

港灣構造物安全檢測與評估研習會

論 文 集



主辦單位：交通部運輸研究所

國立中山大學海洋環境及工程系

協辦單位：交通部

中華民國九十一年七月四日 五日

港灣構造物安全檢測與評估研習會論文集

目 錄

港灣構造物現況探討.....	陳桂清	1-1
港灣混凝土構造物劣化探討(一).....	李釗	2-1
港灣混凝土構造物劣化探討(二)--鹼質與粒料反應--.....	許書王	3-1
碼頭鋼板(管)樁腐蝕檢測與維護.....	羅俊雄、賴貴祥、蔡再興、蔡錦河	4-1
港灣構造物安全檢測與評估.....	李賢華	5-1

港灣構造物現況探討

陳桂清¹

摘要

台灣四面環海對外經貿以海運為主，港灣設施扮演一重要運輸管道。近年來災況頻傳，許多公共工程屢遭襲擊，港灣設施之受創時有所聞，且日益受到關注。因此，港灣設施之現況與安全，必需明確瞭解，俾採取必要之防範措施。本文主要對五大國際港區之重要構造物之現況，做一通盤之瞭解與探討。

Field Surveying on Harbor Structures in Taiwan

Kuei-Ching Chen

ABSTRACT

Taiwan is surrounded by sea. The world trading activities around the earth are major via carrier transportation. And harbor facilities are played as one of the important channels. Recently natural forces attacking and catastrophes occurred; lots of public facilities are under seriously damaged. Harbor structures are also confronted and being more concerned. Therefore, their physical situations and safety must be definitely realized and necessary precaution strategies are taken. In the article, five major harbors in island are under investigated and discussed.

一、前言

台灣四面環海，地處環太平洋地震帶上，地震發生頻繁，每年颱風侵襲不斷，港灣設施處於此巨大外力衝擊與海水鹽份浸泡等惡劣環境下，甚易

¹ 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

造成港工構材諸如鋼板樁腐蝕、混凝土劣化、強度損失以及內部鋼筋腐蝕、斷裂等之破壞現象，對構造物之耐久性與安全性威脅甚大。

近年來，國內風災、地震頻傳，許多公共工程諸如交通設施，屢遭襲擊，一夕之間不是倒塌就是受損嚴重，結構物面臨岌岌可危，安全堪慮的窘境。台灣為一海島型經濟國家，對外經貿運輸主要以海運為主，港埠設施之完善、營運正常與安全，攸關貨物之流暢與經濟發展。自民國 88 年 921 大地震以及近幾年來之大小災襲後，各大商、漁港之碼頭、防波堤等設施陸續零星發生損壞，例如蘇澳港區之南外廓防波堤沉箱之掏空塌陷、花蓮港新東防波堤胸牆之嚴重損毀，或其它突發性無預警之損壞事例，時有所聞。因此，港灣工程結構現況是否安全堪用，必需明確瞭解，俾採必要之防範措施。由於港埠設施所包含之範圍相當廣泛，本文主要乃以近幾年來對國內五大國際商港之重要構造物(諸如碼頭、鋼板樁、防波堤等)之現況調查，做一通盤之瞭解與探討。

二、港灣構造物概述

2.1 構造物種類

港灣構造物依所處環境可分為：水下結構與岸上結構。水下結構物主要包括有碼頭、防波堤等，岸上結構物主要為廠房、一般建物及機具設備。這些構造物使用的構材有鋼構材料與鋼筋混凝土材料等。鋼構材料主要為鋼板樁、鋼管樁、固定結構之拉桿、鋼纜線以及排放流管線等，大部份使用於水面下。混凝土材料則廣泛使用於諸如碼頭結構體、防波堤、消波塊、沉箱結構、樁基式碼頭之 PC 樁、RC 樁等。為簡化構造物種類，僅依建造材料將港灣構造物分成下列兩大類；

1. 混凝土構造物(包括鋼筋混凝土構造物)
2. 鋼材構造物。

2.2 調查範圍

本文主要探討港區混凝土與鋼材構造物近幾年來之現況，調查範圍侷限於基隆、蘇澳、花蓮、台中、高雄等五港區。由於各港區幅員遼闊，對不同類型之構造物現況探討時，僅以該構造物可能損壞的情形予於討論，情況不嚴重或損壞不明顯者將予略過。表 1 為港灣 R.C. 結構物較常可能損壞之狀況。

三、混凝土構造物現況

港灣鋼筋混凝土結構物之耐久性與安全，一般可分為對整體結構體與建造材料(鋼筋混凝土)等兩方面來調查，其調查方式與檢測之重點分述如下：

3.1. 整體結構體

主要以目視方式，從外觀上檢視各型構造物可能產生之破壞現象，諸如碼頭不均勻沉陷、拱起、崩塌、岸肩伸縮縫破損、岸壁傾斜、法線位移等現象。

3.2 建造材料

鋼筋混凝土建材之劣化、損壞、鋼筋腐蝕等現象，影響結構物之安全與耐久性，其材料品質現況可由下述檢測方法分析之：

1. 目視檢測

目視檢測為最簡單、最容易觀察結構物現況的方法之一。由混凝土表面外觀是否有裂縫、剝落、鋼筋銹斑等劣化現象，可略知鋼筋混凝土材料現況。

2. 非破壞性檢測

目視檢測僅提供判斷結構物劣化最初步之訊息，對於材料劣化損壞之程度，則必需有其它較廣泛的檢測數據來輔助分析。非破壞性檢測技術，提供了一個較方便、迅速且短時間內即可解析材料劣損之情形。一般非破壞性檢測項目，包括有下列幾項：

混凝土中性化深度

混凝土電阻係數

混凝土強度

混凝土的裂縫位置、寬度、長度和深度

混凝土內部或背面的孔洞、蜂窩等缺陷

保護層厚度及鋼筋尺寸、位置

鋼筋腐蝕狀態量測

3.鑽心取樣

混凝土劣化較嚴重或損壞原因不明之結構物，必需在現場進行鑽心取樣，採集足夠之試樣，攜回實驗室進行深入之試驗分析。分析項目包括抗壓強度、透水係數、氯離子濃度、病變生成物化性與微觀分析。如混凝土遭受「鹼質與粒料反應」破壞時，其驗證方式則必需綜合混凝土外部與內部徵候，以及鹼質膠體化性成份鑑定等結果合併研判。

3.3 調查結果

五大港口混凝土結構物，諸如港區內之碼頭道面(混凝土道路面板)、碼頭結構體、碼頭底面(包括面板、樑、柱、基樁等)、沉箱、防波堤、消波塊等，歷年來均有損壞及維修記錄。其損壞情形大致如下：

1.碼頭道面(路)

五大港區內之碼頭道路大多為混凝土面，由於混凝土本身之塑性收縮，基礎土壤填料自然下陷等因素，造成路面產生許多橫、縱向裂縫，又路面受到卡車衝擊以及超荷重作用，部份路面出現混凝土面板粒料剝落、凹洞、面板塊鄰接縫之邊、角處或有分離破損情形，部份碼頭護欄破損，鋼筋外露腐蝕。

2.碼頭構造物

(1)重力式碼頭

重力式碼頭損壞原因，通常不外是基礎土壤承載力不足、堤體方塊滑動或傾斜，或碼頭整體滑動造成全面性崩潰等。造成上述破壞情形，主要來自地震力、主動土壓力或殘餘水壓力等。

蘇澳港

民國 75 年 11 月 15 日宜蘭花蓮地區曾發生強烈地震，造成港區 3、4、5 號碼頭之沉箱破損、碼頭面沉陷、碼頭法線向海側位移，最大位移量約有五十幾公分。

台中港

民國 88 年 9 月 21 日中部地區發生芮氏規模 7.3 級之大地震，造成港內之#1~#4A 號等 5 座碼頭，因基礎土壤液化，碼頭發生嚴重傾斜、

後線陸地多處噴砂、開裂，地層塌陷(沉陷量最大約 0.57m)並形成多處坑洞、沉箱向海側位移(最大外移量約 1.7 公尺)與背填土龜裂、錯開或分離，碼頭上各種相關設施及結構如貨物輸送系統、維生管線等之傾倒、破壞嚴重。

高雄港

本港區重力式碼頭計有 22 座，新舊均有且建造年期不一。損壞原因有的是屬於基礎穩定性問題，如#19 碼頭曾於民國 83 年 8 月 5 日，於凱特琳颱風過境後，突然發生嚴重坍塌損壞，另有數座碼頭過去曾受到泊船碰撞壁體，造成碼頭程度不一的塌陷。

(2)板樁式碼頭

基隆港

民國 79 年間東#4 ~東#6 碼頭，因鋼板樁腐蝕、穿孔、板樁背填土流失、基礎掏空，導致碼頭塌陷損壞。港務局曾進行修復，近幾年來東岸數座碼頭面(岸肩)，亦曾出現多處路面下陷現象。另西岸第一突堤碼頭(西#22~西#26)，為鋼板樁井筒式碼頭，民國 63 年完工啟用至今已近三十年，當初建造時並無做防蝕措施，民國 90 年間，港務局曾進行本突堤碼頭鋼板樁腐蝕現況檢測。由於碼頭作業區及後方之貨櫃場地略顯下陷現象，為確保碼頭貨櫃裝卸設備作業安全，本(91)年 4 月間，港務局開挖西#25 碼頭臨水面啟重機下之跨距(兩條軌道間)面層，道面開挖長度約 200 公尺範圍。初步檢視承載起重機軌道之橫樑尚無異象，跨距間道面 R.C.面板下之基礎則有數處下陷、掏空之情形，掏空深度約數米之深，掏空處(位置)正位於板樁井筒與井筒間再與外弧鋼板所圍成之基礎。

高雄港

高雄港中洲碼頭(#150 號)，位於旗津漁港區內原為港內之儲木池，民國 87 年開始改建為海事工作船渠碼頭，民國 91 年初剛建造完工，不久即發現碼頭法線明顯彎曲，法線向海測傾斜，整座碼頭冠牆後方基礎經開挖後，發現土層內板樁錨定用之高耐索斷裂，斷裂數量甚多，碼頭目前無法使用，正等待損壞鑑定與修護。

(3)樁基式碼頭(底面板、樑、基樁)

棧橋式碼頭之 R.C.底面板及橫樑等結構，長期受海水潮汐浸泡、浪流等衝擊之作用，底面板混凝土保護層甚易剝落，造成內部鋼筋裸露、

腐蝕嚴重。打入海水中之 P.C.、R.C.基樁於潮間帶之部位，亦出現混凝土保護層剝落，內部鋼筋嚴重腐蝕、裸露，甚至預力鋼腱銹斷之情形發生。

蘇澳港

民國 82 年港區 12、13 號(混凝土基樁)棧橋碼頭面，曾因 R.C.底面板主筋銹蝕，發生碼頭面板塌陷、損壞，為安全起見，當時曾進行修護補強，事隔數年後，於民國 90 年調查時，R.C.底面板再次發現面板混凝土剝落，鋼筋腐蝕、外露、斷裂等嚴重損壞狀況。另民國 89 年 10 月進行鋼板(管)樁碼頭腐蝕調查時，在 6 與 7 號鋼管樁碼頭之 R.C.底面板、橫樑等部位，亦發現有多處大面積之混凝土剝落，內部鋼筋嚴重腐蝕外露。上述損壞現象應即早進行全面檢查與修護，否則碼頭面板再發生塌陷損毀是無法避免。

高雄港

本港新舊棧橋碼頭約有 27 座，其中多座老舊碼頭建造已有五六十一年以上，損壞情形大多為法線橫樑破損，鋼筋外露腐蝕(可能受到船隻靠泊碰撞所致)、碼頭面板龜裂、沉陷、底面板與橫樑及樁基構件之鋼筋嚴重腐蝕、斷裂或破損等，近年來，港務局已規畫逐年進行修復，如#33、#48~#53 等碼頭面板、橫樑之維修。

3.防波堤

基隆港

東、西防波堤自日據時期即已建造啟用，由於使用時間較長，混凝土結構體有較多明顯的破損情形，損壞多為伸縮縫損壞、不規則裂縫等，對整體結構安全並無影響。但是拋放於東防波堤周圍之護堤消波塊，則發現有「鹼質與粒料反應」之現象，推測消波塊之製作材料可能有使用到活性骨材所致。

蘇澳港

(1)南外防波堤

南外防波堤從民國 64 年 1 月開工以來，期間曾遭多次颱風襲擊，其後又發生兩次重大颱風災害，造成多處胸牆損毀等災害。民國 83 年 8~10 月間，連續四個颱風接踵來襲，導致拋石、消波塊流失及 SB

19、SB 31 兩座沉箱主體嚴重損毀、消波胸牆與堤面發生塌陷，民國 85 年 8 月賀伯颱風過境後，SB 23 沉箱海側潮線下方又發現一高約六公尺，寬約二十公尺之巨大破洞，影響防波堤結構安全甚巨。港務局曾委託港研所針對防波堤現況進行調查，深入探討損壞原因並提出改善方法，並於民國 87 年修復損壞部份。但於民國 89 年 7 月啟德颱風過境時，造成 SB 30 號沉箱嚴重破損，隔月(民國 89 年 8 月)另一強烈颱風碧利斯侵襲，更造成本防波堤相當嚴重的損毀。除了上述嚴重之損毀外，伸縮縫之破損、堤身裂縫及沉箱接縫間之損壞與鋼筋腐蝕外露等現象亦相當明顯。民國 91 年 3 月 31 日，台灣東北部發生規模 6.8 大地震後，再度勘查本防波堤現況，雖無重大災損發生，但是目前仍有數座沉箱上之胸牆損毀，等待後續修護。

(2)北外廓防波堤

北外廓防波堤全長 300 公尺，為沉箱合成堤結構，沉箱總計 12 座。歷年來檢測並未發現有嚴重破壞，僅港側 LNB1~LNB6 沉箱外壁混凝土有剝落、鋼筋外露、腐蝕之情形，海側 LNB2、LNB3 沉箱有局部掏空現象，港務局早已修復。

(3)漁港北外防波堤

漁港北外堤自開工以來因颱風災害，造成 FNB 8、FNB 9 兩座沉箱主體嚴重損壞、沉箱頂部折斷沉陷水下，至今，仍可清晰看到沉箱基體殘留原地，港務局暫無修復考慮。

台中港

台中港民國 65 年開港啟用迄今僅二十幾年，港區內之南、北防波堤現況良好，並無嚴重損壞情形。

花蓮港

(1)舊東堤

舊東堤於民國 16 年建造，民國 24 年完工，使用至今約有六七十年之久，堤身全長 1,330 公尺，分別採用沉箱式($1^{\text{K}}+080$ 至 $1^{\text{K}}+330$)、方塊堆疊式($0^{\text{K}}+990\sim 1^{\text{K}}+80$)，其餘區段採合成堤式建造(約 990 公尺)。堤心係採用級配料，原設計使用壽命約五十年。堤外波滔洶湧，毫無天然屏障，經年累月受此波浪之衝擊、地震之侵襲破壞，多年來造成

堤面及胸牆多處嚴重龜裂，每年又需承受數次颱風之巨浪襲擊，雖以大型消波塊保護，仍於民國 77 至 78 年間，堤身部份區段發生塌陷，堤內級配料被掏空，有斷裂塌陷之慮，由於本防波堤係保護港內船隻進出航道之屏障，對港區之營運安全影響至巨。民國 79 年堤身鑽探結果顯示，部份區段堤身底下級配料有嚴重掏空現象，如 0^K+650m ， 0^K+700m ， 0^K+760m ， 0^K+800m ， 0^K+850m 。部份堤身混凝土表面並有嚴重龜裂現象，港務局曾以灌漿工法加固進行維修，惟因孔隙過大及海浪沖刷致成效不佳。

(2)新東堤

新東堤屬於第四期擴建部份，自民國 67 年 7 月開始建造至民國 80 年 12 月止，全長共 1837 公尺。民國 85 年調查發現，部份堤身混凝土表面有明顯之地圖狀裂縫，並有膠質滲出，經檢測分析研判應屬「鹼質與粒料反應」之現象，影響混凝土材料之耐久性。是年(85 年)安珀颱風侵襲時，造成數處堤身胸牆長達數百公尺之整齊傾倒、斷裂，消波室隔艙鋼筋遭拉斷、隔艙嚴重破損等情形。修護不久後，民國 89 年 8 月強烈颱風碧利斯侵襲，再次重創本段防波堤，堤身斷成數節，胸牆整齊傾倒、斷裂，消波室隔艙嚴重破損，損壞程度超過民國 85 年之損壞，對航道之通行威脅很大。又本堤沉箱水下之調查結果顯示，有多處堤腳與堤址之卵石流失及 AB 護基方塊損壞。

(3)西堤護堤消波塊

西堤亦屬第四期擴建部份，建造時間自民國 69 年 4 月至民國 78 年 1 月止，全長共 1050 公尺，堤身無明顯損壞，但四周護堤之整批消波塊有「鹼質與粒料反應」現象，造成消波塊表面有大小寬度不一之地圖狀裂縫，裂縫仍有持續成長之趨勢，裂縫處有白色膠體質滲出物。若過多消波塊發生嚴重裂損、折斷，將降低消波功能，威脅防堤安全。

高雄港

一港口北防波堤劣化損壞情形包括；堤面收縮裂縫、接縫處破損，南防波堤堤面風化、堤面板鋼筋外露、堤面多處有連續裂縫及落差等現狀。二港口北防波堤劣化損壞狀況為多處沉箱有陷落現象，南防波堤則無明顯損壞情形。

4.港區建物(倉庫、廠房、辦公廳舍等)

港區建物因位處海洋環境，空氣中夾雜鹽份濃度甚高之水氣，部份港區年代較久之老舊建物，外觀已出現混凝土牆壁剝落、鋼筋腐蝕外露等劣化現象，但尚無安全疑慮，這些建物或許都已達拆掉重建之地步。近年來新造之建物，則尚未發現有嚴重損壞之現象。

5.混凝土材料劣損

結構物除因外力作用造成主結構、外觀等發生損壞外，營建材料之劣化亦為結構體損壞的主要原因之一。例如混凝土發生「鹼質與粒料反應」，會導致混凝土開裂、龜裂、起泡爆裂，大幅降低抗拉、抗壓強度和動彈性模數等力學性能，影響構造物設計功能，間接引起混凝土內部鋼筋腐蝕，造成構造物崩毀，縮短其使用年限。

在五大港區調查時發現，台灣東部部份地區之砂石具有活性，部份港區內混凝土構造物，如基隆、花蓮港之護堤消波塊、防波堤等，或近水但不浸水之結構物，有發生鹼質與粒料反應(Alkali aggregate reaction, AAR)之損壞跡象，影響混凝土耐久性甚大，在長期劣化滋長過程下，最後將導致結構物崩毀。「鹼質與粒料反應」之現象已為混凝土耐久性重要參考指標之一。

3.4 修復方法

1.修復前之評估

為使受損破壞部位能進行有效的修復，以保障結構物的正常使用，在修補前應確實做好下列工作：

調查及分析損壞之情況

找出破壞原因

選定修補方法

維修材料選定

修復後結構物是否能維持或改善原有之耐久性與設計功能(第一考慮條件)

能否恢復原有結構物之完整性

修復時是否需考慮結構物之外觀

經濟性的考量

綜合分析上述各項條件與要求外，最後對修補材料之選用仍然必需審慎，下列為需考慮之因素：

對基材是否具有足夠之黏著能力

與基材是否具有相容性(諸如：乾縮、熱膨脹、潛變、彈性模數等)

強度

耐化學性

對鋼筋表面能形成電化學鈍態

低水、氣之滲透性

易於應用與施工

2.修復情形

(1)碼頭道面(路)

港區碼頭路面破裂損壞範圍多屬小面積，一般修護多採用傳統工法，以混凝土或水泥砂漿填補，惟修補後因重車通行，不久後又再次損壞。基港局曾在混凝土澆填硬固前，另以 5kg/m^2 用量之金鋼砂均勻撒佈填補面上再粉光，以增加路面抵抗磨損之能力。高港區之碼頭路面維護時，亦以傳統工法將舊有及裂化部份鑿除後，澆注瀝青乳濟黏層後，鋪設新的瀝青混凝土。由於碼頭路面不是重要結構，屬於一般例行性之維修，僅短暫影響港區車輛進出、貨物裝卸作業。

(2)重力式碼頭

基隆港

基港之碼頭沉箱損壞時維修，曾先將沉箱頂層之混凝土打除，以拋石填充隔艙後，再以特密管將混凝土漿體灌入填縫固結，最後封頂完成修復。

台中港

#1 至 #4A 碼頭於民國 88 年 9 月大地震損壞後，港務局隨即於兩個月後發包進行復舊工程。對碼頭後線沉陷部份以 10cm 以上之石或攪拌之回收料混合回填整平，並於碼頭後線打入一排鋼管樁以錨碇方式對

碼頭沉箱進行永久復舊，並將耐震力由原來設計震度 0.15 提高至 0.20。最後碼頭面之路基再以天然級配、瀝青混凝土材料(AC)進行鋪面整平。

(3)基樁式碼頭(底面板、樑、基樁)

基隆港

港務局對棧橋碼頭面板或樑柱腐蝕損壞之修護，係將混凝土剝落敲除清至內部鋼筋處，再以噴混凝土(shotcreting)工法，將含壓克力樹脂或樹脂石英砂之混凝土噴漿覆蓋於上，此工法僅為治標，維修效果有限。因為噴混凝土漿體並未能完全阻絕海水之滲入，底板內之鋼筋仍會接觸滲入之海水，發生鋼筋腐蝕體積膨脹，隔一段時間後修補部位之混凝土會再度剝落，因此，必需每隔 3~5 年再進行修護。如面板之鋼筋已嚴重腐蝕、斷裂，在結構安全上有疑慮時，則必須將原碼頭面板打掉，重新再鋪設新的面板。建議鋪設新面板時，應加裝陰極防蝕處理，以增強抗蝕效果。

對於 P.C.預力樁或 R.C.樁，於潮間帶或基樁外壁剝落處之修補，港務局仍以噴混凝土之傳統工法維修，防蝕效果不佳。如採用加裝套管工法修復，防蝕效果可大為改善，主要原因乃套管與混凝土基樁表面之間，澆填流動性之混凝土補實間隙(猶如增加保護層厚度)，可防止或降低海水氯離子侵入混凝土內，阻絕鋼筋腐蝕。為了提高套管工法防蝕之效應，可採用有附加鋅網或鈦網之 FRP 套管，將鋅網或鈦網接通混凝土基樁外露鋼筋，基本上這種安排如同鋼筋進行陰極防蝕一樣。

蘇澳港

蘇澳港對於面板或樑柱損壞之維修，亦採取傳統工法處理，先將底板風化表面先行鑿除後，以高壓水柱去除浮鬆物質，鋼筋銹蝕部份除銹後，斷裂部份切除後，搭接更換新品，使用 II 型水泥及速凝劑，以噴漿混凝土分二層覆蓋之，修復效果有限。

上述基、蘇兩港區採用之傳同維修工法顯然效果有限，因此，對面板或樑柱腐蝕損壞之維護，建議應將底面板之剝落混凝土清除乾淨，鋼筋銹蝕清除後，以附加鋅網或鈦網之 FRP 套管進行陰極防蝕，如此一來，可防止內部鋼筋再度腐蝕，降低面板或樑柱持續劣化損壞。

高雄港

中島區之#48~#53 為 PC 樁之棧橋式碼頭，碼頭面板由於內部鋼筋腐蝕嚴重、斷裂，碼頭面出現裂縫、破損、下陷、大洞等狀況，基於結

構安全與正常營運，港務局已逐年編列預算進行翻修工程。民國 89 年翻修 #48~#49 碼頭，90 年翻修 #50 碼頭，本(91)年正進行 #51 碼頭。翻修工程主要將損壞之棧橋碼頭面板、樑等拆除，重新澆築，基於防蝕考量面板之保護層厚度設計為 10cm，並採用 II 型水泥澆注。PC 基樁如有破損壞斷裂者則以鋼套管補修，再以水泥漿注入填滿夾層縫隙。

(4)防波堤

蘇澳港南外廓防波堤

南外廓防波堤沉箱破損塌陷、堤身斷裂多處，蘇港局過去曾採用以鋼板模具搭接斷裂缺口處兩側，以特密管深入沉箱隔艙底層，再灌入水中混凝土，填滿固結至堤頂，做成一巨積實體堤身，修復效果尚可。但對堤內基礎掏空之堤身，則僅能以較可行之陸上鑽孔灌漿方式來修補。民國 88 年 2 月以 SB 16 沉箱作為試驗，委託港研中心評估灌漿工法之可行性，以做為其它破損或掏空沉箱日後之修復依據。SB 16 沉箱在海側共有五個隔艙並列，試驗時，第一艙使用 JSP 工法(空氣噴射灌漿工法)，第二艙使用導管灌漿工法、第三艙使用 JSP 與鑽桿灌漿工法、第四艙使用鑽桿灌漿工法、第五艙使用 CCP 工法(高壓噴射灌漿)，進行灌漿固結。經過詳細評估各工法之可行性與效果，最後試驗結果顯示，以導管灌漿工法效果較佳。民國 90 年已修護 6 座沉箱，91 年度預計再修護 6 座。

花蓮港

舊東防波堤

民國 77 年港研所曾以堤身灌漿加固修復方式，進行固結試驗研究，結果效果不佳，爾後港務局亦以鑿孔灌入水泥漿體方式進行修復，效果仍然不佳，僅能短期間阻止堤內掏空持續擴大。民國 82 年至 87 年間，花港局依損壞程度分段進行舊堤加固，先將破碎堤身舊混凝土挖除，堤心級配料填免滿至零水位高程，再以 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 之混凝土漿體澆灌，使堤身形成一巨積穩定堤體，修復迄今尚未發現沉陷等現象。

新東防波堤

新東防波堤段損壞之部位，大多為堤面之胸牆斷裂、倒塌或消波室之隔艙破損，堤身基礎並無掏空、下陷或嚴重移位等問題。因此，港務局修護時僅於原來損壞之部位，如重力式面牆內植入鋼筋，

組立模板銜接損壞斷落段，再以一般混凝土灌注，形成一完整無斷裂之重力面牆。

四、鋼構造物現況

海水對大多數金屬材料而言，原本即為一極容易腐蝕的環境，鋼材構物諸如鋼板(管)樁、管線、拉桿等構件，常年浸泡於海水嚴酷的環境下，甚難倖免於腐蝕損壞的威脅。近年來，新建之港灣設施如高雄港第五貨櫃中心碼頭、雲林麥寮工業港及台北港等之開發，均大量採用版樁式碼頭之建造，加上各港區早期興建之版(管)樁式碼頭，目前數量龐大。由於鋼版樁長年接觸海水，港區海水有日益惡化之趨勢，碼頭鋼板樁受腐蝕威脅更甚於前。

台灣鋼構物大多位於水面下，由於檢測不易，常有發生嚴重破損而未能及時發現，影響碼頭使用安全甚巨。目前對鋼結構物外觀腐蝕狀況之了解，除了必需派請潛水人員下水，做近距離接觸、觀測、拍照、記錄損壞之位置外，另一方面必需對鋼構物進行鋼材之腐蝕電位量測。綜合各方面之檢測結果，最後才能分析研判目前之狀況。

台灣地區之鋼板(管)樁碼頭已使用近 40 年了，從各港務局歷年來之檢修記錄，以及港研中心對五港區之調查發現，部份港口之鋼板樁碼頭在興建之初即未做陰極防蝕保護措施，因此有些鋼板樁之腐蝕早已相當嚴重，其腐蝕速率已超過規範值許多。鑑於安全顧慮，各港局在興建新板(管)樁碼頭時，均考慮或做防蝕保護，對於舊有碼頭亦逐年進行維修並安裝陰極防蝕之保護措施，以確保結構體之使用安全及延長壽命。

4.1 調查方法

1. 資料蒐集

蒐集國內各港區之鋼板樁碼頭相關資料及使用鋼材之原始資料。

2. 選定碼頭

選定特定或發現有嚴重腐蝕之碼頭，進行現況調查。

3. 目視檢測

在碼頭面上，選定及編號測樁的位置，派遣潛水人員潛入海水下，先以目視方式檢視鋼板樁腐蝕現況，並以攝影器材做全面攝影。如發現異常或破洞處，通知岸上人員記錄位置，並量測破洞的大小。

4.海生物敲除

在設定之水深測點上，使用工具將鋼板樁上之附著海生物敲除，敲除面積約 10 x 10 平方公分，Z 型鋼板樁取凸、側、凹三面，直線型鋼板樁取一面，鋼管樁則在圓周取四點對稱面敲除之。

5.厚度量測

使用超音波厚度計，量測每個測點之鋼板樁現有厚度，精確度 ± 1.0mm，每測點量取 2 個數據，平均之。

6.腐蝕速率之計算

將實際測得之鋼(管)板厚度，與原始設計厚度比較之，即可算出鋼板之腐蝕速率。計算公式如下：

$$\text{腐蝕速率(mm/yr)} = (\text{原有厚度(mm)} - \text{現有厚度(mm)}) / \text{使用年期(yr)}$$

7.水質檢測

鋼板樁之腐蝕與海水變化有密切關係，與海生物之附著生長及其分泌物之性質，亦有一定程度之關連性。調查中可使用現場水質檢測儀，分別在腐蝕較嚴重與不嚴重之碼頭水域進行水質檢測，並取水樣攜回實驗室進行分析，諸如 COD(化學需氧量)、BOD(生物需氧量)、多種離子 等檢測，以了解海水水質狀況。

4.2 調查結果

港研中心自民國78年至89年間，曾多次對五港區之碼頭鋼板樁，進行腐蝕現況調查。歷年來各港區調查結果簡述如下：

基隆港

本港區之板(管)樁式碼頭大多興建於民國六七十年代期間，建造時無安裝防蝕保護措施。民國 77 年調查時，大部份之鋼板(管)樁已腐蝕非常嚴重，如東岸#2~#5 碼頭鋼板樁壁面有孔蝕、嚴重穿孔、破洞(損)等現象，導致碼頭壁後級配砂石流失、掏空、岸肩沉陷。西岸#20~#27 碼頭之腐蝕亦相當嚴重，腐蝕速率從 0.1mm/yr.高至 0.2mm/yr.以上，部份區段板樁於潮間帶部位，曾發現十數支樁一字連續相接出現孔蝕、破洞等嚴重腐蝕狀況，對碼頭之結構安全影響甚巨。當時港務局特逐年編列

預算，進行維修與全面安裝犧牲陽極塊，大幅改善腐蝕狀況，但潮間帶部位之防蝕效果並不理想。

民國 90 年間(距上次調查時隔十數年後)，港研中心調查顯示，東#2~東#4 碼頭鋼板樁之防蝕電位均達小於-850mV(對 Cu/CuSO₄ 電極)，板樁外觀亦無發現嚴重腐蝕穿孔、破洞之情形，腐蝕速率小於0.1mm/yr. 以下，目前之腐蝕狀況較十年前調查結果有大幅改善，顯示陰極防蝕發生作用。東#5~東#7 碼頭現為軍方使用之碼頭，雖然亦有陰極防蝕措施，但是仍有部分鋼板樁現況相當不好，例如東#5~東#6 碼頭之板樁腐蝕數量甚多且位置相當密集，總計約有數十處出現嚴重穿孔、破洞之狀況，板樁背填土掏空之深度由數十公分至 1~2 米不等，內部形成甚多孔洞，東#7 碼頭板樁則有二處穿孔、破洞之狀況，破洞深度達 1 米左右。此三座碼頭整體腐蝕狀況較過去嚴重許多，對碼頭上裝卸承載之安全有威脅性，基港局應儘快進行修護。

另外，基港局於民國89年亦委託其它研究機構，對第一突堤碼頭(西#24~西#26)鋼板樁現況進行調查，調查結果指出，西#24 碼頭發現 6 處鋼板樁破洞，破損位置多集中於突堤頂端轉角附近。西#25 碼頭板樁破洞數量有 6 處，均位於水面下，其中一處(從西#25 碼頭接頭端算起 245m，水深-12m 之位置，亦即靠近板樁底部)之破洞甚大，破洞大小為 2.5m(破洞高度) x 2.0m(破洞寬度) x 1.2m(破洞深度)，顯然板樁背填土應已嚴重流失掏空。西#26 碼頭之破洞數量亦有 4 處，都位於水面下，其中 2 處之破洞尺寸甚大且亦靠近板樁之底部，基礎流失堪慮，至於潮間帶鋼板之腐蝕速率約達 0.15mm/yr.，腐蝕狀況嚴重。

蘇澳港

駁船碼頭民國 67 年完工，建造時並未做防蝕保護。民國 79 年檢測時，鋼板樁腐蝕相當嚴重，腐蝕率超過 0.20mm/yr，潮間帶部位有嚴重孔蝕或穿孔、破洞等狀況。港務局於民國 82 年間隨即進行補修並加裝犧牲陽極塊等防蝕措施，於潮間帶再加貼防蝕帶及 FRP 夾克保護，防蝕效果大幅改善。民國 89 年調查時，潮間帶之鋼板樁表面並未發現孔蝕或穿孔破洞之狀況，但部份區段於水深+0.0m 位置，腐蝕速率已大於 0.1mm/yr.，應持續監控注意，至於沒入水面下之鋼板樁之腐蝕速率仍然很小。

#6 與#7 碼頭為管樁橋墩式碼頭，民國 72 年興建時即安裝陰極防蝕，防蝕效果良好，前後幾次調查之結果相近，腐蝕速率很小，鋼管樁現況良好。

台中港

民國 80 年時，港區內鋼板(管)樁建造之碼頭座數不多，僅#14 與#15 碼頭之護岸結構採用板樁式結構保護，#29 與#30 碼頭交接處為鋼管樁式結構，建造之初即採取塗覆與安裝犧牲陽極塊之保護措施。民國 82 年檢測#14、#15、#29 及#30 碼頭時，並未發現有嚴重腐蝕狀況，鋼板樁之腐蝕速率甚小(約為 0.02mm/yr.)。民國 83 年以後，隨著政府推動發展亞太營運中心之政策，台中港開始急速擴建，鋼板(管)樁建造之碼頭座數逐漸增加中，目前新建之輸油站西 3 與西 4、#33、#34、#35、#99~#101 碼頭均為該類型結構，建造時即有安裝防蝕保護措施。

花蓮港

本港鋼板樁碼頭建造迄今已有三、四十年之久，主要範圍為#4 至 #9 碼頭及航道西側岸壁結構，至今未做任何防蝕措施。民國 80~83 年調查時，全港區之鋼板樁腐蝕率約為 0.1mm/yr.。民國 88 年港務局例行檢視發現，航道岸壁之鋼板樁於飛沫帶有大面積之微小孔蝕現象，水面下之狀況不明，為了碼頭安全與營運考量，於民國 89 年委託港研中心，進行鋼安全檢測，期能對腐蝕現況採取有效之修護，避免損壞擴大，經檢測發現，曝露大氣與飛沫區之鋼板樁(#4~#5 號碼頭)，過去曾做塗覆防蝕保護但目前已剝落，表面有明顯銹蝕斑點，腐蝕速率約為 0.02~0.05mm/yr.，潮汐帶之腐蝕速率為 0.07mm/yr.，水面下腐蝕速率小於 0.1mm/yr.。鑑於港區航道狹窄且長，其岸壁板樁結構之安全影響船舶進出，民國 90 年特詳細調查板樁之腐蝕狀況。

整體上，全港區之腐蝕速率大多在 0.1mm/yr.以下，腐蝕速率雖未超過設計規範，但鋼板樁原設計年限為 20 年，如以 0.2 mm/yr.之腐蝕速率設計規範計算，鋼板樁最大允許腐蝕厚度為 4.0 mm。目前#4~#6 號之厚度減少量約 2-3 mm，#8 號之厚度減少量約 2.5-4.0 mm 不等，#9 號厚度之平均減少量約 2.0 mm、航道岸壁厚厚度減少量大多為 1-2 mm，距允許腐蝕厚度已相當接近，對鋼板樁結構之安全已具威脅，應儘速委請專家就鋼板樁斷面結構承載、碼頭原有之設計條件(諸如基礎、地質、錨碇設施、碼頭面載重等)，進行詳細評估，確保碼頭與航道安全。

高雄港

高雄港鋼板(管)樁碼頭數量很多，興建之初即已加裝陰極防蝕措施，因此腐蝕狀況甚為輕微。由於本港區鋼板(管)樁碼頭數量很多且每一座碼頭範圍很大，民國 80~83 年調查時，限於經費僅選擇數座不同區域之碼頭，如#39、#40、#58、#63、#69、#70 等進行調查，調查結果腐蝕速率均小於 0.1mm/yr.，腐蝕電位值均小於-850mV，屬於有效防蝕保護範圍。民國 89 年檢測第五貨櫃碼頭(#76~#81)時，鋼板樁之腐蝕電位值均達防蝕保護範圍。

4.3 修復方法

港灣鋼構物常年浸漬於海水中，受到海水中各種腐蝕因素之侵襲，鋼材極易腐蝕損壞，嚴重威脅結構物之安全與使用年限。由於鋼板(樁)處於不同海水深度(部位)，防蝕工法有所不同，對於新建或舊有鋼構物必須採用適當的防蝕工法，以保護及延長使用年限。海洋環境下之防蝕工法有下列幾種：

- 1.陰極防蝕；適合沒入海水中之鋼材防蝕，港灣碼頭通常多以安裝犧牲陽極塊方式處理，防蝕效果良好。
- 2.塗裝、覆襯或金屬熔射；適合曝露於大氣、飛沫及潮間帶鋼板(管)樁之防蝕。
- 3.防蝕帶及加裝 FRP 夾克保護;適合於潮間帶鋼板(管)樁之防蝕。
- 4.預留腐蝕厚度；增加鋼板原始設計厚度，藉此延長鋼板使用年限。

陰極防蝕為海水下鋼結構物最有效之防蝕方法，潮間帶之防蝕工法則可視施工難易與防蝕效果，選擇適當防蝕材料與工法處理之(如表 2 所示)。如果鋼板樁已嚴重腐蝕至穿孔、破洞時，則必需於鋼板破損部位先行切除、清理，以鋼板焊補破洞防止背填土持續流失後，再選擇適當的防蝕工法處理。除了對鋼構物做上述之防蝕保護外，工程人員仍必需定期檢測，隨時掌控現況以維護結構物之安全。

4.4 修復情形

基隆港務局於民國 78 年已發現碼頭鋼板樁嚴重腐蝕之現象，已著手進行修復工作，同時逐年進行陰極防蝕之措施，全面改善可能持續腐蝕穿孔之情形，目前鋼板樁防蝕情況良好。蘇澳港之駁船碼頭亦於民國 82 年進行陰極防蝕之改善。花蓮港迄今仍未做陰極防蝕措施，鋼板樁雖然沒有很嚴重腐蝕，如以耐久及安全考量，應採取防蝕保護才為上策。高雄港區早期即已有

陰極防蝕，鋼板樁腐蝕速率很小，僅定期量測腐蝕電位值及按年限更換陽極塊之消耗

五、新建工程未來走向

台灣對外經貿運輸主要以海運為主，港灣工程之建造、維護與安全極為重要，對民生影響甚巨。基於耐久性、經濟效應及使用之安全，未來港灣之開發或擴建，在土木工程上，應大量使用高性能(自充填)混凝土或於普通混凝土中添加波索蘭材料或採用Ⅱ型水泥等材料建造，以提升結構物之耐久性。同時為監測結構物之現況，在建造時可埋設監測元件，隨時掌握結構物受外力衝擊或內部鋼筋腐蝕變化之情形，一旦發生狀況時，可立即搶修或防範未然。在R.C.結構體重要部位之鋼筋，可考慮施作陰極防蝕保護等措施或其它防蝕工法，以降低或防止鋼筋受腐蝕之威脅，維持結構承载力。至於在鋼構物方面，板(管)樁式之碼頭應全面採取陰極防蝕措施，以提高鋼板樁之耐久性與碼頭結構之安全。下面簡述相關新材料、新工法應用於港灣工程建設之說明；

5.1 高性能(自充填)混凝土

高性能混凝土(High performance concrete, HPC)，近年來為國內外大力研發與應用之營建新材料。歐美國家除強調高強度與高坍度外，並要求需達到耐久使用之目標。日本將高性能混凝土區分為三類；(1)高強度高性能混凝土(2)高流動高性能混凝土(3)特殊功能之高性能混凝土。其中之第(2)項即為自填充混凝土(Self-Compacting Concrete, SCC)，不須搗實即可達到均勻填充。

中華民國結構工程學會對高性能混凝土之定義為；抗壓強度大於 $560\text{kg}_f/\text{cm}^2$ (8000 psi) 之混凝土，坍度為 $250\pm 15\text{mm}$ ，澆置 45 分鐘之坍度仍具有 235 mm，每立方公尺混凝土水泥用量小於 450kg，水膠比在 0.2 至 0.45 之間。使用材料為水泥、水、粗細骨材、強塑劑及礦物摻料等，其性能、品質均較一般傳統混凝土高出甚多。

高性能混凝土具有高流動性與高品質之特性，施工時不需搗實可自動澆置，又無骨材析離與泌水現象之優越性(如表 3 所示)。廣泛的自流特性對鋼筋密集之狹窄間距或斷面，均能流通並達到充分填充效果。由於具有高度之安全性、耐久性、工作性、經濟性及環保性等優越的工程特性，因此，近十年來已被廣泛應用於高樓建物，海域平台、港灣設施等方面。例如單以北海混凝土平台之興建為例，自 1973 年至 1995 年共有 27 座，水深自 70 公

尺至 345 公尺不等，其耐久性與安全性，不言可喻，表 4 簡列國外之高性能混凝土應用於海域環境各種結構之工程實例。1990 年國內開始將 HPC 使用於台北遠企大樓之興建，1994 年高雄東帝士 85 層國際廣場大廈、南二高之一座橋樑、中油防爆牆控制室、1997 年國立海洋生物博物館以及即將興建之台北國際金融大樓新建工程，目前台灣高鐵工程有多標之土木工程案均採用自充填混凝土建造。基於上述之事實，未來港灣工程之建設，應大力採用之以提升結構物之耐久性與安全。

5.2 添加波索蘭材料

波索蘭材料為一含矽質或鋁質之材料，本身不具膠結性，但在有水份的環境下與水泥混合後，會生成類似 C-S-H 膠體，具有膠結性。波索蘭材料包括稻殼灰，矽灰，高爐熟料及飛灰等，新拌混凝土時適量的添加，可減少用水量並增加工作性，其細顆粒可填充混凝土漿體之孔隙，使整體結構更為緻密而不易滲水，並可抵抗氯離子之滲入及抵抗硫酸鹽類之侵蝕，同時可提高混凝土晚期強度，大幅提升混凝土之品質與耐久性。

添加適量之飛灰、爐石粉等波索蘭材料亦可改善或抑制混凝土發生「鹼質與粒料反應」的情形。為確保混凝土構造物使用安全，建議日後新建或維護之混凝土結構物，應針對混凝土材料，尤以水泥和砂石粒料，事先進行有關鹼質與粒料反應之試驗與檢測。如無法避免使用活性骨材時，則必需添加適量的波索蘭材料以改善之。

5.3 R.C.結構物採用陰極防蝕措施或以金屬熔射工法塗覆處理

棧橋式碼頭面板底面及樑柱浸泡於海水之部份，應採用陰極防蝕，深入水面下之 P.C.預力樁或 R.C.樁，於潮間帶或基樁外壁混凝土剝落處，可加裝附加鋅網或鈦網之 FRP 套管，進行陰極防蝕，如此才能有效防止鋼筋繼續發生腐蝕。如無做陰極防蝕保護處理時，可考慮在外界腐蝕因子嚴重入侵之部位或結構重要之部位使用熔射工法將金屬材料(諸如鋅，鋁等)熔射於混凝土表面層，或於鋼筋腐蝕嚴重部位，先將混凝土保護層敲除乾淨至鋼筋表面，將銹蝕鋼筋噴砂除銹至露出金屬光澤，以熔射技術將金屬噴塗於鋼筋表面，最後再以混凝土批覆，或於批覆層中添加鋼筋腐蝕抑制劑，增加防蝕保護效果，此種處理尤如犧牲陽極式之陰極防蝕，近年來已盛行於歐、美國家之濱海地區橋樑、港灣等設施之防蝕，防蝕效果良好。

5.4 混凝土材料品管

近年來國內經濟急速發展，多項重大工程持續建造中，其中以混凝土建材需求量最大，須耗用大量水泥及砂石粒料，但國內堪用之優良粒料日漸缺乏，加以政府全面禁採主要河川砂石以及實施水泥工業東移政策，混凝土粒料及水泥原料採用東部砂石乃必然趨勢，惟國內相關研究指出花蓮台東等地區某些河川砂石可能具反應活性，部分水泥廠商生產或進口之水泥含鹼量亦有超過規範允許值之情形，如使用作為混凝土材料，在台灣高溫多雨的環境條件下，混凝土極易發生鹼質與粒料反應。

港灣工程使用混凝土數量非常龐大，濱臨海洋環境較諸其它構造物更易發生鹼質與粒料反應的危害威脅，在政府大力推動東砂西運政策及業者進口境外反應活性不明之粒料等原因，各港區混凝土構造物使用具反應活性大的粒料，發生「鹼質與粒料反應」機率大增。為未雨綢繆，如能在混凝土構造物劣化之前及早發現並迅速採用適當對策，建立預警及防制措施，將能確保構造物安全並充分發揮服務功能。

5.5 鋼構造物防蝕保護

鑑於鋼構造物常年浸漬於海水中，鋼材無法倖免於腐蝕損壞的事實，對結構物之安全與使用年限影響甚大。因此，未來不論新建或舊有鋼構物，應必須採用適當的防蝕措施，以確保碼頭營運之安全。

六、結論

港灣構造物長年處於惡劣腐蝕之海洋環境下，為維護港口營運正常，港區內之結構物必需定期檢測與維護。維修時需採用適當之工法，不但可以節省公帑又可延長結構物使用年限。由於損壞原因不一，因此就施工成效而言，新建遠比維修優，因此損壞進行維修前之各項評估甚為重要。未來新建工程時，則必需採用適合海洋結構物之規範，確實做好施工品質控制，將可降低維修機率與成本。此外，進行新建工程設計時，若能同時考慮未來的維修方法、技術、材料、設備等，則將更有助於維修成效的提高，進而增加構造物的使用壽命。

參考文獻

1. Richard T. L. Allen, Concrete in Coastal Structure, Thomas Telford Ltd., 1st ed., Heron Quay, London, 1998.
2. J. Glanville and A. Neville, Prediction of Concrete Durability, 1st ed., E & FN Spon, London, 1997.
3. P. M. Chess, Cathodic Protection of Steel in Concrete, 1st ed., E & FN Spon, London, 1998.
4. J. Kropp and H. K. Hilsdorf, Performance Criteria for Concrete Durability, 1st ed., E & FN Spon, London, 1995.
5. CEB-FIP, Application of High Performance Concrete, CEB-FIP Bulletin Information #222, pp.53~60, Nov., 1994.
6. A. K. Haug, Concrete Technology; the Key to Current Concrete Platform Concepts, pp.60~63, ACI-SP 149.
7. 港灣工程耐震安全評估與災害防治研討會(論文集), 交通部運輸研究所港灣技術研究中心, 民國 89 年 7 月 25、26 日, 台北。
8. 饒正、陳圭璋等, 蘇澳港南外堤沉箱灌漿試驗研究報告, MOTC-IOT-IHMT- ME8801, 交通部運輸研究所港灣技術研究中心, 民國 89 年 2 月。
9. 邱永芳等, 蘇澳港防波堤改善工程規畫報告, (港研專刊 146 號, 交通處港灣技術研究所, 民國 86 年 2 月。
10. 饒正、陳桂清等, 港灣 R.C. 結構物修理系統之評估研究報告(83 研 11), 交通處港灣技術研究所, 民國 83 年 6 月。
11. 台中港 1 至 4A 碼頭 921 地震液化災損初步調查研究, 港研專刊 172 號, 交通部運輸研究所港灣技術研究中心, 民國 88 年 10 月 21 日。
12. 饒正、張道光等, 港灣環境下高性能混凝土結構體之性質研究報告(88-研 12), 交通處港灣技術研究所, 民國 88 年 6 月。
13. 陳桂清、柯正龍等, 現有結構物安全評估及維護研究(88-研 12-1,2,3), 交通處港灣技術研究所, 民國 88 年 6 月。
14. 蔣元駒, 韓素芳, 混凝土工程病害與修補加固, 海洋出版社, 北京, 1996.

15. 喬生祥，黃華平，水工混凝土缺陷檢測和處理，中國水利水電出版社，北京，1997.
16. 李延恭、蘇吉立等，高雄港區老舊碼頭安全調查及評估研究，87-研(7)，交通處港灣技術研究所，民國 87 年 6 月。
17. 李賢華等，港灣構造物安全檢測與評估之研究(第二年報告)，交通部科技顧問室委託計畫，民國 90 年 12 月。
18. 「基隆港鋼板(管)樁安全檢測與評估」期中報告，基隆港務局委託研究計畫，民國 90 年 8 月。

表 1 混凝土結構物可能損壞之狀況

損壞等級	損壞之情形	造成之原因
一般常見之損壞	<ol style="list-style-type: none"> 1. 剝落 2. 接縫破損 3. 材料劣化，保護層厚度減低 4. 化學侵襲 5. 劣縫生成 6. 表面缺陷(蜂窩或孔洞) 7. 表面銹斑 	<p>外力撞擊、鋼筋腐蝕</p> <p>材料黏著性不佳，接縫材料不適當</p> <p>表面磨損，浪、流衝擊等</p> <p>酸性會浸蝕鹼性混凝土漿體，一般海水浸蝕之因子為硫酸鹽類及氯離子</p> <p>混凝土塑性縮收，結構物發生沉陷 混凝土漿體內外之熱量差變化</p> <p>攪拌不均勻、灌漿時有空氣或水份存在、或搗實不當</p> <p>內部鋼筋腐蝕、漿體孔隙增大</p>
嚴重損壞	<ol style="list-style-type: none"> 1. 基礎掏空 2. 沉陷、傾斜 3. 結構體斷裂 4. 崩毀 	<p>填充不足、夯實不夠，波浪、外力等衝擊(刷)</p>

表 2 潮間帶防蝕工法比較

防蝕工法		海洋環境		大氣帶		飛沫帶		潮間帶		海水下		底泥中		鋼構型式		
		新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	管樁	直線型板樁	Z-型板樁		
有機被覆	PE 包覆													可	可	可
	PU 包覆													可	可	可
	水中環氧樹脂													可	可	可
無機被覆	水泥包覆													可	否	否
	石油酯防蝕帶													可	否	否
金屬包覆	不銹鋼包覆													可	否	否
	低合金抗蝕鋼材													可	否	否
塗料														可	可	可
金屬熔射														可	可	可
陰極防蝕														可	可	可

註： 防蝕效果理想
 施工困難，防蝕效果不佳

施工可行，防蝕效果良好
 超出評估範圍

表 3 高性能混凝土之優點及應用性

<p>(1)早期强度高 6 小時：30~40 kgf/cm² 24 小時：200~400 kgf/cm² 利於 PC 施工 可提早拆模 減少支撐需求 鋪面施工迅速 減少養護及保養時間</p>	<p>(4)耐久性高 相同條件下，抵抗劣化能力成正比 可抵抗： 1.磨耗 2.化學侵蝕 3.鹼質與粒料之反應 4.氯離子引起之鋼筋腐蝕</p>	<p>(7)可控制水化時間 可控制凝結時間 減少水泥用量 減少拌合水量 增加搬運距離 改善施工時程</p>
<p>(2)極限强度高 28 天：400~700 kgf/cm² 56 天：700~1250 kgf/cm² 適用高層建築，縮小柱子斷面 增加混凝土與鋼筋相對強度 減少柱子數量，增加可利用空間 可提早拆模 加速預鑄樑柱之施工 增加樑柱間距</p>	<p>(5)工作性、泵送與修飾性佳 坍度 25 ± 2 公分(0 分鐘) 23 公分 (45 分鐘) 坍流度 60 公分(0~45 分鐘) 增加澆置速率 降低泵送壓力 改善結構體表面平滑度 無泌水及析離現象 易於修飾 自行凝固</p>	<p>(8)水中澆置性 在水下施工，可減少被刷掉 抗流動水 不需幫浦及可免用密特管工法， 可使用一般管線輸送 修理時，管線不需除水</p>
<p>(3)彈性模數高 450,000~500,000 kgf/cm² 適用於建築施工 混凝土與鋼筋相對之彈性模數提高 適用複合材料設計</p>	<p>(6)在任何天候下均可澆置 全年均可施工 可在炎熱天候下施工 1.坍度之損失量少 2.搬運距離長 3.溫度控制佳</p>	

表 4 海域環境下採用高性能混凝土之工程案例

工程名稱	地點	施工時間	混凝土性能及使用量	設計考量及規範
高速鐵路之橋柱修理	日本 Hokuriko	1991	強度 80 Mpa	
公路結構及橋樑維修	挪威	1989 迄今	水膠比 0.4 使用矽灰	NS 3473 挪威 process code /1989
船塢岸壁維修	葡萄牙 Setubal	1991	平均強度 74 Mpa 10 Mpa(最高值) 水膠比 0.35	葡萄牙規範(REPAP)及 CEB-FIP
機場海岸碼頭嵌板	澳洲雪梨機場	1993	強度 40 Mpa 混凝土摻用矽灰	海洋環境
濱海液化天然氣槽	日本橫濱	1993	水灰比 0.3 指定強度 60 Mpa	日本土木學會 高性能凝土規範
浮式平台(石油生產)	挪威北海	1993/94	平均強度 75 Mpa 水膠比 0.38 摻用矽灰 5% 使用量 43,000m ³	NS3473
浮式平台(石油生產)	法國 Marseille	1994/95	強度 70 Mpa	大的預力浮式駁船(200m長)
張力腳平台(石油生產)	挪威北海	1993/95	平均強度 75 Mpa 水膠比 0.36 坍度 200~220mm 空氣含量 3~5% 密度 1940kg/m ³ 使用量 65,000 m ³	NS3473 水深 350m
浮式橋樑(輕質骨材)	挪威 Bergsoysundet	1990/92	水膠比 0.40 密度 1920kg/m ³ 使用量 4500m ³	NS3473
浮式平台(石油生產)	紐芬蘭 Hibemia	1994/95	水膠比 0.34 坍度 21cm 摻用矽灰 8.5% 使用量 165,000 m ³	NS3473 重力式基座結構, 直徑 108m, 高 111m
外海石油平台/動力基礎結構	挪威北海 Draugen	1990/93	平均強度 80 Mpa 水膠比 0.4~0.42 坍度 22~25cm 使用量 80,000 m ³	NS3473 水深 251m
外海天然氣平台	挪威北海	1992/95	平均強度 82 Mpa 水膠比 0.38~0.40 坍度 24~26cm 使用量 224,000 m ³	NS3473 水深 303m
天然氣平台/重力基礎結構	挪威北海 Sleipner	1991/93	平均強度 78 Mpa 水膠比 0.4~0.42 水泥用量 75,000 m ³	NS3473 水深 83m
浮式平台基礎	挪威北海 Helgrun	1993/94	平均強度 83 Mpa 水膠比<0.43	NS3473

港灣混凝土構造物劣化探討(一)

李 釗*

摘要

港灣混凝土構造物因長期受海洋環境的侵蝕，因此在規劃、設計、施工及維護時，必須考量混凝土的耐久性問題，以免造成結構物劣化縮短使用壽命。本文的主要內容為盡量說明港灣混凝土結構物耐久性應考量的項目，及其原理和處理對策，其中包括：混凝土結構物劣化的型態、混凝土的物理耐久性、耐化學侵蝕的耐久性、及鋼筋腐蝕等，以供參考。

Harbor Concrete Structures Deterioration (I)

Chau Lee

ABSTRACT

Most harbor concrete structures are confronted and aggressed by marine severe environment. Therefore, in order to prevent shortening the structures servicing years, concrete durability must be taken into consideration in planning, design, working and maintaining. In the paper, the topics were focused on concrete durable items, such as deteriorated patterns, physical or chemical resistant ability and rebars corrosion problems.

一、前言

混凝土的耐久性為其抵抗風化、化學侵蝕、磨損、鋼筋腐蝕、或其他可能造成混凝土破壞的能力，耐久性良好的混凝土結構物，即使在侵蝕環境下仍可長時間的保持其型狀、品質、和服務性。

* 國立中央大學土木系 教授

以混凝土作為結構物材料，雖然具有經濟性、耐久性、耐火性、任意成型、施工方便、美觀和場鑄及預鑄均可等優點，但在使用時亦有其極限，如混凝土的抗張強度不足，延展性低和會膨脹及收縮等缺點。台灣由於四面環海，受海洋環境的侵蝕，使港灣鋼筋混凝土結構物面臨腐蝕破壞的危機。由於低成本且品質良好的混凝土材料日漸缺乏，使用次級材料的機會大為增加，加上近年來人工成本增加，工程實務上仍存有許多積非成是的觀念，和未確實的執行管理監工，致未能確保工程品質，亦增加結構物受侵蝕的機會，降低結構物的耐久性。

本文的主要目的，在於盡量說明港灣混凝土結構物耐久性應考量的項目，及其原理和處理對策，其中包括：混凝土結構物劣化的型態、混凝土物理的耐久性、耐化學侵蝕的耐久性、及鋼筋腐蝕等，以供參考。

二、混凝土結構物劣化的型態

在正常的情形下，鋼筋混凝土結構物應具有非常好的耐久性，且不需特別的維修，但是由於許多外在和內在的問題，如混凝土施工不良，材料選擇和配比不當，外力超過允許範圍，受周圍環境物理和化學的侵蝕，及其他問題的影響，使混凝土有過高的滲透性或產生裂縫，使有害性物質易於侵入混凝土內部，再經由各種因素的交互作用和惡性循環，使混凝土產生新裂縫和加速舊裂縫延伸，進而使鋼筋混凝土結構物劣化，而須進行適當的檢測和維修，一般鋼筋混凝土結構物劣化的過程如圖 1 所示。

鋼筋混凝土結構物因材料問題而產生裂縫損壞的成因、環境影響因子和控制變數如表 1 所示。鋼筋混凝土結構物產生裂縫的型態、成因和注意事項如表 2 所示。吾人可參考表 1 和表 2 所列的裂縫型態，對鋼筋混凝土結構物劣化的情形做初步目視的成因研判，並決定進一步的檢測方法和維修方案。

2.1 混凝土的收縮現象

混凝土因係用水拌合製成，當拌合水被水泥水化作用消耗和蒸發失水後，混凝土會產生收縮現象。混凝土的收縮行為可分為塑性收縮、乾燥收縮、自生收縮和碳化收縮等四種型態。

當混凝土在塑性階段尚未凝結時，因空氣或混凝土溫度高、風速大、濕度低等因素，使新拌混凝土的失水速率大於泌水速率時，固體顆粒間會形成毛細現象，產生負的毛細壓力，將水泥漿的顆粒拉近使體積縮小，造成混凝土收縮的現象稱為塑性收縮。一般塑性收縮多發生在較大面積的混凝土施

工，如橋面版、樓版、剛性舖面等，而有模板包覆的混凝土，因有模板保護較不會產生塑性收縮，但若模板會吸水則仍可能產生塑性收縮的現象。混凝土產生塑性收縮的裂縫多發生在混凝土表面，其型態可概分為兩種，一種是在混凝土表面產生較細且不深的網狀裂縫，多發生在泌水較多，或施工時現場加水較多的混凝土版表面，或以水泥砂漿粉刷的牆面，因進行粉光後未做適當的養護，使混凝土繼續收縮所致；另一種型態的塑性收縮裂縫為平行版邊、平行束制方向、或垂直風向的裂縫。欲改善混凝土產生塑性收縮的現象，可針對使混凝土失水過快的原因進行防護減低失水速率，其次是掌握適當的粉光時機，在混凝土的泌水停止時再進行表面粉光，再來就是在適當的時機提前對混凝土進行養護，以維持混凝土的潮濕狀態。

當混凝土施工完成後，混凝土在乾燥的環境會持續緩慢的失水乾燥，而產生乾燥收縮的現象。混凝土乾燥收縮的速率和收縮量會因混凝土的水灰比高、水泥用量多、骨材用量少、含水量高、構件尺寸大、相對濕度低、乾燥時間長而產生較大的收縮量。乾燥收縮裂縫的型態多為大而有規則的裂縫，但常會受構件和束制情形的影響而有特殊的型態，如垂直構件的長方向，或平行構件的束制方向等。

碳化收縮是由於混凝土中含有水泥水化後產生的氫氧化鈣，與空氣中的二氧化碳反應變成碳酸鈣，在反應時會產生收縮的現象稱為碳化收縮。碳化收縮須在較低的相對濕度(約 50%)有較大的收縮量。

自生收縮是由於混凝土的拌合水用量低於水泥水化的需水量，即使控制混凝土中的水分不蒸發散失，當水泥水化將拌合水用盡後，混凝土仍會因乾燥而產生收縮現象，稱為混凝土的自生收縮，通常發生在低水灰比的混凝土，因此在混凝土施工時須加濕養護，以減少混凝土產生自生收縮的現象。

2.2 水泥的健性問題

硬固水泥漿維持其體積不變的能力稱為健性，造成水泥健性不良的原因，係由於在製造水泥的過程中配料不當，原料含有過多的石灰石，或燒結溫度和時間不夠，無法使 CaO 完全與 SiO_2 結合形成矽酸鈣，使得水泥中含有過多的游離石灰(CaO)和方鎂石(MgO)，因石灰石在大約 900 時即分解成 CaO 和 CO_2 ，而一般水泥的燒結約達 1500 ，所以水泥中的游離 CaO 和 MgO ，經高於其分解的溫度燒結，此種情形稱為硬燒(hard burned)，經硬燒後的 CaO 和 MgO 水化速率較慢，且由於係膨脹性反應，在其進行水化時，水泥早已硬固，所以易導致混凝土破裂，此種現象即為水泥的健性不良，其反應式如下：

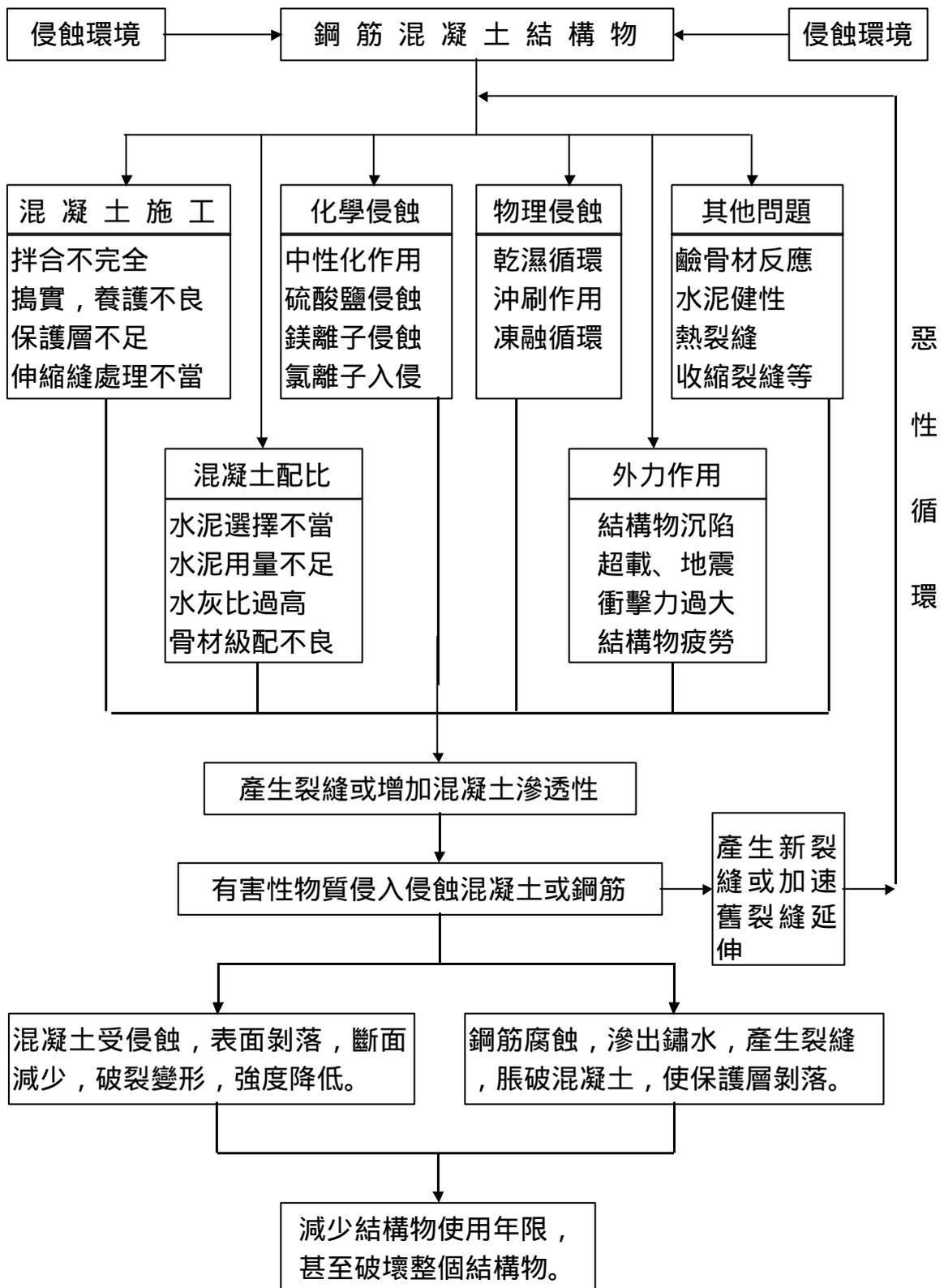


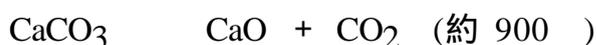
圖 1 因材料問題造成鋼筋混凝土結構物損壞之流程圖

表 1 材料造成混凝土裂縫之成因與改善方法

材料	型態	成因	環境因子	控制變數
水泥	健性不良	體積膨脹	水分	游離石灰與方鎂石
	溫度裂縫	熱應力	溫度	水化熱與冷卻速率
骨材	鹼骨材反應	體積膨脹	水分供應	水泥鹼金屬含量 骨材成分與特性
	凍害	水力應力	凍融循環	骨材吸水性 混凝土含氣量 骨材最大粒徑
水泥漿	塑性收縮	水分喪失	風、溫度、溼度	混凝土溫度 表面防護
	乾燥收縮	水分喪失	相對溼度	配合設計 乾燥速率
	硫酸鹽侵蝕	體積膨脹	硫酸根離子	配合設計 水泥形式
	熱膨脹	體積膨脹	溫度改變	上昇溫度 改變速率
鋼筋	電化學腐蝕	體積膨脹	氧、水分	適當之保護層厚度

表 2 鋼筋混凝土裂縫的型態與成因

裂 縫 型 態	形 成 原 因	改 善 方 法
大而不規則或與邊成特定角度或貫穿結構物	結構性裂縫、支撐不良、超載或反覆荷重	改變設計斷面，加強支撐，補強，限制載重
大而有規則之間距	收縮裂縫	水分蒸發速率，配合設計
	熱裂縫	水化放熱、溫度上升與改變速率
粗且有規則之地圖狀裂縫，有膠體流出	鹼骨材反應	使用低鹼水泥，避免使用活性骨材，使用波蜀蘭物質，做好混凝土防水
細且有規則之地圖狀裂縫，可能裂縫不深	過度泌水	泌水停止後再抹光，且避免過度抹光
	塑性收縮	配合設計，表面防護，提早養護
細且稍有規則的平行版邊，或與風向垂直	塑性收縮	配合設計，表面防護，提早養護
平行版邊或控制縫邊緣(D 裂縫)	使用多孔骨材、含水量過高、受凍融影響	骨材吸水率，混凝土含氣量，骨材最大粒徑
沿鋼筋位置之裂縫或有銹水流出	鋼筋腐蝕	適當的保護層，以減少氧和水分滲入，控制氯離子含量
混凝土表面剝蝕	硫酸鹽侵蝕	配合設計，水泥種類，使用礦物摻料



在 CNS 61 [卜特蘭水泥] 中未直接規定水泥中游離石灰的限量，但規定依 CNS 1258[卜特蘭水泥熱壓膨脹試驗法] 之試驗結果，其膨脹量不可超過

0.8%。一般而言水泥中游離石灰的含量在 0.5%左右，若其含量超過 1.5%則表示水泥的品質發生問題。

2.3 熱裂縫

水泥的水化反應為一放熱反應，在建造巨積混凝土，或構件的最小斷面大於 1.2 公尺時，應注意防止因水化熱過高，使混凝土內外的溫度差過大而產生熱應力，造成混凝土產生裂縫的現象，必要時可使用第二型中度抗硫和低熱水泥、第四型低熱水泥、或以波蜀蘭物質取代部份水泥，以降低混凝土的水化熱，或以降低混凝土各材料溫度的方法，如利用碎冰拌合混凝土，以減少混凝土內外的溫度差。當混凝土因水化熱過高產生熱裂縫時，其裂縫型態為大而有規則間距之裂縫。

三、混凝土的耐磨性

3.1 混凝土耐磨損的類型

混凝土的耐磨性為混凝土表面抵抗磨擦或研磨作用的能力，在混凝土工程上可分為三種類型：

1.磨損：

指混凝土樓版、樓梯、剛性鋪面等表面，長期受行人、貨物、車輛等反覆研磨及摩擦作用，使混凝土表面產生磨平、光滑、凹陷等損壞。一般混凝土中水泥漿的抗磨性不是很好，混凝土抵抗的抗磨的能力，主要取決於粒料的硬度。

2.沖蝕：

指混凝土洩洪道、渠道、水管、橋墩等水利工程，受流動液體與液體中懸浮固體長期磨蝕所造成的損害，混凝土發生沖蝕的嚴重程度，主要取決於液體中懸浮固體的數量多寡和性質，若液體中無沈澱物，且沒有化學侵蝕發生時，發生剝蝕的機會並不大。而混凝土抗剝蝕的能力取決於混凝土的抗壓強度。

3.孔蝕：

當高速流動之流體改變方向或改變斷面時，所產生之亂流和負壓力，對混凝土表面會產生衝擊損壞。對於混凝土而言，孔蝕的損害是相當嚴重的問題，即使品質非常良好的混凝土亦可能發生損壞。防止孔蝕最好的方

法是藉良好的流力設計，避免流體在高速時，發生方向或速度急速的變化。使用品質良好的混凝土材料，可將損害降低。

3.2 增加混凝土耐磨性的策略

混凝土中水泥漿的耐磨性較差，當水泥漿被磨損粒料露出但未剝落時，由粒料抵抗後續的磨損，此時混凝土粒料與水泥漿間的結合力將掌控混凝土的耐磨性，因此混凝土的表面強度和粒料硬度，為影響混凝土耐磨性的重要因素。

增加混凝土耐磨性的策略可分為材料和施工兩部份。選擇適當的混凝土材料包括：選擇適當的混凝土強度、降低水灰比、適當的粒料級配、採用堅硬的粒料等。

在施工時，避免混凝土產生析離現象、消除泌水現象、掌握適當的表面抹光時機、降低表面水灰比、嚴禁混凝土任意加水、使用硬鏟刀鏟抹表面、確實做好養護工作等，均可改善混凝土表面的耐磨性。

增加老舊混凝土表面的耐磨性，可在混凝土表面噴洒如矽酸鈉、氟矽酸鎂、或氟矽酸鋅等化學藥劑，藉此藥劑與混凝土中的氫氧化鈣反應，生成矽酸鈣膠體，使混凝土表面不致產生粉化現象，進而增加混凝土表面的耐磨性。

3.3 混凝土鋪面的防滑性

混凝土表面粗糙的紋理是防滑性的主要來源，混凝土表面紋理可分為施工時刻意製造的粗糙表面形成巨觀紋理(macro-texture)，及細粒料硬度和型態所形成的微觀紋理(micro-texture)。當車速在時速 80 公里以下時，混凝土表面的微觀紋理較為重要，車速在 80 公里以上時則巨觀紋理則較為重要，以防止車輛在高速且有積水時產生漂浮現象(hydroplaning)。

混凝土鋪面通車後，巨觀紋理會磨損而露出粒料，此時鋪面的抗滑性則視紋理深度及粒料的硬度和岩石種類，若細粒料含有大量堅硬的矽質顆粒可減緩巨觀紋理磨損的速率，並維持微觀紋理的抗滑功能。若使用堅硬度不足的粒料，如石灰石等，則混凝土表面會有較快的磨損速率，使混凝土表面變得較光滑，而降低鋪面的抗滑性。因此選擇適當的材料，製造品質良好的混凝土，配合優良的施工，將可增加鋪面的耐久性。

四、有害化學物質侵蝕

在一般的環境下，品質良好的混凝土應具有令人滿意的耐久性，但是在侵蝕環境下，若未對混凝土作適當的防護處理，即使是品質良好的混凝土仍會受到侵蝕，而降低混凝土的耐久性和使用壽命。

一般固體或乾的化學物質，較不會對混凝土造成侵蝕現象，而化學物質多以足夠濃度的溶液型態侵蝕混凝土，且若有壓力的環境下會使有害物質更易滲入混凝土，而加速有害物質的侵蝕現象。

為方便混凝土結構物在規劃設計時，考量環境因素對混凝土耐久性的影響，表 3 列舉常見的化學物質對混凝土侵蝕速率。表 4 顯示混凝土抵抗化學侵蝕能力的影響因子。

表 3 常見化學物質對混凝土之侵蝕速率

常溫下之侵蝕速率	無機酸	有機酸	鹼性溶液	鹽類溶液	其他
快	鹽酸 硫酸 硝酸	醋酸 蟻酸 乳酸	----	氯化鋁	----
中等	磷酸	單寧酸	氫氧化鈉 (> 20%) ^註	硝酸胺 硫酸胺 硫酸鈉 硫酸鎂 硫酸鈣	溴氣
慢	碳酸	----	氫氧化鈉 (10~20%) 次氯酸鈉	氯化胺 氯化鎂 氰化鈉	氯氣 海水 軟水
可忽略	----	草酸 酒石酸	氫氧化鈉 (< 10%) 氫氧化胺	氯化鈣 氯化鈉 硝酸鋅 鉻酸鈉	氨水

註：若混凝土中含有活性粒料，氫氧化鈉易造成鹼質與粒料反應。

表 4 混凝土受化學侵蝕之影響因子

加速或惡化侵蝕之因子	減輕或延緩侵蝕之因子
高吸水性、高滲透性、高孔隙率	產製緻密的混凝土： 1.適當的混凝土配比 2.降低用水量、水灰比 3.足夠的膠結材料 4.適度的輸氣 5.適當的搗實作業 6.有效的養護處理
因應力集中或溫度改變產生之裂縫	減少混凝土產生張力裂縫的機會： 1.採用適當尺寸和正確施工之鋼筋 2.添加適量卜作嵐材料降低水化熱 3.設置適當的收縮縫
因液體流動、積水或水壓力，造成液體貫入和滲出混凝土	結構設計： 1.盡量減少混凝土接觸有害化學物質的面積和產生亂流的機會 2.在嚴重侵蝕環境可考慮採用外層薄膜防護

混凝土結構物受到外來化學物質侵蝕的情形，一般多考量硫酸鹽侵蝕、海水侵蝕、酸蝕、和中性化(碳化)作用等。

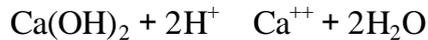
4.1 酸蝕

混凝土為一種鹼性材料，較不會遭受鹼性物質的侵蝕，但是酸性溶液則會對混凝土造成侵蝕現象。一般酸雨、工業廢水等為較常見對混凝土可能造成侵蝕的酸性溶液，另外溶解有二氧化碳的礦泉水、土壤中若含硫化鐵在氧化後地下水中會含有硫酸、廢水或污泥中有機物經細菌分解後生成硫化氫再遇水轉變為硫酸、採礦區或堆礦區之排水等情況形成酸性環境，均可能對混凝土造成酸蝕現象。

4.1.1 酸蝕機理

混凝土受酸性溶液的侵蝕，主要是由於混凝土中含有水泥水化後產生

鹼性的氫氧化鈣，遇酸性溶液後會產生中和反應，生成含鈣的鹽類和水，酸性溶液中氫離子與氫氧化鈣的反應如下：



如果酸性溶液濃度高時，混凝土中具膠結性提供強度的 C-S-H 膠體會被分解而失去膠結性：



酸蝕所產生含鈣鹽類的特性，依溶液中的陰離子而定，可能為水溶性或為非水溶性鈣鹽。若生成水溶性鈣鹽，在藉水析出混凝土後，則會造成析晶現象和增加混凝土的孔隙，對混凝土的侵蝕性較強，一般硫酸、鹽酸、硝酸、醋酸、甲酸、乳酸、和單寧酸等溶液，與氫氧化鈣反應後會產生水溶性鈣鹽，其中硫酸在酸蝕後產生之硫酸鈣，會對混凝土進行一步造成硫酸鹽侵蝕。磷酸、酒石酸侵蝕後則生成非水溶性的鈣鹽，其沉澱物能堵塞混凝土孔隙，保護混凝土受到進一步的侵蝕。

糖雖不是酸，但是糖水會溶解氫氧化鈣，亦會慢慢分解 C-S-H 膠體與水化鋁酸鈣，故糖水對混凝土亦具有極強的侵蝕性。

4.1.2 酸蝕對策

低水灰比的緻密混凝土或適當使用卜作嵐材料的混凝土，通常可抵抗偶而出現的弱酸侵蝕，但是沒有任何卜特嵐混凝土可長期浸泡在酸性溶液，尤其是 pH 值低於 3 的酸性溶液，因此必須另外以耐酸蝕的材料對混凝土做表面防護。

4.2 混凝土的中性化

4.2.1 反應機理

水泥水化後會產生大約 24% 鹼性的氫氧化鈣，使混凝土呈鹼性。若混凝土的滲透性大、裂縫和孔隙多，空氣中或溶在水中的二氧化碳會侵入混凝土，和氫氧化鈣反應，生成溶解性較低呈中性的碳酸鈣，若混凝土繼續受碳化作用，碳酸鈣會轉變成溶解性較高的碳酸氫鈣，析出混凝土而增加混凝土的孔隙，造成強度遞減的現象，並使有害性物質更容易滲入混凝土：





由於混凝土中的高鹼性，主要是由氫氧化鈣提供，在碳化作用後變成中性的碳酸鈣，會使混凝土的 pH 值降低，所以碳化作用一般常稱為混凝土的中性化。若碳化情形嚴重，亦可能分解提供混凝土強度的 C-S-H 膠體，而降低混凝土的強度：



4.2.2 中性化檢測

混凝土中性化程度的檢測，通常是敲取一塊混凝土試體，使混凝土產生一新斷面，或在鑽取鑽心試試體時，將酚汰溶液噴在試體表面上，利用酚汰溶液遇鹼性物質會變成粉紅色的特性，量取未變色部份的深度即為所謂的中性化深度。

4.2.3 中性化對混凝土性質之影響與對策

中性化對混凝土性質的影響，依碳化時間、碳化速率、二氧化碳濃度等不同條件，可分為有利影響和不利影響兩部份。若混凝土在產製過程中適度進行碳化處理，因碳化作用會使混凝土產生碳化收縮現象，所以可適度增加混凝土強度和改善體積穩定性。

由於混凝土的鹼性主要是由氫氧化鈣提供，在碳化後會降低混凝土的鹼性(pH 值)，而破壞鋼筋在鹼性環境才會生成的 Fe_2O_3 鈍態保護膜，而使鋼筋易受到腐蝕，因此若中性化至鋼筋表面，會降低混凝土保護鋼筋的效果，對防止鋼筋腐蝕較不利。在品質夠好的混凝土中，一般中性化深度並不深，若保護層夠厚，對鋼筋腐蝕的影響並不大，但若混凝土有裂縫、孔隙過多、滲透性大、或保護層不足，混凝土的中性化就會導致鋼筋腐蝕。

若混凝土在水化硬化階段，受大量二氧化碳影響，如通風不良之燃燒式加熱系統，會使混凝土表面孔隙增加和粉化現象，而降低混凝土表面耐磨損性。

在大氣環境下，混凝土的碳化作用相當緩慢，碳化速率會受相對濕度、混凝土的滲透性、和二氧化碳濃度影響。若相對濕度為 50~75%，混凝土會有較快的碳化速率，若相對濕度大於 75%，因混凝土孔隙中的水分可阻擋二氧化碳，碳化速率較慢。在工業區或都會區的二氧化碳濃度一般會較高，混凝土易產生中性化現象，所以要求良好的混凝土品質，宜考慮較低的水灰比、良好的施工以降低混凝土的滲透性。

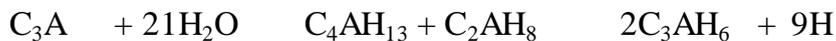
4.3 硫酸鹽侵蝕

4.3.1 侵蝕現象

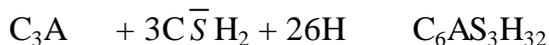
一般在海水、地下水、工業廢水中，可能含有如硫酸鈉、硫酸鉀、硫酸鎂、硫酸鈣等硫酸鹽，若在硫酸鹽環境中的混凝土結構物未做適當的防護處理，混凝土中的水泥水化產物會產生膨脹，造成結構物發生剝落、粉化、裂縫等硫酸鹽侵蝕現象。若混凝土結構物以浸泡的方式接觸硫酸鹽溶液，則硫酸鹽是由外向內逐步侵蝕混凝土；若結構物暴露在大氣中的部份，容許由另一面滲入混凝土之硫酸鹽溶液蒸發，會增加混凝土中孔隙溶液中的硫酸鹽濃度，而硫酸鹽濃度高的部位將會發生硫酸鹽侵蝕現象。

4.3.2 侵蝕機理

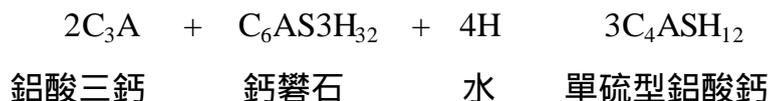
混凝土受硫酸鹽侵蝕的反應機理，一般認為是由鈣礬石二度膨脹和石膏腐蝕兩種反應組合而成。形成鈣礬石二度膨脹的主要原因，乃是水泥中鋁酸三鈣(C₃A)的水化產物對硫酸鹽不穩定所造成，因此首先須瞭解鋁酸三鈣的水化過程，和其可能造成的問題。由於純鋁酸三鈣的水化速率相當快，會造成混凝土閃凝的現象，而影響混凝土的工作性和日後的強度，其反應式如下：



為避免產生閃凝現象，在製造水泥時須在水泥中加入石膏，以控制鋁酸三鈣的水化速率。當鋁酸三鈣與石膏同時進行水化反應時，會在鋁酸三鈣顆粒表面形成含硫量較多的鈣礬石(ettringite)：

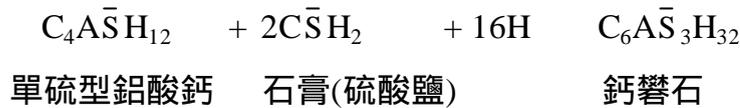


若反應系統中的石膏含量，不足以使全部的鋁酸三鈣水化形成鈣礬石時，尚未水化的鋁酸三鈣，會與鈣礬石搶鈣礬石中的硫酸根，而生成含硫量較低的單硫型鋁酸鈣(monosulfoaluminate)：



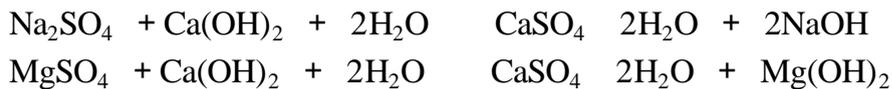
由於單硫型鋁酸鈣對硫酸根離子不穩定，若遇到外來的硫酸鹽時，會

再度轉變成鈣礬石：



當鋁酸三鈣在水化生成鈣礬石時，體積會膨脹 8.15 倍，但此時混凝土尚在塑性狀態，對混凝土並不會造成損害，但是由單硫型鋁酸鈣轉變成鈣礬石時，體積膨脹 2.27 倍，由於此時混凝土已硬固，在轉變時會使混凝土產生膨脹、剝落、破裂和強度降低等硫酸鹽侵蝕的現象。

水泥中之矽酸二鈣和矽酸三鈣在水化後，除生成具有膠結性的 C-S-H 膠體外，亦生成氫氧化鈣，來自外界硫酸鹽中的陽離子(鈉和鎂)，會和氫氧化鈣進行陽離子交換生成石膏：



此反應亦為一膨脹性反應，因此亦稱為石膏腐蝕，其對混凝土影響的程度，須視外界硫酸鹽的濃度而定，若在高濃度時，石膏腐蝕對混凝土的影響就不可忽視。

4.3.3 硫酸鹽侵蝕的對策

面對硫酸鹽侵蝕混凝土的處理對策，著重在預防措施，原則上係掌握下述兩大重點：

- (1) 選擇適當型式的水泥，或以適當的卜作嵐材料取代部份水泥，以減少混凝土內部產生膨脹的因子。
- (2) 藉降低水灰比(或水膠比)、適當的配比、良好的施工等手段，以降低混凝土的滲透性。

CNS 12891 和 ACI 318 對選擇適當型式水泥，要求常重混凝土的最高水灰比，及輕質混凝土的最低抗壓強度，如表 5 所示。英國的 BS 8110:Part 1 中除規範在不同的硫酸鹽環境下宜使用的水泥種類和最高水灰比外，亦規定使用不同最大粒徑骨材時之最低水泥用量，以減少混凝土中之孔隙和降低滲透性，如表 6 所示。

表 5 CNS 12891 對混凝土暴露於硫酸鹽環境時之規定

硫酸鹽 暴露條件	土壤中水溶性 硫酸鹽濃度 (重量%)	水溶液中 硫酸鹽濃度 (ppm)	建議使用 水泥種類	最大 水灰比	輕質骨材混 凝土最低強度 (kg/cm ²)
可忽略	0.00-0.10	0-150	---	---	---
中度侵蝕 (海水)	0.10-0.20	150-1500	Type 、 IP、 IS	0.5	260
嚴重侵蝕	0.20-2.00	1500-10000	Type	0.45	300
非常嚴重	2.00 以上	10000 以上	Type + 卜作 嵐材料	0.45	300

表 6 不同最大粒徑時，混凝土之最低水泥含量

骨材最大粒徑		最低水泥用量	
in	mm	lb/yd ³	kg/m ³
1.5	37.5	470	280
1.0	25.0	520	310
3/4	18.8	540	320
1/2	12.5	590	350
3/8	9.4	610	362

由於造成混凝土受硫酸鹽侵蝕的原因，主要是來自水泥中鋁酸三鈣的水化產物和外來硫酸鹽發生膨脹性反應，所以 CNS 12891 和 ACI 318 對不同環境的硫酸鹽濃度，規範使用適當的水泥種類，藉減少水泥中之鋁酸三鈣含量，減少造成混凝土膨脹破裂的因子，其中第二型水泥要求鋁酸三鈣的含量須低於 8%，第五型水泥的鋁酸三鈣須低於 5%，且 C₃A+C₄AF 的不可超過 25%。以卜作嵐材料取代部份水泥抵抗硫酸鹽侵蝕的原理，主要為減少混凝土中鋁酸三鈣和氫氧化鈣的含量，及降低混凝土的滲透性，但是應選擇適當的卜作嵐材料，一般而言選用 F 級飛灰對抵抗硫酸鹽侵蝕的效果較佳，而 C 級飛灰的效果較差，水淬爐石粉在使用前則應先進行評估。

當混凝土外觀發現有剝落、粉化、裂縫等現象時，要進一步確認是否

是遭受硫酸鹽侵蝕時，可採取混凝土試體至試驗室，分析試體中的鈣礬石和石膏含量，是否遠超過正常的混凝土，同時並分析結構物所處的環境是否含有硫酸鹽，瞭解其濃度和種類，再進行最後的研判。

4.4 海水對混凝土的侵蝕

4.4.1 侵蝕現象

海水對混凝土的侵蝕，主要係由於海水中的鹽分對混凝土會有侵蝕作用，海水和海砂中之鹽分對混凝土性質的影響如表 7 所示。水泥水化產物受海水侵蝕反應項目摘要如表 8 所示。

觀察鋼筋混凝土受海洋環境侵蝕破壞的現象，若依結構物受侵蝕的部位分類，可分為大氣區，潮汐區和浸泡區等三部份。在浸泡區的混凝土，由於經常浸泡在海水中，所以直接會受到海水的化學侵蝕，如碳化作用，鎂離子侵蝕，硫酸鹽侵蝕和氯離子侵蝕等，使混凝土的孔隙增大，剝落開裂和強度降低。因為必須氧氣和水分同時存在時，才會造成鋼筋腐蝕，在浸泡區的鋼筋混凝土，雖然有氯離子和水分的入侵，但因海水中的溶氧量有限，所以在浸泡區混凝土中鋼筋的腐蝕情形較不嚴重。

位於潮汐區的鋼筋混凝土，除會受到海水的化學侵蝕外，亦經常受到海浪和海水中夾帶的固體物沖刷和衝擊，及漲潮和退潮的影響，使混凝土經常處於乾燥和潮濕的循環，由於混凝土具有吸水膨脹和乾燥收縮的特性，容易導致混凝土產生裂縫，另外海水中的鹽分在乾燥的過程中，會使混凝土孔隙中的海水濃度增加，而加速海水對混凝土的侵蝕，若混凝土孔隙中的海水因乾燥生成結晶時，會產生結晶壓力，使混凝土產生微裂縫，讓有害性物質更易侵入混凝土，而加速海水對混凝土的侵蝕，加上在潮汐區的氧氣和水分不虞匱乏，當混凝土的滲透性大或有裂縫時，氯離子和氧氣的入侵，會加速鋼筋的腐蝕，所以在潮汐區的鋼筋混凝土，受海洋環境侵蝕的情況最為嚴重。

在大氣區的鋼筋混凝土，雖然不會受到海浪的沖刷和海水直接的侵蝕，但是若鋼筋混凝土的配比不當，施工不良，受超過設計允許的外力作用，及其他因素造成混凝土表面產生裂縫時，大氣中所含的氯離子和氧氣，易經裂縫穿過混凝土腐蝕鋼筋，因為鋼筋受腐蝕後的體積變大，所以一般鋼筋混凝土受腐蝕後，多半是沿平行鋼筋的方向產生裂縫，若情況嚴重則會使混凝土表面的保護層爆開或剝落，曝露出已受腐蝕的鋼筋，或自鋼筋附近的裂縫流出鏽水，在混凝土表面形成鏽斑。由於混凝土產生裂縫機會大的部位，鋼筋較易受到腐蝕，所以若以鋼筋混凝土受力的情況來看，腐蝕多半發生在結構物的張力區，且以結構物的靠海面或迎風面，受腐蝕的情形較為嚴重。

表 7 海砂或海水中之鹽分對混凝土性質的影響

氯化鈉 (NaCl)	氯離子會造成鋼筋腐蝕 鈉離子會惡化鹼骨材反應
氯化鎂 (MgCl ₂)	氯離子會造成鋼筋腐蝕 與氫氧化鈣反應生成氫氧化鎂和氯化鈣
硫酸鎂 (MgSO ₄)	1. 硫酸根離子會造成硫酸鹽侵蝕 2. 鎂離子會與 C-S-H 中之鈣進行陽離子交換，生成 M-S-H 破壞水泥漿體結構，降低強度
硫酸鈣 (CaSO ₄)	造成硫酸鹽侵蝕
氯化鈣 (CaCl ₂)	造成鋼筋腐蝕
綜合影響	1. 加速水泥水化，縮短凝結時間 2. 提高早期強度，降低晚期強度 3. 水溶性鹽類易造成混凝土析晶現象 4. 造成硫酸鹽侵蝕和鋼筋腐蝕 5. 降低混凝土耐久性

表 8 水泥水化產物受海水侵蝕反應機理摘要

水泥成分	水化產物	海水侵蝕方式	侵蝕結果
矽酸二鈣 (C ₂ S) 矽酸三鈣 (C ₃ S)	C-S-H 膠體	碳化作用分解	失去膠結性
		鎂離子侵蝕	失去膠結性
		氯離子侵蝕	變成網狀結構
	氫氧化鈣	碳化作用	析出，降低 pH 值
		鎂離子侵蝕	析出，降低 pH 值
鋁酸三鈣 + 石膏 (C ₃ A+Gypsum)	單硫型鋁酸鈣	硫酸鹽侵蝕	鈣礬石二度膨脹
		氯離子侵蝕	形成氯化鋁酸鈣
鐵鋁酸四鈣 + 石膏 (C ₄ AF+Gypsum)	鈣礬石	碳化作用	形成 thaumasite

3.4.2 對策

在正常環境下，鋼筋因受到混凝土內部鹼性環境的保護，在鋼筋的表面生成鈍態的保護膜，使鋼筋不易受到腐蝕，但是鋼筋混凝土在海洋環境下時，由於許多混凝土本身的問題，如混凝土施工不良，配比不當，外力超過允許範圍，受海洋環境物理和化學的侵蝕，及其他問題的影響，使混凝土有過高的滲透性或產生裂縫，使有害性物質易於侵入混凝土內部，再經由各種因素的交互作用和惡性循環，使混凝土產生新裂縫和加速舊裂縫延伸，擴大海洋環境侵蝕的效果，進而使氯離子更易侵入混凝土，破壞鋼筋表面的鈍態保護膜，使鋼筋受到腐蝕，而減少結構物的使用年限。由此可見在海洋環境下，保護鋼筋不受腐蝕的第一道防線為混凝土，若混凝土的滲透性低，保護層夠厚，並控制混凝土裂縫的發展，則可有效的增加鋼筋混凝土在海洋環境下的耐久性。

欲增加鋼筋混凝土在海洋環境下的耐久性，在策略上的第一步是使有害性物質無法侵入，其次是使有害性物質侵入後，無法造成危害性的反應，最後才是以其他的方法，保護鋼筋和混凝土不受侵蝕。

為防止有害性物質侵入混凝土，增加鋼筋混凝土的耐久性，首先須降低混凝土的滲透性，其次須防止在混凝土表面產生裂縫。一般降低混凝土滲透性的方法，為以較低的水灰比，使用較高的水泥含量，配合級配良好的骨材，拌合出品質良好的混凝土，加上良好的施工，搗實和養護，另外依規範混凝土採用第二型水泥，或以卜作嵐材料適當的取代部分水泥或細骨材，均可有效的降低混凝土的滲透性及受硫酸鹽侵蝕的機會。

為使有害性物質侵入混凝土後，無法造成對混凝土危害的反應，可由選擇適當的材料著手，如依規範混凝土採用第二型水泥，或以卜作嵐材料適當的取代部分水泥或細骨材，減少混凝土中氫氧化鈣的含量，和避免硫酸鹽侵蝕造成膨脹，為防止混凝土受化學侵蝕的有效策略。

若無法達到上述的要求，或上述方法仍無法有效的防蝕，則可視結構物的重要性和經濟性的要求，另外採取犧牲陽極或外加電流的陰極防蝕法，在鋼筋或混凝土表面包封法，或使用腐蝕抑制劑等方法，進一步防止鋼筋和混凝土的腐蝕。

五、鋼筋腐蝕

一般而言，鋼筋在品質良好的混凝土中是不會生鏽的，其原因是在混凝土的孔隙溶液(pore solution)中，由於含有飽和的氫氧化鈣和鈉、鉀的鹽

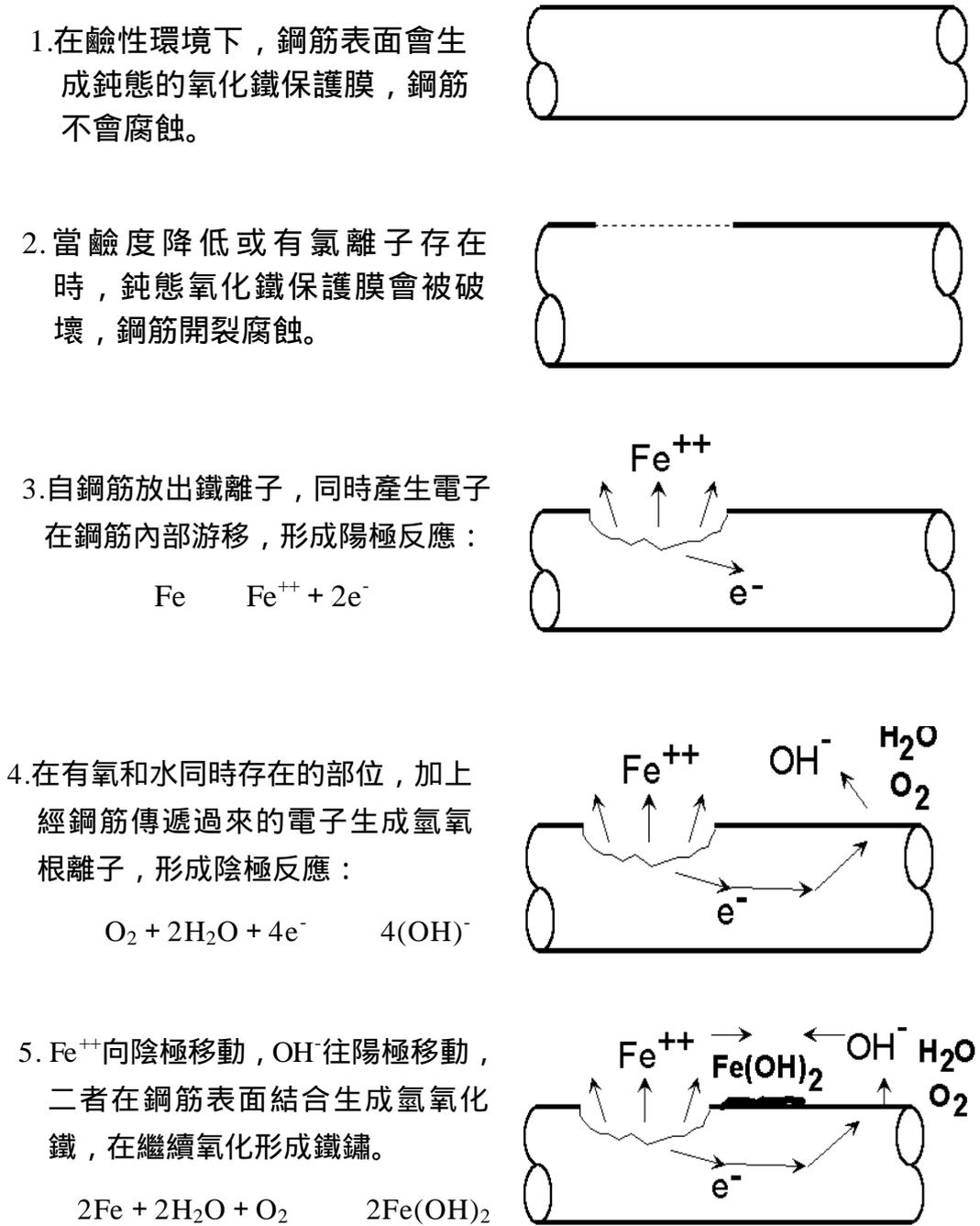


圖 2 鋼筋腐蝕的過程與反應機理

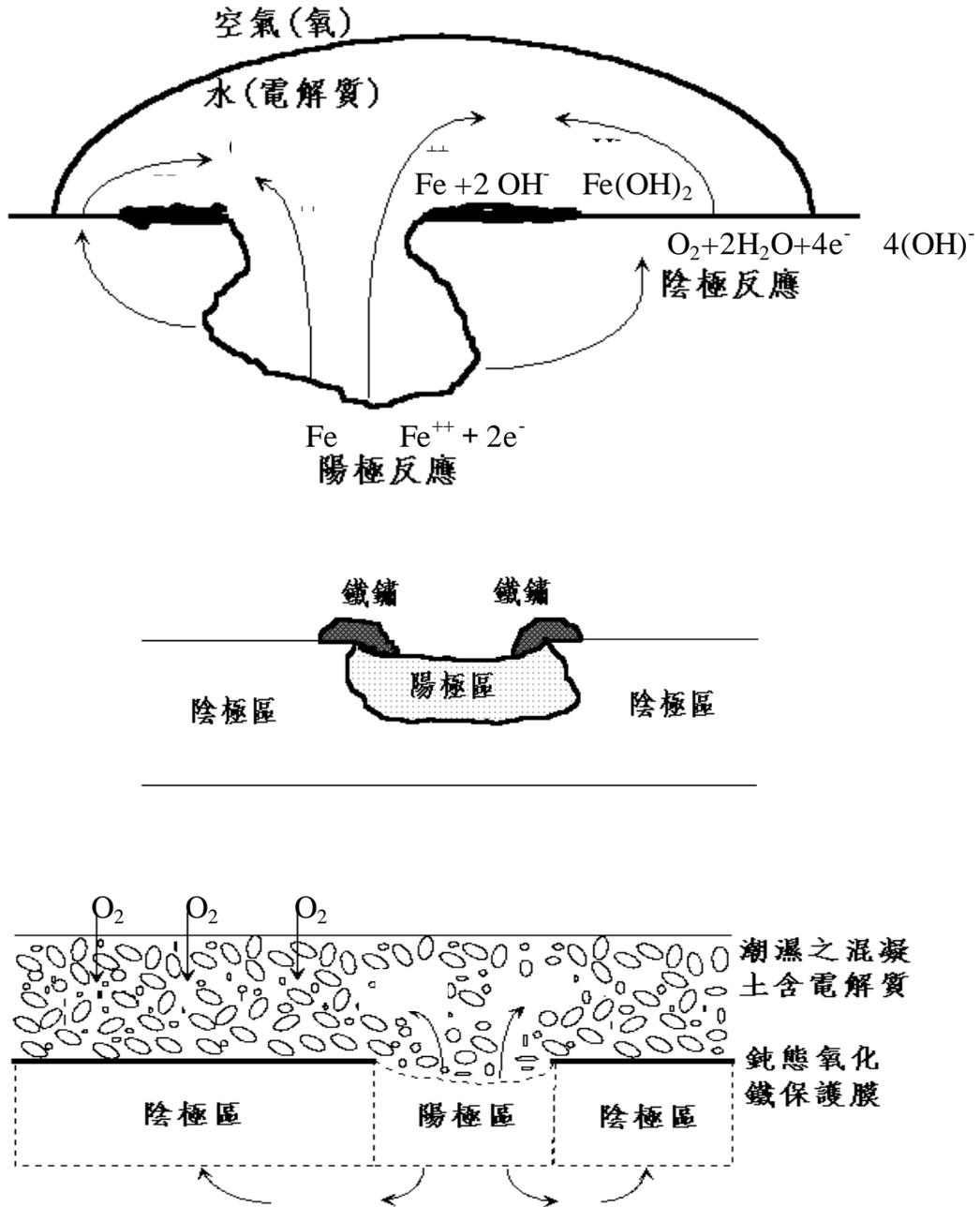


圖 3 典型的鋼筋腐蝕機理示意圖

鐵鏽的生長情形和不同腐蝕程度鐵鏽的體積的變化如圖 4 所示，最嚴重的腐蝕可使鋼筋體積增加為原來的六倍，所以混凝土中的鋼筋腐蝕，初期會脹裂混凝土，使混凝土表面產生沿鋼筋方向的裂縫，進而會使保護層的混凝土產生凸出現象，更嚴重時會使混凝土表面的保護層整片剝落，除此之外，鋼筋亦會因腐蝕導致有效斷面積減少，因而降低鋼筋混凝土承受張力的能力。

如前所述，在品質良好的混凝土中，鋼筋是不易受到腐蝕的，且造成鋼筋腐蝕亦是有多重條件同時發生，才可能使鋼筋腐蝕，造成鋼筋腐蝕的條件如下：

1. 鋼筋表面的鈍態氧化鐵保護膜受到破壞，導致鐵元素可轉變為鐵離子，產生氧化反應的陽極區。使鈍態氧化鐵保護膜破壞的因素，包括混凝土品質不良或產生裂縫，使有害物質入侵；混凝土受碳化作用，使水溶性的鹼性氫氧化鈣，轉變為非水溶性的碳酸鈣，使混凝土的 pH 值 降低至 11.5 以下；或鋼筋附近有氯離子存在。
2. 混凝土中有電解質溶液並溶有氧氣，若接受經鋼筋傳導過來的電子，即形成陰極反應。電解質溶液並可作為鐵離子和氫氧根離子移動的媒介。

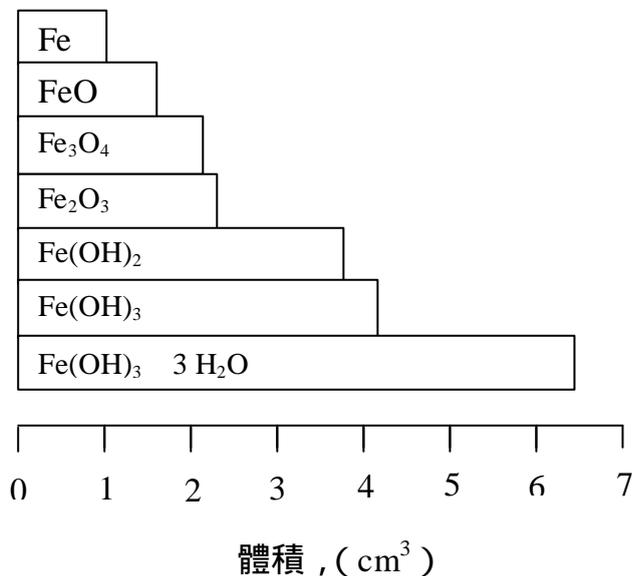


圖 4 鋼筋表面鐵鏽生長情形及不同氧化程度鐵鏽的體積變化

5.2 氯離子對鋼筋腐蝕的影響機理

在正常的混凝土中鋼筋會受到鹼性環境的保護，但是當混凝土內部有氯離子，且有氧和水分共同存在時，不論氯離子是來自水泥、骨材、拌合水、摻料等混凝土材料，或是來自海洋環境、去冰鹽等的氯離子，均會使混凝土中的鋼筋產生腐蝕。

氯離子對混凝土中的鋼筋是否會造成腐蝕，須視混凝土內部氧及水分提供程度和鹼性而定，若混凝土的品質好滲透性低或外層有包封，使氧不易滲入，或混凝土處於乾燥狀態，鋼筋較不易腐蝕。若混凝土的鹼性高，即使有少量的氯離子，鋼筋亦可忍受不致立即腐蝕，但是若混凝土的鹼性降低，雖然少量的氯離子亦會加速鋼筋腐蝕，混凝土內部 pH 值和氯離子濃度與鋼筋腐蝕的關係如圖 5 所示。一般而言，當混凝土內部 $[Cl^-]/[OH^-]$ 的莫耳比 (molar ratio) 大於 0.6 時，即使混凝土的 pH 值大於 11.5，鹼性環境對鋼筋的保護作用會消失，鈍態的氧化鐵保護膜會受到破壞，使鋼筋易於腐蝕。當鋼筋表面的鈍態氧化鐵受到破壞後，鋼筋的腐蝕速率將受混凝土的電阻和氧的提供量控制，若混凝土在乾燥情形下，或沒有氧提供的環境下，鋼筋的腐蝕速率仍較慢，若由於混凝土的品質不佳滲透性大或有裂縫，氧和水分均易侵入混凝土，而使鋼筋的腐蝕速率加快。

氯離子對鋼筋腐蝕的影響機理，可由不同的角度說明，主要是氯離子會破壞鋼筋表面的鈍態氧化鐵保護膜，形成水溶性的氯化鐵錯合物 (complex)，並溶解離開鋼筋表面擴散至混凝土中，與氫氧根離子結合生成氫氧化鐵釋放出氯離子，再與氧和水反應形成鐵銹，由於氯化鐵會溶解並經擴散離開鋼筋表面，加上會再度釋放氯離子，所以非但對鋼筋沒有保護作用，還會促使腐蝕反應持續進行，其過程如圖 6 所示。當混凝土中有氯離子存在時，亦會增加混凝土內孔隙溶液的導電度，增加腐蝕反應的活性。氯離子(氯化鈣)亦會降低混凝土的鹼性，使鈍態保護膜更易受到破壞而腐蝕。

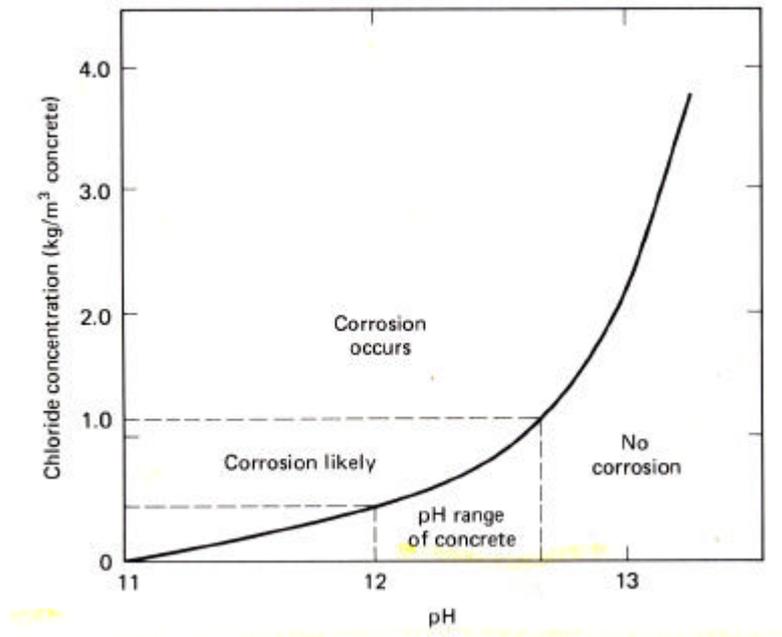


圖 5 氯離子濃度與 pH 值對混凝土中鋼筋腐蝕的影響

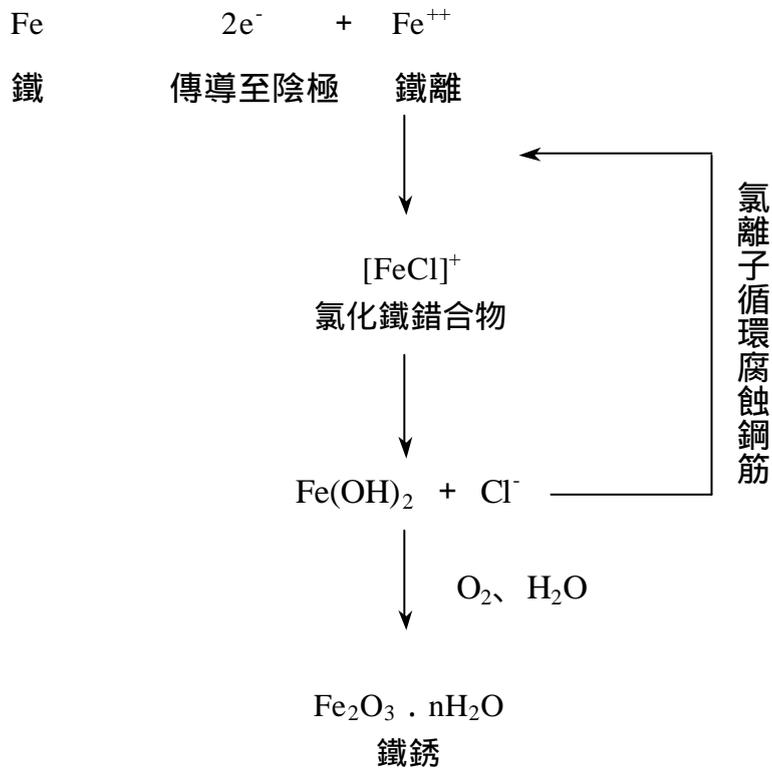


圖 6 氯離子侵蝕鋼筋的機理和過程

5.3 防止鋼筋腐蝕之對策

5.3.1 選用適當之混凝土材料

CNS 對各拌製混凝土材料之氯離子含量有相關規定：

1.粒料

CNS 1240 [混凝土粒料] 對細粒料之水溶性氯離子含量如表 9 所示，粗粒料未作相關規定。

表 9 CNS 1240 細粒料中水溶性氯離子含量限制

細粒料使用對象	最大許可值(質量%)*
(1)預力混凝土	0.012
(2)其它混凝土	0.024

* 測試方法:CNS 13407 [細粒料中水溶性氯離子含量試驗法]

2.新拌混凝土

CNS 3090 [預拌混凝土] 及 CNS 12891 [混凝土配比設計準則]，對新拌混凝土中之水溶性氯離子含量作總量管制，其內容如表 10 所示。

表 10 新拌混凝土中之水溶性氯離子含量限制

構件型式	水溶性氯離子含量最大許可值** (kg/m ³)
(1)預力混凝土	0.15
(2)鋼筋混凝土	0.3

* 檢測方法 CNS 13465 [新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗法]

3.硬固混凝土

現有 CNS 中尚未對硬固混凝土之氯離子含量作規定。對混凝土受氯離子侵蝕的檢測，可敲取或鑽取混凝土試體至試驗室內，依 AASHTO T260 的方法，將試體粉碎、泡水、煮沸、過濾，再利用硝酸銀滴定或電位滴定的方法分析氯離子含量。由於目前 CNS 並未針對硬固混凝土規定最大容許氯離

子含量，在研判時可參考 CNS 3090 對預拌混凝土中水溶性氯離子含量的規定，如表 10 所示，若超過規定可視為鋼筋混凝土結構物已受氯離子侵蝕。然而混凝土試體的取樣位置對研判結果的影響相當大，若在任意的位置取樣，或取樣位置較深，或在氯離子無法侵蝕到的範圍取樣，檢測分析的結果代表原混凝土材料是否含過量的氯離子，如是否使用海砂或海水拌製混凝土。若見混凝土中之鋼筋已有腐蝕現象，欲研判是否是因受外來的氯離子侵蝕所造成，此時宜取鋼筋周圍之混凝土，進行氯離子分析，且最好是將混凝土試體切片，分析不同深度混凝土中之氯離子含量，做進一步的確認。

4. 氯離子含量試驗法

CNS 13407 [細粒料中水溶性氯離子含量試驗法]

CNS 13465 [新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗法]

CNS 5858 [工業廢水氯離子檢驗法]

CNS 830401 [混凝土及其原料中總氯離子含量之取樣及試驗法]

5.3.2 適當的混凝土配合設計

針對海洋環境下之混凝土進行配合設計時，最重要的是選擇適當的水泥，和以控制水灰比的方法，降低混凝土的滲透性，以防止海水中的有害物質入侵，和有害物質入侵後不致對混凝土造成危害，CNS 12891 [混凝土配比設計準則] 規定在不同暴露情況下，混凝土的最大容許水灰比如表 11 所示。對暴露於硫酸鹽溶液環境之混凝土要求如前述。

5.3.3 足夠的保護層

為防止混凝土中鋼筋受到海洋環境的侵蝕，CNS 3035[鋼筋混凝土建築設計規範] 規定鋼筋保護層之最小厚度，如表 12 所示。英國之規範 BS 8110 對不同暴露條件下混凝土保護層厚度、最高水灰比、和最低水泥用量，作如表 13 所示的要求，可供參考。

表 11 CNS 12891 對不同暴露環境條件混凝土最高水灰比之規定

暴露條件	常重混凝土 最大水灰比	輕質骨材混凝土 最低設計強度 (kg/cm ²)
混凝土須考慮水密性		
a. 暴露於清水	0.50	265
b. 暴露於海水或含鹽分之水	0.45	300
混凝土在潮溼環境下受凍融循環		
a. 緣石、護欄或薄構件	0.45	300
b. 其他構件	0.50	265
c. 使用去冰鹽	0.45	300
混凝土暴露於去冰鹽、海水、鹽水或其他濺沫中須防止鋼筋腐蝕	0.40	335

表 12 CNS 3035 鋼筋混凝土建築設計規範對保護層厚度的要求

說明	版		牆	梁	柱	基腳
	厚度 <22.5cm	厚度 >22.5cm				
不直接受風雨侵蝕之面	20	25	20	40	40	40
直接受風雨侵蝕之面						
鋼筋標稱直徑<16mm	40	40	40	40	40	40
鋼筋標稱直徑>16mm		50	50	50	50	50
經常與水或土壤接觸之面		65	65	65	75	65
混凝土直接澆置於土壤岩石上或與腐蝕性液體接觸之面	50	75	75	75	75	75
與海水接觸之面	75	100	100	100	100	100
註：鋼筋之保護層厚度至少須等於鋼筋直徑，並不得小於粗粒料最大尺寸之 1 倍半。鋼筋混凝土版不在此限。(單位：mm)						

表 13 BS 8110 對不同暴露條件下混凝土保護層厚度、最高水灰比和最低水泥用量之要求

暴露條件	保護層厚度				
	不嚴重	25	25	20	20
中度侵蝕		35	30	25	20
嚴重侵蝕			40	30	25
非常嚴重侵蝕			50	40	30
極嚴重侵蝕				60	50
最高水灰比	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
最低水泥用量(kg/m ³)	275	300	325	350	400

5.3.4 良好的施工

混凝土施工時應注意混凝土拌合均勻、控制運送和澆置時間、避免產生冷接縫、適當的鋼筋保護層厚度、不可任意加水、確實搗實混凝土、避免產生析離的現象、注意表面排水、落實混凝土養護工作等。

六、結語

一個結構物自新建到使用，在工程上可概分為規劃、設計、施工和維護四個階段，在耐久性的角度而言，四個階段各有其重要性，且各自須環環相扣，才能使結構物有較長的壽命和耐久性。在整體經濟面的考量下，唯有依序做好各階段的工作，才能節省日後的維修成本，若規劃設計不當或施工時偷工減料，導致耐久性不良的後果，將大幅增加日後的維修成本，而因維修增加的成本，將遠高於當初確實依規範施工的成本。

混凝土結構物劣化的過程，多數是混凝土先產生裂縫或混凝土的滲透性增加，使外界的有害物質侵入內部，經過一段時間的惡性循環後，導致混凝土惡化或鋼筋腐蝕，進而使結構物的承重能力和服務品質降低，即使在短時間內可能不致發生大問題，但在過程中若遇較大

的外力或環境改變，結構物極可能產生破壞甚至釀成災害。

在多數的規範中對改善混凝土耐久性的策略，主要是提昇混凝土的品質，具體的作法，簡而言之則是選擇適當的混凝土材料、以低水灰比製造適當強度的混凝土、足夠的保護層、良好的施工、和確實進行混凝土養護等。

參考文獻

- 1.ACI 201.2R, "Guide to Durable Concrete", ACI Concrete Manual, 1988.
- 2.Sidney Mindess and J. Francis Young, "Concrete,"Prentice Hall, Inc. 1981.
- 3.P. K. Mehta, "Concrete Structure, Properties, and Materials," Prentice-Hall, Inc., 1986.
- 4.李惠隆, 「凝土材料中水溶性氯離子含量試驗法」。
- 5.陳式毅, 「如何引用 CNS 於工程推動中 以凝土材料之含鹽量規定為例」。
- 6.李 釗, 「海洋環境對凝土侵蝕的反應機理及注意事項」。
- 7.李 釗、巫柏蕙、劉志堅、許書王, 「鹼質與粒料反應簡介及其檢測與維修」。
- 8.李 釗、許書王, 「凝土材料劣化」。
- 9.李 釗, 「氯離子對鋼筋凝土性質之影響與改善耐久性的方法」。
- 10.李 釗, 「設計規範中應有的防蝕考量」。
- 11.李 釗、許書王、陳桂清, 「從凝土材料看橋樑破壞」。
- 12.李 釗, 「氯離子與凝土耐久性之關係」。

港灣混凝土構造物劣化探討 (二) --鹼質與粒料反應--

許書王¹

摘要

濱海環境為混凝土發生「鹼質與粒料反應」的潛勢條件之一，在港灣構造物之現地檢測應將此現象列入重要檢測項目之一。「鹼質與粒料反應」為一長期性作用而產生混凝土劣化，新建物在短期內可能並無發生此一現象的可能，但並不表示永久不會發生，除非在建造時便已採取預防措施。「鹼質與粒料反應」除了造成混凝土龜裂而衍生內部鋼筋腐蝕的問題外，若因龜裂弱化強度，再因外力作用導致崩毀，其後果將相當嚴重。本文主要針對「鹼質與粒料反應」案例、檢測方法及對策進行探討，期望能有助於對「鹼質與粒料反應」的初步認識。

Harbor Concrete Structures Deterioration (II) - Alkali-Aggregate Reaction in Concrete

S. W. Hsu

ABSTR ACT

Environment around seashore area is one of the potential conditions for alkali-aggregate reaction (AAR) occurred in concrete. Therefore, AAR testing must be listed as one of the important items in field surveying. It is a long-term reaction and would result in concrete deteriorated. For new concrete structures, there might be no symptom of AAR in a short time period, although using reactive aggregates. In fact, it should be happened in the last unless some precautions

¹ 交通部科技顧問室技正

were taken during the constructing. AAR would cause concrete expansion, cracking, and result in rebars corrosion. Eventually, it would make structures collapsing. In the article, some physical cases of AAR, diagnosing methods and rehabilitation strategies are discussed. It would be helpful to understand AAR preliminarily.

一、緒論

混凝土構造物劣化其實原因很多，包括施工不良、偷工減料等所導致，基本上材料於現地使用一段時間也會有老化的情形，不過在良好施工與不偷工剪料的情況下，如果不注意混凝土材料組成與環境之關係的情況下，混凝土構造物仍無法達到使用年限或使用中便已發生裂損徵候，原因其實也很多，個中原因值得注意的是有一個國人較為忽略的問題，那就是「鹼質與粒料反應」，前一般稱「鹼骨材反應」。

鹼質與粒料反應首次於 1940 年由 Stanton 發表在 Engineering News Record，後來包括加拿大、衣索匹亞、印度、澳洲、英國、荷蘭、瑞典、挪威、丹麥、日本、中國大陸、香港、紐西蘭、韓國、南非、台灣、伊拉克、冰島等為數甚多的國家相繼均有和鹼質與粒料反應相關的報告，由於鹼質與粒料反應從發展到構造物惡化為期甚長，而且由於地域關係，各國所產製的水泥性質、粒料性質以及氣象條件或有不同，因此相關的研究方法及規範或多或少均有不同，不過基本上對於鹼質與粒料反應的重視則是一致的。目前專門探討鹼質與粒料反應之國際研討會已進行至第十一屆，第十二屆鹼質與粒料反應國際研討會計畫將在大陸舉行。

又我國針對鹼質與粒料反應所制訂的中國國家標準，其施行日期為 1996 年 6 月 21 日，原俗稱鹼骨材反應之口語，為免遭誤解為鹼性骨材反應等，爰引用 CNS 總號 13619 類號 A3355 水泥與粒料之組合潛在鹼質反應性試驗法（水泥砂漿棒法）等相關標準用語，正名為「鹼質與粒料反應」。

二、鹼質與粒料反應案例介紹

混凝土造成鹼質與粒料反應到底有多嚴重，要視反應的程度而定，當然如果能早期發現並防治，則嚴重性勢必降低，在國內外發生鹼質與粒料反應案例章節中，將介紹不同構造物發生鹼質與粒料反應的情形，供作參酌。引起對鹼質與粒料反應的關切，主要有下列原因：

1. 不容易獲得價廉且低鹼的水泥。

- 2.重新瞭解古老構造物劣化的原因包括了鹼質與粒料反應。
- 3.歐洲部份國家逐漸認為鹼質與粒料反應是構造物劣化的重要原因。

2.1 中國大陸

1953 年中國大陸修建佛子嶺水庫時，吳中傳教授建議應重視鹼質與粒料反應之影響，並明文規定凡水利工程使用之粒料與混凝土均需符合鹼質與粒料反應之規定，故部分水利工程雖可能使用含活性粒料，但因已採取預防措施，出現鹼質與粒料反應之報告較其他國家少。1984 年大陸制訂水泥之矽酸鹽含量標準，一般混凝土工程則因大陸自 1970 年開始，硫酸鈉普遍被作為早強劑使用，在寒冷天候施工時，硝酸鈉、碳酸鉀等含鹼之添加劑也被大量使用，混凝土如使用具有活性潛能之粒料，將具備發生鹼質與粒料反應之潛在威脅。1990 年經調查發現建於 1984 年位於北平市之三元立體交叉橋樑，發現橋台及擋土牆混凝土在潮濕部分出現地圖狀裂縫，混凝土墩柱潮濕處不僅出現地圖狀裂縫，並有局部膨脹使表面出現不平現象，蓋樑端也有長 3-4 公尺的平行鋼筋之水平裂縫發生，此裂縫雖經補修但至 1993 年又發現新的類似裂縫，經現場取樣攜回試驗室試驗，結果證明該橋具備發生鹼質與粒料反應之潛在威脅。此外北平市建築研究所等單位亦針對北平四大主要粒料來源進行調查研究，發現南口碎石屬於活性粒料，西郊永定河水系屬有害和潛在有害的活性粒料，北郊溫榆河和東郊白河屬非活性粒料。近年來更極力發展適用於全大陸之混凝土鹼質與粒料反應檢測規範。

2.2 美國

1912 年建造於美國維吉尼亞州的 Buck 水力發電廠，為最早被確認是鹼質與粒料反應的構造物，其後包括胡佛水壩等混凝土構造物相繼被確認。

2-3 加拿大

加拿大早在 1940 年初期就積極投入鹼質與粒料反應之研究，1965 年 E.G.Swenson 發現另一種類鹼質與粒料反應，是謂鹼-碳酸鹽反應，粒料主要為一些白雲石和石灰石，這類粒料具有豐富的碳酸鈣類及氧化鈣、氧化鎂等成份，同年 Gillott 發現粒料中含有 Grewacke、粘土質岩及 phylite 等，造成鹼-矽酸鹽反應，膨脹非常緩慢，由於活性之粒料種類較少，滲出膠體的量也很小，此類反應機理目前尚未完全瞭解。

第十一屆鹼質與粒料反應之國際研討會在加拿大的魁北克市舉行，研

討會除有論文發表外，並專車帶領學員參觀該市具鹼質與粒料反應的混凝土構造物，其中包括了橋梁、車行地下道等。

2.4 日本

日本於 1951 年對山形縣村山及長崎橋混凝土構造物進行調查，開始研究鹼質與粒料反應之問題。1980 年京都、大阪、廣島等西部地區發現大量因鹼質與粒料反應而造成損壞之混凝土構造物，活性粒料主要為安山岩、燧石和板岩等。1982 年，阪神道路公團在確認設施有鹼質與粒料反應的情形後，由阪神高速道路管理技術中心及日本材料學會設立調查委員會。1995 年日本神戶大地震之後，日本道路公團又成立「應急對策檢討委員會」進行更深入調查，調查資料顯示位於神戶市東灘區深江本町附近橋全長 635 公尺之 17 座鋼筋混凝土橋墩全數崩倒，這些橋樑崩塌原因包括了鹼質與粒料反應而致垂直承載強度折損的問題。

日本混凝土之配比設計，因大量使用海砂做為細粒料，且水泥含鹼量高，單位水泥用量也高，如再摻入添加劑，混凝土總含鹼量將更為提高，日本建設省因此規定除應儘量選用非活性粒料和低鹼水泥外，若水泥含鹼量超過 0.6% 時，則改限制混凝土總含鹼量應小於 3.0kg/m^3 。

總含鹼量計算方式如下：

1. 添加劑大量使用時：

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = (\text{水泥之含鹼量}) \times (\text{每立方公尺之水泥用量}) + 0.9(\text{每立方公尺之氯離子含量}) + (\text{添加劑於每立方公尺所提供之 Na}_2\text{O 當量}) < 3.0\text{kg/m}^3$$

2. 添加劑用量少時：

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = (\text{水泥之含鹼量}) \times ((\text{每立方公尺之水泥量}) < 2.5\text{kg/m}^3)$$

2.5 我國

依據文獻記載國內鹼質與粒料反應研究，首由成功大學王櫻茂教授進行探討，研究結果初步認為台灣東部地區某些骨材具有活性成分，俟後中興大學校長顏聰等教授亦針對台灣地區部份河川等進行調查試驗，發現部份砂石亦有活性反應的情形，中央大學李釗教授針對國內外文獻進行回顧後，在現地活性骨材調查以及抑制鹼質與粒料反應部份，做更周詳的研究探討，完成委託研究計畫有關鹼質與粒料反應領域至少完成五份報告，其中包括港灣構造物鹼質與粒料反應調查研究、抑制策略，基本上較重要的問題是，混

土構造物檢測中除了應加入鹼質與粒料反應的項目外，如何檢測與採取對策應是重要的課題。

由於篇幅關係無法一一介紹國外以發生之每個案例，不過要注意的是依據近年來有關鹼質與粒料反應的相關文獻報導，全球已有數十個國家發現其國內混凝土構造物有鹼質與粒料反應的問題，當然如果未加以注意，除了構造物耐久性的問題外，對於古蹟的保存將形成斷層，對於社會進步的說詞亦為諷刺。

三、鹼質與粒料反應的機理

3.1 鹼質與粒料反應的種類

1. 鹼-氧化矽反應 (Alkali-Silica Reaction)

鹼-氧化矽反應係因水泥與粒料在加水拌合後，混凝土中的水泥漿體會產生強鹼性的氫氧根、鈉、鉀離子，該等離子會破壞活性粒料中的矽氧鍵結，並與之結合成鹼矽膠體，此種膠體會吸水而膨脹，進而造成混凝土構造物的劣化，本研究主要係針對鹼-氧化矽反應進行探討。

2. 鹼-矽酸鹽反應 (Alkali-Silicate Reaction)

混凝土發生鹼-矽酸鹽反應，主要係由於使用如 Phyllites、Greywacks、Argillites、Granitic 等岩石所製成的粒料，而此種反應的速率比鹼氧化矽的速率慢，在目前 ASTM 規範中之 ASTM C227[、ASTM C289 無法有效鑑定此種粒料的活性。

3. 鹼-碳酸鹽反應 (Alkali-Carbonate Reaction)

使用夾雜有黏土的含鎂石灰石 (Dolomitic Limestone, $MgCO_3/CaCO_3$) 又稱白雲石做為混凝土粒料，可能是造成鹼碳酸鹽反應的原因，但是其機理目前尚未完全瞭解。

3.2 鹼質與粒料反應的機理

文獻中所討論之鹼質與粒料反應損壞案例，大部分係由鹼-氧化矽 (Alkali - Silica Reaction) 所造成，簡稱 ASR。就混凝土構造物的損壞而言，包括了相當多的原因，諸如外力、不均勻沈陷、設計不當、施工不當、環境因素、材料因素等等，ASR 則較屬於環境因素與材料因素的合成。

鹼質與粒料反應主要原因為水泥中的鹼金屬離子 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{+2} 等滲

入反應性粒料，破壞粒料中的二氧化矽之矽氧鍵結，並與反應矽作用形成鹼矽膠體，鹼矽膠體在有水的情況下會因吸水而膨脹，造成混凝土內部產生壓力，當混凝土本身無法承受此內部壓力時，將會造成混凝土體積的增加，進而產生龜裂以釋放內部壓力，如圖 1 所示。

由於混凝土具有高鹼性的特質，文獻中使用高壓榨汁的方法，所取得的孔隙溶液其 pH 值約為 13-14 之間，孔隙溶液中的鹼離子包括 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{+2} ，等，因為混凝土環境中鹼離子和活性矽的化學作用會生成鹼矽膠體。在因鹼質與粒料反應導致混凝土裂縫生成時，從裂縫表面所看到的膠體通常是白色樹脂狀的，其黏性介於樹脂與近似機油之間，其暴露於空氣中一段時間會變成白色乾硬狀。一般而言新的混凝土裂痕表面比較有可能看到膠體，主要因為生成於混凝土裂縫表面的膠體，會很快地因為沖刷、磨耗等原因而看不到，膠體的組成成分其性質對於膠體因吸水而產生膨脹的大小有絕對的關係，Diamond 指出在一項為期四個月於密閉室溫的環境中，發現不活潑的膠體，其膨脹量小於 2%，而較活潑的膠體其膨脹量高達 63%。

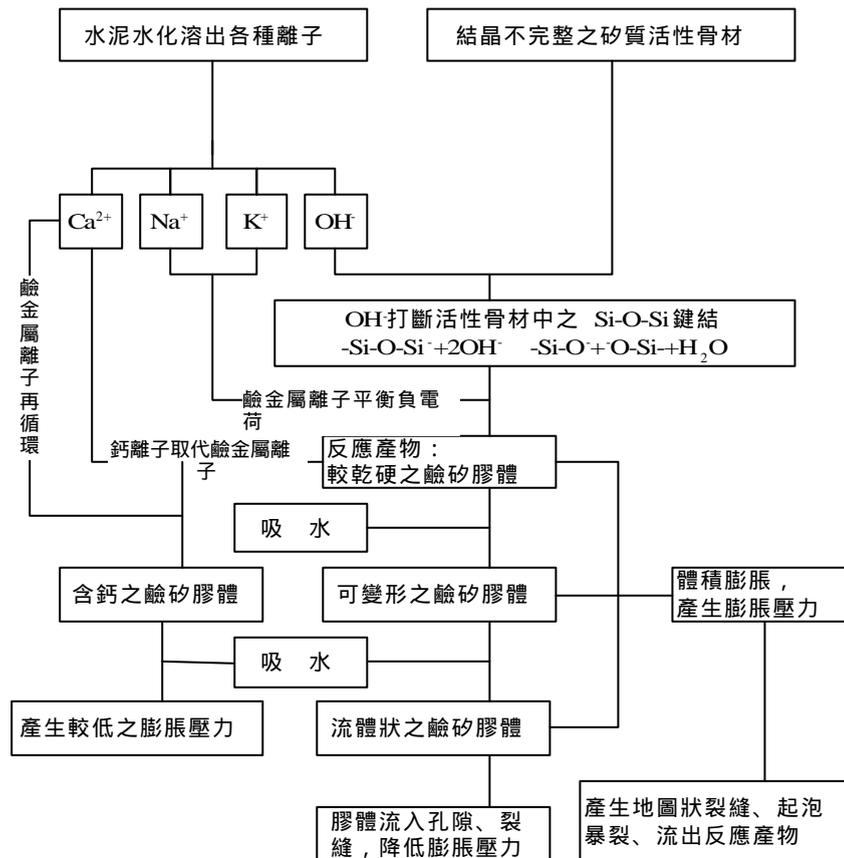


圖 1 鹼-骨材反應之機理與過程

四、國內鹼質與粒料反應之潛勢

4.1 水泥含鹼量調查

圖 2 為國內各水泥廠 85 年 4 月至 87 年 6 月所生產之水泥，每 2-3 個月抽測乙次之含鹼量 (eq.Na₂O) 值，由圖中發現國內產製之水泥含鹼量在本抽測期程中均有超過 ASTM C150 所規定的 0.6% 的情形，甚至更有 10 家超過 1.0%。對照本研究以 1.0% eq.Na₂O 以上鹼量所製作之試體的膨脹量變化，國內產製水泥的含鹼量值，將無可避免成為鹼質與粒料反應潛勢重要的影響因素。

在生產水泥之地域上而言，經分析各廠水泥產地的分佈與其所產水泥含鹼量的高低，發現所有樣品中每處產源均有超過 0.6% 的情形，因此不論從任何來源取得水泥，均有可能使用到含鹼量超過 0.6% eq.Na₂O 的水泥，因此就抑制鹼質與粒料反應而言，無論在台灣任何地區施工，均有必要於事前瞭解所使用之水泥及含鹼量的狀況，並據以為適當之措施。

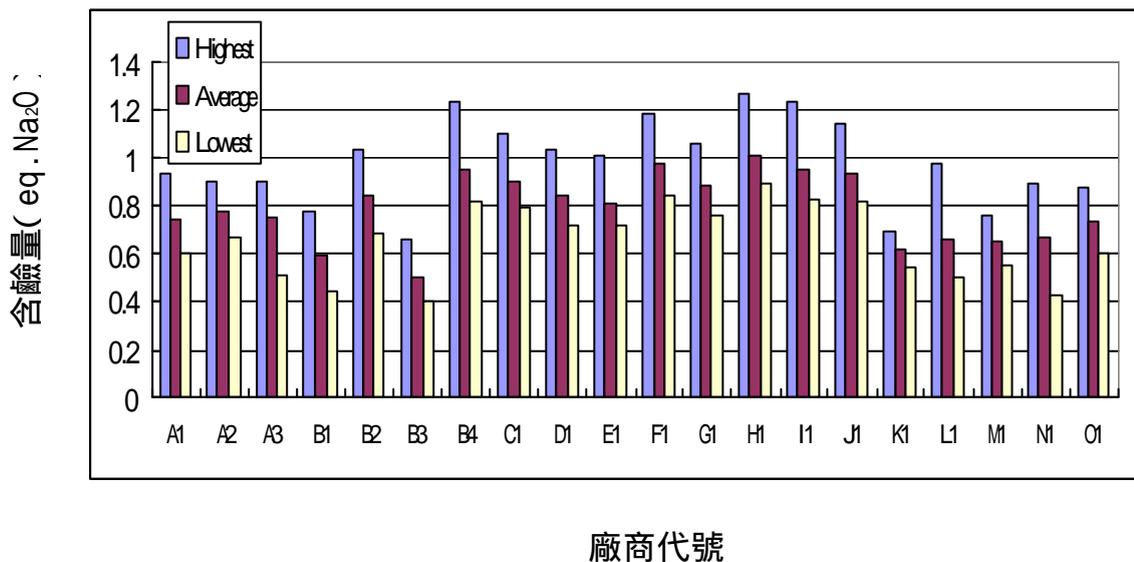


圖 2 85 年 4 月至 87 年 6 月各水泥廠所生產之水泥含鹼量示意圖

4-2 國內活性粒料調查文獻整理

國內建設用砂石來源主要包括陸砂、河砂，其中陸砂部份經由中央地質調查所所進行的台灣地區陸上砂石資源調查，結果發現大屯山安山岩有可能鹼性有害物質，觀音山安山岩，眉溪砂岩，畢祿山層砂岩與砂質片岩中則發現有鹼性有害粒料存在，河沙部份本節收錄目前國內有關粒料活性檢測結

果之相關資訊，並將砂石產區位址標示製圖，詳如圖 3，從圖上明確顯示具活性性質的粒料，並非僅東部獨有，包括西部、南部、北部等都有活性粒料的蹤跡，因此就抑制鹼質與粒料反應而言，不論採用河砂或陸地砂石，粒料使用前的事先檢測應屬必要，而從國內河砂與陸砂之資料研判使用活性骨材的混凝土構造物應『散佈各地』，另有關境外砂石，由於國內目前並未有相關完整之文獻資料，為長遠之計政府應出面進行境外砂石來源區之評估以供作業參考，以避免業者未有警覺，競相作業引進砂石而徒耗國本。

陸上砂石具活性部份：大屯山安山岩、眉溪砂岩、觀音山安山岩、畢祿山層砂岩與片岩。

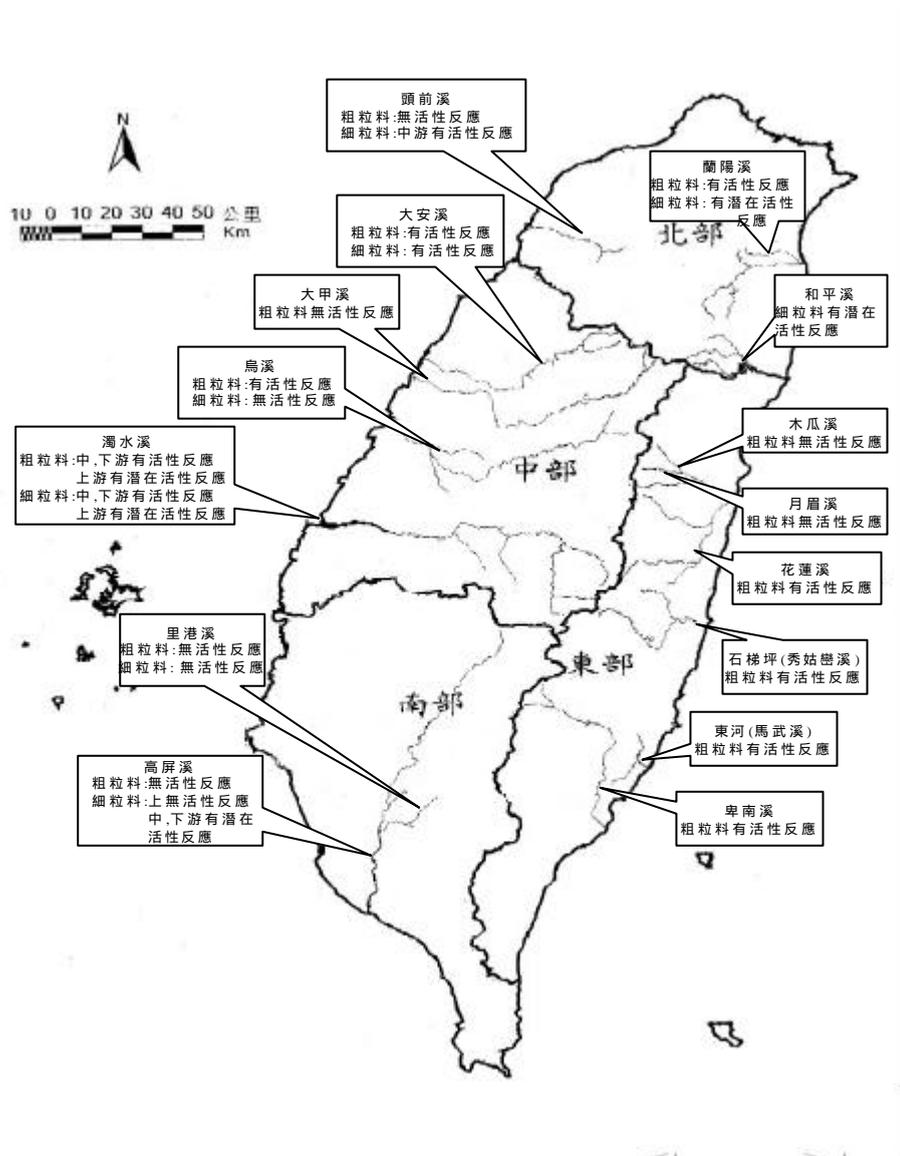


圖 3 國內各溪流粒料活性反應示意圖

4.3 環境溫度、溼度

1.環境溫度

圖 4 為 87 年度台灣各氣象測候站所測得之大氣溫度資料,整體而言各地區溫度值均遠遠大於造成鹼質與粒料反應停止或延緩的溫度(4 以下),因此就鹼質與粒料反應而言,台灣地區的大氣溫度並不會造成鹼質與粒料反應的停止或延緩,甚或由於地處亞熱帶,部份月份溫度較高,反有助長鹼質與粒料反應的條件。

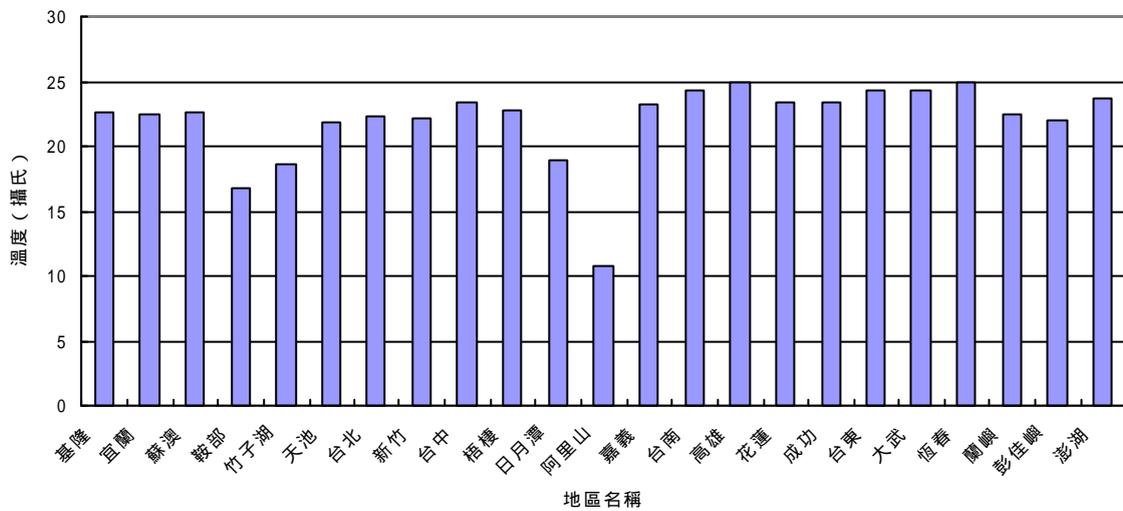


圖 4 87 年國內各測站所測得之月平均溫度

2.環境溼度

圖 5 為 87 年度國內各氣象觀測站所觀測到一年的溼度變化圖,經發現除幾處高山區及外島有溼度超過 85%的情形外,其餘各地區絕大部份均在 80% 以下,對於鹼質與粒料反應而言,並未構成發生鹼質與粒料反應的因素,本項分析印證了為何台灣地區有多處活性粒料的檢測報告、有水泥含鹼量日漸趨高的情形、有高溫的溫度條件,但發現鹼質與粒料反應的損壞案例卻僅是較具地域性的混凝土構造物,依現地調查及實驗室實驗結果顯示,國內可能發現有鹼質與粒料反應的混凝土構造物,其所處的位置應是近水而非長年浸泡在水中者,在這些位置存在的混凝土構造物可能包括水壩、橋樑、港灣構造物、鋪面、鑽油平台、水塔等,此將可提供進行現地調查或後續研究者參酌。

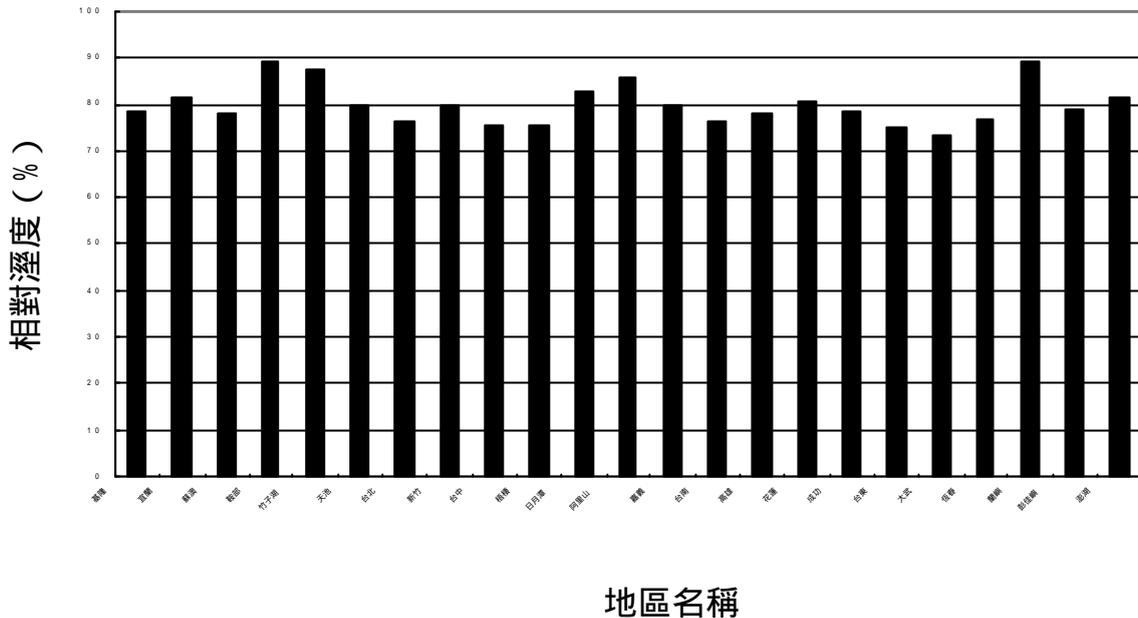


圖 5 87 年國內各測站所測得之月平均溼度

五、鹼質與粒料反應之徵候與檢測

5.1 鹼質與粒料反應之徵候

1. 構造物外部徵候

純混凝土構造物發生鹼質與粒料反應，表面會呈不規則的地圖狀裂縫。在環境沒有改變的情況下，裂縫隨時間而變寬。構造物發生鹼質與粒料反應時，因混凝土中粒料呈不規則性的分佈，裂縫最初生成位置多於活性粒料較集中處，形成焦點中心，因此可發現有數條不同走向的裂痕併交會於焦點中心，在近混凝土表面甚至會有起泡爆裂的現象，如未受磨蝕與沖刷影響，混凝土表面有呈透明、白色或濕點狀之反應生成物（膠體）滲出。鋼筋混凝土構造物在有鹼質與粒料反應之現象時，由於鋼筋的束制，其裂縫沿著主應力方向開裂或與鋼筋平行，其餘現象與無筋混凝土同，惟鋼筋混凝土構造物有時其表面會有鏽斑。

2. 構造物內部徵候

發生鹼質與粒料反應時，內部徵候包括微細裂縫、膠體反應產物、粒料周圍有暗色的反應圈等現象，而外部所顯現之地圖狀的裂縫，係由內部生成逐漸擴散至表面，混凝土表面之透明、白色或溼點狀物質，亦是從內

部所生成流出。因為鹼矽膠體係由水泥中的鹼金屬與活性粒料中的活性矽所形成，反應在粒料周圍先發生然後再逐次侵入粒料內部，故粒料周圍是會有暗色的反應圈，亦是判定鹼質與粒料反應的重點。

由於在凍融、乾溼循環以及硫酸鹽侵蝕的情況下，也會造成混凝土構造物表面的龜裂，因此在確認鹼質與粒料反應上有必要從混凝土內部加以確認，當混凝土發生鹼質與粒料反應時其內部的徵候包括微細裂縫、膠體反應產物、粒料周圍有暗色的反應圈等。

5.2 檢測

實驗室檢測的目的在確認混凝土破壞的主因、評估混凝土現況與決定混凝土未來因鹼質與粒料反應而膨脹及破壞的潛勢。

5.2.1 粒料活性潛能檢測方法

1.化學法

依據 ASTM C289 測定矽濃度(S_c)與氫氧化鈉消耗量(R_c)，一般以繪製 R_c - S_c 座標圖 (半對數圖, R_c v.s. $\log S_c$) 後，判斷粒料是否為有害、潛在性有害或是無害，如 S_c 大於 R_c ，且 R_c 超過 70，粒料試樣為具潛在活性，如果 S_c 大於 $35 + (R_c/2)$ 且 R_c 小於 70，則該粒料試樣為具有害活性。中國國家標準 (CNS) 列為粒料之潛在鹼質與二氧化矽反應性試驗法 (化學法總號 13618，類號 A3354)。

2.水泥砂漿棒膨脹量試驗

依據 ASTM C227 規範，調整水泥含鹼量製作水泥砂漿棒 (試體尺寸：285 × 25 × 25 mm)，定期量測其伸長量變化再與規定數據，比較判斷粒料是否具有活性，如試體三個月膨脹量大於 0.05% 或六個月大於 0.10% 時，視粒料為具有活性反應之危害潛能。

3.粒料岩相分析法

依據 ASTM C295 規範利用岩石礦物之偏光特性，依各岩石之光譜、偏光角、晶相及組成成分之不同，藉由偏光顯微鏡在單偏光系統及正交偏光系統進行觀察分析，可將粒料進行分類並判斷其礦物組成，試驗時需將岩石磨製成 0.03 mm 薄片。

4. 混凝土稜柱體膨脹量試驗

為使試驗能更符合現地混凝土構造物情況，國外目前有許多混凝土稜柱體試驗方法其試驗方法和所需條件不一，其中美國 ASTM C1293 規範係先調整水泥含鹼量製作混凝土稜柱體（試體尺寸：285 × 75 × 75 mm）後，定期量測其伸長量變化再與規定數據比較，判斷粒料是否具有活性。評估方法為試體之一年膨脹量如大於 0.04% 時，粒料為具活性反應之危害潛能。

5. 浸泡溶液或增溫、增壓等加速試驗

前述方法因試驗所需時間甚長，無法迅速得到結果，因此許多國家之研究人員正致力加速方法的研究，發展以浸泡溶液、增溫或增壓方式，期望能提早在較短時間內即可得知粒料活性潛能，以日本為例，係先製作 4*4*16cm 砂漿棒，添加氫氧化鉀調整水泥含鹼量至 1.5 %，試體於澆置 24 小時後拆模置於 0.15-0.02Mpa 壓蒸 4-5 小時，以 0.1 % 的膨脹量作為判測是否為活性粒料的依據。

5.2.2 硬固混凝土鹼質與粒料反應潛能檢測方法

1. 鑽心試體量測

現有混凝土構造物除了依據其外部徵候初步判測是否有發生鹼質與粒料反應外，可進行鑽心取樣獲得試體，觀察其內部徵候及在試驗室應用儀器進行微觀分析或針對試體中之粒料進行岩相分析等試驗，並將試體利用加速方式量測其長度變化，一般多將試體置於 100 % 相對溼度環境或浸泡於 1N NaOH 溶液中再綜合研判之。

2. 快速檢測

1991 年在美國 SHRP（Strategic Highway Research Program）所出版之確認 ASR 在公路結構中發生的工具書裡面，提出以稀釋之醋酸鈾噴在新鮮的混凝土表面上，再利用波長為 254nm 之紫外燈照射，如有淡黃綠色螢光出現則表示有 ASR 反應，可快速確認混凝土構造物是否有 ASR 反應的方法。

(1) 醋酸鈾螢光法(Uranyl Acetate Fluorescence Method)

本法最初是由 Natesaiyer 及 Hover 發展出的評估技術，在 SHRP 的「公路結構物鹼—氧化矽反應檢測手冊」[、ASTM C856 之附錄及 AASHTO T 299-93 對本試驗都有明確而詳盡的描述及規定。試驗方法是

將一定濃度的醋酸鈾[$\text{UO}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$]溶液噴灑於以去離子水適當濕潤過之新鮮混凝土面，SHRP 手冊建議反應 3 至 5 分鐘（ASTM C856 建議 1 分鐘、AASHTO T 299-93 規定 30 至 60 秒）後以去離子水洗去溶液，由於鈾(UO_2^{2+})會取代鹼質與粒料反應膠體中的鹼質，且產生之反應產物在短波（254nm）紫外光的照射下會有黃綠色的反應特徵。據此可檢測鹼質與粒料反應的發生與否。雖然需另備紫外燈設備及暗箱，然而迅速的優點幾乎是其他檢測法所無法取代的。

醋酸鈾技術的發展對現場或實驗室中實際檢測鹼質與粒料反應有相當的貢獻，惟因鈾屬放射性元素，且醋酸鈾為劇毒物質，故本法有下列隱憂：①使用者將暴露於含鈾溶液及受到鈾污染的固體下；②會產生鈾污染的廢棄物；③因為鈾離子亦可能與表面上的其他負離子結合，故仍可能產生誤判；④使用時要特別注意通風，並避免直接接觸藥劑。詳細使用步驟及其他注意事項可參閱 SHRP 的公路結構物鹼—氧化矽反應檢測手冊、ASTM C856 之附錄及 AASHTO T 299-93。

(2)雙染色法(Dual Staining Method)

本法是 1997 年由 George 等人提出，以鹼質與粒料反應的兩種特徵成分：鉀和鈣為基礎，利用亞硝酸鈷鈉（ $\text{Na}_3\text{Co}(\text{NO}_2)_6$ ）及玫瑰紅顏料 B（ $\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_3\text{Cl}$ ）兩種藥品的飽和溶液分別噴灑於混凝土表面。由於溶解的亞硝酸鈷鈉會與鹼質與粒料反應膠體中的鉀離子反應，形成一種帶六個結晶水的亞硝酸鈷鈉鉀（ $\text{K}_2\text{NaCo}(\text{NO}_2)_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ）黃色沈澱，而玫瑰紅顏料 B 則為鈣的染色劑，不會被 CSH 膠體吸收但會被富含鈣且含鉀量少的鹼質與粒料反應膠體吸收。依據此一原理，本法不但可檢測鹼質與粒料反應的發生，更可以辨識出不同成分的反應膠體。粉紅色染色區較不如黃色染色普遍，它通常在毀壞程度極嚴重的結構物中發現。在絕大部份的情況下，粉紅染色區僅在有大量黃色染色區出現時才會出現。而染色強度在數週或數月後會褪色或消失，但表面在重新處理後仍會恢復原來的強度。

本法之優點如下：①沈澱反應在數分鐘內即會發生，可快速判測；②染色劑對於鹼質與粒料反應膠體在化學上具有單一性，誤判機會較低；③亞硝酸鈷鈉及玫瑰紅顏料 B 皆容易購得，且無毒害及廢棄物處理的問題；④混凝土表面的顏色變化在一般光線下用肉眼即可觀測；⑤使用過醋酸鈾後的表面仍可用本法檢測；⑥除了從染色部份觀測，還可以同時分析粒料的岩種及混凝土的整體型態。惟 George 在研究中指出，少數的碳酸鈣也會吸收玫瑰紅顏料 B，例如某些石灰石等沈積層的某些

層就會被玫瑰紅顏料 B 染色，發生原因不詳，因此仍有誤判的可能；另外，含鈉之鹼質與粒料反應膠體必須以其他方法檢測，不適用本法。

(3)微觀分析:

利用掃描式電子顯微鏡和 X 光繞射分析儀進行微觀分析，觀察混凝土孔隙和粒料周圍是否有鹼矽膠體等反應產物。

5.3 現地鹼質與粒料反應初步判斷方法彙整

- 1.歷史資料
- 2.構造物所在環境潛勢
- 3.構造物外部
- 4.構造物內部

5.4 台灣地區鹼質與粒料反應檢測之相關規範

目前中國國家標準 (CNS) 列有混凝土岩相分析指引 (總號 1361, 類號 A3353) 水泥與粒料之組合潛在鹼質與粒料反應試驗法 (水泥砂漿棒法, 總號 13619, 類號 A3355) 粒料之潛在鹼質與二氧化矽反應性試驗法 (化學法, 總號 13618, 類號 A3354) 碳酸鹽質岩石用作混凝土粒料之潛在鹼質反應性試驗法 (總號 13620, 類號 A3356)。

其它有關混凝土構造物鹼質與粒料反應之規定有：

1.港灣及海岸結構物設計基準：

港灣及海岸結構物設計基準中提到之對策：

為控制鹼質與粒料反應，原則上可採用下列四種任一對策為之。

- (1)使用已確認為安全之粒料，無害的粒料即依 JIS A5308 預拌混凝土附註說明書之規定辦理。可用 ASTM C289「粒料之潛在反應試驗方法」或 ASTM C227「粒料之潛在反應試驗方法」替代之。
- (2)使用低鹼水泥，須符合日本 JIS A5210 卜作嵐水泥之規定。
- (3)使用可有效控制鹼質與粒料反應之混合水泥，例如高爐水泥。
- (4)混凝土中總含鹼量之控制，混凝土總含鹼量小於 3.0kg/m^3 。

2.台灣省政府礦物局建議抑制鹼質與粒料方面的意見為:

混凝土使用之水泥其原料採用含鈉、鉀及鹼性較低者，以減低水泥之含鹼量。

- (1)混凝土所使用之粒料，其鹽分(NaCl)應維持在 0.04%以下或氯離子含量應小於在 0.024%。
- (2)混凝土使用之混合材料，其含鹼量($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$)應小於 0.6%。
- (3)混凝土拌合用水其氯化物含量應在 0.1%以下。
- (4)鋼筋混凝土氯離子含量每立方公尺應維持在 0.3kg 以下。
- (5)排除採用具有鹼質與粒料反應活性之蛋白石、玉燧石、沸石及火山玻璃質等碎石粒料。
- (6)鋼筋混凝土之建造材料、施工作業及養護工作應確實。

六、鹼質與粒料反應之防治對策

6.1 新拌混凝土抑制鹼質與粒料反應的對策

1.採用低鹼水泥或控制混凝土總含鹼量

ASTM C150 規定水泥中的鹼金屬當量應低於水泥重量之 0.6 %，目前已有 20 多個國家將此限制值列為國家標準或訂為規範參用，惟未強制將混凝土使用水泥數量影響併入考慮；混凝土鹼金屬來源另包括拌合水、摻料、添加劑等，1996 年在國際混凝土鹼質與粒料反應研討會中，多位學者建議混凝土中的鹼金屬總量應低於 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 、酸溶性鹼金屬總量應低於 $3.25\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2.控制含水量

降低混凝土滲透性與做好混凝土的防水，藉以減少鹼-矽膠體吸水的機會，可有效抑制鹼質與粒料反應。

3.避免使用活性骨材

藉由經驗及適當方法篩用合適粒料，可避免構造物發生鹼質與粒料反應，圖 6、7 為採用活性與非活性粒料之試體膨脹行為。

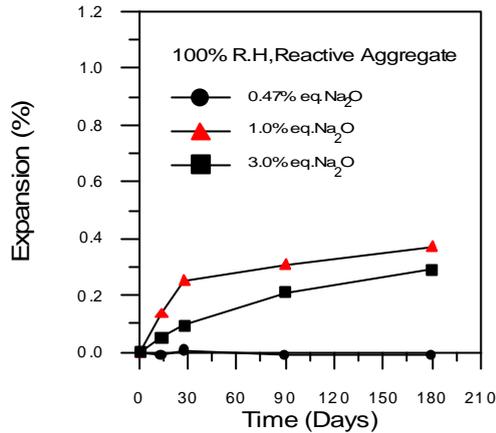


圖 6 以活性粒料、不同含鹼量製作之試體,在 100%相對溼度環境 180 天的膨脹量

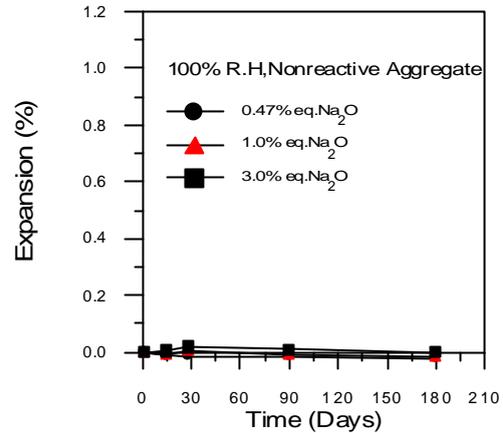


圖 7 以非活性粒料、不同含鹼量製作之試體,在 100%相對溼度環境 180 天的膨脹量

4.使用輸氣劑

混凝土使用輸氣劑會在構造中形成孔隙，鹼矽膠體吸水膨脹時，若有適當的孔隙容納膨脹的鹼矽膠體，則會降低膨脹壓力。

5.改變鹼矽膠體

添加亞硝酸鋰、碳酸鋰、氫氧化鋰，有延緩或降低鹼質與粒料反應的效果，因鋰離子活性較鈉、鉀等離子大，會先與活性矽反應形成不吸水的鋰矽膠體，減少發生像鈉、鉀-矽膠體吸水膨脹導致構造物體積增加的情形。

選擇適當添加物以控制混凝土發生鹼質與粒料反應，添加物應具以下幾點特性：

- (1)可形成一定比例的氫氧化物。
- (2)反應生成物為不可溶的矽酸鹽類。
- (3)生成離子不會妨礙水泥之水化反應。
- (4)離子不會加入或生成具膨脹性的反應。
- (5)成本合理及不對混凝土造成危害。

6.使用適當的卜作嵐物質

卜作嵐物質是一種矽質或鋁質的材料，其本身不具膠結性，但若將其磨細，在有水的環境下，會和水泥水化後所產生的氫氧化鈣或其他的激發物質，產生化學反應，生成類似 C-S-H 膠體，具有膠結性的物質。卜作嵐物質可適量的替代水泥，且卜作嵐物質的化學作用，可消耗氫氧化鈣，加上反應過程中因其顆粒細小能結合孔隙溶液中的鈉、鉀離子和降低 pH 值；此外由於添加較大比表面積之卜作嵐物質會使混凝土體更為密緻，亦降低了水的移動及離子擴散的速度。因此使用適當的卜作嵐物質除了對原為造成鹼質與粒料反應重要因素之一的氫氧化鈣有降低的作用，更減緩鹼質與粒料反應的作用。在使用如飛灰或是爐石等卜作嵐物質時，其添加量隨著使用的水泥種類、用量、強度要求，而有所不同，因此必須事先試驗，在符合工程要求下求出最佳用量，使用飛灰進行抑制鹼質與粒料反應以採 F 級飛灰為佳，添加量過低時成效不彰顯，採用爐石其取代量亦有雷同的影響。

在使用飛灰抑制鹼質與粒料反應，美國 Kansas 州的 McPherson 試驗道路以普通波特蘭水泥混凝土與添加 25 % 飛灰混凝土進行試驗比較，結果發現摻有 25 % 飛灰的混凝土，其鹼質與粒料反應所生成的裂縫寬度與數量，均比普通波特蘭水泥混凝土者大。日本 Hanshin 高速公路上高架橋採用 20 % 的飛灰，部份已經發生鹼質與粒料反應的龜裂，由此顯示並非所有的飛灰摻量或性質均能在所有條件下，用以進行抑制鹼質與粒料反應。

此外大陸採用添加 30% 之沸石粉（ SiO_2 含量較高，且為多孔結構）取代水泥，結果得到可抑制鹼質與粒料反應之效果。

圖 8 為採用國內活性骨材添加飛灰之試體其 360 天的膨脹行為，趨勢為隨者飛灰取代量的增加其膨脹量趨小的情形，顯示對於抑制成效高低與飛灰添加量有關。

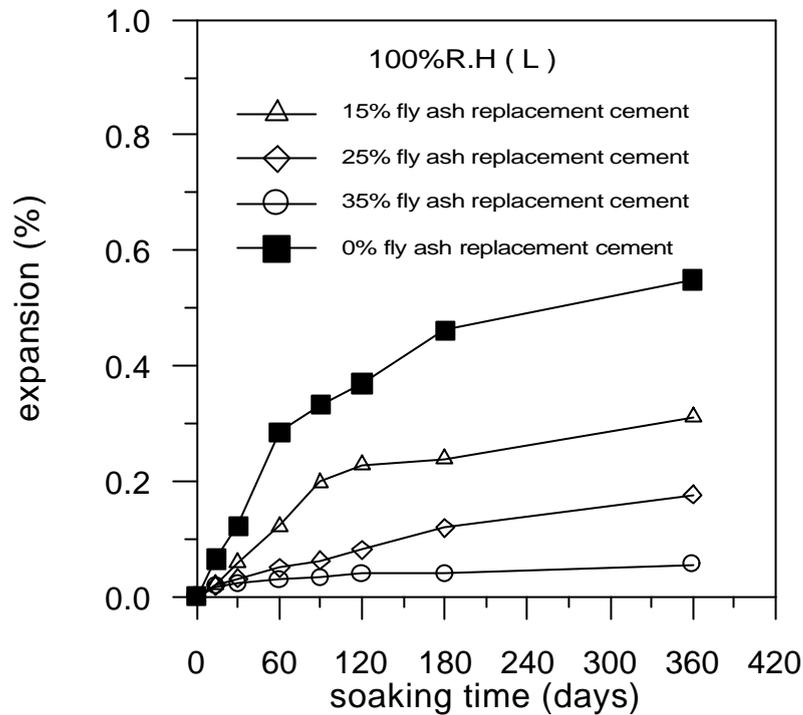


圖 8 含鹼量 1.0%、不等飛灰取代量，在 38、100% 相對濕度下，360 天試體膨脹量

6.2 硬固混凝土鹼質與粒料反應改善方法

1. 混凝土構造物確認已發生鹼質與粒料反應而尚不影響結構物安全時應進行下列步驟：

- (1) 評估構造物是否符合原設計需求？
- (2) 移除環境中的水分，減緩鹼質與粒料反應的持續作用
- (3) 填補裂縫
- (4) 進行表面覆層工作
- (5) 擬定監測方法進行定期監測
- (6) 以電化學方式移除或取代混凝土構造物中的鹼離子

現有混凝土構造物發生鹼質與粒料反應改善方法，以填補裂縫以及覆層為主，惟填補裂縫常因使用材料之品質、施工良劣、外在環境影響、材料壽命和維修材料與混凝土相容性等原因，影響改善成效；以覆層方式進行混凝土發生鹼質與粒料反應時之維修機理主要著眼於混凝土構造物發生鹼質與粒料反應有三項必備因素：即（1）足夠的鹼含量（2）足夠的活性砂（3）足夠的水份，研究指出改善硬固混凝土發生鹼質與粒料反應最可行的方法為排除或斷絕混凝土中之水分，其中又以表面封阻的方法最為有效，使用於表面封阻之材料特性，是改善混凝土鹼質與粒料反應成效最重要的因素。

2.其他抑制的方法

- (1)添加鋰化合物於混凝土中,可改善鹼質與粒料反應之膨脹行為,雖然鋰和鈉、鉀一樣會和活性砂作用,但鋰離子和活性砂作用形成不溶性之產物,此化合物不會溶解也不吸水,因此不會發生膨脹性的反應。
- (2)應用電化學技術降低混凝土中之含鹼量。
- (3)添加化學藥劑。

如構造物之損壞情況已無法修復或不符經濟效益時，則建議敲除重建。

參考文獻

1. **Hobbs, D. W.**, "Alkali-Silica Reaction in Concrete," Thoma Telford, London. 1988.
2. **Stanton, T. E.**, "Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate." Proc ASCE Vol.66, 1940.
3. **McCoy, W. J.**, "Effect of Hydration on Water Solubility of Ions in Portland Cement," Martin Marietta Corp., pp. 35-46, U.S.A., 1978.
4. **Diamond, S.**, Barbeyback, R. S. and Struble, L. J., "On the Physical and Chemistry of Alkali-Silica Reactions", Proceedings of the 5th Inter-national Conference on AAR in Concrete, Cape Town, 1981.
5. **Hobbs, D. W.**, "Expansion of Concrete due to Alkali-Silica Reaction," The Structural Engineer, CCA, England, 1984.
6. **SHRP-C-342**, "Alkali Silica Reactivity: An Overview of Research", Strategic Highway Research Program, 1993.
7. **SHRP-C/FR-91-101**, "Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures", Strategic Highway Research Program, 1991.
8. **SHRP-C-343**, "Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity", Strategic Highway Research Program, 1993.
9. **Bian, Q., Xuequan, W., and Tang, M, S** "Effect of Reactive Aggregate Powder on Suppressing Expansion Due to Alkali-Silica Reaction." Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 1996.
10. **Okada, K., Tezuka, M., Yoshikawa, T., Himeno, M. and Komada M.**, "Alkali Aggregate Reaction and Investigation on Its Causes and Strength Evaluations of Materials Subject to Its Effects", Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, pp.609-615, 1989.
11. **Stokes, D. B.**, "Use of Lithium to Combat Alkali Silica Reaction," Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 1996.

12. **Ohama, Y., Demura, K. and Suzuki, D.**, “Evaluation of Alkali-Silica Reaction Inhibitors by Partial Immersion Test of Concrete in 2.5% NaCl Solution,” ICAAR, 10th International Conference, 1996.
13. **McCoy, W. J., and Caldwell, A. G.**, “New Approach to Inhibiting Alkali-Aggregate Expansion,” Journal of the American Concrete Institute, Vol. 47, pp. 693-706, Detroit, 1951.
14. **Shayan. A., Diggins, R. G. and Ivanusec, I.**, “ Long-term Effectiveness of Fly Ash in Preventing Deleterious Expansions due to Alkali–Aggregate Reaction in Concrete,” ICAAR, 10th International Conference, pp.538-545, 1996,.
15. **Z. Fan and Hanson, J. M.**, “Effect of Alkali-Silica Reaction Expansion and Cracking on Structural Behavior of Reinforced Concrete Beam“, ACI Structural Journal, 1998.
16. **R. G. Sibbick and Page C. L.**, “Mechanisms Affecting Development of Alkali-Silica Reaction in Hardened Concretes Expansion to Saline Environments“, Magazine of Concrete Research, No2, 1998.
17. **P. J. M. Monteiro, Wang K. and Sposito G.**, “Influence of Mineral Admixtures on the Alkali-Aggregate Reaction“, Concrete Cement Research, Vol.27, No.12, 1997。
18. **Feng Naiqian, Jia Hongwei and Chen Enyi**, “Study on the Suppression Effect of Natural Zeolite on Expansion of Concretes Due to Alkali- Aggregate Reaction “, Magazine of Concrete Research, No.1, 1998.
19. 黃石城等, “阪神淡陸大震災行政院訪問考察團報告”, 1995 年。
20. 王櫻茂, 吳振成, “制訂混凝土耐久性試驗方法及規範研究”, 內政部建研究所籌備處, 專題研究計畫成果報告, MOIS840018。
21. 褚炳麟、顏聰、盧俊寬, 「台灣西部地區砂石料源鹼質反應調查研究」, 交通部國道新建工程局研究報告, 1994 年。
22. 李釗, 陳桂清, 許書王, 「花蓮港區混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查研究」, 台灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告, 1998 年。
23. 李釗, 陳桂清, 許書王, 「港區混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析研究」, 台灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告, 1999 年。

- 24.王天送，「鋼筋混凝土與鹼-矽反應防範對策之探討」土木水利，第二十三卷第二期，1996 年。
- 25.許書王，「台灣地區鹼質與粒料反應抑制策略之研究」，國立中央大學土木工程研究所博士論文，1999 年。
- 26.「港灣及海岸結構物設計基準」，台灣省政府交通處港灣技術研究所，專刊第 123 號，1997 年。

碼頭鋼板(管)樁腐蝕檢測與維護

羅俊雄¹ 賴貴祥² 蔡再興³ 蔡錦河⁴

摘要

碼頭鋼板(管)樁常年置於海洋環境中，極易發生腐蝕劣化，為確保碼頭整體結構安全，鋼板(管)樁的腐蝕檢測及防蝕維護有其重要與必要性。本文將針對鋼板(管)樁的腐蝕檢測與在「潮間帶」的防蝕技術作一介紹，以為碼頭管理之參考依據。

Corrosion Inspection and Prevention for Steel Piling Systems

J. S. Luo¹ K. H. Lai² T. S. Tsai³ C. H. Chai⁴

ABSTRACT

Corrosion of steel piling systems in marine environment is apparent. To insure that the structural integrity of harbor systems is maintained for the anticipated service life, corrosion inspection and prevention of steel piling systems are important. The present study is focused upon procedures to perform corrosion inspection for steel piling systems. In addition, corrosion prevention of piling systems in splash zone and tidal zone is addressed.

一、前言

金屬發生腐蝕為一自然反應過程，尤其是在酸、鹼或海水等環境下，腐蝕更趨嚴重。海洋(水)面積佔地球表面積百分之七十，為一廣大浩翰的大自然水溶液，它包含許多物質，如有機體、無機體、固體、氣體...等。金屬材

¹工業技術研究院工業材料研究所 研究員

²交通部基隆港務局港埠工程處 正工程司

³交通部基隆港務局港埠工程處水電所 主任

⁴交通部基隆港務局港埠工程處水電所 幫工程司

料浸泡於此水溶液環境中，材料原具有之熱力學平衡性質失去了穩定性，因此金屬發生腐蝕。鋼板(管)樁與鋼筋混凝土為港灣結構的主要組成，在常年海洋環境的侵襲下，鋼板(管)樁會產生腐蝕現象，造成構材斷面縮小、整體結構變化，以致於最終強度損失，無法承擔外力的作用；而鋼筋混凝土結構，因海水中或大氣中的氯離子入侵，促使鋼筋銹蝕劣化，造成混凝土表面剝落，膨脹裂開，強度降低，甚至破壞整個結構物。因此，瞭解鋼板(管)樁與鋼筋在混凝土在海洋環境中的腐蝕行為與防蝕方法，有其重要與必要性。由於碳鋼在海洋環境中之潮汐帶與大氣帶間的腐蝕速率最大，因此本文將針對鋼板(管)樁的腐蝕檢測與在「潮間帶」的防蝕技術作一介紹，其範圍不僅包含高低潮位之間之潮汐帶，更包括平均高潮位以上至海面大氣帶下端之飛沫帶區域。

二、文獻回顧

2.1 海洋環境

根據 Boyd etc.所著 Corrosion of Metals in Marine Environments^[1]一文指出，海洋結構物的腐蝕速率依結構物接觸(曝露)海洋環境的不同，有明顯的差異；為方便區分與探討，將海洋環境區分成五個曝露區域，並將鋼材腐蝕速率與環境因子之關係，概述如下：

1.海洋大氣帶(Atmospheric Zone)：

此區域範圍內結構物表面完全曝露接觸大氣中之各種介質，如氣體、日照...等，由於大氣中含有高濃度之海鹽粒子，加上大氣中日照、溫度變化，致使碳鋼材料結構體之外表極易受到侵蝕。

2.飛沫帶(Splash Zone)：

此區域範圍自平均高潮位以上至海面大氣帶下端，鋼板樁曝露於此範圍內時，由於不斷地受到海浪的潑濺以及日曬乾燥，產生乾濕循環作用，致使附著鋼材表面之鹽份(氯離子)及氧氣濃度不斷增加，致使腐蝕更為嚴重。

3.潮汐帶(Tidal Zone)：

此區域介於高低潮位之間，由於受到海水漲退潮的影響，鋼板(管)樁表面週期性的接觸海水浸泡及曝露於大氣中；在此區域內，由於空氣與海水波浪的交互作用，致使海水中溶氧濃度較高，因而在潮汐帶下方緊鄰海中

帶的部份，恰可形成一個氧差電池之作用。在溶氧量較高之潮汐帶中的鋼板，可視為一陰極反應區域，腐蝕速率較低，而位於低潮位下約 1m 處(亦即海中帶部份)，因海水溶氧量較低，可視為一陽極反應部位，故腐蝕量較大。

4.水下帶(Full Immersion Zone)：

此區域範圍自低潮位下端至海泥(床)帶間，在此曝露範圍內，整個結構體完全浸泡於海水中。此區域之上端邊緣，即與最低潮位緊接鄰的區域，因有氧差電池之作用，鋼板腐蝕速率較大；此外，海生物之附著問題，海流之沖擊、水溫及溶氧量等因素，均會影響海中帶鋼板(管)樁之腐蝕速率。

5.海泥帶(Mud Zone)：

在此暴露區域內，鋼板(管)樁等結構物均係埋入於海底土層中，與海水接觸較小，一般而言鋼材之腐蝕速率很小，然而在污染的海域中，如有硫化氫(H_2S)或海泥中有硫酸還原菌存在的話，則鋼材的腐蝕性會增加，腐蝕速率變大。

根據美國腐蝕工程師協會(NACE International)技術報告#1G194 - Splash Zone Maintenance Systems for Marine Steel Structures^[2]，碳鋼在海洋環境中腐蝕速率與環境因子之關係如圖 1 所示。圖中，潮汐帶與大氣帶間的碳鋼腐蝕速率最大；再者，根據交通部運研所港灣技術研究中心 81 年執行「基隆港鋼板樁檢測及維護改善方案之研究」之有關鋼板樁腐蝕狀況調查成果，及 89 年工業技術研究院工業材料研究所執行基隆港務局委託「基隆港鋼板管樁安全檢測及評估」，也發現鋼板(管)樁在“潮間帶”的腐蝕狀況較海水浸泡的水下區域嚴重。

2.2 鋼板(管)樁之防蝕

海洋腐蝕環境可分為海洋大氣帶、飛沫帶、潮汐帶、水下帶、海泥帶，依結構物的防蝕區域區分，又可分為海上部、海中部、海底土部，根據國內外經驗，採用複合式防蝕工法如：塗裝、包覆與陰極防蝕等技術，可達到鋼板(管)樁防蝕的目的。各種環境下之防蝕方法如圖 2 所示(圖中之“有機被膜”是指塗裝或包覆)；今更將鋼板(管)樁所在水下帶與潮間帶的防蝕方式，敘述如下：

2.2.1 水下帶防蝕工法、材料

鋼板(管)樁的防蝕方法，在海水浸泡的水下區多採用陰極防蝕保護，而陰極保護的原理由熱力學的觀點來看，就是將被保護的鋼樁電位降低，使腐蝕不會產生。以鐵為例，在 Pourbaix diagram (E-pH diagram) 中，鐵與環境的作用型態可分為腐蝕區、鈍化區、及免疫區(如圖 3)；在一定 pH 情況下，將腐蝕區鐵的電位降低，降至免疫區內，則鐵的腐蝕便不會產生(圖 4)。而由電化學的觀點來看，一般腐蝕電池的產生，組成要件包括 1)陰極，2)陽極，3)電解液，以及 4)陰極與陽極間電子流通的線路。由於陰極與陽極本身結構性質與化學特性的不同，兩極間會有電位差產生，造成電流由陽極流向電解液。若利用外加電源的方法，使陰極電流流向金屬，可使金屬腐蝕的淨陽極電流減小，甚至趨近於零，以致腐蝕不會產生。因此陰極防蝕的基本原理為降低金屬的腐蝕電位，往負值的方向進行，達到金屬防蝕的目的。因此，陰極防蝕的方法有兩種，一為犧牲陽極法，一為外加電流法。犧牲陽極法主要是利用電位較負之金屬為陽極，與鋼樁於介質(海水)中聯結，形成一電化學電池；由於異類金屬相接觸，較活潑(active)之金屬(陽極)會在反應中被消耗，而鈍性(noble)的鋼樁(陰極)會因此而被保護。外加電流式陰極防蝕系統主要是利用一外部電源來提供陰極與陽極之間的電位差。陽極必須接於電源之正端，而被保護結構物則接於電源之負端。電流從陽極經過介質(海水)到鋼樁表面，然後沿著鋼樁經導線回到電源，如此鋼樁便受到保護。目前國內碼頭鋼板(管)樁在海水浸泡區域的防蝕方法多採用鋁犧牲陽極塊來進行犧牲陽極式的陰極保護。

2.2.2 潮間帶防蝕工法

潮間帶防蝕施工可分為先工法與後工法兩種。先工法為針對新樁，將部份組件於岸上或工廠內施以防蝕被覆後再於現場組裝，之後，在現場進行修護補強；而後工法則為結構工程完成後(如舊樁的維護)再予防蝕施工。其優缺點比較如下：

	優 點	缺 點
先 工 法	1.施工條件易控制 2.價格便宜	1.現場安裝後，易造成大面積破損 2.施工周延性不足，責任歸屬不明 3.修補造成預期耐用年限折損 4.修補困難，工程品質不易控制
後 工 法	1.整體施工周延完整 2. 致 3.相對於先工法，期望耐用年限較易估算 4.修補容易	1.工程難度高、單價高 2.水上與水中作業為專門性之技術，廠商施工實績與作業專職技術人力應納入考量。

2.2.3 潮間帶防蝕材料

綜合日本建設廳、日本港灣協會－港灣設施技術基準及解說，美國腐蝕工程師學會 Task Group T1G-27 之技術報告 1G194，與美國佛羅里達州交通局材料腐蝕實驗室(Materials Lab., Florida Department of Transportation, FDOT) 之研究，潮間帶的防蝕工法依使用材料區分，可分為：

1. 塗料，如無機鋅底漆+柏油環氧樹脂(Coating Coal-Tar Epoxy)面漆
2. 有機被覆，如多元酯樹脂(PE)、聚氨酯(PU)、環氧樹脂(Epoxy)
3. 無機被覆，如水泥包覆、玻璃纖維樹脂(FRP)包覆、中性石油脂防蝕帶包覆
4. 金屬包覆
5. 金屬熔射
6. 陰極防蝕法

且依施工性質歸納，PE、PU 有機被覆及金屬熔射屬於先工法，而無機被覆、金屬包覆、陰極防蝕是屬後工法，至於塗料、環氧樹脂(Epoxy)的施工，可於陸上施工或是現場塗裝(先工法與後工法均適用)。

今針對潮間帶舊樁的防蝕材料及工法(後工法)，將 NACE 技術報告 1G194 摘錄如下：

1. 圍堰塗裝(Cofferdam and Coat, C & C)

此系統於現場施工時，需利用鐵製的圍堰將被塗的結構物圍起，並將圍堰與結構物間的海水抽乾，乾燥後，將傳統大氣帶新結構物使用之有機重塗塗料(High-Build Organic, Heavy-Duty Coating Systems，如無機鋅粉底漆+環氧樹脂中層漆+壓克力或 PU 面漆)塗佈於結構物表面。根據 NACE Standard RP0176-94^[3]，傳統大氣帶使用的有機重塗塗料如表 1 所示。但因施工時需要圍堰措施，故此系統僅能供鋼管樁之直線區域(Straight Tubular Sections)施工。

2. 水中硬化環氧樹脂(Underwater-Curing Epoxy, UCE)

水中硬化環氧樹脂為 100%固化的樹脂，可在潮濕的環境或水中施工，並於空氣或水下硬化。一般而言，此類環氧樹脂於潮間帶使用時，其乾膜厚度應在 0.5 至 2.0 mm 之間。該塗料技術發展至今已 20 多年，其有相當好的抗蝕性與抗陰極剝離(Cathodic Disbondment Resistance)能力，且當樹脂

硬化後，可承受波高 1m 的衝擊。再者，因其有可在水下施工的特性，所以被塗裝之鋼板(管)樁無幾何形狀的限制，即任何型式之鋼板(管)樁，均可用此水中硬化環氧樹脂施工。

3.水中硬化環氧複合樹脂(Underwater-Curing Epoxy-Based Composite, UCEC)

水中硬化環氧複合樹脂與水中硬化環氧樹脂相類似，僅於樹脂中添加玻璃纖維(Fiberglass)，以增加塗料的強度與穩定性。其有相當好的抗蝕性與機械特性，但在波高 0.6 m 時就無法施工。使用對象僅為鋼管樁(Tubular Sections)，無法在直線型或 Z 型的鋼樁上使用。

4.石油脂防蝕帶包覆(Petrolatum/Wax-Based Composite, PBC)

防蝕帶係以耐腐蝕合成纖維為襯材，兩面塗覆中性石油脂防蝕劑並被覆一層高密度聚乙烯膠膜(High Density Polyethylene Film)；防蝕劑中添加惰性劑(Inert Fillers)、祛水劑(Water Displacing Additives)等成份，以增進適合水下使用與抑制銹蝕之功能。但其機械性能不佳，若曝露於大氣或海水中，可能受外界環境之機械衝擊(如波浪衝擊)，須另加一機械夾層補強，夾層材質如 PE、PVC 或 FRP 等。一般而言，防蝕帶包覆系統僅能在波高 0.6 m 下施工，施工完成後可抵抗波高 1m 的衝擊，但其保護對象僅限於鋼管樁之直線部份。

5.矽膏防蝕帶包覆 (Silicone Gel-Based Composite, SGBC)

矽膏防蝕帶包覆系統可分兩部份：矽膏內襯與多元酯樹脂外襯。矽膏內襯的主要功用為在鋼鐵表面形成防水(Water-Repelling Barrier)機制，而多元酯樹脂外襯則提供機械性的保護，避免矽膏內襯受到波浪作用或其他機械原因而破壞。與石油脂防蝕帶包覆系統相似，矽膏防蝕帶包覆系統僅能在波高 0.6 m 下施工，施工完成後可抵抗波高 1m 的衝擊；其保護對象仍限於鋼管樁，無法使用於直線型或 Z 型的鋼板樁上。

6.混凝土覆合包覆(Concrete Composite)

此系統乃是利用 PE 或 FRP 作為外部夾層，而夾層與被保護結構物間預留 9.5 至 32 mm，內注混凝土將水排出，固化後即形成包覆。其施工在波高 1.2 m 時仍可進行，且混凝土固化凝結後可抵抗波高 1m 以上的衝擊；但因包覆形狀的限制，此系統僅能在鋼管樁之直線部份施工。

7.金屬包覆(Alloy Sheathing)

金屬包覆的方式是將 1-5 mm 厚的銅鎳合金,如 Nickel-Copper Alloy 400 (UNS N04400)、90/10 Copper-Nickel (UNS C70600)焊接到碳鋼組件,再將碳鋼組件組合至結構體。由於焊接施工的困難,金屬包覆系統在波高 0.6 m 時就無法施工,但若完成,則可抵抗波高 1m 以上的衝擊。其施工對象包含鋼管樁及直線型或 Z 型板樁。

綜合以上工法比較,今將其表列如表 2 所示^[2]。

三、鋼板(管)樁腐蝕檢測

鋼板(管)樁腐蝕調查的目的主要是為瞭解鋼板(管)樁碼頭腐蝕現況,並評估既有陰極防蝕系統之有效性,以進行碼頭安全性評估;此外,藉由鋼板(管)樁檢測時發現破洞位的置與範圍分析,更可提供港務局對鋼板(管)樁修補之優先順序考量。其主要工作流程如圖 5 所示。

3.1 檢測項目

為瞭解鋼板(管)樁碼頭腐蝕現況並評估既有陰極防蝕系統之有效性,鋼板(管)樁腐蝕檢測的項目包括:

- 1.碼頭現場勘查。
- 2.在碼頭面上定位、編號測樁的位置。
- 3.鋼板樁腐蝕及鋁陽極塊現況攝影。
- 4.鋼板(管)樁破損尺寸拍照。
- 5.鋼板樁、鋁陽極塊電位量測。
- 6.鋼板(管)樁電位量測。
- 7.綜合分析檢測資料,瞭解目前鋼板樁之腐蝕劣化趨勢與陰極防蝕之有效性。

3.2 檢測方法

根據檢測項目,鋼板(管)樁腐蝕檢測的執行方法如下:

- 1.蒐集碼頭設計圖或竣工圖,瞭解鋼板樁之平面佈置,進行測樁之定位、編號。

- 2.測樁定位：為確實掌握鋼板樁腐蝕狀況，依據交通部運研所港灣技術研究中心 81 年執行「基隆港鋼板樁檢測及維護改善方案之研究」，及 89 年工業技術研究院工業材料研究所執行基隆港務局委託「基隆港鋼板管樁安全檢測及評估」的檢測方法，檢測率需大於 20%，即每 5 支鋼板樁定一支測樁。
- 3.水深測點：鋼板樁水深測點選擇自冠牆底板位置起，每隔 0.5~1 公尺一測點。由於鋼板(管)樁在潮間帶的腐蝕狀況較海水浸泡的水下區域嚴重，故水深測點之選擇在低潮位線上為每 0.5 m 一點，而自低潮位線下起，每隔 1m 一測點，直至鋼樁與海床面接觸為止。
- 4.鋼板樁腐蝕及鋁陽極塊現況攝影：派遣潛水夫及研究人員以目視方法檢測鋼板樁與鋁陽極塊現況，並以水下錄影機作全面攝影，若發現異常或破洞，通知岸上人員定位，並以水下照相機拍攝，並量測破洞大小。
- 5.鋼板(管)樁破損尺寸記錄：記錄破洞位置、破損程度、破損範圍、及相對嚴重程度，進行分析。
- 6.鋼板樁厚度量測：在水深測點上先將附著的海生物及腐蝕產物(鐵銹)去除，金屬暴露面積至少約 15 cm x 15 cm，使用超音波測厚計量測、記錄。
- 7.腐蝕速率計算：將各測點所得數據依下列公式計算腐蝕速率

$$\text{腐蝕速率}(mm/yr) = \frac{\text{原有厚度}(mm) - \text{現有厚度}(mm)}{\text{使用年期}(yr)}$$

- 8.鋼板樁電位量測：使用氯化銀參考電極及電位記錄器量測每一測點之電位，然後將每支測樁量測所得之電位繪製等位圖，建立鋼板樁腐蝕電位與樁壁腐蝕速率之關係。
- 9.量測位置：
 - (1)鋼管樁 – 量測水深測點處鋼管直徑兩端之鋼壁厚度與電位；
 - (2)直線型鋼板樁 – 量測水深測點處鋼板之厚度、電位；
 - (3)Z 型鋼板樁 – 量測水深測點處鋼板凸、側、凹三面之厚度、電位。

3.3 檢測資料分析

依據鋼板(管)樁腐蝕調查檢測項目與檢查方法，今以民國 89 年工業技術研究院工業材料研究所執行基隆港西 26 號碼頭鋼板樁檢測為一案例，加以說明。

3.3.1 背景資料

基隆港西 26 號碼頭於民國 63 年完工，係井筒式直線型鋼板樁與 Z-45 型鋼板樁混合構築之碼頭，碼頭長度 210 公尺，碼頭面高程+3.0 公尺，設計水深-11.0 公尺。設計之初未作防蝕處理，民國 81 年始在水下鋼板樁加裝鋁犧牲陽極進行陰極保護。

長度 (M)	水深 (M)	鋼板樁型式	鋼板樁原厚度(mm)	完工日期	水下陰極防蝕處理	過去調查日期
210	-11.00	井筒式 直線型鋼板樁 Z 型鋼板樁	12.5 凹、凸、側	民國 63 年	民國 81 年	民國 81 年

3.3.2 調查結果

1.目視結果

西 26 號碼頭發現破洞的位置有 4 處，分別位於碼頭 83m 87m 123.3m 及 153.3m 處。破洞深度在靠近樁底部份(水深-10 m)均在 1 m 以上。破損相片如相片 1 至相片 6 所示，破損位置如下表所示。

碼頭名稱	破損位置	水深	破洞高度	破洞寬度	破洞深度	備註
W26	83 m	-10 m	1.2 m	0.6 m	1.0 m	
	87 m	-10 m	1.9 m	1.2 m	1.5 m	
	123.3 m	-0.5 m	=0.1 m		1.04 m	圓形破洞
	153.3 m	-5 m	0.9 m	0.5 m		裂縫

2.鋼板樁檢測

西 26 號碼頭構造係直線型井筒式鋼板樁碼頭，但在碼頭起點後 100 公尺處又有 10 支 Z 型鋼板樁，長度約 11.5 m。直線型鋼板樁厚度檢測測點自碼頭起點(與西 27 號碼頭交界處)為第一支測樁，共計 105 支樁，每支測樁量測 10 個水深點，共計 1050 個測點；而 Z 型鋼板樁則選取 5 支樁進行檢測，量測鋼板凸、側、凹三面各 10 個水深點，共計 150 個測點。

(1)直線型鋼板樁

圖 6 為鋼板樁在各水深點之平均腐蝕速率。圖中，鋼樁在潮間帶(水深+0.5 m 至-0.25 m 間) 的現有平均腐蝕速率較其餘區域為大，顯示該碼頭在潮間帶腐蝕情況嚴重；而在水深-3 m 以下，平均腐蝕速率並無因水深變化而有顯著差異。與 81 年港灣技術研究中心調查結果比較，81 年時在低潮位線附近平均腐蝕速率約為 0.10 mm/yr，水下帶之平均腐蝕速率約為 0.03 mm/yr；而目前檢測結果，潮間帶的平均腐蝕速率在碼頭前段達 0.15 mm/yr 左右，水下帶之平均腐蝕速率約在 0.05 mm/yr 與 0.10 mm/yr 之間。換句話說，該碼頭自民國 81 年進行水下陰極防蝕處理加裝鋁犧牲陽極塊後，鋼板樁之腐蝕速率仍有劣化趨勢。其原因可能是因該碼頭前段有基隆市下水道出口，該處匯集污水排放，以至海水水質改變，鋼樁腐蝕速率增加；與西 25 號碼頭相較，西 25 號碼頭較近外海，水流交換容易，所以鋼樁腐蝕速率與 81 年時相當。

圖 7 為鋼板樁在各水深點之平均厚度之 2D 等高線與 3D 立體圖，各鋼板樁之平均厚度約為 10 mm 左右，在碼頭尾端近西 25 號碼頭附近有增加的趨勢。圖 8 為鋼板樁在各水深點電位之 2D 等高線與 3D 立體圖。根據美國腐蝕工程師協會陰極保護電位標準 Standard RP-01-69-92，對鋼鐵而言，在海水中進行陰極保護，利用氯化銀參考電極量測到的鋼鐵電位至少需負於-780 mV。因犧牲陽極塊的安裝，西 26 號碼頭在水下帶的鋼樁電位多在-800 mV (vs.氯化銀參考電極)以下，顯示陰極保護效果良好，但部份鋼樁保護電位較差(圖 8 電位 2D 等高線圖)的地方，應進行犧牲陽極塊檢查。此外，鋼樁的保護電位隨水深的增加有下降的趨勢，顯示陰極防蝕效果在水深較深的地方比潮間帶佳；再次驗證陰極防蝕的效果對潮間帶鋼樁的防蝕保護有限。

2.Z型鋼板樁

圖 9 為 Z 型鋼板樁凸面(convex)、測面(side)、凹面(concave)在各水深點之平均腐蝕速率。圖中，鋼樁在潮間帶(水深+0.5 m 至-0.25 m 間) 的現有平均腐蝕速率略大於水深較深之部位，且凸、側、凹三面在同一水深的腐蝕速有顯著的差異，其中凹面的腐蝕速率最大，側面的腐蝕速率最小，凸面則介於兩者之間。依據原始設計資料，凸、凹面原有厚度為 17.2 mm，側面厚度為 11.4 mm；目前量測結果，凸面現有厚度約 14 mm，腐蝕速率 0.1 mm/yr，側面現有厚度約 10.7 mm，腐蝕速率 0.025 mm/yr，而凹面現有厚度約 12.5 mm，腐蝕速率 0.18 mm/yr，顯示鋼樁的幾合形式不同，即使在同一水深，腐蝕速率亦有極大的差異。

圖 10 為 Z 型鋼板樁凸面(convex)、側面(side)、凹面(concave)在各水深點之電位圖。圖中，鋼樁的電位均隨水深的增加而遞減，顯示陰極防蝕效果在水深較深的地方比潮間帶佳；再者，比較凸、側、凹三面各別的電位，在水深 1 m 以下，鋼樁電位相似，均負於-850 mV (vs.氯化銀參考電極)，但在潮間帶(水深+0.5 m 至-0.25 m 間)，凸、側、凹三面的電位分別為-810 mV、-800 mV、與-760 mV(vs.氯化銀參考電極)左右。依據美國腐蝕工程師協會陰極保護電位標準 Standard RP-01-69-92，顯然的，此處鋼樁之凹面電位未達保護標準，而凸面與側面的電位亦僅在保護臨界值左右，這可能說明了鋼樁凹面在潮間帶的腐蝕速率較大的原因。

3.4 鋼板(管)樁厚度量測比較

鋼板(管)樁厚度量測傳統均是採手工除銹方式，即在水深測點上先將附著的海生物及腐蝕產物(鐵銹)以鐵鏟去除，再選取較平坦處以超音波測厚計量測，量測時裸露的鋼樁顏色為黑色。但為瞭解手工除銹方法對鋼樁厚度量測的準確性與使用超音波測厚計 A-scan 或 B-scan 量測時鋼板樁厚度的差異(超音波測厚計 A-scan 與 B-scan 的區別為：A-scan 以 點 為單位檢測，B-scan 以 線 為單位檢測，即 B-scan 設備具有連續影像輸出及數據顯示功能，不僅可以量測厚度平均值，也可以量測厚度最小值)，90 年工業技術研究院工業材料研究所執行基隆港西 26 號碼頭鋼板樁檢測時亦使用高壓噴砂機將鋼樁表面附著的海生物、油污、剝落漆片、銹蝕產物徹底清除，使鋼樁表面呈近似白金屬色澤(相當於瑞典 SIS Sa 2½之表面處理標準)，再使用超音波 A-scan 測厚計量測鋼樁厚度。結果顯示，經過噴砂處理後使用 A-scan 所測得之鋼樁平均厚度較使用手工除銹後以 A-scan 所量得之鋼樁的平均厚度約少 2.5 mm，但與使用超音波 B-scan 測厚計所得之最小厚度值相近；換句話說，噴砂處理是將鋼樁表面的銹蝕產物徹底清除，所以獲得之鋼樁厚度數據為鋼樁現有的真實厚度，與手工除銹方式比較，厚度更具確實性。所以檢測時若仍以手工除銹為主，則進行鋼樁結構安全計算或服務壽年評估時，厚度資料處理應考慮鋼樁表面黑色銹蝕產物的影響，即為獲得鋼樁現有的確實厚度，使用 A-scan 超音波測厚計量測時，所得之鋼樁平均厚度值應減去一修訂值(如 2 mm)，或是使用超音波 B-scan 測厚計直接量測鋼樁的最小厚度。

四、潮間帶防蝕工法

防蝕工程的成效，除適當材質之選用與材料規範外，尚須正確的施工程序與監造檢測技術，配合定期與不定期的維護補修程序，方可有效延長結構

物之使用年限，延緩材質老化、劣化程度。犧牲陽極式的陰極保護已被各港務單位廣泛應用於水下鋼板(管)樁之防蝕，使用以來防蝕效果良好，但位於潮間帶部份的鋼板(管)樁因未施作防蝕處理而有銹蝕現象。因此，為延長鋼板(管)樁之使用壽命，確保港埠使用安全，今針對潮間帶鋼板(管)樁之防蝕材料、防蝕工法進行討論，作為日後潮間帶防蝕之參考依據。

4.1 潮間帶防蝕工法選擇

依據日本建設廳、日本港灣協會－港灣設施技術基準及解說，美國腐蝕工程師學會 Task Group T1G-27 之技術報告 1G194，與美國佛羅里達州交通局材料腐蝕實驗室(Materials Lab., FDOT)之研究，配合國內現有鋼板(管)樁型式，如鋼管樁、井筒式直線型鋼板樁、Z 型鋼板樁(凸、凹、側三面)，依海洋環境、樁型應用、新樁與舊樁施工成效，將可用之防蝕工法比較如表 3 所示。明顯的，在潮間帶之新樁，PU 包覆、水中硬化環氧樹脂、不銹鋼包覆均有良好的防蝕效果；而對舊樁而言，水中硬化環氧樹脂、中性石油脂防蝕帶為較佳的選擇。再者，根據挪威 Det Norske Veritas (DNV) 實驗室挪威石油公司(The Norwegian Petroleum Directorate)在北海鑽油平台的防蝕經驗^[4]，在潮間帶的陰極防蝕系統常因鋼樁表面間歇性乾燥的結果而無顯著防蝕功效。因此，針對國內潮間帶鋼板管樁防蝕之材料選擇，建議如下：

- 1.新樁：以 PU 包覆、水中硬化環氧樹脂或鋅鋁複合合金熔射於陸地上噴塗施工。
- 2.舊樁：以水中硬化環氧樹脂、中性石油脂防蝕帶於潮間帶施工，

4.2 潮間帶防蝕工法試驗

為瞭解潮間帶防蝕材料與工法的適用性，89 年工業技術研究院工業材料研究所執行基隆港務局委託「基隆港鋼板管樁安全檢測及評估」計畫時，針對潮間帶鋼板(管)樁的防蝕材料與工法，選擇有機與無機塗裝進行試驗，試驗項目包括塗裝之物化性評估、實驗室乾濕交替電化學試驗與現場示範工程，並就塗裝材料的防蝕性、現場施工的可行性、工法的難易程度與經濟效益進行考量。今就試驗評估結果概述如下：

4.2.1 塗裝材料

試驗之有機與無機塗裝材料如下：

A (Epoxy1-Both)：無溶劑型水中硬化環氧樹脂 1，新舊樁均可使用。

B (Epoxy2-New)：無溶劑型水中硬化環氧樹脂 2，新樁使用。

C (Epoxy3-New)：無溶劑型水中硬化環氧樹脂 3，新樁使用。

D (Epoxy4-Old)：無溶劑型水中硬化環氧樹脂 4，舊樁使用。

E (PU1-New)：聚氨酯 PU1，新樁使用。

F (Epoxy5-Old)：無溶劑型水中硬化環氧樹脂 5，舊樁使用。

G (PU2-New)：聚氨酯 PU2，新樁使用。

H (熔射-NEW)：鋅鋁複合合金(85% Zn, 15% Al)熔射，新樁使用。

4.2.2 試驗步驟

- 1.塗裝之物化性評估：為瞭解選擇塗裝的物理及化學性質，在實驗室中準備新舊樁之塗料試片，進行塗層之物理性質與化學性質試驗，評估項目如表 4 所示。
- 2.實驗室乾濕交替電化學試驗：乾濕交替試驗為在實驗室中設計建造實驗水槽，模擬潮間帶乾濕交互環境，進行加速腐蝕試驗，並利用電化學方法(如 AC 交流電阻抗分析)量測塗裝之塗膜阻抗，評估其防蝕之有效性。試驗水槽一天內乾濕循環各 6 次，試驗期間共 90 日，持續循環 540 次。試驗相片如相片 7 至 8 所示。
- 3.現場示範工程：
 - (1)新樁部份：為瞭解新樁塗料的特性，今以試片方式進行潮間帶新樁防蝕評估。現場安裝相片如相片 9 至 10 所示。
 - (2)舊樁部份：考量施工的可行性，今選用可以在水中直間塗裝的無溶劑型水中硬化環氧樹脂(Epoxy)為塗料，而工法為手刀塗佈、鏟刀塗佈、或以機器塗刷；至於鋼管樁之防蝕帶包覆材料，則選擇中性石油脂防蝕帶。

4.3 潮間帶防蝕工法評估

4.3.1 新樁部份

潮間帶新樁防蝕材料的選擇包括 A 型、B 型、C 型水中硬化環氧樹脂塗料，E 型與 G 型聚氨酯(Polyurethane, PU)包覆，與鋅鋁複合合金熔射；工法為於陸地上噴塗施工後浸漬於海水中。今根據試驗結果評估如下：

- 1.塗裝物化性評估：各塗料物化性試驗結果如表 5 所示，其適用性依序為 G 型 PU 塗料、C 型環氧樹脂塗料、A 型環氧樹脂塗料、B 型環氧樹脂塗料、

E 型 PU 塗料；而熔射方式因鋅、鋁成份在水中消耗速率過快，故僅限用於大氣帶，不適用於與海水接觸浸漬的潮間帶。

- 2.實驗室乾濕交替電化學試驗：新樁塗料於交流電阻抗分析下最低頻率(1m Hz)時，塗層完整試片總阻抗值與時間的關係如圖 11 所示。圖中，塗膜阻抗以 G 型聚氨酯 PU 塗料與 A 型、C 型環氧樹脂塗料較佳，鋅鋁複合合金熔射較差，B 型環氧樹脂與 E 型聚氨酯 PU 塗料劣化較快。
- 3.現場示範工程 170 日後浸漬試片：各塗裝試片表面無起泡現象，且浸漬時受鄰近鋁犧牲陽極的陰極保護，刮痕試片無銹蝕產生(相片 11)；但 H 型熔射試片於現場敲除時表面熔射層極易剝落，且敲下的塗層色澤均為鋅的腐蝕產物(鋅白)。

綜合以上試驗結果，潮間帶新樁防蝕材料的選用依序為：G 型 PU 塗料、C 型環氧樹脂塗料、A 型環氧樹脂塗料；而 B 型環氧樹脂與 E 型聚氨酯 PU 塗料因其耐鹽霧性較差(B 型塗料有起泡現象，E 型塗料有剝離現象)，不適用於潮間帶新樁防蝕；鋅鋁熔射(85%的鋅與 15%的鋁)方式因鋅、鋁成份在海水中消耗速率過快，僅適用於大氣帶，不適用於與海水接觸浸漬的潮間帶。再者，不論使用何種塗料，塗裝系統再加上陰極保護複合式的防蝕方法，是為一較佳的防蝕方法。此外值得注意的是：新樁塗裝是於陸地上噴塗施工後再浸漬於海水中，在打樁的過程中，除金屬熔射塗裝外，所有塗料包括環氧樹脂塗料與聚氨酯 PU 塗料均可能會因打樁時持續振動與鋼索吊掛的結果而有所損傷，更可能因打樁過程中鋼樁與地盤磨擦產生的高熱而影響塗裝原有的附著性，因此現場塗裝修補的可行性必需加以評估考量。

4.3.2 舊樁部份

考慮現場施工的可行性與使用工法的難易度，潮間帶舊樁防蝕是以現場水中施工為原則，工法採用水中直接塗裝方式進行，測試塗料包括無溶劑型水中硬化環氧樹脂 A 型、D 型與 F 型三種，鋼管樁則是使用中性石油脂防蝕帶包覆。由於鋼板樁的塗裝施工可應用於鋼管樁上，而中性石油脂防蝕帶的包覆不能應用於鋼板樁上，今就試驗評估結果概述如下：

- 1.塗裝物化性評估：潮間帶選用的塗料依其物理及化學性質，適用性依序為 A 型環氧樹脂塗料、D 型環氧樹脂塗料、F 型環氧樹脂塗料。由於 D 型塗料於後續現場施工時無法附著於鋼板樁上，故以 R 型塗料取帶，以為鏟刀施工之依據；但因無製作 R 型塗料試片，故無 R 型塗料之物化性實驗室測試數據。試驗結果如表 5 所示。

- 2.實驗室乾濕交替電化學試驗：完整塗裝之塗膜阻抗其值由大而小依序為 D 型、A 型、與 F 型環氧樹脂塗料。試驗結果如圖 12 所示。
- 3.現場示範工程：A 型塗料完成 170 日後，鋼樁塗層表面無剝落或起泡現象，塗層固著性良好。D 型塗料施工時塗料無法固著於鋼板樁上。F 型塗料若採直接塗裝方式，完工 100 日後，塗料與鋼樁間有海水滲入，附著性不佳；但若採內加鍍鋅網之施工方式，被覆塗層表面無剝落或起泡現象且附著性良好。R 型塗料 100 日後，鋼樁塗層表面無剝落或起泡現象，固著性良好。中性石油脂防蝕帶完成 170 日後，包覆良好，無脫落現象，以刀片將防蝕帶切開，鋼樁仍維持金屬光澤。現場檢測相片如相片 12 至 21 所示。

綜合以上試驗結果，潮間帶既有鋼板(管)樁防蝕材料的選擇，塗料的適用性依序為 A 型環氧樹脂塗料、R 型環氧樹脂塗料、與 F 型環氧樹脂塗料；而針對鋼管樁而言，除上述塗料的選用外，若使用中性石油脂防蝕帶包覆，防蝕效果亦佳。此外，不論使用何種塗裝或包覆，若塗裝包覆系統再配合犧牲陽極塊的安裝，於潮間帶沉浸區內當包覆破損時，陰極保護將可發揮防蝕的功效。

五、結語

防蝕工程的成效，除適當材質之選用與材料規範外，尚須正確的施工程序與監造檢測技術，配合定期與不定期的維護補修程序，更可有效延長結構物之使用年限，延緩材質老化、劣化程度。鋼板(管)樁在潮間帶的防蝕方法選擇，需考慮選用材料的特性、施工方法的難易以及經費預算；若能以複合防蝕方法，即將塗裝、包覆等防蝕方法配合陰極保護法，則鋼板(管)樁在潮間帶的防蝕將可達到更佳的效果。

參考文獻

- 1.F. W. Fink and W. K. Boyd, “The Corrosion of Metals in Marine Environment”, DMIC Report 245, 1970.
- 2.“Splash Zone Maintenance Systems for Marine Steel Structures “, NACE International Task Group T-1G-27, 1994.
- 3.“Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production”, NACE Standard RP0176-94, 1994.
- 4.R. E. Lye, “Splash Zone Protection on Offshore Platforms- A Norwegian Operator’ s Experience”, Materials Performance, Vol. 40, No. 4, April 2001.

表 1. 傳統大氣帶使用的有機重塗塗料^[3]

TYPICAL COATING SYSTEMS USED IN THE ATMOSPHERIC ZONE ^(A)		
Coating System	Thickness	
	μm	mil
Wash Primer	13	0.5
Vinyl, intermediate and topcoats (3 to 4 coats)	200 to 250	8-10
Wash Primer	13	0.5
Chlorinated rubber, intermediate and topcoats (3 to 4 coats)	200 to 250	8 to 10
Inorganic zinc-rich self-cured primer	75	3
Epoxy intermediate coat	125	5
Vinyl acrylic or polyurethane topcoat	50	2
Inorganic zinc-rich self-cured primer	75	3
Epoxy intermediate and topcoat (2 coats)	250	10
Inorganic zinc-rich self-cured primer	75	3
Vinyl high-build intermediate coat	100 to 150	4 to 6
Vinyl topcoat (2 coats)	50	2
Inorganic zinc-rich post-cured primer	75	3
Epoxy intermediate coat	125	5
Vinyl acrylic or polyurethane topcoat	50	2
Inorganic zinc-rich post-cured primer	75	3
Epoxy tie-coat	50	2
Epoxy intermediate coat	100 to 150	4 to 6
Vinyl acrylic or polyurethane topcoat	50	2
Inorganic zinc-rich post-cured primer	75	3
Co-polymer tie-coat	50	2
Vinyl high-build topcoat	150 to 250	6 to 10
Inorganic zinc-rich self-cured primer	75	3
Epoxy tie-coat	50	2
High-build polyurethane	150 to 200	6 to 8

^(A) The specified number of coats and the thickness may vary among operators and manufacturers.

(資料來源：NACE Standard RP0176-94)

表2. 潮間帶舊樁防蝕材料、工法^[2]

System	Surface Preparation	Wave Action (Application)	Wave Action (In-Service)	Structure Geometry
C&C	Abrasive Blasting	Up to 2 m	Severe	Straight Tubular Sections
UCE	Abrasive Blasting	Essentially No Wave Action Can be Present	Moderate	Essentially Unlimited
UCEC	Abrasive Blasting	Up to 0.6 m	Severe	Tubular Sections and Simple Geometry
PBC	Mechanical Cleaning	Up to 0.6 m	Moderate	Straight Tubular Sections
SGBC	Mechanical Cleaning	Up to 0.6 m	Moderate	Straight and Complex Tubular Sections
Concrete	Mechanical Cleaning or Abrasive Blasting	Up to 1.2 m	Severe	Straight Tubular Sections and Straight Angle Steel
Alloy	Mechanical Cleaning	Up to 0.6 m	Severe	Straight Tubular Sections and flat plate

註：

C&C= Cofferdam and Coat
 UCE= Underwater-Curing Epoxy
 CEC= Underwater-Curing Epoxy-Based Composite
 PBC= Petrolatum/Wax-Based Composite
 SGBC= Silicon Gel-Based Composite
 Concrete= Concrete Composite
 Alloy= Alloy Sheathing

Typical Maximum In-Service Wave Heights

Moderate= Up to 1 m (3 ft) wave heights

Severe= Greater than 1 m (3 ft) wave heights

(資料來源：NACE International Task Group T-1G-27)

表 3. 潮間帶防蝕材料選擇

海洋環境 鋼樁情況 防蝕效果		大氣區		飛沫帶		潮間帶		海水中		海底泥中		樁型應用		
		新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	鋼管樁	鋼板樁	
													直線型	Z 型
	塗料				△	△	△	△	-	△	-	可	可	可
有機被覆	PE 包覆		-		△		△		-	-	-	可	可	可
	PU 包覆		-		△		△		-	-	-	可	可	可
	水中環氧樹脂									-	-	可	可	可
無機被覆	水泥包覆			△	△	△	△		-	-	-	可	否	否
	中性石油脂防蝕帶							△	△	-	-	可	否	否
金屬包覆	不銹鋼包覆						-		-	-	-	可	可	否
	低合金抗蝕鋼鐵		-		△		-		-	-	-	可	可	否
	金屬熔射						△	-	-	-	-	可	可	可
	陰極防蝕	-	-	-	-							可	可	可

防蝕效果理想 施工可行，防蝕效果良好
△ 施工困難，防蝕效果不佳 - 超出評估範圍

表 4. 塗裝物化性評估項目

物理性質	檢驗方法	使用儀器
附著性	CNS 10757-K6801 (ASTM D3359)	方格試驗刀
衝擊性	CNS 10757-K6801 (ASTM D2794)	衝擊試驗機
硬度	CNS 10757-K6801 (ASTM D3363)	硬度試驗機
耐磨耗	ASTM D968	落砂試驗機

化學性質	檢驗方法	使用儀器
鹽霧性	CNS 8886-Z8026 (ASTM B117-90)	鹽霧試驗機
耐候性	ASTM G53-91	耐候試驗機
溫濕度	ASTM D2247	恆溫恆濕試驗機
塗層表面起泡等級評估	ASTM D714-94	標準相片比較
塗層刮痕銹蝕擴張等級評估	ASTM D1654-92	刮刀切割後依規範判定

表 5. 實驗室塗裝物化性評估結果 - 表示無量測

塗料編號	附著性 (kg/cm ²)	衝擊性 (in-lb)	硬度	耐磨耗性 (200 公升 矽砂)	耐酸性 (240HR)	耐鹼性 (240 HR)	鹽霧試驗刮 痕銹蝕擴張 等級 (1200 HR)	鹽霧試驗銹 蝕、起泡等 級 (1200 HR)	光澤衰減 率 G(%) (1200 HR)	色度改變 <i>E_{ab}</i> (1200 HR)
A (Epoxy1-Both)	> 30	45 (有剝離)	3H	無底材 露出	無異狀	無異狀	0	10	97	3.5
B (Epoxy2-New)	> 30	45 (有剝離)	4H	無底材 露出	顏色稍微變 淡	無異狀	1	5	98	10
C (Epoxy3-New)	> 30	45 (有剝離)	3H	無底材 露出	顏色變淡	無異狀	4	10	85	4.5
D (Epoxy4-Old)	> 30	45 (有剝離)	3H	無底材 露出	顏色變淡	無異狀	3	10	98	12
E (PU1-New)	> 30	80 (無剝離)	H	無底材 露出	無異狀	無異狀	整片剝離	10	88	35
F (Epoxy5-Old)	> 20	45 (裂縫擴張)	6H	無底材 露出	無異狀	無異狀	整片剝離	10	75	20
G (PU2-New)	> 50	80 (無剝離)	2H	無底材 露出	無異狀	無異狀	2	10	98	7.5
I (熔射-New)	-	-	-	-	有紅銹蝕 產生	有鋅白 產生	有 5% 紅色 銹斑	7	-	-

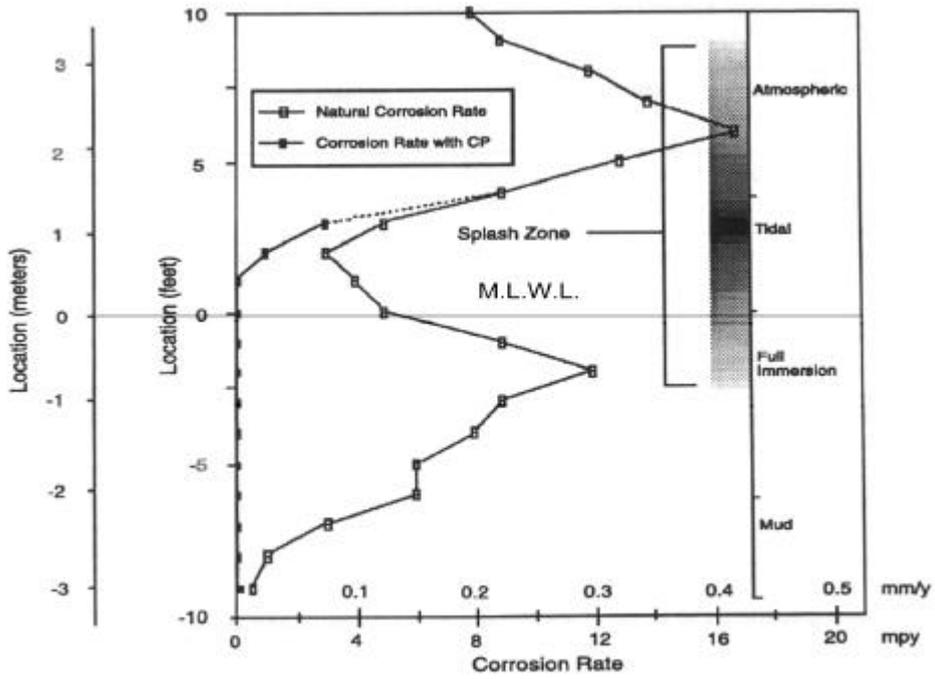


圖 1. 碳鋼在海洋環境中腐蝕速率與環境因子之關係^[1]

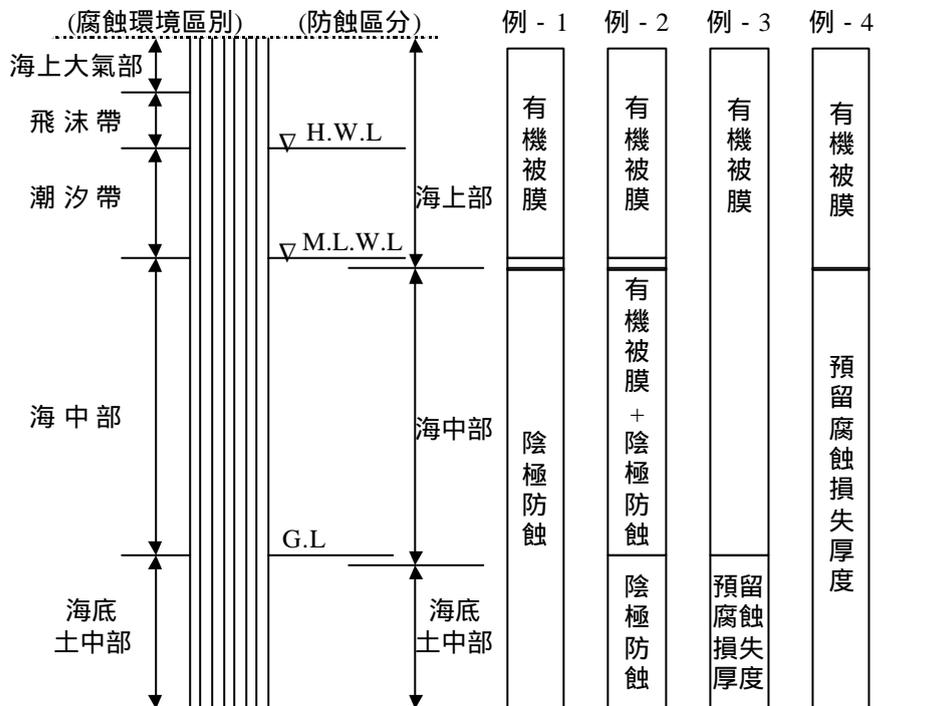


圖 2. 鋼板(管)樁之防蝕

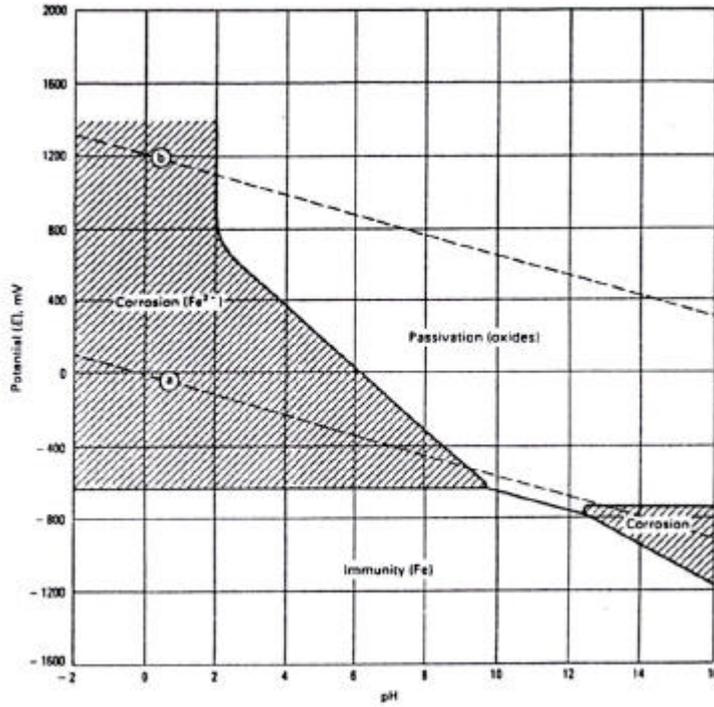


圖 3. 鐵 E-pH 圖

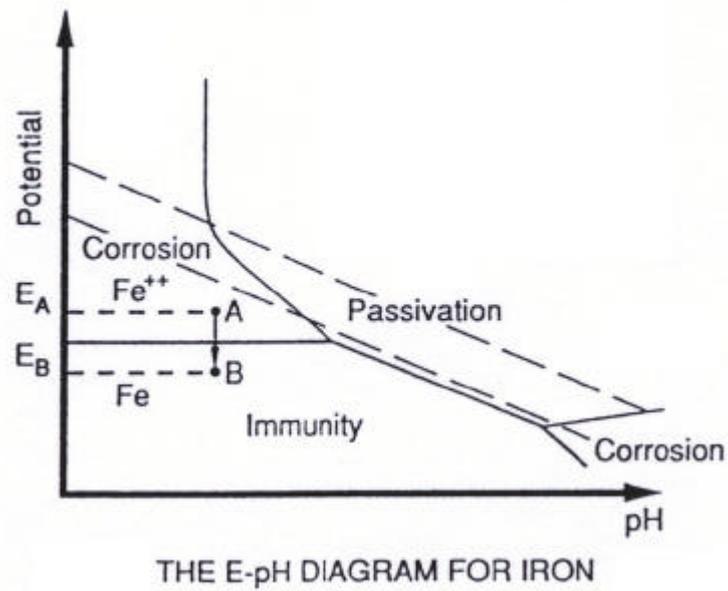


圖 4. 陰極防蝕熱力學原理

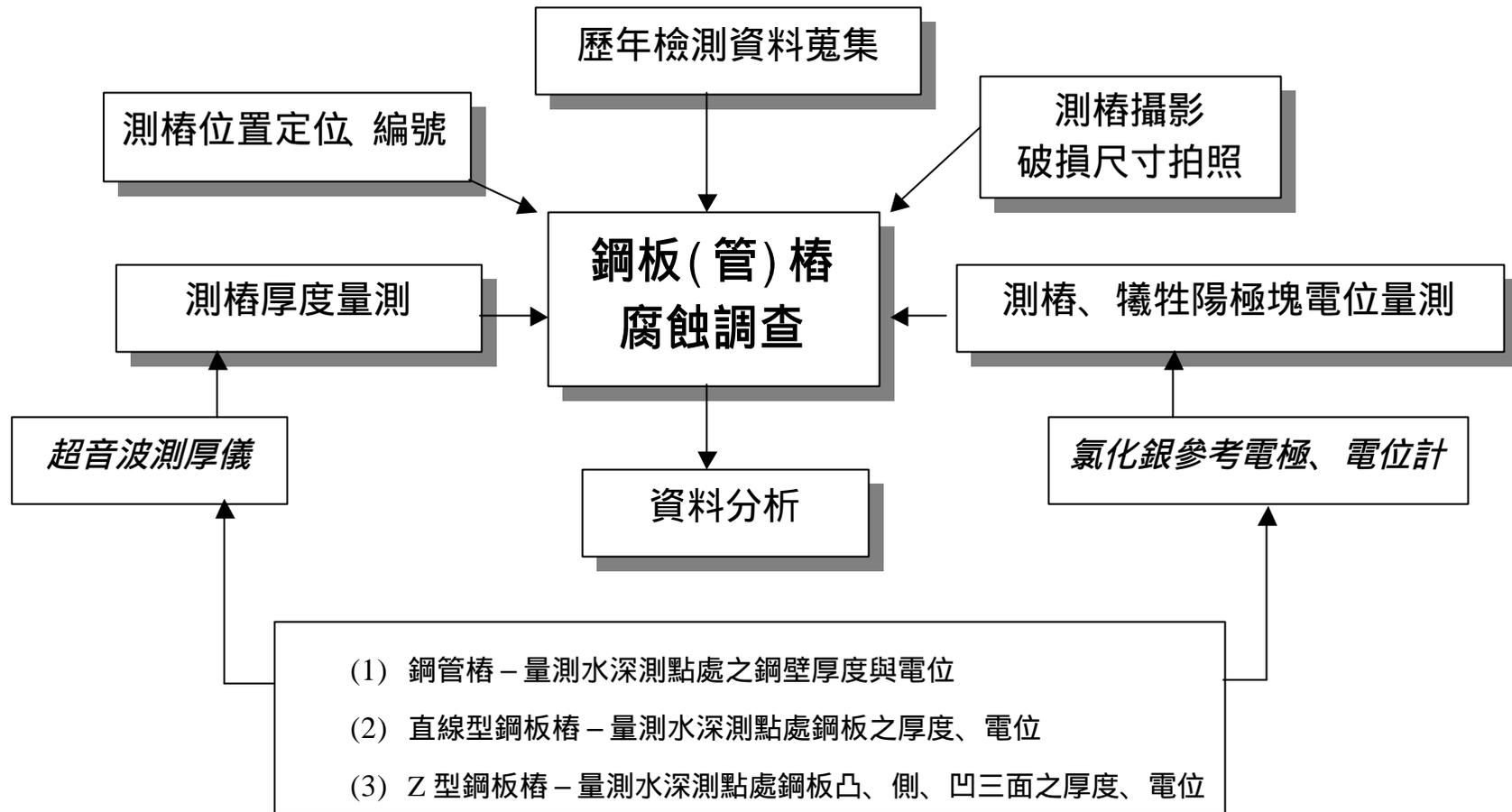


圖 5. 鋼板(管)樁腐蝕調查工作流程

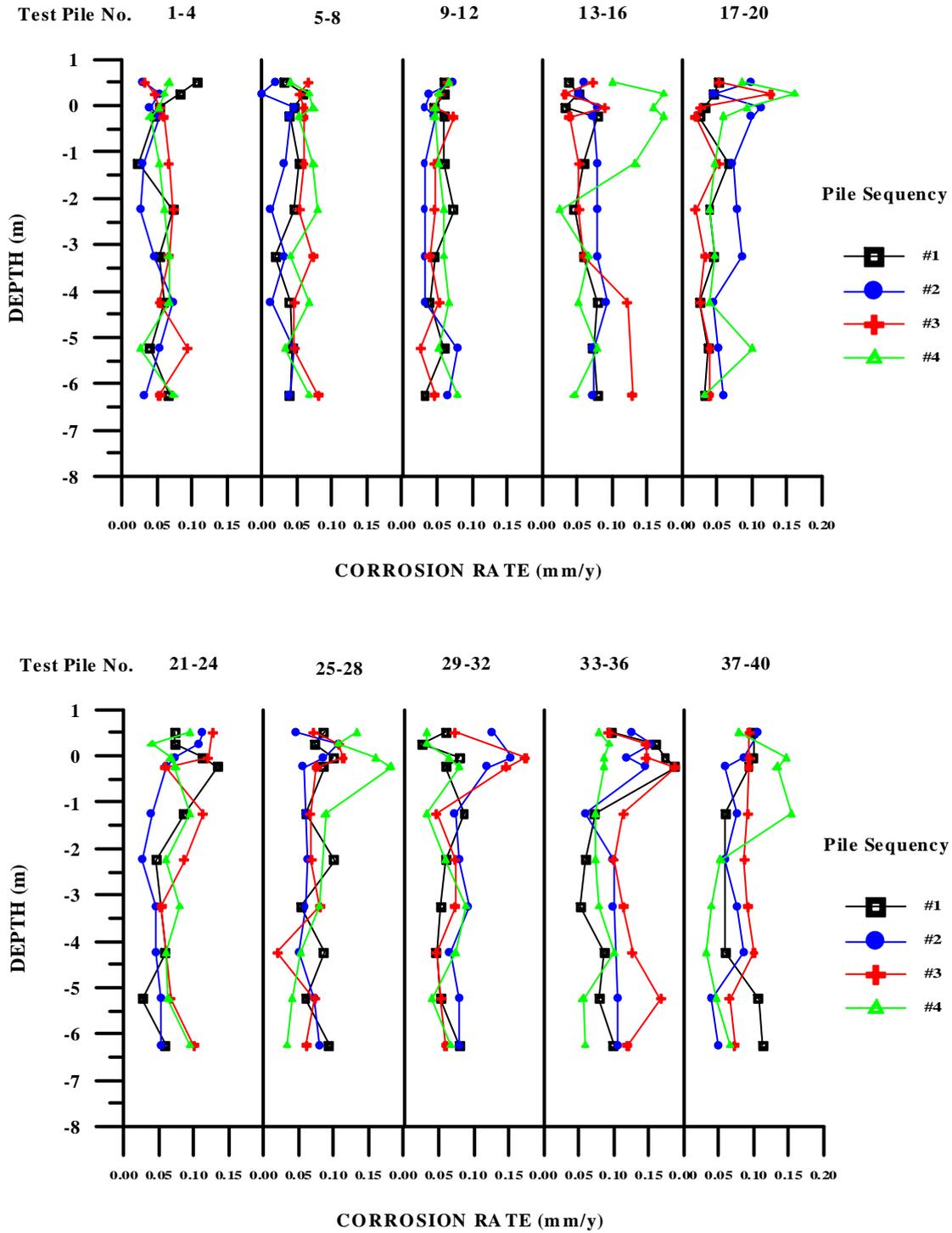


圖 6.1 西 26 號碼頭鋼板樁在各水深點之平均腐蝕速率(一)

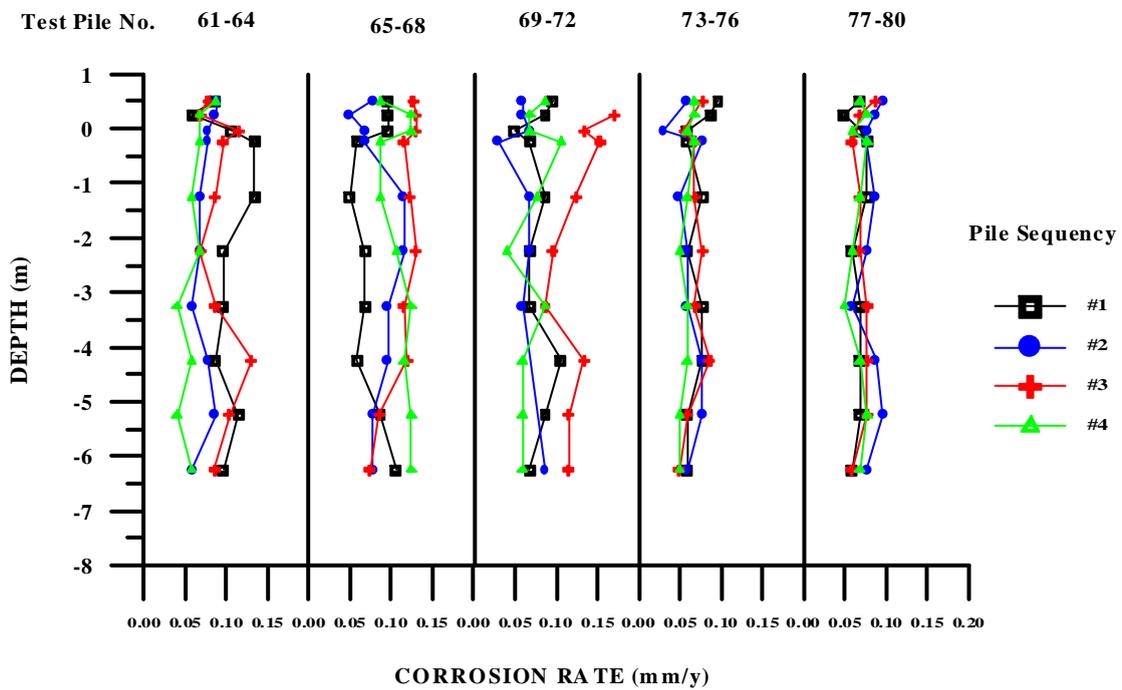
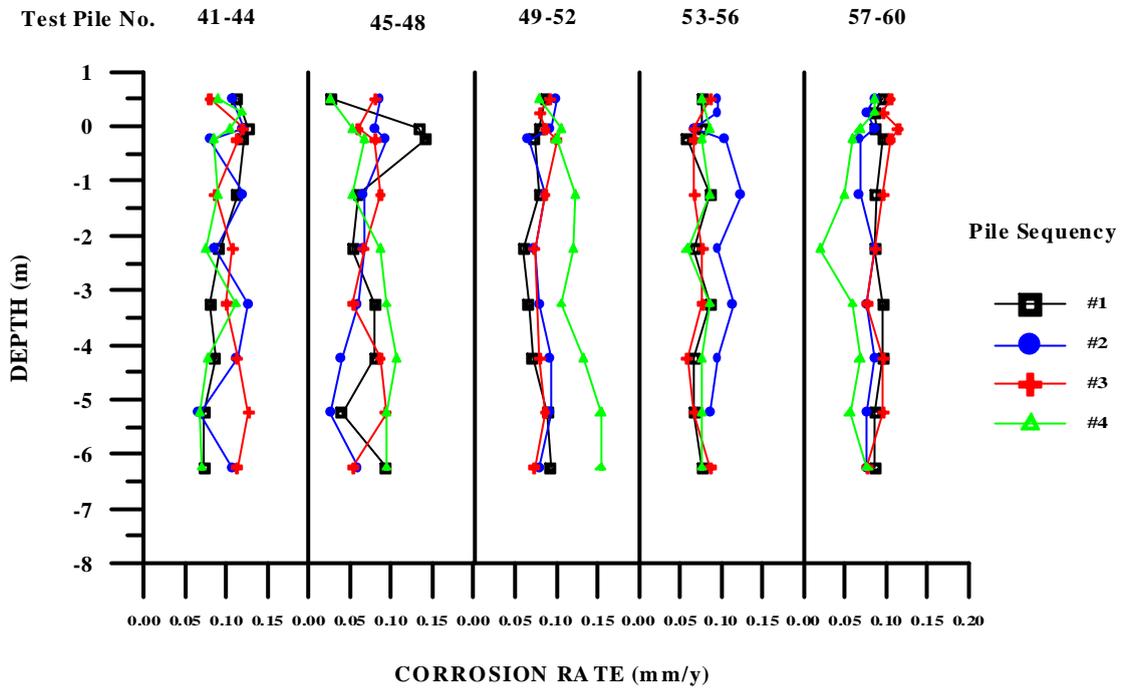


圖 6.2 西 26 號碼頭鋼板樁在各水深點之平均腐蝕速率(二)

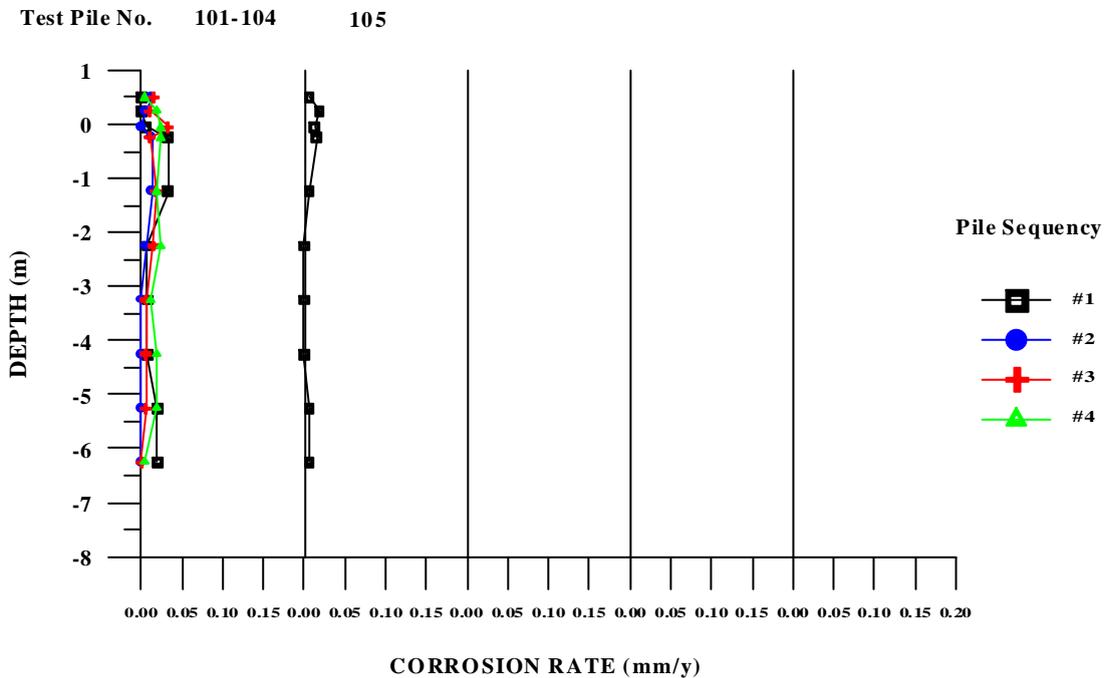
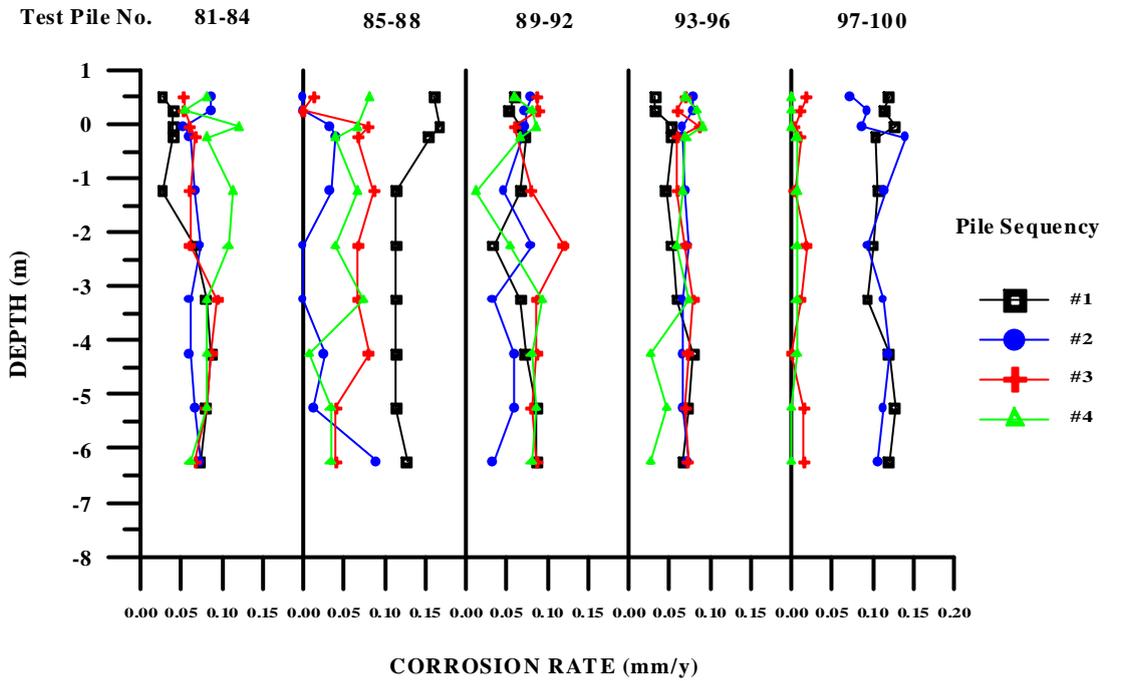


圖 6.3 西 26 號碼頭鋼板樁在各水深點之平均腐蝕速率(三)

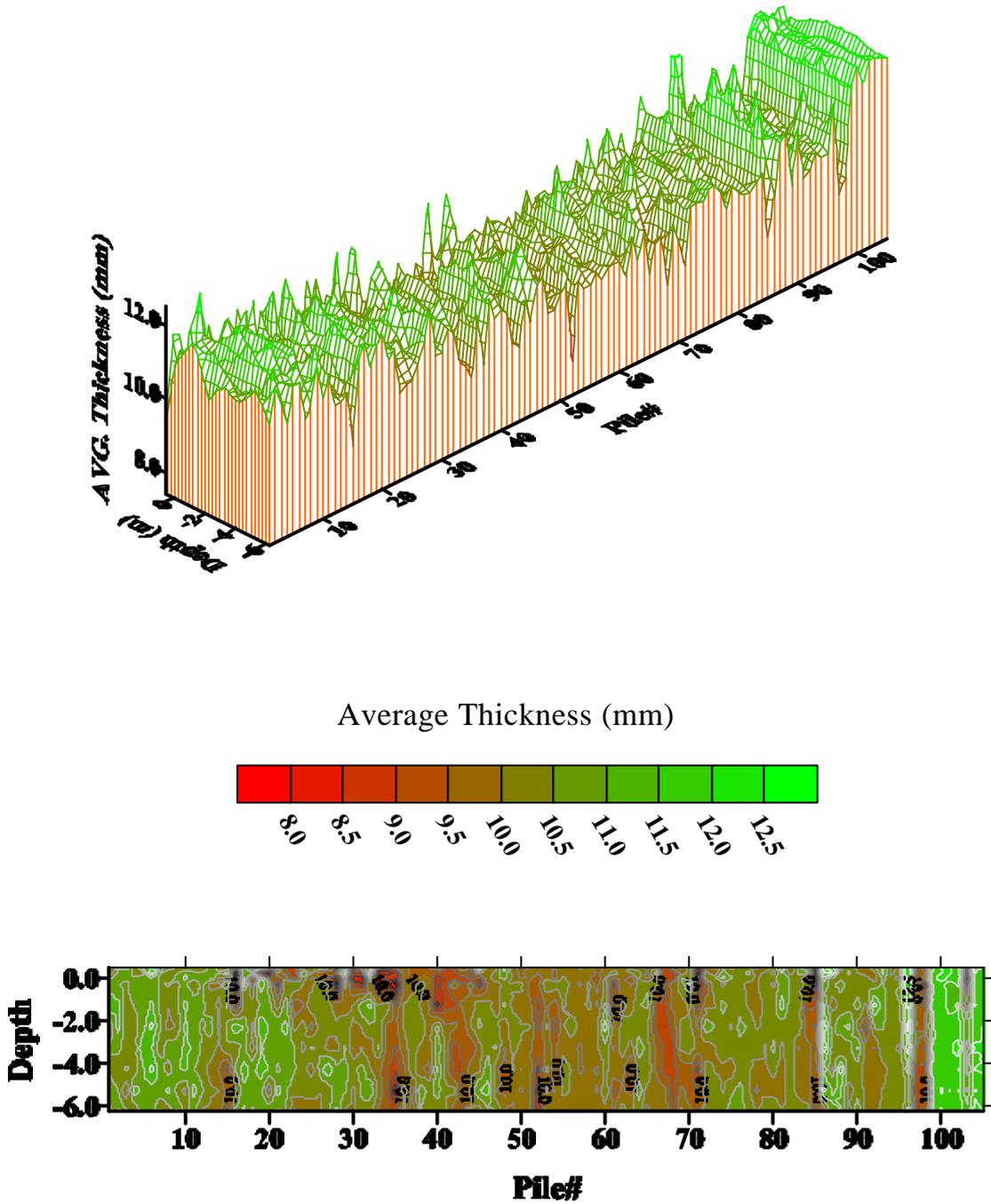


圖 7. 西 26 號碼頭鋼板樁在各水深點平均厚度之 2D 等高線與 3D 圖

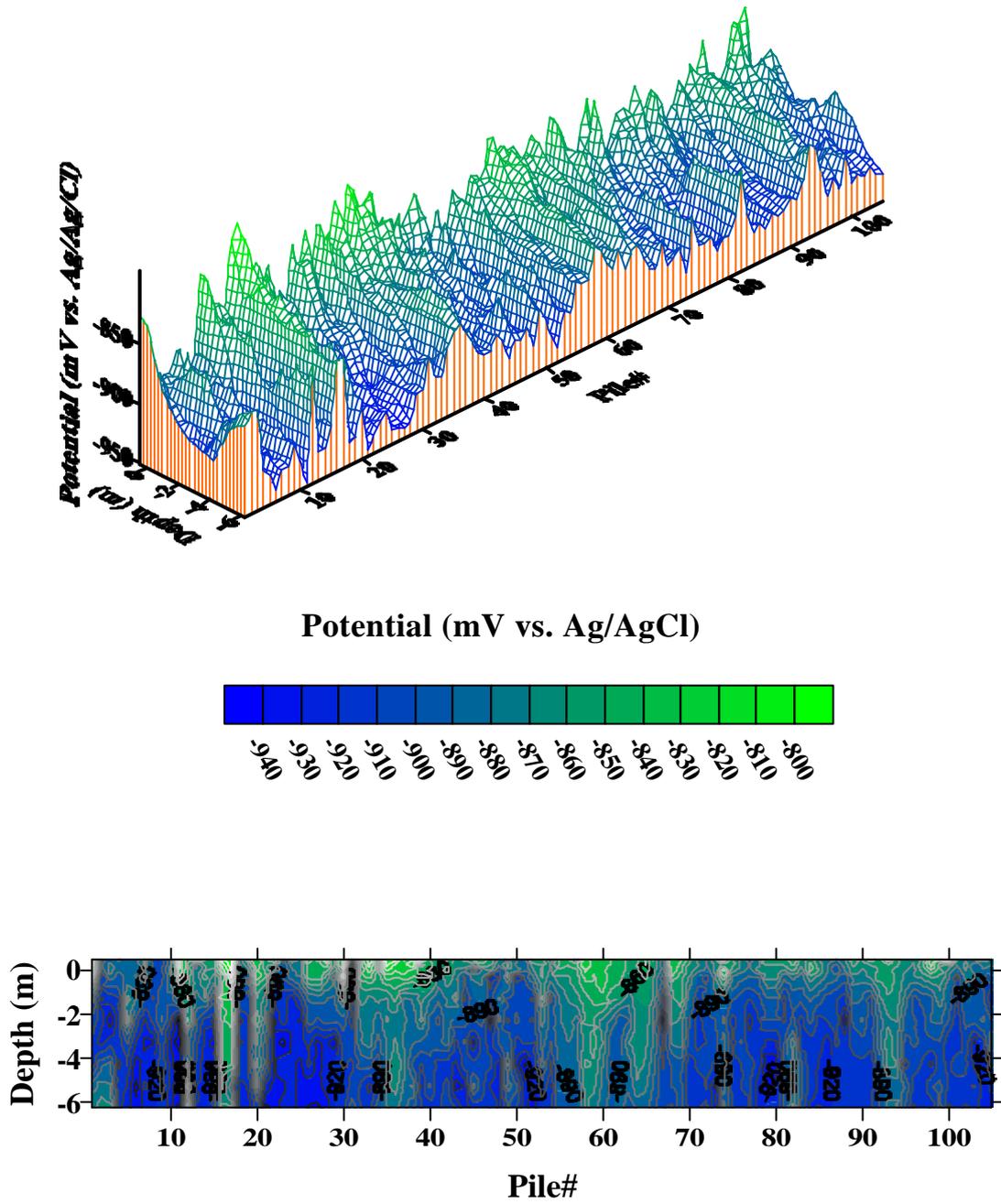


圖 8. 西 26 號碼頭鋼板樁在各水深點電位之 2D 等高線與 3D 立體圖

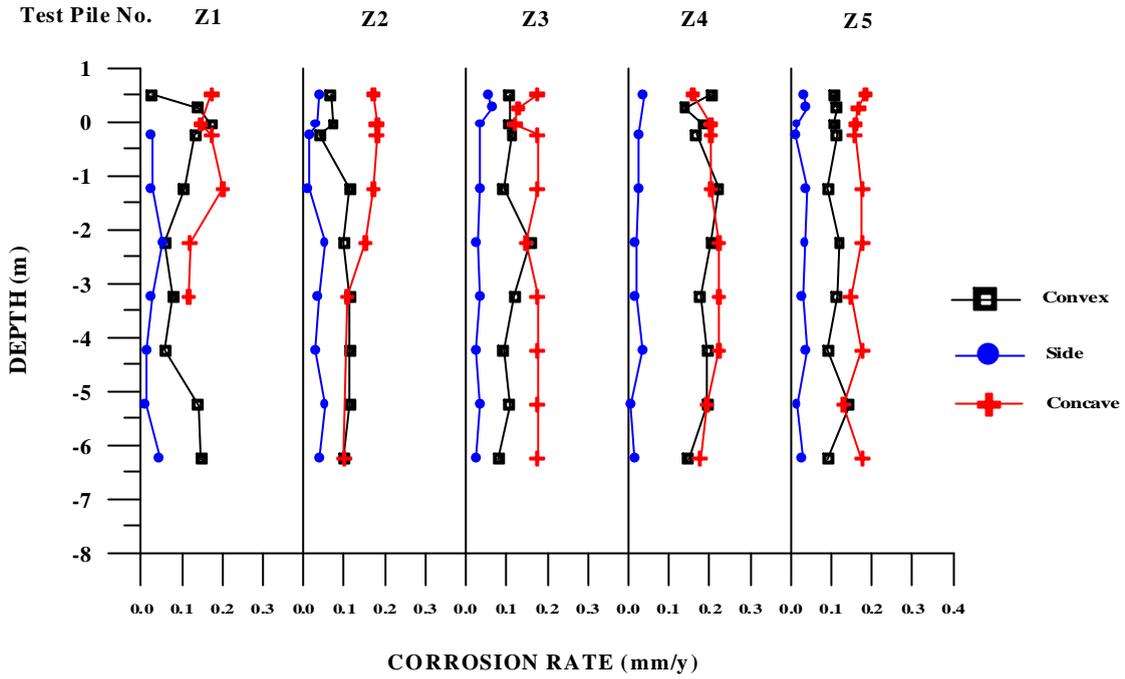


圖 9. Z 型鋼板樁凸面(convex)、側面(side)、凹面(concave)在各水深點之平均腐蝕速率

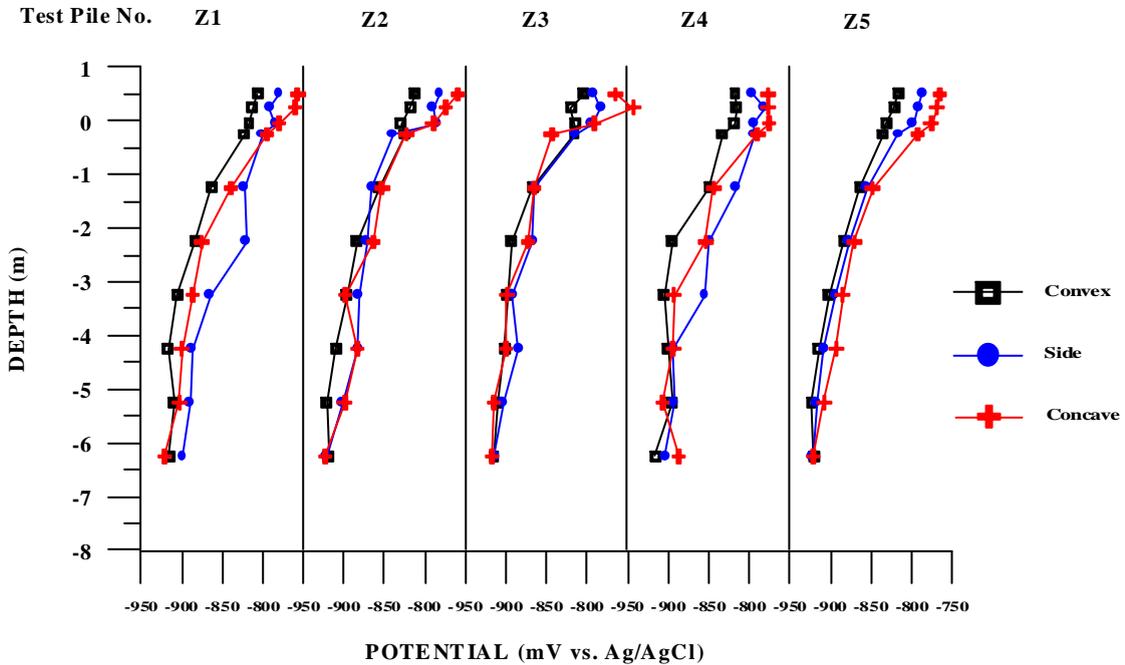


圖 10. Z 型鋼板樁凸面(convex)、側面(side)、凹面(concave)在各水深點之電位

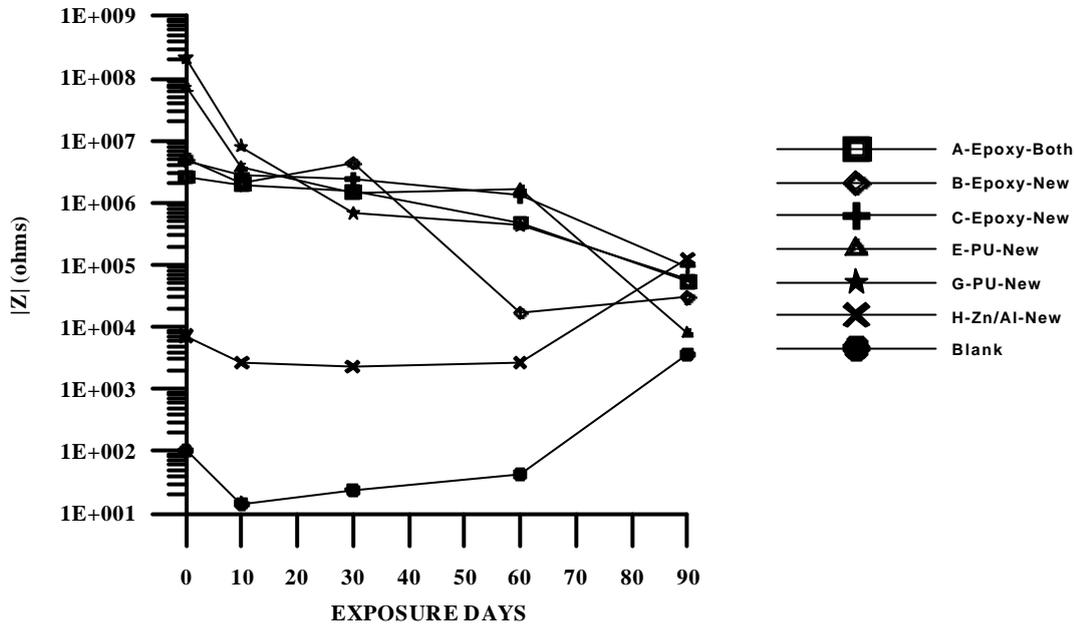


圖 11. 新橋塗料試片於最低頻率(1 mHz)時總阻抗值與時間之關係

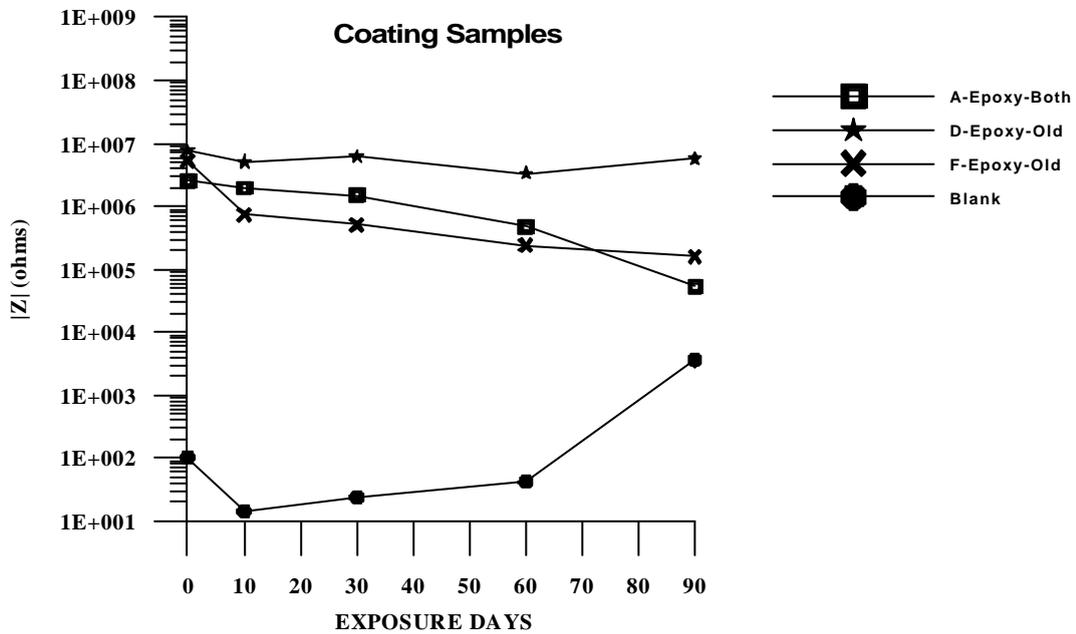


圖 12. 舊橋塗料試片於最低頻率(1 mHz)時總阻抗值與時間之關係



相片 1. W26- 83m 處(一)



相片 2.W26- 83m 處(二)



相片 3. W26- 87m 處(一)



相片 4.W26- 87m 處(二)



相片 5. W26- 153.3m 處



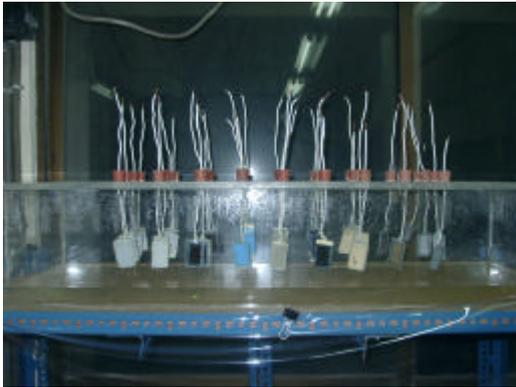
相片 6.W26- 123.3m 處



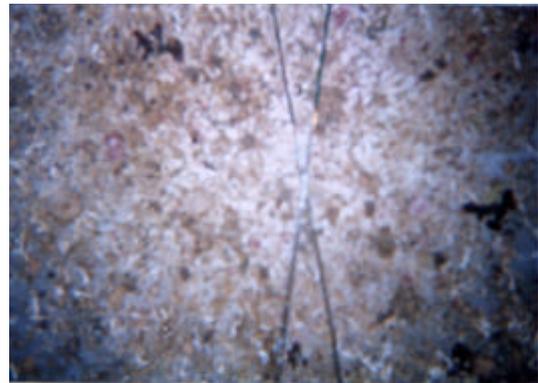
相片 7. 實驗室乾濕循環試驗-浸漬時



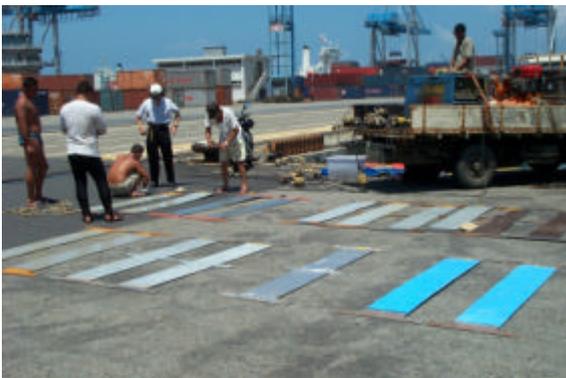
相片 10. 新樁試片安裝



相片 8. 實驗室乾濕循環試驗-退水時



相片 11. 170 日後刮痕位置無銹蝕



相片 9. 現場示範工程新樁試片



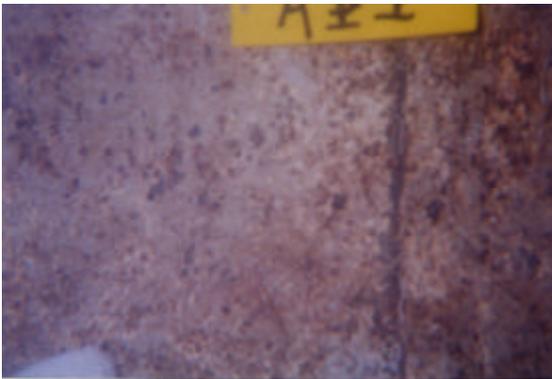
相片 12. A 型塗料水下塗刷



相片 13. A 型塗料塗裝完畢



相片 16. F 型塗料與鋼樁接觸面(170 日後)



相片 14. A 型塗料(170 日後)



相片 17. F 型塗料加網塗佈



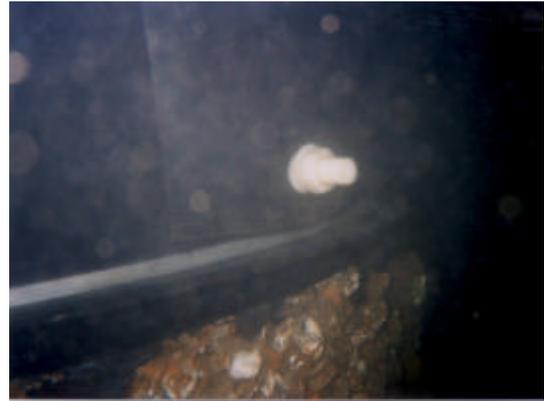
相片 15. F 型塗料水下垂流脫落



相片 18. R 型塗料塗裝(100 日後)



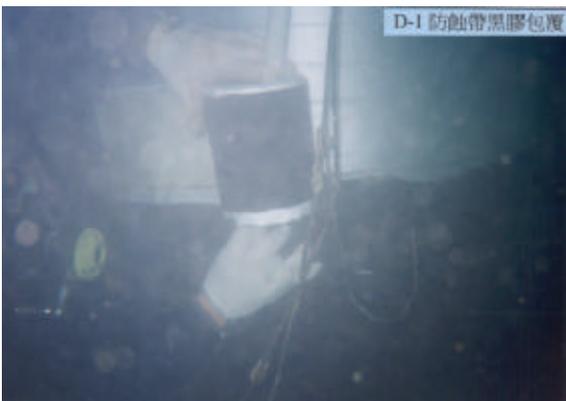
相片 19. A 型塗料與鋼樁接觸面



相片 22. 防蝕帶外層以 HDPE 包覆



相片 20. R 型塗料與鋼樁接觸面



相片 21. 鋼管樁防蝕帶包覆

第一章 總 則

1.1 檢測要義

港灣構造物本身長年面臨惡劣的環境，如波浪作用、颱風，甚至船舶靠岸時的撞擊，都可能造成結構體不同程度的毀損。其中破壞現象若以巨觀的角度來看，包括沉箱傾倒及位移、岸壁被撞擊而破裂、碼頭崩塌、防波堤塌陷及鋼版樁的破裂損壞等；而以微觀角度而言，則包括了鋼版樁的腐蝕穿孔、混凝土材質劣化及斷面變薄、基樁斷裂以及防舷材的破損等不勝枚舉。除了颱風來襲時之嚴重破壞現象外，平時在風浪作用下，尤其東北季風盛行時，隨時間增加逐漸造成之材料劣化、結構變形、結點扭曲等則不易察覺，以致一但較大風浪作用時，則嚴重損害，常無法修護而必須花數倍乃至數十倍的經費來重建。因此，若能有適當的檢測方法以及經常性實施的檢測制度，進行港灣構造物安全檢測，不僅能適時找出有問題的港工設施，在造成大型損壞前予以補強，防範於未然，在平常的管理、經營中，更能進一步避免港灣災難的發生。

結構安全檢測其考慮要點包括實施範圍、實施頻率、對象、精確性、方便性與經濟性等。而目前港灣構造中，最主要者為碼頭及防波堤結構。防波堤屬於港灣構造中之外廓工程，用以防止海洋波浪傳遞至港池內，維持港灣內水域之靜穩。碼頭則為船舶停靠、裝卸物資時，最重要的繫靠設備。其他岸上設施則包含廣泛，除了繫靠設備必要之碼頭附屬設施之外，岸上設施則依碼頭用途之差異而有不同，大部分屬於機械、運送、裝載設施。

1.2 港灣結構安全檢測系統

港灣構造安全檢測實施之時機可概分為，定期及不定期實施之一般性安全檢測，及在重大災害發生時之緊急檢測，檢測時機如大型颱風過後，重大地震發生時，碼頭營運中發生重大事故（如大型船隻操船不當而碰撞）以致造成碼頭結構安全受損，以及施工時因故造成之結構破壞等。1.3 中所顯示即為檢測實施之流程圖，以下則將此流程圖加以較詳細之說明。

1.2.1 一般性安全檢測

一般性安全檢測通常以定期實施的方式進行，針對各種不同港灣構造形式以及設施完工後使用之狀況、年限、環境等條件，實施之期間則容許有差異性。在實施中發現較為嚴重破壞狀況，但尚無需立即修復或立即修復有困難時，即進入密集監階段，其檢測實施期間宜縮短以維護港灣營運安全。而不定期實施之一般性檢測則作為補充性檢測，即在定期實施之檢測有困難時，如機具、人員調度、環境惡劣而無法定期實施時，實施時雖未明定檢測進行之時間或間距，但宜訂出在一定期間內應實施之次數或完成之時間。

1.2.2 緊急災變檢測

重大災害發生時必須進行緊急檢測，如大型颱風過後在波浪可能襲擊的範圍，及以防浪為主的構造物如防波堤、消波設施等應進行緊急檢測；地震發生時，針對地表加速度及動力作用較敏感的港灣構造，如重力式構造物或為固定在與海床接觸處之構造等，亦應進行緊急檢測，較嚴重之地震發生時則應對所有港灣構造進行全面性檢測；碼頭營運中發生重大事故如大型船隻操船不當而碰撞，導致碼頭結構安全受損，以及施工時因故造成之結構破壞等事故時，針對個別構造物及其周遭之港灣構造亦應進行緊急檢測。

1.2.3 第一階段 初步檢測

檢測工作區分為兩個階段實施，第一階段為初步檢測，一般性安全檢測及重大災害發生時之緊急檢測，均必須先經過第一階段之初步檢測，依初步檢測之結果，經過評估判定後再決定是否必須進行第二階段之檢測。第一階段之檢測其檢測項目及檢測重點，依照港灣構造物之形式、使用狀況及環境條件等，建立成表格化之形式，使得在經常性實施時具有較高的效率，及較正確之結果。第一階段檢測工作完成後，即進入檢測結果初評階段，評估時其標準主要有兩大部分：其一為結構安全是否有問題，其二為構造之功能性是否有問題，依據評估結果構造之初步檢測結果可分成三個等級，第一等級為安全無虞、無須進行細部檢測或於未來增加檢測頻率；第二等級為安全無虞、無須進行細部檢測但於未來必須增加檢測頻率；第三等級為安全堪虞、必須進行第二階段之細部檢測以進一步了解構造物破壞狀況。

1.2.4 第二階段 細部檢測

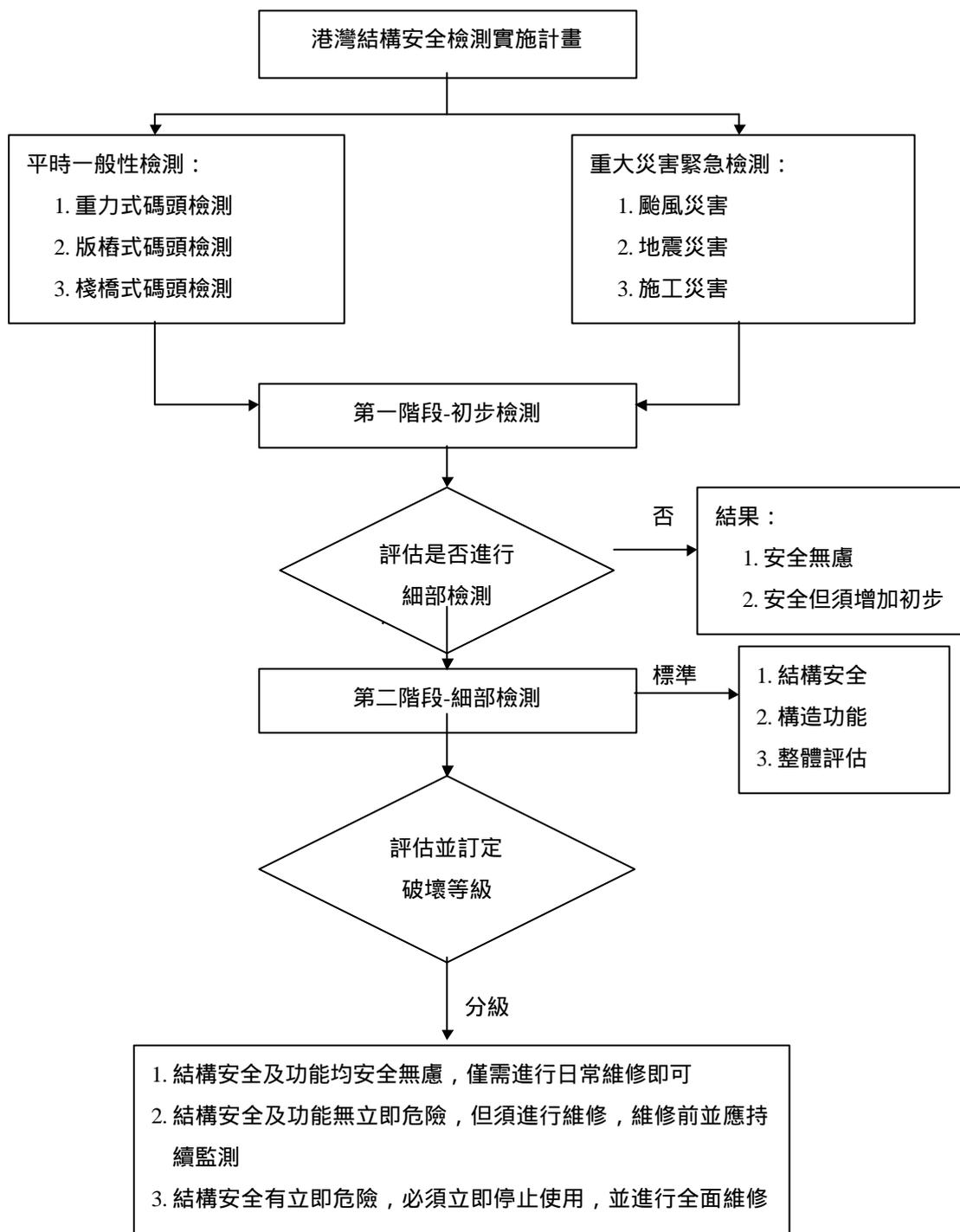
第二階段的檢測工作根據一般性檢測或緊急檢測而有所區分。若為一般性檢測時，第二階段的細部檢測工作將依構件位置、材料特性等來加以區分，並同樣將檢測之重點、具體要求之數據建立成表格化之形式，以便於能經常性的執行。立即性的緊急檢測在第二階段實施時，屬於較嚴重損壞，而有立即修復必要的港灣構造，則必須建立檢測計畫，因其檢測結果除了顯示構造破壞之程度之外，並將成為未來修復工作之重要參考。檢測計畫可參考一般性檢測、第二階段細部檢測表格內之檢測項目及重點，並考慮未來修復之重點，加上個別港灣構造之特殊檢測項目來加以建立。

1.2.5 檢測結果評估

第二階段檢測工作完成後，則進入檢測結果終評階段，評估時其標準區分為三大部分：其一為結構安全是否有問題，其二為構造之功能性是

否有問題，其三為整體經濟效益之評估。港灣構造之細部檢測數據依據評估結果同樣可分成三個等級，第一等級為輕微受損、結構安全及構造之功能均無虞，僅需須進行日常維修即可，但於未來必須增加初步檢測之頻率；第二等級為構造損壞但結構安全及構造之功能均無立即危險、應進行維修若無法立即實施則必須在維修前進行同步監測工作；第三等級為嚴重損壞、結構安全有立即危險，且構造之功能亦無法發揮，必須立即停止使用該構造物並進行大部維修，或依經濟效益之考慮而拆除重建。

1.3 檢測流程



第二章 檢測作業程序

2.1 建立檢測計畫

檢測工作進行前，首先必須研擬檢測工作計畫。研擬檢測工作計畫的目的在於使得檢測工作能夠順利進行，並在一定時間範圍內確實達到檢測工作目標。檢測工作計畫通常可以包括：檢測之前置作業、檢測作業程序、檢測表格之填寫及製作、其他檢測相關注意事項等。檢測計畫的擬定以負責檢測工作之編組人員執行為主，若人員編組尚未完成時，則由檢測工作之召集人負責，而召集人必須由具有檢測工作經驗的人來擔任為佳。以下則針對各項必須包含於檢測計畫之項目加以討論。

2.2 檢測前置作業

檢測之前置作業為進行檢測作業前之準備工作，準備工作中所包含的項目有：了解檢測位階、認識檢測對象、準備檢測工具、熟習檢測方法等。以下逐一分節討論。

2.2.1 了解檢測位階

檢測進行時首先必須了解，該次檢測為初步檢測或細部檢測，為一般性檢測或緊急檢測，針對不同的檢測位階，而準備相關之檢測圖表等。

2.2.2 認識檢測對象

由於港灣構造中，碼頭結構及堤防構造形式眾多，檢測重點亦有所差異，在進行檢測前必須先確定檢測對象之碼頭結構種類，檢測之範圍大小等，並事先取得相關之設計圖及應用資料，如靠泊船級、碼頭建造日期、設計水深、法線標高、船席長等，過去曾進行之檢測記錄、維修記錄等。

針對取得之資料事先加以研讀，以熟悉檢測之對象，並將相關資料填入檢測表的「碼頭基本資料」欄中，在過去相關記錄的研讀中，最好能列出檢測之重點，以便在最短時間獲得最正確之檢測結果。

2.2.3 檢測人員編組

由任務要求與人力資源狀況進行人員編組，若為常態性之檢測工作，則應有常態性依任務編制或專職編制之檢測人員編組，若非常態性之檢測工作則應有臨時性之任務編組。檢測人員之編組依工作性質、工作範圍大小、預估工作時程及整體工作量來加以編組，原則為檢測工作的執行能順暢進行，並能在預定時程內能完成既定工作。

2.2.4 準備檢測工具

由於檢測方法以及檢測對象的不同，檢測工具的差異性甚大。尤其在細部檢測時，許多資料的取得有賴於長期性的監測，除了有些檢測方式必須於水下進行之外，有些則必須埋設儀器長期同步記錄，並定時或不定時取出數據分析，方能獲取檢測所需之資料，因此本節所談之工具準備將以初步檢測為原則。

初步檢測時必須講求速度及時效，如平時之一般性檢測範圍廣大，災難時之緊急檢測則必須迅速進行，故所需檢測工具不宜過於複雜，其進行之方式主要以目測及簡單輔助工具為主，以非破壞性檢測之方法為輔。目視檢測之輔助工具包括有：清潔用工具、標示用工具、簡單量測用工具及放大、看遠及照明等輔助視覺用工具。至於非破壞性檢測之工具則依所需檢測方法而準備，通常所需之檢測對象為，混凝土強度變化、裂縫分佈、鋼筋排設或腐蝕狀況等。

2.2.5 熟習檢測方法

熟習檢測方法為檢測工作者之重要職責，理論上希望能達到不同的

檢測者（工程師）在進行同一區域同一項目時，其獲得之檢測數據並無不同，而事實上可能有相當差距，尤其仰賴工作經驗甚重之目視檢測。因此工程師在進行檢測工作前務必熟習各種檢測方法，及其判斷之依據及準則，如本報告第三章中有關各種檢測方法的建議及目視檢測的原則。

2.3 確定檢測工作程序

一旦前置作業完成後，檢測作業即將開始，檢測工作開始後其所依循的作業方式即是檢測工作程序，首要目的在於避免不同工作者進行同樣工作時有所差異，其次則使檢測工作的進行具有順暢性，第三則是讓檢測重點及檢測標準能夠保持。

如前所述，檢測工作程序在細部檢測階段，依其檢測之急迫性、檢測對象及檢測範圍等必須詳細加以規劃，本節中以初步檢測之工作程序加以討論。

2.3.1 檢測標的規劃

檢測工作首先必須規劃整個工作的進行流程，由於碼頭面積甚大，包含的構件甚多，所需進行檢測的材料性質或破壞特性則有相似處，故檢測之進行順序可以依檢測之材料或破壞特性規劃，或依檢測之構件順序來規劃，或混合進行者，以檢測工作之順暢性為最重要原則。以下略述之：

1. 依檢測性質順序規劃

檢測性質指的是檢測對象之材料性質或破壞特性，在做檢測順序規劃時，考慮同性質的的檢測工作，例如同屬混凝土強度檢測，或同為混凝土裂縫檢測工作，無論位於碼頭面版或屬於碼頭岸壁，均列為同一階段的檢測工作，待該階段檢測工作結束後，再進行不同之材料性質或破壞特性之檢測工作，然後依此類推而完成最終的檢測工作。

2. 依檢測構件順序規劃

依檢測構件順序來規劃檢測工作，為將同種類構件的所有不同材料性質的檢測工作在同一檢測工作階段中完成，然後再進行其他構件的檢測工作，其進行順序以結構之構件型式區分，如碼頭面版上測完所有相關檢測項目後，再進行碼頭岸壁之檢測，依此類推直至完成所有規劃之檢測工作。

3. 依劃分區塊混合進行

當受檢測構件無法明顯區分，或部份構件之檢測工作需特殊裝備時，或檢測對象之範圍過於廣大時，亦可採取以上兩種方式混合進行，以編定區塊的順序來區分。

2.3.2 編定檢測點

當檢測工作順序決定之後，在該階段檢測範圍內的檢測對象必須編定檢測點，如混凝土之強度檢測，不可能將檢測範圍內之所有點均加以檢測，必須編定適當測點來進行。而針對各檢測項目之特性，有些則必須標示，有些除了標示清楚之外還必須埋設簡單的儀器，這些亦屬於編定檢測點時的工作項目。檢測點的標號在檢測數據的記錄上亦屬重要數據，必須清楚且容易辨識，以免檢測時記載錯誤。

2.3.3 進行檢測並填寫檢測表

檢測之進行必須依照編定之檢測點順序，並務必遵照相關檢測方法確實執行。檢測表之填寫則如第三章中之初步檢測表 3.1 及 3.2 所示；但由於檢測範圍可能為局部或全面性涵蓋許多座碼頭，該檢測表之應用亦可具有相當的彈性，尤其是針對個別構件之檢測，或局部性檢測時，檢測人員依據檢測對象之編號，如各碼頭項下另行分割成區塊編號，將檢測值填具統計後，即可獲得檢測表之檢測數據，進而進行檢測結果之評估。若為局部性檢測，則無須填具檢測表之所有項目亦可獲得局部性之檢測結果。

2.3.4 檢測報告及檢測結果評估

檢測報告之填寫除了包含檢測表項目之數據之外，數據取得之過程及統計過程應加以敘述，另外最重要的是檢測工作進行時，遭遇的困難或檢測的不確定性、原因及處置方式應以文字說明。有重大破壞情形在檢測項目中未條列，或有條列而評估數值(D 值或 R 值) 超過 3 時即應加以說明，故檢測報告中除了檢測表數據之填寫之外，應輔助以書面性之報告如表 2.1 之「現場檢測記錄表」，其內容包含如：

1. 檢測項目
2. 檢測位置或標定之檢測點
3. 破壞敘述或檢測困難敘述
4. 其他建議事項

檢測數據填具於檢測表中後，即可據此計算檢測之評估結果，檢測結果之評估方式如第三及第四章中所述，初步檢測的結果評估分為三個等級：第一等級為安全無虞，無須進行細部檢測亦無須於未來增加檢測頻率。第二等級為安全無虞，雖無須進行細部檢測但於未來必須增加檢測頻率。第三等級為安全堪虞，必須進行第二階段之細部檢測以進一步了解構造物破壞狀況。

2.4 檢測進行時應注意事項

檢測工作進行時，除了依照檢測作業程序（圖 2.1）確實執行檢測作業之外，由於檢測工作位於各種貨物裝卸作業場所，各型大卡車來往頻繁，若有水中作業時，更有大型船隻靠泊，整個檢測作業的進行可以說非常危險。尤其船舶的停靠或貨物的裝卸並不能臨時喊停，由於各碼頭使用功能性的差異，亦無法以調換船席或碼頭的方式騰出待測的碼頭，除非已

有明顯危及安全狀況。因此碼頭檢測工作的進行確實在相當危險的環境中進行，檢測員必具備良好的安全意識，以避免危險狀況發生。

以下為維持檢測安全的幾個原則：

1. 充分的事前準備工作

充分的事前準備工作除了檢測前制作業中，針對檢測作業的規定，如適當的工具準備、事先認識檢測對象、熟習檢測方法等之外，工作時需要良好的體能及精神，亦有賴事前充足的休息及睡眠。

2. 團隊的合作及協調

檢測工作的進行通常由一組工作人員共同執行，故團隊的默契以及相互的照應能避免許多意外的發生

3. 遵守工作安全守則

檢測工作是執行一種「安全檢查」的工作，故有關一般工作安全的基本守則，務必確實遵守。

4. 特殊檢測場所之安全意識

檢測工作之進行可能位於水下、碼頭下、船舶旁等，依檢測場所之屬性，必須有特殊的裝備及人員訓練，以及相關的作業守則等，檢測者務必事先準備齊全，熟習相關作業規定並確實加以遵守。

5. 其他事項

其他事項中包括有：良好暢通的相互聯繫工具，事件發生之緊急處理程序，必要的交通管制安排等。

表 2.1 現場檢測調查紀錄表

碼頭基本資料	隸屬港口：		碼頭編號：		
	建造日期：		啟用日期：		
	靠泊船級	原設計：		實際使用：	
	碼頭法線版面標高：	長度： 縱深：	水域深度	原設計： 目前：	
	靠泊船隻屬性	<input type="checkbox"/> 貨櫃 <input type="checkbox"/> 化學(油)品 <input type="checkbox"/> 雜貨輪 <input type="checkbox"/> 其他			
	碼頭構造型式	<input type="checkbox"/> 重力式 <input type="checkbox"/> (井筒)版樁式 <input type="checkbox"/> 棧橋式 <input type="checkbox"/> 其他			
	上次檢測	時間：	單位：	區分：	結果：
圖 示 描 繪	依現地災損或勘查所示如實繪製示意圖，並加以量測區位距離方位，標註地形、地物				
現象說明	詳實描述現場情形並盡量拍照、攝影以資參考				
破壞原因	就破壞現象及構件位置簡述損壞之可能原因				
修護建議	提出修護建議與可保持營運功能兼具安全前提下之緊急修護（應變）措施				

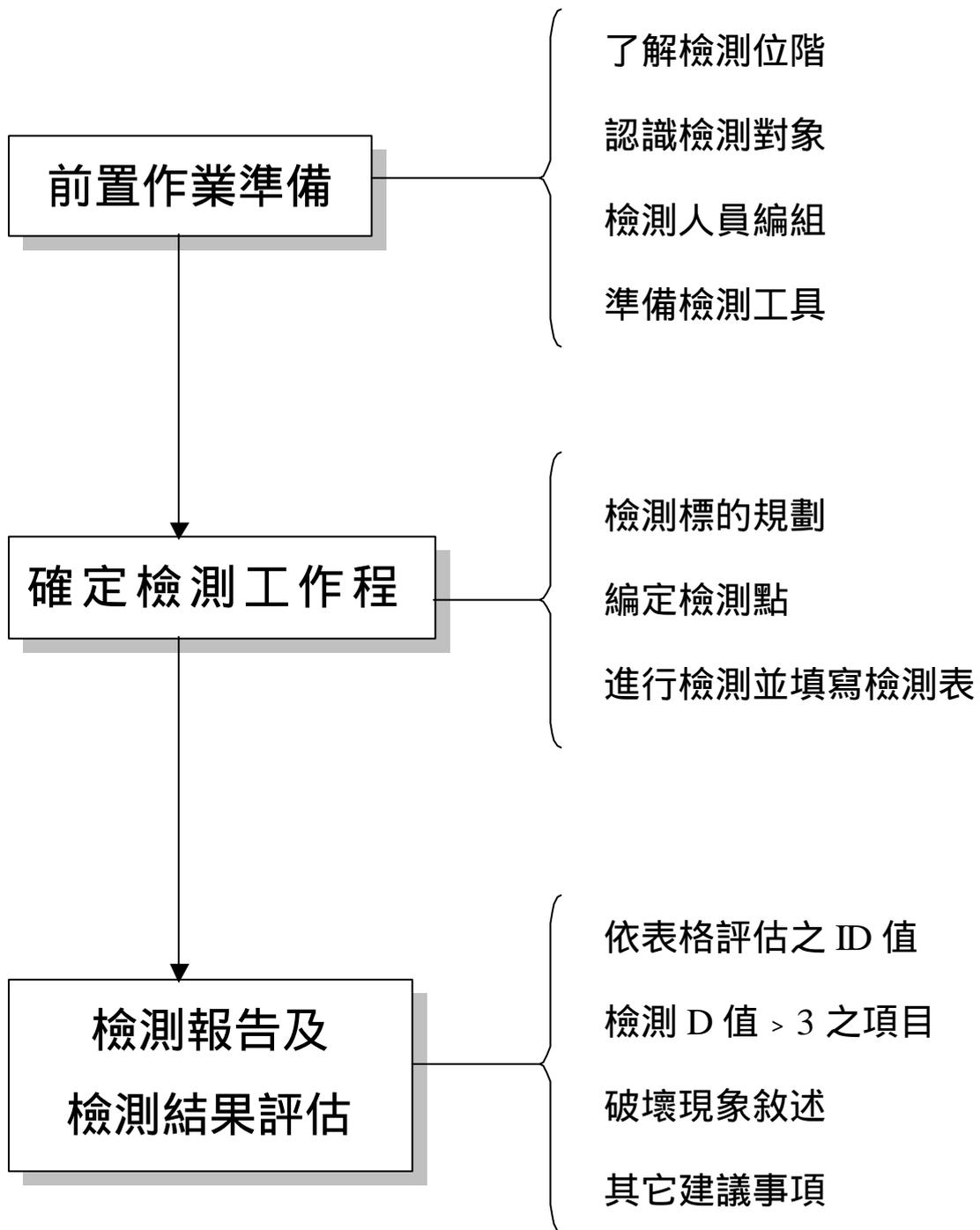


圖 2.1 碼頭檢測作業程序流程圖

第三章 結構安全檢測方法介紹

由於港灣構造物的安全與港區內的人員、廠房、機具等，甚至對於鄰近地區居民的生命財產都有密切的關係，因此，建立一套完整而周延的檢測及評估系統是相當重要的。目前將檢測方法初步分為一般性的檢測及深入化檢測兩種。所謂一般性檢測，即為巨觀檢測，利用比較普遍化的儀器輔助進行檢測，至於深入檢測則需使用較精密的儀器。深入檢測又可再細分為非破壞性檢測與破壞性檢測兩種。以下分別就鋼筋混凝土材料、鋼構材料，提出說明。

3.1 混凝土及鋼筋混凝土材料

3.1.1 一般性檢測：

以目測的方式或極簡單的工具來進行檢測，如觀察混凝土表面外觀是否有損壞狀況，例如裂縫、剝落、剝離、變形等現象，先進行初步的觀察鑑定，如果有發現裂縫，則描繪記錄裂縫的位置，並依其形式初步判定可能的破壞原因。因為裂縫是混凝土劣化的前兆，外界有害物質會經由裂縫侵入，也是造成內部鋼筋銹蝕的主要原因。

3.1.2 非破壞性檢測：

非破壞性檢測具有快速性、對受測物不產生破壞、可直接對現有結構物之混凝土進行檢測等項優點。應用非破壞檢測技術的檢測項目一般包括：(1)混凝土強度，(2)混凝土的彈性模數，(3)尺寸與厚度，(4)裂縫的寬度、深度與長度，(5)鋼筋的直徑、位置及保護層，(6)混凝土中的水分，(7)混凝土內鋼材的銹蝕等，而上述一般性檢測亦可列為非破壞性檢測的範圍。一般而言，混凝土的非破壞檢測涵蓋三個範圍：一是檢測混凝土強度，二是檢測混凝土內部缺陷等強度以外的特性，三是檢測混凝土內含鋼筋之大致銹蝕情況。但由於其檢測結果與施行測量的方式有很大的關係，對於相同的試體，不同的施測程序，可能產生很大的差異。因此，試驗程序的建立使其具有一致性則相當重要。

而近幾年來，與結構物劣化診斷等有關的混凝土內部裂縫、空洞等缺

陷，鋼筋的位置、直徑及銹蝕狀態等強度以外的非破壞檢測方法日益受到重視。以下就混凝土材料表面硬度、構件內部完整性及混凝土中鋼筋的腐蝕情況等相關的檢測工法、所需儀器設備、進行時機及方式程序等，列舉較普遍使用之方法於表 3.1，並做簡單介紹。

(1) 混凝土強度檢測

混凝土強度簡易檢測方式包括有衝錘法、貫入阻力法等方法，主要以簡單的表面強度或有限深度處之混凝土強度來換算出大致上的整體混凝土強度。如衝錘法使衝錘垂直衝擊混凝土表面，衝擊後讀取反彈係數，再依反彈係數值估算混凝土強度。其現地測試情形及儀器使用則如圖 3.1 及 3.2 所示。而貫入阻力法則將設計好之探頭或探針，於測試點之混凝土表面，將該探頭或探針貫入混凝土中，將度量板置於探孔上固定後讀取探頭暴露長度，再利用貫入長度與阻力關係換算混凝土的強度。其現地測試情形及儀器使用則如圖 3.3 所示。

(2) 混凝土內部缺陷等強度以外的特性檢測

混凝土內部缺陷(蜂窩、裂縫等)或構件內部完整性之檢測方法則包括有超音波脈波速度法、共振頻率法、敲擊回音法等多種方法。其目的在了解基礎底板厚度、灌漿完成模板拆除後偵測混凝土結構內部蜂窩、混凝土構件之完整性以及混凝土裂縫向內延伸深度及走向等。如超音波脈波速度法利用脈波發生器傳送接收後，來分析其速率改變與物質內部密度變化的關係。其現地測試情形及儀器使用則如圖 3.4 及 3.5 所示。

敲擊回音法為在 80 年代末期所發展出來的方法，由於其使用上的可靠性較為提高，目前也有被廣泛推廣的現象。該方法使用了包括敲擊源、接收器、含資料擷取卡之電腦(如圖 3.6)等設備，其原理為固定傳播速率的壓力波在介質中傳輸時，除以頻率為其傳播介質(如混凝土版)的兩倍厚度。其中在混凝土中之傳播速率必須事先測出，而傳播頻率則於實測中繪出其反應頻譜圖得出，依主控頻率的改變計算坑洞的厚度(如從低頻移至高頻實顯示其厚度減少)及位置。

(3) 混凝土內含鋼筋之大致銹蝕情況檢測

混凝土內含鋼筋之銹蝕情況檢測方法則，如自然電位法等。自

然電位法為使用半電池及電位計測定自然電位，根據自然電位的分布狀態以確定鋼筋有可能銹蝕的範圍。

3.1.3 破壞性檢測：

對於較嚴重的破壞現象，或較複雜的破壞機制，則必須在實驗室中進行更深入的分析，亦即必須在現場採取足夠之試樣或試體回實驗室做檢測，如鑽心取樣、混凝土中性化分析或混凝土受鹼骨材破壞分析等實驗。如工程界中最常使用者為鑽心取樣實驗，在現場利用高功率及強度之鑽桿及鑽頭，取下圓柱型之混凝土試體後，再送回材料實驗室進行抗壓強度實驗，測出試體之實際抗壓強度值。而此方法中免不了對實際結構物造成大小不等的破壞，因此除非沒有其他較可靠的取代方式，否則以少採用為原則。

3.2 鋼結構材料檢測

港灣中的鋼結構構造物大多位於水面下，如鋼版樁、鋼管樁等，檢測不易，因此常有嚴重破損而未能及時發現，嚴重影響碼頭使用的安全性。目前普遍使用的方法則是以潛水人員進行水下檢測。此法施作具有相當大的困難度，除了費用昂貴、人員素質影響較大之外，耗時且危險性高亦為其缺點，經常性的實施便不可行。若能事先以較經濟、省時的方法做初期的檢測，確有嚴重破壞時再進行較昂貴的檢測，則在經濟上、效率上當能更為提高。規劃中將針對版樁式及棧橋式碼頭發展新的方法，以雷射掃描的方式來做初期檢測的工作。

針對鋼結構材料於海港中之腐蝕情形，本研究中將依據多年來所建立之鋼版樁在各港口腐蝕之資料，如腐蝕速率與放置地點、放置水深、浸漬時間及附著生物等之關係，研判出主要港口碼頭中鋼版樁在未受保護及保護情況下，其在台灣海域環境條件下之真實腐蝕速率。如一般工程設計中，將未受保護鋼版樁之腐蝕速率定為 0.2 mm/y，但根據實際調查及現場實驗證實，台灣港區中鋼版材料之未受保護腐蝕速率將超過此數值，尤其於完工後前半年時間將更為可觀。因此，本研究中計劃依各港口特性訂定出鋼版樁碼頭受保護及未受保護情況下之檢測時程表。

表 3.1 A 混凝土強度非破壞性檢測方法表
(A、 表面強度及硬度)

檢測項目	試驗工法	儀器設施	進行方式及試驗時機
表面硬度及強度	衝鎚法	衝 鎚 (如圖 3.1、圖 3.2)	<p>1.方式：握住衝鎚，使衝鎚垂直衝擊混凝土表面，慢慢增加衝鎚的壓力，直到衝擊棒衝擊到混凝土，衝擊後讀取反彈係數，每個試驗區域，須有 10 個讀數，任兩個衝擊試驗須相隔 2.5cm 以上</p> <p>2.時機：灌漿完成模板拆除後評估混凝土強度、定期安全檢查評估混凝土強度</p>
	貫入阻力法	Windsor Prob (如圖 3.3)	<p>1.方式：(1)探頭貫入試驗法—儀器固定於測試點之混凝土表面，裝上探頭後發動探頭，將度量板置於探孔上固定後讀取探頭暴露長度</p> <p>(2)探針貫入試驗法—新探針裝入彈簧發射裝置，貫入設備緊靠混凝土試驗表面維持垂直角度，發射探針，移除針孔內異物後，量取貫入深度</p> <p>2.時機：與衝鎚法相同</p>

表 3.1 B 混凝土強度非破壞性檢測方法表
(B、 構件內部完整性)

檢測項目	試驗工法	儀器設施	進行方式及試驗時機
構件內部完整性	超音波脈波速度法	脈波發生器 傳送器 (如圖 3.4、圖 3.5)	1.方式：校正設備的校正、歸零校正、量取音波傳播時間 2.時機：灌漿完成模板拆除後量測基礎底板厚度、定期安全檢查混凝土構件之完整性
	共振頻率法	波型分析儀	1.方式：橫波頻率法、縱波頻率法、扭轉頻率法 2.時機：灌漿完成模板拆除後量測基礎底板厚度、灌漿完成模板拆除後偵測混凝土結構內部蜂窩、定期安全檢查混凝土構件之完整性、定期安全檢查混凝土裂縫向內延伸深度及走向
	敲擊回音法	敲擊源、接收器、含資料擷取卡之電腦(如圖 3.6)	1.方式：頻率域分析、時間域分析 2.時機：灌漿完成模板拆除後量測基礎底板厚度、灌漿完成模板拆除後偵測混凝土結構內部蜂窩、定期安全檢查混凝土構件之完整性、定期安全檢查混凝土裂縫向內延伸深度及走向

表 3.1 C 混凝土強度非破壞性檢測方法表

(C、混凝土中鋼筋之鏽蝕情形)

檢測項目	試驗工法	儀器設施	進行方式及試驗時機
混凝土中鋼筋的腐蝕情況	自然電位法	A half cell and 'Canin logging voltmeter' (如圖 3.7)	1.方式：測定自然電位，根據自然電位的分布狀態可以確定鋼筋有可能鏽蝕的範圍 2.時機：靠海構造物在一定使用年限後，判斷鋼筋有可能鏽蝕時

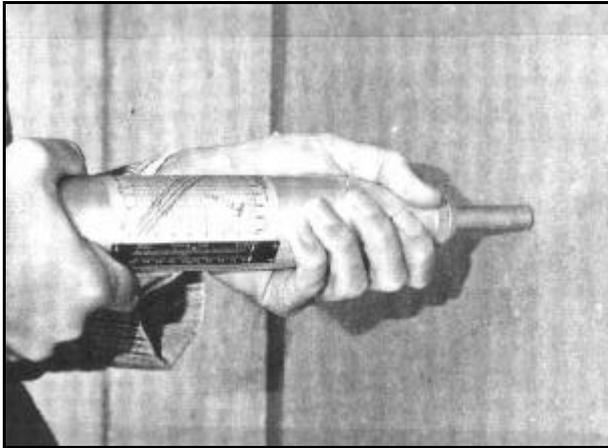


圖 3.1 混凝土強度試驗錘



圖 3.3 強度試驗錘(探頭貫入型)

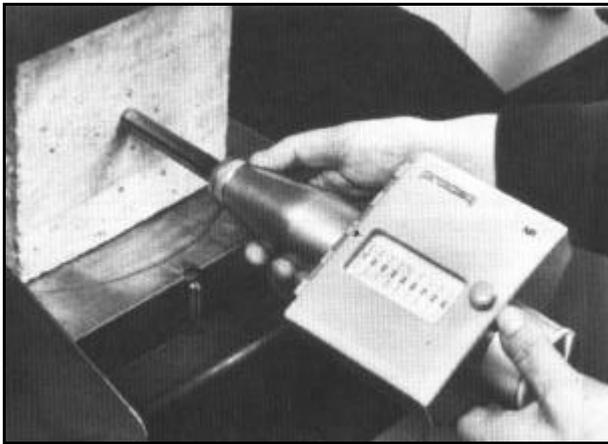


圖 3.2 混凝土強度試驗錘(記錄型)

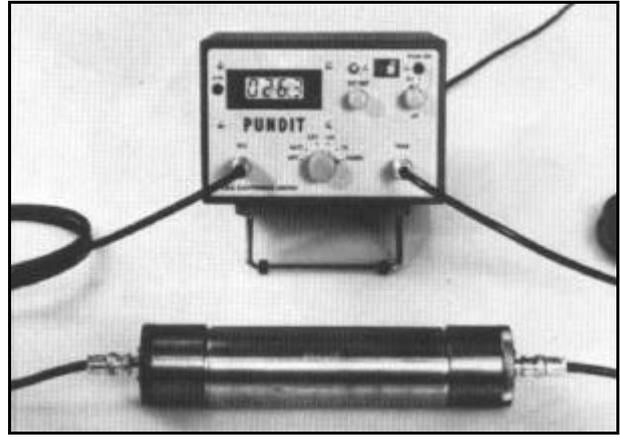


圖 3.4 超音波探測儀(脈波速度法)



圖 3.5 超音波探測儀

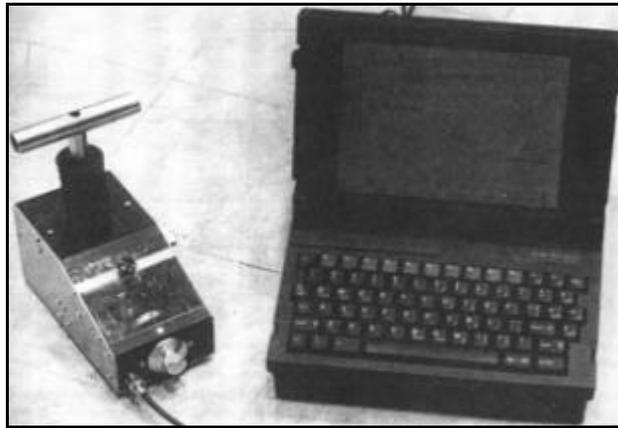


圖 3.6 超音波探測儀(敲擊回音法)

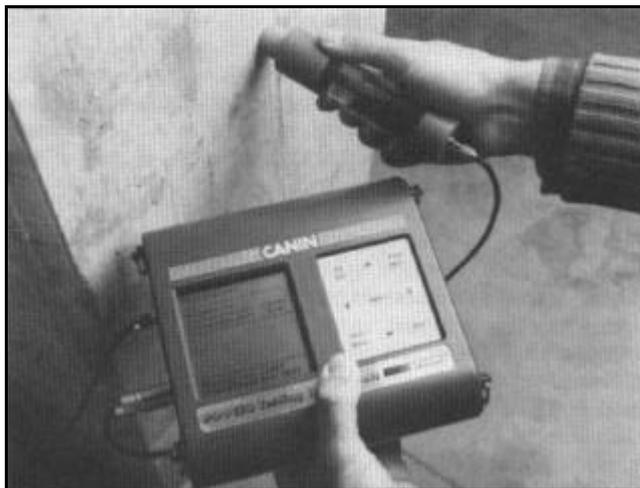


圖 3.7 腐蝕探測儀

第四章 初步檢測及評估

初步檢測為以目測方式及較簡單之測量儀器對碼頭整體結構變形或位移進行了解，檢查碼頭面混凝土是否有剝離、裂縫、鋼筋外露等現象，附屬設施如橡膠護舷是否產生龜裂、破損，再配合已蒐集之背景資料（如碼頭屬性、港池水文資料、地盤屬性）作初步安全評估，並加以拍照、繪圖描述記錄。

4.1 碼頭初步檢測

港灣結構物初步檢測評估表針對所有種類的碼頭及防波堤而設計，其所包含的項目主要有幾個共通的特點：一、在所有類似的港灣構造中大部分含有該檢測項目者，二、檢測對象的材料或構造變化採用目視或簡單儀器即可辨識者，三、檢測對象所在位置、環境不須藉助特殊機具設備即可進行者。

4.1.1 碼頭初步檢測時機（頻率）

(1) 定期檢測

每年檢查 2 次，建議檢測時間為 3 月~4 月與 9 月~10 月各實施檢查一次。

(2) 不定期檢查

如有突發事件或發生重大災害時隨即施行檢測，如地震、颱風等。

4.1.2 碼頭初步檢測單元區分

依碼頭本身構造分段或適當長度 (50m~100m)。

4.1.3 碼頭初步檢測評估表

檢測依據總則檢測工作程序規定進行，依序為目標規劃、單元（範圍）編定、檢測操作即表格填寫、結果評估，以下則針對表格填寫進行說明。

(1)、碼頭基本資料

碼頭基本資料包括有隸屬港口，碼頭編號，碼頭長度、縱深，船隻靠泊（船席）水域深度，包括原設計水深及調查水深；靠泊船隻屬性，如為貨櫃碼頭、雜散貨輪碼頭、化學品碼頭等；靠泊船級、最大噸位；碼頭構造型式等。

(2)、過去檢測及維修歷史、檢測者及單位

碼頭過去之檢測歷史如檢測日期，檢測區分為初步或細部檢測，過去檢測結果，如有特別註記或維修者，應附上維修記錄檔案名稱、編號等；檢測單位及檢測者姓名等，均有助於檢測工作之落實、追蹤及考核，也有助於未來作檢測結果之判定及評估工作。

碼頭 基 本 資 料	隸屬港口：		碼頭編號：		檢測區段：	
	建造日期：		啟用日期：			
	靠泊船級	原設計：		實際使用：		
	碼頭法線	長度：	水域深度	原設計：		
	面版標高：	縱深：		目前：		
	靠泊船隻屬性	<input type="checkbox"/> 貨櫃 <input type="checkbox"/> 化學(油)品 <input type="checkbox"/> 雜貨輪 <input type="checkbox"/> 其他				
	碼頭構造型式	<input type="checkbox"/> 重力式 <input type="checkbox"/> 版樁式 <input type="checkbox"/> 棧橋式 <input type="checkbox"/> 其他				
	上次檢測	時間：	單位：	區分：	結果：	

(3)、整體結構變形檢測

整體結構變形檢測中包含之檢測項目有：碼頭壁體(或堤體)傾斜、位移檢測，碼頭面法線改變檢測，碼頭面沈陷檢測，碼頭沉箱與後線連接縫檢測。

(4)、構造主結構體檢測

碼頭構造主結構體包含範圍甚廣，但由於主體結構的主要部份均位於水下，初步檢測時以人工或簡單儀器為主，僅能以碼頭面或露出水面之碼頭（或堤體）岸壁等破壞檢測進行之。如碼頭面之裂縫檢測包括裂縫長度、裂縫寬度及裂縫深度等；鋼筋之相關特性檢測如鋼筋外露程度，鋼筋腐蝕探測；混凝土材料檢測則包括混凝土強度劣化檢測，混凝土保護層厚度檢測等；構造伸縮縫檢測則包括有岸肩伸縮縫破壞檢測，及其他如面版伸縮縫等之檢測。

調查項目及評估值		破壞程度 D	破壞範圍 E	破壞影響 R	(D+E)×R
整體結構變形及主結構體破壞檢測	101 碼頭法線				
	102 碼頭岸壁				
	103 碼頭岸肩				
	1031 (岸肩)混凝土強度				
	1032 (岸肩)保護層厚度				
	1033(岸肩)鋼筋腐蝕探測				
	104 碼頭面(版)沈陷				
	1041 (面版)混凝土強度				
	1042(面版)保護層厚度				
	1043(面版)鋼筋腐蝕探測				
	105 鋼版腐蝕檢測				
主體結構破壞評估		$ID_p = \sum_{i=1}^{N_p} (D_i + E_i) \times R_i / \sum_i R_i =$			

(5)、鋼版樁碼頭或鋼管樁碼頭腐蝕目視檢測

鋼版樁或鋼管樁等金屬材料位於海洋環境中，受到海生物附著以及電化學作用而腐蝕為經常發生者，故在碼頭結構之初步檢測時，亦應儘可能加以進行。其檢測項目包括有：鏽蝕位置檢測，鏽蝕範圍檢測，海生物附著檢測以及鏽蝕厚度檢測。檢測時須有相當經驗人員才能進行，其檢測方法在第三章中已有詳盡介紹，評估及判定方式在下節中將有較詳細敘述。

(6)、碼頭結構附屬設施檢測

碼頭非主結構體的檢測包括有：護舷材（或防舷材）破損、劣化及裂縫檢測；繫船柱基礎裂縫、柱體損壞、移位及變形檢測；其他附屬設施如起重機軌道、防颱固定座、擋車牆、給水排水設備、照明設備、供電供油相關之管線、管路等。有時候由此非主結構之破壞中，可發現主結構體不易被檢測之潛在破壞危險性。

非主結構設施破壞檢測	111 護舷材				
	112 繫船柱				
	113 擋車牆				
	114 排水給水設備				
	115 照明設施				
	116 油電管路				
	117 起重機軌道				
	118 防颱固定座				
	119 其他項目				
	附屬設施破壞評估	$ID_A = \sum_{i=1}^{N_A} (D_i + E_i) \times R_i / \sum_i R_i =$			

4.2 防波堤初步檢測

4.2.1 防波堤初步檢測時機（頻率）

(1) 定期檢查

每年檢查 2 次，建議檢測時間為 3 月~4 月與 9 月~10 月各實施檢查一次。

(2) 不定期檢查

發生重大災害時隨即施行檢測，如地震、颱風等。

4.2.2 防波堤初步檢測單元

若屬沉箱式防波堤以個別沉箱為檢測單位，其他形式防波堤則以適當長度為單位（20m~40m）。

4.2.3 防波堤初步檢測評估表

檢測依據總則檢測工作程序規定進行，依序為目標規劃、單元（範圍）編定、檢測操作即表格填寫、結果評估，以下則針對表格填寫進行說明。結構主體檢測工作進行以整體目視檢測優先於儀器檢測，而使用儀器檢測時又以相同性質項目為優先順序，如此依序完成單元檢查重點。當結構體因形式差異而有檢測表中未涵括之項目時，則填寫於其他項目中，

(1)、防波堤基本資料

防波堤基本資料包括有隸屬港口，堤防編號，防波堤位置，防波堤長度、堤寬，水域深度，包括原設計水深及調查水深；防波堤構造方式等。

(2)、過去檢測及維修歷史、檢測者及單位

防波堤過去之檢測歷史如檢測日期，檢測區分為初步或細部檢測，過去檢測結果中如有特別註記者，附上維修記錄檔案名稱、編號等。

堤 防 基 本 資 料	隸屬港口：		堤防位置、編號：		
	建造日期：		啟用日期：		
	防波堤標高：	長度：	水域深度	原設計：	
		寬度：		目前：	
	防波堤構造型式	<input type="checkbox"/> 沉箱堤 <input type="checkbox"/> 拋石堤 <input type="checkbox"/> 合成堤 <input type="checkbox"/> 其他			
	前次檢測紀錄	時間：	單位：	區分：	結果：

(3)、整體結構變形檢測

防波堤整體結構變形檢測中包含之檢測項目有：堤體傾斜、位移檢測，堤面沈陷或高度改變檢測，防波堤沉箱與堤前消波塊位移檢測，堤頭損壞等。

(4)、構造主結構體檢測

防波堤構造主結構體以沉箱、混凝土塊或結合堤底拋石所組成，同樣大部分主體結構位於水下，初步檢測時僅能以堤面或露出水面之堤體岸壁等破壞檢測進行之。如堤面或沉箱之裂縫檢測包括裂縫長度、裂縫寬度及裂縫深度等；鋼筋之相關特性檢測如鋼筋外露程度，鋼筋腐蝕探測；混凝土材料檢測則包括混凝土強度劣化檢測，混凝土保護層厚度檢測等；構造伸縮縫檢測則包括有岸肩伸縮縫破壞檢測，及其他如面版伸縮縫等之檢測。

	調查項目	破壞程度 D	破壞範圍 E	破壞影響性 R	(D+E)×R
整體結構變形及主結構破壞檢測	201 堤面沈陷傾斜				
	2011 混凝土強度				
	2012 保護層厚度				
	2013 鋼筋腐蝕探測				
	202 堤頭損壞				
	203 沉箱破損				
	204 胸牆壁體傾斜				
	205 消波塊移位				
	206 胸牆裂縫				
	210 其他				

4.3 港灣結構初步檢測劣化評估值決定

在碼頭結構初步檢測之各個項目決定之後，檢測後構造物之損壞狀況評估參考交通部國道高速公路局「高速公路橋樑管理系統」中對於高速公路橋樑檢測之損壞分類，評估時區分為損壞程度(D)、損壞範圍(E)，及該構件損壞對整體結構之影響性(R)，稱為D.E.R 評估法。

損壞程度(D)等級分為六等，級別為0級到4級時分別代表檢測對象之損壞程度，隨級別之增加其損壞程度亦隨之提高，級別為“5”時則代表該檢測項目無法判定或無法檢測，通常代表進一步細部檢測之必要性。至於級別為1級到4級時代表檢測對象之損壞程度，其等級之決定於表3.3中以敘述性之方式分別描述各種構件或材料破壞時之現象與等級。

E 值為構件破壞範圍或破壞構件參數，以構件破壞數與受測構件數的百分比，或破壞面積與受測面積的百分比為參考，依其所座

落範圍訂出“1”到“5”的等級，以百分比乘以十後，捨棄小數點為E值，大於5之值均以5填入表格。

至於R值為重要性指數，亦可視為各檢測項目中之權值，其值之決定端視該項目（構件）損壞對構造物安全性、功能性之影響比重。本手冊參照港工結構設計基準及相關力學觀點，並經實地勘查與檢討，將R值先行訂定於各檢測評估表中。若R值為“0”時則代表該檢測項目在該受檢測碼頭中並不存在，因本檢測表必須包括所有在初步檢測階段中能涵蓋的項目，該項目很可能因碼頭形式之差異而不存在。

4.4 港灣結構物初步檢測結果判定

初步檢測為第一階段檢測，初步檢測工作完成後，即進入檢測結果初評階段，整體檢測結果之判定及評估時，其標準主要有兩大部分：其一為結構安全是否有問題？其二為構造之功能性是否有問題？依據檢測結果，亦即表格3.1及表3.2中各項檢測項目之檢測值經下列公式換算後，其值所在範圍而決定最後等級。

$$ID_1 = \frac{\sum_i^N (D_i + E_i) R_i}{\sum_i^N R_i}$$

式中 ID_1 為初步檢測危險度指標(Index of Dangerousness) , D_i 、 E_i 、 R_i 分別為各項檢測中檢測人員填寫之檢測值， N 則代表檢測項目之總數。 ID_1 值越高則代表危險度越高，數值分配範圍為0到9間，其與判定結果關係，在初步檢測階段分成三個等級並條列如下：

- 1、第一等級為安全無虞，無須進行細部檢測或增加檢測頻率；
 $0 \leq ID_1 < 2$
- 2、第二等級為安全無虞，無須進行細部檢測但於未來必須增加檢測頻率； $2 \leq ID_1 < 4$
- 3、第三等級為功能堪虞，小型立即性維修可改善功能狀況者者應立即進行（非主體結構之 $ID \leq 4$ ，但其他主結構體之 $ID < 4$ ），或必須進行第二階段之細部檢測以進一步了解構造物破壞狀況（主結構體或整體檢測值之 $ID \leq 4$ ）

表 4.1 港灣碼頭初步檢測評估表

碼頭 基本 資料	隸屬港口：		碼頭編號：		檢測區段：					
	建造日期：		啟用日期：							
	靠泊船級		原設計：		實際使用：					
	碼頭法線版面標高：		長度： 縱深：		水域深度					
	靠泊船隻屬性		原設計： 目前：							
	碼頭構造型式		<input type="checkbox"/> 貨櫃 <input type="checkbox"/> 化學(油)品 <input type="checkbox"/> 雜貨輪 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/> 重力式 <input type="checkbox"/> 版樁式 <input type="checkbox"/> 棧橋式 <input type="checkbox"/> 其他							
上次檢測		時間：		單位：		區分：		結果：		
調查項目及評估值		破壞程度 D		破壞範圍 E		破壞影響性 R		(D+E)×R		
整體 結構 變形 及 主結 構體 破壞 檢測	101 碼頭法線平直						4			
	102 碼頭岸壁傾斜						5			
	103 岸肩伸縮縫						4			
	1031(岸肩)混凝土強度						2			
	1032(岸肩)保護層厚度						2			
	1033(岸肩)鋼筋腐蝕探測						2			
	104 碼頭面(版)沈陷						4			
	1041 (面版)混凝土強度						2			
	1042 (面版)保護層厚度						2			
	1043 (面版)鋼筋腐蝕探測						2			
105 鋼版腐蝕檢測						3				
主體結構破壞評估		$ID_p = \sum_{i=1}^{N_p} (D_i + E_i) \times R_i \Big/ \sum_i R_i =$								
非主 結構 設施 破壞 檢測	111 護舷材						3			
	112 繫船柱						2			
	113 擋車牆						1			
	114 排水給水設備						2			
	115 照明設施						2			
	116 油電管路						2			
	117 貨櫃起重機軌道						2			
	118 防颱固定座						2			
	119 其他									
	附屬設施破壞評估		$ID_A = \sum_{i=1}^{N_A} (D_i + E_i) \times R_i \Big/ \sum_i R_i =$							
整體破壞評估(初步檢測)		$ID_1 = \sum_{i=1}^N (D_i + E_i) \times R_i \Big/ \sum_i R_i =$								
檢測單位：		檢測人：			檢測時間：					

*式中 D 之評估值可參照表 4.3 填寫，E 為所佔範圍%×10 以整數 0 到 5 表示

*N_p 及 N_A 分別為主結構及附屬設施受檢項目數，總檢測項目數 N=N_A+N_p

表 4.2 防波堤初步檢測評估表

堤防 基本 資料	隸屬港口：		堤防位置、編號：		
	建造日期：		啟用日期：		
	防波堤標高：	長度： 寬度：	水域深度	原設計： 目前：	
	防波堤構造型式	<input type="checkbox"/> 沉箱堤 <input type="checkbox"/> 拋石堤 <input type="checkbox"/> 混成堤 <input type="checkbox"/> 其他			
	上次檢測	時間：	單位：	區分：	結果：
調查項目及評估值		破壞程度 D	破壞範圍 E	破壞影響性 R	(D+E)×R
整體 結構 變形 及 主結 構體 破壞 檢測	201 堤面沈陷傾斜破壞			5	
	2011 混凝土強度			4	
	2012 保護層厚度			2	
	2013 鋼筋腐蝕探測			2	
	202 堤頭損壞			2	
	203 沉箱破損			5	
	204 胸牆壁體傾斜			4	
	205 消波塊移位流失			3	
209 胸牆裂縫			4		
整體破壞評估(初步檢測)		$ID_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (D_i + E_i) \times R_i}{\sum_{i=1}^N R_i} =$			
檢測單位：		檢測人：		檢測時間：	

*式中 D 之評估值可參照表 4.3 填寫，E 為所佔範圍%×10 以整數 0 到 5 表示

表4.3 港灣碼頭初步檢測劣化程度與評估值關係-1

檢測位置	劣化現象	劣化程度	D 值
碼頭壁體	傾斜、破損、混凝土剝離龜裂	1. 混凝土輕微剝落且鋼筋尚未露出，或鋼筋部份露出且無腐蝕現象	2
		2. 混凝土龜裂，鋼筋完全露出，無腐蝕現象。鋼筋部份露出，而且有腐蝕現象。壁體傾斜達 10~15 度時	3
		3. 可目視出傾斜或岸壁鋼筋完全露出而且腐蝕預力管露出。傾斜達 15 度以上時	4
碼頭法線	變形、扭曲	1. 儀器檢測出法線偏移、扭曲	3
		2. 可目視觀察出法線偏移、扭曲	4
碼頭面版	龜裂、沈陷、材質劣化	1. 面版混凝土輕微剝落或龜裂開且鋼筋尚未露出，或鋼筋部份露出且無腐蝕現象	2
		2. 儀器檢測出輕微沈陷，或面版鋼筋完全露出，無腐蝕現象	3
		3. 可目視出沈陷、崩塌，或面版鋼筋完全露出而且有腐蝕現象	4
混凝土強度	劣化、不足	1. 強度不足為 10% 以內	1
		2. 強度不足為 20% 以內	2
		3. 強度不足為 30% 以內	3
		4. 強度不足達 30% 以上	4
保護層厚度	不足	1. 厚度不足為 20% 以內	1
		2. 厚度不足為 30% 以內	2
		3. 厚度不足為 40% 以內	3
		4. 厚度不足達 40% 以上	4
鋼筋腐蝕探測	腐蝕	1. 無明顯的鏽蝕區域	1
		2. 局部區域有鏽水出現	2
		3. 帶狀區域的鏽蝕、混凝土出現裂縫	3
		4. 一半區域的鋼筋鏽蝕，混凝土出現紅橙色片狀剝落	4
鋼版腐蝕檢測	鏽蝕位置	1. L.W.L.至平均低潮位附近無明顯鏽蝕	1
		2. 平均低潮位附近起，於 L.W.L.附近可見紅橙色生鏽或皆見不到	2
		3. 於 L.W.L.至海底，有連續性的帶狀鏽蝕區分布	3
		4. H.W.L.以上的飛沫帶及平均低潮位接近 L.W.L.的附近，在鋼版樁表面有明顯凹洞及氧化物剝落現象	4

表 4.3(續) 港灣碼頭初步檢測劣化程度與評估值關係-2

檢測位置	劣化現象	劣化程度	D 值
鋼版腐蝕 檢 測	鏽蝕範圍	1. 無明顯的鏽蝕區域 2. 局部區域有鏽蝕集中 3. 受到漂流物反覆侵蝕，形成帶狀區域的鏽蝕 4. 3/4 區域出現紅橙色的鏽蝕，且有明顯的凹洞或破洞	1 2 3 4
岸肩伸縮縫	變形、破壞	1. 接縫處雜屑堆積使伸縮縫功能減弱 2. 埋入接頭上方之材料開裂，彈性材料變質但仍具水密性 3. 合成之材質開裂、伸展接頭完全被密封、壓力封完全掉入膨脹缺口、彈性元件開裂等	2 3 4
護舷材	開裂、材質劣化	1. 材質表面褪色、輕微劣化，靠船時有輕微龜裂現象 2. 材質表面劣化明顯，靠船時能明顯觀察到龜裂現象 3. 材質老化、構件變形、脫落，靠船時開裂過大以失去避振功能	2 3 4
繫船柱	破損、變形	1. 材質已有鏽損狀況，基座無明顯龜裂情形 2. 材質鏽損狀況明顯，基座有龜裂情形 3. 材質鏽損甚至剝落，基座龜裂擴大	2 3 4
擋車牆	破損、變形	1. 材質表面已有龜裂情形 2. 材質表面有明顯龜裂，基座有崩塌情形 3. 材質龜裂擴大或多處崩塌、破損、位移	2 3 4
排水、給水 設備	破壞、斷裂	1. 破損而有滲水現象 2. 斷裂失去功能	3 4
照明設施	破 壞	1. 部份損壞而只能發揮部份功能 2. 大部損壞失去功能性	3 4
油電管路	破 壞	1. 破損而有滲油、漏電現象， 2. 斷裂而失去功能性	3 4

第五章 細部檢測及評估

5.1 港灣碼頭細部檢測

細部檢測為第二階段的結構安全檢測，必須配合結構物非破壞性檢測儀器或其他更深入之檢測方法，對港灣結構進行細部構材檢測，進入第二階段細部檢測工作者有幾個特性，一是目視檢測無法行使或檢測對象不易進行者，二為經初步檢測判定結果必須進行細部檢測者，三為重大災害或重大事故發生後之緊急檢測，四為工程維修進行中有特殊需求者。

5.1.1 碼頭細部檢測時機（頻率）

(1) 定期檢查

依初步檢測之結果必須實施細部檢測者，每年實施1次檢測，建議檢測時間9月~10月。

(2) 不定期檢查

發生重大災害時隨即施行檢測，如地震、颱風或靠船不慎之碰撞等。

5.1.2 碼頭細部檢測單元

依碼頭本身構造分段或適當長度（50m~100m）。

5.1.3 碼頭細部檢測項目及要領

細部檢測時對於不同形式的碼頭雖有共同檢測項目，但檢測重點有不同強調處，因此細部檢測項目依照碼頭及堤防型式不同而有所區分，主要以目前台灣各港區使用較多的碼頭結構型式，分為重力式碼

頭、版樁式碼頭、棧橋式碼頭以及沉箱式碼頭。

5.1.4 碼頭基本資料

碼頭基本資料在細部檢測階段中，除了包括在第一階段初步檢測表中之所有基本資料之外，並將加入碼頭坐落位置地盤屬性資料，液化潛能評估資料，同種類碼頭下部結構（ Infra-structure ）形式，如以重力式碼頭為例，其下部結構可能為L型塊式、空心方塊式、方塊式、場鑄混凝土或沉箱式等，其中沉箱式碼頭在細部檢測中，與沉箱式防坡堤將另組成一份表格。下部結構材料亦必須填註於細部檢測評估表中。

5.1.5 基礎地盤調查

不管任何形式的碼頭結構或防坡堤構造物都必須座落在基礎地盤上，即使以樁基礎為主的鋼版樁碼頭或棧橋式碼頭其檢測重點也有不同強調處，其基樁所在海床之挖深或土壤變化，亦將影響到基樁的安全性。因此基礎地盤調查在細部檢測時為重要大項，但由於基礎地盤調查中部份項目必須於水下作業，有些碼頭水深超過15公尺以上，作業並不容易，宜慎重為之。基礎地盤調查的重點有：地盤所屬種類、液化潛能、沖刷及掏空檢測等。

5.2 重力式碼頭檢測重點

重力式碼頭主要依賴碼頭本身的重量來抵抗外力的作用，以避免其傾倒或滑移，故必須避免重量的損失如漏砂、混凝土塊流失或堤前空洞以致重心改變。具體檢測項目亦大部分必須於水下施作，今條列如下：

- 1、碼頭岸側背填料空洞
- 2、碼頭前側基礎掏刷

- 3、混凝土塊破損或劣化
- 4、混凝土塊或層間產生相對位移
- 5、碼頭壁體破損前傾
- 6、鋼筋腐蝕破壞檢測
- 7、混凝土保護層厚度

重力式碼頭之細部檢測之評估表建議格式如表4.1。

5.3 版樁式碼頭檢測重點

台灣各港口所使用的版樁固然形式各異，但材料則大部分以鋼鐵為主，故在檢測時亦特別以鋼鐵材料的腐蝕及保護為重點。以下為版樁式碼頭細部檢測之具體項目，並列於表4.2中。有關腐蝕之初步檢測為岸上以目視觀察為之，發現腐蝕情形嚴重時才進行本階段之檢測，檢測工作大部分必須在水下進行。

- 1、碼頭岸側背填料沈陷或空洞
- 2、碼頭基礎掏刷
- 3、水下版樁法線方向變位
- 4、鋼版樁潮間帶及海下腐蝕
- 5、版樁裂縫或破損
- 6、鋼版樁接縫開裂
- 7、鋼版樁陰極防蝕塊損耗檢測等
- 8、版樁漏砂檢測

5.4 棧橋式碼頭檢測重點

棧橋式碼頭構造與橋樑構造類似，但其基樁直接承載碼頭面版，而非有類似橋墩之構造介於基樁與橋面版中間。基樁可以為鋼料或是混凝土材料，同須考慮其腐蝕破壞情形（RC樁或PC樁可能因樁體裂縫導致鋼筋腐蝕）。針對棧橋式碼頭其檢測重點為：材料腐蝕，振動特性以及樁基礎之掏刷狀況，以下則為細部檢測項目：

- 1、碼頭面版強度及混凝土性質檢測
- 2、基樁潮間帶腐蝕及海下腐蝕
- 3、基樁基礎掏刷
- 4、陰極防蝕塊損耗檢測
- 5、碼頭靠船速度或撞擊振動監測等

棧橋式碼頭之檢測及初步評估表建議格式如表4.3。

5.5 沉箱式碼頭及防波堤檢測重點

沉箱式碼頭亦屬重力式碼頭之一種，而沉箱式防波堤則為除拋石堤以外在台灣各港區使用較多的防波堤。沉箱的結構材料主要以鋼筋混凝土製成箱型構造，故破壞時除了典型重力式碼頭的破壞現象之外，沉箱體破裂、傾倒或鋼筋外漏等亦經常發生，故其檢測重點及具體項目包括如下：

- 1、冠牆裂縫
- 2、沉箱結構裂縫
- 3、結構體鋼筋腐蝕
- 4、沉箱壁體傾斜
- 5、護基方塊沈陷、移動
- 6、拋石基礎沈陷、移動或沖刷
- 7、與混凝土材質相關之檢測
- 8、鋼筋腐蝕及保護層厚度檢測

沉箱式碼頭之檢測及初步評估表建議格式如表4.4。

5.6 拋石堤檢測重點

拋石堤亦為港灣常用的堤防構造方式之一，尤其以水深較淺處效果較佳。拋石堤由於堤身具有孔隙，海水在堤身流進流出時可能造成掏空作用，進而影響整體結構的穩定性，以致造成堤面損壞。故堤面有不均勻沈陷現象或損壞裂縫時應特別注意，以下為拋石堤具體檢測

項目：

- 1、不均勻沈陷
- 2、冠牆裂縫
- 3、冠牆壁體傾斜
- 4、堤面裂縫
- 5、拋石基礎沈陷、移動或沖刷

5.7 港灣結構細部檢測劣化評估值決定

損壞程度(D)等級分為六等，級別為0級到5級時分別代表檢測對象之損壞程度，隨級別之增加其損壞程度亦隨之提高，級別為1級到5級時代表檢測對象之損壞程度，其等級之決定於表4.5中以敘述性之方式分別描述各種構件或材料破壞時之現象與等級。

E值為構件破壞範圍或破壞構件參數，以構件破壞數與受測構件數的百分比，或破壞面積與受測面積的百分比為參考，依其所座落範圍訂出“1”到“5”的等級，以百分比乘以十後，捨棄小數點為E值，大於5之值均以5填入表格。

R值為重要性指數，亦可視為各檢測項目中之權值，其值之決定端視該項目（構件）損壞對構造物安全性、功能性之影響比重。本研究參照港工結構設計基準及相關力學觀點，並經實地勘查與檢討，將R值先行訂定於各檢測評估表中。若R值為“0”時則代表該檢測項目在該受檢測碼頭中並不存在，因本檢測表必須包括所有在初步檢測階段中能涵蓋的項目，該項目很可能因碼頭形式之差異而不存在。

5.8 港灣結構物細部檢測結果評估

第二階段檢測分級中，必須將第一階段檢測中的主結構體列入考慮（尤其評等危險度較高並進行第二次檢測之項目），並將第二階段依碼頭型式不同，而進行之細部檢測結果一起列入評估。其評估方式類似第一階段可表示如下：

$$ID_2 = \frac{\sum_i^N (D_i + E_i) R_i}{\sum_i^N R_i}$$

式中 ID_2 為細部檢測危險度指標（Index of Dangerousness）， D_i 、 E_i 、 R_i 分別為各項檢測中檢測人員填寫之檢測值， N 則代表檢測項目之總數，包括細部檢測及初步檢測主結構體之受測項目（若進行重新檢測，以較新的數據為準）。 ID 值越高則代表危險度越高，數值分配範圍為0到10間，其與判定結果關係，與初步檢測階段類似分成三個等級並條列如下：

- 1、第一等級為輕微受損，結構安全及構造之功能均無虞，僅需須進行日常維修即可，但於未來必須增加初步檢測之頻率； $0 < ID_2 < 3$
- 2、第二等級為構造損壞但結構安全及構造之功能均無立即危險、應進行維修，若無法立即實施則必須在維修前進行同步監測工作； $3 < ID_2 < 6$
- 3、第三等級為嚴重損壞、結構安全有立即危險，且構造之功能亦無法發揮，必須立即停止使用該構造物並進行大部維修，或依經濟效益之考慮而拆除重建； $ID_2 > 6$

5.9 港灣結構檢測結果整體評估分級

在兩階段的檢測工作分別完成後，其整體結構之安全評估工作，除

了ID值之計算做參考之外，可以輔佐以現地檢測之相片、數據資料以及圖表等較為複雜的資訊。尤其針對結構物安全性的評估工作，牽涉複雜的結構力學行為，若能進一步進行結構力學相關之分析，對整體結構的安全能有更正確的了解。以下則將檢測評估之三項原則包括，結構安全性，構造功能性，整體考量等加以說明。

5.9.1 結構安全性原則

港灣構造破壞後安全與否，如果無法由測得之數據以建議公式計算值直接判斷時，則必須經過結構力學分析方能判定。結構理論的建立及分析中主要包含兩個部份，第一是個別構件有程度不等的破壞或材質劣化時，該構件的功能及強度分析。其次為各種構件分別有程度不等的破壞時，整體結構的安全性評估。其中由於港灣構造物不僅包含不同的材料組成，結構受外力作用時尚須考慮與海水以及土壤間的互制作用，故理論的分析中具非常大的挑戰性。考量港灣結構體之外力作用與材料性能，對碼頭結構物進行結構力學分析時，除現行一般設計使用之靜力分析外，若能配合波浪作用、地震力進行動力分析，則所得結果將更接近真實情況。

5.9.2 構造功能性原則

港灣構造物均有其應用上之各種功能，若破壞後以致功能無法正常發揮時，則龐然大物之構造即形同廢物。構造物功能性無法發揮時並不一定代表結構之安全性有問題，例如碼頭附屬設施如防舷材之破壞，使得船隻靠泊時有破壞船體外殼之虞而無法順利靠泊，即使靠泊後，由於湧浪的作用亦可能與碼頭岸壁相互碰撞，此時該結構物即屬於無法完全發揮其功能性，若未維修並將進一步造成結構之破壞而危及其安全性。本研究在初步檢測階段中已針對碼頭附屬設施，如防舷材、繫船柱等提出檢測評估方式，碼頭附屬設施檢測之結果可單獨評估，或併入主結構體之檢測結果一起評估。無論合併評估或單獨評估，一旦評定等級屬於

為安全堪虞的第三等級時，如表4.1中非主體結構之 $ID_A = 4$ ，但其他主結構體之 $ID_I < 4$ 時，小型立即性維修可改善安全或使用之功能狀況者應立即進行，以維護港灣之正常運作。

5.9.3 整體性評估原則

整體性評估中除了將第一階段檢測中的主結構體列入考慮之外，並將第二階段依碼頭型式不同，而進行之細部檢測結果一起列入評估。由以上安全性及功能性兩大原則評估後，其中無論是安全性或功能性有問題即應進行修復工作，但在決定採取何種修復措施之前，則應做整體性的評估，其中並包括非工程因素之經濟效益考量，並配合港灣整體營運採取最適切之修復措施。

表5.1 重力式碼頭細部檢測評估表

碼頭 基本 資料	隸屬港口：		碼頭編號：		
	建造日期：		啟用日期：		
	靠泊船級	原設計：		實際使用：	
	碼頭法線版面標高：	長度： 縱深：	水域深度	原設計： 目前：	
	靠泊船隻屬性	<input type="checkbox"/> 貨櫃 <input type="checkbox"/> 化學(油)品 <input type="checkbox"/> 雜貨輪 <input type="checkbox"/> 其他			
	基礎地盤資料	地盤屬性種類： <input type="checkbox"/> 第1類 <input type="checkbox"/> 第2類 <input type="checkbox"/> 第3類 <input type="checkbox"/> 第4類			
		液化潛能： <input type="checkbox"/> 高 <input type="checkbox"/> 可能 <input type="checkbox"/> 低			
	下部結構形式	<input type="checkbox"/> L型塊式 <input type="checkbox"/> 空心方塊式 <input type="checkbox"/> 方塊式 <input type="checkbox"/> 場鑄混凝土			
下部結構材料	<input type="checkbox"/> PC <input type="checkbox"/> RC <input type="checkbox"/> 場鑄混凝土				
上次檢測	時間：	單位：	區分：	結果：	
調查項目及評估值		破壞程度 D	破壞範圍 E	破壞影響性 R	(D+E)×R
下部 主 結構 體 破 壞 檢 測	301 基礎沖刷			5	
	302 碼頭滑移			5	
	302 壁體傾斜			5	
	303 壁體裂縫			4	
	3041 側牆岸壁 混凝土強度			3	
	3042 保護層厚度			2	
	3043 鋼筋腐蝕 探測			2	
	305 鋼版腐蝕檢測 (井筒式碼頭)			4	
306 漏砂檢測			3		
主體結構破壞評估		$ID_U = \sum_{i=1}^{N_U} (D_i + E_i) \times R_i / \sum_i R_i =$			
整體破壞評估(細部檢測)		$ID_2 = \sum_{i=1}^N (D_i + E_i) \times R_i / \sum_i R_i =$			
檢測單位：		檢測人：		檢測時間：	

式中 D 之評估值可參照表4.3及5.5 填寫，E 為所佔範圍%×10 以整數0到5表示

N_p 及 N_U 分別為上部及下部主結構受檢項目數，總檢測項目數 $N=N_U+N_p$

表5.2 版樁式碼頭細部檢測評估表

碼頭 基本 資料	隸屬港口：		碼頭編號：		
	建造日期：		啟用日期：		
	靠泊船級	原設計：		實際使用：	
	碼頭法線版面標高：	長度： 縱深：	水域深度	原設計： 目前：	
	靠泊船隻屬性	<input type="checkbox"/> 貨櫃 <input type="checkbox"/> 化學(油)品 <input type="checkbox"/> 雜貨輪 <input type="checkbox"/> 其他			
	基礎地盤資料	地盤屬性種類： <input type="checkbox"/> 第1類 <input type="checkbox"/> 第2類 <input type="checkbox"/> 第3類 <input type="checkbox"/> 第4類			
		液化潛能： <input type="checkbox"/> 高 <input type="checkbox"/> 可能 <input type="checkbox"/> 低			
	下部結構形式	<input type="checkbox"/> 錨錠版式 <input type="checkbox"/> 錨錠樁式 <input type="checkbox"/> 斜樁錨錠式 <input type="checkbox"/> 自立式 <input type="checkbox"/> 前斜樁式 <input type="checkbox"/> 雙重版樁式			
下部結構材料	<input type="checkbox"/> 鋼管樁 <input type="checkbox"/> 鋼版樁 <input type="checkbox"/> H型樁				
上次檢測	時間：	單位：	區分：	結果：	
調查項目及評估值		破壞程度 D	破壞範圍 E	破壞影響性 R	(D+E)×R
下部 主 結構 體 破 壞 檢 測	401 基礎沖刷			3	
	402 壁體傾斜			4	
	403 背填土沈陷			4	
	404 版樁開裂			4	
	405 鋼版腐蝕檢測			3	
	4051 鋼版厚度			5	
	4052 防蝕塊檢測			2	
	4053 漏砂檢測			4	
406 冠牆接頭檢測			2		
主體結構破壞評估		$ID_U = \sum_{i=1}^{N_U} (D_i + E_i) \times R_i / \sum_i R_i =$			
整體破壞評估(細部檢測)		$ID_2 = \sum_{i=1}^N (D_i + E_i) \times R_i / \sum_i R_i =$			
檢測單位：		檢測人：		檢測時間：	

式中 D 之評估值可參照表4.3及5.5 填寫，E 為所佔範圍%×10 以整數0到5表示

N_p 及 N_U 分別為上部及下部主結構受檢項目數，總檢測項目數 $N=N_U+N_p$

表5.3 棧橋式碼頭細部檢測評估表

碼 頭 基 本 資 料	隸屬港口：		碼頭編號：		
	建造日期：		啟用日期：		
	靠泊船級	原設計：		實際使用：	
	碼頭法線版面標高：	長度： 縱深：	水域深度	原設計： 目前：	
	靠泊船隻屬性	<input type="checkbox"/> 貨櫃 <input type="checkbox"/> 化學(油)品 <input type="checkbox"/> 雜貨輪 <input type="checkbox"/> 其他			
	基礎地盤資料	地盤屬性種類： <input type="checkbox"/> 第1類 <input type="checkbox"/> 第2類 <input type="checkbox"/> 第3類 <input type="checkbox"/> 第4類			
		液化潛能： <input type="checkbox"/> 高 <input type="checkbox"/> 可能 <input type="checkbox"/> 低			
	下部結構形式	<input type="checkbox"/> 直樁式 <input type="checkbox"/> 斜樁式 <input type="checkbox"/> 圓柱式 <input type="checkbox"/> 腳柱式 <input type="checkbox"/> 橋墩式			
下部結構材料	<input type="checkbox"/> 鋼管樁 <input type="checkbox"/> PC 樁 <input type="checkbox"/> RC 樁				
上次檢測	時間：	單位：	區分：	結果：	
調查項目及評估值		破壞程度 D	破壞範圍 E	破壞影響性 R	(D+E)×R
下 部 主 結 構 體 破 壞 檢 測	501 基樁基礎掏刷			4	
	502 基樁傾斜位移			5	
	5021 混凝土樁劣化			4	
	5022 PC,RC樁腐蝕			4	
	5023 鋼管樁腐蝕			4	
	5024 防蝕塊檢測			2	
	503 樁頂接頭檢測			3	
	5031 樁混凝土強度			2	
	5032 樁保護層厚度			2	
	5033 樁鋼筋鏽蝕			2	
	504 碼頭整體振動特性檢測			3	
主體結構破壞評估		$ID_U = \sum_{i=1}^{N_U} (D_i + E_i) \times R_i / \sum_i R_i =$			
整體破壞評估(細部檢測)		$ID_2 = \sum_{i=1}^N (D_i + E_i) \times R_i / \sum_i R_i =$			
檢測單位：		檢測人：		檢測時間：	

式中 D 之評估值可參照表4.3及5.5 填寫，E 為所佔範圍%×10 以整數0到5表示

N_P 及 N_U 分別為上部及下部主結構受檢項目數，總檢測項目數 $N=N_U+N_P$

表5.4 沉箱式碼頭及防坡堤細部檢測評估表

碼 頭 基 本 資 料	隸屬港口：		碼頭編號：		
	建造日期：		啟用日期：		
	靠泊船級	原設計：		實際使用：	
	碼頭法線版面標高：	長度： 縱深：	水域深度	原設計： 目前：	
	靠泊船隻屬性	<input type="checkbox"/> 貨櫃 <input type="checkbox"/> 化學(油)品 <input type="checkbox"/> 雜貨輪 <input type="checkbox"/> 其他			
	基礎地盤資料	地盤屬性種類： <input type="checkbox"/> 第1類 <input type="checkbox"/> 第2類 <input type="checkbox"/> 第3類 <input type="checkbox"/> 第4類			
		液化潛能： <input type="checkbox"/> 高 <input type="checkbox"/> 可能 <input type="checkbox"/> 低			
	下部結構材料	<input type="checkbox"/> PC <input type="checkbox"/> RC <input type="checkbox"/> 場鑄混凝土			
上次檢測	時間：	單位：	區分：	結果：	
調查項目及評估值		破壞程度 D	破壞範圍 E	破壞影響性 R	(D+E)×R
下 部 主 結 構 體 破 壞 檢 測	601 基礎沖刷移動			4	
	602 護基方塊沈陷移動			4	
	603 沉箱結構裂縫			3	
	604 沉箱壁體傾斜			5	
	605 冠(胸)牆裂縫			3	
	606 保護層厚度			2	
	607 鋼筋腐蝕探測			3	
	608 漏砂檢測			4	
主體結構破壞評估		$ID_U = \sum_{i=1}^{N_U} (D_i + E_i) \times R_i / \sum_i R_i =$			
整體破壞評估(細部檢測)		$ID_2 = \sum_{i=1}^N (D_i + E_i) \times R_i / \sum_i R_i =$			
檢測單位：		檢測人：	檢測時間：		

式中 D 之評估值可參照表4.3及5.5 填寫，E 為所佔範圍%×10 以整數0到5表示

N_p 及 N_U 分別為上部及下部主結構受檢項目數，總檢測項目數 $N=N_U+N_p$

表5.5 港灣碼頭細部檢測劣化程度與評估值關係-1

碼頭型式	檢測重點	劣化現象	劣化程度	D 值
重力式碼頭	基礎冲刷	刷深、沈陷、基礎護石位移	1. 基礎顯示刷深現象，基礎護石觀察出沈陷、位移情形 2. 基礎嚴重刷深現象，基礎護石嚴重沈陷或移動情形	3~4 4~5
	側牆岸壁混凝土剝離龜裂	傾斜、破損、混凝土剝離龜裂	1. 混凝土輕微剝落且鋼筋尚未露出，或鋼筋部份露出且無腐蝕現象。 2. 混凝土龜裂，鋼筋完全露出，無腐蝕現象。鋼筋部份露出，而且有腐蝕現象。 3. 可目視出傾斜或岸壁鋼筋完全露出而且腐蝕預力管露出。	2 3~4 4~5
	漏砂檢測	漏砂	1. 牆面裂縫已可觀查出漏砂 2. 背填砂經由大型破洞漏出，或孔洞內看不到砂	3~4 4~5
	壁體滑移	滑移	1. 滑移值達20公分~40公分。 2. 滑移值大於40公分。	3~4 4~5
版樁式碼頭	版樁開裂	開裂長度、寬度	1. 開裂長度達10公分至20公分 2. 開裂長度達20公分至30公分 3. 開裂長度達30公分以上	2 3 4~5
	鋼版厚度	不足	1. 平均厚度不足為5%以內。 2. 平均厚度不足為10%以內。 3. 平均厚度不足為20%以內。 4. 平均厚度不足達20%以上。	1 2 3 4~5
	鋼版腐蝕檢測	腐蝕	1. 無明顯的鏽蝕區域。 2. 局部區域有鏽蝕集中。 3. 帶狀區域的鏽蝕、並有局部小型穿孔現象。 4. 連續性多範圍鏽蝕，鋼版樁表面穿孔範圍擴大且有嚴重漏砂現象。	1 2 3 4~5
	防蝕塊檢測	鏽蝕位置	1. 陰極防蝕塊損耗達設計數量 1/3時。 2. 陰極防蝕塊損耗達設計數量 1/2時。 3. 陰極防蝕塊損耗達設計數量 2/3時。	2 3 4

表5.5 (續) 港灣碼頭細部檢測劣化程度與評估值關係-2

碼頭型式	檢測重點	劣化現象	劣化程度	D 值
棧橋式碼頭	基樁傾斜	基樁傾斜、位移	1. 原設計非傾斜基樁產生傾斜現象 2. 多支基樁均產生傾斜或傾斜已造成結構破壞	3~4 4~5
	鋼管腐蝕檢測	腐蝕、穿孔	1. 無明顯的鏽蝕區域。 2. 基樁局部區域有鏽蝕集中。 3. 帶狀區域的鏽蝕、並有局部小型穿孔現象。 4. 連續性多之鋼管樁鏽蝕，鋼管樁表面穿孔範圍擴大。	1 2 3 4
	樁頂接頭檢測	鬆動、破損	1. 樁頂接頭稍有破損現象。 2. 樁頂接頭破損造成連結問題或附近結構之破壞。	3~4 4~5
沉箱式碼頭	基礎沖刷	刷深、沈陷、基礎護石位移	1. 基礎顯示刷深現象，基礎護石觀察出沈陷、位移情形 2. 基礎嚴重刷深現象，基礎護石嚴重沈陷或移動情形	3 4
	側牆岸壁混凝土版	傾斜、破損、混凝土剝離龜裂	1. 面版混凝土輕微剝落或龜裂開且鋼筋尚未露出，或鋼筋部份露出且無腐蝕現象。 2. 儀器檢測出輕微沈陷，或面版鋼筋完全露出，無腐蝕現象。 3. 可目視出沈陷、崩塌，或面版鋼筋完全露出而且有腐蝕現象。	2 3~4 4~5
	漏砂檢測	漏砂	1. 牆面裂縫已可觀查出漏砂 2. 背填砂經由大型破洞漏出，或孔洞內看不到砂	3~4 4~5
	沉箱面版鋼筋腐蝕	腐蝕	1. 無明顯的鏽蝕區域。 2. 局部區域有鏽蝕集中。 3. 帶狀區域的鏽蝕、混凝土出現紅橙色成帶狀剝落。 4. 一半區域的鋼筋鏽蝕，混凝土出現紅橙色剝落達構件 1/3 的範圍。	1 2 3 4