

混凝土品質對鋼筋混凝土構件 腐蝕影響之探討

黃 然*、葉為忠*、張建智*、楊仲家**、吳建國**

Influence of Concrete Quality on the Corrosion of RC Members

R. Huang*, D.W. Yeih*, J.J. Chang*, C.C. Yang** J.K. Wu**

摘要

鋼筋腐蝕是影響鋼筋混凝土結構物耐久性的主要原因。由於鋼動混凝土橋樑的維修費時耗財，所以如何提高新築橋樑及修繕補強後之現有結構物的耐久性，成為土木工程界必須面對的主要課題。造成鋼筋腐蝕的原因主要可分成化學性因素及物理性因素。改善混凝土品質或使用高性能混凝土可降低環境因子對於混凝土的侵害，確保鋼筋免於腐蝕，提高混凝土結構物的耐久性。此符合土木結構物長期經濟性的要求。

關鍵詞：鋼筋，腐蝕，橋樑，混凝土，品質

ABSTRACT

The corrosion of reinforcing steel is the major factor affecting the durability of reinforced concrete structures. The rebar corrosion may result from physical factors and chemical factors. The improvement of concrete quality can reduce the deterioration and prevent the reinforcing steel from corrosion. Thus, the durability of RC structures can be assured.

Key words: rebar, corrosion, bridge, concrete, quality

一、前言

六年國建計畫中，交通建設所佔比例甚大，其中又以高速公路網，高速鐵路的興建為其主要項目。而台灣島內多河川山岳，所以橋樑成為交通運輸網的主要連接動脈，民國七十七年台灣公

路系統的橋樑總數已超過九千九百多座，其中 98.4% 為混凝土橋樑⁽¹⁾。所以橋樑的設計，施工的品質，直接影響了整個路網的功能及使用年限。又因台灣四面環海土地面積有限，為減少土地徵收的困難，沿海岸線興建高架快速道路成為未來可考慮規劃的方向之一。由於混凝土具有價

*國立台灣海洋大學河海工程研究所

**國立台灣海洋大學海洋材料工程研究所

*Department of Harbor and River Engineering National Taiwan Ocean University

**Institute of Materials Engineering National Taiwan Ocean University

廉、耐久、施工容易等優點，所以預力混凝土或鋼筋混凝土仍為未來橋樑結構物的主要營建材料。然而，海洋環境下大氣及水中的鹽分，使得濱海橋樑極易產生腐蝕的問題，倘若橋樑設計不當或施工品質欠佳，使用後必需耗損龐大的維修費，或縮短橋樑的使用年限，甚且造成人命財產的嚴重損失，所以對於鋼筋或預力混凝土鹽份腐蝕問題及防蝕技術之建立，不能不加以重視。特別是國建計畫之重大交通工程，更應以提升工程品質，確保結構物耐久性為首要之務。

鋼材表面伽凡尼腐蝕電池的形成的必要條件是水分、氧氣與氯離子同時存在於鋼材表面。所以氧氣的擴散速率與水泥糊體中氯離子的含量均直接影響鋼材的腐蝕行為。高品質混凝土中氣體的傳輸與離子的擴散相當的緩慢，且多經由微裂縫(microcrack)與毛細孔隙而形成的交錯連續網路。所以若環境因素加大微裂縫，則腐蝕速率將快速增加。由於透水性是控制混凝土整體耐久性的關鍵因素，因此發展高強度低透水性混凝土已成為近年來材料研究的主要趨勢。

過去研究發現使用中之混凝土結構物裂縫產生的主要原因為：(1)不當的載重如提前施加載重、超載或不當的撞擊；(2)未適當控制水化熱而生成熱縫裂；(3)凍融效應；(4)疲勞加載所產生的裂縫會延伸至鋼材表面；(5)鋼筋腐蝕等。混凝土中造成鋼材腐蝕的伽凡尼電池包括陽極及陰極反應。當鋼材表面的鈍態氧化膜由於酸蝕或氯離子的作用而破壞時陽極反應開始進行，當足夠的氧氣和水份存在陽極附近的鋼材表面時陰極反應開始進行，而完成腐蝕電池。透水的混凝土是良好的導電材料，然而混凝土的阻抗隨著養護齡期的增加而增加。研究報告指出混凝土的阻抗(resistance)大於 $8500\text{ohm}\cdot\text{cm}$ 時，即使有相當數量的氯離子存在，鋼材亦不會腐蝕。所以，只有在材料保護系統同時失效的情況下，鋼筋或預力混凝土才有可能因腐蝕而發生破壞。

鋼筋或預力混凝土的腐蝕行為主要取決於材料的品質與外在的環境因素。混凝土品質的改善或鋼材的防蝕處理，對於結構物的耐久性有正面的影響。設計時構件或結構物若能避免超載及不當之使用，考慮載重的效應，應可有效地控制混凝土表面裂縫的數目及成長速度。避免環境中的腐蝕因子滲入混凝土中，因而抑制了鋼筋發生腐蝕。

鋼筋混凝土樑受腐蝕後，會在鋼筋表面形成一層氧化物保護層。可是氧化物的保護層未必能夠降低腐蝕速率，除非材料本身具有化學及機械性的穩定性。尤其機械性的穩定性更為重要。一般而言氧化物的體積比鋼材本身為大，由於氧化物的形成，造成體積應變上的不協調性(mismatch)，是以混凝土本身在平形界面上承受著伸張殘餘應力，使得原本之裂縫或孔隙張開，有時會造成微小的孔隙成長為新的裂縫，因此離子擴散進入界面的機會增大，使得腐蝕速率增加。

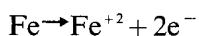
一般而言，如果混凝土結構物經過適當地規劃、設計與施工，混凝土保護層的品質（包括厚度、不透水品質等）能確切地被保證，即使在惡劣的環境條件下，鋼筋的混凝土中將有效地被保護而免於腐蝕。主要是因為混凝土中的孔隙水(pore water)提供了高鹼性環境，導致鋼筋表面產生具有抗蝕能力的惰性保護膜。而混凝土結構物的保護層主要做為化學性及物理性的屏障，阻止具有破壞惰性保護膜的有害物質侵入，其中包括二氧化碳及氯離子等。雖然如此混凝土結構物內由於鋼筋腐蝕而產生的破壞仍層出不窮。其原因包括(1)使用較精確的設計後，結構物構件尺寸偏小，設計誤差及構件變形較易產生裂縫導致鋼筋腐蝕；(2)構件製作方式的改變對於保護層的品質保證會有負面的影響；(3)新的材料如摻合料的使用，新水泥的使用或會增加鋼材腐蝕的機率；(4)市場的惡性競爭會造成混凝土的品質低落。

二、腐蝕機理

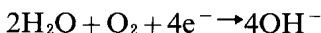
(一)電化學反應

腐蝕破壞是材料與周圍環境發生化學或電化學反應後所造成的損壞。在自然界中，金屬大部份會以化合物的型式穩定存在，換言之，腐蝕完全是一種自然反應。鋼筋混凝土內鋼筋的腐蝕機理與一般金屬的腐蝕除了環境因素不同外，基本上均須具有陰極、陰極、導電通路、電流及電解溶液等五大要項。其各種反應方式如下：

1. 陰極：發生化學性氧化反應的電極，此種反應使金屬離子化而釋放出電子。陽極反應的例子如下：



2. 陰極：發生化學性還原反應的電極，陰極反應的例子如下：



3. 導電通路：由以上反應可知，氧化還原作用均有電子的移轉，因此，良好的導電通路將可提供電子的移轉，如此腐蝕才可順利的進行。
4. 電流：要使離子化反應順利進行必須要有足夠的電子數，換言之，要有足夠的電動勢才可使電子流動。
5. 電解溶液：電化腐蝕又稱為濕腐蝕，也就是說必須要在濕氣或有水份的狀況下氧化還原反應才會發生。在濕潤的狀況下，離子的移動速率遠比金屬氧化擴散作用快，所以金屬蝕速率相當快，假使沒有濕氣供應，則離子無法解離，腐蝕中止。

(二)腐蝕趨勢

對一特定金屬在一特定的環境中，其是否有腐蝕的趨勢，我們可由熱力學的觀點來了解。對

任何在定溫、定壓情況下發生的化學反應而言，驅動力(driving force)可由自由能之減少量($-\Delta G$)推得。假設一般反應式為：

其中 n_a 表示 A 之莫耳數分量，其他皆類同。其中

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln\left(\frac{[C]^{n_c}[D]^{n_d}}{[A]^{n_a}[B]^{n_b}}\right)$$

ΔG^0 ：標準自由能

R：氣體常數

T：絕對溫度

當 $\Delta G < 0$ 時，反應會自然發生； $\Delta G = 0$ 時，反應達平衡狀態。因此，當我們知道某一反應之 ΔG^0 時，便可由反應物及生成物之濃度得之反應是否發生。又 $\Delta G = -nFE$ ，故

$$E_{eq} = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{[A]^{n_a}[B]^{n_b}}{[C]^{n_c}[D]^{n_d}}\right)$$

其中

E_{eq} ：平衡時之金屬電位

E_0 ：金屬之標準電位

F：法拉第常數

n：反應電荷數

當 $E < E_{eq}$ 時，反應會自然發生。

三、鋼筋混凝土腐蝕破壞之原因

鋼筋混凝土被大量應用在構築橋樑、碼頭、房屋等結構物上，主要原因是利用混凝土來承受壓力，鋼筋承受拉力；而混凝土又可以保護鋼筋，使之不受到外界環境中有害物的侵蝕。因此，一般鋼筋混凝土結構物的設計壽命至少都在 50 年以上。但是，因使用組合材料的不同、設計考慮的周密性、施工的品質及週遭環境差異等因素的影響，許多結構物常未達設計年限即需進行修補或重建⁽²⁾。

鋼筋或預力混凝土結構物破壞的主要因素可分為混凝土的劣化(deterioration)及鋼筋的腐蝕(corrosion)⁽³⁾。由於混凝土提供的高鹼性環境($\text{pH} = 12.5 \sim 13.2$)，鋼筋表面形成一層鈍態氧化

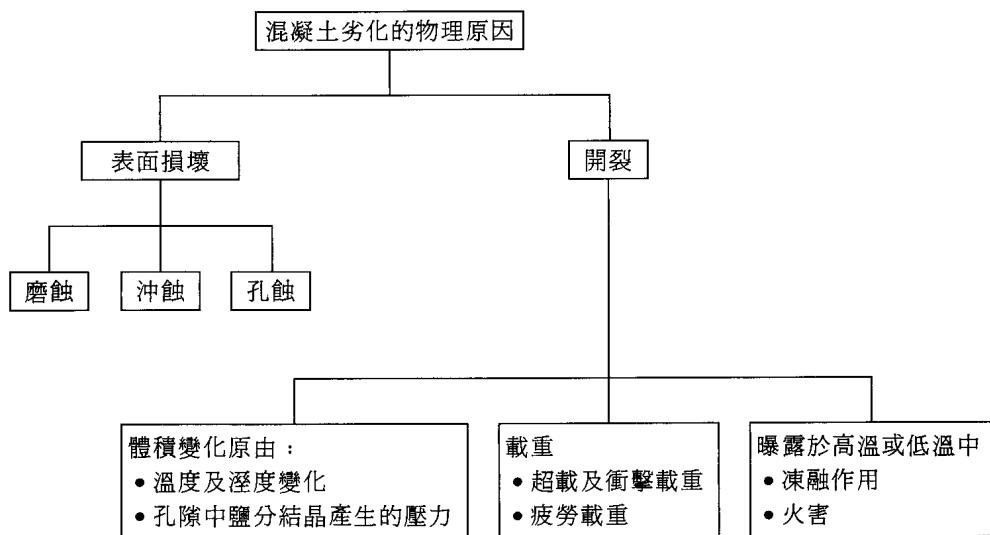


圖 1 混凝土劣化的物理原因[3]

Fig. 1 Physical causes for concrete deterioration.[3]

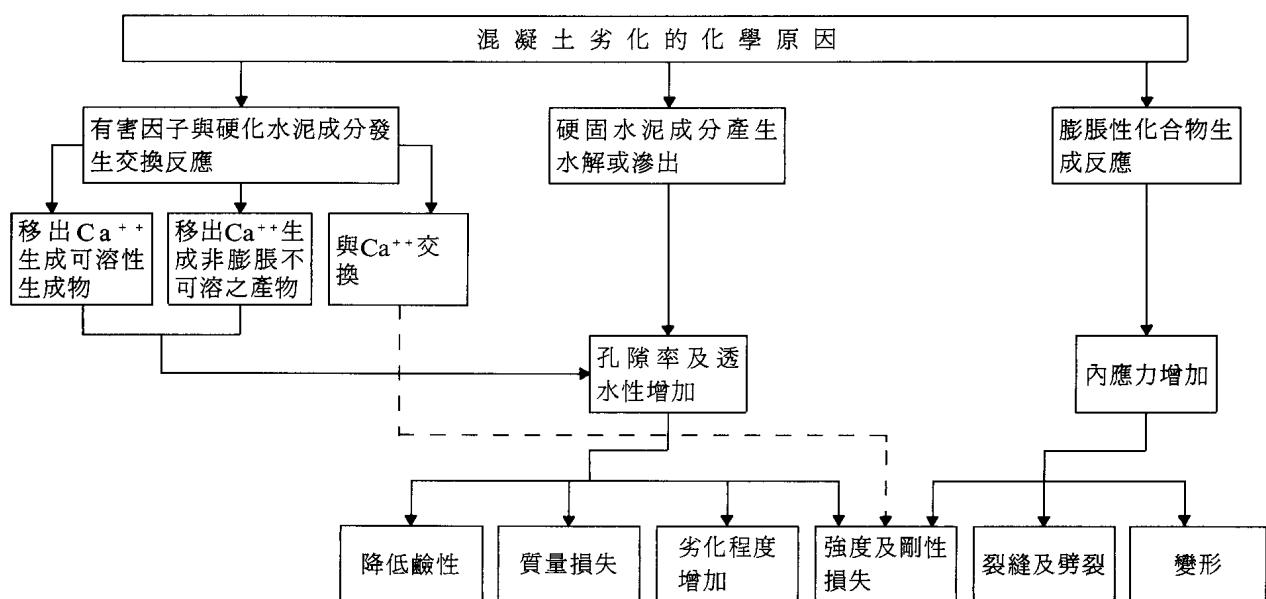


圖 2 混凝土劣化的化學原因[3]

Fig. 2 Deterioration of concrete by chemical reaction [3].

膜得以維持。但若混凝土品質不佳或發生劣化，鋼筋腐蝕的機率即上昇，當鋼筋開始腐蝕時，鋼筋與混凝土的結合力降低且其承受張應力的有效斷面積減少，若銹蝕程度破壞至鋼筋無法再承受設計載重時，整個結構物便會破壞。

混凝土劣化的原因很多，大致上可區分為物理性侵蝕及化學性侵蝕兩大類（如圖 1，圖 2 所示）。物理性侵蝕包括磨蝕、沖蝕、孔蝕及開裂，化學性侵蝕包括有害因子與硬化水泥成分發生交換反應、硬固水泥成分產生水解或滲出及膨

脹性化合物生成反應⁽³⁾。當混凝土劣化之後，由於外界侵入之腐蝕因子，其侵蝕路徑縮短及路徑斷面積增加，提高了腐蝕因子與鋼筋的接觸機會；並且鋼筋表面鈍態氧化膜分解之氯離子瓶頸濃度(threshold concentration)亦會因pH值降低而降低。

在鋼筋腐蝕方面，主要可分為氧化作用、氯離子侵蝕及碳化作用，其影響為腐蝕生成物膨脹，使混凝土破裂，增加鋼筋曝露程度。

混凝土破壞的原因有許多種，但濱海結構物以鋼筋腐蝕破壞最為嚴重。由於混凝土為高鹼性材料，因而能提供良好的惰性保護層，使鋼筋免於腐蝕。然而當二氧化碳、二氧化硫等氣體侵入混凝土中與氯化物發生反應產生碳酸鹽或硫酸鹽，會降低了混凝土的pH值，原先存在的惰性層將失去保護的能力。所以保護層的厚度、混凝土的透水性以及表面層開裂的大小與型式對於鋼筋的腐蝕速率有相當大的影響。特別在海洋中因

氯化物的存在而使腐蝕的問題加劇。氯化物即使在鹼性的環境下亦能局部地破壞鋼筋的保護層而產生痕蝕(pitting corrosion)，所以氯化物的濃度是決定腐蝕快慢的主要原因之一。使用含有氯化物的海水或化學藥劑將會降低混凝土中鋼筋的惰性而生鏽，造成混凝土的開裂或剝落，並且在腐蝕鋼筋與未腐蝕鋼筋間因電位不同而產生伽凡尼電偶(galvanic couple)。同時混凝土會提供足夠水氣做為電解液配合侵入的氧氣，經由陰極反應加速鋼筋全面腐蝕。鋼材腐蝕與混凝土開裂的交互作用如圖3所示。

氯離子的存在是影響鋼筋腐蝕的重要因素之一。許多規範對混凝土中氯離子的含量都有嚴格的限制，如日本鋼筋混凝土建築規範(Japanese Architectural Standard Specification for Reinforced Concrete Work)即規定使用海砂於混凝土拌合時，氯離子的含量不得超過砂重量的0.04%⁽⁴⁾。然而，對於曝露在海洋環境下的混凝土結構

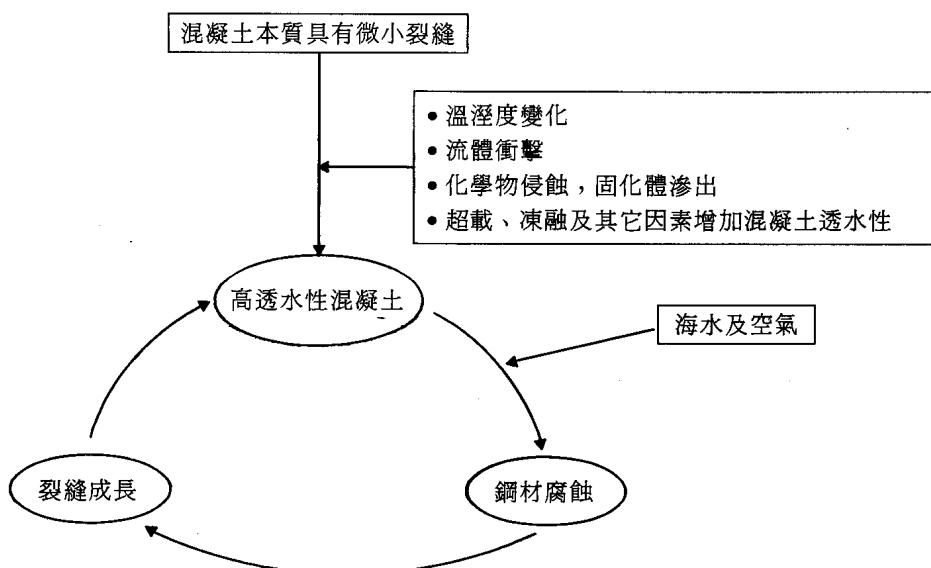


圖 3 混凝土開裂—鋼筋腐蝕交互作用[3]

Fig. 3 Cracking-corrosion cracking cycles in concrete [3].

物而言，因氯離子侵蝕所造成的原因及程度，目前尚無法明確的瞭解並加以控制。因此，為了確保結構物的耐久性，探討氯離子在混凝土中的擴散行為並瞭解其對鋼筋腐蝕的影響是需要的。

綜合上述所言，吾人知道鋼筋腐蝕的發生主要由於侵蝕性因子(Cl^- , CO_2 , SO_4^{2-} , O_2)的侵入。然而因為混凝土的高鹼性保護層，使得離子的累積量必須到達某一個瓶頸濃度(threshold concentration)，氧化保護膜才會解離。文獻^(5,6)顯示，自由氯離子的莫耳濃度必須滿足：

$$\frac{[\text{Cl}^-]}{[\text{OH}^-]} \geq 0.6$$

才會破壞氧化膜。

四、混凝土品質對於鋼筋腐蝕之影響

現有國內外設計規範或施工準則對於海洋結構物混凝土品質的要求較一般結構物的混凝土嚴格。美國及加拿大工程界多依照美國混凝土學會(ACI, American Concrete Institute)以及美國高速公路局(AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials)之建議，將鋼筋混凝土及預力混凝土結構物在海洋環境下各種材料使用的限制條件列入考慮。在歐洲與亞洲亦使用不同的規範做為設計施工的依據，如英國標準規範(BS, British Standard Specifications)、英國能源部規範(UK Department of Energy Code)、FIP規範(International Federation of Prestressed Concrete structures, Code of Practice)、日本土木學會規範(Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures)、AUS規範(AS1480, Draft Australian Standard, Unified concrete Structures Code)、DnV規範(Det norske Veritas)、NPD規範(Norwegian Petroleum Directorate)，及我國公路橋樑設計規範及公路工程施工規範等各種規

範之制訂均為確保混凝土結構物在濱海環境下之耐久性。基本上，各規範均依循下列各途徑保障混凝土橋樑結構物在濱海環境下之耐久性(特別是抗鹽份腐蝕性)：(1)混凝土設計使用低水灰比；(2)使用品質良好的骨材；(3)採用適當的養護條件；(4)以及嚴格的品管措施，除此以外，保護層厚度的選擇亦是結構設計考慮重點之一。

水灰比之要求

混凝土水灰比的決定，不僅基於強度的考慮，更且將耐久性的因素列入。在惡劣的曝露環境下，水灰比的選擇多基於耐久性的要求(即低水灰比混凝土的強度較需求強度為高，所以規範多訂有最大水灰比的規則，以保證結構物混凝土具有一定程度的不透水性或耐水性)。美國混凝土學會(American Concrete Institute, ACI committee 201)規定曝露於海洋環境中，混凝土的水灰比不得超過0.45(但細薄斷面或保護層厚度較小的構件，混凝土的水灰比不得超過0.40)，ACI Committee 357 (1984)建議水中混凝土水灰比不得大於0.45，潮汐區及大氣區不得大於0.40。FIP (1985)建議結構物在海洋環境中，混凝土之水灰比以不超過0.45為限，以低於0.40為佳。AASHTO亦設定0.45為水灰比的上限。日本土木學會(JSCE) (1985)及DnV (1977)建議海洋混凝土曝露於海洋環境下其水灰比不得超過0.45(水中帶0.50)。Aus (1983)草案建議水中帶混凝土水灰比不得超過0.50，飛沫及大氣帶不超過0.40，BS 8110 (1985)及NPD (1977)建議水灰比不得超過0.45。由於鋼筋混凝土在海洋環境中，會遭受鹽份的化學侵襲，混凝土劣化或鋼筋腐蝕發生的機率隨使用時間的增加而提高，所以為確保結構物在惡劣環境中能夠持續使用，水灰比自然應較一般環境下之混凝土為低。此處所指之海洋環境，包括海水波浪、潮汐以及海風影響所及的區域。所以離岸(offshore)、岸上、近岸、河海港

等結構物均受海洋環境影響。而結構物又依其遭受潮汐、波浪影響的程度分水中帶(submerged zone)、潮汐帶(tidal zone)以及大氣帶(atmospheric zone)。其中潮汐區構件因受波浪、潮汐的乾濕循環作用，易遭化學物侵襲，凍融作用以及鋼筋腐蝕破壞，耐久性最為可慮。海水中構件，因長期在水中氧氣不足，鋼筋腐蝕的機率較大氣帶及潮汐帶構件低了許多。陸上結構物如果受到海風影響，水灰比應不超過大氣帶混凝土最大水灰比的規定，倘若遭受波浪之影響，最大水灰比應減0.05。

混凝土組合材料之要求

海洋環境下，混凝土持續遭受海水及海風的物理性與化學性的侵襲，以及遭受波浪及漂浮物的撞擊、沖蝕而會發生材料破壞。為抵抗海水環境衝擊最可靠的方法就是使用高品質的耐久性混凝土（具高強度及不透水性等特質），如高分子波特蘭水泥混凝土或高分子混凝土及矽灰混凝土等均可考慮做為海洋混凝土使用。

組合材料的選擇確是一件不容易的事，因為任何一種已知材料的使用總會伴隨某些負面的效果。所以審慎的評估目前各國規範的限制，是增進正確判別能力的第一步驟。由於混凝土是多種材料的組合，材料間的相合性與交互作用不易預測，所以試驗室的試拌資料與工地的現場經驗必須相互配合以得到最佳適用的結果。

ACI (ACI 357R-84)建議使用在海洋混凝土中之水泥，其C₃A的含量應介於4%與10%之間，俾能提供鋼筋足夠的腐蝕保護以及提供混凝土抗硫酸鹽侵蝕的能力。FIP未明確限制水泥中C₃A的含量僅建議使用在潮汐區以及大氣區混凝土中的水泥應含適量的C₃A (Type I OPC, 8-12%; Type II OPC 5-7%; Type V OPC<5%)以提供低鹽份腐蝕的能力。日本JSCE僅簡單敘述水泥中的C₃A含量應適當地被控制以獲致耐久性混凝

土。一般而言，基於混凝土的工作性，熱應力所造成的微細裂縫的控制，以及氯離子的擴散速率等考量，ASTM的第一型或第二型波特蘭水泥（適量的C₃A與C₃S）與礦物摻料混合使用，應可滿足海洋混凝土耐久性的要求。

提高混凝土單位體積中水泥的使用量可改善混凝土的工作度，均勻性以及不透水性。所以在海洋環境下混凝土應訂出最低的水泥含量以確保混凝土的品質。ACI規定(ACI357-84 Recommendations)最小的水泥含量為356Kg/m³(600 1b/yd)，FIP規定(FIP-1985 Recommendations)如使用於潮汐帶構件的混凝土水泥最小含量為400Kg/m³，而使用於其他區域構件，如最大骨材尺寸為4公分時，混凝土最小水泥用量為320Kg/m³，同時規定水泥使用量不得超過500Kg/m³，以避免於造成細薄斷面乾縮開裂或於大斷面中產生過大的熱應力。日本JSCE規定於潮汐帶及大氣帶的混凝土如果最大骨材尺寸為2.5公分，最小水泥用量為330Kg/m³，如最大骨材尺寸為4公分，則最小水泥用量為300Kg/m³，於水中區構件混凝土如最大骨材尺寸為2.5公分，最小水泥使用量是300Kg/m³，如最大骨材尺寸為4公分，最小水泥使用量為280Kg/m³，AASHTO規定水下構件最小的水泥使用量為390Kg/m³，其他區域最小水泥使用量為362Kg/m³，而最大水泥使用量(含礦物摻料)不得超過475Kg/m³(800 1b/yd)。DnV規定最小水泥用量為300Kg/m³，NPD規定最小水泥用量為400Kg/m³，BS6235規定水中帶最小水泥用量為360Kg/m³，大氣帶及潮汐帶為400Kg/m³，Aus建議水中帶為330Kg/m³，大氣帶及潮汐帶為400Kg/m³。BS 8110建議最小水泥量為400Kg/m³。

最小壓力強度的要求

FIP建議直接曝露於海洋環境中混凝土的28天圓柱試(Φ 15 × 30cm)體的壓力強度不得小於32

表 1 保護層厚度比較表
Table 1 Protection Cover

	Nominal cover to reinforcement (mm)								
	DnV (1977)	FIP 3rd edn	FIP 4th edn	BS 8110 (1985)	BS 6235 (1982)	ACI (1984)	UK Dept. of Energy.	NPD (1977)	Aus (1983)
Reinforcing bars									
(a) Submerged	50	60	50	60	60	50	40	50	60
(b) Splash Zone	50	75	75	60	75	65	75	50	75
(c) Atmospheric Zone	40	75	75	60	75	50	55	50	75
Prestressing tendons									
(a) Submerged	100	75	65	60	75	75	45	70	75
(b) Splash	100	100	90	60	100	90	70	70	100
(c) Atmospheric	80	100	90	60	100	75	55	70	100

MPa，而未直接曝露於海洋大氣中的混凝土圓柱試體強度不得小於24MPa。有嚴重沖刷之虞的混凝土，其壓力強度不得小於36MPa。美國工兵署建議28天混凝土圓柱試體壓力強度不得小於28MPa，當有嚴重磨耗現象發生時，混凝土強度不得小於34MPa。ACI(ACI 357-84)建議在海洋環境中混凝土壓力強度不得小於35MPa，有表面磨損之虞時壓力強度不得小於42MPa。AASHTO建議海洋混凝土28天壓力強度不得小於28MPa，日本JSCE沒有明確的規定，我國亦無明確之規定。

波索蘭材料使用之要求

ACI認為符合ASTM C618之要求的波索蘭材料（包括天然的波索蘭材料及飛灰）可使用在海洋混凝土中。FIP建議可使用高品質波索蘭材料諸如矽灰、飛灰等以提高混凝土強度及耐久性。日本JSCE認為使用高品質的波索蘭材料可改善混凝土的不透水性，但用量及波索蘭材料品質會影響使用之效果。AASHTO建議波索蘭材料的使用應不超過膠結材料(cementitious materials)總重量的五分之一。而波索蘭材料的

燒失量(loss of ignition)不得超過5%。

由改善混凝土之工作性、均勻性、降低水化熱及增加界面區域(transition zone)的強度觀之，使用礦物摻料能夠降低微裂縫發生的機率而提高混凝土的強度與不透水性。所以適當使用礦物摻料當能提升混凝土在海洋惡劣環境下之耐久性。

混凝土保護層厚度之要求

保護層厚度對於鋼筋混凝土及預力混凝土構件在海洋環境下之耐久性有非常重要的影響。保護層厚度過大將會增加混凝土裂縫寬度，厚度過小將導致鹽水輕易進入而腐蝕鋼筋，如何選擇一適當厚度，不僅能限制開裂寬度，又能阻止鹽水滲入，實為工程設計者必須面對的難題。ACI (ACI 224R-80)認為遭受乾溼作用產生的拉力其最大允許裂縫寬度為0.15mm。FIP認為在主鋼筋附近5公分的保護層的最大裂縫寬度不得超過0.3mm。而縱向裂縫較橫向裂縫對鋼筋腐蝕的影響較為嚴重。各國有關保護層厚度之規定如表1所示。

離岸或海岸結構物保護層厚度的大小與構件曝露區域有關。水下區域，FIP與ACI均建議主

表 2 依壓力強度決定保護層因子
Table 2 Protection Cover Factor

Characteristic Compressive Strength $f_c k \text{ Kgf/cm}^2$	Cover factor α
Not greater than 180	1.2
From 180 to 350	1.00
Not less than 350	0.8

表 3 構件與曝露環境保護層厚度對照表
Table 3 Protection Cover and Exposure Condition

Environmental conditions	Slabs (cm)	Beams (cm)	Columns (cm)
Normal condition	2.5	3.0	3.5
Corrosive condition	4.0	5.0	6.0
Severely corrosive condition	5.0	6.0	7.0

鋼筋之保護層厚度為 5 公分，而預力鋼鍵之保護層厚度為 7.5 公分。潮汐區構件，主鋼筋保護層厚度可增加 1.5 公分。DnV 建議主鋼筋保護層厚度為 4~5 公分，預力鋼鍵為 8~10 公分；NPD 建議主鋼筋保護層厚度為 5 公分，預力鋼鍵為 7 公分。對於薄壁結構物 FIP 建議保護層不得小於最大骨材尺寸的 1.5 倍或最大鋼筋直徑的 1.5 倍。如果鋼筋混凝土有表面塗裝措施保護層厚度可以減少。日本 JSCE 依據下式決定保護層最小厚度 (C_{\min})，但厚度不得小於最大鋼筋直徑。

$$C_{\min} = \alpha \times C_0$$

式中 α 為保護層因子由壓力強度決定之，如表 2 所示。

C_0 為基本保護層厚度，依據曝露環境而決定之，如表 3 所示。

若為預鑄之混凝土構件，因為品質管制較佳，上式所標出之保護層厚度或可折減 20%。AASHTO 建議曝露於海水的混凝土層厚度不得小於 10 公分。

氯離子含量要求

氯化物的滲透率是導致鋼筋腐蝕的主要原因之一。而影響滲透率的因素有許多種如水泥種類、水灰比、水泥使用量以及夯實程度等。Lukas⁽⁷⁾指出水灰比是影響氯化物滲透的最主要因素，但是 Vennesland 與 Gjørv⁽⁸⁾ 發現水灰比僅影響短時間存在於混凝土表層的氯化物的穿透量，主要決定於水泥的種類。一般而言，混凝土中氯離子的主要來源，有三個途徑：

- (1) 混凝土組成材料本身即含有氯離子成份，如細骨材、拌合水中含有氯離子等。
- (2) 添加含有氯離子的摻料，如速凝劑。
- (3) 由外部侵入的氯離子，如來自海域環境的鹽類侵入混凝土、使用含有氯離子的水養護及寒帶區域使用去冰劑等。

ACI (ACI Committee 201) 規定海洋鋼筋混凝土氯離子含量不得超過水泥重量的 0.1%；而 FIP 規定使用摻和料之氯離子含量不得超過 0.1%；DnV 規定氯離子含量不得超過 0.19%；Aus 規定氯離子含量不得超過 0.20%；BS6325 規定不得超過 0.35%。而預力混凝土之最大氯離子含量較鋼筋混凝土更為嚴格。各國有關最大氯離子含量之限制如表 4 所示。

混凝土最大裂縫寬度之要求

BS6235 考慮裂縫控制時建議最大的裂縫寬度不得超過 0.3mm 或 $0.004 \times C_{\max}$ (C 為保護層厚度)，Aus 則建議為 $0.004 \times C$ ，而 BS8110 規定最大開裂寬度為 0.3mm，JSCE 規定大氣帶及潮汐帶之裂縫寬度不得大於 0.15mm，水中帶不得大於 0.2mm。

五、結論與建議

1. 鋼筋腐蝕直接影響混凝土橋樑的耐久性與安全性。維護及修補破損橋樑費時耗財，且不

表 4 最大氯離子含量之限制
Table 4 The Maximum Chloride Content

	Chloride Content, % Cl-by weight cement						
	DnV (1977)	NPD (—)	FIP (1985)	ACI (1978)	BS6235 (1982)	Aus (1983)	BS8110 (1985)
Reinforcement							
*BS12 cement or Similar	0.19	—	0.10	0.10	0.35	0.20	0.40
**BS4027 cement or similar	0.19	—	0.06	0.06	0.06	0.20	0.20
Prestressing Steel all cement	0.19	—	0.06	0.06	0.06	0.10	0.10

*BS12 cement: ordinary and rapid-hardening Portland cement

**BS4027 cement: sulphate-resisting Portland cement

易保證維修後之品質，所以宜於設計建築時考慮混凝土的品質與鋼材防蝕措施，以減少使用後之維修成本。

2. 鋼筋腐蝕為電化學反應。主要在鋼筋表面需有水份、氧氣、氯離子等的存在。而氯離子的滲入對於腐蝕發生的影響甚巨，濱海之氯離子的分佈及滲入情況需做周詳之探討，以為橋樑設計時之參考。
3. 控制混凝土的水灰比、水泥品質、壓力強度、組合材料品質、氯離子含量及保護層厚度等可提高混凝土的耐久性，進而降低鋼筋發生腐蝕的機率。
4. 橋樑應避免超載或非預期性之衝擊載重，以減少裂縫數目的增加與裂縫尺寸的成長。
5. 曝露於腐蝕環境下混凝土之水灰比於潮汐帶建議不得高過0.45，於海中帶不得超過0.50；曝露於腐蝕環境下混凝土之水泥用量每立方公尺至少300公斤；曝露於腐蝕環境下混凝土之28天壓力強度至少應達280Kg/cm²。
6. 曝露於腐蝕環境下之混凝土若與海水接觸或污染河水接觸時應採用波特蘭第Ⅱ型水泥。
7. 曝露於腐蝕環境下混凝土，保護層厚度建議參照部頒公路橋樑設計規範。
8. 曝露於腐蝕環境下混凝土，在品管制度確立下，可適量地使用波索蘭材料。

9. 曝露於腐蝕環境下混凝土，為免有害因子滲入，裂縫寬度應限制在0.30mm以下。

10. 曝露於腐蝕環境下混凝土，存在骨材中或混凝土中水溶性氯離子含量可參照CNS之規定。
11. 曝露於腐蝕環境下混凝土，可採用外加電流防蝕法，或塗裝法補強混凝土之耐蝕性。
12. 土木工程師設計混凝土橋樑時，應以生命週期的整體經濟性來考量使用材料品質的選擇及各種防蝕措施的使用。

參考文獻

1. 陳振川，“台灣地區橋樑安全之初步研究”，經建會委託之研究報告，民國78年，pp.31-32。
2. 黃然、吳建國，“漁港結構物腐蝕特性與防治之研究”，行政院農業委員會專題研究計畫成果報告，1992。
3. Metha, P.K., “Concrete: Structure, Properties and Materials”, Prentice-Hall Inc, 1998.
4. Hideo kawaka Mi, “A Study of Chloride Concentration in a Reinforced Concrete Building with Diffusion Theory”, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.7, 1985, pp.149-156.
5. Ehtesham Hussain S., Al-Saadoun S.S., “Effect of Cement Composition on Chloride Binding and Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete”, Cement and Concrete Research, Vol.21, Jan., 1991, pp.777-794.

6. Hiroo nagano, Takafumi Nato, "Application of Diffusion Theory to Chloride Penetration into Concrete Located in Splashing Zones", Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.7, 1985, pp.157-164.
7. Lukas, W., "Chloride Penetration in Standard concrete, Water-reduced concrete, and Superplasticized Concrete", ACI, SP68-14, pp.253-267.
8. Gjørv O.E., and Vennesland Ø., "Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete", Cement and Concrete Research, Vol.9, No.2, 1979, pp.229-238.