

台灣濱海鋼筋混凝土結構物 腐蝕調查研究

林維明* 黃兆龍** 彭耀南*** 饒正****

Corrosion Investigation Study Of Nearshore Reinforced Concrete Structures In Taiwan

W.M.Lin C.L.Hwang** Y.N.Peng*** Cliff.C.Rau*****

摘 要

台灣濱海之鋼筋混凝土(RC)結構物之腐蝕現況已進行十年以上之調查。調查工作包括混凝土保護層厚度和混凝土鑽心取樣等工作。而在實驗室工作係根據鑽心取樣所取回之試樣進行化學分析及氯離子擴散速率等解析。試驗結果顯示現有海洋RC結構物之氯離子(Cl⁻)含量相當高；鋼筋腐蝕之主因為Cl⁻之侵入；結構物離海岸愈近者，Cl⁻侵入擴散分佈曲線愈準確，對使用年限為50年之RC結構物混凝土保護層厚度至少需保護層厚度11.4公分及使用具有良好品質控制之措施。

關鍵詞：腐蝕、鋼筋混凝土、氯離子侵入、保護層厚度、使用年限、概率分佈、Fick 第二擴散定律

ABSTRACT

The nearshore reinforced concrete (RC) structures in Taiwan have been investigated for over ten years. The field survey included concrete cover layer and core samples drilled. The tests included the chemical analysis, microstructure analysis, and chloride diffusion rate etc. The test data show that the content of Cl⁻ in the existing marine RC structures is very high. The main factor that controls the corrosion of steel in the RC structures is the penetration of Cl⁻. The test data show that the more nearshore the structures are, the more accurate distribution of chloride penetration in the concrete will be.

* 港灣技術研究所港工材料組研究員

Researcher, Harbor Eng. Material Division, Institute of Harbor and Marine Technology (IHMT).

** 國立台灣科技大學營建系教授

Professor, Dept. of Const. Eng., Natl. Taiwan Univ. of Science and Technology.

*** 國立交通大學土木系教授

Professor, Dept. of Civil Eng., National Chiao-Tung Univ.

**** 港灣技術研究所副研究員兼港工材料組組長

Associate Researcher and Head of Harbor Eng. Material Division, IHMT.

For 50 years service life of steel in RC structures, a minimum depth of 11.4 cm concrete cover layer with better quality control of concrete is required in Taiwan.

Key words:corrosion, reinforced concrete (RC), simulation of chloride ion penetration, depth of concrete cover layer, service life, probability distribution of Cl⁻ activation front, Fick's second diffusion law.

一、前言

一般而言，鋼筋混凝土結構物具有優越的結構特性和耐久性能，但在許多結構物上可發現混凝土剝落及鋼筋銹蝕劣化現象。台灣為一海島位於亞熱帶，氣溫高、相對濕度亦大。在此海洋環境下，濱海鋼筋混凝土結構物，橋樑、跨海大橋，或建築物常年受惡劣海洋環境侵襲作用更容易發生混凝土劣化與鋼筋腐蝕現象。港灣技術研究所曾進行濱海 RC 結構物之耐久性調查自 1986 年就開始進行。所調查之結構物種類包括建築物、橋樑及碼頭等。調查之地點如圖 1 示遍佈全省。調查工作如至現場對結構體進行目視檢查劣化現象及照相，繪出龜裂與剝落現況圖，非破壞性檢查如使用超音波及試驗錘測定混凝土強度、鋼筋探查器測定保護層厚度，及腐蝕電位測定儀測定電位分佈等，及對混凝土結構體進行鑽心取樣並將之攜回實驗室進行分析。其工作包括鑽心試體外觀描繪與研判、試體比重、孔隙率及抗壓強度、透水性吸水率及化學成分（如 Cl⁻, CO₂, MgO, SO₃²⁻）分析，水泥含量及粗細骨材比率、氯離子及二氧化碳侵入結構體之擴散分佈，使用 X 光繞射分析(XRD)及掃描式電子顯微鏡(SEM)微觀混凝土結構物病變之生成物特性等，詳細調查資料可參見參考文獻 1-3，由於濱海鋼筋混凝土結構物發生腐蝕之原因很多，本文僅就其中最重要的因素即氯離子侵入混凝土之擴散速率進行分析與研討，並提出防蝕設計所需混凝土保護層厚度之建議。鋼筋混凝土結構物耐久性為全球性之問題，其最主要之關鍵為所使用之混凝土之透水性低以防止一些有害因子如氯化物、二氧化

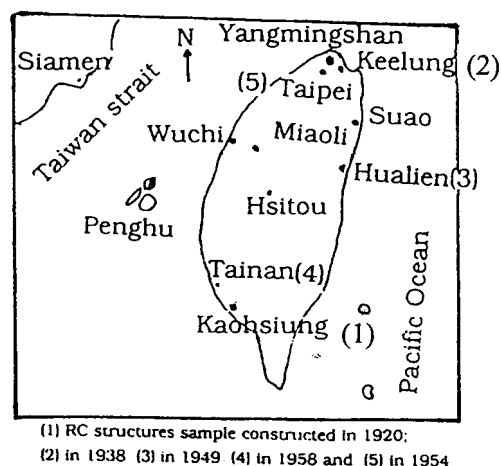


圖 1 台灣鋼筋混凝土結構物腐蝕狀況調查位置圖

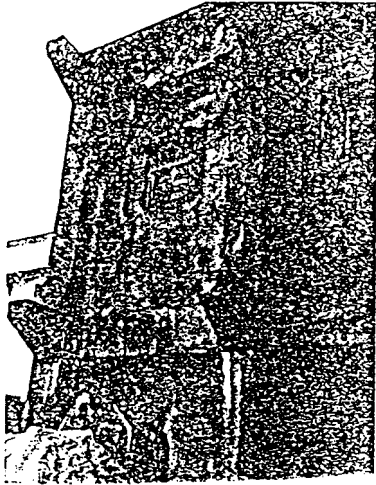
Fig.1 The location of corrosion status survey of RC structures in Taiwan.

碳、氧氣及水等之侵入，使用具有良好品質控制措施是一致性之建議^(4,5)，高性能混凝土是使用一般傳統性之組成材料再加上適量之礦物及化學摻料所製作之混凝土，其透水性相當低，在國外海域工程如北海海域鑽油平台及跨海橋樑碼頭等已有不少應用實例，且發現極具耐久性⁽⁶⁾，而國內正在研發階段。

二、調查與試驗分析工作

2.1 調查對象

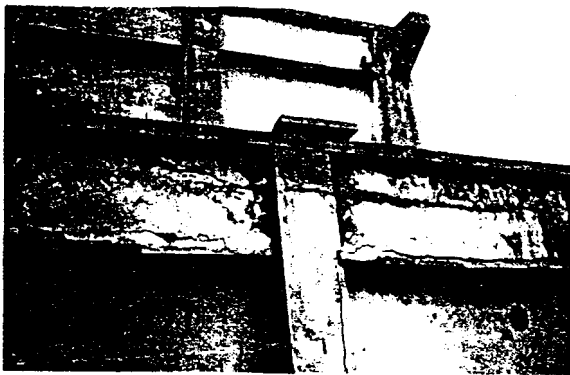
本研究選定高雄港 9-1 號碼頭倉庫（試樣 1），基隆港西 16 號碼頭倉庫（試樣 2），花蓮港 3 號碼頭倉庫（試樣 3），安南國中一棟廢棄老舊倉庫（試樣 4）及大埔橋（試樣 5）等進行調查，這些結構物如圖 2 所示。前三座倉庫均為二層樓 RC 結構建築物，安南國中則為鋼筋加



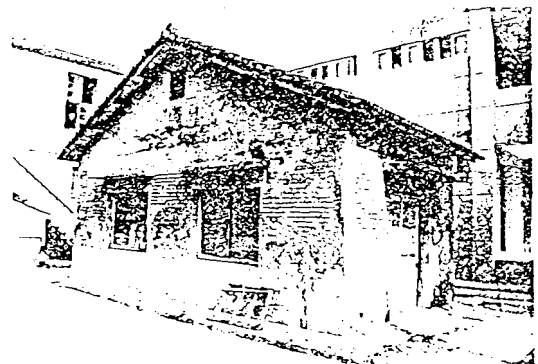
試樣 1 高雄港 9-1 號碼頭倉庫
sample 1



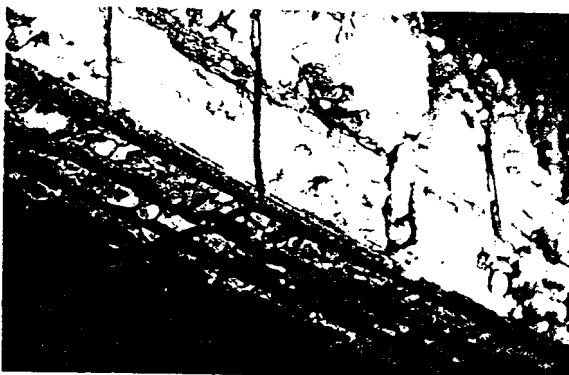
試樣 2 基隆港西 16 號碼頭倉庫
sample 2



試樣 3 花蓮 3 號碼頭倉庫
sample 3



試樣 4 台南安南國中倉庫
sample 4



試樣 5 台 15 線大園鄉大埔橋
sample 5

強磚造平房，而大埔橋位於大園工業區及中正國際機場旁的一座 RC 橋樑。

2.2 研究調查方法

RC 結構物之品質發生劣化原因很多，包括保護層不足、混凝土品質不佳，加上結構體常年受到氯化物、二氧化碳及濕氣之侵入，而加速混凝土之品質劣化及鋼筋腐蝕。為探討結構物可能發生腐蝕及劣化原因，必須進行鑽心取樣及作化性和物性分析。

鑽心取樣試體直徑為 7.6 公分長度約 15~20 公分。試體從表面算起，依次按深度 1 公分，2 公分，3 公分，3~5 公分，5~10 公分，10~15

圖 2 腐蝕調查之結構物

Fig.2 The corrosion structures

公分等斷面切割。再將切割後的各斷面試體依 ASTM 規範處理研磨為粉狀，此為化學分析之試樣，然後依 ASTM C114-85 進行 CaO, MgO, SO₃²⁻ 及 Cl 含量之化學分析。

2.3 氯離子侵入混凝土擴散係數分析

RC 結構物之使用年限可視為包括鋼筋仍維持在鈍態之初始時間(t₁)及腐蝕進展已超過最大容忍限度之腐蝕發展時間(t₂)；後者較不易預測，因為它決定於氧氣擴散進入混凝土保護層及結構物對腐蝕之容忍度等因素而定。實際上 t₂ 受混凝土中之濕氣含量、品質、強度及力學需求條件等各參數之變化而定。

一般而言，氣溫高及混凝土迅速乾燥則 t₂ 較縮短，約為 6 個月至 5 年⁽⁴⁾。因此由於腐蝕破壞之有效使用期限可視為鋼筋開始產生活性化階段；即氧化反應開始發生時之初始時間 t₁，可視為結構物之設計年限，因為卜特蘭水泥在水化過程中會生成 NaOH, KOH 及 Ca(OH)₂ 等水化生成物，故其 pH 值約為 13~14⁽⁵⁾，所以混凝土在鹼性保護下鋼筋之行爲顯現鈍態。而腐蝕速率可忽略，然而由於環境中之腐蝕因子如 CO₂ 會使混凝土碳化而降低其 pH 值至中性程度，或是氯離子引起鋼筋發生點蝕(pitting)現象；即使在 pH 值高之情況亦將會破壞鋼筋之鈍態膜⁽⁷⁾，因為在台灣的混凝土中性化的影響程度較之氯離子所引起的劣化現象可忽略⁽⁸⁾，因此本文僅就氯離子侵入作深入探討。為模擬實際氯離子侵入混凝土中之擴散分佈狀況，依據 Fick's 第二擴散定律⁽⁷⁾，氯離子濃度(C)之控制方程式(Governing equation) 為：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (1)$$

其邊界條件：

1. 在表面上 X=0, C=C_s;
2. 在內部深處 X → ∞, C=C₀

式(1)之特殊解為：

$$C(X,t) = (C_s - C_0) [1 - 2\text{Erf}(X/\sqrt{2Dt})] + C_0 \quad (2)$$

式中

C_s: 氯離子表面濃度，

C₀: 原始濃度，

X: 深度，

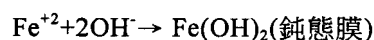
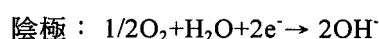
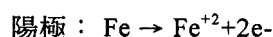
D: 有效擴散係數，

t: 時間，

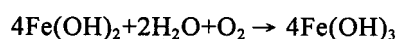
Erf: 誤差函數(Error function)，其定義為：

$$\text{Erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-y^2/2) dy \quad (3)$$

由於氯離子對鋼筋混凝土之影響主要是其會提高鋼筋之腐蝕活性(corrosion activation)，促進鋼筋之氧化作用。其電化學反應原理如下：



當 Cl⁻ 與 OH⁻ 之比值大於 0.6 時，鈍態膜將會發生氧化破裂而形成為紅鐵銹 Fe(OH)₃，即



Van Daveer 曾研究鋼筋混凝土橋面版受除冰鹽侵蝕之影響⁽⁹⁾，並指出當混凝土中氯離子與水泥之重量百分比大於 0.4% 時，鋼筋就開始活性化，亦即發生氧化反應。

三、結果與討論

3.1 氯離子擴散分析

表 1 鑽心取樣試體中氯離子侵入混凝土結構體之特性
Table 1 Chloride ion penetration of the drilled concrete samples

Samples	Const. (yrs.)	Age (yrs.)	Surface conc., Cs(%)	Original conc., Co(%)	Diffusion co., D(cm ² /yr.)	Depth of activation front, X(mm)
1	1920	77	3.52	0.00	0.0803	52.3
2	1938	59	5.83	0.07	0.2346	89.2
3	1949	48	2.50	0.16	0.0408	24.9
4	1958	39	4.73	0.20	0.0273	34.7
5	1954	43	5.33	0.25	0.0356	38.6

Note: • % is weight ratio of Cl to cement in concrete.
• The 4th, and 6th columns are derived from eq.(2) by using least square method.
• The last column is solved by eq.(2) as Cl conc. attains 0.4% wt. of cement.

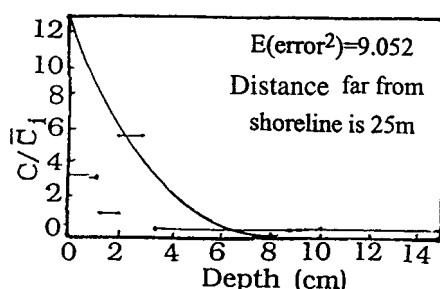


圖 3 試樣 1 之氯離子侵入模擬
Fig.3 Simulation of chloride ion penetration in sample 1.

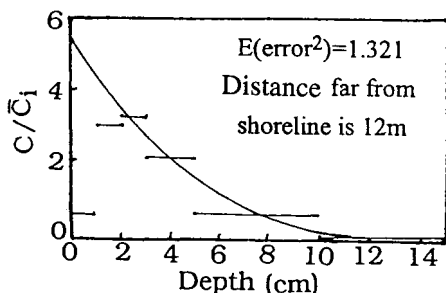


圖 4 試樣 2 之氯離子侵入模擬
Fig.4 Simulation of chloride ion penetration in sample 2.

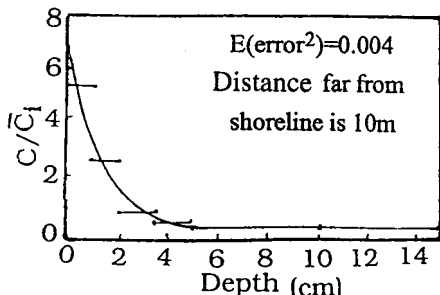


圖 5 試樣 3 之氯離子侵入模擬
Fig.5 Simulation of chloride ion penetration in sample 3.

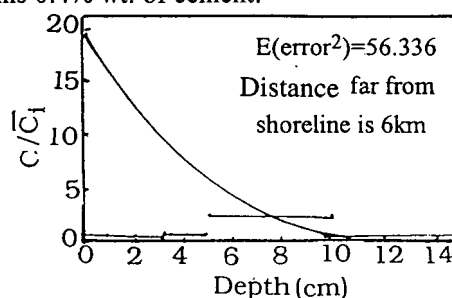


圖 6 試樣 4 之氯離子侵入模擬
Fig.6 Simulation of chloride ion penetration in sample 4.

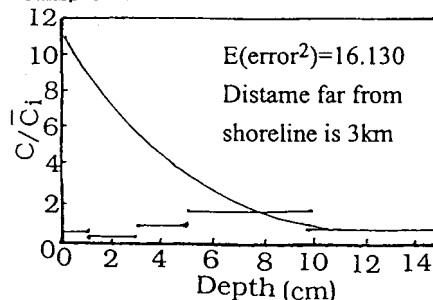


圖 7 試樣 5 之氯離子侵入模擬
Fig.7 Simulation of chloride ion penetration in sample 5.

五個地點之鑽心取樣的氯離子擴散分析，依據式(2)及實測之氯離子分佈結果，經由電腦程式分析可計算得出各建築物之表面氯離子濃度(Cs)、原始濃度(Co)、擴散係數(D)等數據列如表 1 所示。圖 3 至圖 7 示模擬之氯離子分佈曲線(fitting curve)與實測值比較。其平均誤差值隨著試樣距離海岸遠近而異，由於季節性之變化、風與雨之影響，距離海岸結構物愈遠之情況，則混凝土中之氯離子含

量和相對濕度變化性將較大。因此其理論之模擬曲線與實際曲線之變化將較大，由圖中可發現與海岸線距離自 10 公尺變化至 6 公里，則其誤差值將自 0.004 變化至 56.336。

3.2 防蝕設計所需之保護層厚度

當混凝土中氯離子濃度達到水泥重量之 0.4% 時，則鋼筋將開始於活性狀態，因此應用式 (2) 之模擬分析，可算出各建築物之混凝土氯離子在各曝露齡期下之侵入濃度等於水泥重量 0.4% 之臨界深度如圖 8 所示。因此概率密度分佈如圖 9 所示。而由圖 10 可見為防止氯離子侵入之結構物使用年限為 10 年、30 年及 50 年，其概率為 95% 下所需之混凝土保護層厚度分別為 5.1 公分、8.8 公分及 11.4 公分等。

3.3 氯離子分析結果檢討

根據實測與理論分析結果，可發現下列現象：

1. 氯離子分佈狀況在混凝土表層並非最大，其原因可能是由於表層裂縫較多，而被雨水沖洗掉之故，而致使 Cl^- 濃度降低。試樣 4 之氯離子分佈可能是當初混凝土所使用之骨材已受氯化物污染再加上混凝土已發生嚴重龜裂所致。
2. 在試樣 3 的混凝土內部，可發現其 Cl^- 濃度漸趨近於一定值 (0.16%)，由此可推測當初所使用骨材已受 Cl^- 污染，如扣除此污染含量，則 Cl^- 分佈狀態與理論值將更為符合。
3. 若考慮建築物之安全使用年限 50 年， Cl^- 侵入之臨界深度可達 11.4 公分，顯然超過海洋結構物施工規範 RC 保護層厚度為 5 公分甚多，因此施工時絕對必須嚴格要求混凝土之保護層厚度之限制。

四、結論

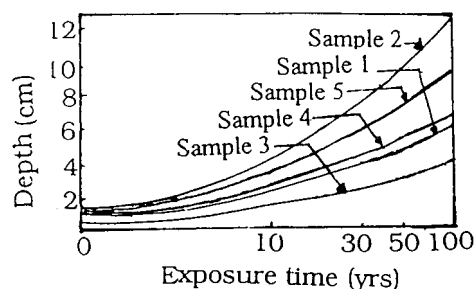


圖 8 氯離子引起之腐蝕臨界深度與曝露齡期之關係

Fig.8 Corrosion activation from due to chloride ion(=0.4% wt.of Cl^- in cement).

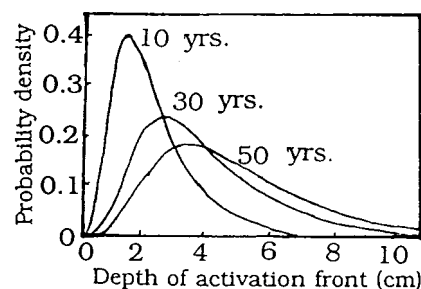


圖 9 氯離子侵入深度之概率密度分佈

Fig.9 Probability distribution of chloride ion activation front.

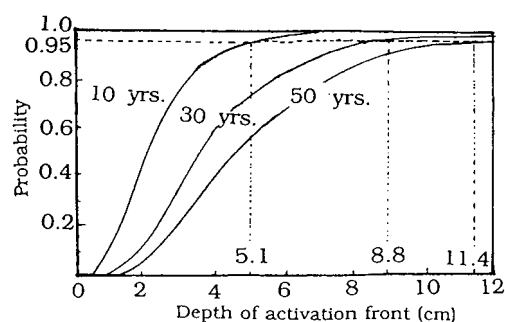


圖 10 氯離子侵入深度之概率分佈

Fig.10 Probability distribution of chloride ion activation front.

根據在台灣濱海地區四棟建築物及一座橋樑的鑽心取樣與化性分析所得之結果可得出下列結論：

1. 在海洋環境下，鋼筋混凝土腐蝕之主要因素為氯離子侵入。結構體離海岸愈近，則其擴散速率遵循 Fick 第二擴散定律將愈趨準確。
2. 在台灣地區濱海鋼筋混凝土結構物使用年限為 50 年之防蝕設計，所需之混凝土保護層厚度

為 11.4 公分，否則必須採取增進混凝土品質之策略。

五、誌謝

作者感謝周祖望君在電腦方面之協助，陳正義及何木火君等在調查執行上之幫忙。

參考文獻

1. 林維明、饒正，「澎湖跨海大橋腐蝕調查研究」，港灣技術研究所專刊第 41 號，1988。
2. 林維明、饒正，「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，1988。
3. 林維明等，「港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究」，港灣技術研究所 80 研(6)，1991。
4. Browne, R.D., Design Prediction of the Life for Reinforced Concrete in Marine and Other Chloride Environments, in Durability of Building Materials, 1982, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, pp.113-125.
5. Tuutt, K, Corrosion of Steel in Concrete, 1982, Stockholm, Swedish Cement & Concrete Research Institute, S-10044, pp.20-35.
6. 林維明等，「高性能混凝土在港灣工程上應用之展望」，高性能混凝土之應用研習會講義，港灣技術研究所專刊第 134 號，1997, pp.11-1~11-28。
7. Christopher, L. P., Barriers to the Prediction of Service Life of Metallic Materials, in NATO ASI Series E95, 1985, Dordrecht/Boston/Lancaster, Martinus Nijhoff Publishers, pp.59-74.
8. Lin, W.M., Chen, K.C., Rau, C. and Wu, S.S., The Primary Study on the Durability of Marine Reinforced Concrete Structures in Taiwan, in Proc. of Second CANMET/ACI Intern. Conf. on Durability of Concrete, Supplementary Papers, 1991, Montreal, American Concrete Institute, pp. 61-77.
9. Van Daveer, J.R., Techniques for Evaluating Reinforced Concrete Bridge Decks, in Journal of the American Concrete Institute, Vol.72,1975, Michigan, American Concrete Institute, pp.697-704.