圖 8-23 敲擊回音法量測位置示意圖^[8-19]

$$C = \sqrt{\left[\frac{(V_P \times \Delta t)}{2} \right]^2 - H^2} \quad (8.16)$$

8-5 鋼筋腐蝕檢測^[8-20~8-23]

造成鋼筋腐蝕的主要原因有鹽害與中性化兩大類。在鹽害方面，當混凝土中鋼筋表面的氯離子超過一定的量時，鋼筋表面的保護性鈍化膜開始破壞，接著鋼筋開始腐蝕膨脹造成混凝土龜裂或崩落。至於氯離子的來源，又可分為在興建期間加入或是在使用期間滲透進入兩大管道。在興建期間氯離子進入混凝土的管道除了隨早強劑的使用而加入混凝土外，另一則是使用含氯離子的粒料如海砂及含鹽分的水。在結構使用期間，環境中的氯離子會吸附混凝土而擴散到鋼筋表面。這些環境中氯離子主要來源有二：一是融冰鹽，這種情況在寒帶國家中最高為普遍，這些國家為解決冬天下雪造成路面結冰的問題，大量使用融冰鹽導致融冰鹽滲透進入混凝土後造成鋼筋腐蝕。第二個

氯離子來源是海風或海水，由於台灣四周環海再加上地小人稠，相當多的建設均集中在海邊，這些結構物很容易因海風或海水帶來鹽分滲入混凝土而造成鋼筋腐蝕進而影響結構安全。

而當混凝土材料暴露於大氣中，尤其是工業污染的環境下，含有二氧化碳或二氧化硫等酸性氣體會使混凝土的 pH 值降低，混凝土中性化的結果將會造成其內部之鋼筋開始腐蝕。由於混凝土發生中性化時，是由最外層漸漸向內侵入，當中性化層到達鋼筋時，保護鋼筋銹蝕環境不再存在，腐蝕於是開始進行。所以中性化的速度決定了鋼筋腐蝕發生的時間。而中性化的速率和混凝土最小保護層之厚度有關，當保護層越厚，鋼筋表面混凝土中性化越慢，表 8-5 與表 8-6 為一般鋼筋混凝土構造物之最小保護層厚度之相關規定。

鋼筋的腐蝕性質或物理性質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種極為複雜的材料，量測鋼筋腐蝕速度或腐蝕量並不容易。在以下內容中將介紹幾種常用之鋼筋腐蝕檢測方法。

表 8-5 場鑄混凝土最小保護層厚度(ACI318)

構造物暴露環境	最小保護層厚度(in)
直接澆注且永久暴露於水中混凝土	3
露置於土中或大氣中之混凝土： 6 號~18 號鋼筋 5 號以下	2 1.5

表 8-6 鋼筋混凝土之最小保護層厚度(AASHTO)

構造物暴露環境	最小保護層厚度(in)
直接澆注且永久暴露於水中混凝土	3
露置於土中或大氣中之混凝土： 主筋 肋筋、箍筋、螺旋箍筋	2 1.5
在溫暖氣候下之混凝土橋版： 頂層鋼筋 底層鋼筋	2 1
無積極防蝕措施且經常暴露於除冰鹽下 之混凝土橋版： 頂層鋼筋 底層鋼筋	2.5 1
不露置於大氣或接觸地面之混凝土： 主筋 肋筋、箍筋、螺旋箍筋	1.5 1
直接澆注或永久露置於土中之混凝土樁	2

8-5-1 腐蝕電位

利用鋼筋腐蝕偵測儀(圖 8-24)來確定鋼筋銹蝕範圍，圖 8-25 為採用腐蝕電位檢測技術之檢測實例。此方法必須在鋼筋具有連續導電性時方可使用，檢驗時首先要將腐蝕偵測儀的參考電極與鋼筋相連接以形成通路後，再輸入高阻抗，移動探頭並記錄電位差藉以繪出等位圖，再依等位圖判定腐蝕發生之區域。當腐蝕電位在-350 mV 以下時(以硫酸銅溶液為電解液)，視作此區域鋼筋腐蝕之潛能達 90%以上，而腐蝕電位在-200 mV(以硫酸銅溶液為電解

液)以上時，則此區域之鋼筋可視作幾乎沒有腐蝕發生。鋼筋腐蝕偵測儀有單探頭定點式及滾輪式(詳見圖 8-26)等。根據規範 ASTM-C876 量測腐蝕電位與預測內部鋼筋腐蝕程度之關係如表 8-7 所示。

表 8-7 腐蝕電位與鋼筋腐蝕機率評估表

腐蝕電位 E(以硫酸銅溶液為電解液)	鋼筋腐蝕機率
$-350 \text{ mV} > E$	90%
$-200 \text{ mV} > E > -350 \text{ mV}$	5%~90%
$E > -200 \text{ mV}$	5%

另外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，並製成如圖 8-27 之腐蝕電位圖，再由此一圖來判斷腐蝕集中的區域，以利後續的維修規劃。雖然此一方法相當簡便，但是有以下的缺點：

1. 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。
2. 腐蝕電位可能不適用於中性化的結構或海砂結構體，理由是中性化所引起的界面電位差(Junction Potential)可能高達 200 mV，如此大的誤差很容易造成誤判。例如原本腐蝕電位在-350 mV 以下，可能測出之值為-150 mV，因此誤判為鋼筋發生腐蝕的機率在 5%以下。



圖 8-24 鋼筋腐蝕偵測儀

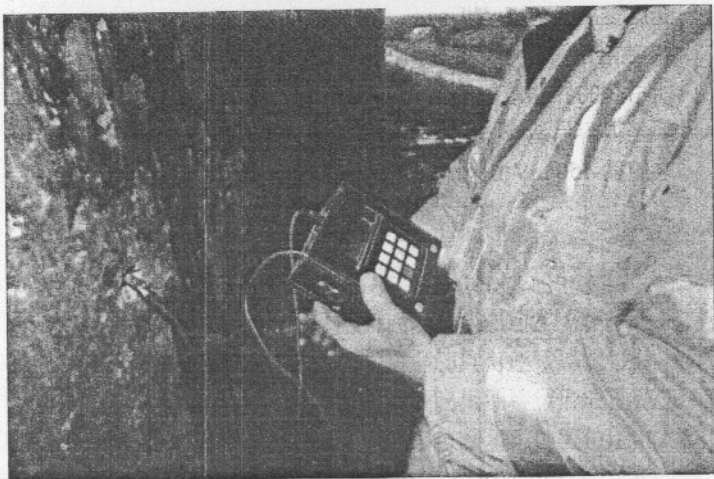


圖 8-25 腐蝕電位檢測實例(FOSROC 公司提供)



圖 8-26 滾輪式鋼筋腐蝕偵測儀

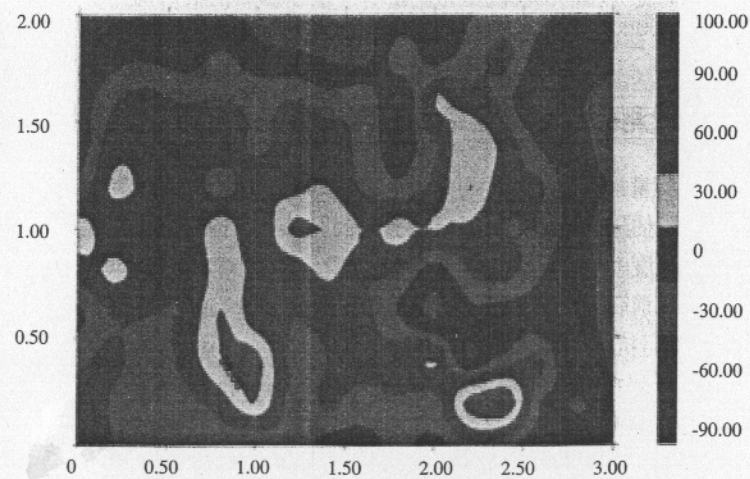


圖 8-27 腐蝕電位趨勢圖

3. 結構物是在水下時，因為結構體缺乏氧，所以鋼筋不會腐蝕，但卻會測到相當負值的腐蝕電位(遠小於-350 mV)。

當採用鋼筋腐蝕電位檢測法進行鋼筋腐蝕偵測時需注意以下事項：

1. 結構內鋼筋是否連結，必須先以電表檢查，如發現有未連結之鋼筋則必須設法予以連結，否則將影響腐蝕之量測工作。而將來防蝕通電流時，其未連結部份之鋼筋將變為陽極反而增加鋼筋腐蝕之速率。
2. 檢測時半電瓶應密接混凝土表面，否則將影響電位差之讀數。
3. 手不能接觸到半電瓶之銅部份以免發生誤差。
4. 應測各點須切實標明位置，以利將來反覆檢查比較之用。
5. 接電線前必須將腐蝕鋼筋之鐵銹清除。
6. 為了能獲得良好而較正確的電位差，必須在測量點先以海棉沾上適量之水份潤濕，以助電流傳導。
7. 半電瓶鋼筋與電線之接頭須接好。
8. 盡量使用同一儀器來檢測。
9. 須先求鋼筋保護層之厚度，分析混凝土之成份及其對電阻之關係並作混凝土 pH 值含量之試驗，以利將來防蝕之用。
10. 先以電阻表測鋼筋保護層之厚度是否超過電阻 50,000 Ω。
11. 檢測前需進行儀器的校正與檢查。

8-5-2 量測瞬間腐蝕速率

直接測量鋼筋腐蝕速率可以瞭解結構的腐蝕原因，協助規劃最適當的維修方法及評估防蝕措施的效果。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獲知鋼筋的腐蝕速度。在實驗室中，有以下幾種方法可以用來測量鋼筋的腐蝕速度，包含線性極化阻抗(Linear Polarization Resistance, LPR)、交流阻抗(AC Impedance)、調和分析(Harmonic Analysis)等電化學方法。檢測時只要將探頭放在欲檢測之位置上，再由電化學檢測設備量出腐蝕速率，如此即可獲知整個鋼筋混凝土結構的腐蝕速率分佈；而如果我們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。以下是量測瞬間腐蝕速率的幾種電化學技術。

8-5-2-1 線性極化法

線性極化法的偵測必須利用三極式(工作電極、參考電極和輔助電極)才能求得極化斜率，以追蹤腐蝕狀況。基於 Stern and Gearey 理論推算腐蝕速率如下：

$$\text{腐蝕速率} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a \beta_c)} \times \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \quad (8.17)$$

式中 β_a = 陽極 Tafel 斜率；

β_c = 陰極 Tafel 斜率；

ΔI = 電流；

ΔE = 電位變化；

B = Stern-Gearey 常數；

R_p = 極化電阻。

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都可以精確的測出。

8-5-2-2 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。腐蝕速率可依據鈍化層電阻(R_p)來推斷。

8-5-2-3 調和分析法

公式(8.17)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。使用調和分析則可以測定公式中 B 值。調和分析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。鋼筋的腐蝕速率及 Tafel Slope(斜率)可由以下公式求得。

$$i_{corr} = \frac{i_0}{(48)^{0.5} (2i_0 i_2 - i_1^2)^{0.5}} \quad (8.18)$$