

港灣季刊

(原港灣報導季刊)

第 102 期

交通部運輸研究所

中華民國 104 年 10 月

港 灣 季 刊 第 102 期

刊期頻率：季刊

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw

電 話：(04)26587176

總 編 輯：林志明

編輯委員：邱永芳、朱金元、許英正、謝明志、何良勝、簡仲璟
蘇青和、單誠基、馬維倫

出版年月：每年 2、6、10 月

創刊年月：中華民國 77 年 2 月 1 日

定 價：100 元

本次出刊：130 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

印 刷 者：悅翔數位印刷有限公司

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：2007700020 ISSN：1019-2603

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

目 錄

一、臺北港短期性海岸地形變遷數值監測模式之研究1

蔡清標	國立中興大學土木工程學系特聘教授
陳盈圻	國立中興大學土木工程學系研究助理
柯鈞瀚	國立中興大學土木工程學系博士生
何良勝	交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
黃茂信	交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員

二、橋梁殘餘壽齡與保全評估模式建立之研究13

鄭明淵	國立臺灣科技大學營建工程系特聘教授
邱建國	國立臺灣科技大學營建工程系副教授
吳育偉	國立臺灣科技大學營建工程系博士後研究員
林雅雯	交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員
徐梓隆	國立臺灣科技大學營建工程系碩士

三、地震作用下港區土層的放大效應.....32

陳志芳	交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
-----	----------------------

四、臺灣港務公司之監督與公司治理績效評估研究48

吳榮貴	臺北城市科技大學行銷與流通管理系教授
謝幼屏	交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

五、航海雷達應用於偵測港區海面油污之初探61

吳立中	國立成功大學近海水文中心專案助理研究員
莊士賢	國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授
簡仲璟	交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
李俊穎	交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

臺北港短期性海岸地形變遷數值監測模式之研究

蔡清標 國立中興大學土木工程學系特聘教授

陳盈圻 國立中興大學土木工程學系研究助理

柯鈞瀚 國立中興大學土木工程學系博士生

何良勝 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長

黃茂信 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員

摘要

根據長期監測之分析結果得知，臺北港海岸地形因防波堤之漂沙阻擋效應，於淡水河口以南至外廓防波堤區之地形明顯呈現淤積現象，而南防波堤南側區之灘線則呈侵蝕狀態。本研究主要分析臺北港近年海岸地形變遷特性，建立淡水河口以南至北防波堤間北淤沙區之海岸地形短期變遷數值監測模式，及南堤南側區之海岸灘線長期變遷數值模式。依現地資料與數值模擬結果顯示，於淡水第二漁港附近因受波浪直接作用下，易造成明顯之地形變遷，颱風波浪影響時，近岸大致為屬侵蝕而向離岸則為淤積之變遷特性。淡水河口南側之地形變遷主要呈現較大範圍淤積現象，特別是水深-3m~-10m 處。而淡水河道（靠近挖子尾自然保留區）水深-2m 以內，以及水深-4m 以內靠近外廓防波堤處則屬侵蝕之變遷特性。而於南防波堤南側

區預測至 2016 年之海岸灘線變遷結果顯示，除靠近南防波堤以及近林口電廠之灘線外有岸線前進之趨勢，其餘海岸灘線大致呈現穩定不變亦或是些微後退之趨勢，最多後退約 10m 左右。

一、前言

臺北港位於淡水河口南岸之沙質海岸地區，其外廓防波堤之興建，改變原來的波流場特性，影響海岸漂沙而造成近岸地形變遷；加上淡水河河川輸沙之作用及長短期的季節性海象變化，更添增此海岸地形變遷之複雜性。

臺灣港務公司基隆分公司為配合臺北港工程，持續辦理海岸漂沙調查及海氣象與地形變遷監測作業，俾提供建港持續工程及環境影響評估之運用。本研究主要利用臺北港現地觀測水深地形及海氣象資料，並應用數值模擬方法，建立臺北港海岸地形變遷數值監測模式，模擬臺北港港附近之

地形變化，評估臺北港鄰近海岸地形的短期及長期變遷趨勢，以提供建港單位即時性的建議及相關防治對策研擬的參考。

二、研究方法

本研究主要重點為(1)淡水河口以南至北防波堤之北淤沙區受颱風波浪短期作用下之地形侵淤特性探討，及(2)南防波堤下游側之長期海岸灘線變遷之預測。

2.1 海岸地形短期變遷模式

本研究以 Copeland (1985) 及 Watanabe and Maruyama (1986) 所提出的時間相關緩坡方程式 (time-dependent mild-slope equation) 為基礎，以反應防波堤結構物可能產生之波浪反射及繞射等變形問題，控制方程式為：

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + FQ_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \zeta}{\partial y} + FQ_y = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{n} \left(\frac{\partial nQ_x}{\partial x} + \frac{\partial nQ_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

式中 Q_x 、 Q_y 分別為 x 及 y 方向的流率， ζ 為水面高程， c 為波速， $n=c_g/c$ ， c_g 為群波速度，而 F 為波浪能量修正因子，模式中引入 Tsai et al. (2001) 提出之非線性淺化修正因子，

並採用 Goda (1975) 之碎波指標，以改善碎波點附近的波高預測，提高波場計算模式之精度。本研究波場計算係利用蛙跳法 (leap frog method)，配合適當之邊界條件以有限差分法解析之。

近岸流場之計算則以 Longuet-Higgins and Steward (1964) 所提之波浪輻射應力 (radiation stress) 為基礎之動量守恆方程式，並考慮海底摩擦力及側向混合力加以解析。控制方程式如下：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + F_x - M_x + R_x + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + F_y - M_y + R_y + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} + \frac{\partial(h + \bar{\zeta})U}{\partial x} + \frac{\partial(h + \bar{\zeta})V}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

其中 U 、 V 分別為 x 、 y 方向之平均流速， $\bar{\zeta}$ 為水位變動量， h 為靜水深， g 為重力加速度。 F_x 與 F_y 為海底摩擦項， M_x 與 M_y 為側向混合項， R_x 與 R_y 為輻射應力項。

海岸地形的變遷主要係由於波浪變形及碎波衍生近岸流系統等聯合效應所造成，漂沙模式係將近岸波流場所導致之向離岸及沿岸輸沙量，配合輸沙連續方程式計算地形變遷。本研究之輸沙模式依據 Bailard (1981) 理論計算。控制方程式如下：

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + q_o \right) \quad (7)$$

等號左邊為水深之時間變化， q_x 及 q_y 分別為 x 及 y 方向單位寬度的輸沙量（即向離岸輸沙及沿岸輸沙）， q_0 為 source 或 sink， λ 為沙質孔隙率。

2.2 海岸灘線長期變遷數值監測模式

海岸灘線變遷主要係由於波浪的折射、淺化、繞射、反射及碎波衍生之近岸流系統等聯合效應所造成，本研究灘線長期變遷之計算模式，係以單線模式及輸沙連續方程式建立之。

沿岸輸沙量之計算係採用 Ozasa and Brampton (1980) 所提出之結構物存在時沿岸輸沙量的修正公式，引入碎波波高之沿岸梯度變化用以修正無結構物存在時之沿岸輸沙量，為：

$$Q = H_b^2 C_{gb} \left[a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \cos \theta_{bs} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \right]_b \quad (8)$$

式中 H_b 為碎波波高， C_{gb} 為碎波狀態下以線性波浪理論求得的群波速度， θ_{bs} 為碎波時之波峰線與當地海岸線之間的夾角， a_1 及 a_2 為無因次的參數，分別表示為：

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - \lambda) (1.416)^{5/2}} \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - \lambda) \tan \beta (1.416)^{5/2}} \quad (10)$$

其中 ρ_s 為沙粒的密度， ρ 為海水密度， λ 為底床沙質孔隙率， $\tan \beta$ 為沿岸輸沙作用下之海灘平均底床坡度。 K_1

及 K_2 是與當地波浪及輸沙相關之校正或經驗係數，常被稱為傳輸係數（transport parameters）； K_1 所代表模擬灘線變遷之時間縮尺及沿岸漂沙率的多寡， K_2 則是計算結構物鄰近海域灘線之變遷。傳輸係數 K 值的大小是由實測灘線率定而得。

對於長時期、大範圍海岸地形變遷之預測，一般可採用單線模式（one-line model）藉由離岸等深線之進退來探討海岸的侵淤情形；本研究採用 Pelnard-Considere (1956) 所提出之單線模式為基礎，探討臺北港南側海岸灘線之長期變遷趨勢。

灘線長期變遷之控制方程式是以質量守恆定律為基礎，且因大部份之沿岸漂沙運動，大多發生於碎波帶內，沿岸漂沙臨界水深一般可由深海波浪條件配合 Hellermeier (1983) 之經驗公式來推估求得：

$$D_s = \left[2.3 - 10.9 \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \right] H_0 \quad (11)$$

式中 D_s 為無明顯漂沙運動之臨界水深，上式中 H_0 為深海波高， L_0 為深海波長。

而在 Δt 的時間間隔內，於控制區間的漂沙體積變化為 $\Delta V = D_s \Delta x \Delta y$ ，亦即漂沙在此區間進出的變量， Δx 表示灘線位置水平移動的距離， Δy 代表兩相鄰海岸剖面的間隔。若沿岸漂沙量

的變化為 ΔQ ，則在此區間兩側邊之沿岸方向體積淨變化量為 $\Delta Q \Delta t = (\partial Q / \partial y) \Delta y \Delta t$ 。假設在離岸方向 q_s 與向岸方向 q_o 的漂沙量之和為 $q (= q_s + q_o)$ ，則由向離岸沙源所產生之體積淨變化量為 $q \Delta y \Delta t$ 。而河川對海岸的供沙量，可以考慮於 q_o 中。

由漂沙量之守恆可得控制體之體積變化量 $\Delta V = D_s \Delta x \Delta y = ((\frac{\partial Q}{\partial y}) + q) \Delta y \Delta t$ 。若 $\Delta t \rightarrow 0$ ，則灘線長期變遷的控制方程式為：

$$(\frac{\partial x}{\partial t}) + (\frac{1}{D_s})(\frac{\partial Q}{\partial y} - q) = 0 \quad (12)$$

本研究並進行有限差分疊代，而差分過程中須滿足 Courant number，以達到數值計算穩定條件。

三、模擬結果與分析

3.1 短期地形變遷之模擬

2011 年 10 月至 2012 年 10 月期間之現地地形進行分析與模擬，將模擬成果與現地臺北港之實測地形進行比對，以校驗模式之精度並探討北淤沙區受颱風短期作用之侵淤趨勢，此期間臺北港海域受到冬季季風浪與蘇拉颱風、海葵颱風、天秤及杰拉華颱風四個颱風之影響，其波向分別為 N、NNW、N、NNE、N。本研究依序模擬並展現之波流場圖與地形侵淤圖，其座標均以全球座標系統表示，橫坐

標為 N，縱座標為 E。

數值模擬方面，模擬條件彙整於表 1，冬季颱風模擬 3 個月，颱風波浪則為 12 小時，其模擬成果則表如圖 1~圖 5。圖 1 為冬季季風浪作用之模擬結果圖。波浪以 N 向入射，於近岸靠近淡水河道處，受到地形影響波紋發生明顯變形，波高驟降之情況亦伴隨著碎波現象，其波高梯度引致其輻射應力，於淡水河道南側水深-1m 處發生環流影響，產生些微侵蝕現象，其環流受到現地地形影響，將沙源帶至外廓防波堤處並產生淤積。而位於淡水第二漁港附近，受正北向之冬季風浪作用，導致發生碎波產生較明顯流場變化，並於此處發生淤積現象，淡水河道北側則形成遮蔽區，其地形變遷趨勢為淤積作用。

接續再以冬季季風浪作用後之地形計算蘇拉颱風波浪作用之波流場與地形變化，如圖 2 所示，由於波向為 NNW 斜向入射，直接作用於淡水漁港區域，且受到淡水河口處淤沙區影響，故波紋於此處造成明顯波浪變形，此情況可由波場分佈看出波浪受地形影響產生波高衰減，於淡水河道處與近岸區形成碎波現象，並於淡水漁港附近海域及淡水河道南側處水深-5m 處引致環流機制，故地形變遷於此處較為明顯，兩者地形變遷特性為侵淤互現。

接續模擬海葵颱風作用，模擬結

果如圖 3 所示。因其波向與冬季風波浪一致，其波紋亦呈現相似，但其波高值較冬季波浪大，故其波高分佈圖中，發生波高驟降發生碎波位置較為近岸，其引致之流場環流特性亦為劇烈，流場明顯分佈於水深-3m 處以及淡水第二漁港區域，由侵淤圖顯示地形變遷除了發生於淡水漁港附近外，北淤沙淤則發生於水深-2m~-5m 區域，且其影響範圍與等深線分佈有關，呈現侵淤互現之情況。

而天秤颱風接續作用之模擬結果如圖 4 所示，天秤颱風波浪以波向以 NNE 向入射，因岬頭影響導致波浪繞射之現象，而亦受到淡水河出海口北側之淡水第二漁港遮蔽效應影響，於淡水河道北側區形成遮蔽區，導致波高衰減，且因北區地形影響造成波浪變形，其輻射應力引致於水深-4m 以內之海域有明顯環流流場，帶動其地形變遷機制，影響範圍主要水深-2m ~ -4m 區域，其分佈情況亦與等深線一致。

本研究持續進行模擬強度颱風杰拉華之影響，模擬結果為圖 5。波浪以 N 向入射，因臺北港海域地形因素，故發生波浪變形且碎波現象，由於杰拉華颱風圍強颱，其波高值為亦為四個颱風中最大值，故波高梯度引致流場機制亦為最劇烈且範圍最廣，地形侵淤影響範圍則可達至水深-10m 處，最劇烈之地形變遷則集中在水深-5m ~

-7m，以及靠近北外廓防波堤處之近岸海域間呈現明顯淤積現象。

本研究以 2011 年 10 月之現地地形為基礎，模擬冬季季風浪與四個颱風綜合作用後之地形結果（圖 6），而臺北港北淤沙區之現地地形侵淤則為圖 7 所示。由上述模擬結果分析與現地實測地形比較可得，臺北港北淤沙區受到冬季季風浪與颱風波浪作用影響之下，以淡水河口北側而言，此海域因受波浪直接作用下易造成明顯之地形變遷，近岸大致為屬侵蝕而向離岸則為淤積之變遷特性。而淡水河口南側，除了水深-4m 以內靠近外廓防波堤處，以及淡水河道（靠近挖子尾自然保留區）水深-2m 以內較顯著外，北淤沙區之地形變遷主要則呈現較大範圍淤積現象，特別是水深-3m~-10m 處，模擬結果之地形變遷特性趨勢與現地實測值趨勢相符。

表 1 臺北港颱風期間波浪與潮位計算條件
(2011.10 ~ 2012.10)

波浪條件	波向	波高	週期	平均潮位
冬季季風波浪	N	1.73 m	7 s	1.56 m
2012 年侵臺颱風				
颱風	波向	波高	週期	平均潮位
蘇拉(中度)	NNW	3.8 m	9.8 s	1.77 m
海葵(中度)	N	2.60 m	10.4 s	1.71 m
天秤(中度)	NNE	2.4 m	6.5 s	1.51 m
杰拉華(強度)	N	4.90 m	10.8 s	1.41 m
【資料來源：102 年臺灣國內商港海域海氣象觀測分析研究】				

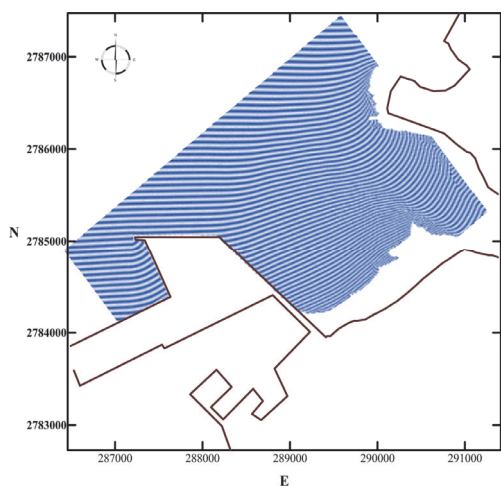


圖 1(a) 冬季季風波浪之波紋模擬結果

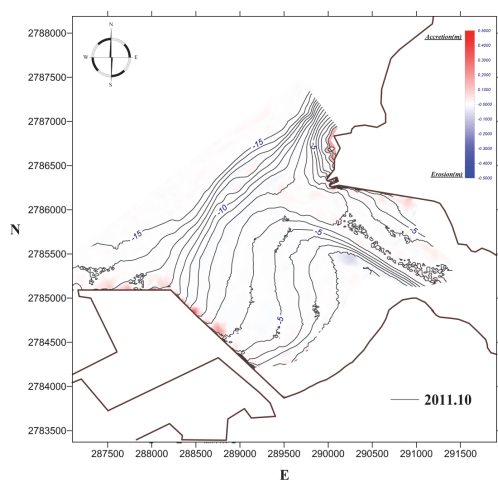


圖 1(d) 冬季季風波浪之地形模擬結果

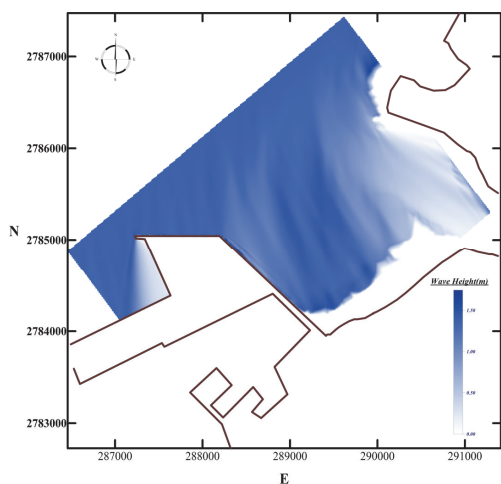


圖 1(b) 冬季季風波浪之波場模擬結果

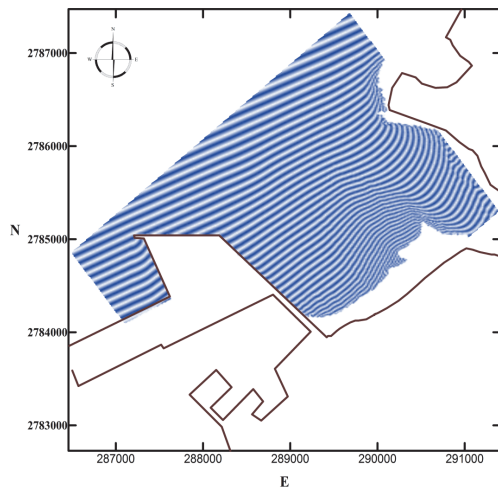


圖 2(a) 蘇拉颱風波浪之波紋模擬結果

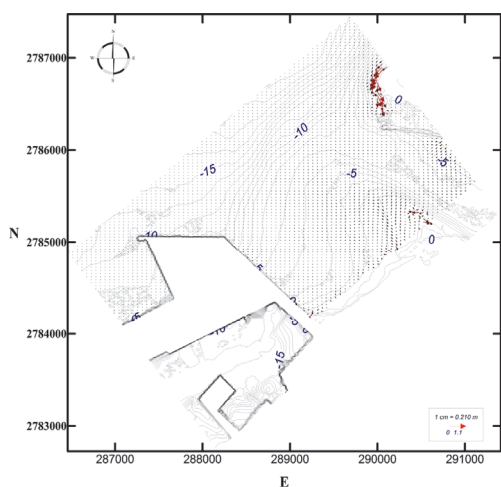


圖 1(c) 冬季季風波浪之流場模擬結果

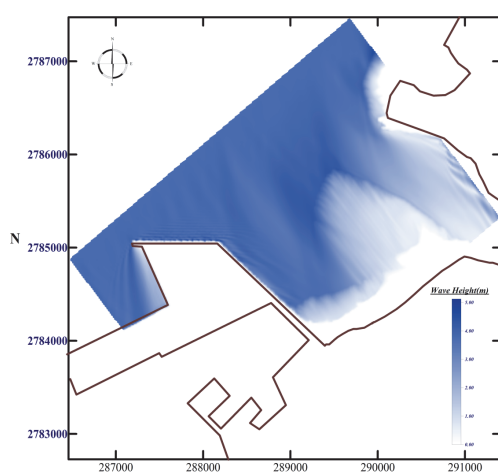


圖 2(b) 蘇拉颱風波浪之波場模擬結果

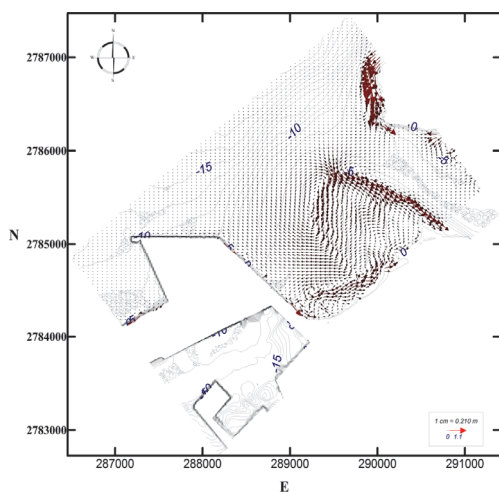


圖 2(c) 蘇拉颱風波浪之流場模擬結果

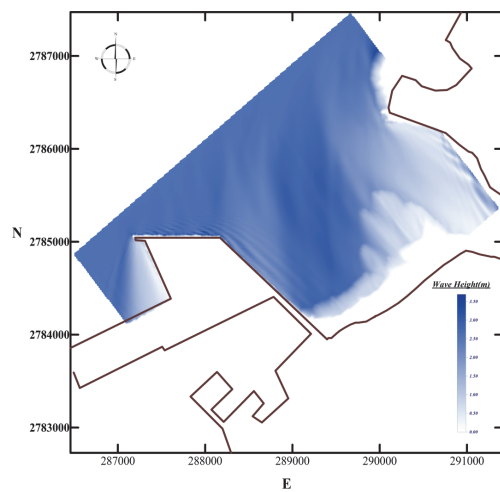


圖 3(b) 海葵颱風波浪之波場模擬結果

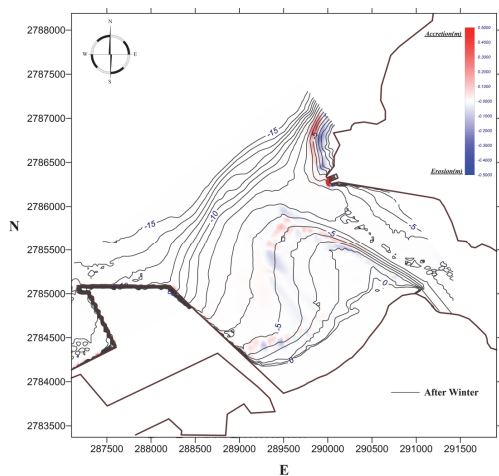


圖 2(d) 蘇拉颱風波浪之地形模擬結果

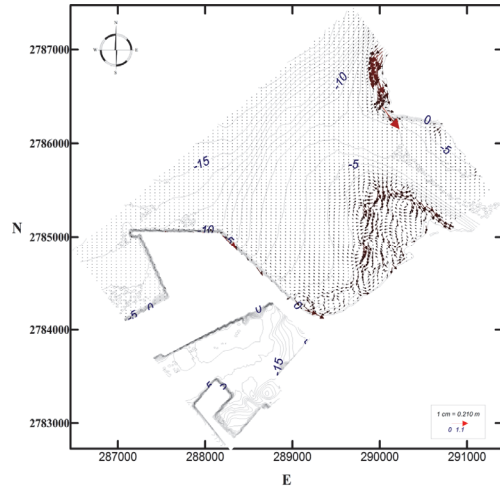


圖 3(c) 海葵颱風波浪之流場模擬結果

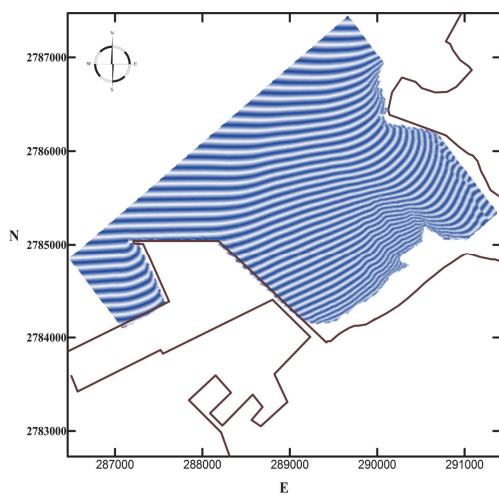


圖 3(a) 海葵颱風波浪之波紋模擬結果

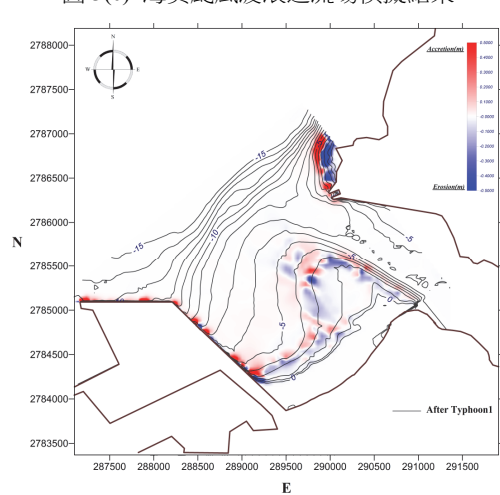


圖 3(d) 海葵颱風波浪之地形模擬結果

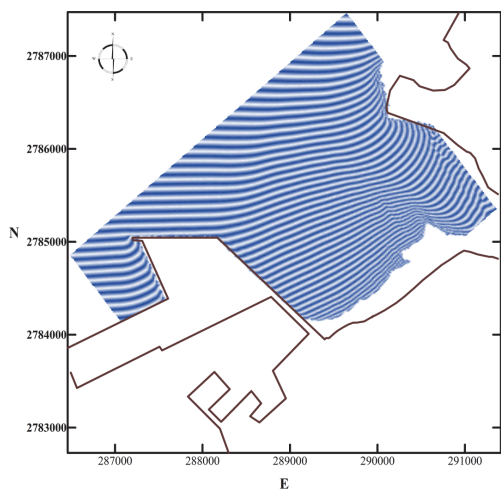


圖 4(a) 天秤颱風波浪之波紋模擬結果

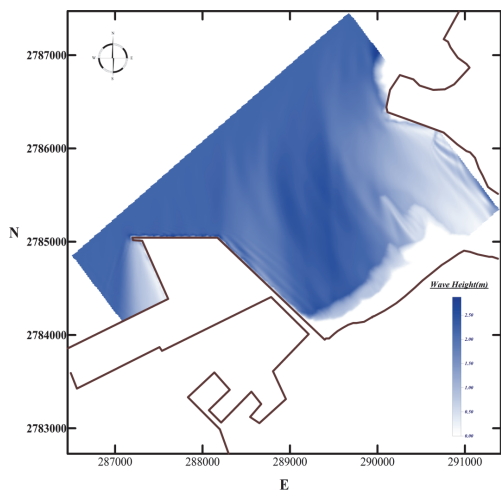


圖 4(b) 天秤颱風波浪之波場模擬結果

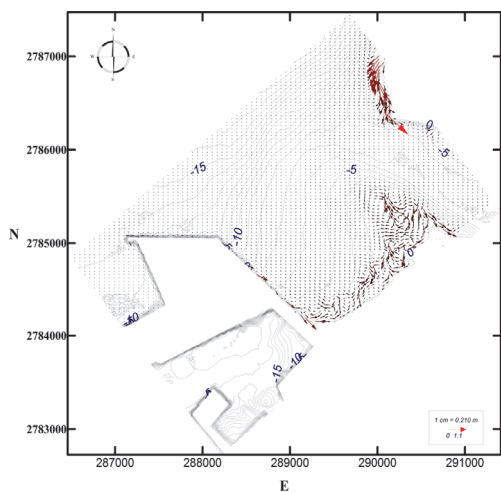


圖 4(c) 天秤颱風波浪之流場模擬結果

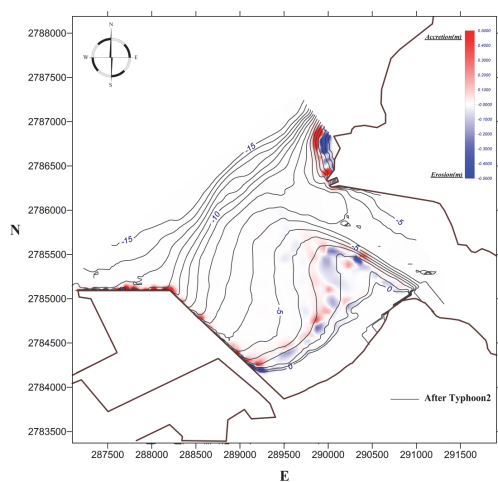


圖 4(d) 天秤颱風波浪之地形模擬結果

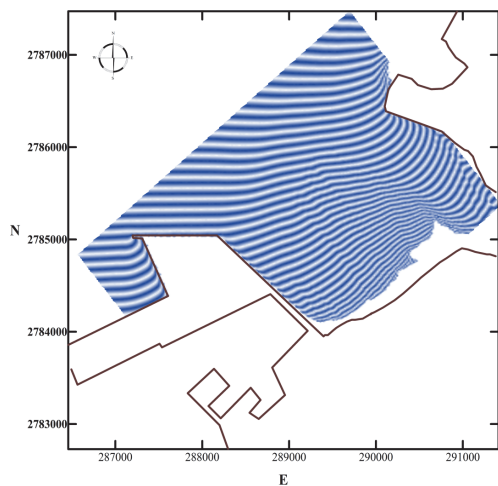


圖 5(a) 杰拉華颱風波浪之波紋模擬結果

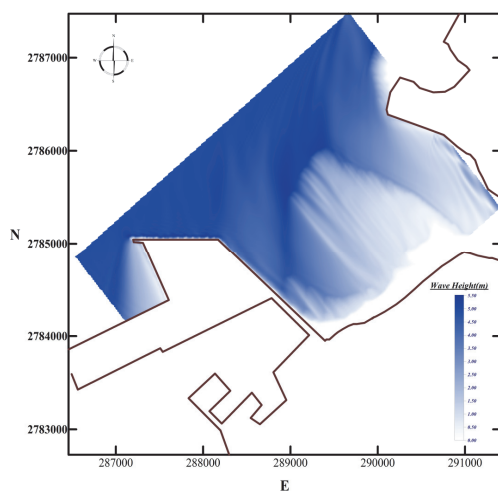


圖 5(b) 杰拉華颱風波浪之波場模擬結果

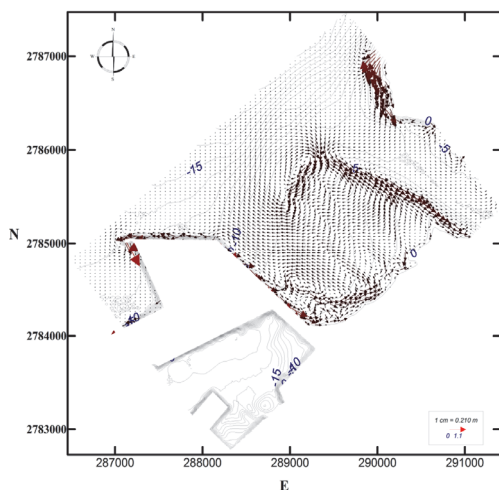


圖 5(c) 杰拉華颱風波浪之流場模擬結果

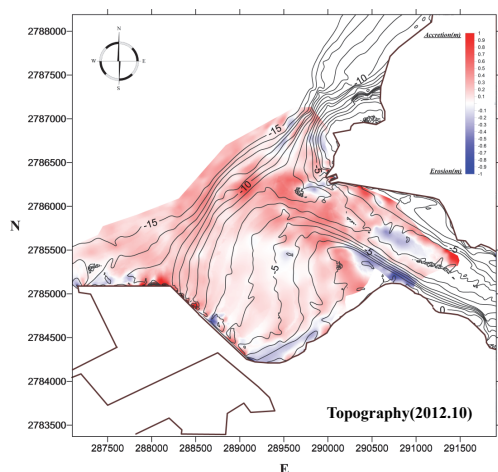


圖 7 臺北港北淤沙區現地地形侵淤變化圖
(2011.10~2012.10)

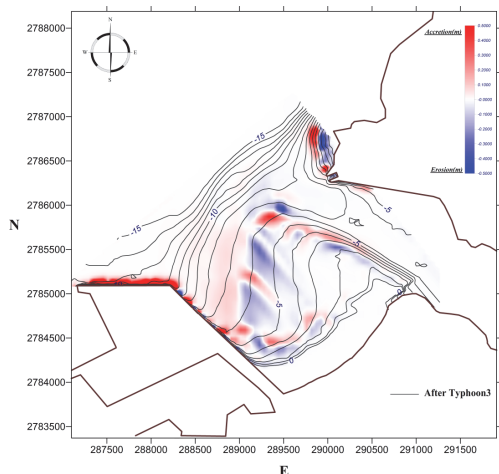


圖 5(d) 杰拉華颱風波浪之地形模擬結果

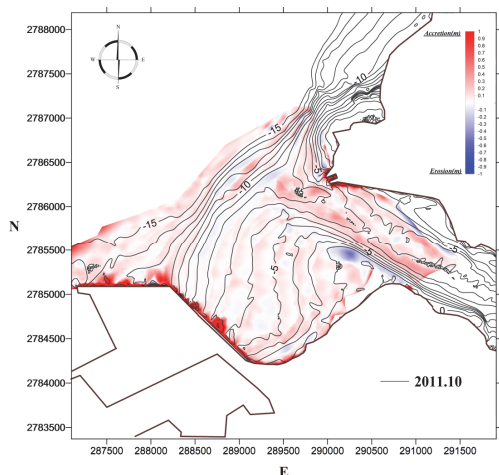


圖 6 數值模擬結果之地形侵淤圖
(2011.10~2012.10)

3.2 長期海岸灘線變遷之模擬

本研究係以季風波浪條件作用下，預測南防波堤南側海岸灘線之長期變遷，波高 (H) 為 1.73 m、週期 (T) 為 7 s、波向為 N 向、平均潮位 1.56m。為了尋求在本研究方案中合適的 K_1 與 K_2 值，利用 2010 年 10 月與 2012 年 11 月海岸線進行率定模式校正參數，本研究參考 Komar and Inman (1970) 由追蹤實驗之結果，定義出 K_1 之經驗值為 0.5，而 K_2 值於考慮有防波堤結構物之情況下，分別以 $K_2 = 0$ 、 $K_2 = 5 K_1$ 、 $K_2 = 10 K_1$ 、 $K_2 = 20 K_1$ 四者情況，進行率定，結果如圖 9 所示，而均方根誤差值列於表 2，均方根誤差定義為：

$$RMS = \frac{1}{\bar{X}_{obs}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{mod} - X_{obs})^2} \quad (13)$$

其中 $\bar{X}_{obs}$ 為實驗值平均， X_{mod} 為模式結果值， X_{obs} 為實驗值。由表 2 顯示均方根誤差值以 $K_2 = 5 K_1$ 為最小，故本文以 $K_2 = 5 K_1$ 模擬之。

表 2 K_1 與 K_2 率定之均方根誤差比較

	<i>RMS</i>
$K_2 = 0$	14.68%
$K_2 = 5 K_1$	8.96%
$K_2 = 10 K_1$	11.77%
$K_2 = 20 K_1$	42.68%

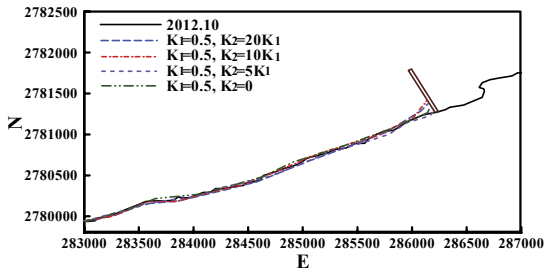


圖 9 臺北港長期灘線模式校正參數 (K_1 與 K_2) 率定結果

圖 10 所示為季風波浪條件之波紋計算結果當冬季季風浪以正北向入射至南堤南側區域，波浪會受北防波堤堤頭影響，產生明顯繞射之現象，由波場計算結果(圖 11)所示，受到地形影響及遮蔽效應，使南防波堤近岸海域波高較小，於水深-3m 處發生碎波，於水深-3m 以內產生多處環流，如圖 12 流場計算結果所示。

灘線長期變化預測至 2016 年之結果如圖 13 所示，於南防波堤附近，由於波浪入射受到遮蔽影響及輻射應力的變化，南防波堤南側 1400m 區域有明顯灘線前進現象產生，前進最大程

度約為 120m。但於 283000m 附近區域之海岸灘線則有後退之趨勢，灘線後退程度約為 10m；而靠近林口電廠 281800m 處，海岸灘線有前進之現象，前進最大程度約為 125m。由預測至 2016 年之結果，經與 2012 年灘線比較，整體而言，除靠近南防波堤以及近林口電廠之灘線外有岸線前進之趨勢，其餘海岸灘線大致呈現穩定不變亦或是些微後退之趨勢。

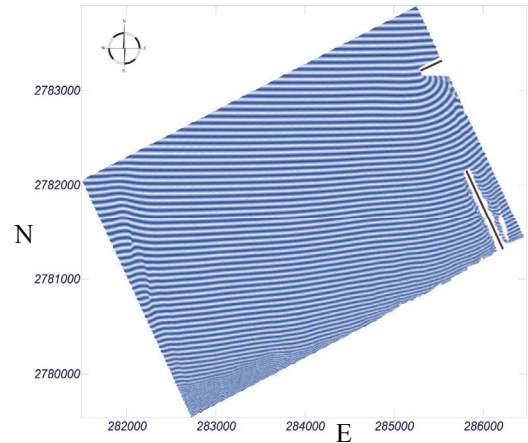


圖 10 臺北港南防波堤南側區之波紋計算結果

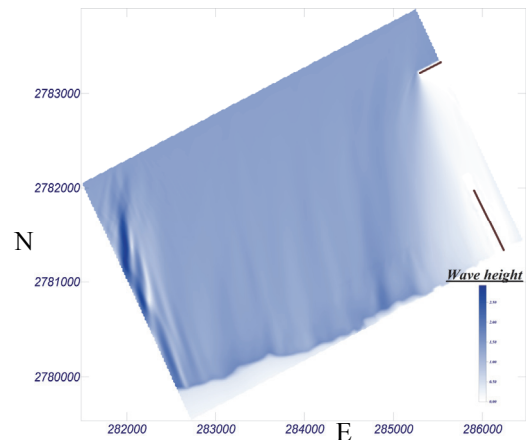


圖 11 臺北港南防波堤南側區之波場計算結果

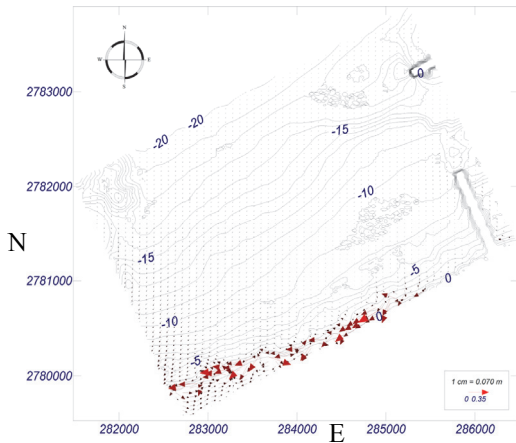


圖 12 臺北港南防波堤南側區之流場計算結果

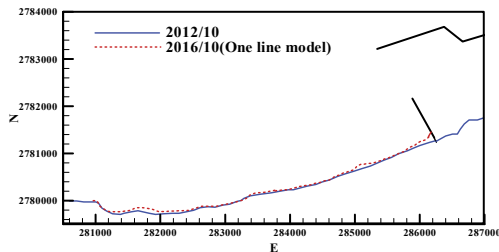


圖 13 臺北港南防波堤南側區之灘線預測結果

四、結論

本研究配合臺北港水深地形調查及海氣象資料，建立臺北港海岸地形變遷數值監測模式，以探討臺北港對鄰近海岸之地形變遷影響，研究重點為北防波堤淤沙區受颱風短期作用之地形侵淤趨勢，及南防波堤南側海岸灘線之長期變遷。依研究結果可獲致結論如下，於淡水第二漁港附近因受波浪直接作用下，易造成明顯之地形變遷，颱風波浪影響時，近岸大致為屬侵蝕而向離岸則為淤積之變遷特性。淡水河口南側之地形變遷主要呈現較大範圍淤積現象。而淡水河道（靠近挖子尾自然保留區）水深-2m 以內，以及

水深-4m 以內靠近外廓防波堤處則屬侵蝕之變遷特性。南防波堤下游側之海岸灘線變遷預測至 2016 年結果，除靠近南防波堤以及近林口電廠之灘線外有岸線前進之趨勢外，其餘海岸灘線大致呈現穩定不變亦或是些微後退之趨勢。

參考文獻

1. Bailard, J.A. (1981). "An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, pp. 10938-10954.
2. Goda, Y. (1975). "Irregular wave deformation in the surf zone," *Coastal Engineering in Japan*, 18, pp. 13-26.
3. Hallermeier, R. J. (1983). "Sand transport limits in coastal structure design," *Proceedings, Coastal Structures '83*, American Society of Civil Engineers, pp. 703-716.
4. Komar, P. H. and D. L. Inman. (1970). "Longshore sand transport on beaches," *Journal of Geophysical Research*, 75, pp. 5914-5927.
5. Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1964). "Radiation stress in water wave – a physical discussion with applications," *Deep-Sea Research*, Vol. 11, pp. 13-26.
6. Ozasa, H. and Brampton, A. H. (1980). "Mathematical modeling of

- beaches backed by seawalls,” Coastal Engineering, Vol. 14, pp. 47-64.
7. Pelnard-Considere, R. (1956). “Essai de theorie de l'evolution des forms de vivage en plages de sable et de dalets,” IVeme Journees de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Report, No. 1, pp. 289-298.
 8. Tsai, C. P., Chen, H. B. and Hsu, J. R. C. (2001). “Calculations of wave transformation across the surf zone,” Ocean Engineering, Vol. 28(8), pp. 941-955.
 9. Watanabe, A. and Maruyama, K. (1986). “Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking,” Coastal Engineering in Japan, Vol. 29, pp. 19-39.
 10. 蘇青和等人 (2012) 「2011 年臺灣海氣地象觀測資料年報 (臺北港) (上、下冊)」，交通部運輸研究所，研究報告 MOTC-IOT-101-H2DA001e-11。

橋梁殘餘壽齡與保全評估模式建立之研究

鄭明淵 國立臺灣科技大學營建工程系 特聘教授
邱建國 國立臺灣科技大學營建工程系 副教授
吳育偉 國立臺灣科技大學營建工程系 博士後研究員
林雅雯 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員
涂梓隆 國立臺灣科技大學營建工程系 碩士

摘要

臺灣受季風氣候影響及位處地震帶，因此颱風與地震頻傳，橋梁飽受各種天然災害侵害，如地震、颱風及材料劣化等，橋梁往往須於其壽齡內花上大筆費用進行維護補強工作，此外在人為使用方面，亦有車輛超載問題。如何從現有橋梁之健康度評估在不同時間點進行維護之延壽與經濟效益，考量公路橋梁管理單位維護經費限制下，如何將有限資源做最有效運用將是迫切的課題。因此，本計畫考量公路橋梁管理單位在年度維護預算有限情形下，無法同時對所有橋梁進行全面檢測與修復之工作，工務段難以針對轄區內橋梁進行預算分配及維護成本估計，所以依不同橋梁現況有效投入成本進行維護與補強工作更顯重要。故本計畫將各橋梁損壞社會風險成本及公路管理單位年度維護預算限制等因子納入考量，同樣應用生物

共生演算法 (Symbiotic Organism Search, SOS) 求得群橋生命週期內，與有限經費下之最適維護策略，達到最佳經濟效益，節省橋梁管理單位維護補強經費。

一、前言

臺灣多屬多山多谷，爰建造公路系統時，常需興建橋梁來跨越自然之阻礙。橋梁除具有跨越河川及山谷、聯絡外地之功能，亦擔負起維繫經濟動脈之重要使命。且臺灣地處環太平洋地震帶與受太平洋季風區影響，颱風與地震頻繁，因而加速橋梁元件老化，再者，隨著臺灣地區橋梁建設趨於飽和，橋梁重點由新建轉成維護，橋梁如未適時做適當的維護補強修復，提升橋梁安全與壽命，一旦橋梁遭受到天然災害，將導致橋梁損壞，危及用路人之旅行與安全。因此，橋管單位如何在年度預算限制下，規劃群橋生命週期維護策略，以提升橋梁壽齡，

為一重要且刻不容緩的問題。

臺灣橋梁承受各種天然災害侵害，包括橋梁元件老化、颱風及地震等。在元件老化方面，由於臺灣屬海島型氣候，環境中充滿鋼筋腐蝕老化的因子，橋梁往往須在其壽齡中，耗費大筆經費進行維護與補強工作。在洪水方面，因每年颱風、豪大雨及近年來氣候變遷、河床下降嚴重等因素，造成河水暴漲，橋台及橋墩基礎處之河床發生劇烈沖刷，對原本已裸露之橋基，災情更形惡化，致使橋梁易受沖刷而導致損壞。而地震方面，頻繁的地震事件會造成許多橋梁不同程度的損壞，而早期老舊橋梁的耐震能力更有不足之疑慮，亟待補強。近年來，許多橋梁由於過去施工技術不足，加上施工品質未能嚴謹控制，造成未屆設計年限，卻面臨拆除或需花費龐大金額進行維護補強，對於政府日漸拮据之財務狀況，無疑是雪上加霜。因此，橋梁耐久性與安全性日益受到重視，橋管單位如何在適當時間，選擇適當的方法，進行維護補強修復，以提升橋梁安全與壽命，為目前國內橋梁維護迫切亟需解決的重要課題（鄭明淵等，2014）[1]。

要維護甚至延長橋梁壽命，維持橋梁安全可靠的運輸狀況，除了規劃設計與施工品質妥善以外，維護工作也非常重要，而完善的維護作業有賴

於完整適當的橋梁檢測制度與系統之建立，安全檢測工作的實施，以及檢測後所做的性能評估、修繕、補強與維護管理。目前國內橋梁管理單位擬定橋梁維護策略之實務作法，係以目視檢測結果(D.E.R.&U.)作為判定橋梁是否應進行維護之決策依據，此一作法並未將洪水沖刷、地震等不可視潛勢危害所造成之橋梁內在損傷因素納入考慮，且未以生命週期角度完整評估橋梁風險。再者，橋梁每年之維護預算有限，每一橋梁管理單位管理之橋梁數量介於300至600座，因此在考量可視風險與潛勢危害，及橋梁重要性與用路人成本損失之條件下，如何排定橋梁維護優先順序及成本，從生命週期角度求得群橋維護的最適時機與最小維護總成本，為橋管單位亟待探討的議題。

有鑒於此，針對橋梁生命週期維護策略之探討，本計畫首度提出可視(Visible)與不可視(潛勢)(Invisible)危害二風險類別，並將橋梁在維護或是斷橋風險下造成經濟損失之用路人成本納入考量，建立橋梁維護風險成本分析模式。可視危害部分主要考量元件老化風險因子，而不可視危害則包括洪水沖刷與地震二因子，然後應用風險期望值(風險成本)的觀念，分別計算各因子在橋梁生命週期內可能造成之損壞機率與維護成本，再以兩

者相乘積和，進一步建立群橋風險指標 E (Cost) 與評估模式。

本模式依據所搜集地震及 200 年洪峰等歷史資料，應用蒙地卡羅模擬，求得橋梁損壞機率。因橋梁不同破壞程度所需維護成本不同，目前國內橋梁維護成本歷史資料，以 TBMS (Taiwan Bridge Management System) 最為完整，然而該資料庫中之資料係在某一破壞程度 CI (Condition Index，橋梁整體狀況指標) 所花費的維護費用，無法從歷史資料推論求得其他破壞程度所需維護成本。因此本計畫擬應用人工智慧 AI (Artificial Intelligence) 推論模式，找出歷史案例中輸入值 (D.E.R.&U.) 與輸出值維護成本之映射關係。後續評估橋梁可能維護成本時，可根據 (D.E.R.&U.) 中的 CI 與 SSI (Scouring Stability Index) 指標下降趨勢，推論不同破壞程度下，所需之維護成本。

由於每一橋梁在不同時間點執行維護會有不同之效益，亦即維護方案執行後，使設施保持堪用狀態或延續壽命的程度可能會有所差異，其損壞機率與維護成本不同，因此工程處針對轄區內橋梁擬定維護策略時，除考量因老化、洪水與地震造成之風險影響成本外，亦須將各橋梁用路人直接成本及橋管單位年度維護預算限制等因子納入考量，以排定維護優先順序

與決定維護時機，有效分配橋梁維護預算。但其組合眾多，因此本計畫使用生物共生演算法 (Symbiotic Organism Search, SOS) 作為最佳化模式之理論，並以生命週期成本導向之概念建置「群橋生命週期維護策略最佳化之模式」，同時考量各橋梁所評估之現況及風險影響程度，進而輔助橋梁管理單位針對群橋進行維護時機及經費估計，依不同橋梁現況有效投入經費進行維護與補強工作。分析結果可提供橋管單位在維護階段，從生命週期成本 (Life Cycle Cost, LCC) 的角度規劃群橋最佳維護時機與成本，在有限維護經費條件下達到最佳經濟效益。

二、研究範圍

本計畫選定的研究對象為公路總局所管理的混凝土橋梁，因公路總局所轄橋梁遍及臺灣各地，是最具有代表性的單位，且其在 TBMS 系統建置的資料最齊全。另外根據統計，臺灣橋梁以鋼筋混凝土結構為應用最廣的類型，其中，有 95% 以上為混凝土橋梁，且 75% 以上橋齡高於二十年以上，橋梁強度堪慮。目前公路總局管理之省縣道橋梁，五個工程處加總共有 2590 座。本計畫所規劃各工程處群橋維護週期以 20 年為期，而設定 20 年的考量，是因為依據過去歷史資料顯示，政府在 8~10 年間，會因應橋梁受損狀

況，編列特別預算，進行全面橋梁檢視與補強，同樣地一旦橋梁經全面補強後，平時之橋梁維護亦需重新規劃。考量此需求，本計畫提供年限設定之彈性，橋梁管理單位可依實際需求，設定求得 20, 25, 30 年維護週期之維護策略。另外，本計畫設定元件老化、洪水及地震為三個獨立事件，不考量多重災害之影響。

三、群橋生命週期維護策略最佳化模式之建立

本研究發展建立一群橋生命週期維護策略最佳化之模式，群橋之定義為同一工程處管理之橋梁。橋梁風險評估模式中考量之風險因子分為可視風險（Visible）：元件老化與潛勢危害（Invisible）：洪水與地震，然後根據各風險因子分析計算風險成本，再加入用路人風險成本。本研究主要包含 4 個步驟。以下按照研究步驟依序論述，如圖 1 所示。

以下分別敘述各部份工作內容。

步驟一、橋梁風險評估模式：

本階段首先針對本土橋梁進行風險辨識，篩選風險因子，其包括元件老化、洪水、地震等，發展橋梁風險評估模式，並將用路人風險成本納入橋梁風險評估模式，模式中求得之橋梁維護風險期望值（風險成本）定義為橋梁綜合能力指標，並按此一指標，

作為求解群橋生命週期最適維護時間及最小總成本之依據。

步驟二、橋梁維護機率：

本階段將評估各風險因子之維護發生機率。元件老化與洪水部分，將依據不同橋梁類型，蒐集 TBMS 歷史檢測紀錄，迴歸找出 CI 及 SSI 下降趨勢，再應用蒙地卡羅模擬因元件老化、洪水沖刷造成橋梁需維護或重建之機率。地震則是以地震潛勢機率模型計算求得各橋梁所在地之 PGA。再考量橋梁現有耐震強度（ A_y, A_c ），評估橋梁地震損失進而求得橋梁地震損傷指標，並以蒙地卡羅模擬找出橋梁地震損傷需維護及重建之機率。

步驟三、橋梁風險影響程度：

將橋梁檢測歷史紀錄與維護補強案例庫連結，可建置不同檢測結果（CI 及 SSI）對應補強成本歷史案例庫，然後應用人工智慧推論模式，找出案例資料中輸入值（CI 及 SSI）與輸出值維護成本之映射關係，再依據迴歸橋梁檢測資料所得之橋梁損壞下降趨勢，求得不同年限下元件老化程度（CI）與洪水沖刷程度（SSI）值，作為前述 AI 輸入值，以推論求得可能維護成本。地震部分擬參考阪神地震文獻建議使用不同損傷超越機率所對應之風險成本計算求得。

步驟四、群橋維護成本最佳化：

本部分流程將分成三部分完成，

分別為橋梁用路人成本評估 $E(UC)$ 、生物共生演算法最佳化搜尋與群橋生命週期維護成本最佳化成果。用路人成本評估橋梁維護或是車輛改道額外增加之成本損失。另外，生物共生演算法最佳化搜尋分別計算不同維護方案之風險影響程度，找出符合預算限

制下，最低生命週期成本 $EGT(Cost)$ 之維護時機組合。最後，群橋生命週期維護成本最佳化成果可提供橋管單位從生命週期成本 (LCC) 的角度，規劃群橋最佳維護時機及成本，在有限維護經費條件下達到最佳經濟效益。

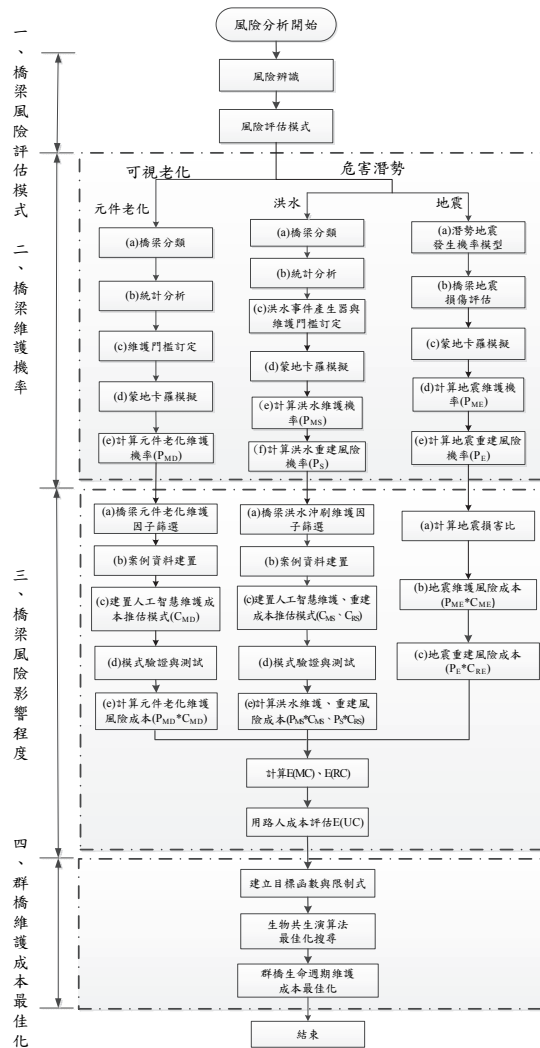


圖 1 橋梁風險評估及維護策略模式建置流程

3.1 橋梁風險評估模式

本階段首先針對本土橋梁進行風險辨識，分析確認橋梁可能遭受的風險類別，然後利用影響圖篩選各類風險之風險因子，建置一橋梁風險評估模式，計算求得橋梁綜合能力指標。本研究參考相關文獻[2]，應用影響圖初步確認橋梁之風險因子包括：承載及使用、元件老化、氣候、地震、洪水等。其中承載及使用屬於橋梁元件老化所造成之風險，故以元件老化代表作為其風險因子，加上自然環境之潛勢危害風險因子洪水及地震，共歸納成三項風險因子。再依此進一步辨識確認造成橋梁損傷及破壞之影響原因，如圖 2 所示。

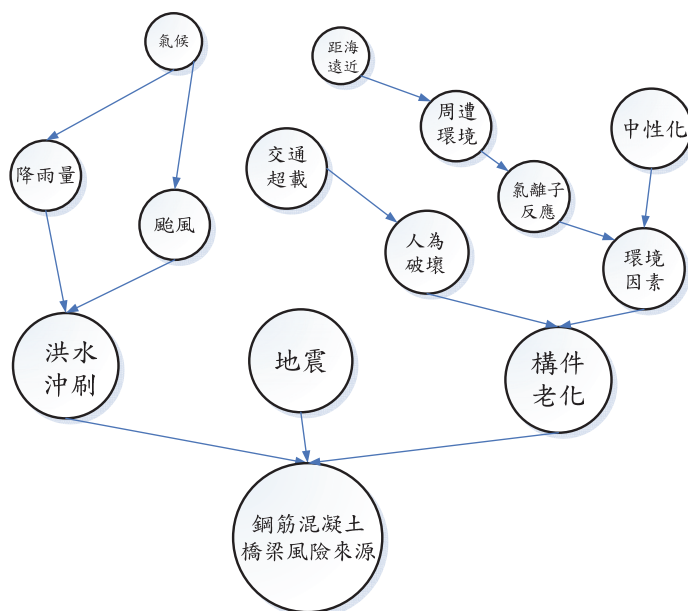


圖 2 橋梁風險因子影響圖

本研究風險類別分為可視危害（Visible）與潛勢危害（Invisible）二部份，如圖 3 所示。其中可視危害主要考量元件老化風險因子，其風險指標為平時 D.E.R.&U. 檢測可得之狀況指標（CI，Condition Index），風險評估採用蒙地卡羅模擬求得元件老化維護之發生機率。而潛勢危害則包括洪水沖刷與地震二因子，洪水沖刷部分採用 SSI 值作為風險指標，在風險評估方面

則採用蒙地卡羅模擬不同重現期之洪水事件，以求得橋梁因洪水造成損傷之機率。地震風險指標使用考慮材料劣化影響之結構耐震容量（ A_y 及 A_c ），同樣應用蒙地卡羅模擬生命週期地震事件，再結合受損結構性能修正模型來評估因地震累積損傷影響之風險機率。風險影響程度將維護、重建風險成本和用路人成本損失納入。

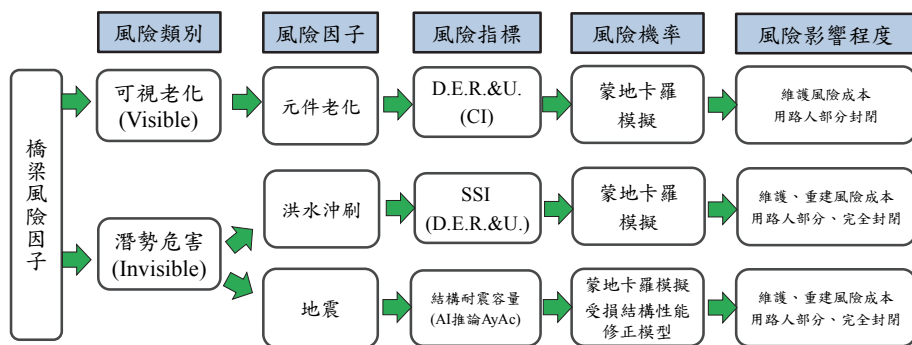


圖 3 橋梁風險評估模式

在群橋維護策略最佳化問題中，除需考量因老化、洪水、地震而造成之維護風險成本 $E(MC)$ 及重建風險成本 $E(RC)$ 外，亦須將用路人成本之損失 $E(UC)$ 納入。本研究根據風險評估模式之因子，以風險期望值之概念，建立橋梁維護之風險期望值 $EB(Cost)$ 。

3.2 橋梁維護機率

風險辨識部分已將風險類別分為可視老化 (visible) 與潛勢危害 (invisible)，其中可視老化中元件老化為風險因子，其風險指標為平時 D.E.R.&U. 檢測可得之狀況指標 CI 值，透過蒙地卡羅模擬求得維護機率。潛勢危害部分可分為地震及洪水沖刷為主要原因，洪水沖刷部分採用現行 SSI 值作為風險指標，亦採用蒙地卡羅模擬洪水事件以進行風險評估。地震則是以地震潛勢機率模型求得各橋梁所在地之 PGA，再考量橋梁現有耐震強度 (A_y, A_c)，求得橋梁地震損傷指標，再以蒙地卡羅模擬找出橋梁地震損傷需維護及重建之風險機率。橋梁維護與重建機率可分成五個部分 (PMD、PME、PMS、PS、PE)，依元件老化、洪水、地震順序介紹，按模擬步驟分別求得各橋梁 1~20 年之維護機率。

3.2.1 橋梁元件老化維護機率

可視老化中元件之狀況，會隨著

時間而變化，因此元件老化隱含了許多不確定性，本研究以統計的概念找出同類型橋梁不同維護時間間隔下狀態指標 CI 值之機率密度函數，風險評估部分採用蒙地卡羅模擬求得元件老化維護之發生機率，其步驟如下，詳細步驟說明如下。

(a) 橋梁分類

本研究收集整理臺灣橋梁管理系統中歷年調查結果，將影響可視老化之因素如結構型式、距海遠近、交通流量等因子作為分組之依據，並假設同一類型橋梁其元件老化狀況類似。

(b) 統計分析 (CI 與橋齡)

根據 TBMS 檢測歷史資料，利用迴歸分析找出每一座橋梁橋齡與 CI 之關係式，求得該橋 CI 值下降趨勢，亦即斜率。並計算同類型同組之橋梁 CI 下降平均值與標準差。本研究將以梁式橋第 1 組中之復興三橋為例，將橋齡設為 X 軸、CI 值設為 Y 軸，進行迴歸分析，求得該橋之 CI 值下降趨勢，亦即斜率。

同理迴歸求得其餘 126 座橋梁之 CI 下降趨勢 (斜率)，並以同組橋梁依距海遠近及車流量進行分類，再計算該組 127 座橋梁斜率之平均值與變異數為 0.23 及 0.047，如下表 1。再依此求得梁式橋 CI 值下降趨勢。

表 1 相關參數表（以梁式橋為例）

組別	距海遠近 (m)	車流量 (次/日)	下降平均值	下降變異數
1	<300	<6000	0.230	0.047
2	<300	6000~12000	0.056	0.001
3	<300	>12000	0.405	0.000
4	300~1000	<6000	0.229	0.094
5	300~1000	6000~12000	0.060	0.001
6	300~1000	>12000	0.405	0.000
7	1000~3000	<6000	0.201	0.096
8	1000~3000	6000~12000	0.048	0.001
9	1000~3000	>12000	0.405	0.000
10	>3000	<6000	0.275	0.552
11	>3000	6000~12000	0.242	0.053
12	>3000	>12000	0.284	0.048

(c) 維護門檻訂定-元件老化

本研究透過文獻與歷史資料擬定維護門檻 CI 值，依據以往 TBMS 資料庫中歷史維護記錄，以各類型橋梁最

後一次維護時 CI 為建議維護門檻，經過統計各橋梁的維護時機點皆不同，因此本研究初步設定以 CI 值 83 分作為維護門檻值搜尋範圍。

(d) 蒙地卡羅模擬-元件老化

以某一座橋梁為例，該橋為梁式橋，分析其距海遠近與車流量應為第 1 組，以 CI 下降趨勢平均值與變異數，作為蒙地卡羅模擬之輸入(如圖 4 所示)，模擬 10000 次，找出橋梁於未來各時間點 CI 小於門檻值 83 分之累計次數，除以模擬次數即為橋梁因可視危害所造成之維護機率。

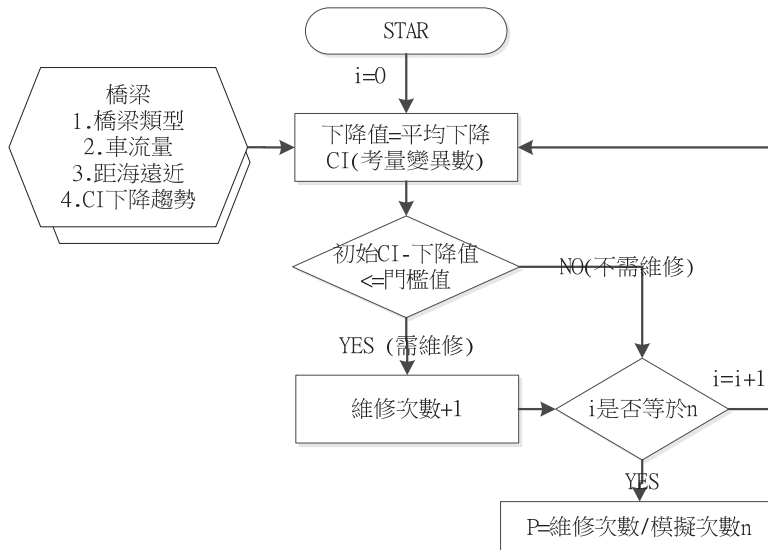


圖 4 可視危害造成維護機率蒙地卡羅計算流程圖

(e) 計算元件老化維護機率 (PMD)

以門檻值 83 分為例，在 10000 次蒙地卡羅模擬中，總計有 1700 次橋梁的 CI 值低於 83 分，故 $PMD=1700/10000=17\%$ 。

3.2.2 橋梁洪水維護與重建機率

洪水狀況隱含了相當多的不確定性，在橋梁未來生命週期中可能會發生不同大小的洪水事件。本研究藉由

TBMS 歷年 SSI 調查記錄與水利署水位站監測記錄，統計分析找出各年度 SSI 下降值與當年對應之洪水重現期之關連性。並導入可靠度的觀念，以蒙地卡羅模擬橋梁受洪水影響而需維護或重建之機率。

3.2.3 橋梁地震維護與重建機率

此階段主要評估橋梁於維護間隔 (Δt) 時間之地震風險，參考交通部運輸研究所之橋梁通阻跨河橋梁分析模型 (2011) [2]，分析步驟依順序應用潛勢地震發生機率模型、橋梁地震損傷

評估方式評估橋梁地震維護機率。詳細步驟說明如下：

(a) 潛勢地震發生機率模型

本部分參考文獻國家地震工程研究中心所執行之計畫[3]，「最具潛勢及歷史災害地震之強地動模擬」(2005)。本研究採用計畫中所提出之數學機率模型，建立臺灣地區一般性震源、活動斷層之潛勢地震發生機率模型，並依機率模型推估未來臺灣 1~20 年之地震發生次數與機率。圖 5 為此模型之分析流程。

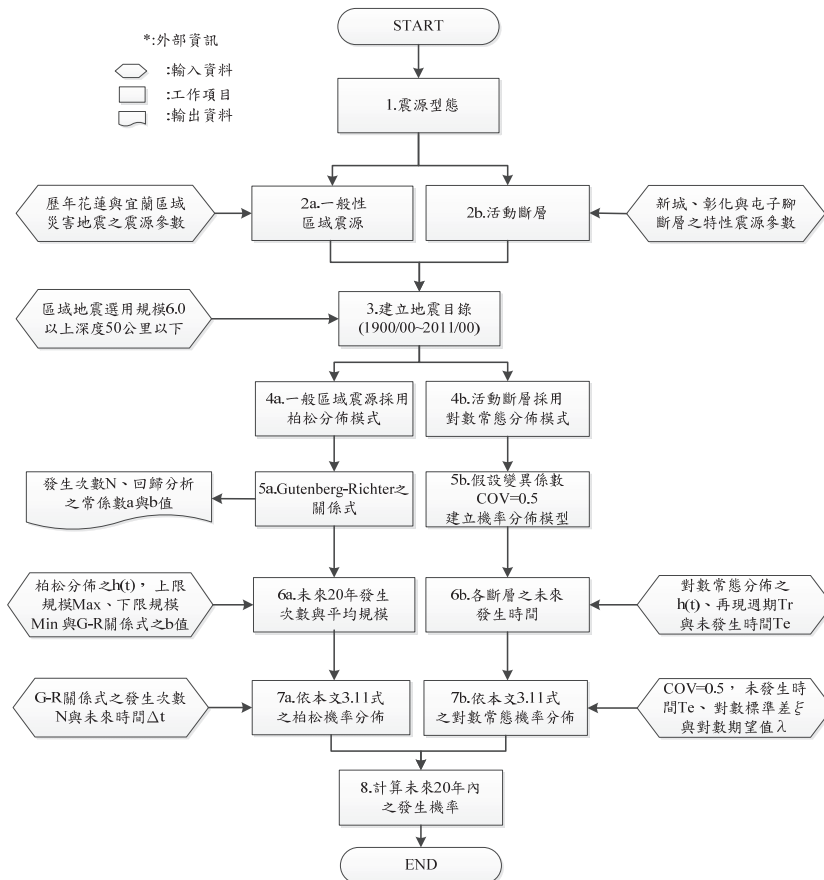


圖 5 潛勢地震發生機率模型之流程圖

(b) 橋梁地震損傷評估

本節採用文獻[2]中所建置之側推模式（Pushover），依側推分析所得之等值單自由度結構特性參數，並利用武田模式（Takeda model）進行橋梁之非線性動力分析。依橋梁所在位置之劣化影響及考慮 20 年可能遭遇之地震，計算其地震損傷指標。分析流程可參考圖 6 所示。

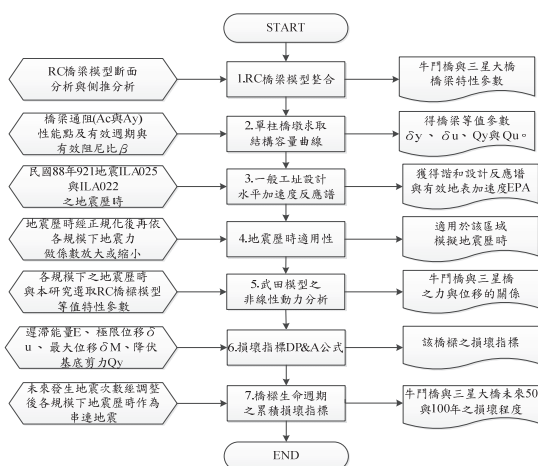


圖 6 橋梁地震損傷評估流程圖

(c) 蒙地卡羅模擬

本研究依據蒙地卡羅模擬地震發生序列，並假設橋梁在維護間隔 Δt 年，未來因地震所造成的累積損傷，流程如圖 7。設定模擬次數 10000 次，依橋梁累積損傷計算橋梁地震破壞機率。

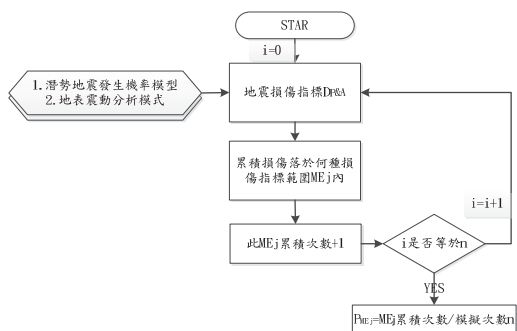


圖 7 地震造成維護機率蒙地卡羅計算流程圖

(d) 計算地震維護機率 (P_{ME})

根據損傷指標 (DP&A) 範圍將損壞等級分為五個等級，然後應用蒙地卡羅模擬結果，繪製使用年與不同損壞分級之維護機率 (PME)。

Park and Ang (1985) 所發展出之 PA 準則主要用於結構物震後損壞程度判斷依據，目前已被廣泛使用於 RC 結構桿件或系統；根據損傷指標 (DP&A) 範圍將損壞等級分為五個等級，而與地震損傷指標關係可參照學者高橋稔明日本阪神大地震之統計分析結果 (2005) [4]，如表 2 所示，PA 模型之損壞指標主要依據地震作用下結構物之最大變形反應與反覆載重下遲滯迴圈之消散能量（即每一振動迴圈遲滯阻尼所消散之能量）進行評估。

表 2 RC 結構物之損傷指標

損壞分級 (ME _j)	損傷指標 (DP&A)	損壞程度之描述
無損傷 ME ₁	<0.1	外部輕微裂縫非結構元件出現
輕微損傷 ME ₂	0.1-0.2	結構元件出現微小裂縫
中度損傷 ME ₃	0.2-0.4	隔間住上下兩端出現撓剪裂縫。非結構元件出現明損壞。
重度損傷 ME ₄	0.4-0.1	混凝土橋柱之核心混凝土碎裂，箍筋嚴重鬆脫，主筋挫屈。
完全崩塌 ME ₅	>1.0	混凝土橋柱之核心混凝土嚴重碎裂脫離，喪失承載能力，橋柱倒塌趨勢。

本階段應用蒙地卡羅模擬結果，繪製使用年與不同損壞分級之維護機率 (PME)。以圖 8 之繪製方法為例，在 10000 次蒙地卡羅中，橋梁於第 5 年時，其損傷指標 (DP&A) 介於 0.1~0.2 的次數共 850 次，則對應之損傷分級落在輕微損傷之機率為 $850/10000=8.5\%$ 。以此類推，即可匯出圖 15 之關係曲線。

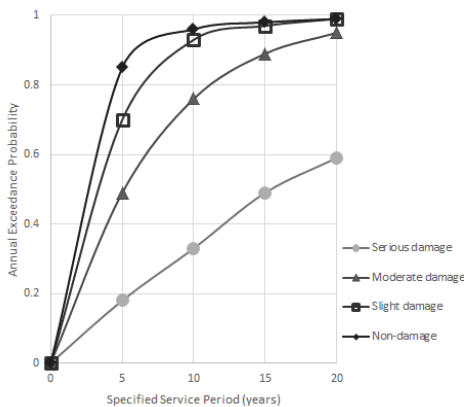


圖 8 未來損傷分級機率關係曲線

(e) 計算地震重建風險機率 (PE)

由前一階段所求得之完全崩塌機率曲線，即為橋梁在不同使用年限時，因地震造成斷橋重建風險機率 (PE) 的

曲線。例如，在 10000 次蒙地卡羅中，其損傷分級落在完全崩塌之次數總計有 8 次，因此可得到地震造成重建機率 $PE=8/10000=0.08\%$ 。

3.3 橋梁風險影響程度

本研究將橋梁破壞後，維護達原設計水準 90% 所花費之成本，然後乘上橋梁維護或重建之風險機率定義為風險影響程度 (高橋稔明, 2005) [4]。有鑑於此，本研究分別建立檢測歷史紀錄、元件老化與洪水橋梁維護案例資料，藉由檢測歷史紀錄與維護案例資料之連結，可得不同損壞狀態下 (CI 及 SSI) 所對應之維護成本。然後應用人工智慧推論模式，以 CI 及 SSI 等因子為輸入，維護成本為輸出，建立橋梁老化、耐洪維護成本推估模式，以預測未來橋梁分別因老化與洪水維護所需花費的成本 (CMD&CMS)。地震部分則參考日本阪神地震之文獻，依據前一階段所求得橋梁各損傷指標發生機率，先乘上此指標所對應損害分級之損害比，加總後再乘上興建成本即為橋梁因地震風險下所需成本。用路人成本部分利用重要性影響因子建立用路人成本評估模式，蒐集各橋梁之參數資料，經由計算求得。最後橋梁因老化與洪水因素所需花費的維護成本 (CMD&CMS) 分別與因老化與洪水維護機率 (PMD&PMS) 相乘，再加

上橋梁因地震風險下所需維護成本，即可得到橋梁風險下維護風險成本 $E(MC)$ 。而洪水與地震橋梁重建成本與橋梁重建機率相乘即可得到橋梁在損害風險下之重建風險成本 $E(RC)$ 。另外將各風險因子維護機率乘上部分封閉用路人成本，加上不可視因子重建機率乘上完全封閉用路人成本即可得到用路人成本 $E(UC)$ 。本階段利用上章節獲得之橋梁維護機率(P)結合本章推估之橋梁維護成本(C)，應用人工智慧推論各橋梁風險影響程度。

3.4 計算 $E(MC)$ 、 $E(RC)$

本步驟將計算元件老化、洪水、地震而造成之維護風險成本 $E(MC)$ 及重建風險成本 $E(RC)$ 。 $E(MC)$ 計算之方法為加總各風險因子之維護風險成。另外， $E(RC)$ 計算之方法為加總洪水與地震之重建風險成本。

3.5 用路人成本評估 $E(UC)$

本階段將蒐集重要性非直接成本因子，並彙整相關用路人成本文獻，並經由篩選將重要性非直接成本因子量化成用路人成本，待確認用路人成

本之量化公式後，本研究將收集用路人成本公式之相關資料與各橋梁之統計數據，如替代道路長度與車流量等，概算出橋梁部分封閉與完全封閉狀況下所額外增加之成本。

3.5.1 用路人直接成本評估模式

用路人成本概算表編號分成三大類。第一類為旅行延時成本，考量道路狀況分成部分封閉（維護時間間隔下，下次橋梁維護造成交通擁擠或是車流型態變化，而造成之用路人損失）與完全封閉（因洪水或是地震造成橋梁斷橋而道路中斷，用路人因橋梁封閉需改道行駛替代道路來抵達目的地之成本損失）。第二類為車輛運行成本，也分成部分封閉與完全封閉。第三類為事故發生成本，經由文獻（蘇振維，1991）[5]可得知，施工期間施工區肇事機率無明顯增加（ $A_n=A_a$ ），因此本研究不考慮橋梁部分封閉之事故發生成本，故僅考慮完全封閉。另外，商家損失因不易評估，所以本研究僅考慮用路人成本。用路人直接成本概算表如表 3 所示。

表3 用路人直接成本概算表（元/天）

類別 編號	用路人成本			
	成本項目	道路 狀況	計算公式	說明
I	旅行 延時成本	部分 封閉	$(\frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n}) \times ADT \times W \times NP$	L 為因子橋梁長度與改造長度量化部分 L：維修影響的道路長度(Km) L'：橋梁的改造長度(Km) S 為道路等級量化之部分，因不同道路等級平時車行速度不同 Sa：維修時車行速度(Km/hr) Sn：平日車行速度(Km/hr)
		完全 封閉	$(\frac{L'}{S_n} - \frac{L}{S_n}) \times ADT \times W \times NP$	
II	車輛 運行成本	部分 封閉	$(\frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n}) \times ADT \times r$	ADT 為橋上交通量量化部分 ADT：每日平均交通流量(輛/日) W：旅行平均每小時時間價值(元/hr) NP：平均乘載駕駛人 r：車輛平均每小時燃料及折舊成本(元/hr) An：車輛事故發生率(次/百萬輛公里) Ca：每次事故成本(元/次)
		完全 封閉	$(\frac{L'}{S_n} - \frac{L}{S_n}) \times ADT \times r$	
III	事故發生 成本	完全 封閉	$(L' - L) \times ADT \times A_n \times C_a$	

3.5.2 旅行延時成本（Daily Traveler's Time Value）

用路人成本類別的第一類為旅行延時成本，為道路因橋梁維護或是災害發生時造成使用者旅行時間之延滯所帶來之成本損失。另外，延滯成本之產生也可能是由於道路進行工程施工時，造成交通擁擠或車流型態變化而造成旅行時間相對增加。其中施工期間之長短決定於施工作業量及施工效率，施工延時越長對於交通旅次將產生越大的衝擊。

3.5.2.1 旅行延時成本（部分封閉）

公式1為部分封閉的旅行延時成本計算公式，單位為（元/天）。

$$(\frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n}) \times ADT \times W \times NP \quad (1)$$

參數名詞意義與說明

L= 維護影響的道路長度(Km)，為橋梁之長度。

Sa= 維護時車行速度（Km/hr）。依照2012年交通部公路總局快速公路施工交通管制手冊[5]之規定，相鄰兩最高速限標誌行車速度不得大於20公里，因此本研究假設Sa為Sn速限降低20公里。

Sn= 平日車行速度(Km/hr)。依照交通部運輸研究所的第三期台灣地區運輸系統規劃-旅運特性與交通調查分析評估研究計畫（1995）[7]，其中，道路的平均車流速率可以依照道路等級設定，本研究依道路類別區分道路等級，如表4所示，本研究之橋梁所在道路類別有省級及縣級，因此根據橋梁所屬類別可找出各橋之平均自由車流速率。

表4 道路等級與平均車流速率

道路等級	道路類別	自由車流速率 (公里/小時)
2	(省級) 主要道路	50
3	(縣級) 主要道路	45

ADT=每日平均交通流量（輛/日）。可查詢 TBMS 系統，部分資料缺漏部分將使用交通部公路總局公路統計資訊（2014）[7]公布各路段之車流量。

W= 旅行平均每小時時間價值（元/hr），引用學者賴禎秀之研究[9]，按2003 年運輸計畫季刊開車通勤者時間價值之模式研究，其考量可用時間、所得等各項限制條件，結果顯示車輛排隊等候時間價值每人約為每小時 98.8 元（經過基期換算後為每小時 115 元）。

NP=平均乘載人數。由於橋梁可供不同車種之交通工具行駛如機車、汽車、大客車等，而各車種之平

均載客數又不相同。本研究依據運研所公路車輛行車成本調查（張杏珍，2000）[10]，統整出不同車種的平均載客數。並彙整中華民國交通部公路總局公路統計資訊（2014）[11]各區各車種之平均車流量，可算出各車種佔該區路線之百分比，最後乘上各車種之平均載客數，相加後得到該區之平均乘載人數。

表5為各區工程處各車種之平均車流量，各車種可依照各區車種百分比乘上其平均載客數得到那一區之車種平均載客數。如二區工程處其平均乘載人數為 1.887 人。

表 5 各區各車種之平均乘載數

區域	項目	機車	小型車	大客車	大貨車	聯結車	總和
第一區	平均車流量	5296	10423	227	310	250	16505
	車種百分比	32.09%	63.15%	1.38%	1.88%	1.51%	1
	車種平均乘載數	0.353	1.263	0.297	0.024	0.017	1.954人
第二區	平均車流量	1516	3400	47	146	54	5163
	車種百分比	29.35%	65.84%	0.92%	2.83%	1.05%	1
	車種平均乘載數	0.323	1.317	0.198	0.037	0.012	1.887人
第三區	平均車流量	2311	2369	37	61	10	4788
	車種百分比	48.27%	49.47%	0.77%	1.28%	0.20%	1
	車種平均乘載數	0.531	0.989	0.167	0.017	0.002	1.706人
第四區	平均車流量	1439	4852	118	138	78	6626
	車種百分比	21.72%	73.23%	1.79%	2.09%	1.18%	1
	車種平均乘載數	0.239	1.465	0.386	0.027	0.013	2.129人
第五區	平均車流量	3158	6073	73	205	88	9597
	車種百分比	32.90%	63.28%	0.76%	2.14%	0.92%	1
	車種平均乘載數	0.362	1.266	0.165	0.028	0.010	1.830人

3.5.2.2 旅行延時成本（完全封閉）

公式 2 為完全封閉的旅行延時成本計算公式，單位為（元/天）。

$$\left(\frac{L'}{S_n} - \frac{L}{S_n} \right) \times ADT \times W \times NP \quad (2)$$

參數名詞意義與說明

L = 維護影響的道路長度 (Km)。

L' = 改道長度 (Km)，為車輛行駛替代道路的長度。資料來源係使用 TBMS 系統上之資料，部分缺漏之資料則以查閱地圖之方式判定求得。

Sn = 平日車行速度 (Km/hr)。

ADT = 每日平均交通流量 (輛/日)。

W = 旅行平均每小時時間價值 (元/hr)。

NP = 平均乘載人數。

3.5.3 車輛運行成本 (Daily Vehicle Detouring Cost)

非直接成本因子類別的第二類為車輛運行成本。可能為道路施工管制期間，因工程需要橋梁必須全面封閉施工，此時原行駛車流將移轉到鄰近替代道路通行，或是因道路部分封閉造成車流速度降低或是交通擁塞，因而除了影響鄰近道路交通量，也同時增加了用路者行車成本。

3.5.3.1 車輛運行成本 (部分封閉)

公式 3 為部分封閉的車輛運行成本計算公式，單位為 (元/天)。

$$\left(\frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n}\right) \times ADT \times r \quad (3)$$

參數名詞意義與說明

L = 維護影響的道路長度 (Km)。

Sa = 維護時車行速度 (Km/hr)。

Sn = 平日車行速度 (Km/hr)。

ADT = 每日平均交通流量 (輛/日)。

r = 車輛平均每小時燃料及折舊成本為 13 (元/小時)。

3.6.3.2 車輛運行成本 (完全封閉)

公式 4 為完全封閉的車輛運行成本計算公式，單位為 (元/天)。

$$\left(\frac{L'}{S_n} - \frac{L}{S_n}\right) \times ADT \times r \quad (4)$$

參數名詞意義與說明

L = 維護影響的道路長度 (Km)。

L' = 改道長度 (Km)。

Sn = 平日車行速度 (Km/hr)。

ADT = 每日平均交通流量 (輛/日)。

r = 車輛平均每小時燃料及折舊成本 13 (元/小時)。

3.5.4 事故發生成本 (Accident Occurrence Cost)

非直接成本因子類別的第三類為事故發生成本。當駕駛人行駛於道路時就會有發生事故的可能，當事故一旦發生即可能造成使用者生命財產之損失。經由文獻 (蘇振維, 1991) [5] 可得知施工期間施工區肇事機率無明顯增加 ($A_n = A_a$)，因此本研究不考慮橋梁部分封閉之事故發生成本，僅考慮完全封閉車輛行駛替代道路造成之事故發生成本。計算公式之相關參數解釋如下。

$$(L'-L) \times ADT \times A_n \times C_a \quad (5)$$

參數名詞意義與說明

L= 維護影響的道路長度 (Km)

L'= 改道長度

ADT=每日平均交通流量 (輛/日)

An= 車輛事故發生率，從交通部交通統計月報之道路交通事故及違規概況[12]，可得知車輛交通事故 97 年~102 年每年的平均肇事率為 102.34 次/萬輛，且每輛車一年之駕駛里程為 12,808 公里(交通部統計處，2011) [13]，兩者相除後可得到車輛事故發生率為 0.799 次/百萬輛公里。

Ca= 每次事故成本=每次事故(受傷+死亡)成本(元/次)。每次事故成本可以分成交通事故受傷成本與交通事故死亡成本。由 97 年~102 年交通統計月報之道路交通事故及違規概況[14]，可得知每次事故平均造成 0.00934 人死亡與約 1.33568 人受傷。將每次事故的死亡損失 96,515 元/次與每次事故的受傷損失 626,236 元/次，兩者相加後，可估算出每次事故成本(受傷+死亡)約為 722,751 元/次，在經過基期的換算後(2000 年至 2014 年)，最後可得每次事故成本約為 835,968 元/次。

3.5.5 用路人直接成本小結

綜合上述各節成本計算流程結果，可彙整公路總局所管理的 2590 座橋梁之用路人直接成本。分成部分封閉與完全封閉，將部分封閉乘上維護機率，與完全封閉乘上重建機率，兩者取平均再乘上施工天數即可求得 E(UC)。

3.6 建立目標函數與限制式

3.6.1 群橋最佳化模式之目標方程式

將各橋之風險期望成本 EB(Cost) 加總可得到群橋風險期望成本 EGT (Cost)，而群橋維護最佳化之目標方程式，係以各工程處之預算為限制條件(式 6)，找出群橋生命週期最小的風險期望成本 EGT (Cost)。

$$\text{Min}E_{GT}(\text{Cost}) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n E_{Bij}(\text{Cost}) \quad (6)$$

式中：

3.6.2 群橋最佳化模式之限制式

本模式之限制式為橋梁管理單位的維護預算，以第 i 年為例，最佳化需滿足第 i 年之預算限制。在生物共生演算法最佳化搜尋過程中會用隨機組合之方式，來找出滿足最小群橋風險成本 EGT (Cost) 同時又滿足限制式的維護策略。

3.7 生物共生演算法最佳化搜尋

在橋梁生命週期中，不同維護時

機之損壞機率與維護成本不同，其組合眾多。若以傳統試誤法等方式求解，將無法在短時間內找到答案，所以本研究應用生物共生演算法，分別計算不同維護時機點之風險影響程度與所需維護成本，進而找出最低符合預算限制與生命週期風險成本最小之維護策略組合。

生物共生演算法是以其他演算法為研究基礎所發展出的演算法，SOS 可在搜尋空間不斷地迭代候選解，進而求得全域最佳解。在 SOS 演算法中，

初始假設數值空間是一個生態系統，在這個生態系統搜尋空間中，會有一組隨機生成的生物群，生物群中的每一個生物體代表一個對應問題的候選解，同時每一個生物體在生態系統中也代表一組目標適存值 (Fitness value)，這個目標適存值會反映預期目標的適存程度。本研究使用 Matlab 撰寫群橋最佳化之程式，應用流程如圖 9，首先是橋梁相關參數輸入，再來是最佳化 SOS 搜尋

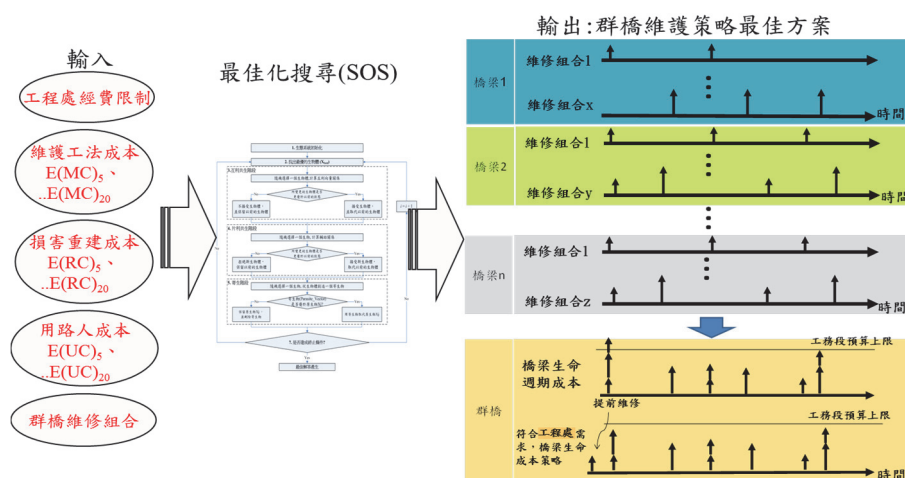


圖 9 群橋最佳化應用 SOS 演算法程序

四、驗證結果

以二區工程處為例，二區工程處目前總共管理 647 座橋梁，其橋梁維護方案有多種維護組合，SOS 會由同一工程處所有橋梁 EB(Cost) 加總所得之 EGT(Cost) 中，在小於預算限制式下，搜尋金額最低之成本組合，進而找出適合之維護策略。本研究以二區工程

處為例，二區工程處管理橋梁數量為 647 座，預算限制為每年 3,780,217,329 元（平均值加上兩倍標準差）。另外，本研究成本計算部分皆考慮基期的影響。

如圖 10 所示，目標函數最佳化搜尋結果中的 X 軸為疊代次數、而 Y 軸為最佳化之目標函數 Min EGT(Cost)。

由此可知二區工程處在每個年度皆滿足預算限制下，20 年的維護策略 Min EGT (Cost) 為 41,278,150,716 元。如表 21 所示。其維護策略為第一年維護 269 座、第二年維護 280 座、以此類推、第 20 年維護 260 座，由此可估計每年平均維護的橋梁數量為 295 座。

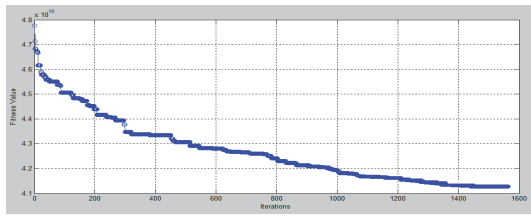


圖 10 最佳化搜尋目標函數結果

五、結論

本研究同時考量可視老化 (visible) 與潛勢危害 (invisible) 等損壞因素，導入風險概念，並以蒙地卡羅模擬計算橋梁生命週期將遭遇之災害頻率及強度，進而評估橋梁可能風險，並輔以人工智慧推論橋梁不同維護策略之維護成本。最後，使用生物共生最佳化演算法，在低於歷年維護經費限制下，搜尋最低之群橋生命週期風險成本的維護策略。

本節彙整前述之研究過程及完成之研究成果，歸納以下幾點作為結論：

1. 本研究導入生命週期成本導向之概念，建置群橋維護策略最佳化模式，決定橋梁因年限、外力影響受損之

最佳維護時機，進一步求得維護經費。

2. 本研究針對國內橋梁進行風險辨識，篩選影響橋梁安全維護之風險因子，主要包括元件老化、洪水、地震等，另外納入用路人成本之損失，以風險期望值（風險成本）之概念，發展一橋梁風險評估模式，進而確立橋梁綜合能力指標。
3. 本研究建立之橋梁綜合能力指標分別計算各因子在橋梁生命週期內可能造成之損壞機率與維護成本。機率部分依機率模型建置事件模擬器，透過蒙地卡羅模擬求得。成本部分應用人工智慧 ESIM 推估與預測各工程處內橋梁不同維護經費成本。再以兩者相乘積和，進而評估橋梁生命週期中可能造成的風險影響程度，加總得到群橋風險期望成本。
4. 考量公路橋梁管理機關在維護經費有限情形下，應用生物共生演算法建置群橋生命週期維護策略最佳化模式，搜尋風險高低順序排列，並依據預算限制找出在預算限制下需維護之橋梁名單與成本。本研究成果可建議橋梁管理機關依不同橋梁現況有效投入經費進行維護與補強工作，找出群橋最小生命週期風險期望成本維護方案。

參考文獻

1. 鄭明淵等 (2014)，*橋梁殘餘壽齡與保全評估決策模式之研究* (4/4)，交通部運輸研究所。
2. 鄭明淵等 (2011)，*橋梁通阻檢測分析模式建立研究*，交通部運輸研究所。
3. 溫國梁、簡文郁、張毓文 (2005)，*最具潛勢及歷史災害地震之強地動模擬*，國家地震工程研究中心。
4. 高橋稔明、酒井通孝、関博、松島学 (2005)，*塩害環境下における RC 構造物の LCC 算定と補修工法選定システムの開発*，コンクリート工學論文集。
5. 蘇振維 (1991)，*都市地區影響交通之重大工程施工規劃研究*，碩士論文，國立交通大學交通運輸工程研究所，新竹。
6. 交通部公路總局 (2012)，*快速公路施工交通管制手冊*，交通部。
7. 交通部運輸研究所 (1995)，*第三期台灣地區運輸系統規劃-旅運特性與交通調查分析評估*。
8. 中華民國交通部公路總局公路統計資訊 (2014)，<http://www.thb.gov.tw/TM/Default.aspx>。
9. 賴禎秀 (2003)，*開車通勤者時間價值之模式研究*，運輸計劃季刊 32 卷 3 期。
10. 張杏珍 (2000)，*公路車輛行車成本調查*，交通部運輸研究所。
11. 中華民國交通部 (2014)，*交通統計月報之道路交通事故及違規概況*，<http://www.motc.gov.tw/ch/index.jsp>。
12. 中華民國交通部 (2014)，*交通統計月報之道路交通事故及違規概況*，<http://www.motc.gov.tw/ch/index.jsp>。
13. 交通部 (2011)，*自用小客車使用狀況調查報告*，交通部統計處。
14. 陳孜穎、周榮昌、邱裕鈞、郭仲偉 (2012)，*交通事故賠償金額之研究-法院民事判決之應用*，中華民國運輸年會暨學術論文國際研討會。

地震作用下港區土層的放大效應

陳志芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副研究員

摘要

本文以港區井下陣列地震與動態水壓監測站依歷年監測資料，彙整臺北港、臺中港與高雄港等井下地震資料進行震波放大、港區土層、動態孔隙水壓等放大效應分析。篩選安平港、臺中港兩站之水平地表加速度地震資料，依建築物耐震設計規範與港灣構造物設計基準等兩種設計地震係數分析後，進行繪製地表加速度反應譜曲線。擷取高雄港監測站之強、弱震地表地震資料依日本學者 Nakamura 之單站頻譜比進行分析。最後採逸奇科技公司研發的 Visual Signal 訊號分析軟體，針對高雄港於 2006 年之強震資料進行時頻分析。研究結果顯示：(1)港區之震波放大倍率為臺北港約 3.5 倍、臺中港約 3 倍、高雄港約 4 倍。(2)安平港井下地震監測站之超額動態孔隙水壓，經分離動態水壓結果，超額孔隙水壓為 0.08Hz 以下之低頻反應，震盪動態水壓為 0.08Hz 以上之高頻反應。

一、前言

臺灣位於環太平洋的地震帶，地震活動頻繁，當地震來襲時，因港灣地區地層大都為疏鬆軟弱之沖積土層及抽砂回填土所構成，震波從震源深處向上經過軟弱的覆土層，振幅通常有放大作用。軟弱土層在強烈地震之反復作用下，土壤之孔隙水壓會逐漸上升，土壤之承载力會逐漸減低，當土壤之超額孔隙水壓上升累積至與土壤之垂直壓力相等時，即所謂土壤液化，此時，土壤的承载力會瞬間驟降甚至到零的地步，建築於其上的結構物也會因基礎失去支撐而傾斜或倒塌。

在歷史上的大地震中，例如 1985 年墨西哥 (Mexico) 地震，1988 年亞美尼亞 (Armenia) 地震以及 1989 年美國洛馬普利塔 (Loma Prieta) 地震中，皆由於軟弱土層對地震波之放大作用造成局部地區之災害。1995 年日本阪神大地震，港區新生地發生嚴重液化造成神戶港之碼頭、岸壁等港灣設施嚴重毀損。臺灣於 1999 年 921 大地震時，臺中港區亦發生土壤液化現象，造成港灣結構物的損毀。因此，於港區設

置井下地震及動態水壓監測站，以探討地震在港區之放大效應與動態水壓變化行為，並作為液化分析及港灣設施耐震設計之參考。

二、井下地震陣列監測

由於地震在鬆軟地層之放大效應，攸關港灣構造物之安全，為瞭解地震時，震波於土層中之傳遞特性，分別於最深之堅硬地盤及不同深度之軟弱土層，鑽井設置埋入型地震計及動態孔隙水壓計，以瞭解港區地層之地震放大效應。本章分別依監測站規劃、震波放大倍率、場址放大與設計反應譜等進行敘述與分析。

2.1 監測系統規劃

2.1.1 系統規劃與資料擷取

測站分別於港區自由場選擇適當位置安裝地震及孔隙水壓監測系統，水壓計安裝設計深度為地表下 4m、8m、12m、15m、20m、30m 等 6 支分置於 3 孔，埋入型地震儀深度規劃大約於地表下 15m、30m、100m、300m 等 4 組分置於 4 孔，另於地表安裝 1 部地震儀，最後藉由電纜線組合到觀測房以自動記錄方式將資料記錄儲存在電腦，監測系統規劃與流程設計如圖 2.1 所示。

地震計主要是監測地震波於不同土層的震波變化，雖分層安裝，但可以同時啟動、同步監測。記錄方式係可預設一基本激發起動值，只要震波大於起動值，系統即可自動啟動記錄。電子式水壓計是量測地下水的壓力，及地震時的水位變化，以求得強震時土壤液化的變化情形，所有地震計與水壓計資料經訊號放大後，經由配管接到觀測房的集錄器上，藉由中華電信之數位專線與 Modem 將地震資料傳回港研中心辦公室電腦儲存。

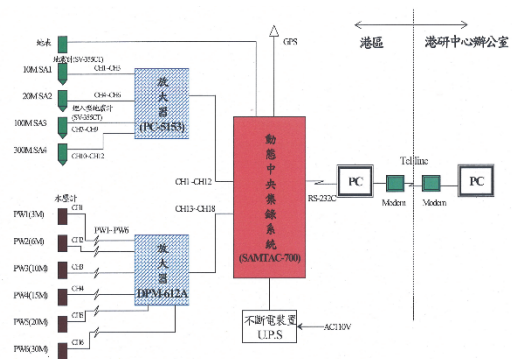


圖 2.1 港區地震監測系統規劃與流程圖

2.1.2 監測站儀器配置

監測站儀器規劃，以臺北港地震監測站為例，臺北港測站設置於臨港大道與商港路之交叉路路口上，如圖 2.2 所示。測站規劃分別為地震儀、水壓計、儀器觀測房等，如圖 2.3。儀器規劃安裝示意如圖 2.4、圖 2.5 所示。



圖 2.2 臺北港井下地震及動態水壓監測站平面示意圖

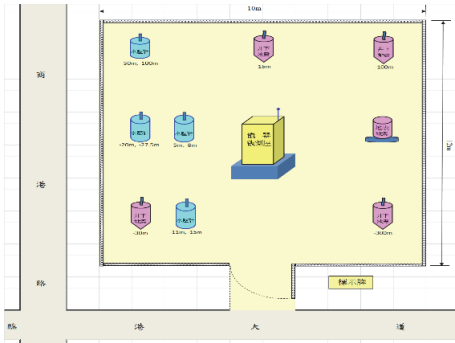


圖 2.3 臺北港井下地震及動態水壓監測站規劃示意圖

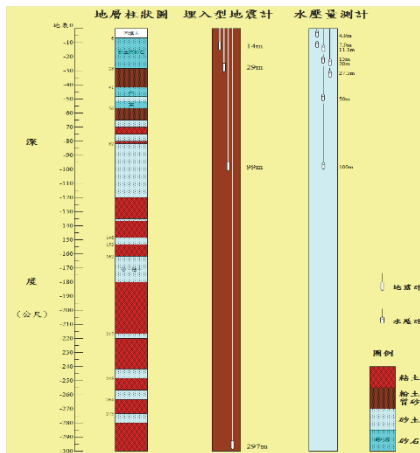


圖 2.4 臺北港井下地震及動態水壓監測站斷面示意圖



圖 2.5 臺北港井下地震及動態水壓監測站示意圖

2.2 港區地震波放大特性

地震波自岩盤深處向上傳至地表時，其振幅通常有明顯放大現象，為探討港區震波放大特性，本節彙整臺北、臺中及高雄港井下地震資料，將各深度之最大加速度正規化，即將各深度之最大加速度除以地表之最大加速度，並加以統計迴歸分析，正規化之最大加速度隨深度變化之分析結果，臺北、臺中、高雄等各港迴歸函數如下：

臺北港最大加速度之正規化值隨深度變化之迴歸分析結果如下：

$$\text{南北向：正規化加速度} = \exp(-0.16 * (\text{深度})^{0.38}) \dots\dots\dots (2-1a)$$

$$\text{東西向：正規化加速度} = \exp(-0.21 * (\text{深度})^{0.32}) \dots\dots\dots (2-1b)$$

$$\text{垂直向：正規化加速度} = \exp(-0.22 * (\text{深度})^{0.28}) \dots\dots\dots (2-1c)$$

臺中港最大加速度之正規化值隨深度變化之迴歸分析結果如下：

$$\text{南北向：正規化加速度} = \exp(-0.20 * (\text{深度})^{0.30}) \quad (2-2a)$$

$$\text{東西向：正規化加速度} = \exp(-0.24 * (\text{深度})^{0.25}) \quad (2-2b)$$

$$\text{垂直向：正規化加速度} = \exp(-0.10 * (\text{深度})^{0.45}) \quad (2-2c)$$

高雄港最大加速度之正規化值隨深度變化之迴歸分析結果如下：

$$\text{南北向：正規化加速度} = \exp(-0.146 * (\text{深度})^{0.404}) \quad (2-3a)$$

$$\text{東西向：正規化加速度} = \exp(-0.147 * (\text{深度})^{0.401}) \quad (2-3b)$$

$$\text{垂直向：正規化加速度} = \exp(-0.230 * (\text{深度})^{0.276}) \quad (2-3c)$$

由地震波放大倍率與最大地表加速度之研究可發現，臺北港震波放大倍率約於 3~5 倍之間，平均約為 3.5 倍，如圖 2.6。臺中港震波放大倍率約於 2~5 倍之間，平均約為 3 倍，如圖 2.7。高雄港震波放大倍率約於 3~5.5 倍之間，平均約為 4.0 倍，如圖 2.8，由此可知高雄港區淺層地層最為疏鬆軟弱。

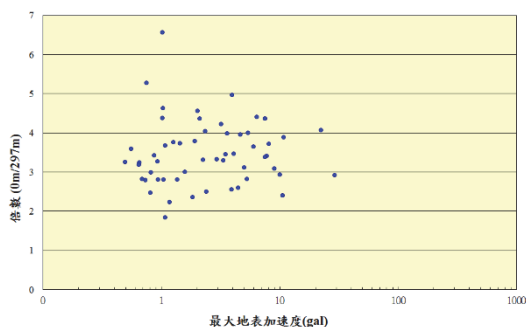


圖 2.6 臺北港井下地震站震波放大倍率與地表最大加速度圖

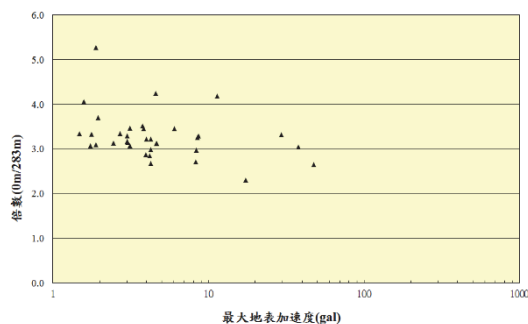


圖 2.7 臺中港井下地震站震波放大倍率與地表最大加速度圖

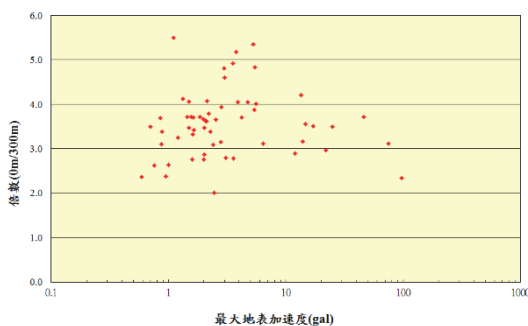


圖 2.8 高雄港井下地震站震波放大倍率與地表最大加速度圖

2.3 港區土層放大效應

2.3.1 港區最大地表加速度推估

依據以往之震紀錄考慮，考慮震源之線性模式與衰減率，推測工址之

可能發生最大地震（maximun credible eathquake MCE）。根據下列最大地表加速度衰減率公式，可以推估港區可能發生之最大地表加速度 $a_{\max}$ 。

Kanai 公式：

$$a_{\max} = 1.192e^{0.735M} (R + 34)^{-1.743} \dots\dots\dots (3-5)$$

Joyner & Boore 公式

$$\log_{10}(a_{\max}) = -1.352 + 0.2875M - \log_{10} \sqrt{R^2 + 14^2} \dots\dots\dots (3-6)$$

Campbell 公式：

$$a_{\max} = 0.009e^{1.024M} (R + 0.04e^{0.94M})^{-1.074} \dots\dots\dots (3-7)$$

Japan Rock Site 公式：

$$\log_{10}(0.981a_{\max}) = \left(\frac{R + 75}{100}\right)(-4.92 + 1.018M - 0.06M^2) \dots\dots\dots (3-8)$$

茅聲燾公式：

$$a_{\max} = 0.3725e^{0.876M} (R^2 + 400)^{-0.918} \dots\dots\dots (3-9)$$

上式中， $a_{\max}$ =最大地表加速度，單位為 g。

M=地震規模。R=震源至當地距離，單位為公里。

上述衰減公式 (3-5) ~ (3-9)，係羅俊雄（1990）根據 Kanai、Joyner & Boore、Campbell、Japan Rock Site 所建議之基本型式，再根據 1973 年後臺灣地震網 (TTSN) 已建立，且震源位置測定較精密，所收集之地震資料，求得較合適之係數，而式 (3-9) 為茅聲燾以 1935 年臺中、新竹等五次臺灣大地震

資料所建立之加速度衰減公式。

根據安平港、臺中港區地震站與 921 集集大地震之地表加速度 $a_{\max}$ 記錄資料顯示，沖積土層之地震力皆有放大效應，其加速度 $a_{\max}$ 值大部份皆較衰減公式所推估者為高。將實測值與衰減公式之推估值相比，可得各公式之修正係數如表 2-1、2-2 所示。

表 2-1 安平港測站實測地震各衰減公式之計算值及修正係數

模 式 記 錄		衰 減 公 式					平均值
		Kanai	Joyner & Boore	Campbell	Japan Rock Site	茅聲燾	
M=7.0 2006/12/26 20:26:51	計算值 (g)	0.025	0.0321	0.047	0.026	0.019	0.0298
	實測值 (g)	0.050					
	修正係數	1.987	1.547	1.062	1.909	2.628	1.827
M=7.0 2006/12/26 20:34:36	計算值 (g)	0.033	0.039	0.056	0.041	0.027	0.039
	實測值 (g)	0.101					
	修正係數	3.054	2.575	1.808	2.475	3.712	2.734
M=6.9 2009/12/19	計算值 (g)	0.017	0.024	0.035	0.0135	0.012	0.0203
	實測值 (g)	0.036					
	修正係數	2.084	1.468	1.013	2.665	3.023	2.051
M=6.4 2010/03/04	計算值 (g)	0.049	0.052	0.062	0.0728	0.053	0.0577
	實測值 (g)	0.081					
	修正係數	1.634	1.576	1.317	1.1123	1.534	1.435
M=6.1 2012/02/26	計算值 (g)	0.033	0.036	0.042	0.046	0.031	0.0376
	實測值 (g)	0.052					
	修正係數	1.562	1.432	1.245	1.138	1.667	1.408

表 2-2 臺中港測站實測地震各衰減公式之計算值及修正係數

模 式 記 錄		衰 減 公 式					平均值
		Kanai	Joyner & Boore	Campbell	Japan Rock Site	茅聲燾	
M=6.9 2009/12/19	計算值 (g)	0.025838	0.0324314	0.0441795	0.0261568	0.01985	0.0297
	實測值 (g)	0.0475					
	修正係數	1.83837	1.464629	1.07515	1.81597	2.39294	1.717
M=6.4 2010/03/04	計算值 (g)	0.017465	0.0228950	0.0290564	0.0146545	0.01241	0.0192
	實測值 (g)	0.0378					
	修正係數	2.164328	1.65101	1.300918	2.579412	3.04593	2.148
M=6.2 2013/03/27	計算值 (g)	0.024072	0.02830451	0.0337799	0.0264539	0.019417	0.0264
	實測值 (g)	0.08416					
	修正係數	3.49617	2.97337	2.49142	3.181022	4.33434	3.295
M=6.5 2013/06/02	計算值 (g)	0.048951	0.051083	0.062558	0.0665115	0.050636	0.0559
	實測值 (g)	0.06953					
	修正係數	1.42039	1.36118	1.111448	1.045383	1.37313	1.262
M=6.9 2009/12/19	計算值 (g)	0.025838	0.0324314	0.0441795	0.0261568	0.01985	0.0297
	實測值 (g)	0.0475					
	修正係數	1.83837	1.464629	1.07515	1.81597	2.39294	1.717

2.4. 港區設計地震反應譜

1. 安平港測站地震類型

2.4.1 監測站地震類型

彙整安平港井下地震監測站歷年監測所得，依地震規模大小與測站震

度、距離，將地表地震資料分為 A、B、C 三種不同類型。A 類型地震為震央距測站超過 10 公里，芮氏規模介於 4.5~6.4、測站震度為 5 級以下之地震紀錄。B 類型地震為震央離測站亦超過 10 公里，芮氏規模 6.4 以上、測站震度為 5 級以上之強震紀錄。C 類型地震為震央距測站少於 10 公里、芮氏規模小於 4.6，測站震度 2 級以上，屬於近距離之地震紀錄，各地震類型如圖 2.9 所示，三種地震之加速度歷時、加速度富氏譜分別如圖 2.10 所示。將 A、B、C 三種地震記錄之水平方向加速度歷時資料分別進行 5% 阻尼比之反應譜分析，如圖 2.11 所示。

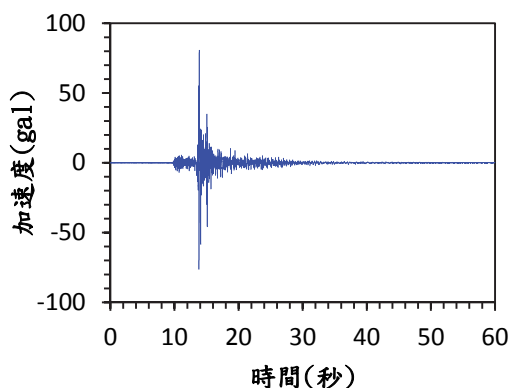


圖 2.9c 安平港 C 類型地震歷時圖

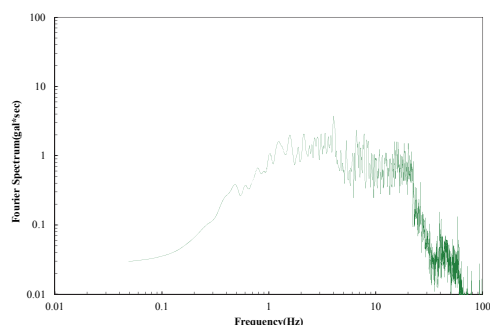


圖 2.10a A 類型地震加速度富氏譜圖

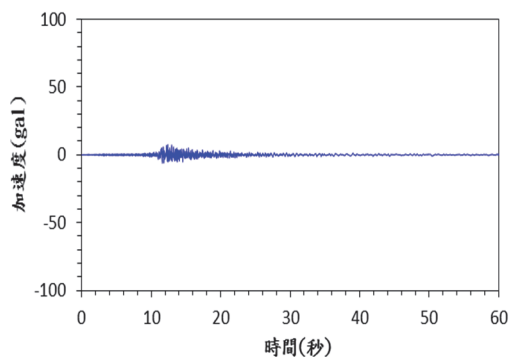


圖 2.9a 安平港 A 類型地震歷時圖

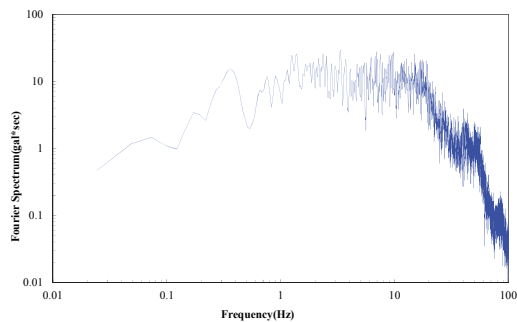


圖 2.10b B 類型地震加速度富氏譜圖

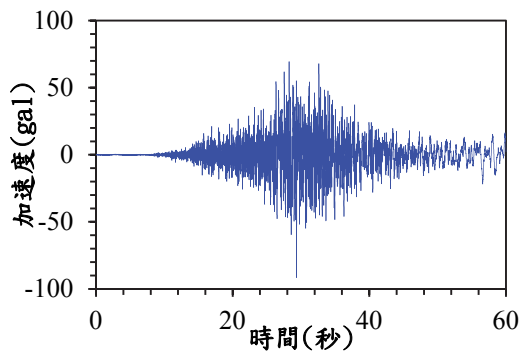


圖 2.9b 安平港 B 類型地震歷時圖

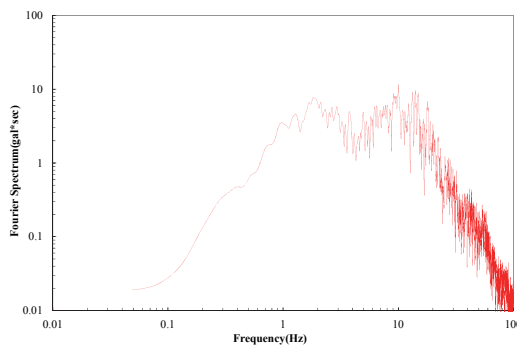


圖 2.10c 安平港 C 類型地震加速度富氏譜圖

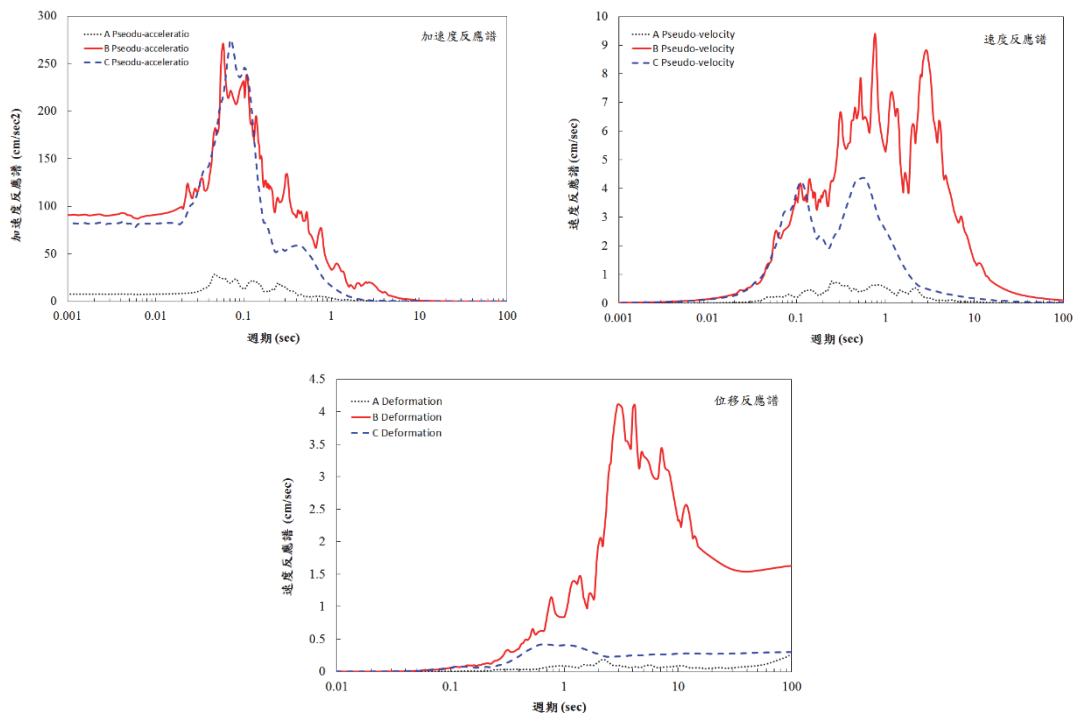


圖 2.11 安平港 A、B 及 C 類型地震之加速度、速度及位移反應譜圖

2. 臺中港測站地震類型

臺中港井下地震監測站依地震規模大小與測站震度、距離，將地表地震資料分為 A、B 兩種不同類型。A 類型地震為震央距測站超過 10 公里，芮氏規模介於 4.4~6.4、測站震度為 4 級

以下之地震紀錄。B 類型地震為震央離測站亦超過 10 公里，芮氏規模 6.4 以上、測站震度為 4 級以上之強震紀錄，如圖 2.12 所示。兩種地震類型之加速度歷時、加速度富氏譜分別如圖 2.13 所示。

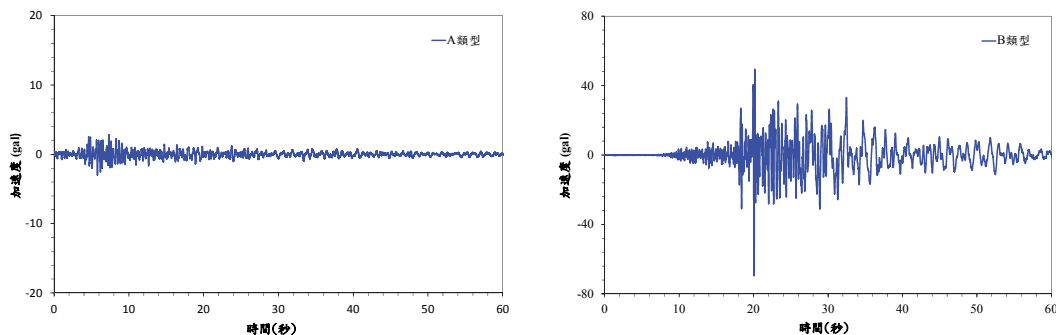


圖 2.12 臺中港地震站 A、B 類型地震歷時圖

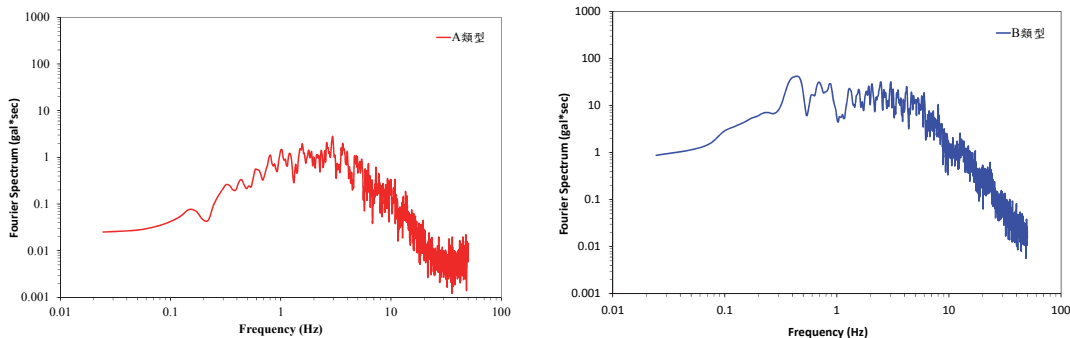


圖 2.13 臺中港 A 類型與 B 類型地震加速度富氏譜圖

2.4.2 港區之水平加速度反應譜

建築物耐震設計規範的設計地震力，主要是以回歸期 475 年的地震水準為標的，相當於 50 年使用期限內具有 10% 的超越機率。一般製作設計反應譜之步驟，是選擇同一測站之多筆不同地震記錄，將每筆地震記錄強度調整至設計地震大小（475 年回歸期），然後進行反應譜分析後，分別得到擬加速度、擬加速度及相對位移等反應譜，最後再平均化、平滑化並繪製成反應譜曲線。

本節依內政部頒「建築物耐震設計規範」之靜力分析法，彙整安平港自 2006 年至 2013 年止共 70 餘次經中央氣象局定位之地震紀錄，選擇地表水平方向加速度歷時地震資料，震央距測站超過 10 公里之 A、B 類型地震共有 130 餘筆，將地震強度調整到 475 年設計地震大小，並進行反應譜分析、彙整、平均化等步驟後得到水平譜加速度曲線圖，最後與規範中 475 年設計

地震水平譜加速度曲線圖比較。

1. 安平港之水平加速度反應譜

依內政部頒建築物耐震設計規範之規定，震區短週期及一秒週期之設計水平譜加速度係數 S_S^D 與 S_1^D 分別代表工址所屬震區在堅實地盤下，設計地震作用時之短週期結構及一秒週期結構之 5% 阻尼譜加速度與重力加速度 g 之比值。我國之震區係以鄉鎮市等行政區為單位劃分，各微分區內之震區設計水平譜加速度係數 S_S^D 與 S_1^D 乃根據 50 年 10% 超越機率之均布危害度分析訂定，地震回歸期為 475 年。

靜力分析法，依內政部頒建築物耐震設計規範，工址設計水平譜加速度係數不得低於 $0.4S_{DS}$ ，以避免長週期建築物的設計地震力過低。依規範係數表中，安平港行政區劃分為南區，其短週期及一秒週期之設計水平譜加速度係數分別為 0.7 及 0.4，港區土層由地表至地下 30 公尺深的土層平均剪力波速為 167m/sec，為第三類地盤，

屬軟弱地盤，工址短週期設計水平譜加速度係數， $S_{DS} = S_S^D F_a$ ，所以， $PGA = 0.4 \times S_{DS} = 0.4 S_S^D F_a = 0.308$

上式中， F_a ：為反應譜等加速度段之工址放大係數（短週期結構）。

因此，將安平港 A、B 類型各組地震調整至 0.308g 後進行反應譜分析，水平加速度反應譜經平均化如圖 2.14 所示，反應譜曲線平台約介於 0.07~0.58 秒。

另依交通部 99 年部頒之港灣構造物設計基準，於民國 88 年 921 地震後將臺灣之震區劃分為地震甲區及地震乙區，其對應之加速度係數分別為 0.33 及 0.23，安平港區位於臺南市屬地震甲區，其加速度係數為 0.33，因此，將安平港 A、B 類型各組地表水平向地震調整至 0.33g 後進行反應譜分析，水平加速度反應譜經平均化如圖 2.14 所示。

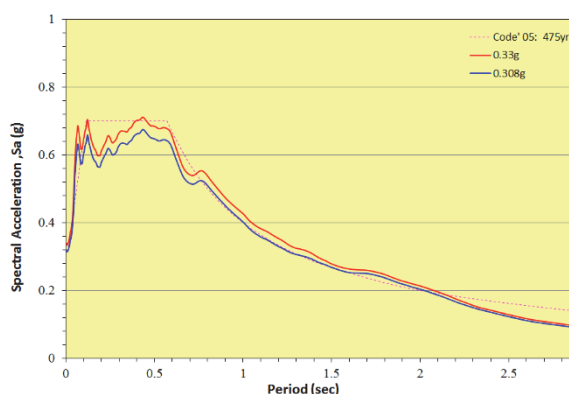


圖 2.14 安平港 A、B 類型地震水平加速度反應譜曲線圖（0.308g、0.33g）

2. 臺中港之水平加速度反應譜

篩選臺中港測站自 2006 年至 2013 年止共 51 次經中央氣象局定位之地震紀錄，震央距測站超過 10 公里之 A、B 類型地震，彙整地表水平兩方向加速度歷時地震資料共有 102 餘筆，將地震強度調整到 475 年設計地震大小，並進行反應譜分析比較。依內政部頒建築物耐震設計規範係數表中，臺中港之行政區劃分為梧棲區，其短週期及一秒週期之設計水平譜加速度係數分別為 0.7 及 0.4，港區土層由地表至地下 30 公尺深的土層平均剪力波速為 $V_s = 256m/sec$ ，為第二類地盤，屬普通地盤，工址短週期設計水平譜加速度係數，所以：

$$PGA = 0.4 \times S_{DS} = 0.4 S_S^D F_a = 0.28$$

將臺中港測站各組地表水平向之地震資料調整至 0.28g 後，分別進行 5% 阻尼比之反應譜分析，水平加速度反應譜經平均化如圖 2.15 所示，反應譜曲線平台約介於 0.12~0.45 秒。

另依交通部 99 年部頒之港灣構造物設計基準，臺中港區位於梧棲區屬地震甲區，其加速度係數為 0.33，因此，將臺中港 A、B 類型各組地表水平向地震調整至 0.33g 後進行反應譜分析，水平加速度反應譜經平均化如圖 2.15 所示。

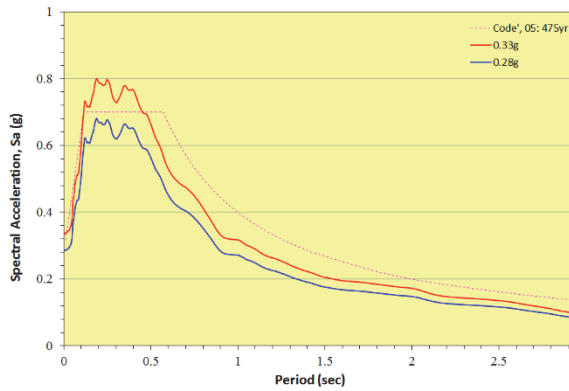


圖 2.15 臺中港地表地震水平加速度反應譜曲線圖
(0.28g、0.33g)

三、動態孔隙水壓

3.1 動態孔隙水壓分析

港區井下地震站除了安裝不同深度地震計外，也設置動態孔隙水壓計來量測強震時動態孔隙水壓激發放大反應。港區測站自設置監測以來，安平、蘇澳與高雄等測站曾擷取到動態孔隙水壓紀錄，分別為 2006 年之恆春地震、2010 年之甲仙地震與 2012 年震央位於屏東縣霧台鄉附近芮氏規模 6.1 之地震，皆有監測到動態孔隙水壓資料。本節依安平港 2006 年及 2010 年之超額動態孔隙水壓為例進行分離，超額動態孔隙水壓有超額之孔隙水壓及震盪之動態水壓，以適當之震盪頻率將其分離結果，動態孔隙水壓圖分別如圖 3.1 至圖 3.6，超額之孔隙水壓為低頻反應，震盪之孔隙水壓為高頻，分離之震盪頻率為 0.08Hz。安平港監

測站於 2006 年、2010 年及 2012 年皆監測到超額動態孔隙水壓，震盪頻率分離之頻率皆為 0.08Hz，初步評估應是該區之土層特性所造成。

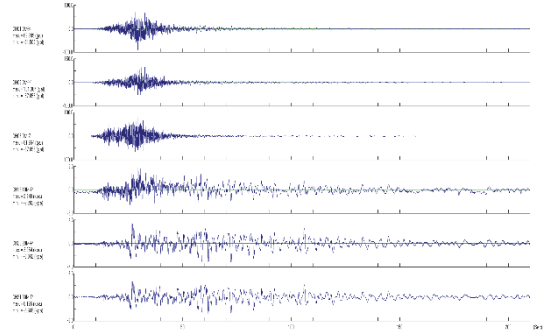


圖 3.1 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態孔隙水壓變化

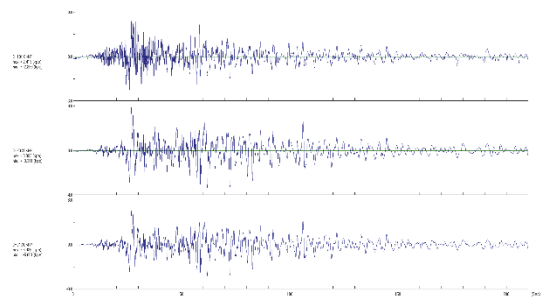


圖 3.2 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態孔隙水壓變化（大於 0.08Hz）

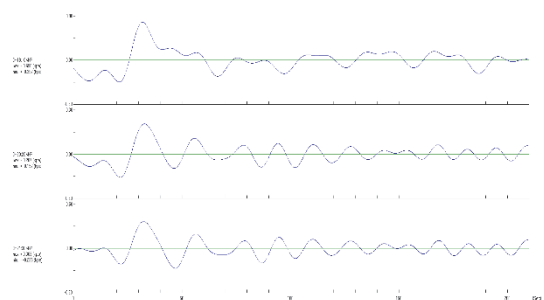


圖 3.3 安平港 2006 年 12 月 26 日地震之動態孔隙水壓變化（小於 0.08Hz）

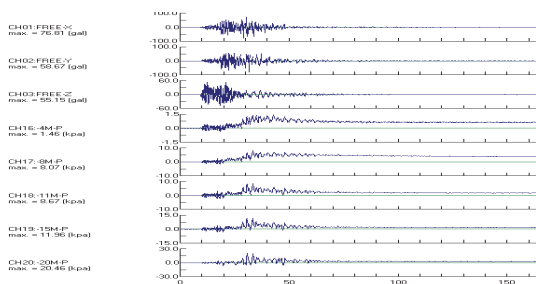


圖 3.4 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化

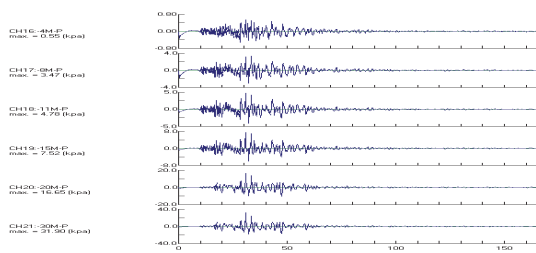


圖 3.5 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化（大於 0.08Hz）

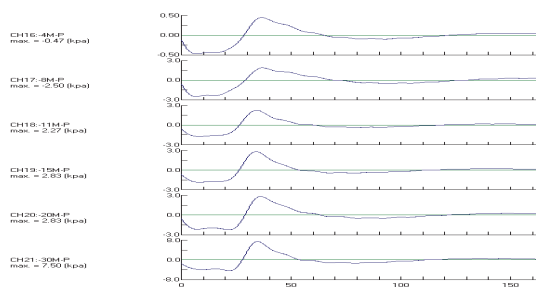


圖 3.6 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化（小於 0.08Hz）

四、單站頻譜比

4.1 單站頻譜比法

由於港區大多為沖積土層，要選擇一個適當的岩盤參考測站並不容易，或因參考測站選擇不當，也會因為地形效應的影響，使場址效應分析結果有所差異，故雙站法並不適用於港區。本節採 Nakamura 在 1989 年提出單站頻譜比法之經驗式，利用微地動資料，以水平與垂直向震幅放大頻譜比（H/V

amplification spectrum ratio），分析出淺層沖積土層之共振頻率。而 Lermo and Chavez-Garcia（1993）亦從理論層狀構造來進行研究，認為此法也適用於地震之 S 波分析。茲就 Nakamura 之單站頻譜比法簡述如下：

若 S_H 代表地表振動水平分量之傅氏振幅譜， B_H 為鬆軟土層底部水平分量之傅氏振幅譜，則水平向頻譜比 S_E 可以表示為

$$S_E = \frac{S_H}{B_H} \dots\dots\dots (4-1)$$

由於受到近地表雷利波（Rayleigh wave）之影響，在地表所紀錄到之水平向振幅 S_H 會大於地下岩盤測站之水平向振幅 B_H 。

利用垂直向頻譜比 A_S ，代表震源放大作用

$$A_S = \frac{S_V}{B_V} \dots\dots\dots (4-2)$$

S_V 代表地表振動垂直分量之傅氏振幅譜， B_V 為鬆軟土層底部垂直分量之傅氏振幅譜。為了除去震源放大效應，將（3-4）式除以（3-5）式，即

$$S_M = \frac{S_E}{A_S} = \frac{\left[\frac{S_H}{B_H} \right]}{\left[\frac{S_V}{B_V} \right]} = \left[\frac{\frac{S_H}{B_H}}{\frac{S_V}{B_V}} \right] \dots\dots\dots (4-3)$$

上式中之分母 $\frac{B_H}{B_V}$ ，Nakamura 曾利用井下微地動觀測資料得到其值約等於 1。利用以上關係，即可得到單站頻

譜比法此一經驗式：

$$S_M = \frac{S_H}{S_V} \dots\dots\dots (4-9)$$

簡言之，就是利用單一測站之水平向傅氏頻譜除以垂直向傅氏頻譜，即可估計此筆地震對此測站區域所造成的場址效應。

利用 Nakamura 單站頻譜比法之經驗式來估計港區地震站之場址效應，即採用測站之真實地震歷時紀錄之 S 波資料，將地震資料由時間域轉至頻率域，藉由單站頻譜比法得到的單一水平向（取東西向及南北向頻譜值均方根）與垂直向頻譜的比值，探討震波在測站區域的放大效應。本節彙整 2006 年至 2008 年期間高雄港地震站之 PGA 小於 25gal 的弱地震資料與 2006 年恆春強震資料，分析測站地區強震與弱震之場址效應差異。先利用單站頻譜比法計算測站的弱震平均場址效應後，再將強震之單站頻譜比值與測站弱震之平均頻譜進行相互比對，觀測地震期間測站地區之場址效應變化，並進而探討測站在地震時是否有非線性反應發生。

4.2 監測站弱震平均頻譜比

蒐集 2005 至 2008 年高雄港地震監

測站地表地震儀所記錄的弱震資料約 30 餘筆中，共選取高雄港測站最大地表加速度小於 25gal（3 級地震）較完整之 30 筆弱震資料，先將個別的地震進行單站頻譜比法後，再將所得之頻譜比值加以平均，以降低震源效應的影響，最後可得到測站之弱震平均場址效應，如圖 4.1，由圖中可知，放大主頻大約分布於 0.6~1.3Hz。

4.3 監測站強、弱震頻譜比

2006 年於恆春外海發生規模 7.0 之強烈地震，造成屏東恆春地區一些災情，於恆春南灣地區亦有土壤液化災情，顯示恆春地區可能有土壤非線性反應的災害發生，本節依據設置於高雄港地震站監測所得資料進行單站頻譜比分析，測站於 2006 年 12 月 26 日所監測之地震紀錄，地表最大加速度為 96gal，選取水平兩方向頻譜值均方根與垂直向頻譜值比後，如圖 4.2 所示。

將測站強、弱震頻譜比資料比對結果，在低頻帶部份 0.12Hz 以下呈現線性反應並無放大現象，0.3Hz~1.3Hz 出現明顯的線性放大反應，但在 8.3Hz~28Hz 之間強震頻譜比卻小於弱震平均頻譜比值，港區土壤出現非線性反應，如圖 4.3。

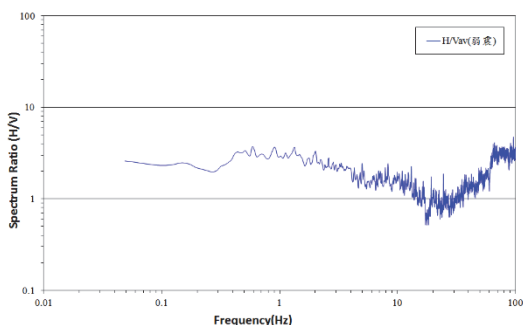


圖 4.1 高雄港地震站弱震單站平均頻譜比

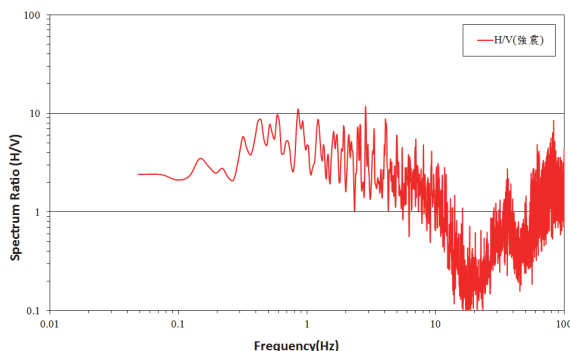


圖 4.2 高雄港地震站強震單站頻譜比

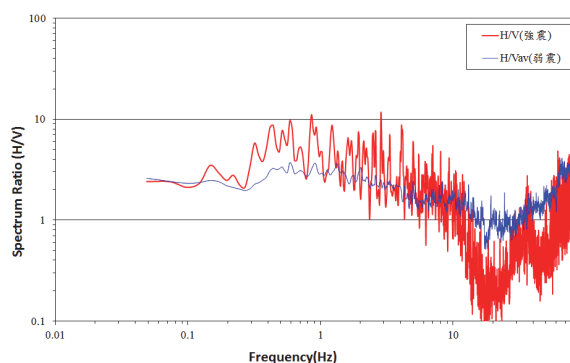


圖 4.3 高雄港地震站強、弱震單站頻譜比

五、時頻分析

時頻分析 (Time-Frequency Analysis) 是逸奇科技公司研發的 Visual Signal 訊號分析軟體工具，TFA 模組群它提供了 Short-Term Fourier Transform (短時傅立葉轉換)、Morlet Transform (小波轉換) 及 Hilbert Spectrum (計算

每個時間點的瞬時頻率) 等時頻分析的計算，本節以該公司提供的試用版軟體，進行分析 2006 年恆春地震於高雄港地震站監測的資料，如圖 5.1 所示，即應用 Visual Signal 軟體，以 EMD (Empirical Mode Decomposition_Huang et al., 1998) 模組先行作經驗模態分解，從而可得其隱模態函數組 (IMFs_Intrinsic Mode Functions)，再透過 HHT (Hilbert-Huang Transform_Huang et al., 1998) 模組作時頻分析並計算邊際頻譜 (marginal spectrum)，進而可得相關之時頻圖及能譜圖，如圖 5.2 至圖 5.3 所示，由圖 5.4 可知地震波振盪主頻為 0.4Hz 之低頻。

一般在研究土壤場址效應時，是將地表與井下測站之地震紀錄波訊號，進行傅立葉轉換自時間訊號轉換至頻率域，再利用雙站頻譜比法，將地表與井下水平向的頻譜相除，其比值即代表各個頻率的土壤放大因子，而其頻譜比之第一峰值所在的頻率，即為兩測站間土層之共振主頻。

由於土壤受到較大之地震作用將會改變其共振主頻，如果採用一般之傅氏頻譜分析僅能得知地震共振主頻的不同，卻無法得知主頻發生變化與時間的關係。因此本節亦利用 Visual Signal 軟體之短時傅氏轉換法 (Short-Term Fourier Transform) 分析高雄港測站之 2006 年恆春地震訊號，再加上利

用雙站頻譜比法，將地表與井下-14.7m 之頻譜比相除，其比值最大值所在之頻率，即是共振主頻。利用上述方法進行 2006 年 12 月 26 日強震 1 筆地震資料後，如圖 5.5，強震時其主頻約為 2.4Hz，由其它案例可知共振主頻隨 PGA 值增大而往低頻移動，圖中橫軸為訊號的時間軸，縱軸為頻率，圖的顏色代表強度。布袋港地震站 2010 年 3 月 4 日地震 STFT 法頻譜比圖如圖 5.5 所示。

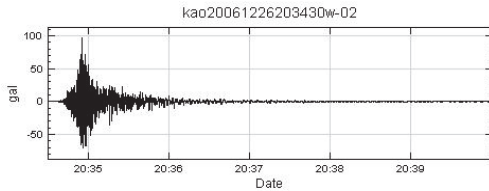


圖 5.1 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震 PGA 圖

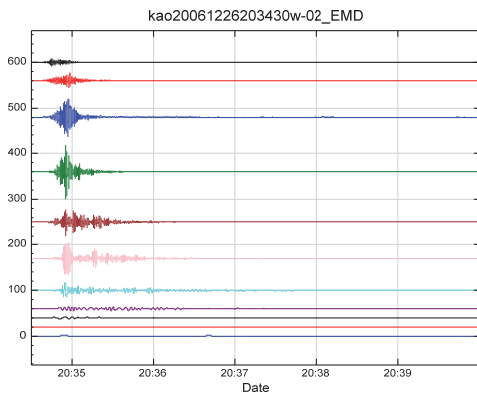


圖 5.2 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震隱模態函數組圖 (IMFs_Intrinsic Mode Functions)

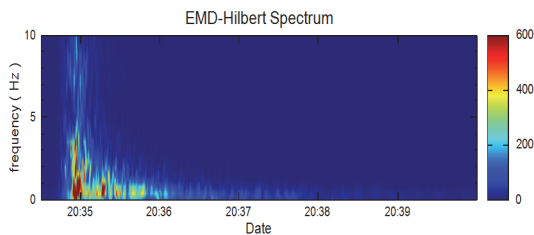


圖 5.3 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震 (HHT) 時頻分析圖

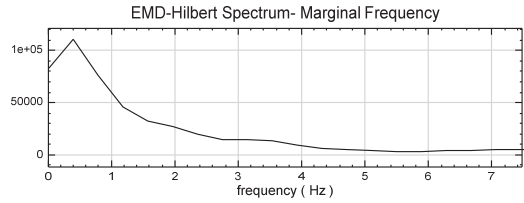


圖 5.4 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震能譜圖

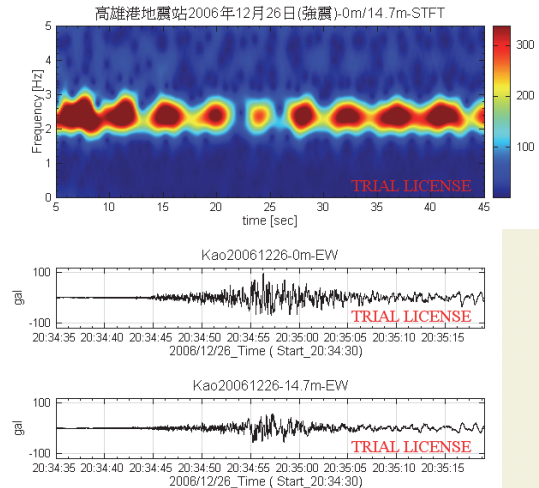


圖 5.5 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日地震 STFT 法頻譜比圖

六、結論

1. 港區土層震波放大倍率，由震波放大倍率與最大地表加速度之研究得知，臺北港震波放大倍率平均約 3.5 倍。臺中港約於 2~5 倍之間，平均約 3 倍。高雄港平均約 4 倍，高雄港區淺層地層最為疏鬆軟弱，臺北港次之，臺中港最小。
2. 港區地震力經實測資料與經驗式方法推估後，港區沖積土層之最大地表加速度有放大效應，經蒐集測站震度 4 級以上之資料估算後，安平港區放大倍數平均約 1.89 倍，臺中港區平均放大約 2.1 倍。

3. 安平港井下地震監測站於 2006 年、2010 年與 2012 年之強震中，皆監測到超額動態孔隙水壓，經分離動態水壓結果，超額孔隙水壓為 0.08Hz 以下之低頻反應，震盪動態水壓為 0.08Hz 以上之高頻，顯示該區之土層特性。
4. 高雄港地震站以單站頻譜比法，分析強、弱震頻譜比，結果顯示，在低頻帶部份 0.12Hz 以下呈現線性反應並無放大現象，頻率 0.3Hz~1.3Hz 出現明顯的線性放大反應，但在 8.3Hz~28Hz 間之強震頻譜比卻小於弱震平均頻譜比值，顯示港區土壤有非線性反應。

參考文獻：

1. 內政部，「建築物耐震設計規範及解說」，民國 95 年 1 月。
2. 交通部，「港灣構造物設計基準—碼頭設計基準及說明」，民國 86 年 7 月。
3. 港灣研究中心，「臺中港 1~4A 碼頭 921 地震液化災損初步調查研究」港灣研究中心專刊 172 號，1999。
4. 交通部，港灣構造物設計基準—碼頭設計基準及說明，2000。
5. 交通部運輸研究所，港灣構造物設計基準修訂，2005 年 2 月。
6. 翁駿民，「耐震設計講意」，國立中興大學土木工程系，民國 101 年。
7. 陳志芳，謝明志，「港區地震與地層下陷監測之研究（1/2）」，交通部運輸研究所報告，2014。
8. 彭瀚毅，「臺北盆地場址效應之研究」，中央大學博士論文，1998。
9. 逸奇科技股份有限公司，AnCAD（2011）「Visual Signal 參考指南」，第 1.4 試用版。
10. 賴聖耀、李延恭、陳志芳，「安平港地震與動態孔隙水壓監測之研究」，交通部運輸研究所報告，2000。
11. 羅俊雄，1990，地下結構物耐震設計之研究，中央大學土木工程研究所研究報告。
12. Chopra, A. K., "Dynamic of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering," Prentice-Hall, pp.197-250 (2001).
13. Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
14. Lermo, J., & Chavez-Garcia, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, Bulletin Seismological Society of America, 83, 1574 - 1594.
15. Nakamura, Y., (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micro tremor on the ground surface, QR of RTRI 30, no.1, February, 25-33.

臺灣港務公司之監督與公司治理績效評估研究

吳榮貴 臺北城市科技大學行銷與流通管理系 教授

謝幼昇 交通部運輸研究所臺灣技術研究中心 研究員

摘要

針對臺灣各港務局公司化後，交通部如何對臺灣港務公司進行監督、公司治理與績效評估等課題進行研究，據以提出策略與具體執行方案供交通部參考。內容分別就臺灣港務公司的適法性監督、適當性監督、公司治理與績效評估等四方面做探討分析，並研提策略與具體執行方案。根據研究結果提出的政策方案包括：在監督方面，的「兩港兩制」、「一港兩管」、「主管機關授權」、「規劃與建設程序」、「合資民營」等；在公司治理方面，提出強化臺灣港務公司之公司治理模式的作法及評鑑指標；在績效評估方面，將現行考核指標系統綜整簡化後，提出一套試算結果相當的修正方案。

一、緒論

交通部為了健全臺灣港口的管理組織，提升港口的經營效率，在101年3月1日依「政企分離」原則，成立了臺灣港務公司與航港局。在改制之前，交通部依照「商港法」於基隆、臺中、

高雄與花蓮等4個國際商港分別設置港務局為各個國際商港與國內商港的管理機關，負責各港的經營管理。各港務局再於各轄區內的國際商港之輔助港（包括基隆港務局的蘇澳港與臺北港、高雄港務局的安平港等3港）設分局，或於所管國內商港（如高雄港務局的布袋港與澎湖港）設辦事處經管之。至於金門與馬祖港則分由金門與連江縣政府經營及管理。

改制之後，在「政」的方面，交通部成立航港局（Maritime and Port Bureau，簡稱MPB）辦理航政與港政業務，其中包括原關務署海務處負責燈塔等航路標誌業務移撥人員的移轉；該局則於4個國際商港所在地分設航務中心，接管原各港務局在當地的航政業務。在「企」的方面，交通部則整合原有4個港務局，依據以「商港法」為法源的「國營港務股份有限公司設置條例」成立臺灣港務股份有限公司（Taiwan International Ports Corporations，簡稱TIPC），經管7個國際商港，包括前述4個國際商港，以及基隆港的蘇澳與臺北兩個輔助港、高雄港的安平輔助港。

不過在國內商港方面，基於政策與任務之考量，除了金門與馬祖港仍維持分別由當地金門與連江縣政府經營及管理之外，其他國內商港則由航港局經管，只是暫委託臺灣港務公司代管。

臺灣港務公司成立後，該公司與交通部的關係發生轉變。原本，港務局是交通部所主管之商港的管理機關，在公司成立後，交通部的角色雖仍為商港的主管機關，但也扮演公司股東的角色，其與航港局及港務公司之間的關係詳如圖1所示。這樣的轉變除了

增加航港局的航政與港政公權力機關之外，也凸顯出未來交通部在「公司治理」這個議題上的重要性。

因應上述航港體制的變革需要，交通部運輸研究所乃委託臺北城市科技大學合作辦理「臺灣港務公司之監督與公司治理績效評估研究」案的2年期計畫（以下簡稱本計畫），針對臺灣各港務局公司化後，交通部如何對臺灣港務公司進行監督、公司治理與績效評估等課題進行研究，據以提出策略與具體執行方案供交通部參考。



圖1 公司化後交通部、航港局與臺灣港務公司間的關係

二、臺灣港務公司的適法性監督

本文所謂「適法性監督」係指交通部以商港主管機關之地位，依據現行

「商港法」與「國營港務股份有限公司設置條例」等相關法規對臺灣港務公司所進行的監督事宜。這兩大法規系統即是本研究所依據，用於探討交通部對臺灣港務公司之適法性監督的主要

依據。雖然由於依據該條例所成立的臺灣港務公司仍需遵循其他國營事業法規，而由交通部加以監督，但本研究將其納入公司治理部分探討。

為探討適法性監督，本研究先根據「商港法」，針對交通部、航港局與臺灣港務公司等3方面，在國際商港之規劃、建設、管理、經營、安全及污染防治等6大事權的劃分加以探討，以釐清交通部對於臺灣港務公司的監督法源依據。而後，再依據「國營港務股份有限公司設置條例」，分析交通部對於臺灣港務公司組織運作的監督權責。

經分析後，本研究歸納出在商港的經營與管理上有3項議題值得探討。分別是：1.國內商港與國際商港之經營管理的「兩港兩制」議題；2.國際商港管理事項的「一港兩管」議題；3.交通部對航港局授權事項之檢討議題。在港埠規劃與建設上有2項議題值得探討。分別是：1.航港局參與港埠規劃之議題，2.航港局委託臺灣港務公司辦理商港公共基礎設施之議題。以下分別就這些議題做說明，並研提具體建議方案。

2.1 經營與管理上的適法性監督

1. 國內商港與國際商港經營管理的「兩港兩制」議題

目前國際商港與國內商港之經營管理，分別由臺灣港務公司及航港局辦理（其中金門與馬祖兩國內商港仍由

地方政府經營），從而形成「兩港兩制」的體制。也就是說，在航港體制改革時，國內商港並未與國際商港一併依「政企分離」原則交給臺灣港務公司，而是由航港局負責經營管理。只是在實際運作上，航港局所掌管的國內商港（布袋與澎湖港）仍是委託臺灣港務公司在經營管理。

從學理上來說，國內商港與國際商港統籌由一個專業經營團隊來經營，將有助於整合商港的整體資源，並可用專業化之經營來提高效率。因此，本研究認為國內商港與國際商港宜統籌由一個專業經營團隊經營。

惟目前國內商港（布袋與澎湖港）已由航港局委託臺灣港務公司經營，實際上是統籌由一個專業團隊在經營。因此，本研究建議除非有政務考量上的需要，否則也沒有立即啟動修法的急迫性或必要性；若在政務考量上經充分溝通而決定依此一構想而改變現況時，則可以考慮修改「商港法」為之。該法第2條第2項之具體修正草案建議如下（修正部分加底線）：

「商港之經營及管理組織如下：

- 一、國際商港與國內商港：由主管機關設國營事業機構經營及管理；管理事項涉及公權力部分，由交通及建設部航港局（以下簡稱航港局）辦理。
- 二、國內商港：必要時得由行政院指

定之機關（以下簡稱指定機關）經營及管理。」

2. 國際商港管理事項的「一港兩管」議題

目前國際商港的規劃、建設、經營、管理均由臺灣港務公司辦理，但「涉及公權力的管理事項」則由航港局掌管，從而形成「一港兩管」的體制。也就是說，國際商港由航港局及臺灣港務公司分掌「屬公權力」及「非屬公權力」之管理事項。

然而，所謂「屬公權力」及「非屬公權力」的管理事項劃分易有灰色地帶，例如：關於商港區域涉及安全與污染防治等管理事權之劃分，雖在「商港法」中已有所規定，但仍可能存在不易劃分之事項。

為避免權責混淆而影響商港管理職能的發揮，本研究建議短期而言，可由交通部以行政命令為法律之解釋，明確將航港局所掌管的「涉及公權力的管理事項」，進一步界定為「港政監理」業務。並在此前題下，以行政命令明確劃分該兩機關（構）在國際商港之管理事權，包括現行有關商港區域涉及安全與污染防治上的管理事權，也一併加以釐清。惟當發覺該一事權之重新劃分無法僅以行政命令為之時，則有必要考慮進一步修改「商港法」相關條文以為因應。

3. 交通部對航港局授權事項之檢討議題

目前「商港法」於配合航港體制改革修正時，僅將「涉及公權力的管理事項」從原為「商港管理機關」的港務局的部分港政監理事權移歸航港局，因此，目前「商港法」中應報請主管機關核定之事項仍多。譬如：臺灣港務公司及公民營事業機構之申設辦法與特許、費率管制等較屬「涉及公權力的管理事項」，幾乎都是由交通部自行辦理。

未來，交通部亦可考慮進一步將其非屬政策或法制性的業務也授權移交航港局辦理。長期而言，上述之授權事項亦可考慮進一步修改「商港法」的相關條文，以法律明定之。

2.2 港埠規劃與建設上的適法性監督

1. 航港局參與港埠規劃之議題

目前臺灣港埠的規劃，係由交通部委託運輸研究所辦理上位計畫「商港整體發展規劃」，通盤檢討各國際與國內商港相關課題後，研擬各商港未來的發展目標、策略及功能定位。而後由臺灣港務公司依照上述「商港整體發展規劃」，並考量所轄商港之未來港埠環境、經營條件與地方產業發展需求等要件，以港群概念訂定「臺灣地區國際商港未來發展及建設計畫」。故目前航港局並未參與港埠的規劃工作，且

在「商港法」中亦未訂有航港局參與的法源。

不過，本研究考量到航港局是商港區域公有土地與財產的提供者，也是依「商港法」規定，將「商港公共基礎設施」委託臺灣港務公司興建維護的機關，更為負責該等設施投資之航港建設基金的管理機關。因此，本研究建議在商港公共基礎設施的興建與規劃的擬定方面，可考慮讓航港局參與。

關於航港局參與國際商港整體規劃與發展計畫之擬訂的參與方式，本研究建議如下：由臺灣港務公司於擬訂過程中，於徵詢各商港所在地之地方政府意見時，同步「徵詢」航港局的意見。短期而言，可以由交通部以行政命令為之；長遠來看，則可考慮修改「商港法」相關條文。

2. 航港局委託臺灣港務公司辦理商港公共基礎設施之議題

關於臺灣各港公共基礎設施的建設，係由航港建設基金支應興建，過去在航港體制改革前，資金之運用係以「補助」性質投入，而改制後，航港建設基金由航港局掌管，改以「投資」方式委託臺灣港務公司辦理。

此一由航港局委託臺灣港務公司辦理商港公共基礎設施，值得探討的議題在於其委託關係上所涉及的效率問題。在航港局身為委託人的立場，

由其收取商港服務費納入航港建設基金，再從該基金投資並委由臺灣港務公司規劃、興建與維護公共基礎設施，但產權仍登記為該局所有，增加委託事務上的管理負擔。

本研究建議除了檢討維持現況之方案外，再研擬兩個替選方案供考量，分別為由航港局自辦商港公共基礎設施之興建與維護，以及由臺灣港務公司自行收費與自辦商港公共基礎設施之興建與維護等方案。各方案各有其優劣，未來值得進一步探討。

三、港埠經營策略的適當性監督

所謂「適當性監督」係指交通部以股東代表的身份，透過董事會對臺灣港務公司的規劃、建設與經營策略進行監督。本研究在本章先針對公司在港埠經營策略的適當性監督做探討，而後，第四章從公司治理的角度來探討適當性監督。

本研究發現港務局在公司化之後，臺灣港務公司的經營策略趨向自營港埠事業，並擴充自營業務。從公司以營利為目的的立場來看，其為追求利潤而傾向自營並無問題。但從交通部代表政府，為全民追求利益的角度來看，可能要考量國營公司的經營效率問題。

臺灣港務公司為政府獨資之國營

事業，除在部份人事與公司內部制度獲得自主權外，尚受政府國營企業相關法規的束縛，會面對內部組織的企業化效率挑戰。包括：1.各港務局降為分公司之效率問題；2.非純商業化的董事會結構；3.非純自主的人事制度；4.國營企業的法令規章與制度；5.國營企業的文化。

受上述因素影響下，臺灣港務公司在港埠服務的經營效率上難免較無彈性，與專業追求效率的民營企業相較，其在經營上的獨立、自主、彈性與商業化經營效率尚有可期待進步的空間。

此外，尚需考量臺灣港務公司自營業務之必要性。目前臺灣港務公司認為需要自營港埠事業的理由之一，是當有民間業者對於商港區域內的港埠服務無經營意願時，公司不得不自營，以維持業務不中斷。實際上，此一需要政府職能介入的例外情形在比較無利可圖的商港是有可能發生。但在國際商港的貨運業務上，當發生碼頭設施招標無民間企業有意投資經營時，則有必要考究其原因是否為需求不足，從而使得民間企業意願缺缺所致。

從整體資源的使用效率來看，倘若碼頭設施因港埠需求不足而閒置，則除了自營一途，港務公司需要檢討的還包括諸如：是否因出租條件因素

而導致民營企業不願參與？是不是還有合資經營的模式可以吸引民營者參與？如果這些答案都是否定的，從而印證了根本碼頭設施是多餘的，則宜在使用限制下尋求其他替代用途，以為資源之有效利用。

根據上述分析，本研究針對港埠經營策略的適當性監督提出下列2項建議：

1. 由於臺灣港務公司為政府獨資之國營事業，其在港埠經營上的獨立自主性、彈性與商業化經營效率通常不如民營企業，為提高經營效率，達到整體社會資源有效利用的目的，臺灣港務公司在其核心「本港本業」業務上，可採行「地主港」的經營型態，扮演地主或房東的角色，全力聚焦在其規劃與建設的港區營業用土地或設施的招商經營上。
2. 進一步可考慮將自營部分的港埠事業民營化，具體作法上除了過去所採行的委外、出租（含約定合作興建或設定地上權的 BOT）之外，宜認真考慮採用「合資民營」的方式，即採取與民營企業以合資「官股不過半」的民營公司型態來經營港埠事業。此一推動將可借重民間企業商業化經營的效率與彈性，並達到「與民興利」的目的，惟推動方式可能需交通部在政策上引導。

四、公司治理模式研擬

4.1 公司治理的基本概念

公司治理主要探討如何在符合法律與契約的規範中，建立機制以促成公司價值的極大化。公司治理涉及之參與者範圍甚廣，狹義的公司治理係指存在公司股東、董事會、內部監察機關及管理階層參與公司管理及經營者間之關係。而廣義的公司治理則不止探討股東或內部監控機關對管理者的制衡，更進一步將「利害關係人」（stakeholder）的角色及功能納入討論，如員工、客戶、供應商、債權人等。

依據 World Bank（1999）所提出的公司治理體系架構，分從公司和公共政策兩個角度，區分為內部治理機制和外部治理機制：

1. 內部治理：指透過股東會、董事會、監事會與經營管理層（三會一層）所形成之治理結構，共同透過內部控制制度之管理過程，確保企業目標

之達成，完善的內部控制應貫穿於整個企業的管理活動，並據此建立相應的內控制度。

2. 外部治理：係透過公司以外的力量對公司營運進行監控與管理，強調市場規範機制，以提供公司誘因與紀律。包括主管機關的行政監督、司法機構的司法監控及資本市場和其他利害關係人的市場監控等。

4.2 公司治理模式研擬

參考 World Bank（1999）所提的公司治理架構，本研究進行臺灣港務公司之公司治理模式研擬。經分析後，本研究將臺灣港務公司之公司治理模式現況，以及強化各階層功能之具體建議，彙整於表 1。表中研提之建議主要參考國際港務公司在公司治理上的作法，並從治理架構及治理制度設計上來研提建議，期能提供臺灣港務公司，做為其發展公司治理模式之參考。

表 1 臺灣港務公司之公司治理模式現況與建議作法

	現況說明	建議作法
股東大會	●組成:100%國營，即全民股東，交通部為股東代表。 ●運作：股東會職權由董事會代行。	●規範交通部做為股東代表的角色，以確保全民股東的權利。 ●應有公開透明之公司治理資訊，讓全民股東了解港務公司之財務運作、利潤分配及董監事等議案。 ●將公司及其下屬子公司納入治理範疇，以落實公司與關係企業間之公司治理。

	現況說明	建議作法
董事會	●組成：含公股代表、勞工董事及專業董事。 ●結構：中央代表仍占多數，對於重大事項仍有相當的主導權。	●遴選國際化與專業化程度高之董事，以強化董事會效能。 ●董事會會議記錄應完整真實，相關訊息揭露亦應及時充分，以檢視董事會是否依照法規要求履行職責。 ●檢視董事會下設之委員會，是否分工明確、權責分明，並有效運作。 ●發展董事績效評估制度，評估董事會成員之適任性。
監察人	●組成：設監察人3至5人。 ●職權：本著對股東負責的精神履行職責，對董事會日常運作、公司財務及董事、高階經理人員之合法、合規性進行監督。	●遴選具有專長之專家，對公司進行合法合規性監督，維護公司和股東的合法權益。 ●檢視監察人之功能是否有效運作。 ●設置監察人評估制度，落實監察人之效能。
管理層	●人員：總經理及副總經理等高階管理人員，向董事會負責。 ●副總經理共8位：總公司內部4位，首席為執行副總經理，其餘3位分別督導業務、工程、行政；另外部4位分掌4個分公司。	●公司管理層的聘任公開、透明，符合法律的規定，並對推行公司治理需有強烈使命感。 ●高階管理人員之薪酬與經營績效連結，訂定中長期激勵機制與執行方案。 ●組織結構配合業務需要進行部門設置，以強化管理層的有效運作。

資料來源：現況說明係依臺灣港務公司實際資料整編。

4.3 公司治理評鑑指標

公司治理的推動，除透過法規及專業守則來建立公司內部的治理架構外，一個有效的方法是使市場投資者將公司治理機制的良窳納入投資決策的依據，此即公司治理制度評量。藉由公司治理制度的評量，可提供受評企業自我檢視的機會，以發掘強化改善領域，強化對股東之公信力、展現誠信經營落實法令遵循的決心等效益。

因此，本研究參考中華公司治理協會（2014）提出的國營企業之公司治理制度評量指標，以及臺灣證券交易所提出的公司治理評鑑指標，發展出適

合臺灣港務公司的公司治理評鑑指標系統，並進一步研擬出一套「臺灣港務公司之公司治理評鑑作業要點（草案）」。

若要推動此一公司治理評鑑作業，具體執行作法建議如下：臺灣港務公司可於董事會下設置功能性的「公司治理委員會」，來推動本項工作，或成立專案小組來進行。為了不增加評鑑次數，在執行時程上可與「交通部所屬事業年度工作考成實施要點」的作業同步進行。

五、績效評估

目前國營事業已有一套用於評核年度績效獎金的「國營事業工作考成辦

法」，交通部所屬事業也不例外，因此，本研究即以此績效考成指標系統為基礎進行研析。將臺灣港務公司組織特色中有關公司願景與經營目標，與現行交通部所屬事業的年度工作考成評估指標系統之考成項目進行關聯性比較，而後研擬出一套可供交通部用於修正現行考核指標的系統。

這套系統依公司治理著重永續經營的發展趨勢，並以成效為績效考核之目的，將現行適用於臺灣港務公司的考成指標的五大評估面向（1.業務經營、2.工業安全、3.企劃管理、4.財務管理、5.人力資源管理）調整為三大評估面向（1.業務經營、2.勞安與環保、3.企業社會責任）。同時並建議簡化指標項目，由現行 23 項（含子指標項目），修正為 13 項，修正後之評估指標包含收益力、業務量、顧客滿意度、員工

安全衛生、環保執行力、進用原住民職員（工）比率、進用身心障礙人士職員（工）比率、社會公益支出占比等。詳如表 2 所示。

本研究並將研提之績效考核指標，以臺灣港務公司 102 年的工作考成的初核分數表進行試算。試算結果顯示，本研究建議的績效指標系統與臺灣港務公司現行指標系統所得的分數相當，顯示這套修正的指標系統頗具適用性，不但以成效為考核目標，符合目標管理的原則，且較簡化而易於操作。

在執行作法上，考量到交通部所屬國營事業不僅有臺灣港務公司，還有中華郵政公司、臺灣鐵路管理局、桃園國際機場股份有限公司等，建議可參考本研究所提之方案進行通盤檢討。

表 2 本研究建議及現行指標系統之對照表

修正面向、指標與權重		現行面向、指標與權重	
面向	權重 (%)	面向	權重 (%)
一、業務經營	66	一、業務經營	61
1.收益力	33	1.收益力	25
1.1 營業收入	16	1.1 營業利益	15
1.2 本期淨利	11	1.2 本期淨利	10
1.3 員工生產力	6	2.顧客滿意度	5
2.業務量	27	3.業務成長率	23
2.1 貨櫃裝卸量年度預算目標達成率	13	3.1 自由貿易港區事業貿易值成長率	4
2.2 非貨櫃裝卸量年度預算目標達成率	4	3.2 裝卸量	15
2.3 國際客運量年度預算目標達成率	5	3.2.1.1 貨櫃裝卸量年度預算目標達成率	6

修正面向、指標與權重		現行面向、指標與權重	
面向	權重 (%)	面向	權重 (%)
2.4 自由貿易港區事業貿易值年度預算目標達成率	5	3.2.1.2 大宗及散雜貨年度預算目標達成率	1.5
3.顧客滿意度	6	3.2.2.1 貨櫃裝卸量實際數超越前 3 年實際數平均值比率	6
		3.2.2.2 大宗及散雜貨實際數超越前 3 年實際數平均值比率	1.5
		3.3 國際客運量實際數超越前 3 年實際數平均值比率	4
		4.服務效率	8
		4.1 平均每月之船機設施可用率	2
		4.2 港灣效率	3
		4.3 裝卸效率	3
二、勞安與環保	17	二、工業安全	3
4.員工安全衛生	8	5.員工安全衛生	3
5.環保執行力	9	三、企劃行銷	5
		6.固定資產投資計畫執行力	3
		7.港埠行銷	1
		8.辦理招商活動	1
		四、財務管理	19
		9.短期償債能力	5
		10.經營能力	4
		11.獲利能力	10
		11.1 資產報酬率	6
		11.2 權益報酬率	4
三、企業社會責任	17	五、人力資源管理	12
6.進用原住民職員（工）比率	5	12.員工生產力	5
7.進用身心障礙人士職員（工）比率	5	13.用人費率	5
8.社會公益支出占比	7	14.進用原住民職員（工）比率	1
		15.進用身心障礙人士職員（工）比率	1
合計	100	合計	100

資料來源：現行指標與權重係引用交通部所屬事業 2014 年度工作考成實施要點。

六、結論與建議

針對交通部所屬 4 個港務局於 101 年 3 月 1 日合併成立臺灣港務公司，且交通部也另行成立航港局接管公權力性質的航政與港政監理業務之後，交

通部如何對臺灣港務公司進行監督、公司治理與績效評估等課題進行研究，本計畫根據研究結果分別提出策略與執行方案，供交通部與臺灣港務公司參考採用。以下分 3 節分別就本計畫所

獲得的結論、建議與後續研究建議加以報告。

6.1 結論

本計畫的主要結論綜整如下：

1. 在監督方面：在深入分析後，提出有「兩港兩制」、「一港兩管」、「授權檢討」、「規劃與建設程序」、「合資民營」等五大議題值得探討。建議可由交通部邀集相關單位就上述議題做研商討論，以促進商港管理得以權責分明、有效運作，並強化商港的經營效能。
2. 在公司治理方面：依循公司治理架構與治理制度設計的理念，並參考國際港務公司在公司治理上的作法，研提出強化臺灣港務公司之公司治理模式的具體建議作法。其次，為了讓港務公司能夠自我檢視其公司治理的推動成效，發掘自我可再強化改善的領域，研擬一套公司治理評鑑指標系統，並進一步發展成為「臺灣港務公司之公司治理評鑑實施要點（草案）」。
3. 在績效評估方面：依循目標管理原則—以成效為績效考核目標，並因應公司治理應著重永續經營的發展趨勢，將現行考核指標系統綜整、簡化後，提出一套修正的指標系統。

6.2 建議

根據上面的結論，本計畫提出下列政策建議：

1. 關於本研究提出的「兩港兩制」、「一港兩管」、「授權檢討」、「規劃與建設程序」、「合資民營」等五大議題及相關問題，建議可由交通部組成航港體制改革檢討專案小組，邀集航港局、臺灣港務公司與相關單位進行研商。
2. 有關公司治理政策，建議由交通部邀集臺灣港務公司董事會相關人員研商，擬訂「臺灣港務公司之公司治理評鑑實施要點」。是否與現行「交通部所屬事業年度工作考成實施要點」的作業時程同步作業？是否與其他部屬交通事業（如中華郵政公司、桃園國際機場公司等）同步辦理？亦可一併研商。
3. 有關績效評估，建議交通部可參考本研究研提之臺灣港務公司績效考核指標系統，酌予修改年度工作考成實施要點的指標系統。

參考文獻

1. 中華公司治理協會（2014），「公司治理」，2013年1月10日，取自：http://www.cga.org.tw/f_1_01_company_govern.aspx。
2. 吳榮貴、吳朝升、孫儷芳、張淑滿、陳銓、楊世豪及陳秋玲

- (2013)，*臺灣港務公司之監督與公司治理績效評估研究 (1/2)*，交通部運輸研究所委託研究報告，編號 MOTC-IOT-102-H1BD003a。
3. 吳榮貴、吳朝升、孫儷芳、張淑滿、陳銓、楊世豪及陳秋玲
(2014)，*臺灣港務公司之監督與公司治理績效評估研究 (2/2)*，交通部運輸研究所委託研究報告，編號 MOTC-IOT-103-H1BD003a。
 4. World Bank (1999), Corporate Governance: A Framework for Implementation-Overview.
 5. 吳朝升、陳銓、謝幼屏及吳榮貴
(2013)，「國外主要港口港務公司經營策略比較分析」，*2013 年臺灣港務公司經營策略與公司治理研討會論文集*，交通部運輸研究所，2013 年 9 月 17 日，臺灣，臺中，頁 5-1 - 5-20。
 6. 吳朝升、謝幼屏、吳榮貴及陳銓
(2014)，「臺灣港口的經營策略—學界觀點」，*2014 年臺灣港務公司經營策略與公司治理研討會論文集*，2014 年 10 月 3 日，臺灣，臺中，頁 3-1 - 3-15。
 7. 吳榮貴、王克尹及楊世豪
(2014)，「交通部航港局與臺灣港務公司的權責劃分」，*2014 年臺灣港務公司經營策略與公司治理研討會論文集*，2014 年 10 月 3 日，臺灣，臺中，頁 4-1 - 4-18。
 8. 吳榮貴、朱金元、楊世豪及王克尹
(2013a)，「臺灣港務局公司化前後航港管理與經營體制的比較分析」，*2013 年臺灣港務公司經營策略與公司治理研討會論文集*，交通部運輸研究所，2013 年 9 月 17 日，臺灣，臺中，頁 2-1 - 2-21。
 9. 周財丁 (2014)，「臺灣港口的經營策略—航商觀點」，*2014 年臺灣港務公司經營策略與公司治理研討會論文集*，2014 年 10 月 3 日，臺灣，臺中，頁 2-1 - 2-5。
 10. 孫儷芳、謝明志及吳榮貴
(2014)，「臺灣港務公司的公司治理模式」，*2014 年臺灣港務公司經營策略與公司治理研討會論文集*，2014 年 10 月 3 日，臺灣，臺中，頁 5-1 - 5-25。
 11. 孫儷芳、謝明志、吳榮貴及謝幼屏
(2013)，「臺灣港務公司化的公司治理模式」，*2013 年臺灣港務公司經營策略與公司治理研討會論文集*，交通部運輸研究所，2013 年 9 月 17 日，臺灣，臺中，頁 6-1 - 6-20。
 12. 張淑滿、朱金元及吳榮貴
(2014)，「臺灣港務公司的績效評估分析」，*2014 年臺灣港務公司經營策略與公司治理研討會論文集*，2014 年 10 月 3 日，臺灣，臺中，頁 6-1 - 6-22。
 13. 蕭丁訓 (2013)，「臺灣港務公司未來經營策略之構想」，*2013 年臺灣港務公司經營策略與公司治理研討會論文集*，2013 年 9 月 17 日，臺灣，臺中，頁 1-1 - 1-20。

14. 蕭丁訓（2014），「臺灣港務公司成立以來的經營策略與未來展望，」*2014 年臺灣港務公司經營策略與公司治理研討會論文集*，2014 年 10 月 3 日，臺灣，臺中，頁 1-1 - 1-30。

航海雷達應用於偵測港區海面油污之初探

吳立中 國立成功大學近海水文中心 專案助理研究員

莊士賢 國立成功大學海洋科技與事務研究所 副教授

簡仲璟 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 科長

李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副研究員

摘要

港區海域的大型油污不但會對海洋生態與經濟活動造成嚴重衝擊，也影響到國家門面形象。掌握油污的發生區域與運動特徵，將能更有效地進行油污災情控制與清理工作。遙測為監控大範圍空間水域極具潛力之工具，本文以 X-Band 航海雷達遙測技術為基礎，搭配影像處理與特徵辨識之演算法，來建立 X-Band 航海雷達偵測海洋油污之監控技術，以協助權責單位掌握海面油污在時空間上的變化情況。

一、前言

東亞島弧位居全球最大陸地與最大洋之間，其地理位置極具經貿價值。臺灣位處東亞島弧中樞，西邊隔著臺灣海峽與中國大陸此一龐大消費市場相鄰；向北可連結日本與韓國等貿易大國；向南則可通往新興東協市場。臺灣地理條件之優勢使航運貿易成為我國主要的經濟活動之一，因而造就

了環島多個國際商港的蓬勃發展。商港的船舶活動頻繁，若不慎發生漏油事件，除了影響航運、污染港域環境生態，也會使得國家門面形象受損。

依據我國海洋污染防治法之規定，行政院環境保護署為海洋污染防治的主管機關。為有效防治海洋污染，保護海洋環境，維護海洋生態，確保國民健康及永續利用海洋資源，環保署已發展出利用無人飛機、衛星、及 X-band 航海雷達等平臺為基礎的監測技術。海洋污染防治法第二條責成環保署管轄之範圍包括：潮間帶、內水、領海、鄰接區、專屬經濟海域及大陸礁層上覆水域，再於第十一條規定：「各類港口管理機關應依本法及其他相關規定採取措施，以防止、排除或減輕所轄港區之污染。各類港口目的事業主管機關，應輔導所轄港區之污染改善。」海面油污染為港口常見的海洋污染事件，為確保港域的環境品質，港口管理機關有責任去改善油污造成的影響，其必要的採取措施之一是建

立自主油污監控技術。

傳統的污染偵測大都以現地採樣實測為主，但考慮到海域油污染問題的複雜性和突發性，現場量測有其實際的限制與執行困難，不易滿足資訊的迫切性與即時性需求，且無法在空間域與時間域上取得完整的資訊。二次世界大戰之後，隨著遙測（remote sensing）技術的蓬勃發展，「海洋遙測」已成為海洋相關學科研究領域探索各種海洋現象的重要工具。相較於現場量測技術能夠獲取準確的時間域數據且具有高度自動化與作業化之優勢；遙測技術則以感測器可隔空探測目標（因此不致改變環境參數），且具有「廣景覽要」之優勢見長。

表1為三種目前常見的海面油污遙測技術之優勢比較。利用無人飛機攝影可取得光學影像，相對易於目測辨識，提供相對較為直接的海面油污證據。衛星微波遙測及航海雷達遙測則是依據電磁波在乾淨海面與油污覆蓋海面之間所產生回波強度的差異，藉以辨識油污覆蓋之範圍。由於衛星居高臨下，可取得極大範圍的海面影像。一般而言，衛星測得影像大小可達百公里乘百公里的範圍，且可取得遠洋的海面影像。但大多數的觀測衛星都屬於軌道衛星，要透過衛星對相同的海域進行連續監測，必須考慮到衛星的再訪率。

航海雷達原本為探測搜尋之設備，由陸地或船舶表面反射的電磁訊號得以識別陸地、島嶼或航行船舶之相關資訊。當雷達應用於船舶導航目的時，海面回波會干擾目標物之判識，故通常被視為雜訊而濾除；但進行海洋環境調查研究時，海面回波正是吾人感興趣而欲取得之訊號，可加以分析後取得海洋環境參數。相較於衛星遙測，航海雷達則可進行固定海域的連續監控，且雷達波不受夜間能見度不佳之限制，可進行不間斷的海面監控。

港口附近水域的油污監控需使用近岸高解析度的不間斷監測技術，經綜合評估，航海雷達遙測為監控港灣附近水域油污特徵的適合工具。本研究目的是以航海雷達遙測技術為基礎，開發其海洋油污偵測之技術，藉以掌握海面油污在空間上的變化特徵。

表1 三種常見海面油污遙測技術之比較

	技術優勢
無人飛機攝影	1. 機動性高 2. 光學影像相對較易於目測辨識 3. 監測成本低 4. 減少到海上工作之危險性
衛星微波遙測	1. 觀測範圍大 2. 可取得遠洋的海面影像 3. 不受日夜與能見度之影響 4. 不受雲雨影響 5. 減少到海上工作之危險性
航海雷達遙測	1. 可進行定點連續監控 2. 不受日夜與能見度之影響 3. 觀測範圍可達數公里 4. 縮短維護時間，減少資料漏失率 5. 監測成本低 6. 減少到海上工作之危險性

二、海面油污遙測技術之發展

不同海洋特徵所需之觀測尺度規模亦不同，其中海面油污的時間解析度建議約在一天之內，空間解析度則需在百公尺之內才能有效的被解析出（Kanevsky, 2009）。根據海面油污的物理特性，以往已有不同的油污監測技術被提出，表 2 彙整出各種油污監測技術之原理與特色。早期有透過目視或是攝影機等光學技術進行海面監測，但受限於水域環境的光源限制，因此以電磁波為核心的監測技術相繼被提出。例如有研究透過紅外線（對應頻率約在 300 GHz 到 430 THz 之間，對應波長則約在 1 mm 到 750 nm 之間）掃描的方式偵測海面油污，其觀測原理為油污吸收太陽輻射之後，會轉化為熱能，因此可透過紅外線感測器偵測出。雷射螢光計（laser fluorosensors）的觀測原理則是根據油污因吸收紫外光後，油污合成物內電子被激發，導致油污會產生螢光，因而可透過雷射螢光計偵測出（Brown and Fingas, 2003）。輻射計則是根據油污與一般海面所反射輻射量的不同，藉以辨識出油污所在區域。相較於上述的油污監測技術，微波（microwave）技術的優勢在於日夜皆可進行觀測，其偵測油污的原理在於乾淨海表面與覆蓋有油污之海表面

的毛細波所造成的海面電磁回波量存有差異。

表 2 各種油污遙測技術原理與特色

遙測方式	原理	技術特色
目視攝影機 可見光譜儀	光學偵測	適用於能見度佳之海域
紅外線感測器	偵測油污熱能	較適合日間觀測
紫外線感測器	偵測油污反射光	適合日間觀測
雷射螢光計	偵測油污因吸收紫外光後產生螢光	夜間適合近距離觀測
輻射計	偵測油污所產生的輻射	具量測油污厚度的潛力
微波雷達	偵測油污與乾淨海面電磁回波差異	日夜皆可進行觀測
微波散射計	量測油污與乾淨海面回波散射差異	日夜皆可進行觀測

從 1960 年代起，就有學者發現雷達回波可反映出一些海面之波紋特徵（Ijima et al., 1964），且不同頻段電磁波於海面所產生的回波效果不盡相同。

為能從 X-band 雷達的海面回波影像中辨識出油污所在區域與一般海面之差異，在 1990 年代已有學者透過實驗證實 X-band 電磁波在油污監測應用之效果較 L-band 與 C-band 更理想（Fingas and Brown, 1997）。此外，針對油污監測之應用，早期有 Tennyson（1988）評估 X-band 航海雷達應用於海面油污監測之可行性，並成功偵測到距離雷達天線 8km 之海面油污特徵。後期則有挪威的團隊投入此一領域之研究，並推出以 X-band 雷達為技術核心的商業化監測系統（Egset and Nøst,

2007)。

在國內，交通部運輸研究所港灣技術研究中心與臺灣大學進行 X-band 雷達遙測系統之建置(王，1999)，為國內開發 X-band 雷達海洋環境遙測系統之先驅。港灣技術研究中心也與臺灣海洋大學(尹等，2005；翁等，2011)的研究團隊共同合作，持續投入此領域之技術發展與研究討論，並針對雷達所測得海面影像的統計特徵進行深入之檢討，獲得許多豐碩的成果。成功大學近海水文中心自 2002 年起持續進行雷達系統軟硬體技術之研發，包括：自行開發雷達訊號的取樣、分析方法與軟體程式，並經將雷達系統自行改裝為陸上移動式觀測系統，對臺灣沿海進行機動性的觀測作業，在 X-band 雷達遙測領域已獲得了許多研究結果(Wu et al., 2011)。

前述國內之研究都是利用雷達遙測技術進行海洋物理參數的量測，並無應用於油污偵測之研究。國立臺灣大學的研究團隊雖曾針對 2001 年 1 月 14 日的阿瑪斯油污事件進行 X-band 雷達監測與檢討(王等，2001)，但因遲至 2 月 9 日才於南灣進行海面遙測，而未能發現有任何明顯之大面積油污帶漂浮在海面上，只在阿瑪斯號沈船下風處有一不明顯的雷達回波暗帶，疑似由油漬所造成，這應是國內學界利用 X-band 雷達進行油污監測的先例。

三、航海雷達偵測油污技術之建立

X-Band 航海雷達可應用於海域油污偵測的關鍵在於海面油污反應在雷達回波訊號上的成像機制。雷達影像是依據觀測範圍內不同位置所反射的回波強度進行成像，而主導海面電磁回波的效應主要分為 tilt modulation 與 hydrodynamic modulation 兩類。tilt modulation 指的是海浪波面的傾斜特徵，不同斜率(傾角)的波面會對電磁波產生不同的回波效果。當海面起伏大或波浪大時，波動之海面類似鏡面，雷達波射向鏡面產生反射，其反射強度與雷達掠角(grazing)有關。hydrodynamic modulation 則指出了波浪水粒子運動過程中，因水動力效應，造成波浪表面不同區段的粗糙度差異。根據波浪理論，迎波面上波峰的水粒子朝波谷方向運動；波谷處的水粒子則朝波峰方向運動。這樣的現象造成迎波面的幅聚(convergence)效應，進而增強了重力波面上的粗糙度(毛細波數量)。但在背波面上的水粒子則分別向波峰與波谷運動，造成波面的幅散(divergence)效應，致使背波面的毛細波減少，波面粗糙度相對較迎波面平滑。而粗糙海面上所呈現數公分波長的毛細波就是 X-band 雷達回波之重要關鍵，也是海面電磁回波產生布拉

格散射 (Bragg scattering) 的主因。

利用雷達電磁波偵測海面油污之原理是立基於電磁波接觸到乾淨海面與油污所覆蓋海面會產生不同的回波效果。海面油膜對短波長之重力波和毛細波具有一定的抑制作用，稱為 Marangoni damping。因油污黏滯性的影響，抑制了海面的布拉格波（可造成雷達電磁波產生布拉格散射之海面波浪條件），進而影響海面電磁波布拉格散射的效應，此一機制是從雷達影像中區分油污與一般乾淨海面之間差異的重要物理基礎。為能透過定量的數據來評判海面油污對雷達回波的影響，Wismann et al. (1993) 以海面污染薄膜與清潔海面之間的雷達回波比值定義為抑制比 (damping ratio)，透過此一定量指標來評估不同電磁波段與不同掠角 (grazing angle) 在海面污染薄膜與清潔海面的回波特徵。圖 1 顯示不同電磁波段對海面的雷達波抑制比，證實了海面污染薄膜確實會影響電磁回波之特徵。值得注意的是，不同成分的油污也會造成不同程度的海面波動抑制現象。換言之，不同成分的油污會造成不同程度的雷達回波效果。

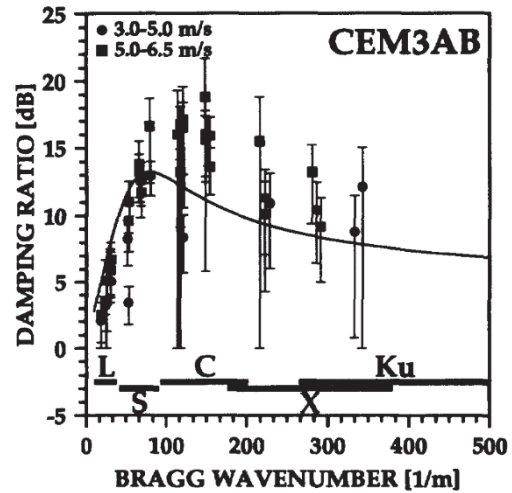


圖 1 電磁波段對海面的雷達波抑制比
(Wismann, Theis et al., 1993)

為能達到航海雷達監測海面油污之目標，需整合下列三項關鍵技術，作為雷達遙測技術之核心：

3.1 雷達天線系統

本文油污監測系統採用的是現有多數船舶所搭載之雷達設備，但這些商用雷達原本皆僅作為船舶導航用途，並未具有油污監測功能。為使既有的雷達設備增加油污監測能力，有必要先檢視其天線系統能否達到油污監測功能之需求，以及選定各種技術參數的作業設定值，詳見下述說明：

1. 工作波長：雷達所用的波長愈短（即頻率越高），目標的反射能力越強，且天線尺寸也愈小，亦即在同樣天線尺寸下電波波束愈狹，方位測量的正確度愈高。本文使用 X-band 雷達之工作波長約為 3cm，對應之 Bragg 散射波約為 1.5cm，對海

面能產生較好的散射效果。

2. 電波波束：電波的波束是錐體形的，整個波束的立體角愈小，射頻能量愈集中，目標的反射也愈強；波束水平方向愈窄，所獲得的雷達回波影像則愈精細。較窄的水平束寬可以改善雷達影像之側向解析力，本文所使用之航海雷達水平束寬為 1.2° 。
3. 脈衝重複頻率：每秒內發射的脈衝次數要看所測目標的距離遠近而定。若脈衝頻率選擇過高，反射回來的脈衝未到達時即發射出下一個脈衝，這樣就很難辨別哪個回波是由哪個探測脈衝反射的訊號，因此就無法測量距離。但過低的脈衝重複頻率則會使接收機在天線的旋轉一圈中所收的脈衝累積數目減少，從而使雷達影像中的目標物特徵變不明顯，所以也是不利的。本文所使用雷達的脈衝重複頻率最高為 3000Hz。
4. 脈衝寬度：脈衝寬度愈窄，區別距離的能力愈強，最短可測距離愈短，亦即雷達的盲區會愈小。本文所使用航海雷達的脈衝寬度最短為 μsec ，經計算得雷達盲區的半徑小於 50m。
5. 天線的轉速：天線轉速愈快，雷達觀測海水面的頻率會愈高。觀測頻率雖然與偵測海面油污效果的關係不大，但愈高的觀測頻率能完整的描述波浪在時間域的變化特性。雷

達天線的轉速一般約為 20~60rpm，本文所使用航海雷達的天線的轉速為 42rpm，經計算得知雷達系統約每 1.43sec 即可獲取一張雷達影像。

3.2 高速訊號取樣技術

因 X-band 雷達設備中所獲得的回波訊號為類比 (analog) 電壓值，不易分析與保存，必須透過資料擷取與數位化轉換技術俾使回波訊號轉換為電腦可辨識、儲存與分析的數位值。雷達訊號取樣頻率通常由使用者自定，但是一般來說要符合 Nyquist sampling theorem，即須考慮有效取樣頻率 (effective sampling frequency)，否則易造成取樣失真 (aliasing)。有效取樣頻率必須大於兩倍的 Nyquist frequency。本文針對雷達訊號將採用高速取樣頻率，以 20MHz 的取樣頻率擷取雷達訊號，可取得之雷達影像空間解析度為 7.5m/pixel，以確保失真情形不易發生。

3.3 雷達影像處理技術

將觀測海面的雷達回波影像進行特定的影像處理分析是獲得油污資訊的核心技術。海面回波影像如含有油污資訊於其中，需先經由適當的影像處理方法才能從中萃取油污特徵資訊。因此本文先針對航海雷達成像技術進行研究與討論，藉以掌握 X-band 雷達偵測油污之基礎技術。

雷達的觸發電路每隔一段時間會產生作用時間很短之觸發脈衝，並透過雷達天線將電磁波發送。在相鄰兩脈衝波發射時間內，天線則接收脈衝波經由外在環境反射所得到之回波。電磁波之行進速度與光速相同為 3×10^8 m/sec，距離雷達愈遠處，其回波就會愈慢返回到雷達天線，也因此可藉由雷達訊號時序列中不同時間之變化計算出雷達回波的空間位置。

雷達回波訊號時序列（如圖 2）中每一脈衝波代表著雷達天線在轉動空間中所指向的每一個方位角（azimuth）。而相鄰脈衝波之間的訊號則代表著在空間中某一方位上，距離雷達不同遠近位置所返回的回波強度。雷達回波訊號的擷取及數位化是透過高速取樣的資料擷取設備來進行，取樣頻率（ S_R ）決定了雷達影像徑向的空間解析度（ Δ_R ）：

$$\Delta_R = \frac{V_e}{2S_R} \quad (1)$$

上式中， V_e 為電磁波的行進速度。

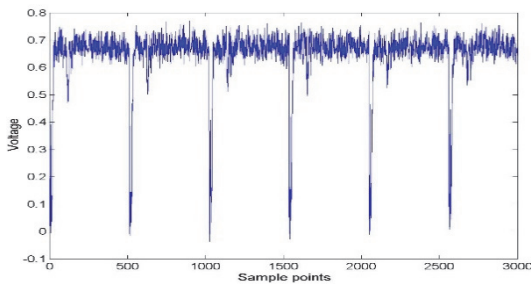


圖 2 雷達取得之回波時序列案例

根據式(1)可推算當使用取樣頻率為 20 MHz 的資料擷取卡擷取雷達訊號時，雷達影像之徑向的空間解析度為 7.5m/pixel。至於雷達影像側向的空間解析度（ Δ_s ）則受到雷達硬體規格的影響：

$$\Delta_s = \frac{2\pi R}{F_{PR}} T_s \quad (2)$$

上式中 F_{PR} 為雷達的脈衝波發射頻率 (Hz)； T_s 為雷達天線旋轉一圈所需時間 (sec)； R 為雷達徑向觀測範圍，亦即雷達的觀測半徑 (m)。本文使用之雷達脈衝波發射頻率為 3000 Hz，天線轉速為 42 rpm，由上述之數學式可計算出雷達影像中距離雷達 3 km 處任一位置點之側向的空間解析度約為 4.4m/pixel。

由於後續的影像分析方法是在卡氏坐標的影像矩陣架構下進行，本文透過坐標轉換及空間線性內插的方法，將原本是極坐標的雷達影像（如圖 3）轉換成卡氏坐標上所對應的影像矩陣（如圖 4）。考慮到雷達影像的徑向空間解析度固定為 7.5m/pixel，本文坐標轉換完後，在進行空間線性內插時，將卡氏坐標影像的空間解析度定為 7.5m/pixel。

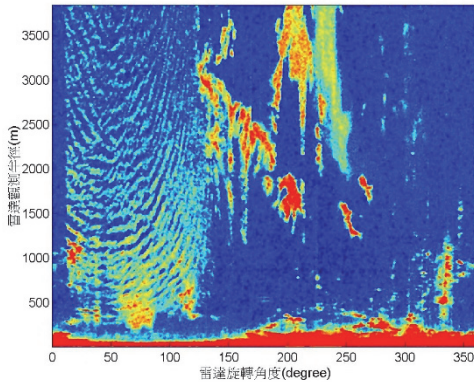


圖 3 回波時序序列轉換成極坐標影像

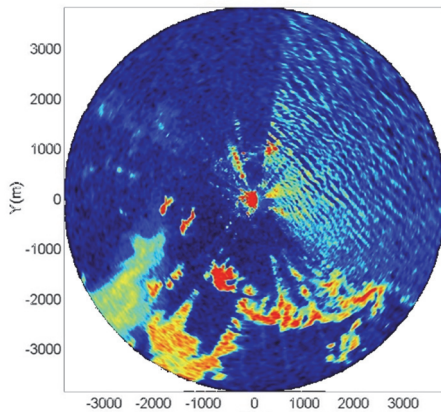


圖 4 極坐標影像轉換成卡式坐標影像

為能更有效從 X-band 雷達回波影像中提取出海面油污特徵，本文將透過影像處理進行影像特徵強化。由於雷達觀測屬於間接式的遙測技術，在觀測過程當中，外在環境或多或少會對觀測結果造成一定程度之影響。在觀測區域的雷達影像訊號中，一些會影響到海面回波訊號偵測的電磁回波皆被視為雜訊。由於 X-band 之電磁波對於海面之重力波（風浪）會產生較為強烈之回波，而這些重力波之波紋會影響油污目標物之判讀。此外，一些海面船舶所造成的強烈回波，也有可

能會影響到海面回波訊號之研究。為能更完整的取得研究所需之回波資訊，須於雷達影像分析過程的前期進行影像訊號的減噪程序。

影像訊號減噪最直接的做法就是進行濾波（filtering），濾波程序雖可能會影響後續的影像特徵邊緣偵測的結果，然而本研究的重點為發展具有潛力的油污影像處理方法，一旦取得實際油污影像就可深入檢討影像處理方法的實際效果，以及其效果受到濾波程序影響的程度。

一般常見的影像濾波方式可區分為空間域濾波（spatial filtering）及頻率域濾波（frequency domain filtering）。空間域濾波技術中，以線性平滑濾波法最為簡便，其所使用之濾波器一般稱為均值濾波器（averaging filter），或稱作低通濾波器（lowpass filters）。其方法是以濾波器遮罩（mask）所定義之像素區域中回波能量的平均值，取代原影像中每一個像素對應之原始回波能量值（圖 5）。

空間影像 $f(x, y)$ 經過與空間濾波器遮罩的摺積運算之後，得到濾波後的影像 $g(x, y)$ ，其數學關係可由下式表達之：

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x+s, y+t) \quad (3)$$

上式中， $w(s, t)$ 為所設計之濾波器遮罩。以均值濾波器為例，其遮罩函

數可表示為：

$$w = \begin{bmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{bmatrix} \quad (4)$$

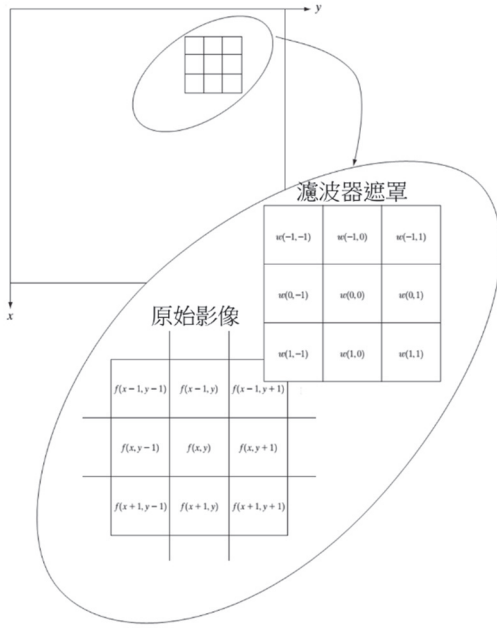


圖 5 影像空間域濾波示意圖
(Gonzalez and Woods, 2006)

另一種常用的濾波器遮罩為拉普拉斯 (Laplacian) 濾波器，其遮罩函數有許多不同的表示式，其中常見為：

$$w = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

相較於空間域濾波，頻率域濾波則是先透過譜轉換將空間影像轉換至頻率域，並透過頻率域的濾波器與前述頻率域的影像函數進行演算，之後再透過逆譜轉換，取得濾波後之影像

分析結果，分析流程如圖 6 所示。

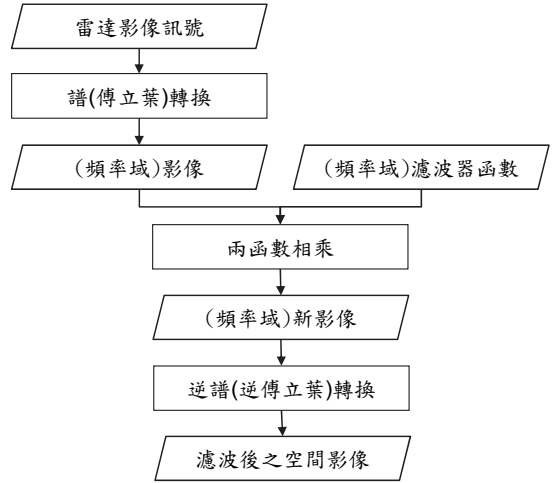


圖 6 影像頻率域濾波減噪之流程

空間域濾波

$$f(x,y) \rightarrow \boxed{h(x,y)} \rightarrow g(x,y)$$

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y)$$

頻率域濾波

$$F(u,v) \rightarrow \boxed{H(u,v)} \rightarrow G(u,v)$$

$$G(u,v) = F(u,v) H(u,v)$$

$$(g(x,y) = \mathbf{F}^{-1}(F(u,v) H(u,v)))$$

$\mathbf{F}^{-1}$: 逆傅立葉轉換

圖 7 空間域濾波與頻率域濾波之關係

事實上，空間域與頻率域的線性濾波之間存在著如式 (6) 與圖 7 之關係：

$$f(x,y) * h(x,y) \Leftrightarrow F(u,v) H(u,v) \quad (6)$$

上式中，* 代表兩函數之摺積 (convolution，或稱卷積或迴旋積)，

$F(u,v)$ 與 $H(u,v)$ 則分別為 $f(x,y)$ 與 $h(x,y)$ 經傅立葉轉換後於頻率域之函數。針對較小尺寸的影像矩陣之計算，空間濾波會比頻率域濾波更有效率（Gonzalez and Woods, 2006）。但針對大尺寸的影像矩陣而言，若透過快速傅立葉演算法進行，則可有效減少運算量。

為界定出油污分布範圍的邊界，本文進一步以影像特徵邊緣偵測演算方法來辨別海面是否有油污。影像邊緣檢測的目的是要找出回波影像強度值有劇烈變化或是有突然改變的邊界位置，其數學方法是利用回波影像的梯度值（gradient）變化來判定，包括一階梯度值和二階梯度值都是判斷影像邊界的良好工具。圖 8 為一影像邊緣偵測案例，透過該影像的一階梯度值和二階梯度值計算，可求取出邊緣特徵之差異。二維空間影像 $f(x,y)$ 可以式（7）計算其梯度值：

$$\nabla f(x,y) = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (7)$$

上式中， G_x 為影像水平方向之梯度值； G_y 代表垂直方向之梯度值。為方便判斷影像中每一個像素點的梯度值與其方向，可透過下式計算之：

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (8)$$

$$\theta_G = \tan^{-1} \left(\frac{G_y}{G_x} \right) \quad (9)$$

在實務影像分析過程中，考慮到回波影像本身屬於離散矩陣，而非連續型函數，可透過設計相關遮罩函數與影像進行摺積運算（Parker, 2010）：

$$G_x = M_x * f(x,y) \quad (10)$$

$$G_y = M_y * f(x,y) \quad (11)$$

M_x 與 M_y 分別為 x 方向與 y 方向的遮罩函數，以 Sobel 函數為例，其函數可表達為：

$$M_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$M_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

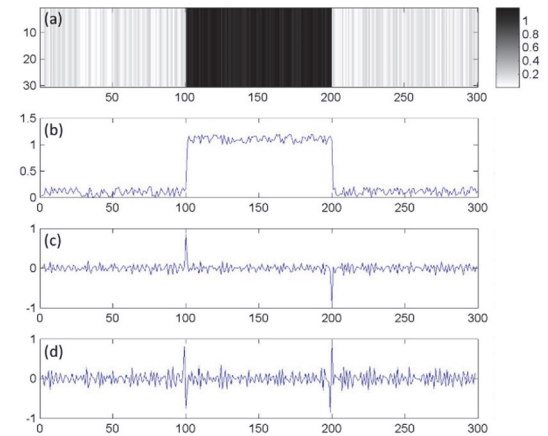


圖 8 (a) 影像範例；(b) 影像橫剖面之影像強度；(c) 影像強度之一階微分；(d) 影像強度之二階微分

3.4 雷達偵測油污環境條件之檢討

根據前述討論，X-band 航海雷達雖具有監測海面油污之能力，但每一項觀測設備在實務應用時都有其使用之限制，航海雷達的油污監控能量也有其適用之環境條件。當無風或是風速太微弱時，海面布拉格波相對較不明顯，致使雷達電磁波經過油污與一般乾淨海面之間的回波特性之差異並不明顯。然而，一旦風吹拂海面產生毛細波後，油污的抑制作用會使得電磁波的回波效應與乾淨海面的毛細波造成的電磁波回波效果明顯不同，因而有助於辨識油污與一般乾淨海面之間的差異。一般而言，風速達 2m/sec 左右，雷達偵測油污的效果就可被辨識出。Alpers and Hühnerfuss (1989) 提出油污抑制海面波動的效應與海面波長與風速有關，波長愈短與風速愈大，海面波動被抑制的現象則愈明顯。然而，風速若是太過強大，卻會影響雷達監測海面油污的能力，一般而言，當風速超過 10m/sec~14m/sec 時，海面油污會被海面碎波所攪動，造成油污抑制海面布拉格波的效應會減弱，進而導致雷達影像中油污區域與清潔海域之回波特性之差別會減小。

除了船艦之外，風浪或湧浪在雷達影像中所產生的亮暗相間之波紋影像（如圖 4 所示）也是影響油污辨識的

因素之一，此種波紋現象為海面波鋒前緣所造成的強烈回波（亮帶）與因重力波水體遮蔽效應所造成的微弱回波（暗帶）所共同組成的海面特徵，可據以推估波浪特性。有鑑於海面之重力波會以約略每秒數公尺的速度移動，如將一段適當時間長度內的連續回波影像序列進行平均，可有效將海表面影像的重力波特徵移除，藉以解析海面影像中所測得的其他特徵。

降雨也會影響雷達監測海面油污的效果。當降雨強度越強以及電磁波長越短時，電磁波隨距離之衰減效應會越明顯。除大氣中的雨滴之外，雨滴擊打海面所造成的效應也是影響雷達偵測油污的因素之一。雨滴撞擊海面時，會產生環波與二次撞擊等現象，進而導致海面粗糙度變大。然而，當雨水進入到海水體後，則會產生水下擾動，這卻會造成水體本身黏滯力變大，反而會抑制原本存在於海水面的毛細波，進而導致海面粗糙度變小，影響雷達回波之機制，也因此造成降雨期間的海面雷達回波機制更為複雜。

除上述的影響之外，湧升流可能會造成海面產生懸浮生物膜（biogenic slicks），因造成黏滯性的改變，進而也抑制了海面的毛細波。然而湧升流屬於較大尺度的海洋物理現象，對於航海雷達監測相對尺度較小的油污現象，其影響相對較小。

3.5 雷達監測之現場作業評估

將雷達系統設置於海岸邊進行現場監測作業時，雖可少去海上工作的危險性，但岸上適合架設雷達天線的地點必須考量諸多因素，包含架設位置、電力供給、系統安裝的困難度等，以及其他相關配合條件。以下設置條件的檢討與評估可作為未來進行海面監測作業之參考。

1. 雷達架設位置：雷達架設位置要以能取得越大範圍的海面回波訊號為優先考量，但考慮到實務應用時，越長距離的觀測模式會減低雷達的脈衝重複頻率，進而減低雷達影像的側向解析度。有鑑於此，本文所使用的系統預設觀測距離為 4.5km，藉以取得最佳之影像側向解析度；一旦有遠距離的油污事件發生，可依照實際需求調整雷達監測範圍。雷達觀測範圍與天線架設高度有關，考慮到海面回波之效果，雷達天線的架設高度理論上越高，其觀測掠角相對越大，也就越有利於海面回波之偵測，因此雷達架站的優先選擇為附近海岸地區的制高點。除天然之地勢之外，在現場還可考慮在建築物頂樓進行雷達架設的可行性。
2. 雷達系統的電力供給：雷達系統對於電力的需求可分為三部份，分別為雷達天線本體、訊號擷取器、及

分析用的電腦設備。雷達天線需要進行電磁波的發射、接收、及天線之轉動等動作，若以本文使用之雷達系統的作業條件：每小時觀測一次、每次擷取 64 張連續影像為例計算，每次觀測包含暖機、訊號擷取、分析、資料儲存等工作之作業時間約需 15 鐘，在海岸現場沒有穩定市電供應的情況下，2000W 汽油發電機經實際測試是足夠負荷整個雷達系統所需的電力。

3. 現場系統組裝：海面油污偵測是高度時效性的作業，抵達現場後，如能越早將系統組裝架設完成以進行觀測，則越能取得完整資訊。本文設計之雷達觀測系統包含：雷達天線本體、天線支架、電腦系統、發電機等元件，上述設備利用一般休旅車即可裝載運送，抵達現場後可在半小時內完成系統組裝，並啟動監測作業。

上述雷達系統的各配置條件與規格整理如表 3 所示。

表 3 油污監測之雷達配置條件與規格

系統項目	規 格
監測範圍	半徑 4km 以上之區域
影像解析度	7.5m/pixel
儀器大小	6.5ft 之船用雷達天線加上控制主機與電腦
安置位置或高度	天線與觀測水域之間需有效避開其他障礙物之影響。
電源供應	穩定 110V 市電或是發電機

四、現場試驗與雷達影像分析

4.1 海岸現場試驗

在實驗室進行一系列的系統元件檢校、組裝調校、系統整合測試、及雷達訊號測試與確認後，進一步前往海岸現場進行雷達系統之功能測試。由於海面油污染為偶發事件，在實際油污事件發生前只能先透過海面上既存之大面積特徵物的偵測作為前期測試。

海上的船艦、蚵架、漂流木、油污等浮體都會在雷達回波影像上造成異於一般海水面的回波特徵與強度，為取得目標物的正確資訊，在取得雷達影像後必須進行謹慎之判斷。圖9為本研究在臺南海岸現場取得的海面之雷達回波影像案例，其中之單點強烈回波可能為海面船舶，為確保海上安全，船舶之間都會保持足夠的安全距離，因此回波訊號強烈且分散。蚵架則因養殖效益之考量，大多是條狀密佈在不同區塊，因此在雷達影像上呈現大片範圍之強烈回波，但該強烈回波區域中存有相對微弱回波之交錯分隔，這是因為蚵架與蚵架之間的間隙所造成之結果。此外，船舶因具有自主動力，一般漂流物則無，透過長時間的連續監測，可由目標物的移動軌跡與速度辨識出其差異性。相較於上

述目標物，油污因會減弱雷達回波強度，因此影像中所呈現的回波強度會較一般海面更微弱。

將圖9的一系列連續雷達影像進行時間平均，結果如圖10所示，顯示此一影像濾波處理程序可有效地將圖9之風湧浪造成的波紋特徵濾除，且使得海面蚵架所造成之回波較圖9的結果更為明顯。

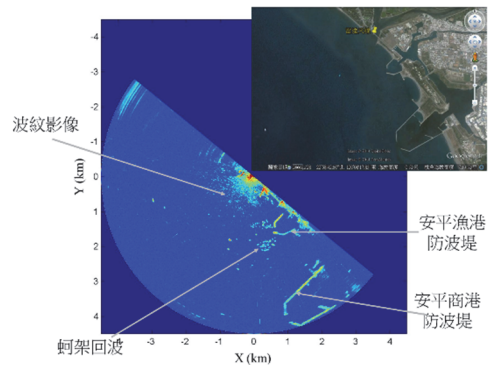


圖9 臺南海域現場之雷達影像

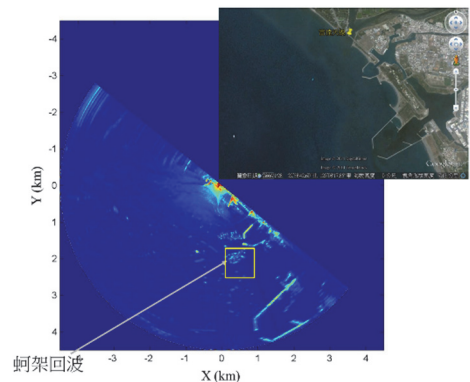


圖10 影像時序列對時間域平均後結果

4.2 雷達影像分析結果

由於現場測試期間的監測海域並無油污事件發生，為檢驗油污偵測系統之影像分析功能的識別能力，本文

暫以分布的蚵架作為分析對象。進一步利用圖 10 中方框所標示區域的雷達子影像進行測試分析，藉以確認相關演算法應用於影像特徵辨識的可行性。考慮到未來所分析的海面油污回波強度應低於乾淨海面之回波強度，但影像中的蚵架回波強度則較海面回波強烈，因此將所分析的子影像先進行強度反轉，也就是讓蚵架所在區域的回波強度低於背景海面的回波強度。圖 11 的上圖為海面蚵架區域的子影像強度；下圖則為從原始影像中擷取其中一列之回波強度序列值，從圖中可發現，原始影像中海面背景回波強度值呈現些許之震盪特徵。為避免後續進行影像邊界辨識時產生誤判，本文先透過 3.3 節之影像濾波程序對原始子影像進行均值濾波處理，結果如圖 12 所示，顯示濾波後的海面背景回波強度值已相對較為穩定，有助於後續影像邊界之辨識。

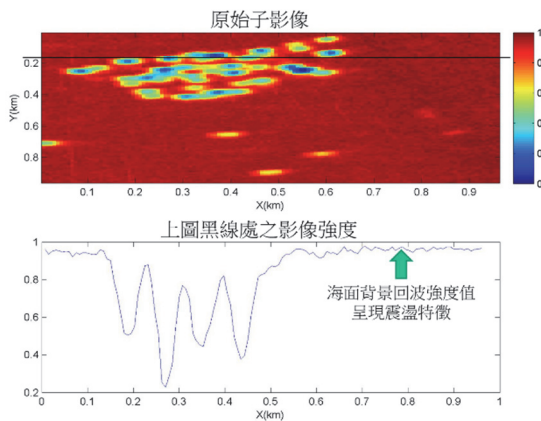


圖 11 海面蚵架區域的原始子影像

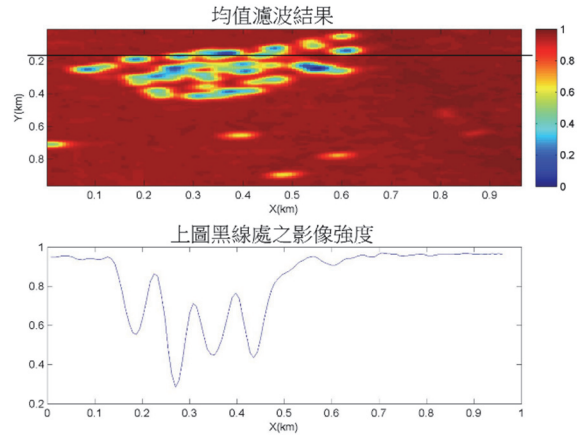


圖 12 蚵架影像經均值濾波後之結果

將圖 12 結果再進行影像邊緣偵測，可將原始之圖 10 中方框所標示區域的雷達子影像內的蚵架回波訊號強化，如圖 13 所示，顯示前述之影像特徵辨識演算法確實可界定出蚵架的分布。經過上述測試，顯示此一雷達系統與演算程序應具有偵測海面油污的能力，然其辨識功能的準確度仍待實際油污事件發生後，進一步的現場監測與分析檢驗去證實。

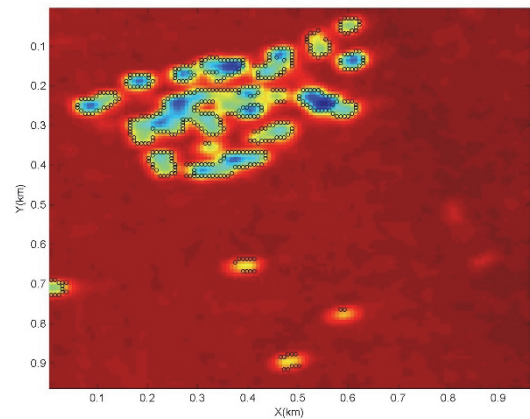


圖 13 均值濾波影像進行邊緣偵測結果

五、結論

本文之目的是以 X-band 航海雷達設備為基礎，發展海洋油污染偵測之技術。為能掌握當前油污監測技術的發展趨勢與其適用條件，本文針對現有海域油污遙測技術進行綜整回顧與討論，並透過學理之檢討確認 X-band 雷達觀測技術應用於油污監測之可行性。

考慮到海面回波成像與影像訊號之處理是辨識海面油污特徵的基礎，本文針對航海雷達成像技術以及後端影像處理技術進行研發，包括影像訊號的雜訊抑制與目標物特徵分析理論之研究，藉以作為海面油污監測的基礎。

由於雷達技術發展期間並未遭遇大型油污之溢油災害，本研究先嘗試利用影像演算法進行現場海面回波影像之分析，結果顯示影像演算法能界定出海面蚶架之分布範圍。未來在取得海面油污影像後，將依循本文之處裡方法進行油污分布範圍之界定，輔以空照光學影像以資檢驗。

參考文獻

1. 王甯 (1991)，「淡水港雷達遙感波浪監測研究 (I)」，港灣技術研究中心報告。
2. 尹彰、翁文凱、周宗仁、林騰威、陳泰宏、邱永芳、何良勝

(2005)，「應用船用雷達影像分析波浪資料」，第 27 屆海洋工程研討會論文集。

3. 翁文凱、周宗仁、尹彰、邱永芳、何良勝 (2011)，「利用海雜波推算推算海面波場特性」，海洋工程學刊，第 11 卷，第 1 期，第 31-55 頁。
4. Alpers, W., and H. Hühnerfuss, 1989, The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem. *Journal of Geophysical Research, Oceans* 94 (C5), pp. 6251-6265.
5. Brown, C.E., and Fingas, M.F., 2003, Review of the development of laser fluorosensors for oil spill application, *Marine pollution bulletin*, Vol. 47, pp. 477-484.
6. Egset, C.E., and Nøst, E., 2007, Oil Spill Detection System Based on Marine X-band Radar, *Sea Technology*, Apr 2007.
7. Fingas, M.F., and Brown, C.E., 1997, Review of oil spill remote sensing, *Spill Science & Technology Bulletin*, Vol. 4, pp. 199-208.
8. Ijima, T., Takahashi, T., and Sasaki, H., 1964, Application of radars to wave observations, *Proc. Conf. Coastal Eng.*, pp.10-22.
9. Gonzalez, R.C., and Woods, R.E., 2006, *Digital Image Processing (3rd Edition)*, Prentice-Hall, Inc.

10. Kanevsky, M.B., 2009, Radar Imaging of the Ocean Waves, Elsevier, Oxford.
11. Tennyson, E.J., 1988, Shipborne radar as an oil spill tracking tool, In: Proceedings of the Eleventh Arctic and Marine Oil spill Program Technical Seminar, Ottawa, Ontario, pp. 385-390.
12. Wismann, V., Theis, R., Alpers, W., and Hühnerfuss, H., The damping of short gravity capillary waves by experimental sea slicks measured by a multifrequency microwave scatterometer, in Proc. OCEAN, vol. II, Victoria, Canada, 1993, pp. 342–347.
13. Wu, L.C, Chuang, L.Z.H, Doong, D.J., and Kao, C.C., 2011, Ocean Remote Sensed Image Analysis by the Two-dimensional Continuous Wavelet Transform, International Journal of Remote Sensing, Vol. 32, No. 23, pp. 8779-8798.

港 灣 季 刊 徵 稿 簡 訊

1. 本刊為提供國內港灣工程界同仁交換工作經驗與心得之園地，歡迎工程、學術界之同仁提供港灣工程相關之工程動態、實務、工程新聞、技術新知、地工技術、工程材料、營運規劃及其他有關之工程簡介或推動中之計畫等的報告、論著或譯述。
2. 投稿者應保證所投稿件無侵害他人著作權情事，如有違反，願就侵害他人著作權情勢負損害賠償責任，並對中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）因此肇致之損害負賠償責任。
3. 來稿經本刊接受刊登後，作者應附具著作授權同意書，同意非專屬授權予本刊做下述利用：
 - (1) 以紙本或是數位方式出版。
 - (2) 進行數位化典藏、重製、透過網路公開傳輸、授權用戶下載、列印、瀏覽等資料庫銷售或提供服務之行為。
 - (3) 再授權國家圖書館或其他資料庫業者將本論文納入資料庫中提供服務。
 - (4) 為符合各資料庫之系統需求，並得進行格式之變更。
4. 作者應保證稿件為其所自行創作，有權為前項授權，且授權著作未侵害任何第三人之智慧財產權。
5. 稿件每篇以八頁（含圖）（4000~5000 字）以內為原則，稿酬從優；請附磁片或 E-mail，並請加註身分證字號及戶籍地址（含鄰、里）。
6. 本刊每年刊行 3 期，分別於 2 月、6 月、10 月出版。如蒙惠稿請於每期出版前 30 日寄交本刊。
7. 聯絡電話：(04)2658-7139 馬維倫
傳真電話：(04)2656-4415
E-mail：elisa@mail.ihmt.gov.tw
8. 歡迎賜稿，來稿請寄：
43542 臺中市梧棲區中橫十路 2 號
交通部運輸研究所港灣技術研究中心「港灣季刊編輯委員會」收