

花蓮港與蘇澳港開口胸牆防波堤沉箱維修探討

林受勳	交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
洪維屏	交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
羅冠顯	交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
李政達	交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
郭少谷	台灣世曦工程顧問股份有限公司專案經理與水利技師

摘要

臺灣東部港口開口胸牆防波堤因承受強大波力以及大量越波水量，造成沉箱和胸牆損害，拋石堤、消波塊流失問題與結構物裂縫、沉陷等破壞，且主要結構多已逼近使用年限，故對港灣安全及水域穩定性影響甚鉅，本研究針對此類防波堤沉箱結構物之防救災方案，進行各項深入調查評估和探討分析，完成結構安全評估工作與相關補強對策，提供港務公司編列未來養護所需經費及維修工法建議。

一、前言

臺灣東部港口極易受颱風影響，本研究針對花蓮及蘇澳港原有開口胸牆之防波堤、沉箱設計條件進行檢討(研究範圍如圖 1、圖 2 所示之虛線框內區域)，探討舊有結構物的安全性、破壞原因及研擬修護措施，提供主管機關未來執行參考。透過堤址現場攝影與測量數據，瞭解結構物破壞原因與沉箱位移狀況，並研擬短期修護措施，提供各港務分公司一套完整的維護策略，使結構物遭受颱風侵襲後，能有一完整的應變措施。

臺灣東部現有港灣構造物使用年期多已達到原設計使用年限，由於工程改建費用龐大，港埠建設基金恐無法容納，基於「維修重於重建」乃今後工程發展的導向，因此，如何維持構造物性能，延長其使用年限，實為國內港灣設施未來之重要課題。

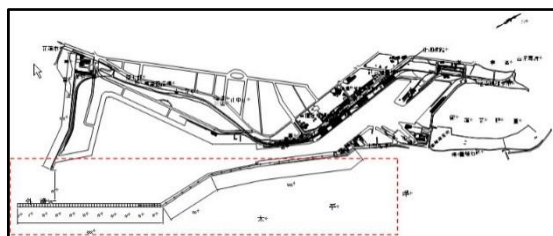


圖 1 花蓮港及東防波堤示意圖

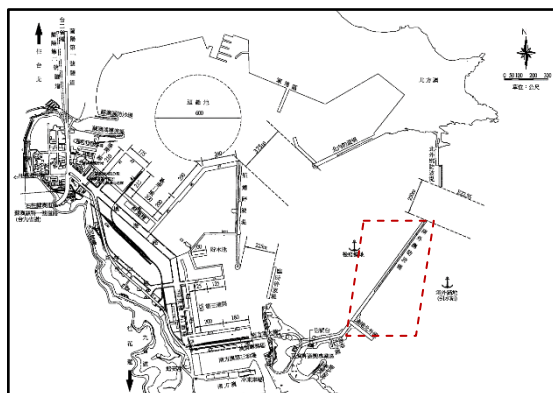


圖 2 蘇澳港及南外廓防波堤示意圖

二、結構物波力及安全性分析

本研究主要目的為分析檢討舊有沉箱式防波堤安全性及破壞原因、並研擬受損防波堤結構短期及長期補強工法，提供港務公司研擬沉箱式防波堤維護策略參考應用。研究項目包括：(1)沉箱式防波堤堤址波浪外力評估；(2)舊有沉箱式防波堤安全性分析及破壞原因檢討；(3)受損結構短期及長期補強方案研擬；(4)沉箱式防波堤開口胸牆維護工法探討。研究流程及分析方法，詳如圖 3 所示。

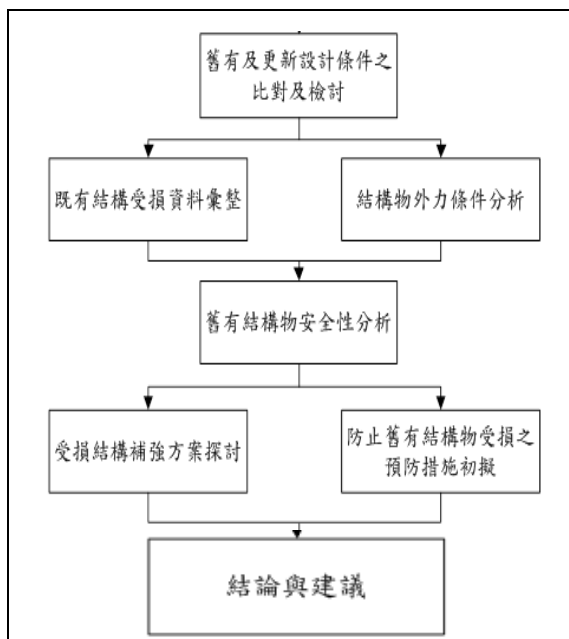
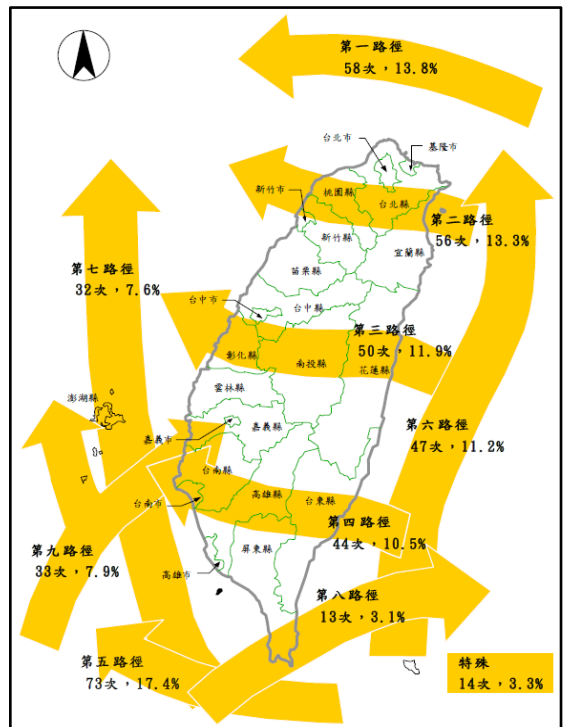


圖 3 研究流程及分析方法圖

2.1 結構物堤址波浪外力評估

颱風為威脅臺灣地區最嚴重之自然災害，歷年來因颱風而損失之生命財產實不可勝數，尤其當颱風直接侵襲時，不僅影響海上船隻作業，更對海岸結構物造成極大之衝擊，故對颱風各項資料及特性，須詳予蒐集分析。根據中央氣象局 1897~2019 年侵襲臺灣颱風路徑最新統計資料(如圖 4)。侵臺颱風路徑大致可劃分為 9 類，本文研究範圍位於臺灣東海岸，除第 2 與第 6 路徑之颱風將直

接侵襲本區外，第 1 與第 3 路徑亦有甚大影響；平均每年約有 1.72 個颱風影響臺灣東部港口海域。



1. 2008年前颱風路徑採中央氣象局圖書館歷年颱風調查報告 (<http://photino.cwb.gov.tw/rdcweb/lib/clm/tyname.htm>)，1897~2008年侵臺颱風綱要表9類路徑分類，2009年後採用TDB防災颱風資料庫分類 (<http://rdc28.cwb.gov.tw/data.php>)
2. 颱風編號191610、191710、194700、197426、199603無颱風路徑資料不列入統計分類，本統計侵臺颱風總數405次

圖 4 侵襲臺灣之颱風路徑統計圖

2.1.1 外海波浪條件重新探討

建構防波堤時有其原外海設計波浪條件，重新評估結構安全時，亦須將最新觀測資料納入考量，爰此，有必要重新探討相關波浪條件。本研究利用井島武士及湯麟武博士理論發展出之 TYPH 電腦程式，就影響本文研究範圍較大之颱風進行波浪模擬推算，將各方向颱風可能發生最大示性波高，依大小順序列表，再以極端值分佈法推算各復現期波高，進而得知各迴歸期颱風設計波高，如表 1、表 2 所示。

表 1 花蓮外海各迴歸期颱風設計波高

波向	250		200		100		50		25		20		10	
	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts
S	14.3	15.9	13.8	15.6	12.3	14.7	10.7	13.7	9.2	12.7	8.7	12.4	7.1	11.2
SSE	14.0	15.7	13.7	15.5	12.7	15	11.6	14.3	10.4	13.5	10.0	13.3	8.7	12.4
SE	16.4	17.0	16.1	16.9	14.9	16.2	13.6	15.5	12.3	14.7	11.8	14.4	10.3	13.5
ESE	18.2	17.9	17.8	17.7	16.5	17.1	15.2	16.4	13.7	15.5	13.2	15.3	11.6	14.3
E	19.0	18.3	18.6	18.1	17.3	17.5	15.9	16.7	14.4	15.9	13.9	15.7	12.2	14.7
ENE	19.8	18.7	19.3	18.5	17.9	17.8	16.3	17.0	14.7	16.1	14.1	15.8	12.2	14.7
NE	18.6	18.1	18.1	17.9	16.6	17.1	15.1	16.3	13.4	15.4	12.8	15.0	10.9	13.9
NNE	14.8	16.2	14.4	15.9	13.2	15.3	11.9	14.5	10.6	13.7	10.1	13.3	8.5	12.2
N	12.0	14.5	11.7	14.4	10.6	13.7	9.4	12.9	8.1	12.0	7.6	11.6	6.1	10.4

註：1.推算目標區為 121.68°E，24.25°N。

2.目標區水深為-141m。

3. Hs 單位為 m，Ts 單位為 sec。

表 2 蘇澳外海各迴歸期颱風設計波高

波向	250		200		100		50		25		20		10	
	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts
S	13.7	14.7	13.3	14.6	12.1	14.3	10.9	13.9	9.6	13.4	9.2	13.2	7.8	12.7
SSE	14.0	15.0	13.7	14.9	12.8	14.7	11.8	14.4	10.7	14.0	10.4	13.9	9.2	13.5
SE	17.8	17.2	17.4	17.1	16.2	16.8	14.9	16.4	13.6	15.9	13.1	15.7	11.5	15.2
ESE	19.6	17.6	19.2	17.5	17.9	17.2	16.5	16.8	15.0	16.3	14.5	16.2	12.8	15.6
E	20.7	18.8	20.3	18.7	18.9	18.2	17.4	17.7	15.7	17.2	15.2	17.0	13.3	16.3
ENE	20.6	20.4	20.1	20.3	18.6	19.6	17.1	18.9	15.4	18.2	14.8	17.9	12.9	16.9
NE	18.6	20.9	18.1	20.7	16.7	19.9	15.2	19.1	13.6	18.1	13.0	17.8	11.2	16.6
NNE	14.9	21.3	14.5	21.0	13.4	20.0	12.1	19.0	10.7	17.8	10.3	17.3	8.7	15.9
N	12.9	19.1	12.5	18.9	11.4	18.0	10.2	16.9	8.8	15.7	8.4	15.3	6.9	13.8

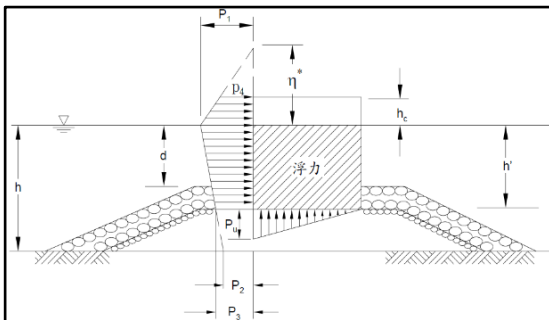
註：1.推算目標區為 121.94°E，24.58°N。

2.目標區水深為-500m。

3. Hs 單位為 m，Ts 單位為 sec。

2.1.2 沉箱堤址波力計算

本研究計算防波堤沉箱堤前波高，採用合田良實(Goda)^[1]波壓公式，其壓力分佈如圖 5 所示，計算步驟詳述如下：



資料來源：Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan，本計畫整理

圖 5 防波堤直立部份波壓分佈圖

(一)示性波高與最大波高計算：

由 Goda 波壓公式計算堤體受力所得示性波高、最大波高與相當外海波高間關係式，如式 1、式 2。

$$H_s = \begin{cases} K_s H_o' & h/L_o \geq 0.2 \text{ (式 1)} \\ \min\{(\beta_o H_o' + \beta_1 h), \beta_{\max} H_o', K_s H_o'\} & h/L_o < 0.2 \end{cases}$$

式中

$$\beta_o = 0.028(H_o'/L_o) - 0.38 \exp^{[20 \tan 1.5 \theta]}$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp^{[4.2 \tan \theta]}$$

$$\beta_{\max} = \max\{0.92, 0.32(H_o'/L_o)^{-0.29} \exp^{[2.4 \tan \theta]}\}$$

$$H_{\max} = \begin{cases} 1.8 K_s H_o' & h/L_o \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_o^* H_o' + \beta_1^* h), \beta_{\max}^* H_o', 1.8 K_s H_o'\} & h/L_o < 0.2 \text{ (式 2)} \end{cases}$$

式中

H_o' ：相當外海波高($H_o' = H_o \cdot K_r \cdot K_d$)

$$\beta_o^* : 0.052(H_o'/L_o)^{-0.38} \exp^{[20 \tan 1.5 \theta]}$$

$$\beta_1^* : 0.63 \exp^{[3.8 \tan \theta]}$$

$$\beta_{\max}^* : \max\{1.65, 0.53(H_o'/L_o)^{-0.29} \exp^{[2.4 \tan \theta]}\}$$

$\tan \theta$ ：堤址附近海底坡度

(二)波壓作用高程，如式 3：

$$\eta = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 H_{\max} \quad \text{(式 3)}$$

式中

η ：波壓作用在靜水位以上高度(m)

β ：入射波向與海堤垂線之夾角 $\pm 15^\circ$ 取其大者

λ_1 ：緩變波壓項之修正係數，通常為 0.8~1.0，

通常沉箱堤設計採用 1.0；拋石堤則採用 0.9

(三)波壓強度，如式 4 至式 7：

$$P_1 = 1/2(1 + \cos \beta)(\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos 2\beta) W_o H_{\max} \quad \text{(式 4)}$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\cosh(2\pi h/L)} \quad \text{(式 5)}$$

$$P_3 = \alpha_3 \cdot P_1 \quad \text{(式 6)}$$

$$P_4 = \alpha_4 \cdot P_1 \quad \text{(式 7)}$$

β ：入射波向與堤線垂線之夾角 $\pm 15^\circ$ ，取其大者

λ_1 ：緩變波壓項之修正係數，通常為 0.8~1.0

λ_2 ：碎波波壓項之修正係數

λ_3 ：上揚壓力項之修正係數

$$\alpha_1 = 0.6 + 1/2 \left(\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right)^2$$

$$\alpha_2 = \min \left[\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right]$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right]$$

$$\alpha_4 = 1 - h_c^*/\eta^*$$

$$h_c^* = \min[\eta^*, h_c]$$

式中

P_1 ：靜水位之波壓強度(t/m^2)

P_2 ：海底之波壓強度(t/m^2)

P_3 ：堤底之波壓強度(t/m^2)

P_4 ：胸牆頂之波壓強度(t/m^2)

h ：堤趾水深(m)

h_b ：堤前5倍 $H_{1/3}$ 距離處之水深(m)

h' ：直立部份之水深(m)

d ：護基方塊或覆坡石(塊)中水深較小者(m)

W_0 ：海水單位重(t/m^3)

L ：水深 h 處之波長

$\min\{a,b\}$ ： a,b 中取較小值

本研究防波堤為消波式沉箱結構，波力計算雖仍可採用 Goda 之波壓公式，但早期設計 λ_1 (緩變波壓項之修正係數)於消波式沉箱中皆採用 0.9，惟該公式已有部分修正，隨著波浪作用狀況不同， λ_1 、 λ_2 之值應做修正(如圖 6 及表 3 所示)，後續計算波力，將分別依 3 種不同波浪作用狀況，計算受力總合，結果則是採用最保守之波力條件檢核消波式沉箱外力條件。

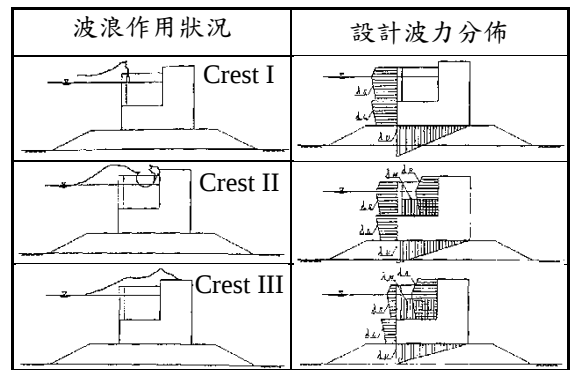


圖 6 消波式沉箱防波堤波壓作用分佈圖

表 3 消波式沉箱防波堤波壓係數表

		Crest I	Crest II	Crest III
消能壁	λ_{S1}	0.85	0.7	0.3
	λ_{S2}	$\begin{cases} 0.4 & (\alpha^* \leq 0.75) \\ 0.3/\alpha^* & (\alpha^* > 0.75) \end{cases}$	0	0
前壁	λ_{L1}	1.0	0.75	0.65
	λ_{L2}	$\begin{cases} 0.4 & (\alpha^* \leq 0.5) \\ 0.2/\alpha^* & (\alpha^* > 0.5) \end{cases}$	0	0
後壁	λ_{R1}	0	$\begin{cases} 20\ell/3L' & (\ell/L' \leq 0.15) \\ 1.0 & (\ell/L' > 0.15) \end{cases}$	$\begin{cases} 1.4 & (H/h \leq 0.1) \\ 1.6 - 2H/h & (0.1 < H/h < 0.3) \\ 1.0 & (H/h \geq 0.3) \end{cases}$
	λ_{R2}	0	$\begin{cases} 0.56 & (\alpha^* \leq 25/28) \\ 0.5/\alpha^* & (\alpha^* > 25/28) \end{cases}$	0
底板	λ_{M1}	0	$\begin{cases} 20\ell/3L' & (\ell/L' \leq 0.15) \\ 1.0 & (\ell/L' > 0.15) \end{cases}$	$\begin{cases} 1.4 & (H/h \leq 0.1) \\ 1.6 - 2H/h & (0.1 < H/h < 0.3) \\ 1.0 & (H/h \geq 0.3) \end{cases}$
	λ_{M2}	0	0	0
揚壓力	$\lambda_U (= \lambda_3)$	1.0	0.75	0.65

考量不同情況下之波壓修正計算，Crest I 之波力及揚力皆有增加，導致滑動及傾倒安全係數略有減少，Crest II 之波力及揚力皆減小，導致滑動及傾倒安全係數增加，Crest III 之波力減小且總揚力極小。

(四)浮力及上揚力浮力：

浮力僅考慮直立堤身於設計水位以下部份；上揚力則假設為三角形分佈，作用於直立堤身底部；最大上揚力 P_u 作用於海側堤趾，港側堤趾 P_u 為零，其計算公式，如式 8：

$$P_u = 1/2(1 + \cos\beta) \cdot \lambda_3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot W_0 \cdot H_{\max} \quad (\text{式 } 8)$$

(五)波力合成力及其力矩：

基於上述計算，波力合成力 P 及力矩 M_p 可依式 9、式 10 求得：

$$P = 1/2(P_1 + P_3)h' + 1/2(P_1 + P_4)h_c^* \quad (\text{式 9})$$

$$M_p = 1/6(2P_1 + P_3)h'^2 + 1/2(P_1 + P_4)h' \times h_c^* + 1/6(P_1 + 2P_4)h_c^{*2} \quad (\text{式 10})$$

上揚力之合成力 U 及力矩 M_u ，如式 11、式 12 計算得知：

$$U = 1/2 P_u \cdot \ell_u \quad (\text{式 11})$$

$$M_u = 2/3 U \cdot \ell_u \quad (\text{式 12})$$

式中

ℓ_u ：表示上揚力作用於堤底範圍，若直立堤身位於設計水位之下，則 $\ell_u = B$ 堤底寬，若直立堤身位於設計水位以上則

$$\ell_u = \min \left\{ B, 0.2 \frac{(\eta^* + h')^2}{|h'|} \right\}$$

其中

h' ：直立堤底部出水面高度(取負值)

2.1.3 防波堤結構安全性分析

堤體安全性分析方法：有關護基方塊護面石及堤址塊石重量計算，係採用 Hudson 類型之公式(如式 13)推算。

$$W = \frac{\gamma_s H_s^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (\text{式 13})$$

式中

W：護面塊重量(t)

γ_s ：護面塊單位重(t/m^3)

H_s ：堤前設計波高($H_{1/3}$)

S_r ：護面塊對海水比重

N_s 依谷本勝利(TANIMOTO)建議之計算方式(如式 14)，依護基型式不同如表 4 所示。

$$N_s = \max \left\{ 18, \left[A \frac{1-k}{k^m} \frac{h'}{H_{1/3}} + NSC \exp \left(-B \frac{(1-k)^2}{k^m} \frac{h'}{H_{1/3}} \right) \right] \right\} \quad (\text{式 14})$$

式中

$$k = \frac{4\pi h' / L'}{\sinh(4\pi h' / L')} \sin^2 \left[\frac{2\pi B_m}{L'} \right]$$

h' ：護基方塊放置處之水深(m)

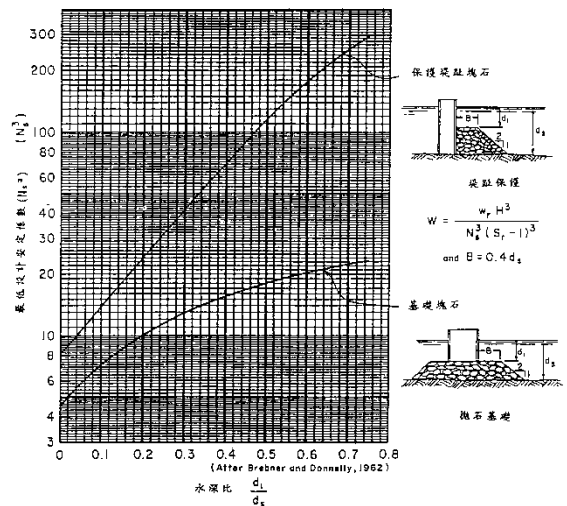
L' ： h' 水深處之波長(m)

B_m ：堤前拋石平台寬(m)

表 4 A 型、m、NSC、B 型：係數，依護基型式而取不同值

護基型式	A	m	NSC	B
塊石	1.3	1/3	1.8	1.5
方塊	1.0	1/3	1.4	1.2
開孔方塊	0.82	1/2	1.6	0.9

另 Shore Protection Manual 依拋石功用區分為基礎保護用及護基用 2 大類型，具以提供安定係數 N_s^3 圖表選取之方式，如圖 7 所示。



資料來源：Shore Protection Manual

圖 7 護基及堤址拋石之安定係數圖

上述谷本勝利(Tanimoto)公式利用原設計颱風波浪條件計算結果，可得本研究方塊重量須達到 7.03t~11.05t，分別由原設計圖斷面兩種護基方塊尺寸，3mx2mx2m(A 型)及 3mx3mx2m(B 型)計算其重量分別為 27.6t 及 41.4t。經檢

討可知護基方塊 A 型及 B 型重量皆大於 11.05t，可符合原設計颱風波浪需求。

2.1.4 堤體穩定性評估

有關堤體穩定分析，分別依滑動與傾倒驗算，如式 15、式 16：

(一)滑動驗算：

$$SF_s = \frac{\mu(W_A - W_B - U) + W_S}{P} \quad (\text{式 15})$$

式中

SFs：滑動安全係數

μ ：摩擦係數

W_A ：堤體重量

W_B ：堤體所受之浮力

U ：堤體所受之上揚力

W_S ：堤體所受之被動土壓力

P ：堤體所受波浪之合力

(二)傾倒驗算：

$$SF_o = \frac{M_A - M_B - M_U + M_S}{M_p} \quad (\text{式 16})$$

式中

SF_o ：傾倒安全係數

M_A ：由堤體自重產生之抗傾力矩

M_B ：由堤體所受浮力產生之力矩

M_U ：由堤體所受上揚力產生之力矩

M_S ：由堤體所受被動土壓力產生之抗傾力矩

M_p ：總波力矩

2.1.5 消波艙結構安全性探討

針對消波艙之混凝土剪力破壞，及分段施工造成之接合面破壞加以探討。

(一)消波艙之剪力破壞分析：

混凝土剪力計算強度公式如式 17

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}b_wd \quad (\text{式 17})$$

式中

V_c ：剪力強度(kg)

f'_c ：混凝土之抗壓強度(kg/cm²)

b_w ：寬度

以花蓮港消波艙開孔與開孔間之混凝土最短距離至少超過 80cm 且厚度至少 200cm 條件計算，可知以 175kg/cm² 混凝土打設 30cm*200cm 之混凝土面積，至少可承受約 112 噸之外力作力，其遠大於波力所產生之外力，在混凝土結構一致之條件下，消波艙之混凝土結構應不致產生破壞。

(二)混凝土分段施工面之破壞分析：

花蓮港在混凝土結構完整之條件下本身可承受剪力；但由於消波艙之高度必須施作消波艙之開孔，故實際施工時，必須分次施工，依現場研判，每次澆鑄混凝土之厚度約為 1.0m~1.5m 左右，部份之破壞是由施工交接面所產生，消波艙外壁頂部與下層之混凝土間並未完整接合，當波力作用時，消波艙外壁僅能依靠重力所產生摩擦力保持穩定，當颱風大浪來襲時，如波力大於摩擦力及後側混凝土剪力總合時，就容易產生外壁破壞之情況。以 1 次澆鑄 2 艙，每艙 4m 寬、內隔牆厚度 0.8m、外壁厚 3m、混凝土高度 1.5m 及 50 年迴歸期颱風波浪所產生之堤頂波壓 11.17ton/m² 做為初步驗核之基準波力計算。

受力面積：1.5*(4*2+0.8)-4* π *1.4²/4=7.04m²

波力總合：11.17ton/m²*7.04m²=78.64ton

(三)混凝土剪力計算：

花蓮港防波堤以後側牆高 1m 為條件，堤後可能破壞角及波力於破壞面上之分力，整理如表 5 與圖 8 所示。

表 5 堤後破壞角與波力及剪力關係表

破壞角 (度)	剪力 (ton)	波力(ton) (斜面分力)	差值 (ton)
10	323.01	77.44	245.57
20	164.00	73.89	90.10
30	112.18	68.10	44.08
40	87.26	60.24	27.02
50	73.22	50.55	22.67
60	64.77	39.32	25.45
70	59.69	26.90	32.79
80	56.96	13.66	43.30

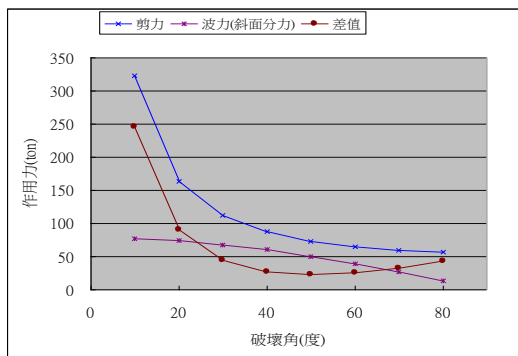


圖 8 堤後破壞角與波力及剪力關係圖

由以上計算結果顯示，花蓮港防波堤外牆後方側牆提供剪力均大於波力，當破壞角約為 50° 時，兩者差值最小，剪力仍較波力多出約 22.67 噸，表示外牆受均勻力量作用時，側牆不致於產生剪力破壞。進一步探討側牆發生破壞原因之一，可能是作用於外牆之波力並非均勻分佈，如波力較偏於一側，側牆會因受彎矩作用而產生破壞分離。

(四)消波艙結構安全性計算：

花蓮港此處採用海側前消波艙，前寬 4m，內長 5m，高 7m，兩邊側牆厚 0.8m，後側版厚 2m、前側(含消波孔)版厚 3m，三邊固定，如圖 9 所示。計算可知，兩邊側牆厚僅需超過 0.51m 即可符合需求，而現況兩邊側牆厚度已超過標準，應屬安全設計。

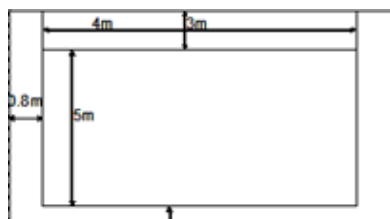


圖 9 消波艙尺寸示意圖

三、防波堤結構補強工法研擬

研擬之保護與維護工法區分為基礎掏空及護基方塊位移補強、消波艙破壞補強及沉箱隙縫探討，相關研擬方案如下詳述。

3.1 基礎掏空及護基方塊位移補強

沉箱之護基方塊已有位移且造成基礎掏空情況，雖然經由安全評估探討，此狀況對沉箱擋浪功能之影響較小，但若長時期之掏空，亦不排除造成沉箱本體損傷而致破壞，其安全性亦需重視。

為因應較嚴重之基礎掏空及護基方塊位移情況，研擬修補基礎掏空方案。

1. 短期方案研擬：

蘇澳港防波堤歷年沉箱內填沙外漏並造成解體破壞狀況影響最大，將直接影響堤體抵禦波浪能力及港內水域之靜穩外，未來混凝土材質劣化問題將愈加嚴重，初步建議可先行於堤面以鑽探方式以確認目前是否有漏沙情形，並視需要採用水中混凝土取代海側第 1 艙之回填沙以加固壁體，如圖 10 所示。

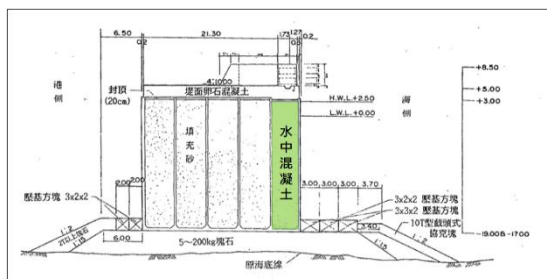


圖 10 沉箱壁體補強斷面示意圖

除對增加蘇澳港堤體穩定略有幫助之外，亦有效增加沉箱外壁強度並避免因 RC 劣化而毀損，確保堤體不致因外壁破壞於短時間內產生漏沙及解體連鎖效應。

2. 永久修復方案：

為防止現有堤基繼續淘空並使其護基方塊達到所需重量，可參考日本於阪神大地震後神戶港之修復工法，建議可採用水中混凝土將現有基礎淘空處及護基方塊一併澆置，如圖 11 所示。藉由水中混凝土修補現有淘空部位，以防止堤基細料繼續流失及使其重量達到 101t 以上，以確保現有堤基之穩定性。

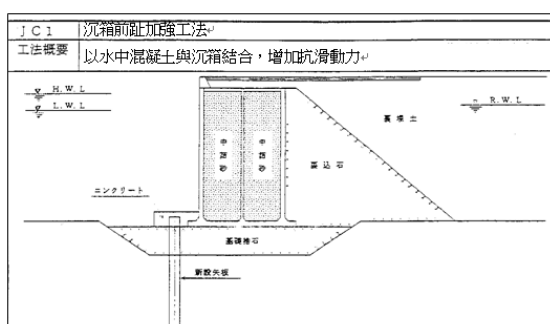


圖 11 永久修復方案示意圖

3. 緊急修復方案：

考量花蓮港現有護基方塊重量不足並已位移，建議可先以吊移或破碎方式將其清除，再利用石塊修補現有基礎淘空處及將堤前拋石基礎整平，最後重新放置開孔或實心方塊作為護基方塊。由前計算可知，若以更新設計條件所計算之 50 年迴歸期颱風波浪計算，其方塊重量需達 101t 或開孔方塊需達 46t 以上，方可確定不會移動，建議可直接採用開孔方塊 $l(m) \times b(m) \times h(m) = 5.0 \times 2.5 \times 2.0$ ， $t=0.3m$ 或空心方塊並回填塊石方式使其重量達到 101t 以上，做為本方案所需之護基方塊。

3.2 消波倉破壞補強及沉箱隙縫探討

1. 消波倉破壞補強，屬防波堤上部胸牆結構，其損壞對防波堤主體結構影響

較低。由消波倉安全評估探討可知，其破壞類型包括開孔面及側牆破壞，但整體而論皆屬於消波倉本身結構性破壞，因此消波倉之補強方案初步可採用以下方法：

(1) 消波倉開孔面及側牆面加厚，消波倉側牆會發生破壞之原因，其中可能是波力作用於外牆時並非均勻分佈，例如波力較偏於一側，則會造側牆受彎矩作用產生破壞而分離。因此，補強方案可採用消波倉開孔面及側牆加厚方式來增加抵抗彎矩破壞作用力，惟此法可能因降低開孔之孔隙率而使堤面承受正向之波力增大，由堤體穩定評估可知，因滑動安全係數依原設計條件估算尚達 1.27，故增加部分波力應不致影響堤體結構安全。

(2) 消波倉內填放塊石或消波塊，此項方法係利用大型塊石填充於消波倉內，除可增加堤體自重外，亦可藉由填充倉內空間來增加消波倉開孔面及側牆抵抗力矩。惟此法須考量消波孔直徑與塊石大小之關係，亦即需採用大型塊石以防止塊石藉由消波孔流失。

(3) 若考慮大型塊石取得不易或容易由消波孔流失問題，則可考量採用消波塊替代，惟填放之消波塊應慎選固定性較佳且適合既有消波倉尺寸之型式。

2. 沉箱隙縫探討經結構穩定計算可知，無論是原設計或本計畫重新推算之波浪條件，其滑動及傾倒之安全係數都大於 1.0，顯示現有沉箱尚無受波浪外力而產生移動之可能。故現有沉箱隙縫應屬施工時所造成，亦即現有沉箱隙縫應為完成初期即發生之情形。由現況調查發現，現有沉箱隙縫尚未造成護基方塊移動或堤基石料淘空情形，是以尚無結構安全疑慮。

未來仍需藉由持續監測瞭解是否有上述之損壞情形，若一經發現因沉箱隙縫所造成淘空之情形，將可比照上述所建議之基礎淘空及護基方塊位移補強方案辦理後續維護。

四、結論

為進一步瞭解部分沉箱堤址較嚴重掏空之內部填充粒料是否有溢出情形，本研究辦理沉箱堤體鑽探工作，由鑽探調查的結果進行探討，可以得知沉箱內填沙所產生之空隙，可能的原因為長年外力震動而導致沙料緊實所致，初期尚無發生沉箱漏沙之可能。而沉箱之內艙雖有空隙，尚無結構安全之影響。目前針對沉箱堤體採用透地雷達及回聲敲擊法調查方式，嘗試新方法之探究和判斷解析之可行性。

護基方塊乃為沉箱堤腳保護之重要一環，護基方塊移動則致使堤基拋石外露，進一步將造成堤基淘空而有傾斜之危險，臺灣東部港口開口胸牆防波堤多為低基式沉箱堤，堤基淘空後將使沉箱發生前傾現象，對沉箱擋浪功能之影響有限，但若長時期之淘空，亦不排除造成沉箱本體損傷而致破壞，故護基方塊之穩定性雖屬附屬保護設施，但其安全性亦需重視，有鑑於現況護基方塊已有移動之情形，顯示現況波浪條件已有超過原設計波浪條件(相當於 10 年颱風波浪條件)，但尚未超過本計畫推算之 50 年颱風波浪設計條件。

堤體穩定分析方面，採用原設計波浪條件及 50 年設計波浪條件進行穩定計算，結果發現若以原設計波浪條件(相當 10 年颱風波浪設計條件)保守估計安全係數皆大於 1.2 而滿足規範需求，而若以本計畫 50 年颱風波浪比對可知，其滑動安全係數保守估計已降為 1.09 而低於規範需求之 1.2，但若以大於 1.0 作為破壞依據，則約可承受 50 年颱風波浪侵

襲，此與現況沉箱本體並無產生結構性破壞之現狀相符。

參考文獻

1. Goda, Yoshimi, Random Seas and Design of Maritime Structures, Tokyo: University of Tokyo Press, Japan, 1985.
2. US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual- Part II, Official Publications of HQ USACE Website, Publications / Engineer Manuals, 2002, EM 1110-2-1100.
3. Ports and Harbours Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT, Port and Airport Research Institute, Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2009.
4. 交通部運輸研究所、台灣世曦工程顧問股份有限公司，蘇澳港防波堤沉箱安全評估及港池靜穩度探討，港灣技術研究中心工作計畫書，2020。
5. 交通部運輸研究所，港灣海氣象觀測資料統計年報，港灣技術研究中心報告，2016~2018。
6. 交通部運輸研究所、台灣世曦工程顧問股份有限公司，蘇澳港灣防波堤沉箱安全評估探討及構造物維護管理資訊系統調查建置工作，港灣技術研究中心報告，2012。
7. 何良勝、曾相茂、吳基、林柏青、蘇青和，臺灣主要港口附近海域長期性海氣象觀測及資料特性應用之研究，交通部運輸研究所，2009~2012。
8. 何良勝、曾相茂、吳基、林柏青、蘇青和，臺灣地區主要港口附近海域海

- 氣象觀測調查及資料庫建立之研究，交通部運輸研究所，2005~2008。
9. 臺灣港務公司高雄港務分公司，高雄港港灣設施維護管理手冊及港灣設施維護管理制度，2006。
 10. 交通部運輸研究所，港灣設施防災技術之研究(一)－港灣構造物維護管理準則之研究，2004。
 11. 交通部，港灣構造物安全檢測與評估之研究，2001。
 12. 湯麟武，港灣及海域工程-中國工程師手冊水利類第 11 篇，中國土木工程學會，1999。
 13. 日本運輸省港灣技術研究所，港灣構造物の維持・補修マニュアル，財団法人沿岸開発技術研究センター，1999。
 14. 臺灣省政府交通處基隆港務局，基隆港務局港埠設施維護檢修作業規定，1998。
 15. 日本運輸省港灣技術研究所，港灣構造物の維持・補修手冊，1996。
 16. 湯麟武，淺灘海岸上波浪推算方法之研究，成功大學土木水利學術彙刊第 1 期，1970，pp.105~164。
 17. 湯麟武，波浪學綱要，臺南水工試驗所印行，1986。
 18. 井島武士等，數值計算颱風域內波分佈-海洋上颱風場合，日本第 14 回海岸工程學講演會論文集，1967。