

## 鋼材在模擬混凝土環境下之氫滲行為研究

張建智\*、葉為忠\*、何世鵬\*、王春寶\*

### Hydrogen Permeation Through Cathodically Protected Steel Membranes in Simulated Concrete Environment

J.J. Chang\*, W. Yeih\*, S.P. Her\* and C.B. Wang\*

#### 摘 要

本研究旨在探討外加陰極電流對模擬混凝土環境下之鋼材氫滲透的影響，以間接瞭解鋼材氫脆化的可能性。研究方法主要是藉由電化學氫滲透實驗來獲得試片之氫滲電流密度，試驗變數包括碳鋼之含碳量、外加陰極電流密度、陰極槽電解液以及水泥砂漿保護層之水灰比等因素。由研究結果顯示，無覆蓋水泥砂漿保護層的鋼片在3.5% NaCl溶液中，其氫滲電流密度會隨鋼材之含碳量降低及外加電流密度增加而變大；此外，陰極槽電解液為含3.5% NaCl之模擬混凝土孔隙水溶液（SPS），其氫滲電流密度較3.5% NaCl者高。有覆蓋水泥砂漿保護層的鋼片，其氫滲電流密度受水泥砂漿保護層水灰比的不同而改變，氫滲行為較無保護層複雜。

關鍵詞：陰極電流密度、氫脆、氫滲透、水泥砂漿保護層

#### Abstract

The effects of an impressed cathodic current on the hydrogen permeation in iron membranes protected by cement-based composite materials were studied. The electrochemical hydrogen permeation technique was used to measure the hydrogen permeation current of the membranes. The main emphasis in this work was to investigate the factors that might affect hydrogen permeation through cathodically protected iron membranes with and without mortar cover. These included the effects of the carbon content of steel, impressed cathodic current density, cathodic electrolyte, and water/cement ratio. Experimental results shows that the hydrogen permeation current density for bare iron membranes immersed in 3.5% NaCl solution increased with

---

\* 國立台灣海洋大學河海工程學系  
Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University

decreasing carbon content and increasing cathodic current density. And the hydrogen permeation current density for the bare iron membranes immersed in a simulated cement pore solution (SPS) with 3.5% NaCl addition was higher than the one immersed in 3.5% NaCl solution. It appeared that the behavior of hydrogen permeation current density for the iron membranes covered with mortar was more complex than that without mortar-covered ones.

Keywords : cathodic current density, hydrogen embrittlement, hydrogen permeation, mortar-covered membranes

## 一、前言

台灣本島四面環海，由於海風所夾帶的含鹽粒子附著於結構物的表面，且地處於亞熱帶與熱帶地區，對於鋼筋混凝土結構物而言，屬於腐蝕性侵蝕的環境，加上國內在防蝕規劃及施工品質控制的不夠落實，造成許多結構物在一、二十年內就出現鋼筋腐蝕甚至外露的現象，此種由鹽害所導致的腐蝕現象，在台灣濱海地區是一普遍存在的嚴重問題。當氯離子侵入混凝土中，破壞鋼筋表面的鈍化層 (passive layer) 而導致鋼筋腐蝕，一般而言，腐蝕反應物增加的體積會比原材體積大2~6倍<sup>(1)</sup>，當混凝土抗張強度無法承受腐蝕反應物所產生的張應力時，使得混凝土出現順筋裂縫，進而加速水、氧氣及有害離子侵入的速度，惡性循環下，結構物表面之混凝土便開始龜裂甚至剝落，影響了結構物的耐久性及安全性。

對於鋼筋腐蝕威脅了結構物的使用年限及安全考量，且鋼筋混凝土腐蝕的維修補強會耗費極大的社會資源<sup>(2)</sup>，各種防範的措施乃因應而生，如：添加腐蝕抑制劑<sup>(3-4)</sup>、提昇混凝土品質<sup>(5-6)</sup>、鋼筋表面塗封緻密之有機材料保護層<sup>(7)</sup>及採用陰極防蝕系統<sup>(8)</sup>等措施。其中陰極防蝕法具有事先防範與事後補救等優點，且其效果明顯可見並符合經濟效益，近年來已成為實用上的鋼筋混凝土結構物防蝕對策。

由於混凝土與生俱有之不均質性，再加上受到外界環境物理及化學侵蝕所造成之不穩定性，在外加電流陰極防護下，可能使得鋼筋表面保護電流分

佈不均勻，而導致局部過保護區域<sup>(9-10)</sup>，或因施加不當的保護電流密度時，亦可能出現過保護的狀態。而氫原子可藉由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，很容易藉由擴散效應進入鋼材結晶格子內，進入之氫原子會在鋼材內部的孔隙、疊層或微裂縫中結合成氫分子，累積於缺陷中形成高壓，且氫原子在擴散過程中亦會造成鋼材晶格間之畸變 (distortion)，均會使鋼筋性質變脆。以往對於施加陰極極化之鋼材在各種不同溶液環境中的氫滲行為雖曾被廣泛地探討<sup>(11-14)</sup>，然而，在混凝土或模擬混凝土環境中有關的氫滲文獻資料卻相當有限，因此有必要進一步深入探討。

本研究係利用電化學氫滲實驗探討鋼材在有無水泥砂漿保護層覆蓋下之氫滲行為，並輔以SEM觀測表面沉積物及量測水泥砂漿之抗壓強度，以瞭解鋼材發生不同程度氫脆化的原因。由於混凝土可視為二相複合材料，即水泥砂漿與粗骨材的組合，其中水泥漿會產生化學反應而形成含有膠結性質的化合物，因此，為簡化粗骨材造成的影響，故採用水泥砂漿為鋼材保護層。

## 二、實驗方法

### 2-1 實驗材料與試體製作

本研究所使用之鋼材試片，係採高碳鋼、中碳鋼及低碳鋼等三種不同含碳量之鋼片，其化學成份

分析如表 1 所示。在鋼片的處理上，首先將材料加工成直徑 1.6 cm（面積為 2cm<sup>2</sup>）、厚度為 1.50 ± 0.04 mm 之圓形試片，試片兩面利用磨平機及碳化矽（SiC）水磨砂紙，由 320 號、600 號、800 號及 1000 號砂紙依序逐一磨平，然後放入丙酮溶液中以超音波振盪五分鐘，取出試片以去離子水沖洗乾淨後，經暖風機烘乾表面，使試片保持乾燥。

對於覆蓋水泥砂漿保護層的試片而言，先將壓克力模粘貼於鋼片的一側，另一側則以 3M 防酸鹼防水膠帶密封之，以避免養護過程中發生腐蝕。然後於模內填裝水泥砂漿，砂漿係使用波特蘭 I 型水泥，砂的細度模數為 3.24，水灰比分別為 0.4、0.5 及 0.6，其配比係以控制在相同標準流度下進行設計，如表 2 所示。拌合時係以砂漿拌合機將各組成材料充分攪拌，待灌注填模後，並加以機械震動搗實 2 分鐘，以減少拌合時所進入之氣泡（entrapped air）及使得混凝土與鋼片界面間更均勻密接，不同水灰比各製作三個試體，保護層厚度均為 2cm。隨後將試體置入已設定蒸養曲線之蒸養箱中，俟蒸養 1 天後取出試體，然後在鋼片另一側（裸露面）鍍上厚約 4000 Å 的銀層，作為氫滲量測的陽極面，其目的在防止試片表面氧化，並可降低實驗時陽極的干擾電流（background current），鍍銀溶液的成份及操作環境如表 3 所示，然而對於無覆蓋水泥砂漿保護層之試片而言，則僅需於其中一側進行鍍銀工作。

## 2-2 氫滲電流之量測

本實驗所採用的電化學氫滲透法係根據 McCright<sup>(15)</sup>所發展之實驗技術而來。實驗裝置是由兩個容積為 3 公升之正方形電解槽、參考電極（飽和甘汞電極）、輔助電極（白金電極）、恆電位電流儀及置於兩電解槽間當作工作電極之試片所構成，如圖 1 所示。

陽極電解槽內之電解液為 0.1N NaOH 溶液；首先利用恆電位儀（potentiostat）施加 +250mV(SCE) 的定電位，並量測電流值，直至電流密度降低至 0.6

μA/cm<sup>2</sup> 以下，且達到穩定狀態。此一過程約需 8~10 小時，以確保鋼材中殘存的氫完全析出，始進行陰極充氫試驗。陰極電解槽內之電解液則為 3.5% NaCl 溶液或根據 Barneyback 等人<sup>(16)</sup>所建議之模擬混凝土孔隙水溶液（simulated concrete pore solution, SPS）含 3.5% NaCl，此溶液之成份係由 0.60 M KOH、0.20 M NaOH 及 0.001 M Ca(OH)<sub>2</sub> 配製而成。實驗時，使該槽外接恆電流儀並施予各種不同定電流，氫由試片陰極側滲入，當氫一到達試片陽極側表面即瞬間被離子化，經由記錄器將陽極極化電流的變化記錄下來，以便求得其穩定氫滲電流密度及滲透速率等數據。兩電解槽內皆需充氮氣以除溶氧，且保持氫滲透試驗在 25 ± 1 °C 的環境中進行。氫滲量測完成後，並以掃描式電子顯微鏡（SEM）觀察鋼片表面所附著之沉積物。

## 2-3 數據分析

電化學滲透法主要是以氫滲電流密度  $i_p$ （hydrogen permeation current density）為測量值，當氫擴散達到穩定狀態時，氫之通量與穩定電流密度之關係可表示如下式：

$$J_{\infty} = \frac{i_p^{\infty}}{nF} \quad (1)$$

式中， $J_{\infty}$  為穩定狀態氫之通量（steady state permeation flux）， $i_p^{\infty}$  為穩態電流密度（steady state permeation current density）， $n$  為電化學反應之原子價數，在此為 1， $F$  為法拉第常數 96500（Coulomb / mole）。此外，氫滲實驗亦可利用滲透速率（permeation rate）來表示穩態氫滲的行為<sup>(17)</sup>，其定義如下式：

$$J_{\infty} L = \frac{i_p^{\infty}}{nF} L \quad (2)$$

其中  $L$  為試片厚度。

### 三、結果與討論

#### 3-1 未覆蓋水泥砂漿層鋼材之氫滲透行為

##### 3-1-1 鋼材含碳量對氫滲透之影響

由於鋼筋混凝土結構物中，鋼材大多屬於低、中碳鋼<sup>(18)</sup>，在材料的選擇上，本試驗主要採用中碳鋼片，並另以低碳鋼及高碳鋼作為對照組，以瞭解鋼材含碳量對氫滲透之影響。由圖2可知，穩定氫滲電流密度會隨著鋼材含碳量增加而降低；表4更顯示出含碳量增加，會降低鋼材的氫滲透速率，此結果與文獻<sup>(19)</sup>利用正常化後之(normalized)低、中碳鋼所得之氫原子在低碳鋼內的滲透速率較大相符合。上述現象表示未覆蓋水泥砂漿保護層之鋼材，其氫滲過程和內部構造組織有密切的關係。一般而言，氫原子對碳鋼的擴散及滲透速率會隨著碳化物的形狀、粗細及含碳量而有所變化。此外，由鋼材之化學成份分析表(如表1)得知，鋼材之含矽(Si)量分別為：高碳鋼(0.28%)、中碳鋼(0.16%)及低碳鋼(0.05%)，雖然三種碳鋼含矽量亦略有差異，但矽在鋼材中是屬固溶體(solid solution)，對氫之滲透擴散影響不若碳含量明顯，此因碳在鋼材達飽和後即以第二相碳化物析出，碳化物對氫之擴散是一種阻礙物(obstacle)，同時碳化物與肥粒鐵間之界面是氫之捕集區(hydrogen trapping site)<sup>(20)</sup>。當碳鋼中含碳量增加時，其波來鐵(pearlite)含量亦增加，而氫滲透速率會下降。因此，含碳量較高之鋼材，較不易產生氫滲透效應。

##### 3-1-2 外加電流密度對氫滲透之影響

未覆蓋水泥砂漿保護層之中碳鋼試片，以3.5% NaCl 溶液為電化學氫滲透試驗之陰極槽電解液，施以不同外加陰極電流密度(375、750、1500 及3000  $\mu A/cm^2$ )，量測所得之氫滲電流密度變化情形，如圖3所示。另根據所得數據，計算各鋼材之氫滲速率，整理如表4所示。由試驗結果發現，氫滲電流密度及氫滲速率會隨著外加陰極電流密度的增加而提高，這是因為在鋼片陰極側所吸附的氫原子量會

隨著外加陰極電流密度的增加而增加，而電化學氫滲透試驗的原理，便是利用固定之外加電流，迫使鋼材表面的氫以擴散效應滲入試片，因此愈大的外加電流密度，將造成愈大的驅動力，使鋼材陽極面有較多的氫原子瞬間被離子化，形成較大的氫滲電流。

圖4為穩定氫滲電流密度( $i_p^\infty$ )與外加電流密度平方根( $i_c^{1/2}$ )的關係圖，圖中虛線係表示氫滲電流密度與外加電流密度的平方根呈線性函數關係，其迴歸方程式為 $i_p^\infty = 0.020 i_c^{1/2} + 0.113$ ；此種線性關係與 El-Sherik<sup>(21)</sup>等學者所做之相關試驗結果亦有相同的行為；然而此線性方程式卻顯示出未加任何電流密度時，也有存在一微小氫滲電流密度的不合理現象，這可能來自於鋼材表面沈積物的影響，鋼材陰極表面沈積物會增加局部的充氫電流密度，而且會形成氫滲的能障(potential barrier)，但是增加局部的充氫電流密度之效應似乎比形成氫滲的能障效應來的更明顯，所以造成線性迴歸線都向上平移。

##### 3-1-3 模擬混凝土孔隙水溶液對氫滲透之影響

為瞭解電化學氫滲透試驗中，陰極槽電解液對鋼材氫滲透之影響，本研究除了採用一般之3.5% NaCl 溶液進行試驗外，另以含3.5%NaCl 之模擬混凝土孔隙水溶液(simulated concrete pore solution, SPS)進行對照試驗。此 SPS 溶液係於1981年，由 Barneyback 等學者<sup>(16)</sup>利用養護數個星期的波特蘭水泥漿體，以壓榨(extracted)技術發現，孔隙水之化學成份主要是由0.60 M KOH + 0.20 M NaOH + 0.001 M Ca(OH)<sub>2</sub>所組成，實驗所得之氫滲透情形如圖5所示，而兩種電解液環境下鋼材之滲透速率整理如表4。由圖5可知，以模擬孔隙水溶液為陰極槽電解液進行氫滲透試驗，其氫滲電流密度遠大於電解液為3.5%NaCl 之氫滲電流密度。一般而言，模擬混凝土孔隙水溶液中含有易解離之正價離子(如鉀離子、鈉離子及鈣離子)，這些離子會因施加陰極電流而在鋼材陰極側產生鈣質沈積物(calcium deposit)

如圖6所示，而這些鈣質沈積物便會造成氫滲透的能障，導致氫滲電流密度會下降。然而，鈣質沈積物亦會使鋼材表面之有效面積降低，使得實際在導電面積上之局部有效面積減少導致局部電流密度增大之效應，其影響遠大於鈣質沈積物阻礙外加電流滲透之效應，故模擬混凝土孔隙水溶液所得之氫滲電流密度會遠大於3.5%NaCl所得之氫滲電流密度。

### 3-2 覆蓋水泥砂漿層鋼材之氫滲透行為

本研究中，採用三種不同水灰比（ $w/c=0.4$ 、 $0.5$  及  $0.6$ ）之普通波特蘭水泥砂漿覆蓋鋼片進行電化學氫滲透試驗，試驗之鋼材係為中碳鋼，水泥砂漿保護層厚度皆為2cm，而外加陰極電流密度皆施以  $1500 \mu A/cm^2$ ，觀測其氫滲電流密度變化之情況，如圖7所示。三種保護層水灰比對鋼材滲透速率之影響，整理如表4。由實驗結果顯示，同樣為普通波特蘭水泥漿體，穩定氫滲電流密度及滲透速率會隨著水灰比的增加而提高，由於水灰比愈高，砂漿內部之孔隙結構愈鬆散；反之，水灰比愈低者，砂漿內部孔隙則愈緻密，緻密的保護層結構組織，將阻礙了外加電流的滲入，因此降低了鋼材陽極側的氫滲電流密度。而不同的水灰比漿體，其蒸汽養護下之抗壓強度與穩定氫滲電流密度關係如圖8所示，由圖中可知抗壓強度與水灰比成反比關係，然而穩定氫滲電流密度是與水灰比成接近線性正比關係。一般而言，水泥漿體的緻密性，亦可由其抗壓強度來加以詮釋，水灰比較低者，由於其內部的連通孔隙越少會有較緻密的結構組織，因此其抗壓強度較高，故而導致氫滲電流密度則較低。

此外，以圖5中模擬混凝土孔隙水溶液之試片與圖7中水泥砂漿覆蓋之試片相比較，可發現三種不同水灰比保護層之試片其穩定氫滲透電流密度均低於無保護層者，其原因為有砂漿保護者會因水泥水化後的高鹼性環境而形成一鈍態氧化膜，相對地，雖然模擬混凝土孔隙水溶液亦為高鹼性環境（ $pH=13.8$ ），然係因直接與3.5%NaCl相接觸，造成

Cl<sup>-</sup>會破壞鈍態保護膜，除此之外，有砂漿保護之試片，其氫原子的傳輸路徑是藉由砂漿內部的連通孔隙，相較於無保護層者，其氫原子吸附的有效面積會減少。

至於保護層厚度對氫滲透行為之影響，依據El-Sherik 等人<sup>(21)</sup>之研究指出，當保護層厚度在2 mm ~ 10 mm 之間時，由於氫分壓效應致使鋼片的氫滲速率隨保護層厚度的增加而提高。在本研究中亦發現，氫滲實驗完畢後，鋼片與混凝土保護層會有脫離（debondment）現象發生，且在鋼片陰極側發現有白色豐富的鈣質沉積物。界面處的脫離現象是因為有效斷面積減少下局部的高陰極電流會增加氫的產生，部份的氫原子會結合成氫分子，因此在界面處形成氫分壓，當分壓逐漸增大時，脫離現象便會產生。

## 四、結論

1. 穩定氫滲電流密度會隨著鋼材含碳量的增加而降低，這主要與其內部結構有關；當碳含量愈高時，由於碳化物的阻礙效應，導致氫原子的滲透速率降低。
2. 未覆蓋水泥砂漿之鋼材試片，其氫滲電流密度會隨著所施以的外加陰極電流密度增加而提高，較高的外加陰極防蝕電流密度，雖可達到防蝕效果，然而將會導致較嚴重的氫脆問題。模擬混凝土孔隙水溶液（SPS）在施以外加電流後，會在鋼材表面形成鈣質沈積物，此沈積物雖使得氫吸附的有效面積減少，但卻因實際在導電面積上之局部電流密度被放大，反倒使氫滲電流密度提高。
3. 水泥砂漿保護層的水灰比降低，其砂漿孔隙較為緻密，造成電流滲入的能障，使得氫滲電流密度較低；且緻密的孔隙，提供了較高的抗壓強度。在保護層厚度2cm的範圍內，有砂漿保護層覆蓋之試片，其氫滲速率低於無保護層者。

## 五、誌謝

本研究感謝行政院國家科學委員會提供部份經費補助 (NSC 89-2211-E-019-017)，使其得以順利完成，同時對吳建國教授對本研究構思之啟發，在此一併致謝。

## 六、參考文獻

1. P.K. Mehta, Concrete: Structure, Properties and Materials, Prentice- Hall Inc., 1986.
2. 陳君弢，國立台灣海洋大學河海工程學系碩士論文，基隆，1999年。
3. C.A. Loto : Corrosion, 48(1992)759.
4. W.D. Collins, and R.E. Weyers : Corrosion, 49 (1993) 74.
5. J. Cook : Concrete International, Design and Construction, 4(1982)72.
6. 陳振川，高性能混凝土研發與推動現況，營建新知，159(1996)25.
7. R.A. Treece, and J.O. Jirsa : ACI Materials Journal, 86(1989)167.
8. 李枝河、吳致毅，鋼筋混凝土結構物之陰極防蝕系統，立偉防蝕工程公司講稿，1999年。
9. B.S. Wyatt, and D.J. Irvine : Materials Performance, 26(1987)12.
10. J.A. Lehmann : Materials Performance, 26(1987)79.
11. T. Zakroczymski, and Z.S. Smialowska : J. Electrochem. Soc., 132(1985)2548.
12. K.A. Lucas, and M.J. Robinson : Corrosion Science, 26(1986)705.
13. R.B. Hamzah, and M.J. Robinson : Corrosion Science, 27(1987)971.
14. J.R. Scully, and P.J. Moran : J. Electrochem. Soc., 135(1988)1337.
15. R.D. McCright, Ph. D Thesis, The Ohio State University, Columbus, OH, 1971.
16. R.S. Barneyback, and J.S. Diamond : Cement and Concrete Research, 11(1981)279.
17. C.C. Juang, and J.K. Wu : Corros. Sci., 36(1994)1727.
18. 王堯雄譯，營造材料學，科技圖書股份有限公司，1998年。
19. 魯萬鈞，國立台灣海洋大學材料工程研究所碩士論文，基隆，1995年。
20. G.M. Pressouyre : Metall. Trans., 10A(1979)1571.
21. A.M. El-Sherik, and M. Shirkhanzadeh : Corrosion, 48(1992)1001.

表 1 鋼材試片之化學成份分析表 (wt%)

Table 1 Chemical compositions of steel membrane (wt%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Fe
高碳鋼	0.97	0.28	0.42	0.04	0.05	Balance
中碳鋼	0.45	0.16	0.72	0.04	0.05	Balance
低碳鋼	0.18	0.05	0.45	0.04	0.05	Balance

表 2 水泥砂漿保護層配比

Table 2 Mix designs for mortar cover

水灰比(w/c)	水( kg/m <sup>3</sup> )	水泥( kg/m <sup>3</sup> )	細骨材( kg/m <sup>3</sup> )
0.4	326	816	1119
0.5	293	586	1405
0.6	286	476	1520

表 3 Watt浴法電鍍鎳之溶液成份及操作環境

Table 3 The composition of electrolyte and operation conditions for the Watt bath method

硫酸鎳(NiSO <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O)	240 g/l	浴溫	45~60°C
氯化鎳(NiCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O)	45 g/l	攪拌	需要
硼酸(H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub> )	30 g/l	浴壓	6~12 Volts
pH值	4.5~5.5	電流密度	20~60 mA/cm <sup>2</sup>

表 4 鋼材在各種不同條件下之氫滲速率值

Table 4 Hydrogen permeation rates of steel membranes under various conditions

變數	範圍			
	低碳鋼	中碳鋼	高碳鋼	
滲透速率 $J_{\infty} L$ (mole[H] × m <sup>-1</sup> × sec <sup>-1</sup> )	1.71 × 10 <sup>-10</sup>	1.46 × 10 <sup>-10</sup>	1.15 × 10 <sup>-10</sup>	
外加陰極電流密度 $i$ (μA/cm <sup>2</sup> )	375	750	1500	3000
滲透速率 $J_{\infty} L$ (mole[H] × m <sup>-1</sup> × sec <sup>-1</sup> )	7.46 × 10 <sup>-11</sup>	9.64 × 10 <sup>-11</sup>	1.46 × 10 <sup>-10</sup>	1.79 × 10 <sup>-10</sup>
陰極槽電解液	3.5% NaCl		含3.5% NaCl之模擬 混凝土孔隙水溶液	
滲透速率 $J_{\infty} L$ (mole[H] × m <sup>-1</sup> × sec <sup>-1</sup> )	1.46 × 10 <sup>-10</sup>		3.34 × 10 <sup>-10</sup>	
水泥砂漿水灰比 w/c ratio	0.4	0.5	0.6	
滲透速率 $J_{\infty} L$ (mole[H] × m <sup>-1</sup> × sec <sup>-1</sup> )	8.39 × 10 <sup>-11</sup>	1.24 × 10 <sup>-10</sup>	1.79 × 10 <sup>-10</sup>	

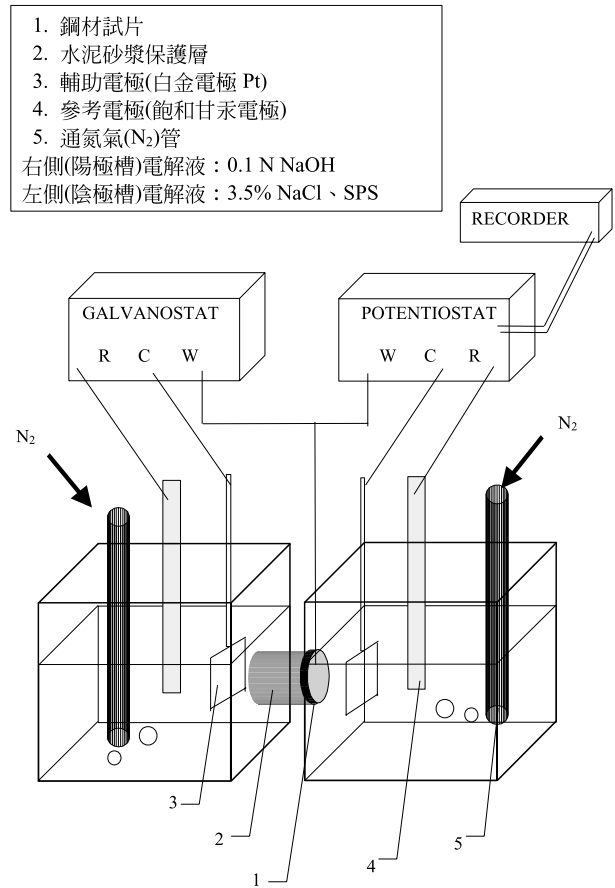


圖 1 電化學氫滲透試驗裝置圖

Fig 1. Experimental setup of electrochemical hydrogen permeation test

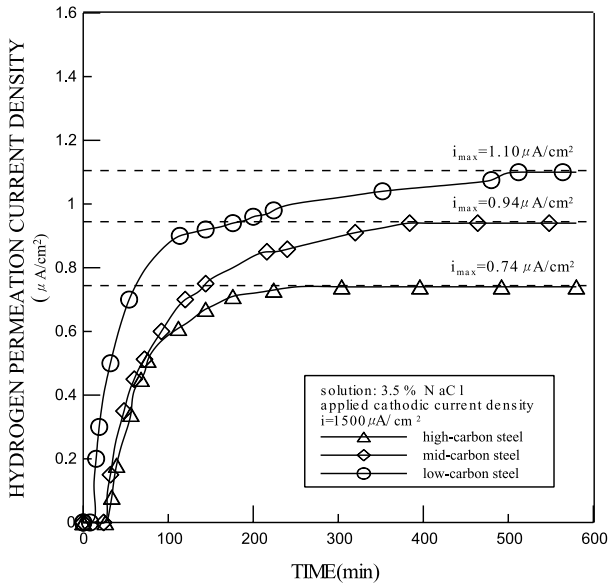


圖 2 鋼材含碳量對氫滲過程之影響  
Fig. 2 The influence of carbon content in steel on the hydrogen permeation current

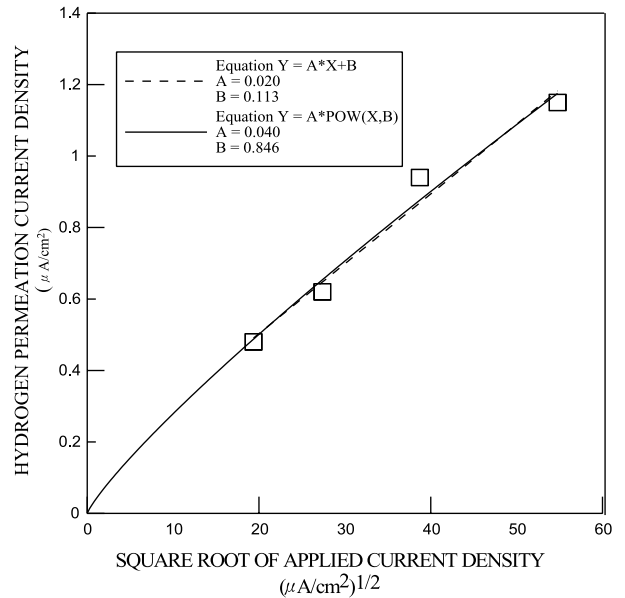


圖 4 穩定氫滲透電流密度與外加陰極電流密度平方根關係  
Fig. 4 Permeation current density versus the square root of charging current density

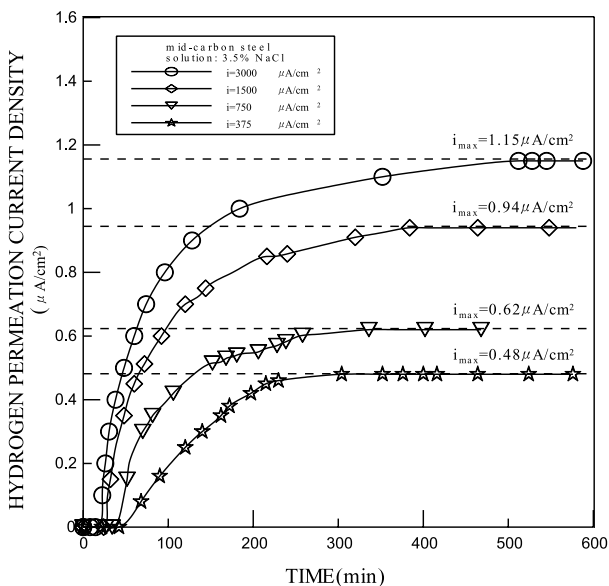


圖 3 外加陰極電流密度對氫滲過程之影響  
Fig. 3 The influence of applied cathodic current density on the hydrogen permeation current

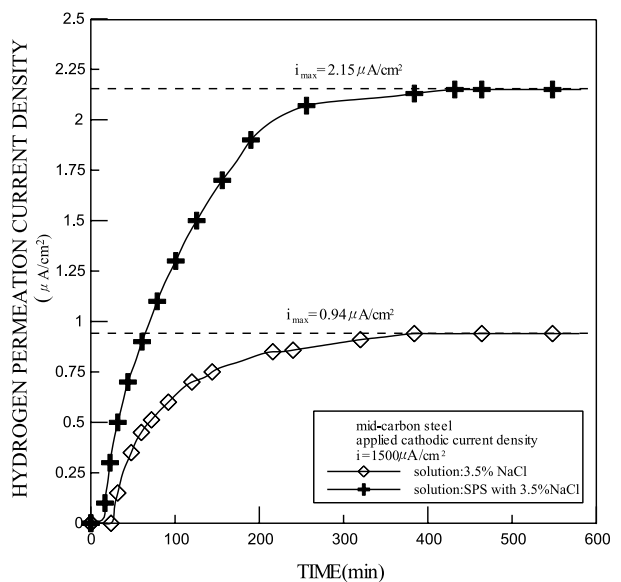


圖 5 陰極槽電解液對氫滲過程之影響  
Fig. 5 Effect of different electrolyte on the hydrogen permeation current



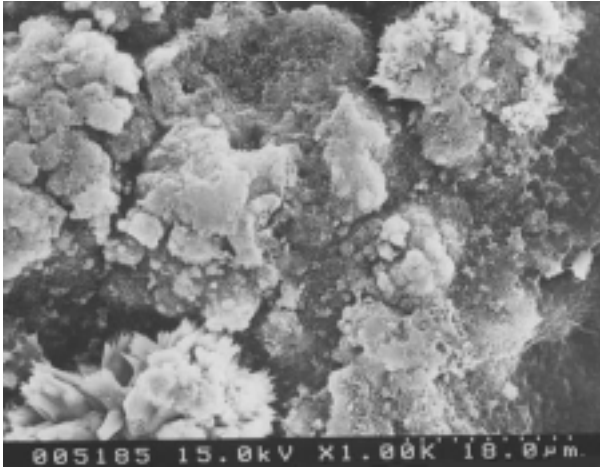


圖 6 鋼材表面的鈣質沉積物微觀圖  
Fig. 6 SEM of the interface calcium deposit on steel

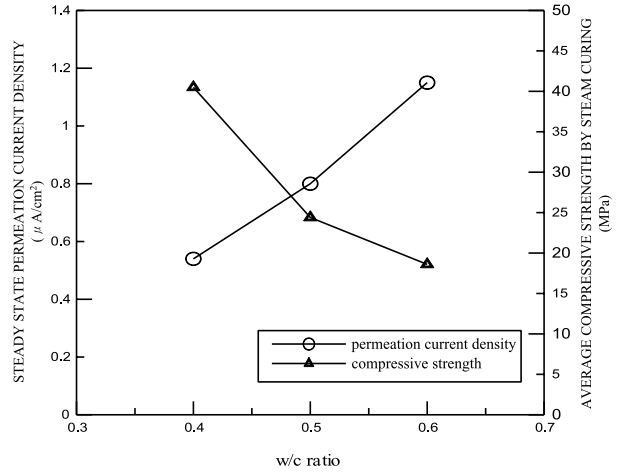


圖 8 不同水灰比漿體之抗壓強度與氫滲電流密度關係圖

Fig. 8 Compressive strengths and hydrogen permeation current densities for mortar with different w/c ratios

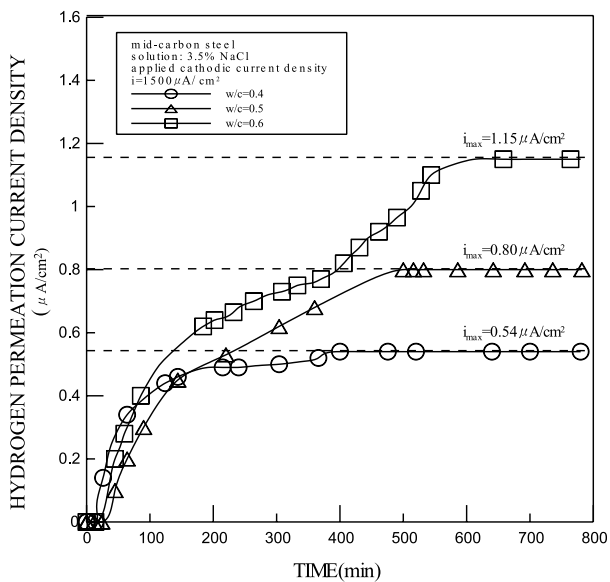


圖 7 水泥砂漿水灰比對氫滲過程之影響  
Fig. 7 The effect of w/c ratio of mortar on the hydrogen permeation current

