地理資訊系統應用於港區溢淹災害潛勢圖

陳冠宇 國立中山大學海洋科學系教授

劉俊志 國立中山大學海洋科學系研究助理

張義偉 國立中山大學資訊管理系博士生

一、前言

2004 年南亞海嘯與 2011 年東日本 311 海嘯都造成重大傷亡;為有效減少 這樣的災害造成之傷亡,我們發展一 個具實用性,可在海嘯發生初期即快 速計算出到達時間及波高之海嘯預報 與速算系統。惟目前的預報系統只提 供外海波高,未能提供港內可能的受 災狀況,故各港務分公司不知如何應 變。若能結合視覺化之防災溢淹潛勢 圖(Inundation Map)並與地理資訊系統 之圖資一起展現,則不論一般民眾或 是主管機關都能快速掌握港內受災狀 況,大幅降低災害之威脅。

本研究延續先前建構之海嘯預 報系統,自動撷取美國地質調查所 (United States Geological Survey)網站 來更新地震資料,再自動進行海嘯模 擬。發展淹水潛勢預報系統,提供溢 淹潛勢圖並結合 Google Earth 地理資 訊系統之圖資,以建立 Google Earth 地理資訊系統圖資之視窗化操作介面, 作為海嘯警報發布時各港務分公司之 應變參考。

二、溢淹潛勢圖之必要性

海嘯所造成之災害不同於其他天 然災害,由於海嘯是整個水體被帶動 且波長甚長,故能攜帶之水體通常會 造成大範圍之溢淹,以2004年南亞 海嘯東斯里蘭卡為例,可造成長度約 2.5km 之溢淹; 薩摩亞海嘯也有此一現 象產生。後續衍生之衛生、心理及重 建問題亦是甚為棘手之問題。其次是 海嘯波引致之水流速度,2011年3月 11日東日本海嘯事件中,由現場實況 及事後調查報告均顯示即使海嘯波已 經造成溢淹,其殘餘水流速度仍足夠 衝垮目前現有之結構物。因為海嘯具 有強大破壞性,故自南亞海嘯之後, 印度洋周邊國家開始建立區域性海嘯 預警系統;美日兩國也加強與周邊國 家之資訊交流,但在薩摩亞海嘯事件

中證明現有之海嘯預警系統/流程對於 近域海嘯幾乎無事先預警之功能。日 本先前所建立之海嘯預警系統及應變 措施在這次的海嘯事件中有發揮其功 效,有效降低傷亡之人數。自2004年 南亞海嘯事件後,至2015年12月為 止,較具規模之海嘯事件共十起,如 表1所示。

表1 2004~2015年間重大海嘯事件

資料來源	:	美國 NGDC/WDS 之 Global
		Historical Tsunami Database

Date (Earthquake Magnitude)	Country	Name	Max. wave height (m)	Death
2004/12/26 (9.1)	Indonesia	Sumatra	50.9	226,898
2005/3/28 (8.7)	Indonesia	Indonesia	3	10
2006/7/17 (7.7)	Indonesia	Java	10	802
2007/4/1 (8.1)	Solomon	Solomon	12.1	52
2007/4/21 (6.2)	Chile	Chile	7.6	10
2009/9/29 (8.0)	Samoa	Samoa	22.35	192
2010/2/27 (8.8)	Chile	Chile	29	156
2010/10/25 (7.8)	Indonesia	Sumatra	7	431
2011/3/11 (9.0)	Japan	Honshu	38.9	15,854
2013/2/6 (8.0)	Solomon	Solomon Islands		10
2014/4/1 (8.2)	Chile	Chile	4.40	6
2015/9/16 (8.3)	Chile	Chile	4.70	8

以表1發現,同為智利2010及 2015 地震所引發的海嘯,2015 年災害 所造成的死亡人數遠遠小於2010年的 災害死亡人數,所以有良好的預警系 統是可以有效的減少災害的傷亡。

三、研究方法

海嘯溢淹模擬最佳之方式就是確 切得知發生一已知之震源或是一組斷 層參數,得知初始水位高度後據以模 擬海嘯之溢淹行為及特性。但實務上, 上述之方法有其困難度:

- (1)首先是震源位址,目前並無法準測 事先預測地震之發生;其次,斷層 破裂的錯動也多不均匀。
- (2)另一方面,目前也無法確知各個可 能震源點所能產生之最大地震矩 規模。

由以上兩點可知,在許多必要條 件均缺乏之情況下進行海嘯於近岸地 區之數值模擬是相當不便的,加以防 災需求宜作較為保守之推估;因此, 利用單一波形及情境模擬方式來進行 溢淹模擬除了可獲得較為保守之結果 外,更可匯集成一資料庫,在實際海 嘯事件發生時,得知外海波高後, 即可知對應可能之海嘯資訊。採以 COMCOT模式模擬高斯波入射溢淹區 域,紀錄模擬期間內每個空間點所發 生的最大水位高度來當作溢淹高度。 其溢淹高度為進水水位高度減原地形 高度。藉由數值模式進行影響範圍之 潛勢分析將有助了解各港區之警戒範 圍。溢淹潛勢圖可分為實體圖與電子 圖;前者不易臨時改變,後者則可依 需要增減或局部改變所呈現的圖資。

3-1 海嘯速報系統及海嘯預警系統

由於海嘯預警系統建置所需成本 高昂,其所量測之訊號也需進一步判 讀,且須包含通報程序及系統;依此 定義而言,本研究所開發之系統是一 種「海嘯速報系統/預報系統」,其 主要目的在於在海嘯發生初期即利用 歷史參數或是即時地震參數計算各港 口對應可能水位變化及到達時間,而 後將資訊彙整至權責單位憑以進行後 續程序;其優勢為在有限之成本及時 效,可得出實用性甚高之海嘯初期評 估資料。

3-2 海嘯數值模式

本計畫採用美國康乃爾大學土木 與環境工程學系團隊發展出的 COrnell Multigrid COupled Tsunami model (COMCOT)模式作為主要模擬工具(陳 等,2011;陳等,2012)。模式經過智 利海嘯、花蓮海嘯以及南亞海嘯之實 例驗證,其研究成果也常發表於國內 外知名期刊,該模式也為國內其他相 關學術單位所使用。而 COMCOT 模 式之基本理論是淺水方程組(shallow water equations),由康乃爾大學劉立 方教授領導建立(Liu 等人, 1998),至 今已進行多次改版。我們研究團隊前 期採用 COMCOT 1.7 版為基礎,加入 OpenMP 平行運算語法,檔案輸出由 文字檔更動為 nc 檔 (netcdf) (陳與陳, 2012;陳等,2013;陳,2013)。

3-3 地形資料

(1) 海域地形

海域地形主要是採用海科中 心網格間距為500公尺之水深資料 (TaiDBMV6),如圖1;除了TaiDBMV6 外,港區之水深亦採用港研中心所 提供之船测資料加以校正。陸域地 形資料是由內政部地政司所提供之 5m×5m之DSM 數值地形資料,其中 平面坐標採內政部 1997 臺灣大地基 準 (TWD97),高程坐標採內政部 2001 臺灣高程基準(TWVD2001)。即是定 義在1990年1月1日標準大氣環境 下,並採用基隆潮位站(基隆平均海 水面)1957年至1991年之潮汐資料化 算而得,即為中潮系統。每一網格點 是一組 E、N、H 三個坐標值,組成 右旋坐標系的三個 X、Y、Z 坐標 (如 250000 2670000 123.0,坐標之間以一 空格隔開); 無法測製區及湖泊、水 庫等水體區則以影像當時邊界線高 測 製。無法測製區及水體區則依地形特 徵資 檔格式加測並儲存記 邊界線。海 域水體部分以海岸線及圖幅邊界組成 邊界線。

(2) 陸域地形 DEM 及 DSM

本研究為考量DSM 數值地形資 料,於港區的貨櫃容易被誤判成建築, 另以陸域地形資料是由內政部地政司 所提供之 5m×5m 之 DEM 數值地形資 料,無建物之地形資料來模擬,以代 表所有建築物被一掃而空之最糟情況。 其中 DSM(Digital Surface Model) 則指 的是地表上所有地物,包含人工構造 物或自然森林或人工作物覆蓋地面的 高程, DEM (Digital Elevation Model) 經由大量自動與人工的植生濾除過程 以得到原始地表高程。陸域地形需轉 成經緯度座標。5m×5m 數值地形資料 之測繪在實務上實屬不易,雖然無法 表示局部地區之建物構造特色與實際 情況,但是此一解析度已可做為溢淹 圖資之用,以安平港為例,圖2為安 平港之陸域數值地形。由於兩者解析 度不同,在無其他較為精細海底地形 之來源時,將海域地形以內插之方式 製作成與陸域地形資料相同解析度之 數值地形。圖3為海陸域整合後之數 值地形檔。並將港研中心所提供之港 內實測地形資料整併至數值地形圖 4。 各港均以此方法建構其模擬用之數值 地形。





圖 1 臺灣 500m 解析度水深地形資料

圖 2 安平港 5m 解析度數值地形檔



圖 3 安平港整合海陸域之數值地形檔



圖 4 安平港整併港內實際地形之數 值地形檔

3-4 安平港之模擬結果

本研究使用 COMCOT 溢淹模式, 以不同波高之高斯波模擬海嘯波垂直 岸線入射(0.5m~10m);海嘯波為長週 期之重力波,一般週期約為15~30分 鐘,其所攜帶之水量遠大於季風所引 起之短週期風浪,而孤立波之高度及 寬度有一固定關係,本研究所稱之高 斯波為說明其週期與波高的不同而定 義,採用之週期為約20分鐘,以安平 港為例,海嘯波模擬採用之週期為約 20 分鐘,圖5為波高4m週期約20分 鐘之高斯波,以此波形在模式地形邊 界上入射,模擬此情境下陸地之溢淹 狀況;研究所設定之海嘯潛勢波源區 為整個環太平洋地震帶,圖 6(a),(b)z 分別為安平港入射 0.5 公尺高斯波及 2 公尺高斯波之溢淹潛勢圖。



週期 20 分鐘波高 4m 高斯波 圖 5



圖 6(a)

安平港入射 0.5m 之溢淹潛勢圖



安平港入射 2m 之溢淹潛勢圖 圖 6(b)

3-5 地理資訊系統

前期研究所建構之預報系統只提 供外海波高,未能提供港內可能的受 災狀況,本研究將結合前節所呈現之 視覺化之防災溢淹潛勢圖 (Inundation Map) 並整合地理資訊系統之圖資一 起展現,以建立 Google Earth 地理資 訊系統圖資之視窗化操作介面,其方 法將每一網格水位的高度已製做成溢 淹的範圍並顯示水位高度(圖7),藉 此將所計算出來的水位資料疊加原始 的地形資料, 並轉將其經緯度座標轉 换成地理資訊系統座標,與地理資訊 系 統 (Geographic Information System, GIS) 相結合(圖8), 配合各種圖層(圖 9),依照每個溢淹潛勢圖的功能,以 最一目了然的方式呈現。各地理資訊 系統中尤其以 Google Earth 最方便經 濟,系統使用者可直接於網 上下載使 用應用軟體,同時可以免除建立基本 圖層及 位資 之困擾,其強大之多圖層 功能可應用於防災圖資之建立,做為 溢淹潛勢圖的展示平臺,因此海嘯速 報系統將可輸出 Google Earth 圖資地 形用之 kmz 檔。圖 10(a)(b) 為安平港 之DSM 地形數值模擬結果,圖11(a)(b) 為安平港之 DEM 地形數值模擬結果。



圖 7 溢淹潛勢圖 (實體圖)



圖 8 溢淹潛勢圖 (電子圖)



圖 9 Google Earth 圖層



圖 10(a) 安平港結合 Google Earth 之溢 淹圖 (DSM),入射波高 0.5 公尺



圖 10(b) 安平港結合 Google Earth 之溢 淹圖 (DSM),入射波高 2 公尺



圖 11(a) 安平港結合 Google Earth 之溢 淹圖 (DEM),入射波高 0.5 公尺



圖 11(b) 安平港結合 Google Earth 之溢 淹圖 (DEM),入射波高 2 公尺

3-5 G-R 關係式

當一般區域震源可用指數規模分 佈模式來表示,而此模式中之地震規 模與再現頻率關係式 (Gutenberg and Richter, 1944),稱為 G-R 關係式,其 形式為:

$$\log(N) = a - bM \tag{1}$$

G-R 關係式中,b 值是地震危害分 析中一個極為重要的參數,其表示地 震在某一地震規模內的大地震與小地 震間的比例關係。b 值隨著研究區域內 的地質分佈、構造、地溫與應力…等 條件的不同而有所變化。此一回歸分 析法,即是在一區域內對於地震規模 \geq Mb(設定之地震下限)而言的,式 中 M 代表地震矩規模,並依小而大之 順序排列,式中之 N 表示規模大於或 是等於 M 之次數,在本研究中地震矩 規模 M 的區 間為 4.25、4.75、5.25、 5.75、6.25、6.75、7.25、7.75、8.25、 8.75、9.25 取各區間內累計數即為N, 而a、b則為線性迴歸係數。以日本東 側東經133 到139度,北緯34 到36 度為例,圖12 藍點為各地震矩累計次 數,35 年為過去地震次數記錄的時間 長度,將此回歸線上各點除以統計年 時間長度35 乘上評估年時間長度50、 100 再轉換回 G-R 關係式,則可得到 圖5 上未來50 年及未來100 年的回歸 係數與回歸線,紅點線(50 年)及錄點 線(100 年),此回歸線為評估未來50 年及未來100 年,可能發生之累計次 數,進而可得到各地震矩規模區間的 可能發生次數,如表2 所示。

表 2 各地震規模區間未來預估可能 發生之次數值

Mw	6.5	7	7.5	8	8.5	9
50年	4.0552	1.1116	0.3047	0.0835	0.0228	0.0062
100年	8.1099	2.2231	0.6094	0.1670	0.0457	0.0125



圖 13 高雄港 DSM 地形的溢淹範圍



圖 12 G-R 關係式之計算範例(東經 113 到 139 度,北緯 34 到 36 度)

以高雄港為例,當馬尼拉海溝北 段東經120.75度,北緯20.96度的位 置發生地震矩規模8.0的地震時,於高 雄港外海造成約1.5公尺的海嘯波高。 由美國地質調查所1973至2010年期 間的地震資料求得的G-R 關係式可知 每個地震規模所對應的再現頻率。當 地規模8.0的地震在100年間的期望次



圖 14 高雄港 DEM 地形的溢淹範圍

數約0.04,即每2500年發生1次規模 8.0以上的地震。圖13及圖14各為1.5 公尺海嘯波高在DSM和DEM地形下 所造成的溢淹範圍(由海嘯模式分別 模擬1和2公尺高斯波形入射,再利 用兩者的結果作溢淹水位的空間線性 內插)。

四、結果

整合先前研究所建構之海嘯波高 資料庫,提高海嘯計算之效率,在遠/ 近域海嘯發生後,能夠快速掌握可能 之最大波高以及到達時間,本研究也 應用地理資訊系統整合溢淹潛勢圖, 使能在 Google Earth 讀取,標註主要 道、醫院、學校等重要地點供防災應 變之用,提供給各港務(分)公司作為 後續應變之作為之參考,並將各個港 口之資料庫整合在單一操作界面如圖 15,其預警系統主要流程如圖16所示。





圖 16 海嘯速報系統流程圖

以安平港之溢淹圖顯示,地形採 用 DSM 之數值地形,入射波若大於 2 公尺,對安平港超過1公尺的溢淹; 地形採用 DEM 之數值地形,入射波若 大於1公尺,對安平港有超過1公尺 的溢淹,因 DEM 數值地形資料,是無 建物之地形資料,此溢淹圖代表所有 建築物被一掃而空之最糟情況。若透 過 Google Earth 地理資訊系統的圖資, 可以提供給各港務(分)公司相關溢淹 的資訊,進一步可由相關的地理資訊 圖資作支援決策。

五、結論

本研究以海嘯模擬技術為主軸, 整合相關研究計畫之成果,海嘯資料 蒐集、海嘯數值模式實例探討及海嘯 溢淹模擬,結合視覺化之防災溢淹潛 勢圖(Inundation Map)並整合地理資訊 系統之圖資以展現溢淹模擬,以建立 Google Earth 地理資訊系統圖資之視 窗化操作介面,可透過原有的海嘯速 報系統介面輸出 Google Earth 地理資 訊系統之 kml 檔,分別實際應用於評 估臺中、布袋、安平、高雄等主要商 港。使主管機關都能快速掌握港內受 災狀況,大幅降低災害之威脅,也作 為海嘯警報發布時各港務分公司之應 變參考。

參考文獻

- 陳冠宇 (2013) 海嘯預警與溢淹潛 勢圖數值模擬之回顧與探討,海洋 工程學刊,第13卷,第1期,第 69-91頁。
- 陳冠宇、陳陽、邱永芳、蘇青和、 單誠基(2011),「臺灣沿岸海嘯影 響範圍與淹水潛勢分析(4/4)」, 交通部運輸研究所港灣技術研究 中心。
- 陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青 和、單誠基、李俊穎(2012),「提 昇海岸及港灣海嘯模擬技術之研究 (1/4)」,交通部運輸研究所港灣技 術研究中心。
- 4. 美國 NGDC 資料庫 http://www.ngdc. noaa.gov/hazard/hazards.shtml.
- 美國地調所 USGS 國家地震訊息中 心 NEIC 資料庫 http://earthquake.usgs. gov/regional/neic/.
- 6. Chen, G. Y. and C. C. Liu (2009),

"Evaluating the Location of Tsunami Sensors: Methodology and Application to the Northeast Coast of Taiwan", Terr. Atmos. Ocean. Sci., 20(4), pp.563-571.

- Chen, G. Y., C. C. Liu and C. H. Lin (2011), "Probabilistic Forecast of Tsunami Inundation (PFTI) and Earthquake-induced Tsunami Inundation Probability (ETIP) – Algorithm and Application to the Southwest Coast of Taiwan", Tsunami Simulation for Impact Assessment, pp.74-83.
- Chen, G. Y., C. H. Lin and C. C. Liu(2012), "Quick Evaluation of Runup Height and Inundation Area for Early Warning of Tsunami", Journal of Earthquake and Tsunami, 6(1), 1250005, pp. 1-23.
- Chen, G. Y., Y. F. Chiu, J. H. Lin, C. C. Lin, Y. W. Chang and C. J. Lien (2014), "Combining Tsunami Hazard and Vulnerability on the Assessment of Tsunami Inundation Probability in Taiwan", Journal of Earthquake and Tsunami, 8(3), 1440003 [23 pages]
- Chen, G. Y., C. C. Liu, and C. C. Yao, (2015), "Forecast System for Offshore Water Surface Elevation With Inundation Map Integrated

for Tsunami Early Warning", IEEE Journal of Oceanic Engineering, 40(1), pp. 37-47.

- Gusiakov, V. K.(2005), "Tsunami generation potential of different tsunamigenic regions in the Pacific", Marine Geology, 215, pp.3-9.
- 12. Gutenberg, B. and C. F. Richter (1944), "Frequency of earthquake in California", Bulletin of the Seismological Society of America, 34, pp.185-188.
- 13. National Geophysical Data Center / World Data Service(NGDC/WDS): Global Historical Tsunami Database. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5PN93H7
- 14. Wang, X. M. and P. L.-F., Liu, Cornell Multigrid Coupled Tsunami model COMCOT)User Manual, Cornell University, 2007.