

海堤區域越波溢堤預測技術之發展

張育誠¹ 邱啓敏¹ 黃清哲^{1,2} 林俊遠² 簡昭群³
馬家驊³ 王仲豪³

¹ 國立成功大學水利及海洋工程學系

² 國立成功大學近海水文中心

³ 經濟部水利署水文技術組

摘要

本研究開發一套海堤區域預越波溢堤預警系統，應用作業化數值波浪模式與美國陸軍工兵團 (U.S. Army Corps of Engineers, USACE) 所制定之海岸工程手冊 (CEM) 設計準則，預估颱風期間波浪於近岸海堤地區發生之最大溯升高與平均越波量。為檢視溯升預估結果之正確性，本研究同時在臺南市曾文海埔地海堤，建置一套堤面波浪溯升即時量測系統，記錄 2014 年海鷗及鳳凰颱風期間堤面溯升之演變資料，分析最大溯升高，提供經驗公式進行比對與校驗。另外，本研究之數值波潮模式引進交通部中央氣象局 (CWB)、日本氣象廳 (JMA)、及美國國家環境預報中心 (NECP) 等國際氣象單位公布之風場及氣壓場，將產出波浪溯升高導入系集預報 (Ensemble Forecasting) 進行統計計算，可提昇海堤區域預越波溢堤預測之準確性。

關鍵詞：海堤、波浪溯升、越波、經驗公式、系集預報

Innovative of Technologies for Prediction Wave Runup and Overtopping on the Seawall

Yu-Chen Chang Chi-Min Chiu Ching-Jer Huang* Chun-Yuan Lin Chao-Chun Chien
Jia-Lin Ma Zhong-Hao Wang

*Professor, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University
Director, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

ABSTRACT

This work developed an early warning system for predicting wave runup and overtopping on a seawall during typhoon period. The numerical ocean and wave models were applied to predict water levels and the waves, respectively. The wave runup empirical formula (U.S. Army Corps of Engineers, USACE) was used to estimate the maximum wave runup and the mean overtopping discharge, based on the predicted water level and wave height. A real-time wave runup monitoring system was developed and deployed on the Zeng-Wen seawall, locates at the southwest coast of Taiwan, for recording the wave runup during the KALMAEGI and FUNG-WONG typhoons in 2014. The predicted maximum wave runups during the typhoons agree quite well with those obtained using the method of ensemble forecasting.

Keywords: Seawall; Wave runup; Overtopping; Empirical formula; Ensemble Forecasting

一、前言

海岸地區中，海堤前方水域是海岸地區溢淹預

警與防治的關鍵區域。臺灣每逢夏季常遭遇颱風侵襲，近年來受全球氣候變遷影響，侵臺颱風期間造成的波浪有逐年增大之趨勢 (行政院經濟建設委員

會，2012)。侵臺颱風於近岸海域常造成極端的波浪，也導致臺灣西岸海堤有波浪越波溢堤的風險。沿岸海堤於極端颱風事件的侵襲下，其颱風波浪於海堤堤面溯升的高度是大家一直想瞭解與探討的部份。目前波浪溯升預測皆參考美國陸軍兵工團海岸工程手冊的經驗公式計算，限於近岸堤前水深地形資料不易量測及取得，所以無法得到最佳的經驗公式參數。

颱風波浪溯升越波的研究包括現場量測、由實驗得出的經驗公式、及數值模式等，而本研究結合現場量測與經驗公式來作預測。在現場量測方面，De Rouck et al. (2007) 在比利時 Zeebrugge 拋石防波堤上，曾利用大型吊臂架設往離岸方向分佈的波高計，將實際測得波浪溯升高度，提供予經驗公式作為參數率定與驗證。在經驗公式方面，De Wall and van der Meer (1992) 在丹麥水工試驗所研究波浪於不同海堤結構物溯升的物理現象，研究條件為海堤坡度介於 1:1.5 ~ 1:8，有考慮光滑混凝土及拋石糙度堤面的複合式平台，針對不同波浪條件與海堤形式進行一系列的研究，建立波浪於堤面溯升經驗公式，其中複合式海堤可提供許多實際海岸建置海堤之參考。van der Meer (1998) 在荷蘭海岸設計海堤，針對海堤不同的形式與高度，建立波浪於堤面上溯升與平均越波量的經驗公式，並整理出堤面糙度對溯升高的影響，亦受到廣泛的應用。

本研究發展之海堤堤面溯升量測技術，整合佈置於海堤堤面之導電度計及壓力計，可紀錄颱風期間堤面水位高程與波壓變化。透過海堤堤面實際量測，可評估海岸工程設計標準及應用於臺灣特定重點地區之溯升、越波量的適用性。此外，本研究亦應用作業化數值波潮模式以及美國陸軍兵工團 (U.S. Army Corps of Engineers, USACE) 所制定之海岸工程手冊 (CEM) 設計準則，推估颱風波浪於近岸海堤地區發生之最大溯升高度與平均越波量。

然而，颱風氣象結構複雜，因此模擬風場及氣壓場的正確預測有其不確定性，將間接影響溯升經驗公式推估海堤波浪溯升之正確性。為增加海岸防災預警的準確性及實用性，本研究之作業化數值波潮模式，引進交通部中央氣象局 (CWB)、日本氣象廳 (JMA) 及美國國家環境預報中心 (NCEP) 等國際氣象單位公布之風場、氣壓場條件，產出海堤波

浪溯升高度，將最大溯升高度預估結果導入系集統計概念，以提昇波浪溯升越波預測之準確性。

二、理論分析

本研究發展一套波浪溯升即時量測與預測系統，此系統在量測部份發展一套堤面溯升即時量測系統，而在預測部份則應用美國陸軍兵工團的溯升經驗公式，其方法說明如下。

2.1 堤面溯升即時量測系統

颱風期間，波浪溯升是評估颱風波浪造成海岸結構物損壞、堤腳掏刷、越堤溢淹等災害之重要指標之一，為海堤高度設計及海岸暴潮預測之重要依據。建置堤面波浪溯升即時量測系統，可量測颱風事件之海堤堤面溯升與波壓演變資料，並提供於驗證相關溯升經驗公式或數值模式的準確性。

堤面波浪溯升即時量測系統乃由 5 組高精度導電度計與壓力計共組成，搭配資料即時傳輸與紀錄系統。圖 1 為堤面波浪溯升即時量測系統裝置圖，由圖中可知，曾文海埔地海堤高程為 5.0 m，堤前有拋石，而每組儀器 (壓力計與導電度計) 沿海堤堤面進行佈置，各組儀器高程間距為 0.55 m。堤後有資料即時傳輸及紀錄系統，透過 GPRS (General Packet Radio Service) 可將溯升量測資料即時傳輸至控制中心，同時也將紀錄資料儲存於 Data Logger 以保全颱風期間的資料。

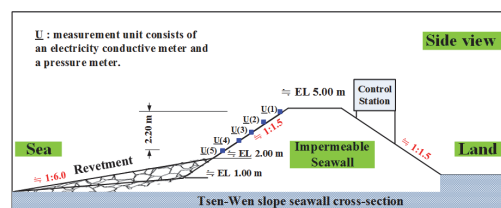


圖 1 堤面溯升即時量測系統

本系統採用導電度計量測波浪於堤面溯升演變情況，主要是颱風期間會伴隨暴雨，而導電度計能區分海水與淡水之差異，以取得實際波浪於堤面溯升的演變資料。另外，壓力計可記錄颱風波浪對海堤堤面所造成之壓力變化，以進一步瞭解波壓對海堤之影響。

曾文海埔地海堤 (如圖 2) 屬於斜坡式海堤，亦即波浪於海堤上造成的波壓屬於波浪到達堤趾前即已破碎所造成之波壓，故到達堤面的壓力峰值會較

垂直防波堤較小 (Kortenhaus & Oumeraci, 1998)。關於壓力峰值詳細說明請參考邱等 (2014)。

Kirkgöz (1991 & 1995) 經由實驗顯示，較緩之堤面坡度，其波壓峰值近似於靜水壓，可用下式表示：

$$P_s / \gamma = K\eta - y \quad (1)$$

式中 $\gamma = \rho g$ ：流體的單位體積重量， η ：發生最大衝擊壓力水位高度， y ：靜水位高度， K ：動壓係數 (0.8 ~ 2.0)，最大壓力約出現於靜水位， $y = 0$ ， $K = 2.0$ ，式 (1) 則可改寫如下式：

$$P_s / \gamma = 2\eta \Rightarrow P_s = 2\rho g\eta \quad (2)$$

曾文海埔地海堤堤前海底底床坡度約 1:500，屬於非常緩之坡度，波浪在外海區域已陸續發生碎波，到達堤前波浪能量已大量耗損，可依據式 (2) 計算之最大波壓為靜水壓的 2 倍。曾文海埔地海堤堤頂高程為 5.0 m，2 倍靜水壓高度約 10.0 m (靜水壓力約為 14.5 psi)，本研究設計容許壓力計可量測三倍的靜水壓 (量測範圍為 0 ~ 20 psi)，進行量測颱風期間波壓於海堤上變化的情況。

2.2 經驗公式

本研究依據實驗室溯升經驗公式，考慮歷史颱風波浪觀測資料極值，估算不同海堤坡度對應的最大溯升高度，用以制定海堤建議高度。而各國海岸工程設計標準，如美國海岸工程手冊 (Costal Engineering Manual, 簡稱 CEM)、歐盟越波手冊 (European Overtopping Manual, 2007, 簡稱 EurOtop) 以及荷蘭洪水防禦技術諮詢委員會報告 (Technical Advisory Committee for Flood Defence in the Netherlands, 2002, 簡稱 TAW) 等，乃基於實驗室不規則波浪於複合式斜坡斷面上溯升之量測結果，透過統計分析，歸納出超越機率 (2%) 對應的溯升高度與平均越波量。本研究採用國際上較常應用的美國海岸工程手冊之溯升經驗公式進行參數率定。

根據 Van der Meer 與 Stam (1992) 分析不規則波於光滑堤面上溯升的實驗研究中分析指出，波浪溯升高可以示性波高及碎波相似參數 (breaker parameter) 表示為：

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = 1.5 \cdot \xi_p \quad \text{with a maximum of 3.0} \quad (3)$$

式中， $R_{u2\%}$ 為不規則波最大溯升高記錄中，排序前 2% 大之溯升高度， H_s 為堤址處的示性波高。

ξ_p 為不規則波之碎波相似參數，定義為：

$$\xi_p = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_p}} \quad (4)$$

當中， $\tan \alpha$ 為堤面坡度。 s_p 為波浪尖銳度 (wave steepness)，定義為：

$$s_p = \frac{H_s}{L_p} = \frac{2\pi H_s}{g T_p^2} \quad (5)$$

T_p 為不規則波浪頻譜 (wave spectrum) 極大值對應之週期，與平均週期 T_m 存在 $T_p/T_m = 1.1-1.2$ 的關係式。

De Waal 與 Van der Meer (1992) 延伸 Van der Meer 與 Stam (1992) 的溯升實驗研究，提出波浪溯升高 $R_{u2\%}$ 的修正式，適用於具粗糙度的複合式堤面，並為美國海岸工程手冊 (CEM) 所採用：

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = \begin{cases} 1.5 \cdot \xi_p \cdot \gamma_\gamma \cdot \gamma_b \cdot \gamma_h \cdot \gamma_\beta & \text{for } 0.5 < \xi_{eq} < 2 \\ 3.0 \cdot \gamma_\gamma \cdot \gamma_b \cdot \gamma_h \cdot \gamma_\beta & \text{for } \xi_{eq} \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

估算平均越波量則參考 van der Meer and Janssen (1995) 實驗研究的結果：

當 $\xi_p < 2$ 時：

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.06 \sqrt{\frac{\tan \alpha}{s_p}} \exp\left(-5.2 \frac{R_c}{H_s} \frac{\sqrt{s_p}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma_\gamma \cdot \gamma_b \cdot \gamma_h \cdot \gamma_\beta}\right) \quad (7)$$

適用範圍：

$$0.3 < \frac{R_c}{H_s} \frac{\sqrt{s_p}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma_\gamma \cdot \gamma_b \cdot \gamma_h \cdot \gamma_\beta} < 2 \quad (8)$$

當 $\xi_p \geq 2$ 時：

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.2 \cdot \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_\gamma \cdot \gamma_b \cdot \gamma_h \cdot \gamma_\beta}\right) \quad (9)$$

式中 ξ_{eq} ，為考慮複合式堤面平均坡度的碎波相似參數。 γ_γ 為堤面糙度影響因子， γ_b 為平台影響因子， γ_h 為淺化影響因子， γ_β 波浪斜向入射影響因子。 q 為單位寬度平均越波量 (單位：cms/m)， R_c 為堤頂出水高。為適切反應實際海堤斷面糙度，本研究參考 TAW (2002)，權重拋石與光滑堤面影響長度，用以決定堤面糙度影響因子 γ_γ ：

$$\gamma_\gamma = \frac{\sum_i \gamma_i L_i}{\sum_i L_i} \quad (10)$$

其中， γ_i 為各斷面糙度，其對應影響長度則為 L_i 。計算影響長度 L_i 需先假定複合斷面為光滑堤面，計算其可能之溯升範圍後，始決定溯升過程中各堤面糙度之影響長度，詳閱 TAW (2002)。

為考慮堤址前示性波高到達堤趾時的淺化效應，淺化影響因子 γ_h 定義為：

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_h = 1 - 0.03 \left(4 - \frac{h}{H_s} \right)^2 \quad \text{for } 1 \leq \frac{h}{H_s} < 4 \\ \gamma_h = 1 \quad \text{for } \frac{h}{H_s} \geq 4 \end{array} \right. \quad (11)$$

其中， h 為堤趾水深。當考慮複合式海堤設置平台 (Berm) 時，碎波相似參數 ξ_p 可透過平台影響因子修正為 ξ_{eq} ($= \xi_p \cdot \gamma_b$)。經複合式堤面坡度修正後的碎波相似參數定義為：

$$\xi_p = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_p}}, \quad \xi_{eq} = \frac{\tan \alpha_{eq}}{\sqrt{s_p}} \quad (12)$$

$\tan \alpha$ 為考慮平台高度之平均坡度 (average slope)， $\tan \alpha_{eq}$ 為考慮複合式堤面平台寬度之等值坡度 (equivalent slope)。為適切評估波浪溯升高度與平均越波量，擬假定波浪正向入射海堤達到最大溯升高度 ($\gamma_\beta = 1.0$)，用以保守估計各海堤的最大溯升高度與平均越波量。

本研究同時應用作業化數值浪潮模式取得外海預測波浪與水位資料，再透過美國陸軍兵工團 (U.S. Army Corps of Engineers, USACE) 所制定之海岸工程手冊 (CEM) 設計準則，計算颱風波浪於近岸海堤地區發生之最大溯升高。另外再引進交通部中央氣象局 (CWB)、日本氣象廳 (JMA) 及美國國家環境預報中心 (NCEP) 等國際氣象單位公布之風場、氣壓場條件，模擬颱風侵臺期間海堤區域未來 72 小時之近岸浪潮條件，以產出海堤波浪溯升高度之系集預報 (ensemble forecast) 結果。此法可將最大溯升高度預估結果導入系集統計概念，涵蓋颱風期間海堤可能發生最大溯升高度的範圍。

三、結果與討論

3.1 結果

2014 年研究期間，本研究成功透過堤面波浪溯升即時量測系統擷取到海鷗 (09/13 ~ 09/17, 未侵臺) 及鳳凰 (09/19 ~ 09/22) 颱風影響期間，颱風波浪於曾文海埔地海堤堤面上的溯升高資料。在溯升經驗公式應用方面，外海波浪與水位條件乃由作業化數值波浪模式提供；現地海床的水深地形、堤面形狀及粗糙度等資料乃由水利署第六河川局所提供。堤

前平均海床坡度約為 1:500，海堤高度為 5.0 m，堤面坡度為 1:1.5，為光滑混凝土堤面，粗糙係數定義為 1.0；堤前拋石高度為 2 m，拋石坡度 1:7，粗糙係數乃依據 TAW (2002) 建議，定義為 0.55。將上述條件代入式 (6) 至式 (9)，即能估算颱風波浪於堤面上溯升及平均越波量的可能情形。

圖 2 及圖 3 分別為估算曾文海埔地海堤在海鷗颱風以及鳳凰颱風影響期間，不同風場、氣壓場條件對應的堤面最大溯升高度預估結果，並與現地量測資料比對。圖中，橫軸代表日期 (逐時輸出)；縱軸代表「預測水位高程」、「預測示性波高」與「預估溯升高度」，單位為 m。其中，「預測水位高程」乃經由海洋數值模式作業化提供未來 72 小時的預測水位高度；「預測示性波高」則透過數值風浪模式作業化提供未來 72 小時的預測波場結果，並經由 Goda (1985) 淺化經驗公式，淺化至堤前 200 m 處的示性波高 (TAW, 2002)；「預估溯升高度」為本研究利用美國陸軍兵工團海岸工程手冊溯升經驗公式，依據當地水深地形、堤面坡度與粗糙度等參數所預估的累積機率 2% 最大溯升高度與平均越波量；「Measurement Data」為海堤堤面波浪溯升量測系統於颱風影響期間現地量測的最大溯升高度。右側縱軸亦標示安裝於堤面各測點之對應高度，由下而上分別為 2.70 m、3.25 m、3.80 m、4.35 m 及 4.90 m。由比對結果可知，美國陸軍兵工團海岸工程手冊溯升經驗公式估算出的溯升高與現地量測資料接近。而最大溯升高的準確預估，則可提供海岸區域防災禦潮更為便捷、可靠的越波溢堤預警資訊。

圖 4 展示在各預測時間 (縱軸) 選用不同國際氣象組織公布之風場、氣壓場條件，推估未來 72 小時海堤波浪溯升高度，所得各時間延時 (橫軸) 系集預測統計樣本組數的示意圖。而國際氣象組織發布最新風場、氣壓場之時間，分別為臺灣時間上午兩點與下午兩點。以時間延時 (橫軸) 第 N 日下午之系集預估作業為例，考慮某一國際氣象組織發布之風場、氣壓場，並推估海堤波浪溯升結果，其系集統計樣本包括第 N-2 日上午推估之第一筆結果，以及第 N-2 日下午推估之第二筆結果等。依此類推，推估第 N 日下午海堤波浪溯升結果之系集預測統計樣本個數共計六筆。本研究數值浪潮模式在考慮引進臺灣、日本及美國等三個國際氣象單

位發布之模擬風場、氣壓場條件下，將可獲得共計十八筆 (3 × 6 = 18) 海堤波浪溯升預估之系集統計樣本數。

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (14)$$

當中， x_i 為第 i 筆系集統計樣本； n 為統計樣本總筆數。假設波浪溯升預測結果 (母體) 呈常態分配，則 $\bar{x} - 2\delta$ 與 $\bar{x} + 2\delta$ 即為 95% 信賴區間的系集預測上下限範圍。

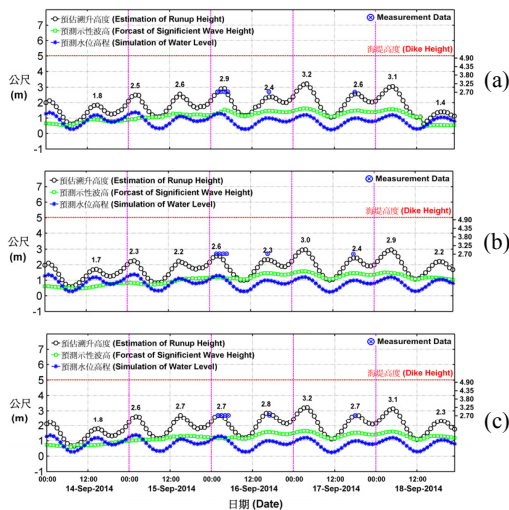


圖 2 溯升經驗公式與現地量測資料比對 (海鷗颱風影響期間)；預測水位高程及示性波高分別依據 CWB (a)、JMA (b)、及 NCEP (c) 所發布之風場及氣壓場條件所求得

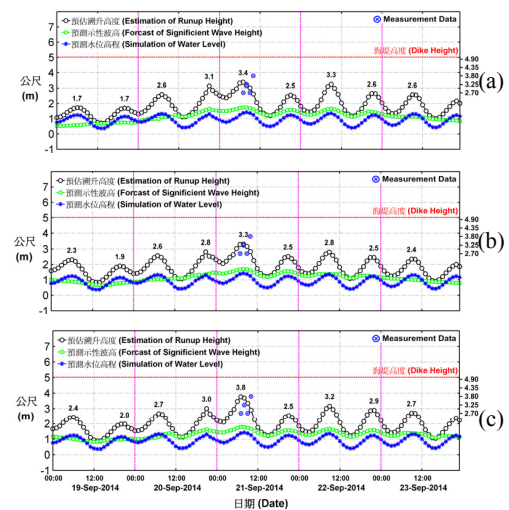


圖 3 溯升經驗公式與現地量測資料比對 (鳳凰颱風影響期間)；預測水位高程及示性波高分別依據 CWB (a)、JMA (b)、及 NCEP (c) 所發布之風場及氣壓場條件所求得

將系集預測統計樣本經由統計分析即可獲得波浪溯升預測平均值 \bar{x} 及標準差 δ ：

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (13)$$

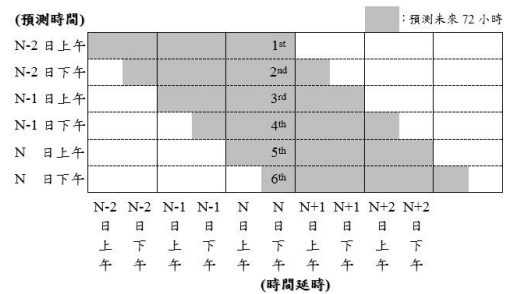


圖 4 系集預測海堤波浪溯升高度之統計樣本示意圖

圖 5 展示選用不同風場、氣壓場條件，所得堤面波浪最大溯升高度系集預測結果。結果說明本研究方法，可涵蓋颱風影響期間颶風波浪可能造成海堤堤面發生最大溯升高度的可能範圍，大大提高實際應用於海岸防災時的準確性。

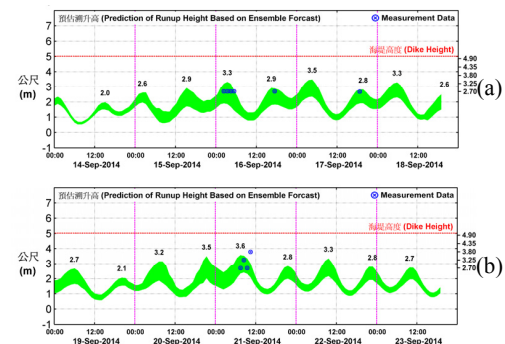


圖 5 堤面波浪最大溯升高度系集預測結果與現地量測資料比對結果。(a)海鷗颱風、(b)鳳凰颱風影響期間

3.2 討論

在三個不同氣象模式所提供的風場及氣壓場條件下，海鷗颱風可較準確的預估溯升高，而鳳凰颱風的預估溯升高雖與現地量測有些誤差，但仍然可預估其變化趨勢。由此可見，颱風氣象結構複雜，模擬風場及氣壓場的準確性有其不確定性，此將間接影響數值波潮模式模擬結果及推估海堤波浪溯升

之準確性。另外，本研究導入系集預報方法，可推估海堤堤面發生最大溯升高度的可能範圍，以提昇堤面最大溯升高推估的準確性。

四、結論

本研究應用美國陸軍工兵團 (U.S. Army Corps of Engineers, USACE) 所制定之海岸工程手冊 (CEM) 設計準則之溯升經驗公式，結合作業化數值波潮模式，估算颱風波浪於近岸海堤地區發生之最大溯升高度與平均越波量，並與實際現地量測溯升資料作驗證，得到當地溯升經驗公式的參數，亦能準確地預測颱風波浪於海堤上的溯升高度。另外，將最大溯升高度預估結果再經由系集統計方法計算後，可得到颱風波浪造成海堤堤面發生最大溯升高度的可能範圍，能更有效掌握颱風期間堤面溯升高的變化趨勢。

經本研究驗證及率定後溯升經驗公式可作為未來建置波浪越堤溢淹之預警系統，也能依此模式建置台灣西岸重要海堤的溯升經驗公式，提供政府機關關於颱風期間海堤溢淹的緊急應變，以及因應未來海平面上升檢討海堤現況安全之重要參考依據。

謝誌

本論文係經濟部水利署科專計畫「海堤區域非接觸式水文觀測及越波溢堤新興技術之研發(2/2)」(2014)之部份研究成果，承蒙水利署經費補助使本研究更臻完善，謹致謝忱。

參考文獻

1. 行政院經濟建設委員會(2012)國家氣候變遷調適政策綱領，行政院經濟建設委員會。
2. 邱啓敏、張育誠、黃清哲、林俊遠、曾均敏、馬家麟、王仲豪(2014)作業化海堤溯升越波預警系統之發展，第36屆海洋工程研討會論文集，第203-208頁。
3. 經濟部水利署等(2014)海堤區域非接觸式水文觀測及越波溢堤新興技術之研發(2/2)，經濟部水利署。
4. *Coastal Engineering Manual*, U.S. Army Corps of Engineers.
5. De Rouck, J., Van der Walle, B, Troch, P., van der Meer, J., Van Damme, L., Medina, J. R., Willems,

- M., and Frigaard, P. (2007) Wave run-up on the Zeebrugge rubble mound breakwater: full-scale measurement results, *Journal of Coastal Research*, 23(3), 557-583.
6. De Waal, J.P. and van der Meer, J.W. (1992) Wave runup and overtopping on coastal structures, *ICCE, Coastal Engineering Proceedings*, Ch. 134, pp. 1758-1771, Venice, Italy.
7. EurOtop (2007) *European Overtopping Manual*, EA (UK), ENW (NL), and KFKI (DE), 185 pages.
8. Goda, Y., (1985) *Random Seas and Design of Maritime Structures*, University of Tokyo Press.
9. Kirkgöz, M.S. (1991) Impact pressure of breaking waves on vertical and sloping walls, *Ocean Engineering*, 18, 45 - 59.
10. Kirkgöz, M.S. (1995) Breaking wave impact on vertical and sloping coastal structures, *Ocean Engineering*, 22, 35 - 48.
11. Kortenhaus, A., & Oumeraci, H. (1998) Classification of wave loading on monolithic coastal structures, *ICCE, Coastal Engineering Proceedings*, 1(26), 867-880.
12. TAW. (2002) *Technical Report – Wave run-up and wave overtopping at dikes*, Technical Advisory Committee for Flood Defence in the Netherlands.
13. Van der Meer, J. W. (1998) *Wave run-up and overtopping, Dikes and Revetments: Design, Maintenance and Safety Assessment*, ed. KW Pilarczyk (AA Balkema, Rotterdam, The Netherlands), 145-159.
14. Van der Meer, J.W. and Janssen, J.P.F.M. (1995) Wave run-up and wave overtopping at dikes, *ASCE, Wave Forces on Inclined and Vertical Structures*, 1-26.
15. Van der Meer, J.W. and Stam, C.J.M. (1992) Wave run-up on smooth and rock slopes of coastal structures, *ASCE, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 118(5), 534-550.