

RC 結構物防蝕策略之研究

張炳坤 * 彭耀南 ** 廖東昇 ***

Study on the Anti-Corrosion of Reinforce Concrete Structural

Ping-Kun Chang, Yaw-Nun Peng and Tung-Sn Liao

摘 要

混凝土中鋼筋的腐蝕行為決定於混凝土的品質，裂縫之形成，氯離子等有害物質入侵及外在載重之條件等。本研究係探討混凝土中鋼筋腐蝕機理，鋼筋混凝土主要劣化因素，及混凝土中鋼筋防蝕技術。分別就材料之選擇、施工技術及管理加以剖析，俾有效抑制因鋼筋腐蝕造成之損壞，以確保結構物之安全。

關鍵詞：腐蝕行為，防蝕技術，氯離子，腐蝕機理。

ABSTRACT

The corrosion behavior of steel embedded in concrete is significantly affected quality, existance of the crack, the invasion of determinate element, such as chloride-ion, and external loading. In this research, based on the corrosion mechanism of steel in concrete, and induce reinforce concrete failure, We also study on the anti-corrosion technology of steel in concrete. The select of anti-corrosion material and construction management will be discussed in this paper. We hope to prevent steel corrosion and to prove structure safety.

Key words: Corrosion behavior, Anti-corrosion technique, Chloride-ion, Corrosion mechanism.

一、前言

鋼筋混凝土一向被視為最堅固、耐久的施工材料，故對於鋼筋混凝土的腐蝕問題未加以重視，雖然國內相關腐蝕調查及研究工作已進行多年^(1~10)，但直到最近，混凝土中之鋼筋腐蝕與鋼筋剝

落，異常裂縫之產生而衍生的種種劣化現象，始為大家所注意。但此時，結構的修復問題，卻又形成另一爭論的焦點，因當腐蝕現象被注意時，往往結構體的腐蝕已經達到危害結構或使用者的安全，結構的修復變成幾乎不可能或是非常的昂貴。重建與修復的意見不一，修復的方法更是難

* 國立交通大學土研所博士班研究生

PhD. Graduate Student, Department of Civil Engineering, National Chao Tung University.

** 國立交通大學土木工程研究所教授

Professor, Department of Civil Engineering, National Chao Tung University.

*** 國立台灣科技大學營建工程技術系碩士

Master, Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology.

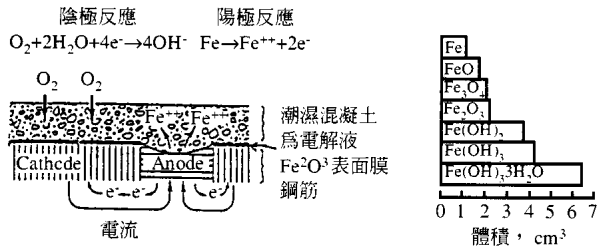
圖 2-1 鋼筋腐蝕原因及產生的膨脹性反應⁽¹⁴⁾。

Fig. 2-1 The cause of steel corrosion and induce expansion reaction.

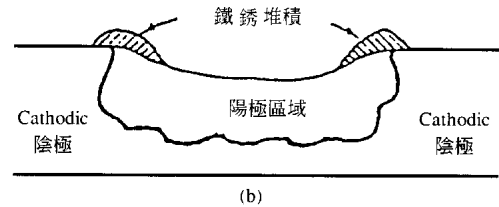
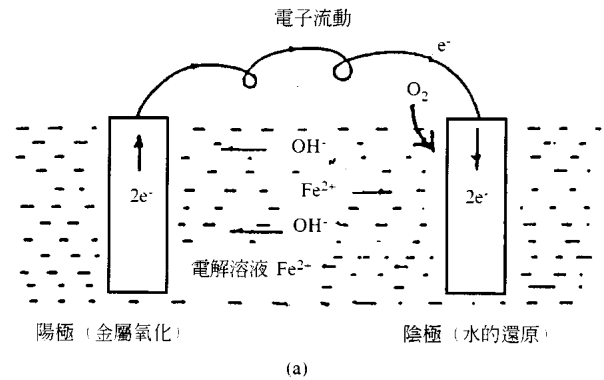
以選擇。

雖然鋼筋與混凝土的組合具有若干優點，但最主要的優點之一為，混凝土的鹼性對鋼筋具有優異的防蝕能力。因此，若混凝土沒有裂縫，則其內部的鋼筋不易腐蝕。然而，在載重或使用環境作用下，混凝土難免會發生裂縫，尤其當混凝土承受種種劣化因素的影響時會變質、劣化，使得內部鋼筋的防銹力亦降低。一般而言，鋼筋混凝土由混凝土產生“病變”，到鋼筋生鏽，混凝土剝落，需要一段時間，而在這段時間內，可利用檢測方法，事先診斷，使得問題能早日發現，同時對症下藥，以免因為問題惡化，而走上重建拆除的地步。

二、混凝土中鋼筋腐蝕機理

鋼筋是由鐵礦經加熱冶煉而成。在大自然中，只要環境容許，鋼筋會回到其原來的狀況——鐵銹。混凝土中鋼筋腐蝕之機理與一般金屬腐蝕除了環境因素不同外，基本上是相同的，依物質不滅定律會釋放出能量而回復到氧化物平衡穩定狀態，金屬往往釋放出電子形成陽離子，再與其他的陰離子形成穩定的化合物，此過程即為一般的腐蝕，金屬腐蝕的型態因環境的不同而有乾式腐蝕(Dry Corrosion)及濕式腐蝕(Wet Corrosion)⁽¹¹⁻¹³⁾。

鋼為構造用金屬材料中使用量最多者，但是鐵由離子化傾向而言是一種活性高之金屬，若與水



金屬的腐蝕 (a)電化腐蝕基本條件 (b)單一鋼筋的生銹

圖 2-2 金屬的腐蝕⁽¹⁵⁾。

Fig. 2-2 Corrosion of metal.

發生接觸則容易以離子之狀態溶出而產生銹蝕如圖 2-1⁽¹⁴⁾所示。但鐵在空氣中之場合，一般而言於表面會形成氧化包膜而安定的存在，經由種種的研究，綜合其結果，由鐵與包膜之界面開始而至表面為 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，漸次地變為氧化程度較高之材料。一但此一安定包膜被破壞則會發生銹蝕，而金屬腐蝕基本上需具有陽極、陰極、導電通路、電流及電解溶液等五大要素如圖 2-2⁽¹⁵⁾所示，缺一要項，則腐蝕將無法進行。

1. 陽極(Anode)

陽極是氧化反應(Oxidation)的地方，此種反應使金屬離子化而放出電子。



2. 陰極(Cathode)

陰極則產生水的還原反應(Reduction)，在基性

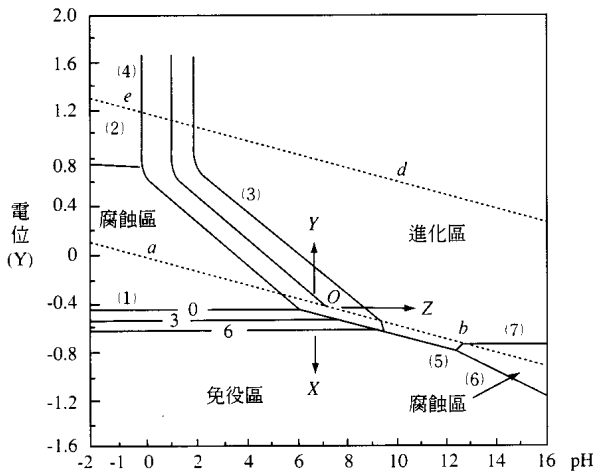
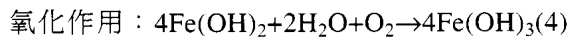
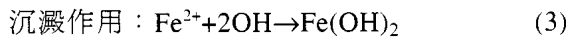
圖 2-3 水在水溶液中之波氏圖⁽¹⁴⁾。

Fig. 2-3 The diagram of iron in Water Liquid.

(Basic)溶液中，這種反應將使水與空氣的氧(O₂)吸收游離離子而形成氫氧離子(OH⁻)。



一旦氫氧離子產生，金屬離子才有機會與之結合而形成沉澱物，進而氧化生鐵銹[Fe(OH)₃]。

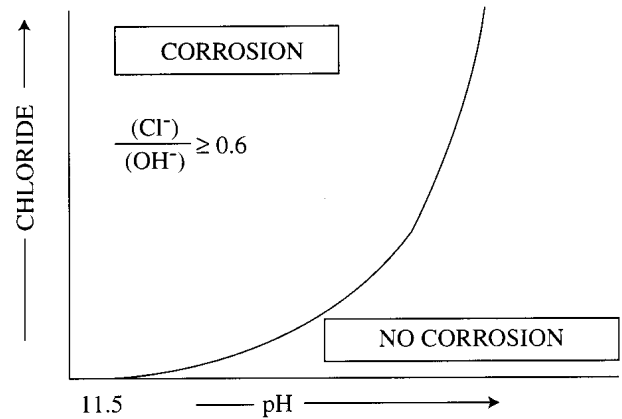


3.電導通路(Conducing Path)

由公式一及二可看出，氧化還原作用均需有電子的轉移，所以在有良好的導電路線的狀況下，腐蝕作用才可順利進行，相反的，當導電性不佳時，腐蝕反應速率就變的遲滯，這也是一般控制腐蝕的方法。

4.電流(Corrsoion Current)

腐蝕的產生必須要有足夠的電子數才可使離子化反應順利進行，換言之要有足夠的電動勢

圖 2-4 氯離子與氫氧離子濃度臨界曲線⁽¹⁶⁾。Fig. 2-4 Critical curve of Cl⁻ and OH⁺ ion density distribution.

(Electromotive)才可使電子流動，如此當然腐蝕的速率會加快。相反的，如果加上反向電流，則原來被腐蝕物即變成保護，也就達成防蝕目的了。

5.電解溶液(Electrolyte)

對於混凝土內之鋼筋，通常由於水泥水化所提供的鹼性環境，因此鋼筋外表產生的保護性氧化膜($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)得此確保，當然腐蝕反應不會發生。這種鹼性環境若純由水化生成物氫氧化鈣[Ca(OH)₂]提供，則其 pH 值約為 12.4，若考慮水泥中所含少量的鹼性氧化物 Na₂O 及 K₂O 則其 pH 值將提高至 13.2 以上，參照圖 2-3⁽¹⁴⁾ Pourbaix pH- 電勢能關係可以看出除非 pH 值降低至 9 以下，或昇高 14 以上，否則腐蝕將不易產生。除了碳化（中性）作用影響外，混凝土內若含有或外界有氯離子(Cl⁻)浸透的話，則將造成鈍化氫氧化膜(Passive Oxide Layer)的破壞，即使是在較高 pH 值環境下，隨著氯離子的提高，有效保護的 pH 環境亦隨之提高，否則無法克服，而圖 2-4⁽¹⁶⁾即表示氯離子與氫離子濃度臨界曲線，但此刻必須注意鹼骨材(AAR)反應問題。但祇限於游離的氯離子（水溶性者）而言，倘若氯離子與其他物質化合合成穩定的氯化物則其影響減低，研究結果發現水泥中 C₃A 熟料礦物及

- ① CO₂ 擴散進入裂縫
- ② CO₂ 擴散進入混凝土
- ③ 化學反應
- ④ OH⁻ 擴散

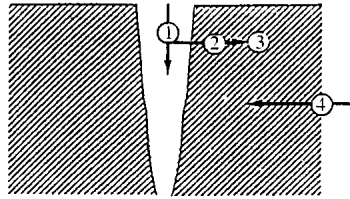
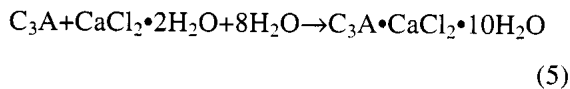


圖 2-5 水灰比與養護情況其混凝土內鋼筋腐蝕示意圖⁽¹¹⁾。

Fig. 2-5 Water to cement ratio curing state in concrete steel corrosion diagram.

俱有此種沖淡作用，如公式五，它會與氯離子形成氯鋁酸鈣水化物(Chloroaluminate Hydrates, $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)，惟 C_3A 礦物的抑制腐蝕的功能，至少需 3.4% 以上才可平衡。



游離氯化物可能經由摻料 ($CaCl_2$ 早強劑)、水 (含的氯的水、海水)、骨材 (如海砂、海石)、海水的侵蝕、沖刷等方式帶入。當然以上是假設無縫混凝土狀況下，要是結構混凝土由於力系不平衡造成張力裂縫時，則濕氣、氧氣可直接侵入，滿足了電化腐蝕的條件促使腐蝕加速。

由以上可知造成混凝土中鋼筋腐蝕最重要且簡單的機理為(1)混凝土的品質(2)混凝土的破裂(3)混凝土中性化或(4)氯離子的侵入等，以致鋼筋在潮濕空氣條件下得以進行一般電化學腐蝕反應。有裂縫存在的混凝土其腐蝕為直接的，而無裂縫存在的混凝土其腐蝕速率則受混凝土滲透係數所支配。換言之，品質良好的混凝土因裂縫減少，故其腐蝕性極低。低水灰比及良好養護的混凝土其滲透性低如圖 2-5 所示⁽¹¹⁾，所以氧氣、氯離子和二氧化碳擴散至鐵/水泥漿介面的速率非常緩慢，相對的氫氧離子(OH^-)被溶出的機率也降低，電阻增大，電流腐蝕反應遲滯。同時，水灰比小毛細孔

減少，孔徑較小，反應產物 (鐵繡) 的擴散步調更慢，而進一步阻止腐蝕的進行。

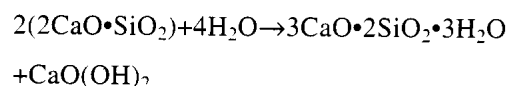
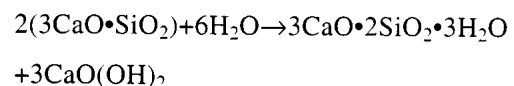
2-2 鋼筋混凝土主要的劣化原因：

理想的鋼筋混凝土結構物因鋼筋受到高鹼性混凝土的保護作用，其鈍態氧化膜不容易受到侵蝕，然而由於混凝土由材料準備至養護完成等作業過程乃至使用時均很容易受到人為、自然及氣候影響，以致混凝土預定品質受損，產生裂縫等問題，增加了腐蝕或潛在腐蝕的機率發生，表 2-1⁽¹⁹⁾為腐蝕損傷程度歸類。

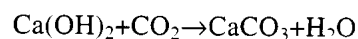
鋼筋混凝土之主要劣化因素與劣化現象，表 2-2⁽²⁰⁾概述如下：

(1) 混凝土中性化：

卜特蘭水泥由 $3CaO \cdot SiO_2$ ， $2CaO \cdot SiO_2$ ， $3CaO \cdot Al_2O_3$ ， $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ 等礦物組成。此等礦物與水產生如下之水化反應。



水泥經完全水化反應時，約產生 25% 之 $Ca(OH)_2$ 使混凝土保持 pH 值 12 以上。在如此之強鹼環境下鋼筋不會進行腐蝕作用。然而由於大氣中二氧化碳等酸性物質之侵透如圖 2-6，2-7⁽²¹⁾所示，混凝土之鹼性會由表面開始慢慢地漸次降低，此種現象稱為中性化現象。其化學反應式如下：



當中性化作用進行至鋼筋部分時，鋼筋對於腐

RC 結構物防蝕策略之研究

表 2-1 混凝土物理與化學性劣化種類、基因、控制變數及劣化機理⁽¹⁹⁾

Table 2-1 Concrete in physical & Chemical Failure type based influence control variable and failure mechanism

	劣化種類		劣化機理**	劣化機理說明	材料基因+			需要控制變數* (*愈多愈重要)										
					P	A	R	W/C	W/B	W/S	W/C	f _a	V _p	p	sp	a/c	air	
物理性劣化	表面磨耗	磨損、沖蝕、穴蝕	剪應力>剪力強度。反覆車載(磨損)，水的磨損(沖蝕)；激流作用(穴蝕)。	表面抗剪力不足，造成表面被剪破壞。	✓	✓		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	裂	體積變化	溫濕度坡降	水份喪失；毛細管張力、表面能量改變。	乾燥時表面收縮，造成表面裂紋；潮濕時表面膨脹，造成內部裂縫。	✓			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		鹽結晶壓力	鹽結晶而常混凝土乾燥時產生楔作用	孔隙中鹽類結晶產生晶壓。		✓			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	縫	結構載重	超載重和衝擊	混凝土受拉緣應力超過破裂模數				*	*					*	*	*	*	*
		反覆載重	載重下之微裂縫在反覆載重下因應力集中而擴大蔓延	設計不當或例工減料，損及強度；或車輛超重，另外路面不平整及接頭高程差過大。				*	*					*	*	*	*	*
		暴露極端溫度	凍融作用	支配膨脹的因為：1.水力定律(Power)；2.冰分離(Power)；3.出孔卸水(Livani)；4.滲透性。	水結冰體積膨脹9%，造成冰鏡或壓力，使混凝土分離。	✓	✓		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
			火害	骨材與水泥漿體膨脹係數及水泥漿遇乾縮作用；水泥漿體水化物的溫分解。	劇烈溫度上升產生內外溫差，而使水分無法順利排出，造成崩解作用。	✓	✓		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
化學性劣化	溶解和析晶		氫氧化鈣被溶解而造成孔隙；氫氧化鈣被溶解而與其他有害物質結合。	水份滲入混凝土，溶解氫氧化鈣，而於滲透面露出；乾濕作用而將溶解物析出結構外。	✓			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	硫酸鹽侵蝕		四、步驟 1. SO ₄ ²⁻ 滲透SO ₄ ²⁻ (水泥)； 2. Ca(OH) ₂ →溶解Ca ²⁺ +2OH ⁻ ； 3. SO ₄ ²⁻ +Ca ²⁺ +2H ₂ O析晶→CSH ₂ ； 4. C ₃ A·CS·H ₁₁ +2CSH ₂ +16H→C ₃ A·3CS·32H。	單硫酸型鋁酸鈣水化物與硫酸鈣鹽類作用，而生成鈣鈦石造成體積膨脹作用，致分離混凝土。	✓			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
物理性劣化	鹼骨材反應		1. 鹼分解並溶解活性矽或碳酸鹽之骨材； 2. 形成含水的酸鹼玻璃S+N/KH→N/K-S-H；碳酸與氫氧化鈣結晶； 3. 玻璃吸水形成溶膠滯留侵蝕周圍。	骨材之活性矽酸鹽與水泥中之鹼，鉀或鈉，作用產生圓狀裂縫，滲出膠體，一般呈現爆開或剝落現象。		✓		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	酸和鹼作用		1. Ca(OH) ₂ +2H ⁺ →Ca ²⁺ +2H ₂ O； 2. C ₃ S ₂ H ₃ +6H ⁺ +3H ₂ O→3Ca ²⁺ +2SHn+6H ⁺ ；	鹼對混凝土的影響甚小，然而酸性會因H ⁺ 離子而加速氫氧化鈣之溶解，甚至使C-S-H受侵蝕而產生砂膠。	✓			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
化學性劣化	鋼筋腐蝕		1. 陽極反應：Fe→Fe ²⁺ (aq)+2e ⁻ ； 2. 陰極反應：2H ₂ O+O ₂ +4e ⁻ →4(OH) ⁻ ； 3. 沈澱作用：Fe ²⁺ (aq)+2(OH) ⁻ →Fe(OH) ₂ ； 4. 氧化生銹：4Fe(OH) ₂ +2H ₂ O+O ₂ →4Fe(OH) ₃ 。	電化學反應造成鐵受氧化，形成氧化鐵，致使體積膨脹而產生鑄結剝離、破裂或剝落現象。		✓		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

+P.A.R.：分水泥漿體，骨材及鋼筋

*W/C：水灰比，W：用水量，C：水泥量，fa：骨材強度，Vp：水泥漿量，p：卜作嵐材料，sp：強塑劑，a/c：骨材／水泥比，air：空氣含量。

**混用水泥化學簡寫符號：C-CaO，S-SO₂，H-H₂O，A-Al₂O₃，S-SiO₂。

表 2-2 鋼筋混凝土結構物遭受鋼筋腐蝕損傷程度歸類⁽²⁰⁾

Table 2-2. The damage degree of Reinforce Concrete structure by corrosion m steel

目視徵兆	損傷程度歸類				
	A	B	C	D	E
混凝土表面顏色改變(*)	銹斑	銹斑	銹斑	銹斑	銹斑
混凝土龜裂	鋼筋軸向上有一些	軸向較多箍筋亦有些	大量的	大量的	大量的
混凝土剝落	-	有一些	大量	有些地方，鋼筋與混凝土不接觸	有些地方，混凝土脫離鋼筋之掌握裡
鋼筋斷面損失 (DA _s /A _s) ^(**)	-	-5%	-10%	-25%	箍筋有些部以損毀
結構體撓曲	-	-	-	可能	很明顯

(*)混凝土表面顏色改變並非經常出現，因此這種徵兆並非損傷歸類中一項事必備之重要徵兆。

(**)相對之氧化物厚度為 $t_o = a(\Delta A_s / A_s) \phi$ ，式中 ϕ 為鋼筋直徑，為係數，一般氧化物 $\alpha=1$ ，而氧化物與水泥材料混雜情況下 $\alpha=2$ ， A_s 及 ΔA_s 分別為鋼筋斷面積及損失量。

蝕作用變得沒有防護，而若有氧及水之供給時就會生銹。當鋼筋之腐蝕進行至某一程度時會因鐵銹之膨脹壓力而導致保護層混凝土產生裂縫或剝落。

若鋼筋有足夠之保護層而且混凝土之保護層品

質良好，則中性化到達鋼筋位置為止需要很長的時間，並且在中性化作用進行後，由於混凝土保護層防止氧化水之侵入，鋼筋之銹蝕作用不易進行，因此鋼筋混凝土之耐久性變得非常優異。其次，中性化現象大多不會降低混凝土本身之品質。

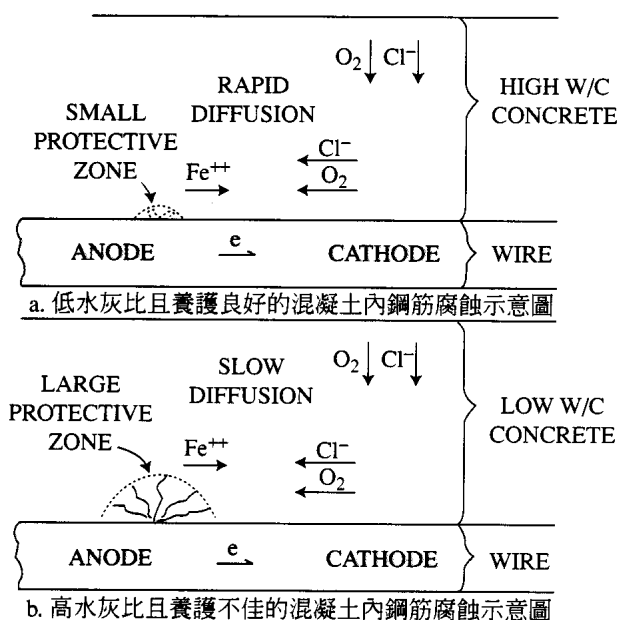
圖 2-6 有裂縫混凝土之碳化過程⁽²¹⁾。

Fig. 2-6 Carbonation process in crack concrete.

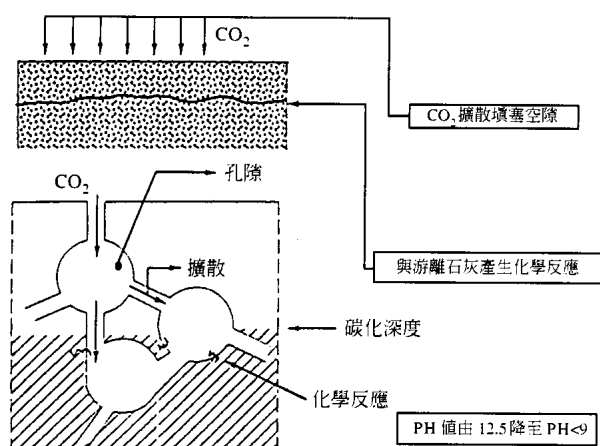
圖 2-7 無裂縫混凝土之碳化過程⁽²¹⁾。

Fig. 2-7 Carbonation process no crack concrete.

最近大多數常見之混凝土保護層剝落與銹蝕鋼筋局部外露現象，乃是肇因於保護層厚度不足。

(2) 鹽分導致鋼筋之銹蝕

若混凝土中存在之鹽分（氯離子）到達某一程度以上，即使混凝土沒有中性化，鋼筋亦會銹蝕

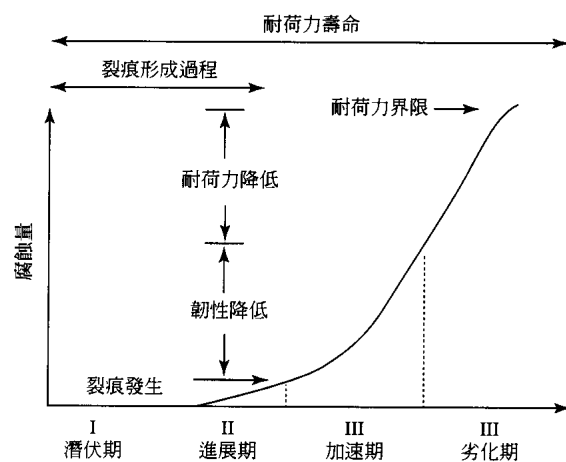
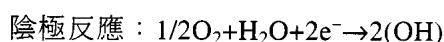
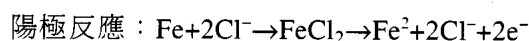
圖 2-8 鹽害之劣化過程⁽²⁵⁾。

Fig. 2-8 The failure process of salt damage.

愈快；並且鹽分含量愈多，則銹蝕愈快。其次，若鋼筋位置之混凝土已中性化，則更促進了銹蝕作用之進行。

氯離子的主要來源為水泥、摻料、水、骨材及暴露於海水環境所致，氯離子對於鋼筋腐蝕的影響主要視含水量與陰極極性化所需氧的含量而定，其影響可由下列公式看出。



氯離子侵入混凝土內部之途徑有二種，其一為從混凝土製造時進入，另一為結構物完成後由於海水飛沫噴濺而侵透⁽²²⁻²⁴⁾。初始進入包括使用未清洗乾淨之海砂或是使用作為促凝劑之氯化鈣（CaCl₂）等。特別是由海砂鹽分之混入成為現今問題，一次的氯化物總量規定⁽²²⁾目的亦為防止此種現象產生。其次氯離子本身對於混凝土品質，大體上沒有影響。

鹽害劣化之過程一般分為四期如圖 2-8⁽²⁵⁾所示，第一期為潛伏期，氯離子侵透入鋼筋混凝土內，逐漸在鋼筋附近累積，潛伏期之長短主要視

氯離子在混凝土中之擴散速度而定，但如使用海砂為混凝土原料，則因氯離子很多，潛伏期不存在，而直接進入進展期。第二期為進展期，氯離子開始腐蝕鋼筋，銹蝕逐漸累積產生膨脹，造成混凝土裂痕，進展期之長短視腐蝕速度而定，並受溶氧量，水及混凝土電氣抵抗等之影響。第三期為加速期，鋼筋沿軸方向產生裂痕，腐蝕速度加速，保護層隨之剝離、剝落，其支配原因大致與進展期相同，此時由於孔蝕與反覆應力之形成，構造物之韌性與耐荷力降低。第四期為劣化期，鋼筋全面腐蝕截面積顯著減少，承載能力明顯降低。

(3) 環境條件導致混凝土本身之劣化

混凝土是由岩石破碎的骨材，利用水泥作為膠凝體來粘結，可稱為人工岩石之一種材料。經由氣候作用之影響，會呈現出風化與溶解等劣化現象。

這些劣化現象中，特別顯著的是凍結與融解反覆作用所吸收之水分於其內部凍結，此時由於體積膨脹而對混凝土施與膨脹壓，此一過程反覆數十~數百次而導致混凝土破壞之現象。通常會由混凝土表面開始產生裂縫與薄片剝離，而後伴隨著鋼筋之腐蝕與外露，位於寒冷地區容易形成含水狀態。屋外面混凝土即容易遭致此種損傷。除此之外，因雨水是一種弱酸性，會導致混凝土表面融出水泥漿等劣化現象產生。濕氣或含水量的存在是滿足電化腐蝕的電解液條件，也是決定腐蝕速率的重要因子，倘若完全無濕氣存在的話，則腐蝕將終止，一般腐蝕最嚴重者乃空氣中的濕氣，因為，同時俱有水及氧氣，若鋼筋混凝土長期浸泡水中則腐蝕反而減少。

其次，由於日光照射之熱量及夜間冷卻之反覆作用導致鋼筋混凝土構件因溫度膨脹與收縮之反覆循環，於收縮時為構件造成拉應力而產生裂縫。

(4) 混凝土中材料的因素

混凝土材料品質若能控制鹼性物的含量或水、氧氣及氯化物的擴散，均可控制鋼筋的腐蝕問題。這些因素主要與水膠比(W/B)、骨材、拌和水質、水泥成分和摻料的特性而異。

a. 水膠比(Water To Binder Ratio)

水膠比決定混凝土品質，也決定水及氯離子的滲透性。水膠比愈大則水與氯化物的滲透性愈大，水膠比低而良好品質之混凝土對碳化作用的遏阻作用愈大，因為水膠比低則滲透性愈小，混凝土受碳化作用的深度也愈少。

b. 骨材 (粒料)(Aggregates)

骨材為混凝土的主要基材，為強度的主要來源，而其對鋼筋的影響主要是滲透性的影響，而目前的海砂屋問題即是大量採用海砂或摻用海水所造成，此亦為骨材來源的影響。

c. 水泥(Cement)

水泥對鋼筋腐蝕的影響經常被忽略，而在 ACI 318-95 規範中控制氯離子含量的方法，是利用降低水膠比或增加水泥用量來降低水泥單位水泥重量之氯離子量至某一比例。

d. 摻料(Admixture)

使用在混凝土中的摻料種類甚多，摻料的原料為廢料，大多數有機質材料對鋼筋無腐蝕的影響，然若考慮家加減水劑、強塑劑和輸氣劑等利用減水功能而降低水膠比時，摻料即有良好阻滯鋼筋腐蝕的功用。但早強劑如 CaCl_2 中的 Cl 含量，將對混凝土內鋼筋造成嚴重腐蝕的威脅，故使用時必須謹慎。

e. 鋼筋(Steel)

鋼筋對腐蝕的影響主要為其品質，如製造過程中，因品管不佳或摻有雜質，形成電化學腐蝕的條件，或鋼筋本身之鐵鏽可能影響握裹效果。

(5) 其它設計或施工上之因素

鋼筋混凝土建築物最常見到之不良，現象有裂縫、漏水及最初所述之保護層厚度不足等問題。但不僅只於此現象而已，亦存在著相關於混凝土自身之品質及建築物之劣化進行等問題。

a. 鋼筋保護層

很多建築物產生腐蝕的問題多出自於保護層不足所造成，故施工時需特別注意。

b. 搗實

施工時，搗實過度可能造成泌水及析離，則此將造成鋼筋週遭的空氣袋而有害鋼筋；搗實不足時，會造成蜂窩現象的發生。搗實的度亦受鋼筋混凝土可工作性的影響，一般施工作業應視混凝土坍度而決定搗實工具，而高性能混凝土的研發即是解決搗實的問題。

c. 養護

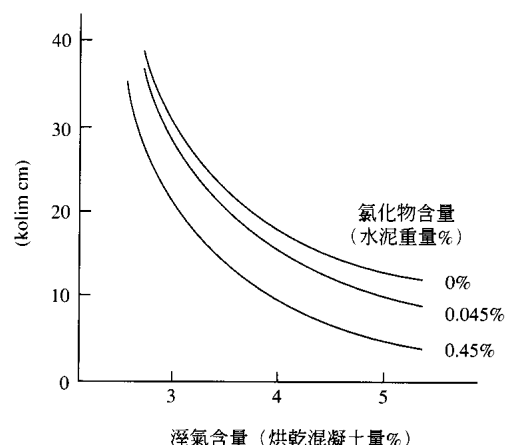
養護對滲透性有相當的影響，養護時間愈長，則水密性愈佳，而水中養護有較佳之抗腐蝕能力，浸水或泡水養護對混凝土品質有正面的意義。

三、混凝土中鋼筋防蝕技術

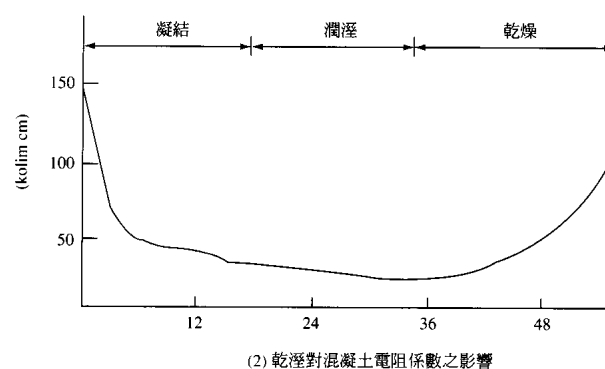
鋼筋混凝土的劣化因素可分為混凝土部分及鋼筋部分，若要到達防蝕的目的，亦必須針對其劣化因子加以討論。

3.1 混凝土的修補及防蝕技術

鋼筋混凝土之增加腐蝕之防疫能力，首先應從本身體質改善做起依據 ACI318-95 之耐久性要求，使降低混凝土的水膠比以提高其強度，減少混凝土孔隙及滲透性，摒除有害物質於構件之外部，設法減少有害物質之敏感性，及鈍化材料反應能力，如添加卜作嵐材料減少氯離子之侵蝕及空氣中水份的侵透。就改善混凝土品質的要點分析如下⁽³³⁾：



(1) 濕氣對混凝土電阻係數之影響



(2) 乾溼對混凝土電阻係數之影響

圖 3-1 混凝土保護層之電阻係數⁽³⁵⁾。

Fig. 3-1 Electric resistance coefficient in concrete layer.

(一) 防蝕材料之選擇

(1) 增加混凝土之阻抗

降低水灰比或水膠比減少混凝土的孔隙及滲透性，防止有害物質侵入，另在施工性改善，避免加水之現象發生，如使用高性能混凝土，即可改善混凝土之品質又可減少被侵蝕物質之存在增加工作性，使影響品質之因素降低。另外水泥用量之降低及改變水泥之品質亦可改善混凝土體積穩定性，減少塑性收縮及潛變導致裂紋之產生，如此可增加混凝土之阻抗以保護鋼筋如圖 3-1⁽³⁵⁾所示。

(2) 減少混凝土裂縫之產生

混凝土品質佳可保護鋼筋，但一旦裂縫產生，則混凝土的阻抗將大幅降低，如何減少混凝土裂

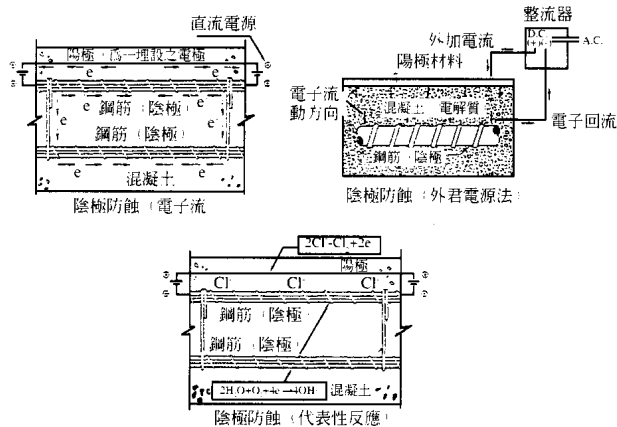
圖 3-2 陰極防蝕法⁽³³⁾。

Fig. 3-2 Cathodic Protection system.

縫產生或寬度成長，就是減少有害物長驅直入以侵蝕鋼筋的關鍵，除了增加強度外，應選擇能改善混凝土韌性的條件，尤其在反覆載重下，如在橋樑構造物中添加纖維，可以增加混凝土之韌性及構件之變位，減少裂縫寬度而鋼筋纖維之犧牲亦可增加保護鋼筋的程度。

(二) 施工技術及管理

一般鋼筋混凝土結構物屬現場施工，加工層次過多，且大多在露天下進行，因此結構體的品質隨施工材料、人員素質、環境、施工品管及法令體制的執行影響很大。如果鋼筋混凝土品質源於材料本身的缺陷，應以技術能克服，如肇因始於人為因素，則以教育訓練方法，以避免再發生。良好的施工環境、管理技術、工作時間、工人士氣與情緒等對鋼筋混凝土品質有相當影響；因此合理的管理、獎懲政策等對品質間接影響到鋼筋的腐蝕抵抗力。

(三) 維修技術

如果構造物有腐蝕狀況則由專家評估其損壞程度，其修護方法、材料及特徵如表 3-1 所示。若構造物損壞輕微則可由專業提供修補計劃，並應考

慮下列幾點：

- (1) 應熟悉構造物損壞的機構。
- (2) 適當修補材料及技術。
- (3) 施工技術及品質應能掌握。
- (4) 施工後應定期檢測。

一般而言，修補材料主要必須滿足下列規範：

(1) 必須比結構物修補區之原有材料更具有耐久性。

(2) 保護鋼筋防蝕（儘可能提高鋼筋周界混凝土之鹼性或在鋼筋及混凝土上塗上防止有害之腐蝕因子侵入）。

(3) 體積穩定（適當並能配合構件）。

(4) 混凝土與鋼筋間之握裹良好。

最近的材料發展的技術也可供選用即：

(1) 卜特蘭水泥砂漿及混凝土（價格低廉，現有技術優良，具有高鹼性及握裹能力良好）。

(2) 稀泥狀之聚合物類水泥材料（可作為表面底層材料，能增加與底材之握裹力）之聚合物類，如砂漿 / 混凝土（可作為混凝土修補材料）。

(3) 環氧樹脂水泥漿：此種材料較難處理而且較為昂貴，易受溫度之影響，鹼性較脆弱，但不易透水，握裹能力加強，不起化學作用，迅速硬化而且當塗敷於薄層而具有良好保護層，將相當的堅固耐用。

3.2 混凝土中鋼筋之防蝕技術

鋼筋混凝土中鋼筋之腐蝕必須對其腐蝕之原理採取對策而對症下藥始有效。最重要者應先建立正確之基本觀念而必須認清該構造物之損壞係因其內部鋼筋腐蝕膨脹而破裂損壞，應針對鋼筋之腐蝕採取防蝕措施而非對混凝土採取防蝕，防蝕方法、時機及效用如表 3-2 所示，以下就是混凝土中鋼筋之防蝕技術，作一介紹：

(一) 陰極防蝕法

表 3-1 混凝土修復的方法、材料及特徵⁽²²⁾
Table 3-1. Concrete repair method, Material and characteristic

修復方法 填封裂縫	適用狀況 微裂隙（寬度小於 0.05mm）	可選用材料 環氧樹脂、低黏性聚合物、 乳液	材料需求特性 良好的膠結性能、不受潮濕影響
	大裂縫（寬度大於）接頭、 漏罅	卜特蘭水泥砂漿、聚合物砂 漿、油灰和填隙料	搗實良好 膠結性能良好 人造聚合物及煤焦油
表面塗封	表面漏水、防水處理、隔離 有害物質進入混凝土內	人造聚合物塗料、瀝青塗料	良好的附著性、接觸角小
局部表面補綴	繫件孔洞、螺絲孔、預力導 孔、局部的破裂	卜特蘭混凝土或水泥砂漿 速凝水泥 聚合物樹脂 聚合物混凝土、瀝青混凝土 乳液改良混凝土	鋁酸鈣和凝結調整水泥、環氧劑 聚脂等俱良好膠結性材料
鋪面和噴漿	無法表面補綴或效果不佳需 全面補修，如橋面版、橋底 鋼筋或混凝土損壞剝落、沖 蝕等。一般修補厚度為 25 至 100mm。	卜特蘭水泥混凝土 纖維加強混凝土 乳液改良混凝土 聚合物混凝土 瀝青混凝土	使用速凝摻料 抗破裂佳 良好的膠結性能
貼片補強	結構體構件承載力不足，需 局部或全部加強，如橋樑底 樑或建築物補強。	鋼板，以螺栓（化學或膨脹 性）固定或修補介面用環氧 樹脂充填。使用單向強化纖 維，用環氧樹脂粘貼於修補 面上。	修補複合系統應俱承載力及適當 韌性，唯應注意表面防火。
重建	安全性考慮無法修復時		

一般認為混凝土內鋼筋腐蝕之原因仍屬自然之電化學作用所致，則應施用陰極防蝕技術來防止腐蝕。

所施用的陰極防蝕法係以適當之方向放出之電流以阻止鋼筋上之陽極腐蝕電流發生，而進入電解質（混凝土）中，如果鋼筋上陽極得到防蝕電流而發生不再發生腐蝕電流，變成收受電流而被防蝕之陰極如圖 3-2 所示。換言之，鋼筋上所有陽極負電位必須改變為比原陽極負電位更低之電位才能達到防蝕。茲介紹目前已採用之 RC 構造物陰極防蝕技術如下：

(1) 封層式陰極防蝕法(Conductive Material Overlay Cathodic Protection System)

採用白金線網或鍍鉑之鈮、鈦或銅線網極陽極

腐蝕，該項網材料昂貴惟可在該線網上噴施水泥砂漿鋪蓋作為電解質，故可以作為版底面或樑柱上作為防蝕之陽極材料。此防蝕措施較為經濟，惟其缺點僅適用於平面 RC 版上面且增加 RC 版面等之重量。

(2) 無封層式陰極防蝕法(Non-overly Cathodic Protection System)

1. 採用白金線形陽極或鍍鉑之鈮或鈦線形陽極防蝕法

白金或鍍鉑之線形陽極較一般陽極昂貴，為減少該項陽極之數量，降低供料費用，採用傳導性良好之陽極混凝土(Anode-Concrete)作為傳佈防蝕電流之材料，予以擴大電流傳佈面積。在 RC 面版或其構造物表面上每隔 3 公尺（依防蝕面積而定）

表 3-2 鋼筋混凝土防蝕方法、時機及效用

Table 3-2. Reinforce concrete anti-corrosion method. Chance time and efficiency

防蝕方法			應用時機		潛在需求：被接受程度			
			施工時	施工完成後	肯定	懷疑	現場評估	研究／發展
1. 去氯離子法	電化學＋離子交換			○	○			○
2. 腐蝕抑制	添加錫鹽類，硝酸鹽類，安息香酸鹽類		○			○		○
3. 混凝土塗封	(1) 表面	(1) 防水塗膜	○	○	○			
		(2) 鋪面： a. 低水灰比混凝土	○	○	○		○	
		b. 乳液改良砂漿	○	○	○			
	(2) 低水灰比混凝土	強塑劑混凝土(SPC)	○		○			○
		高性能混凝土	○		○			○
	(3) 內部填封混凝土	添加乳液	○		○		○	
	(4) 注膠混凝土	(1) 聚合物 (2) 苯乙烯、MMA (3) 硫磺	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○		○ ○	
4. 鋼筋表面包封	(1) 隔離屏障層	環氧樹脂，氧化橡膠	○		○		○	
	(2) 陽極處理	鍍鋅，鍍鎳	○			○	○	
5. 陰極保護	抑制電流		○	○	○		○	

鋸成溝槽填放陽極及陽極混凝土予以防蝕。

2. 採用細碳絞線陽極防蝕法

碳絞線陽極防蝕法與白金或鍍鉑線形陽極相同，只是碳絞線供應之電流密度較鍍鉑線形陽極為低，故填放陽極及陽極混凝土之溝槽間隔應予以縮小（依防蝕鋼筋面積而定）。該項陽極亦可作為次要陽極輔助鍍鉑線形陽極傳佈電流之用。

3. 採用導電聚合料銅心絞線陽極防蝕法

聚合料銅心線陽極較鍍鉑線形陽極廉價，雖然亦可以用上述溝槽方式處理，但為方便施工，該項陽極在工廠編為網狀形捲為一捆，施工時易於攤開直接裝設於各種形體之 RC 構造物表面上。裝設於平面上鋪蓋者 1 吋厚以上之一般水泥混凝土作為電解質，裝設於柱或橋面版底面或大樑者，噴用水泥漿鋪蓋作為電解質。

上述無封層陰極防蝕法及瀝青封層陰極防蝕法分別有其優缺點。無封層陰極防蝕法適用於任何

型態及位置之防蝕，惟需費用較高，而封層防蝕法限用於平面上，惟防蝕費用較少。

(二) 氯離子的去除或添加抑制劑

氯離子去除的方法，有使用清水沖淡方式或利用電化學、電滲、離子取代法等兩種。第一種方法效果不佳，而第二種的成功率頗高。抑制劑的使用效果在受壓構材效果不錯，但在受張構材仍未被全面肯定，甚或研究指出效果不佳。另外，使用抑制劑有時會使混凝土強度受到影響。通常被使用的抑制劑為錫鹽類(Stannous salt)、硝酸鹽類(Nitrate)和安息香酸鹽類(Benzoates)等氧化物廢料等。

(三) 混凝土填封料

混凝土填封料基本上分為兩種類型，一種是提供表面屏障或遲滯功能，使水、氯化物、氧氣和

二氧化碳難以進入混凝土內；另一類為滲入混凝土填封毛細管孔隙而阻止任何腐蝕物質進入混凝土。此法應注意與構件之受力行爲配合，爲避免裂縫處造成防蝕之漏洞，應選擇多種之防蝕處理，並與構件行爲相變形且具有修補的功能之材料，表示理想修補系統模式。

(1) 防水塗膜

防水膜的材料諸如聚脂樹脂、環氧劑改良煤焦油塗層、防水膠帶等均爲有效的防水膜形成材料，此類材料爲塗膜或黏貼表面上，俟乾燥後即形成防水隔離層，此防蝕材料施工應注意材料之均勻性及對地下水之耐蝕性。

(2) 不透水鋪面

鋪設一層低水灰比，高水泥因子，高性能混凝土或良好搗實的混凝土於原有混凝土表面上，或使用苯乙烯、丁基橡膠、乳液改良水泥砂漿形成連續性防水膜的保護方式保護底層混凝土內之鋼筋。鋪面處理對氯化物之滲入有相當之阻止效果。

(3) 全面使用低水膠比之高性能混凝土

利用高性能減水劑（即強塑劑）的減水功能，使低水膠比的混凝土容易工作，進而達到最佳自流式之高性能混凝土，此對防腐蝕有極佳的效果。

(4) 內部填封混凝土

基本上使用高分子乳液材料添加入混凝土中使用形成填封毛細管孔之連續薄膜，因此阻擋氯化物、水及氧氣的侵入。

(5) 注膠混凝土

將高分子單體注入硬固混凝土內，部分或全部填封混凝土內之孔隙，然後加熱使之聚合，則可有效防止外界侵蝕物質進入，此類單體材料有甲

基丙烯酸甲脂，苯乙烯或硫磺等易於聚合的低黏性、低毒性材料。

(四) 鋼筋表面包封

將鋼筋表面以優良材料直接包封，理論上應用此法可以不考慮混凝土品質問題，腐蝕問題也無法發生，此類包封材料可分爲兩類，即屏障包封及陽極處理包封。有機質材料如靜電粉末處理的環氧樹脂、氯化橡膠等常用作屏障包封材料。鋼筋塗膜保護雖然效果不錯，但是一旦塗膜在施工中破損，則其腐蝕會更嚴重。

(五) 含水量隔離保護

使用乾燥處理譬如通風，空調等隔離濕空氣或降低露點，則可以保持混凝土表面及內部的乾燥，避免二氧化碳、水的侵入而達到防蝕的目的。

(六) 電化學去鹽法

將鋼安排成陰極，當電流通後，帶負電的氯離子會遠離陰極而朝向陽極集中，而且給的電流愈大，氯離子的移動速度愈快，鋼筋表面的氯離子含量會逐漸降低，直到不會造成鋼筋腐蝕爲止。

(七) 鋼筋保護材料之選擇

鋼筋保護材料之選擇，可以從鋼筋本身表面處理材料及環境條件的改變，選擇增加鋼筋阻抗的材料來使用，均可達到保護效果，對鋼筋本身材料而言，可選擇合金材料來增加鋼筋之熱動力學之穩定性，但在營建工程而言，合金材料費用太高不適當，亦可以熱浸鍍鋅之方式形成一種障壁機構，由鋅的犧牲機理以增加陰極（鋼筋）電位方式達到防蝕之目的，近年來亦有相當多之工程採用此方法取代傳統之表面塗裝方式，以減少結構物之維修。

除了鋼筋本身外，亦可由表面塗層增加電極間

的電位降，如一些有機塗層及無機之塗膜，均可增加其阻隔效應，一般常用如環氧樹脂靜電塗層，氯化橡膠及橡膠化瀝青材料等。另外在環境控制中，混凝土多了一種選擇，在混凝土中添加改變鋼筋活性的摻料，如抑制劑之鉻酸鹽、硝酸鹽及胺基酸等，減少混凝土之含水量及孔隙，如礦粉摻料-飛灰、爐石等，阻止氧氣及水分等入侵或對於外在環境之改變，如減少構件之尺寸等方式均可。

四、結論與建議

1. 鋼筋混凝土在建築構造上的使用，已有相當長的時間，而在取代材料的研發工作上亦尚未成熟，故在未來的使用，還可說是建築構材的主流。
2. 對混凝土構造物的使用壽命而言，它是要求耐久及嚴謹的構材，若以生命體的觀念來看，可使用優生學的理念來使用於鋼筋混凝土。
3. 在預防重於治療的前提下，最好能於材料使用之初即加以注意品控，將能減少日後的隱患。

誌謝

感謝台灣科技大學營建材料研究室黃兆龍教授給予指導與鼓勵，謹致由衷謝忱。

參考文獻

1. 林草英，「混凝土破裂及剝落之防止」，鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會，P1-49，台北(1990)。
2. 施漢章，「腐蝕原理」，省交通處港灣技術研究所專刊 No. 26，P1/1~1/66 台中(1986)。
3. 黃兆龍，「鋼筋混凝土之腐蝕與防蝕」，省交通處港灣技術研究所，P4/1~4/29，台中(1986)。
4. 黃兆龍、董榮進、李清俊、郭昭宏、釋俊仁，「混凝土中鋼筋腐蝕行為研究」，第四屆技術及職業教育研討會，P1313~1318，高雄(1989)。
5. 黃兆龍、陳建成，「鋼筋混凝土樑鋼筋腐蝕性質與探討」，碩士論文，國立台灣工業技術學院工程技術研究所，台北(1990)。
6. 蔡得時，「海域構造物之腐蝕研究」，第五屆技術及職業教育研討會論文集，P1166~1175，台南(1990)。
7. 彭耀南、趙文成，「海砂用於生產混凝土可行性研究」，內政部建築研究所籌備處專題研究計劃成果，期末報告(1991)。
8. 黃兆龍、郭昭宏，「反覆載下鋼筋混凝土樑之鋼筋腐蝕機理之研究」，國立台灣工業技術學院營建材料研究序列(1991)。
9. 黃兆龍、王和源，「海砂/海水對水泥漿硫酸鹽侵蝕微觀結構變化及抑制策略探討」1991。
10. 莊秋明，「鋼筋混凝土結構腐蝕的危機」，鋼筋混凝土施工技術與結構物腐蝕防治研討會，1994。
11. 左克東、許世希、藍亨吉等譯，「腐蝕防制學」，百成書局，(1997)。
12. William F. Smith, "Principles of Materials Science and Engineering," McGraw-Hill Publishing Company, (1990).
13. Lawrence H. Van Vlack, "Element of Materials Science and Engineering," Addison-Wesley Publishing Company, (1989).
14. Wranglen G, "An Introduction to Corrosion and Protection of Metals," Chapman and Hall Ltd, USA, (1985).
15. 黃兆龍，「混凝土中氯離子含量檢測技術」，詹氏書局，(1994)。
16. 萬其超，「電化學之原理與應用」，徐氏基金會出版(1990、12)。
17. 朱堯倫譯，「基本電化學」，徐氏基金會出版(1990)。
18. 黃兆龍、張炳坤、廖東昇「鋼筋混凝土腐蝕防治之探討」，營建工程技術，第19期，台北，(1996)。
19. 施建治，「鋼筋混凝土腐蝕診斷技術」，防蝕工程，第六卷第四期(1992)。
20. 黃兆龍，「混凝土耐久性基因及控制設計」，第十五屆中日工程技術研討會建築研究組(2)，內政部建築研究所籌備處，(1994)。
21. Schiesl P., Corrosion of Steel in Concrete, Chapman and Hall, (1988).
22. 李釗，「設計規範應有的防蝕考量」，鋼筋混凝土施工技術與結構物腐蝕防治研討會論文輯(黃兆龍主編)，國立台灣工業技術學院，(1994)。
23. 李釗，「海洋環境對鋼筋混凝土侵蝕的反應機理及防蝕注意事項」，鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會技術論文，台中，(1989)。

24. 林維明，「鋼筋混凝土腐蝕鹽害機構」，省交通處港灣技術研究所，台中，(1988)。
25. 陳文源，「海洋鋼筋混凝土防蝕策略」，港灣報導。
26. 梁明德、黃然、林詠彬、翁榮州，「鋼筋混凝土之檢測方法介紹」，材料與社會，第 6 9 期，(1992)。
27. 陳四桂，「鋼筋混凝土缺陷非破壞檢測技術簡介(上)」，工業材料，第 100 期，(1995、4)。
28. 陳四桂，「鋼筋混凝土缺陷非破壞檢測技術簡介(下)」，工業材料，第 101 期，(1995、5)。
29. 林宜清、劉宗豪，「混凝土結構裂縫之非破壞檢測技術評析」，橋樑與公路鋪面混凝土結構破壞檢測技術研討會論文集(黃兆龍主編)，台北，(1995)。
30. 施建治，林葆喜，「鋼筋混凝土結構物腐蝕檢測與資料處理」，鋼筋混凝土施工技術與結構物腐蝕防治研討會論文輯(黃兆龍主編)，國立台灣工業技術學院，(1994)。
31. 林葆喜，「混凝土結構物防蝕方法」，材料與社會，第 69 期，(1992)。
32. 張炳坤，「混凝土中鋼筋防蝕對策」，萬能學報，第 21 期(1999)。
33. 黃兆龍，「混凝土性質與行為」，詹氏書局，(1997)。
34. Minddless S. and Young d. F., Concrete, Prectice, Hall, N.J. (1981).
35. 林維明，「海洋混凝土結構物防蝕規範及使用壽命預測及檢討」，海洋混凝土工程研討會，台中，(1987)。
36. 黃兆龍，「混凝土病變及修復」，混凝土施工及研討會，財團法人台灣營建研究中心，台北，(1987)。
37. 鋼筋混凝土腐蝕偵測及防蝕技術(海砂結構物檢測及防蝕技術簡介)，技術簡介，工業技術研究院(1994)。
38. 王仲宇，「混凝土結構物貼片補強技術」，鋼筋混凝土結構物維修補強技術講習會(黃兆龍主編)，台北，(1995)。
39. 賴耿陽譯，「工業防蝕實務」，復漢出版社，(1987)。
40. 湛淵源(黃兆龍指導)，「專家系統在混凝土病變診斷雛形系統之研究」，國立台灣工業技術學院營建工技術研究所，(1990)。
41. 湛淵源、黃兆龍，「混凝土病變診斷與維修技術」，鋼筋混凝土結構物維修補強技術講習會(黃兆龍主編)，台北，(1995)。
42. 鄭棟元(指導教授：黃兆龍)，「反覆載重下及單筋樑應力腐蝕之研究」，國立台灣工業技術學院營建工技術研究所，(1993)。