陰極防護對鋼材抗蝕及機械性能之影響

黃然** • 葉為忠* • 張建智* • 吳建國**

A Study on the Protection of Steel Using Cathodic Potential in 3.5% NaCl Solution

R. Huang, Weichung Yeih, J.J. Chang and J.K. Wu

摘 要

中碳鋼棒在25℃及3.5%NaCl溶液中經外加電位測試，電位為-0.75V(SCE)時即達臨界保護電位值(critical protection potential)。未加電位保護之鋼棒試驗在30天後測出之腐蝕速率為5 mpy。鋼筋之機械強度因腐蝕而影響而有明顯損失，本研究顯示陰極防護並不造成鋼筋之機械性能的損失，即在3.5%NaCl溶液中並不因氫氣之生成而損失鋼筋之強度與延展性。此外，外加電位以-0.75~0.8V(SCE)為宜。

關鍵詞：臨界保護電位、陰極防護、中碳鋼、機械性能

ABSTRACT

The critical protection potential for medium carbon steel specimens in 3.5% NaCl solution at 25℃ was evaluated, and -0.75V (SCE) critical protection potential was obtained. After 30-day immersion testing, the corrosion rate of specimens without protection potential was 5 mpy. Mechanical properties of corroded specimens show significant degradation. On the other hand, specimens protected by impressed current show no evident changes in mechanical properties, i.e., specimens under impressed current protection in the 3.5% NaCl solution do not lose their strength and ductility because of hydrogen effect. According to this study, the optimum range of protection potential is -0.75V~0.80V (SCE).

Key words: critical protection potential, cathodic protection, medium carbon steel, mechanical properties

一、前言

繚爪混凝土由於混凝土提供高鹼性環境(pH = 12.5~13.2)，能於繚爪表面形成鈍態膜保護繚爪免於腐蝕(1,2)。但若混凝土受到碳化作用使其pH值降低，或當繚爪表面氫離子積量達到相當程度時，鈍態膜會遭受破壞；此時倘若繚爪周遭存在足夠之水及氧氣，將會發生腐蝕而使結構

*國立台灣海洋大學河海工程研究所
**國立台灣海洋大學海洋材料工程研究所
物破壞。因此在海洋環境下之鋼筋混凝土結構物
如濱海橋樑或碼頭等需重視其腐蝕問題及考量防
蝕之措施。陰極防蝕系統係有效的防蝕方法之
一，型式有犧牲陽極法和外加電流法。本研究中
所探討的範圍為外加電流法，其基本原理係利用
外加電流或外加電位強制使鋼筋形成陰極，如
圖一所示。鋼筋原處在活性腐蝕位置，因電化學
反應失去電子，但若經由陰極防護提供電子，使
鋼筋表面上之鐵沒有機會釋出電子產生電化學反
應，而受到保護。

雖然犧牲陽極系統裝置較外加電流法為簡
單，但應用於鋼筋混凝土防蝕方面，受到電流分
佈、生成物體積膨脹及犧牲陽極體積大小分佈等
限制，因此目前國外已有採用外加電流陰極防
護法進行鋼筋混凝土結構物的防蝕，例如美國聯
邦公路局等指出外加電流法係在含有鹽類的環境
有效之防蝕方法。外加電流法可用直流電源 (DC)
或經由整流器 (rectifier) 的交流電源 (AC)
，輸出電位只要在鋼筋的自然電位以下範圍內變
動，即可保護鋼筋，一般所使用保護電位約在−
0.72V ~ −1.02V (SCE)。

雖然外加電流法一有效之防蝕法，但是此
法可能導致之氯離問題亦需併考量。由於混
凝土結構物的不均質性，在外加電流陰極防護
下，可能會出現局部過保護的區域，導致鋼筋電
位沿著表面變化。而氧原子可由腐蝕反應及外加
電流狀況下產生，吸附於鋼筋表面，由於氧原
子尺寸較小，可在金屬格子間擴散。進入金屬格
子內之氧原子會在孔隙、層裂或微裂縫中結合成
氧分子，累積於缺陝中形成高壓，對材料有不利
之影響，且氧原子在擴散過程中造成材料晶格間
亦之歪變 (distortion)，均會使鋼筋性質變脆。

爲確保陰極防護能有效且安全地應用於鋼結
構物，鋼筋或預力混凝土構造物上，外加電位不
宜過高以避免產生過度保護 (overprotection)、浪
費電力及伴隨造成的氯離問題。理想之保護電位
之選擇如圖二所示，約位於 Tafel 線性區域之起
始處。美國腐蝕工程學會 (National Association of Corrosion Engineers, NACE)指出鋼
結構物暴露於土壤或水溶液中須與電解質環境保
持 −0.77V (SCE) 之電位差才能有效達到陰極防
護；過去的研究亦指出，當極化電位 (polarized potential) 低於 −1.25V (Cu/CuSO₄) (−1.17V,

![Diagram](image)

**圖一** 鋼筋混凝土陰極防護示意圖
Fig.1 Schematic of cathodic protection for reinfere-
ing steel in concrete.

**圖二** 外加電流法防護電位之選擇
Fig.2 Selection for the protection potential.
SCE)時，鋼材表面將產生氨氣；Hope及Poland指出，鋼筋混凝土之陰極防護，如使用完全整流的極化電流，鋼筋的極化電位在−1.02V～
−1.12V (SCE)時，就產生氨氣。而當外加交流電流其整流不完全時，鋼筋的極化電位在低於
−0.86V (SCE)時，就產生氨氣。

氨對鋼材機械性質之影響，可由兩方面來考量(1)氨在鋼中存在的型式（原子或分子）(2)鋼本身的強度及應力狀態。分子態的氨易於空孔、疊層雜質面上形成而引起崩塗，這種型式之破壞並
不會引起鋼的脆化；鋼脆化之效應與氧化態氨溶入鐵之間隙有關，在格子間的氧化態氨，在彈性
範圍內對鋼材不構成具體危害，但應力達到塑性
範圍時影響則很大。2～2.5ppm的氧化態氨即會
降低鋼的延展性，而含有5～6ppm的氧化態氨影
響更為明顯，而對於高強度鋼只要少許的氨，就
能引起嚴重的脆化。

二、試驗計畫

本研究所採用外加電流陰極防護法，先施予
鋼材四種不同之定電位，經浸泡實驗後，選擇最
佳之保護電位，並以萬能材料試驗機進行力學性
質測試，以評估所使用之保護電位是否對鋼材力
學性質造成影響，以評定氨脆之影響。

(一)試棒與試液

實驗採用之試棒為4竹節鋼筋，屬中碳
鋼，試棒之成份如表1所示。先將鋼筋車床處
理成直徑10mm，長度100mm之鋼棒，經磨光處

理，再以丙酮清洗後，利用防銹防鹼劑牌包裏兩
端，使裸露之鋼棒長度為50mm，所採用之試液
係利用蒸餾水配製3.5％NaCl溶液，此為一般實
驗中常被採用之人造海水。

(二)陰極防護

本研究所採用陰極防護法外加電流法並同
時計算其電流，將暴露面積為15.7cm²之鋼棒浸
泡在溫度25℃之1公升3.5％NaCl溶液。先以恆電
位儀測出其腐蝕電位，參考電極採用鈣合甘汞電
極(SCE)，後將試片施加各種定電位−0.75V、
−0.8V、−0.9V及−1.0V(SCE)並同時記錄其電
流，十天後取出，以10％鹽酸每公升添加1g之六
次甲基四胺清除金屬表面鉬垢後，再以蒸餾水沖
洗並烘乾，利用精密天平秤重至0.1mg，腐蝕速
率可由單位面積重量損失值換算之。

(三)機械性質探討

鋼棒在25℃之3.5％NaCl溶液中，未加電位
與外加電位(−0.75V～−1.2V)各30天後，將鋼
棒取出，於兩側貼上應變計(strain gage)並置於
日製(Shimadzu)20噸萬能材料試驗機上進行拉
力試驗。試驗數據並與控制組相比較，觀測其機
械性質受腐蝕與氨脆影響之程度，試驗項目包括
極限強度、降伏強度、彈性模數與伸長率。

三、試驗結果與討論

(一)外加電位對腐蝕速率之影響

本研究所採用之陰極防護法係採用定電位
法，並配合記錄其最絡之穩定電流，首先利用恆
電位儀測試棒在3.5％NaCl溶液之腐蝕電位，
其值為−0.68V(SCE)，然後將試棒分別設在
−0.75V～−1.0V(SCE)十天後再測其腐蝕速率，
其腐蝕速率如表2所示。結果顯示未施加電位
時，鋼棒之腐蝕速率為5mpy，在外加電位情況

<table>
<thead>
<tr>
<th>元 素</th>
<th>C</th>
<th>Cu</th>
<th>Si</th>
<th>Mn</th>
<th>P</th>
<th>S</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>重量％</td>
<td>0.36</td>
<td>0.23</td>
<td>0.20</td>
<td>0.61</td>
<td>0.04</td>
<td>0.025</td>
</tr>
</tbody>
</table>

<table>
<thead>
<tr>
<th>元 素</th>
<th>Ni</th>
<th>Cr</th>
<th>Mo</th>
<th>Sn</th>
<th>Fe</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>重量％</td>
<td>0.11</td>
<td>0.12</td>
<td>0.01</td>
<td>0.02</td>
<td>balance</td>
</tr>
</tbody>
</table>
### 表2 試棒在各種電位之腐蝕速率

<table>
<thead>
<tr>
<th>鋼棒電位 (V, SCE)</th>
<th>( \Phi_{corr} )**</th>
<th>0.75</th>
<th>0.8</th>
<th>0.9</th>
<th>1.0</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>外加電位 (μA/cm²)</td>
<td>0</td>
<td>12</td>
<td>15</td>
<td>25</td>
<td>60</td>
</tr>
<tr>
<td>腐蝕速率 (mpy)*</td>
<td>5.0</td>
<td>0.8</td>
<td>0.4</td>
<td>nil</td>
<td>nil</td>
</tr>
</tbody>
</table>

* 1mpy = 10⁻³ inch per year
** \( \Phi_{corr} \)：腐蝕電位 (未施加電位時)

下，其腐蝕速率隨外加電位的下降而降而降低。電位維持在 −0.75V(SCE) 時，腐蝕速率降至 1mpy 以下，而電位下降至 −0.9V(SCE) 以下時，腐蝕速率太小無法量測。

(二)外加電位對機械性質之影響

鋼棒在 3.5% NaCl 溶液中，未加電位與外加電位 30 天後其機械性質如表 3 所示。其機械性質會受兩種效應影響：一是腐蝕反應鐵生成造成局部斷面積減小，另一為外加電位可能產生之氫滲入材料內部，造成氫脆問題，致使材料力學性質變化。試驗結果顯示在 3.5% NaCl 溶液浸泡未加電位保護之試棒其拉力強度略降，此因試棒表面並非均勻之腐蝕，表面略呈凹凸不平，而使試棒強度降低。當外加電位在 −0.9V ～ −1.2V (SCE) 時，鋼棒受到外加電流保護未受腐蝕作用，僅需考慮有無氫脆現象。由結果顯示鋼棒之力學性質略未明顯變化，其原因可能為鋼棒表面所吸附的氧不多或氧無足夠時間擴散進入鋼棒中。因此鋼棒在陰極防護外加電位介於 −0.75V ～ −1.2V 時，施加一個月後所受氫脆影響不顯著。

### 四、結論

1. 為確保陰極防護能安全有效應用於鋼結構物、鋼筋混凝土及預力混凝土，必需謹慎選用適當之電位，避免過度保護產生氫脆問題。
2. 鋼棒在 25°C 3.5% NaCl 溶液中，未施加電位時，鋼棒之腐蝕速率為 5mpy，當外加電位 −0.75V(SCE) 時，鋼棒之腐蝕速率降至 1mpy 以下；在電位降至 −0.9V(SCE) 以下時，幾乎均降至零。
3. 在 3.5% NaCl 溶液浸泡未加電位保護之試棒強度略降，當外加電位達 −0.9V(SCE) 甚或更低時因未受腐蝕作用及氫害影響，其機械性質未明顯變化。至於長期以外加電流保護或受應力狀況下是否會造成較明顯之氫害應再以實驗佐證。

### 參考文獻

2. P. K. Mehta, "Durability of Concrete in Marine Environment-A Review", Performance of Con-

### 表3 鋼棒在各種電位下之力學性質

<table>
<thead>
<tr>
<th>鋼棒電位 (SCE)</th>
<th>極限強度 (kgf/cm²)</th>
<th>頂破強度 (kgf/cm²)</th>
<th>彈性模數 (kgf/cm²)</th>
<th>伸長率 (%)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>原鋼材</td>
<td>8655</td>
<td>7600</td>
<td>2.07 × 10⁶</td>
<td>5.95</td>
</tr>
<tr>
<td>3.5% NaCl 溶液浸泡30天</td>
<td>7987</td>
<td>7150</td>
<td>1.87 × 10⁶</td>
<td>5.89</td>
</tr>
<tr>
<td>−0.75V</td>
<td>8087</td>
<td>7350</td>
<td>1.81 × 10⁶</td>
<td>5.71</td>
</tr>
<tr>
<td>−0.80V</td>
<td>8612</td>
<td>7550</td>
<td>2.02 × 10⁶</td>
<td>8.34</td>
</tr>
<tr>
<td>−0.90V</td>
<td>8762</td>
<td>7800</td>
<td>2.00 × 10⁶</td>
<td>7.65</td>
</tr>
<tr>
<td>−1.00V</td>
<td>8643</td>
<td>7600</td>
<td>2.11 × 10⁶</td>
<td>6.61</td>
</tr>
<tr>
<td>−1.20V</td>
<td>8637</td>
<td>7655</td>
<td>2.10 × 10⁶</td>
<td>6.00</td>
</tr>
</tbody>
</table>


