

# 海洋環境下鋼筋及預力混凝土防蝕系統探討

林維明\* 論述

## Corrosion and Protection Systems for Reinforced and Prestressed Concrete in the Marine Environment

Lin, Wei-Ming

### 摘要

海洋混凝土結構物防蝕必須在整個設計與施工階段中當作一套系統來處理，而近年來在這方面之科技發展迅速之主要原因是希望降低濱海橋樑和海洋結構物之維修及換新之費用。因此，外海及浮式結構物使用混凝土製作之數量雖然日增，但已逐漸用新材料如強塑劑、矽灰、填縫劑及鍍鋅鋼筋或環氧樹脂鋼筋等。

通常腐蝕問題都可在施工前預測並加以防止，在細步設計上，參照海洋混凝土設計與施工規範；在選用材料及設計和施工之技術上作改進，並且在可能會發生腐蝕的地點採用經濟上可行之新的防蝕系統，如此可避免或降低腐蝕的發生。

### 一、前言

在海洋環境下、混凝土結構物之防蝕必須視為在整個設計與施工過程中的一套系統。將此系統定義為組成一複雜的整體的一群互制、相關及相倚之單元則防蝕系統不是簡單的施工材料和程序規範或是在一結構物上塗裝應用而已。

有效的防蝕系統須考慮使用者之需求及經費限制。設計者對腐蝕損傷之原因和嚴重性及防護方法之了解，和施工廠商雇用工人之技術及使用材料之品質等都有互相之關連性。因此在磋商合約、設計及施工期間即發展出會考慮此種相互影響的系統，則可能可以避免因為混凝土內鋼筋腐蝕所引起之昂貴維修問題。

近年來已經迅速發展預防嚴重腐蝕損害技術，其主要為：

1. 降低混凝土橋樑和其他基礎設施修理和換新之費用。

2. 因應混凝土在外海及浮式結構物之使用量日增。
3. 發揮新發展出之材料如高性能減水劑、矽灰、填縫劑和鋼筋上之熔凝塗裝等之功能。因此，現在已可經濟且實用的防治任何海洋結構物上因腐蝕所致之損害。

### 二、選擇一套防蝕系統

海洋結構物設計者首先必須瞭解要作防蝕的主要原因。業主及設計者都喜歡以經濟與風險觀點選用適當的保護系統，而近年來之研究成果和一些在進行中之研究經驗，可使他們作較明智的選擇。

#### 1. 現有測試方法

鋼筋及預力混凝土之重要性質可指出保護系統和鋼筋的性能及條件，但卻無法使用現有之測量方法作準確地測試。例如美國材料試驗學會 ASTM C876 有關混凝土鋼筋半電池電位標準量測法用於檢測腐蝕之活動性。但卻無法測量腐蝕速

\* 省交通處港灣技術研究所港工材料組組長

率或腐蝕損傷數量。同樣的，混凝土中氯化物含量之量測，並無法描述腐蝕程度或速率。這些參數也許可使用電流及電阻量測得知，例如在試驗室使用交流阻抗可量測腐蝕速率，可是卻也需再作更多之研究，才能使其能在現場廣泛的使用及解說實際發生的現象。

## 2. 最近之研究

經由已經執行的研究可使作決定者能預報保護系統之性能，近年來美國 Wiss, Janney Elstner Associates Inc (WJE) 曾執行兩個研究(1, 2)，已可定量在侵略性氯化物環境下使用各種防蝕法的混凝土中之鋼筋行為。鋼筋及預力混凝土中腐蝕活性之起始及隨後的發展可使用巨大模型的腐蝕電池電氣偵測，此類電池包括各種系統，因此可利用下列方法偵測腐蝕特性，即：

- ①量測陰極和陽極鋼筋層或各種裝配鋼筋間之電流。
- ②決定在各種鋼筋組成部份間產生電流之瞬間斷路電位 (Instant-off potential  $I_{op}$ ) 或迴電壓 (back Voltage) (電動力)。
- ③決定氯化物污染日增之混凝土中，鋼筋之半電池電位。
- ④測量鋼筋保護層的混凝土阻抗和鋼筋間的電阻。
- ⑤在陽極鋼筋之處，鑽心抽出混凝土粉狀，量測其氯化物含量，此為在剛開始腐蝕時和循環試驗終止時所作的。

根據上列量測方法計算下列腐蝕特性而得到相對的性能，而加以比較，即：

- ①當巨型電池腐蝕電流開始流動時，腐蝕啟始所需之時間。
- ②開始產生腐蝕的氯離子含量啟始值。
- ③瞬間斷路電位 ( $I_{op}$ ) 與混凝土電阻之相對值。

具有這些數據，且一般傳統性和新試探的腐蝕保護系統已經在相當嚴酷之條件下經過試驗及比較。設計及建造小組則可能對選擇何種系統更具有信心，而此項選擇也必須包括下列各項之考慮：

- ①腐蝕風險性對結構完整性及對原具有之性能的衝擊。

②腐蝕損傷修理所需之費用，是否可接近損傷處及因修理而被迫停止生產或交通的停工時間。

③結構物之使用壽命會有多大改變。

④類似系統之性能歷程。

## 3. 保護系統之需求

Beeby<sup>(3)</sup>曾比較鋼筋腐蝕影響因素，如：混凝土品質、保護層厚度及龜裂間之相對重要性。結論是龜裂對腐蝕之影響性過份被強調，而最重要的參數為保護層厚度與混凝土品質。Mehta 與 Gerwick<sup>(4)</sup>強調防蝕可減少水泥漿被濾出及降低混凝土之透水性、限制骨材與水泥砂漿和鋼筋及水泥漿界面之微裂。他們強調龜裂僅在鋼筋暴露面積大，例如鋼筋縱向龜裂情況下，才會產生顯著的腐蝕現象。

概言之，腐蝕保護必須：

- ①規定混凝土之透水性低及限制微裂以降低鋼筋表面之含氧量和減少孔隙溶液中氯化物的濃度差。
- ②由降低凍融、溫度及溼度差，減少反覆及衝擊負荷和海水中鎂鹽濾走水泥漿之影響性等來減少微裂之形成和透水性。

許多海洋混凝土結構物包括預力鋼鍵可能需作額外的防蝕措施。NCHRP 之 313 號報告<sup>(5)</sup>即特別強調錨碇/套管/套管接頭和灌漿的整個系統在防止氯化物及氧氣等侵至預力鋼材處的重要性。

## 三、防蝕系統性能描述

### 1. 海洋結構物防蝕系統歷史

海洋結構物設計者及建造者早已認知在海洋環境下混凝土會發生惡化及鋼筋發生腐蝕之可能性，因此這些結構物都根據各學會所訂定的設計與施工規範建造。例如美國混凝土學會 (ACI)，美國州公路及運輸官員協會 (AASHTO)，國際預力混凝土學會 (FIP)，挪威 Det norske Veritas (DnV)，英國標準學會 (BS)，日本土木港灣及海事協會等都定有規範，而且隨時在修正以確保耐久性。

一般而言，根據海洋結構物現場調查結果顯示其品質僅是有點退化，因此在 1982 FIP 之報告<sup>(6)</sup>歸納在許多海洋結構物之健康情形測試結

果顯示沒有因腐蝕或混凝土品質退化的大災難或重大的破壞被報導。一般腐蝕都發生在潑濺區、碼頭或橋面版樑、基樁及支撐上。

北海自1973年有許多巨型的混凝土平台被使用，這些結構物在施工階段及完工後都經由很嚴格的檢查，因此所發現有顯著損害的大都侷限於受意外的碰撞之混凝土表面。驗證當局亦已表明可減少使用期間之檢查次數，而且不需作例行的維護工作。

WJE 曾對遍及世界的預力混凝土結構物防蝕系統之性能作一概觀的調查和文獻的調查，發現海洋結構物腐蝕之損害僅發生在日本及美國佛羅里達海岸。佛羅里達有些跨海、離海面之橋樑和海洋中之混凝土樁有嚴重的腐蝕問題，嚴重者其材齡為15—20年，且限於飛沫及大氣區。這些結構物使用的水灰比為0.45—0.55，而保護層為1—2英吋（在許多地方實測值較此值為低）。而在日本方面，920座橋樑有20%已經腐蝕，惡化原因是海風挾帶氯化物；其中鋼筋和後拉式預力橋樑的腐蝕情況較先拉式預力橋樑嚴重。

根據上述調查及本所曾對國內濱海橋樑和港灣鋼筋混凝土結構物所作之調查結果<sup>(6,7)</sup>顯示腐蝕致因為不良之施工（例如保護層厚度不足，混凝土的水灰比過高及不良之搗實等）和設計不完善（例如，使用不良施工材料；橋面距離海面太低，未使用海洋混凝土設計與施工規範，或未作防蝕措施，及設計負荷無法滿足使用時之需求等）所致。

大多數在1975年建造的結構物都是使用傳統的防蝕法，即使用水灰比為0.35—0.45的高品質混凝土，其保護層至少為1英吋；而在1975年以後有些結構施工時已經配合使用高性能減水劑，矽灰、環氧樹脂塗裝鋼筋及特殊之後拉式鋼鍵處理等。這些新材料之改變逐漸變為外海結構物之標準應用。

## 2. 使用新材料之試驗結果

美國聯邦公路署近年來曾執行開發使用新防蝕材料，這些新材料是：

- 熔射結合的環氧樹脂鋼筋和含七線的預力鋼股。
- 使用低水灰比、填加高性能減水劑及矽灰摻料

製成之低透水性的混凝土。

- 熱浸鍍鋅鋼筋。
- 表面灌注矽甲烷填縫劑（silane sealers）及進行甲基丙烯酸酯塗裝（methacrylate coatings）。
- 亞硝酸鈣腐蝕抑制劑。

使用這些材料製成之124個鋼筋混凝土版，在乾濕循環海水暴露試驗下進行48週，並且於每週或每個月進行腐蝕試驗，包括腐蝕啟始之氯化物含量，半電池參考電位，瞬間斷路電位（instant-off potential）及混凝土電阻量測。根據試驗結果可得出下列結論：

- ① 熔射結合的環氧樹脂鋼筋或預力鋼鍵不會發生任何腐蝕，即使保護層厚度為1英吋。
- ② 當水灰比自0.5降至0.4，則長期的氯化物滲透性減少80%，而當水灰比再降至0.28則可減少至95%。
- ③ 不管水灰比之使用量多寡，保護層厚度為1英吋，則未塗裝的灰色鋼筋很快就會發生腐蝕，但是使用矽灰混凝土及矽甲烷填縫劑者，則在1英吋保護層厚度之試體下，可達防制腐蝕之功效。
- ④ 混凝土試體之保護層厚度為1.5，2及3英吋，即使在水灰比大於0.51（在這些試驗中，此水灰比為極大值）情況下，並未發生任何腐蝕現象。在這些試體中，鋼筋處之氯化物含量都維持在一般腐蝕臨界值以下，即水泥重的0.03%以下。
- ⑤ 填加硝酸鈣摻料者並未有顯著的延緩腐蝕發生的時間，但可降低腐蝕之嚴重性。
- ⑥ 鍍鋅鋼筋如同一般鋼筋會發展出大且持久的腐蝕電流。在此情況下會發生局部腐蝕。當混凝土中所有鋼筋都使用鍍鋅，則可大大地降低腐蝕性。
- ⑦ 經過矽甲烷填縫劑處理之試體，氯化物侵入至0.5英吋或1英吋處之數量降低約95%及99%。其中只有一個試體在29週後發現有相當輕微的腐蝕。
- ⑧ 使用甲基丙烯酸酯塗裝之混凝土試體被發現在保護層1英吋和2英吋情況下，都有顯著的腐蝕現象，此似乎是塗裝惡化和產生不均勻的保

護所致。

- ⑨ 矽灰混凝土與普通混凝土使用之水灰比為0.44時作比較，在深度大於或等於1英吋之處的氯化物侵入量減少約98%。
- ⑩ 在不加重的未塗裝預力鋼鍵之混凝土試體，腐蝕起始之氯化物含量約為水泥重之1.2%，此數據為普通鋼筋的6倍。

聯邦公路機構（FHWA）進行實體構件之試驗<sup>(3)</sup>，包括下列各種試體：

- ① 18英吋見方鋼筋柱。
- ② 18英吋見方樑。
- ③ 16英吋見方預構及預力樁。
- ④ 2.5英吋厚預構預力及現搗之橋面板（stay-in place bridge deck panel）共製作19個大型試體暴露於海水中進行乾濕循環試驗。這些試體之保護厚度均為1英吋，故並未阻止腐蝕的發生。所有試體的水灰比都是0.44，除了一個使用矽灰者，其水灰比為0.18。預構、預力混凝土為使用標準加速養生方法作加熱養生。在這些實體之構件試體，所採用之防蝕系統係選用上述192個小試體所使用的。包括環氧樹脂塗裝鋼筋及鋼鍵，鍍鋅鋼筋，矽甲烷處理之混凝土，填加亞硝酸鈣腐蝕抑制劑和矽灰混凝土等。

暴露條件為模擬潮汐、海水潑濺及噴霧之影響性。如小試體之試驗一樣地量測電流及電阻及氯化物含量等，測試結果顯示下列現象。

- ① 鋼筋混凝土柱及樑中埋設普通鋼筋或鍍鋅鋼筋及亞硝酸鈣抑制劑，其保護層厚度均為1英吋，結果都發生腐蝕現象。
- ② 普通鋼筋有1.5及2英吋之保護層厚度，使用環氧樹脂塗裝鋼筋，矽甲烷處理混凝土和矽灰混凝土之試體等都無腐蝕現象發生。
- ③ 在預力混凝土試體埋設普通鋼股，1英吋保護層厚度；普通鋼筋混凝土之保護層厚度為1英吋及填加亞硝酸鈣之試體都有腐蝕現象發生。
- ④ 在預力樁無龜裂區域或橋面板（deck panels）含矽甲烷處理之混凝土，環氧樹脂鋼鍵和有一試體為普通鋼鍵，保護層厚1英吋等情況，均未發生腐蝕。
- ⑤ 在預力樑的某些鋼鍵上，在去除張力時在鋼鍵

縱向上的混凝土有細微龜裂，此可量測之腐蝕活動為發生於每天經過50次循環作用之鋼鍵上。

- ⑥ 加速熱養生之構件與濕氣養生混凝土作比較，在最初的1英吋保護層厚度內吸收30—50%較少的氯化物。此現象建議薄預構之構件經熱養生較溼氣養生對滲透性有所改善。Mehta<sup>(4)</sup>曾指出厚的巨積混凝土斷面似乎較易發展有害的微裂，係因冷卻時溫度應變差異所致。
- ⑦ 完全受力的預力鋼鍵之腐蝕起始時間為未加應力之鋼鍵的1/3，不過受力的鋼鍵之腐蝕乃屬輕微的。
- ⑧ 當半電池參考電位達到-0.23伏特時，才開始發生腐蝕電流。此腐蝕電位範圍乃根據ASTM C876所定的腐蝕機率大於50%即在-0.20至-0.35伏特的範圍內。

### 3. 預力系統的試驗

國際合作公路研究計劃第313號報告<sup>(5)</sup>中曾敘述超過一年的加速腐蝕試驗。此計劃評估後拉式及先拉式預力混凝土承受海水乾濕反覆作用下，某些具有潛力的防蝕系統。使用於這些防蝕系統的材料如同上述之美國聯邦公路署的試驗<sup>(1)</sup>即：

- ① 混凝土或套管灌漿的摻料（矽灰和亞硝酸鈣）。
- ② 聚乙烯套管和環氧樹脂套管。
- ③ 環氧樹脂預力鋼索。
- ④ 環氧樹脂錨碇設備。
- ⑤ 供密封套管接頭（duct joints）之熱一縮管（heat-shrink tubing）。

試驗試體包括已龜裂未龜裂之預力長方形樑和後拉式系統特別考慮錨碇、套管鋼索、補助零件和軟鋼材加強物等。在該研究計劃中，使用8支預力樑及32支後拉式錨碇系統。

在這些預力試體之防蝕系統與含有標準裸鋼索，混凝土水灰比為0.45至0.50，鍍鋅和裸鋼套管接套管膠帶（duct tape）及卜特蘭水泥漿的控制試體等相比較，可得出下列重要的結論：

- ① 灌注於套管中之三種高品質水泥漿（習用的、填加亞硝酸鈣及矽灰），當海水經過套管接頭或已腐蝕的套管的孔隙漏進套管內，則將使得

未塗裝的裸鋼索之腐蝕量儘可能地減少。

- ②環氧樹脂塗裝錨碇及相關的配件可達到相當良好的防蝕效果。若在錨碇端的鋼鍵灌漿未完全，則可能發生預力鋼材之保護不足。錨碇處，除一般使用之乾填水泥（dry-packed mortar）外，尚需作更多之保護。
- ③在預力和後拉式樑，應用環氧樹脂預力鋼索可得到優越的防蝕效果。
- ④聚乙烯套管和環氧樹脂塗裝套管使用性能優越，聚乙烯對氯化物具有較高之阻抗能力。

#### 四、防蝕系統建議

上述兩個研究計劃已提供有關各種防蝕系統，包括綜合使用習用的或新材料及施工程序等較具耐久性而具有相當價值的資料。然而如前言所述，一套成功的防蝕系統必須考慮可能會對腐蝕造成傷害之所有因素。

現在的海洋結構物設計及施工規範必須對於由腐蝕引起混凝土結構物之惡化提供足夠的保護。在規範中述及之混凝土品質，保護層厚度，鋼筋及後拉式預力系統等都相當謹慎地應用；才能得到良好之結果。

對現有的防蝕系統之改進必須對設計者無法或不能選擇如何去控制有害的情況而能提供詳細地考慮，可視為額外的保證，下列之建議對於習用的系統都需增加額外經費，雖然有些將可提早回收，然而對長期耐久性而言仍然是經濟的。

##### 1. 混凝土品質和保護層厚度

混凝土之水灰比視當地情況，應儘可能地低。低於0.44或最好在0.32—0.34之間。某些專家認為水灰比太低，如低於0.34會較水灰比高者耐久性差。在美國現已有一些在使用中之海洋結構物是以水灰比低於0.3建造的，未來在這些結構物上腐蝕調查，將有助於瞭解低水灰比是否會有耐久性差的現象。

較重要的是裸鋼筋和預力鋼索之保護層厚度至少為2.25英吋，此包括施工上有0.5英吋的容許誤差，保護層厚度增加可減少腐蝕風險，而厚度低於1.75英吋，則腐蝕風險相對地增加。

混凝土中填加矽灰可減少透水性及增加電阻，達到非常有效的防護效果。然而一些研究者認

為使用矽灰混凝土於海洋結構物中較普通混凝土缺乏耐久性之原因是鹼性降低。長期性能測試結果可能可證明這是正確的。然而在現今的海洋結構物應用上，似乎有許多理由支持使用矽灰。

現在有些規範要求在海洋結構物使用的卜特蘭水泥中之鋁酸三鈣  $C_3A$  含量需為5~9（或10）%，顯然此標準已經有所改變，有時需要時低的  $C_3A$  含量，以便能在海水中具耐久性。 $C_3A$  含量高，似乎在數量上需作一考量，低量可防制水泥漿濾出，而高量則可防制腐蝕。

##### 2. 環氧樹脂鋼筋

在保護層厚度小於1.75英吋，可能會發生縱向龜裂之處或是在飛沫及大氣區，混凝土透水性高之處等，必須考慮塗裝鋼筋或鋼索。在結構物之浸水區域或是鋼筋的保護層相當厚的情況，並沒有使用環氧樹脂鋼筋的好理由。

假如在後拉式套管的保護上可能會發生破壞之情況下，則可以使用環氧樹脂鋼索，作為防蝕措施。

##### 3. 灌注填縫劑

在後拉式錨碇區，或保護層不足處，透水性高或懷疑有微裂之處等，均可以灌注矽甲烷（silanes）或矽氣烷（siloxanes）作額外的保護，以達到良好的防蝕效果。

##### 4. 後拉式鋼鍵之改善

對於密封套管接頭，使用熱縮管比套管帶來得好，而且非常有效。此材料易於應用。當套管是潮溼時，此材料不易受黏著之影響，且在接頭處（splice joint）能符合所有的交錯狀（indentation）。

在海洋結構物中，灌漿錨碇區（grouted anchorage blockants）似乎是最易受惡化傷害的，在此區域，使用環氧樹脂塗裝之錨碇及附件可望發揮良好的效果。

假定無法保證上述混凝土品質和保護層厚度能符合要求，則必須使用聚乙烯或環氧樹脂套管。假定氯化物侵入一套管，則在管內之水泥漿之保護能力將受置疑，此時使用聚乙烯和環氧樹脂套管將較裸鋼或鍍鋅之套管更具耐蝕能力。

#### 五、結 論

海洋混凝土結構物上有腐蝕問題之位置是可預測的。鋼筋混凝土預期會在飛沫區或大氣區以及鋼筋太擠所引起保護層不足之處發生腐蝕。尖銳的轉角承受乾溼反覆作用亦易受影響。在後拉式預力混凝土的錨碇區處也常會發生腐蝕。若鋼鍵之灌漿不完全，則將會發生嚴重的腐蝕現象。

預力的混凝土樁在飛沫區，保護層不足，則有可能發生腐蝕。一般在搬運和打樁時所發生之橫向龜裂並不是一嚴重的問題，除非龜裂距離緊密。預力樁經常在現場吊裝時，其吊環索不再需要時，用火焰切除處需修補，此修補處必須使用良好的填縫劑加以塗裝。

這些腐蝕問題都可在施工前可預料到，且在設計階段均可加以防止的。設計者在細步設計時，可選用足夠的保護層厚度和避免鋼筋太擠，及採用上述之防蝕系統設計。而在可能發生問題之地點需使用新的防蝕系統，最後在考慮各種新的防蝕系統降低腐蝕風險時，必須考慮經濟上是否適宜。

#### 參考文獻

- (1) Pfeifer, D. W., Landgren, J. R., and ZoobA, (1987) "Protective Systems for New Prestressed and Substructure Concrete", *Federal Highway Administration. Report No.86 FHW A/RD-86/193*.
- (2) erenchio, W. F., Fraczek, J., and Pfeifer D.W., (1989) "Corrosion Protection of Prestressing Systems in Concrete Bridges" *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) NO. 113*.
- (3) Beeby, A. W., (1983) "Crecking, Cover and Corrosion of Reinforcement", *Concrete International*. Vol. 5, No. 2.
- (4) Mehta, P. K. and Gerwick, Jr., B. C. (1982) "Cracking—Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment", *Concrete International*. Vol. 4.
- (5) Federation Internationale de la Precontrainte. (1982) "State of Art Report: The Inspection, Maintenance and Repair of Concrete Sea Structures".
- (6) 林維明等 (1988) 澎湖跨海大橋腐蝕調查研究，港灣技術研究所專刊第41號
- (7) 林維明等 (1988) 鋼筋混凝土結構物腐蝕調查研究，港灣技術研究所專刊第43號。