

港灣季刊



季刊 第 106 期

要 目

- ❖ 公路邊坡淺層滑動依時預警與無線感測模組研發
- ❖ 電子海圖系統之應用
- ❖ 橋梁振動頻率量測方法與安全評估模式之研發
- ❖ 高雄港在新航路趨勢下的因應策略
- ❖ 防救災系統參與港研中心105年防災演習

中 華 民 國 106 年 2 月 出 版

港灣季刊

(原港灣報導季刊)

第 106 期

交通部運輸研究所

中華民國 106 年 2 月

港 灣 季 刊 第 106 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)26587132

總 編 輯：吳玉珍

編輯委員：邱永芳、朱金元、許英正、謝明志、蔡立宏、蘇青和、
陳鈞彥、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：100 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：九茹印刷有限公司

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、公路邊坡淺層滑動依時預警與無線感測模組研發……………1

張文忠 國立成功大學土木工程學系 副教授
黃安斌 國立交通大學土木工程學系 教授
陳志芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員
謝明志 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員兼科長

二、電子海圖系統之應用……………25

邱永芳 交通部運輸研究所 港灣技術研究中心主任
黃茂信 交通部運輸研究所 港灣技術研究中心副研究員

三、橋梁振動頻率量測方法與安全評估模式之研發……………42

鄭明淵 國立臺灣科技大學營建工程系特聘教授
廖國偉 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
郭佑綱 國立臺灣科技大學營建工程系碩士

四、高雄港在新航路趨勢下的因應策略……………63

陳春益 長榮大學航運管理學系 教授
楊清喬 國立高雄海洋科技大學航運管理系 副教授
戴輝煌 國立高雄海洋科技大學航運管理系 教授
朱金元 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副主任
謝幼屏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

五、防救災系統參與港研中心 105 年防災演習……………85

曾文傑 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
邱永芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
吳勝宏 弘光科技大學環境與安全衛生工程系助理教授

公路邊坡淺層滑動依時預警與無線感測模組研發

張文忠 國立成功大學土木工程學系 副教授
黃安斌 國立交通大學土木工程學系 教授
陳志芳 交通部運輸研究所臺灣技術研究中心研究員
謝明志 交通部運輸研究所臺灣技術研究中心研究員兼科長

一、前言

臺灣地區地狹人稠，山區與坡地仍有人類與經濟活動，山區道路除為當地居民對外聯繫主要途徑，更具有觀光與國防之重要性，而臺灣受造山運動影響導致地質脆弱之坡地分佈廣泛，且颱風與地震發生頻繁，整體天然環境因素導致坡地崩塌無法避免，而山區公路邊坡崩塌常導致人員損傷、交通中斷及經濟損失等。山區道路邊坡崩塌主因為地震與降雨引致，其中降雨引致之邊坡破壞其發生頻率與範圍遠較地震引致崩塌為高，且降雨引致之邊坡破壞具有一定之延時與前期徵兆，使得此類災害之預警較為可行且易發揮成效。

現有對於降雨引發崩塌之評估方法可概分為經驗法與解析法兩種。經驗法為根據以往崩塌資料及崩塌的內在因素與外在誘因，如地形、地質、降雨資料與崩塌相關性之統計迴歸與整理，歸納出簡易的關係式，作為評估崩塌之用。經驗法因具有簡單與單純性，因此較為廣泛地被使用，尤其是對區域性之坡地崩塌分析與預警機制之擬訂已行之有年，如以累積降雨量或降雨強度為基準發佈土石流警戒燈號即為典型之

應用。但是此類經驗法因缺乏嚴謹之力學概念，且近年來受極端氣候常態化影響，降雨有趨於異常強烈之傾向，導致近期之崩塌案例其緩坡之崩塌面積擴大與陡坡之滑動面深度增加，限於過去類似經驗有限，經驗法則對此類邊坡崩塌之預測有其侷限。

公路邊坡依其滑動深度可分為淺層與深層滑動，二種邊坡破壞其滑動機制與致災因子顯著不同，因此其解析程序及對應之崩塌預警模式亦應分開考慮，本研究以較常見之淺層降雨崩塌為研究對象，淺層滑動依 Varnes (1978) 之邊坡移動分類方法屬土壤之平面或圓弧滑動，水土保持局山崩分類方法中之地滑，依楊樹榮等(2011)所提本土化山崩分類系統中之弧形崩塌及平面型崩塌，其定義為發生於崩積土壤或崩塌岩屑，破壞深度在 2~3 m 內，且以固體型態滑動之破壞類型。現今對淺層邊坡預警之趨勢為整合考慮地形、地質材料特性之場址破壞機制分析，搭配即時監測相關引致滑動之土層物理量與地層運動之預警系統，此類預警技術包含兩部分，其一為藉由地質探勘與地形測量，

建立場址地質模型並據以進行解析法分析，預測其滑動機制、範圍及不同階段警戒值；其二為佈設監測硬體於反應敏感之位置，進行即時土層監測並發佈警報。目前以數值方法進行淺層崩塌機制分析已有相當進展，但是現地土層邊坡預警監測系統仍有價格昂貴、佈設不易及維護困難等瓶頸，因此發展具備無線土層監測之模組化系統，對於推廣以解析法為依據之淺層公路邊坡降雨崩塌預警系統具重要關鍵。

本研究針對公路邊坡可能遭遇之淺層崩塌破壞進行解析法分析並研發與解析法搭配之無線感測土層反應模組，發展不同於現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，以提高預警之準確與時效性。研究結合解析法與邊坡無線土層監測模組，發展場址客製化淺層公路邊坡降雨崩塌預警系統，利用建立之場址地質模型進行水力力學耦合

(coupled hydro-mechanical)邊坡滑動分析，預測邊坡依時性反應，作為無線土層反應監測模組佈設及制定警戒值之依據。研究採用廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統(Micro-electro-mechanical system, MEMS)感測器，利用台灣高科技產業電子整合能力，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、地表位移、土層體積含水量之監測模組，形成分布式淺層土層感測網路。由於此類電子產品可大量生產因此可大幅降低成本，且監測點位選定與分布式監測感測反應詮釋一併考量，監測之結果亦可回饋解析法分析模式，此流程將可作為開發可快速佈設且具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警模組，利於相關單位對此類災害預警及管理之決策參考，作為相關防災作為啟動之準據。

二、國內外相關研究情況

2.1 解析法邊坡穩定分析

美國交通研究委員會(TRB, 1996)依邊坡破壞之材料種類及運動方式，將邊坡崩塌型態分類，依照滑動材料可區分為岩層(rock)、岩屑(debris)及土壤(soil)，而根據崩塌運動類型，區分為墜落(fall)、傾覆(toppling)、滑移(slide)、側移(spreads)及流動(flow)等五種基本類型。Kurahashi (2008) 分析 1990~2004 年期間日本 1310 個公路崩塌災點，發現約有 90%的崩塌災害是因為降雨造

成的，且 80%是表層破壞造成的崩塌。

在多數邊坡穩定的問題中，水為最常見之觸發因子，降雨入滲不但增加邊坡土壤的下滑力，在非飽和邊坡還會因基質吸力減少使剪力強度下降，所以水和土壤之水力力學耦合特性於邊坡穩定分析中不可或缺。經驗指出絕大部分因降雨而導致之崩積層坡地崩塌屬於淺層破壞(Cascini et al. 2010; Fannin et al., 2005)，破壞面深度約在 0.5 至 3m 之間，覆土壓力在 5 至 25kPa 之間。Cascini

et al. (2010) 歸納前人的研究，將此類淺層邊坡崩塌分析分成破壞(failure)，破壞後(postfailure)與擴散(propagation)三個階段，並指出破壞與破壞後分析可以獨立進行。Cascini et al. (2010)使用現地應力路徑 (field stress path) 的框架，

將邊坡破壞後的行為分成地滑(slide)，地滑變流動 (slide to flow) 與流動型地滑 (flowslide) 如圖 1 所示，圖 1 中之 F_d 代表地層內之驅動力， F_r 為抵抗力， δ 為地層移動量，剪應力 q 定義為：

$$q = \left[\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2}{2} + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2.1)$$

而平均有效應力 p' 定義為：

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \dots\dots\dots (2.2)$$

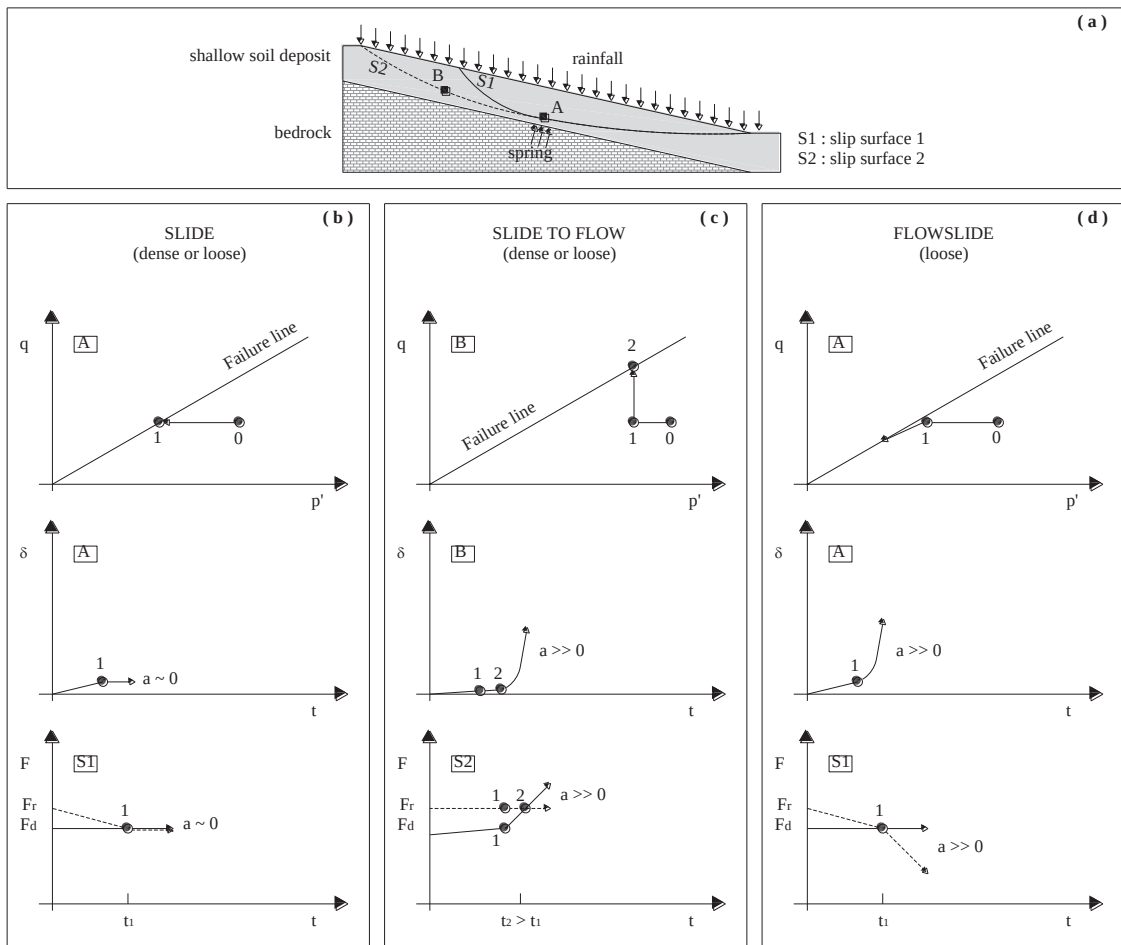


圖 1 有效應力路徑觀念下邊坡破壞類型 (Cascini et al., 2010)

受到降雨入滲或地層內滲流水之影響使得應力路徑達到破壞包絡線，當 $F_d \geq F_r$ 時即發生邊坡破壞，但是破壞發生後是否產生流動型地滑則取決於地層力學性質、孔隙水壓變化以及破壞時排水狀況。大部分地滑式邊坡破壞屬於圖 1(b)所示，破壞時剪應力 q 保持定值。圖 1(c)為高陡邊坡邊坡破壞時產生應力轉移 (stress transfer) 或漸進式破壞使得破壞區之 q 增加。圖 1(d)則發生於鬆土中，破壞發生後剪力破壞變成不排水應變軟化而流動 (Anderson and Sitar, 1995)。Collins and Znidarcic (2004)提

出非飽和邊坡中滲透對邊坡穩定有顯著的影響，孔隙水壓在邊坡內之分布會隨著水向下入滲至土壤內而改變，因此在分析非飽和邊坡穩定性時，須將非飽和土壤之剪力強度和基質吸力影響及滲流列入考慮。其於非飽和滲流下之無限邊坡穩定分析中，假設平行坡面滲流且滲流力之方向和水平面之夾角為與坡角相同均為 β ，考慮非飽和土壤中之土壤剪力強度可以衍伸莫爾-庫倫破壞準則 (extended Mohr-Coulomb failure criteria)表示 (Fredlund et al., 1978)：

$$\tau_{ff} = [c' + (u_a - u_w)\tan\phi^b] + (\sigma - u_a)\tan\phi' \dots\dots\dots (2.3)$$

式中 c' 與 ϕ' 分別為非飽和土壤有效凝聚力與摩擦角， ϕ^b 為基質吸力所提供之剪力摩擦角。則其破壞深度 (d_{cr}) 可表示為：

$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c \cdot \tan\phi^b - \gamma_w \cdot h_p \cdot \tan\phi'}{\gamma \cdot \cos^2\beta \cdot [\tan\beta - \tan\phi']} \dots\dots\dots (2.4)$$

式中 γ_w 為水單位重， h_c 虹吸水頭高， $\gamma_w \cdot h_c = u_a - u_w$ 為土壤基質吸力， h_p 為壓力水頭高，考慮土層內之壓力水頭變化，可定義出土層之穩定包絡線 (即壓力水頭和臨界破壞深度之變化關係)。

Collins and Znidarcic (2004)將式(2.4)以下列邊坡土壤參數： $\beta = 40^\circ$ ， $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ， $c' = 3 \text{ kPa}$ ， $\phi' = 30^\circ$ ， $\phi^b = 26^\circ$ ，計算穩定包絡線，並根據預測之壓力水頭 h_p/h_c ，計算出對應之臨界破壞深度 (如圖 2 所示)，穩定包絡線和滲流曲線交於 A 和 B 兩點 (FS=1)，A 點之破壞與

滲流無關聯，而 B 點和穩定包絡線交於滲流開始後 47 小時深度 1.8m 處，B 點之破壞是由於滲流使土壤內之基質吸力降低，土壤的剪力強度下降所造成的，此可做為預測淺層破壞之依時行為之基礎。

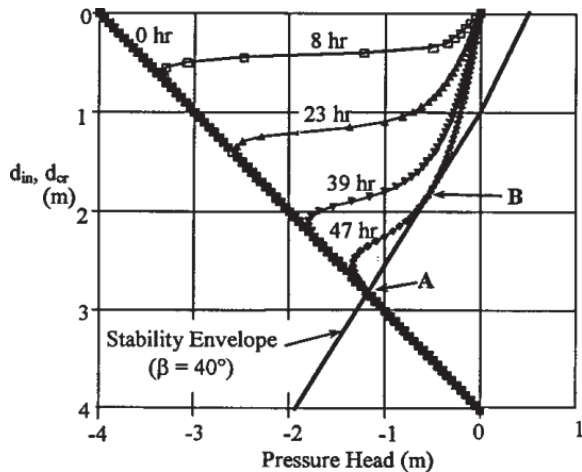


圖 2 典型細顆粒土壤水力學耦合邊坡穩定分析結果(Collins and Znidarcic, 2004)

2.2 邊坡監測預警

黃安斌等(2002)提出道路邊坡之安全監測涉及三個環節：(1)確保安全監測所測為合宜之參考物理量；(2)妥善進行監測所得物理量之詮釋；與(3)訂定合宜之預警基準以應用於管理層次。結合參考物理量、物理量之詮釋及預警基準，道路防災管理方能落實。依運研所(2011)研究指出，道路邊坡之監測系統可概分為人工記讀系統以及自動化系統，自動化系統其組成包括：(1)感測單元；(2)資料擷取單元；(3)資料傳輸單元；(4)資料儲存、展現或分析單元；以及(5)電源供應等五個單元。其中感測單元感測現地物理量(如位移)或環境條件(如雨量)之變化，由資料擷取系統收集、記錄、篩選、判讀並經由資料傳輸單元送達遠端之資料儲存單元儲存、展現或分析資料，並可發送現地警報通知守視人員。

目前國內外所採用之道路邊坡監測系統種類繁多，常見之監測儀器可分為：(1)土中位移監測，(2)地表位移監測，(3)水壓或地下水位監測，(4)雨量監測，(5)土壓監測及(6)擋土結構監測等，可依據邊坡之可能破壞模式及風險性之不同進行分級，對於風險性較低或較穩定之邊坡，選擇簡易及較經濟之監測系統加以監測，對於風險性較高或較不穩定之邊坡，則需選擇較完整之監測系統(運研所, 2013)。黃安斌等(2002)應用光纖感測(Fiber Optic Sensor, FOS)，透過多點式的光纖光柵感測器配合應變管之原理進行自動化，長時間、連續性地層變形監測，研發完成包括地層錯動、水位監測、線性伸張以及雨量計等之監測儀器系統。

Uchimura et al. (2008)發展一簡易邊坡預警監測系統，其僅監測表面位移傾角及坡面含水量變化，系統配置如圖 3 所示，藉由無線網路可將地表運動與含水量變化傳送至監控中心，配合邊坡破壞前會有一顯著運動之特性，進行必要之預警，此系統已佈設於多個場址，為現今具有較多應用案例之系統。張達德等(2013)以傾度儀結合 Zigbee 無線傳輸，於國道三號 3.1K 進行無線網路邊坡預警監測，但現有系統監測至破壞之時間不一，並無安裝位置之建議，對於非圓弧破壞地表傾度並不顯著，且預警準則為經驗法則，缺乏嚴謹力學分析，仍有相當改善空間。

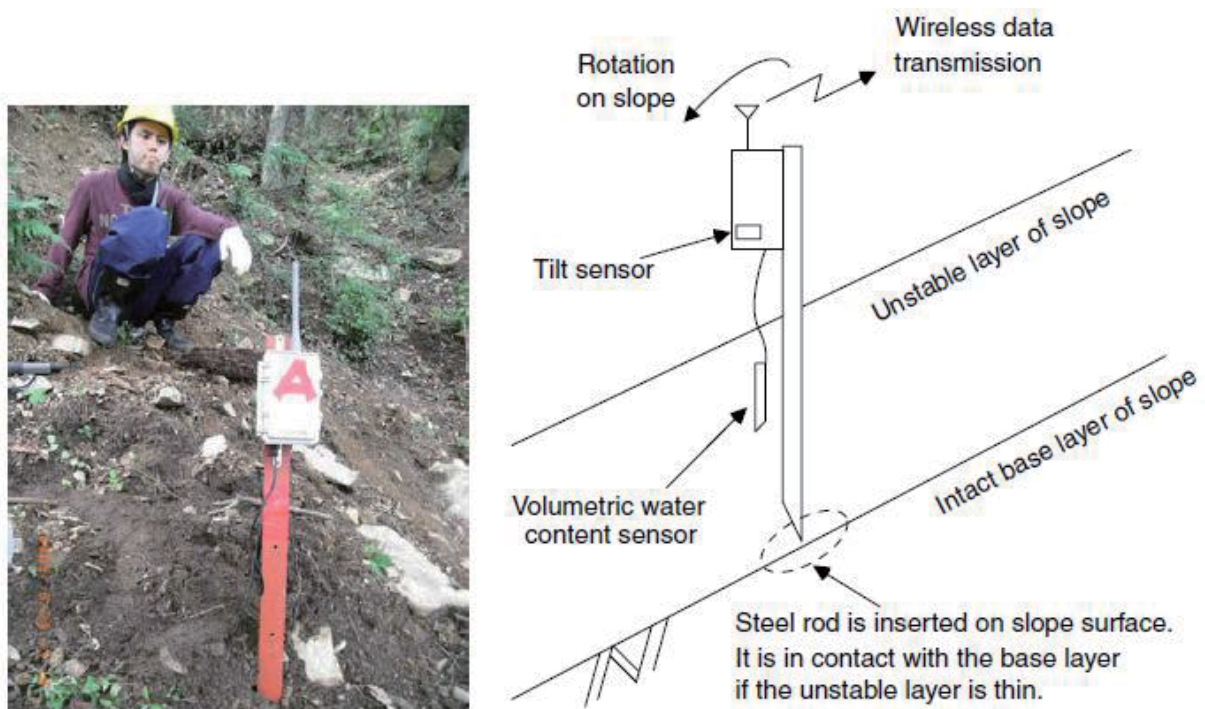


圖 3 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008)

李秉乾(2004)透過現地實測的結果，建議各項感測單元的傳輸方式以 TCP 為佳，盡量避免異質傳輸規格的整合，以減少系統不穩定性。而在相同的傳輸協定下，資訊傳輸介質可依地形需要進行不同的規劃，如 RS485、TCP 或是 802.11b 之方式。該研究亦指出山區道路邊坡監測系統在整體架構上，以監測路段現地資料的接收及整合為主要目的，經由無線傳輸技術將監測資料傳回資料接收中心並儲存於資料庫。所有資料經過加值與整合成資訊，整合預測破壞模式可發展為具有即時應變能力的通報系統。

分佈式無線感測器網路(Wireless Sensor Networks, WSN)是由一到數個無線資料收集器以及為數眾多的感測器(sensors)所構成的網路系統(Chong

and Kumar, 2003)，新近發展之物聯網(Internet of Thing, IoT)為將單純無線感測加入控制之功能，此一概念之元件之間的溝通採用無線的通訊方式，且具備低成本、低耗電、體積小、容易佈建，並具有感應環境裝置，可程式化、可動態組成等特性，已開發於土木工程之應用如 Senera 之橋梁監測系統。為充分利用台灣於高科技產業之優勢，本計畫將採用廣為應用之微機電系統(Micro-electro-mechanical system, MEMS)感測器，發展可監測地表傾角(tilting)、淺層土壤濕度(soil moisture)之監測單元，並以低耗電之無線網路連接，形成分佈式無線感測器網路，由於其可大量生產，因此可大幅降低成本，長期目標為建立模組化可拋棄式物聯網元件。

由於監測點位選定與分佈式無線

感測器網路反應詮釋與滑動機制相關，為增進預警系統之準確度，監測網路佈設前將進行地質模型建立及邊坡滑動分析，此結果將用於監測網路佈設，而監測之結果亦可回饋數值分析模式，本

研究將結合無線散佈式表層感測系統與解析成果，建立可快速佈設且具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警系統，以此流程建立場址不同階段預警值，作為相關防災作為啟動之準據。

三、水力力學耦合邊坡穩定分析

3.1 研究分析場址

為配合淺層邊坡破壞條件及後續監測模組安裝測試便利性，本計畫選定分析場址一處進行場址二維水力力學耦合分析，淺層滑動候選場址須符合下列條件：

- (1) 現地需有軟弱土層，且為坡度大於有效摩擦角之陡坡地形，淺再滑動面為非飽和土層。
- (2) 具有相關幾何、水文及地質參數，並有現地監測資料參考。
- (3) 須為鄰近道路之邊坡，且具高破壞潛勢或有破壞歷史。
- (4) 鄰近具有有線通訊或無線寬頻訊號及電源供應，以裝設監測主機。

滿足前兩項之需求案例多為學術研究之案例，其中水文地質參數並不常見，國內僅有經濟部地調所於「集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫」(2007)有相關調查。綜合考慮上述條件，選定高雄甲仙區寶隆崩塌地，鄭清江等(2009)以此場址進行降雨引致邊坡淺層崩塌分析，利用 SEEP/W 進行降雨入滲及滲流水文分析，以滲流分析成果帶入極限平衡邊坡穩定分析 SLOPE/W 及有限元素變形分析 SIGMA

/W，其假設入滲條件並將入滲與力學分析分開計算，且非飽和土壤強度計算亦以簡化法計算，寶隆崩塌地水文地質模型如圖 4 所示，包含崩積層、風化岩層及基盤岩層，基盤岩層為不透水層。

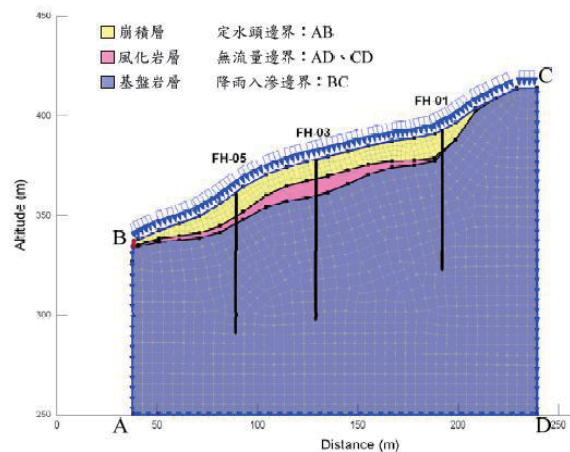


圖 4 寶隆調查範圍水文地質模型與邊界條件(鄭清江等 2009)

3.2 研究場址水力力學耦合分析

為進行非飽和土層水力力學耦合分析，本研究以 FLAC 程式中之兩相流模組(Two-phase flow module)進行非飽和滲流分析，並開啟力學分析功能，於暫態滲流分析過程中同步進行力學計算，以有限差分型式進行非線性大變形模擬，且力學計算中考慮非飽和土壤基質吸力改變對有效應力之影響，更新土

壤彈性參數及強度，適切模擬非飽和土層邊坡因降雨引致之破壞過程模擬。

分析時以修正之 Mohr-Coulomb

彈塑性組構模式，簡化式(2.3)並考慮其剪力強度($\tau^{\max}$)為：

$$\tau^{\max} = (\sigma - u_a) \tan \phi + S_w(u_a - u_w) \tan \phi + c' \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

式中 S_w 為水之飽和度，基質吸力($u_a - u_w$)以 P_c 代表，其與水飽和度之關係以 van Genuchten (1980)建議之關係式表示如下：

$$P_c(S_w) = P_0(S_e^{-1/a} - 1)^{(1-a)} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

式中 a 為土壤常數， S_e 為有效飽和度，其定義為：

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

式中 S_r 為土壤殘餘飽和度，低於此值土壤水力與力學特性不再變化； P_0 為參考基質吸力，其值為：

$$P_0 = \frac{\rho_w g}{\alpha} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

式中 ρ_w 為水之密度， α 為土壤常數。

非飽和滲透係數亦以常用之 van Genuchten (1980)準則表示，其與相對飽和度之關係為：

$$k_r = S_e \left[1 - (1 - S_e^{(1-a)})^a \right]^2 \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

式中 k_r 為相對滲透係數，不同飽和度之滲透係數 $k(S_e)$ 與飽和滲透係數 k_{sat} 為：

$$k(S_e) = k_r * k_{sat} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

研究場址分為崩積層(Colluvium)及基岩(Bedrock)，相關水力參數如表 1 所示，力學參數與鄭清江等(2009)數值相同。以圖 5 所示之網格，選用之力學

邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。水力邊界則以底部為滲流邊界，坡頂表面設為保持飽和狀態並固定其孔隙水壓力為 0，初始基質吸

力為表 1 之 Pc 值，初始飽和度為崩積層之平均值，以此初始與邊界條件進行水力力學耦合模擬，分析時監測上下邊

坡交界處不同深度之反應，監測點位如圖 6 所示。

表 1 寶隆非飽和水文參數

參數	Colluvium	Bedrock	物理意義
Porosity	0.486	0.1	孔隙率
ksat	5e-9	1e-12	飽和滲透係數
fmodulus	2e9	2e9	水體積模數
saturation	0.53978	0.53978	初始飽和度
vga	0.336	0.1	VG parameter a
vgpcw	0.5	0.5	VG water parameter b
vgpncw	0.5	0.5	VG air parameter
vgp0	15000	15000	VG P0
Pc	-45203	-45203	初始 From Pc(Sw)

模擬過程中不同深度孔隙水壓力歷時如圖 7 所示，孔隙水壓變化可分成兩階段，第一階段表面飽和入滲開始後，水由表層開始以垂直向下流動進行入滲，不同深度土層基質吸力降低，當土層飽和後其基質吸力為 0 並產生正孔隙

水壓力，其值與水位位於地表層之靜水壓相近，第二階段為而當飽和土層達到一定厚度後開始產生約略平行坡面之滲流，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，且此時因孔隙水壓增加導致安全係數大幅降低。

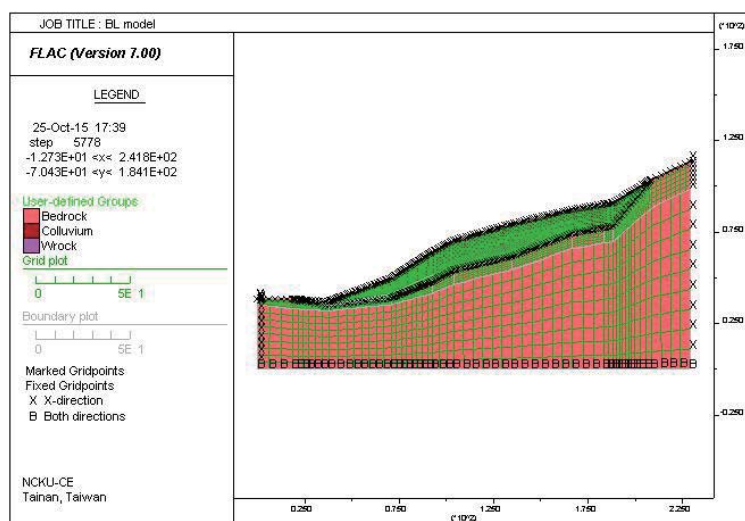


圖 5 寶隆 FLAC 模型

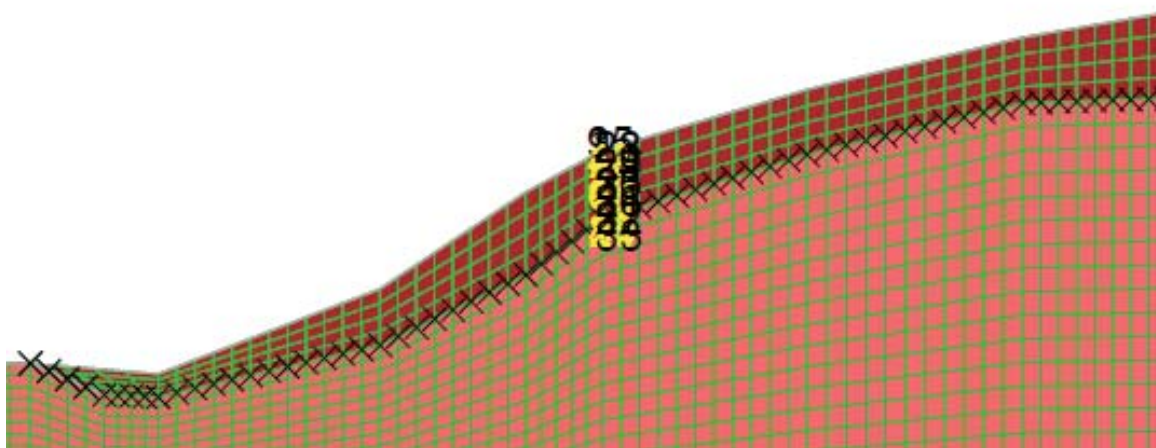


圖 6 監測點位分布圖

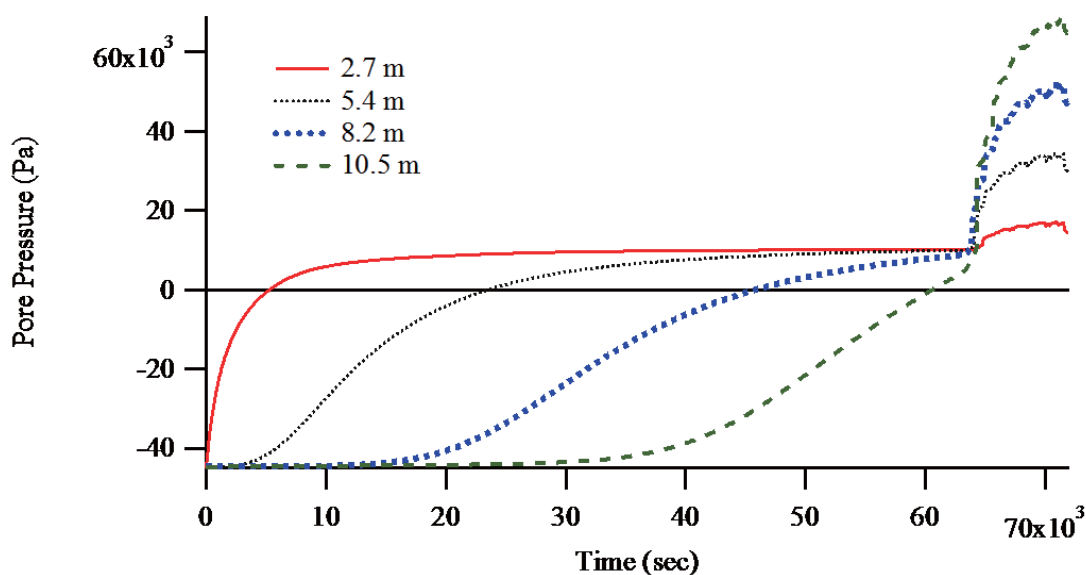
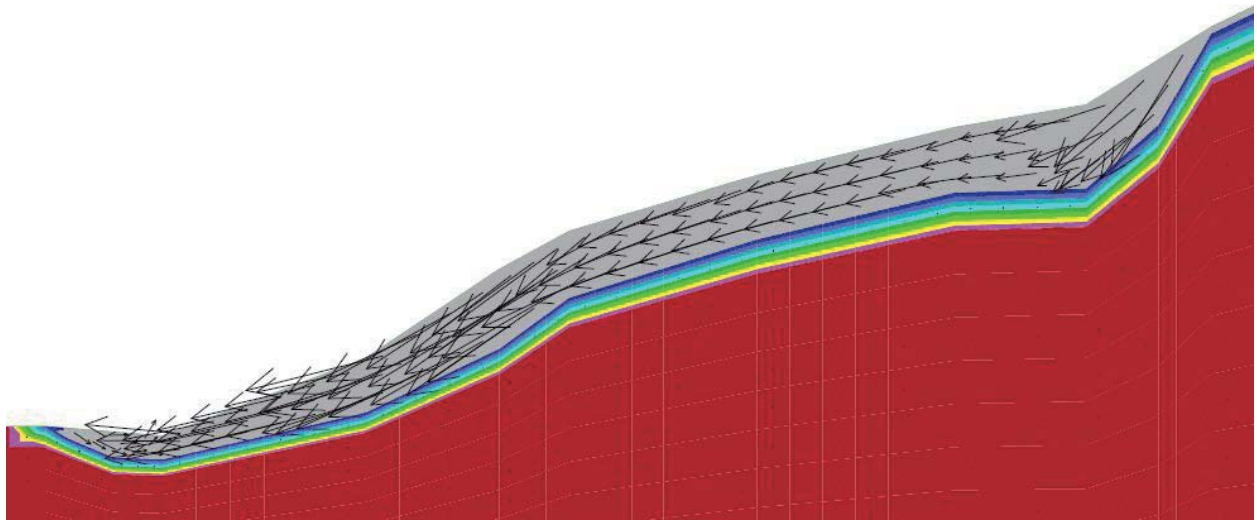


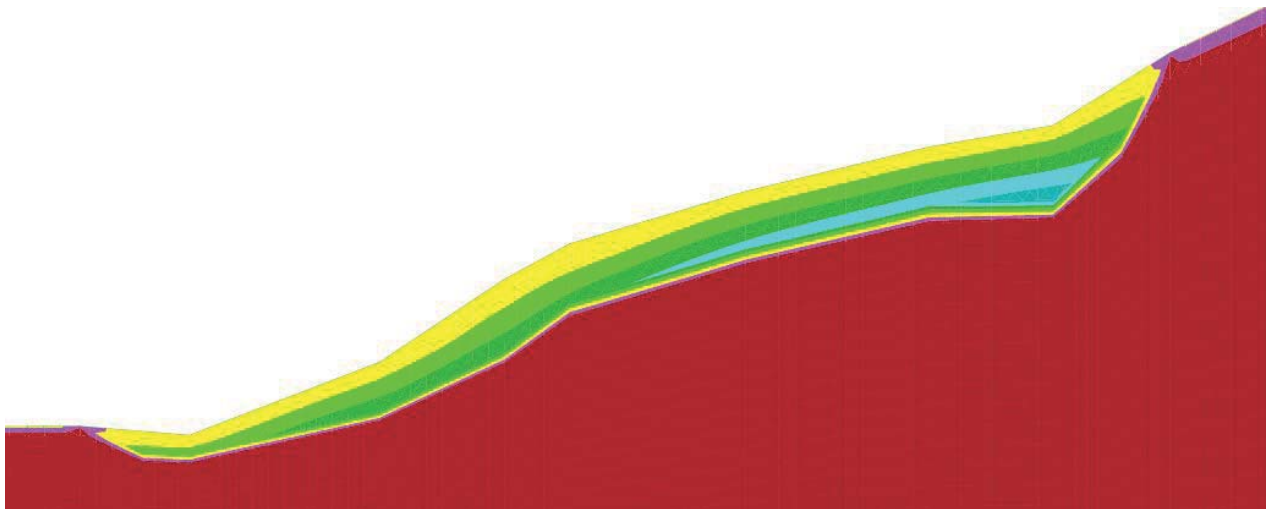
圖 7 監測點位孔隙水壓歷時

圖 8 為當崩積層均達飽和狀態時之穩態流況與孔隙水壓分佈，崩積層產生平行下方具低滲透係數邊界岩盤流況，而其孔隙水壓力分佈為隨深度增加而增加，此流況下邊坡穩定分析結果與位移分佈如圖 9 所示，位移集中於下邊坡，且最大水平位移發生於上下邊坡交界，位移向量顯示其表面傾角最大，此時安全係數為 1.03，接近破壞。與地調所分

析結果比較其於莫拉克降雨時最小安全係數為 1.125，對應之地表最大位移量約為 6.3cm，發生於邊坡中段，其差異應為其流況分析選取階段差異，地調所分析並無水平流況考慮，僅假設地下水位上升至地表，另外分析結果顯示，若現有使用參數及地質模型具可信度，此邊坡不易產生滑動。



(a)飽和度分佈及流線

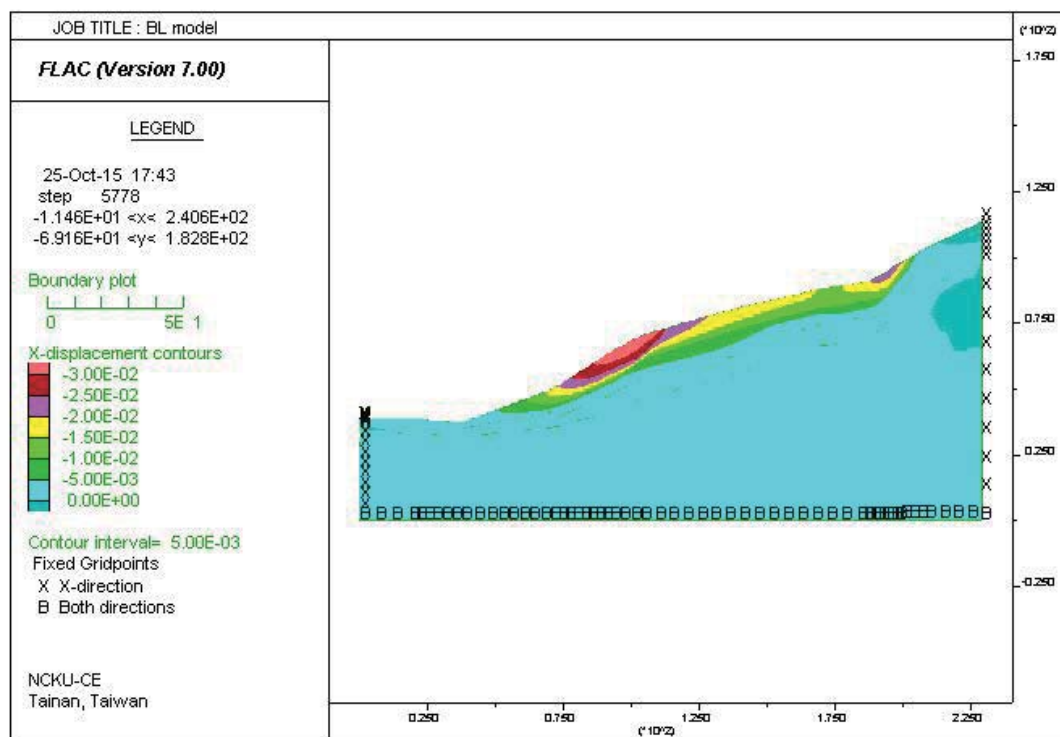


(b)孔隙水壓力分佈圖

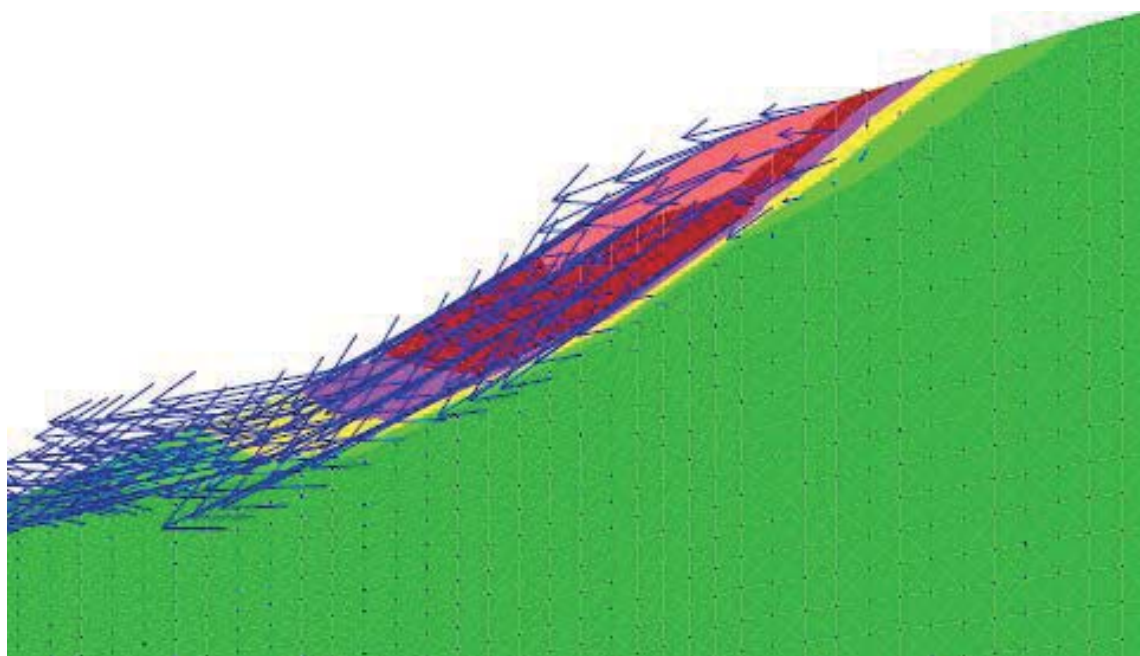
圖 8 穩態流況下水力行為

水力力學耦合分析中監測點之水平與垂直變位歷時如圖 10 所示，崩積層與基岩交界無顯著位移發生，最大位移量發生於地表，且由圖 7 水壓歷時比較顯示，水壓力與位移變化發生時間差

異有限，發生整體滑動前具有一定警戒時間，而由水平與垂直位移之比值顯示其破壞前地表具有顯著傾斜角發生，此特點為監測模組量測物理量與訂定警戒值之依據。

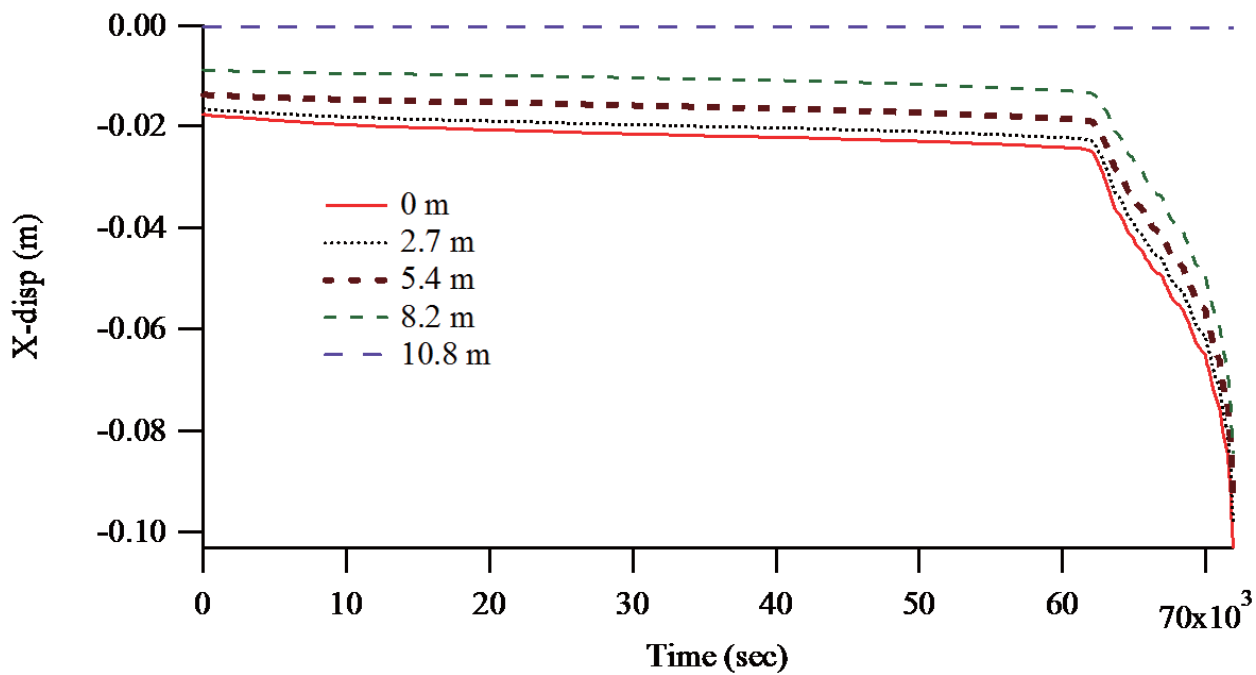


(a)滑動面與水平位移分佈

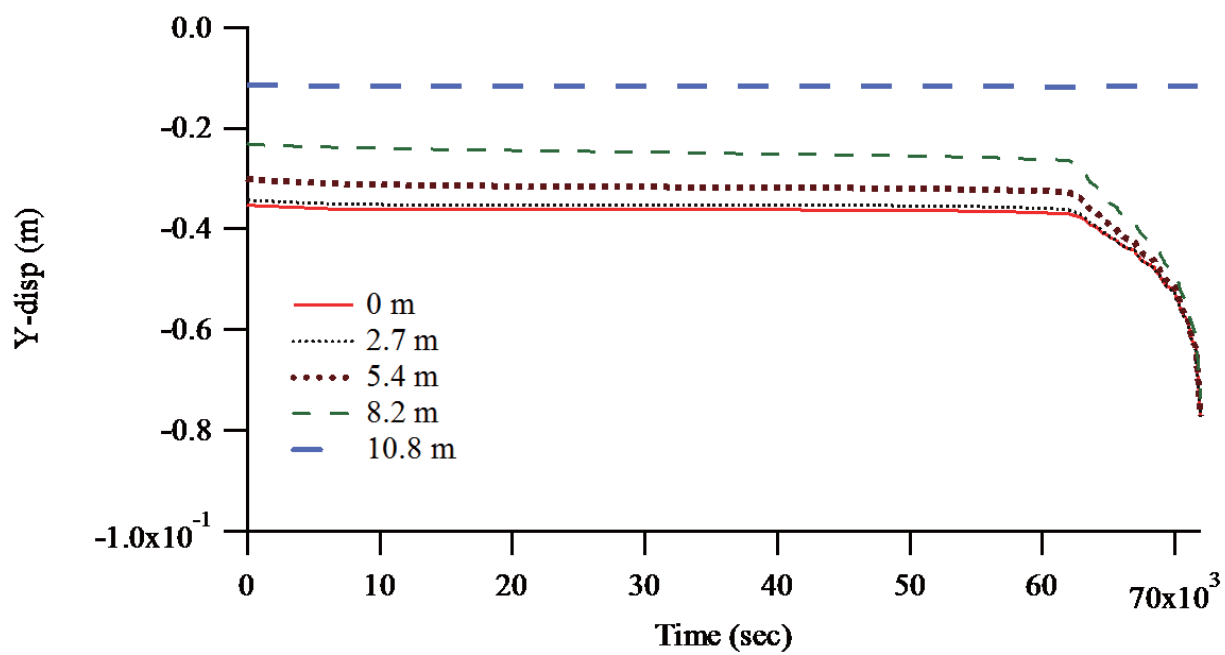


(b)位移向量

圖 9 穩定流況下邊坡穩定分析結果(FS=1.03)



(a)水平位移歷時



(b)垂直位移歷時

圖 10 水力力學耦合分析位移歷時

四、淺層邊坡無線監測模組研發

本研究目的為發展一簡易土層監測模組，廣設於具淺層崩坍潛勢之邊坡表層，監測地表運動量及淺層土壤含水量，各模組間以無線傳輸方式將資料傳至監測主機，結合水力力學耦合分析成果，由遠端人員進行判讀或自動判讀以達即時預警之目的。研究採用廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、土壤含水量之土層監測模組，形成分佈式邊坡表層監測網路。研究研發一分佈式分層土壤含水量計，透過量測不同深度土層電容變化，間接測得各深度土壤含水量，現地監測降雨時浸潤面隨時間之變化，提供非飽和土壤水力與強度參數，進行非飽和邊坡耦合穩定分析。

4.1 現地土壤含水量量測

國內外研究已提出充分證據顯示土壤邊坡淺層崩塌主要之機制在於非飽和土壤內基質吸力($u_a - u_w$)，也就是負孔隙水壓受降雨入滲影響而降低或消失進而使得土壤強度降低，進而導致崩塌。評估不飽和邊坡破壞模式所需主要強度參數分別為($u_a - u_w$)及 ϕ^b 。既有應用於現地之非飽和土壤內基質吸力量測方法可分為直接法與間接法兩種。直接方法使用張力計(Tensiometer)直接量測土壤內基質吸力。張力計使用一飽和之高進氣吸力值陶瓷(High Air Entry Ceramic)量測周圍土壤之負孔隙水壓，但此類陶瓷製作成本相當高，且陶瓷內之孔隙水在負壓下會逐漸汽化為水蒸

氣而形成氣泡，此現象稱為穴蝕效應(Cavitation)，形成之氣泡將阻礙孔隙水的聯通而影響量測，故張力計因須定期重新飽和其高透氣陶瓷，無法應用於長期邊坡安全監測。

間接量測方法係將取自現場試驗土樣依據現場孔隙比大小重模後，求得土壤體積含水量與基質吸力之關係曲線，稱之為土壤水分特性曲線(soil-water characterization curve, SWCC)，透過量測現地土壤體積含水量，藉由 SWCC 曲線間接推估現場土壤基質吸力大小。

已知土壤體積含水量(以下簡稱含水量)量測方式有下列二種方法：(1)土壤電阻率(R, Resistivity)，(2)土壤介電常數(ϵ_r , Relative permittivity)，而土壤電阻率主要受土壤種類、土壤組構及土壤飽和度影響，其中土壤種類與土壤組構具有區域性，若欲透過量測土壤電阻率間接量得土壤含水量或飽和度，需先調查監測區域內之土壤種類與組構，其中土壤組構須透過現地試驗或取現地非擾動土樣方可測得，此法顯得不切實。土壤介電常數雖亦受上述土壤參數影響，但由於土壤固體介電常數(3~5)與空氣介電常數(=1)相當接近，而水介電常數在 20 度時為 80.1，100 度時為 55.3，皆遠大於土壤固體以及空氣之介電常數，若將土壤視為空氣，其所產生之誤差小於 5%，即土壤種類與土壤組構對土壤介電常數影響相當有限，且介電係數值主要受水佔有比例影響，即土壤含

水量或飽和度對介電係數具有顯著影響，因此透過量測土壤介電常數以間接量測土壤含水量方法可省去土壤參數之調查，因此量測介電常數為取得土壤含水量較經濟的方法(林哲毅，1999)。

土壤介電常數可藉由平行板電容(parallel-plate capacitor)之特性，量測土壤電容間接獲得，平行板電容特性關係式為：

$$C = \varepsilon A / D \dots\dots\dots (4.1)$$

式中：C=電容， ε =介電常數，A=平行板面積，D =平行板間距。透過式(4.1)可知平行板間土壤之電容值與其介電常數成正比，其餘參數皆可控制，故透過量測平行板間土壤電容值即可量得土壤之介電常數。

藉由電容進行液位量測為基於量測待測目標內液體與氣體比例，可透過式(4.2)及(4.3)獲得液面位置：

$$C_{meas} \propto h_w \varepsilon_w + (h_L - h_w) \varepsilon_a \dots\dots\dots (4.2)$$

$$Level = h_{RL} \frac{C_{level} - C_{level}(0)}{C_{RL} - C_{RE}} \dots\dots\dots (4.3)$$

式中 h_L =最大液位高， h_w =液位高， ε_w =水介電常數， ε_a =空氣介電常數， h_{RL} =單位參考液位高(通常=1)， C_{level} =液位電容量測值， $C_{level}(0)$ =液位電容乾燥值， C_{RL} =參考液位電容量測值， C_{RE} =參考環境電容量測值。

土壤雖包含液體、氣體、固體三相，較液位量測多一固相，但固相介電常數為一常數，不受含水量變化而改變，又式(4.3)中 $\frac{h_{RL}}{C_{RL} - C_{RE}}$ 為常數，則式(4.3)可簡化為下式：

$$\begin{aligned} C_{level} - C_{level}(0) &= (h_a \varepsilon_a + h_w \varepsilon_w + h_s \varepsilon_s) - (h_a \varepsilon_a + h_w \varepsilon_a + h_s \varepsilon_s) \\ &= h_w (\varepsilon_w - \varepsilon_a) \dots\dots\dots (4.4) \end{aligned}$$

由式(4.4)得知固相影響因子因其為常數，在消除乾燥初始值時得以將之消除，故含水量計算與液位計算相同，顯示此方法可行性相當高。

4.2 無線感測土層監測模組架構

受消費性電子產品大量使用之影響，微機電系統感測器近來快速發展。此類感測器有以下之優點：

1. 體積微小：常用 MEMS 感測器長寬在 3mm，厚度在 1 mm 以下。
2. 低功耗：其功率通常以 μW 來標示，非常省電。
3. 介面簡易：MEMS 輸出數據大多使用標準之數位介面，容易與其他感測器及通訊模組整合。
4. 低成本：本研究所需之 MEMS 感測器單價大都在 10 元美金以下，部分在 1 元美金以下，可提高監測目標區之佈設密度。系統整合與製作容易，可以輕易在市場上找到配合廠商做系統整合，相關線路板製作與量產，所需零件可以輕易在國內取得。

本計畫主軸之一為開發一適用於因降雨造成之淺層邊坡滑移且具有即時、無線、自動化特點之邊坡表層監測模組，所整合之感測器種類與功能如下：

1. 三軸向重力感測器(G sensor)：量測 xyz 三軸向線性加速度，反應相對於重力方向傾斜角度變化，透過積分後可得三軸向上之位移量。
2. 三軸向陀螺儀(Gyroscope sensor)：量測 xyz 三軸向旋轉角加速度，與 G sensor 整合形成一慣性量測單元(Inertial Measurement Unit, IMU)，使用各加速度隨時間之積分來計算地表監測模組的運動軌跡。提供地表加速度、傾斜及位移等參數，作為邊坡滑移與地震時之即時參數。

IMU 已廣泛的應用於飛行器，汽車導航，娛樂與運動器材之中，做為軌跡追蹤主要感測單元。

3. 傾斜儀(Tiltmeter/Inclinometer)：量測雙軸向傾斜量變化，透過一只傾斜儀提供 xy 二軸向上高精度及高靈敏度之傾斜量測。
4. 電容 / 數位轉換器 (Capacitance/Digital converter)：非接觸式量測周圍環境電容變化，間接量得土壤之含水量。

上述感測器皆為 MEMS 感測器，成本低廉且已發展成熟，感測架構如圖 11 所示，所研發之 MEMS 動態感測器(傾斜儀)、通訊、數據及訊號處理/紀錄與電源供應模組將全部裝置於一防雨密閉盒中(圖 11 中實線圓)，並於其外覆以耐候層(圖 11 中虛線圓)以降低其受日曬之影響其耐久性並提升其防雨性，其下方將連結分佈式含水量計，感測器位置側向管壁將以塑料取代金屬，使其得以透過非接觸式量測方法量測周圍土壤之含水量。

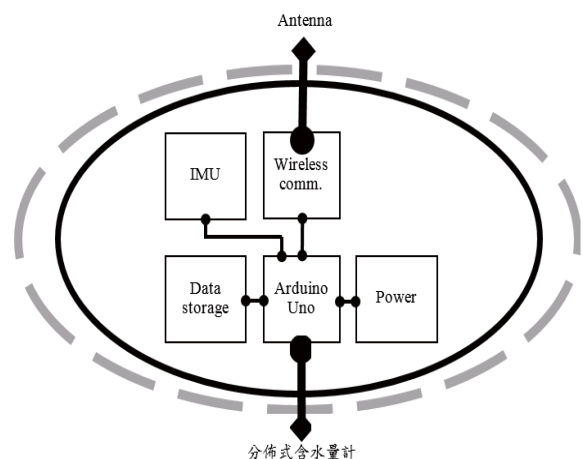


圖 11 土層監測模組內部感測器架構示意圖

所發展之無線土層監測模組包括(1)微處理器、(2)慣性量測單元、(3)傾斜儀、(4)分佈式含水量計、(5)無線傳輸模組及(6)圖形化使用介面，除感測器外各部分說明如下：

微處理器

採用市售開放式原始碼之微控制器，目前常見之市售開放式原始碼的軟硬體平台主要有四種：(1)Arduino、(2)樹莓派(Raspberry Pi)、(3)Linkit 及(4)Intel Edison。其中以 Arduino 及 Raspberry Pi 較為廣泛使用。

樹莓派為一微型化電腦，而 Arduino 則為微處理器，因此樹莓派在功能上勝過 Arduino，但是 Arduino 包含 I/O 腳位，多可直接與電子元件連結，使得開發難度相對低於樹莓派，透過 USB 介面連結電腦便可更改其操作程序，使得 Arduino 在開發上較具優勢，且樹莓派需要掛載擴充面板方可提供足夠數量的輸入端，使得 Arduino 在空間上略勝一籌。故本計畫決定採用 Arduino Uno 版本之微處理器作為土層監測模組之微處理器，其搭載 ATmega328 微處理器，其時脈高達 16MHz，且具 14 支數位 I/O 接腳，其中包含有一組 SPI (Serial Peripheral Interface Bus) 介面以及一組 I²C (Inter-Integrated Circuit) 介面，I²C 更支援單一匯流排最多可和 112 個節點通訊，足以應付多數模組間之數位資料傳輸。另外配有 6 支類比訊號接腳，可透過微控制器內含之 ADC (Analog/Digital Converter) 將類比訊號轉換成數位訊號，亦可作為數位 I/O 接腳使用，滿足土層監測模組的功能需求，其尺寸僅長

2.7”(約 6.9cm)、寬 2.1”(約 5.4cm)，符合監測模組尺寸要求，所用工作電壓為 5V，輸入電壓介於 7~12V 也適用多數市售充電電池。

(2) 慣性量測單元(IMU)

IMU 已廣泛的應用於飛行器，汽車導航，娛樂與運動器材之中，做為軌跡追蹤主要感測單元，IMU 至少具備有一個三軸向重力感測器以及一個三軸向陀螺儀，由此二感測器分別提供：(1)三軸向線性加速度及(2)三軸向角速度。上述二者共計六項物理量為循跡運算所必須之物理量，故 IMU 亦稱作六軸動態感測器。目前已有九軸動態感測器，其係指除上述六項必要物理量外，增設一三軸向磁力計(3-axis Magnetometer)，提供 IMU 一絕對參考準位以避免六軸 IMU 經由積分所產生之誤差累積，由於本研究軌跡量測可視為靜態量測，誤差累積並不明顯，為簡化軟體與硬體之開發，故本研究先選擇六軸 IMU 作為動態感測器。

(3) 傾斜儀

傾斜儀可觀察長期地表傾斜角度之變化，耦合分析顯示地表傾角於滑動前持續產生變化，由於土層監測模組對傾斜儀之解析度要求相對較高，本研究以 Murata Electronics 所生產之高精度傾斜儀 SCA100T，其於±90 度量測範圍下解析度可達 0.0035 度，支援比例類比電壓與數位 SPI 輸出，與微控制器間通訊相當彈性，故採用其作為土層監測模組之傾斜儀。

(4) 分佈式含水量計

現有市售現地含水量計成本相當高，且體積甚大，不利於整合進監測模

組，因此本計畫研發簡易含水量計，透過量測土壤介電係數，間接量測土壤含水量變化，透過間接方法評估土壤內基質吸力。透過多組電容量測裝置於一探棒表面(圖 12)，所研發之簡易含水量計

可進行分佈式地層含水量量測，同時監測探棒長度內多深度土層之含水量，提供降雨時浸潤面隨時間與降雨量的變化。

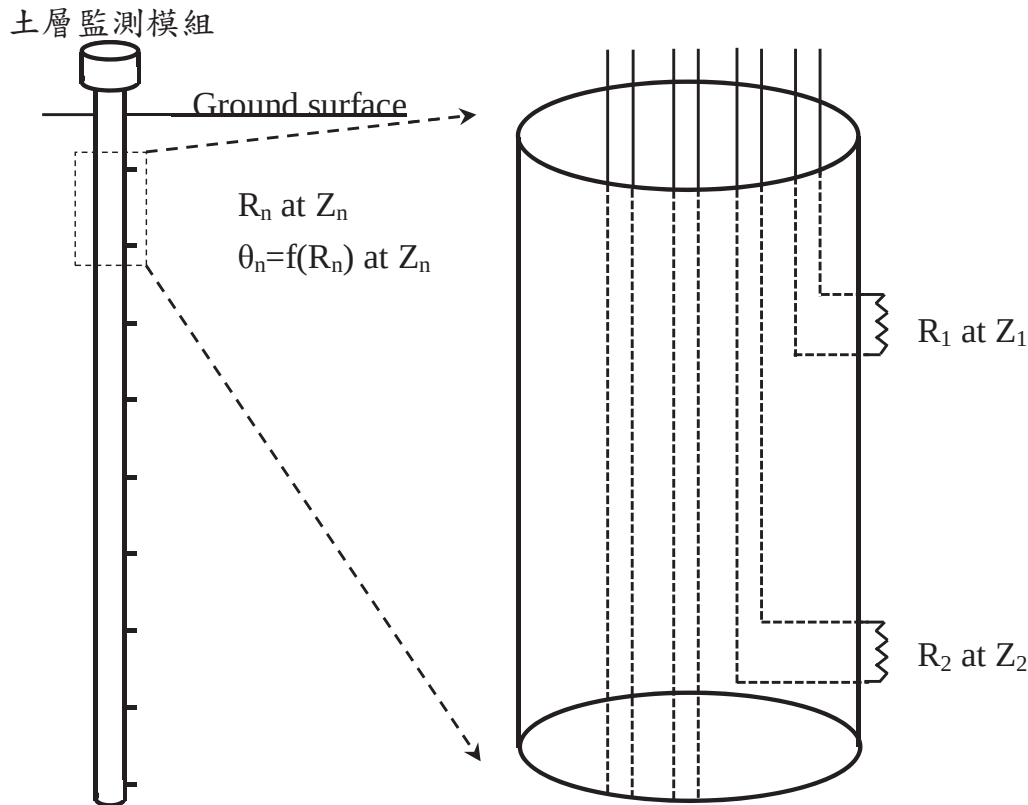


圖 12 土層監測模組與分佈式含水量監測示意圖

含水量量測由電容改變間接推估，所需硬體主要為 TI 之 FDC1004EVM 開發模組電容轉換器，進行含水量量測測試。該開發模組包含微控制器、FDC1004 模組以及液位量測感測器，可直接透過微控制器上之 USB 與電腦傳輸進行測試，且提供免費現成之 GUI，便於開發，開發模組屬於可拆式設計，可拆除微控制器，將 FDC1004 模組與感測器直接與 Arduino Uno 連接進行測

試。

(5) 無線傳輸模組

無線數據傳輸平台有許多選擇，如 Wi-Fi，藍牙，GSM 與 Zigbee 等相關技術可以在市場上購得。由於邊坡滑移多發生於強降雨時，而水對電磁波的傳遞具有相當程度的屏蔽效應，因此無線傳輸平台的選擇須將穿透屏蔽能力納入考量，而增加傳輸距離以及採用傳輸網路陣列則可降低中繼站數量，降低能源

與成本需求，亦為選擇上之考量。其中 RF 為最為廣泛使用之無線訊號傳輸模組，由於具有智能調整以及可延伸傳輸的特性，使其幾乎適用各種狀況，對多系統平台的支援也使其更便於擷取。其於戶外無訊號屏蔽環境下傳輸距離約 650m，。

本研究以 RF 傳輸技術的衍生技術 NRF24L01 作為本案主要無線傳輸模組，由於 NRF24L01 之電路與元件已完全模組化，使其便於開發，而其低工作電壓 (1.9V~3.6V) 與工作電流 (<25mA) 使其具備低功耗之優勢，高速傳輸 (2Mbps) 並支援多達 125 頻點，滿足多點通信與跳頻通訊之需求。NRF24L01 集成了所有與 RF 協議相關的高速信號處理功能，包括自動重發丟失數據包和自動產生應答信號，使其得以自動檢測並重發遺失的封包，重發時間及重發次數可透過軟體控制，並可自動存取未收到應答信號的封包，自動應答功能在收到有效數據後，模組將自動送出應答信號，無須另行編程載波檢測。NRF24L01 內部具有固定頻率檢測硬體 CRC 偵錯和對多點通道地址控制，封包傳輸錯誤計數器及載波檢測功能則可用於跳頻設置，提供同時最大 6 組接收通道地址設置，並可有選擇性地開啟接收通道標準排針 Dip2.54mm 介面，便於嵌入式應用。NRF24L01 的 SPI 介面可以利用微控制器的 SPI 介面連接或以 I/O 接腳進行模擬，內部具有 FIFO (First In, First Out) 與各種高低速微處理器接腳，便於使用低成本微控制器。

(6) 圖形化使用介面 (GUI, Graphical user interface)

為簡化並加快對各土層監測模組之監控，需發展一圖形化使用者介面，透過 GUI 可不必透過 Arduino 編輯器更改 Arduino 韌體 (firmware)，即可達到對土層監測模組以及接收端之 Arduino 進行必要之控制與資料擷取。為簡化程式開發成本與時間，本研究 GUI 使用 Microsoft Visual Studio 進行編寫，並以 C++ 語言作為 GUI 開發語言。完成之 GUI 可控制接收端 Arduino Uno、接收無線模組所發射之訊號，並將接受到之資料進行編譯，換算成有效數據後顯示於 GUI 內，有效數據包括土壤體積飽和度變化、兩向度之傾斜角變化，並具備傾斜角度歸零與所有資料儲存功能。

儲存後之檔案格式為 ASCII 文字檔，儲存時各資料皆以逗點分隔，便於數據之分析與應用，資料儲存順序為：系統日期 (mon, day, year)、系統時間 (hour, min, sec)、土壤含水量 (%)、電容值 (pF)、X 向傾斜角度 (°)、Y 向傾斜角度 (°)、X 向加速度數值、Y 向加速度數值、Z 向加速度數值、X 向角速度數值、Y 向角速度數值、Z 向角速度數值、歸零 X 向加速度準位數值、歸零 Y 向加速度準位數值。歸零按鈕則提供管理單位可於完成安裝後使用，點擊該按鈕將儲存當下所測得之 X、Y 向加速度數值作為參考準位，X、Y 向傾斜角度計算將以該準位作為零點，但不影響儲存之三軸向加速度與角速度數值，僅影響儲存之 X、Y 向之傾斜角度，且歸零時之參考準位將作為末二項數值一併儲存入文字檔中。

4.3 淺層邊坡無線監測模組原型

土層監測模組可分為發射端與接收端兩部分，發射端係指由微控制器結合各感測器所構成之土層監測模組，裝置於待測地點並持續透過無線傳輸將各感測器所獲取之資料送出；接受端則指單純由微控制器結合無線傳輸模組之無線接收系統，並不具備量測功能，裝設於現地之伺服電腦進行資料收集，並儲存至伺服電腦以供管理單位透過遠端監控並存取監測數據。

研發中使用 Sparkfun 推出之可相容 Arduino UNO 的原型擴充板，直接固定於作為微控制器 Arduino UNO 之排針母座上，並將發射端方面除電容感測器以外之感測器皆固定於該原型電路板上，並設有電容感測器排線接口，如此減少了線材走線所佔用之體積以及線接頭鬆脫之風險。發射端除了包含微控制器外，更搭載 4 顆鋰電池作為戶外供電系統，將來可加入太陽能板與供電控制器以提升土層監測模組續航能力。圖 13 為本研究所研發之土層監測模組發射端之外構，發射端的外構設計可大致分為三部分：



圖 13 發射端外構

1. 核心內盒(圖 14(a))：搭載微控制器、IMU、無線傳輸模組、供電系統

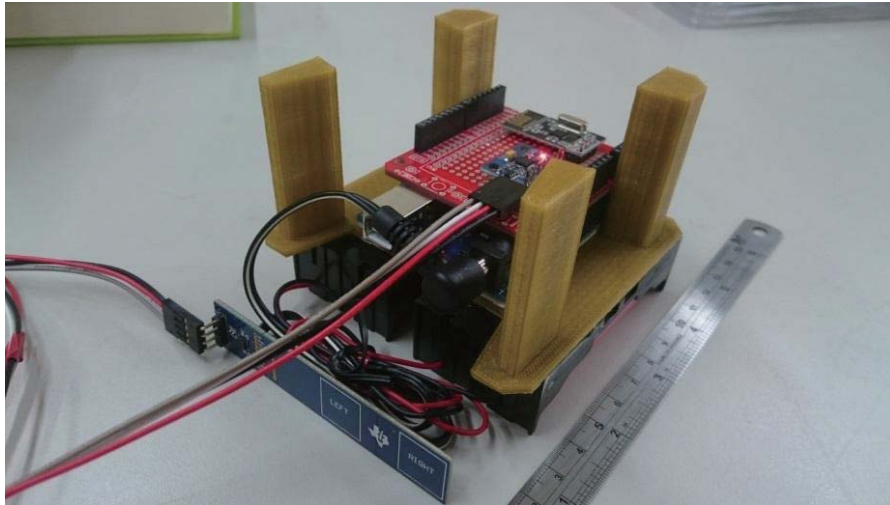
。

2. 核心外盒(圖 14(b))：提供防雨、防曬與散熱之保護殼層。
3. 含水量計(圖 14(c))：裝置電容感測器之防水殼層。

核心內盒包含一骨架，其下方固定有電池盒，其上則用以固定微控制系統與感測器電路，骨架主要功能為固定微控制器、感測器電路板以及電池盒，其上支撐設計將抵住外盒頂部，使骨架緊密與內外盒緊密貼合避免內外相對震動，外盒與感測器電路板與微控制器間留有空間，搭配外盒與內盒間預留之空隙使其具有隔熱與散熱作用，外盒預留之通風孔高度皆低於內盒高以確保雨水無法進入內盒，使其通風散熱同時達到防雨的需求。內盒下方以一連結器連結一長 80cm 之高密度 PCV 管如圖 13 所示，PCV 管下方與含水量計黏合，接縫處皆以膠充填使其完全防水，電容感測器則以一 90cm 長之 4 芯排線穿過 UPVC 水管連結至感測器電路板上之排線接口，未來將在管壁上多處增設開口，並裝置多處含水量計於其表面，使其得以分佈式量測淺層土壤飽和度。

接收端包含一微控制器與一搭載無線傳輸模組之電路板，該電路板之針腳設計使其得以直接固定於 Arduino UNO 如圖 15(a)所示，並透過一 USB 傳輸線與電腦連接，接收端連結至電腦後僅需啟動本研究所開發之 GUI 即可顯示土層監測模組回傳之數據。本研究亦製作一接收端專用外殼如圖 15(b)所示，避免電路板與微控制器接觸金屬導致短路，並預留有一 USB 開孔。本研究並針對各感測器進行標定，結果顯示各

感測器皆符合本研究目的之需求。



(a)發射端核心內盒



(b)發射端核心外盒

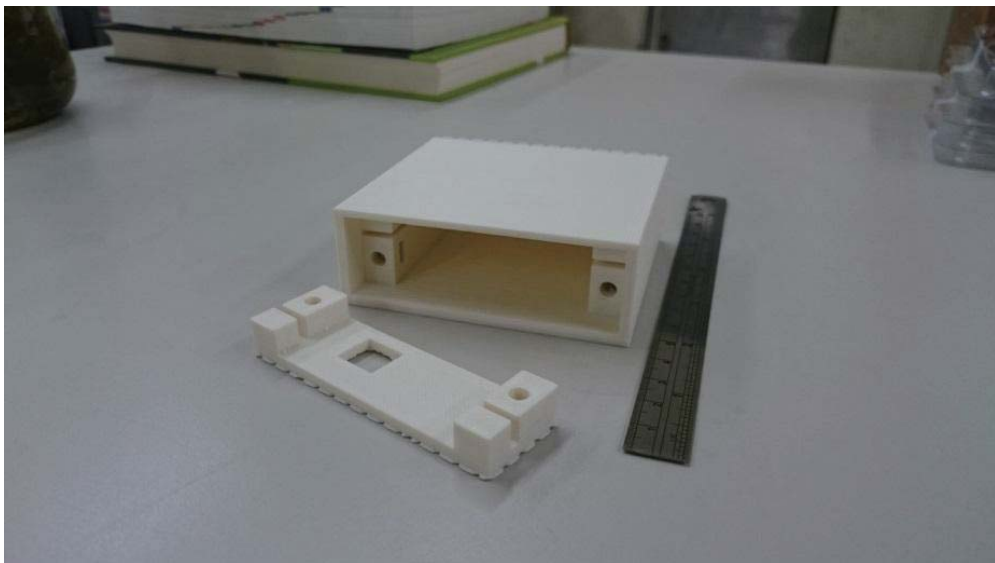


(c)含水量計殼層

圖 14 無線監測模組發射端



(a)接收端之微控制器與搭載電路板



(b)接收端外殼

圖 15 無線監測模組接收端

由於土層監測模組之含水量計有防水之需求，採取貫入方式安裝有可能破壞其防水功能，因此建議採預鑽孔埋設後回填安裝方式，建議安裝流程如下：

1. 使用手鑽(Hand auger)於安裝地點鑽掘一深度 0.5m 之鑽孔。
2. 將土層監測模組置入鑽孔中，並向下貫入 0.5 m。
3. 含水量計上下 50 mm 區間以粗砂回

填。

4. 其餘深度以皂土漿回填至地表。

五、結論

本研究包含公路邊坡淺層滑動解析法預測模式建立與監測模組研發，以達成依時預警監測模組之功能，希冀整合此二部份成果，提出整合之依時預警系統架構。所進行之二維水力力學耦合數值分析，為考慮結合表面入滲與土中滲流分析等水力反應及非飽和土層非線性有效應力變形分析，利用相同的網格，於進行滲流分析時，將孔隙水壓及含水量變化狀態參數，傳遞給相同網格之土壤進行力學分析，滲流分析之結果將用於更新非飽和土壤之彈性及強度參數，近似模擬水力力學耦合分析，可作為現地監測模組佈設與警戒值制定之依據。

無線監測模組研發則採用廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統，進行淺層土壤水力與運動量監測，如此可大幅降低成本及安裝費用，增加監測範圍。本研究所研發之土層無線監測模組備有下列元件：(1)微控制器、(2)慣性量測單元、(3)高精度電子傾斜儀、(4)電容土壤水份計及(5)無線傳輸模組，藉由上述元件量測資料可推估淺層土壤之體積飽和度以及地層傾斜角度，並藉由無線傳輸模組將資料傳至監測主機，由遠端人員透過本研究開發之圖形化人機介面進行判讀或自動判讀以及時預警，提前進行相關減災行動。

參考文獻

1. 林哲毅，1999，「土壤電阻率與含水特性關係之探討」，國立交通大學土木工程系，碩士論文。
2. 李維峰等人，2003，「台灣地區道路邊坡崩塌發生機制及防治效益評估方法研究與應用（二）」，MOTC。
3. 財團法人中興工程顧問社，2009，「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置(第2期 98年度)－集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(2/3)」，經濟部中央地質調查所研究報告，成果報告。
4. 黃安斌、林志平、廖志中、潘以文、湯士弘、簡旭君、吳政達、葉致翔、盧吉勇、楊培熙，2002，「先進邊坡監測系統之研發」，中國土木水利學會會刊，第二十九卷第二期，第 65-78 頁。
5. 鄭清江、譚志豪、鍾明劍、李錦發、費立沅，2009，「莫拉克降雨引致高屏地區邊坡淺層崩塌災害勘查

- 與穩定性數值分析案例」，地工技術，第 122 期(2009 年 12 月)第 133-142 頁。
6. 張達德、蔡育秀、李宏徹、楊凱鈞，2013，「無線感測網路應用於邊坡穩定即時監測系統的研究」，第十五屆大地工程學術研討會。
 7. Cascini, L., Cuomo, S., Pastor M, and Giuseppe Sorbino, G. (2010). "Modeling of Rainfall-Induced Shallow Landslides of the Flow-Type." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136 (1), pp. 85-98.
 8. Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, pp. 362-372.
 9. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978). "The shear strength of unsaturated soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), pp.313-321.
 10. Kurahashi, T., Yajima, Y., and Sasaki, Y. (2008). "Landslide disasters and hazard maps along national highways in Japan. ", In : *The 2nd East Asia Landslides Symposium*, Seoul, Korea, May 22-23, 2008.
 11. Uchimura T, Towhata I, Wang L and Seko I. (2008). "Simple and low-cost wireless monitoring units for slope failure. ", In: *Proc. of the First World Landslide Forum*, International Consortium on Landslides (ICL), Tokyo, pp. 611-614.
 12. van Genuchten M. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Journal of Soil Science Society of America*, 44, pp. 892-898.
 13. Varnes, D. J. (1978). "Slope movement types and processes.", In : *Special Report 176 : Landslides : Analysis and Control* (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.), Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., pp. 11-33.

電子海圖系統之應用

邱永芳 交通部運輸研究所 港灣技術研究中心主任

黃茂信 交通部運輸研究所 港灣技術研究中心副研究員

摘要

我國海上交通運輸具有相當優勢且漁業活動頻繁興盛，然而船舶在從事海上行動時，由於氣候與地理的多變性，無論在任何時間、空間，危險及災難總是伴隨在左右，所造成的人員傷害與海洋生態浩劫也十分嚴重並且影響長遠，

因此海上安全一直都是世界各國所注視的重點之一。將通訊傳輸、網路資訊又或是其它相關電子資通訊技術與海上地圖結合演變為電子海圖，降低災害以達到船舶的基本安全保障是我國必要之發展趨勢。

一、研究背景與目的

在處於資訊爆炸性成長的時代，不管是通訊傳輸、網路資訊又或是其它相關電子資通訊技術不斷持續的在進步。而將這些資通訊科技技術結合至海洋測量、航運安全與氣象資訊等相關海洋事務是我國必要之發展趨勢，其主要原因在於我國為四面環海的海島型國家，地理位置坐落於西太平洋第一島鏈的中心位置，不僅是東北亞與東南亞海上來往航運的樞紐，在國防戰略、經濟貿易上亦是國際上不可或缺的一員。從圖 1 中可以明顯看出我國地理位置處於東北亞與東南亞之間，往上航運路線通往韓國、日本等東北亞各國，往下航運路線通往菲律賓、印尼、泰國、新加坡及

馬來西亞等東南亞各國，因此我國在整個東亞的地理位置上扮演著極為重要的角色。

隨著電子資通訊科技的發展，海上地圖亦結合這些電子資通訊科技演變為電子海圖，並且不斷的修正、改善及訂定更加完整的電子海圖相關標準，國際水道測量組織 (International Hydrographic Organization, IHO) 在電子海圖相關標準中所建議的全球電子海圖資料庫 (World Electronic Navigational Chart Database, WEND)，其概念區域電子海圖協調中心，作為用戶與區域內各國製圖機構之間的仲介，其 WEND 運作模式如圖 2 所示。

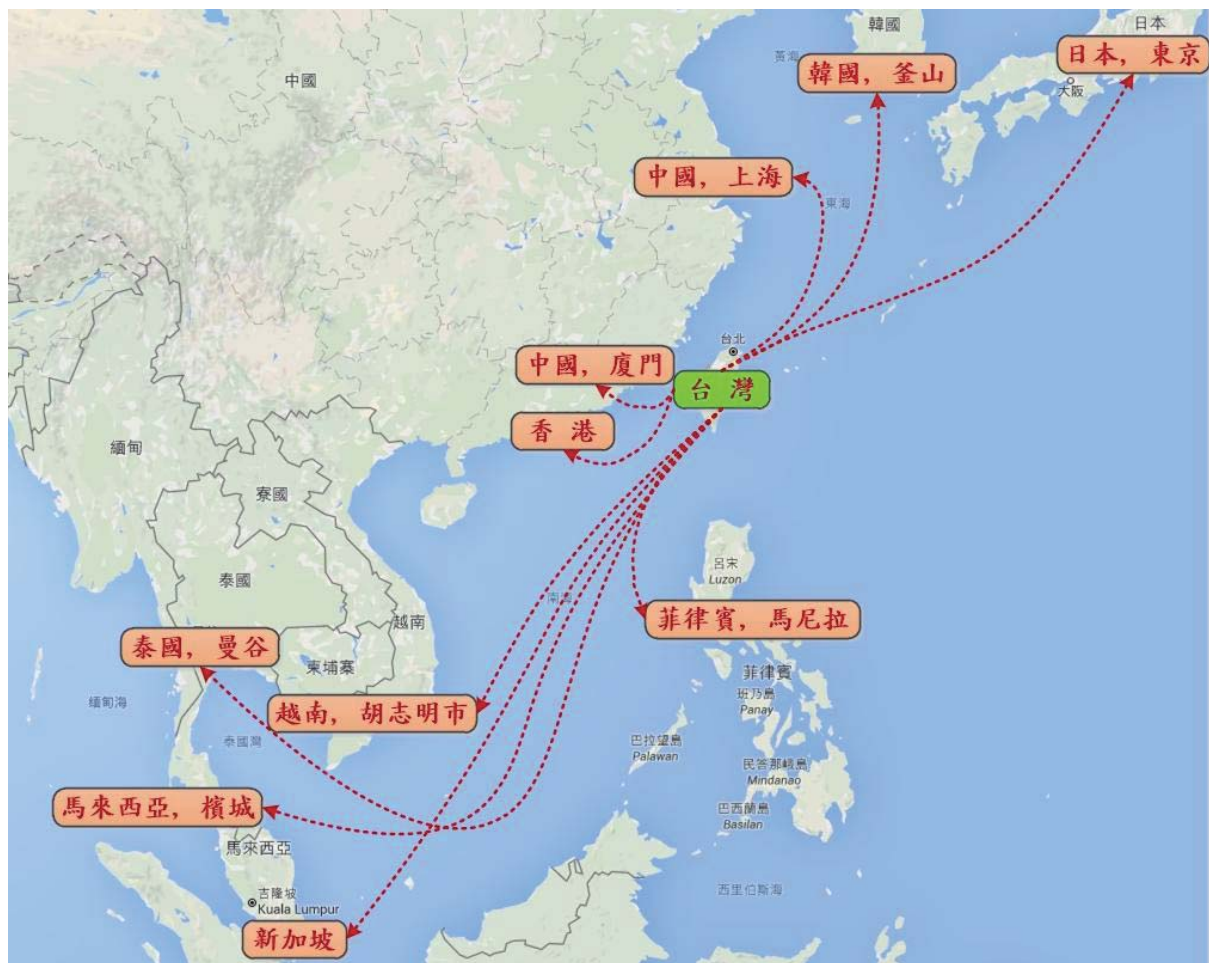


圖 1 我國航運路線示意圖

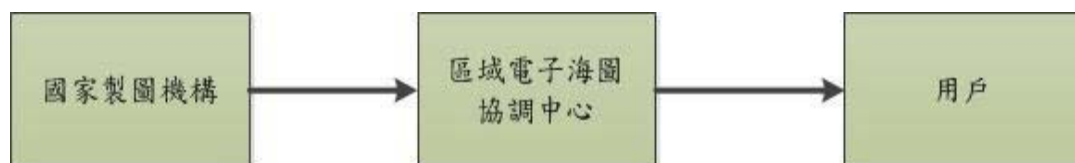


圖 2 WEND 運作模式

根據 IHO 於 2010 年的統計，電子海圖對於國際海上人命安全公約 (International Convention for the Safety of life at Sea, SOLAS) 所規範之船舶航線覆蓋率已達 85%，截至目前為止仍持續成長中，而對於各國有以下之權利與責任說明：

1. SOLAS 第五章第九條要求締約國政

府確保海測資料以適當方式提供，以滿足安全航行需求，2008 年 7 月 1 日前必須涵蓋高速船 (High Speed Craft, HSC) 航路，此為國際海事組織 (International Marine Organization, IMO) 強制要求 HSC 安裝電子海圖顯示與資訊系統 (Electronic Chart Display and Information System,

ECDIS)的日期。

2. 預期各成員國將儘早就其國家所管轄海域備妥完善的電子海圖(Electronic Navigational Chart, ENC)供應系統以及其後續的更新機制。
3. 在2008年七月以前，各成員國家提供必要的電子海圖涵蓋，或是與其它國家協議由他國代為生產必要的電子海圖涵蓋。

基於上述各項資料之分析，對於我國航政而言，電子海圖供應系統與更新機制的建置，已是不可或缺的政策。

船舶在海上航行時，由於海洋氣象的瞬息萬變、海上地理環境的多變性等種種不確定因素，使船舶的航行無論是時間、空間，危險與災難總是伴隨其行，

且海難災害造成的結果比起陸上的災害事件更加不能輕易忽視，海難事件所造成的人員傷亡率、海洋生態汙染等種種災害結果不僅十分嚴重，其汙染對環境影響的時效性更是久遠。根據英國勞氏驗船協會(Lloyd's Register of Shipping, LRS)的海難回顧資料我們可以知道，海上環境風險(Risk Environment)是以海難事件發生頻率當作海上風險環境評估的主要準則，此外再加上天候氣象能見度、海象潮汐變化、航行船舶密度與交通流量複雜度等條件因素做為全球海域的評估依據，而根據上述條件因素的評估與分析，我國海域被列為中等程度海上風險之環境。



圖3 海上環境風險評估元素

本研究主要是在於因應海洋科技通訊技術及船舶資通訊設備發展需求為導向，進行海洋資訊、技術和電子海

圖資料庫的整合升級本中心原有電子海圖系統，予以建置一更加完善的電子海圖系統。SOLAS 國際公約在第五章

「航行安全」章節的第 9 條例中明確規定各國政府具備蒐集、編輯、刊登、公告及維護更新航海所需之相關資訊的義務，其所需相關資訊包含航海圖、航

行指南、燈塔表、潮汐表及航船佈告，且亦須提供服務所需之管理機制的支援，並確保海圖與其航海資訊符合相關的國際決議與規範。

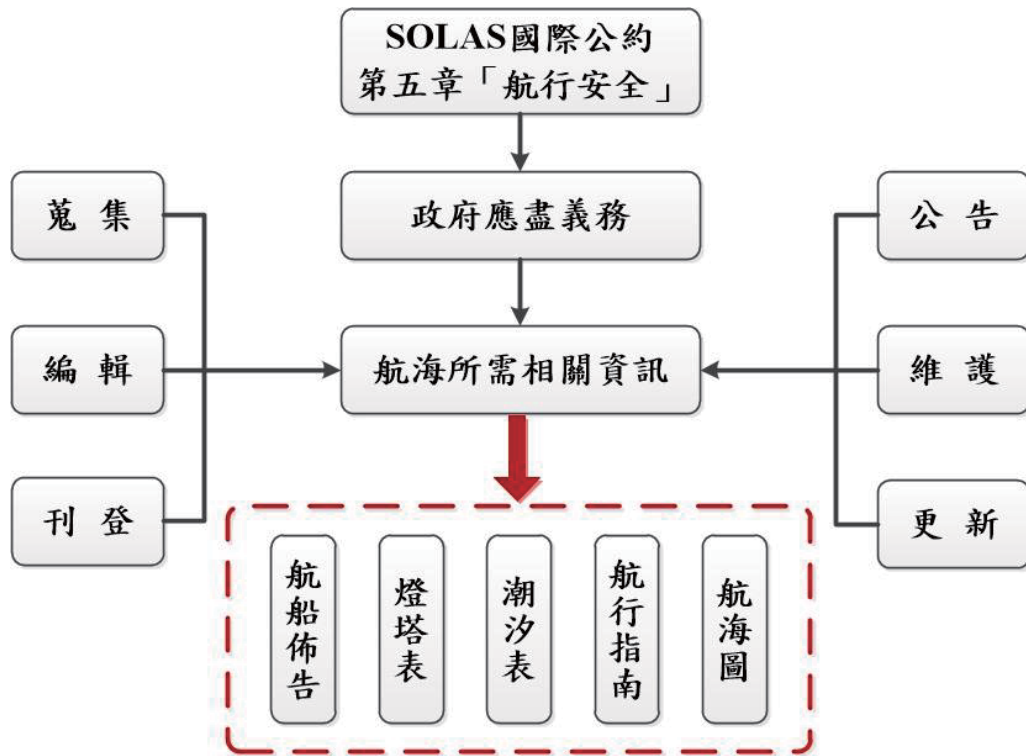


圖 4 政府應提供之相關航海資訊

綜合上述的分析我們可以得知電子海圖系統即是為了提升船舶海上航行安全為考量而建置的，且基於 SOLAS 公約規範，電子海圖系統已納為強制性的船舶設備亦對其訂定相關之後續資訊更新機制。因此，本系統順應 SOLAS 公約中將電子海圖系統納為強制性搭

載的船舶設備之規範，我們結合 AIS 收發機使 AIS 封包格式能被接收，並將其匯至電子海圖系統，使系統能呈現船舶位置以及兩者間相對位置等相關資訊，從而達到系統整合概念並降低船舶航行設備的建置成本，提升船舶航行安全與漁撈作業的效率。

二、設備介紹

2.1 設備使用之硬體介紹

系統所使用之研究設備：包含捷元 E10T3W 平板電腦與 AIS-700 收發機。

1. 捷元 E10T3W 平板電腦

平板電腦用途主要是搭載電子海圖系統並接收 AIS 收發機接收之訊息

格式並呈現於海圖系統上。

表 1、平板電腦設備規格表

規 格	
CPU	Bay Trail-TZ3735F (四核心 Up to 1.83Ghz)
主機板	Intel Bay Trail 平台
記憶體	DDR3-16GB RAM
顯示器尺寸	10.1" 解析度 1280x800
顯示卡	內建 Intel HD 顯示晶片
硬碟	32GB
音效	內建 HD AUDIO 高傳真 音效
網路	802.11b/g/n 無線網路 藍芽 4.0
作業系統	Windows 8.1 中文版
鏡頭	200 萬像素攝影機/ 後置 500 萬像素攝影機
尺寸	176.2mm(L)x258mm(W) x 10.3mm (H)
重量	580g(不含鍵盤)/470g (硬式基座鍵盤)
電源	5V/3A 變壓器
配件	硬式基座鍵盤/ OTG 轉接線

參考資料來源：<http://www.genuine.com.tw/>

2. AIS-700 收發機

該 AIS 收發機具備接收 GPS 與 AIS 兩種資料格式的功能。因此，有利於我們在電子海圖系統顯示不同格式資料之位置資訊，達到更廣泛的資訊顯示功能，如以 AIS 資料格式為主的船舶位置

資訊，或以 GPS 資料格式為主的海事氣象浮標、海上無人載具等位置資訊。

表 2、AIS-700 收發機規格表

規 格		
Dimensions	140mm (L) x131.4mm (W) x 46mm (H)	
Weight	550g	
Battery Power	DC (9~30V)	
Average power consumption	4W	
Peak current rating	2A	
GPS Receiver (AIS Internal)	IEC 61108-1 compliant	
Electrical Interfaces	RS232 38.4kBaud bi-directional	
	RS422 NMEA 38.4kBaud bi-directional	
Connectors	Power	4 -pole Plug
	VHF Antenna connector	BNC
	GPS Antenna connector	TNC
	Interface	RS232/RS422
VHF Transceiver	Transmitter x 1	
	Receiver x 2	
	Frequency: 161.975 to 162.025 MHz in 25 kHz steps	
Output Power	33dBm $\pm$ 1.5 dB	
Channel Bandwidth	25kHz	
Channel Step	25kHz	
Bit rate	9600 b/s $\pm$ 50 ppm (GMSK)	
RX Sensitivity	Sensitivity: - 107dBm 25kHz	
Environmental	IEC 60945 Operating Temperature: -25°C to +70°	
Compass Safe Distance	1 meter	
Indicators	On, TX, RX, Status, TX timeout, Error, TX Off	

參考資料來源：<http://pcnautic.nl/shop/Datasheets/AIS-700%20User%20manual.pdf>

2.2 設備使用之軟體介紹

本系統所使用之軟體包含：

1. ECDIS 海圖系統

ECDIS 海圖系統為一套由 Python 語言開發的海上航行軟體。Python 為 Guido van Rossum 在 1989 年於阿姆斯特丹開發的一套新的指令碼解釋程式，作為 ABC 語言的一種繼承，而之所以會取名為 Python(中譯為大蟒蛇)，是因為開發者為一電視劇名叫飛行馬戲團(Monty Pythons Flying Circus)的愛好者。

Python 是一門跨平台的指令碼語言，支援大眾常用的作業系統，包括 Windows/Dos、Linux、Macintosh(Mac OS)、Android 與 FreeBSD，以及一些非整合式開發軟體的文字編輯器，包括 Eclipse、NetBeans、PSPad 與 Notepad++ 等，多數 Linux 發行版與 Mac OS 作業系統都直接整合了 Python，讓使用者可以直接在終端機下執行。

Python 自己有一套 Python 語法規則，透過實作與遵守這條規則來編寫 Python 直譯器，大部分使用者用最多的為 C 版本的 Python，也就是 C 語言實作的 Python，需要與其他直譯器作區別才以 CPython 來稱呼，除此之外還有 Java 程式語言的 JPython 和使用 .NET Framework 的 IronPython，這些實作可以讓使用者充分利用已有的其他資源。

Python 所使用的函式、模組、數字與字串都是物件，支援繼承、衍生、重載與多重繼承等特性，進而增強原始的複用性。Python 本身提供豐富的 API 與工具列，方便讓使用者能夠使用 C 或

C++來編寫擴充新的模組，因此，可擴充性對於作為編程語言的 Python 是一大賣點。Python 具有龐大的標準函式庫，包含科學計算、字串處理、網路通訊協定的編寫與 World Wide Web Consortium(W3C)的格式支援。

除了主程式 Python 外，還使用了支援 Python 軟體的套件包含：

- (1) Pywin32-216 版本，Python 連結 Windows 系統 API 程式介面的 Python 開發模組。
- (2) PySerial-2.7.win32, Python 用來讀寫 Serial Port 的開發模組。
- (3) PyAudio-0.2.4.py27，Python 使用 PortAudio 的開發模組，PortAudio 為一個跨平台音頻庫，整合了 SGI、Unix 與 Beos 到終端的混音器中，使 Python 可以方便的錄製聲音與播放音頻。
- (4) GDAL1.11.3 模組，GDAL/OGR 為一個開源且持續更新的函式庫，目前是由兩個不同的模組所組成，包含 GDAL (Geospatial Data Abstraction Library)，一個提供了讀取、寫入與轉換各種網路數據資料格式功能的地理空間資料存取函式庫，例如地理資訊系統(GIS)、向量與 3D 數據模型，和 OGR，一個提供讀寫諸多向量資料格式功能的抽象函式庫，OGR 目前支援了許多數據格式，例如 Binary、Coverage、DWG、ArcSDE、GML 與 PostgreSQL 等常見的格式。因為歷史的原因，GDAL 與 OGR 維護方式都遵照同一個生成系統，創始者為是 OSGeo 的

Frank Warmerdam。

OGR 設計的架構，主要是參照於開放式地理資訊系統(Open Geodata Interoperation Specification, OGIS)的簡單要素實現規範。架構類別大致可分為 6 種：幾何形狀(Geometry)、空間參考(Spatial Reference)、要素與要素定義(Feature/Feature Class Definition)、圖層(Layer)、原始資料(Data Source)與驅動(Drivers)。

OGIS 提供一套具有開放介面規範的通用模組，讓開發者透過規範來實現

不同種類的地理數據和處理方法，地理的數據基礎為 Feature 要素，在地圖中表示為一多邊形的建築物，而組成要素有兩個必要的成份就是幾何與屬性，幾何訊息組成又分點、邊、面與集合四種，其中 Linestring 為邊，Polygon 為面，幾何的設計中採用 Composite 組合模式，將 GeometryCollection 幾何集合與要素集合 FeatureCollection 都定義成一種幾何類型。

2. Windows8.1 作業系統

三、設備操作

軟體設備操作說明：

圖 9 為電子海圖執行於 Window8 初始畫面。

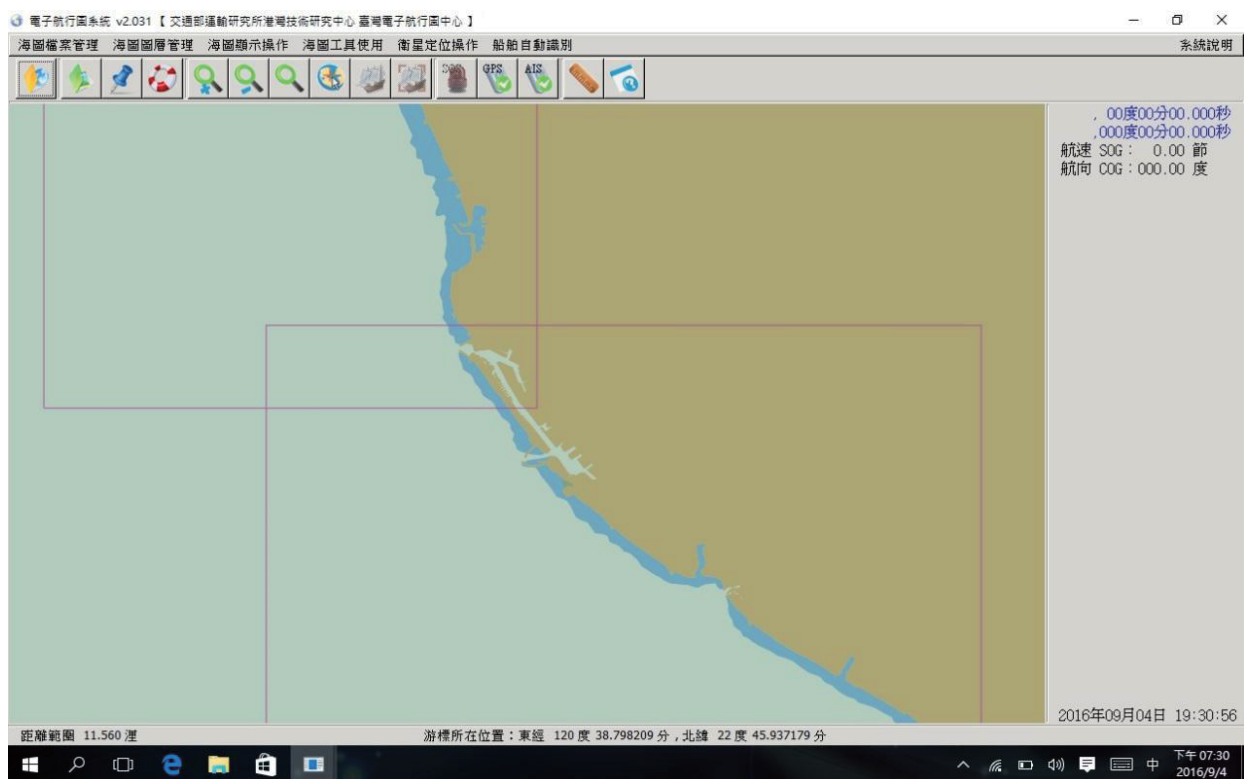


圖 9 海圖初始畫面

圖 10 紅框為設定系統初始港口。

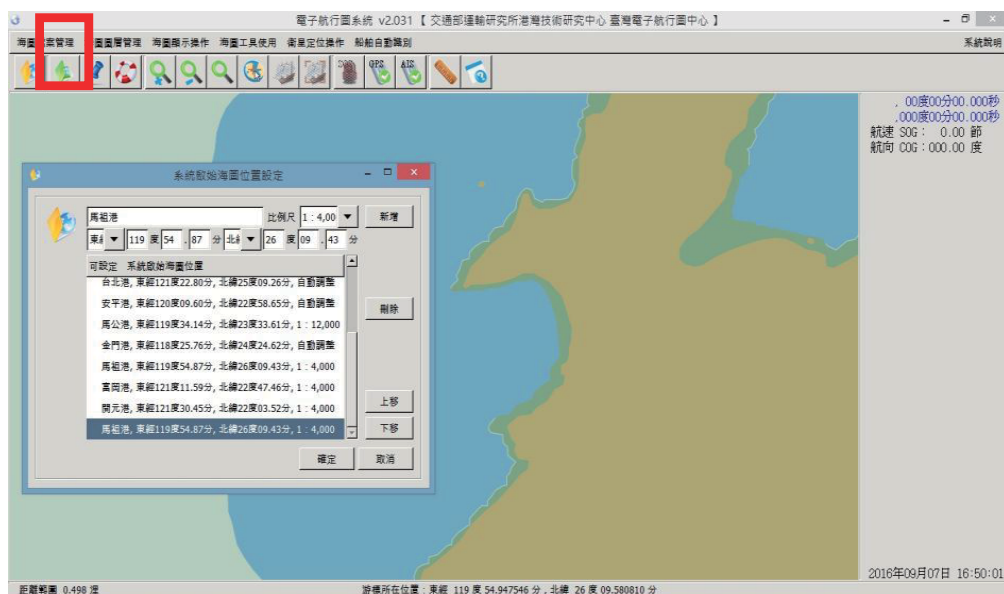


圖 10 設定系統初始港口

圖 11 選擇衛星定位操作後再選擇 GPS 衛星定位控制設定

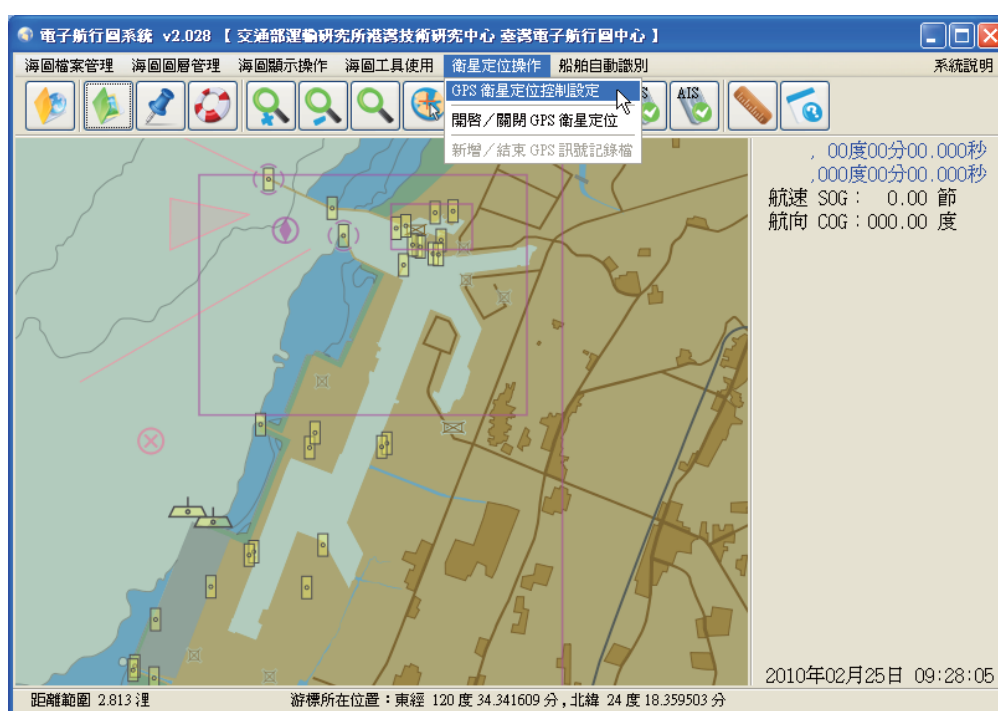


圖 11 GPS 衛星定位控制設定

上述參數設定完後，接收到 GPS 訊息即可在海圖上顯示本船船位以及顯示 GPS 訊號之經緯度、航速 SOG 與航向 COG，如圖 12 所示。

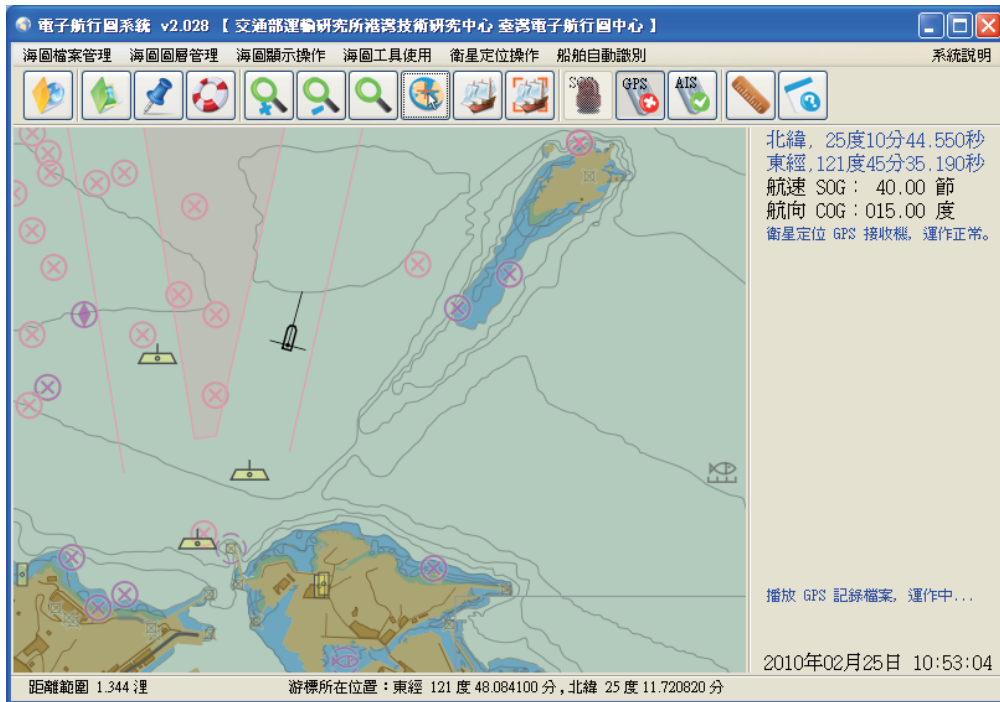


圖 12 顯示 GPS 衛星定位等相關資訊

如圖 13 所示，選擇船舶自動識別後再選擇 AIS 船舶自動識別設定，設定完成後，如有成功收到 AIS 收發機回船之訊息，即可在海圖上顯示附近範圍的船隻 MMSI 與兩船之間的距離，如圖 14 所示。



圖 13 AIS 船舶自動識別設定



圖 14 顯示鄰近船舶相關資訊(MMSI 與距離)

如果 GPS 衛星定位失效，警告將會在右側欄位顯示，如圖 15 所示。

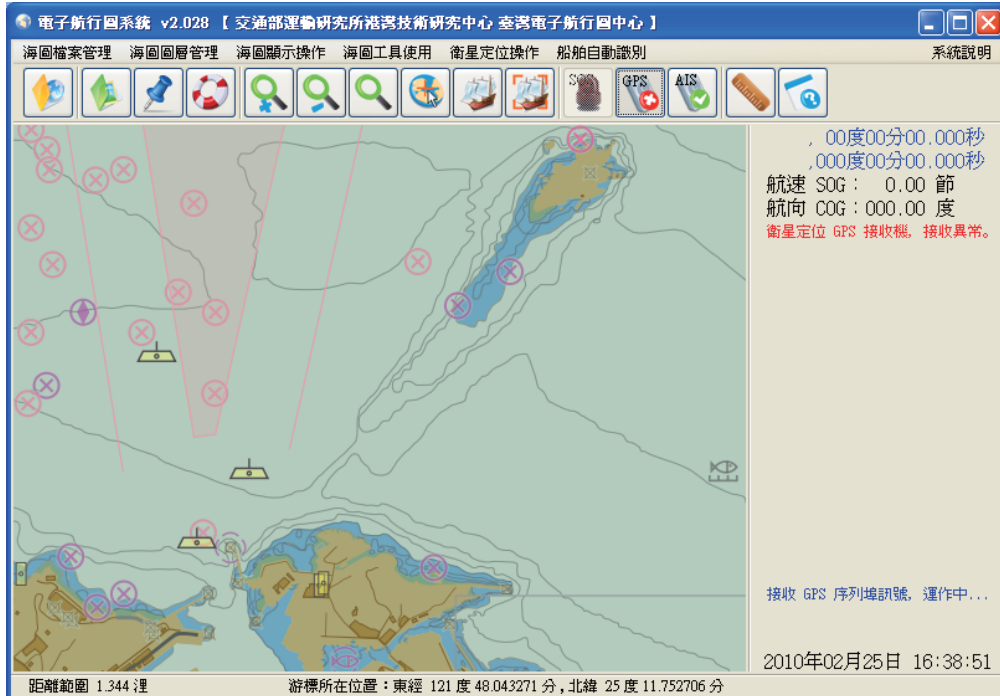


圖 15 GPS 定位失效警告

選擇直尺圖示的功能，可以使用在海圖上點擊 A 點到 B 點來顯示兩者之間的距離如圖 16 所示。



圖 16 顯示兩點距離

如圖 17 所示，點選海圖工具使用內的海圖安全警告設定，可以設定海域安全水深、航路安全寬度與船舶碰撞警告等告警功能，如圖 18 與圖 19 所示。



圖 17 安全警告設定

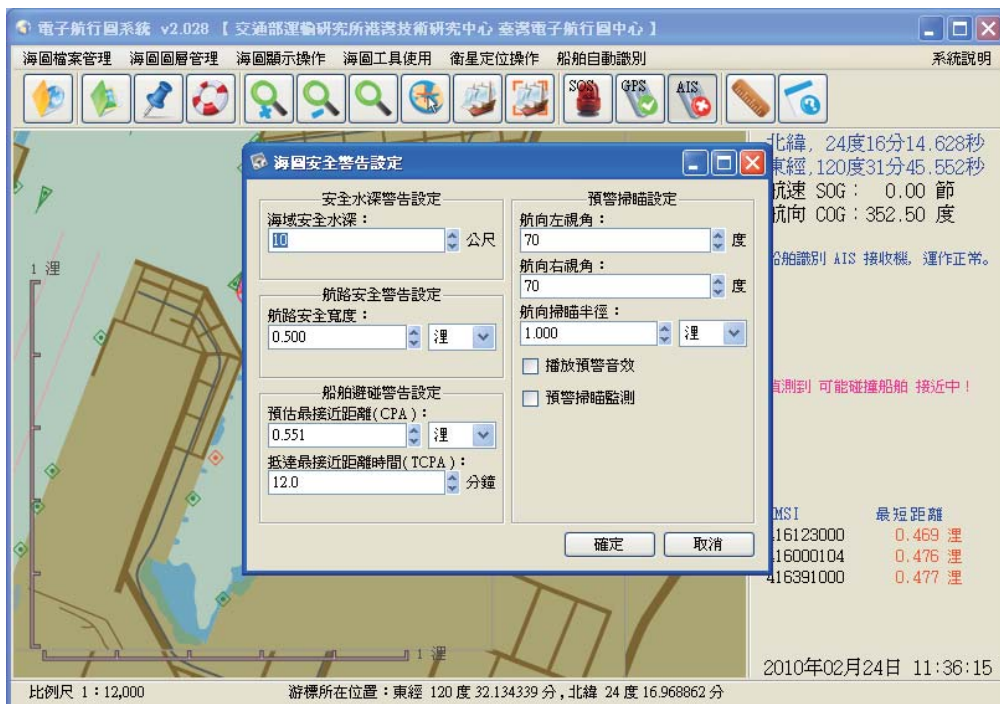


圖 18 安全警告設定



圖 19 安全警告設定：偵測可能碰撞船舶 (CPA、TCPA)

如圖 20 所示，點選海圖工具使用內的設定海圖航路，之後在海圖上點擊左鍵選擇起始點，並可任意點選位置來設定路線，最後點擊右鍵來完成航路設定，並可顯示船舶距離的總長度，結果如圖 21 所示。

設定完航路後可以選擇海圖安全警告設定來設定航路安全寬度如圖 22 與圖 23 所示，若出現航行船隻偏離航行路線會在右側欄位出現偏離航線之警告，如圖 24 所示。



圖 20 安全警告設定：設定海圖航路

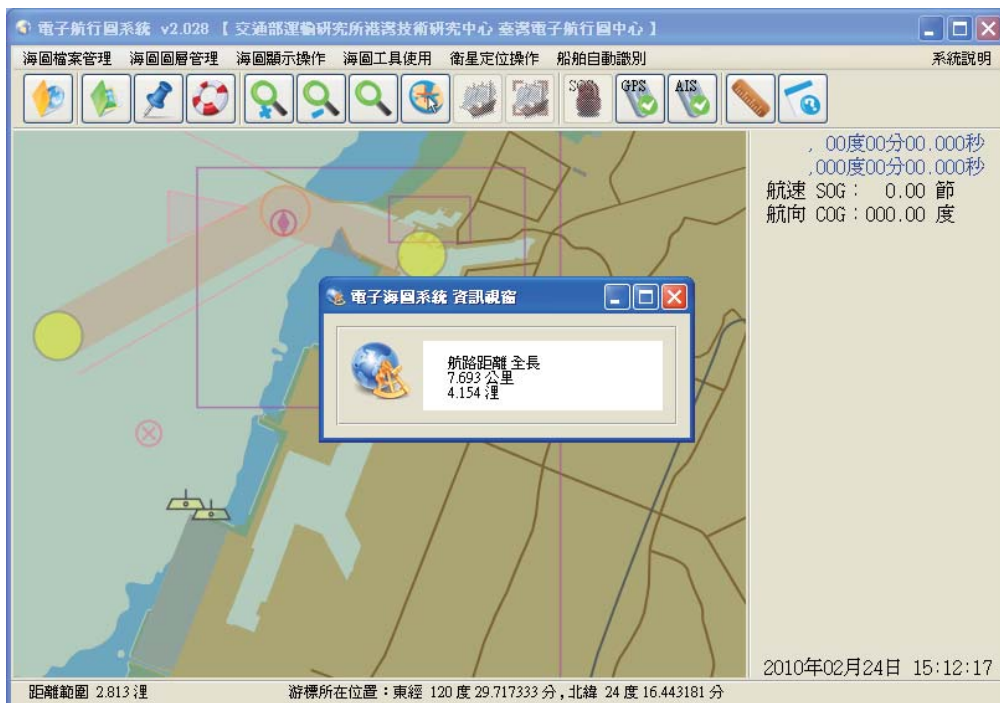


圖 21 編輯航路結果

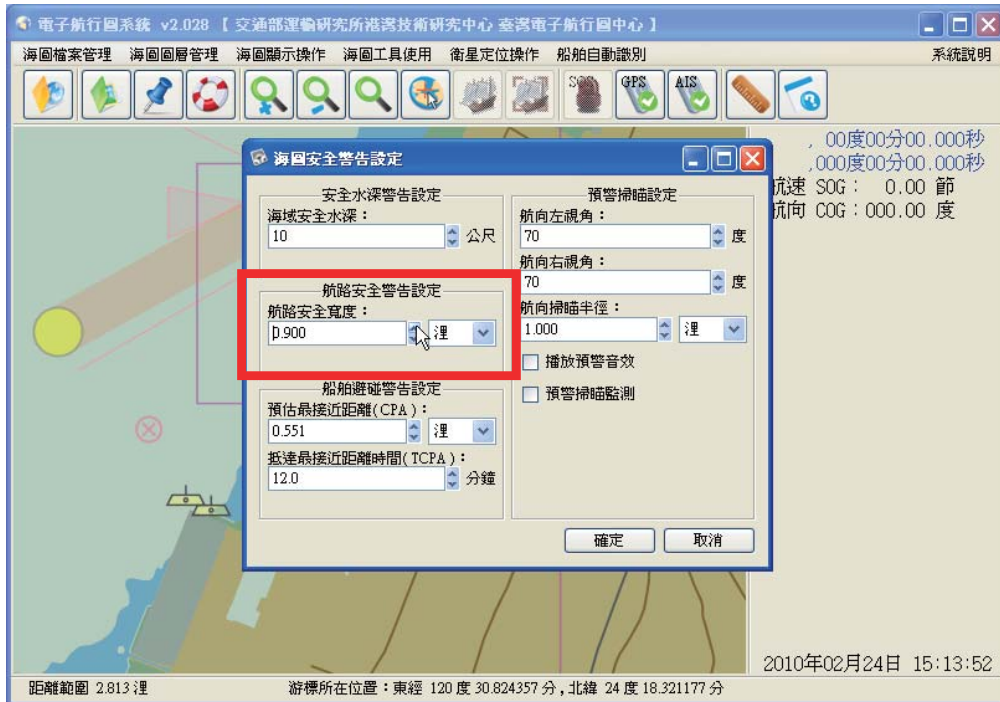


圖 22 安全警告設定：航路安全寬度調整設定



圖 23 安全警告設定：航路安全寬度調整設定

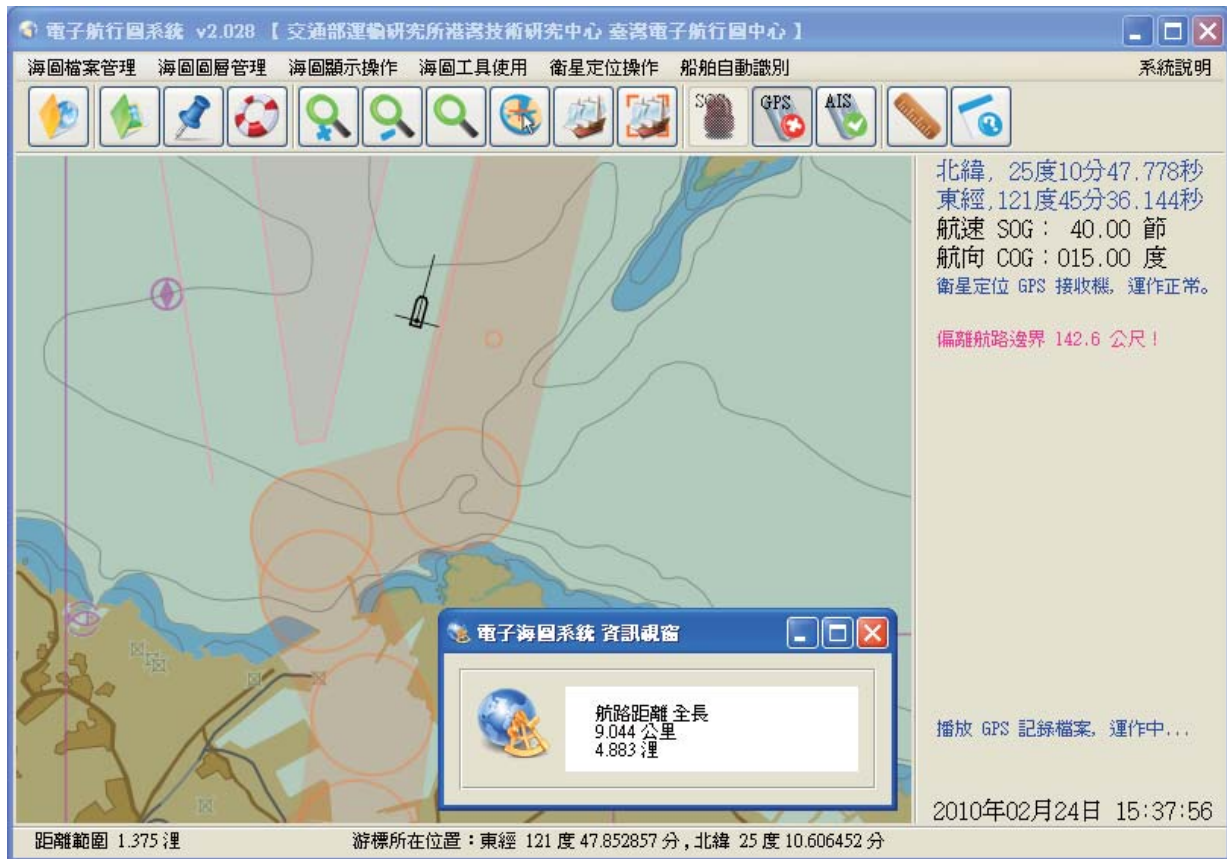


圖 24 安全警告設定：本船航路偏航警告

四、結論與建議

本中心原有之電子海圖系統平台是以 Python 2.5 版本開發，系統只能執行於 Windows XP 環境。目前已成功將電子海圖系統平台重新升級，升級內容包括重新編譯 Python 程式語言滿足系統硬體 Windows 8(含以上)平台需求、重新編譯 PYGTK 圖形使用者介面配合系統硬體 Windows 8(含以上)平台執行需求、更新 glib 函式庫滿足系統程式架構規劃。升級系統也於馬祖進行實機測試，此次測試是於南竿、北竿、東莒、西莒航線之交通船上進行系統測試。目

前已將整組電子海圖系統平台安裝於馬祖閩珠八號交通船，其安裝過程及運作情形如圖 25 至 27 所示，其航行軌跡如圖 28。因本研究主要是以提升電子海圖顯示與資訊系統，後續將配合協助馬祖地區之交通船，進行安裝架設。因限於建置經費之限制，礙於平板電腦規格，所以系統反應速度與桌上型電腦比較起來未如預期，建議使用更高規格平板電腦，達到系統反應速度。



圖 25 天線架設完成圖



圖 26 實體系統測試

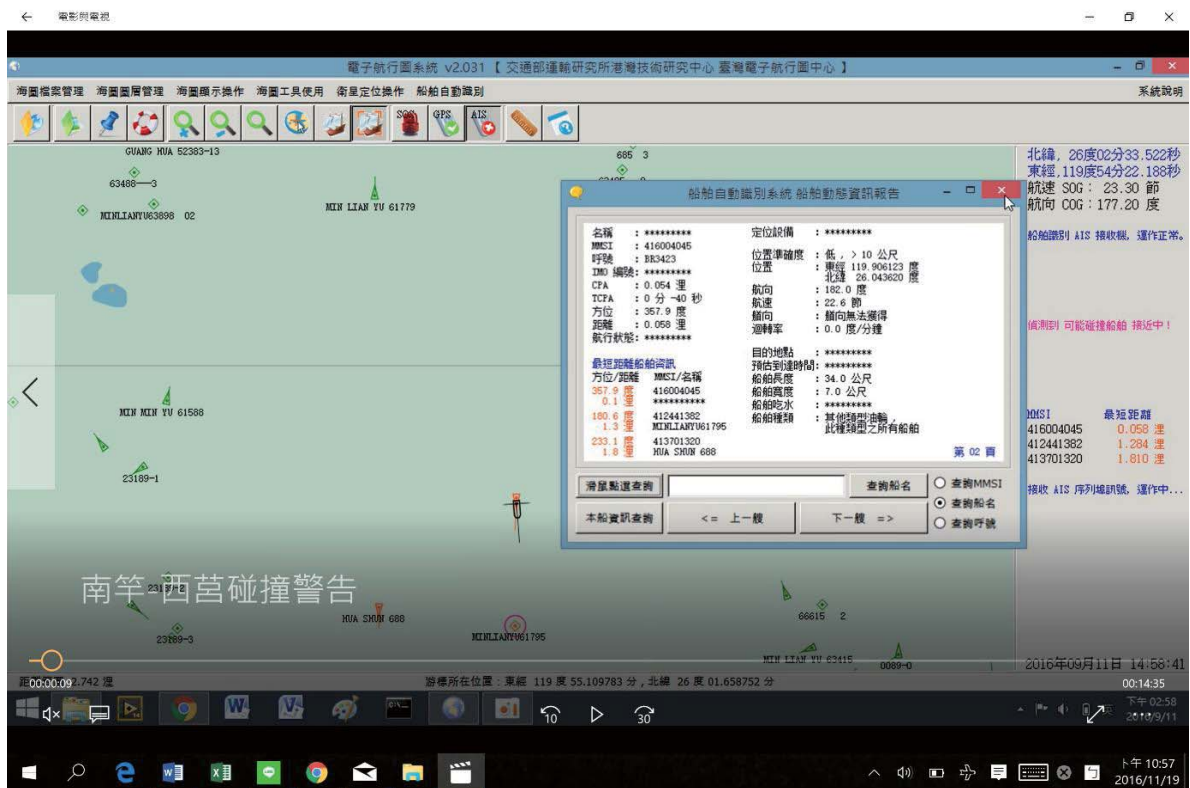


圖 27 碰撞警告

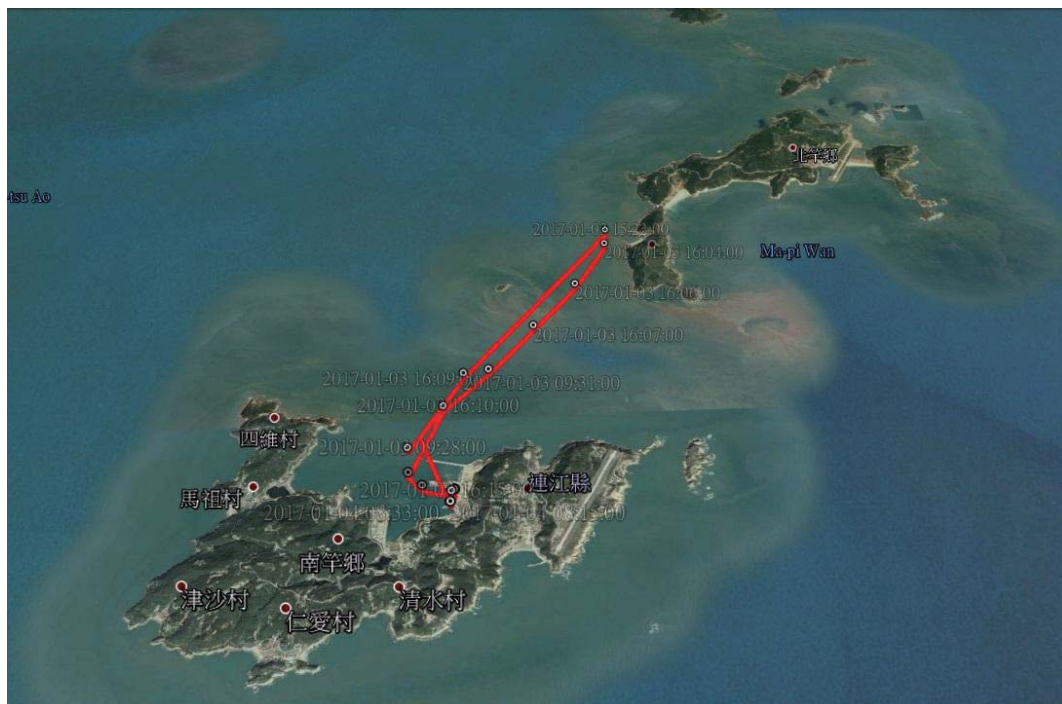


圖 28 航行軌跡

參考文獻

1. 行政院農委會漁業署，「102 年度漁業統計年報」，2013。
2. 高雄市政府主計處，「104 年漁業統計」，2015。
3. 邱永芳、張富東、張淑淨、簡曉芸，「資料庫管理系統在電子海圖上之應用」，RITI Technology Inc，2008。
4. IHO M-4, Regulations of the IHO for International (INT) Charts and Chart Specifications of the IHO, 3rd Edition
5. 行政院研究發展考核委員會，「海洋政策白皮書」，海洋事務推動小組，2006。
6. Maritime Safety Committee, "International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)," International Maritime Organization, 1974..
7. Python 介紹，維基百科。
8. GDAL - Geospatial Data Abstraction Library，GDAL website。
9. GIS Interoperability and OGC Specifications，nki 知識網。
10. 李錫堤、鄭錦桐、廖啟雯、林書毅，「地理資訊系統導論」。

橋梁振動頻率量測方法與安全評估模式之研發

鄭明淵	國立臺灣科技大學營建工程系特聘教授
廖國偉	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
郭佑綱	國立臺灣科技大學營建工程系碩士

摘要

臺灣橋梁因天然環境因素，遭受洪水與地震等災害時倒塌或斷裂的機率極高。因此，對現有橋梁進行健康度檢測勢在必行。本研究以量測橋梁自然振動頻率取代目前例行性目視檢測方式(D.E.R.&U.)，改善其僅能觀看橋梁外部受損，無法評估內部性能損傷的缺點。而振動量測方式可分為直接和間接，直接量測法雖然結果較準確，但全面安裝測量儀器不僅費時且所需經費高。因此，本研究參考已發展之間接量測技術，評估間接量測所量測到橋面版之振動頻率是否能反應直接量測法量測到之橋墩振動頻率，進一步藉由量測頻率評估橋梁安全性。

根據上述，本計畫分為兩部分：1. 驗證間接量測橋面板之振動頻率能否反映直接量測法量測到橋墩振動頻率：分為實驗室試驗與現場調查兩部分進行驗證。首先，建立縮尺模型之水工

試驗成果，確認橋梁洪水沖刷與頻率之相關性，再藉由現地量測驗證間接量測能否反映直接量測之振動頻率；2. 決定橋梁振動頻率基準值，以作為衡量判斷橋梁是否安全之標準：用數值分析方法進行耐震與耐洪側推分析，推導求得橋梁損壞前後之頻率變化比值，定義為「地震損壞臨界頻率比值」(Rec)與「洪水沖刷臨界頻率比值」(Rsc)。並發展創新人工智慧推論模式，應用案例學習機制，找出所建置 27 座橋梁分析案例之初評因子(輸入)與詳評 Rec、Rsc 值(輸出)的映射關係，推論求得其餘 2590 座橋梁之 Rec 與 Rsc，作為判斷各橋梁是否安全之振動頻率比值基準值。公路橋管單位在災時即可藉由災害前後所量測之橋梁振動頻率比值與基準值比較，作為判斷橋梁封橋後能否開放通行之依據。平時則可用來檢視橋梁健康度，作為橋梁維護之參考。

一、前言

橋梁為台灣地區用來連絡河流兩岸之重要交通工程設施，然而台灣屬季風型氣候夏季多雨，每年洪水來襲皆造成橋梁重大威脅，由於河水沖刷導致河床降低，使橋梁基礎深度變淺，影響橋梁的安全性能。此外台灣為多地震的國家，一旦發生地震等大規模天然災害時，橋梁倒塌或斷裂的機率極高。為了避免災害發生時，造成橋梁損壞導致交通中斷、居民受困或是人員傷亡等事件的發生，對現有橋梁進行健康度檢測勢在必行。目前臺灣橋梁例行性檢測方式係採用臺灣地區橋梁管理系統(TBMS)中之構件劣化評估方法(D.E.R.&U.)^[1]，此檢測方法為目視檢測，最大優點是執行容易、省時且耗費不多，但缺點是檢測成果常常會因檢測人員之訓練程度、經驗與主觀意識而有不一致現象^[2]，且評估結果有時與現場儀器檢測或載重實驗有甚大差異。再者，目視檢測僅能觀看到橋梁外部受損情形，無法評估橋梁因外力衝擊所造成內部性能損傷的狀況。

橋梁之自然振動頻率是評估橋梁安全的重要參數指標之一，當頻率發生變化的同時，極有可能是橋梁物理性質改變的徵兆。過去學者^[3]研究發現橋梁振動頻率的改變，相當反應著橋梁結構的惡化，原因可能來自橋梁結構其中任何一個桿件、連接介面、支撐點產生破壞，或是材料強度上發生老化的現象所造成。因此針對橋梁結構進行動力反應之量測，藉以求得橋梁的振動特性，再

由橋梁頻率的改變推估橋梁目前健康程度，為目前國內外監測橋梁進行防災預警的常用方法。

橋梁振動特性的量測方式可分為兩種：直接量測法和間接量測法。直接量測法主要利用安裝在橋梁墩柱之速度計，對橋梁作直接的振動量測，其量測結果準確，各振態皆可清楚於圖表上呈現，以作為判斷橋梁是否安全之依據，也是目前國內公路管理單位監測橋梁的普遍作法^[4]。然而由於台灣橋梁眾多，且多分佈於沿岸或高山縱谷間，全面安裝測量儀器不僅費時，且儀器安裝與維護成本亦非常巨大，因受限於預算限制，僅能針對少數重大橋梁進行監測。為此，楊永斌教授團隊^[5]由車橋互制理論概念首創間接量測法，相較於直接量測法，間接量測法只須藉由裝置在移動車輛上的速度計，即可擷取到待測橋梁橋面板之振動頻率，此方法具有移動性、迅速性、經濟性等優勢，然而過去對於間接量測法的研究重心，主要以橋梁或移動車輛之數值模擬、參數分析以及初步之現地試驗為主，目的在於證實間接量測法在理論上及實務上之可行性^[6]；目前之發展技術已可在現地間接量測到橋梁的頻率，但是間接量測所量測到橋面板之振動頻率是否能反應直接量測法量測到之橋墩振動頻率，並未作探討，而且對於所量測到之頻率如何分析評估橋梁安全性之研究，仍付之闕如，因此本計畫針對間接量測法作進一步之研究探討，透過橋梁所量測振動

頻率變化，分析評估橋樑之安全性。

本計畫針對公路總局所轄之橋樑，分兩個部分進行研究：1.驗證間接量測橋面板之振動頻率能否反映直接量測法量測到橋墩振動頻率：此部分驗證成果將作為後續研究之基礎，因此規劃分為實驗室試驗與現場調查兩部分進行驗證。首先，參考^[7]所建立縮尺模型之土工試驗成果，確認橋樑洪水沖刷與頻率之相關性，再藉由現地量測驗證間接量測能否反映直接量測之振動頻率；2.決定橋樑振動頻率基準值，以作為衡量判斷橋樑是否安全之標準：本計畫用數值分析方法，應用目前國內外常用之 SAP2000 軟體，建立橋樑有限元素模型，進行耐震與耐洪側推分析，推導求得橋樑損壞前後之頻率變化比值，將之定義為「地震損壞的臨界頻率比值」(R_{ec})與「洪水沖刷臨界頻率比值」(R_{sc})，此比值即可作為衡量評估橋樑健康度應用之基準。藉此，橋管單位可在災害前後，應用上述之快速量測方法，量測求得橋樑災害前後之頻率變化比值，然後再與理論 R_{ec} 或 R_{sc} 作比較，評估衡量橋樑安全性，於災時可作為橋樑封橋後能否開放通行之決策依據，平時

則可用來評估橋樑健康度，以作為橋樑維護之參考。

然而建立每座橋樑有限元素模型，進行耐震與耐洪之側推分析，其過程需具備專業知識，並耗費相當大的時間與人力，因此不可能針對公路總局轄下 2590 座橋樑作逐一的分析，求得各橋之 R_{ec} 、 R_{sc} 值，所以本研究以「橋樑通阻檢測分析模式建立之研究」計畫^[8]所建之 27 座橋樑模型為基礎，在本計畫中將先前下部結構為固定(fixed)之假設解開，加入土壤性質，使數值分析更吻合於現場狀況，再針對地震與洪水沖刷重新分別進行結構模擬分析，並將分析結果建立案例庫，然後發展創新人工智慧(Artificial Intelligence, AI)推論模式，應用案例學習機制，找出案例初評因子(輸入)與詳評 R_{ec} 、 R_{sc} 值(輸出)的映射關係，推論求得其餘 2590 座橋樑之 R_{ec} 與 R_{sc} ，作為判斷各橋樑是否安全之振動頻率比值基準值，如此公路橋管單位在災時即可藉由災害前後所量測之橋樑振動頻率比值與基準值比較，作為衡量判斷橋樑封橋後能否開放通行之依據，在平時則可用來檢視橋樑健康度，作為橋樑維護之參考。

二、研究目的

根據前述之動機，為避免災害發生時，造成橋樑損壞導致交通中斷、居民受困或是人員傷亡等事件的發生，而須對現有橋樑進行全面快速檢測的前提下，本研究發展一套現地橋樑振動頻率

快速間接量測法與橋樑臨界頻率比值 AI 推論模式，然後將現地量測之振動頻率與推論模式推論之橋樑臨界頻率比值作比較，探討分析橋樑健康程度。在建立橋樑有限元素模型作數值分析方

面，除了考慮橋梁設計、地質狀況、初步評估與塑鉸性質外，為更貼近實際橋梁破壞情形，本計畫以交通部運輸研究所「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」計畫^[8]所建之 27 座橋梁模型為基礎，將土壤反力係數納入考量，探討橋梁遭受地震與洪水等外力破壞時，反應在橋梁振動頻率變化之相關課題。綜合上述，本研究目的說明如下：

2.1 發展現地橋梁振動頻率快速間接量測方法

快速間接量測方法之建立主要分為三部份：

2.1.1 自動化資料收集與傳輸

此部份將針對量測頻率之速度計，開發軟體介面，擷取量測之頻率，顯示頻譜圖形，並以無線方式自動將資料傳回伺服器端，如此即可將現地橋梁所量測之頻率資料即時傳回，作後續之評估分析。

2.1.2 間接量測方法之建立

(1) 水工試驗確認水流流速對沖刷深度的影響，以及流速與振動頻率之相關性結合本計畫共同主持人廖國偉執行之科技部計畫「建立目視檢測之跨河橋梁耐洪可靠度評估模式」^[7]所建立縮尺模型之水工試驗成果，模擬在不同水理參數條件下，求得洪水沖刷與橋梁振動頻率之歷時變化圖，進而確認水流流速對沖刷深度的影響，以及流速與振動頻率之相關性。此階段之驗證成果係作為後續以振動頻率評估橋梁安全性之重要基礎。

(2) 建立間接量測法之標準作業流程
間接量測法在量測時，須考慮之因

素眾多，例如速度計放置位置(拖車上、轎車上或橋面板上)、量測方式(行進間或靜止)以及量測時橋上有無行車(正常或管制通行)，不同組合，其頻率量測結果均會有差異。因此此部份參考交通部「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」^[8]計畫，針對可行的組合，進一步作現地橋梁頻率量測試驗，彙整比較其振動頻率，確認何種間接量測法最為適當。

2.1.3 驗證間接量測能否反映直接量測法量測到橋墩振動頻率

將速度計分別安置在橋面版與橋墩(柱)上，固定其他橋梁條件，量測其頻率，再彙整分析比較兩者間之相關性。

2.2 建立橋梁耐震臨界頻率比值推論模式

在確認橋梁震動頻率間接量測之可行性後，接著為建立橋梁安全評估模式。在地震方面，建立橋梁耐震臨界頻率比值推論模式，此模式分為 4 步驟：

2.2.1 建置橋梁耐震有限元素模型

將以於交通部運輸研究所「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」計畫^[8]所建之 27 座橋梁模型為基礎，在本計畫中，將先前下部結構為固定(fixed)之假設解開，加入土壤性質，使數值分析更吻合於現場狀況，並考量五種材料劣化程度，建置橋梁耐震有限元素模型。

2.2.2 進行側推分析案例

依上述已建立之橋梁耐震有限元素模型，再考量 RC 橋鋼筋腐蝕五種劣化程度，總計 135 筆模型資料重新進行側推分析，進而求得 135 筆橋梁耐震臨界頻率比值 (R_{ec})。

2.2.3 確立橋梁耐震臨界頻率比值影響因子，建立案例庫

本階段參考交通部公路總局計畫「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」^[9]與 TBMS 中所建立之橋梁基本資料及初步評估屬性，作為初步影響橋梁安全之因子(Input)， R_{ec} 為輸出，應用主成份分析法、類神經分析之多層感知法，及相關係數等分析法，對 135 筆資料做相關性分析，找出各輸入因子與輸出(R_{ec})之相關程度，據此篩選出重要影響因子，然後以所確認之影響因子作為輸入因子，側推分析求得之 R_{ec} 為輸出因子，建立此 27 座橋梁，鋼筋腐蝕 5 種劣化程度，共 135 筆資料之案例庫。

2.2.4 建立橋梁耐震臨界頻率比值推論模式

公路總局轄下橋梁共兩千餘座，若要對每座橋梁皆進行數值結構分析求得 R_{ec} 值，在運作上將會有時間及預算限制困難，故本研究應用創新人工智慧「演化式支持向量機推論模式」(ESIM)^[10]，結合上一步驟所建立之案例庫，透過案例訓練測試找出初評因子(輸入)與詳評 R_{ec} (輸出)間的映射關係，進而建立「橋梁耐震臨界頻率比值推論模式」。再以此模式推論公路總局轄下 2590 座橋梁之耐震臨界頻率比值(R_{ec})。

2.3 建立橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式

橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式之建立步驟與耐震推論模式相類似，共分 4 步驟：

2.3.1 建置橋梁耐洪有限元素模型

本步驟採用相同 27 座橋梁模型與土壤條件，不同之處在於考量五種洪水沖刷深度，建置橋梁耐洪有限元素模型。

2.3.2 進行側推分析

針對 27 座橋梁，5 種沖刷深度，進行側推分析，求得 135 筆橋梁耐洪臨界頻率比值(R_{sc})。

2.3.3 確立橋梁耐洪臨界頻率比值影響因子，建立案例庫

應用耐震推論模式中之因子篩選方法，確認選出影響耐洪臨界頻率之重要影響因子，作為本模式之輸入因子，上步驟側推分析求得之 R_{sc} 為輸出因子，建立此 27 座橋梁，5 種沖刷深度，共 135 筆資料之案例庫。

2.3.4 建立橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式

同樣地，結合演化式支持向量機推論模式(ESIM)與上步驟之案例庫，建立「橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式」。經由模式案例訓練測試結果，推論公路總局轄下 2590 座橋梁之耐洪臨界頻率比值(R_{sc})。

2.4 模式案例驗證與現地試驗

研究期間，在颱洪發生前後，按照本研究所建立之間接頻率量測方法，在洪水發生前後，量測所選定橋梁之振動頻率，計算求得災害前後之振動頻率變化比值 R_s ，比較 R_s 與 R_{sc} 值，若 $R_s > R_{sc}$ ，則橋梁健康度無疑慮，封閉橋梁可開放通行；若否，則該橋須作進一步之詳細檢測評估。在平時，則利用前後年量測之頻率變化比值與 R_{ec} 或 R_{sc} 比較，以作為橋梁維護補強之參考。

三、文獻回顧

本階段首先說明直接量測與間接量測之差別與優缺點，再探討橋梁臨界頻率等相關文獻。

3.1 橋梁振動量測簡介

為確保用路人行車安全與延長橋梁使用年限，例行性維修成為必要的工作；橋梁結構之檢測結果可為維修的時間點、範圍與程度之重要依據。因此，檢測的目的在於即時掌握橋梁結構之現況，包含發掘橋梁結構之損傷程度，用以評定橋梁之承載能力。評估橋梁之安全承載能力時，通常必須在合理的成本下，取得精確之檢測數據。然而橋梁檢測方法眾多，其中自然振動頻率一般均認為可做為橋梁健康與否的指標，因為若橋基受到嚴重的沖刷或破壞，則橋墩的振動頻率將隨之下降，因此若檢測過程中偵測到上述情形時，表示該橋量極有可能無法達到原設計之目標強度，橋梁亦可能發生非預期性之破壞，導致行車及用路人有安全上的顧慮，故橋梁結構自然振動頻率檢測分析為本計畫主要檢測對象。以下為振動量測試驗之介紹，分別為直接量測法與間接量測法。

直接量測法利用直接安裝在橋墩之高敏感度、高精確度的感應振動計（如速度計、加速度計等）量測自然外力（如風力、地震力或車輛載重等）所產生的微小振動，進一步將結構物位移、速度或加速度的反應歷時轉換反應輸

出頻譜，即可求得結構物的振動頻率。直接量測法其頻率測量結果較準確，但需耗費時間及安裝成本與維護成本龐大，在有限經費與專業人力下，將無法對每座橋梁做測量^[4]。

間接測量法源自於 Yang 等人於車橋互制問題(Vehicle-Bridge Interactive Problem)上的研究所提出來的概念^[11]，係利用安裝有感應器之實驗車輛通過橋梁的方式，間接來量測橋梁頻率，取代以往直接由橋梁橋墩上的感應器取得其動力反應。這種量測方式不需要安裝任何設備在橋梁結構體上，所以在施作上將更為迅速且經濟，經由車輛與橋梁之間的互制作用後，系統的輸出包含橋梁與移動車輛的動力反應。Yang 等人研究間接量測法目的在於使其更貼近直接量測結果。以下為直接量測與間接量測優缺點比較表(表 1) 及相關文獻介紹(表 2)。

表 1、振動量測法優缺點比較表

檢測方法	優點	缺點
直接量測法	量測結果準確	耗時、安裝及維修成本龐大
間接量測法 (移動式振動檢測)	量測迅速、成本較低	量測結果有部分誤差需修正

表 2、相關文獻介紹

作者	研究內容	量測方法	
		直接	間接
S.A. Mirza and J.G. MacGregor(1979)	Variability of mechanical properties of reinforcing bars	✓	
Yang, Y.B., Lin, C.W., and Yau, J.D. (2004)	從經過的車輛的動態影響提取橋頻率的可行性。		✓
Lin, C.W., and Yang, Y.B. (2005)	由一個輕型拖曳車用接收的橋的振動基本頻率，利用傅力葉轉換去除其他雜訊，得到橋梁真正頻率，作為快速量測方法		✓
陳正興、李維峰、梅興泰(2009)	嘗試使用微振法得出頻率的下降程度診斷出結構是否安全或結構破壞的原因。	✓	
Yang, Y.B., and Chang, K.C. (2009a)	為了提高成功確定關注的橋頻率的概率，各個振幅比將被定義，用於評估成功識別從經過車輛的橋頻率作有用的指標。		✓
S. Foti, D. Sabia(2011)	Influence of foundation scour on the dynamic response of an existing bridge	✓	
石峰(2011)	根據現地橋體微振量測進行有效沖刷評估以至長期監測的方法。	✓	
李金翰(2011)	試圖以橋墩頻率的變化，對橋墩的臨界封橋頻率值作一明確的定義。	✓	✓
鄭明淵、歐昱辰、邱建國、廖國偉(2011)	透過非破壞性振動檢測、材料劣化評估與地震破壞潛勢、人工智慧機械學習推論模式及地表震動分析模式等方法之結合，進而發展一符合台灣地區特性之「橋梁通阻檢測分析模式」。		✓
S.H. Ju(2013)	Determination of scoured bridge natural frequencies with soil-structure interaction	✓	
L.J. Prendergast, D. Hester, K. Gavin, J.J. O'Sullivan(2013)	An investigation of the changes in the natural frequency of a pile affected by scour	✓	
鄭明淵、廖國偉與吳育偉等(2013)	針對多種橋梁頻率量測法(包含直接與非直接量測)進行試驗，分析並比較其間差異，探討非直接量測法應用於實際橋梁之可行性。	✓	✓
陳旻昱(2014)	本文主要分為兩大部份，第一部份為使用直接量測法中的微振試驗，獲取目標試驗橋梁的振動資訊，並且分析其動力特性；第二部份為間接量測法試驗研究，包括試驗拖車的設計及其動力特性，以及間接量測法現地試驗。	✓	✓
吳侑軒(2014)	利用數值模擬進行間接量測法之探討。	✓	✓

本計畫將針對現地橋梁振動頻率檢測與分析進行研究，然而因台灣地區橋梁數量多，逐一設置固定式頻率監測儀器成本過高，且申請封橋程序過於繁複困難，亦須考慮當地居民之通行方便與否，因此在不影響交通前提下，快速量測橋梁頻率為本研究探討重點。

3.2 橋梁臨界頻率之相關研究文獻探討

橋梁之自然振動頻率是橋梁的重要參數指標之一，當其發生變化的同時，極有可能是橋梁物理性質改變的徵兆。過去的研究學者亦發現橋梁振動頻率的降低^[3]，極可能隱含著橋梁結構的惡化，可能是由於橋梁結構其中任何一個桿件、連接介面、支撐點產生破壞，或是材料強度上發生老化的現象所造成，表示該橋梁極有可能無法達到原設計之目標強度。

橋梁自然頻率的下降，即橋梁可能產生受損情況，在 M_{bridge} (橋梁質量) 不

會明顯改變的情況下， ω_{bridge} (橋梁震動頻率) 的下降極有可能是由於 K_{bridge} (橋梁自身勁度) 下滑所造成，以下為橋梁頻率與橋梁勁度及橋梁質量之間的關係式(1)。

$$\omega_{\text{bridge}} = \sqrt{\frac{K_{\text{bridge}}}{M_{\text{bridge}}}} \quad (1)$$

橋梁振動頻率之量測具有必要性，其中主要的原因有二，其一，針對一座新完工落成之橋梁，利用現地量測法取得橋梁的基本動力性質，可做為橋梁基本性質的基準，也可以做為分析方法比較之依據。其二，當橋梁使用時間越長，其結構將越容易因為局部破壞或是老化現象，而與當初設計之目標產生偏差，其力學性質就更加難以掌握，因此利用現地量測法得到橋梁當下之動力性質，進而分析橋梁的現況^[12]。

四、橋梁臨界頻率比值推論模式架構

4.1 橋梁臨界頻率比值推論模式

透過文獻，彙整國內外橋梁自然振動頻率相關文獻資料，回顧橋梁頻率量測之方法作業流程，及影響頻率之相關因子(輸入與輸出因子)；另探討本計畫發展應用之相關技術，研擬如何將人工智慧 ESIM 導入橋梁安全臨界頻率比值之推論，建立橋梁臨界頻率比值推論模式。

(1) 橋梁耐震臨界頻率比值(R_{ec})

雖然工程師可以針對同一座橋梁

進行地震前後頻率之量測與比較，但若要分析評估橋梁之受損情況，則須訂定一明確臨界值，作為比較基準。在此，將地震破壞橋梁前後之頻率比值定義如下：

$$R_e = \frac{f_a}{f_b} \quad (2)$$

其中， f_a 為地震後橋墩的量測振動頻率， f_b 為地震前橋墩的量測振動頻率， R_e 為兩者之比值。

橋梁安全預警臨界頻率比值 R_{ec} 則定義如下：

$$R_{ec} = \frac{f_c}{f_o} \quad (3)$$

其中， f_c 為橋梁崩壞點所對應之頻率， f_o 為橋梁未受損前(原始)之頻率。崩壞點之定義為任一橋梁之極限側向抵抗力等於地震施加於該橋梁的外力。

$R_e < R_{ec}$ 則該橋梁有安全上的疑慮，封橋後不建議開放通行。

$R_e > R_{ec}$ 則該橋梁無安全上的疑慮，封橋後建議開放通行。

(2) 橋梁耐洪臨界頻率比值(R_{sc})

同樣地，洪水前後之頻率比值定義如下：

$$R_s = \frac{f_{sa}}{f_{sb}} \quad (4)$$

其中， f_{sa} 為洪水後橋墩的量測振動頻率(第一振態)， f_{sb} 為洪水前橋墩的量測振動頻率(第一振態)， R_s 為兩者之比值。

橋梁安全耐洪臨界頻率比值 R_{sc} 定義如下：

$$R_{sc} = \frac{f_{aa}}{f_{ab}} \quad (5)$$

其中， f_{aa} 為橋墩達到極限受損時的振動頻率(第一振態)， f_{ab} 為橋墩未受損的振動頻率(第一振態)。極限受損之定義為任一橋梁之極限側向抵抗力等於洪水施加於該橋梁的外力。

$R_s < R_{sc}$ 則該橋梁有安全上的疑慮，封橋後不建議開放通行。

$R_s > R_{sc}$ 則該橋梁無安全上的疑慮，

封橋後建議開放通行。

本計畫將以比值做為研判橋梁安全與否的指標，圖 1 為橋梁安全臨界頻率比值推論模式與安全評估之流程架構。

4.2 執行步驟

4.2.1 自動化資料收集分析與傳輸

本系統將自動下載速度計中所記錄之檔案，擷取出使用者所需的資料並且加以分析，最後將分析結果透過 4G 無線網路傳輸方式匯入至伺服器端^[13]，作後續模式之推論與評估分析。本階段共分為三部分：(1)資料收集(2)資料轉換分析(3)資料傳輸

4.2.2 間接量測方法之建立

(1) 水工試驗確認水流流速對冲刷深度的影響

本計畫參考共同主持人廖國偉教授執行之科技部計畫「建立目視檢測之跨河橋梁耐洪可靠度評估模式」^[7]所建立縮尺模型之水工試驗成果，該研究模在不同水理參數條件下，求得洪水冲刷與橋梁振動頻率之歷時變化圖，進而確認水流流速對冲刷深度的影響，以及流速與振動頻率之相關性。而此部分之研究成果為本計畫後續以振動頻率評估橋梁安全性之重要基礎。

水工試驗的首要步驟為確認原流況與模型間具有相同之福祿數，即縮尺模型的建置必須確認對應於實驗對象環境，設置模型尺寸的另一個原則為在已知的試驗場地條件下，選擇較有利(大)的縮尺比例；在此條件下設計模擬之幾何與水理參數如：流速、流量與曼寧係數。該計畫模擬的對象為蘭陽溪流域之蘭陽大橋，根據上述原則，一旦決定所

試驗的對象(橋梁)後，即可進行相關參數的設定，如流速與流量。蘭陽大橋 100 重現期之平均流速為 2.27m/s，則試驗時所對應的流速為 $2.67/6=0.445\text{m/s}$ 。

(2) 建立間接量測法之標準作業流程

本研究根據移動式量測之特性，擬定移動式振動檢測作業流程如圖 2 所示。

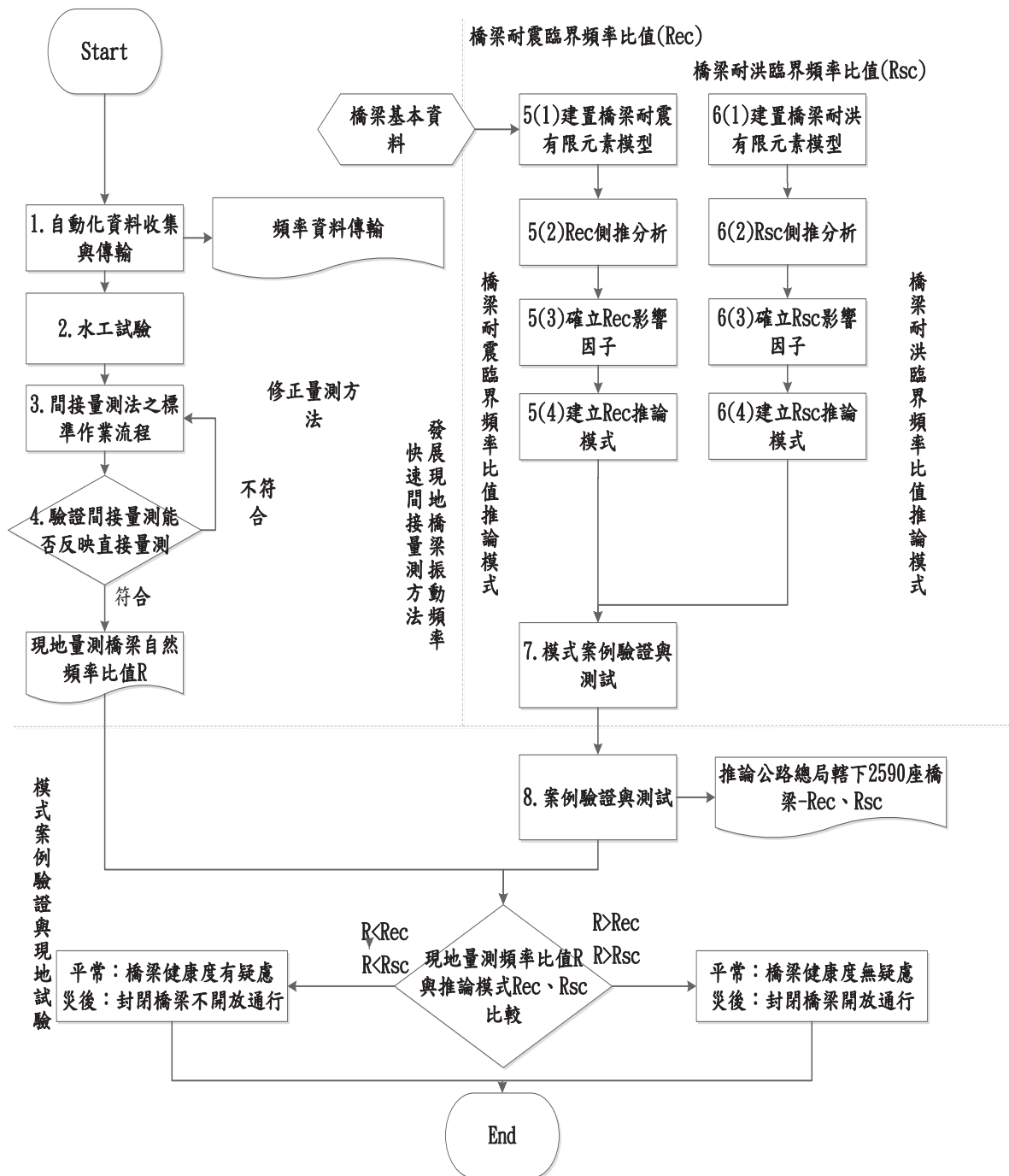


圖 1 橋梁臨界頻率比值推論模式與安全評估流程架構圖

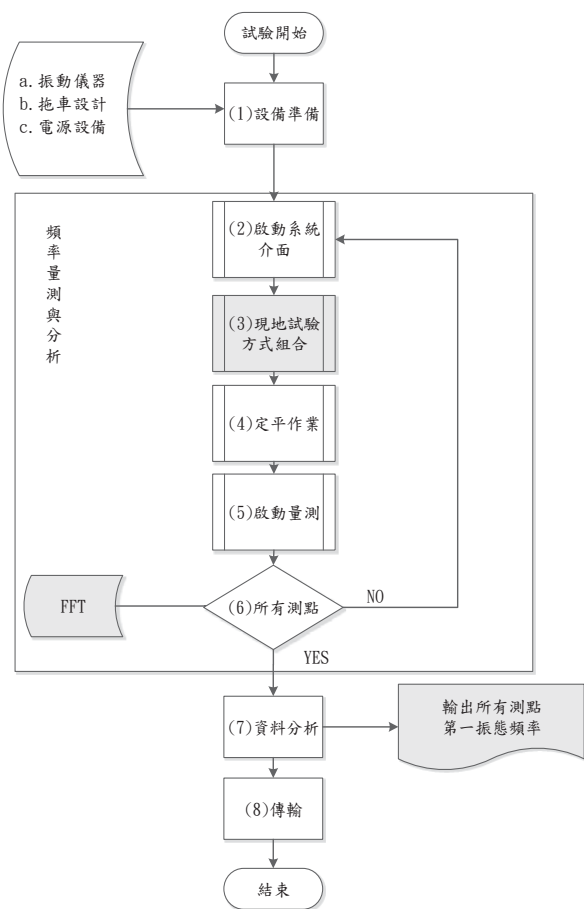


圖 2 臺灣地區建議之移動式振動檢測作業流程圖

4.2.3 驗證間接量測能否反映直接量測 法量測到橋墩振動頻率

在上述間接量測法標準流程建立後，本計畫將進一步驗證間接測量能否反映直接量測法所量測到之橋墩振動頻率，本計畫依據以下幾點選擇試驗對象：

- (1) 因間接量測技術於國內尚未成熟，為專注於技術開發，以簡支直線型橋梁為優先。
- (2) 為配合整體設計規劃，試驗橋梁需有竣工圖，以利相關後續分析。

4.2.4 建立橋梁耐震臨界頻率比值推論 模式

(1) 建置橋梁耐震有限元素模型

本計畫以交通部運研所「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」^[8]所建立 27 座橋梁之 SAP2000 數值模型為基礎，基於橋梁振動頻率會受基礎土壤性質的影響，因此需將先前假設橋梁基礎為固定之條件解開；再考量各橋梁會因材料劣化，如：鹽害、中性化等因素，造成鋼筋斷面腐蝕，降低橋梁耐震能力，進而影響橋梁之振動頻率，所以研究將針對每座橋考量 5 種不同鋼筋腐蝕程度，進行側推分析。27 座橋梁清單如表 3 所示。

表 3 分析橋梁總表

編號	橋名	縣市	路線
1	三星橋	宜蘭縣	臺 7 丙線
2	千鳥橋	臺南市	臺 20 線
3	中隘橋	新竹市	臺 1 線
4	中彰大橋	臺中市	臺 61 線
5	牛鬥橋	宜蘭縣	臺 7 丙線
6	平和橋	臺南市	臺 20 線
7	尖山大橋	苗栗縣	臺 1 線
8	朴子溪橋	嘉義縣	臺 19 線
9	老坑溪橋	桃園	臺 1 線
10	西湖橋	雲林縣	臺 17 線
11	東華大橋	花蓮縣	臺 11 丙線
12	枋山大橋	屏東縣	臺 1 線
13	虎尾溪橋	雲林縣	臺 1 線
14	南勝橋	高雄市	臺 21 線
15	急水溪橋	臺南市	臺 1 線
16	執信橋	宜蘭縣	臺 7 線
17	都威橋	臺東縣	臺 11 線
18	富林橋	桃園縣	臺 15 線
19	新潮州大橋	屏東縣	臺 1 線
20	福同橋	南投縣	臺 21 線
21	頭屋大橋	苗栗縣	臺 13 線
22	龍門橋	新北市	臺 2 線
23	豐源大橋	臺東縣	臺 11 線
24	蘭陽大橋	宜蘭縣	臺 9 線
25	北勢大橋	苗栗縣	臺 13 甲線
26	武陵橋	臺東縣	臺 9 線
27	仙人橋	南投縣	臺 14 線

(2) 進行側推分析

本研究使用：1.Xtract 2.SAP2000 兩套軟體，進行建模分析。在使用 SAP2000 套裝軟體建置橋梁模型前，應用 Xtract 斷面分析軟體分析橋墩斷面，再以 SAP2000 進行側推分析，求得橋梁之振動臨界頻率比值。詳細分析步驟如下：

關於 Xtract 部分：在取得橋梁竣工圖後，依據圖中橋梁相關尺寸與資訊，如橋墩高度、橋墩寬、基礎尺寸、鋼筋量等，應用在 Xtract 建置墩柱斷面模型，接著將 Xtract 軟體分析所得之墩柱降伏彎矩、極限彎矩、降伏曲率、極限曲率等相關係數，進行塑鉸之計算及破壞模式之判定，如此即可得知墩柱之塑鉸性質，並可判斷其破壞模式。

在 SAP 分析部分：此階段依據橋梁竣工圖中所提供之橋梁資料，例如：

橋梁材料強度、斷面尺寸、基礎及地盤型式、鋼筋混凝土構材配筋等細節資料，建置 SAP 模型，進行側推分析，以求取整體結構之水平側力及水平位移關係，進而求得橋梁的耐震臨界頻率比值^[15]。

(3) 確立橋梁耐震臨界頻率比值影響因子，建立案例庫

本研究參考交通部公路總局於 2009 計畫「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」^[9]與 TBMS 中所建立之橋梁基本屬性資料為基礎，並結合文獻中所收集之影響因子，運用問卷調查、統計相關性等方法進行篩選，找出影響橋梁耐震能力較高之因子，作為人工智慧推論模式之輸入因子，並以前述側推分析所求得之橋梁 Rec 值為輸出變數，建立案例庫。以下為影響因子篩選步驟，如圖 3 所示。

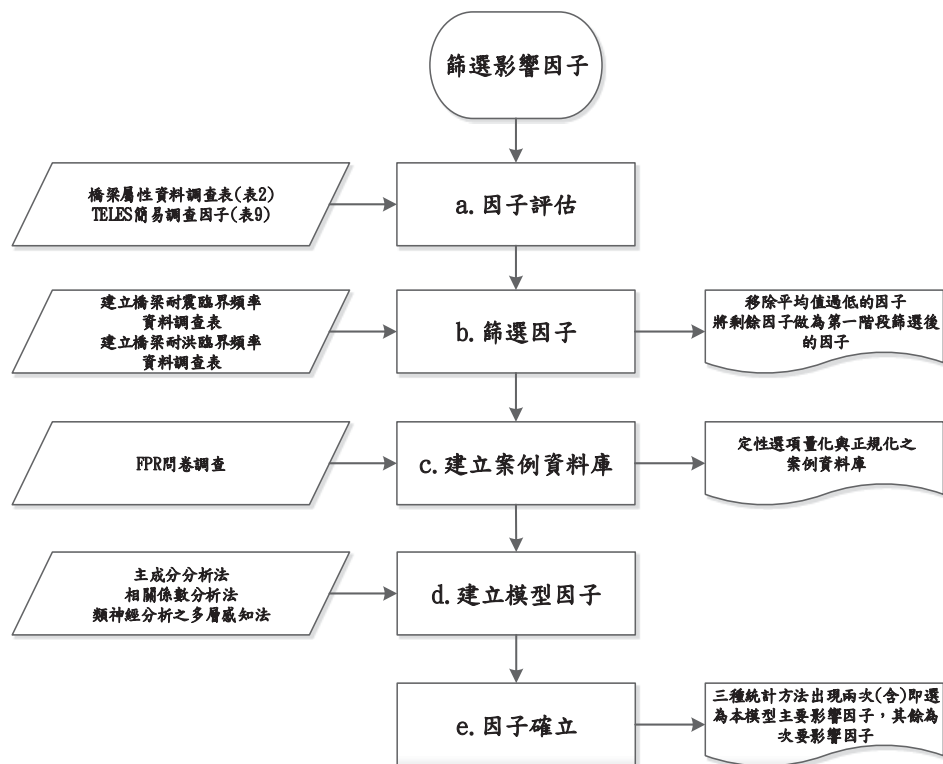


圖 3 篩選影響因子步驟圖

- a. 因子評估：根據上述，本研究初步確認 33 項影響因子，再依定量因子、定性因子及其他因子三項進行歸類，如表 4 所示。

表 4 初擬因子

輸入	定量因子	1.單垮最大垮距	5.設計水平加速度	9.歪斜角
		2.橋寬	6.橋長	10.垮數
		3.震動單元數	7.橋梁座標	
		4.基樁裸露深度	8.土壤液化類別	
	定性因子	11.結構型態	15.橋梁分類	19.防落設施
		12.橋墩型式	16.主梁型式	20.地盤種類
		13.橋台型式	17.橋墩基礎	21.設計年代
		14.支承裝置	18.橋台基礎	
	其他因子	22.橋梁名稱	26.路線名稱	30.竣工月
		23.工程處	27.里程數	31.ID
		24.工務段	28.公路總局橋梁編號	32.跨越河川或道路
		25.道路等級	29.竣工年	33.附設維生管線
輸出	橋梁耐震臨界頻率比值(Rec)			

- b. 篩選因子：設計「橋梁簡易調查因子耐震臨界頻率問卷」，對以上 33 項因子做橋梁耐震問卷調查，填寫人以自身主觀的認知勾選各項因子對於橋梁耐震的強弱關係，本問卷分為五個等級分別為無關、微相關、相關、極為相關、絕對相關。而各等級間再進一步細分折衷值，有助於專家學者勾填，再量化計算時由 0 到 10 分成 10 等份，每往右一間隔則相關性提高 1.25，依序計算之。根據統計結果，以平均值高至低作排序，再移除平均值低的因子，將剩餘的因子作為第一階段篩選後的因子。

- c. 建立案例資料庫：由於定性因子非

以數字呈現，無法明確表示出與橋梁耐震臨界頻率之關係，故本階段需先將各定性因子做量化動作，以便後續應用 AI 軟體做訓練。

本研究採用問卷調查的方式，結合模糊偏好關係(FPR)對定性因子進行調查，找出各不同屬性之因子對於耐震能力的高低關係，以便量化。

決策者考量評估問題的偏好，可運用乘積偏好關係矩陣(Multiplicative preference relation, MPR)來求出模糊偏好關係(FPR)，運用 FPR 理論可求得各影響因子與 Rec 之間的權重。

- d. 建立模型因子：本階段使用 SPSS 軟

體，應用主成分分析法、相關係數分析法及類神經分析之多層感知法，對 135 筆案例裡的因子與 Rec 做相關性分析，找出各輸入(因子)與輸出(Rec)的重要性程度，再依據結果，挑選出部分重要性因子，做為本研究之模型參數。

- e. 因子確立：針對上階段挑分析選出的橋梁重要性影響因子進行最後篩選，在三種統計方法中出現兩次(含)以上的因子，即選為本模型主要影響因子，其餘為次要影響因子。以上述所確認之影響因子(輸入)與 Rec(輸出)建立案例庫。

(4) 建立橋梁耐震臨界頻率比值推論模式

基於橋梁細部檢測與評估分析，所需耗費之人力、物力經費與時間相當龐大，分析成果之橋梁數有限且時效性不足，無法滿足公路管理單位轄下所有橋

梁作全面性安全評估之需求，因此本研究應用人工智慧，建立「橋梁耐震臨界頻率比值推論模式」，找出橋梁日常巡檢目視調查之耐震能力影響因子屬性資料與對應案例細部分析結果 Rec 值之映射關係，再針對其餘未進行細部分析之橋梁，利用訓練結果預測其餘橋梁之 Rec 值。

本研究使用^[10]以 ESIM 為架構發展而成的 Evolutionary Support Vector Machine Inference System「演化式支持向量機推論系統，ESIS」作為訓練與測試軟體。首先將橋梁耐震臨界頻率比值推論模式所需之參數設定值輸入軟體中，利用 ESIM 執行自我調適程序，系統會將最後搜尋出之最佳染色體，並解碼為橋梁耐震臨界頻率比值預測模式，以便使用者利用此一模式進行橋梁的耐震臨界頻率比值預測。其架構如圖 4 所示。

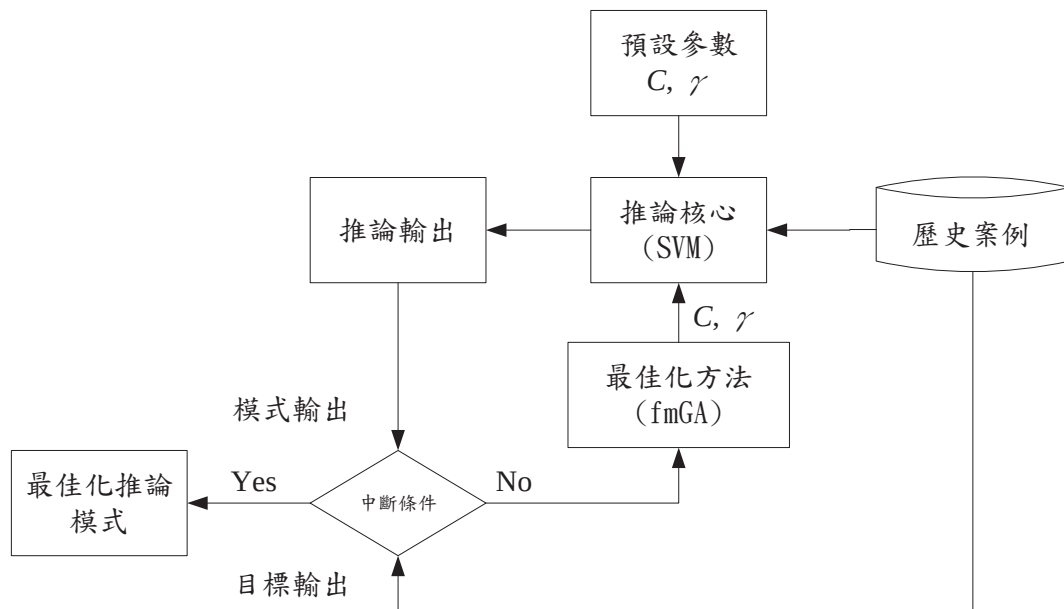


圖 4 支持向量機最佳化模式架構

此模式中，將藉由過去案例作為輸入訓練之用，使用初始 C 與 γ 參數值，運用 SVM 進行輸出之預測並與實際輸出進行比較，fmGA 則經由實際輸出與推估輸出之誤差與模式中支持向量數目作為目標函數，進行參數之最佳化。

依據 ESIM 之架構與特性，針對本研究預測橋梁耐震臨界頻率比值之特性進行評估，分析了解此課題是否適合以 ESIM 模式處理。

- a. ESIM 可以經由快速混雜基因演算法案例學習中，擷取最佳化容錯值參數 C 及核心函數(Kernl Fuction)中 γ (gamma)值，決定支持向量機最佳化重要參數。
- b. ESIM 以演化式支持向量機為架構，妥善的處理不確定的資訊，以解決不確定性的問題(uncertainty)，所以對於橋梁耐震狀況的不確定性已經被考慮在其中。
- c. ESIM 係以為支持向量機(SVM)為推論引擎，以處理複雜的輸入與輸出變數之間映射關係，能夠有效地描述出影響因子與 Rec 之映射關係。

4.2.5 建立橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式

(1) 建置橋梁耐洪有限元素模型

本步驟採用相同 27 座橋梁模型與土壤條件，不同之處在於改為考量五種洪水沖刷深度，建置橋梁耐洪有限元素模型。

(2) 橋梁耐洪側推分析

本步驟與 4(2)雷同，與耐震頻率比值分析不同的為將原本考慮 5 種劣化程

度改為 5 種洪水沖刷深度。本計畫參考^[7]提出以整體橋梁基礎為自由體，考量橋梁基礎裸露現狀、保護工施作與否、河川相關變數等，計算橋梁基礎可能發生之最大沖刷深度，並考量橋梁在可能外力，如活載中與水流力等作用下，橋梁基礎所承受之力量，並據以求得橋梁遭遇該河川之計畫洪水量侵襲時，基礎剩餘之極限承載能力。其中學者廖國偉加入橋梁基礎與土壤互制作用，可以依等值土壤彈簧根據不同的基面深度模擬周圍基礎，設置相對應的水平等質土壤彈簧；而基礎底部則設置一垂直等值土壤彈簧，模擬土壤現地狀況。最後獲得結論，河床沖刷導致基樁裸露，為影響橋梁耐洪能力重要因素之一。

耐洪安全臨界頻率比值需由橋梁是否已達極限受損狀態進一步求得，極限受損狀態則需藉由橋梁之容量與需求計算而得，而橋梁之容量(側向抵抗力)與需求(洪水施加於該橋梁的外力)則視沖刷深度而異，即不同沖刷深度下，橋梁的容量與需求均不同^[17]。橋梁的容量曲線可經由側推分析而得，而需求曲線則為水流力所引致之側向力，以下將逐一說明容量與需求之計算方法。

本計畫定義橋梁基礎耐洪能力之容量為側推分析中之降伏點。因此針對不同沖刷深度分別進行側推分析，範例如圖5所示。並將各側推分析之降伏點連成一曲線，即為橋梁耐洪能力之容量曲線，如圖6所示。

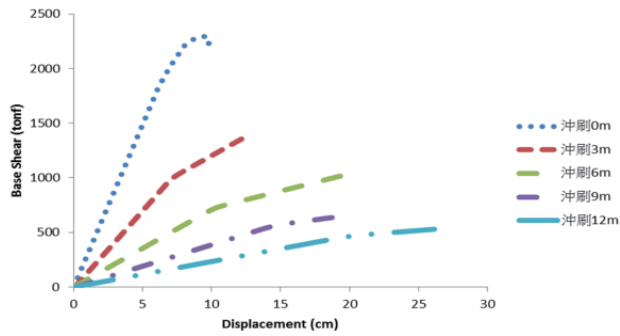


圖 5 各冲刷深度下之側推分析結果範例

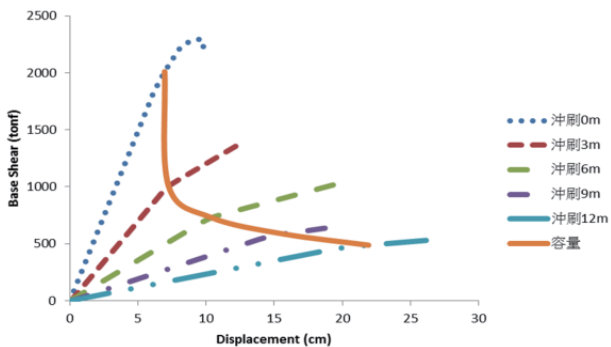


圖 6 橋梁耐洪能力之容量曲線範例

將水流作用力以水流壓力與水流流經橋墩面積之乘積計算而得，並將水流作用力對應於由側推分析後所得之各冲刷深度的容量曲線，則可對應出各冲刷深度之位移，將其連成一曲線。此線段即為本研究對於橋梁結構體需求之認定^[18]，圖 7 為一座橋梁在各冲刷深度下之需求與容量連線範例。

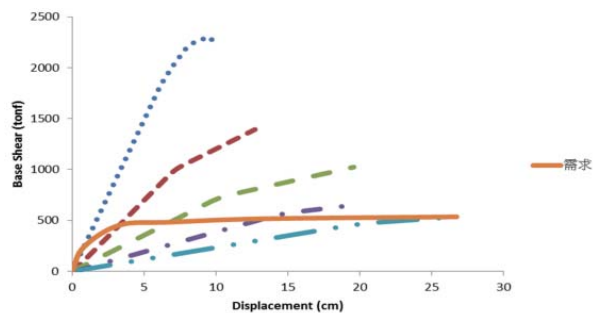


圖 7 各冲刷深度下之需求連線範例

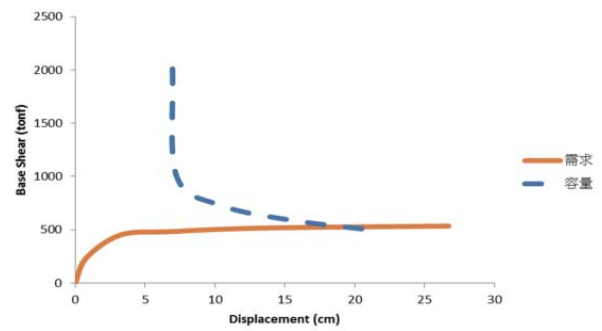


圖 8 各冲刷深度下之需求與容量連線範例

本計畫同樣經由 SAP2000 側推分析結果，求到各橋梁之容量與需求。關於橋梁的側推分析，國內外已有許多相關的研究，但將基礎冲刷深度納入評估過程則相對較少，較常見的情形為將基礎假設為固定端來進行側推分析；因本階段主要在評估橋梁冲刷後之安全評估，故基礎埋入土壤部分亦納入側推分析中。

由橋梁容量與需求之認定，可知橋梁結構體執行側推分析後，可得到其各冲刷深度下之容量，並可依據水流側向力得到橋梁結構體之需求。以圖 8 為例，極限受損時頻率之計算結果容量需求曲線相交於冲刷 9m 與冲刷 12m 之間，根據冲刷 9m 與冲刷 12m 的橋梁結構分別執行模態分析，得到此兩種狀態下之橋梁振動頻率，並透過內插方式求出需求與容量相交點之頻率，此即本文定義之極限受損頻率^[19]。由未受損與極限受損頻率，求得兩者之比值，即可得安全臨界頻率比值 R_{sc} 。

(3) 確立橋梁耐洪臨界頻率比值影響因子，建立案例庫

本階段同樣以前述之橋梁基本屬

性資料為基礎，並結合文獻中所收集之影響因子，運用敏感度分析、相關係數及問卷調查等方式進行篩選，找出影響橋梁耐洪臨界頻率比值較高之因子，作為人工智慧推論模式之輸入，如步驟4(3)所述，並以27座橋梁5種沖刷深度經側推分析求得之135筆橋梁 R_{sc} 值為模式之輸出，建立案例庫。

(4) 建立橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式

本階段同樣應用ESIM。建立「橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式」，找出橋梁日常巡檢目視調查之耐洪能力影響因子屬性資料與對應案例細部分析結果 R_{sc} 值之映射關係，再針對其餘未進行細部分析之橋梁，利用訓練結果預測其餘橋梁之 R_{sc} 值。

4.3 模式推論結果

檢驗模式預測能力的指標有許多種，本研究採用平均絕對誤差(MAE)、平均絕對誤差百分比(MAPE)、均方根誤差(RMSE)及相關係數(R)，此四種來衡量模式預測能力，如式(6)、(7)、(8)、(9)所示，其中 y_i 為第 i 筆案例之實際值， $\hat{y}_i$ 為第 i 筆案例之預測值，則 n 為預測案例之總筆數，橋梁耐震臨界頻率比值推論模式訓練與測試結果於表6。

a. 平均絕對誤差(Mean Absolute Error, MAE)

平均絕對誤差是將各個實際值與預測值之誤差絕對值後取平均值，如式(6)所示，可藉由MAE值比較實際值與預測值之間的平均誤差，而不受正負抵消之影響。其MAE值愈小，表示誤差愈小。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (6)$$

b. 平均絕對百分比誤差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)

平均絕對百分誤差為實際值與預測值的誤差程度，以百分比表示，如式(7)所示。所得之MAPE值愈小，表示預測能力愈佳。

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (7)$$

依據Lewis(1982)^[27]建議，模式依據MAPE大小能分為四種等級，如下表5所示。

表5、MAPE評估指標

MAPE(%)	預測能力
<10	高度準確
10~20	良好
20~50	合理
>50	不準確

c. 均方根誤差(Root Mean Squared Error, RMSE)

均方根誤差為實際值與預測值之誤差平方值之平方根，公式(8)所示。可藉由RMSE值衡量實際值與預測值間的離散程度，將誤差程度以該變數之實際值標準化。平方值的意義為給予各個實際值與預測值誤差不同的平方加權方式，強化誤差分配的群聚範圍，能得到更明確的比較結果，所得之RMSE值愈小，表示預測能力愈佳。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (8)$$

d. 回歸模式之變異量(Coefficient of determination)

與相關係數 r 相似，在學術研究上最通俗的觀念是 R² 愈接近 1.0 愈好。

$$R^2 = SS_{Reg} / SS_{Total} \quad (9)$$

表 6、橋梁耐震臨界頻率比值推論模式訓練與測試結果

	Training				Testing			
	MAE	MAPE (%)	RMSE	R ²	MAE	MAPE (%)	RMSE	R ²
Fold1	0.0141	3.66	0.0269	0.9905	0.0420	11.81	0.0603	0.9001
Fold2	0.0096	2.17	0.0198	0.9944	0.0164	3.68	0.0235	0.9941
Fold3	0.0072	1.69	0.0127	0.9978	0.0607	11.96	0.1156	0.8483
Fold4	0.0060	1.37	0.0125	0.9979	0.0507	13.49	0.0746	0.9190
Fold5	0.0062	1.37	0.0134	0.9974	0.0404	8.69	0.0605	0.9673
Fold6	0.0101	2.24	0.0206	0.9943	0.035	9.22	0.0471	0.9621
Fold7	0.0071	1.49	0.0158	0.9965	0.0228	10.67	0.0284	0.9933
Fold8	0.0099	2.33	0.0207	0.9938	0.0337	13.34	0.0484	0.9802
Fold9	0.0097	2.18	0.0195	0.9948	0.0174	6.86	0.0255	0.9911
Fold10	0.0091	2.10	0.0192	0.9950	0.0276	7.51	0.0403	0.9793
Average	0.0089	2.06	0.0181	0.9952	0.0347	9.72	0.0524	0.9535

在橋梁沖刷後臨界頻率部分同樣採用平均絕對誤差(MAE)、平均絕對誤差百分比(MAPE)、均方根誤差(RMSE)及回歸模式之變異量，此四種來衡量模式預測能力。橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式訓練與測試結果於表 7。

表 7、橋梁耐洪臨界頻率比值推論模式訓練與測試結果

	Training				Testing			
	MAE	MAPE (%)	RMSE	R ²	MAE	MAPE (%)	RMSE	R ²
Fold1	0.0112	3.82	0.0181	0.9942	0.0376	8.27	0.0603	0.8864
Fold2	0.0113	3.36	0.0210	0.9915	0.0319	11.04	0.0372	0.9842
Fold3	0.0159	5.52	0.0285	0.9841	0.0848	10.87	0.1283	0.6761
Fold4	0.0162	4.82	0.0273	0.9862	0.0254	15.77	0.0378	0.9732
Fold5	0.0111	3.60	0.0173	0.9944	0.0383	15.49	0.0671	0.9506
Fold6	0.0178	5.83	0.0294	0.9844	0.036	9.33	0.0499	0.9515
Fold7	0.0167	5.57	0.0282	0.9850	0.0246	4.51	0.0378	0.9868
Fold8	0.0126	4.15	0.0231	0.9906	0.0281	9.61	0.0342	0.9627
Fold9	0.0118	3.86	0.0209	0.9923	0.0455	11.73	0.0558	0.9125
Fold10	0.0104	3.40	0.0208	0.9916	0.0491	24.15	0.0702	0.9348
Average	0.0135	4.39	0.0235	0.9894	0.0401	12.08	0.0579	0.9219

4.4 案例驗證

為驗證橋梁健康度，是否因為平常洪水沖刷造成橋梁日漸損壞，在颱風前後至南雲大橋進行現地頻率量測，檢驗橋梁振動頻率是否有明顯的差異。首先於 2016/06/17 至南雲大橋以振動量測儀器量測橋梁自然振動頻率，檢視橋墩處水流向之結果，橋墩水流方向第一振態約在 2.41Hz 附近。

2015/10/03 颱風後同樣至南雲大橋量測橋梁自然振動頻率，檢視橋墩處水流向之結果，橋墩水流方向第一振態約在 2.26Hz 附近。

表 8 為二次試驗與一次試驗結果之比較，根據表中數據，振動頻率數值並沒有太大的差異，表示此期間並未對南雲大橋造成顯著的沖刷影響。

表 8、洪水前後量測之頻率比較
(第一振態)

	橋墩振動頻率(H_z)
第一次試驗	2.41
第二次試驗	2.26

橋梁現地之自然振動頻率比值 R_s 經計算得 0.938。而南雲大橋在低流速下之 R_{sc} 值為 0.4428。因此橋梁健康度之依據可以 R_{sc} 值與 R_s 值兩者相比較。

若 $R_s > R_{sc}$ ，則橋梁健康度無虞；反之，則應考慮是否做詳細橋梁檢測與補強。經由計算比較兩數值，結果為 $R_s > R_{sc}$ ，故南雲大橋在此狀況下橋梁健康度無疑慮。而根據現地狀況亦發現在 2016 年度颱風洪水未對南雲大橋造成明顯之沖刷影響，因此建議後續研究可選擇易受沖刷危害之跨河橋梁進行振動頻率量測試驗，進一步驗證模式之適用性。

五、結論

本研究發展一套現地橋梁振動頻率快速間接量測法與橋梁臨界頻率比值 AI 推論模式，然後將現地量測之振動頻率與推論模式推論之橋梁臨界頻率比值作比較，探討分析橋梁健康程度。在建立橋梁有限元素模型作數值分析方面，除了考慮橋梁設計、地質狀況、初步評估與塑鉸性質外，為更貼近實際橋梁破壞情形，本計畫以交通部運輸研究所「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」計畫^[4]所建之 27 座橋梁模型為基礎，將土壤反力係數納入考量，探討橋梁遭受地震與洪水等外力破壞時，反應在橋梁振動頻率變化之相關課題，然後發展創新人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 推論模式，應用案例學習機制，找出案例初評因子(輸入)與詳評 Rec、Rsc 值(輸出)的映射關係，推論求得其餘 2590 座橋梁之 Rec 與 Rsc，作為判斷各橋梁是否安全之振動頻率比值基準值，如此公路橋管單位在災時即

可藉由災害前後所量測之橋梁振動頻率比值與基準值比較，作為衡量判斷橋梁封橋後能否開放通行之依據，在平時則可用來檢視橋梁健康度，作為橋梁維護之參考。綜合前述之研究成果歸納以下幾點結論：

1. 應用人工智慧建立「橋梁耐震臨界頻率比值推論模式」，預測結果與實際值比較，為高精確且高度相關，所以此推論模式預測其他橋梁可得到高效率與準確率的橋梁耐震臨界頻率比值。
2. 以橋梁耐震臨界頻率比值推論模式與快速間接量測方法建立橋健康度診斷模式，希望由現有橋梁案例庫使用本研究所確立之模式推論其餘公路橋梁耐震臨界頻率比值，配合快速間接量測可以快速判斷橋梁健康度，作為橋梁維護之參考。
3. 於地震發生後，可利用本研究建立之橋梁健康度診斷模式，判斷封橋

與否，可降低因為目視檢測只判斷橋梁外部損傷之缺點。

4. 於目前橋梁地震災害處理通報流程，目視檢測後封橋，可利用本研究建立之橋健康度診斷模式，作為封

橋後是否開通橋梁之參考。

5. 於洪汛發生後，水位退至正常水位，可利用本研究建立之橋梁健康度診斷模式，作為橋梁維護之參考。

參考文獻

1. 陳永銘、許阿明，「臺灣與美國之橋梁檢測系統與制度」，臺灣公路工程，2008。
2. 橋梁檢測基本理論，中國土木水利工程協會，2013。
3. 陳正興、李維峰與梅興泰，「振動量測於橋梁之識別分析」，第六屆公共工程非破壞檢測技術研討會，2009。
4. 石峰，「應用現地微振量測進行斜張橋之沖刷評估」，國立雲林科技大學，2011。
5. 陳旻昱，「橋梁振動特性實驗研究」，國立臺灣大學碩士論文，2014
6. Yang, Y.B., Lin, C.W., and Yau, J.D. (2004), "Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle," *Journal of Sound and Vibration* 272: 471-493.
7. 廖國偉，「建立目視檢測之跨河橋梁耐洪可靠度評估模式」，科技部計畫，2013。
8. 鄭明淵、歐昱辰、邱建國、廖國偉，「橋梁通阻檢測分析模式建立之研究」，交通運輸研究所。
9. 王豐裕，「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」，交通部公路總局，2009。
10. Min-Yuan Cheng and Yu-Wei Wu*, (2009), "Evolutionary Support Vector Machine Inference System for Construction Management", *Automation in Construction*, 18(5), pp.597-604, UK, SCI, EI
11. Lin, C.W., and Yang, Y.B. (2005), "Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification," *Engineering Structures* 27: 1865-1878. Yang, Y.B., and Chang, K.C.
12. 吳佑軒，「車橋互制理論於橋梁頻率間接量測法之應用」，國立臺灣大學，2014。
13. 鄭明淵、廖國偉、吳育偉等，「移動式橋梁振動檢測及訊號分析與傳輸通報系統」，交通運輸研究所，2013。
14. 李金翰，「橋墩振動頻率作為封橋基準之研究」，國立臺灣科技大學，2011。
15. CSI,"SAP2000 : Integrated Finite Element Analysis and Design of

- structures”, Computers and Structures, Inc., Berkely, California, (1996).
16. 陳正興，建築技術規則建築構造編基礎構造設計規範，內政部，1998。
 17. 賈亦騰，「跨河橋梁耐洪能力之可靠度分析」，國立臺灣科技大學，2014。
 18. 林怡君，「基礎沖刷深度對橋梁自然頻率的影響識別」，國立成功大學，2012。
 19. (2009a), “Extracting the Bridge Frequencies Indirectly from a Passing Vehicle: Parametric Study,” Engineering Structures, 31(10): 2448-2459.
 20. S.A. Mirza and J.G. MacGregor, “Variability of mechanical properties of reinforcing bars.” Jour. Struct. Div., ASCE, 105(ST5): 921-937, 1979.

高雄港在新航路趨勢下的因應策略

陳春益 長榮大學航運管理學系 教授
楊清喬 國立高雄海洋科技大學航運管理系 副教授
戴輝煌 國立高雄海洋科技大學航運管理系 教授
朱金元 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副主任
謝幼屏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

摘要

近年來全球貨櫃航運市場正面臨船舶大型化、策略聯盟重組、以及新航路發展等重大變遷，而此相關重大航運市場發展趨勢，將直接影響定期貨櫃航商在船隊與航線之佈署，進而影響港埠管理單位之營運。因此，本文旨在探究高雄港在諸多新航路發展趨勢的因應策略，藉由探討新航路趨勢對航線網絡

、航商對港口設施需求；以及策略聯盟航商營運行為等層面之衝擊，發現新航路之開發以巴拿馬運河拓寬對我國高雄港之衝擊最大，並歸納整理出高雄港在新航路趨勢下面臨的四大課題：(1)設施面(2)營運面(3)資源整合面以及(4)能源保護面，並據以初擬出 13 項因應策略。

一、前言

全球貨櫃航運發展自 1956 年開始迄今已近 60 年，相關航運與港口產業的發展已經頗具市場成熟性，導致市場呈現激烈競爭，因此，貨櫃航商莫不採取低價與差異化等競爭策略，例如船型趨大、聯營結盟與整體港口及棧埠物流服務之提供等整體運送模式。特別是貨櫃船舶持續大型化，已促使貨櫃航商聯盟重整且力量趨強，因此，各航商為維持其競爭優勢，均採一致性的作法，透過共同派大型貨櫃船舶來經營各大主

要航線，此即船舶趨於「大型化」，除可據以大幅降低單位營運成本之外，為了增加與非策略聯盟航商、或其他聯盟之差異化服務，亦會共同派用更多大型船舶來新闢更多的主／支航線，因而促使服務航線趨於「網狀化」。在這種船舶「大型化」的驅策之下，貨櫃船型的大小差距加大，為了有效經營船隊，大船以直靠大港為原則，因而後續並會導致各類貨櫃港口的層級化，例如傳統的樞紐港，又可再細分為洲際型貨櫃樞紐

港；例如釜山、上海、香港、深圳與新加坡，與區域型貨櫃樞紐港；例如高雄港(交通部運輸研究所，2013)。

此外，目前各大貨櫃航商在採取各種營運策略的議題上，亦開始涉及企業社會責任之承擔問題，特別是船舶用油具有極高度的污染特性，其對港口鄰近區域居民健康問題與加速地球暖化問題，直接產生出高度衝擊性且日益嚴重，致使航運產業面對環境保護與航運企業社會責任之承擔等議題上，因而日益備受關注，「綠色航運」包括與綠色港口的相關議題與主張，包括如何促使航商去使用高效率能源、或低碳能源的船舶，以及港口朝向生態港、綠色港埠的發展等，更成為近年來的航港新興議題。現有航路如以遠東為中心，則有越太平洋、南美、紐澳、遠歐、中東印巴、非洲與亞洲區域等七大航路。所謂新航路除北極航線外，皆為現有航路的擴充，主要包括巴拿馬運河拓寬、尼加拉瓜運河與克拉運河之新闢。

近年全球貨櫃航運之發展快速，其衝擊大致可區分為內部與外部作用力之影響，內部作用力乃指全球貨櫃航運產業之內部結構的變化，特別是航商運務與造船技術成熟下，加上船舶大型化產生的運送規模經濟性，衍生出服務航線網產生面狀發展，加上近年來諸多中/大型航商策略聯盟成功的經驗，與全球航運產業在 2009 年後顯著產生運能過剩之整合過程(交通部運輸研究所，2012a/b)，致使航商趨於採行「生產與服務分離化」，藉由分離化，貨櫃航商可因策略聯盟而降低更多的營運成本，且可保留個別航商提供服務之差異化

，因而，目前全球貨櫃航商中，僅餘極少數航商未能與其他航商進行策略聯盟。而外部作用力乃指國家的政治力/經濟力、以及企業的社會責任，二者應對在航運產業之效果或影響力，前者如國際重要運河之新闢與擴建，後者如綠色航運之推動。因此，在講求成本、效率以及速度的物流時代，各國為透過相關物流建設提升其物流作業與國家經濟競爭力，不斷的透過運河拓寬與新建而衍生出新的航路。故，源於國際航運情勢之持續變化，上述內外部環境之衝擊對各國先進的貨櫃港口營運情勢，特別是我國國際貨櫃港的未來動向亦有直接性與間接性的影響。

其中新航路之開發以巴拿馬運河拓寬對我國高雄港之衝擊最大，2016 年出巴拿馬運河拓寬完成後，允許萬 TEU 級船舶航行通過運河前往美東，此將導北美東岸航線與沿岸港口產生歷史性的變革，全球巨型貨櫃母船更可以直接環繞全球東/向主航線，而我國高雄港正位處越太平洋及遠歐航線之樞紐位置，是否可以在此新航路趨勢下，仍保有基本的樞紐地位以吸引母船泊靠，是值得深入探討的課題。儘管近幾年高雄港已經由洲際樞紐港逐漸變成區域樞紐港，然近期在巴拿馬運河拓寬與航商使用船型趨大之情勢下，航商在營運上勢必調整其主/支航線且進行船隊重新佈署，高雄港若欲繼續維持其樞紐港地位，未來在營運上勢必須從航商立場，規劃諸多與高雄港相關的措施。

因此，本文主要目的，即是探討高雄港在新航路趨勢下之因應對策，先歸納出新航路所可能衍生之課題，再針對

各課提出擬因應對策，以祈提升高雄港競爭優勢。

二、新航路發展趨勢分析

2.1 新航路發展介紹

1. 巴拿馬運河拓寬完成

巴拿馬運河係位於中美洲的巴拿馬國家境內，以東南—西北走向斜切貫穿巴拿馬地峽，於 1904 年開工並於 1914 年正式通航，由於巴拿馬運河銜接著大西洋及太平洋兩大洋，運河之開通可縮短了兩大洋之間約 12,600 公里的航程，提供美國東西兩岸更短、快速與安全之航程；故在亞洲迄北美航線的全水路(all water)運輸中扮演著相當重要

的地理位置，素有「世界橋樑」之稱。受限當初設計建構的尺寸，目前僅約 4,500 TEU 左右的船舶能通過此運河，隨著船舶大型化趨勢發展，為繼續保持運河之競爭力，巴拿馬在 2006 年 3 月宣布了運河擴建計畫，並已於 2016 年第二季完成拓寬計畫，拓寬後可以讓超巴拿馬極限型的船舶通過，可讓更多大型船舶通過以降低船舶航行成本與時間，有關巴拿馬運河擴建前後比較可見表 2-1。

表 2-1 巴拿馬運河擴建前後比較表

	擴建前	擴建後
水道數量	2	3
水道開關方式	閉閘式	重力式
航道通行狀況	最窄航道僅單向通行	皆可雙向通行
船寬	32m	49m
船長	294m	366m
吃水	12m	15.2m
年船舶通行量	13,500~14,000	16,000
每年運能	2013 年超過 3.1954 億 PCUMS 噸 (2012 年 3.33 億 PCUMS 噸為歷年最高)	預計 6 億 PCUMS 噸
最大船舶運能	4,500 TEU	12,000 TEU

資料來源：Rodrigue (2010)；陳繼紅等人(2013)；交通部運輸研究所(2015a)。

近年來美國進口商為接近銷售市場及降低成本，漸漸將物流配送中心設置在美國東岸，也可預期未來亞洲美東

航線之櫃量會持續增長，目前巴拿馬運河約佔亞洲美東航線櫃量 36%。其預計在 2016 年後，將使巴拿馬運河可容

納 12,000 TEU 之貨櫃輪航行通過，相較現今僅 4,500 TEU 的船舶通行有著約 3 倍的成長，年船舶通行量將增加至 16,000 艘，且運河年貨物通過量將由目前的 3 億 PCUMS 噸增加到 6 億 PCUMS 噸(陳繼紅等人，2013)。

若以遠東地區為中心，巴拿馬運河拓寬將可能影響越太平洋美東/美西航線之變化，拓寬後航商在美東/美西航線之佈署可如圖 2.1 所示，尤其對美東貨櫃航線之影響最大，在 1999 年以前，亞洲出口到美國東岸港口的貨櫃貨物大約有 86% 會先運到美國西海岸港口，然後利用陸運進行複合運輸轉運到美國東海岸；約 3% 的貨物通過蘇伊士運

河；11% 的貨物則通過巴拿馬運河，再一路水運抵達美國墨西哥灣和美國東海岸港口。但是，到了 2004 年，亞洲出口的貨櫃貨物通過巴拿馬運河全水運航線直抵美國東海岸的比例增加到 38%，從美國西海岸港口轉口到美國東海岸的貨櫃貨物則跌落到六成。以往亞洲至美東經巴拿馬運河，大約配置 4,000 TEU 的船，但目前受貨櫃船大型化之影響，5,000 至 6,000 TEU 貨櫃船改由蘇伊士運河走美東航線有增加之現象。因此，巴拿馬運河拓寬完成後，亞洲至美東繞到蘇伊士運河之航線將受到影響。

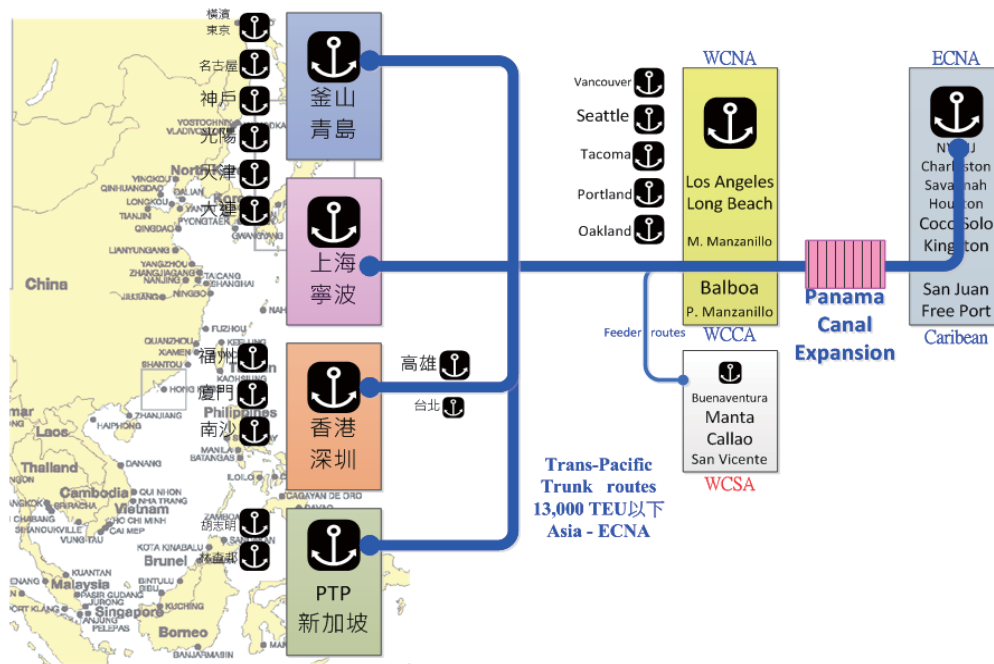


圖 2.1 巴拿馬運河擴建後之航線影響示意圖

資料來源：交通部運輸研究所(2015a)

2. 尼加拉瓜運河之新闢

大西洋和太平洋之間的連接橋樑是國際海運貿易相當重要的部分，自 1914 年以來，巴拿馬運河提供航道縮短

了兩大洋的距離。巴拿馬運河的地理優勢使其能夠享受國際海運貿易的獨家地位，但是運河通行量的需求從開通以來卻不斷增加，使運河窄道終將無法負

荷。此外，目前運河航道狹窄可通過貨輪的噸位有限，尼加拉瓜的運河計畫就是為了因應現今大型貨輪往來大西洋和太平洋需繞道合恩角(Cape Horn)的困擾，尼加拉瓜運河於 2014 年年底開工，預計 2020 年開通後可通過 40 萬噸的大型油輪，船隻不必繞過南美合恩角，即可經由此運河完成從大西洋到太平洋的路程，將大幅縮短美東至遠東的航程。據預計，2025 年尼加拉瓜運河將不僅會成為船隻在大西洋和太平洋之間往返傳遞的另一途徑之外，同時也將引發海運貿易格局的動態變化(Yip, 2015)。

尼加拉瓜運河的開通猶如都市新建「外環道」一般，興建完成初期頗有利於疏導通過性交通，因而，如都市因通過性交通而導致幹道產生瓶頸，開闢外環道為不錯的建設計畫。在巴拿馬運河之需求產生瓶頸兼之通行費高漲之年代，尼加拉瓜運河建成後可以解決很多問題，但也能嚴重威脅巴拿馬運河的樞紐地位。其將大幅縮短船隻往來太平洋和大西洋的航程，預估一艘由紐約前

往加州的船隻，與經由巴拿馬運河相比，可縮短 800 公里路程，航行時間可減少 1 天以上。對於全球運輸貿易來說，不論是拓寬巴拿馬運河或新建尼加拉瓜運河，都能大幅提高遠東與美東、拉美地區海上貿易之便利性。

除了競爭之外，巴拿馬運河和尼加拉瓜運河將是互補的航線。圖 2-2 紅虛線為傳統的美西航線與美東航線，美東航線一般會先擇一美西或墨西哥港口，進行燃料加注或櫃源匯集與裝卸。未來運河拓寬或新運河建造後，可容船型趨大後，則亦可直航經二大運河，特別是巴拿馬運河(圖 2.2 藍粗線)，更能夠直接以中美洲作為港口轉運樞紐，進行航線匯集與轉運的功能；而尼加拉瓜運河位置處於巴拿馬運河北方，離美國較近，更能吸引越太平洋之直航美東船舶。未來兩大運河將能壟斷所有橫越大洋的航線，造成美東航線單線化，並更進一步造成加勒比海域產生單線直航的情境(尼加拉瓜運河)與運轉樞紐情境(巴拿馬運河)。

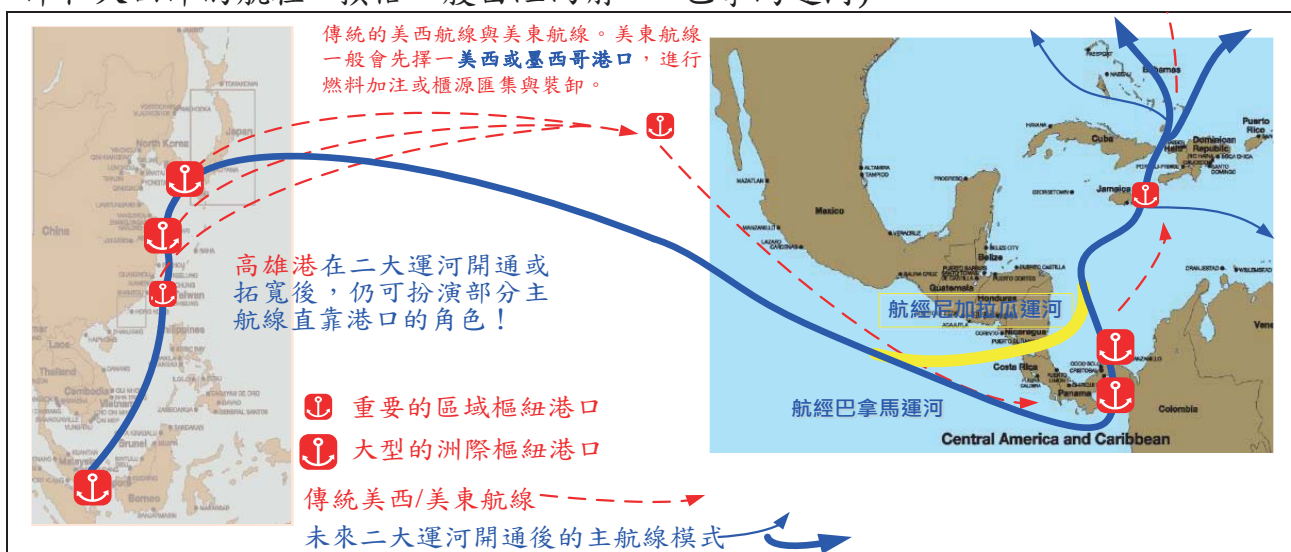


圖 2.2 尼加拉瓜運河與巴拿馬運河對未來影響之示意圖

資料來源：交通部運輸研究所(2015 a)

3. 克拉運河新闢

克拉運河是否開通的問題，類如尼加拉瓜運河之「外環道」開發課題，惟所面對的是新加坡與麻六甲此一南亞交通要道產生瓶頸之際，開發這個外環道，亦可能會是最佳決策。泰國政府計畫在泰國中南半島的克拉地峽興建克拉運河，該運河穿過泰國灣與印度洋，讓東南亞貿易區不用以通過麻六甲海峽為核心，節省了大量的航運成本。預計的克拉運河全長約 100 公里，寬約 500 公尺，水深 20 公尺，若為雙向航道則需斥資 250 億美元，預計耗時 10 年完工(交通部運輸研究所，2015a)。

世界經濟已跨入海洋經濟時代，全球各大洲各大經濟體之間的貿易來往日益密切，新闢克拉運河將原有航道截彎取直，進而分食現有遠歐航線、東亞航線之運量，而對於其相關港埠建設與產業，也將會有一定程度的影響，此必將會影響全球航運界。克拉運河的建設將增加泰國本土就業機會，與周圍附帶建設所產生的經濟效益，以及吸引國外投資客在此地投資，將帶動泰國的經濟發展。未來克拉運河完工後將可能取代麻六甲海峽，超越巴拿馬運河，成為亞、非、澳 50 億人口經濟圈的國際轉運樞紐區，泰國將因此成為世界經濟全球化的最大受益者。

克拉運河建造完成後將可縮短原經由麻六甲海峽的 600 多海浬航程，且可避免過分依賴麻六甲海峽，降低石油運送成本。然由於中國對這項工程一直猶豫不決以及泰國國內外的反對聲浪

，目前仍然處於規劃階段。尚在醞釀期的克拉運河，如果國際能多加討論，共同投資並承擔風險，相信大家都能分享其所帶來的利益。

以高雄港而言，因其位於低緯位置，距離泰國較近，因此能夠獲得克拉運河所帶來的好處，亦有機會成為克拉運河重要的樞紐中心。假使克拉運河能夠分食麻六甲海峽的運輸流量，將會有更多船隻經由此地，而高雄港即可做為各國可利用的一個良好轉運港。如圖 2.3 所示，克拉運河目前並不易改變麻六甲海峽在國際運輸上的交通地位，因其開發還未定案，且同時新加坡已成東南亞之運轉樞紐港，更是全球最重要的船舶燃料加注中心。

4. 北極航線

從歐洲到太平洋有三條主要航線，分別經由蘇伊士運河、巴拿馬運河和繞道非洲好望角的航道，其中以經蘇伊士運河為主要航線。北極航線加諸於此情境中，就如同臺灣南北各大環島路網中，再加上中部橫貫公路一般。雖然航程短且可以聯結很多資源，但通行狀況不良。如圖 2.4 所示，從東北亞前往歐洲，取道北極航線比取道蘇伊士運河少將近 40% 航程，縮短約 4,500 多海浬，航行時間約減少 9 天。然而，雖然北極航線有相當高的經濟價值，但其通航時間受氣候限制，一年之中只有 7 月至 12 月初的融冰期間才可通航。另外，也有其他額外的附加費用，如破冰船費用、管理費、保險費，以及航行設備的限制和航海人才的不足等等因素。

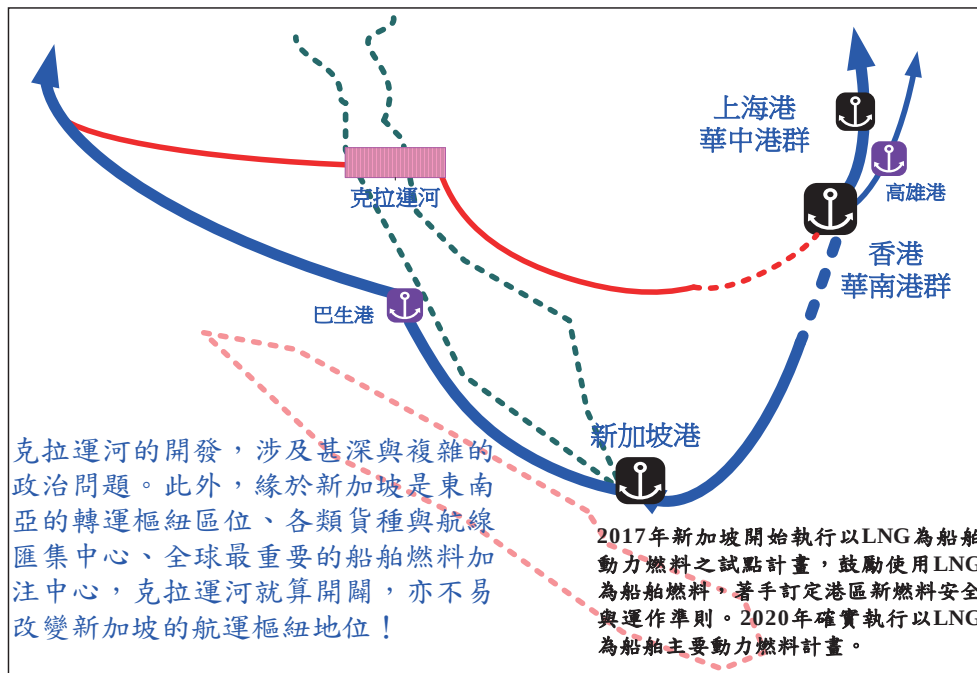


圖 2.3 克拉運河影響示意

資料來源：交通部運輸研究所(2015a)。



圖 2.4 北極航線與傳統主航線比較示意

資料來源：交通部運輸研究所(2015b)

被譽為新「大西洋-太平洋軸心航線」的北海航道，是由加拿大沿岸的「西北航道」和西伯利亞北方沿岸的「東北

航道」兩條航道構成。北極航線為戰略性與宣示性意味較大的議題。ICE-Class 的船舶(可破冰的船舶)用在北歐波羅的

海頗為普遍，但成本高昂，例如漢堡迄聖彼德堡之間的近洋航線，每年適航時間只有 7-8 個月，其他月份則需使用破冰船才能通航，更何況是極地地區。目前北極航線主力的船舶只有約 1,000 TEU 大小的貨櫃船。此外，探討北極航線的商業航行，主要是指北歐迄遠東地區，才有意義，但航商的經營成本可能高居不下(船小造價高、航程遠、適航受限)，因而不易取代現有航線。

北極航線若真的可以開通，或許將成為運送遠東和歐洲之間的貨物替代路線。由於龐大的節省油耗、運輸成本、碳排放量和縮減航程時間，各國海運公司縱使存疑，仍給予北極航線相當大的肯定與認可。這種情況可能會影響麻六甲海峽的海上商業活動，亦會影響通航於蘇伊士運河和印度洋的船隻，預計通行量將會隨之減少。

綜整上述四個新航路發展，近程會影響現有航路的新航路為拓寬後之巴拿馬運河，預計於 2016 年第二季拓寬完成；而尼加拉瓜運河雖已於 2014 年 11 月底動工，然預計需至 2020 年方可新闢完成，完成後預期短期內對貨櫃航線之影響有限；至於克拉運河之開發因涉及甚深與複雜的政治問題，目前尚在規劃中，其開工是否會受到中國大陸「一帶一路」政策而提前，值得觀察；北極航線則受到天候、成本、設備與航海人才不足等因素限制(交通部運輸研究所，2015a)；因此，短期而言，北極新航路對高雄港之影響亦不大。故本文將僅就近期內，巴拿馬運河拓寬後產生之新航路變化，對航運產業以及高雄港之衝擊與影響進行後續分析。

2.2 巴拿馬運河拓寬對航運之衝擊與影響

巴拿馬運河擴建完成後，屆時大型母船將可直接聯繫太平洋和大西洋兩大洋，更可就亞、美、歐等主三大主要經濟區域做有效之整合，相較蘇伊士運河將可強化其競爭優勢，包括提供航程較短以及總運輸成本較低之優勢。因此，巴拿馬運河擴建後，對主要大型航商在全球貨櫃運輸航線之佈署將產生變化，以長期來看，未來全球貨櫃航線之佈署將形成更廣的航線網絡，Rodrigue (2010)即認為巴拿馬運河擴建後，未來全球貨櫃航線將形成四個主要部分(如圖 2.5)，分別為(1)環赤道航線；(2)南北鐘擺式航線；(3)越洋鐘擺式航線；以及(4)區域內部中轉運輸支線。

在 Rodrigue (2010)和 Tai and Lin (2014)的研究中均有提到巴拿馬拓寬後環赤道航線或全球航線之可能性，亦即未來越太平洋航線的美西航線與美東航線可能合併而形成全球航線，然整體而言，考量未來(1)運河通行費用調整(2)美東港口之基礎建設(3)美國內陸運輸成本(4)美國碼頭工會抗爭以及(5)內河航行權(Cabotage)等因素，越太平洋美西航線與美東航線合併之可能性不高，亦即美東/美西航線仍如圖 2.2 所示會同時並存。以 Cabotage 問題為例，若兩航線合併，航商將面臨無法從美西岸捎帶貨櫃至美東岸之問題，就航商所佈署之大型貨櫃母船而言，是不具經濟效益的。此外，考量運河費用、運輸時間與內陸運輸成本，運河拓寬後，全水路模式無法全面取代蘇伊士運河模式或複合運輸模式，例如鄧振飛 (2013) 即指

出，在運河擴建前，中遠航運 COSCO 在 2008 年調整了其航線配置，其中航線 CEU 是採泊靠巴拿馬太平洋側的 Balboa 港而不通過巴拿馬運河，貨櫃運至 Balboa 港後再利用鐵運中轉到巴拿馬大西洋側碼頭利用支線船轉運至美東港口；抑或直接從 Balboa 港採陸運運達美東地區，此航線調整除可節省 30

萬美元的運河通行費，亦可縮短航線週期，船舶配置數由 8 艘減至 7 艘；美國 Tran system 顧問公司亦認為以主幹線母船將貨櫃運至巴拿馬太平洋側碼頭，並以該碼頭做為樞紐港，將貨櫃以支線船方式轉運至美東之成本會比由亞洲經巴拿馬運河直靠美東港口之成本要節省約 10~20%。

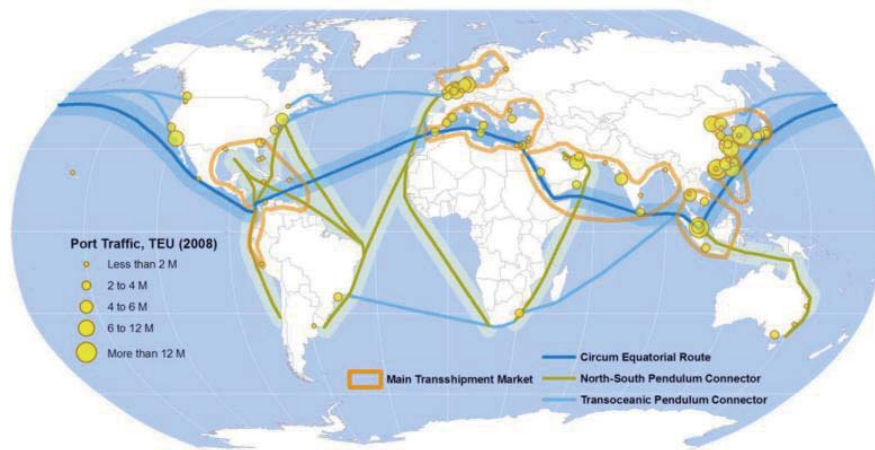


圖 2.5 巴拿馬運河擴建後全球貨櫃航線配置示意圖

資料來源：Rodrigue (2010)

東亞至美國貨櫃航線在巴拿馬運河擴建前後比較如圖 2.6 所示，可知巴拿馬運河擴建後，東亞經蘇伊士運河至美東航線之佈署並無太大改變(圖 2.6a)；而經巴拿馬運河最大之改變是採大型貨櫃母船並可以全水路抵達美東港口。在船舶大型化，航商不論走巴拿馬運河或是蘇伊士運河，均需在亞洲港口增加貨載，實務上，遠歐航線及經蘇伊士運河應以東南亞之新加坡港為起運港；相對地，經巴拿馬運河之美東航線的市場以東北亞為主。因此，由兩圖對照可知香港與深圳港群在兩條航線中扮演重要地位，而中國華南及東南亞市場

預期會是兩航線互相競爭的腹地。就遠歐或美洲經蘇伊士運河航線而言，在遠歐航線單線化與母船集貨化趨勢下，不論起運港是東北亞抑或從新加坡，可以預期高雄港對於歐洲貨源；或是經蘇伊士運河至美洲之轉運功能角色，將逐漸喪失或不具競爭優勢(戴輝煌，2012)。

相對的，在亞洲至美東經巴拿馬航線部分(圖 2.6b)，未來隨著運河拓寬及大型貨櫃母船的投入，航商將泊靠亞洲主要幾個大型轉運樞紐港進行貨櫃集貨作業，儘管目前在越太平洋航線上，高雄港因為航線平行化而有喪失東南亞轉運功能之地位 (戴輝煌，2012)，然

航商在配置大型母船之模式下，為集併更多櫃源，香港除繼續扮演珠三角地區之轉運樞紐港角色外，高雄港或許可因巴拿馬運河拓寬而重新取得東南亞市場出口美東之轉運樞紐港角色，不過仍要端看美東港口未來是否會繼續浚深建設，以及泰國和越南等地之港口建設與航線密集度。但由交通部運研所(2016)之研究竟發現：美東航線在巴拿馬運河拓寬前已進行重組，即所謂「西

向化」。該西向化竟減少東南亞之美東轉運櫃至高雄港之機會，因而導致流失了吸引貨櫃航商在高雄港佈署東向美東航線的誘因。之後，在巴拿馬運河拓寬後，航商所佈署的船型從 4,500TEU 增至 8,500TEU，高雄港在沒有東南亞轉運櫃源之充分奧援，東向美東航線更加弱化，如原有航線數三條，降至僅剩一條，甚至部分國籍航商不依循「派船母港化」之趨勢佈署東向美東航線。

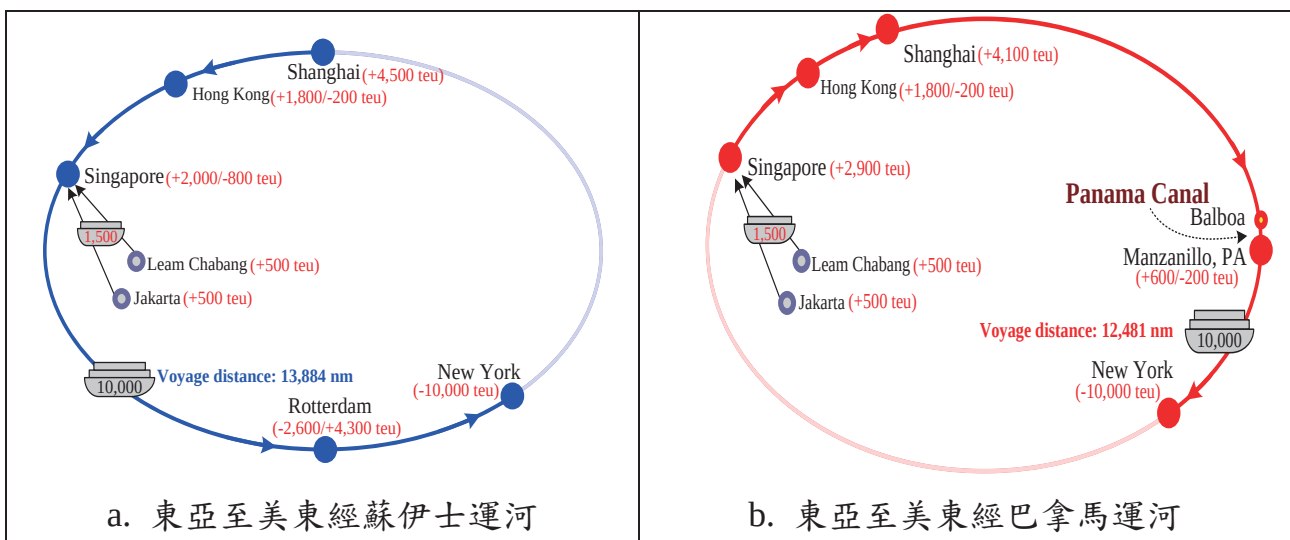


圖 2.6 東亞至美東貨櫃航線佈署示意

資料來源：Tai and Lin (2014)；交通部運輸研究所(2015a)。

航線佈署最直接的即是對港口地位之衝擊與影響，根據陳繼紅等人(2013)、鄧志飛(2013)和 Tai (2014)等人之研究，巴拿馬運河拓寬後對鄰近港口之影響將包括北美區域港口、中美/加勒比海區域港口和南美區域港口，本文另將亞洲地區港口列入探討，相關介紹臚列如后：

1. 北美區域港口系統

此區域主要有北美西岸、北美東岸

和海灣區等三個港口群，在巴拿馬運河擴建後，目前最直接的衝擊應該是原來經陸橋運輸運至美東港口之作業模式，故對美西港口有一定的衝擊，然此衝擊仍端看未來巴拿馬運河通行費、美國內陸鐵運費率、美東港口基礎設施和內河航行權(Cabotage)等因素影響。

2. 中美/加勒比海區域港口系統

在巴拿馬運河擴建能有效連結大西洋與太平洋兩岸後，巴拿馬運河自然

是中美/加勒比地區實現港口轉運的主要樞紐港；此區域除古巴和哥倫比亞之國際貿易較盛行外，其他國家之經濟發展並不活躍，因此經濟腹地較小。然憑藉其地理位置以及大型航商未來環赤道航線和南北鐘擺航線之佈署，此區港口將可作為海灣區、加勒比地區和南美等區之轉運軸心港。

3. 南美區域港口系統

受到南美內陸鐵運和公路運輸不是很完善，南美東西兩岸之港口連結不若北美來的發達，因此，南美東西兩岸港口有各自的經濟腹地，相互競爭有限。而在巴拿馬運河擴建後，將可有效銜接南美兩岸之港群，對未來港口競爭和航線配置有較大的影響。

4. 亞洲地區港口系統

巴拿馬運河擴建除對上述區域港口系統有影響外，對亞洲地區之港口亦有一定之衝擊，隨著大型船舶可直接通過巴拿馬運河而航行至美東，未來亞洲出口美東貨物將會增加採全水路模式，現行採蘇伊士運河模式之航商，也可能會轉移改走巴拿馬運河；然在母船由傳統巴拿馬極限型改為超巴拿馬型之船舶後，航商為增加船艙使用率以創造規模經濟，勢必在亞洲地區必須增加貨櫃量之裝載，而直接受惠的即是具備港埠設施現代化、裝卸效率快和航線網路密集之大型轉運樞紐港，例如東南亞各大港口。

易言之，巴拿馬運河拓寬後將可使原本分屬北美東西兩岸的港群進行有效的整合與連結成深水港區，有利航商在東亞至美東貨櫃航線以大型貨櫃船進行佈署營運；未來此航線在亞洲地區

仍以新加坡、香港/深圳港群、上海/寧波港群和釜山/青島港群為主要軸心樞紐港進行集貨，高雄港則恐僅能列為區域性樞紐港之列。就各港口而言，未來更須努力擠身成為大型母船泊靠之選擇港。另外，大船在亞洲港群集貨完成後，除非是美國籍船舶，否則將受 Cabotage 之限，大型母船在北美西岸可能除了美西港口之外，仍需泊靠溫哥華和 Balbota 港等港口以擴展貨源，再直迄巴拿馬運河後，串聯加勒比地區之 Kingston 等港，最終再泊靠美東紐約港。

2.3 新航路發展未來對高雄港之可能影響

巴拿馬運河已於 2016 年第二季拓寬完成，航商在越太平洋美東航線配置大型母船之模式下，勢必在亞洲地區更需要集併更多櫃源，因此，在這半年來可以發現：我國高雄港在巴拿馬運河拓寬後，反而失去部分東南亞市場出口至美東的轉口櫃，這點是值得港務公司注意的事(交通部運研所，2016)。

本文將就巴拿馬運河拓寬所形成之新航路檢視其對高雄港越太平洋航線之影響，以下將從航線網絡變化衝擊、船舶大型化及策略聯盟航商營運行為衝擊等層面進行探討。

1. 航線網絡之衝擊

船舶大型化和策略聯盟重組將直接影響航商在亞太地區及高雄港航線之佈署，本計畫將依據交通部運研所 104 年度「國際海運資料庫」更新擴充及資料分析服務之資料，檢視其對高雄港越太平洋航線之影響。

高雄港近幾年之主/支航線數如表

2-2 所示，在主航線部分，本文將以遠洋航線的越太平洋航線、遠歐航線、南美航線、非洲航線與中東印巴航線為主；相對的，支航線則以紐澳航線、近洋航線與兩岸航線為主。由資料可發現 2011 年高雄港總航線數為 116 條，2014

年則略減為 110 條；就主航線數來看，2011 年為 37 條，2014 年為 33 條，可發現高雄港主航線比例已稍有下降趨勢，從 2011 年的 31.9% 下降至 2014 年的 30.0%，值得進一步加以觀察。

表 2-2 高雄港主/支航線之變化

航線別		2011	2014	增減
主航線	越太平洋航線	22	21	-1
	遠歐航線	8	5	-3
	非洲航線	5	6	+1
	中東印巴航線	12	7	-5
	南美航線	2	5	+3
	小計*	37	33	-4
支航線	澳紐航線	13	13	0
	亞洲區域航線	66	64	-2
	小計*	79	77	-2
合計*		116	110	-6

*：不含重複航線之加總，如部分屬遠歐航線亦靠泊中東印巴等區域之港口，亦屬中東印巴航線，則僅累加一次。

資料來源：交通部運輸研究所，104 年度「國際海運資料庫」更新擴充及資料分析服務。

從 2011 與 2014 兩年度來看高雄港航線佈署情況，2011 年高雄港總航線數為 116 條，在航線分配上可發現以亞洲區域航線為最多達 66 條，其次為越太平洋航線 22 條、澳紐航線 13 條、中東印巴航線 12 條，遠歐航線則為 8 條；整體而言，2011 年高雄港主航線比例為 31.9%。高雄港在 2014 年的總航線數則略減為 110 條，2014 年的航線主要仍以亞洲區域航線的 64 條為最多，然相較 2011 年減少了 2 條，其次為越太平洋航線(21 條)、澳紐航線(13 條)，值得注意的是，南美航線增加 3 條為 5 條，但是遠歐航線減少 3 條剩 5 條。整體而言，高雄港 2014 年相較 2011 年在主航線共減少 4 條，主航線比例已至

30.0%。

未來巴拿馬運河拓寬完成後，由於新航路允許萬 TEU 級大型船舶航行經巴拿馬運河之美東航線，若依目前高雄港主/支航線佈署趨勢，在高雄港無更進一步具體營運因應策略下，經巴拿馬運河之美東航線將有可能與近年遠歐航線類似，會有持續遞減之趨勢發生，主/支航線比率也會持續下降。惟高雄港若能滿足良好硬體設施、高效率裝卸機具、高效率的櫃場作業和自動化資訊系統等大型船舶之需求，高雄港仍可扮演部分主航線直靠港口角色。另可透過實質獎勵美東航線靠泊以吸引航商佈署主航線，因此，高雄港未來主航線之佈署除受上述因素影響外，最大影響因素即

是支線船之佈署，高雄港近幾年在亞洲區間和兩岸直航等近洋航線能保有優勢，尤其密集之轉運航線是吸引母船泊靠主因，因此，在新航路陸續開通之下，高雄港若能持續增加亞洲區間支航線數，尤其增加對泰國、越南和菲律賓等東南亞地區港口的支線船，將有機會繼續扮演東南亞地區貨源轉運美東和美西之主要洲際樞紐港，連帶效應下應該也會持續吸引美洲主航線泊靠。

未來大型貨櫃母船佈署在越太平洋美東航線後，為提高裝載率以創造規模經濟效益，勢必在亞洲選擇少數現代港口作為樞紐港，再進行集貨，因此，本文進一步分析亞洲主要港口在越太平洋航線之佈署變化趨勢，如表 2-3 所示，依據 LLI 資料庫顯示 2011 年越太平洋航線(含美東及美西航線)總數為 77 條，其中有 50 線泊靠上海港(64.9%)，其次為香港(63.6%)、釜山港(55.8%)、高雄港(28.6%)及廈門港(22.2%)，相較鄰近港口，高雄港泊靠數僅略高於廈門港。受到船舶大型化及航商策略聯盟行為之影響，2014 年越太平洋航線總數略減為 72 條，其中，仍以泊靠上海港之航線數為最多(68.1%)，其次為釜山港

(52.8%)、香港(50.0%)、高雄港(29.2%)及廈門港(22.2%)。值得注意的是，釜山港雖航線數比例沒有增加，但航線數排名已提升至第二位，僅次於上海港，顯示其在越太平洋航線之重要性有提升；相對的，香港則可能受到鄰近深圳港和南沙港之競爭，越太平洋航線泊靠數和比率均大幅降低。而我國高雄港雖然航線數減少 1 條，然泊靠比率卻仍小幅增加，顯示高雄港目前在越太平洋航線仍有優勢存在。

若進一步探討越太平洋航線中之美東航線，2014 年計有 19 條，其中 11 條是經過巴拿馬運河，而靠泊高雄港有 5 條，佔 45.5%；相對的，8 條經蘇伊士運河，靠泊高雄港僅有 2 條，佔 25.0%，顯示高雄港在美東航線的確有一定的份量，尤其是經巴拿馬運河的美東航線。因此，明年巴拿馬運河拓寬後，經巴拿馬運河之美東航線運量將顯著增加，此對高雄港相當有利，但未來如沒足夠貨源，面對巴拿馬運河拓寬之美東航線船行大型化，將如遠歐航線船行大型化而靠泊航線數大幅減少，值得高雄港加以關注。

表 2-3 越太平洋航線亞洲主要港口航線數

港口別	2011 年		2014 年	
	航線數	%	航線數	%
高雄港	22	28.6	21	29.2
廈門港	17	22.1	16	22.2
香港	49	63.6	36	50.0
釜山港	43	55.8	38	52.8
上海港	50	64.9	49	68.1
總數	77	100.0	72	100.0

資料來源：交通部運輸研究所，104 年度「國際海運資料庫」更新擴充及資料分析服務。

2. 船舶大型化衝擊

根據 UNCTAD 彙總 Fairplay 資料所得全貨櫃船的發展趨勢觀之，全球貨櫃船舶艘數從 1987 年的 1,052 艘增加到 2011 年的 4,868 艘，而至 2015 年 4 月下旬已成長到 5,066 艘；在運能方面則由 1987 年的 1,215,215 TEU 增長到 2015 年 4 月的 18,846,593 TEU，平均船舶大小則由 1987 年的 1,155 TEU 型船舶增加到 2015 年的 3,720 TEU。此外，根據 Lloyd's List Intelligence (2014) 和交通部運輸研究所(2015a)之研究資料顯示(如表 2-4)，至 2017 年止，預計有 134 艘 7,500~9,999 TEU 型之船舶交船，1.3 萬 TEU 以上大型船舶則有 119 艘；而在超

過 1.8 萬 TEU 大型船舶部分，Maersk 和 MSC 未來將分別預計再交付 20 艘船，長榮預計交付 11 艘，UASC、MOL 和 OOCL 則分別各有 6 艘，CSCL 有 5 艘，CMA CGM 有 3 艘(Alphaliner, 2015)。總計至 2014 年底止，全球營運和興建中之超大型船舶有 20% 屬於 15,000~15,999 TEU、4% 是 16,000~16,999 TEU、9% 是 17,000~18,000 TEU 以及 67% 為超過 1.8 萬 TEU，可看出船舶大型化已是必然趨勢，超過 1.8 萬 TEU 之貨櫃船已投入營運，尤其愈大型航商在新建船舶上有愈大型化之趨勢，甚至 2.2 萬 TEU 之貨櫃船已著手規劃設計。

表 2-4 全球 2017 年止預計交付之貨櫃船規模分佈

船舶規模 (TEU)	艘數	百分比(%)	總運能	百分比
999 以下	40	6.6	20,780	0.5
1,000~2,499	151	25.0	266,915	6.2
2,500~4,999	87	14.4	312,522	7.3
5,000~7,499	25	4.1	146,774	3.4
7,500~9,999	134	22.2	1,210,963	28.2
10,000~12,999	47	7.8	488,104	11.4
13,000 以上	119	19.7	1,840,849	42.9
總計	603	100.0	4,286,907	100.0

資料來源: Lloyd's List Intelligence (2014)；交通部運輸研究所(2015a)。

船舶大型化趨勢對航運業所產生之衝擊大抵有：

(1) 產業供需失衡：航商為尋求規模經濟以降低單位經營成本降低，紛紛投資建造大型船舶，然船舶拆解數量並未顯著增加，導致貨櫃市場出現運能供給大於需求，而衍生供需失衡問題。

(2) 碼頭及航道設施的擴建：儘管船舶大型化並未顯著增加吃水深度，然配合船寬與船長之放大，現有碼頭泊位必須延伸方能因應萬 TEU 級船舶泊靠，此外，裝卸機具必須更新，航道必須浚深且貨櫃堆場容量必須擴充。

(3) 聯營航線增加：船舶大型化結果，

航商為有效增加裝載率以降低單位營運成本，必須透過聯營模式以化解艙位壓力。因為據交通部運輸研究所(2014)之研究計畫成果，2013年第4季遠歐航線採聯營方式共有17條航線，所佔比例為77%；越太平洋航線部分則有53條航線數聯營，所佔比例為93%；兩航線聯營比例相較2013年第一季分別有2%和3%的增長。

- (4) 船型的排遞效應：由於碼頭基礎設施之限制，大型船舶主要投入東西向遠洋航線，所替換出來的中小型船轉則投入二線航運市場；然隨著萬TEU級船舶陸續下水，航商將此萬TEU級船舶佈署在遠歐航線，而原本遠歐8,000 TEU級的船舶則替換至越太平洋美西航線；因此，船舶大型化將產生船型的排遞效應(交通部運輸研究所，2013)。
- (5) 碼頭租賃制度受衝擊：在船舶大型化以及航商策略聯盟協議下，航商在航線佈署上將採船舶艙位共享方式，僅泊靠少數主要軸心樞紐港，且聯盟航商共同泊靠碼頭，此將對高雄港現有之專用碼頭租賃制度產生衝擊，當航商約期滿會改採和聯盟航商共租用碼頭，不再續租之可能性將提高。

定期航運市場之貨櫃船舶建造已趨向大型化、省油化及設備自動化的方向發展，以謀求規模經濟效益達到降低營運成本及增加競爭力之目標。目前航

商在遠歐航線大量佈署萬TEU級船舶，而將原本8,000 TEU級船舶替換至越太平洋航線，此將造成世界兩條主要航線之單一船舶平均運能逐漸增長，如圖2.7所示，遠歐航線單一船舶平均運能從2013年第1季的10,236 TEU增加到2014年第3季的11,451 TEU，船舶平均運能增加了10.8%；越太平洋航線部分，單一船舶平均運能則從6,042 TEU增加到6,651 TEU，船舶平均運能增加了10.1%。此船舶大型化趨勢也將直接影響航商對高雄港碼頭之需求，以表2.5高雄港船型分佈資料顯示，目前泊靠高雄港計有3條航線是超過萬TEU級船舶，其中遠歐航線有2條佔40%，顯示遠歐航線船舶大型化趨勢已是事實，而大型化和策略聯盟重整因素可能也是造成高雄港遠歐航線減少3條的原因。越太平洋航線部分，目前有1條航線是利用萬TEU級船舶，另有4條是介於8千至1萬TEU，隨著巴拿運河拓寬後，美東航線將佈署更多萬TEU級船舶，高雄港除需有足夠貨源吸引泊靠外，深水碼頭等基礎設施更是最重要之因素，因此，若無法滿足航商之需求，越太平洋航線將有可能和遠歐航線類似，未來航商將減少高雄港之泊靠。就高雄港而言，為符合航商之需求而成為船舶泊靠之主要軸心港，必須針對下列幾項港口設施需求進行改善：(1)良好的硬體設施(2)高效率的裝卸機具(3)高效率的櫃場作業以及(4)自動化資訊系統。

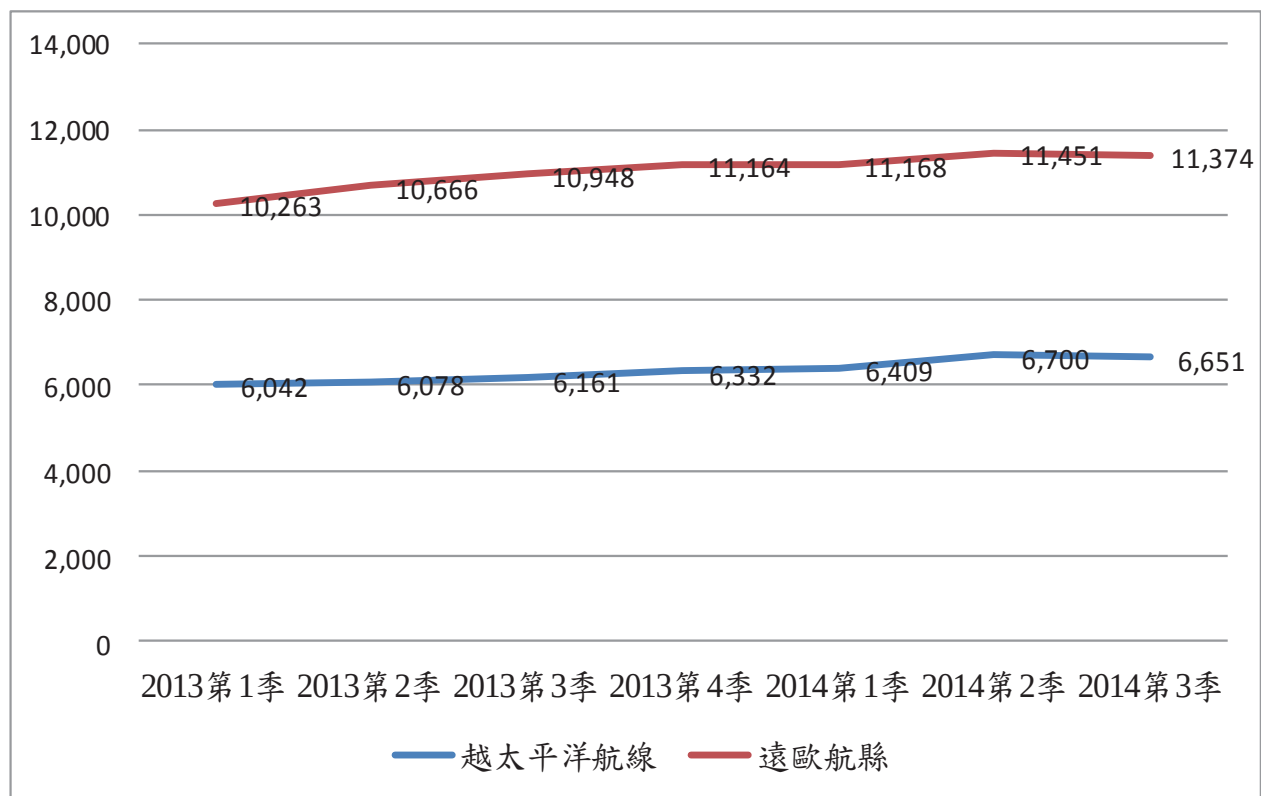


圖 2.7 遠歐/越太平洋主航線單一船舶平均運能變化趨勢

資料來源：交通部運輸研究所 (2015)

表 2-5 高雄港船型分佈

遠洋船型分佈 (TEU)	4,999 以下	5,000~8,000	8,001~10,000	10,001~13,000	13,001 以上
越太平洋航線/21 條	8	8	4	1	0
遠歐航線/5 條	1	0	2	1	1
近洋船型分佈 (TEU)	1,000 以下	1,001~2,000	2,001~3,000	3,001 以上	
近洋區域航線/64 條	11	39	9	5	

資料來源：交通部運輸研究所 104 年度「國際海運資料庫」更新擴充及資料分析服務。

3. 大型策略聯盟航商營運行為之衝擊

在船舶大型化、油價高漲與世界經濟不景氣之市場氛圍下，由馬士基於 2012 年率先提出日班服務，爾後其他大型航商亦陸續推出日班服務，至此整個全球貨櫃市場產生重大改變，各航商為因應日班服務所帶來之衝擊以及持續提升本身競爭力，遂重新進行聯盟重組 (交通部運輸研究所，2013)。原本之

Grand Alliance 與 The New World Alliance 重新合組成 G6 聯盟；長榮海運加入 CKYH 聯盟運作而成為 CKYHE 聯盟；MAERSK、CMA CGM 和 MSC 等世界前三大貨櫃航商更籌組 P3 聯盟，然 P3 聯盟最後遭中國否決而無法組成；MAERSK 與 MSC 轉而合作組成 2M 聯盟；CMA CGM 則尋求 China Shipping 和 UASC 的合作組成 O3 聯盟；至 2015

年4月底止，全世界主要有四大定期貨櫃航商聯盟。目前四大聯盟貨櫃船隊運能約占全球百大船隊的81.8%，故，聯盟航商成員之行為將顯著的影響全球航運及港埠市場。在主要四大航運策略聯盟中，以2M聯盟所擁有之市場運能最大達545.8萬TEU，佔全球百大船隊運能達29.5%，G6、CKYHE和O3等三大聯盟運能則分別為353.9萬TEU(19.1%)、329.6萬TEU(17.8%)和244.6萬TEU(15.4%)。在船舶艘數部分，全球百大船隊總船舶艘數約為5,001艘，全球貨櫃船隊船舶艘數前三名依序為Maersk、MSC和CMA CGM，分別為605、495和467艘；在航商聯盟部分，四大聯盟共計3042艘，佔全球百大船隊之60.8%，其中以2M聯盟的1,100

艘最多，佔船舶艘數之22%；其次為O3聯盟(13.2%)、G6聯盟(12.9%)和CKYHE(12.7%)聯盟。

越太平洋航線運能之配置變化部分，如表2-6所示，四大航商聯盟近3年所掌控越太平洋航線運能之比例高達約96%，由各別航商聯盟之運能配置變化來看，發現以亞洲地區為根據地的航商成員，如CKYHE和G6聯盟在越太平洋航線之運能配置上並無太大的增長(約增加7.7%運能)；相對的，2M聯盟在越太平洋航線之運能配置增長率是最高達25.1%，O3聯盟之運能配置亦增加10.8%。因此，近3年越太平洋航線運能之配置變化，以2M聯盟增加最多，其所掌控之比例相對其他航商聯盟是呈現成長的。

表 2-6 四大航商聯盟越太平洋航線運能配置變化表

單位:萬 TEU

聯盟 名稱	2014 年第 1 季		2015 年第 1 季	
	運能	百分比	運能	百分比
CKYHE	168.3	36.0%	181.5	34.7%
G6	154.5	33.1%	166.4	31.8%
2M	68.9	14.8%	86.2	16.5%
O3	61.2	13.1%	67.8	13.0%
非聯盟成員	14.2	3.0%	21.2	4.0%
總計	467.1	100.0%	523.1	100.0%

註：2015 年第 1 季總運能以每週運能*13 週估算。

資料來源：交通部運輸研究所(2014，2015)；Alphaliner (2015.01)。

本文進一步針對越太平洋之美東和美西航線進行探討，表 2-7 顯示 2015 年 5 月止美西航線數總計約 39 條，平均每週運能為 276,250 TEU，美西航線運能以 CKYHE 聯盟佈署 17 條為最多

，其次為 G6 的 12 條、O3 的 5 條和 2M 的 4 條。美東航線部分則共約 25 條航線，每週總運能約 139,800 TEU，其中經巴拿馬運河之全水路航線約 16 條，每週平均運能為 72,650 TEU；相對的，

美東經蘇伊士運河之總航線數為 9 條，每週運能約 67,150 TEU。美東經巴拿馬運河全水路之航線不論在航線數或運能配置比例均比經蘇伊士運河來的高，而由航商聯盟之佈署行為來看，G6 和 2M 聯盟相對 CKYHE 和 O3 聯盟在美東航線上佈署上較偏向經蘇伊士運

河，此原因有可能 G6 和 2M 兩聯盟航商成員擁有較多之大型貨櫃船舶以及 2M 聯盟成員均以歐洲為其據點。因此，整體而言，以亞洲為基地的 CKYHE 聯盟在越太平洋航線之佈署上以美西為主；相對地，歐洲為基地的 2M 聯盟則相對較重視美東經蘇伊士運河航線。

表 2-7 遠東至美國東/西岸每週運力表

區域 / 聯盟	G6	CKYHE	2M	O3	Others	總航線	平均每週運能
美西	12	17	4	5	1	39	276,250
美東經巴拿馬運河	5	6	1	3	1	16	72,650
美東經蘇伊士運河	3	2	2	1	1	9	67,150
總計	20	25	8	9	3	64	416,050

資料來源：Alphaliner (2015.04.05)。

美東航線之佈署行為是否會因巴拿馬運河之拓寬完成而有所改變是值得探討的，在運河未拓寬前，貨櫃航商在考量船舶大型化、船舶裝載率、東南亞貨源、美西港口罷工和美國內陸複合運輸運費高漲等因素，遠東至美東航線經蘇伊士運河成為航商另一營運選擇，因此，如圖 2.8 顯示美東航線經巴拿馬運河和蘇伊士運河在航線及運能之配置變化，可發現從 2010 年起至 2015 年元月止，經巴拿馬運河之運能是呈現減少，而經蘇伊士運河則是呈現增加。隨著運河在 2016 年第 2 季完成，此趨

勢將有所變化，根據 Alphaliner (2015.03)之預測，美東經巴拿馬運河全水路運能將增加 6%，其中有三個新航線主要是中國華北至美國東岸，顯示巴拿馬的地理位置優勢對東北亞地區輸往北美東岸之貨物有吸引力。故在巴拿馬運河拓寬完成後，貨櫃航商將增加佈署大型貨櫃船於遠東至北美東岸航線，對高雄港而言，若能回復以往扮演東南亞地區轉運至美洲洲際樞紐港之角色，則巴拿馬運河拓寬對高雄港而言，將有很大契機。

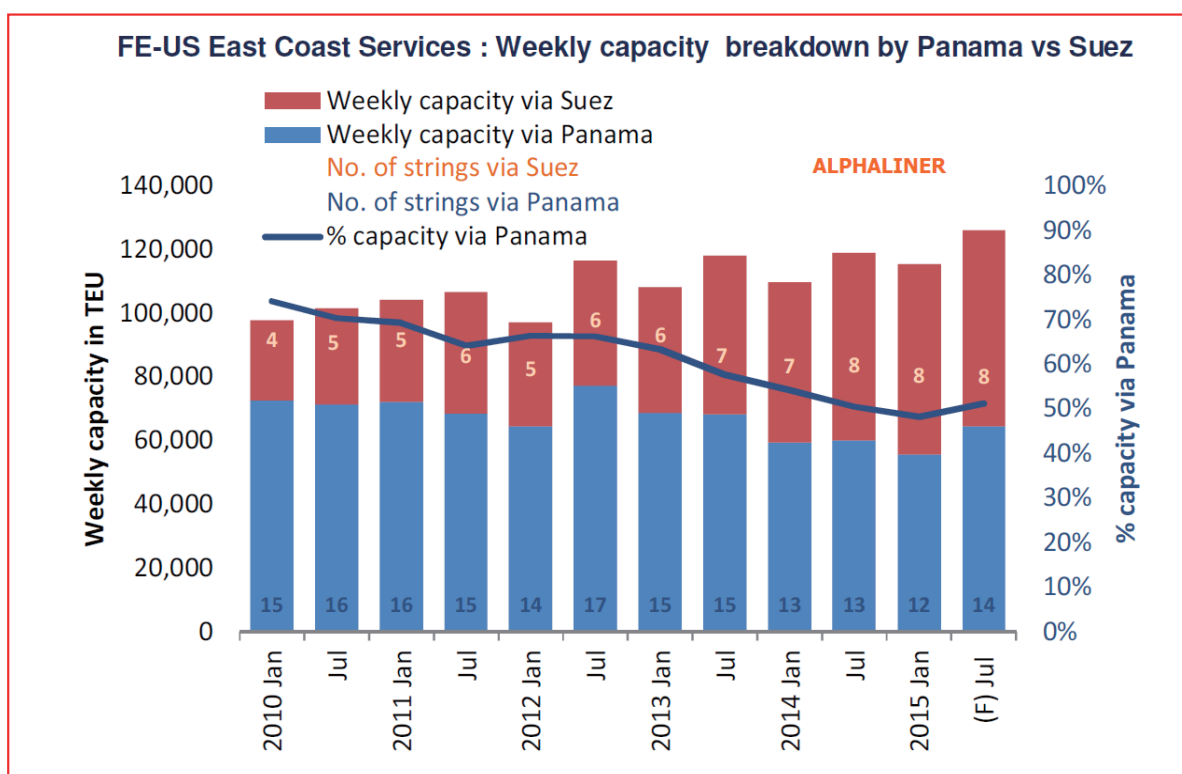


圖 2.8 遠東至北美東岸經巴拿馬運河/蘇伊士運河運能配置變化圖

資料來源：Alphaliner (2015.03)

三、高雄港在新航路趨勢下面臨之課題與因應對策

以臺灣各港口之主航線靠泊頻率及船舶運能而言，越太平洋航線顯著地較亞歐航線為高，由於目前北極航線還未成定數，而蘇伊士運河雖於 2015 年 8 月完成河道擴增工程，航程由每趟 18 小時縮為 11 小時，節省約 7 個小時，但對亞歐航線之總航程影響有限。因此，在海運新航路發展趨勢下，國際貨櫃港埠短期內要因應和面對的是巴拿馬運河拓寬後，所受到船舶大型化以及大型策略聯盟航商營運行為等趨勢之衝擊，而各貨櫃樞紐港口所需具備的條件包括：(1)港口設施需可以應對大型化船舶(upsizing)、(2)港口腹地貨源需有多樣

性以帶動航線之匯集、以及(3)宜因應綠色港與新能源船舶未來的轉變。本文將就上述相關發展趨勢，從設施面、營運面、資源整合面及能源環保面提出高雄港所面臨之課題及所對應之課題提出初擬對策。

3.1 面臨之課題

課題一、設施面：未來通過巴拿馬運河之船型由 4,000 多 TEU 增至 13,000 TEU，如果高雄港擬爭取經巴拿馬運河之美東航線靠泊，未來宜提供足夠水深的貨櫃碼頭資源供其靠泊。惟目前高雄港貨櫃碼頭分租給航商與碼頭營運商，宜全面性、抑或局部性地改善設施，

值得加以探討。

課題二、營運面：近年來我國貨源成長有限，包括起迄貨櫃與轉運貨櫃，對吸引船舶日益大型化之航線靠泊，頗為不利，亟待改善。

課題三、資源整合面：我國港口之營運，不但需面臨新航路之改變，亦需面對航運市場之航商策略聯盟化、船舶大型化與航線層級化，以及大陸與東協港口之競爭，易言之，外部環境極為嚴峻，亟待政企與港埠資源有效整合。

課題四、能源環保面：港埠發展亦須善盡社會責任，包括有效運用各類能源、減少對地球環境的負面衝擊。

3.2 因應之對策

課題一：設施面

對策初擬：

1. 考量高雄港實質條件，宜對現有承租航商所屬碼頭，局部性進行航道浚深與碼頭設施改善，據以提供深水碼頭。
2. 港務公司宜成立專責的洲際貨櫃碼頭公司，經營高雄港第七貨櫃中心深水碼頭。
3. 高雄港需要完整的貨櫃碼頭遞移計畫，促使非深水碼頭區之租賃航商，將大型船舶靠泊業務移轉至洲際深水碼頭。

課題二：營運面

對策初擬：

1. 港務公司宜對在高雄佈署主支航線的貨櫃航商，進行實質的航線開闢補助。
2. 港務公司宜對在高雄佈署主支航線的貨櫃航商，進行實質的轉運櫃量獎勵措施。

3. 港務公司宜通盤檢討與調整高雄港出租碼頭之成本制度和租約費率，特別是針對有把自身主支航線佈署至高雄港的航商，給於租約之優惠。
4. 港務公司須整合高雄港內貨櫃碼頭營運資源，並規劃碼頭間的接駁運輸，讓未來高雄港各洲際碼頭，可吸引更多的航線泊靠。

課題三：資源整合面

對策初擬：

1. 政府相關單位宜積極協助第七貨櫃中心聯外道路(國七高速公路)之建設，以期發揮高雄港洲際樞紐深水碼頭之預期效益。
2. 航港體制改革仍在過渡期，政府相關單位宜在相關政策與措施上，全力協助臺灣港務公司進行多角化與本業以外之事業經營。
3. 政府相關單位應持續透過兩岸航運協商，為我國航商爭取開放更多的大陸中轉櫃源。

課題四：能源環保面

對策初擬：

1. 港務公司宜因應全球各類新型態船舶能源之潛在發展，規劃出如 LNG 加注站等碼頭相關貯存設施。
2. 因應 IMO 對於近岸排放管制區(ECA)所採之低硫燃料等相關措施，港務公司應針對進出港船舶，採取近港減速、減排、置換低硫油品之規範與查驗。
3. 港務公司宜順應環保與企業責任趨勢，仿世界各大樞紐港口，持續在各港推動綠色港埠政策，保有生態港口標章。

四、結語

本文旨在探討新航路發展對高雄港之可能影響分析及因應對策。新航路中除北極航線外，皆為現有航路的擴充，主要包括巴拿馬運河拓寬、尼加拉瓜運河與克拉運河之新闢。北極航線猶如國內公路環島路網中，再加上中部橫貫公路一般，其航程短且可以聯結頗多資源，但通行狀況不良，其戰略與資源開發之意義應甚於航路意義；而尼加拉瓜運河與克拉運河之開通猶如都市新建「外環道」一般，興建完成頗有利於疏導通過性交通，但對產業鏈複雜的貨櫃

航運而言，初期影響不大。而近期影響航運路網最大乃是即將於 2016 年第二季拓寬完成的巴拿馬運河。

易言之，在新航路之發展趨勢下，高雄港短期內要因應與面對的是巴拿馬運河拓寬後，所受到船舶大型化以及大型策略聯盟航商營運行為等趨勢之衝擊，尤其策略聯盟航商在美東航線之重新佈署。高雄港除須提供必要的港埠設施之外，亦須塑造吸引主航線的環境，以免重蹈「遠歐航線船舶大型化」之覆轍。

參考文獻

英文部份

1. Alphaliner, 2015. Alphaliner Weekly Newsletter, 14, 1-15.
2. Alphaliner, 2014, Alphaliner Fleet Stats. Available at:
http://www.alphaliner.com/liner2/research_files/liner_studies/nofleet/Alphaliner-FleetMthly-2014-10.pdf。
3. Alphaliner, 2014. Weekly Newsletter, Vol. 2014, Issue 1~47.
4. Lloyd's List Intelligence (2014).
5. Rodrigue, J.P., 2010. Factors Impacting North American Freight Distribution in View of the Panama

Canal Expansion. Available at:

http://people.hofstra.edu/jean-paul_rodrigue/downloads/Panama%20Canal%20Study%202011%20Final.pdf

6. Tai, H. H., 2014, A Comparative Study on Pollutant Emissions and Hub-Port Selection in Panama Canal Expansion, Maritime Economics and Logistics, 2014 Macmillan Publishers Ltd. 1479-2931, 1-16, www.palgrave-journals.com/mel/.
7. Tai, H. H., Lin, D. Y., 2014, "The Impact of Panama Canal Expansion and Clean-Lines Strategy on Unit

- Emission of Trunk Route Deployments in International Container Shipping,” International Forum on Shipping, Port and Airports, IFSPA 2014, Conference Proceedings, Paper Code: M72, Maritime Session 1, 19-21 May 2014, Hong Kong, China.
8. Tai, H. H. and Lin, D. Y., 2013 Comparing the Unit Emissions of Daily Frequency and Slow Steaming Strategies on Trunk Route Deployment in International Container Shipping. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 21, June 2013, 26-31.
 9. Tsz Leung Yip, Mei Chi Wong, The Nicaragua Canal: scenarios of its future roles, *Journal of Transport Geography*, Volume 43, February 2015, Pages 1–13
 10. 交通部運輸研究所，2012a，「我國貨櫃港口因應環境變遷之碼頭營運模式研究」。101MOTC-IOT-101-H1DB001a。
 11. 交通部運輸研究所，2012b，「國際海運貨物完整流向資料收集與分析之研究」。
 12. 交通部運輸研究所，2013，交通部運輸政策白皮書-海運，p.117，臺北市。
 13. 交通部運輸研究所，2014，「我國及亞洲主要港口之主航線及運能資料建置」，交通部運輸研究所計畫。
 14. 交通部運輸研究所，2015a，新航路與船舶動力發展對高雄港樞紐地位之影響與因應策略，交通部運輸研究所 104 年度合作研究計畫，第二次期中報告。
 15. 交通部運輸研究所，2015b，交通部運輸研究所 104 年度「國際海運資料庫」更新擴充及資料分析服務。
 16. 交通部運輸研究所，2016，交通部運輸研究所 105 年度「國際海運資料庫」更新擴充及資料分析服務。
 17. 陳繼紅、曹越、梁小芳、韓玲冰，2013，巴拿馬運河擴建對國際集裝箱海運格局的影響，*航海技術*，第一期，73-76。
 18. 鄧志飛，2013，基於巴拿馬運河擴建的遠東/美東班輪航線規劃研究，大連海事大學交通運輸規劃與管理系碩士論文，大連市。
 19. 戴輝煌，2012，東亞主航線佈署與兩岸直航對高雄轉運功能之影響，*運輸計劃季刊*，第 41 卷，第 4 期，435-464。

防救災系統參與港研中心 105 年防災演習

曾文傑 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
邱永芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
吳勝宏 弘光科技大學環境與安全衛生工程系助理教授

摘要

為提升臺灣各主要港埠之防救災能量，交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)已運用地理資訊系統技術建立完成基隆港、臺北港、蘇澳港、臺中港、高雄港、安平港及花蓮港之『港灣地區防救災系統』，並依據使用者經驗進行系統調整與功能開發。為擴大系統使用效益，更積極參與各港區防救災演習，該系統曾參演行政院「2011 金華演習」及海岸巡防署海洋巡防總局「100 年度海嘯應變演練暨港口保全演習」，並多次參與台灣中油公司液化天然氣台中廠應變演習等防災實兵演習，提供災情資訊通報與傳遞等項目，藉以修正系統架構，以符各港務分公司及港區各事業單位實際操作使用。

臺中港是位於臺中市的一座國際商港，目前因吞吐量大幅成長為臺灣第二大港，也是中臺灣的航運門戶。此次以本中心發展之防救災系統參與港研中心 105 年防災演習工作，選取臺中港區為演習主要對象，進行四場實體兵推

演練：第一場為港研中心火災避難逃生演練、第二場為港研中心水災避難逃生演練、第三場為西碼頭區化學品洩漏事件實地演練、第四場為臺中港區倉儲業意外事故實地演練。除了規劃、撰寫演習腳本，並協助演習流程能順利進行，本演習選定運用防救災應變系統及緊急應變指揮系統，實際瞭解臺中港區若發生災害事故時系統是否能夠滿足通報與應變需求。

防救災系統能強化緊急應變計畫、防救災資源整合、急救與搶救資源整合等，能於系統上登載相關防救災設備位置、消防單位及設備位置與數量、區域醫院相對位置與可容納病床數、毒化災應變能力與緊急通道安排等，發揮防救災系統 ALL IN ONE 整合的優點，亦能於緊急情況或無電力供應階段可連接雲端系統，發揮通報之功效或前段連結 APP、QR CODE 先期定位與通報系統，使災害事故相對位置誤差機率縮小，並能解決災害位置點選的誤差，顯示防救災系統可調式設計的優點。

一、前言

臺灣各主要港埠不僅需提升港埠競爭力、資產開發、轉投資及國際化等多角化經營需求外，對於港埠內外之災害防救，當災害發生時搶救之相關機制是否可以即時啟動，達到災害抑制、災損降低之目的，此乃為另一重要課題。

港埠使用者可能面臨的災害潛勢，可分為災害空間（地）、災害類型（型）與災害時間（時）等三個向度。其中，(1)災害空間係指港埠中所有災害發生之有形環境（包含：水域設施、隔浪設施、繫船設施、港勤船舶等）；(2)災害類型包含港埠使用者所可能面臨的災害 (disaster) (包含：海嘯襲堤、爆炸火災、護岸崩塌、結構倒塌等)；(3)災害時間則為針對地與型於災害發生前、災害發生時及災害發生後三個重要防制分界點。

防救災系統以網際網路地理資訊系統，建構防救災資料庫，主要針對：(1)採多方位災情通報流程、(2)具有時間

及空間資訊整合展示能力、(3)防救災資源維護簡單化及(4)定位為各港既有系統之輔助系統^[1-2]。以上四項要素可有利提升各港災害事故處理及應變能力。

防救災系統參與本次實兵演習，持續更新與建立防救災應變系統、防災體系規劃、危害風險等級劃分與應變組織規劃及緊急應變流程建置，以協助(1)港區內事業單位災害通報與事故報告輔助系統(低風險事故)、(2)協助港區及港務分公司成立緊急應變中心之災害指揮輔助系統(中風險事故)、(3)協助中央應變中心災情輔助系統(高風險事故)^[3]。

透過本次防救災系統參與港研中心 105 年防災演習工作，將可驗證防救災應變系統是否可配合緊急應變指揮系統(標準流程)，以達輔助臺中港港務分公司及港區各事業單位進行災害事故通報與災害應變中心災情分析與管理之用^[4-5]。

二、防救災系統功能

防救災系統功能 (如圖 1)，採多方位災情通報流程。以往主要通報方式為室內電話及行動電話為主，但往往人、事、時、地、物等資訊無法在室內電話及行動電話中完全展現出來，因此採用

多方位災情通報方式 (如圖 2)，如多媒體簡訊、自動語音電話、網路自動傳真，配合手持裝置的使用，可有效提升災情通報的精度、時效與品質。

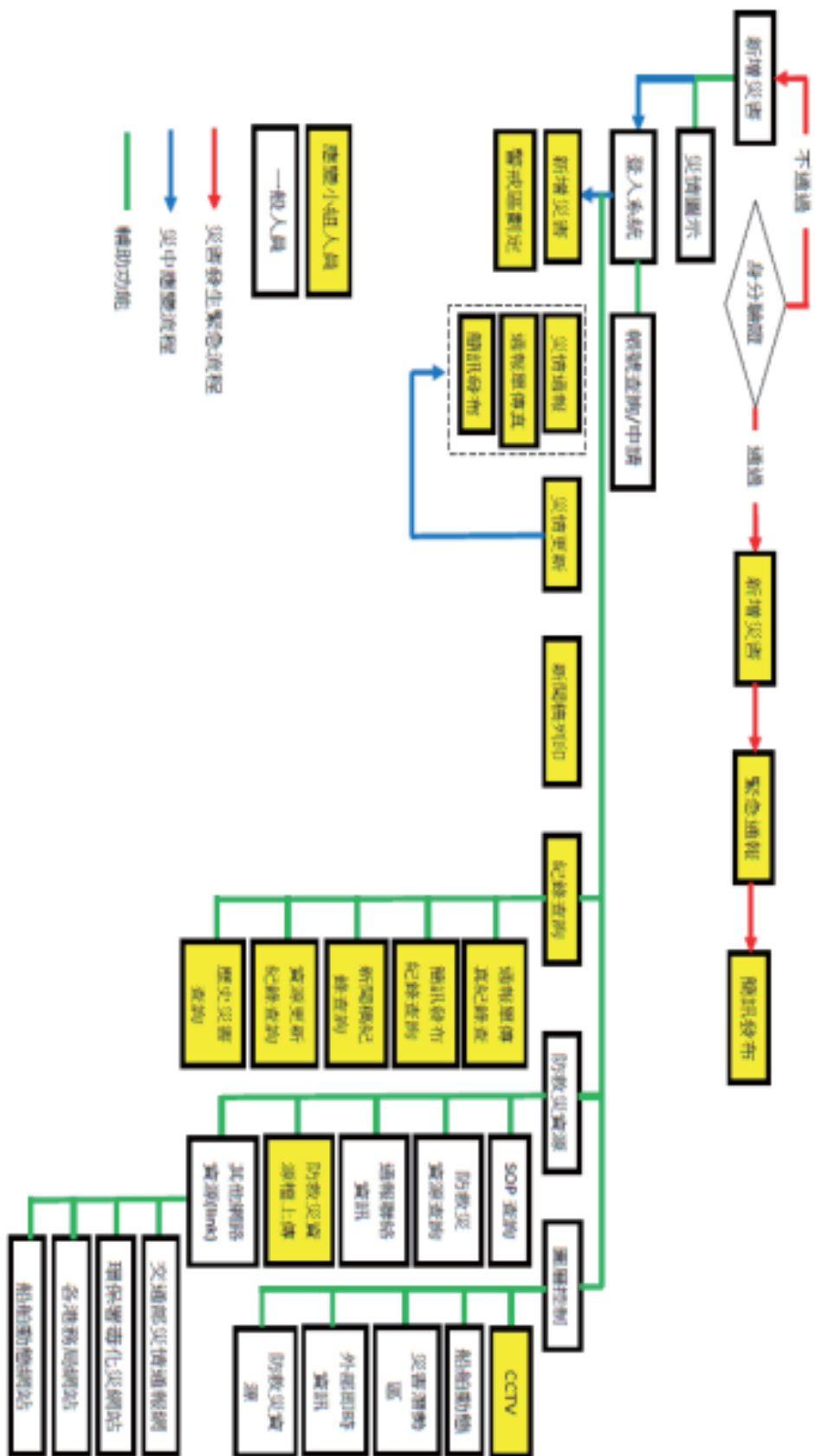


圖 1 防救災系統功能^[1]



圖 2 全方位災情通報方式

系統使用者無須登入系統即可於首頁 <http://163.29.73.11/dprs2015/tchb/> 中了解最新災情資訊，本系統開發之災害狀況圖示描述如下：以地圖方式顯示港埠地區之災害狀況，包括災害類型、最新處置現況、時間等資訊，無需下載任何元件即可瀏覽地圖資訊，可支援桌上型電腦及手持裝置大部分之瀏覽器，具備跨平台之特性(如圖 3)。



圖 3 防災系統登入首頁

新增災害模組：當災害發生時災害發現者或聯絡中人員可點選此功能進

行災害之新增 (如圖 4)，於地圖上點選災害發生位置，選取災害事件、災害類型，輸入災害描述、災前整備，若有精確位置也可手動輸入災害位置之座標 (經、緯度) 後即可完成。



圖 4 新增災害

災情通報及管理模組：災情通報及管理模組為災中應變流程，包括「語音通報」、「傳真通報」、「簡訊通報」等多元通報方式，點選災情通報功能 (如圖 5)，於通報內容輸入欲發送之通報資訊，選擇通報方式為簡訊通報或語音通報，指定接收訊息之群組聯絡人，確認後點選送出，即可完成災情通報。



圖 5 災情通報功能畫面



圖 6 事件歸檔與紀錄

事件歸檔：災情處置作為之一功能，根據災害處理情況加以判斷與分析是否為結案事件。若災害處理完畢，則可以使用事件歸檔功能並將相關該事故通報所有資料、描述、影音、簡訊等過程加以記錄並保持日後事故調查、災情參考、年度統計等使用（如圖 6）。

即時災情：提供「多媒體簡訊即時災況」、「影音即時災況」與「影音即時災況上傳」等即時災情資訊接收與傳送之方法。多媒體簡訊即時災況：使用中華電信簡訊特碼服務，可接收手機發送至指定門號的多媒體簡訊，包括文字、圖片等資訊。災害現場人員使用手持式裝置拍攝照片，以多媒體簡訊的方式發送至「000-0000」。開啟多媒體簡訊即時災況功能，系統會自動擷取多媒體簡訊內容，並於畫面上顯示影像及文字內容；更進一步，將選定的影像以多媒體簡訊的方式轉發至指定的群組聯絡人（如圖 7）。



圖 7 即時災情通報模組化

後臺管控措施：登入首頁可設定管控人員進入，並且針對申請帳號及相關權限管控(如圖 8)。管理功能選單包含：使用者帳號管理、災情傳遞群組管理、電話輸入通報管理、災害類型管理、災情狀況管理、防救災資源更新、事件監控。系統主畫面：當使用者被通過檢核後，會開啟系統主畫面，下列範例以「應變人員」完整權限做說明。主畫面配置，包括主功能選單、事件災害選單、地圖控制工具列、地圖顯示區與地圖狀態列。

防救災資源：內容包含文件查詢、資源分布圖層展示、其他網站查詢（如圖 9）。文件查詢可以提供相關防救災標準作業流程、物質安全資料表、火災分類、滅火措施等相關重要防救災文件。



圖 8 後臺管控措施



圖 9 防災資源查詢

三、系統參與防災演習工作

本次防災演習主辦單位為港研中心,協辦單位有台灣中油股份有限公司、臺中液化天然氣廠、臺中港務消防隊、宏全國際股份有限公司及綠卡邦科技顧問股份有限公司等。而防救災系統參與此次演習除了規劃、撰寫演習腳本外，並協助使演習流程能順利進行。

3.1 演練時間

本次防災分別於 105 年 11 月 23、25 日及 12 月 1、5 日早上共進行 4 次預演,並於 12 月 5 日下午進行正式演習。

3.2 演練目的

- (1) 強化本所各單位及人員火災應變、水災、地震災害應變觀念。
- (2) 建構完善災害防救機制與設備，充分運用周邊地區災害防救資源。
- (3) 培養員工迅速、確實之災害搶救技能。
- (4) 有效預防災害發生及減輕災害衍生之損失，確保人員生命及財務之安全。

- (5) 防救災系統應用於臺中港區實體通報與應變能力培訓。

- (6) 建構臺中港區各級事業單位使用防救災系統施行緊急應變通報與報告能力。

3.3 演練項目及地點

- (1) 火災避難逃生演練(港研中心)。
- (2) 水災避難逃生演練(港研中心)。
- (3) 臺中液化天然氣廠火警通報與應變系統演練(港研中心及臺中液化天然氣廠廠區)。
- (4) 臺中港區中小企業火警通報與應變系統演練(港研中心及宏全國際股份有限公司)。

3.4 實員演練流程及配製說明

- (1) 演練流程圖：如圖 10 所示。
- (2) 配製說明圖：如圖 11 所示。
- (3) 舞台區背板：如圖 12 所示。

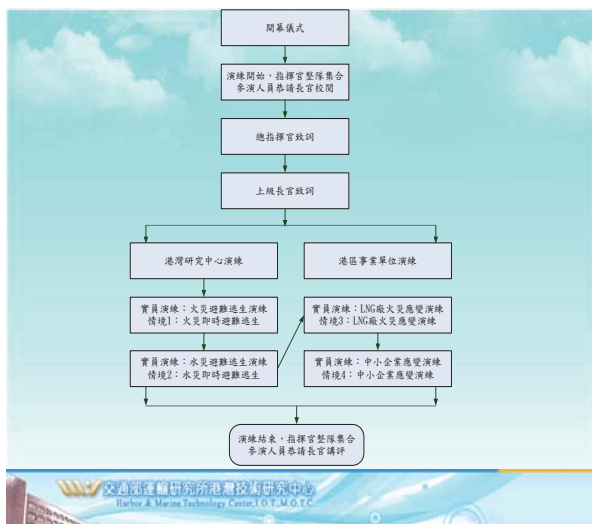


圖 10 演練流程

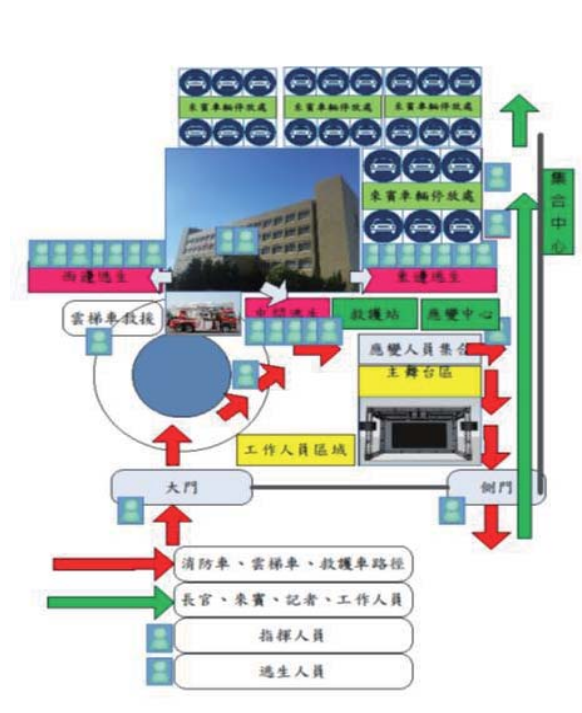


圖 11 配製說明



圖 12 舞台區背板

3.5 演練任務編組

本次防災演習之緊急應變小組共分為五班，緊急應變指揮官於成立緊急應變小組並依據緊急應變計畫使其各組應變工作啟動，其任務編組目的如下：

1. 疏散班：於各樓層及主要逃生口協助所有人員於適當逃生途徑逃生並且確保逃生中煙毒及跌傷危害。
2. 通報班：通報臺中港區消防隊火災狀況並請求消防員、消防車、救護車、雲梯車協助救災。
3. 滅火班：關斷室內總電源確保滅火人員無感電之危害後，啟動室內消防系統進行初期滅火。
4. 救護班：於室外冷區成立急救與救護，協助安撫與初階處理相關受傷人員受傷情況，並等待救護車抵達後協助傷患前往醫院治療。
5. 指揮班：於室外門口進行相關人車管制及救災人員與車輛進入指引並要求非相關人員禁止與災害區域內進行非相關救援行員。

3.6 實員演練重點說明

本次防災演習，演練開始由指揮官集合所有參演的人員進場。向統裁官邱主任報告本次演練項目內容及演練人數共計 80 人，隨後由統裁官校閱參演隊伍儀容及裝備（如圖 13）。參演的單位及人員分別為項目一及項目二：港灣技術研究中心及臺中港務消防隊；項目三：港灣技術研究中心及臺灣中油股份有限公司臺中液化天然氣廠；項目四：港灣技術研究中心及台中港區宏全國際股份有限公司。另演練項目三及項目四進行過程均現場即時錄影並上傳送

至港研中心舞台畫面上，展示給參與貴賓同步觀賞，並運用港研中心發展之「港區防救災系統」，依據現場發生災害事故情境，同步進行演練各階段之通報。演練重點說明如下：

演練項目一：演練開始組長集合其組員完畢，進場。向統裁官報告演練項目為火災避難逃生及演練人數共計 80 人。演練假設狀況重點說明：某日上班時刻，因二樓電腦機房電線迴路異常過熱導致火警，員工發現煙流快速竄升並發現有火源。火警發生時，幾名員工驚覺後立即大喊「失火了！」「失火了！」並隨即按下該樓層「消防通報系統警報扭」以通知各樓層及所有人員趕緊準備避難逃生。緊急應變指揮官立即成立緊急應變小組（如圖 14），並依據緊急應變計畫使其各組應變工作啟動，緊急應變指揮官於一樓消防受信總機廣播火警逃生訊息並要求緊急應變小組立即啟動各組應變任務，現場人員全數由緊急逃生樓梯進行避難逃生（避難逃生人員編成 3 隊。A 隊大樓東側：16 人；B 隊大樓中廊：17 人；C 隊大樓西側：5 人）如圖 15，除了有一名人員因逃生時不慎跌傷（如圖 16），及一名人員有吸入性嗆傷（如圖 17），由疏散班將二名人員協助送至救護站並由救護班照護後由消防隊救護車送往鄰近醫院進一步檢查（如圖 18），同時三樓露臺有二名人員受困等待救援，指揮官於集合區域確實針對所有人員進行逐一清點，同時並由臺中港區消防隊運用雲梯車進行三樓二名受困人員救護動作如圖（19）。本演練項目運用火災動力學模擬系統模擬港研中心研究大樓火警，以預測火警發

生後之相關煙流走向與人員疏散及演練相關位置，以提供撰寫緊急應變演練時參酌人員疏散方式與位置。



圖 13 統裁官校閱



圖 14 成立緊急應變小組



圖 15 火災避難逃生



圖 16 不慎跌傷人員



圖 17 吸入性嗆傷人員



圖 18 救護車送受傷人員至醫院



圖 19 雲梯車進行受困人員救護

演練項目二：演練開始組長集合其組員完畢，進場。向統裁官報告演練項目為水災避難逃生及演練人數共計 25 人(如圖 20)。演練假設狀況重點說明：台灣中部地區發生芮氏規模 7.0 以上之強烈地震。地震停止後且安全無疑下，一名電氣設備巡檢員進入研究中心地下一樓進行電氣設備安全巡檢，此時頂樓水塔及水管因強烈地震後，導致水管破裂且大量水體溢出由頂樓向地下一樓滲漏，快速導致地下一樓淹水一公尺高。現場目擊同仁發現地下一樓淹水且有一名人員受困，立即通報指揮官並且依據「水災緊急應變計畫」進行緊急應變。指揮官指揮由最接近水源源頭的樓層同仁儘速關斷水閥，並通知抽水設備負責同仁，立即於室外起動抽水馬達(如圖 21)，並且隨時確保抽水系統有效性。另指揮救護班立即施以受困者浮條並施以拋繩救援，並且由一組水肺系統救護人員待命，若受困者因異物無法動彈時，立即潛入水面設法解除障礙，並迅速將受困者救出，並視其身體狀況施以相關緊急救護或護送至轄區醫院觀察或救護。



圖 20 水災避難逃生及演練整隊



圖 21 抽水馬達起動抽水

演練項目三：共計 30 人參演，演練假設狀況重點說明：臺灣中油股份有限公司臺中液化天然氣廠（以下簡稱 LNG 廠）台中廠碼頭區台達號正在卸料時發生芮氏規模 8 級地震，震央位於福建泉州，儲槽地震偵測器啟動保護機制使全廠緊急停機，地震造成台中廠海管輸出中斷，永安廠受地震影響較小仍可繼續供氣，通報內湖大潭改由永安廠供氣。控制室接獲狀況報告，立刻指示應變工作：要求監控員全廠廣播 NG6 摻配設備計量站法蘭著火，請消防班人員到現場進行滅火救災工作。監控員並報告安管中心、聯絡消防人員、救護班、保全隊、供應班及搶修班，請求派員支援。並引導現場承包商工作人員撤離。控制室執勤同仁接獲通報(1)立即啟動港研中心防救災系統，如圖 22 (2) 災況位置與狀況點選(3)系統作業進行現場通報與災情建立(4)災情更新並將即時畫面上傳。(5)災後復原並由公司執勤，LNG 廠同仁運用港研中心防救災系統進行災後結案及紀錄作業。

演練項目目四：共計 15 人參演，演練假設狀況重點說明：宏全國際股份

有限公司宏全無菌二廠人員於運用資源類廢棄物到廢棄物暫存區時，發現廢棄物處理區中有不明火苗竄出。發現人員情急之下，立即奔跑拿取周邊滅火器欲滅火，但當中不慎造成腳踝扭傷。受傷人員大聲呼救，請求周邊進行倉儲作業同仁協助。倉儲同仁發現有人員呼救，立即前往探視；經發現有火警及人員受傷，立即通報該廠主管。主管立即通報啟動廠內緊急應變小組，指揮官接到訊息後，立即通知各班班長，帶領成員前往廢棄物處理區旁集結。通報班同仁接獲通報 (1)立即啟動港研中心防救災系統(2) 災況位置與狀況點選(3)系統作業進行現場通報與災情建立，如圖 23 (4)災情更新並將即時畫面上傳。(5)災後復原，並運用港研中心防救災系統進行災後結案及紀錄作業。



圖 22 啟動港研中心防災系統



圖 23 現場通報與災情建立

四、結語

港區防救災系統參與港研中心 105 年防災演習工作，成果說明如下：

- (1) 本次防災演習邀請觀摩的單位，計有交通部交通動員委員會、交通部航港局、交通部航港局中部航務中心、臺灣港務股份有限公司、臺灣港務股份有限公司高雄港務分公司、臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司、臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司、臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司、內政部消防署臺中港務消防隊、台灣中油股份有限公司天然氣事業部台中液化天然氣廠、宏全國際股份有限公司、漁業廣播電台等共計 12 個單位參加。
- (2) 本系統可應用於臺中港務分公司、港區事業單位及港區消防相關單位，主要協助於天然災害及人為災害發生時，運用系統快速點選、方便地傳達災害相關訊息給應變指揮中心或各級長官瞭解，並就災情狀況加以指示。
- (3) 本系統提供防救災相關資源，包括：重要道路、消防單位、消防栓、醫療運送路線、醫療據點、避難路線、避難空間、毒化災洩漏模擬及爆炸潛勢等資源，相關使用單位之防災人員可依據需求，查詢防救災資源以達到減災、降災、與防災三大目標。
- (4) 本系統可應用多向度通報方法，其中包含：簡訊通報、語音通報、傳真通報等方式，於同一個系統介面即可多方通報，能縮短防救災人員通報時間與繁瑣業務，且能瞭解接受端是否有接到相關通報訊息及可登載歷史通報紀錄。
- (5) 本系統能於緊急情況或無電力供應階段連接雲端系統，亦能發揮通報之功效，並能解決災害事故相對位置點選的誤差，顯示防救災系統可調式設計的優點。
- (6) 本系統能將災況結案及記錄可供日後港務總公司及其各分公司、港區消防單位等機關針對事故調查、災因分析、災房設備佈署、防救災佈署等問題詳加統計與分析，並可劃分危害區域與風險區域分析。
- (7) 未來本系統應用上，必需先執行教育訓練，能讓使用單位之防災人員清楚瞭解防救災系統操作步驟、應用的時機、責任等，方可使通報過程中減少錯誤的通報、決策、判斷。
- (8) 透過本次防救災系統參與港研中心 105 年防災演習工作，驗證港區防救災系統可輔助臺中港港務分公司及港區各事業單位進行災害事故通報與災害應變中心災情分析與管理之用。

參考文獻

1. 邱永芳、謝明志、曾文傑、紀雲曜、黃敏郎、葉永信、林文釵(2009)，「港區防救災體系建置之研究(1/2)」，交通部運輸研究所。
2. 邱永芳、謝明志、曾文傑、紀雲曜、黃敏郎、蔡宗在、林文釵、陳谷君(2013)，「港區防救災網路地理資訊系統擴建及整合研究」，交通部運輸研究所。
3. 吳勝宏，職業安全與衛生，普林斯頓國際有限公司，ISBN: 978-9866534638。
4. 曾文傑、邱永芳、謝明志、吳勝宏(2015)，「港灣地區防救災系統整合及應用可行性研究」，交通部運輸研究所。
5. 曾文傑、邱永芳、謝明志、吳勝宏，「臺中港地區防救災系統整合及應用」，港灣報導 103 期，105 年 2 月。

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 臺中縣梧棲鎮中橫十路 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

ISSN 1019-2603



9 771019 260006

GPN 2007700020

定價 100 元