

鋼筋混凝土腐蝕診斷技術

施建志* 論述

摘 要

台灣為高溫高濕的海島型氣候，島內鋼筋混凝土結構易遭遇嚴重之腐蝕問題。過去，橋樑等結構物腐蝕問題，因缺乏有效的腐蝕檢測方法，以致無法即早發現腐蝕原因，採取適當防蝕措施，使得結構物必需拆除重建，造成莫大之損失。有鑑於此，本文將介紹各種鋼筋混凝土結構物的檢測技術，以便適時處理鋼筋混凝土結構物的腐蝕問題。

鋼筋混凝土結構物檢測的目的不外乎要了解鋼筋混凝土是否劣化，劣化原因及其堪用程度。一般的檢測程序有初步檢測及深入檢測。初步檢測工作大多由例行維修人員執行，檢測的項目包括目測檢查結構物外表是否有裂縫、鏽斑，或其他機械性能的檢測。初步檢測有一相當重要的功能就是及早發現結構物異狀，以便委由專業人員進行深入檢測工作。深入檢測的工作則是檢查鋼筋混凝土結構物各種性能後，以專業知識來判斷結構物的現況、劣化原因以及其堪用程度。

ABSTRACT

Corrosion of reinforced concrete structure can be severe in tropical island like Taiwan. In order to diagnose the corrosion problem of reinforced concrete and to repair effectively the corrosion damaged reinforced concrete structure, one requires effective inspection techniques. In this paper various techniques will be described and reviewed in terms of their applicability on the inspection of corrosion damaged reinforced concrete structure.

一、鋼筋混凝土腐蝕特性

鋼筋和混凝土劣化作用，在鋼筋混凝土結構物上，雖然是各自獨立進行；但往往也

互為因果。鋼筋的鏽蝕膨脹，可造成混凝土裂開，而混凝土裂開，則可促進鋼筋的腐蝕（如表1、2、3）。

*工業材料研究所研究員

鋼筋混凝土腐蝕診斷技術

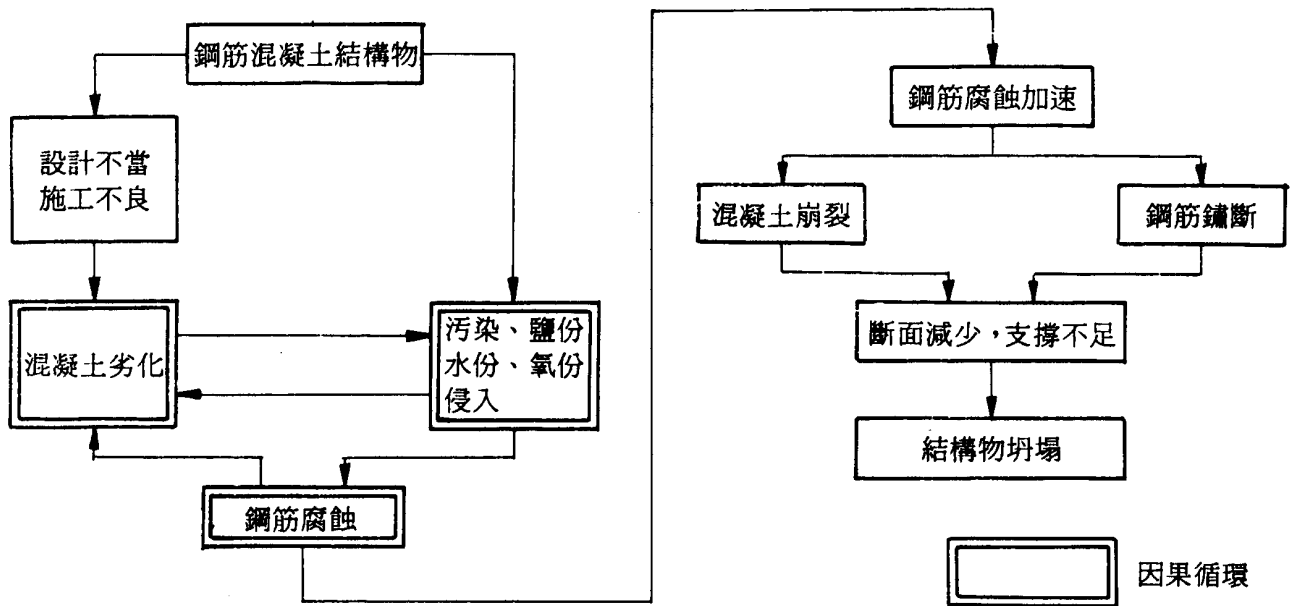
表 1 混凝土劣化原理
Table 1 Degradation modes of concrete

1. 物理性侵蝕	影 響	2. 化學性侵蝕	影 響
凍 融 作 用	• 使混凝土因脹縮而破壞或產生裂縫	硫 酸 鹽 作 用	• 形成鈣汎石造成膨脹破壞
乾濕循環作用	• 混凝土中鹽類濃縮及結晶因 而膨脹使混凝土破裂	鹼 化 物 作 用	• 形成溶解性鹽類造成混凝土 多孔性
磨 損 及 磨 耗	• 混凝土保護層被磨損	碳 化 作 用	• pH 值降低

表 2 鋼筋腐蝕原理
Table 2 Corrosion mechanism of reinforcing rebar

因 素	反 應 說 明	影 響
氧化作用	$2\text{Fe} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3$ 紅鏽 $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO}$ $3\text{Fe} + 8\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{e}^- + 4\text{H}_2\text{O}$ 黑鏽	腐蝕生成物膨脹 → 混凝土破壞 → 鋼筋曝露程度增 加
Cl ⁻ 侵蝕	$ \begin{array}{c} \text{Fe} \cdots \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^- \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \vdots \text{Cl}^- \quad \cdots \text{O}_2 \quad \cdots 2\text{OH}^- \\ \vdots \quad \quad \quad \text{H}_2\text{O} \quad \quad \quad \vdots \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \text{FeCl}_2 \quad \quad \quad \cdots \text{FeO}(\text{OH}) \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \cdots \text{Fe}(\text{OH})_2 \quad \cdots \cdots \cdots \text{Fe}(\text{OH})_3 \\ \text{OH}^- \quad \quad \quad \text{O}_2 \end{array} $ 鋼筋表面鈍態膜分解 $\left(\frac{[\text{Cl}^-]}{[\text{OH}^-]} > 0.6 \text{ 臨界值} \right)$	腐蝕生成物膨脹 增加腐蝕反應面
碳化作用	$\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$ $\text{FeO} + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{FeCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ $4\text{FeCO}_3 + 10\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 2\text{e}^-$ $\rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 4\text{H}_2\text{CO}_3$ 紅鏽 鋼筋表面鈍態膜分解 (混凝土層 pH 值降低)	腐蝕生成物膨脹 增加腐蝕反應面

表 3 鋼筋混凝土結構物腐蝕破壞流程

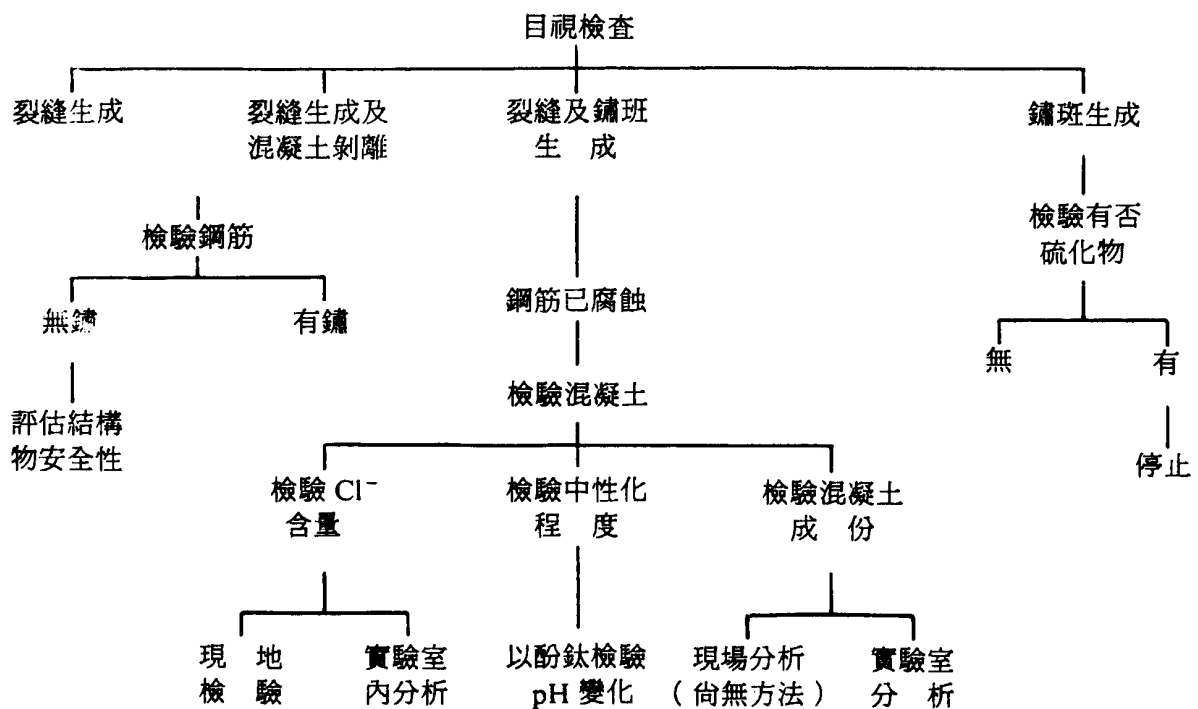


二、鋼筋混凝土腐蝕檢測程序

鋼筋混凝土結構物之現場腐蝕診斷，由其腐蝕特性分析可知，基本上有必要將混

土和鋼筋兩種材料分開測析。但因兩者互為因果，又必須將之合併進行，從而提供綜合分析及評估，表 4 為普遍採用的方式之一。一般採用的步驟，大致可分為三個階

表 4 鋼筋混凝土腐蝕檢驗流程



段，即(1)表面觀察；(2)檢驗混凝土；(3)檢驗鋼筋。以下就各項檢驗方法做進一步解釋。

2-1 表面觀察

對於曝露在大氣中的鋼筋混凝土結構物，腐蝕診斷可先由表面作初步的觀察。

(1)目視檢查

由於混凝土劣化及鋼筋腐蝕均會造成脹裂，目視主要是檢視混凝土表面的裂縫及是否有銹斑的生成，以便及時修補或就特定位置進行深入檢測。

裂縫一般分為縱向、橫向及網狀。1. 橫向裂縫的生成可能是因為混凝土凝固變縮、溫差作用或是超載重等所造成。對此種裂縫，通常直接灌入樹脂水泥做補修。2. 網狀裂縫往往是由於混凝土凝固收縮造成，以同樣方法補修，避免讓外界因子滲入鋼筋表面，促成鋼筋腐蝕。3. 縱向裂縫（與鋼筋排列方向平行）亦是較危險訊號，象徵鋼筋已經鏽蝕或混凝土即將剝離。4. 混凝土崩裂，加上同時發現有鏽斑痕跡，即表示鏽蝕已達相當嚴重地步。

(2)量測調查

在目視檢查部份，腐蝕破壞程度可依等級作成記錄，以為後續深入測析工作之依據，及考量總體腐蝕狀況的基本資料。分述如下：

A. 混凝土層劣化所造成表層骨才突露出土體表面，可分為五個劣化等級，如圖 1 所示。

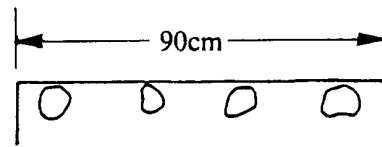
B. 基於裂縫特性，利用下列公式推求劣化指標：

(a)縱向裂縫

$$\text{實測值} = \sum_{i=1}^{N_c} (L_c, W_c)$$

N_c = 裂縫之總數目

L_c = 裂縫之總長度



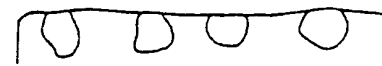
等級0
< 15個骨材突露表面



等級1
< 15個骨材突露表面



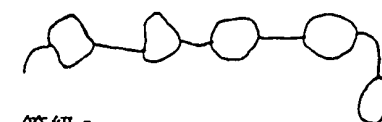
等級2
< 50%表面骨材突露



等級3
< 80%表面骨材突露



等級4
< 20%表面骨材突露



等級5
< 90%表面骨材有50%的骨材體突露

圖 1 混凝土表面腐蝕程度之目測評估系統
Fig. 1 Classification of corrosion damaged reinforced concrete structure.

$$\text{腐壞度} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} (L_c, W_c)}{\sum_{i=1}^{N_b} (L_b)}$$

W_c = 裂縫之平均寬

N_b = 裂縫方向鋼筋總數目

L_b = 鋼筋之總長度

$$\text{散佈度} = \frac{A_b}{A_T}$$

A_b = 劣化範圍長面積

(b) 網狀裂縫

$$\text{實測值} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} (W_c) = \frac{1}{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_{CR}} (R_c)$$

$$\text{腐壞度} = \frac{\frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} (W_c)}{\frac{1}{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_{CR}} (R_c)}$$

A_T = 結構物之總長面積

N = 網狀裂縫之面數目

R_c = 網狀裂縫之最大圓周半徑

$$\text{散佈度} = \frac{A_b}{A_T}$$

三、混凝土檢測

鋼筋混凝土結構物的檢測若以材料來區分，又可以分為混凝土部份及鋼筋部份的檢測。混凝土部份的檢測包括以下幾個項目：

(1) 混凝土層剝離鋼筋的情形

(2) 保護層厚度

(3) 碳化層厚度

(4) 氯離子含量

(5) 混凝土強度

(6) 鑽心取樣

(7) 超音波波速測試

(8) 吸水性及透水性測試

以上項目是為混凝土及理性質及化學性質的檢測，這些性質的測定有助於分析及判

斷鋼筋混凝土劣化腐蝕的原因。各項詳細說明如下。

(1) 保護層剝離鋼筋的情形

當鋼筋腐蝕造成混凝土保護層脫離開鋼筋時，我們可以用鐵鎚敲打混凝土表面是否產生空洞聲來判斷。大面積結構的混凝土剝離則可用雷達迅速測量。

(2) 保護層厚度

可由設計圖上知道其設計厚度或使用電磁波厚度儀來檢測。

(3) 碳化層厚度 (Carbonation depth)

檢查混凝土是否碳化，可以在新敲開的混凝土層噴灑 pH 指示劑來判斷。

(4) 氯離子含量

氯離子含量的測定可以在實驗室中進行，為了瞭解氯離子分佈情形，我們可以用鑽心取樣機從結構上取得一圓柱體從，拿回實驗室中進行分析。

(5) 混凝土強度

現場測定表面混凝土強度的設備如反彈鎚，可用來測量混凝土表面之硬度或強度。

(6) 鑽心取樣

鑽心取樣的方法可以分析氯離子含量，另外我們也可以用來了解混凝土內部的強度、孔度、透水性、水灰比、水泥種類等。但是在做鑽心取樣之前必須先確定不會影響結構物的安全後才可進行。

(7) 超音波波速測試 (Ultrasonic Velocity Measurement)

測量超音波在混凝土中進行的速度可以用來測定混凝土內部的裂縫、缺隙、孔洞及強度，對判斷混凝土耐久性很有助益。

(8) 吸水性及透水性測試

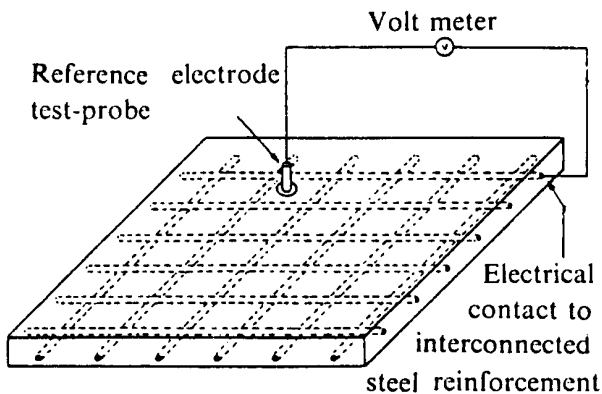
將鑽心取樣的圓柱體切成薄片之後，可以在實驗室內進行吸水性及透水性測試。透水性的測試方法如：Figg Test, 另現場測試方法也正在開發中⁽¹⁾。

四、鋼筋檢測

鋼筋的腐蝕性質或物理性的檢測是判斷鋼筋腐蝕最直接的方法。但是由於鋼筋混凝土是一極為複雜的材料，要準確測量鋼筋的腐蝕速度或腐蝕量並不是一件容易的事。以下介紹五種目前常用的方法及其優缺點。

(一)測量腐蝕電位圖

使用一個高輸入阻抗的電位計，一端接一參考電極（如銅／硫酸銅），另一端接鋼筋，就可以測量鋼筋的腐蝕電位（見圖 2



Electrical circuit for single probe (Method A) technique for determining surface potentials on reinforced concrete.

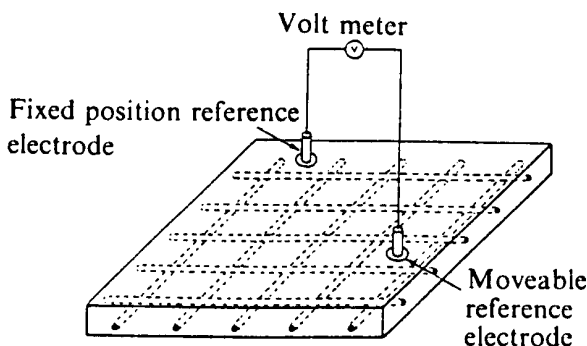


圖 2 腐蝕電位測量方法。單一參考電極法（方法 A），雙參考電極法（方法 B）。

Fig. 2 Electrical circuit for two electrode (Method B) technique for determining surface potential variation on reinforced concrete.

）。依據 ASTM 標準⁽²⁾，腐蝕電位在 -350 mV (Cu/CuSO_4) 以下時，有 95% 的發生腐蝕可能，腐蝕電位在 -200 mV (Cu/CuSO_4) 以上時，腐蝕發生的機率在 5% 以下。另外我們亦可在一個結構物上分成數個區域，然後測量各區的腐蝕電位，並製成一腐蝕電位圖，再由此一圖來判斷腐蝕集中的區域，以利後續的維修規劃（圖 3）。雖然此一方法相當簡便，但是有以下的缺點。第一、數據只能指出鋼筋是否有發生腐蝕的可能，卻無法告訴我們鋼筋的腐蝕速度。第二、上面的判斷標準只是一個經驗法則，在若干情形並不適用。

(二)腐蝕電位和混凝土電阻同時測量

測量混凝土電阻可以使用測量土壤電阻的 Wenner method。利用數學模式，腐蝕電位圖和混凝土電阻可以用來預測鋼筋的腐蝕速度⁽³⁾。另外混凝土電阻亦可以輔助腐蝕電位來判斷腐蝕速度的大小。當腐蝕電位在 -350 mV (Cu/CuSO_4) 以下時，若混凝土電阻大於 $12\Omega/\text{cm}$ ，則腐蝕速度很小，但如果混凝土電阻小於 $12\text{ k}\Omega/\text{cm}$ 時，則腐蝕速度會很大⁽⁴⁾。

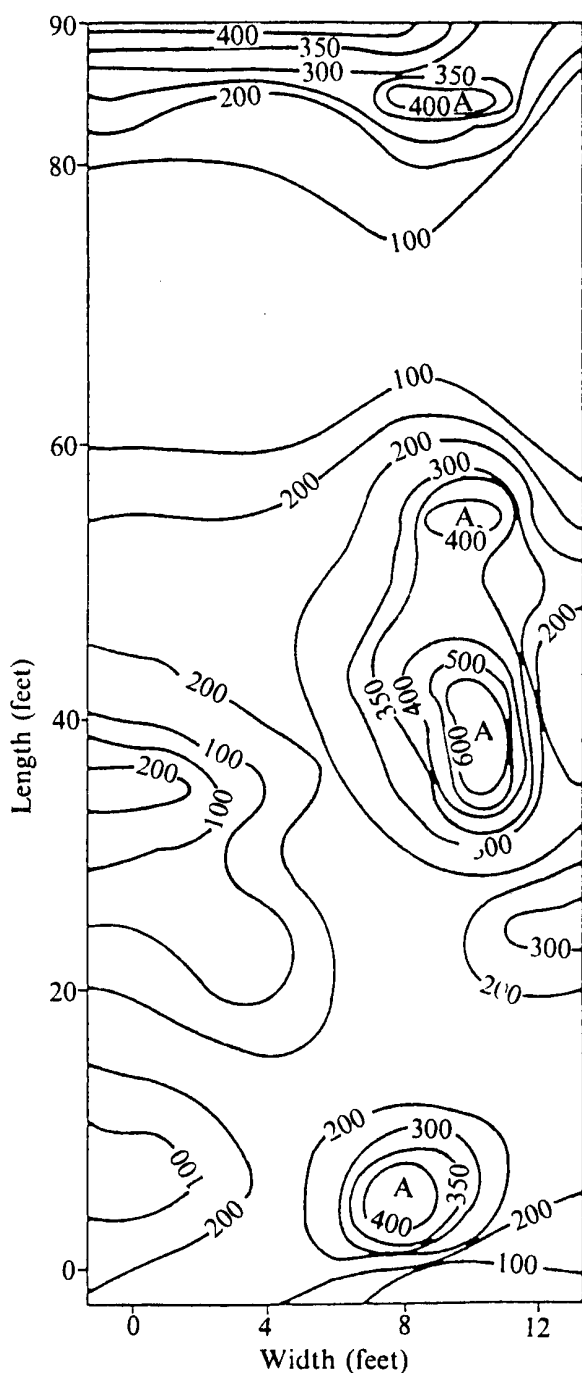
(三)測量瞬間腐蝕速度

由於鋼筋腐蝕是一種電化學反應，測量其電化學反應速度就可以推測鋼筋的腐蝕速度。在實驗室中，以下幾種方法可以用來測量鋼筋的腐蝕速度，這包含 LPR (Linear polarisation resistance)⁽⁵⁾、AC impedance⁽⁶⁾、Harmonic analysis⁽⁷⁾ 等電化學方法。現今，全世界有很多個研究單位從事現場鋼筋腐蝕速度測量設備開發。本所亦從事此方面工作，目前已開發出雛型設備，並在實驗室內完成評估工作，近期內可應用在現場。

以下簡單介紹幾種電化學技術原理：

(1) DC 線性極化法

DC 線性極化法必須利用三極式（工作



A = Areas requiring further investigation

圖 3 鋼筋混凝土橋面版腐蝕等電位圖

Fig. 3 Isopotential map of reinforced concrete bridge deck identifying areas of greatest corrosion concern

電極、參考電極和輔助電極）才能求得極化圖之斜率，如圖 4 所示，以追蹤腐蝕狀況。基於 Stern and Gearey 理論推算腐蝕速率如下：

$$\text{腐蝕速率} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)} \times \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \dots (1)$$

β_a = 陽極 Tafel Slope

β_c = 陰極 Tafel Slope

ΔI = 電流

ΔE = 電位變化

B = Stern-Gearey 常數

R_p = 極化電阻

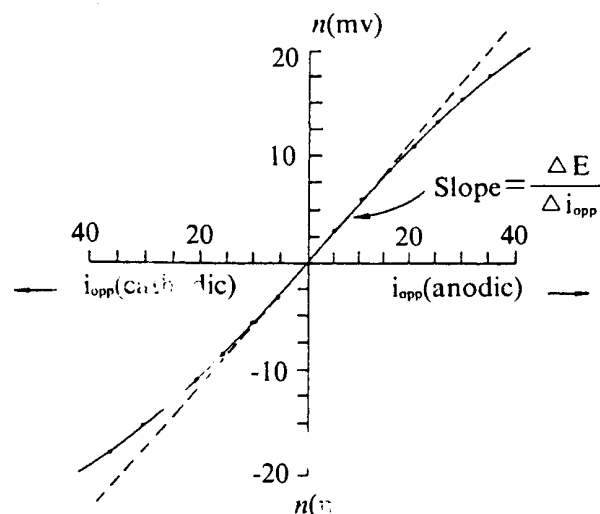


圖 4 DC 線性極化圖

Fig. 4 DC linear polarisation curve

DC 線性極化法的優點，包括可以很快的求得腐蝕速率；甚至極輕微的腐蝕狀況，如 < 1 mpy，都可以精確的測出，混凝土多孔性的材質引起 IR Drop 所造成的偏差，可經由儀器的 IR Compensation 電路輸入 IR 值；或改變參考電極位置而獲得改善。

(2) AC 交流阻抗法

AC 交流阻抗法可測得混凝土比電阻或

溶液電阻 (R_s)、鋼筋表面鈍化層電阻 (R_p) 及電容值 (C_p)。測得結果以 Nyquist Plot 表示。Nyquist Plot 圖形可分析其等效電路，並得以了解鋼筋於混凝土內的腐蝕機構。腐蝕速率，亦可依據鈍化層電阻 (R_p) 來推斷。

圖 5 為最簡單之鋼筋混凝土等效電路，其 Nyquist Plot 則如圖 6 所示。但基於各種實際情況所影響，往往會出現扭曲的圖形，因此常須配合不同形態的圖，作合理的判斷。

腐蝕速度再由公式(1)求出

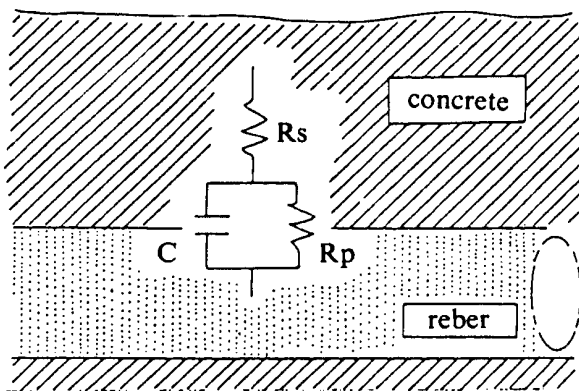


圖 5 鋼筋混凝土之等效電路圖

Fig. 5 Equivalent circuit of reinforcing rebar in concrete

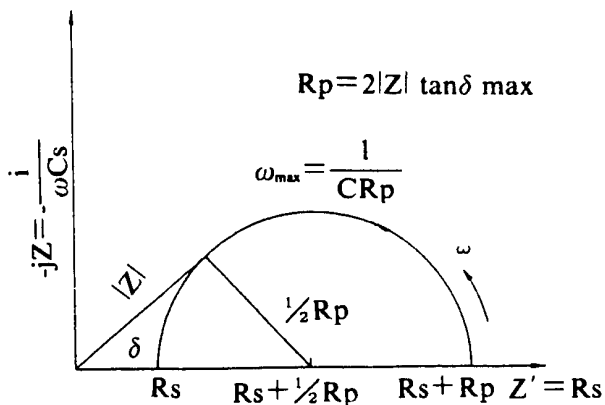


圖 6 圖 5 等效電路之複數平面圖 (Nyquist Plot)

Fig. 6 Nyquist plot of AC impedance data for equivalent circuit shown in Fig. 5.

(3) Harmonic Analysis 法⁽⁸⁾

以往公式(1)中定值 B 一般都是假設值或由文獻獲得。電化學技術如 DC 線性極化法，AC 交流阻抗法皆無法測得此一 B 值，使用 Harmonic Analysis 則可以測定公式中 B 值。Harmonic Analytic 的基本原理是施於系統一個固定頻率的正弦電壓波，然後分析回應電流訊號。鋼筋的腐蝕速度及 Tafel slope 可由以下公式求得。

$$i_{corr} = \frac{i_0}{(48)^{0.5} (2i_0 i_2 - i_1^2)^{0.5}}$$

$$\frac{1}{b_a} = \frac{1}{2u_0} \left(\frac{i_0}{i_{corr}} + \frac{4i_1}{i_0} \right)$$

$$\frac{1}{b_c} = \frac{1}{2u_0} \left(\frac{i_0}{i_{corr}} - \frac{4i_1}{i_0} \right)$$

而 B 值則可由下式獲得

$$B = \frac{b_a b_c}{2.3(b_a + b_c)}$$

i_{corr} = 腐蝕電流

i_0 = fundamental current

i_1 = first order current

i_2 = second order current

b_a = anodic tafel slope

b_c = cathodic tafel slope

u_0 = applied voltage amplitude

(4) 現場偵測技術

將以上三種電化學技術用於現場測量鋼筋的腐蝕速度時，儀器設備及探頭設計都和實驗室中不同，另外，測量速度也是一考量因素。⁽⁹⁾

直接測量鋼筋腐蝕速度可以幫助我們了解結構物的腐蝕原因，評估其堪用程度，以利規劃最適當的維修方法。另外，這種技術也可以幫助評估防蝕措施的效果。圖 7，顯示材料所最新開發的設備在實驗室中評估

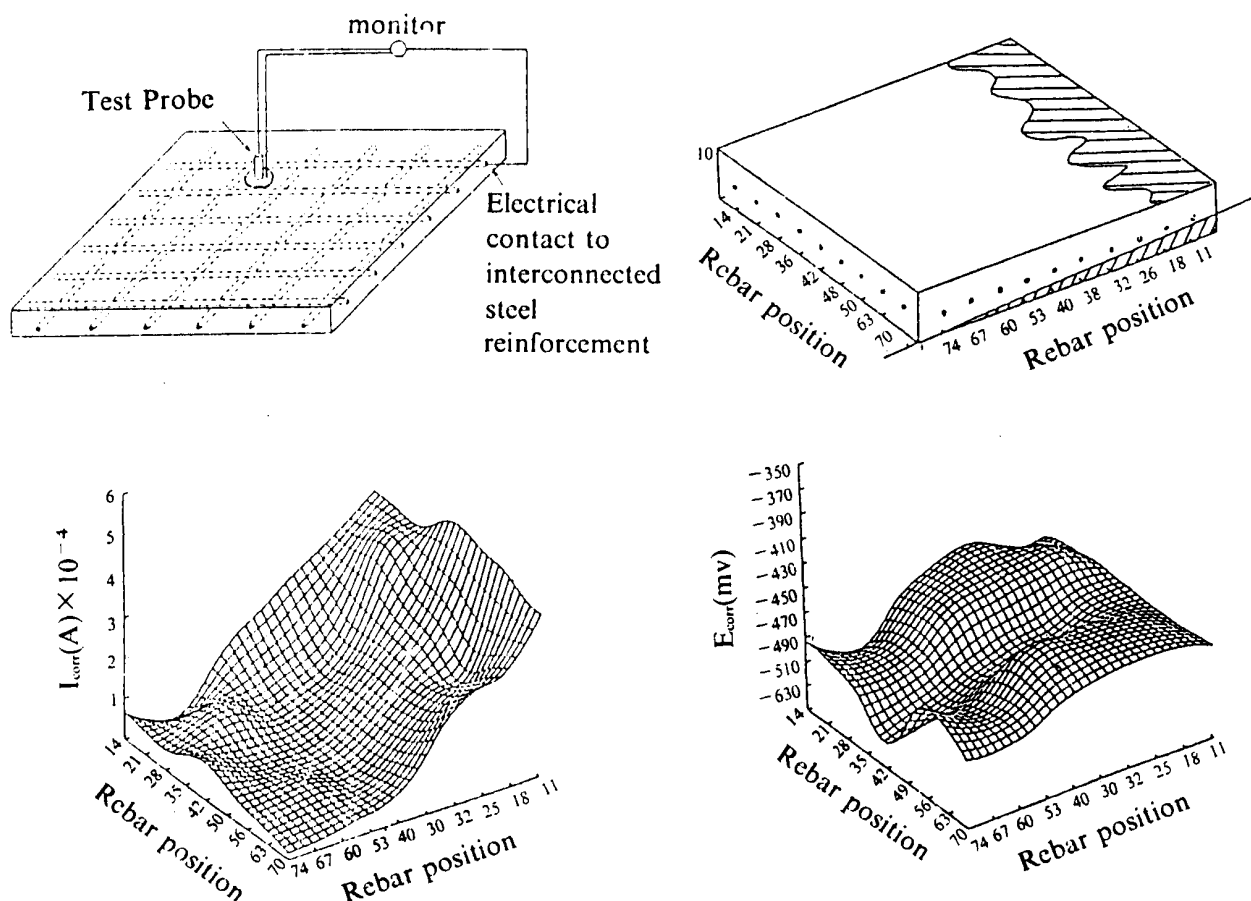


圖 7 鋼筋混凝土腐蝕速度偵測範例。

Fig. 7 Corrosion rate contour of reinforced concrete slab.

的數據。圖 7 的右上角顯示的是實驗用的大型水泥塊（長寬各 1 公尺）其中有互相交錯的鋼筋 20 根。此水泥塊半浸在鹽水中，另外我們特意在水泥塊的右方噴灑鹽水，並使右方水位高於左方水位。在此特意營造的腐蝕環境下，我們預期右方鋼筋的腐蝕速度要比左方的要快。圖 7 的一上角顯示檢測的方法。檢測時，將特別設計可移動式探頭放在欲檢測的位置，再由電化學檢測設備量出腐蝕速度，如此即可獲知整個鋼筋混凝土結構的腐蝕速度分佈。圖 7 左下角就是檢測所得的腐蝕速度分佈圖，明顯的和我們預期的結果相同。但是，如果使用上面所提的腐蝕電

位方法，則無法用來顯示腐蝕的趨勢。圖 7 右下角就是腐蝕電位分佈圖。腐蝕電位分佈似乎和腐蝕分佈完全不能吻合。上面說明了正確使用此一技術，不只可以提供結構物的腐蝕速度並可以結合環境資料來判斷造成腐蝕的原因。

(四)測量鋼筋因腐蝕減少的截面積

上面所提的電化學方法只能測量目前鋼筋的腐蝕速度，但是無法告訴我們此時鋼筋已經鏽了多少。為了正確預測鋼筋在某段時間後的有效截面積及強度，我們必須要能測量出鋼筋現在的有效截面（就是沒有腐蝕的截面積）。現今人們已嘗試使用何如 radar

、超音波、渦電流等非破壞性技術來進行此一物理性質的測量⁽¹⁰⁾。

(五)長期腐蝕速度監偵測

對於一個新的建築物來講，如果一開始就在混凝土中埋設一根鋼筋，即可長期對此一埋設的鋼筋進行腐蝕速度測量。假設此一埋設的鋼筋和結構物有相同的腐蝕狀況，則我們可以隨時掌握此結構物的腐蝕狀況。

五、腐蝕檢測技術之應用

(一)評估結構物腐蝕狀況

經過腐蝕檢測之後，可以將結構物資料依經驗上之損壞程度歸類，以便作以後維修之依據。表 5 為有關鋼筋腐蝕損害程度歸類之範例。結構物使用單位可參考過去經驗判斷結構物必須進行維修之損害程序。

(二)評估腐蝕區域及預測混凝土崩裂時間

預測此一區域發生崩裂的時機可協助規劃維修工作，預測發生崩裂時機可用以下方法進行。在現場使用腐蝕速度偵測技術後，

我們可獲得如圖 7 的腐蝕分佈圖，此圖可判斷腐蝕集中區域。此區域將是最早發生混凝土層崩裂的地方。從此區域取得含有鋼筋之混凝土圓柱體後，在實驗室中通一固定電流 I_0 ，並觀察發生裂縫時間 (t_0)。如此，要使混凝土崩裂，鋼筋表面需要再腐蝕量折合的電荷是等於 $I_0 \times t_0$ 。若鋼筋現今最大腐蝕電流為 I_1 ，則鋼筋若以 I_1 的速度腐蝕，在結構物上發現裂縫的時間則為 t_1 ， $t_1 = I_0 t_0 / I_1$ 。

(三)鋼筋混凝土結構的壽命預測

檢測鋼筋或混凝土不外乎要能預測此結構物的殘留壽命，以便採取正確和經濟的防蝕或修護措施。一個受腐蝕影響的 RC 結構物的壽命可分為兩個階段。第一階段是從混凝土變質到鋼筋開始腐蝕。這段期間可訂為 t_1 。第二階段是從鋼筋開始腐蝕到結構承受力因腐蝕而低於其使用要求時。這段期間長為 t_2 。整個結構物的壽命則為 t ， $t = t_1 + t_2$ 。 t_2 的大小和腐蝕速度及腐蝕物生成量有關。腐蝕會造成鋼筋截面積減少，因此會降低鋼

表 5 鋼筋混凝土結構物遭受鋼筋腐蝕損傷程度歸類

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 上 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 脫離鋼筋之握裹
鋼 筋 斷 面 損 失 ($\Delta A_s / A_s$) (**)	—	— 5%	— 10%	— 25%	箍筋有些都已損毀
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先必備之重要徵兆。

(**) 相對之氧化物厚度為 $t_o = \alpha (\Delta A_s / A_s) \phi$ ，式中 ϕ 為鋼筋直徑， α 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。

筋的承受強度；另外腐蝕也會造成混凝土剝落，影響其支撐力量。正確使用前面所述幾種技術，可產生有關腐蝕速度、腐蝕生成量的定量資料再配合結構性安全性分析應該可以預測 t 的大小。

七、結 論

由上面的介紹，我們知道妥善運用檢測技術可以即早發現鋼筋混凝土腐蝕劣化問題，早日維修，以免造成重建的經濟損失或危險事件。

參考資料

- (1)Montgomery F. R., Long A. E., Basbeer P. A. M., IABSE Reports, 57 (1989) 871.
- (2)ASTM C876-87, "Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete".
- (3)Elsener B., Muller S., Suter M., Bohni H., UK Corrosion, (1988) 169.
- (4)Cavalier P. G., Vassie P. R., ICE Proceeding, 70 (1981) 46.
- (5)Feliu S., Gronzalz. V. A., Andrade C. and Feliu C., Corrosion, 44 (1988) 761.
- (6)Dawson J. L., CH12, "Corrosion of Reinforcement in Concrete Structure" Ed Crane, P., (1983).
- (7)施建志，林葆喜，陳新北，"電化學技術於鋼筋混凝土腐蝕速度偵測之應用"，(1992) 7, 交流阻抗學術研討會，新竹，1992.
- (8)Jafar M. A., PhD. Thesis University of Manchester, (1990).
- (9)施建志，MRL Technical Report 81-53810102.
- (10)Woodward R. J. TRRL. Technical Paper BD /TP/12/89, (1989).