

鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討

林維明* 論述

一、前言

鋼筋混凝土結構物係以鋼筋加強混凝土之抗彎及抗拉強度，並以混凝土保護層及水泥之高鹼性來防制鋼筋之腐蝕，為一種具耐久性之複合材料。混凝土若健全，則鋼筋不會生銹，但因拌合

材料，施工條件，自然與社會環境條件和使用條件等各種參數之變化（如圖1所示）⁽¹⁾因此使得結構物發生表面惡化，強度降低及撓曲度大等現象，其致因分別如圖2至圖4所示⁽¹⁾。而主要之劣化要因及劣化現象如圖5所示⁽¹⁾；各種混凝土劣化現象之相互關係則如表1所示⁽¹⁾。

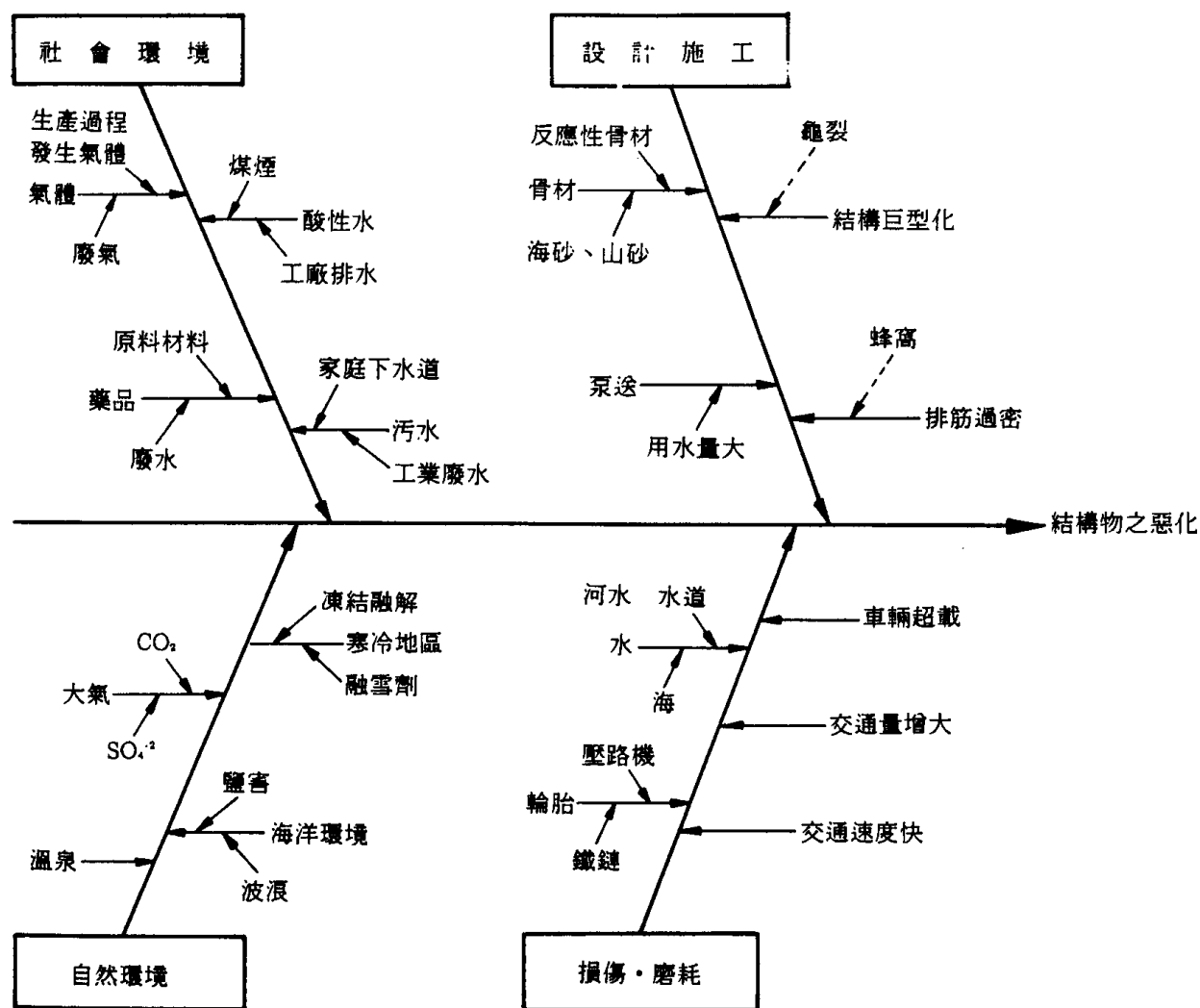


圖1 混凝土結構物惡化主要參數⁽¹⁾

* 交通處港灣技術研究所港工材料組組長

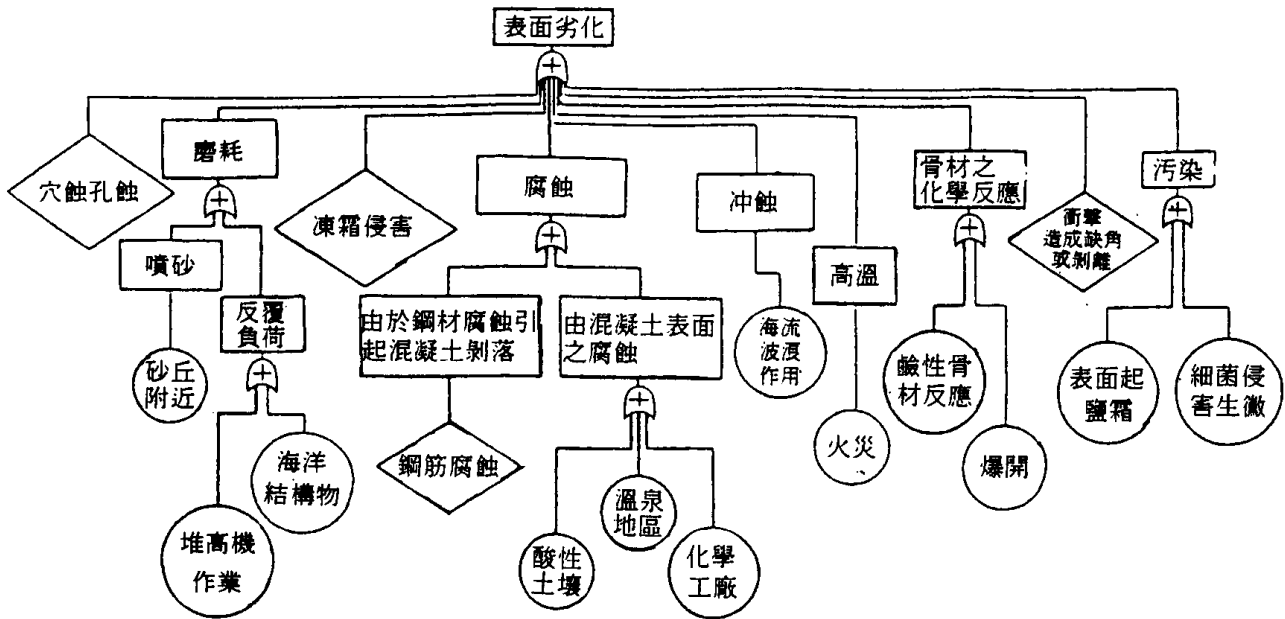


圖 2 表面劣化之原因分析圖⁽²⁾

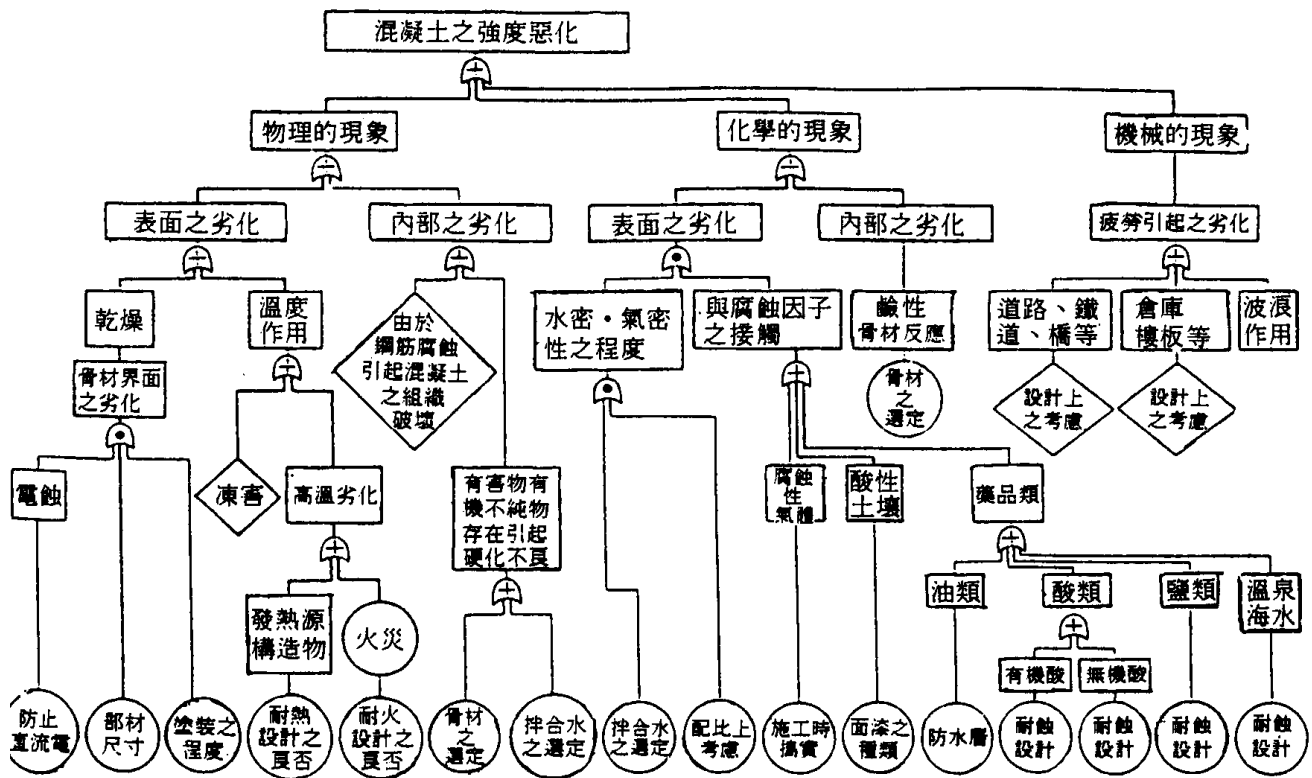


圖 3 混凝土強度惡化之原因分析圖⁽¹⁾

鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討

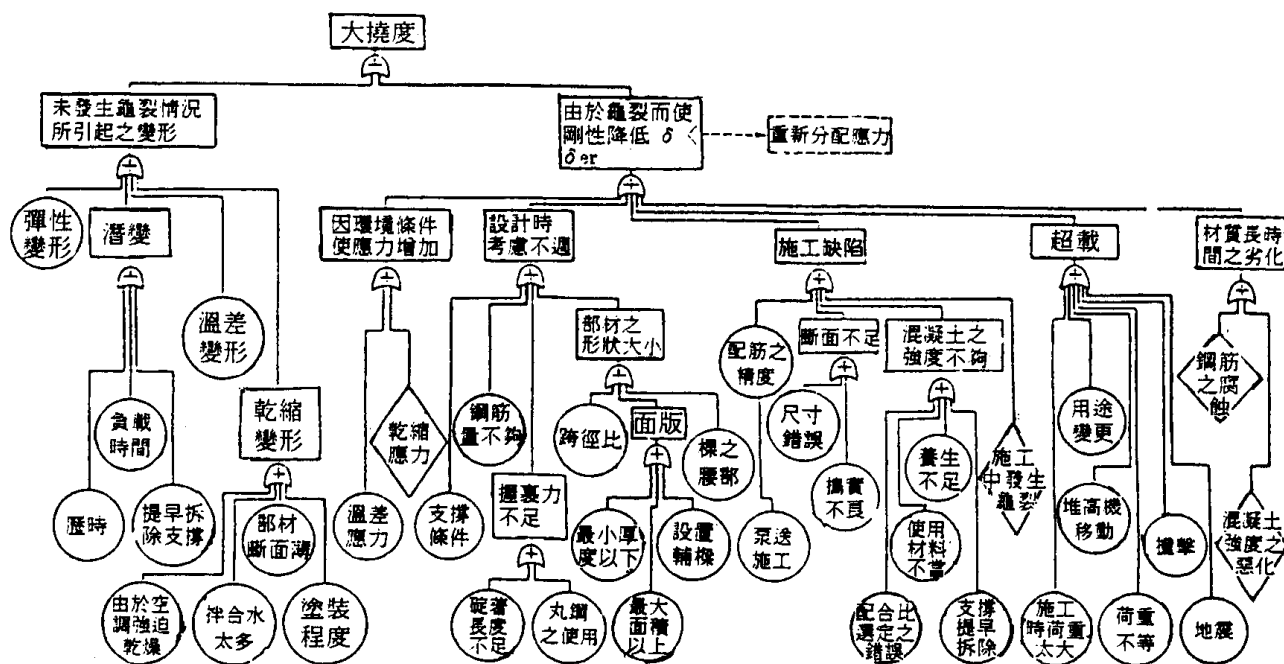


圖 4 大撓度之原因分析圖⁽¹⁾

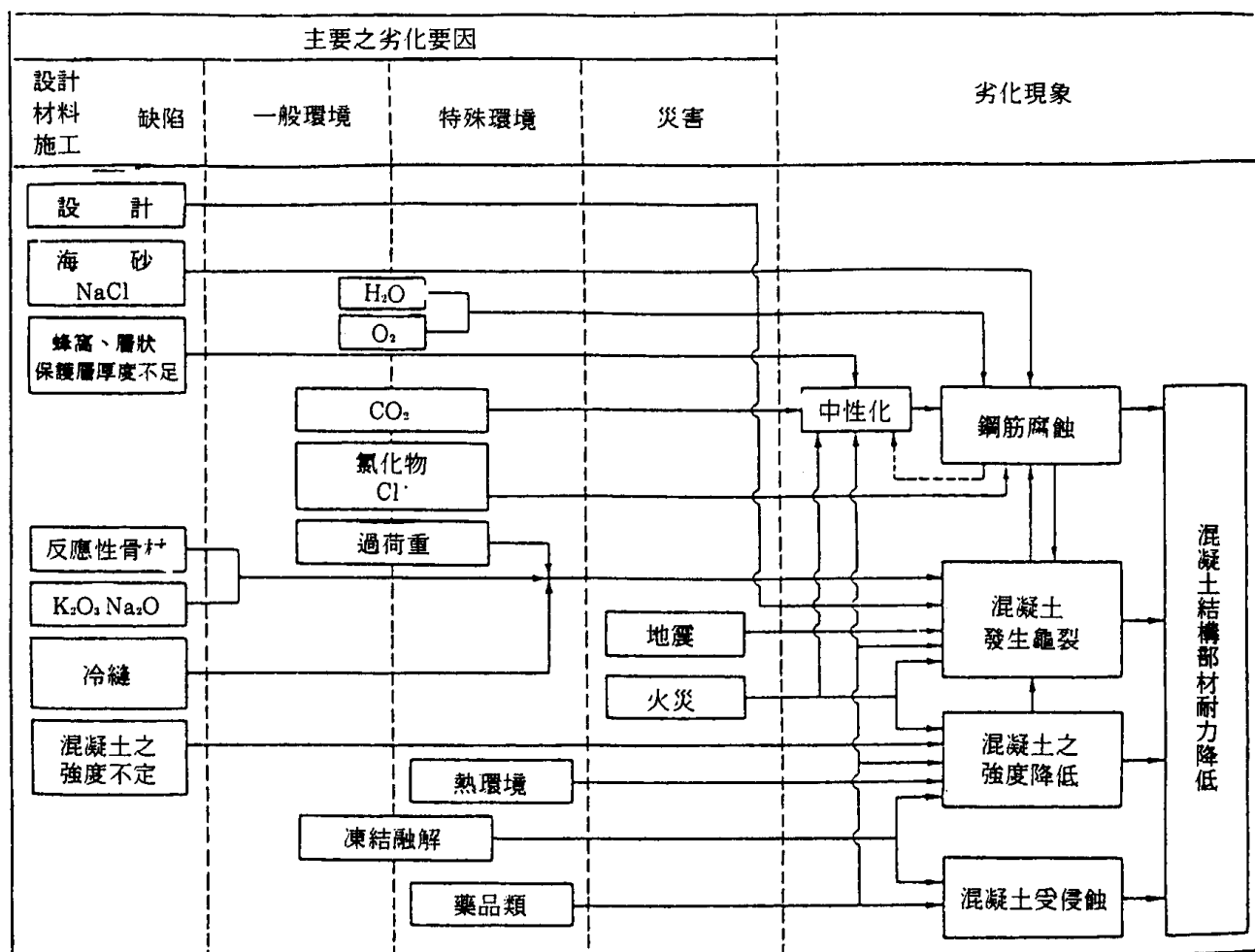


圖 5 主要之劣化要因及劣化現象⁽¹⁾

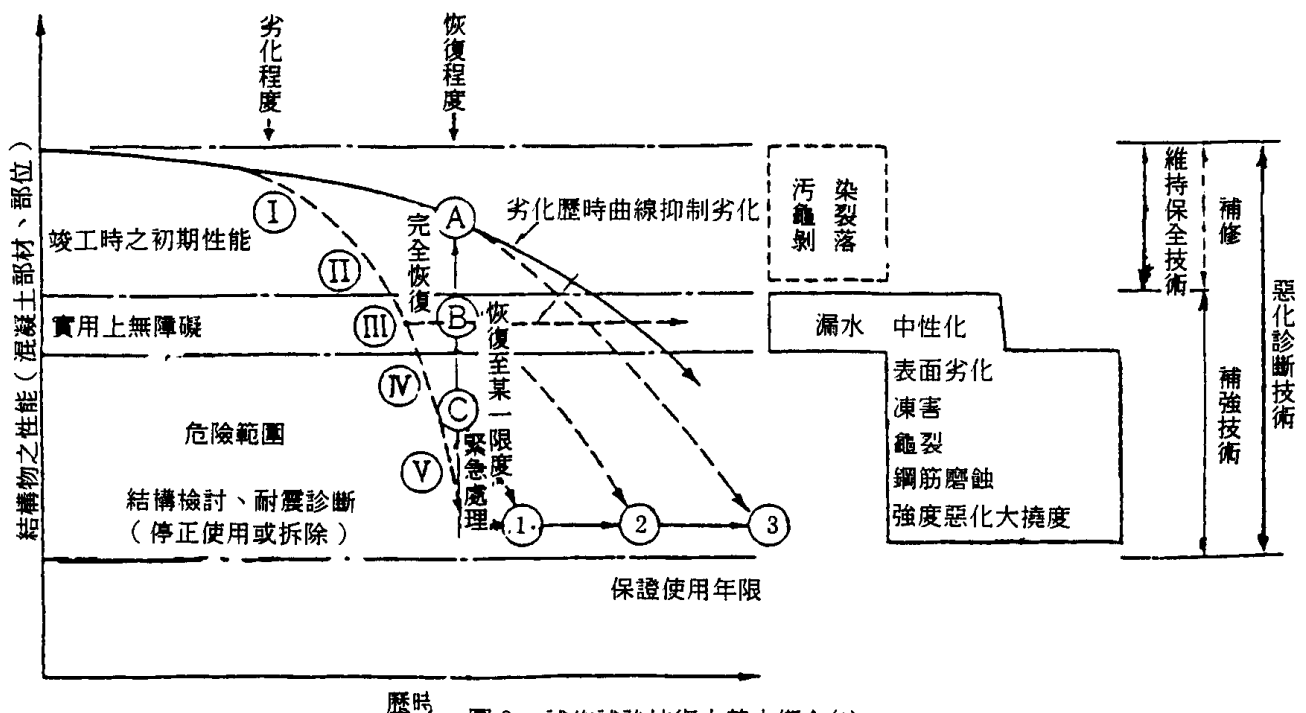
表 1 各種劣化現象相互之關係⁽¹⁾

主要原因，相關之劣化現象 現在發生的劣化現象	凍害	強度劣化 (強度不足)	龜裂	漏水	中性化	鋼筋腐蝕	表面劣化	大的變形	主要之劣化原因
凍害	●	○	△						溫度變化，水 強度降低(施工 缺陷)
強度劣化 (強度不足)	●	●	△					○	溫度變化，超荷 重(施工)
龜裂	●	●	●			●		○	龜裂(施工)
漏水	○	●	●	●		△		○	CO ₂ 侵入
中性化	○	○	●	●	●		○		Cl ⁻ ，水，O ₂ 等侵入
鋼筋腐蝕	○	○	●	●	○	●	△		
表面劣化	●	○	○	●		●			
大的彎曲變形		●	●			●			超荷重

(注) ● 1 次的原因，○ 2 次的原因，△ 3 次的原因

結構物之品質會隨時間增加而產生劣化情形，但就使用之規定，在使用期間內應均保持同樣的耐久性。然而結構體各部位劣化程度經常不一致，部份需進行補修以達到恢復其使用性、耐久及耐用性。補修之基本概念如圖 6 所示。迄今已有許多學者，進行各種改善鋼筋混凝土耐久性之研究再綜合上述各圖表可得出鋼筋混凝土腐蝕因素主要為使用不適當之混凝土組成材料，施工品質控

制不良，環境太惡劣，使用條件超過原來設計條件等因素，可說是相當地複雜。表 2 則為發生腐蝕之原因概要⁽¹⁾。一般檢討鋼筋混凝土結構物之耐久性時，基本上需考慮混凝土本身之品質劣化現象及混凝土中鋼筋發生之腐蝕，對港灣鋼筋混凝土結構物而言，主要之惡化原因及其影響性如表 3 所示。

圖 6 補修補強技術之基本概念⁽¹⁾

鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討

表 2 腐蝕發生之要因⁽¹⁾

項 目	裂縫之腐蝕	混 凝 土 中 之 腐 蝕						
		直 接 之 要 因				間 接 之 要 因		
		Cl ⁻ ⑤		中性化	O ₂ , H ₂ O 之供給	混凝土之化學性惡化⑥	混凝土之物理性劣化⑧	
		已存在⑥	侵入					
環境及施工條件	海水條件 (海中、潑濺、大氣)	○①	×	○	○	○	○	○
	氣溫條件乾濕 (有無凍融現象)	? ②	×	×	△	×	△	○
	荷重(波力、載重)	○③	×	×	×	×	×	○
	製作(現鑄、預鑄)	?	×	? ⑦	? ⑦	×	×	×
	PC或RC	○④	×	?	?	×	×	×
設計	保護層厚度	○	×	○	×	○	×	×
	龜裂寬度(荷重作用)	○						
使用材料	水泥種類	×	×	?	△	×	○	×
	細骨材 (如海砂, 輕質骨材)	×	○ 海砂	△	△	△	×	△⑩
	粗骨材 (高爐石, 輕質材)	×	×	△	△	△	×	△⑩
	拌合水(含 Cl ⁻)	×	○	×	×	×	×	×
配合設計	單位水泥用量	×	×	○	○	?	○	○
	水灰比	×	×	○	○	?	△	○

○一次的原因 △二次的原因 ×三次的原因

註：①O₂, H₂O 供給條件不同。

②凍融或乾濕作用引起龜裂變化。

③沒有荷重之頻率變化。

④因有無 PC 套管之腐蝕度不同。

⑤PH 值在 12 以上不會發生腐蝕。

⑥使用材料中含 Cl⁻。

⑦考慮現鑄及預鑄具有同一種混凝土品質。

⑧Ca(OH)₂ 之溶出及 SO₄²⁻ 之作用引起混凝土劣化。

⑨漂砂及漂游物之作用。

⑩輕質骨材之使用。

表 3 港灣 RC 結構物的惡化原因及其影響性⁽²⁾

種 類			原 因	對混凝土及鋼筋的影響
混凝土本身品質劣化	化學作用	氫氧化鈣的溶解	與海水作用，水泥硬化體被分解。	混凝土變為多孔性及中性化
		使用鹼性骨材 硫酸鹽的侵入	與鹼類鹽起反應。 海水中硫酸鹽的作用。	鈣矽石形成及膨脹破壞。 混凝土內部起結晶而膨脹。
	物理作用	凍融、乾濕作用 磨耗、沖蝕作用	氣象海象作用。 漂浮物，海流漂砂	產生龜裂及鹽類濃縮與結晶 混凝土表層之破壞及風化
鋼筋腐蝕引起之惡化	混凝土中腐蝕	碳酸鹽化作用 鹽分的作用	碳酸鈣與二氧化碳的化學反應。 使用材料(海砂、摻料)中含有 Cl ⁻ 及海水之滲透	混凝土的中性化，使 PH 值降低。 氯離子的作用而使鋼筋之鈍態膜被破壞
	斷面龜裂，引起鋼筋腐蝕		受到荷重、外力及乾燥收縮作用	鹽分及水分滲透至鋼筋處發生腐蝕

事實上鋼筋銹蝕生成物 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (紅銹) 或 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (黑銹) 將使其體積膨脹為原來的 2-6 倍，因而引起混凝土保護層剝落 (圖 7)⁽³⁾ 鋼筋強度降低，甚至鋼筋發生斷裂危及安全。而混凝土發生劣化，則容易引起鋼筋腐蝕。因此兩者關係密切。本文主要檢討海洋結構物中，混凝土劣化及鋼筋銹蝕之要因及延緩腐蝕之對策。

二、海洋環境下，混凝土劣化及鋼筋腐蝕之要因

2-1 混凝土劣化原因及現象

海洋 RC 結構物終年處於海洋環境下，混凝土發生劣化原因及現象和所處之腐蝕環境位置之影響性如表 4 所示⁽⁴⁾，現列舉主要影響因素，概述如下：

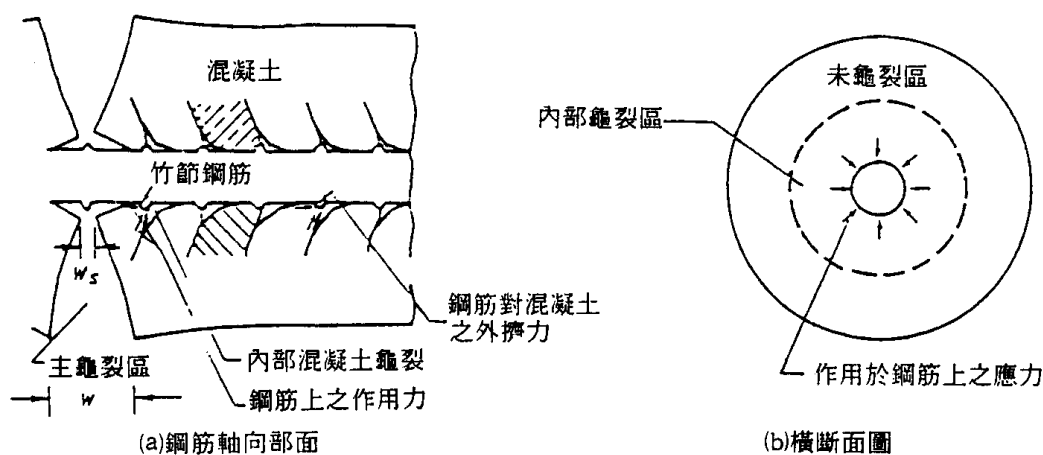


圖 7 鋼筋腐蝕變形後，其周界之應力應變情形⁽³⁾

表 4 海洋鋼筋混凝土之劣化原因及現象⁽⁴⁾

主要原因	劣化原因	劣化現象	與潮位之關係			
			海中區	潮汐帶	飛沫帶	大氣帶
化學的原因	外界的作用	硫酸鹽之作用 碳酸化 氯化物之作用	○ ○	○ △ ○	△ △ △	△
	內部的原因	水泥硬化體溶出 使用海砂、摻料 使用反應性骨材	○ △ ○	○ ○ ○	△ ○ △	○
物理的原因	①氣象作用 ②凍結、融解作用 ③乾燥、濕潤之循環	混凝土表層發生風化破壞 混凝土表面層破壞及膨脹現象 拘束引起裂縫之生成		△ △ △	○ ○ △	○
	④氣溫變化 ⑤波浪作用 ⑥漂砂及漂流物之作用 ⑦海流作用	鹽酸濃縮與結晶化產生膨脹壓力 熱脹冷縮引起混凝土龜裂 混凝土表層受沖蝕及磨耗 混凝土表層受磨耗之破壞 混凝土表層之破壞發生孔蝕及沖蝕	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○	
因	內部的原因	鋼筋之腐蝕		△	○	○

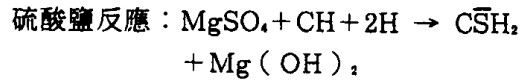
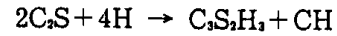
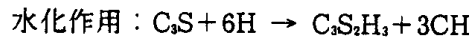
○顯著 △次要

(1)氣象因素作用所引起之混凝土劣化現象

在施工階段，若新拌混凝土溫度太高，再加上其水化過程中釋放之熱量，會使溫度再升高，但在夜晚時，溫度會降低，此種冷熱循環，將極易造成結構體表面龜裂。而且若新拌混凝土表面乾燥速率比浮水上升至混凝土表面之速率為快時，容易引起塑性收縮。此種現象在混凝土溫度高，周界環境濕度與氣溫為低及風速大之情況下，最容易發生（圖8）⁽⁶⁾另外在結構物使用期間，溫差變化會引起結構體膨脹與收縮，濕度漸失亦會造成乾縮，尤其在乾旱、濕度低的地區更為顯著，此種情形將引起混凝土之潛變。溫、濕度變化引起混凝土體積變化不穩定，若體積變化不均勻或因鋼筋之存在而受拘束所產生之局部張應力大於混凝土之抗張強度時，將造成混凝土龜裂或剝離。

(2)海水中有毒鹽類作用所引起的混凝土惡化現象

海水中各種鹽類，以硫酸鎂為害最大，在混凝土中之化學反應如下：



（水泥化學簡寫符號 C=CaO, S=SiO₂

H=H₂O, A=Al₂O₃, $\bar{\text{S}}$ =SO₃）

反應生成物鈣矾石（Ettringite）在混凝土孔隙中形成針狀結晶造成壓力增大，而且由於晶相不完整，故在鹼性環境下，會吸收水份造成體積膨脹至約二倍大，使混凝土發生龜裂，以致海水更易於侵入鋼筋處造成腐蝕。

另外在混凝土中，水泥漿 Ca(OH)₂ 受稀釋，將使混凝土變為軟弱多孔性組織，其鹼性將喪失。

(3)波浪或漂流物衝擊所引起的混凝土惡化現象

海洋結構物，除上述兩項之作用外，可能也會受到波浪及漂流固體之衝擊，船隻之碰撞或漂砂之磨耗，海流之衝蝕而發生惡化。

(4)鋼筋腐蝕引起之劣化

混凝土澆鑄，搗實不良，龜裂或混凝土中之水泥溶出，中性化等均會使海水易侵入鋼筋處造成鋼筋銹蝕，保護層剝落破壞等現象。表5⁽⁴⁾則列出鋼筋腐蝕之主要原因，由此可見發生銹蝕之相原相當複雜，大多由好幾種原因所引起的，故必須充分檢討使用材料與施工技術。表6⁽⁴⁾所示為耐久性對策及其相關之影響參數。日本、美國、英國、挪威及法國等先進國家對於海洋混凝土結構物耐久性均訂有設計、施工及檢查規範，然而其內容未完整，各國學者，對這方面一直在繼續進行研究，其目的是希望能訂出更完善之規範，可供設計、施工及檢查者來遵循。

2-2 引起鋼筋腐蝕之環境因素

引起鋼筋發生腐蝕之環境因素有直接影響者稱為一次因素，影響一次因素變化者稱為二次因素，而影響二次因素者為三次因素等三類，表7為一覽表⁽⁴⁾現概述如下：

(1)PH 值之影響

水泥中含有 CaO，及少量之 Na₂O 及 K₂O，在剛澆鑄後，會與混凝土發生水化作用，生成

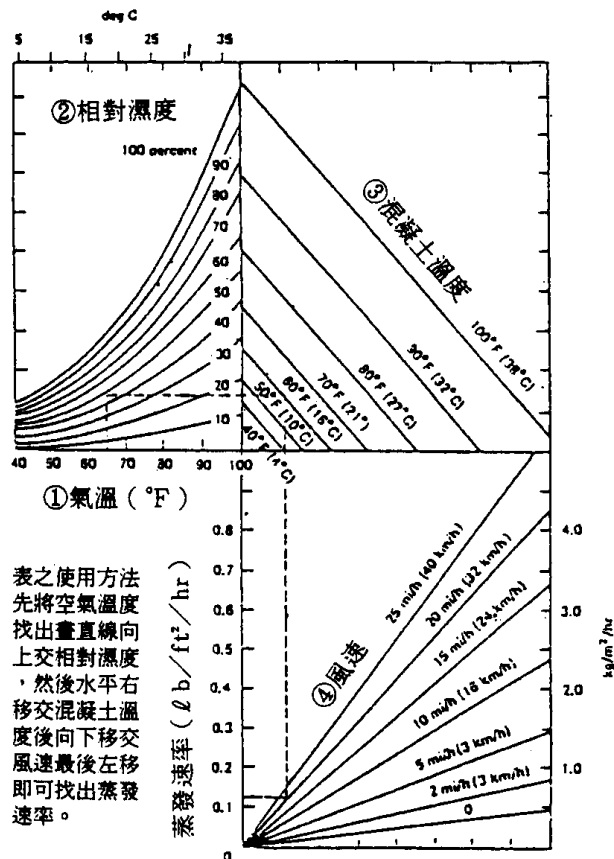


圖8 新拌混凝土水份蒸發速率求算簡圖⁽⁶⁾

表5 混凝土中鋼筋之腐蝕主要原因⁽⁴⁾

	主 要 原 因	腐 蝕 因 子
鋼筋容易腐蝕的條件	1. 海岸區域 2. 污染區域 3. 預鑄塊部材 4. 混凝土摻料 5. 使用海砂 6. 寒冷地帶構造物 7. 基礎構造物 8. 污水設備 9. 發生裂縫 10. 鋼筋局部的露出 11. 迷失電流	多濕(高溫), Cl^- 濃度 污染空氣(SO_2 濃度等) 接合部位, 保護層厚度 使用 CaCl_2 海水之成分(Cl^- , SO_4^{2-} 等) 混入 凍結融解 酸性土壤 污染之排水(工廠污水, 都市衛生下水道)
影響鋼筋腐蝕之主要原因	1. 混凝土之透水性、通氣性及滲入水之成份 2. 混凝土周圍環境 3. 混凝土本身之性質 (1) 材料及配比 (2) 澆置狀況 (3) 保護層厚度 (4) 養護方法 (5) 裂 縫 4. 鋼筋之選擇	氧, 氯, 二氧化碳 Cl^- 之濃度, SO_4^{2-} 之濃度, 氧氣及濕度之變化 水泥種類、水灰比, 骨材之種類與級配, 摻料 混凝土中之孔隙 濕度之滲入 歷時變化, 蒸氣養護 大小及位置 材質、表面狀態, 靜應力之大小
由腐蝕機構觀察之主要原因	1. 鋼筋形成腐蝕電池 2. 混凝土形成腐蝕電池 3. 混凝土 PH 值降低 4. 氯離子之存在 5. 硫酸根離子之存在	合金成分, 表面含有物、抓傷黑皮 結晶粒界發生破裂, 靜的及反覆應力 氧濃度差、溫度差、鹽濃度差、接觸面之空隙、裂縫、密度差 鹽份滲入、溶解作用、碳酸化作用 形成氯化鐵, PH 值降低 形成硫化鐵, PH 值降低

表6 鋼筋混凝土結構物之耐久性對策與相關影響因素⁽⁴⁾

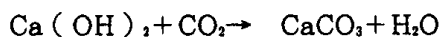
環境條件	耐久性對策	影 響 因 素
一般環境下	1. 製造中性化慢之混凝土 2. 材料中不含有害成分 3. 保護層應足夠 4. 注意施工中之缺陷 5. 注意由外界作用之原因	水泥種類, 骨材種類, 級配, 摻料, 水灰比 配合比, 空氣含量, 施工狀況等。 骨材含不純物, 骨材之化學成分, 摻料等 鋼筋組立、鋼筋固定與配管之關係, 組模等 蜂窩、龜裂, 接合處發生分離, 沉陷等 大氣、雨、漏水、滯留水、鹽分、迷失電流、化學藥品等
特殊環境下	6. 製造耐凍結融解之混凝土 7. 製造抗化學性侵蝕之混凝土 8. 受化學腐蝕的地方採取適當的保護對策	水泥成分, 骨材、摻料、配合比, 施工, 水灰比, 養護等。 水泥種類, 骨材品質、摻料之配比、施工、養護等
海洋環境下	9. 充分考慮1~8 10. 製造水密性高的混凝土 11. 設計周全的防銹、防蝕對策	骨材種類, 品質, 水灰比, 施工, 養護等

鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討

表 7 腐蝕環境因素之分類⁽⁴⁾

次序	一 次 因 素		二 次 因 素		三 次 因 素	
	因 素	其 內 容	因 素	其 內 容	因 素	其 內 容
1	PH 值	Ca(OH) ₂ , CaCO ₃ 及少量之 NaOH 與 KOH 水泥品質，富貧配合比	CO ₂	直接與空氣中之 CO ₂ 接觸，及 CO ₂ 溶解於 H ₂ O 後侵入，是間接接觸	與 CO ₂ 接觸之程度	澆置後混凝土之緊密保護層厚度裂縫
2	溶存之氧氣量	混凝土中之溶液之成分 溫度	CO ₂	同 上	同 上	同 上
			氧氣	與空氣中 O ₂ 之直接、間接接觸	與 O ₂ 接觸之程度	同 上
3	水 分	單位用水量	水分	設置場所、氣候（水中、陸上）	水侵入之程度	同 上
4	氯離子（或其他鹽類）	混凝土材料中含 NaCl，CaCl ₂ 等鹽類	CaCl ₂	與水泥之反應	—	—
		硬化後由外界侵入	氯離子	設置場所（濱海地帶、海水中）	氯離子侵入之程度	同 上
5	作用於鋼筋之應力	預力混凝土	—	—	—	—
6	鋼筋之品質	使用不同金屬而造成局部電池及金屬組織的不一致	—	—	—	—
7	抑制劑	人為的摻入				
8	迷失電流					
9	溫 度	反應速度				

Ca(OH)₂，NaOH 及 KOH，使其 PH 值約為 12.5-13，因此呈現強鹼性之環境。PH 值若維持在 10 以上則腐蝕量不大（圖 9）⁽⁶⁾，但混凝土為一多孔性材料，空氣中之 CO₂ 得以穿過孔隙進入混凝土內部（圖 10）與水泥中之 Ca(OH)₂ 作用產生碳酸鈣，反應式如下：



因此 PH 值會逐漸降低，至小於 10 之情況，此種現象稱為中性化。若將老舊混凝土剝下，然後塗上酚酞之酒精溶液，健全（鹼性）部份會呈現紫紅色，而中性化部份則為無色，可明確地判明中性化之範圍（圖 11）⁽⁷⁾。鋼筋腐蝕速度與 PH 值之關係與溶液有很大之關係，如圖 9 為採

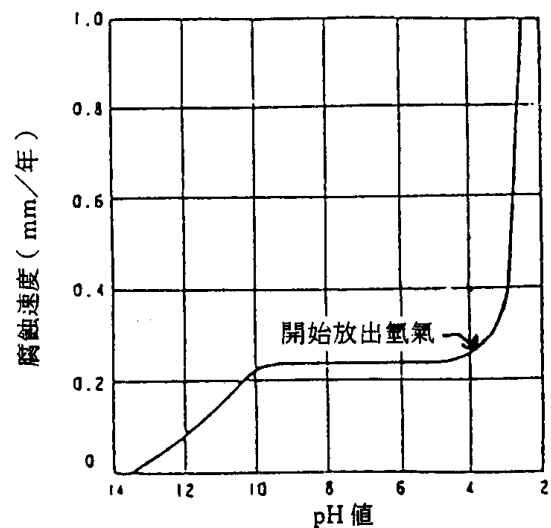


圖 9 PH 值與鋼筋之腐蝕⁽⁶⁾

NaOH 與 HCl 溶液，而圖 12 為使用緩和之溶液所得的結果⁽⁴⁾。

(2) 溶解氧

鋼筋腐蝕可分為陰極和陽極反應，如圖 13 所示⁽⁴⁾。在反應中氧氣為促進陰極反應之主要因素，控制腐蝕之速率。在腐蝕反應過程中僅有

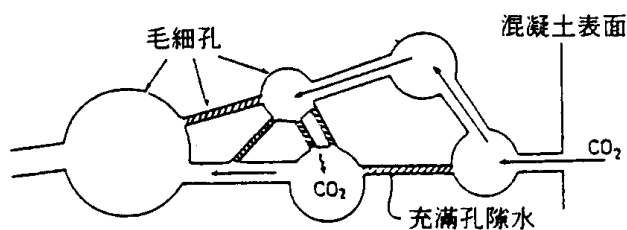


圖 10 CO₂ 在混凝土擴散示意圖

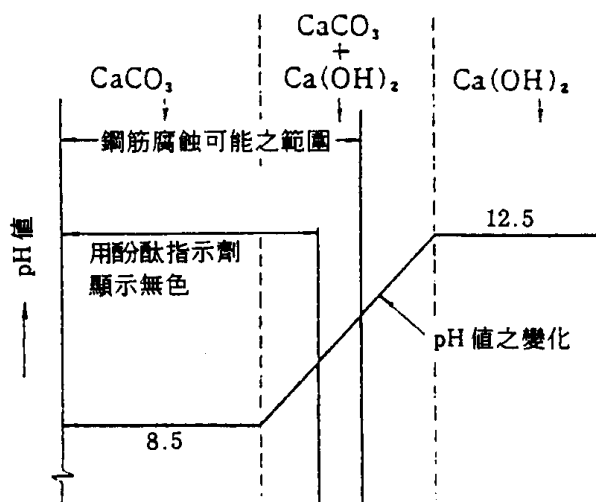
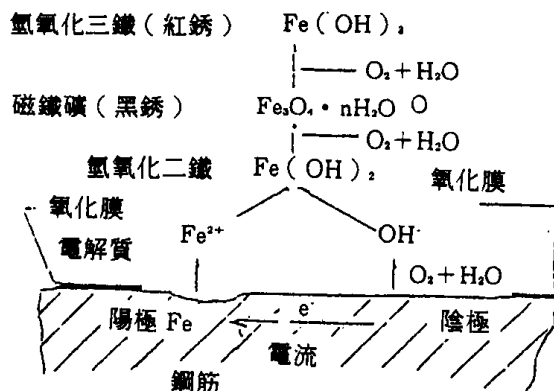
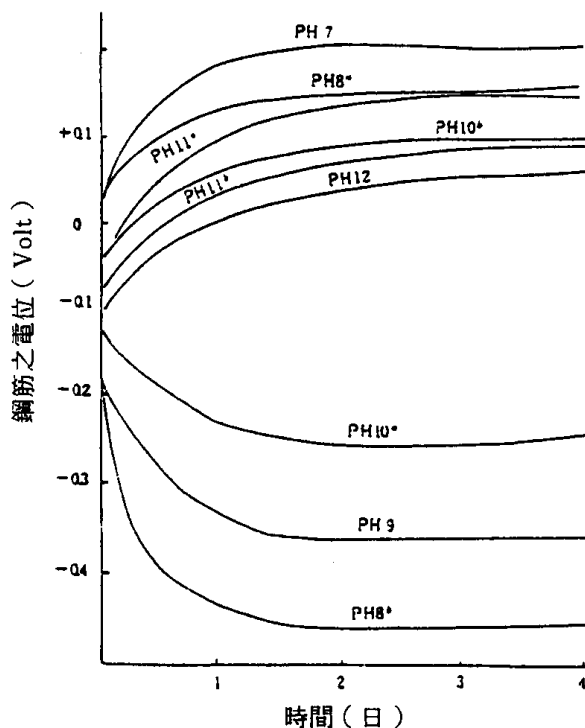


圖 11 混凝土中性化現象之形成與 PH 值之變化關係

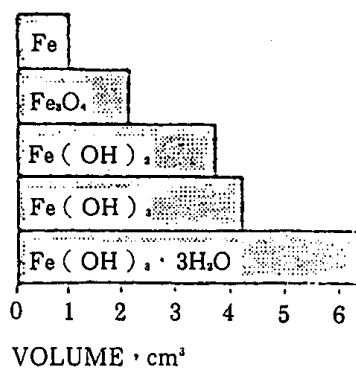


(a) 鋼筋腐蝕機構



PH 7 (6.95) $\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{NaOH}$
 PH 8a (7.95) $\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{NaOH}$
 PH 8b (7.95) $\text{H}_2\text{BO}_3 + \text{KCL} + \text{NaOH}$
 PH 9 (8.93) $\text{H}_2\text{BO}_3 + \text{KCL} + \text{NaOH}$
 PH 10a (9.82) $\text{H}_2\text{BO}_3 + \text{KCL} + \text{NaOH}$
 PH 10b (10.00) $\text{NO}_2\text{BO}_3 \cdot \text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3$
 PH 11a (10.83) $\text{NO}_2\text{BO}_3 \cdot \text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3$
 PH 11b (10.60) $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$
 PH 12 (11.82) $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$
 () 內為最後 PH 值

圖 12 用 Buffer 溶液調配 PH 值，測量 PH 值與鋼筋之電位關係



(b) 鐵銹體積膨脹

圖 13 鋼筋腐蝕及體積膨脹

O₂被消耗掉，故必須有充足之氧氣供應量才能使電化學反應之腐蝕現象得以繼續進行。混凝土澆鑄時、混凝土中含氧量可被認為已飽和，若發生腐蝕，先消耗氧氣，然後等待供應，其供應量因所處環境及混凝土品質而異。在海中溶氧量不大，混凝土孔隙中充滿水，鋼筋之腐蝕速率緩慢。而在潮汐帶，乾濕反覆作用使氧氣供應充分會加速鋼筋之腐蝕速率。透水性低及密實之混凝土，氧氣不易侵入，可以改善結構物之耐久性。圖14及圖15⁽⁴⁾分別為溶氧量缺乏或充足情況下在Ca(OH)₂溶液中變化PH值後，鋼筋之自然電位歷時之變化。圖中可比較出溶氧量供應充分或儘量減少情況下，自然電位之變化特性。由氧氣供給至陰極之速度可決定自然電位之高低，氧氣供應充足，則陰極之自然電位變低，更易發生腐蝕。

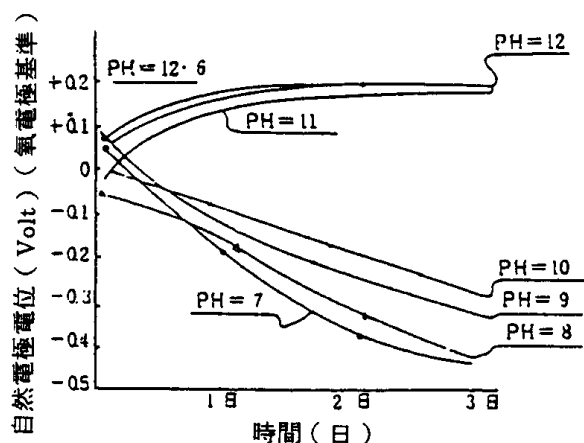


圖14 用Ca(OH)₂變化PH值，鋼筋之自然電極電位之歷時變化(O₂減少)⁽⁴⁾

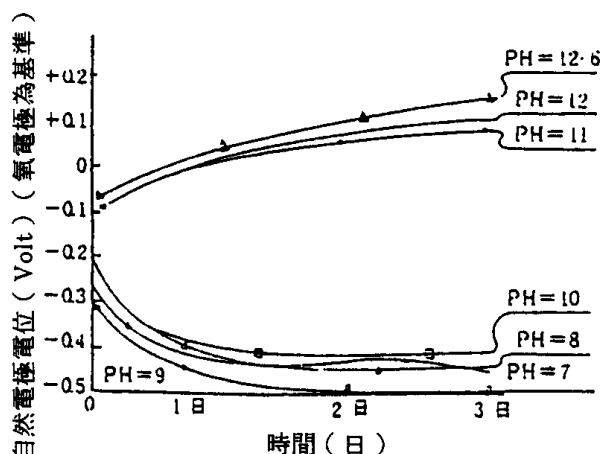


圖15 用Ca(OH)₂變化PH值，測量鋼筋之自然電極電位之歷時變化(O₂增加)

(3)水分之影響

鋼筋混凝土結構物，須有水分才會使鋼筋進行腐蝕反應，新拌混凝土含有多量之拌合水，硬化過程中變為結晶水，多餘的水蒸發至空氣中，並與空氣中之濕度保持平衡含水狀態，澆鑄時含水量多寡不直接影響腐蝕速度，但含不純物或含鹽類會降低混凝土品質。由外界侵入之水，因含CO₂、O₂、Cl⁻等，所以會影響腐蝕速率，一般可考慮製作透水性低，保護層厚度較厚及龜裂寬度微小之混凝土來加以控制。

(4)氯化物之影響性

氯化物侵入會破壞鋼筋之鈍態，這種現象被氧化膜論者認為氯離子易侵入混凝土至鋼筋上之氧化膜，破壞氧化膜使之分散成膠狀，而增加滲透性。但吸附論者認為氯離子、溶解氧及氫氧離子相競地在鋼筋表面上吸附，氯離子可加速金屬離子之水化作用，而使金屬離子易於分解(圖16)⁽⁹⁾。

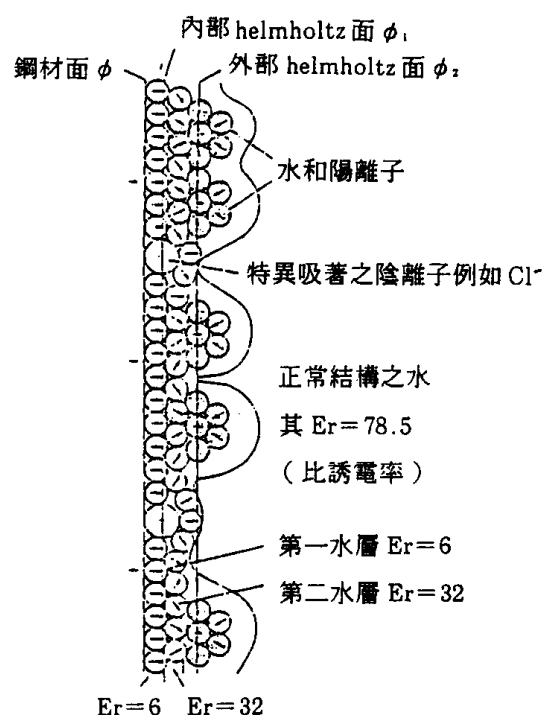
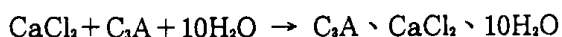


圖16 Devanathan-Bockris-Muller之電氣二重層模型

侵入之氯離子有鹼金屬類(NaCl, KCl)及鹼土族鹽類(CaCl₂)。後者之腐蝕性較小，這些氯離子有時是在拌合時之摻料中摻加或由外界侵

入。混凝土中所含 CaCl_2 與水泥中鋁酸三鈣 (C_3A) 起化學反應形成 Friedel 鹽如下式：



有一些學者經過試驗後發現，若混凝土與鋼筋之接著性良好，則鋼筋不會因 CaCl_2 含量而發生腐蝕，因此對此方面目前尚無定論。另由於 Friedel 鹽會與硫酸鹽及 CO_2 起化學反應形成鈣矾石 ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) 及 thaumasite ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) 使混凝土體積發生膨脹。參與反應分解產物之 Cl^- 及未產生反應之 Cl^- 則會使鋼筋發生孔蝕現象。目前各國對水泥中所含 CaCl_2 量之限制如表8所示⁽¹⁰⁾。

鋼筋在氯化鈉溶液中之腐蝕特性以濃度 3% 為最大 (圖17)⁽⁹⁾，表9為各先進國家對海洋

混凝土結構物氯化物含量之限制規定。^(9,11)。

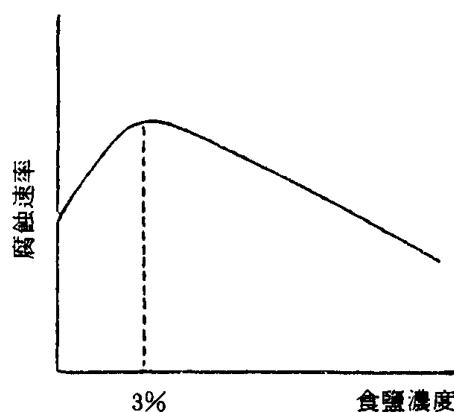


圖17 食鹽溶液中：鋼材之腐蝕速率與食鹽濃度之關係⁽⁹⁾

表8 各國對混凝土鹽分含有量的規定一覽表⁽¹⁰⁾

國名	對水泥的 CaCl_2 添加界限值 (以 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 或以 Cl^- 的含量規定者均換算成 CaCl_2)			備 考
	混凝土	鋼筋混凝土	預力混凝土	
美國		2%	0%	(1)ASTM C33-67, C33-68T 無規定 C260-66T 則規定製造廠商應購買者的要求必須註明氯化物的含有量。 C494-68的規定同上。 (2)ACI ACI301-66的3.4.4節規定預力混凝土或混凝土中埋設鍍鋁或鍍鋅金屬時，混凝土拌和水之 Cl^- 含量不得超過 150ppm (換算成 NaCl 則約為 0.24kg/ℓ)，又 3.7.1節規定 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 含量不得超過水泥重量的 2%，換算為 CaCl_2 則約為 1.5%。
西德		0%	0%	DIN 1045 (1972.1) 混凝土摻料中不得含有任何有害物質，混凝土拌合水中氯化物含有量規定必須小於 300 mg/ℓ。
法國	2%	2% (保護層厚度為 40mm 以上) 1% (保護層厚度為 20mm 以上)		1966 年的建議僅為使用普通波特蘭水泥時可含有 CaCl_2 。
日本				(1)日本混凝土工學協會 (1974) 採用防銹劑時鹽分含有量換算 CaCl_2 為細骨材重量的 0.1%。 (2)JASS 5 細骨材的鹽分含有量在 I 級骨材時為 0.04% 以下；II 及 III 級骨材時，如採用防蝕鋼筋時為 0.1% 以下。

鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討

表 9a 各種海洋混凝土結構物氯化物含量規定比較^(*)

結構物所處位置		海 岸	外 海 結 構 物				海 岸 結 構 物	
參 數	曝露條件	CP 110 (1972)	DnV (1977)	NPD (1977)	ACI (1978)	BS 6235 (1982)	AS 1480 (1983)	BS 8110 (1985)
氯化物含量 (水泥重之%)	RC	0.35	0.19	—	0.10	0.35	0.20	0.40
	PC	0.06	0.19	—	0.06	0.06	0.10	0.10

表 9b 美國混凝土協會 (ACI) 出版文獻對氯化物含量之規定⁽¹¹⁾

201-2R-77		318-83		222R-85	
混凝土橋墩處於水溶氯離子之限度。		齡期二十八天硬化混凝土中，由組成材料包括水、骨材膠結物，及摻料所提供之水溶氯離子之最大濃度值。		依 ASTM C114 試驗之酸溶氯化物含量之最大值。	
構件型式	限度 *	構件型式	限度 *	構件型式	限度 *
預力混凝土	0.06	預力混凝土	0.06	預力混凝土	0.08
鋼筋混凝土於濕潤環境且暴露於氯化物中	0.10	鋼筋混凝土將暴露於氯化物中	0.15	鋼筋混凝土	0.20
鋼筋混凝土於濕潤環境中，但不暴露於氯化物中*	0.15	鋼筋混凝土將處於乾燥或防潮之環境	1.0		
地面上構造物之混凝土於乾燥環境	無限度△	其他鋼筋混凝土結構物	0.30		

* 與水泥重量之百分比

+ 包括混凝土局部偶而受潮處一如廚房、停車場、河岸結構物及濕氣凝結處。

△如使用氯化鈣為摻料應在 2% 限度內，以免導致腐蝕。

使用 2% 之常態氯化鈣摻料將產生約 1% 之氯離子。

(5) 鋼筋之品質

由於鋼筋種類及製造方法不同，因此鋼筋中之碳、氮、硫黃及特殊金屬之微量成份或金屬組織亦不同。一般普通鋼筋依外表可分為平面及竹節鋼筋，JIS 規範僅限制 C, Mn, P, S 等之上限值及一些簡單之機械性質如降伏點或耐力、抗拉強度、伸長率、彎曲角度及彎曲直徑等 (表 10)⁽¹²⁾ 而 ASTM 則僅規定抗拉及降伏強度和彎曲性之最低標準，化學成份除限定磷需 0.06% 以下外，並無其他任何限制 (表 11)⁽¹²⁾，因此為求增加強度及提高韌性，有高強力鋼筋之製造。為求腐蝕防制，有生產熱浸鍍鋅鋼筋及環氧樹脂塗

裝鋼筋及耐鹽性鋼筋。根據許多文獻指出環氧樹脂被覆為保護鋼筋之最佳方法。另外在混凝土中必須避免使用兩種不同之金屬銲接或搭接，以免引起局部腐蝕現象。

(6) 作用於鋼筋上之應力

鋼筋在受力狀態或鋼筋內有殘留應力時，有可能引起應力腐蝕龜裂。應力腐蝕為鋼筋在受應力 (外加或內餘) 下，材料與環境相互作用所引起之現象。鋼筋在腐蝕環境下，表面生成一層氧化膜，可防止或減少腐蝕持續發生。然而在受力下，氧化膜局部發生破裂而產生蝕孔，此種龜裂之萌芽亦受表面粗糙度及化學成分不均勻所影響

表10 JIS G3112化學成分及機械性能表⁽¹²⁾

區分	鋼筋記號	化 學 成 分 (%)					機 械 性 能						
		C	Mn	P	S	C+Mn 6	降伏點或耐力 (kgf / mm ²)	拉拉強度 (kgf / mm ²)	試片	伸長率 (%)	彎曲角度		彎曲直徑
平面 鋼筋	SR24	—	—	0.050 以下	0.050 以下	—	24以上	39-53	2 號 3 號	20以上 24以上	180°		標稱直徑之 3 倍
	SR30	—	—	0.050 以下	0.050 以下	—	30以上	49-63	2 號 3 號	16以上 20以上	180°		標稱直徑之 4 倍
凸 節	SD24	—	—	0.050 以下	0.050 以下	—	24以上	39-53	2 號 3 號	18以上 22以上	180°		標稱直徑之 3 倍
	SD30	—	—	0.050 以下	0.050 以下	—	30以上	49-63	2 號 3 號	14以上 18以上	180°		標稱直徑之 4 倍
鋼 筋	SD35	0.27 以下	1.60 以下	0.050 以下	0.050 以下	0.50 以下	35以上	50以上	2 號 3 號	18以上 20以上	180°	D41以下 D51	標稱直徑之 4 倍 標稱直徑之 5 倍
	SD40	0.29 以下	1.80 以下	0.050 以下	0.050 以下	0.55 以下	40以上	57以上	2 號 3 號	16以上 18以上	180°		標稱直徑之 5 倍
	SD50	0.32 以下	1.80 以下	0.050 以下	0.050 以下	0.60 以下	50以上	63以上	2 號 3 號	12以上 14以上	90°	D25以下 超過D25	標稱直徑之 5 倍 標稱直徑之 6 倍

註：凡超過 D32 之熱軋凸節鋼筋，每增加稱號 3，按表列之伸長率減少 2%，但減少之最大值以 4% 為限。

表11a ASTM A615鋼筋化學成分及機械性能表⁽¹³⁾

鋼 筋 記 號	化 學 成 分 %				機 械 性 能						
	C	Mn	P	S	降伏強度 min, psi	抗拉強度 min, psi	伸長率 min %		彎曲角度		彎曲直徑
Gr. 40	—	—	0.06 以下	—	40,000	70,000	No.3	11	180°	No.5 以下	標稱直徑之 4 倍
							No.4 以上 至 No.6 以下	12		No.6	標稱直徑之 5 倍
Gr. 60	—	—	0.06 以下	—	60,000	90,000	No.6 以下	9	180°	No.5 以下	標稱直徑之 4 倍
							No.7 以上 至 No.8 以下	8		No.6	標稱直徑之 5 倍
							No.9 以上 至 No.11以下	7		No.7 以上 至 No.8 以下	標稱直徑之 6 倍
									No.9 以上 至 No.11以下	標稱直徑之 8 倍	

。裂縫係因保護膜受力破裂所產生，在蝕孔處之水溶液下會引起局部氧化，然後再生成保護膜交互進行而使裂紋繼續成長，裂縫以穿晶式

(Transgranular cracking) 貫穿材料之晶粒而成長及沿晶式 (Intergranular cracking) 即沿金屬晶粒之界面而成長。在蝕孔之尖端會發生

表11b ASTM A706鋼筋化學成分及機械性能表⁽¹²⁾

鋼 筋 記 號	化 學 成 分 %						機 械 性 能						
	C	Mn	P	S	Si	CE	降伏強度 psi	抗拉強度 min, psi	伸長率 min %		彎曲角度		彎曲直徑
Gr. 60	.30	1.50	0.035	0.045	0.50	0.55	60,000以上 至 78,000	80,000	No.6 以下	14	180°	No.5 以下	標稱直徑之 3 倍
	以下	以下	以下	以下	以下	以下	No.6 以上 至 No.11以下		12	No.6 以上 至 No.8 以下		標稱直徑之 4 倍	
										No.9 以上 至 No.11以下		標稱直徑之 6 倍	

$$\text{註：1.C.E.} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu}{6} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10}$$

2. 實測抗拉強度應不小於實測降伏強度之1.25倍

應力集中現象，應力、腐蝕環境與龜裂三者惡性循環，當應力強度達到臨界破裂韌性強度時，則產生瞬間斷裂現象。預力混凝土鋼構物因腐蝕斷裂之範例不少，澎湖跨海大橋就是一明顯之例子。

有一些學者作過試驗發現預力或預鑄混凝土中，若含有氯化鈣 2-4%，腐蝕現象即相當嚴重。因此混凝土中含氯化鈣不得超過水泥重量之 2%，以免發生預力鋼筋應力腐蝕破裂。

(7) 腐蝕抑制劑

腐蝕抑制劑為一種化學品，將其少量填加於腐蝕環境中可有效地減緩鋼筋之腐蝕速率，依化學組成可分為無機物型及有機物型。無機類防銹劑如亞硝酸鹽、鉻酸鹽、矽酸鹽及磷酸鹽等，而有機類鹽如有機磷酸鹽、胺類、磺酸鹽，有機酸類、硫醇、硝基化合物、烷基苯酚類、酯鹽等。對於含有氯化物之混凝土結構體，以亞硝酸鹽 (NO_2^-) 及重鉻酸鹽 (CrO_4^{2-}) 最具有防蝕效果。防銹劑通常藉下列四種方式來達到緩蝕效果：

- ① 防銹劑以分子狀態在鋼筋表面上進行化學吸附，生成一層薄膜，阻斷腐蝕因子對鋼筋發生腐蝕作用。
- ② 由於防銹劑與鋼筋作用生成一層厚實且緻密之腐蝕生成物，促使鐵離子穩定而不進行腐蝕反應。
- ③ 與環境中之酸性或鹼性腐蝕因子起反應、

生成保護膜之沉澱物，阻止腐蝕之發生。

- ④ 將環境中之腐蝕因子吸附下來，使其不再攻擊鋼筋。

工藤矩弘與伊部博曾作過防銹劑 (RUST-NEIN) 對鋼筋混凝土防蝕之效果實驗，所得出結果如圖18至圖20所示^(10,13)。添加防銹劑於混凝土中對新拌混凝土之效果為工作度較差，在特定之空氣含量下可減少10-30%之輸氣劑摻量、減少浮水、縮短浮水經過時間、凝結時間與未添加情況相差很小。而對硬固混凝土而言，強度無影響；對物理性質而言，亦無負面之影響。

(7) 迷失電流

迷失電流就是流經預定迴路以外路徑之電流，引起迷失電流之來源可能為直流電曳引系統，陰極防蝕，交流電或直流電之輸送及地磁電流等。混凝土中之鋼筋由外界流入之電流有直流或交流，而直流可能由混凝土流向鋼筋或反向。交流所引起之損傷較直流情況為小。以60HZ 交流情況而言，其損傷程度僅為相同電流值下之直流情況的 1%，混凝土流向鋼筋之直流，可使鋼筋表面發生極化現象，即腐蝕陰極與陽極電位達相等，而不產生腐蝕電流，然而若外加電源之電位或電流過高可能使混凝土發生軟化現象，以致自鋼筋流向混凝土之電流將使鐵溶出。

(8) 溫度

由於氧氣之擴散，腐蝕會很有規律地進行。

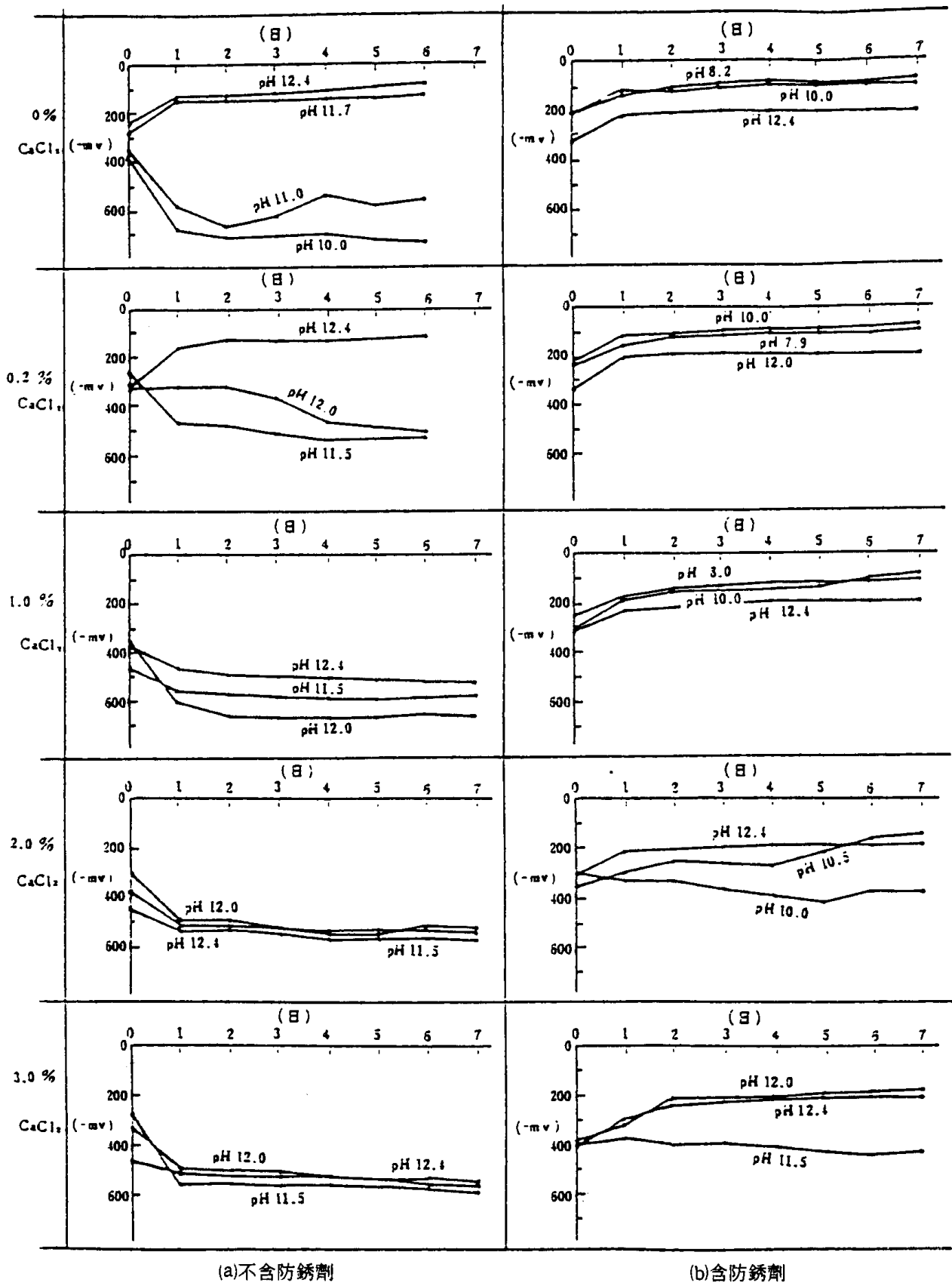


圖18 添加防銹劑後鐵之自然電極電位變化⁽¹²⁾

鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討

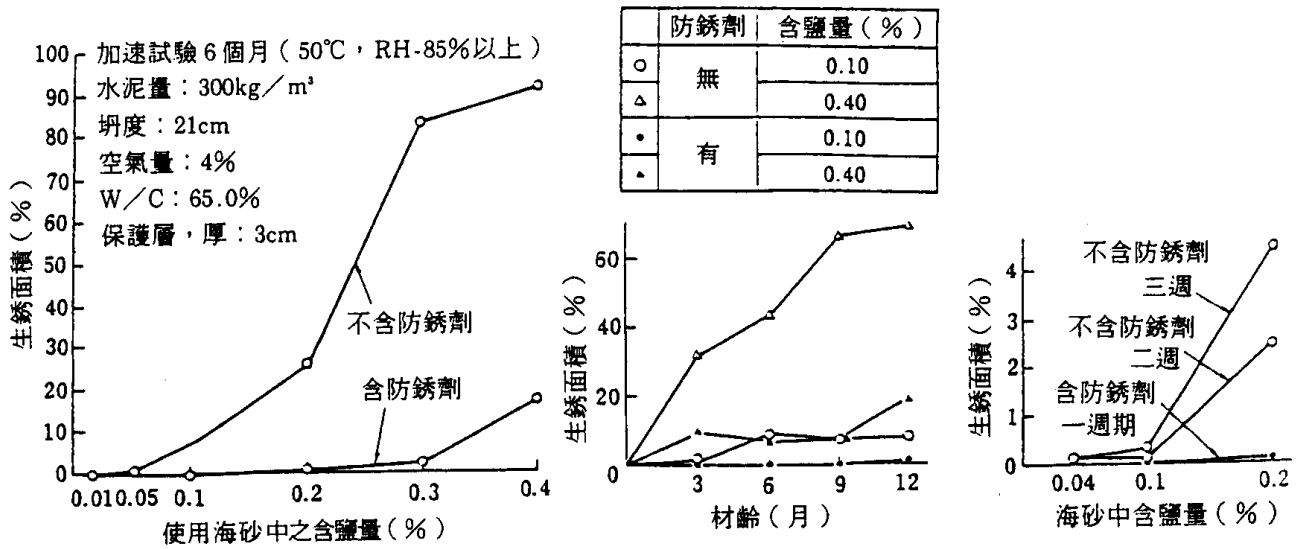


圖19 含防銹劑加速試驗所得生銹面積率特性⁽¹⁰⁾

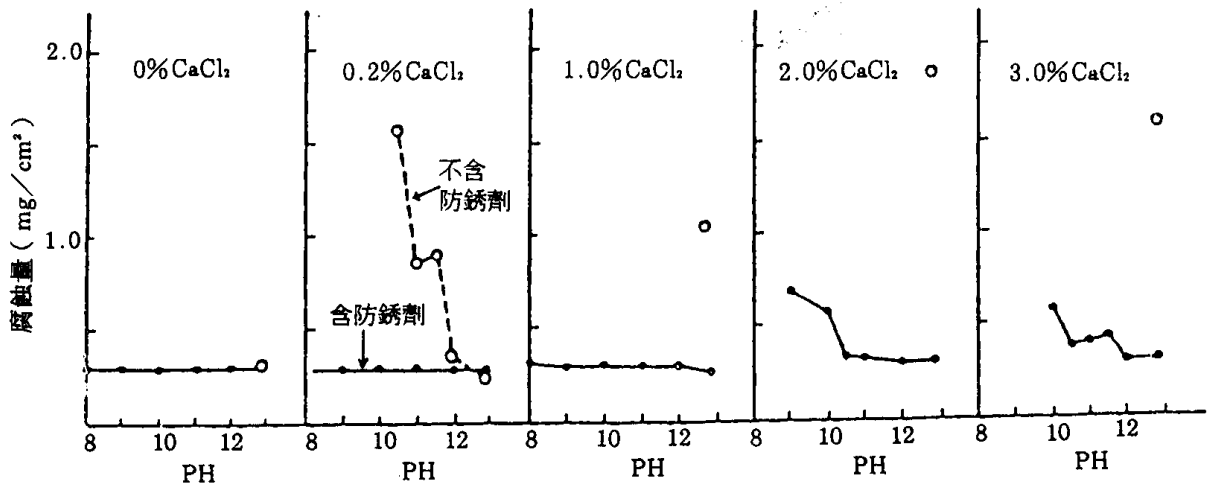


圖20 腐蝕量與PH之關係⁽¹³⁾

在一定濃度之氧氣下、鋼筋之腐蝕速率每增加30°C即增加一倍。然而在80°C以下，氧之溶解度顯著地下降，故腐蝕速率亦隨著下降（圖21）⁽⁶⁾。

三、鋼筋腐蝕之主要原因

(1) 混凝土中鋼材腐蝕之原因

鋼筋在高鹼性之混凝土中，其表面形成具有保護性之鈍態膜，此鈍態膜之安全性全賴混凝土中之鹼性程度維持，鹼性愈高則保護性愈佳，若鹼性成分被溶出或碳酸化而引起混凝土中之鹼性降低或在施工拌合中摻入有害物或外界腐蝕因子例如氯離子、硫化物離子、硫酸根離子等之侵入

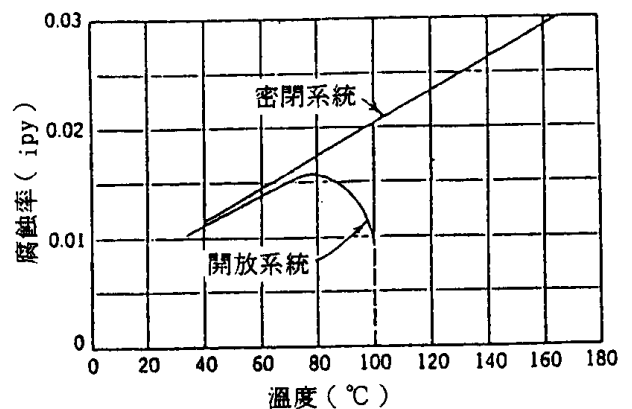


圖21 在含溶氧之水溶液下，溫度對鐵之腐蝕率之關係⁽⁶⁾

破壞鋼筋之鈍態使之變為活性則易生腐蝕，這些有害物中以氯離子之作用為最厲害。氯離子可由使用海砂或速凝劑混入混凝土中或在海洋環境下受海風或海水作用侵入附著於鋼筋表面之鈍態膜上引起孔蝕現象，由於局部腐蝕造成混凝土龜裂，使更多之氯離子易侵入，造成腐蝕範圍擴大。

(2)大氣作用所引起之鋼筋腐蝕

地球表面自然界空氣之狀態稱為大氣、鋼筋曝露在大氣中，吸附空氣中之水份及氧氣產生電化學反應而生銹腐蝕稱為大氣腐蝕，按金屬表面附著水分之情形，大氣腐蝕可分為肉眼可見凝結水膜存在之濕潤（Wet）大氣腐蝕，或肉眼看不見薄液膜存在之潮濕（Moist）大氣腐蝕，及無液膜存在之乾燥大氣腐蝕。水分為大氣腐蝕最重要之因素之一，在沙漠地帶，鋼筋表面無法吸收水分，因此永保光澤，大氣中因環境中除空氣成分外尚含有氯化鈉、亞硫酸氣、煤煙、塵埃等，故腐蝕度將依污染物不同而異。

(3)飛來海鹽所引起之鋼筋腐蝕

海風挾帶海水之水汽、漂向陸地，附著於鋼筋表面將引起腐蝕，圖22為日本實地調查混凝土表面含鹽量與距海岸距離之關係⁽⁹⁾，而圖23為ISO/TC之調查結果，一般而言在距海岸200公尺內飛來鹽份量較多。距離海岸線愈遠，受海鹽侵襲量愈小。風大地域，可及數公里⁽⁹⁾，表12為樞野先生實地調查結果⁽⁹⁾。

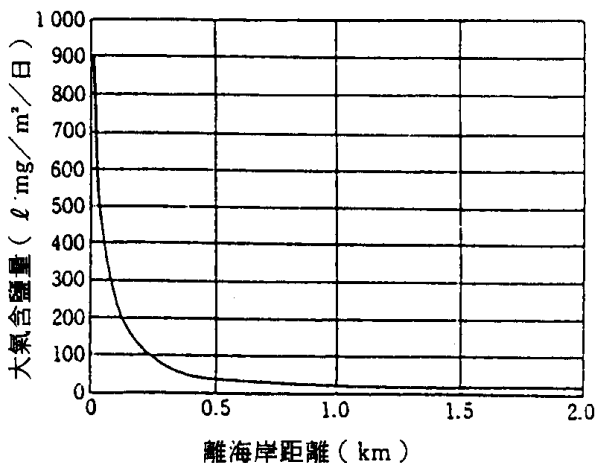


圖23 離海岸某一距離下之大氣含鹽量⁽⁹⁾

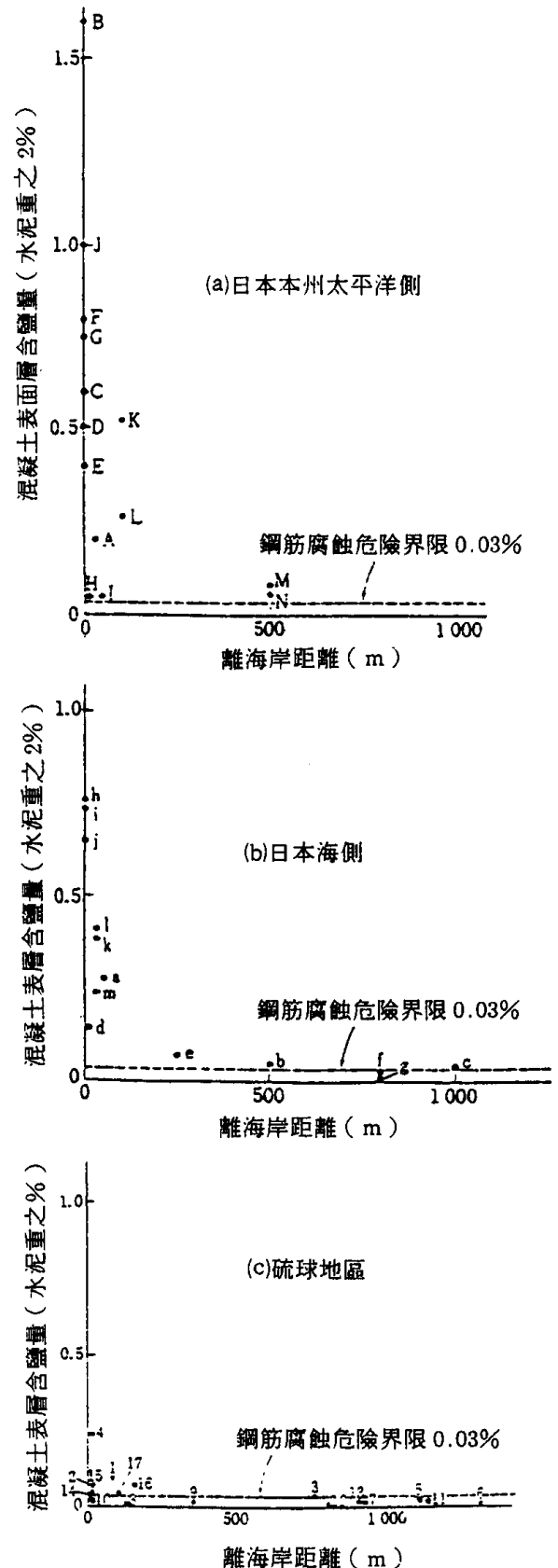


圖22 日本調查飛來鹽份量結果

表12 大氣中之含鹽量與混凝土中鹽份滲透量之關係^(*)

離海岸之距離	<200m	<1km	<10km	> 10km
大氣中之含鹽量	0.3~0.8mg/dm ³ /日	平均 0.2mg/dm ³ /日	颱風及季節風等特殊情況，下風速大時，會含有相當程度之鹽份量	不影響混凝土耐久性
混凝土表層部位鹽份滲透量	超過鹽害臨界值 0.03%甚多	500m 以內會超過 0.03%，800m 以內不會超過		

註：dm=10⁻¹meter

(4)金屬材料之耐候性

金屬材料之耐久性主要係以斷面積減少，強度降低來研判。外觀劣化影響美觀、腐蝕發生後，材料本身特性變化對鄰接物如混凝土亦會造成影響。碳鋼及低合金鋼為最常用之鋼材，在大氣中之腐蝕速率較其他金屬為大，為滿足材料強度之要求，有效斷面積減少必須列為其耐久性之重點。而不銹鋼、鋁、銅等之腐蝕速率較緩，但在使用上必須考慮外觀劣化之問題。

(5)結露引起鋼材之腐蝕

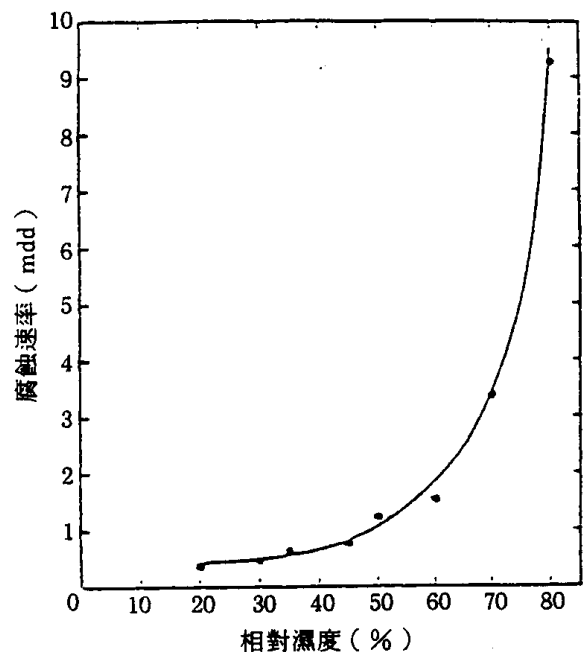
在大氣中容易生銹之條件為濕度在臨界相對濕度附近，而氣溫有數度之變化。金屬接觸到比其表面溫度高之空氣，則空氣中所含之水蒸氣變為液態雨露析出於金屬表面，而使金屬表面潤濕，這種現象稱為結露，為一種濕潤大氣腐蝕之現象。相對濕度與鋼材之腐蝕率之關係如圖24所示⁽⁷⁾。鋼鐵、銅合金類之臨界相對濕度為70%，此數值隨金屬與表面污染物情況而定。由圖24可見相對濕度超過70%以上，腐蝕速率快速上升，易於結露之條件可列舉如下：

(a)微小縫隙或微細孔穴，因毛細管凝縮，雖濕度未達100%亦會結露。

(b)水中含有鹽類時，其飽和蒸氣壓會降低，故含鹽份之空氣較清淨之空氣易凝結，雖濕度未及100%亦將結露。

(c)在氣象方面，濕度高，大氣安定，無風，氣溫下降愈快之情況愈易結露。

(d)鐵為熱傳導良好之東西，其表面溫度隨氣溫下降而遞減，由於鐵表面易散熱故亦易結露。

圖24 相對濕度與腐蝕率之關係⁽⁷⁾

(6)大氣污染物對鋼材之腐蝕

大氣污染物為含有大氣成份以外之物質，係由於工廠汽車及家庭等之排放物。污染物之濃度與數量及持續時間等均為對鋼材構成腐蝕之參數，大氣污染物由於存在情況可分為四類。

(a)酸雨為工廠及汽車排放之硫氧化物(SO_x)，氮氧化物(NO_x)，氯化氫(HCl)等稀釋於天空中形成雲霧，再降雨。通常雨水與大氣中之二氧化碳保持PH值約5.6，若PH值降至5.6以下稱為酸雨，當PH<4為強酸性之酸雨，對結構物會造成危害。鐵表面沾上硫酸會產生激烈腐蝕反應，然而鐵曝露在含多量亞硫酸氣之大氣

中，並不一定會產生激烈之腐蝕反應，因為腐蝕反應的發生必須依鐵表面之潤濕情況而定。

- (b)塵埃（因磨耗、風化、施工、清除或其他原因生成之固體顆粒）
- (c)煙（昇華、蒸餾、焙燒或由於化學反應等所產生之蒸氣凝結而成之固體微粒）。
- (d)霧（為液體顆粒，由於蒸氣之凝結，化學反應或液體之結露所致）各種大氣污染物之顆粒大小範圍如表13所示⁽¹⁴⁾。

(7)海水中鋼材之腐蝕

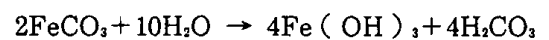
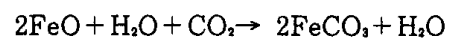
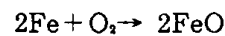
海水中因溶解氯化物等鹽類，導電度高，故為一代表性之腐蝕環境。依長期浸於海中之金屬試片腐蝕研究得知軟鋼，鑄鐵全年之平均侵蝕度為0.06-0.17mm 平均為0.12mm，而銅0.05mm，鎳0.02mm，鋅0.025mm，錫0.015mm及鉛為0.012mm。這些數據為在乾淨海水中之腐蝕速率，而目前工業廢水及都市下水道污水海洋放流對海洋結構物已構成嚴重之腐蝕問題。

海水中有波浪及海流之運動，海中亦生長消耗氧之動植物與微生物，故海水中氧氣分佈不均勻，在潑濺區，氧氣供應較充分，腐蝕亦特別嚴重，而在海中則由於缺氧，故腐蝕較輕微。普通鋼板樁在潑濺區之腐蝕度為0.5mm/ yr.，海中0.2mm/ yr.，海床中0.1mm/ yr.，鎳銅磷合金鋼之耐蝕性相當好，潑濺區平均為0.1mm/ yr.。

四、混凝土腐蝕主要原因與耐久性對策

4-1 混凝土中性化

健全混凝土中之孔隙水為氫氧化鈣之飽和溶液，會使鋼筋表面生成鈍態膜，故鐵不會溶解成為離子，但於水分與二氧化碳侵入之鋼筋處，鐵會發生電化學反應，如下式：



有碳酸鈣存在時，還會加速腐蝕之進行。在未碳化之混凝土，由於含氫氧化鈣之飽和水溶液，故PH值維持在12.5-13.0，而在中性化與健全混凝土交界處，氫氧化鈣溶解為碳酸鈣，PH值降為10，在中性化區域則為碳酸鈣飽和溶液，經空氣長時間侵入，PH值降為8.5，而PH=10為鐵生銹與不生銹之分界線。

4-2 延緩混凝土中性化速率對策

為延緩混凝土中性化之速率，即相對地延緩鋼筋生銹時間，所應考慮之因素如圖25所示⁽¹⁴⁾，下面就使用材料及配比來加以檢討。

(a)水泥種類

岸谷曾研究不同水泥種類在同一水灰比下之中性化速度比，同時白山及河野等亦進行過研究，所得結果如表14和表15所示。根據這些實驗結

表13 大氣污染物顆粒大小範圍⁽⁹⁾

	(Å)	(nm)	C	(μm)	(mm)	(cm)
	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹
固體			fume		dust	
液體			mist		spray	
氣象			smog	雲・霧	霧雨	雨
現象		a althen 核	海鹽核	霧	海水滴	水滴

鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討

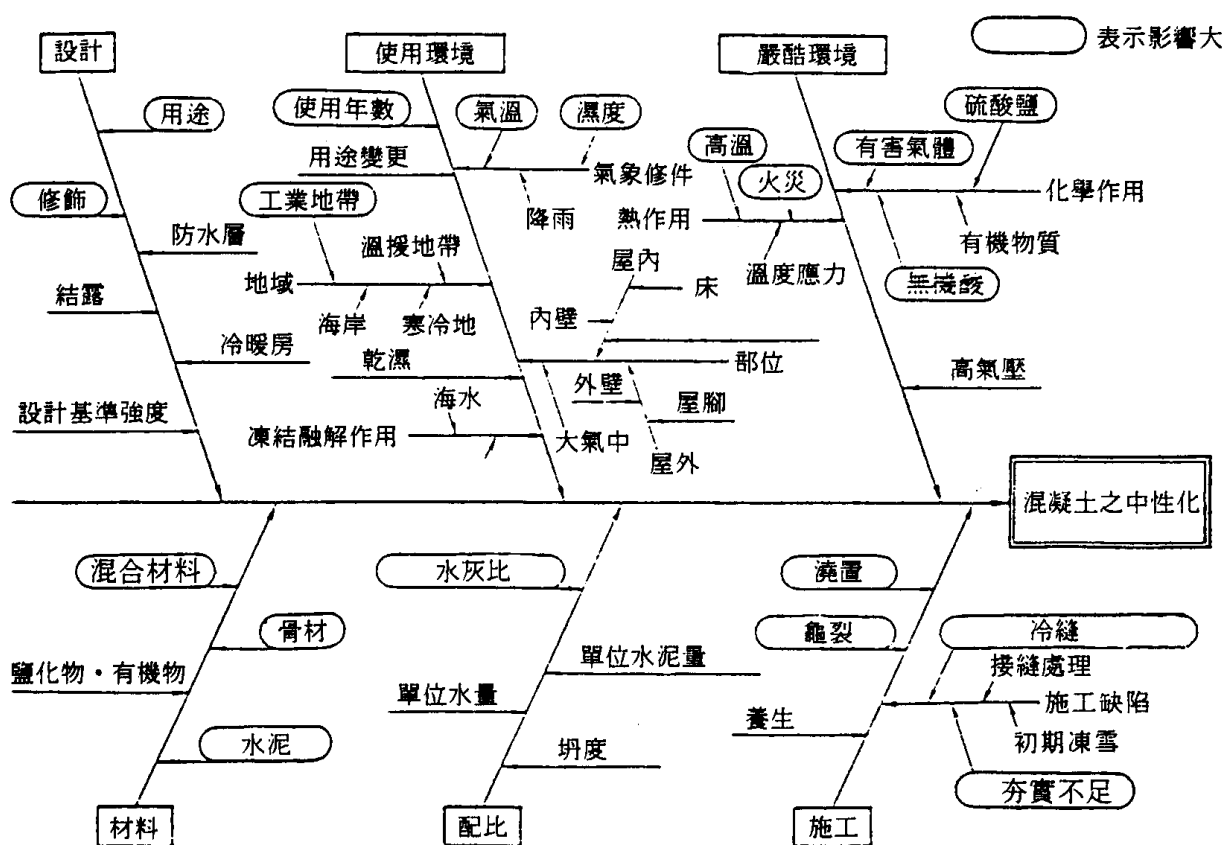


圖25 混凝土中性化之影響參數⁽¹⁴⁾

表14 混凝土使用各種不同水泥之中性化速度比⁽¹⁴⁾

普通卜特蘭水泥混凝土	早強卜特蘭水泥混凝土	高爐水泥 (含爐石30-40%)	高爐水泥 (含爐石60%)	矽灰水泥 混 凝 土	飛灰混凝土 (飛灰取代率20%)
1.0	0.6	1.4	2.2	1.7	1.9

表15 混凝土使用各種不同水泥之中性化速度比⁽¹⁴⁾

普通水泥	早強水泥	高 爐 水 泥			飛灰水泥 B 種	矽灰水泥 B 種
		A 種	B 種	C 種		
1.00	0.79	1.29	1.41	1.82	1.82	1.82

果顯示混合水泥（矽灰，高爐石及飛灰）之中性化較快。為提高 RC 結構物耐久性以使用卜特蘭水泥較好，而早強水泥之中性化速率最為緩慢，亦即耐久性最佳⁽¹⁴⁾。

(b)骨材之種類

混凝土所使用之骨材若使用普通河砂、河川之礫石、碎石等密實堅硬性骨材，其透氣性低，故混凝土中性化係穿過水泥漿進行；但若使用輕質骨材，由於骨材本身透氣性亦大，因此中性化速率較快，中性化比值如表16所示⁽¹⁴⁾。

表16 混凝土使用材料與中性化比例之關係⁽¹⁴⁾

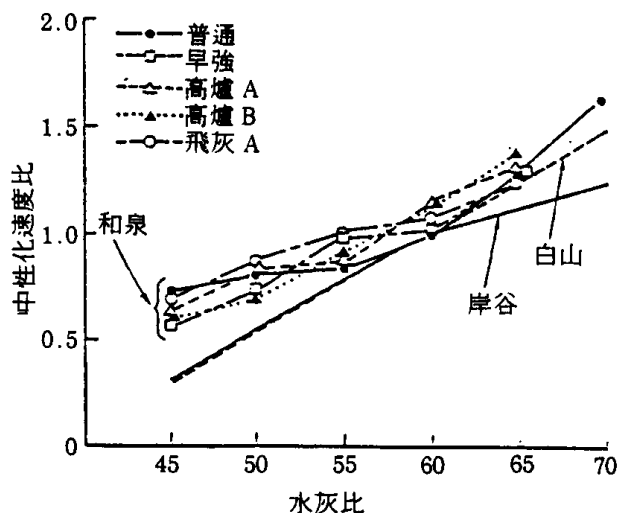
細、粗骨材		河砂、河石			河砂輕質粗骨材			輕質粗細骨材		
表面活性劑		無	AE劑	減水劑	無	AE劑	減水劑	無	AE劑	減水劑
水 泥 種 類	普通卜特蘭水泥	1	0.6	0.4	1.2	0.8	0.5	2.9	1.8	1.1
	早強卜特蘭水泥	0.6	0.4	0.2	0.7	0.4	0.3	1.8	1.0	0.7
	高爐水泥(爐渣 30-40%)	1.4	0.8	0.6	1.7	1.0	0.7	4.1	2.4	1.6
	高爐水泥(爐渣 60%)	2.2	1.3	0.9	2.6	1.6	1.1	6.4	3.8	2.6
	矽灰水泥	1.7	1.0	0.7	2.0	1.2	0.8	4.9	3.0	2.0
	飛灰水泥(20%)	1.9	1.1	0.8	2.3	1.4	0.9	5.5	3.3	2.2

(c) 界面活性劑之使用

使用品質優良之輸氣劑(Air Entraining Agent 簡稱 AE 劑)可改善新拌混凝土之工作度,減少材料析離、泌水及增加凝聚性等功能,因此可得密實性佳之混凝土,故中性化速率會減緩(表15)⁽¹⁴⁾而減水劑是作用於固體與液體之界面上,使水泥顆粒均勻分散。中性化之效果比 AE 劑更為顯著,所以使用品質優良之 AE 減水劑可提高 RC 結構物之耐久性⁽¹⁴⁾。

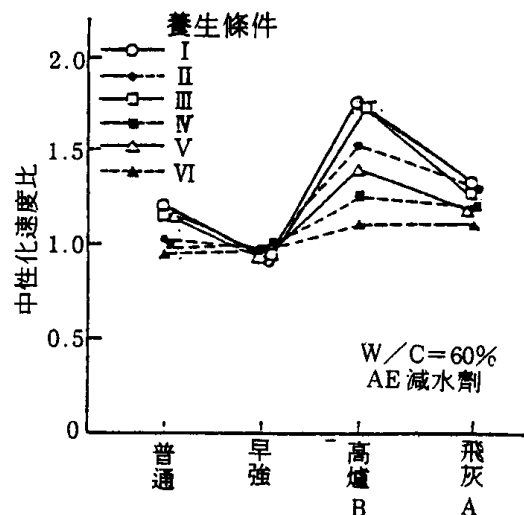
(d) 水灰比

水灰比愈小,水泥漿較為密實性,因此中性化較緩。圖26為各種水泥種類在不同水灰比與中性化速率之關係⁽¹⁴⁾。

圖26 水灰比與中性化速度比之關係⁽¹⁴⁾

(e) 施工條件

混凝土之養生條件影響到透水性與中性化速率,此由圖27可看出養生條件之影響性⁽¹⁴⁾。

圖27 各種不同水泥種類在不同養生條件下之中性化速度比⁽¹⁴⁾

記號	水中養生溫度(%)	養生時間				
I	10	○	△	□	◇	×
II	10	○	△	□	◇	×
III	20	○	△	□	◇	×
IV	20	○	△	□	◇	×
V	30	○	△	□	◇	×
VI	30	○	△	□	◇	×
		0 1週 4週 5週 8週				
		混凝土製作完成 — 水中養生 — 20°C—60%RH				

混凝土之夯實充分可增加密實性，減緩中性化速率。施工接縫處無法避免中性化之侵入，此可在打接時將混凝土剷除約 5 公分，再打入新混凝土為佳。

(e)環境及塗裝條件

混凝土中性化會因環境之曝露條件特性而異，例如室內因溫度及 CO_2 濃度較高，故中性化較大（圖 28）⁽¹⁴⁾。

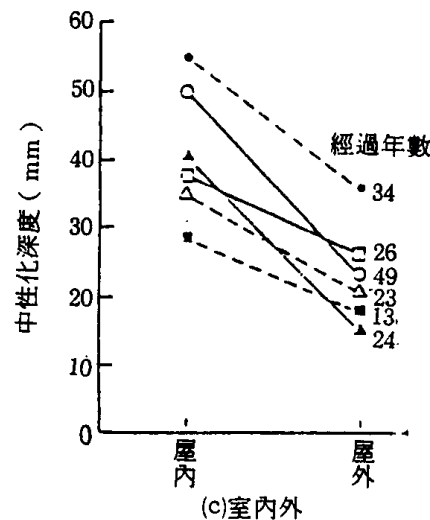
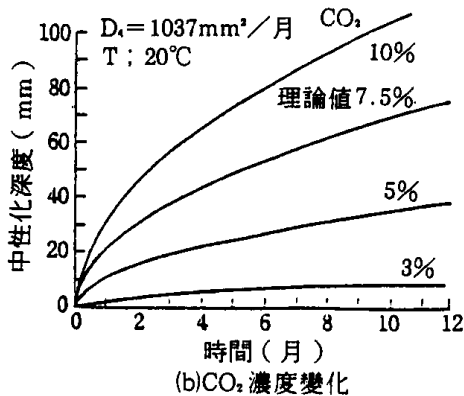
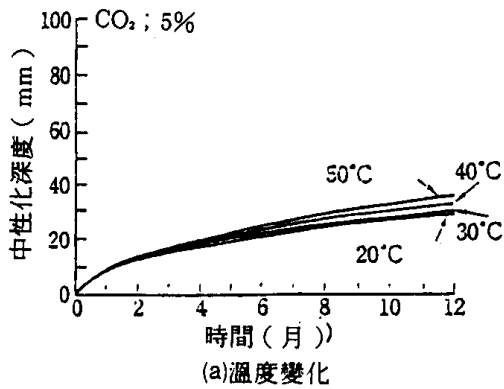


圖 28 環境因素對中性化深度之影響性⁽¹⁴⁾

一般可在混凝土表面塗裝，以降低中性化速率，噴水泥漿塗刷防水塗料或外裝材（貼磁磚、石板等）對防止中性化均具相當功效。

4-3 混凝土中氯化物之行為及對策

海水所含氯離子侵入混凝土，有三種型態如圖 29⁽⁷⁾，一為與水泥中之鋁酸鹽化合物反應生成難溶性之 Friedel 鹽，而有些氯離子吸附於孔隙壁上，剩餘約有 30% 之游離氯離子在孔隙中擴散，可能到達鋼筋處，引起腐蝕反應。根據 Hausmann 指出在鋼筋與混凝土界面之 Cl^- 及 OH^- 濃度比值大於 0.61 ($\text{Cl}^-/\text{OH}^- > 0.61$) 則將發生腐蝕（圖 30）⁽⁷⁾。

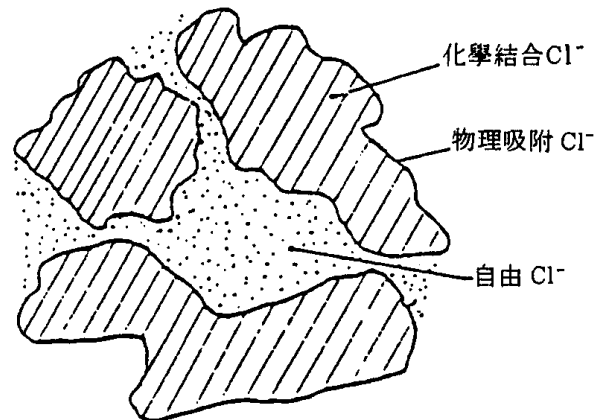


圖 29 混凝土中氯離子三種不同形態⁽⁷⁾

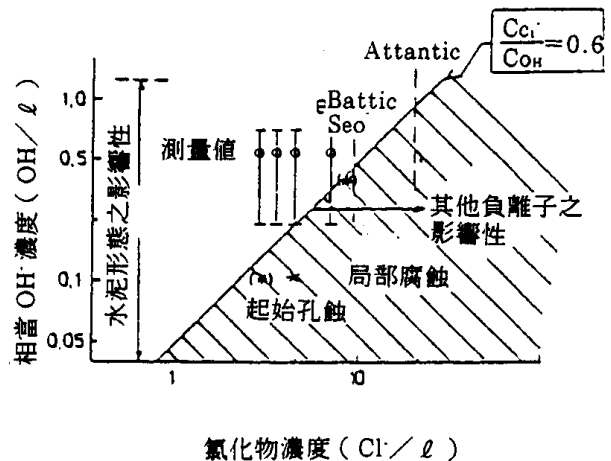


圖 30 開始發生腐蝕之 Cl^- 濃度與 OH^- 濃度之關係⁽⁷⁾

混凝土在乾濕反覆情況下，潮濕時，海水藉混凝土孔隙之毛細管作用（圖31），因此有大量之 Cl^- 及 H_2O 侵入，而乾燥時水份蒸發。因此 Cl^- 隨水份往混凝土表面層移動，表面附近鹽份濃度之增加程度與乾燥時間成比例⁽¹⁵⁾。

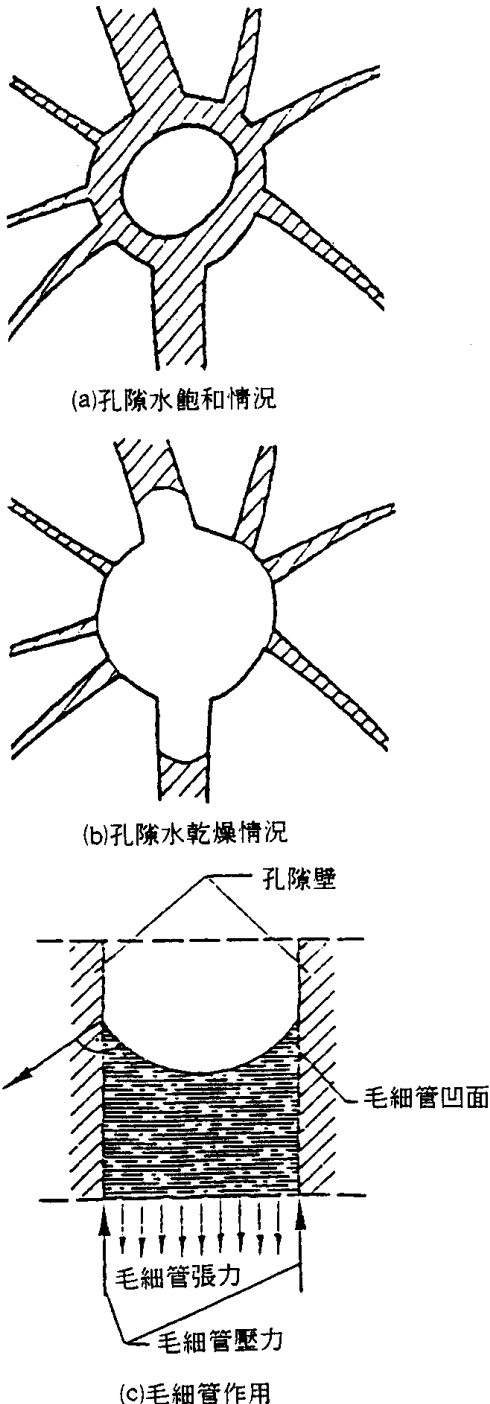


圖31 在狹窄混凝土孔隙中水份之行為⁽¹⁵⁾

受海水侵蝕之混凝土改善對策有二，即使用耐海水性材料和製造均質水密性高的混凝土。

由於海水中含有硫酸鹽離子，易與水泥中之 C_3A 反應生成膨脹性之鈣矾石，因此可採用含 C_3A 量較少之抗硫酸鹽水泥（ASTM 第二種及第五種水泥），而製作水密性佳之混凝土可使用富級配（單位泥量 400 kg/m^3 以上），水灰比儘量小，可調整至適當之工作度範圍，同時必須使用 AE 劑或 AE 減水劑以減少浮水及增加水密性。施工時，保護層要足夠且不得造成澆置時材料分離及搗固不實，因此選擇適當之材料及小心地施工相當重要。

五、龜裂與鋼筋腐蝕

5-1 龜裂形態與鋼筋腐蝕

鋼筋混凝土結構物，無論如何嚴格控制施工品質都無法避免發生龜裂，混凝土若有裂縫，則腐蝕因子將侵入，混凝土龜裂與鋼筋生銹互為因果關係，施工方法有缺陷，溫度變化，乾燥收縮，乾濕反覆作用，硫酸鹽及鹼性骨材反應，超載，衝擊和基礎沉陷不均勻等引起龜裂均會導致鋼筋銹蝕。中性化，迷失電流，使用海砂，使用溫泉水、海水拌合導致鋼筋先銹蝕，體積膨脹擠壓混凝土亦會引起混凝土發生龜裂，如此惡性循環。

圖32為鋼筋銹蝕與混凝土龜裂相關性模式圖⁽⁴⁾，情況(1)為混凝土先發生龜裂後，再產生鋼筋銹蝕；情況(2)為鋼筋先銹蝕，混凝土才發生龜裂現象。後者龜裂方向沿主筋方向，而前者龜裂方向可與主筋成任意角度。

混凝土上有龜裂，空氣中之 CO_2 會侵入裂縫，混凝土中性化再加上水與氧氣之侵入，因此使鋼筋開始生銹。在海洋地區，化學工廠及溫泉等地方有氯化物、硫酸鹽、酸雨有害氣體或飛塵等腐蝕因子之作用，因此鋼筋更容易發生腐蝕。

雖然混凝土表面上沒有發現龜裂現象，但是混凝土本身有孔隙，因此空氣、水份及氧氣會利用毛細管侵入進行中性化，然後引起鋼筋生銹，體積膨脹而破壞混凝土使之發生龜裂。這種現象以海岸結構物或使用含鹽量高之海砂之情況最為常見。

鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討

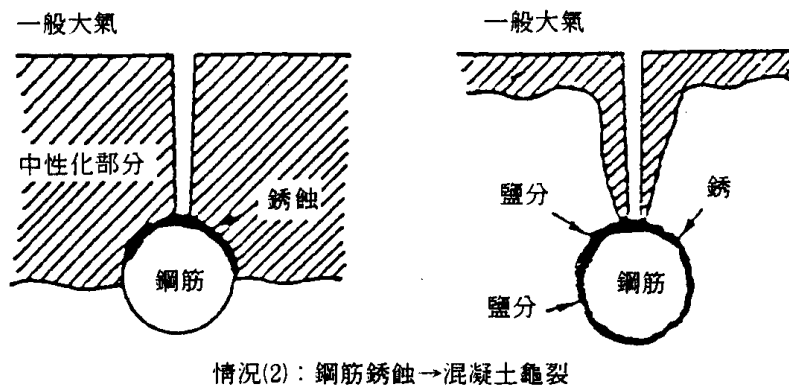
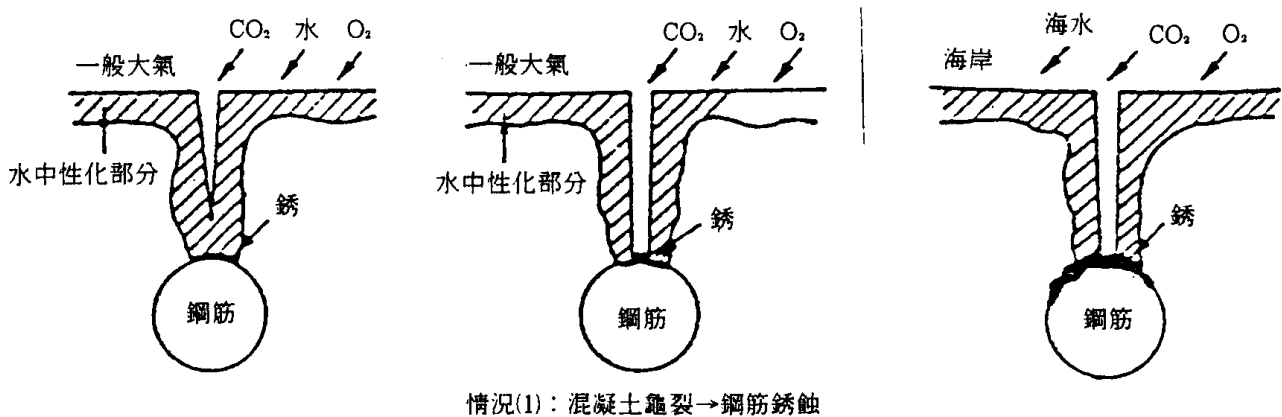


圖32 鋼筋銹蝕與混凝土龜裂模式圖⁽⁴⁾

5-2 龜裂寬度與鋼筋腐蝕

隨著工業發展所造成之環境污染及工程上要求構材斷面縮小及應力增強之故，因此 RC 結構物之腐蝕問題帶來很大之困擾，到底裂縫寬度多大，才會引起鋼筋生銹，這種容許龜裂寬度不易求得，通常使用普通骨材者約為0.3mm，而輕質骨材為0.2mm。

由於使用海砂及海水為拌合材料，會增加鋼筋之腐蝕速率，裂縫寬度在0.15mm 以下者，鋼筋銹蝕主要受混凝土內含鹽量之影響。而寬度介於0.15~0.3mm 情況，則龜裂寬度與混凝土本身之含鹽量對鋼筋銹蝕都有影響性，而當龜裂寬度大於0.3mm 情況，則只受裂縫寬度之影響而已，此時腐蝕因子可大量且順利地侵入之故。

由於河砂來源有限，有時需考慮使用海砂，為防止鋼筋混凝土中鋼筋發生腐蝕可使用腐蝕抑制劑為混凝土摻料。性能高之防銹劑，即使龜裂寬度至0.4mm 仍有效，一般龜裂寬度若在0.1mm 以下，其效果較為顯著。

六、混凝土劣化現象之診斷

混凝土之劣化現象若能及早發現，則可迅速採取對策。表17列出表面劣化要因之調查診斷應注意之重點，而推定劣化症狀致因，需採取之調查方法如表18所示。而結構物強度劣化及大撓度現象之各種要因及其相關致因應進行之調查，試驗檢討之工作項目分別如表19及表20所示。而表21為劣化要因之區分。圖33則為補修、補強及更換之基本概念流程圖。對於診斷結果所應採取之對策如圖34所示，對補修更換技術之選定計劃，則如圖35所示⁽¹⁾。

七、結論與建議

由本文可看出鋼筋混凝土引起惡化之因素很多，若能在設計時，詳細考慮使用適當之材料，對於特殊環境，材料與結構設計應加強考慮。施工時能嚴加品質控制，使用期間不超載，平時多作調查並研判惡化原因和現象，以研究應採取之

表17 表面劣化要因之調查診斷上應注意要點⁽¹⁾

劣化要因			調查・診斷上應注意要點
地域 要因	外力	氣溫、濕度、降水量 凍結融解作用 海鹽粒子	最高、最低、平均氣溫、乾濕反覆作用 混凝土之鹽分滲透量 有無亞硫酸鹽或硫化物之作用
	內力	骨材	有無使用海砂，混凝土之含反應性骨材否
部位 要因	外力	高溫作用 流水作用（穴蝕） 磨耗作用 有機，無機酸 鹽類 油脂類 碳酸鹽	加熱溫度（ <500 ， $500<<750$ ， $>750^{\circ}\text{C}$ ） 加熱期間，中性化深度。 限界流速 $>12\text{m/s}$ （開水路）， 8m/s （閉水路） 通過物之形態，重量，速度 種類，濃度，溫度，量，流動狀態 硫酸鹽濕度，溫度，量，流動狀態 種類，濕度，溫度，量，流動狀態 濃度，中性化深度
	內力	樓版 欄杆，護牆，屋簷，陽台 使用火之處	磨耗量，化學的損失量 形狀 高濕作用
其他		水灰比 微生物之作用 電蝕作用 結露	是否過大 硫酸，細菌 迷失電流，混凝土之含水量及含鹽量 因結露水引起水泥漿之溶出

表18 推定表面劣化症狀致因需採取之調查方法⁽¹⁾

劣化症狀	致因	為推定原因所需之調查方法
污 染	表面生鹽結晶 漏水 銹蝕之污染	有無龜裂，弄清楚水路 有無龜裂，查明水路及水之種類（兩水或地下水） 由鋼筋生銹，埋設金屬物之生銹，混凝土之保護層剝離
保護層之混凝土 之剝離或剝落	鋼筋腐蝕 保護層厚度不足 蜂窩 緊密配筋 雨水之侵入	由剝離部份之露出狀況推定銹蝕之污染情況 在剝落處之露出鋼筋測定或使用鋼筋探查機測定 以目視觀察混凝土結構體或超音波測量 剝落部份以鋼筋探查機推定配筋狀況 由雨水之痕跡加以推定
由機械的作用 所造成之磨耗	人，車等之交通作用 噴砂作用 流水及波浪	車種，交通量，推算磨損之規則性 建築物之環境條件 同上
因化學的作用所 引起之表面劣化	與水之接觸 藥品之接觸 大氣中之有毒氣體 溫熱環境	雨水、地下水等之接觸狀況 由劣化狀況，調查工廠等藥品是否有與酸或鹽類接觸 建築物之環境條件 建築物之環境條件，建築物之種類

鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討

表19a 強度劣化之主要原因與檢討項目⁽¹⁾

分 類	致 因	應檢討進行之調查、試驗
配比設計考慮不夠	配比設計錯誤	a. 配比表之確認 b. 混凝土之製造及品質管理資料之確認 c. 計量值之記錄確認 d. 送入檢查時之資料確認 e. 簡易試驗，本試驗
	水泥用量之不足	a. 配比表之確認 b. 計量值之記錄確認 c. 水泥之化學分析試驗 d. 簡易試驗，本試驗
	對骨材之品質考慮不足	a. 骨材成績表之確認 b. 骨材品質之試驗
	添加太多混合材料，種類之考慮不足	a. 配比表之確認 b. 計量值之記錄確認 c. 凝結時間，凝結試驗 d. 硬化時間 e. 膨脹試驗
氣象，環境條件之考慮不足	高溫乾燥	a. 龜裂之觀察 b. 氣象條件 c. 施工記錄
	低溫	a. 氣象條件 b. 施工記錄
	凍害	a. 龜裂之觀察 b. 表面之剝離，剝落 c. 氣象條件 d. 施工記錄 e. 抗張試驗（剝離試驗）
	因風作用引起乾燥收縮	a. 龜裂之觀察 b. 氣象條件 c. 施工記錄
	初期養生之不足	a. 初期龜裂之觀察 b. 下陷引起龜裂之觀察 c. 氣象條件 d. 施工記錄
施工缺陷	填充性之不足	a. 目視觀察 b. 以打擊音進行試驗 c. 鋼球落下試驗 d. 超音波，試驗錘

表19b 強度劣化之主要原因與檢討項目(續)⁽¹⁾

分 類	致 因	應檢討進行之調查，試驗
	分離	a. 目視觀察 b. 強度試驗
	低品質骨材	a. 骨材之品質確認 b. 鑽心強度試驗 c. 楊氏彈性係數試驗
物理現象	乾燥	a. 龜裂之觀察 b. 氣象條件 c. 施工記錄
物理現象	溫度	a. 龜裂之觀察 b. 氣象條件 c. 施工記錄 d. 混凝土之表面發生變色及退色(火災) e. 以打擊音進行試驗(火害)
化學現象	從表面發生之劣化	a. 龜裂之觀察 b. 混凝土之表面發生變色及退色 c. 以打擊音進行試驗 d. 磨耗之程度
	從內部發生之劣化	a. 龜裂之觀察 b. 爆開之觀察 c. 銹蝕之程度(部材) d. X 線繞射程度 e. ASTM C289
機械的現象	反覆荷重	a. 龜裂之觀察 b. 使用狀況

表20 大撓度之主要原因與應檢討調查項目⁽¹⁾

分 類	致 因	應檢討之調查試驗
設計時考慮不足	鋼筋量不足	a. 配筋圖 b. 鋼筋探查機確認
	部材之形狀，尺寸不足	a. 形狀，尺寸實測 b. 鑽心取樣分析
施工缺陷	配筋精度不良	a. 以鋼筋探查機確認 b. 鑽心取樣確認鋼筋上下端位置及 確認保護層厚度
	支撐工早期撤除	施工記錄之確認
	早期負載	施工記錄之確認
超載	用途變更	a. 實態調查 b. 用途變更
長期間之材質劣化	鋼筋之腐蝕 混凝土強度降低	a. 鋼筋腐蝕診斷 b. 試驗錘，鑽心取樣強度試驗

鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討

表21 劣化要因之區分⁽¹⁾

大區分	中區分		小區分
環境條件	氣候（主要以氣溫區分）		寒冷地域（凍結融解），溫暖地域，亞熱帶地域，熱帶地域，高溫多濕地域
	海鹽之影響		海中波浪，潮汐經常作用，離海岸線之距離（例：25m 以下，25~50m，50~250m，250~1000m，1km 以上）
	其他特殊之區分		颱風之路徑，季節風之地域，多雪地域，工業地域，溫泉地域等
使用條件	溫濕度環境		高溫、低溫、高溫多濕等
	化學工廠 其 他		藥品類 超載
建物條件	屋 外	部 位 突 出 部 方 位	屋腳，外壁（遮雨棚否）面版，基礎，階梯等 屋簷、欄杆、突出部或升起等等 向風面或是向陽面易發生劣化
	屋 內	一 般 使用水之處	床、壁、樑等（乾燥狀態） 廁所、實驗室、作業室等
材料，施工 條件	使用水泥種類		普通卜特蘭及耐硫酸鹽卜特蘭水泥混合水泥 A.B.C 類等
	骨材	種別 品質	川砂、海砂、碎砂、川砂粒、碎石、輕質細粗骨材等之組合。 比重、吸水率、實積率、粒土塊量、清洗試驗、有機不純物、鹽分、粒度
	混凝土配 比及養生	坍度	15cm 以下、16~18cm，19~21cm
		水灰比	55%以下，56~60%，61~65%
		模板存置期間	3 日以內，4~5 日，6 日以上

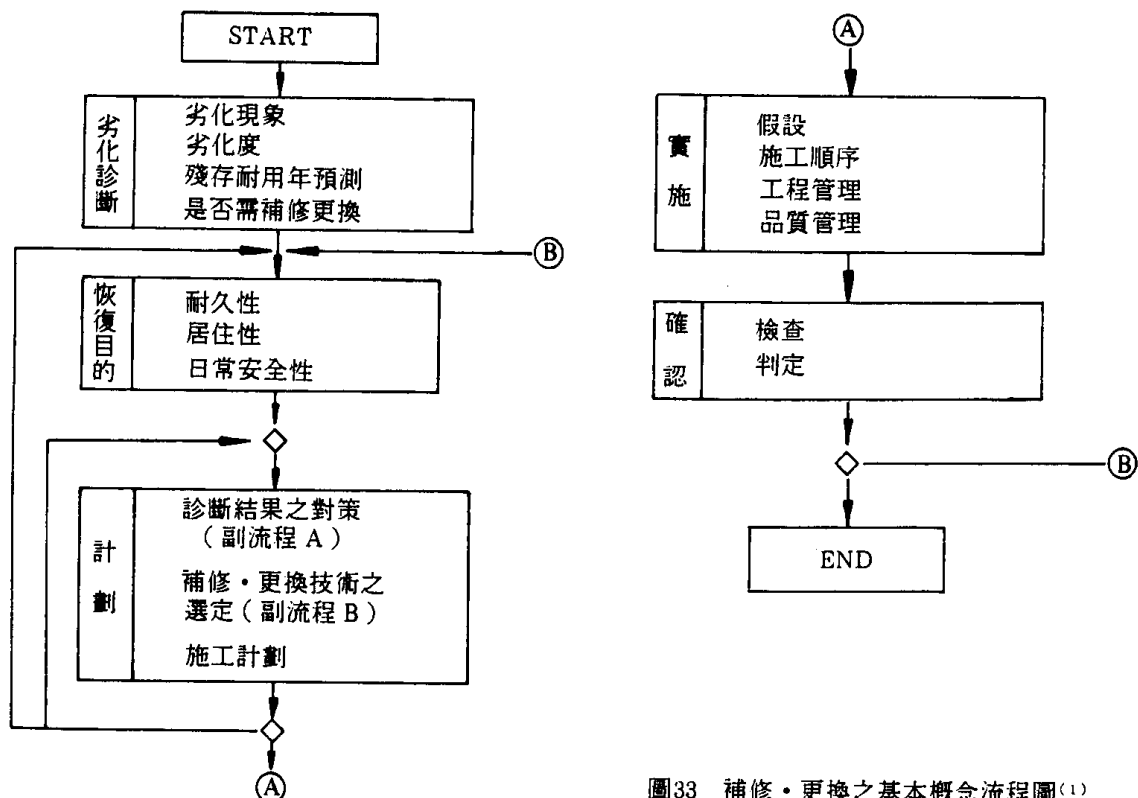


圖33 補修・更換之基本概念流程圖⁽¹⁾

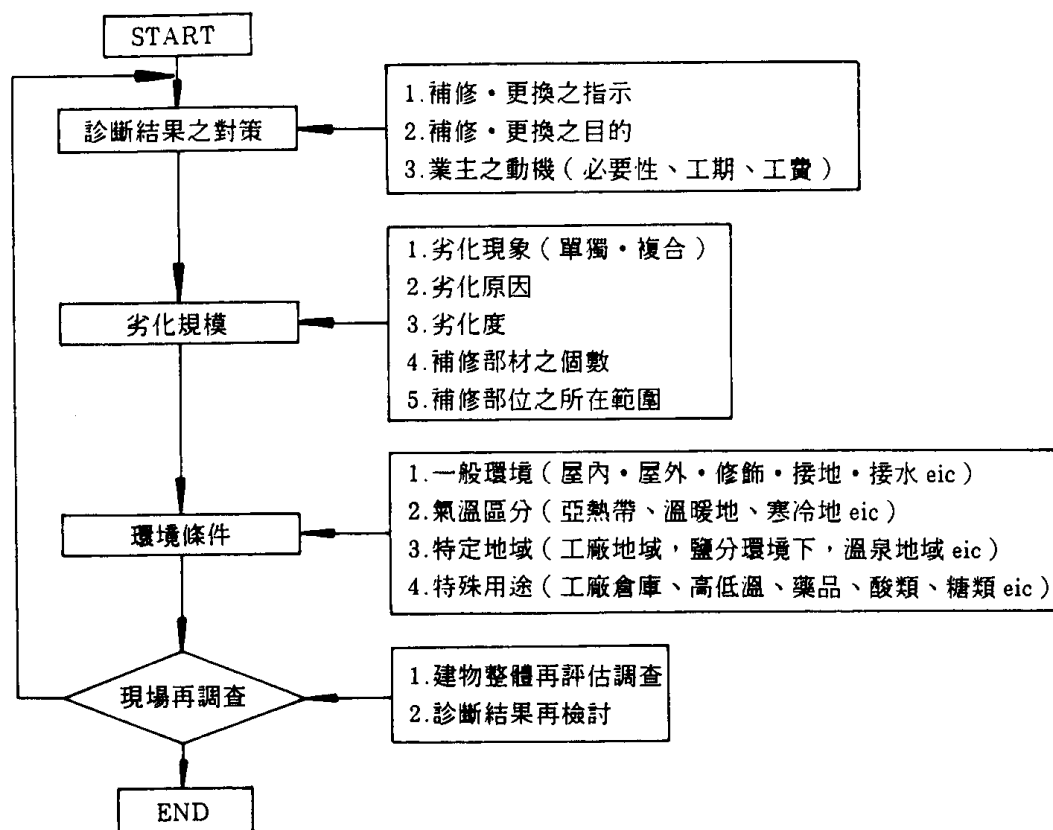


圖34 診斷結果之對策（副程式 A）⁽¹⁾

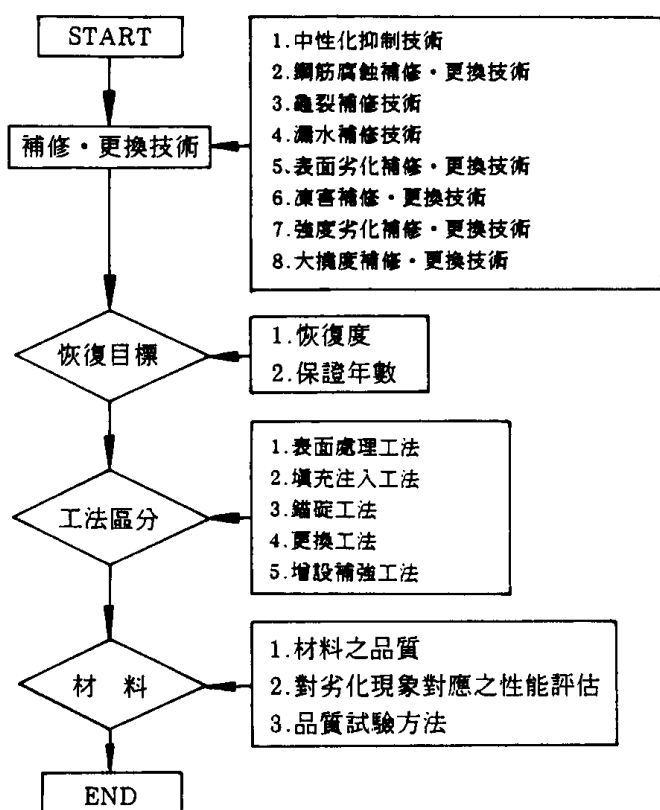


圖35 補修・更換技術之選定（副程式 B）⁽¹⁾

對策。多應用最新之科技儀器進行調查與試驗工作，進行合理之分析與研判，相信可避免混凝土癌症之發生，進而延長結構物之使用壽命，保持工程之耐久與耐用性。

參考文獻

- (1) 國土開發技術研究センター“鐵筋コンクリート構造建築物耐久性向上技術”技報堂出版，昭和61年5月。
- (2) 川上光男“RC結構物之耐久性研究”港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會資料彙刊，港灣技術研究所專刊第23號民國74年。
- (3) Beeby A.W. “cracking and Corrosion” Concrete in the oceans, Tech. Report No.1, Cement and Concrete Association, Dept, of Energy, London, 1978.
- (4) 川上光男“鋼筋混凝土構造耐久性”中日鋼筋混凝土構造物耐久性研討會，財團法人日本交流協會，民國77年3月。
- (5) 黃兆龍“混凝土病變及修復”混凝土施工技術研討會，台灣營建中心，民國76年2月。

鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之檢討

- (6) Uhlig H. H. & Revie R. W. "Corrosion and Corrosion control", John Wiley & Sons Inc, 1985, Third Edition.
- (7) Tuutti K. "corrosion of steel in concrete" Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
- (8) 林維明 "海洋混凝土結構物耐久性之檢討" 海洋混凝土工程研討會資料彙刊, 港研所專刊第38號, 民國76年。
- (9) 大即信明等 "鹽害(Ⅰ)" 技報堂出版, 1986年。
- (10) 日本コンクリート工學協會 "海洋コンクリート構造物の防食指針(案)" 昭和58年。
- (11) ACI forum: Influence of chlorides in reinforced concrete Concrete, International ACI sept., 1985。
- (12) 魏豐義 "從腐蝕觀點淺談鋼筋的發展" 海洋混凝土工程研討會資料彙刊, 港研所專刊第38號, 民國76年。
- (13) Noarihiro Kudo & Hiroshi Ibe "Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete Containing Chloride and its Rust Inhibition (part 2)" Technical Report, Onoda Construction Materials Co. Ltd., Research Lab., 1976。
- (14) 和泉登志等 "中性化" 技報堂出版, 1986。
- (15) 林維明 "混凝土結構遭受沖蝕及龜裂之檢討" 台灣公路工程第16卷1期, 民國78年7月。