

作業化海堤溯升越波預警系統之發展

邱啓敏¹ 張育誠¹ 黃清哲^{1,2} 林俊遠² 曾鈞敏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波浪溯升越波預警系統，應用作業化數值波浪模式 (SWAN 及 POM) 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 2013 年尤特、潭美、天兔等颱風期間堤面溯升變化，分析最大溯升高，並進行比對與校驗，以提昇波浪溯升越波預警系統的準確性。

關鍵詞：海堤、波浪溯升、越波、經驗公式

Development of an Operating Early Warning System for Wave Runup and Overtopping on a Seawall

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

* PhD student, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

ABSTRACT

In this study, an early warning system was developed for predicting wave runup and overtopping on a seawall during typhoon period. Numerical wave and ocean model (SWAN and POM) were applied and the wave runup empirical formula (U.S. Army Corps of Engineers, USACE) was used to estimate maximum wave runup and mean overtopping discharge. A real-time wave runup detection system was developed and deployed on the Zeng-Wen seawall, locates at the southwest coast of Taiwan, for recording the wave runup during the UTOR, TRAMI and USAGI typhoons in 2013. Comparisons of the measurement data with the predicting data shows that both are in good agreement.

Keywords: Seawall; Wave runup; Overtopping; Empirical formula

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。台灣每逢夏季常遭遇颱風侵襲，近年來受全球氣候變遷影響，侵台颱風期間造成的颱風波浪有逐年增大之趨勢，波浪對海堤的衝

擊力量也增大 (行政院經濟建設委員會，2012)。侵台颱風於近岸海域常造成極端的波浪，也導致台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，其颱風波浪溯升的高度是大家一直想瞭解與探討的部份。過去雖曾有相關現場量測颱風波浪於海堤上溯升之研究，但皆屬研發階

段，並未真正應用於實際海岸環境。另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，由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，而本研究主要以現場量測與經驗公式預測為主。在現場量測方面，De Rouck et al. (2007) 在比利時 Zeebregge 拋石防波堤上，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) 在荷蘭海岸設計保護的海堤，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。Hughes (2004) 重新檢驗規則波、不規則波、孤立波在光滑不可透水海堤的溯升經驗公式，並提出適用於不同堤面坡度 ($2/3 \leq \tan \alpha \leq 1/30$) 的溯升推估經驗公式。

2012 年泰利颱風造成長浪侵襲台南市曾文海埔地海堤導致南側土堤毀損，影響堤後水產養殖戶的生命財產安全。土堤毀損乃肇因於堤前防風林侵蝕，海床地貌改變，致使颱風波浪直接侵襲而發生破損。雖曾文海埔地海堤南側土堤已於 2013 年初完成整建，惟堤前地貌的改變，仍讓當地居民對於波浪溢堤仍存疑慮。目前國內仍欠缺現場實測的堤面波浪溯升資料提供經驗公式作驗證，有鑒於此，本研究即以此為出發點，建置作業化海堤堤面波浪溯升越波預警系統。此系統分為二大部份，一為颱風波浪於海堤上溯升高的即時量測系統，另一則為利用溯升越波經驗公式進行海堤上溯升高與平均越波量之推估。藉由作業化海堤堤面波浪溯升越波預警系統，可建立當地海岸波浪溯升的經驗公式，以期制定海堤地區防災標準。

二、研究方法

本研究發展一套波浪溯升即時觀測與預測系統，此系統在觀測部份發展一套堤面溯升即時量測系統，另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。本研究進行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) 可將資料即時傳輸至控制中心，另一方面將紀錄資料儲存於 Data Logger 以保全颱風期間的資料。

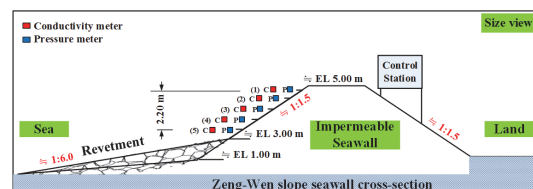


圖 1 堤面溯升即時量測系統

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。一般而言，淡水的導電度量測值低於 1,200 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，海水的導電度 48,000 ~ 52,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (32 ~ 34 ppt)。由於颱風期間伴隨暴雨，堤面上導電度量測值將介於淡水與海水之間，本研究以門檻值大於 5,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 即可判定為堤面實際溯升影響範圍。

歐盟在海堤防護設計手冊 (2007) 中，對不同波浪與海堤型式造成的波壓作一些分類，如圖 2 (Kortenhaus & Oumeraci, 1998)，海堤型式分為三類，第 1 類為垂直防波堤 (Vertical Breakwater)、第 2 類為複合式海堤 (Composite Breakwater)、以及第 3 類為皇冠狀拋石防波堤 (Crown Walls Rubble Mound Breakwater)；波浪於不同類型海堤上造成的波壓則分為四種，依序為駐波造成的壓力、碎波造成的壓力、衝擊波壓、以及破碎後壓力。由壓力變化形態可知，壓力峰值有二個，第一個峰值為波浪衝擊海堤時，波浪碎波瞬間所造成的瞬間衝擊壓力。第二個峰值為波浪碎波後於海堤前震盪所造成的壓力。第一與第二壓力峰值的大小在不同的海堤型式會呈現不同的差異。

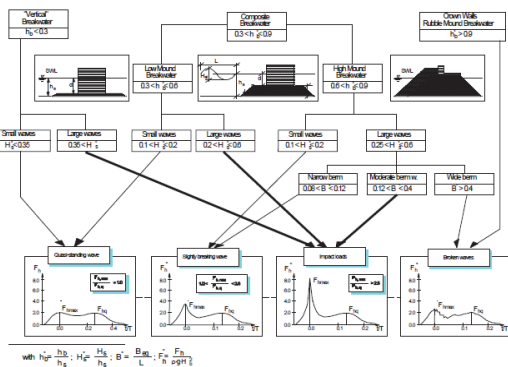


圖 2 PROVERBS 海堤設計參數 (Kortenhaus & Oumeraci, 1998)

曾文海埔地海堤 (如圖 3) 可歸納為第 3 類的海堤，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，第一與第二壓力峰值差異較小。郭 (1995) 提及海床比較平緩時 (< 1:50)，大波浪未達堤趾已先碎波，等到達海堤前方時大部份能量已損失，導致波力大為降低。湯 (1999) 提及，直立式海堤前方，第一次的波浪衝擊壓力 (first peak impact pressures) 發生的時間只有短暫 1/1000 sec，而衝擊壓力強度約為靜水壓的 100 至 200 倍。但斜坡式海堤大多數屬於第二次波浪衝擊壓力 (secondary peak impact pressures) 波浪碎波後產生震盪，發生的時間介於 1/100 ~ 1/10 sec，衝擊壓力強度約為靜水壓的數倍至數十倍。

Kirkgöz (1991 & 1995) 經由實驗顯示，較緩之堤面坡度，其第一次與第二次波壓峰值大小差異不大。而第二次出現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)。若屬第二次出現波壓峰值，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)，本研究保守估計約 3 倍的靜水壓，故選用測量範圍為 0 ~ 20 psi 的壓力計，進行量測颱風期間波壓於海堤上變化的情況。

本量測系統訊號取樣頻率設為 2 Hz。數據擷取方式為連續不間斷記錄，以描述颱風期間波浪於堤面溯升的演變情況。堤面波浪溯升即時量測系統作業時機，為中央氣象局發布海上颱風警報時，至曾文海埔地海堤進行安裝，待颱風警報解除後再取回儀器。藉由分析，可取得颱風期間波浪於堤上面溯升的演變情況。

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， 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：

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

適用範圍：

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

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址時的淺化效應，淺化影響因子 γ_h 定義為：

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

其中， h 為堤址水深。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與平均越波量，擬假定波浪正向入射海堤達到最大溯升高 ($\gamma_\beta = 1.0$)，用以保守估計各海堤的最大溯升高與平均越波量。

本研究同時應用作業化數值波浪模式 (SWAN 及 POM) 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，建置波浪越堤溢淹之預警系統。

三、結果與討論

3.1 結果

2013 年研究期間，適逢 08/10 ~ 08/15 尤特颱風，08/20 ~ 08/22 潭美颱風，及 09/19 ~ 09/22 天兔颱風等影響。颱風期間造成之長浪對曾文海埔地海堤造成影響，圖 3 為潭美颱風造成長浪侵襲曾文海埔地海堤的情況。

本研究於前述颱風期間，已成功透過堤面波浪溯升即時量測系統擷取到颱風波浪於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 SWAN 及 POM 模式作業化提供；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。平均海床坡度約略為 1:500 海堤高度為 5.0 m，堤面坡度為 1:1.5；堤前拋石高度為 2 m，拋石坡度 1:6。另本研究採用 TAW (2002) 建議，給定堤前 200 m 之示性波高，作為入射波浪條件。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，並與現地量測資料比對。

圖 4 至圖 6 分別為尤特、潭美及天兔颱風影響期間，本研究溯升經驗公式預測溯升高與現地量測資料比對結果。圖中，「堤前水位高」為 POM 模式預測的水位；「堤前示性波高」為 SWAN 模式預測的颱風波浪條件；「堤前溯升高」與「平均越波量」為利用美國海岸工程手冊溯升經驗公式，根據當地水深地形、堤面坡度與粗糙度等參數所預估的堤前溯升高與平均越波量；「溯升量測資料」為海堤堤面波浪溯升量測系統於尤特及潭美颱風影響期間現地量測的溯升資料。由比對結果可知，美國海岸工程手冊溯升經驗公式計算出的溯升高與現地量測資料非常吻合。而最大溯升高的準確預估，則可提供海岸防災更為便捷、可靠的溢堤預警資訊。

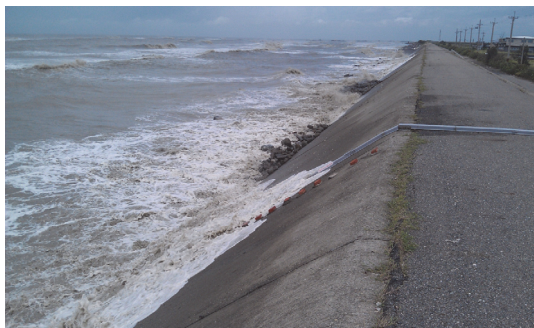


圖 3 潭美颱風期間曾文海埔地海堤堤面波浪溯升情況

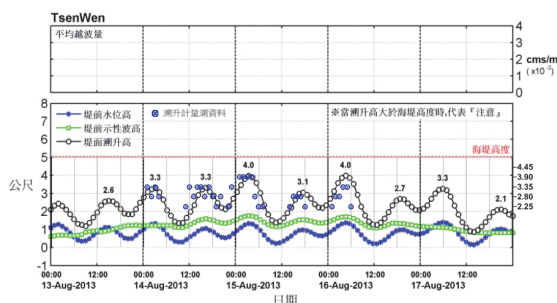


圖 4 溯升經驗公式與現地量測資料比對 (尤特颱風影響期間)

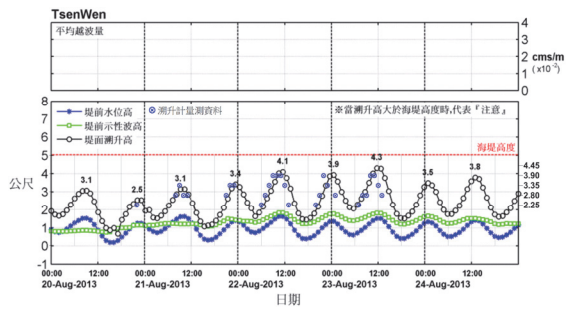


圖 5 溯升經驗公式與現地量測資料比對 (潭美颱風影響期間)

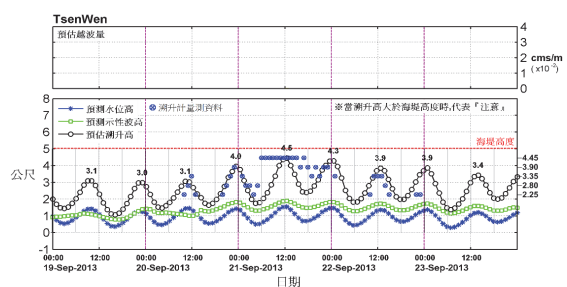


圖 6 溯升經驗公式與現地量測資料比對 (天兔颱風影響期間)

3.2 討論

三次颱風影響期間，以天兔颱風造成海堤上溯升高最明顯，在 09/21 06:00 ~ 18:00 期間出現固定值為超過儀器可量測最大溯升高，在颱風過後至現地探勘，亦發現有漂流木被颱風波浪沖至堤頂，故研判當時海堤應有越波發生的情況。溯升經驗公式雖未推估有越波情況，其原因有可能堤前海岸坡度經歷前二次颱風影響而改變，但仍可準確地預測波浪於堤面溯升的情況。上述三場颱風並未直接侵襲台南曾文海埔地海堤，僅天兔颱風影響較大，於 9/21 9:00 左右有明顯的溯升高，因此堤面底部第 5 支壓力計有量到最大壓力值約 3.1 psi。

綜合上述結果，利用美國海岸工程手冊溯升經驗公式，考慮當地水深地形資料、堤面坡度與粗糙度，並透過 SWAN 與 POM 模式作業化輸出颱風波浪、水位等預測資料，估算海堤堤面溯升高，與現地量測資料比對，結果令人滿意。

四、結論與建議

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，結合作業化數值波浪模式 (SWAN 及 POM)，計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。

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

經濟部水利署第六河川局提供台南市七股區曾文海埔地海堤附近水深地形資料，使本研究成果更臻完善，謹致謝忱。

參考文獻

1. 郭金棟(1995) *海岸工程*，中國土木水利工程學會。
2. 湯麟武(1999) *港灣及海域工程*，中國土木水利工程學會，第二版。
3. 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。
4. 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.
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. EurOtop (2007) *European Overtopping Manual*, EA (UK), ENW (NL), and KFKI (DE), 185 pages.
7. *Coastal Engineering Manual*, U.S. Army Corps of Engineers.
8. Hughes, S.A. (2004) Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter, *Coastal Engineering* 51(11), 1085-1104.
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., and 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. 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.
14. 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.
15. 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.