

# 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°C及3.5%NaCl溶液中經外加電位測試，電位在-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體浸泡30天後測出之腐蝕速率為5mpy。鋼筋之機械強度因腐蝕面影響而有明顯損失，本研究顯示陰極防護並不造成鋼棒之機械性能的損失，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°C 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

鋼筋混凝土由於混凝土提供高鹼性環境(pH=12.5~13.2)，能在鋼筋表面形成鈍態膜保護鋼

筋免於腐蝕<sup>(1,2)</sup>。但若混凝土受到碳化作用使其pH值降低，或當鋼筋表面氯離子累積量達到相當程度時，鈍態膜會遭受破壞；此時倘若鋼筋周遭存在足夠之水及氧氣，將會發生腐蝕而使結構

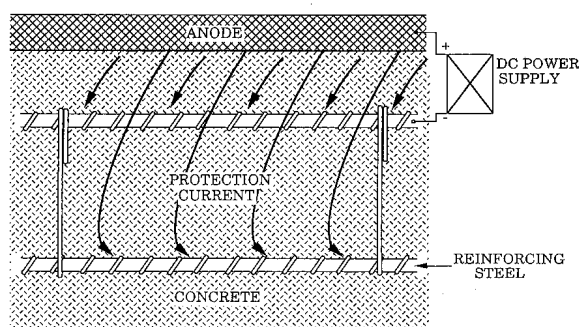
\*國立台灣海洋大學河海工程研究所

\*\*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。陰極防蝕系統為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<sup>(3)</sup>，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，使鋼筋表面上的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<sup>(4)</sup>，因此目前國外多半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便指出外加電流法為在含有鹽類的橋墩有效之防蝕方法<sup>(5)</sup>。外加電流法可利用直流電源(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 $-0.72V \sim -1.02V(SCE)$ <sup>(6)</sup>。

雖然外加電流法是一有效之防蝕法，但是此法可能導致之氫脆問題亦需併同考量<sup>(7)</sup>。由於混凝土結構物的不均質性，在外加電流陰極防護

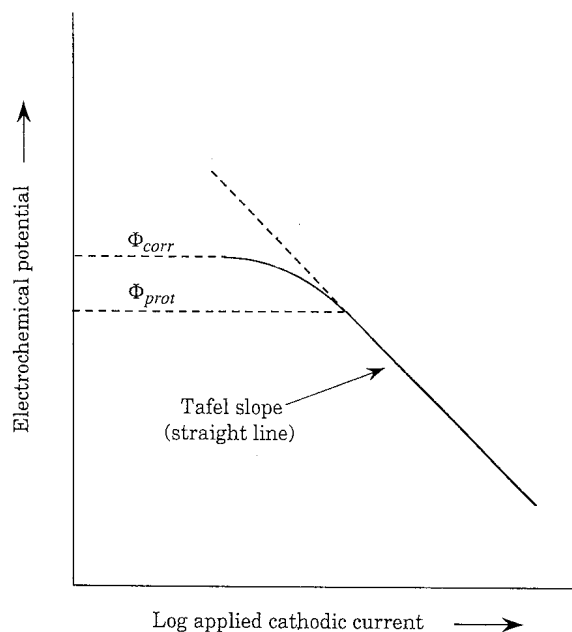


圖一 鋼筋混凝土陰極防護示意圖

Fig.1 Schematic of cathodic protection for reinforcing steel in concrete.

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。而氫原子可藉由腐蝕反應及外加電流狀況下產生，吸附於鋼筋表面，由於氫原子尺寸較小，可在金屬格子間擴散。進入金屬格子內之氫原子會在孔隙、疊層或微裂縫中結合成氫分子，累積於缺陷中形成高壓，對材料有不利之影響，且氫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<sup>(8)</sup>。

為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氫脆問題。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)<sup>(9)</sup>指出鋼結構物曝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 $-1.25V(Cu/CuSO_4)$  ( $-1.17V$ ,



圖二 外加電流法防護電位之選擇

Fig.2 Selection for the protection potential.

SCE)時，鋼材表面將產生氫氣；Hope及Poland<sup>(6)</sup>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 $-1.02V \sim -1.12V$  (SCE)時，就會產生氫氣。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，便會產生氫氣。

氫對鋼材機械性質之影響，可由兩方面來考量(1)氫在鋼中存在的型式(原子或分子)(2)鋼本身的強度及應力狀態。分子態的氫易於空孔、疊層雜質面上形成而引起泡腫，這種型式之破壞並不會引起鋼的脆化；鋼脆化的效應與原子態氫溶入鐵之間隙有關。在格子間的原子態氫，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。 $2 \sim 2.5ppm$ 的原子態氫即會降低鋼的延展性，而含有 $5 \sim 6ppm$ 的原子態氫影響更為明顯，而對於高強度鋼只要少許的氫，就能引起嚴重的脆化<sup>(10)</sup>。

## 二、試驗計畫

本研究擬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，以評定氫脆之影響。

### (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

表1 鋼筋之化學成份表

Table 1 Chemical compositions of steel rebar

元素	C	Cu	Si	Mn	P	S
重量%	0.36	0.23	0.20	0.61	0.04	0.025
元素	Ni	Cr	Mo	Sn	Fe	
重量%	0.11	0.12	0.01	0.02	balance	

理，再以丙酮清洗後，利用防酸防鹼膠帶包裹兩端，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為外加電流法並同時計算其電流，將曝露面積為 $15.7cm^2$ 之鋼棒浸泡在溫度 $25^{\circ}C$ 之1公升3.5%NaCl溶液。先以恆電位儀測出其腐蝕電位，參考電極採用飽合甘汞電極(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鐵垢後，再以蒸餾水沖洗並烘乾，利用精密天平稱重至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 $25^{\circ}C$ 之3.5%NaCl溶液中，未加電位與外加電位( $-0.75V \sim -1.2V$ )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氫脆影響之程度，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量試棒在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 $-0.75V \sim -1.0V$ (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

表 2 試棒在各種電位之腐蝕速率

Table 2 Corrosion rates of steel bar for various potentials

外加電位 (V, SCE)	$\Phi_{corr}^{**}$	-0.75	-0.8	-0.9	-1.0
外加電流 ( $\mu A/cm^2$ )	0	12	15	25	60
腐蝕速率 (mpy)*	5.0	0.8	0.4	nil	nil

\* : 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 天後其力學性質如表 3 所示。其機械性質會受兩種效應影響：一是腐蝕反應鐵銹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性之腐蝕，表面略呈凹凸不平，而使試棒強度降低。當外加電位在  $-0.9V \sim 1.2V(SCE)$  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

力學性質未明顯變化，其原因可能為鋼棒表面所吸附的氫不多或氫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  $-0.75V \sim -1.2V$  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  $25^\circ C$  3.5% NaCl 溶液中，未施加電位時，鋼棒之腐蝕速度為 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，幾乎均降至為零。
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

1. A.L. Marshall, "Marine Concrete", Blackie and Son Ltd. (1990), pp.217-218.
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 3 Mechanical properties of steel bar in 3.5% NaCl solution as a function of applied potential

外加電位 (SCE)	極限強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	彈性模數 (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸長率 (%)
原鋼材	8655	7600	$2.07 \times 10^6$	5.95
3.5% NaCl 溶液浸泡 30 天	7987	7150	$1.87 \times 10^6$	5.89
-0.75V	8087	7350	$1.81 \times 10^6$	5.71
-0.80V	8612	7550	$2.02 \times 10^6$	8.34
-0.90V	8762	7800	$2.00 \times 10^6$	7.65
-1.00V	8643	7600	$2.11 \times 10^6$	6.61
-1.20V	8637	7655	$2.10 \times 10^6$	6.00

- crete in Marine Environment ACISP-65,(1980), pp.1-19.
3. B. S. Wyatt and D. J. Irvine, "A Review of Cathodic Protection of Reinforced Concrete", *Materials Performance*, Dec.(1987),pp.12-28.
  4. 林葆喜, "鋼筋混凝土結構物最佳防蝕法—陰極防蝕", *材料與社會*, 第37期, (1980), pp.41-46.
  5. C. E. Locke and C. Dehghanian, "Related Studies to Cathodic Protection of Reinforced Concrete", Report No. FHEA/OK 83(06), University of Oklahoma, Norman, (1983)
  6. B. B. Hope and J. S. Poland, "Cathodic Protection and Hydrogen Generation", *ACI Materials Journal*, Sep.-Oct., (1990), pp. 469-472.
  7. 陳春霖, "石化工業金屬材料氫脆與腐蝕問題之防治", 國立台灣海洋大學航運技術研究所碩士論文, (1993)。
  8. A. M. El-Sherik and M. Shirkhazandeh, "Hydrogen Permeation through Cathodically Protected Iron Membranes in Simulated Concrete Environment", *Corrosion*, Vol.48, No.12(1992), pp.1001-1008.
  9. NACE, "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping System", Recommended Practice RP-01-69, Houston, TX, U.S.A. (1976).
  10. Warren D., "Hydrogen Effects on Steel", *Materials Performance*, Vol.28, No.1, (1987), pp.38-48.