防蝕工程　第三十卷第三期第 19～29 頁　2016 年 9 月
Journal of Chinese Corrosion Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 19～29 (September, 2016)

防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：http://www.anticorr.org.tw

10.6376/JCCE.201609_30(3).0003

花蓮港碼頭主體設施調查與評估之研究
Study of Wharf Field Investigation and Its Evaluation at Hualien Harbor

柯正龍、陳桂清
Jeng-Long Ko , Kuei-Ching Chen

中文摘要

花蓮港位居臺灣東部，瀕臨太平洋，每年夏、秋兩季常有颱風襲擊，加上地震頻繁，碼頭主體設施受波浪衝擊、地震力作用及海水鹽分侵襲，甚易損壞或腐蝕。為確保碼頭設施正常運作，提升維護管理效能與掌握設施現況，本文特對該港碼頭，進行岸上目視調查、非破壞性檢測與現況評估。目視調查發現數座R.C.碼頭有混凝土剝落、內部鋼筋腐蝕外露，鋼板樁碼頭其鋼板樁表面銹蝕破裂。依非破壞性檢測數據評估，碼頭混凝土品質仍符合設計要求，內部鋼筋腐蝕斷裂機率偏高，鋼板樁無法倖免腐蝕侵襲，應加強後續監測及檢測頻率。

關鍵詞：碼頭；維護管理；非破壞性檢測。

Abstract

Hualien harbor locates at eastern part of Taiwan and on the brink of Pacific Ocean. There are many typhoons during summer and autumn seasons, earthquakes and huge wave attacking harbor facilities, which could cause seriously damages. For assuring the normal operation of harbor wharf, escalating maintenance with efficient management and realizing actual current situations for all the wharfs at harbor area were under field investigated and evaluated.

Keywords: Wharf; Maintenance management; Nondestructive-testing (NDT).

收到日期：107 年 4 月 20 日　　修訂日期：107 年 8 月 27 日　　接受日期：107 年 10 月 16 日

交通部運輸研究所港灣技術研究中心
Harbor and Marine Technology Center
*聯絡作者： jerry@mail.ihmt.gov.tw

1. 前言

花蓮港位居臺灣東部瀕臨太平洋，每年夏、秋兩季常有颱風襲擊，加上地震頻繁，防波堤、碼頭等港灣構造物受波浪衝擊、地震力作用及海水鹽份侵襲，構造物甚易損壞或腐蝕，降低港池水域安定性與遮蔽等功能，對港口安全與營運有重大的影響。

綜觀過往，本港之 17 至 25 號碼頭、西防波堤海側及新舊東堤港內側交接處，於民國 80 年四期擴建完工迄今未曾進行檢測；近年來內港之 4 至 6 號之鋼板樁碼頭，其鋼板樁於潮間帶發現有多處銹蝕裂縫。由於港埠啟用迄今多已超過 40 年，港埠設施維護為一經常性業務，常因人事異動，或無專人辦理系統性分門別類及彙整，致使維護資料管理中斷或資料不完整，決策上層甚難掌握港埠設施現況。

本文除對本港 1 至 25 號碼頭，進行岸上目視調查、非破壞性檢測與評估外，並彙整本所歷年有關碼頭與防波堤維護管理之既有成果，提出維修改善建議。

2. 研究方法

2.1 構造物及維修資料蒐集

(1) 構造物基本資料蒐集

基本資料蒐集包括有隸屬港口、碼頭編號、碼頭長度與縱深、靠泊水域深度(原設計水深及調查水深)、靠泊船隻屬性(如貨櫃、雜散貨輪、化學品等)、靠泊船級、最大噸位與碼頭構造型式等。

(2) 檢測及維修資料蒐集

檢測歷史紀錄包含：檢測單位、檢測人員、檢測日期、檢測區分（初步或細部檢測）與檢測結果，如有特別註記或維修，應附上記錄檔案名稱、編號等。

2.2 岸上目視調查

依據本所研擬之港灣構造物檢測項目與標準[1-2]及花蓮港碼頭主體設施結構型式拆解構件。重力與板樁式碼頭外觀相似，僅構築之方式與建造材料不同，重力式以沉箱或方塊式混凝土堆砌為主體，板樁式則以板樁作為壁體，並於其後回填土砂，再於板樁頂部澆築鋼筋混凝土頂壁，加築碼頭面層。故其構件可分為碼頭本體、海床與附屬設施，碼頭本體可再分為岸肩、壁體、後線與法線(如圖 1 所示)，附屬設施可再分為車擋、繫船柱、防舷材與吊車軌道(如圖 2 所示)。

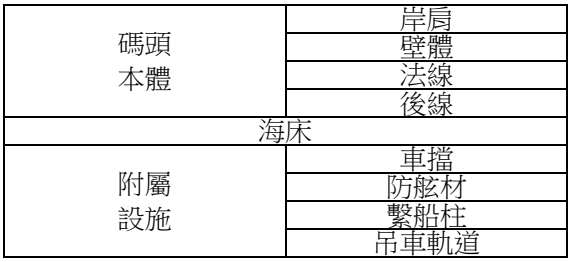

圖 1　重力與板樁式碼頭構件。
Figure 1　Gravity and sheet pile wharf members.

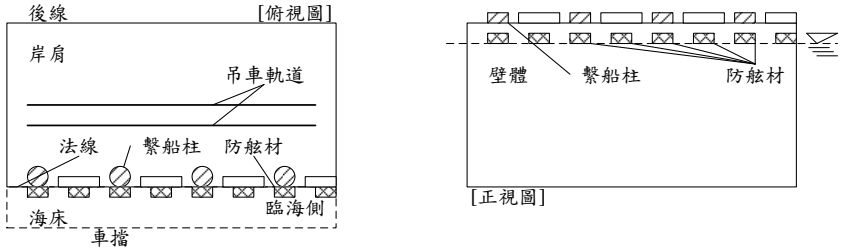

圖 2　重力與板樁式碼頭構件拆解圖示。
Figure 2　Figures of gravity and sheet pile Wharf members.

調查時，以近距離目視觀察碼頭陸上結構體混凝土表面外觀損壞狀況，如裂縫、剝落、破洞、鋼筋外露或腐蝕…等之初步觀察鑑定，描繪記錄劣損位置及情形，各座碼頭陸上混凝土結構體應逐一編號記錄。劣化狀況依其程度分為 a、b、c、d 四個等級，a 為構件性能有顯著弱化情況；b 為構件性能有弱化情況；c 為有異狀，但還不到構件性能弱化狀態；d 為未有異狀。各座碼頭結構體應逐一編號記錄。表 1 及表 2 分別為重力與板樁式碼頭目視檢測標準與其分級。

表 1　重力碼頭目視檢測標準。
Table1　Visual inspection standards of gravity wharf.

第 1 層構件	第 2 層構件	劣化類型	劣化狀況	劣化狀況說明
碼頭本體	岸肩	裂縫	d	無異狀
			c	局部($1m^2$)可見到 2 個以下寬度 3mm 以下的裂縫
			b	局部($1m^2$)可見到 3 個以上寬度 3mm 以下的裂縫或裂縫寬度約 3~5mm
			a	裂縫擴散至整個岸肩或裂縫寬度大於 5mm
		剝落	d	無異狀
			c	混凝土輕微剝落且鋼筋尚未露出或剝落寬度<15 cm，深度<2.5 cm
			b	鋼筋混凝土鋼筋(或鋼筋網)外露腐蝕或剝落寬度≦15 cm，深度>2.5 cm 或剝落寬度>15 cm，深度≦2.5 cm
			a	鋼筋混凝土鋼筋外露腐蝕，且鋼筋下方混凝土剝落，且剝落寬度>15 cm，深度>2.5 cm
		沉陷	d	無異狀
			c	岸肩輕微下陷(面積<5 m^2 或深度<2.5 cm)
			b	岸肩明顯下陷(面積≦5 m^2、深度>2.5 cm 或面積>5 m^2、深度≦2.5 cm)
			a	岸肩嚴重下陷(面積>5 m^2 或深度>2.5 cm)
	壁體	裂縫	d	無異狀
			c	局部($1m^2$)可見到 2 個以下寬度 3mm 以下的裂縫
			b	局部($1m^2$)可見到 3 個以上寬度 3mm 以下的裂縫或裂縫寬度約 3~5mm
			a	裂縫擴散至整個岸肩或裂縫寬度大於 5mm
		剝落	d	無異狀
			c	混凝土輕微剝落且鋼筋尚未露出或剝落寬度<15 cm，深度<2.5 cm
			b	鋼筋混凝土鋼筋(或鋼筋網)外露腐蝕或剝落寬度≦15 cm，深度>2.5 cm 或剝落寬度>15 cm，深度≦2.5 cm
			a	鋼筋混凝土鋼筋外露腐蝕，且鋼筋下方混凝土剝落，且剝落寬度>15 cm，深度>2.5 cm
		漏砂	d	無異狀
			c	壁體出現孔洞，但並未漏砂
			b	壁體裂縫已可觀察出漏砂
			a	背填砂經由大型破洞露出，或孔內看不到砂
	後線	沉陷	d	無異狀
			c	後線輕微下陷(深度<5cm 或面積<5m^2)
			b	後線明顯下陷(5≦深度≦10cm 或 5m^2≦面積≦10m^2
			a	後線嚴重下陷(深度>15 cm 或面積>20 m^2)
	法線	變位	d	無異狀
			c	—
			b	—
			a	嚴重變位
海床		沖刷	d	無異狀
			c	基礎輕微淘刷(以文公尺丈量沖刷坑深度 50cm 以下)
			b	基礎中等淘刷(以文公尺丈量沖刷坑深度 50~100cm)
			a	基礎嚴重淘刷(以文公尺丈量沖刷坑深度 100cm 以上)

表 2　板樁式碼頭目視檢測標準。
Table 2　Visual inspection standards of sheet pile wharf.

第 1 層構件	第 2 層構件	劣化類型	劣化狀況	劣化狀況說明
碼頭本體	岸肩	裂縫	d	無異狀
			c	局部($1m^2$)可見到 2 個以下寬度 3mm 以下的裂縫
			b	局部($1m^2$)可見到 3 個以上寬度 3mm 以下的裂縫或裂縫寬度約 3~5mm
			a	裂縫擴散至整個岸肩或裂縫寬度大於 5mm
		剝落	d	無異狀
			c	混凝土輕微剝落且鋼筋尚未露出或剝落寬度<15 cm，深度<2.5 cm
			b	鋼筋混凝土鋼筋(或鋼筋網)外露腐蝕或剝落寬度≦15 cm，深度>2.5 cm 或剝落寬度>15 cm，深度≦2.5 cm
			a	鋼筋混凝土鋼筋外露腐蝕，且鋼筋下方混凝土剝落，且剝落寬度>15 cm，深度>2.5 cm
		沉陷	d	無異狀
			c	岸肩輕微下陷(面積<5 m^2 或深度<2.5 cm)
			b	岸肩明顯下陷(面積≦5 m^2、深度>2.5 cm 或面積>5 m^2、深度≦2.5 cm)
			a	岸肩嚴重下陷(面積>5 m^2 或深度>2.5 cm)
	壁體	接縫開裂	d	無異狀
			c	開裂深度輕微(文公尺可入裂縫約<10cm 深)
			b	開裂深度中等(文公尺可入裂縫 10~20cm 深)
			a	開裂深度嚴重(文公尺可入裂縫約>20cm 深)
		穿孔	d	無異狀
			c	小範圍區域的鏽蝕現象
			b	帶狀區域的鏽蝕現象
			a	連續性多範圍鏽蝕，鋼板指表面穿孔(面積大於 12 cm^2)擴大且有漏砂現象
		防蝕性能降低	d	海水下，防蝕電位 <-850mV(v.s. CuSO4 電極)；潮間帶以上鋼材有塗裝保護，外觀完好
			c	海水下，-780mV <防蝕電位< -850mV；潮間帶鋼材塗裝面積破損率 3~5%
			b	海水下，-650mV <防蝕電位< -780mV；潮間帶鋼材塗裝面積破損率 5~10%
			a	海水下，防蝕電位 < -650mV；潮間帶鋼材無塗裝保護或塗裝面積破損率達 10%以上
	後線	沉陷	d	無異狀
			c	後線輕微下陷(深度<5cm 或面積<5m^2)
			b	後線明顯下陷(5≦深度≦10cm 或 5m^2≦面積≦10m^2)
			a	後線嚴重下陷(深度>15 cm 或面積>20 m^2)
	法線	變位	d	無異狀
			c	—
			b	—
			a	嚴重變位
海床		沖刷	d	無異狀
			c	基礎輕微淘刷(以文公尺丈量沖刷坑深度 50cm 以下)
			b	基礎中等淘刷(以文公尺丈量沖刷坑深度 50~100cm)
			a	基礎嚴重淘刷(以文公尺丈量沖刷坑深度 100cm 以上)

2.3 非破壞性檢測、半破壞性檢測與試驗室試驗

(1) 非破壞性檢測

A. 反彈錘法

檢測時選定面積約 1 × 2 m 的混凝土表面，繪製 20 cm 見方之方格進行反彈錘試驗，每一方格測試 12 次，計算反彈值時先將最大與最小值剔除後，求得其平均值。由反彈值可推估鑽心試體之抗壓強度。

B. 混凝土電阻係數量測

量測時於混凝土表面鑽取定距離之兩孔(約 5 公分)，吹出孔內因鑽孔而產生之粉塵顆粒後，注入凡士林做為介質，接著以具兩個探針(頭)之電阻量測儀進行試驗。混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕速率之關係如表 3 所示。

C. 鋼筋腐蝕電位量測

混凝土內之鋼筋腐蝕是一種電化學反應，在鋼筋表面會形成陰極(鈍態)和陽極(正在腐蝕部位)，不同位置會有不同的電位

和電流，應用此原理可測量某一範圍之電位分佈情形，以評估鋼筋表面上發生腐蝕的可能程度。依據 ASTM C-876 規範，鋼筋腐蝕電位與腐蝕機率之關係如表 4 所示。

D. 保護層厚度量測

應用非破壞性電磁儀器鋼筋測定儀(R-Meter)，量測鋼筋保護層的厚度，瞭解施工品質，提早決定若保護層厚度不足時應採取之因應對策。保護層愈厚則對於防止水份、鹽份、氧氣等滲透之能力就愈大，故能提高防蝕能力。設計時應配合環境條件規定適當的保護層厚度，根據國外資料，在海洋環境下飛沫帶，鋼筋混凝土結構物的保護層厚度最少須 75 ㎜以上。

(2) 半破壞性檢測與試驗室試驗

本檢測主要為執行混凝土鑽心試體取樣，目的為決定結構體部份區域之混凝土抗壓強度，同時取出之試體可做中性化試驗與超音波脈波檢測。

A. 中性化試驗

測定混凝土中性化深度及區域，最簡便常用之方法為酚酞試劑，將現場所鑽取之混凝土試體或敲除之混凝土，放置在乾燥環境讓試體自然乾燥後，再將混凝土表面上噴灑酚酞指示劑。

觀察指示劑顏色的變化，以判斷其中性化深度，該試劑在 pH 值在 8.5 以上之鹼性環境中會變為紅色，而 pH 值在小於 8.5 的環境下則為無色，實際測定則以剖面的分界點來判定未中性化程度。一般在維修時，即以此方法來判定應敲除混凝土劣化區域與決定修復範圍。

B. 抗壓試驗

依據 CNS 1232 混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法試驗之。試體長度直徑比小於 2 時，可將求得之抗壓強度乘以表 5 之修正因數。

C. 超音波脈波速度量測

使用超音波脈波速度測定儀，量測在硬固混凝土材質內超音波脈波之傳遞速度，瞭解混凝土之品質狀況。脈波速度與混凝土品質關係如表 6 所示，可作初步研判。

D. 氯離子含量檢測

AASHTO-T260 為硬固混凝土氯離子含量試驗規範(水溶法)，此法乃是將混凝土粉末，浸泡於蒸餾水中，加熱沸騰後，靜置 24 小時後過濾之，以離子層析儀測得之 Cl^- 含量。氯離子含量與鋼筋腐蝕機率之關係如表 7 所示。

表 3　混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕速率之關係[4]。

Table 3 Relationship between the coefficient of resistance and corrosion rate.

混凝土電阻係數 (KΩ-cm)	鋼筋腐蝕速率
< 5	極高
5>10	高
10-20	低~中等
>20	低

表 4　ASTM C-876 鋼筋腐蝕電位與腐蝕機率關係。

Table 4 ASTM C-876 relationship between steel bar corrosion potential and corrosion probability.

鋼筋電位值 mV (CSE)	腐蝕機率
> -200	< 5%
-200 ~ -350	50% ~ 95%
< -350	> 95%

註：CSE ($CuSO_4$ 參考電極)

表 5　圓柱試體長度直徑比[5]。

Table 5 Cylindrical specimen length diameter ratio.

試體長度直徑比	1.75	1.50	1.25	1.10	1.00
強度修正因數	0.98	0.96	0.93	0.90	0.87

表 6　超音波脈波速度與混凝土品質之關係[6]。
Table 6 Relationship between ultrasonic pulse wave velocity and quality of concrete.

脈波速度(m/sec)	混凝土品質狀況
< 2000	很差
2000 ~ 3000	差
3000 ~ 3500	中等
3500 ~4000	良
4000 ~4500	優良
> 4500	很優良

表 7　氯離子(Cl^-)含量與鋼筋腐蝕機率之關係[7]。
Table 7 Relationship between chloride ion content and steel bar corrosion probability.

Cl^-含量 (%，佔水泥量)	Cl^-含量 (kg/m^3 混凝土)	鋼筋腐蝕機率
< 0.4	< 1.5	可忽略
0.4 ~ 1.0	1.5 ~ 3.5	可能腐蝕
1.0 ~ 2.0	3.5 ~ 7.0	或有腐蝕
> 2.0	> 7.0	一定腐蝕

3. 結果與討論

3.1 構造物基本及檢測維修資料蒐集

花蓮港共計有 25 座碼頭，其基本資料與位置如表 8 及圖 3 所示。

3.2 岸上目視檢測

碼頭岸上目視檢測時，發現少部分碼頭面版出現龜裂、沈陷、材質劣化；岸肩、車擋混凝土剝落或鋼筋腐蝕外露；碼頭後線下陷；護舷材破損、材質劣化及裂縫或螺栓鬆脫；繫船樁表面腐蝕與飛沫帶鋼板樁孔蝕等現象，劣化狀況多為 b、c 等級，屬於無立即性危損及營運安全，碼頭劣損狀況如表 9 所示，部分劣損照片如圖 4。25 號碼頭後線沉陷之劣化異狀，因其劣化狀況較為嚴重，惟水下檢測並未發現壁體有異狀，此碼頭鄰近西防波堤，故需確認鄰近此區域之堤防是否有異狀發生，目前建議以回填料填補壓實法改善，但需進行結構分析，瞭解成因與是否影響安全性，再進行結構補強。

表 8　花蓮港碼頭基本資料。
Table 8 Wharf fundamental data at Hua-lien harbor.

編號	用途	長度(m)	設計水深(m)	碼頭結構	建　造　日　期
1 號	雜貨	123	-7.5	混凝土重力式	民國 19 年至 28 年
2 號	雜貨	153	-7.5	混凝土重力式	〃　〃
3 號	雜貨	134	-7.5	混凝土重力式	〃　〃
4 號	雜貨、油品	160	-8.5	鋼板樁式	民國 48 年至 51 年
5 號	雜貨	160	-8.5	鋼板樁式	〃　〃
6 號	雜貨	150	-8.5	鋼板樁式	民國 58 年至 62 年
7 號	雜貨	120 18	-6.5 -6.5	重力式 鋼板樁式	〃　〃
8 號	水泥	220	-10.5	鋼板樁式	〃　〃
9 號	雜貨	103	-9.5	鋼板樁式	民國 63 年至 67 年
10 號	水泥石料	368	-9.5	混凝土重力式	〃　〃
11 號	水泥石料	368	-9.5	混凝土重力式	民國 63 年至 67 年
12 號	雜貨	150	-7.5	混凝土重力式	〃　〃
13 號	雜貨	370	-9.5	混凝土重力式	〃　〃
14 號	雜貨	370	-9.5	混凝土重力式	〃　〃
15 號	雜貨	100	-8.5	混凝土重力式	〃　〃
16 號	客運	144	-7.5	混凝土重力式	〃　〃

編號	用途	長度(m)	設計水深(m)	碼頭結構	建　造　日　期
17 號	雜貨	200	-12.0	消波方塊式	″　″
18 號	水泥	200	-12.0	消波方塊式	民國 70 年
19 號	水泥	310	-14.0	消波沉箱式	民國 71 年
20 號	石料	302	-14.0	消波沉箱式	民國 73 年
21 號	石料	200	-14.0	消波沉箱式	民國 74 年
22 號	石料	200	-14.0	消波沉箱式	民國 75 年
23 號	木片	272	-14.0	消波沉箱式	民國 76 年
24 號	油品	271	-14.0	消波沉箱式	民國 76 年
25 號	煤	332	-16.5	消波沉箱式	民國 78 年

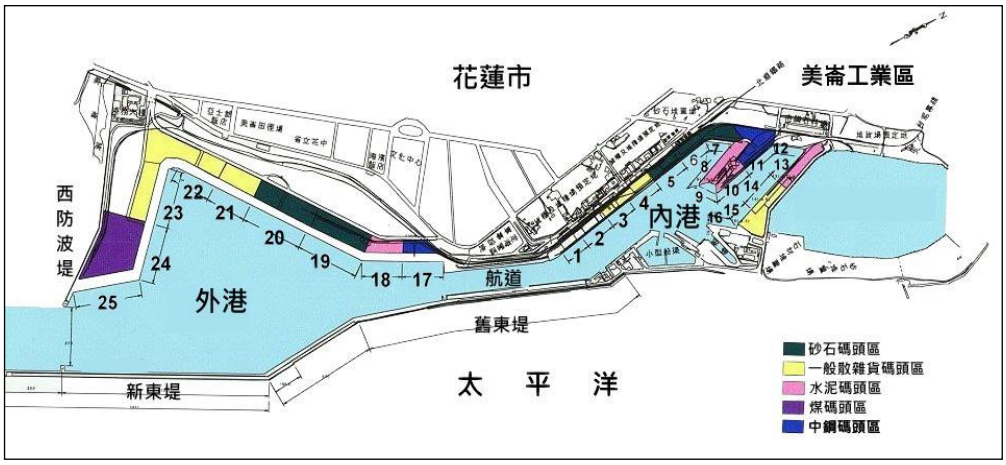

圖 3　花蓮港平面圖。
Figure 3　Plan of Hua-lien harbor.

表 9　岸上目視檢測結果與建議改善對策。
Table 9　Visual inspection results and recommending improvement strategy.

碼頭名稱	構件與劣化類型	劣化狀況等級	劣化單元	劣化位置	劣化數量	改善對策
3 號	防舷材 龜裂破損	b	B01	第 1 個	1 個	建議排入 年度維修
9 號	岸肩裂縫	c	B01	X=1m、 Y=3m	16m	
	車擋龜裂破損	c	B02	第 1 個	1 個	
20 號	岸肩剝落	b	B09	X=12m Y=0m	1m^2	
	防舷材 龜裂破損	b	B07	第 2 個	1 個	
21 號	岸肩剝落	b	B03	X=12m Y=0m	0.5m^2	
22 號	岸肩剝落	b	B03	X=7.4m Y=0m	2.8m^2	
23 號	岸肩剝落	b	B07	X=16.6m Y=3.5m	1.08m^2	
25 號	後線沉陷	a	B10	X=3m	10m^2	建議採用回填料填補壓實法，但需進行結構分析瞭解成因與是否影響安全性，再進行結構補強

碼頭面版龜裂、沈陷情形
(5 至 6 號碼頭)

岸肩混凝土剝落或鋼筋腐蝕外露情形(4 至 5 號碼頭)

護舷材破損、材質劣化情形

繫船樁表面腐蝕情形

飛沫帶鋼板樁表面腐蝕情形
(4 至 5 號碼頭)

碼頭後線沉陷
(25 號碼頭)

圖 4　碼頭設施劣損現況。
Figure 4　Degradation of wharf facilities.

3.2 非破壞性檢測、半破壞性檢測與試驗室試驗

依碼頭及防波堤不同結構型式，分別選定 6-8 號（重力方塊式）、17 號、21 號、24-25 號（重力沉箱式）等進行現地反彈錘、混凝土電阻係數、鋼筋腐蝕電位、保護層厚度量測等非破壞性檢測，並鑽取混凝土試體量測中性化深度，試體並攜回試驗室進行抗壓強度、超音波脈波速度及氯離子濃度等試驗。現地作業情形如圖 5 所示。

(1) 反彈錘試驗

以反彈錘檢測 7 座碼頭岸壁，檢測結果如表 10。由平均反彈值推估，岸壁混凝土抗壓強度約在 226 ~ 438 kg/cm^2 之間，以 6 號碼頭強度最高，24 號碼頭最低。鑽心取樣試體外觀比較，6 號碼頭混凝土粒料大小粒徑分佈、級配較均勻，24 號碼頭則有出現氣泡與細小孔洞。

圖 5　非破壞性檢測現地作業情形。
Figure 5　Non-destructive testing in-site operation.

(2) 混凝土電阻係數

一般而言，混凝土電阻係數越大，內部鋼筋腐蝕速率越低，相對關係如表 3。本次試驗結果如表 10，電阻係數多在 5～10 KΩ-cm 之間，顯示其內部鋼筋腐蝕機率高。

(3) 鋼筋腐蝕電位

以硫酸銅參考電極量測碼頭岸壁鋼筋腐蝕電位，量測結果如表 10。大部分鋼筋腐蝕電位值均介於 -212 ~ -432 mV 之間，依據 ASTM C876 規範(如表 4)，本次調查之碼頭岸壁內部鋼筋腐蝕機率為 50%以上，其中部分鋼筋腐蝕電位值小於 -350 mV，則其腐蝕機率可能高達 95%。

(4) 保護層厚度量測

以鋼筋探測儀檢測碼頭岸壁鋼筋保護層厚度，量測結果如表 10。大部分保護層厚度介於 7.2 ~ 15 cm 之間，應符合海洋環境構造物設計規範之要求。低於 7.5 cm 部分，保護層稍有不足，推斷原因可能為碼頭岸壁建造施工時，模板內配置之鋼筋可能因澆置混凝土時，受到鋼筋自重或外力因素，發生鋼筋傾斜偏離或移位等現象造成。

(5) 中性化深度

現場鑽取碼頭混凝土試體，將其置於乾燥環境自然乾燥後，於混凝土表面噴灑酚酞指示劑，觀察試體顏色變化，判斷其中性化深度。檢測結果示如表 10，碼頭岸壁與防波堤堤身試體中性化深度僅約 0 ~ 0.5 cm 左右，顯示混凝土內部仍應為鹼性環境，對鋼筋仍具有保護作用。

(6) 抗壓強度

鑽心試體攜回試驗室，依據 CNS 規範之規定，切取適當長度並蓋平，測試其抗壓強度，試驗結果如表 11。碼頭岸壁平均抗壓強度介於 222 ~ 663 kg/cm^2 之間，與由反彈值推估強度相較，其趨勢大致符合，惟後者數值較低。

(7) 超音波脈波速度

鑽心試體攜回試驗室，依據 CNS 規範之規定，以超音波脈波測儀量測通過試體之時間並計算其速度，瞭解混凝土之品質狀況。試驗結果如表 12，所有試體之脈波速度均大於 3500 m/s，顯示混凝土品質應屬正常範圍。

(8) 氯離子含量分析

鑽心試體攜回試驗室，每一試體依距離表面不同深度(0 ~ 7cm)鑽取粉末並過篩，再依 AASHTO-T260 規範進行分析，分析結果如表 13。大部份氯離子含量在靠近試體表面較高，並呈現隨試體深度增加而減少之趨勢。本次分析結果，氯離子含量介於在 0.70～4.00 kg/cm^3，對照表 7 之判別，其內部鋼筋之腐蝕機率為"可能"、"或有"腐蝕之範圍。

表 10　現地非破壞性檢測結果。
Table 10 Results of non-destructive test in-site.

檢測位置	平均反彈值 (推估強度 kg/cm^2)	中性化深度(cm)	電阻係數 (KΩ-cm)	腐蝕電位 (mV)	保護層厚度(cm)
#6 碼頭 K+090	44.2(438)	0.0～0.2	5.0～8.1	-268～-212	7.3～9.6
#7 碼頭 0K+080	34.1(263)	0.0～0.3	5.9～6.9	-272～-231	7.9～15.1
#8 碼頭 0K+038	37.9(319)	0.0～0.2	4.5～17.4	-432～-296	7.2～15.4
#17 碼頭 0K+100	43.9(414)	0.1～0.3	1.6～ 8.7	-424～-320	8.4～10.2
#21 碼頭 0K+066	35.6(284)	0.1～0.5	7.0～16.2	-416～-338	7.2～13.3
#24 碼頭 0K+030	31.5(226)	0.1～0.3	7.7～18.1	-376～-288	8.6～15.5
#25 碼頭 0K+250	33.8(259)	0.0～0.3	8.2～17.3	-355～-215	10.2～17.3

表 11　抗壓強度試驗結果。
Table 11 Results of compressive strength test.

試體編號	荷重 kg	高度 cm	高度 /6.75	修正係數	直徑 cm	抗壓強度 kg/cm²		
						修正前	修正後	平均
#6 碼頭 0K+090 C7	22520	13.2	1.96	0.9964	6.75	629	627	663
#6 碼頭 0K+090 D5	21260	13.4	1.99	0.9988	6.75	594	593	
#6 碼頭 0K+090 E6	27670	13.1	1.94	0.9953	6.75	773	770	
#7 碼頭 0K+080 C4-1	28890	11.4	1.69	0.9751	6.75	807	787	524
#7 碼頭 0K+080 D6	14990	13.2	1.96	0.9964	6.75	419	417	
#7 碼頭 0K+080 B5	13230	13.3	1.97	0.9976	6.75	370	369	
#8 碼頭 0K+038 C5	19780	13.5	2.00	1.0000	6.75	553	553	506
#8 碼頭 0K+038 C6	21220	13.4	1.99	0.9988	6.75	593	592	
#8 碼頭 0K+038 C7	13360	13.4	1.99	0.9988	6.75	373	373	
#17 碼頭 0K+100 B5	14830	13.3	1.97	0.9976	6.75	414	413	355
#17 碼頭 0K+100 C7	9310	13.3	1.97	0.9976	6.75	260	260	
#17 碼頭 0K+100 D5	14100	13.3	1.97	0.9976	6.75	394	393	
#21 碼頭 0K+066 C5	17090	10.7	1.59	0.9668	6.75	478	462	372
#21 碼頭 0K+066 C6	8180	13.5	2.00	1.0000	6.75	229	229	
#21 碼頭 0K+066 E5	15310	13.2	1.96	0.9964	6.75	428	426	
#24 碼頭 0K+030 A5	7440	13.5	2.00	1.0000	6.75	208	208	222
#24 碼頭 0K+030 B4	8640	13.4	1.99	0.9988	6.75	241	241	
#24 碼頭 0K+030 C8	7720	13.5	2.00	1.0000	6.75	216	216	
#25 碼頭 0K+250 B4	7490	13.4	1.99	0.9988	6.75	209	209	238
#25 碼頭 0K+250 C8	9590	13.1	1.94	0.9953	6.75	268	267	
#25 碼頭 0K+250 D4	4560	12.5	1.85	0.9881	6.75	127	126	

表 12　超音波脈波速度量測結果。
Table 12 Results of ultrasonic pulse wave velocity measurement.

試體編號	長度 cm	通過時間 sec	波速 m/s	平均波速 m/s
#6 碼頭 0K+090 C7	23.6	49.0	4816	4770
#6 碼頭 0K+090 D5	24.6	52.7	4668	
#6 碼頭 0K+090 E6	24.9	51.6	4826	
#7 碼頭 0K+080 C4-1	14.7	30.9	4757	4507
#7 碼頭 0K+080 D6	11.4	24.6	4634	
#7 碼頭 0K+080 B5	5.7	13.8	4130	
#8 碼頭 0K+038 C5	21.0	46.0	4565	4506
#8 碼頭 0K+038 C6	23.3	51.4	4533	
#8 碼頭 0K+038 C7	21.0	47.5	4421	
#17 碼頭 0K+100 B5	16.3	39.4	4137	4207
#17 碼頭 0K+100 C7	14.7	34.5	4261	
#17 碼頭 0K+100 D5	13.3	31.5	4222	
#21 碼頭 0K+066 C5	24.8	55.5	4468	4365
#21 碼頭 0K+066 C6	25.4	58.9	4312	
#21 碼頭 0K+066 E5	10.7	24.8	4315	
#24 碼頭 0K+030 A5	21.0	54.8	3832	3859
#24 碼頭 0K+030 B4	20.3	50.4	4028	
#24 碼頭 0K+030 C8	22.6	60.8	3717	
#25 碼頭 0K+250 B4	24.3	64.9	3744	3658
#25 碼頭 0K+250 C8	14.5	39.0	3718	
#25 碼頭 0K+250 D4	12.5	35.6	3511	

表 13　氯離子含量檢測結果(單位：kg/m³)。
Table 13 Results of chloride content test.

試體編號	深度(cm，距表面距離)						
	1	2	3	4	5	6	7
#6 碼頭 0K+090	2.54	1.20	0.89	0.93	0.64	0.49	0.39
#7 碼頭 0K+080	1.64	1.90	1.60	1.32	0.57	0.82	0.91
#8 碼頭 0K+038	2.30	1.81	1.80	0.60	0.45	0.48	0.34
#17 碼頭 0K+100	0.70	0.95	0.84	0.86	0.76	0.63	0.51
#21 碼頭 0K+066	4.00	1.32	1.16	0.86	0.44	0.45	0.38
#24 碼頭 0K+030	2.68	1.67	1.25	1.21	0.98	0.87	0.85
#25 碼頭 0K+250	1.25	1.28	1.70	1.60	0.95	1.16	1.18

4. 結論與建議

4.1 結論

1. 目視檢測結果顯示，花蓮港除 4、5 號與 8 號碼頭岸壁有較嚴重之混凝土劣損、鋼筋腐蝕生鏽及外露外，4、5 號碼頭飛沫帶鋼板樁多處亦發現斑點狀腐蝕， 25 號碼頭後線出現明顯沉陷，部分防舷材有裂損。
2. 非破壞性檢測，本次共選取 7 處碼頭岸壁，由現地反彈錘、保護層厚度及中性化深度等試驗結果，混凝土品質與設計應無明顯差異；混凝土電阻試驗與鋼筋腐蝕電位量測則顯示內部鋼筋部分腐蝕機率仍高；鑽心試體室內抗壓強度、超音波脈波試驗與氯離子濃度分析之結果顯示，亦與上述相符。
3. 碼頭目視檢測評估作業程序：可用於花蓮港全港經常巡查與定期巡查作業，並調查全港基本資料，提供建置維護管理系統使用。

4.1 建議

1. 碼頭岸上目視檢測，發現之碼頭岸壁、面版、岸肩及車擋等混凝土剝落或鋼筋腐蝕外露，防舷材及繫船樁表面腐蝕等現象，應持續監測，並依劣化程度，排序編列預算進行維護。
2. 4、5 號碼頭飛沫帶之鋼板樁多處發現斑點狀腐蝕，應加強監測與檢測頻率，或將飛沫帶鋼板樁加以水泥被覆或參採其他取代工法，確保其使用安全。
3. 25 號碼頭後線沉陷情況較為嚴重 建議採用回填料填補壓實法，但需進行結構分析瞭解成因與是否影響安全性，再進行結構補強，以確認修復成效。

參考文獻

[1] 陳桂清等，〝花蓮港構造物檢測〞，交通部花蓮港務局委託交通部運輸研究所研究報告 MOTC-IOT-IHMT-HE8907，2000。

[2] 陳桂清等，〝花蓮港外港防波堤及碼頭鋼板樁監測〞，交通部花蓮港務局委託交通部運輸研究所研究報告CHMT-9101，2001。

[3] 陳桂清等，〝港灣構造物安全檢查評估之研究(4/4)〞，交通部運輸研究所研究報告 MOTC-IOT-103-H1DB006b，2015。

[4] International Atomic Energy Agency (IAEA) in: Guidebook on Non-destructive Testing of concrete structures (IAEA,Vienna, Austria ,2002) pp.76-78.

[5] 中國國家標準CNS 1232 A3045：混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法，2002。

[6] “Nondestructive Evaluation of Concrete Strength: An historical Review and a New

Perspective by Combining NDT Methods", D.Breysse, Construction and Building Materials, 33 (2012) pp.139-163.

[7] 陳桂清，〝構造物知府時劣化檢測與防蝕維護策略〞，海洋環境下鋼筋混凝土與剛才構造物陰極防蝕技術與應用研討會，交通部運輸研究所等，台灣臺中，2004.09.15-16，第1-1~1-36頁。