

鋼筋或預力混凝土橋樑等構造物鹽害之防治研究

莊秋明* 論述

一、前言

社會大眾一般認為鋼筋或預力混凝土建造物永久不壞，其實不然。縱使其結構設計上沒有錯誤，如用錯水泥或施工不良，尤其在臨海地域之鋼筋混凝土建造物，受硫酸鹽侵蝕及鹽害，很快就會腐損，在國內外發生之實例已不勝枚舉。為能建造耐久性之鋼筋混凝土，除從設計及施工求完善之外，尚須從水泥化學之觀點尋求對策。至鋼筋混凝土受化學反應而損壞之原因可略舉如下四項說明：

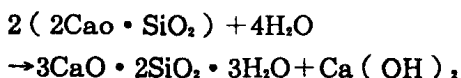
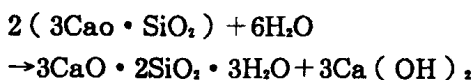
1. 中性化。
2. 硫酸鹽侵蝕。
3. 鹽害。
4. 溫泉或化學工廠之廢液等化學反應。

如何使臨海建造物避免受上述損害，以達成耐久堅固之建造物，對四面臨海之本省，可以說是非常重要之問題。

二、中性化

2.1 何謂中性化

卜特蘭水泥由 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 等礦物組成。此等礦物與水產生如下之水合反應：

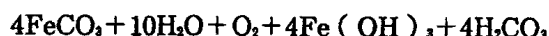
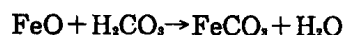
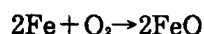


水泥經完全水合反應時，產生約25%之 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，使混凝土 pH 值保持12.5左右。硬化後之混凝土與表面受空氣中 CO_2 反應，使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，逐漸變成 CaCO_3 ，pH 值則逐漸降低，此現象稱

為中性化。

2.2 混凝土中性化與鋼筋生銹之關係

混凝土 pH 值保持12以上時，因鹼性強鋼筋不易被氧化，但因受空氣中之 CO_2 反應，pH 值逐漸減低，上述功能亦跟著退失。鋼筋則由於 H_2O , O_2 , CO_2 共存之下被氧化，產下列反應式而生銹。



生銹之鋼筋體積變成原先之二倍以上，致其周圍之混凝土保護層受脹力產生龜裂。此龜裂將沿著鋼筋擴展導致水、空氣及 CO_2 由裂縫直接進入，更加速了中性化及生銹速率，如圖1。

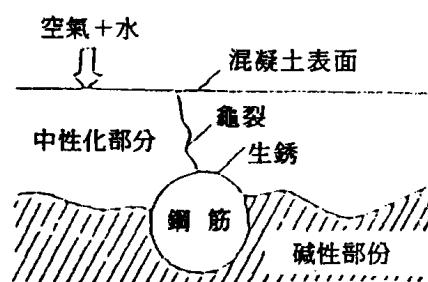


圖1 中性化與鋼筋生銹

鋼筋之生銹部份與未銹部份產生電位差，因而產生局部電池作用。在水與空氣之媒介下，以電化學之原理使整個連接之鋼筋生銹。此現象愈演愈烈，鋼筋之生銹部份 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 將從鋼筋本體剝落。使鋼筋的有效斷面愈來愈細終於喪失鋼筋剛強之特性，導致鋼筋混凝土之崩潰。

使用鹼性強之水泥且水密性高之混凝土，上述之中性化反應甚為緩慢。水灰比大之混凝土，

* 台灣省公路局副技術長兼副處長

鋼筋或預力混凝土橋樑等構造物鹽害之防治研究

水分乾燥後遺留甚多孔隙。此種孔隙率大之混凝土易受空氣及 CO_2 水之擴散滲透。如乾縮導致龜裂時，上述現象更易發生。因此為避免中性化，除了應注意灌製水灰比低，水密性高之混凝土外，為了保持高 pH 值，還應該採用水合作用時能產生高量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 之卜特蘭水泥，避免採用混合 Pozzolana 材料低 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 之混合水泥（如矽灰水泥，爐渣水泥或飛灰水泥），若使用混合水泥且考慮中性化因素時，則應降低水灰比，提高混凝土的水密性。

據河野俊夫先生實驗結果表 1、表 2、表 5

表 1 水泥種類與混凝土之中性化速度
(中性化深度 mm，括弧內為卜特蘭水泥之比例)

水泥之種類	試驗條件		
	CO_2 (加速) 5 個月	大氣暴露 5 年	室內保存 5 年
普通卜特蘭水泥	10 (1)	2.6 (1)	6.9 (1)
平強卜特蘭水泥	4 (0.4)	1.5 (0.5)	4.6 (0.7)
高爐水泥(爐渣含量30%)	11 (1.1)	2.9 (1.1)	8.7 (1.3)
矽灰水泥	12.5 (1.3)	3.4 (1.3)	9.9 (1.4)

表 2 混合水泥之中性化比例之範圍與平均

實驗條件	卜特蘭水泥		高爐水泥		矽灰水泥	飛灰水泥
	普通	天然	爐渣 (30~40%)	爐渣 (50%)	水泥15~20%	水泥15~20%
以 CO_2 加速暴露	1	0.4	1.1~2.3 1.8	2.1~2.2 2.2	1.2~2.8 1.9	1.6~2.8 2.3
大氣暴露	1	0.6	1.1	—	1.3~2.1 1.7	1.9~2.6 2.2
室內保存	1	0.7	1.3	—	1.4	1.1~1.2 1.2
平均	1	0.6	1.4	2.2	1.7	1.9

表 3 影響中性化速度之水灰比
(普通混凝土，中性化深度 mm 括弧內為對 W/C 60 之比例)

混凝土之種類		以 CO_2 加速		大氣暴露	
W/C	混合物	5 個月	1 年	1 年	6 年半
0.69	無	20 (1.3)	25 (1.4)	4 (2.0)	7.5 (2.5)
0.60	無	15 (1)	18 (1)	2 (1)	3.0 (1)
0.50	無	10 (0.7)	12 (0.7)	1 (0.5)	1.5 (0.5)
0.55	無	10 (0.7)	12 (0.7)	1.5 (0.6)	1.8 (0.6)

表 4 變動水灰比時之中性化比例
(普通混凝土，中性化深度 mm 括弧內為對 W/C 60 之比例)

混凝土之種類		區別條件		
W/C	混合物	以 CO_2 加速 6 個月	大氣暴露 5 年	室內保存 5 年
0.71	無	13.5 (1.4)	2.8 (1.1)	7.8 (1.1)
0.60	無	10.0 (1)	2.5 (1)	5.9 (1)
0.52	無	3.5 (0.4)	1.6 (0.6)	3.8 (0.6)
0.54	AE	3.0 (0.3)	1.5 (0.6)	3.3 (0.5)
0.55	AE	6.5 (0.7)	1.8 (0.7)	5.3 (0.8)
0.54	AE	4.0 (0.4)	1.7 (0.4)	3.3 (0.5)

表 5 要因別之中性比例

水泥之種類 (%)	卜特蘭水泥		高爐水泥		矽灰水泥	飛灰水泥 (FA20%)
	普通	早強	爐渣 30~40%	爐渣 50%		
	1	0.6	1.4	1.7	1.7	1.9
骨材之種類 (%)	河砂、河石 1		河砂輕質骨材 1.2		輕質粗細骨材 2.9	煤矽(細粗) 3.3
表面活性劑 (%)	無		AE類 0.6		分散劑 0.4	

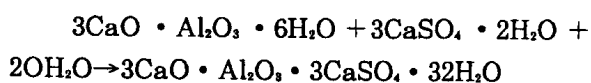
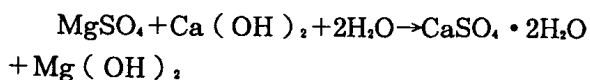
表 6 混凝土之種類與中性化比例

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	分散劑	無	AE類	分散劑	無	AE劑	分散劑
水	普通卜特蘭水泥	1	0.5	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%前後)	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
泥	飛灰水泥(20%)	1.9	1.1	0.8	2.3	1.4	0.9	5.5	3.3	2.2

、表 6 顯示，使用高爐水泥飛灰水泥及，矽灰水泥時均較普通卜特蘭水泥之中性化速度快且深。表 3、表 4、圖 2、均顯示混凝土之水灰比愈大時中性化愈嚴重⁽¹⁾。

三、硫酸鹽之侵蝕

臨海地域之鋼筋混凝土損壞情形，若詳細觀察結果將發現，其內部之鋼筋受塩害腐蝕之前，混凝土表面已經先被硫酸塩侵蝕。海水中之硫酸塩成份 $MgSO_4$ 與 $Ca(OH)_2$ 及 $3CaO \cdot Al_2O_3$ 成份會發生如下之化學反應產生 Ettringite (鈣鉭石)。



產生 Ettringite 之混凝土體積變成原先之二倍以上，使混凝土脹裂，海水即從龜裂之裂縫進入混凝土內部。海水之硫酸塩成份再與混凝土產生如上述之化學反應，使裂縫繼續發生愈寬愈長

，終使混凝土保護層從裂縫脆弱處一層一層剝落。海水則更易侵入鋼筋表面而發生腐蝕，鋼筋腐蝕後產生如前節中性化所述，發生電化學作用使整個連接之鋼筋連續不斷腐蝕，而影響其構造物本身之安全，終於拆除重建或棄廢不用。

據 Dr. Bogue 試驗，配製了 C_3A 含量 16%

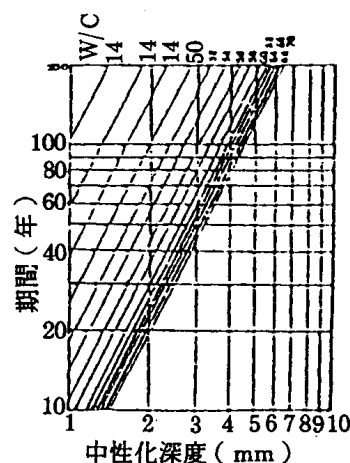


圖 2 水灰比、中性化深度齡期之關係 (普通水泥、河砂、河石、混凝土)

與5%之卜特蘭水泥第一型與第五型泡於如下之落液中：

水灰比1：4混凝土泡於 Na_2SO_4 溶液中1個月

水灰比1：2混凝土泡於 Na_2SO_4 溶液中2個月

水灰比1：4混凝土泡於 MgSO_4 溶液中3個月

水灰比1：2混凝土泡於 MgSO_4 溶液中4個月

結果 C_3A 含量多之第一型水泥（普通水泥）被硫酸鹽侵蝕產生龜裂，而 C_3A 含量少之第五型水泥則仍完整無缺。再度配製 C_3A 含量16%、11%及6%之第一型水泥與第二型水泥泡在與前述相同濃度之硫酸鹽溶液中，得到相同結果⁽²⁾。由此試驗 C_3A 含量多之普通水泥易被硫酸鹽溶液侵蝕之事實，可證明臨海地域之鋼筋混凝土建造物應儘量避免使用普通水泥而應選用第五型水泥。

四、鹽 害

位於海水中及海邊地域之鋼筋混凝土構造物，因受海水、海浪、飛沫或海鹽粒子之長久侵襲，使鹽份更易滲透進入混凝土內部而觸及鋼筋表面造成鋼筋腐蝕。因此在臨海地域要建造鋼筋混凝土構造物時，需特別注意材料之選擇及施工方

法，以免遭受無謂之損失。

1. 受鹽害之地域範圍

據岸谷，竺井先生在日本之海邊地域實地調查，混凝土表面部份之含鹽濃度與離海岸之距離之關係結果如圖3⁽³⁾。

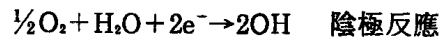
此外 ISP/TC 亦曾經發表海鹽粒子之濃度與離海岸距離之關係之調查報告如圖4⁽⁴⁾。

一般而言距離海岸200公尺以內之地域含鹽份甚多，1公里以內尚會受鹽份之影響。風大之地域其影響範圍可達數公里處，甚至到十公里之處。但在十公里以外之地方，除非特殊情況外可以說鹽害之影響甚少。

據經野氏實地測定結果如表7⁽⁵⁾。

2. 鹽害之機理 (Mechanism)

混凝土中之鋼筋與滲透進來之水及氧氣產生下列之反應式：



2個電子遺留於母材中，鐵變成離子溶出，稱為陽極反應，將陽極反應所產生之電子消耗之反應稱為陰極反應。

上述二則反應式綜合成為下列反應式：



混凝土之 pH 值降低後， Cl^- 離子滲透至鋼筋表面，破壞 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 鈍態膜（所謂解膠作用）

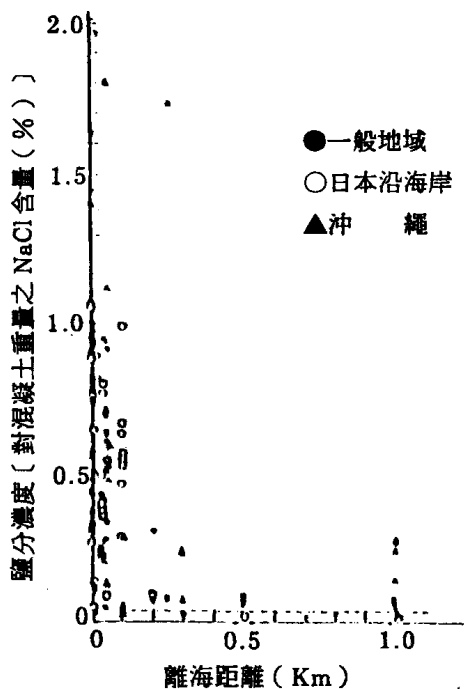


圖3 各地域別表面濃度與離海岸之距離

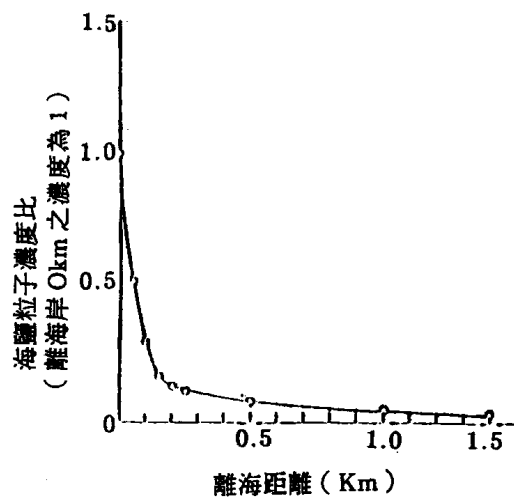


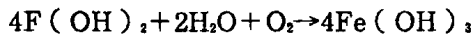
圖4 離海距離與海鹽粒子濃度

表 7 大氣中之含鹽量與混凝土中塩侵透量之關係

離海岸之距離	200 m 以內之距離	1km 以內之距離	10km 以內之距離	10km 以外之陸地
大氣中之含鹽量	0.3~0.8mg/dm ² /日	平均0.2mg/dm ² /日	風大之地域或刮強烈 季節風時有相當量之 塩分	大氣中不含有影響混 凝土耐久性之塩分
混凝土塩份侵透量	超過塩害界限含量之 0.03%甚多 *	500m 以內超過0.03% 800 m 以內則不超過		

* 對混凝土重量比，以 NaCl 計算

，產生下列之反應式將鋼筋氧化變成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ，
，即所謂生銹現象。



以食塩水腐蝕鋼筋之試驗結果如圖 4，隨食塩水之濃度提高，腐蝕速度亦增高，但超過 3% 即減緩腐蝕速度。海水中之含鹽量約 3%，適為腐蝕速度最大之含量⁽⁶⁾。

據 Richartz, W 之實驗，混凝土中之 pH 值如能保持愈高，塩害界限含量也愈高。滲透進來少量 Cl^- 離子對鋼筋尚不會發生嚴重影響。請參照圖 5⁽⁷⁾。

鋼筋混凝土之 pH 值最低應保持 10 以上，如能保持 12 以上時，一般而言鋼筋不易被氧化。pH 值降為 10 以下時，腐蝕速度急劇增加。⁽⁶⁾ 因此可以說，設法使混凝土保持 pH 值 12 以上乃為防止鋼筋混凝土塩害腐蝕之最基本對策。請參照圖 7。

歐洲混凝土委員會將鋼筋混凝土腐蝕之各種要因與其相互關係說明於圖 8⁽⁶⁾。

在圖中提及 Cl^- 量界限值，孔蝕電位，混凝土導電度及溶存氧為先決條件，並列舉與先決條件直接有關之要因，及對混凝土構造物之設計有關之間接問題，以及防止腐蝕及控制方法等簡要的說明，雖不甚完善但尚可讓大家初步了解，鋼筋混凝土腐蝕之因素及控制方法。在圖 9 說明混凝土中之塩害界限含鹽量與有關要因之關係。

五、塩害防蝕之對策

鋼筋混凝土之防蝕，需要最先考慮的是構造物之環境條件。臨海地域之建造物應選用能抗海水侵蝕之材料及施工品質。因海水中含有硫酸塩

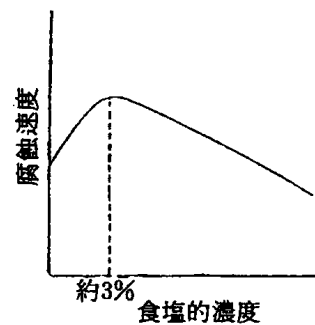


圖5 食塩濃度與腐蝕速度

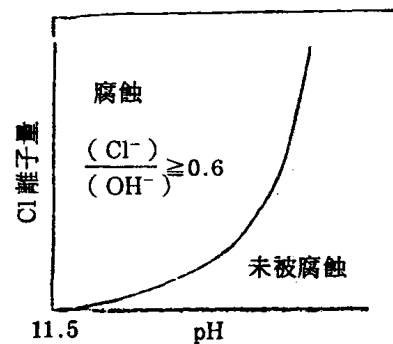


圖6 pH值對Cl腐蝕之關係

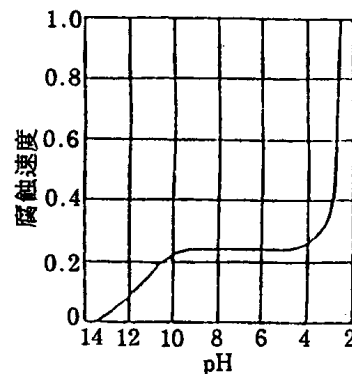


圖7 pH值與鋼筋腐蝕速度

鋼筋或預力混凝土橋樑等構造物鹽害之防治研究

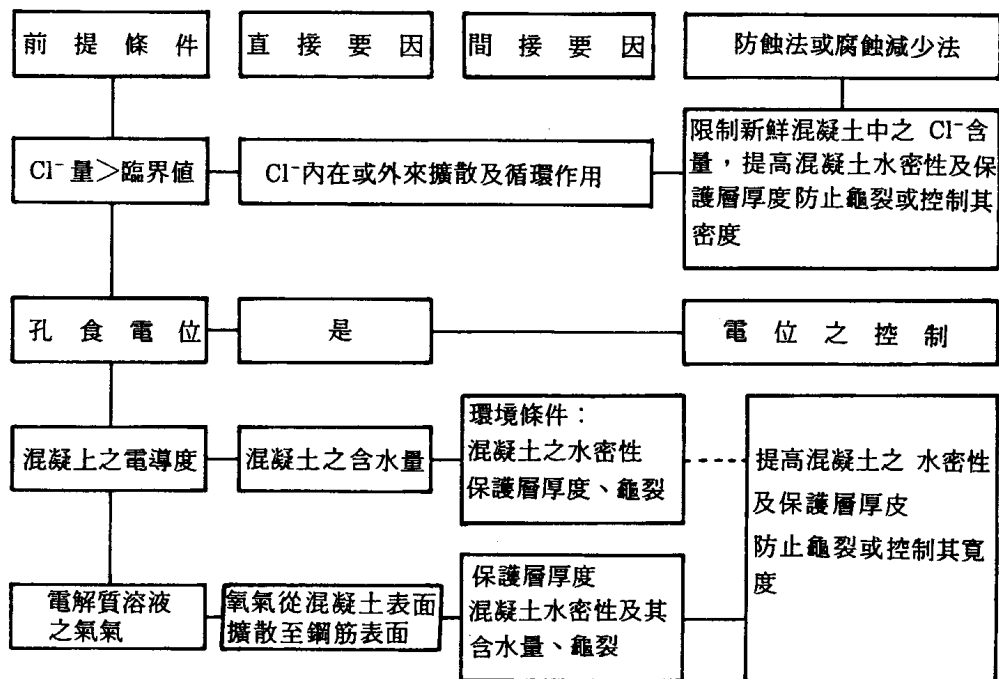


圖8 混凝土受塩化物腐蝕之各種要因及相互關係

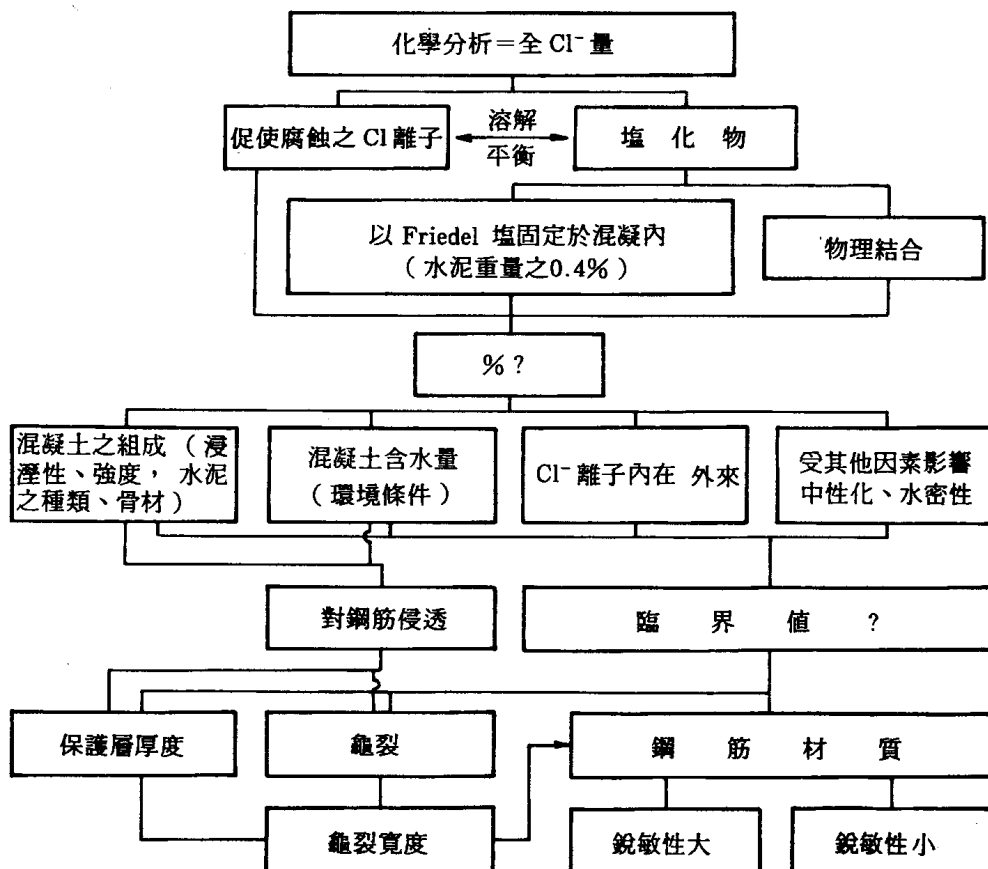


圖9 混凝土中塩害界限含塩量或無害量之有關各種要因與其關係

及食塩，故海中或海邊之混凝土構造物應使用具有抗硫酸塩性能之水泥，建造緻密度高之混凝土，並有充足之保護層，使得混凝土能保持高 pH 值，Cl 離子才不易滲透進入鋼筋表面而發生銹蝕。施工上應注意防止發生龜裂，以免海水直接侵入使鋼筋腐蝕。以上所述幾點則為鋼筋混凝土防蝕上最基本之對策。茲將水泥混凝土構造物在設計施工上應注意各點說明如下：

1. 混凝土材料之選擇

(1) 水：

海水中含有約 3% 之 NaCl，屬於腐蝕速度最高之含量，故應嚴禁使用海水於鋼筋混凝土工程。

(2) 粗細骨材：

海砂中含有 NaCl，如前述 Cl 離子會對 Fe (OH)₂ 鈍態膜作解膠作用，破壞其保護之功能。故應嚴禁使用海砂於鋼筋混凝土之工程。但萬一地域上之關係（如澎湖等外島地區）不得已要用海砂時，必須經水洗直到海砂中之塩化物含量符合規定之限量。日本建築學會規定一般建築物用之海砂含塩量不得超過 0.1%。該會實驗結果亦顯示，混凝土中之塩化物總含量如超過 0.30 kg/cm³ 時，一般而言，混凝土中之鋼筋會迅速腐蝕⁽¹⁰⁾。

骨材應使用符合 ASIM C33 及 C330 之材料。

(3) 水泥：

高爐水泥及飛灰水泥固然具有甚多優點，但國人尚未普遍地對此充分了解其各種優劣點特性（包括使用上之注意事項），因此未被土木界普遍採用。為避免中性化起見應使用水合反應時能產生 Ca(OH)₂ 之多卜特蘭水泥，而為避免硫酸塩侵蝕應使用上述成份含量少之第二型或第五型卜特蘭水泥。ACI 有明文規定（詳附表 8）硫酸塩 SO₄²⁻ 含量在 150~1500 ppm 時應使用第二型水泥，而超過 1,500 到 10,000 ppm 時應使用第五型水泥⁽¹¹⁾。在海水中，潮汐帶及飛沫帶及距海 200m 以內之地域應使用第五型水泥。在海邊不直接受海水飛沫影響之陸地建造物，距海 200m~1 Km 及海邊風大之地域距海 10 Km 以內之鋼筋混凝土應使用第二型卜特蘭水泥。

表 8 混凝土被阻塩害之建議表 (ACI)

暴露情況	土中水溶性硫酸塩 (SO ₄) C/O	水中硫酸塩 ppm	水泥	最大水灰比
輕度	0.00~0.10	0.~150	—	—
中度	0.10~0.20	150~1500	Type II 1P(MS) 1S(MS)	0.50
嚴苛	0.20~2.00	1500~1,000	Type V	0.45
極嚴	2.00以上	10,000以上	Type V +普澤蘭	0.45

4. 添加劑：

應禁止使用 CaCl₂ 為促進劑及含有 Cl 離子之添加劑。

2. 混凝土品質之提高

(1) 水灰比：

經常受海水、飛沫或海塩影響之臨海建造物，為提高耐久性建造緻密度高之混凝土為鋼筋混凝土防蝕上最重要對策之一。一般而言抗壓强度高之混凝土其密度亦高。如眾所知抗壓強度與水灰比有密切之關係。在保持適當工作性之下，應儘量降低水灰比，降低水灰比不但會提高混凝土之抗壓強度及水密性。由於緻密度高不但可保持高 pH 值，且塩分亦不易乘隙滲透而入，因此可以達到防止塩害之目的。

日本混凝土工學協會制定之海洋混凝土構造物之防蝕指針中將水灰比規定如下⁽¹²⁾：

臨海海洋大氣中	50~45%
飛沫帶	45~40%
海水中	50~45%

依施工條件，在其範圍內調整。

水灰比與抗壓強度之關係如圖 10⁽¹³⁾。

水灰比與透水係數之關係如圖 11⁽¹⁴⁾。

水灰比與含塩量及深度之關係如圖 12⁽¹⁴⁾。

(2) 單位水泥用量

在海洋環境下為提高防蝕之性能應注意混凝土配料設計上之單位水泥用量。為最佳之混凝土

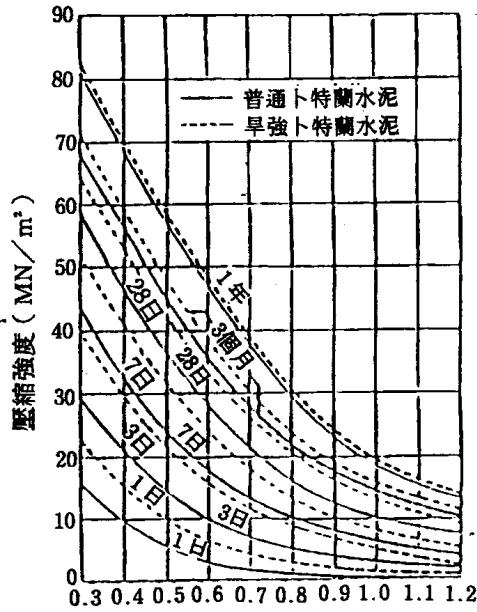


圖10 水灰比與壓縮強度之關係

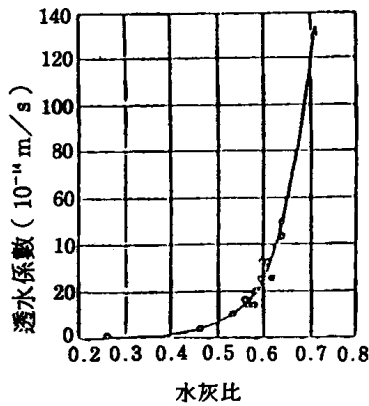


圖11 水灰比與透水係數之關係

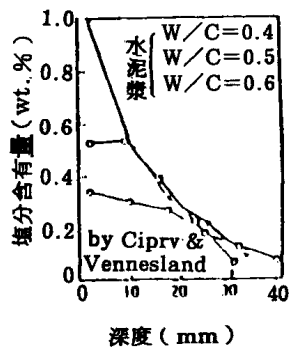


圖12 水灰比與塩分分布混在上與水中二年

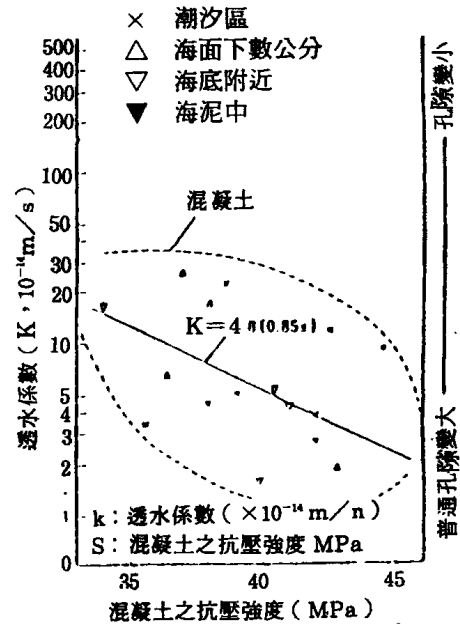


圖13 混凝土之抗壓強度與透水係數的關係

拌合增加其工作性及其抗壓強度，使水泥漿與鋼筋緊密結合在一起，並注意拌成均勻緻密之混凝土。因增加混凝土之水泥用量，對海水中塩類之化學抵抗力增強，能大幅提高其耐久性⁽¹⁶⁾，但如果單位水泥用量增加過多，在薄斷面之混凝土將引起乾燥收縮，在厚斷面則因水合熱引起膨脹收縮，導致龜裂。因此單位水泥用量宜控制於 500 kg/cm^2 以下。

日本混凝土工學協會制定之海洋混凝土構造物之防蝕指針裡，規定單位水泥用量如下：

臨海海洋大氣中	325~375kg/m ³ 以上 500kg/m ³ 以下
飛沫帶	350~400kg/m ³ 以上 500kg/m ³ 以下
海水中	300~350kg/m ³ 以上 500kg/m ³ 以下

依施工條件，粗骨材最大尺寸，在其範圍內調整。

3. 注意灌製密度均勻之鋼筋混凝土：

鋼筋混凝土如果產生如圖14之情形，則產生電位差造成腐蝕電位而腐蝕⁽¹⁷⁾。因此須注意鋼筋材質均勻，搬運時不可損傷以免產生電位差。並注意灌製均勻之混凝土並注意搗實，使其能製

成密度均勻高品質之鋼筋混凝土。

圖14-(1)R.C中產生龜裂，使空氣含量不同產生電位差而發生濃淡氧電池腐蝕。

圖14-(2)R.C中混凝土與鋼筋接觸面產生空隙，致產生間隙腐蝕。

圖14-(3)R.C中混凝土之密度不同，則孔隙不同，而產生不同含水量，發生電位差。

圖14-(4)R.C鋼筋之材質不均勻產生電位差。

圖14-(5)R.C中鋼筋上部有凹痕，產生間隙腐蝕。

圖14-(6)R.C中鋼筋表面保護層損害產生電位差。

圖14-(7)R.C中鋼筋冶金時，產生結晶破壞，致產生電位差。

4. 增加保護層厚度：

臨海地域之鋼筋混凝土建造物，如果無龜裂時，Cl離子以Hooke之擴散法則，從混凝土表面緩慢滲透至鋼筋表面。因此如果能建造緻密度

高，適當保護層厚度之混凝土，Cl離子之擴散速度會非常緩慢，且擴散進入混凝土內部之Cl離子之一部（約水泥重量之0.4%），與Mono sulphate ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot nH_2O$) 起化學反應，變成與塩害無關之下 Fried-Cl 塩 ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot nH_2O$) 被固定於混凝土內部。

據日人太郎先生之實驗，在潮汐帶附近對已建造15年久之棧橋版面，調查其保護層厚度與Cl離子擴散速度（以Cl離子含量表示）之關係求擴散係數，其結果如表9。

由表9之值顯示，保護層厚度愈厚且水灰比愈低，由擴散進入混凝土內部之Cl離子愈少。所以增加保護層厚度對於防止水份、塩份、氧氣之滲透有顯著之效果，鋼筋混凝土之防蝕對策上可以說是非常重要之措施之一。

近年來鋼筋混凝土用的鋼筋直徑有增大之趨勢，用大直徑之鋼筋時，由於對混凝土之乾燥收縮之拘束增大，內部易產生微細龜裂。又由於混凝土之界面增大易產生泌水而易產生孔隙，使之

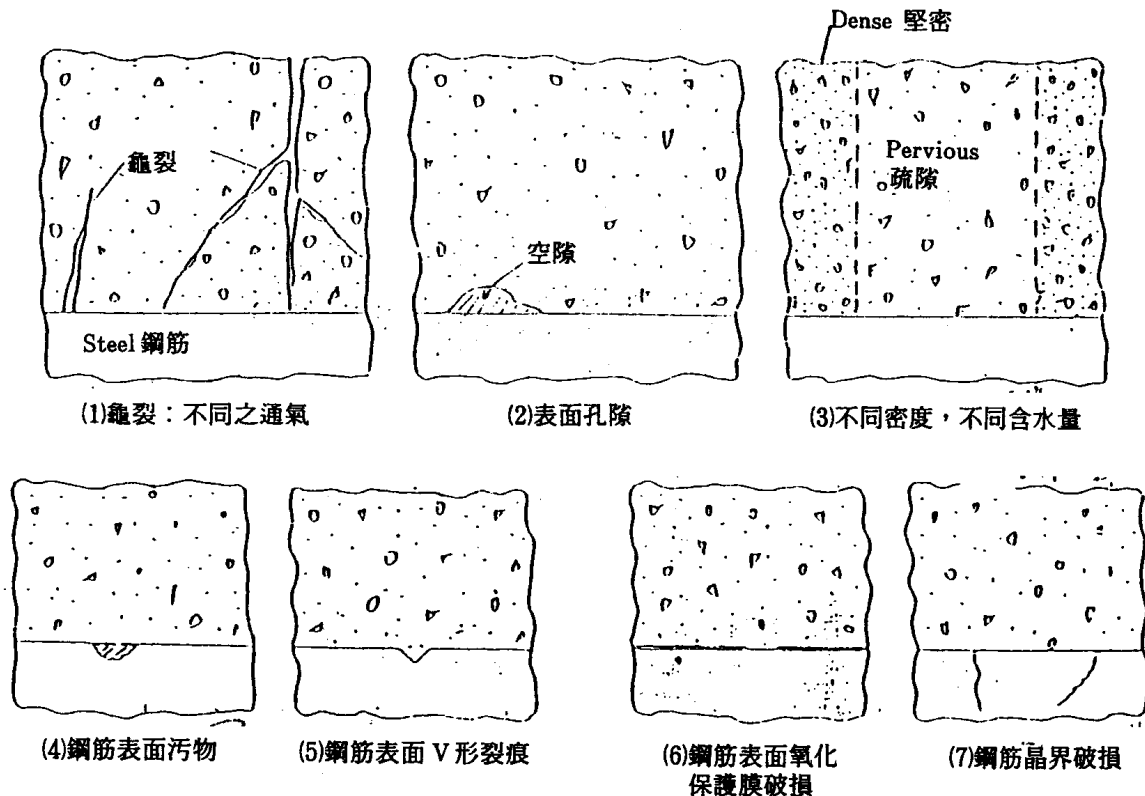


圖14 混凝土和鋼筋存有之缺陷

鋼筋或預力混凝土橋樑等構造物鹽害之防治研究

表9 棧橋混凝土版面之Cl離子含量與保護層厚度之關係

	W/C及水泥 單位用量	保護層厚度	Cl離子含量 (%) * ₂	經過年數 (年)	計算值	
					Co (%)	Dc * ₁
棧 橋 之 混 凝 土 版 面	C=315kg/m ³ W/C=36%	2.5	0.08	20	0.10	3.9
		7.5	0.05			
		12.5	0.035			
		17.5	0.03			
	C=430kg/m ³ W/C=43%	2.5	0.53	20	0.56	1.3
		7.5	0.21			
		12.5	0.10			
		17.5	0.02			

*₁: $\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{g}^2$ *₂: Cl離子含量係對水泥漿之重量比(%)

降低防蝕性能。因此設計時應考慮配合鋼筋直徑比以決定鋼筋混凝土之厚度。據 Attimtai 之實驗，鋼筋直徑之比採取2.5~3.0時其3防蝕性最為有效⁽¹⁹⁾。小林，宮川先生等做了加速試驗結果後發現保護層厚度與鋼筋直徑之比以4為宜。日本建築學會參考圖15⁽²¹⁾讀取各水灰比下之Cl離子擴散係數，再以臨海地域別乘修正係數，將計算結果繪製圖16⁽²²⁾，以Cl離子達到臨界含鹽濃度之年數，決定具有耐久性之保護層之厚度。日本建築學會規定臨海地域之混凝土保護層厚度如下表10：

表10 保護層厚度 (mm)

潮 汐 帶	90
海 水 中	80
飛 沫 帶	70

5. 防止龜裂：

鋼筋混凝土建造物，建在如美國濕度50度以下之乾燥地域，產生一小龜裂，對該建造物之耐久性影響不會太大。但建在本省濕度高之地方，O₂，CO₂，H₂O等即從龜裂之裂縫進入，使之加速中性化及腐蝕。也就是說在臨海地域之鋼筋混凝土建造物產生龜裂時，塩份較易進入至鋼筋表面，將鋼筋表面之鈍態皮膜破壞，加以水及氧氣之侵入使之氧化導致腐蝕，嚴重降低該建造物之耐久年限。從水泥化學及防蝕之觀點而言，鋼筋混凝土之龜裂對腐蝕為最嚴重因素之一，因此必

須設法防止產生龜裂。有關防止龜裂之方法曾經由國內外學者發表甚多論文及報導。設計及施工

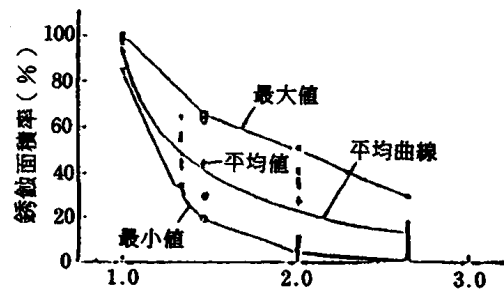


圖15 C/O (保護層厚度/鋼筋直徑) C/O對鋼筋腐蝕之影響

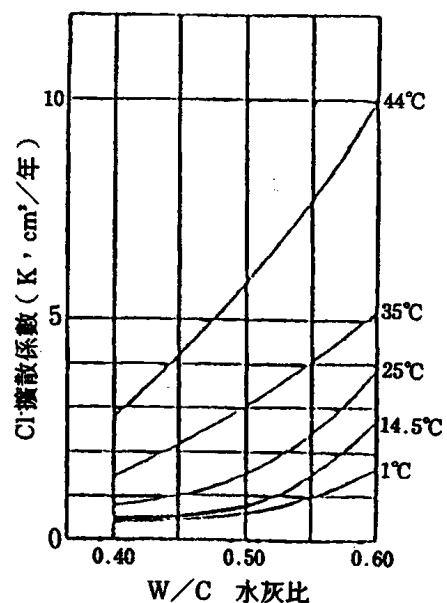


圖16 各水灰比下之Cl擴散係數

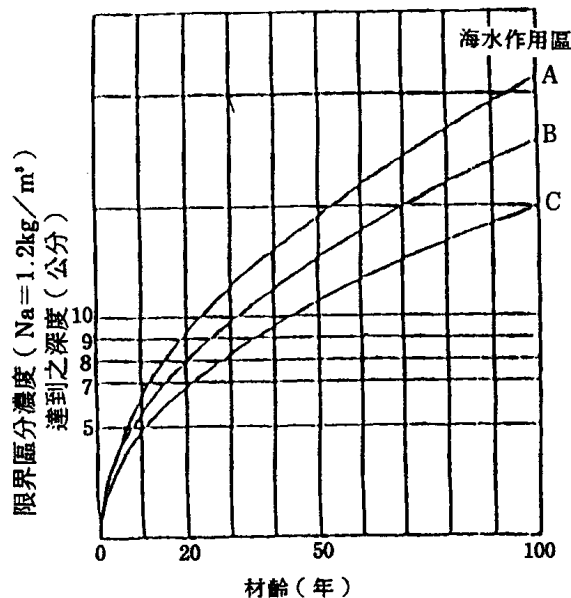


圖20 塩份侵透深度與材齡

時參照該文獻以免產生因龜裂導致無謂損失。

臨海地域一般而言風速大，氣溫變化大而影響水份之蒸發速度。據 Lerch 實驗風速、濕度、氣溫及混凝土溫度對水份蒸發速度之影響如表11⁽²³⁾。

6. 防蝕設施上尚有混凝土之塗裝，鋼筋之各種防蝕措施以及陰極，陽極電化學原理之防蝕方法，因篇幅限制在此不再贅言，敬請各位參考專家之文獻。

六、結 論

為防止鋼筋混凝土之塩害，應詳細觀察造成腐蝕之原因。針對原因尋求對策，訂定周全之計畫逐步付之實施。首先應認識環境，選擇符合該環境之材料，以免用錯水泥或用錯材料（海水，海砂）等使鋼筋混凝土之表面一層一層剝落，造成鋼筋露出使之腐蝕。鋼筋防蝕最基本之方法為使鋼筋表面有堅強之鈍態皮膜包圍，以緻密度高適當保護層厚度之混凝土使鋼筋周圍之 pH 值保持12以上，擴散進來之 NaCl 濃度控制於0.045%以下，鋼筋因此才不易生銹。並在設計及施工時設法使之不產生或減少生龜裂，如有發現小龜裂應立即修補或施予塗裝，以期防蝕措施之萬全。

如果能依照上述之方法注意設計及施工，我們相信可以使臨海地域之鋼筋混凝土建造物更能保持設計上應有之耐久年限。

參考文獻

- (1) 河野俊夫 實用コンクリート技術下冊 p.129。
- (2) Dr. Bogue : The Chemistry of Portland Cement.
- (3) 岸谷孝一、笠井浩：鐵筋コンクリート構造物の塩分侵入に関する文獻研究：昭和60年度日本建築學會大學學術講演梗概集 1985.10。
- (4) Corrosion of Atmospheres : ISO / TC 156 , WG4 , N66E 1983.
- (5) 經野紀元：塩分による鐵筋の腐蝕上防食對策，あらか一建設省建築研究所成果撰，建築研究振興協會，1984.10.5。
- (6) 井上勝也：鑄上の戰い，三省堂 1965.5。
- (7) Erlin, B., et al : Corrosion of Metal in Concrete-Needed Research-ACI SP-49 1975, pp.37~46.
- (8) Whitmann, W., et al : Effect of Hydrogen Concentration on the Submerged Corrosion of Steel, Ind, Eng, Chem, Vol.1.16 No.7 1924.7。
- (9) CEB Jask Group Durability : Durability of Concrete Structures State of Art Report Bulletin information, CEB No.148, 1982.2.
- (10) JASS 5 1986 p.129.
- (11) ACI 201 2R-12.198.
- (12) 岸谷孝一等編著 塩害 p.67。
- (13) ネビル著 後藤幸伍，尾板芳夫監譯 コンクリートの特性 技報堂出版，1977 p.483。
- (14) Gjorv, O.E : Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete, Cement and Concrete Research Vol.9 1979.
- (15) 經野紀元：鐵筋コンクリート造棧橋の調査，日本建築學會關東支部概梗 1982.15。
- (16) 岸谷孝一等編著 塩害 p.61。
- (17) 張一熙：港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會資料彙刊 p.8。
- (18) 大即，森，關：海洋環境下におけるコンクリート中の塩素に関する考察：土木學會論文報告集 第332號 1983。
- (19) Attimay, E : Chloride Corrosion of Reinforced Concrete, Texas Univ 1971.3.

鋼筋或預力混凝土橋樑等構造物鹽害之防治研究

表11 氣溫、濕度、風速、混凝土溫度對水分之蒸發速度之影響

混凝土溫度 ℃	氣溫 ℃	濕度 %	露點 ℃	風速 m/hr	水分之蒸發速度 hg/m ² /hr
(1)風速增加時					
21.1	21.1	70	15.0	0	0.074
21.1	21.1	70	15.0	8	0.186
21.1	21.1	70	15.0	16	0.304
21.1	21.1	70	15.0	24	0.417
21.1	21.1	70	15.0	32	0.539
21.1	21.1	70	15.0	40	0.662
(2)濕度減少時					
21.1	21.1	90	19.4	16	0.098
21.1	21.1	70	15.0	16	0.304
21.1	21.1	50	10.0	16	0.490
21.1	21.1	30	2.8	16	0.662
21.1	21.1	10	-10.6	16	0.858
(3)混凝土濕度及氣溫增高時					
10.0	10.0	70	5.0	16	0.098
15.6	15.6	70	10.0	16	0.211
21.1	21.1	70	15.0	16	0.304
26.7	26.7	70	21.1	16	0.377
32.2	32.2	70	26.1	16	0.540
37.8	37.8	70	31.1	16	0.882
(4)混凝土溫度(21.1℃)，氣溫降低時					
21.1	26.7	70	21.0	16	0.000
21.1	21.1	70	15.0	16	0.304
21.1	10.0	70	5.0	16	0.613
21.1	-1.1	70	-6.1	16	0.809
(5)氣溫(4.4℃)，濕度100%混凝土溫度高時					
26.7	4.4	100	4.4	16	1.004
21.1	4.4	100	4.4	16	0.637
15.6	4.4	100	4.4	16	3.308
(6)混凝土溫度高，氣溫44℃，風速變時					
21.1	4.4	50	-5.0	0	0.172
21.1	4.4	50	-5.0	16	0.794
21.1	4.4	50	-5.0	40	1.749
(7)氣溫21.1℃混凝土溫度降低時					
26.7	21.1	50	10.0	16	0.858
21.1	21.1	50	10.0	16	0.490
15.6	21.1	50	10.0	16	0.221
(8)濕度10%，混凝土溫度及氣溫高，風速變化時					
32.2	32.2	10	-3.8	0	0.343
32.2	32.2	10	-3.8	16	1.646
32.2	32.2	10	-3.8	40	3.626

Hardened Cement Paste Coment and Concrete
Research Vol.11 No.3 1981.

(22) JASS 1986 p.413.

(23) W. Lerch : Modern Concrete 25 { 12 Apr } 34.
1962.

(20) 小林和夫，宮川豊幸等，かぶりコンクリート
が鉄筋腐食に與える影響，セメント技術年報
36巻 1983.12 p.497～501.

(21) C.L Page et al : Diffusion of Chloride Io-nn.