

# 蘇澳港防波堤改善工程規劃

## 第三子計畫

### 颱風波浪資料分析及預報模式之建立

張憲國 邱永芳

委託單位：省交通處基隆港務局蘇澳港分局

承辦單位：省交通處港灣技術研究所

協辦單位：國立交通大學土木工程研究所  
海洋工程組

中華民國八十六年二月

## 第三子計劃

### 颱風波浪資料分析及預報模式之建立

計劃主持人：國立交通大學土研所  
副教授 張憲國博士

共同主持人：港研所海岸工程組  
研究員 邱永芳博士

## 摘要

根據中央氣象局統計 96 年(1986-1992)侵襲台灣之颱風，每年平均發生 3.5 次，而在蘇澳港通過或沿岸經過者，佔約 40 %，對於蘇澳港防波堤而言，每年需面臨 1.4 次颱風波浪直接強烈作用，對防波堤安全性是極大之考驗。所以，本計畫主要研究之目的乃為建立一個波浪推算之模式，其中包括統計迴歸方法及數值計算方法二種，去推算蘇澳港之颱風波浪。

由利用收集颱風及颱風波浪資料，整理分析，經統計分析迴歸出推算颱風波浪之公式，並利用極值統計分析迴歸出各種重現期之波浪特性。

推算颱風湧浪之特性為

$$H_S = 1.4 + 6.5 \left( \frac{\Delta p}{100} \right) e^{3.0 \left( \frac{R_7}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_S)$$

$$T_S = 4.0 + 52.69 \left( \frac{\Delta p}{100 \cdot g} \right)^{1/2} e^{0.75 \left( \frac{R_7}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_S)$$

而推算風浪公式為

$$H_w = 1.4 + 95.68 \left( \frac{\Delta p}{100} \right) (1 - A_S)$$

$$T_w = 4.0 + 120.5 \left( \frac{\Delta p}{100 \cdot g} \right)^{1/2} (1 - A_S)$$

蘇澳港 50 年重現期之波高，經極值統計分析約為 10.3 ~ 11.7 公尺，標準偏差為 0.7 ~ 1.2 公尺之間。

本計劃所發展出之推算波浪公式，因颱風波浪資料尚少，且局部於花蓮港之單點數據，可靠性較低，且極值分析所選擇之樣本僅 10 年，樣本數尚少，應再做更深入且樣本數多之分析。

# 目 錄

中文摘要 -----	I
目錄 -----	III
圖目錄 -----	V
表目錄 -----	VI
符號說明 -----	VII
第一章 緒論 -----	1
1.1 研究目的 -----	1
1.2 研究方法 -----	2
第二章 示性波推算 -----	4
2.1 颱風風場式 -----	4
2.2 CERC 風浪推算式 -----	5
2.3 示性波推算模式 -----	6
2.4 示性波推算法驗証 -----	8
第三章 數值模式 -----	18
3.1 基本理論 -----	18
3.2 數值模式 -----	21
3.2.1 風浪及湧浪判別條件 -----	21
3.2.2 數值計算法 -----	22
3.2.3 邊界條件及穩定條件 -----	23
3.3 模式驗証 -----	23
第四章 極值統計分析 -----	28
4.1 極值分析函數 -----	28
4.2 極值分佈推定 -----	30
4.2.1 資料序列選擇 -----	30

4.2.2 樣本之極值概率-----	31
4.2.3 推定商適用性 -----	32
4.2.4 極值統計之信賴區-----	33
4.2.5 極值分析推定步驟-----	36
4.3 蘇澳颱風波浪之極端值推定 -----	37
第五章 結論 -----	41
參考文獻 -----	42

## 圖 目 錄

圖 2-1 式(2.19)推算之波高與實測波高的比較 -----	12
圖 2-2 式(2.20)推算之週期與實測週期的比較 -----	12
圖 2-3 式(2.21)推算之波高與實測波高的比較 -----	13
圖 2-4 式(2.22)推算之週期與實測週期的比較 -----	13
圖 2-5 式(2.23)推算之波高與實測波高的比較 -----	14
圖 2-6 式(2.24)推算之週期與實測週期的比較 -----	14
圖 2-7(a) 芭比颱風統計推算波浪波高與實測的比較-----	15
圖 2-7(b) 芭比颱風統計推算波浪週期與實測的比較-----	15
圖 2-8(a) 提姆颱風統計推算波浪波高與實測的比較-----	16
圖 2-8(b) 提姆颱風統計推算波浪週期與實測的比較-----	16
圖 2-9(a) 弗雷特颱風統計推算波浪波高與實測的比較-----	17
圖 2-9(b) 弗雷特颱風統計推算波浪週期與實測的比較-----	17
圖 3-1(a) 芭比颱風數值推算波浪波高與實測的比較-----	25
圖 3-1(b) 芭比颱風數值推算波浪週期與實測的比較-----	25
圖 3-2(a) 提姆颱風數值推算波浪波高與實測的比較-----	26
圖 3-2(b) 提姆颱風數值推算波浪週期與實測的比較-----	26
圖 3-3(a) 弗雷特颱風數值推算波浪波高與實測的比較-----	27
圖 3-3(b) 弗雷特颱風數值推算波浪週期與實測的比較-----	27

## 表 目 錄

表 4.1 各極值分布相關統計量之特性 -----	30
表 4.2 計算樣本順位概率之參數 -----	31
表 4.3 相關係數殘差平均值公式之係數 $a$ 、 $b$ 及 $c$ 值 -----	33
表 4.4 相關係數殘差累積 $\Delta r_{95\%}$ 非超過概率值之係數 -----	34
表 4.5 重現期推算量之標準偏差公式中係數 -----	36
表 4.6 不同取樣方法與不同極值分布之相關係數、MIR 及 $\Delta r_{95\%}$ --	39
表 4.7 以偉伯分布計算各重現期之波浪波高 -----	40

## 符 號 說 明

- $A$  : 分布函數相關形狀之變數
- $A_s$  : 遮蔽面積
- $a$  : 迴歸待定係數
- $\alpha$  : 常數
- $\alpha_1$  : 差分係數
- $\alpha_2$  : 差分係數
- $\alpha_3$  : 差分係數
- $\alpha_4$  : 差分係數
- $B$  : 分布函數相關形狀之變數
- $b$  : 迴歸待定係數
- $\beta_m$  : 衰減係數
- $C$  : 液浪波速
- $C_d$  : 抗阻係數
- $C_g$  : 深水群波速度
- $\overline{C_g}$  : 平均群波速度
- $c$  : 迴歸待定係數
- $D$  : 兩點距離
- $\delta$  : 界定風浪頻率之修正係數
- $E$  : 波浪方向波譜
- $E_{mpm}$  : 修正  $p_m$  波譜能量

- $E_\delta$  : 風浪之能量  
 $\epsilon$  : 波能  
 $\hat{\epsilon}$  : 無因次波能  
 $F$  : 風域  
 $F_m$  : 分布函數之概率  
 $F(x)$  : 累積概率函數  
 $f$  : 頻率  
 $f_{max}$  : 最大頻率  
 $f_{mpm}$  : 修正 p m 波譜尖峰頻率  
 $f_{min}$  : 最小頻率  
 $f_p$  : 波譜之尖峰頻率  
 $f_{m\theta}$  : 波浪 $\theta$ 方向之主頻  
 $f(x)$  : 概率密度函數  
 $G$  : 能量授受之能源  
 $g$  : 重力加速度  
 $\Gamma$  : 珀瑪函數  
 $\gamma$  : 增幅因子  
 $\gamma$  : 尤拉數  
 $H$  : 颱風波浪之波高  
 $H_0$  : 示性波高  
 $H_R$  : 最大風速半徑處波高  
 $H_s$  : 涌浪波高

- $H_w$  : 風浪波高  
 $K$  : 常數  
 $\lambda$  : 經度  
 $\hat{v}$  : 無因次主頻  
 $P$  : 距離暴風中心 $r$  之壓力  
 $\Omega$  : 地球自轉角速度  
 $P_0$  : 暴風中心氣壓  
 $P_n$  : 暴風外圍氣壓  
 $P_n$  : 正常大氣壓  
 $\Phi$  : 標準正規分布之累積分布函數  
 $\phi$  : 緯度  
 $q$  : 群波速度修正因子  
 $R$  : 最大風速半徑  
 $R_7$  : 七級風暴風半徑  
 $r$  : 颱風中心點向外之距離  
 $\rho_a$  : 空氣密度  
 $s$  : 傳播路徑長度  
 $\sigma$  : 頻寬參數  
 $T$  : 颱風波浪之週期  
 $T_0$  : 示性週期  
 $T_s$  : 涌浪週期  
 $T_w$  : 風浪週期

- $t$  : 吹送延時  
 $t$  : 時間  
 $\hat{t}$  : 無因次時間  
 $\theta$  : 波浪傳遞方向  
 $\theta_w$  : 主波向角度  
 $U$  : 距離颱風中心最大風速  
 $U_A$  : 風剪因子  
 $U_{gr}$  : 傾度風速  
 $U_R$  : 10 公尺高最大風速  
 $u_*$  : 風在海表面之摩擦速度  
 $u_{10}$  : 海面上 10 公尺之風速  
 $V_F$  : 颱風移動速度  
 $x$  : 樣本變數

# 第一章 緒論

## 1.1 研究目的

台灣位於歐亞和太平洋交接處，屬於亞熱帶氣候，颱風常於夏季形成，颱風強勁的風力且夾帶之豪雨，對台灣居民之生命財產易造成損傷或損失，並且颱風引起之暴潮及颱風波浪，對於海岸結構物之破壞更加嚴重，是故，颱風為威脅台灣最嚴重之自然災害之一。

民國八十三年有六個颱風侵襲台灣，據張(1994)探討花蓮港及蘇澳港因颱風造成災害指出，在七月提姆颱風波浪作用之下，花蓮東防波堤之胸牆損毀近500公尺且附近港口碼頭破壞。至於蘇澳港，當提姆颱風造成防波堤損壞，而尚未來得及修補時，又緊接來了兩個強烈颱風及一個在附近登陸的輕度颱風，造成防波堤之損害擴大。另外，同年八月道格颱風造成龍洞遊艇港防波堤嚴重損毀，其原因由侯等(1994)指出因颱風所造成波浪超過設計波浪。綜合上述港灣設施在颱風波浪侵襲下而損壞之例子，頗令人怵目驚心，若探究其原因不只一端，然而，波浪特性之異常必然是重要原因之一。根據中央氣象局統計96年(1896-1992)侵襲台灣之颱風，每年平均發生3.5次，而在蘇澳港通過或沿岸經過者，佔約40%，對於蘇澳港防波堤而言，平均每年需面臨1.4次颱風波浪直接強烈作用，對防波堤安全性是極大之考驗，所以，如何去推算波浪是對瞭解或預測波浪特性之重要手段。

本計畫主要研究之目的乃為建立一個波浪推算之模式，其中包括統計迴歸方法及數值計算方法二種，藉由此兩種模式相互印證，增加推算之精度及預報(forecasting)可靠度。

## 1.2 研究方法

Mitsuyasu(1990)指出所謂波浪推算(wave calculation)之意義為在海底地形及氣象條件為已知的條件下，計算海面波浪狀況，若由過去的氣象資料來計算當時的波浪狀況稱為波浪追算(wave hindcasting)；若預測未來之氣象狀況，再根據其資料來計算波浪者，稱之為波浪預測(wave prediction)，或稱波浪預報(wave forecasting)。波浪推算是包括此二者，即不論氣象資料是現在、未來或者現在，凡根據氣象資料來推算波浪狀況均屬於波浪推算。

波浪推算常用方法一般可分為二種，一為統計經驗公式方法、另一為數值預測模式。前者又可分為兩大類，一為示性波法，另一為波譜法。後者SWAMP(1984)歸類可分為DP模式(Decoupled Propagation model)、CH模式(Coupled Hybrid model)及CD模式(Coupled Discrete model)三種。

統計經驗公式法主要以示性波(significant wave)之概念，將紛紜(random)變動之海洋波浪利用統計平均值定量來描述之。風浪產生、發達、傳播、減衰等一連串變化的全體現象，由收集觀測到之資料，整理分析，找出示性波高及其週期與發生波浪外在條件的關係，而外在條件主要為風速、颱風歷時(duration)以及吹送距離(fetch)、水深等無尺度函數，上述方法可用在一般季節風及強風之情況。

本計畫首先研究的方法，基於示性波之統計分析法之研究架構，只針對颱風造成某推算點(interested point)之颱風波浪，其中可包括脫離颱風風域之湧浪(swell)、推算點在風域中之風浪(wind wave)及颱風遠離之湧浪。

至於數值模式之波浪推算法，往昔研究均架構於波浪的能量平衡方程式(energy equation)，考慮波浪在海面空間上及時間變化均不同，而表示波浪中各種頻率及方向的成份波能量密度的兩尺度能量密度譜(two dimensional energy density function)，在時間及空間之總變化與傳入或消散(dissipation)之能源(source function)達到平衡，即可建立平衡方程式。

數值模式處理能量平衡方程式，若將推算海域分成許多格子點，計算各處的波譜的時間變化稱為格子點法。如果僅對某特定點進行推算，可沿波浪傳播的路徑，逐步計算波其波譜變化，稱之為徑路法或一點法。本計畫因只對某一特定點(蘇澳港)，在颱風侵襲下，之颱風波浪有興趣，故本計劃使用徑路法之數值方法來處理蘇澳港颱風波浪推算較為方便。

## 第二章 示性波推算

波浪統計推算主要由收集過去之颱風及波浪資料來建立二者之關係，再由此相關公式推算所有颱風吹送下之波浪，示性波推算為較為簡易之波浪推算之方法。示性波推算因包括颱風性質及波浪特性，故本章首先介紹颱風風場模式，再說明推算之技巧。

### 2.1 颱風風場模式

對於颱風波浪特性瞭解之前，首先需瞭解造成颱風波浪的風場特性。描述颱風風場的模式相當多，但較常為一般使用的模式，為Rakin vortex模式。此模式認為離颱風中心最大風速之距離 $R$ 內的風速呈線性變化，而在 $R$ 以外與距離成反比遞減。即

$$U = Kr, \quad r \leq R \quad (2.1)$$

$$U = \frac{KR^2}{r}, \quad r \geq R \quad (2.2)$$

其中， $K$ 為常數， $r$ 為颱風中心點向外之距離。Collins 和 Viehman(1971)指出式(2.1)及式(2.2)亦常使用在工程應用問題上。至於，造成風場之壓力分佈及風速，Myers(1954)及Harris(1958)以數學簡單分別描述如下

$$\frac{P - P_0}{P_n - P_0} = e^{-\frac{R}{r}} \quad (2.3)$$

及

$$\frac{U_{gr}^2}{r} + 2\Omega \sin \phi U_{gr} = \frac{1}{\rho_a} (P_n - P_0) \frac{R}{r^2} e^{-\frac{R}{r}} \quad (2.4)$$

其中 $P$ 為離暴風中心 $r$ 之壓力， $P_0$ 為暴風中心之氣壓， $P_n$ 為暴風外圍之氣壓， $\rho_a$ 為空氣之密度(在 $20^\circ C$ 時為 $1.025 \text{ kg/m}^3$ )， $U_{gr}$ 為傾度風速

(gradient wind speed)， $\Omega$ 為地球自轉角速度， $\Omega = 2\pi/24\text{ (rad/hr)}$ ， $\phi$ 為緯度(latitude)。

## 2.2 CERC 風浪推算模式

根據美國工程兵團(Coastal Engineering Research Center)之海岸保護手冊(Shore Protection manual)(1984)，當颱風緩慢移動時，風域內最大深水之指示性波高及週期分別如下所示

$$H_0 = 5.03e^{\frac{R\Delta P}{4700}} \left[ 1 + \frac{0.29\alpha V_F}{\sqrt{U_R}} \right] \quad (2.5)$$

及

$$T_s = 8.6e^{\frac{R\Delta P}{9400}} \left[ 1 + \frac{0.145\alpha V_F}{\sqrt{U_R}} \right] \quad (2.6)$$

其中  $\Delta P = P_n - P_0$  為氣壓差， $P_n$  為正常大氣壓(760mmHg)， $V_F$  為颱風移動速度， $U_R$  為10公尺高最大風速。

至於季節風浪方面，因為風浪特性受風域， $F$ ，及吹送延時， $t$ ，雙重影響，若是風域限制時(fetch limited)，示性波高、週期及延時分別為

$$\frac{gH_0}{U_A^2} = 1.6 \times 10^{-3} \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

$$\frac{gT_0}{U_A} = 2.857 \times 10^{-1} \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.8)$$

$$\frac{gt}{U_A} = 6.88 \times 10^1 \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.9)$$

其中  $U_A$  為風剪力因子(wind-stress factor)。若風域中為完全發展時

$$\frac{gH_0}{U_A^2} = 2.433 \times 10^{-1} \quad (2.10)$$

$$\frac{gT_0}{U_A} = 8.134 \quad (2.11)$$

$$\frac{gt}{U_A} = 7.15 \times 10^4 \quad (2.12)$$

Boship等(1992)指出利用式(2.7)至式(2.9)，考慮風速修正係數  $U_A$  並未能更精準推算風浪，反而傳統SMB法(1970)及Donelan(1980)法二者均較適用推算波浪。

### 2.3 示性波推算模式

由上節所述統計分析颱風波浪及季節風浪之影響因子，包括氣壓差 ( $\Delta P$ )、最大風速 ( $U_R$ )、颱風前進速度 ( $V_F$ )、吹風距離 ( $F$ )、科氏參數 ( $f$ ) 及最強風速之半徑 ( $R$ )，所以，颱風波浪之波高或週期為上述因子之函數

$$H = f_I(\Delta P, U_R, V_F, F, f, R) \quad (2.13)$$

若利用式(2.3)及式(2.4)可知  $\Delta P$ ， $U_R$ ， $F$ ， $f$ ， $R$  存在給定函數之關係，所以

$$H = f(\Delta P, V_F, F) \quad (2.14)$$

在式(2.14)中，颱風之吹風距離可利用颱風中心與推算點之距離取代之，此距離若假設地球為球形，只要給予兩點之經緯度，則下式可計算二點之間距離為

$$D = 6371 \times \cos^{-1}(\sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1)) \quad (2.15)$$

式(2.15)中 $\phi_1$ ,  $\phi_2$ 為兩點之緯度,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ 為兩點之經度。另外,  $D$ 亦可用麥肯托垂直投影法(universal transverse mercator projection, UTM)來計算平面距離, 如Williams(1995)所提簡易UTM投影計算方式, 較即以Williams(1995)方法計算之。

另外, 最大風速之半徑 $R$ , 在中央氣象局公布颱風資料中, 並無此資料, 無法引用, 然而颱風規模與風域大小有關, 即是七級風半徑大小有關, 一般而言, 七級風半徑愈大, 颱風愈強, 所以, 式(2.14)中取以 $R_7$ 取代 $R$ 。由颱風風場知道中央氣壓差愈大, 颱風愈強, 七級風半徑愈大, 風力愈強, 故此二者與颱風波浪應存正比例之關係, 反之, 颱風中心離推算點愈遠颱風波浪愈小, 故颱風波高與波浪成反比例, 由港研所提供的颱風波浪資料來分析颱風波浪與颱風移動速度無強烈關係, 故綜合上述颱風波浪之基本特性, 則式(2.14)之颱風湧浪可以氣壓差( $\Delta P$ )、七級風暴風半徑( $R_7$ )及推算點距離( $D$ )三個因子來表示。

在式(2.14)之基礎下, 選擇函數特性決定推算點颱風波浪之波高及週期

$$H = a + b \left( \frac{\Delta P}{100} \right) e^{c \left( \frac{R_7}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_s) \quad (2.16)$$

及

$$T = a + b \left( \frac{\Delta P}{100 \cdot g} \right)^{1/2} e^{c \left( \frac{R_7}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_s) \quad (2.17)$$

式(2.16)及式(2.17)中,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 為迴歸時之待定係數,  $A$   $A_s$   $A_s$ 為颱風七級風風域因陸地所遮蔽之面積比例。式(2.16)及式(2.17)之迴歸公式屬於非線性, 不能使用一般線性迴歸公式, 本計劃使用SPSS軟體來進行非線性迴歸。

中央氣象局公佈之颱風氣象資料中，包括颱風中心氣壓(百帕，100pa)，颱風中心之經度、緯度，七級及(或)十級風之暴風半徑，及最大風速。由此公佈之颱風氣象資料，可利用式(2.16)來迴歸者為中心氣壓差、颱風中心及七級風暴風半徑。中心氣壓可轉換為氣壓差( $\Delta P = (1013 - P_a) \times 0.075 [cmHg]$ )，及颱風中心位置可計算推算距離。式(2.16)中，各物理量之單位分別為，波高單位為公分， $\Delta P$ 之單位取為水銀汞柱高(cmHg)， $D$ 之單位為公里(km)， $R_7$ 之單位為(km)，其他角度為強度(radian)，由式(2.16)及式(2.17)之因次及單位顯示，等號左右之因次相同，且物理量單位相同，故迴歸後之係數為無因次，應用上較為方便。

式(2.16)除了考慮中央氣象局發佈颱風資料之項目外，並避免其他學者所較繁瑣計算之困擾，如梁(1994)所提湧浪推算公式：

$$H = C \cdot H_R \cdot \frac{R_7}{\sqrt{D}} \quad (2.18)$$

式(2.18)中， $H_R$ 為以Bretschneider公式求出最大風速半徑處之波高，而此值計算過程相當繁瑣。

## 2.4 示性波推算法驗証

中央氣象局(1994)將颱風自1897至1992年侵襲台灣路徑分類成七種。此七種路徑及颱風通過之百分比如下：(1)通過台灣北部及北部海面或西北進行者，共89次，佔27%。(2)通過中部自西或西北進行者有44次，佔13%。(3)通過南部及南部海上向西或西北進行者有107次，佔32%。(4)沿東岸或東部海面北上者，共41次，佔12%。(5)沿西岸或台灣海峽北上者，共17次，佔5%。(6)通過中南部再向東北出海者計24次，佔7%。(7)路徑特殊不能併入以上六類者有13次，佔4%。

目前台灣收集颱風波浪資料，因儀器設備之施放環境問題，且無長期定點定格式之記錄，颱風資料尚少，蘇澳港附近之颱風波浪資料更是缺乏。台灣波浪資料庫集中存於台中港灣技術研究所，本計劃故從港研所搜取台灣花蓮颱風波浪資料，來加以分析。

颱風波浪特性，因颱風風力直接作用或者脫離風場而傳播至推算點，二種性質不同，前者為風浪之壓力波(forced wave)，後者為湧浪之自由波(free wave)。依據港研所提供的花蓮港颱風波浪資料，將波浪在七級風半徑範圍外定義為湧浪，而在七級風半徑範圍內定義為風浪。由湧浪資料分別代入式(2.16)及式(2.17)，分別得到湧浪波高及週期與颱風規模之關係為

$$H_s = 1.4 + 6.5 \left( \frac{\Delta p}{100} \right) e^{3.0 \left( \frac{R_7}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_s) \quad (2.19)$$

及

$$T_s = 4.0 + 52.69 \left( \frac{\Delta p}{100 \cdot g} \right)^{1/2} e^{0.75 \left( \frac{R_7}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_s) \quad (2.20)$$

式(2.19)及式(2.20)迴歸所得相關係數平方分別為0.786及0.738，迴歸的結果示如圖2-1及圖2-2。圖2-1之橫軸為推算之波高，而縱軸為實測之波高，圖2-2之橫軸為推算之週期，而縱軸為實測之週期。

至於風浪方面，若以式(2.16)及式(2.17)迴歸，因 $D$ 可能距離推算點近， $R_7/D$ 值大，迴歸偏差大，相關係數低，故捨棄式(2.16)及式(2.17)指數函數之部分，迴歸獲得結果為

$$H_w = 1.4 + 95.68 \left( \frac{\Delta P}{100} \right) (1 - A_s) \quad (2.21)$$

及

$$T_w = 4.0 + 120.5 \left( \frac{\Delta P}{100 \cdot g} \right)^{1/2} (1 - A_s) \quad (2.22)$$

以式(2.21)及式(2.22)推算波高及週期與實測值比較示如圖2-3及圖2-4。其相關係數平方分別為0.747及0.753。

以上迴歸係分別迴歸湧浪及風浪之結果，若合併所有颱風波浪資料，以式(2.16)及式(2.17)迴歸獲得結果為

$$H = 1.4 + 11.50 \left( \frac{\Delta P}{100} \right) e^{2.02 \left( \frac{R_7}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_s), \quad R_7 < \frac{D}{2} \quad (2.23)$$
$$= 1.4 + 11.50 \left( \frac{\Delta P}{100} \right) e^{2.02} (1 - A_s), \quad R_7 \geq \frac{D}{2}$$

及

$$T = 4.0 + 55.39 \left( \frac{\Delta P}{100 \cdot g} \right)^{1/2} e^{0.74 \left( \frac{R_7}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_s), \quad R_7 < \frac{D}{2} \quad (2.24)$$
$$= 4.0 + 55.39 \left( \frac{\Delta P}{100 \cdot g} \right)^{1/2} e^{0.74} (1 - A_s), \quad R_7 \geq \frac{D}{2}$$

由式(2.23)及式(2.24)推算所以颱風波浪之波高及週期之結果分別示如圖2-5及圖2-6，二者推算結果與實測值之相關係數分別為0.728及0.733。

選擇三個颱風波浪記錄較為完整之三個颱風，芭比(Bobbie)，提姆(Tim)及弗雷特(Fred)，此三個颱風路徑分別為由台灣東岸經過，中部通過，及北岸通過，在路徑歸類上分別屬於第四，第二及第一類路徑。

三個颱風波浪推算之波高及週期分別示如圖2-7(a)至圖2-9(b)所示。圖2-7(a)為芭比颱風之推算波高，圖中實線為以湧浪及風浪分別

計算，即由式(2.19)及式(2.21)，而虛線為以式(2.23)計算所得，而圖2-7(b)為推算之週期，實線應為分別計算湧浪及風浪之結果，即以式(2.20)及式(2.22)計算所得，而虛線為以式(2.24)計算之週期，圖2-7(a)及圖2-7(b)之橫軸為中央氣象局發布颱風警報日起算之天數。

由圖2-7(a)顯示推算結果與實測頗為吻合，僅在第二天後有高估現象，此時颱風正位於花蓮正東方，即花蓮在颱風之左半圈。此高估之可能性因為颱風右半圈之風力一般比左半圈為大，在左半圈之颱風波浪應比右半圈之波浪為小，但迴歸公式並沒有考慮風速與前進速度合成之效應。在週期方面第二天前週期有低估現象，此可能為湧浪成份大，週期較長，造成推算偏差較大的原因。

至於提姆颱風的波浪推算結果，由圖2-8(a)顯示在颱風初期波高推算稍為偏高，大約有1公尺之偏差，但颱風愈接近花蓮港偏差變小，直至颱風通過台灣波高急速下降。在圖2-8(b)之週期預測，顯然偏差較大，尤其當颱風接近於花蓮時，大約有3-4秒之偏差。

弗雷特颱風造成之颱風波浪示如圖2-9(a)及圖2-9(b)。由圖2-9(a)顯示推算波高均較實測者為高，此原因與上述颱風波浪在颱風之左右半圈有差別，弗雷特颱風經過台灣北岸，花蓮位於颱風圈之左半圈，因而實測值會較預測值小。至於週期方面，此結果顯示預測值與實測頗為吻合，唯在颱風後期有低估現象，此可能為颱風部份在陸地上，遮蔽面積大，故有偏低預測。

綜合上述之例子，本預測之公式應可應用於颱風推算，尤其在台灣東海岸相似之地理特性，故可引用至蘇澳港之颱風波浪推算。另外，本經驗式含蓄的參數較為單純，考慮因素較少，應可再發展較符合實際狀況，但需較多迴歸參數之經驗公式。

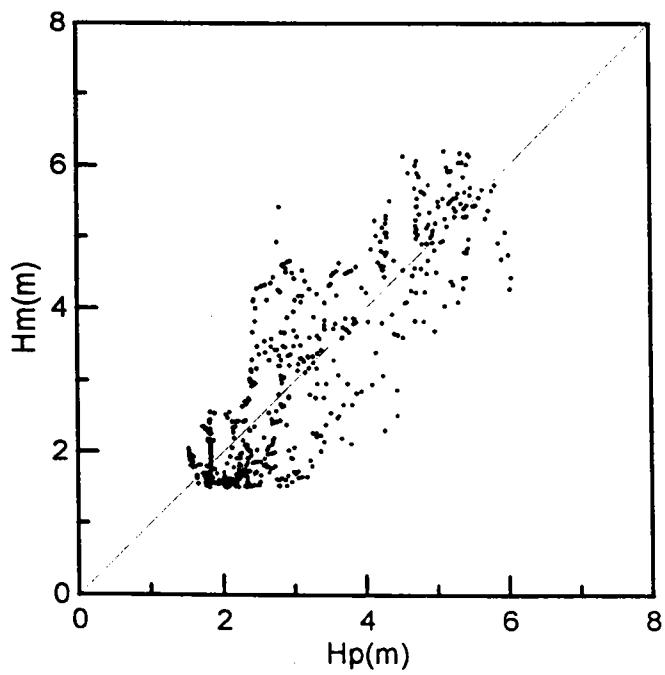


圖 2-1 式(2.19)推算之波高與實測波高的比較

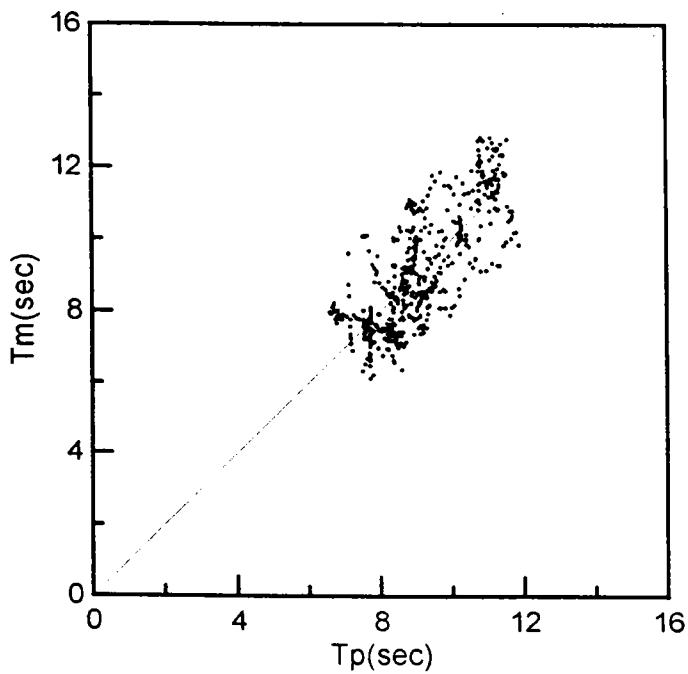


圖 2-2 式(2.20)推算之週期與實測週期的比較

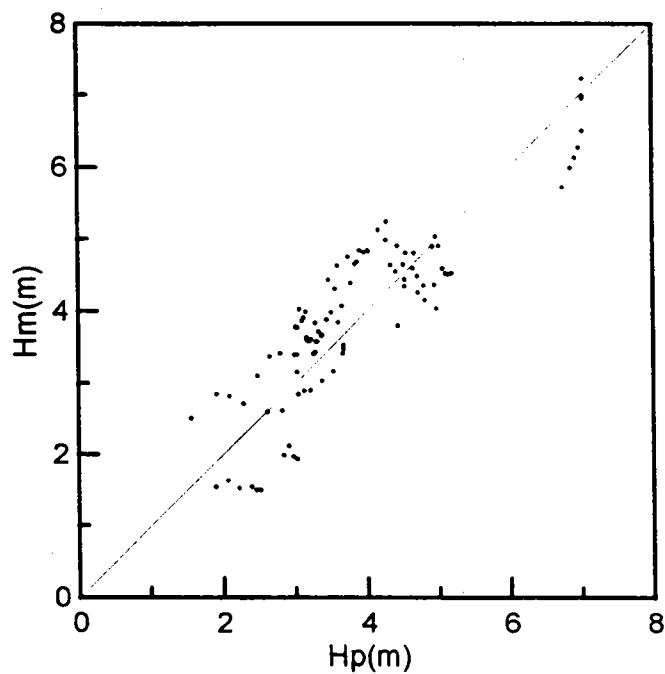


圖 2-3 式(2.21)推算之波高與實測波高的比較

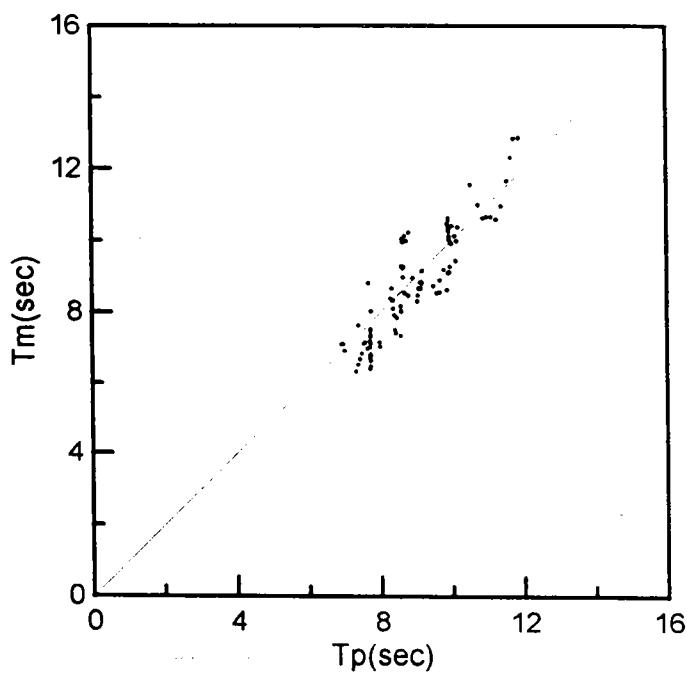


圖 2-4 式(2.22)推算之週期與實測週期的比較

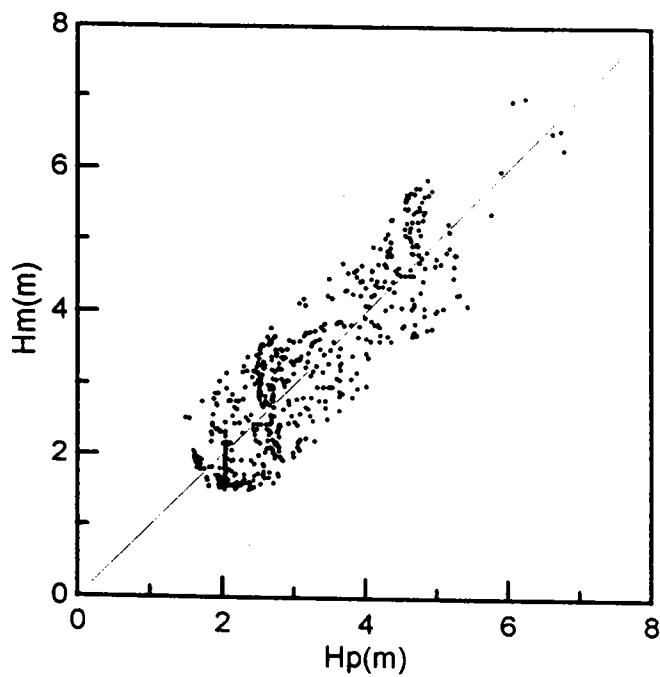


圖 2-5 式(2.23)推算之波高與實測波高的比較

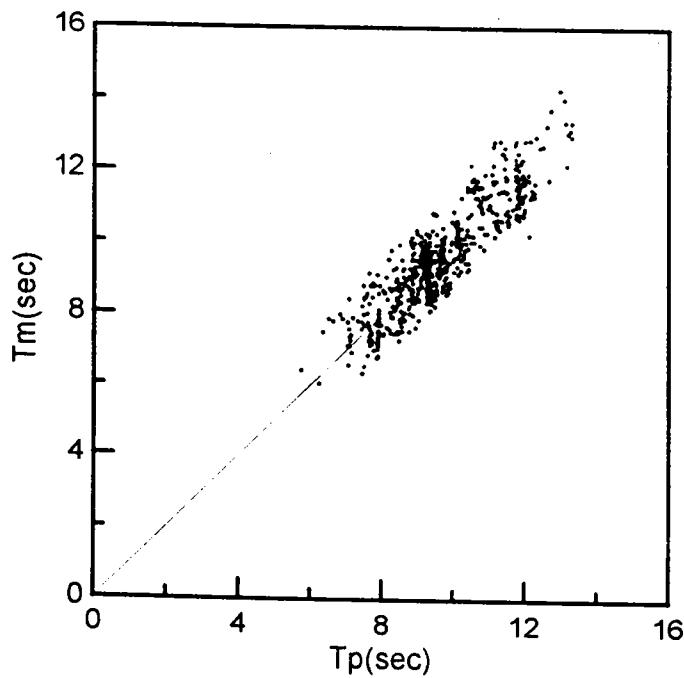


圖 2-6 式(2.24)推算之週期與實測週期的比較

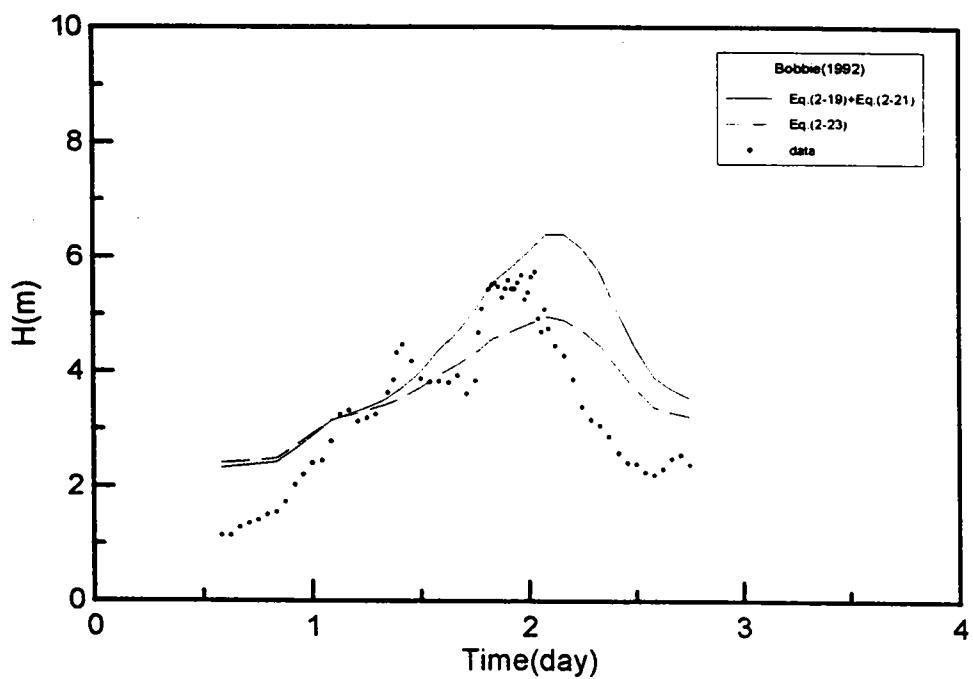


圖 2-7(a) 芭比颱風統計推算波浪波高與實測的比較

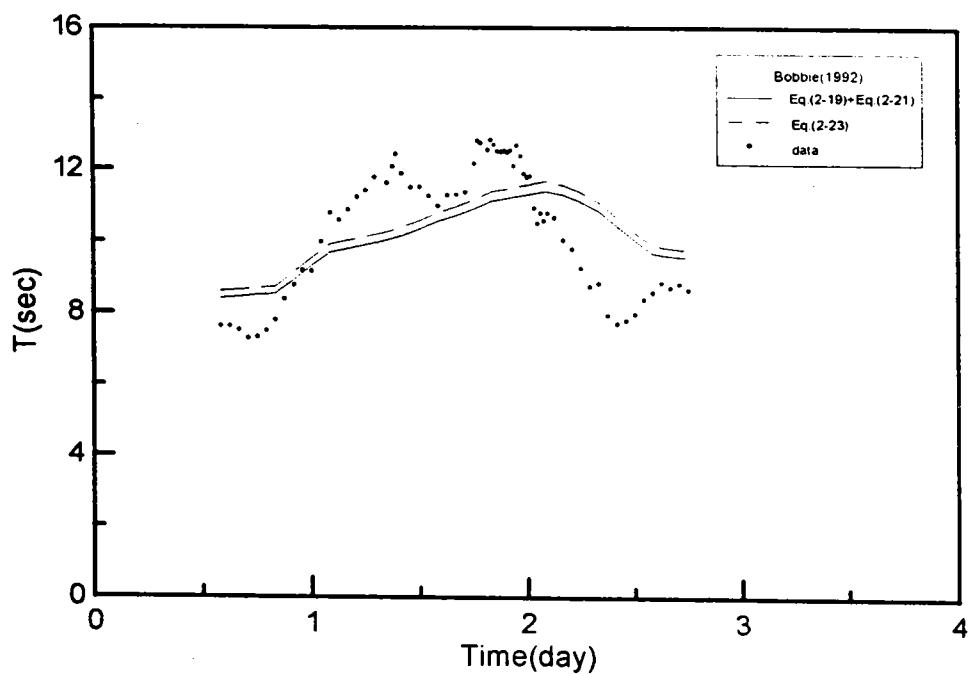


圖 2-7(b) 芭比颱風統計推算波浪週期與實測的比較

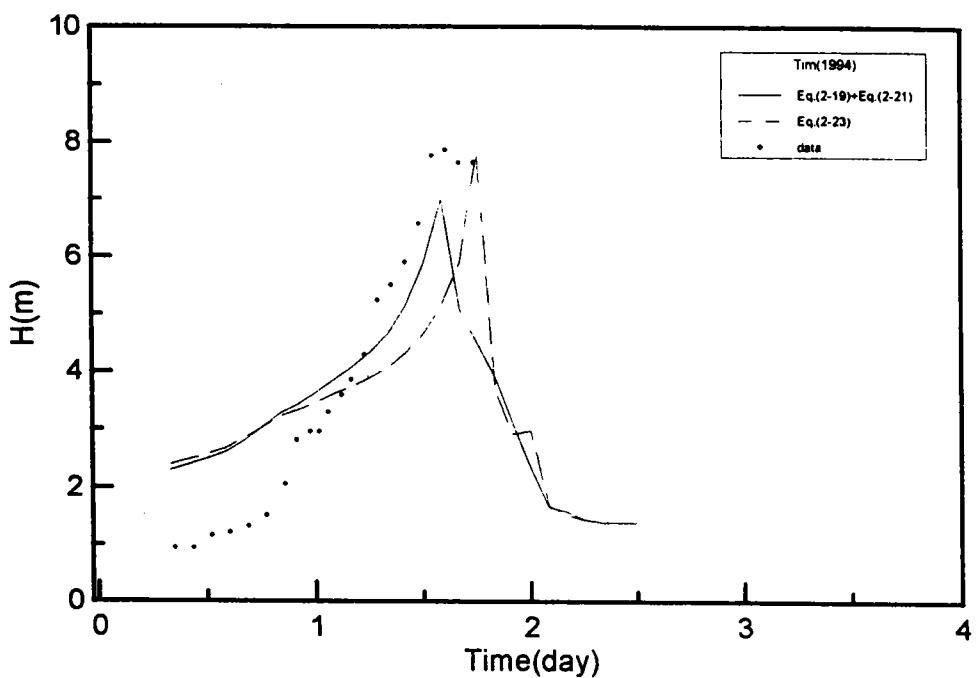


圖 2-8(a) 提姆颱風統計推算波浪波高與實測的比較

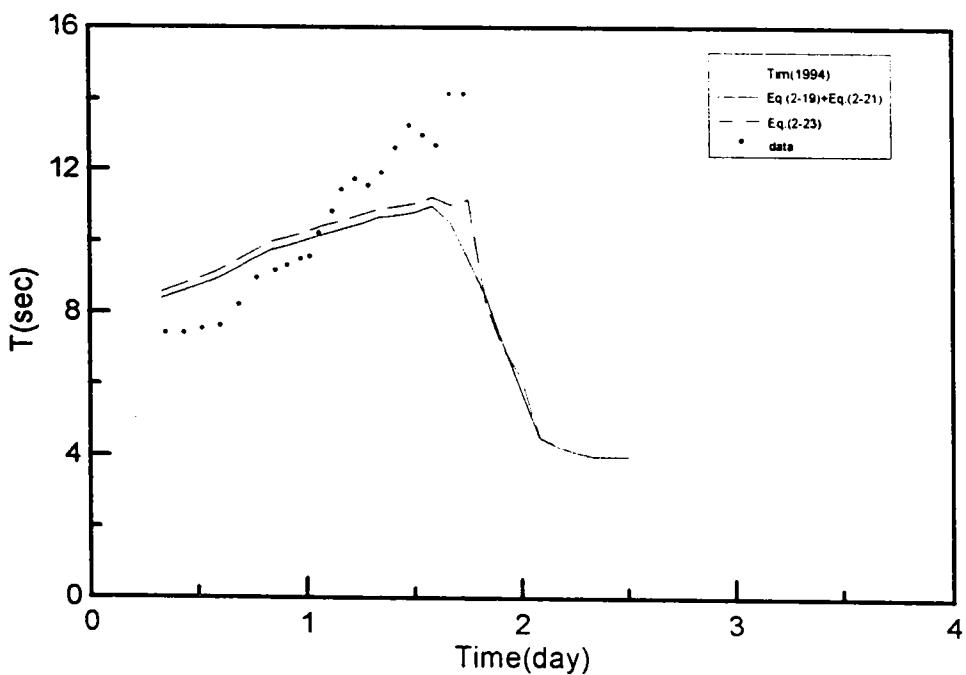


圖 2-8(b) 提姆颱風統計推算波浪週期與實測的比較

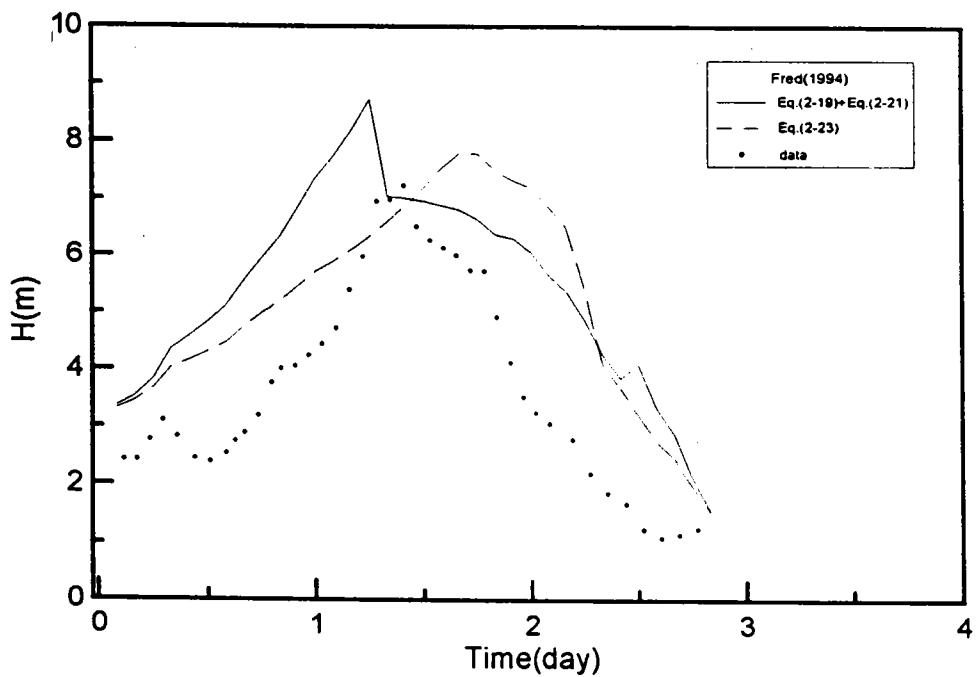


圖 2-9(a) 弗雷特颱風統計推算波浪波高與實測的比較

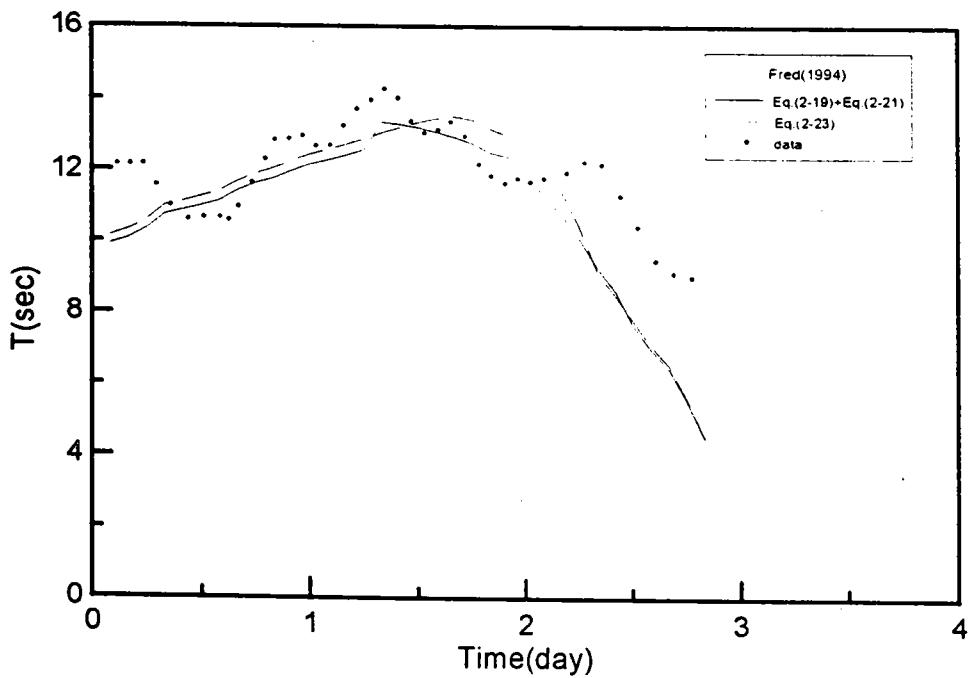


圖 2-9(b) 弗雷特颱風統計推算波浪週期與實測的比較

## 第三章 數值模式

### 3.1 基本理論

本推算颱風波浪之數值模式，乃修正山口等(1988)所發展出之混合式方向參數推算法 (directionally decoupled hybrid parametrical model)，其理論架構乃基於風場在深水所造成之波浪，其理論如下所述，波浪傳遞方程式為能量平衡方程式

$$\frac{\partial E(f, \theta)}{\partial t} + \frac{\partial c_g(f)E(f, \theta)}{\partial s} = G(f, \theta) \quad (3.1)$$

式(3.1)中， $E(f, \theta)$ 為波浪方向波譜(directional spectrum)， $f$ 為頻率(frequency)， $f = 1/T$ ， $\theta$ 為波浪傳遞方向， $c_g(f)$ 為深水群波速度(group velocity)， $c_g = g/(4\pi f)$ ， $g$ 為重力加速度(gravitational acceleration)， $s$ 為傳播路徑長度， $t$ 為時間， $G(f, \theta)$ 為能量授受之能源(source function)。

若將式(3.1)取頻率積分，則得波浪方向能譜之傳遞方程式為

$$\frac{\partial E(\theta)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}_g E(\theta)}{\partial s} = \int_0^\infty G(f, \theta) df \quad (3.2)$$

其中

$$E(\theta) = \int_0^\infty E(f, \theta) df \quad (3.3)$$

$$\bar{c}_g = \int_0^\infty c_g(f) df \quad (3.4)$$

式(3.4)即為平均群波速度。

方向波譜若使用 JONSWAP 能譜及方向分佈函數乘積表示之為

$$E(f, \theta) = E(f) \cdot D(\theta) \quad (3.5)$$

其中

$$E(f) = \alpha \frac{g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}\left(\frac{f}{f_p}\right)^2\right] \quad (3.6)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, & f \leq f_p \\ 0.09, & f > f_p \end{cases}$$

及

$$D(\theta) = \begin{cases} \left(\frac{8}{3\pi}\right) \cos^4(\theta - \theta_w), & (\theta - \theta_w) < \pi/2 \\ 0, & (\theta - \theta_w) \geq \pi/2 \end{cases} \quad (3.7)$$

式(3.6)中  $f_p$  為波譜之尖峰頻率 (peak frequency)， $\gamma$  為增幅因子 (enhancement factor)，此值乃控制波譜尖度， $\gamma$  值小於 1 會產生雙峰波譜，較為不合理，一般取  $\gamma \geq 1$ ， $\sigma$  為頻寬參數 (peak width)， $\theta_w$  為主波向角度， $\alpha$  為常數，此值與波浪成熟與否有關。在理想發展條件下，即為風場定速定向吹送，波浪完全成熟，其波能可由式(3.8)表示之

$$\varepsilon = \int_{-\pi}^{\pi} E(\theta) d\theta \quad (3.8)$$

此時，式(3.6)之  $\alpha$  與  $\gamma$  值可表示為

$$\alpha = 5.274 \times 10^{-2} \hat{\varepsilon}^{-\frac{2}{3}} e^{1.169 \times 10^{-11} \hat{\varepsilon}^{3.163}} \quad (3.9)$$

$$\hat{\varepsilon} = 5.840 \times 10^{-2} \hat{\nu}^{-\frac{1}{3}} e^{3.481 \times 10^{-4} \hat{\nu}^{0.1865}} \quad (3.10)$$

$$\gamma = \left[ \frac{(2\pi\hat{\nu})^4 \hat{\varepsilon}}{0.065\alpha} - 2.077 \right]^{1.245} \quad (3.11)$$

式(3.9)中， $\hat{\varepsilon}$ 為無因次波能， $\hat{\varepsilon} = g^2 \varepsilon / u_*^4$ ， $\hat{v}$ 為無因次主頻， $\hat{v} = f_p u_* / g$ ，而 $u_*$ 為風在海表面之摩擦速度(friction velocity)， $u_* = \sqrt{c_d} u_{10}$ ， $u_{10}$ 為海面上10公尺之風速， $c_d$ 為抗阻係數(drag coefficient)，此值Mitsuyasu和Kusaba(1984)提出與風速之關係為

$$c_d = \begin{cases} (0.581 + 0.063 \cdot u_{10}) \times 10^{-3}, & u_{10} \leq 8 \text{ m/sec} \\ 1.085 \times 10^{-3}, & u_{10} > 8 \text{ m/sec} \end{cases} \quad (3.12)$$

平均群波速度，山口(1984)提出高精度的近似公式，以主頻群波速度及增幅因子函數乘積代表之。

$$\bar{c_g} = c_g(f_p)q(\gamma) \quad (3.13a)$$

而

$$q(\gamma) = 0.8572\gamma^{0.0426} \quad (3.13b)$$

在風域中波浪未達完全成熟時，波浪成長速率可表為

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\varepsilon}}{dt} &= 2.581 \times 10^{-4} \hat{\varepsilon} \cdot e^{-0.0875 \left( \frac{\hat{\varepsilon}}{1430 - \hat{\varepsilon}} \right)^{0.8542}} \\ &= G(\hat{\varepsilon}) \end{aligned} \quad (3.14)$$

式(3.14)中， $\hat{t}$ 為無因次時間， $\hat{t} = gt/u_*$ 。所以，由式(3.2)及(3.14)可知控制風波之方程式為

$$\frac{\partial E(\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial \theta} [c_g(f_m)q(\gamma)E(\theta)] = G \left[ \frac{E(\theta)}{D(\theta)} \right] \cdot \frac{u_*^3}{g} \cos(\theta - \theta_w) D(\theta) \quad (3.15)$$

而湧浪之部分，其控制方程式為

$$\frac{\partial E_s}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial \theta} [c_g(f) E_s(f, \theta)] = \begin{cases} -0.25 \left( \frac{u_*}{c} \right)^2 f E_s(f, \theta), & |\theta - \theta_w| < \pi/2 \\ -\beta_m E_s(f, \theta), & |\theta - \theta_w| \geq \pi/2 \end{cases} \quad (3.16)$$

其中

$$\beta_m = 0.3 \left( \frac{u_*}{c} \right)^2 e^{-2.63 \times 10^{-4} \left( \frac{c}{u_*} \right)^2 - 0.5 \left( \frac{u_*}{c} \right)} f |\cos(\theta - \theta_w)| \quad (3.17)$$

式(3.16)及式(3.17)中， $c$ 為湧浪之波速， $c = 2\pi/f$ 。一般海洋常包涵著風浪及湧浪二種，若定義風浪乃波譜中大於 $\delta f_m$ 之波浪，即較短期週波浪者，因此風浪之能量為

$$E_\delta(\theta) = \int_{\delta f_m \theta}^{\infty} E(f, \theta) df \quad (3.18)$$

式(3.18)中 $f_m \theta$ 為波浪 $\theta$ 方向之主頻， $\delta$ 為界定風浪頻率之修正係數，一般取為0.6。

## 3.2 數值模式

### 3.2.1 風浪及湧浪判別條件

依據上述颱風波浪之數學理論基礎，數值計算之流程據山口正隆等(1984)指出為

1. 當 $|\theta - \theta_w| \geq \pi/2$ ，及 $f_{max} < f_{mpm}$ 時，

此時為逆風狀態，屬於僅湧浪能存在而風浪不能存在之情況，此時群波速度為

$$\overline{c_g} = \frac{0.8696 g}{4\pi f_{mpm}} \quad (3.19)$$

2. 當  $|\theta - \theta_w| < \pi/2$ ，且  $E_\delta(\theta) \leq E_{mpm}(\theta)$  時，

此情況為在風場中，波浪尚未達到完全成熟，故在風浪部份，僅為頻率大於  $\delta f_{m0}$  之部分，其餘者為湧浪。

$$E_{mpm}(\theta) = 1430 \frac{u^4}{g^2} \frac{8}{3\pi} \cos^4(\theta - \theta_w) \quad (3.20)$$

3. 當  $|\theta - \theta_w| < \pi/2$ ，且  $E_\delta(\theta) > E_{mpm}(\theta)$  時，

此情況為風浪已達成熟。若無因次化週期  $\hat{v} > 0.0052$  時，乃指波浪中混合著成熟之風浪及湧浪，反之，若  $\hat{v} < 0.0052$  時，代表在局部風所造成的波浪不可能達到成熟，因而需找出等值風速 (equivalent wind velocity)，此二種情況之處理方式分別如下

(1)  $\hat{v} > 0.0052$  時，將湧浪從波浪中扣除，剩下之風浪再由 JONSWAP 波譜計算之，即為

$$E_s(f, \theta) = \begin{cases} E(f, \theta) - E_w(f, \theta), & E(f, \theta) > E_w(f, \theta) \\ 0, & E(f, \theta) \leq E_w(f, \theta) \end{cases} \quad (3.21)$$

風波部份由式(3.8)至(3.11)及式(3.13)代入式(3.6)來計算之。

(2)  $\hat{v} < 0.0052$  時，等值風速  $u_{*e} = 0.0052 g / f_{m0}$ ，再由此等值風速，代入式(3.20)求出風浪之能量。

### 3.2.2 數值計算法

波浪推算因包括風浪及湧浪兩部份，此二種波浪傳遞方式不同，在數值處理技巧上為同時考慮計算精度及時間分別處理風浪及湧浪，前者使用 Lax-Wendroff 二階段有限差分法及後者使用波向線法 (wave ray method)，即特徵線法 (characteristic line method)，此二種數

值技巧分述如下。

風浪控制方程式為式(3.15)，修正二階段Lax-Wendroff有限差分法，如Anderson等(1984)有精度高，收斂性佳之優點，此差分方程式為

$$E_{i+1/2}^{n+1} = \frac{1}{2} \left( E_i^n + E_{i+1}^n \right) - \frac{\Delta t}{2\Delta s} \left( F_{i+1}^n - F_i^n \right) + Q_{i+1/2}^n \frac{\Delta t}{2} \quad (3.22)$$

及

$$E_i^{n+1} = E_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta s} \left( F_{i+1/2}^{n+1/2} - F_{i-1/2}^{n+1/2} \right) + Q_i^{n+1/2} \Delta t \quad (3.23)$$

式(3.22)及式(3.23)中，上標 $n$ ， $n+1/2$ 等為計算時間段，下標 $i$ ， $i+1/2$ 等為波向線上網格點之編號， $E = E(\theta)$ ， $F = \bar{c}_g E(\theta)$ ， $Q$ 為式(3.14)等號在邊之能量輸入量。

湧浪計算使用特徵線法，首先計算空間變化特性，其次再計算時間局部變化特性。空間變化採用3次Lagrange插分式，得

$$E_s(f, \theta) = a_1 E_{s_i-2}^n(f, \theta) + a_2 E_{s_i-1}^n(f, \theta) + a_3 E_{s_i}^n(f, \theta) + a_4 E_{s_i+1}^n(f, \theta) \quad (3.24)$$

其中

$$\left. \begin{array}{l} a_1 = -\frac{1}{6}(\gamma - 2)(\gamma - 1)\gamma \\ a_2 = \frac{1}{2}(\gamma - 2)(\gamma - 1)(\gamma + 1) \\ a_3 = -\frac{1}{2}(\gamma - 2)\gamma(\gamma + 1) \\ a_4 = \frac{1}{6}(\gamma - 1)\gamma(\gamma + 1) \\ \gamma = 1 - c_g(f) \frac{\Delta t}{\Delta s} \end{array} \right\} \quad (3.25)$$

在邊界部份使用2次Lagrange插分

$$E_s(f, \theta) = (1 - \gamma)E_{s1}^n(f, \theta) + \gamma E_{s2}^n(f, \theta) \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} E_s(f, \theta) = & \frac{1}{2}\gamma(1 - \gamma)E_{sN-2}^n(f, \theta) + (1 - \gamma)(1 + \gamma)E_{sN-1}^n(f, \theta) \\ & + \frac{1}{2}\gamma(\gamma + 1)E_{sN}^n(f, \theta) \end{aligned} \quad (3.27)$$

湧浪時間變化部份，考慮順風及逆風情況之計算方式為

$$E_s^{n+1}(f, \theta) = E_s(f, \theta)e^{-0.25\left(\frac{u_*}{c}\right)^2 f\Delta t}, \quad |\theta - \theta_w| \leq \pi/2 \quad (3.28)$$

$$E_s^{n+1}(f, \theta) = E_s(f, \theta)e^{-\beta m \Delta t}, \quad |\theta - \theta_w| \geq \pi/2 \quad (3.29)$$

### 3.2.3 邊界條件及穩定條件

在風浪及湧浪計算過程，若網格點在陸上時，波能均令為0，而在開放邊界時，讓波浪通過之輻射邊界為

$$E_N^{n+1} = E_N^n - \frac{\Delta t}{\Delta s} (F_N^n - F_{N-1}^n) + Q_N^n \Delta t \quad (3.30)$$

至於計算穩定條件，採用Courant數小於1，即

$$c_g(f_{min}) \frac{\Delta t}{\Delta s} \leq 1 \quad (3.31)$$

## 3.3 模式驗證

為了說明本模式之數值計算之適用性，本節亦選擇第二章所用之芭比、提姆及弗雷特三個颱風，分別計算花蓮港之颱風波浪。

圖3-1(a)為數值推算芭比颱風波浪與實測波高比較，而圖3-1(b)為週期之比較。由圖3-1(a)顯示在颱風初期，本預測值比實測稍高，當颱風接近花蓮時，本預測值卻比實測低，而當颱風遠離，預測值又

比實測值高，由此可見本模式當颱風離推算點較遠時，本模式推算偏高，但接近推算點可能低估。由圖3-1(b)本模式預估之週期幾乎成定值，與實測之週期有持長短變化之特性相異，顯示本模式，在週期推算能力不佳，應做適度改善，所以，本模式並不引用至蘇澳港颱風波浪推算。

圖3-2(a)及圖3-2(b)為推算提姆颱風波浪之波高及週期，由圖3-2(a)顯示本模式推算波高能力尚可，但從圖3-2(b)顯示本模式推算週期與實測相差頗大，且趨勢不同。

圖3-3(a)及圖3-3(b)為推算弗雷特颱風波之特性。圖3-3(a)顯示波高之推算如前所述與實測接近，週期則相差較大。

綜合上述三個颱風波浪數值推算結果與實測比較，顯示本模式對波高預測能力尚可，但對週期之預測能力相當低，本模式應再做修正其基本理論架構，包括能量源及波譜傳遞特性等，以及數值技巧。

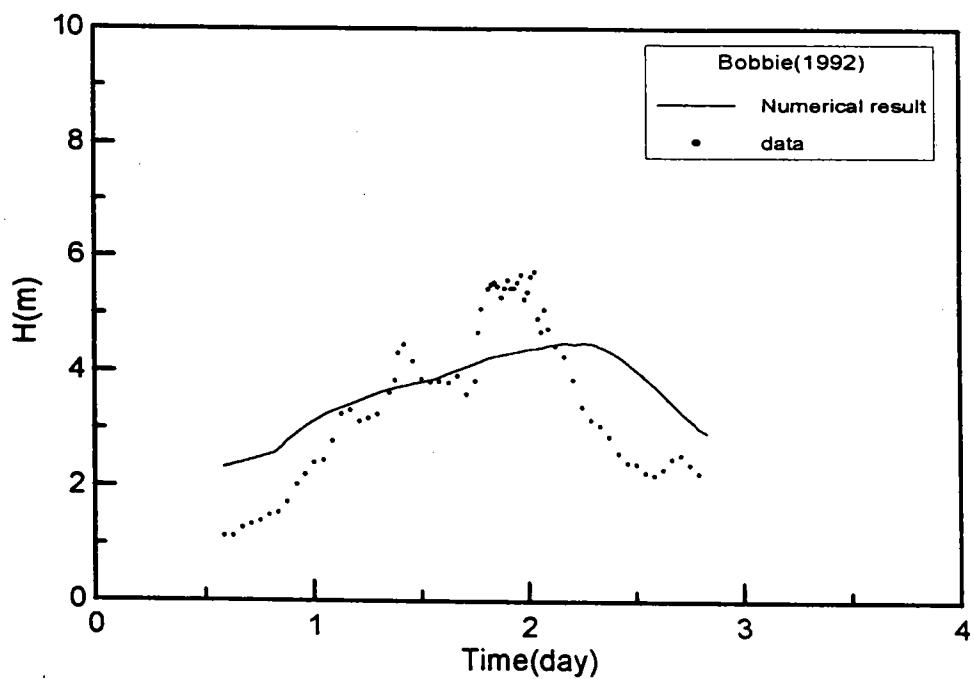


圖 3-1(a) 芭比颱風數值推算波浪波高與實測的比較

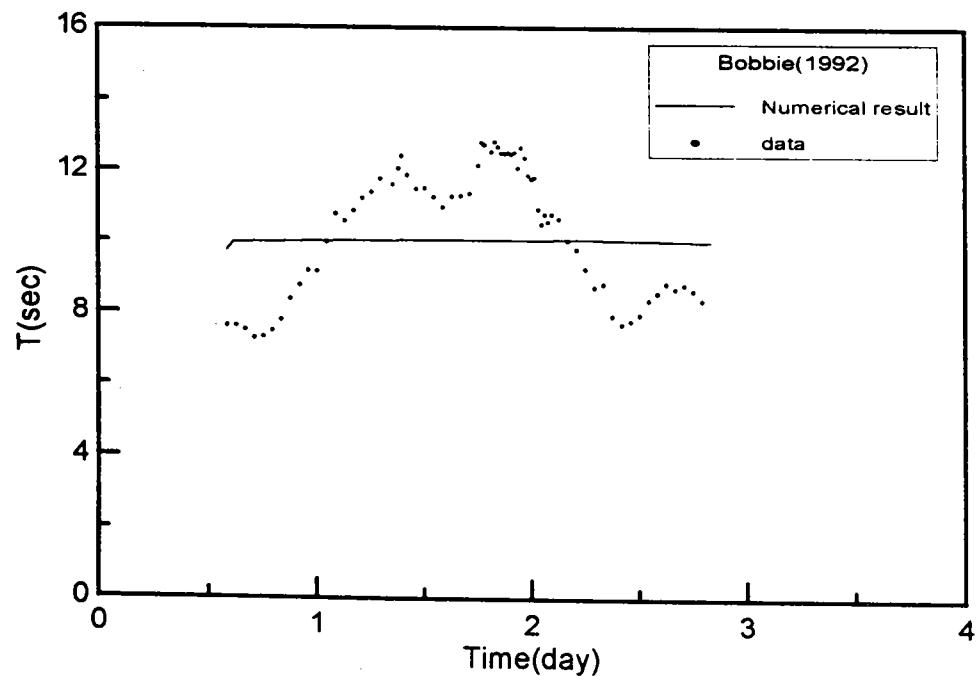


圖 3-1(b) 芭比颱風數值推算波浪週期與實測的比較

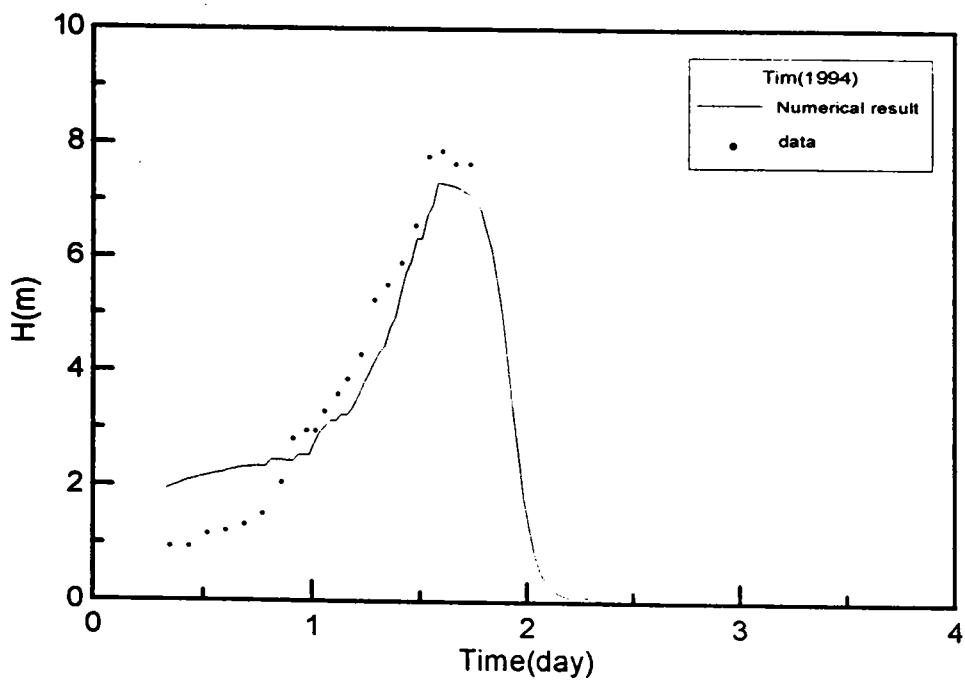


圖 3-2(a) 提姆颱風數值推算波浪波高與實測的比較

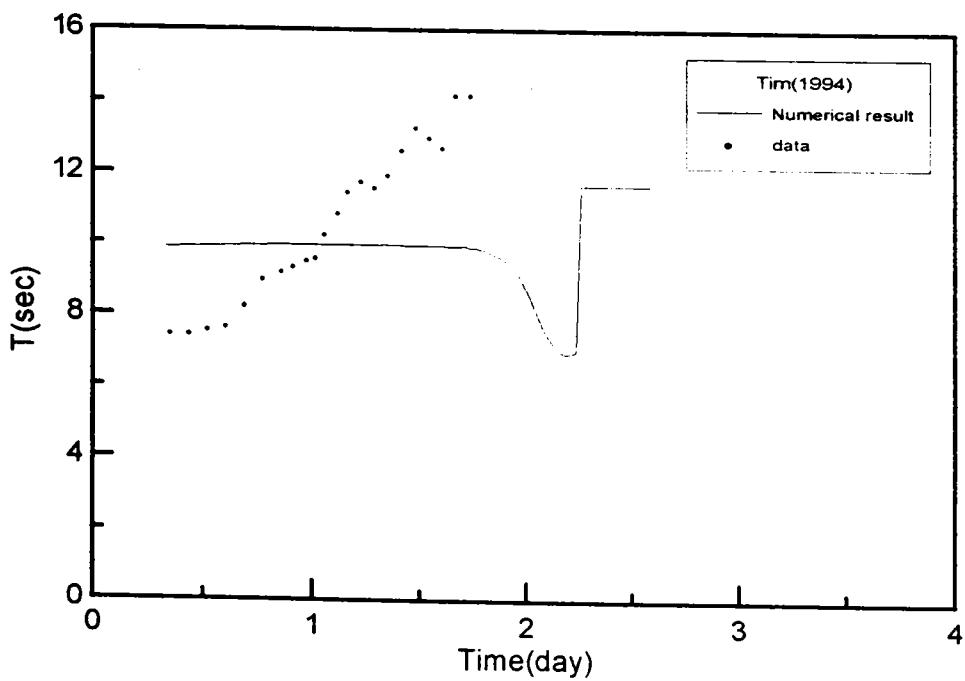


圖 3-2(b) 提姆颱風數值推算波浪週期與實測的比較

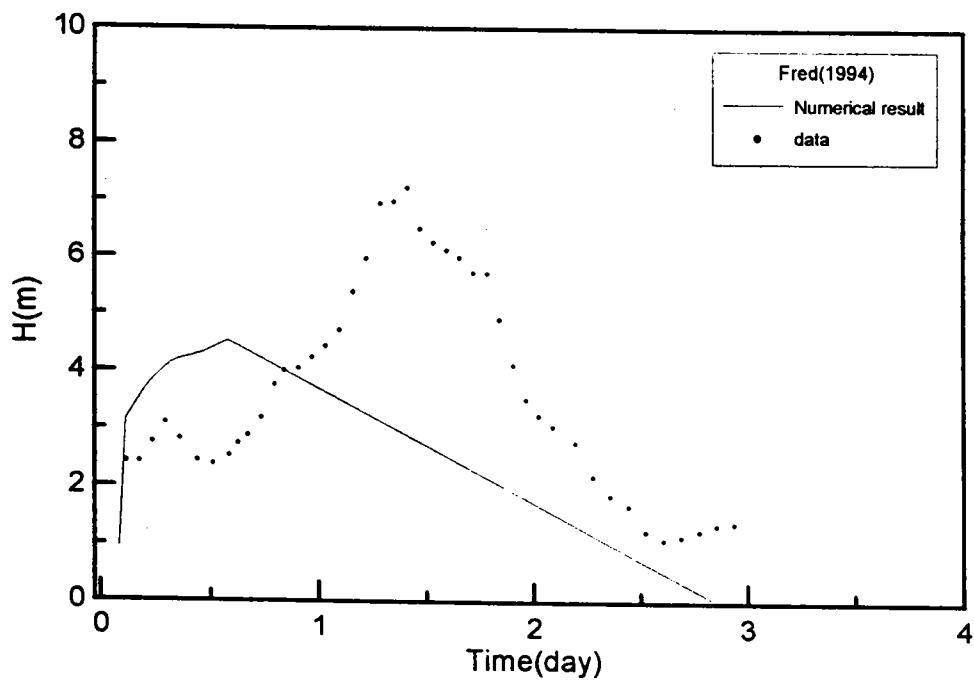


圖 3-3(a) 弗雷特颱風數值推算波浪波高與實測的比較

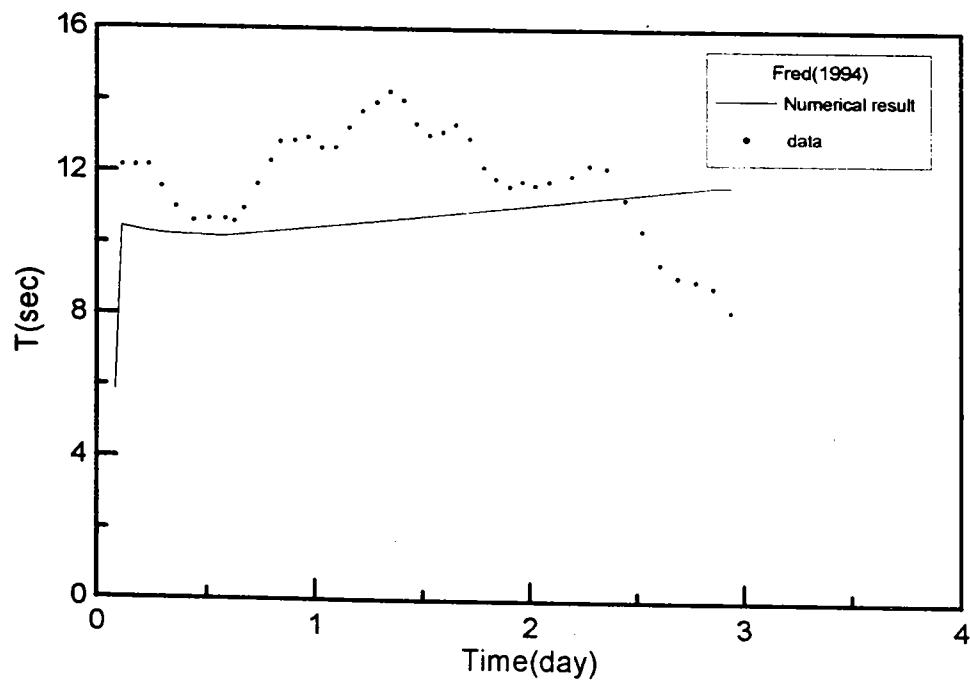


圖 3-3(b) 弗雷特颱風數值推算波浪週期與實測的比較

## 第四章 極值統計分析

### 4.1 極值分析函數

設計海岸結構物考慮使用年限時，可能常因現有記錄時間不足，無法分析出所需資料。此時，需要藉由統計方法，由過去實測記錄歸納出其特性，再推估不同重現期(return period)之特性，此分析技巧稱為頻率分析(frequency analysis)或者極值統計分析(extreme statistics)。

極值統計所採用樣本，基本上需滿足獨立性(independency)及等質性(homogeneity)二項要求。Fisher和Tippett(1928)提出樣本變數 $x$ 可滿足三種型態之極值分布，即為

#### (1) 極值 I 型分布(FT-I 型分布)

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-B}{A}}}, \quad -\infty < x < B$$
$$f(x) = \frac{1}{A} e^{-\frac{x-B}{A} - e^{-\frac{x-B}{A}}} \quad (4.1)$$

#### (2) 極值 II 型分布(FT-II 型分布)

$$F(x) = e^{-(1+\frac{x-B}{kA})^{-k}}, \quad B - kA \leq x < \infty$$
$$f(x) = \frac{1}{A} \left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-(1+k)} e^{-(1+\frac{x-B}{kA})^{-k}} \quad (4.2)$$

#### (3) 極值 III 型分布(FT-III 型分布)

$$F(x) = e^{-\left(\frac{B-x}{A}\right)^k}, \quad -\infty \leq x \leq \infty$$
$$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{B-x}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{B-x}{A}\right)^k} \quad (4.3)$$

式(4.1)至式(4.3)中， $x$ 為樣本變數， $f(x)$ 為概率密度函數(probability density function)， $F(x)$ 為累積概率函數(cumulative probability function)， $A$ ， $B$ 為分布函數相關形狀之變數，此數與樣本平均值(mean)，變異數(variance)有關，即與尺度參數(scale parameter)，位置參數(location parameter)有關。

上述式(4.3)之極值分布之樣本變數 $x$ 自 $B$ 值以下為負值，此與波浪波高特性永遠大於零之性質不符，故此極端分布不適用於波高分布。另外，相類似FT極值分布有

#### (4) 偵伯分布(Weibull distribution)

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k}, \quad B \leq x < \infty \quad (4.4)$$

$$f(x) = \frac{x}{A} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k}$$

#### (5) 對數正規分布(lognormal distribution)

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt, \quad 0 < x < \infty \quad (4.5)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Ax} e^{-\frac{(\ln x - B)^2}{2A^2}}$$

式(4.4)之偉伯分布為Weibull(1939)研究材料破壞強度分布所提出。

對波浪波高分布特性，其變數波高 $x$ 永遠大於零，故上述分布特性中，僅FT-I，FT-II，偉伯及對數正規分布四種符合波高之基本需求，而此四種分布相關特性與統計量、眾數(mode)、期望值或平均值(expected value)，及標準偏差(variance)有關，其關係分別如表4.1。

表4.1 各極值分布相關統計量之特性

分布函數	眾數	平均值	標準偏差
極值I型分布	$B$	$B + A\gamma$	$\pi A/\sqrt{6}$
極值II型分布	$B + Ak\left[\left(\frac{k}{k+1}\right)^{1/k} - 1\right]$	$B + kA\left[\Gamma\left(1 - \frac{1}{k}\right) - 1\right]$	$kA\left[\Gamma\left(1 - \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{k}\right)\right]^{1/2}$
偉伯分布	$B + A\left(1 - \frac{1}{k}\right)^{1/k}, k > 1$	$B + A\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$A\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^{1/2}$
對數正規分布	$e^{B-A^2}$	$e^{\left(B+\frac{A^2}{2}\right)}$	$e^{\left(B+\frac{A^2}{2}\right)}\left(e^{A^2} - 1\right)^{1/2}$

表4.1中， $\Gamma(\cdot)$ 為伽瑪函數(Gamma function)， $\gamma$ 為尤拉數(euler number)。

## 4.2 極值分布推定

### 4.2.1 資料序列選擇

極值分布推定，首先需將原始資料作基本之選擇及排序。資料序列選擇之方法可分為三大類，

(1)全部記錄選用法(full series, complete-duration series)

此種方法乃將所有記錄取出，加以極值分析。此法因需將所有波浪資料加予分析，程序及資料數量繁瑣，分析費時，一般較不用此法。

## (2) 極端值選用法(extreme-value series)

此法乃利用現有記錄，在每一固定期間內(如一年)僅取一個極端值為樣本來分析。此法依期限長短分為年計選用法(annual series)及非年計選用法(non-annual series)，前者係以每年僅取出一個極端值來分析，而後者選取之期間不為一年。年選用法因每年選出一個極端值，取擇較為客觀，是其優點，但波浪發生有時一年內連續發生數次極端事件，年選用法恐有掛一漏萬之缺點。

## (3) 超量選用法(partial-duration series)

此方法為以某一基本量為基準，不考慮其發生時間間隔之長短。此法依年限可分為年超過量選用法(annual exceedance series)及非年超過量選用法(non-annual exceedance series)。前者完全以記錄年數，選擇最大記錄年數之波浪當做標準衡量，如有20年之波浪資料時，則選擇最大20個當做分析之樣本。後者則以工程需要，只要訂出取樣標準，即可選擇出超過標準量之樣本，此種方法優點為考慮波浪樣本之大小順序而不論其發生時間，其缺點為不一定每年取出一個資料來分析，有時一年卻有數個，較為不客觀。

極端值選用法及超量選用法較常使用，一般工程若損壞只歸咎於一次臨界嚴重情況時，則使用極端值選用法，如果工程之損壞乃由於重覆性大波浪作用而造成的，極值分析時宜採用超量選用法。

### 4.2.2 樣本之極值概率

依上述樣本選擇方法，若選取N個資料，首先將N個資料依大小順序排列，再計算各順位在選擇分布函數之概率 $F_m$ ，此概率計算方法在四種分布函數所需之參數分別如表4.2所示。

$$F_m = 1 - \frac{m+\alpha}{N+\beta}, \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (4.6)$$

表4.2 計算樣本順位概率之參數

分布函數	$\alpha$ 值	$\beta$ 值
極值 I 型分布	0.44	0.12
極值 II 型分布	$0.44 + 0.52/k$	$0.12 - 0.11/k$
偉伯分布	$0.20 + 0.27/\sqrt{k}$	$0.20 + 0.23/\sqrt{k}$
對數正規分布	0.375	0.25

在極值分布函數中，極值 II 型及偉伯分布均有形狀參數  $k$ ， $k$  值一般有 4 個固定值，在極值 II 型分布  $k=2.5, 3.33, 5.0$  及  $10.0$ ，而偉伯分布  $k=0.75, 1.0, 1.4$  及  $2.0$  等 4 種。

樣本順序  $x_m$  對應之分布概率  $F_m$ ，則可用最小二乘法將順序統計量與基準化變量  $y_m$  直線迴歸成

$$x_m = ay_m + b \quad (4.7)$$

式 (4.7) 中之  $a$ ， $b$  分別為直線回歸之斜率 (slope) 及截距 (intersection)，而  $y_m$  基準化變量與概率  $F_m$  依不同分布有下列關係

$$\text{極值 I 型分布} : \quad y_m = -\ln(-\ln F_m) \quad (4.8)$$

$$\text{極值 II 型分布} : \quad y_m = k \left[ (-\ln F_m)^{-1/k} - 1 \right] \quad (4.9)$$

$$\text{偉伯分布} : \quad y_m = \left[ -\ln(1 - F_m) \right]^{1/k} \quad (4.10)$$

$$\text{對數正規分佈: } y_m = \Phi^{-1}(F_m) \quad (4.11)$$

式(4.11)中  $\Phi$  為標準正規分布之累積分布函數， $\Phi^{-1}$  為其逆函數。

#### 4.2.3 推定適用性

一般樣本選定極值分布分析之適用性，可以利用合田和小舟(1989)提出 MIR 法 (minimum ratio of residual correlation coefficient) 來當做判斷之基準。由最小二乘法所得直線函數，可推算出樣本概率  $F_m$  下之推算值，由樣本及推算值可計算出二者相關係數  $r$ ，若定義相關係數殘差為  $\Delta r = 1 - r$  時，合田和小舟(1989)提出相關係數殘差平均值為

$$\Delta \bar{r} = e^{a + b \ln N + c (\ln N)^2} \quad (4.12)$$

式(4.12)中係數  $a$ ， $b$  及  $c$  依不同分布分別示如表4.3。表 4.3 中  $v$  為選取樣本之子集個數，即樣本之採樣率。

表4.3 相關係數殘差平均值公式之係數 $a$ ， $b$ 及 $c$ 值

分布函數	係數 $a$	係數 $b$	係數 $c$
極值 I 型	$-2.364 + 0.054v^{5/2}$	$-0.2665 - 0.0457v^{5/2}$	-0.044
極值 II 型 ( $k = 2.5$ )	$-2.470 + 0.015v^{3/2}$	$-0.1530 - 0.0052v^{5/2}$	0
極值 II 型 ( $k = 3.33$ )	$-2.462 - 0.009v^2$	$-0.1933 - 0.0037v^{5/2}$	-0.007
極值 II 型 ( $k = 5.0$ )	-2.463	$-0.2110 - 0.0131v^{5/2}$	-0.019
極值 II 型 ( $k = 10.0$ )	$-2.437 + 0.028v^{5/2}$	$-0.2280 - 0.0300v^{5/2}$	-0.033
偉伯分布 ( $k = 0.75$ )	$-2.435 - 0.168v^{1/2}$	$-0.2088 + 0.1074v^{1/2}$	-0.047
偉伯分布 ( $k = 1.0$ )	-2.355	-0.2612	-0.043
偉伯分布 ( $k = 1.4$ )	$-2.277 + 0.056v^{1/2}$	$-0.3169 - 0.0499v$	-0.044
偉伯分布 ( $k = 2.0$ )	$-2.160 + 0.113v$	$-0.3788 - 0.0979v$	-0.041
對數正規分布	$-2.153 + 0.059v^2$	$-0.2627 - 0.1716v^{1/4}$	-0.045

#### 4.2.4 極值統計之信賴區

上述相關係數殘差值與取樣之個數有關，若取樣較多，則相關係數殘差量減小。若相關係數殘差值累積，直到全數極值資料95%時，其相關係數殘差累積 $\Delta r_{95\%}$ 與採樣個數 $N$ 有下式之關係

$$\Delta r_{95\%} = e^{a+b \ln N + c(\ln N)^2} \quad (4.13)$$

其中係數  $a$ ， $b$  及  $c$  如同式(4.12)與分布函數及形狀參數相關，其關係如表4.4。

相關係數殘差 95% 非超過概率值，合田和小舟(1989)提出當為適用基準，名為 REC(residue of correlation coefficient)，當選擇分布函數之相關係數殘差  $\Delta r$  小於 95% 非超過概率值  $\Delta r_{95\%}$  為適用。

利用此種方法可以對樣本異常之資料予以削減，或者削減不滿足選擇分布函數之子集資料。

表4.4 相關係數殘差累積  $\Delta r_{95\%}$  非超過概率值之係數

分布函數	係數 $a$	係數 $b$	係數 $c$
極值 I 型	$-1.444$	$-0.2733 - 0.0414v^{5/2}$	$-0.045$
極值 II 型 ( $k = 2.5$ )	$-1.122 - 0.037v$	$-0.3298 + 0.0105v^{1/4}$	$0.016$
極值 II 型 ( $k = 3.33$ )	$-1.306 - 0.105v^{3/2}$	$-0.3001 + 0.0404v^{1/2}$	$0$
極值 II 型 ( $k = 5.0$ )	$-1.463 - 0.107v^{3/2}$	$-0.2716 + 0.0517v^{1/4}$	$-0.018$
極值 II 型 ( $k = 10.0$ )	$-1.490 - 0.073v$	$-0.2299 - 0.0099v^{5/2}$	$-0.034$
偉伯分布 ( $k = 0.75$ )	$-1.473 - 0.049v$	$-0.2181 + 0.0505v^2$	$-0.041$
偉伯分布 ( $k = 1.0$ )	$-1.433$	$-0.2679$	$-0.044$
偉伯分布 ( $k = 1.4$ )	$-1.322$	$-0.3356 - 0.0449v$	$-0.045$
偉伯分布 ( $k = 2.0$ )	$-1.188 + 0.073v^{1/2}$	$-0.4401 - 0.0846v^{3/2}$	$-0.039$
對數正規分布	$-1.362 + 0.360v^{1/2}$	$-0.3439 - 0.2185v^{1/2}$	$-0.035$

對於極值分析所推算出各重限期之各物理值，因為數據不完全符合選擇之分布函數，故所推算之結果必含有變動性，亦即推算結果僅是分布函數中某概率上之平均值，其偏差量大小應要予以估算。

極值 I 型分布之估算值之標準偏差量為

$$\sigma(x_R) = \left[ 1 + 0.885(y_R - r) + 0.6687(y_R - r)^2 \right]^{1/2} \sigma / \sqrt{N} \quad (4.14)$$

式(4.14)中  $\sigma$  為樣本  $x$  之標準偏差， $y_R$  為重現期之基準化變量， $x_R$  為重現期之推算值。其他分布並無簡易公式推定，合田和小舟(1989)提出以補統計量的標準偏差  $\sigma_z$  合併可表為

$$\sigma(x_R) = \sigma_x \cdot \sigma_z \quad (4.15)$$

其中，極值 I, II 型及偉伯分布之  $\sigma_z$  為

$$\sigma_z = \left[ 1.0 + a(y - c + \alpha \ln v)^2 \right]^{1/2} \quad (4.16)$$

而  $a$  值在極值 I 型及偉伯分布為

$$a = a_1 e^{a_2 N^{-1.3} + k(-\ln v)^{1/2}} \quad (4.17)$$

但極值分布 II 型分布  $a$  值可表為

$$a = a_1 e^{a_2 \left[ \ln \left( Nv^{0.5} / N_0 \right) \right]^2 - k \left[ \ln \left( v / v_0 \right) \right]^2} \quad (4.18)$$

式(4.16)至式(4.18)中， $v$  需大於 0.15，另外，其他係數如表 4.5 所示

表4.5 重現期推算量之標準偏差公式中之係數

分布函數	$a_1$	$a_2$	$k$	$c$	$\alpha$	$N_0$	$v_0$
極值 I 型	0.64	9.0	0.93	0	1.33		
極值 II 型 ( $k = 2.5$ )	1.27	0.12	0.24	0.3	2.3	23	1.34
極值 II 型 ( $k = 3.33$ )	1.23	0.09	0.36	0.2	1.9	25	0.66
極值 II 型 ( $k = 5.0$ )	1.34	0.07	0.41	0.1	1.6	35	0.45
極值 II 型 ( $k = 10.0$ )	1.48	0.06	0.47	0	1.4	60	0.34
偉伯分布 ( $k = 0.75$ )	1.68	11.4	-0.63	0	1.15		
偉伯分布 ( $k = 1.0$ )	1.92	11.4	0	0.3	0.90		
偉伯分布 ( $k = 1.4$ )	2.05	11.4	0.69	0.4	0.72		
偉伯分布 ( $k = 2.0$ )	2.24	11.4	1.34	0.5	0.54		

至於對數正規函數之  $\sigma_z$  為

$$\sigma_z = \left[ 1.2 + a(y_R - 0.2)^q \right]^{1/2} / \sqrt{2} \quad (4.19)$$

式(4.18)中  $q$  及係數  $a$  依不同  $v$  值而變，

$$\left. \begin{array}{ll} v = 1.0 & a = 0.65 \\ v = 0.5 & a = 1.55e^{-4.6N^{-0.6}} \\ v = 0.25 & a = 1.18e^{-8.8N^{-0.6}} \end{array} \right\} \begin{array}{l} q = 2.0 \\ q = 2.0e^{1.96N^{-0.5}} \\ q = 2.5e^{2.34N^{-0.5}} \end{array} \quad (4.20)$$

#### 4.2.5 極值分析推定步驟

依據上述極值分析之分布函數，推定方法及適用性基準，整個極值分析推定步驟應如下所述：

- (1) 選取  $k$  年內  $N$  個樣本  $x_m$ 。若選擇樣本為非年選用法時， $\lambda = N/R$ ，年選用法時  $\lambda = 1$ ，即  $K = N$ 。
- (2) 將樣本  $x_m$  依大小順序排列。
- (3) 由式(4.6)及表4.2計算各樣本之概率  $F_m$ 。
- (4) 選擇分布函數，並由式(4.8)至式(4.11)計算基準化變量  $y_m$ 。
- (5) 由  $x_m$  及  $y_m$  線性迴歸出直線方程式，式(4.7)，並計算相關係數  $r$ ，及相關係數殘差  $\Delta r = 1 - r$ 。
- (6) 由式(4.12)計算相關係數平均值  $\bar{r}$ ，並比較各形狀參數  $k$  或各分布函數之MIR， $\Delta r/\Delta \bar{r}$ ，具最小值者為最佳分布及形狀參數。
- (7) 以式(4.13)計算  $\Delta r_{95\%}$ ，判斷所選擇之分布函數所得相關係數殘差是否小於  $\Delta r_{95\%}$ ，如是，則選擇分布函數適用，若非，則選擇函數不適用。
- (8) 選擇重現期  $T$ ，其累積概率  $F_m = 1 - 1/(\lambda T)$ ，代入式(4.8)至式(4.11)計算相對應之  $y_R$ 。
- (9) 由步驟(8)所得  $y_R$ ，代入式(4.7)求出  $x_R$ 。
- (10) 由式(4.15)計算標準偏差  $\sigma(x_R)$ ，則推定出之重現期結果為  $x_R \pm \sigma(x_R)$ 。

### 4.3 蘇澳颱風波浪之極端值推定

由第三章統計經驗公式法，以74年至83年中央氣象局公布侵台之颱風資料，代入式(2.19)迴歸蘇澳之湧浪及式(2.21)計算蘇澳之風浪，再取湧浪及風浪之最大值，當為該颱風造成蘇澳港之最大波高。另外，由式(2.23)合併迴歸蘇澳港之湧浪及風浪，再從各時段波浪找出最大之波高，二種方法所選擇結果當為極值分析樣本。

由上述二種方法中，10年內共分析颱風波浪為58個颱風，若依非年選用法 $\lambda = \frac{58}{10} = 5.8$ ，取58個樣本，若依年選用法分析，則樣本為10個。選擇極值分布函數為極值I型、極值II型、偉伯分布及對數正規分布四種。以此四種分布分析蘇澳颱風風波浪極值分布之相關係數特性為表4.6。

由表4.6顯示，非年選用法中，偉伯分布( $k = 2.0$ )之MIR較其他三者為小，顯示偉伯分布較其他三種更適合當為颱風波浪波高分布之函數，且四種分布之殘差值均小於 $\Delta r_{95\%}$ 值，此顯示偉伯分布為較可信賴之分布函數。另外，若為年選用法所得相關係數均較非年選用法為低，此顯示年選用法所得之結果應較非年選用法不準確，此原因可能因為在此計算所選用之颱風年數僅10年，數據可能偏少所致。

另外，由港研所(1985)以34年颱風資料，應用單位元素面積風域法數值推算蘇澳港資料，分析偉伯分布之迴歸相關係數為0.985，MIR為0.566，而 $\Delta r_{95\%}$ 為0.026。

表4.6 不同取樣方法與不同極值分布之相關係數、MIR及 $\Delta r_{95\%}$

取樣方法		極值 I 型	極值 II 型 ( $k=10.0$ )	偉伯 ( $k=2.0$ )	對數正規
分別迴歸	相關係數( $r$ )	0.986	0.968	0.995	0.980
	最小相關係數殘差(MIR)	1.020	0.710	0.200	1.970
	$\Delta r_{95\%}$	0.032	0.046	0.021	0.021
合併回歸	相關係數( $r$ )	0.995	0.991	0.996	0.961
	最小相關係數殘差(MIR)	0.396	0.195	0.191	3.824
	$\Delta r_{95\%}$	0.032	0.046	0.027	0.021
分別回歸	相關係數( $r$ )	0.962	0.943	0.967	0.983
	最小相關係數殘差(MIR)	1.000	0.960	0.710	0.450
	$\Delta r_{95\%}$	0.090	0.101	0.080	0.084
合併回歸	相關係數( $r$ )	0.988	0.989	0.985	0.967
	最小相關係數殘差(MIR)	0.308	0.191	0.329	0.930
	$\Delta r_{95\%}$	0.090	0.101	0.088	0.084

若以非年選用法選擇樣本及港研所推算結果，以偉伯分布計算各重現期之波浪波高值分別如表4.7所示

表4.7 以偉伯分布計算各重現期之波浪波高

單位：公尺

重現期(年)	分別迴歸	合併迴歸	數值計算
5	$8.10 \pm 0.57$	$8.47 \pm 0.79$	$7.99 \pm 0.40$
10	$8.84 \pm 0.63$	$9.51 \pm 0.92$	$8.90 \pm 0.48$
20	$9.53 \pm 0.69$	$10.48 \pm 1.03$	$9.68 \pm 0.56$
50	$10.35 \pm 0.76$	$11.71 \pm 1.19$	$10.58 \pm 0.65$
100	$10.94 \pm 0.82$	$12.59 \pm 1.30$	$11.20 \pm 0.71$

● 註：數值結果為港研所（1985）以單位元素面積風域法計算所得數據，經較極值推定者。

表4.7中，推定重現期之波高，後加正負號之值為以式(4.12)計算推定值一個標準偏差值。由表4.7中顯示由分別迴歸非年選用法所得推定波高結果與數值計算推定波高較為接近，而兩者均較合併迴歸結果為小，其差值在0.5~1.3公尺之間。由表4.7顯示蘇澳港50年重現期之波高10.3~11.7公尺，標準偏差量在0.7~1.2公尺之間。

至於各重現期波浪之週期，目前因無學理來推算，若欲引用可利用波高與週期之統計關係，見SPM（1984）

$$T_s = 12.1 \sqrt{\frac{H}{g}} \quad (4.21)$$

若以式（4.21），將蘇澳港50年重現期波浪之波高範圍9.6~12.9公尺代入，得50年重現期波浪週期為11.84~13.88秒。

本研究所得結果乃印證花蓮港之結果後，直接引用至蘇澳港，其中颱風波浪是否有地區之局部性影響乃值得再研究，另外，目前計算結果僅以10年颱風波浪資料進行分析，樣本個數上似乎稍嫌太少，應再多取颱風，增加樣本數量以增加極端值推算之精確性。

## 第五章 結論

本計劃利用所收集颱風及颱風波浪資料，整理分析，經統計分析迴歸出推算颱風波浪之公式，並利用極值統計分析迴歸出各種重現期之波浪特性，得到下列四點結論：

(一) 本計劃提出推算颱風湧浪之特性為

$$H_s = 1.4 + 6.5 \left( \frac{\Delta p}{100} \right) e^{3.0 \left( \frac{R_g}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_s)$$

$$T_s = 4.0 + 52.69 \left( \frac{\Delta p}{100 \cdot g} \right)^{1/2} e^{0.75 \left( \frac{R_g}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_s)$$

(二) 而推算風浪公式為

$$H_w = 1.4 + 95.68 \left( \frac{\Delta P}{100} \right) (1 - A_s)$$

$$T_w = 4.0 + 120.5 \left( \frac{\Delta P}{100 \cdot g} \right)^{1/2} (1 - A_s)$$

(三) 蘇澳港50年重現期之波高，經極值統計分析約為10.3~11.7公尺，標準偏差為0.7~1.2公尺之間，波浪週期為11.84~13.88秒之間。

(四) 本計劃所發展出之推算波浪公式，因颱風波浪資料尚少，且局部於花蓮港之單點數據，可靠性較低，且極值分析所選擇之樣本僅10年，樣本數尚少，應再做更深入且樣本數多之分析。

## 參考文獻

1. 山口正隆, L.H. Holthuijsen, 日野幹雄, 鈴田佳男, 波的方向性考慮之混合參數波浪預測模式, 土木學會論文集, 第39號/II-10, 第193~202頁, (1988)。
2. 交通部中央氣象局(1994), 「颱風百問」, 第27~29頁。
3. 光易恆(1990), 「波浪推算、數值模式及有關物理現象」, 日本土木學會論文集第423號, 第11~14頁。
4. 合田良實(1990), 港灣構造物的耐波設計, 鹿島出版社。
5. 合田良實, 小舟浩治(1989), 「波浪的極值統計分布函數之棄卻基準」, 海岸工學論文集, 第36卷, 第135~139頁。
6. 林柏青, 莊甲子(1995), 「彌陀海域風湧浪合成模式研究」, 第十七屆海洋工程研討會論文集, 臺南, 第379~392頁。
7. 侯和雄, 王玉懷, 陳森河(1995), 「颱風暴潮之探討—龍洞案例」, 第十七屆海洋工程研討會論文集, 臺南, 第351~366頁。
8. 張金機(1994), 「花蓮港與蘇澳港八十三年颱風災害探討」, 臺灣省政府交通處港灣技術研究所專刊第99號。
9. 梁乃匡, 林文宗(1995), 「夏季侵台颱風波浪推算研究」, 第十七屆海洋工程研討會論文集, 臺南, 第425~442頁。
10. 梁乃匡(1985), 「台灣四周海岸波浪推算數值模式研究」, 臺灣省政府交通處港灣技術研究所專刊第74-研(二)號。
11. 簡仲環、曾相茂、林受勳(1995), 「台灣區域波浪統計特性比較研究」, 第十七屆海洋工程研討會論文集, 臺南, 第161~176頁。

12. Anderson, D. A., J. C. Tannehill and R. H. Pletcher (1984) ,Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, McGraw-Hill, pp.102-103.
13. Bishop, C. T., M. A. Donelan and K. K. Kahma, (1992), "Shore Protection Manual's Wave Prediction Reviewed," Coastal Eng., Vol.17, pp.41-48.
14. Bretchneider,C.L.(1970) " Wave Forecasting Relations for Wave Generation,"Look Lab, Hawaii ,Vol.1 ,No.3.
15. Collins,J.I. and M.J. Viehman (1971), "A Simplified Empirical Model for lourricane with Fields," Offshore Technology Conf.,vol.1, Houston,Tex.,Apr.
16. Donelan,M.A. (1980) "Simifarity Theory Applied to the Forecasting of Wave Heights, Preiods and Directions," Proc.Canadian Coastal Conf., pp.47-61.
17. Harris, D. L. (1958) , "Meteorological Aspects of Storm Surge Generation," Journal of the Hydraulics Dicision, ASCE,No.HY7, paper1859, 25pp.
18. Mitsyasu,H. and T. Kusaba (1984) "Drag Coefficient over Water.Surface under the Action of Strong Wind," J. Natural Disas.,Sci ,Vol.6,No.2 , pp.43-50.
19. Myers, V. A.(1954), "Characteristics of United States . Hurricanes Pertinent to Levee Design for Lake Okeechobee,Florida," Hydro-meteorological Research No.32,U.S Weather Bureau, Washington,D.C..
20. Shore Protection Manual (1984),U.S. Army of Corps of Engineers ,Coastal Engineering Research Center, U. S. Govt. Printing Office,Washington,D.C..

- 21.SWAMP Group(24 Authors),(1985), Ocean Wave Modeling, Plenum Press, New York, 256pp.
- 22.Williams,R.T.(1995), "Lambert and Mercator Map Projection in Geology and Geophysics," Computer & Geosciences, Vol.21, No.3, pp.353-364.