

花蓮港港灣設施改善計畫之研究

—第三子計畫：數值模擬—

- 計畫召集人：張金機 所長
- 執行單位：數學模式組
- 計畫主持人：蘇育和 研究員兼組長
- 協同研究：蔡丁貴 台灣大學土木工程系教授
- 參與人員：
- ：莊文傑 副研究員
 - ：陳明宗 副研究員
 - ：曾相茂 副研究員
 - ：陳冠宇 助理研究員
 - ：江中權 助理研究員
 - ：郭思吟 研究生
 - ：吳明全 研究生
 - ：陳毓清 行政助理

摘 要

本計畫主要引用數值方法，並配合相關現場觀測、水工模型試驗等計畫之研究，以探討花蓮港港池之靜穩度、近岸地區之波流場特性及海岸淤積現象，並提出改善方案。

現場觀測資料及數值分析顯示，影響花蓮港港池靜穩度之主要外力為颱風波浪入侵造成之長週期劇烈水位變化。颱風過境期間，觀測資料顯示颱風波浪在外海，主要成份波之週期約為15秒，並無明顯長週期成份波存在。但港池底端則有週期約160秒，波長約3,200米之長週期成份波存在。波譜分析顯示由東南方來之颱風波浪經由南濱海岸前進至港口、再進入港內，因海岸邊界、地形及狹長之港池效應，隨波浪傳遞距離增加，波長更長成份波分別在四個觀測站，由15秒 \Rightarrow 93秒 \Rightarrow 120秒 \Rightarrow 158秒成長增大。

本計畫港池之靜穩度數值計算結果經與觀測資料之比較驗證，顯示二者相當一致，證明模式應用於花蓮港之共振現象分析正確性。最後根據幾種港池改善佈置再次進行港內波浪穩靜度計算、進而分析並比較港池改善佈置之成效，在引用模型試驗及現場觀測之結果，並提出較可行之改善方案。

有關改善港池靜穩度，近程方面建議在考慮經濟效益及工程施工時效等因素，以拆除新東堤與舊東堤相鄰之新東堤段，而沿著東堤方向加建一段防波堤，開口處之淺礁區並可設置拋石潛堤，並在外海南濱海岸適當位置建凸堤群(潛堤)。在較遠程方面，則配合工程施工時程之延長及未來舊東堤改建等條件，則將上述配置沿伸之地區納入為港區，完全拆除舊東堤，並在外海南濱海岸適當位置建凸堤(潛堤)。此方案工程經費將較高，施工時程也將較長，但此方案可同時配合完成舊東堤之改建計畫，如此除了改善港池不穩靜現象，同時也解決了舊東堤因年代久遠而產生的老化問題，並且也一併解決了內港航道寬度不足的安全顧慮。

現場在東防波堤至南灣之海岸線經觀測結果，顯示部分為美崙溪口附近有淤積現象，但往南段則有侵蝕現象。數值推算析顯示，潮流及風吹流對花蓮港近岸或港口地區之地形變遷影響不大，但偏東北之颱風波浪作用下之沿岸流流場分佈，顯示一部份水流由於斜向波浪作用而向南方向流動，另一部份則在堤後形成一反向環流。環流系統將泥沙帶往美崙溪口，部份泥沙淤積於港口處。而南下方向之沿岸流因環流帶走泥沙，頓失沙源，因此造成自由街排水口以南的海岸遭受侵蝕。東北季風作用時，因波高較小，碎波帶較颱風作用時來的狹小，環流之範圍及速度皆較小，但因季風是經年累月之作用，因此其影響也不可忽視。

針對因東北季風及東北方向之颱風波浪產生之沿岸流效應，產生花蓮港近岸海岸線部分淤積及部分有侵蝕之現象。建議在南濱海岸適當位置建凸堤(或凸堤群)，除可維護該處之海岸受波浪作用，也可有效破壞環流系統，以達到保護海岸線之目的。而且此方案其又有相當程度改善現有港池靜穩度之效果，可謂一舉兩得。

花蓮港港灣設施改善計畫之研究

—第三子計畫:數值模擬—

目 錄

摘要	i
目錄	iii
壹、前言	1
貳、花蓮港港池穩靜度數值分析	5
一、港池共振數值模式—Model WE21	5
二、例子說明及港池共振特性介紹	12
三、花蓮港現場觀測之波浪特性	21
四、花蓮港現有港池之穩靜度數值分析	35
五、花蓮港改善配置港池之穩靜度數值分析	47
六、討論	50
參、花蓮港近岸海域流場數值分析	61
一、潮流數值模式—Model CT21	61
二、沿岸流數值模式—Model WL21	68
三、近岸波場數值模式—Model WP21	73
四、例子說明	75
五、花蓮港現場觀測之海流特性	85
六、花蓮港近岸海域之海流數值推算特性	119
肆、結論及建議	138
一、結論	138
二、建議	140
參考文獻	141

壹、前 言

良好的港內穩靜度，不僅能提供船舶繫靠安全之保障，更能提高裝卸速度與增進營運效率。為能快速且有效地掌握不同波浪造成港池之穩靜程度，本研究擬利用本所建立之波場推算數值模式，計算現有之港池其受不同週期入射波浪影響所形成之全港內區域波浪穩靜之程度。尤其針對必要之特定點計算其波高放大係數(amplification factor) (港內與外海波高比值)，俾利與現場觀測、模型試驗之現況分析結果比較及參考。最後根據幾種港池改善佈置再次進行港內波浪穩靜度計算、進而分析並比較港池改善佈置之成效，在與模型試驗比較，並提出較可行之改善方案。

目前港內之靜穩度大多皆以放大係數分佈來判斷，數值上之處理，一般都以所謂的橢圓型邊界值問題(elliptic boundary value problem)對待之，再配合輻射條件(radiation condition)，以求解緩坡方程式(mild-slope equation)之波函數解(wave function)。為求解任意形狀、不等深港池內任意點之振幅，本數值計算將採用有限元素法(finite element method)，此因有限元素法在處理不規則又複雜之港池問題，元素取用方便，為一很有效之數值方法。計算中將根據現場資料設定波浪由不同方向入射港內，同時考慮波浪淺化、折射、繞射及反射等效應後之港內波高分佈。

近岸流況為造成海灘地形變化之主要成因之一，其於航道附近除影響船舶進出港口安全外，在漂沙活躍區域更可能因其造成航道口淤塞或相關結構物崩壞。由於流場在近岸區甚易受水深、地形及結構物影響而改變大小及方向，加以其全面施測並不易進行，因此有必要配合現場條件進行數值模擬，俾利現場流況之掌握。為此，本流況計算之範圍將北起東防波堤外之部份，南至南濱段海岸之近岸區域。

近岸流之計算一般含蓋二類，一為潮流(tide current)，另一為波浪引致之沿岸流(near-shore current)。為能有效評估兩者對港口及其對近岸區之影響，潮流及波浪引致之近岸流將分別考慮計算，另為顧及近岸區複雜地形及港口設施等影響，數值方法仍將以有限元素法為主。

有關港池靜穩度水波數值推算問題，在地形變化不劇烈，即地形緩慢變化之海域或港池，Berkhoff(1972)提出緩坡方程式(mild-slope equation)，並引用有限元素法求解波浪之折繞射共同效應，在外海邊界上則以邊界元素法處理。Chen and Mei (1974)，Tsay and Liu(1983)發展混合元素法(hybrid finite element method)，分別求解淺水波方程式及緩坡方程式。其作法為邊界內以一般有限元素法運算，而其港口外圍邊界則以解析解形式展開。本計畫將引用本所研究開發之池共振數值模式—Model WE21(蘇、蔡,1995)，探討算花蓮港池受不同週期波浪影響所形成之港內區域波浪穩靜程度。

波浪從深海區進入近海淺水區，因地形或結構物之影響，波向及波高皆將改變，如何推算其能量分佈變化為一重要工作。早期計算近海波場之折射及淺化現象，一般引用波向線理論(wave ray theory)，波向線理論為假設波能延著波向線進行，波向線可能因地形變化改變，因此波向線間之距離可能改變，但能量為守恆，波向線間距減小，表示波高增大，但波向線理論上不能相交，因為相交點之距離為零，波高無限大為不合理，因此波向線理論無法包容波浪繞射現象。拋物線解析法(parabolic approximation)以解析包括折射及繞射現象之波場，在引用拋物線方程式(parabolic wave equation)，改進波向線理論不能容納波向線相交之現象，其理論較完整的納入繞射效應。

Tsay et al (1989)等則針對近岸地區之不規則地形及區域，引用曲線座標系統(curvilinear coordinate system)，並以數值方法計算貼壁座標系統(boundary-fitted curvilinear coordinate)，將不規則地區轉換為長方形網格系統。原有之拋物線方程式經座標轉換新座標再以差分原理，化為差分方程式。此種方法將可解決區域不規則形狀時之數值網格切割困擾。拋物型態之波方程式，在微分方程屬拋物線型，因此一般引用有限差分法建立數值模式；而波場計算則由深海推算至近岸區。拋物線模式，其理論基本上無法納入波浪之反射效應，而與海岸線之夾角需為小入射角($20^{\circ} \sim 30^{\circ}$)，也是一般之限制(Liu, 1989)。不過因為拋物線模式所解之波場變數為振幅及相位變化，因此網格點間距不必像有限元素

法模式所要求之嚴格，將可減少甚多之電腦記憶體。

本計畫將引用本所研究開發之近岸波場推算數值模式—Model WP21(蘇、蔡,1995)，探討算花蓮港外近岸地區池，受不同方向波浪作用所形成之波場分佈。

影響近岸域之流場，主要外力有潮汐作用、波力、風力、流體剪應力、科氏力、地形邊界效應、底床摩擦力等項目，而流體密度變化、濃差效應，除某些特定地區造成較大影響，一般實際情形影響不大。潮汐可視為一種淺水長波，其引致之流場稱為潮流，潮流一般較為規則化，而颱風產生之暴潮及流況則較複雜。風剪力所引起之流場稱為風吹流，其影響之深度有限。另將波浪視為一外力，其引致之流場，稱為沿岸流，波場本身即為一複雜之現象，因此沿岸流之計算較為複雜。

海域潮汐及潮流計算方面文獻中，Hansen(1962)，首先應用顯式有限差分法模擬二維暴潮水流現象。Yih and Chen(1982)以及李(1989)等人的論著，則探討有關台灣海峽的潮汐數值計算，這些文獻研究的主要重點在於整個台灣海峽大區域潮汐海流之水理分析，其結果與局部海域水理特性分析不同。

使用層化積分模式計算流在文獻中為數已然不少。Wang and Connor(1975)使用有限元素法發展出單層及雙層深度積分模式用來計算海岸地區流況。使用單層水深積分模式模擬流場可得到滿意之結果，但是流場在水深方向之變化則無法獲得。

如以數值方法模擬大範圍三維流場，首先遭遇之問題在於所考慮區域之平面尺度遠大於水深，以致於數值計算格網足以代表欲模擬區域時，格網節點數往往過多，而數值計算所需電腦容量甚大，且電腦計算時間過久；導致數值模擬大範圍，以三維流場於實際上、經濟上不可行。解決此問題之方法之一即為採用層化積分模式，李和郭(1989)建立三維多層模式，層化積分模式可區分為單層水深積分模式及多層深度積分模式，此種模式之基本精神為利用深度積分平均量表現模擬之流場特性，進而配合層次上下交界面之界條件化簡原有三維之數值計

算爲二維之計算但仍保有三維問題之特性。

潮流模式可用來計海域、港灣、河口及湖泊之三維(三度空間變化)或二維(深度平均)的水理變化。所謂流況變化即指水體內之水流速度和水位變化。至於三維或二維的選擇，三維模式適用於深水或深度變化較大的港灣與海域。但三維模式之應用需要龐大的計算容量和較長的計算時間，而且需要較多的邊界條件、參數值和水位、水流速的觀測值資料。本計畫將引用本所研究開發之二維潮流推算數值模式—Model WT21(蘇、蔡,1995)，探討算花蓮港外海受潮汐(風力)作用，所形成之潮流(風吹流)特性。

關於近岸流(nearshore current)方面，Longuet-Higgins and Stewart(1964)提出輻射應力(radiation stress)之觀念，應用於解析波浪波一流和波一波交互作用，進而合理的說明波浪溯升(set up)，下降(set down)，沿岸流(longshore current)，裂流(rip current)及沿岸流系統等現象。沿岸流場因地形變化複雜及海岸結構物配置不規則，理論計算不易，除較規則地形變化或配置簡單之結構物，可求得較簡易之流場經驗公式外，一般常引用有限差分法或有限元素法等數值方法推算流場。Nishimura(1982)，孫(1991)等引用輻射應力之觀念，使用有限差分法解析近岸流之流場，其底部摩擦項(摩擦係數)則引用不同之經驗公式表示。Liu and Lennou(1978)學者則引用有限元素法解析近岸流場。

解析近岸流場前必需先推算波浪場，再利用推算之波浪場結果，才能進一步計算流場，因此波場與流場之數值計算結果間建立橋樑爲一個重要的原則。本計畫將引用本所研究開發之沿岸流推算數值模式—Model WL21(蘇等,1995)，探討算花蓮港外海因波浪引起之沿岸流特性。

貳、花蓮港港池穩靜度數值分析

一、港池共振數值模式 — Model WE21

二維有限元素法港池波場推算模式，主要控制方程式為橢圓形式緩坡方程式(mild-slope equation)計算時將港池區分割為有限個線性三角形元素，計算區域可為緩變不等。波浪自外海甚遠處向港區方向前進，其振幅為 a_1 ，週期為 T_1 (波長為 L_1 ，波數為 k_1)，外海為等水深 h_1 ，在接近幅射界面邊界之前波浪特性不變。波浪進入港區後因繞射、折射(淺化)，反射等效應，部份波浪由幅射邊界向外傳遞，部份波浪部份留於港內，詳細模式說明如下。

考慮包括任意不規則形狀港池及緩變地形變化之近岸海域，如圖 2-1-1 平面示意圖，x 軸置於海岸線上，原點為海岸線上適當點，正 y 軸向外海方向。有限港池區(包括港內區與港口處半徑 R_a 之半圓區)稱區域 II，水深 $h_2(x, y)$ 為緩慢變化之不等水深區;港外區(稱區域 I)為外海無限範圍，為等水深區(水深 h_1)，區域 I 與區域 II 之相連邊界為半徑 R_a 之半圓(理論上不一定為半圓)，以 ∂A 表示。假設滿足不可壓縮、無黏性及非旋流之條件因此存在流速勢(velocity potential) $\Phi_j(x, y, z, t)$, $j = 1, 2$ 分別滿足三維拉普拉氏方程式(Laplace equation)

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial z^2} = 0, \quad j = 1, 2 \quad (2.1)$$

Φ_1, Φ_2 分別表示在區域 I 及區域 II 之流速勢。假設入射波 ζ_0 波向線與正 x 軸成 θ_0 角度(如圖 2-1-1)，其複數表示式為：

$$\zeta_0(x, y, t) = a_0 e^{-i[k_0(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0) - i\sigma t]} \quad (2.2a)$$

或

$$\zeta_0(r, \theta, t) = a_0 e^{-i[k_0 r \cos(\theta - \theta_0) - i\sigma t]} \quad (2.2b)$$

$$\lim_{k_0 r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial f_s}{\partial r} + i k_0 f_s \right) = 0$$

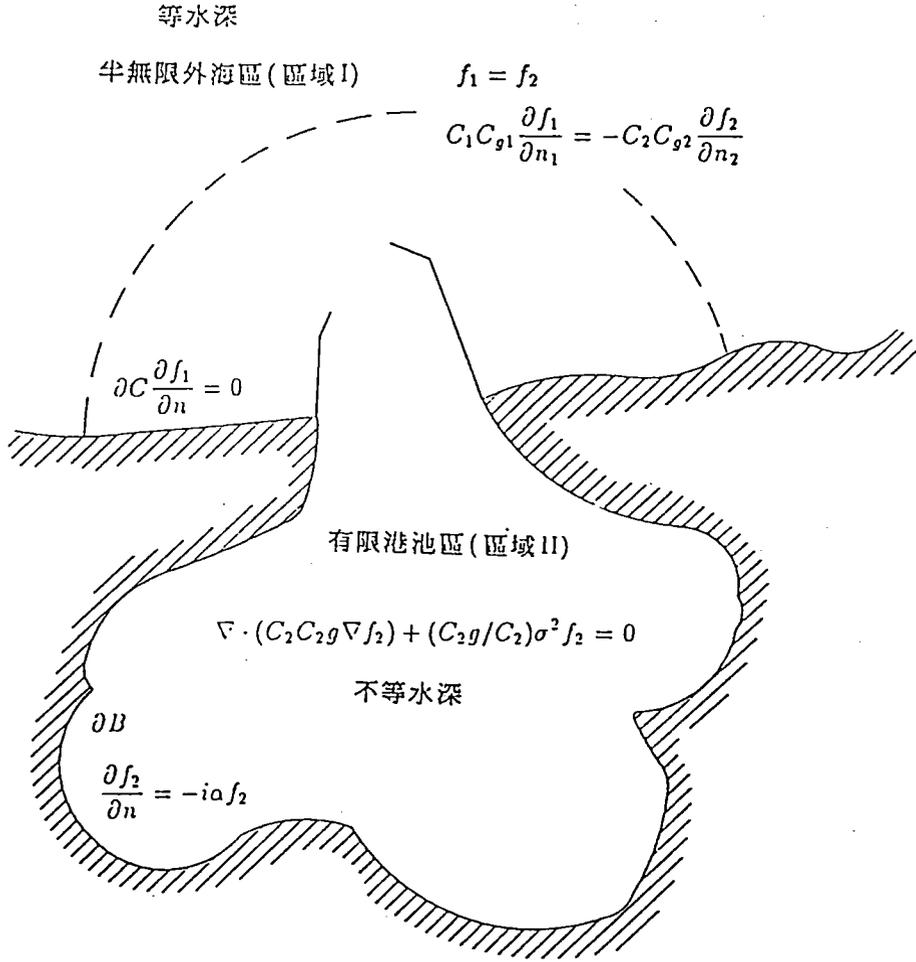


圖2-1-1 有限元素法計算區域示意圖

式中 a_0 為波浪振幅 (wave amplitude), $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta, i = \sqrt{-1}$

k_0 為週波數 (radian wave number), $k_0 = 2\pi / L_0$, L_0 為波長 (wave length)

σ 為週頻率 (radian frequency), $\sigma = 2\pi / T$, T 為波浪週期 (wave period)

區域 I 及區域 II 之流速勢 Φ_1 及 Φ_2 皆分別滿足線性自由表面動力邊界條件及運動邊界條件, 即

$$\frac{\partial \zeta_j}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = 0, \quad j = 1, 2, \quad , z = 0 \quad (2.3a)$$

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial t} + g \zeta_j = 0, \quad j = 1, 2, \quad , z = 0 \quad (2.3b)$$

式中 $\zeta_1(x, y, t), \zeta_2(x, y, t)$ 分別表示在區域 I 及區域 II 之水位變化， g 為重力加速度。

上二式可合併為

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = 0, \quad j = 1, 2, \quad , z = 0 \quad (2.3c)$$

基於入射波條件及線性理論，我們可假設水位變化 ζ_j 為週期性函數，可表示為

$$\zeta_j(x, y, t) = f_j(x, y) e^{i\sigma t}, \quad j = 1, 2 \quad (2.4)$$

式中 f_1, f_2 分別稱為區域 I 及區域 II 之波函數 (wave function)。

在外海區 (區域 I) 為等水深區，假設海底不透水，則滿足

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial z} = 0, \quad z = -h_1 \quad (2.5)$$

在有限港池區 (區域 II) 為不等深區，同理假設海底不透水，則滿足

$$\frac{\partial \Phi_2}{\partial z} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \frac{\partial h_2}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \frac{\partial h_2}{\partial y} = 0, \quad z = -h_2(x, y) \quad (2.6)$$

在外海區 (區域 I)，根據控制方程式 (2.1)，入射波條件 (2.2) 式，邊界條件 (2.5) 式及水位變化週期性條件 (2.4) 式，則流速勢 $\Phi_1(x, y, z, t)$ 可表示為：

$$\Phi_1(x, y, z, t) = A_0 \cosh[k_0(h_1 + z)] f_1(x, y) e^{i\sigma t} \quad (2.7)$$

其中常數 A_0 定義為

$$A_0 = \frac{ig}{\sigma \cosh(k_0 h_1)} \quad (2.8)$$

式中波函數 $f_1(x, y)$ 滿足下列荷姆茲方程式 (Helmholtz equation)

$$\frac{\partial^2 f_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f_1}{\partial y^2} + k_0^2 f_1 = 0 \quad (2.9)$$

且波數 k_0 滿足分散關係式 (dispersion relation)

$$\sigma^2 = g k_0 \tanh(k_0 h_1) \quad (2.10)$$

在外海區 (區域 I) 之波速為 $C_1 = L_0/T$ ，群波速 (group velocity) 為 $C_{1g} = \kappa_1 C_1$ ，式中 κ_1 定義為

$$\kappa_1 = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2k_0 h_1}{\sinh 2k_0 h_1} \right] \quad (2.11)$$

在有限港池區 (區域 II)，假設深度為緩慢變化，流速勢 $\Phi_2(x, y, z, t)$ 表示為：

$$\Phi_2(x, y, z, t) = A_0 \phi_2(x, y, z) e^{i\sigma t} \quad (2.12)$$

式中 ϕ_2 為波函數。

我們引用 Booij(1981) 修正 Berkhoff(1972) 提出之一階修正緩坡方程式 (modified mild slope equation)：

$$\nabla \cdot (C_2 C_{2g} \nabla f_2) + (C_{2g}/C_2 + i\sigma E_0) \sigma^2 f_2 = 0 \quad (2.13a)$$

式中 $f_2(x, y) \cosh[k(h_2 + z)]$ 為波函數 $\phi_2(x, y, z)$ 之一階項， $f_2(x, y)$ 為二維波函數， E_0 為每單位波能密度之能量消散。 $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$ 二維梯度運算子， $C_2 = L_2/T$ 為波速， $k_2 = 2\pi/L_2$ 為波數， $C_{2g} = \kappa_2 C_2$ 為群波速 (group velocity)， κ_2 定義為

$$\kappa_2 = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2k_2 h_2}{\sinh 2k_2 h_2} \right] \quad (2.13b)$$

在淺水波 (shallow water wave)， $k_2 h_2 \ll 1$ ， $C_2 = \sqrt{g h_2}$ ， $C_{2g} = C_2$ ，則方程式(2.13)可簡化為

$$\nabla \cdot (h_2 \nabla f_2) + (\sigma^2/g + i\sigma E_0/g) f_2 = 0 \quad (2.14)$$

在深水波 (deep water wave)， $k_2 h_2 \gg 1$ ， $C_2 = g/\sigma$ ， $C_{2g} = 0.5C_2$ ，則方程式(2.13)可簡化為修正荷姆茲方程式

$$\frac{\partial^2 f_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f_2}{\partial y^2} + (k_2^2 + \frac{i\sigma E_0}{g h_2}) f_2 = 0 \quad (2.15)$$

荷姆茲方程式(2.9)及修正緩坡方程式(2.13)分別為港外區及有限港池區之主要控制方程式。

假設外海岸線為平直向兩測無限延伸，海岸為平緩海灘，波浪入作用於海岸時反射波幾乎不存在，入射波也甚小，則 f_1 在海岸線 (以 ∂C 表示) 滿足

$$f_1 = 0, \quad \text{on } \partial C \quad (2.16)$$

外海地區之波函數 f_1 ，除包括入射波 f_0 ，還包括港內由港口向外散射之散射波 f_s ，表示為

$$f_1 = f_0 + f_s \quad (2.17)$$

其中散射波在無窮遠處，滿足輻射條件(Sommerfeld radiation condition)

$$\lim_{k_0 r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial f_s}{\partial r} + i k_0 f_s \right) = 0 \quad (2.18)$$

假設港池以多孔消波體設計為內壁，則其邊界上(以 ∂B 表示)應滿足多孔邊界條件

$$\frac{\partial f_2}{\partial n} = -i\alpha f_2 \quad \text{on } \partial B \quad (2.19)$$

式中 α 為阻尼係數(impedance coefficient)。

在區域 I 及區域 II 之界面處 ∂A ，應分別滿足波函數及波函數之法線方向導數連續條件：

$$f_1 = f_2 \quad \text{on } \partial A \quad (2.20a)$$

$$C_1 C_{g1} \frac{\partial f_1}{\partial n_1} = -C_2 C_{g2} \frac{\partial f_2}{\partial n_2} \quad \text{on } \partial A \quad (2.20b)$$

式中 \vec{n}_1 及 \vec{n}_2 分別表示區域 I 及區域 II 在界面向外法線方向之單位向量， $\vec{n}_1 = -\vec{n}_2$ 。

使用混合元素法(hybrid finite element method) (Chen 及 Mei, 1974)，(Tsay 及 Liu, 1983)以求解上述橢圓型態緩坡方程式之邊界值問題。在有限港池區域 II 為有限範圍，切割為有限個三角形元素，以求解元素結點上之未知波函數，外海區域 I 為無限範圍，我們則應用特徵函數(eigenfunctions)表示法(Tsay 及 Liu, 1983)，將波函數 f_1 之各成份波 f_0 、 f_s 分別展開。根據變分法(calculus of variation)之極小化原理，上述控制方程式，邊界條件及區域分割原理(包括邊界連續條件)，可得定態泛函數(stationary functional)，並化為矩陣方程式，再由高斯消去法(Gaussian elimination)求解。

港池放大係數R我們定義為港內任意點 \vec{x} 之振幅對港口外之入射波之振幅的比值，表示如下：

$$R(\vec{x}) = \left| \frac{f_2(\vec{x})}{f_0(\vec{x}_0)} \right| \quad (2.21)$$

式中 \vec{x} 港內任一點， \vec{x}_0 為港口外任一點。

二、例子說明及港池共振特性介紹

將取用縱深 $\ell = 1.021$ 英呎 (0.311m)，寬 0.207 英呎 (0.006m)，等水深 $h=0.844$ 英呎 (0.257m) 之開口矩形港池，並假設其外海之海岸線皆平直向兩側無限延伸，做為有限元素法模式之計算例子說明。有限元素法模式矩形港池之三角元素切割大小及結點編號，如附圖 2-2-1，此處將取矩形港池之端點 A(0,-0.311m) 作觀察點，當波浪由外海正向入射作用於港池，圖 2-2-2 為矩形港池之無因次波浪參數 ℓ/L 與放大率 R 之相關曲線圖，實線為有限元素法模式，虛線為 Lee(1969) 邊界元素法模式，圓圈點為 Ippen and Goda(1963) 之試驗結果，實心黑點則為 Lee(1969) 之試驗結果，數值計算結果與試驗結果趨勢甚為吻合。

對開口一維不透水矩形港池(長度遠大於寬度)之自然共振週期 T ，Merian's 公式(Wilson, 1972)表示為：

$$T = \frac{2\ell}{(2n+1)\sqrt{gh}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.22)$$

式中 ℓ 為港池長度， g 為重力加速度， h 為水深。如以無因次參數 ℓ/L 可表示為：

$$\frac{\ell}{L} = \frac{2n+1}{4} = \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, 1\frac{1}{4}, 1\frac{3}{4}, 2\frac{1}{4}, 2\frac{3}{4}, \dots \quad (2.23)$$

式中 L 為波長。即產生共振之條件時，開口處為駐波節點，即開口處水位為零；港池底端為駐波奏點，即底端處水位變化最大。可能發生之共振波長分別為 4ℓ 或 $4/3\ell$ 或 $4/5\ell$ 或 $4/7\ell$ 等倍數之港池長度。

根據數值模式推算上述不透水矩形港池(長與寬之比約為 5) 因波浪引起之共振(開口處滿足水位連續及速度連續條件)，前兩個共振點分別發生在無因次參數 $\ell/L = \frac{1}{4.8}$ 及 $\ell/L = \frac{3}{4.5}$ ，相較 Merian's 公式估計值 $\ell/L = \frac{1}{4}$ 及 $\ell/L = \frac{3}{4}$ 甚為接近，但略小。

根據數值模式推算一不透水矩形港池之第一共振點發生在長週期；其位於處港池底端之放大係數約為8(如圖2-2-2)，即共振時底端之波高可為原來8倍之多，但短週期之第二共振點處放大係數略小於3，相對較小。此顯示在不考慮能量消散之效應，一般長週期之共振也較短週期為大。其次一般短週期之波浪，比較容易受如防波堤結構物之遮蔽，透水邊界能量消散及地形摩擦等效應之影響，而在進入港內後快速減衰，因此港外短週期成份波進入港內後迅速衰減，但長週期之波能相較則不易受遮蔽效應，或透水牆波能消散影響，且隨週期之增大，波長之增長影響之程度遞減，因此長週期波浪對港池共振之影響一般較短期波浪為大，也較為重要。

圖2-2-3為矩形港池在沿港池縱向(y向)，即從底端至港口第1點($y = -\ell$)至第9點($y = 0$)，在港池中線 $x=0$ 之無因次波浪參數 ℓ/L 與放大率 R 之相關曲線圖。圖中不同曲線代表沿沿港池縱向不同位置之共振曲線，而在三個共振點處顯示底端之放大率 R 值最大，港口最小，在部份位置共振曲線並有結點存在。此現象表示共振發生時，港區內水位並非全面性的抬昇，而是部份地區可能產生甚大水位抬昇，但有些地區水位抬昇現象並不明顯，港區每一點發生共振之週期並不完全相同。

若港池岸壁為部分反射體，根據蘇(1993)解析之結果，消波岸壁港池之消波特性主要由阻尼係數(impedence) α 決定其物理特性，阻尼係數 α 為一複數，其實部之物理意義相當於電學之電阻(resistance)，主要決定作用於消波岸壁後之反射波振幅大小；其虛部則相當於電學之電抗(reactance)，主要決定入射波與反射波之相位差。在假設無相位差及正向波作用之條件下，阻尼係數與反射係數 C_r 之關係式，根據蘇(1993)可表示為

$$\alpha = -k_0 \frac{1 - C_r}{1 + C_r}, \quad 0 \leq C_r \leq 1 \quad (2.24)$$

同樣取矩形港池之端點A(0,-0.311)作觀察點，當波浪由外海正向入射作用於港池($\theta_0 = 270^\circ$)，圖2-2-4為端點A之無因次波浪參數 ℓ/L 與放大率 R

之相關曲線圖，不同曲線代表不同反射係數($C_r=1,0.99,0.97,0.95,0.8,0.7,0.5$ etc)。圖中顯示隨反射係數 C_r 之減少，在共振點之放大率快速的減少，顯示反射係數將影響共振大小甚巨。

數值計算顯示矩形港池岸壁若為不透水全反射體，產生之共振效果甚為強大，但一般實際港池確甚少發生此類現象，其原因乃實際之港池岸壁不可能為全反射體，而為部分反射體，且隨岸壁之透水性不同，或作用波浪週期不同，岸壁有不同之反射係數。根據數值推算上述狹長矩形港池，發現隨反射係數之減少，共振點之放大係數快速的減少，例如反射係數為0.90時放大係數已降至2以下(如附圖2-2-4)，此點說明實際港池共振放大係數不可能甚大，否則颱風波高若為10米，放大係數為2之港內波高將可達20米，將是個甚危險狀況。

若港池岸壁引用含有透水牆及消波室設計之消波體設計(蘇, 1993)，其消波特性與孔隙牆(以多孔影響參數 G_0 描述)及消波室寬度(d/L)等因素有關。此處 α 為實部及虛部皆不為零之複數，蘇(1993)發現港池共振週期及其放大率皆可能改變，如附圖2-2-5， α 之虛部主要影響共振週期之變化，其值為負數時，將增長原有共振週期，其絕對值愈大改變愈大，反之其值為正數時，將減短原有共振週期，其絕對值愈大改變也愈大；實部則影響振幅大小，其絕對值愈大能量消散也愈大。在實際應用時，對一不透水直立壁港池，或可引用消波體設計之岸壁改變某個共振週期，以減低可能發生共振之放大率。

進一步考慮港口寬度與縱深長比值不同，對共振現象之影響。圖2-2-6為矩形港池之端點之無因次波浪參數 ℓ/L 與放大率 R 之相關曲線圖，不同曲線代表水深相同但不同矩形港池寬度與縱深長比值(1:1, 1:2, 1:4, 1:6等)。圖中顯示開口愈小發生之共振反而愈大，此即所謂港口矛盾論(Harbor paradox)之現象(Miles and Munk, 1961)。不過開口小之共振之尖度及頻寬也愈窄，表示發生共振之週期範圍較窄。

Node and Element in region

Rectangular Harbor (0.311m=0.060m) F-A REA1111.DAT

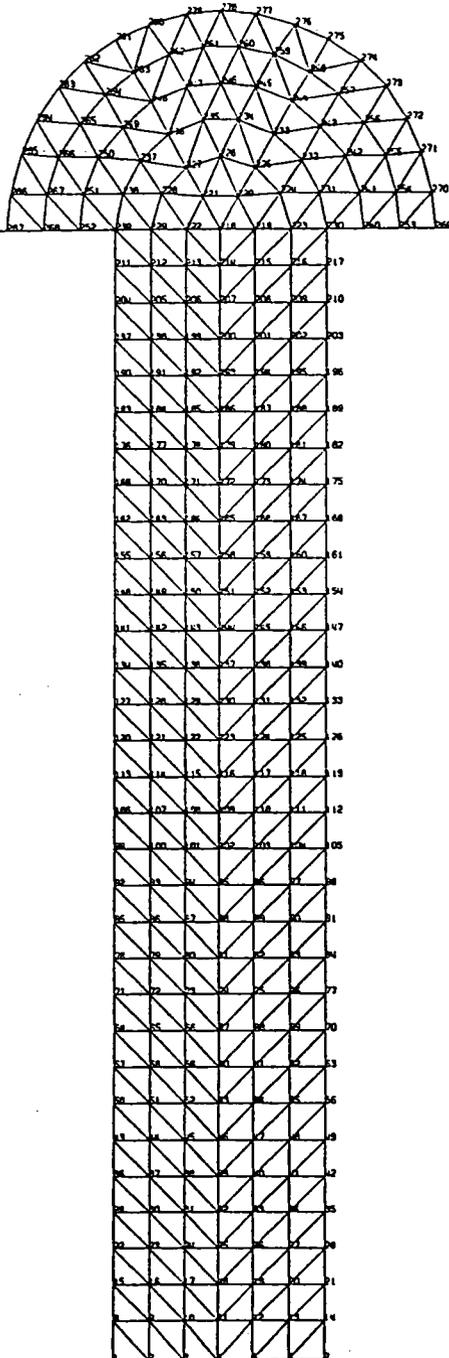


圖2-2-1 Model WE21矩形港池三角形元素分割及結點編號示意圖

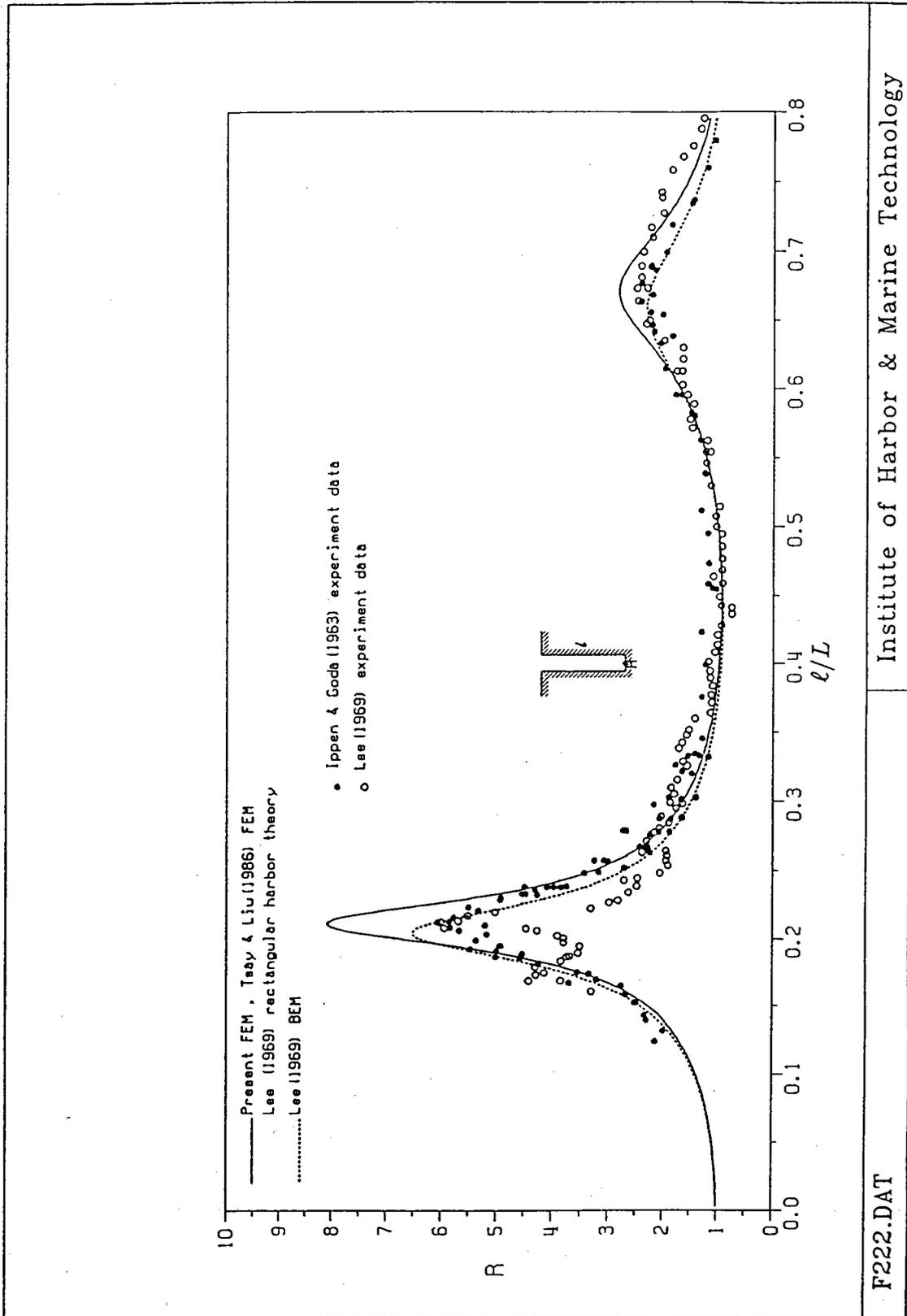
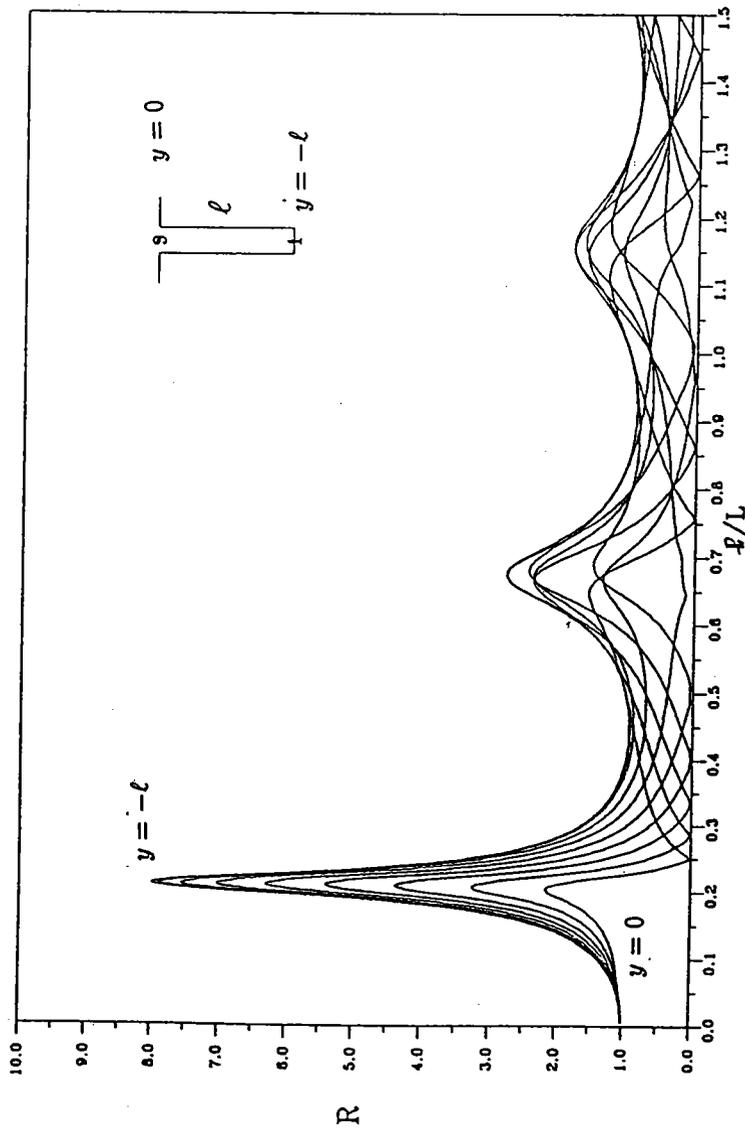


圖2-2-2 矩形港池端點處波浪參數 l/L 與放大係數 R 相關曲線圖

Rectangular Harbor(0.31jm*0.060m) F-A REAIL12.DAT
 NO.1 ang=270 T= .36sec l/L= 1.500 B/L= .288 C r=1.00 h= .26m
 NO.9 ang=270 T= .36sec l/L= 1.500 B/L= .288 C r=1.00 h= .26m



REAIL21.OUA

P11A8N.FOR

Institute of Harbor & Marine Technology

1985.9.27

圖2-2-3 矩形港池沿港池縱向(y向)之波浪參數 l/L 與放大係數 R 相關曲線圖

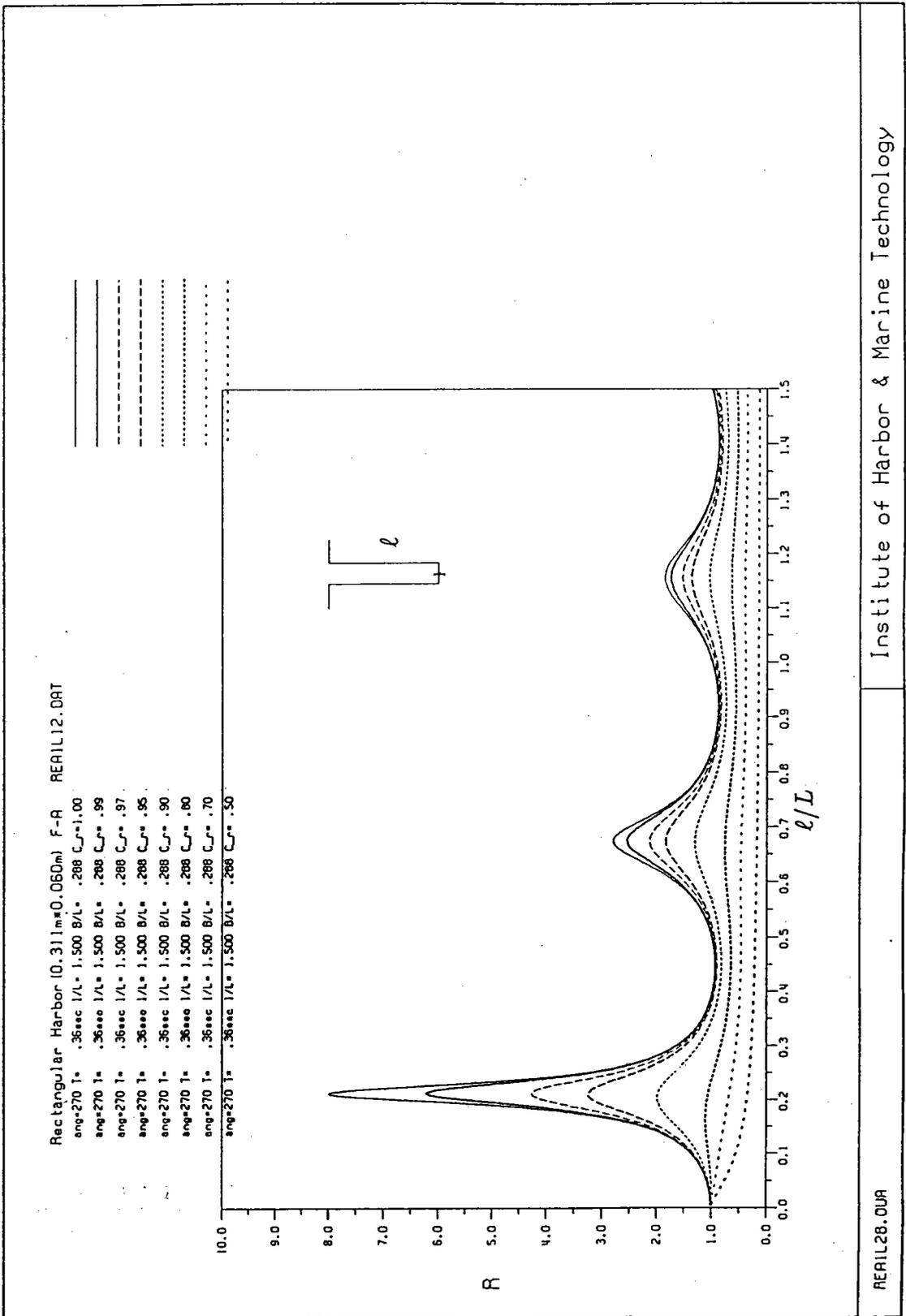
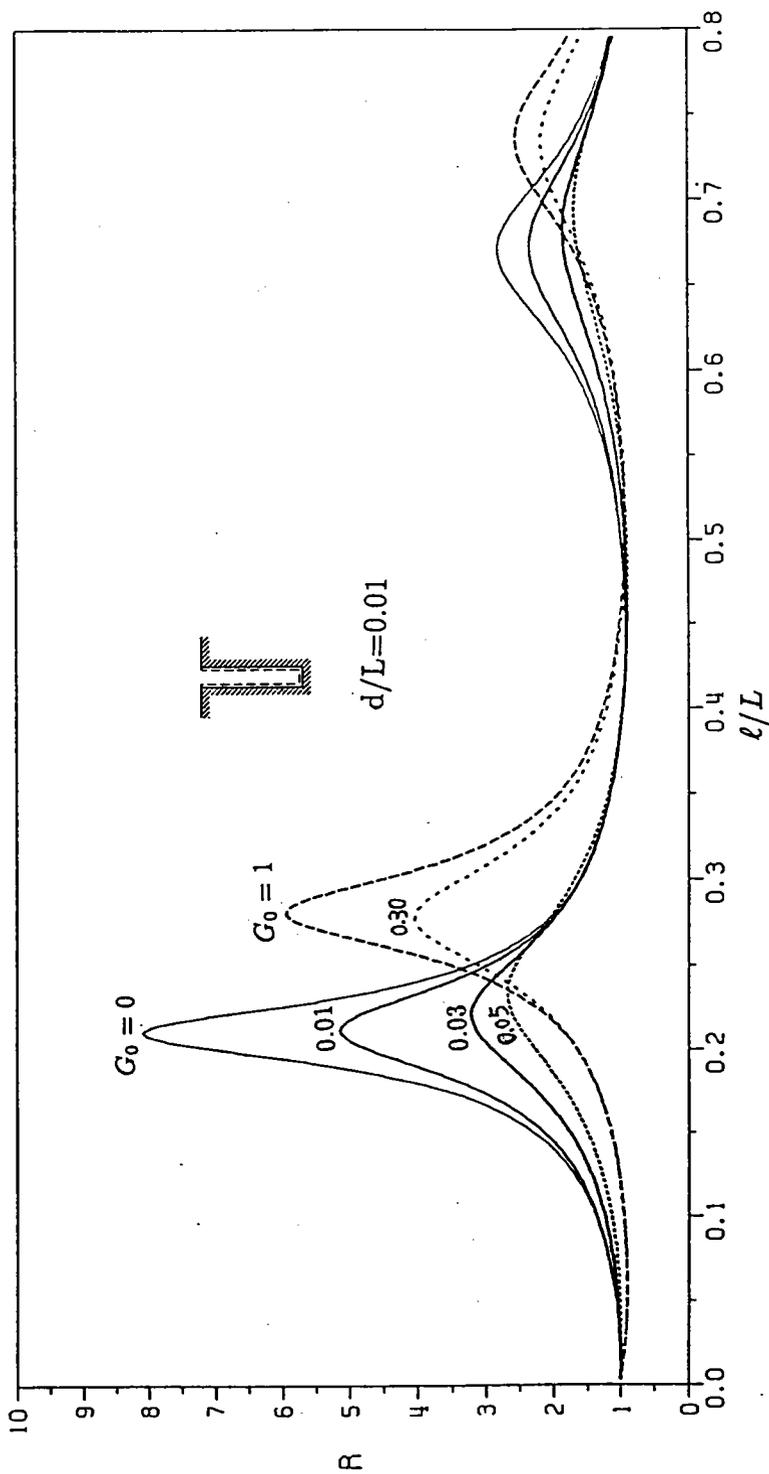


圖2-2-4 矩形港池端點處考慮不同反射係數 C_r 之波浪參數 l/L 與放大係數 R 相關曲線圖



F225.DAT

Institute of Harbor & Marine Technology

F225.P02

1993.8.27

圖 2-2-5 消波體岸壁矩形港池端點處波浪參數 l/L 與放大係數 R 相關曲線圖 (引自蘇, 1993)

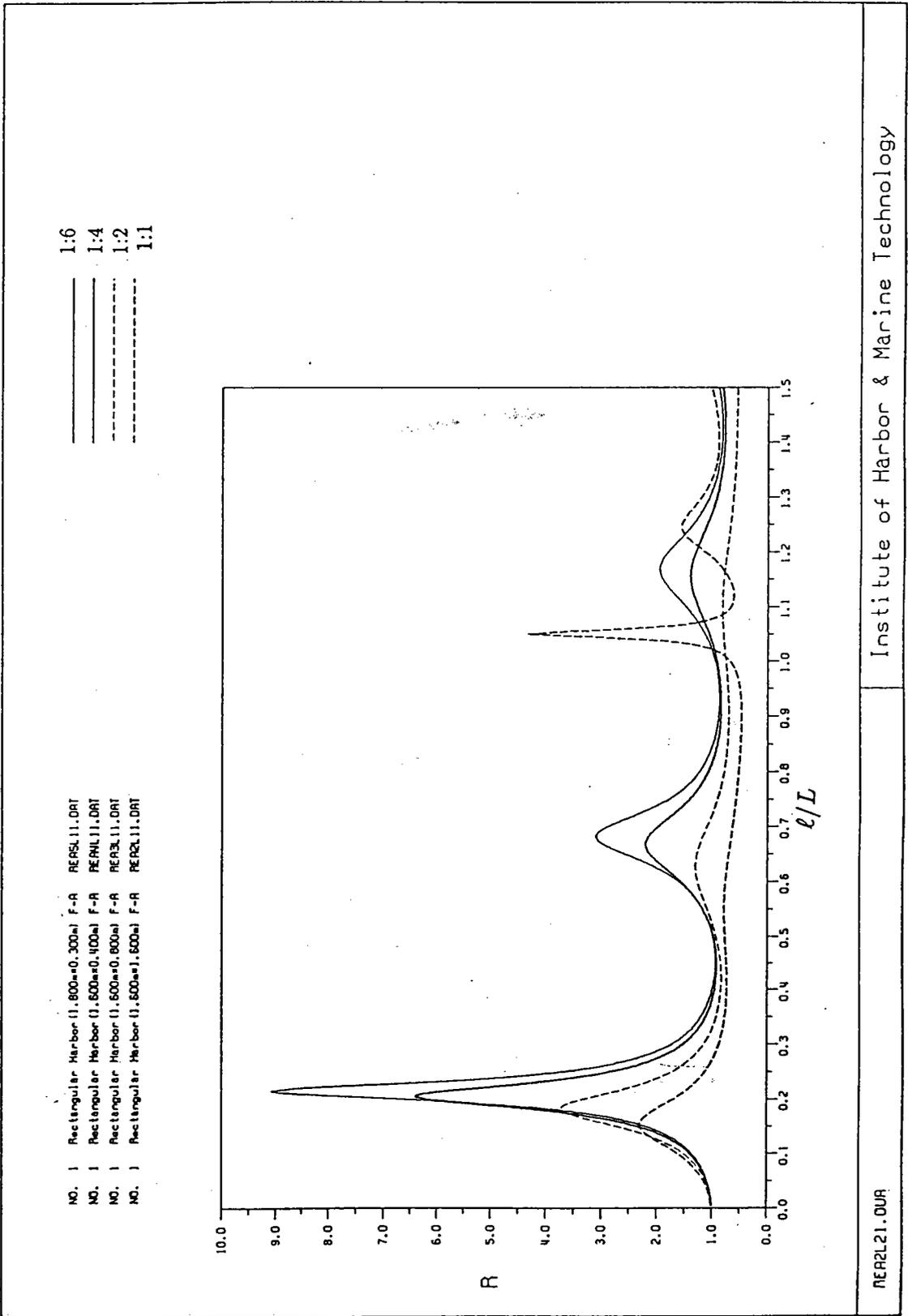


圖 2-2-6 矩形港池端點處考慮不同寬與長比值之波浪參數 l/L 與放大係數 R 相關曲線圖

三、花蓮港現場觀測之波浪特性

花港港池形狀及位置如附圖2-3-1。花蓮港位於台灣東部，面臨太平洋，港池座向西南，港口至港池底端呈夾長形，縱身長約4公里，港口寬約300米左右，港池內航道甚窄小寬度約80米，整個港池形狀近似漏斗狀。圖2-3-2則為港港區地圖經數位板輸入電腦數位化之水深分佈圖，港區入口水深約為16米，港內航道水深為10米左右，港區之水深變化並不劇烈。港外因面臨太平洋，地理特性因素，離岸500米水深快速下降，部分地區離岸不及1公里水深可達70米。影響花蓮港港池靜穩度之主要外力為颱風入侵造成劇烈水位變化，港內船舶繫泊困難，更有因而斷纜。

根據前年1994年7月強烈颱風提姆(TIM)於8日侵台，其路徑如附圖2-3-3，颱風提姆(TIM)於8日在菲律賓東方海面形成，強度快速增加向西北進行直撲台灣，於10日20時10分從花蓮縣秀姑巒溪口登陸，11日凌晨在台中附近出海，根據經驗從台灣東南方向侵襲之颱風因正向花蓮港口，影響花蓮港最劇烈。此次颱風侵襲時，正逢農曆初二大潮之滿潮段(19時30分)登陸，強風大浪，加上海水高漲，因此造成東防波堤近600公尺的胸牆破損及運砂船在10號碼頭斷纜之災害。此次颱風期間，本所在東堤之東北方外海(以#00表示)，西防波堤之西南方港口處(以#05表示)、10號碼頭(以#10表示)、8號碼頭(以#8表示)及22號碼頭(以#22表示)皆設置有波浪觀測站，其位置如附圖2-3-2。取7月8日16時觀測約半小時之典型現場五個觀測站資料分析之颱風波浪特性如下:圖2-3-4a，圖2-3-4b，圖2-3-4c，圖2-3-4d，圖2-3-4e，分別為各測站之部份時段觀測之逐秒水位變化圖，圖2-3-5a，圖2-3-5b，則為分別比較東堤之外海處(編號#00)及外港口(編號#05)兩處之水位變化，及比較港內#8、#10、#22三個碼頭附近之觀測資料。表2-1則為5個觀測站之波浪統計特性，其中示性波高 $H_{1/3}$ 及，示性週期 $T_{1/3}$ 分別如下:

外海(#00)	: $H_{1/3} = 10.2$ 米	$T_{1/3} = 14$ 秒
外港口(#05)	: $H_{1/3} = 5.0$ 米	$T_{1/3} = 14$ 秒

8號碼頭(#8)	: $H_{1/3} = 1.5$ 米	$T_{1/3} = 70$ 秒
10號碼頭(#10)	: $H_{1/3} = 1.1$ 米	$T_{1/3} = 88$ 秒
22號碼頭(#22)	: $H_{1/3} = 2.8$	$T_{1/3} = 18$ 秒

表2-1顯示外海示性波高達10米(最大波高15米)，示性週期14秒，而外港口處示性波高也達5米(最大波高約6米)，示性週期同樣為14秒，外港口處相對較外海之示性波高比值約為0.5。22號碼頭相對外海之示性波高比值約為0.27，其示性週期18秒較外海示性週期14秒稍大。8號及10號碼頭之相對外海示性波高比值略小則分別為0.11及0.17，但示性週期則分別為外海示性週期之5倍及6倍，顯示8號及10號碼頭處有明顯之長波存在。

為進一步了解各測點之不同成份波之波高大小，進一步做波譜分析，圖2-3-6a，圖2-3-6b，圖2-3-6c，圖2-3-6d，圖2-3-6e分別為各觀測點之能譜圖，圖中橫軸為成份波頻率(1/sec)，縱軸為成份波之波高譜(m)。圖2-3-7a，圖2-3-7b，圖2-3-7c，圖2-3-7d，圖2-3-7e同樣為各測點之能譜圖，僅圖中橫軸改為成份波週期(sec)，縱軸為成份波之波高譜(m)。圖2-3-6可較明顯查看短週期之波高譜值，但圖2-3-7可較明顯查看長週期之波高譜值。圖2-3-8a及圖2-3-8b則為比較各觀測點之不同成份波波高譜大小之波譜圖。外海(#00)主頻分別在14.8秒(波高譜值2.9)及16.7秒(波高譜值2.8)二個尖峰，顯示週期15秒附近為主要成份波，其他頻率則無相對尖峰值存在。外港口(#05)主頻分別在15.5秒(波高譜值1.0)及16.0秒(波高譜值1.0)二個尖峰，顯示週期15秒附近也是為主要成份波，其他副頻則落在93秒(波高譜值0.5)或45秒(波高譜值0.40)，或39秒(波高譜值0.3)處。8號及10號碼頭之主頻則落在158秒附近，波高譜值皆為0.50，其值遠較港外之值為大，但短週期則無相對尖峰值存在，其波高值皆甚小；10號碼頭其他副頻則落在82秒(波高譜值0.2)或44秒(波高譜值0.3)，或34秒(波高譜值0.1)處；8號碼頭其他副頻則落在113秒(波高譜值0.4)或98秒(波高譜值0.4)，或82秒(波高譜值0.3)處，或47秒(波高譜值0.3)處等處。10號碼頭及8號碼頭同樣位於港池後端處，因此波譜分佈甚為相似；但因8號碼頭與10號碼頭分別落在隔離之凹形水域，而且

8號碼頭又較10號碼頭更接近端點，因此兩地之波譜分佈也不盡相同。概略而言，8號及10號碼頭主要為長波成份，短週期波成份不明顯。22號碼頭之成份波分佈則甚為廣泛，如在對應外海之主頻14秒，16秒及17秒附近也有較大尖峰值存在，其他尖峰值則在40秒至200秒間皆有存在。顯示22號碼頭主要成份為短週期波，而長波成份也存在，但短週期波成份大於長週期波。

現場波浪分析顯示，外海(#00)、外港口(#05)、22號碼頭、10號碼頭與8號碼頭各處之波浪特性不同。此處將作更詳細之比較，外海(#00)測站在較外海之主要成份波為約15秒之短週期波浪，長波成份並不明顯，但波浪沿南濱海岸前進至外港口(#05)、再進入港內到達22號碼頭，最後再傳至10號碼頭與8號碼頭處，不同位置各成份波已有明顯變化。例如較短週期主頻15秒週期之成份波，在外港口處(#05)(如圖2-3-6b)僅為外海站(#00)(如圖2-3-6a)之一半，即外港口處(#05)相對較外海(#00)之示性波高比值約為0.5，此成份波進港後在22號碼頭(即離港口較近)能量繼續消散(如圖2-3-6c)，波高較外港口處(#00)減小，但尚有部分能量存在；而最後在進入在港池底端，即8號碼頭或10號碼頭處(如圖2-3-6d,e)能量已幾乎不存在。

但在較長週期之成份波方面，則由外海站(#00)顯示長波並不明顯存在(圖2-3-7a)，但波浪沿南濱海岸前進至外港口(#05)處，可能因海岸邊界及地形效應，如93秒之波長較長之成份波(波高譜值0.5)處能量相對增大(圖2-3-7b)，當波浪進入港內到達之22號碼頭處，如120秒(波高譜值0.3)及146秒(波高譜值0.3)之波長更長之成份波能量相對增大(圖2-3-7c)。最後波浪傳遞至港內端點之8號碼頭及10號碼頭處，如158秒(波高譜值0.5)之波長更長之成份波能量相對又增大(圖2-3-7d,e)。以上分析顯示隨波浪傳遞距離增加，波長更長之成份波由15秒 \Rightarrow 93秒 \Rightarrow 120秒 \Rightarrow 146秒 \Rightarrow 158秒等能量相對增大。

一般短週期之波浪，比較容易受如防波堤結構物之遮蔽，透水邊界能量消散及地形摩擦等效應之影響，而在進入港內後快速減衰，因此

港外主頻15秒左右短週期成份波進入港內後迅速衰減。但長如50秒甚至93秒週期之波能相較則不易受遮蔽效應，或透水牆波能消散影響，且隨週期之增大，波長之增長影響之程度遞減，因此長週期波浪對港池共振之影響一般較短期波浪為大，也較為重要。根據數值模式推算一不透水矩形港池之第一共振點發生在長週期；其位於處港池底端之放大係數約為8(如圖2-2-2)，即共振時底端之波高可為原來8倍之多，但短週期之第二共振點處放大係數略小於3，相對較小。此也顯示長週期之共振也較短週期為大。

花港港整個港池形狀近似漏斗狀，港口至港池底端呈夾長形，縱身長約4公里，港口寬約300米左右，港池內航道甚窄小寬度約80米，港區之水深約為十幾米左右，如以Merian's公式(2.22)估算，假設港池長 $l=4,000\text{m}$ ， $g=9.8\text{ m/sec}^2$ ， $h=10\text{ m}$ ，則可能發生之共振週期如下： $T=800$ 秒，267秒，160秒，114秒，89秒，73秒，62秒，53秒，47秒，42秒....等。其中第三個共振週期 $T=160$ 秒與觀測值 $T=158$ 秒甚為接近，其他如114秒、89秒、47秒及42秒等附近，各觀測點之能譜圖，也顯示相對週期之成份波存在。

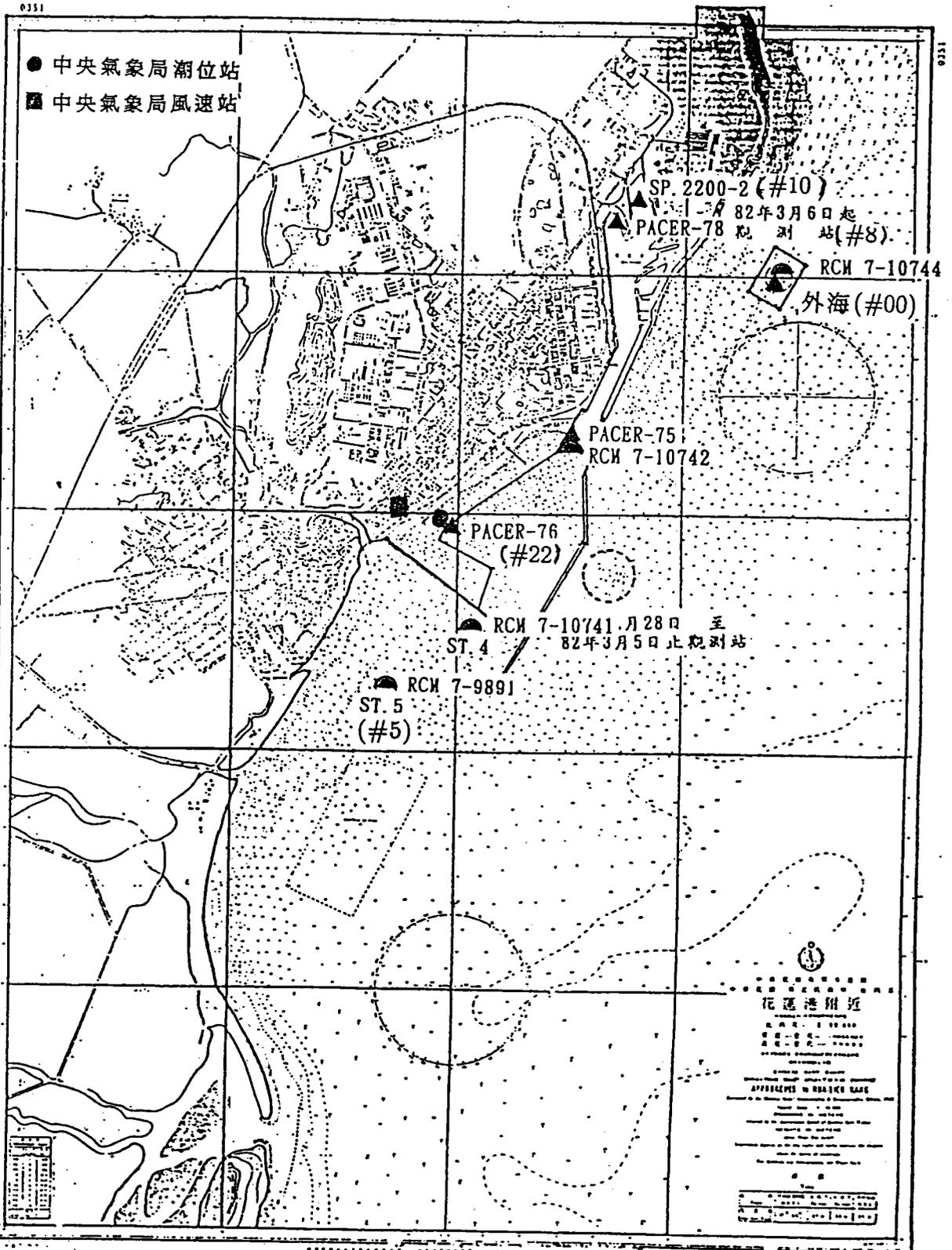


圖2-3-1 花港港池形狀及海氣象觀測站位置示意圖

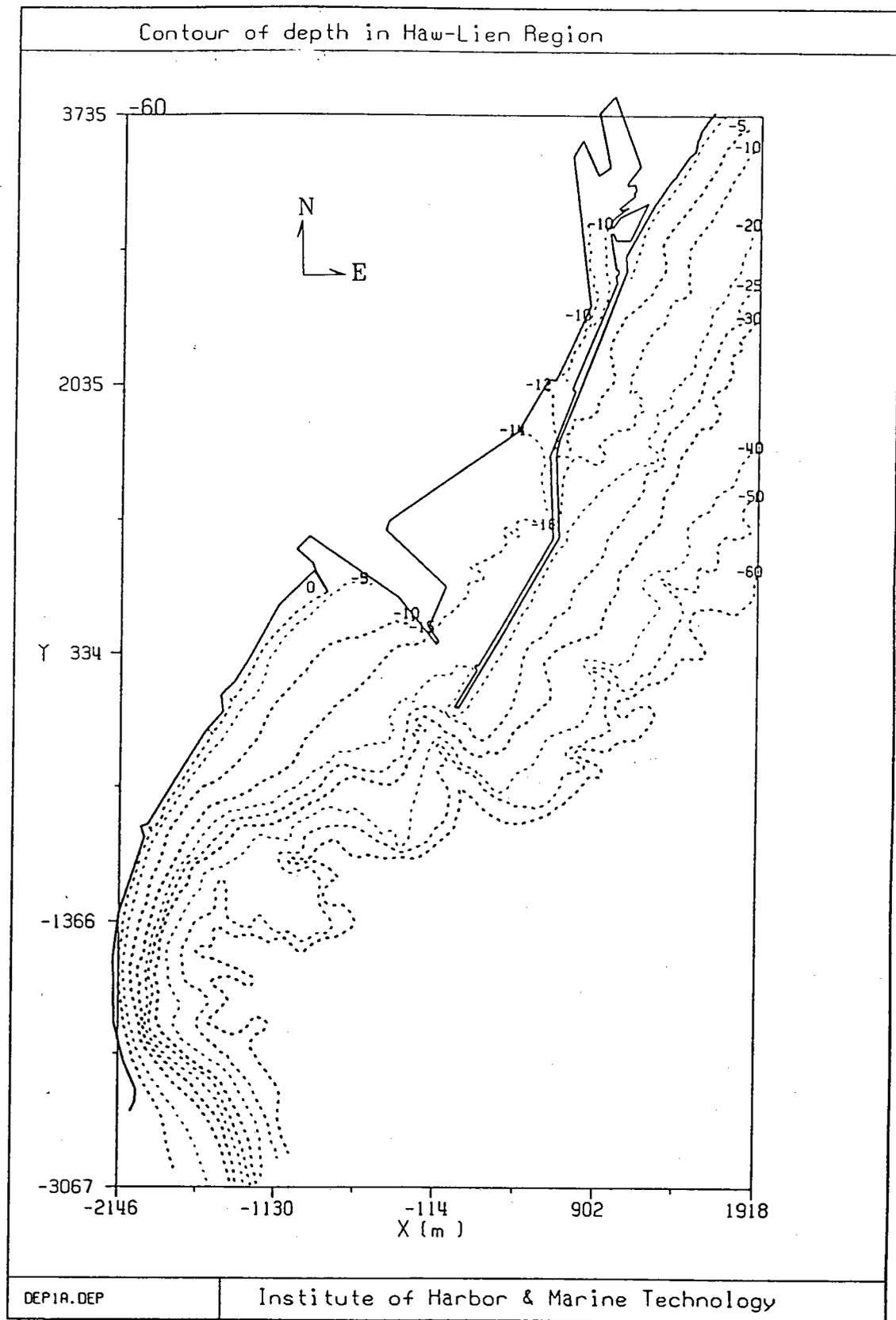


圖2-3-2 花蓮港港池及近岸海域水深分佈圖

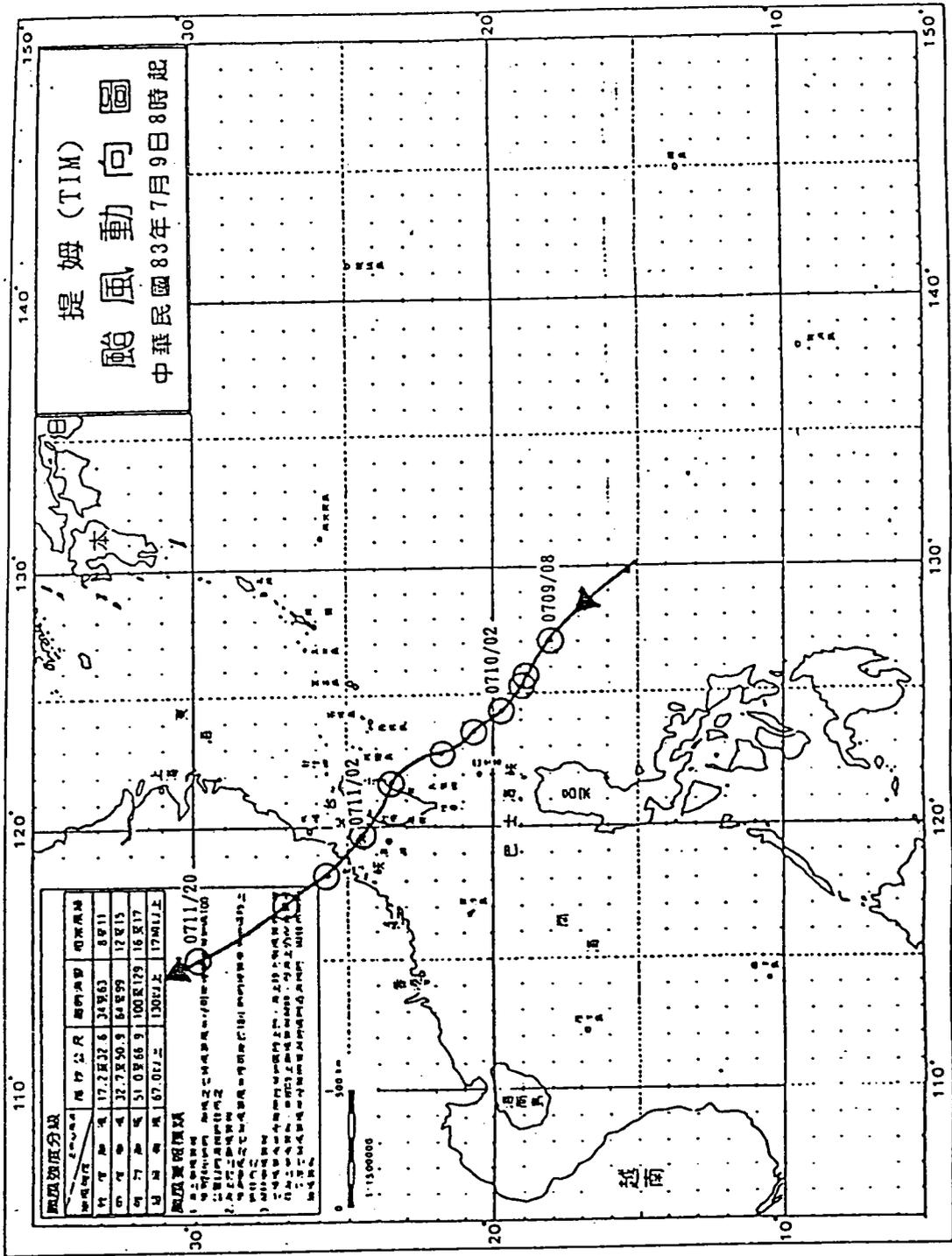
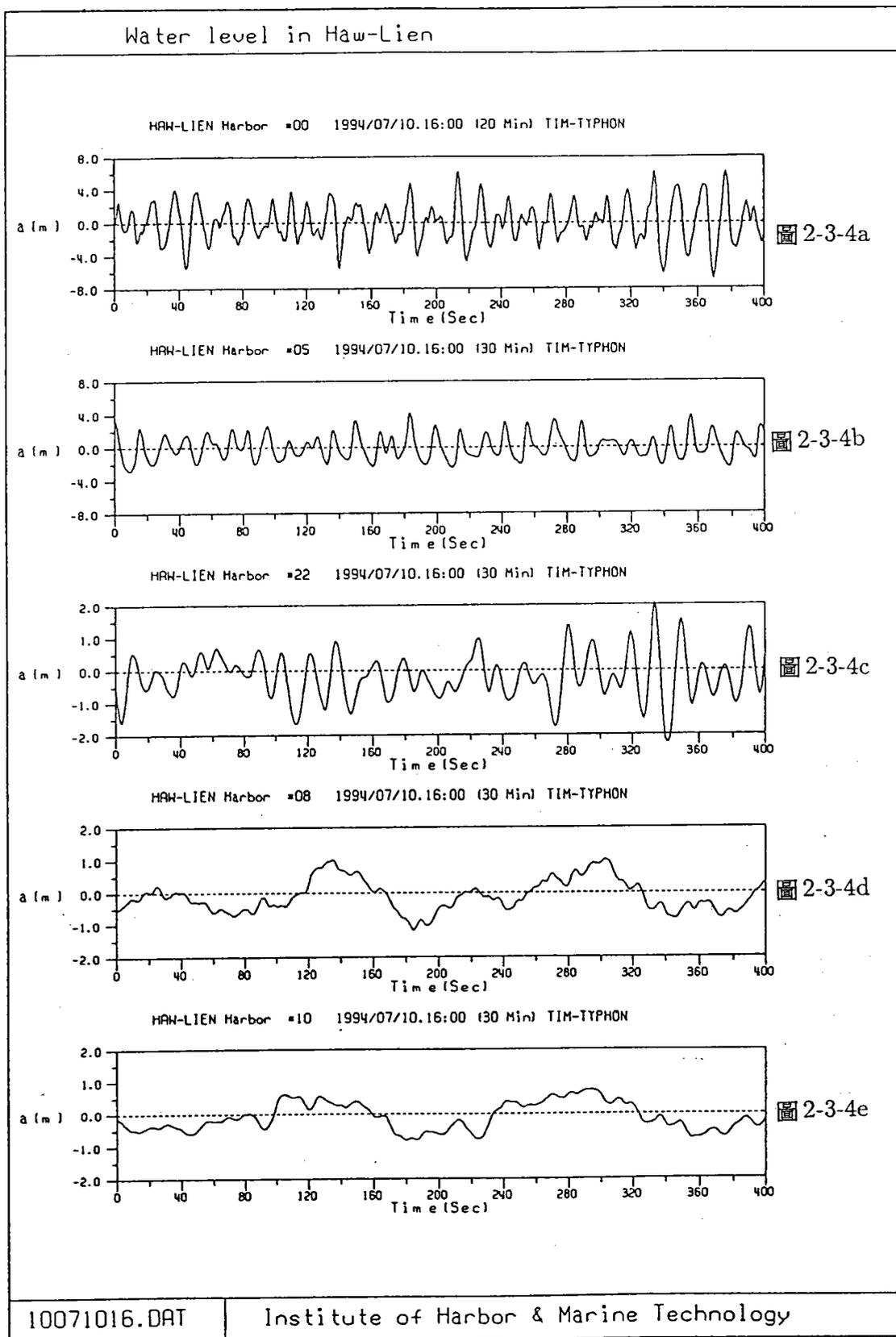


圖 2-3-3 1994 年 7 月強烈颱風提姆 (TIM) 路徑圖



PLDRSV.FOR

1996.11.20

圖2-3-4 強烈颱風提姆過境時花蓮港外海附近(#00)、外港口(#05)及#8、#10、#22三個碼頭附近之逐秒水位變化圖

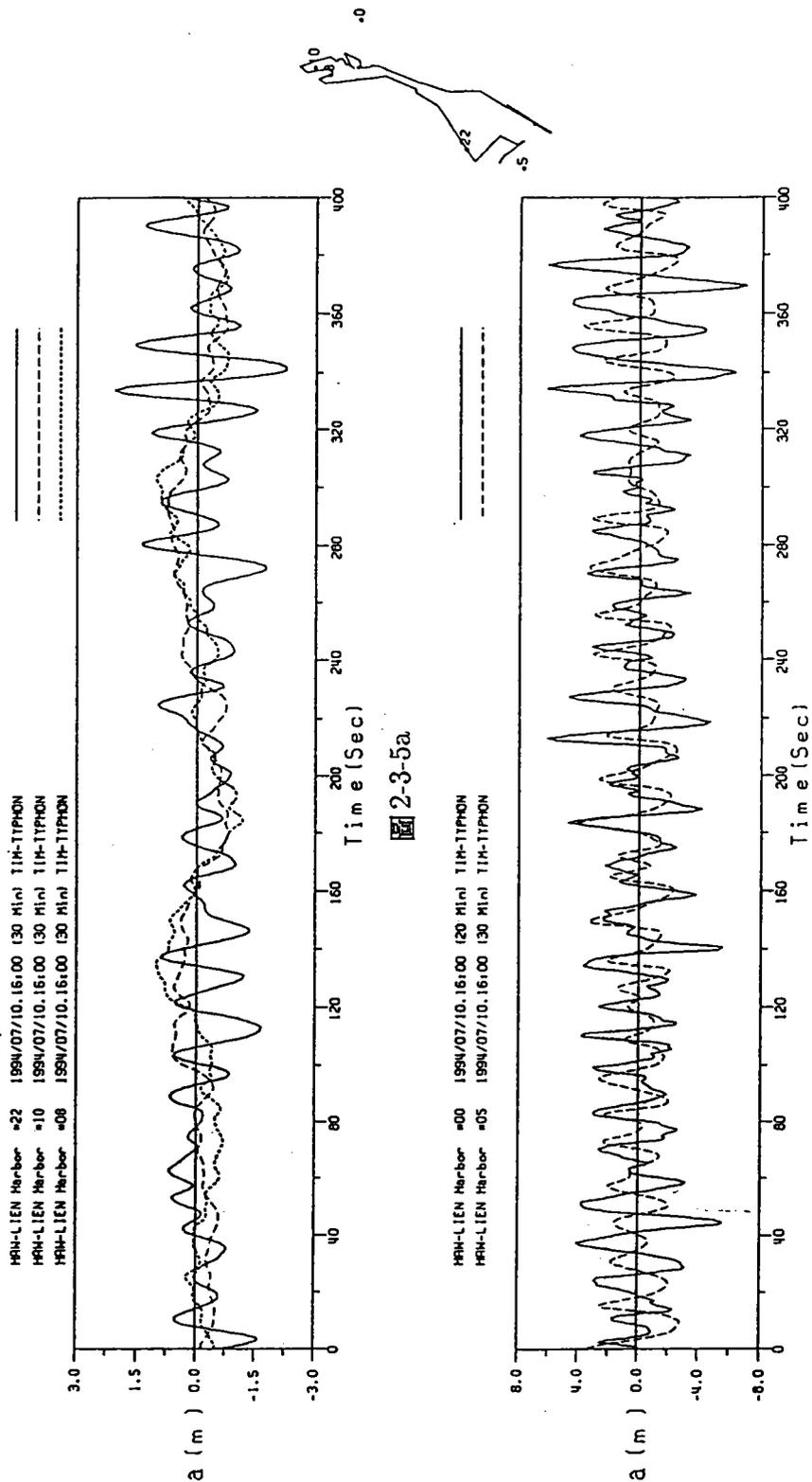


圖2-3-5 強烈颱風提姆過境時花蓮港外海(編號#00)與外港口(#05)及#8、#10、#22三個碼頭附近之逐秒水位變化比較圖

0001016.DAT ...etc

PL02041/08

Institute of Harbor & Marine Technology

圖 2-3-5b

表2-1 外海(編號#00)、外港口(#05)及8、10、22碼頭觀測站之波浪統計量

HAW-LIEN Harbor 1994/07/10.16:00 (30 min) TIM-TYPHON									
#	HMAX (m)	TMAX (sec)	H1/10 (m)	T1/10 (sec)	H1/3 (m)	T1/3 (sec)	HMEAN (m)	TMEAN (sec)	NO.
0	15.51	14.6	12.78	14.8	10.24	14.0	6.13	12.0	100
5	5.72	14.2	5.56	14.0	5.03	13.7	3.76	13.3	76
8	2.19	91.0	2.06	98.0	1.52	69.9	.87	41.8	48
10	1.54	106.5	1.45	139.3	1.12	88.4	.66	47.5	41
22	4.31	15.9	3.52	19.5	2.82	18.7	1.89	17.8	114

Wave Height and period (Descending)									
#00		#05		#08		#10		#22	
H(m)	T(sec)	H(m)	T(sec)	H(m)	T(sec)	H(m)	T(sec)	H(m)	T(sec)
15.5	14.6	5.72	14.2	2.1	91.0	1.5	106.5	4.3	15.9
14.7	14.3	5.71	14.4	2.1	100.9	1.5	174.9	3.9	17.8
13.1	14.9	5.65	13.0	1.9	91.9	1.4	135.2	3.6	15.7
12.4	14.2	5.55	12.2	1.9	108.1	1.3	140.6	3.5	47.5
12.3	17.1	5.54	14.7	1.8	90.0	1.1	105.4	3.5	22.5
12.2	16.5	5.38	14.8	1.8	137.7	1.1	75.5	3.4	14.5
12.2	15.3	5.38	14.7	1.4	61.5	1.0	91.1	3.4	13.9
11.9	14.0	5.25	11.7	1.3	50.8	1.0	94.9	3.3	16.9
11.6	12.6	5.15	12.8	1.3	93.0	.9	79.7	3.3	16.6
11.5	14.6	5.09	13.5	1.2	45.0	.9	48.3	3.1	19.8
10.8	13.6	5.07	15.1	1.2	44.0	.8	44.4	3.1	13.5
10.7	14.2	4.99	12.4	1.2	41.4	.8	27.7	3.1	14.2
10.6	13.9	4.98	12.8	1.2	46.7	.8	25.7	3.0	16.1
10.4	14.2	4.92	13.9	1.2	56.8	.7	31.2	3.0	14.0
10.1	16.5	4.82	15.6	1.0	39.0	.7	42.4	3.0	15.5

rept1.dat

Wave Spectral in Haw-Lien

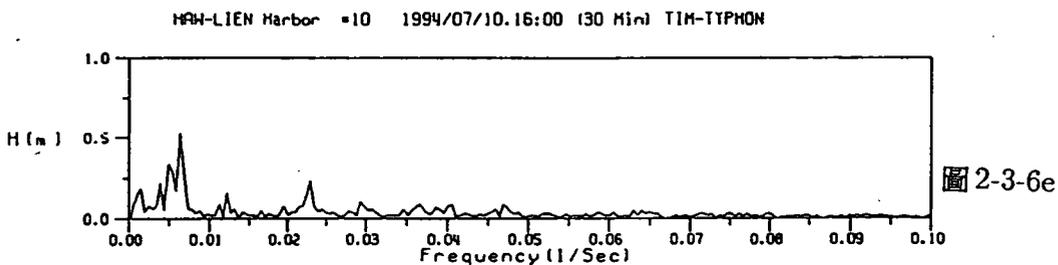
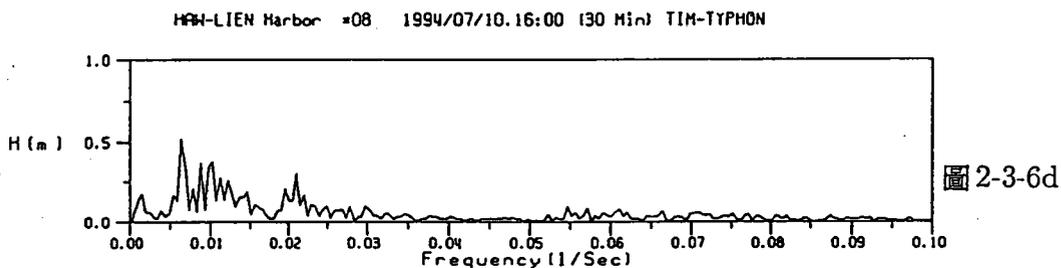
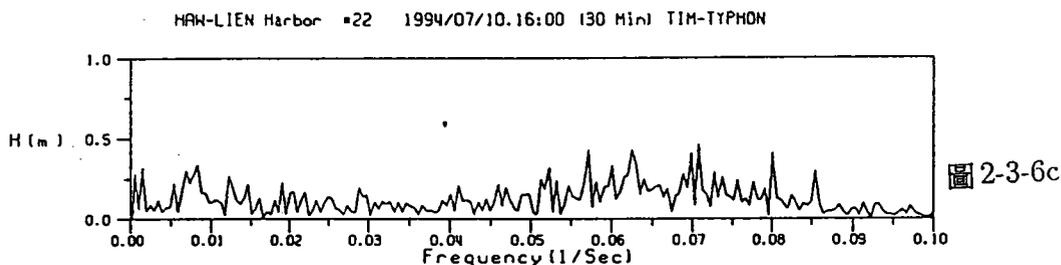
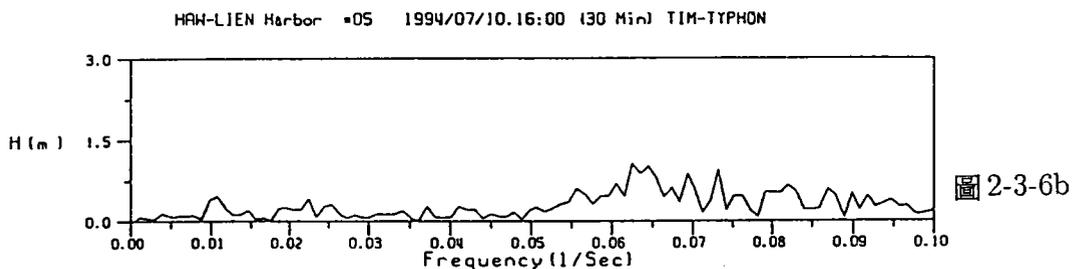
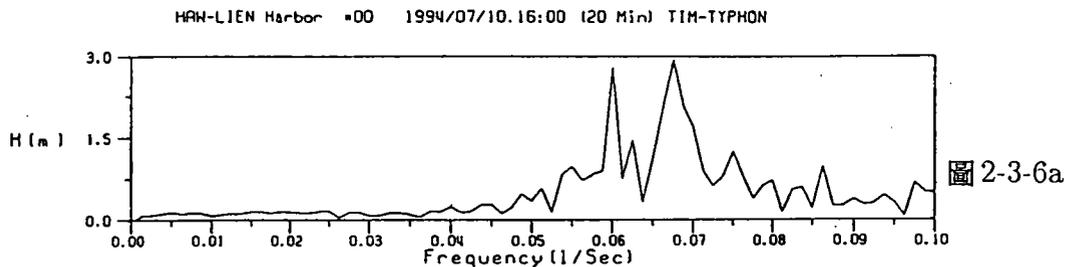
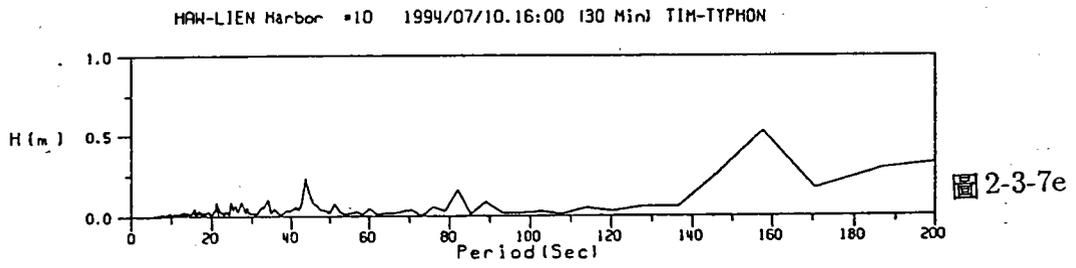
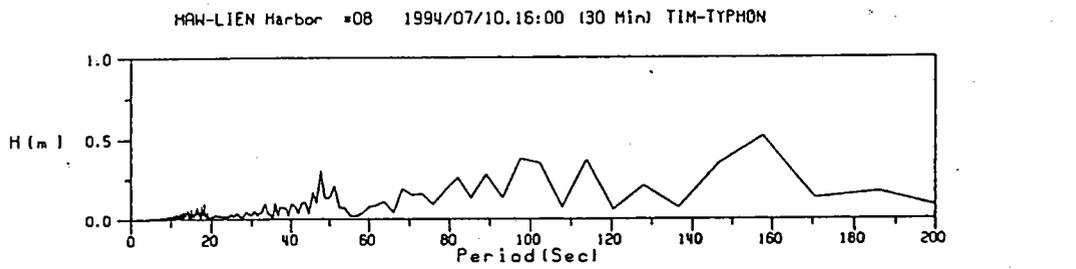
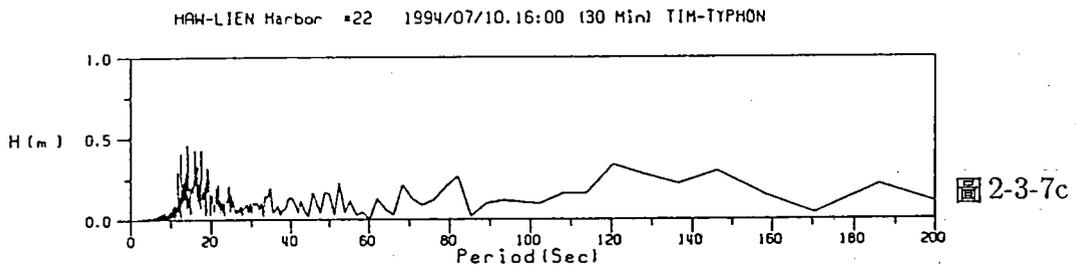
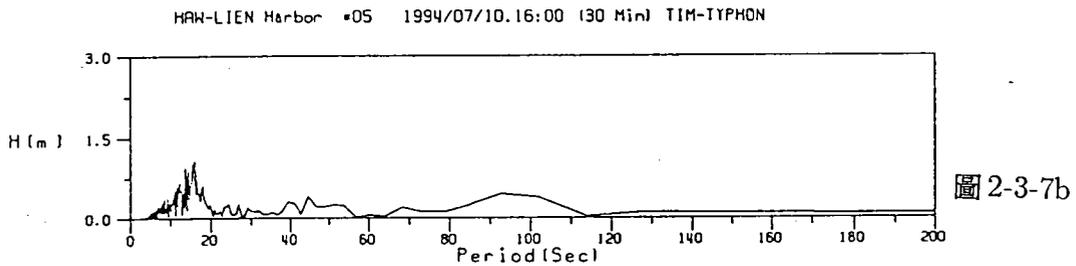
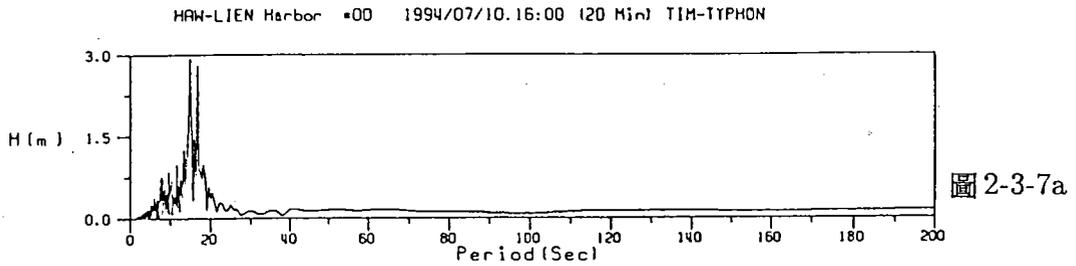


圖2-3-6 花蓮港外海(#00)、外港口(#05)及#8、#10、#22三個碼頭附近之波譜圖

Wave Spectral in Haw-Lien



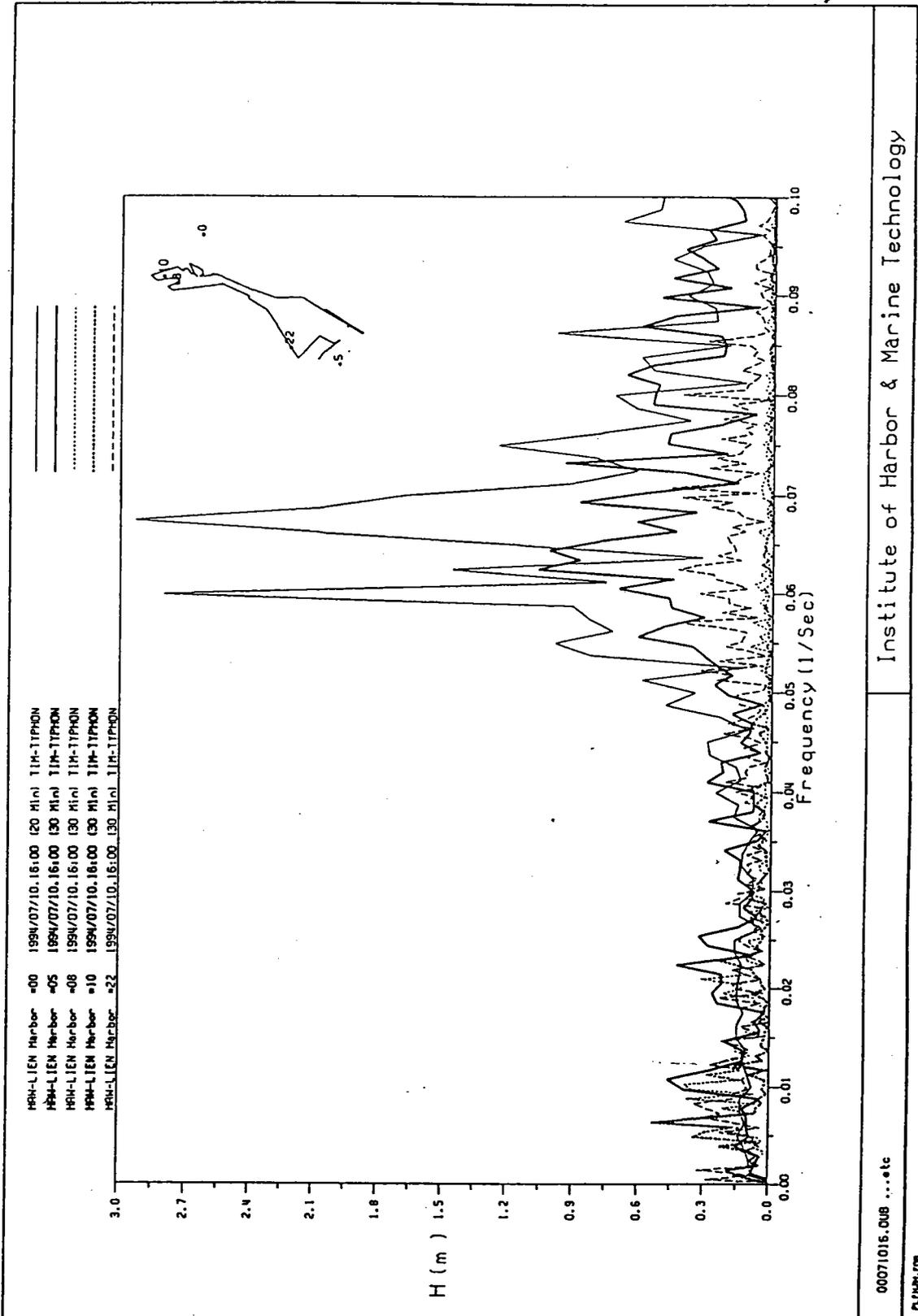
10071016.008

Institute of Harbor & Marine Technology

PLTNOV.FOR

1996.6.30

圖 2-3-7 花蓮港外海(#00)、外港口(#05)及#8、#10、#22三個碼頭附近之波譜圖



Institute of Harbor & Marine Technology

00071016.0UBetc

P:\JMR\708

1999.5.29

圖2-3-8a 花蓮港外海(#00)、外港口(#05)及#8、#10、#22三個碼頭附近之波譜比較圖

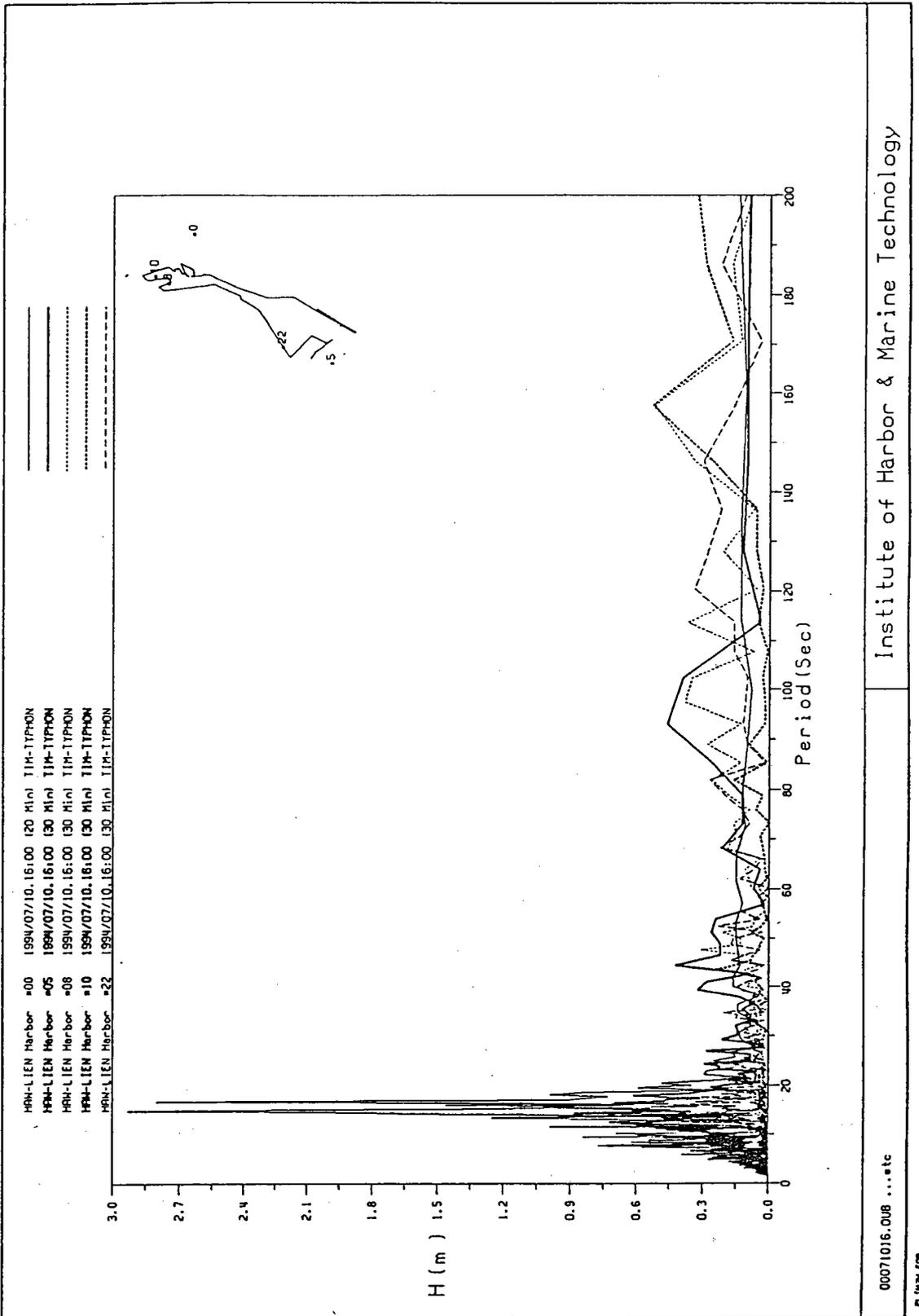


圖2-3-8b 花蓮港外海(#00)、外港口(#05)及#8、#10、#22三個碼頭附近之波譜比較圖

四、花蓮港現有港池之穩靜度數值分析

此節將利用上述之港池共振數值模式—Model WE21，推算花蓮港之共振特性並與現場觀測結果比較。影響花蓮港港池穩靜度之主要外力為颱風入侵造成劇烈水位變化，港內船舶繫泊困難，更有因而斷纜。因此颱風入侵時10秒週期以上波浪造成之港池共振現象為數值分析之重點。

數值推算之花蓮港現有港池區域範圍如圖2-4-1，稱配置A，區域分割三角形網格之長度約為25米左右，網格結點個數為8271，三角形元素計15830個，如圖2-4-2。花蓮港港池岸壁計有棧橋式，萬代福式，多孔牆式，水泥牆式等不同岸壁形態，其消波特性不同，因此反射係數不相同，但決定反射係數最大的另一個重要因素為波浪週期(波長)，萬代福式之岸壁對週期10秒之波浪而言，其反射係數可能在0.80以下，但對波浪如150秒以上之長週期波浪而言，其反射係數應甚接近於1，其消波之能量甚微小。根據上述數值計算，顯示矩形港池岸壁若為透水體，反射係數之大小也是決定共振點放大係數之一個重要因素(圖2-2-4)，因此計算港池共振現象，岸壁反射係數之決定為影響實際大小之重要因素。

水深變化及海底摩擦效應也是影響共振點放大係數之一個因素，但因為一般港池水深變化不劇烈，如花蓮港之水深整體而言，變化也並不顯著。根據歐等(1990)數值計算之比較評估結果，水深及海底摩擦等效應在水深變化不甚劇烈之港池，其影響遠較透水邊界能量消散效應為小。

在假設花蓮港之岸壁為完全反射之不透水體，圖2-4-3a，圖2-4-3b，圖2-4-3c，分別為港內8、10、22三個碼頭數值計算之結果，其顯示港內之某些共振點放大係數皆甚強烈，有些值甚至趨近於10。根據上述數值計算，顯示矩形港池港內每點共振曲線(港內每點之放大係數與週期大小之關係曲線)，若考慮不同反射係數，則可繪製不同共振曲線圖(圖2-2-4)，反射係數之大小決定共振點放大係數，隨岸壁反射係數之減小，共振點之放大係數快速的降低，但不改變共振週期。在此先分析假設為完全反射之不透水體岸壁，即反射係數 $C_r = 1$ ，探討花蓮港現有港

池之共振特性。

上節分析圖2-3-6a為8號碼頭觀測資料能譜分析顯示在47秒、82秒、98秒、114秒及158秒等處皆存在尖峰值，圖2-4-3a數值計算共振曲線也顯示在42秒、87秒、92秒、118秒及155秒等處皆存在尖峰值(數值計算之尖峰值更明顯)。圖2-3-6b為10號碼頭觀測資料能譜分析顯示在34秒、44秒、82秒及158秒等處皆存在尖峰值，圖2-4-5b數值計算共振曲線顯示在30秒、43秒、85秒、155秒等處皆存在尖峰值(數值計算之尖峰值也更明顯)。圖2-3-6c為22號碼頭觀測資料能譜分析顯示在14秒至20秒間、82秒、120秒及146秒等處皆存在尖峰值，圖2-4-5c數值計算共振曲線顯示在14秒至20秒間、84秒、119秒及144秒等處皆存在尖峰值。數值計算結果在8號碼頭、10號碼頭及22號碼頭處經過與觀測資料之比較驗證，顯示二者相當一致，也證明模式應用於花蓮港之共振現象分析可行性。而由數值模式推算花蓮港之共振曲線顯示港內發生共振之週期甚多，表示這些成份週期之波浪也可能產生較明顯之共振現象，不過可能因為外海之入射波並無此成份波存在或其成份甚小，因此這些成份波並無明顯共振產生。

如前所述波浪週期大小，為決定反射係數大小之一個重要因素，但此處每一條共振曲線不管週期大小皆是在假設一固定反射係數而求得，因此任何一條共振曲線，皆不能完全代表不同週期波浪之特性。實際上針對同一種型態岸壁，長週期波浪對應之反射係數應遠較短週期之值為大。對特定的岸壁，正確的求得反射係數與週期之關係式為決定數值正確之一個決定性因素。不過甚為可惜的是，這個關係式一般並不容易求得。其原因是利用理論解析方法不太可能求得此關係式，模型試驗又有其現實之局限性，而利用現場觀測實際上也無法量測真正反射係數。此處，建議先利用數值計算幾種不同反射係數之共振曲線結果，並配合現場觀測之分析結果，反推以決定反射係數與週期變化之關係。圖2-4-4a, b, c分別為考慮不同反射係數($C_r=1, 0.99, 0.97, 0.90$)港內#8、#10、#22三個碼頭每點之共振曲線。圖2-4-5a, 圖2-4-5b, 圖2-4-5c分別為利用數值計算之各站不同反射係數結果(圖2-4-4)，與現場

觀測分析資料(圖2-3-8)比較，在考慮反射係數與週期變化之關係，所推算較接近實際港池之共振曲線。

其次我們將利用數值模式推算花蓮港在颱風過境幾個可能發生共振時之全港區等放大係數分佈(或稱等波高分佈)，以進一步了解整個港池之靜穩度。波浪週期為155秒時(圖2-4-6)，8號碼頭，10號碼頭處放大係數較大，22A號碼頭附近角落處放大係數也較大，但往22號碼頭及21號碼頭附近處放大係數則漸小。波浪週期為100秒時(圖2-4-7)，8號碼頭、10號碼頭處放大係數較小，22號碼頭處附近放大係數相對較大。波浪週期為45秒時(圖2-4-8)，10號碼頭處附近明顯較8號碼頭附近放大係數為大，而22號碼頭處附近放大係數也不大。波浪週期為15秒時(圖2-4-9)，8號碼頭，10號碼頭處放大係數相對已甚小，22號碼頭處附近放大係數也不大。幾種不同週期之分析結果，顯示不同週期之波浪作用整個港池等波高分佈形態及大小皆不同。

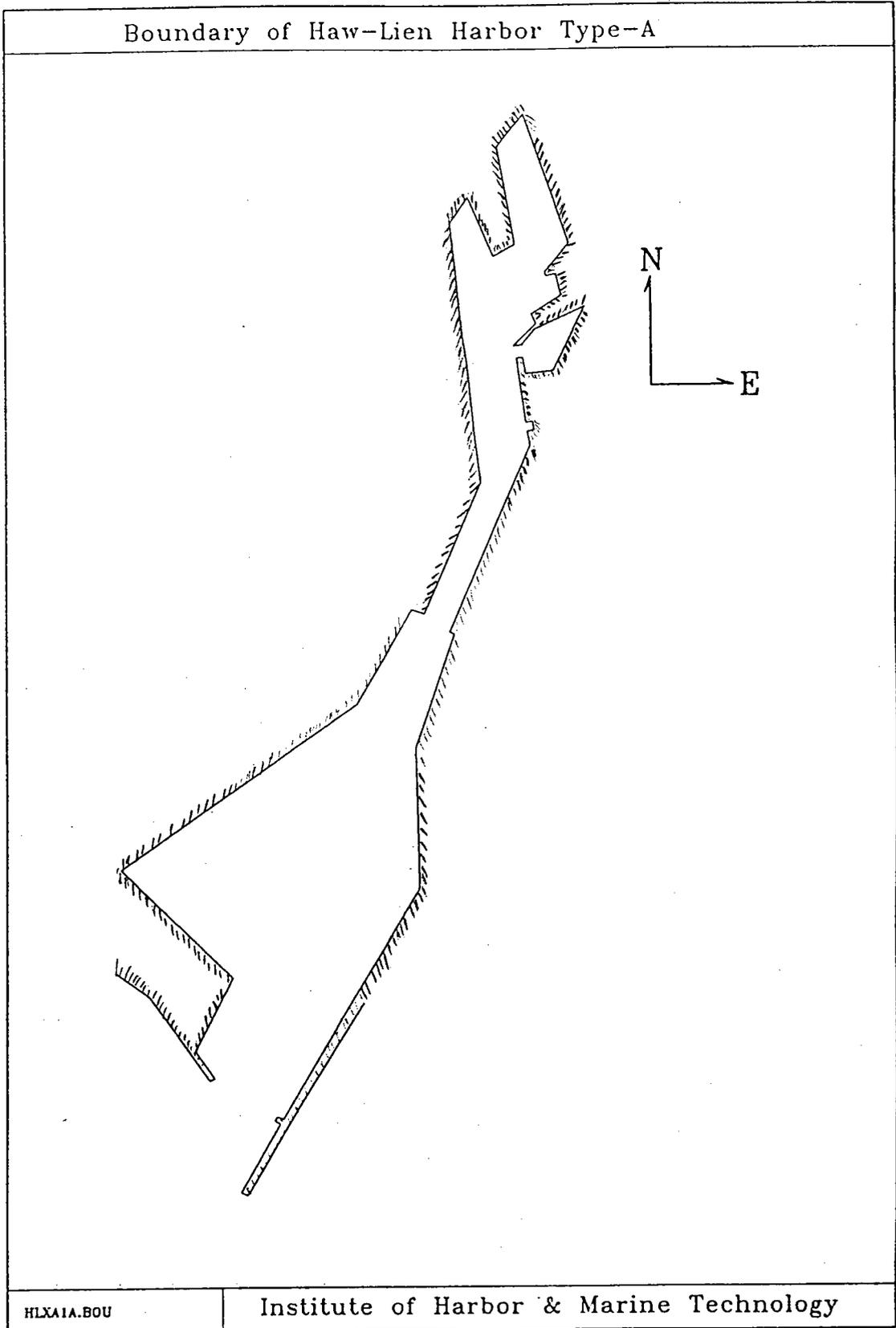


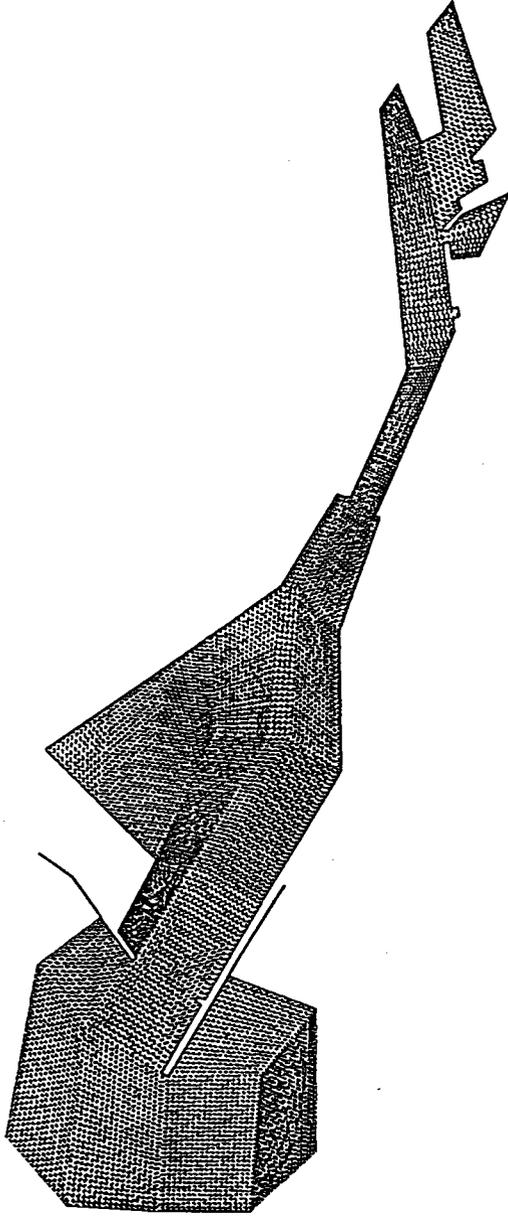
圖2-4-1數值推算之花蓮港現有港池區域範圍(稱配置A)

Node and element in Harbor

HAW-LIEN Harbour HLA11.DAT

8271

15830



HLSA31.DAT

Institute of Harbor & Marine Technology

PLA029A.FOR

1996.6.28

圖2-4-2花蓮港港區三角形元素切割示意圖

Amplification factor in Haw-Lien

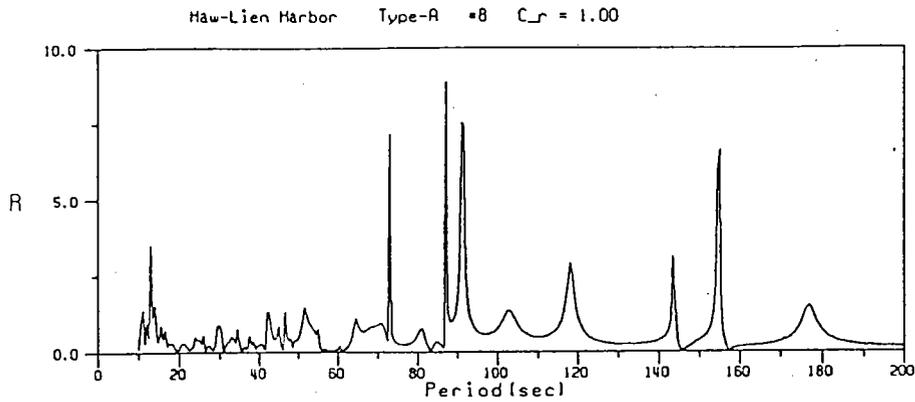


圖 2-4-3a

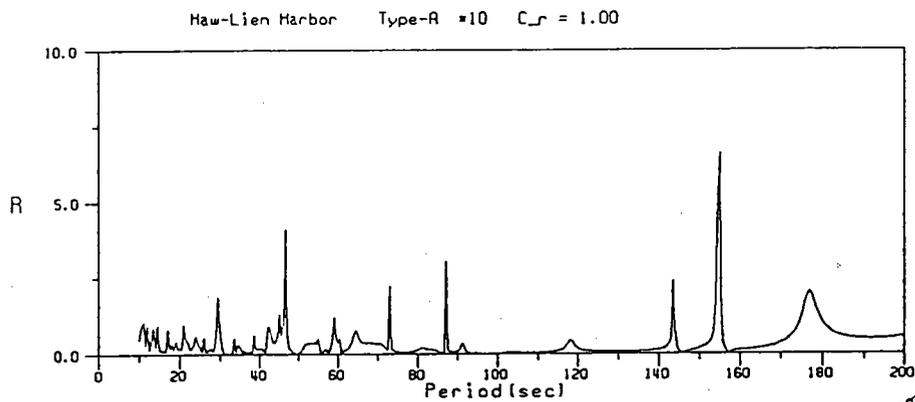


圖 2-4-3b

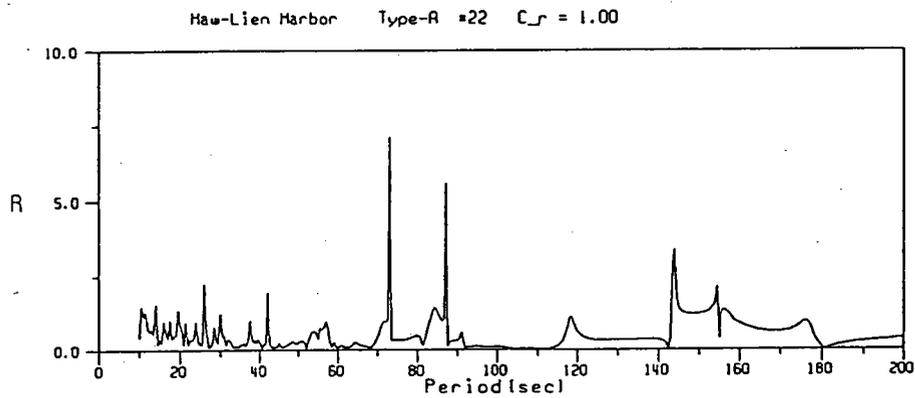


圖 2-4-3c

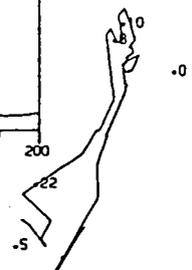


圖 2-4-3 數值計算現有花蓮港港池岸壁假設岸壁為完全反射體
在 8 號、10 號及 22 號碼頭各處之共振曲線圖

Amplification factor in Haw-Lien

Haw-Lien Harbor	Type-A	#8	$C_r = 1.00$
Haw-Lien Harbor	Type-A	#8	$C_r = .99$
Haw-Lien Harbor	Type-A	#8	$C_r = .97$
Haw-Lien Harbor	Type-A	#8	$C_r = .90$

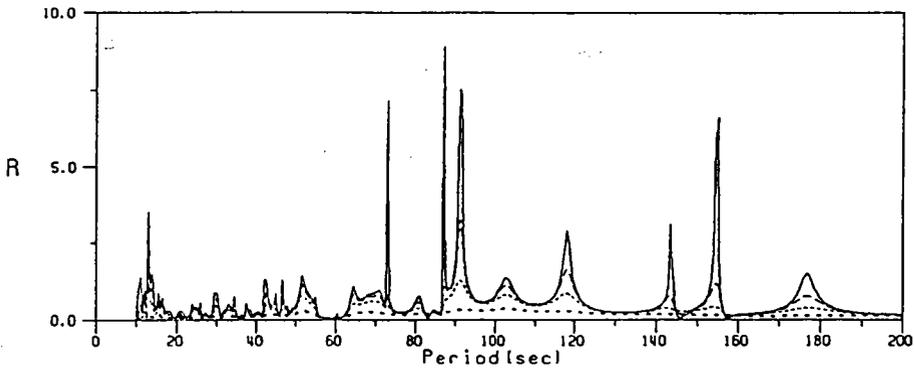


圖 2-4-4a

Haw-Lien Harbor	Type-A	#10	$C_r = 1.00$
Haw-Lien Harbor	Type-A	#10	$C_r = .99$
Haw-Lien Harbor	Type-A	#10	$C_r = .97$
Haw-Lien Harbor	Type-A	#10	$C_r = .90$

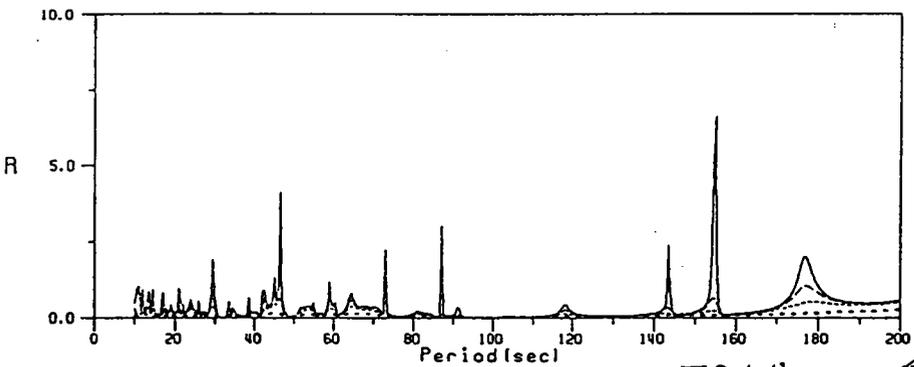


圖 2-4-4b

Haw-Lien Harbor	Type-A	#22	$C_r = 1.00$
Haw-Lien Harbor	Type-A	#22	$C_r = .99$
Haw-Lien Harbor	Type-A	#22	$C_r = .97$
Haw-Lien Harbor	Type-A	#22	$C_r = .90$

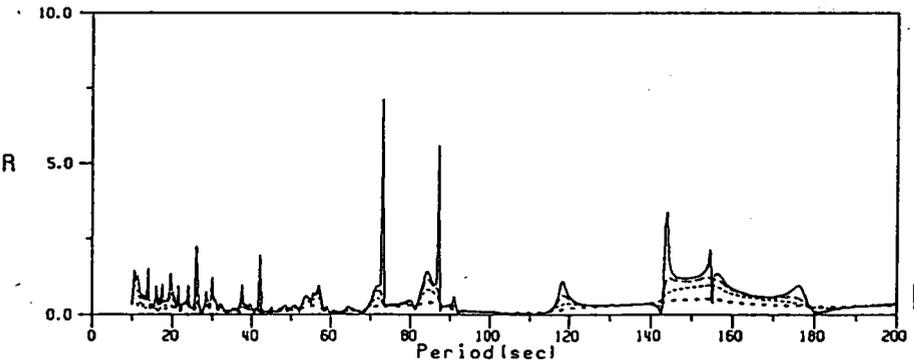


圖 2-4-4c

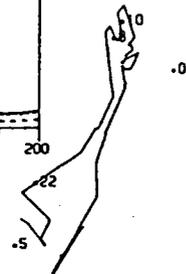


圖 2-4-4 數值計算現有花蓮港港池比較不同反射係數之岸壁
在 8 號、10 號及 22 號碼頭各處之共振曲線圖

Amplification factor in Haw-Lien

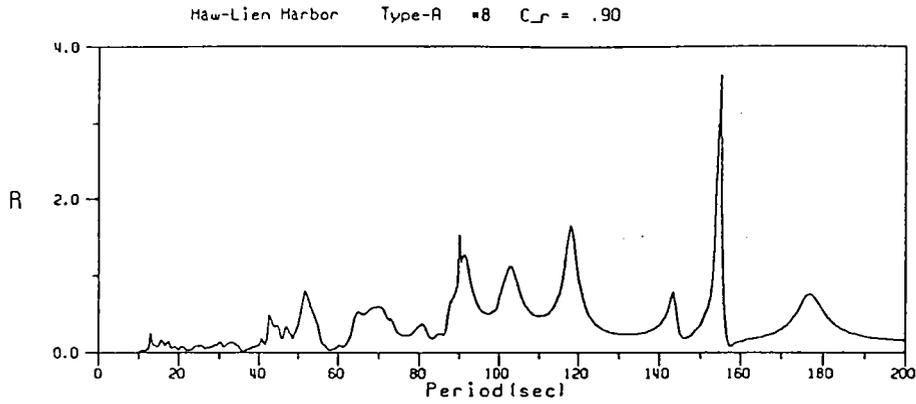


圖 2-4-5a

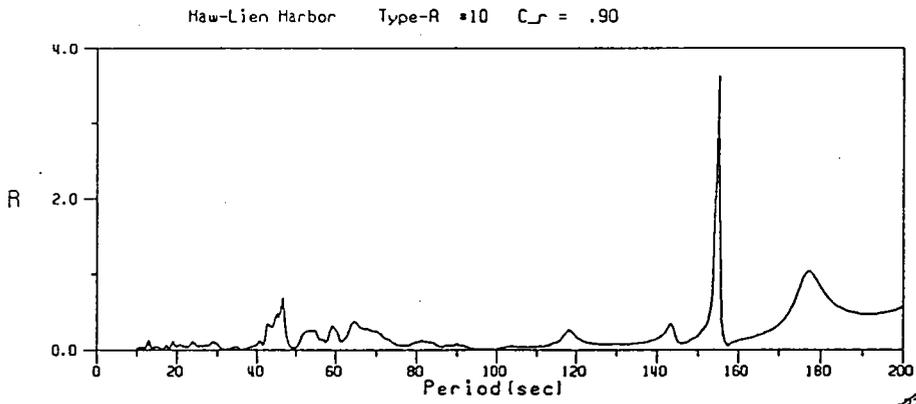


圖 2-4-5b

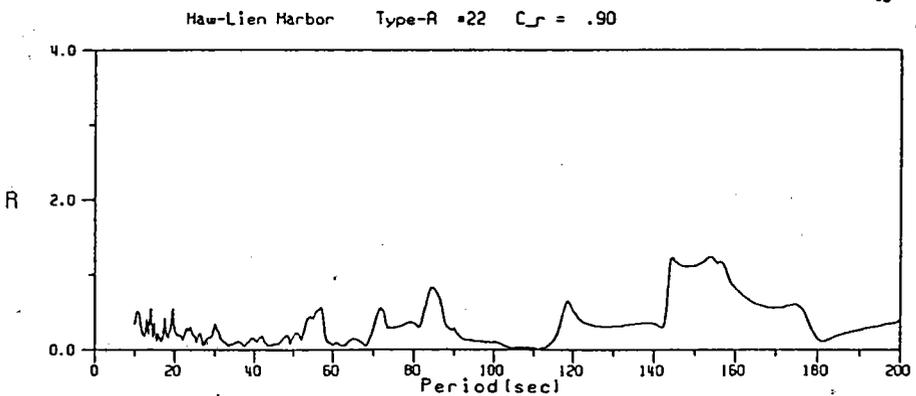
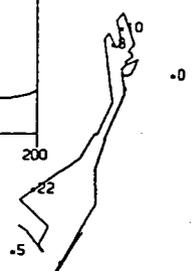


圖 2-4-5c



FHXSP21.DUE

Institute of Harbor & Marine Technology

PLP2YR.FOR

1988.4.30

圖 2-4-5 數值計算現有花蓮港港池引用實測資料估計岸壁之反射係數在 8 號、10 號及 22 號碼頭各處之共振曲線圖

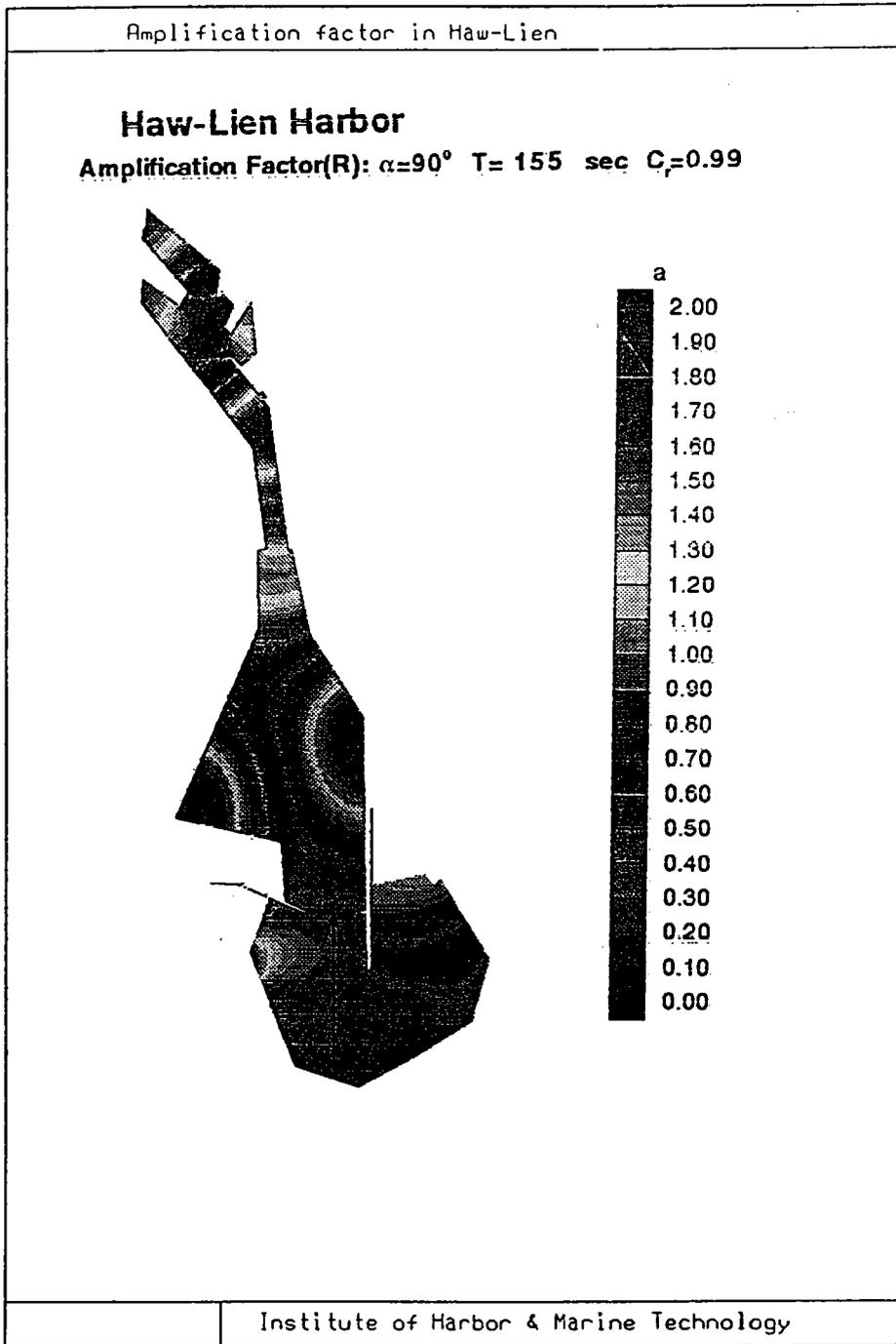


圖2-4-6 數值計算現有花蓮港波浪週期為155秒港池等波高分佈圖

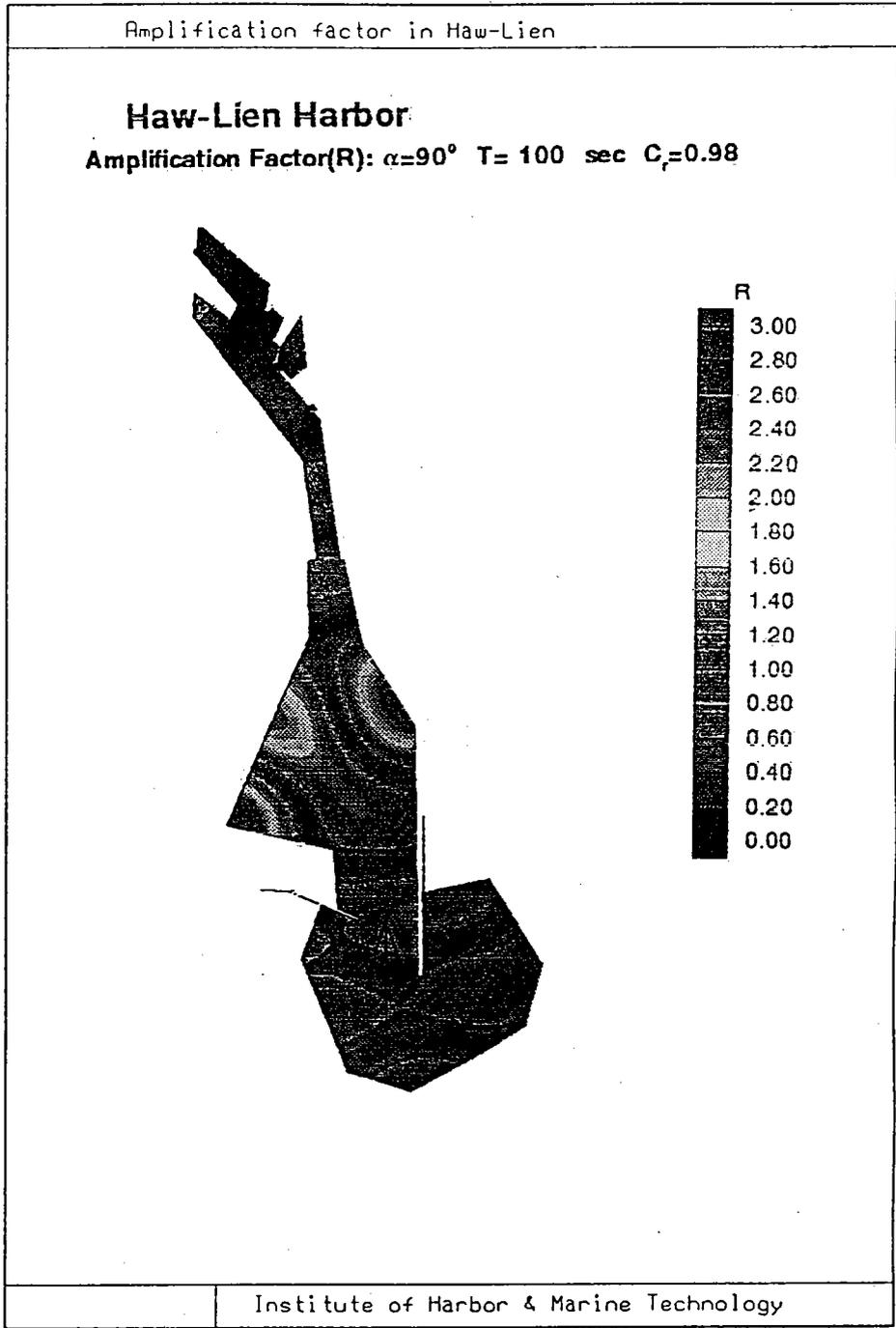


圖2-4-7 數值計算現有花蓮港波浪週期為100秒港池等波高分佈圖

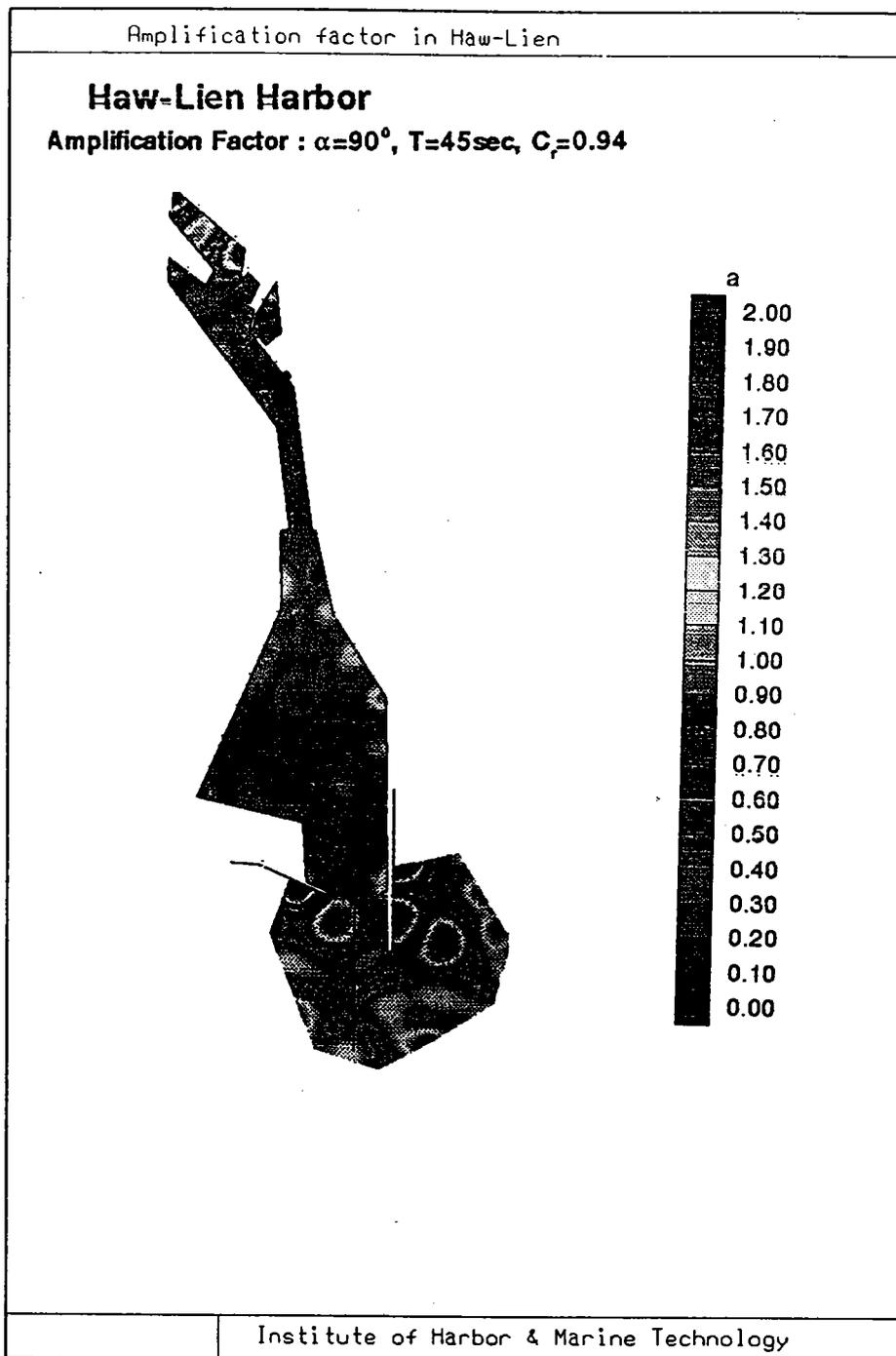


圖2-4-8 數值計算現有花蓮港波浪週期為45秒港池等波高分佈圖

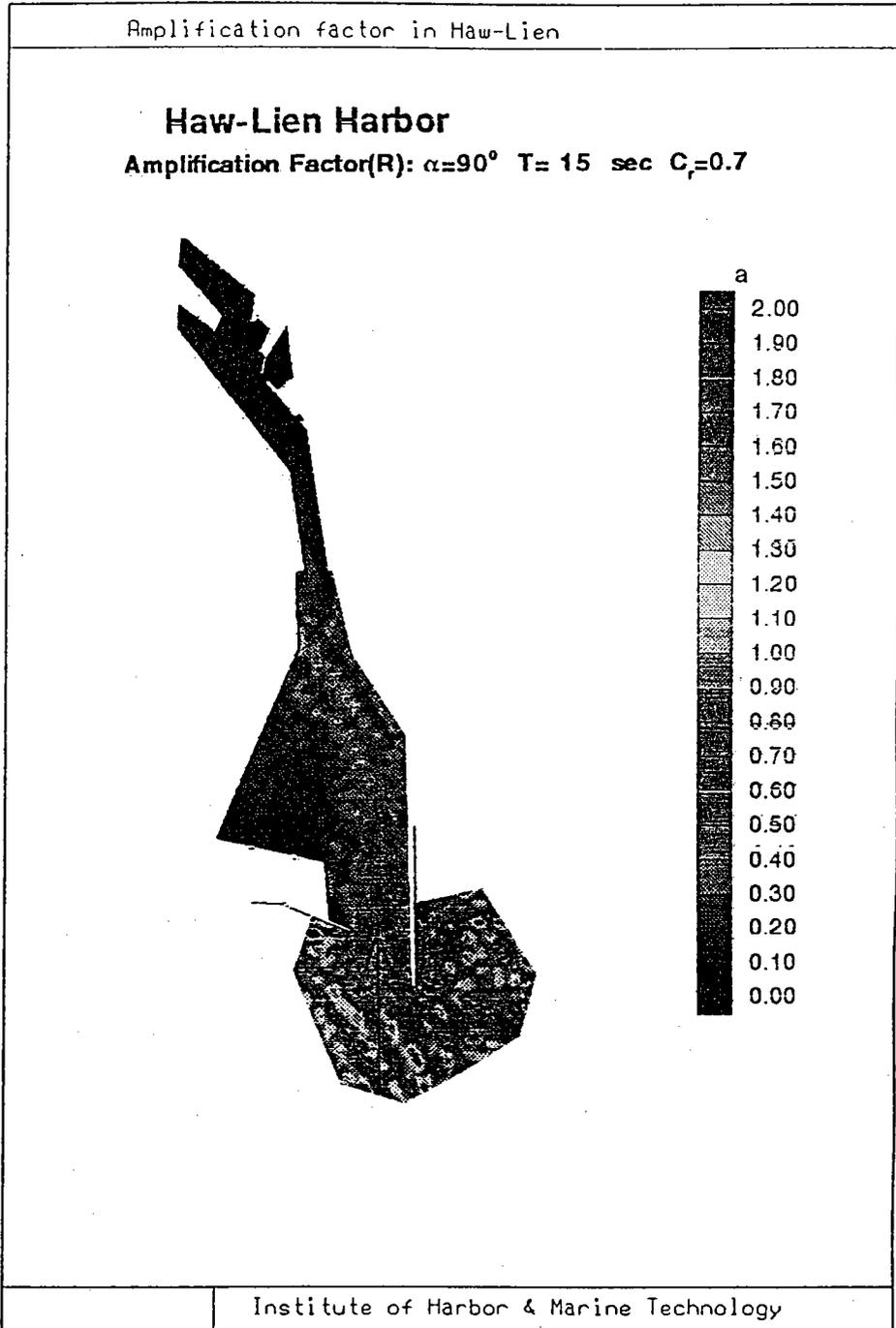


圖2-4-9 數值計算現有花蓮港波浪週期為15秒港池等波高分佈圖

五、花蓮港改善配置港池之靜穩度數值分析

影響花蓮港港池靜穩度之主要外力為颱風入侵造成劇烈水位變化，港內船舶繫泊困難，更有因而斷纜。由現場觀測及數值計算之結果顯示因颱風入侵而產生長如40秒，100秒，甚至160秒之長波波浪造成之港池共振現象為影響花蓮港港池靜穩度之重要因素。一般波高大小為影響港內船舶停靠靜穩及繫覽繩受力之重要因素，但相同波高之波浪作用條件下，長週期波浪對船舶運動(包括移動及轉動)及繫覽繩之受力較短週期之情形為大。如以160秒之長浪而言，若波高有1米時，對港內船舶繫泊停靠即產生甚大之安全威脅。因此改善花蓮港港池靜穩度之主要方法，即是避免在港內存在如160秒之長波波浪造成之港池共振現象，或盡可能降低長波波浪造成之港池共振。

一般常用改善港池靜穩度或降低共振幅度一般實施方法可在港口增建(增長)防波堤，或外海增建離岸堤、突堤，防波堤可提高遮蔽效果，離岸堤或突堤可減低入港波之能浪。而提高港池岸壁消波能力，如取用透水式、棧橋式，也可減低共振效果。其他如改變港池形狀或是改變特徵長度以改變共振點發生之週期位置，也是改善港池靜穩度一種方法。以下將提出幾種不同配置，並進一步探討其改善港池靜穩度之可行性。

首先提出的第一個可能改善方案，為拆除新東堤與舊東堤相鄰之新東堤段，如附圖2-5-1，稱配置B，並沿著東堤方向加建一段防波堤(長約750米)，以防止冬天東北季風之直接入侵港區，開口處之淺礁區並可設置拋石潛堤，以減低東北方向波浪之作用，維持冬季期間港池之靜穩。而針對由東北方向入侵之颱風波浪，因大部分能量可由入口處向外傳出，雖然對外港例如22號碼頭處仍會造成影響，但在超過中央內航道之內港區影響應不太大，仍可維持內港區之靜穩。在考慮不同週期之波浪正向作用於配置B港池，在8號、10號及22號碼頭之港池共振曲線如附圖(2-5-2a,b,c)，圖中點線為配置B港池三站之共振曲線(假設岸壁反射係數 $C_r = 1$)，實線則為現有港池(稱配置A)之共振曲線(岸壁

反射係數同樣假設為 $C_r = 1$)，比較配置B港池與現有港池之共振曲線，發現有以下幾點特性。部分現有港池存在之共振點在配置B港池並不再為共振點，而且配置B發生共振之點數大量減少。8號碼頭長週期僅92秒及155秒共振點存在；10號碼頭長週期僅155秒共振點存在。而22號碼頭除74秒及155秒附近仍有共振點，其他週期發生共振也不明顯。其次共振點之放大係數配置B港池也遠較現有港池為小。不過根據現場資料分析影響實際港池最大之共振點155秒處之放大係數仍然甚大，顯示週期155秒之波浪仍然對配置B有某種程度之影響。根據上述Meran's公式估算之現有港池自共振週期第3個，第5個及第6個共振週期為160秒，114秒，73秒。比較配置B存在之共振週期與此甚為相近，顯示主要特徵港池形狀之自然共振週期影響甚大，些微之減低改變岸壁能量消散，並不能完全改變共振型態，但配置B已有相當程度改善現有港池靜穩度。

第二個改善配置，則將上述配置B沿伸之地區納入為港區，完全拆除舊東堤，如附圖2-5-3，稱配置C。同樣在考慮不同波浪週期作用下，圖2-5-4為配置與現有港池配置A之共振比較圖，圖中顯示因配置C主航道變寬，大部份之共振點放大係數皆有減小之趨勢，此與第二節所述矩形港池寬度增大，放大係數反而減小，共振週期變長(圖2-2-5)之現象相似。但圖中顯示仍有少數共振點放大係數反而增大，此原因可能為花蓮港港池幾何形狀較複雜，並不能理想完全假設為狹長矩形港池之故。而在現有港池影響甚巨之共振點155秒處，在配置C港池共振曲線有雙峰存在，顯示共振週期已有明顯移動，如外在之入射波成份不變，或可避免此共振之發生，但如果外海入射波波浪週期為不規則或非穩定性，即週期有增長或減短之改變，則共振情形仍可能發生。

第三個改善配置則考慮將東堤向外海延伸約600米，如附圖2-5-5，稱配置D，延長東堤對冬季東北季風產生之波浪應可產生較佳之遮蔽效果。但對南濱海岸之流場及海岸變化可能會產生甚大之影響，此方面影響大小需作進一步之分析。同樣在考慮不同週期波浪作用下，圖2-5-6為現有港池與配置D共振曲線比較圖。配置D之共振點放大係數仍然甚大，在158秒處放大係數雖然較現有配置港池共振放大係數為小，但減

低量並不大，反而因防波堤延長，港池縱向特徵長度增長，178秒共振點之放大係數反而有加大之現象。整體而言，配置D延長本防波堤並不能有效改善長波共振現象。其次以經濟效益考量，在以現有東堤頭外海處水深高達50米，延伸防波堤之經濟效益甚低。

第四個改善配置，稱配置E，則考慮針對狹長型之花蓮港池特性，在中央內航道寬度僅80米左右之處，設一閘門(圖2-5-7)，在颱風可能侵襲花蓮港之前，封閉閘門，以保該內港之船隻。閘門之設計及承受力問題這裡暫不考慮，首先利用數值模式探討在閘門封閉時港區之波場變化。在考慮關閉閘門時之港內前段區22號碼頭處之共振曲線數值推算結果(圖2-5-8)，顯示155秒之長週期之成份波已不甚明顯，而且內港此時應受閘之保護。如不考慮工程設計是否可行之條件下，閘門或許為一可行之途徑，但有關閘門之設計及承受波力之大小分析，則有待進一步研究。

六、討論

花蓮港於颱風季節期間常發生港池不穩靜現象，為瞭解其原因，並探討可能的改善方案，在本計畫分別進行海氣象現場觀測、模型試驗、數值模式計算、防波堤改善方案等研究，以期提供較佳之綜合改善方案。而由以上四種可能改善配置之數值分析結果，顯示各種方案雖有某種成度之改善，但皆不是達到較為完美之改善。因此將參考其他模型試驗或防波堤改善方案研究之結果，作一綜合性之探討。

在外海波浪尚未進入港池前，以避免產生週期約155秒左右之長波，或減低會產生港池共振之長波波高，也是改善港池靜穩度一種方法。外海週期155秒之長波，根據解析其產生之原因可能颱風波浪經海底特殊地形及南濱海岸導浪效果而產生，如在南濱海岸適當位置建凸堤(潛堤)(如圖2-6-1)，應可避免此長波之生成，或在外海就減低此成份波之波高。以目前之現有數值模式或理論方法，以解析波浪在存在潛堤或凸堤複雜海岸之波浪變形或非線性效應甚為困難，但以水工模型試驗探討則為較可行之方法。此方面之研究，由本所平面模型水工模型試驗結果顯示，拋石凸堤確時有減低非線性長波產生之能力，詳細內容可參考平面模型水工模型試驗結果報告。

由以上之比較分析，此處提出一綜合性之建議如下：近程方面在考慮經濟效益及工程施工時效等因素，以第一個改善配置(配置B)，並配合在南濱海岸適當位置建凸堤為較佳，即拆除新東堤與舊東堤相鄰之新東堤段，沿著東堤方向加建一段防波堤，開口處之淺礁區並可設置拋石潛堤，並在外海南濱海岸適當位置建凸堤(潛堤)。此兩種配置之組合根據以上之分析，已有相當程度改善現有港池靜穩度。

其次在較遠程方面，則配合工程施工時程之延長及未來舊東堤改建等條件，以第二個改善配置(配置C)，並配合在南濱海岸適當位置建凸堤之實施為較佳，即則將上述配置B沿伸之地區納入為港區，完全拆除舊東堤，並在外海南濱海岸適當位置建凸堤(潛堤)。此方案工程經費將

較高，施工時程也將較長，但此方案可同時配合完成舊東堤之改建計畫，如此除了改善港池不穩靜現象，同時也解決了舊東堤因年代久遠而產生的老化問題，並且也一併解決了內港航道寬度不足的安全顧慮。

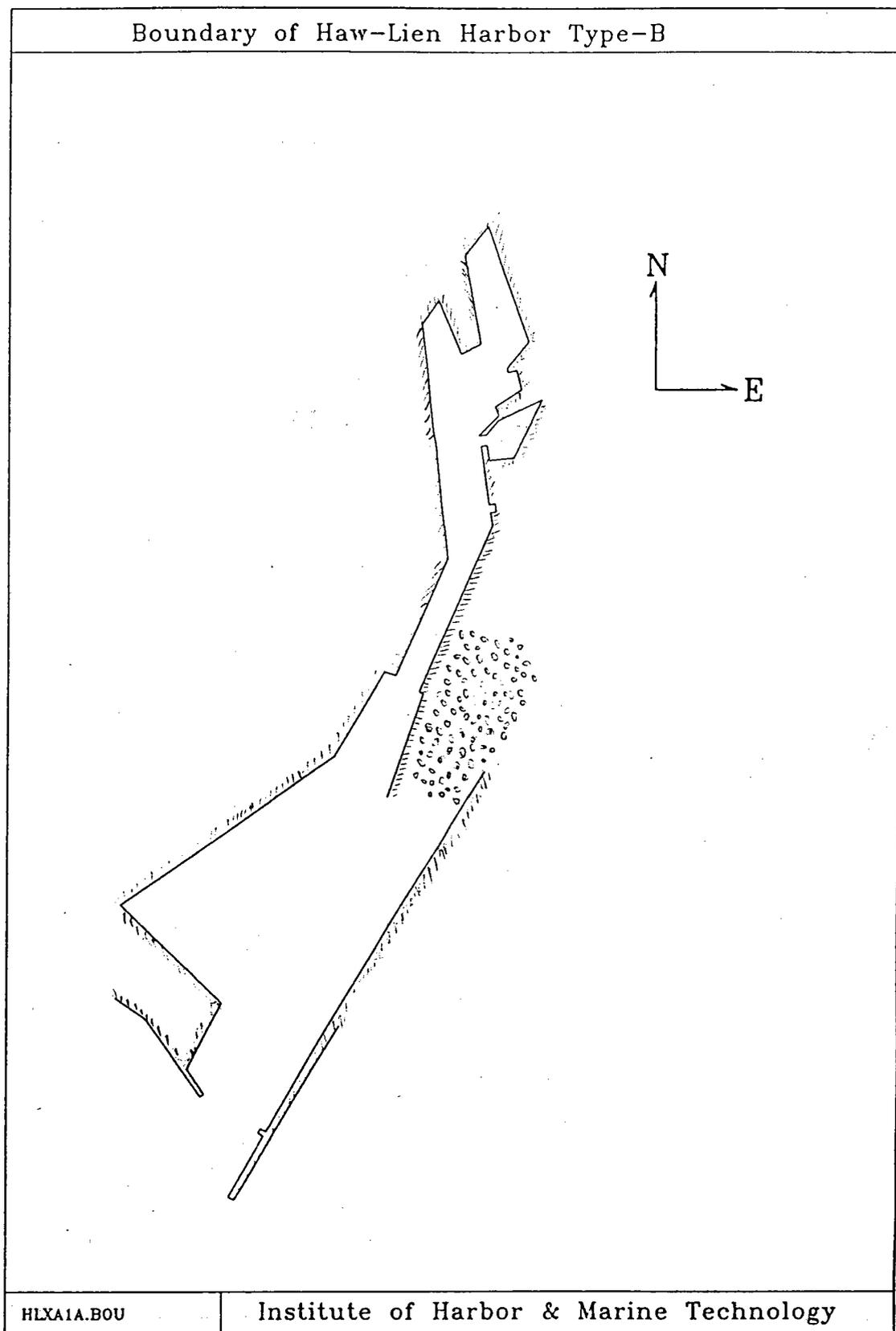
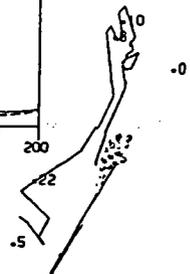
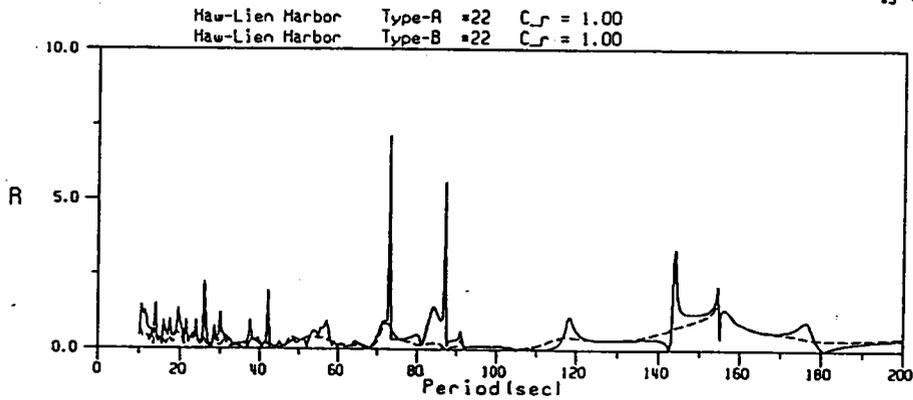
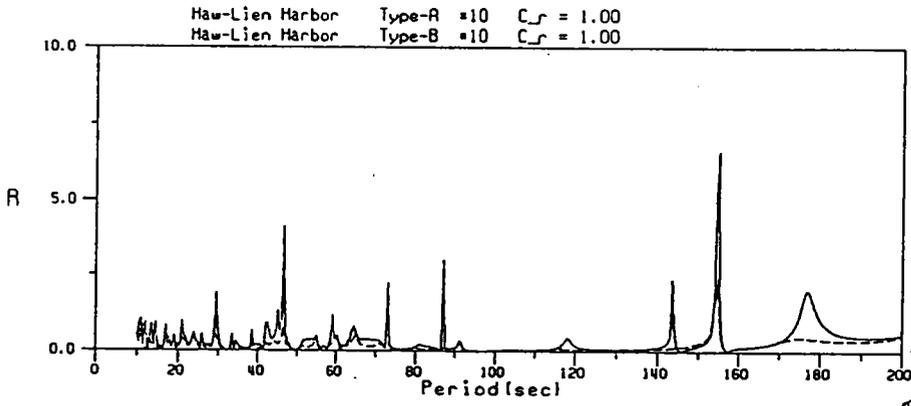
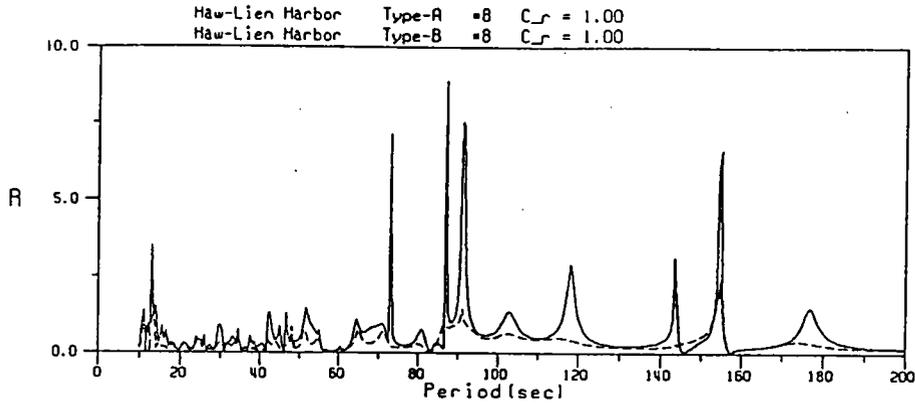


圖2-5-1花蓮港第一個改善方案配置圖(稱配置B)

Amplification factor in Haw-Lien



FHXSA21.000

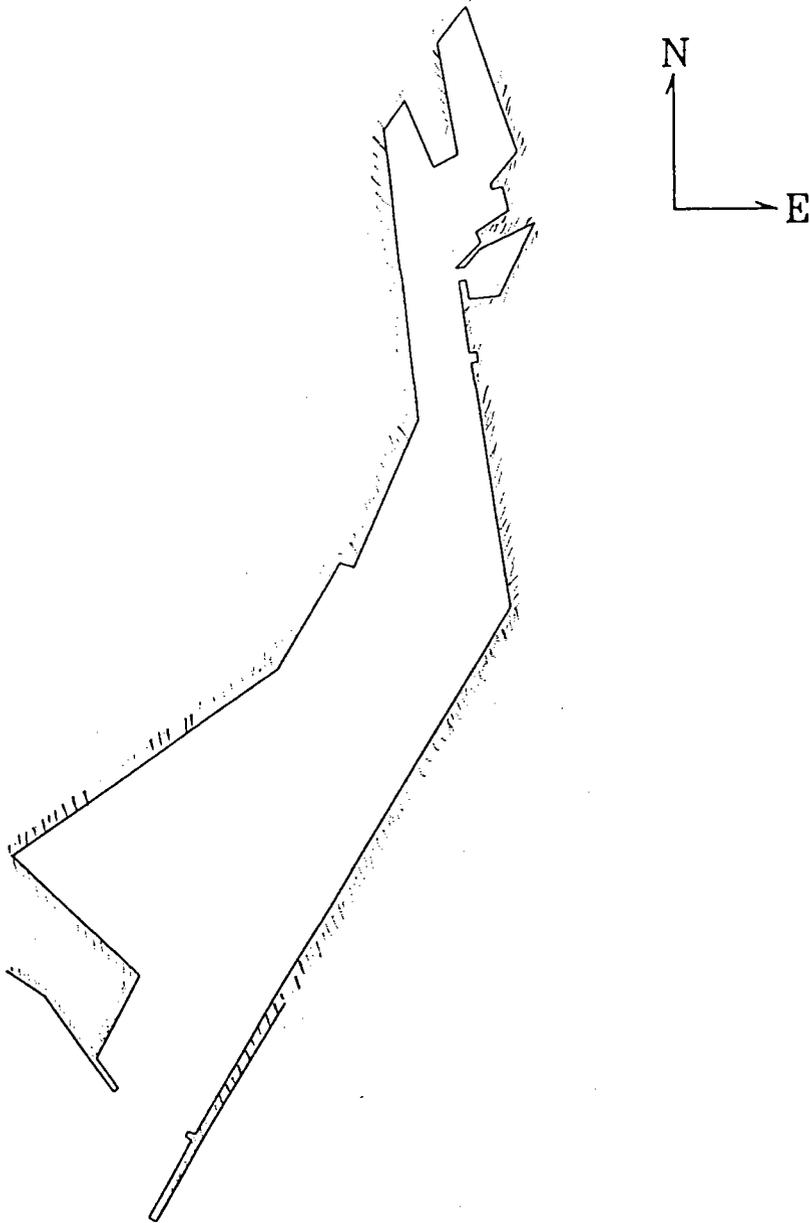
Institute of Harbor & Marine Technology

PLPRev.F08

1286 . 6 . 30

圖2-5-2 配置B花蓮港池在8號、10號及22號碼頭各處之共振曲線圖

Boundary of Haw-Lien Harbor Type-C



HLXP1A.BOU

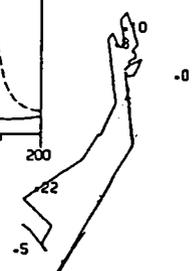
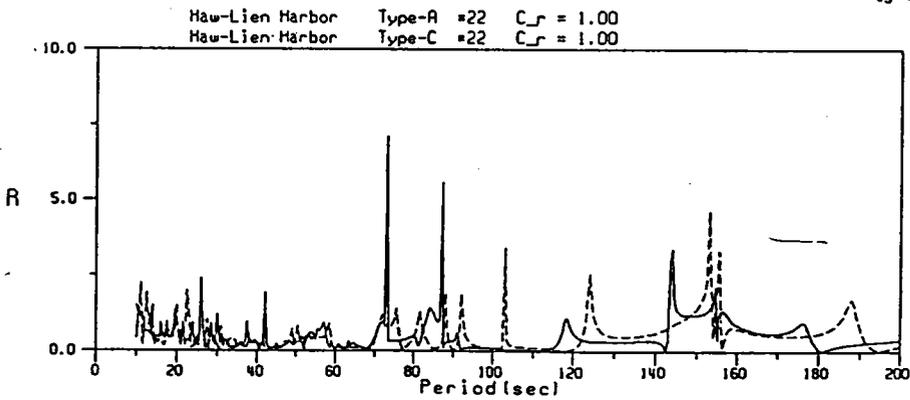
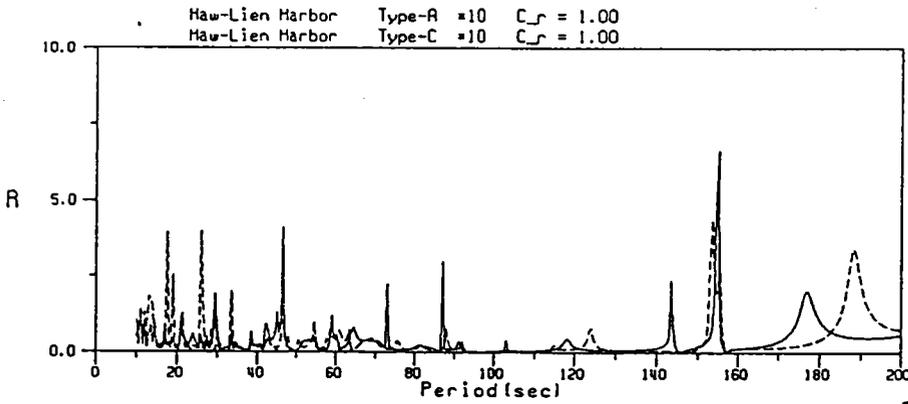
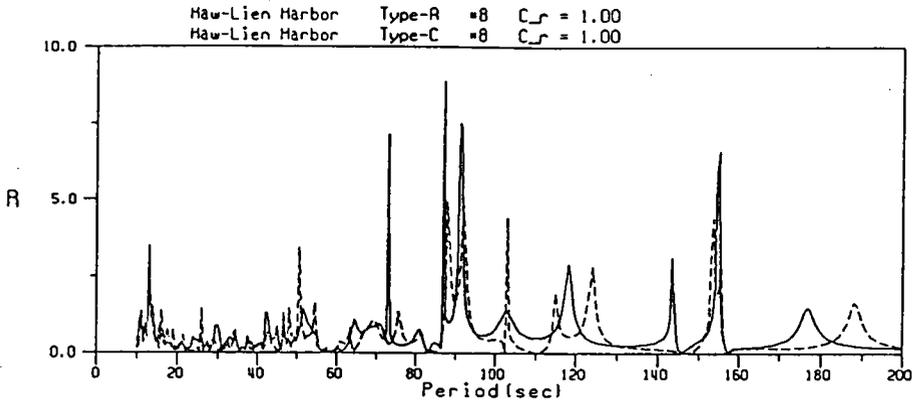
Institute of Harbor & Marine Technology

PLBU1V.FOR

1999.6.30

圖2-5-3花蓮港第二個改善方案配置圖(稱配置C)

Amplification factor in Haw-Lien



FHXSP21.000

Institute of Harbor & Marine Technology

PUPREV.FOR

1998.4.30

圖2-5-4 配置C花蓮港池在8號、10號及22號碼頭各處之共振曲線圖

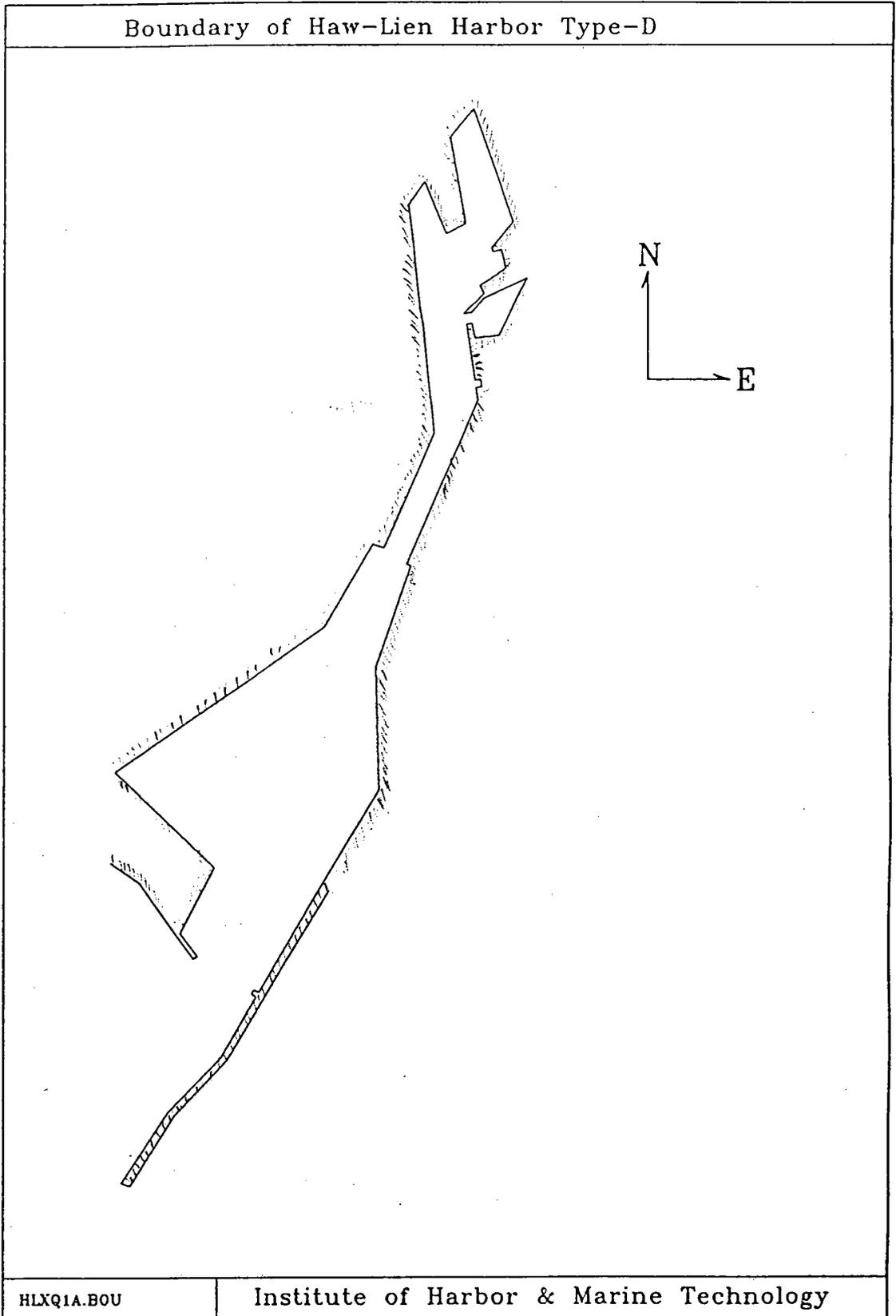
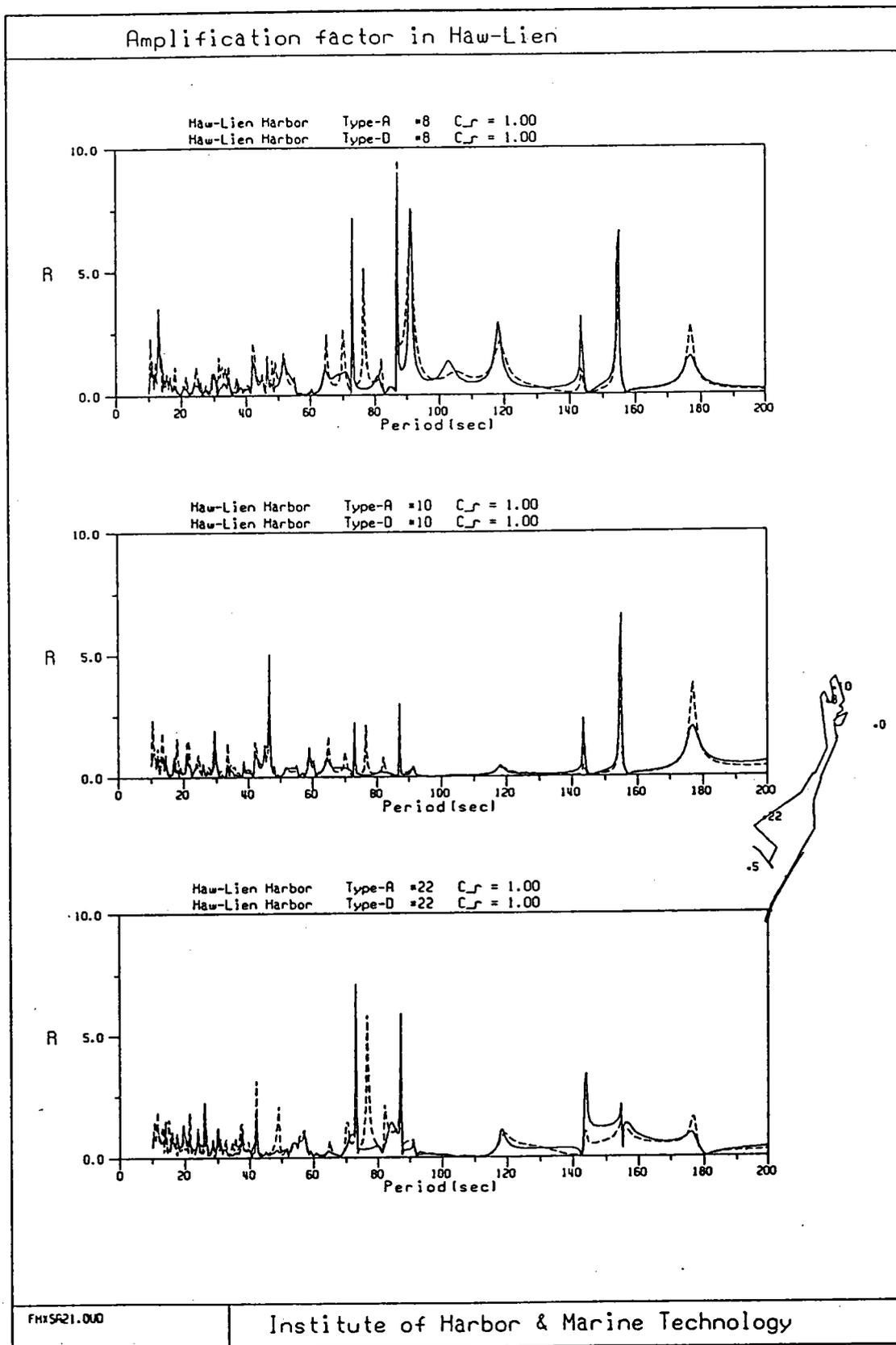


圖2-5-5花蓮港第三個改善方案配置圖(稱配置D)



FHX521.000

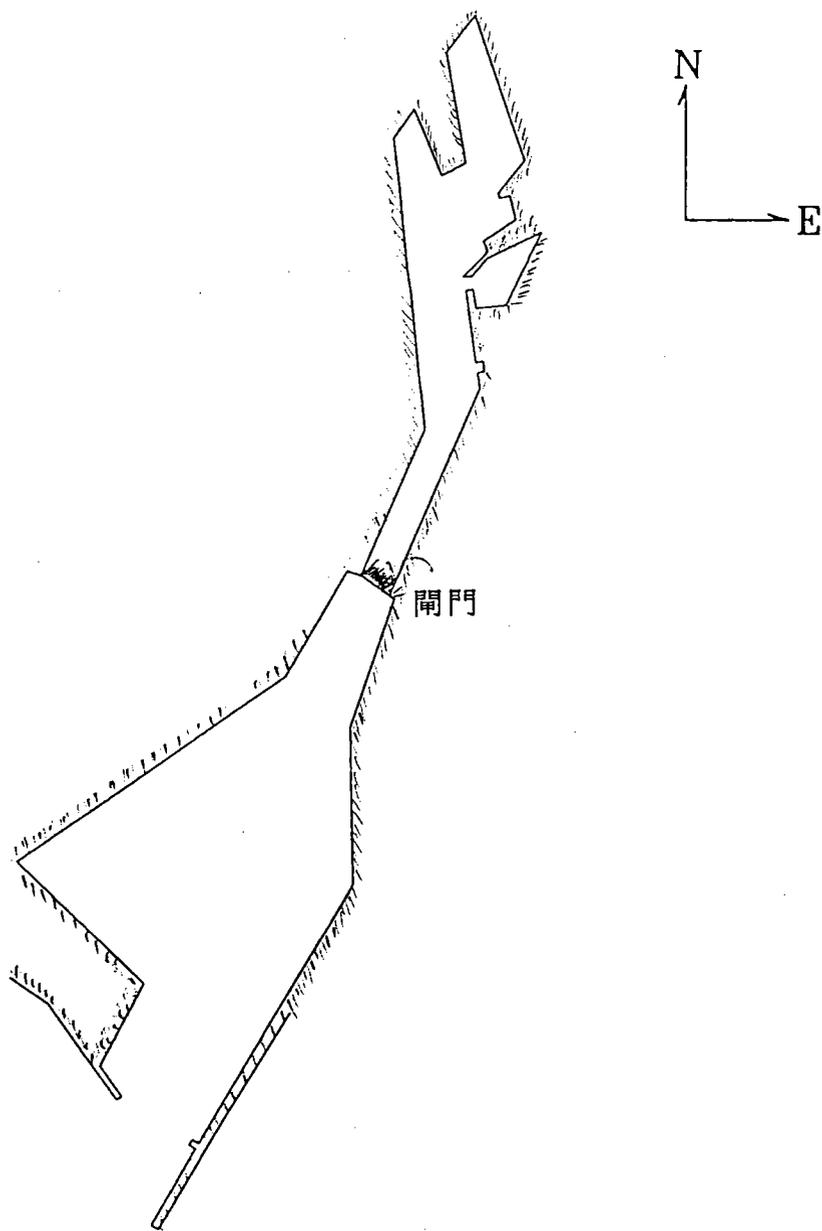
Institute of Harbor & Marine Technology

PLP2V.F01

1990.01.30

圖2-5-6 配置D花蓮港池在8號、10號及22號碼頭各處之共振曲線圖

Boundary of Haw-Lien Harbor Type-E



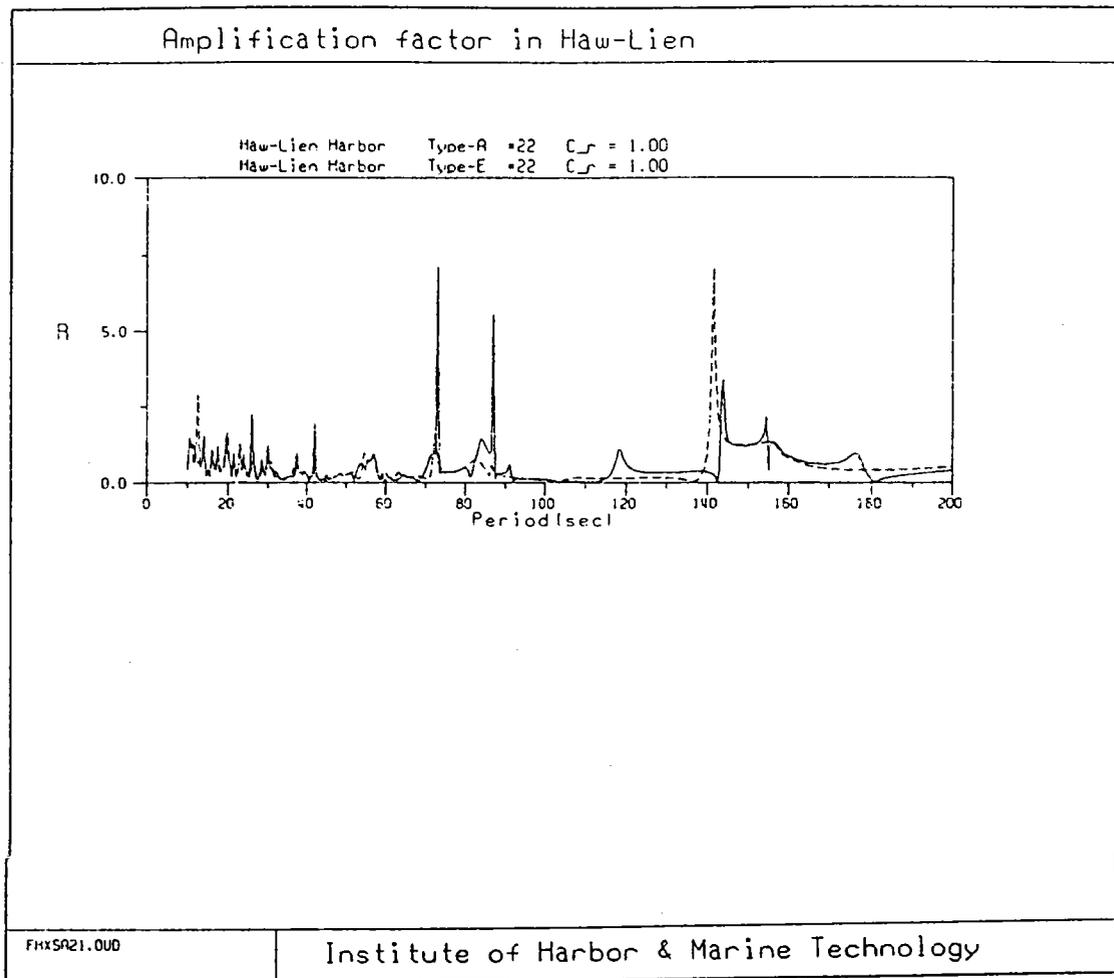
HLXZ1A.BOU

Institute of Harbor & Marine Technology

PLBUIV.FOR

1994.8.20

圖2-5-7花蓮港第四個改善方案配置圖(稱配置E)



P:PR2v.FOR

1996.6.30

圖2-5-8 配置E花蓮港池在在22號碼頭各處之共振曲線圖

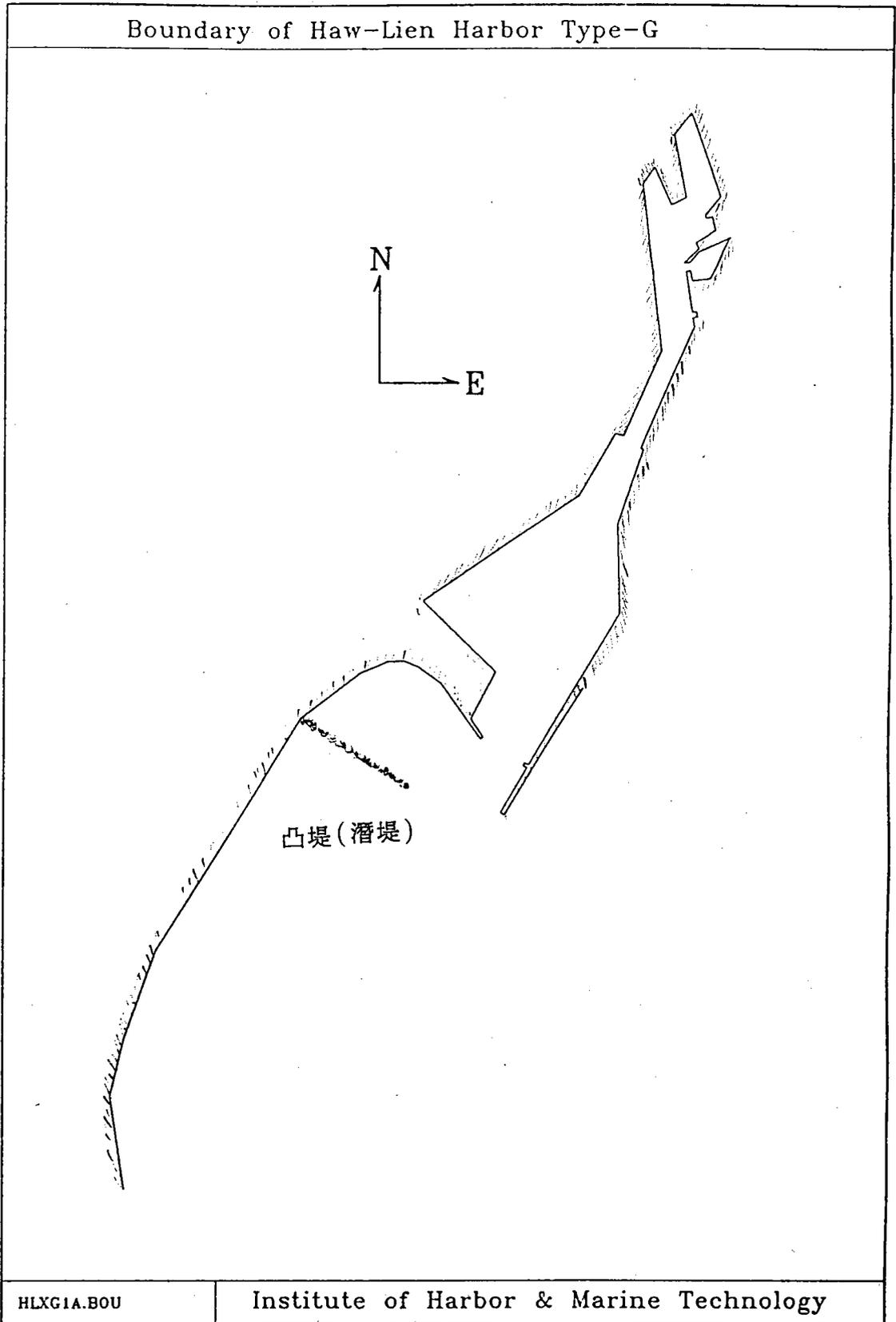


圖2-6-1花蓮港在南濱海岸適當位置建凸堤示意圖

參、花蓮港近岸海域流場數值分析

近岸流況為造成海灘地形變化之主要成因之一，其於航道附近除影響船舶進出港口安全外，在漂沙活躍區域更可能因其造成航道口淤塞或相關結構物崩壞。由於流場在近岸區甚易受水深、地形及結構物影響而改變大小及方向，加以其全面施觀測並不易進行，因此有必要配合現場條件進行數值模擬，俾利現場流況之掌握。近岸流之計算一般含蓋二類，一為潮流(tide current)，包括風吹流。另一為波浪引致之沿岸流(near-shore current)。為能有效評估兩者對港口及其對近岸區之影響，及考慮波浪與潮汐二個外力時間週期相差甚大，因此潮流及波浪引致之近岸流將分別考慮計算。

一、 潮流數值模式—*Model CT21*

考慮近岸海域區域(如示意圖3-1-1)， x, y 軸分別代表離向岸方向(離岸方向為正)，及沿岸方向， z 軸表垂直方向(上向為正)，水深分佈為 $h(x, y)$ ，水位變化為 $\zeta(x, y, t)$ 。

根據質量守恒原理(the conservation of mass)，不可壓縮流體可表示為下列連續方程式(continuity equation)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

式中 $u(x, y, z, t)$ ， $v(x, y, z, t)$ ， $w(x, y, z, t)$ 分別為 x, y 及 z 方向之流速，假如垂直方向之流向變化不甚劇烈，而在如潮汐之長波作用條件下，我們將引用垂直積分原理，化簡方程(3.1)為二維問題，即使用積分運算 $\int_{-h}^{\zeta}(\)dz$ 於式(3.1)可得

$$\begin{aligned} & \int_{-h}^{\zeta} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz \\ &= \int_{-h}^{\zeta} \frac{\partial u}{\partial x} dz + \int_{-h}^{\zeta} \frac{\partial v}{\partial y} dz + w(x, y, \zeta) - w(x, y, -h) = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

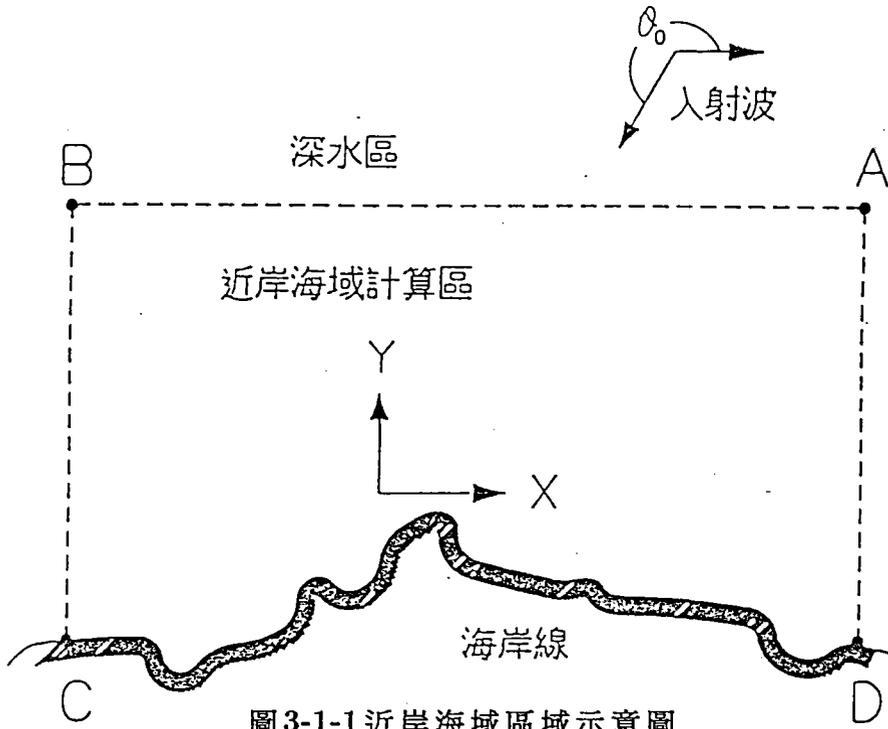


圖 3-1-1 近岸海域區域示意圖

引用萊不尼茲積分法(The Leibniz rule of integration)於(3.2)式右邊各項可得

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz - u(x, y, \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} - u(x, y, -h) \frac{\partial h}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz - v(x, y, \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} - v(x, y, -h) \frac{\partial h}{\partial y} \\ & + w(x, y, \zeta) - w(x, y, -h) = 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

假如定義

$$U = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} u dz \quad (3.4a)$$

$$V = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} v dz \quad (3.4b)$$

式中 U, V 分別為 x 方向及 y 方向之平均流速。

並使用三維自由表面運動邊界條件

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u(x, y, \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v(x, y, \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} - w(x, y, \zeta) = 0, \quad z = \zeta(x, y, t) \quad (3.5)$$

及不透水邊界條件

$$u(x, y, -h) \frac{\partial h}{\partial x} + v(x, y, h) \frac{\partial h}{\partial y} + w(x, y, -h) = 0, \quad z = -h(x, y) \quad (3.6)$$

則式(3.3)可化爲

$$\frac{\partial}{\partial x}(UD) + \frac{\partial}{\partial y}(VD) + \frac{\partial D}{\partial t} = 0 \quad (3.7)$$

式中 $D = h + \zeta$ ，而 UD, VD 分別代表 x 方向及 y 方方向之流量。

根據動量守恒原理 (conservation of momentum) 不可壓縮流可表示爲下列運動方程式 (momentum equation)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (3.8a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (3.8b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -2\omega_x v + 2\omega_y u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (3.8c)$$

式中 f 爲柯氏力參數 (Coriolis parameter phase velocity)， $f = 2\omega_e \sin \phi$ ， ω 爲地球自轉相位速度， ω_x, ω_y 分別爲地球自轉之 x 分量及 y 分量， ϕ 爲緯度 (latitude)。 $\tau_{ij}, i, j = x, y, z$ ，表示分子粘滯力 (molecular velocity) 及亂流動量傳遞 (turbulent momentum transfer) 之合成剪應力。 p 爲壓力， ρ 爲水密度。

一般典型近岸區垂直方向之流速 (w)，遠較水平速度 (u, v) 爲小，垂直之深度 (幾拾米)，遠較水平之尺度 (幾公里) 爲小，因此在較長波之條件下垂直方向之動量方程式，主要力量爲壓力及重力，其他力量予以忽略，式(3.8c)化簡爲

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (3.9a)$$

$$\text{or } p = \rho g(\zeta - z) \quad (3.9b)$$

因此

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (3.10a)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (3.10b)$$

將(3.10)代入(3.8a)及(3.8b)，並利用垂直積分 $\int_{-h}^{\zeta} (\) dz$ 運算、萊不尼茲原理、自由表面運動邊界條件(3.5)及不透水邊界條件(3.6)，可得

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}[U(h+\zeta)] + \frac{\partial}{\partial x}[\beta_{xx}U^2(h+\zeta)] + \frac{\partial}{\partial y}[\beta_{xy}UV(h+\zeta)] \\ & = (h+\zeta)fV - g(h+\zeta)\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{h+\zeta}{\zeta} \left(\frac{\partial F_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho}(F_{xs} - F_{xb}) \end{aligned} \quad (3.11a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}[V(h+\zeta)] + \frac{\partial}{\partial x}[\beta_{yx}UV(h+\zeta)] + \frac{\partial}{\partial y}[\beta_{yy}V^2(h+\zeta)] \\ & = -(h+\zeta)fU - g(h+\zeta)\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{h+\zeta}{\zeta} \left(\frac{\partial F_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho}(F_{ys} - F_{yb}) \end{aligned} \quad (3.11b)$$

式中 $\beta_{xx}, \beta_{yy}, \beta_{xy}, \beta_{yx}$ 稱動量修正因子(momentum correction factor)，分別定義為

$$\beta_{xx} = \frac{1}{(h+\zeta)U^2} \int_{-h}^{\zeta} u^2 dz \quad (3.12a)$$

$$\beta_{yy} = \frac{1}{(h+\zeta)V^2} \int_{-h}^{\zeta} v^2 dz \quad (3.12b)$$

$$\beta_{xy} = \beta_{yx} = \frac{1}{(h+\zeta)UV} \int_{-h}^{\zeta} uv dz \quad (3.12c)$$

剪應力 $F_{xx}, F_{xy}, F_{yx}, F_{yy}$ 分別定義為

$$F_{xx} = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} \tau_{xx} dz \quad (3.13a)$$

$$F_{xy} = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} \tau_{xy} dz \quad (3.13b)$$

$$F_{yx} = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} \tau_{yx} dz \quad (3.13c)$$

$$F_{yy} = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} \tau_{yy} dz \quad (3.13d)$$

F_{xs}, F_{ys} 及 F_{xb}, F_{yb} 分別代表自由表面之剪力(風剪力)及海底之剪力(摩擦力)。

一般實際應用時動量修正因子可假設為 1 (Dean and Dalrymple, 1984)

，即 $\beta_{xx} = \beta_{xy} = \beta_{yx} = B_{yy} = 1$ ，則式(3.11a)及(3.11b)可化為

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = fV - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial F_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{D\rho} (F_{xs} - F_{xb}) \quad (3.14a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -fU - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial F_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{D\rho} (F_{ys} - F_{yb}) \quad (3.14b)$$

剪應力 $F_{xx}, F_{yy}, F_{xy}, F_{yx}$ 一般可表示為

$$F_{xx} = \rho E_{xx} \frac{\partial U}{\partial x} \quad (3.15a)$$

$$F_{yy} = \rho E_{yy} \frac{\partial V}{\partial y} \quad (3.15b)$$

$$F_{xy} = F_{yx} = \frac{\rho}{2} E_{xy} \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (3.15c)$$

$E_{xx}, E_{xy}, E_{yx}, E_{yy}$ 稱為剪應力黏滯性係數 (eddy Viscosity Coefficient)，一般取 $E_v = E_{xx} = E_{yy} = E_{xy} = E_{yx}$ ，而海面一般主要為風剪力，其分量 F_{xs}, F_{ys} 依 Dean(1984) 可表示為

$$F_{xs} = \rho E_w W_d^2 \cos(\theta_w) \quad (3.16a)$$

$$F_{ys} = \rho E_w W_d^2 \sin(\theta_w) \quad (3.16b)$$

式中 W_d 為距海平面 10 米處風速。 E_w 為風剪力係數。 θ_w 為風與 x 軸之夾角。

而海底摩擦力在 x 及 y 方向之分量 F_{xb} 及 F_{yb} 依 Smith and Cheng(1987) 可表示為

$$F_{xb} = \rho E_b U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (3.17a)$$

$$F_{yb} = \rho E_b V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (3.17b)$$

式中 E_b 為海底摩擦係數。

一般在垂直流由方向變化不大，受潮汐、風影響之近岸流況可引用式(3.7)，(3.14a)及(3.14b)三個方程式，求解平均流速 U, V 及水位變化 D 等三個變數之流場。

二維單層模式主要引用控制方程式，包括式(3.7)，(3.14a)及(3.14b)之時間函數問題 (time dependent problem)，三個方程求之三個變數為水平流速 U, V 及水位 ζ 。本節將引用有限元素法將上述積分表示式改為有限元素方程式。

將上述微分方程式以區域積分轉換為 weak form 如下

$$\int \int_R \psi \left(\frac{\partial(UD)}{\partial x} + \frac{\partial(VD)}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial t} \right) dR = 0 \quad (3.18)$$

$$\int \int_R \psi \left[\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial(D-h)}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial F_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yx}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho D} (F_{xs} - F_{xb}) \right] dR = 0 \quad (3.19)$$

$$\int \int_R \psi \left[\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial(D-h)}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial F_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho D} (F_{ys} - F_{yb}) \right] dR = 0 \quad (3.20)$$

式中 R 為計算區域， ψ 為權重函數 (weighting function)。

本文利用 Galerkin 有限元素之近似觀念 (Galerkin approximation)，即權重函數取用元素之形狀函數，將計算區域 R 分割為有限個元素 (以 $R^{(e)}$ 表示)，此處取用線性三角形元素，計有 N 個元素，對流場每個元素上之變量 U, V, D 及 h ，皆可表示為： $U = \sum_{i=1}^3 U_i \psi_i$ ， $V = \sum_{i=1}^3 V_i \psi_i$ ， $D = \sum_{i=1}^3 D_i \psi_i$ ， $h = \sum_{i=1}^3 h_i \psi_i$ 。式中 U_i, V_i, D_i 及 h_i 為元素 $R^{(e)}$ 上結點 i 之 U, V, D, h 值， $i=1, 2, 3$ ，一般以逆時鐘方向排列， ψ_i 為線性三角形元素之形狀函數。最後引用部分積分公式及 divergence 定理推導之關係式，經整理可化為矩陣方程式，再由高斯消去法 (Gaussian elimination) 求解。時間變化引用二步驟顯示法 (Kawahara et al., 1978) 對時間做數值積分，二步驟顯示法為積分一個時間間距時先計算半個時距之值再據以完成整個時距之計算，此方法具有二階精確度。此方法滿足條件穩定，時間間距之大小一般受限於 Courant-Friendrichs-law 條件

$$\Delta t \leq (1-2) \frac{\Delta d}{\sqrt{2gh}} \quad (3.21)$$

式中 Δd 為元素之最小邊長。

邊界條件，在海面一般主要外力為風力，海底則引用經驗式描述摩擦力之作用。在二維模式側面邊界有固定邊界及開放邊界。固定邊界一般假設為不透水直立壁，垂直於岸壁之速度為零，同時假定非滑動 (non-slip)，即平行於岸壁之速度不為零，在開口邊界則需給定實測之潮位或流速。本文之二維模式為時間變化問題，因此在啓始時間 ($t=0$) 時，即啓始條件需給定整個區域之水位 D 及流速 U, V 。

二、 沿岸流數值模式 — Model CL21

將波浪視為一外力，其引致之流場，稱為沿岸流，波場本身即為一複雜之現象，因此沿岸流之計算較為複雜。解析近岸流場前必需先推算波浪場，再利用推算之波浪場結果，才能進一步計算流場，因此波場與流場之數值計算結果間建立橋樑為一個重要的原則。

假設波浪與海流之交互作用甚為明顯，即波力應視為獨立外力，因此將水平速度區分為一平均速度及因波力造成出之速度變化表示為

$$u = u^* + u' \quad (3.22a)$$

$$v = v^* + v' \quad (3.22b)$$

式中 u^*, v^* 為一平均流速， u', v' 為波力造成之速度分量。

而水位變化 ζ 包括因流速影響產生之 ζ_a ，因波浪與海流交互作用產生之平均水位變化 ζ_v ，如水位抬昇(set up)或水位降低(set down)，表示為 $\zeta = \zeta_a + \zeta_v$ 。類似上節中之垂直積分原理，以 $\int_{-h}^{\zeta} (\) dz$ 做積分運算於連續方程式(3.1)及運動方程式(3.8a)及(3.8b)則可得下列方程式

$$\frac{\partial}{\partial x}[U(h+\zeta)] + \frac{\partial}{\partial y}[V(h+\zeta)] + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = fV - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial F_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{xy}}{\partial y} \right) \\ - \frac{1}{\rho(h+\zeta)} (F_{xs} - F_{xb}) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -fU - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial F_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yy}}{\partial y} \right) \\ - \frac{1}{\rho(h+\zeta)} (F_{ys} - F_{yb}) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.25)$$

式中 U, V 定義如式(3.4a)及(3.4b)。 $F_{xx}, F_{xy}, F_{yx}, F_{yy}$ 定義如式(3.15)，式中 E_v 依 Longuet-higgins (1970) 之建議可表示為

$$E_v = N_c \ell_c \sqrt{g(h + \zeta)} \quad (3.26)$$

式中 N_c 為常數，其值小於 0.016， ℓ_c 為特性長度，定義為

$$\ell_c = (h + \zeta) / \tan \beta \quad (3.27)$$

式中 $\tan \beta$ 為平均底床坡度。

F_{xs} 及 F_{ys} 定義如式(3.16)，此處假設無風剪力作用， $F_{xs} = F_{ys} = 0$ ， F_{xb} 及 F_{yb} 則定義如式(3.17)。

輻射應力 (radiation stress) S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} , S_{yx} 定義為

$$S_{xx} = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} (u'u' + \frac{p}{\rho}) dz - \frac{1}{2} g(h + \zeta) - U'U' \quad (3.28a)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} (v'v' + \frac{p}{\rho}) dz - \frac{1}{2} g(h + \zeta) - V'V' \quad (3.28b)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} u'v' dz - U'V' \quad (3.28c)$$

式中 U' , V' 分別定義為

$$U' = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} u' dz \quad (3.29a)$$

$$V' = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} v' dz \quad (3.29a)$$

假如波場及波力引起之流場週期皆為 T ，針對(3.23)，(3.24)及(3.25)等式取週期平均 $\frac{1}{T} \int_0^T () dt$ ，並定義 $D = h + \zeta$ ，則可化簡為

$$\frac{\partial}{\partial x}(\overline{UD}) + \frac{\partial}{\partial y}(\overline{UD}) = 0 \quad (3.30a)$$

$$\overline{U} \frac{\partial \overline{U}}{\partial x} + \overline{V} \frac{\partial \overline{U}}{\partial y} = f\overline{V} - g \frac{\partial(\overline{D} - h)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{F_{xx}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{F_{xy}}}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho \overline{D}} \overline{F_{xb}} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{S_{xx}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{S_{xy}}}{\partial y} \right) \quad (3.30b)$$

$$\overline{U} \frac{\partial \overline{V}}{\partial x} + \overline{V} \frac{\partial \overline{V}}{\partial y} = -f\overline{U} - g \frac{\partial(\overline{D} - h)}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{F_{yx}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{F_{yy}}}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho \overline{D}} \overline{F_{yb}} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{S_{yx}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{S_{yy}}}{\partial y} \right) \quad (3.30c)$$

式中各物理量變數上之短線一代表週期平均量。且 $\overline{D} = \overline{h} + \overline{\zeta} = h + \overline{\zeta}$ ，其中 $\overline{\zeta} = \overline{\zeta_a} + \overline{\zeta_v}$ 。

假設入射波(波高H，波數k，頻率σ)為小振幅線性波，其波向與x軸夾 θ_o 角，表示為

$$\zeta_o(x, y, t) = \frac{H}{2} \cos(k \cos \theta_o x + k \sin \theta_o y - \sigma t) \quad (3.31)$$

則根據(Dean and Dalrymple, 1984)

$$\overline{S_{xx}} = E_o [n_c (\cos^2 \theta_o + 1) - \frac{1}{2}] \quad (3.32a)$$

$$\overline{S_{yy}} = E_o [n_c (\sin^2 \theta_o + 1) - \frac{1}{2}] \quad (3.32b)$$

$$\overline{S_{xy}} = \frac{E_o}{2} n_c \sin 2\theta_o \quad (3.32c)$$

式中

$$n_c = \frac{kh}{\sinh(2kh)} + \frac{1}{2} \quad (3.33)$$

n_c 稱為波浪之群速(group velocity)與相位速度(phase velocity)比值， E_o 為每單位長度之能量。

$$E_o = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (3.34)$$

水位變化中之因波浪引起之平均水位變化量 $\bar{\zeta}_v$ ，本文將分別引用 Horikawa 碎波前淺化區及碎波後之經驗公式求得。碎波前之水位為下降 (set down) 表示為

$$\bar{\zeta}_v = -\frac{H^2}{8} \frac{k}{\sinh(2kh)} \quad (3.35a)$$

碎波後之水位提昇 (set up) 表示為

$$\bar{\zeta}_v = 0.167(h_b - h) - \frac{H_b^2}{8} \frac{k}{\sinh(2kh_b)} \quad (3.35b)$$

式中 h_b 為碎波處水深， H_b 為碎波處波高，碎波條件則引用淺水波臨界尖銳度為指標，即

$$(H/L)_{max} = 0.142 \tan h\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (3.35c)$$

式中 L 為波長

沿岸流之控制方程式為 (3.30a)，(3.30b) 及 (3.30c) 等三式，以求解 \bar{U} 、 \bar{V} 及 \bar{D} 三個未知量。

近岸流數值模式引用控制方程式為 (3.30)、(3.30b) 及 (3.30c) 與時間無關之問題，同上一章將引用有限元素法將上述積分表示式化為有限元素方程式之 Weak form 如下：

$$\int \int_R \psi_i \left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{U}\bar{D}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{U}\bar{D}) \right] dR = 0 \quad (3.36)$$

$$\int \int_R \psi_i \left[\bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} - f\bar{V} + g \frac{\partial (\bar{D} - h)}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{F}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{F}_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho \bar{D}} \bar{F}_{xb} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{S}_{xy}}{\partial y} \right) \right] dR = 0 \quad (3.37)$$

$$\int \int_R \psi_i \left[\bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + f \bar{U} + g \frac{\partial (\bar{D} - h)}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{F}_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{F}_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho \bar{D}} \bar{F}_{yb} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{S}_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{S}_{yy}}{\partial y} \right) \right] dR = 0 \quad (3.38)$$

式中 R 為計算區域， ψ_i 為元素之形狀函數，此處取用線性四邊形元素。引用部分積分公式及 divergence 定理推導之關係式，經整理可化為矩陣方程式，再由高斯消去法 (Gaussian elimination) 求解。邊界條件，在海面一般主要外力為波力，海底則引用經驗式描述摩擦力之作用。在二維模式側面邊界有固定邊界及開放邊界。固定邊界一般假設為不透水直立壁，垂直於岸壁之速度為零，同時假定非滑動 (non-slip)，即平行於岸壁之速度不為零，在開口邊界則需給定實測之水位或流速。

三、近岸波場數值模式—Model WP21

解析近岸流場前必需先推算波浪場，再利用推算之波浪場結果，才能進一步計算流場，此處推算近岸地區波浪之淺化、折射及繞射及碎波後之波場，將引用Model WP21 (蘇等, 1995)及Model WS21 (蘇等, 1995)兩個波場推算模式結合計算。

Model WP21波浪理論之基本方程式為拋物線近似(parabolic approximation)之緩坡方程式(mild-slope equation)：

$$\frac{\nabla^2 A}{A} + \frac{\nabla C C_g}{C C_g} \cdot \frac{\nabla A}{A} + k^2 - |\nabla S|^2 = 0 \quad (3.39)$$

$$\zeta(x, y, t) = A(x, y) e^{iS(x, y)} e^{-i\omega t} \quad (3.40)$$

式中 $A(x, y)$ 及 $S(x, y)$ 分別振幅(amplitude)及相位(phase)。

Model Wp21之數值方法為引用貼壁座標系統及有限差分法，解析拋物線型態緩坡方程式之波場。其特性可推算不等水深(緩變)、不規則形狀區域之波場分佈。包括折射及淺化之影響果，一般求解波浪振幅網格點可較Model WE21求解水位變化為大，計算之範圍可較廣大，而貼壁座標系統可應用於不規則形狀海岸線。模式考慮淺化、折射及碎波等現象，但無考慮反射及強烈繞射效應。其可應用為解析近岸地區之波高及波向，而波場推算之結果進一步提供Model CL21解析近岸流場。

Model WP21引用之基本方程式為拋物線近似之緩坡方程式，因此模式有考慮淺化、折射及碎波等現象，並無考慮反射及強烈繞射效應。但一般近岸地區於港口處常有防波堤存在，或為保護海岸線之離岸堤、潛堤或突堤存在。此時波浪反射及強烈繞射效應顯然甚為重要，而不可忽略。

Model WS21波浪理論之基本方程式為荷姆茲方程式(Helmholtz equation)

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} + k^2 \eta = 0 \quad (3.41)$$

由橢圓形態緩坡方程式(mild- slope equation)，在等水深之條件方程式簡化而得。其功能可推算不同配置透水性離岸堤、防波堤及潛堤之繞射及反射現象。解析方法則以半無限長堤之Sommerfeld Solution為基本解，利用線性疊加原理求解波場，可推算等水深、長條型結構物附近之波場分佈。結構物如不透水性離岸堤、防波堤及透水性潛堤等。而堤以無厚度處理、堤為部分反射及部分穿透體。模式考慮之堤可為單堤、雙堤及多堤，並引用線性波理論，等水深條件，包括繞射及反射，不考慮碎波及折射等影響。因為以理論解利用線性疊加原理求解波場，格點大小無限制。其可應用於離岸堤、防波堤及潛堤附近之波場推分佈。

Model WP21與Model WS21之組合將可較完整得推算近岸地區，包括透水性離岸堤、防波堤及潛堤等結構物，並考慮淺化、折射、繞射、反射及碎波等影響之波場。

四、 例子說明

有關潮流模式— Model CT21，取一十字形港池(如圖3-4-1)，長30公里，寬15公里，深度8米，對數值模式做初步印證。並假設開口有一振幅1米，週期12.5小時之潮波作用於靜止之港池。此計算例為模擬一部份開口之港池在開口處受半日潮作用港池內之水位及流場變化。計算此例主要目的在初步測試模式之正確性。數值計算中所用之有限元素格網如圖3-4-2所示，數值積分所用之時間間距取10秒，數值模式計算結果在部份時間港池內等水位及流分佈分別如圖3-4-3所示，由於港邊壁為全反射直立壁因此可預期受到反射波影響於漲潮時港內水位較開口處水位為高，退潮時港內水位則較開口處水位為低。港池開口處由高潮位退潮至零水位時港池流場為往開口處流動而港池開口處由低潮位漲潮至零水位時港池流場則為由開口處往港內流動。

有關繞射推算模式— Model WS21，取一半無限長防波堤為例。波浪遭遇防波堤，在堤後水域，仍有部份波浪存在，此為繞射(Diffraction)現象，一般同樣可以依光波繞射原理解析，防波堤對波浪之遮蔽(Sheltering)效果，繞射後之波高與入射波高比值稱為繞射係數(Diffraction coefficient)，繞射後之波向線同樣產生彎曲現象，一般以等繞射係數及等相位線描述繞射現象。圖3-4-4波浪斜向(ENE)作用於半無限長防波堤之等波高分佈圖，圖3-4-5波浪斜向(ENE)作用於半無限長防波堤之等相位分佈圖。而在堤前部份波浪反射(稱為反射波)，入射波與反射波因加成作用產生重複波，對防波堤近造成甚大影響，波浪由直角或斜向投射向防波堤之狀況，即按光波反射原理解析。

有關近岸波場推算模式— Model WP21，取一等坡度1/20、長1000米、寬800米之近岸區域為例，並假設一規則波內外海甚遠處向近岸區方向前進，其振幅為 a_1 ，週期為 T_1 (波長為 L_1 ，波數為 k_1)，方向為 θ_0 。圖3-4-6為假設振幅 $a_1 = 1.0$ 米，週期為 $T_1 = 10$ 秒，方向為 $\theta_0 = 22.5^\circ$ ，即波浪斜向以ENE近入海岸，數值計算求得之等波線及波向線，虛線則為與海岸平行之等水深線。波浪從深海區進入近海淺水區，因地形之影響，

波向及波高皆將改變，計算近海波場之折射及淺化現象，一般引用波向線理論(wave ray theory)，即假設波能延著波向線進行，波向線可能因地形變化改變，因此波向線間之距離可能改變，但能量為守恒，波向線間距減小，表示波高增大，圖中顯示波向越接近海岸，越趨向垂直於海岸線。波向線理論上不能相交，因為相交點之距離為零，波高無限大為不合理，因此波向線理論無法包容波浪繞射現象。Model WP21也考慮波浪進入近岸區後除折射及淺化效應、因水深變淺產生碎波效應，部份波浪能量將消散。

沿岸流模式Model CL21之計算，考慮存在一離岸堤長1000米、寬800米之近岸海域，其等水深分佈，如示意圖3-4-7之點線所示，圖3-4-8為引用Model WP21及Model WS21組合數值計算之波高及波向之結果。圖3-4-9為本文沿岸流模式—Model CL21計算之結果，流場分佈形態尚稱合理。

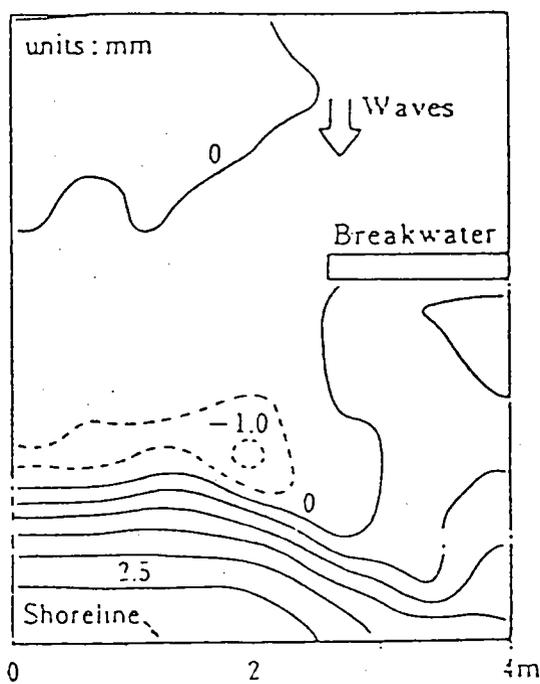


圖3-4-7近岸流模式計算例子海域區域水深圖

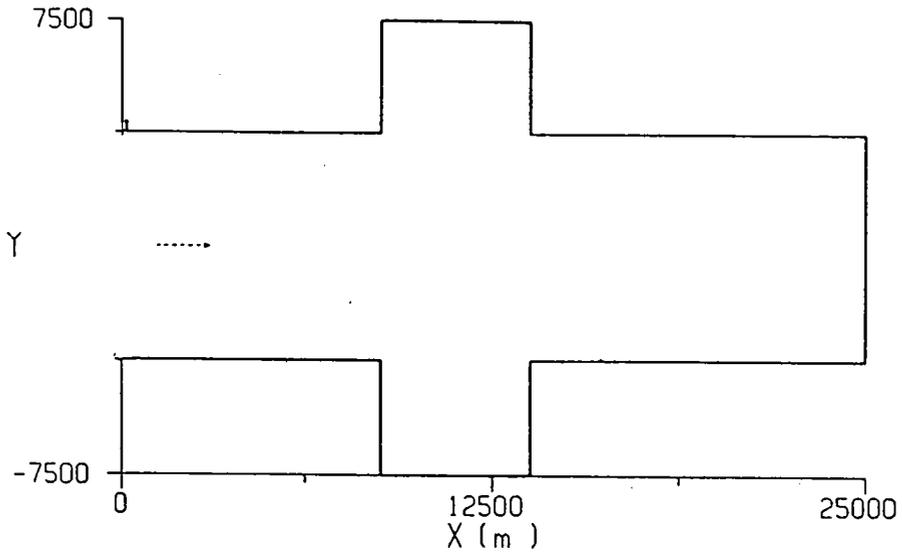


圖 3-4-1 十字形港池示意圖

EXAMPLE NO. 3 = COASTAL ESTUARY PROBLEM

RECA1C11.DAT

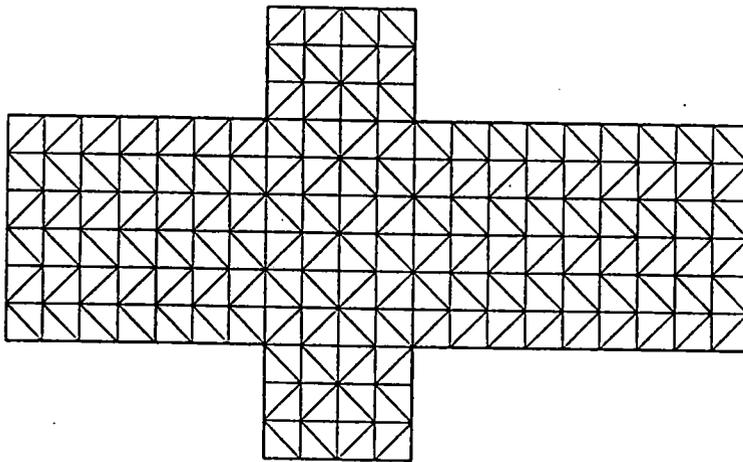


圖 3-4-2 十字形港池有限元素格網分割圖

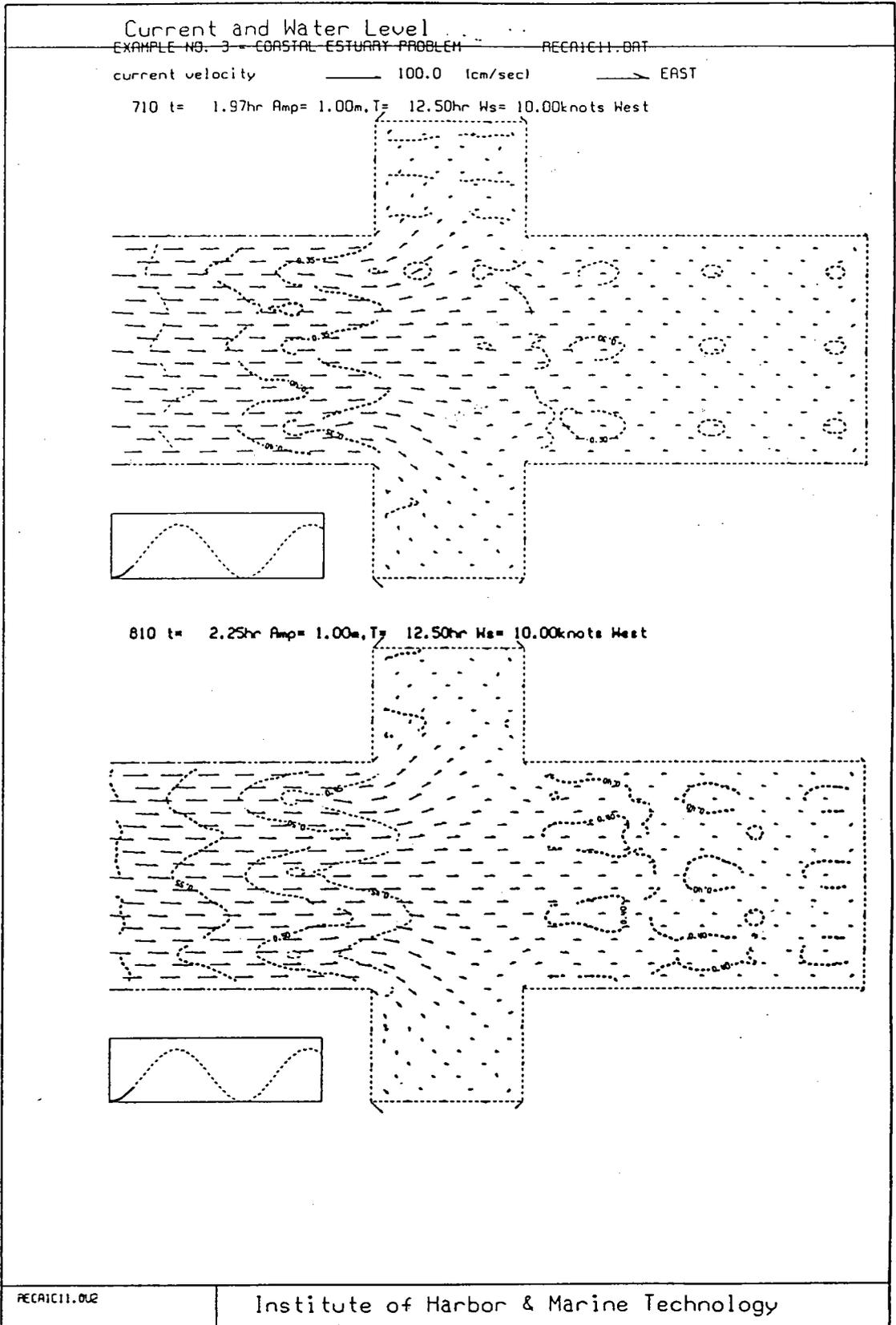


圖 3-4-3 漲潮時十字形港池水位及速度分佈圖

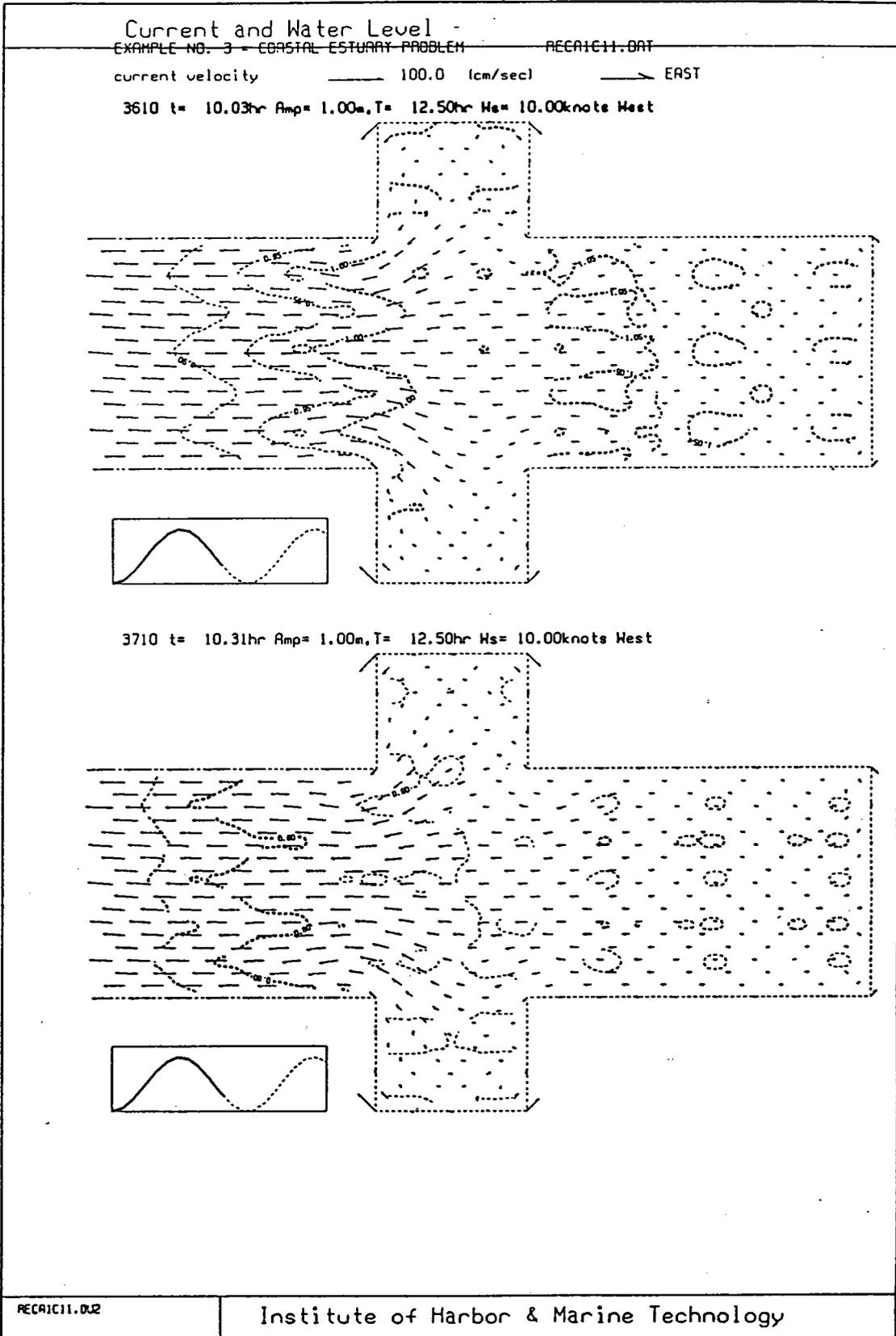


圖3-4-4退潮時十字形港池水位及速度分佈圖

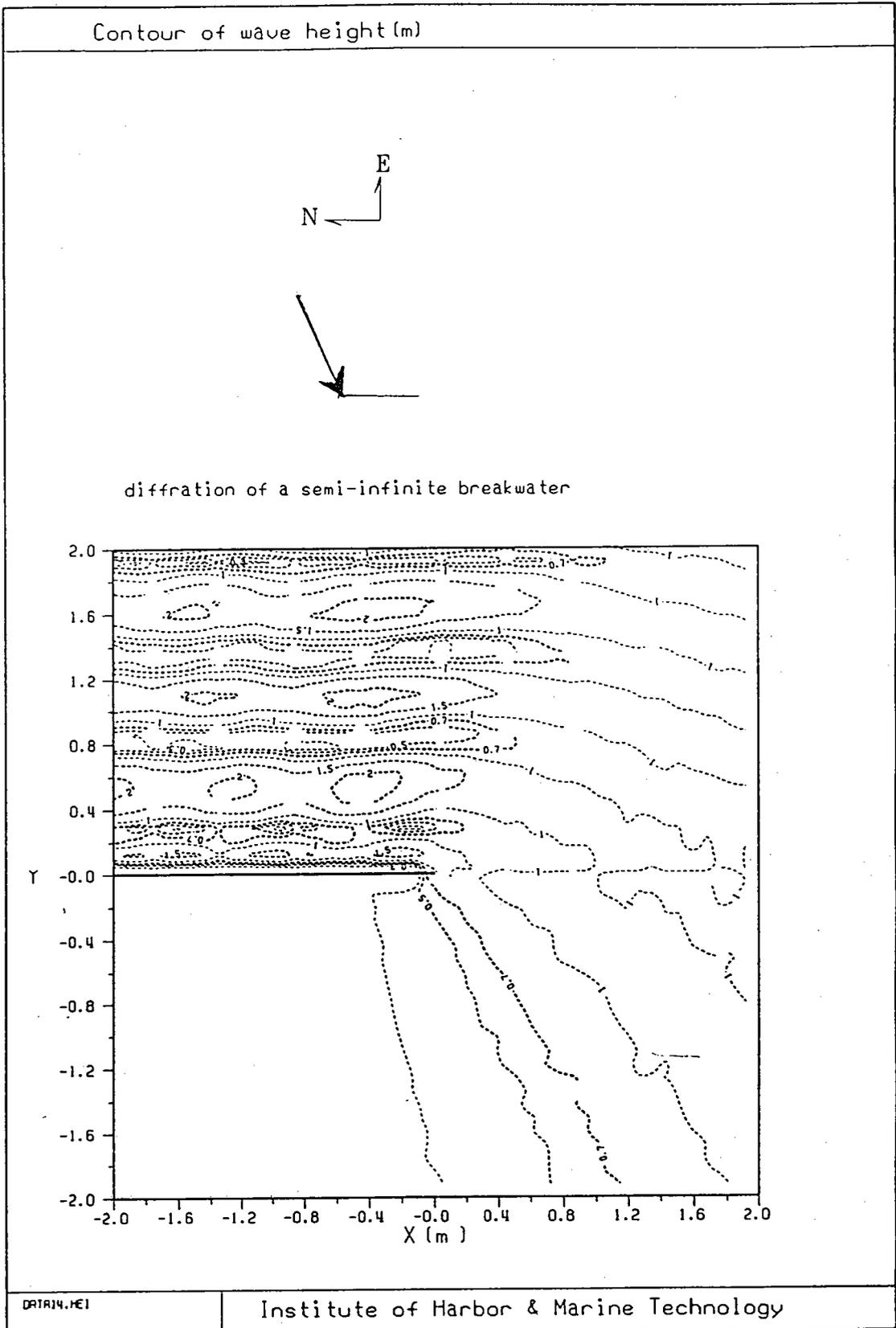
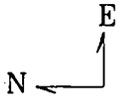
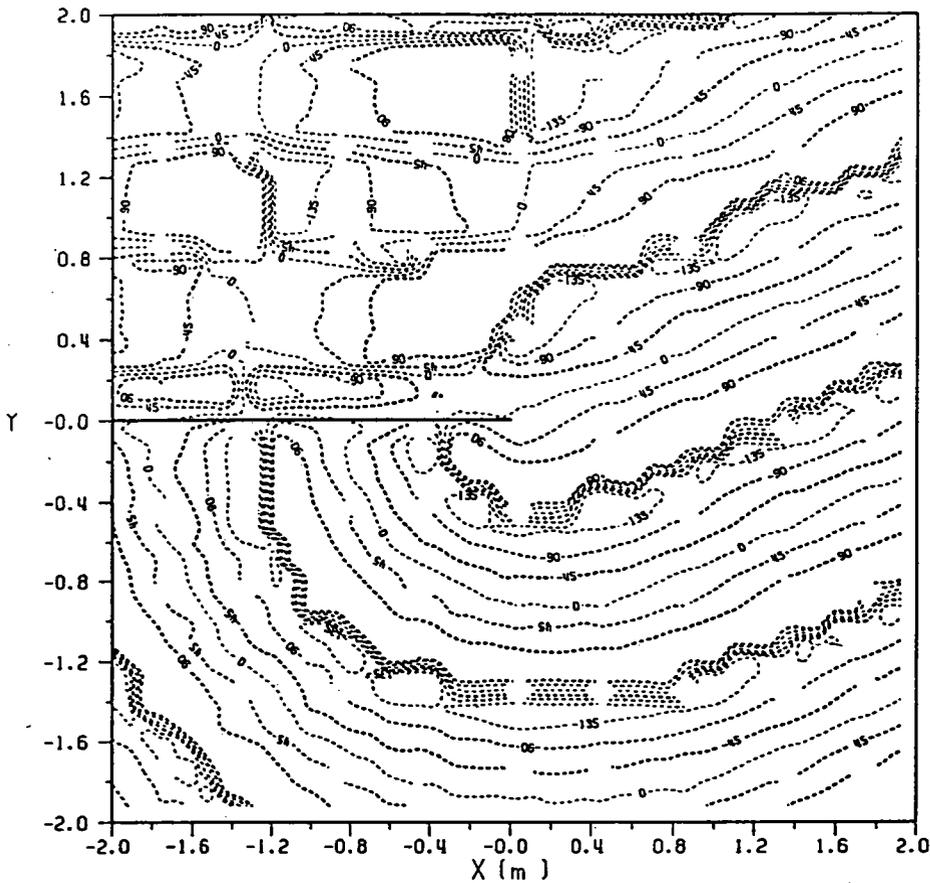


圖3-4-5a 波浪斜向(ENE)作用於半無限長防波堤之等波高分佈圖

Contour of wave phase (degree)



diffraction of a semi-infinite breakwater



DATA14.PHS

Institute of Harbor & Marine Technology

PLSP1V.FOR

1990.4.30

圖3-4-5b 波浪斜向(ENE)作用於半無限長防波堤之等相位分佈圖

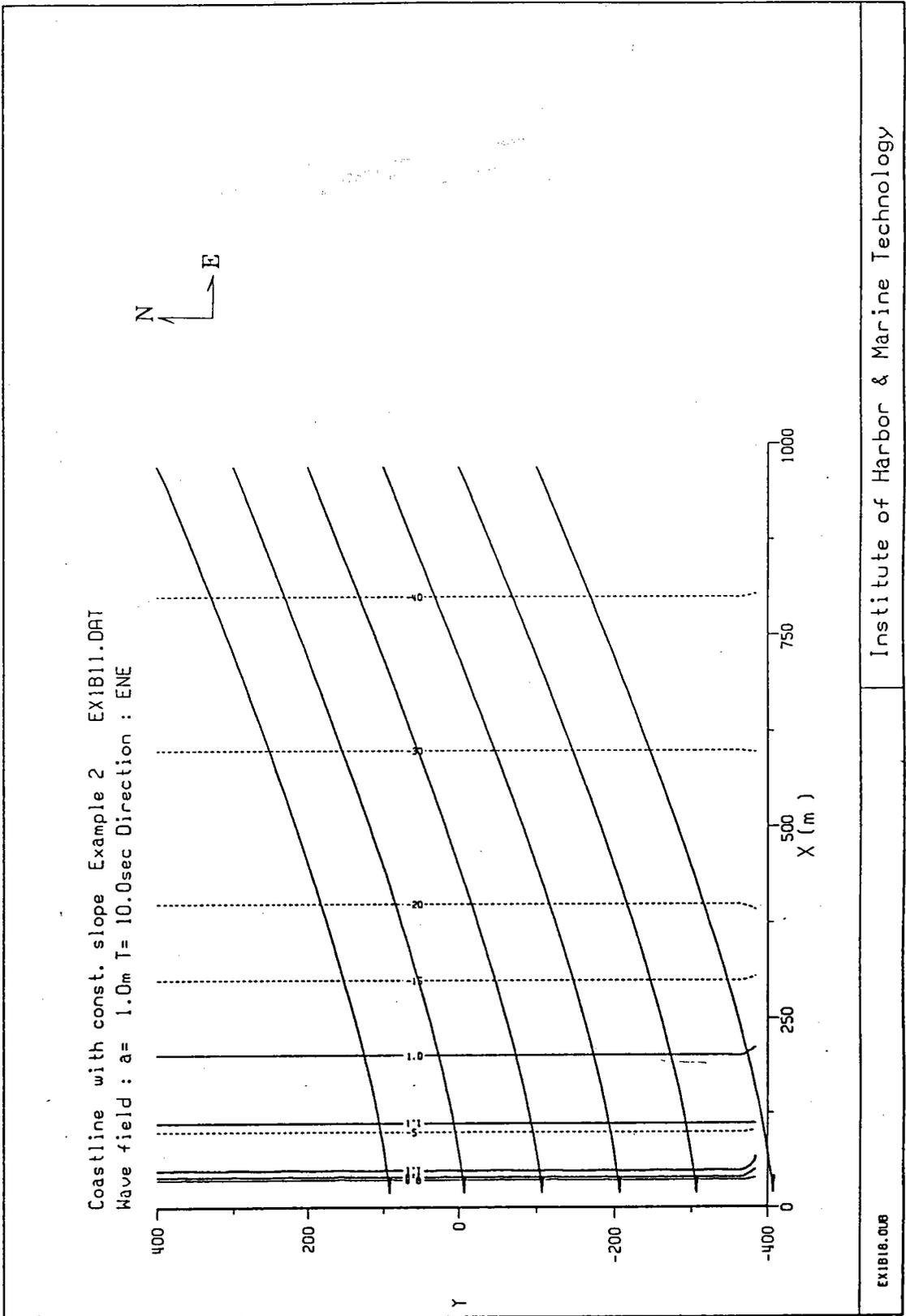


圖3-4-6波浪斜向(ENE)作用於等坡度1/20
之近岸區域之波高及波向線分佈圖

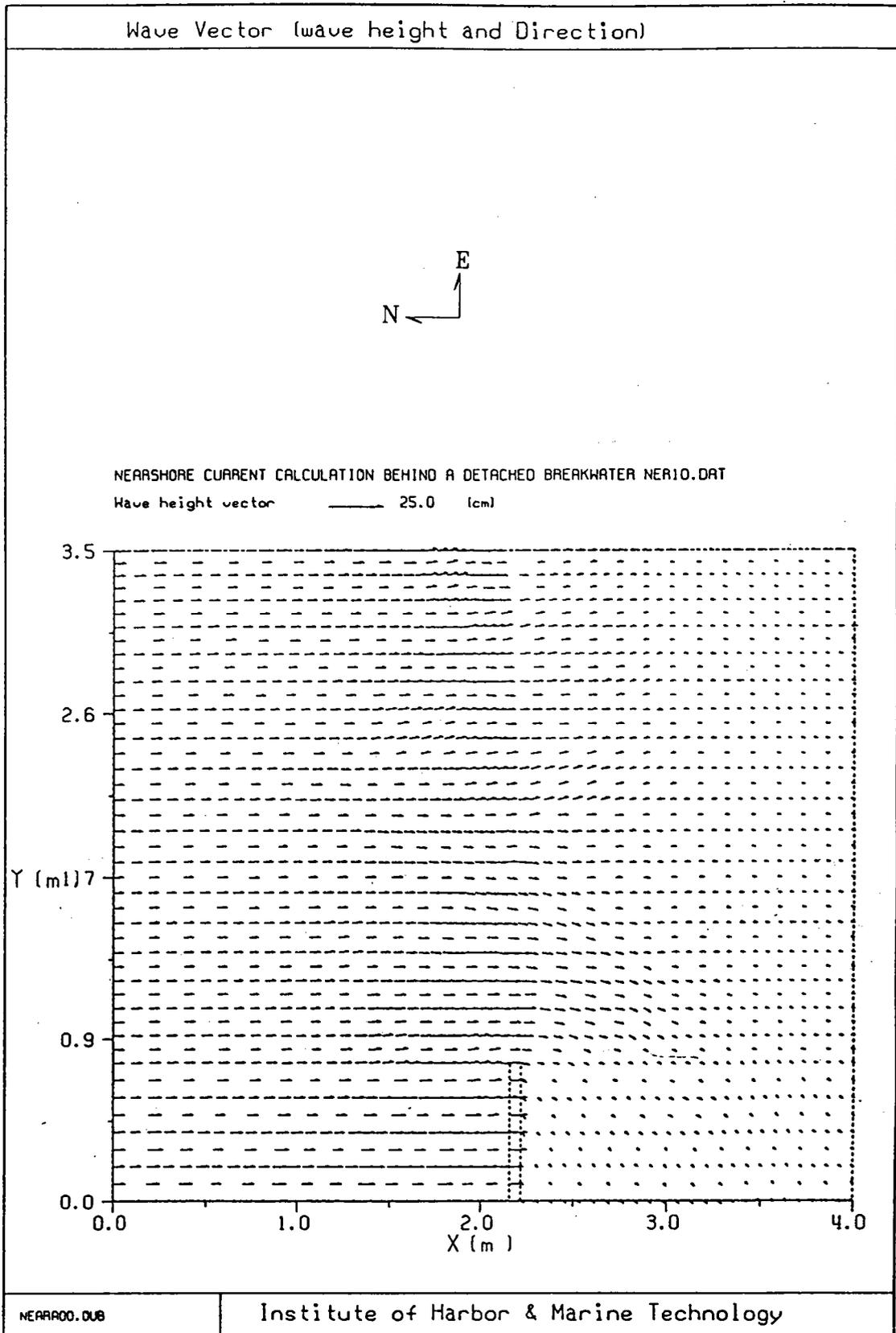


圖3-4-8近岸流模式計算例子海域區域波高及波向線分佈圖

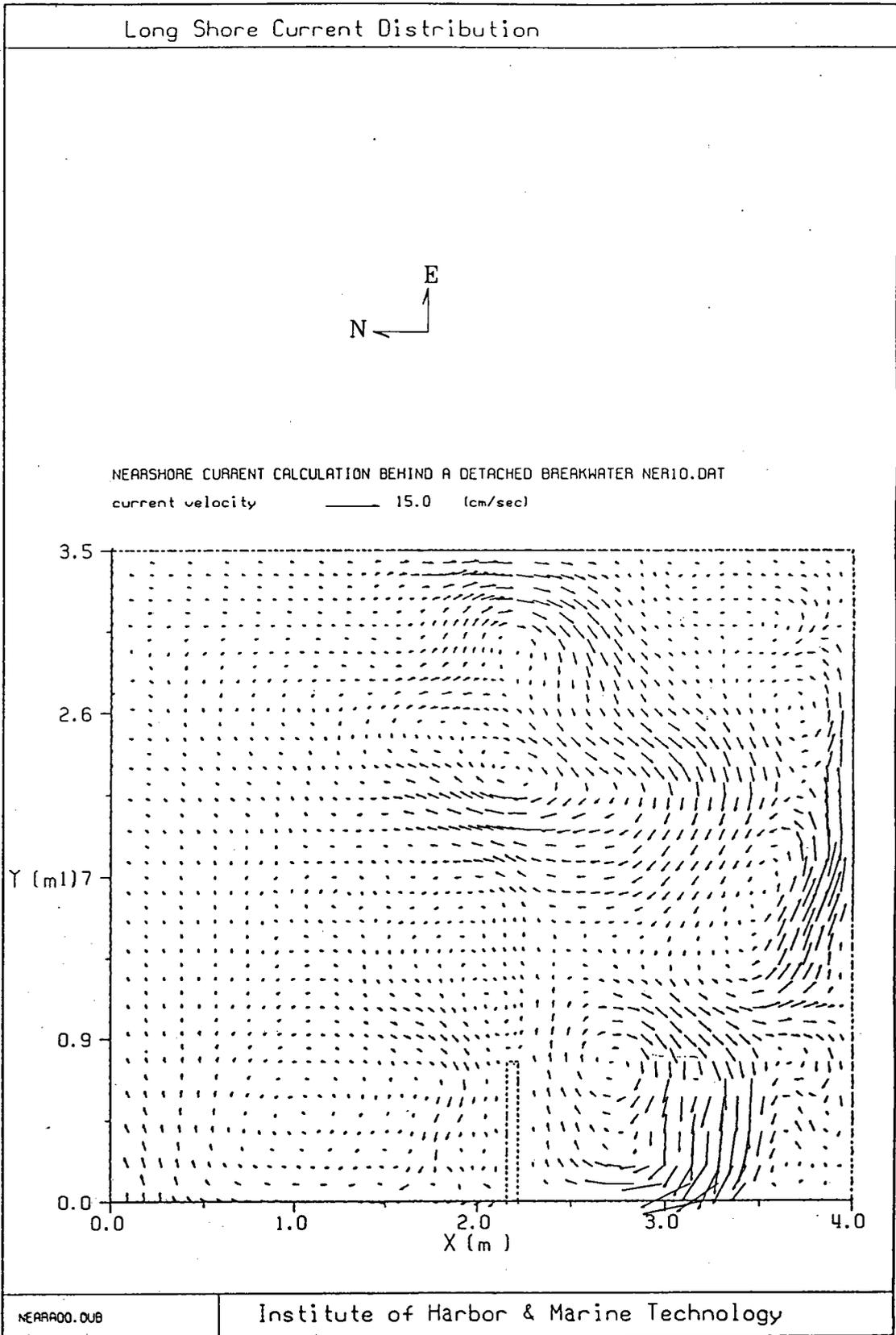


圖3-4-9近岸流模式數值計算例子之流況分佈圖

五、 花蓮港現場觀測之近岸海流特性

影響花蓮港近岸域海之流場，主要外力有潮汐作用、波力、風力；潮汐其引致之潮流一般較為規則化；風剪力所引起之風吹流，其影響之深度有限；而颱風產生之暴潮及流況則較複雜。波浪在近岸因碎波效應引致之沿岸流，也甚為重要。因為波場本身即為一複雜之現象，加上海域附近之防波堤等結構物影響，沿岸流特性較為複雜。

探討近岸地區之流況，首先必須了解當地之潮汐、風及波浪等主要影響因素之特性。花蓮港附近所設之潮位站，於22碼頭附近，位置如附圖(2-3-1)，風速計則設置於中央氣象局之觀測站，位置如附圖(2-3-1)。波浪儀設置於如上一章所示，於東堤之東北方外海(以#00表示)，西防波堤之西南方港口處(以#05表示)、10號碼頭(以#10表示)、8號碼頭(以#8表示)及22號碼頭(以#22表示)皆設置有波浪觀測站，其位置如附圖(2-3-1)。潮位及風之資料一般作較長期之觀測。此處僅取典型之代表資料分析於后。

圖3-5-1分別為1994年7月至10月間，於潮測站觀測之典型逐時潮位變化圖，表3-1為1994年7月至10月間，於潮測站觀測之三筆潮位按潮波波高大小排列之潮波波高及週期分佈之統計量。圖3-5-1顯示潮位變動範圍約在-1米至1米之間，表3-1顯示平均潮差(即潮波波高)約為1米左右，平均潮波週期約為12時左右(半日潮)。最大潮差(潮波波高)為1.94米，1/3平均潮差(即潮波波高1/3)，約為1米左右。整體而言花蓮港地區之潮位並不大。圖3-5-2a,b,c分別為1994年7月至10月間，於潮測站觀測之三筆潮位能譜圖，潮位能譜分析結果，由資料中可看出能譜的相對尖鋒出現在週期12小時及24小時附近，亦即花蓮港的潮汐主要為半日潮及全日潮，而半日潮又較全日潮為大，全日潮振幅約為半日潮之1/3之1/5間，半日潮之振幅約為0.5米左右。

圖3-5-3a,b,c,d,e,f,g,h分別為1994年9月，於測風站觀測之逐時風速及風向(指來向)逐時變化圖，風之東西分量及風之南北分量逐時變化圖，

風速統計方塊圖，風向統計玫瑰圖，風東西分量之統計方塊圖，風南北分量之統計方塊圖，風東西分量之能譜圖，風南北分量之能譜圖。以 U-comp.，代表風之東西分量；正值代表東分量，負值代表西分量，以 V-comp.，代表風之南北分量，正值代表北分量，負值代表南分量。圖 3-5-4a,b,c,d,e,f,g,h 分別為 1994 年 10 月間，於測風站觀測之三筆逐時風速及風向(指來向)逐時變化圖，風之東西分量及風之南北分量逐時變化圖，風速統計方塊圖，風向統計玫瑰圖，風東西分量之統計方塊圖，風南北分量之統計方塊圖，風東西分量之能譜圖，風南北分量之能譜圖。

夏季月份之風玫瑰圖以 1994 年 9 月份為例(如圖 3-5-3)，圖中顯示風向集中在西南及西南西方向大約佔 40%，平均風速約為 4m/sec，風速超過 10m/sec 者僅約佔 2%，是屬夏季西南季風型態，但因受陸地遮蔽效應之影響，整體而言花蓮港外海地區之夏季西南季風不大。冬夏季交替月份之風玫瑰圖以 1996 年 10 月份為例如圖 3-5-4，顯示風向主要分別集中在北北東方向，大約佔 17%，及在西南西向，大約佔 18%，平均風速約為 5m/sec，風速超過 10m/sec 者約佔 6%，風速較 9 月典型夏季西南季風型態顯然為大，10 月份呈現典型的冬季東北季風及西南季風交替現象，由逐時風速及風向(指來向)逐時變化圖也顯示，東北季風時風速較西南季風為大。以上分析初步顯示花蓮港外海地區風吹流成份可能不大，而且夏季海流中風驅流的成份又遠較冬季為小。

花蓮近岸波浪特性方面，於 1994 年 6 月、7 月及 8 月夏季西南季風(颱風)期間各觀測時期之波浪(H1/3 及 T1/3)逐時變化圖，如圖 3-5-5a，H1/3 統計方塊圖及 T1/3 統計方塊圖(圖 3-5-5b)，平均 H1/3 為 1.1 米，最大 H1/3 為 10.2 米(提姆颱風)，H1/3 介於 0.5 米~1.0 米約佔 58%，最大 T1/3 為 14.7 秒(提姆颱風)，T1/3 介於 6 秒~7 秒約佔 35%，顯示夏季除颱風期間，波浪並不大。在 1993 至 1994 年 12 月、1 月及 2 月冬季東北季風期間各觀測鋒面過境時期之波浪(H1/3 及 T1/3)波逐時變化，如圖 3-5-6a，H1/3 統計方塊圖及 T1/3 統計方塊圖(圖 3-5-6b)，平均 H1/3 為 1.5 米，最大 H1/3 為 3.2 米，H1/3 介於 1.0 米~1.5 米約佔 35%，最大 T1/3 為 10.6 秒，T1/3 介於 7 秒~8 秒約佔 42%，顯示冬季之波高及週期皆較夏季期間為大。由夏

季波浪(H1/3及T1/3)逐時變化圖，可知在1994年7、8月間分別有兩個颱風通過台灣附近海域，其外圍環流及西南季風雙重影響所產生的湧浪與風浪，到達花蓮港海域，如提姆(TIM)颱風，所產生之有義波高(H1/3)、週期(T1/3)分別約為(10米，14秒)。夏季西南季風期間因風速小，波浪一般也甚小，但颱風侵襲時波浪增大，波高、週期皆大幅的提高。而在冬季東北季風期間，因風速增大，波高、週期則顯然較夏季為高。風浪較大的流速、流向，受風吹流及碎波後產生之沿岸流影響也較大，以上分析顯示颱風波浪及冬季波浪將影響花蓮港近岸流場較大。

海流調查測站設置有三個測點(ST-2，ST-4及ST-5)，位置如圖2-3-2，測站ST-2水深20m，測站ST-4水深12m，測站ST-5水深13m。圖3-5-7a,b,c,d,e,f,g,h分別為1994年6月間，於ST-2站觀測之逐時流速及流向(指去向)逐時變化圖，流之東西分量及流之南北分量逐時變化圖，流速統計方塊圖，流向統計玫瑰圖，流東西分量之統計方塊圖，流南北分量之統計方塊圖，海流向量進行圖，流東西分量之能譜圖，流南北分量之能譜圖。以U-comp.，代表流之東西分量，正值代表東分量，負值代表西分量，以V-comp.，代表流之南北分量，正值代表北分量，負值代表南分量。圖3-5-8a,b,c,d,e,f,g,h,i分別為1994年8月間，於ST-4站觀測之海流逐時變化圖、統計圖、向量進行圖及能譜圖。圖3-5-9a,b,c,d,e,f,g,h,i分別為1994年10月間，於ST-5站觀測之海流逐時變化圖、統計圖、向量進行圖及能譜圖。圖3-5-7顯示在外海測站ST-2，夏季除颱風外，海面風平浪靜，潮汐漲落是影響流況主要因素，港口流況特性呈較規則性變化，此段期間ST-2測站之平均流速約為18cm/sec，東西分量平均流速約5cm/sec，南北分量平均流速約為10cm/sec，流向集中在NNE、NE(佔62%)及SW、SSW(佔18%)等方向。能譜分析(圖3-5-7g及圖3-5-7h)顯示在12小時及24小時左右，有明顯尖峰值存在，表示海流之主成為半日潮及全日潮，而半日潮及遠較全日潮為大。因測站ST-2位於東堤外海，流向變化受到近岸影響，主要在沿岸方向做週期流動。潮流之移動，漲潮往東北東向，退潮往南南西向，而海流向量進行圖(圖3-5-7g)顯示長期流向偏往東北東向移動，表示漲潮時較退潮時之流速為大，其差量

可能為地形效應所至，也可能為洋流分叉於近岸之支流，而西南季風引起之風吹流影響流場並不大。

測站ST-4位於西防波堤口處，此段期間平均流速約6cm/sec，東西分量平均流速2cm/sec，南北分量平均流速-3.0cm/sec，表示測站ST-4之流速遠較ST-2之流速為小，而流向集中在SE、ENE及SSE(佔88%)，顯示不管漲潮或退潮ST-4之流向皆往東南向，其原因為漲潮時在南濱海域，由於西防波堤之阻擋，產生順時鐘向之回流，而退潮時潮水也往東南流出。因此不管漲退潮流向皆往東南，但也因為漲潮時回流規模不大，退潮時又受西防波堤之阻擋，因此測站ST-4之流速並不大。而能譜圖(圖3-5-8g, h)顯示在24小時處有相對尖峰存在，表示該點主要全日潮流，半日潮流成份並不明顯。因為潮汐主要份為半日潮，次要成份為全日潮，潮波在近岸傳遞過程因海底摩擦效應，短週期之半日潮比長週期之全日潮能量消散為大，因此在較外海ST-2站半日潮流比全日潮流為大，但在傳遞至港口處ST-4處，反而僅有全日潮流存在，半日潮流已不明顯。

測站ST-5位於測站ST-4之西南方，此段期間平均流速約6cm/sec，東西分量平均流速約2cm/sec，東西分量平均流速約3cm/sec，顯示測站ST-5之流速與測站ST-4相近，而流向集中於ENE及NE(佔55%)，表示測站ST-5之流向與測站ST-2相似。其原因為漲潮流速較退潮流速為大，因此流向集中東北向，但因此站較ST-2接近海岸線海底摩擦較大，而且受東北季風之影響，風吹流向西南流，因此流速顯然較ST-2為小。海流之能譜圖(3-5-7g, h)則顯示因受東北季風及波浪之影響。風浪較大的流速其流向受風吹流及碎波後產生之沿岸流影響較大，流向些微偏西北。冬季海流之成份包括潮流、風吹流及沿岸流，不完全是潮流的週期性運動。綜合上述冬、夏兩季流況特性顯示，冬季港口流況除受潮汐影響外，還受風吹流及碎波所產生之沿岸流影響，而且各項影響因素又交互作用，例如：漲退潮水位高低影響碎波帶位置；水位相同時碎波帶位置又決定於波高大小及週期長短；波高大小決定沿岸流強弱。因此，冬季不論風力大小，海面波浪較夏季為大，流況分佈較複雜，流況特性較難掌握。夏季海流之主要成份為潮流週期性運動。

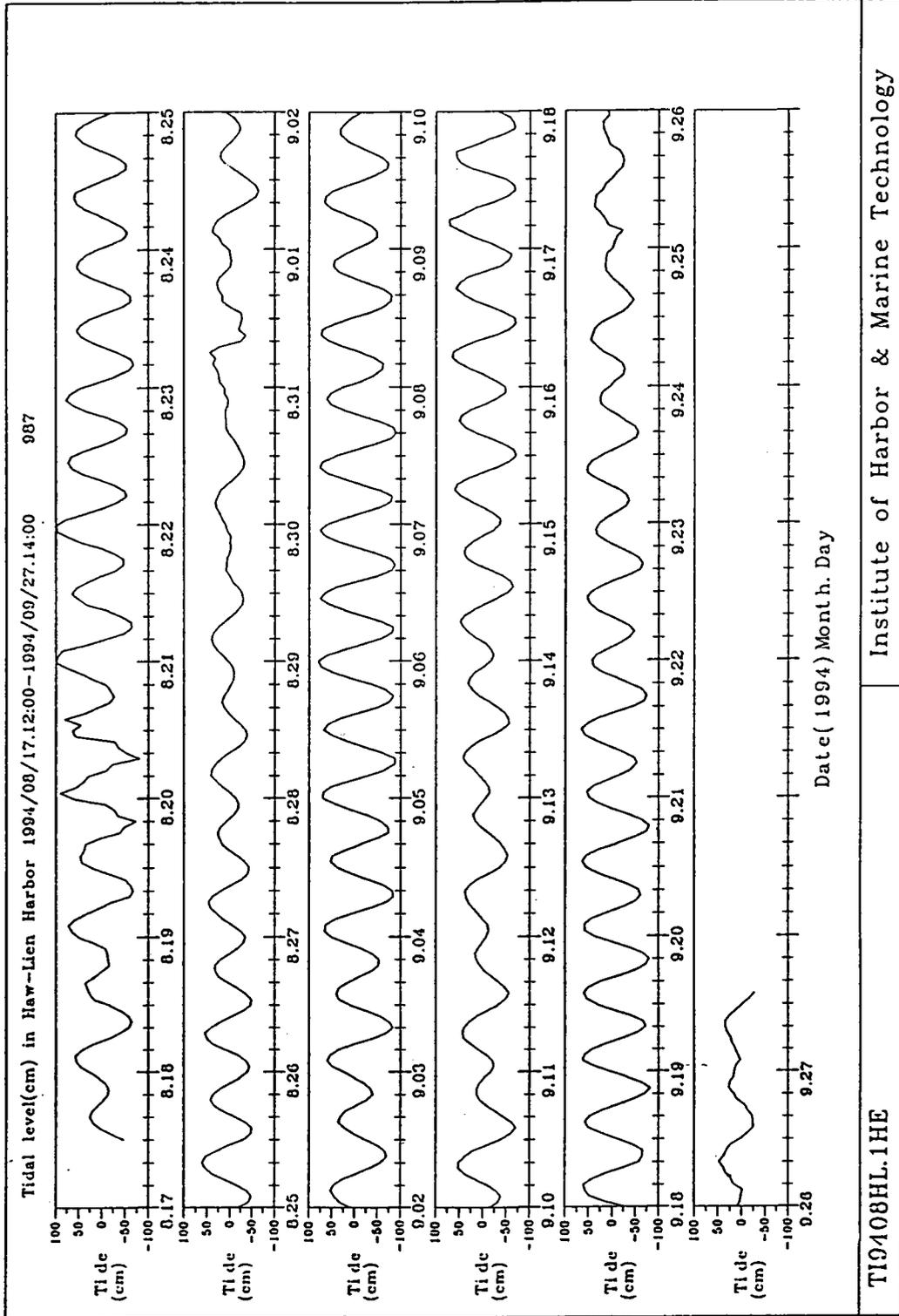
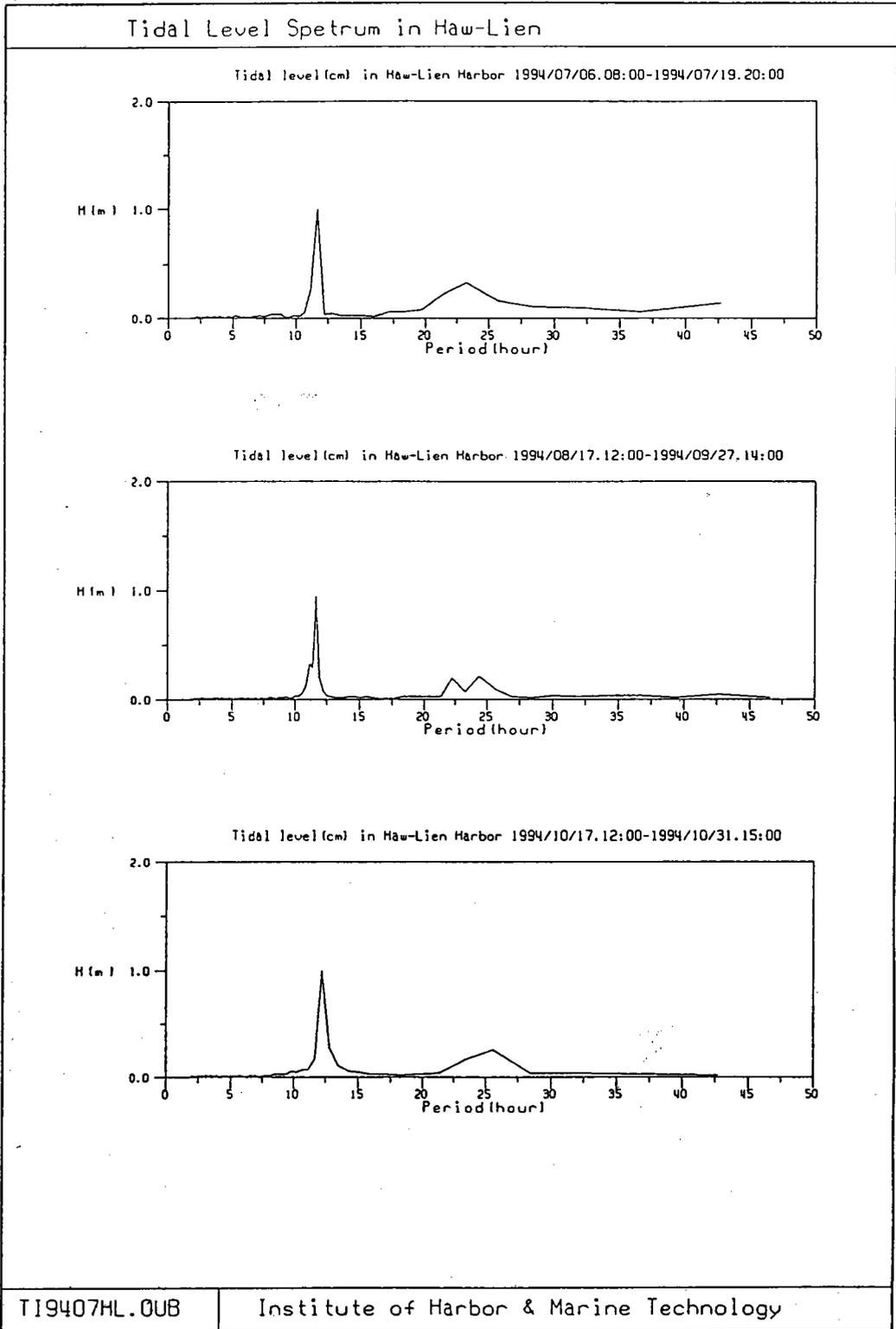


圖3-5-1 1994年8月、9月間於潮測站觀測之逐時潮位變化圖



PLOTZ.FOR

1994.7.11

圖3-5-2 1994年7月至10月間於潮測站觀測之三筆潮位能譜圖

表3-1 1994年7月至10月間三筆潮位之潮波波高及週期分佈統計量

Tidal Wave Height H(m) and Period T(hour) of HAW-LIEN									

Date Y/M	HMAX (m)	TMAX (sec)	H1/10 (m)	T1/10 (sec)	H1/3 (m)	T1/3 (sec)	HMEAN (m)	TMEAN (sec)	NO.

83/07	1.94	24.5	1.90	18.2	1.54	14.7	1.02	12.1	26
83/08	1.72	11.2	1.63	11.9	1.46	12.0	1.03	11.8	82
83/11	1.77	13.3	1.59	13.0	1.39	12.6	1.01	12.4	83

Wave Height and period (Descending)									

83/08		83/08		83/11					
H(m)	T(sec)	H(m)	T(sec)	H(m)	T(sec)				

1.94	24.5	1.72	11.2	1.77	13.3				
1.87	12.0	1.67	12.0	1.70	13.1				
1.58	13.3	1.65	11.6	1.58	12.9				
1.47	12.6	1.65	11.7	1.58	12.9				
1.43	13.9	1.64	12.9	1.56	12.8				
1.39	14.9	1.59	11.9	1.53	13.0				
1.35	12.5	1.56	11.2	1.53	13.0				
1.26	13.9	1.54	12.5	1.47	13.2				
1.16	15.1	1.53	11.2	1.44	12.8				
1.07	11.6	1.52	11.9	1.41	12.8				
.97	11.8	1.51	12.4	1.40	11.5				
.95	14.5	1.46	12.0	1.37	11.7				
.95	10.5	1.44	12.0	1.34	13.2				
.95	11.0	1.43	12.8	1.33	11.6				
.94	13.4	1.41	11.5	1.33	13.2				
.93	12.4	1.41	11.9	1.33	13.0				
.88	10.0	1.40	11.9	1.31	12.1				
.85	11.3	1.40	12.5	1.30	11.7				
.82	10.2	1.40	13.1	1.30	12.7				
.68	9.6	1.38	13.0	1.30	11.6				

rept2.dat

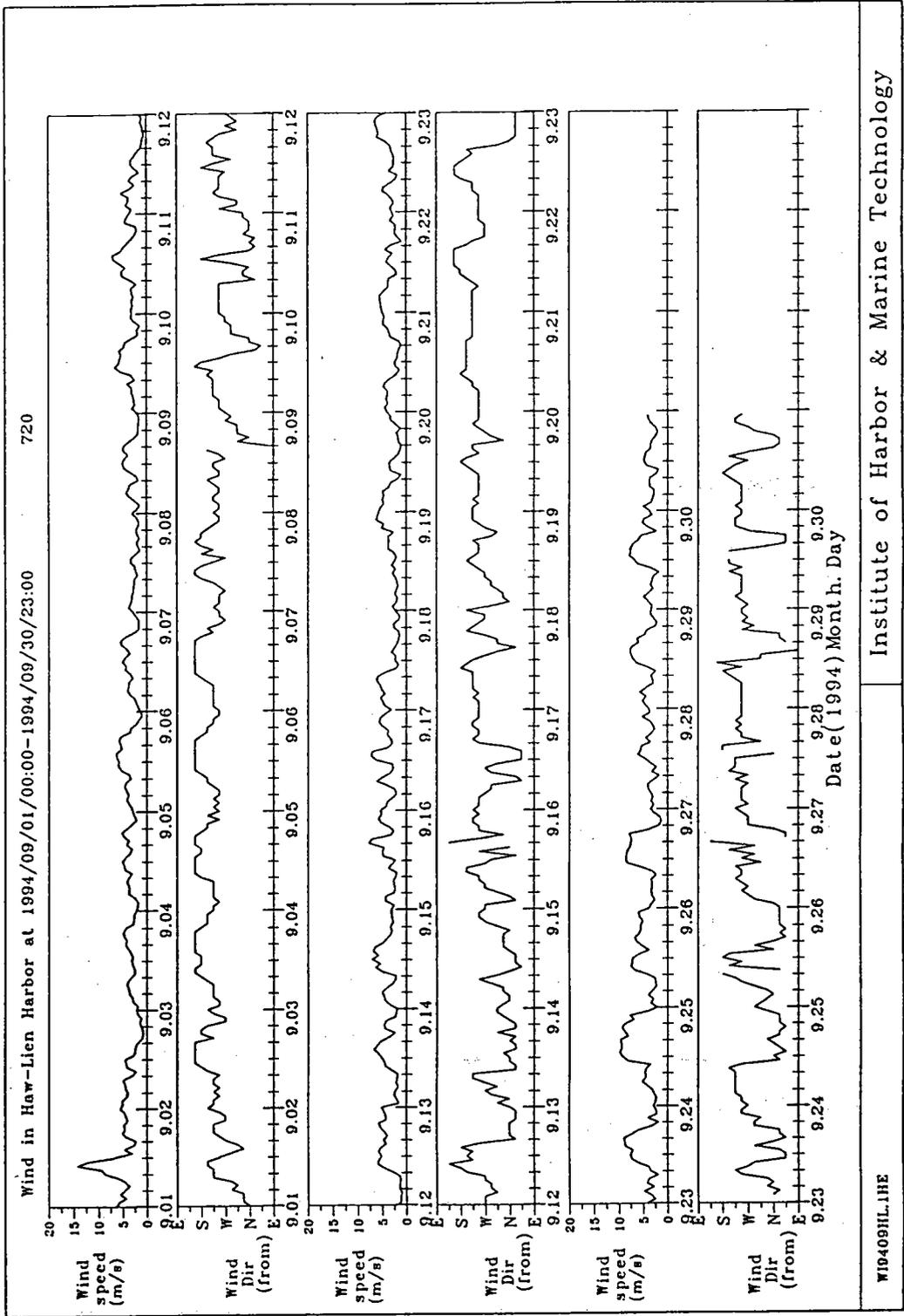


圖 3-5-3a 1994 年 9 月間觀測之逐時風速及風向(指來向)逐時變化圖

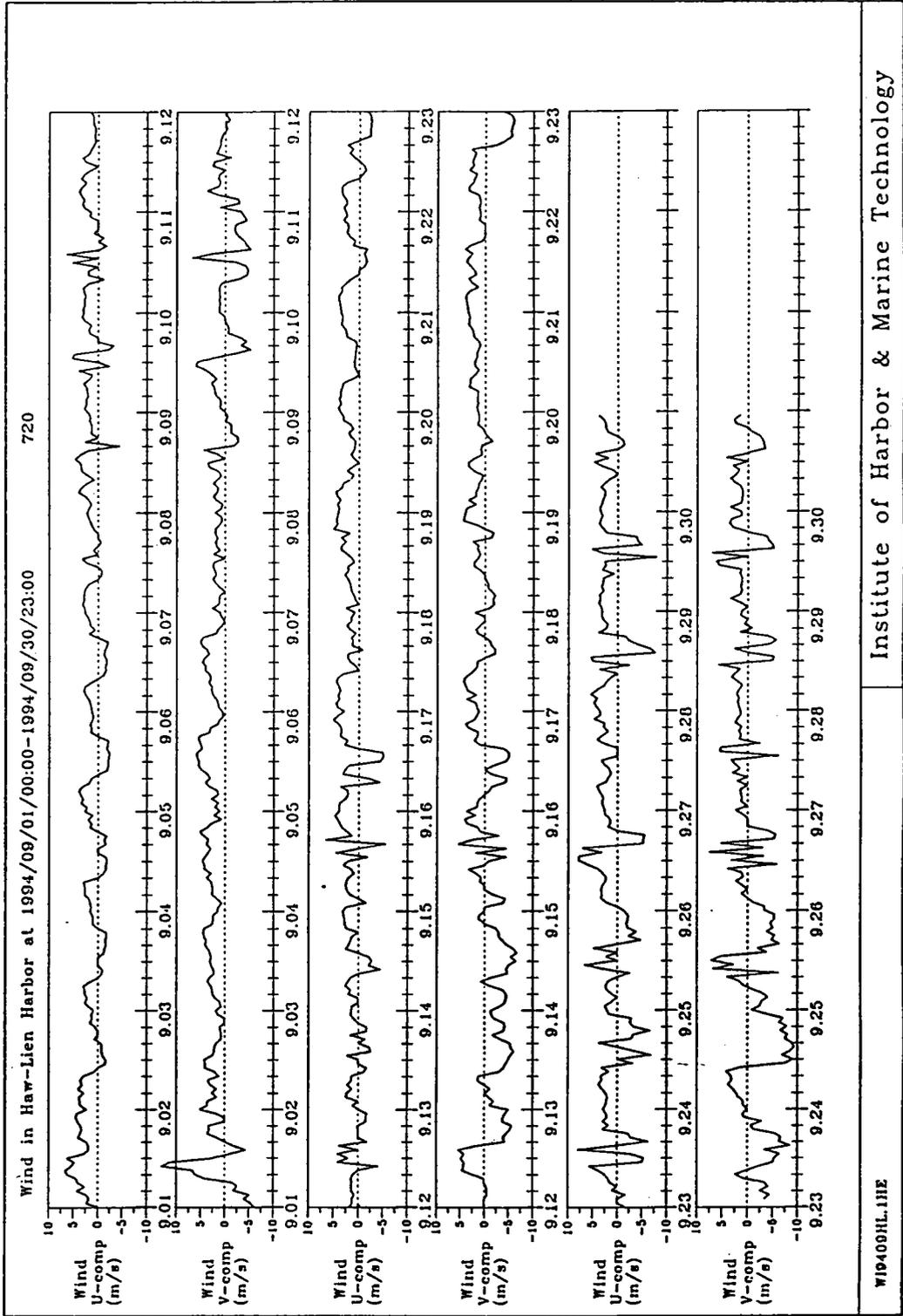


圖 3-5-3b 1994 年 9 月間觀測之逐時風之東西分量及風之南北分量變化圖

Wind in Hsu-Lien Harbor at 1994/09/01/00:00-1994/09/30/23:00
 mean : 3.8m/s, s.d.: 1.8m/s, min : .5m/s, max : 14.2m/s.
 File : W19409ML1HE Data no. 720 hours Lost data no. 0 hours

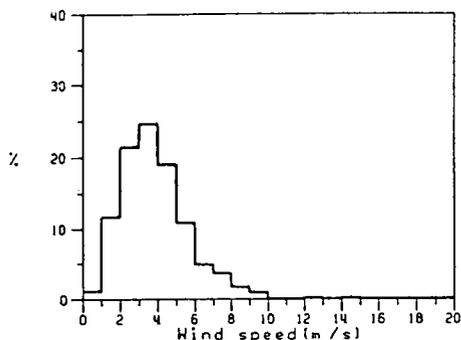


圖 3-5-3c 風速統計方塊圖

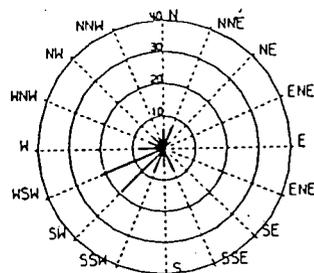


圖 3-5-3d 風向統計玫瑰圖

Wind in Hsu-Lien Harbor at 1994/09/01/00:00-1994/09/30/23:00
 mean : 1.4m/s, s.d.: 2.3m/s, min : -7.8m/s, max : 7.9m/s.
 File : W19409ML1HE Data no. 720 hours Lost data no. 0 hours

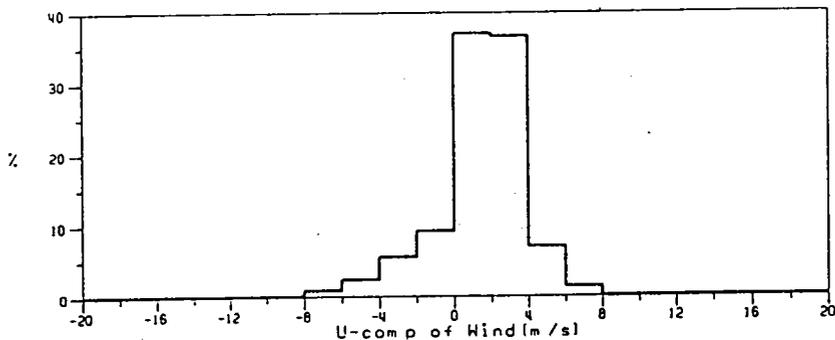


圖 3-5-3e 1994年9月間觀測之風東西分量之統計方塊圖

Wind in Hsu-Lien Harbor at 1994/09/01/00:00-1994/09/30/23:00
 mean : .5m/s, s.d.: 3.2m/s, min : -9.4m/s, max : 13.1m/s.
 File : W19409ML1HE Data no. 720 hours Lost data no. 0 hours

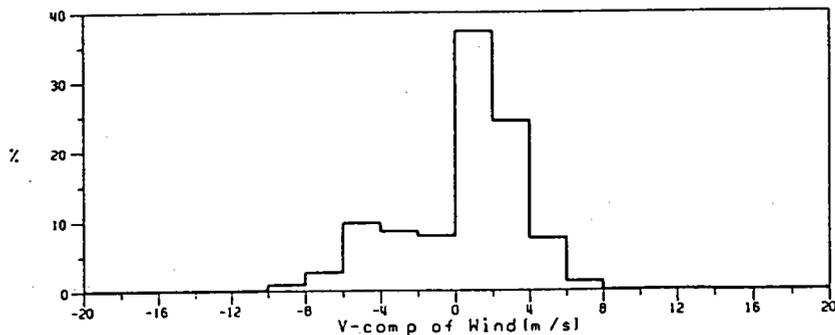


圖 3-5-3f 1994年9月間觀測之風南北分量之統計方塊圖

Wind spectrum in Haw-Lien

Wind in Haw-Lien Harbor at 1994/09/01/00:00-1994/09/30/23:00

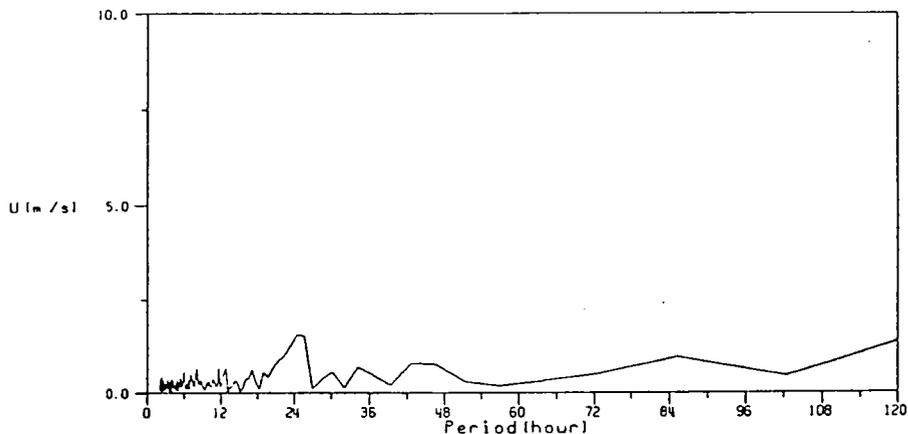


圖3-5-3g 1994年9月間觀測之風東西分量之能譜圖

Wind in Haw-Lien Harbor at 1994/09/01/00:00-1994/09/30/23:00

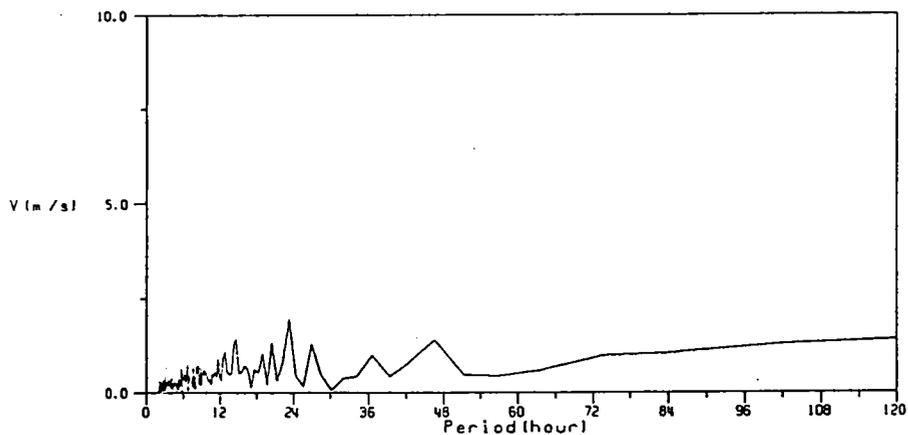


圖3-5-3h 1994年9月間觀測之風南北分量之能譜圖

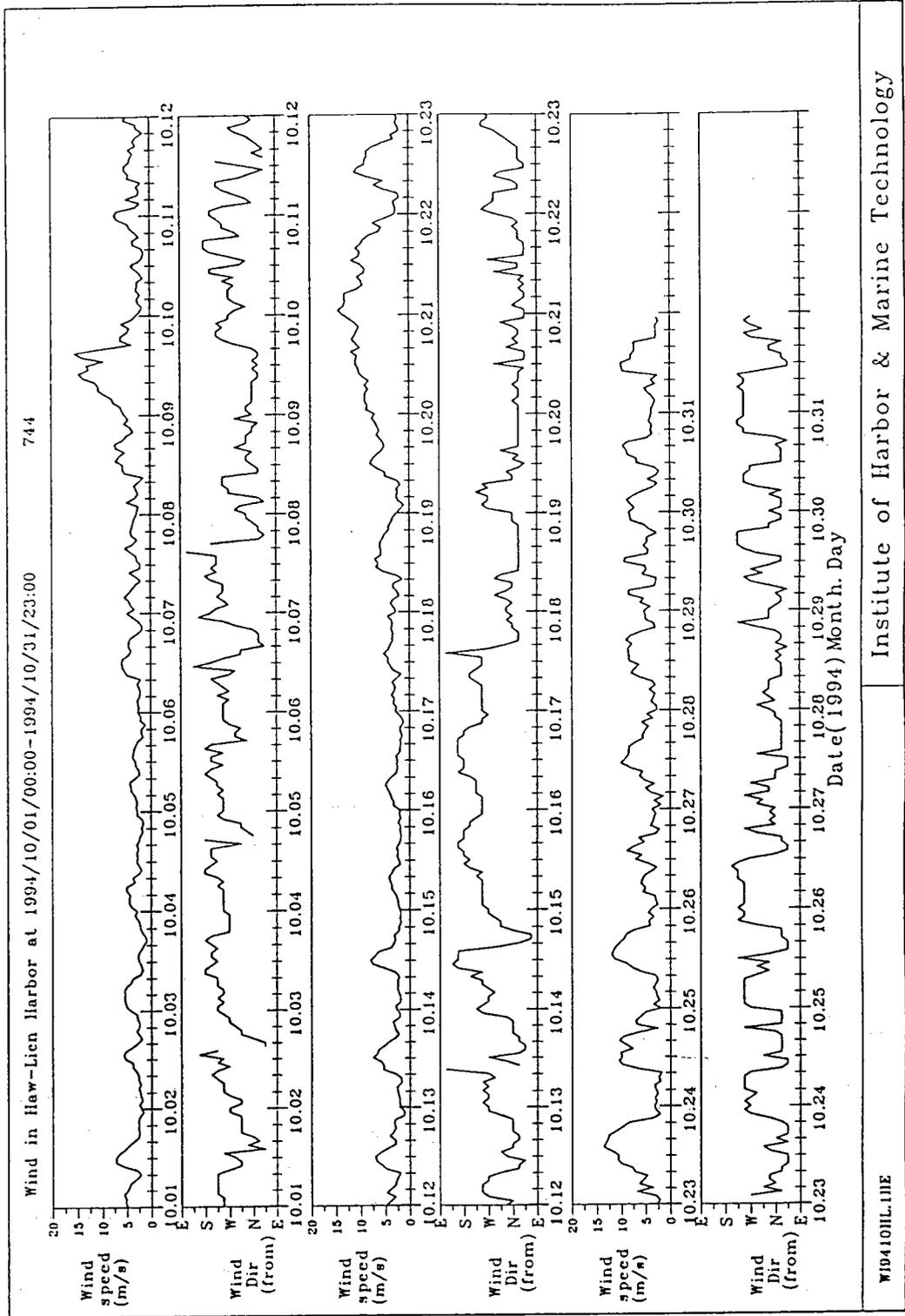


圖3-5-4a 1994年10月間觀測之逐時風速及風向(指來向)逐時變化圖

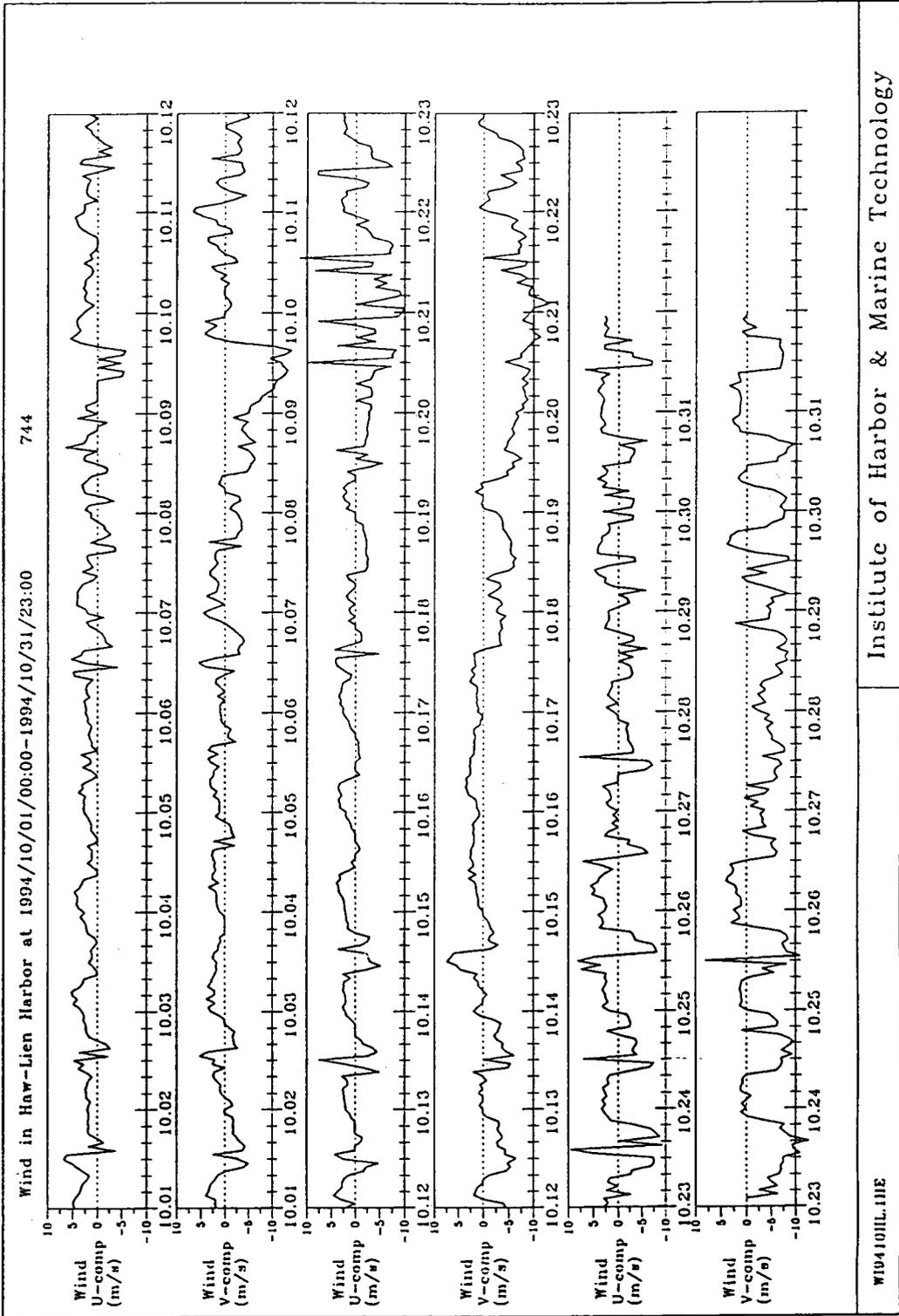


圖3-5-4b 1994年10月間觀測之逐時風之東西分量及風之南北分量變化圖

Wind in Hwa-Lien Harbor at 1994/10/01/00:00-1994/10/31/23:00
 mean : 4.8m/s, s.d.: 2.8m/s, min : .9m/s, max : 15.3m/s.
 File : W19410HL.IHE Data no. 744 hours Lost data no. 0 hours

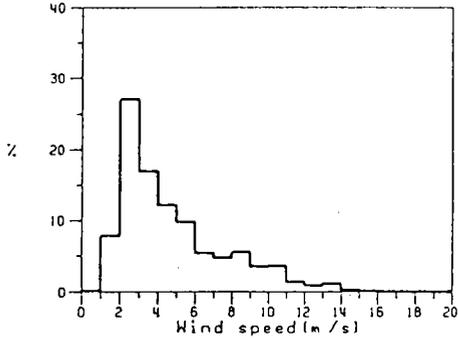


圖 3-5-4c 風速統計方塊圖

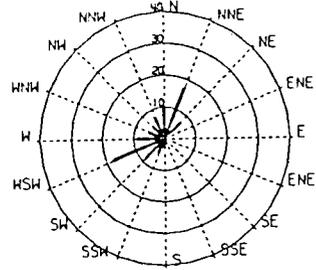


圖 3-5-4d 風向統計玫瑰圖

Wind in Hwa-Lien Harbor at 1994/10/01/00:00-1994/10/31/23:00
 mean : -1.6m/s, s.d.: 3.2m/s, min : -10.0m/s, max : 11.6m/s.
 File : W19410HL.IHE Data no. 744 hours Lost data no. 0 hours

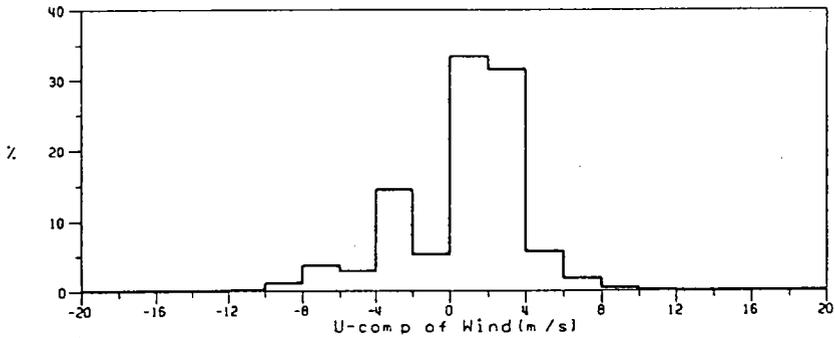


圖 3-5-4e 1994年10月間觀測之風東西分量之統計方塊圖

Wind in Hwa-Lien Harbor at 1994/10/01/00:00-1994/10/31/23:00
 mean : -2.0m/s, s.d.: 4.1m/s, min : -14.1m/s, max : 8.0m/s.
 File : W19410HL.IHE Data no. 744 hours Lost data no. 0 hours

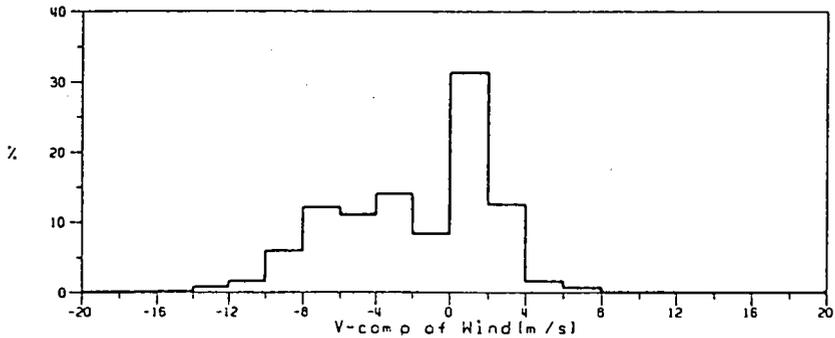


圖 3-5-4f 1994年10月間觀測之風南北分量之統計方塊圖

Wind spectrum in Haw-Lien

Wind in Haw-Lien Harbor at 1994/10/01/00:00-1994/10/31/23:00

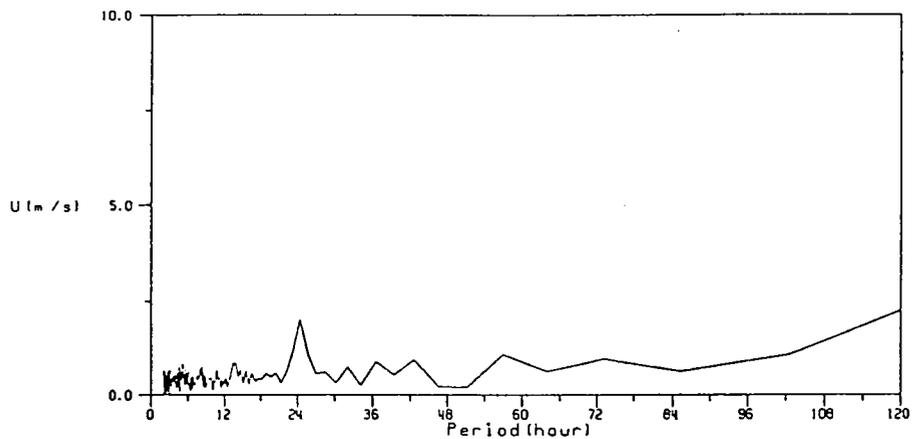


圖 3-5-4g 1994年10月間觀測之風東西分量之能譜圖

Wind in Haw-Lien Harbor at 1994/10/01/00:00-1994/10/31/23:00

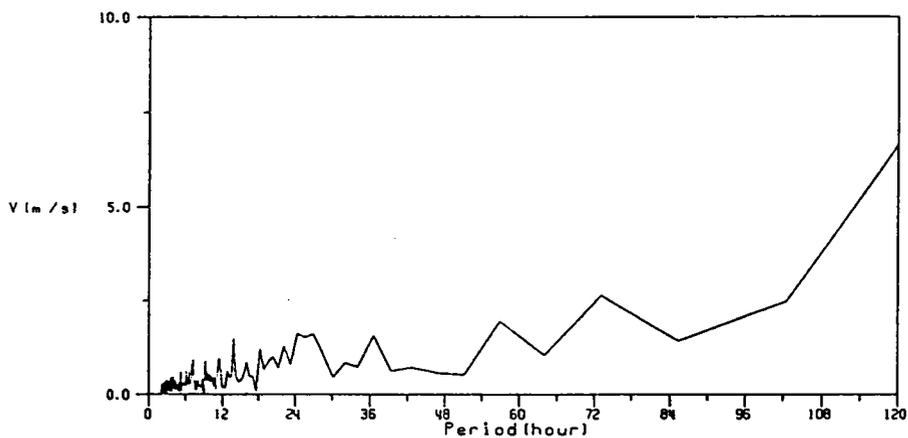


圖 3-5-4h 1994年10月間觀測之風南北分量之能譜圖

W19410HL.OUB

Institute of Harbor & Marine Technology

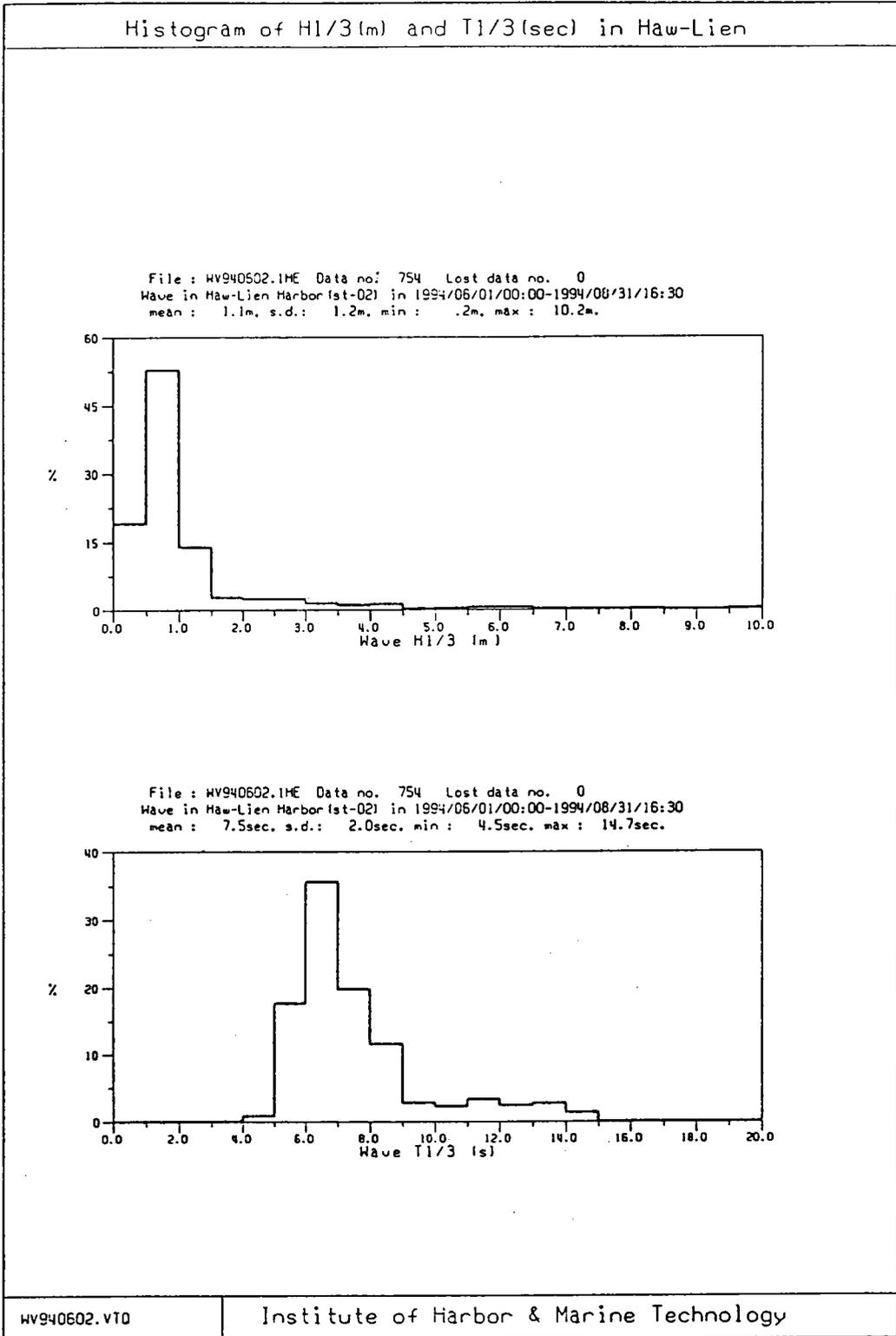


圖3-5-5b 1994年夏季期間觀測之示性波高(H1/3)及示性週期(T1/3)統計方塊圖

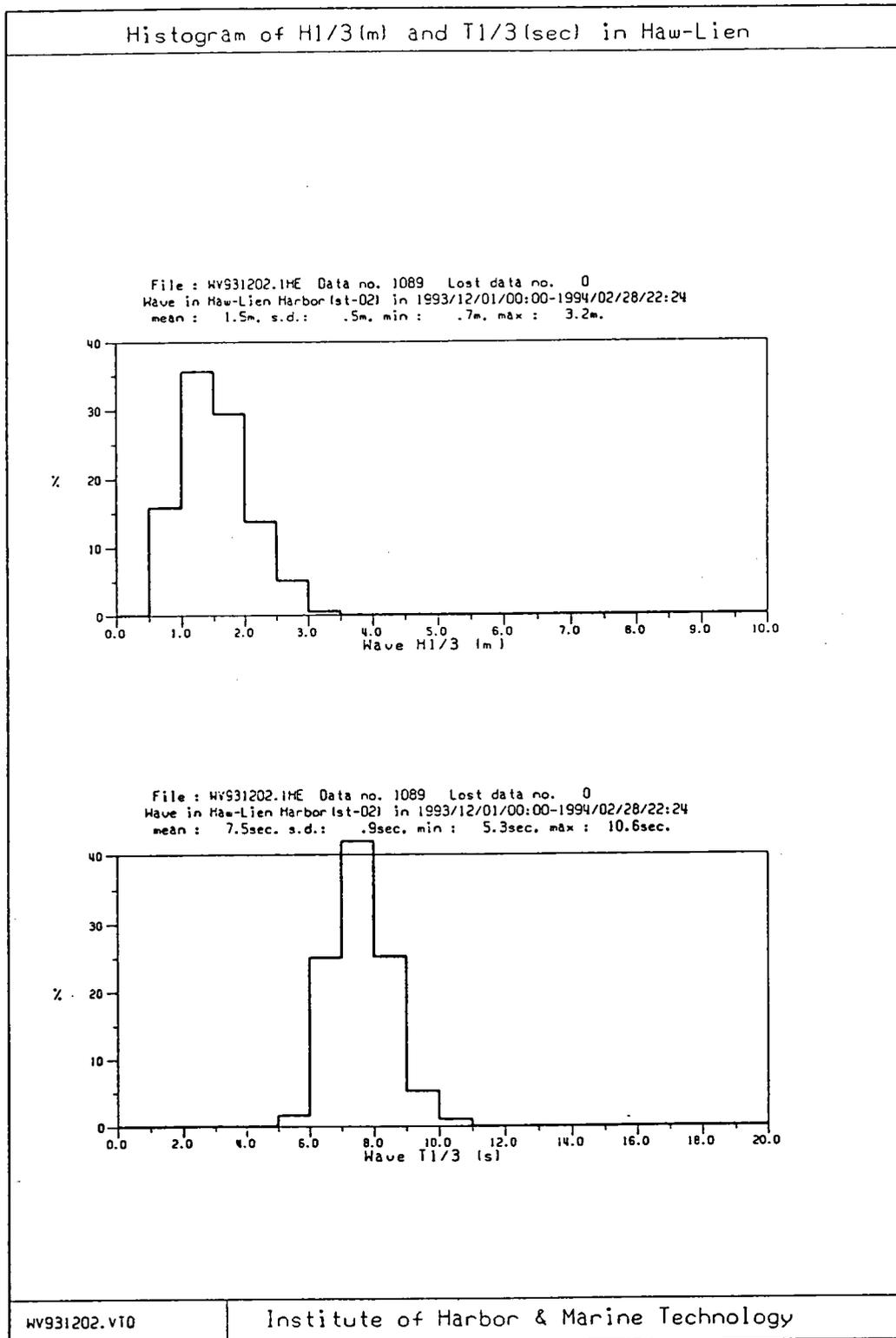


圖3-5-6b 1994年冬季期間觀測之示性波高(H1/3)及示性週期(T1/3)統計方塊圖

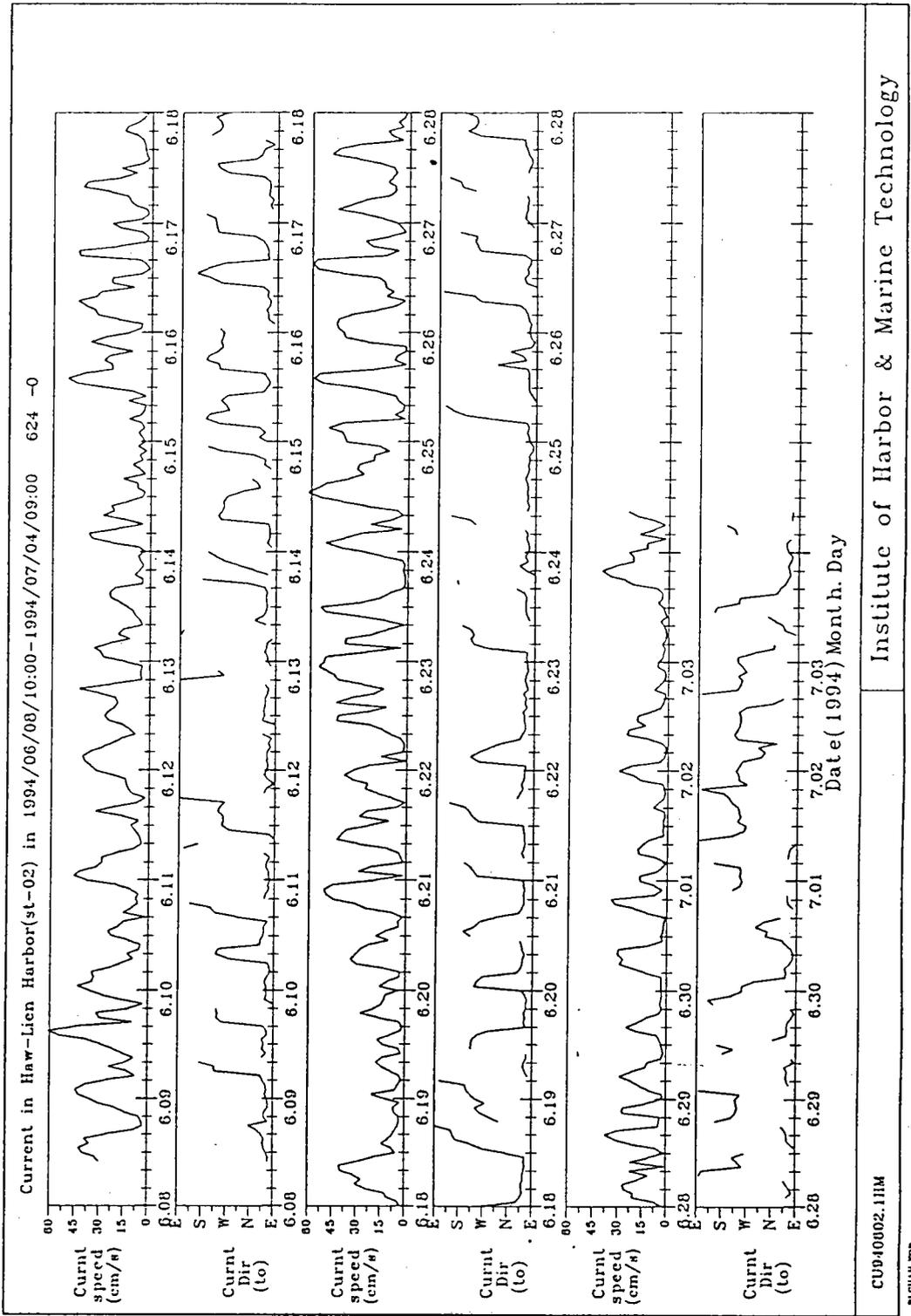


圖3-5-7a 1994年6月間於ST-2站觀測之逐時流速及流向(指去向)變化圖

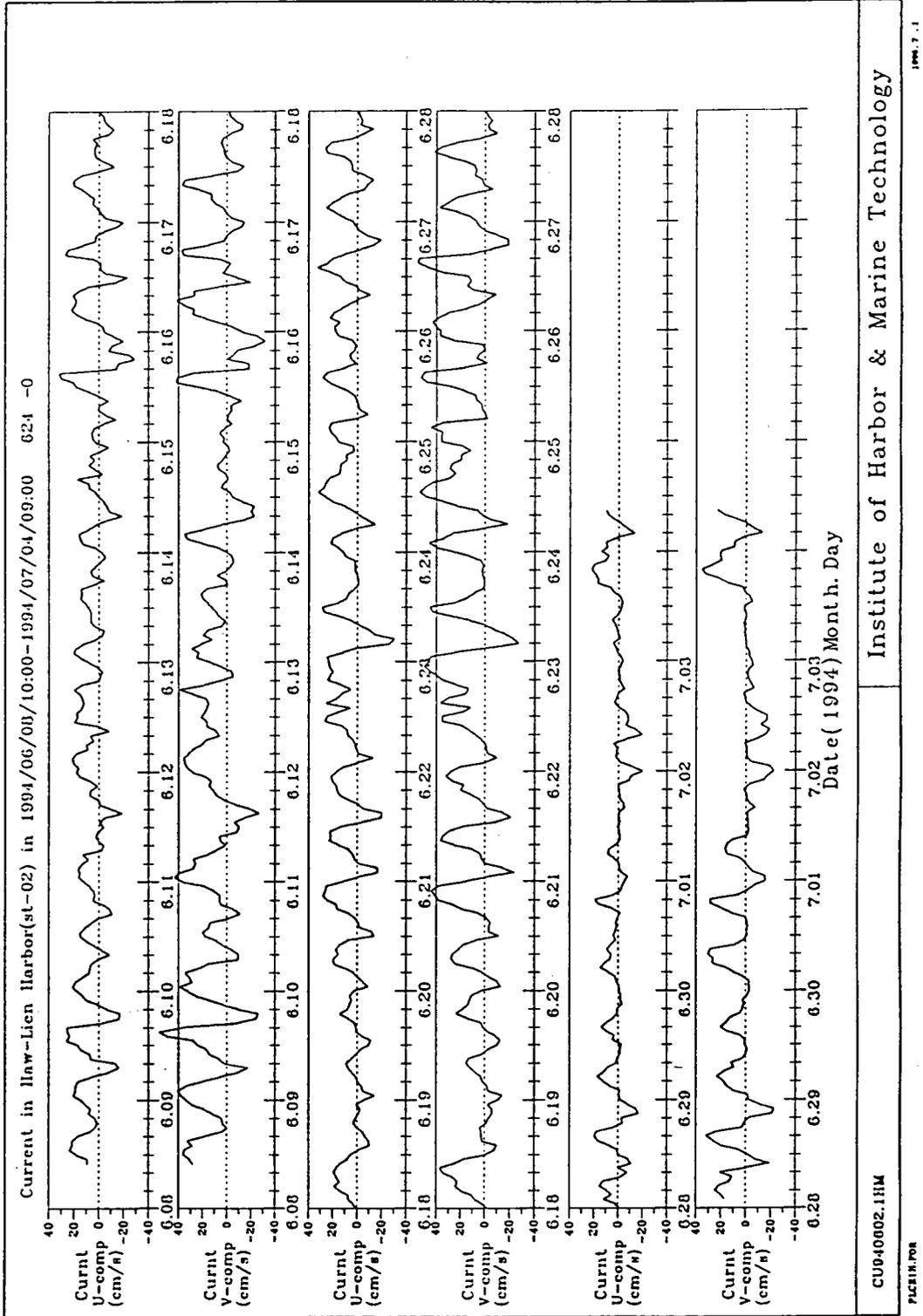


圖3-5-7b 1994年6月間於ST-2站觀測之逐時流東西分量及流南北分量變化圖

Current in Hwa-Lien Harbor (st-02) in 1994/06/08/10:00-1994/07/04/09:00
 mean : 17.8cm/s, s.d.: 14.4cm/s, min : .5cm/s, max : 62.0cm/s.
 File : CU940502.1HM Data no. 624 hours Lost data no. 0 hours

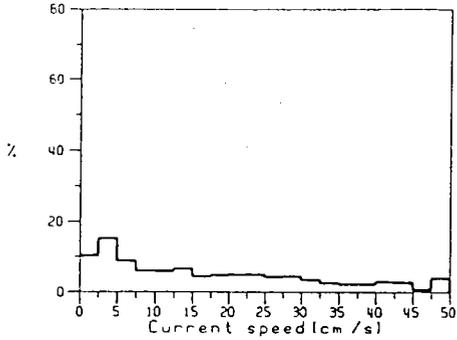


圖 3-5-7c 流速統計方塊圖

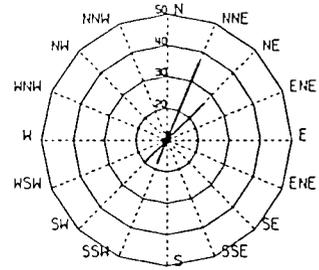


圖 3-5-7d 流向統計玫瑰圖

Current in Hwa-Lien Harbor (st-02) in 1994/06/08/10:00-1994/07/04/09:00
 mean : 4.8cm/s, s.d.: 10.9cm/s, min : -30.4cm/s, max : 32.0cm/s.
 File : CU940502.1HM Data no. 624 hours Lost data no. 0 hours

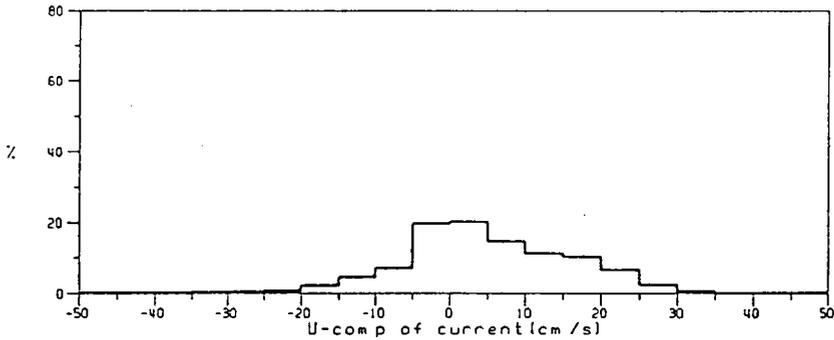


圖 3-5-7e 1994年6月間於ST-2站觀測之流東西分量統計方塊圖

Current in Hwa-Lien Harbor (st-02) in 1994/06/08/10:00-1994/07/04/09:00
 mean : 9.6cm/s, s.d.: 16.9cm/s, min : -31.5cm/s, max : 55.9cm/s.
 File : CU940502.1HM Data no. 624 hours Lost data no. 0 hours

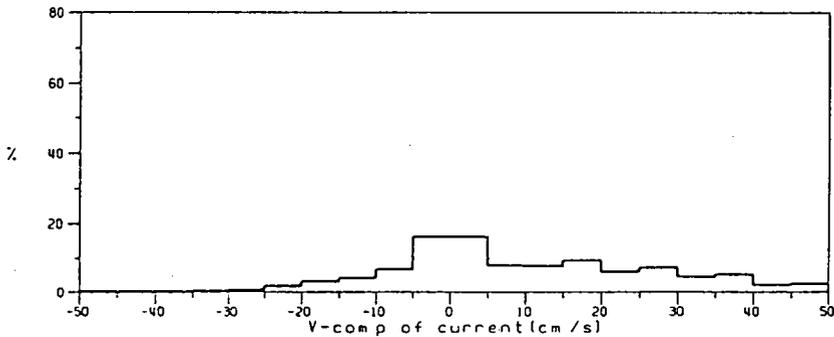


圖 3-5-7f 1994年6月間於ST-2站觀測之流南北分量統計方塊圖

Current Spectrum in Haw-Lien

Current in Haw-Lien Harbor (st-02) in 1994/06/08/10:00-1994/07/04/09:00

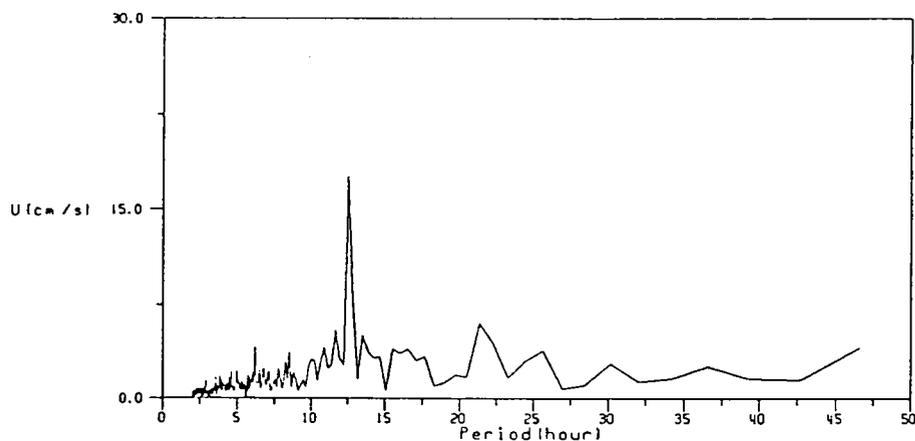


圖 3-5-7g 1994年6月間於ST-2站觀測之流東西分量能譜圖

Current in Haw-Lien Harbor (st-02) in 1994/06/08/10:00-1994/07/04/09:00

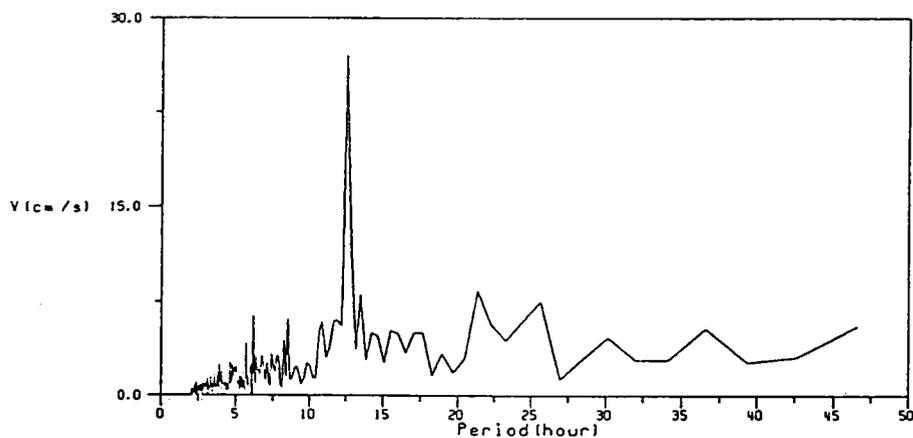
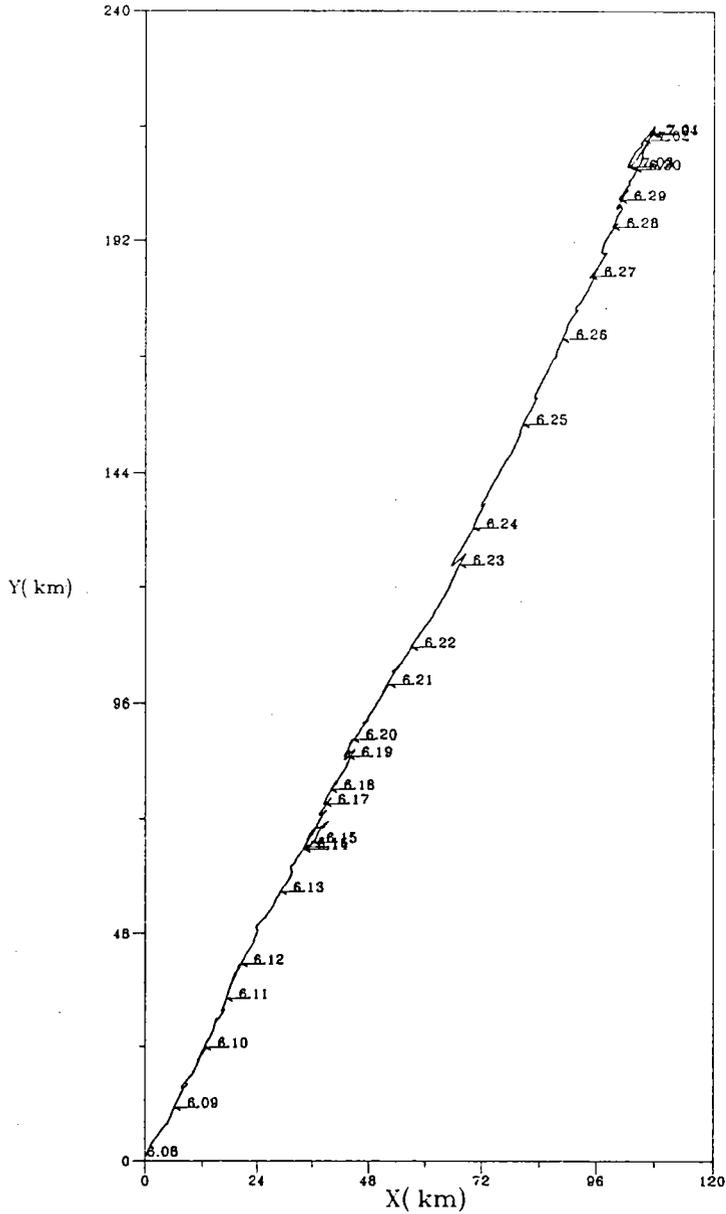


圖 3-5-7h 1994年6月間於ST-2站觀測之流南北分量能譜圖

Progressive Vector Diagram

Current in Haw-Lien Harbor(st-02) in 1994/06/08/10:00-1994/07/04/09:00
Total hours: 624 -0



CU940602.1HM

Institute of Harbor & Marine Technology

PLPVIV.FOR

1006.11.21

圖3-5-7i 1994年6月間於ST-2站觀測之海流向量進行圖

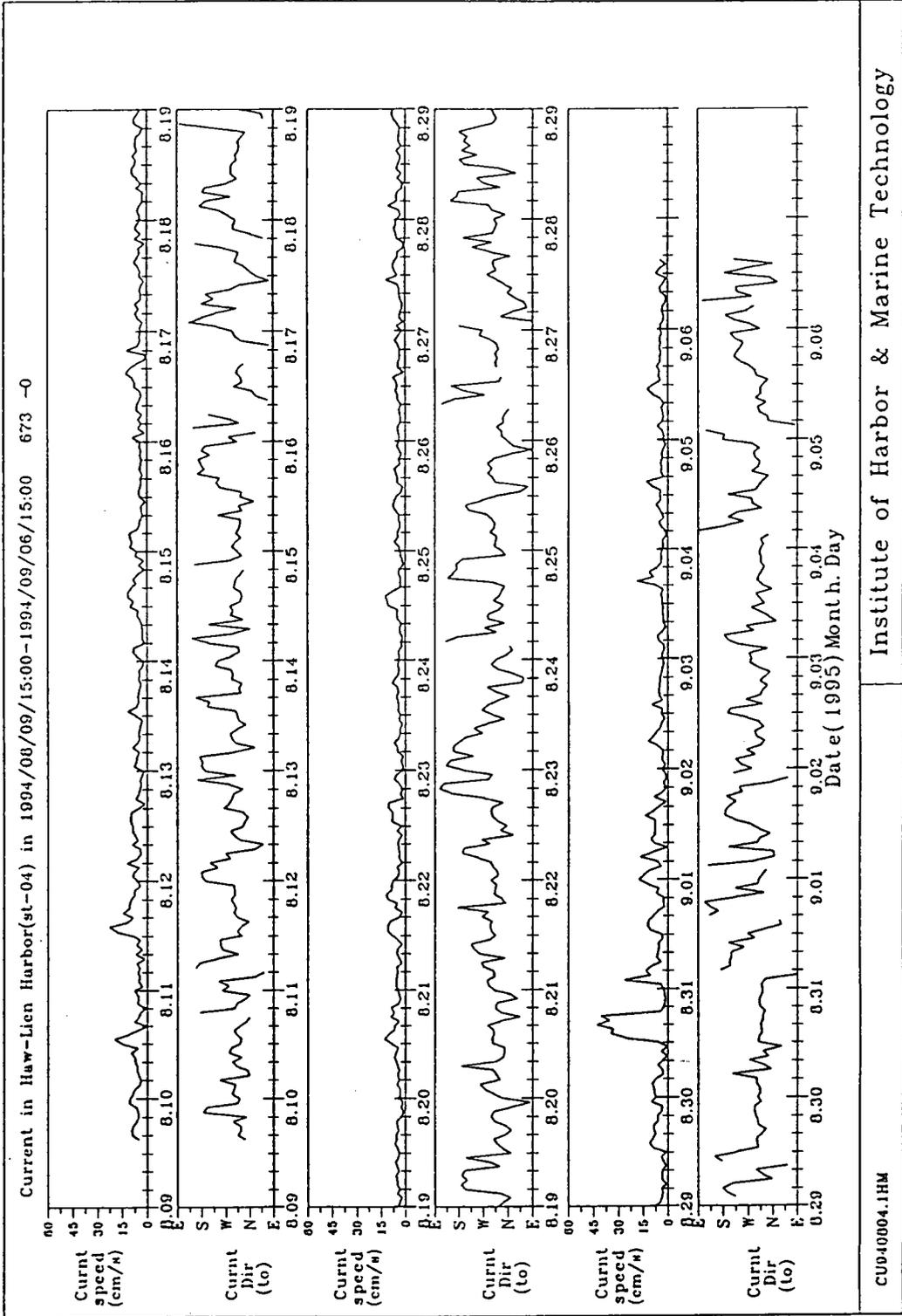


圖 3-5-8a 1994 年 8 月間於 ST-4 站觀測之逐時流速及流向(指去向)變化圖

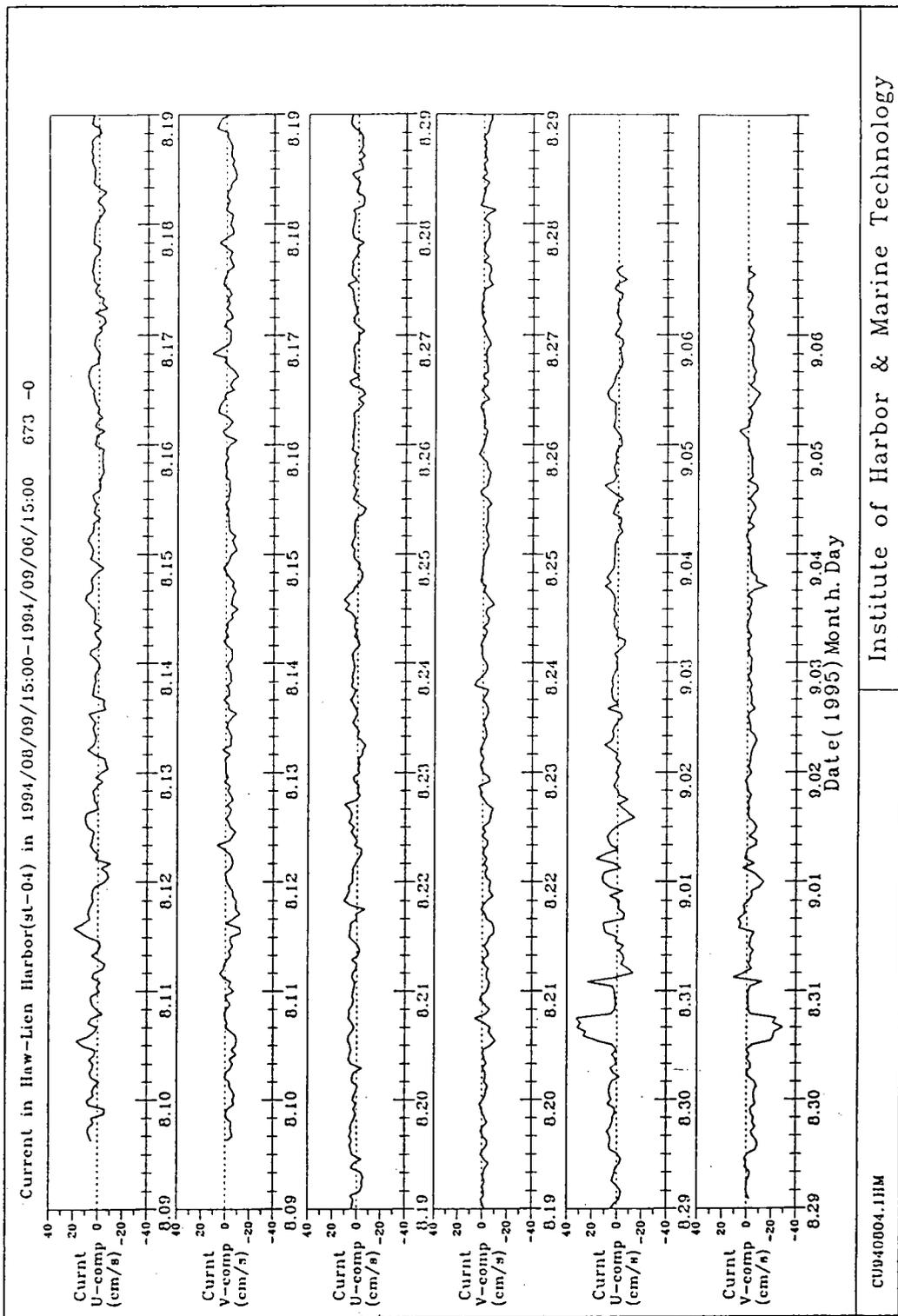


圖3-5-8b 1994年8月間於ST-4站觀測之逐時流東西分量及流南北分量變化圖

- 參、花蓮港近岸海域流場數值分析 -

File : CU940804.IHM Data no. 673 hours Lost data no. 0 hours
 Current in Hsu-Lien Harbor (st-04) in 1994/08/09/15:00-1994/09/06/15:00
 mean : 5.6cm/s, s.d.: 4.2cm/s, min : .4cm/s, max : 42.9cm/s.

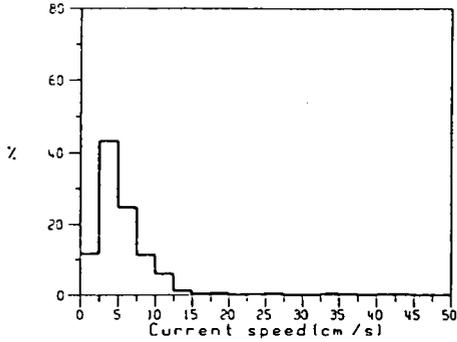


圖3-5-8c 流速統計方塊圖

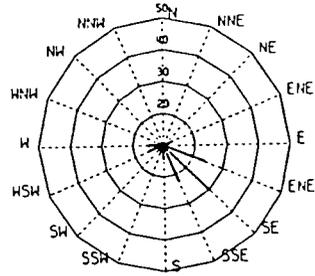


圖3-5-8d 流向統計玫瑰圖

File : CU940804.IHM Data no. 673 hours Lost data no. 0 hours
 Current in Hsu-Lien Harbor (st-04) in 1994/08/09/15:00-1994/09/06/15:00
 mean : -2.8cm/s, s.d.: 3.8cm/s, min : -29.4cm/s, max : 11.9cm/s.

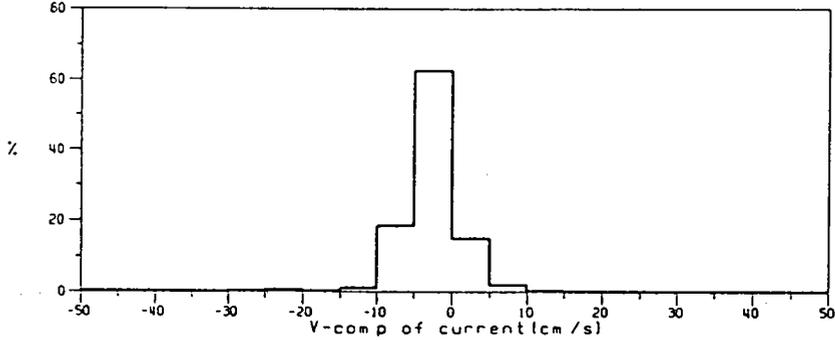


圖3-5-8e 1994年8月間於ST-4站觀測之流東西分量統計方塊圖

File : CU940804.IHM Data no. 673 hours Lost data no. 0 hours
 Current in Hsu-Lien Harbor (st-04) in 1994/08/09/15:00-1994/09/06/15:00
 mean : 2.0cm/s, s.d.: 4.8cm/s, min : -13.8cm/s, max : 32.1cm/s.

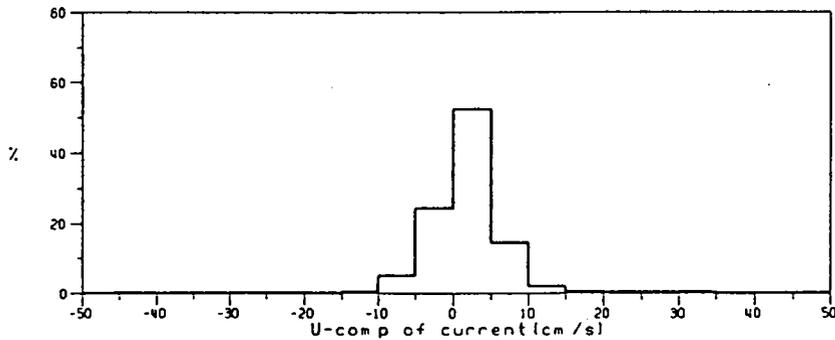


圖3-5-8f 1994年8月間於ST-4站觀測之流南北分量統計方塊圖

Current Spectrum in Haw-Lien

Current in Haw-Lien Harbor (st-04) in 1994/08/09/15:00-1994/09/05/15:00

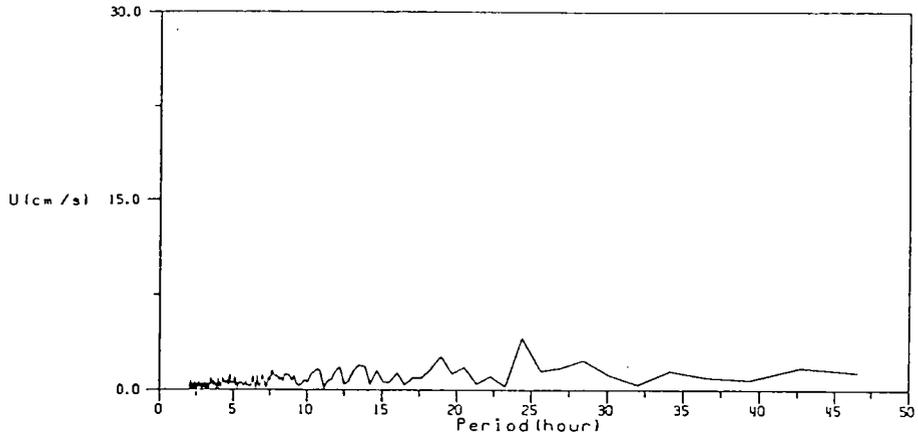


圖 3-5-8g 1994年8月間於ST-4站觀測之流東西分量能譜圖

Current in Haw-Lien Harbor (st-04) in 1994/08/09/15:00-1994/09/05/15:00

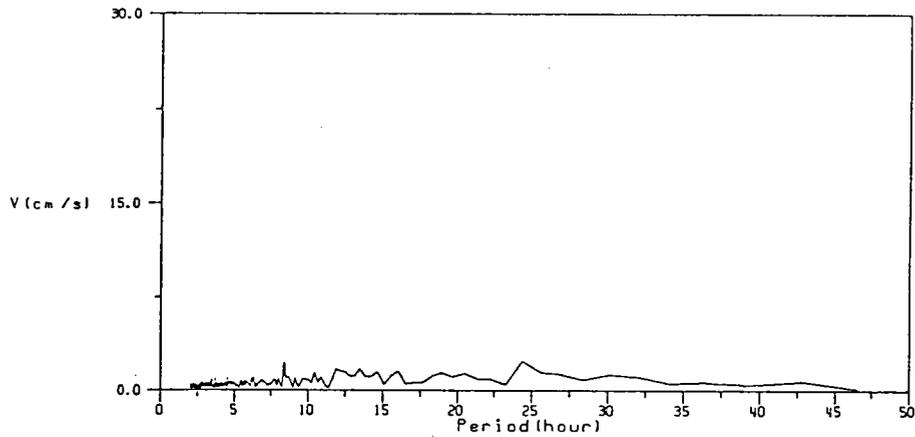
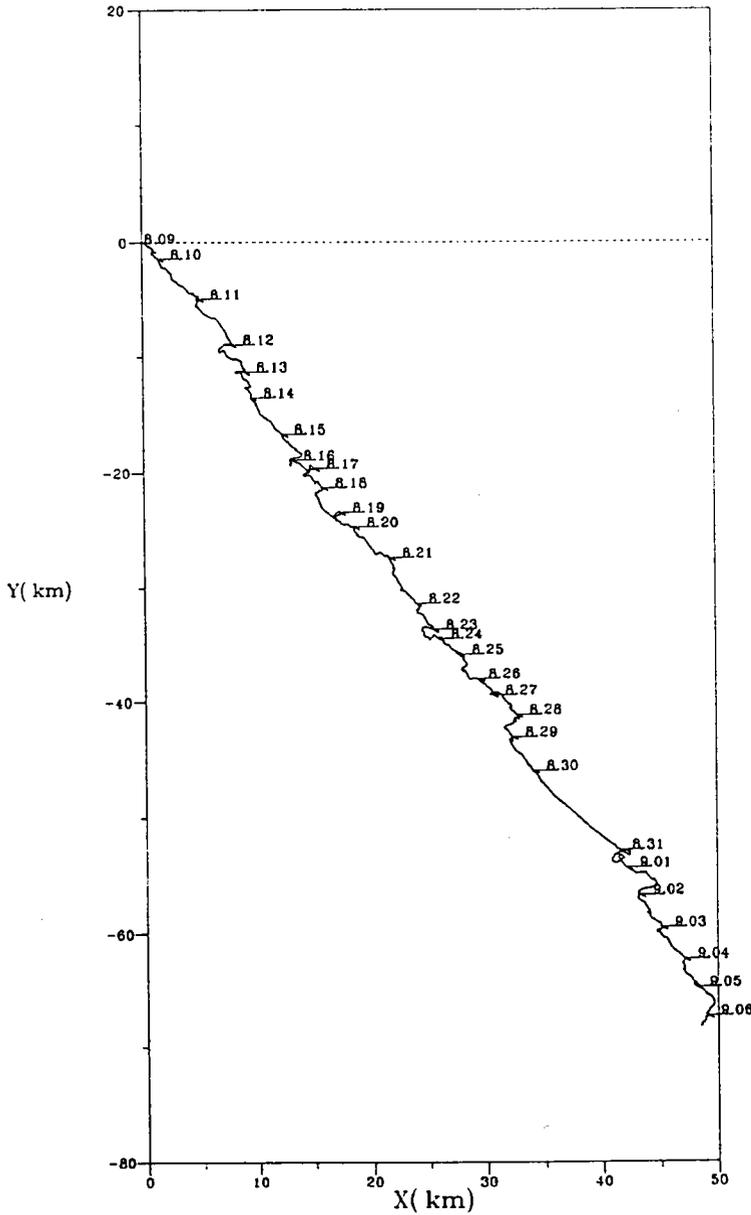


圖 3-5-8h 1994年8月間於ST-4站觀測之流南北分量能譜圖

Progressive Vector Diagram

Current in Haw-Lien Harbor(st-04) in 1994/08/09/15:00-1994/09/06/15:00
Total hours: 673 -0



CU940804.1HM

Institute of Harbor & Marine Technology

PLPVIV.FOR

1994.11.21

圖3-5-Si 1994年8月間於ST-4站觀測之海流向量進行圖

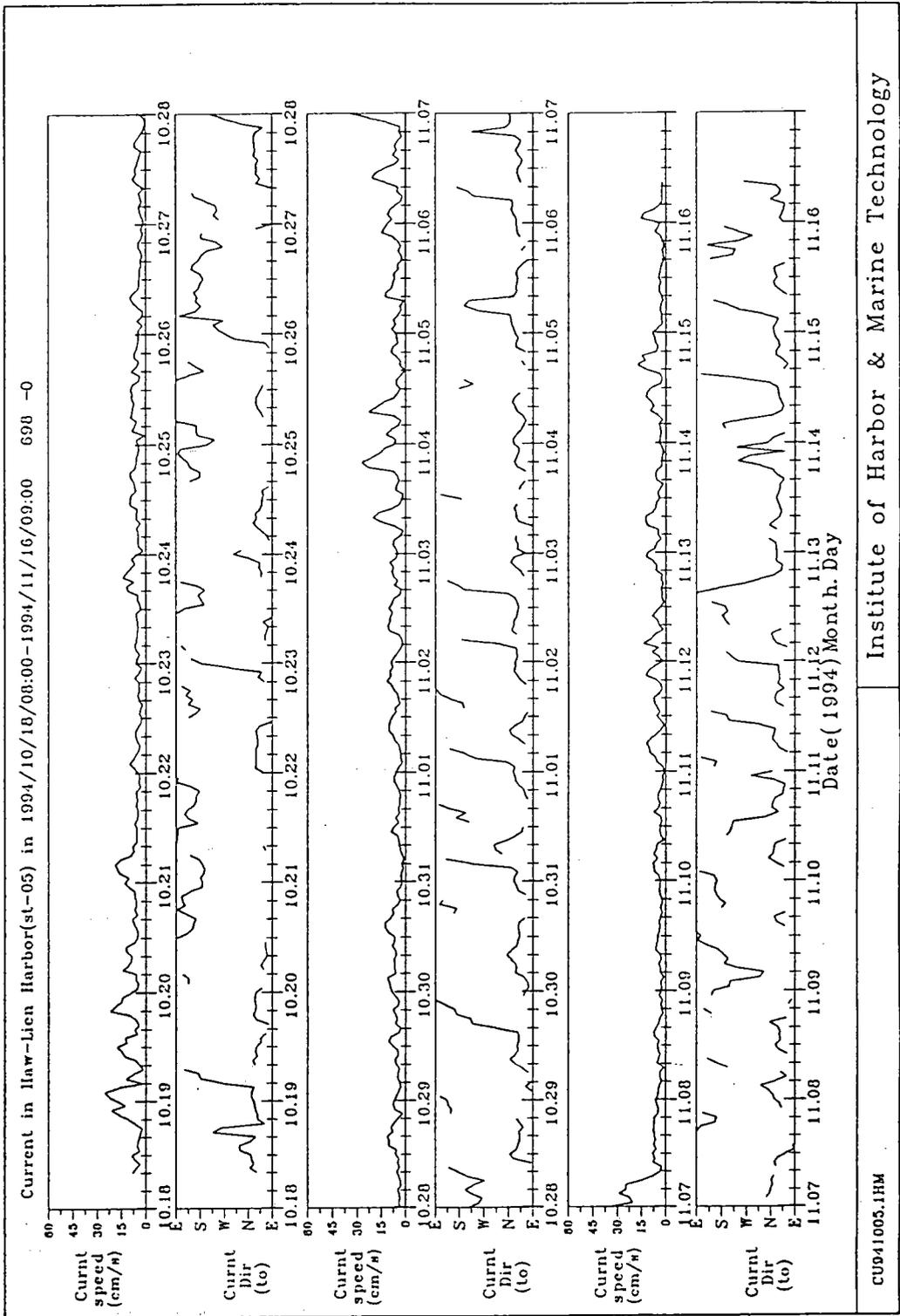


圖3-5-9a 1994年10月間於ST-5站觀測之逐時流速及流向(指去向)變化圖

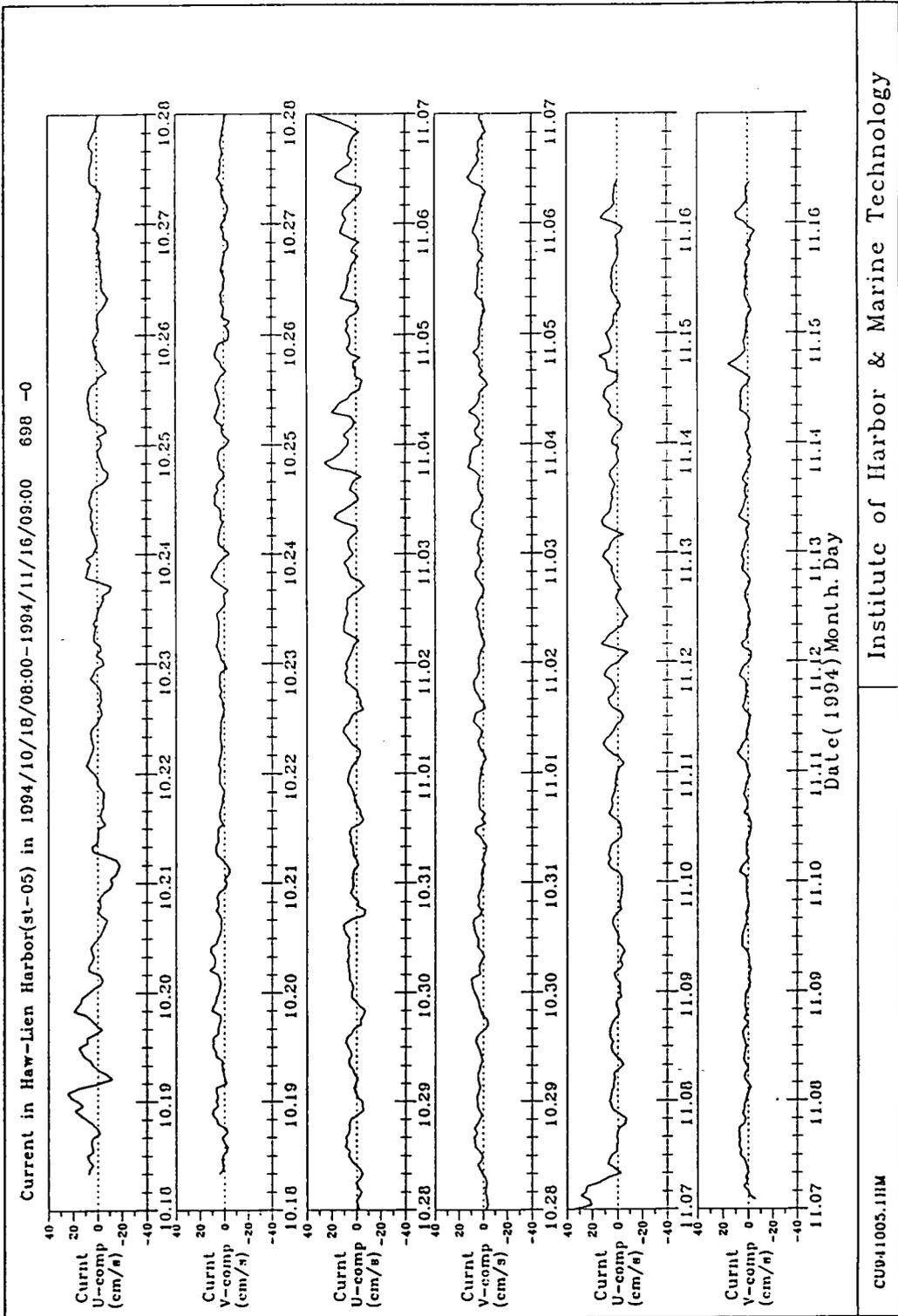


圖3-5-9b 1994年10月間於ST-5站觀測之逐時流東西分量及流南北分量變化圖

Current in Hsu-Lien Harbor (st-05) in 1994/10/18/08:00-1994/11/16/09:00
 mean : 6.3cm/s, s.d.: 4.3cm/s, min : .3cm/s, max : 32.9cm/s.
 File : CU941005.IHM Data no. 698 hours Lost data no. 0 hours

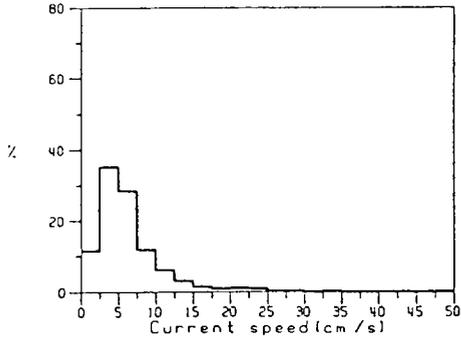


圖 3-5-9c 流速統計方塊圖

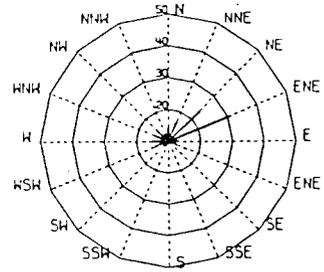


圖 3-5-9d 流向統計玫瑰圖

Current in Hsu-Lien Harbor (st-05) in 1994/10/18/08:00-1994/11/16/09:00
 mean : 2.4cm/s, s.d.: 6.0cm/s, min : -18.3cm/s, max : 32.8cm/s.
 File : CU941005.IHM Data no. 698 hours Lost data no. 0 hours

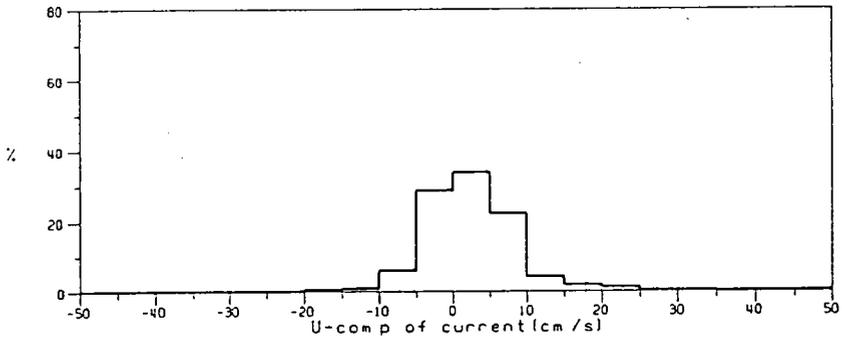


圖 3-5-9e 1994年10月間於ST-5站觀測之流東西分量統計方塊圖

Current in Hsu-Lien Harbor (st-05) in 1994/10/18/08:00-1994/11/16/09:00
 mean : 2.6cm/s, s.d.: 3.2cm/s, min : -5.8cm/s, max : 15.6cm/s.
 File : CU941005.IHM Data no. 698 hours Lost data no. 0 hours

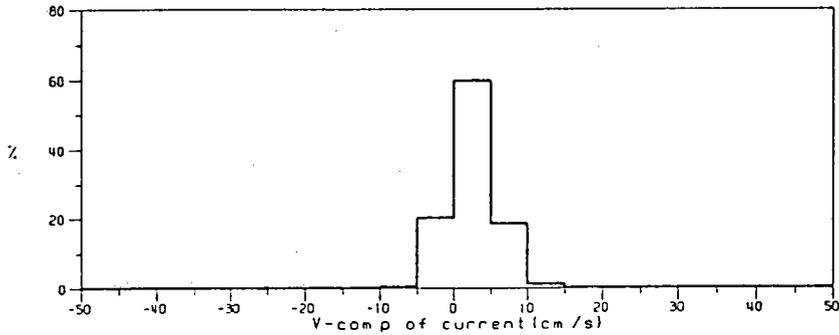


圖 3-5-9f 1994年10月間於ST-5站觀測之流南北分量統計方塊圖

Current Spectrum in Haw-Lien

Current in Haw-Lien Harbor (st-05) in 1994/10/18/08:00-1994/11/16/09:00

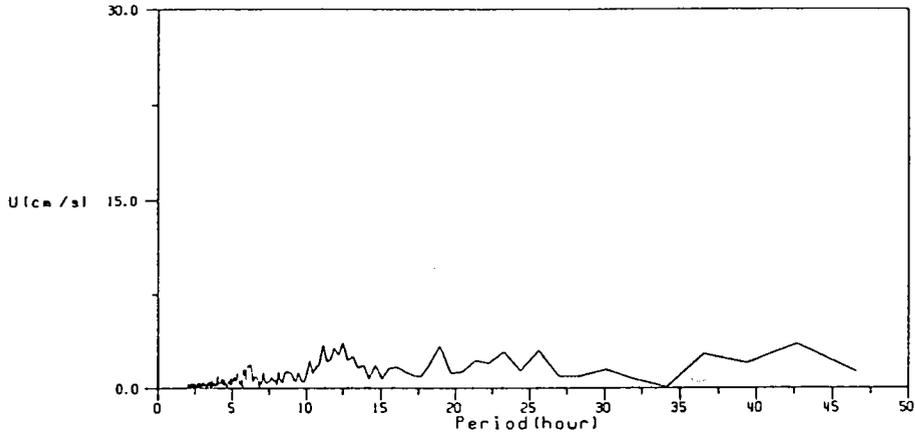


圖 3-5-9g 1994年10月間於ST-5站觀測之流東西分量能譜圖

Current in Haw-Lien Harbor (st-05) in 1994/10/18/08:00-1994/11/16/09:00

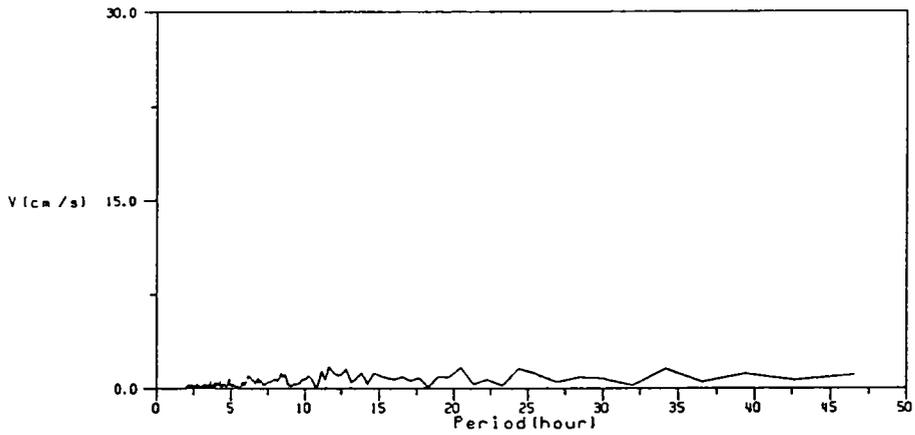
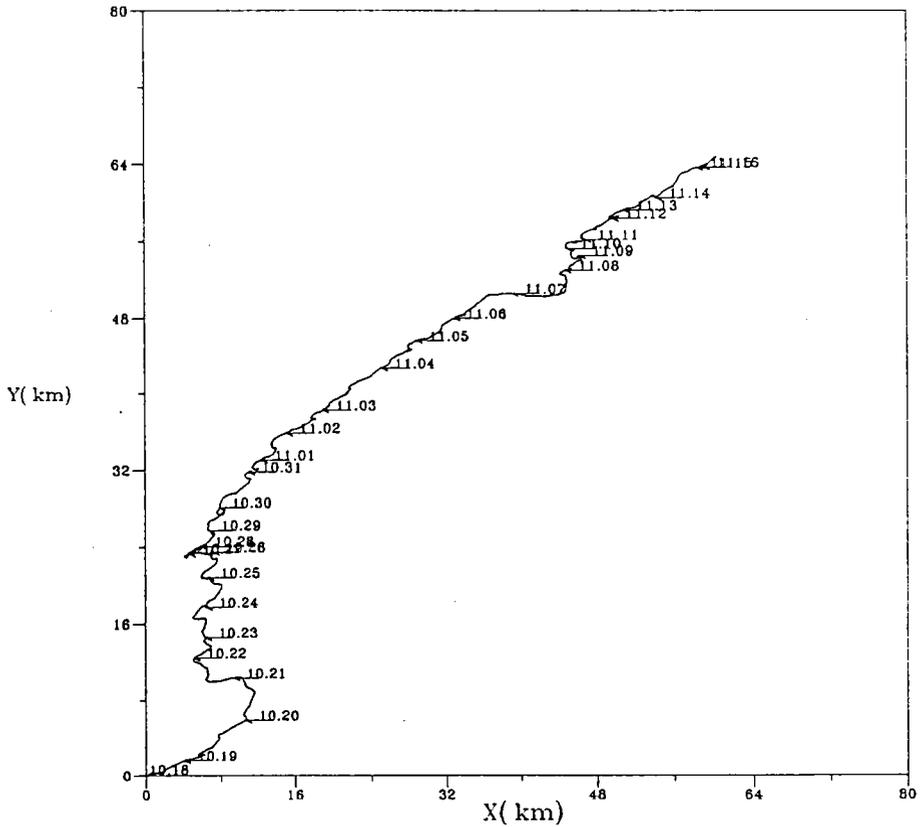


圖 3-5-9h 1994年10月間於ST-5站觀測之流南北分量能譜圖

Progressive Vector Diagram

Current in Haw-Lien Harbor(st-05) in 1994/10/18/08:00-1994/11/16/09:00
Total hours: 698 -0



CU941005.1HM

Institute of Harbor & Marine Technology

PLPVIV.FOR

1994.11.21

圖3-5-9i 1994年10月間於ST-5站觀測之海流向量進行圖

六、 花蓮港近岸海域之近岸海流數值推算

花蓮港海岸東、西防波堤擴建，海岸侵淤發生明顯變化，在東防波堤至南灣之海岸線經觀測結果，顯示部分美崙溪口附近有淤積現象，但往南段則有侵蝕現象，借本數值推算流場特性研究了解這些侵淤原因，以便能提出有效改善方案。

風、潮汐與波浪作用為影響花蓮近岸地區流場之主要外力，Model CT21主要推由風力及潮汐作用下之風吹流及潮流，由上節分析現場觀測流況顯示風影響近岸地區之流場並不明顯，其原因為花蓮地區之季節風不管夏季或冬季並不太大，而且夏季季風又遠較冬季為小。因此數值推算僅取冬季東北季風，以風速10m/sec北北東風向為風場外力進行數值推算，而夏季季風影響流場甚微，數值計算則不考慮風之外力，予於忽略。潮汐現場分析顯示主要分潮為半日潮，其次為全日潮，半日潮之潮差為一米，全日潮之潮差約為四分之一米，花蓮近岸地區之潮汐移動，漲潮往東北東向，退潮往南南西向，潮汐之作用將引用此為邊界條件。

潮流推算之花蓮港近岸地區南起花蓮港，北至東堤外海，其範圍約2.3 * 3.9公里，如圖3-6-1所示。三角形元素網格切割如圖3-6-2所示，區域分割三角形網格之長度約為90米左右，網格結點個數為1112，三角形元素計2076個。圖3-6-3a,b,c,d分別為夏季不考慮風之影響，在半日潮差1米之潮汐作用下，數值推算漲潮及退潮不同時段之流場，圖中顯示外海之潮流流速最大約為30cm/sec左右，南濱近海之潮流流速最大約為12cm/sec左右。漲潮時向北北東(圖3-6-3a,b)，退潮時向南南西(圖3-6-3c,d)。因為潮汐為週期性運動，可預期潮流對海岸之南北漂沙搬移影響並不明顯，因此對改變地形變遷並不顯著。圖3-6-4a,b,c,d分別為冬季慮冬北季風之影響，在風速10m/sec，風向北北東及在半日潮差1米之潮汐作用下，數值推算漲潮及退潮不同時段之流場，圖中顯示冬季潮流及風吹流合成之流速，及在漲潮時段較夏季為小，但在退潮時段較夏季為大，其原因為風吹流與漲潮之潮流流向相反之故。

潮流及風吹流由以上數值分析顯示對花蓮港近岸或港口地區之地形變遷影響不大，但此兩種成份流況對船舶進港之操船則有一定之影響，其次在港內與外海水體交換能力有決定性之影響。換言之，港池污染擴散之效果，潮流移動方為大小為一重要影響因素。

沿岸流一般對海岸漂沙之擾動及移動影響較大，如海岸附近另有防波堤等結構物，則將改變波浪及水流之型態，繼而影響漂沙運轉之特性，造成海岸地形變遷。花蓮港根據許等(1991)，及歐等(1992)研究，發現東防波堤擴建從南濱段海岸遭受侵蝕與海堤破壞，而港口附近部分有淤積現象。颱風波浪在花蓮地區為一重要的影響因素，不僅其波高甚大，而且其發生之頻率也不低，因此颱風波浪所引起之沿岸流流場為數值推算之重要。

數值推算將考慮颱風波浪波高10米，週期14秒，波向ENE及SE方向入射產生之沿岸流之流場。圖3-6-5及圖3-6-6分別為ENE及SE向颱風波浪作用下，由Model WP21推算之波場分佈，圖中向量線代表波浪進行之波向線，不同粗細實線代表不同值之等波高線。圖3-6-5之現象如第四節例子說明(圖3-4-5)所示，港口遮蔽區為波浪繞射區，波高較小，波向線呈幅射狀，但在SE波浪作用下，堤後產生遮蔽效應之地區甚小，並不明顯(圖3-6-6)，ENE向堤頭後左右之波高差顯然較SE波向作用之波高差為大。

沿岸流推算之四邊行之網格切割如圖3-6-7所示，區域分割四邊形網格之長度約為40米左右，網格結點個數為5559，四邊形元素計1788個。圖3-6-8及圖3-6-9則分別為ENE及SE向颱風波浪作用下之流場分佈，圖3-6-8為波以ENE方向入射，由於防波堤之遮蔽效應，導致堤後水位梯度之差異，使得近岸流場產生不同的變化，一部分的水流由於斜向波浪而向南方向流動，另一部份則在堤後形成一反向環流。環流系統將泥沙帶往美崙溪口，流速在港口處變小(如附圖3-6-8)，部份泥沙將淤積於港口處。而南下方向之沿岸流因環流帶走泥沙，頓失沙源，而淘挖海底沙粒，因此造成自由街排水口以南的海岸遭受侵蝕。東北季風作用

時，因波高較小，碎波帶較颱風作用時來的狹小，可預期環流之範圍及速度皆較小，但因季風是經年累月之作用，因此其影響也不同忽視。圖3-6-9波浪以SE方向入射，因此在碎波帶內沿岸流分佈由南向北，此時不管南濱海岸或港口處皆無環流產生，可預期對海岸之漂沙搬移影響並不明顯，因此改變地形變遷並不甚顯著。

針對因沿岸流產生之環流效應，在東防波堤至南灣之海岸線，部分美崙溪口附近淤積現象，南濱段有侵蝕之現象，初步提出以下之構想：為有效破壞環流系統，建議在南濱海岸適當位置建凸堤(或凸堤群)，除可保護該處之海岸，也可改變附近之流場分佈，此方案或可改變此淤積及侵蝕現象。而且此方案根據上一章之波浪分析，也顯示其又有相當程度改善現有港池靜穩度之效果，此種改善佈置方案可謂一舉兩得。

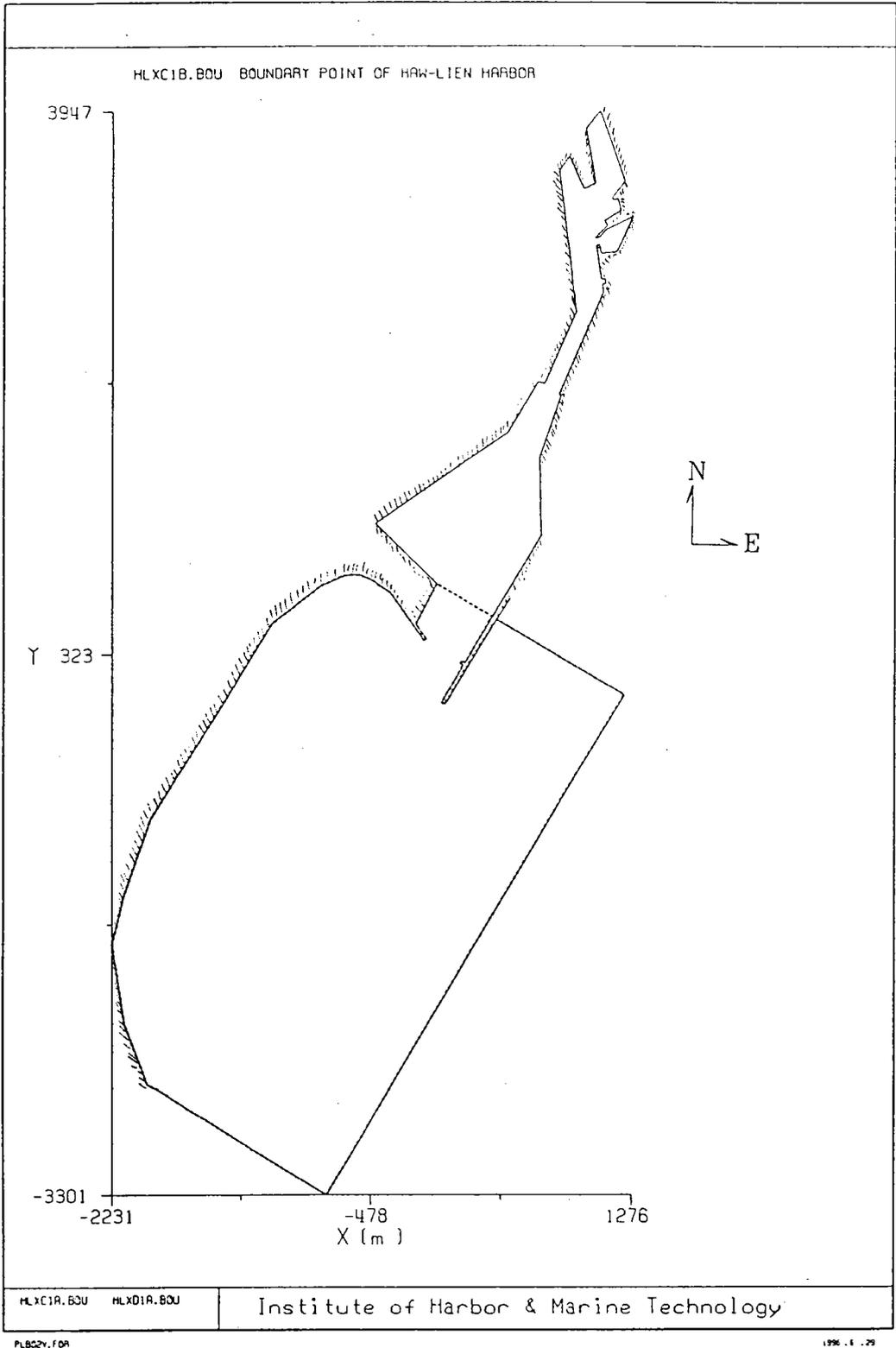


圖3-6-1花蓮港近岸地區潮流推算之範圍示意圖

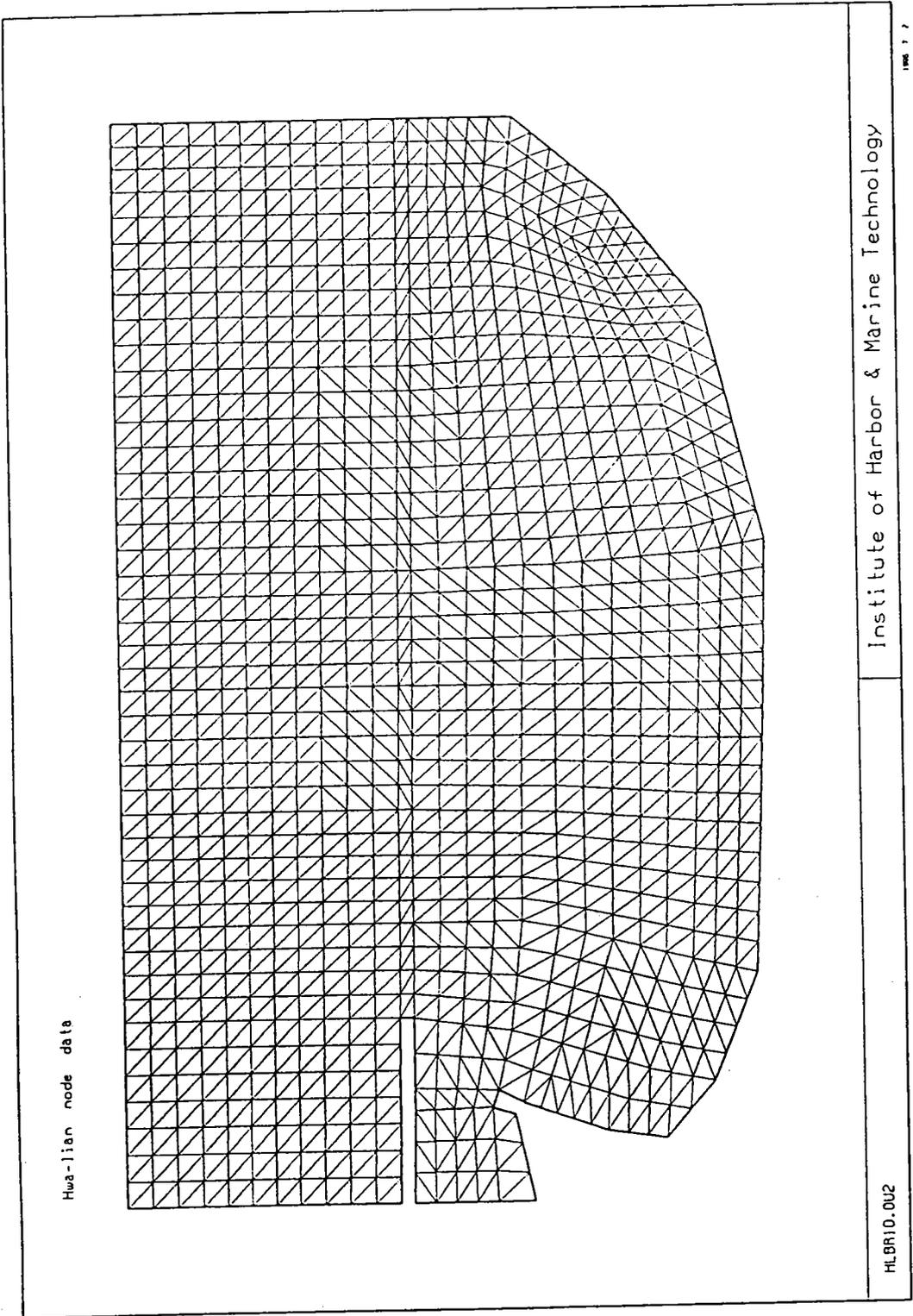


圖3-6-2花蓮港近岸地區潮流推算三角形元素切割示意圖

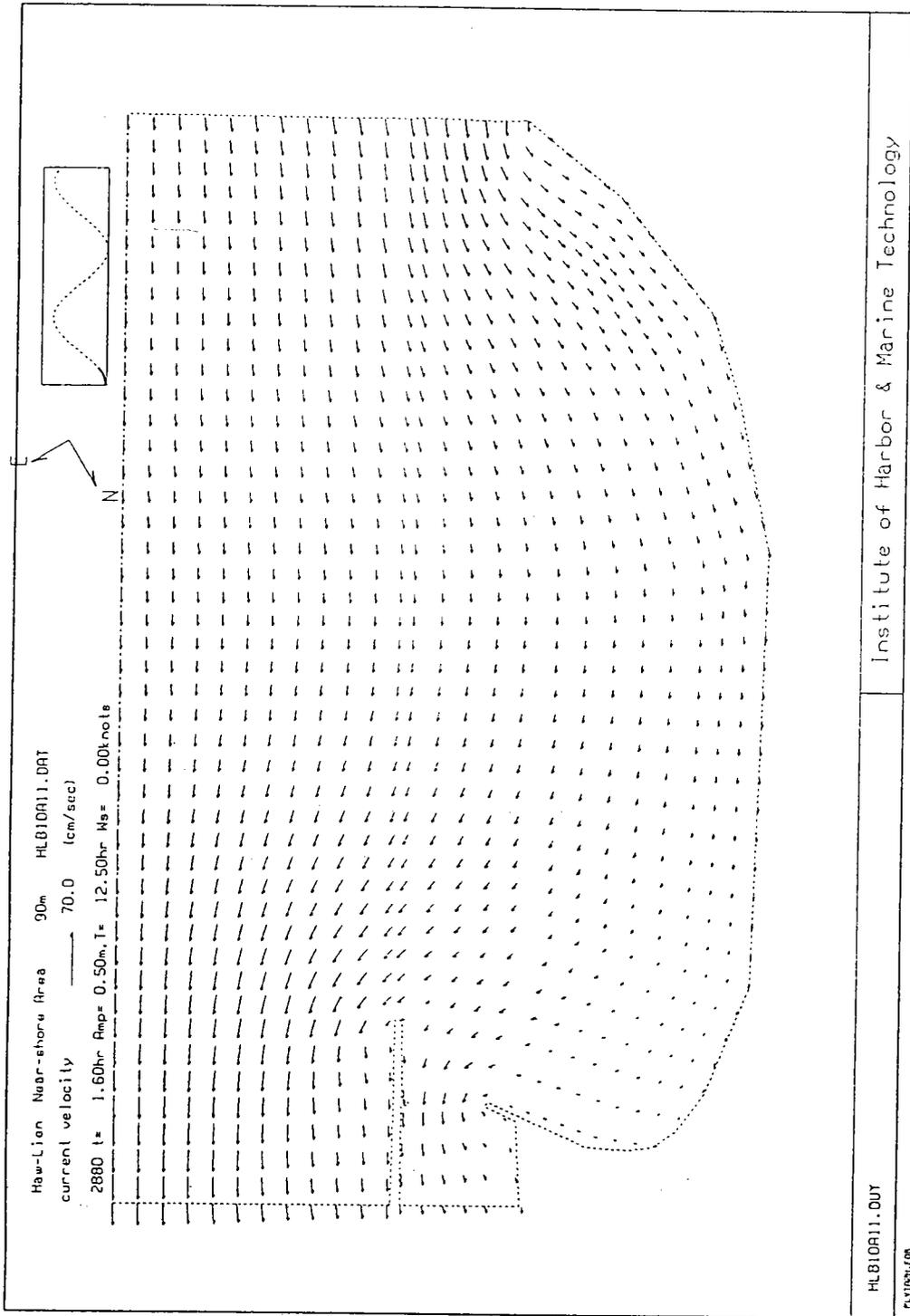


圖3-6-3a花蓮港近岸地區潮流推算夏季期間漲潮時段之流場

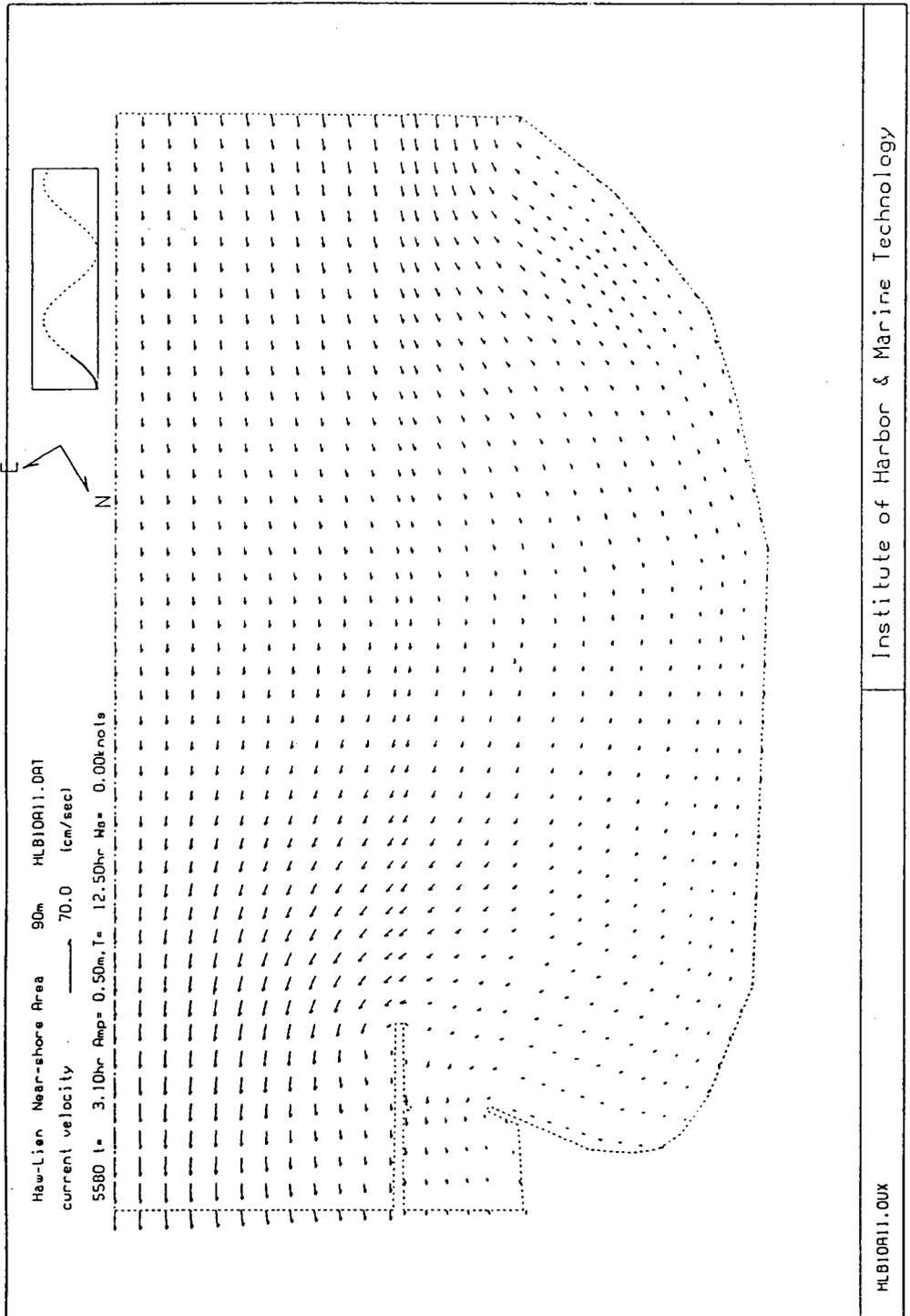


圖3-6-3b 花蓮港近岸地區潮流推算夏季期間漲潮時段之流場

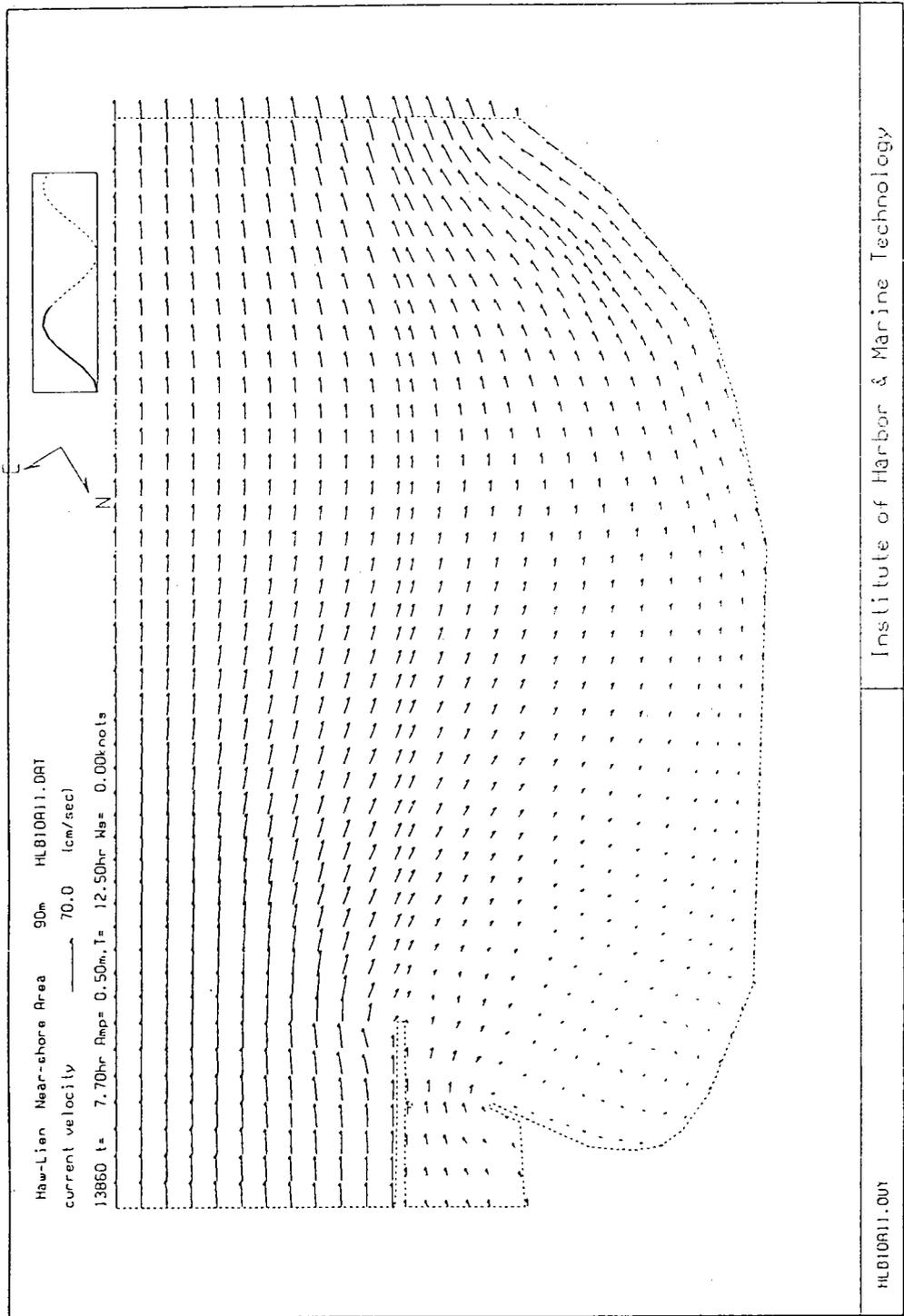


圖3-6-3c 花蓮港近岸地區潮流推算夏季期間退潮時段之流場

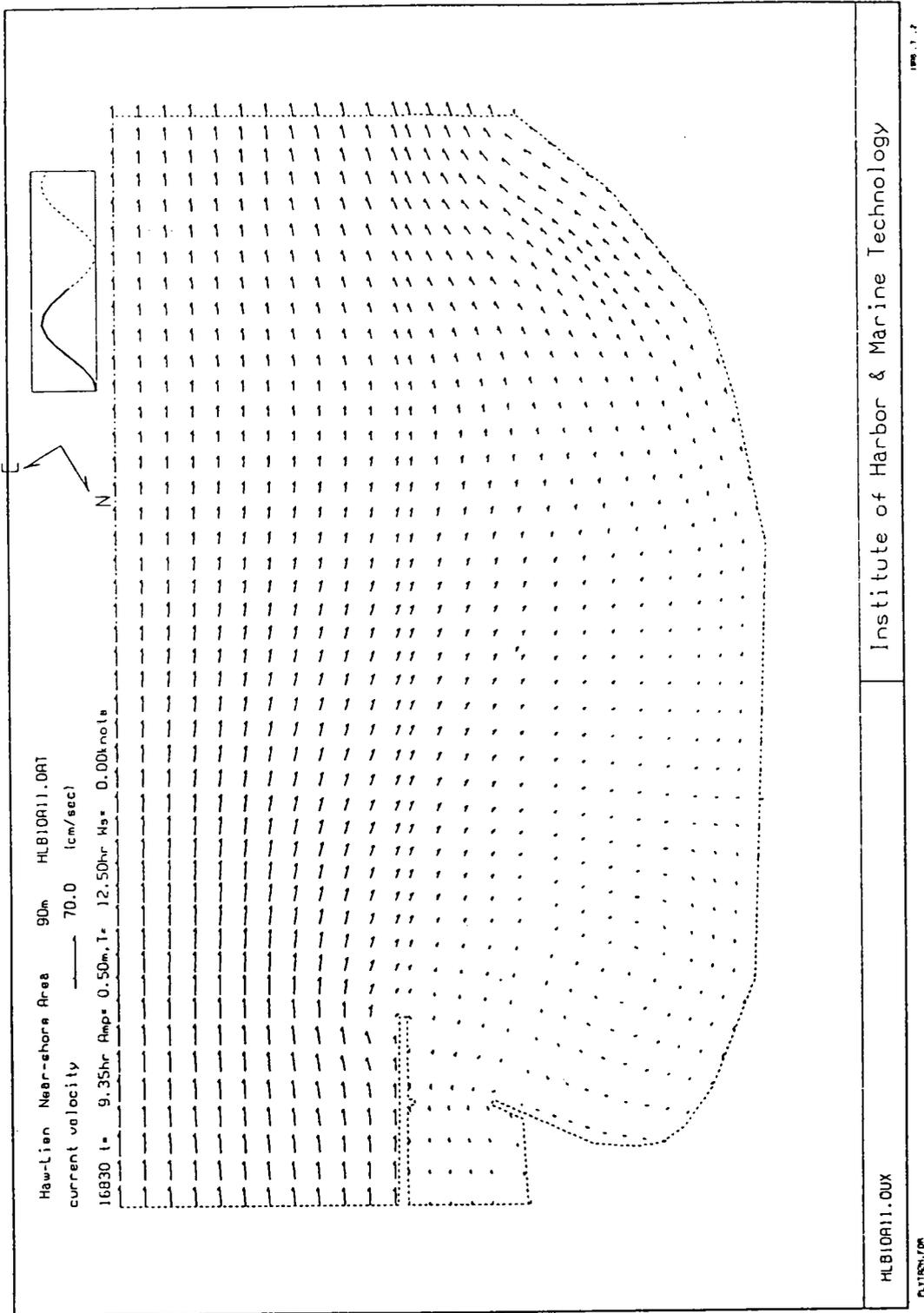


圖3-6-3d花蓮港近岸地區潮流推算夏季期間退潮時段之流場

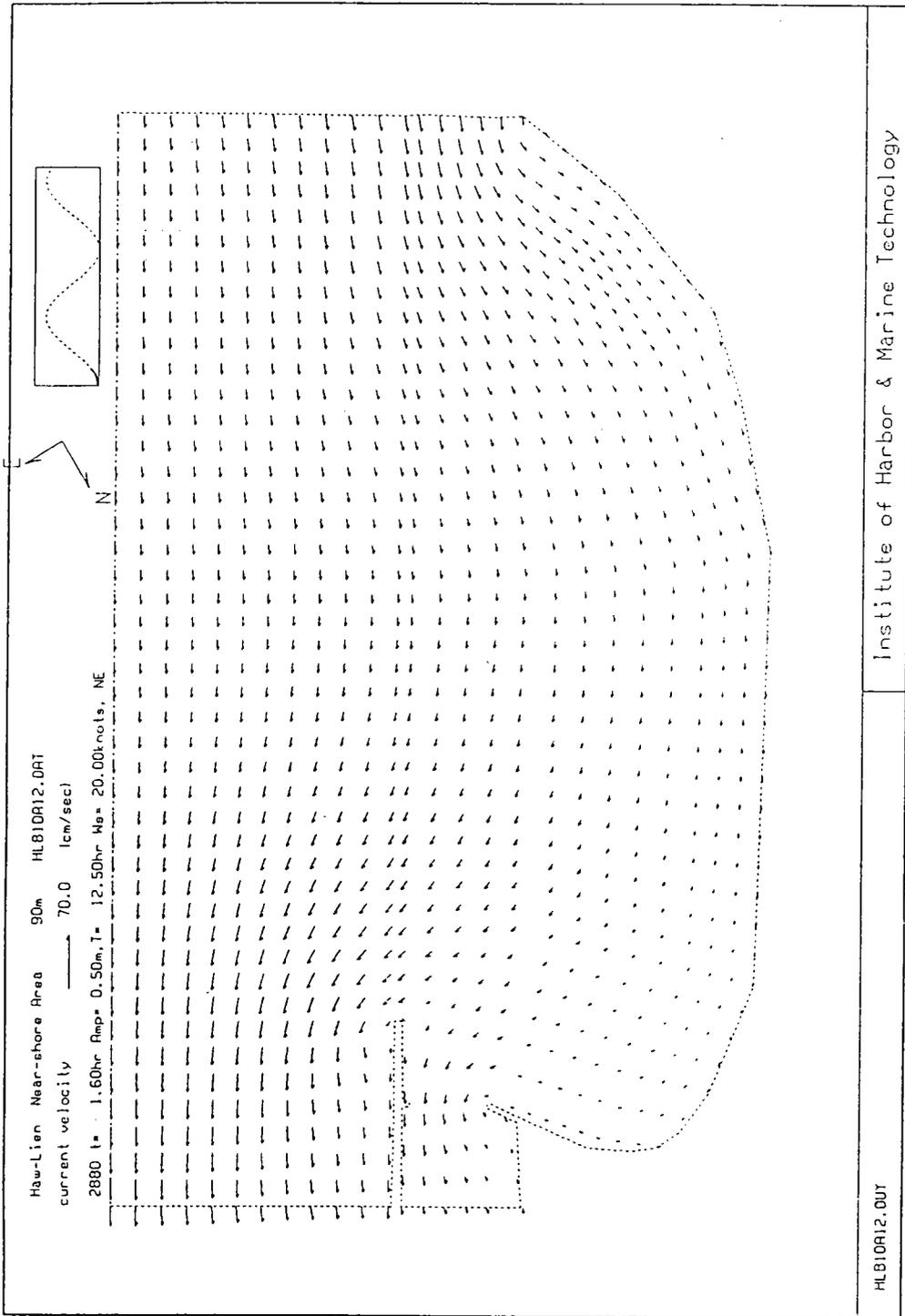


圖3-6-4a花蓮港近岸地區潮流推算冬季期間漲潮時段之流場

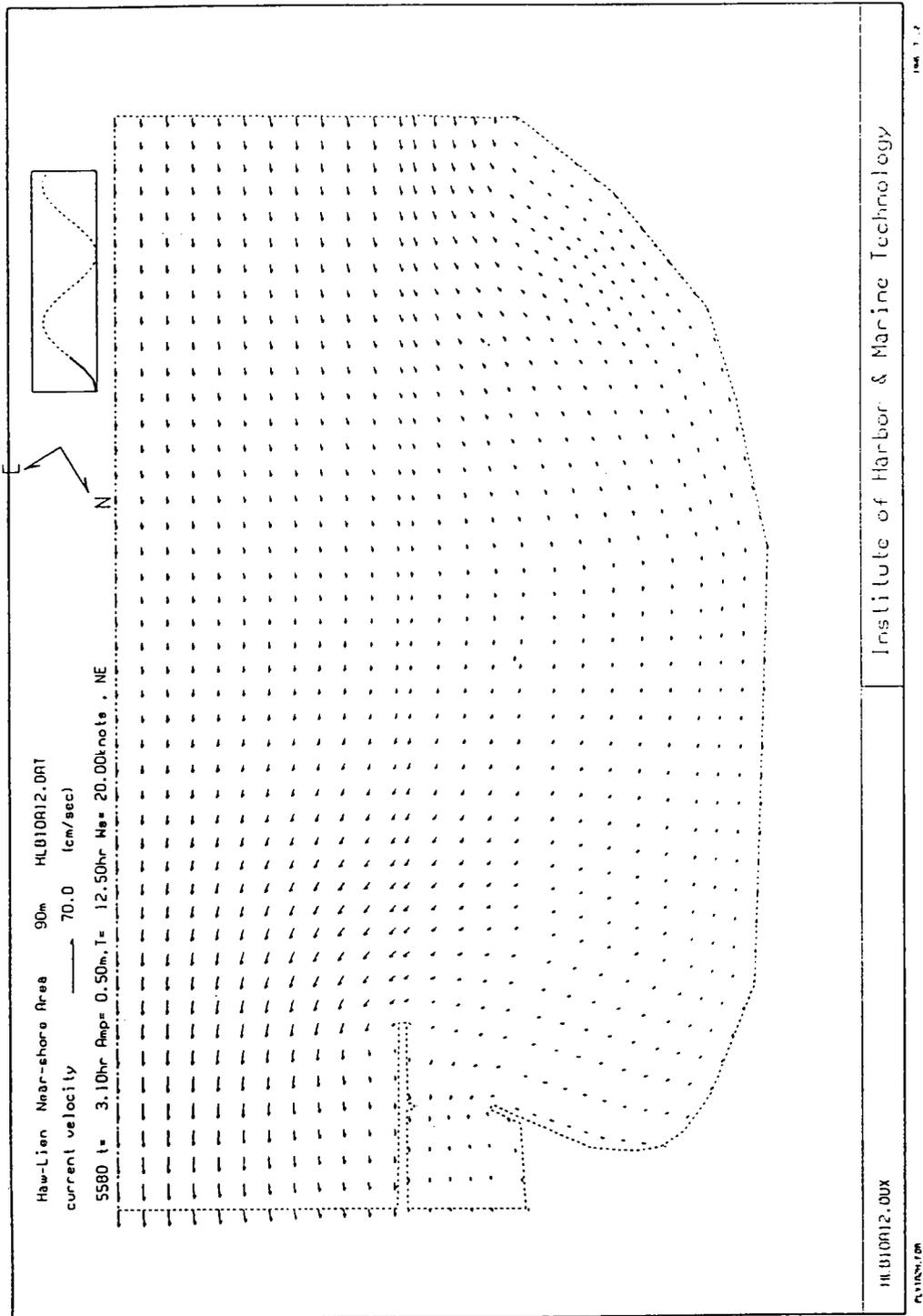


圖3-6-4b花蓮港近岸地區潮流推算冬季期間漲潮時段之流場

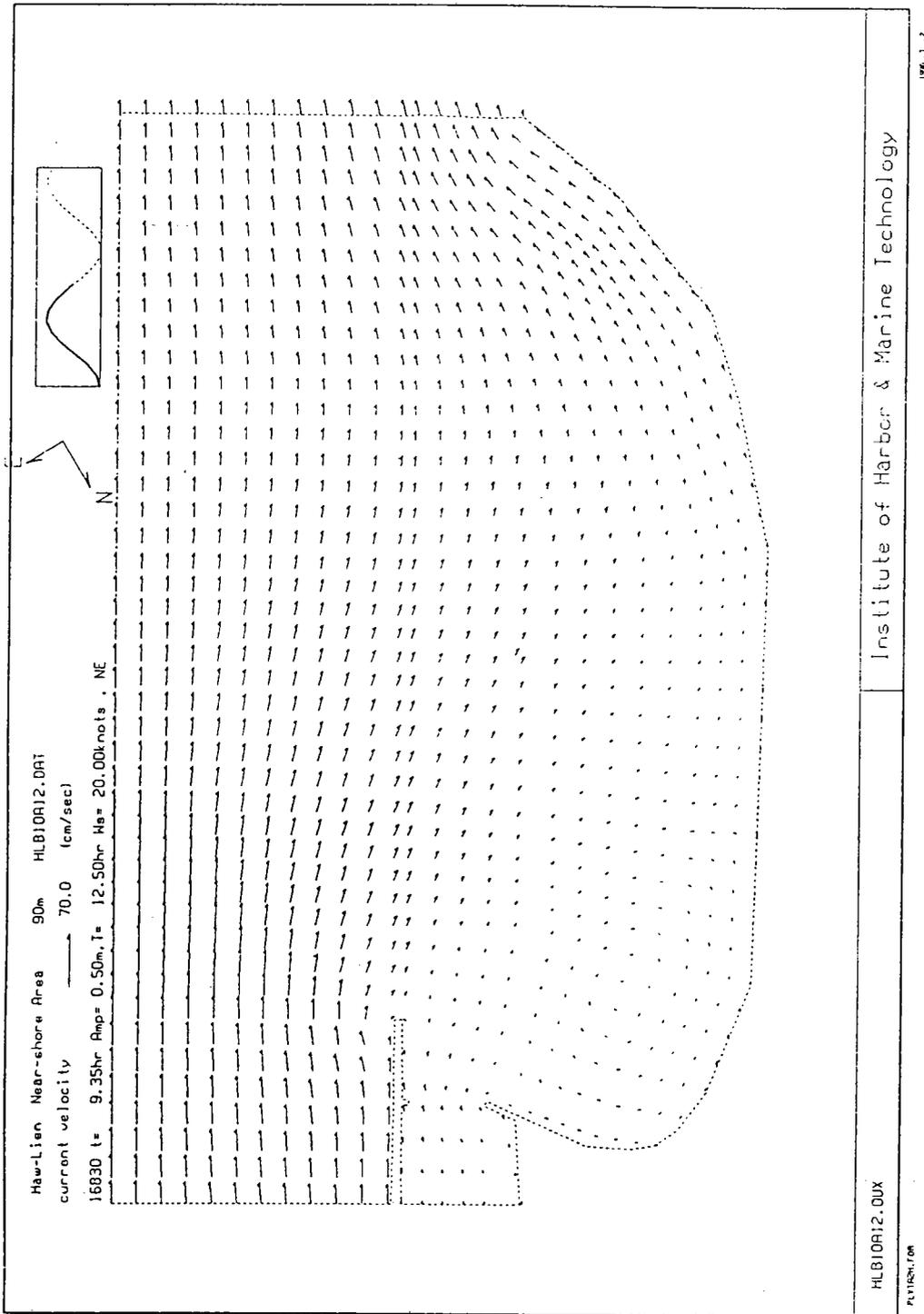


圖3-6-4c 花蓮港近岸地區潮流推算冬季期間退潮時段之流場

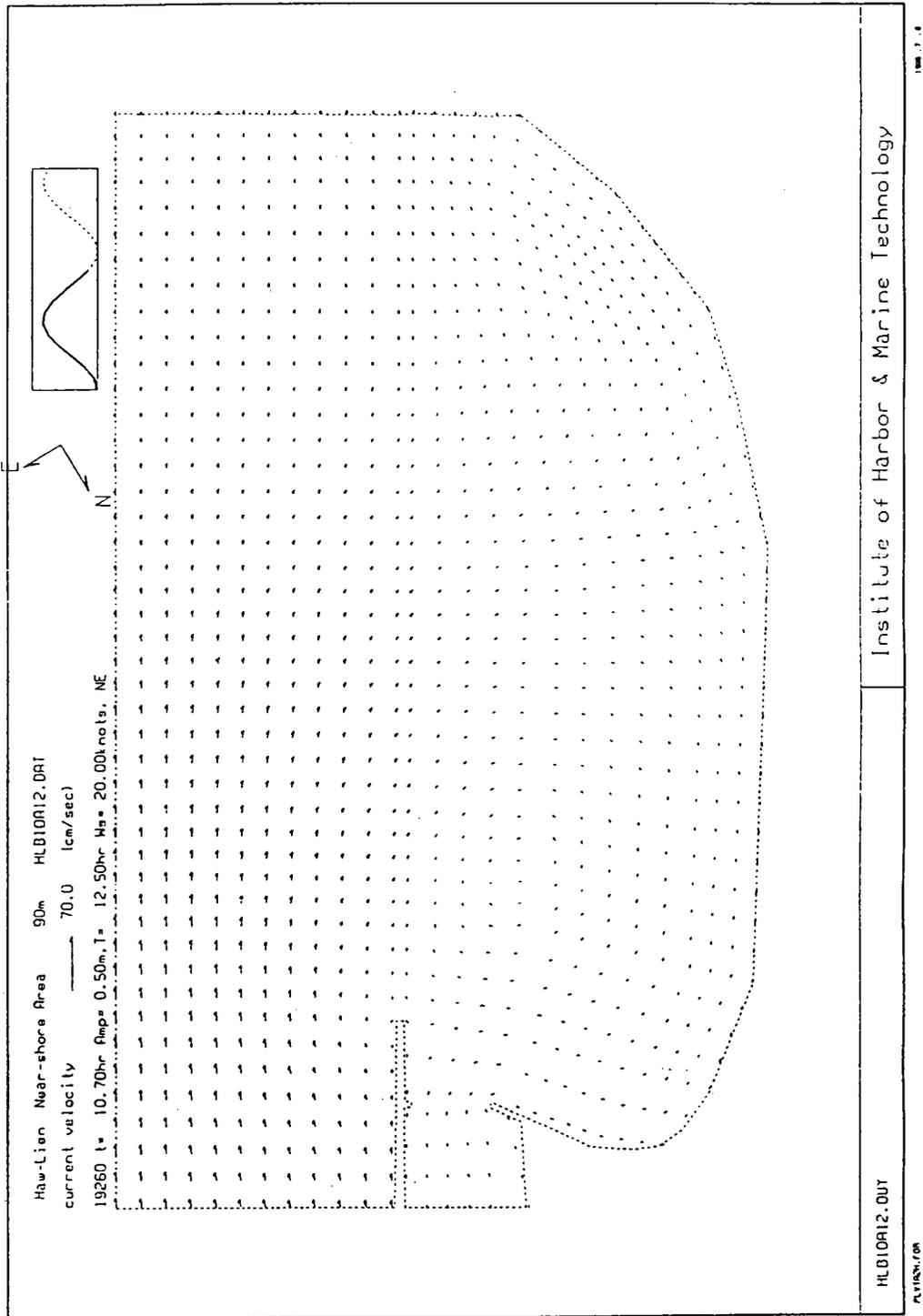


圖3-6-4d花蓮港近岸地區潮流推算冬季期間退潮時段之流場

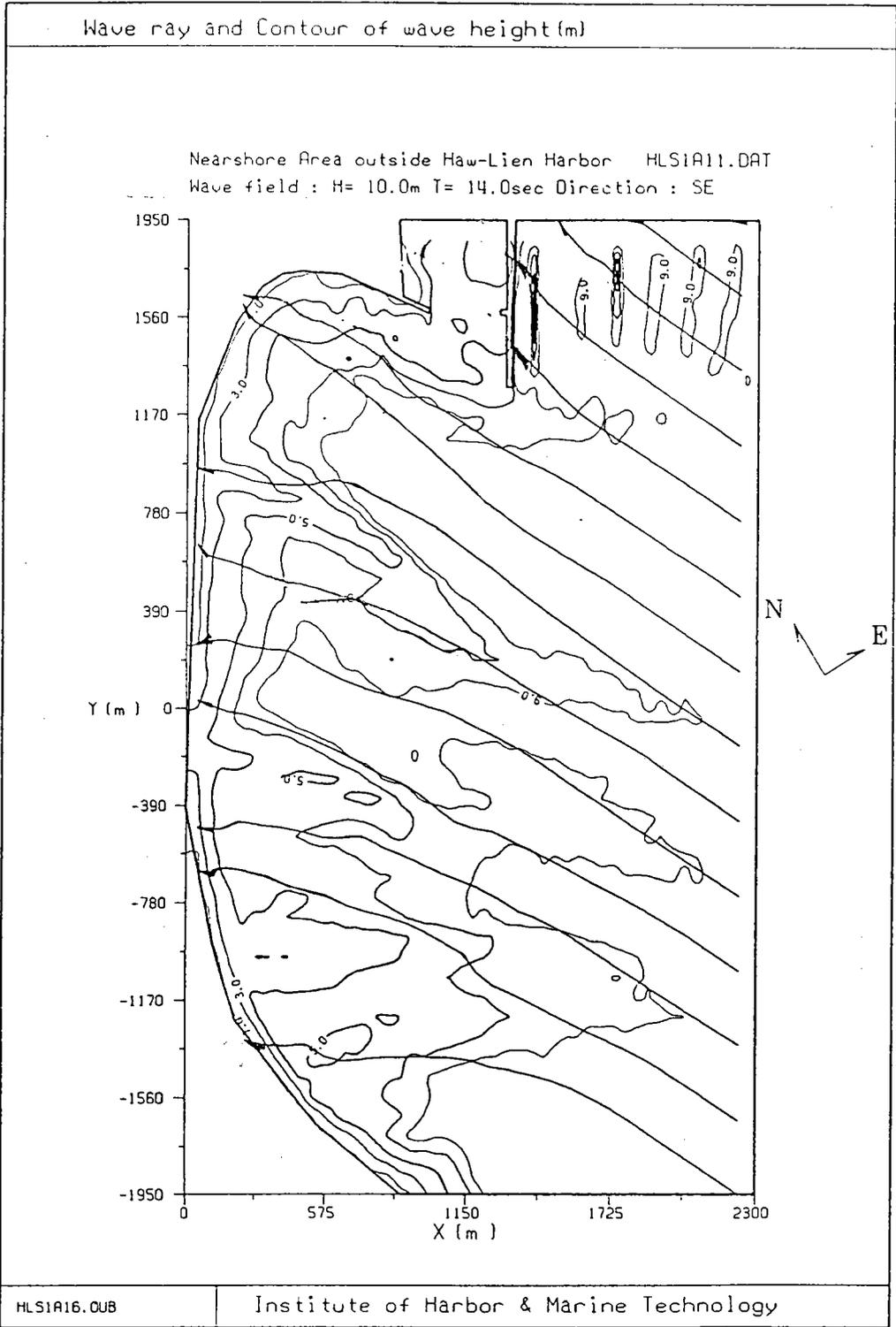


圖3-6-5花蓮港近岸地區SE向颱風波浪作用下之波場分佈

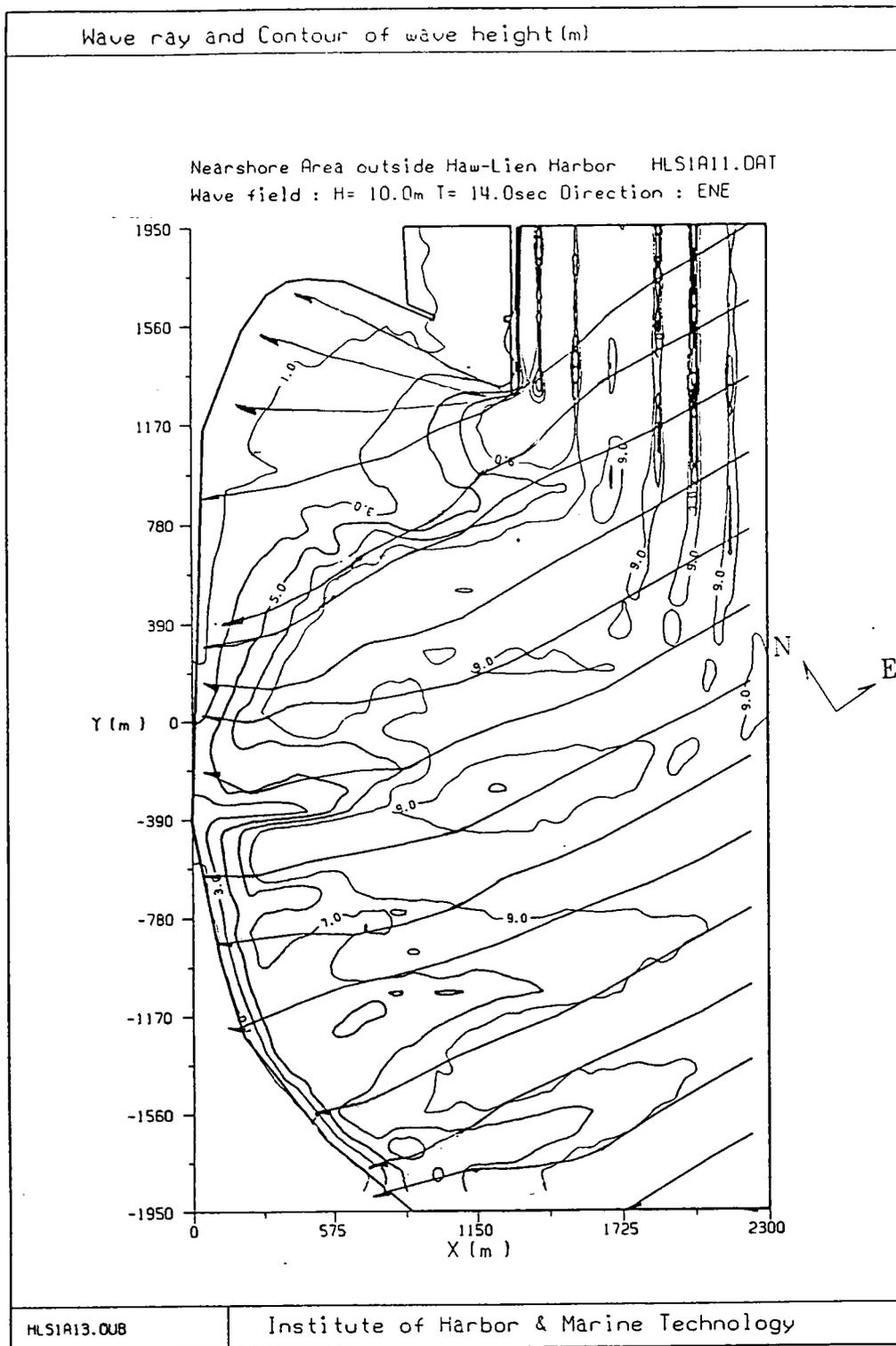


圖3-6-6花蓮港近岸地區ENE向颱風波浪作用下之波場分佈

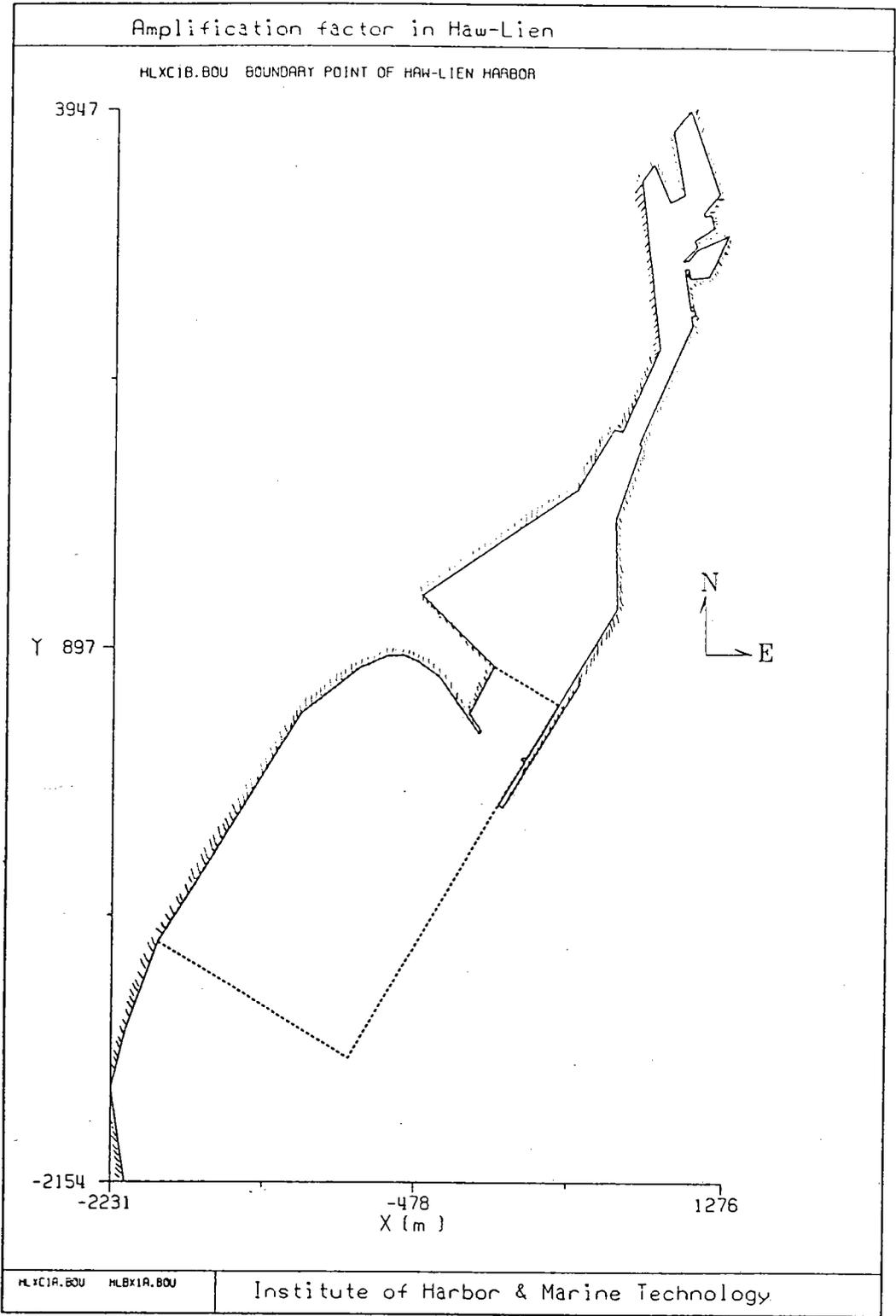


圖3-6-7花蓮港近岸地區沿岸流推算之範圍示意圖

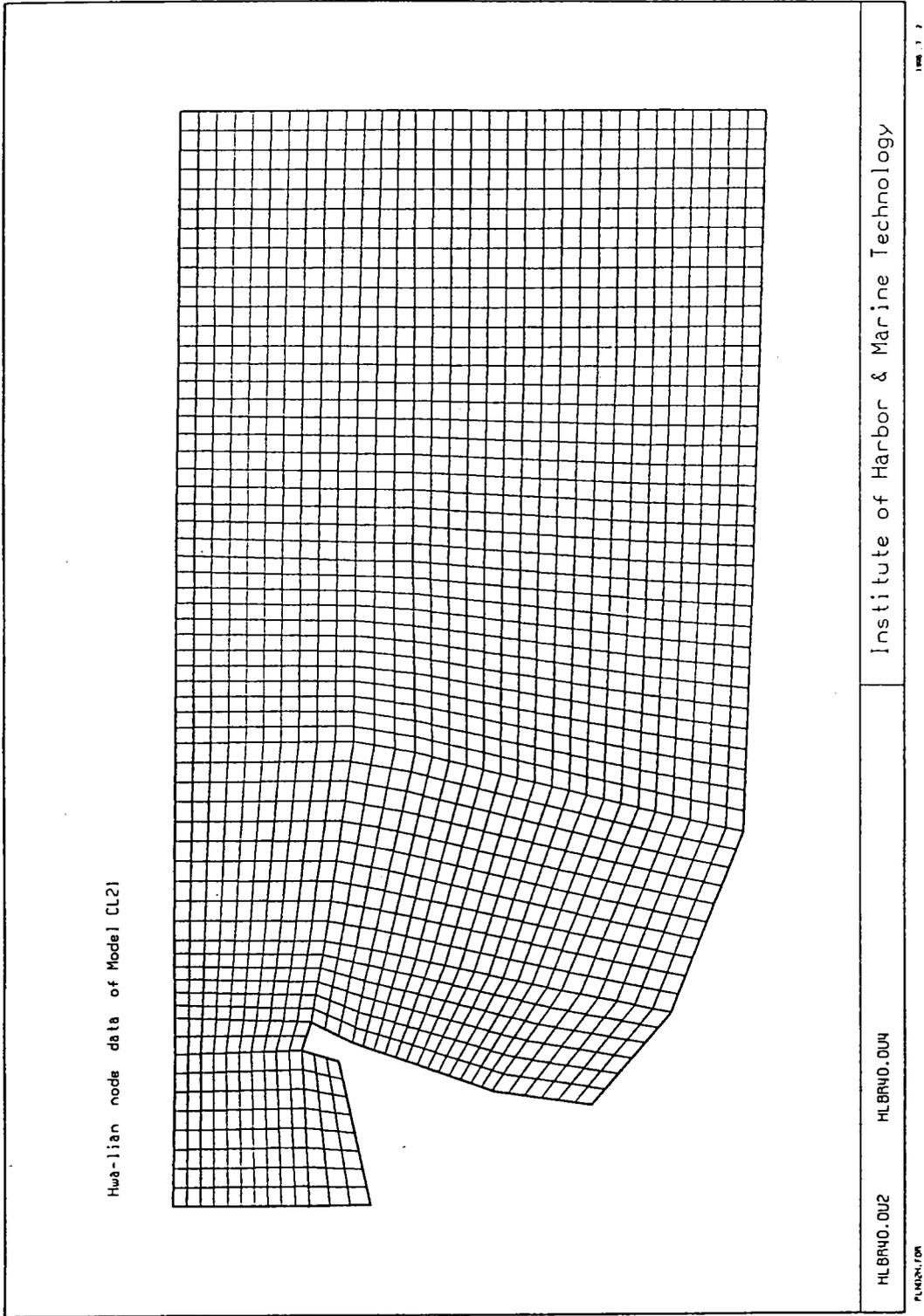


圖3-6-8花蓮港近岸地區沿岸流推算四邊形元素切割示意圖

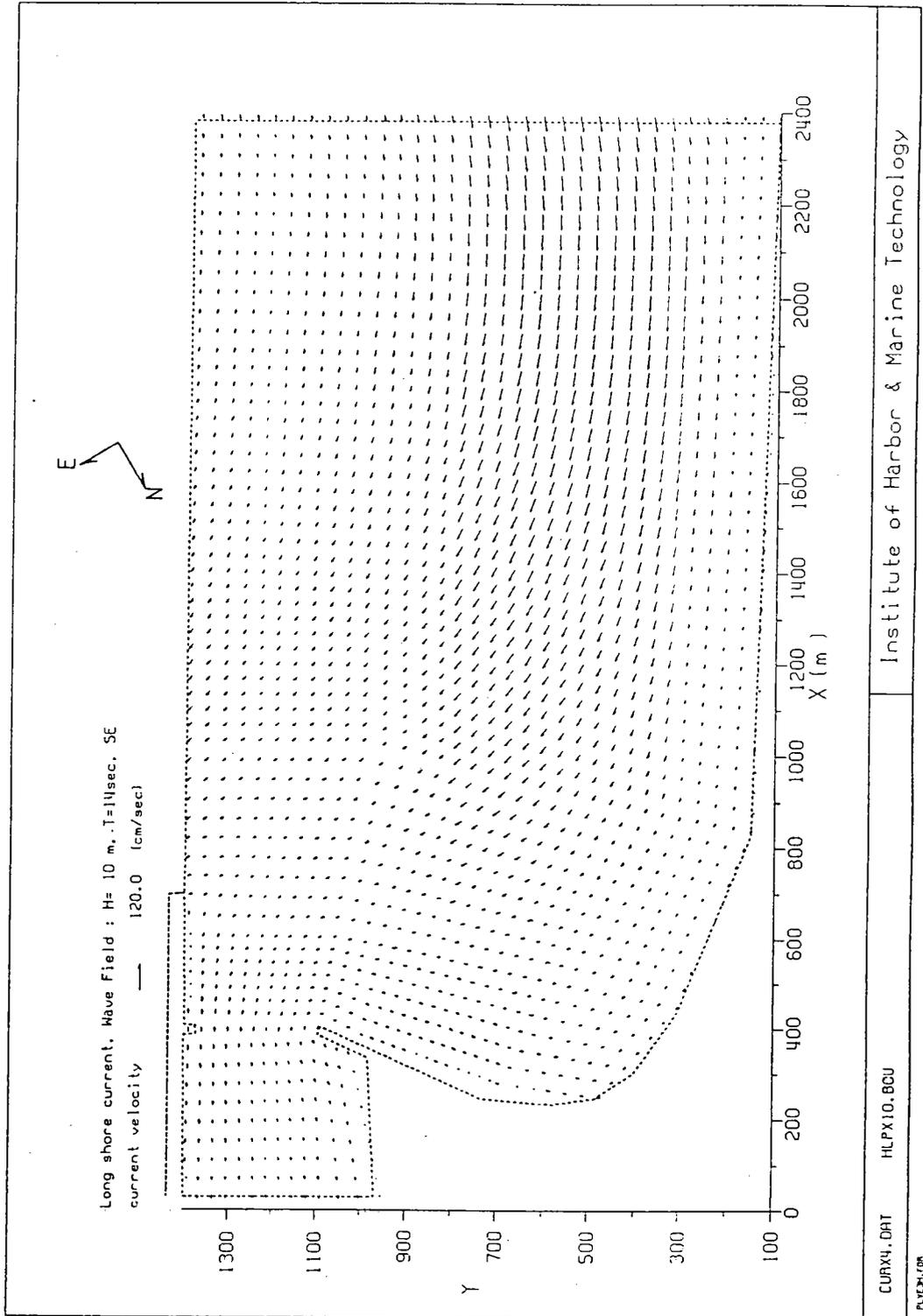


圖3-6-9花蓮港近岸地區SE向颱風波浪作用下之流場分佈

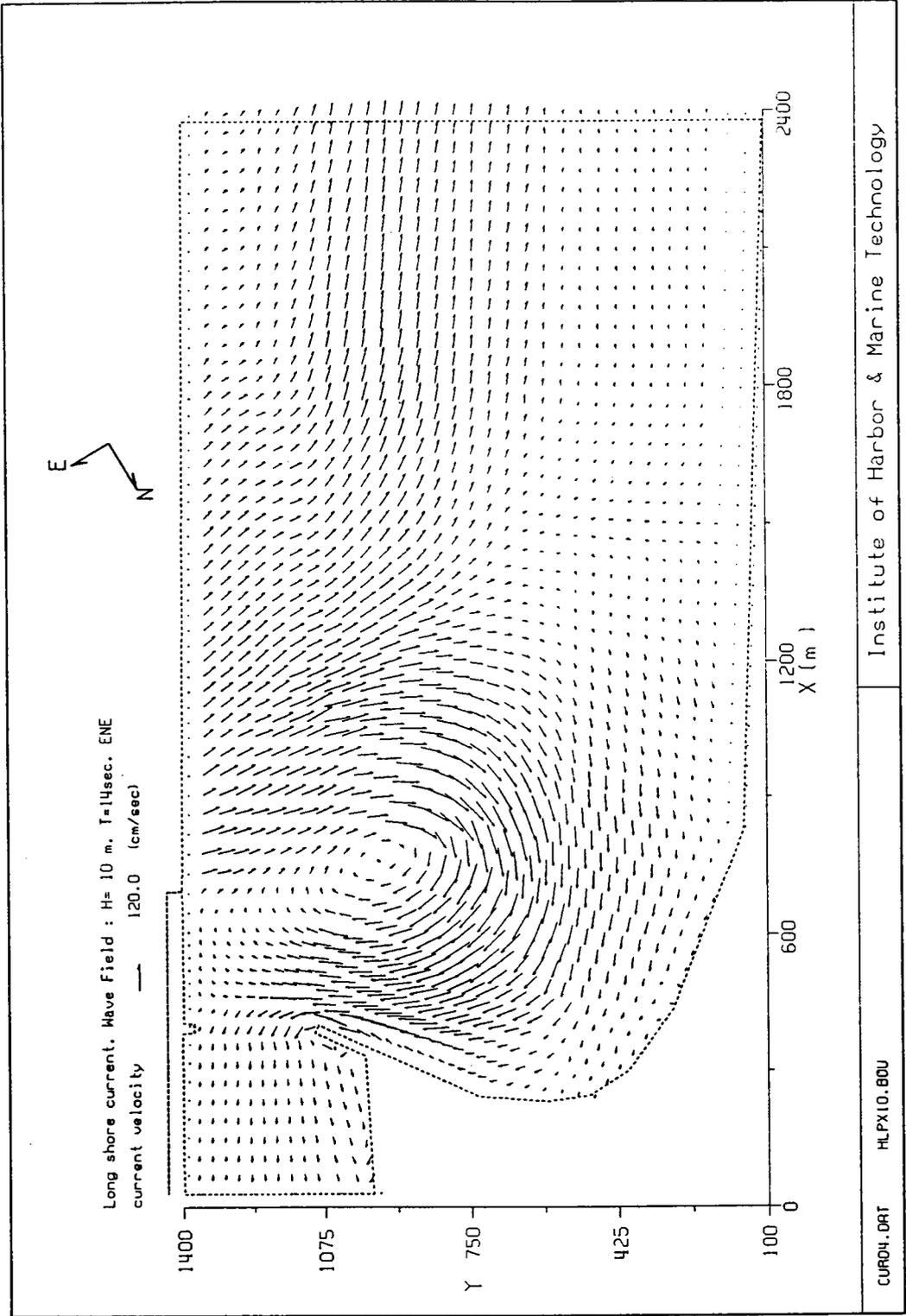


圖3-6-10花蓮港近岸地區ENE向颱風波浪作用下之流場分佈

肆、結論及建議

一、結論

1. 影響花蓮港港池靜穩度之主要外力為颱風入侵造成劇烈水位變化，港內船舶繫泊困難，更有因而斷纜。颱風波浪影響花蓮港靜穩度最大，因此颱風波浪引起之港共振為探討之重點。
2. 根據83年提姆颱風過境期間，本所在花蓮港較遠外海觀測之波浪特性顯示， $H_{1/3}$ 約為10米，主要週期約為14秒。港口外觀測之波浪特性顯示， $H_{1/3}$ 約為5米，主要週期約為14秒。港內較接近港口處之22號碼頭 $H_{1/3}$ 約為3米， $T_{1/3}$ 約為18秒，港池底端兩個測點，10號碼頭 $H_{1/3}$ 約為1米， $T_{1/3}$ 約為88秒，8號碼頭 $H_{1/3}$ 約為1米半， $T_{1/3}$ 約為70秒。說明港外並無明顯長週期成份波存在，但港內有明顯長週期成份波存在。
3. 觀測之波浪經波譜分析，顯示港池底端兩個測點：8號及10號碼頭之主頻則落在158秒附近，波高譜值皆為0.50，其值遠較港外之值為大，但短週期則無相對尖峰值存在，其波高值皆甚小。此現象說明港內有週期長約3分鐘，波長約3,200米之長週期成份波存在。
4. 如以Merian's公式估算，花蓮港可能發生之共振週期如下： $T=800$ 秒，267秒，160秒，114秒，89秒，73秒，62秒，53秒，47秒，42秒...等。其中第三個共振週期 $T=160$ 秒與觀測值 $T=158$ 秒甚為接近，顯示觀測值甚為吻合。
5. 現場波譜分析顯示在較外海週期15秒之主要成份波，沿南濱海岸前進至外港口處，波高僅為外海站之一半，進入港內到達22號碼頭處，能量繼續消散；而最後在進入在港池底端，即8號碼頭或10號碼頭處能量已幾乎不存在。短週期之波浪，比較容易受如防波堤結構物之甚過，透水邊界能量消散及地形摩擦等效應之影響，而在進入港內後快速減衰，因此港外主頻15秒左右短週期成份波進入港內後迅速衰減。
6. 現場波譜分析顯示在較長週期之成份波方面，外海站顯示長波並不明顯存在但波浪沿南濱海岸前進至外港口處，因海岸邊界及地形效應，如93秒之波長較長之成份波處能量相對增大，當波浪進入港內到達之22號碼

頭處，如120秒更長之成份波能量相對增大。最後波浪傳遞至港內端點之8號碼頭及10號碼頭處，如158秒更長之成份波能量相對又增大。顯示隨波浪傳遞距離增加，在四個測站之成份波由15秒 \Rightarrow 93秒 \Rightarrow 120秒 \Rightarrow 158秒等波長之能量相對成長增大。長週期之波能相較則不易受遮蔽效應，或透水牆波能消散影響，因此長週期波浪對港池靜穩度之影響一般較短期波浪為大。

7. 數值計算結果在8號碼頭、10號碼頭及22號碼頭等處與觀測資料之比較驗證，顯示二者相當一致，證明模式應用於花蓮港之共振分析正確性。
8. 本計畫提出四種改善配置，並進一步以數值分析比較其不同配置，在改善港池靜穩度之優劣性及可行性。而四種可能改善配置之數值分析結果，顯示各種方案雖有某種成度之改善，但皆不是達到較為完美之成度。因此將參考其他模型試驗或防波堤改善方案研究之結果，再作一綜合性之建議。
9. 花蓮港海岸東、西防波堤擴建，已使海岸侵淤發生明顯變化。在東防波堤至南灣之海岸線經觀測結果，顯示部分為美崙溪口附近有淤積現象，但往南段則有侵蝕現象。借本數值推算流場特性研究了解這些侵淤原因，以便能提出有效改善方案。
10. 現場觀測資料分析顯示，夏季海流之主要成份為潮流週期性運動。潮流之移動，漲潮往東北東向，退潮往南南西向。潮流之主成爲半日潮及全日潮，而半日潮遠較全日潮爲大。冬季海流之成份包括潮流、風吹流及沿岸流，不完全是潮流的週期性運動。冬季不論風力大小，海面波浪較夏季爲大，流況分佈較複雜，流況特性較難掌握。
11. 數值推算析顯示，潮流及風吹流對花蓮港近岸或港口地區之地形變遷影響不大，但此兩種成份流況對船舶進港之操船則有一定之影響，其次在港內與外海水體交換能力有決定性之影響。換言之，港池污染擴散之效果，潮流移動方爲大小爲一重要影響因素。
12. 數值推算ENE向颱風波浪作用下之流場分佈，顯示一部份水流由於斜向波浪而向南方向流動，另一部份則在堤後形成一反向環流。環流系統將泥沙帶往美崙溪口，部份泥沙淤積於港口處。而南下方向之沿岸流因環

流帶走泥沙，頓失沙源，而淘挖海底沙粒，因此造成自由街排水口以南的海岸遭受侵蝕。東北季風作用時，因波高較小，碎波帶較颱風作用時來的狹小，環流之範圍及速度皆較小，但因季風是經年累月之作用，因此其影響也不可忽視。

二、建議

1. 改善港池靜穩度，一般較常可在外海增建(增長)防波堤，提高遮蔽效果。但以上方法，對改善10幾秒週期之較短波浪或許可行，但長如50秒，甚至150秒之長波，此種改善方法之效果就甚為有限。因此再延長東防波堤，對改善花蓮港港池靜穩度效果可能有限。其次以經濟效益考量，在以現有東堤頭外海處水深高達50米，延伸防波堤之經濟效益甚低。
2. 改善港池岸壁消波能力，如取用萬代福式、棧橋式，一般可以減低共振效果。但此種方法，對改善10幾秒週期之較短波浪或許可行，但針對欲改善花蓮港港池長如150秒之長波，此種方法之效果就甚為有限。
3. 有關改善港池靜穩度，近程方面建議在考慮經濟效益及工程施工時效等因素，以拆除新東堤與舊東堤相鄰之新東堤段，而沿著東堤方向加建一段防波堤，開口處之淺礁區並可設置拋石潛堤，並在外海南濱海岸適當位置建凸堤群(潛堤)。
4. 在較遠程方面，則配合工程施工時程之延長及未來舊東堤改建等條件，則將上述配置沿伸之地區納入為港區，完全拆除舊東堤，並在外海南濱海岸適當位置建凸堤(潛堤)。此方案工程經費將較高，施工時程也將較長，但此方案可同時配合完成舊東堤之改建計畫，如此除了改善港池不穩靜現象，同時也解決了舊東堤因年代久遠而產生的老化問題，並且也一併解決了內港航道寬度不足的安全顧慮。
5. 針對因東北季風及東北方向之颱風波浪產生之沿岸流效應，產生花蓮港近岸海岸線部分淤積及部分有侵蝕之現象。建議在南濱海岸適當位置建凸堤(或凸堤群)，除可維護該處之海岸波浪作用，也可有效破壞環流系統，以達到保護海岸線之目的。而且此方案其又有相當程度改善現有港池靜穩度之效果，可謂一舉兩得。

參考文獻

1. Berkhoff, J. C. W., "Computation of Combined Refraction Diffraction", Proc. 13th Coastal Engineering Conference, Vol. 1 (1972).
2. Chen, H. S. and C. C. Mei, "Oscillations and Wave Forces in an Offshore Harbor", Ralph M. Parsons Laboratory, Report No. 190, MIT, August(1974).
3. Lee, J.J., "Wave-Induced Oscillations in Harbours of Arbitrary Shape ", Report KH-R-20, W. M. Keek laboratory of Hydraulics and Water Resources, California, Institute of Technology, Berkeley, Calif. (1969).
4. Liu, P.L.-F. , "Wave Transformation " ,in B. LeMehaute and D.M. Hanes (eds.), The Sea Vol. 9: Ocean Engineering Science, Wiley, New York (1989).
5. Longuet-higgins, M. S. and R. W. Stewart, "Radiation Stress in Water Wave- A Physical Discussion with Appli- cations," Deep Sea Res., Vol. 11, No. 4, pp. 529-562, (1964).
6. Nishimura, H., "Numerical Simulation Nearshore Circula- tion,"Proc. 29th, Japanese Conf. on Coastal Eng., JECE, pp.13-127, (1982).
7. Tsay, T. K. and P. L- F. Liu , "A Finite Element Model for Wave Refraction and Diffraction " , Appl. Ocean Research ,Vol. 5, pp.30 ~ 37 (1983).
8. Tsay, T., K. , W. Zhu and P. L-F. Liu , "A Finite Element Model for Wave Re- fraction , Diffraction ,Reflection and Dissipation", Applied Ocean Research , Vol. 11, No1. pp.33 ~ 38 (1989).
9. Wang, J.D. and Connor, J.J., " Mathematical Modelling of near Coastal Cir- culation, Report No.200, Ralph M. Parsons Lab. for Water Resources and Hydrodynamics, Dept. of Civil Engineering, MIT, USA ,(1975).
10. Yin, F., and Chen, S.H. "Tidal Computation on Taiwan Strait", ASCE, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean, Vol. 108, No. WW4, pp.539-553, 1982.

11. 李兆芳、郭仲仁”三維流場有限元素多層深度積分模式”，中華民國第十一屆海洋工程研討會論文集，pp.383-400 (1989).
12. 李賢文，”台灣鄰近海域潮流預報數值模式”，第二屆海洋數值模式研習會論文集，台灣省交通處港灣技術研究所(1989)。
13. 許泰文、歐善惠、張憲國、王順寬，「花蓮港東防波堤擴建前後地形變化之研究」，中華民國第十三屆海洋工程研討會論文集，第441~456頁(1991)。
14. 歐善惠、林西川、林火旺、蘇青和，「不等水深多孔岸壁港池之共振模式」，中華民國第十二屆海洋工程研討會論文集，台中，第74~94頁(1990)。
15. 歐善惠、許泰文、張憲國、洪逸銘，「花蓮南濱海岸波場與流場之研究」，中華民國第十四屆海洋工程研討會論文集，第107~127頁(1992)。
16. 蘇青和，多孔消波體波能消散解析及其應用於港池之研究，博士論文，成功大學水利及海洋工程研究所，台南(1993)。
17. 蘇青和、蔡丁貴，「港池波場推算模式—Model WE21使用手冊」，港灣技術研究所研究出版，(1995)。
18. 蘇青和、蔡丁貴，「近岸波場推算模式—Model WP21使用手冊」，港灣技術研究所研究出版，(1995)。
19. 蘇青和、蔡丁貴，「近岸潮流模式—Model CT21使用手冊」，港灣技術研究所研究出版，(1995)。
20. 蘇青和、蔡丁貴、莊文傑，「沿岸流模式—Model CL21使用手冊」，港灣技術研究所研究出版，(1995)。
21. 孫君偉、許泰文、歐善惠、張憲國，”離岸堤背後地形變化之研究”，中華民國第十三屆海洋工程研討會論文集，pp.519-536, (1991)。