

海洋環境中混凝土構造物之防蝕研究及實務報導

莊秋明* 論述

一、前言

鋼筋混凝土結構物曝露於易腐蝕之海洋環境中並承受重負荷之雙重錯綜複雜情況下，自易發生多種之變壞作用。探究此種現象之發生並非混凝土本身之風化作用，而是一種象徵著海洋中混凝土結構物之安全性、耐久性所引起之嚴重問題，即所謂之混凝土內鋼筋電化腐蝕現象。據研究分析及參考國外有關文獻證實鋼筋或預力混凝土結構物長時期曝露於存有氯離子 (Chloride Ions) 環境下，氯離子能滲入一般認為好品質而足夠厚度之鋼筋混凝土保護層內部導致鋼筋腐蝕。因此在海洋環境中之混凝土結構物除應具有良好品質而足夠厚度之混凝土保護層外，尚需尋求防範腐蝕之措施，尤其在預力混凝土結構物方面，更是為一非常重要之工作。該項工作在設計及施工中除必須就防蝕觀點加以考慮外，最新發展之定期性檢核技術亦須同時內於鑑察鋼筋是否發生腐蝕及其狀況。

二、本文

有關混凝土結構物在海水中之耐久性文章在長久之混凝土技術演進過程中佔有既廣泛，有趣又引人入勝之章節。過去 150 年來，有無數之職業團體，研究機構及政府機關從事於有關此方面問題之研究，並舉辦無數次之混凝土結構物耐久性及其防蝕技術研討會，同時發表過很多論文，茲將較重要而俱參考之結論及實際工作經驗資料陳述如下：

(1) 化學侵襲 (Chemical Attack)：

自從 1938 年兩位專家 Stanton 及 Meder 先生指出混凝土之抗硫酸鹽侵襲與水泥內含有 C_3A 成份有極密切關係以來，一直被認為混凝土與海

水之化學反應是學術研究課題之一，同時廣泛被假設此項海水化學反應在寒冷地區不至發生困擾問題。因此在海中混凝土施工中，對於採用低成份 C_3A 水泥並未特別予以重視。舉挪威海港之實例說明，該海港之設施自 1910 年以來普遍採用高含量 C_3A 之水泥來建造，數年前經實地調查結果發現大多數海港混凝土構造物設施都已腐損破壞⁽¹⁾。台灣各海港之混凝土結構物與沿海道路橋樑及海上之澎湖跨海大橋等之腐蝕原因雖多，但採用高含量 C_3A 之 TYPE 1 水泥建造亦為造成嚴重腐損原因之一，其實例值供大家注意參考。

Tremie placing 為一種良好之水中混凝土施工法，雖然採用高品質混凝土，並嚴格施工亦難免在施工中無法達到 100% 之品管標準導致有較大之滲透性部位。國外曾就該項施工法之混凝土構造物鑽取海上及水中各部位之試樣加以研究分析，結果發現有些水中部位之樣品，其水泥漿合石灰成份被慮釋分離而減低高達 80%，但氧化鎂含量反而增至原含量之 14 倍⁽¹⁾。由此顯示其混凝土凝聚力 (剪力) 及載重能力 (強度) 完全被海水作用所破壞無遺。惟水中混凝土經加以小心正確施工達到品管要求而完成之有些混凝土構造物部位，雖經長期曝露於未加稀釋之海水中達數十年之久，亦能保持完整及光滑之表面。

對於採用普通波特蘭水泥建造之混凝土構造物曝露於溫海水中，凡質地滲透性較高者，易導致嚴重變質，惟具有充分密質 (滲透性低) 之水中混凝土構造物雖經數十年曝露於溫海水中亦可維持良好狀況。因此為改善混凝土本身在海洋環境中易蝕之先天條件，在海中興建之混凝土構造物務須重視採用抗硫酸鹽或中等抗硫酸鹽之水泥 (如第五類或第二類水泥)，較能有效防止化

* 公路局正工程司兼規劃處副處長

學之侵襲，尤其施工中局部易發生混凝土透水性超過臨界限度之構造物更應特別重視其滲透性及水泥種類之選用。

經長期繁複之實驗結果顯示採用低成分 C_3A 之水泥混凝土，其滲透性高者仍難免遭受某程度之損害。總之，水泥混凝土耐久性越高，其臨界滲透性限度需越高。依實際施工經驗顯示波特蘭水泥混凝土構造物之水灰比必須為 0.4~0.5，而不應超過 0.5。

(2) 冰凍與溶化：

經多方面在工地及試驗室探查實驗結果，由於冰凍及溶化引起之水泥混凝土變壞，其腐蝕程度在鹽水中者較在淡水中者為嚴重。同樣情形，在加入輸氣量 (Entrained Air) 於混凝土中以獲得同一程度之抗凍效果時，在鹽水中者亦較淡水中者需要量高。這種抗凍差異，通常係歸因於混凝土空隙組織接受鹽份而生成滲透作用時所產生較高空隙內水壓力所致⁽⁴⁾。水泥混凝土專家 Warris 先生指出，混凝土中大部份之空隙在歷經長期潮濕後開始凍結時充滿水份，尤其當空隙中有鹽份存在時更容易充滿水份⁽⁶⁾。雖然在鹽水中之混凝土耐凍力較差，但高品質混凝土之變壞速率則較緩慢。混凝土之抗凍力主要是取決於凍結時混凝土中含水量之多寡及其是否達到飽和臨界點而定。因此在水面變動之高度範圍內更有利於凍害條件。故在潮水地帶之混凝土乃呈現另一型式之變壞 (腐蝕) 形態。

(3) 潮水帶之綜合影響：

在挪威海港混凝土構造物之實地調查工作中，曾就潮水帶採取被分解腐損之混凝土樣品加以檢驗，從這些樣品之化學分析中發現混凝土之水泥漿和海水之間發生離子交換而發生變壞腐損之現象與取自水面下混凝土之腐損現象相同，不同者只有腐損之輕重程度而已。雖然位於潮水帶與水中之混凝土構造物化學變壞過程相同，惟經拌用抗硫化物之水泥混凝土構造物並經長期在挪威 Trondheim 港及 Barents Seas 之潮水帶實驗結果證明其防腐損變壞之效果，並證實冰凍作用亦為混凝土變壞原因之一⁽⁴⁾。

就 Trondhim 港之試樣分析結果，混凝土含鹽量試驗並未顯示鹽結晶為促成變壞之因素，且

獲知鹽份結集於混凝土表面足以大幅降低冰凍點⁽⁴⁾。至於侵入混凝土之鹽份較量，大致依混凝土本身滲透性及自混凝土表面之蒸發率等因素而定。滲透性較高之混凝土構造物加上易蒸發 (脫水、散失) 之表面將導致鹽份濃縮量增多，因此無冰凍地帶之混凝土構造物亦易發生變壞腐損。

(4) 加勁鋼筋之腐蝕：

廣泛衆多之文獻仍一直認為鋼筋之腐蝕對海洋中混凝土構造物之耐久性與安全性構成最嚴重的威脅。混凝土專家 Wig 及 Furguson 先生早在 50 年前即對沿海岸鋼筋混凝土構造物之腐蝕之問題提出警告，如今事實證明各國沿海岸之混凝土構造物前後不斷發生腐蝕及修復又腐損之問題。舉一實例來說，在挪威海岸混凝土構造物最近經檢查結果發現幾乎全部或多或少都有某種程度之腐蝕，雖屢經整修或加以防蝕處理，惟該項蝕害仍無法防止。同樣在台灣各海港混凝土構造物與沿海岸及海上橋樑亦發生類似腐損現象，雖經整修防蝕，常無效果而終於拆除重建。混凝土構造物最易腐蝕而腐嚴之部位係曝露於乾濕交替之海水衝擊地帶⁽²⁾。倘有良好品質又屬抗硫酸鹽之混凝土完全飽和含水，則其混凝土本身腐損甚輕微，幾乎可以忽視。惟混凝土構造物常因施工品管不易控制，且受冲刷或外力之損壞及中性化致長期浸在海水中之混凝土內部鋼筋亦有嚴重之腐蝕現象⁽⁸⁾。混凝土對埋置於內部之鋼筋具有防蝕作用，主要因鋼筋在混凝土中被陽極極化後在鋼筋表面形成 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (Gamma Iron Oxide) 之保護膜所致⁽²⁾。但當混凝土被碳化，PH 值在 10 以下或當氯離子侵入鋼筋表面時，上述具有抗蝕性之保護膜則被破壞產生腐蝕，故鋼筋腐蝕速率與周遭之酸鹼性或氯化物濃度有密切之關係。

據 Shalon, Raphael 及 Mausman 三位專家研究結果，顯示位於海洋環境中之混凝土構造物內部之筋腐蝕發生前，先有氯離子超過量情形發生，這種超過量係依周遭之 PH 值而定^(3,4)。衆所周知，只要少量氯離子即能將鋼筋鈍態保護膜破壞。Baumel 及 Engell 兩位專家亦表示，倘以飽和之氫氧化鈣溶液取代混凝土，則氯化物濃度甚至少於 0.0035% 時對於鋼筋抗蝕性也會產

生某種程度之影響⁽⁸⁾。至於鋼筋之鈍性遭受部份或全部破壞之事，意味著如下之電化學作用：即鋼筋之部份表面具有鈍化穩定電位時，若其局部電化電位變成負性（陽極地帶），因潮濕混凝土體為一良好之電解質，便導致一種頗為複雜之流電電池作用沿著鋼筋表面發展。這種流電電池之電動勢（Electro motive force）視下列情況而定：(a)PH 值及其在鋼筋鄰近處水份中之氯化物濃度，(b)沿混凝土保護層溶解氧氣之轉變量⁽⁵⁾。除非混凝土發生龜裂或其保護層有缺損，一般情形混凝土之碳化並無困擾問題。位於含高濃度氯離子之海洋環境中的混凝土構造物，據檢測結果，氯離子甚至可滲透進入高強度混凝土內部。經從混凝土含水泥量 $383\text{kg}/\text{m}^3$, $W/\text{cm}=0.51$ ，位於潮水漲落水位上、下之混凝土構造物，各取出 5cm 厚混凝土保護層碎片加以測定，結果對於其吸水重量之平均含氯化物濃度分別為 2 及 10%。並從混凝土含水泥量 $313\text{kg}/\text{M}^3$, $W/C=0.56$ 位於潮水地帶之混凝土構造物檢結果獲悉其混凝土表面下 75~100mm 深之內部竟含有氯化物濃度高達 14%⁽³⁾。

據美國加州公路材料研究部（Material and Research Department of the California Division Highway）在實驗室實驗的研究結果：①混凝土水泥含量自 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 增至 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 時鹽份侵入 22mm 厚混凝土保護層內之速度延緩為 3 倍（自 60 日緩至 180 日）②當水泥含量自 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 增至 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 時，該項延緩係數約為 2（自 180 天延為 380 天）。上述研究資料顯示，有害量之氯離子有可能浸入高強度混凝土，並到達一般認為足夠厚度之保護層內部^(4,7)。

眾所周知，混凝土施預力可以減少其結構物之龜裂，推預力仍不能影響混凝土材料原本具備之透水性，且彈性撓度大之預力樑，在長期重負荷施力之下易使原有龜裂之細縫擴大，致使水氣侵入內部。更值得一提者，承受高應力之高強度鋼筋更會引起對腐蝕之敏感性。因氯化物被認為對預力鋼筋（線）具有嚴重腐蝕影響，在規畫設計預力混凝土構造物時應特別注意選用之預力鋼筋，鋼線或鋼棒。因此位於海岸，海上等易腐蝕環境下之混凝土構造物，除應具有良好品質之混

凝土保護層外，尚需尋求防範腐蝕之對策。

前人對防止混凝土內鋼筋腐蝕，尋求保護之方法已付出很大的心力，耗費長期之時間、人力及財力。在易腐蝕海洋環境中，新建之混凝土構造物偏重於採用①水氣隔離法，②腐蝕抑制劑法，③鋼筋防蝕處理法（如鍍鋅、鎳及塗裝 Epoxy 等等）。在舊混凝土構造物方面，除採用新建構造物之防蝕設計外，偏重於採用①去除內部鋼筋鐵銹並塗防蝕劑後，拌以各種和成劑之混凝土補修防蝕，②裂縫注入加成劑或水泥漿與表面噴漿修補防蝕③陰極防蝕法等等。經長期之實驗及實際防蝕工作得到的結果顯示，在新建立之混凝土構造物方面，採用鍍鋅或塗裝 Epoxy 鋼筋較適用耐久，在舊構造物方面，因各種防蝕方法均無法消除內部鋼筋原已腐蝕發生之腐蝕電流，雖經防蝕修復完工，3~5 年後該舊構造物會再發生腐蝕龜裂^(1,2)。因此目前各國均努力集中研究陰極防蝕法。在混凝土構造物之陰極防蝕法方面，美國已有相當豐富之研究成果及經驗，並已獲美國聯邦公路總署（Federal Highway Administration）證實目前在已腐蝕舊鋼筋混凝土構造物修復防蝕法中能長久防止內部鋼筋腐蝕之防蝕方法⁽⁵⁾。總而言之，混凝土構造物在設計及施工中，除必須就防蝕事宜加以考慮外，定期性檢核技術亦須及時採用於監察內部鋼筋是否發生腐蝕。對於鋼筋腐蝕之損壞，其對策應該在修復構造物或塗刷防蝕料之前必須就電解條件或腐蝕電池之產生環境優先加以改善消除始可收效。此論點為極重要之觀念，工作技術人員必須先加以瞭解。已往因內部鋼筋銹蝕致混凝土構造物龜裂破損，針對混凝土裂損加以修補之作法亦應及時改正，否則龜裂重補之工作將不斷發生，徒然浪費時間，人力及財力。

三、結 論

綜合上述，位於海洋環境中混凝土構造物，依實驗研究及實際防蝕經驗之資料，作成以下之結語：

- (1)海水中或海岸混凝土構造物之化學侵蝕問題，由於使用水泥之種類及混凝土透水性之差異、在寒冷地區亦必須（熱帶地區更需要）

注意加以防範。對於混凝土之水灰比而言， W/C 應為 0.4~0.5，不得大於 0.5。

- (2) 海洋混凝土施工中，對於抗硫酸鹽水泥 (TYPE V) 或中度抗硫酸鹽水泥 (TYPE II) 之使用必須加以重視，在海水中建造混凝土構造物時更應注意。
- (3) 雖然高強度混凝土遭受海水腐蝕較為緩慢，惟在海洋冰凍地區仍須採用加氣混凝土。
- (4) 依實地經驗得知，在海洋環境中之混凝土構造物，其耐久性與安全性為嚴重困擾之難題，一直仍是加勁鋼筋腐蝕之問題。
- (5) 依實地觀察研究得知，在經常浸沒於海水中之混凝土構造物腐蝕，雖較潮間區 (Tidal Zone) 及浪花飛濺區者緩慢，惟仍然會發生嚴重之鋼筋腐蝕現象。
- (6) 依實地觀測研析獲知，達到有害量之氯離子仍能侵入一般認為足夠厚度之高強度混凝土鋼筋保護層內部。因此在海洋環境中之混凝土構造物除應具備良好品質及足夠之保護層厚度之外，尚須採用防蝕措施，尤其在預力混凝土構造物方面更須特別加以注意。
- (7) 雖然對於混凝土內鋼筋腐蝕之防蝕方法已付出很大之心血，耗費長期之時間，人力及財力在研究各種防治腐蝕之方法，惟在海洋環境中新建混凝土構造物方面，除應提高混凝土設計及施工品質與應有之鋼筋保護層厚度外，所採用之鋼筋也應先加以防蝕處理 (如鍍鋅鋼或塗裝 Epoxy 等)。在已腐蝕之舊混凝土構造物方面，經補修防蝕後之構造物

，目前被證實持久有效之防蝕設施為外如電流陰極防蝕法。

- (8) 在設計及施工中須注意防蝕設施外，定期性檢核技術亦須及時用來監察鋼筋之腐蝕是否發生。
- (9) 混凝土構造物由於鋼筋有腐蝕、損壞問題，其對策應該在修復構造物或塗刷防蝕塗料之前，必須就電解條件或腐蝕電池之產生環境優先加以改善和消除，始可收效。

四、參考文獻

- (1) 海洋コンクリート構造物設計施工指針，日本コンクリート工業協會。(1984)
- (2) 海洋コンクリートの防食指針，日本コンクリート工學協會。(1984)
- (3) 海洋構造物建設技術の開発，日本建設省。(1980)
- (4) Odd E. Gjorv: Durability of Concrete Structures in the Ocean Environment。(1981)
- (5) John E. Slater: Criteria for adequate Cathodic protection of steel in Concrete。(1979)
- (6) J. L. Beaton, D. L. spellman, R. F. Stratfull: Corrosion of steel in Continuously Submerged Reinforced Concrete Piling。(1982)
- (7) J. L. Beaton, R. F. Stratfull: Environmental Influence on the Corrosion of Reinforcing steel in Concrete Bridge。(1975)
- (8) 鐵筋コンクリート構造物の劣化に関する調査，日本コンクリート工學協會。(1982)