

爐石混凝土耐海水性之研究

蔡得時* 著

A Study of Seawater Resistance of Slag-Cement Concrete

D. S. Tsay*

摘要

本研究係以爐石取代部份水泥，製作爐石取代量為0~50%之爐石水泥混凝土，將其浸泡於乾濕循環之海水中進行加速試驗超過一年，於各齡期測試試體之抗壓強度、滲透性、電阻、氯離子農度、腐蝕電位及壓汞孔隙體積分佈等，試驗結果，以爐石取代量為20~30%之爐石混凝土的耐腐蝕性為最佳。

關鍵字：爐石混凝土，耐海水性

ABSTRACT

In this study, slag was used to substitute 0~50% of cement for producing slag-cement concrete. All specimens were cyclically immersed in synthetic seawater for more than one year. During the test, compressive strength, permeability, electrical resistance, concentration of chloride, corrosion potential and distribution of pore size were measured after certain period of time. Results show that the slag-cement concrete containing 20~30% slag has the best corrosion resistance.

Key words: Slag-cement concrete, Seawater resistance

一、前言

海洋佔地球表面80%，為開發海洋，因此，大量的海岸、海上結構物應運而生，海水對混凝土結構物的影響，在耐久性方面扮演了非常重要的角色，海水中對鋼筋混凝土腐蝕影響者有氯離子及硫酸根離子，由於腐蝕造成的裂縫更加速混凝土結構物之惡化，致使其壽命縮短。鋼筋混凝土之耐久性端視其滲透性而定，此可由較低的水

灰比及充份的搗實等來達成。另外，若添加爐石等波索蘭材料於混凝土中，可降低水化水泥漿體之大孔隙體積，因而降低滲透率，而達到混凝土的耐久性。爐石為生產鋼鐵過程中之副產品，依其生產方式之不同，分為氣冷爐石與水淬爐石，氣冷爐石通常當作輕質骨材使用，使用量有限，故大多數將其海拋，水淬爐石由於含有高量玻璃質而具有潛在的膠結能力，會與石灰進行波索蘭反應，形成類似 C-S-H ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)

*中國工商專科學校建築工程科副教授

Associate Professor, Department of Architectural Engineering, China Junior College of Industrial & Commercial Management, Taipei, Taiwan, R.O.C.

爐石混凝土耐海水性之研究

) 膠體，與水泥性質相似，可取代部份水泥，國內有關這方面的研究不多，一直無法有效而適當的應用此一資源，最近中國鋼鐵公司著手產製水淬爐石，並穩定其品質，以期能推廣應用於混凝土中⁽¹⁾。本研究即對取代部份水泥之爐石混凝土的耐海水性作探討。

二、研究過程及方法

本研究係以爐石取代部份水泥，製作兩種不同水灰比之爐石水泥混凝土試體，其中爐石取代水泥量之比例為0%、10%、20%、30%及50%等五種；水灰比取0.48及0.60兩種，當試體(10 cmφ×20cm)製作完成，並經28天濕治養護後，將其浸泡於參考ASTM D1141⁽²⁾所配製之人工海水中，並使其在每浸泡3天—乾燥4天之乾濕循環條件下進行加速試驗，並以置於空氣中之波特蘭水泥混凝土試體作為控制組，於各齡期時，測試試體之抗壓強度、滲透性、電阻、氯離子濃度、腐蝕電位及壓汞孔隙體積等。其中供作腐蝕電位測試之圓柱試體，尚須於試體中央插入一支適當長度之#3竹節鋼筋，且鋼筋外露部份以環氧樹脂塗封，而鋼筋保護層厚度取為5.0公

分。至於測試齡期計有7天、28天、90天、180天、270天及一年等六種。表1所示為爐石混凝土之配比設計。

本研究所使用之試驗材料計有波特蘭第一型水泥，其比重為3.15。爐石使用中國鋼鐵公司提供研磨後散裝之水淬爐石粉，其化學成份及物理性質，如表2所示。骨材採用天然河砂及碎石，其級配均合乎CNS 1240⁽³⁾之規定，河砂比重為2.58，吸水率為3.26%，細度模數為2.36，而碎石比重為2.56，吸水率為1.32%，最大粒徑為1/2"，單位體積重為1503kg/m³。鋼筋採用無腐蝕之#3竹節鋼筋，其降伏強度 $f_y = 3263\text{kg/cm}^2$ ，極限強度 $f_u = 4212\text{kg/cm}^2$ ，伸長率為19.3%，單位重為0.565kg/m，合乎CNS 560⁽⁴⁾之規定。

於各齡期時進行抗壓強度試驗，並參照顏聰⁽⁵⁾之試驗方法，以測定混凝土之滲透係數，採用數位式陣列電阻顯示器測定混凝土電阻、綜合水質分析儀量測混凝土內氯離子濃度、飽和甘汞電極(SCE)測試混凝土內鋼筋之電位及壓汞孔隙測定儀(M.I.P)量測水泥漿體的累積孔隙體積。最後並於一年齡期後將試體劈開，觀察其內鋼筋表面腐蝕情況。

表1 爐石混凝土之配比
Table 1 Proportion design of slag concrete

水灰比	爐石取代量(%)	試體編號	配比材料(kg/m ³)					備註
			水	水泥	水淬爐石粉	細骨材	粗骨材	
0.48	0	0.48 EC	228	475	0	594	932	置於空氣中 浸泡於乾濕循環人工海水中。
		0.48 E						
	10	0.48 D	228	427.5	47.5	594	932	
	20	0.48 C	228	380.0	95.0	594	932	
	30	0.48 B	228	332.5	142.5	594	932	
	50	0.48 A	228	237.5	237.5	594	932	
0.60	0	0.60 EC	228	380	0	670	932	置於空氣中 浸泡於乾濕循環人工海水中。
		0.60 E						
	10	0.60 D	228	342	38	670	932	
	20	0.60 C	228	304	76	670	932	
	30	0.60 B	228	266	114	670	932	
	50	0.60 A	228	190	190	670	932	

表2 爐石之化學成份與物理性質

Table 2 Chemical analysis and physical properties of slag

化學成份 (%)	氧化矽 (SiO_2)	33.46
	氧化鋁 (Al_2O_3)	15.74
	氧化鐵 (Fe_2O_3)	0.56
	氧化鈣 (CaO)	38.81
	氧化鎂 (MgO)	7.65
	氧化硫 (SO_3)	1.96
	燒失量	0.10
物理性質	細度 (cm^2/g)	3988
	比重	2.88

三、試驗結果與討論

1. 抗壓強度

本研究乃探討海水對爐石混凝土強度之影響及瞭解爐石混凝土抵抗海水侵蝕之能力。通常海水對混凝土之侵蝕可分為硫酸鹽害與氯化物侵蝕兩種，硫酸鹽害會造成混凝土的剝落與崩壞，對強度有直接的影響，而氯化物侵蝕會對混凝土內鋼筋造成腐蝕，間接影響到混凝土的強度。

圖1、圖2所示為浸泡於海水中爐石混凝土抗壓強度發展情形，其與水灰比及爐石的取代量有關，觀測至一年齡期，發現爐石取代量愈多，其抗壓強度愈低，另外，為便於了解爐石取代量對海水侵蝕之抵抗性，將強度發展情形以強度折減比值表示之，所謂強度折減比值乃指浸泡於海水中之爐石混凝土強度與置於空氣中相同條件下控制組純水泥混凝土強度之比值，圖3、圖4所示即為浸泡於海水中爐石混凝土抗壓強度折減比值，由圖示可知爐石取代量為0%之純水泥混凝土，其浸泡於海水中試體之抗壓強度均較其置於空氣中之控制組者為低，可見強度已受到海水侵蝕之影響，品質已有劣化現象，且隨著齡期增加，其影響愈大，此可由強度折減比值由7天齡期之0.99降至一年齡期之0.92（水灰比=0.48）及由0.96降至0.92（水灰比=0.60）得到印證。至於爐石混凝土者，則隨著齡期之增加，其強度

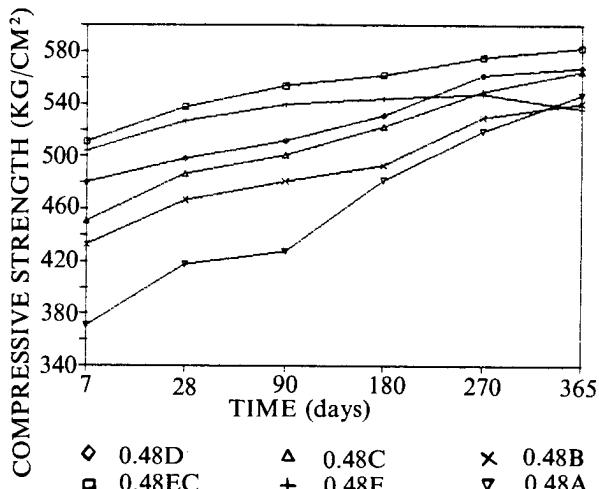


圖1 爐石混凝土抗壓強度與時間之關係（水灰比=0.48）

Fig. 1 Relationship between compressive strength and time (W/C=0.48)

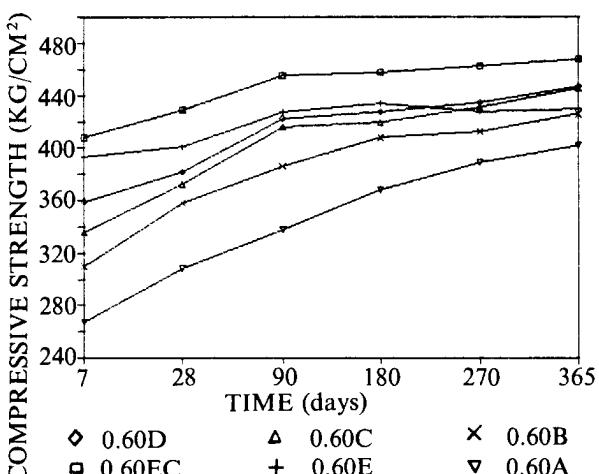


圖2 爐石混凝土抗壓強度與時間之關係（水灰比=0.60）

Fig. 1 Relationship between compressive strength and time (W/C=0.60)

折減比值愈高，但亦小於1.00，此乃顯示爐石混凝土雖受到海水之侵蝕，但由於波索蘭反應之進行，而形成C-S-H膠體，以填塞混凝土組成材料間之孔隙，因此抵抗海水侵蝕之效果漸漸顯現，至於最佳爐石取代量約為20%，又水灰比較低者，由於混凝土品質較佳，其強度折減量較小，故爐石抵抗海水侵蝕之效果亦較佳。

2. 滲透性

爐 石 混 凝 土 耐 海 水 性 之 研 究

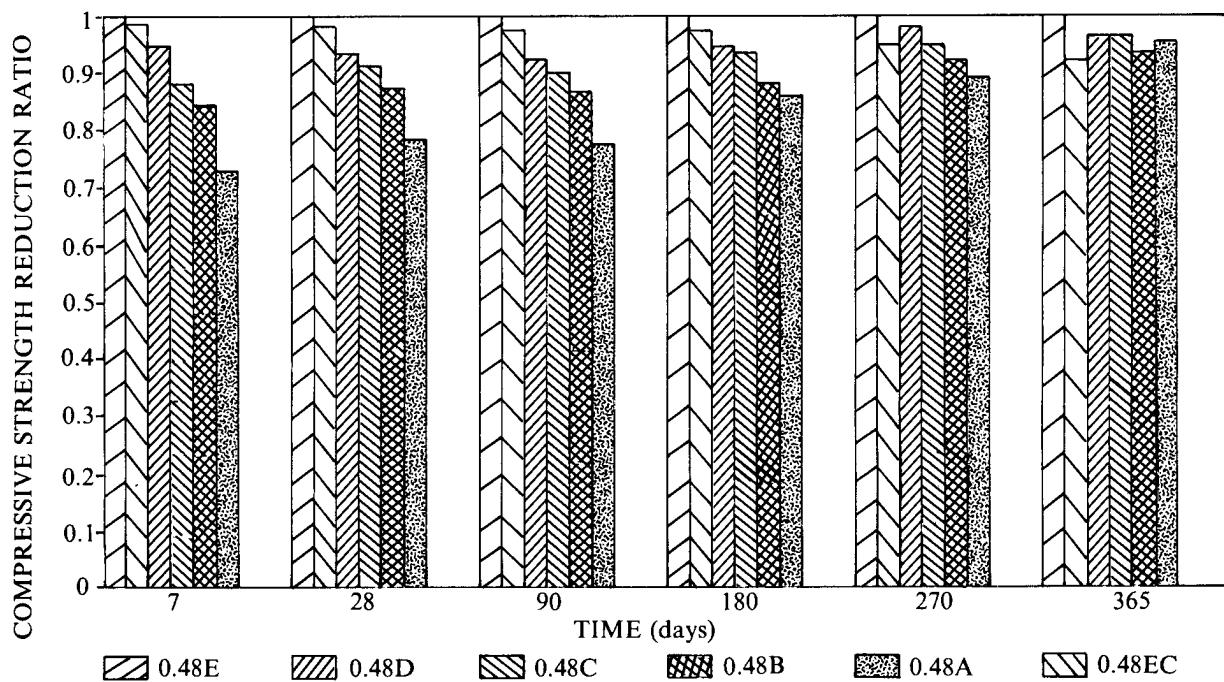


圖 3 爐石混凝土抗壓強度折減比值 (水灰比 = 0.48)

Fig. 3 Compressive strength reduction ratio in concrete (W/C=0.48)

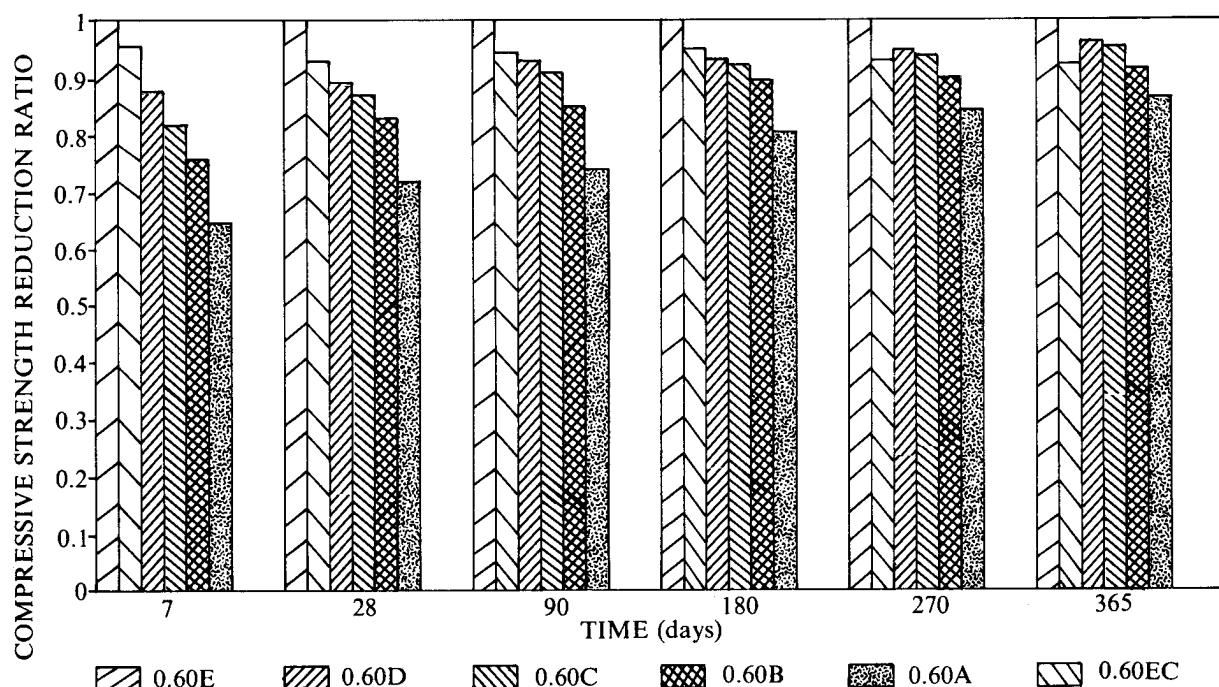


圖 4 爐石混凝土抗壓強度折減比值 (水灰比 = 0.60)

Fig. 3 Compressive strength reduction ratio in concrete (W/C=0.60)

一般混凝土的滲透性愈大，則愈易受到有害物質的侵蝕，而造成強度的折減，而水灰比乃影響混凝土滲透性的主要因素，通常水灰比愈高，

混凝土內的孔隙會愈大，故滲透性亦愈大，因此較易受到外來有害物質之侵蝕，圖 5、圖 6 所示為浸泡於海水中爐石混凝土的滲透係數，由圖示

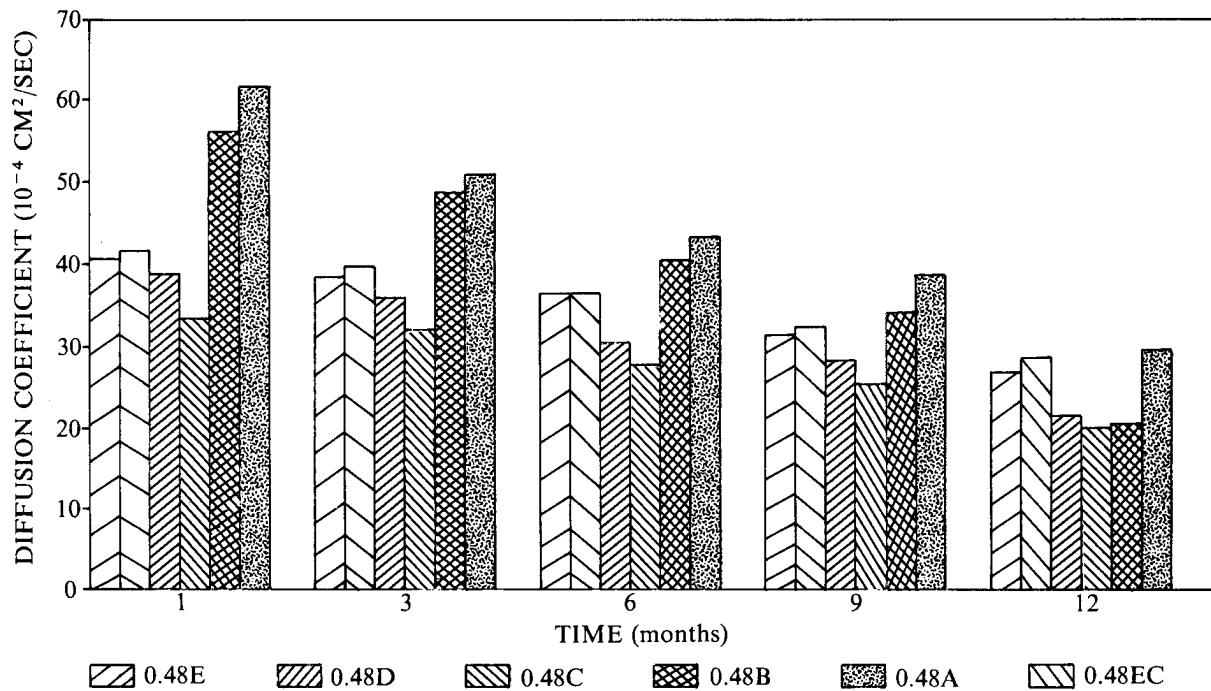


圖 5 爐石混凝土滲透係數與時間之關係 (水灰比=0.48)

Fig. 5 Relationship between permeability coefficient and time (W/C=0.48)

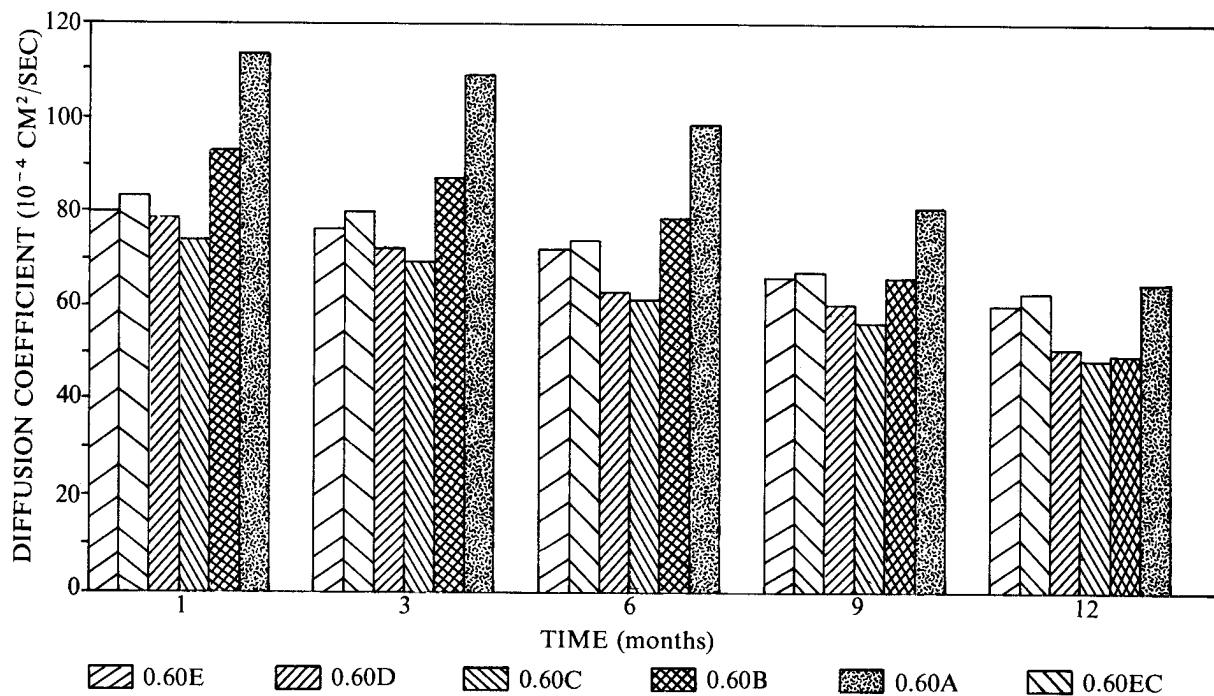


圖 6 爐石混凝土滲透係數與時間之關係 (水灰比=0.60)

Fig. 6 Relationship between permeability coefficient and time (W/C=0.60)

爐石混凝土耐海水性之研究

可知，混凝土的滲透性與爐石取代量、水灰比及齡期均有關係，於相同條件下，當爐石取代量為20%，其滲透係數較小，亦即其水密性較佳，抵抗海水侵蝕之能力較高，此乃由於爐石具有波索蘭反應，可將混凝土中的孔隙結構改變，使混凝土中的大孔隙變為小孔隙，並使孔隙體積量降低，因此，爐石混凝土對於抵抗有害物質侵蝕的能力較佳。至於爐石取代量為50%之爐石混凝土，其滲透係數較大，亦即水密性較差，此可能由於取代量過多，造成水泥所供給之氫氧化鈣不夠，致波索蘭反應不佳，另外，爐石取代量為50%之爐石混凝土，由於拌和製作時產生泌水現象，此對於混凝土的孔隙結構可能有不良影響。又水灰比較低者，由於混凝土品質較佳，其滲透係數較小，且水泥水化作用及波索蘭反應持續進行，因此，混凝土滲透係數隨著齡期之增加而減小。

由圖7可知，混凝土的滲透係數隨著強度的增加而減少，亦即強度較高混凝土之緻密性較佳，因而滲透係數較小，防止有害物質侵略之能力亦較佳，至於強度較低混凝土，因其較高水灰比之拌和水遠超過混凝土中水泥水化作用所需之

水，此多餘水分佔了部分的體積，最後以孔隙型態存在混凝土中，且水量愈多相對所形成的孔隙體積亦愈大，然而在未受到海水侵蝕之前，若能經長期的濕治養護使其強度得以發展，此對爐石取代量較多之爐石混凝土更有助於波索蘭反應之進行，則其對抵抗鹽類之侵蝕應更有所助益，另外，發現爐石取代量為0%之純水泥混凝土，無論其置於空氣中或浸泡於海水中，兩者之滲透係數非常接近。若將各齡期之抗壓強度與滲透係數作迴歸分析，則可得混凝土滲透係數與抗壓強度之關係，如圖7及下列所示：

$$K = 201.54 - 0.314 f_c \quad (\text{相關係數 } r = -0.92)$$

其中， K ：混凝土之滲透係數 ($10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$)

f_c ：混凝土之抗壓強度 (kg/cm^2)

3. 電阻

海水中所含鹽類中，以氯離子及硫酸鹽最易造成鋼筋及混凝土的腐蝕與劣化，此可用量測混凝土電阻來判斷其內鋼筋腐蝕程度，因水分及鹽類之滲透可使混凝土保護層之電氣阻抗降低且使腐蝕電流容易流通，因而更促進腐蝕作用，鹽類中的氯離子為良好的電解質，可增加孔隙水的導電度，另外氯化鈣與鋁酸三鈣 (C_3A) 結合，形成孔隙較大的結晶，使混凝土滲透性增加，因此若有氯離子存在，鋼筋腐蝕速率更為加速，所以混凝土電阻大者表示其品質較為緻密，亦即滲透性較小，則影響鋼筋腐蝕之物質較難浸透入而達到保護鋼筋之目的，反之，則較易造成鋼筋腐蝕。

因此量測混凝土電阻可以判斷其內鋼筋腐蝕程度，通常腐蝕速率正比於腐蝕電流，而腐蝕電流反比於陽極與陰極間的電阻，因此鋼筋周圍混凝土電阻亦與鋼筋腐蝕有關，據 Hope 等⁽⁶⁾研究指出，含氯化物的鋼筋混凝土試體，當電阻低於 $6.5 k\Omega \cdot \text{cm}$ 時，則腐蝕極易產生。

圖8、圖9所示為浸泡於海水中爐石混凝土之電阻，由圖示可知，隨著齡期之增加，混凝土

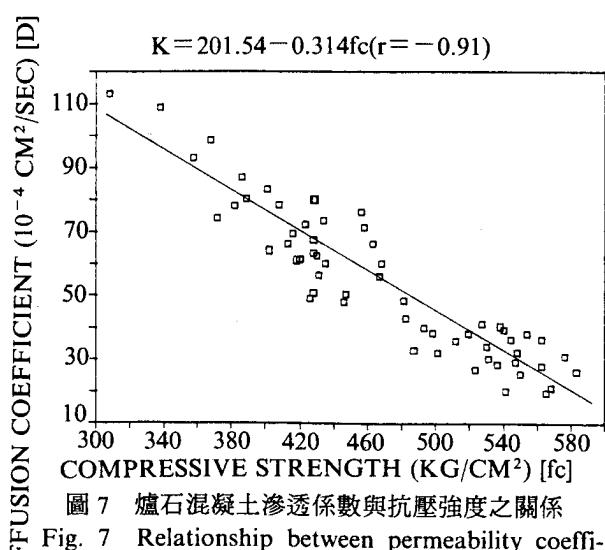


圖 7 爐石混凝土滲透係數與抗壓強度之關係
Fig. 7 Relationship between permeability coefficient and compressive strength

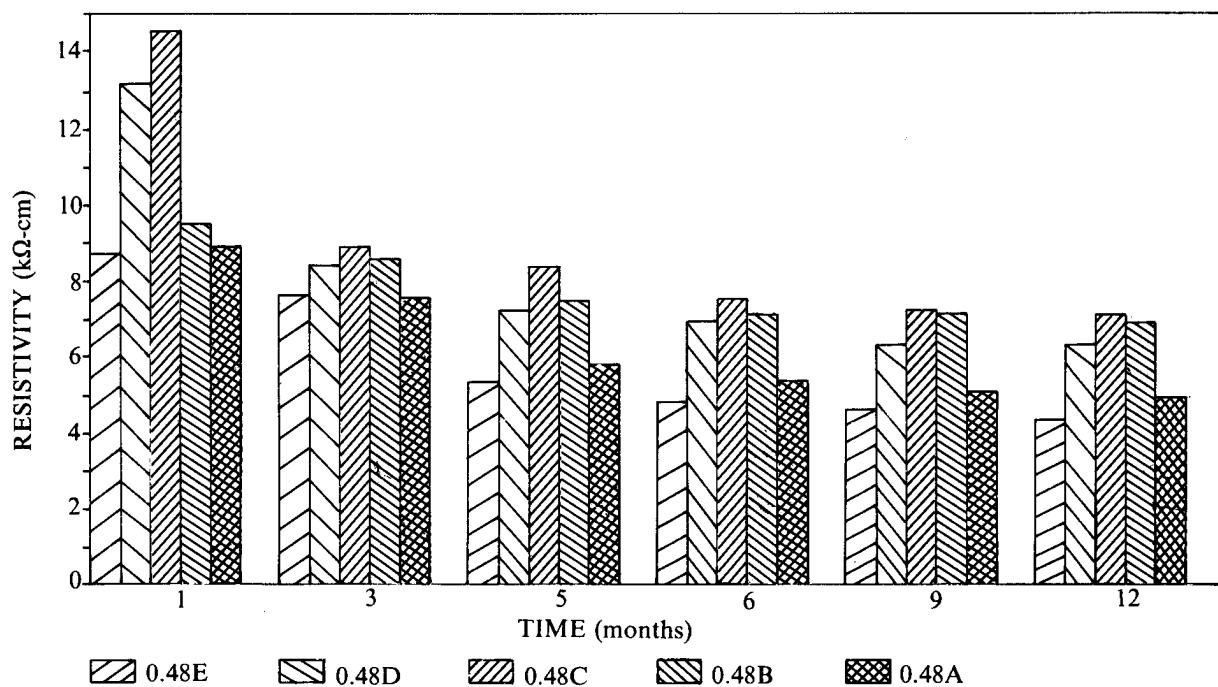


圖 8 爐石混凝土電阻與時間之關係 (水灰比 = 0.48)
Fig. 8 Relationship between electrical resistivity and time (W/C=0.48)

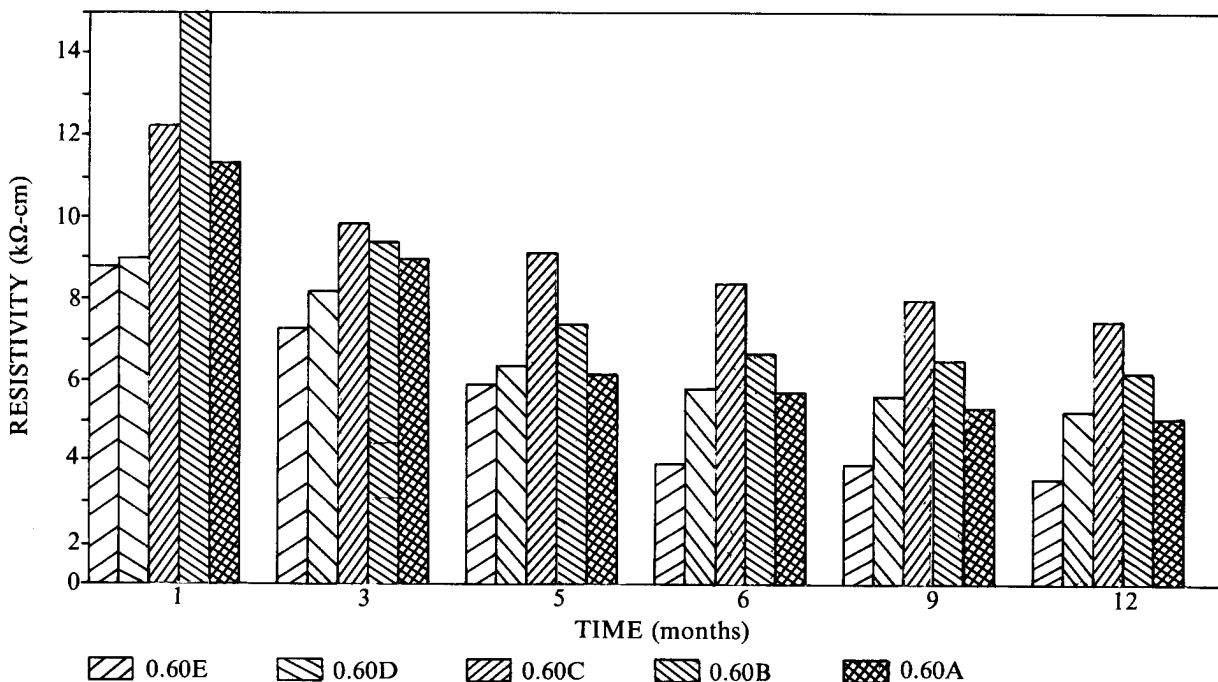


圖 9 爐石混凝土電阻與時間之關係 (水灰比 = 0.60)
Fig. 9 Relationship between electrical resistivity and time (W/C=0.60)

爐石混凝土耐海水性之研究

之電阻愈小，亦即愈可能造成鋼筋腐蝕，觀測至一年齡期為止，以爐石取代量為20–30%之爐石混凝土的電阻較大，亦即其較不易造成其內鋼筋之腐蝕。

4. 氯離子濃度

氯離子滲透入混凝土之程度可以 Fick 擴散定律 [如下式所示] 說明，且與混凝土品質及其環境條件均有關係，若能瞭解混凝土所處環境中之氯化物含量 C_0 ，並測得氯化物擴散係數 D ，則可由下式求得混凝土深度 x 處於 t 時間之氯化物含量 $C(x, t)$ ，其中 erf 為誤差函數⁽⁷⁾。

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$

氯離子對鋼筋腐蝕的影響已為人所熟知，其會破壞鋼筋表面之鈍化保護膜，加速鋼筋腐蝕，亦會侵蝕水泥的水化產物，海水中之氯離子主要來源為氯化鈉及氯化鎂，其中以氯化鎂對混凝土的侵蝕較為嚴重，當氯化物和氫氧化鈣反應後，生成之氯化鈣會和鋁酸三鈣 (C_3A) 反應生成不溶性的氯化鋁酸鈣水化物 ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)，因此，大部份的氯離子是成結合的狀態。

圖10~圖13所示為浸泡於海水中爐石混凝土

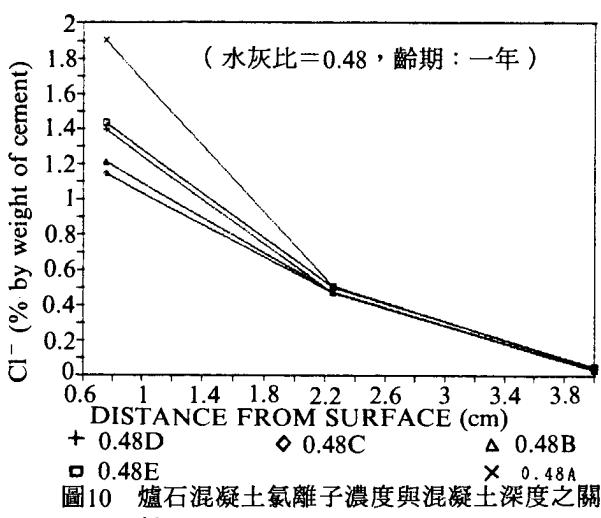


Fig. 10 Content of chloride ion in concrete

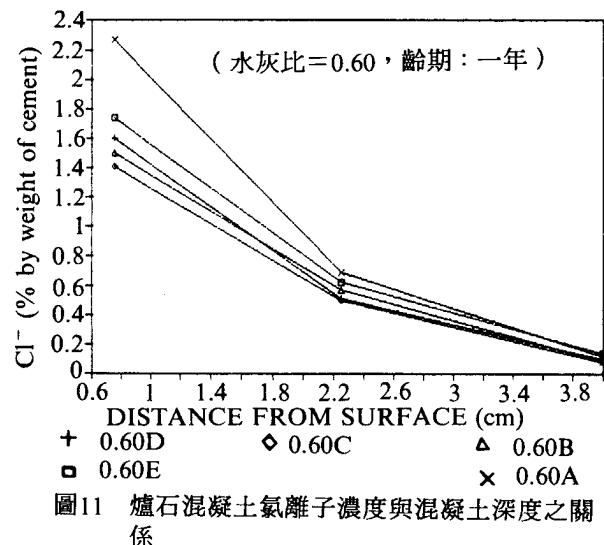


圖11 爐石混凝土氯離子濃度與混凝土深度之關係

Fig. 11 Content of chloride ion in concrete

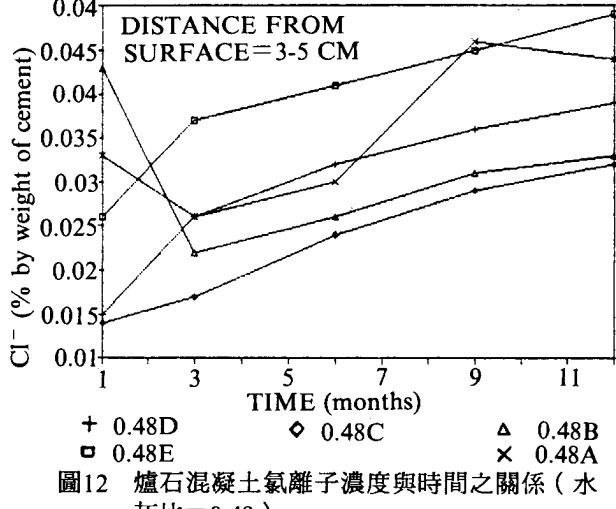


圖12 爐石混凝土氯離子濃度與時間之關係 (水灰比=0.48)

Fig. 12 Relationship between content of chloride ion and time ($W/C = 0.48$)

內氯離子濃度與時間及混凝土深度之關係，試驗時係將 $10\text{cm}\phi \times 20\text{cm}$ 之圓柱試體切割成薄片，並依不同深度（計有距混凝土表面 $0–1.5$ 公分、 $1.5–3.0$ 公分及 $3.0–5.0$ 公分等三種）採取水泥砂漿，經烘乾、磨碎，使其通過#325篩，而後取5公克試樣加入不含氯離子之蒸餾水50毫升，充分振盪10小時，靜置1小時，並過濾，最後以綜合水質分析儀量測氯離子濃度，而氯離子濃度

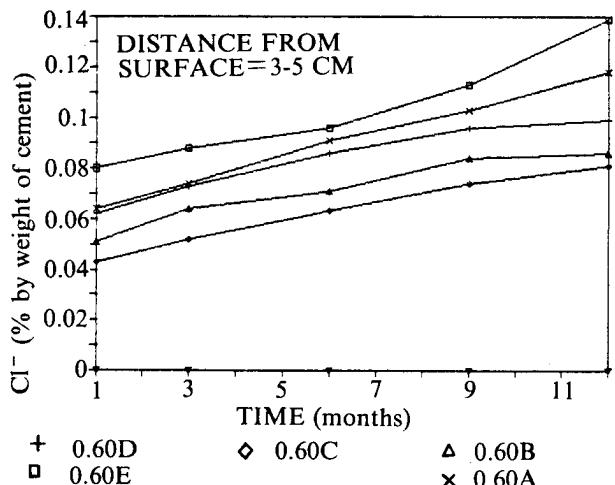


圖13 爐石混凝土氯離子濃度與時間之關係 (水灰比=0.60)

Fig. 13 Relationship between content of chloride ion and time (W/C=0.60)

乃指對拌和水泥重量百分比而言。

由圖所示可知，將試體浸泡於海水28天齡期時，無論何種條件之混凝土，距其表面1.5公分以內之氯離子濃度均已超過造成混凝土內鋼筋腐蝕之臨界氯離子含量0.10—0.20%^(8~10)，而距混凝土表面1.5—3.0公分之深度，於水灰比為0.48時，所有混凝土內氯離子濃度均未超過臨界氯離子含量，但當水灰比為0.60時，僅爐石取代量為20—30%之爐石混凝土內之氯離子濃度未超過臨界氯離子含量，至於距混凝土表面3.0—5.0公分之深度，無論何種水灰比之混凝土，其內氯離子濃度均未超過臨界氯離子含量。

當試體浸泡於海水一年齡期時，由於海水之侵蝕更為嚴重，故距混凝土表面3.0公分以內之深度，無論何種水灰比之混凝土，其內氯離子濃度均超過臨界氯離子含量，至於距混凝土表面3.0—5.0公分之深度，僅水灰比為0.60之純水泥混凝土及爐石取代量為50%之爐石混凝土內之氯離子濃度超過臨界氯離子含量。

將各配比混凝土中氯離子濃度與時間、混凝土保護層厚度作統計迴歸，則若已知混凝土保護

層厚度，即可求出可能造成鋼筋腐蝕(臨界氯離子濃度為0.15% (對水泥重量) [C(x, t)]) 所需之時間，以水灰比為0.48之混凝土為例，對純水泥混凝土、爐石取代量為10%、20%、30% 及50%之爐石混凝土，則氯離子浸透入混凝土內5公分之濃度達0.15%時，約分別需時11.5年、11.9年、22.9年、25.5年及17.7年。

對暴露於海域環境之鋼筋混凝土結構物而言，其鋼筋保護層厚度至少應為7.5公分^(8~10)，而本研究觀測至一年齡期時，大部分之混凝土於距混凝土表面3.0公分以上深度之氯離子濃度均尚未超過造成混凝土內鋼筋腐蝕之臨界氯離子含量，故距氯離子浸透入7.5公分保護層而直接侵蝕鋼筋，可能尚須一段時日。

由圖示亦可知，水灰比較低之混凝土，由於強度較高，水密性較佳，故氯離子浸透入之濃度亦較低。又氯離子浸透入混凝土之濃度亦隨著距其表面深度之增加而顯著降低。

另外，由圖示亦發現，當爐石取代量為20%時，氯離子浸透入爐石混凝土之濃度為最小，亦即其抵抗海水侵蝕之能力為最佳。

5. 腐蝕電位

混凝土內鋼筋初期之腐蝕不易由外觀察覺，若腐蝕嚴重至使混凝土龜裂，則將造成結構體之破壞，故通常以非破壞性試驗方法來偵測鋼筋腐蝕的情況，鋼筋腐蝕電位之量測即為其中的一種方法，依 ASTM C876-80⁽¹¹⁾ 規定之方法，並配合以飽和甘汞電極，可以量測鋼筋腐蝕電位，據 Stratfull⁽¹²⁾ 之建議，當電位 E 低於 -270mV，則鋼筋產生腐蝕，而電位 E 介於 -220mV 與 -270mV 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 -220mV，則鋼筋處在鈍態區，不產生腐蝕。

圖14、圖15所示為浸泡於海水中爐石混凝土內鋼筋之腐蝕電位，由圖示可知，以爐石取代量為10—30%之爐石混凝土的腐蝕電位較高，亦即

爐石混凝土耐海水性之研究

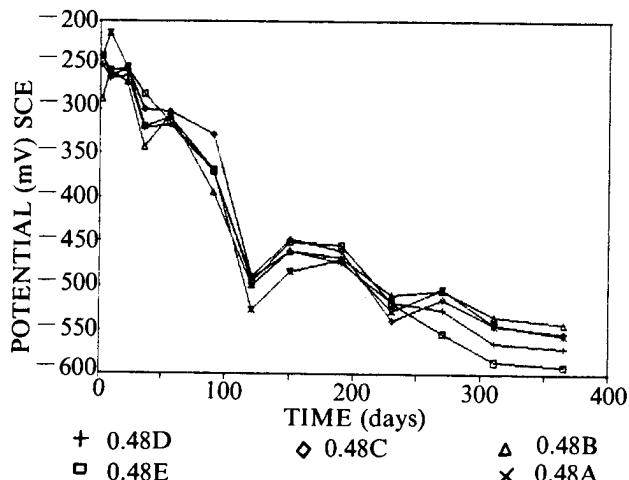


圖14 爐石混凝土內鋼筋腐蝕電位與時間之關係
(水灰比=0.48)

Fig. 14 Potentials of rebars in concrete ($W/C=0.48$)

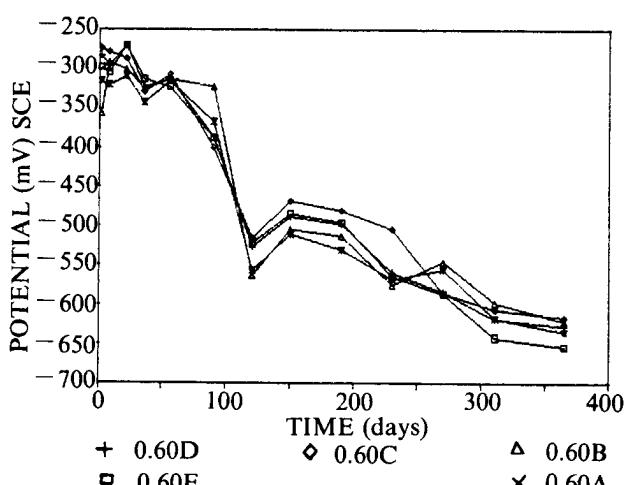


圖15 爐石混凝土內鋼筋腐蝕電位與時間之關係
(水灰比=0.60)

Fig. 15 Potentials of rebars in concrete ($W/C=0.60$)

其抗腐蝕性較佳。

經一年齡期後，將試體劈裂剖開，觀察其內鋼筋表面腐蝕情況，結果發現水灰比為0.60之純水泥混凝土及爐石取代量為50%之爐石混凝土內之鋼筋已產生腐蝕現象，此亦可印證造成混凝土內鋼筋腐蝕之臨界氯離子含量訂為0.10—0.20%乃是合理的，而其餘試體內之鋼筋仍完好，沒有腐蝕產生。另外，編號為0.48EC及0.60EC之控

制組試體，由於其置於空氣中，沒有受到海水之侵蝕，故腐蝕電位均相當高，觀測至一年齡期時，其電位分別為 -34mV 及 -118mV 。

6. 壓汞孔隙體積

水泥漿體的孔隙結構與漿體的工程性質有密切關係，而影響孔隙結構的因素有拌和水量、水泥水化程度及搗實條件等，故可藉由孔隙結構的量測來探討添加爐石對水泥漿體孔隙結構之影響，本研究係以壓汞孔隙測定儀來量測水泥漿體的累積孔隙體積。

圖16、圖17所示為水灰比0.60，而齡期分別為三個月及一年時之爐石混凝土的累積孔隙體積，由圖示可知孔隙的大小隨著齡期之增加而減少，即由大孔隙逐漸發展成小孔隙，且累積孔隙體積亦有減少趨勢，此乃水泥水化進行過程中，水化產物逐漸成長，因而填充了水泥漿體中的孔隙，故孔隙隨著齡期之增加而逐漸的減少及變小。

以一年齡期為例，由圖17所示可知純水泥混凝土、爐石取代量為10%、20%、30%及50%之爐石混凝土每公克試樣中的壓汞孔隙體積分別為

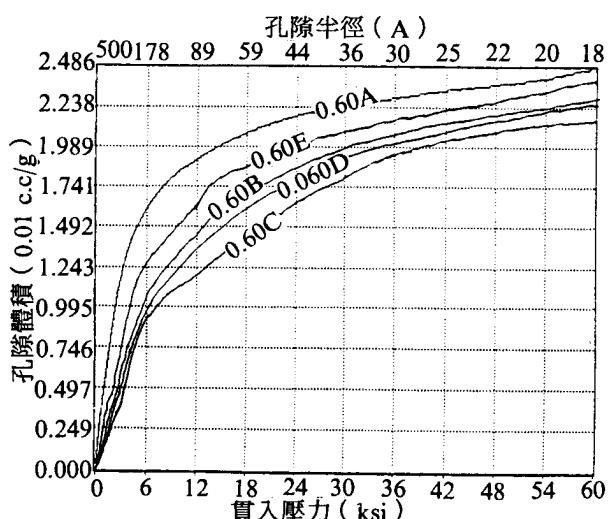


圖16 爐石混凝土壓汞孔隙曲線 (水灰比=0.60，齡期：三個月)

Fig. 16 Pore-size distribution in concrete ($W/C=0.60$, Times: 3 months)

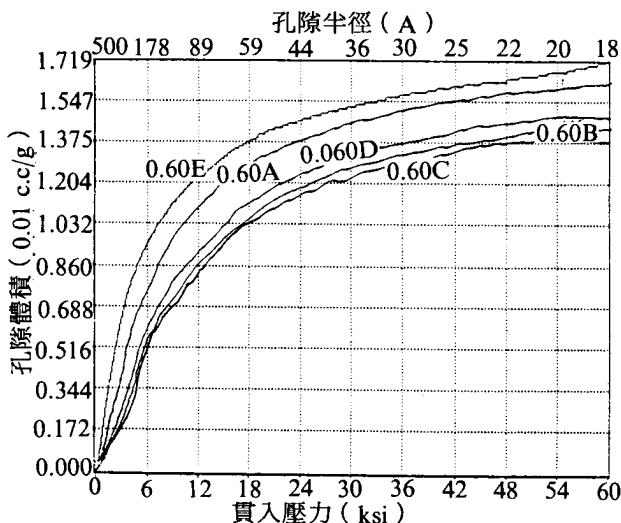


圖17 爐石混凝土壓汞孔隙曲線（水灰比=0.60，齡期：一年）
Fig. 17 Pore-size distribution in concrete (W/C=0.60, Times: 1 years)

0.0172cm³、0.0148cm³、0.0138cm³、0.0143cm³及0.0162cm³。以壓汞孔隙體積除以硬化水泥漿體體積（一公克水泥漿體的體積約為0.417cm³），可求得壓汞孔隙率（壓汞孔隙體積與試樣總體積的百分比），經計算可得純水泥混凝土、爐石取代量為10%、20%、30%及50%之爐石混凝土之壓汞孔隙率分別為4.1%、3.5%、3%、3.4%及3.9%，其大小順序大致與滲透係數相對應。由圖示亦可知爐石取代量為20%之爐石混凝土，其孔隙體積為最少。

四、結論

本研究觀測時間經一年，茲將所獲得之結論歸納如下：

- 對於浸泡於海水之爐石混凝土而言，隨著齡期之增加，其抵抗海水侵蝕之效果愈佳。
- 對於浸泡於海水之爐石混凝土而言，其滲透係數(k)與抗壓強度(f_c)之關係為

$$k = 201.54 - 0.314f_c \left(10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec} \right)$$

- 爐石取代量為20%之爐石混凝土，其滲透係

數較小，抵抗海水侵蝕之能力較高。

- 爐石取代量為20–30%之爐石混凝土，其電阻較大，亦即較不易造成其內鋼筋腐蝕。
- 觀測至一年齡期時，於距混凝土表面3.0公分以上深度，僅水灰比為0.60之純水泥混凝土及爐石取代量為50%之爐石混凝土內氯離子濃度超過造成混凝土內鋼筋腐蝕之臨界氯離子含量。
- 由混凝土中氯離子濃度與時間、混凝土保護層厚度之關係，可推估混凝土內鋼筋產生腐蝕所需之時間，以水灰比0.48之混凝土為例，對純水泥混凝土、爐石取代量為10%、20%、30%及50%之爐石混凝土，其混凝土保護層厚度5公分處鋼筋產生腐蝕所需之時間分別為11.5年、11.9年、22.9年、25.5年及17.7年。
- 觀測至一年齡期時，以爐石取代量為10–30%之爐石混凝土之腐蝕電位較高，亦即其抗腐蝕性較佳，且發現水灰比為0.60之純水泥混凝土及爐石取代量為50%之爐石混凝土內之鋼筋已產生腐蝕現象，此亦可印證造成混凝土內鋼筋腐蝕之臨界氯離子含量訂為0.10–0.20%乃是合理的。
- 觀測至一年齡期時，以爐石取代量為20%之爐石混凝土的孔隙體積為最少，且壓汞孔隙率之大小順序大致與滲透係數相對應。

參考文獻

- 陳清泉、陳振川，「爐石為水泥熟料與填加料對混凝土特性影響之文獻及國外現況調查研究」，台灣營建研究中心，民國76年3月。
- ASTM D1141-75, "Substitute Ocean Water".
- CNS 1240, "混凝土粒料"。
- CNS 560, "鋼筋混凝土用鋼筋"。
- 顏聰，「普通混凝土及含外加物混凝土水密性之研究」，土木工程，第10卷，第2期，1967年11月，pp. 1-14。
- Hope, B.B., and Ip, A.K., "Corrosion and Electrical Impedance in Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 15, 1985, pp. 525-534.

爐 石 混 凝 土 耐 海 水 性 之 研 究

- (7)Takewaka, K., and Mastumoto, S., "Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride penetration in Marine Environments," in Concrete in Marine Environment, ACI SP-109, pp. 381-400 (1988).
- (8)ACI 201. 2R-77, "Guide to Durable Concrete", Chapter 4, ACI Committee 201.
- (9)ACI 222R-85, "Corrosion of Metals in Concrete", Chapter 3, ACI Committee 222.
- (10)ACI 318-83, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", Chapter 4, ACI Committee 318.
- (11)ASTM 876-80, "Half cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete".
- (12)Stratfull, R.F., "Half-cell Potentials and The Corrosion of Steel in Concrete, "Highway Research Record No. 433, 1973, pp. 12-21.