

八十三年度港灣技術短期訓練班講義

目 錄

- 一、台灣地區波浪調查概況……………1—1~24

張金機所長

- 二、碎形法則在海岸工程之應用……………2—1~38

吳瑞賢教授

- 三、海岸漂沙防治對策及實例探討……………3—1~37

黃清和 組 長

何良勝 研究員

邱永芳副研究員

- 四、遙測在海岸地區的監測應用……………4—1~39

陳繼藩・陳錕山教授

- 五、海岸結構物設計水位之決定……………5—1~27

簡仲和教授

- 六、海岸保護工法之探討……………6—1~35

郭金棟教授

台灣地區波浪調查概況

The Status of Wave Investigation in Taiwan Area

張金機 港灣技術研究所所長

ABSTRACT

The status of wave observation around Taiwan, including location of wave station, wave instrument and applicable wave data are described in this report. Six wave stations which obtained long term wave data are analyzed and wave characteristics for different zone around Taiwan are discussed. Wave data recorded at Taichung station are used as an example for more intensive statistic analysis in engineering application. Finally, the existing problems of wave observation are mentioned and personal suggestions are proposed.

摘 要

本報告介紹台灣沿岸現場波浪觀測概況，包括測站分佈，採用儀器及可用資料期間。選擇波浪資料較完整的六個長期測站分析統計，以探討台灣沿岸分區波浪特性；再以台中港測站資料為例進一步辦理工程應用統計分析。最後呼籲各界重視現存波浪觀測所遭遇問題。

一、前言

台灣地處西太平洋，冬季受東北季風侵襲，夏季則常受颱風威脅，造成海上波浪洶湧，除影響海上航行及作業船隻安全外，也可能破壞沿岸各項工程設施，導致重大災難。近年來政府積極推動海洋開發建設，

不論對外貿易興建港口、沿岸新生地開發、環境保育或海上遊憩活動都與海面波浪有極密切關係。海岸工程規劃必需根據長期波浪觀測資料統計、可作業天數，決定設計波浪；港埠營運必需利用長期波浪資料評估每年船隻不能進港時間，不能作業天數甚至更嚴重時需要疏散條件；海上航行船隻、作業漁船及休閒活動，不但需要了解即時波浪狀況，最好還能獲得未來波浪預報資料作為應變依據。

波浪觀測為一長期性工作，平時即需投入固定人力從事持續性觀測；天候越惡劣，資料取得越困難，所獲得資料越珍貴。國內波浪觀測雖有氣象局、港務局、大學研究所、中油、台電等事業機構及港研所等十餘個單位參與；但多年來均缺乏整體規劃，事權不能統一，人力、財力分散，取得資料零散且未作有系統整理分析，影響工程規劃品質。

本文分別就台灣四周波浪觀測概況，波浪統計特性及未來展望三節報告如后：

二、波浪觀測概況

國內早期在50年代中辦理波浪觀測大多採用目測法，在淺海水域設立規標式波高計，觀測員利用望遠鏡或經緯儀直接讀取波峰與波谷時浮標高度，測得淺海高潮時粗略且有限之波浪資料。60年代初期引進階段電阻式波高計及直結式波高計；在防波堤等海上構造物安裝階段電阻式波高計直接紀錄堤前類比波形，或在淺海安裝直結式波高計，量取海底波壓變化，再轉換為水面波浪。兩種型式波高計，雖可連續紀錄海上波浪變化，但仍無法取得長期可靠之外海波浪資料。

70年代規劃建設台中港，籌備處成立後有感於過去波浪資料殘缺不全，除再度於低潮位時水深4.5m及8m處設置波浪觀測桿，利用經緯儀安裝紀錄器，追蹤浮標漲落紀錄波形。台中港工程局成立後，積極展開各項資料調查，1971年初在北防波堤外海低潮位下水深19m處安裝超音波式波高計一台，每隔兩小時紀錄外海波浪20分鐘，開始我國波浪觀測新紀元；其後採用超音波式波高計的相繼有氣象局1976年在小琉球水深34m處設站；高雄港務局為規劃大鵬灣為輔助港，1978年在大鵬灣外海水

深 13m 處設立長期波浪觀測站。氣象局在 1980 年初著手再設置鼻頭角、東吉與成功（新港）測站，使氣象局擁有四個長期波浪觀測站。1983 年 6 月基隆港務局在港口外，水深 56m 處設立測站；蘇澳港分局也在 1984 年在蘇澳港外海水深 29m 處安裝超音波式波高計。除氣象局與港務局為海象預報及港埠營運利用超音波式波高計設置長期波浪測站外，經濟部工業局及中油、台電等產業單位為工程規劃需要亦委託研究機構辦理短期波浪觀測，測站分佈如圖 1，茲分別就氣象局、港研所負責之長期波浪觀測站與學術機構辦理之短期波浪觀測計畫概述如下。

（一）氣象局四個長期波浪觀測站

中央氣象局早在 1976 年底在小琉球安裝超音波式波高計，1977 年 5 月開始紀錄海面波浪；其後 1980 年起又在鼻頭角、成功及東吉設站；1987 年起由成大高家俊教授協助建立資料擷取系統。鼻頭角等四個測站觀測時間、儀器型式及安裝水深等如表 1。

（二）港研所負責蒐集之國際港口測站

台灣五個國際港口，基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港（大鵬灣）及台中港均設有波浪觀測站，由港灣技術研究所負責連線蒐集資料。各測站波高計安裝與資料蒐集情形如表 2。

（三）研究機構設置之短期測站

經濟部工業局為開發彰濱工業，台西離島式基礎工業區委託台南水工所辦理波浪觀測；中油公司為探勘開採海上資源委託台大海研所辦理野柳及新竹外海波浪觀測；台電為規劃電廠設置專用碼頭，除本身辦理波浪調查外，委託港研所辦理興達港波浪觀測；港研所為配合研究需要辦理北部觀音，西南部外傘頂洲等地短期波浪觀測，茲將各測站觀測概況整理如表 3。

表1 氣象局波浪測站

測站名稱	觀 測 時 間	波高計 水 深	儀 器 型 式	備 註
鼻頭角	1980/10-1988/06 1991/06-1993/09	55公尺	超音波式波高計	1. 缺1982/07 1983/11 1984/03-06 1984/08-11 2. 1991/06 汰換
成 功 (新港)	1980/06-1988/06 1992/06-1993/09	36公尺 43公尺	" "	1. 缺1981/10 1983/01-1983/12 1984/10-1985/11 2. 1992/06 汰換
小琉球	1977/05-1988/05 1992/06-1993/09	34公尺 23公尺	" "	1. 缺1978/02 1978/07-08 1980/08-09 1981/05-10 1982/01-04 1983/01-12 1985/07-08 2. 1992/06 汰換
東吉島	1981/07-1988/05 1992/06-1993/09	44公尺 29公尺	" "	1. 缺1983/06-1985/0 1985/08- 2. 1992/06 汰換

表2 港研所負責蒐集之國際港口波浪測站

測站名稱	觀測時間	波高計 水深	儀器型式	備註
基隆港	1983/06-1990/04 1987/0701-1987/0919 1988/0308-1990/09	56公尺	超音波式波高計 港研所連線 "	1.缺1983/08 1983/10-11 2.故障未修復
蘇澳港	1992/08-1993/09	29公尺	"	
花蓮	1984/06-1984/09 1988/0122-1988/0129 1989/1229-1993/09	30公尺	NBA-DNW5 NBA-DNW5 浮球式波浪儀	1.缺1984/08 2.超音波式波高計故障，利用浮球式波高計替代
大鵬灣	1978/09-1984/12 1990/11-1993/09	16公尺	超音波式波高計	1.1978年所測資料未鍵入檔 2.缺1992/10-12 1991/07-1992/01
台中港	1971/0712-1977/1215 1981/1108-1981/1204 1986/1202-1987/0107 1988/0311-1988/0420 1987/0306-1987/0324 1989/0823-1989/0918 1989/1108-1989/1206 1993/0608-1993/09	19公尺 20公尺 13公尺	超音波式波高計 浮球式波浪儀 壓力式波浪儀 " " 浮球式波浪儀 壓力式波浪儀 超音波式波高計	缺1973/0521-1973/0912 1973/1024-1973/1207 1974/1201-1974/1231 1975/1101-1976/0304 1976/0722-1976/1002 1976/1110-1977/0630 1977/0929-1977/1107

表3 研究機構短期波浪觀測站

測站名稱	觀測時間	觀測單位	水深(m)	儀器型式	備註
新竹CBK	1984/0926 -1989/0231	台大研究所	67	WAVERIDER	1. 施放16次均在CBK礦區 2. 部份時間資料中斷
新竹CBK 香山海岸	1984/0617 -1984/1022	台大海研所	14	壓力式	
野柳A站 野柳B站	1980/0709 -1980/0803 1980/0903 -1981/0709	台大海研所	120 70	WAVERIDER	一年中缺七、八月資料
彰化 (彰濱)	1991/0209 -1993/0601	台南水工作	11-21	壓力式	觀測九次每次約取得10 至30天資料
雲林 (台西)	1993/0314 -1993/0506 1992/11-	台南水工作 台南水工作	12 15	壓力式 水面超音波式 波高計	1. 觀測兩次取得20餘天 資料 2. 利用海上平台
高雄 (深水港)	1992/0711 -1993/0216	台南水工作	20	壓力式	1. 20m測站觀測十次每次 取得約10至15天資料 2. 10m測站觀測二次
外傘頂洲	1989/0131 -1989/0330 1989/0909 -1989/1130 1990/10 -1991/04 1991/08 -1992/09	港研所	20 13 20 20	壓力式 壓力式 WAVERIDER	缺1992/01-1992/04
觀音 許厝	1981/12 -1984/06 1991/10 -1993/03	港研所	13	壓力式 壓力式	1. 缺1982/04-1983/04 1984/02-1984/04 2. 觀測四次，每次均未 滿一個月
興達港	1984/06 -1985/11		9.5	壓力式	缺1985/06

國內波浪觀測儀器主要有超音波式波高計，浮球式波高計及壓力式波高計三種，其他型式波高計雖曾引進但不普遍。超音波式波高計可以取得即時波浪資料長時間連續紀錄海面波浪狀況，廣泛被安裝在台灣四周長期測站，包括氣象局、鼻頭角、成功、東吉及小琉球四個永久測站及基隆港、蘇澳港、花蓮港、台中港與高雄港（大鵬灣）五個國際港口測站。浮球式波高計，內部蓄電池約可維持四到六個月電力，波浪資料可經由天線傳輸到陸上控制站，或利用浮球內卡帶儲存，適用於較大水深，短、中期觀測站採用。港研所外傘頂站、花蓮港及台中港（短期替代測站）、台電蘇澳、鹽寮測站，中華工程淡水站，及台大海研所 CBK 測站等均安裝浮球式波高計。壓力式波高計內部蓄電池及卡帶 Solid State RAM 儲存量（約512 KB）每隔二小時紀錄10分鐘，約可使用20天，安裝容易，較不影響船隻作業，適合於淺海地區短期波浪觀測使用。台南水工所在彰濱、台西及高雄測站，港研所在外傘頂、觀音、興達港等測站均採用壓力式波高計。

國內波浪觀測所採用儀器大部份由國外進口，代理商缺乏儀器維修能力，一發生故障則需仰賴國外技術；此外，波浪觀測所需經費大都來自政府年度預算，而預算編列一拖二、三年，耗時費事，無法取得連續資料。

波高計研究發展方面，成大黃明志教授曾在國科會補助下，研究碟盤型浮標式波高計，利用太陽能板供應電源，資料即時傳到陸上接收站，長期觀測海面波浪，獲得初步成果，但未作進一步商業開發。成大高家俊教授在國科會補助下，在海上觀測平台安裝太陽能板提供電源，利用超音波量測海面波浪，並將資料傳回陸上接收站。1991年在台中港外海國科會補助設立之海岸觀測平台安裝，效果良好；1992年11月台南水工在台西外海低潮位下水深15公尺處設置觀測平台，利用高教授研發之水面上超音波式感應器量測平台四周波高（四個測點），所有資料均以無線電傳轉到8公里處之陸上接收站。

三、波浪統計特性

台灣沿岸波浪分別由氣象局、港務局、大學研究所與港研所等十餘單位辦理觀測；因未作整合儲存，有些觀測站只取得數天或一兩個月資料，有些資料只作簡單的統計分析；甚至有些測站花費不少人力、物力取得資料未經處理已不知去處。港研所近年來曾致力於海象、氣象資料蒐集、建檔與統計分析，但因人力、經費限制及資料格式不統一等因素，至今尚有部份資料未建檔；建檔資料也因品質、數量及觀測單位不同的處理方法很難作統一格式之統計分析。簡等(1992)篩選有區域性代表，資料較完整的台中港、高雄港（大鵬灣）、成功（新港）、花蓮港鼻頭角及東吉島等六個測站資料加以統計分析。統計結果波高分佈概率如圖 2，週期分佈概率如圖 3，台灣四周六個分區測站波浪統計結果如表 4。根據表 4 分區波浪統計結果，可以歸納下項特性。

1. 影響台灣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 4 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，位於西南部的高雄港(大鵬灣)測站受夏季盛行之西南風影響最大，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。
2. 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 22.4 % ，台中港 15.6% ，高雄只有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。
3. 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% ，獲得佐証。東海岸鼻頭角、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。

4. 根據統計各測站波浪較惡劣月份顯示，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。

表4 台灣四周分區波浪特性

測站及代表區域		台 中 港	高 雄 港	成 功	花 蓮 港	鼻 頭 角	東 吉 島 台灣海峽 中 部
波 浪 特 性		西 北 部	西 南 部	東 南 部	東 部	東 北 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		92/09/05		91/07/19	85/08/23	87/12/21
示 性 波	最大波高(m)	6.3	7.0	8.1	12.2	9.7	7.0
	發生日期	89/09/12	92/09/05	80/09/18	90/06/23	85/08/23	87/07/29
	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以上波高概率(%)	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 公 尺	大 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

爲進一步分析特定測站波浪統計特性，作爲工程規劃、設計依據，茲以台中港測站爲例，就以往所測得一萬八千多筆示性波浪資料統計結果概述如后。

(一)波高與週期分佈

台中港各月份波高與週期平均值如圖 4，冬季受強烈東北季風吹襲波高偏大，週期較長，夏季除颱風外，海面波浪平靜，全年平均示性波高 1.16m，週期 5.68sec，按月其中以 11 月份波高 1.86m 最大，7 月份波高只有 0.56m 最小。根據波高大小，將全年十二個月區分爲冬季、轉型期及夏季。冬、夏兩季波高累積概率分佈及週期概率分佈如圖 5。冬季波高集中於 1m 至 3m 間發生概率約佔 77%，週期介於 5.0sec 至 7.5sec 約佔 80%；夏季波高在 1m 以下約佔 86%，週期在 3.0sec 至 6.5sec 間佔 89%。冬季波高大於 2m 佔 15.1%，週期大於 6sec 佔 59.2%；夏季波高大於 2m 只佔 1.5%，週期大於 6sec 亦只有 22.8%，顯示週期有伴隨波高成長趨勢。波高與週期聯合概率分佈如圖 6，波浪尖銳度介於 0.005 與 0.035 間約佔 88%。

(二)波高與週期延時

波浪延時爲評估不能作業時間最重要指標，亦爲研究海岸地形變遷重要參數。Lawson 及 Abernethy (1975) 曾提出波高超過某一特定值 H_c ，其平均延時 D ，可以 $D = \alpha H_c^\beta$ 表示，其中 α ， β 爲特定係數。簡 (1994) 利用台中港冬季、夏季及全年波浪資料分析波高與週期平均延時，其結果分別繪如圖 7、8 及 9。圖中實線爲一次迴歸線，「C.C.」表示相關係數，實線段區間波高及週期出現百分比亦標示於圖中。此項分析顯示，經常發生之波高及週期與平均延時有良好之線性相關。由圖 7 至圖 9 迴歸線計算波高超過 2m 平均連續發生時間分別爲夏季 0.16 天，冬季 1.27 天及全年 0.85 天，顯示冬季海上持續發生惡劣波浪時間遠較夏季長。

(三)波浪統計值之相關特性

現場觀測所獲得之波浪資料，一般常以示性波浪統計分析，但是在海岸或港灣工程設計上則需考慮構造物重要性而採用最大波浪或最大十分之一波浪。海面風浪一般均呈雷分佈，最大波高與示性波高之比爲連

續觀測波浪個數之函數。

$$H_{\max}/H_s = 0.707(l_n N)^{0.5}$$

N 為資料個數

假設連續觀測20分，取得 200 個波，則波浪統計值之關係為

$$H_{\max}/H_s = 1.63$$

$$H_{1/10}/H_s = 1.27$$

$$H_{\text{mean}}/H_s = 0.625$$

簡(1994)分析以上三種波高統計比值，結果為

$$H_{\max}/H_s = 1.63 \pm 0.38$$

$$H_{1/10}/H_s = 1.27 \pm 0.08$$

$$H_{\text{mean}}/H_s = 0.625 \pm 0.05$$

“±” 值為標準偏差

(四)波高極端值

極端值統計分析可依資料多寡及分佈特性採用 Gumbel, Weibull 或 Normal 等分佈加以計算。資料篩選方法及資料個數常造成極端值統計結果差異。簡(1994)自台中港一萬八千餘筆波浪資料篩選43個波高超過4.0m，利用Gumbel方法加以計算，求得台中港冬、夏季不同復現期距波高極端值，如表5。張(1991)按月篩選最大波高，利用 Weibull 方法統計冬季、夏季及全年極端值分佈，如圖10；不同復現期距波高極端值，如表5。中華顧問工程司採用 Weibull 分佈建立波高概率分佈關係，求得各種復現期距波高極端值如表5。同樣是利用 Weibull 分佈，因選擇資料方法不同，而有1m以上差異，因此，如何篩選資料統計分析極端值仍有待更進一步研究。

表 5 台中港不同復現期距波高極端值

復現期距(年) 季 別		5	10	20	25	50	100	備 註
全	年	5.19	5.58	5.95	6.07	6.43	6.79	簡仲璟 Gumbel
冬	季	4.61	4.64	4.68	4.69	4.72	4.75	張 金 機 Weibull
夏	季	6.13	6.27	6.40	6.45	6.57	6.70	
全	年	6.59	6.72	6.85	6.89	7.01	7.12	
冬	季	4.67	4.85	5.02	5.09	5.24	5.40	中華顧問 工程司
夏	季	5.84	6.34	6.85	7.02	7.53	8.05	

四、未來展望

中央氣象局八十二年七月一日根據全國科技會議，建議成立海象測報中心，負責整合國內海象觀測系統，建立海象資料庫，發展海象預報模式等任務，並將波浪觀測分為外海與近岸兩區。海象測報中心負責外海波浪觀測與資料蒐集，除測取即時波浪資料提供海上經濟活動與休閒遊憩等參考外，並作為海上波浪模式驗證資料。港灣技術研究所負責五個國際港口波浪觀測與近岸資料蒐集，除作為港灣與海岸工程規劃及作業依據外，尚可提供學術研究。

波浪觀測是一項艱苦且耗費金錢的工作，以往國內對波浪觀測並不重視；除中央氣象局設置四個永久測站及五個國際港口辦理長期波浪觀

測外，大都只有從事短期觀測，取得零散不連續資料。近年來海上安裝波浪儀器，雖依規定發佈航行通告，不但不能受到合理保護，甚至常遭受漁民破壞，無理索賠，為減少抗爭事業機構只好減少現場觀測業務。未來產業界、學術界應積極呼籲政府重視漁民破壞海上觀測儀器行為，提高海上安全保障，並加強培育海上觀測人力，提升技術水準。

國內波浪觀測儀器大都由國外進口，代理商大多缺乏儀器檢驗與維修能力。平時測取資料品質無法掌握，儀器發生故障則需仰賴國外技術，曠日費時，無法測得長時間連續資料。以目前國內科技水準，應該具備各式波高計研製能力。近程應該成立儀器維修小組，負責海象觀測儀器維修檢校及人員訓練。中長程則應該結合海象測報中心、港灣技術研究所、工研院及學術單位共同研製國內環境適用之各種海象觀測儀器。

目前國內波浪觀測取樣時間、取樣頻率以及資料格式、儲存方法、分析、統計等均不一致；造成資料統一建檔不易，系統化分析困難。海象測報中心成立後，希望能研訂波浪觀測規範。長期波浪測站必需採用電信傳輸網路，即時蒐集海面波浪資料，配合波浪預報系統，隨時發佈海上波浪情報，提供海上航行及作業船隻與休閒遊憩活動參考。短期波浪測站，大都配合工程規劃、施工而設立之臨時測站，受電力供應或記憶容量限制，測取資料較零散；除提供目前的事業工程規劃、施工用途外，應統一蒐集建檔儲存，達成資料共享目標。

五、參考資料

1. 張金機，1989.9，台灣沿岸波浪，海岸工程講習會講義，成大水利及海洋工程研究所等主辦。
2. 梁乃匡、張金機、簡仲璟、曾相茂等，1987至1993，台灣四周海象氣象調查研究(一)～(八)，港灣技術研究所。
3. 沈景鵬等，1993.6，建立海象觀測網與海洋環境資料庫整合系統之規劃(一)，海下技術學會。
4. 章家棗等，1973.6，台中港海岸氣象及海象調查研究，台中港工程局。

- 5.黃煌輝等，1993.，高雄海域海氣象調查研究，台南水工試驗所。
- 6.簡仲璟，1994，台中港漂沙防治與新生地開發。(初稿)

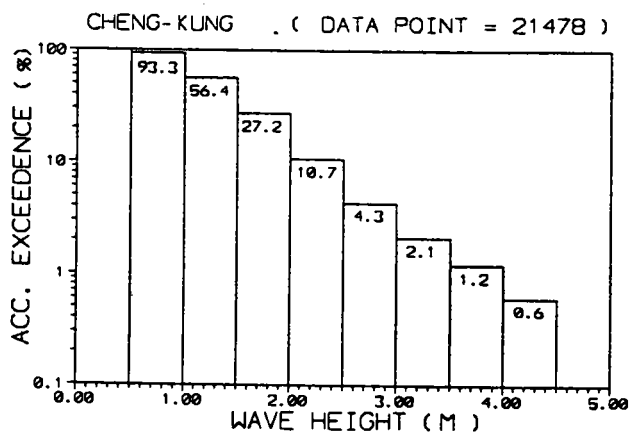
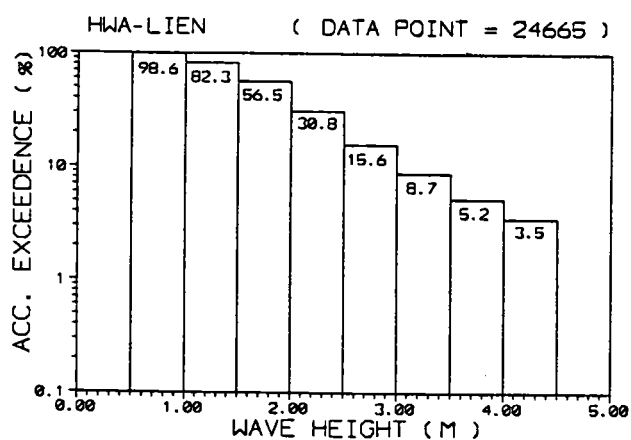
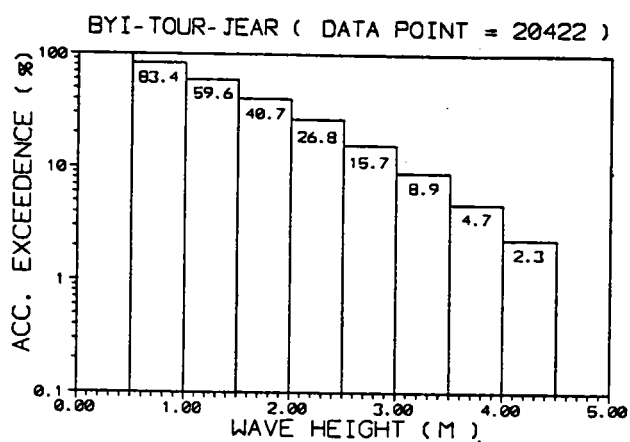


圖2(a) 台灣四周六測站波高概率分佈

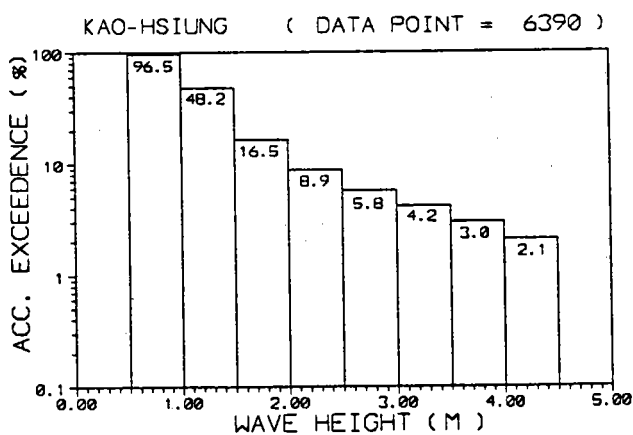
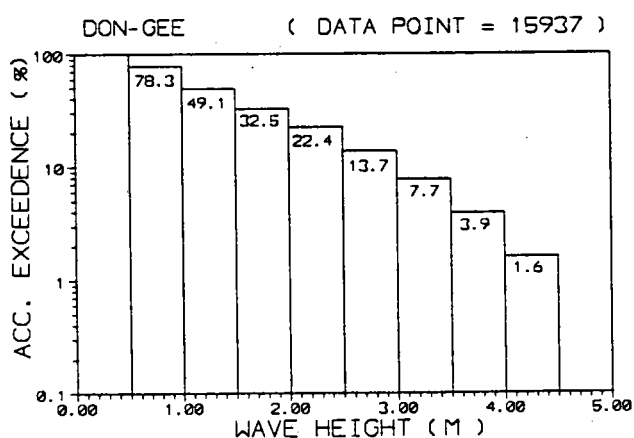
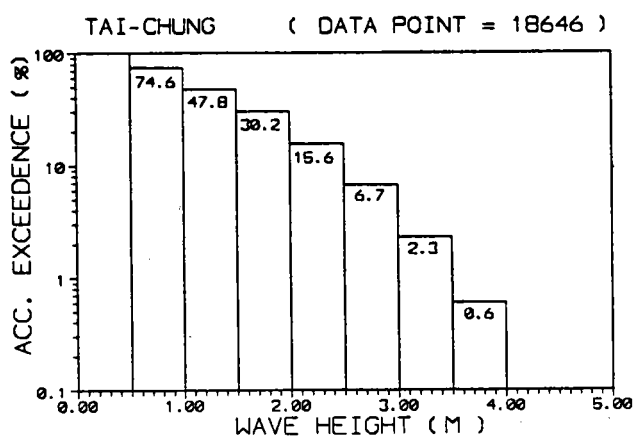


圖2(b) 台灣四周六測站波高概率分佈

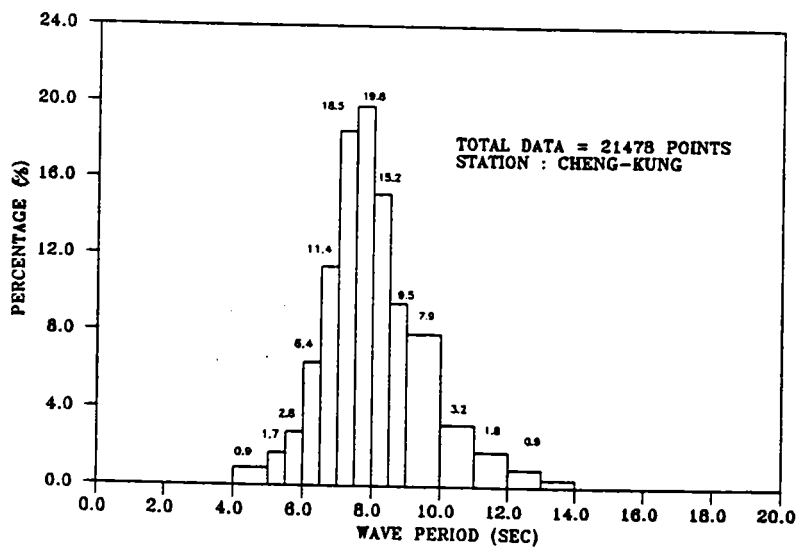
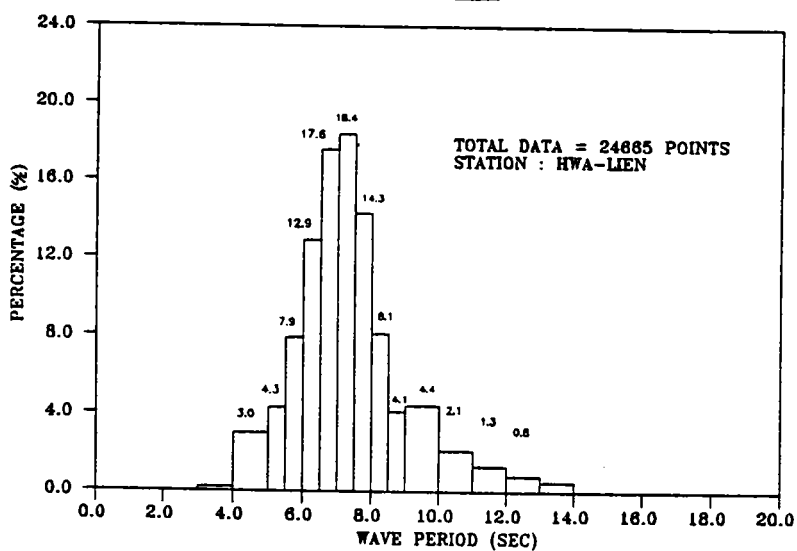
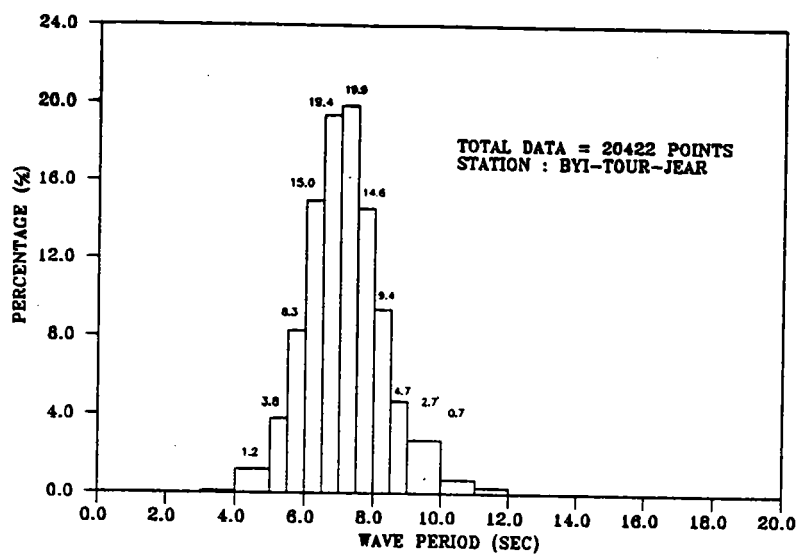


圖3(a) 台灣四周六測站週期概率分佈

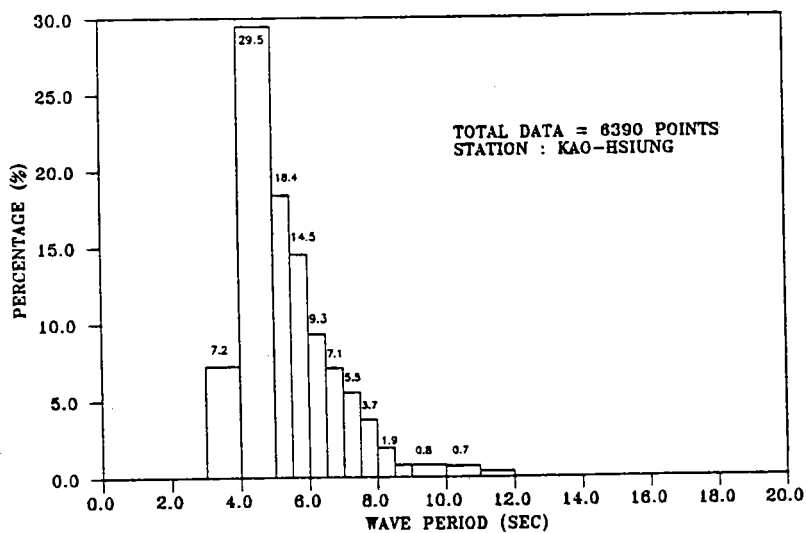
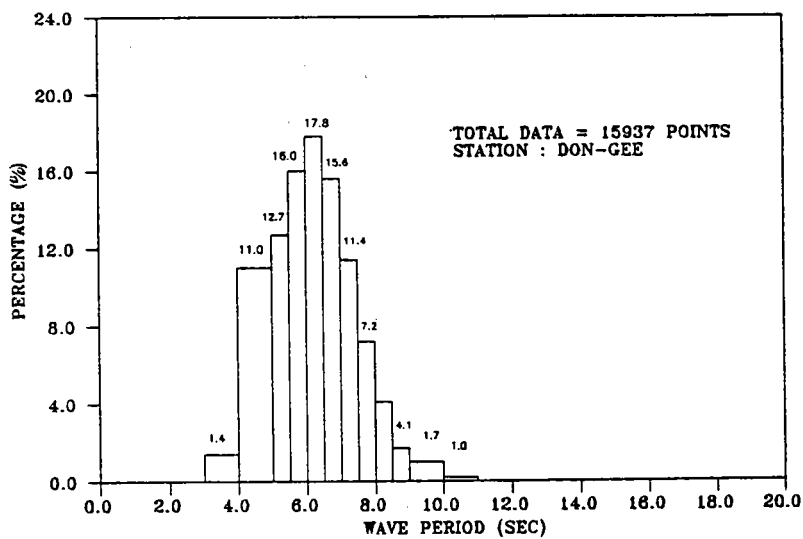
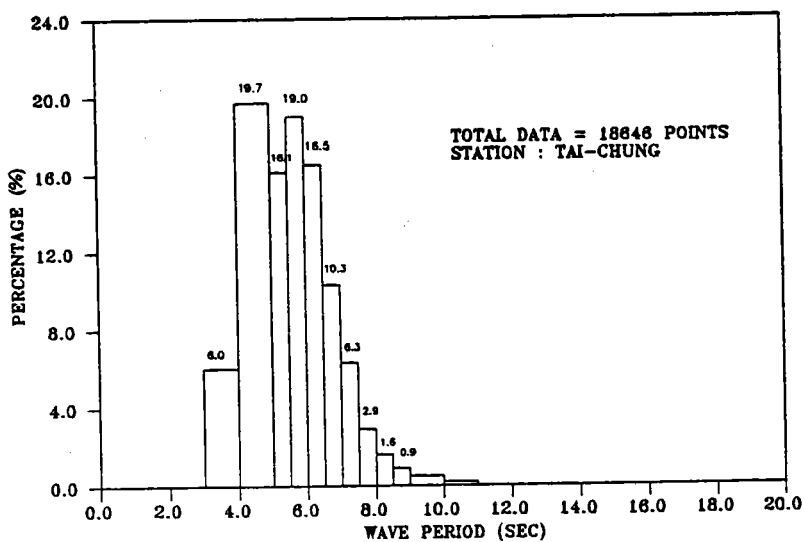


圖3(b) 台灣四周六測站週期概率分佈

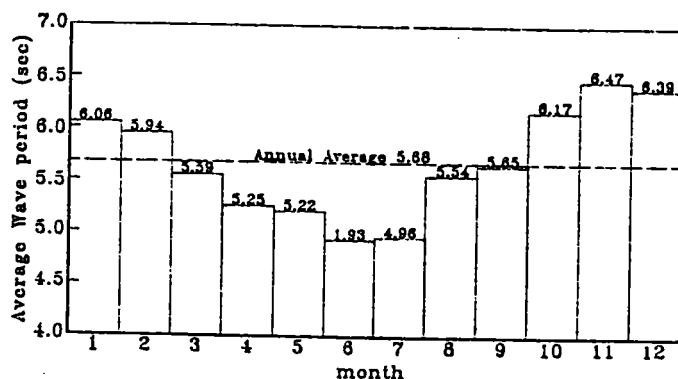
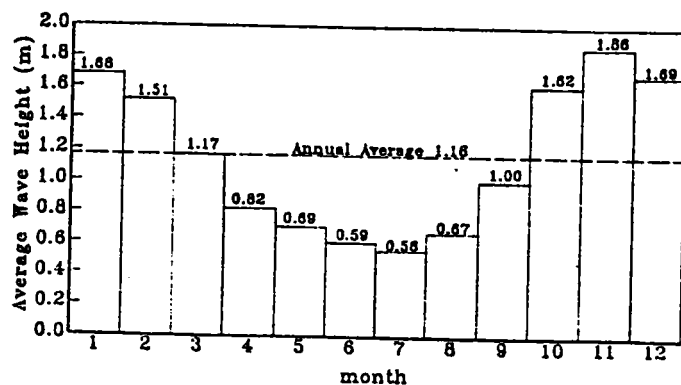


圖4 台中港各月份波高、週期平均值

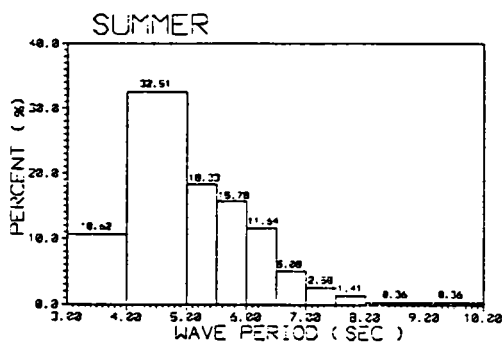
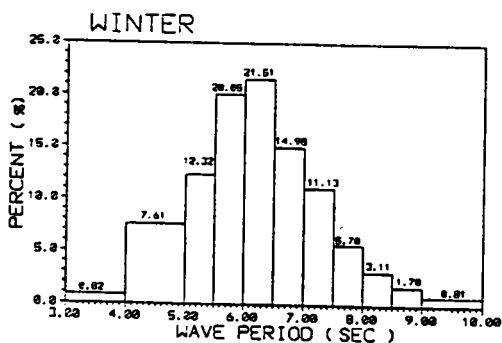
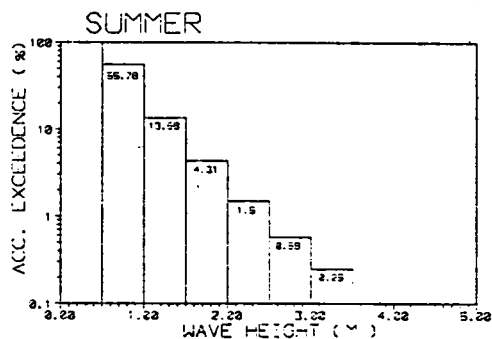
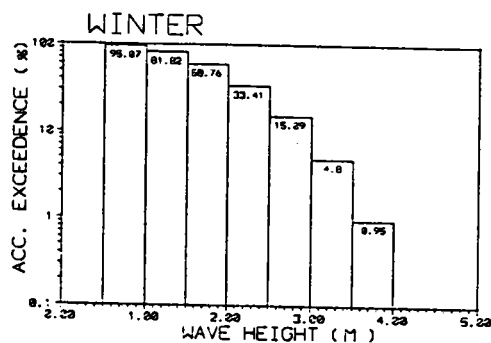


圖5 台中港冬夏季波高累積概率與週期概率分佈

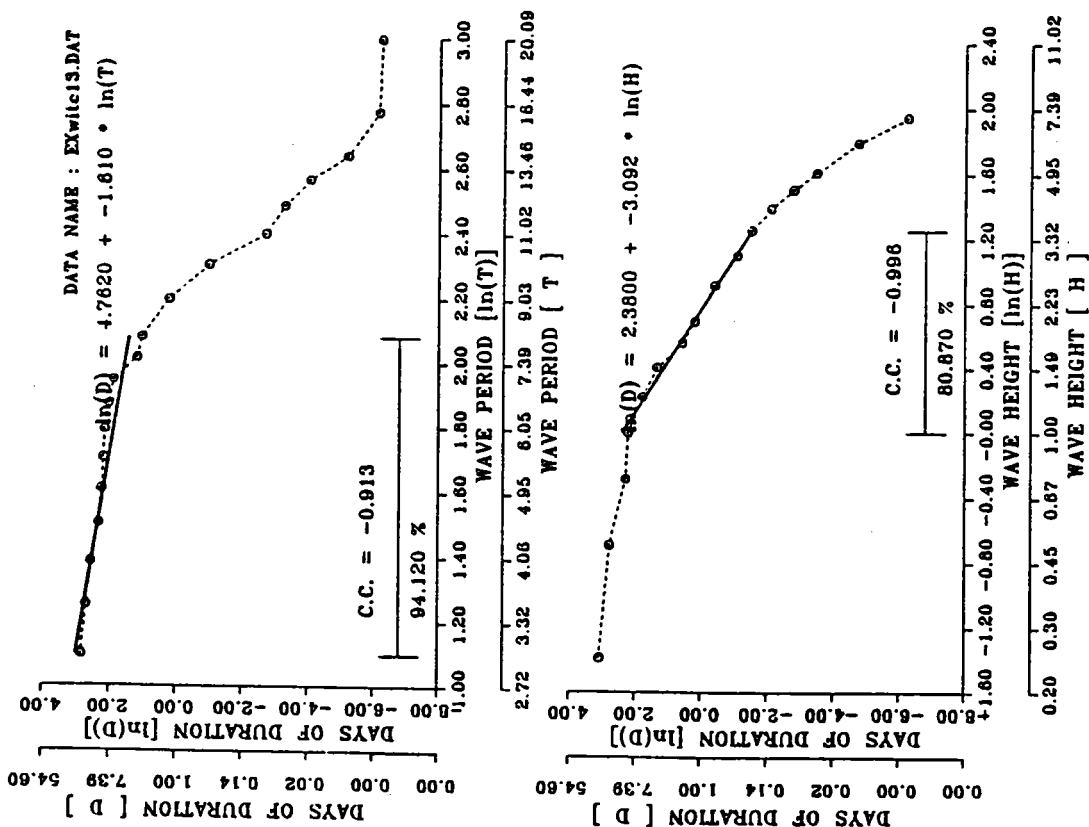


圖8 台中港冬季波高與週期平均延時

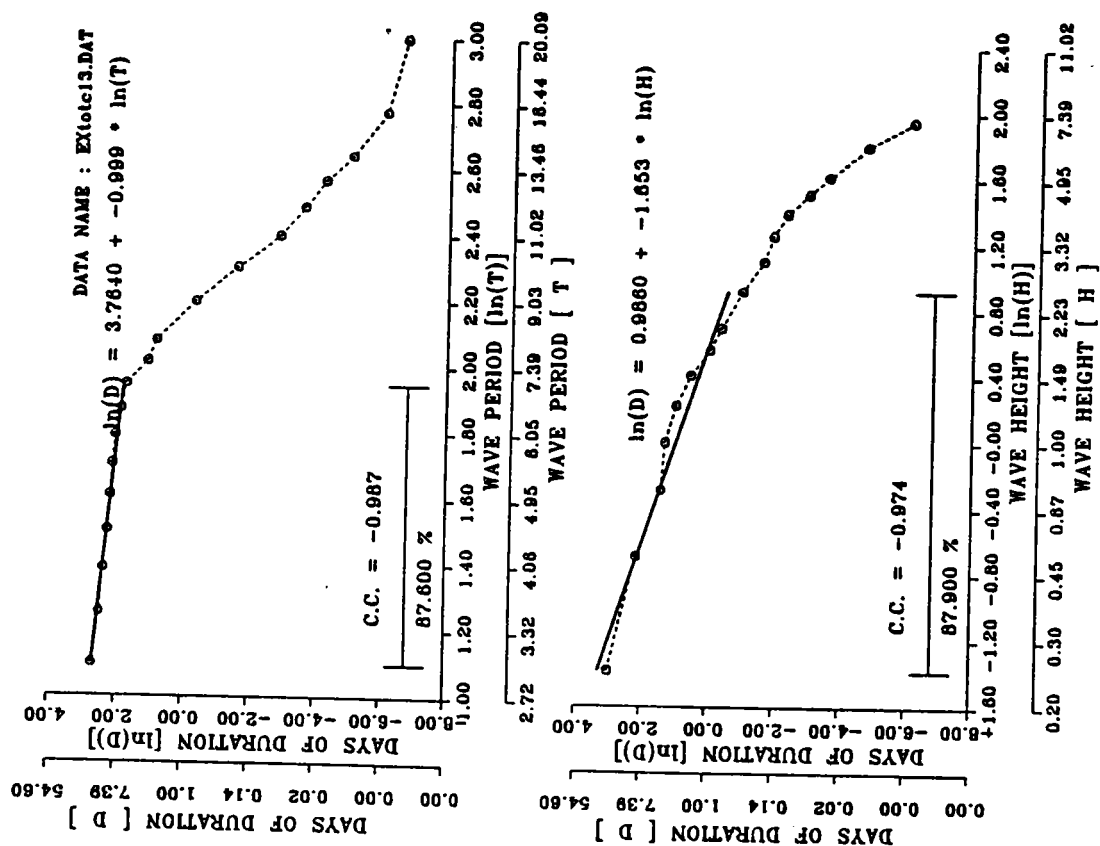


圖9 台中港全年波高與週期平均延時

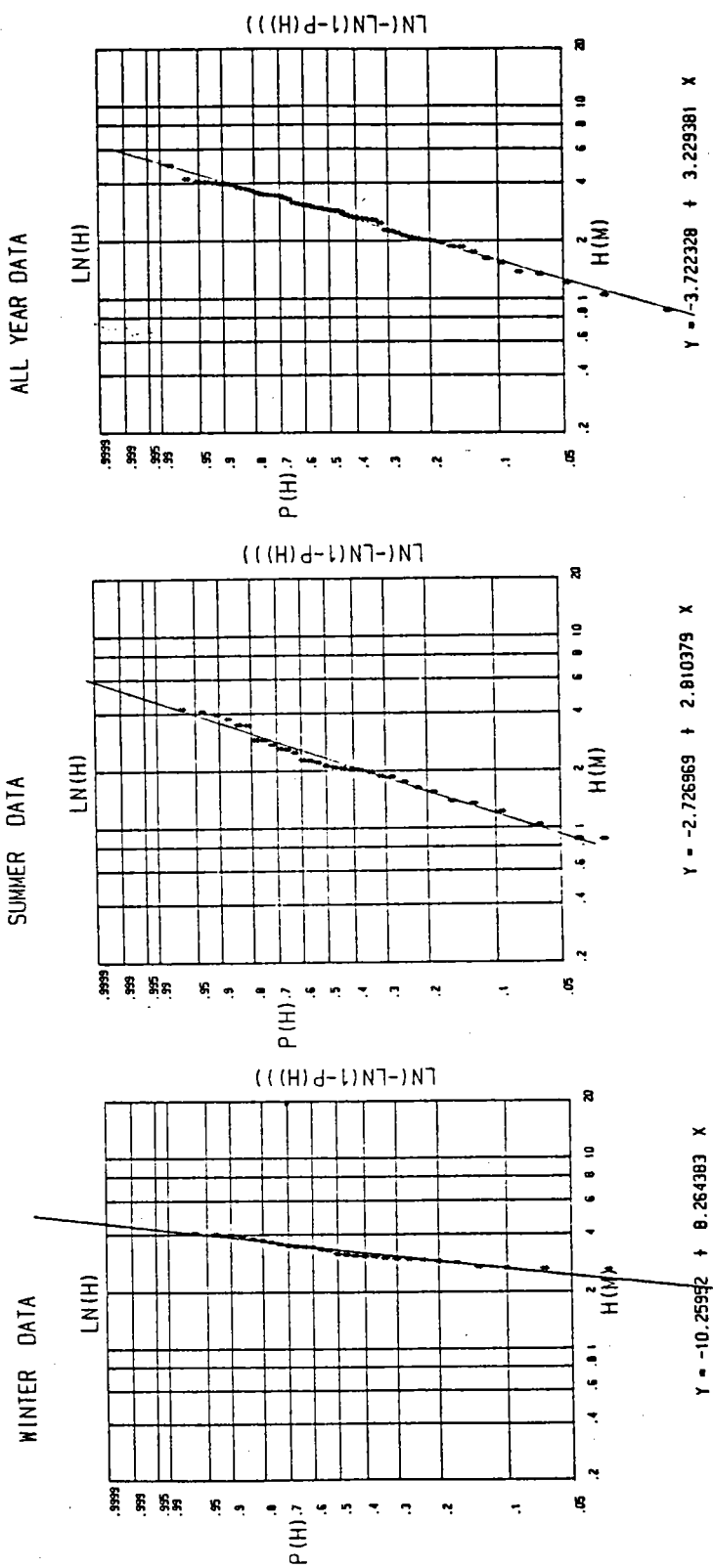


圖10 台中港冬季、夏季及全年波高極端值分佈
(Weibull Method)

碎形法則在海岸工程之應用

吳瑞賢 國立中央大學土木工程系副教授

碎形源起

自從曼德布洛(Benoit Mandelbrot)於1975年提出碎形法則之後，由於其比傳統歐氏幾何對自然界物體、現象的描述，更為傳神，已引起很大的注意。以土木水利工程的觀點而言，有效的應用碎形法則於工程技術上，可望有助於了解複雜系統的內涵，亦即在不過度簡化問題的前提下，解決工程難題。曼氏稱碎形扮演兩種角色，一是其為表示定率混沌的幾何，另一則是其為描述山、雲、宇宙的幾何。碎形與渾沌的關係密切，為求完整起見，本文首先將渾沌與碎形的源起一併介紹。

科學傳統上，如法國物理學家拉普拉斯(Pierre Laplace)認為未來的結果皆可由目前的因素所決定，即：只要科學家了解描述現象的數學方程式，則吾人可以解釋宇宙萬物。這種想法在熱力學火熵(Entropy)的觀念發展之後，受到了嚴格的考驗。但是經由波茲曼(Ludwig Boltzmann)的機率概率引導下，直到廿世紀初，化約主義及機械論仍然牢不可破。

然而到了廿紀中期，各種非線性系統指出，微小的擾動將造成極大的影響，如此則使得長時間的預測是不可能的。在許多領域，非線性系統可視為渾沌的代名詞。與渾沌理論有關且困擾許多研究者的課題包括：紊流，訊號雜訊，天氣預報等。

上述這些問題（或稱這些系統）是定率的或是純然隨機呢？自60年代以來，研究者更發現某些非常簡單的非線性定率系統，顯現出混沌或者隨機的行為。

1963年勞倫茲(E.N.Lorenz)發現在一組簡單的非線性方程式（只有三條方程式），系統是定率的，他發覺系統永遠不重覆，但是可以在空

間中呈現相當的規則的邊界，這即是如蝴蝶翅膀形狀的勞倫茲吸子。在此以前勞倫茲發現了所謂蝴蝶效應 (Butterfly Effect) 即對初始條件的靈敏度大，而他進一步的發掘混亂中的秩序。他的發現可以以簡單圖形說明，系統起始狀態可以表示為某一量測點，當系統疊代時，起始狀態所內含的複雜性便開始顯現，而可以在相空間中軌跡中看出。如果起始狀態相當相似的兩點，在一段歷程後，將有顯著不同的表現。然而，這系統整體是穩定的，這意味著相空間中的奇異吸子的形狀是不變的。所謂相空間是以空間中的圖形用來表現系統的所有可能情況，亦即可以將時間序列以相空間的軌跡表示。對於系統收斂至固定的狀態，相空間圖上也收縮至一點；對於系統成週期性的重覆，相空間上將呈現環狀軌跡；至於在混沌的狀態下，將呈現奇異吸子。重組相空間的方法一直為研究混沌者所採用。科學家正在發掘許多形形色色的吸子。

混沌 (Chaos) 的名詞是由約克 (James Yorke) 所訂下。約克體會出自自然界訊息的不規則，提出正視這些複雜訊息，而不是力圖簡化之。混沌的例子中最著名的包括討論生態學族群週期繁衍與縮減，水龍頭水滴的間隔，以及疊代差分方程式的漢諾吸子。

為了研究混沌系統的複雜性，學者開始注意所謂“定性數學 (Qualitative Mathematics)” 。傳統的定量數學是研究系統中某一變數改變對系統其他表徵的影響。在定性數學中則是研究系統整體特性的模式，亦即探討整體系統的改變或各系統間的差異。舉例而言，里阿普諾夫數 (Lyapunov number) 提供了量度“秩序與無秩序程度”的定性量度，也在國內被用來研究水文系統。基本上，里阿普諾夫數是量度系統中相鄰兩點，如河水中水分子或公路上汽車，彼此遠離的快慢程度。換言之，它量度系統內的相關性崩潰的速率，以及擾動影響的傳佈速率。

對工程師而言，最能直接感受混沌系統的複雜度及神祕的例子可能是以牛頓方法解多項式所得到的碎形圖形。即使對尋找-1的立方根時，吾人可以得到一張黑白相間的複雜圖形，如果起始值選在白色區域，則解答將是實根，如果起始值選在黑色區域，則解答將收斂至複數根。這個圖案是碎形的，因為在更小的尺度下，都會看到相同的圖案，黑色和

白色交錯相鄰，但又呈現相似的螺旋狀。研究者嘗試以色彩來表現更複雜的圖形，如以方程式 $X^4 - 1 = 0$ 為例，以四種顏色表示收斂到四種答案，其複雜的程度，並不因局部放大而減低。

總結而言，目前已知的基本物理法則並不能成功的預測水管的水滴落下的時間，或者一週後的天氣，甚至不容易預估當一個物體受到兩個以上的力作用時的行為，更不用說實際上受許多力作用的複雜系統。然而混沌理論使人們更了解簡單定率的基本物理原理將可以引致複雜而不規則的行為，其行為對初始條件非常敏感，而系統的回饋使得這些細小雜訊一再被放大。經由電腦的計算，系統的行為可以由電腦圖形表示。這些複雜又難預測的圖形引發了研究者的注意，如何運用這些理論來描述自然界的現象，以及其在工程上的應用是研究者當今的重要課題。

第一部份：碎形法則簡介

雖然自然界物體，諸如景觀、海岸線、河川或血管分佈等都呈現出非常複雜的幾何形狀，但同時也隱含了某種「與尺度無關」(scale-invariance)的性質。舉例而言，若無某些參考物體（如一個人或一個硬幣）出現在照片上，則岩岸照片拍攝時與攝影機的距離將無法加以分辨。幾乎所有的地理景觀都有這個特性。這種與尺度無關的性質似乎是自然界作用之下最為重要的結果。

爲了將此性質以數學方法加以描述，曼德布洛首先在分析海岸線長度時考慮分數維度，並在1975年提出碎形法則 (concept of fractals)。碎形 (Fractals) 來自拉丁文殘破 (frangere) 的形容詞 (Fractus)，而英文中有破碎 (Fracture) 和分數，如 $\frac{2}{3}$ (fraction) 似乎都很合適，於是曼德布洛創造了碎形的字眼。中國大陸則多翻譯爲「殘形」。此法則爲描述不規則幾何形狀及冪次分佈 (power-law distribution) 提供數學理論基礎。近期的研究發現，這種與傳統歐氏幾何截然不同的新觀念已可對自然界現象做出更佳的描述

碎形法則

討論碎形可先由幾何學上的幾個特異圖形 (pathology) 著手。本文

以三種圖形，分別是三角卡區曲線 (triadic von Koch curve) 西爾平斯基三角形 (Sierpinsky triangle)。及明吉海綿 (Menger Sponge) 為例來說明。附圖中表示這些圖形的建構步驟。在建構完成之後，三角卡區曲線將可在有限的平面中（很明顯地，並未超過這張紙的範圍）擁有無限的長度；西爾平斯基三角形將可佔據一個平面而不具有任何面積而明吉海綿則佔有空間而不具有體積。長久以來此種圖形都被視為數學上獨有的特異圖形，因為古典幾何及微積分都完全無法應用於其上。這三個圖形都具有「自我位似」 (self-similarity) 性質，亦即在任何一個觀測尺度之下其形狀都完全一致。

Mandelbrot 整理了 Hausdorff 等人先前在數學上的研究，稱此類圖形為碎形 (fractals)；在 1975 年提出碎形法則；並首先嘗試將其應用於描述自然界現象。最近的研究發現自然界的現象，如地理景觀、電子雜訊、非線性動力系統的混沌行為 (chaotic behavior) 等都和碎形有密切的關係。

雖然自然界的物體在各個不同尺度下看起來非常相似，但可想而知，除了少數的例外（如雪花），大部份自然界物體在各個不同尺度下的形狀不可能完全一樣。換言之，自然界物體在某一特定觀測尺度範圍下大多數皆不為嚴格自我位似 (strictly self-similar)。為符合碎形自我位似要求，曼德布洛認為自然界的物體與數學上某些隨機集 (random sets) 所具的「統計上自我位似」性質一致，亦即每個尺度下的形狀可視為在統計觀點下原圖形的縮小。然而雖經由此定義符合了自我位似要求，自然界的物體仍不是真正數學上所稱的碎形。因為若以夠小或夠大的尺度來觀察自然界物體，則其碎形特性將消失而由歐氏幾何所主導。這個特性與前述碎形所應具有的等一項性質互相矛盾，因此許多學者對碎形於自然界描述的適用性加以質疑。然而，由於在一特定尺度範圍中自然界物體仍具有和碎形非常近似的性質，因此在這個範圍中若以碎形來描述將非常適合。由於與數學上的碎形有所出入，因此更適切的稱呼應為「自然碎形」 (natural fractals)。

碎形的最主要特徵為其維度。曼德布洛定義碎形為具有自我位似本

質，且其豪斯道夫(Hausdorff)維度， D_H ，超越本身的拓撲維度(topological dimension) (有關各種維度的意義將提供在下章節中)。因此一個歐氏幾何下的物體其 D_H 為整數而碎形的 D_H 通常為分數。

富坎默(Falconer)指出Mandelbrot的這項定義並不能包括所有可視為碎形的集合。並認為較佳的定義為將碎形所表現的特性加以條列如下：

- 一、在任何尺度下碎形的微細結構依然存在。因此不論在何種尺度下圖形都因為過於複雜而無法以傳統的幾何來描述。
- 二、具有自我位似性質，可為統計上自我位似(Statistical self-similarity) (有關自我位似的定義將提供在下章節中)。
- 三、通常其碎形維度(fractal dimension)大於拓撲維度。
- 四、通常可用很簡單的步驟重複建構而成，如前述三角卡區曲線，西爾平斯基三角形及明吉海綿的建構過程。

此外，所謂的「維度」是純數學中的定義，亦即在使用維度一詞時必須經過詳盡而完整的數學證明。然而事實上在自然界無法獲致如此完善的證明。在自然界的碎形分析稱呼的維度僅只是一種性質相近且較為簡便易於解釋的方法。

第二部份：碎形維度計算

數學上所謂「維度」(dimension)，即是觀察以趨近於零的尺度，對一集合做量測(measurement)時，此集合所表現的行為。可想而知，這種利用無限小尺度所做的量測在實際上並不可行。因此如果要在自然界應用時，維度的量測必須經由另一種程序。曼德布洛指出所謂碎形維度即是當量測尺度縮小時，物體會增加多少新的部份的描述。由於碎形的本質為自我位似，所以維度可經由比較物體在兩種不同尺度下的性質而得。

另一方面，由於合於維度性質的數學定義非常多，甚至對同一集合而言，不同的定義可能產生不同的維度值而且具有極不相同的特性。使用不同定義的維度值可能因此造成極大困擾。所以聲明所使用的維度定義非常重要。通常在實際的應用上只有利用相同定義進行量測所得的維

度值才可直接進行比較。而欲確定用同一程序所量得的維度值為同一數值，則每次所量的值之間的誤差不可超過 0.005。

以下詳述六種維度的定義。其中尤以最後三種，即盒數維度、網格維度與角規維度，在實際應用上最為普遍。葛任 (Gallant) 指出盒數維度與角規維度定義對統計上自我位似曲線的維度量測可得到相同的結果。

拓樸維度 (Topologic Dimension)

拓樸維度恆為非負整數。若一集合中任一點的任意小鄰接 (neighborhood) 與此集合交於一具有 $K-1$ 維的集合，則稱原集合為拓樸 K 維。若與原集合沒有交集則為拓樸零維。舉例而言，西爾平斯基三角形上任一點的小鄰接 (以圓圈表示) 與此圖形交於一有限的點集合 (其拓樸維度為零維，即 $k=1$)，因此稱西爾平斯基三角形為拓樸一維。

拓樸維度在所有維度量測中最為粗糙。由於其假設物體具有無限的延展性，因此所有物體均可經過一連串連續變形而回歸到具有整數維度的原始狀況。

豪斯道夫維度 (Hausdorff Dimension)

豪斯道夫維度又稱豪斯道夫—貝斯考維其維度 (Hausdorff Besicovitch dimension)。其量測方法如下：假設所欲量測維度的物體可用函數， $h(d) = g(d)d^d$ ，加以覆蓋，其中 $g(d)$ 為用以覆蓋格子的形狀因子 (如圓盤為 $\pi/4$)， d 為單位長度， d 為用以覆蓋格子的維度。吾人可定義 d -量測 (d -measure)， M_d ，如下式所示

$$M_d = Sg(d) d^d = g(d) N(d) d^d \quad (1)$$

其中 $N(d)$ 為覆蓋整個物體所需的格子數目。很明顯的，一塊面積不能用有限數目的線 ($d=1$) 或點 ($d=0$) 所蓋滿，但卻可用有限數目的正方形 ($d=2$) 蓋滿。考慮在 d 趨近於零的情況下 (用以符合維度的數學定義)，前者的 M_d 為無限大而後者的 M_d 為零。所以 d 必存在一臨界值使得 M_d 由零轉為無限大，此臨界值即稱為豪斯道夫維度 D_H 。以 D 代表 D_H 則可得到下列二漸近形式：

$$N(d) = \frac{1}{d^D} \quad (2)$$

$$M_d = N(d) h(d) = \frac{d^d}{d^D} \quad (3)$$

豪斯道夫維度另有一常被用到的性質：即完全包含於另一個母空間的子空間的維度不能大於母空間的維度。舉例而言，圓形的維度因為其一方面包含於方形，且一方面亦可包含方形，因此圓形的維度等於 2。

由於其數學應用上的簡易性及對任何集合均可定義，因此成為碎形維度最基本的定義。基於自然界物體在某特定尺度範圍下的自我位似特性，式 (2) 及式 (3) 成為碎形理論在自然界應用時所根據的基礎。

位似性維度 (Similarity dimension)

位似性維度的定義為：若能將一集合分為 N 個小部份，每個小部份皆為原圖形縮小 r 倍而成 ($r > 1$)，則定義 D_s 為位似性維度，如下式：

$$D_s = \frac{\ln(N)}{\ln(r)} \quad (4)$$

舉例而言，正方形可分為四塊由原圖形縮小二倍而成的小正方形，因此其位似性維度等於 2：

$$D_s = \frac{\ln(4)}{\ln(2)} = 2 \quad (5)$$

此外，三角卡區曲線可視為由四個縮小三倍的小段所蓋滿：故其位似性維度可以下式求出：

$$D_s = \frac{\ln(4)}{\ln(3)} = 1.2618 \quad (6)$$

位似性維度僅適用於諸如此類嚴格的自我位似集合，因為各個小部份都必須和原圖形的形狀完全相同。

盒數維度 (Box Dimension)

盒數維度 (box dimension), D_b ，又稱科莫格羅夫熵 (Komogorov entropy)、容積維度 (capacity dimension)、訊息維度 (informa-

tion dimension)。該維度是在實際應用上最常使用的維度定義。其計算方法，即盒子計數法 (box counting algorithm)，非常的簡易。盒子計數法即量測當量測單位， e ，趨近於零時，下式的比值：

$$D_b = \frac{\log N(e)}{\log 1/e} \quad (7)$$

由於實際應用上不可能使用邊長為無限小的網格做量測，因此網格計數法以比較兩不同尺度下的性質為基礎。其基本概念就是將互不重疊的 n 維盒子（通常使用二維）覆蓋在所欲求出維度的物體上，計算盒子邊長和蓋滿所須數目之間的關係，將這兩個數量各取對數繪於直角坐標圖上，圖上所呈現的斜率之負值即碎形維度；或稱為盒數維度。請注意這裡所稱的盒子並不一定是方形，可以是圓形或球形等。研究者成功的以光學的原理，利用兩張底片的透光程度，能準確的計算出平面物體的盒數維度。

網格維度 (Grid Dimension)

其基本概念同盒數維度相仿，是將空間以網格區分成許多小部份，再數網格中覆蓋到所求出維度的物體的數目，改變網格的大小，而計算網格的數目，仍以式 (7) 求出維度。

角規維度 (divider dimension)

角規維度 (or Compass Dimension) 只適用於曲線的描述。在數學上的定義為使用一長度趨近於零的線段蓋滿整段曲線時所須數目與線段長乘積，亦即所量得曲線總長度與所使用線段長度間的關係。同理，角規法 (divider walking algorithm) 亦以比較兩個不同尺度下的性質為其在實際應用上的根據。應用角規法的步驟為每次使用不同開幅長度的角規量得曲線的全長，再將角規開幅 (divider open length) 及所量得總長度各取對數繪於直角坐標圖上。求得圖上斜線之斜率 d_s 。則碎形維度，或稱為角規維度為 $D_d = 1 - d_s$ 。

若將角規法與盒子計數法做一比較，可發現盒子計數法的應用範圍非常廣泛。在真實世界中幾乎所有具有碎形特性的物體，由拓撲零維的

康特集 (Cantor Set) 到更高維度的金屬表面起伏都可應用。相形之下，角規法的應用只局限於拓撲一維的曲線上，應用範圍非常有限。但其優點在於能夠在資料精度所允許的尺度範圍中使用一系列開幅差距非常小的角規量取全長，因此可以很詳盡的表現曲線在各個差距很小的尺度間的細微性質變化。這個細微的變化可能隱含很重要的物理意義。

第三部份：河川流徑與海岸線的碎形結構

河川流徑的碎形結構

河川網路是自然界集水區的主要特徵。其形成受到自然界氣候及集流盆地本身的地文狀況所影響。若能充份了解河川網路形狀及分佈與水文歷程之間的關係，將有助於灌溉及洪水防治系統的工程設計。長久以來，如何運用幾何方法對其加以量化描述，已在水資源研究領域中受到廣大的注目。最近所發展的地文單位歷線 (Geomorphologic Unit Hydrograph, GUH) 即將盆地及河川形狀與分佈等地文參數列入降雨—逕流模式的考量因素之一，但是盆地或河川形狀通常都因為太過於複雜而使其幾何描述產生問題。這類因子可由地圖或空照圖中加以量測，但是不同的觀測尺度或不同的地圖精度都可能產生不同的數值結果。因此，以普通幾何方法所定義的地文參數在各個量測尺度之下並不穩定，難以應用水文模式之中。為解決此一問題，唯有尋求在整個集水區範圍尺度下的某種較能產生規則且可預測結果的簡化法則。基於此構想，荷頓 (Horton) 及史塔勒 (Strahler) 相繼提出了一套河川網路分級的方法以及相關經驗公式：稱為荷頓定律 (Horton's laws)。雖然這套分級方法及公式純由觀測結果而得，不具備任何數學或物理的基礎，然而由於其有效地簡化了複雜的量測及可得到與自然河系相近的結果，直到今日仍然廣泛應用於工程界之中。

今以單一河川平面流徑 (individual river plan forms) 為例，對碎形在自然界的應用作一說明。河川的長度無法很適切的表示。因為當地圖比例尺逐漸減少的时候，更多小的河川彎曲就會出現，使長度逐漸增加。最近的研究發現河川的蜿蜒形狀介於規則 (regular) 與完全隨機

(purely random) 的形狀之間。此項發現表示河川的形狀具有碎形特性。史諾(Snow)及尼可拉(1991)即將碎形分析應用在單一河川的平面流徑形狀上。

最先注意到河川長度隨量測尺度而變化，並利用雙對數圖加以分析者為理查森(L.F.Richardson)。理查森所使用的方法即為角規法，也就是在河川資料精度所許可的範圍內，利用一系列不同開幅長度的角規(量測尺度)以量得河川的總長度。如前所述，角規法非常適用於拓撲一維曲線的分析，因其可以藉由一系列彼此間差距甚小的量測尺度將被量測物體的特性完整地展現。在本文中所使用的角規法程式計算以一定開幅角規量完整段曲線所需的量測次數，以及最後所餘不足此開幅長的曲線剩餘長度(remainder)佔此開幅長的比例。以這兩項的和估算河川在特定量測尺度下的總長度。

角規法的應用對象除了只能應用在曲線之外，也有其他的限制。吉爾伯特(Gilbert)指出，雖然應用角規法可以很完整的獲知被量測曲線的性質，但只有在此曲線為嚴格的自我位似為前提下，所得到的結果才有意義。然而據史諾(1992)指出，在運用角規法量測卡區曲線(嚴格的自我位似集之一種)時，可能由於圖形過於規則，其結果並不若應用在統計上自我位似集的結果好。由於吉爾伯特的此項觀點是針對角規法可能誤用於描述自我仿射集(self-affine sets)而言，因此可能對「嚴格的自我位似」一詞的數學含義有所誤用。故正確的觀念應為角規法只適用於自我位似集的描述，不論此自我位似集的本質為嚴格自我位似或統計上自我位似。最近的研究都將河川視為統計上自我位似集。基於這項假設，在此試圖利用角規法對單一河川平面流徑加以分析。

由於台灣東、西部的地質構造有極大的不同，所以選擇西部八掌溪、朴子溪、北港溪、濁水溪、曾文溪、中港溪及北部新店溪和基隆河部份河段做為研究對象，並使用十萬分之一及二十五萬分之一兩種比例尺地圖。每個河川區段的資料經由數位板數化。這種數化的方式稱為「河川軸線數位化」(mid-channel tracing)，因為僅考慮河川的中軸流徑，並未考慮河道的寬度。在數位化時，兩個資料點間的最小差距設定為

五十公尺（按照真實尺度），也就是在十萬分之一地圖上的 0.5 公釐及二十五萬分之一地圖上的 0.2 公釐。在分析時，起始的尺度設定為一百公尺以避免因資料的精度而影響到分析結果。

分析的結果報告於附圖上。所示之雙對數圖又稱之為「理查森圖」(Richardson plot) 以紀念理查森的前驅研究。在理查森圖上可以清楚發現整個圖形是 S 狀，亦即在某兩個特定的尺度以上或以下，碎形特性即不復存在。這兩個尺度稱為上、下界 (upper and lower cut-offs)。在量測尺度比河川直線長度的十分之一大的時候，理查森圖出現不可靠的震盪。這種震盪的成因是開幅相近的角規可能會持續遇到或未遇到小的彎曲，因而嚴重影響所量得的總長度。然而這種震盪純由計算上的截位 (truncation) 而來，並不具物理上的意義。所以在圖三中，大尺度範圍的理查森圖已經加以適當處理使得震盪減少。在上、下界間存在一具有斜率 d_s 的斜線，所以此段區域的有效維度 (effective dimension)，亦即碎形維度或稱角規維度定義為 $D_d = 1 - d_s$ 。

曼德布洛 (1983) 根據海克 (Hack) 觀察所得之集水區主流長度—流域面積關係 (length-area relationship) 推測單一河川流徑的碎形維度為 1.2。而根據葛雷 (Gray) 所提出的較佳觀測值，此碎形維度應 1.136。塔伯等 (Tarboton) 表示其以角規法所做的河川分析結果與此值非常相近。表一中台灣八個河川區段維度值範圍由 1.08 到 1.28，並具有平均值 1.19。此值亦與推測值 1.136 相近。這裡所量測得的河川碎形維度與曼德布洛所推測的單一河川統徑維度彼此之間可能存在些許差異。塔伯等雖同以角規法分析單一河川流徑，但其圖形的量測尺度範圍比本文所使的範圍大以便順帶計算河川網路的總長度。在如此大的量測尺度範圍下，這裡所示理查森圖的 S 形狀特徵將成為塔伯等所量測的直線段上不易觀察的小起伏；亦即此 S 狀曲線已被拉為直線。而真正造成曼德布洛及塔伯所推論的河川碎形維度原因可能為在大於上界尺度時，河川仍可能還存在碎形特性。史諾 (Snow) 表示在許多類似本文理查森圖分析的例子中，大於上界尺度時河川仍可能具有碎形特性，雖然此時的維度值非常近於 1。因此這時的維度很可能即為塔伯等所觀測到的值。然而，由於理查

森圖在大尺度時的不可靠性，由本文中的理查森圖無法清楚了解是否量測尺度大於上界時，河川平面流徑是否仍具有碎形特性。不過可確知若仍為碎形，其維度必比位於上、下界之間部份的維度小。為了分別兩者之間的差異，在本文使用的名稱「蜿蜒碎形維度」(sinuosity fractal dimension)為位於上、下界之間所觀察到的維度命名。

在本文中的理查森圖中最主要的特徵為上、下界。史諾及尼可拉皆指出下界的尺度接近於河道寬度。尼可拉利用理查森圖建立了一個單一河川平面流徑碎形結構的模型並藉由此模型估算河床坡度及河谷坡度間的關係。此模型並可重新定義河川的蜿蜒度(sinuosity)。

河道寬度估算

尼可拉模型認為下界的尺度約與河道寬度相當。這項認定與實際的觀察結果有下列兩項出入：

- 一、與地圖上所顯現的河道寬度互相比較，本研究的理查森圖分析結果顯示事實上河道寬度應比下界的尺度少一個位數(order)，亦即河道寬度不與下界尺度相等，而約為其十分之一。由於「少一位數」僅表示一個模糊的數量概念，並非精確的數值，因此，本文所稱的「河道寬度」為全河段河道寬度的約略估計值。主要的用意在於強調單一河川平面流徑的碎形特性所能顯現的最小尺度約比河道寬度大一位數。此外，由於各河段的這種特性相當具有一致性，所以河段碎形分析的下界值對於估計河道寬度具有很大的價值。
- 二、尼可拉並未指出如何定義下界的尺度。本研究得到的理查森圖顯示在具碎形特性的中央部份斜線段，以及此部份外顯現的水平線段間是以曲線相連接，因此上、下界應位於中央部份斜線段的兩個端點上。反觀尼可拉模型，其假設中央部份斜線段和此部份外的水平線段直接相接，因此在相接處為突然的轉折，和本文所使用的點數較密理查森圖呈現的曲線有所出入，其可能的設定位置在如圖四所示的實線段上。值得注意的是雖然尼可拉的模型亦是建構在理查森圖分析數據之上，但是其所用的理查森圖點數過少

，並不足以充份表現河川的碎形特性。

根據本文所使用的較密理查森圖，尼可拉模型可加以改良如圖四所示。原尼可拉模型中關於河谷蜿蜒的部份在本改良模型中不予考慮。由圖四可知，尼可拉模型將兩個轉折點定義為上、下界，因此其模型與本研究所建議改良後的模型在下界處所取定的值可能有相當偏差。這可能即是尼可拉將下界尺度視為河道寬度的原因。很明顯地，較密的理查森圖有助於觀察河川流徑的真正行為。

河床坡度的估算

史塔勒根據數段河川的實測結果建議河谷坡度， G ，與河床坡度， S ，之間的關係可以下式表示：

$$\log G = 0.6 + 0.8 \log S \quad (8)$$

式(8)表示河谷的坡度與河床坡度的0.8次方成正比。但實際上本式僅為經驗式，並沒有任何理論根據。

尼可拉根據其模型推導出下式(9)以便從河谷坡度估算河道坡度。

$$\frac{L_r}{L} = \frac{I_v}{I_r} \quad (9)$$

式中

L_r 為河川的真實長度(actual length)

L 為大尺度流徑長度(course length)

I_v 為河谷坡度

I_r 為河床坡度

史諾(1989)稱 L_r/L 比值為河道的「碎形蜿蜒度」(fractal sinuosity)，並認為此值比其他關於蜿蜒度的定義都要更加穩定可行。

式(9)表示河谷坡度與河床坡度成正比。兩個理查森圖所提供參數之一， L_r 表示當量測尺度小於下界尺度時河川的長度。由理查森圖可知，在尺度小於下界時將呈現一條水平線，而此水平線即表示河川長度趨向定值。此定值即為 L_r ，稱為河川的「真實長度」。對另一參數 L ，史諾及尼可拉均定義為在上界尺度時河川的長度。但尼可拉模型由於點

數過少的原因，並未能清楚指出如何定義上界。本文中較密的理查森圖顯示在上界的尺度附近仍為一段曲線，並在尺度大於上界時有一段水平線趨勢（或認為其具有碎形特性，即很小的斜率）。實際上，上界應定義於中央部份斜線段的較大尺度端點上，亦即一旦尺度持續增加，脫離此斜線段進入曲線部份後即不再具有同樣的碎形特性。而尼可拉模型由於點數過少的原因，並不易發覺此曲線段。故推論尼可拉可能將上界設定於圖四右方尺度較大的轉折點上；而其所定義的大尺度流徑長度 L （亦即上界時的河川長度）即落在右方的水平線上。因此，本文所使用的較合理定義會比尼可拉的定義得到較小的上界值及較大的 L 。所以在真實長度 L_r 取法一致的情況下，本文的定義會造成較小的 L_r/L 比值；並對固定的河谷坡度得到較大的河川坡度估計值。由表一可知估算台灣八個河川區段結果發現河床坡度約為河谷坡度的0.45到0.75倍。這個範圍稍嫌偏高，其原因可能即如上述。

河川網路的碎形維度

今以不同的門限流量萃取河川網路，並以鯉魚潭集水區為例，可以進行網格計數法的碎形分析。圖形顯示當門限流量逐漸增加時，網格維度逐漸減少，亦即河川網路漸趨簡單，佔據平面的程度逐漸減少。門限流量值與網格維度之間大致上呈現冪次衰減現象，但並沒有很明顯的關連性。當門限流量的設定使河川網路僅僅出現一條主流時，網格維度約為 1.073。

討論：

此分析顯示較密的理查森圖較能完整表現河川的特性。並且在本文中已根據理查森圖建立一可估算河道寬度與河床坡度並據以決定蜿蜒度的新模型。此模型可直接將地圖上的高程、河道形狀資料轉化為須實地測量而且不易獲致的河床坡度及河道寬度估計值，程序非常簡單一致，應可成為工程設計或處理具地文參數的水文模式的一項參考。惟現今仍需要更多實測資料以檢定公式的正確性。

在本研究中所進行的碎形分析根基於河川為統計上自我位似集的假設上。然而，最近的研究發現事實上許多自然界物體具有自仿射性，亦

即對一個物體而言很可能其與尺度無關的特性由兩個以上獨立變數（如時間與距離）分別控制。直到今日尚未有探討河川流徑是否為自我仿射曲線的研究。由於單一河川流徑的碎形結構對整體河川網路的碎形結構所產生的影響在最近的學術界產生爭議，因此對單一河川流徑更多的研究是必要的。對於河川網路的累次衰減與門限流量的關係仍不明瞭，然而有可能利用河川網路維度來估計門限流量的選擇。

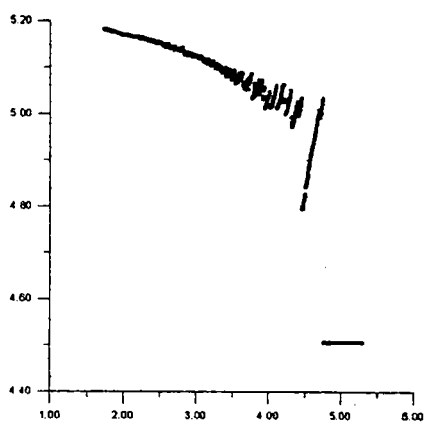
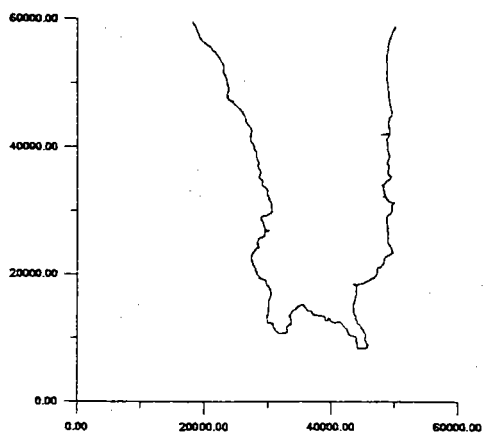
海岸線的碎形結構

海岸線形成受到自然界地質、氣候及潮汐所影響。海岸線的長度與蜿蜒度可由地圖或空照圖中加以量測，但是不同的觀測尺度或不同的地圖精度都可能產生不同的數值結果。

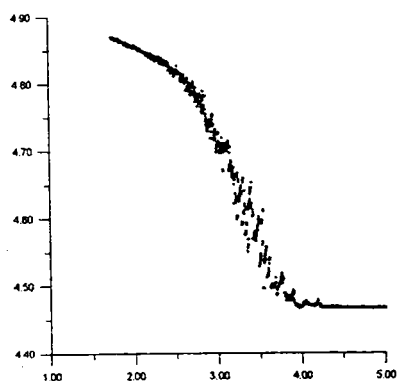
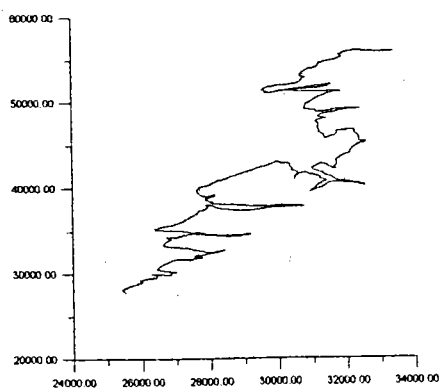
本文以台灣地區海岸線為例，對碎形在自然界的應用作一說明。值得注意的是海岸線的長度無法很適切的表示。當地圖比例尺逐漸減少的時候，更多小的海岸變曲就會出現，使長度逐漸增加。

吾人可利用雙對數圖加以分析。所使用的方法即為角規法，也就是在海岸線資料精度所許可的範圍內，利用一系列不同開幅長度的角規（量測尺度）以量得海岸線的總長度。如前所述，角規法非常適用於拓樸一維曲線的分析，因其可以藉由一系列彼此間差距甚小的量測尺度將被量測物體的特性完整地展現。

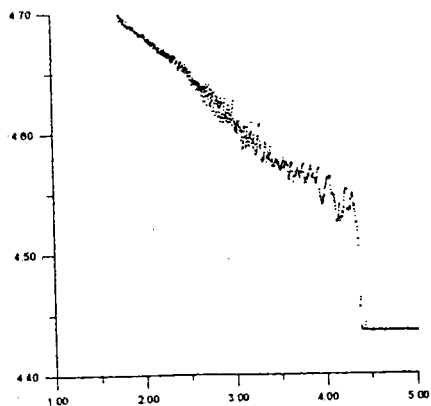
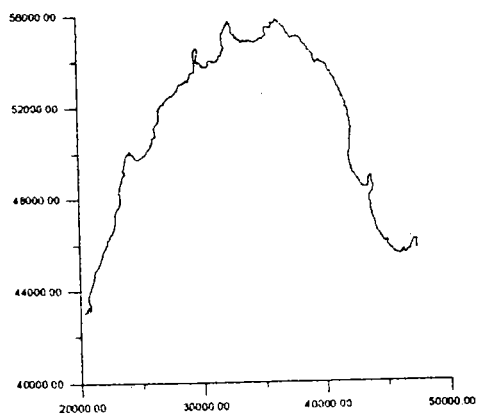
此次選擇台灣四個地區的海岸線作角規分析之研究對象，此四個地區分別為枋寮（圖一）、北門（圖二）、野柳（圖三）與清水（圖四）。使用二十五萬分之一比例尺地圖。整段海岸線的資料經由數位格數化，在數化時，兩個資料點間的最小差距設定為五十公尺（按照實際長度），也就是在二十五萬分之一地圖上之0.2公釐。在分析時，起始的尺度設定為五十公尺以避免因資料的精度而影響到分析的結果。



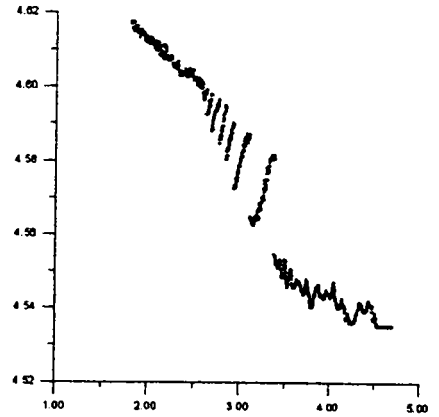
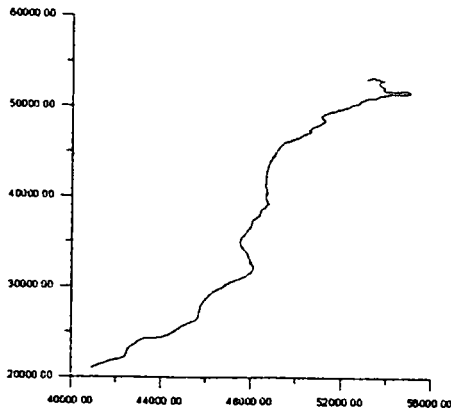
圖一、枋寮地區海岸線圖與理查森圖



圖二、北門地區海岸線圖與理查森圖



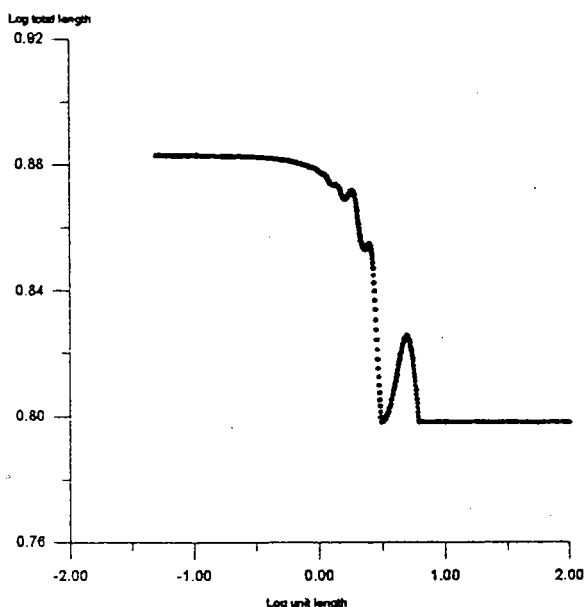
圖三、野柳地區海岸線圖與理查森圖



圖四、清水地區海岸線圖與理查森圖

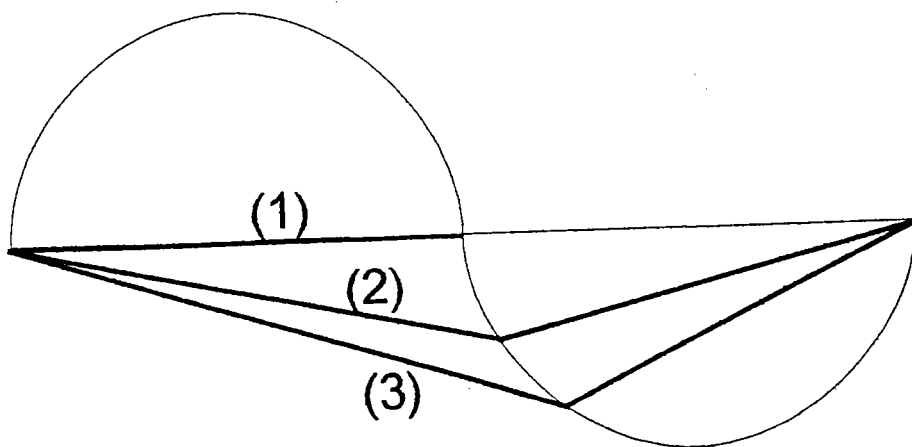
次圖為分析北門地區之結果。由該雙對數圖（即理查森圖）上可看到整個圖形是S狀，亦即在某兩個特定尺度以上或以下，碎形特性即不再存在。這兩個尺度稱為上界 (upper cut-offs) 與下界 (lower cut-offs)。在上、下界間存在一具有斜率 d_s 的斜線。依照角規法的定義 $D_d = 1 - d_s$ ，可推求出此段區域的碎形維度（或稱角規維度）為1.29。

北門地區之理查森圖為此次分析的四個地區中較標準之理查森圖，其原因為在北門地區其海岸線為砂岸所構成，砂岸之特色為海岸線較為曲折，故在作碎形分析時其結果較為理想。吾檢視其他三個地區所產生的圖形可發現，枋寮及清水地區，其理查森圖中有明顯的正斜率之線段發生，就是說，當量測的開幅越大時，所量測到的海岸線長度就越長。這似乎與當初曼德布洛所認為的當所量測的尺度越小則所量得的海岸線長度就越長的看法大異其趣。對於這個問題，吾先檢視對 Sin 作角規法時所產生之理查森圖：



圖五、Sin 之角規法分析

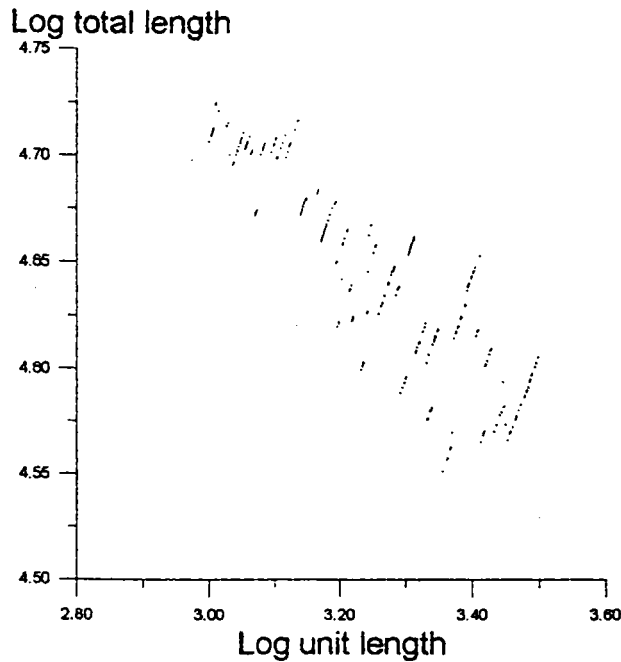
由此圖可看出對 Sin 作角規法時所產生之特殊情況，即產生了斜率為正值之斜線（不包括上下界），此斜率代表了當角規法之開幅越大其所量測之長度越長，乍看之下似乎違反了常理，但仔細分析便發現此為正常現象。舉例來說，當開幅為 $1/2$ 時，量得之長度 l （如圖六之(1)）（此為量測 Sin 時所能量測到之最短長度），此後開幅一直增加，在開幅為 1 之前所量測之長度均不可能小於 1 。又如在 Sin 的後半段（如圖六之(2)、(3)），由圖可明顯看出當開幅越大，其所量測之長度越長。



圖六、不同開幅對 Sin 所作之角規法

清水與枋寮，由分析圖中可明顯看出其皆有類似 Sin 之正斜率之斜線，造成此原之因素為：其海岸線之結構較與 Sin 類似，即其曲線內較容易分離出數個 Sin 之曲線，故產生類似 Sin 之斜線，又因為是由數個大小不同之 Sin 所組成，所以其斜線亦為多條。

具有較標準理查森圖之北門地區，若仔細檢視其圖亦會發現其也是由許多正斜率的斜線構成。若再局部放大該圖將可清楚的看到類似 Sin 的正斜率線段。

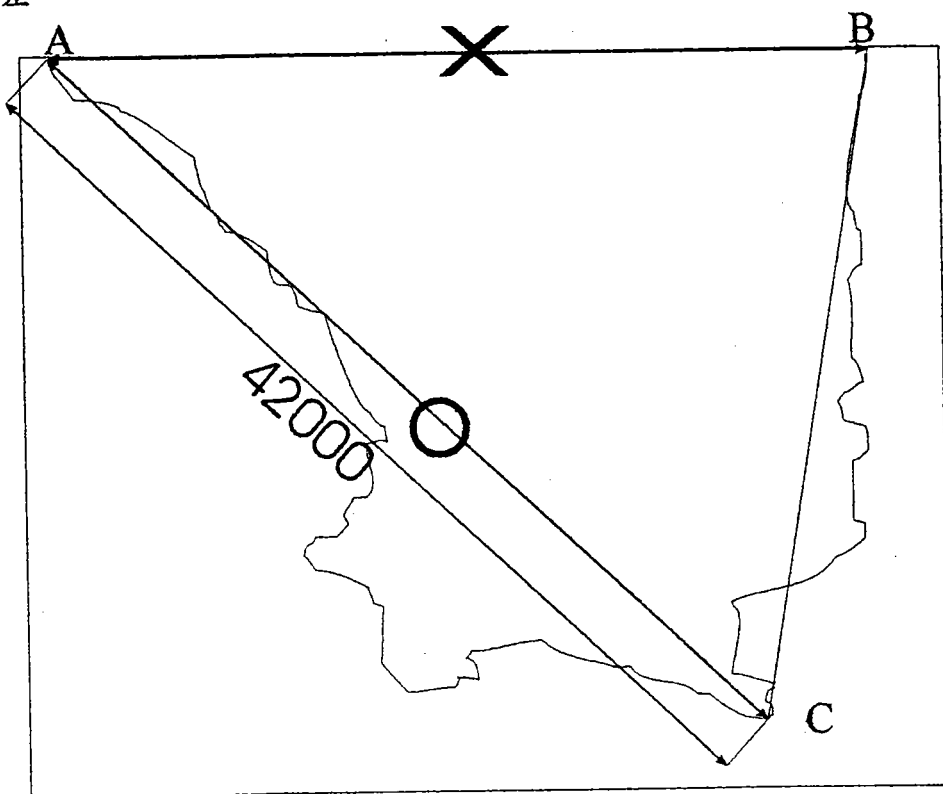


圖七、北門地區之局部放大圖

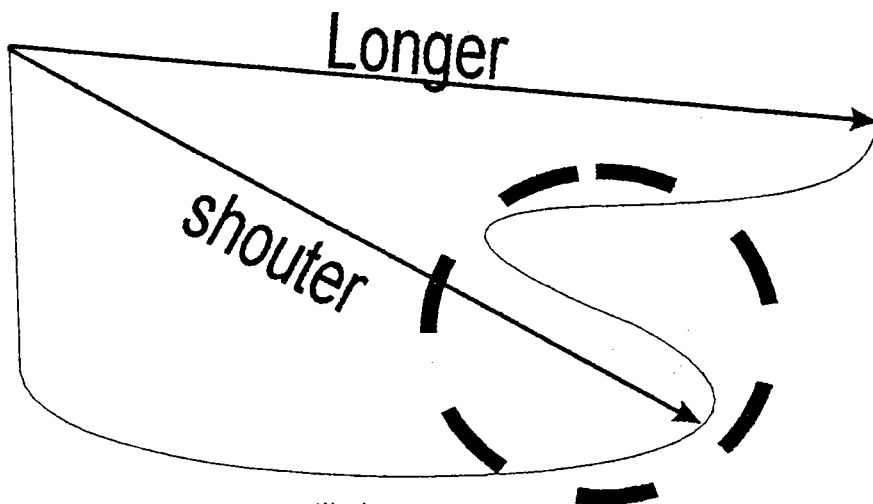
若繼續作局部放大，則又會發現其在正斜率的線段中，又是由數個大小不一的正斜率線段所構成，如此無窮無盡，則似乎又進入了另一種不同形態的碎形當中。

另一個現象為當開幅接近上界時，其點群會突然中斷，且與上界有極大之落差（圖一與圖三），此原因為：由圖一與圖四可看出一明顯之特徵即其皆有 U 字形之特色，以另一種說法即開幅所能展開之最大長度並非發生於曲線之兩端，而是發生在兩端之當中（如圖八）。如枋寮（圖一）之海岸線，其最大開幅為圖八中打圈之段其長度約為 42000，取 Log 後為 4.6。程式在計算角規法時所依循之規則為由起點 A 開始，尋

找AB曲線上直線長度=開幅的點C，若BC不及一開幅長，則 $AC+BC$ 為總長度估計。由於此例中最大開幅並非發生於兩端，因此在達到最大開幅後由於AB曲線段上沒有一點可符合 $AC=$ 開幅長的條件，所以AB即成為總長度估計值，而 $AC+BC>AB$ ，所以會有落差發生。同理，若圖形呈現如圖九，在較短開幅處其曲線有斜率為負之彎曲時（如圓圈標記處）亦會發生落差。

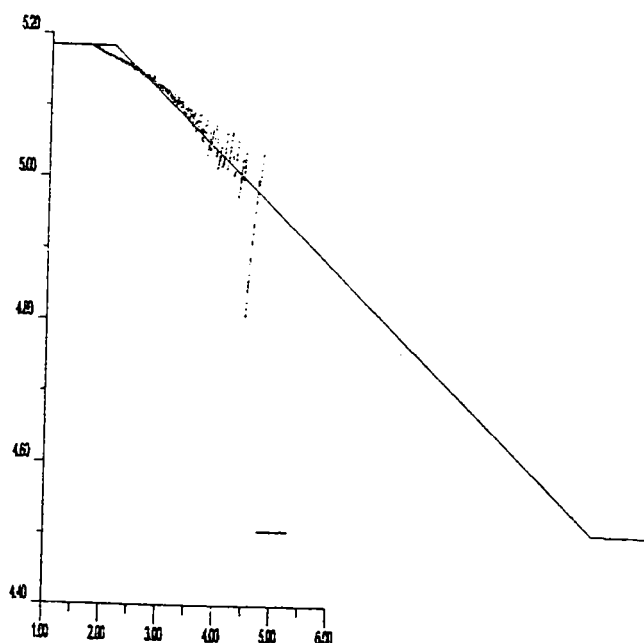


圖八、最大開幅並非發生於兩端



圖九、呈現內凹之彎曲

枋寮地區之理查森圖（圖一）所展現出的圖形相當奇特，難以判斷其上下界，更遑論其斜率。本次研究定其斜率的方法為斜線取在碎形特性明顯之處，而其右端之水平線由於為無限向右延伸，故可如圖十取之。



圖十、斜線取在碎形特性明顯之處，其斜率為 -0.11

碎形維度值越接近於整數則表示其在該領域（如一維到二維之間）內表現出越複雜之面貌，如一條直線，其維度值為 1。若加以彎曲，則其碎形維度將升高，如 1.1。若彎曲複雜，則維度值將繼續升高，如 1.3。如此繼續，其維度值將升高到接近於 2。所以吾可說，碎形維度高表示複雜度越高。在自然界中，同一領域的自然維度 (natural fractals) 越高，表示其自我位似性 (self-similarity) 越好，此時可將碎形維度值作為比較信心度之依據。如此次所研究的四個台灣海岸線，理查森圖表現最佳的北門地區，其維度值亦最高，觀察其海岸線也可以發現該海岸線彎曲最為複雜。

在一般人的印象中，沙灘的曲線是平緩柔和而岩岸則較為曲折，但在本研究中因採用 1 : 250,000 之比例尺，所呈現出之海岸線圖反而是

岩岸較為平直而砂岸則較曲折。此牽涉到尺度的影響時，原圖之解析度便顯得相當重要。在本研究中讀取海岸線的點間隔為 50m（真實長度），勢必無法表現出岩石之曲折多變。又解析度之改變會影響碎形維度值，因此在選擇比例尺與點與點之距離時，必須考慮如何能把碎形程度適切表現出來，而同時又能兼顧資料的可信度。

如枋寮地區之理查森圖有明顯之落差時，其碎形維度所取之斜線應取碎形特性明顯之處（如圖十）。

第四部份：滲流形狀的碎形特性

在上個世紀末期，海里－蕭 (Hele-Shaw) (1898) 發展出一簡單的系統，用來研究在低雷諾數時水的各種不同現象。他設計包含兩透明玻璃平板之槽，長約 30cm，兩平板間距離約 1mm。流體可由平板的一端或上層平板的中心注入。此槽即為海里－蕭裝置 (Hele-Shaw cell)。海里－蕭裝置具有非常簡單、規則性的特徵，並且容易觀測流體的運動，在分析上極為方便，因此大多數的學者都採 Hele-Shaw 模式作為理論分析和試驗上的觀測，一方面簡化邊界的複雜性，並可將其視為二維的流動；另一方面可使物理的行為而非複雜的數學問題。

Hele-Shaw cell 最大的特徵為其薄板的寬度 W 與兩薄板間所夾的厚度 b 相差極為懸殊，若以數學式來描述可寫成 $(b/w \gg 1)$ 。而兩不互溶的流體所形成即為指頭流 fingering。

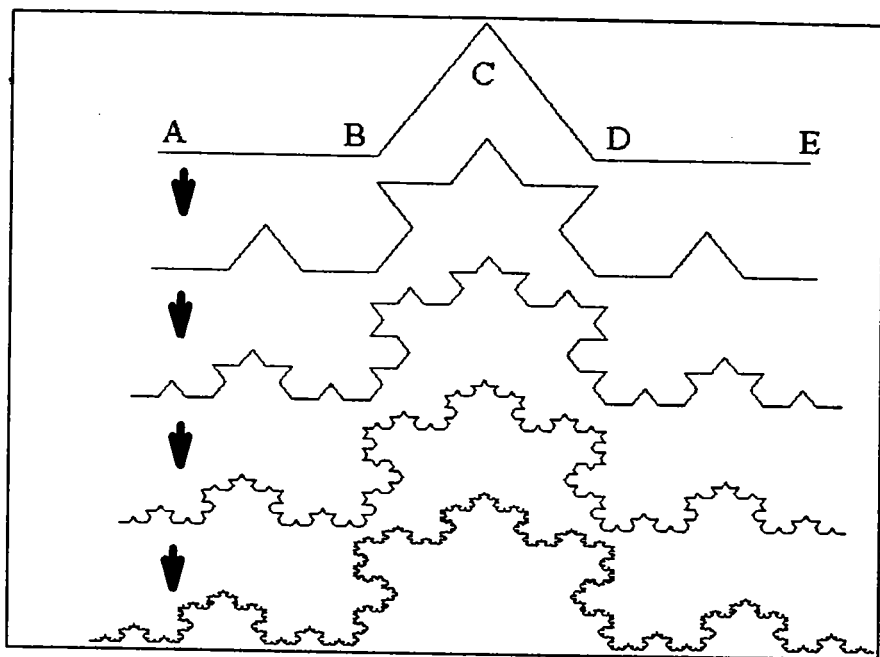
泰勒 (Taylor (1950)) 指出，兩種不同密度的流體，在互相侵入取代的過程中，其接觸面的穩定與否和其移動的方向有極大關係。若密度較大的流體侵入密度較小的流體，其接觸面為穩定狀態；反之為不穩定狀態。

在傳統的海里－蕭裝置 (Hele-Shaw cell) 的試驗中，兩不互溶之間是沒有介質存在的，但是現今的研究的研究情況已經完全改變，目前研究的重點為在兩流體在完全隨機的情況下，在多孔隙介質中互相接觸取代的情形。試驗的方法多為以透明的兩壓克力薄板構成一扁平的通道，當中填充多孔隙之介質。流體由薄板的一側或上層薄板的中心點注入

。若注入之速度大，則控制整個流場變化者為流體與孔隙間之黏滯力，反之，控制流場之力為表面張力。

在加入介質之後的研究，重點是放在初始時期導致指頭流發生之溼潤指尖。格拉斯等 (Glass et al) . 將水以連續方式注入含均質砂土的 Hele-Shaw cell 中，發現指頭流之指尖速度為一常數。他們並認為發展中之指頭流，其濕度剖面之移動垂直於指尖的速度。

近年來，有關均質砂土之研究相當多，如斯而克 (1991) 在同一時間內量測 5 個指頭的成長。他以相同的試驗方式研究 20 至 30 種砂土。並繪製其指尖位置與時間的關係圖。結果發現其斜率在 $0.999 \sim 0.994$ 之間，這一點支持了在良好條件與定義下，指尖速度為一常數之推論。Selker (1991) 並且繪製指頭流的成長過程，他發現成長中的指頭流最先由高濕度區開始，指頭必需克服水進入砂土之入滲壓，最後在特別低濕度區落下，此時指頭流發生。他並且證實濕度剖面在指尖移動時並沒有發生移動上的改變。



圖、三角卡區曲線之建構過程

其中A,,B,C,D,E分別為固定點(0,0),(1/3,0),(1/2,1/3),(2/3,0),(1,0)，今利用固定尺度轉換法(scale-invariant transform)轉換此圖形。

令下一點之座標與原先座標有著一函數關係：

$$(x_{i+1}, y_{i+1}) = f(x_i, y_i)$$

$$\text{而 } f_{AB}(x, y) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

其中 $\begin{bmatrix} -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$ 稱為收縮矩陣(shrink matrix);

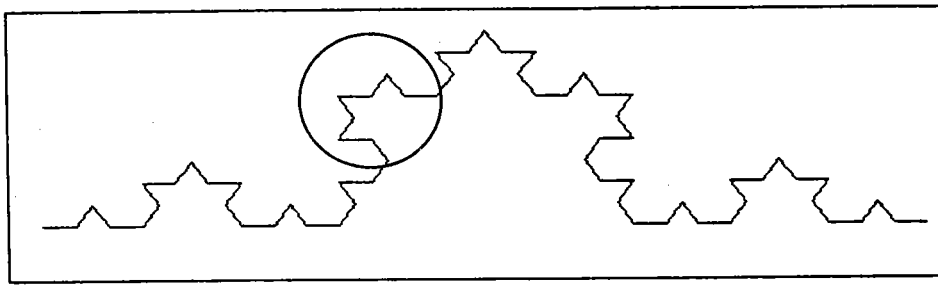
$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ 稱為移動矩陣(translation matrix)

$$\text{則 } f_{DE}(x, y) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

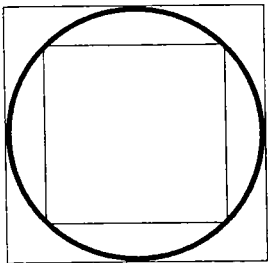
$$f_{BC}(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$f_{CD}(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{6} \end{pmatrix}$$

其中 $\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$ 表示旋轉矩陣(rotation matrix)

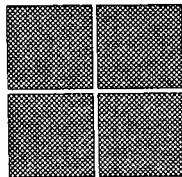
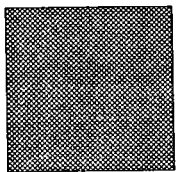


圖：三角卡區曲線之拓樸維度計算：曲線上任一點的小鄰接（以圓圈表示）
與此圖形交於一有限的點集合，故為拓樸一維



圖：圓形之豪斯道夫維度計算法

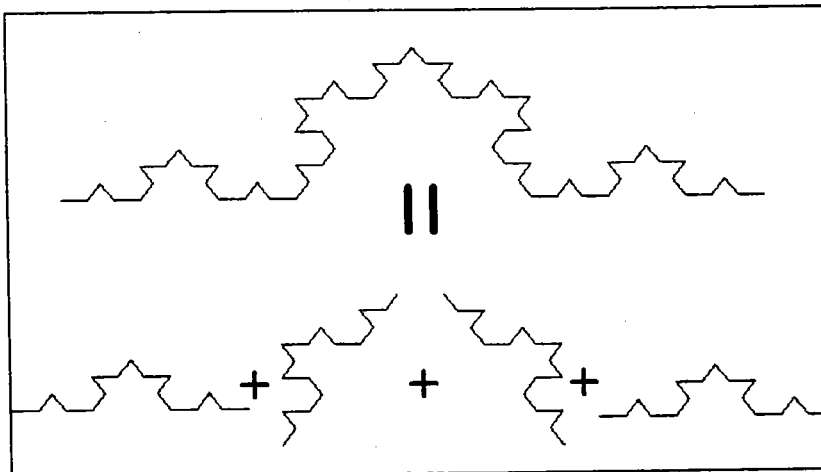
一個圓形可包含一個二維的方形，亦可被一個二維的方形所包含，因此其豪斯道夫維度為二維。



圖：正方形之位似性維度計算法

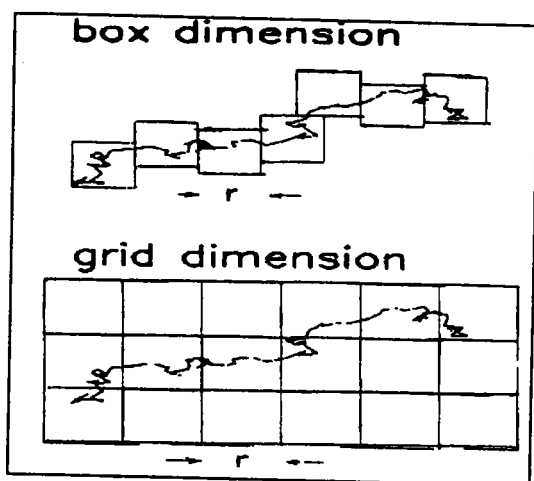
正方形可分為四塊由原圖形縮小二倍而成的小正方形，因此其位似性維度

$$\text{等於} 2 : D_s = \frac{\ln(4)}{\ln(2)} = 2$$



圖：三角卡區曲線之位似性維度計算法：三角卡區曲線可視為由四個縮小三

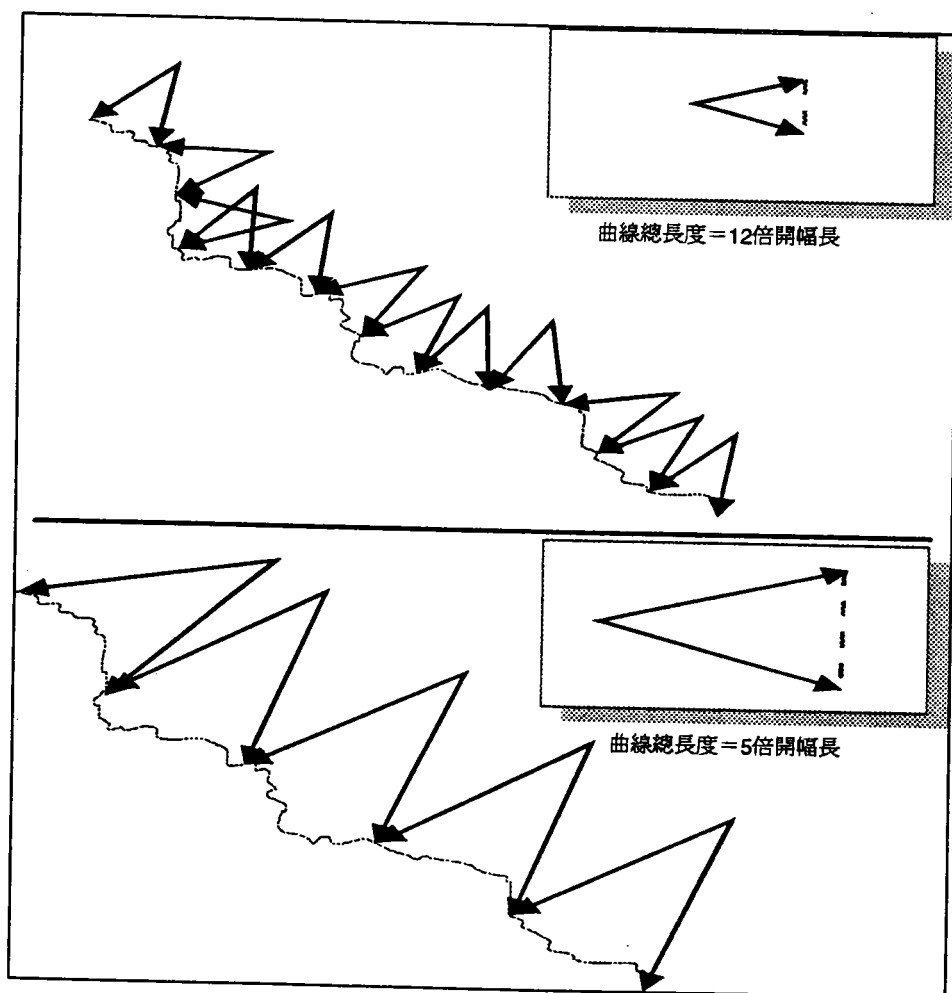
倍的小段所蓋滿；故其位似性維度可以下式求出： $D_s = \frac{\ln(4)}{\ln(3)} = 1.2618$



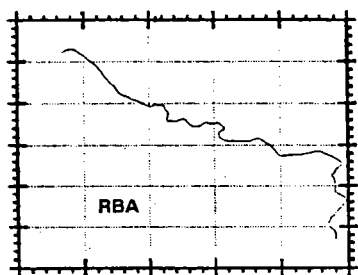
圖；網格維度的計算

將互不重疊的 n 維網格（通常使用二維）覆蓋在所欲求出維度的物體上，計算網格邊長和蓋滿所需數目之間的關係

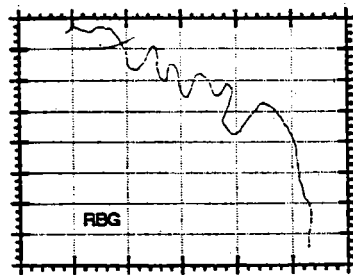
$$N(r) \propto \frac{1}{r^D}$$



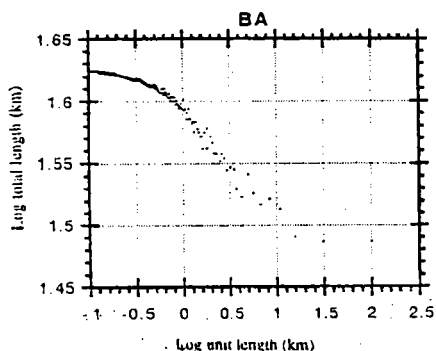
圖：角規法量測方式：每次使用不同開幅長度的角規量得曲線的總長，再將角規開幅 (divider open length) 及所量得總長度各取對數繪於直角座標圖上。求得圖上斜線之斜率 d_s 。則碎形維度，或稱角規維度。其維度值為： $D_s = 1 - d_s$



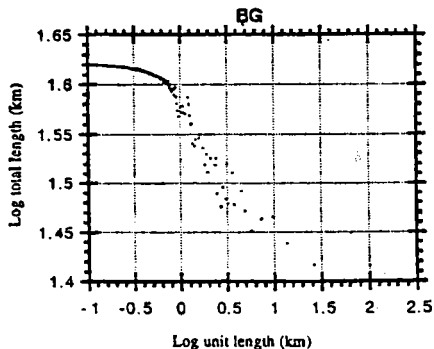
橫軸每一大格表示 5 公里，每一小格表示 1 公里
縱軸每一大格表示 5 公里，每一小格表示 1 公里



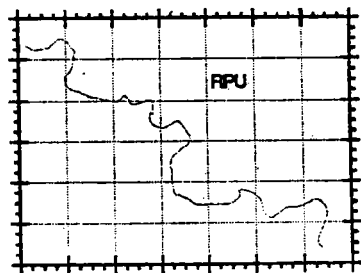
橫軸每一大格表示 5 公里，每一小格表示 1 公里
縱軸每一大格表示 2 公里，每一小格表示 0.5 公里



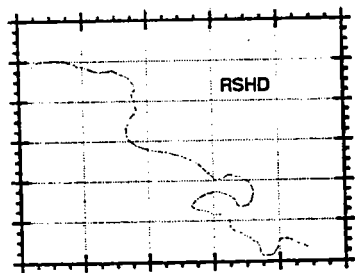
八掌溪，河口—外溪洲，十萬分之一比例尺



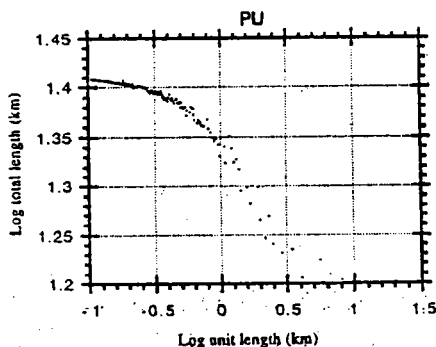
北港溪，河口—西鎮，十萬分之一比例尺



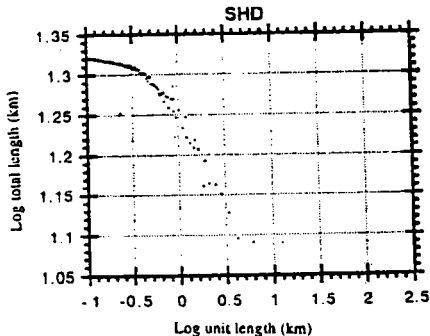
橫軸每一大格表示 2 公里，每一小格表示 0.5 公里
縱軸每一大格表示 2 公里，每一小格表示 0.5 公里



橫軸每一大格表示 2 公里，每一小格表示 0.5 公里
縱軸每一大格表示 2 公里，每一小格表示 0.5 公里



朴子溪，河口—蒜頭，十萬分之一比例尺



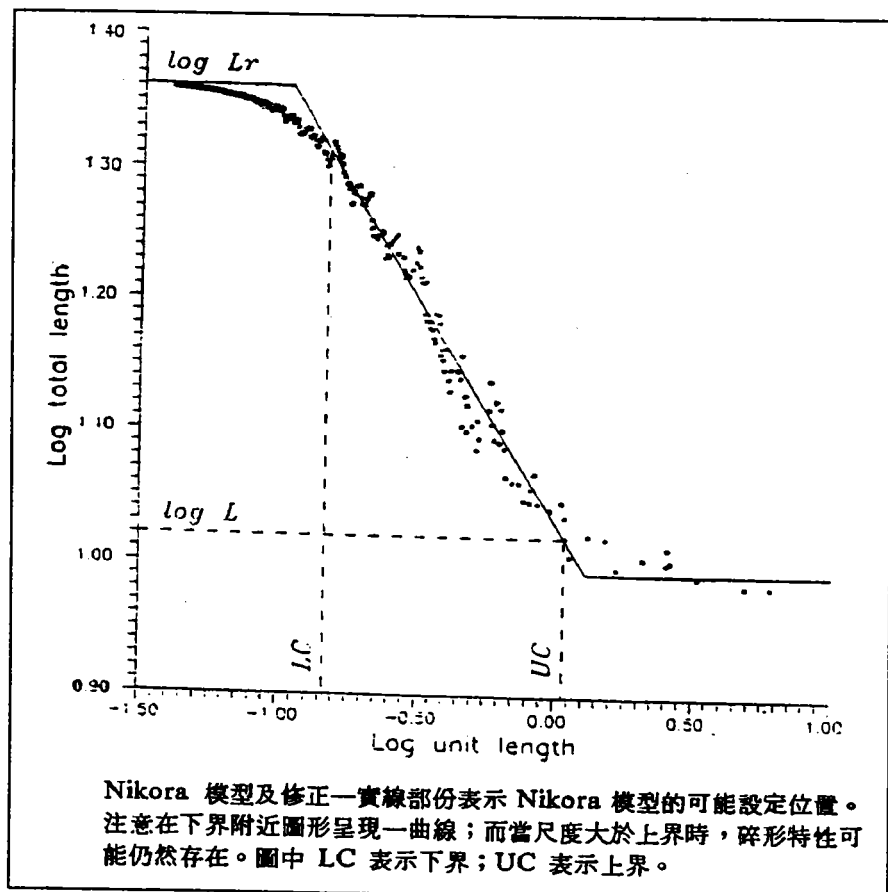
新店溪，永和—一曲尺，二十五萬分之一比例尺

圖：以角規法分析台灣河川網路：研究結果發現台灣西部八個河川區段蜿蜒
碎形維度值範圍由 1.08 到 1.28，並具有平均值 1.19

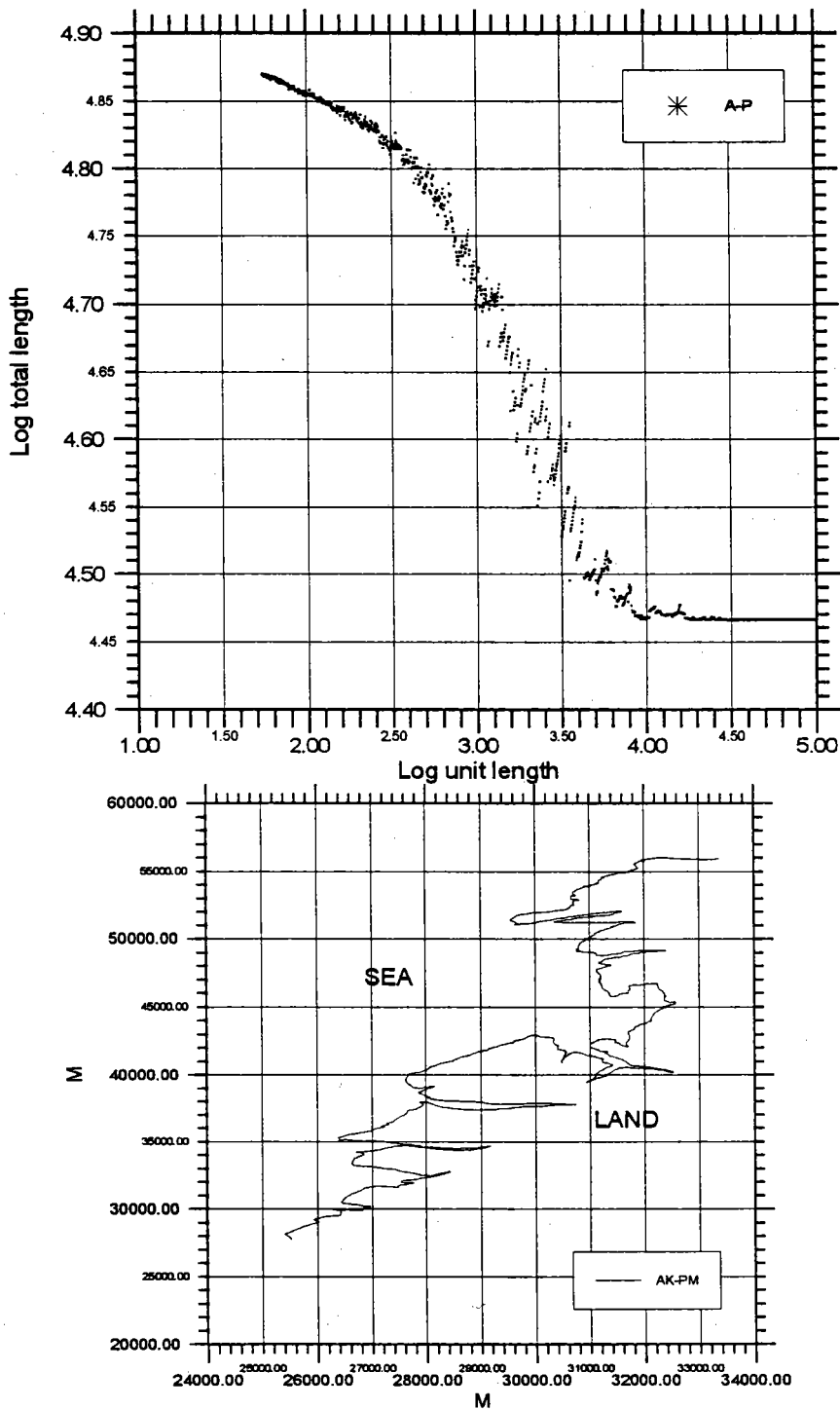
表：台灣西部八個河川碎形分析結果：碎形維度值範圍由 1.08 到 1.28，具有平均值 1.19。估算八個河川區段之河床坡度約為河谷坡度的 0.45 到 0.75 倍。

	蜿蜒碎形維度	下界 (m)	上界 (m)	碎形蜿蜒度 (L_r/L)	河道約略寬度* (m)
八掌溪 河口—外溪洲	1.08	650	15,140	1.36	80
北港溪 河口—西鎮	1.17	790	3,980	1.39	80
朴子溪 河口—蒜頭	1.21	610	2,990	1.51	100
新店溪 永和—曲尺	1.21	470	3,160	1.59	100
濁水溪 地利—武界	1.26	320	3,310	2.16	30
曾文溪 河口—曾文水庫	1.13	870	17,380	1.58	200
中港溪 河口—南庄	1.18	710	9,770	1.77	50
基隆河 士林—七堵	1.28	420	2,040	1.74	75

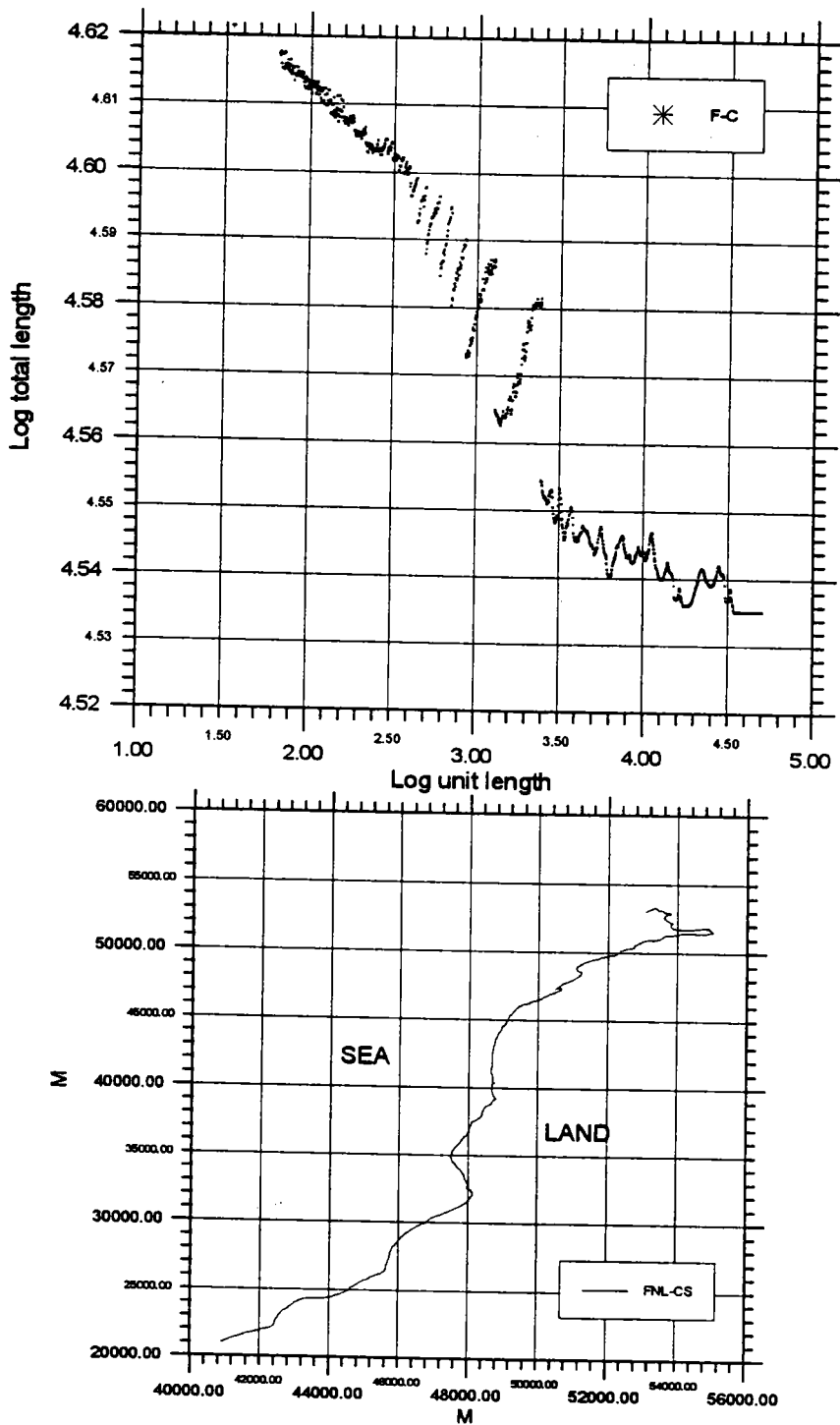
* 河道約略寬度由地圖量測



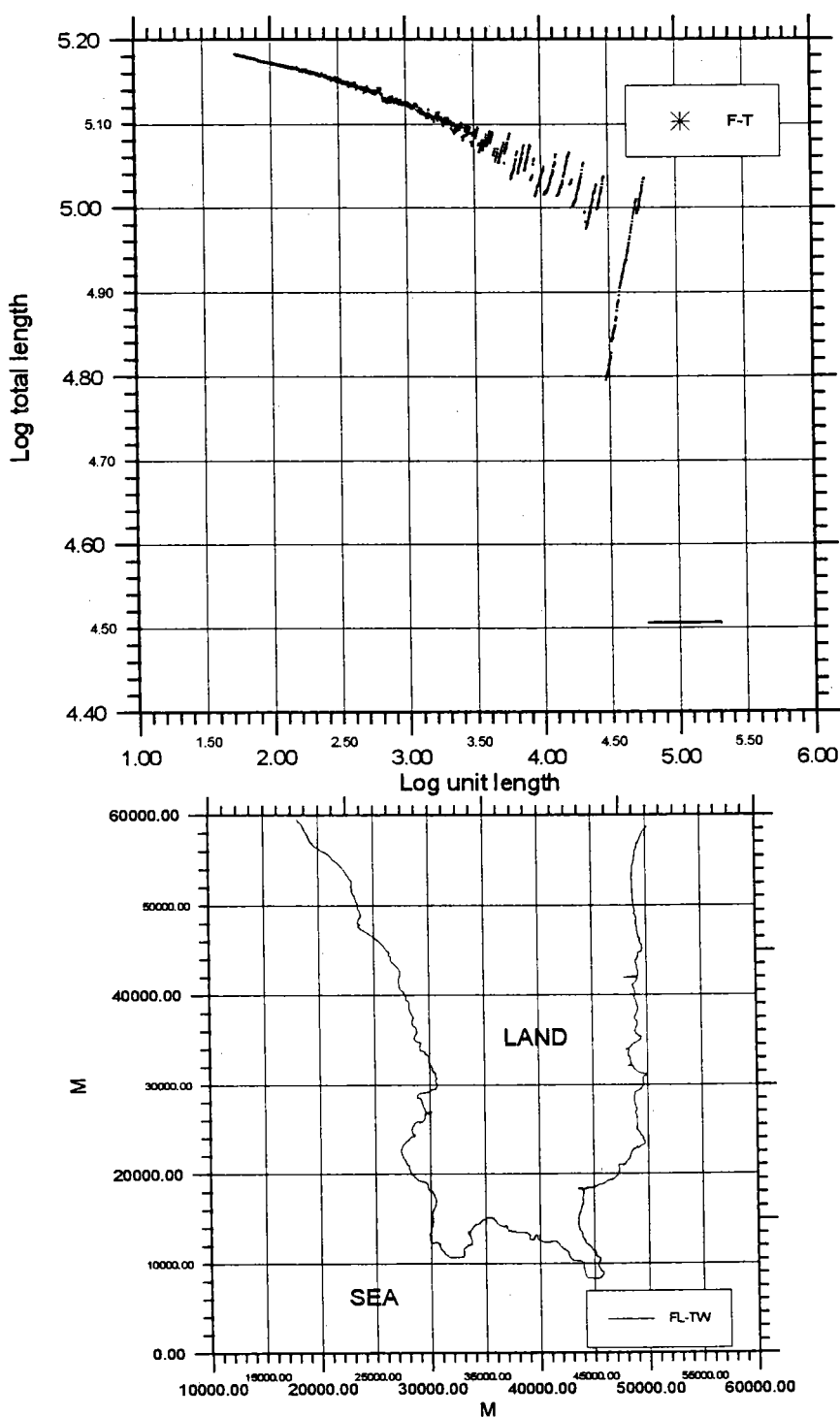
圖：雙對數圖又稱為「理查森圖」(Richardson plot)：整個圖形是 S 形，亦即在某兩個特定的上、下界尺度外，碎形特性即不存在。在上、下界間存在一具有斜率 d_s 的斜線，此段區域的碎形維度，定義為 $D_d = 1 - d_s$ 。



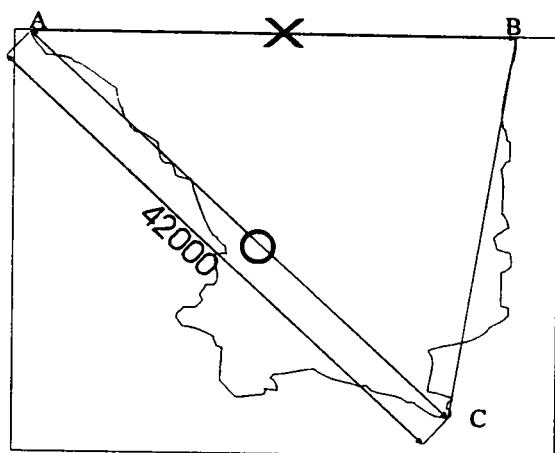
圖：北門地區之理查森圖與海岸線圖：使用二十五萬分之一比例尺地圖。海岸線的資料經由數位板數化，在分析時起始的尺度設為一百公尺以避免因資料的精度而影響到分析結果。結果與分析台灣河川網路之結果最為接近，其原因為在北門地區其海岸線為砂岸所構成，砂岸之特色為海岸線較為曲折，故在作碎形分析時其結果較為理想。



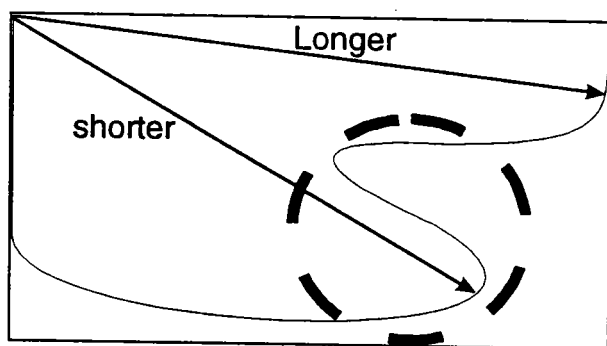
圖：清水地區之理查森圖與海岸線圖：使用二十五萬分之一比例尺地圖。海岸線的資料經由數位板數化，在分析時起始的尺度設為一百公尺以避免因資料的精度而影響到分析結果。圖中有類似 $\sin$ 之正斜率之斜線，其海岸線之結構較與 $\sin$ 類似，即其曲線內較容易分離出數個 $\sin$ 之曲線，故產生類似 $\sin$ 之斜線。又因為是由數個大小不同之 $\sin$ 所組成，所以其斜線亦為多條。



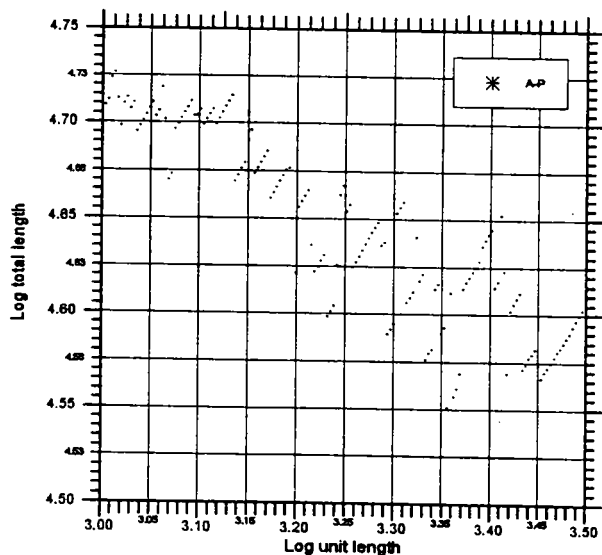
圖：枋寮地區之理查森圖與海岸線圖：圖中有類似 $\sin$ 之正斜率之斜線，其海岸線之結構易分離出數個大小不同類似 $\sin$ 所組成。又當開幅接近上界時，其點群會突然中斷，且與上界有極大之落差，此原因為一明顯之特徵即其皆有U字形之特色，即開幅所能展開之最大長度並非發生於曲線之兩端，而是發生在兩端之當中。



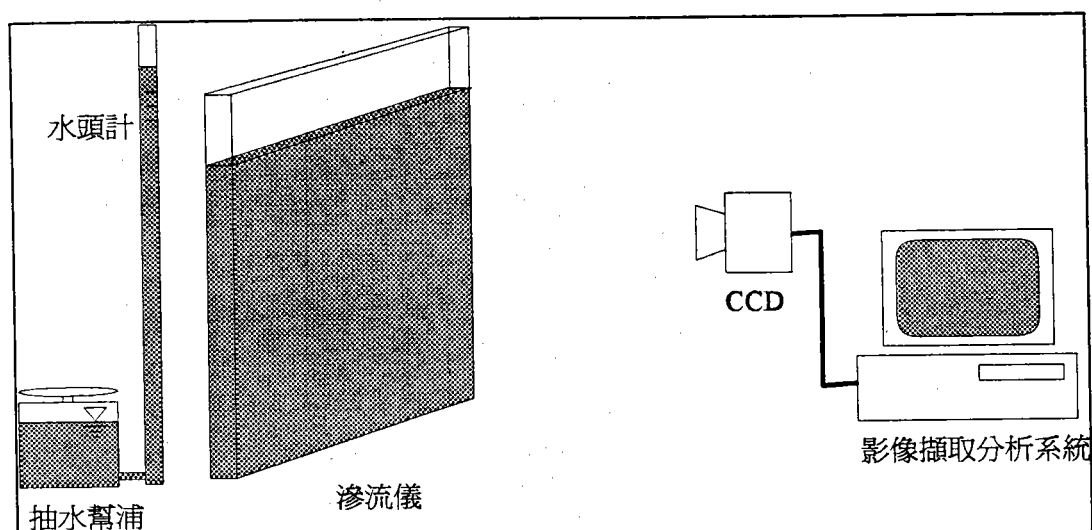
圖：最大開幅並非發生於兩端：開幅所能展開之最大長度並非發生於曲線之兩端，而是發生在兩端之當中。如枋寮之海岸線，其最大開幅為圖中打圈之段，其長度約為 42000，取 Log 後為 4.6。程式在計算角規法時所依循之規則為由起點 A 開始，尋找 AB 曲線上直線長度=開幅的點 C，若 BC 不及一開幅長，則 $AC + BC$ 為總長度估計。由於此例中最大開幅並非發生於兩端，因此在達到最大開幅後由於 AB 曲線段上沒有一點可符合 ($AC = \text{開幅長}$) 的條件，所以 AB 即成為總長度估計值，而 $AC + BC > AB$ ，所以會有落差發生。



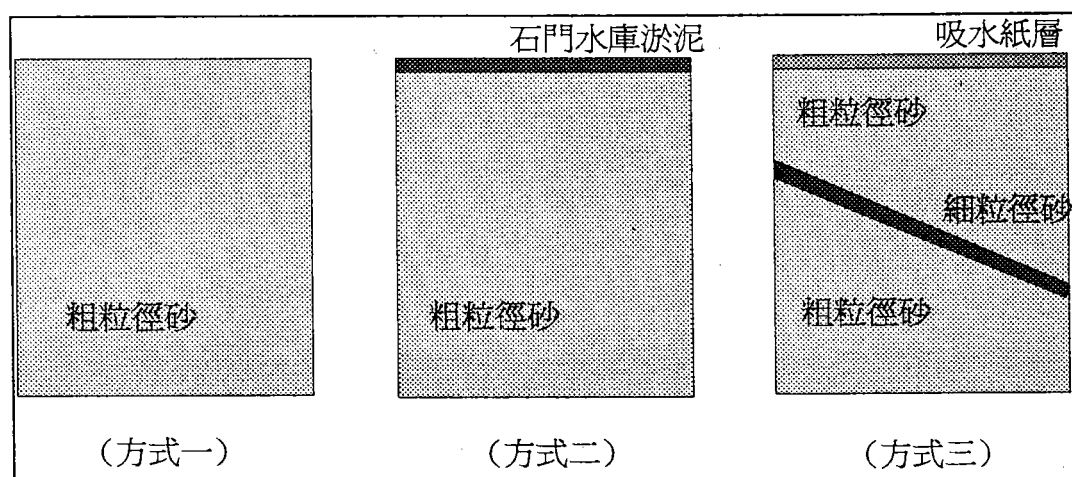
圖：呈現內凹之彎曲：在較短開幅處其曲線有斜率為負之彎曲時（如圓圈標記處）亦會發生落差。



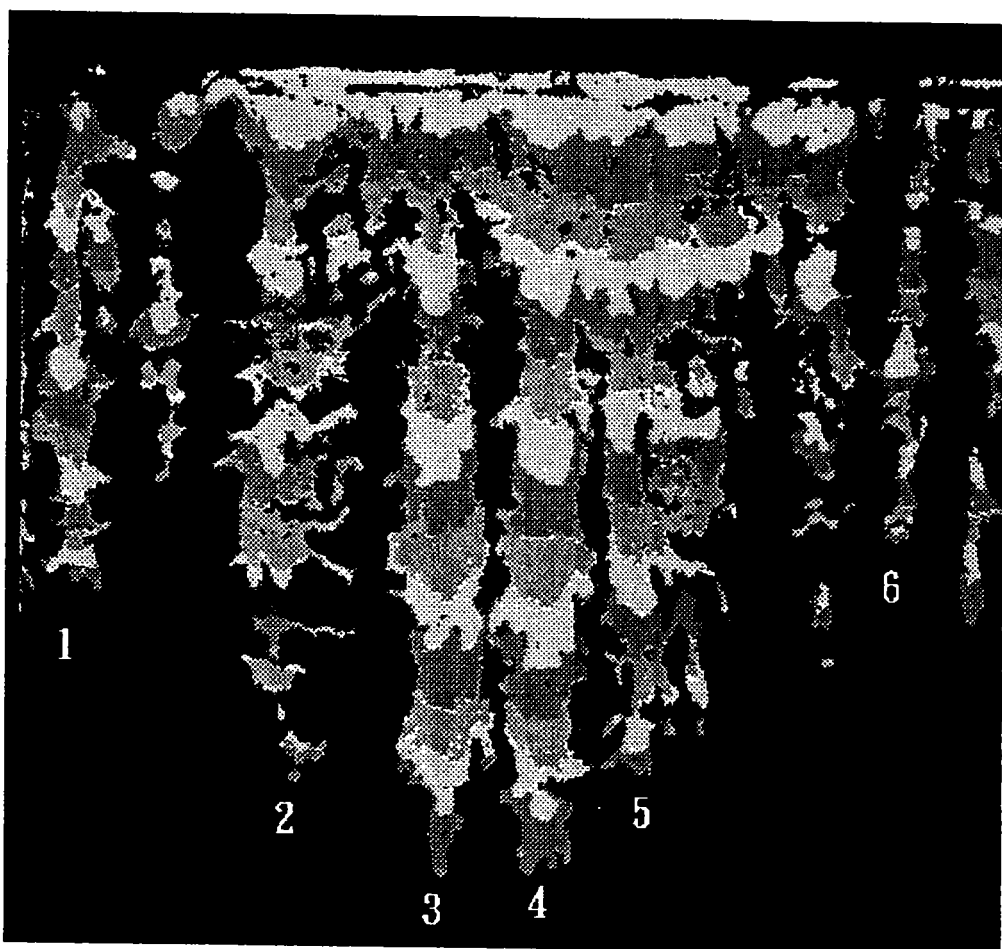
圖：北門地區之局部放大：若將北門地區之角規法作圖局部放大，可發現許多成正斜率之斜線，此可說明其亦為由數個 Sin 圖形所組成。



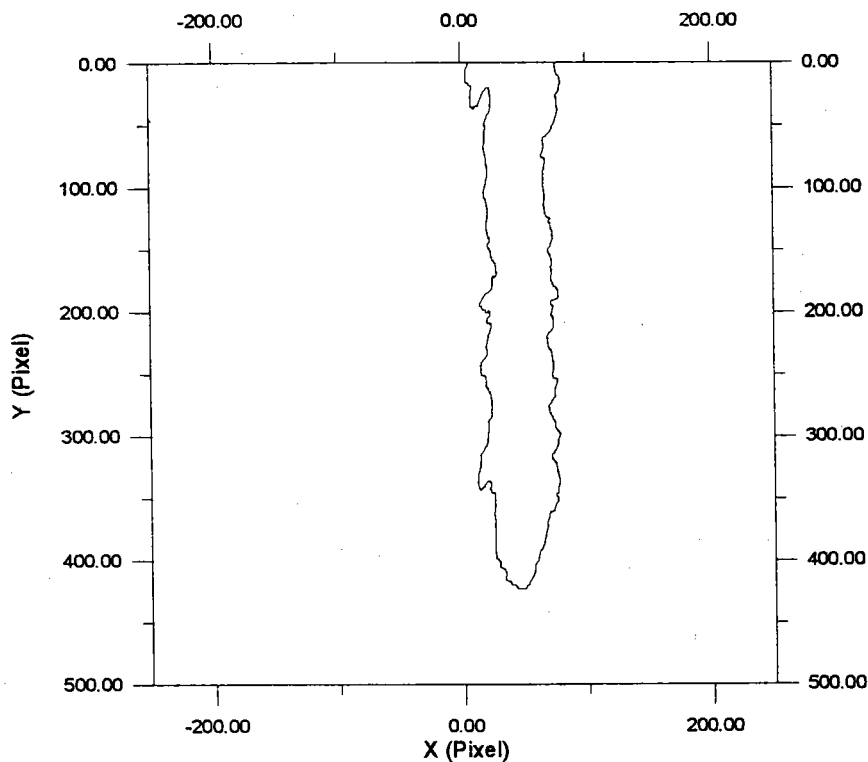
圖：模擬未飽和層水的傳輸流沉實驗儀器的配置：整體的配置主要有抽水幫浦、水頭計、影像處理系統與滲流儀 (Infiltration Experiments)。其中未飽和層滲流儀是以透明的壓克力板組合而成。圍成一個 1 公分厚的長方形封閉夾槽 ($150 \times 100 \times 2 \text{ cm}^3$)。準備實驗時，砂可由滲流儀的上方引入夾槽內。



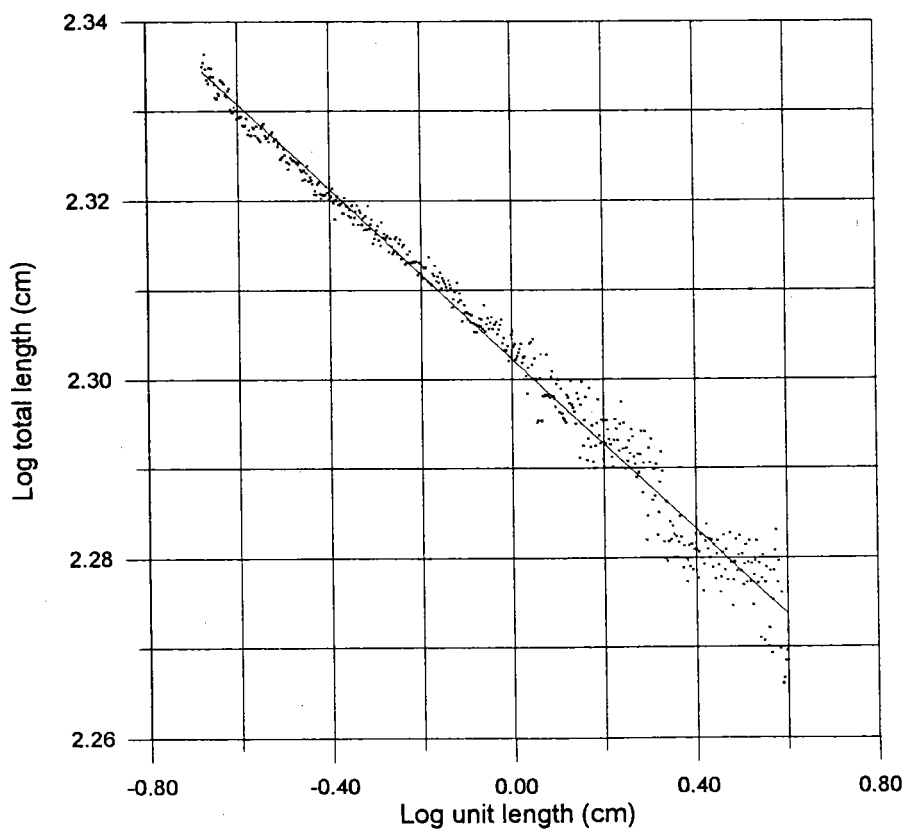
圖：三種地下水流沉實驗方式：(一) 滲透儀填裝相同粒徑的砂，以一定流量注入水流。(二) 滲透儀內裝填兩種不同性質的砂層。上層使用粒徑極小的黏土層 (二公分厚) 以模擬地表覆土，下層則使用與 (一) 相同的標準砂，並且以一定的流量強制注入水流。(三) 未飽和層以三種不同性質的材料構成。上層使用吸水性強的紙層以模擬地表覆土，使水不致直接進入下層的砂層。下層中包括兩種不同粒徑的砂層，其中粒徑小者形成一個帶狀，以 25 度的斜角填裝，帶狀砂層上方及下方使用粒徑較大的砂。注入水流的方式是以一定的水頭高度注入滲透儀內，使水能先潤溼上層後，再經由兩層的介面，自然滲透進入下層的砂層。



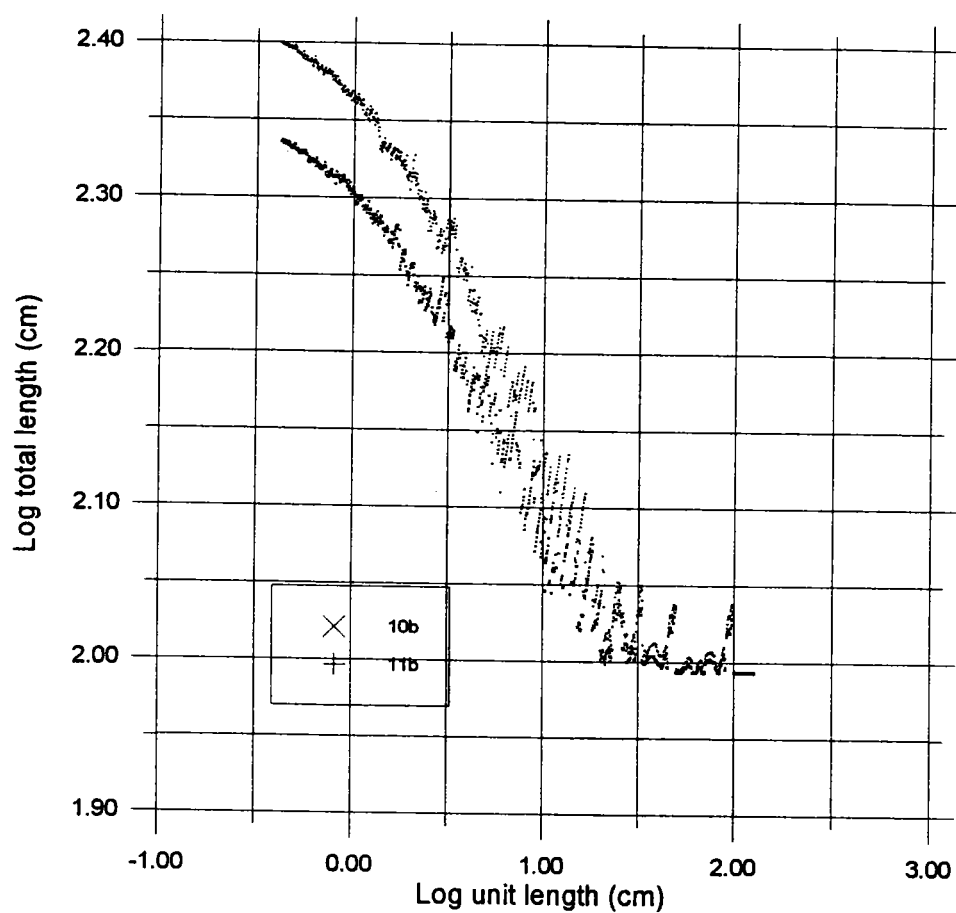
圖：實驗（方式一）每隔30秒的滲流流況：水進入砂層中後，是以分支的方式向下延伸，形成一支支的滲流路徑，即所謂的指頭流（fingering flow）。但在滲流的過程中，發生分歧的狀況，也就是由一支分成數支滲流路徑的情形並不多。通常的情形是一但滲流的路徑發生分歧之後，便會再度合併成為一支。並且滲流的方向改變也不大，是以垂直向下的方向為主，而水平方向的滲流，應是由於滲流的過程受到重力的影響較大因而分歧的現象較不易發生。



圖：實驗（方式一）第2支指頭第400秒鐘之示意圖



圖：實驗（方式一）第2支指頭第400秒鐘之理查森圖



圖：實驗（方式一）之全接觸面之理查森圖

一般參考文獻

- 混沌-不測風雲的背後，James Gleick 原著，林和 譯，天下文化出版公司，1991
- 混沌魔鏡，J. Briggs, F. D. Peat 原著，王彥文 譯，牛頓出版公司，1993
- *Chaos-Making a New Science*, James Gleick, Viking Penguin, 1987
- *The New Scientist guide to Chaos*, Nina Hall ed., Penguin Group, 1992
- *The Fractal Geometry of Nature*, Mandelbrot, B. B., New York: W. H. Freeman, 1983
- *The Science of Fractal Images*, M.F. Barnsley et al., Springer-Verlag, 1988

專業參考文獻

- Devaney, R. L., *A First Course in Chaotic Dynamical Systems: Theory and Applications*, Reading: Addison-Wesley, 1992
- Falconer, K. J., *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*, New York: John Wiley & Sons, 1990
- Liebovitch, L. S., and T. Toth, A Fast Algorithm to Determine Fractal Dimensions by Box Counting, *Phys. Lett. A*, **141**, 386-390, 1989
- Mandelbrot, B. B., How Long is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension, *Science*, **156**, 636-638, 1967
- Nikora, V. I., Fractal Structure of River Plan Forms, *Water Resources Res.*, **27(6)**, 1327-1333, 1991
- Snow, R. S., Fractal Sinuosity of Stream Channels, in *Fractals in Geophysics*, edited by C. H. Scholz and B. B. Mandelbrot, Basel: Birkhauser Verlag, 99-109, 1989
- Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe, The Fractal Nature of River Networks, *Water Resources Res.*, **24(8)**, 1317-1322, 1988
- Turcotte, D. L., Fractals in Geology and Geophysics, in *Fractals in Geophysics*, edited by C. H. Scholz and B. B. Mandelbrot, Basel: Birkhauser Verlag, 171-196, 1989

海岸漂砂防治對策及實例探討

黃清和 港灣技術研究所海岸工程組研究員兼組長
何良勝 港灣技術研究所海岸工程組研究員
邱永芳 港灣技術研究所海岸工程組副研究員

一、前言

一般所謂漂砂 (sand drift) 係指因波浪、潮汐以及海流交互作用所引起之海灘物質移動之現象，而不含因風力作用移動之飛砂，但在研究海岸過程中二者同屬重要。海灘底質移動方向大致可分為海岸法線方向之向一離岸漂砂 (on-offshore) 以及海岸切線方向之沿岸漂砂 (along shore drift)，向離岸方向之漂砂屬於短期性變化，探討重點以碎波點為界限，分為碎波帶內及碎波帶外兩區，其變化過程因波浪性質及底質大小而異；沿岸漂砂為改變海灘外貌，形成海岸侵蝕或淤積之主因，當波浪與海岸斜交入射時現象最為卓越，可分為發生於灘線處之海灘漂砂 (beach drift) 以及碎波點與碎波帶內因沿岸流移動之漂砂。

研究漂砂目的在解決港灣工程、海岸保護工程上可能遭遇之問題，藉由其過去之海岸過程，預測工程施工後可能發生之海岸變化。惟引起漂砂現象原因複雜且地形因時、因地而異，各種海岸都有其獨特性，不能期望“放諸四海皆準”或一勞永逸的解決方案，因此必須做實地調查，根據觀測資料分析作用之外力判斷底質移動方向，比較地形變化趨勢估計漂砂量。但實地調查極費人力與經費，且受自然條件之限制，實施極為困難，故最好輔以數值計算模式或水工模型試驗。有關海灘地形變化的數值計算模式，中外各有許多，惟必須慎重驗證其適用性，最重要的，應慎選各種模式之輸入條件，若輸入有誤，則輸出必將更為錯誤，

故台灣海峽的波浪、海流等情況，亦應正確地測定，否則數值模式計算，不過是一場電腦遊戲罷了。而水工模型試驗係依相似性原理，按比尺縮小原型，一般有關港口配置、防波堤斷面等定床（fixed-bed）試驗，因為Froude數一致，至少因重力而產生之種種現象可以完全相似，因此成功地案例非常多；但有關動床（movable-bed）漂砂試驗，因為砂粒無法按比例縮小，必須做許多預備、驗證等試驗後，認為可以代表自然現象後，始能進行各種計劃試驗，但因縮尺影響及現象過份簡化，無法將變化多端之自然現象完全重現於模型，其結果定性的可能正確，定量的則無法有一比例數字計算，但藉由該種水工模型試驗仍不失為了解漂砂之有效方法。

二、台灣西海岸沖淤近況

台灣西海岸為一平緩沙灘海岸，沿岸漂沙活動劇烈，海岸潮間帶廣闊、沙洲林立。根據國立成功大學水利及海洋工程研究所郭金棟教授、工研院能資所遙測室吳啓南研究員以及本所對外傘頂洲地形變遷之研究結果，檢視台灣西海岸自淡水河口南岸至林口間，因上游河床大量採砂，海岸線逐年退縮，昔日碉堡沒入海中已不復再見，而今日八里污水廠也深受威脅，幸好淡水港之興建及時保住河口附近海岸，但如不事前防範，則數年後林口附近海岸之侵蝕將指日可待；桃園海岸附近漁港防波堤興建，造成局部沖淤外，海岸尚稱穩定；新竹頭前溪南岸新竹（南寮）漁港興建防波堤，造成漁港南側數公里處垃圾場、海水浴場侵蝕現象；苗栗海岸除通宵火力發電廠外，因有顯著突出海岸構造物，沖淤情況較為緩和。

台中港興建北防波堤阻斷由北往南漂砂輸送，破壞海岸平衡，造成防波堤北側大量堆積，南側呈現嚴重沖刷現象；彰化海岸因北有大肚溪、南有濁水溪兩大河川沙源補注，雖有大規模造陸，海岸仍能維持穩定。

雲嘉海岸北起濁水溪口，南至朴子溪口，早期區內濁水溪、新舊虎尾溪、北港溪等，河川挾帶大量泥沙排入河口，再經沿岸波浪帶動，形

成長達20餘公里離岸沙洲。惟近年來因河川上游水土保持工作之整治，河川輸沙顯著減少，海岸呈現嚴重侵蝕現象，目前除外傘頂洲外，其餘如海豐島、統仙洲、箔子寮仙等在高潮時均潛沒在水面下。

根據本所在外傘頂洲連續四年（自民國七十九年七月～八十三年）地形實測調查結果顯示，外傘頂洲目前也正快速消失中；圖1為本所在外傘頂洲連續四年實測地形變化圖，圖2為各分區歷年之沖淤積量，根據調查結果顯示雲嘉海岸外海為一系列不穩定沙洲所構成，漂砂優勢方向自北向南，沙洲逐年向岸退縮，且呈向南遷移現象；而六輕與台西基礎工業區等大型新生地開發，勢將阻斷沿岸漂砂，減少濁水溪砂源對砂洲補注，勢必加速外傘頂洲消失。

自朴子溪口以南至曾文溪口則為西海岸僅存的一段沙洲海岸，包括東石港洲、白水湖洲、新北門港洲（好美里洲）、海汕洲、王爺港洲、青山港洲、網子寮洲、頂頭額洲以及新灣崙洲等，由此往南，現已無露出高潮位面之沙洲存在；根據吳啓南研究員利用歷年航空照片判釋分析顯示，朴子溪口至曾文溪口沿海的九個沙洲除已陸化的海汕洲較為穩定外，四十餘年來所有沙洲都有內移及南進趨勢。且資料顯示，北門以南至七股沿海的王爺港洲、青山港洲以及網子寮洲都有較劇烈侵蝕後退現象，尤以馬沙溝至七股外海後兩者最為嚴重。

曾文溪以南台南海岸因受該溪豐富輸砂影響，外海沙洲亦甚發達，其成因與該區波浪小，潮差小亦有關，該區海岸整體而言相當穩定。而高雄縣海岸線變化自興達港向西南至壽山屬嚴重侵蝕，大體而言，該區南向漂砂仍然略優於北向漂砂量；壽山以南部份則往南逐漸淤積，高雄二港口以北約以每年一公尺之速度淤積，但小港至鳳鼻頭間侵蝕，而由此至中芸漁港間其侵蝕亦頗嚴重。至於屏東縣海岸，根據郭金棟教授依歷次測量圖分析顯示，自東港至林邊溪口在早期屬侵蝕，而自民國七十二年後，反有淤積；楓港、四重溪口一帶則因有若干地區開闢公路，挖土填海致海岸前進外，其他地區則保持平衡；珊瑚礁海岸亦保持不變；貓鼻頭至南灣、鵝鑾鼻部份海岸，則因受波浪沖擊侵蝕，而珊瑚礁成長極為緩慢，故該區亦呈現侵蝕。

152656.8542E
2608384.7763N

140636.039E
2596363.961N

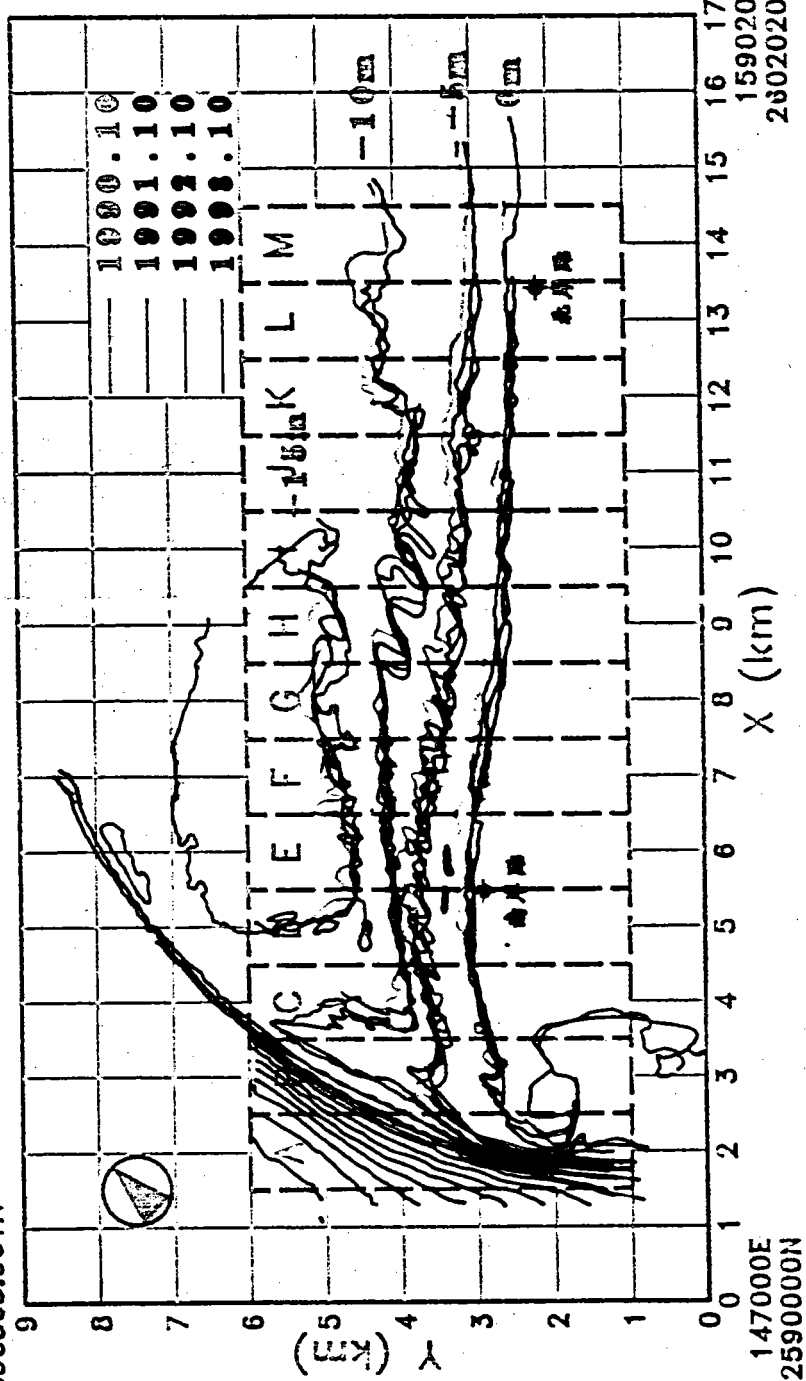


圖 1 本所在外傘頂洲連續四年實測地形變化圖

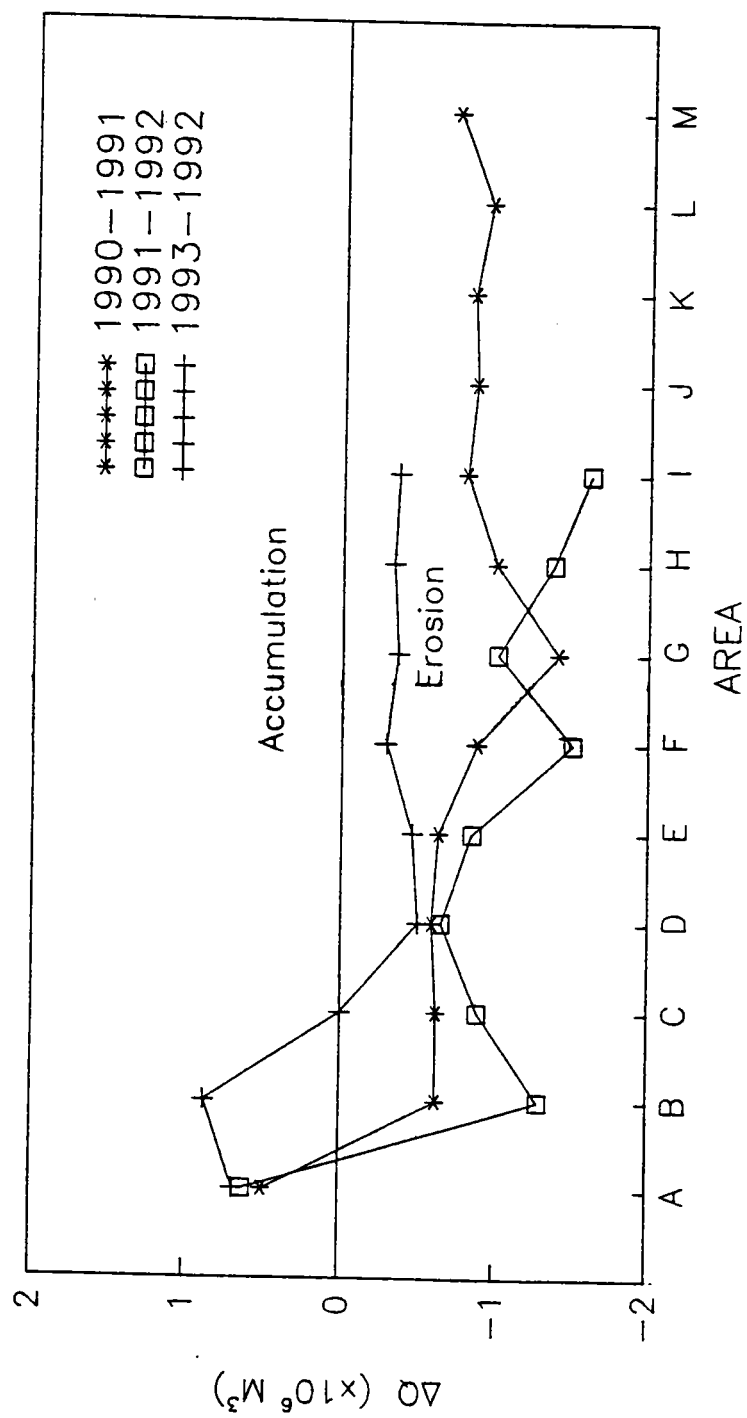


圖 2 各分區歷年之沖淤積量

三、海岸保護對策

海岸侵淤現象，導自於沿岸輸砂量平衡失調結果所致，每當海岸地段之輸砂在流失量多於供給量時，侵蝕現象便會逐發生；反之則產生淤積現象。影響海岸侵蝕原因，因限於篇幅，學員可逕自參考海岸工程、港灣工程等書籍，本章節僅引用歸國學人薛署生博士（原泰興工程顧問公司、中華顧問工程司主任工程師及專案經理，目前為方舟工程顧問有限公司總經理，曾在美國Greenhorne & O'Mara, Inc.以及 RPI/Coastal Science & Engineering Inc.擔任專案經理以及數值模擬部主管）就其實際參與有關美國海岸侵蝕保護對策工作經驗所整理資料與學員共享以供參考。

美國目前海岸防蝕對策，有硬體工法（Hard Structures），軟體工法（Soft Structures），軟硬體結合法，及政策行動（Political Actions）等，茲分別簡略介紹如后。

1. 硬體工法

硬體工法是傳統的工程師護岸措施，其主要策略是以硬體結構物擾亂或改變自然的原有海岸動力系統，以達到局部海岸地區的防護目的。它們對高能量海潮與波浪的突然來襲，確有顯著功效，而建造費用也是相當昂貴。

海岸硬體結構物一般可分為沿岸線型（例如海堤、護岸、直立岸壁等）、垂直岸線型（例如突堤群、導流堤、防波堤等）以及離岸型（例如離岸堤等）三類。沿岸線型結構物容易導致堤趾附近海床沖刷，尤以直立式岸壁為然。垂直岸線結構物對海岸線變動影響較大，它們攔截上游漂砂常導致下游海岸嚴重侵蝕。離岸堤若能規劃適當，對海岸穩定較有幫助，環境所受衝擊也較低。

結構物之建造材料與型式，對海岸生物之棲息環境也有重要影響。一般木料及石料比較適合海岸生物棲息，金屬與混凝土則較差。斜坡式的拋石護岸常能提供節肢海生物良好的之棲息所，而直立式岸壁不但本身不具良好棲息環境，還會加速堤趾沖刷，改變鄰近底棲生物

環境。

硬體工法雖有抵抗強烈浪潮功能，但對海岸生態環境以及景觀的影響，常居負面，同時還有下面兩點致命的缺陷：

- (1)硬體結構物會加速砂粒的流失，以致造成沙灘的流失和結構物本身的不穩定。
- (2)這些結構物一旦施工完成，要再想變更或挪移，是極其困難的事，根本無法更正工程上的錯誤。

2. 軟體工法

軟體工法是近代海域環保意識抬頭和審美觀轉變之雙重衝擊下的產物。其主要精神，在於順應自然界的趨勢作設計，以防止海岸砂土的流失，決不作頂撞的挑釁考慮。由於自然界的物體過程常是週期性的，因而許多軟體工程也需作週期性的設計考慮。茲將目前美國一些軟體工法略介紹於下：

(1) 設置後退線法 (Setback Line)

後退線是一條設立的界線，在此線的海側，劃為緩衝侵蝕區，嚴禁任何建築物的建造。設置後退線法是軟體工程中最軟的方案，極適用於未開發的海岸線地區。此法需要藉助於法令的制訂和執行。

就純技術觀點而言，後退線的擬訂基準應包括侵蝕速率、砂丘保護情況、氾濫危害性、波浪上溯、地形等高線以及植物形態等。在定線之前，這些基準項目應有可靠的歷史變遷資料和調查與分析的結果作為依據。

(2) 砂丘建造 (Dune Building)

砂丘一般都設在前灘區，其主要功能在於防止或緩和潮水與波浪的侵害，並在必要時為海灘提供養護用的砂源。在風暴後，若有足夠的平靜時期，遭受沖刷的部份砂丘多能因風力的作用而恢復舊貌。為了加速其恢復速度或減少風暴時的沖刷程度，工程師與海岸管理人員可以設置攔砂柵，種植特定的植物，或設定法令以防止人為的破壞。

在一些已開發的海岸區，常由於開發前未作細心規劃，以致許多建築用地面臨侵蝕的命運。此時，人為的砂丘建造往往是必要的。規

劃設計人工砂丘之前，工程師對於當地之海岸動力過程、風向、風速、海灘特性，以及植物型態與砂源等，應作充份調查瞭解，以進行最佳設計。人工砂丘建造常與硬體結構物配合辦理，以兼顧安全與美觀雙方面的要求。

(3) 潮間帶闢建沼澤地 (Marsh Building)

潮間帶沼澤地多介於海洋與內陸之間，常能緩和波浪對海岸的直接侵襲，也帶給附近居民一個優美的自然景觀。沼澤地也是海域生物豐富，活動力較強的所在。美國許多州都以法令規定來保護這些潮間帶沼澤地，不但不容許破壞現有的沼澤地，並規定開發規劃中，必須考慮闢建符合規定尺寸的沼澤地。

在美國馬里蘭州的所謂「非結構物 (Non-Structure)」計畫中，就以半結構物與種植沼澤草的方式，作沼澤地的建造和水土保持。北卡羅萊州以南至喬治亞州的廣大海岸沼澤區，沼澤地之建造與維護更是極受重視的計畫。

海岸沼澤地之各類植物與海水之鹽度、潮差、上潮頻率、溫度、土質及地形高程都有極密切的關連。在闢建沼澤地之前，宜作研究分析，細心挑選合適的沼澤草，並於種植之後，繼作追蹤，調查其存活率。

(4) 潮流通道人工位移法 (Relocation of Migrating Tidal Inlets)

河流或鹹水湖的出海口，每因沿岸流或其他海象因素迫使其向下游方向位移的情況。地貌學者的研究發現，這種位移現象常是週期性的。

與此類似的工法尚有潛洲位移法，借水流及波浪能量將近海潛洲推移至海岸線，以達養灘之目的。

(5) 人工養灘法 (Beach Nourishment)

除了借助自然力量推移砂源達養灘目的外，人工養灘是目前美國最常用的軟體工法。東岸的Rockaway (紐約州)，Wrightsville (北卡州)，Myrtle Beach (南卡州) 及Miami (佛州) 等海灘都曾使用大量外界砂源作人工養灘。其它小型工程更是多得不勝枚舉。

在作養灘工程設計時，工程師須先作其邊界條件之調查研究，再進行工程本身的設計工作。養灘工程設計的邊界條件包括：歷史性的海岸線資料（如臨界水深測量誤差、季節性變化等）、暴潮與水位變化、地貌及砂質條件、水文測量、漂砂情況、砂源、海生物與水質、海岸結構物等等。設計本身的原則應考慮：海陸向之變動因素（如砂灘所增加的寬度與砂質的關係、海水位上昇的影響等），養灘計畫的規劃形式之可能演變（如養灘之長度、寬度決定，其工程壽命，兩端變化，與下游海岸的影響等），以及養灘工程降低損失之評估。

養灘工法中有兩項常遇難的困難，一為砂源問題，另為潮流出海口的處理。養灘砂源一般可分為外界砂源及內部砂源。外界砂源有來自海洋大陸棚、河口或海口三角洲，內陸借土區，以及運河水道之浚渫沙土等。內部砂源包括河海口附近之淺灘以及鄰近增長中之沙灘地等。這些近水樓台的砂源之所以稱為「內部」砂源，原因是其漂砂大多源自本地區內部漂砂系統，並非由他處漂流而來，其工程成本遠較外界砂源來的經濟。處理潮流出海口的方式一般採用旁砂道法，此工法將於下節說明。

過去養灘工法常遭反對，主要的理由是它們無法一勞永逸地解決問題。巨額養灘工程費用投入海岸水流中，隨著砂土流失，遠不如硬體結構物立時奏效。近年來，由於設計經驗和知識的增加和一般國人對此工法之瞭解，養灘工程正大行其道中，至於其成效究竟如何，只有等待來日評估定論。惟人工養灘工法需要小心分析其成本及效益，從長遠與整體海岸的觀點著手規劃，不能只注意目前和局部的效益。在效益評估中，也必須包括海灘恢復後所帶來的美感和娛樂價值。這些價值往往是無法以金錢的數目來表達的。

(6) 旁砂道法 (Sand Bypassing)

港灣的建設中，常用突堤或防波堤穩定航道，以致攔截了海岸線沿岸流與漂砂，造成下游側海岸極嚴重之侵蝕。這是世界各地侵蝕的共同原因之一。

人工旁砂道法是解決這種侵蝕問題的主要方案。對於有硬體結構

物的港口而言，人工旁砂道法主要借力於裝設機械輸砂道系統。其工法有岸裝挖送法、浮動挖送法、陸上車具法，以及噴射泵浦系統等四種。惟這些工法較適用於小型航道出口，對於大型海港而言，極難達到輸砂養灘目的，其所需費用也必巨大驚人。就無結構物之出海口航道而言，可借力於水力浚渫，疏挖航道。運用旁砂道法，對於海口潮汐動力系統、自然旁砂道進行過程，以及附近地貌變遷，需要有充份的瞭解，方能有效掌握。

(7)人工岬灣法 (Headland Control)

試圖模仿自然系統作規劃設計 (Design With Nature) 是控制海灘侵蝕的新趨勢。前面所討論之潮流通道人工位移法及人工岬灣法是這個新趨勢最突出的例子，也是軟硬工法雙管其下的方案。R. Silvester 基於 W. E. Yasso 在 1965 年對岬灣螺旋形海灘的平面幾何概念，進一步觀察分析其物理因素，發現天然岬灣的形狀主要是因為斜向波浪經岩岬繞射的結果，於 1974 年提出人工月形岬灣工法。同時並建議以建造離岸堤模擬自然岩岬，期能形成人工岬灣的平衡海灘。R. Silvester 高徒許榮中博士，根據各地的數據，經數年努力，在岬灣形狀定量分析上有極傑出的貢獻，使工程人員在應用該工法上方便良多。

3. 軟硬體結合工法

軟硬體工法各有優缺點及限制。抵抗強風巨浪，硬體工法比較有效，但其在景觀及環境方面則不十分理想，而軟體工法之功能則正好相反。因此，結合軟硬體工法之優點，使之在防災及環境品質上兼顧，應是相得益彰。這種結合工法是上述規劃理念下的自然產物，已在美國各州使用多年。

(1) 養灘、砂丘建造與硬體結構物之結合使用

這種結合工法之使用，最為普通。主要的動機是在針對許多已經建造的硬體結構物，面臨侵蝕危機時，以養灘方式加以覆蓋，達到維護目的。因此，前述各型硬體結構物都可使用。養灘後之沙灘，不但景觀較佳，可供市民休閒活動之用，而且對環境之衝擊較小，對下游海岸線之穩定性有增無減。當然，如同養灘計畫一樣，必須按其工程

設計壽命期限作週期性養護工作。

通常大浪潮對海岸線之破壞大都是局部性的，使用此種結合工法，沙灘在暴風潮後可能會有局部流失，但硬軟結構物則可保全其陸側之土地免難，事後局部流失沙灘之維護也比較容易。

在美國南卡州，海岸評議委員會對一般硬體結構之建造許可申請都不核准，除非在必要之危急情況下，也要求以軟硬體結合工法實施，硬體結構物（大多為斜坡式拋石護岸）必須埋在海砂之下。

馬里蘭有名的灘地休閒中心海洋城（Ocean City）最近新建重型海堤，堤外填砂養灘，並作砂丘建造，種植定砂植物，並在海堤頂及內側搭建木質遊客散步道（Board Walk），是很典型的軟硬體結合工法例證。其它各州受颶風威脅的觀光海灘勝地，大都走向這種結合式工法。

(2) 沼澤草種植與硬體結構物之結合使用

在波浪條件比較緩和之海岸地區，沼澤草存活率比較高時，這種結合工法比較合適。前面提到的馬里蘭州「非結構物（Non-Structure）」計畫，即是此種工法。該計畫之指定方法為以小型石料在低潮線以外附近堆放成似離岸堤石堆，石堆內側鋪放砂料，在低潮線與高潮線間之灘地上種植沼澤草。一般沼澤草之存活率必須達到80%以上。此種結合式工法不但能防護海岸侵蝕，並能改善海岸水質。目前在美國環保署之海岸水域非點源污染管制方案中，這種工法是所推薦的管制方法之一（EPA，1993）。

另外，利用木製版樁配合沼澤草種植以改善沼澤區之排水流量也是類似之結合工法。在此法中，主流斷面以木製版樁固定兩邊側岸砂土，而版樁陸側則闢建為斜坡沼澤地。版樁頂高程一般設在中潮位以下，好在高潮位時，潮水得以溢流樁頂兩側，滋養該處沼澤植物。若在溢流之兩側沼澤區內種植合適之沼澤草，俟草長密後，防蝕、改善水質及景觀等功能均可達成。

4. 政策行動

在既定政策已經確定後，可藉諸法令規章推行。目前美國防護措

施的政策行動，包括區域劃定 (Zoning)、懲治 (Condemnation)、不獎勵施工 (Negative Incentives to Construction)、及核准程序 (Permitting Processes) 等四種。前述之規劃理念可將之揉合在這四種政策行動之法令規章細則中，以達到管制功能，邁向防護措施之最佳目標。

四、實例探討

4-1 彰化濱海工業區海堤堤腳沖刷與人工岬灣水工模型試驗研究

(一) 前言

在沙灘海岸興建結構物可能使地形原已變化不多或已達穩定之海岸遭遇破壞而重新塑造地形新貌，因此如何控制沙灘地形變化，尤其海岸結構物計劃興建之時，研究如何減少地形變化所產生之災害一直為海岸工程界所極關心之焦點。本節中實例係以試驗室水工模型試驗，研究探討彰化濱海工業區的最佳海堤面坡配置以及海堤興建後以人工岬灣方式保護堤體的可行性。

彰化濱海工業區位於台灣中部彰化縣西海岸，北起線西鄉田尾排水口，南達鹿港，南北長約12公里餘，由於此一地區恰位於台灣西海岸漂沙極為活躍之地帶，若未能有效擬定對策控制，工業區設置後，對日後鄰近地形變化預料將有很大之變化，此外，由於工業區係一海埔新生地，須築海堤防護，根據許多文獻記錄，海堤築成後，將來入射波浪在海堤堤身造成反射形成反射波，入、反射波重疊形成短峰波，此一短峰波沿海堤堤線平行方向運動，將造成堤腳嚴重侵蝕，日久堤基遭受人侵蝕而導致堤身崩坍，此係海堤遭受破壞主因之一，因此如何保護堤身安全，除了注意堤腳基礎之保護外，最根本之道在於破壞堤身前短峰波之形成，尤其類似彰濱又長又直之海堤，更須注意防止短峰波之破壞力。

本節中依海堤面坡與堤腳沖刷深度關係以及人工岬灣保護堤體之可行性研究分述如后。

(二) 海堤面坡與堤腳沖刷深度關係

海堤堤腳沖刷與海堤所產生之反射波有關，若能減少反射波將可減

少堤腳之沖刷，而降低反射最有效之方法莫過於減緩海堤面坡。是故，海堤面坡減緩將有助於堤腳侵蝕之緩和，進而減少日後海堤之維護費，惟海堤面坡減緩將增加海堤斷面因而提高工程費用；反之，海堤面坡增加可以減少建築工程費但卻增加日後之維護費。因此，本試驗研究的目的是，即是提供海堤面坡與堤腳刷深關係之試驗結果，進行評估決定一最佳海堤面坡。

1. 試驗條件

本試驗採用水平比尺 1/500，垂直比尺 1/83.3 之歪比模型 (distorted model)，試驗波高與週期之比尺：

$$N_H = (N_r^{1/2} N_{d50}^{1/2} N_f^{-1/2} N_v^{2/3})^{3/7} \quad (4-1)$$

$$N_T = (N_r^{1/2} N_{d50}^{1/2} N_f^{-1/2} N_v^{2/3})^{6/7} \quad (4-2)$$

式中 N_r : 浸水比重比尺

N_{d50} : 底質中值粒徑比尺

N_f : 摩擦係數比尺

N_v : 垂直比尺

實體與模型相關之試驗條件如下表 4-1 所示。

表 4-1 模型比尺與模型物理量

物 理 量	比 尺	實 體 物 理 量		模 型 物 理 量	
水 平 長 度	1/500	24.0km		48cm	
垂 直 長 度	1/83.3	水 深	+3m~-28m	水 深	+3.6cm~-33.6cm
		潮 位	+2.38m~-2.13m	潮 位	+2.86cm~-2.56cm
波 高	1/56.53	季節風波浪 NNE	2.60m	季節風波浪 NNE	4.60cm
		颱風波浪 SW	4.50m	颱風波浪 SW	7.96cm
週 期	1/7.52	季節風波浪 NNE	7.76sec	季節風波浪 NNE	1.03sec
		颱風波浪 SW	11.20sec	颱風波浪 SW	1.49sec
潮 汐 週 期	1/9.1	12.42hr		1.36hr	
底質浸水比重	1/1.62	1.65		1.02	
底質中值粒徑	1/2	0.24mm		0.12mm	

2. 試驗設備

本試驗係於港灣技術研究所第二試驗場棚中進行，其主要試驗儀器與設備計有不規則造波機、容量型波高計、沙面測定儀、水準儀及資料處理系統等等。

3. 試驗項目

依實際需要情況，颱風與季節風波浪皆辦理海堤面坡 1/2、1/4 與 1/6 三種坡度之試驗研究，根據試驗結果再行選擇堤腳沖刷情況較嚴重者進行面坡 1/3、1/5 與 1/7 三種坡度之試驗。而依據試驗結果，試驗項目如下表 4-2 所示。

表 4-2 試驗項目表

面坡類別 波浪類別	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7
颱風波浪	✓	✓	✓	✓	✓	✓
季節風波浪	✓		✓		✓	

4. 試驗步驟

- (1) 於模型鋪設前先行檢驗波高與週期，由於造波時間長，波浪經地形與結構物反射結果，入射波高可能受影響而變，因此於試驗中每隔半小時取其五分鐘造波資料分析，以 $H_{1/3}$ 及 $T_{1/3}$ 調整修正入射波高與週期。
- (2) 於模型鋪設完畢後，先行造波五分鐘讓地形勻稱，再量測地形變化視為造波前之初期地形，爾後再依季節風波浪或颱風波浪造波，並於各時段中量測地形變化情況。
- (3) 季節風波浪累積造波時間為15小時，並於第三、六、十、十五小時實施地形量測。
- (4) 颱風波浪累積造波時間為六小時，並於第一、三、六小時實施地形量測。
- (5) 試驗過程中，依潮汐週期控制水位變化，且每隔半小時加煤灰約10kg，視為沿岸輸沙補給量。
- (6) 每當改變入射波條件或變換堤面坡度時，即恢復原初期試驗地形，並重覆2～5之步驟試驗。

5. 試驗結果與結論

依颱風與季節風波浪作用於各種海堤面坡之試驗結果如圖 4-1～圖 4-4 所示，詳盡之試驗結果可參考港研所專刊第78號報告。

由於波浪反射關係，不同之海堤面坡即有不同之堤腳沖刷程度，在衡量工程經費與堤體安全及維護上，自應決定一較佳之海堤面坡。

綜觀上節試驗結果，茲謹陳列數點結論與建議如下：

- (1) 於颱風與季節風波浪作用之比較下，颱風波浪時間雖短促，但卻有較嚴重堤腳沖刷情況。
- (2) 各種海堤面坡與堤腳沖刷關係，以面坡 $1/2$ 者較為嚴重，其餘者則差別不大。
- (3) 颱風波浪作用時，堤腳沖刷深度較嚴重者有達 3.8m 以上，將來海堤施工時應注意堤腳之安全保護。
- (4) 各海堤轉彎處，堤腳沖刷變化常較劇烈，未來施工時亦應特別注意保護。

(三) 人工岬灣保護堤體之可行性研究

人工岬灣觀念首先係由西澳大學 Silvester and Hsu 提出，利用海岸線兩岬頭間形成一穩定灘線以保護堤岸。雖然，此觀念有異於往昔以人工方式進行海岸防護之方法，但就成果而言，國外尚少利用，而國內則尚付厥如，因此，以人工岬灣保護岸線之方法，是否適用於台灣之波浪條件與海岸地形，則尚未可知，況且彼等之人工岬灣係以岸邊之自然灘線為原則，然本試驗區域係由海堤構築而成之海埔新生地，堤外並無灘線存在，因此，以突堤方式當作人工岬灣岬頭，區內先行補沙之方式，是否能形成一避免堤腳侵蝕，保護堤身安全之岬灣形式，或者是雖無法形成一明顯岬灣灘線，但仍可避免堤腳較嚴重之侵蝕，此即為本試驗之主要目的。

1. 試驗條件與配置

有關試驗條件設備與前節所述者相同，海堤面坡於鹿港線西兩區採用 $1/3$ 之堤面坡度，崙尾區則採用 $1/2$ 之坡度。試驗中以突堤型式為人工岬灣之岬頭，有關試驗配置如表 4-3 及圖 4-5 所示。

，同時海水浴場之底床高程為北高南低，因此是否波浪由SW向或SSW向傾斜入射進入海水浴場後水流在封閉海域內形成順時針之環流，而將沙源帶到海側。

- (3) 海水浴場之形狀因素所引起之港池振盪，而形成環流將沙源帶走。
- (4) 颱風期間波浪方向大約為SW和SSW向，而此向之波浪正好斜向進入海水浴場，可能在海水浴場內形成環流，又颱風期間水位暴漲，颱風過後水位突降，在此雙重因素作用下很快的把海水浴場內之沙帶到海側。
- (5) 南堤築後斷絕西南向進來之沙源，使得海水浴場內沙僅有出而沒有補，造成供需失調而破壞平衡。
- (6) 傾斜入射時，南堤內側形成一個遮蔽區，此區內波浪因繞射形成環流。

本研究即針對以上討論之流沙可能發生的原因，擬以現場實測及水工模型試驗二大方向來逐一探討，進而找出主要發生流沙之原因，並提出定沙的方案。

(二) 現場實測

現場實測之目的係要了解在經常風期間潮汐所引起之潮流對海水浴場內沙源流失之影響程度，同時追查沙源之流失走向，因此現場實測共分成三大部份來討論，即為開口處以流速儀量測距底床約100公分處之流速，投置螢光砂與採取底床沙做粒徑分析，詳述如下：

(1) 量測開口處之速度

十分鐘平均最大速度為12.04cm/sec到12.4cm/sec，平均流速入口方向為7.61cm/sec，垂直於入口方向為7cm/sec。

(2) 螢光砂追蹤漂沙移動的主要移動方向

經常風期間潮汐的漲落所引起的潮流對海水浴場之漂砂移動影響不大。

(3) 粒徑分析

靠近南堤內側 D_{50} 在0.2mm左右，南堤外側據潛水人員表示有一大片沙其粒徑亦在0.2~0.28mm與海水浴場內之粒徑相對，很有可能海

CASE NAME : S 1:2

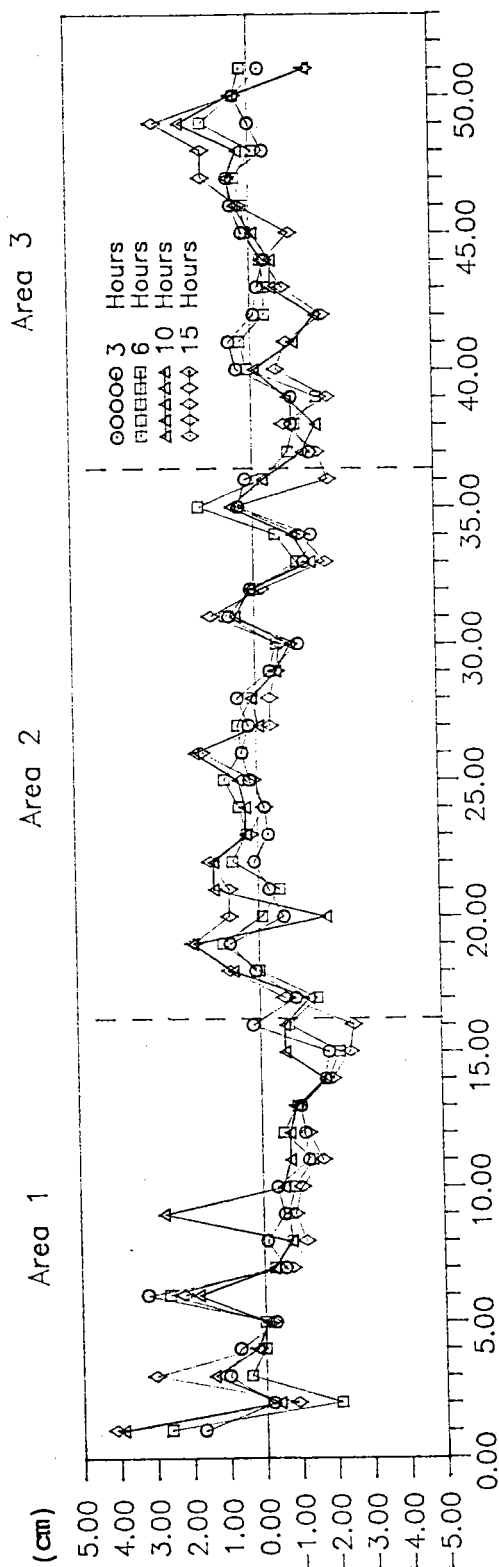


圖 4-1 堤面坡度 1/2 時，季節風波浪各時段之堤腳冲刷深度

CASE NAME : T 1:2

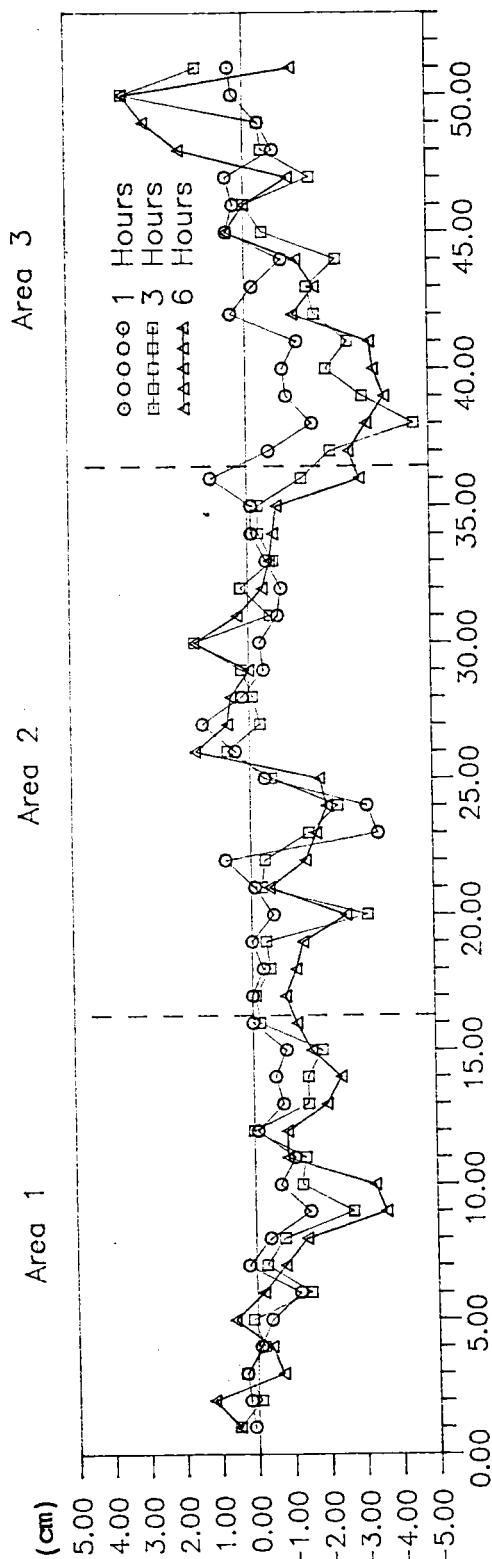


圖 4-2 堤面坡度 1/2 時，颱風波浪各時段之堤腳冲刷深度

CASE NAME : T-S 1:2

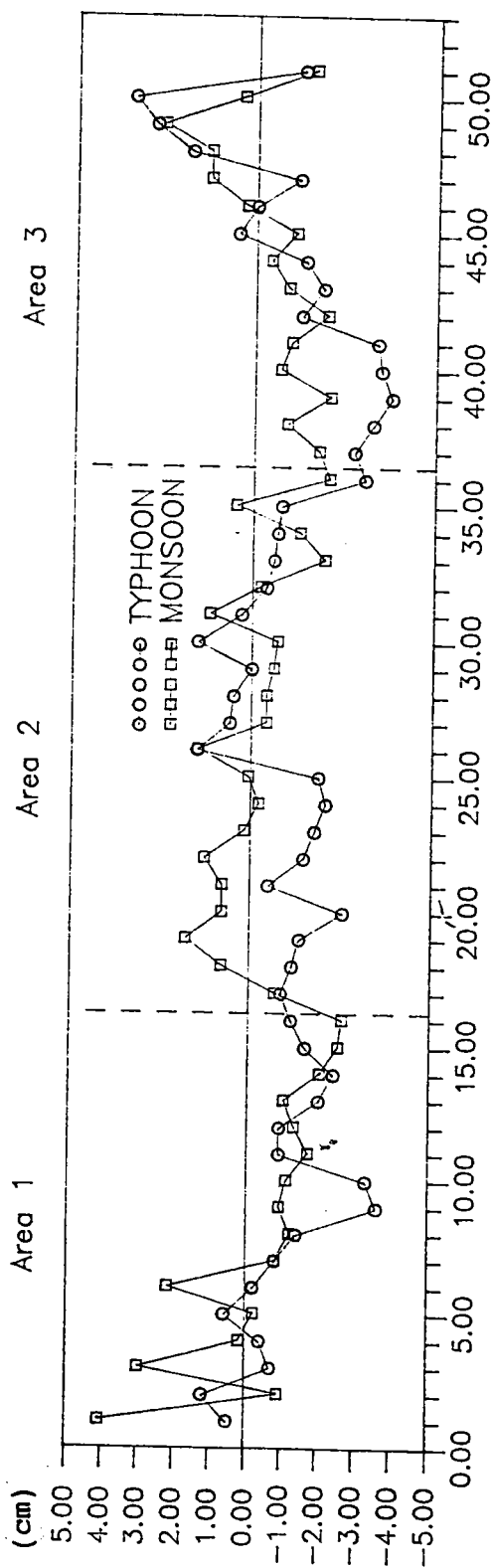


圖 4-3 堤面坡度 1/2 時，颱風與季節風波浪堤腳冲刷深度之比較

CASE NAME : T-S 1:6

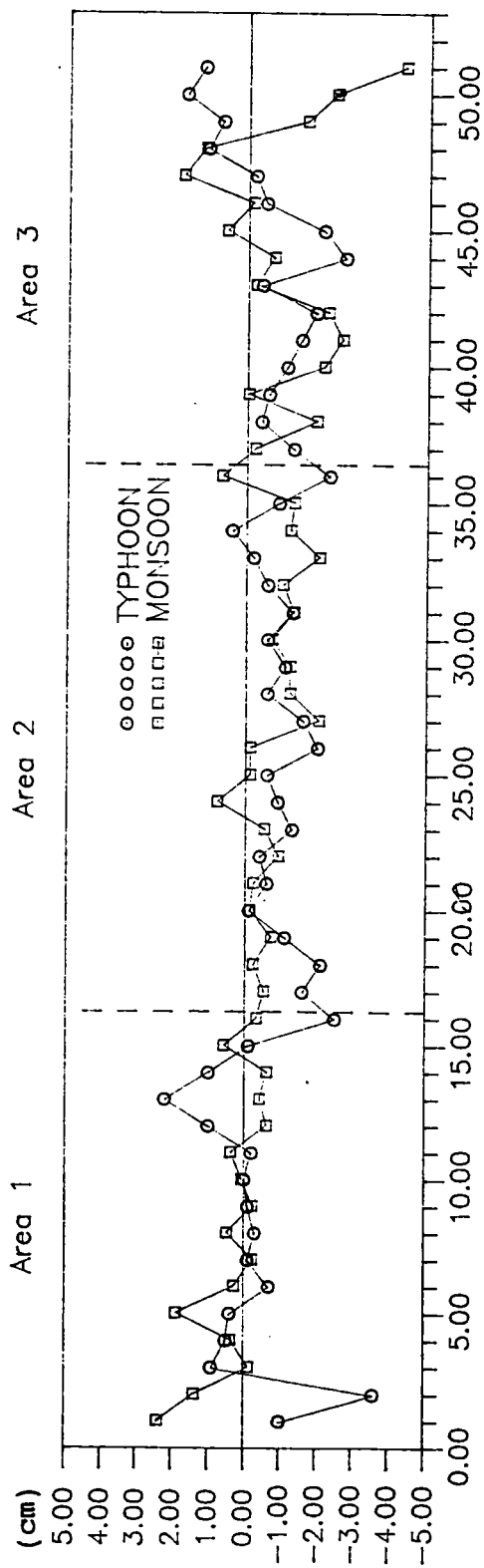


圖 4-4 堤面坡度 1/6 時，颱風與季節風波浪堤腳冲刷深度之比較

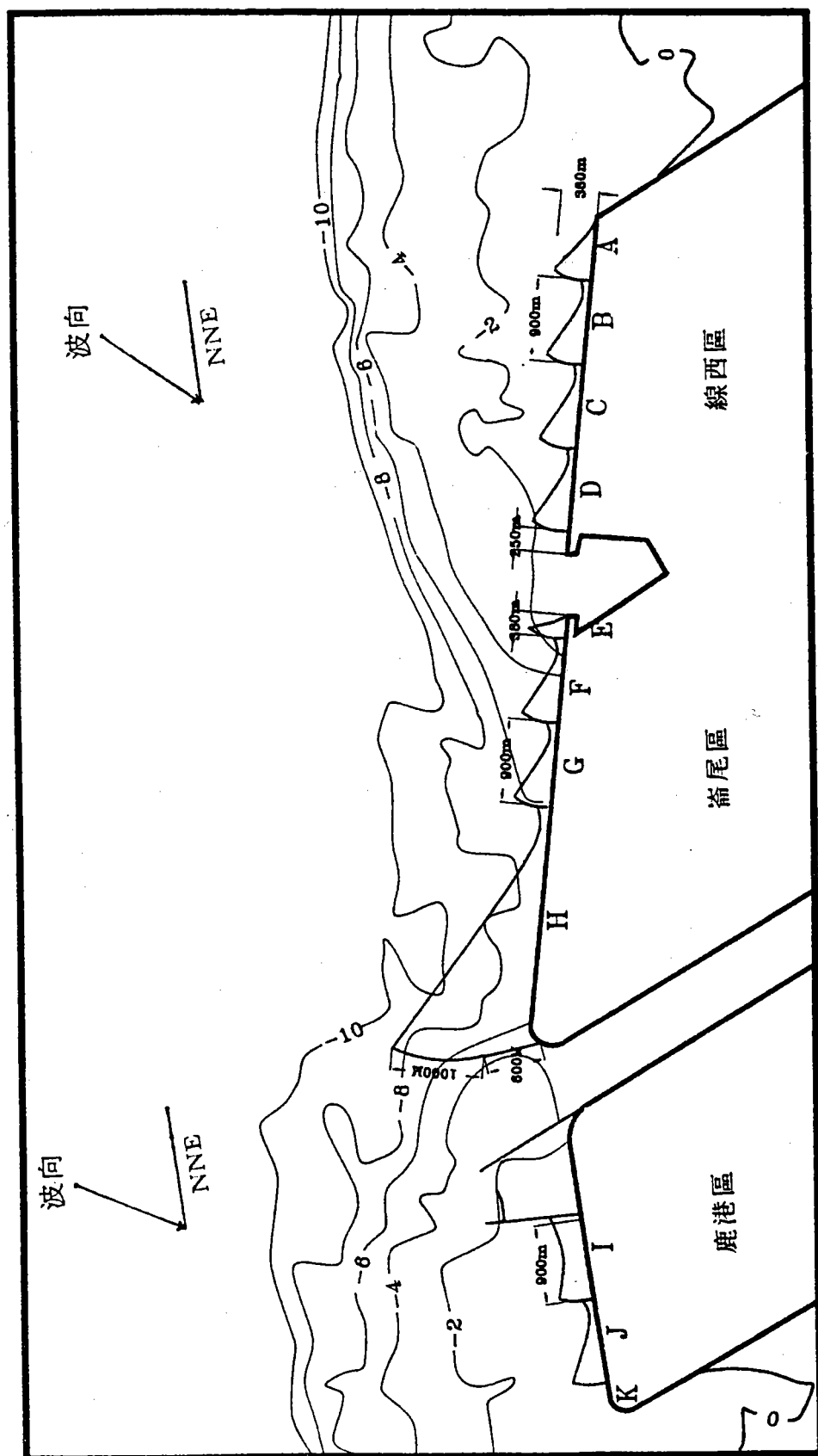


圖 4-5 人工岬灣試驗配置 II，理論灘線示意圖

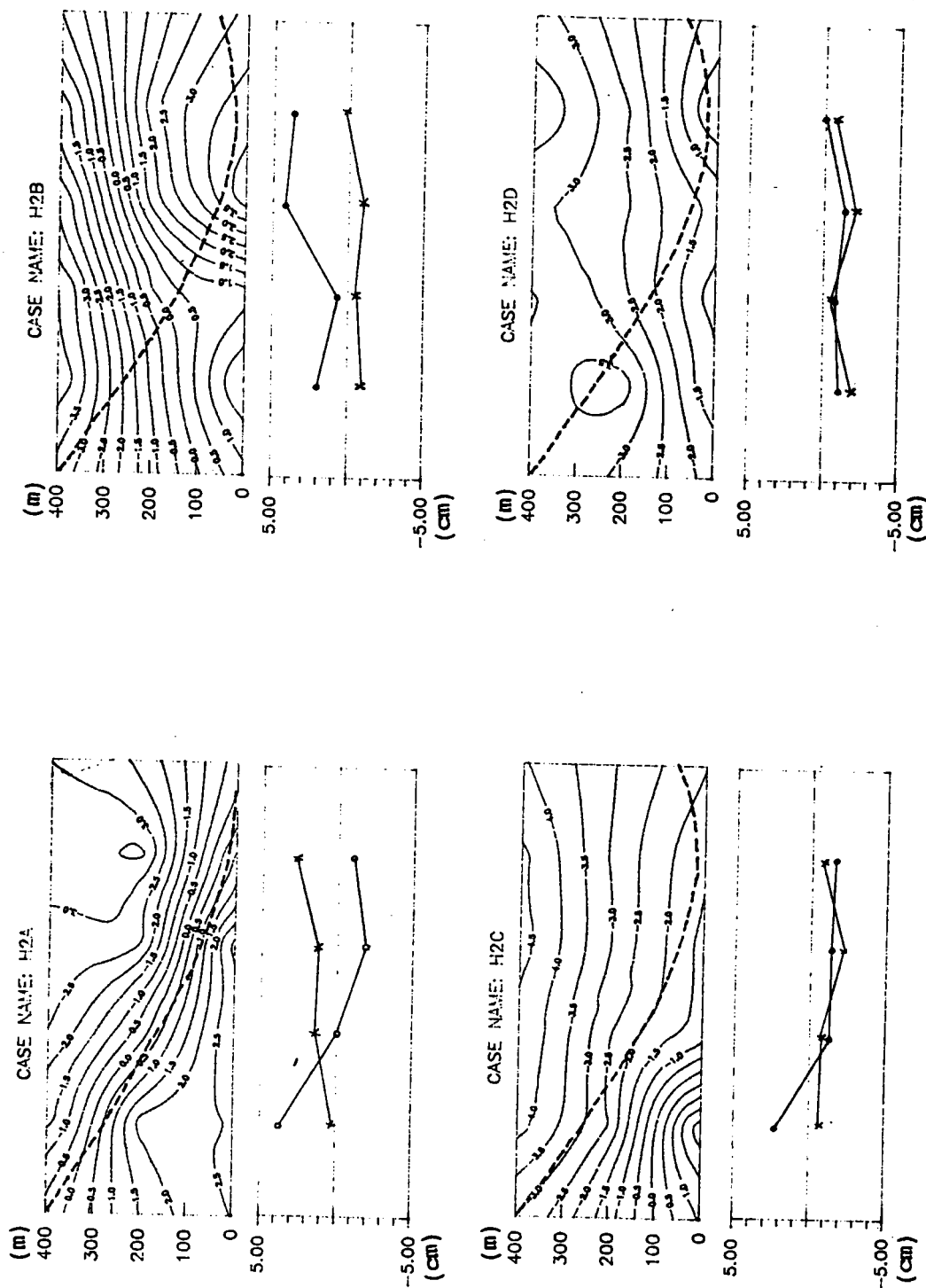


圖 4-6 試驗配置 II，各突堤間之地形變化
(o-o-o-o : 有突堤佈置, x-x-x : 無突堤佈置)

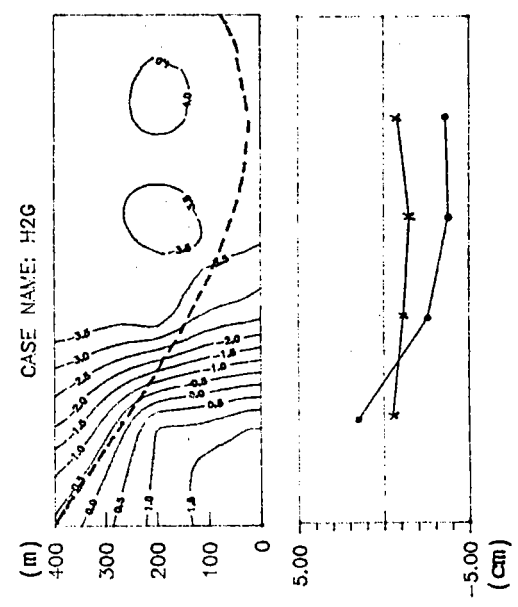
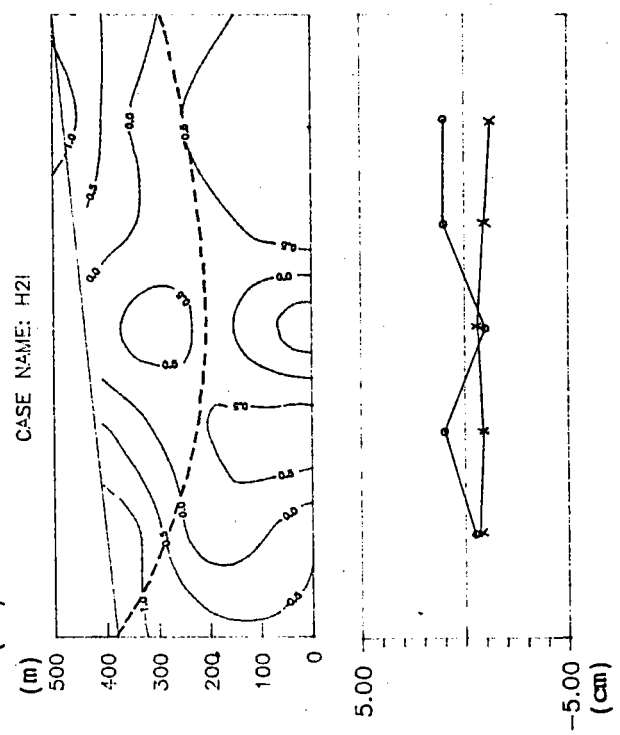
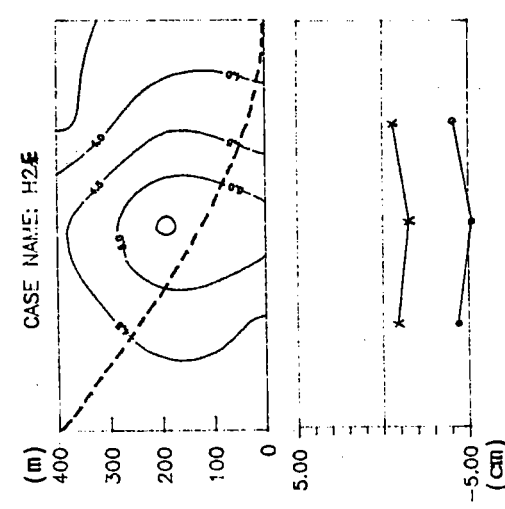
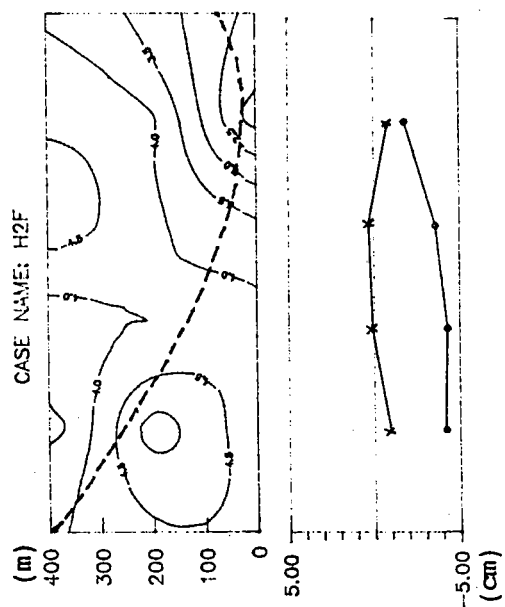


圖 4-7 試驗配置 II，各突堤間之地形變化

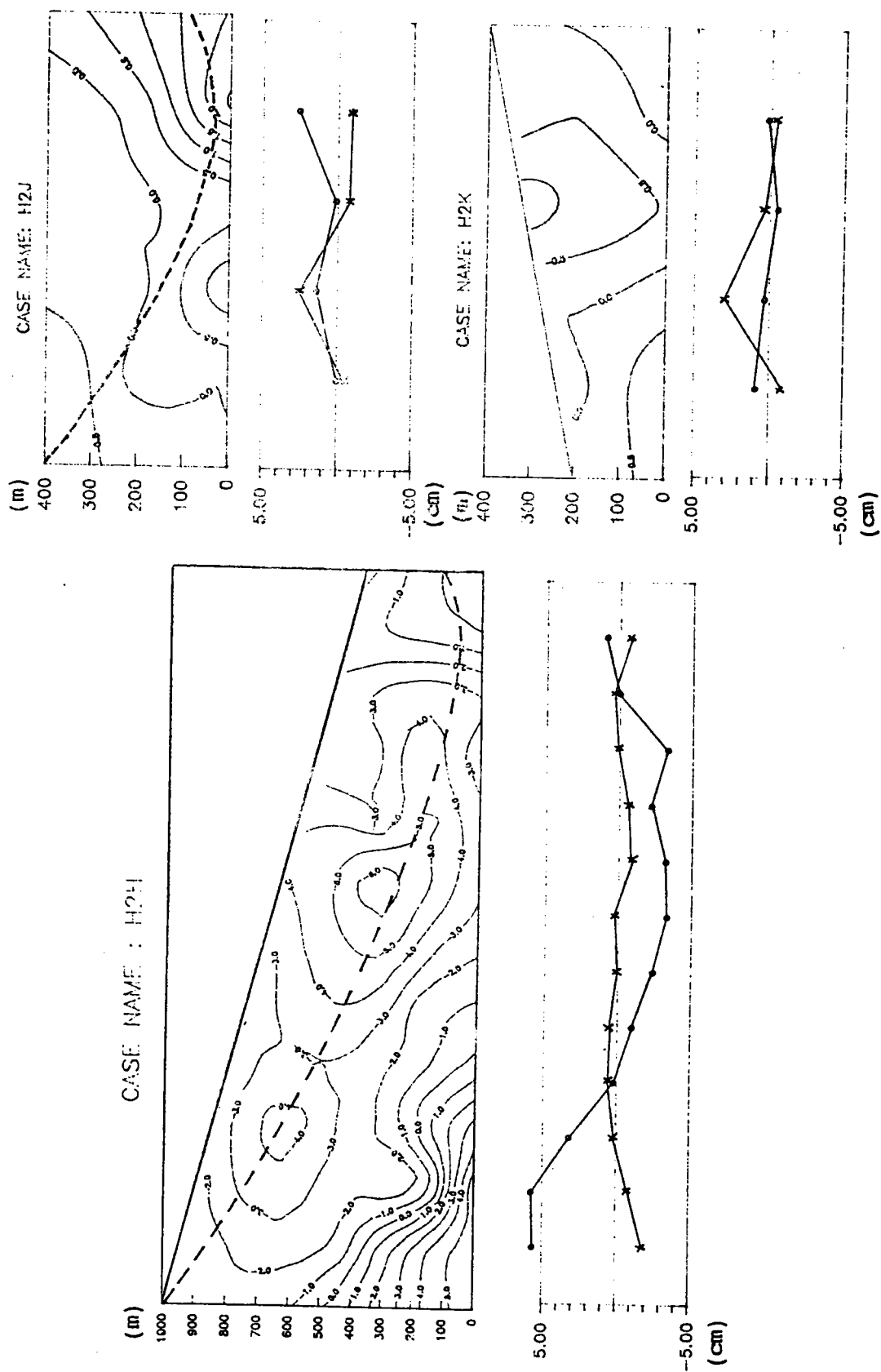


圖 4-8 試驗配置 II，各突堤間之地形變化

4-2 觀音亭定沙水工模型定性試驗研究

(一) 前言

澎湖觀音亭海水浴場為澎湖馬公觀賞落日餘暉及夏季戲水之主要休憩地點，甚具開發觀光之價值。因而交通部觀光局澎湖風景特定區管理籌備處擬將海水浴場之開發配合馬公觀音亭海埔新生地及遊艇港之闢建，有系統的整體規劃成觀音亭觀光帶，帶動地方繁榮。但因鑑於觀音亭海水浴場底床沙質常受波浪、潮流等外力之作用，又缺乏外來沙源供應之情況下，導至海水浴場底床沙質流失，岩石牡蠣殼露出造成戲水質感的破壞。澎湖縣政府曾於該海水浴場以人工加沙之方式，改善底床沙質流失之現象，但經二、三年之經常風及颱風波浪潮流等作用，投置之沙源亦再度流失殆盡。因此，本研究擬先行針對底床沙質之流向及發生之成因做一全盤的瞭解，進而提出解決流沙之方案，提供觀音亭觀光帶配置規劃時之參酌。

據當地居民表示在觀音亭海水浴場築南堤時，海水浴場內在退潮期間會出現很漂亮的沙灘，但南堤築後，沙灘底床質漸漸流失，因而澎湖縣政府於七十七年再以人工加沙補充底床沙質，但經過二年至三年的時光，所加之沙亦流失殆盡。至今僅在整個海水浴場之角隅處尚有少許之貝殼沙留存。經由以上的查訪大概可推測海水浴場沙源流失之可能原因為：

(1) 潮汐之漲退是否在開口處形成較大之潮流而將沙源帶走，但據居民及泳者表示在開口處很少發生意外事件，在開口處游泳亦沒有流向外海的感覺，因此在可游泳的期間，因開口束縮所引起的開口處流速加大，而將沙源帶走的可能性較小，又由訪談中得知在可游泳的期間海水浴場內水質清澈亦即海水浴場內之底床質不會受波浪作用形成懸浮質再由潮流帶走。但颱風期間於開口處之流速是否很大，或受波浪作用而形成海水浴場內之底床質形成懸浮質，便不得而知，或許此時段潮流亦是加強沙源外移的另一原因。

(2) 南堤築後，海水浴場形成一個三面封閉開口很小，形狀像港澳的海域

，同時海水浴場之底床高程爲北高南低，因此是否波浪由SW向或SSW向傾斜入射進入海水浴場後水流在封閉海域內形成順時針之環流，而將沙源帶到海側。

- (3) 海水浴場之形狀因素所引起之港池振盪，而形成環流將沙源帶走。
- (4) 颱風期間波浪方向大約爲SW和SSW向，而此向之波浪正好斜向進入海水浴場，可能在海水浴場內形成環流，又颱風期間水位暴漲，颱風過後水位突降，在此雙重因素作用下很快的把海水浴場內之沙帶到海側。
- (5) 南堤築後斷絕西南向進來之沙源，使得海水浴場內沙僅有出而沒有補，造成供需失調而破壞平衡。
- (6) 傾斜入射時，南堤內側形成一個遮蔽區，此區內波浪因繞射形成環流。

本研究即針對以上討論之流沙可能發生的原因，擬以現場實測及水工模型試驗二大方向來逐一探討，進而找出主要發生流沙之原因，並提出定沙的方案。

(二) 現場實測

現場實測之目的係要了解在經常風期間潮汐所引起之潮流對海水浴場內沙源流失之影響程度，同時追查沙源之流失走向，因此現場實測共分成三大部份來討論，即爲開口處以流速儀量測距底床約100公分處之流速，投置螢光砂與採取底床沙做粒徑分析，詳述如下：

(1) 量測開口處之速度

十分鐘平均最大速度爲12.04cm/sec到12.4cm/sec，平均流速入口方向爲7.61cm/sec，垂直於入口方向爲7cm/sec。

(2) 螢光砂追蹤漂沙移動的主要移動方向

經常風期間潮汐的漲落所引起的潮流對海水浴場之漂砂移動影響不大。

(3) 粒徑分析

靠近南堤內側 D_{50} 在0.2mm左右，南堤外側據潛水人員表示有一大片沙其粒徑亦在0.2~0.28mm與海水浴場內之粒徑相對，很有可能海

水浴場內之沙流出海水浴場後之堆積地點。

(三) 水工模型試驗

本研究分成二大部份來探討流沙之原因，其一為定床試驗，其二為半固定床試驗。定床試驗係用來探討(1)波浪斜向入後海水浴場內環流是否形成，(2)加入潛堤及離岸堤後，海水浴場內波況及流況，(3)校驗海水浴場形狀因素之影響而形成之振盪。而以半固定床試驗方式來探討漂沙移動方向，採用半固定床的原因為本試驗區域底床目前皆為岩石，底床沙已經流失殆盡，又假設沙源不會由外海補充僅考慮沙源流失之情況來探討，海水浴場內砂源移動的機制及移動方向並提出定沙方案。以上將依定床試驗與無固定床試驗分別詳述之。

3-1 定床試驗

3-1-1 試驗設備

見港研所專刊91號

3-1-2 試驗範圍

本試驗模型範圍採原海水浴場及鄰近海域，顧及影響海水場周邊之邊界條件及考慮離結構物七倍試驗波長以上之造波距離。模型之距離範圍採用 20 公尺長 20 公尺寬換算成實地長度為 720 公尺長 720 公尺寬。

3-1-3 模型縮尺

縮尺比例為 1/36。

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

3-1-4 試驗用之波浪、潮汐條件及試驗佈置

本試驗共採二種入射方向，SW方向與SSW方向，三種佈置即原型、入口處置潛堤及入口海側設置離岸堤。波浪條件採季節風與颱風並加潮汐變化如表二所示，本表採用環海顧問公司推算結果。

表二 固定床試驗條件

	模 型			實 體		
	波 高 (cm)	週 期 (sec)	水 位 (cm)	波 高 (m)	週 期 (sec)	水 位 (m)
季 節 風	3	0.8	+4.75	1.08	4.8	+1.71
颶 風	14.4	1.08	+4.75	5.18	10.8	+1.71

3-1-5 試驗步驟

本試驗依下列步驟實施：

(1)模型製作

依據澎湖特定區管理籌備處提供之現場地形圖，依縮尺關係佈置於平面水槽內，並利用水泥、沙漿鋪設五公分厚之表面。潛堤及離岸堤皆使用鋁製之消波堤模型鋪設。

(2)原型試驗

1. 利用乒乓球加水，使其比重與水相似。而以定點定時投放與全面平均投放二種方式追蹤海水浴場內之流況。
2. 追蹤流況採用人為繪圖，照相及V8錄影機同時做記錄。
3. 率定波高計共14支，為求較精確之水位變化，因而將波高計改成量測部份僅10公分長。
4. 在海水浴場內佈置12支波高計，造波機前佈置二支波高計控制入射波高，為精確量測海水浴場內之波高變化，容量式波高計皆改成10公分長，以減少量測誤差。
5. 在海水浴場內佈三支螺旋槳式流速計，以量測固定點流速之變化，此三支流速計採用三角形佈置，以利環流之監測。

(3)潛堤試驗

潛堤試驗時採用原型地形試驗，僅在入口處以消波塊佈置透水性的潛堤，其堤高高程為+0.5公尺。其餘各項試驗與原型相同。

(4) 離岸堤試驗

離岸堤試驗亦採原型地形試驗，在入口處前以消波塊設置長

3.1 公尺之透水性離岸堤，其餘各項試驗與原型試驗相同。

3-1-6 試驗結果與討論

依流速、波高分佈、環流及水位抬升等四個主題分別討論如下：

(1) 流速

表三 SW向三控制點之流速比較表

條 件 佈 置	季 節 風			颱 風		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
原型佈置	6.0	1.6	3.3	13.2	9.2	12.7
潛堤佈置	2.6	1.4	3.1	12.0	8.0	8.1
離岸堤佈置	5.3	1.7	4.5	12.0	9.0	13.2

表四 SSW 向三控制點之流速比較表

條 件 佈 置	季 節 風			颱 風		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
原型佈置	4.9	2.6	3.4	14.2	6.8	13.6
潛堤佈置	3.7	2.7	2.6	8.7	5.7	12.2
離岸堤佈置	3.9	2.8	3.8	8.9	5.8	8.9

(2) 波高分布

表五 季節風之波高比值比較表

波 向	佈 置	入 口 處 波 高 比	海 水 浴 場 內 波 高 比 之 平 均 值
SW	原 型	1.07	0.217
	潛 堤	0.91	0.169
	離 岸 堤	1.09	0.195
SSW	原 型	0.79	0.193
	潛 堤	0.75	0.164
	離 岸 堤	0.95	0.206

表六 颱風之波高比值比較表

波 向	佈 置	入 口 處 波 高 比	海 水 浴 場 內 波 高 比 之 平 均 值
SW	原 型	0.36	0.159
	潛 堤	0.32	0.117
	離 岸 堤	0.37	0.164
SSW	原 型	0.32	0.141
	潛 堤	0.28	0.110
	離 岸 堤	0.38	0.136

(3) 流況追蹤

在原始地形高程不變，同時潮汐亦固定不變之情況下，無論何種方向之入射波及佈置，在海水浴場內均會有順時針之環流出現，同時大致上可判斷此環流係由地形北高南低，而迫使斜向入射（SW、SSW 向）之水體受地形擁高而往南側較低處移動而形成環流。同時因南堤的遮蔽而形成的繞射區域亦為加強環流的另一主因。

(4) 水位抬昇

現場之水位差為4.68公分，此差值不大，故海水浴場尚不會發生振盪現象。

3-1-7 分析結果

- (1) 經由定床試驗的結果，可得知海水浴場內沙源流失可能不是經常風時潮汐所引起。
- (2) 海水浴場內之環流可能由於地形南北二側高不同而引起水體運動及南堤的遮蔽而形成繞射區域所致。
- (3) 潛堤之佈置可得到較原型及離岸堤好的效果。
- (4) 海水浴場內不致因水位抬昇而產生振盪。
- (5) 由以上之討論可得知，海水浴場內流沙之原因為地形不平衡而產生之環流及斜向入射而形成之繞射區內之環流現象復加上颱風時暴潮位之突降，而將沙帶出海水浴場。

3-2 半固定床試驗

由於觀音亭海水浴場為三面封閉之港澳形狀之海域，其港外北側海域為岩石底床，南側雖有沙源但被南堤阻擋無法供給海水浴場；入口處亦為岩石底床，因此本研究先行認定海水浴場無沙源可供給，僅考慮沙是否能穩定於海水浴場內，或流出海水浴場之問題，故本模型試驗海水浴場外為固定底床以混凝土沙漿鋪設底床，而海水浴場內才使用煤灰鋪設底床。

3-2-1 試驗設備

同定床試驗

3-2-2 試驗範圍

同定床試驗

3-2-3 模型縮尺

縮尺比例1/36。

3-2-4 試驗條件

同固定床試驗

3-2-5 試驗步驟

本試驗依下列步驟實施

(1)模型製作

依據定床試驗的結論知，海水浴場內沙流出之機制，可能為地不平衡造成的環流及南堤後繞射區內形成之環流復加上颱風時期的潮位突降所引起，因此針對此原因來採取對策，亦是將地形儘量調成與波向線成垂直，同時高程平均，及坡度緩變。

海水浴場外側利用水泥沙漿鋪設五公分厚之表面，海水浴場內鋪設通過100號篩而停留在200號篩之煤灰。潛堤使用鉛製之消波塊模型鋪設。

(2)模型鋪設後浸水半日再量測原始地形。

(3)以季節風之條件造波半小時後再量取地形變化，連續二次。

(4)爾後再造波一小時，再量取地形變化，再連續造波三小時後改為每造波二小時後量測地形。

(5)俟地形穩定後，再施放乒乓球以測繪流況，並用V8攝機拍攝流況。

(6)連續造波13小時後，地形已呈穩定狀態。

(7)每隔二公分放水線一條。

(8)颱風之起始地形採用季節風之終期地形。

(9)颱風之造波時間與季節風相同。

(10)重複步驟(1)到步驟(9)。

3-2-6 試驗結果與討論

3-2-6-1 原型檢核

見港研所專刊91號

3-2-6-2 改善方案

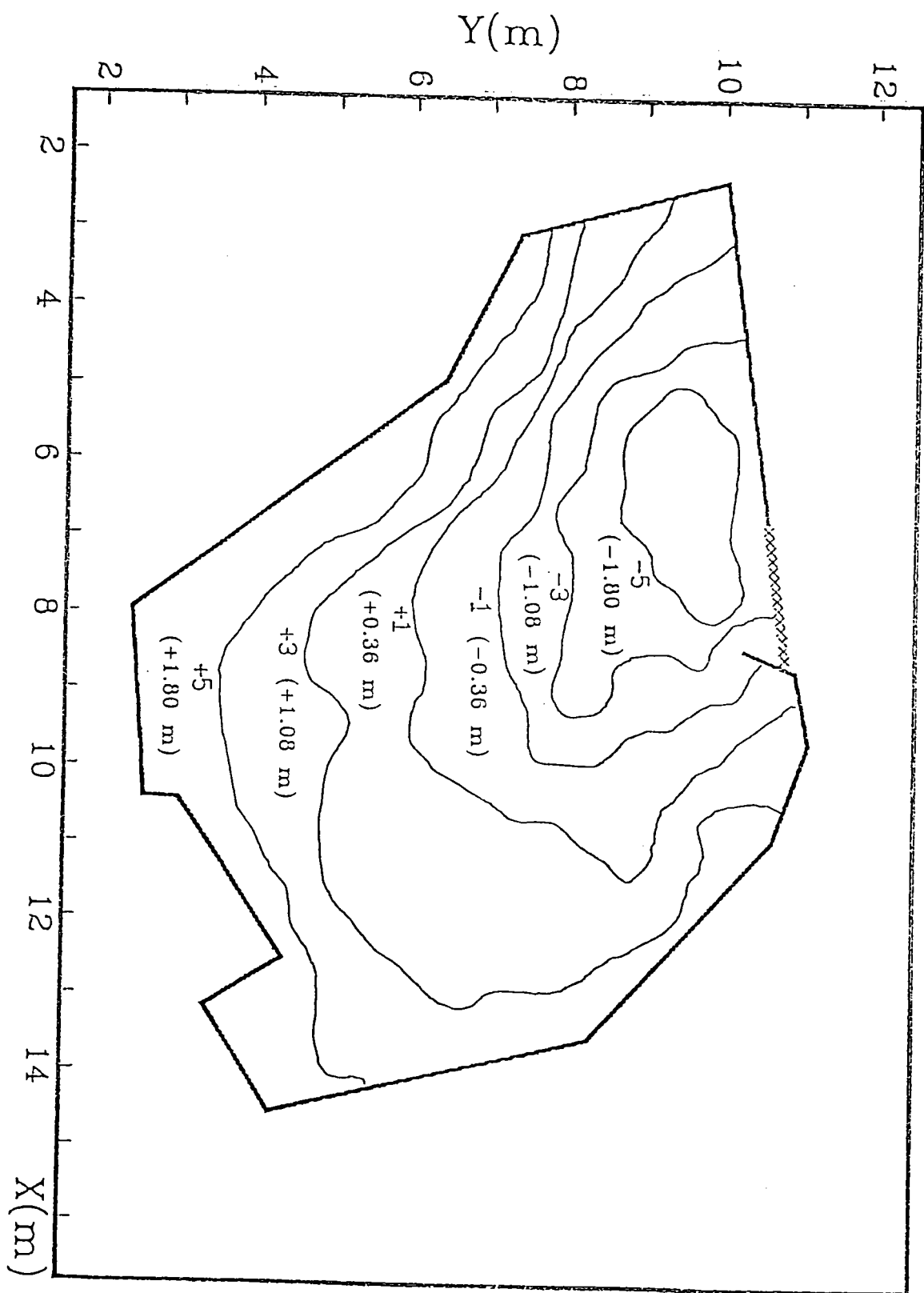
依據定床試驗的結論得知，海水浴場內沙源流出之機制，可能為地形不平衡造成的環流及南堤後繞射區內形成的環流，颱風期間波浪能量較大而將底床質懸浮後加上颱風時期的潮位突降引起，因此本改善方案即針對此原因來採取對策，亦將地形儘量調成與波向線垂直，同時高程平均及坡度緩變，並於入口處加一道潛堤迫使進入海水浴場前波浪形成碎波消除波能，減小底床質形成懸浮質之可能性，其佈置圖如後圖所示。

(1) SW向

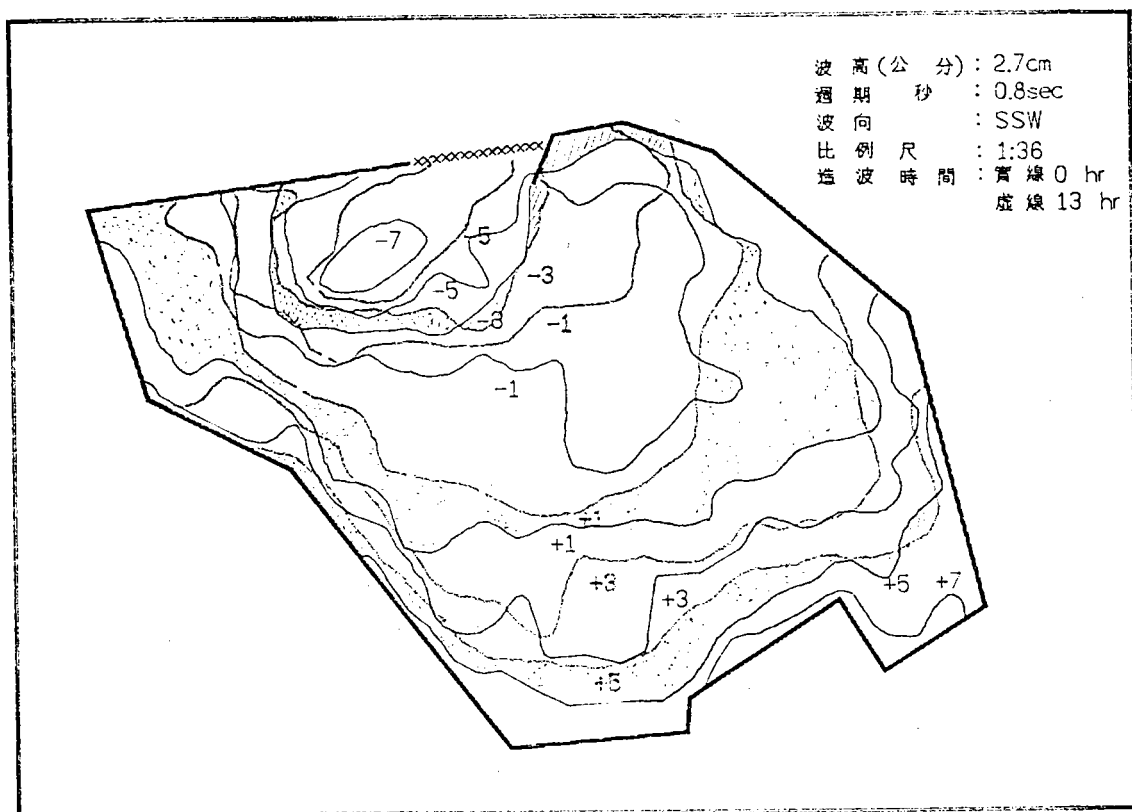
- ① 流況追蹤。
- ② 斷面高程比較。
- ③ 平面高程比較。

(2) SSW 向

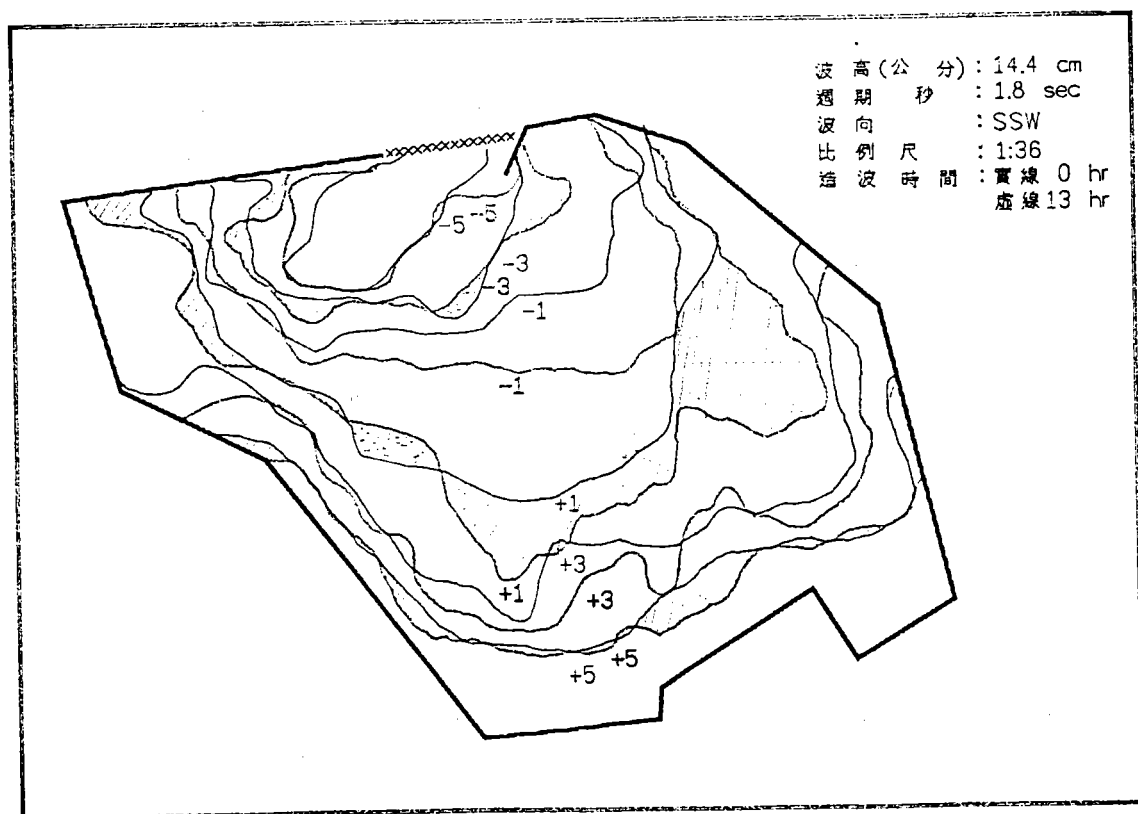
- ① 流況追蹤。
- ② 斷面高程比較。
- ③ 平面高程比較。



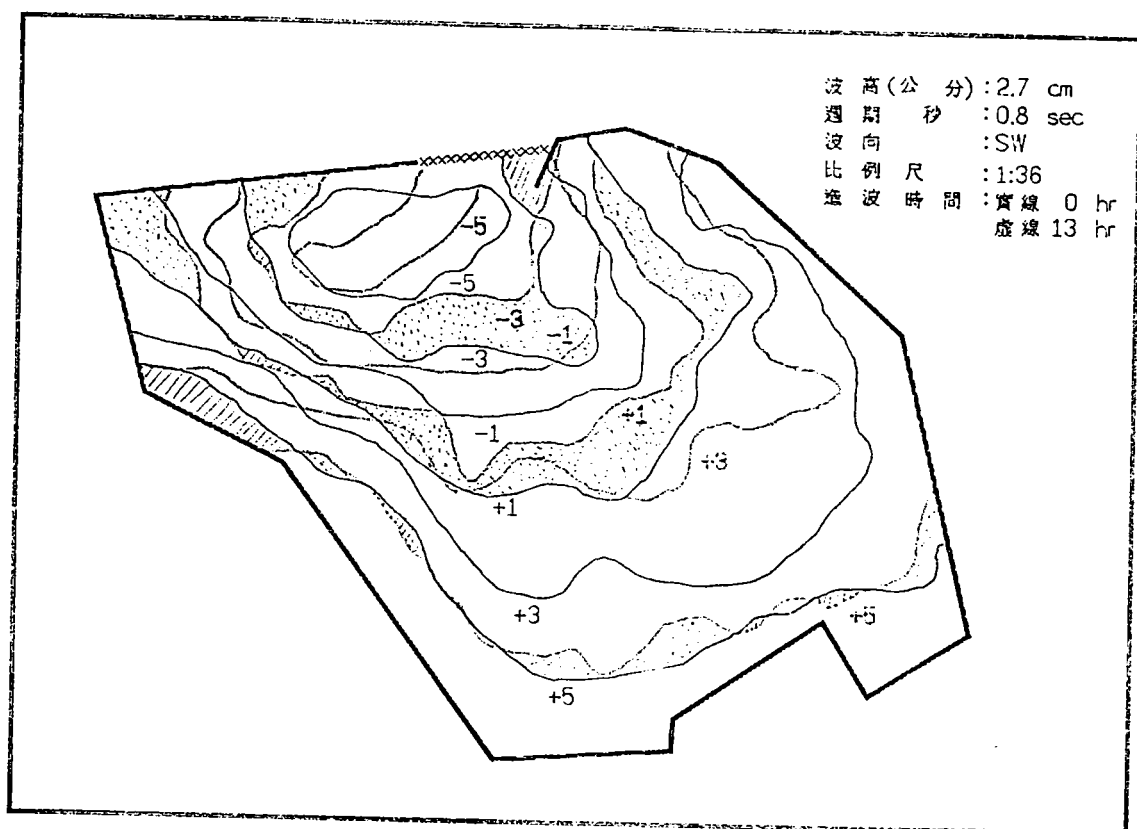
改善佈置等深線



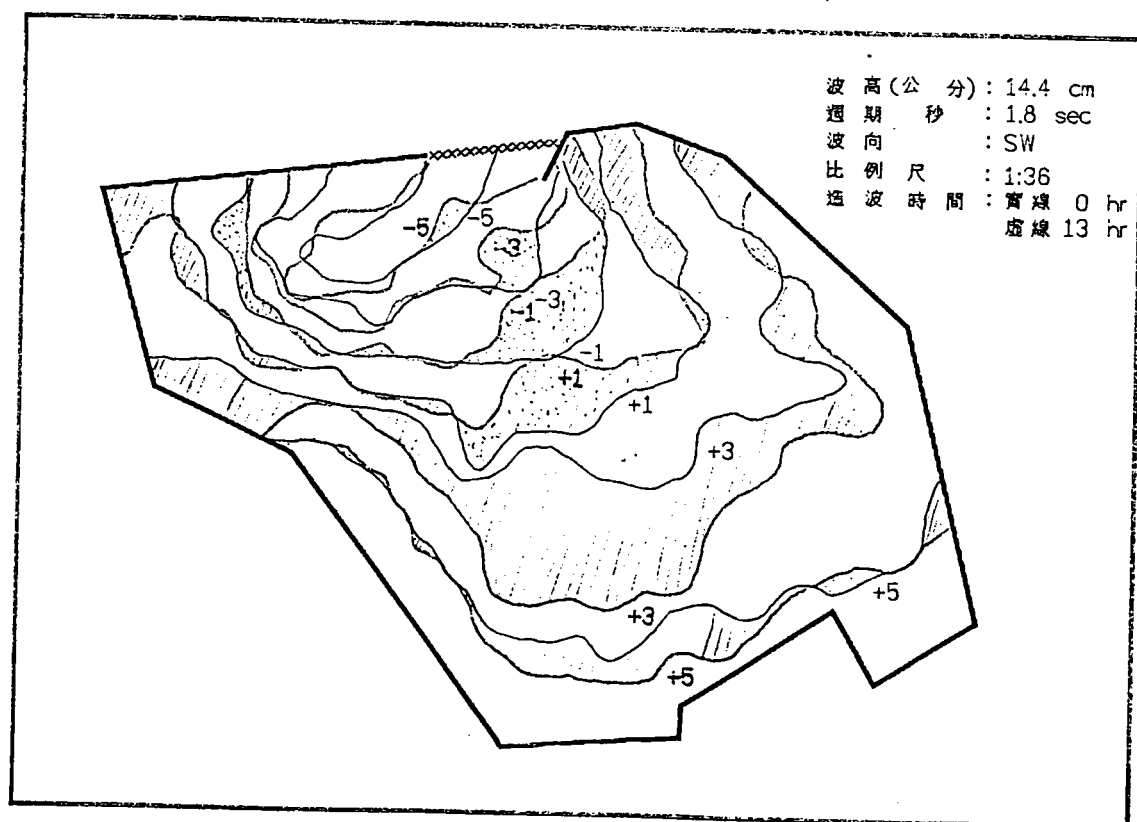
SSW 向季節風起始地形與終期地形比較圖



SSW 向颱風起始地形與終期地形比較圖



SW向季節風起始地形與終期地形比較圖



SW向颱風起始地形與終期地形比較圖

(四) 結論與建議

結 論

經由現場實測與固定床、半固定床等水工模型試驗，得到以下各點結論：

- (1) 由現場實測得知，海水浴場內入口處之流速在十月份大潮期間之最大退潮流速為 12.44cm/sec。
- (2) 經常風期間內潮汐所引起的潮流不是海水浴場內沙源流出的主因，亦就此時期之潮流對漂沙影響不大。
- (3) 由地形北高南低及波浪斜向入射所造的繞射，而造成海水浴場內有環流出現。
- (4) 颱風時之暴潮位之突降，係沙源被帶出海水浴場之主因。颱風時較高的波能使底床質形成懸浮質而被突降之退潮潮流帶出海水浴場。
- (5) 經由調整海水浴場之地形高程後，發現在季節風時期沙源會向岸側移動，而在颱風期沙源即會往海側漂出去。
- (6) 颱風時期所帶走的沙源如沒有補充來源，即會呈現海水浴場內沒沙之情況。
- (7) 經地形調整後海水浴場內之環流現象已經排除，但對於颱風暴潮位所引起的漂沙動力，無法有效克服，因此改善方案僅能達到延緩沙源帶出海水浴場之時間。
- (8) 由檢核試驗中發現，由於澎湖縣政府所投入沙源不適，而且底床為岩石，因而造成二種材質間之結合性較差，更易形成沙源的移動。

建 議

- (1) 用來鋪設海水浴場之沙源之粒徑應採用粒徑較大者，方能較有效的抵抗颱風時之暴潮位突降所引起之流。粒徑應大到多少應以景觀及海灘質感為判斷依據，但粒徑愈大愈有效果。
- (2) 每年應編列維護費補充沙源。
- (3) 南堤如拆除後是否堆置在南堤外側的沙源會產生補充海水浴場之效果，應再做進一步之研究，同時南堤外側沙源分佈範圍究竟有多大，應再詳細調查評估。

(4)地形可採用前圖所示之等深線圖。

五、結語

台灣過去的海岸侵蝕防護措施多採用傳統的硬體工法，在佈置方案與海岸配合上似乎仍在摸索體驗之中。目前，台灣西海岸環境迫切需要改善，上述美國之規劃理念及各種工法或能提供相關主管單位參考，在制訂法規及政策時，納入考慮，或能有助於台灣海岸環境品質之提昇。

最後，引用湯麟武教授在八十三年四月於台北所舉辦“海岸結構物與海岸地貌研討會”中轉述，日本的海岸專家故豐島修博士(Dr.Toyoshima, Osamu, 1926-1990)，畢生從事日本列島的海岸防護工作，曾留下幾句名言作為結語。

1. 要利用海岸地區，先將海灘防護工作做好，再進行其他工程。
2. 海灘因工程規劃不正確而消失時，再生成的機會幾乎沒有。
3. 防止侵蝕一切對策，必定要從海中著手。
4. 防止侵蝕防護海灘的工程，一旦錯誤，反而加速侵蝕。

參考資料

1. 郭金棟 (79.12.)：“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工程研究所，CKHOTR-90-012，台南。
2. 吳啓南 (83.4)：“遙測影像分析台灣西海岸地貌變遷”，海岸結構物與海岸地貌研討會論文集，pp4-1~4-30，台北市。
3. 張金機 (83.4)：“未來的港灣建設與海岸開發”，海岸結構物與海岸地貌研討會論文集，pp13-1~pp13-9。
4. 黃清和 (82.7)：“台灣西海岸沖淤調查研究 (I)、(II)、(III)”，港研所基本研究報告。
5. 薛曙生 (83.4)：“美國海岸侵蝕防護措施”，海岸結構物與海岸地貌研討會論文集，pp 10-1~10-12，台北市。
6. 郭金棟 (77.5)：“海岸工程”，中國土木水利工程師學會。
7. 湯麟武 (78.4)：“港灣及海域工程”，中國土木水利工程師學會。

遙測在海岸地區的監測應用(一)

陳繼藩

國立中央大學太空遙測中心教授

一、遙測原理

遙測之定義從一較廣泛的角度來講是指感測器不需與目標物接觸就能獲取並量度該物體特性之資料。從應用之角度而言，遙測是專指獲取，處理及應用有關地球環境，自然資源之資料，以作有效的監視與管理。基本上，遙測感測器與目標物之間資料的獲取是靠兩者之間電磁波能量的傳遞，（即輻射）。電磁波所涵蓋的範圍相當廣泛，從X光（短波）、可見光、近紅外、熱紅外至微波（長波），構成一完整的光譜（圖1）。遙測感測器即利用電磁波來獲取目標物在不同波段的資料。通常感測器可分為被動式與主動式（圖1）。被動式的能量來源，主要來自太陽對地面的反射，感測器所獲得的資料大部份為光學的影像。主動式的能量來源來自感測器本身，電磁波由感測器發出，碰到目標物後，再返回感測器。資料形式大部份為雷達影像。被動式的遙測會受到天候、雲層及夜晚的影響而無法獲取地面的資料，主動式則不受影響可以24小時全天候的獲取資料。一個完整的遙測系統通常包含感測器之種類，遙測資料之產生，數位化影像之分析及多目標之應用（圖2）。

二、衛星資料

從早期的美國 Landsat 地球資源衛星至最近的法國 SPOT，衛星資料都具備了多光譜和數值化的特性。大部份地球資源衛星的多光譜範圍都會涵蓋可見光至紅外部份，少數會包含熱紅外。其空間解析度則從早期 Landsat MSS 的80公尺提升到目前法國 SPOT 的20公尺多光譜及10公尺的全色態。週期則從 Landsat 的18天至 SPOT 的3～5天不等。Landsat 衛星的設計只能獲取垂直角度的資料，而 SPOT 則可旋轉感測器的角度，以

獲得立體像對（圖 3.4.5）。

國內第一座地球資源衛星接收站在國科會的支援下，已於八十二年夏天在中央大學正式運轉，其 13 米的天線可接收法國的 SPOT，美國的 Landsat 及歐洲的 ERS-1 的衛星資料，各種不同性質的資料及各種不同幾何校正等級的產品，使得國內衛星遙測邁向一多元化及多目標的應用。

三、多目標應用

基本上衛星資料之應用，所採取的是利用影像處理系統來進行電腦處理，不同的應用有不同的處理方式，其目的是多元化、多目標（圖 6）。

1. 衛星影像圖的製作

SPOT HRV (High Resolution Visible) 影像有二種形式：

全色態 (PAN, Panchromatic)，其地面解析度 10 公尺，涵蓋波長範圍在可見光。

PAN : 0.51—0.73 μ m。

多光譜 (XS, Multispectral)，其地面解析度為 20 公尺，波長範圍如下：

XS1 0.50—0.59 μ m / 綠

XS2 0.61—0.68 μ m / 紅

XS3 0.79—0.89 μ m / 近紅外

很明顯的，SPOT 影像的特性為 10 公尺較高的解析度卻是黑白的，而 20 公尺較低解析度的卻是彩色的。所以問題是如何將二種影像合成一起製做 10 公尺彩色影像，這也是衛星影像地圖所要達成的要求——10 公尺的解析度且為彩色。通常顏色的產生可由所謂的三原色合成 (RGB : Red , Green and Blue)。但這並不是唯一的表示方法，另一種表示形式為亮度 (Intensity)，飽合度 (Saturation)，和色度 (Hue) 即所謂的 ISH。所以可將 RGB 和 IHS 視為描述顏色的二個不同的座標系統。系統與系統之間的座標轉換是可透過數學模式來完成。SPOT 10 公尺彩色影像的製作，即是先將 20 公尺的影像校正成 10 公尺，然

後再將 XS3 / 近紅外，XS2 / 紅，和 XS1 / 綠（代表 RGB），轉換為 ISH。以 PAN（10公尺）的亮度值取代 ISH 的 I（I'SH），然後再轉換為新的 R'G'B'。即得到10公尺的彩色影像。

2. 土地覆蓋／土地利用之分類

資源衛星多光譜資料自一九七二年美國 Landsat MSS 發射以來，就一直都被應用於大規模的土地分類。主要的原因是過去的土地分類必須仰賴大量的人力進行地面實地的調查。如果調查範圍屬於小規模的測試地區，人力的調配還勉強可應付，但碰到大範圍的地區，如國土地利用調查，純靠人力方式的地面調查，很明顯的，在時間、金錢、效益上必定會遭遇相當大的困難。而地球資源衛星提供了從天上監測地面的絕佳工具。所以許多研究針對資源衛星多光譜及數值化的資料特性發展出甚多的自動化土地分類法（圖7）。

這些分類方法基本上可歸納為監督性分類法（Supervised）和非監督性分類法（unsupervised）。監督性分類法通常兩個步驟來完成：(1)訓練階段：由使用者先於影像上選取訓練區，不同訓練區所包含的影像資料即為不同類別的樣本資料，其統計特性應具有高度的分辨性。訓練資料的分辨性與分類結果的成功與否有極大的關係。(2)分類階段：以訓練階段所得到的訓練資料為主，對影像上的每一像元進行分類。分類的方法有許多不同的方式，但最常用的有：parallelepipping, minimum distance to mean, maximum likelihood。基本上這些分類方法都是以像元和訓練資料中最相近或最相似的類別做為像元分類的歸屬。非監督性分類法則不需經過訓練階段，而以群集（clustering）的方法來自動組合具相同統計特性的像元成一類別。

3. 土地變遷之偵測

土地變遷的資訊一直都是很多不同領域所必須的，小範圍的土地變遷，也許可利用地面調查來完成，但所花費的人力、時間及金錢相當驚人，更遑論大範圍的變遷。同時在變遷偵測的時效上，人力調查的方式，絕對無法提供及時的變遷資訊。因此合乎經濟成本和時效要求的變遷偵測方法是變遷資訊能否被大量應用的主要關鍵。為達此目

的，很明顯的在資料上必須具數值化、多元化，及週期性，在方法上必須能夠達到自動偵測。地球資源衛星的資料基本上相當適合上述的要求，其資料是多光譜的數值化影像資料，對同一地區也有相當連續的週期性資料，其各種分析方法也都是自動化的影像處理技術。

自1972年美國地球資源衛星 Landsat 發射以來，衛星影像即被廣泛應用至不同地區的土地變遷偵測，如都市地區、沼澤區、非洲半乾燥區、農業區及海岸地區等（圖8），基本上這些變遷偵測所用的資料都是涵蓋同一地區不同日期的衛星影像，資料本身具多光譜和數值化的特性，而變遷偵測依方法之不同可歸類如下。

* 數學運算法

(1) 相減法

將兩期影像像元對像元相減，理論上來講，沒有變化的區域應有相同的像元值，所以相減後為零是無變遷的區域，非零的則為變遷的區域。但實際上，因許多因素（如大氣情況）會影響兩期影像輻射值，在沒有變化的區域，也會產生不同的輻射值，所以沒有變遷的區域並不僅是在相減為零的情況，換句話說，相減值只要介於一個界限範圍內都可視為沒有變遷。但如何決定此變遷／無變遷界限的門檻值(threshold)相當困難。通常可利用相減值的直方圖(histogram)作為門檻值決定的輔助，但決定的過程相當主觀。因此此方法雖然簡單，但其結果通常不理想。

(2) 相除法

將兩期影像相除，可減少某些常數因素的影響，但對於複雜的因素，仍會有如上述相減法的困難，同時在門檻值的決定也是非常困難。

* 分類法

(1) 分類後比較法

兩期影像分別進行土地覆蓋／土地利用分類，然後比較分類後影像，即可得到土地變遷圖。此方法不僅可偵測變遷的區域，同時還可找出不同土地類別之間的變遷。但其缺點是分類方法的精確度會影響整個變遷的結果，同時也會造成不同類別之間錯綜複雜的變遷。

(2) 週期影像合成分類法

將兩期影像合成單一影像然後再進行分類，整個分析過程只進行一次分類。因為無變遷類別的統計特性和變遷類別會有顯著的不同，所以分類過程會將兩者區別出來，而達到變遷偵測的目的。此方法因輸入為兩期影像的所有光譜資料，對分類而言是相當複雜的過程，同時也會產生相當大數目的類別而造成類別判釋的困難。

* 其他

(1) 前期處理

針對特定類別的變遷可用高低頻過濾法(high and low-pass filter)來加強類別的特性以易於偵測。但特性加強的過程往往會犧牲其他有用的資訊。

(2) 主軸轉換法

利用主軸轉換法(principal component analysis)將兩期影像的多光譜資料同時轉換至不同的主軸。理論上，變遷與無變遷的資訊會分別出現在不同的主軸上，但因不同地區經主軸轉換後所呈現的主軸資訊也不盡相同，換句話說，每一主軸並不是永遠包含固定的資訊，所以如何判斷變遷資訊出現在第幾個主軸上，是此方法最困難之處。

(3) 向量分析法

當土地從某一類別變化至另一類別時，其光譜反應必隨著變化。如果將兩期影像各類別的光譜反應同時畫在散佈圖上(scatter plot)，變遷部份的光譜會呈現向量式的變化。此方法的困難在於如何決定向量大小與方向的門檻值以作為變遷的依據。

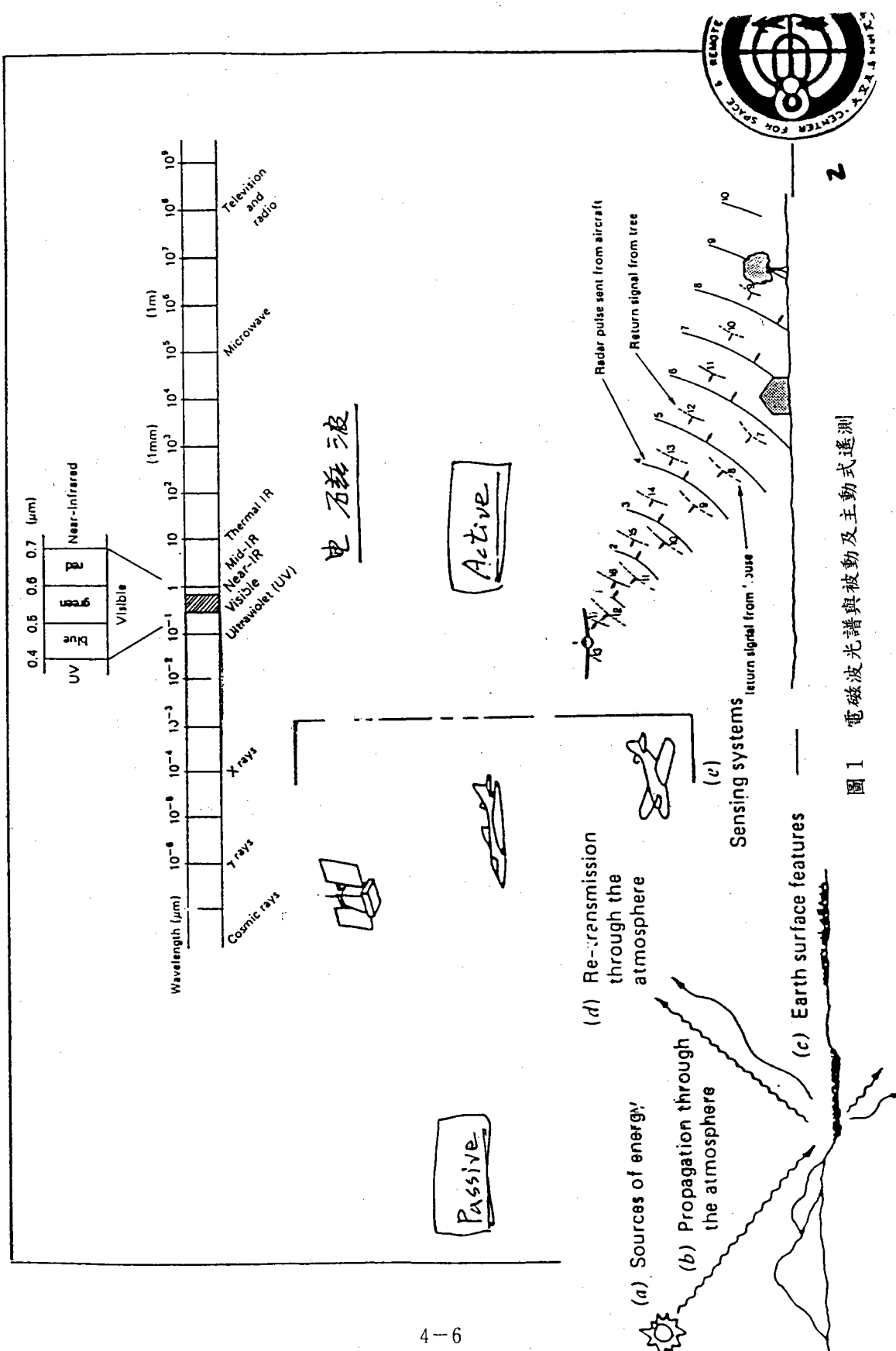


圖 1 電磁波光譜與被動及主動式遙測

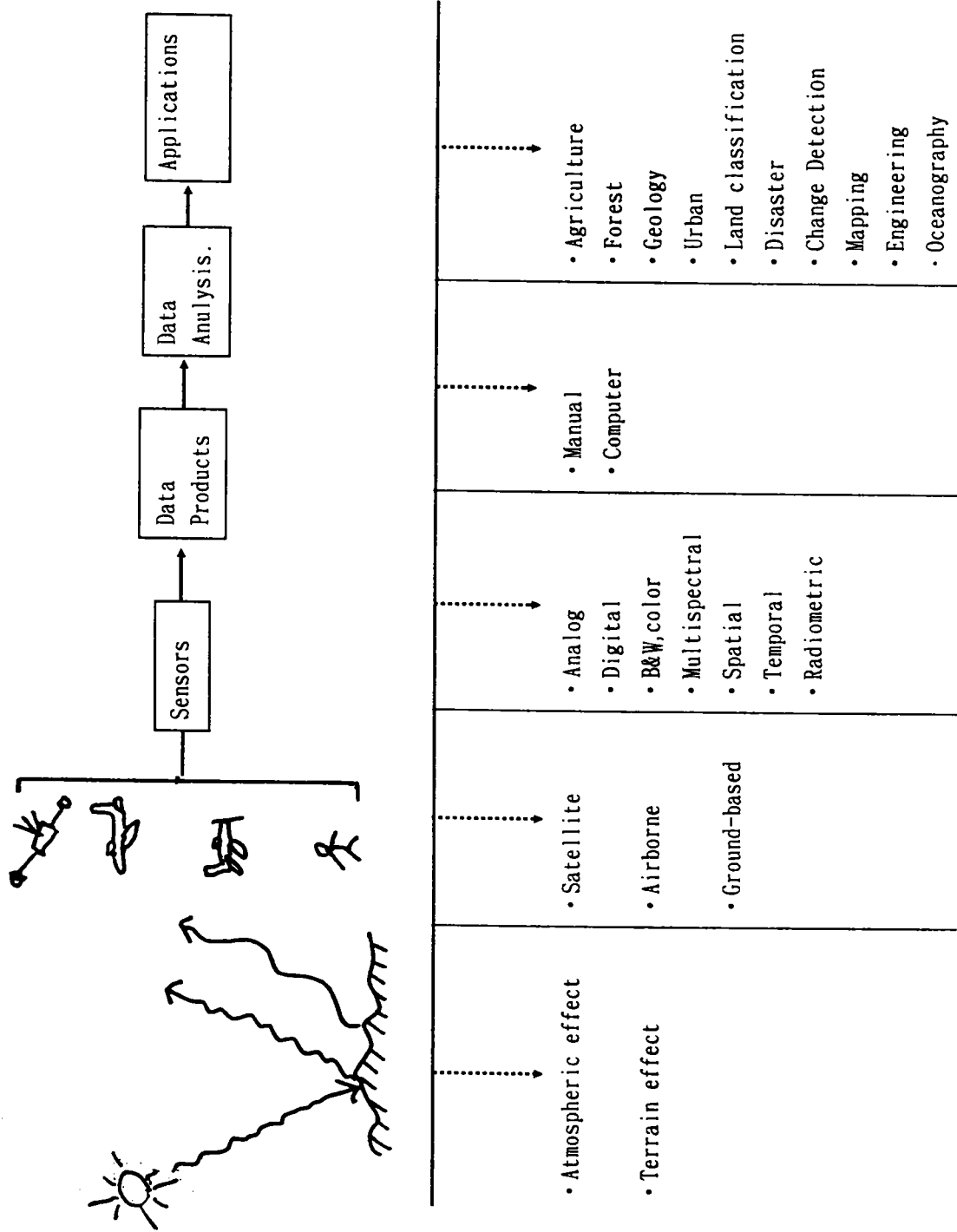


圖 2 完整的遙測系統與流程

<u>發 射</u>		<u>高度(Km)</u>	<u>週期(days)</u>	<u>解析度(m)</u>
Landsat	1,2,3	72,75,78	18	80(MSS)
Landsat	4,5	82,84	16	30(TM)
Spot	1,2,3	86,90,93	26(3-5)	20(XS) 10(PAN)

圖 3 地球資源衛星之飛行高度、週期及空間解析度

Landsat MSS	(um)		Resolution(m)
green	4	0.50-0.60	80
red	5	0.60-0.70	80
near-IR	6	0.70-0.80	80
near-IR	7	0.80-1.10	80

Landsat TM	(um)		Resolution(m)
blue	1	0.45-0.52	30
green	2	0.53-0.61	30
red	3	0.62-0.69	30
near-IR	4	0.78-0.90	30
mid-IR	5	1.57-1.78	30
mid-IR	7	2.10-2.35	30
thermal	6	10.42-11.66	120

Spot	(um)		Resolution(m)
Panchromatic		0.51-0.73	10
green	1	0.50-0.59	20
red	2	0.61-0.68	20
near-IR	3	0.79-0.89	20

圖 4 地球資源衛星之涵蓋範圍

遙測資料的特性：

光譜 (Spectral) —— 可見光，紅外線，熱紅外，微波
空間 (Spatial) —— 各種比例尺空照，多光譜掃描儀5m，

Landsat MSS 80m，TM 30m，

Spot 20m，10m，AVHRR 1.1km

形式 (Format) —— analog (像片)，digital

量測值 (Radiometric) —— 明亮對比、輻射值、數值化

週期 (Temporal) —— 不定期，每12小時 (氣象衛星)，

26天 (SPOT)

圖5 遙測與影像處理系統

遙測與影像處理系統：

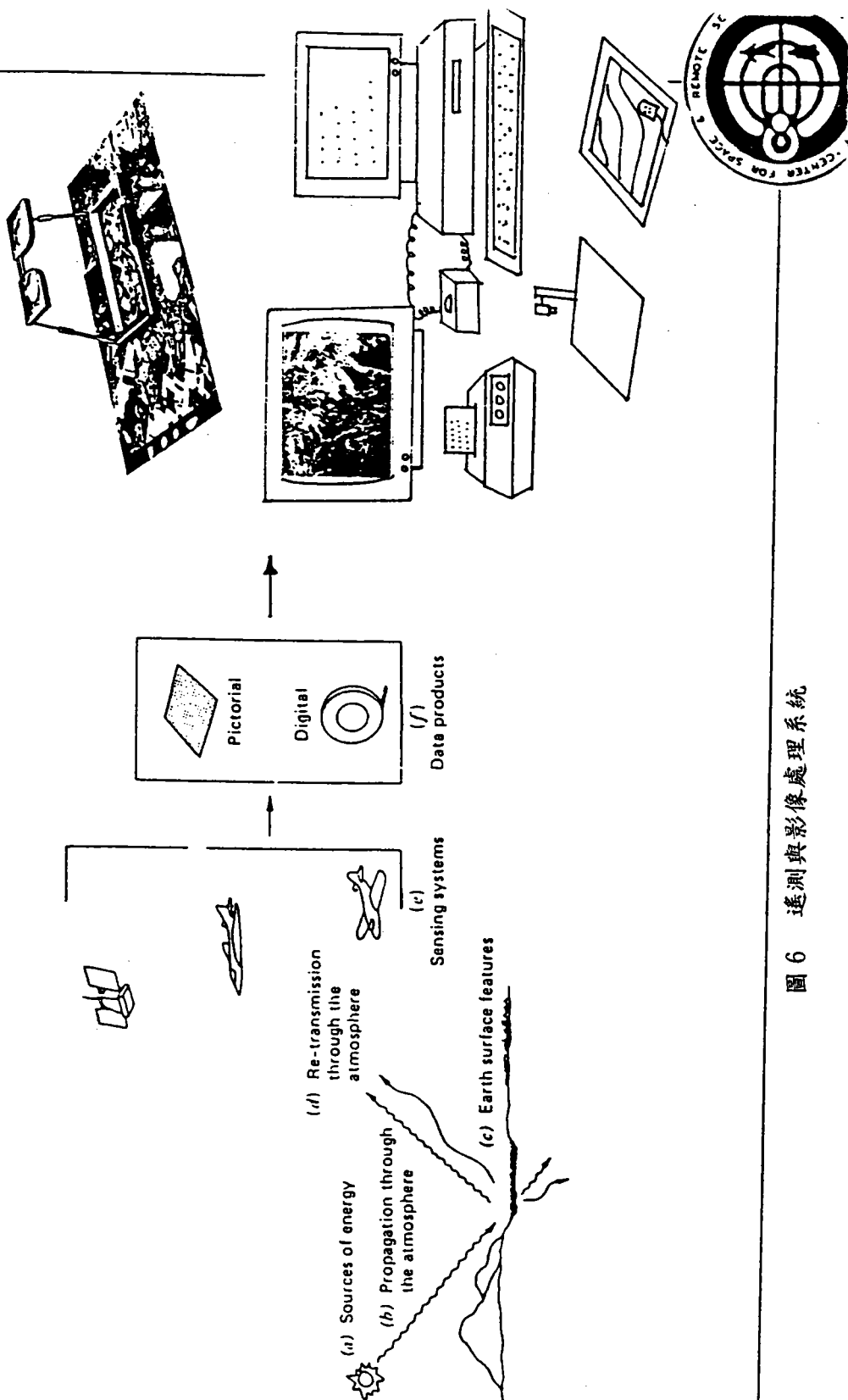


圖 6 遙測與影像處理系統

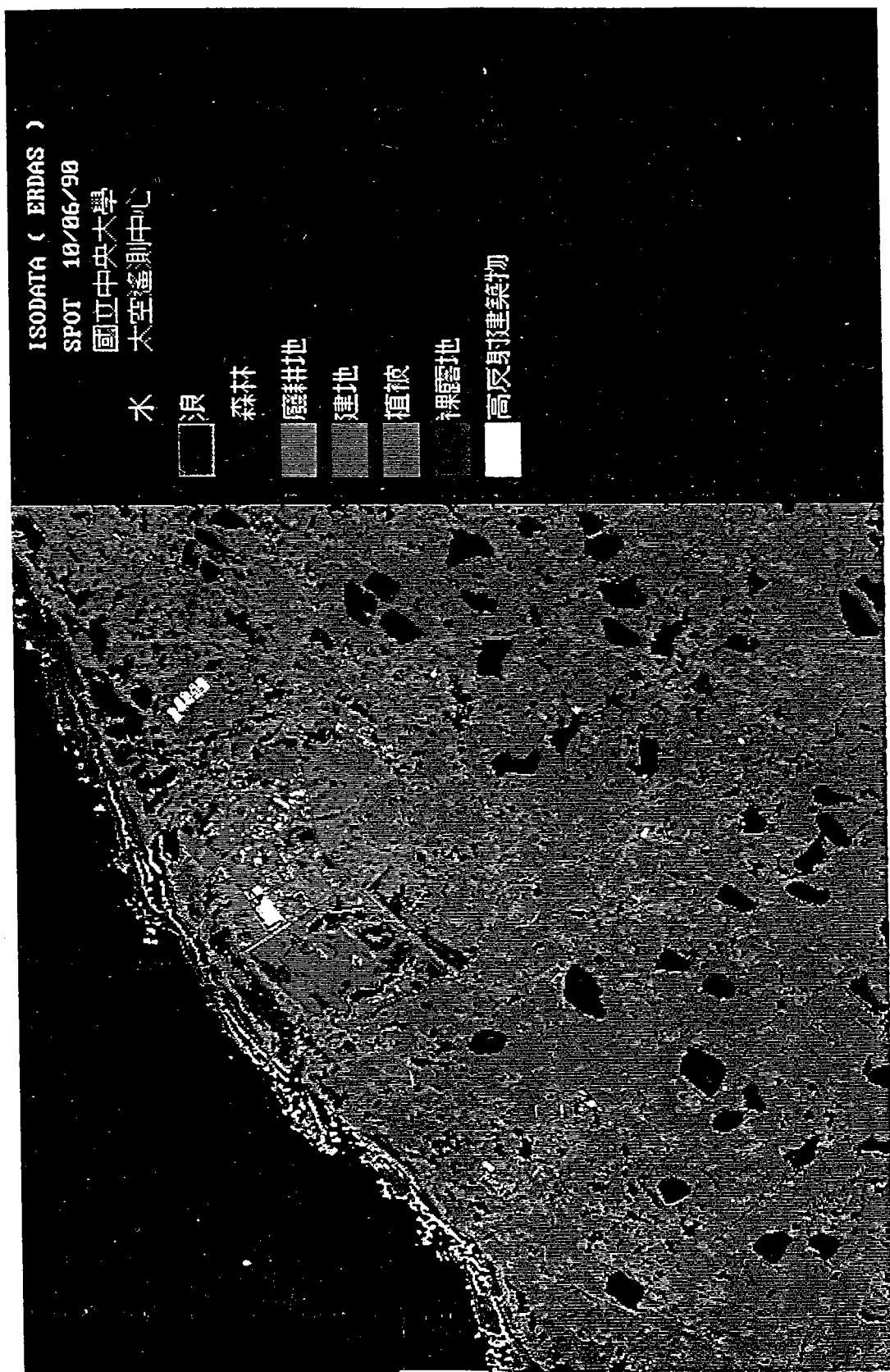
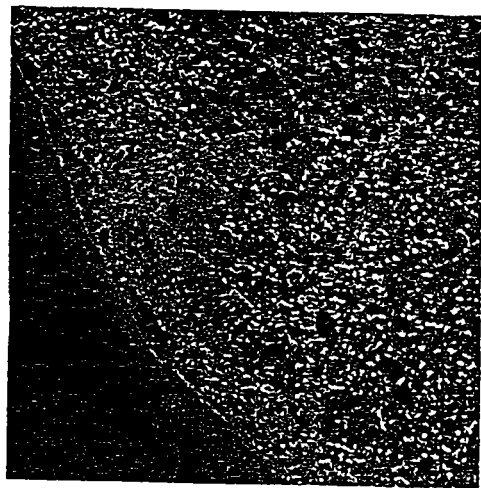
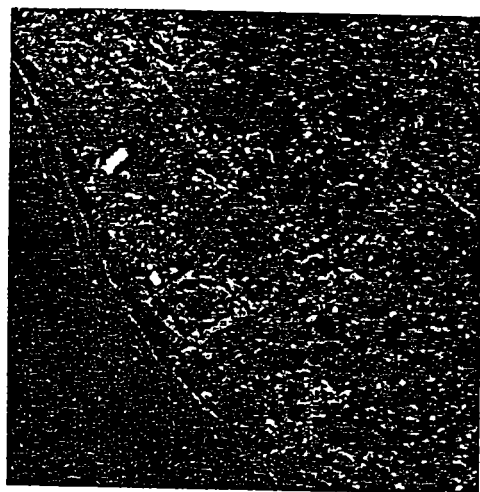


圖 7 土地覆蓋／土地利用分類圖



<圖二> 1986/10/4之試區影像



<圖三> 1990/10/6經幾何校正後之試區影像

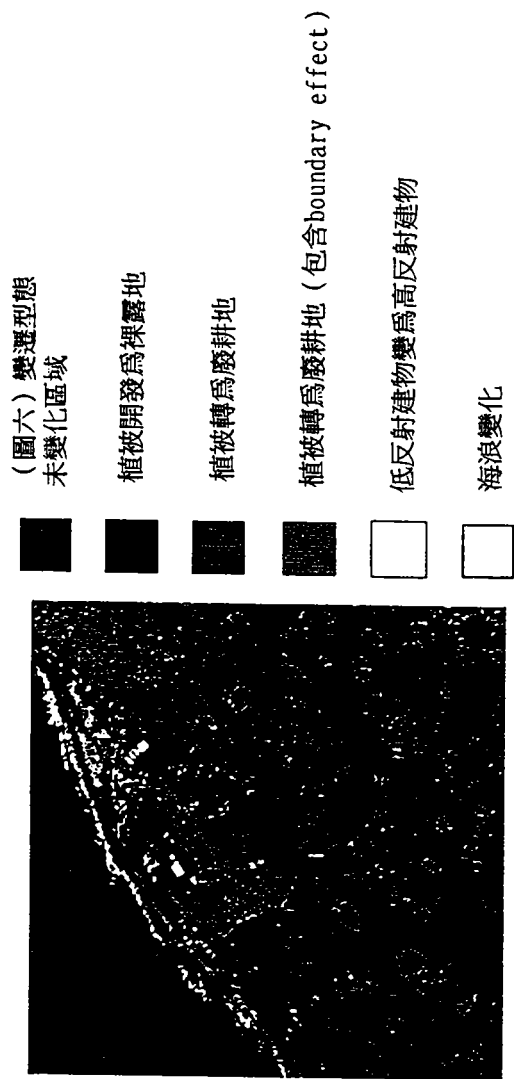


圖 8 土地變遷圖

遙測在海岸地區的監測應用(二)

陳 錕 山 國立中央大學太空遙測中心教授

DEFINITIONS

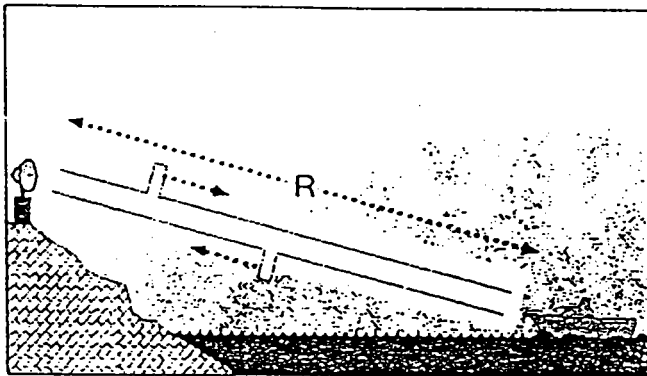
A radar transmits microwave signals and measures the strength and time delay of returned energy

RADAR

Radar is an acronym for RAdio Detection And Ranging.

- Radar remote sensing techniques can provide information about the Earth's surface related to:
 - surface roughness
 - topography
 - moisture conditions
- A Radar system has three primary functions: it *transmits* microwave (radio) signals towards a scene; it receives the portion of the transmitted energy backscattered from the scene; and it observes the strength (detection) and the time delay (ranging) of the return signals.
- Radar provides its own energy source and, therefore, operates independent of sunlight for illumination. This type of system is known as an *active remote sensing system*.
- Canadian industry is a leading manufacturer of state-of-the-art radars and a major supplier of radar survey and interpretation services around the world.
- The government of Canada is committed to the use of imaging radar systems for Earth resource applications.

RADAR - RAdio Detection And Ranging



$$\text{Round Trip Time} = 2 \times \text{Distance} / c$$

$$\text{Distance} = \text{Range} = c \times t / 2$$

c = speed of light (300.00 km/sec)

... notes ...

Diagram Source CCRST-TDS

DEFINITIONS

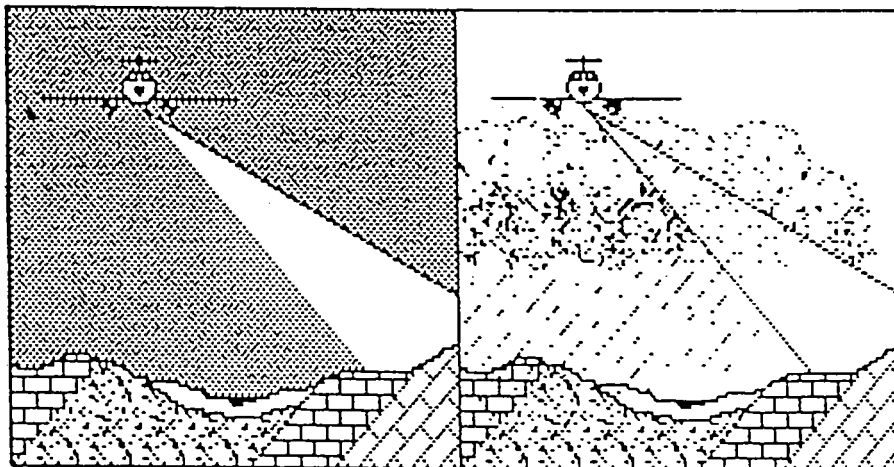
Radar can
operate both
day or night
and through
cloud cover

ADVANTAGES

- Microwave energy can penetrate cloud and to a high degree, rain. For those parts of the world where cloud and rain present a problem in acquiring images, radar is highly beneficial.
- Since radar is an active sensor, it can operate during both day and night. This is especially advantageous in Polar regions where long periods of darkness can hinder image acquisition.
- Interpretation of radar imagery can yield valuable information that is not available in the visible or infrared region of the electromagnetic spectrum.



Advantages



... notes ...

Diagram Source CCRS/TTTOS

DEFINITIONS

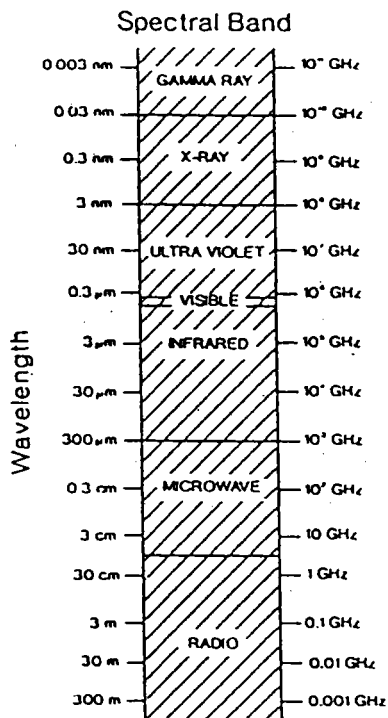
Radar remote sensing uses the microwave portion of the electromagnetic spectrum

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

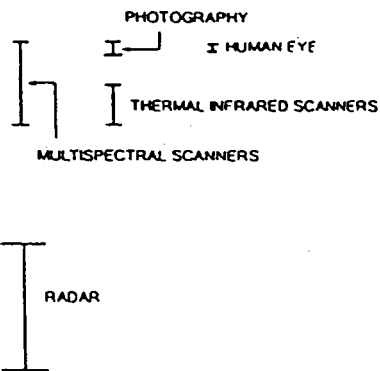
- The *Electromagnetic Spectrum* is an ordered array of energy which travel at the speed of light in a harmonic wave pattern. It is detectable through its interactions with the environment.
- Electromagnetic energy is measured by *frequency*, and by *wavelength* (the reciprocal of frequency).
- Radar remote sensing uses the microwave portion of the spectrum, from a frequency of 0.3 GHz to 300 GHz, or in wavelength terms, from 1 m to 1 mm.



Electromagnetic Spectrum



Frequency



... notes ...

Diagram Source

DEFINITIONS

There are four main frequencies of microwave energy which are currently used for satellite remote sensing

MICROWAVES

- Most remote sensing radars operate at wavelengths between .5 cm to 50 cm.
- The microwave frequencies have been arbitrarily assigned to bands identified by letter. The most popular of these bands for use by imaging radars include:

X-band: uses a wavelength range from 2.4 to 3.8 cm (12.5 to 8 GHz) and is widely used for military reconnaissance and commercially for terrain surveys.

C-band: uses a wavelength range from 3.8 to 7.5 cm (8 to 4 GHz) and is used in many spaceborne SARs, such as ERS-1 and RADARSAT

S-band: uses a wavelength range from 7.5 to 15 cm (4 to 2 GHz) and is used in Almaz.

L-band: uses a wavelength range from 15 to 30 cm (2 to 1 GHz) used on SEASAT and JERS-1.

- The capability to penetrate through precipitation or into a surface layer is increased with longer wavelengths. Radars operating at wavelengths greater than 2 cm are not significantly affected by cloud cover, however, rain does become a factor at wavelengths shorter than 4 cm.



Radar Bands

Band Designation	Wavelength (λ) cm	Frequency (f) GHz
X	2.4 - 3.8	12.5 - 8.0
C	3.8 - 7.5	8.0 - 4.0
S	7.5 - 15.0	4.0 - 2.0
L	15.0 - 30.0	2.0 - 1.0

These are the most common bands for use by imaging radars. An important advantage is the ability to penetrate through cloud and precipitation.

... notes ...

Diagram Source: Adapted from L. E. Land, T. M. and R. W. Keller, *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley & Sons, New York, 1979.

DEFINITIONS

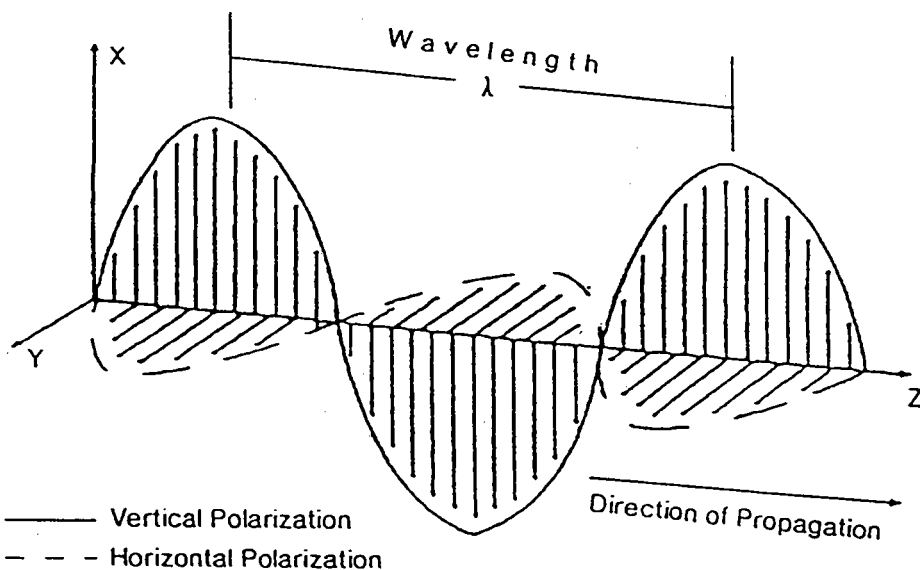
Polarization refers to the orientation of microwave energy transmitted and received by the radar

POLARIZATION

- *Polarization* refers to the orientation of the electric and magnetic fields of *electromagnetic waves*.
- Radar systems can be configured to transmit and receive either horizontally or vertically polarized electromagnetic radiation.
- When transmitted and received energy is polarized in the same direction, it is referred to as like-polarized. HH refers to horizontally transmitted and received energy; VV for vertically transmitted and received energy.
- When transmitted and received energy is polarized in opposite directions, it is referred to as cross-polarized. HV refers to horizontal transmission and vertical reception; VH for vertical transmission and horizontal reception.
- When the radar wave interacts with a surface, the polarization is modified based on the properties of that surface. This affects the way the scene appears on radar imagery.



Polarization



... notes ...

Diagram Source

DEFINITIONS

Average viewing geometry is more stable in spaceborne SARs but earth curvature becomes a factor

SPACEBORNE SARs

- The viewing geometry of a spaceborne SAR, in comparison to an airborne SAR with a similar swath width, varies only over a few degrees and thus provides a more uniform illumination geometry over the whole swath.
- Depending on orbit parameters, a spaceborne SAR can collect data more quickly over larger areas than its airborne equivalent.
- Frequency of coverage by a spaceborne SAR is set by orbital constraints, and by imaging modes of the radar. An area can be revisited typically every 3 - 34 days.
- Once a spaceborne SAR is in orbit, flexibility and serviceability are severely restricted. However, the overall mission coverage is often more uniform and repeatable than for airborne systems.
- While spaceborne SARs are not affected by air turbulence, corrections must be made for the effects of earth curvature, earth rotation and orbital variations. These are routine operations built into the SAR processor.



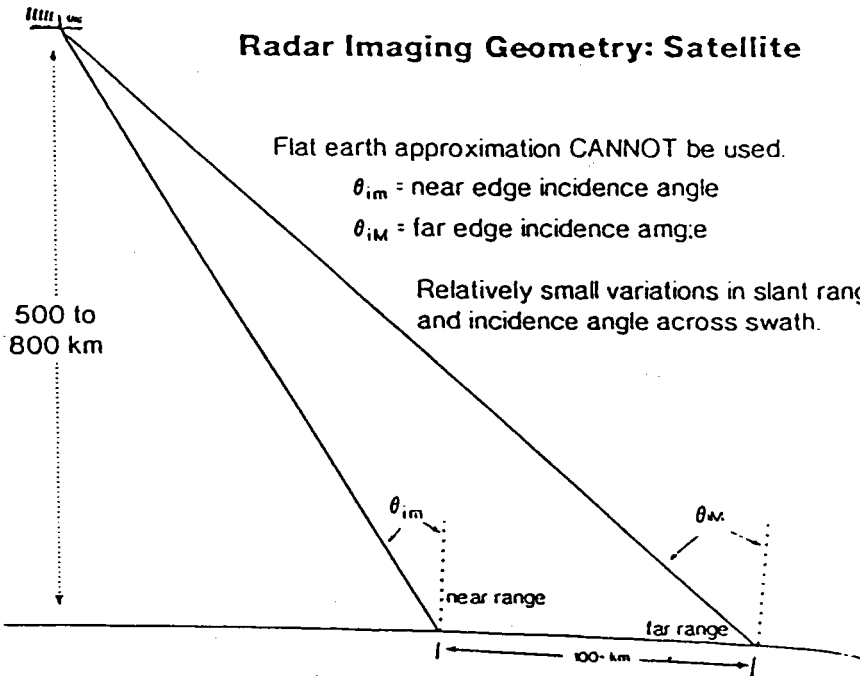
Radar Imaging Geometry: Satellite

Flat earth approximation CANNOT be used.

θ_{im} = near edge incidence angle

θ_{iM} = far edge incidence angle

Relatively small variations in slant range and incidence angle across swath.



... notes ...

Diagram Source CCRS/TTTDS

DEFINITIONS

Resolution is defined as the ability of a system to differentiate between two closely spaced objects. In a radar system, resolution is defined for both the range and azimuth directions.

RESOLUTION**Range**

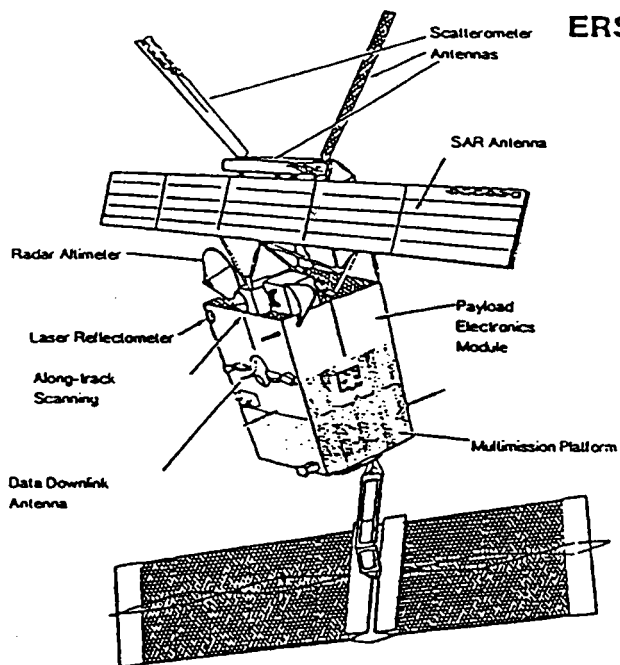
- Range resolution of a SAR (Synthetic Aperture Radar) is determined by built-in radar and processor constraints which act in the slant range domain.
- Range resolution is dependent on the length of the processed pulse; shorter pulses result in "higher" resolution.
- Radar data are created in the slant range domain, but usually are projected onto the ground range plane when processed into an image.

Azimuth

- Azimuth resolution is determined by the angular beam width of the terrain strip illuminated by the radar beam.
- For two objects to be resolved, they must be separated in the azimuth direction by a distance greater than the beam width on the ground.
- Synthetic Aperture Radar (SAR) gets its name from the azimuth processing and can achieve an azimuth resolution which may be hundreds of times smaller than the transmitted antenna beam width.



ERS-1 Satellite



... notes ...

Diagram Source

DEFINITIONS

ERS-1 was launched in 1991 and is currently collecting C-band SAR data

SATELLITE SARs:

ERS-1

- ERS-1 (European Earth Resource Satellite) is the European Space Agency's first remote sensing satellite. It was launched in July 1991.
- ERS-1 operates in a *sun-synchronous, near-polar orbit*, at a mean altitude of 785 km.
- ERS-1 is a C-band (5.3 GHz) SAR with vertical polarization at an incidence angle of 23°. Data is collected in 100 km x 100 km frames, with variable resolutions depending on the product type.

Canada receives ERS-1 data at both Gatineau and Prince Albert Satellite Stations, but processing occurs only at Gatineau. Radarsat International Inc. is the official North American commercial distributor of ERS-1 data.

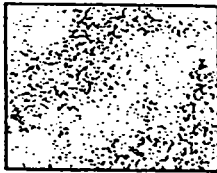


Elements of Interpretation

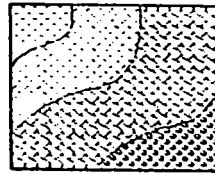
Tone



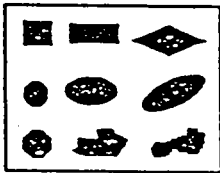
Texture



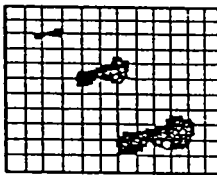
Pattern



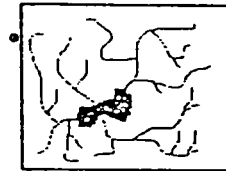
Shape



Size



Association



... notes ...

Diagram Source: CCRS/TTTDS

**THE HUMAN
EDGE**

The radar image is a representation of the strength of the microwave energy reflected back to the radar

THE RADAR IMAGE

- Radar images (in photographic format) are a black and white representation of the interactions between the radar beam and the earth's surface.
- The brightness of the image represents the amount of energy received by the antenna from the returned pulse. A black or dark feature indicates little or no returned energy, whereas bright or light tones indicate higher energy returns.
- In most remote sensing radars, the recording format is digital. An image is a two-dimensional collection of digital signal levels or pixel values. The brightness of each pixel displayed in a visual image is proportional to the digital signal level.

THE HUMAN
EDGE

Since radar imagery is substantially different from other forms of remote sensing, its unique geometry and properties must be considered during visual interpretation

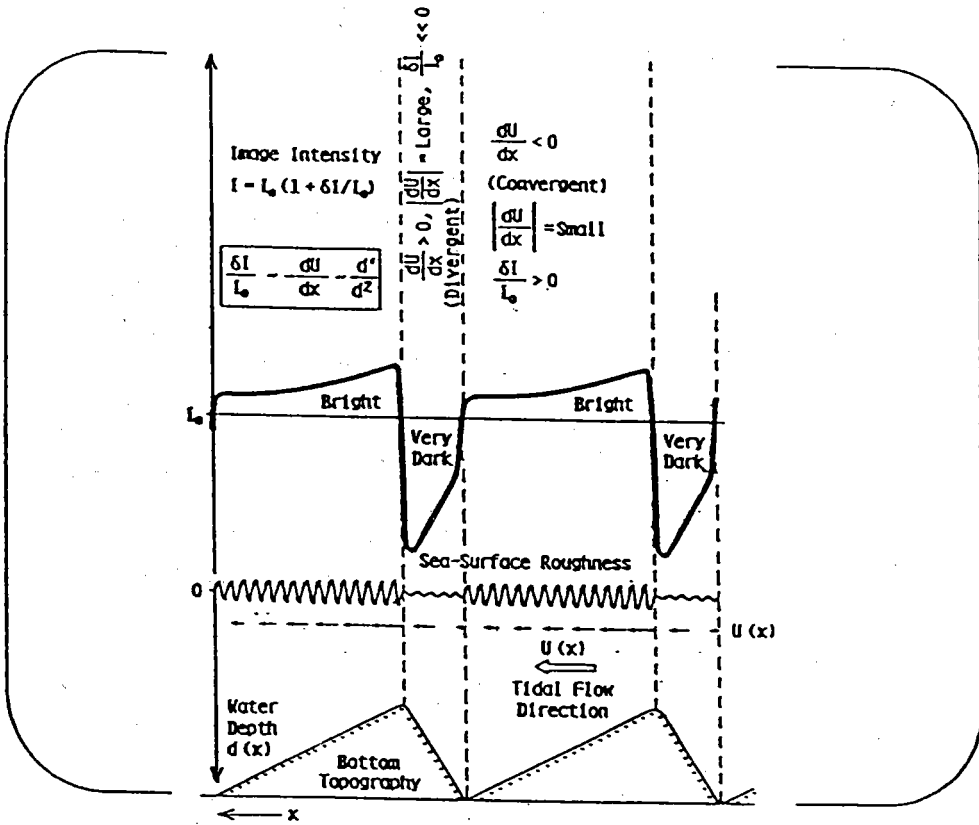
VISUAL INTERPRETATION

- Visual interpretation of radar imagery should be a systematic process, with the objectives of identifying, interpreting, and determining the meaning and significance of features.
- To aid in image interpretation, an interpretation key is often used. A key is an organized list describing element characteristics as they often appear on imagery and what they commonly represent. These elements include tone, texture, size and shape, association and surface roughness.
- Although the same interpretation key is used in other forms of remote sensing, the unique properties of radar must be remembered and incorporated into the interpretation.
- *Tone* is the most basic element of human visual perception. Tone in radar images is the result of reflection at only one wavelength. The tonal variations in a SAR scene are generally functions of the strength of the radar backscatter from the ground area.
- *Texture* is defined as the spatial pattern of tonal variation within a particular area and can be classified as smooth, fine, linear, grainy, speckled, flecked, or checkered.
- Texture aids in identifying and delineating homogeneous areas with particular surface properties and is important for geological and vegetation mapping.

THE HUMAN
EDGE

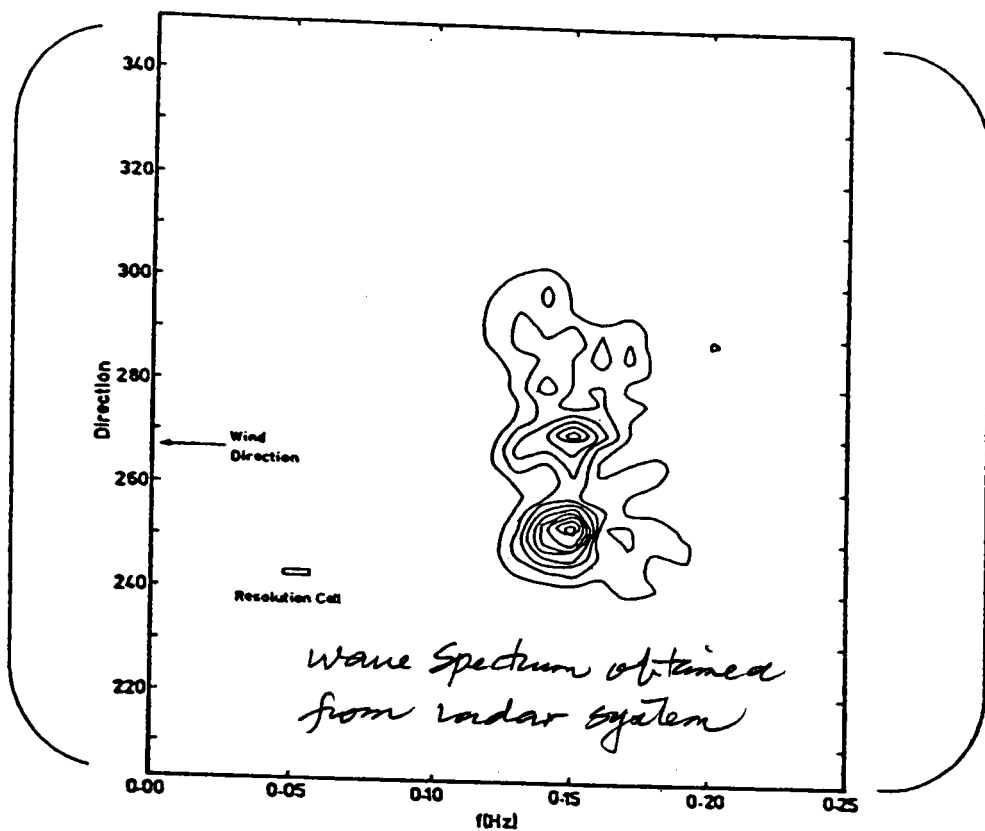
VISUAL INTERPRETATION (Cont'd)

- *Pattern* represents the orderly spatial arrangement or repetition of features. Orientation, spacing, density or uniformity are indicative of pattern.
- The *size* of features is identified in terms of contrast from their surroundings and can be helpful in the interpretation process. The scale of the image will be one factor which influences the size of an object or feature. As well, size is a function of the radar system parameters and feature characteristics are generally smaller in scale on radar imagery compared to aerial photography.
- *Shape* refers to the spatial form of an object or area. Shape can help to distinguish between natural and cultural features.
- The shape of radar shadows can indicate terrain type, while the length of shadows can be used to estimate height. Shadow projections also indicate spatial form. The crest of a mountain range may be more obvious from its shadow than the feature itself.
- Visual interpretation of imagery can also be aided through *association*. Association is the process of identifying a feature by examining associated elements and/or surrounding features. Association can take place at a physical or a cultural level.



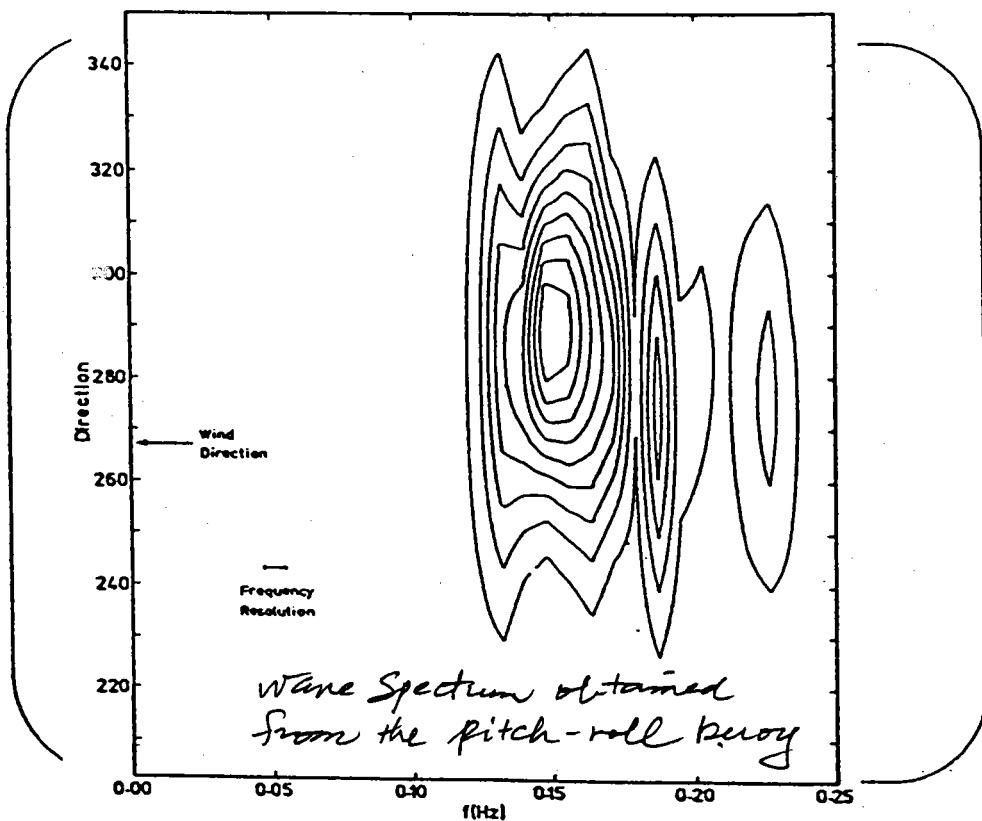
... notes ...

Diagram Source



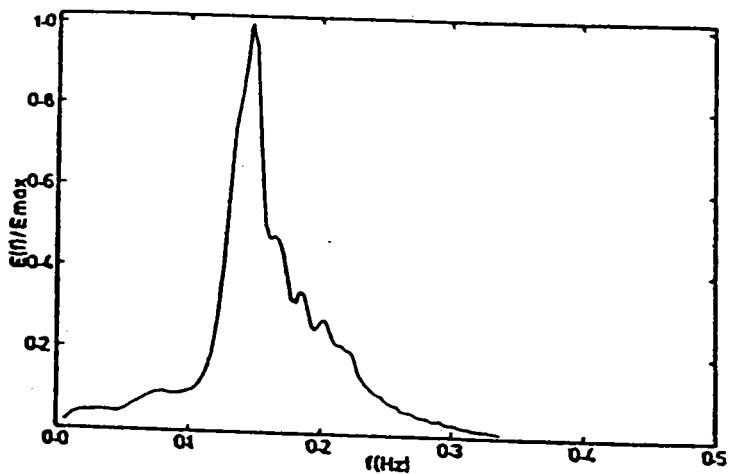
... notes ...

Diagram Source



... notes ...

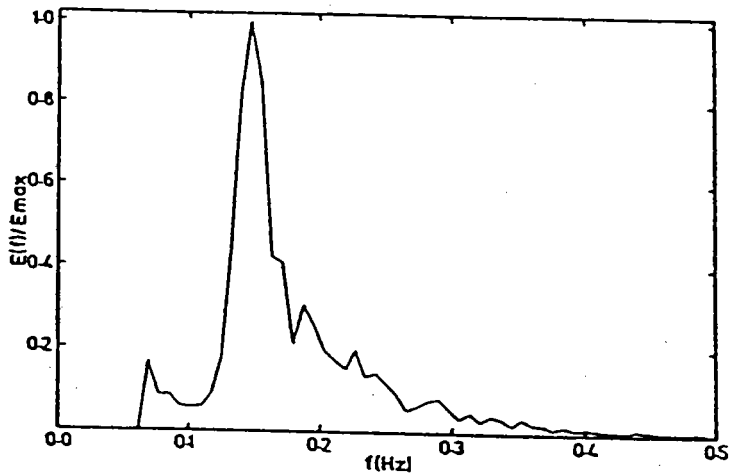
Diagram Source



one dimensional cut from
radar system

... notes ...

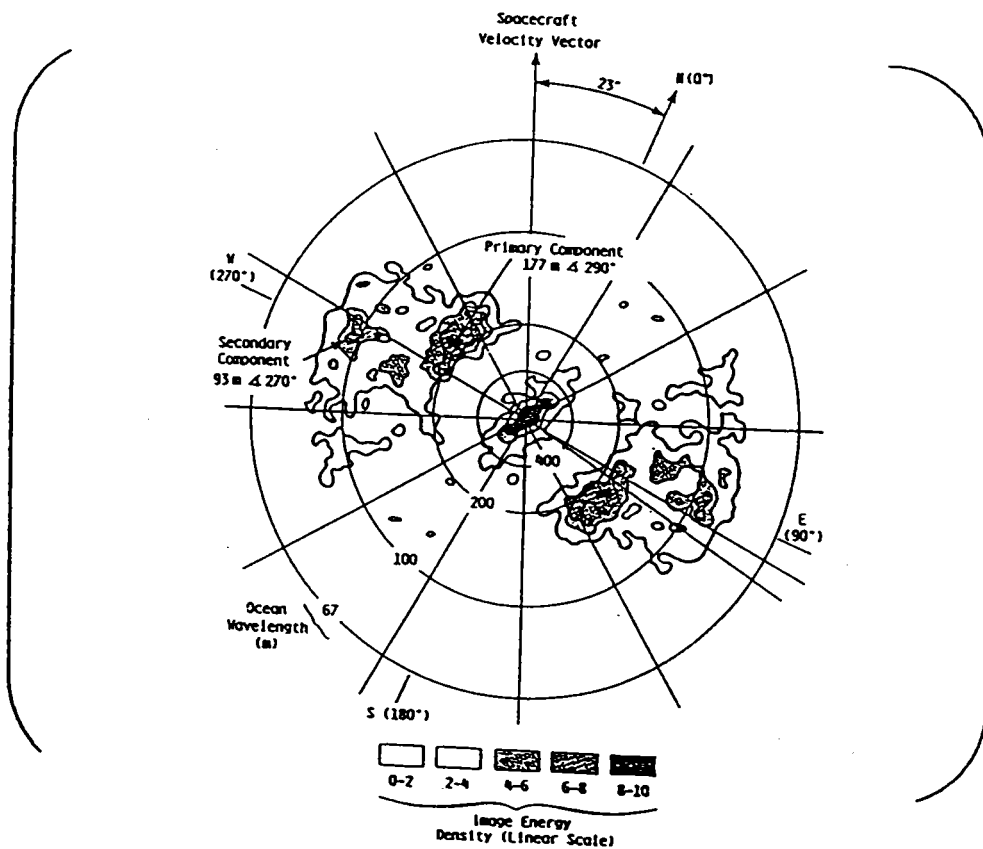
Diagram Source



One dimensional cut from
pitch-roll buoy

... notes ...

Diagram Source



... notes ...

Diagram Source

海岸結構物設計水位之決定方法

簡仲和 成功大學水利及海洋工程研究所教授

摘 要

本文先以說明設計水位對海岸結構物之重要性及結構物用途對設計水位決定方法之影響作為引言，次由造成海水位變化之起源說明天文分潮之組成、週期變化特性及調和分析(率波、最小二乘法、暴潮分離)之方法與數據處理原則，進而闡釋暴潮數值模式與應用(考慮波浪擁升之一維暴潮模式、天文潮位之影響)，最後藉由天文潮位、暴潮偏差之機率特性，討論現行決定設計水位之方法(極值統計法、疊加合成法、結合機率法)以供規劃設計者參考。

章節目錄

前言	波浪及水位、設計水位、復現期、異常高水位、異常低水位
水位記錄資料分析	水位記錄、天文潮、調和分析、選用天文分潮、調和分析法實例、暴潮數值模式
設計水位之決定方法	遭遇機率與使用年限、極值統計法、疊加合成法、結合機率法
結語	

前 言

波浪及水位

波浪及水位為作用於海岸結構物之主要外力，兩者往往關係著結構物安全性與其用途之設計需求。台灣海岸水位資料除四大商港外一般均缺乏完整之長期記錄，且在以往於台灣水位記錄係屬保密資料，因此有關水位方面之分析研究似乎不如波浪研究般普遍。而傳統上海岸結構物之設計規劃早期亦都偏重於有關波浪之力學行為，往往在選定設計水位後，即進行有關諸如折繞射及波浪作用力等計算，少有考慮波浪及水位之交互影響者。

眾所周知防波堤之功能主要在遮蔽波浪、保護航道船隻之航行安全及泊地水面之穩靜性，因此其堤頂高度必須能適當地防止波浪所造成之大量越波，以免越波之擾動造成堤後水面之動盪不定。而堤前之水位越高，波高較大之波浪越容易直接拍打在堤面，將產生較大之波力與溯升高度，也就直接影響到堤頂高度及防波堤斷面大小之設計，當然也更影響到建造經費。

近年，由於漁業及休閒用港灣之開發，許多海岸結構物多建在碎波帶附近，水位影響碎波波高大小之情形更是顯著，因此在規劃設計時，常需反覆模擬不同水位及波浪作用下之力學行為，以決定最適合之設計。此皆為水位與波浪交互作用影響設計之明顯例子，同時也可讓人瞭解水位對海岸結構物規劃設計之重要性。

設計水位、復現期

海岸結構物之設計水位需視其用途及其重要性決定之，其決定方法亦可能有所不同。在海岸防災而言，海堤之功用主要在防止海水倒灌，規劃設計時以高水位發生之越波為防患對象，因此設計水位以異常之高水位為主要考慮因素，而視堤後之使用價值(重要性)決定此異常高水位之復現期(return period)或發生頻率(frequency)，平常性之海堤其復現期可能取30年，重要之海堤則需取50年甚至一、二百年之復現期。在另一方面，核能電廠之海岸取水係供冷卻發電系統所產生之高溫使用，為避免取水口無水取用，取水口海岸結構物之設計必需確保在異

常低水位時亦有足夠之水量供應，因需確保核能電廠之安全故須以一、二百年以上復現期之異常低水位作為設計水位。

異常高水位、異常低水位

所謂異常高水位、異常低水位皆為異常氣象(氣壓差、強風、波浪)與天文潮位交互作用而造成，異常之低氣壓與向岸強風較易於高潮位時形成異常之高水位，而異常之高氣壓與離岸強風較易於低潮位時形成異常之低水位。而在某種天文潮位下何種氣象會形成多大之異常水位，其發生頻率又為何，此乃結合機率(joint probability)問題。

由上述可知設計水位係以其發生頻率或復現期為決定因素，其分析方法可分為下列三種：(1)為具有長期之實測水位資料時，可由實測資料選取各時間區間之極值，依其機率回歸分析，是謂極值統計法(extreme value statistics method)。(2)當實測水位資料較短時，可以天文潮位(astronomical tide)累加暴潮偏差(surge)之方式，按其發生頻率推估設計水位，是謂疊加合成法(superposition method)。(3)由實測水位資料分析天文潮與暴潮偏差之機率，再予結合、分析不同復現期之設計水位，此為結合機率法(joint probability method)。

因此章節安排上在水位記錄資料分析一節中說明由實測水位資料分離天文潮位、暴潮偏差之方法及其機率特性，於暴潮數值模式一節中闡述相關理論、模式及應用，在設計水位之決定方法一節中說明極值統計法、疊加合成法、結合機率法之相關理論及推算方法。

水位記錄資料分析

水位記錄

海面上之水位變化 H 依其成因可表示為

$$H = H_m + H_p + H_w + H_r^* \quad (1)$$

式中 H_m 為平均海水面， H_p 為天文因素所衍生之水位變化量，係一項可預測之值，通稱為天文潮位。 H_w 為風或其他因素生成之短週期波浪所產生之水位變化量。 H_r^* 為剩餘量(residual)，係海氣象因素(如氣壓、風剪力、波浪碎波以及降雨等等)或非前述兩項因素所造成之水位變化量。

以量測長週期(以分鐘為單位)水位變化為主之水位站或潮位站(tide gage)，在設置時均被設計成能應除短週期(以秒為單位)波浪之水位變化 H_w ，而潮位站之儀器系統或多或少均存有誤差 H_{err} ，所以潮位站實際所記錄到之水位觀測值 H_o 應表示為

$$H_o = H_m + H_p + H_r \quad (2)$$

式中 $H_r = H_r^* + H_{err}$

天文潮

天文潮為天體之萬有引力及其彼此間運動位置之交互作用所引起，在這些天體引起之天文分潮中，以受至地球距離較近之太陽與月球影響較大，其所分別引起之太陽潮(solar tides)與太陰潮(lunar tides)水位變化亦較大。而由於地球之自轉運動，月球亦如太陽一般每隔一段期間即自地平線升起，此時間間距是謂太陰日(lunar day)，為時約24時50分，略比太陽日(solar day)長50分，是以大潮之時間間距逐日後延約50分鐘。

若在地球觀看，月球每回歸至其運動軌道(白道)與天體赤道之上昇交點為期約需27.32日，而太陽每回歸至其運動軌道(黃道)與天體赤道之上昇交點為期約365.24日(Godin, 1972)。前者起潮力有半日週期、日週期與半月週期等三部份，後者起潮力分為半日週期、日週期與半年週期三部份。又由於天文潮之交互作用，其中有以倍速推進者是為倍潮(overtides)，有以分潮速度之和或差前進者是謂複合潮(compound tides)。依分潮週期可分為日週潮(diurnal tides)、半日週潮(semidiurnal tides)、1/3日週潮(terdiurnal tides)、倍潮等短週期分潮與為期約兩週以上之長週期分潮(中野，1975)。

各分潮之水位通常可假設為以固定振幅作週期性 *cosine* 波形之變動，若設天文潮 H_p 係由 i 個振幅、角速度(度/時)分別為 H_{ti} , σ_i 之分潮所合成則可寫成

$$H_p = \sum H_{ti} \cos(\sigma_i t) \quad (2')$$

然而受到地球軸心線有約偏心 5 度之小振動，前述黃道、白道與天體赤道之上昇交點亦隨之作週期性變動，為期約 6,797.3 日(約 18.61 年)，其分潮振幅及位相應加以調整；又，天體運動軌道並非等半徑，且與其分潮之起伏並非同步，對水位站亦存有位相，據此將式(2')加以修正後代入式(2)可得

$$H_o = H_m + \sum f_i H_{ti} \cos(\sigma_i t + V_i + U_i - G_i) + H_r \quad (3)$$

其中 f_i , U_i 分別為各分潮振幅 H_{ti} 之節點調幅係數(nodal modulation)及節點調幅之位相(phase of nodal modulation), V_i , G_i 分別為潮位站相對於天體運動之位相與各分潮滿潮時刻之位相遲角(phase lag), 各天文參數之意義如圖 1 所示。而各分潮之 f_i , U_i , V_i 均可根據時間 t 推算之，詳細推算方法可參考中野(1975)、Godin(1972)、連三郎(1977)或台灣漁業技術顧問社(1988)。而 H_{ti} , G_i 受到潮位站地理位置及水深地形影響而各有不同，亦即需由潮位站之水位記錄進行分析始能獲得者。

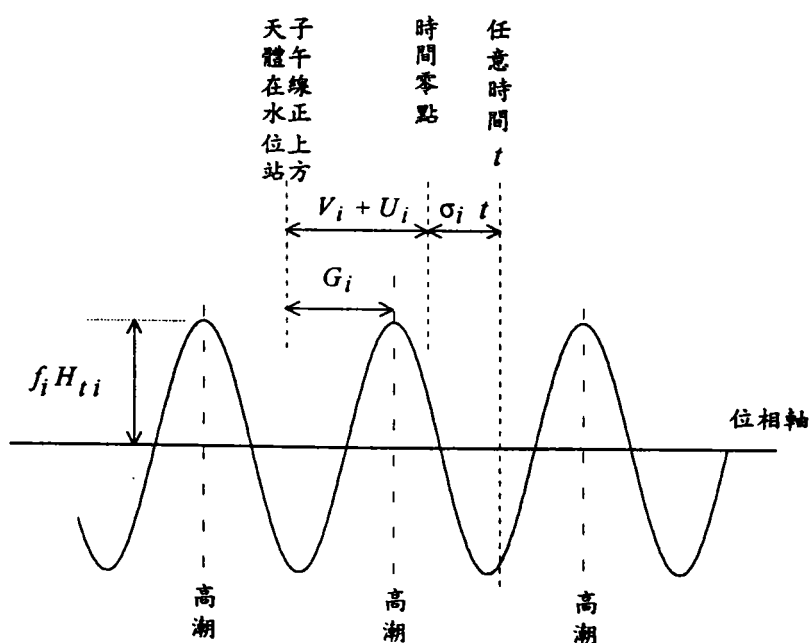


圖 1 天文潮參數與時間位相之示意圖

調和分析

解析式(3)之方法有調和分析法(harmonic method)與頻譜分析法(spectrum method)，詳細解析方法可參考Godin(1972)，蔡瓊林、黃煌輝(1984)，蘇青和、張金機(1992)。此處參考蔡瓊林、黃煌輝(1984)之最小二乘解析法(least square method)，將濾波處理(filtering process)引入振幅 H_{ti} 與位相 G_i 之調和分析，茲將分析過程說明於下：

1. 以水位逐時實測資料之中心點作為時間零點，前後各取 n 點數據(即前後各 n 個小時數據)，總計 $2n+1$ 個水位數據 H_{oj} ($j=-n, \dots, -1, 0, 1, \dots, n$)，並計算時間零點之天文係數 f_i, U_i, V_i 。
2. 選取 k 個分潮，將(3)展開可得 j 時水位為

$$\begin{aligned} H_{oj} &= H_m + \sum_{i=1}^k f_i H_{ti} \cos(\sigma_i \times j - \theta_i) + H_{rj} \\ &= H_m + \sum_{i=1}^k A_i \cos(\sigma_i \times j) + \sum_{i=1}^k B_i \sin(\sigma_i \times j) + H_{rj} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $H_{ti} = \sqrt{A_i^2 + B_i^2} / f_i$ ，而 $\theta_i = G_i - V_i - U_i = \arctan(B_i / A_i)$

3. 式(4)中之 H_{rj} 即為水位觀測值 H_{oj} 與可預測值 $(H_m + H_p)$ 之偏差，由最小二乘法原理，欲期待所有水位偏差之平方和為為最小，即需其對各未知數 (H_m, A_i, B_i) 之微分值均等於零，聯立微分式利用三角函數與微積分定律可簡化為矩陣運算式如

$$\begin{bmatrix} (2n+1) & Z(\sigma_1) & Z(\sigma_2) & \cdots & Z(\sigma_k) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ Z(\sigma_1) & f_{11} & f_{21} & \cdots & f_{k1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ Z(\sigma_2) & f_{12} & f_{22} & \cdots & f_{k2} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z(\sigma_k) & f_{1k} & f_{2k} & \cdots & f_{kk} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & g_{11} & g_{21} & \cdots & g_{k1} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & g_{12} & g_{22} & \cdots & g_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & g_{1k} & g_{2k} & \cdots & g_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_m \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_k \\ B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=-n}^n H_{oj} \\ \sum_{j=-n}^n H_{oj} \cos \sigma_1 j \\ \sum_{j=-n}^n H_{oj} \cos \sigma_2 j \\ \vdots \\ \sum_{j=-n}^n H_{oj} \cos \sigma_k j \\ \sum_{j=-n}^n H_{oj} \sin \sigma_1 j \\ \sum_{j=-n}^n H_{oj} \sin \sigma_2 j \\ \vdots \\ \sum_{j=-n}^n H_{oj} \sin \sigma_k j \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $Z(\sigma_i) = \sin[(n + \frac{1}{2})\sigma_i] / \sin(\frac{1}{2}\sigma_i)$ ， $\sigma_i \neq 0$

= $2n+1$ ， $\sigma_i = 0$

$$f_{rs} = \frac{1}{2} [Z(\sigma_r + \sigma_s) + Z(\sigma_r - \sigma_s)] \quad , \quad r, s = 1, \dots, k$$

$$g_{rs} = \frac{1}{2} [Z(\sigma_r - \sigma_s) - Z(\sigma_r + \sigma_s)] \quad , \quad r, s = 1, \dots, k$$

4. 以低頻通過濾波(low pass filter)方式將水位記錄濾為週期在三小時以上之水位變化(即濾除週期在三小時以下之短週期水位變化)。
5. 以低頻通過濾波方式將步驟4.濾波後之數據再予濾為週期在13日以上之長週期水位變化。
6. 將步驟5.之數據代入式(5)即可求出平均水位 H_m 及長週期分潮(週期在13日以上，如太陰半月週潮 M_t)之 A_i, B_i 。
7. 自步驟4.之數據濾除31小時以上之水位變化後即為短週期分潮合成之水位變化，將之代入式(5)即可求出短週期分潮(週期在29小時以下，日週潮、半日週潮、倍潮、1/3日週潮等)之 A_i, B_i 。
8. 將步驟6.及7.求出之 A_i, B_i 與其天文係數 f_i, U_i, V_i 分別代入式(4)即可求出各分潮之振幅 H_{ti} 與位相遲角 G_i 。
9. 進行潮位預報時仿照步驟1.先計算預報期間中點之天文係數 f_i, U_i, V_i 及其前後預報潮位之時數 n ，再與步驟8.由調和分析求出之平均水位 H_m 與各分潮振幅 H_{ti} 及其位相遲角 G_i 代入式(4)予以合成，即可獲得預報期間逐時之潮位變化。
10. 若將調和振幅及位相遲角視為定數則步驟1.、步驟8.、步驟9.中有關天文係數之計算均可略去，而直接以 H_m, A_i, B_i 或 H_m, H_{ti}, θ_i 計算即可。

選用天文分潮

進行調和分析時，選用分潮須視水位站之設置水深或水位記錄資料之多寡而定。雖然有些地區(如英吉利海峽之南安普敦 Southampton、朴茲茅斯 Portsmouth)選用多達 102 個分潮進行調和分析，但通常選用如表一所示之 60 個傳統天文分潮(orthodox 60 constituents)即可獲得精確之預測結果。在水深較深或淺灘坡地距離較短時，忽略掉大部份之倍潮與複合潮亦可得到不錯之預測結果，反之，則應如前述英吉利海峽之兩個港口一般增選倍潮或複合潮，但 Walden 等(1982)建議增選倍潮或複合潮時需避免分潮週期相同之情形發生，以免造成節點調幅係數 f_i 與其位相 U_i 之誤用。

表 一 傳統60個天文分潮之名稱及其角速度、週期一覽表

分潮 名稱	角速度 (度/時)	週期 (時/周)	分潮 名稱	角速度 (度/時)	週期 (時/周)
S_a	0.0410686	8765.8210896	M_2	28.9841042	12.4206012
S_{sa}	0.0821373	4382.9052087	MKS_2	29.0662415	12.3855023
M_m	0.5443747	661.3092049	λ_2	29.4556253	12.2217742
M_{sf}	1.0158958	354.3670522	L_2	29.5284789	12.1916202
M_f	1.0980331	327.8589689	T_2	29.9589333	12.0164492
$2Q_1$	12.8542862	28.0062225	S_2	30	12
σ_1	12.9271398	27.8483876	R_2	30.0410667	11.9835958
Q_1	13.3986609	26.8683567	K_2	30.0821373	11.9672348
ρ_1	13.4715145	26.7230533	MSN_2	30.5443747	11.7861309
O_1	13.9430396	25.8193343	KJ_2	30.626512	11.7545217
MP_1	14.0251729	25.6681328	$2SM_2$	31.0158958	11.6069516
M_1	14.4920521	24.8412024	MO_3	42.9271398	8.386303
X_1	14.5695476	24.7090720	M_3	43.4761563	8.2804008
π_1	14.9178647	24.1321400	SO_3	43.9430356	8.1924245
P_1	14.9589314	24.0658902	MK_3	44.0251729	8.1771399
S_1	15	24	SK_3	45.0410383	7.9927109
K_1	15.0410686	23.9344697	MN_4	57.4238337	6.2691739
φ_1	15.0821353	23.8692992	M_4	57.9682084	6.2103006
ϕ_1	15.1232059	23.8044765	SN_4	58.4397295	6.1601928
θ_1	15.5125897	23.2069569	MS_4	58.9841042	6.1033393
J_1	15.5854433	23.0984768	MK_4	59.0662415	6.094852
SO_1	16.0569644	22.4201780	S_4	60	6
OO_1	16.1391017	22.3060742	Sk_4	60.0821373	5.9917975
OQ_2	27.3416964	13.1667031	$2MN_6$	86.407938	4.1662839
MNS_2	27.4238337	13.1272675	M_6	86.9523127	4.1402004
$2N_2$	27.8953548	12.9053745	MSN_6	87.4238337	4.1178702
μ_2	27.9682084	12.8717576	$2MS_6$	87.9682084	4.0923875
N_2	28.4397295	12.6583482	$2MK_6$	88.0503457	4.08857
v_2	28.5125831	12.6260044	$2SM_6$	88.9841042	4.0456664
OP_2	28.9019669	12.4558997	MSK_6	89.0662415	4.0419355

如前述，較完整之天文潮循環為期約18.61年，此間天文係數 f_i , U_i , V_i 係隨各天體之運動位置而變動。但進行最小二乘法分析時，係以分析期間之中心為零點，計算其天文係數作為分析期間之參考值，然而較長之分析期間其天文係數之變動範圍較大，因此太長之分析期間反而易造成預測結果會產生較大之偏差。表一所列傳統60個天文分潮如有為期一年之水位記錄即能將各分潮析離，因此如有多年之水位記錄時，可考慮以逐年記錄進行分析之方式為之。如此分析，從各年之分析結果中，通常會發現振幅較小之分潮其各年振幅、位相遲角間常存有較大百分比之變動，此時若以平均值取代之會有較佳之預測結果。不過亦有研究者將此類微小值予以忽略，如吳建民、馮德榮(1990)分析淡水河之天文潮位時建議採用39個分潮，而蔡瓊林、黃煌輝(1984)則由最小殘差之認定建議基隆港與高雄港天文分潮之選用個數。

當水位記錄期間遠比一年少時，若勉強用以分析傳統之60個天文分潮，或許會有結果，但其預測之天文潮位往往令人覺得訝異。此時分潮之選用不但瑣碎亦頗為重要，連三郎(1977)，蘇青和、張金機(1992)從分潮角速度之分野與分析、預測結果說明判斷選用分潮是否正確之觀念，蔡瓊林、黃煌輝(1984)建議先進行頻譜分析藉以篩選分潮之方法，但這些研究均未建立明確之選用原則可以提供給計算機程式直接判斷如何選用分潮。根據作者經驗，短期水位記錄之調和分析若按下述方法選用分潮，則不致於有式(5)無解、解析值或預測值不合理之情形發生：

1. 假設所選用之分潮在水位記錄期間至少應有一個週期以上之完整記錄時，最小二乘法之分析值才具代表性。因此，以水位記錄期間之長短($2j+1$ 小時)為基準時，只有週期(T ，單位為小時/周，詳見表一)比記錄期間短的分潮才予選取，即須滿足 $T \leq (2j+1)$ 或 $360/\sigma_i \leq (2j+1)$ 。
2. 假設欲使兩個分潮能正確地析離，則此兩個分潮至少有一組同時出現之水位能在水位記錄期間內再同時出現一次以上。若兩個分潮之角速度分別為 σ_i 與 σ_j ，其角速度差為 $(\sigma_i - \sigma_j)$ ，要一組同時出現之水位能再同時出現一次必需累計速度差積滿360度，亦即需有 $360/(\sigma_i - \sigma_j)$ 個逐時水位記錄。因此本項假設之逐時水位記錄長度必需滿足 $360/(\sigma_i - \sigma_j) \leq (2j+1)$ 。
3. 若兩個分潮未能滿足步驟2.之條件式則以分潮振幅較大者作為選用分潮。由於須先明瞭振幅大小，因此可經由式(5)分別求解此二分潮之振幅與位相

或參考鄰近水位站天文潮之振幅大小作為判斷選用分潮之依據，但後者較易產生偏差。

根據上述選用分潮之判斷方法，若有14日之短期水位記錄則可析離出下述太陰半月週潮 M_f ，日週潮 $2Q_1$ 、 Q_1 、 K_1 、 OO_1 ，半日週潮 $2N_2$ 、 M_2 、 S_2 ，1/3日潮 M_3 ，倍潮 M_4 及複合潮 SK_3 、 MK_4 、 $2MN_6$ 、 $2MS_6$ 、 MSK_6 等15個分潮。

若水位資料有部份欠缺時，可先以零(吳建民、馮德榮，1990)或平均水位(蘇青和、張金機，1992)替代後，並據以進行調和分析。作者(1992、1994)以欠缺水位記錄期間不以計數之方式進行分析，若欠缺水位記錄期間之數據能反覆以調和分析結果之天文潮位預測值取代，並續進行調和分析，則疊代三次後其方差值即已收斂。一般言之，若欲分析結果具有代表性，欠缺水位記錄期間之長度不應長於總資料長度之五分之一。

調和分析法實例

作者為執行國科會計畫於1993年在高雄縣彌陀漁港北防波堤堤頭外側(靠海測)設置一個水位站，圖2為其實測水位資料(1993年4月13日至1994年2月28日，總計約316日)調和分析過程之實例。其中分圖(A)為實測水位記錄。分圖(B)為以31小時低頻濾波後之水位數據。分圖(C)=A-B，為藉以調和分析29小時以下短週期分潮之水位數據，與分圖(A)之實測水位記錄相較，水位數據明顯地係沿水平軸變動。分圖(D)為以313小時低頻濾波後之水位數據，可藉以調和分析13日以上之長週期分潮，與分圖(B)中之31小時低頻濾波後之水位數據相較，313小時低頻濾波後之水位數據顯得更平滑。分圖(E)為以調和分析析離得之分潮所預測之天文潮位，顯比分圖(A)中之實測水位記錄來得有規律，大致上亦顯示有年週期分潮之影響存在。而分圖(F)=A-E，為實測水位記錄與天文潮位預測值之偏差量，即為式(3)中之 H_r ，其大小趨勢與分圖(B)中之31小時低頻濾波後之水位數據相彷彿，但水位有較顯著之小變動。由分圖(F)及(B)可明確地判斷在1993年6月27日及8月20日左右各有為期2至3日、高約四十公分之水位偏差存在，此分別為柯恩颱風與塔莎颱風以西北方向經過臺灣南部之巴士海峽所致。

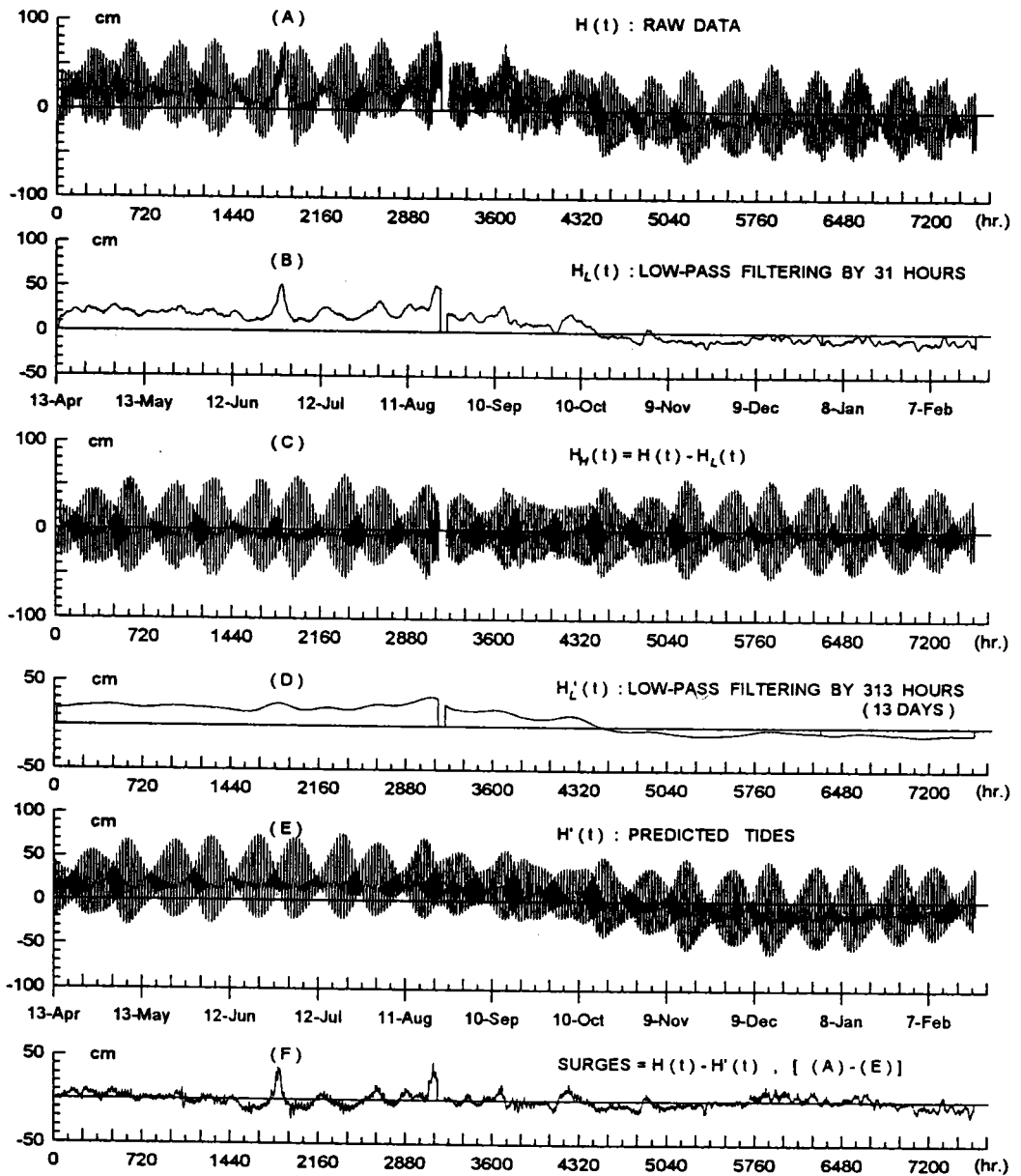


圖 2 實測水位記錄之調和分析過程圖例。

(A) 實測水位記錄。

(B) 以31小時低頻濾波後之水位數據。

(C) = A - B，藉以調和分析29小時以下短週期分潮之水位數據。

(D) 以313小時低頻濾波後之水位數據，藉以調和分析13日以上長週期分潮。

(E) 以調和分析析離之分潮所預測之天文潮位。

(F) = A - E，實測水位記錄與天文潮位預測值之偏差量。

暴潮數值模式

海氣象條件異常期間之水位是該期間天文潮位與海氣象條件衍生水位堆升(或曳降)所合成之結果，該期間之水位偏差 H_r 泛稱為暴潮偏差，其大小可由推算區域之水深資料與海氣象條件代入流體力學方程式以數值模式推算之，亦可以經驗公式或水位之時間相關性估算之。由於後兩種方式需要相當充份之水位數據始能得到可靠之推估值；而台灣海域之暴潮偏差主要是由颱風侵襲所造成，受限於颱風氣象(如中心氣壓強度、暴風半徑、最大風速與侵襲路徑等)及海域水深之複雜影響，不易獲得較完整之實測水位數據，所以傳統上大都以數值模式為推算暴潮偏差或暴潮水位之主要工具，間佐以實測暴潮資料驗證後，再擴大引用。

暴潮數值模式之理論依據主要為連續方程式(continuity equation)與運動方程式(motion equation)，按照應用空間尺度可分為一維、二維與三維模式。國內應用於暴潮推算者多為二維模式，使用三維模式者為中央氣象局(1984至1992)或學術研究(蕭政宗，1987)，但兩者均需耗費大量計算時間，尤其三維模式實際應用時更需專用電腦支援，在時效或費用上並不甚經濟。完整模式之運動方程式應包含風剪力(wind stress)、大氣壓力與波浪幅射應力(radiation stress)等海氣象條件所引致之外力。由於考慮波浪幅射應力時必須先推算海域之波浪分佈，再推算流場、水位分佈，反複推算至相互收斂為止，如此將更消耗更多電腦之記憶體與計算時間，因此暴潮數值模式通常都不考慮波浪幅射應力項。

然而波浪幅射應力項所產生之效應頗大，在波浪碎波前後水位分別會有下降及堆昇現象，波浪碎波在岸線附近所造成之水位堆昇甚至有可能達到波高之0.15倍，對颱風波浪而言不可謂不大，因此於進行海岸工程設計所需之近岸暴潮推算時，不宜輕忽此波浪幅射應力項之效應。作者(1992, 1993)為配合海堤設計及海岸防災之需求，發展出考慮波浪幅射應力之一維颱風暴潮模式。由於上述二維、三維數值模式之相關研究國內已頗多論著，如楊春生(1974)、李賢文(1986)等二維模式與上述三維模式，此處不擬再予重述，而代以考慮波浪幅射應力之一維模式(作者，1993)作為推算颱風暴潮數值模式之說明。

在假設海水密度為定值、海岸法線上之流速為零及柯氏力項(Coriolis term)對水

位影響極小之情況下，作者(1993)將考慮波浪幅射應力之一維動力方程式以擬定常化(quasi-steady)之方式將其可簡化如下

$$g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_s - \tau_b}{\rho(\zeta + h)} + \frac{1}{\rho(\zeta + h)} \frac{\partial S}{\partial x} \quad (6)$$

式中 g = 重力加速度 (gravity acceleration)

x = 海岸線之離岸法線 (offshore normal to the shore)

ζ = 自基準面起算之水面高度 (water surface elevation from the datum)

ρ = 海水密度 (water density)

p = 海平面上之大氣壓力 (atmospheric pressure at the sea surface)

h = 自基準面起算之水底高度 (undisturbed water depth)

τ_s = 海平面上之風剪應力 (surface wind stress) 在 x 方向之分量

τ_b = 海底之剪應力 (bottom stress) 在 x 方向之分量

S = 垂直海岸之向岸幅射應力 (radiation stress normal to the shore)

式(6)等號右邊幅射應力項引起之水位變化即所謂波擁，根據Longuet-Higgins 及 Stewart(1964)之理論，其大小可直接由波浪條件予以推估之。為便於計算，可將幅射應力項之水位擁升變化予以分開計算。又，美國陸軍工兵軍團海岸防護手冊(Shore Protection Manual, 1977)提議以係數 $n = 1 - \tau_b/\tau_s$ 代表將底床剪力效應合入於風剪力之方法。因此，式(6)可由疊加合成之方式改寫成

$$\zeta_t = \zeta_s + \zeta_w \quad (7)$$

$$\text{而 } g \frac{\partial \zeta_s}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{n \tau_s}{\rho(\zeta_s + h)} \quad (7-1)$$

$$\zeta_w = -\frac{1}{8} \frac{k H^2}{\sin(2kh')} \quad \text{當 } h' \geq h'_b \quad (7-2a)$$

$$\zeta_w = \zeta_b + (1 + C_b)^{-1} (h'_b - h') \quad \text{當 } h' \leq h'_b \quad (7-2b)$$

式中 ζ_t = 合成之總暴潮偏差 (total surge)

ζ_s = 壓力梯度與風剪力所衍生之暴潮偏差

ζ_w = 波擁 (wave setup)，即波浪幅射應力造成之水位擁升

$C_b = 8(H_b/h'_b)^{-2/3}$

$\tau_s = C_k \rho_a |V_w| V_{wx}$

ρ_a = 空氣密度，約為 1.22 kg/m^3

C_k = 風剪係數，取為 0.0025

V_w = 風速，附加下標 x 代表海岸方向之風速分量

$h' = h + \zeta_s$ ，即 h 與 ζ_s 之合成水深

H = 合成水深 h' 處之波高

k = 合成水深 h' 之週波數 (wave number)

h'_b = 碎波水深 (water depth where the wave breaks)

ζ_b = 碎波水深 h'_b 處之水位擁升

H_b = 碎波水深 h'_b 處之波高即碎波波高 (breaker height)

式(7-2a)及(7-2b)分別為Longuet-Higgins, Stewart(1964)及Horikawa (1978)所推導，兩式中均以合成水深 h' 作為使用水深。而作者(1992, 1993)在應用式(7-1)推算暴潮偏差 ζ_s 時，係將天文潮位之逐時變動累加於水深 h ，再予合成為 h' ，然後根據式(7-2)計算波擁 ζ_w ，最後由式(7)累加為總暴潮偏差 ζ_t 。計算過程融入風剪力項、壓力梯度項、波擁與天文潮位間之非線性效應 (nonlinear interaction effect)，如此可更合於計算式(6)所涵示之精義。

在考慮天文潮位與氣壓潮、風擁及波擁之非線性作用下，作者(1993)以不等間距格子差分法求解式(7)中暴潮水位之方式，應用於面向颱風侵襲路徑下東海岸梗枋水位站與富岡水位站等近岸區水深-2.5公尺附近之水位歷程計算。圖3(A)為民國69年8月28日0時瑞諾斯中度颱風(Typhoon Norris, 1980)登陸梗枋期間，梗枋站水位觀測值與推算值之比較例。圖3(B)為民國71年7月29日6時安迪強烈颱風(Typhoon Andy, 1982)登陸富岡期間，富岡站之水位觀測值與推算值之比較例。圖中之實線及虛線分別表示實測水位及推算天文潮水位，符號線 $\oplus$ 及 $\ominus$ 則分別為不考慮波擁及考慮波擁之模式計算值。結果顯示除於颱風登陸前後水位站在暴風圈外時受湧浪影響有所偏差外，模式之適用性相當良好，最大暴潮偏差之推估亦極相近。由兩個比較例可知：即使在陡坡之近岸地區，波擁在其暴潮水位中佔有相當大之比例，因此在進行暴潮推算時不應忽略幅射應力之影響。

上述兩個計算例在運算速率為0.3 Mflops之低價位HP9000-345工作站，以HP Basic語言進行推算時，為時4日之水位歷程計算與螢幕顯示比較僅需數秒，故知此一維模式之運算效率相當高，對登陸前後時段內之水位歷程與最大暴潮偏差之推算結果亦頗可靠，可謂是深具實用性之暴潮數值模式，足供海岸工程設計規劃應用參考。

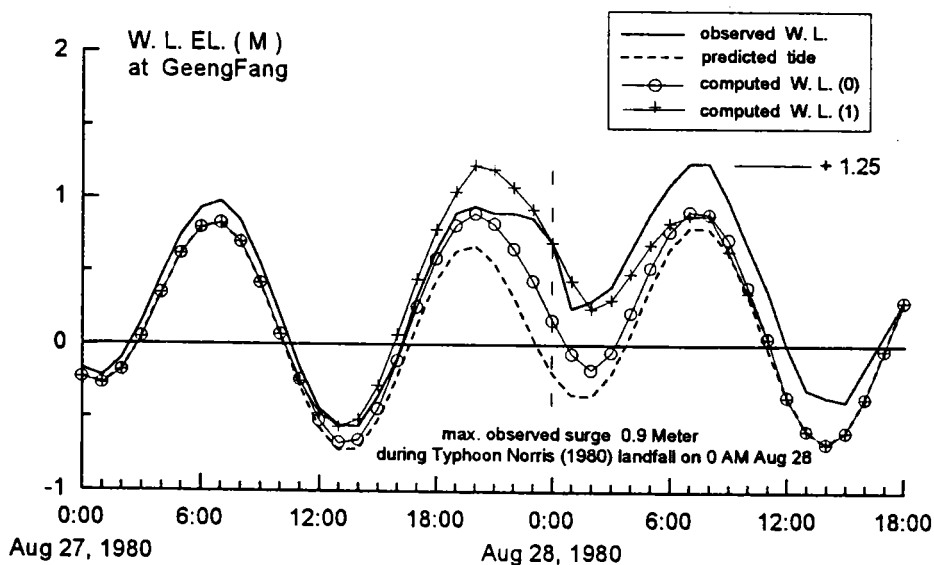


圖 3(A) 民國69年諾瑞斯颱風期間梗枋站之水位歷程比較圖。圖中之實線及虛線分別表示實測水位及推算天文潮水位，符號線-○-及-+-分別為不考慮波擁及考慮波擁之模式計算值。(作者，1993，重繪)

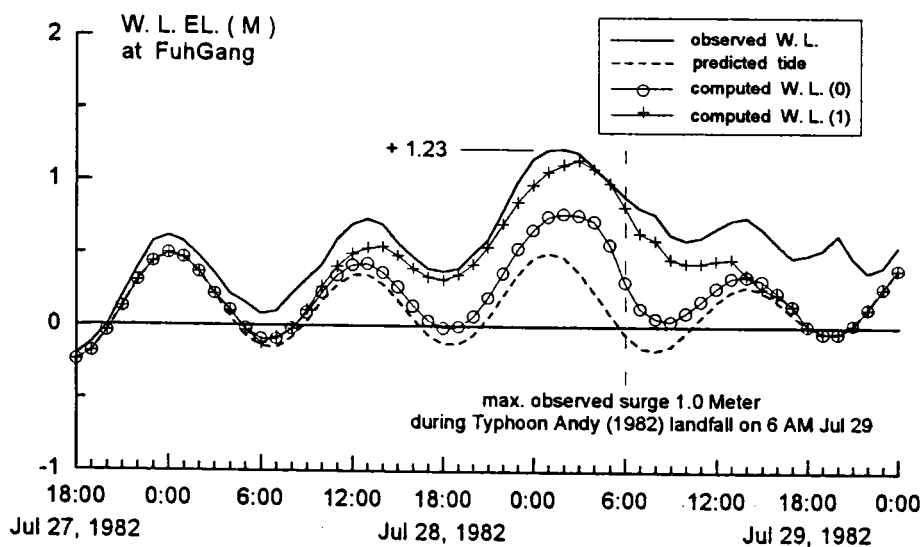


圖 3(B) 民國71年安迪颱風侵襲期間富岡站之水位歷程比較圖。圖中之實線及虛線分別表示實測水位及推算天文潮水位，符號線-○-及-+-分別為不考慮波擁及考慮波擁之模式計算值。(作者，1993，重繪)

設計水位之決定方法

設計水位之決定方式主要由其統計機率予以推估，而推估是否可靠則與統計機率所使用之數據多寡(即水位記錄之時間長短)、統計方法有直接之相關。如前言中所說明，決定設計水位之方法可分成極值統計法、疊加合成法與結合機率法等三大類別，三者都由回歸期或設計年限計算發生頻率後，再根據各類別之統計方法推算其相對之水位，經取不同之設計年限反覆推估，即可獲得各回歸期或設計年限之相關水位，經以各相關水位進行經濟及重要性之分析、評估後，據以決定結構物之相關回歸期或設計年限，亦即可決定其設計水位(同一結構物視其設計需求或目的可有數種設計水位，見前言中之說明)。

前段所述及之設計年限與其相關水位間之關係是藉由其統計機率予以回歸而得，是以設計年限稱為回歸期或復現期(return period)，而其相關水位則稱為復現值(return value)。復現期 T 與其發生頻率 f (frequency) 之關係如下式

$$T = 1/f = 1/(1 - F) \quad (8)$$

式中 F 為非超越機率(probability of nonexceedance)。復現期之單位與發生頻率之單位互為倒數，應視需要予以換算單位，如水位資料採用逐時記錄分析，則發生頻率之單位為每小時一次，其復現期單位為小時，若欲換算成以年為單位之復現期則需除以8766，同理資料為逐日或逐月數據時，則根據式(8)計算之結果需分別除以365.24或12，才得以換算成年單位之復現期。

遭遇機率與使用年限

若各復現值互為獨立事件，則復現期為 T 個單位時間之復現值在每個單位時間發生之機率為 f ，不發生之機率為 $1 - f$ ，若結構物使用年限(lifetime)為 R 個單位時間，則連續 R 個單位時間不發生此復現值之機率為 $(1 - f)^R$ ，換言之，在此 R 個單位時間內此復現值之遭遇機率 E (encounter probability，或發生機率 probability of occurrence) 為

$$\begin{aligned} E &= 1 - (1 - f)^R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^R \\ &= 1 - e^{-(R/T)} \quad , \quad \text{當 } T \text{ 相當大時} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 R, T 必需同一單位時間，式(9)之關係曲線繪如圖4所示。

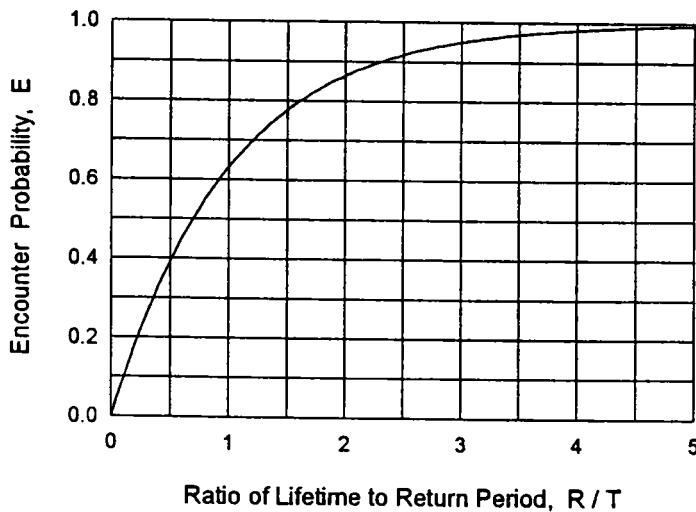


圖 4 復現期 T 與其復現值在結構物使用期限 R 內發生機率 E 之關係曲線圖。

由式(9)或圖4可推知任一復現值在其復現期內(即 $R/T = 1$)之發生機率均為63%。舉例言之，若結構物之使用年限為30年，則復現期為50年之復現值在使用年限內發生之可能性約為45%，而在50年內發生之可能性則達63%。同理，使用期限為600個月，則復現期為1200個月之復現值在使用期限內發生之可能性約為40%，而在300個月內發生之可能性則為22%。反之，欲求在使用年限30年發生可能性為20%之復現值，即可先由式(9)或圖4推得 R/T 約為0.2，換算其復現期約為150年，再以式(8)計算其發生頻率，然後根據所使用之統計迴歸式予以計算，便可求得該復現值。

極值統計法

極值統計法是將各單位時間內互為獨立事件之極值(extreme value，最大值或最小值)按大小予以排次後，再以其點繪位置(plotting position)之機率依所使用之機率函數進行最適化分析(fitting)求得其相關參數，茲供回歸(regressing)不同復現期之極值時應用。極值統計所使用之機率函數有相當多種，如Fisher-Tippett I (FT-I, Gumbel)、Fisher-Tippett II (FT-II)、Fisher-Tippett III (FT-III)、Weibull、Lognormal、Log Pearson Type III、Gama、Poisson-Gumbel等等，而其相對點繪

位置機率之計算方式也可能不盡相同。至於究竟何種機率函數與數據分佈較為吻合，則須以密合度試驗(goodness of fit test)檢核之。最顯而易見的檢驗法為數據與機率函數之直接點繪比較；早期是由數據點繪於各機率函數機率紙上之直線性予以判斷何者之密合性較佳，但由於各機率函數點繪於不同機率函數機率紙上時可能為曲線，因此以直線性作為判斷依據顯得並不客觀，較為有效者為Q-Q點繪法(quantile-quantile plot)，亦即由數據與各機率函數推估值之直接點繪結果比較其直線密合性。此外亦可以數值密合度試驗(numerical goodness of fit test)檢核之，較容易者如相關係數(correlation coefficient)或chi-squared檢定，較繁瑣者如Kolmogorov-Smirnov檢定等等。

最適化分析方法(fitting method)有moments, least squares, maximum likelihood, geometric mean slope等，其中以最大概似法最為精確，而最小二乘法之程式最為方便應用較廣。在水位極值統計方面，一般較常使用之機率分佈函數有Gumbel與FT-III兩種，其分佈函數形式如下：

$$\text{Gumbel (FT-I)} : y = -\ln(-\ln F(H)) \quad (10a)$$

$$\text{FT-III} : k \ln(1-y) = -\ln(-\ln F(H)) \quad (10b)$$

式中 $y = (H - H_c)/a$ ，而 k, H_c, a 為所欲求得之回歸式參數，其中 H 為水位極值數據， $F(H)$ 為其點繪位置之非超越機率(即水位極值小於或等於 H 之機率)。對(10b)之 FT-III 機率分佈而言，其水位極限為 $H_c + a$ 。而非超越機率之點繪位置依Gringorten(1963)之公式可寫成

$$F(H) = 1 - (i - \alpha) / (N + 1 - 2\alpha) , \quad i = 1, 2, \dots, N_s \text{ and } N \geq N_s \quad (11)$$

式中 N 為數據總數， i 為排次序號，可依需要只取 N_s 個排次較高者。Gringorten發覺當 N 大於20時 α 取為0.44，則式(11)可得到精確之計算機率值。圖5為根據上述方法以最小二乘法回歸天文潮位每月最高高潮位機率分佈之圖例，圖5(A)縱座標為機率值取二次自然對數後之線性座標，圖5(B)縱座標為機率座標，橫座標則皆為每月之最高高潮位。圖中實心黑點為依式(11)點繪之數據，虛線、破折線及實線分別為Gumbel、Log Pearson Type III與FT-III等函數之推估值。相較之下，Gumbel分佈用於外插推估值(extrapolating estimation)時似過於高估，稍趨於保守

；FT-III分佈與數據較為密合，較適於外插值具有極限之推估場合。

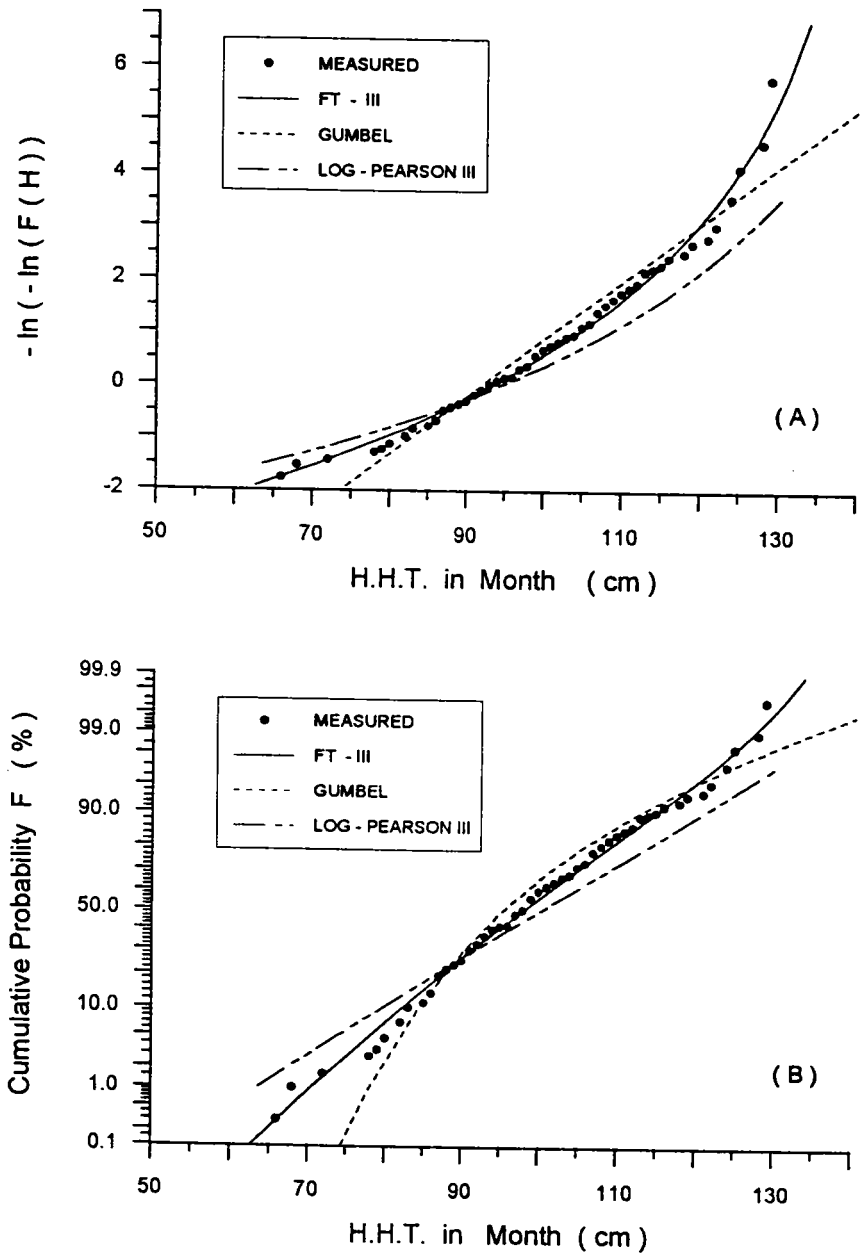


圖 5 以最小二乘法回歸天文潮位每月最高高潮位機率分佈之圖例。圖中實心黑點為依式(11)點繪之數據，虛線、破折線及實線分別為Gumbel、Log Pearson Type III與FT-III等函數之推估值。圖5(A)縱座標為機率值取二次自然對數後之線性座標。圖5(B)縱座標為機率座標，橫座標皆為每月之最高高潮位。

極值統計法在應用上除需有較長期之數據資料外，一般其外插推估值之復現期亦不應超出數據長度之四倍，如此始能獲得較佳之推估結果。而在水位極值之回歸時必需注意到水位極值間之獨立性，因此在事先之資料整理上應過濾長期短期之相關性；如水位數據具有長期之趨向(longterm trend)時，可利用移動平均法(moving average)濾除之，而前後單位時間之水位極值是否為同一事件產生則須由水位之時間歷程檢視判斷如何取捨。例如選用每月最高水位進行水位極值回歸分析時，若有同一事件(天文或氣象)於前後兩個月銜接之際發生，且都在此兩月份造成其最高水位，則次大水位之月份應另取非同一事件所造成之最高水位為數據，以維持各月份水位極值間之獨立性。同理，若改為選取每月最大水位偏差進行極值回歸分析，亦應從事相同之數據檢視工作。

水位極值數據之選用分析方法可分兩種，一為各單位時間依前節說明只各取一個水位極值，則 N_t 個單位時間恰有 $N=N_t$ 個水位極值。另一為分析期間內所有獨立事件所造成之水位極值均取之，則資料總數 N 大於或等於 N_t ，此數據稱為部份時間系列數據(partial-duration series data)，亦稱非篩檢數據(uncensored data)；若設一門檻值(threshold)，而大於此一門檻值之獨立水位極值始選取之，則 N_t 個單位時間有 N_s 個水位極值數據(有的單位時間可能有數個獨立事件之水位極值，有的單位時間則可能未取)，此數據是謂篩檢數據(censored data)，以此數據進行前述回歸分析之方法即所謂門檻極值法(peak over threshold method，簡稱POT法)。其中比值 $u=N/N_t$ 為各單位時間之平均發生速率(mean rate)，比值 $v=N_s/N$ 則稱為篩檢參數(censoring parameter)。

若以Gumbel或FT-III函數回歸分析各相關參數，則上述兩種數據取法在選取數據資料後均可按式(10)、(11)予以回歸分析。至於復現值之推估則略有不同，第一種數據取法為 N_t 個單位時間恰有 $N=N_t$ 個數據，所以 N 個單位時間之復現期，由式(8)可計算出其非超越機率 F ，再將其代入式(10)或(11)之回歸式即可推估得其水位復現值 H 。如圖5(B)之例，復現期為50年時，相對於圖中單位時間約600個月，其非超越機率約99.83%，由其縱座標比對橫座標可推估得其最高高潮位復現值約為133公分。

若為第二種數據取法(POT法)，則在已知復現期為 T (須換算為單位時間)之情況下，其復現值之非超越機率 $F(H)$ 應以下式推算之

$$F(H) = 1 - 1/(uT) \quad (12)$$

然後以同樣方法代入式(10)或(11)回歸式即可推估得水位復現值 H 。

疊加合成法

將水位分為天文潮位與暴潮偏差兩項，個別決定其設計值後再予疊加合成為設計水位，故稱之為疊加合成法，以此法推估之水位復現值要比極值統計法來得保守，因此主要用於水位數據資料不是很長之水位站，以彌補數據不足可能造成推估偏差之缺失。水位站設置不久，或因資料中斷、遺失或前後水準高程不一致或遺失，都可應用此法推估設計水位。茲將國內應用此種方法從事設計水位推估之相關探討方法予以概要說明於下以供參考：

蔡茂明(1977)：由花蓮、基隆、台中、高雄四港二十餘年之水位資料，以暴潮位等於天文滿潮位與氣壓潮、風揚之和作為設計潮位。其分析以歷年三月實測之最高潮位記錄作為天文滿潮位，依各區域氣壓之復現值推估氣壓潮，另假設颱風期間東、西海岸之平均風速分別為25、20公尺每秒而以Colding公式推算風揚，再予其和為設計水位。

王俊、馬平亞(1980)：由花蓮、基隆、高雄三港約二十餘年之水位資料，以調和分析法預測天文潮位，並分析各天文潮位之發生頻率，另由天文潮位與實測潮位之圖形或數值比對推估颱風暴潮偏差，同時以極值統計法回歸年極值之結果推算暴潮偏差之復現值，再合成選定發生頻率之天文潮位與不同復現期之暴潮偏差而得各復現期之設計水位。

簡仲和、唐文堂、邱耀達(1992)：由水位站歷年七月至十月之實測大潮平均高潮位，求得其平均值作為設計天文潮位。其次在假設颱風侵襲路徑下，以指定復現期之颱風強度應用於前述一維暴潮數值模式，推估設計天文潮位與暴潮間非線性作用下之水位變動歷程，最後由各不同颱風侵襲路徑下之水位歷程求得最高水位，作為該指定復現期之設計水位。

結合機率法

天文潮位為週期性之變動，暴潮偏差之變化為隨機性，分別將天文潮位、暴潮偏差之變動範圍劃分成等間格之區間，將各區間之天文潮位、暴潮偏差依其大小與發生機率分別予以合成新的合成區間與機率，如此即可以復現期之非超越機率按新合成之區間與其機率關係推估水位復現值，此法是位結合機率法。若 p_t 與 p_s 分別為天文潮位及暴潮偏差之機率密度函數(probability density function, pdf)，而其合成水位 H 之機率密度函數為 $p(H)$ ，則其關係式可寫成

$$p(H) = \int_{-\infty}^{\infty} p_t(H-y)p_s(y) dy \quad (13)$$

同時，水位 H_g 之非超越機率 $F(H_g)$ 可以下式計算之

$$F(H_g) = \text{prob}(H_g < H) = \int_{-\infty}^H p(H) dH \quad (14)$$

若將天文潮位與暴潮偏差均劃為等間距 ΔH 之區間，則式(13)可改寫成

$$p(H) = \sum_{i=-n}^n p_t(H-i\Delta H)p_s(i\Delta H) \quad (15)$$

式中 $(2n+1)$ 區間必需含蓋所有天文潮位與暴潮偏差之合成範圍(即天文潮位最小值與暴潮偏差最小值之和至天文潮位最大值與暴潮偏差最大值之和)。間距 ΔH 之大小可取為5或10公分，可視水位變動範圍大小而調整之。

用以進行結合機率分析之天文潮位與暴潮偏差數據應由逐時之水位實測值以調和分析法分離而得，圖6系列即為圖2實測水位經調和分析後之數據應用於結合機率法之實例。圖6(A)為實測水位值之機率密度圖(柱狀圖)與正規分佈函數(實心圓點)之比較情形，圖6(B)為由實測水位值分離出暴潮偏差之機率密度圖(柱狀圖)與正規分佈函數(實心圓點)之比較情形，圖6(C)為由預測天文潮位之機率密度圖(柱狀圖)與正規分佈函數(實心圓點)之比較情形，由三圖之比較大致可知暴潮偏差之分佈較為集中，與正規分佈函數較為接近，但在正值暴潮偏差之分佈範圍似較正值暴潮偏差之分佈為廣，而預測天文潮位之分佈則有較明顯之雙峰。圖6(D)為各水位機率密度之對照圖，圖中空心圓圈代表實測水位之機率密度，實心黑點為以圖6(C)預測天文潮位與圖6(B)暴潮偏差合成水位之機率密度，圖中顯示合成水位之分佈範圍要較實測水位者為寬，因此可用以推估發生頻率較小之水位

復現值，但由於實測水位數據之期間只約316日為期甚短，所獲得之暴潮偏差數據並不充份，因此兩者機率密度分佈差距並不大，難以推估發生頻率甚小之水位復現值。

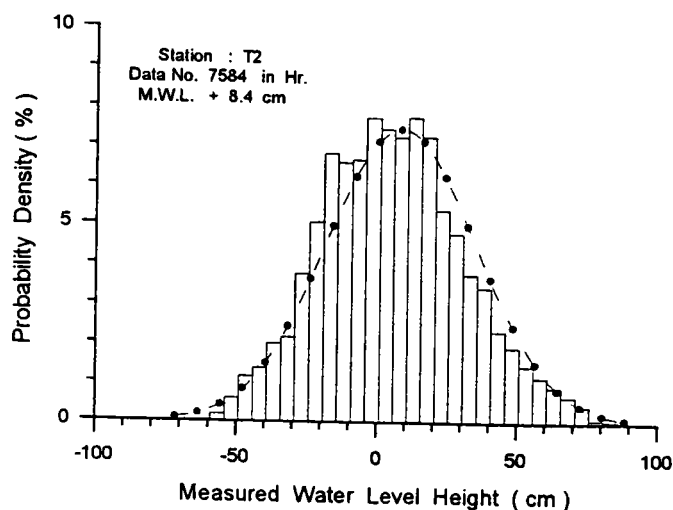


圖 6(A) 實測水位值之機率密度圖(柱狀圖)與正規分佈函數(實心圓點)之比較情形。

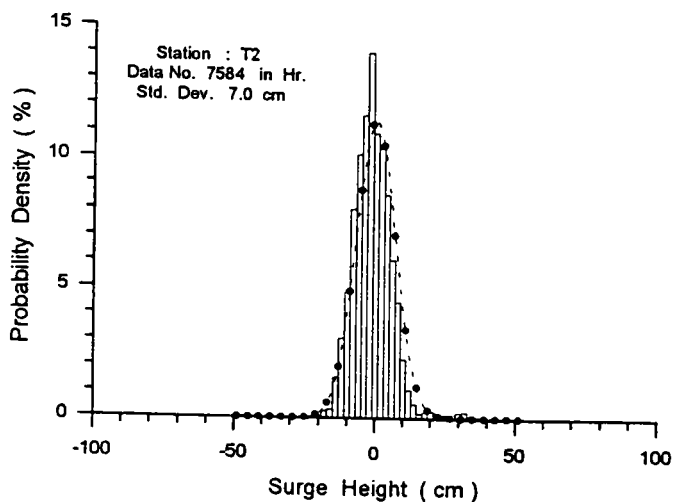


圖 6(B) 由實測水位值分離出暴潮偏差之機率密度圖(柱狀圖)與正規分佈函數(實心圓點)之比較情形。

民國八十三年五月

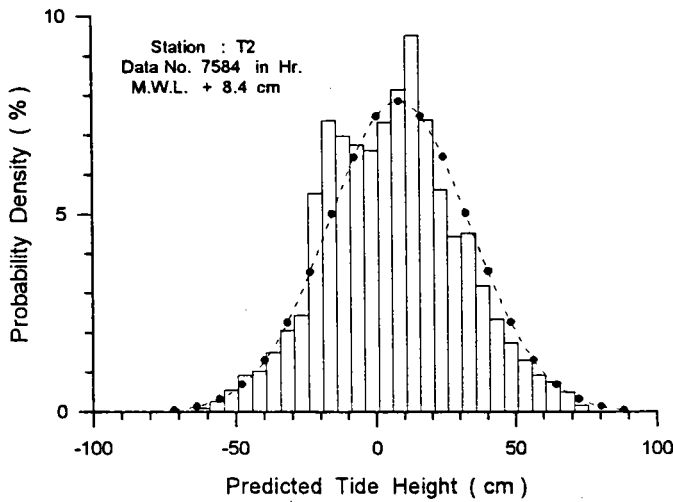


圖 6(C) 由預測天文潮位之機率密度圖(柱狀圖)與正規分佈函數(實心圓點)之比較情形。

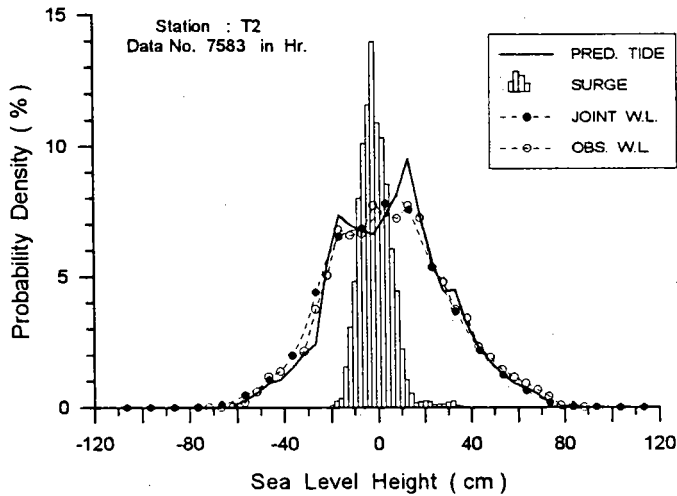


圖 6(D) 各水位機率密度之對照圖，圖中空心圓圈代表實測水位之機率密度，實心黑點為合成水位之機率密度，而實線、柱狀圖分別代表預測天文潮位與暴潮偏差。

圖6(E)及圖6(F)為圖6(E)各水位機率密度之累積機率圖，圖中符號意義與圖6(E)說明均相同。前者為線性縱座標，後者為機率縱座標，左側縱座標為低水位之發生頻率(亦即高水位之非超越機率)，右側縱座標為高水位之發生頻率(亦即低水位

之非超越機率)——請參考式(8)、(12)定義。很顯然地，結合機率法可同時用以推估高水位與低水位之復現值，此為極值統計法、疊加合成法所不及。

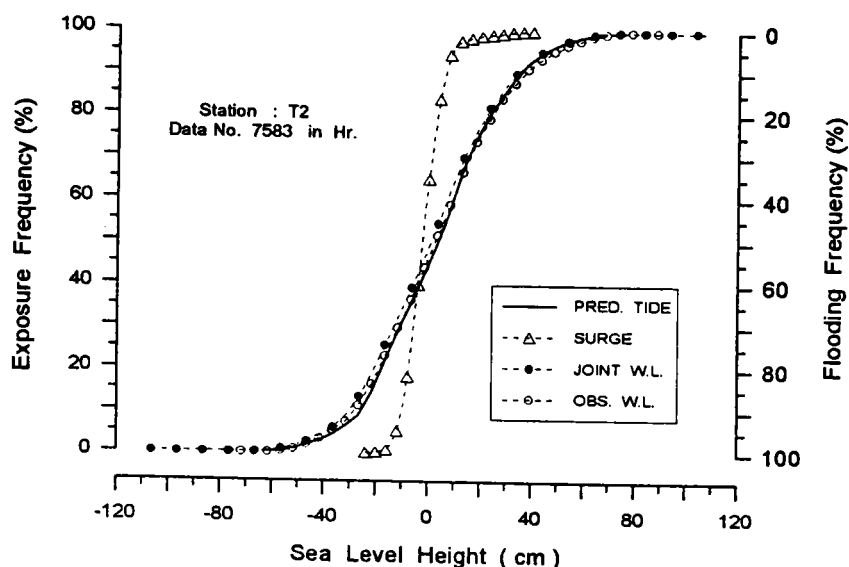


圖 6(E) 水位發生頻率圖，圖中符號意義與圖6(E)說明均相同。線性縱座標左側為低水位之發生頻率，右側為高水位之發生頻率。

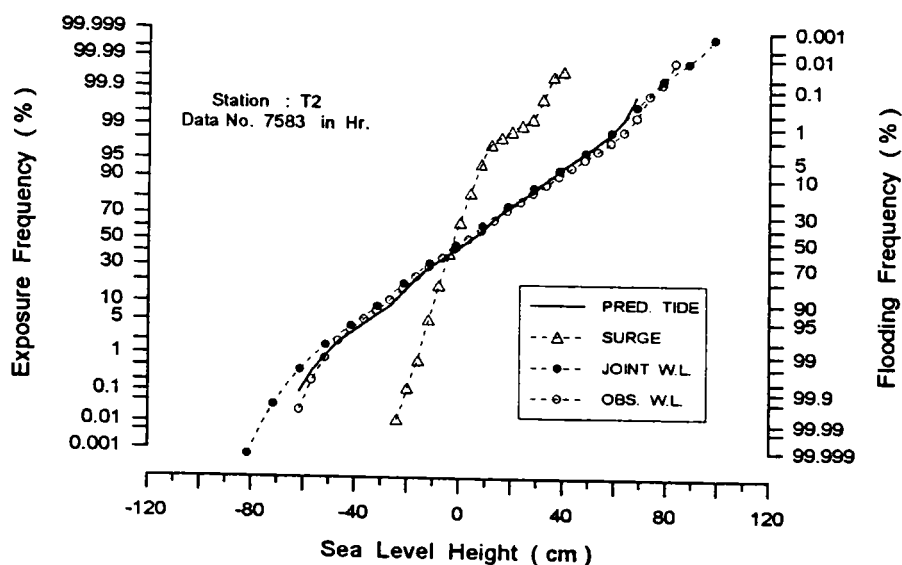


圖 6(F) 水位發生頻率圖，圖中符號意義與圖6(E)說明均相同。機率縱座標左側為低水位之發生頻率，右側為高水位之發生頻率。

結 語

本文主要在說明設計水位之決定過程，從水位記錄之資料分析、暴潮數值模式至設計水位決定方法，除闡述其相關定義及原理外，對一些基本分析方法之分析步驟、應注意事項也分別予以詳述。雖然設計水位之方法依其為處理過程或步驟不同分為三類，不過其基本分析方法均源自機率問題，因此可謂殊途同歸，瞭解其中一種方法後，對其餘兩種即不致覺得陌生，應用上亦不致會有格格不入之感。然而篇幅有限，有些分析方法（比如復現值之不確定度、極值統計法中之POT回歸法、結合機率法中水位與暴潮偏差之交互影響以及水位與暴潮偏差作用延時之關係、不同決定方法之比較分析等等）究竟未能深入探討，冀望日後相關研究能促使海岸結構物設計水位之規劃與設計應用更臻於完善。

參考資料

- 中野猿人，潮汐學，複版，生產技術中心，日本，1975。
- 連三郎，潮汐預報電腦程式模型，國立台灣大學海洋研究所，1977。
- 台灣漁業技術顧問社，台灣地區漁港建社基本資料，1988。
- 蘇青和、張金機等，台灣各港口潮汐相關性與預報模式研究，台灣省政府交通處港灣技術研究所，81-研(十三)，1992。
- 吳建民、馮德榮，淡水河感潮水位站水位調和分析，第五屆水利工程研討會論文集，1023-1034，國立成功大學，1990。
- 黃煌輝、蔡瓊林，海堤設計天文潮位頻率分析及平均海水面變化研究，國立成功大學台南水工試驗所，研究試驗報告第六十九號，1984。
- 楊春生，台灣北部海岸暴潮推算之研究，土木水利學術彙刊，第五卷，國立成功大學土木工程研究所，台南水工試驗所，pp. 49--63，1974。
- 李賢文，沿海窪地與海水堆升之研究(II)--臺灣周圍海域天文潮與颱風暴潮合成的數值模式，行政院國家科學委員會，NSC73-04140-P019-01，pp. 1--33，1986。

- 劉肖孔，台灣海域颱風暴潮及氣象潮數值預報模式研究計畫，行政院科技顧問組，中央氣象局研究報告，1984-1992。
- 蕭政宗，颱風暴潮模式之建立與應用，國立成功大學水利及海洋工程研究所，碩士論文，1987。
- 蔡茂明，颱風及暴潮頻率分析研究，第二屆海洋工程研討會文集，pp. 4-1--4-10, 1977。
- 王俊、馬平亞，台灣地區暴潮現象之研究(第一報)，第四屆海洋工程研討會文集，pp. 569--584, 1980。
- 簡仲和、唐文堂、邱耀達，全省海堤設計高度檢討計畫報告，國立成功大學水利及海洋工程研究所報告，CKHOPJ-92-005，pp. 1--125，1992。
- Chien, Chung-Ho, 1-D Modeling of Surges for the Eastern Coast of Taiwan Induced by Typhoons, Proc. of XXV Congress of IAHR, Vol. IV, No. C-2-1, pp. 40-47, 1993.
- Graff, J. and D. L. Blackman, Analysis of Maximum Sea Levels in Southern England, Proc. 20th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 931-948, 1978.
- Walden, A. T., P. Prescott and N. B. Webber, The Examination of Surge-Tide Interaction At Two Ports On the Central South Coast of England, Coastal Engineering, Vol. 6, pp. 59--70, Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- Alcock, G. A. and D. J. T. Carter, Extreme Events in Wave and Water Levels, Developments in Breakwaters, Thomas Telford Ltd, London, pp.53-68, 1986.

海岸保護工法之探討

郭金棟 國立成功大學水利及海洋工程研究所教授

一、引言

爲防止海岸災害、保護海岸避免國土及財產遭受暴潮（海水倒灌）波浪災害，或者爲開發沿岸新生地有效利用海岸空間，控制海灘穩定海岸免於侵蝕，常常需要在海岸建設一些海岸結構物控制漂砂移動、控制波浪，乃致於用人工填砂石改變海灘地形。

最近由於沿岸土地之高度利用海岸，加強海岸防災結構之呼籲日高，而同時由於河川輸砂量之減少、地盤下沉及水面上升、以及海岸大型結構物之興建改變近海海況或阻止沿岸漂砂之移動，海岸侵蝕成爲眾所矚目的問題。大範圍大規模之海岸侵蝕，需就大範圍內土砂來源收支平衡問題從大局去考慮，亦即從河川輸砂來源供應量與海岸波浪漂砂量供支之平衡去調整，即如何不減少或增加河川輸砂供應量，保持河海整體之平衡性予以考慮，如僅依靠海岸保護結構物非但所費不貲而且亦難達到目的。依賴海岸結構物保護海岸防止侵蝕應僅限於有限的局部特殊海岸，以人爲方法保持局部性之平衡。蓋往往因欲保護某一地區之海岸卻引起鄰近海岸失去平衡發生侵蝕，永無止境。海岸災害及侵蝕之防止不能僅靠結構物，亦需就易受災害地區之土地使用予以限制減輕災害，更需要有管理辦法限制行爲活動。

防止侵蝕或災害之結構物不外下列數類：

1. 海堤或護岸 (Seawall, revetment)
2. 突堤 (防砂突堤) (Groins)
3. 離岸堤 (Offshore or detached breakwater)
4. 人工礁 (Artificial Reef work)
5. 岬島 (Headland defence work)

6.人工養灘 (Beach nourishment)，土砂側渡 (Sand bypassing)

7.砂丘 (Sand dune)

8.海灘抽水

由上列方法之一，或複數混合使用，以達到控制波浪、漂砂及流之目的。

此等工程方法之優劣應從其功能、安全性、耐久性、經濟性、施工性、景觀等予以評估。

各種結構物均有其特殊之功能，應就其所需要之目的何在選擇結構物種類。安全性包括受波力及其他外力時結構物之安全性，以及興建後對外界之危害程度。經濟性則包括建設工程費、用地補償費等施工因陸地施工或海上施工其施工設備及工程費相差甚多，同時海上施工工期受限制，有無施工場所等而有差異。景觀當為未來建設結構物之一大問題，不僅不能因而失去或破壞海上景觀，更需加強水邊設計積極改善沿岸景觀，提供居民海邊活動、休閒空間。

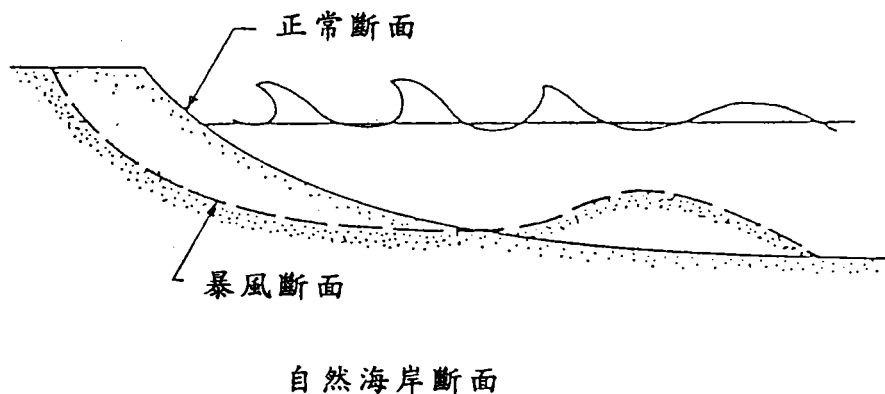
二、海堤、護岸

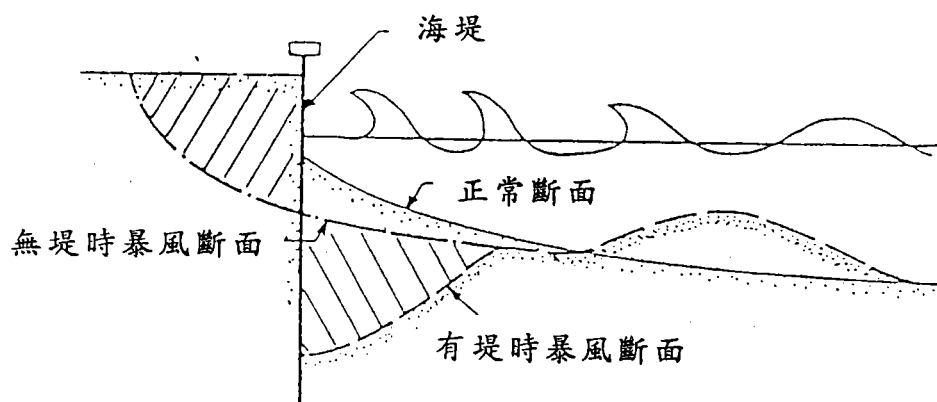
護岸乃為保護陸地被波浪沖走於海陸交接處興建之結構物，其背後即為陸地而堤高略高於陸地。海堤則為防止海水侵入陸地對付暴潮及波浪之結構物，較地表高出於灘線附近興建之。建設海堤或護岸本來之目的在阻止暴潮時海水侵入陸地，同時防止陸地被海浪沖蝕，並無防治海灘侵蝕之功能。但由於近來海岸砂丘之消失，或因海岸線後退使砂丘之相對高度降低，或因濱鄰海岸之鄉村需有防潮、防浪之安全措施，海堤反而成為廣被採用之防止侵蝕之工程方法。其原因可能由於海堤護岸在直接感覺上較有安全感，被認為可遏阻灘線後退之簡易方法，同時在施工方便且工程費用較其方法低廉而被普遍採用，實則如設置不當，非但無法遏阻侵蝕反而助長堤體潰決等現象。

如在灘線附近波浪經常打到之處興建海堤、護岸，則沖刷上沙灘之波浪與堤衝擊，反射後倒流入海。反射波使流向海之回流或沿岸流加速，且流量增多，堤前之土砂被沖刷流向下游或外海方向之搬運力增強，

非但堤基被淘蝕，如基礎深度不足，堤防即倒塌陷落乃至崩潰，海灘亦因而消失（參照圖 2-1）。此種現象尤常見於反波式或直立式陡坡海堤，故海堤或護岸絕無防止海岸侵蝕之機能，不應用於侵蝕性海岸保護。即使採用緩坡式或空隙式柔性海堤也只能治標性的阻止陸地之被沖刷，在防止海灘後退、前灘侵蝕、堤址淘刷上毫無功能，應採其他方法。天然海岸如發生大規模侵蝕，對背後之房屋或公共設施有造成災害之虞時，除應興建海堤防止海水入侵外，更應配合防砂突堤、離岸堤或人工養灘等方能奏效。

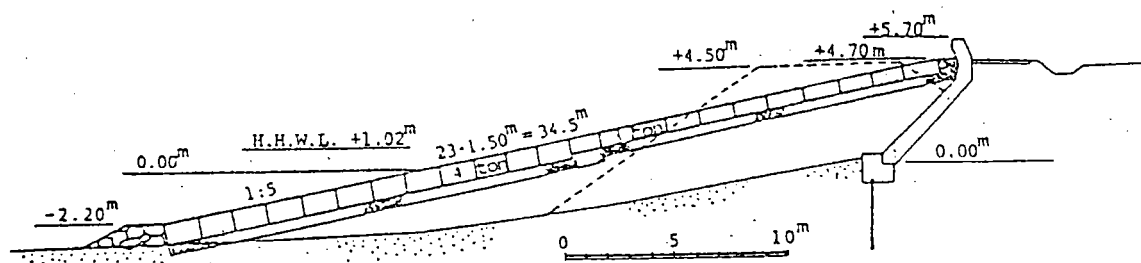
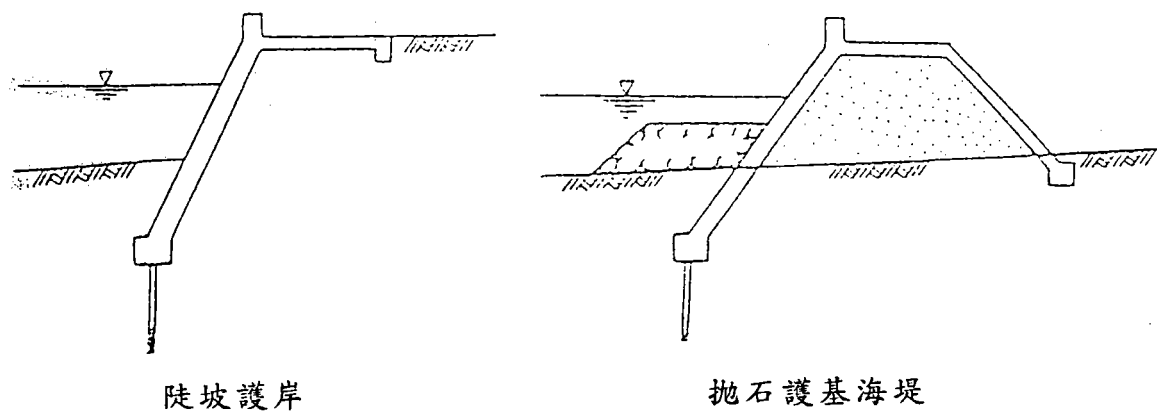
如欲海堤或護岸兼具防災及保護海灘之作用，基本上其堤面坡度應平緩方能減低反射率防止沖刷降底溯升及越波。從波浪溯升特性而言，堤面坡度能放緩到 $1/6 \sim 1/10$ 最為理想，但由於土地利用及節省工程材料關係，海堤、護岸之堤面坡度在若干國家如英國、美國、日本等都採用陡坡堤，因此非但無法抑制海岸侵蝕反而加速海灘流失。日本從失敗中獲取經驗，海堤設計之理念由光面陡坡堤變為消波護基堤，再又變為緩坡堤如圖 2-2 所示。





有海堤時之海岸斷面

圖 2-1 自然與有堤時之海岸斷面比較



緩坡堤

圖 2-2 日本海堤之演變

荷蘭等西歐國家對海岸保護已有長年經驗，早在13世紀已具備各種防護方法。基本觀念上採用流線原理。順應自然減少反作用之柔性工程方法，故海堤、護岸均採取極緩坡度之1/10坡度大斷面，或許與其建築材料有關，但的確此種坡度之海堤溯升高度非常低而且堤基沖刷甚少發生。台灣西海岸若干海埔地海堤亦仿此採用1/7坡度卵石堤面，迄今四十年仍安然無恙。日本海埔地圍堤亦採用之。西德之堤防坡面亦採用1/4 ~ 1/6，印度等開發中國家亦因採用石材建堤，故堤面坡度亦屬1/4 ~ 1/10，在防止侵蝕上發揮良好之效果。Rruun有鑑於此極力主張緩坡工法。技術發達之國家如美、日、英則過於信賴科技，採用與自然抗爭之工法，多用陡坡之剛性海堤、護岸，反射作用反而大增，反射率強，波浪淘蝕力大增，海灘反而加速流失。

2-1 緩坡堤水理特性

2-1.1 光滑堤之溯升

緩坡堤之防災效果可自其溯升高、堤趾沖刷及造灘效果三方面考慮。有關波浪溯升問題已有不少研究，但多以不透水光滑面為對象。依試驗結果視之，就坡度在1:0.5 ~ 1:30之堤防言，堤趾水深 h 與波高 H 之比例 $h/H_0 < 1$ 時堤面坡度愈緩者溯升愈低，但 $h/H_0 > 2$ 則相反。故在水深大於 $h/H_0 > 2$ 時，一般應先以Miche之碎波臨界條件

$$(H_0/L_0)_{\max} = \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\pi} \quad (1)$$

由入射波條件界定入射波是否會在堤面碎波之臨界坡度 θ 。如堤面坡度小於此 θ_c 角則波浪會在堤面碎波，否則不碎波而產生全反射。在堤面坡度 $\theta > \theta_c$ 時，坡度緩者反而溯升愈高， $\theta < \theta_c$ 則依Hunt之試驗。

$$\frac{R}{H_0} = \tan \theta / \sqrt{H_0/L_0} \quad (2)$$

坡度愈緩溯升愈低。就颱風波浪而言，產生最溯升之堤面坡度大約1:2。

就 $h/H_0=0$ 之情況言，在通常波浪作用下 1:1.5 ~ 1:3 之坡度所產生之相對溯升高並無明顯之差別。1/2 < h/H_0 < 2 間，坡度為 1:2 與 1:3 者相對溯升相同，1:4 以下之緩坡坡度愈緩溯升愈低，同時溯升高與水深成正比，水深愈淺溯升愈低。綜合以上結果，堤面坡度緩於 1:4 以下任何水深處波浪溯升較會隨坡度遽減，大於 1:3 則視波浪水深而定。各種堤趾水深，不同坡度在不同入射波之相對溯升可由圖 2-3 查得。由圖 2-4 在 $H_0/L_0=0.03$ 時不同堤趾水深 d/H_0 下，不同坡度之相對溯升之比較可知在坡度 1:2 ~ 1:4 時，堤趾水深大時溯升照常高而 1:5 ~ 1:6 則相當低。由圖 2-5 亦可知 1:5 ~ 1:6 坡度之溯升只有 1:2 者之 1/2，而相對水深大時愈小。

最近光滑混凝土面海堤漸少採用，而多採用消波塊鋪面，一則增加粗糙率增加阻力，同時增加透水性，降低流速，消殺波能，使溯升高可降低到光滑面之 0.45 ~ 0.65 倍如圖 2-6 所示，此種效果在緩坡堤尤為顯著，大約提高只要等於波高即不越波，而高橋等 (1990) 亦由試驗結果修正粗面透水堤之溯升高為

$$R/H_0 = 1.19 \left(\tan \theta / \sqrt{H_0/L_0} \right)^{0.29}$$

顯然較 Hunt 之公式大為降低。

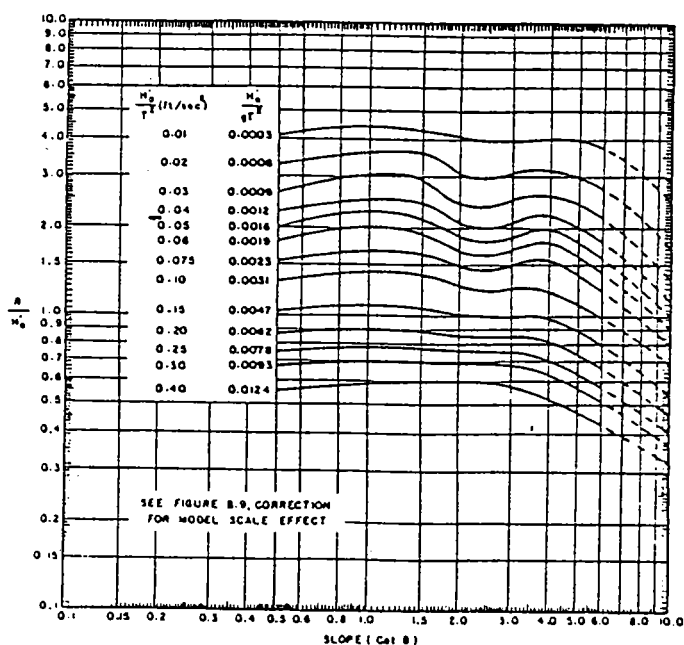
2-1.2 緩坡堤之越波

有關越波之研究過去多以陡坡堤試驗為主，極少緩坡堤之實驗。依井上等 (1990) 以 1:3 ~ 1:6 之緩坡試驗結果，無因次平均越波量 $q/\sqrt{2gH_{1/3}^3}$ 與堤趾相對水深 $h/L_{1/2}$ 之關係如圖 2-7 所示，圖中 H_c 表示堤頂出水高。 q 為單位寬度單位時間越波量， h 為水深， $H_{1/3}$ 及 $L_{1/3}$ 分別為有義波波高及週期。由圖可知相對水深增加時越波量增加，尤以 1:3 坡度者增加最快，同時由圖知垂直至 1:6 坡度之越波量在相對水深極小時相差不大，但相對水深較大時坡度大者越波量愈大，而 1:3 坡度比垂直堤之越波量還大。顯然從越波觀點看 1:5 以下之緩坡堤較為有利，不僅量少且較不受相對水深增加之影響，而 1:3 坡度者最為不利。

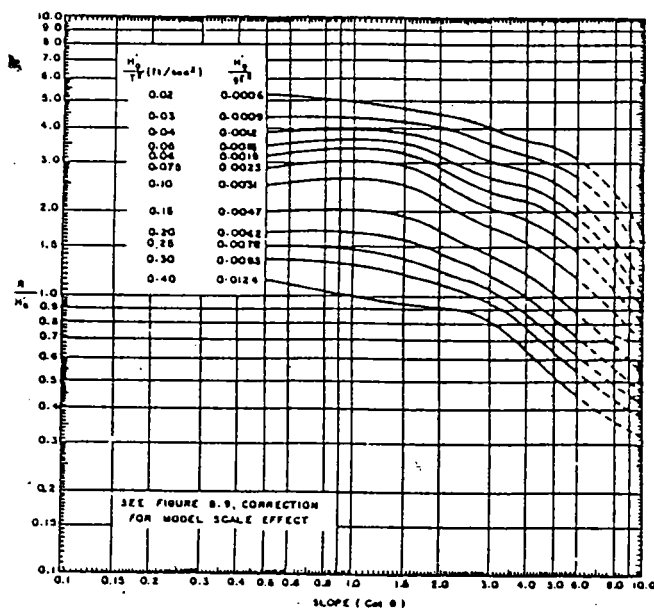
從越波率 r_0 即不規則波群中越波波數與全入射波數之比，觀察其結果如圖 2-8 所示，坡度越緩越波率越低，相對水深 $h/L_{1/3}$ 增加時越波

率均有增加之趨勢，而坡度較陡者增加較快。

各種代表越波量 $Q_{\max}$ ， $Q_{1/10}$ ， $Q_{1/3}$ 與平均越波量 Q_m 之比例關係則



(a) $d_s/H'_0 = 0$



(b) $d_s/H'_0 = 0.45$

圖 2-3 光滑堤湧升高與坡度、水深之關係

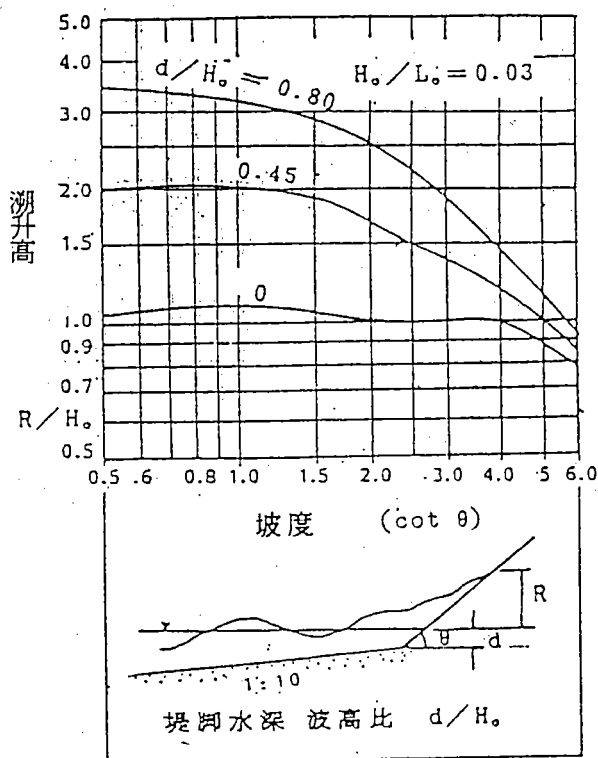


圖 2-4 坡度與溯
升之關係

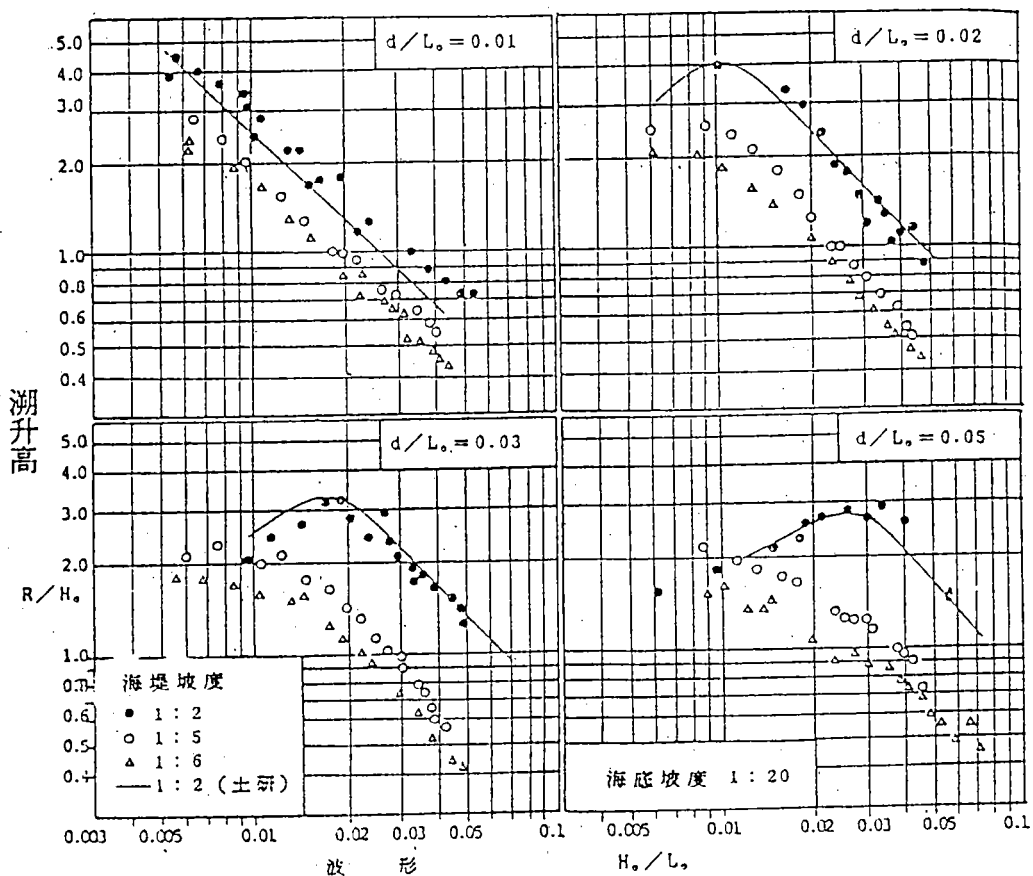


圖 2-5 緩波堤之溯升高

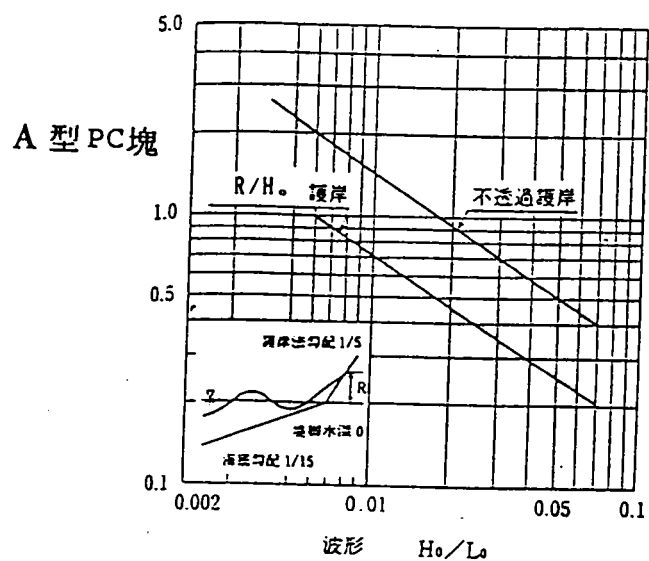
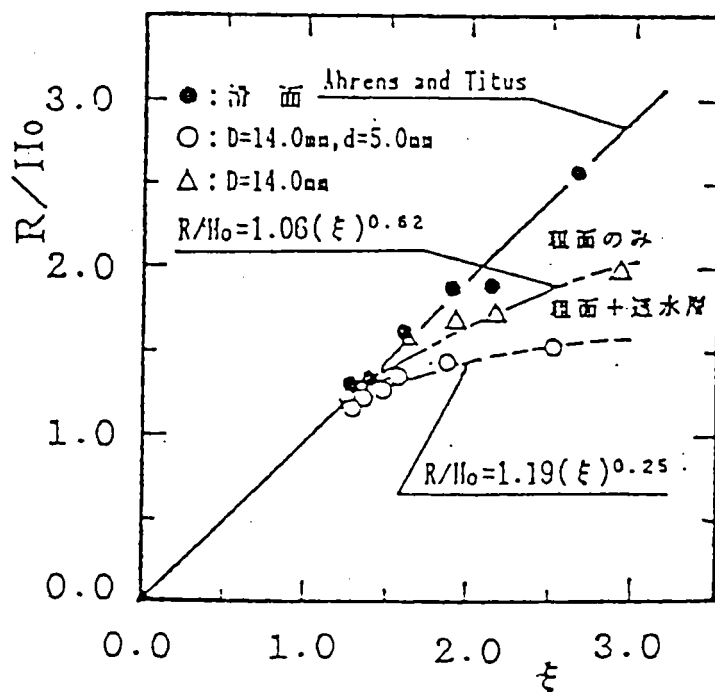


圖 2-6a



R/H_0 與 ξ 之關係

圖 2-6b 粗面、透水堤之溯升

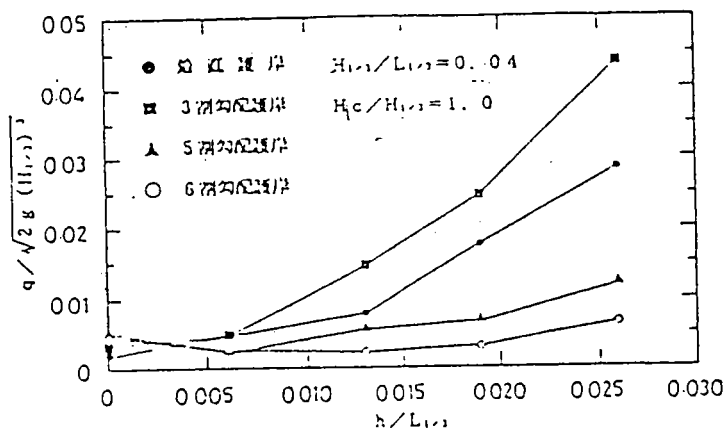


圖 2-7 越波率與堤趾水深、波長比之關係

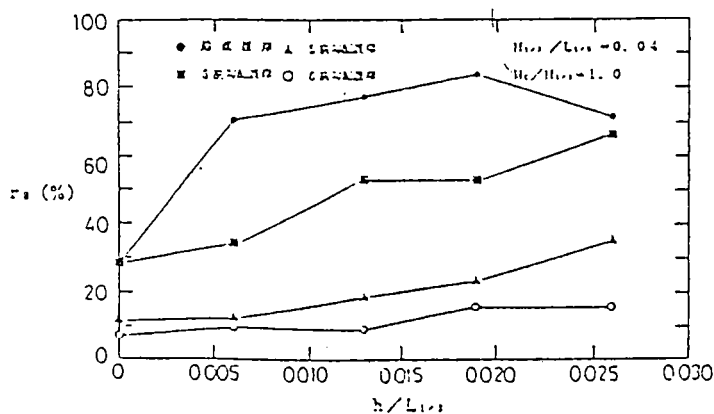
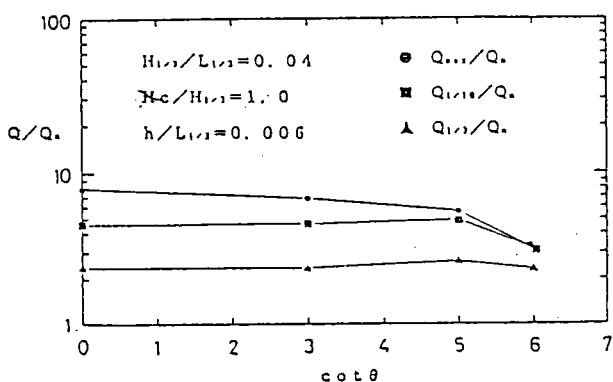
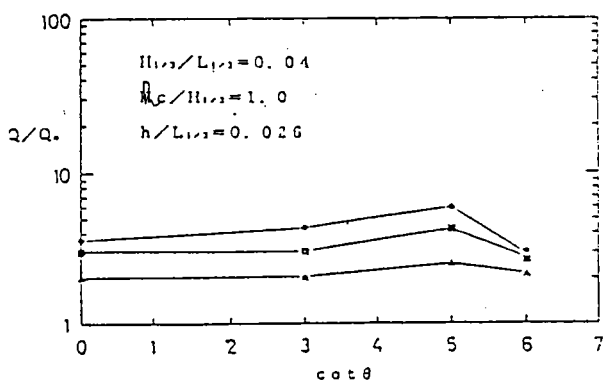


圖 2-8 無因次越波流量與堤趾相對水深之關係



(a) $h/L_{1/3} = 0.006$



(b) $h/L_{1/3} = 0.026$

圖 2-9 代表越波量比堤面坡度之關係

如圖 2-9 所示，有義越波量 $Q_{1/3}$ 約為平均越波量之 2~3 倍，最大 1/10 越波量為平均越波量之 3~7 倍，最大越波量為平均越波量之 3~10 倍，此等比例因坡度而異尤以 $Q_{\max}$ 最為明顯，而 $h/L_{1/3} < 0.006$ 時 Q/Q_m 隨坡度緩減小，表示緩坡堤在防災上較佳，即無特別大量之一波越波量，越波量較均勻尤以 1:6 時為然。

2-1.3 緩坡堤鋪面塊重量

大致與拋石塊之設計方法無異，可由 Hudson 公式

$$W = \frac{r_r H^3}{K_d (S_s - 1)^3 \cot \theta}$$

計算式中 W ：重量 (ton)， H ：堤趾設計波高 (m)， θ ：堤趾交角

r_r ：混凝土單位體積重 (t/m^3)， S_s ：混凝土/海水比重

K_d ：安定係數。

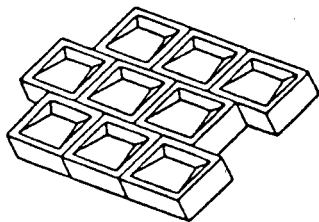
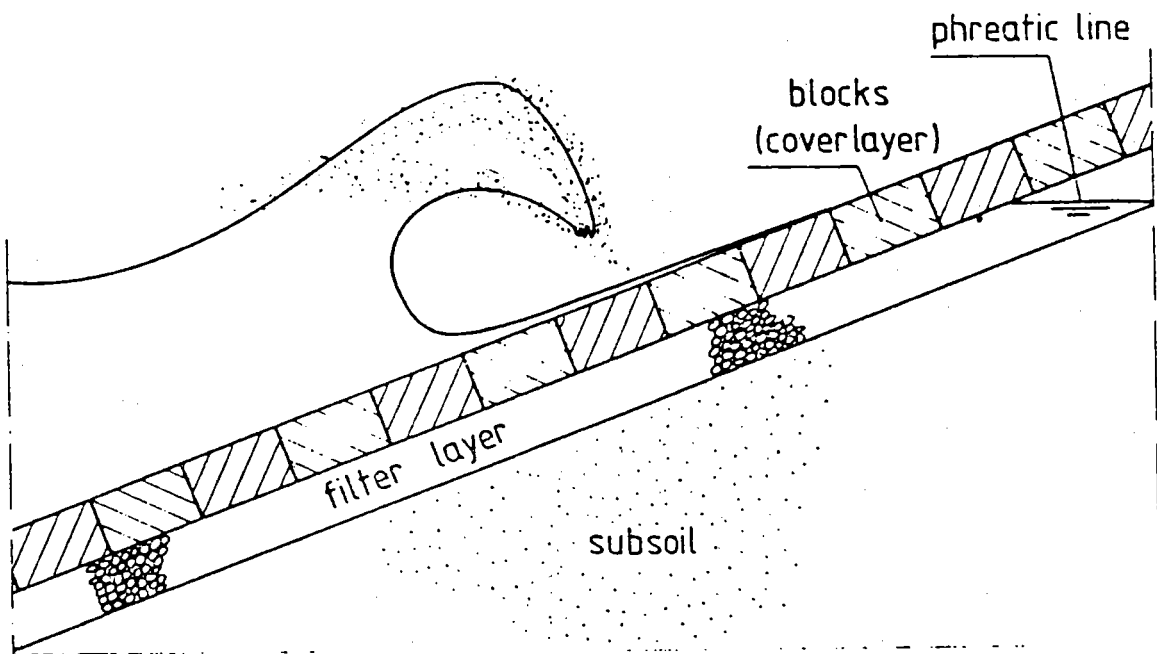
$K_d \approx 7$) 因型塊而異，同時因排列方式而變化，如無適當之空隙率可能增加堤內間隙水壓，使混凝土塊或下層之過濾層石料被吸出，尤以無過濾層時間隙水壓更大，常因而導致緩坡堤面之損害。

2.2 砌石及消波塊海堤

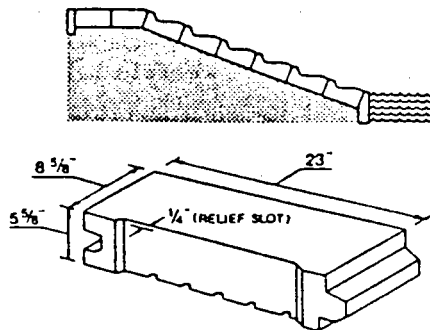
前節曾述及在設計海岸保護工程結構物時，應盡量避免採用堅固之混凝土堤，而應盡量採用柔性結構物，如砌卵石、塊石或消波塊被覆之海堤。對波浪小而坡度緩之海堤，石塊安定重量輕，故以 30cm 卵石乾砌亦可保持安定，但對波浪較大且坡度不緩之堤面，則需以大塊石或消波塊鋪砌堤面保護下層之卵石層。

此種粗面堤防具有下面特性：

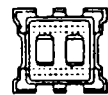
1. 斜面凹凸阻力大可減低溯升及回流。
2. 具有透水性，波能及水流可藉滲透吸收。
3. 堤面上之流速及流量較小。
4. 堤趾如有沖刷，堤面下側可能隨之有部分下陷獲得若干補救。
5. 堤體土砂倘被吸出流失，塊石或消波塊仍能保護表面，不致產生全面性破壞或決堤。



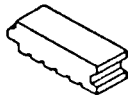
free rectangular blocks



modified tongue-and-groove block



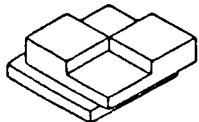
armorflex block&mat



TONGUE-AND-GROOVE TYPE



SHIP-LAP TYPE

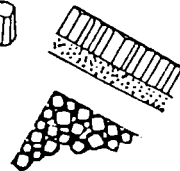


WAFFLE TYPE

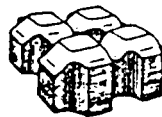


STEPPED TYPE

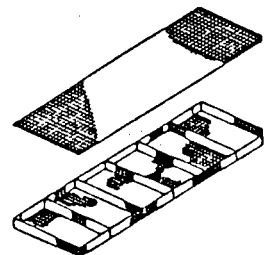
interlocking blocks



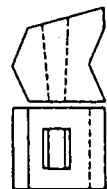
basalton
revetment



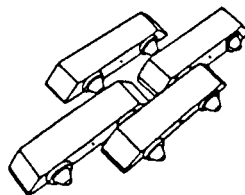
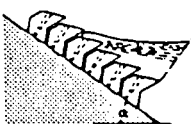
gobi-block



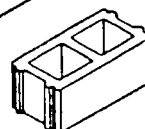
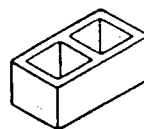
reno-matress



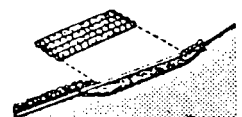
svee-blocks



terrafix-blocks



building blocks



sand-matress

6. 災害後可將落下或散亂之石塊再收集整修。

過去由於消波塊被覆堤凹凸太大，市民無法跨過海堤下海，阻絕人民親水權利，故最近先進國家都採用平面開孔性混凝土塊覆蓋於堤面，使市民能步下堤面到達海灘。此種混凝土塊通常重量較一般消波塊輕，故不適於水深波浪大之處，而常用於建造在海灘上波浪非經常能到達之海堤表層被覆或直接鋪設於砂丘上增加抵抗被沖刷力量。此種工程方法雖坡度緩反射率低，但仍然較自然海灘之反射率高，故難免堤腳部份有被沖刷之情形發生，故應注意加強防止堤趾沖刷，或俟有堤趾被沖刷即再補修，或考慮潮差將堤面延伸至低潮線以下。依據二維實驗結果亦難期待損失的砂灘有恢復之可能，但在現場施工例中堤面有覆土現象發生，表示在夏季有少量回淤現象。

2-2.1 海堤高度之決定

海堤高度一般由暴潮時之溯升高加上地盤沉陷量及海水上升量，若干餘裕決定。由於暴潮位及波浪之大小須由其出現之機率與其可能產生之災害危險性決定，同時與防止災害之投資成本有關，究竟應取多少頻率因目前資料極為有限難決定。在荷蘭海堤之水位以年 10^{-4} 未超過之機率設計，日本因海堤重要性而異，一般取50年或100年再現年。溯升高則取未超過機率2%設計，美國3%。沉陷量則以填土壓密沉陷量及地盤沉陷量在至少30年內可能發生之預期沉陷量計算。平均海水面上升量大約以0.25m估計之，餘裕高則取0.5m。

a. 溯升高 (Run-up)

溯升高因海堤堤趾水深、波高及週期、入射角、堤面坡度、粗糙率、斷面形狀及透水性而異，正確之推算不易，此等因素影響之個別影響如何不易分別估計，故通常以波浪直角入射於光滑面之直線傾斜堤為基本溯升高，然後再以其他影響因素推算。即有效溯升高為

$$R' = RK_r K_\beta K_f \quad (3)$$

式中 R' 為綜合各種影響後之溯升高 R 為光滑傾斜堤之溯升高

K_r 為粗糙度改正係數

K_β 為波浪入射角改正係數

K_f 為有平台時堤形改正係數

光滑傾斜堤溯升高，最近多以不規則波設計。依據不規則波之實驗結果，未超過機率 2 % 即 100 波中 98 波小於此，而 2 個溯升大於此之溯升高 R_2 推算式有

1. Wassing (1957) — Delft 公式

$$\frac{R_2}{H_s} = 8 \tan \theta \quad 3.5 \leq \cot \theta \leq 10 \quad (4)$$

$$H_o/L_o \approx 0.05$$

式中 H_s ：有義波高 θ ：堤面角度

2. Vinje (1972)

$$\frac{R_2}{H_s} = C_2 \sqrt{2\pi} \quad \xi \quad (5)$$

$$\text{但 } \xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_s/L_p}} = \frac{1.25}{\sqrt{H_s}} T_p \tan \theta < 2.5 \quad (6)$$

C_2 ：超過 2 % 之溯升係數

$C_2 = 0.55 \sim 0.60$ ：窄頻波譜

$= 0.70$ ：寬頻波譜，或 $H_o/L_o = 0.05$ 時

為安全計風浪時：

$$\frac{R_2}{H_s} = 0.7 T_p \sqrt{g H_s} \tan \theta ; \xi < 2.0 \sim 2.5 \quad (7)$$

$$\frac{R_2}{H_s} = 3.5 \quad ; \xi \geq 2.5 \quad (8)$$

Tautenhain (1981) 建議 $C_2 = 0.70 \sim 0.86$ ，Grune (1982) 則依實際海堤溯升觀測值建議 1: 4 坡度堤採 $C_2 = 0.53 \sim 1.14$ ，在堤趾水深大時 C_2 較大。依 Ahrens 之分析 2 % 未超過溯升與有義溯升高 R_s 之比為

$$R_2 = 1.54 R_s \quad (9)$$

R_s 可由規則波之溯升試驗結果代替，此時規則之波浪波高以有義波高 H_s ，週期以波譜主週期 T_p 代替。

Ahren (1988) 等同時建議以下式推算粗糙透水堤或拋石堤之溯升

$$\frac{R_{\max}}{H_{m0}} = \frac{1.154 \xi}{1.0 + 0.202 \xi} \quad (10)$$

$R_{\max}$ 為 256 秒內之最大溯升高

H_{m0} 為堤趾零次動差波高

b. 堤表面粗糙度之修正：

依據荷蘭海堤設計規範之建議，各種不同堤面粗糙率及透水性對溯升之減少率如下：

瀝青、光滑混凝土面	$K_r = 1$
混凝土塊、纖維蓆	0.95
漿砌石	0.90
卵石、蛇籠	0.70
混凝土消波塊一層	0.80
拋塊石或消波塊二層	0.60

c. 平台之影響：

平台寬度 B 一定時，平台水深 $d_b < 0.5H$ 時對溯升之降低最有效果，平台寬度 B 愈長愈有效，於不碎波或弱碎波下以 $B=0.25L_0$ 時，或在強碎波 $H_0/L_0 > 0.03$ 時， $B=4H$ 最有效。在平台寬等於或大於此值時，溯升減少率如下：

坡度	$r_f (d < 0.5H)$
1:5 ~ 1:7	0.75 ~ 0.80
4	0.60 ~ 0.70
3	0.50 ~ 0.60

d. 波浪入射角之修正：

波峰線與堤線成 β 角入射時之溯升高 R 與波浪垂直入射 ($\beta = 0^\circ$) 時溯升高 R 之關係如以下式表示：

$$R_\beta = R \cdot K_\beta \quad (11)$$

時，其平均修正係數依 Tautenhain 等 (1982) 以規則波試驗結果

$$K_\beta = \frac{R_\beta}{R} = \cos \beta^3 \sqrt{2 - \cos^3 2\beta} \quad (12)$$

即 $\beta = 0^\circ \sim 35^\circ$ 時反比垂直入射時之溯升增加，此一結果與蘇聯、日本等所做之結果有所不同，不同研究之結果比較圖如圖 2-10 Tautenhain (1982) 等係以下式推算規則波垂直入射時之溯升高。

$$R = 1.29 \sqrt{H \cdot L_0 (1 - K_r)} / \cos \theta \quad (13)$$

K_r 為反射率， H 、 L_0 為堤前波高及外海波長

由此觀之 $0 < \beta < 35^\circ$ 內溯升高以不修正為宜，若為安全計則依 (12) 式推算。

2-2.2 溯降 (Run-down)

在溯降範圍內海堤仍需有相類似於溯升區之保護工程，甚至於溯降以下之海堤面亦須回流、沿岸流、船波等可能發生之沖刷加以適當之保護。溯降可由下式推算：

$$\frac{R_d}{H_s} = (0.8\xi + 0.5) \quad ; \quad \xi < 2.5 \quad (14)$$

$$\frac{R_s}{H_s} = 2.5 \quad ; \quad \xi \geq 2.5 \quad (15)$$

一群海洋波浪出現之大小不一極不規則，故其產生之溯升高亦因之呈現極不規則之分佈，故在設計結構物時亦應考慮此種變化，估計所可能發生之溯升或溢流量之機率分佈，順應安全之需要設計之。依 Saville (1962)、Bajjtes (1971) 等之研究，溯升高之機率分佈為一 Rayleigh 型分佈。此一假定雖有些保守，但為一合理之假定，頗能代表實驗之結果。且在推算上亦方便簡單，故雖以後如 Mase，郭等證明以 Weibull 分佈表示較合理，但仍多引用之。依 Rayleigh，某一超過機率 p 之溯升高 R_p 與有義溯升高 R_s 之比例為：

$$\frac{R_p}{R_s} = \left(\frac{\frac{1}{\ln P}}{2} \right)^{1/2} = K_p \quad (16)$$

R_s 即某一波譜所具有之有義波高與平均週期所產生之一序列溯升高，較大 $1/3$ 個之平均值。在方便上令其等於規則波所產生之溯升高，俾能將過去用規則波所做之溯升試驗結果應用於一般推算之用。實際上此一

假定是否適切不無疑問。

依據Rayleigh分佈推算之溯升比，如欲以未超過機率2%做為設計標準，則依上式其與有義溯升 R_s 之比例。

$$K_{0.02} = \frac{R_2}{R_s} = \ln \left(\frac{1.0}{0.02} \right) = 1.40 \quad (17)$$

即2%溯升高比有義溯升高增加40%，3%溯升高比 $K_{0.03} = 1.324$ 。

2-2.3 拋石堤安定設計

粗骨材料如卵石、天然塊石等用在斜坡護岸或防波堤等極為普遍。過去多引用Irribain公式。自有Hudson公式後，由於其簡單，過去20年更廣泛被引用於拋石堤設計。但Hudson公式本身並未包括週期影響，同時亦無不規則波相關資料，使用不無缺陷。Ahnens (1975)，Pilarczyk and den Boer (1983)，Losada and Gimenez-Curto (1979)等人，雖曾就週期之影響提出修正，但都屬規則波之實驗結果。荷蘭Delft 試驗室Vander Meer and Pilarczyk (1985)經200餘次之不規則波試驗並將Wallingford 試驗室Thompson and Shutter (1975)之試驗資料加以分析，認為影響拋石安定性之因素不僅石塊代表直徑 D_{n50} ，相對密度 $\Delta = \rho_s / \rho_w - 1$ 、有義波高 H_s 、平均週期 T_z 、坡度 α 有關亦與損害程度 S_2 ，波數 N ，拋石級配比 D_{85}/D_{15} ，波譜形狀、群波因子及堤心滲透性有關。損害程度 S_2 與作用波數有關，不規則波試驗需5000波以上斷面才能達到平衡，波數 N 之損害程度與5000波之損害比如下：

$$S_2(N) = 0.014 \sqrt{NS_2(5000)} \quad (18)$$

$S_2(5000)$ 表示5000波試驗之損害率， $S_2(N)$ 表示 N 波之損害率。規則波通常1000~2000波即達平衡，但不規則波試驗則10000波尚未呈安定斷面。

如將損害程度分為三類，分別為開始損害、中度損害、損毀（過濾層露出），則其 S_2 值如下表：

$\cos \alpha$	開始破壞	損 毀
2	$S_2=2$	$S_2=8$
3	$S_2=2$	$S_2=12$
4	$S_2=3$	$S_2=17$
6	$S_2=3$	$S_2=17$

級配比在 $D_{85}/D_{15}=2.25 \sim 1.25$ 間影響不大，波譜寬及群波因子對安定性之影響亦不十分明顯。堤心透水性對安定之影響甚大，堤心透水者比不透水者安定性增加約一倍。對堤心不透水堤之安定性 Van der Meer & Pilarczyk 提議以下式計算：

碎波時： $\xi < 2.5 \sim 3.5$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 4.4 (S_2/\sqrt{N})^{0.22\xi - 0.54} \quad (19)$$

不碎波時： $\xi > 2.5 \sim 3.5$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.25 \sqrt{\cot \alpha} (S_2/\sqrt{N})^{1/6\xi + 0.1}; \cot \alpha \leq 3$$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.25 \sqrt{3} (S_2/\sqrt{N})^{1/6\xi + 0.1} \quad ; \cot \alpha \geq 3 \quad (21)$$

$$\text{但 } D_{n50} : (W_{50}/\rho_s)^{1/3} \quad (22)$$

W_{50} : 累積曲線 50% 之石塊重量

ρ_s : 石塊比重

$$\xi = \tan \alpha / \sqrt{H_s/L_0} = \frac{\tan \alpha}{2\pi H_s/gT_z^2} \quad (23)$$

$$S_2 = A_2/D_{n50}^2 \quad (24)$$

A_2 : 斷面被沖刷面積

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

對波數3000，微損情況下堤心不透水之安定性可由圖2-11求得。堤心能透水時公式(19)、(20)、及(21)式之常數分別改為5.8；1.65，即其安定性分別可提高32%至58%。D_{n50} 算出後可由(22)式求得石塊重量。

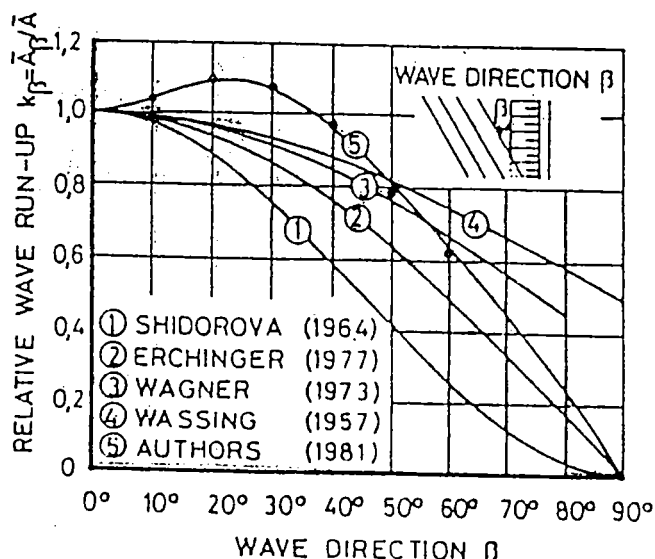


圖2-10 溯升波向修正係數

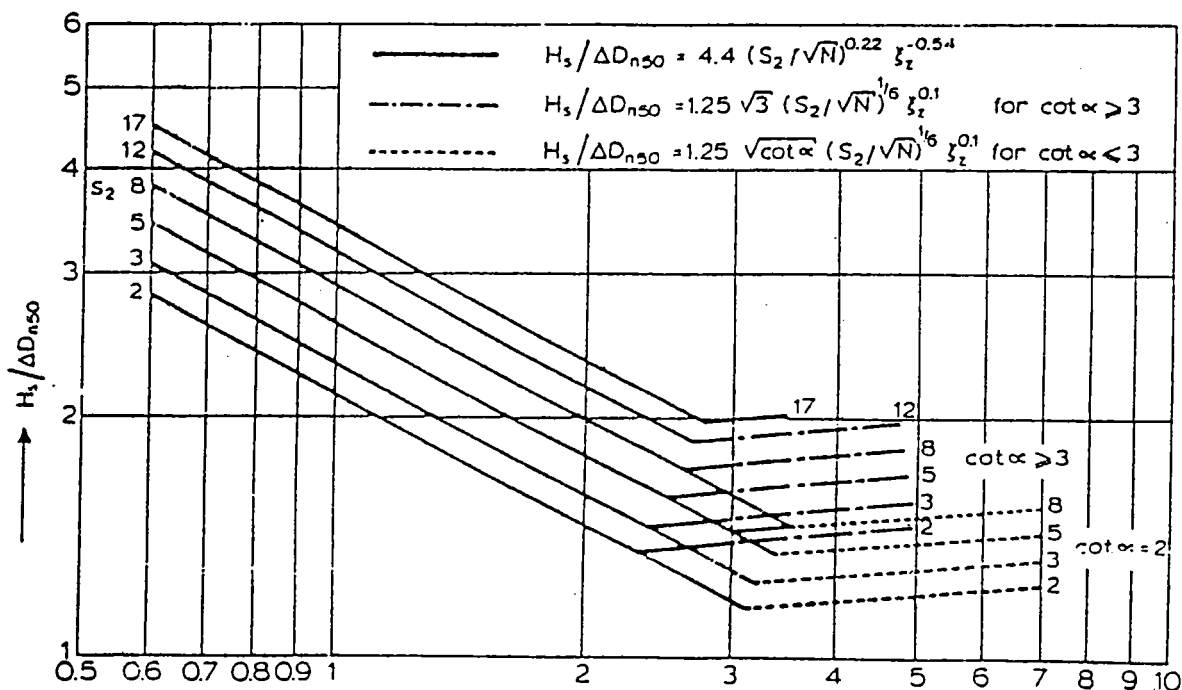


圖2-11 石塊安定重量計算圖(N=3000)

三、離岸堤 (Offshore Breakwater, Detached Breakwater)

離開海灘平行或大致平行於海岸線成島狀建設於外海中，用以促進海灘成長保護海岸之結構物稱為離岸堤。離岸堤由於其背後波浪繞射形成蔭蔽區，波高及沿岸流速減緩，使沿岸漂砂沉澱淤積，形成突出原海岸地形之砂嘴 (caspate spit)，最後形成繫陸島 (tombolo)。離岸堤最初採用於義大利、日本，因其效果良好，美、歐漸多採用做保護海岸促進砂灘成長之結構物，唯因建設於海中結構體受力頗大需堅固，故成本極高且受施工設備之限制等使用率不高。離岸堤之長度大小及高度一般視地形及攔砂需要決定，通常採用透水堤以便漂砂能自外海滲入。離岸堤雖可使堤後累積漂砂形成海灘，但亦能使其漂砂下游側發生侵蝕。離岸堤與防波堤雖在結構上類似但功能不同，防波堤僅做阻擋波浪破壞波動消減波能之用，離岸堤則兼具減衰波浪與控制海灘安定之功能。由於離岸堤突出海面嶙峋不雅觀，故最近有採用潛堤 (submerged Breakwater) 之趨勢，即使堤頂低於平均低潮位以免破壞海岸景觀。

離岸堤建設後海岸線變化之反應主要控制因素來自鄰近海岸沿岸漂砂、向離岸漂砂、離岸堤佈置方式、波浪條件及海灘坡度與粒徑。如波向與海岸垂直入射則堤背部後波浪繞射，將土砂從堤開口輸送到遮蔽區，最後海灘線調整到與繞射波峰線成平行輸砂量趨近於停止，故 caspate spit 或 Tombolo 呈現對稱形 (參照圖 3-1)。如波浪斜向入射，則離岸堤下游側沿岸漂砂量減少導致沿岸漂砂沉積下來，caspate spit 偏在堤後下游側形成，亦能慢慢成長為 Tombolo，一旦 Tombolo 形成則沿岸輸砂完全被阻斷，無法繞過堤供應下游海岸，此後下游海岸將形成嚴重侵蝕。斜向入射波形成之 caspate 或 Tombolo 地形不對稱，其形狀因離岸堤長、離岸距離及近岸波浪條件而異。這些海岸線變化大致可由數值模擬加以預測。而最近對離岸堤背後地形變化之物理模型試驗亦不少，頗有助於地形變化之了解。離岸堤設計時必要考慮到興建後之利弊，究竟以後之海岸線成為 caspate spit 好或成 Tombolo 地形好？Tombolo 之形成可獲得寬廣之海灘，提供休閒設施及遊憩區同時可供遊客利用到

離岸堤。但如前述如波浪斜向入射之海岸有阻斷沿岸漂砂引起下游侵蝕之慮，故波浪斜向入射之海岸以採用caspate spit形海岸為宜，尤以波向有季節性變化之海岸採用caspate spit形可使大部份沿岸漂砂通過堤背繼續供應上下游，又不致於迫使漂砂通過堤前而流失到外海，對地形改變較少應較有利。

3-1 離岸堤設置目的與功能

A. 消減波能為目的

1. 減少海堤或護岸之溯升及越波，俾海堤設計高度能降低或代替海堤之加高、加強發揮第一道防線作用。
2. 為漁業養殖需要確保隱靜之水域，但同時又不妨害水質之交換，以利養殖。
3. 防止或減輕波浪入射獲得隱靜之休閒水域供游泳及海上活動之用。
4. 改變流場、波場，阻止沿岸流及離岸流。
5. 做為港灣防波堤之一部份。

B. 海堤保護

1. 防止漂砂流出外海，促進外海漂砂流入堤內。
2. 控制沿岸漂砂，促進漂砂沉澱形成海灘，供海岸保護及休閒用。
3. 促使波浪越波或碎波減小波形銳度形成有利養灘之條件。
4. 阻止或減輕海灘或海崖之侵蝕。
5. 阻止港口漂砂侵入或防止河口閉塞。
6. 防止人工養灘流失（潛堤式）。

3-2 離岸堤型式

1. 單支島堤或分隔堤（Segmented Breakwater）。
2. 潛堤或露出堤。
3. 透水堤或不透水堤。
4. 消波堤或離岸堤。
5. 拋石堤、沉箱堤、樁堤、浮堤、廢船堤。

為消減波能獲得寧靜海域及保護結構物之需要者，通常採用長度甚

長之單支島堤，為養殖及保護海灘者則多採用留有開口連續排列之分隔堤，俾使漂砂能自開口流入或有海水自開口流入流出促進交換改善水質，而同時又保有寧靜水域。為景觀環境需要或供養灘目的者通常採用潛堤式，而為養殖目的者亦有採用潛堤或浮堤，以利海水可自堤頂或堤下交流，此種型式又以灣內養殖區多採用之。在海崖或海灘保護上常於灘線附近興建消波堤阻止波浪直接衝突海崖防止侵蝕。為使水流不僅自開口流入亦可自堤身流入或排出，通常採用拋石或消波堤之透水堤，消波塊堤不但粗糙有利反射之減低亦可適當的減少斜向入射時之沿岸流減少沖刷。倘使目的僅在阻止波浪則採直立堤或混成堤亦可。

3-3 離岸堤設置位置

離岸堤之設置目的在阻止漂砂移動，在促使其背後形成砂嘴或繫陸砂洲，故其設置位置即離岸距離應有足夠於使波浪與流減衰到漂砂沉澱之最小空間，但一方面從經濟觀點言又以盡量靠近灘線才能節省工程費，亦需考慮到盡量離開地形變化大坡度陡急之處。離岸太遠設置水深太深，非但不經濟，地形變化亦較大，也會使沿岸流無法減緩不易形成繫陸島，而流及波之減衰又與開口寬度有關，故設置位置尤需配合堤長與開口比例，以及碎波位置與設置位置之比例，頗難決定一良好的法則。日本離岸堤之離岸距離有從10~300m，水深±0~8m者，但以離岸30~100m，水深3~5m者所佔比例最多，未滿水深5m者佔90%。美國CERC認為離岸距離Y必須大於離岸堤長l。

$$l < Y$$

蓋如此方能使自兩端之繞射波未達海岸線即交叉，始有機會形成繫陸砂洲， $l < 2Y$ 幾乎都形成。在開闊海岸設置水深一般介於1~8m，設置於正常碎波帶內較易促進海岸線之生長形成繫陸砂洲。如設置在碎波帶外則大部份沿岸漂砂會通過堤外海側，攔砂率較低海岸線調整較緩慢，此一做法通常在陡坡碎波帶狹之海岸採用。從波浪透過率以及水位上升言，如離岸距離不到 $1/5 \sim 1/10$ 波長，必有明顯之水位上升增加海堤越波量。

依清治等（1986）現場資料之統計，砂嘴面積比

L_e 為繫陸島高度， B_e 為其半長度（參照圖 3-2）於海岸較緩砂洲發達之 B 型海岸大約於 $1/Y \doteq 1.6$ 時 T_a 最大（參照圖 3-3）。此即表示如欲使繫陸島相對面積最大，則堤長 l 與離岸距離保時 1.6 倍最佳，而設置水深 h' 與碎波水深 h_b 之比 h'/h_b 大部實例均在 1 以下（參照圖 3-3）。以此資料看， h'/h_b 值愈大 T_a 愈大，即離岸愈遠相對堆積面積愈大。而就海底坡度陡急無砂洲之 C 型海岸，則以 $1/Y \doteq 2.0$ 時 T_a 達最大值，以後 $1/Y > 2.0$ 無明顯增加， $h'/h_b > 1$ 時， T_a 反而減小，表示設置於碎波帶外之離岸堤繫陸島面積比反小。

野田等（1983）在三維試驗中指出 $X/X_b = 0.56$ 時 Tombolo 最發達，設置於碎波帶外無漂砂透過堤輸入堤內，反之接近灘線則為迴流帶走流失，樁木則認為離岸距離要 $5/4$ 倍堤長方能堆砂。

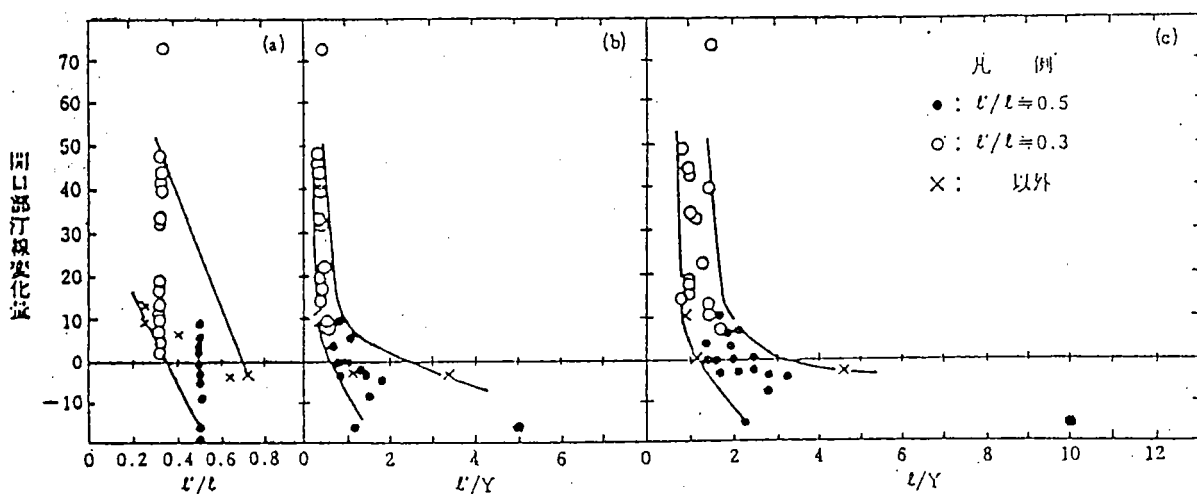


圖 3-4 開口部灘線變化量與離岸堤位置之關係

Sauvage 亦由單支堤試驗獲得 $l/L_0 = 1$ 、 $Y/L_0 > 5/4$ 時方能產生砂嘴，而篠原則得 $l/L_0 = 1.13$ 時 $Y/L_0 = 2.0$ ($Y/l = 1.76$) 時產生砂嘴。

3-4 離岸堤長度

一般離岸堤離岸愈遠每座長度愈長，同時開口亦可較大。依豐島之建議堤長與堤趾波長 L 之關係應依設置水深調整，其關係如下表：

表-1 堤長、離岸距離、堤趾水深關係建議案 (豐島)

堤趾水深(m) d		離岸距離(m) Y	堤長(m) l	開口比(m) l_o	備 註
灘線附近			(2~3) L	1L	面對外洋陡海岸每座 $l=50\sim100\text{m}$ ， $l_o=20\sim30\text{m}$ 。
小水深(<-1.0m) (陸上施工)			(3~5)L或 60~100	1L或10~30	潮差大，滿潮時長波長之浪來處堤長要長些。
中水深 (-2~-4m) (海上施工)	單堤	(1~3) L	(3~10)L 或100~300		
	群堤	(0.3~1) l 或30~100m	(2~6)L 或60~200	1L或20~50	
大水深 超過惡劣海象時 碎波帶外		依水深、繞射、 水面利用決定。			以遮蔽、碎波為目的，不期待淤砂。

亦有建議離岸距離之2倍($l=2Y$)為堤長者，依圖4-3之關係 $l/Y \div 2$ 時面積比最大，此一建議頗為合理，豐島之建議案大致亦有此比例關係。

榎木(1991)認為堤長約為半深海波波長 $l \div L_o/2$ ，或堤長約等於一波長($l=L_o$)，但設置於碎波帶外時可捕捉50~70%自上游流下之沿岸漂砂，堤長等於波長但設於碎波帶內時可捕捉全部沿岸漂砂。

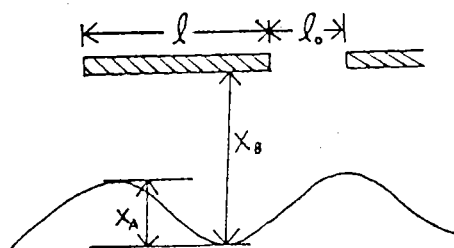
依Nir(1982)調查以色列離岸堤之地形所得結果，離岸距離介於70~216m，堤長180~314m， $X = \text{距離} / \text{長度} = 0.38 \sim 0.97$ ，平均砂嘴高度Y與X之關係為 $Y = 1.786 - 0.809X$ (m) (3-2)
即距離/長度比 $X > 2$ 時不積砂。

依據栗山、加藤(1988)歸納日本沿岸五處人工養灘之離岸堤，海灘安定後離岸堤長度 Y_b 與堤後海岸線起伏之振幅 X_a 之間大致有如下關係：

$$X_a = 0.21$$

而與海岸線最凹處之距離則為

$$X_b = 0.65l$$



唯日本海柏崎海岸則偏離此關係甚多。

開孔寬度 l_0 與離岸堤長大致維持如下關係：

$$l_0 = 0.3l \quad ; \quad l < 160\text{m}$$

$$l_0 = 1.8l - 230 \quad ; \quad l < 160\text{m}$$

故一但 X_b 條件給與，並決定 l ， l_0 之後即可由此求得 X_a 。又據川口等 (1972) 之試驗 $l = 0.73L$ 。時繫陸島之規模較大。

3-5 開口比

分隔堤開口部份一則可使水流及波浪自開口部份灌入，保持良好水質，亦可使漂砂自開口處輸入，同時亦可利用為漁船進出之用。開口部份不建造堤亦可節省不少工程費，但開口太大則波浪遮蔽不良，不利漂砂沉積，同時堤防淤升及越波量增高無法達到海岸保護之目的。如何調整堤長／開口寬比及離岸距離，才能使堤背後能產生最大攔砂量達到保護海岸之目的當為設計之重點，但到目前尚無規則可規範乃在探討中。

川口等(1972)曾由一連串之試驗，以二支離岸堤堤長一定 ($l = L_0/2$)，改變設置位置及堤長／開口比舉行試驗，觀察堤後所形成之地形，將此分為四類：

- A 型：單頭型砂嘴：二支離岸堤相連成一支堤（參照圖 3-5）。
- B 型：台字形雙頭型砂嘴：砂嘴波谷亦較原灘線前進。
- C 型：雙頭型，但開口處海岸線幾乎無變化，堤後有砂嘴介於 D、B 型間，自海岸防侵觀點乃一臨界型。
- D 型：雙頭型，但開口過寬，離岸堤後之砂嘴砂源取自中間海岸，開口部海岸侵蝕後退。

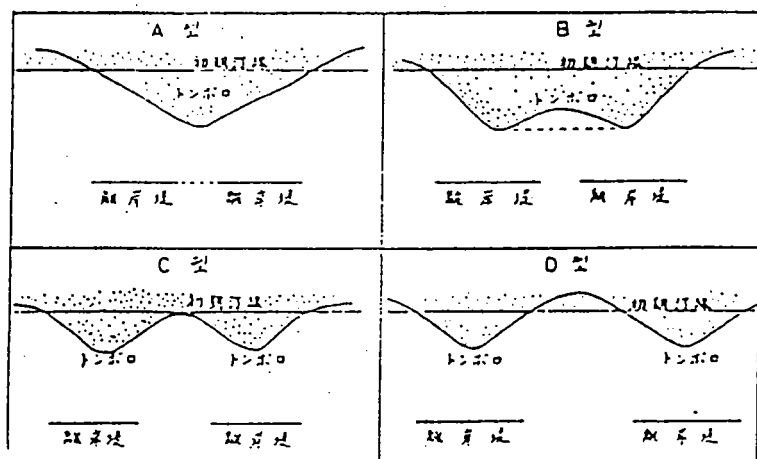


圖 3-5 開口幅變化對砂形狀之影響

歸納試驗結果如下表2及表3：

表—2 開口幅與繫陸島形狀

開口幅(o)	離岸距離 $Y=L_0$				離岸距離 $Y=0.73L_0$				離岸距離 $Y=0.46L_0$			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
0	○	—	—	—	○	—	—	—	○	—	—	—
$L_0/8$	○	—	—	—	○	—	—	—	—	○	—	—
$L_0/6$	○	—	—	—	—	○	—	—	—	○	—	—
$L_0/4$	—	○	—	—	—	○	—	—	—	—	○	—
$L_0/2$	—	—	○	○	—	—	—	○	—	—	—	○
L_0	—	—	—	○	—	—	—	○	—	—	—	○

表—3 具有海岸侵蝕防止效果之開口幅限界與離岸距離

離岸距離 Y	開口幅 l_0 (A,B,C型)	開口幅 l_0 (A,B型)
L_0	$L_0/2$ 以下	$L_0/4$ 以下
$0.73L_0$	$L_0/4$ 以下	$L_0/4$ 以下
$0.46L_0$	$L_0/4$ 以下	$L_0/6$ 以下

由此可知離岸距離短開口寬度需採較窄之寬度方能不致於使海岸侵蝕，開口寬於離岸距離 $Y=L_0$ ， $0.73L_0$ 時要 $L_0/4$ 以下， $Y=0.46L_0$ 時要 $L_0/6$ 以下方有效。

清治等(1986)依據現場資料開口寬與堤長比 l_0/l 對開口部份灘線之變化量，指出 $l_0/l \div 0.3$ 者海岸線均有前進且前進量有達 50m 者， $l_0/l \div 0.3$ 、 $l/Y > 2$ 時海岸線不前進，即離岸距離小於堤長一半海灘不見前進。而 $l_0/l \div 0.5$ 者前進後退各半，前進量最大不過 10m，後退最大達 20m。

$Y < l/2$ 時海岸後退，此原因乃開口部之波高因離岸堤之設置反較原來增加之故。

又依 Pope & Dean (1986) 調查美國離岸堤之結果指出：堤長 l 與開口寬 l_0 比 l/l_0 小，同時堤平均離岸距離 $\bar{X}$ 與水深 d_s 之比 $\bar{X}/d_s$ 小時易形成 Tombolo，反之不易，其分界大致如圖 3-6 所示，即入射能量少時形成 Tombolo，高能量傳達到海灘時不形成砂嘴地形。

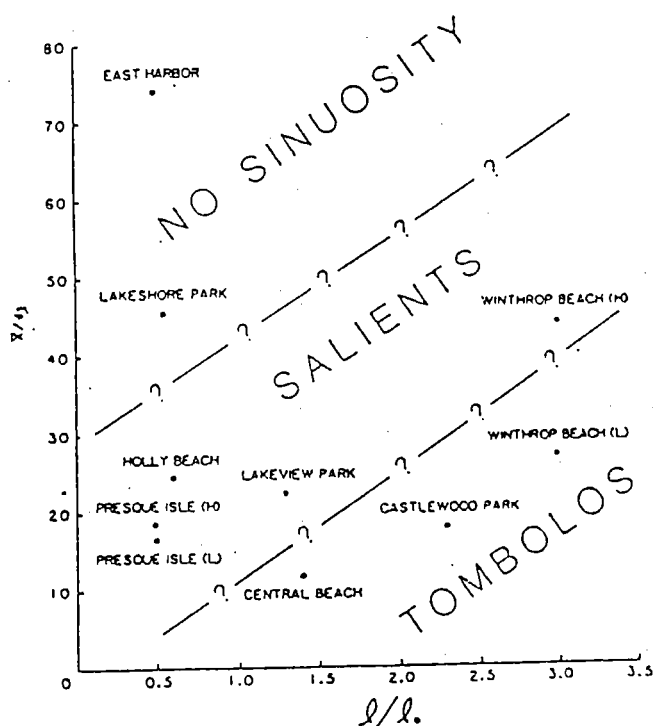


圖 3-6 離岸堤長、開口寬比與背後地形之關係圖

3-6 離岸堤高度

一般離岸堤都採用拋消波塊為多，其空隙率約在40~60%，因此堤寬對透過率之影響不如堤高大，故越波量主由堤高決定。如堤頂不高於水面則消波效果有限，因離岸堤兼有防止暴潮、越波之功能，故可考慮透過率決定。二維時波浪透過率可由下式推算：

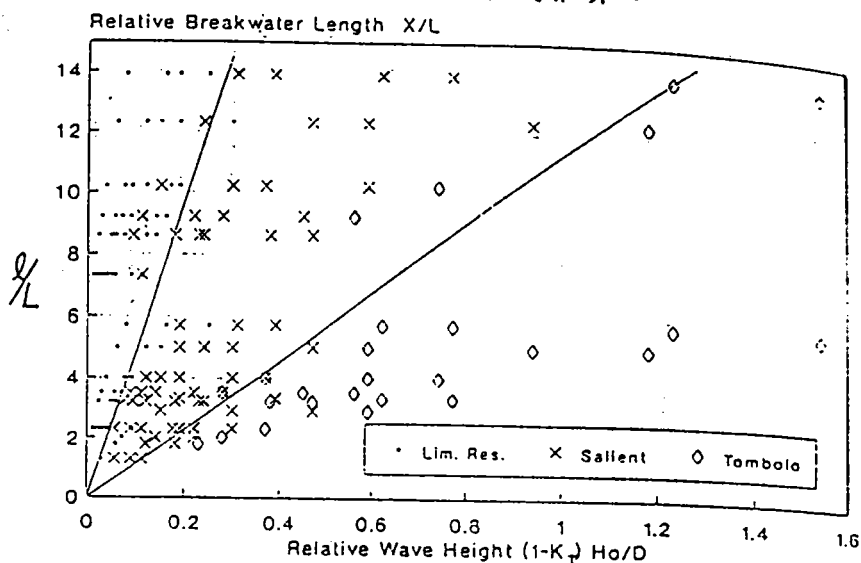


圖3-8a 單支離岸堤相對堤長與地形關係 (計算)

SHORELINE RESPONSE TO BREAKWATER

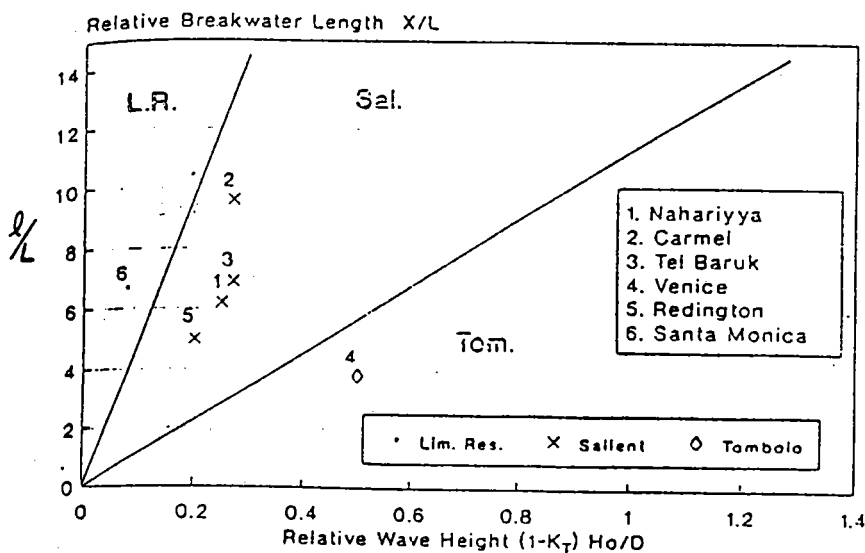


圖3-8b 單支離岸堤相對堤長與地形關係 (實例)

如為促成砂灘生長則堤高大部份維持在朔望平均高潮位上 1.0 ~ 1.5m 高或以朔望平均高潮位加 $H/2$ 為度，再考慮可能之沉陷量酌予加高。

$$EL = H.W.L + 1/2H_{1/3} + \text{沉陷量}$$

或 $+ 1.0 \sim 1.5m$

坡度平緩地形堤高可採用設置點朔望平均潮位時之水深約 0.4 倍。

3-7 沉陷量

據日本新潟海岸離岸堤調查沉陷量最大曾達 1.7m，有不織布沈床加拋石者可較無不織布者沉陷量減少至 $1/2 \sim 1/4$ ，大約施工一年內會大量沉陷，以後速度大為減緩。

3-8 消波塊重要

Hudson 公式算出之重量乘 1.5 倍，即可安定不致於散亂（散亂函數不超過 3.1%），發生散亂者均重量在 10 噸以下。整齊排列發生散亂者約為任意拋放者之半，因沉陷產生散亂者多於無沉陷者之二倍。消波堤重量未滿計算重量之 1.1 倍者散亂發生率之 30%。因波浪可自堤頂越過，碎波流速之衝擊力甚強，越波量越多愈容易沖散消波塊，故重量應比一般防波堤者加重，堤兩端應放緩坡堤或加重消波塊重量。

四、工程方法之選擇

4-1 海岸侵蝕防治方法優選系統

圖 1 為海岸侵蝕防治方法之最佳工程方法優選流程圖，根據此圖當知應蒐集何種資料，進行什麼分析。

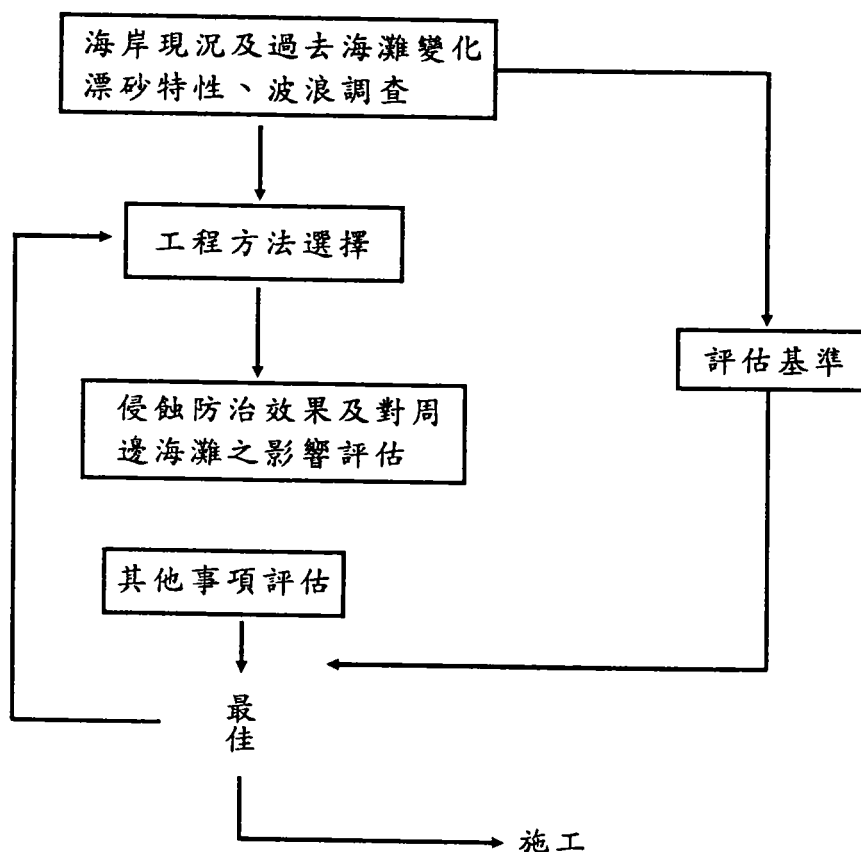
1. 海岸現況及過去之海灘變化、漂砂移動特性調查

目的在把握海岸特性，了解何種波浪來襲時可能產生何種漂砂，產生什麼地形變化。所需蒐集之資料包括：

- 水深測量資料：探討海岸特性、推斷漂砂方向、統計分析。
- 氣象資料：分析風向、風速、颱風的機率分佈及時列分析，供波浪推算參數。
- 海象資料：波浪、潮汐發生機率及代表波之決定。

- d. 底質資料：沿岸及垂直海岸方向粒徑分佈及礦物成份。
- e. 河川資料：流量、輸砂量。
- f. 水質資料：

圖 1



2. 考慮事項

選擇何種防治侵蝕之工程方法應將下列條件考慮：

a. 漂砂特性：

漂砂移動方向是為沿岸漂砂或向離岸漂砂卓越，或沿岸及向離岸漂砂兼具，其所應採用之工程方法自異。沿岸漂砂卓越之海岸應採用與海岸垂直或近似垂直方向構築之結構物；如防砂突堤及突堤群、導流堤或 Head-land 工程，用以減低沿岸流流速，減少及捕捉沿岸漂砂。

如屬向離岸漂砂海岸則應採用與海岸平行方向之結構物；如離岸堤、潛堤群等方式，用以消殺波能減低回流，減少離岸漂砂之損失。

如為沿岸及離岸漂砂均存在之海岸，則應同時採用離岸堤群及防砂突堤群之方法，或採用 T 型防砂突堤輔助波浪繞射效果改變波向及海濱流系統遏阻漂砂。

b. 海岸坡度：

坡度陡急之海岸內灘短促，可能離岸不遠即水深甚深。在此地形下興建離岸堤，則非但水深斷面大工程費高，則離岸距離不足，消浪效果不佳難獲得良好之保護效果。故以採用消波堤方式，即沿海灘線附近興建平行海岸之結構物以穩定海灘。如海岸坡度中度者當不受此限制離岸堤、防砂突堤均具成效。海岸坡度平緩者通常海灘較為寬闊可以緩坡海堤或護岸減低反射率及回流保護海岸。

c. 土砂補給來源：

如因人工結構物之興建使漂砂下游失去砂源引起海岸侵蝕，可用側渡法（Sand by-pass）將上游淤積之土砂以水力、機械方法輸送至下游補給之，使海灘保持平衡。如在侵蝕海岸鄰近地區有砂源，如河川外海可採取到砂源，亦可採用養灘（beach nourishment）以人工擴寬海灘寬度減緩海灘坡度，增加消波效果保護海灘，但此一方法通常需配合離岸堤或防砂突堤阻止土砂再流失。

d. 景觀考慮：

在海水浴場或海邊休閒地區，海岸結構物常會破壞自然海岸之景觀，影響視野，故在海岸保護結構設計上必需特別考慮配合周邊景觀，不得破壞之。故應採用較低高度，不得影響視界之海堤或護岸，或採用低堤頂之防砂突堤並使其外觀亮麗，或採潛堤等。世界有名之渡假海岸常採用緩坡階梯式護岸並配合養灘工程提高海灘品質，供遊客游泳休閒之需要。

e. 對周邊海灘之影響：

任何海岸結構物之興建或多或少必對鄰近海岸發生影響，結構物愈長其影響範圍愈廣常廣達二側 2～3 倍遠，使其影響範圍內之波浪、水流及砂灘發生變化。故除在設計應盡量採用影響較小之結構物構造外，亦應對海灘可能發生之影響予以預測。預測方法有①水工模型試驗②數

值模擬③物理數值模擬等方法。

f. 其他：

- (1) 結構物之安全性
- (2) 工程施工方法及工程費
- (3) 耐用期限
- (4) 漁業影響

5-2 各種防治方法之比較

控制海岸侵蝕之方法及原理及經驗公式亦不少，同一方法採用不同型式與施工材料及方法者亦有之，亦有不少實例可供參考各國習慣不同，但並非每一工程均成功，失敗者亦不少。茲將各種方法比較如下表：

工 法	控制目的	控制因素	利 點	弱 點	經 費	備 考
突 堤	波、沿 岸流	沿岸流速 沿岸漂砂	結構簡單	單支無效	普 通	低、斜滲透堤 為宜，不可完 全阻止沿岸漂 砂，設計準則 不明。
離岸堤	波	繞射 近岸流場 向離岸漂 砂	波場改變 大	沿岸漂砂 受擾亂， 維護不易 破壞景觀 ，外海及 下游侵蝕	高	向離岸漂砂控 制有效，海堤 反射強時可消 浪，位置選擇 不易。
人工養灘 或（及） 側 渡	海灘	坡度、顆 粒漂砂、 波能	保持漂砂 不變，吸 收波能。	需另有配 合工程或 補充砂源 。	高	需海水浴場或 新生地時。
人工礁	波	近岸流場 向離岸漂 砂	吸收波能	對沿岸漂 砂之有效 性存疑。	極高	斜向波可能導 致離岸流，有 待研究。
岬 島	波、沿 岸流	沿岸漂砂	原理依據	不利大浪	便宜	可使海岸安定 ，位置、大小 、形狀不易決 定。
緩坡堤	溯升	向離岸漂 砂	低反射、 防止暴潮	結構弱， 對沿岸漂 砂控制存 疑。	普通	無法阻止侵蝕 ，有寬前灘時 應用。
砂 丘	海灘	溯升	保持天然 景觀無結 構物。	無安全感 需大量砂 、土地。	普通	依據機率決定 斷面。
抽 水	海灘地 下水位	回降流速 降低水位	促進堆積	方法未明	低	待研究。

上述方法並非只限單獨使用，通常依侵蝕範圍大小、被保護對象之重要性，保護目的（海岸或防災）、海灘性質及漂砂方向以二種工法或以上之相互配合運用，例如：

海堤＋突堤：海堤可阻止堤後之侵蝕，但堤前海灘須賴突堤破解沿岸使海灘淤砂。

海堤＋人工養灘：堤腳及海灘填砂保護並供應下游砂源。

突堤＋海堤：突堤安定海灘，海堤防止暴潮。

突堤＋人工養灘：使海灘寬度增加，不致使下游受影響。

離岸堤＋突堤：離岸堤形成繫陸島後阻止沿岸漂砂下游因之侵蝕，突堤可用以緩和之。

離岸堤＋人工養灘：海灘更快生長，補充下游侵蝕。

離岸堤＋海堤：保護背後免被淹水。

人工養灘＋海堤：同上。

人工養灘＋突堤：同上。

人工養灘＋離岸堤：同上。

人工養灘＋海堤＋突堤：嚴重侵蝕處。