

鋼筋混凝土樑構件腐蝕後力學行爲之研究

楊仲家*、黃 然**、葉爲忠**、卓益揚*

A Study on the Mechanical Behavior of Corroded Concrete Beam

C.C. Yang*, R. Huang**, W. Yeih**, Y.Y. Jwo*

摘 要

本研究針對不同的混凝土梁試體，探討其腐蝕後之力學行爲。試驗變數包括水灰比及開裂程度。研究結果顯示有裂縫存在或水灰比較高之梁試體，由於混凝土水密性較差，容易造成外界氯離子侵入，使得鋼筋發生腐蝕之機率較高；且當混凝土梁腐蝕後，梁之極限荷重有下降之趨勢。

關鍵詞：混凝土梁，直流極化法，開路電位法，腐蝕厚度，極限承載。

ABSTRACT

In this paper, reinforced concrete beams with different water/cement ratios and defects were used to study corrosion of the effect on the beam behavior. Test results show that concrete beams with crack or concrete with a higher water/cement ratio have larger possibility of steel corrosion because of chloride ions penetration. The results also show that the rebar corrosion may significantly reduce the loading capacity of RC beams.

Key words: concrete beam, DC polarization, OCP, corrosion thickness, ultimate load.

一、前言

構件斷面積減小，會減低構件之勁度，使得結構物使用性降低。一般工程師於設計鋼筋混凝土結構物時，大都只要求材料或構件之強度，結構物之耐蝕性則較少考慮；。然而即使結構物在未達使用年限前便已損壞甚至倒塌的例子在世界

各國時有所聞。對於一些臨海都市而言，濱海結構物或海中結構物的興建是不可避免之趨勢，而濱海地區的腐蝕問題嚴重，所以混凝土耐蝕性就成爲結構設計時不得不考量之重要因素。

鋼筋由於混凝土提供高鹼性環境 ($\text{pH} = 12.5 \sim 13.6$)，在鋼筋之表面會形成一層 Fe_2O_3 的鈍態保護膜 (passive film)，將鋼筋和外界環境隔離；

*國立台灣海洋大學材料工程研究所

*Institute of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University

**國立台灣海洋大學河海工程研究所

**Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University

所以只要此層不被破壞，則可避免鋼筋受到腐蝕。但當混凝土滲透性很高或或混凝土有裂縫存在時，有害物質：如 O_2 、 H_2O 、 Cl^- 、 CO_2 等，可經由最短之路徑直接侵入混凝土中，破壞鋼筋表面鈍態保護膜，使其氧化物轉換為 $Fe(OH)_2$ ，造成鋼筋腐蝕。在鋼筋表面生成鐵銹，而鐵銹的體積可膨脹至6倍左右，並因而導致鋼筋周圍混凝土產生應力，當張應力超過混凝土張力強度時，就會使得原先裂縫成長並擴大，此將更利於腐蝕因子之侵入，造成鋼筋腐蝕。

一旦鋼筋遭受腐蝕後，不僅鋼筋有效斷面積將因鐵鏽生成而減少，使得力學性質降低，並且鐵鏽生成導致混凝土開裂，亦將使得混凝土有效斷面積減小，進而降低構件之勁度，縮短結構物使用年限。

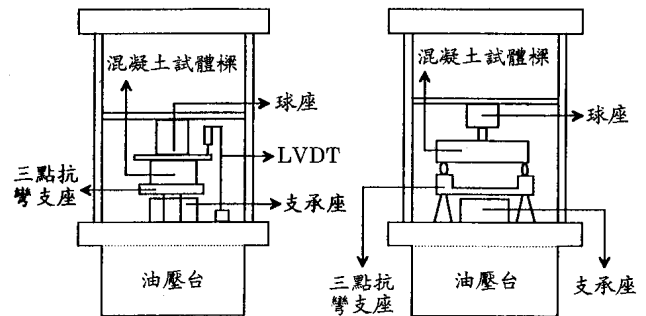
二、實驗過程

造成鋼筋或預力混凝土結構物之腐蝕的因素很多，本研究僅針對不同的鋼筋混凝土梁試體，於加速腐蝕環境下，探討混凝土內鋼筋腐蝕的程度，及其腐蝕後混凝土梁試體力學行為的變化。

(一) 配比與試體

混凝土之配比設計及試體編號如表一所示，水泥採第一型波特蘭水泥。在表一中試體編號以兩個字元代表不同變數之試體，第一個字元表示拌合時之水灰比，其中A代表水灰比等於0.4之混凝土材料，B代表水灰比等於0.3之混凝土材料，第二個字元表示有無梁試體張力面預埋裂縫，S代表完整梁試體，K代表有預埋2cm深，1mm寬裂縫之梁試體。共四組鋼筋混凝土梁試體，每組試體共灌置8根，試體尺寸採長×寬×高分別為50cm×15cm×15cm，並於試體下方設置四號鋼筋（詳如圖二所示），試體灌置後24小時拆模，並將試體置於水中28天後，才開始進行實驗。

(二) 梁載重試驗



圖一 梁試驗示意圖

Fig. 1 Beam test configuratuon

當每組梁試體在灌置完成並養護28天後，立即進行載重試驗以求得未腐蝕前之極限承載及變位，並利用電化學方法量測其腐蝕電位及腐蝕速率，以便作為控制組，爾後將其餘試體浸泡於3.5%之NaCl溶液中，以外加電流加速腐蝕，而後當每個試體有銹水滲出或有新裂縫產生時，以電化學方法（AC method, DC mehod, OCP method 及 Half-Cell Potential method）量測其腐蝕訊號，完成後施以三點載重試驗。如圖一所示。

在表一中試體編號以兩個字元代表不同變數之試體，第一個字元表示拌合時之水灰比，其中A代表水灰比等於0.4之混凝土材料，B代表水灰比等於0.3之混凝土材料，第二個字元表示有無梁試體張力面預埋裂縫，S代表完整梁試體，K代表有預埋2cm深，1mm寬裂縫之梁試體。共四組鋼筋混凝土梁試體，每組試體共灌置8根，試體尺寸採長×寬×高分別為50cm×15cm×15cm，並於試體下方設置四號鋼筋之單排筋（詳如圖二所示），試體灌置後24小時拆模，並將試體置於水中28天後，才開始進行實驗。

(三) 腐蝕量測方法

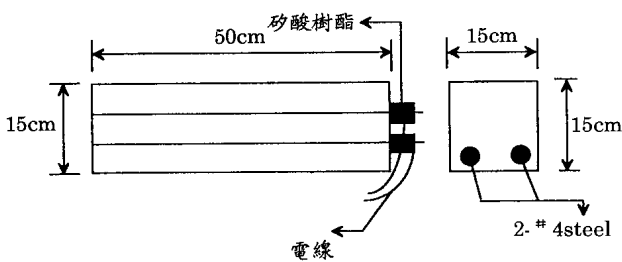
(1) 開路電位法

由於鋼筋腐蝕反應在鋼筋表面並不是很均勻

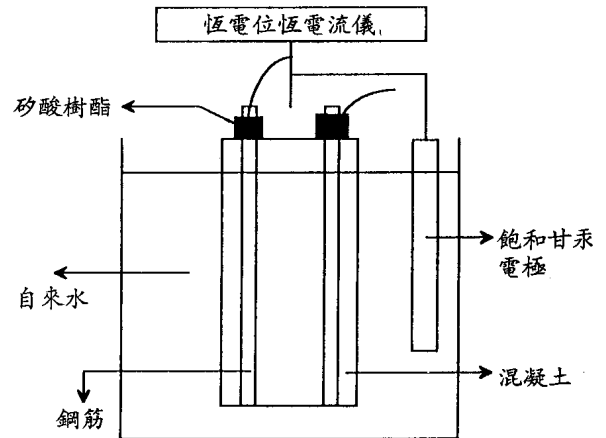
表一 試驗混凝土之配比設計
Table 1 Concrete mix proportions.

單位：kgf/m³

試體編號	水灰比	水	水泥	細骨材	粗骨材	強塑劑
AS	0.4	180	450	733	1,011	4.95
AK	0.4	180	450	733	1,011	4.95
BS	0.3	156	520	738	1,011	8.84
BK	0.3	156	520	738	1,011	8.84



圖二 梁試體
Fig. 2 Beam specimen



圖三 開路電位法量測裝置圖
Fig. 3 The open circuit potential measurement

的產生，亦即腐蝕的發生是很隨機的，只要陽極反應（腐蝕區域）及陰極反應（未腐蝕區域）分別在金屬表面不同微小區域進行時，便形成腐蝕微電池。開路電位法(Open circuit method, OCP)在於量測當鋼筋無外電流與之相通時，這些腐蝕微電池與參考電極間全面的電位差稱腐蝕電位。雖然開路電位法並無法將整個腐蝕系統的特性定量化，但是可以將試驗所得資料用統計的方法，大致的評估鋼筋發生腐蝕的機率。其量測裝置如圖三所示。以飽和甘汞電極(SCE)為參考電極(RE)鋼筋為工作電極(WE)，接於銹電位電流儀上即可得知鋼筋腐蝕電位。如圖三所示。

(2)交流阻抗法

乃是利用將一極小的交流電流輸入此腐蝕系統中，然後再借助電路解析的技巧，在一個極寬的交流訊號頻率內($1.0 \times 10^6 \times \text{Hz} - 1.0 \times 10^{-3} \text{Hz}$)，測定不同頻率時此腐蝕系統之阻抗值，進而分解求出系統中鋼筋之阻抗值(R_p)，爾後即可求得

鋼筋之腐蝕速率。其量測方法如圖四所示，將在直流極化法中所使用之參考電極(RE)，輔助電極(CE)，工作電極(WE)，與阻抗增益相位分析儀及恆電位電流儀之組合系統相連接，並且利用電路解析之應用軟體(Zplot)，即可分解求出系統中鋼筋的阻抗值(R_p)。如圖四所示。

(3)直流極化法

由於鋼筋在自由的腐蝕狀態下，電流的流動情形若由整體而言並沒有淨電荷(net charge)的轉移，所以對於鋼筋混凝土這個腐蝕系統而言，必須由外界輸入一個訊號使其擾動，然而再量測這個系統平衡時所產生之反應，由於外加過電位之差值在腐蝕電位的 $\pm 10\text{mv}$ 之間時，電流和電位會呈現一個線性關係，所以直流極化法乃是利用此系統中外加一個微小的過電壓加以掃描，然後

再將電壓對電流作圖，而此關係圖上的斜率即所為謂的極化阻抗值 (polarization resistance)。如圖五所示。

$$R_p = \Delta E / \Delta i$$

R_p : 極化電阻 (ohm-cm²)

ΔE : 電位差 (V)

Δi : 電流密度差 (A/cm²)

$$i_{corr} = [\beta_a \beta_b / 2.303 / (\beta_a + \beta_b)] \times \Delta i / \Delta E = B / R_p \quad (1)$$

i_{corr} : 腐蝕電流密度

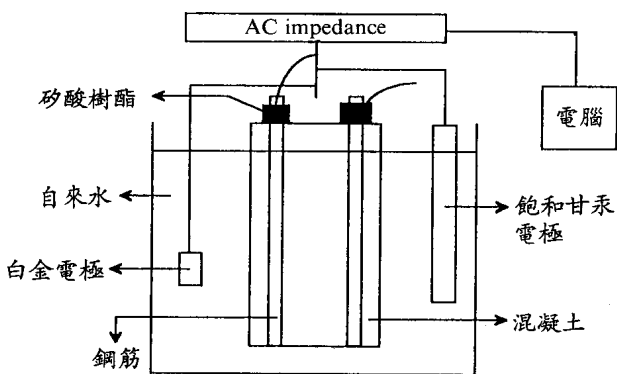
β_a : 陽極極化曲線斜率

β_b : 陰極極化曲線斜率

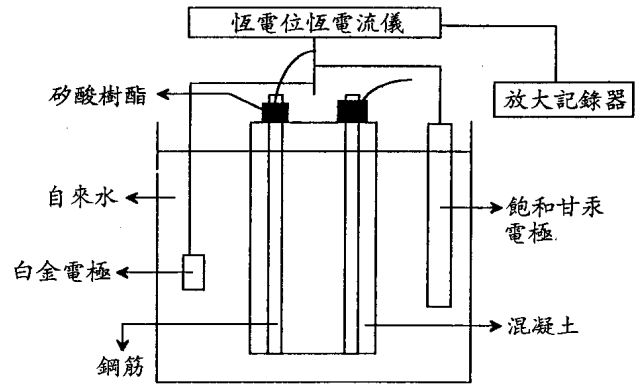
(4) 半電池電位量測法

此法具有儀器輕巧，容易操作，量測範圍寬，且適用於任何天氣條件之優點，為一簡便之量測法。是利用一個穩定之電化學參考電極，去量測腐蝕反應發生時陽極和陰極之反應電位差，由於使用之參考電極具有穩定之電位值並不受環境影響，所以當電位改變時，均是由於鋼筋腐蝕之電位變化。可根據此電位之變化判斷在參考半電池附近鋼筋實際之腐蝕情形。如圖六所示。

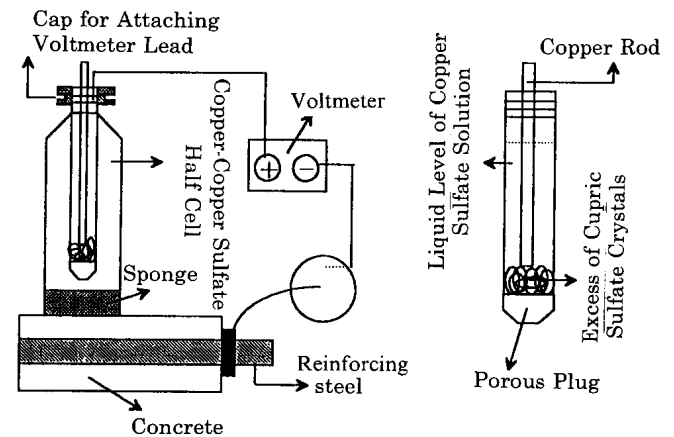
ASTM C876-91建議，當混凝土中鋼筋的半



圖四 交流阻抗法量測裝置示意圖
Fig. 4 The AC impedance measurement



圖五 直流極化法量測裝置示意圖
Fig. 5 The DC impedance measurement

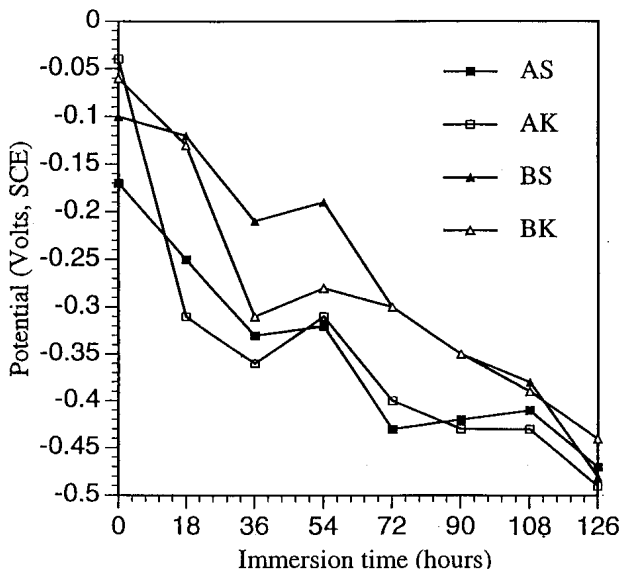


圖六 半電池電位法量測裝置示意圖
Fig. 6 The half-cell potential measurement

電池電位值大於 -200mV ， Cu/CuSO_4 (-120mV , SCE) 時，發生腐蝕之機率低於 10%，而當開路電位值在 $-200\text{mV} \sim -350\text{mV}$ ， Cu/CuSO_4 ($-120\text{mV} \sim -270\text{mV}$, SCE) 之間時，則無法判斷其腐蝕的機率，而開路電位值小於 -350mV ， Cu/CuSO_4 (-270mV , SCE) 時，腐蝕發生之機率便高於 90%。

三、結果與討論

圖七為梁試體在每隔 18 小時外加電流加速腐蝕共 126 小時，以開路電位法量測所得之鋼筋腐蝕電位值。由圖七中可發現，在浸泡初始階段水

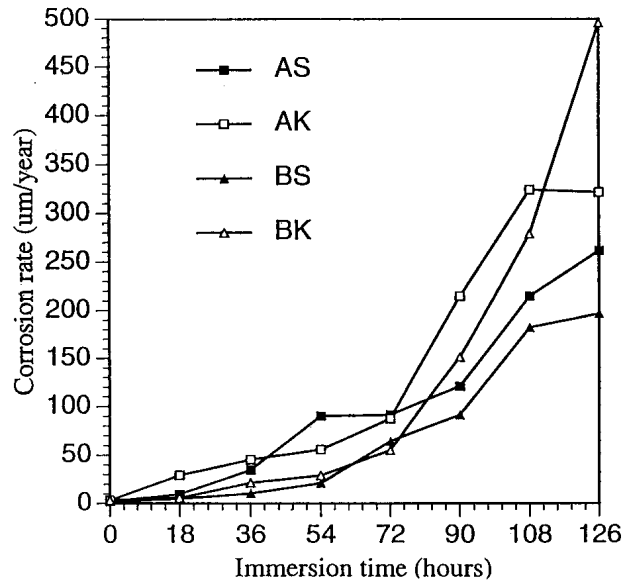


圖七 梁試體之腐蝕電位圖
Fig. 7 The potential vs. immersion time diagram

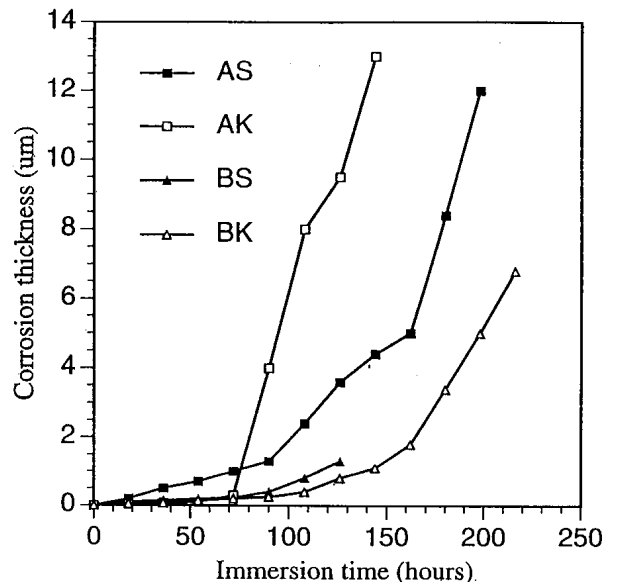
灰比0.3的梁試體其開路電位之絕對值均比水灰比0.4的梁試體來的小，亦即發生腐蝕的機率較低，然而當加速至108小時後的水灰比與開路電位間便不在有任何關係，呈現雜亂跳動之情形，這乃是因為對於完整的混凝土梁試體而言，人造海水中之氯離子必須靠滲透方式才能穿過鋼筋表面混凝土，到達鋼筋表面腐蝕鋼筋，而水灰比0.3的混凝土由於其孔隙較少，混凝土的水密性較高，造成氯離子穿透的困難度較高，所以相對腐蝕發生機率較低。

然而在加速腐蝕108小時後混凝土因鐵銹生成開裂，氯離子不再選擇困難重重的滲透方式，而是較短路徑的裂縫長驅直入，所以此時決定腐蝕機率的因素就不在是水灰比，而是裂縫的寬度，深度及數目了，因而使得其開路電位之絕對值呈現不規則之跳動。固在開始腐蝕之初始階段內水灰比仍然有其作用，但在混凝土因鐵銹而開裂後，水灰比便不是最重要之影響因素了。

由圖七中也可發現，對於相同水灰比之完好梁試體而言，有預設裂縫的試體其電位下降的速度均較完整的試體來得快，可見保護層厚度越薄



圖八 梁試體之腐蝕速率圖
Fig. 8 The corrosion rate vs. immersion time diagram



圖九 梁試體之腐蝕厚度圖
Fig. 9 Corrosion thickness vs. immersion time diagram

之混凝土，氯離子穿透所須的時間也越短，因而使得鋼筋在較短的時間內發生腐蝕的機率也較高。

經由交流阻抗法並藉由電路解析技巧分解求出鋼筋阻抗值再代入 1 式 2 式後，所得之鋼筋腐蝕速率，如圖九所示。由圖九可以觀察得知，

AS組梁試體大約在加速腐蝕90小時後，腐蝕速率快速上升，而BS組梁試體則必須等到加速腐蝕108小時後，腐蝕速率才有急速上升的變化，在此之前，此兩組梁試體的腐蝕速率差距不大。

上述情形之原因，在於開始加速腐蝕的前幾個小時內，由於水灰比高低之不同，導致混凝土在緻密性上的差異，而造成腐蝕速率上些微之差距。而當混凝土出現微裂縫後，氯離子便可透過微裂縫進入混凝土內腐蝕鋼筋，因而使得腐蝕速率在瞬間急速上升，而水灰比之高低不同也間接的影響混凝土微裂縫出現的時間，所以才使得腐蝕速率急速上升的時間而有所不同。

而在加速腐蝕108小時之後，腐蝕速率彼此間出現高低起伏之不規則變化，主要在於表面腐蝕膨脹裂縫之生成，使得混凝土品質的高低不再是影響鋼筋腐蝕速率快慢之主因。

AK及BK此兩組梁試體，腐蝕速率急速上升之時間較AS及BS兩組梁試體為早，AK及BK組梁試體大約都在加速腐蝕72小時後腐蝕速率便及速上升，這乃是由於AK及BK組梁試體保護層厚度為0.5cm，而AS及BS兩組梁試體保護層厚度為2cm，顯示保護層厚度越薄之混凝土，將使得氯離子在穿透混凝土，進而造成鋼筋腐蝕時，所須時間越短。

保護層厚度對於腐蝕速率造成之影響，也可由圖八觀察知，在加速腐蝕之早期，完整試體和有裂縫試體之腐蝕速率，雖然有預裂的試體，由於保護層厚度較薄使其腐蝕速慮有較快之趨勢，然而其中之差異並不明顯，但是由圖中可以發現，保護層厚度越薄之試體，由於混凝土滲透時間所須較短之緣故，使得腐蝕速率急速上升之時間較完整試體提前，而一旦生成腐蝕裂縫之後，保護層所造成之影響便不再明顯。

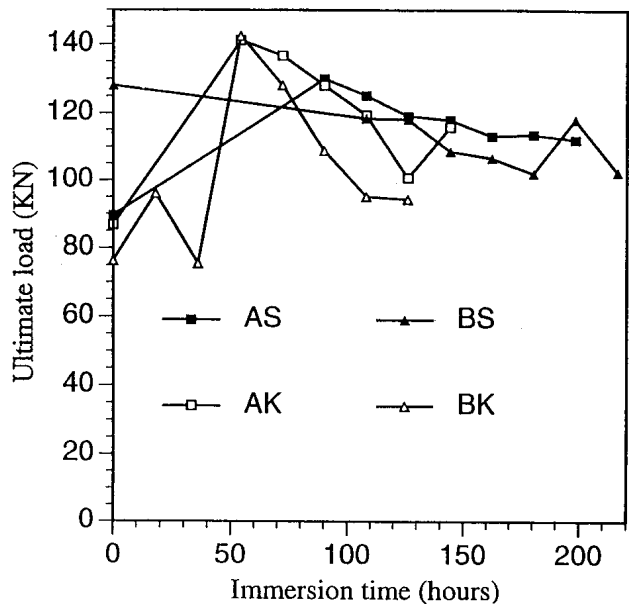
將圖八依每18小時之時間間隔，計算曲線下方之面積，然後再累加起來，便可得到經果過每18小時加速腐蝕後，鋼筋表面之腐蝕生成物厚

度，然後再將其對加速腐蝕時間作圖即可得到加速腐蝕時間與腐蝕生成物厚度之關係圖，如圖九所示。由此圖中可發現，隨著加速腐蝕時間增加，腐蝕生成的厚度將越厚，此結果較腐蝕速率所得結果符合真實腐蝕情形。

由圖九也可觀察得知，有預裂之梁試體其腐蝕生成物成長速度較完整梁試體快且高，這個結果和先前在腐蝕電位，腐蝕速率的研究中所得之結果類似，因為其亦係肇因於氯離子之侵入。

當氯離子越容易侵入時，腐蝕電位值將越趨活性，腐蝕速率也將越快，所以腐蝕生成物之成長也越快且越厚，此外必須注意的是，當腐蝕生成物成長的速度越快且越厚時，表示混凝土也將越早承受鐵銹膨脹所產生之張應力，並且其所產生之張應力也將越大，而鋼筋斷面積減小之速度也越快，這點對於力學行為的說明將有很重要的意義。

四組梁試體載重試驗施作完成後，其結果如圖十所示，對於腐蝕後單排筋混凝土梁試驗力學



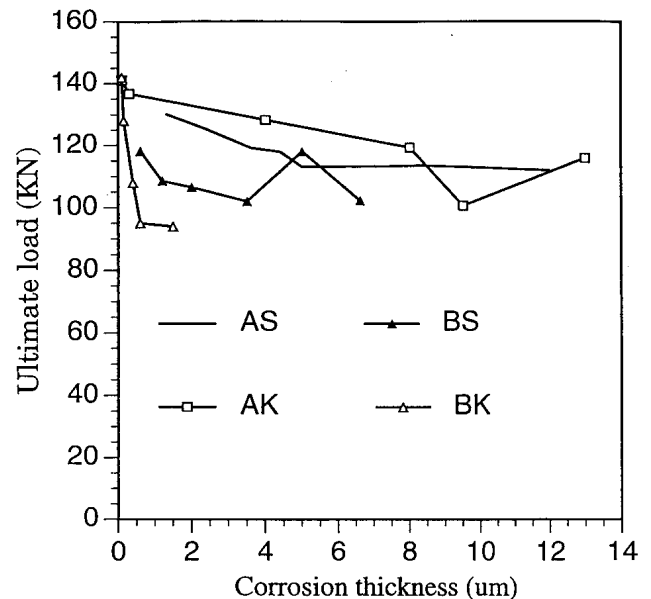
圖十 浸泡時間與極限承載關係圖

Fig. 10 The relationship between immersion time and ultimate load

行為的探討，便是經由判斷其中極限承載的變化情形，以便瞭解其力學行為下降程度，其中對於勁度的求法為，計算在試驗所得之荷重—撓度曲線中，荷重未達極限承載前曲線之斜率值，其意義為使該混凝土梁產生單位位移所須之力。圖十為此四組單排筋梁試體極限承載變化之相互比較圖。圖中顯示，當鋼筋腐蝕程度越來越嚴重時，各組梁試體破壞前之極限荷重也逐漸降低。大致上，其變化和加速腐蝕時間呈現一負斜率之關係。隨著加速腐蝕時間的進行，各組極限承載下降之幅度，由比較得知，AK，BK 試體其斜率之絕對值均分別較AS，BS試體大，由此可知，有預裂縫之單排筋梁試體其極限承載下降之速度較完整之試體為快。圖十中顯示，有預裂縫之單排筋梁試體其下降之幅度較完整之梁試體為快。這可能是由於：(i)有預裂縫之試體由於保護層較薄，使其腐蝕反應發生之速度也較快而當鋼筋因不同腐蝕程度而使其力學行為降低時，將會造成混凝土量載重能力之折減，(ii)有預裂縫之試體，由於鋼筋容易腐蝕的原因，造成混凝土較易因鋼筋之腐蝕而產生膨脹破裂，一旦混凝土產生裂縫後，其抵抗外力之有效面積也減小，所以使得其極限承載下降之速度也較快。

當鋼筋腐蝕的越嚴重時，鋼筋之有效斷面積將因鐵銹之生成而減小，並且鋼筋混凝土間之鍵結力也會降低，因而導致整個單排筋混凝土梁斷面抗彎強度下降。有預裂縫之試體容易因腐蝕產生裂縫，而當混凝土有裂縫產生時，將使得其中性軸向上移動，造成斷面之彎矩慣性值急速下降。而鋼筋受侵蝕後斷面積縮小，也將使得其所承受之應力值急速上升，導致撓度和裂縫之增加，因而造成其抗彎強度下降的幅度較完整之試體為快。

圖十一為此四組單排筋梁試體加速腐蝕後，經由抗彎試驗所得之極限承載與腐蝕生成物厚度之關係圖。由圖中可發現極限承載與腐蝕生成物



圖十一 梁試體腐蝕厚度與極限承載關係圖

Fig. 11 The relationship between corrosion thickness and ultimate load

厚度是呈一負斜率關係。圖中顯示若能計算出試體中鋼筋腐蝕生成物厚度，便可大略推算出其力學性質折減後之強度值。

四、結 論

本研究探討混凝土單排筋梁試體，在不同試驗條件下的腐蝕行為，及其腐蝕後力學行為折減之情形。由前述結果與討論可得下列之結論。

1. 經由試驗發現，強度低或有裂縫存在之試體，由於混凝土中孔隙較多，水密性差，使得其發生腐蝕的機率，較完整梁試體為大。
2. 由於腐蝕電位之量測，只能提供當時腐蝕進行之程度，若須了解真正的腐蝕情形時，以腐蝕速率及腐蝕生成物厚度判別較佳。
3. 當混凝土結構物內鋼材發生腐蝕時，由於鐵銹之生成，造成鋼筋斷面積減小，混凝土膨脹開裂，或鋼筋和混凝土握裹降低，均會使得混凝土構件力學行為發生折減，而有裂縫存在及水

灰比較高之梁試體，由於其遭受腐蝕的機率也較高，導致其承載力下降的速度也較快。

4. 雖然有裂縫存在之梁試體，均容易由於腐蝕因子之侵入而造成鋼筋的腐蝕，使得其力學行為下降的速度較完整梁試體為快，但是由於水灰比較低之試體其內部孔隙較少也較小，使得在載重試驗時抵抗裂縫成長之消能機構—混凝土中之孔隙也較少，因而造成裂縫成長不受限制，因此在載重試驗時其承載力下降幅度也較大。

誌謝

感謝研究期間張正忠先生的協助及NSC 85-2211-E-019-002計劃之贊助。

參考文獻

1. 吳建國，黃然，葉為忠，楊仲家，張建智，「混凝土橋樑鹽分腐蝕之研究」，交通部臺灣區國道興建工程局（1994年12月）。
2. 林維民，「鋼筋混凝土腐蝕」，防蝕工程，第二卷，第一期，(1988)。
3. 林維民，「鋼筋混凝土腐蝕損壞診斷與修護方法檢討」，防蝕工程，第二卷，第一期，(1988)。
4. J.R. Clifton; ACI Material J, 90(1993)611.
5. B. Daksh, R. Harold, S. Vute; Cement and Concrete Research, 1(1993)1418.
6. D.A. Hauamann; Materials Protection, 6(1967)19.
7. ACI Committee 224; ACI201. 2R-92, (1962).
8. ASTM C876-91; Standard Test Method For Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, (1991).