

花蓮港防波堤沉箱圖像資料調查分析評估

邱永芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
洪維屏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
洪志偉 詮華國土測繪有限公司海測部協理
薛憲文 國立中山大學海洋環境及工程學系教授

摘要

本調查分析評估為「花蓮港碼頭防波堤檢測及修復建議（延續性研究）」計畫之基本資料蒐集，用以調查颱風期間前後花蓮港外防波堤結構物破壞情形，研擬短期及長期的維

護措施及估算工程經費，並提出沉箱式防波堤維護工法以防範未然，使花蓮港防波堤於遭受颱風侵襲後，能有一完整的應變措施。

一、計畫緣起及目的

花蓮港位於臺灣東部，東臨太平洋，西倚中央山脈，是一個由東、西防波堤合攏而成的人工港。花蓮港每年平均受 3.1 次颱風的侵襲，使得東防波堤在颱風期間受波浪之作用，亦引起消波式胸牆的破壞，東防波堤與舊東防波堤受到惡劣波浪與颱風期間極端大浪的侵襲作用，造成防波堤必需每年加以維修與復建，故在花蓮港整體規劃及未來發展預定利用平

面折繞射數值模式針對東防波堤所承受之堤址外力進行評估。

藉由堤址附近圖像資料調查分析；水面上下攝影調查作業；東堤高程、法線量測工作；港區內水深背景地形調查；水面以上結構物檢測評估；各項檢測成果比對；沉箱安全評估探討分析；潮位站維修保養工作等項進行花蓮港防波堤沉箱圖像資料調查分析評估。

二、現況環境

調查分析評估地點為花蓮港東防波堤及西防波堤港灣構造物附近海域範圍調查。工作範圍包含①東堤：測區範圍沿著花蓮港東防波堤(新舊東堤)，內外

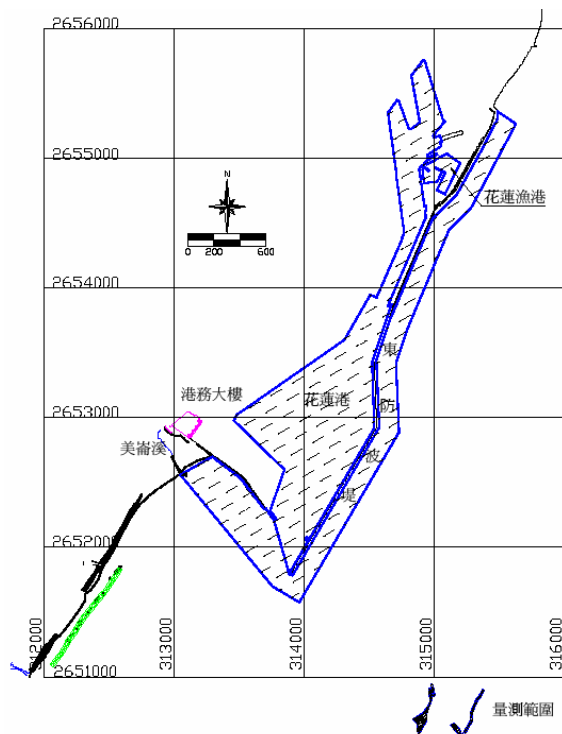


圖 1 港區內水深背景地形調查範圍(斜線區域)

二側各 50 公尺測區，北自舊東堤賞鯨碼頭堤岸區，南至新東堤堤頭燈塔處，測帶寬約 100 公尺，全長約 4 公里測帶，面積約 0.4 平方公里的水深資料及水下結構物。②西堤：測區範圍沿著花蓮港西防波堤內外二側各 50 公尺測區，測帶寬約 100 公尺，全長約 7 百公尺測帶，面積約 0.07 平方公里的水深資料及水下結構物。其中港區內水深背景地形調查範圍如圖 1 斜線區域所示；堤址附近圖像資料調查分析範圍如圖 2 所示。

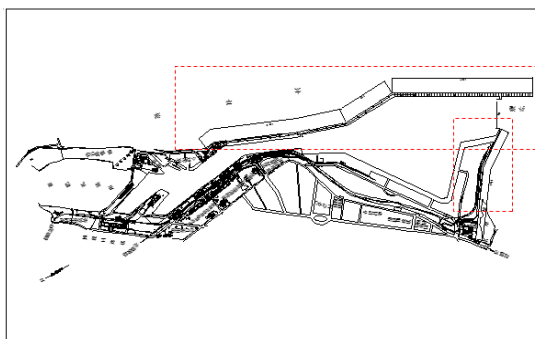


圖 2 花蓮港東防坡堤沉箱檢核背景地形調查基本圖像和資料之建立作業區域示意圖

三、花蓮港防波堤沉箱圖像資料調查

3.1 花蓮港測深調查

1. 堤址附近圖像資料調查分析

堤址附近圖像資料調查分析主要採用多音束測深系統進行施測。主要作業步驟包含事前準備工作、測線規劃、儀器檢校、儀器架設及疊合測試

(patch test)外，在進行水深測量(測深)同時，亦需再進行船隻導航及定位、水位觀測、水中聲速量測、船隻姿態角觀測等工作項目，將所有觀測蒐集的資料進行內業處理與計算，才可得到歸算後的水深地形成果(成果詳圖 3)。

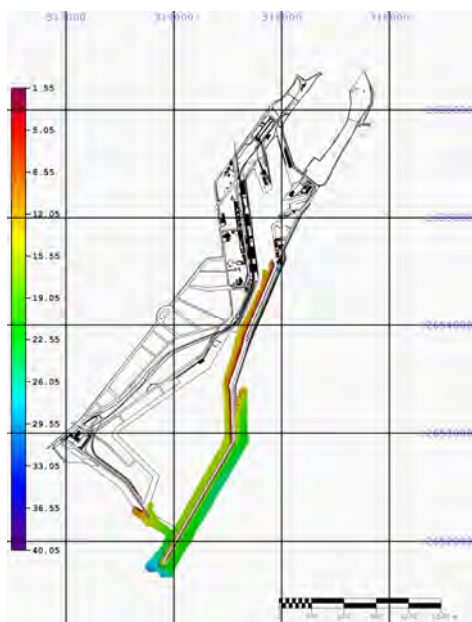


圖 3 堤址附近圖像資料調查成果

2. 港區內水深背景地形調查

此外，使用多音束測深系統測量花蓮港港區內及港外至 30 米處水深地形(成果詳圖 4)。

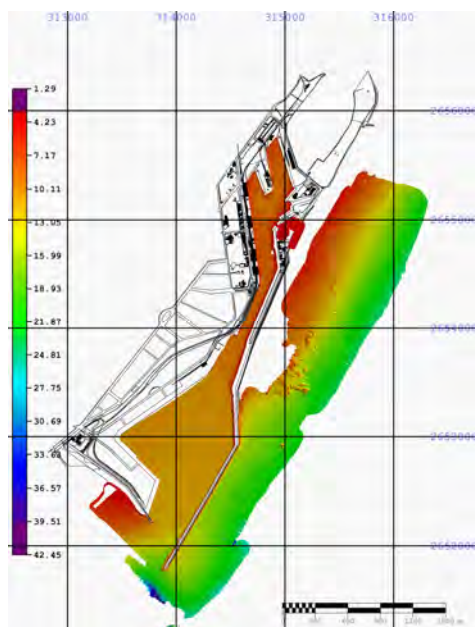


圖 4 港區內水深背景地形調查成果

3.2 水面上下攝影調查作業

於花蓮港東防波堤與花蓮外港西防波堤進行水下檢查堤腳及堤址並施做水下攝影，主要採用潛水夫以人工進行水下攝影方式，可即時人為判斷並以錄影和人工量測方式來描述潛堤區消波塊堆置情形。

1. 第一次攝影調查作業(106/06)

本次攝影調查作業成果如表 1(表格內藍字部分為堤腳異常處，紅字為大區塊或明顯異常部份)，攝影檢查沉箱數量新東堤 74 座，其中新東堤#01 號沉箱於新舊堤銜接處因淺水激浪區無法靠近攝影。

東堤堤腳發現護基方塊異位或位移共有 4 處，沉箱編號分別為 S13、S14、S32 及 S57 等。

東堤堤腳發現較嚴重護基方塊明顯異位或位移達 2 公尺以上共有 10 處，沉箱編號分別為 S15、S16、S17、S19、S26、S27、S33、S35、S41 及 S68 等(其中 S26、S27 及 S35 均有蛇籠灌漿等施工修復現象)。

2. 第二次攝影調查作業(106/11)

本次攝影調查作業成果如表 2(表格內紅字為明顯異常部份)，攝影檢查沉箱數量新東堤 74 座，其中新東堤 S01 號至 S06 號及 S09 至 S11 號沉箱已明顯放置大型消波塊，已全部覆蓋沉箱垂直壁面。西堤則進行 4 座，堤內銜接#25 號碼頭，堤外則大型消波塊堆積，只能前進至 S05 號沉箱。

東堤堤腳發現護基方塊明顯異位或位移達 2 公尺以上共有 14 處，沉箱編號分別為 S13、S14、S15、S16、S17、S19、S26、S27、S32、

S33、S35、S41、S57 及 S68 等(其中 S26、S27 及 S35 均有蛇籠灌漿等施工修繕現象)。

表 1 第一次水下攝影調查成果(僅標出異常處)

沉箱編號	堤腳狀況及異常說明
S13	外側護基方塊位移 內側護基方塊位移1M
S14	外側護基方塊明顯位移 內側護基方塊明顯位移2.5M
S15	內側護基方塊連續明顯位移最大3M 沉箱底部掏空
S16	沉箱外凸60cm 外側護基方塊連續明顯長距離位移
S17	沉箱外凸大於3M 外側護基方塊明顯位移2M以上 內側護基方塊底部掏空 外側護基方塊下陷
S19	外側護基方塊連續明顯位移
S26	外側護基方塊連續明顯長距離位移 內側護基方塊長距離蛇籠灌漿
S27	內側護基方塊長距離蛇籠灌漿
S32	外側護基方塊明顯位移2M 內側護基方塊底部掏空
S33	內側護基方塊明顯連續位移最大2M 塊石堆積
S34	塊石堆積 護基方塊堆積於塊石上(高1層)
S35	護基方塊明顯位移 內側護基方塊長距離蛇籠灌漿
S41	外側護基方塊明顯連續位移達3M以上
S57	外側護基方塊長距離位移
S68	外側護基方塊明顯連續位移

表 2 第二次水下攝影調查成果(僅標出異常處)

沉箱編號	堤腳狀況及異常說明
S68	外側護基方塊明顯連續位移 最大約3M
S57	外側護基方塊長距離位移
S41	外側護基方塊明顯連續位移達3M以上
S35	護基方塊明顯位移 內側護基方塊長距離蛇籠灌漿
S33	內側護基方塊明顯連續位移最大3M 塊石堆積
S32	外側護基方塊明顯位移 內側護基方塊底部掏空
S27	內側護基方塊長距離蛇籠灌漿
S26	內側護基方塊長距離蛇籠灌漿
S19	沉箱外凸80cm 外側護基方塊位移
S17	外側護基方塊明顯位移2M以上 內側護基方塊底部掏空 外側護基方塊下陷
S16	沉箱外凸大於3M 外側護基方塊連續明顯長距離位移 內側護基方塊底部掏空
S15	內側護基方塊連續明顯位移最大3M 沉箱底部掏空
S14	外側護基方塊明顯位移 內側護基方塊明顯位移2.5M
S13	外側護基方塊位移 內側護基方塊位移1M

3.3 水面以上結構物檢測評估

西防波堤堤體現況檢視可知其主體係採沉箱堤，海側則拋放 20 噸

雙 T 型塊；而由水上檢視成果可知，水面上之防波堤堤體無位移及剝落等情形發生，整體而言並無明顯損壞，惟後續仍建議持續辦理巡查檢視；海側部份之消波塊可知現況水上消波塊尚保持完整，惟於部份防波堤海側有加拋消波塊之情況，為加強其保護堤體之功能。而西防波堤堤面部份，經檢視堤頂及胸牆出現數處裂縫，堤頂亦有部份陷落及修補情形，惟因其大抵並無明顯損壞情況，經評估應不影響堤體功能及安全性，尚不需立即辦理修繕，建議後續仍持續辦理巡查檢視。

舊東防波堤堤體之主體係採拋石堤，910~990M 處之海側則加拋 10 噸鼎型塊；而由水上檢視成果可知，堤頂除出現數處裂縫以外，亦有部份陷落情形，惟經評估應不影響堤體功能及安全性，尚不需立即辦理修繕，建議後續仍持續辦理巡查檢視。

新東防波堤堤體之主體係沉箱堤，且於海側為加強衰減波浪之功效，則採開孔消波艙之設計；新東防波堤共有 74 座沉箱，#1~#15 沉箱僅堤頂出現數處裂縫，且消波艙有部份

剝落；#16~#30 沉箱堤頂與消波艙皆出現數處裂縫及剝落，於消波艙亦有部份錯位情形，此應是當初施做消波艙係採分次施工所致，破壞情況皆是發生在施工交接面上；#31~#60 沉箱堤頂及消波艙僅出現數處裂縫與部份剝落；#61~#74 沉箱堤頂及消波艙僅出現數處裂縫及部份剝落，惟因其已進行修補，經評估並不影響堤體功能及安全性，建議後續仍持續辦理巡查檢視，此外沉箱有錯位情況發生，研判可能為沉箱於安放時之誤差，惟不影響堤體安全。

此外，另比較 98 年與今(106)年水上檢視比較成果可知，於東堤 #27、#31 及 #63 沉箱處自 98 年起已有毀損情況，且截至今年為止，該破壞情形並無擴大加劇之跡象；而於東堤 #28 沉箱處有出現部份剝落情況，但此破壞情形應不影響堤體功能及安全性；另於東堤 #51 沉箱處於 98 年時有部份損壞、鋼筋外露之現象，但與今年現勘成果相比，該部份已進行修補工程。整體而言，計畫區並無增加明顯之損壞情況，惟後續仍建議持續辦理巡查檢視。

四、作成果資料比對及與歷年調查資料之比對

4.1 多音束影像檢測

將本年度兩次堤腳測量的成果彙整如表 3 及摘錄部份影像如圖 6 所示，由影像可發現在東堤內堤腳處多有塊石散落，外堤堤腳之護基方塊部

分有明顯位移，有關單位需持續注意沉箱之現況。表中標示紅字為護基方塊已明顯位移，標示藍色為護基方塊已有位移之跡象。



圖 5 堤體現況檢視照片

表 3 堤腳多音東影像檢測(僅標出異常處)

沉箱編號	堤腳狀況及異常說明
13外	外側護基方塊明顯位移
14外	外側護基方塊明顯位移，內側護基方塊部分位移
15外	外側護基方塊明顯滑落，內側護基方塊部分位移
16外	外側護基方塊明顯位移
17外	外側護基方塊明顯位移
18外	外側護基方塊堆疊不平整
19外	外側護基方塊明顯位移
20外	外側護基方塊堆疊不平整
26外	外側護基方塊明顯滑落，內側護基方塊不平整
27外	外側護基方塊明顯滑落
30外	外側護基方塊微幅位移
31外	外側護基方塊明顯位移
32外	外側護基方塊明顯位移
33外	外側護基方塊明顯滑落，內側護基方塊微幅位移
34外	內、外側護基方塊明顯位移
35外	外側護基方塊明顯滑落
36外	外側護基方塊明顯位移
38外	外側護基方塊微幅位移
39外	外側護基方塊微幅位移
40外	外側護基方塊微幅位移
41外	外側護基方塊明顯位移
45外	外側護基方塊微幅位移
57外	外側護基方塊明顯位移
59外	外側護基方塊微幅位移
67外	外側護基方塊微幅位移
68外	外側護基方塊微幅位移
70外	外側護基方塊明顯位移

4.2 歷史資料比對

本團隊蒐集到 97 年全港域水深資料並與本年度資料進行比對，將 106 年夏季(106/06)與 97 年水深地形資料匯入 Golden Surfer 地形資料處理軟體，以 5 米網格資料進行海域地形侵淤比較

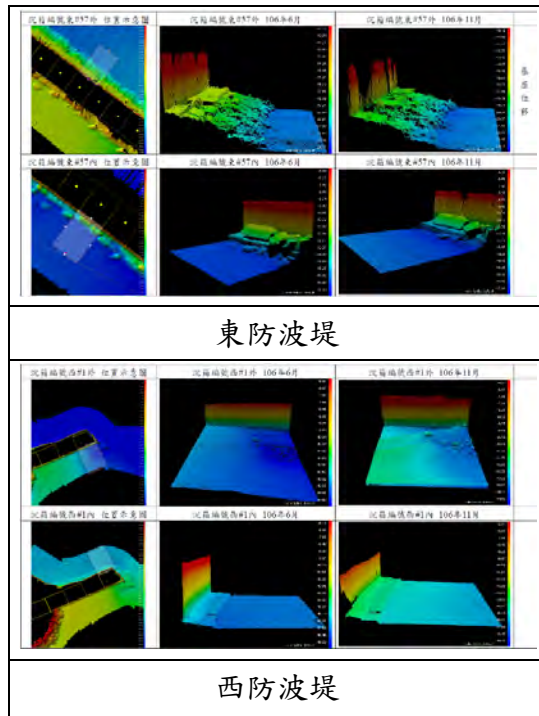


圖 6 堤腳多音東影像檢測比較圖

(圖 7)。紅色代表淤積、藍色代表侵蝕，侵淤深度單位為米。由圖中可發現在港內呈現全面淤積，淤積幅度約在 1~2 米，在東堤外海則侵淤互現，整體地形變化不大。

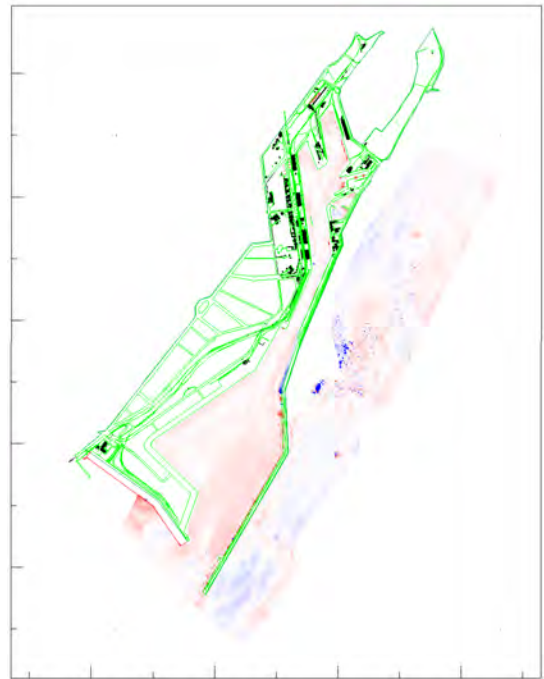


圖 7 海域地形侵淤比較圖

五、沉箱安全評估探討分析

5.1 安全性分析及破壞原因檢討

花蓮港東防波堤自民國19年建港以來，期間歷經多次擴建全長共有1,837公尺，而至今88年間亦遭受多次的颱風及地震的洗禮，依花蓮港務局提供資料顯示，花蓮港防波堤曾在歐菲莉(1990)、黛特(1990)、艾美(1991)、提姆(1994)、道格(1994)、安珀(1997)、碧利斯(2000)、

梅姬(2016)等颱風侵襲時發生之破壞，其中以民國83年提姆颱風來襲時造成胸牆487公尺之結構破壞最為嚴重。

1. 現場結構物破壞原因及災損資料蒐集與分析

為瞭解花蓮港東防波堤過去曾發生之破壞情況，初步蒐集過往現勘照片，並佐以花蓮港務局提供之相關災

損照片，將破壞型式大致歸納為以下幾類。

(1)消波塊體的流失情形

於東堤海側，原拋放 40t 或 50t 之消波塊都已消失於水下，由於原設計用於抵擋或削減波力之消波塊已滑落至水下，導致東防波堤所受波力增大，將對東防波堤結構安全產生不良之影響。

(2)防波堤堤體的破損情形

東堤亦曾發生防波堤堤體破損情況，原沉箱堤面場鑄混凝土已不復可見，且因受颱風影響，沉箱堤體已被巨浪完全貫穿，於水面上可視之堤體均已消失，僅剩港側胸牆以長跨距型式懸空於堤址上，如此將造成防波堤不連續，形成一缺口，且因其通水面積束縮，流速加快，未來將可能導致缺口兩側堤址之淘刷，擴大堤體破壞面積。

(3)海側開孔胸牆的斷裂與位移情形

由於開孔胸牆係採取分層澆置，可能因施工縫未妥善處理導致產生混凝土弱面，若再加上極端波浪作用下，將使混凝土單元間因失去摩擦抵抗力而發生移動及破壞

之情形。

(4)側牆的裂縫情形

消波艙側牆發生直線型裂縫之龜裂現象，此原因可能是大量越波水量以及由孔洞進入消波室的水量在某一特殊時間差的狀況下，限制了消波室裡空氣或水量的溢散，導致因壓縮而對消波室側壁產生側向波壓，最終使側壁因承受超過預期之波力而發生龜裂，另由新的側牆修復型式可看出，除依原先設計尺寸外，並新增直徑6”之洩壓孔，應是為減少側向波壓之功能。

5.2 結構物堤址波浪外力評估

1.基本條件資料蒐集及分析-颱風波浪

本計畫區位於台灣東海岸，平均每年約有 1.25 個颱風侵襲附近海域，故附近港工結構物之設計皆須以颱風波浪為基準。因此，颱風資料之完整蒐集及颱風波浪之準確推算，將直接影響海上工程之安全及結構物之安定；以港工結構物設計之 50 年迴歸期設計條件而言，本計畫區受 ENE 向影響最大，其外海波浪條件 $H_s=18.2m$ 、 $T_s=17.9sec$ ，並逐漸向南遞減，至 S 方向時降為 $H_s=10.7m$ 、 $T_s=13.7sec$ 。

表 4 花蓮外海各方向各迴歸期颱風設計波高分析表

波向	250		200		100		50		25		20		10	
	H_s	T_s	H_s	T_s	H_s	T_s	H_s	T_s	H_s	T_s	H_s	T_s	H_s	T_s
S	13.9	15.7	13.4	15.4	12.1	14.6	10.7	13.7	9.3	12.8	8.9	12.5	7.5	11.5
SSE	14.6	16.0	14.3	15.9	13.3	15.3	12.2	14.7	11.0	13.9	10.6	13.7	9.2	12.7
SE	16.7	17.2	16.4	17.0	15.2	16.4	14.0	15.7	12.6	14.9	12.2	14.7	10.6	13.7
ESE	19.8	18.7	19.4	18.5	18.1	17.9	16.6	17.1	15.1	16.3	14.5	16.0	12.8	15.0
E	20.8	19.2	20.4	19.0	19.0	18.3	17.5	17.6	15.9	16.7	15.4	16.5	13.5	15.4
ENE	21.9	19.7	21.4	19.4	19.8	18.7	18.2	17.9	16.4	17.0	15.8	16.7	13.8	15.6
NE	19.9	18.7	19.4	18.5	18.0	17.8	16.4	17.0	14.7	16.1	14.1	15.8	12.2	14.7
NNE	16.2	16.9	15.8	16.7	14.5	16.0	13.2	15.3	11.7	14.4	11.2	14.1	9.6	13.0
N	12.7	15.0	12.4	14.8	11.2	14.1	10.0	13.3	8.7	12.4	8.2	12.0	6.8	11.0

註：1.依據 1940~2016 年間之颱風資料推算。

3.目標區水深為-141m。

2.推算目標區為 $121.65^{\circ}E$ ， $23.94^{\circ}N$ 。

4. H_s 單位為 m， T_s 單位為 sec。

2.折繞射平面數值分析

經由颱風波浪推算(詳表 4),計畫區影響較大之颱風波浪係以 NE、ENE、E 及 ESE 向颱風為主,為了解何種方向波浪對近岸波高之影響較大,採用民國 106 年 6 月之水深測量結果進行數值分析,且於各堤段間取一處沉箱以代表該堤段特性,並據以將其 $K_r K_d$ 極值取出,配合各方向 50 年颱風波浪之入射波高,可得現況海堤之相當外海波高結果。

而根據水面下攝影調查作業,西防波堤無出現明顯損壞,近岸側亦有淤積現象,故西防波堤部份逕取堤頭處之#1 號沉箱予以分析;於新東防波堤部份,依其轉折可分為兩段,分別是#1~#22 號沉箱(簡稱新東防波堤北段)及#23~#74 號沉箱(簡稱新東防波堤南段);由水下攝影成果,於新東防波堤北段堤段, #9~#20 號沉箱有基礎破壞加大趨勢,故初步選定#15 號沉箱予以分析;而於新東防波堤南段堤段, #26~#27、#32~#36 號沉箱有基礎破壞加大之趨勢,惟其皆有近期修補痕跡,另於#41、#45、#57、#67、#68 號沉箱皆具潛在破壞可能,故初步選擇#57 號沉箱進行後續分析;分析現況海堤之相當外海波高結果可知,西堤#1、東堤#15 及#57 號沉箱之相當外海波高(H_o)最大值分別為 5.47m、17.29m 及 17.93m,波向則介於 ENE~ESE 向;圖 8 為各方向颱風波浪經由 NSW 模式計算所得之 $K_r K_d$ 分佈圖,後續進行結構安全性分析時,將以此結果作為評估之外力條件依據。

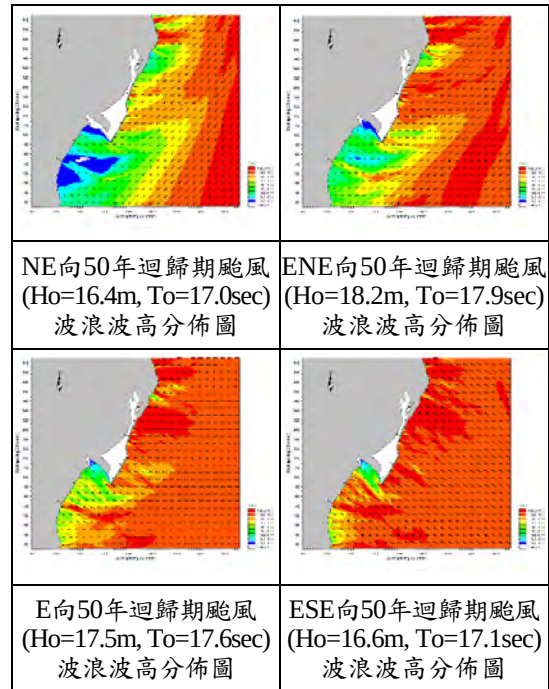


圖8 50年迴歸期颱風波浪波高分佈圖

3.舊有及現今設計條件之比對檢討

有鑑於花蓮港新東防波堤之沉箱為消波式結構,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,惟今該項公式已有部分修正,亦即隨著波浪作用狀況的不同,此時公式中之 λ_1 、 λ_2 之值應做修正,故後續進行波力計算時,將分別依三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進行消波式沉箱外力條件檢核。

(1)原設計條件波力計算結果：

今以破壞較嚴重之以新東堤 #57 號沉箱為例,對照原有設計條件圖,相當於 EB-7 沉箱堤段,各項計算條件詳如表 5 所示,其標準斷面圖詳如圖 9 所示。

表 5 新東堤#57 號沉箱各項原計算條件一覽表

計算條件項目	數值	計算條件項目	數值
設計水位(m)	+3.0	堤趾水深h(m)	23
深海波向	E	直立部份之水深h'(m)	20.5
海底坡度	1/50	堤頂出水高度hc(m)	7.0
堤前5倍H1/3距離處之水深hb(m)	24.17	堤前設基層頂面水深d(m)	12.5
週期T(sec)	14.6	相當外海波高Ho'(m)	12.7
波向線與堤線之夾角 $\alpha(^{\circ})$	74	深海波高Ho(m)	12.6

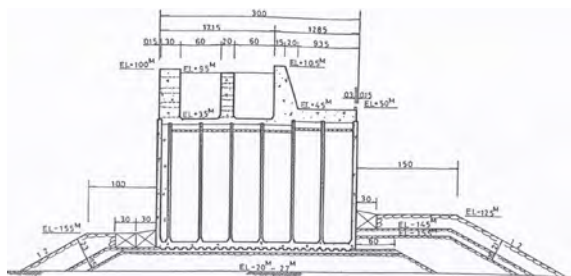


圖 9 新東堤#57 號沉箱(EB-7)標準斷面圖

(2)本計畫設計條件波力計算結果：

由於採用新規範估計之波力較設計為低，顯示原設計條件乃為偏保守，但經長時間颱風資料之修正，50 年迴歸期之 ESE 向颱風浪已增加達 32%，重新計算其

堤址波力詳表 7 所示。由表可知水平波力達 442t，較原設計 409t 為大。

表 6 原有堤址波力計算結果

種類	參數	計算結果
示性波高與最大波高	$H_s(m)$	18.8
	$H_{max}(m)$	11.7
波力合成力及其力矩	$P(t)$	409.23
	$U(t)$	185.31
	$M_p(t-m)$	5677.83
	$M_u(t-m)$	3706.02

表 7 本計畫設計條件波力計算結果

種類	參數	Case I	Case II a	Case III b
波力合成力及其力矩	$P(t)$	442	395	379
	$U(t)$	245	66	-68
	$M_p(t-m)$	5535	5826	5935
	$M_u(t-m)$	4902	1456	-1096

(3)小結

採用本計畫之颱風波浪結果，並以平面折繞射數值模式重新推算堤址波高比對後可知，相當外海波高 H_0' 由原設計 12.7m 增加至 17.93m，波高增加達 41%，經採用 Goda 波壓修正係數檢核後，總波力由 381t 增加至 442t，增加幅度達 16%，顯示原設計條件偏危險，惟考量東防波堤現況沉箱堤並無明顯移動現象，顯示此設計波高尚符合實際需求。

表 8 本計畫推算結果與原設計條件比對 (以東堤#57 號沉箱為例)

	深海波向	週期(sec)	深海波高(m)	K_s	$K_r K_d$	$H_0'(m)$	總波力 $P(t)$	浮力及上揚力 $U(t)$	總波力力矩 $M_p(t-m)$	上揚力力矩 $M_u(t-m)$
原設計條件	E	14.6	12.6	0.97	1.01	12.7	381	204	4806	4089
本計畫推算結果	ESE	17.10	16.6	0.99	1.08	17.93	442	245	5535	4902

5.3 舊有結構物防波堤結構安全性分析 -計算結果與分析

1.護基方塊護面石及堤址塊石重量計算

(1)原設計計算結果

原設計結構計算書並無交代護基方塊重量計算方式，而由原設計圖 A 型(4mx 3mx2m)及 B 型(3mx(2m+2.5m)x4m/2)方塊尺寸，可計算其重量分別為 55.2t 及 62.1t。

(2)本計畫分析結果

經上述 Hudson 公式及谷本勝利(Tanimoto)利用原設計颱風波浪條件(相當本計畫 10 年颱風波浪)計算結果可得，本計畫方塊重量最少須達到 43t，經檢討可知現況方塊無論 A 型及 B 型重量(分別為 55t 及 62t)皆大於 43t，應可符合 10 年颱風波浪之設計需求，惟由現場堤址攝影與測量結果可知，現況方塊有明顯移動情形，此移動現象可能為原設計波浪太小或規範建議之方法有其限制性，經採用本計畫重新推算之相當外海波高 $H_0'=17.93\text{m}$ 重新檢核，發現所需護基方塊重量為 104t 且大於現況護基方塊之重量，顯示原設計波浪條件可能不足。

2.堤體穩定分析

(1)原設計條件計算結果探討

由原設計報告結構計算檢核發現，除波力計算(包括 P 及 U)皆統一採用乘上 0.9 外，另外在被动土壓力計算上，其考慮為背填土為無限邊坡下所能提供之反力，惟實際堤後拋石基礎頂寬僅 15m，應屬

有限邊坡且能提供之被动土壓甚小，一般可忽略不計，因此，經此修正後其滑動安全係數(SFS)降為 1.16。另檢核其傾倒安全係數發現，其將總揚壓力矩(M_u)當作破壞力矩而相加於分母，惟依防波堤設計規範中規定 M_u 應當作抵抗力矩而相減於分子，故依此修正後滑動安全係數(SF_o)提高為 1.61。

另由本計畫考量不同情況下波壓修正計算後，波力較原設計報告總波力(P)減小約介於 93%至 81%間，總揚力(U)增減互見，變化範圍介於+111%至-37%(負表方向相反)。因此，Case I 之波力減小但揚力增加，導致滑動安全係數僅提升約 13%，傾倒安全係數提升 13%，而 Case II a 之波力及揚力皆減小，導致滑動安全係數及傾倒安全係數大幅增加，分別提升 55%至 41%，最後 Case II b 之波力減小幅度最大且揚力甚至改為向下作用，因此，其滑動安全係數及傾倒安全係數分別提升 83%至 67%，詳表 9 所示。

(2)本計畫設計條件之計算結果探討

在穩定計算部分，由原設計報告檢核可知，其滑動安全係數經被动土壓不計之修正後，其值已降為 1.16 而不滿足規範要求之 1.2，但經本計畫波壓修正計算後，即使採用最大波力保守計算下，其滑動安全係數仍為 1.27 而高於規範 1.2 之需求。而傾倒安全係數經修正後，原設計安全係數反而提升至

1.61，其值已符合規範需求，經本計畫波壓修正後，則安全係數上升後更偏保守。顯示原波浪設計條件下，堤體穩定性並無疑慮，另若進一步採用本計畫之 50 年颱風波浪條件，詳表 10 所示，則顯示現有堤體安全性保守估計為 1.03 而不符合規範需求，但若考量安全係數以大於 1.0 為判定堤體破壞之依據，則估計現有防波堤約可承受約 50 年迴歸期以上之颱風波浪。

表 9 東堤#57 號沉箱採用原設計波浪條件之波壓修正穩定計算表

	CaseI		CaseIIa		CaseIIb		原設計 結果
	數值	比例	數值	比例	數值	比例	
總波力(P):	381	93%	352	87%	328	81%	407
總波力矩(M _p):	4806	85%	5332	95%	5182	92%	5636
總揚壓力(U):	204	111%	29	16%	-68	-37%	185
總揚壓力矩(M _u):	4089	111%	728	20%	-1131	-31%	3692
總防波堤重力(W _A):	1470	100%	1470	100%	1470	100%	1470
總防波堤重力矩(M _A):	22237	100%	22237	100%	22237	100%	22237
總浮力(W _B):	633	100%	627	99%	633	100%	633
總浮力矩(M _B):	9498	100%	9498	100%	9498	100%	9498
堤體水中重(W _A -W _B -U):	633	97%	814	125%	905	139%	652
堤體水中重力矩(M _A -M _B -M _u):	8650	96%	12011	133%	13870	153%	9046
SF _S =[P*(W _A -W _B -U)]/P:	1.27	113%	1.73	155%	2.05	183%	1.16
SF _R =(M _A -M _B -M _u)/M _p :	1.81	113%	2.27	141%	2.69	167%	1.61

註：1. 此處採用原颱風波浪設計條件，相當於本計畫 10 年迴歸波浪。 2. 負表方向相反。

表 10 東堤#57 號沉箱採本計畫 50 年颱風波浪之波壓修正穩定計算

	CaseI		CaseIIa		CaseIIb		原設計 結果
	數值	比例	數值	比例	數值	比例	
總波力(P):	442	109%	395	97%	379	93%	407
總波力矩(M _p):	5535	98%	5826	103%	5935	105%	5636
總揚壓力(U):	245	133%	66	36%	-68	-37%	185
總揚壓力矩(M _u):	4902	133%	1456	39%	-1096	-30%	3692
總防波堤重力(W _A):	1470	100%	1470	100%	1470	100%	1470
總防波堤重力矩(M _A):	22237	100%	22237	100%	22237	100%	22237
總浮力(W _B):	633	100%	627	99%	633	100%	633
總浮力矩(M _B):	9498	100%	9498	100%	9498	100%	9498
堤體水中重(W _A -W _B -U):	592	91%	777	119%	905	139%	652
堤體水中重力矩(M _A -M _B -M _u):	7837	87%	11283	125%	13835	153%	9046
SF _S =[P*(W _A -W _B -U)]/P:	1.03	92%	1.48	132%	1.78	159%	1.16
SF _R =(M _A -M _B -M _u)/M _p :	1.43	89%	1.95	121%	2.34	145%	1.61

註：1. 本計畫採用 50 年 ESE 向颱風波浪作為設計條件。 2. 負表方向相反。

3.消波艙結構安全性探討

由前節之整體外力作用下堤體

可符合安全之要求，但由現場消波艙破壞情況，顯示可能有大於消波艙所能負荷之外力作用發生，因而產生破壞。由於消波艙主要受側向波力作用，以下將針對消波艙之混凝土剪力破壞及因分段施工造成之接合面破壞加以探討。

(1)消波艙之剪力破壞分析

原設計結構計算書並無交代護基方塊重量計算方式，而由原設計圖 A 型(4mx 3mx2m)及 B 型(3mx(2m+2.5m)x4m/2)方塊尺寸，可計算其重量分別為 55.2t 及 62.1t。

混凝土剪力計算強度公式如下：

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}b_wd$$

V_c：剪力強度(kg)

f'_c：混凝土之抗壓強度(kg/cm²)

b_w：寬度

d：單位寬度

以目前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 之條件予以計算，可知以 175kg/cm²之混凝土打設下，30cm*200cm 之混凝土面積至少可承受約 112ton 之外力，遠大於波力所產生之外力，由此可知，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。

(2)混凝土分段施工面之破壞分析

由前述分析可知，在混凝土結構完整之條件下，混凝土本身可承受極大之剪力，但由於消波艙之高

度達 7m 左右，且必須施作消波艙之開孔，所以在實際施工時必須分次施工，依現場相片研判，每次打設之厚度約為 1.0m~1.5m 左右，部份之破壞是由施工交接面所產生，詳圖 10 所示。

由圖可看出，消波艙外壁頂部之混凝土與下層之混凝土間並無完整之接合，所以當波力作用時，消波艙外壁僅能依靠重力所產生摩擦力保持穩定，但當颱風大浪來襲時，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飛離之情況。

初步以現場相片及斷面資料，以一次打設 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 11.17 ton/m² 作為初步驗核之基準。

A. 波力計算

原設計結構計算書並無交代護基方塊重量計算方式，而由原設計圖 A 型(4m x 3m x 2m)及 B 型(3m x (2m + 2.5m) x 4m/2)方塊尺寸，可計算其重量分別為 55.2t 及 62.1t。

受力面積：

$$1.5 * (4 * 2 + 0.8) - 4 * \pi * 1.42^2 / 4 = 7.04 \text{ m}^2$$

波力總合：

$$11.17 \text{ ton/m}^2 * 7.04 \text{ m}^2 = 78.64 \text{ ton}$$

B. 混凝土剪力計算

以後側牆高 1m 為條件，整理堤後可能破壞角及波力於破壞面上之分力如表 11 及圖 11 所示。



圖 10 消波艙破壞示意圖

由以上計算顯示，外牆後之側牆可提供之剪力大於波力，而在破壞角約為 50° 兩者差值最小，但剪力仍較波力多出約 22.67ton，顯示在外牆受均勻力量作用時，側牆不致於產生剪力破壞之情形。

進一步探討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，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，但因非均勻受力無法詳細加以計算，建議後續應針對此部份再予以探討。

表 11 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

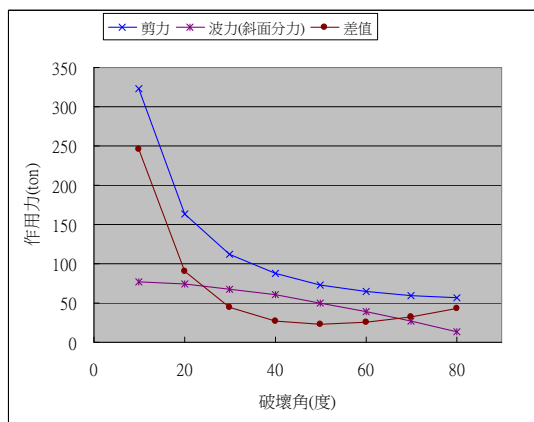


圖 11 堤後破壞角與波力及剪力關係圖

(3)消波艙結構計算結果

經檢核單一消波艙之結構安全，此處採用海側之前消波艙，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，其尺寸詳圖 12 所示。計算結果可知，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，另所需配筋之尺寸因尚無法取得原設計配筋圖，故目前僅能計算符合安全需求之配筋量，惟俟日後取得原設計圖時再行檢核。

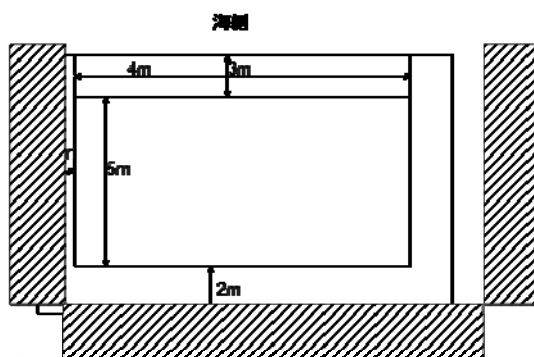


圖 12 消波艙尺寸示意圖

5.4 受損結構補強方案評估研擬

1.補強短期(急迫性)方案研擬

(1)基礎掏空及護基方塊位移補強方案研擬

考慮現有護基方塊移動將造成堤基掏空後使沉箱發生前傾現象，此狀況對沉箱擋浪功能之影響有限，但若長時期之掏空，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，今研擬修補基礎掏空方案，分述如后。

緊急修復-利用拋石修復基礎掏空並採用空心或開孔方塊作堤基：

考量現有護基方塊重量不足並已位移，故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掏空處及將堤前拋石基礎整平，最後，再重新放置開孔或實心方塊作為護基方塊，惟由前述護基方塊計算可知，若以本計畫所計算之 50 年迴歸期颱風波浪計算，其方塊重量需達 104t 或開孔方塊需達 47t 以上，方可確定不會

移動，故建議可直接採用開孔方塊($l(m) \times b(m) \times h(m) = 5.0 \times 2.5 \times 2.0, t = 0.3 m$)或空心方塊並回填塊石方式使其重量達到 104t 以上，作為本計畫所需之護基方塊。

2. 補強長期(逐年維護)方案研擬

(1) 基礎淘空及護基方塊位移補強方案研擬

逐年維護-利用水中混凝土修補淘空部位：

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，詳圖 13 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 104t 以上，以確保現有堤基之穩定性。

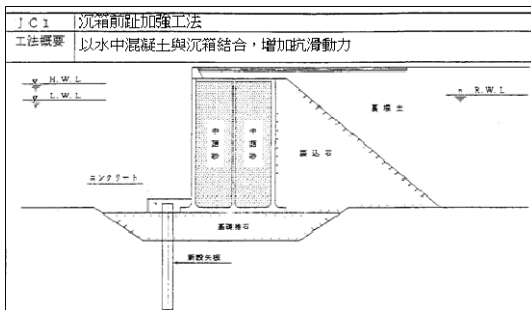


圖 13 沉箱前趾加強工法圖

(2) 消波艙破壞補強方案研擬

有鑑於消波艙屬防波堤上部胸牆結構，其損壞對防波堤主體結構之影響較低，故建議僅需考慮逐年維護(永久修復)方案，視未來運研所經費籌措情形辦理即可，今將消波艙破壞之修復方案說明如后。

經上述消波艙安全性分析可知，其破壞類型包括開孔面及側牆破壞兩種，但整體而論皆屬於消波艙本身結構性破壞，因此，消波艙之補強方案初步可採用以下幾種方法。

A. 消波艙開孔面及側牆面加厚

因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，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艙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，但由現況堤體穩定分析可知，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安全結構。

B. 消波艙內填放塊石

此法係利用大型塊石填充於消波艙內，除可增加堤體自重外，亦可藉由填充艙內空間來增加消波艙開孔面及側牆抵抗力矩，惟此法需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，有關消波效果，則可以水工模型試驗加以確認。

C. 消波艙內填放消波塊

此法補強原理與上述填放塊石相同，惟考慮大型塊石取得不易，且容易由消波孔流失之問題，因此，可考量採用消波塊替代，惟填放之消波塊應慎選固定

性較佳且適合本計畫既有消波
倉尺寸之型式。

(3)沉箱隙縫問題探討

經查沉箱隙縫約達 0.4m～1.0m，考量原先沉箱與沉箱間距在施工時均預留 0.1m～0.2m，故首先需釐清現有沉箱隙縫是否為受波浪外力所產生之移動或是施工階段因定位不當而產生之？經本計畫結構穩定計算可知，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，顯示現有沉箱因無受波浪外力而產生移動之可能，故現有沉

箱隙縫應屬施工不當所造成之情形，亦即現有沉箱隙縫應為完成初期即發生之情形，故將不致有持續擴大之趨勢發生。惟需注意未來隙縫可能造成護基方塊移動或堤基石料淘空之情形，所幸經現有勘查結果發現，現有沉箱隙縫尚未造成上述損壞情形，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，將可比照本計畫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。

六、沉箱式防波堤維護工法探討

年度之定期檢測由定期檢測小組進行檢測，對及防波堤設施進行重點式的了解，目測混凝土表面外觀損壞狀況，以及檢測法線變形情形、岸肩沉陷量、鋼板(管)樁腐蝕電位...等，配合檢測評估表，辦理檢測評估，以作為後續維護

管理之依據。

為配合沉箱式防波堤檢測評估項目，並綜合上述之維護管理工法依結構位置及劣化項目，概分為水上部份及水下部份，彙整如表 12 所示。

表 12 沉箱式防波堤維護管理工法一覽表

檢測位置和項目		劣化程度	維護管理工法
水上部份	胸牆	龜裂損傷 (龜裂寬度目測均 <3mm, 龜裂長度目測均 <5cm)	「裂縫注入工法」
		明顯損傷 (龜裂寬度目測均 >3mm, 龜裂長度目測均 >5cm)	「充填增厚工法」
	剝離與鋼筋外露	胸牆斷落	「斷面修復工法」
		局部混凝土剝落	「充填增厚工法」
	堤面	胸牆損傷致高度不足	「斷面修復工法」
		混凝土剝落致鋼筋外露	「防蝕噴漿工法」
		輕微損傷 (龜裂寬度目測均 <3mm, 龜裂長度目測均 <5cm)	「裂縫注入工法」
		明顯損傷 (龜裂寬度目測均 >3mm, 龜裂長度目測均 >5cm)	「充填增厚工法」
		堤面混凝土斷裂	「鋪面修復工法」
		輕微不均勻沈陷 (輕微積水)	「無筋頂面增厚工法」
		明顯不均勻沈陷 (嚴重積水)	「斷面修復工法」
	鋼筋外露	局部混凝土剝落	「充填增厚工法」
		混凝土剝落致鋼筋外露	「防蝕噴漿工法」
水下部份	沉箱	堤面混凝土斷裂	「斷面修復工法」
		輕微損傷 (龜裂寬度目測均 <3mm, 龜裂長度目測均 <5cm)	「裂縫注入工法」
	沉箱	明顯損傷 (龜裂寬度目測均 >3mm, 龜裂長度目測均 >5cm)	「充填增厚工法」
		雙體側端混凝土剝落致鋼筋外露	「防蝕噴漿工法」
	護基方塊	堤體側端混凝土剝落致鋼筋外露	「防蝕噴漿工法」
		堤體側端混凝土斷裂 (破洞)	「鋼支撐工法」
	變位	部分發生下陷位移 (變位量均 <5cm)	「方塊固結工法」
		小規模下陷位移 (變位量均 5~10 cm)	「重置改善工法」
	消波塊	大範圍下陷位移 (變位量均 >10 cm)	「新製補強工法」
		部分消波塊移動或滾落	「加拋改善工法」
基礎部份	沉箱	消波塊散落沈陷連一層, 堤體滑動安全率有減低之虞	「拋石護基工法」
		消波面減少, 堤體滑動安全率已減低	「斷面修復工法」
	消波塊	消波面減少, 堤體滑動安全率已減低	「加寬補強工法」
		輕微沖刷 (沖刷坑深度均 <50cm)	「拋石護基工法」
	基礎海床	大量沖刷 (沖刷坑深度均 50 ~ 100cm)	「斷面修復工法」
		嚴重沖刷 (沖刷坑深度均 > 100cm)	「基礎加寬補強工法」
	沖刷	輕微沖刷 (沖刷坑深度均 <50cm)	「拋石護基工法」
		大量沖刷 (沖刷坑深度均 50 ~ 100cm)	「斷面修復工法」
	基礎海床	嚴重沖刷 (沖刷坑深度均 > 100cm)	「基礎加寬補強工法」
		輕微沖刷 (沖刷坑深度均 <50cm)	「拋石護基工法」

七、結論

1.經蒐集花蓮港原設計計算書，並以現今港灣技術規範加以檢討可知：

(1)採用本計畫之颱風波浪結果並以平面折繞射數值模式重新推算堤址波高比對後可知，相當外海波高 H_0' 由原設計 12.7m 增加至 17.93m，波高增加達 41%，經採用 Goda 波壓修正係數檢核後，總波力由 381t 增加至 442t，增加幅度達 16%，顯示原設計條件偏危險，惟考量 20 年東防波堤現況沉箱堤並無明顯移動現象，顯示此設計波高尚符合實際需求。

(2)原設計之波壓乃考量消波沉箱 90%之消能效果，但以現今消波沉箱之規範計算，則總波力約 72%~84%之消能效果。故皆較原設計波壓折減係數小，顯示原

設計波力計算為偏保守，故對現有結構安全應有正面之影響。

(3)沉箱於堤後背填塊石提供抵擋力量，早期在無規範限制下，原計算方式尚可接受，但若以現今規範標準，則背堤石料所提供之抵抗力將大為減弱，經此修正後原設計報告其滑動安全係數(SFS)由原來的 1.32 降為 1.16，雖仍大於 1 但已不符合設計規範要求。

(4)經本計畫波壓修正計算後，即使採用最大波力保守計算下，其滑動安全係數仍為 1.27 而高於規範 1.2 之需求。而傾倒安全係數經修正後，原設計安全係數反而提升至 1.61，其值已符合規範需求，經本計畫波壓修正後，則安全係數上升後更偏保守。

(5)另若進一步採用本計畫推算之波浪條件，則顯示現有堤體安全性保守估計為 1.03 而不符合規範需求，但若考量安全係數以大於 1.0 為判定堤體破壞之依據，則估計現有防波堤約可承受約 50 年回歸期以上之颱風波浪。

由上述之檢討可知，原設計乃符合早期之設計準則，但以現今規範檢討原設計，雖波力經重新針對波壓折減係數修正後減少，但因早期被動土壓力有高估的現象，因此，相互抵銷後滑動安全係數保守估計僅提升 6%，但已可符合現今規範需求。而傾倒安全係數因總上揚力矩修正為於分子計算後，其值反較原設計報告高。基此，於穩定計算上，若以安全係數大於 1.0 作為破壞依據，堤體結構無論是滑動或傾倒皆符合現況安全需求，此與現況沈箱本體並無破壞之結果一致。

2.花蓮港防波堤主要之損害以護基方塊及消波艙之破損為主，其現象歸納如下：

(1)護基方塊破損與位移

在早期並無嚴謹之設計方法（一般要求為 30T 以上），但現今規範乃採用谷本勝利之試驗公式定之，經谷本勝利(Tanimoto)計算結果可得本計畫方塊重量最少須達到 43t，與原設計比較可知現況方塊無論 A 型及 B 型重量皆大於 43t，應可符合現況環境需求，惟由現場堤址攝影與測量結果可知，現況方塊有明顯移動情形，此移動現象可能為原設計波浪太小或規範建議之方法有其限制

性，經本計畫重新推算之相當外海波高 $H_0' = 17.93\text{m}$ 重新檢核，發現所需護基方塊重量為 104t 且大於現況護基方塊之重量，顯示原設計波浪條件可能不足。

(2)消波艙之破壞

A.以目前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 之條件予以計算，可知至少可承受約 112ton 之外力作力，遠大於波力所產生之外力，由此可知，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。

B.消波艙側牆部分，由混凝土剪力計算顯示，外牆後之側牆可提供之剪力大於波力，而在破壞角約為 50° 兩者差值最小，但剪力仍較波力多出約 22.67ton，顯示在外牆受均勻力量作用時，側牆不致於產生剪力破壞之情形。進一步探討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，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，但因其受力情形不易模擬，建議應藉由詳細數值模式加以分析研判。

C.消波艙開孔部分，破壞主因應為鋼筋混凝土分段施工之連貫性不佳所致，由現場勘查可看出，消波艙外壁頂部之混凝土與下層之混凝土間並無完整之接合，所以當波力作用時，消波艙外壁僅能依靠重力所產生摩擦力及後側隔牆支撐保持穩

定，但當颱風大浪來襲時，若側牆因不均勻受力造成破壞，

則將連鎖反應以致產生外壁破壞飛離之情況。

參考文獻

1. 2013 年港灣海氣象觀測資料年報，港灣技術研究中心，民國 102 年。
2. 公共工程施工綱要規範。
3. 花蓮港第四期擴建設計報告。
4. 花蓮港碼頭防波堤檢測及修復建議，民國 102 年。
5. 花蓮港整體規劃及未來發展計畫 (2002~2006)，民國 102 年。
6. Shore Protection Manual. 1984.
7. Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan, 2009.