

高強度混凝土中鋼筋腐蝕行爲之研究

楊仲家* 黃然** 卓益揚*

A Study of Rebar Corrosion in High Strength Concrete

C. C. Yang* R. Huang** Y. Y. Jwo*

摘要

本研究旨在探討鋼筋在高強度混凝土中之腐蝕行爲及其對握裹強度之影響。電化學法如開路電位法、直流極化法及交流阻抗法等均應用於同一試體之腐蝕量測，同時經由數值積分法求得等量厚度之累計損失量以爲評估鋼筋腐蝕之另一標準。試驗結果顯示高強度混凝土具有較佳之腐蝕耐久性，但當混凝土發生裂縫時其耐腐蝕之優勢即喪失；又高強度混凝土與鋼筋間握裹強度之折減受腐蝕影響較普通強度混凝土爲明顯。

關鍵字：高強度混凝土，鋼筋，腐蝕，直流極化，交流阻抗，開路電位，拉拔力

ABSTRACT

This study was focused on the rebar corrosion behavior in high strength concrete. Electrochemical methods such as open circuit potential method, DC polarization method, and AC impedance method were applied to investigate the corrosion resistance of high strength concrete. In addition, a numerical integration was used to obtain the equivalent cumulative thickness loss of rebar, which can be another criterion for evaluation of rebar corrosion. Test results show that high strength concrete has better corrosion resistance than normal strength concrete before crack initiation. However, corrosion reduces the bond strength between concrete and rebar is more significant in high strength concrete.

Key words : high strength concrete, rebar, corrosion, DC polarization, AC impedance, OCP, pull-out force.

一. 前言

鋼筋混凝土爲土木結構主要建材，混凝土對鋼筋的包裹作用可以防制腐蝕的發生。一般而言，埋在品質優良緻密性高混凝土的鋼筋不易發

生腐蝕。但臺灣地處四面環海高溫潮溼的亞熱帶，若混凝土施工不良或養護不當而導致過多的孔隙腐蝕因子容易侵入而造成鋼筋腐蝕並且降低鋼筋和混凝土之間的握裹力，影響結構物的耐久性。而握裹力降低是腐蝕行爲發生後造成結構

*國立台灣海洋大學材料工程研究所

Institute of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University.

**國立台灣海洋大學河海工程系所

Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University.

破壞的主要原因之一。

腐蝕是金屬環境起化學或電化學自然性反應。其發生主因在於材料表面上電位的不規則性所造成的腐蝕電池所致。當腐蝕環境 pH 值低時鋼筋易發生腐蝕。一般混凝土中含有水泥水化時所生成之氫氧化鈣所以 pH 約為 12.5，有時若有鈉、鉀離子的存在，pH 值更高達 13.2 以上。但當混凝土受到周圍環境因子破壞造成混凝土產生劣質化，則鋼筋的保護膜會受到破壞。鋼筋的抗腐蝕程度，最主要取決於混凝土的保護層厚度及混凝土品質。鋼筋在高鹼性環境下表面會形成 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 之惰性氧化膜以保護鋼筋不受腐蝕。若有足夠的氯離子存在或由外界環境進入混凝土中，即使在高鹼性環境之下，亦會局部破壞惰性保護膜而導致鋼筋發生腐蝕^[1,2]。當鋼筋被腐蝕時，於鋼筋表面會生成氧化物，也就是一般所謂的鐵鏽，完全鏽蝕鋼筋的體積可為未腐蝕前體積的六倍^[3]。鐵鏽生成膨脹時由於混凝土的圍束會產生內張應力，當張應力超過混凝土的張力強度時，將會使原本存在於混凝土中的微裂縫擴張或成長，形成腐蝕 - 裂縫擴大的惡性循環作用^[4]。

本文主要探討高強度混凝土的腐蝕耐久性並研究鋼筋受腐蝕後對混凝土握裹力的影響。採用不同的電化學量測如：(1)開路電位法(open circuit potential, OCP)；(2)直流極化法(direct current, DC polarization)；(3)交流阻抗法(alternative current, AC impedance)，量測鋼筋混凝土在加速腐蝕後的腐蝕行為，並比較各量測法之結果，同時利用拉拔實驗探討鋼筋腐蝕後鋼筋和混凝土握裹力之折減。

二. 實驗步驟與方法

本研究主要變化水灰比及養護條件，採不同的電化學量測法探討腐蝕行為與其對握裹力的影響。

表 1 混凝土配比設計(kg/m³)

Table 1 Concrete mix proportions (kg/m³)

試體編號	水灰比	水	水泥	砂灰	強塑劑	細骨材	粗骨材
A	0.30	194.4	640.9	71.2	19.2	439.4	1022.5
B	0.40	201.6	486.6	54.1	14.6	565.3	1034.9

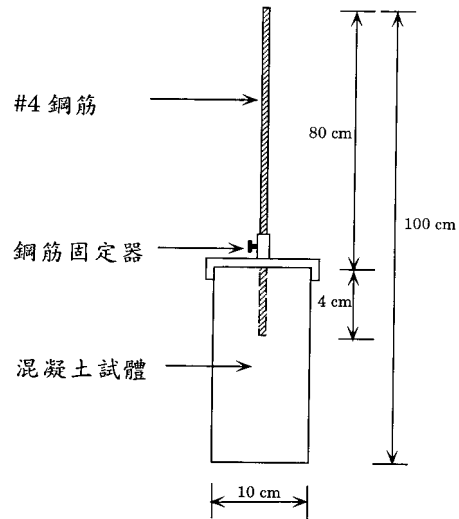


圖 1 拉拔試驗試體

Fig.1 Specimen of pull-out test.

2.1 配比與試體

本實驗之混凝土採兩種水灰比(w/c=0.3 和 0.4)拌製，於養護 28 天後執行各項實驗。本實驗之混凝土配比設計係參照 ACI363-92 拌製，其配比詳列於表 1。

本實驗採 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 之圓柱試體，為執行腐蝕及拉拔實驗，使用磨光、去油後 84 公分長之 4 號竹節鋼筋，於混凝土試體製作時以固定器將鋼棒埋入 4 公分長度於混凝土試體中如圖 1 所示。為防止試棒於養護期間生鏽，試體拆模後需將外露的試棒以 epoxy 塗封，於 28 天養護後再去除接上電線部份之 epoxy，以便進行腐蝕實驗。

2.2 腐蝕實驗

腐蝕實驗分為二階段進行，第一階段先灌製

鋼筋混凝土試體，塗封外露鋼筋後進行試體之養護。第二階段將養護後的試體置於 3.5% 之 NaCl 溶液中，外加 0.5mA/cm² 電流密度進行加速腐蝕，並於不同時間內進行腐蝕量測。

(1)開路電位法

腐蝕之發生是隨機性的，陽極反應（腐蝕）及陰極反應（未腐蝕或還原）分別在金屬表面不同的微小區域進行時會形成許多微小的腐蝕電池。開路電位法主要在量測鋼筋（工作電極）在無外電流相通之情況下，腐蝕電池與參考電極（飽合硫酸銅電極或飽合甘汞電極）之電位差（腐蝕電位）。根據 ASTM C876-91(Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete)規定，當混凝土中鋼筋之開路電位值高於-200 mV, Cu / CuSO₄(-120 mV, SCE)時，腐蝕機率低於 10%，開路電位值低於-350 mV, Cu / CuSO₄(-270 mV, SCE)時，腐蝕機率高於 90%，而開路電位介於-200mV, Cu / CuSO₄ 與-350mV, Cu / CuSO₄ 之間時，其腐蝕機率介於 10%~90%。開路電位法可大致評估混凝土中鋼筋之腐蝕機率。本研究係以飽合甘汞電極為參考電極，鋼筋為工作電極，連接於恆電位電流儀，其量測裝置如圖 2 所示。

(2)直流極化法

當鋼筋處於自然腐蝕狀態下，對整體電流的流動情形，無淨電荷之轉移，所以對鋼筋混凝土腐蝕系統而言，必須輸入極小的外加電流使其擾動，然後再量測此系統平衡時所產生之反應。在外加過電位差值在腐蝕電位正負 10mV 之間時，電流和電位會呈一線性關係^[5]。這種以輸入極小極化電流進行金屬腐蝕速率量測方法為直流極化法^[6]。此一線性關係為極化電阻(polarization resistance)。其表示式如下：

$$R_p = \Delta E / \Delta I \quad (1)$$

R_p=極化電阻(ohm-cm²)

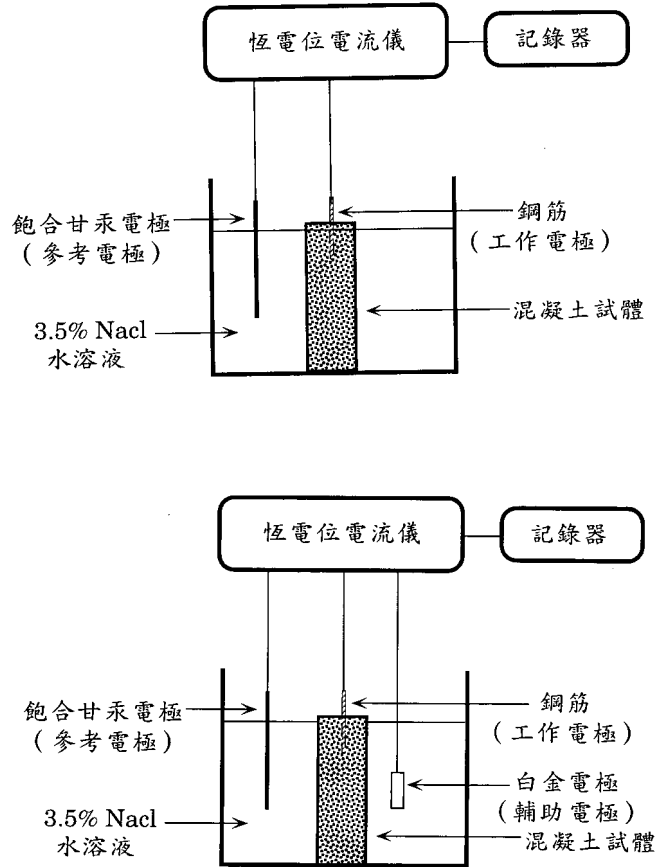


圖 3 直流極化法量測裝置圖

Fig.3 The DC polarization measurement.

△ E=電位差(Volts)

△ I=電流密度差(A/cm²)

再利用 Stern-Geary 式可得腐蝕電流密度如下：

$$i_{corr} = \left[\frac{\beta_a \beta_b}{2.303(\beta_a + \beta_b)} \right] \left(\frac{\Delta E}{\Delta I} \right) = \frac{\beta}{R_p} \quad (2)$$

i_{corr}=腐蝕電流密度(A/cm²)

β_a=陽極極化曲線斜率

β_b=陰極極化曲線斜率

式(2)中之 β 值，對於一般腐蝕狀態之鋼筋而言，約為 26mV^[7]。另外可將腐蝕電流代入下式以求得腐蝕速率(C_R)：

$$C_R = \left(\frac{i_{corr}}{nF} \right) \left(\frac{F_w}{D} \right) \quad (3)$$

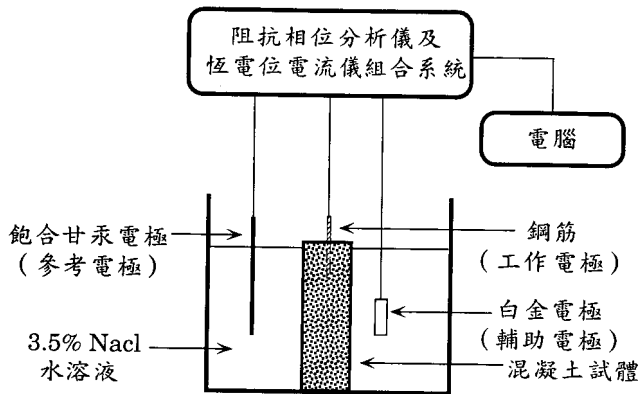


圖 4 交流阻抗法量測裝置圖
Fig.4 The AC impedance measurement

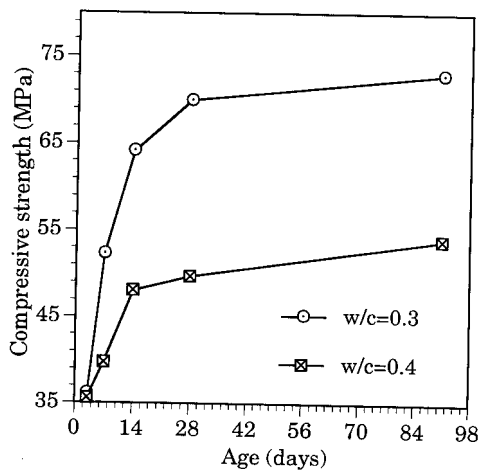


圖 5 混凝土強度發展圖
Fig.5 The strength development curves of concretes

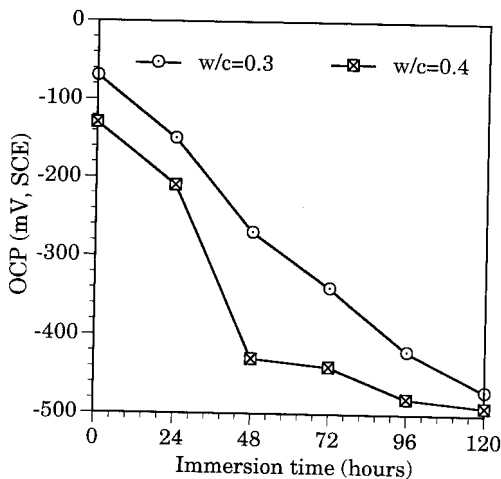


圖 6 開路電位與浸泡時間關係圖
Fig.6 The potential vs. immersion time curves.

n =亞鐵離子電荷數(2)
 F =法拉第常數(Acoulomb/mole)
 F_w =鐵之原子量(55.8 g/mole)
 D =鐵之密度(7.86 g/cm³)

以飽合甘汞電極為參考電極，鋼筋為工作電極，白金電極為輔助電極，連接於恆電位電流儀，且與放大紀錄器連接，以恆電位電流儀顯示之外加電位正負 10mV 之間為掃描區間，求其極化電阻。量測裝置如圖 3 所示。

(3)交流阻抗法

金屬材料的表面性質對電荷轉移之速率有影響，也就是對表面電荷移轉具有相當的阻力，因此可採用電子元件模擬其對電子阻抗^(8,9)，一般的電化學中，為利用電阻、電容及電感三種線性件來模擬金屬材料表面之電化學性質。交流阻抗法將極小電流輸入腐蝕系統中，經電路解析技巧，在一交流訊號頻率內(1.0 × 10⁶ Hz~1.0 × 10⁻³ Hz)，測定不同頻率於此腐蝕系統之阻抗值，分解求得系統中鋼筋阻抗值(R_p)，利用(1)及(2)式求得鋼筋腐蝕速率。其量測裝置如圖 4 所示。

2.3 混凝土強度及拉拔實驗

(1)抗壓強度

本實驗採 ϕ 10X20cm 之圓柱試體，參照 ASTM C39-86 所規定之方法進行混凝土壓力強度試驗。量測其 3 天、7 天、14 天、28 天及 91 天等齡期之壓力強度。

(2)拉拔實驗

拉拔實驗試體如圖 1 所示，試驗法係參照 ASTM C234-91a 之規定，其加載速率不超過 1.27mm/min(0.05in/min)。

三. 結果與討論

混凝土試體壓力強度之發展隨齡期的增加而漸增。其強度發展速率則隨齡期的增加而漸減，在養護齡期 7 天前，強度發展較迅速，7 天

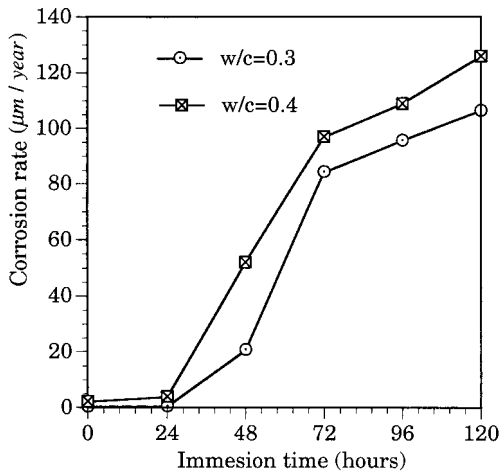


圖 7 腐蝕速率與浸泡時間關係圖(直流極化法)
Fig.7 The corrosion rate vs. immersion time curves (DC method).

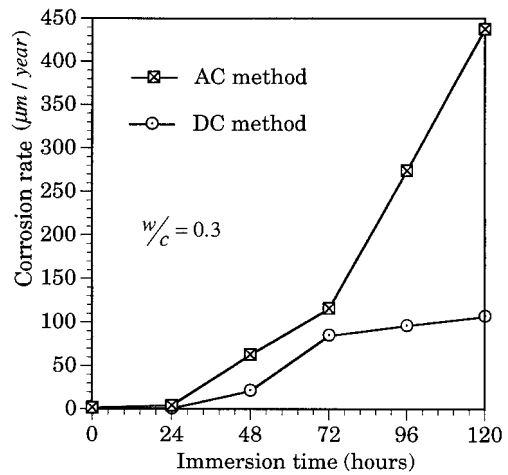


圖 9 腐蝕速率與浸泡時間關係圖(交流阻抗及直流極化法)
Fig.9 The corrosion rate vs. immersion time curves (AC method and DC method).

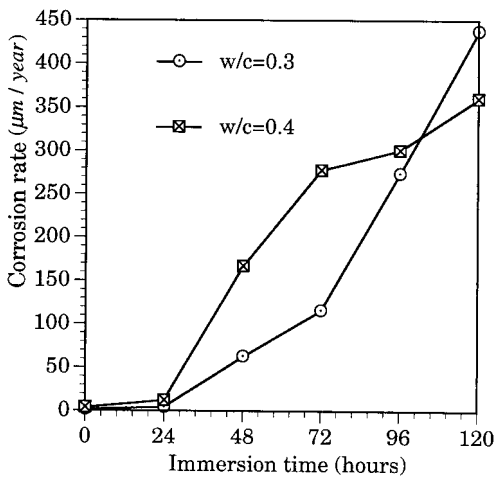


圖 8 腐蝕速率與浸泡時間關係圖(交流阻抗法)
Fig.8 The corrosion rate vs. immersion time curves (AC method).

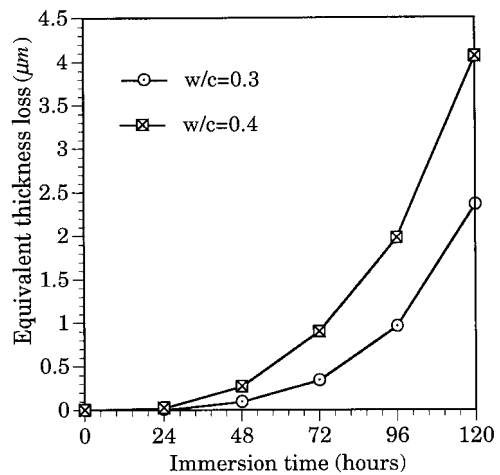


圖 10 等量厚度損失與浸泡時間關係圖
Fig.10 The equivalent thickness loss vs. immersion time curves.

至 28 天強度發展較前段時間緩慢，28 天至 91 天強度發展更為減緩。水灰比 0.3 及 0.4 之混凝土試體壓力強度發展圖如圖 5 所示。圖 5 中高水灰比之混凝土強度比低水灰比之混凝土強度低，顯示高水灰比之混凝土組織較為疏鬆，養護 28 天後兩種水灰比之混凝土的強度均趨於穩定。圖 6 為浸泡時間與開路電位之關係圖，圖中顯示水灰比愈高的混凝土試體，因內部組織較為疏鬆，其開路電位下降的速率較快。水灰比 0.3 及

0.4 之試體，在 0 小時至 24 小時的階段，開路電位值下降的速率緩慢。於 24 小時至 48 小時的階段，開路電位值下降的速率增快，水灰比 0.4 試體的開路電位下降的速率比水灰比 0.3 的試體快，且浸泡時間達 48 小時，兩者的開路電位均低於 -270mV，顯示其腐蝕機率高於 90%。當浸泡時間達 72 小時，試體因生鏽開裂而有鏽水滲出可確定鋼筋已發生腐蝕。

圖 7 與圖 8 分別為直流極化法與交流阻抗法

於各浸泡時間所量測之腐蝕速率。其結果均顯示浸泡 24 小時後的腐蝕速率值急速上升，以開路電位法量測浸泡 24 小時後的腐蝕機率亦高於 90%，此結果可確認浸泡 24 小時後的試體已有腐蝕現象。水灰比較低的試體較不易發生腐蝕，其腐蝕速率較低。但裂縫產生，鏽水滲出後，腐蝕因子直接由裂縫侵入，此時的腐蝕速率便不再由混凝土之水灰比掌控。以直流極化法量測腐蝕速率時，因受溶液及混凝土保護層之阻抗影響，對鋼筋腐蝕速率有低估之現象（如圖 9 所示）。使用交流阻抗法於各浸泡時間與量測之腐蝕速率關係圖，以腐蝕速率對浸泡時間積分，求得鋼筋等量厚度損失累積值，圖 10 為水灰比 0.3 及 0.4 試體於各浸泡時間之等量厚度損失累積圖，圖中顯示水灰比 0.3 及 0.4 之試體均隨加速時間的增加，腐蝕厚度損失愈多。

圖 11 為各浸泡時間與拉拔強度關係曲線，於浸泡時間 72 小時前（未發現鏽水滲出），拉拔強度受混凝土與鋼筋之磨擦力及竹節與混凝土間的卡榫力所掌控，水灰比 0.3 試體的拉拔強度比 0.4 試體的拉拔强度高，此係 0.3 水灰比之混凝土組織較 0.4 水灰比的緻密，混凝土與鋼筋之磨擦力強握裹力高。當浸泡時間達 72 小時後，腐蝕程度較嚴重，混凝土產生嚴重裂縫，此時的拉拔強度主要為竹節與混凝土間的卡榫力所掌控，因此於浸泡時間 72 小時後，水灰比 0.3 試體與水灰比 0.4 試體的拉拔強度差值降低。

圖 12 為拉拔強度與鋼筋等量厚度損失累積量之關係圖，圖中顯示拉拔強度因鋼筋厚度損失的增加而降低。此因混凝土內鋼筋之腐蝕愈趨嚴重，腐蝕生成物累積量增加，原本緻密的組織為組織疏鬆的鐵鏽所取代，使得混凝土與鋼筋之間的磨擦力隨鐵鏽的堆積而漸減，同時卡榫力也因鐵鏽的存在而降低其效能。

四. 結論

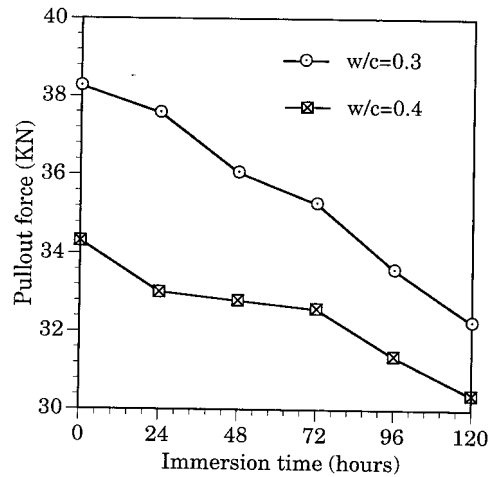


圖 11 浸泡時間與拉拔強度關係圖
Fig.11 The pullout force vs. immersion time curves

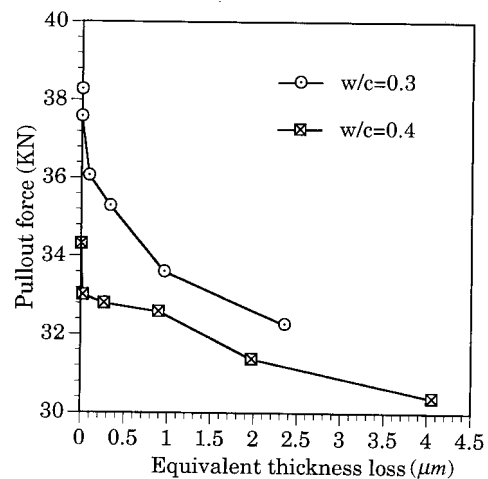


圖 12 等量厚度損失與拉拔強度圖
Fig.12 The pullout force vs. equivalent thickness loss.

本研究利用加速試驗法探討高強度混凝土之腐蝕行為，綜合之結論如下：

1. 混凝土試體之水灰比愈低，壓力強度愈高，於裂縫生成前，腐蝕速率低。
2. 開路電位法僅能測得該時間之腐蝕機率，若已產生二次保護膜，於不同時間點會測得相同之腐蝕電位而造成誤判。最好以腐蝕速率及厚度損失之量化值配合研判較為適當。

3. 以直流極化法量測腐蝕速率時，因受溶液及混凝土保護層之阻抗影響，對鋼筋腐蝕速率有低估之現象，以交流阻抗法量測較為適宜。
4. 腐蝕實驗期間應觀察混凝土裂縫之生成及鏽水滲出之時間，以確認腐蝕因子侵入之途徑。
5. 腐蝕後鋼筋與混凝土握裹力明顯降低，主因為混凝土與鋼筋之間的磨擦力折減及鋼筋竹節卡樺力之折減。水灰比低（或強度高）之混凝土其握裹力受鋼筋腐蝕影響較為嚴重。

誌謝

本研究承國科會 NSC86-2211-E-019-003 經費支助，特此致謝。

參考文獻

1. D. A. Hausmann; *Materials Protection*, 6 (1967) 19.
2. G. J. Verbeck; *ACI*, SP-49 (1975) 21.
3. P. K. Mehta, P. Monteiro, : *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, 2nd. eds. (Prentice-Hall, New Jersey, 1992) p.160.
4. P. K. Mehta, B. C. Gerwick; *Concrete International*, 4 (1982) 45.
5. R. K. Dhir, M. R. Jones; *Cement and Concrete Research*, 23 (1993) 1443.
6. ASTM G59-78; *Standard Practice for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*, (1984).
7. N. S. Berke, M. P. Dallaire, M. C. Hicks, R. J. Hoopes; *Corrosion Engineering*, 49 (1993) 934.
8. K. Hladky, L. M. Callow, J. L. Dawson; *Br. Corrosion*, 15 (1980) 20.
9. ASTM G106-89; *Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements*, (1989).