

颱風時期防波堤之可靠度分析

Reliability Analysis of Breakwaters during Typhoon Period

國立台灣大學土木工程學系教授
兼水工試驗所主任

林 國 峰

Gwo-Fong Lin

基隆港務局工務組設計課
幫工程師

何 秉 均

Ping-Chun Ho

摘 要

構成港灣工程中最重要之結構物為防波堤，在設計時，常以若干年之迴歸週期推算所得之波浪高，計算其防波堤之安全性。然而計算所得之安全性仍不足以反應防波堤之實際安全狀況。本文於是引進可靠度之概念以分析台北港颱風時期防波堤滑動及傾覆安全性。由研究之結果可知，颱風時期最大波高平均值逐漸增大時，滑動可靠度及傾覆可靠度均減小。颱風產生之最大波高平均值小於 5m 時，傾覆可靠度大於滑動可靠度；當最大波高平均值逐漸加大時，傾覆可靠度將逐漸變小，亦即波浪愈大時，防波堤翻轉之可能性會迅速增加。

關鍵詞：可靠度分析，防波堤，滑動，傾覆。

ABSTRACT

Breakwaters are the most important structure in a port. The traditional method of safety factor is often used in the safety analysis of breakwaters. However the safety factor cannot reflect the actual safety of a breakwater. In this paper the concept of reliability is introduced to analyze the safety of breakwaters of the Taipei harbor during typhoon period. Actual data of waves caused by typhoons are used herein. The results show that the reliability against sliding or overturning decreases with increasing typhoon wave height. It is also found that the reliability against overturning is greater than that against sliding when the mean wave height is less than 5 meters. When the wave height is greater than 5 meters, the reliability against overturning is smaller than that against sliding and reduces rapidly with the increasing wave height.

Keywords: Reliability analysis, Breakwater, Sliding, Overturning.

一、前言

在港灣工程中各階段如規劃，設計、施工和維護等各部份，任何一項的影響因子均具不確定性及隨機性，因此工程司在從事防波堤設計時，必須考慮到成功與失敗的機率，務使成功機率提高，亦即降低失敗之機率至最低，在缺乏基本資料及無法預測未來的不定性狀況下，能藉由可靠度的分析，加以各種合理的假設，訂定出適當且合理的可靠度分析模式，用以修正或檢討設計的缺失，再綜合以水工模型試驗、數值分析、操船模擬等，俾使得港灣工程中最重要之防堤工程之設計達於最完美之境界。

目前一般分析可靠度的方法如：直接積分法(direct integration)、均值一階二矩法((Mean-value First-order Second-Moment, 簡稱 MFOSM)、加強一階二矩法(Advanced First-order Second-Moment, 簡稱 AFOSM)、蒙地卡羅(Monte Carlo)法、二階法(second-order)及迴歸週期法(return period)等。

近年來利用一級近似分析來探討水文及水資源工程已相當廣泛，其中以均值一階二矩法較普遍，因其分析系統簡單，快速可應用於工程實際問題之研究，所以有許多應用研究成果。在水利工程上的應用之實例已有許多，例如1970年代早期以雨水排水系統為例首先介紹風險及可靠度分析在水利工程上之可行性。Wood(1977)以水力、地質、土壤及洪水為隨機變數探討及分析防洪堤防結構體損壞之可靠度。Tung and Mays(1981)應用於堤防及涵洞設計。Tung and Mays(1981)以可靠度建立動態規劃(dynamic programming)及離散微分動態規劃(discrete differential dynamic programming)模式用以分析堤防設計之最佳化。

在港灣及海岸工程界之中可靠度研究則僅有較少之成果，如 Nafday and Wang(1983)將 Mellin 轉換之技巧引用於波力作用於海中單柱樁之機率模式分析。Baker(1985)將可靠度觀念引入海洋工程結構物之決策中。Franco et al.

(1986)在義大利 Brindisi 地區應用風險概念於防波堤最佳設計中。丁等人(1994)應用簡單迴歸週期法探討潮位對海堤高度之風險率分析且已用於分析雲林縣海堤外潮位之超越機率。曹等人(1994)以波浪之波壓為荷重，防波堤自重為阻抗，應用均值一階二矩法分析防波堤的可靠度。

本文之目的，在於颱風時期防波堤可靠度之研究，首先蒐集台北港附近海域中的波高紀錄，對於該紀錄予以統計分析。接著分析現行規劃設計防波堤所使用的波壓公式，其影響防波堤不確定性的因子，如波浪之波高及防波堤堤體與其坐底拋石塊之間的摩擦係數，以探討波壓力作用於防波堤時，在不同的最大波高平均值及不同最大波高標準偏差值改變時，防波堤可靠度變化情形。以提供參考並有助於興建防波堤時的規劃設計，以及對於現有防波堤安全性評估，並且可決定是否須加強或改建。

本研究以台北港附近實測之波浪資料，將分析之結構標的物以目前正在施工之沉箱式防波堤分析，並更進一步分析颱風來臨時之浪高，分析本防波堤可靠度變化之情況，以作為日後本港埠擴建時之參考及用於改進現有之防波堤規劃、設計及興建之安全評估。

二、可靠度理論及分析方法

可靠度定義為系統之荷重 L 小於或等於系統之阻抗 R 之機率，可表示如下：

$$\alpha = \text{Prob}(L \leq R) \quad (1)$$

而系統的荷重大於阻抗的機率稱為風險(risk)，數學式表示如下：

$$\alpha' = \text{Prob}(L > R) = 1 - \alpha \quad (2)$$

由附錄中之推導可知可靠度可進而表示如下式：

$$\alpha = \Phi(\beta) \quad (3)$$

其中 $\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}$ 稱可靠度指標(reliability index)，

$\Phi(\cdot)$ 為標準常態累積機率分布函數，而 Z 為表現函數，表為 $Z=R-L$ 。詳細推導如附錄。

三、重覆波壓公式

當港灣之外廓防波堤為直立堤，而堤前水深大於碎波水深甚多時，波浪由外海入射與從堤直立壁反射兩波相重疊而成重覆波，其作用於堤體的總波壓力 P 與力矩 M ，可分為波峰來臨及波谷出現兩類，兩者相較，波峰來臨時，所造成的破壞，較波谷出現時為嚴重，故本文所探討的為波峰來臨時之防波堤可靠度。

Sainflou (1928) 重覆波壓分布如圖 1 所示，由圖 1 可求得總波壓力 P 和力矩 M 如下兩式所示：

$$P = \frac{(h+H+\Delta h_0)(w_0 h + P_1)}{2} - \frac{w_0 h^2}{2} \quad (4)$$

$$M = \frac{(h+H+\Delta h_0)^2 (w_0 h + P_1)}{6} - \frac{w_0 h^3}{6} \quad (5)$$

$$= \frac{w_0}{2} \left[Hh + \Delta h_0 h + \frac{Hh + H^2 + \Delta h_0 H}{\cosh \frac{2\pi h}{\ell}} \right]$$

上兩式中 w_0 為海水單位體積重 (1.03 t/m^3)， ℓ 為波長 (m)， H 為波高 (m)， Δh_0 為重覆波行成後水面之升高 (m)：

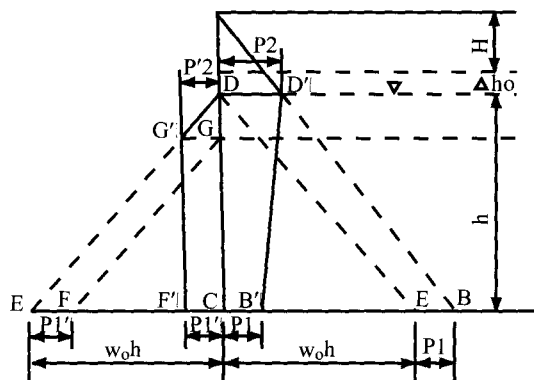


圖 1 重覆波壓分布圖 (Sainflou, 1928)

$$\Delta h_0 = \frac{\pi H^2}{\ell} \coth \frac{2\pi h}{\ell} \quad (6)$$

P_1 為波峰出現時在堤底單位面積的動壓力：

$$P_1 = \frac{w_0 H}{\cosh \frac{2\pi h}{\ell}} \quad (7)$$

其餘符號之意義參照圖 1。

四、均值一階二矩法

在本研究之可靠度分析中的荷重 L 視為外界作用於防波堤，使防波堤產生損壞的荷重函數，為眾多不確定性變數所構成，即

$$L = g(X) \quad (8)$$

其中 X 為各種荷重隨機變數，即

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (9)$$

而阻抗 R 為防波堤所提供，其為避免損壞的阻抗函數，亦為眾多不確定變數所組成的，以 $R = h(Y)$ 表示之， Y 為各種阻抗的隨機變數，即

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \quad (10)$$

(8) 式中 L 以泰勒展開式 (Taylor's expansion) 展開，並忽略二階及二階以上各項，則 (8) 式可改寫如下：

$$L \approx g(\bar{x}) + \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial g(X)}{\partial X_i} \right]_{X=\bar{x}} (X_i - \bar{x}_i) \quad (11)$$

其中 $\left[\frac{\partial g(X)}{\partial X_i} \right]_{X=\bar{x}}$ 稱為敏感係數，以下以 a_i 表示之。

對 (11) 式取期望值可得隨機變數 L 的平均值：

$$\mu_L = E[L] \approx g(\bar{x}) \quad (12)$$

而 L 的變異數可表為下式：

$$\text{Var}[L] = \text{Var}[g(\bar{x})] + \text{Var} \left[\sum_{i=1}^n a_i (X_i - \bar{x}_i) \right] \quad (13)$$

由於 $g(\bar{x})$ 為常數，故 $\text{var}[g(\bar{x})] = 0$ 。(13)式變為：

$$\sigma_P^2 = a_s^2 \sigma_H^2 \quad (21)$$

$$\text{Var}[L] = \text{Var}\left[\sum_{i=1}^n a_i (X_i - \bar{x}_i)\right] \quad (14)$$

上式進一步寫成：

$$\sigma_L^2 = \text{Var}[L] \approx \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i < j}^n a_i a_j \text{cov}[X_i, X_j] \quad (15)$$

其中 σ_i^2 為 \bar{x}_i 的變異數。若 \bar{x}_i 相互獨立，則協變異數如下：

$$\text{cov}[X_i, X_j] = 0 \quad (16)$$

因此荷重 L 的變異數可寫為：

$$\sigma_L^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_i^2 \quad (17)$$

同理利用本分析法可得防波堤阻抗 R 的平均值及變異數。

五、防波堤滑動可靠度分析

總波壓力 P 在此處防波堤滑動可靠度分析中視為系統荷重 L 。由(4)、(6)及(7)式知，總波壓力 P 為 w_0 、 ℓ 、 h 及 H 之函數，其中 w_0 、 ℓ 及 h 為常數，而波高 H 為隨機變數。故總波壓力 P 之敏感係數為：

$$a_s = \left[\frac{\partial P}{\partial H} \right]_{H=\mu_H} \quad (18)$$

其中 μ_H 為波高 H 的平均值即 $E[H]$ ，

$$\frac{\partial P}{\partial H} = \frac{w_0}{2} \left[h + h \frac{\partial \Delta h_0}{\partial H} + \frac{1}{\cosh \frac{2\pi h}{\ell}} \left(h + 2H + H \frac{\partial \Delta h_0}{\partial H} + \Delta h_0 \right) \right] \quad (19)$$

其中

$$\frac{\partial \Delta h_0}{\partial H} = \frac{2\pi H}{\ell} \coth \frac{2\pi h}{\ell} \quad (20)$$

由(17)及(18)式知，作用於防波堤之總波壓力的變異數如下：

由(4)及(12)式可得作用於防波堤之總波壓力的平均值如下式：

$$\mu_P = \frac{w_0}{2} \left[\mu_H h + \Delta h_0 h + \frac{\mu_H h + \mu_H^2 + \Delta h_0 \mu_H}{\cosh \frac{2\pi h}{\ell}} \right] \quad (22)$$

滑動阻抗力為堤體之自重再乘上與坐底處之摩擦係數 k 。滑動阻抗力 R 之平均值如下：

$$\mu_R = \mu_k W \quad (23)$$

其中 μ_k 為防波堤堤底之摩擦係數 k 的平均值即 $E[\mu]$ ， W 為防波堤堤體之淨重。另可求得阻抗之變異數如下

$$\sigma_R^2 = W^2 \sigma_k^2 \quad (24)$$

一旦求得系統之荷重 L （此處即總波壓力）以及系統之阻抗 R （此處即滑動阻抗力）兩者之平均值和變異數，即可求得表現函數 $Z=R-L$ 之平均值和變異數，進而可求得防波堤滑動可靠度可靠度指標 β ，最後可求得防波堤滑動可靠度 α 。

六、防波堤傾覆可靠度分析

在此處防波堤傾覆可靠度分析時，系統荷重為波壓力所導致之總力矩 M ，而系統之阻抗則為抗傾覆力矩 M_R 。由(5)式可知總力矩 M 為隨機變數 H 之函數，故 M 對 H 取偏微分，得

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial H} = & \frac{w_0}{6} [2hH + 2\Delta h_0 h \frac{\partial \Delta h_0}{\partial H} + 2h^2 + 2Hh \frac{\partial \Delta h_0}{\partial H} + 2h^2 \frac{\partial \Delta h_0}{\partial H} + \\ & \frac{1}{\cosh \frac{2\pi h}{\ell}} (h^2 + 3H^2 + \Delta h_0^2 + 2H\Delta h_0 \frac{\partial \Delta h_0}{\partial H} + 4hH + 4H\Delta h_0 + \\ & 2H^2 \frac{\partial \Delta h_0}{\partial H} + 2h\Delta h_0 + 2Hh \frac{\partial \Delta h_0}{\partial H}) \end{aligned} \quad (25)$$

因此總力矩 M 之敏感係數為

$$a_M = \left[\frac{\partial M}{\partial H} \right]_{H=\mu_H} \quad (26)$$

由(17)式知總力矩 M 之變異數如下：

$$\sigma_M^2 = a_M^2 \sigma_H^2 \quad (27)$$

另由(5)式及(12)式可得總力矩 M 的平均值如下式：

$$\mu_M = \frac{w_0}{6} \left[(\mu_H + h + \Delta h_0)^2 + \left(h + \frac{\mu_H}{\cosh \frac{2\pi h}{l}} \right) - h^3 \right] \quad (28)$$

系統之阻抗為堤體自重所生之抗傾覆力矩 M_R ：

$$M_R = \frac{1}{2} [(H_t - h)\gamma + h\gamma_s] B^2 \quad (27)$$

其中 γ_s 為浸水混凝土單位重 1.42 t/m^3 ， γ 為混凝土乾單位重 2.45 t/m^3 ， B 為防波堤堤頂總寬度(m)， h 為防波堤堤前水深(m)， H_t 為防波堤堤體總高度(m)。上式中無隨機變數，所以 M_R 之平均值 $E[M_R] = M_R$ ，又 M_R 的標準偏差為 0。

一旦求得系統之荷重 L (此處即總力矩 M) 以及系統之阻抗 R (此處即抗傾覆力矩 M_R) 兩者之平均值和變異數，即可求得表現函數 $Z=R-L$ 之平均值和變異數，進而可求得防波堤傾覆可靠度可靠度指標 β ，最後可求得防波堤傾覆可靠度 α 。

七、台北港波資料量測

為貫徹禁採和河川砂石之政策以及解決北部砂石需求，經各有關單位研究協商後咸認為東砂北運為一解決之方案。因此，基隆港務局奉省府同意轉呈經建會核準後於淡水河口興建國內商港，鑒於港澳之建設投資經費龐大，考量經濟效益、區域均衡發展及地方民意需求，乃規劃預留台北港未來發展空間以為基隆港之輔助港。

為瞭解建港地點受波浪常長年侵襲之影響，遂委託港灣技術研究所，辦理該地點地形變遷監測等相關之監測，以搜集該區各項基本資料，並為該區工程規劃、設計、施工及未來營運維護之參考。為此，於該建港區西側-15m 處設置一海上觀測平台，搜集之資料包括氣象(風力)，海象(波浪、潮汐、海流及懸浮質)等。

本研究所使用之波浪資料取自 1997 年 1 月至 1997 年 12 月(基隆港務局，1997)。

八、實例研究及分析

經由以上各段之分析，我們可得知，在以均值一階二矩法分析探討防波堤可靠度值時，作用於防波堤之波高大小會對防波堤滑移及傾覆破壞之程度產生不同之影響及結果。

本研究所述之防波堤係位於台北港北防波堤處，依該區海象條件，分別分析拋石斜波堤、土石斜坡堤、沉箱直立堤及鋼版圓筒直立堤等。分析設計時堤址基礎之土壤容許承载力約為 25 t/m^2 ，以抗剪角 $\phi = 28$ 度，標準慣貫入試驗(SPT)錘擊數 $N=5$ 計算。北防波堤里程編號自 3K+960 至 4K+460 處，長度為 500m，設計水深-9.5m 至-10.2m，為沉箱直立堤型防波堤，以沉箱結構落於拋石基礎上，沉箱的寬度為 23m，因沉箱向海處為垂直面，波浪入射後造成之反射波易將堤址沖刷，堤基需以重型護基方塊及大型軟石保護。

由收集之波浪資料經由統計分析，可得 1997 年各月份最大波高的平均值及標準偏差(如表 1)，其中 1997 年 6 月因儀器之關係無法得到該月之資料，故六月份之分析結果無法顯示出，據此可繪圖如圖 2 及圖 3，由圖 2 可知，該 1997 年 1、2、3、9、10、11、12 等月份最

表 1 1997 年各月份最大波高的平均值及標準偏差

月份	最大波高平均值(m)	最大波高標準偏差(m)
1	3.263	1.332
2	3.428	1.448
3	2.266	1.731
4	1.621	0.943
5	1.130	0.956
6	--	--
7	0.477	0.379
8	1.562	1.438
9	2.067	1.435
10	1.764	1.103
11	1.979	1.194
12	2.469	1.365

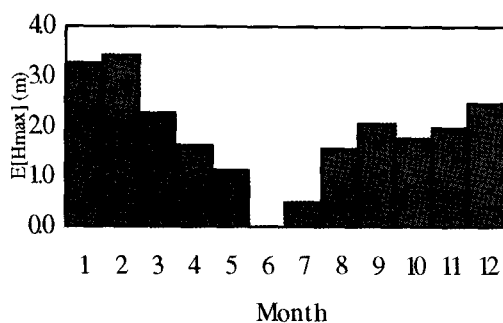


圖 2 台北港 1997 年全年各月最大波高平均值

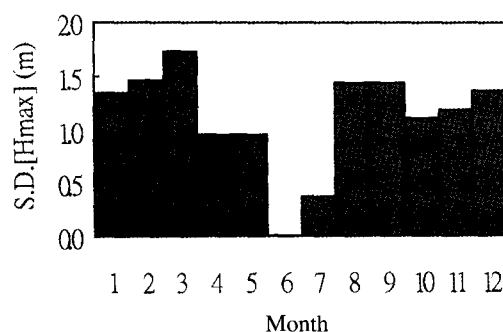


圖 3 台北港 1997 年全年各月最大波高標準偏差

大波高平均值大於 1.7 公尺以上，因冬季時有東北季風吹拂，風強而導致之最大波浪極高。而該年之 4、5、7、8 月份則最大波高平均值較小。由圖 3 亦可看出各月之標準偏差在冬季時變異性極大。

以本研究所推導之模式可計算得滑動可靠度指標如圖 4，進而求得北防波堤之可靠度繪圖如圖 5，由該二圖可知，1997 年的風浪作用下在 1、2、3、9、10、11、12 月份時，因東北季風吹起的風浪而導致防波堤的可靠度介於 99.71%~99.54%之間。而夏季的可靠度表現較為良好，約可達 99.8%以上。

茲再將波高資料輸入傾覆可靠度之模式，可得傾覆可靠度指標及傾覆可靠度，分別將上述二數據繪圖如圖 6 及圖 7。由圖 6 及圖 7 可知，防波堤的傾覆可靠度全年均可達 99.99%以上，換言之，在 1997 年全年的風浪作用下，該

防波堤工程傾覆的可能性極小，亦即台北港北防波堤未來竣工驗收後，以 1997 年之風浪作用下，不論是滑動可靠度或是傾覆可靠度均極為安全。

同時，為了解夏季時期颱風所引起之波浪對北防波堤之影響，應用本發展之模式可求得颱風引起不同之波高及不同之標準偏差，對滑動可靠度及傾覆可靠度影響情形，所得之結果如表 2 至表 5，其中最大波高平均值由 1m 增加至 11m(100 年迴歸週期之浪高)(基隆港務局，1997 年)，最大波高標準偏差由 0.5m 增加至 3m，亦可繪圖如圖 8 至圖 11。由圖 8 至圖 11 可得知當作用於防波堤之最大波高平均值越大時，所得之滑動可靠度及傾覆可靠度會越小。亦可得知，當作用於防波堤之最大波高標準偏差越大時，得之滑動可靠度及傾覆可靠度會越小，反之則越大。

由圖 8 及圖 9 可得知，當最大波高平均值達 5m 及最大波高標準偏差為 1.5m 時，滑動可靠度值為 99.1%，亦即防波堤極為安全。而由圖 10 及圖 11 可得知，當最大波高平均值為 5m 及最大波高標準偏差達 1.5m 時，傾覆可靠度值為 99.99%，亦即防波堤相當安全，但其傾覆之可能性小於滑動之可能性。當最大波高標準偏差達 3m 時滑動可靠度值為 98.6%，而傾覆可靠度值為 98.9%，其滑動之可能性小於傾覆之可能性。

同時可知，當作用於防波堤之最大波高平均值達 11m，時最大波高標準偏差為 1.5m 時，滑動可靠度值為 83.2%而傾覆可靠度值為 77.4%，當標準偏差逐漸增加時，滑動可靠度值及傾覆可靠度值會逐漸減少，其中傾覆可靠度值會急劇下降。

九、結論

作用於防波堤之最大波高平均值越大，防波堤的滑動及傾覆可靠度越小；反之則越大。當最大波高的標準偏差愈大時，防波堤的滑動及傾覆可靠度越小；反之則越大。以 1997 年所測得之波高資料，應用本發展之模式推算之滑

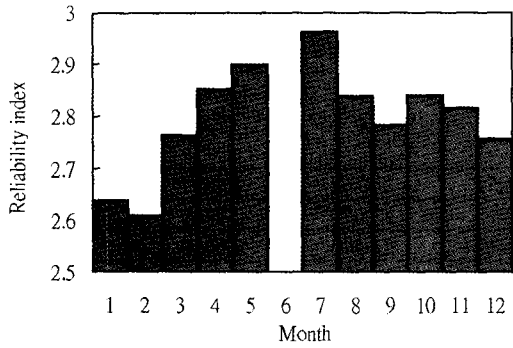


圖 4 台北港北外廓防波堤完工後以 1997 年各月實測波高及標準偏差計算而得之滑動可靠度指標

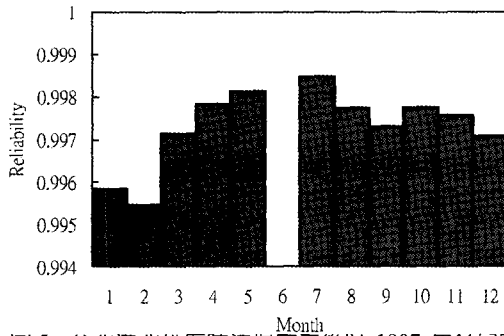


圖 5 台北港北外廓防波堤完工後以 1997 年各月實測波高及標準偏差計算而得之滑動可靠度值

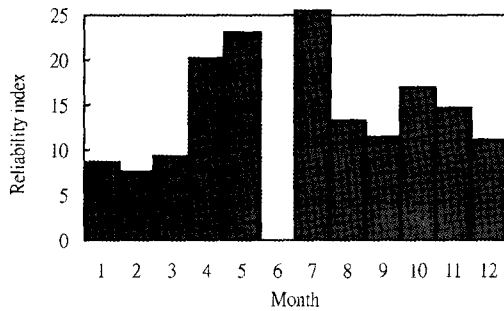


圖 6 台北港北外廓防波堤完工後以 1997 年各月實測波高及標準偏差計算而得之傾覆可靠度指標

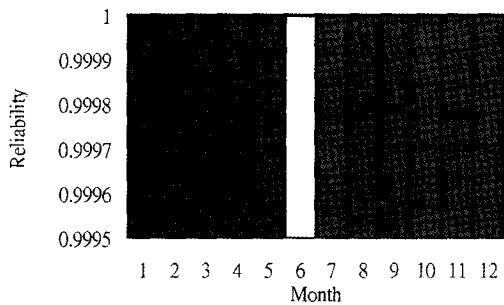


圖 7 台北港北外廓防波堤完工後以 1997 年各月實測波高及標準偏差計算而得之傾覆可靠度值

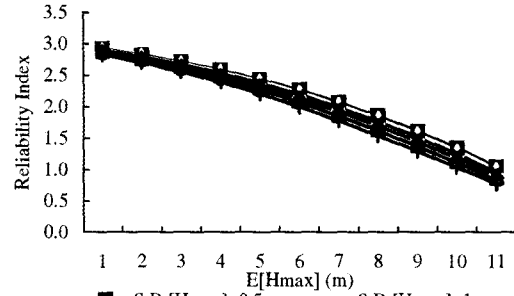


圖 8 颱風時期台北港北外廓防波堤之不同最大波高平均值與標準偏差值間滑動可靠度指標之關係圖

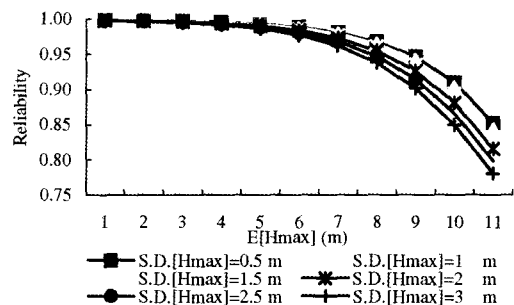


圖 9 颱風時期台北港北外廓防波堤之不同最大波高平均值與標準偏差值間滑動可靠度之關係圖

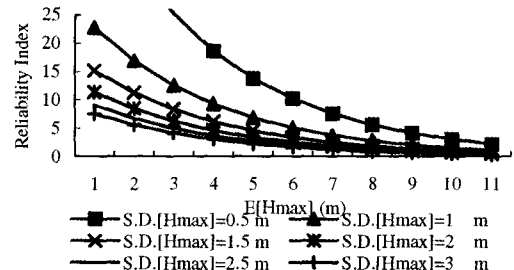


圖 10 颱風時期台北港北外廓防波堤之不同最大波高平均值與標準偏差值間傾覆可靠度指標之關係圖

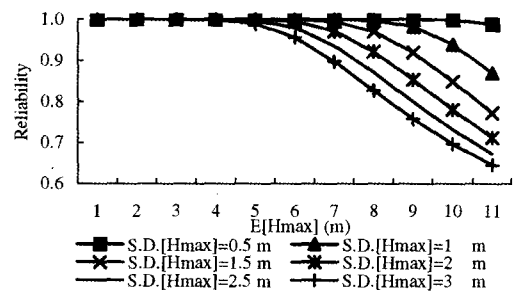


圖 11 颱風時期台北港北外廓防波堤之不同最大波高平均值與標準偏差值間傾覆可靠度值

表 2 颱風時期台北港北外廓防坡堤之不同最大波高平均值與標準偏差值間滑動可靠度指標之關係表

S.D.[Hmax] (m) \ E[Hmax] (m)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1	2.9172	2.9089	2.8953	2.8766	2.8531	2.8251
2	2.8216	2.8106	2.7925	2.7677	2.7369	2.7005
3	2.7096	2.6953	2.6719	2.6402	2.6010	2.5554
4	2.5798	2.5617	2.5323	2.4928	2.4447	2.3895
5	2.4305	2.4083	2.3724	2.3249	2.2677	2.2033
6	2.2604	2.2338	2.1914	2.1360	2.0705	1.9981
7	2.0679	2.0371	1.9886	1.9263	1.8541	1.7760
8	1.8517	1.8172	1.7638	1.6964	1.6202	1.5396
9	1.6104	1.5734	1.5172	1.4477	1.3709	1.2919
10	1.3427	1.3052	1.2492	1.1816	1.1090	1.0361
11	1.0474	1.0122	0.9607	0.9003	0.8371	0.7753

表 3 颱風時期台北港北外廓防坡堤之不同最大波高平均值與標準偏差值間滑動可靠度之關係表

S.D.[Hmax] (m) \ E[Hmax] (m)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1	0.9982	0.9982	0.9981	0.9980	0.9978	0.9976
2	0.9976	0.9975	0.9974	0.9972	0.9969	0.9965
3	0.9966	0.9965	0.9962	0.9959	0.9954	0.9947
4	0.9951	0.9948	0.9943	0.9937	0.9928	0.9916
5	0.9925	0.9920	0.9912	0.9900	0.9883	0.9862
6	0.9881	0.9873	0.9858	0.9837	0.9808	0.9771
7	0.9807	0.9792	0.9766	0.9730	0.9681	0.9621
8	0.9680	0.9654	0.9611	0.9551	0.9474	0.9382
9	0.9463	0.9422	0.9354	0.9261	0.9148	0.9018
10	0.9103	0.9041	0.8942	0.8813	0.8663	0.8499
11	0.8525	0.8443	0.8317	0.8160	0.7987	0.7809

表 4 颱風時期台北港北外廓防坡堤之不同最大波高平均值與標準偏差值間傾覆可靠度指標之關係表

S.D.[Hmax] (m) \ E[Hmax] (m)	.5	1	1.5	2	2.5	3
1	45.6386	22.8193	15.2129	11.4097	9.1277	7.6064
2	33.9288	16.9644	11.3096	8.4822	6.7858	5.6548
3	25.1967	12.5984	8.3989	6.2992	5.0393	4.1995
4	18.6741	9.3371	6.2247	4.6685	3.7348	3.1124
5	13.8386	6.9193	4.6129	3.4596	2.7677	2.3064
6	10.2713	5.1357	3.4238	2.5678	2.0543	1.7119
7	7.6380	3.8190	2.5460	1.9095	1.5276	1.2730
8	5.6831	2.8415	1.8944	1.4208	1.1366	0.9472
9	4.2180	2.1090	1.4060	1.0545	0.8436	0.7030
10	3.1069	1.5535	1.0356	0.7767	0.6214	0.5178
11	2.2531	1.1266	0.7510	0.5633	0.4506	0.3755

表 5 颱風時期台北港北外廓防坡堤之不同最大波高平均值與標準偏差值間傾覆可靠度表

S.D.[Hmax] (m) \ E[Hmax] (m)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.9991
5	1.0000	1.0000	1.0000	0.9997	0.9972	0.9895
6	1.0000	1.0000	0.9997	0.9949	0.9800	0.9565
7	1.0000	0.9999	0.9946	0.9719	0.9367	0.8985
8	1.0000	0.9978	0.9709	0.9223	0.8721	0.8282
9	1.0000	0.9825	0.9201	0.8542	0.8006	0.7590
10	0.9991	0.9398	0.8498	0.7813	0.7328	0.6977
11	0.9879	0.8700	0.7737	0.7134	0.6739	0.6464

動及傾覆可靠度均極為良好。應用本發展之模式推算之傾覆可靠度大於滑動可靠度。颱風時期最大波高平均值逐漸增大時，滑動可靠度及傾覆可靠度均減小。

最大波高平均值小於 5m 時，標準偏差為 3m 時，傾覆可靠度大於滑動可靠度。最大波高平均值大於 5m 時標準偏差為 3m 時，傾覆可靠度會小於滑動可靠度，且急速降低。故可知最大波高平均值較小時，傾覆可靠度大於滑動可靠度，當最大波高平均值逐漸加大時，傾覆可靠度將逐漸小於，亦即波浪愈大時，防波堤翻轉之可能性會迅速增加。

十、附錄

使用安全邊際法 (safety margin) 描述可靠度，則(1)式可改寫如下：

$$\alpha = \text{Prob}(Z \geq 0) \quad (\text{A1})$$

其中 Z 為一表現函數(performance function)：

$$Z = R - L \quad (\text{A2})$$

Z 的平均值 μ_Z 及變異數 σ_Z^2 可由下兩式求出

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_L \quad (\text{A3})$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_L^2 - 2\text{cov}(L, R) \quad (\text{A4})$$

上式中， $\text{cov}(L, R)$ 為變數 L 及變數 R 的協變異數，若 L 及 R 為相互獨立，則該協變異數為 0，所以

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_L^2 \quad (\text{A5})$$

引進標準化變數 $V = (Z - \mu_Z) / \sigma_Z$ ，可靠度可表示如下

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{Prob}(Z \geq 0) \\ &= \text{Prob}\left(V \geq -\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \\ &= 1 - \text{Prob}\left(V \leq -\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \\ &= 1 - F_V(-\beta) \end{aligned} \quad (\text{A6})$$

其中 $\beta = \mu_Z / \sigma_Z$ 稱為可靠度指標 (reliability index)， $F_V(\cdot)$ 為變數 V 之累積機率分布函數。若 V 或 Z 為常態隨機變數時，則上式可寫為

$$\alpha = \Phi(\beta) \quad (\text{A7})$$

其中 $\Phi(\cdot)$ 為標準常態累積機率分布函數。

十一、誌謝

本研究蒙基隆港務局局長謝明輝先生，副局長王鐘雄先生，主任秘書陳清擇先生，總工程司王榮祥先生，工務組長林坤田先生，設計

課長郭建華先生，規劃課長魏震先生及黃勗哲工程司提供波高資料，設計課盧瓊霞小姐協助繕打，何素真小姐繪圖等工作，得使本文順利完成，特此一併敬致謝忱。

十二、參考文獻

1. 丁崇峰、許榮庭、劉長齡，“海堤設計暴潮位之風險率分析”，臺灣水利，第 42 卷，第一期，(1994)。
2. 曹登皓、張景鐘、郭世榮，“堤體安全性可靠度分析之研究”，國科會研究成果報告 NSC83-0209-E019-003 (1994)。
3. 基隆港務局，“淡水港外廓防波堤興建工程細部設計，基本斷面設計討論資料”(1997)。
4. 基隆港務局，“淡水港國內商港漂砂調查及海、氣象與地型變遷監測計劃，波浪監測報告”(1997)。
5. 林國峰、何秉均，“外廓防波堤之可靠度研究”，第九屆水利工程研討會論文集，pp. A9-17 (1998)。
6. Baker, J., “The Reliability Concept as an Aid to Decision Making in Offshore Engineering,” Proceeding of the 4th International Conference on Behavior of Offshore Structure (BOSS'85), Delft, The Netherlands (1985).
7. Franco, L., A. Lamberti, A. Noli and U. Tomasicchio, “Evaluation of Risk Applied to Designed Breaker of Punta Riso at Brindisi, Italy,” Coastal Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 169-191 (1986).
8. Lin, G.F. and P.C. Ho, “Reliability Analysis of Deep Breakwaters,” 11th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association for Hydraulic Research, Yogyakarta, Indonesia, pp. 843-850 (1998).
9. Mays, L.W. and Y.K. Tung, Hydrosystem Engineering and Management, Chapter 5, McGraw-Hill, New York (1992).
10. Nafday, A.M. and H. Wang, “Probabilistic Model of Wave Forces on Cylindrical Pile,” Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 2 (1983).
11. Sainflou, G., “Essa; sur des digues maritime verticales,” Annales des Ponts et Chaussées Partie Technique, Vol. 98, No. IV, pp. 48 (1928).
12. Tung, Y.K., and L.W. Mays, “Optimal Risk-based Design of Flood Levee Systems,” Water Resources Research, Vol. 17, No. 4, pp. 833-852 (1981).
13. Tung, Y.K., and L.W. Mays, “Risk Models for Model Design,” Water Resources Research, Vol. 17, No. 4, pp. 833-842 (1981).
14. Wood, E., “An Analysis of Flood Reliability,” Water Resources Research, Vol. 13, No. 3, pp. 665-671 (1977).

收稿日期：民國 88 年 6 月 4 日

接受日期：民國 88 年 6 月 22 日