

添加爐石及鋼纖維對改善鋼筋混凝土劣化效益之研究

鄭棟元*

The Improvement of Degradation by Adding Slag and Steel Fiber in Reinforced Concrete

Teng-Yuan Tseng*

摘 要

常態下鋼筋混凝土是一種相當耐久的材料，但也很容易受到外在環境影響產生劣化，進而縮短其服務壽命，為此本研究設計 0.4 強度水膠比之混凝土，並於混凝土中添加爐石、鋼纖維等不同摻料於混凝土中，經養護 28 天完成後，浸泡人工海水 70 天與反覆載重以模擬劣化環境，之後再進行一連串巨微觀及化學性分析與電學量測分析，用以檢驗各種摻料對劣化環境下混凝土的抗劣化之成效。研究結果顯示：有添加爐石者因其產生卜作嵐效應，使品質大大提昇，因此使有害物質不易滲入腐蝕鋼筋，而添加鋼纖維可改善混凝土韌性，並具有犧牲陽極保護鋼筋之功效，但須注意其工作性問題。

關鍵詞：劣化；爐石；鋼纖維；人工海水；卜作嵐效應。

ABSTRACT

Concrete is a durable material in normal circumstance. Also easily degraded by external environment, and hence its service period is shortened. This research is to study concrete in water-to-binder ratio of 0.4, That is also mixed with different materials such as slag and steel fiber. After 28-day curing, 70 days of soaking in artificial brine and repeated loading that stimulates degrading environment, a succession of macroscopic and microcosmic chemical analysis can be processed and electricity can be measured. The result shows that by adding slag can trigger pozzolan effect that greatly improves concrete quality. This can also prevent harmful matter to permeate into RC and to corrode steel. The addition of steel fiber can improve the toughness of concrete as expected, but it also may scarify itself to protect the embedded steel reinforced bar. However, it may reduce the workability of concrete.

Keywords: Degradation; Slag; Steel fiber; Brine; Pozzolan effect.

1. 前言

混凝土本身在常態下是一種有相當耐久性的材料，且其具有經濟性、易施工性及可塑性等諸多優點，現為營建工程上不可或缺的一種材料，並且在製造鋼筋混凝土上也比製造鋼樑便宜，因此它被廣泛的應用，在所有建設中為最重要之材料，所佔比例高達 98% 以上^[1]，但混凝土本身為多孔且易脆的材性，很容易受到環境影響而產生劣化的現象^[2]，進而縮短其服務壽命，尤其臺灣地處高溫及高濕的海島型氣候，故混凝土接觸到劣化環境之機會很大，此時除設計低水膠比以提高強度及減少透水性外，並予充分搗實與足夠的保護層等，均會使混凝土品質良好，有害物質不易滲入。另外，於混凝土中添加一些摻料，如水淬爐石、飛灰及腐蝕抑制劑，或是鋼纖維，也都能在水泥水化過程中參與反應，或提高韌性及水密性，或以陽極犧牲方式來保護鋼筋，提高鋼筋混凝土耐久性，直到結構物破壞為止。

2. 實驗計劃與方法

2.1 試驗材料性質與配比設計

2.1.1 水泥

本研究採用台泥生產性質符合 CNS 61 第一型卜特蘭水泥。

2.1.2 粗細骨材

本研究用骨材經洗淨烘乾後，進行比重、吸水率、單位重及篩分析等各項基本物理性驗，以為配比設計之依據，基本性質如表 1 所示。

2.1.3 摻料

(1) 鋼纖維：本研究採用之鋼纖維，比重為 7.84，其長度為 60mm，直徑為 0.78mm，(L/D)=76.932，具較大的細長比與較佳之強化效應，但對混凝土工作度將有不良影響。

(2) 水淬爐石粉：係採用中國鋼鐵公司所生產的水淬爐石粉，細度接近 4000 cm²/g，比重為 2.88。

(3) 強塑劑：採用 ASTM C494 規定之 Type F 強塑劑，主要是應用於製造高強度、高流動性水泥材料發揮潤滑之效用，並予降低成本等特性，可改善快速坍度損失之缺點。

2.1.4 人工海水

採用人工海水素加蒸餾水稀釋，以模擬海水環境，藉以使鋼筋混凝土材料模擬處在惡劣環境下。

2.1.5 鋼筋

本試驗所採用之鋼筋係唐榮公司所生產之 #5 竹節鋼筋。

2.1.6 配比設計

本研究配比係採用「緻密配比理論」設計 0.4 水膠比混凝土，其骨材基本性質經測試如表 1 所示，水泥採用台灣水泥公司生產之卜特蘭第一型水泥，並添加水淬爐石粉及鋼纖維等摻料於混凝土中，並添加適量強塑劑，另於量測工作性方面，採用振動頻率 3000 rpm，振幅為 0.5 mm 之 Vebe 試驗儀測定混凝土工作性，以 Vebe 試驗作出 VC 值-強塑劑用量百分比曲線，但當強塑劑到達一定用量時，VC 值的降低就很平緩，即使再加劑量，VC 值也降得很小，此時曲線的折點，即為強塑劑用量對工作性最佳點，如圖 1 所示，依此來決定強塑劑用量並調整本研究各配比所用之材料，如表 2 所示，且因本研究所用之混凝土配比為較乾硬之混凝土，並添加有鋼纖維很容易絞纏在一起或結成球狀，徒增施工的困難，為此模擬相同狀況混凝土於工地施工振動情況，故捨棄傳統坍度量測方式。

2.2 試驗變數與試體製作

本研究主試驗主要變數為添加爐石、鋼纖維和爐石鋼纖維混合等材料為變數並製作一控制混組凝土與之比較，試體尺寸有三種，第一種是製作 12 cm × 28 cm × 80 cm 之單筋混凝土樑，使用 #5 鋼筋

置於梁中，並於其上綁裹電線，以利電學量測，並以保護層 7.5 cm 置入梁試體澆製混凝土，如圖 2 所示，每種變數澆製 3 個試體。第二種試體是透水試驗用 $\phi 15 \times 12$ cm 之圓柱試體，每種變數澆製 3 個試體，第三種試體是 $\phi 15 \times 30$ cm 之圓柱抗壓強度試體，每種變數澆製 3 個試體。

2.3 試驗流程與試驗方法

本試驗計劃流程如圖 3 所示，試驗方法及試驗設備見表 3。本研究混凝土強度採用 0.4 水膠比配比灌製混凝土三種試體，並將試體浸泡水中養護 28 天後，分別進行圓柱試體的抗壓試驗和透水試驗，抗壓試驗依 CNS 1230 規定以石膏蓋平，並依 CNS 1232 規定進行抗壓強度試驗，其結果如圖 4 所示，而透水試驗則依 JIS A6101 規定進行，在壓力維持一定下，分別於試驗開始後之 0、2、4、8、16 小時及 1、2、3、4、5、7、14、28、90、120 天止，分別記錄量筒之水位，再依達西公式 (Darcy formula) 計算該量測試體之透水係數 K，其結果如圖 5 所示。另將養護完成之梁，浸泡人工海水下 70 天，並每隔 1 天、3 天、5 天不等方式，以配有飽和甘汞電極為參考電極，依 ASTM C876-91 規定施作電位量測，在進行電位量測同時梁試體也進行交流阻抗腐蝕速率分析，利用英國 Sycopel 之 TFA (Transfer Function Analyzer) 2000 交流阻抗試驗儀，掃描頻率設定在 10 mHz ~ 100 Hz，以監測電位電流之相差予以儲存數據，並轉換成圖形，在高頻部份會顯示出一半圓，但在低頻的部份會出現一個擴散尾 (Diffusion Tail)^[9]，藉由賴氏圖 (Nyquist plot) 使用最大相角相切的正切線，可以得到有用的電子轉移電阻之半徑值 (R_p)，而將鋼材腐蝕速率量化，據此推算材料腐蝕速率，經計算各混凝土試體腐蝕速率結果列於表 4。之後將梁浸泡於人工海水下實施反覆載重試驗，以 100 噸 MTS 結構動態載重試驗機作反覆載重，頻率設計為 10Hz 反覆載重 200 萬次下，如圖 6 所示，以模擬類似橋梁結構物，在車輛反覆載重下橋梁所產生之撓度與裂縫之蔓延，並在有害物質環境 (人工海水) 下，鋼筋混凝土結構物混

凝土劣化與鋼筋受蝕情形，試驗全程同時施作電位量測及交流阻抗試驗，其經量測電位變更結果如圖 7 所示。以上試驗完成，取樣進行依 CNS 1078-R3039 規定，以水溶法經化學滴定方式獲得氯離子含量及氫氧根離子含量，以瞭解各混凝土試體於混凝土開裂前後，氯離子含量如圖 8 所示與氫氧根離子含量如圖 9 所示，以判斷混凝土劣化情況，並利用壓汞式孔隙分析儀 (MIP)，將欲測定之混凝土塊取樣約 1 克，將其抽真空後置於 MIP 測定儀中，利用高壓將水銀貫入混凝土試體之孔隙中，經由儀器自動將其各孔徑之孔隙累計體積算出，藉以了解混凝土的孔隙結構，經本研究 MIP 試驗各組混凝土毛細孔與膠孔結果如圖 10 所示，最後使用 SEM 電子顯微鏡以觀測各混凝土浸泡在人工海水侵蝕與反覆載重作用下，混凝土劣化對其顯微結構改變，以印證巨觀之行為，其經試驗照得重要照片如圖 11 至圖 13 所示。

3. 試驗結果分析

3.1 巨觀性質分析

3.1.1 抗壓強度

強度通常多被認為是混凝土最重要的性質，也是一般品質控制的重要指標，而混凝土強度愈高，表示水化程度愈完全，內部缺陷相對地也較少，然水膠比低，並就不代表著強度高，須端賴施工品質而定。由本研究經抗壓試驗結果如圖 4 所示，爐石組混凝土，因其產生「卜作嵐 (Pozzolan) 反應」，導致 28 天抗壓強為 468 kg/cm² 為最高，其次為爐石鋼纖維組抗壓強為 406 kg/cm²，鋼纖維組抗壓強為 389 kg/cm²，最差為控制組混凝土抗壓強為 375 kg/cm²，因此爐石組抗壓強度比控制組增加 24.8%，而鋼纖維只比對控制組增加 3.7%，因此添加爐石對混凝土抗壓強度是有大幅增加的摻料，而鋼纖維在抗壓強度上的助益不大，這點與文獻^[4]結論相同。

3.1.2 彈性模數與卜松比

混凝土最主要且最脆弱的部份，就是水泥漿與

骨材界面，其在載重情況下，其交互界面會有細微裂縫 (Micro-Cracking) 不斷的產生，將造成應變增加的速率大於應力增加的速率，因而影響混凝土的彈性模數，故應力－應變會呈曲線關係^[5]。由本研究所得之應力－應變圖，進而推得之各材料彈性模數及卜松比列於表 5 中，其中爐石組混凝土 28 天抗壓強雖為最高，但也相當脆性，當受壓破壞時會發生巨大爆裂聲，並且試體會往橫向爆開成數個碎片飛散，其殘餘強度急速地減至零值，故測得之彈性模數為 4.5×10^5 與控制組 4.7×10^5 類似，卜松比 0.24 比控制組 0.19 高，但因添加爐石另因減少水泥水化熱使水泥漿與骨材界面溫和成長，而不致產生差異變形，並另因其透過卜作嵐反應，也可增加界面鍵結力之能力，故對長期耐久性而言仍會比控制組好。

而添加鋼纖維組測得之彈性模數為 2.6×10^5 比控制組 4.7×10^5 及爐石組 4.5×10^5 低，因為鋼纖維組混凝土的 28 天抗壓強度經測得之強度本就比另兩組低，故彈性模數偏比也是預料中之事，但由於鋼纖維有較大之韌性，當達到最大載重後的殘餘強度仍很高，隨後再逐漸遞減至最低之現象，故測得之卜松比 0.22 與爐石組 0.24 低一些而高於控制組 0.19，足證添加鋼纖維混凝土具有一定之韌性，可改善混凝土脆性之功效，並於實驗中觀察其破壞行為，不似爐石混凝土會突然爆開成數個碎片飛散，鋼纖維其圍束力將使混凝土慢慢產生裂縫延伸而破壞，這點對混凝土劣化之防治上有極大之助益。

3.1.3 透水係數

混凝土之透水性為確保混凝土構造物耐久性所應考慮的首位因素，尤其是有受到海洋環境侵蝕之慮的環境，則混凝土透水性更是重要。有研究指出高品質混凝土之透水性應低於 10^{-12} m/sec 為上限^[6]。根據本研究所做透水試驗結果表 5 中，在 28 天透水係數以爐石組 0.95×10^{-11} 最低，控制組 1.71×10^{-11} ，鋼纖維組 2.00×10^{-11} 為最高，但都已接近文獻^[6]高品質混凝土要求，甚至到 120 天透水係數其排列關係並無改變，只趨向一定值而已。

再者從本試驗中可以看出，使用緻密配比之混

凝土，在骨材顆粒結構堆積越緻密空隙越小情況下，只要使用少量水泥漿量，一樣可以減少混凝土中弱界面 (骨材與水泥漿之界面) 形成的機率，同時亦可減少水泥漿與骨材不等量變形而產生界面裂縫及漿體裂縫之影響，對混凝土整體強度有正面之貢獻，尤其是添加爐石者，因添加爐石產生「卜作嵐反應」孔隙會更緻密所致，故會有較低之透水係數，而高之抗壓強度，此點與 Mindness 及 Young^[7]：「混凝土機械性質取決於材料中孔隙度，孔隙越大者其強度值越小」指出論述相同，但對有添加鋼纖維者，雖有緻密配比混凝土填塞主要孔隙，但因其工作性較差導致毛隙孔量稍多，故其透水係數為最高，抗壓強度較低之現象。

3.2 化學性質分析

3.2.1 氯離子含量

混凝土中氯離子的主要來源為組成材料本身與外界氯離子的滲入兩種，雖然其含量均有限，但由於氯離子是破壞混凝土內鋼材鈍化膜，而產生腐蝕的主要有害物質之一，故一般規範均要求混凝土氯化物含量，可是混凝土組成材料中多多少少都含有氯化物存在的事實，因此建議混凝土在拌和前須將骨材洗滌，以減少氯離子進入混凝土中的機會。圖 8 為硬固混凝土受反覆載重開裂後，在人工海水侵蝕下氯離子含量的變化，在混凝土開裂前，爐石因卜作嵐反應會使混凝土組織變得緻密，因此氯離子要滲透進入混凝土中劣化混凝土幾乎是不可能的任務，故氯離子含量只有 71 ppm 比控制組 121 ppm 及纖維組 128 ppm 低，另爐石鋼纖維組為 113 ppm，而這些數值跟開裂後混凝土氯離子含量比起來顯然低得多，在開裂後氯離子含量，分別為爐石組 634 ppm、控制組 788 ppm 及鋼纖維組 379 ppm 與爐石鋼纖維組 528 ppm，故在混凝土開裂前後氯離子濃度值增加最少為纖維組增加 196%，其次為爐石鋼纖維組增加 367%，再來是控制組增加 551%，最差為爐石組增加 793%，由上述數字看來，在混凝土開裂後，氯離子可經由裂縫直接進入劣化混凝土，

因此無論有無摻料之混凝土氯離子含量均有成長，其中爐石組及控制組增加最多，顯示添加摻料於混凝土中，在混凝土開裂前具一定抵抗劣化之功效，但一旦混凝土開裂後，添加任何摻料均無法抵擋有害物質之入侵，鋼纖維因對混凝土有圍束與阻擋裂縫成長之效，故測得之氯離子含量增加率最少最不受矚目。

3.2.2 氫氧根離子

混凝土中的氫氧化物和氫氧化鈣是混凝土提供鹼性環境的主要來源，經本研究測試結果列於圖 9 中，研究顯示混凝土開裂前，爐石組氫氧根離子含量高達 6412 ppm 為最高，其次為爐石鋼纖維組 6375 ppm，再來是控制組 6265 ppm，最低為鋼纖維組只有 4078 ppm，顯示鋼纖維混凝土提供鹼性保護環境最不良，也是最容易受劣化的混凝土，果不其然，混凝土開裂後再加以人工海水侵蝕下，鋼纖維氫氧根離子含量下降到只剩 3795 ppm，減少 6.94%，至於爐石組在混凝土開裂後，氫氧根離子含量為 3400 ppm，雖然減少 46.98%，但因其值仍高故劣化有限，因此爐石較具有抵抗劣化環境之能力。而從混凝土浸泡人工海水及反覆載重雙重影響下，氫氧根離子含量變化顯示，混凝土處於惡劣環境都有劣化之危機，因此添加如爐石等卜作嵐材料以減少對環境惡化混凝土是有助益的。

3.2.3 氯離子與氫氧根離子比值

根據 Mehta^[8]之建議，氯離子和氫氧根離子之比值需小於 0.63 才不致對鋼筋造成危害，由本研究之 Cl^-/OH^- 比值，在混凝土開裂前經計算如表 5，其比值均在 0.04 以下。混凝土開裂後，測得 Cl^-/OH^- 比值稍有提高，但最高之值也不過是 0.07 左右，均未達腐蝕鋼筋值，其中以添加爐石之值為最小，因此其達到抑制有害物質之效能為最佳，而添加鋼纖維者，其 Cl^-/OH^- 比值雖為最高，但距腐蝕 0.63 之值還差很多，顯示以緻密配比方式拌對鋼纖維混凝土，因維持一定的緻密性，故還能抵抗人工海水侵蝕而不劣化混凝土。

3.3 電學性質分析

3.3.1 電位量測法

依據 Stratfull^[9]之建議，當電位 E 低於 -270 mv，則鋼筋產生腐蝕，而電位 E 介於 -220 mv 與 -270 mv 之間，則鋼筋可能處在鈍態區，或亦可能已產生腐蝕，若電位 E 高於 -220 mv，則鋼筋處在鈍態區，不產生腐蝕，由於電位量測除不會破壞結構體確保安全性外，並且因其測定方便，為腐蝕量測所常用。由本研究量測混凝土電位結果如圖 7 所示，在浸泡人工海水期間，以純混凝土梁而言，其電位上下跳動並不是很大，至於有添加鋼纖維之梁，電位起伏便較大，甚至電位量測結果已達腐蝕電位，推測其原因，可能是梁表面鋼纖維腐蝕及其保護膜產生再腐蝕，所生成之干擾造成電位之變動，為解開這點疑惑等待試驗完成後，敲開試體察看時才發現，實際上鋼筋未受腐蝕，而係鋼纖維發生腐蝕產生電位之變動，因此利用電位法量測鋼筋腐蝕之方法，其判定結果會受其他物質干擾而造成誤判之困擾，因此利用電位法的量測鋼筋腐蝕之方法，使用上須予謹慎，同時根據混合電位理論，腐蝕速率及腐蝕電位均決定於總氧化反應、速率，故腐蝕電位量測，僅能用於定性探討，無法判斷腐蝕速率及型態^[10]。為解決此一問題，本研究乃另採用交流(AC)阻抗技術量測鋼筋腐蝕速率，利用解析出溶液、混凝土、惰性膜及界面間之阻抗值，以便獲得較精確之極化電阻，以解決誤判問題及能計算出腐蝕速率，以比較出各變數之防蝕差異性。

3.3.2 交流(AC)阻抗量測法

交流(AC)阻抗分析在混凝土未開裂前，其 Nyquist 圖均為擴散行為，離子擴散經混凝土孔隙來完成，因此可以避開因梁表面鋼纖維腐蝕而影響鋼筋量測結果。經交流(AC)阻抗測驗完成，計算各混凝土試體腐蝕速率結果列於表 4。從表 4 中得知，在浸泡人工海水期間，其各組腐蝕率均很低，分別爐石鋼纖維組為 7.0($\mu\text{m}/\text{y}$)、控制組 1.75($\mu\text{m}/\text{y}$) 與鋼纖維為 4.23($\mu\text{m}/\text{y}$)，但在混凝土開裂後，爐石鋼纖維組變為 10.65($\mu\text{m}/\text{y}$)，只有增加 52%，而控制

組為 6.87($\mu\text{m}/\text{y}$)，增加 293%，鋼纖維為 11.95($\mu\text{m}/\text{y}$)，增加 183%。從這些數值變化中顯示，爐石在混凝土未開裂前，具有保護混凝土內部環境免於劣化之功效，但一旦混凝土開裂後，有害物質仍可直接循此管道劣化混凝土腐蝕鋼筋。至於添加鋼纖維者，雖然經量測之腐蝕速率很高，但在混凝土開裂前後其腐蝕增加率只有 183%，如能再添加爐石則效果就更好。顯見於混凝土中添加鋼纖維，其纖維會適時發揮棄車保帥以犧牲陽極方式來保護鋼筋。故從鋼纖維添加來看，也是有助於改善混凝土劣化情況，尤其是混凝土開裂後對鋼筋腐蝕的抑制。

3.4 微觀性質分析

3.4.1 MIP 孔隙 (Mercury intrusion porosimetry) 量測分析

任何材料的特性是「有諸於內，形諸於外」，也就是材料的內部顯微組織結構的改變，都會造成外觀或宏觀特性的變化^[11]，因此混凝土孔隙大小及分佈情形，除關係到強度外，也與有害物質及水分侵入有著密不可分的關係，一般混凝土膠孔較多，而有害物質之侵入皆以毛細管孔為主，因此圖 10 所示之毛隙孔以爐石為最低，只有 26.92%，其次為控制組 45.76%，再其次為爐石鋼纖維組 51.16%，最多為鋼纖維組高達 72.58%，顯見爐石添加於混凝土中產生卜作嵐反應之，緻密效果強大，而添加鋼纖維之混凝土，其毛隙孔所佔之百分比為最多，因此從前面一些相關巨觀性質測驗方面均不良，這從 MIP 孔隙分析中可以獲得一些印證，此時如於鋼纖維混凝土中添加爐石，具有改善孔隙增強抗劣化之功效，從本試驗中也可以找出一些蛛絲馬跡的。

3.4.2 SEM (Scanning Electron Microscopy) 電子顯微分析

電子顯微鏡 (SEM) 在水泥材料之應用，主要在瞭解水泥材料之微觀結構，研究水泥加水反應後所產生水化產物之外觀、結晶組織及孔隙分佈，藉以明瞭其物理性^[12]，因此在本研究中，SEM 仍在觀察控制組與添加爐石及鋼纖維摻料混凝土，在浸泡人工

海水侵蝕與反覆載重作用下，混凝土劣化對其顯微結構改變，以印證巨觀之性質，其經試驗照得重要照片如圖 11 至圖 13 所示。當混凝土接觸海水後，會因水化產物 C-S-H 與海水中之氯離子形成如圖 11 之多孔網結構，並與硫酸鎂等生成如圖 12 之群聚花瓣結構的氫氧化鎂，降低混凝土之 PH 值，然而在有添加爐石混凝土如圖 13 所示，由於卜作嵐反應，使得混凝土組織結構緻密，因此其最不易受劣化。

4. 結論

1. 爐石組抗壓強度比控制組增加 24.8%，而鋼纖維組只比對控制組增加 3.7%，因此爐石對混凝土抗壓強度是有大幅助益的，而鋼纖維在抗壓強度上的助益則不大。
2. 添加鋼纖維組測得之彈性模數雖然比控制組及爐石組低，但由於鋼纖維有較大之韌性，當達到最大載重後的殘餘強度仍很高，隨後再逐漸遞減至最低之現象，足證添加鋼纖維混凝土具有一定之韌性，可改善混凝土脆性之功效，並產生圍束力使混凝土裂縫延伸破壞減緩，這點對混凝土劣化與鋼筋防蝕上有極大之助益。
3. 在 28 天透水係數以爐石組最低，鋼纖維組為最高，顯示爐石因產生「卜作嵐反應」，孔隙變緻密，故會有較低之透水係數而呈最高之抗壓強度，但鋼纖維組，雖有緻密配比混凝土填塞主要孔隙，但因其工作性較差導致隙孔量稍多，故其透水係數為最高，抗壓強度也呈最低之現象，這點在微觀之 MIP 孔隙量測分析及 SEM 電子顯微照片下獲得印證。
4. 經本研究於混凝土開裂前後化學性質測試結果，當混凝土開裂前添加爐石具卜作嵐效應，混凝土結構組織緻密，氯離子不易滲入劣化混凝土，因此氫氧根離子濃度也頗高，但當混凝土開裂後，鋼纖維因對混凝土有圍束與阻擋裂縫成長之效，故測得之氯離子含量增加率最少最受矚目。
5. 從交流 (AC) 阻抗量測各組腐蝕率於開裂前均很低，但在混凝土開裂後，爐石鋼纖維組增加

52%，而控制組增加 293%，鋼纖維組增加 183%，從這些數值變化中顯示，爐石在混凝土未開裂前，具有保護混凝土內部環境免於劣化之功效，但一旦混凝土開裂後，有害物質仍可直接循此管道劣化混凝土腐蝕鋼筋，至於添加鋼纖維者，雖然經量測之腐蝕速率很高，但在混凝土開裂前後其腐蝕增加率只有 183%，如能再添加爐石則效果就更好，顯見於混凝土中添加鋼纖維，其纖維會適時發揮棄車保帥以犧牲陽極方式來保護鋼筋，故從鋼纖維添加來看，也是有助於改善混凝土劣化情況，尤其是混凝土開裂後對鋼筋腐蝕的抑制。

6. 利用電位法量測鋼筋腐蝕之方法，其判定結果會受其他物質干擾而造成誤判之困擾，因此利用電位法的量測鋼筋腐蝕之方法，使用上須予謹慎。

誌謝

本文於研究期間，承蒙台灣科技大學黃兆龍教授提供寶貴意見與指導，始得以完成，在此謹表衷心謝忱。

參考文獻

1. 陳振川，「國科會高性能混凝土群體研究現況」，高性能研發及推廣研討會論文輯，黃兆龍主編，台灣·台北，1997.06.20-21，pp1-21。
2. P. K. Mehta, in: *Concrete Structure, Properties, and Materials* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1986).
3. 劉宏義、魏豐義，「碳鋼與耐候鋼筋並和安定化處理膜的電化學行為研究」，中華民國防蝕工程學會八十年度大會暨綜合防蝕研討會論文集，台灣·溪頭，1991，第 51-59 頁。
4. D. R. Lankard, in: *The Engineering Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete* (Lankard Materials Laboratory, Columbus, Ohio, 1981).
5. F. William Perenchio and Paul Klieger, "Some Physical Properties", RD056. 01T Portlan Cement Association Skokie, 1978.
6. 林維明，「海洋混凝土結構物防蝕規範及使用預測壽命之檢討」，中華民國 76 年防蝕工程年會暨海洋防蝕工程研討會，台灣省交通處港灣技術研討會，台灣·台中，1987，第 10/1-10/16 頁。
7. S. Mindess and J. F. Young, in: *Concrete* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1981).
8. P. K. Mehta, "Durability of Concrete in Marine Environment A Review", ACI SP-65 (1983) pp.1-20.
9. Denny A. Jones, in: *Principles and Prevention of Corrosion* (Macmillan Publishing Company, 2nd ed. New York, 1991).
10. F. Mansteld, "Polarization Resistance Measurements-Todays Status", *Electrochemical Techniques for Corrosion Engineering*, NACE (1986) pp.67-71.
11. 黃兆龍，in：混凝土性質與行為，詹氏書局豪華第三版(臺灣，台北，2002)。
12. Michel Pigeon and Micheline Regourd, "Freezing and Thawing Durability of Three Cement with Various Granulated Blast Furnace Slag Contents", ACI, from Reference 6, SP-79-52 (1983) pp.979-998.

收到日期：2004 年 9 月 4 日

修訂日期：2004 年 12 月 10 日

接受日期：2005 年 3 月 23 日

表1. 粗細骨材之物理性質。

Table 1 The physical properties of the coarse aggregate and fine aggregate.

物理性質	粗骨材	細骨材
比重	2.65	2.50
SSD 吸水率(%)	1.2	2.10
O.D 吸水率(%)	0.84	6.76
單位重(T/m ³)	1.58	1.73
細度模數(F.M)	7.16	2.47
最大粒徑(cm)	1.25	—

表2. 混凝土配比設計(m³)。

Table 2 The mixture proportion of designed concrete (m³).

試體型式	水膠比	材料變數	水泥 Kg	粗骨材 Kg	細骨材 Kg	水 Kg	鋼纖維 Kg	爐石 Kg	強塑劑 Kg	總重 Kg
R.C	0.4	控制組	347.5	961.0	961.0	139.0	—	—	4.3	2412.8
		纖維組	350.8	945.1	945.1	140.3	58.9	—	5.3	2386.6
		爐石組	336.0	929.0	836.1	134.3	—	96.4	4.2	2336.0
		爐石纖維組	334.6	925.2	832.6	133.7	58.9	96.4	5.0	2327.5

表3. 主要試驗方法與設備。

Table 3 The test method and installation.

項目	參考方法	主要試驗設備	說明
篩分析	CNS 486	分析篩、搖篩機	配比設計資料
比重吸水率	CNS 487	比重瓶、電子秤、烘箱	
細度模數	CNS 1047	分析篩、電子秤	
單位重	CNS 1163	磅秤、體積量筒	
比重吸水率	CNS 488	電子秤、烘箱、網筐	
含氣量	CNS 1177	空氣含氣量測定器、搗棒、鏟刀、量筒	新拌混凝土之空氣含量
凝結時間	CNS 786	電子秤、搗棒、鏟刀	新拌混凝土之凝結工作性
SEM 顯微鏡觀察		掃描式電子顯微鏡分析儀 (Cambridge S360)	混凝土受海水侵蝕前後產物觀察
MIP 孔隙量測		Auto Scan-60 Porosimeter	混凝土孔隙結構
AC 交流阻抗分析		英國 Sycopel 之 TFA 2000 (10 mHz ~ 100 Hz)	腐蝕速率量測
電位量測	ASTM C876	飽和甘汞電極、三用電表 (內具高阻抗)	觀察電位—時間變化
氯離子濃度分析	ASTM C114	化學藥品一批、PH 計	係利用硝化法求出酸溶氯化物含量
氫氧根離子分析		化學藥品一批、PH 計	利用標定 NaOH 之 KHP 而求 OH ⁻ 濃度
鹽橋製作		拉金管(Luggin)、飽和氯化鉀溶液	減少因 IR drop 所產生的電壓降
反覆載重試驗		100 噸 MTS 動態試驗機	提供反覆載重
混凝土抗壓試驗	CNS 1230,1232	養護池、100 噸萬能試驗機	測定 28 天齡期之抗壓試驗
透水試驗	JIS A 6101	透水儀一組	依達西定律求其滲透係數

表4. 交流阻抗分析混凝土中鋼筋腐蝕速率。

Table 4 The corrosion rate of steel bar in reinforced concrete by AC Impedance.

試體	環境條件	Rp(ohm)	Ci(F)	CR(μm/y)	Icorr(μm/y)	腐蝕成長率
控制組	浸泡海水 70 天	17.83	0.19×10 ⁻⁶	146	1.75	293%
	反覆載重後	4.54	290×10 ⁻⁶	573	6.88	
纖維組	浸泡海水 70 天	7.37	360×10 ⁻⁶	353	4.23	183%
	反覆載重後	2.61	1200×10 ⁻⁶	996	11.95	
爐石纖維組	浸泡海水 70 天	4.46	180×10 ⁻⁶	583	7.00	52%
	反覆載重後	2.93	670×10 ⁻⁶	887	10.65	

表5. 試驗結果一覽表。

Table 5 Test result of concrete under different admixture condition.

試體	新拌性質			材質特性					化學性質						微觀性質			
	VC值 (秒)	含氣量 (%)	單位重 (kg/cm ³)	Cl ⁻ (ppm)	f _c (kg/cm ²)	透水係數 (28天) (10 ⁻¹¹ m/s)	E (kg/cm ²)	v	開裂前			開裂後			毛細孔體積 (%)	膠體孔體積 (%)	SEM	
									Cl ⁻ (ppm)	OH ⁻ (ppm)	PH值	Cl ⁻ (ppm)	OH ⁻ (ppm)	PH值			開裂前	開裂後
控制組	12	2.5	2612	0.304	375	1.71	4.7×10 ⁵	0.19	121	4690	12.0	131	3400	11.8	45.76	54.24	優	佳
爐石組	11	2.0	2656	0.282	468	0.95	4.5×10 ⁵	0.24	119	6265	12.1	123	4130	11.8	26.92	73.08	極優	優
纖維組	15	3.0	2666	0.301	389	2.00	2.6×10 ⁵	0.22	128	4078	12.2	208	3107	11.9	72.58	27.42	優	尚可
爐石纖維組	15	3.0	2704	0.284	409	1.15	2.2×10 ⁵	0.22	113	6375	12.0	183	4460	11.8	51.16	48.84	極優	佳

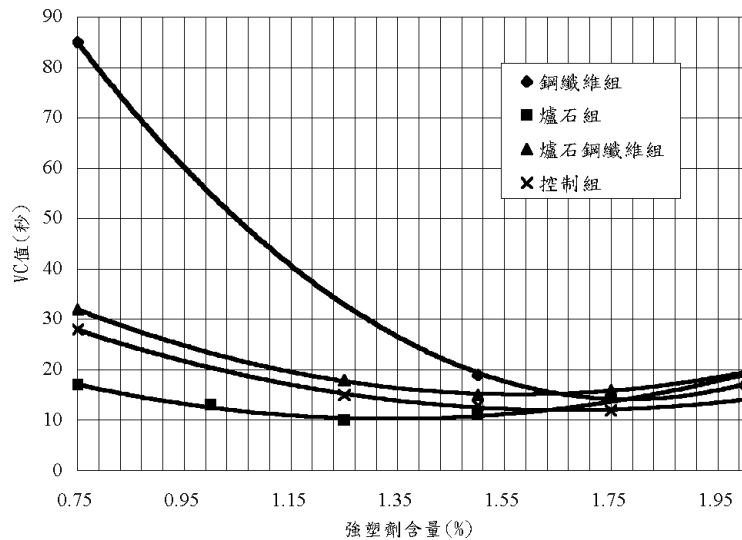


圖1 混凝土之Vebe值與強塑劑之關係圖。

Figure 1 Vebe test data curves the dosage of superplasticizer.

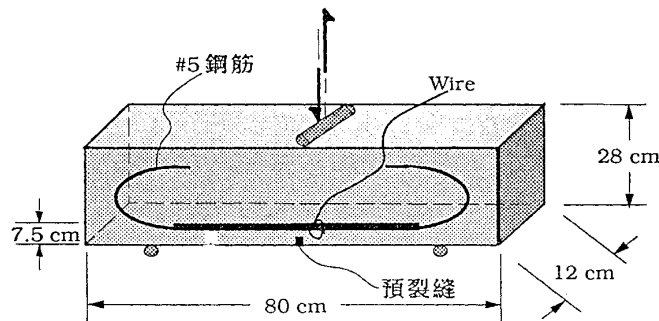


圖2 單筋混凝土樑設計圖。

Figure 2 Schematic drawing of singly reinforced concrete beam.

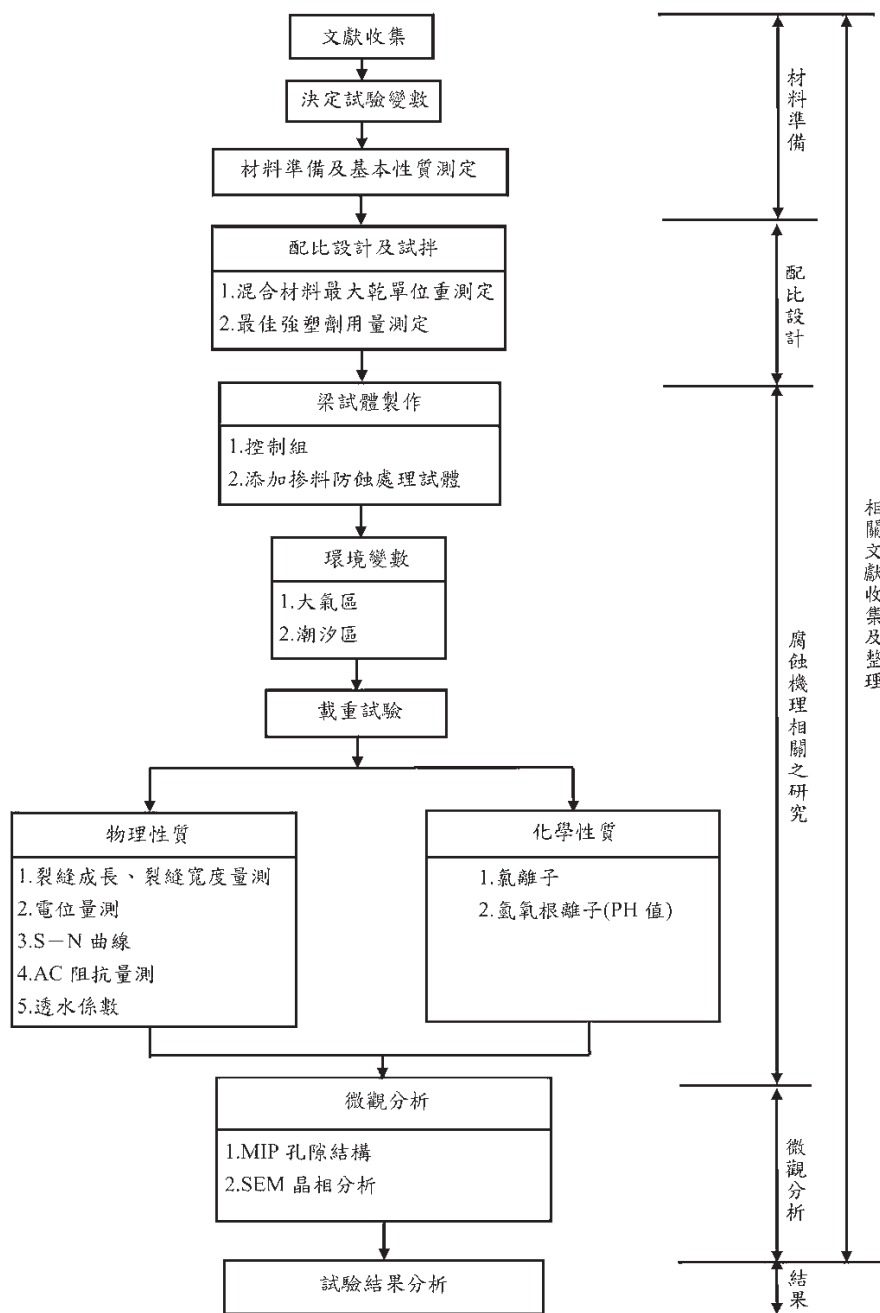


圖3 試驗計劃流程圖。

Figure 3 Study plan.

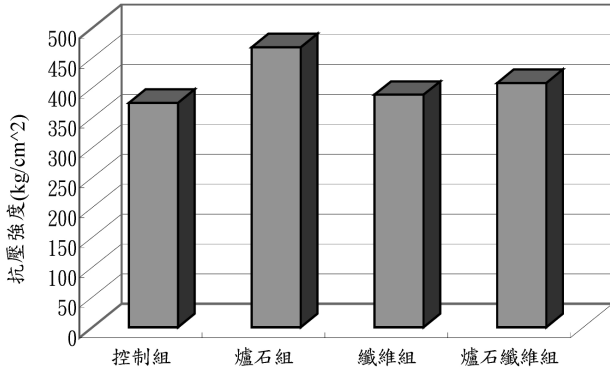


圖4 混凝土抗壓強度比較圖。
Figure 4 Comparison of compressive strength of concrete.

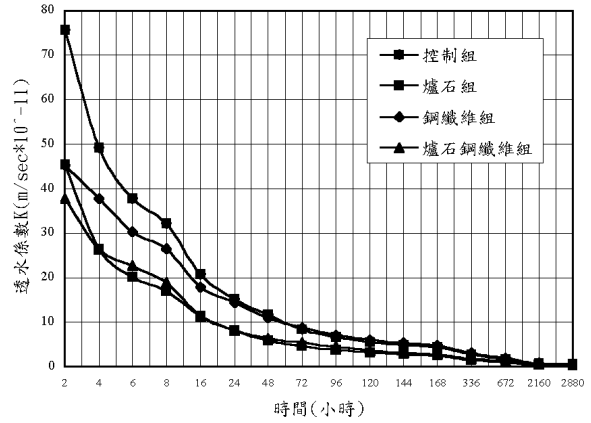


圖5 混凝土透水係數與時間之關係。
Figure 5 Permeability coefficient of concrete versus test time.

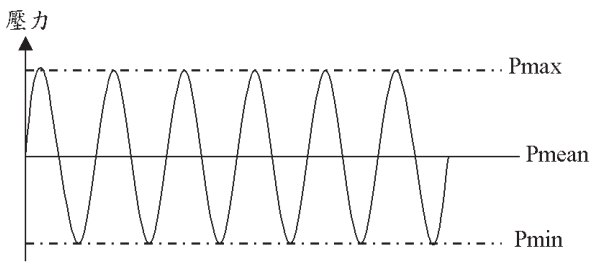


圖6 反覆載重示意圖。
Figure 6 To accept repeated loading diagram.

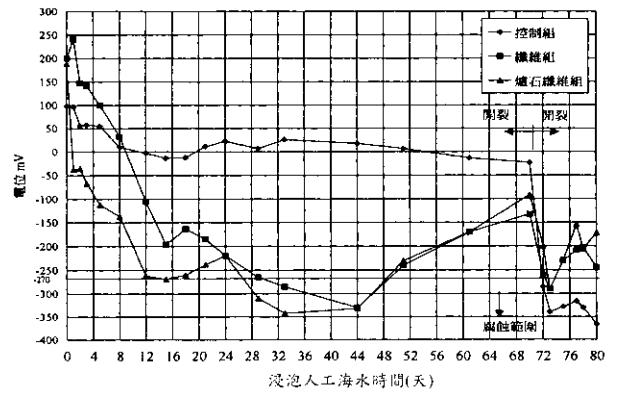


圖7 鋼筋混凝土浸泡人工海水下電位變化。
Figure 7 Current of single reinforce beam soaking in brine.

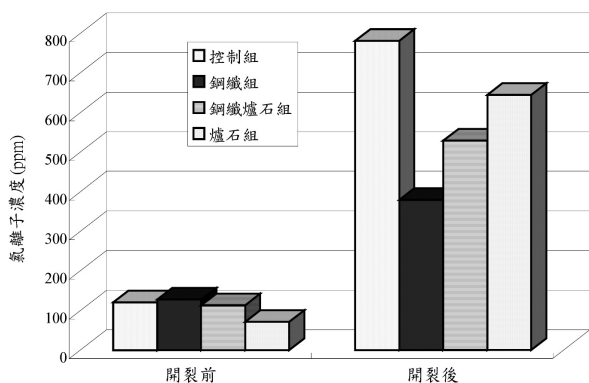


圖8 混凝土開裂前後氯離子比較圖。
Figure 8 The comparison of chloride concentration with different admixture before or after concrete cracks.

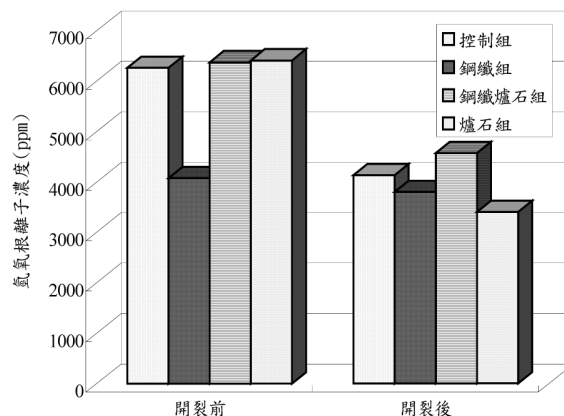


圖9 混凝土開裂前後氫氧根離子比較圖。
Figure 9 The comparison of hydroxyl concentration with different admixture before or after concrete cracks.

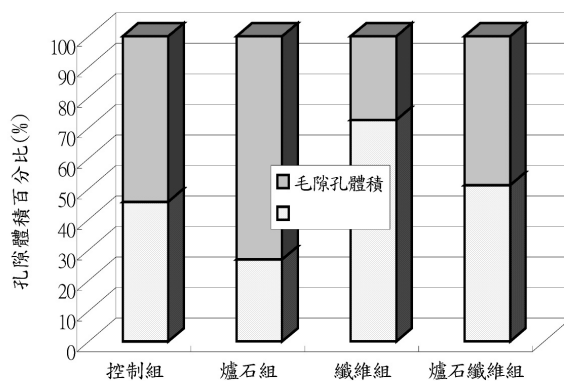


圖10 混凝土孔隙尺寸分佈比較圖。
Figure 10 Comparison of pore size distribution of concrete.

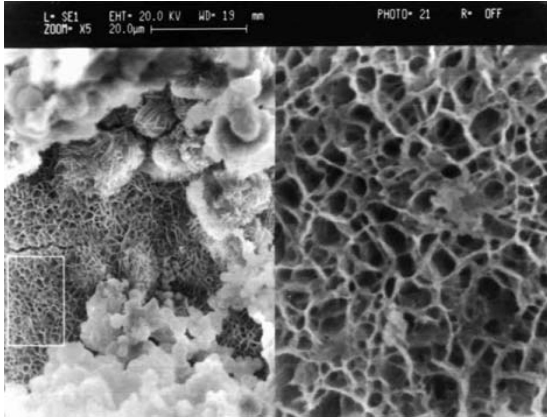


圖11 混凝土受海水侵蝕形成多孔網狀結構SEM圖。

Figure 11 The formation of porous network in concrete soaking in brine by SEM.



圖12 混凝土受硫酸鎂侵蝕形成群聚花瓣結構SEM圖。

Figure 12 The observation of rosette structure from concrete after soaking in magnisiun sulfate.

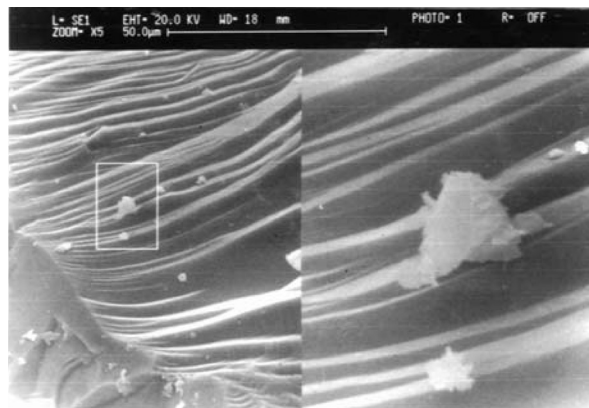


圖13 添加爐石混凝土結構組織緻密之SEM圖。

Figure 13 The observation of dense structure from concrete contain slag.