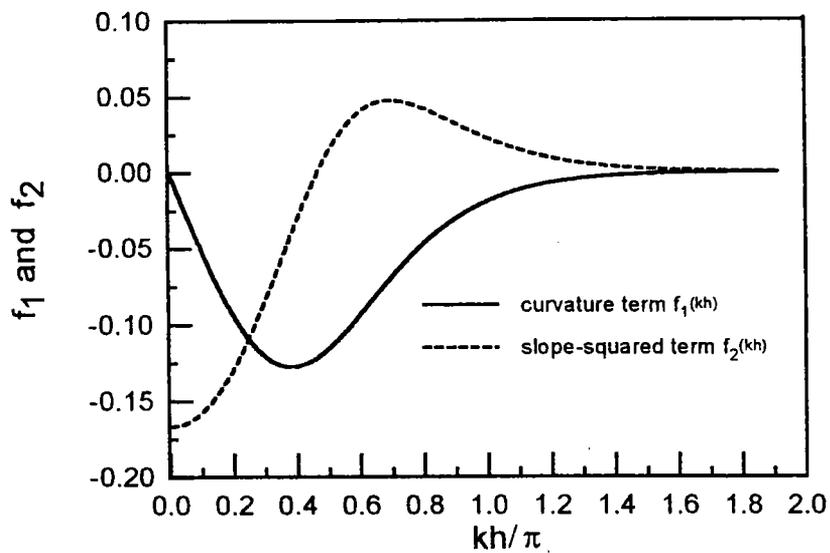


圖 14 不同相對水深  $kh$  下底床曲率及底床斜率平方項係數關係圖

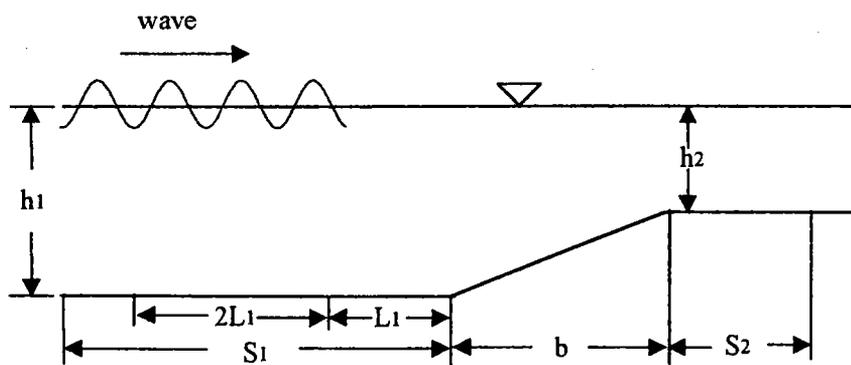


圖 15 波浪通過平面斜坡底床計算佈置圖

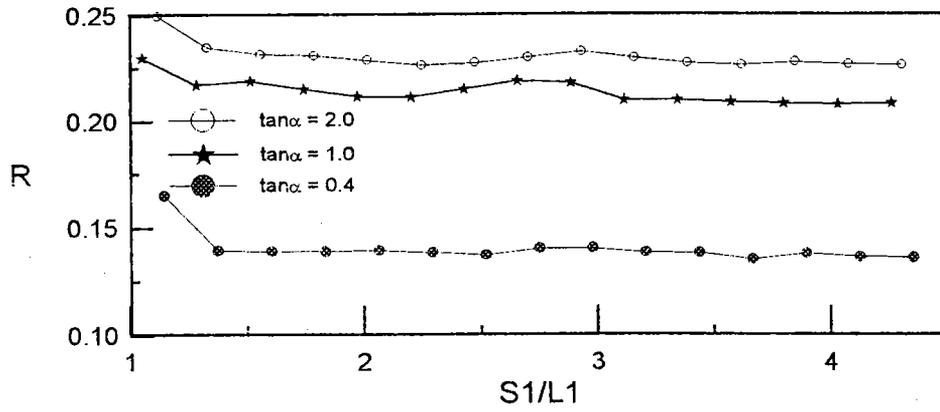


圖 16 反射係數 R 與幅射邊界離岸距離  $S1/L1$  關係圖

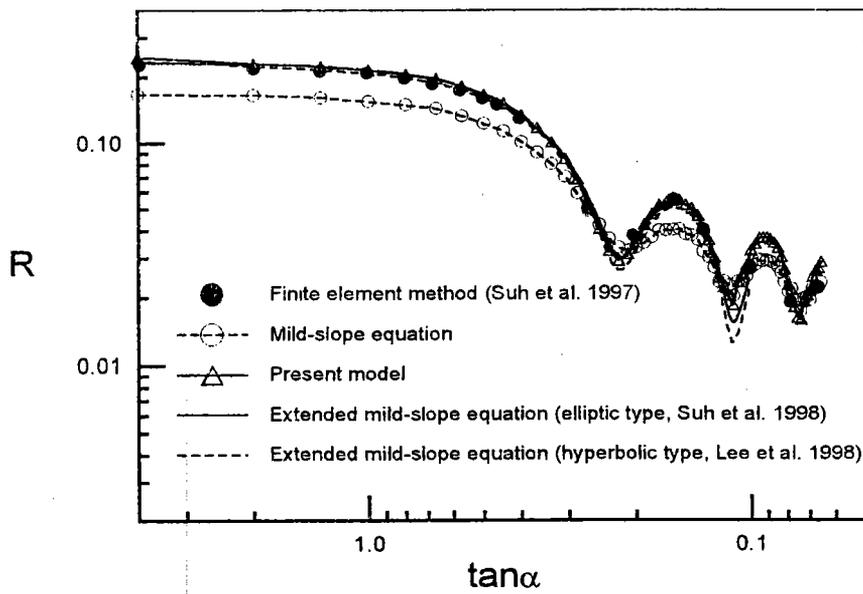


圖 17 反射係數 R 與底床坡度  $\tan\alpha$  關係圖

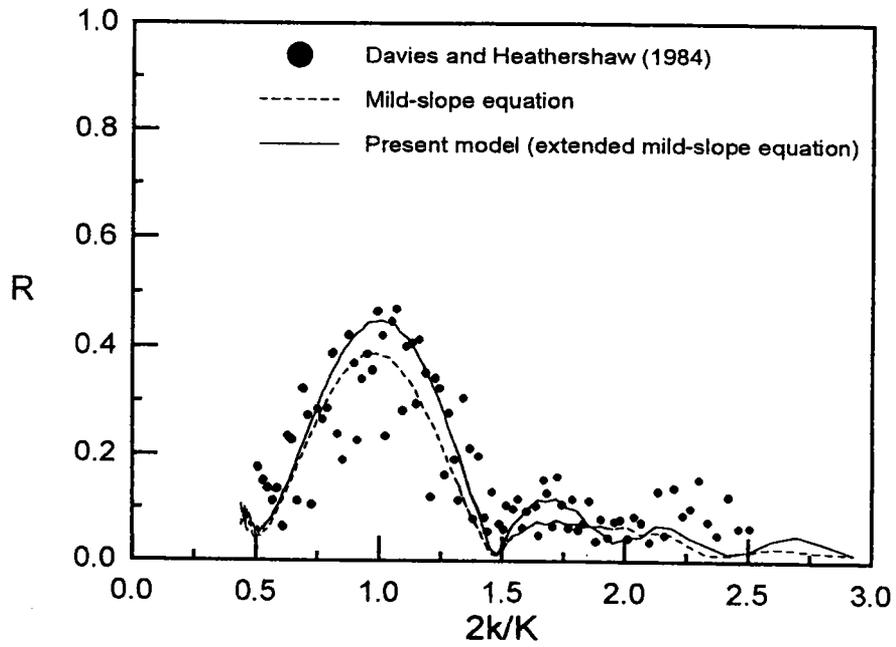


圖 18 波浪通過人工沙漣反射率係數 ( $n=2$ )

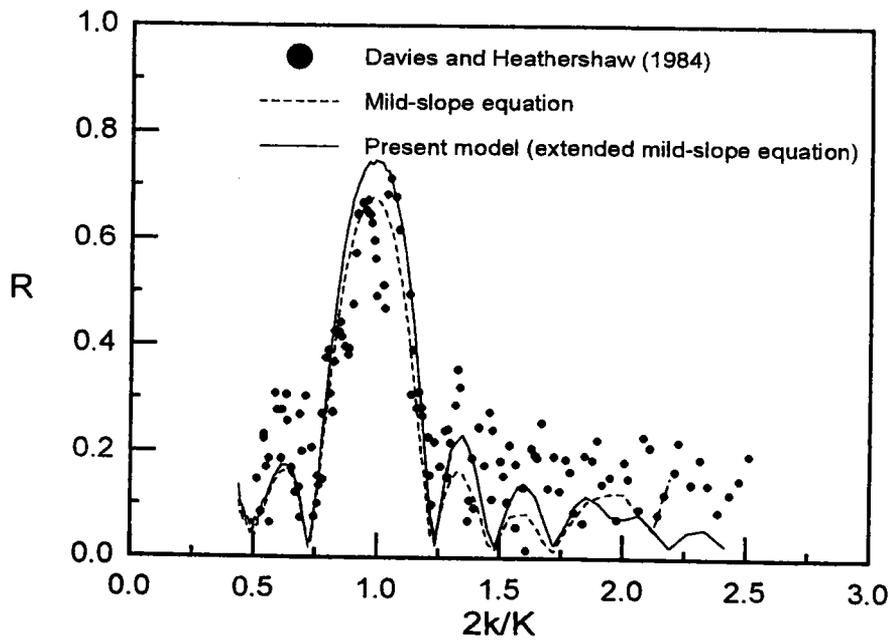


圖 19 波浪通過人工沙漣反射率係數 ( $n=4$ )

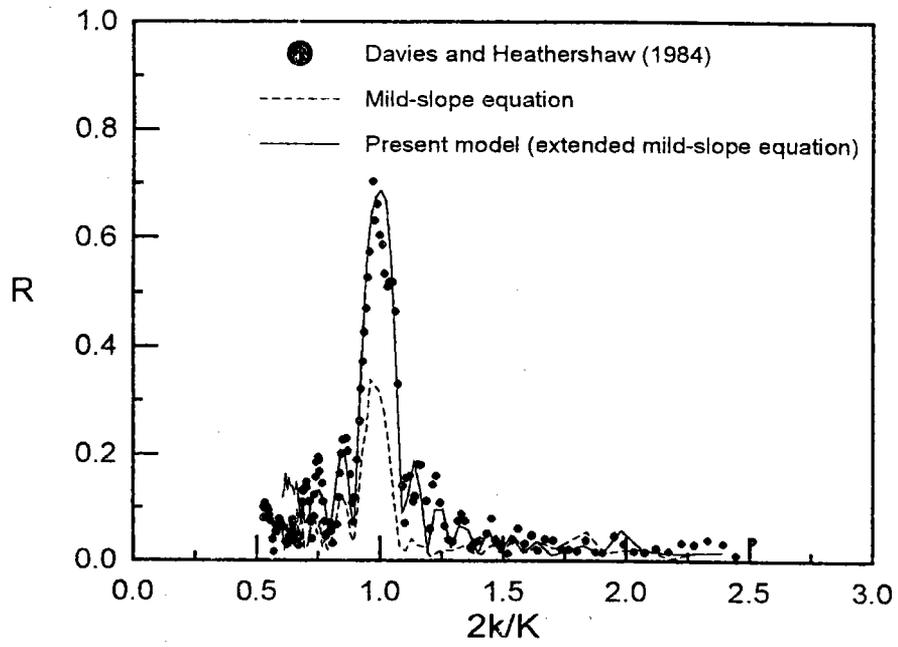


圖 20 波浪通過人工沙漣反射率係數 ( $n=10$ )

# 港灣水理與操航安全

簡仲璟\*

## 一、前言

人類所從事之海上活動無論是就貨物與旅客交通運輸或漁產撈捕或軍事戰略或休閒遊憩等觀點而言，皆需有適當的港灣與港埠設施以提供船舶泊靠、裝卸、補給維修等。早期受限於港灣工程技術的瓶頸大都是利用具有天然地形屏障水域，寬闊穩靜且足夠水深的地點來興建港口，然而具有優良天然條件的地點不多。隨著全球經濟活動的蓬勃發展，船舶大型化之國際趨勢，原有港口已不敷使用。因此除了擴建原有港口規模外也必須在天然條件較不利的地點闢建港口，在這種需求環境下，港灣工程技術的水準也隨之提昇。

由港灣工程的技術層面來看，約 50 年前闢建或擴建港口時主要目標是以獲得更寬闊更穩靜的水域來提供船舶碇靠，其主要施工方式是興建外廓防波堤產生波浪遮蔽效果，而此海上人工結構物對於港口鄰近海岸的影響未受到注意。事實上此人工結構物已破壞了原有海岸的自然平衡狀態，而產生海岸地形的不自然變遷。約 30 年前港灣工程師在進行港口闢建前的規劃工作時，已將此問題納入考量，並研擬防患對策，不過對於進出港船舶在港內航道、迴船池、港口處的操航安全問題是由規劃基準所研定之數倍船長或船寬來考量港口航道寬度或迴船池直徑大小。事實上不同港口海氣象環境條件不同，因此船舶進出港所遭受的外力也就不一樣，故港口、航道寬度或迴船池大小需求也就不同。約 10 餘年前港灣工程師配合電腦科技的快速發展，已利用操船模擬機進行船舶進出港的操航模擬，以了解規劃之港口佈置是否滿足操航安全需求。

由於港口的闢建或擴建將造成附近水域的波浪場與流場明顯的改變，而這種水理特性的改變，除了要符合港池靜穩以便船舶泊靠的基本需求外，

---

\* 港灣技術研究所研究員兼數學模式組組長

也必須同時滿足操航安全的要求。小型船舶由於操控性較佳對於操航安全的問題相較於大型船舶較不顯著，但近年來隨著商船船舶大型化的國際趨勢，船舶操航安全問題已不容忽視。本文將就港灣水理特性對船舶操航安全的影響及因應對策作概念性闡述，並以台中港港口擴建規劃的實例進行個案說明。

## 二、港灣水理

一般所謂港灣係由天然地形或人工築堤而圍成之穩靜水域並具足夠水深，船舶在此安全碇泊不受外海波浪影響。而船舶在此區域的操航安全主要受下列港灣水理因素的影響：

### 2-1 波浪

由歷年來本所持續觀測、蒐集的波浪資料整理，台灣四周六個分區測站波浪統計結果如表 2-1。根據表 2-1 分區波浪統計結果，可歸納如下特性。

- (一)影響台四周海域波浪主要為冬季東北季風與夏季西南季風及颱風，由表 2-1 分區波浪統計值顯示東北部及東部測站受冬季東北季風影響最大，位於台灣海峽之東吉島及台中港受東北季風影響次之。位於西南的高雄港(大鵬灣)測站受夏季盛行之西南季風影響最大，平均示性波高達 1.63m 較冬季 0.93m 高出甚多，東部花蓮港冬季受東北季風影響，夏季則受太平洋颱風威脅平均示性波高均超過 1.7m。
- (二)位於台灣西部之台中港、東吉島及高雄港三測站示性波高小於 1m 所佔概率均大於 50%；示性波高大於 2m 發生概率東吉島 22.4%，台中港 15.6%，高雄港只有 8.9%，而以東部花蓮港 30.8%最高，東北部鼻頭角 26.8%次之；顯示台灣東部及東北部直接暴露於太平洋風浪威脅，西部則受本島遮蔽波高較小。但同樣位於東部海岸的成功測站波高較花蓮港偏低甚多，波高 2m 以上發生概率只有 10.7%，是否因測站位置較遮蔽或冬季東北季風威脅減弱影響，有待進一步分析。
- (三)波浪週期統計結果顯示呈正常分佈，位於台灣海峽的台中港與東吉島最常現週期為 5 至 7sec，發生概率約為 62%。西南部高雄測站最常現週期為 4 至 6sec，約佔 62%，顯示西南季風吹風距離較小，延時亦較短；

此點亦可由示性波高大於 1.5m 發生概率只有 16.5%，其中持續 24 小時以上所佔概率僅為 10%，獲得佐證。鼻頭角、花蓮港及成功三測站最常現週期約為 6 至 8sec，出現概率約為 65%，顯示台灣東部受太平洋波浪威脅。

(四)根據統計各測站波浪較惡月份顯示，鼻頭角、台中港、東吉島及成功四測站受冬季強烈東北季風影響時海況惡劣，但每年春天以後，冬季高壓勢力減弱，影響範圍亦由南部逐漸退縮至北部；成功站二月以後，東吉島與台中港站三月以後，東北部鼻頭角站則延至四月後，才脫離冬季東北季風影響。西南部高雄港測站受地形影響，每年夏季六至九月海上波浪較大，冬季海面平靜。東部花蓮港站夏季受太平洋颱風波浪威脅，相形之下冬季東北季風影響較小。

由以上結果綜合而言，台灣四周波浪條件不佳，因此港口需佈置防波堤以減輕波浪對船舶的影響。一般所謂防波堤是指以人工方式構築於海中長堤，以庇護一片水域，防止波浪侵入，日文稱“波止場”頗為貼切。對港口而言乃其外廓，型式雖然眾多，但目的相同。對欲獲得穩靜水面區域而言，防波堤是否能發揮擋浪的遮蔽效果，則視防波堤的長度與堤線方向能否遮擋主要入射波向的波浪而定。一般而言經過縝密規劃皆能達到預定的計畫目標。不過要注意是防波堤雖然可以阻擋主要波向之波浪入侵，而在其堤背後產生遮蔽區，但對反方向的入射波浪則因該堤體的反射作用而造成水域不穩靜，因此在防波堤的配置及型式的選擇應審慎評估。以台中港為例該水域冬季東北季期風主要入射波向為北向，因此向西向興建之北防波確實發揮功效，使港口附近及錨泊區的水域獲得靜穩，但對夏季西南季風波浪或南向而來之颱風波浪而言，北防波堤將產生波浪反射的情況而影響港口及錨泊區水域靜穩，甚至產生導浪現象使波浪入侵港內，影響船隻泊靠。因此目前台中港北防波堤南側堤體採具消波效果的設計，以減輕反射及導浪現象。此外以花蓮港為例，在港口第四期擴建時將原東防波堤向南延伸，而圍築成一水域名積較大的外港，以供大型船舶泊靠，因此港池形狀與原有不同。每年夏季當颱風出現花蓮港東南方至南方之間海域時，港池發生類似共振現象使得水域靜穩度不佳，船舶碇靠困難，甚至發生斷纜而必需出港避難（蘇澳港也有相同情形）。根據本所在花蓮港多年的波浪觀測資料分析顯示，颱風期間港

內經常存在著長週期之波浪成份，而此正是船隻斷纜的主要原因。至於港內為何會出現長週期波則初步認為與花蓮港港池形狀及港口外南濱海岸之波浪場特性有關。不幸的是傳統的港內消波設施無法減低長週期波浪能量，其可能的因應對策為改變港池形狀及港口附近水域波浪場特性。但這些改變也有可能造成目前未發生之負面影響，需審慎研究評估。綜合而言，港口的闢建或擴建只屬一種幾乎不可逆轉的環境改造工程，因此若僅著重於利用外廓防波堤獲得波浪遮蔽效果，而忽略其他因防波堤興建而可能產生之港口水理變化是不當也不智的作法。因為一但發生問題，所研擬之改善對策方案，很可能再一次改變港口水理特性而產生新的問題，如此循環情況演變可能愈來愈壞，不可不慎。

表 2-1 台灣四周分區波浪特性

測站及代表區域 波浪特性		台中港 (西北部)	高雄港 (西南部)	成 功 (東南部)	花蓮港 (東部)	鼻頭角 (東北部)	東吉島(台灣 海峽中部)
最大波	最大波高(m)	10.8	11.2	14.0	20.6	14.2	11.4
	發生日期	**	1992/09/05	**	1091/07/19	1985/08/23	1987/12/21
示 性 波	最大波高(m)	6.3	7.0	8.1	12.2	9.7	7.0
	發生日期	1989/09/12	1992/09/05	1980/09/18	1990/06/23	1985/08/23	1987/07/29
	全年平均波高(m)	1.15	1.17	1.09	1.80	1.27	1.21
	全年平均週期(sec)	5.7	5.6	6.9	7.3	6.1	5.8
	夏季平均波高(m)	1.07	1.63	1.03	1.79	1.0	1.08
	夏季平均週期(sec)	5.7	6.2	6.8	7.4	5.8	6.0
	冬季平均波高(m)	1.24	0.93	1.15	1.73	1.6	1.3
	冬季平均週期(sec)	5.7	5.3	6.9	7.3	6.5	5.5
示 性 波	最常出現波高(m)	0.25-1.25	0.5-1.5	0.5-1.5	1.0-2.0	0.25-1.25	0.25-1.25
	概 率(%)	55.7	80.0	66.1	51.5	48.9	55.7
	1m 以下波高概率(%)	52.2	51.8	43.6	17.7	40.4	50.9
	2m 以下波高概率(%)	15.6	8.9	10.7	30.8	26.8	22.4
	最常出現週期(sec)	5-7	4-6	6.25-8.25	6-8	6-8	5-7
	概 率(%)	61.9	62.4	64.7	63.2	68.9	61.9
示性波 高大於 1.5公尺	概 率(%)	30.2	16.5	27.2	56.5	40.7	25.7
	持續大於24hrs(%)	26	10	17	45	24	20
	持續大於96hrs(%)	13	5	4	25	10	8
波浪較惡劣月份		1,2,10, 11,12	6,7,8,9	11,12,1	8,9,10	1, 2, 3, 11, 12	1,2,10,11, 12
全部資料筆數		18,000	6,400	24,000	24,000	24,000	17,000

## 2-2 海流

影響台灣近岸海域海流的主要因素包括有黑潮、風趨流、潮流、近岸流、海岸地形及海上結構物等，但隨著區域地點與季節時間不同各因素的影響程度並不一致。

- (一)北赤道之洋流在呂宋島東部轉北向，在台灣東南海面其流速約 1-2 浬/時，其主流通過台灣東海岸流向日本，流速較小（0.2~0.5 浬/時）的支流則經台灣海峽流向東海，因顏色比一般海水深藍故稱之為黑潮。由於黑潮屬大尺度的洋流型態，其流速流向較穩定，對台灣近岸海域流場可近似視為恆流。
- (二)風驅流造成之原因係當風吹掠海面，由於摩擦作用產生順風向的剪應力，上層海面的水分子在風剪力的推動下，沿著受力方向運動，並經由摩擦及紊流混合將動量往下層傳遞，而使海面下的水分子也跟著運動。通常在大洋中風驅流之流向因受科氏力之影響與風向約成 45° 夾角，平均流速約為風速之 3%，如台中港海域冬季風驅流流速約 30~50cm/sec。
- (三)潮流係因天體引力引起海面升降產生之海水流動。漲潮時一般潮流由台灣海峽南北端流向台中港附近，所以台中港附近潮差最大；退潮時潮流則循相反方向流向台灣海峽南北兩端。潮流流速隨著潮位高低而變化，最大流速約 2 節，由台灣海岸海域的海流觀測分析結果可發現潮流是最主要成份，而又以半日潮流較明顯。
- (四)近岸流之成因主要由波浪所引起，由於波浪之質量輸送以及海灘附近發生之碎波，水面垂直起伏之波浪變為水體之水平移動性運動，若波浪與海岸線呈一斜角入射，則大量海水受波浪碎波產生之輻射應力推送而沿海岸方向流動。在碎波帶內與海岸方向平行流動之水流稱沿岸流 (Longshore current)。沿岸流動之水流由於海岸地形不規則，或海水面高低不一致，於海岸突出部份或海溝處常發生向外海方向流動之水流稱離岸流 (Rip current)。由於沿岸流及離岸流均受波浪影響而發生，再加上海岸地形及人工構造物之影響使得近岸水域之流況極為複雜。依美國工兵團海岸保護手冊之沿岸流流速計算公式，在假設碎波波高 2.5m，

週期 7 秒，入射角  $30^\circ$ ，海底坡度 1/200 的條件下，沿岸流速約 44cm/sec。

(五)如前所述海流成份眾多，發生之物理機制也不相同，因此欲完整確切的描述海流流場特性實屬不易。如果再考量人工結構物如防波堤等之影響，則變得更加複雜。以台中港為例，冬季峰面過境時東北季風強勁此海域南向風驅流的作用相當明顯，再加上北側淤沙區之沿岸流因風強浪大，流速明顯增強，當其向南流動時，因受北防波堤阻擋後沿堤向外海流動，形成一股極強勁之強制裂流，北防波堤堤頭流速於未延長 850 公尺前可達 4 節以上，對船舶航行造成威脅。此強勁海流越過堤頭並於堤後產生一逆時針之環流流場，影響船舶進港前的船位與船向操控，同時也影響防波堤堤基的沖刷保護及鄰近海岸地形的變化。北防波堤長 850 公尺後，因堤頭水深變深，強制裂流流速降低流向也偏向西南西，對操航安全有利。夏季期間因風速較小，浪高較低，此海域海流成份主要為潮流及恒流，流速較冬季峰面過境時為小。綜合而言近岸海域的流場除了受各海流成份不同組合形式所支配外，同時也明顯受到人工結構物的影響而改變其流場型態。因此港口闢建或擴建時除了考量外廓防波堤是否能得到預定的波浪遮蔽效果外，也應同時考慮流速、流向之流場型態變化。因為它關係到船舶操航安全或海上人工結構物基礎穩定外，也牽涉到港池水質受污染擴散及海岸地形的變遷及港灣環境維護等問題。

### 2-3 潮汐

潮汐主要是由於地球自轉與月球和太陽等天體對地球表面各處水體引力，因地理位置之差異所引起之不同海水面水位週期性升降現象。此週期性升降現象一般可用潮型(如全日潮型、半日潮型、混合潮型)、潮時(如高潮、低潮、大潮、小潮時間)及潮位(潮汐振幅、潮差)等潮汐特性表示。而影響潮汐變化之原因除天體間之萬有引力外，局部區域之大氣壓力變化(如颱風低壓所造成之暴潮)及海洋地形與海域水深亦皆為造成潮汐特性改變之主因。

檢視台灣環島潮汐測站實測所得之潮汐資料經分析後顯示，在潮型特性方面，於台灣西南部沿海(高雄、安平海域)及東北角沿海(基隆、鹽寮、蘇澳海域)其潮型屬全日潮型態，而其他沿海地區則為全日潮型與半日潮型之混合型態，其中，台灣中部海域(芳苑、台中、苗栗)其半日潮較全日潮顯著。在潮差特性方面位於台灣西岸中部之台中港其平均潮差約為位於北部基隆港之 5 倍，約為位於南部高雄港之 6 倍。其最大潮差可達 5.8 公尺。可見台灣環島海域不僅潮型不一致，其潮差也大不相同。

一般而言由於港口的關建規模，相較於潮波之運動尺度為小，因此對於潮汐特性的影響不大，不過當港池水域面積因關建或擴建而大幅增加，此時若水體流動之出入口(港口)寬度無法使潮水順利進出，則很可能造成潮汐特性的改變。例如台中港港內水域面積達 5 百餘公頃，港口寬度(內堤口)僅 300 公尺，再加上潮差較大，因此港內、外的潮汐特性也就明顯不同(如潮時的延遲)，此外也會造成由潮汐所引致之潮流特性改變，影響船隻航行與泊靠。

### 三、操航安全

何謂操航？廣義的解釋是指船舶駛近港口前到船舶繫纜靠泊碼頭後或船舶解纜離開碼頭到駛離港口後這一段航程中，船舶的操縱動作過程。狹義的說明是指船舶在外力作用下以適當的操控方式調整船速及船向使其航行於計畫航線上稱之操航。影響船舶進出港操航安全之因素很多如港口航道設施、港口水理特性、海氣象條件、導助航設施、船舶操控特性、領港登輪作業、拖船配合作業及漁船干擾等。以往進行港口規劃時，對於船舶的進出港操航安全，是依規劃基準所研定的數倍船長或船寬來考量港口、航道寬度或迴船池直徑大小。事實上不同港口由於海氣象條件不同，故船進出港所遭受的外力也就不一樣，所以依規劃基準所研擬之港口佈置方案在操航安全上就顯得過於保守。港口關建的最主要目的是提供船隻一個穩靜的水域以便靠泊裝卸人員與貨物，欲達此目的除了天然的屏障外，就是以人工的方式構築防波堤，然而防波堤的配置很可能如前章所述改變了港

口水域的水理特性而產生新的危險操航環境。因此本章就影響船舶操航安全之港口水理及氣象條件進行說明。由於一般小型船舶的操控性較佳，以一般大型船舶進出的港口條件而言，其操航安全較無問題，因此本文將針對較大型船舶(商船)的操航安全討論。

### 3-1 波浪

雖然大型船舶的耐波性較佳，但在領港登輪作業中，由於海面波浪起伏將造成領港船與進港船舶間產生相對運動，進港時當領港由領港艇跳攀上進港船舶之爬梯後，若領港艇不能迅速脫離，則下一波波浪可能發生領港艇夾傷領港事件。一但不幸領港受或落海，進港船舶除非船長熟悉港口環境，否則不敢將船舶繼續駛進港口，而必須駛離港口或停船待命。問題是此時船舶的位置若過於接近港口，則船長在沒有領港的指示下能否順利的駛進港口或停船是冒相當大的危險。

依國外領港登輪作業經驗，在波高 1.0m 以下領港登輪應無問題。當波高大於 1.5m 時領港登輪將十分困難(視領港個人膽識、經驗技巧稍有不同)。關於波浪造成領港登輪困難的因應對策，一般是利用船長操航技術，配合調整船艏向利用船體遮蔽波浪，通常外海 3~4m 浪高時，船體遮蔽區浪高可降至 1m 左右。當然，改善領港艇的性能與登輪設備或在適當條件下配合利用拖船或直昇機載送領港也是方法之一。此外，擴建外廓防波堤使登輪區的遮蔽效果提升，以減輕波浪對領港登輪的影響，但防波堤的工程建造費用高昂。所以除特殊情況外一般不會僅對登輪問題以興建防波堤的方式進行改善。

由以上說明可知波浪對船舶操航安全主要是影響領港的登輪，因為領港無法順利登輪時進港船舶之船長在沒有領港的協助下其進港操航會有極大的安全顧慮。雖然港口外廓防波堤興建的主要目的是為了港池水域的靜穩，但其對於港口附近登輪區水域的遮蔽效果，由於關係到領港登輪作業的順利與否，同時也影響到船舶的操航安全，因此也必須加以考量。

### 3-2 風力

在船舶實際操航上，風的作用為影響船舶操航的重要外力因素之一。風力在港外除會引起風趨流及波浪而不利領港登輪與船舶航行穩定外，當船舶進出港口或航行於航道上時，若遇強烈橫風，船舷受強大風力作用後將會影響航行穩定之保持甚至可能因此而偏離航道，致使船舶有擱淺或碰撞防波堤、碼頭等港灣構造物之顧忌。

風對船舶運動之影響，根據海洋大學張石煜教授(1992)之研究結果：若一船體之正面投影面積為  $A_x$ ；側面投影面積為  $A_L$ ，則船體受風產生之風壓合力  $R_a$  可用下式表示：

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_a C_a V_a^2 (A_x \cos^2 \theta + A_L \sin^2 \theta)$$

式中： $\rho_a$  為空氣密度， $V_a$  為風速， $C_a$  為風壓合力係數， $\theta$  為相對風向角。

$C_a$  隨船體、構造、船型、形狀與配置而不同，一般需以風洞實驗定之。行進中之船舶受風後之風壓合力中心與船舶旋轉中心(pivot point)間有距離存在，故船體受風壓時將產生繞旋轉中心迴轉之力矩  $N_a$ ，所圖 3-1 所示。

由於  $R_a$  及  $N_a$  之作用，因此船舶在頂風下操航，船速將減慢，順風時船速增快，偏風時船位不僅向下風偏移，同時也將產生迴轉，尤其水面上船體構造物較高大而受風面之大船舶，其受風之影響將更嚴重。當船舶行進中，迴轉軸一般將前移至重心之前距船首約 1/3 船長處，因風壓力中心與水面下流體阻力與迴轉軸之力臂不同，兩者產生之迴轉力矩將不相等，故而使行進中之船舶產生迴轉，因此需以舵力修正來維持航向如圖 3-2 及圖 3-3。然而船舶的舵效與船速有關，船速愈低舵效愈不明顯，實際操航中船舶在進出港或靠泊碼頭時船速不可太高，此外愈高的船速相對的風壓力也愈大，因此如何選擇一適當的船速來獲得舵效以對抗風壓所造成的船舶迴轉是一項需要經驗累積的工作。假設  $A_a$  表示船舶水線以上之受風面積( $m^2$ )； $V_a$  為相對風速( $m/s$ )，則風壓合力  $R_a$  以公斤力(kgf)表示，經驗上可用下式估算：

$$R_a = 0.0735 A_a V_a^2$$

以船長 198m(LOA)之滿載汽車船為例，其橫向受風面積為 4410m<sup>2</sup>，假設相對風速 20m/s 則風壓合力約 130 噸已接近該船之前進軸推力 180 噸 (13.5MW)。可見風力對船有很大的影響尤其是受風面積較大之汽車船及貨櫃輪。目前，因許多船舶之高大構造物皆建置在船尾，故船舶受風後，船首迎向上風之傾向十分明顯。對於風力強勁的港口而言(例如台中港)，在港口佈置及進出港航線的擬定必須審慎考量該港區的強風風速大小與對應風向，甚至對於碼頭的方向配置也須注意否則也會造成靠泊繫纜的困難，除非有足夠馬力的拖船協助之。

在港口或航道附近區域設置減風設施國內尙未有案可循，國外則有荷蘭鹿特丹港加蘭橋(Calandburg)旁之半圓形減風牆是較成功案例，如照片 3-1。本所也曾對台中港設置減風設施的可行性進行研究，結果顯示減風設施在工程技術上並無困難，但投資工程費甚高，且結構基礎大都在水中構築，再加上維護保養及颱風、地震等考量施工風險極大，同時益本比極低，因此現階段投資興建的可行性不高。

### 3-3 海流

近年來由於船舶大型化發展之結果，船舶之長、寬與吃水深度亦不斷增加，致使海流對船舶操航之影響亦日趨重要。海流對船舶之作用合力  $R_v$  以公斤力(kgf)表示時，可以下式估算

$$R_v = 73.2 A_s (V_s + V_w)^2$$

式中： $A_s$ 表船舶平均吃水深度與船長之乘積(m<sup>2</sup>)， $V_s$ 為船舶受海流作用後之移動速度(m/s)， $V_w$ 為海流流速(m/s)。

相較於海流，風對船舶操航的影響，操航者較易掌握。因為在操航過程中風速大小與主要風向大致侷限在某一範圍內，操航者可以大略預估並根據船舶在航線上不同位置時之船艏向來決定船體受風壓力作用下之操航

因應對策。如前章所述對海流而言，流速大小與流向受港灣結構物的影響而有局部性的劇烈變化，而此種變化又會隨著時間而有所不同，例如週期性的潮流或季節性的風驅流等。因此操航者對計畫航線上不同船位所處的海流狀態較不易估算，必須隨時注意時空的變換，機警的加以因應。海流流速或流向的變化對船舶操航的影響舉例說明如下：

#### (一) 航道中順流與逆流航行

由於航道轉彎使得流速分佈不均勻，因此船體受力也不均勻而造成船隻迴轉或偏移的不易操控情形。如圖 3-4 顯示順流航行由於船艏受力較大，而迴轉中心(P 點)又位在 1/3 船艏處，因此產生較大的逆時方向迴轉力矩，此時若船舶舵效不足以克服此一逆時迴轉，則船艏很可能撞及下側之港灣構造物。類似的情況如圖 3-5 顯示逆流航行雖然船艏受力較大，但因迴轉中心較接近船艏，因此產生的逆時方向迴轉力矩較小，假設船舶的舵效若僅可勉強抵消此一逆時迴轉時，船舶雖不致於發生嚴重迴轉情形，但在水流推力與船舶行進推力聯合作用下，船位可能發生偏離而撞及上側之港灣構造物。

#### (二) 流速或流向突然改變

當船舶接近港灣結構物航行時，由於結構物的阻擋，水流流速或流向可能產生局部的劇烈改變。如圖 3-6 所示，由於流向的改變使得船艏受力較大，產生順時方向的迴轉力矩，此時若船舶舵效無法抵消此一順時迴轉，則可能撞及上側之結構物。此外當船舶航行中過於接近結構物時，會造成船體與結構物之間的流速增加，依伯努利公式(Bernoullieq)將產生低壓區，使得船體往結構物偏靠，發生類似吸引的現象如圖 3-7。海流對船舶的作用力與水深吃水比(水深/船舶吃水)有關，相同的船舶，在相同的流速流向情況下當水深吃水比較小時，海流作用力較大，其大小可能比風壓作用力來得大。以 28 萬噸(DWT)的油輪為例，當海流流速 1 節，水深吃水比為 1.05 時，橫向海流作用力可高達 328 噸，欲抵抗比受力至少須 5,000 馬力的拖船 7 艘方足夠，可見海流作用力實不可忽視。

### 3-4 潮汐

雖然潮汐的變化對操航沒有產生直接的影響，但潮汐所產生之潮流如前節所述仍須加以注意。此外由於水深吃水比值在潮差大的港口變化也較大，而水深吃水比值關係到海流作用力的大小，以 5 萬噸(DWT)貨輪為例，當海流流速 5 節在水深吃水比等於 3 的情況下沿船向水流作用力為 19 噸，但在水深吃水比等於 1.1 時，則大幅提高至 64 噸，如圖 3-8。

由以上說明可知船舶在進出港的操航過程中除了風力外也深受港灣水理特性的影響，而船舶為了抵抗這些外力必須有足夠的操縱性，然而一般大型商船基於經濟成本的因素在設計上並不考量要有靈活的操縱能力，因此大型船舶在進出港過程中常需要有馬力大操控靈活的拖船加以協助。如照片 3-2。雖然如此為了提昇操航安全，在港口關建或擴建規劃時對於如何提供一個安全操航環境是必需納入考量評估。

## 四、規劃策略與方法

港口規劃是一項廣泛全面性的工作，必須考量的層面眾多。本文無法詳盡闡述，而僅能就操航安全的觀點來進行說明。良好的港口水理環境是操航安全的最大保障，因此港口規劃在考量其他目的需求下所研擬的方案，是否能達成操航安全需求必須加以評估與驗證。因此在港口規劃策略上必須利用現場調查、模擬試驗與數值計算結果，作綜合的研判，以評估何種規劃佈置有較佳的港口水理環境，同時也瞭解影響操航安全的臨界環境條件。欲瞭解港口水理環境的特性目前大致有三種方法分別如下：

### 4-1 現場實測調查

海氣象現場觀測的技術在觀測儀器不斷的研發與改進下已有長足的進步，所獲得的資料也愈來愈能忠實反映真實的情況。不過現場調查有兩個重要問題要加以注意(1)海上觀測需要很多的人力、物力與金錢所以無法作

空間及時間上密集的調查。因此，測站的選擇及觀測時間的研定適當與否，將影響到其代表性的問題；(2)由於規劃期間，港口佈置方案仍在評估，此港也尚未闢建或擴建，因此調查所得資料無法顯示或代表闢建後之港口水理特性，前者問題經由縝密審慎的調查作業程序仍有改善的可能，但後者問題則受時空的限制無法克服。即使如此現場調查仍有其重要性，因為數值模擬計算時邊界條件的設定是需有實測調查數據作參考，同時也可作為數值計算模式及水工模型試驗的調校與驗證之用。

#### 4-2 港灣水工模型試驗

將規劃所研擬港口之各佈置方案，依比例製作縮小模型，放入試驗水池中，並模擬各種環境如波浪、海流與潮汐等，藉此明瞭各佈置方案之水動力運動特性或港灣結構物穩定，或海岸地形變化等等，稱之港灣水工模型試驗。

港灣水工模型試驗可分為平面佈置試驗、漂沙試驗及斷面穩定試驗等，分別概述如后：

##### (一)平面佈置試驗

方法：(1)利用定床模型按模型率(以不小於 1/100 為原則)舖設地形，並製作各種結構物模型。

(2)依據外海實測波浪利用造波機在試驗水池內按模型率製造試驗入射波浪。

(3)量測港口、航道、碼頭前及重要水域波高，計算測點波高與入射波高比值。

(4)模擬碇靠船隻及其繫纜系統，試驗波浪作用下，量測碇泊船隻運動量及纜繩拉力與護舷壓力。

目的：(1)評估各種不同外廓堤防佈置對港池遮蔽效果。

(2)根據外海波浪統計結果及試驗所測得繫纜船隻運動量，纜繩與護舷受力及港池靜穩程度，評估不能作業時間(Down-Time)

**Evaluation)**包括不能進、出港口、不能碇靠及不能裝卸作業時間，甚至疏散時間(或稱逃港時間)。

- (3)根據不能作業時間評估每年可能等待時間，進而決定防波堤佈置。

## (二)漂沙試驗

方法：(1)根據模型律製作動床模型，漂沙試驗常因涵蓋廣闊，為便於垂直向波高，及水深量測，模型常採用不等縮尺模型(**Distorted model**)。

- (2)漂沙試驗因模型上沙粒無法比例縮小，在主試驗前常辦理預備試驗，在模型上製造各種試驗條件(波浪、沙源等)，使原型地形變化特性在模型上重現，以求得試驗縮尺。

- (3)主試驗結果利用預備試驗模型縮尺，估算漂沙量。

- (4)漂沙試驗到目前為止仍屬於定性而非定量試驗。

目的：(1)了解海岸沖淤特性，作為構造物佈置與結構設計之依據。

- (2)評估興建港灣工程對上、下游地形影響。

- (3)評估航道維護挖泥量。

## (三)斷面試驗

方法：(1)構造物斷面根據模型縮尺(以不小於 1/36 為原則)在試驗水池內製作模型。

- (2)利用造波機製造外海入射波浪，依試驗目的觀測堤防穩定、量取波浪溯上、越波量、波壓力，計算反射係數等。

目的：根據堤防穩定性、溯上、越波量等試驗結果選擇最佳斷面。

## 4-3 數值模擬計算

由於海岸港灣水動力之理論學理研究愈來愈成熟，再加上電腦軟、硬

體科技日新月異的蓬勃發展，目前資料處理速度快、儲存容量大及價格便宜的新機種不斷於市場上推出，因此以數值模擬計算方式進行海岸港灣水動力現象之研究變得愈來愈普遍，計算結果的精確度與可靠性也明顯提昇。相較於水工模型試驗需要大量人力、場地及經費於模型製作及較長的試驗時間而言，數值模擬計算就顯得較經濟。本文將著重於數值模擬計算的應用說明，關於模式的理論基礎，操演過程、模式驗證、結果評估等請參考其他研究報告。

#### 4-3-1 波浪

波浪作用是海岸工程中最重要之自然外力作用，一般波浪分析依規劃設計之需要分為外海波浪分析和近岸波浪分析。外海波浪分析依工程目的，可分為極端條件下之設計波浪推算，或是海域結構物動態模擬或模擬時所需之常時波浪條件。近岸波浪之模擬則是模擬近岸水域之波浪傳遞及其動力作用，近岸波浪模擬的目的在推算波浪由外海進入近岸區域時之波浪變化以推算近岸區域之設計波浪，此外是推算近岸區之波浪分佈及沿岸流分佈，進而推算近岸泥砂之運動。

當波浪進入港灣時，除了因地形水深變化產生的波浪折射現象，由於港灣結構物的影響同時產生波浪繞射與反射的現象。一般以 Mild Slope 方程式求解，另外 DHI（丹麥水力研究所）之 MIKE-21 之 B.W 模組利用 Boussinesq 方程式或 EMS 模組利用橢圓方式，亦可求解波浪之折、繞射等問題。圖~是利用 EMS 模組計算台中港區波浪之折、繞射之結果，由圖中可瞭遮蔽區及港內波高分佈情形，藉此可評估港口佈置方案的優劣。圖 4-1 則是利用 BW 模組計算的示範例。

#### 4-3-2 海流

海岸港灣之水流分析包括潮汐、洋流、風及波浪之作用等，其計算分析包括水位變化及流場變化。計算模式一般可分為 1 維、2 維或 3 維，理論分析是使用雷諾方程式及紊流模式或傳統之淺水波方程式。在工程應用上，若在寬廣之海岸或港口地區常用之模式為 2 維深度平均之淺水波方程

式，而在感潮河口等狹窄地帶則多使用一維之淺水波方程式。圖 4-2 為利用 Mike-21 之 HD 模組計算台中港港區流場之結果。根據流場的分佈可作為舶進出港時操航安全評估的參考。事實上在操船模擬試驗中流場是不可或缺的重要背景資料。

#### 4-3-3 海岸地形變遷

海岸地形變遷為一錯綜複雜之演變過程，受當地海、氣象條件、地質條件及人為改變之影響而變化。一般與海岸港灣工程開發及海岸保育有關之海岸地形變遷包括灘線之縱坡變化、岸線之變化、河口之改變、潮溝之變化、砂洲之變遷、整體海岸侵淤等等。海岸地形變遷的過程受三維海岸動力條件之變化而具有隨機變化之特徵，但由於所關注的時間及空間尺度不同，有時可以 1 維或 2 維的模式來描述海岸地形特徵變化以簡化問題，一般可分為岸線模型、灘線模型、海岸平面模型、特徵模型及完整的三維模型。其中岸線變遷模式是海岸地形變遷中最常用的分析工具，岸線變遷模式基本上假設海岸地形之變化是沿海岸方向上整體移動，利用連續方程式在通過各控制斷面間輸砂量之不平衡則反應在岸線之變化上。使用本模式之目的在評估與預測長期海岸地形之變化，因此在應用時必須有長時間之岸線變化資料供校正與驗證之用，方能使評估與預測得到較準確的結果。圖 4-4 為利用 DHI 之岸線模式 LIPACK 模擬淡水港附近海岸地形變化之結果。根據此結果可研擬改善對策，並作進一步評估驗證。

#### 4-3-4 水質模擬

台灣沿海海岸水質問題受沿岸河川之污染、工業區之開發、電廠溫排水排放而日益嚴重，對沿岸之自然環境資源影響頗大。海域水質之模擬通常使用 2 維模擬，其控制方程式為海岸水理及質量傳輸方程式，在質量傳輸方程式上考慮污染物質(或溫度場)隨水流移動之平移、擴散及延散、化學反應、生物衰減、蒸發、輻射衰減或其他可能之反應。在海域水質模擬中，平移、擴散及延散作用屬物理反應性質，目前之模式已有很好的表現，但對化學反應及生物作用則大多仍在研究階段。圖 4-5 為台中港北防波堤

附近海渡電廠之溫排水迴流現象，計算結果將用以評估電廠之進出水口佈置。

#### 4-3-5 操船模擬試驗

在港灣水理的特性有所掌握後，對於進出港船舶的操航安全才可能進行評估，目前操船模擬可分為二階段，第一階段為快速(Fast-time)操船模擬試驗，第二階段則為真時(Real-time)操船模擬試驗。就理論而言，船舶運轉受到三項因素之影響(1)操船者操航技巧(2)船舶性能(3)航行環境，操航的安全評估即在探討三者之間的相容性關係。故在模擬過程中必須先建立模擬操船所用之本船性能模式，以及航行環境模式；而操船者則由當地引水人及其他有航海經驗之專家數人擔任。操航者就某種海域之某種環境條件操縱本船航行，以便由統計分析得知操船的困難度，並進而評估其安全性。

##### (一)快速操船模擬試驗

多以個人電腦之操船模擬程式進行之，並以顯示器作為畫面，操船者的臨場感較差，無法觀測出各種人為因素，但是費用便宜，工作時程短，多用於研究規劃之先期作業上，對於多種不定的環境條件可在較短時間內概略的分析出問題的輪廓。例如港口佈置各替選方案經由第一階段的快速操船模擬試驗結果進行操航安全之初步評估，據此修正或研選較佳之佈置方案，以進入第二階段之真時操船模擬試驗。

##### (二)真時操船模擬試驗

模擬機多用於細部之模擬操船試驗與分析，且在試驗之前須進詳細的調查與評估。此種模擬機是將各種環境條件所設定的模組加以組合，例如將船舶操控性能模組、水流流場模組、風力模組、地理環境模組及拖船協助作業模組等結合成一體，因此能提供一個真實操船的環境，不論視覺景觀、操船者心理反應、船舶動態感覺等均與操縱真船相同，可用以觀察操船者的個人操航風格技巧及行為缺失，並檢視各種操航困難的原因，而不需擔心碰撞與污染之後果。但是模擬機造價昂貴、模組製作技術較困難、試驗費時，故大都用於特定的環境條件。操船

模擬機的可靠性、有效性及真實度已被公認與真實航行沒有顯著差異，操航者在模擬機上的表現與在真船上的反應相當一致，因此模擬機也可當作操船之學習訓練之用。

## 五、台中港實例說明

台中港原建港綱要開發計畫中，計畫最大進港船型為 5 萬載重噸船舶，港口即依此目標設計。隨著世界海運環境的變遷，船舶大型化已是國際趨勢，各大航商新造船隻超過巴拿馬極限型的比例不斷增加。因此有意至台中港投資之航商及業者，為因應未來航運需求，均盼望台中港務局能及早進行第二港口關建計畫或進一步改善第一港口(一港口在一期擴建計畫中已延長北防波堤 850 公尺)以安全進泊第三或第四代大型貨櫃船、超巴拿馬極限型散貨輪及受風面較大之汽車運輸船。因此委託本所進行「台中港港口二期擴建工程規劃」計畫。

### (一)計畫目標

- 1.提高一港口計畫進港船型
- 2.提高進港操船安全性，吸引航商及業者投資意願
- 3.降低業海運成本，建立良好投資與營運環境
- 4.因應二港口關建前營運需要，維持港埠正常發展

### (二)擴建替選方案研擬

#### 1.考量因素

- (1)目前一港口為既有設施
- (2)計畫進港船型(12.5 萬 DWT 散貨輪，4,000TEU 貨櫃輪，198m 汽車船)操航安全
- (3)港內水域靜穩需求
- (4)工程經濟性及時效性

#### 2.替選方案研擬

在上述四項基本考量因素下初步研擬較可能之替選方案如表 5-1。

表 5-1 第一港口二期擴期工程替選方案一覽表

替選方案	南防波堤 拆除長度	南內堤 拆除長度	北防波堤		備註
			延伸長度	延建方向	
零方案	0m	0m	0m	--	現況佈置
方案一	170m	50m	480m	WNW 向	
方案二	170m	100m	480m	WNW 向	
方案三	170m	150m	480m	WNW 向	
方案四	170m	150m	480m	W 向	
方案五	170m	100m	750m	WNW 向 480m 轉 W 向 270m	
方案六	170m	50m	750m	WNW 向	
方案七	170m	50m	480m	W 向	
方案八	170m	50m	750m	WNW 向 480m 轉 W 向 270m	
方案九	93m	50m	480m	WNW 向	

### (三) 評估作業與結果

上述所研擬之各替選方案將配合進行數值模擬計算，水工模型遮蔽試驗及快速操船模擬等工作，以期評估研選較佳替選方案，作為後續真時操船模擬及水工模型漂沙試驗之港口佈置方案。各項評估工作之探討課題之結果如下：

#### 1. 波浪折繞射計算

本作業主要探討課題有三項如下：

- (1) 北防波堤延伸對商港區及漁港區水域靜穩之影響
- (2) 南內、外堤拆除商港區及漁港區水域靜穩之影響
- (3) 北防波堤延伸後所形成遮蔽區之範圍大小

本數值計算作業係使用 MIKE21-NSW 近岸波浪模式計算近岸海域波浪分佈狀況。再依 MIKE21-EMS 波浪遮蔽模式計算港口遮蔽區及港內水域靜穩度，主要結果如下：

#### (1) 北防波堤延長後遮蔽範圍之影響

北防波堤不同延伸長度及方向所形成遮蔽區面積、遮蔽航線長度及遮

蔽航行時間如表 5-2 所示。如表中所示北防波堤延建 480m，遮蔽範圍將擴大並涵蓋目前領港登輪地點，且遮蔽航行時明顯增至 9.3 分鐘，此對船舶進港操航安全很有助益。

表 5-2 北防波堤不同延建規模遮蔽範圍比較

方案別	零方案	方案一~三	方案四	方案五
北防波堤延伸長度	0m	480m	480m	750m
遮蔽航線長度	44ha	152ha	140ha	202ha
遮蔽航線長度	920m	1,714m	1,643m	1,928m
遮蔽區航行時間	5min	9.3min	8.9min	10.5min

#### (2)北防波堤延長對港口水域靜穩度影響

北防波堤延長雖可遮蔽東北季風風浪，但在夏季西南向季風或颱風波浪來襲時因堤體反射波與入射波形成短峰波現象，對小型船隻較不利。唯此延長段之反射波並不致作用於港口附近水域，該水域之影響主要為舊有堤段所造成。

#### (3)北防波堤延長對港內水域靜穩度影響

依各方向波浪計算結果顯示北防波堤長對港內水域靜穩度影響並不顯著。

#### (4)南內外堤拆除對港內水域靜穩度影響

南、內外堤拆除部份堤體以拓寬航道，將使侵入港內波能略為增大，受影響較大者為迴船池、北突堤碼頭區前緣及中泊渠入口附近水域。不過對船舶靠泊裝卸影響幅度有限。

### 2.平面水工模型遮蔽試驗

本作業主要探討課題有四項如下：

#### (1)南防波堤拆除 170m 對漁港水域靜穩度之影響

(2)南內堤不同拆除長度對商港區水域靜穩度之影響

(3)北防波堤延伸後，西南向波浪作用於堤體所造成之反射波對港口附近水域影響。

(4)漁港區水域靜穩度改善方案

本作業於本所第一試驗場棚進行，模型縮尺 1/100，取 4 個波向，每個波向採用三組波浪條件，並分規則波與不規則波兩種型態。整個試驗區共佈置 48 支容量式波高計。試驗分析主要結果如下：

(1)各替選方案的港池靜穩度皆比現況佈置稍差，且隨南內、外堤拆除規模愈大而愈差。其中南防波堤的拆除會影響漁港區及商港區的水域靜穩，而南內堤的拆除則僅影響商港區的水域，且影響程度較南防波堤拆除為小。

(2)經比較各替選方案的港池靜穩度優劣，發現以北防波堤依原堤線延長 480 公尺、南防波堤拆除四座沉箱約 93 公尺及南內堤拆除 50 公尺的方案最佳，根據水工模型試驗結果，此佈置評選為較佳方案。

(3)較佳方案配合本試驗所研選之外港池消波設施改方案後如圖 5-1，商港區及漁港區水域靜穩度已有明顯提升，其波高已能符合船舶航行及船隻靠泊之設計規範要求。

(4)北防波堤不同延建方案對商、漁港區水域靜穩影響不大。不過，在偏西南向波浪入射時，港口至主航道附近因沉箱堤體反射及導浪作用，波浪有較紊亂的現象。因此建議北防波堤延建時應採用消波式的設計。

### 3.海流數值模擬計算

本作業主要探討課題有三項如下：

(1)檢討南內堤拆除長度，對內堤口流速之影響。

(2)檢視北防波堤延長，對港口流場型態的變化情形。

(3)建立港口海域流場，提供操船模擬時之環境背景。

本數值計算係使用 MIKE21-HD 水動力模組計算港區附近海域及港

內流速流向的分佈狀況，由比較分析結果如下：

- (1)北防波堤延伸使領港登輪區環流尺度增大，而流速有明顯的降低，雖然延伸愈長效果愈好，不過延 480m 的方案，其流速已明顯降低，約從現況 120cm/sec 降至 30cm/sec。
- (2)南防波堤的拆除僅對外堤口流速有影響，其他觀察點則無影響。南防波堤拆除愈長，外堤口流速愈小。現況佈置的外堤口流速約 70cm/sec(平潮時段)，若拆除 93m 則流速降至約 56cm/sec；而拆除 170m 時則降至 50cm/sec。
- (3)南內堤的拆除對內堤口流速影響較顯著，其他觀察點則無明顯影響。拆除愈長，流速愈小，現況佈置的內堤口流速約 80cm/sec(平潮時段)，若拆除 50m 則流速降至約 70cm/sec；若拆除 150m 則降至約 55cm/sec。
- (4)雖然南防波堤的拆除對漁港及商港水域的穩靜可能會有不利的影響(入港波浪能量增加)，但由於進港船隻在進入外堤口時需作大角度轉向，以避免撞上北防波堤，同時也為後續進內堤口時預作準備(調整船位、航向及船速等)。因此外堤口的流速若能有效減小，對操航安全將有極大助益。

#### 4.快速操船模擬試驗

本作業主要探討課題有二項如下：

- (1)不同佈置之北防波堤對船舶操航安全的相對性比較
- (2)船舶操航安全需求下，所需南內堤拆除長度

本模擬試驗是以丹麥海事研究所(DMI)之數學船型模式軟體 DENMARK1 為基礎，而操船部份則以 DMI 新發展之“Numerical Navigator”模式進行模擬計算。本試驗所採用之海象環境條件，包括兩組潮位條件，滿潮前一小時及滿潮後三小時，以及 15m/s 及 20m/s 兩組風速條件，組合成四組環境條件；搭配五種替選方案之港口配置，共可產生 20 組不同組合。模擬船型資料則如表 5-3。

表 5-3 快速操船模擬船舶資料

編號	船型/載重條件	船長 (LLP,m)	船寬 (m)	吃水 (前/後,m)	排水量 (m <sup>3</sup> )	軸力 (mw)
3115	貨櫃輪/滿載	245.0	32.2	12.80/12.80	63,919	35.0
3011	貨櫃輪/滿載	280.0	32.2	11.45/11.45	65,366	36.8
3082	散貨輪/輕載	226.5	39.9	5.64/8.64	48,851	10.7
3110	散貨輪/滿載	265.0	43.0	16.00/16.00	145,000	13.6

經過 150 次進港操航及 35 次出港操航試驗結果顯示各替選方案並無明顯之差異性如圖 5-2，且各替選方案的操航安全性皆符合需求，換言之，各替選方案皆通過快速操航安全的檢驗，而待進一步的真時操航模擬檢視。

#### 5. 真時操船模擬試驗

快速操船由於無法反映人為因素，故必須經由引水人實際進行真時操船試驗，以期獲得最接近實際狀況之結果。本作業主要探討課如下：

- (1) 較佳替選方案之船舶進出港操航方式，包括拖船協助。
- (2) 較佳替選方案之船舶安全航行之天候海況條件限制
- (3) 船舶安全通過內堤口所需之最小寬度。

本作業是由台中港兩資深領港於丹麥海事研究所之操船模擬機室進行。試驗天候條件係選用冬季較差天候狀況，風場選用 15m/sec 及 20m/sec，風向 NNE；對應外海波高 3m 及 4m，流場條件則採用影響船舶進出港較嚴重(內堤口流速大)之漲、退潮各一時段。依據計畫進港船舶需求選用之試驗船型及條件如表 5-4。

表 5-4 真時操船模擬船型資料

編號	船舶種類	船長(LOA)	船寬	吃水
3040	汽車輪(滿載)	198.00m	32.25m	9.5m
3060	貨櫃輪(半載)	294.12m	32.20m	10.5m
3099	貨櫃輪(滿載)	292.08m	32.20m	12.2m
3082	油輪(空載)	259.80m	39.90m	7.1m
3110	散貨輪(滿載)	285.00m	43.00m	16.0m

經過 114 次真時操航模擬試驗結果分析獲得如下結論：

- (1)由各試驗船舶模擬試驗軌跡圖 5-3 可看出，無論散貨輪或貨櫃輪在進入外堤口時，受風、浪、流影響，明顯偏向南防波堤，其船跡位置相當接近本計畫擬拆除之 93m 堤段，該堤段如不拆除，大型船將無法安全進入港口段主航道。此外，大型船舶在通過內堤口時已偏向南內堤，如本計畫未將南內堤堤頭段拆除 50m 長，則大型船舶無法安全進港。
- (2)當大型船舶通過外堤口後，為克服 NNE 向(約與港口段航道垂直)強勁風力影響，船速必須保持在一定之速度方能維持航向，尤其是受風面大之半載貨櫃輪更須維持在 8~9 節航速，此一航行速度導致船舶無法沿進港航線直接停泊在迴船池內，而需在通過內堤口附近即開始轉向，使船舶駛向迴船池以及內航道間水域，以爭取足夠之衝止距離。
- (3)本計畫研選之較佳擴建配置方案經真時(Real Time)操船模擬試驗驗證結果，顯示第四代貨櫃輪及 12.5 萬噸級散貨輪等大型船可安全進出港口。而由模擬操演中亦發現北防波堤延長 480m 後，雖可有效降低港口海域流速，但須配合拆除南內堤 50m 以及南防波堤 93m，方能確保大型船操航安全目標。

#### 6.平面水工模型漂沙試驗

本作業主要探討課題如下：

(1)北防波堤延伸後對北淤沙區地形變化之影響。

(2)北防波堤延伸後對港口南側海床地形變化之趨勢。

本作業於本所第二試驗場棚進行，水平縮尺 1/500，垂直縮尺 1/100，波高為 4.6m~6.0m，週期 11.5sec~12.5sec，波向 N15°E。試驗結果分析如下：

(1)以 N15°E 波向為波浪的優勢方向，試驗波浪波高為 4.61m~5.95m，週期為 11.5sec~12.5sec 三種搭配方式造波下，模型試驗 45 分鐘的地形變化，相當於現場地形變化一年的時間。

(2)北防波堤延伸 480 公尺的主配置方案試驗結果，南防波堤南側區域除海堤折角落少數地區有淤積情況外，靠近海堤岸側附近大都屬於侵蝕地形，但情況不嚴重，其侵蝕現象隨時間增加而更形明顯，如圖 5-4。而北防波堤北側區域則為淤積地形，且其淤積情況隨時間而增加，如圖 5-5。

## 參考文獻

- 1."台中港港口第二期擴建工程規劃" 期末報告書，港灣技術研究所，1999 年 5 月。
- 2."台中港港口段航道設置減風設施可行性研究"，港灣技術研究所，專刊 1489 號，1997 年 6 月。
- 3."八十五年度海岸及港灣工程研討會論文集" 港灣技術研究所，專刊 116 號，1996 年 3 月。
- 4."The shiphandler's guide"，Captain R.W. Rowe, FNI, The Nautical Institute, England, 1996 年。

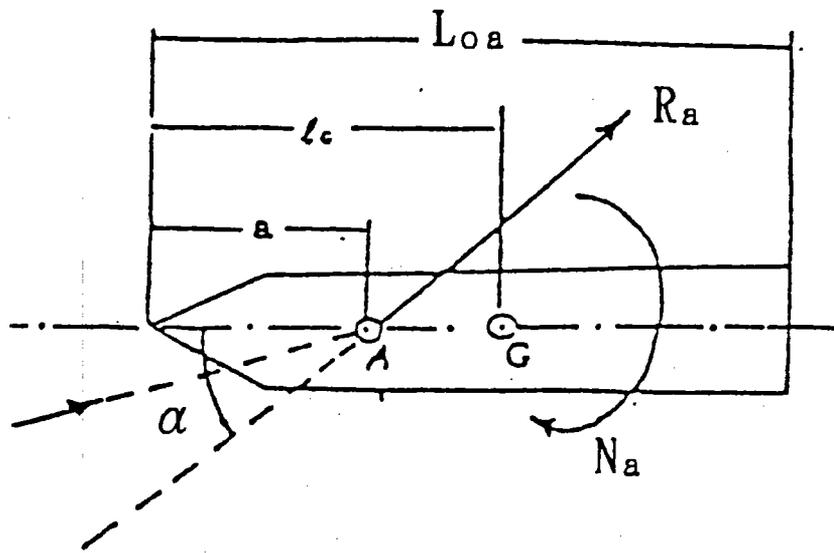


圖 3-1 風對船舶之風壓力及風壓力距

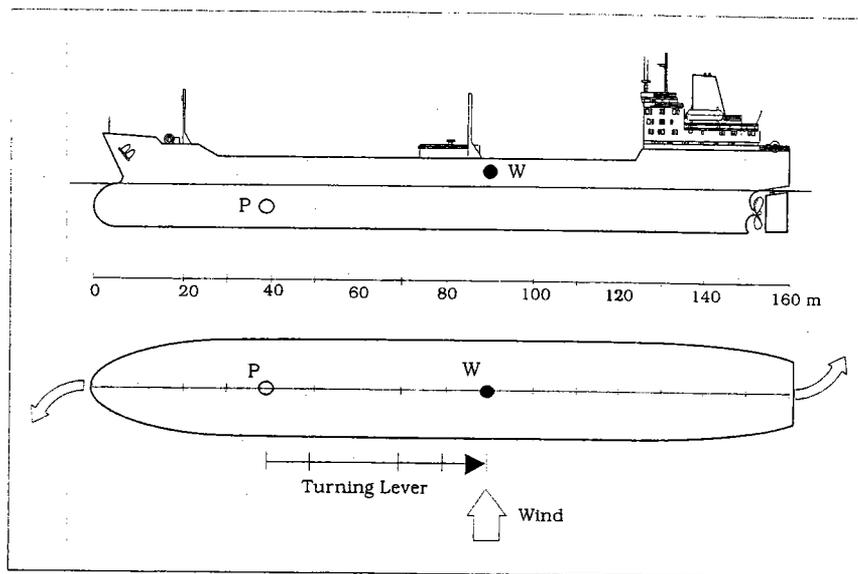


圖 3-2 船舶前車航行時受側風作用之迴轉

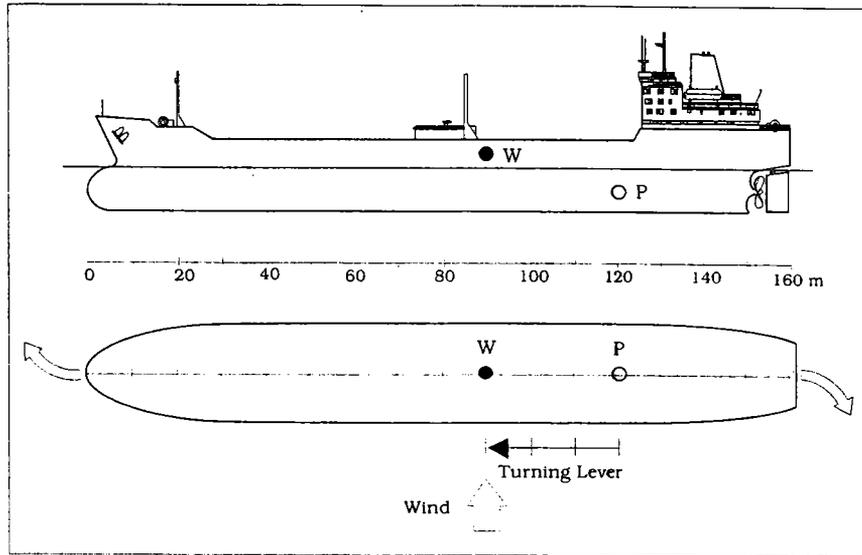


圖 3-3 船舶後車航行時受側風作用之迴轉

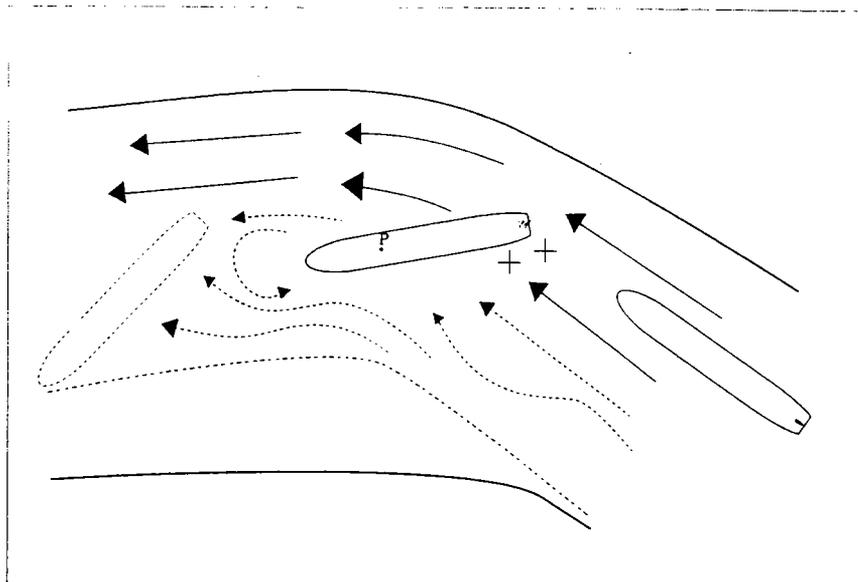


圖 3-4 船舶順流航行時受水流力情形

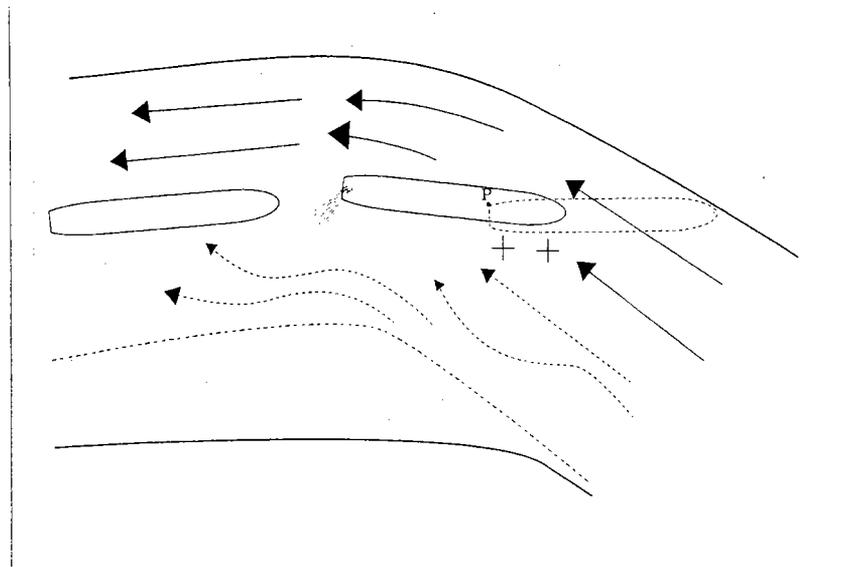


圖 3-5 船舶逆流航行時受水流力情形

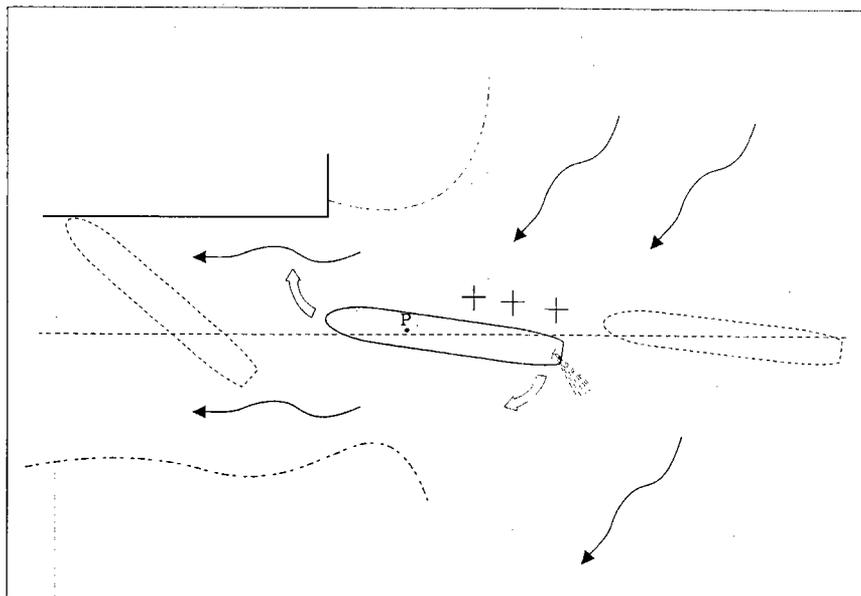


圖 3-6 水流流向突然改變時之船舶受水流力情形

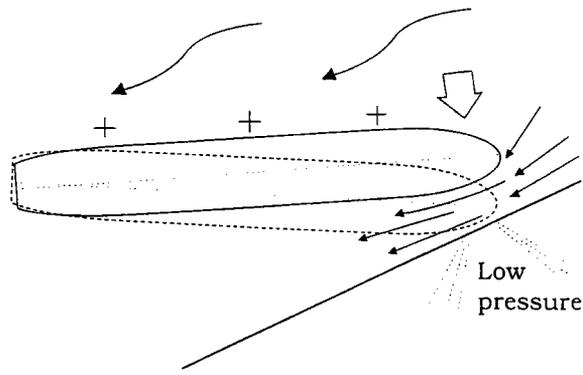


圖 3-7 船舶靠近結構物航行時受水流力情形

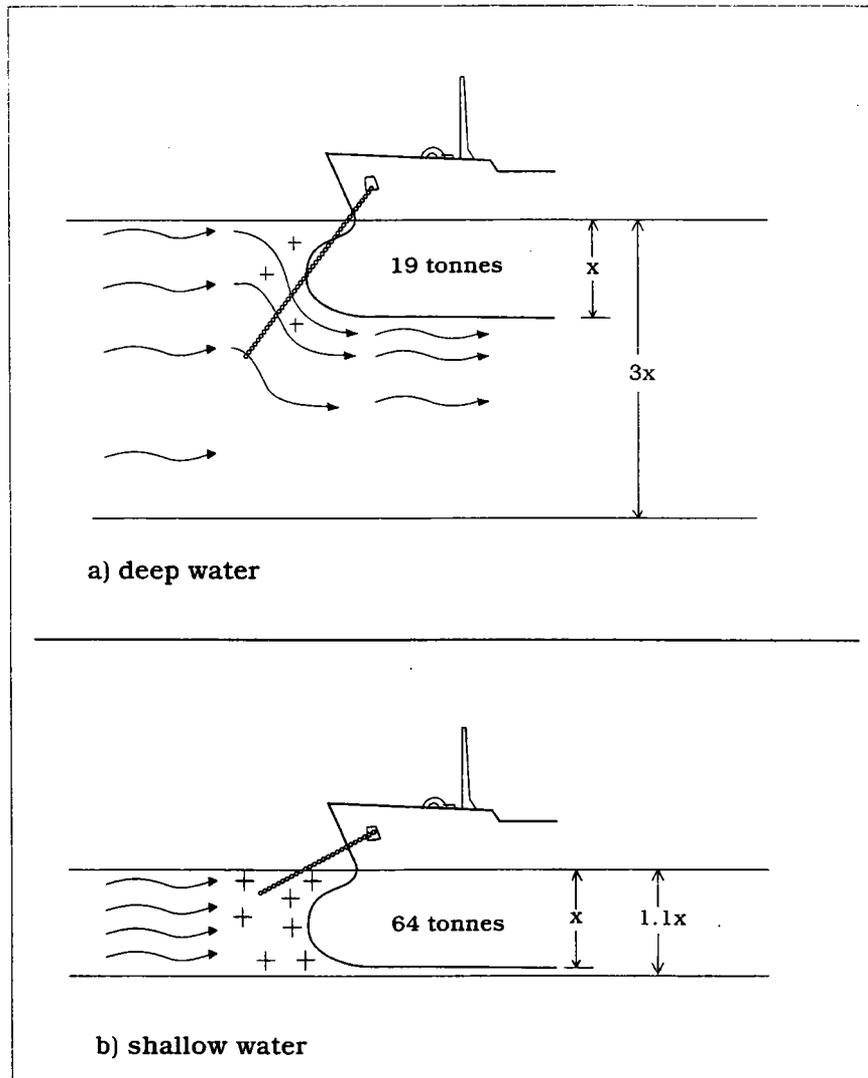
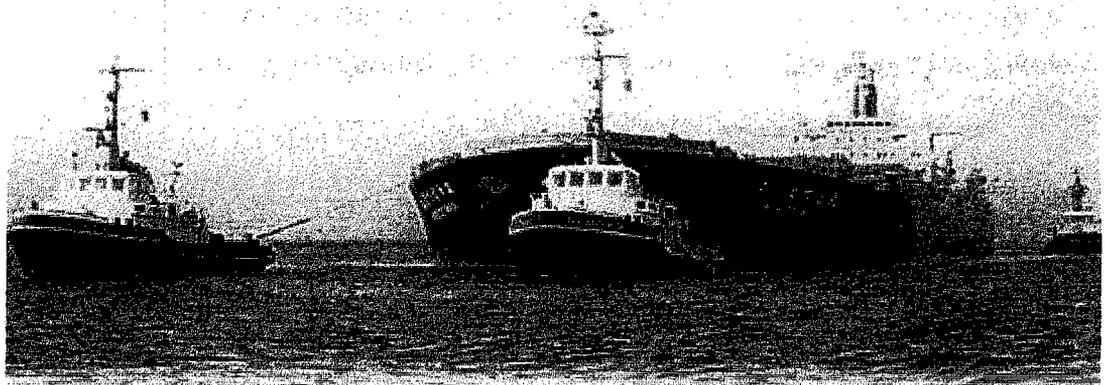


圖 3-8 船舶在不同水深吃水比之沿船向水流作用力



照片 3-1 鹿特丹加蘭橋及加蘭運河旁之減風牆設施



照片 3-2 船舶進出港時之護衛拖船協助作業

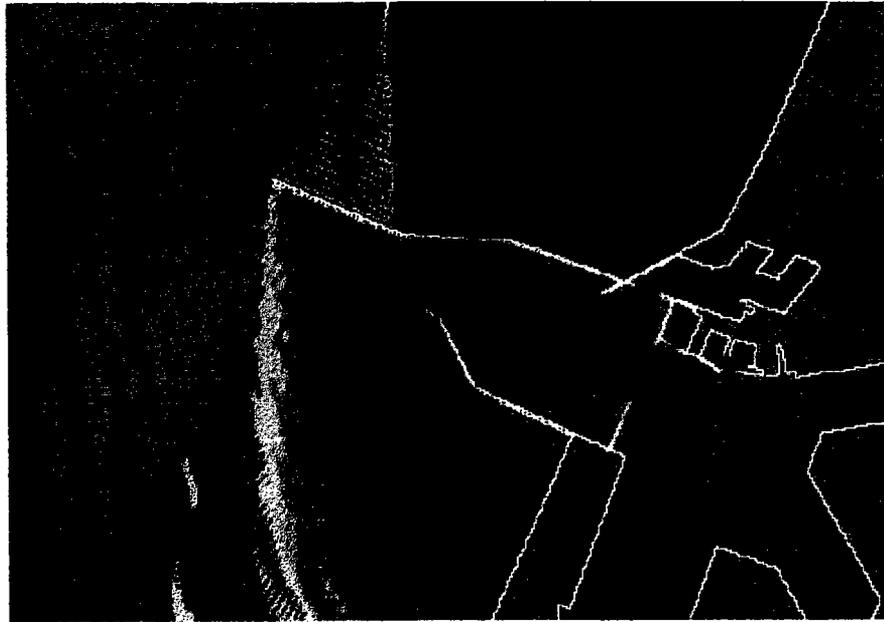


圖 4-1 台中港區之波浪折、繞射數值計算結果 (Mike21-EMS)

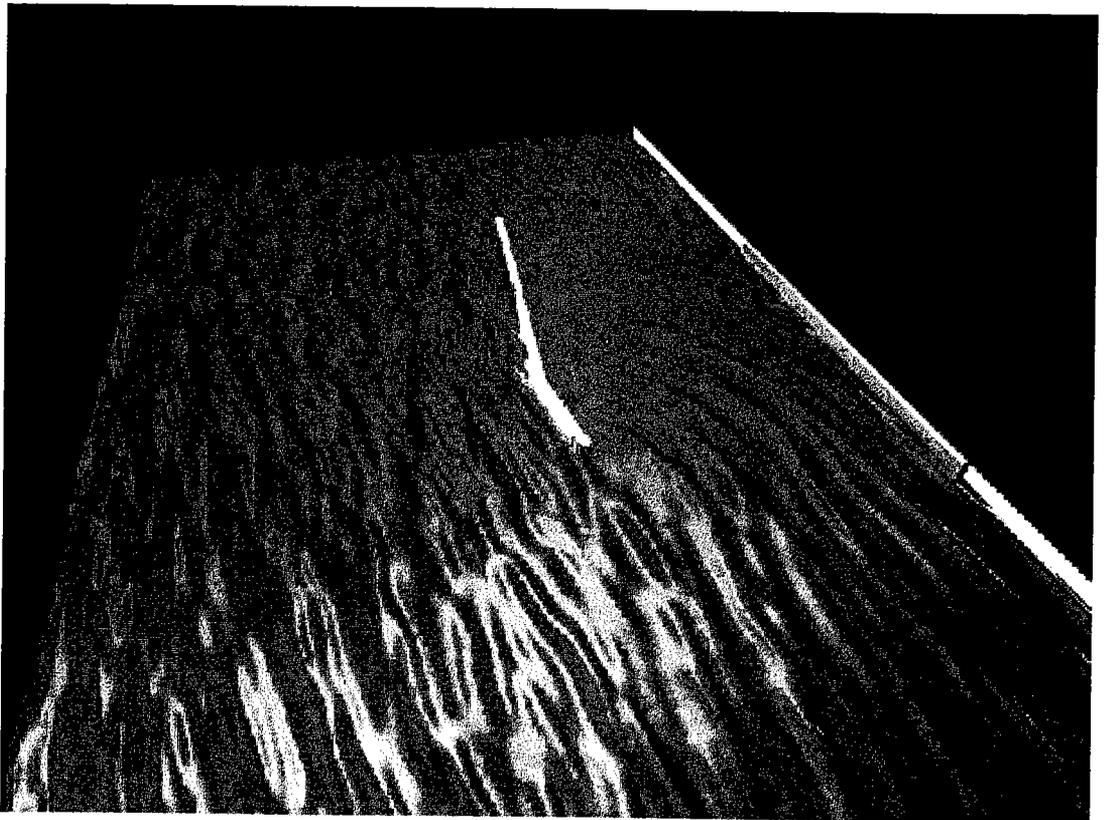
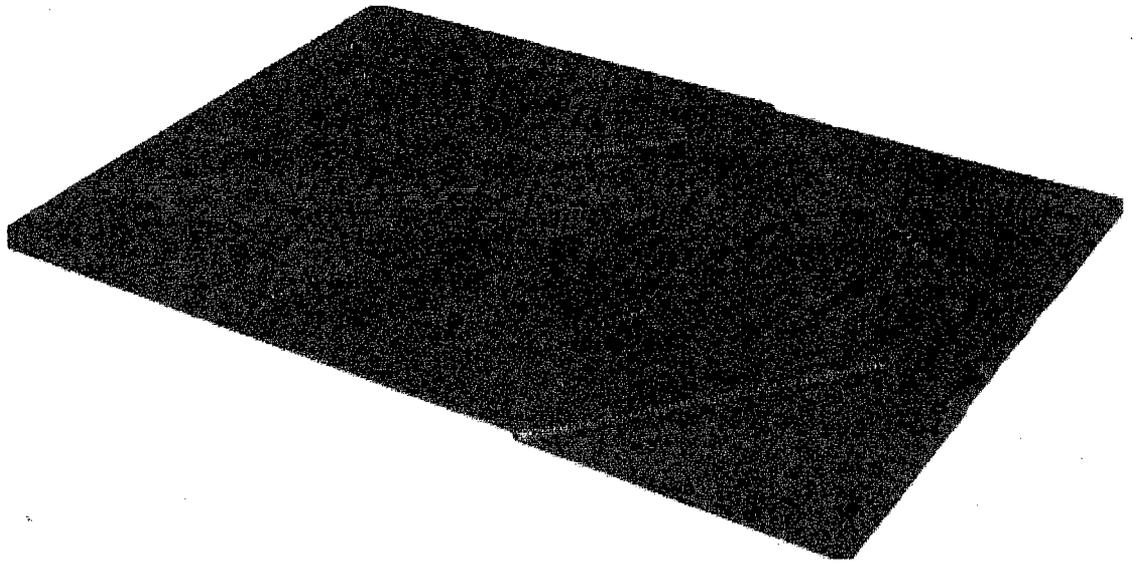


圖 4-2 波浪折、繞射數值計算示範結果 (Mike21-BW)



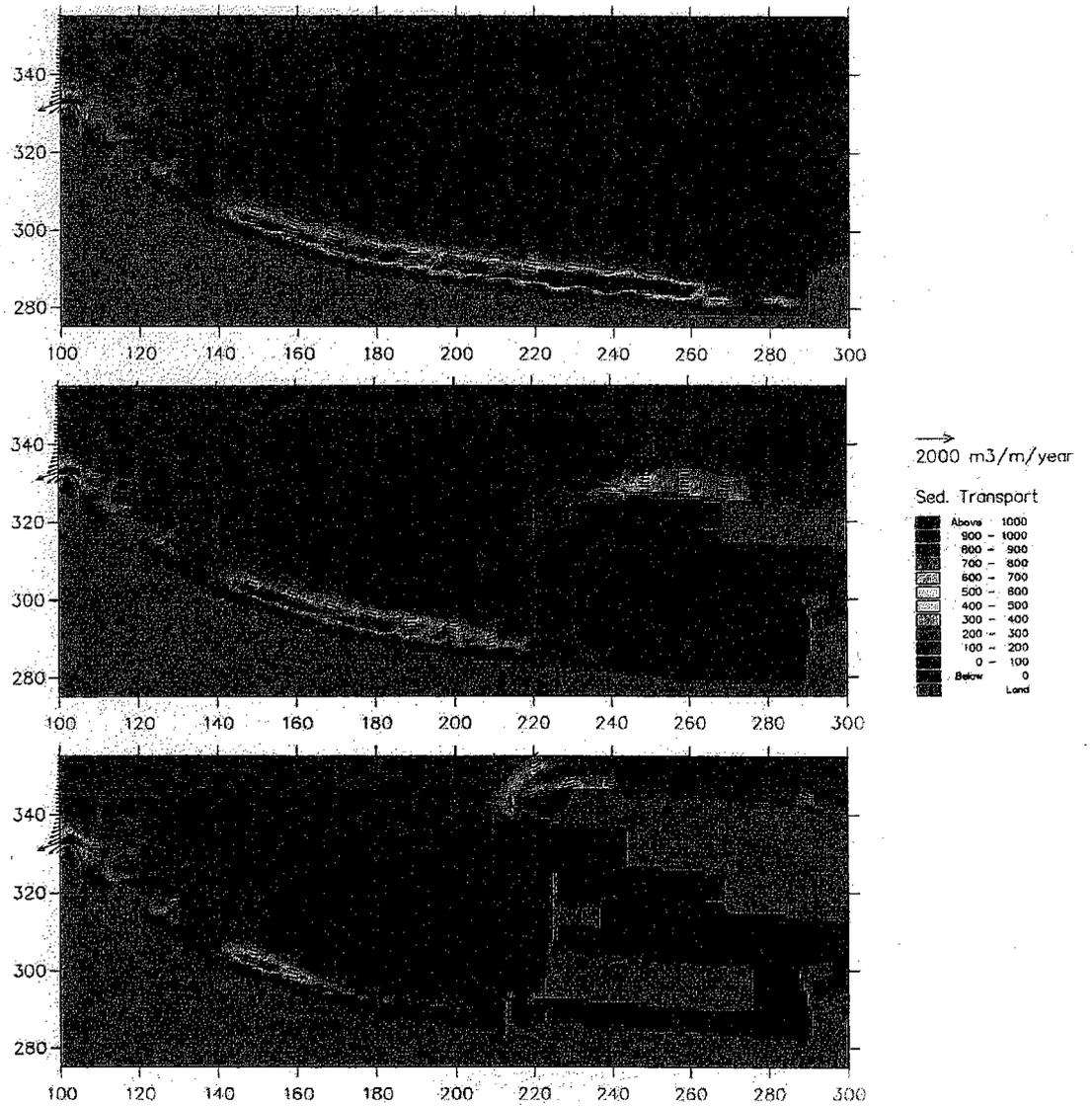


圖 4-4(a) 淡水港附近海岸地形之數值模擬計算結果〔無保護佈置〕

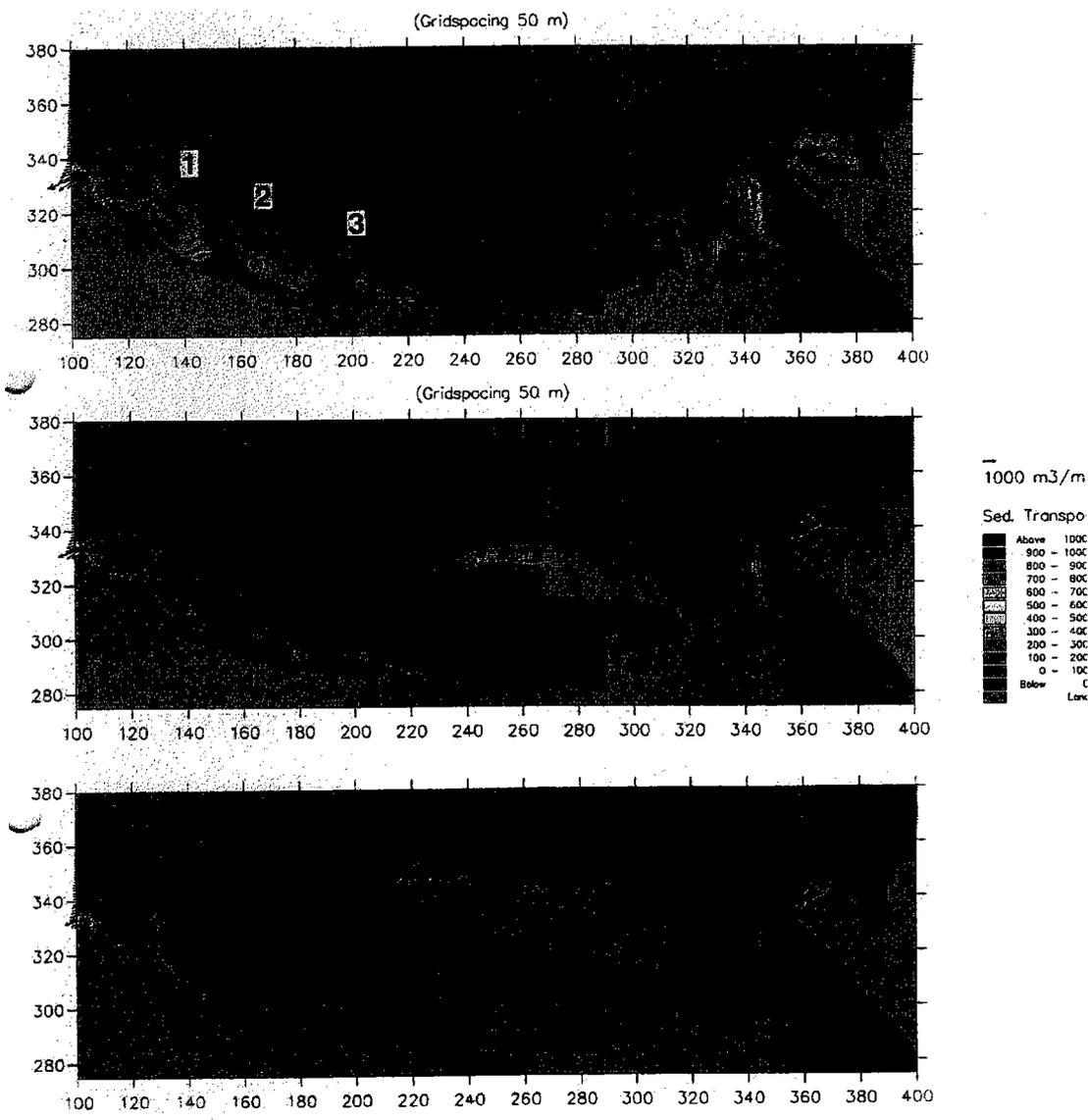


圖 4-4(b) 淡水港附近海岸地形之數值模擬計算結果〔有保護佈置〕

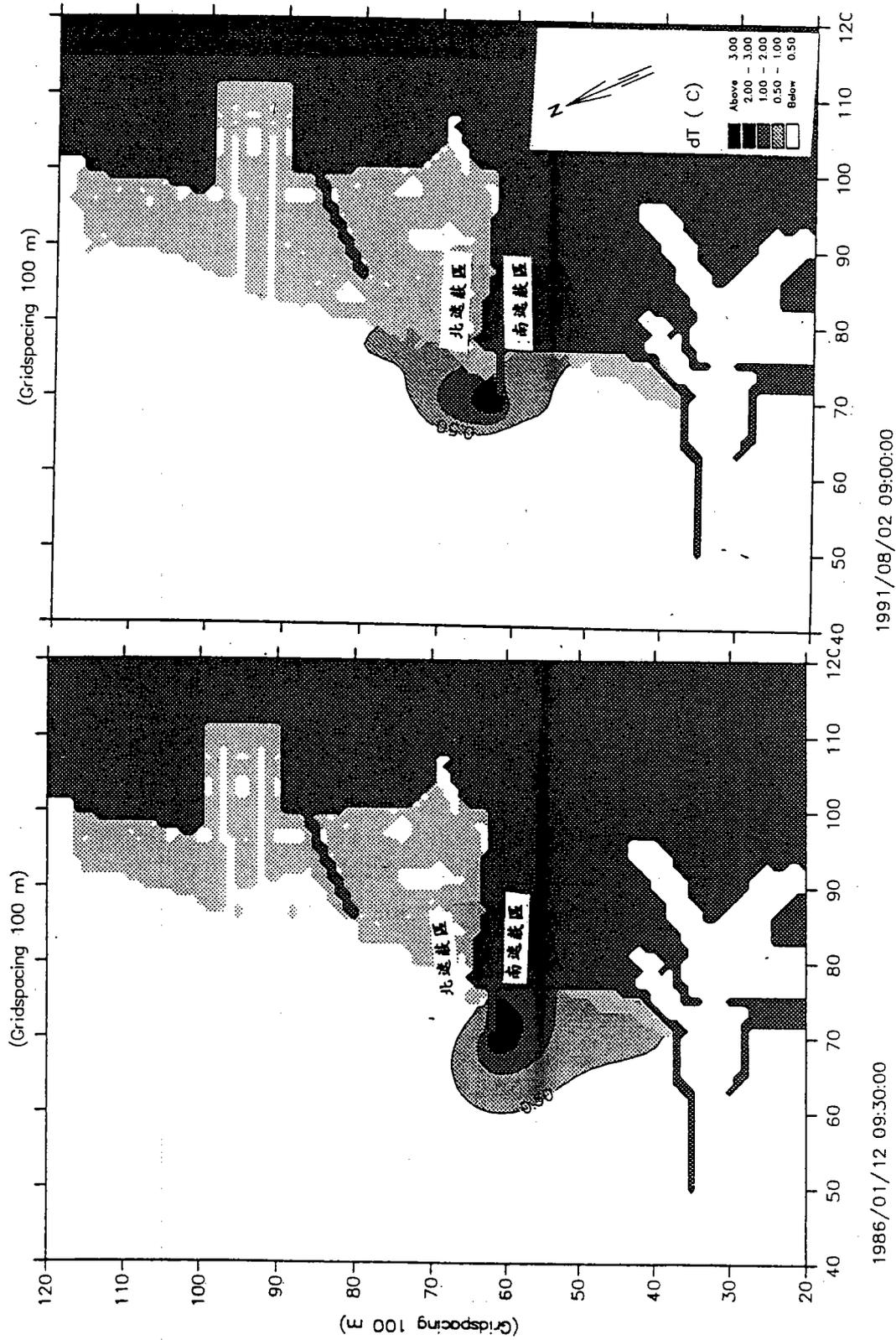


圖 4-5 台中港海渡電廠之溫排水數值模擬計算結果



照片 4-1 真實操船模擬機試驗室一景

改善佈置 2

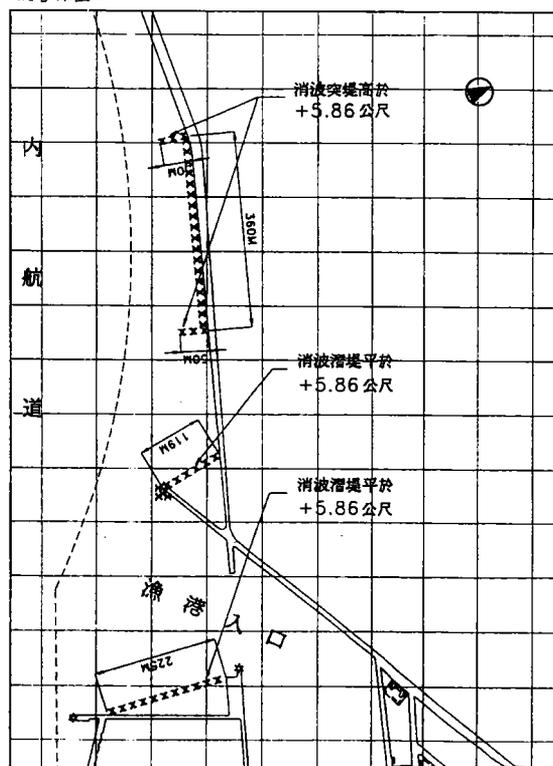


圖 5-1 台中港北防波堤消波設施改善方案

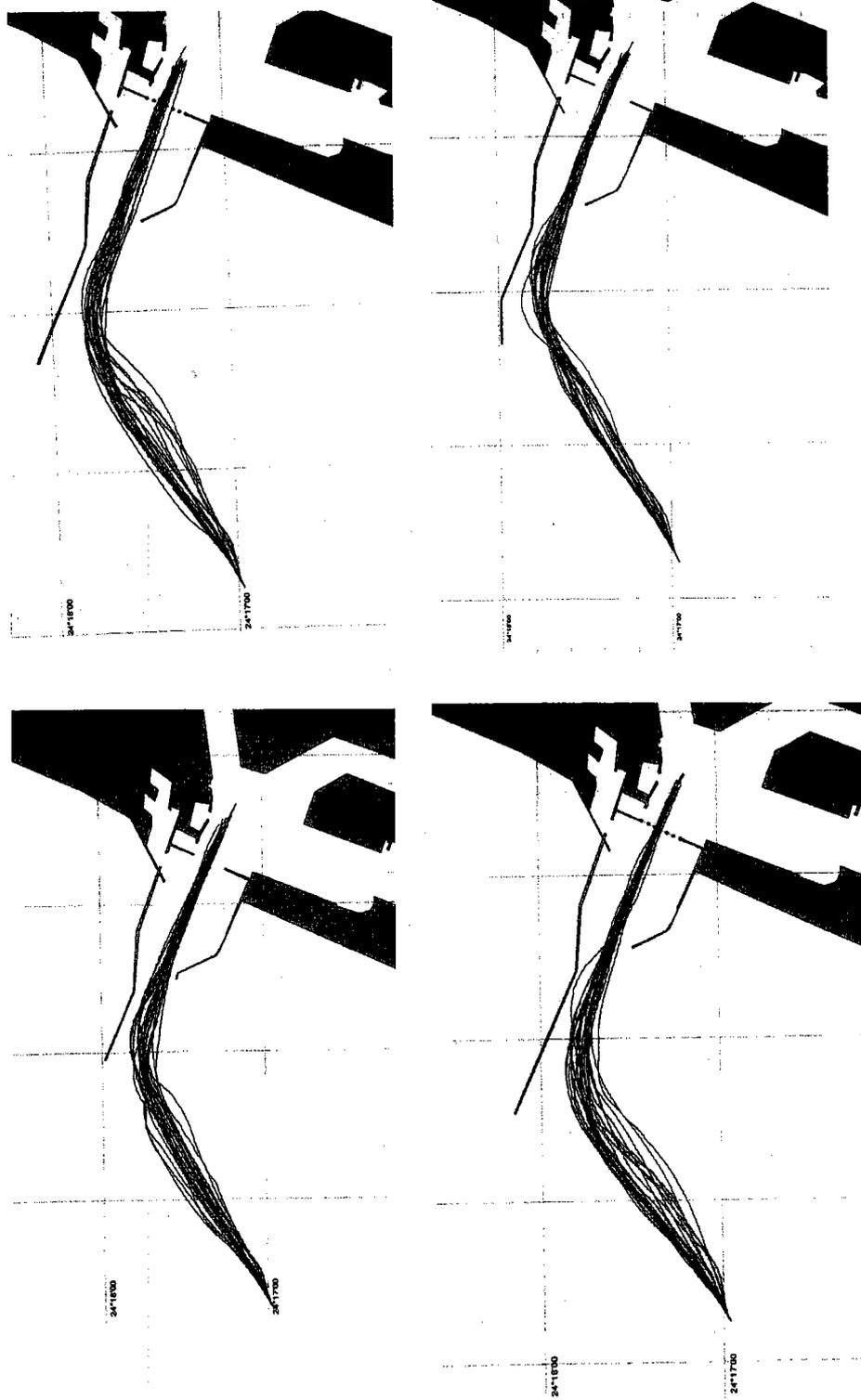


圖 5-2 快速操船模擬試驗船跡圖

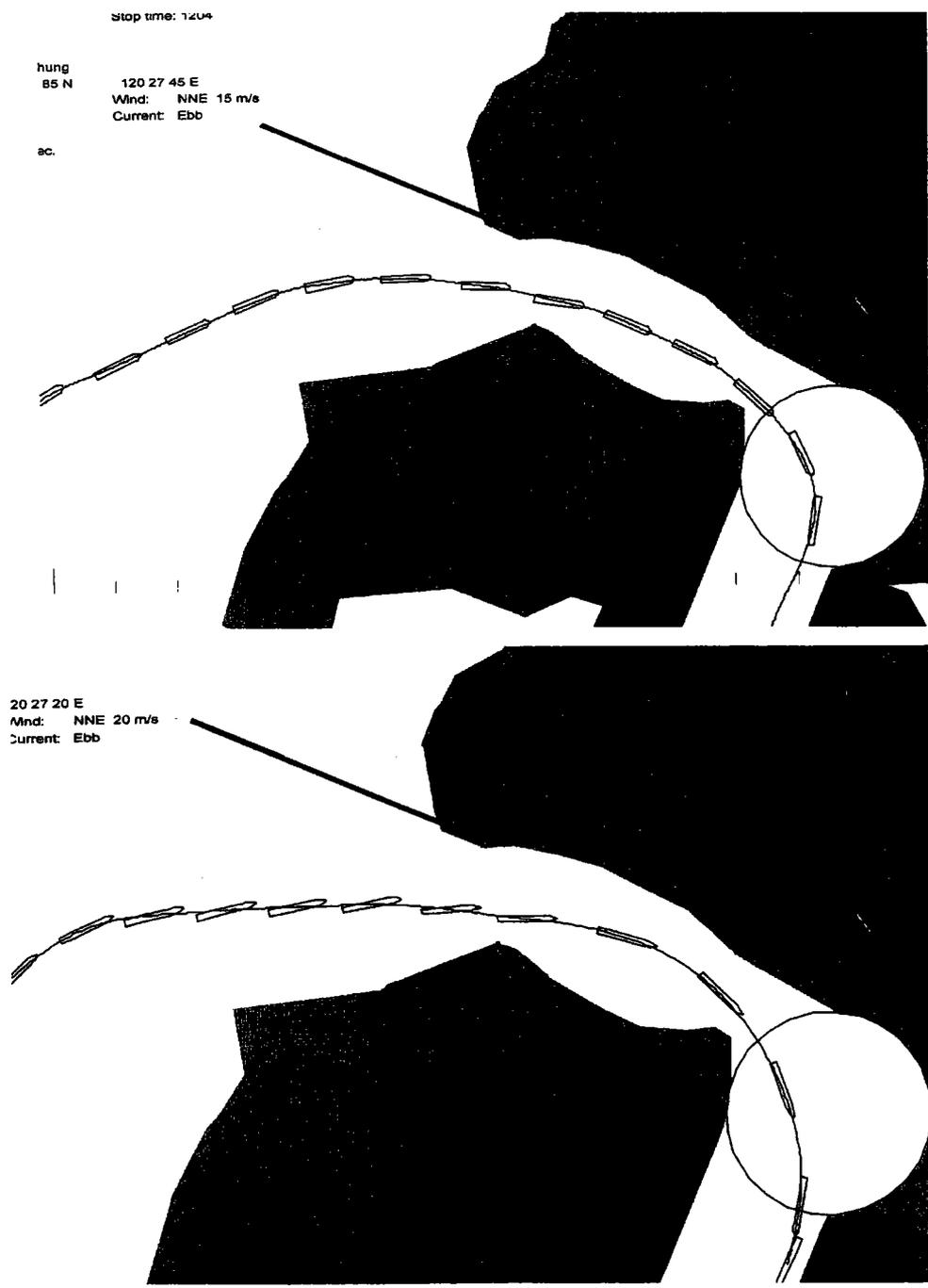


圖 5-3 真實操船模擬試驗船跡圖

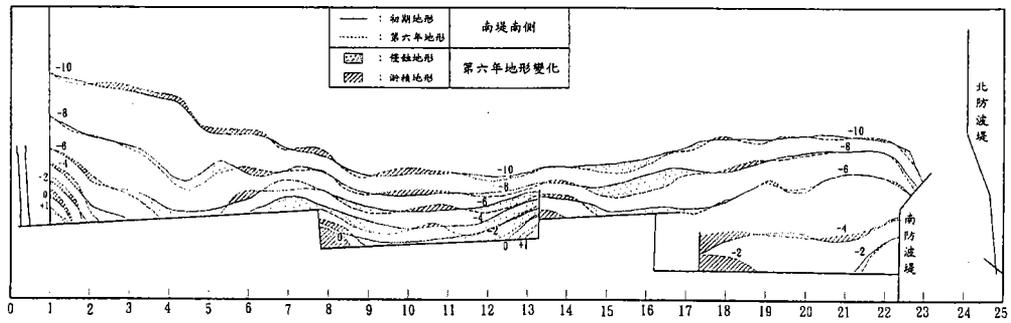


圖 5-4 台中港南防波堤南側區域地形變化 (主配置試驗第六年)

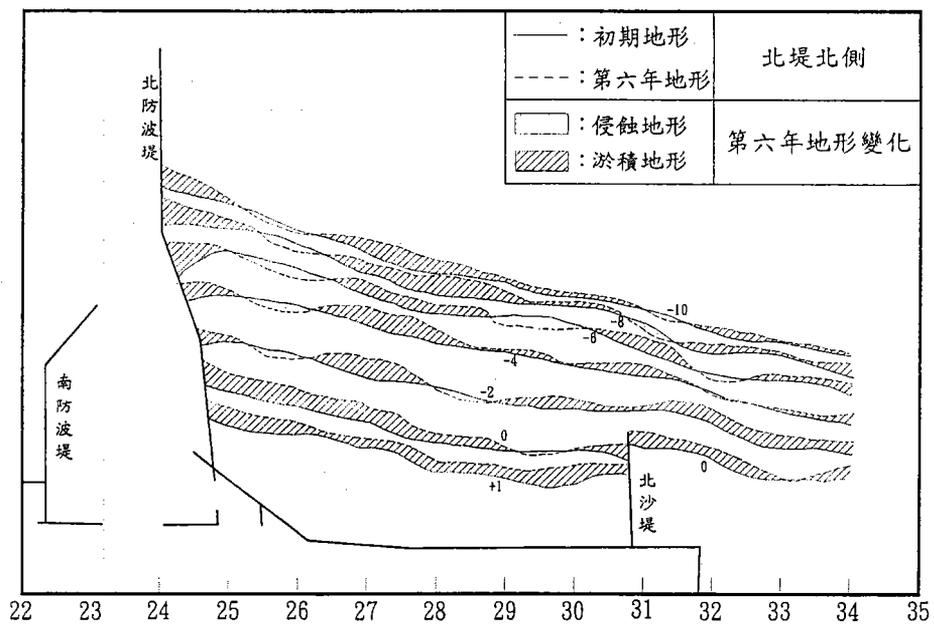


圖 5-5 台中港北防波堤北側區域地形變化 (主配置試驗第六年)

# 港灣開發環境影響評估

莊甲子\*

## 一、環境影響評估簡史

本世紀 60 年代後期，隨著工業的高速發展，人們對開展的工程項目，尤其是大中型開發項目所造成環境質量的下降，越來越感到不安。首先，在美國和歐洲一些發達的國家中，人們感到：修築公路引起對景觀的破壞；建造火力發電廠排放出大量污染物；建設水利工程淹沒了寶貴的沼澤地等等，結果導致了自然生態系統的破壞。因此，人們批評政府在決策時對上述項目造成的環境後果不加考慮，甚至有人到法院控告政府規劃人員只根據“經濟效益”採取傳統的指導原則進行決策。這就迫使政府有關部門在制定和評價備選規劃方案時，不得不認真考慮環境因素。

到了 70 年代，許多工業化國家都制定了環境保護政策和法律，要求政府部門在決策時必須權衡環境影響，全面地進行環境影響評估，並根據工程項目的規模大小，分別提出環境影響評價報告書或環境影響評估報告表，按要求的詳細地或綜合地說明工程項目對經濟、社會、生態、大氣、水體、景觀、古蹟、文化、美學等方面的環境影響和將要採取的對策。

目前世界上大約已有 80 多個國家和地區制定了環境保護法，建立了環境保護機構。聯合國也建立了聯合國環境規劃署，要求對有關建設項目進行環境影響預測和評估，並提出必要的環境保護對策。

## 二、什麼是環境影響評估

在工程項目規劃中，環境影響評估是其中的一個組成部分。從經濟的、社會的和生態方面的考慮，是環境評估的主要內容。科學技術人員試圖把環境影響評估分成若干部分，以便對自然界中各種事物間的相互作用進行考察和重新組合，以保證再生自然資源和環境質量的持續性。

預測是環境評估的一個重要部分。要想對未來預測準確，必須進行基線研究。因此，環境監測又是環境評估的另一個重要方面。只有進行不斷的環境監測，才能搜集到環境影響評估的必要資料。

---

\* 港灣技術研究所副所長

環境影響的另一個含義，是在設計一項工程時，要盡早地與環境相結合；而且，要連續不斷地相結合。也就是說，環境影響評估在工程項目的計畫和管理的任一階段都是有用的。

### 三、為什麼要進行環境影響評估

在過去的歲月中，人們逐漸認識到，只對工程項目進行常規的工程分析和一般性的經濟分析是遠遠不夠的。爲了更全面地弄清人們的活動會產生怎樣的後果，必須增加環境影響分析的內容，對工程項目有關的環境現狀和工程建設、運行中的環境狀況，分別進行客觀的質量評估和影響預測評估。環境影響評估是一種“合理的”環境系統分析方法。所謂合理性，一般係指根據符合客觀狀況的理性認識來理解環境系統，而不受感情和政治的左右。經驗表明，只有對工程項目進行合理的環境影響評估，才能使開發項目達到合理化。

各種開發項目都有自身的目的；然而，在開發時，必須考慮到本項目的持續發展。在“保護”（或保持）和“開發”（或利用）之間存在矛盾。開發應做到既要利用又要保護自然資源。環境影響評估能幫助人們進行持續發展，這就要求人們“盡早地、全面地、經常地”進行環境影響評估的原因。

### 四、如何進行環境影響評估

在設計和執行包括環境影響評估在內的評估工作中，思考和推理是極重要的環節。環境問題靠列清單或填表格的方法是不能解決的，必須採用系統分析方法，找出自然界變化的客觀規律，將生態學和經濟學結合在一起，全面進行分析。

環境影響評估的基本內容與步驟如下：

- (1) 確定分析範圍，即爲評估確定正確的邊界
- (2) 了解自然情況後，對各種方案的後果進行預測
- (3) 對效益和費用估定幣值
- (4) 保留那些不能定量和不能估幣值的因素
- (5) 用費用效益分析法進行分析，比較和評估
- (6) 加入難以確定的因素，分級排序，以便進行最終決策

雖然有些環境影響評估是在工程項目批准之後才進行的，但是，很有必要知道其選址、施工和運行的情況。一旦工程完工之後，僅僅對它進行監測是不夠的，更為重要的是要搜集反饋的資料，用於進一步改善工廠的運行效果。

## 五、環境影響評估法規摘錄

第 1 條：為預防及減輕開發行為對環境造成不良影響，藉以達成環境保護之目的，特制定本法。本法未規定者，適用其他有關法令之規定。

第 4 條：本法專用名詞定義如下：

- (1) 開發行為：指依第 5 條規定之行為。其範圍包括該行為之規劃、進行及完成後之使用。
- (2) 環境影響評估：指開發行為或政府政策對環境包括生活環境、自然環境、社會環境及經濟、文化、生態等可能影響之程度及範圍，事前以科學、客觀、綜合之調查、預測、分析及評定，提出環境管理計畫，並公開說明及審查。環境影響評估工作包括第一階段、第二階段環境影響評估及審查、追蹤考核等程序。

第 5 條：下列開發行為對環境有不良影響之虞者，應實施環境影響評估：

- (1) 工廠之設立及工業區之開發。
- (2) 道路、鐵路、大眾捷運系統、港灣及機場之開發。
- (3) 土石採取及探礦、採礦。
- (4) 蓄水、供水、防洪排水工程之開發。
- (5) 農、林、漁、牧地之開發利用。
- (6) 遊樂、風景區、高爾夫球場及運動場地之開發。
- (7) 文教、醫療建設之開發。
- (8) 新市區建設及高樓建築或舊市區更新。
- (9) 環境保護工程之興建。

(10)核能及其他能源之開發及放射性核廢料儲存或處理場所之興建。

(11)其他經中央主管機關公告者。

前項開發行為應實施環境影響評估者，其認定標準、細目及環境影響評估作業準則，由中央主管機關會同有關機關於本法公布施行後一年內定之，送立法院備查。

第 6 條：開發行為依前條規定應實施環境影響評估者，開發單位於規劃時，應依環境影響評估作業準則，實施第一階段環境影響評估，並作成環境影響說明書。

前項環境影響說明書應記載下列事項：

- (1) 開發單位之名稱及其營業所或事務所。
- (2) 負責人之姓名、住、居所及身份證統一編號。
- (3) 環境影響說明書綜合評估者及影響項目撰寫者之簽名。
- (4) 開發行為之名稱及開發場所。
- (5) 開發行為之目的及其內容。
- (6) 開發行為可能影響範圍之各種相關計畫及環境現況。
- (7) 預測開發行為可能引起之環境影響。
- (8) 環境保護對策、替代方案。
- (9) 執行環境保護工作所需經費。
- (10) 預防及減輕開發行為對環境不良影響對策摘要表。

第 7 條：開發單位申請許可開發行為時，應檢具環境影響說明書，向目的事業主管機關提出，並由目的事業主管機關轉送主管機關審查。

主管機關應於收到前項環境影響說明書後五十日內，作成審查結論公告之，並通知目的事業主管機關及開發單位。但情形特殊者，其審查期限之延長以五十日為限。

前項審查結論主管機關認不須進行第二階段環境影響評估並經許可者，開發單位應舉行公開之說明會。

第 8 條：前條審查結論認為對環境有重大影響之虞，應繼續進行第二階段環境影響評估者，開發單位應辦理下列事項：

- (1) 將環境影響說明書分送有關機關。
- (2) 將環境影響說明書於開發場所附近適當地點陳列或揭示，其期間不得少於三十日。
- (3) 於新聞紙刊載開發單位之名稱、開發場所、審查結論及環境影響說明書陳列或揭示地點。

開發單位應於前項陳列或揭示期滿後，舉行公開說明會。

第 9 條：前條有關機關或當地居民對於開發單位之說明有意見者，應於公開說明會後十五日內以書面向開發單位提出，並副知主管機關及目的事業主管機關。

第 10 條：主管機關應於公開說明會後邀集目的事業主管機關、相關機關、團體、學者、專家及居民代表界定評估範疇。

前項範疇界定之事項如下：

- (1) 確認可行之替代方案。
- (2) 確認應進行環境影響評估之項目；決定調查、預測、分析及評定之方法。
- (3) 其他有關執行環境影響評估作業之事項。

第 11 條：開發單位應參酌主管機關、目的事業主管機關、有關機關、學者、專家、團體及當地居民所提意見，編製環境影響評估報告書(以下簡稱評估書)初稿，向目的事業主管機關提出。

前項評估書初稿應記載下列事項：

- (1) 開發單位之名稱及其營業所或事務所。
- (2) 負責人之姓名、住、居所及身份證統一編號。

- (3) 評估書綜合評估者及影響項目撰寫者之簽名。
- (4) 開發行為之名稱及開發場所。
- (5) 開發行為之目的及其內容。
- (6) 環境現況、開發行為可能影響之主要及次要範圍及各種相關計畫。
- (7) 環境影響預測、分析及評定。
- (8) 減輕或避免不利環境影響之對策。
- (9) 替代方案。
- (10) 綜合環境管理計畫。
- (11) 對有關機關意見之處理情形。
- (12) 對當地居民意見之處理情形。
- (13) 結論及建議。
- (14) 執行環境保護工作所需經費。
- (15) 預防及減輕開發行為對環境不良影響對策摘要表。
- (16) 參考文獻。

第 12 條：目的事業主管機關收到評估書初稿後三十日內，應會同主管機關、委員會委員、其他有關機關，並邀集專家、學者、團體及當地居民，進行現場勘察並舉行聽證會，於三十日內作成記錄，送交主管機關。

前項期間於必要時得延長之。

第 13 條：目的事業主管機關應將前條之勘察現場記錄、聽證會記錄及評估書初稿送請主管機關審查。

主管機關應於六十日內作成審查結論，並將審查結論送達目的事業主管機關及開發單位；開發單位應依審查結論修正評估書初稿，作成評估書，送主管機關依審查結論認可。

前項評估書經主管機關認可後，應將評估書及審查結論摘要公告，並刊登公報。但情形特殊者，其審查期限之延長以六十日為限。

第 19 條：目的事業主管機關追蹤或主管機關監督環境影響評估案時，得行使警察職權。必要時，並得商請轄區內之憲警協助之。

## 六、環境影響評估的程序

### 1. 工作程序

美國環境影響評估工作程序如圖 1。當提出一種開發建議時，應首先將計畫活動的提案提交給主管部門，討論有無必要進行環境影響評估。如果沒有必要，即可著手進行開發；若經與環保局及有關部門協商，認為有必要編寫環境影響報告書時，即開始環境影響評估工作。做出環境影響報告書草案後，還要徵求各有關部門及州的意見，並召開公眾會議，徵求群眾意見，然後交給環保局審查評議，如無問題再交主管部門著手開發，如有問題，則需進一步提交環境質量委員會會審，吸收環保局及環境質量委員會的意見後，再作出環境影響評估報告書，經環保局及環境質量委員會審議批准後，才能著手開發。

### 2. 技術程序

環境影響評估的技術程序一般分下面幾個步驟：

- (1)初步分析開發項目對環境可能產生的利弊，並明確主要的影響因素。
- (2)掌握環境現狀並提出預測評估目的。
- (3)研究和確定環境保護的目標，即達到什麼樣的標準。
- (4)對環境影響進行預測，並以環保目標為量度進行分析與評估。
- (5)結合環境、經驗、社會因素，提出若干防治措施與對策(尤其是不可逆部分的防治)。
- (6)編寫環境影響報告書。

圖 2 是環境影響評估技術程序圖，它主要是掌握調查項目和影響現狀，提出適當的環境目標選用合適的模型和參數進行預測評估。如果這樣的評估得到批准，工作就可結束；如果預測及評估的結果各方面都有意見，可以再

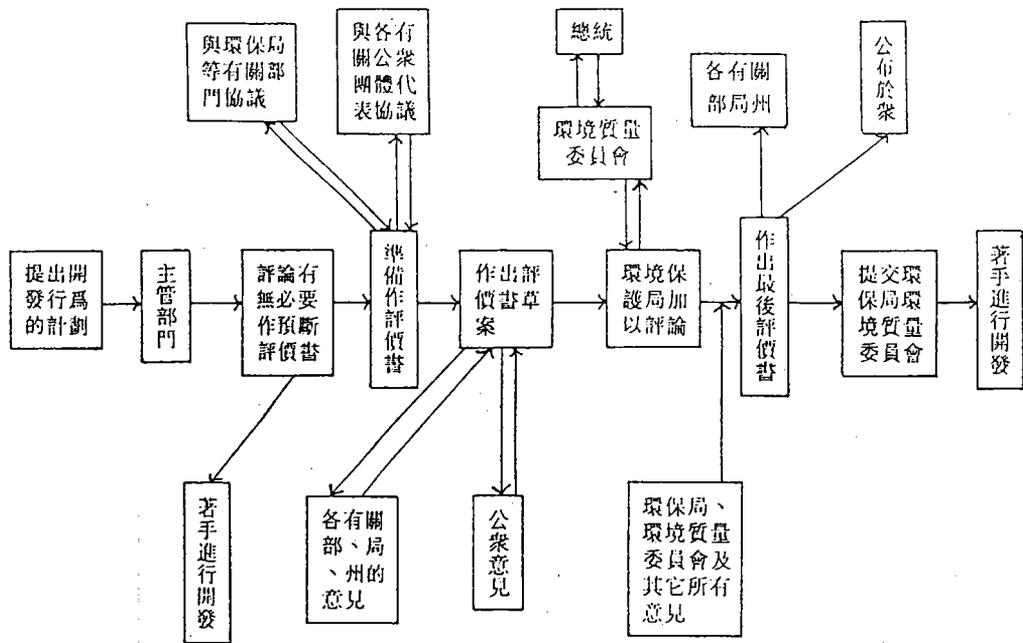


圖 1 環境影響評估工作程序

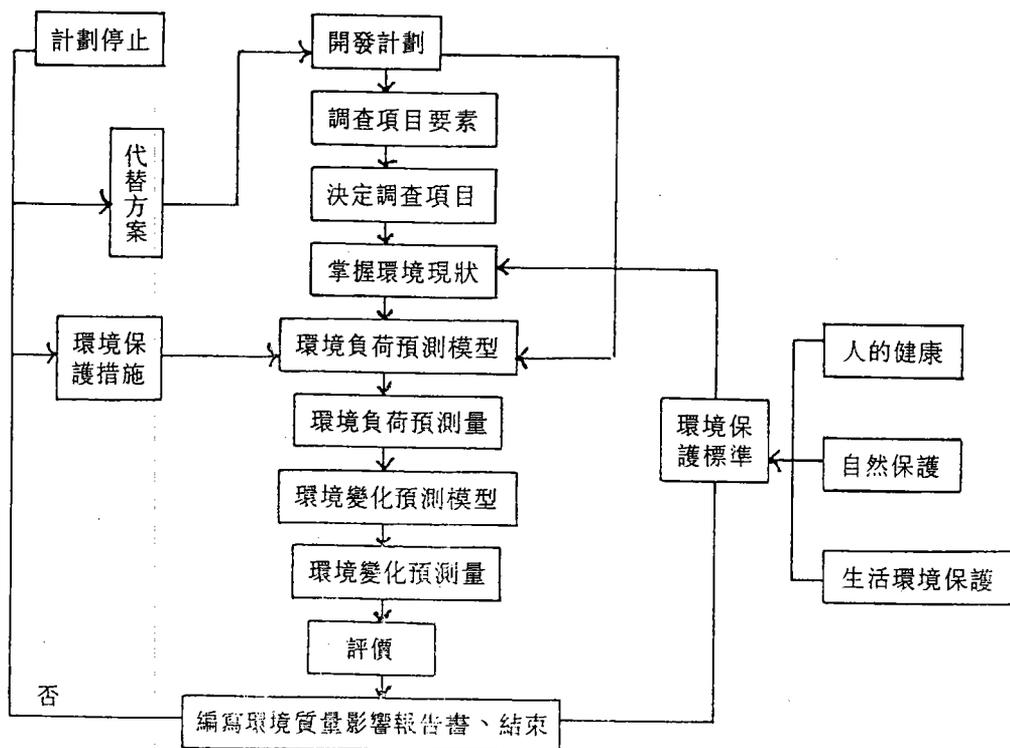
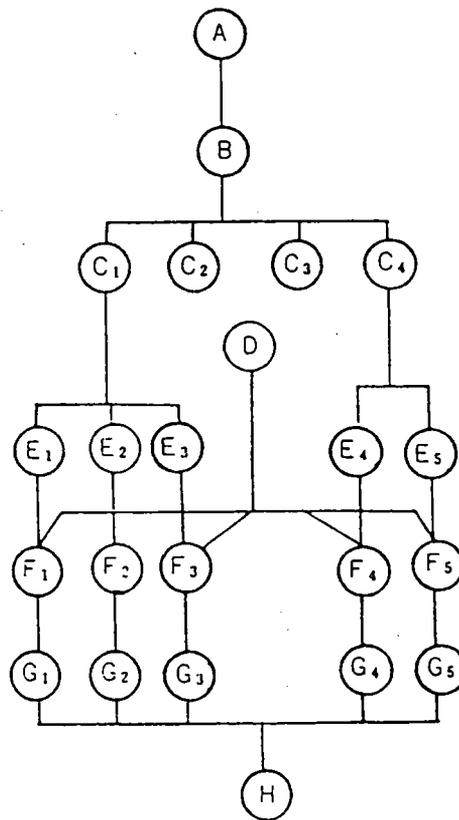


圖 2 環境影響評估技術程序

作代替方案，重新預測評估。如果這個評估得不到批准，則開發計畫就得停止。

圖 3 為另一種環境影響評估技術程序圖。



- |              |                   |
|--------------|-------------------|
| A.目標陳述       | E.供選擇的工程計劃        |
| B.完成目標的技術可能性 | F.確定影響、分析影響的數值重要性 |
| C.建議的活動和方案選擇 | G.影響評價            |
| D.開發前環境特性報告  | H.建議              |

圖 3 開發活動環境流程

## 七、環境影響評估的對象

環境影響評估的對象，一般是指對環境有明顯影響的開發項目。例如美國聯邦一級或州一級的環境影響評估對象，規定有聯邦項目、聯邦資助項目、州及市項目、須經特許認可之事業或項目等、立法和研究開發計畫。瑞典國家環境保護法指出：對環境有污染的活動以及法律上規定的 28 類項目的開發，都屬於環境影響評估的對象。法國自然保護法中規定：城市規劃(包括城市整頓規劃、土地利用規劃、綜合開發住宅區和特別環保區等)，及城市規劃以外的各種事業，均屬於環境影響評估對象。於地區的條例，則結合地區的特點，規定得更為詳細。表 1 中列出的日本名古屋市環境影響評估對象是個典型例子。

表 1 日本名古屋市的環境影響評估對象

序號	對象項目	條件
1	公路建設	新建、擴建 1 公里以上，一側能並排 4 輛以上汽車的公路。
2	鐵路建設	新建、擴建鐵路(包括鐵路、公路連接的主體交叉)。
3	新建電氣裝置	5 萬千瓦以上的發電裝置。
4	新建氣體設備	產生(或精製)能力為 50 萬立方米/月以上的氣體生產(或精製)設備。
5	處理場	新建下水道終站處理場。
6	新建廢棄物處理廠	一般廢棄物處理廠，處理垃圾 200 噸/月以上的焚燒廠，埋填面積 45 畝以上，埋填體積 15 萬立方米以上的最終處理廠。
7	新建住宅區	戶數 1000 戶以上。
8	商業區	占地 150 畝以上。
9	新建大規模建築物	總計面積 3 萬米 <sup>2</sup> 以上，高度 60 米以上。
10	新建工廠	用地面積 9000 米 <sup>2</sup> 以上或建築面積 3000 米 <sup>2</sup> 以上。
11	工業地區建設	面積 45 畝以上。
12	土地區域整頓	施行面積 750 畝以上。
13	公共水面填埋	填埋面積 150 畝以上。
14	開發行為	開發區域面積 150 畝以上。

國內行政院環保署訂有「開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準」，對各項開發行為應實施環境影響評估的情形及認定標準皆有詳細之規定，例如其中第八條載明：對於港灣開發有下列情形之一者，應實施環境影響評估：

1. 商港、輔助港、第一類漁港、第二類漁港或工業專用港興建工程。
2. 遊艇港興建或擴建工程，符合下列規定之一者：
  - (1) 位於國家公園。
  - (2) 位於野生動物保護區或野生動物重要棲息環境。
  - (3) 位於水庫集水區。
  - (4) 位於自來水水源水質水量保護區。
  - (5) 位於原住民保留地。
  - (6) 位於山坡地，申請開發面積一公頃以上者。
  - (7) 碼頭席位一百艘以上或同一場所各案開發累積席位達二百艘以上者。
3. 商港、輔助港、第一類漁港、第二類漁港或工業專用港擴建工程，符合下列規定之一者：
  - (1) 前款第一目或第二目規定。
  - (2) 增設碼頭或防波堤，其長度五百公尺以上者。
  - (3) 填海面積十公頃以上者。

#### 八、環境敏感區位及特定目的區位限制調查

開發單位對於開發基地需先查明開發行為是否位於環境敏感區位及特定目的區位，其限制調查表依序如下：

1. 是否位經「台灣沿海地區自然環境保護計畫」核定公告之「自然保護區」或「一般保護區」？
2. 是否位經河口、海岸瀉湖、紅樹林沼澤、草澤、沙丘、沙洲、珊瑚礁或其他濕地？

3. 是否位經自來水水源水質水量保護區？
4. 是否位經飲用水水源水質保護區或飲用水取水口一定距離？
5. 是否位經重要水庫集水區、保護帶或水源保護區？
6. 是否位經特定水土保持區？
7. 是否位經野生動物保護區或野生動物重要棲息環境？
8. 是否位經獵捕區、垂釣區？
9. 是否有保育類野生動物或珍貴稀有之植物、動物？
10. 是否位經古蹟所在地鄰近地區或古蹟保存區鄰接地、生態保育區或自然保留區？
11. 是否位經國家公園或風景特定區？
12. 是否有獨特珍貴之地理景觀？
13. 是否位經保安林地、國有林、國有林自然保護區或森林遊樂區？
14. 是否位經國營礦區或國家保留礦區？
15. 是否位經水產動植物繁殖保育區、漁業權區域？
16. 是否位經河川行水區、地盤下陷區、海水倒灌區、地下水管制區、洪水平原管制區或水道防護範圍？
17. 是否位經地質構造不穩定區(斷層、地震、地質災害區)或海岸侵蝕區？
18. 是否位經空氣污染三級防制區？
19. 是否位經第一、二類噪音管制區？
20. 是否位經水污染管制區？
21. 是否位經軍事管制區(含軍事飛航管制區)或要塞地帶或影響四周之軍事雷達、通訊、通信、放射電波等設施之運作？
22. 是否位經已劃設限制發展地區(不可開發區及條件發展區)？

23. 是否位經飛航管制區？
24. 是否位經山坡地或原住民保留地？
25. 開發基地面積是否百分之五十以上位於百分之四十坡度以上？
26. 是否位經森林區或林業用地？
27. 是否位經特定農業區或山坡地保育區(古蹟保存用地、生態保護用地、國土保安用地)？
28. 是否位經都市計畫之保護區？
29. 是否有其他環境敏感區或特定區？

### 九、環境影響評估範疇界定

開發單位擬訂之開發行為經審查認定須進行第二階段環境影響評估者，開發單位於評估範疇界定前，應依說明書審查結論填寫範疇界定指引表，並視需要列出不同替代方案之環境影響評估範疇，送主管機關召開會議討論確定評估範疇，此範疇界定表所包含之環境類別、項目及因子等列述如下：

#### 1. 物理及化學類

##### (1) 地形、地質及土壤

此項目所包含環境因子有地形、地質、特殊地形或地質、土壤及土壤污染、取棄土及取砂石、沖蝕及沉積、邊坡穩定、基地沉陷、地震及斷層、礦產資源等。

##### (2) 水文及水質

此項目所包含環境因子有海象、地面水、地下水、水文平衡、水質、排水、洪水、水權等。

##### (3) 氣象及空氣品質

此項目所包含環境因子有氣候、風、日照陰影、熱平衡、空氣品質等。

##### (4) 噪音

##### (5) 振動

- (6) 惡臭
- (7) 廢棄物
- (8) 電波干擾
- (9) 能源
- (10)核幅射
- (11)核廢料

## 2. 生態類

### (1) 陸域動物

包含種類及數量、種歧異度、棲息地及習性、通道及屏障等

### (2) 陸域植物

包含種類及數量、種歧異度、植生分佈、優勢群落

### (3) 水域動物

包含種類及數量、種歧異度、棲息地及習性、遷移及繁衍

### (4) 水域植物

包含種類及數量、種歧異度、植生分佈、優勢群落

### (5) 瀕臨絕種及受保護族群

包含動物、植物

### (6) 生態系統

包含優養作用、生物累積、食物鏈

## 3. 景觀及遊憩類

### (1) 景觀美質：包含原始、生態、文化及人為景觀

### (2) 遊憩：包含遊憩需求、資源、活動、設施、體驗、經濟效益、承載量及類別等

#### 4. 社會經濟類

##### (1) 土地使用

包含使用方式、鄰近土地使用型態、發展特性、住宅拆遷等

##### (2) 社會環境

包含人口及組成、公共設施、公共服務、公共衛生及安全、化學災害等

##### (3) 交通

包含管線設施、交通運輸、施工交通干擾、其他運輸工具等

##### (4) 經濟環境

包含就業、經濟活動、漁業資源、土地所有權、地價、生活水準等

##### (5) 社會關係

包含社會體系、安全危害、社會心理等

##### (6) 開放空間

##### (7) 阻隔

##### (8) 私密性及心理

#### 5. 文化類

##### (1) 教育性及科學性

包含建築、生態系、地質地形等

##### (2) 歷史性

包含建築物、結構體、宗教、寺廟、教堂、活動、事件等

##### (3) 文化性

包含民俗及文化

## 十、實例介紹

茲就國內濱南工業區開發計畫中有關工業專用港開發所完成之環境影響評估報告書(初稿)目錄內容舉例介紹如下：

1. 開發單位名稱及其營業所相關資料
2. 評估書綜合評估者及影響項目撰寫者之簽名
3. 開發行為之名稱及開發場所
  - 3.1 開發行為之名稱及開發場所摘要說明
  - 3.2 開發行為之名稱
  - 3.3 開發場所
4. 開發行為之目的及其內容
  - 4.1 開發行為之目的及其內容摘要說明
  - 4.2 開發行為之目的
  - 4.3 開發計畫內容
    - (1) 計畫港址
      - a. 計畫需求
      - b. 基本配置
      - c. 廢氣處理
      - d. 廢水處理
      - e. 固體廢棄物處理
      - f. 港區安全措施
    - (2) 建港工程
      - a. 防波堤工程

- b. 水域設施
- c. 碼頭工程
- d. 浚填工程
- e. 建港工程施工計畫
- f. 工程費

5. 開發行為可能影響之主要及次要範圍之各種相關計畫及環境現況

5.1 相關計畫

5.2 環境現況說明

(1) 物理及化學環境

- a. 海岸及特殊地形
- b. 地質、土壤及地震斷層
- c. 海水
- d. 地面水
- e. 地下水
- f. 水權
- g. 氣候
- h. 空氣品質
- i. 噪音
- j. 振動
- k. 臭氣
- l. 廢棄物

(2) 生態環境

- a. 陸域植物
- b. 陸域動物
- c. 海域植物
- d. 海域動物
- e. 瀕臨絕種及受保護族群
- f. 生態系統

(3) 景觀及遊憩環境

- a. 景觀美質
- b. 觀光遊憩

(4) 社會經濟環境

- a. 土地利用與地區發展
- b. 社會環境
- c. 交通運輸
- d. 經濟環境
- e. 社會關係

(5) 文化環境

- a. 教育性及科學性(生態系)
- b. 歷史性
- c. 文化性

6. 環境影響預測、分析及評定

6.1 物理及化學環境

(1) 海象

- a. 開發後流況影響分析
  - b. 瀉湖內外沿岸流況分析
  - c. 漂砂優勢方向及數量
- (2) 海岸地形及特殊地形
- a. 海岸地形變遷影響
  - b. 計畫區附近沙洲地形變化
- (3) 開發後瀉湖水文變化影響預測
- (4) 水質
- a. 溫排水對海水溫度之影響
  - b. 開發後瀉湖及排水道水理水質評估
  - c. 廢水排放對海水水質之影響
  - d. 水體涵容量分析
  - e. 溢油事件之影響評估
- (5) 地面水(排水、洪水)
- a. 防洪排水能力評估分析
  - b. 開發前後內陸漁塭區注排水之影響
- (6) 地下水
- a. 開發後地下水位及流向之影響
  - b. 開發後地下水位補注之影響
- (7) 取棄土
- a. 基礎工程開挖土方之處理方式
  - b. 海域抽砂之範圍及其影響

c. 運輸路線影響

(8) 土壤、基礎承載、地震及斷層

a. 港址土壤狀況

b. 土壤荷重分析

c. 基礎承載

d. 地震引致之土壤液化潛能

(9) 礦產資源

(10) 空氣品質

(11) 噪音

a. 施工機具、車輛之噪音影響

b. 營運機械設備、交通之噪音影響

(12) 振動

a. 施工機具、車輛之振動影響

b. 營運機械設備、交通之振動影響

(13) 廢棄物

a. 施工階段

b. 營運階段

6.2 生態環境

(1) 陸域植物

(2) 陸域動物

(3) 海域植物

a. 施工期間

b. 營運期間

(4) 海域動物

a. 施工期間

b. 營運期間

(5) 瀕臨絕種及受保護族群

a. 專用港開發對保育類動物(依農委會公告)之影響

b. 工業區開發對海洋哺乳類之影響

c. 專用港開發對紅樹林之影響

(6) 生態系統(食物鏈)

a. 潟湖生態

b. 魚貝類腫瘤切片及重金屬分析

6.3 景觀及遊憩環境

(1) 景觀美質

a. 施工階段

b. 營運階段

(2) 遊憩

6.4 社會經濟環境

(1) 土地使用

a. 土地利用與地區發展

b. 工業專用港開發規模之合理性

c. 工業區(含專用港)與鄰近地區之相容性

d. 開發後引進人口、產業對鄰近土地之衝擊

e. 長期不可逆之影響

(2) 社會環境

a. 人口結構

b. 公共設施

c. 港區安全之影響分析

(3) 交通運輸

a. 施工階段

b. 營運階段

(4) 經濟環境

a. 對當地就業之影響

b. 經濟與產業活動

c. 鄰近漁港進出及經濟活動

d. 港區開發對漁業經濟之影響

e. 漁業收入之損失及漁業補償方案

f. 睦鄰及回饋措施

(5) 社會關係

a. 人口引進與都市型態對社會關係之影響

b. 居民接受改變之意願及影響

c. 工業區對當地居民活動型態之改變

6.5 文化環境

(1) 工業區開發對生態環境之影響

(2) 工業區開發對地方信仰中心之影響

(3) 漁業、鹽業變遷分析

(4) 相關遺址分析

## 7. 減輕或避免不利環境影響之對策

### 7.1 物理及化學環境

(1) 海象

(2) 海岸地形變遷影響之減輕對策

a. 青山漁港改善措施

b. 港址附近沙洲之保護對策

(3) 開發後瀉湖水文變化影響之減輕對策

(4) 水質

a. 溫排水對海水溫度影響之減輕對策

b. 開發後瀉湖及排水道水理水質影響之減輕對策

c. 廢水排放對海水水質影響之減輕對策

d. 水體涵容量影響之減輕對策

e. 溢油事件影響之減輕對策

(5) 地面水(排水、洪水)

a. 防洪排水能力影響之減輕對策

b. 開發後對漁塭注排水影響之減輕對策

(6) 地下水

a. 開發後地下水位及流向影響之減輕對策

b. 開發後地下水補注影響之減輕對策

(7) 取棄土

a. 海域抽沙影響之減輕對策

b. 運輸路線影響之減輕對策

(8) 土壤基礎承載力

(9) 空氣品質

a. 施工階段

b. 營運階段

(10) 噪音

a. 施工階段

b. 營運階段

(11) 振動

a. 施工階段

b. 營運階段

(12) 廢棄物

a. 施工階段

b. 營運階段

## 7.2 生態環境

(1) 陸域植物

(2) 陸域動物

(3) 海域植物

(4) 海域動物

(5) 生態系統(食物鏈)

## 7.3 景觀及遊憩環境

(1) 景觀美質

(2) 遊憩

#### 7.4 社會經濟環境

(1) 社會環境

(2) 經濟環境

a. 鄰近漁港進出及經濟活動

b. 工業區專用港開發對漁業經濟之影響

(3) 港區安全性影響減輕對策

(4) 交通運輸

#### 8. 替代方案

8.1 零方案

8.2 濱南工業區專用港

8.3 棧橋碼頭

8.4 以高雄港為轉運站

8.5 以台中港為轉運站

8.6 以中心漁港為轉運站

8.7 綜合評判及研選

#### 9. 綜合環境管理計畫

9.1 緊急應變計畫

(1) 港區工安及緊急應變計畫

(2) 溢油緊急應變計畫

9.2 環境管理計畫

### 9.3 環境監測計畫

- (1) 海象及海岸變遷
- (2) 氣象及空氣品質
- (3) 水質(河川、地下水、外海、潟湖)
- (4) 噪音及振動
- (5) 陸域生態
- (6) 海域生態
- (7) 交通量

### 10. 對有關機關意見之處理情形

- 10.1 環保署環境影響說明書審查結論
- 10.2 環保署環境影響評估範疇界定會議結論
- 10.3 經濟部水資源局用水計畫審查結論
- 10.4 台電公司電力供應覆函說明
- 10.5 台南縣政府有關軍事管制區覆函說明

### 11. 對當地居民意見之處理情形

- 11.1 公眾閱覽及公開說明會
  - (1) 程序說明
  - (2) 公開說明會民眾意見處理情形
- 11.2 民眾意見調查分析
  - (1) 前言
  - (2) 調查內容
  - (3) 樣本結構

(4) 調查結果

(5) 開發單位努力目標

11.3 與當地居民、漁民協調會議記錄

12. 結論及建議

13. 執行環境保護工作所需經費

13.1 廢水處理費用

13.2 固體廢棄物處理設備

13.3 空氣污染防治設備費用

13.4 環境監測計畫費用

14. 預防及減輕開發行為對環境不良影響對策摘要表

# 影 像 雷 達

陳鋨山<sup>1</sup> 王志添<sup>2</sup> 陳繼藩<sup>3</sup>

## 一、同調攝像

雷達探測之所以能發展，是基於以下四個科學方面的原理，1)天線能在精確的方向上發射電磁脈衝，2)可以測出由目標物所散射之衰減回波，3)可以測得發射與接收波之時間差，由此得到與目標物之距離，4)可以以一固定方向之波束掃描，得到一大面積之目標物回波。至於第五個原理則是，對於隱藏著訊號資訊的相位作頻譜分析，能對以上四個物理原則之應用有更大的幫助，合成孔徑雷達(SAR)也就因此而開始發展。

空載合成孔徑雷達影像之解析度約為 3 arc seconds，而衛星合成孔徑雷達影像之解析度約為 0.01 arc second。在訊號中由於目標物與雷達有相對運動而產生之都卜勒平移，可由尖峰功率來得知，在此之前要先知道其相對位置及雷達對目標物的速度，並將回波訊號對一個週期時間作積分，此週期就是脈波與下一個脈波之間隔(interpulse period, IPP)。

### 1.1 天線訊號之特性

由電磁波之基本理論，可導出雷達天線傳輸及接收的方向圖(directional pattern)，以通過天線之電流密度之傅立葉轉換表示之。將方形天線中之一均勻電流密度，轉換成 sinc 函數再開根號，可得

---

\* 國立中央大學太空及遙測研究中心教授

到一典型的 lobe 方向圖，如圖 1 所示。 $\text{sinc}$  平方之大小就是偏離中間波束的角度，由  $D/\lambda$  的大小決定，其中  $\lambda$  為訊號之波長， $D$  為天線之長度。給定一功率求其角度時，會發現一個與  $D/\lambda$  呈反比之值，若選取半功率點(3dB)且以徑度來表示波束寬角度  $\gamma$  時，可得到一個近似 0.886 的比例常數。這些分析與點光源照射在矩形繞射格子所產生的強度圖幾乎一樣，事實上，光學上的類比在合成孔徑雷達處理過程中是十分重要的。

然而對 ERS-1 而言，是將相位的位移視為訊號，也因此使得方向圖上之主束變寬，且斜距(Range)方向上的波束寬也相對地增加，此目的為了使 100 公里之斜距寬度(range swath)上分佈著均勻的功率。由於傳送與接收方向圖是對稱的，因此當兩者用同一天線時，在高功率之輸出脈波與低功率的回波之間可做個雙重切換柵(doplex switch gating)。

## 1.2 掃描幾何

載著雷達之飛機或衛星，以穩定的速度沿著既定軌道運行，隨著載具向前移動，雷達亦沿軌跡方向(azimuth)不斷掃描獲取資訊，雷達天線的波束與載具前進方向垂直，波束並向下側視投射到地面景物。

波束向下投射與地面景物成一橢圓形，此橢圓長軸在斜距方向上，打出之脈波會隨斜距之增加而收到地面點的回波訊號，因此在斜距方向上可提供即時的訊號數位化。側視合成孔徑雷達之幾何示意圖如圖 2 所示，俯視合成孔徑雷達與側視合成孔徑雷達不同的是，俯視合成孔徑雷達在同一傳輸時間會對應兩個回波，分別是在俯視

軌跡的左邊及右邊。

## 二、SAR 訊號處理

### 2.1 斜距(range)壓縮處理

在斜距方向一個真實的孔徑雷達發出一短且功率高的方形脈波，接著取出回波訊號，對一時間間隔作平均，每個平均值都是地面點之背面散射強度，而斜距也就是天線至目標物之間的距離對應訊號往返所需時間之半。斜距解析力(range resolution)與脈波波長呈正比，也因此要有較高的之解析力就必須有較短之脈波波長，當然為了使回波訊號夠強，就必須發出高能量之脈波。因此對 SAR 系統而言，就需要極高的功率。

不過，幸運的是訊號處理過程允許使用強度低但較長之脈波，使之仍然可發出足夠之能量來得到回波，也因此不需要很高之功率。雖然有些鄰近點的回波在時間上是重複的，但是在訊號處理上，可藉由脈波之形狀將重疊之訊號分開。事實上在發出脈波時，加入一匹配濾波器可分出訊號中可辨別的組成。因此它們全被壓縮在一個很窄的波形尖峰上。

### 2.2 匹配濾波器

在以下的討論中， $f$ 、 $g$ 、 $s$  皆為複數且都是時間之函數。 $f$  的共軛複數是  $f^*$ ，而其絕對值以  $|f|$  表之。其中 “:=” “這個符號代表“定義而來之等號”（也就是此右邊之表示式定義出此等號之左邊）。

有很多方法可得到匹配濾波器(matched filter)，最簡單的方法就是採用“相關性”的概念。一個訊號的“自相關”(auto-correlation)可由時間延遲的函數來定義之，如下式

$$acf_f = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)f(\tau+t)dt \quad (1)$$

其中 $\tau$ 為時間延遲， $f$ 為訊號。如果不考慮損耗，則代表平均值之訊號會在零上下變動，當 $\tau=0$ 時，此積分則代表能量，其值為正。

若訊號形狀隨時間改變，經時間延遲後，訊號形狀和原先的不同。當時間延遲越長，自相關函數就越低，亦表示訊號越不相關。在任何時間延遲的情況下，由 Schwartz 不等式可知  $|acf_f| \leq E_f$ 。

要設計一個可辨別的訊號就要選擇一個很窄的自相關函數，當回波訊號與發送的訊號有相關時，也就是經過時間延遲後可得到一個較窄的脈波，以上的處理過程也就是一般所稱的數位化 SAR 處理器。而這個處理過程，並非有直接地相關性，而是一些數學式的處理。

若有一個訊號脈波頻率隨時間而增加，這就是我們一般所稱的線性調頻(Linear Frequency Modulation, FM)脈波，亦稱為鳥鳴波(chirp)。一個無限的鳥鳴波如同  $\sin t^2$ ，除了在時間延遲為零之外，自相關函數皆為零，而一個有限的鳥鳴波，載波頻率為  $f_0$ ，持續時間為  $T$ ，頻率變化率為  $a$ ，可表示如下

$$f(t) = \exp[j2\pi(f_0 t + 0.5at^2)], \quad 0 < t < T \quad (2)$$

其自相關函數十分複雜，算式如下

$$acf_f(\tau) = \Phi(\tau) \cdot (T - |\tau|) \cdot \frac{\sin(\pi a \tau (T - |\tau|))}{\pi a \tau (T - |\tau|)} \quad (3)$$

在此 $\Phi$ 是個調和(harmonic)載波，由一個三角波與一個 $\sin c$ 平方的波組成，在圖 3 的波形中十分清楚地看出鳥鳴波被壓縮成一個很窄的波形尖峰。在 $\tau=1/aT$ 附近會出現第一個零值，因此主波束寬是 $2/aT$ ，而半功率寬約為 $1/aT$ 。

鳥鳴波的頻率是(2)式中相位之一次微分，也就是 $2\pi(f_0+at)$ 所以在持續時間為 $T$ 之脈波中很明顯地可知頻寬為 $aT$ 。脈波壓縮率 $T$ 為除以 $1/aT$ ，即是 $aT^2$ ，這也就是鳥鳴波訊號中持續時間與頻寬的乘積(Time-Bandwidth product)，因此若希望得到高解析度就要提高此訊號(Time-bandwidth product)，由於此訊號隱藏著許多訊息，因此稱之為一高性能訊號(sophisticated signal)。

時間頻寬乘積越高也就表示頻率變化率( $a$ )越大，至於 $T$ 之決定有許多考量，特別是考慮到接收波之需要，也就是增加影像之寬度(swath)。由於天線無法同時接收與發送訊號，所以脈波傳輸時間相對於 IPP 要很小。以下為 ERS-1 SAR 的參數， $T=37.1\mu\text{sec}$ ，頻寬 $a=15.5\text{MHz}$ ，所以 $aT^2=575$ ，理論上 $BT < 1$ ，而 ERS-1 則是 $BT < 2$ 。

濾波器在數學上可以摺積運算表示之，對於一個輸入之 $f$ 函數及脈衝響應函數 $h$ ，我們可得到

$$g(\tau) = f * h := \int_{-\infty}^{\infty} f(t)h(\tau - t)dt \quad (4)$$

此處“\*”表示摺積運算。為了使摺積看起來像自相關函數，設  $h(t) = f^*(-t)$ ，則

$$g(\tau) = acf_f(\tau) \quad (5)$$

在第二個等號設  $t' = t - \tau$ ，因此自相關函數與摺積相同。本質上，匹配濾波器就如同摺積的反函數，對輸入訊號求出近似解。因此我們要解中  $\delta = f^*g$  的  $\delta$ ，其中  $\delta$  為 delta 函數。delta 函數的優點是篩選出在某個特定時間的訊號

$$f(t) = f * \delta \quad (6)$$

這也就是我將式(4)中的  $h$  稱作脈衝響應函數的原因。

若濾波器將 delta 脈衝當作輸入，則輸出(response)則為  $h$ 。

現在令傳送脈衝是  $f(t)$ ，而回波訊號則每隔  $\Delta t$  取樣一次，且十分均勻地在空間上作  $N+1$  次的取樣，如此一來，天線所觀測的回波為

$$s(t) = \text{Sum}[\alpha_i f(i\Delta t)] \quad (7)$$

其中  $\alpha_i$  代表在距離方向散射的程度。當然此斜距(range)與取樣的時間有關。在一般  $\Delta t < T$  的情況下，要將以上各項疊加起來，而現在將  $s$  與  $h$  作摺積如式(5)，再用  $\delta$  來近似，則輸出為

$$\begin{aligned} g &:= h * s = \sum_{i=0}^N \alpha_i h * f(t - i\Delta t) \\ &= \sum_{i=0}^N \alpha_i acf_f(t - i\Delta t) \\ &\approx \sum_{i=0}^N \alpha_i \delta(t - i\Delta t) \end{aligned} \quad (8)$$

再利用非連續的篩選特性，其中  $g$  為非連續的時間數列，其值為  $\alpha_i$ ， $g_i = g(i\Delta t) = \alpha_i$ ， $i=0,1,\dots,N$  (9)

然而這只是個近似的形式來表示一行影像(image line)。

## 2.3 參考函數及取視窗 (reference function and windowing)

為了能有效地計算出  $g$ ，所以經由傅立葉轉換，將其轉至頻率域，此時摺積則變為乘法。

$$F\{h * f\} = F\{h\}F\{f\} \quad (10)$$

轉換過後之脈衝響應函數  $F\{h\}$ ，也就是所稱的頻率響應函數，計算如下。

$$F\{f^*(-t)\} = (F\{f\})^* \quad (11)$$

在 SAR 之處理過程中，這就是所謂的參考函數。因此濾波器的流程為，先經過傅立葉轉換，再乘上參考函數，最後經逆傅立葉轉換回來。

經鳥鳴匹配濾波器後，一個理想的點源回波之輸出亦如同圖 3 所示，很明顯地，一個系統解析能力與主瓣寬窄之程度、主瓣振幅比及主、旁瓣距離有關。對 ERS-1 而言，斜距方向，脈波寬度約為 0.13  $\mu\text{sec}$ ，與第一旁瓣距為 0.10  $\mu\text{sec}$ ，而其相對振幅為 0.21，至於斜距方向取樣率為 18-96MHz，取樣間隔為 0.053  $\mu\text{sec}$ ，也就是大約等於主、旁瓣距之一半。這告訴我們，成功地壓縮脈衝會使旁瓣

有重疊，而且一個像元與鄰近像元之間影像強度會有相當程度的模稜(ambiguity)。

以下舉例一個模稜函數(ambiguity function)，其是將訊號波形之自相關做個歸納，且藉由目標物解析能力來辨識脈波壓縮處理之成功與否。

為了減小旁瓣的模稜，對回波訊號加權是很有效的方法。當然也可在頻率域上完成，而且還可以更方便將之併入參考函數。在減小旁瓣時，要將主瓣寬度最小化，這個動作也就決定了加權函數，經由一些近似法可得到一個 window function， $W(f)=\alpha + \beta \cos(2\pi f/B)$ ，其中  $B$  為頻寬，且  $\alpha+\beta=1$ ，最常使用的是 Hamming windows，其  $\alpha=0.54$ 。

## 2.4 方位壓縮處理

真實的孔徑雷達要藉由較小的頻寬來得到方位解析度，此時需要較長的天線，因為頻寬與天線大小呈反比而與波長呈正比。ERS-1 的頻寬約為  $3^\circ$ ，雖然很小，但是在地表的足跡(footprint)約為 5 km。脈波重複頻率 (PRF) 為 1680Hz 時，介於 2 個脈波之間之波來足跡只有 4m。然而雖然在方位資訊的取樣點有很高的解析度，但同一目標物的回波訊號，卻分佈在許多取樣點上。所以在鄰近的目標誤會有重疊之現象。因此訊號的處理就與斜距方向相同，將之積分成為一各壓縮脈波。

## 2.5 都卜勒變化及脈波壓縮

在這要處理的問題是將回波訊號依不同的位置而分辨出來，也

就是找出波束經過目標物所產生之變化，而這段時間稱作同調積分時間(coherent integration time)。

依各訊號由移動的天線接收，頻率會改變，這就是所謂的都卜勒平移。頻率平移  $f$  與發出與接收點之相對位置有關

$$f_D = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR}{dt} \quad (12)$$

其中  $\lambda$  為傳送波之波長。而  $R$  是目標至天線之距離。在圖 4 中， $R_0$  是衛星距目標物最短距離，此時  $t = 0$ ，且  $R_0$  與軌跡方向垂直。若衛星之軌道速度為  $V$ ，忽略地球自轉，由 Pythagorean 公式可知

$$R^2 = R_0^2 + (Vt)^2 \quad (13)$$

將上式對  $t$  微分得

$$dR/dt = V^2 t / R \quad (14)$$

由於軌道路徑不是直線，因此以上是個近似法，而小角度之誤差近似約為  $(5 \text{ km footprint}) / (7150 \text{ km orbit radius}) < 0.0007 \text{ radian}$ 。

因此為求得更精確，訊號之都卜勒頻率變化如下

$$f = f_0 + f_D = f_0 - \frac{2}{\lambda} \frac{V^2}{R} t \quad (15)$$

就如同線性 FM。由於足跡對  $R$  來說十分小， $R$  相對而言為常數，所以在鳥鳴脈波中，回波訊號會在同一個地方被取出來。因此在斜距固定的情形下，沿著軌跡方向取樣，訊號的相位會相同，由於  $V^2/R$  與時間無關，軌跡方向之訊號變化像一鳥鳴波，也因此斜距方向所採用的脈波壓縮技術也可用於此。至於 ERS-1，其足跡為 5km。

而最小距離  $R_0$  為 845 公里，我們可得

$$1 \leq \frac{R}{R_0} \leq \sqrt{1 + \left(\frac{5}{R_0}\right)^2} = 1.000018 \quad (16)$$

在此我們有做個假設，令(12)式中波長為常數，不過，事實上頻寬為 15.5MHz 之鳥鳴波的頻率是呈線性變化的。而實際上，在方位 SAR 處理過程中，利用鳥鳴匹配濾波器可以得到很好的結果。

### 三、準確度及幾何形變與校正

#### 3.1 解析度

在討論訊號處理方法中，我們知道，要得知散射強度與影像中某個特定點之關係必須藉由訊號處理。因此，一張影像之空間解析度的好壞；可由精確度得知，也可由此評斷其訊號處理之優劣。

有許多因素造成訊號的誤差，不過有一點很重要的是，斜距並非直接影響解析度之因素，由理論上也可知 SAR 的辨別能力與其高度無關。而由前一章可得知

$$\gamma = \lambda/L \quad (17)$$

因此在斜距中  $R$  之方向上之足跡  $L_{eff}$  為

$$L_{eff} = \gamma R = \lambda R / L \quad (18)$$

而先前研究之重大突破則是發現  $L_{eff}$  的長度可代表移動雷達的有效孔徑。當目標物還在波束中，天線移動的距離就是有效長度，也就是在這個時間內發出的脈波對此目標物的訊息皆有貢獻。若有效

長度越長，則得到的資訊就越多。為了有效得知整個過程中相位之平移，將(17)式中之長度乘以兩倍，可得有效頻寬

$$\gamma_{eff} = \lambda / 2L_{eff} \quad (19)$$

接下來就可計算出方位解析度。

$$\rho_z = L/2 \quad (20)$$

以上可用於其他應用。從地球上之 Arecibo 雷達(波長為 70cm)觀測金星，利用類似 SAR 之 delay-都卜勒技術。對脈波中相位做訊號處理可辨別出行進之時間延遲及由地球、金星間相對運動造成之都卜勒平移，對兩個半小時的時間做積分，在斜距為 40 萬公里的情況下，可得到半公里之解析度，此時角度解析度約為  $5 \times 10^{-3}$  arc seconds。

在 1.1 節中，我們得知 BT 對影像中目標物辨別能力之影響。對方位處理而言，訊號持續時間就是同調積分時間。等於  $R\lambda/LV$ ，而此時間乘上都卜勒頻變率  $f_R$  就等於頻寬，再由(15)式就可得  $BT = 2\lambda R/L^2$ 。

我們當然希望由很曉得天線就可得到很好的解析度，但是發現在處理的過程中卻和天線大小息息相關。而且在得到適當的影像大小及避免模稜(ambiguities)時，也發現寬度(swath width)、脈波長度、天線大小及 PRF 皆相互限制。

### 3.2 處理過程之誤差

為了正確地校正回波訊號，需要十分準確的時間，此時就要靠當地穩定的震盪器(STALO)，其可到 0.5 微秒的精確度而相位值可維

持在  $\pi/4$  以內。

在前面章節中已經介紹了許多進似及簡化的假設，也因此訊號處理的過程就更需要作校正了。做重新取樣(resampling)的動作是為了得到地面等間隔之空間取樣。當取樣頻率約為 18.96MHz 時，斜距上之空間間隔約為 7.9m，這也就表示地面之空間間隔約為 18~24m，而在內插重新取樣後，一個像元的大小約為 12.5m。

### 3.3 相對運動及都卜勒計算

我們知道由載波頻率及鳥鳴率可算出參考函數。對斜距處理而言，這些參數可由發出訊號之特性得知；然而對方位處理而言，則須由( $f_D$  及  $f_R$ )來決定，也就是所謂的都卜勒史跡(Doppler history)。 $f_D$  是波束中心經過目標物時的頻率，其與衛星與目標物之相對速度有關，若我們有精確的軌道資料及地球運轉資料，則可以準確的  $f_D$  及  $f_R$  估計出這兩個參數，不過相對速度受衛星位置而影響，而且偏角(yaw)、傾角(roll)及仰角(pitch)並不易精確的估計出來。

### 3.4 浮訊鎖定(clutterlock)及自動聚焦(autofocus)

先將由影像資料本身得到的參數，當做初始猜測值，再去評斷其影像品質，最後估算出最佳影像品質。而都卜勒中心頻率也就由方位頻譜得到，這就是所謂的浮訊鎖定，其中零點所在位置的頻率就是  $f_D$ 。

在(15)式中可看出，頻率隨時間呈線性變化，因此將同調積時間間分呈連續的間隔並計算每個間隔中之回波能量，就可得到頻譜。

算出都卜勒中心頻率後，將之微分就可得知都卜勒頻變率，不過，若相對速度之資料來源不可靠時，還需要由資料來求得以上參數。此時就需要用到自動聚焦這個技術了，由於錯誤的都卜勒頻變率會使不同觀點(looks)影像在回波處理的技術中產生錯誤，因此影像會顯得模糊，就像攝影時未調好焦距一般。此時將不同觀點影像進行後方交叉相關運算，用來修正 Doppler Rate，在重複前述步驟，就可估算出最佳之 Doppler Rate。

在實際處理上，可利用浮訊鎖定以得到  $f_D$ ，再用第四章所描述的方位，算出目標物的位置，由以上就可將偵測器與目標物之相對速度計算出來，再經二次微分就得到 Doppler Rate

$$f_R = (-2/\lambda)(d^2R/dt^2) \quad (21)$$

### 3.5 模稜(ambiguity)

由於 SAR 是處理非連續訊號，因此都卜勒頻譜的寬度受限於取樣率。對於方位處理而言，方位位置與都卜勒頻率有關，而天線圖(如圖 1)的旁瓣測得的是足跡外目標物之回波能量，我們認為這些能量相對於主瓣而言會較低，可是在某些情況下卻有著很高的能量，甚至取代了主瓣中較弱的回波訊號。

### 3.6 斜距遷移(Range Migration)

由(16)式中可看出在方位積分時間內斜距的變化很小，不過卻足夠對目標物移動一個像元以上，其中  $R - R_0$  最大值約為 15m，因此最大位移量約為兩個像元，這就是所謂的斜距彎曲(range curvature)效應。

在斜距上有較大的平移量是由於地球自轉，而在方位上我們做較簡單的分析，假設衛星與目標物之相對運動只在衛星軌跡方向，這是由於衛星的傾斜角約為 98.5 度，其軌道有一半是由南向北觀測 (ascending)，另一半則是由北向南(descending)，地球是向東旋轉，而大小為  $V_e = \omega_e R_e \cos \zeta$ ，其中  $\omega_e = 7.229 \times 10^{-5} \text{ rad/sec}$  為恆星角速度， $R_e$  為地球半徑，由緯度  $\zeta$  來決定。對 ERS-1 而言，最北為 84.58 度，而  $V_e = 0.0434 \text{ km/sec}$ ；若在赤道， $V_e = 0.46 \text{ km/sec}$ 。

地球旋轉增加了 SAR 與目標物之相對運動，而相對速度所造成的平移會使得都卜勒中心頻率改變，這些在斜距方向上的平移稱之斜距行走(Range walk)效應。

以上斜距行走及斜距彎曲效應之貢獻稱之為斜距遷移效應。用於彌補以上效應之處理方法，則是沿著平面上彎曲的軌道路徑重新取樣。這些路徑則是由決定 SAR 與目標物相對運動之幾何參數計算出來。

### 3.7 各種幾何上的誤差

若將衛星高度視為固定是錯誤的，由於地球面與軌道面之中心不同，且地球在軌道與極區之半徑差了 21 公里，而地表之地形起伏可相差數公里，至於衛星高度也可相差約 100 公尺，這使得影像的行與列不成直角，可造成約 0.1%的誤差。ERS-1 的  $e = 1.165 \times 10^{-3}$ ，也就是說經過半個週期，速度變化不會超過 0.23%，而在這期間約有 200 個影像，所以可忽略之。

由於地球自轉，方位之像元間隔會隨斜距而改變，且東西方向

之速度隨緯度而增加。在接近極區最遭的情況下，誤差仍小於 0.1%。

### 3.8 衰減及雜訊

#### (1) 雷達方程式

有許多因素造成影響 SAR 的回波功率，例如發出波之功率、天線增益、波長、雜訊等...。因此有人提出信雜比 (SNR)。

$$SNR = A(P\sigma^0\rho_r/R^3\lambda V) \quad (22)$$

A 包括了天線幾何及接收器之熱雜訊這兩個因素，對 SAR 而言，A 是常數。而 P 為傳輸之平均功率， $\lambda$  為波長，R 為斜距，V 為衛星速度， $\rho_r$  為地面斜距方像解析度， $\sigma^0$  為背面散射係數。

#### (2) 斑駁及多觀點處理

對遙測影像雷達而言，像元大小必定比波長大，也就是一個像元中含有很多散射點。由於隨機過程，造成回波訊號的擾動，使得同一目標物的回波經處理後有不同調(incoherent)現象存在，此一現象將造成影像的斑駁效應。由(20)式，可知 ERS-1 之足跡(foot print)為

$$\frac{\lambda}{L} R = \frac{\lambda R}{2\rho_z} = 1.9 km \quad (23)$$

統計上  $\sigma^0$  的計算可藉由降低空間解析力做平均來減少斑駁。或者也可在成像後以影像處理方法做。若考慮計算上的效率，則使用多觀點平均法來減低斑駁效應較好。

### (3)熱雜訊(Thermal Noise)

在所有的電子系統都會有這種背景雜訊，會使影像強度產生偏差，可藉由測量與資料訊號之雜訊功率將其移除，但是仍會降低信雜比。

### (4)輻射校正

由雷達方程式可知訊號強度和斜距有很大的關係，而其他影響訊號之因素也與斜距、入射角或天線增益圖有關，此外，接收器之雜訊及其他系統之增益(gains)及損失(losses)都要考慮進來。內部校正是一些工程上的工作，而外部校正是觀測已知回波特性之地面目標物，在衛星經過之處架上三角反射器也就是為了這個目的。校正後之結果為一函數，其為斜距之函數，用來校正像元之強度，此函數記錄在影像檔案之檔頭中。

## 四、幾何校正及地圖座標套疊

### 4.1 地理像元位置

SAR 影像的影像產品做過一次幾何校正，可視為一張有高解析度之地圖。不過這與大地座標(經度、緯度)的解釋不同，縱使衛星的位置及速度有很高的準確度，但是其姿態卻無法很正確的得知。若衛星指向有一點點誤差，卻可能造成在地表很大的位移。已 ERS-1 而言，偏角(yaw)0.1 度以內的誤差卻可造成地面位置一公里的誤差。

## 4.2 位置方程式

SAR 是主動式雷達，對於至目標物的斜距及回波之都卜勒史跡，提供了很準確地訊息，因為這些與準確的衛星與地表座標有關。

參考圖 5，考慮一個以地心為圓心之卡氏座標系統，x 軸指向春分點，xy 平面就是赤道面，而 z 軸指向北，由右手定則可將之定義出來。此座標系統稱之 GEI(geocentric equatorial inertial)，而地球自轉軸之小振動會造成春分點的小小的移動(相對於恆星)，不過對我們的時間尺度而言，可將之視為固定的。

在此參考座標中地球自轉一個恆星日之週期為 23.93447 小時，角速度為  $(0,0,\omega_e)^T$ ，其中  $\omega_e=7.2292115\times 10^{-5}$  rad/sec。在地球上一個固定點(目標物)之座標為  $(x_i, y_i, z_i)^T$ ，而  $x_i, y_i, z_i$  要滿足下式

$$(x_i^2+y_i^2)/(R_e+h)^2+z_i^2/R_p^2=1 \quad (24)$$

$h=h(x_e, y_e, z_e)$  為當地之高度，而  $R_p=(1-f)(R_e+h)$ ，其中  $R_e=6378.138$  公里， $f=1/298.255$ 。若考慮到地形校正，會發現地表起伏很難定義的。也因此最好的方法就是假設一個固定影像高度  $h$ 。後來角對當地變化做校正。至於地形函數，已經有詳細的資料，若以非連續的形式表示則為數值地形模型(DEM)。

目標物也隨地球而轉動，其速度為

$$\mathbf{V}_T = \overline{\omega_e} \times \mathbf{R}_T \quad (25)$$

而由影像檔案之檔頭可得知衛星之位置與速度，因此在第  $i$  列的像元至感測器之向量為

$$R_{ij} = R_s(t_{ij}) - R_T \quad (26)$$

斜距  $R$  為  $(x, y, z)$  的函數

$$R = R(x_T, y_T, z_T) = |R_{ij}| \quad (27)$$

也就是

$$|R_{ij}|^2 = R_{ij}^2 \quad (28)$$

令  $R_{ij} = (x, y, z)^T$ ，其中  $x = x_s - x_T$ 、 $y = y_s - y_T$ 、 $z = z_s - z_T$  則

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (29)$$

將之對  $t$  微分

$$\dot{R} = dR/dt \quad (30)$$

由於  $(x, y, z)^T = R_s - R_T$ ，再由 2.1 節中的(12)式可得

$$f_D = (-2/\lambda R) (R_s - R_T) \cdot (V_s - V_T) \quad (31)$$

因此得知斜距  $R_{ij}$  後，SAR 處理器就可將某一像元之  $f_D$  求出。

### 4.3 Geocoding 處理法

geocoding 最終的目的就是轉到地面位置，也就是將資料套入 UTM 或立體像對。先用位置方程式(location equation)算出每個像元的 GEI 座標，在轉換至地理座標，就可繪製成影像，可表示如下：

$$(i, j) - (R, f_D) - (x, y, z) \quad (32)$$

$$(x, y, z) - (R, lat, long) \quad (33)$$

$$(lat, long)-(X, Y)-(p, q) \quad (34)$$

其中  $ij$  為像元位置， $R$  及  $f_D$  為斜距及都卜勒中心頻率， $(x, y, z)$  為 GEI 座標， $R_e$ ， $lat$ ， $long$  為當地地球半徑及地理座標， $X, Y$  是東西及南北距離(公尺)， $p, q$  是 geocoded 影像之像元位置。然而求解位置及轉換方程式，非常的耗費計算時間。若影像有輕微的扭曲，在 geocoding 過程中使用 2 個簡單的 2 維轉換法-幾何修正及幾何旋轉，先選擇一個座標系統，得知其感測器及地表的關係，接著對於 2 個座標系統做雙線性轉換，得到幾何修正之影像，最後是旋轉的轉換，將一般座標投影於地圖座標上，在此令  $r$  為地面斜距方向之距離，而  $S$  為地面上軌道方向之距離，其轉換如下

$$(R, f_D)-(r, s) \quad (35)$$

$$(r, s)-(X, Y) \quad (36)$$

(36)式是對影像做旋轉，使  $y$  軸正向朝北，此時會產生一個旋轉之  $\beta$  角，而  $\beta$  的求法是在(32)~(34)式中取 2 個斜距相同之點  $(i_1, j_1)$ ， $(i_2, j_2)$ ，而他們有不同之  $(x, y)$  座標， $\beta = \arctan(\Delta Y / \Delta X)$ 。

現在我們可由(32)(33)(34)(36)式得知  $(i, j)$  與  $(r, s)$  之轉換，先將輸入影像之四個角落的像元轉換到  $(r, s)$ ，再將影像平均地分成許多方形小區域(sub-blocks)，約  $50 \times 50$  像元，再次將各小區域之角落像元轉至  $(r, s)$ ，重複以上步驟直到處理完整個影像。

結合雙線性內插及旋轉分析式最有效的轉換法，再將結果轉為三個一維之重新取樣步驟。

#### 4.4 地形造成的變形

由於影像雷達為側視的，故可以由斜距來區別。若是俯視雷達，則斜距  $R$  與地面座標斜距  $r$  會有不連續現象。由幾何上可算出，其中地面斜距方向的解析度在  $\theta=0$  時是無窮大，在直角三角形中， $\Delta r = \Delta R / \sin\theta$ 。所以入射角要夠大才能得到合理的斜距解析度，但也不能太大而使得背向散射太弱。因此要考慮影像寬度、斜距回波之模稜及希望有較強之回波，來選擇 SAR 之入射角，大約在  $20^\circ \sim 50^\circ$ 。而當目標物在大地水準面上高度  $h$  處，會在地面斜距方向產生位移， $\Delta r = h / \tan\phi$ 。

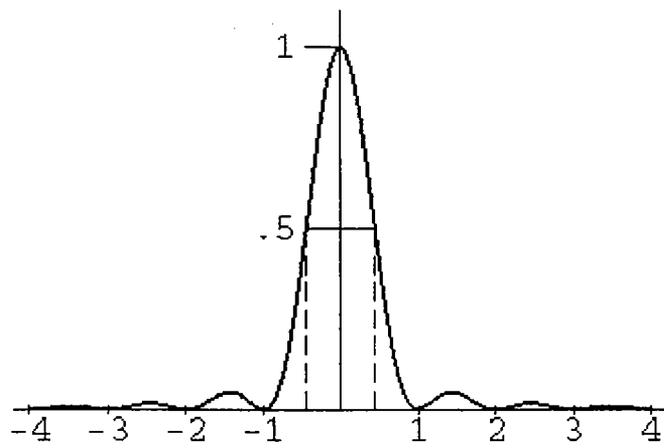


圖 1

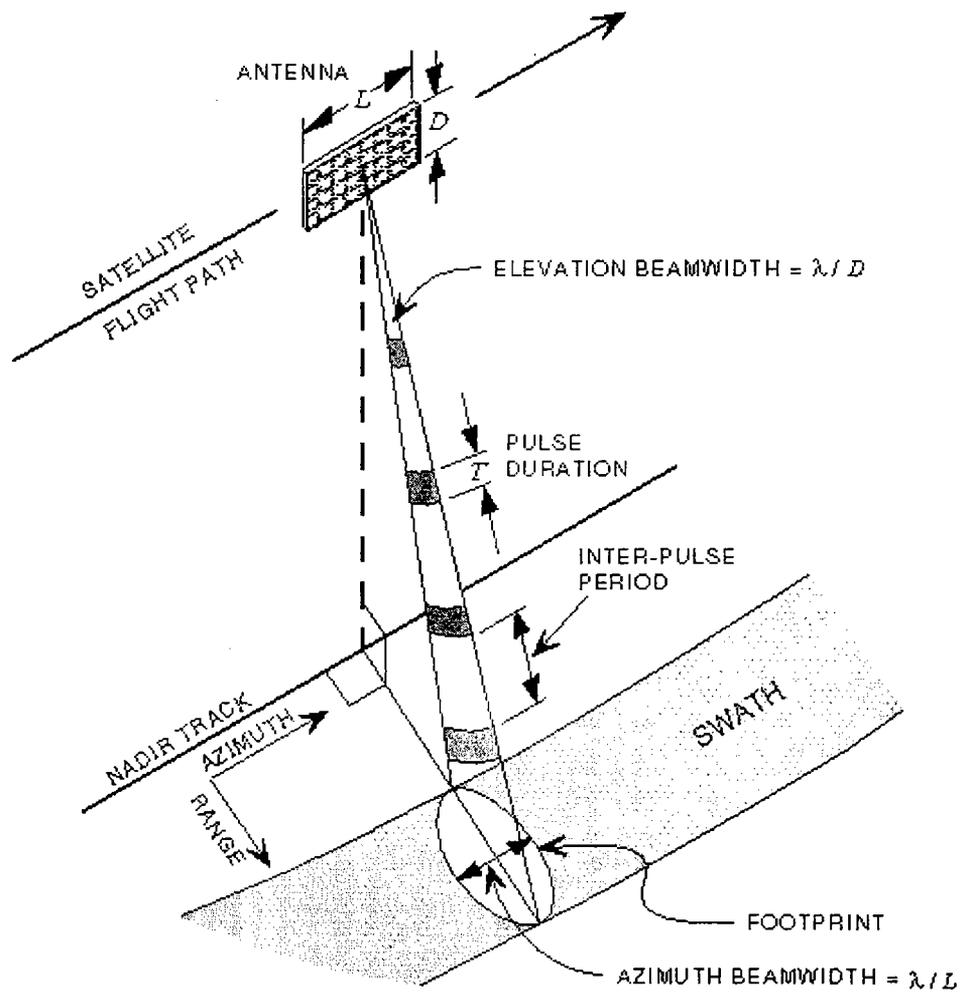


圖 2

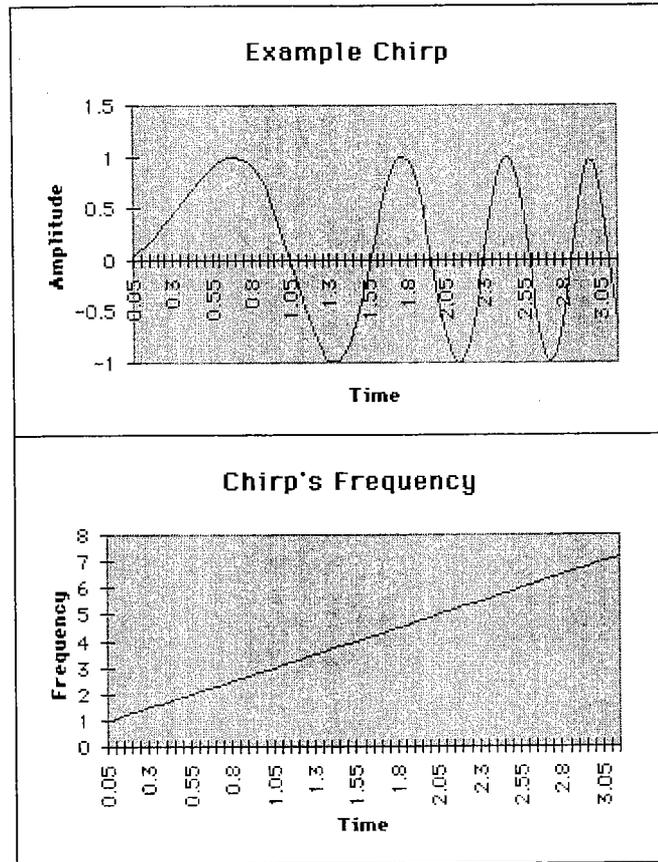


圖 3

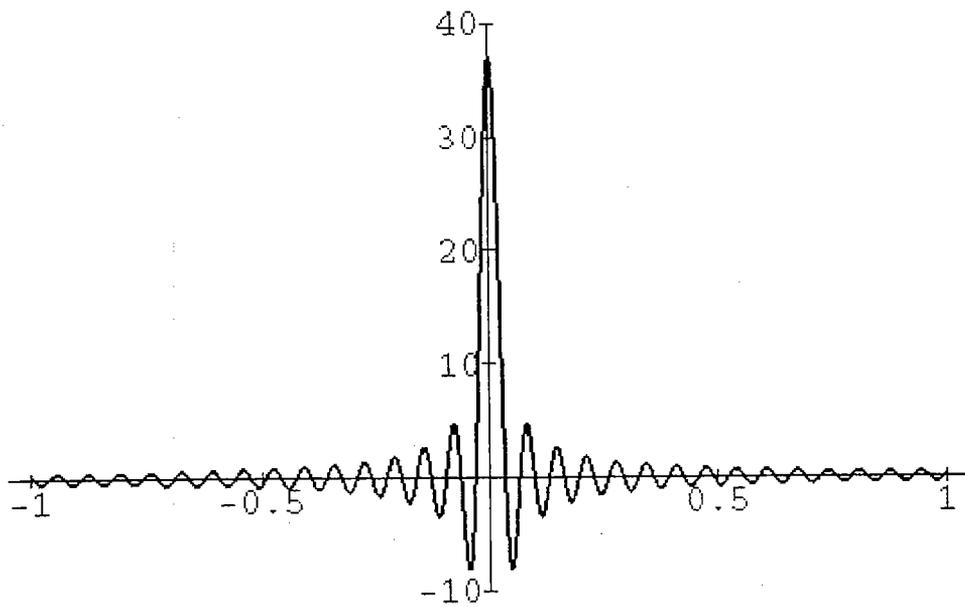


圖 4

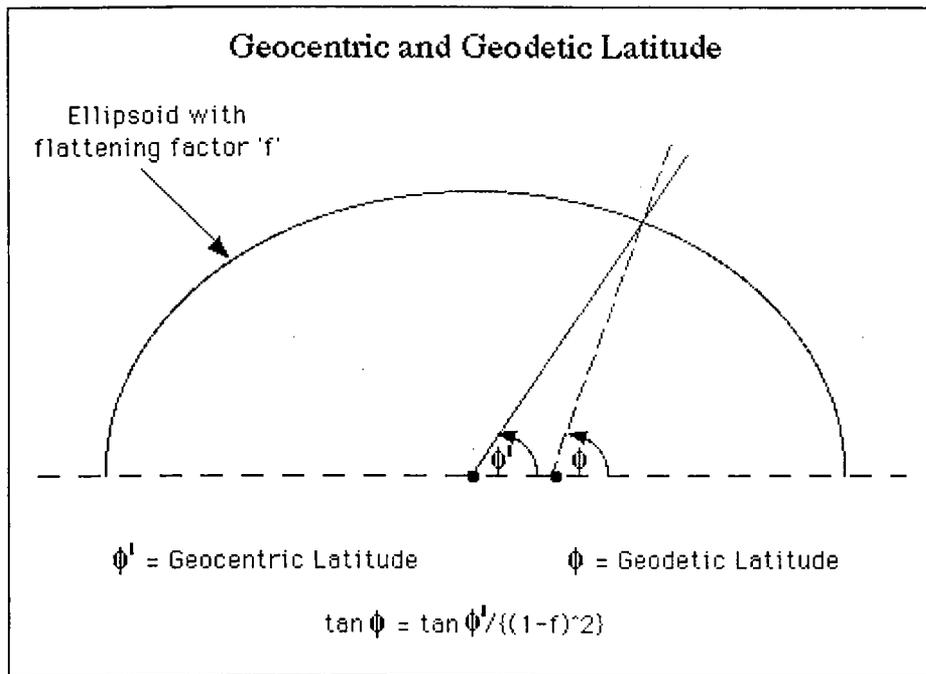


圖 5