

高雄地區混凝土構造物腐蝕調查及防蝕策略之探討

王和源*、林仁益、王耀南

The Study of Concrete Construction Corrosion Investigation and Anti-corrosion Application in Kaohsiung Area

H. Y. Wang*, J. Y. Lin, Y. N. Wang

摘要

高雄地區因受臨海地理環境之影響，港口與都市關係密不可分，海岸工程在本地之經濟建設是不可或缺的一環，但由於面臨海水侵蝕的環境影響，結構物混凝土常在未達五十年之設計年限，即發生結構劣化、功能不足導致須拆除或停用的結果。本文以高雄地區捷運工程之混凝土構造物為例，詮釋如何能利用高性能混凝土，引入其「適當漿量，且漿量愈少耐久性愈佳」之配比理念，並於混凝土中添加卜作嵐材料，降低混凝土中所含的水及水泥，進而增進結構物整體之耐久性。對於海岸工程建設量日益龐大之高雄地區而言，如將高性能混凝土應用於混凝土防蝕工程之設計及修補維護，對於減緩海岸地區結構物之侵蝕將具莫大之意義，就結構物整體營運效益而言，不啻為最經濟的選擇。

關鍵字：高雄地區；混凝土構造物；防蝕；捷運。

ABSTRACT

The relationship between harbors and cities cannot be split in Kaohsiung area, because of the effect of geographical environment adjoining ocean. Coastal engineering is an indispensable part for the economic development in Taiwan. The structure concrete which is less than fifty years has structure deterioration and insufficient function to result in being dismantled or stopped to use due to the effect of corrosion environment adjoining ocean.

This article will take concrete construction of Kaohsiung rapid transit engineering as an example. It annotates how to use high performance concrete introducing its mixture proportioning method, which is being suitable paste amount, and the less paste amount is, the more durability is. Adding on pozzlanic materials reduces the amount of water and cement in concrete and then enhances the integral durability of construction. To Kaohsiung area for increasing construction quantity of coastal engineering, if we could apply high performance concrete to the anti-corrosion design and repairing maintenance of concrete, it has great significance to slow down the corrosion of the construction in coastal area. It is also the most economical choice to entire operation effect of constructions.

Keywords: Kaohsiung area; Concrete construction; Corrosion; Rapid transit.

1. 前言

高雄地區構造物大部份以混凝土為主要結構材料，混凝土的優點為經濟性、耐久性、施工方便、原料取得容易等各項優點，但高雄地區海岸構造物以不到五十年的使用年限，就產生受損嚴重或倒塌，導致結構物岌岌可危，如圖 1、2 所示，主要原因為海洋環境的侵蝕，所以混凝土的耐久性在高雄地區海岸構造物較難表現。

近年來國外海域環境下採用高性能混凝土之工程案例如表 1^[1] 來解決海洋環境的侵蝕，國內案例有海洋生物博物館、彰濱工業區^[2] 等應用，其成效有目共睹。於九十一年內政部頒布的結構混凝土施工規範、結構混凝土設計規範，有利於高性能混凝土應用於 BOT 工程，如近期高雄市前金行政中心北側立體停車場 BOT 案、巨蛋體育館 BOT 案，及正進行中的高雄捷運工程，期能應用高性能混凝土(56天齡期氯離子滲透電量小於 2000 庫侖、電阻值大於 20 K Ω -cm、符合設計抗壓強度及所需之工作性)的耐蝕性達成 BOT 專案工程混凝土之耐久性要求。

2. 高雄地區海岸構造物現況

2.1 高雄地理環境描述

高雄位於台灣的南端，西扼台灣海峽，南臨巴士海峽，為印度洋和東北亞航運中心重要轉運港，是國際第三大港，高雄市依台灣省各地區環境與 ISO 腐蝕分類表屬 C4 分區^[3]，造成位於高雄地區的混凝土構造物受海洋環境的侵蝕是相當重要的課題。

依我國結構混凝土施工規範對不同鹽害環境區分，以高雄市旗津區或高雄 85 國際廣場為例，就可列為重鹽害區或鹽害區域或工業區，故高雄混凝土構造的施築均需重視其受鹽害的影響。

2.2 海岸構造物劣化分析

2.2.1 腐蝕環境

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。依高雄捷運紅橘線沿線各鑽孔資料顯示，部份鑽探孔土壤及水質呈鹼性，或氯離子和硫酸根離子等含量較高^[4]。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。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，如表 2 所示^[4]。

2.2.2 配比設計不當

規範是設計者與施工者之間溝通的管道，規範之良窳對混凝土整體品質有絕對的影響。早期的規範由摸索階段進入較明確時，有知之士即將所有片斷知識及國外規範融入規範中，所以初期泥水匠採用 1:2:4、1:3:6 或 1:4:8 之體積配比及規範，於 1940 年建造的高雄火車站至今仍矗立於高雄，轉而在 1980 年代成為重量配比法，此期間利用預拌混凝土及自動機械施工，於民國 60 年國家十大經濟建設時，大量採用此種預拌混凝土，對於工程貢獻尤多，然而歷經十年後，澎湖大橋的生鏽鏽腐蝕，尤其採用 ACI^[5] 之配比理念甚至更嚴苛的限制配比各材料的用量。曾為了達到高強度採用大量的水泥，又為了限制水量採用控制坍度的方式，以致造成工地施工困難，終至擅自加水，甚或嚴格要求提高工程強度，而造成水泥量過多，以致得到富貴病症狀^[6]。

2.2.3 施工品質不良

傳統上一般混凝土規範會採用較低之坍度值，然而因施工困難，搗實不完全，而易形成蜂窩現象，對品質有不利的影響。現實的問題是在工地為了泵送混凝土方便，工人常會加入大量的水，造成

嚴重泌水及析離的現象，嚴重損及品質^[2]。

2.2.4 高雄海岸地區混凝土受鹽害案例

(1) 前鎮魚市場建物

設計時間約為民國 58 年，部份柱、版結構於長期海風吹拂影響下，出現混凝土爆裂情形，部份構件混凝土之平均氯離子含量高達 1.33 kg/m^3 ，超過 CNS 規定值 0.6 kg/m^3 ，混凝土部份之耐久性已受到外在環境之嚴重侵蝕^[7]。

(2) 財政部高雄關鼓山區濱海路建物

建築物建造於民國 67 年間，臨近港區海邊，潮濕的空氣中附有氯離子及硫酸鹽等，外界環境促進混凝土之劣化而剝落^[8]，主要原因係位於海邊氯鹽侵蝕嚴重。

3. 混凝土構造防蝕策略

3.1 用水概念

依結構混凝土施工規範規定混凝土拌和用水須符合 CNS13961 [混凝土拌和用水] 之規定，其檢驗應按 CNS1237 [混凝土用水品質試驗法] 之規定，且施工所用之混凝土拌和用水應與混凝土配比設計所用者相當。

混凝土電阻係數與水泥漿量及用水量的關係，水量越大非常明顯的相對應的電阻係數愈低，表示水分子在混凝土中與離子很容易移動，其現象類似水滲透一般^[2]。

3.2 粗細粒料使用概念

依結構混凝土施工規範規定各種混凝土骨材須符合規範，包括混凝土骨材、輕質骨材、高爐爐石、粗與細骨材，骨材耐久性質需符合混凝土耐久性相關性質，且高性能混凝土採用粗砂粒徑大於 $600 \mu\text{m}$ (30號篩)^[2]。

3.3 摻料使用概念

依結構混凝土施工規範規定各種混凝土摻料須符合規範，包括輸氣摻料、化學摻料、流動化摻料、飛灰水泥用飛灰、混凝土用飛灰、水淬高爐爐渣粉及混凝土與水泥壩料用矽灰等規定。高雄捷運混凝土採用水淬高爐石等礦物摻料對高腐蝕性環境具有良好抑制效果。

而緻密配比方式係以飛灰等卜作嵐材填塞緻密砂粒的空隙，物理上能使空隙緻密，且因水泥用量減低，進而大量減少鹼之供應來源。另外，卜作嵐反應又將細緻孔隙堵塞達到多重克制效益^[2]。因此飛灰、爐石、矽灰和天然的火山灰等卜作嵐材料可提昇混凝土耐久性^[9]。

3.4 耐久性配比設計

3.4.1 減少水及水泥量

可透過調整級配使得大小粒徑骨材互填，俾能將孔隙縮小，減少水泥漿量降低潤滑漿量厚度，或放大骨材粒徑表面積，並使用減水緩凝劑或強塑劑，於「高性能混凝土特別條款」中建議，應用減水緩凝劑或強塑劑時控制水量宜少於 178 kg/m^3 混凝土，依Malhotra則建議每立方公尺混凝土小於 160 kg 之拌和水^[10]，添加卜作嵐材料，以減少水泥用量，透過卜作嵐反應交換作用，轉換易溶性之氫氧化鈣，或其他鹼性物質，成為穩固的 C-S-H 膠體，增進材料的穩定性^[11]。

3.4.2 強化界面的鍵結性

主要需降低水膠比及水泥漿量，並增加卜作嵐材料，增加固化作用。

3.4.3 阻抗及降低滲透性

有害物質在混凝土中滲透或擴散，都是透過電動勢的趨動，而添加卜作嵐材料，則電阻係數有機會提昇至 $30 \text{ K } \Omega\text{-cm}$ 以上，此點對結構混凝土是有利的。因此降低水固比及減低拌和水量以使孔隙細緻化同時減少滲透性，因高孔隙將不利於混凝土耐久性^[12]。

防蝕策略以緻密配比法，添加適量飛灰等卜作

嵐材料，填塞緻密砂粒的空隙以減少水及水泥量，為配合工作性可添加所需之強塑劑，以高性能混凝土之高防蝕能力，應用於高雄部份地區已屬 C5 為嚴重腐蝕環境有相當大的助益，以達到高耐久性的構造物。

4. 高性能混凝土應用於海岸工程

4.1 以海洋生物博物館為例

- (1) 水量宜少，但工作性要佳：基本上要求值為拌和水量應少於 160 kg/m^3 混凝土，但須有良好工作性，且無蜂窩現象。
- (2) 水膠比 (W/B)：依設計者指定之設計抗壓強度 (fc') 放大至配比目標抗壓強度 $fc'_t = fc' + \Delta fc'$ ，並綜合耐久性要求來選擇，此部份必須按試拌資料建立資料庫來設計。
- (3) 水灰比 (w/c)：無論強度高低，都必須大於 0.42 (針對 C_3S 而言)，以防水泥漿自體乾縮。
- (4) 電阻：56 天混凝土電阻值應大於 $20 \text{ K } \Omega\text{-cm}$ 。
- (5) 電滲值：56 天混凝土電滲值應小於 2000 庫侖。
- (6) 乾縮量：90 天乾縮量應小於 $450 \mu\text{m/m}^{[6]}$ 。

4.2 以高雄捷運工程為例

考量高雄捷運系統地下結構物受鹽害可能性甚大，在施工過程及營運階段可能因鹽份及有害物質之存在而影響施工品質及地下結構物壽命，因此高雄捷運所使用混凝土須訂定相關規定，包括混凝土驗證與認證如圖3^[13]所示，混凝土各組成份規範，已委託 CNLA 認可的試驗室及預拌廠之基本試驗記錄作為認證，篩選混凝土廠商及國家驗證，如廠商提送之文件審查及預拌混凝土廠以通過台灣營建研究院驗證取得優質標章 (GRMC) 為優先考量使用^[13]。

5. 結論與建議

高雄地區混凝土構造物受海水侵蝕的環境影

響，造成許多構造物未到使用年限即發生破壞，正是因為傳統混凝土配比觀念有誤造成。高雄地區已有 85 國際大樓使用高性能混凝土的經驗，所以配比、設計、施工技術和能力在高雄的預拌廠商已具有相當經驗，以 85 國際大樓驗證其距離海岸於 1 公里內，由啟用至今，混凝土品質仍相當優良，所以其抗壓強度亦與日俱增。另高雄舊火車站經六十多年後，其部份混凝土強度高達 1244 kg/cm^2 。混凝土在一般的營建工程的費用比例相當低，但是混凝土因耐久性不佳將造成整個營建工程的破壞，可見混凝土之重要性相當高，高性能混凝土的優點在於抗鹽性高，因此國外的海岸工程及高雄捷運皆將高性能混凝土列入抗蝕的結構材料，雖然材料費用較高，但以整體結構效益而言則較佳。內政部頒布結構混凝土設計及施工規範，高性能混凝土的應用已有法源依據，期待未來高性能混凝土能全面運用於高雄地區海邊之混凝土工程，藉由確實執行配比設計及驗證來提升整體構造物的耐久性。

參考文獻

1. 陳桂清，「港灣構造物現況探討」，港灣構造物安全檢測與評估研習會，2002 年 7 月，第 1 ~ 26 頁。
2. C.L.Hwang, in: "High Performance concrete Theory and Practice", James Publisher., (Taipei, 2004).
3. 胡海潮、陳俊融，「高雄捷運抗鹽防蝕考量」，2000 捷運工程技術研討會論文集，2000 年 3 月，pp. 5-1~5-22。
4. 李釗，「港灣混凝土構造物劣化探討(一)」，港灣構造物安全檢測與評估研習會，2002 年 7 月，第 2-1~2-29 頁。
5. American Concrete Institute, in: "Building Code requirement of Structural Concrete", ACI 318-95 (1995).
6. 黃兆龍、王和源、湛淵源，「混凝土耐久性設計實務」，第二屆海峽兩岸材料腐蝕與防護研討會論文集，台南，2000 年，第 73~78 頁。

7. 達立工程顧問有限公司，「前鎮漁港市場遮陽棚第一期拍賣場建物修及鑑估報告」，2001 年。
 8. 高雄市土木技師公會，「財政部高雄關高雄市鼓山區濱海一路 24 巷 2、4 號建築物鑑定案」，2002 年。
 9. G. Henry and P. E. Russell, in: "Bridge Specifications For High Performance Concrete" (2003) 1,1.
 10. Dr. Malhotra, "Fly Ash, Blast Furnace Slag, Silica Fume and Highly Reactive Metakaolin", in Proceedings of R&D and promotion of High Performance Concrete (1997) pp.163-246.
 11. N. Nakamura, M. Sakai, and R. N. Swamy, "Effect of Slag Fineness on the Engineering Properties of High strength Concrete", in "Blended Cements in Construction", Ed. by R. N. Swamy, Elsevier App. Science, London (1991) pp.302-316.
 12. "High-Performance Concretes" , in: A State-of-Art Report, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (1989-1994).
 13. 陳必貫、呂東隆，「混凝土的驗證與認證」，高雄捷運工程技術研討會(三)，2002 年 7 月，第 6-1~6-10 頁。
- 收到日期：2003 年 7 月 25 日
 修訂日期：2004 年 12 月 5 日
 接受日期：2004 年 12 月 13 日

表1. 海域環境下採用高性能混凝土之工程案例^[1]。

Table 1 The engineering case of high performance concrete under oceanic environment ^[1].

工程名稱	地點	施作時間	混凝土性能及使用量	設計考量及規範
高速鐵路之橋柱之修理	日本、Hokuriko	1991	強度 80 Mpa	
公路結構及橋樑維修	挪威	1989	水膠比 0.4 使用矽灰	NS 3473 挪威 proces code/1989
船塢岸壁維修	葡萄牙 Setubal	1991	平均強度 74 Mpa 強度 100 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 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混凝土規範
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 43,000 m 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(200 m 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 200~220 mm 空氣含量 3~5% 密度 1940 Kg/m ³ 使用量 65,000 m ³	NS3473 水深 350 m

〈接下頁〉〈Continue to next page〉

表1. (續)

Table 1 (Cont.)

工程名稱	地點	施作時間	混凝土性能及使用量	設計考量及規範
浮式橋樑(輕質骨材)	挪威北海 Bergsoysundet	1990/92	水膠比 0.40 密度 1920 Kg/m ³ 使用量 4,500 m ³	NS3473
浮式平台(石油生產)	紐芬蘭 Hibemia	1994/95	水膠比 0.34, 坍度 21 cm 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 111 m
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 22~25 cm 使用量 80,000 m ³	NS3473 水深 251 m
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 24~26 cm 使用量 224,000 m ³	NS3473 水深 303 m
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 83 m
浮式平台基礎	挪威北海 Helgrun	1993/94	平均強度 78 Mpa 水膠比 < 0.43	NS3473

表2 海砂或海水中之鹽分對混凝土性質的影響^[4]。Table 2 The influence of salt of sea-sand or seawater on concrete property^[4].

氯化鈉(NaCl)	<ul style="list-style-type: none"> • 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)	<ul style="list-style-type: none"> • 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)	<ul style="list-style-type: none"> • 硫酸根離子會造成硫酸鹽侵蝕 • 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)	<ul style="list-style-type: none"> • 造成硫酸鹽侵蝕
氯化鈣(CaCl ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • 造成鋼筋腐蝕
綜合影響	<ul style="list-style-type: none"> • 加速水泥水化, 縮短凝結時間 • 提高早期強度, 降低晚期強度 • 水溶性鹽類易造成混凝土析晶現象 • 造成硫酸鹽侵蝕和鋼筋腐蝕 • 降低混凝土耐久性



圖 1 高雄前鎮魚港鋼筋銹蝕^[7]。

Figure 1 The steel rustiness and corrosion at Cianjhen fishing port (Kaohsiung)^[7].



圖 2 旗津海岸公園混凝土剝落。

Figure 2 The concrete decaying at Qijin coastal park (Kaohsiung).

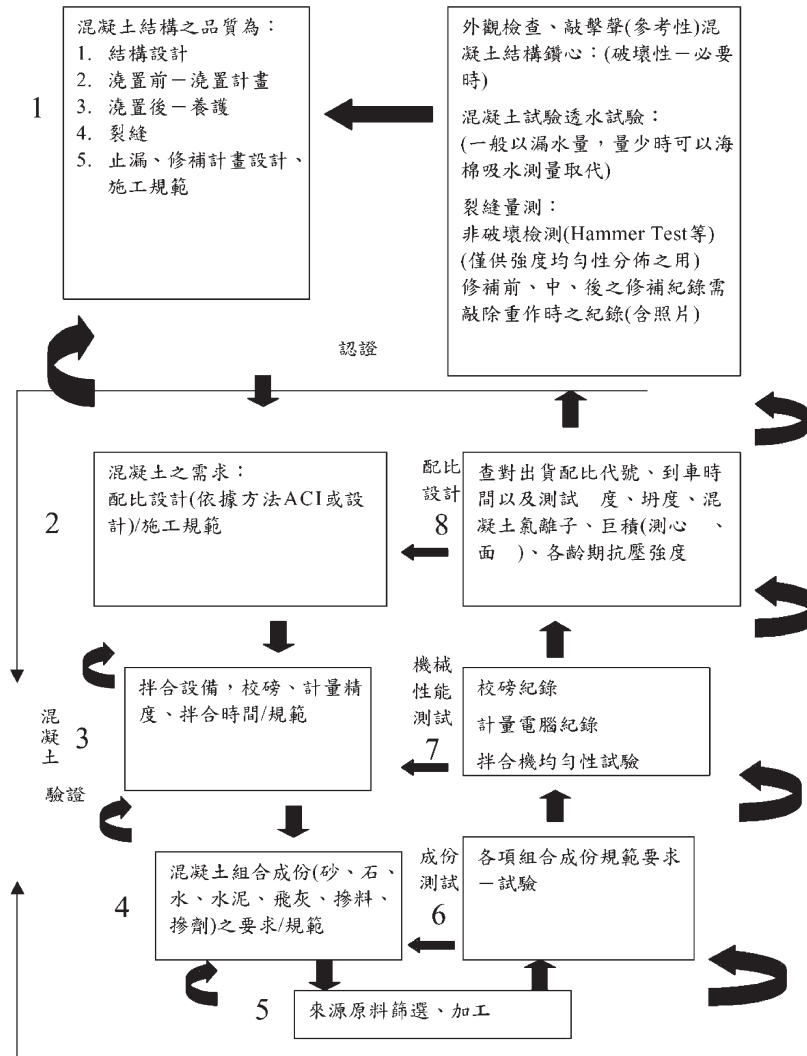


圖3 高雄捷運工程混凝土之驗證與認證^[13]。

Figure 3 The confirmation and authentication of the concrete for Kaohsiung mass rapid transit^[13].