

國立台灣海洋大學  
河海工程學系  
碩士學位論文

指導教授：黃 然

添加卜作嵐材料對於混凝土耐久性影響  
之探討



研究生：劉裕意 撰  
中華民國九十年六月

## 中文摘要

本研究旨在探討不同卜作嵐材料添加方式對於混凝土力學性質、物理性質及耐久性質之影響。首先是單一材料取代水泥，另一方面是二種材料同時取代水泥之方式；試驗項目包括抗壓試驗、電阻量測試驗、吸水率試驗、氣體滲透試驗、氯離子擴散試驗及腐蝕試驗等。

研究結果顯示，添加卜作嵐材料之混凝土圓柱試體的抗壓強度皆提高，其中以爐灰組(20% 飛灰+20% 爐石)為最佳，高出控制組約30~40%，且電阻係數提高、吸水率降低、氣體滲透係數降低。氯離子擴散係數，添加卜作嵐材料之混凝土圓柱試體皆低於控制組，以爐灰組(10% 飛灰及 40% 爐石)為最佳。腐蝕速率，在高水膠比 0.60 時，添加卜作嵐材料之混凝土圓柱試體皆低於控制組且以飛灰組(10%)為最佳，但在水膠比 0.45 及 0.35 時，只有飛灰組低於控制組。

# 目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
目錄	iii
圖目錄	iv
表目錄	viii
第一章 緒論	
1.1 .....研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究方法與流程.....	2
第二章 文獻回顧	
2.1 鋼筋混凝土劣化機制.....	4
2.2 腐蝕機理.....	4
2.3 混凝土耐久性試驗.....	5
2.4 孔隙結構對混凝土之影響.....	9
2.5 卜作嵐材料對混凝土之影響.....	10
2.6 飛灰與爐石.....	11
第三章 試驗計劃	
3.1 試驗變數.....	13
3.2 試驗材料與配比.....	13
3.3 試驗設備.....	19
3.4 試驗方法.....	26
第四章 結果與分析	
4.1 力學性質.....	28
4.2 添加卜作嵐材料對混凝土中鋼筋腐蝕之影響.....	37
4.3 物理性質.....	54
第五章 結論與建議	
5.1 結論.....	69
參考文獻	70

# 表目錄

表 3.1	水泥之化學成份.....	13
表 3.2	水泥之物理成份.....	14
表 3.3	細骨材之物理性質.....	14
表 3.4	細骨材之級配表.....	15
表 3.5	粗骨材之物理性質.....	15
表 3.6	飛灰的化學成份.....	16
表 3.7	飛灰的物理性質.....	17
表 3.8	爐石化學成份與物理性質.....	17
表 3.9	混凝土配比.....	18
表 3.10	氣體流量計轉換表.....	23
表 4.1	混凝土試體在各齡期之抗壓強度(W/b=0.35).....	28
表 4.2	混凝土試體在各齡期之抗壓強度(W/b=0.45).....	28
表 4.3	混凝土試體在各齡期之抗壓強度(W/b=0.60).....	28
表 4.4	水膠比 0.35 之氯離子擴散係數表.....	67
表 4.5	水膠比 0.45 之氯離子擴散係數表.....	67
表 4.6	水膠比 0.60 之氯離子擴散係數表.....	67
表 4.7	水膠比 0.35 之氣體擴散係數表.....	68
表 4.8	水膠比 0.45 之氣體擴散係數表.....	68
表 4.9	水膠比 0.60 之氣體擴散係數表.....	68

# 圖目錄

圖 1.1	研究流程圖.....	3
圖 2.1	鋼筋在混凝土中腐蝕示意圖.....	5
圖 2.2	四極式電阻在混凝土量測示意圖.....	7
圖 2.3	波特蘭水泥混凝土孔隙尺寸分布圖.....	10
圖 3.1	100 噸萬能材料試驗機.....	19
圖 3.2	雙槽式氯離子擴散示意圖.....	20
圖 3.3	雙槽式氯離子擴散槽裝置.....	21
圖 3.4	氯離子滴定儀.....	21
圖 3.5	氣體滲透圖.....	22
圖 3.6	氣體滲透槽示意圖.....	22
圖 3.7	氣體滲透儀器外觀圖.....	23
圖 3.8	恆溫恆濕養治箱.....	24
圖 3.9	恆電位恆電流儀.....	25
圖 3.10	混凝土四極式電阻量測儀.....	25
圖 3.11	腐蝕電位量測裝置圖.....	27
圖 4.1	不同飛灰取代量與抗壓強度關係圖(W/b=0.35).....	30
圖 4.2	不同飛灰取代量與抗壓強度關係圖(W/b=0.45).....	30
圖 4.3	不同飛灰取代量與抗壓強度關係圖(W/b=0.60).....	31
圖 4.4	不同爐石取代量與抗壓強度關係圖(W/b=0.35).....	31
圖 4.5	不同爐石取代量與抗壓強度關係圖(W/b=0.45).....	32
圖 4.6	不同爐石取代量與抗壓強度關係圖(W/b=0.60).....	32
圖 4.7	同取代量 20% 飛灰與 20% 爐石時試體之抗壓 強度關係圖(W/b=0.35).....	33
圖 4.8	同取代量 20% 飛灰與 20% 爐石時試體之抗壓 強度關係圖(W/b=0.45).....	33
圖 4.9	同取代量 20% 飛灰與 20% 爐石時試體之抗壓 強度關係圖(W/b=0.60).....	34
圖 4.10	不同取代量混合比例之爐灰與抗壓強度關係	

	圖(W/b=0.35) .....	34
圖 4.11	不同取代量混合比例之爐灰與抗壓強度關係 圖(W/b=0.45) .....	35
圖 4.12	不同取代量混合比例之爐灰與抗壓強度關係 圖(W/b=0.60) .....	35
圖 4.13	抗壓強度關係圖(W/b=0.35).....	36
圖 4.14	抗壓強度關係圖(W/b=0.45).....	36
圖 4.15	抗壓強度關係圖(W/b=0.6).....	37
圖 4.16	飛灰組試體開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.35)..	38
圖 4.17	飛灰組試體開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.45)..	38
圖 4.18	飛灰組試體開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.60)..	39
圖 4.19	爐石組試體開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.35)..	40
圖 4.20	爐石組試體開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.45)..	41
圖 4.21	爐石組試體開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.60)..	41
圖 4.22	同取代量飛灰組與爐石組之開路電位與累積 加速時間關係圖(W/b=0.35).....	42
圖 4.23	同取代量飛灰組與爐石組之開路電位與累積 加速時間關係圖(W/b=0.45).....	42
圖 4.24	同取代量飛灰組與爐石組之開路電位與累積 加速時間關係圖(W/b=0.60).....	43
圖 4.25	爐灰組試體開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.35)..	43
圖 4.26	爐灰組試體開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.45)..	44
圖 4.27	爐灰組試體開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.60)..	44
圖 4.28	開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.35).....	45
圖 4.29	開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.45).....	45
圖 4.30	開路電位與累積加速時間關係圖(W/b=0.60).....	46
圖 4.31	飛灰組與控制組之腐蝕速率關係圖(W/b=0.35).....	47
圖 4.32	飛灰組與控制組之腐蝕速率關係圖(W/b=0.45).....	47
圖 4.33	飛灰組與控制組之腐蝕速率關係圖(W/b=0.60).....	48
圖 4.34	爐石組與控制組之腐蝕速率關係圖(W/b=0.35).....	48
圖 4.35	爐石組與控制組之腐蝕速率關係圖(W/b=0.45).....	49

圖 4.36	爐石組與控制組之腐蝕速率關係圖( $W/b=0.60$ ).....	49
圖 4.37	同取代量飛灰組與爐石組之腐蝕速率關係圖( $W/b=0.35$ )..	50
圖 4.38	同取代量飛灰組與爐石組之腐蝕速率關係圖( $W/b=0.45$ )..	50
圖 4.39	同取代量飛灰組與爐石組之腐蝕速率關係圖( $W/b=0.60$ )..	51
圖 4.40	爐灰組與控制組之腐蝕速率關係圖( $W/b=0.35$ ).....	51
圖 4.41	爐灰組與控制組之腐蝕速率關係圖( $W/b=0.45$ ).....	52
圖 4.42	爐灰組與控制組之腐蝕速率關係圖( $W/b=0.60$ ).....	52
圖 4.43	腐蝕速率關係圖( $W/b=0.35$ ).....	53
圖 4.44	腐蝕速率關係圖( $W/b=0.45$ ).....	53
圖 4.45	腐蝕速率關係圖( $W/b=0.60$ ).....	54
圖 4.46	電阻係數關係圖( $W/b=0.35$ ).....	55
圖 4.47	電阻係數關係圖( $W/b=0.45$ ).....	56
圖 4.48	電阻係數關係圖( $W/b=0.60$ ).....	56
圖 4.49	電阻係數比較圖 .....	57
圖 4.50	吸水率關係圖( $W/b=0.35$ ) .....	57
圖 4.51	吸水率關係圖( $W/b=0.45$ ) .....	58
圖 4.52	吸水率關係圖( $W/b=0.60$ ) .....	58
圖 4.53	吸水率比較圖.....	59
圖 4.54	飛灰組與控制組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.35$ ) .....	59
圖 4.55	飛灰組與控制組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.45$ ) .....	60
圖 4.56	飛灰組與控制組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.60$ ) .....	60
圖 4.57	爐石組與控制組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.35$ ) .....	61
圖 4.58	爐石組與控制組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.45$ ) .....	61
圖 4.59	爐石組與控制組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.60$ ) .....	62
圖 4.60	同取代量飛灰組與爐石組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.35$ ).....	62
圖 4.61	同取代量飛灰組與爐石組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.45$ ).....	63
圖 4.62	同取代量飛灰組與爐石組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.60$ ).....	63
圖 4.63	爐灰組與控制組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.35$ ) .....	64

圖 4.64	爐灰組與控制組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.45$ ) .....	64
圖 4.65	爐灰組與控制組之氯離子擴散關係圖( $W/b=0.60$ ) .....	65
圖 4.66	氯離子擴散關係圖( $W/b=0.35$ ) .....	65
圖 4.67	氯離子擴散關係圖( $W/b=0.45$ ) .....	66
圖 4.68	氯離子擴散關係圖( $W/b=0.60$ ) .....	66

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

混凝土的耐久性是不容忽視的，尤其是台灣四周環海屬於海島型氣候，使得鋼筋混凝土(RC)結構物特別容易遭受鹽害，造成鋼筋發生腐蝕而加速結構物的劣化。一般 RC 建築物設計使用年限約在 50 年以上，但台灣地區鋼筋混凝土建築物使用十餘年即面臨大規模維修補強之困擾，此即因建築物耐久性設計未受應有之重視，是故未來工程建設會被要求耐久性及長期壽命，尤其是 BOT 工程，更促使投標者充份重視高品質，以降低「生命週期成本」及停滯維修所造成營運的損失。台灣國際金融中心及高速鐵路二項重大 BOT 被提出<sup>[1,2]</sup>，其預約期分別為 75 年及 100 年，如果興建時沒有考慮到耐久性，則其長期損失將是未來人民永遠的痛。根據以往的記錄，一般工程建設很容易產生鋼筋鏽蝕剝落<sup>[3]</sup>。鋼筋混凝土為國內建築之主要建材，內政部建築研定為促進科技及品質之發展，過去於籌備處階段，即完成「中華民國混凝土科技邁向二十一世紀發展之規劃」，及「高性能混凝土規劃與推動研究」。近年依此計畫結合了相當多的學會、大學等學術團體，自行辦理了高強度混凝土及高性能混凝土相關課題之基礎性能、施工品質保證等的研究工作、並舉辦多次相關的研討會及配比競賽。隨著混凝土之施工品質安全、應用方式與使用範圍不斷地增加，因此混凝土之組成已不再只是傳統之水泥與砂石等基本材料，添加化學摻料或卜作嵐材料，以提高混凝土之特性。與一般混凝土比較，高性能混凝土(High Performance Concrete,HPC)兼具高強度、高耐久性、高水密性及高流動性等特性，使用 HPC 不但可減少結構斷面，降低整體成本並且可減少泌水、析離及提高耐久性。在高性能混凝土中添加卜作嵐材料可增加耐久性、改善工作度、提高強度，並可取代水泥，不但增加材料品質、擴大應用方式及使用範圍，並對材料成本、資源再利用等問題有直接之貢獻。近年來世界各國運用工業副產品，如飛灰、爐石等卜作嵐材料取代水泥，已有顯著增加之趨勢，目前國內正在發展高性能混凝土，而卜作嵐材料則扮演重要角色。然而其單獨和水泥時使用仍各有優缺點存在，例如良質飛灰為圓球顆粒較易拌和均勻、浮水較少，乾縮較小但其早期強度較低、品質變異大、燒失量高等缺點；而爐石粉的缺點為不易拌和均勻，保水性差、浮水多、乾縮較大，但其卻有品質穩定、燒失量甚低的優點。就以混凝土品質及成效來考慮，同時添加飛灰及爐石粉可以降低只添飛灰的變異性，同時也可減少添加高量爐石粉所產生的泌水、龜裂等問題，也就以爐石粉的優點彌補飛灰的

缺點，而飛灰的優點又可彌補爐石粉的缺點。

## 1. 2 研究目的

本研究主旨在探討單一添加卜作嵐材料及同時添加二種卜作嵐材料混凝土之耐久性。研究範疇分為下列三部份：

1. 瞭解不同卜作嵐材料的用量對混凝土抗侵蝕能力(如腐蝕電位與腐蝕速率)之成效。
2. 探討不同卜作嵐材之用量對混凝土物理性質(如氣體滲透、氯離子滲透、吸水率、電阻係數)之影響。
3. 比較不同卜作嵐材料之用量，對混凝土力學性質(如抗壓強度)之影響。

## 1. 3 研究方法與流程

本研究灌製 10 × 20cm 混凝土圓柱試體並於製作完成後放置在飽和石灰水中進行養護，待齡期 28 天、56 天、91 天、112 天時取出進行抗壓試驗並且齡期到達 112 天後，進行腐蝕性質試驗(如開路電位與腐蝕速率)及物理性質試驗(如氯離子擴散試驗、吸水率試驗、氣體滲透試驗、電阻係數)。研究流程如圖 1.1 所示。

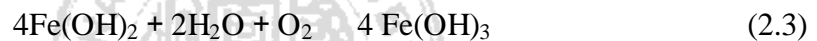
## 第二章 文獻回顧

### 2.1 鋼筋混凝土劣化機制

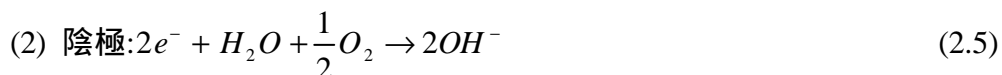
鋼筋混凝土是由鋼筋及混凝土所組成，所以一個結構物會不會破壞，自然與鋼筋腐蝕及混凝土緻密性有關。混凝土是孔隙性材料，其緻密性跟其孔隙結構有絕大的關聯，混凝土的孔隙體積縮小及形成不連續性孔隙，其有害離子(如氯離子、二氧化碳、水等)便無法藉由孔隙侵入混凝土內部與鋼筋表面接觸發生電化學反應破壞。鋼筋表面具有一層鈍態保護膜，一但此膜遭受破壞，便即產生鐵鏽而體積為原體積的六倍大<sup>[4]</sup>，因而腐蝕生成物在混凝土內部產生張力，導致混凝土產生裂縫，外界有害離子便更容易進入混凝土到達鋼筋表面，迅速產生大量的腐蝕生成物，使得鋼筋與混凝土間的握裹力消失，混凝土剝落影響結構物之安全。

### 2.2 腐蝕機理

鋼筋腐蝕的條件基本上需有陰極、陽極、電流、溶液及導電通路等五種因素。



當鋼筋生成  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  時體積脹增加鋼筋與混凝土的交界區體積 2~10 倍<sup>[5]</sup>，以致產生裂縫及脹裂，使得有害離子更易進入進而破壞混凝土結構物。



(3) 導電通路:由以上的反應可知氧化還原均有電子移轉，因此，良好的導電通路將提供電子的移轉，如此腐蝕才可順利進行。

(4) 電流:要使離子化反應順利進行必須有足夠的電動勢才可使電子流流動。

(5) 電解溶液:電化腐蝕又稱為濕腐蝕，由陽極陰極氧化還原反應，即可得知，腐蝕是必須在有水及氧氣的情況下才會發生。

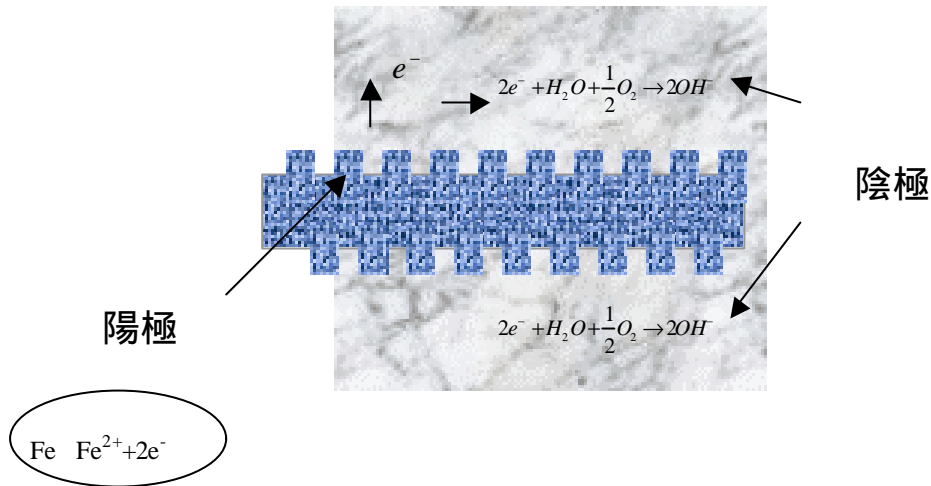


圖 2.1 鋼筋在混凝土中腐蝕示意圖<sup>[5]</sup>

## 2.3 混凝土耐久性試驗

### 氯離子擴散

氯離子擴散是利用離子濃度差而促使氯離子移動。氯離子試驗有許多不同的試驗方法與數學模式來推估擴散係數，本研究以參考 Andrade<sup>[6]</sup>所推導之擴散模式其理論如下：

### 氯離子擴散理論

混凝土孔隙中氯離子的移動模式主要有三種型式：(1) 擴散 (diffusion)、(2) 遷移 (migration)、(3) 對流 (convection)。因此，氯離子傳導過程的通量方程式經過一些假設可以得到 Nernst-Planck 方程式，可以寫成 2.6 式如下表示：

$$-j_j(x) = D_j \frac{\partial C_j(x)}{\partial x} + \frac{z_j F}{RT} D_j C_j \frac{\partial E(x)}{\partial(x)} + C_j V(x) \quad (2.6)$$

上式只適用於離子的電化學勢能梯度與穩態的傳送行為。但若將實驗數值代入所求出的擴散係數麻煩且不正確。所以在文獻中<sup>[6]</sup>，Andrade

對此方程式作了些假設與修正，其假設如下：

- (1)只有混凝土內部發生變化才會影響量測。
- (2)由於氯離子在溶液中的移動速度遠較高於混凝土中，所以可以忽略 Nernst-Planck 方程式中的對流項，即  $C_j V_j$  可被消去。
- (4)不考慮 Nernst-Planck 中的自然擴散項即可忽略  $D_j - C_j$  項。
- (5)待測槽的氯離子濃度必須遠小於另一槽。
- (6)混凝土試片的厚度不能太厚，才能在短時間內達到穩定狀態，則

$$\frac{\partial E}{\partial l} = \frac{\Delta E}{L}$$

其中， $L$  為混凝土試片的厚度， $E$  為電位勢能。故可將 Nernst-Planck 方程式修改並移項化簡後可得

$$D_{eff} = \frac{JRTL}{ZFC_{cl}\Delta E} \quad (2.7)$$

其中  $R = 1.9872 \left( \frac{cal}{mol \cdot ^\circ K} \right)$

$F =$  法利常數  $\left( 23063 \frac{cal}{volt \times eq} \right)$

$E$  為電場的電位 (V)

$Z$  為離子的電價數(1)

$L$  為混凝土試片厚度 (cm)

$T$  為實驗環境的絕對溫度 ( $^\circ K$ )

$C_{cl}$  為擴散槽的氯離子濃度  $\left( \frac{mol}{cm^3} \right)$

$J$  為擴散曲線的斜率其單位為  $\left( \frac{mole}{cm^2 \times sec} \right)$

其計算方式為莫耳濃度乘以正極槽蒸餾水的公升數，再除以混凝土試片的面積乘以時間所得擴散曲線斜率。

影響氯離子擴散的最主要因素，依據過去研究<sup>[7,8,9]</sup>顯示，氯離子擴散係數與混凝土中的孔隙、曝露時間溫度、水灰比、卜作嵐材料的添加有關。在添加卜作嵐方面，學者 Byfors<sup>[9]</sup>研究指出在普通混凝土水灰比為 0.5 時擴散係數為  $6.8 \times 10^{-12} m^2/sec$ ，而利用飛灰與矽灰各取代水泥重分別為 15% 與 20% 時，其擴散係數為  $3.2 \times 10^{-12} m^2/sec$  與  $0.59 \times 10^{-12} m^2/sec$  可知添加卜作嵐材料會造成氯離子擴散係數降低，乃因卜作嵐材料中含有矽、鋁成份在常溫有水的情況下會與混凝土中氫氧化鈣產生反應，而生成水化矽酸鈣(C-S-H)膠體，使混凝土的孔隙減少，阻斷混凝土中的連續通路，使孔隙細緻化而增加混凝土緻密性及降低氯離子擴散速率<sup>[8]</sup>。

混凝土電阻係數

在混凝土電阻率之測定法中，最被普遍使用者當係稱為溫納四電極法之方法，此測定法係 Frank Wenner<sup>[10]</sup>於 1915 年發表。

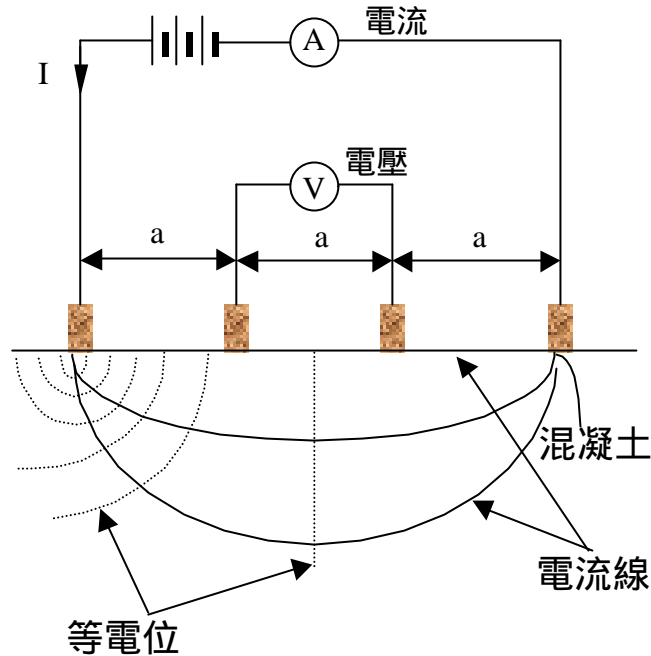


圖 2.2 四極式電阻在混凝土量測示意圖

根據文獻<sup>[10]</sup>中所得之混凝土電阻係數如下(2.8)所示。

$$r = 2 a \frac{V}{I} \quad (\text{單位：k} \Omega \cdot \text{cm}) \quad (2.8)$$

其中， $r$ :電阻係數

$a$ :探頭間距

$\frac{V}{I}$ :電阻

混凝土電阻係數是混凝土內部孔隙水份多寡與連通性的一個指標，亦與混凝土的品質相關的。電阻係數為水泥含量、水灰比、養護條件及添加物等因素所控制。氯離子的侵入不會立即反應於混凝土電阻係數，需有充裕的時間使氯離子溶解於孔隙水中，才會降低混凝土電阻係數值。氯離子是屬於一種濕性的化學離子，容易使水份停留在混凝土孔隙中，導致混凝土的傳導率增加，這是為何氯離子經常發生減少混凝土電阻係數的主要因素。

### 氣體滲透試驗

#### (1)氣體滲透與擴散

氣體滲透是在量測一端外加高壓另一端出口為通過混凝土之流

量。氣體滲透係數。混凝土氣體滲透係數是施加一壓力差來量測混凝土的連通孔隙所通過之氣體流量。所以滲透係數與混凝土的孔隙結構有關，溫度是跟氣體黏滯係數有關。在穩定流狀態下考慮氣體壓縮性，氣體滲透係數  $K_0$  ( $\text{m}^2/\text{sec}$ ) 可以由 2.9 式計算出來。當不考慮氣體壓縮性時，氣體滲透係數  $K_0$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) 可由 2.10 式被計算出來。

$$K_0 = h \frac{Ql}{tA} \frac{2p}{(p_1^2 - p_0^2)} \quad (2.9)$$

$$K_0 = \frac{Q l h}{t A \Delta P} \quad (2.10)$$

試驗的過程是一加速過程試驗：一般來說時間小於 1 小時。實驗所用的氣體為避免與混凝土產生反應，而造成混凝土結構的改變。因此，使用氧氣 ( $\text{O}_2$ ) 或氮氣 ( $\text{N}_2$ ) 而不使用會造成混凝土碳化的二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )。

## (2) 試驗方法

在試體兩側使用不同的相對壓力差，而造成混凝土兩平行面產生一個單軸的氣體流。通過混凝土流量的大小與壓力差的大小、試體斷面積與厚度、連通孔隙的大小與所使用的氣體種類不同而不同。實驗的主要儀器包括氣體供應器 (gas supply)、壓力計與調節器 (pressure regulator with gauge)、滲透試體槽、氣體流量計 (gas flow meter)。

## (3) 試體試驗前處理

量測前必須確定混凝土完全乾燥因為混凝土孔隙含水量對其氣體擴散係數有很大的影響。所以如何使混凝土試片保持完全乾燥是一大主題，若是在高溫烘乾下恐怕產生熱裂縫，是故本研究參考文獻<sup>[1]</sup>中兩種試體先前處理方式：(A)  $20 \pm 2$  且相對濕度  $65 \pm 5\%$  的環境下靜置 28 天。(B)  $105 \pm 5$  環境烘乾七天，接著靜置於  $20 \pm 2$  且相對濕度  $0\%$  的環境下三天。

前者模擬一般建築物的暴露環境，後者則會產生較高的氣體滲透係數。在試驗過程中每個試體的前處理必須相同，實驗結果才能被比較。不同的水灰比或不同的養護條件皆會造成氣體滲透係數明顯的不同。是故本研究以  $50$  烘乾七天接著放置在恆溫恆濕箱 ( $20$  相對濕度  $0\%$ ) 中兩天。

## (4) 試驗的模擬

試驗所採用的壓力儘可能越小越好，較常使用的壓力為  $0.5 \sim 2.5 \text{bar}$ ，使用的氣體種類，以氧氣與氮氣較方便試驗。當氣體滲透係數越低時，需要較長的時間才能獲得穩定的氣體流。故本研究係採  $2.5 \text{bar}$  氧氣來做擴散試驗。

## (5) 氣體滲透之相關研究

Calogovic<sup>[12]</sup> 利用數值的方法導出氣體流在壓力隨時間改變的條件下孔隙材料之比氣體擴散係數。在使用適當模式與準確的實驗室設備下，經實驗證實理論結果符合。方法上，量測變氣體壓力與標準的固定壓力都有一致的認同性。

Nataliya<sup>[13]</sup>等使用一方法量測在受當軸抗壓下的氣體擴散試驗。主要的設備為：兩片特別設計傳遞穿透氣體之抗壓版、密封試體的室溫硫化橡膠（room temperature vulcanize rubber, RTV）。實驗結果顯示當橡膠能有效的塗封試體時，能產生極小的密封，不會影響到試體的應力與應變之關係。這個實驗可初步發現微裂縫與氣體滲透的關係。

SanJuan<sup>[14]</sup>等指出孔隙結構與含水量會直接影響到混凝土的滲透性。因此，任何會影響這兩個因子的因素都將會對混凝土的滲透性產生影響。儘管當環境條件都被控制住時，混凝土的氣體滲透係數仍有很大的分佈範圍。氣體滲透要達到平衡值  $10^{-16} \text{m}^2$  要達 18 年以上之久，這實驗以 20 年時間對氣體滲透進行統計與分析。研究氣體滲透因子與混凝土品質間的關係。

Jacobs<sup>[15]</sup>探討試體含水量對氣體滲透的影響。研究結果顯示氣體滲透係數取對數與孔隙中含水量之百分比成一線性關係。且水灰比對氣體滲透的影響關係也被討論。此外，混凝土不同齡期的也在這被量測。

## 2.4 孔隙結構對混凝土之影響

混凝土屬孔隙性材料，對於孔隙的分類尚未完全建立及承認，主要分類為如圖 2.3 所示，有四類夯實孔隙（compaction pores）是拌合時夯實所產生的，是人為孔隙。輸氣孔隙（entrained pores）是加入化學摻料所產生的孔隙。我們主要討論的是毛細孔隙（capillary pores）和膠體孔隙。

### 膠體孔隙

主要形成膠體孔隙是水泥在水化過程中，水化物無法完全填充所導致而成的。屬小到中的孔隙而且不連續存在，於膠體孔隙中的水是可以部份取出，而膠體孔隙也是影響水泥漿體乾縮潛變的因素，占漿體孔隙體積的 40%~55% 或漿體體積的 28%。

### 毛細孔隙

主要形成毛細孔隙的原因，是水泥漿在水化過程中多餘的用水量未完全參加水化而形成的孔隙，屬中到大孔隙，其體積大小是影響混凝土強度的

因素。

## 2.5 卜作嵐材料對混凝土之影響

鋼筋混凝土結構物要耐久，就必須混凝土夠緻密，以致有害離子無法由孔隙滲透侵入至鋼筋表面與鋼筋發生電化學反應，以致鋼筋腐蝕而產生張力，以致混凝土剝落產生更大裂縫，而加速腐蝕，加速結構物破壞。而如何減少混凝土孔隙體積及形成不連續孔隙，根據過去文獻<sup>[17]</sup>顯示添加卜作嵐材料以形成 C-S-H 膠體更微小的孔隙結構，以達到混凝土更緻密化。

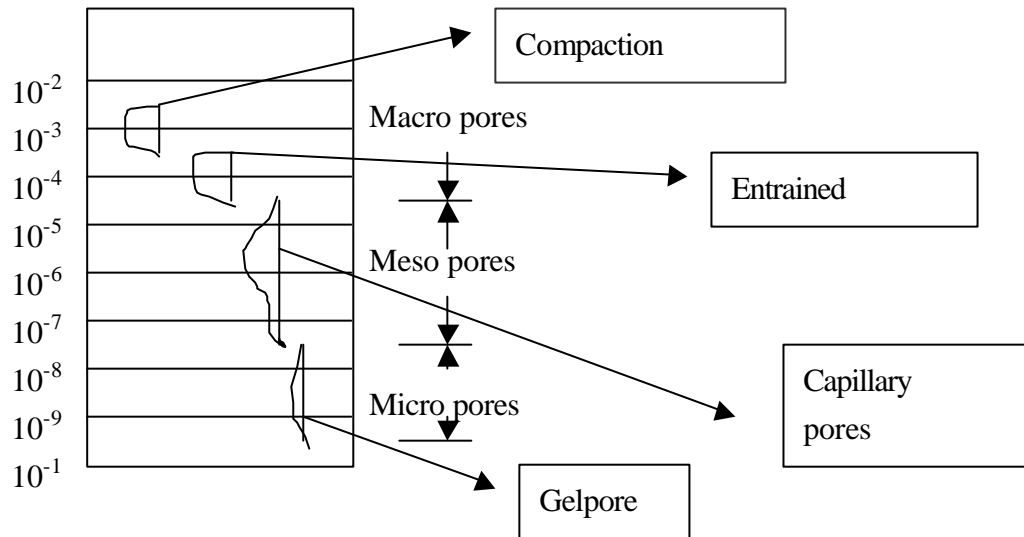
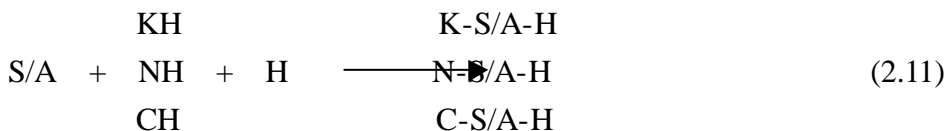


圖 2.3 波特蘭水泥混凝土的孔隙尺寸分布圖<sup>[16]</sup>

所謂卜作嵐材料，就是指含氧化矽及氧化鋁，能與水泥水化而生成之氫氧化鈣或外加鹼質物產生緩慢卜作嵐水化反應，而有類似水泥水化產物之膠結性反應之任何材料均屬之，卜作嵐反應式可簡略如下式 2.11 所示。



就 ASTM C-618 對卜作嵐的定義：”矽質或矽質與鋁質材料，本身擁有或不帶有膠結能力，但在研細形狀及有水份存在。在常溫會氫氧化鈣產生化學反應形成複合物而有膠結性質 .....” 這類的材料有粘土、飛灰、爐石等。其中飛灰、爐石為工業廢料，是故有很多研究者研究其特性，一方面可以減低成本，另一方面可以減少環境破壞及增加混凝土之緻密。

## 2.6 飛灰與爐石

飛灰為火力發電廠燃煤生成的產物，隨著重工業的發達而產量大幅成長，造成堆積及拋棄之困擾，目前飛灰資源化利用及處理正是各國重視而競相研究之課題，飛灰近年來更是被視為是高性能混凝土之主要原料，而積極地進行研究飛灰在水泥中之反應有卜作嵐或類似卜作嵐反應會形成與水泥熟料相似之 C-S-H 膠體及 C-A-H 鹽類，可直接添加或部份取代水泥，含有飛灰之混凝土可以增加其耐久性。飛灰由於其煤原料來源不同而造成種類不同，若為無煙煤或煙煤則會產生含鈣質較低之 F 級飛灰，若為褐煤或次煙煤則會生含鈣質較高(通常 CaO 大於 10%)之 C 級飛灰含鈣質多者其反應性較高，有類似水泥熟料之良好膠結性能及卜作嵐反應效果，否則僅有具卜作嵐反應而已。就 ASTM C618 對飛灰的定義：“粉煨或研磨煤燃後經細分的殘留物 ……” ，用在混凝土的飛灰可分成二類：F 級飛灰只有卜作嵐性質，C 級飛灰除了有卜作嵐性質外，尚有膠結性質，也就是這種材料與水混合會有自硬能力。C 級飛灰的石灰 (CaO)含量會超過 10%。

飛灰有效的應用了波特蘭水泥水化物：(1) 溶解了存在於水泥孔隙結構的氫氧化鈣及鹼；(2) 波特蘭水泥水化所產生的熱，這是飛灰初期反應的重要催化因素。

在混凝土中摻用飛灰的好處有：(1) 改進工作度 (2) 減少骨材分離 (3) 減少泌水 (4) 減少水化熱 (5) 減少乾縮 (6) 增進對硫化物腐蝕的抵抗能力 (7) 增加極限抗張及抗壓強度 (8) 減少透水性<sup>[18]</sup>。

爐石粉為中國鋼鐵公司煉鐵所產生之廢料爐石。水淬高爐爐石是經 1500 高爐高溫之熔融爐渣再水急冷卻使用高壓來噴射急速冷卻的一種砂狀。CNNS12223 鹽基度 =  $\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \geq 1.4$ ，鹽基度越高，玻璃質亦高，強度越高。

在混凝土中添加爐石粉的好處(1) 乾燥收縮之減少 (2) 鹼骨材反應之抑制 (3) 水密性之增加 (4) 可降低水和熱溫度之上昇 (5) 化學性之抵抗作用 (6) 耐熱性之增加 (7) 能改善施工性及工作性 (8) 對氯離子含量之砂抑制 (9) 可大量減少水泥使用量降低成本 (10) 可製造高性能高強度混凝土以及流動化混凝土 (11) 可防止浮水現象 (12) 增加耐久性 (13) 可抵制水泥中之游離石灰<sup>[19]</sup>。

單獨與水泥使用仍有缺點，如良好的飛灰為圓球顆粒較易拌和均勻，浮水較少，乾縮較小，但其早期強度較低、品質變異大、燒失量高等缺點，而爐石缺點是不易拌和均勻、保水性差、浮水多、乾縮較大，

但其卻有品質穩定、燒失量甚低的優點，是故同時添加飛灰及爐石粉可以降低飛灰的變異性，同時也可以改善添加高量爐石所產生的泌水、龜裂等問題。

## 第三章 試驗計畫

### 3.1 試驗變數

卜作嵐材料部份取代水泥量:取代水泥量其中飛灰組，以飛灰取代水泥量 10%、20%；爐石組，以爐石粉取代水泥量 20%、40%，爐灰組飛灰 20% 爐石 20% 及飛灰 10% 爐石 40% 取代水泥量。

### 3.2 試驗材料與配比

#### 水泥

採用亞洲水泥公司洋房牌波特蘭第一型水泥，其化學性質與物理性質如表 3.1 及表 3.2 所示。

#### 細骨材

本試驗所用的細骨材取自宜蘭縣蘭陽溪，其物理性質與級配試驗結果如表 3.3 及表 3.4 顯示。

表 3.1 水泥之化學成分資料來源：亞洲水泥公司

水泥型號	第一型水泥 ( Type I Cement )	
	中國國家標準	試驗值
項目		
二氧化矽 ( SiO <sub>2</sub> ) %	----	20.89
氧化鋁 ( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) %	----	5.61
氧化鐵 ( Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) %	----	3.13
氧化鈣 ( CaO ) %	----	63.87
氧化鎂 ( MgO ) %	Max.6.0	2.93
燒失量 ( L.O.I ) %	Max.0.3	0.73
不溶殘渣 ( Ins.Res )	Max.0.75	----
矽酸三鈣 ( C <sub>3</sub> S ) %	----	50.4
矽酸二鈣 ( C <sub>2</sub> S ) %	----	22.2
鋁酸三鈣 ( C <sub>3</sub> A ) %	----	9.57
鋁鐵酸四鈣 ( C <sub>4</sub> AF ) %	----	9.51

表 3.2 水泥之物理成分

壩料空氣含量	Max.120	8.6
細度：Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Max.2800	3520
健度：Soundness (%)	Max.0.80	0.046
抗壓強度 Compressive Strength,kgf/cm <sup>2</sup> (psi)		
3 天 (days)	Min.126 (1800)	223 (3171)
7 天 (days)	Min.197 (2800)	316 (4494)
28 天 (days)	Min.281 (4000)	412 (5859)
凝結時間：Time of setting (Vicat test)		
初凝：Initial set (hr : Min)	Min.0 : 45	3 : 10
終凝：Finish set (hr : Min)	Max.8 : 00	5 : 30

資料來源：亞洲水泥公司

表 3.3 細骨材物理性質表

試驗項目	試驗依據規範	試驗結果
比重 (SSD)	CNS487	2.67
吸水率 (%)		1.7%
總含水量		2.2%

### 粗骨材

本試驗所用的粗骨材，採用宜蘭陽溪之天然石塊製造之碎石，經試驗分析，其基本物理特性列於表 3.5。

### 飛灰

本實驗採深澳火力發電場所生產飛灰，其化學成份及物理性質，表 3.6 及表 3.7 所示。

### 爐石

本試驗採用中鋼所生產的爐石，其物理及化學性質如表 3.8 所示。

表 3.4 細骨材級配表

篩號尺寸	停留百分比 (%)	累積百分比 (%)	通過百分比 (%)	CNS1240 規範通過百分比 (%)
3/8"	0.0	0.0	100.0	100
#4	1.8	1.8	98.2	95~100
#8	18.2	20.0	80.0	80~100
#16	24.3	44.3	55.7	50~85
#30	19.4	63.7	36.3	25~60
#50	17.3	81.0	19.0	10~30
#100	9.0	90.0	10.0	2~10
底盤	10.0	-	0.0	-
總計	100.0	300.8	-	-
細度模數(F.M.)=3.01				

表 3.5 粗骨材物理性質表

試驗項目	試驗依據規範	試驗結果
比重 (SSD)	CNS488	2.66
吸水率		0.9%
表面含水量		0.9%
烘乾時單位體積重		1775kg/m <sup>3</sup>
最大粒徑		25mm

表 3.6 飛灰的化學成分資料來源：深澳火力發電廠

化學成分	百分比 ( % )
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	86.94
CaO	0.45
MgO	0.40
$\text{K}_2\text{O}$	1.07
$\text{Na}_2\text{O}$	0.27
比重	2.06
含水量	0.53
燒失量	7.50
化學成分	百分比 ( % )
$\text{SiO}_2$	96.00
CaO	0.15
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.15
S	0.12
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.010
MgO	0.010
P	0.034
$\text{Sb}_2\text{O}_5$	0.017
Zn	0.016
MnO	0.012
PbO	0.010
$\text{SnO}_2$	0.006
$\text{ZrO}_2$	0.0016
CuO	0.0012
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.001
$\text{TiO}_2$	0.001
NiO	0.001
$\text{V}_2\text{O}_5$	0.001
Loss of Ignition	1.50
Total Carbon	1.30
Moisture	0.25 Max.
Total Alkali Metal	0.5

表 3.7 飛灰的物理性質

物理性質 ( Physical Properties )	
Color	Medium Gray
PH 值	7.0
比重 ( Specific Gravity )	2.1
密度 ( Density ( kg/m <sup>3</sup> ) )	158.74
表面積 ( Surface Area ( m <sup>2</sup> /g ) )	24

資料來源：深澳火力發電廠

表 3.8 爐石物理性質與化學性質

檢驗項目	檢驗結果		方法依據
化學成份	燒失量(L.O.I)(%)	1.04	高爐石主要成份分析標準操作說明(411-W-109)
	三氧化硫(SO <sub>3</sub> )(%)	2.13	
	硫化物硫(S)(%)	1.1	
	不溶物(I.R.)(%)	0.14	
	游離水份(%)	1.05	
	氯離子(Cl <sup>-</sup> )(%)	0.0068	411-W-119
物理性質	空氣含量(%)	4.4	高爐石粉物理質檢驗標準操作說明(411-W-221)
	密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.88	
	細度(cm <sup>3</sup> /g)	4290	
	325 篩篩餘(%)	1.4	
	活性指數(%)		
7 天	75.3		
28 天	118.6		

資料來源:亞洲水泥公司

## 配比與符號說明

本試驗所採用的試體尺寸為 10×20cm 的圓柱試體。混凝土試驗配比係參考 ACI-211 配比設計法，其配比設計坍度為 10cm。配比如表 3.9 所示。

表 3.9 混凝土配比

符號	水膠比 (W/B)	膠結材 (kg/m <sup>3</sup> )			骨材 (kg/m <sup>3</sup> )		水 (kg/m <sup>3</sup> )
		水泥	爐石	飛灰	細骨材	粗骨材	
A0	0.35	551	---	---	714	947	193
AFA1		496	---	55	704	933	193
AFA2		441	---	110	694	921	193
ASG2		441	110	---	710	941	193
ASG4		331	220	---	706	937	193
AFASG22		331	110	110	691	916	193
AFASG14		276	220	55	697	924	193
B0	0.45	429	---	---	614	1151	193
BFA1		386	---	43	597	1151	193
BFA2		343	---	86	581	1151	193
BSG2		343	86	---	608	1151	193
BSG4		257	172	---	600	1151	193
BFASG22		257	86	86	573	1151	193
BFASG14		214	43	172	584	1151	193
C0	0.6	322	---	---	706	1151	193
CFA1		290	---	32	695	1151	193
CFA2		258	---	64	682	1151	193
CSG2		258	64	---	701	1151	193
CSG4		194	128	---	695	1151	193
CFASG22		194	64	64	676	1151	193
CFASG14		162	128	32	684	1151	193

符號說明：

A、B、C：分別代表水膠比 0.35、0.45、0.60。

A0、B0、C0：分別代表不添加卜作嵐材料之控制組。

AFA1、BFA1、CFA1：分別代表飛灰取代量 10% 混凝土。  
AFA2、BFA2、CFA2：分別代表飛灰取代量 20% 混凝土。  
ASG2、BSG2、CSG2：分別代表爐石取代量 20% 混凝土。  
ASG4、BSG4、CSG4：分別代表爐石取代量 40% 混凝土。  
AFASG22、BFASG22、CFASG22：分別代表飛灰，爐石分別取代量為 20% 及 20% 混凝土。  
AFASG14、BFASG14、CFASG14：分別代表飛灰，爐石分別取代量為 10% 及 40% 混凝土。

### 3.3 試驗設備

#### 100 噸萬能材料試驗機

本試驗採用日本 SHIMADZU 公司所出品的 UH-100A 型萬能材料試驗機，可供混凝土及其他工程材料進行壓力、彎曲、鋼筋抗拉試驗。其最大荷重容量為 100 噸，荷重的範圍可設定為 2、5、10、20、50、100 噸等六種不同切換變化，最小讀數值為 1 公斤，屬於一迴路系統（closed-loop system）試驗機。試驗時，可由面版設定加載速率，亦可由旋轉式控制閥調整加壓速度大小，亦可連接電腦自動控制加載與記錄試驗數據。如圖 3.1 所示。



圖 3.1 100 噸萬能材料試驗機

## 雙槽式擴散槽

本試驗所使用之氯離子擴散槽為二槽式擴散槽，擴散槽是由 5 公釐的壓克力版所製成 20cm×20cm×25cm 方形容器。且為方便裝置試體，中間使用 2 公分厚固定式之壓克力版，將 2 公分後的圓柱試片安裝在壓克力版中之凹槽內，直到無滲水現象為止。試驗裝置示意圖如圖 3.2 及氯離子擴散槽試驗裝置如圖 3.3。

## 直流電源供應器

本試驗使用的直流電源供應器係固偉公司所生產，型號為 GPS3030；以指針方式指示電壓及電流的供應情形，輸入端電源可為 110V/200V/220V/240V 及 50Hz 與 60Hz，且具有一組輸出端，可調整輸出直流電壓為 0 30V，供應電流強度為 0A 12A。

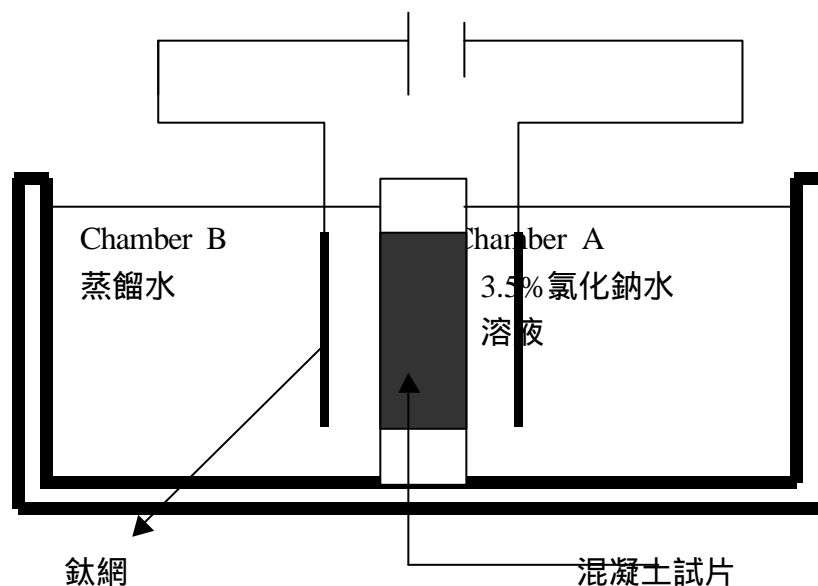


圖 3.2 雙槽式氯離子擴散示意圖

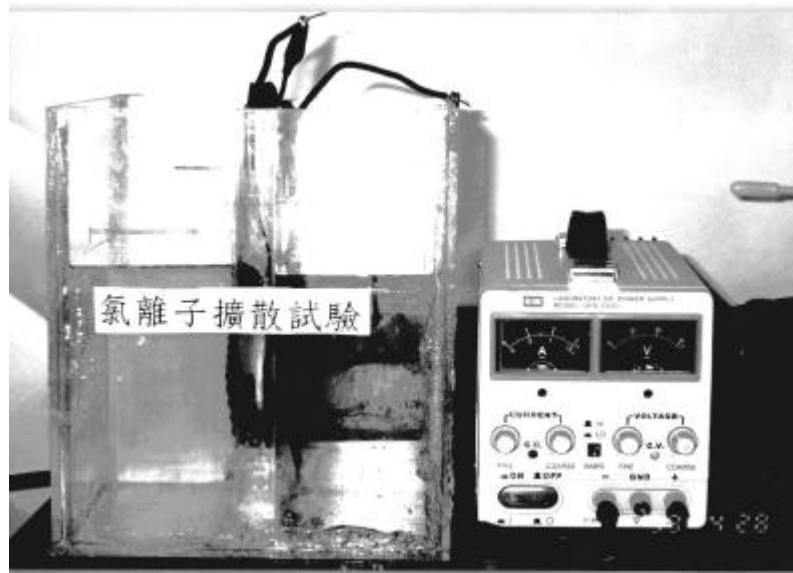


圖 3.3 雙槽式氯離子擴散槽裝置

### 氯離子滴定儀

本試驗所使用的氯離子滴定儀為瑞士商 Metrohm 所出品之滴定儀，其組合為 686 型滴定訊號處理器，並配合 665 型滴定儀。其功用依標準溶液及離子選擇電極之不同而異，除可做氯離子滴定外，尚可做酸鹼滴定、pH 測定及鈉鉀離子測定等其他功能。本試驗用來作為氯離子滴定功能。標準溶液為 0.01N 的硝酸銀 ( $\text{AgNO}_3$ ) 溶液，配合氯離子電極棒，最低可量測至 0.001% (重量百分比)，為電子式滴定儀，如圖 3.4 所示。

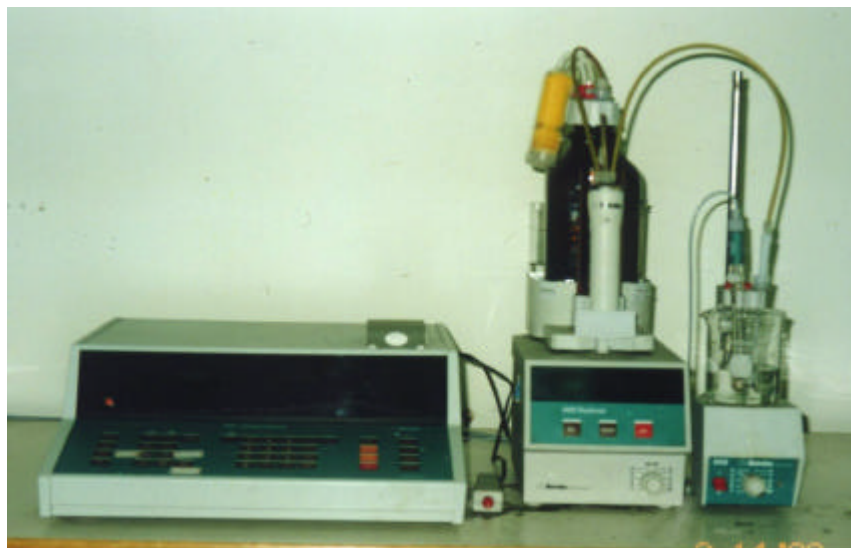


圖 3.4 氯離子滴定儀

## 氣體滲透試驗

本試驗設備係參考 CEMBUREAU 滲透儀來測定滲透性，其設備主要包括氣體供應器 (a gas supply)、壓力控制器與壓力計 (a pressure regulator with pressure gauge)、氣體滲透槽 (the testing cell)、氣體流量計 (gas flow meter) 等，其儀器外觀與示意圖如圖 3.5、圖 3.6 所示，滲透槽示意圖如圖 3.7 所示。採固定壓力且以氣體選擇不會與混凝土試體發生化學反應的氣體氧氣 ( $O_2$ ) 或氮氣 ( $N_2$ )，所使用的壓力範圍為 2-5bar ( $2-5 \times 10^5 Pa$ )。

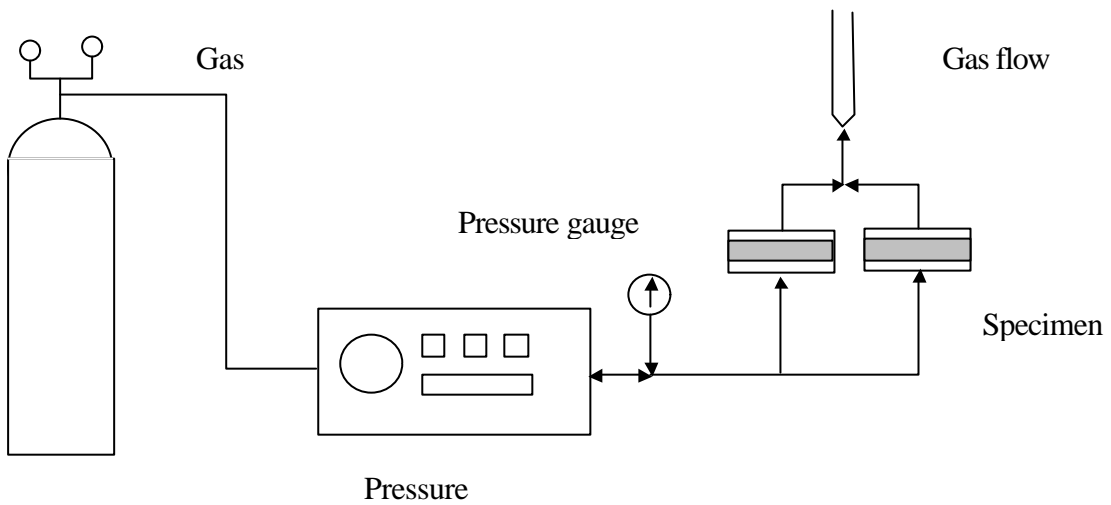


圖 3.5 氣體滲透圖<sup>[20]</sup>

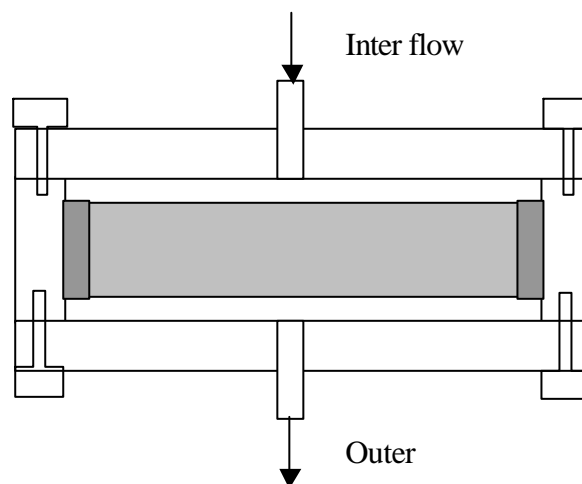


圖 3.6 氣體滲透槽示意圖<sup>[20]</sup>



圖 3.7 氣體滲透儀器外觀圖

### 氣體流量計

本試驗所採用之氣體流量計，為美國 ALORG 公司所製造的流量計，其型號分別為：032-15S 和 042-07T，量測刻度為 0 65，對氧氣量測範圍分別 0 71.5ml/min 和 0 29.55ml/min。不同流量計對不同氣體有不同之流量轉換表，可依氣體通過量而讀出不同流量指數，再依照氣體流量表配合內插法，即可求出所通過氣體之流量其對氧氣轉換表如表 3.10 所示。

表 3.10 氣體流量計轉換表

單位：ml/min

流量計刻度	032-15S	042-07T
65	71.50	29.55
60	61.50	26.70
55	52.00	24.00
50	43.70	21.40
45	36.00	18.60
40	29.00	16.40
35	23.00	14.07
30	18.00	11.80
25	14.00	9.80
20	10.00	7.85
15	8.00	6.28

10	7.00	4.80
5	3.00	3.50

### 恆溫恆濕養治箱

本試驗設備是用來進行養治氣體滲透試驗之烘乾後試體，使其達到混凝土能達到一個穩定平衡的溫度與乾濕狀態。

本機是國內聲慶儀器公司所出品的 Labtek P-9000 型。濕度控制範圍為 0 99.9%，誤差範圍是 2%；溫度控制範圍為-100 200，誤差範圍為 0.2。除可設定訂溫定濕時間，並具有自我異常監測及安全保護等功能，如圖 3.8 所示。



圖 3.8 恆溫恆濕養治箱

### 恆電位恆電流儀

本試驗所採用的恆電位恆電流儀是由日本 NICHIA 公司生產製造，型號為 NP-G1001ED Potentiostat/Galvanostat。本儀器提供開路電位法和直流極化法。其主要功能有量測開路腐蝕電位、提供恆電位(最大至 10Voltage)及提供恆電流(最大至 1A)等三種，電流量測範圍為 0.1mA~1000mA。並且在使用直流極化法時配合小型記錄器(SS-100F)將資料連續記錄並加以分析之，如圖 3.9 所示。



圖 3-9 恆電位恆電流儀

### 四極式電阻量測儀

本試驗所使用的混凝土四極式電阻量測儀是由瑞士 Proceq 公司出品。利用其四極式探針接觸在混凝土表面來量測電阻係數。其阻抗為  $10\text{M}\Omega$ 、額定電流  $180\text{mA}$ 、頻率為  $72\text{Hz}$ 、量測範圍為  $0\Omega\cdot\text{cm} \sim 99\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 、精確度為  $\pm 1\Omega\cdot\text{cm}$ ，如圖 3.10 所示。



圖 3.10 混凝土四極式電阻量測儀

### 3.4 試驗方法

#### 氯離子擴散試驗

將達 91 天齡期的混凝土試體取出，取試體之中段部分，以快速切割機切割成直徑 10 公分厚度 2 公分之圓柱試片，並將試片置於擴散槽中間壓克力版的槽孔中，四周以防水材料塗封，使試片固定於壓克力版上且無滲水現象，再依同樣方法塗封壓克力版周圍的接縫處並以 A 槽和 B 槽各靜置 72 小時來確定無滲水現象。

接著以電極片置於 A、B 兩槽試體表面，並完成電場線路連接工作。在陰極槽（A 槽）置入濃度 3.5% 的氯化鈉（NaCl）溶液 3.5 公升，而陽極槽則置入 3.5 公升的蒸餾水，以 20V 電壓進行加速擴散試驗，每隔 24 小時取樣並利用氯離子滴定儀量測各槽的氯離子濃度一次。在每次取樣時，為避免通入電場影響量測精度，取樣前應暫時切斷電源並靜置 20 分鐘，以免電場的干擾影響溶液濃度的均勻性，實驗期間監測每一擴散槽內的電流變化已確定電場線路連接的完整性。

本試驗所採用的電極為 12cm×12cm 的鈦網作為正負電極片，線徑為 1 公釐。在鈦網與電線的接觸處塗上環氧樹脂（epoxy），以防止實驗中因陽極氧化反應產生腐蝕而造成線路短路，而影響試驗進行。

此外，在滴定氯離子濃度時，取其溶液試樣重量 1 公克，所用的電子秤其精密度達 0.01 公克。

#### 吸水率試驗

本試驗是參考 ASTM C642-90 硬固混凝土吸水率試驗法進行實驗，首先將養護試體取出直接置入烘箱（100—110℃）中乾燥，待 24 小時後取出冷卻到室溫秤重，待此值相差在 0.5% 時記錄其重量(A)；然後在試體置入於水中，每 48 小時取出試體將表面拭乾後秤重，待實驗值相差在 0.5% 時，記錄其重量 (B) 並帶入下列公式求出試體之吸水率：

$$\text{混凝土試體吸水率 (\%)} = \left[ \frac{B - A}{A} \right] \times 100 \%$$

#### 表面電阻試驗

本試驗採用四極式電阻量測計進行表面電阻試驗，圓柱試體到達齡

期後取出，並將試體置入水槽內使其飽和，約 24 小時後試體取出放置面乾內飽和狀況，既可開始量測電阻係數，量測時試體表面及四式探針須保持乾淨。

### 腐蝕試驗

本研究進行的腐蝕試驗，所採用長度為 35 公分的#4 竹節鋼筋使用前以 400 號砂紙磨光，並以丙酮去除表面油脂後，置於烘箱內烘乾，鋼筋埋深長度為距圓柱試體頂端 15 公分，其餘部分皆使用防水材料塗封，待試驗齡期結束，將上端之防材料去除並接上電線，完成電路配置如圖 3.11 所示。其中鋼筋為工作電極飽和甘汞電極為參考電極白金電極為輔助電極。將試體浸置於 3.5% NaCl 溶液中 7 天後，量測第一個路電位值，然後連接電路外加  $0.5 \text{ mA/cm}^2$  的直流電流，24 小時斷電後並等待試體穩定，再分別以開路電位法直流極化法來量測鋼筋的開路電位與腐蝕速率。

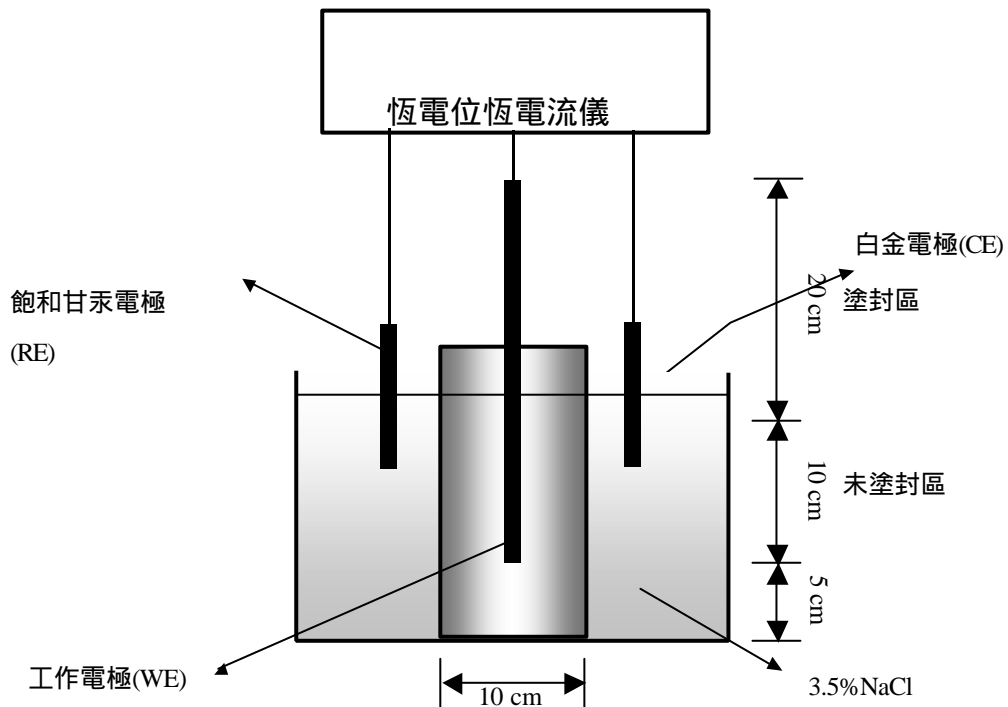


圖 3.11 腐蝕電位量測裝置圖

## 第四章 結果與分析

### 4.1 力學性質

#### 抗壓強度

澆置  $\Phi 10 \times 20\text{cm}$  的圓柱混凝土試體，分別在 28、56、91、112 天等不同齡期下，進行抗壓強度試驗。結果如表 4.1、表 4.2 及表 4.3 顯示。

表 4.1 混凝土試體體在各齡期與抗壓強度(MPa)(W/b=0.35)

齡期(天) 試體編號	28	56	91	112
AO	45.1	48.31	48.40	48.56
AFA1	49.47	54.02	57.93	59.93
AFA2	46.44	51.53	55.97	56.99
ASG2	50.88	51.93	61.74	62.2
ASG4	49.75	50.50	57.74	58.30
AFASG22	43.49	45.75	59.47	59.67
AFASG14	44.75	48.94	54.31	54.81

表 4.2 混凝土試體體在各齡期與抗壓強度(MPa)(W/b=0.45)

齡期(天) 試體編號	28	56	91	112
B0	30.2	34.8	36.9	37.4
BFA1	31.8	37.3	40.8	41.6
BFA2	32.6	41.03	45.82	46.5
BSG2	34.5	43.4	46.1	46.5
BSG4	35.7	44.7	47.1	47.9
BFASG22	33.3	46.67	50.3	51.3
BFASG14	32.58	41.51	46.48	48

表 4.3 混凝土試體體在各齡期與抗壓強度(MPa)(W/b=0.60)

齡期(天) 試體編號	28	56	91	112
CO	21.77	27.04	28.3	28.4
CFA1	25.37	28.54	30.21	31.05
CFA2	27.6	31.3	36.2	36.5
CSG2	28.1	32	36.4	36.6
CSG4	28.01	31.66	35.48	37.17
CFASG22	28.1	35.8	40.5	41.8
CFASG14	26.7	30.7	36.8	37.1

### 不同飛灰取代量的混凝土

由圖 4.1、圖 4.2 及圖 4.3 顯示，當水膠比 0.35 時，混凝土以 10% 飛灰代替水泥為較佳，原因為在低水膠比水泥量比較少，所以水化反應產生之水化物氫氧化鈣比較少，是故取代量以 10% 飛灰為最佳，20% 飛灰為工作度不佳，是故未能充分發揮卜作嵐作用，是故強度上比 10% 來得低，當水膠比 0.45、0.60 時，以取代水泥量 20% 飛灰強度為較佳，由於晚期卜作嵐作用而使強度增加。

### 不同爐石取代量的混凝土

圖 4.4 顯示，當水膠比 0.35 時，取代水泥量爐石 20%、40%，以 20% 較為佳 40% 較差，其原因為工作度不佳以致未能充分發揮卜作嵐作用使強度上比取代水泥量 20% 低，但圖 4.5 及圖 4.6 顯示，當水膠比為 0.45 及 0.60 時，以爐石取代水泥量 20% 與 40% 的試體差異並不大兩者強度接近，在其他研究中亦有得到此結果<sup>[19]</sup>。

### 同取代量飛灰與爐石組

圖 4.7 至圖 4.9 可顯示，當水膠比 0.35 時其爐石組為最佳；在水膠比 0.45 及 0.60 時，兩者之間在強度上並無相異在所有齡期上，在文獻<sup>[21]</sup>中亦得此類結果。

### 不同取代量之爐灰組

圖 4.10、4.11、4.12 顯示其爐灰組以添加卜作嵐材料飛灰 20% 爐石 20% 強度來得高，以圖 4.10 為最明顯，其原因可能是剛好其飛灰補足了其爐石缺點。

圖 4.13、4.14、4.15 為水膠比 0.35、0.45、0.6 的二十八天、五十六天、九十天、一百一十二天齡期強度發展圖，由圖可知其以爐灰組飛灰 20% 爐石 20% 為最佳。以添加 20% 爐石為僅次於控制組其各組在強度上差異並不太。文獻<sup>[21]</sup>中可知水泥水化生成物在 SEM 下的形狀同時添加飛灰與爐石形狀為針狀，飛灰與水化生成物 CH 結合之形狀為圓球網狀，爐石為針狀。由此可推估其更可以填充其混凝土微小孔隙，更緻密化。

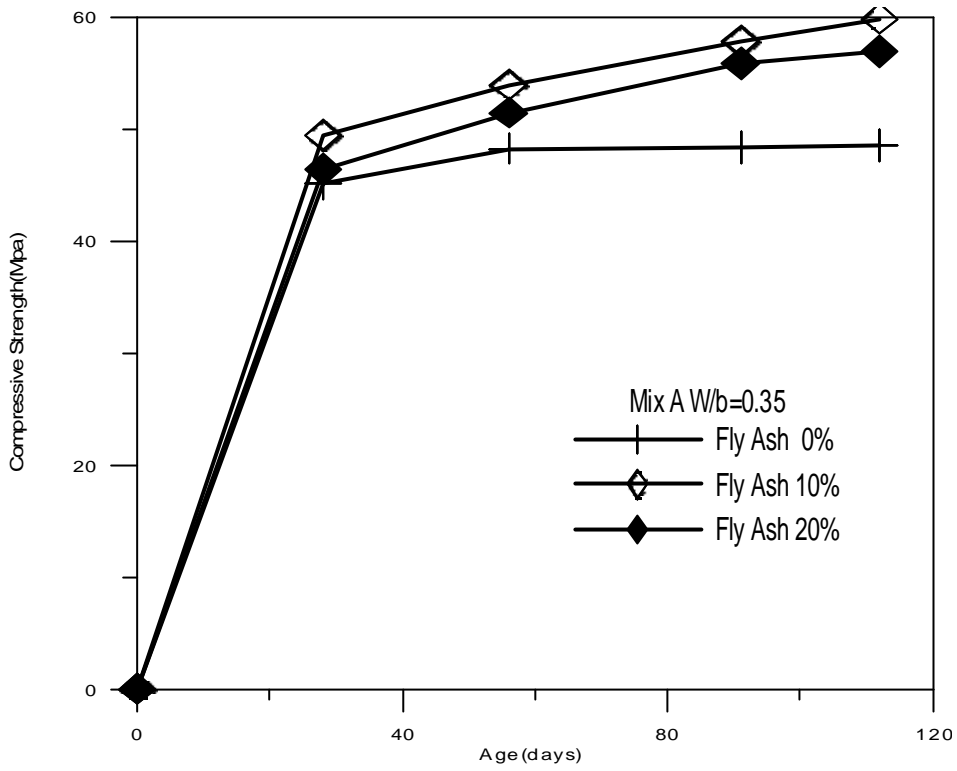


圖 4.1 不同飛灰取代量與抗壓強度關係圖

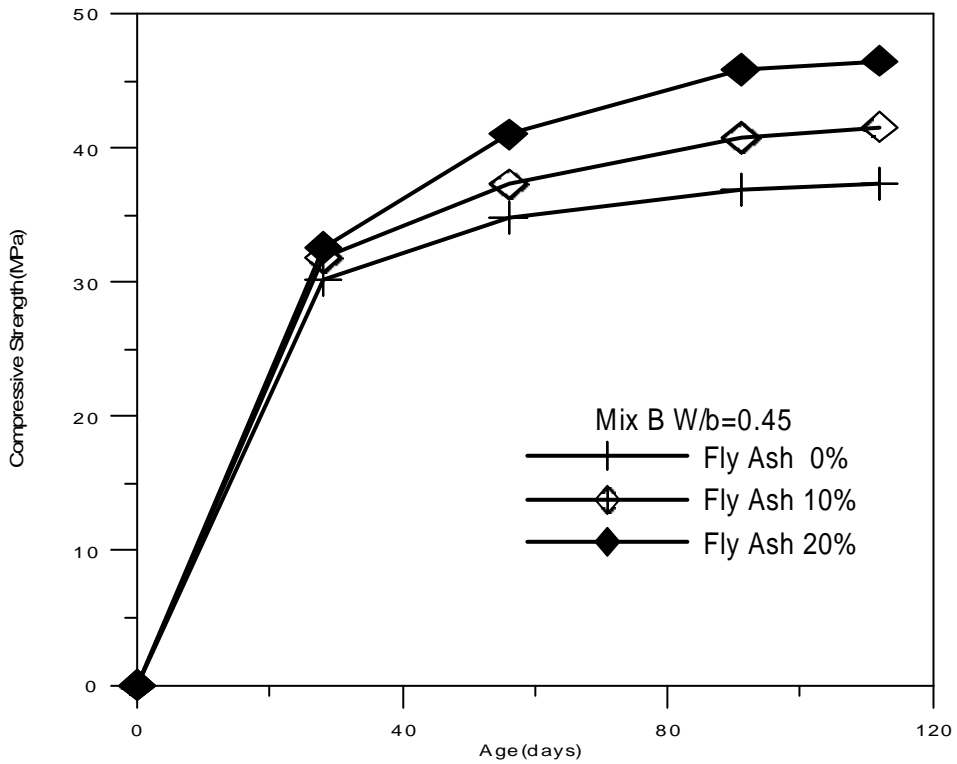


圖 4.2 不同飛灰取代量與抗壓強度關係圖

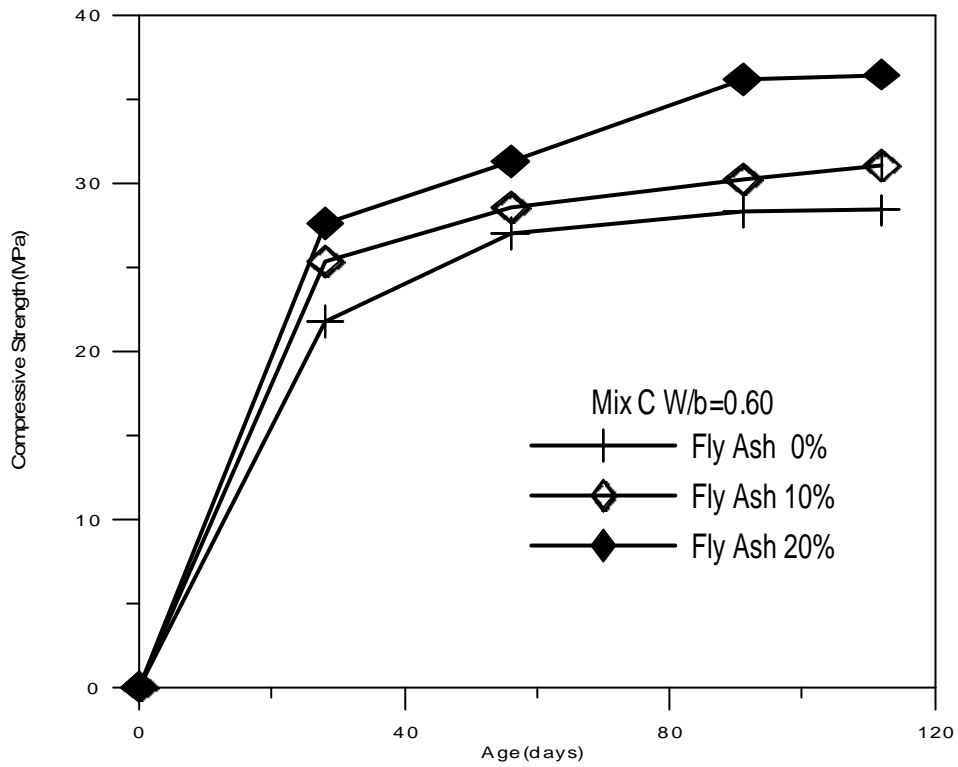


圖 4.3 不同飛灰取代量與抗壓強度關係圖

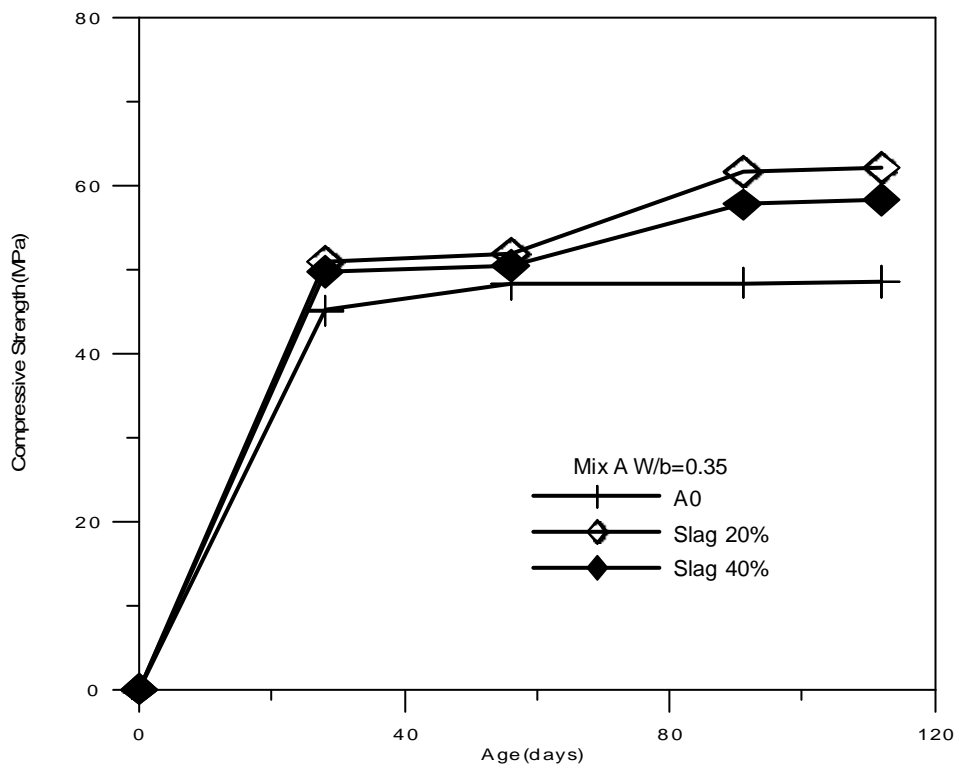


圖 4.4 不同取代量爐石與抗壓強度關係圖

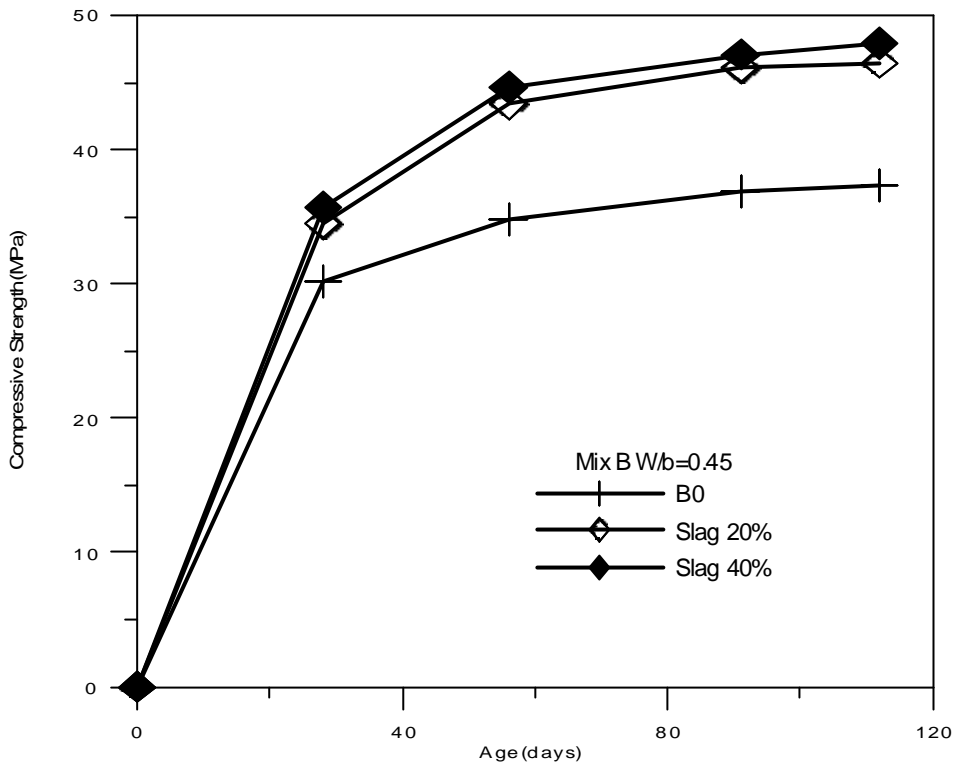


圖 4.5 不同取代量爐石與抗壓強度關係圖

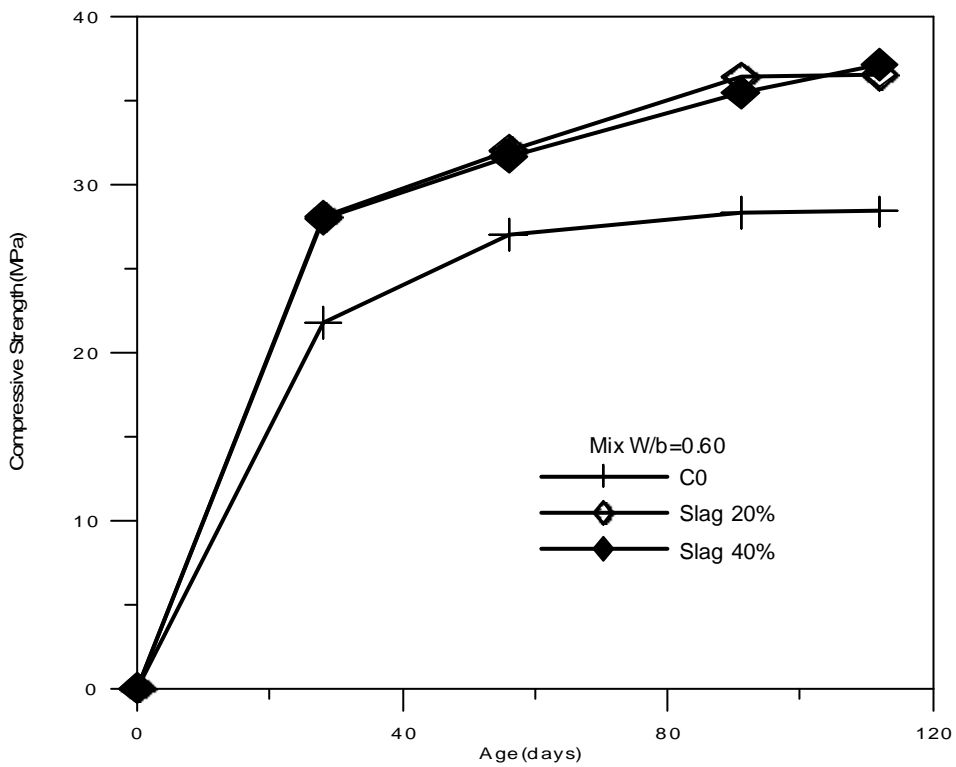


圖 4.6 不同取代量爐石與抗壓強度關係圖

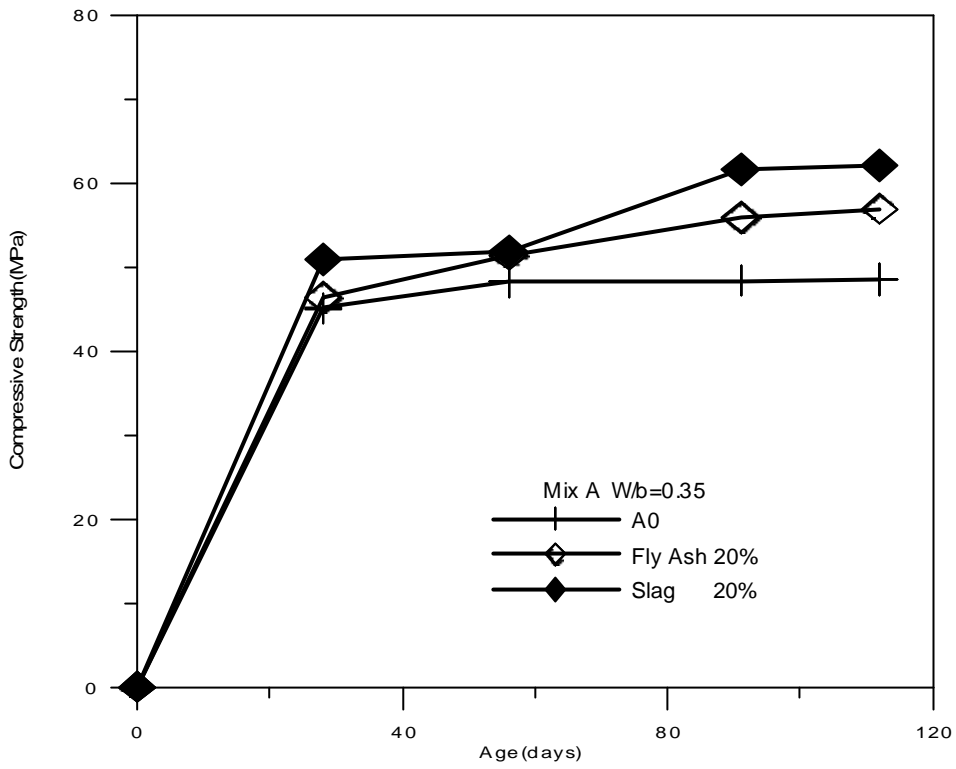


圖 4.7 同取代量 20% 飛灰與 20% 爐石之抗壓強度關係圖

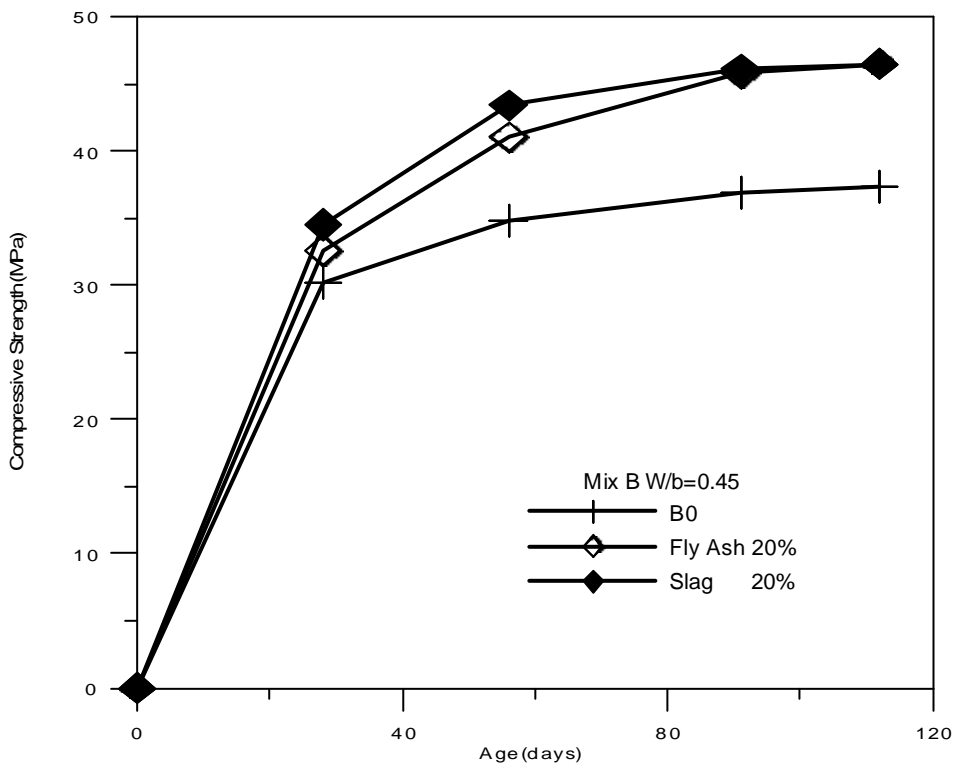


圖 4.8 同取代量 20% 飛灰與 20% 爐石之抗壓強度關係圖

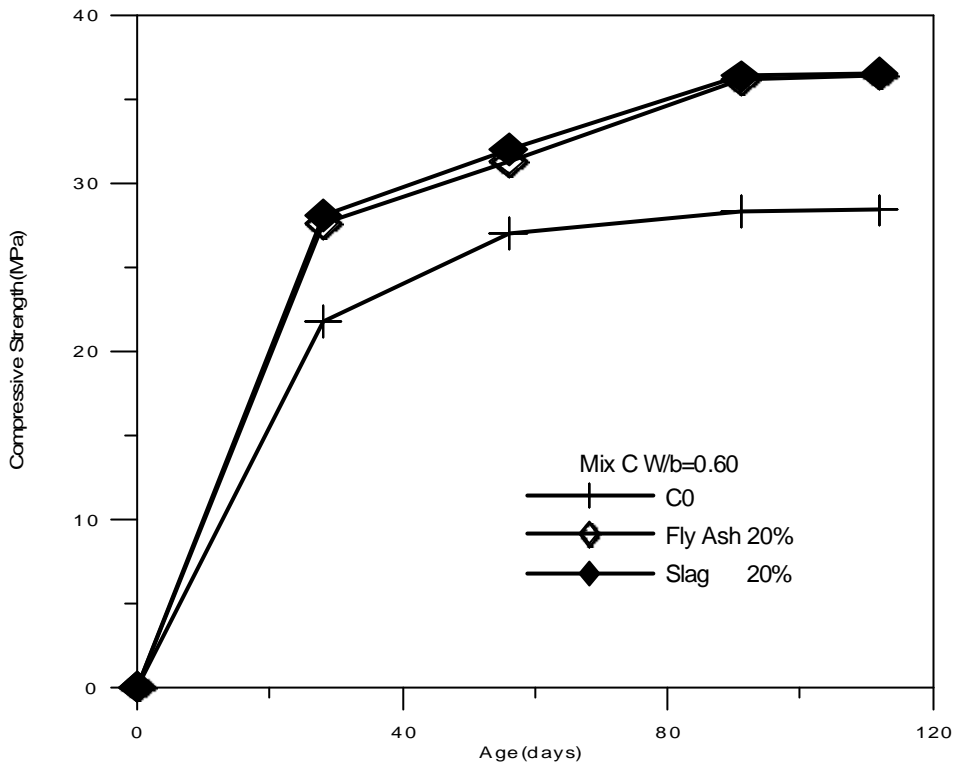


圖 4.9 同取代量 20% 飛灰與 20% 爐石之抗壓強度關係圖

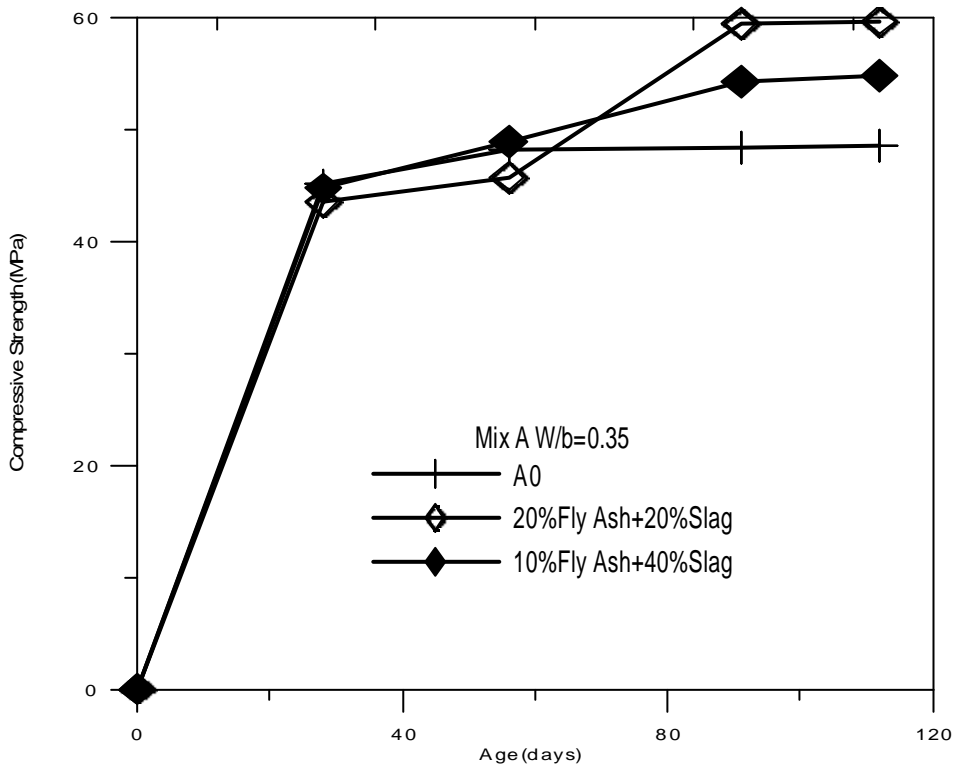


圖 4.10 不同取代量混合比例之爐灰與抗壓強度關係圖

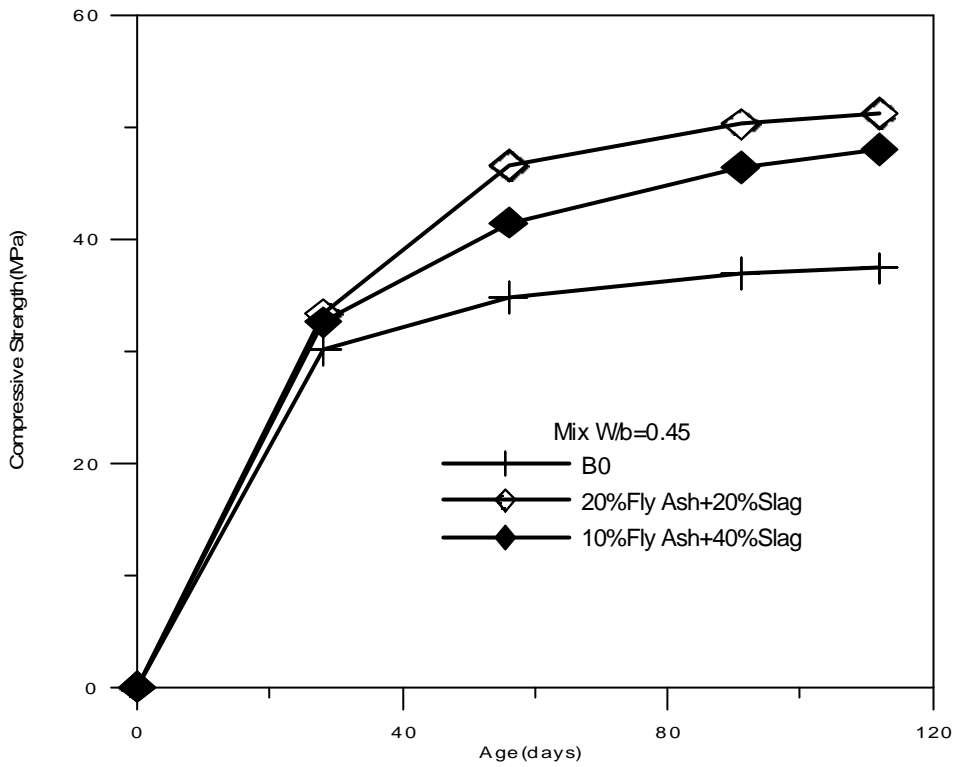


圖 4.11 不同取代量混合比例之爐灰與抗壓強度關係圖

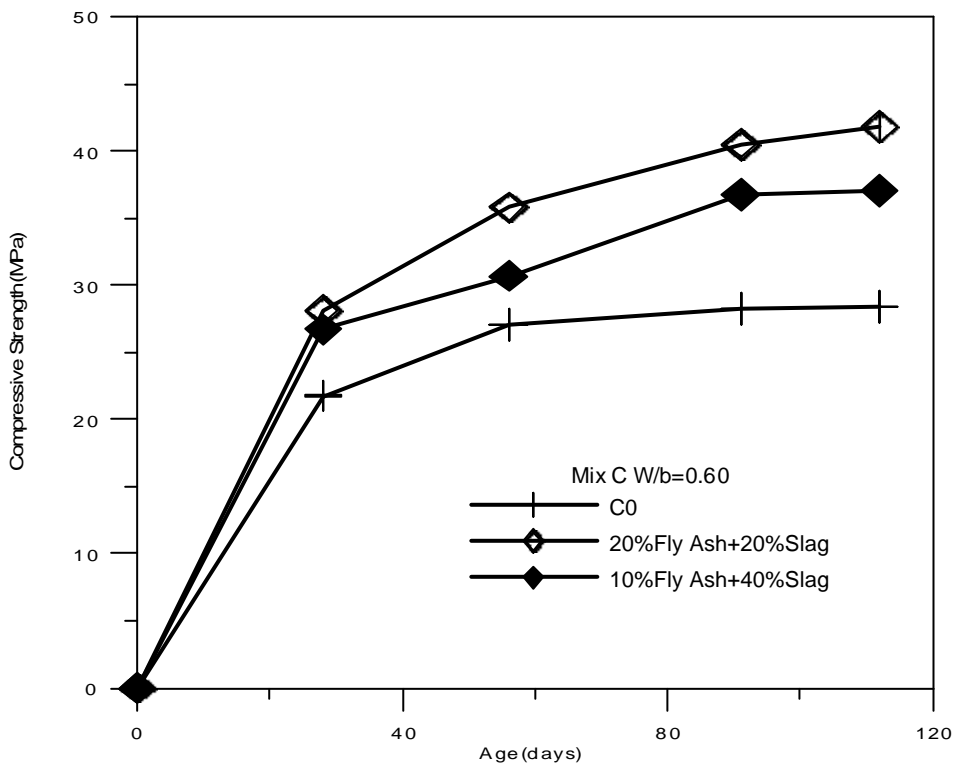


圖 4.12 不同取代量混合比例之爐灰與抗壓強度關係圖

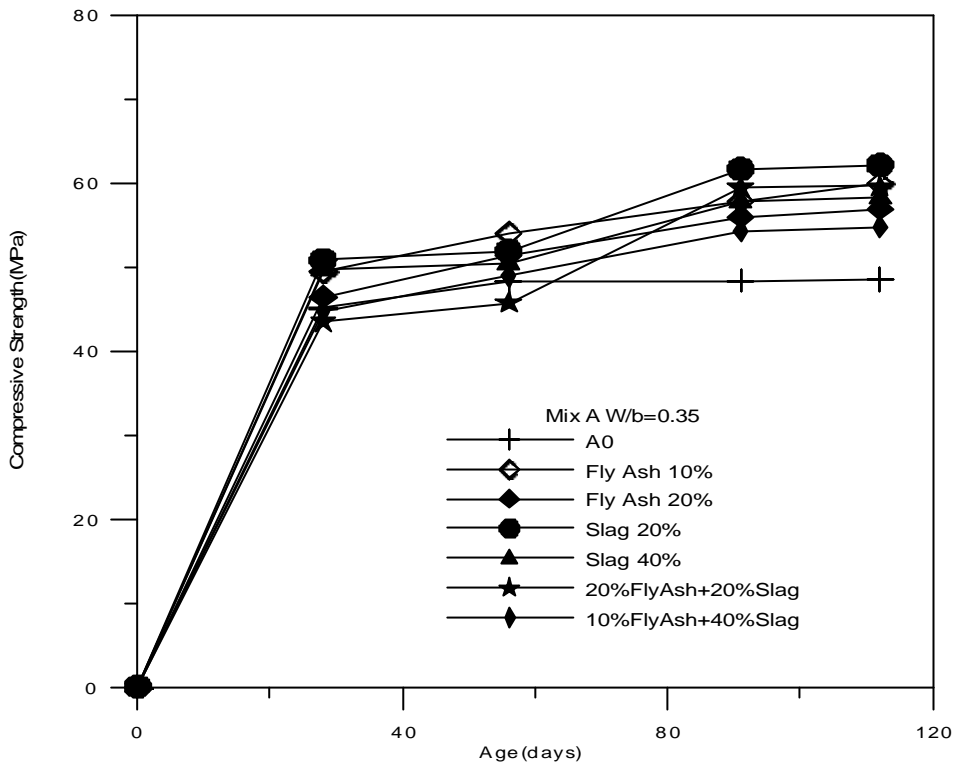


圖 4.13 抗壓強度關係圖

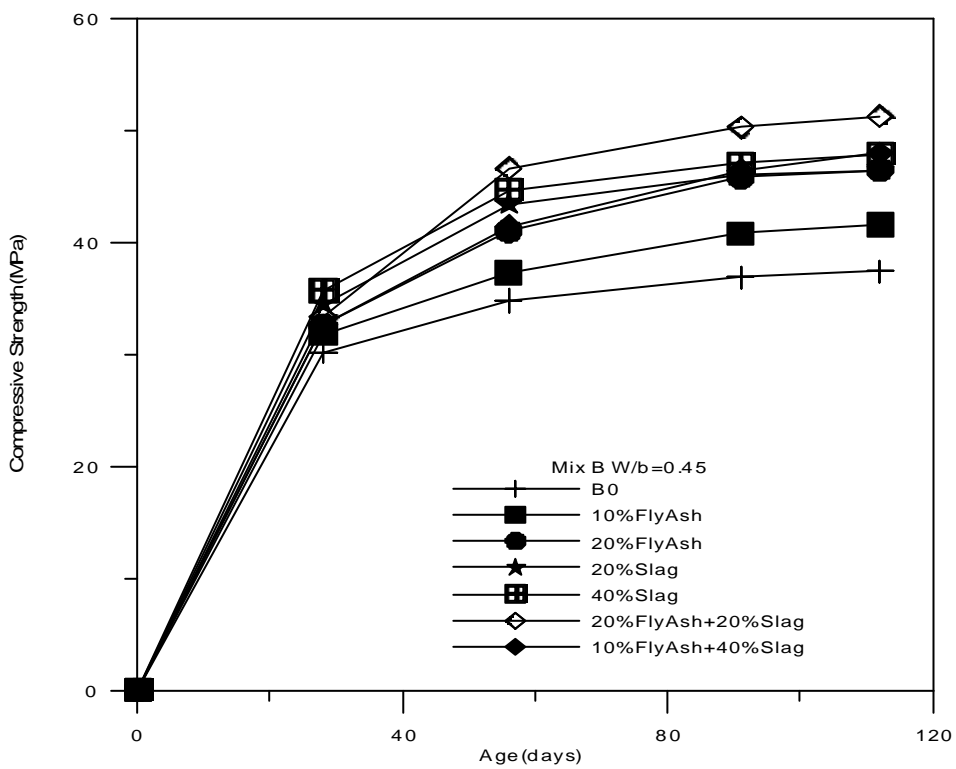


圖 4.14 抗壓強度關係圖

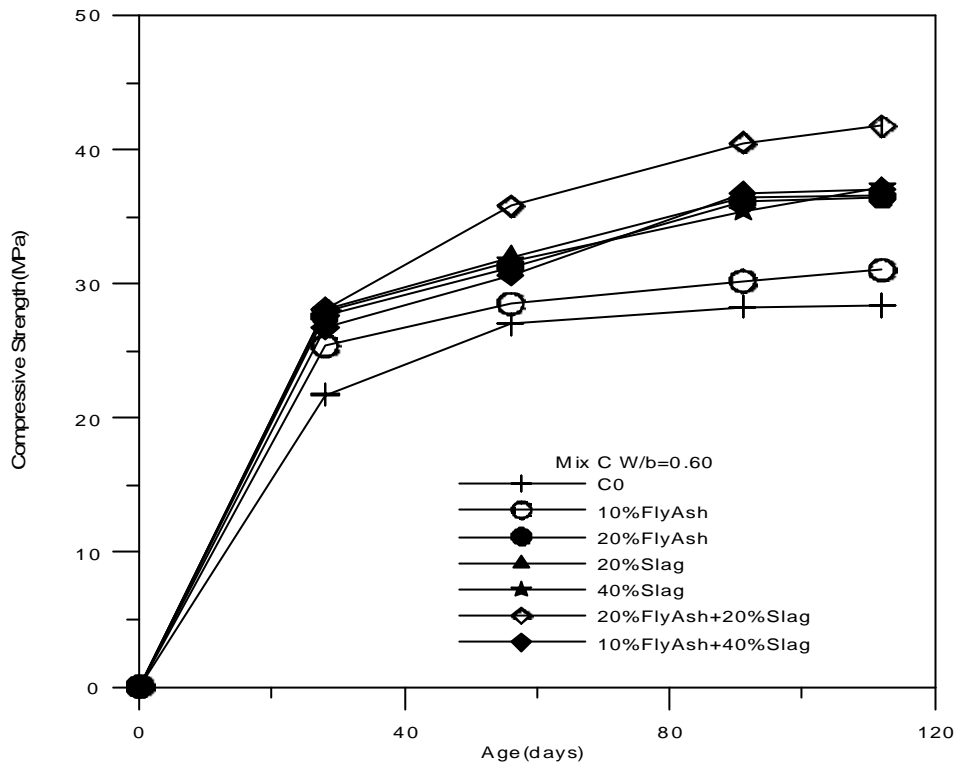


圖 4.15 抗壓強度關係圖

## 4.2 添加卜作嵐對混凝土中鋼筋腐蝕之影響

### 開路電位法

開路電位是了解鋼筋腐蝕方法之一，可初步判斷鋼筋腐蝕機率大小。美國材料試驗學會(“ASTM C876” Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”)建議，當混凝土中鋼筋的開路電位高於  $-200\text{mV}(\text{Cu}/\text{CuSO}_4)$  ( $-120\text{mV}, \text{SCE}$ ) 時，鋼筋發生腐蝕的機率為 10%，低於  $-350\text{mV}(\text{Cu}/\text{CuSO}_4)$  ( $-270\text{mV}, \text{SCE}$ ) 時，鋼筋發生腐蝕機率為 90%，若電位介於兩者之間則發生腐蝕的機率為 50%，Strafull 指出鋼筋電位高於  $-220\text{mV}$  時，鋼筋處於鈍態狀況；電位低於  $(-270\text{mV}, \text{SCE})$  時，則鋼筋產生腐蝕。

### 飛灰之使用對試體開路電位之影響

圖 4.16 至圖 4.18 為不同配比之飛灰試體及控制組試體浸泡在人造海水中，開路電位與累積加速時間之關係圖。依據開路電位法之結果判別，使用適量飛灰有益於腐蝕防止，但飛灰組(20%)比飛灰組(10%)為差。

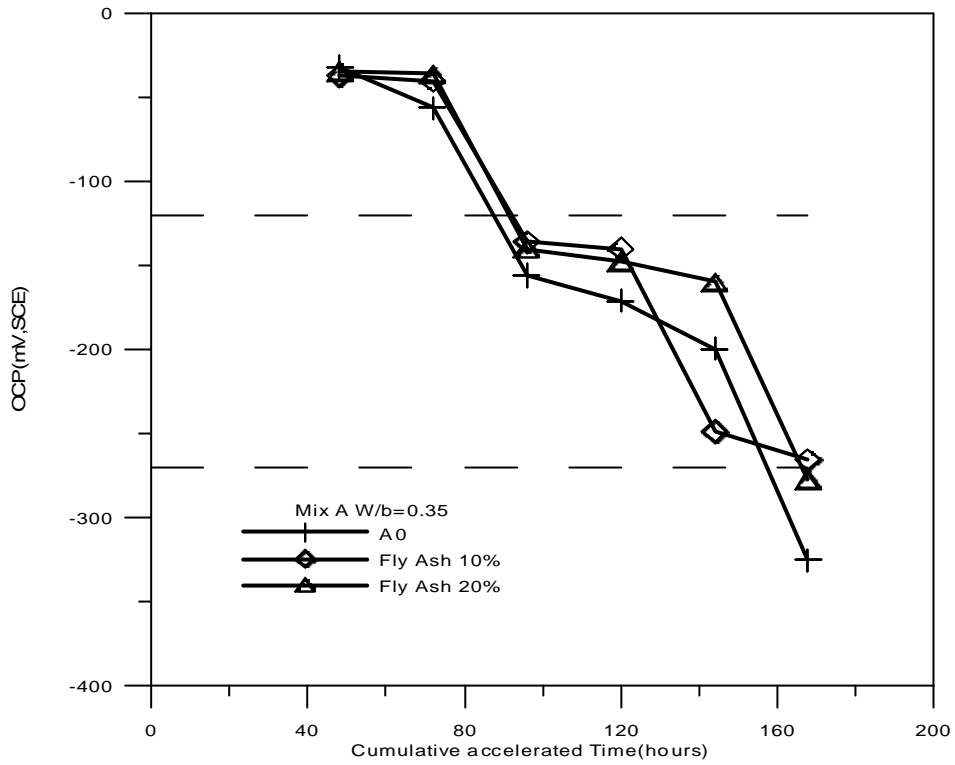


圖 4.16 飛灰組試體開路電位與累積加速時間關係圖

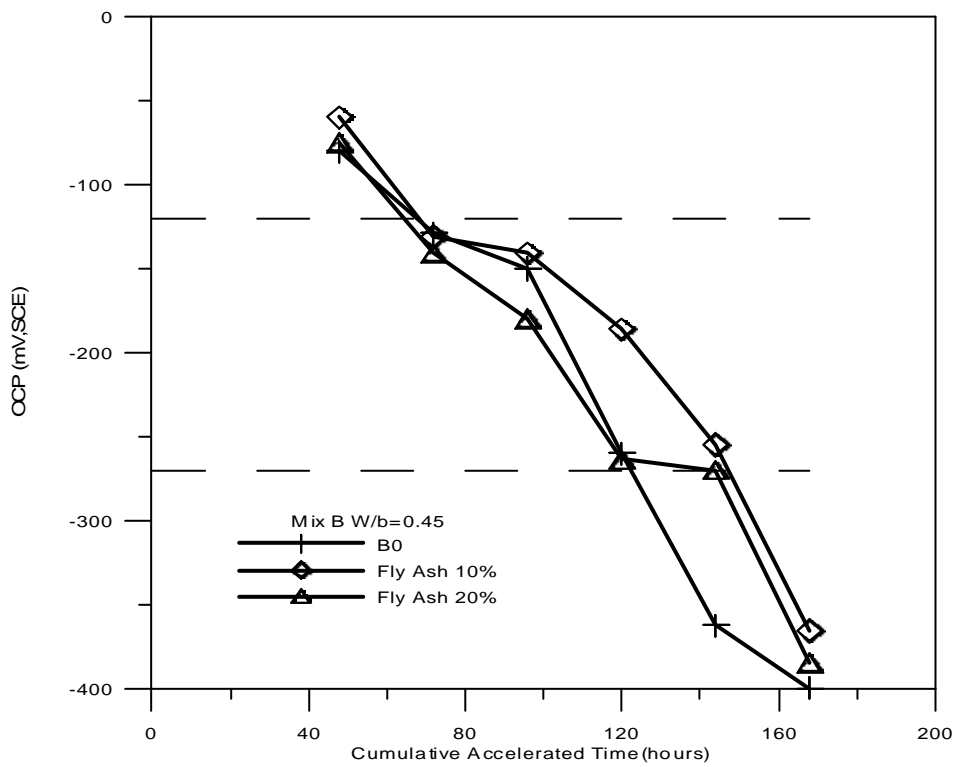


圖 4.17 飛灰組試體開路電位與累積加速時間關係圖

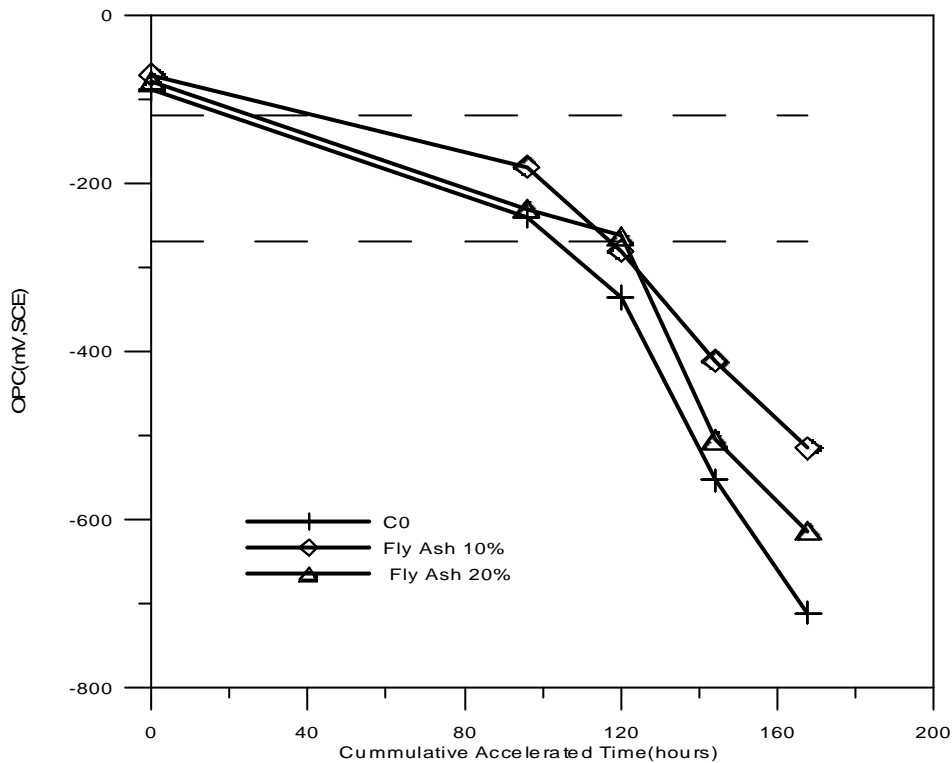


圖 4.18 飛灰組開路電位與累積加速時間關係圖

#### 爐石之使用對試體開路電位之影響

圖 4.19 至圖 4.21 為不同配比之爐石試體及控制組試體浸泡在人造海水中，開路電位與累積加速時間關係圖。圖中顯示，使用大量爐石導致 pH 值降低的影響比提高混凝土緻密性的影響為大。尤其以圖 4.21 水膠比 0.35 爐石添加 40% 爐石試體組最為明顯。

#### 飛灰與爐石對試體開路電位之影響

圖 4.22 至圖 4.24 為不同配比之爐石組、飛灰組試體及控制組試體浸泡在人造海水中，開路電位與累積加速時間關係圖。以飛灰組為量佳，控制組次之，爐石組最差。

#### 爐灰之使用對於開路電位之影響

圖 4.25 至圖 4.27 顯示，圖中顯示，以添加量 50% 卜作嵐材料爐灰組(FASG14)為較差，可能是因為大量消耗氫氧化鈣而導致鋼筋周圍之 pH 值降低，使得鈍態膜破壞易受到氯離子侵入，故添加大量卜作嵐材料雖可增其緻密性，但根據開路電位法之結果判別，因含有大量之爐石，而爐石中含有 Al，Al 的氧化趨勢大於 Fe，是故可能造成誤判。

圖 4.28 至圖 4.30 顯示，當水膠比為 0.35 時，爐石組(40%)為最差，其次爐灰組 (FASG14)，接著控制組，次之爐石組(20%)，次佳爐灰組(FASG22)，最佳為飛灰組。當水膠比 0.45 時，爐灰組最差，其次爐石組，接著為控制組，次佳為飛灰組(20%)，最佳為飛灰組(10%)。當水膠比為 0.60 時，控制組為最差，其次為飛灰組(20%)，接著爐灰組(FASG14)，次佳為飛灰組(10%)及爐石組(40%)，最佳為爐灰組(FASG22)。

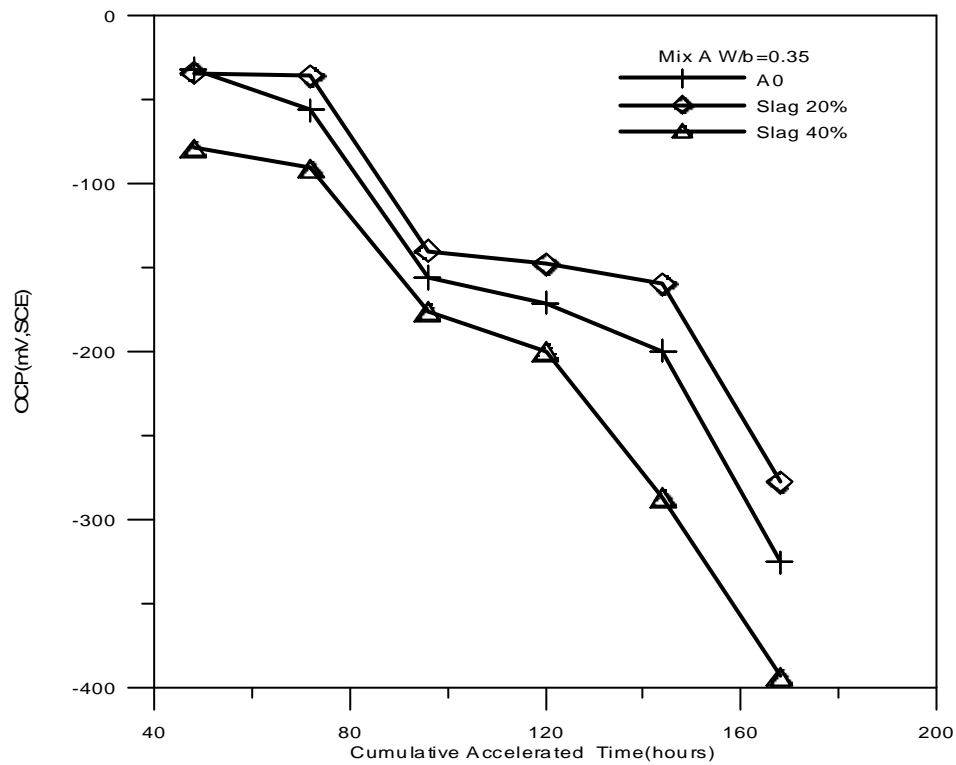


圖 4.19 爐石組試體開路電位與累積加速時間關係圖

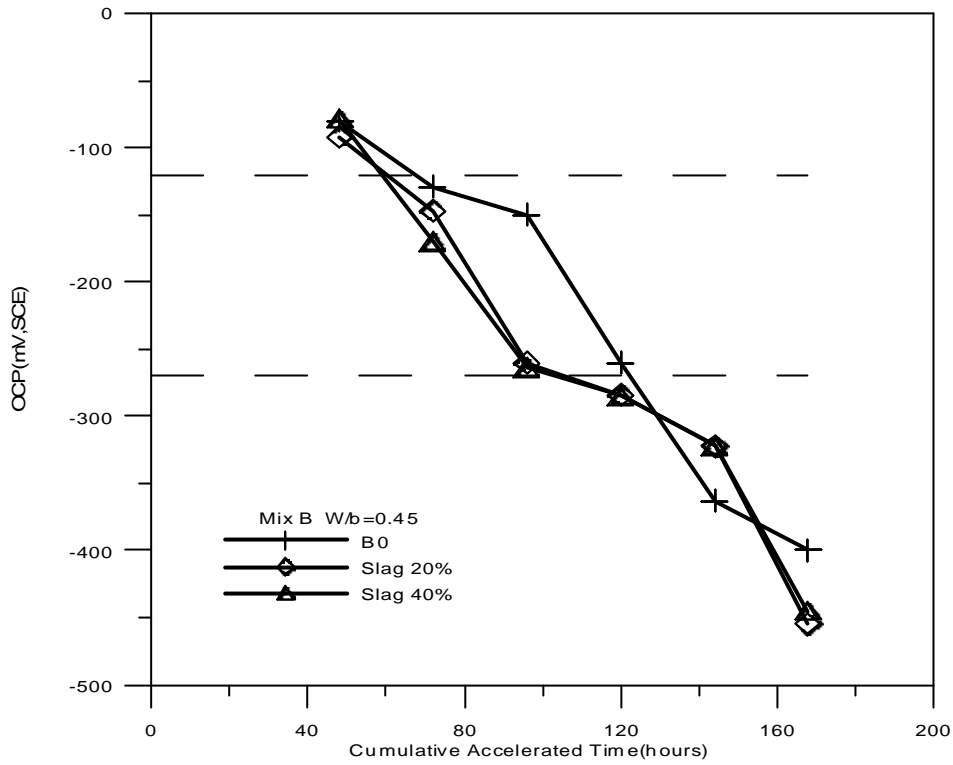


圖 4.20 爐石組試體開路電位與累積加速時間關係圖

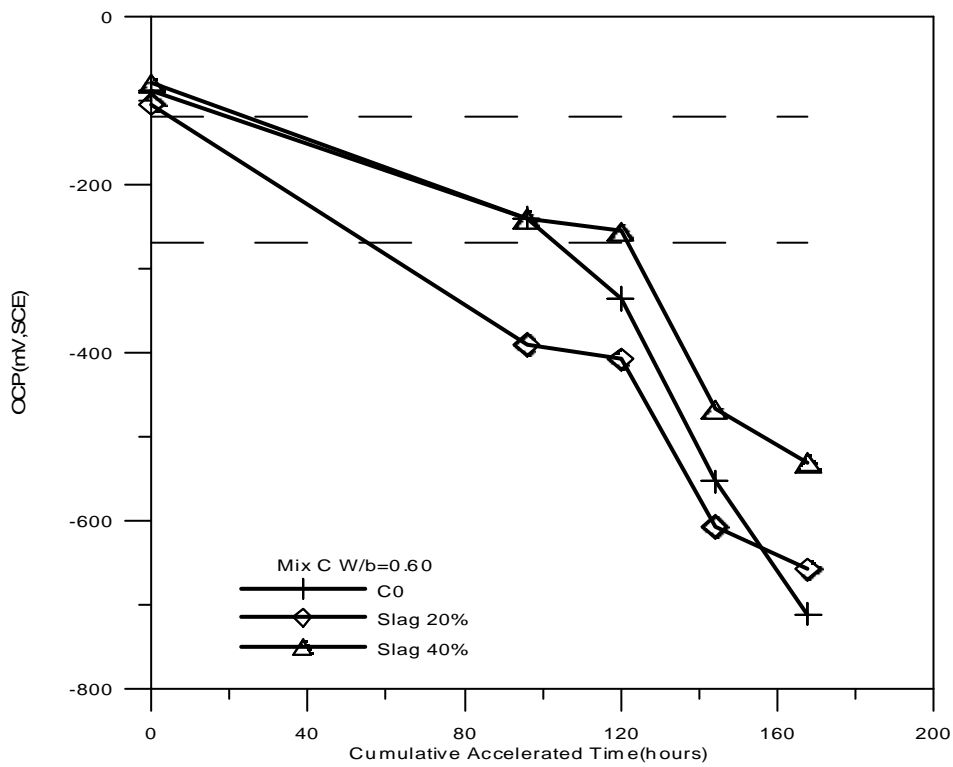


圖 4.21 爐石組開路電位與累積加速時間關係圖

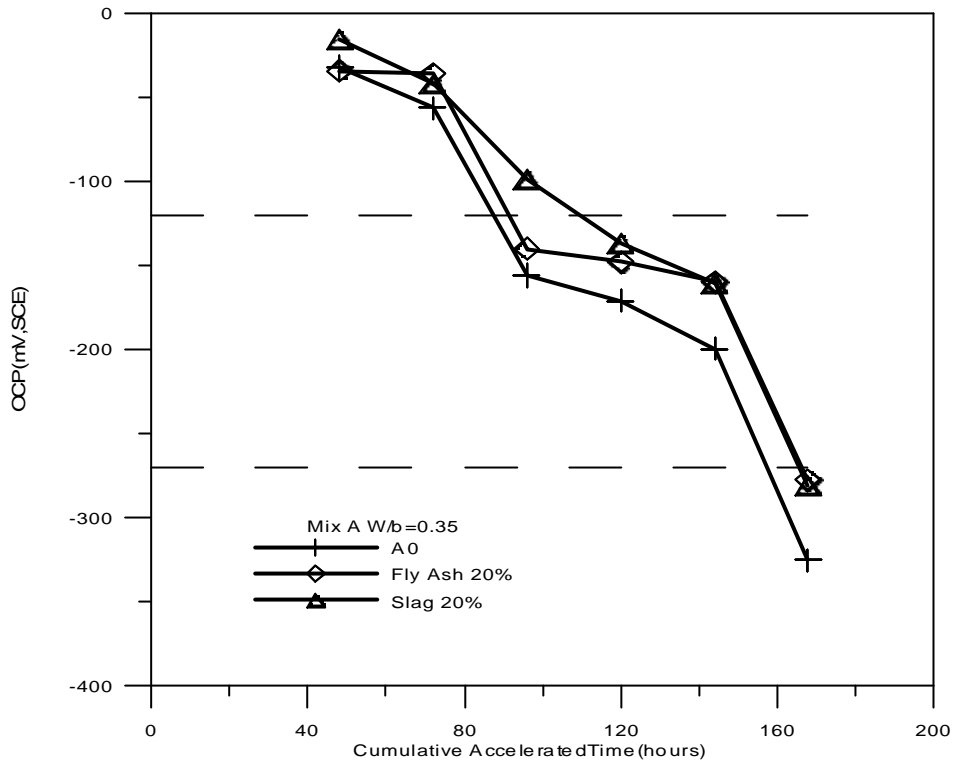


圖 4.22 同取代量飛灰組與爐石組之開路電位與累積加速時間關係圖

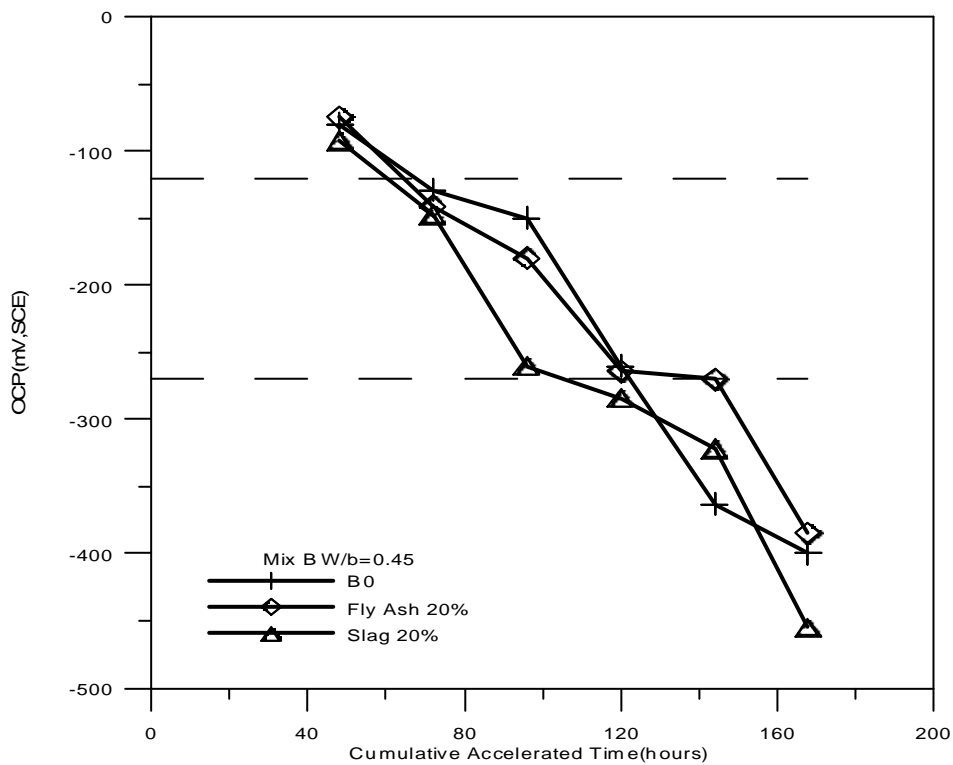


圖 4.23 同取代量飛灰組與爐石組之開路電位與累積加速時間關係圖

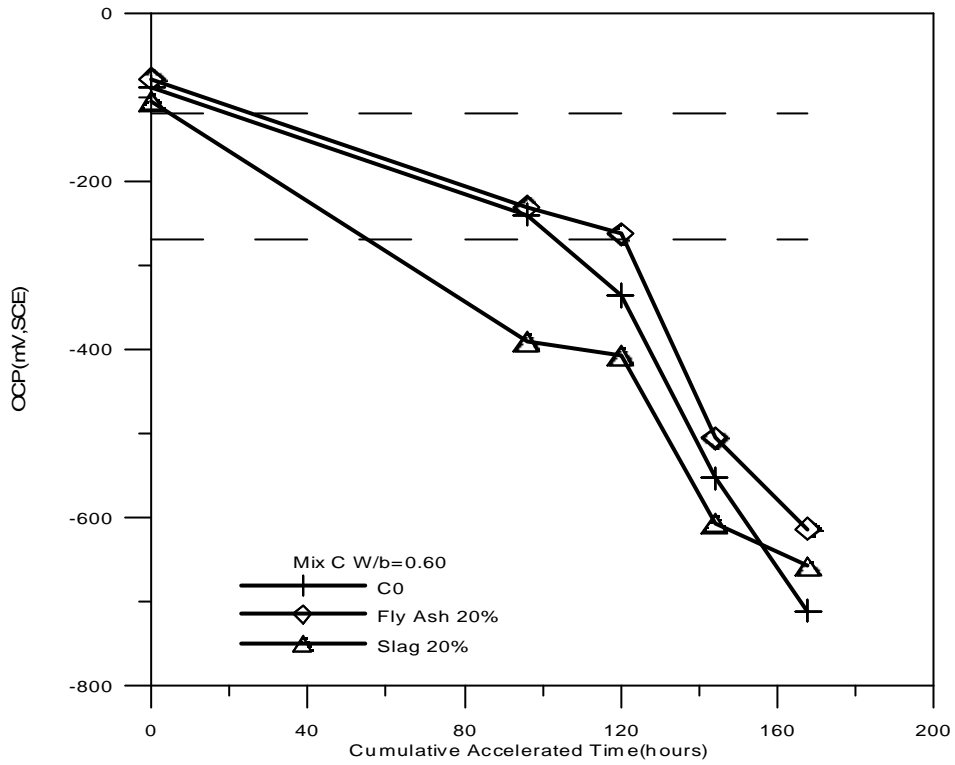


圖 4.24 同取代量飛灰組與爐石組之開路電位與累積加速時間關係圖

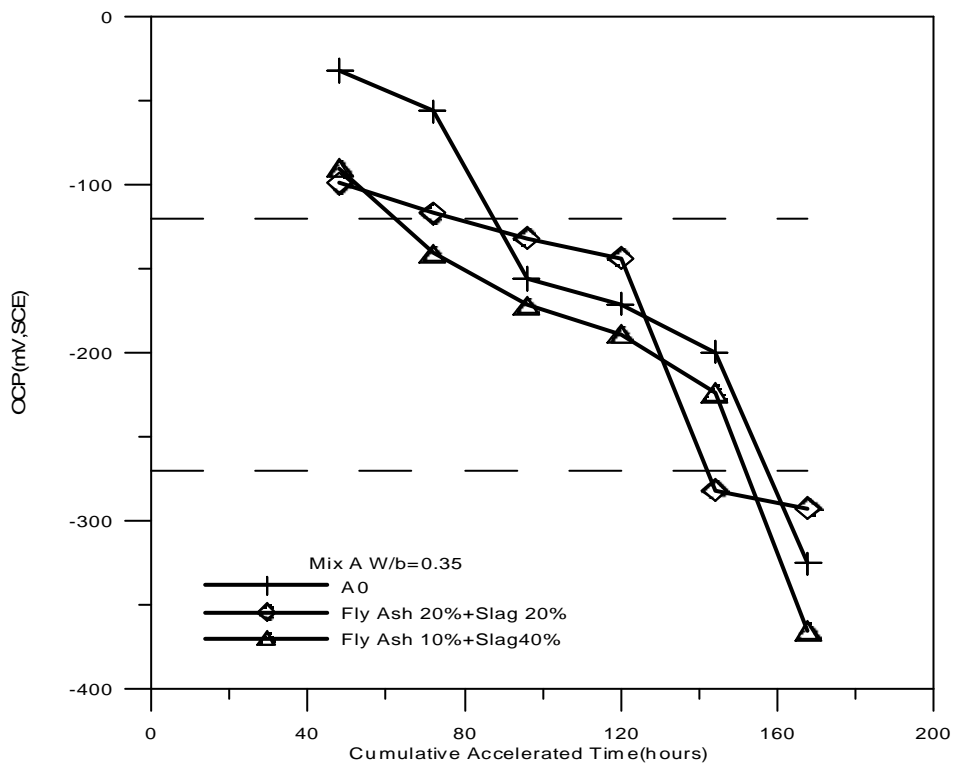


圖 4.25 爐飛組開路電位與累積加速時間關係圖

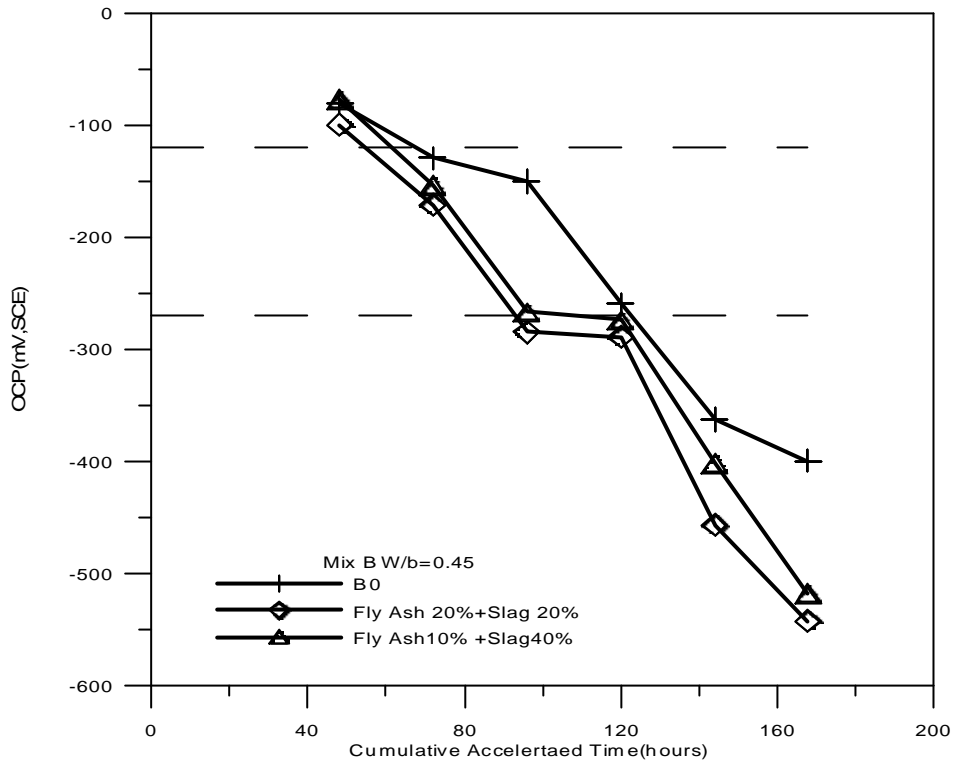


圖 4.26 爐飛組開路電位與累積加速時間關係圖

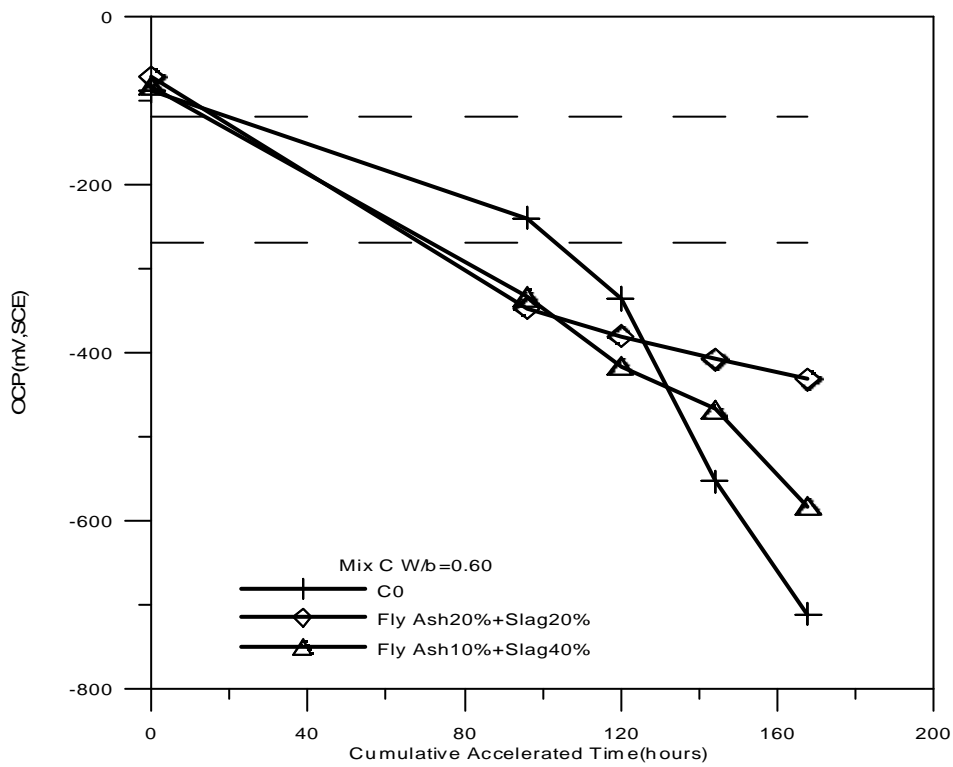


圖 4.27 爐飛組開路電位與累積加速時間關係圖

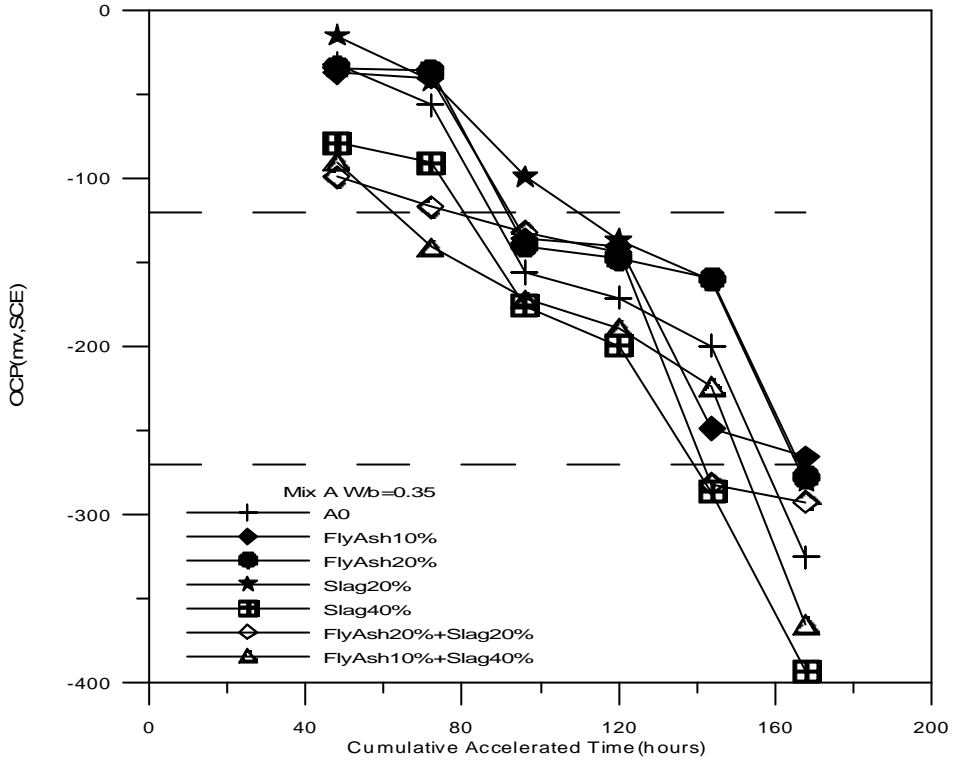


圖 4.28 開路電位與累積加速時間關係圖

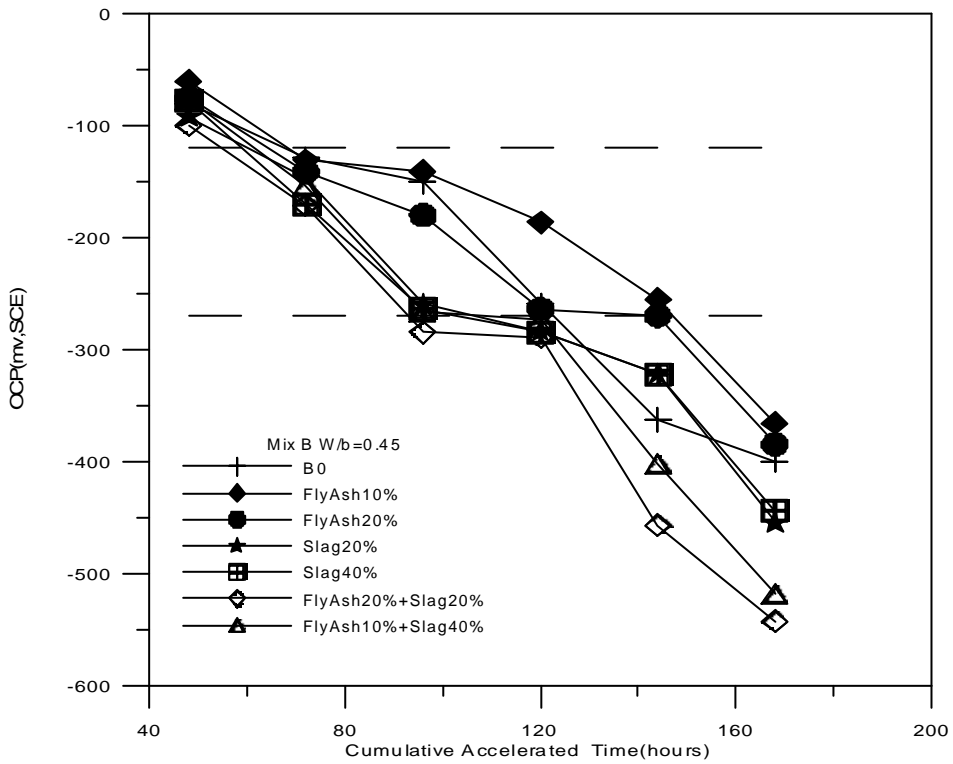


圖 4.29 開路電位與累積加速時間關係圖

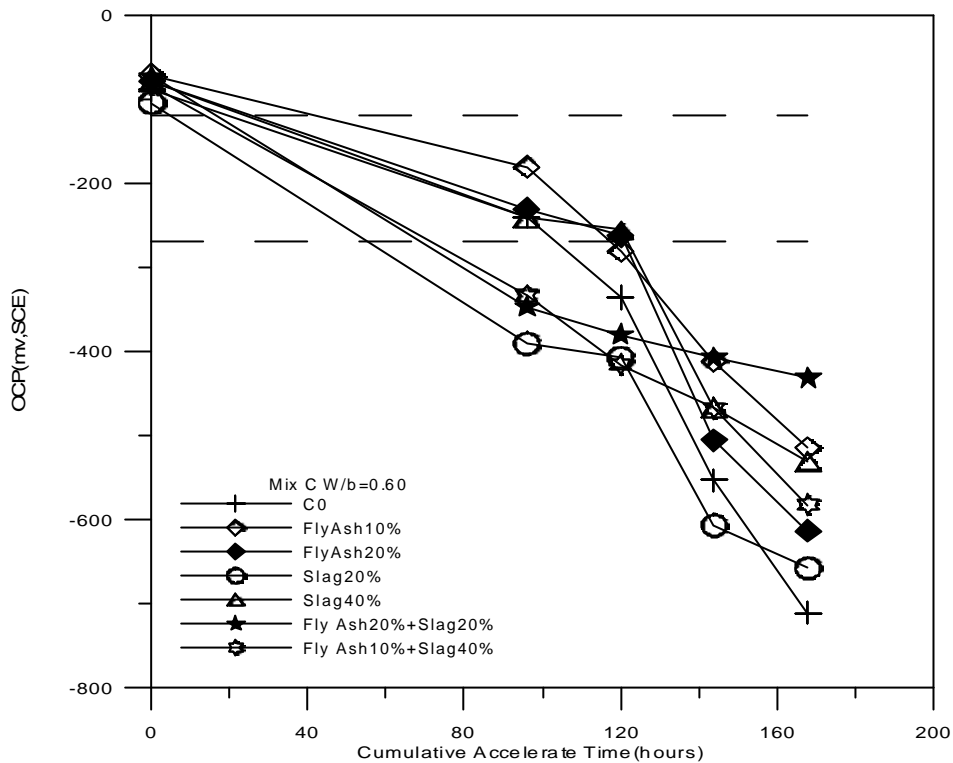


圖 4.30 開路電位與累積加速時間關係圖

圖 4.31 至圖 4.33 顯示，以取代水泥量 10% 飛灰腐蝕速率最低，也說明了卜嵐材料飛灰確實有抑制腐蝕功效。圖 4.34 至圖 4.36 顯示，以 10% 飛灰成效較佳在高水膠比爐石因發生卜作嵐反應，生成 C-S-H 膠體使混凝土較為緻密，但在低水膠比下爐石取代效果不佳。圖 4.37 至圖 4.39 可顯示，飛灰在腐蝕抑制方面比爐石好。圖 4.40 至圖 4.42 顯示，當水膠比 0.35 及 0.45 時，其控制組為最佳，可能原因是水泥量太少以致無法發揮卜作嵐反應的效果。當水膠比為 0.60 時就可以看出其卜作嵐反應的效果。圖 4.43 至圖 4.45，當水膠比 0.35 時，其飛灰組最佳，其次控制組與爐石組(20%)差異不大，次之為爐灰組，最差為爐石組(40%)，其原因可能是爐石含有 Al 其氧化趨勢大於 Fe，而造成有較高腐蝕速率。當水膠比 0.45 時，飛灰組為最佳，而爐石組(20%)次之，接著控制組，其次為爐石組(40%)及爐灰組(FASG14)，最差為爐灰組(FASG22)。當水膠比 0.60 時，飛灰組最佳，爐灰組(FASG14)，次之爐石組(40%)，接著爐灰組(FASG22)，次次之為爐石組(20%)，最差控制組。

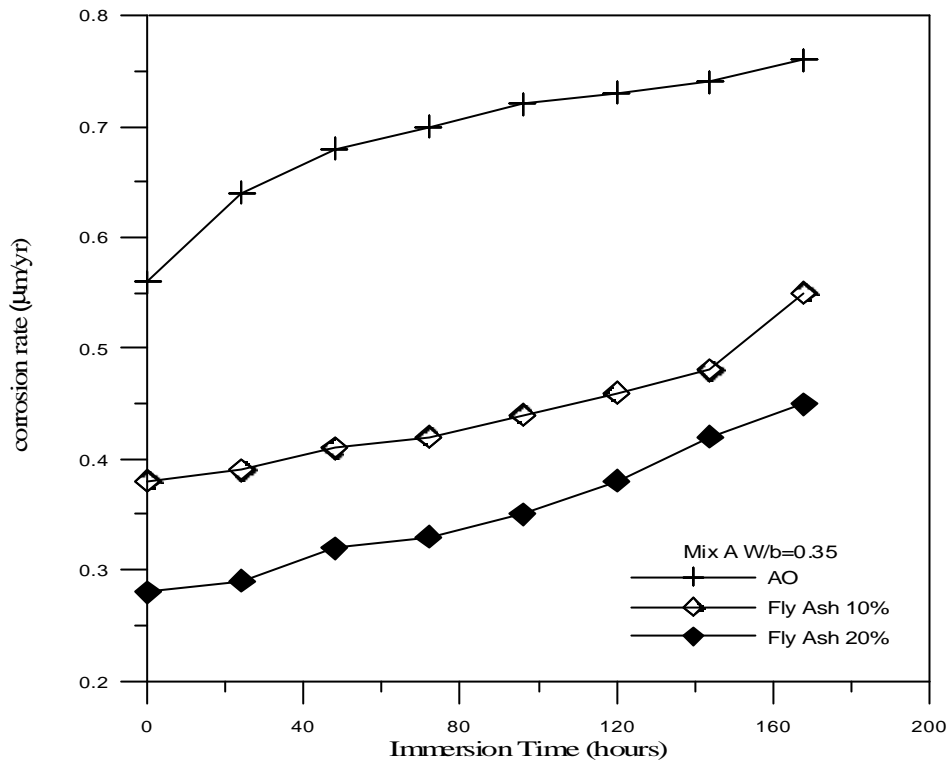


圖 4.31 飛灰組與控制組之腐蝕速率關係圖

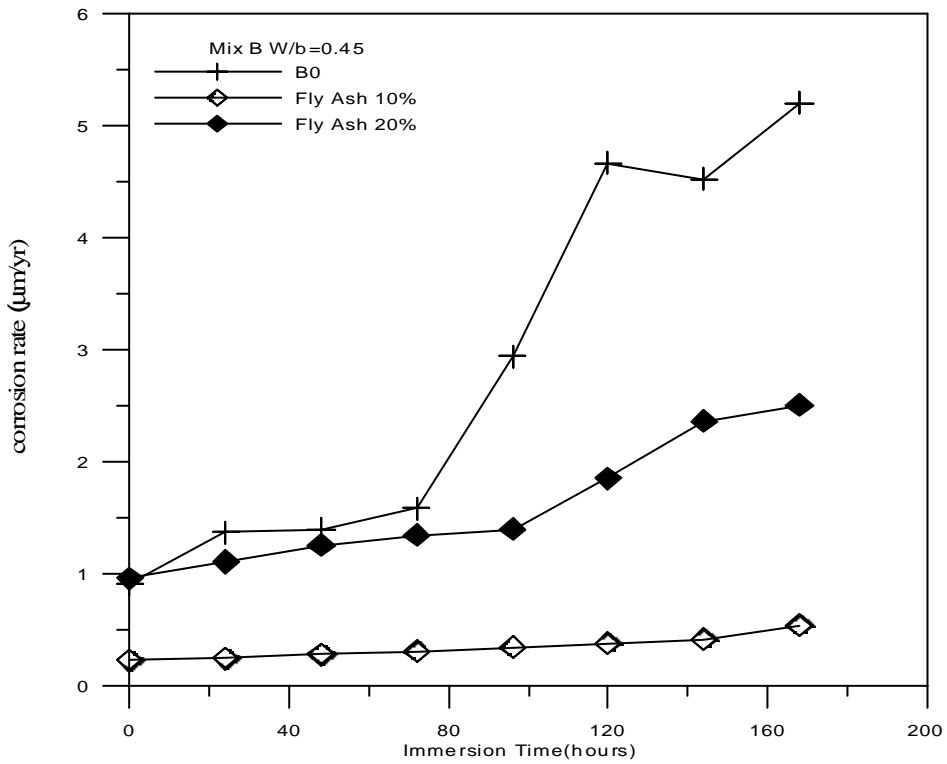


圖 4.32 飛灰組與控制組之腐蝕速率關係圖

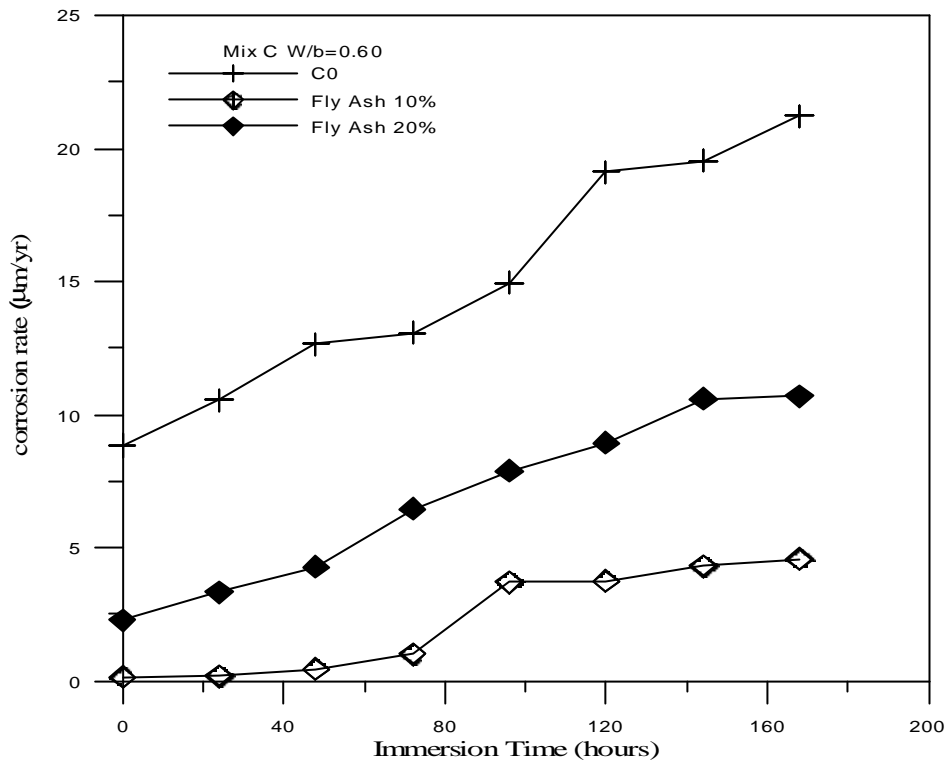


圖 4.33 飛灰組與控制組之腐蝕速率關係圖

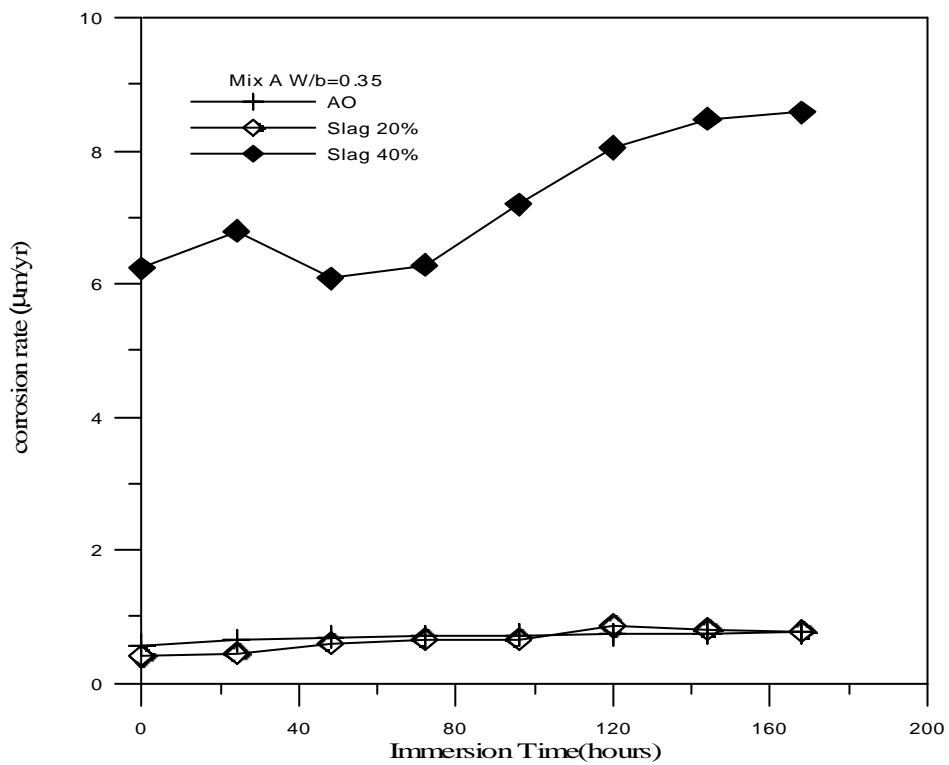


圖 4.34 爐石組與控制組之腐蝕速率關係圖

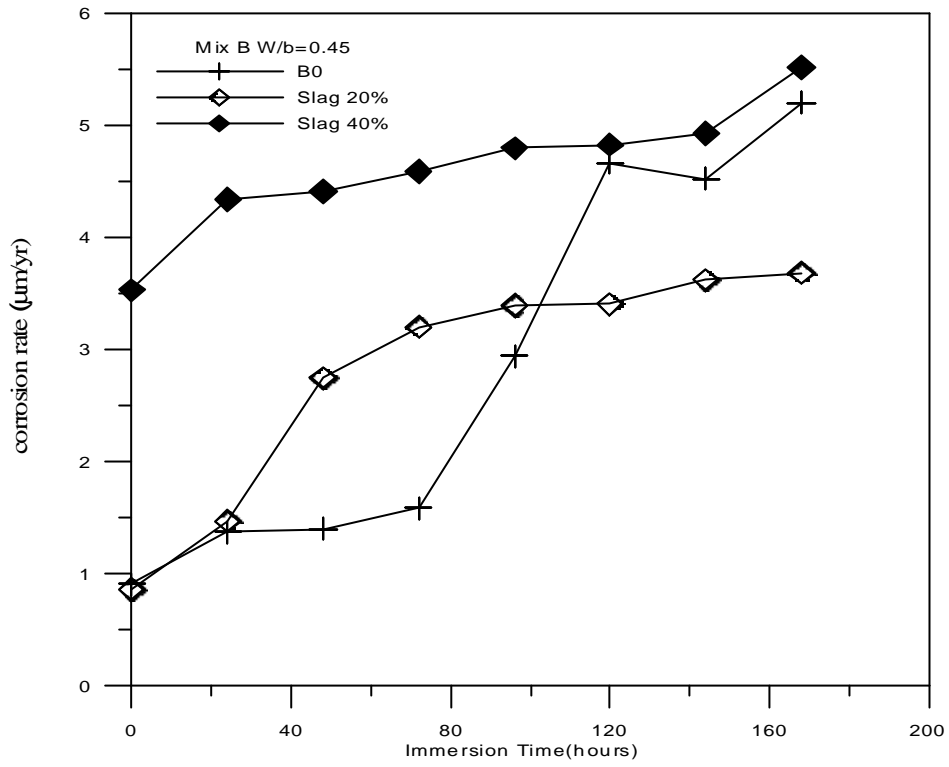


圖 4.35 爐石組與控制組之腐蝕速率關係圖

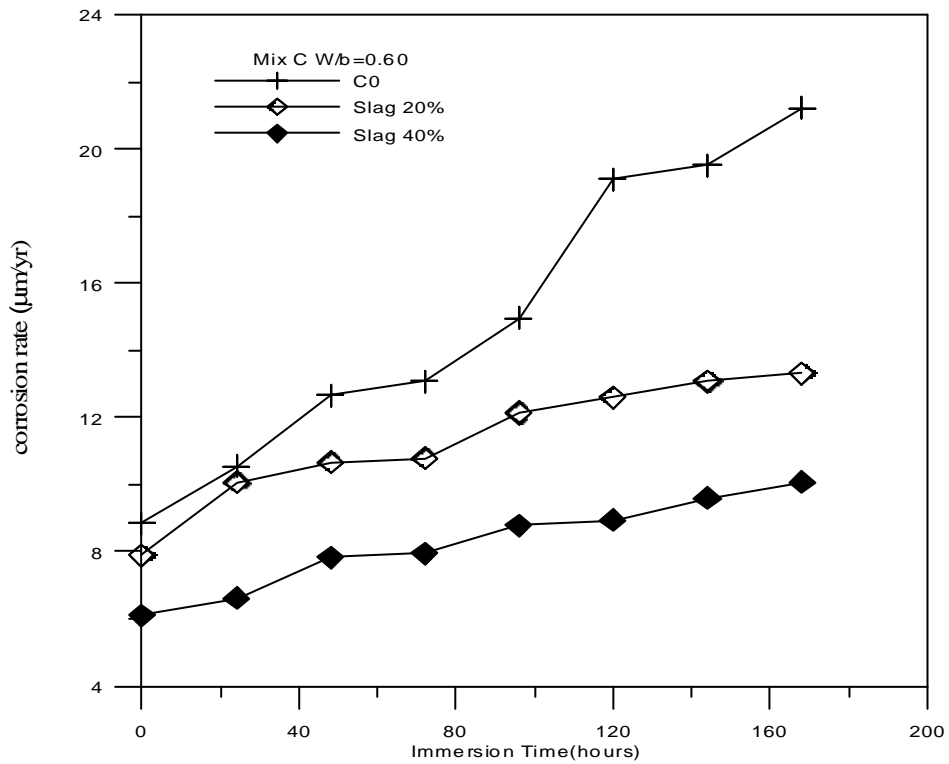


圖 4.36 爐石組與控制組之腐蝕速率關係圖

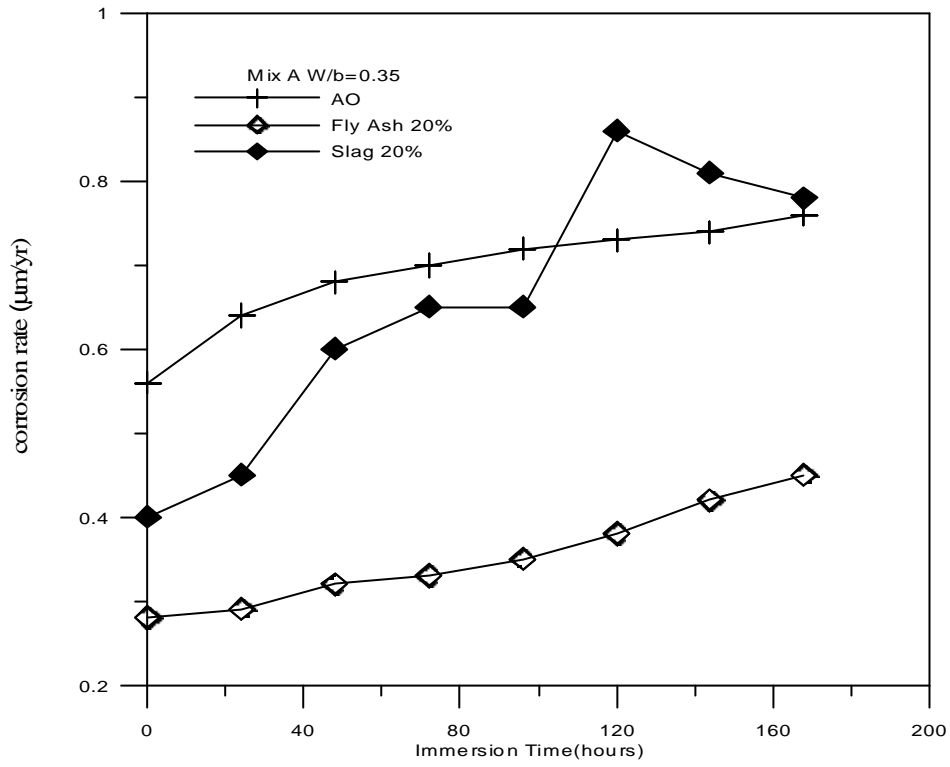


圖 4.37 同取代量飛灰與爐石組之腐蝕速率關係圖

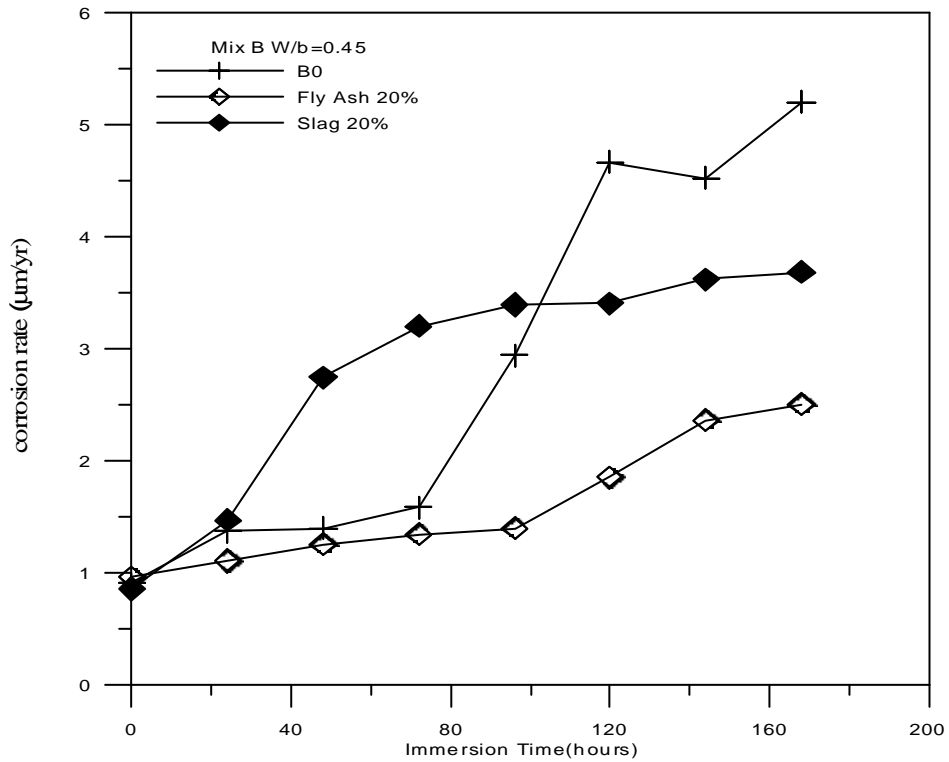


圖 4.38 同取代量飛灰與爐石之腐蝕速率關係圖

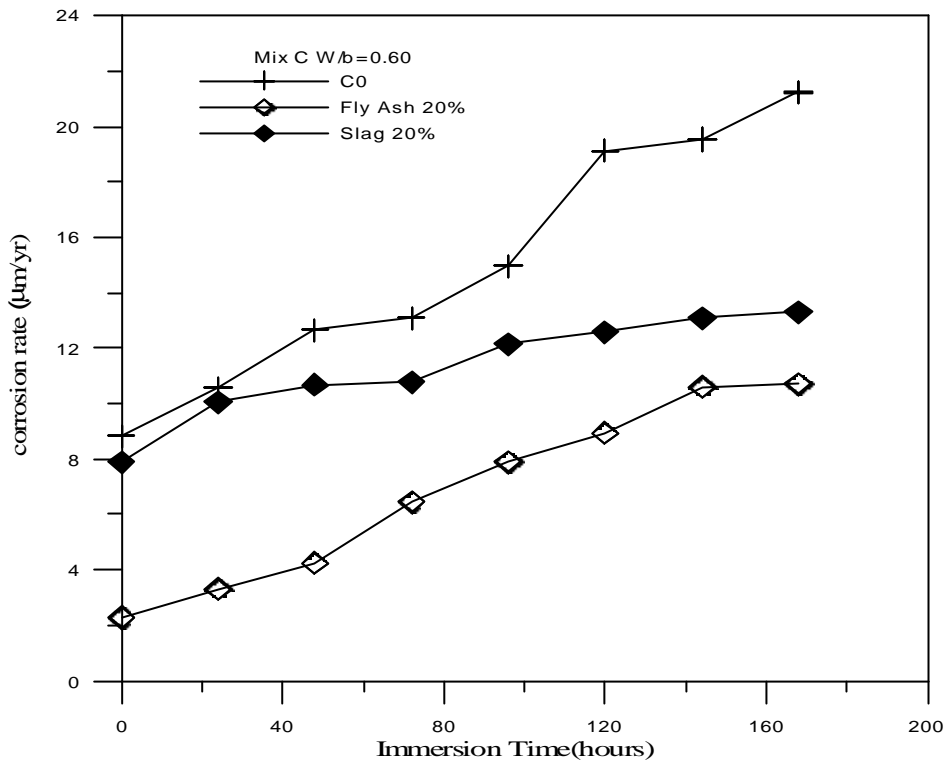


圖 4.39 同取代量飛灰與爐石之腐蝕速率關係圖

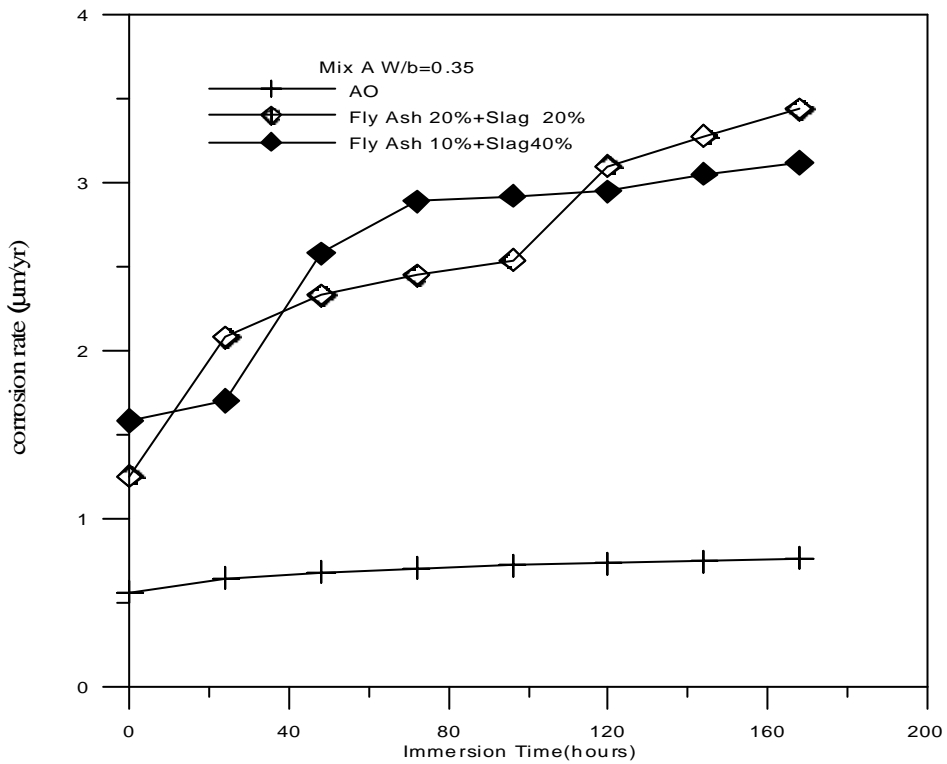


圖 4.40 爐灰組與控制組之腐蝕速率關係圖

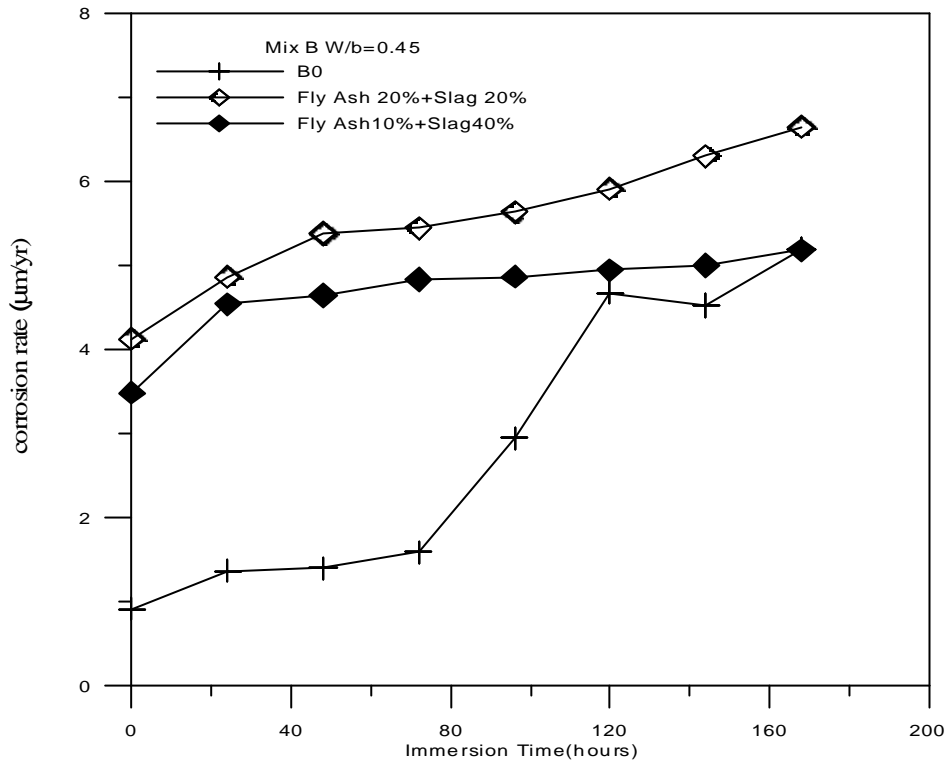


圖 4.41 爐灰組與控制組之腐蝕速率關係圖

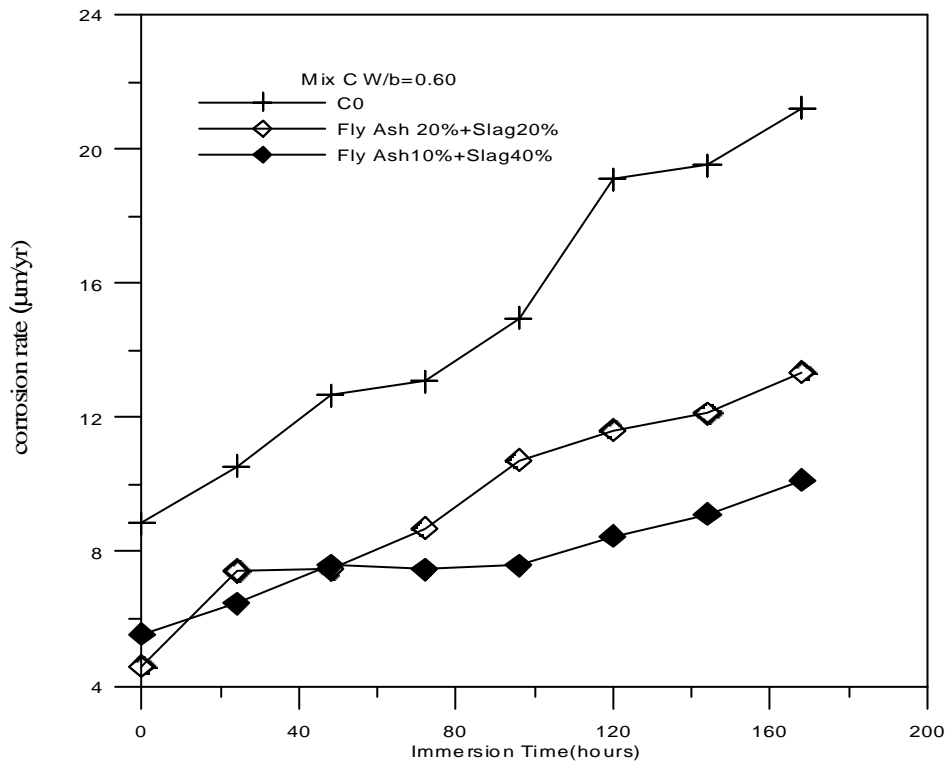


圖 4.42 爐灰組與控制組之腐蝕速率關係圖

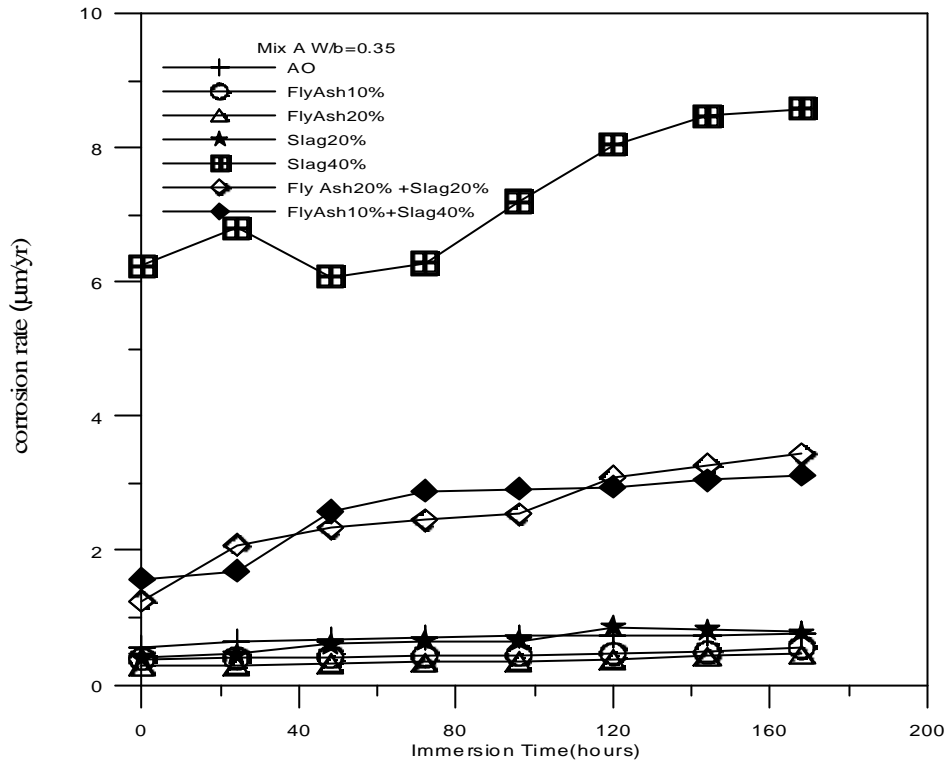


圖 4.43 腐蝕速率之關係圖

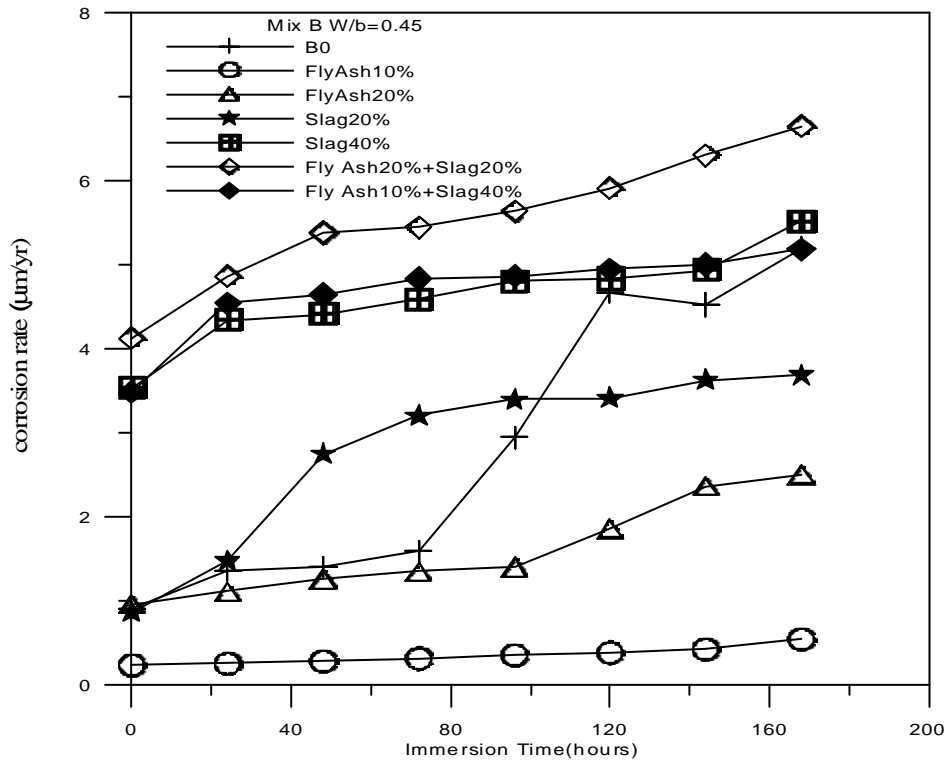


圖 4.44 腐蝕速率之關係圖

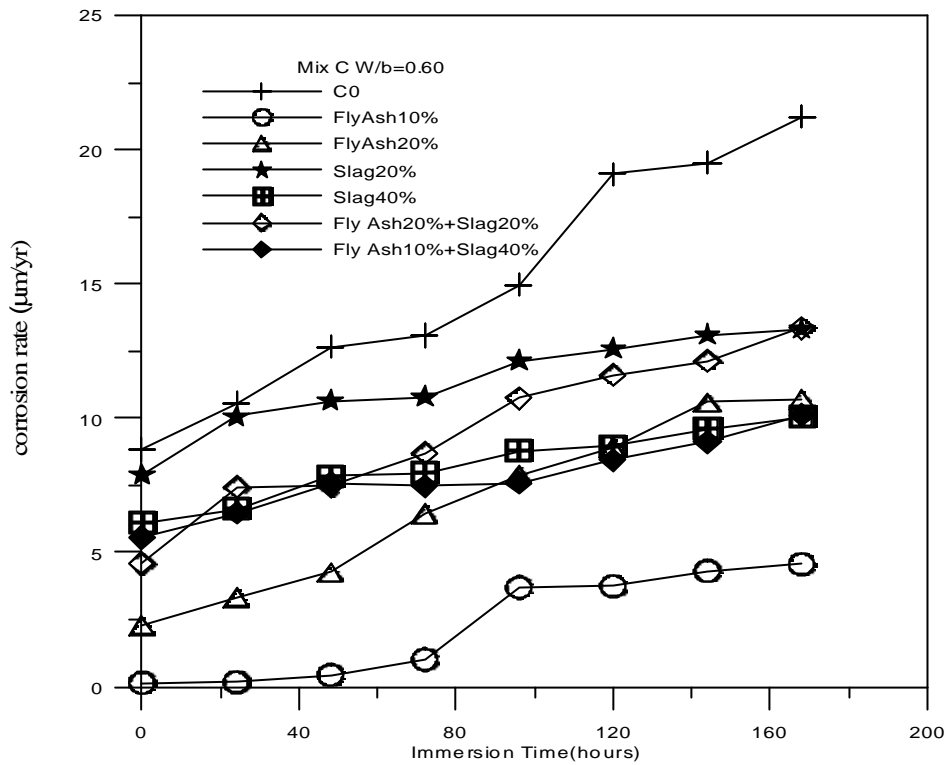


圖 4.45 腐蝕速率之關係圖

### 4.3 物理性質

#### 電阻係數

圖 4.46 至圖 4.49 顯示，其電阻以爐灰組為較大，次之以飛灰組取代量 20% 電阻為較大，接著是爐石組取代量 40%，再次之為飛灰取代 10%，接下來為爐石組 20%，最差為控制組。

#### 吸水率

圖 4.50 至圖 4.53 顯示，其爐灰組為最佳吸水率為最小，其表示連通孔隙為較少或是孔隙較為小，當水膠比為 0.35 時，以飛灰取代量 10% 為次之，接著為爐石組及取代量 20% 飛灰組，最差為控制組。當水膠比為 0.45 時，以飛灰組取代量及爐石組 20% 為次之，接著為爐石組取代量 40%，最差為控制組。當水膠比 0.60 時，其以爐石組為次之，接著為飛灰組，最差為控制組。

#### 氯離子擴散

圖 4.54 至圖 4.56 顯示，以取代量 20% 飛灰組為最佳，次之以取代量 10% 飛

灰組，最差為控制組。說明了飛灰對抵抗氯離子侵入有助益。圖 4.57 至圖 4.59 顯示，以取代量 40% 爐石組為最佳，20% 爐石組為次之，控制組為最差。圖 4.60 至圖 4.62 顯示，以飛灰組為最佳，爐石組次之，控制組為最差。圖 4.63 至圖 4.66 顯示以混合比例 10% 飛灰 40% 爐石為最佳，次之混合比例 20% 飛灰 20% 爐石，次之為爐石組。圖 4.66 至圖 4.68 顯示，當水膠比 0.35 時，以爐灰組(FASG14)為最佳，爐石組(40%)次之，接著飛灰組(20%)，其次爐灰組(FASG22)及爐石組(20%)，次次之為飛灰組(10%)。當水膠比 0.45 時，飛灰組(20%)為最佳，爐石組(20%)次之，接著為爐灰組(FASG22)，其次飛灰組(10%)，次之爐灰組(FASG14)，次次之爐石組(40%)。當水膠比 0.60 時，爐灰組(FASG14)為最佳，爐石組(40%)次之，接著飛灰組(20%)，次之爐石組(20%)，其次飛灰組(10%)，次次之爐灰組(FASG22)，所有配比皆以控制組為最差。

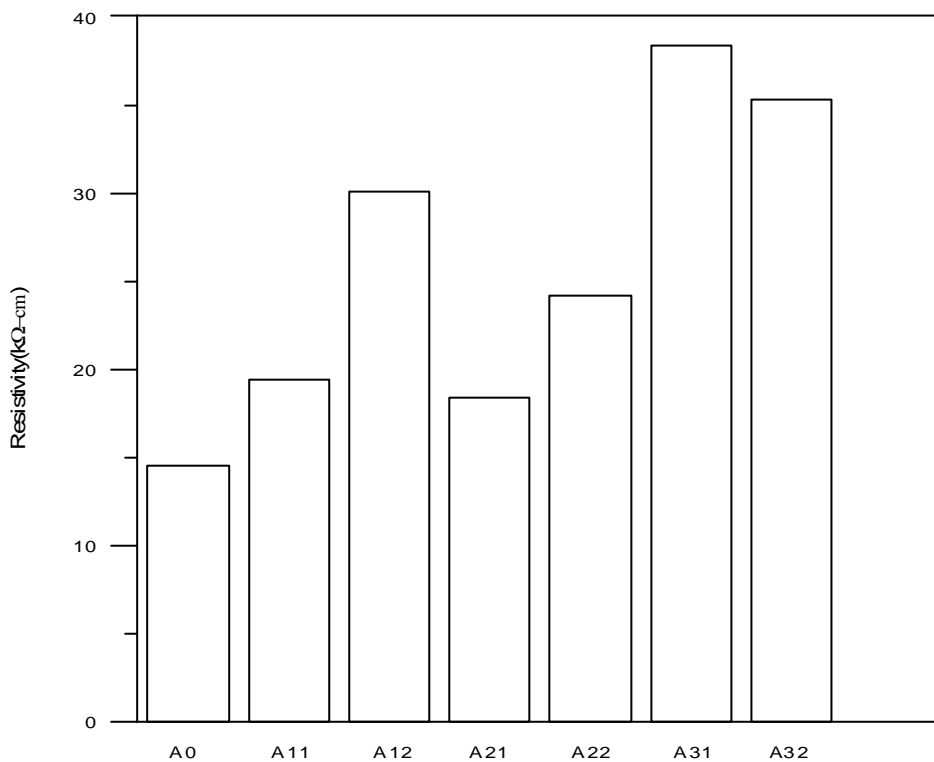


圖 4.46 電阻係數關係圖(W/b=0.35)

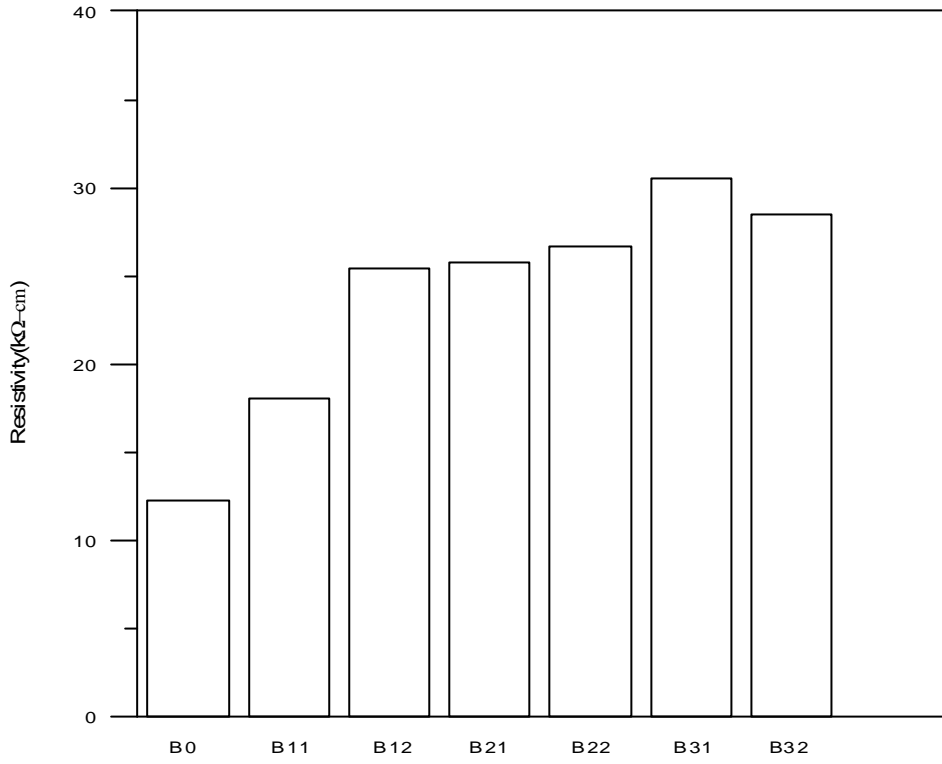


圖 4.47 電阻係數關係圖(W/b=0.45)

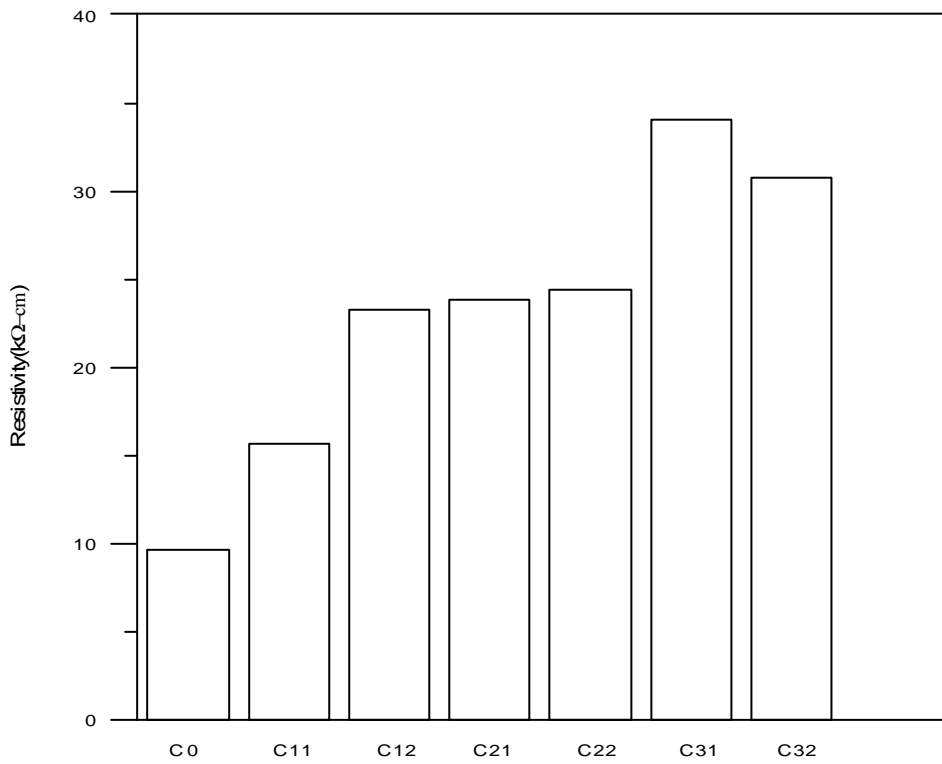


圖 4.48 電阻係數關係圖(W/b=0.6)

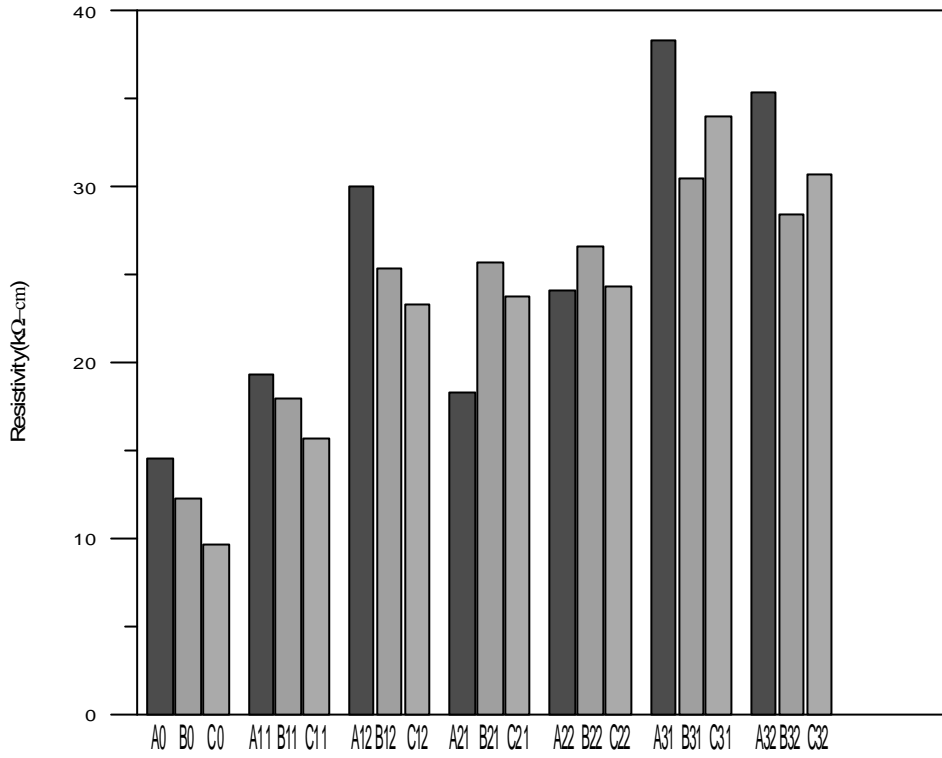


圖 4.49 電阻係數關係比較圖

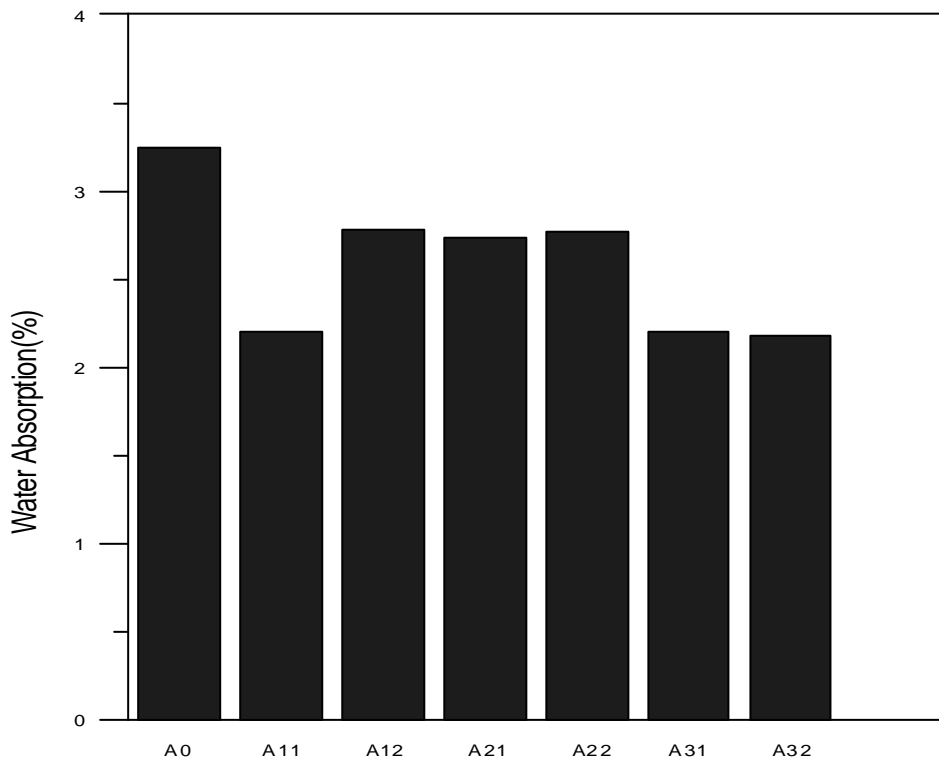


圖 4.50 吸水率關係圖(W/b=0.35)

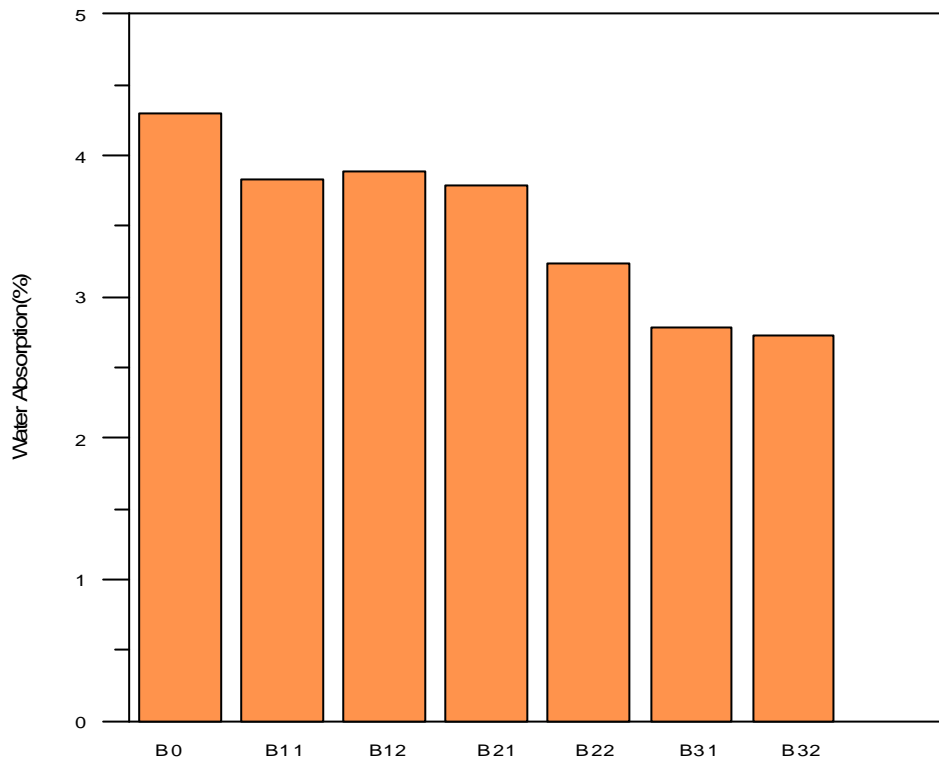


圖 4.51 吸水率關係圖(W/b=0.45)

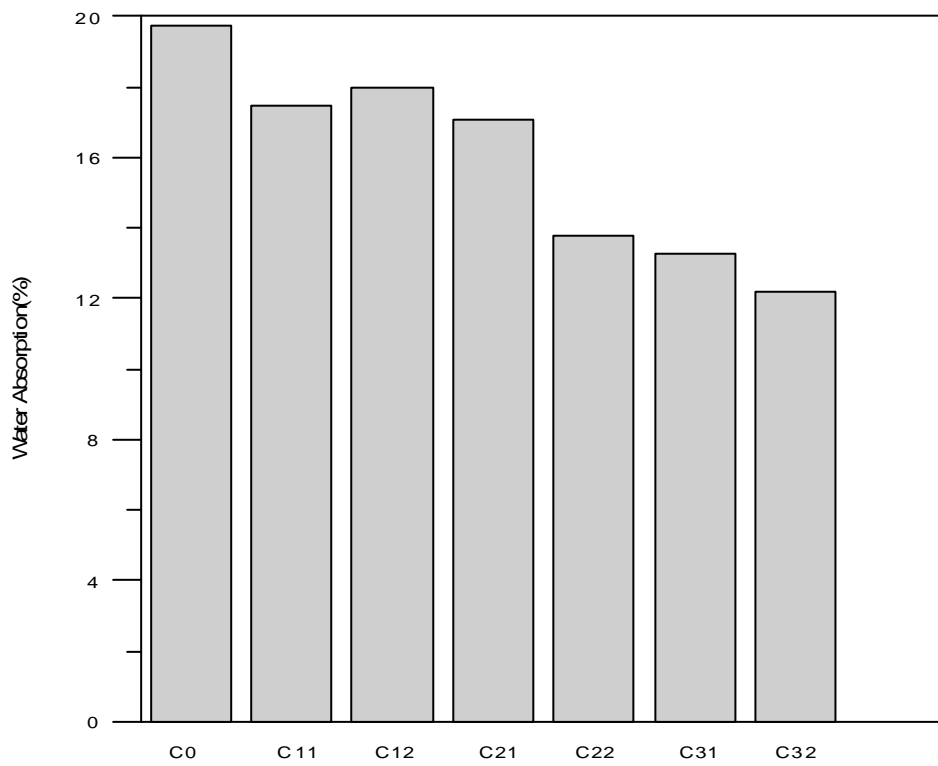


圖 4.52 吸水率關係圖(W/b=0.6)

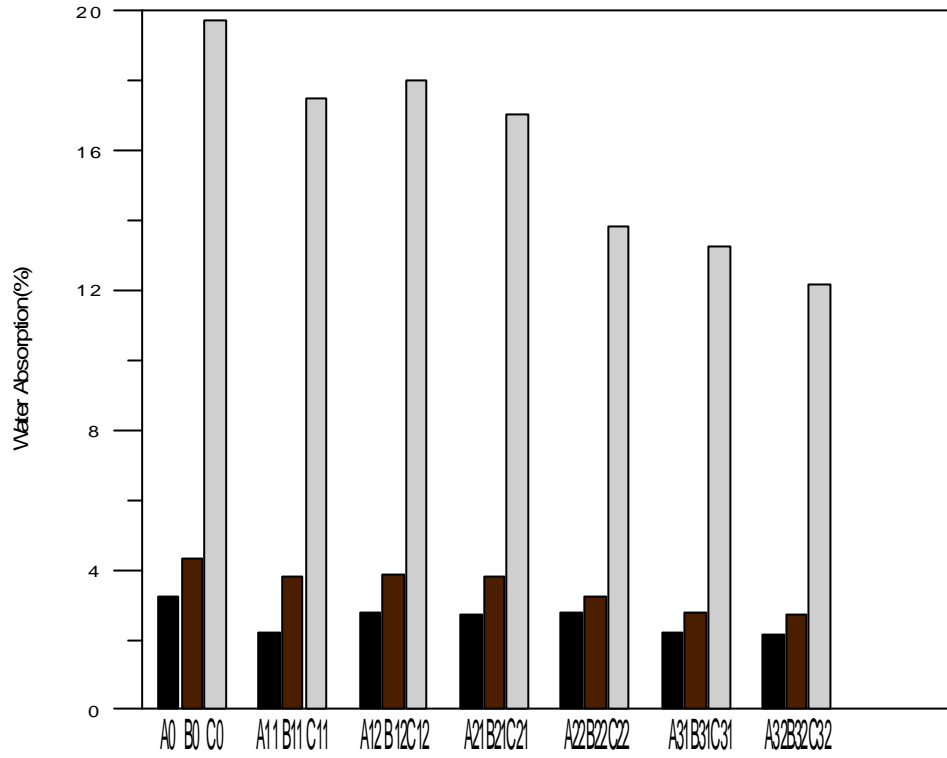


圖 4.53 吸水率比較圖

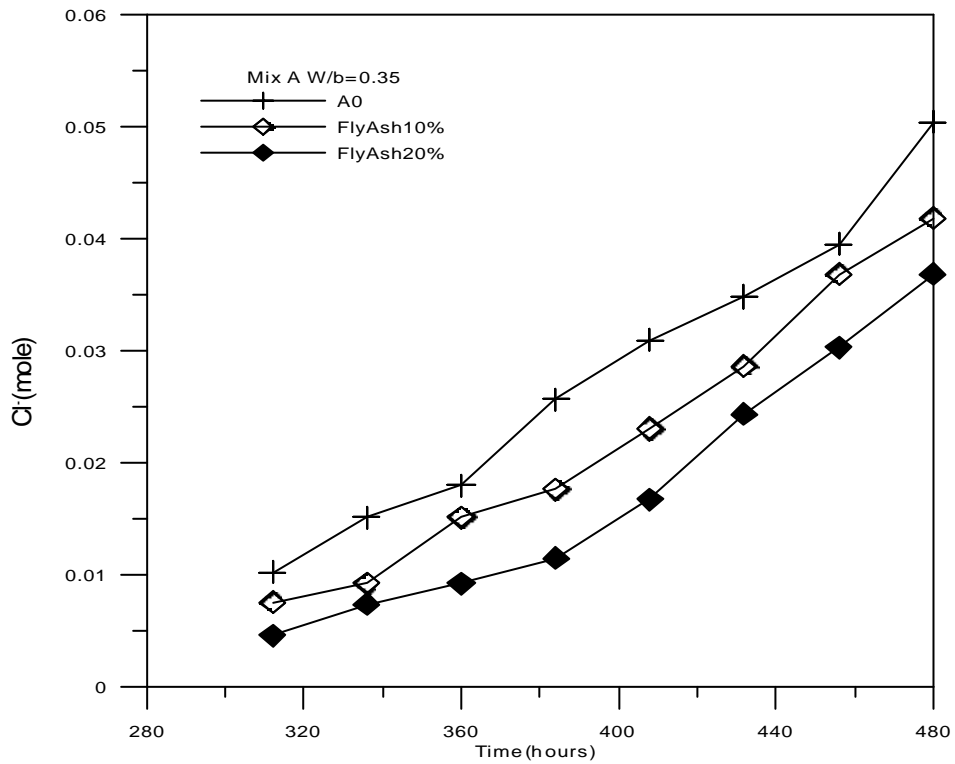


圖 4.54 飛灰組與控制組之氯離子擴散關係圖

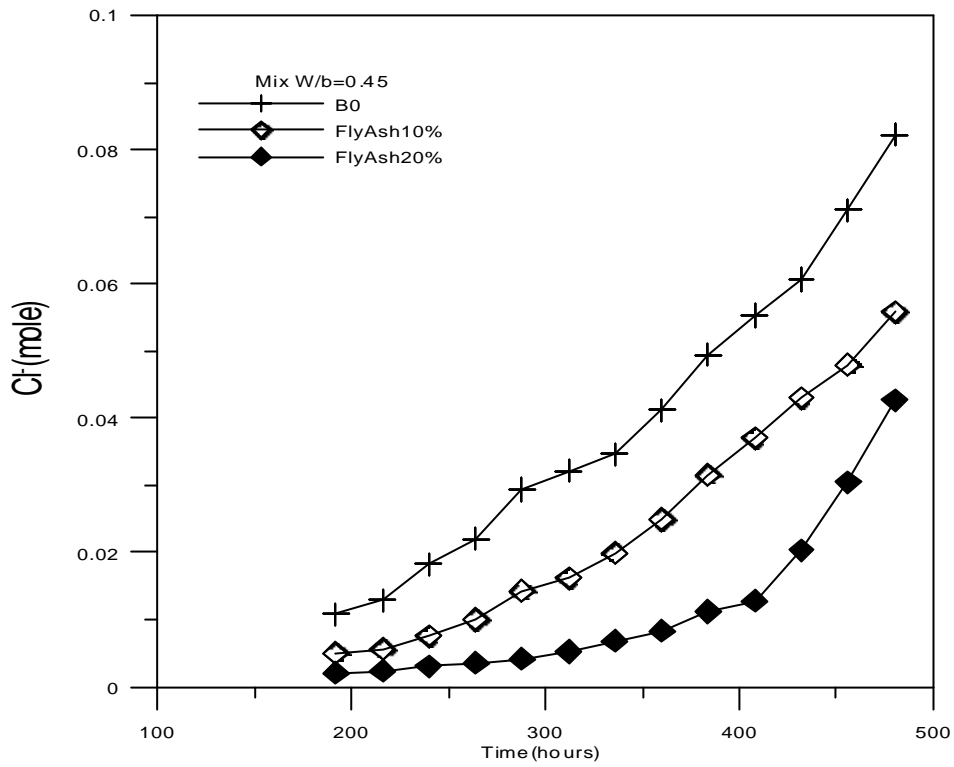


圖 4.55 飛灰組與控制組之氯離子擴散關係圖

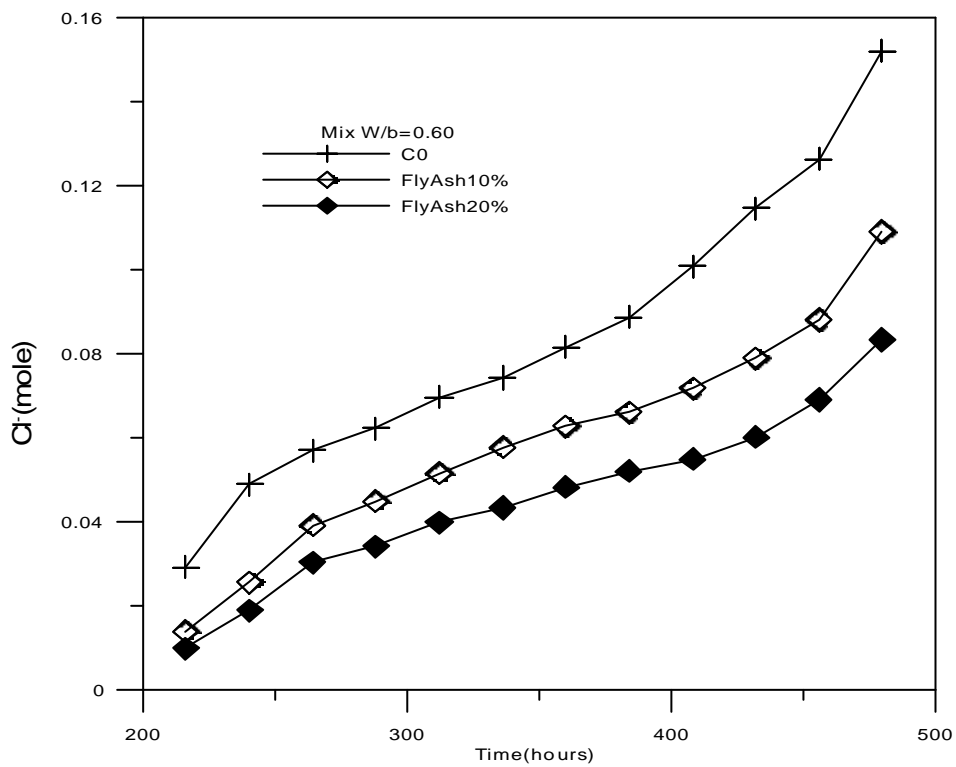


圖 4.56 飛灰組與控制組之氯離子擴散關係圖

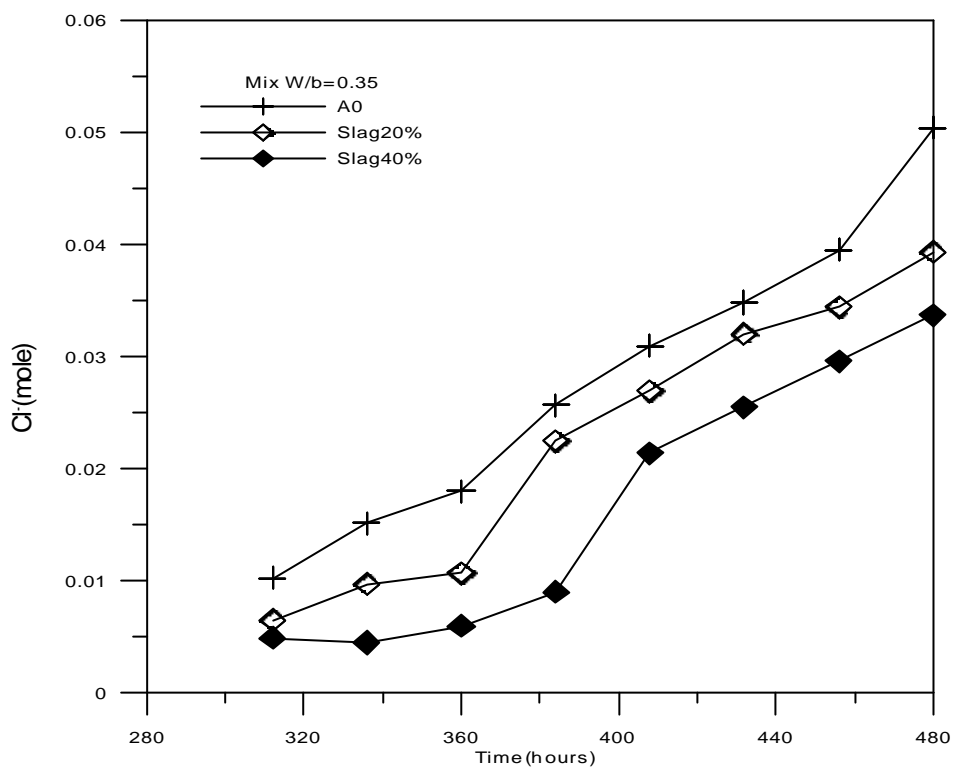


圖 4.57 爐石組與控制組之氯離子擴散關係圖

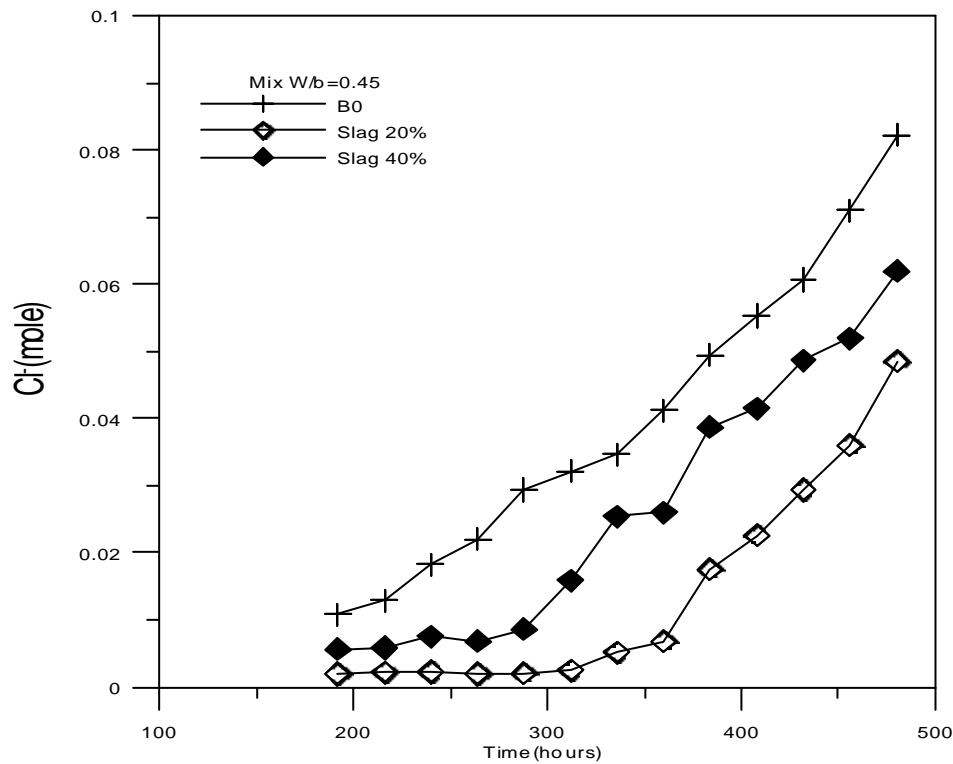


圖 4.58 爐石組與控制組之氯離子擴散關係圖

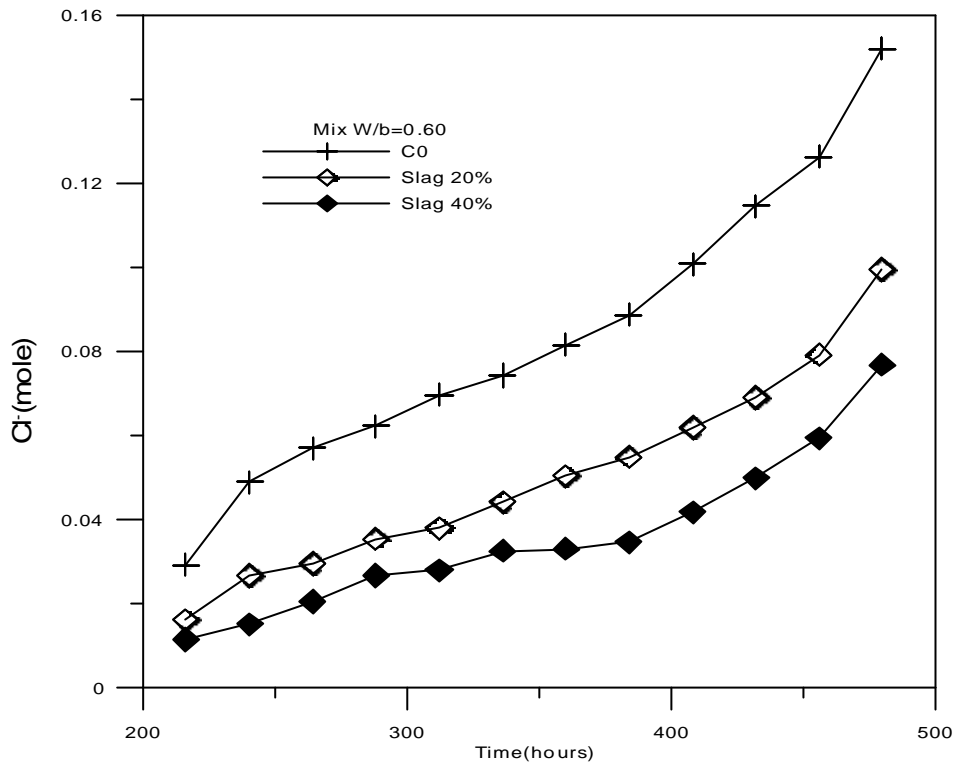


圖 4.59 爐石組與控制組之氯離子擴散關係圖

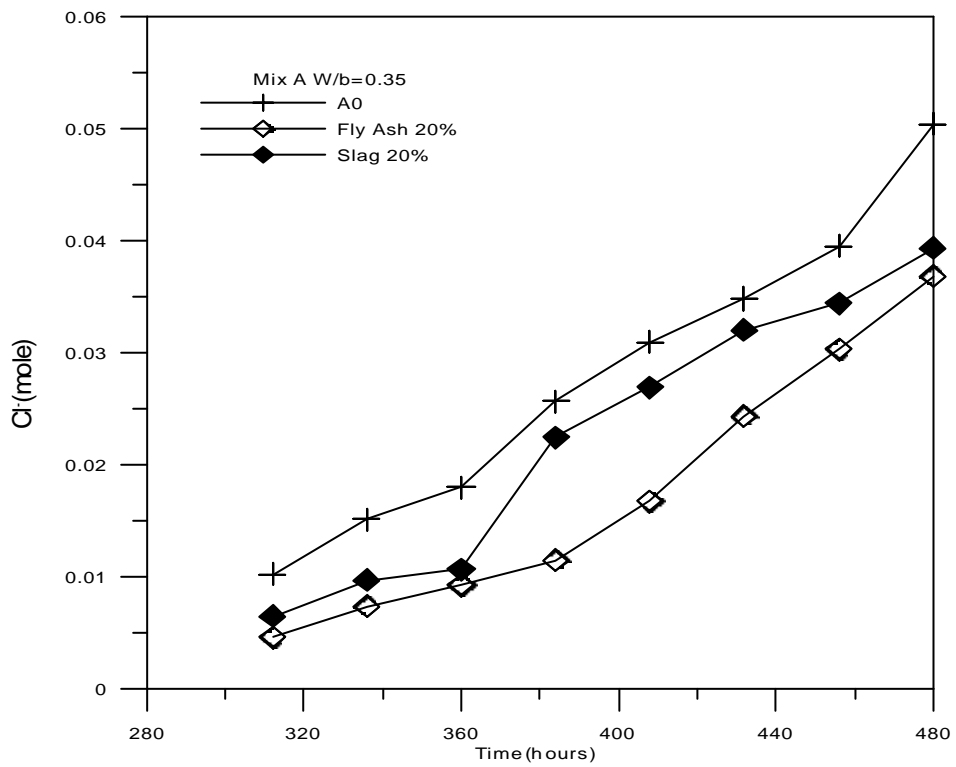


圖 4.60 同取代量飛灰組與爐石組之氯離子擴散關係圖

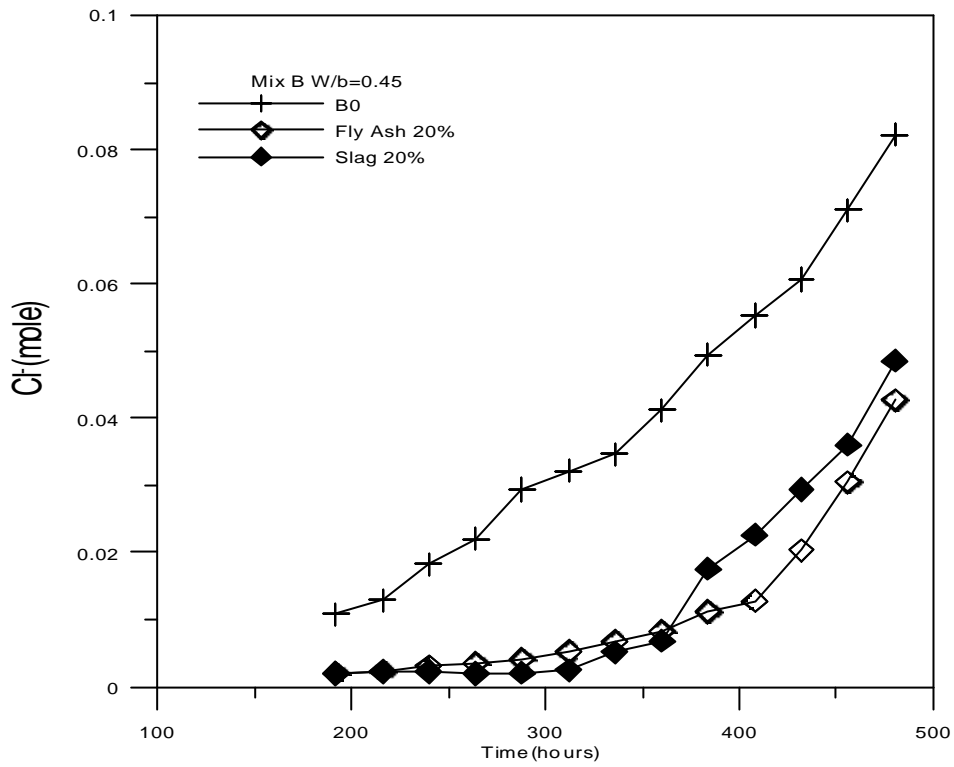


圖 4.61 同取代量飛灰組與爐石組之氯離子擴散關係圖

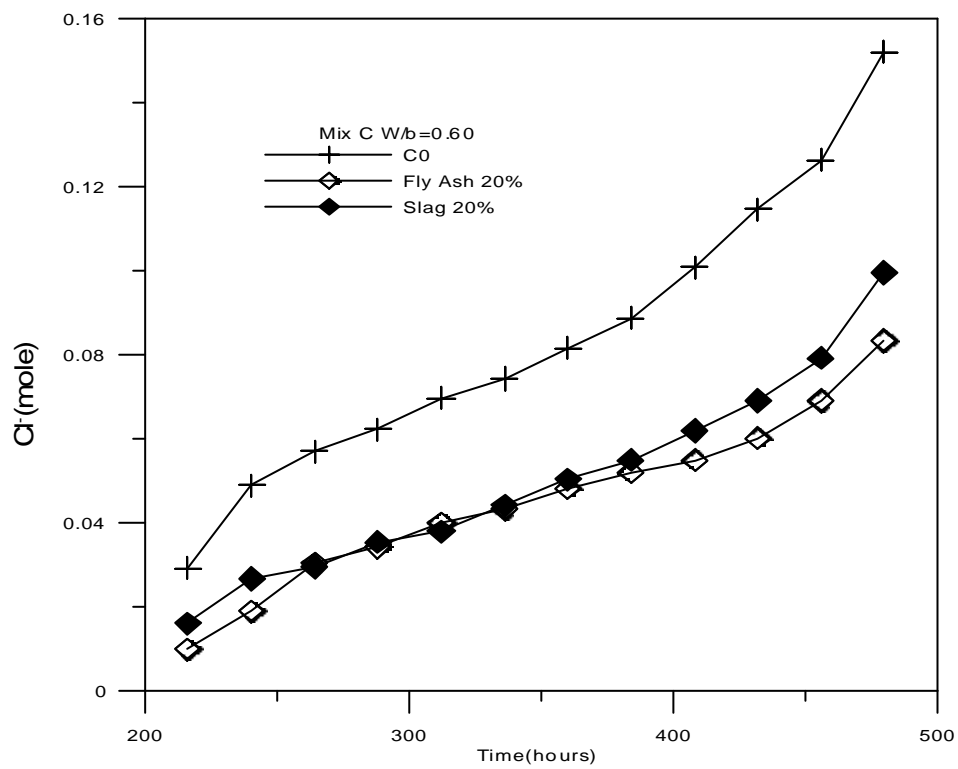


圖 4.62 同取代量飛灰組與爐石組之氯離子擴散關係圖

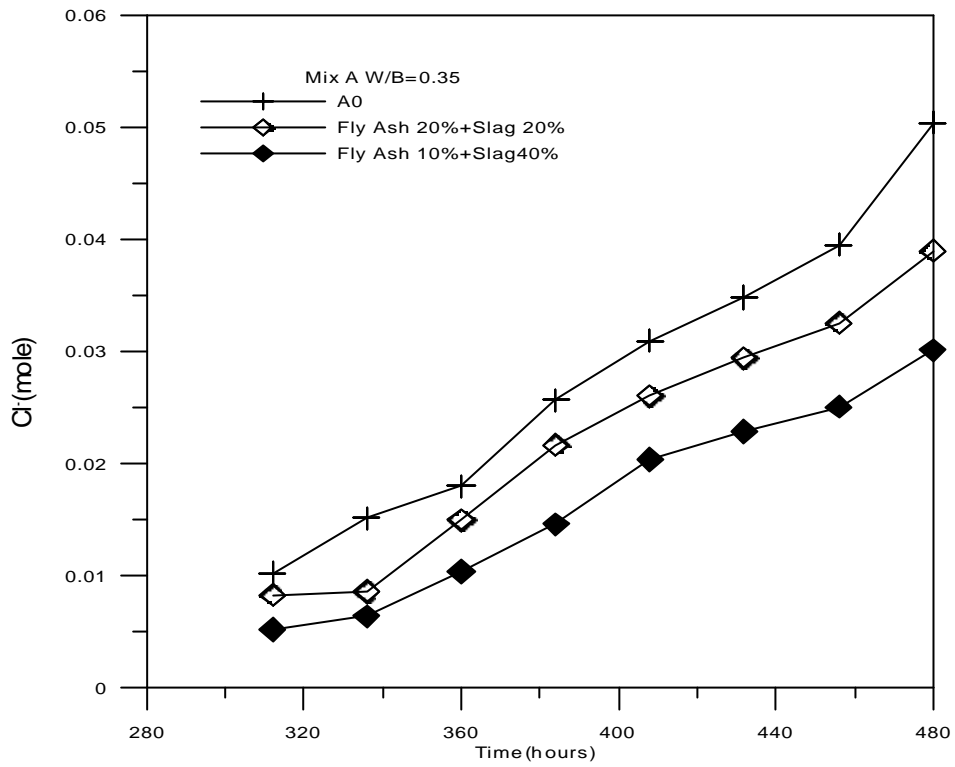


圖 4.63 爐灰組與控制組之氯離子擴散關係圖

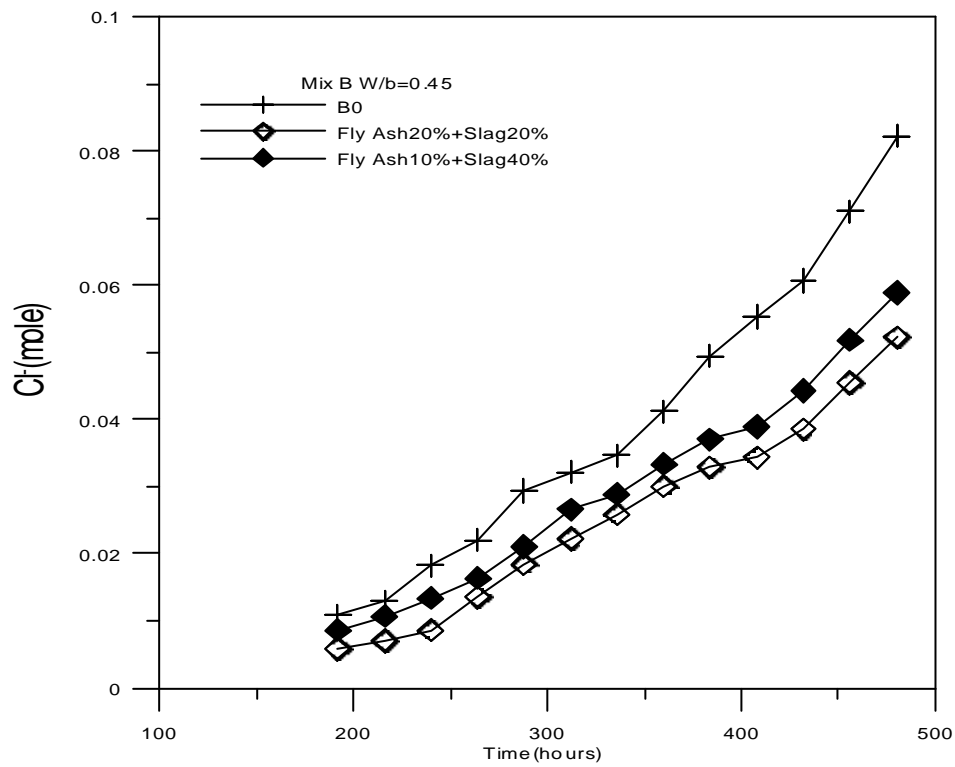


圖 4.64 爐灰組與控制組之氯離子擴散關係圖

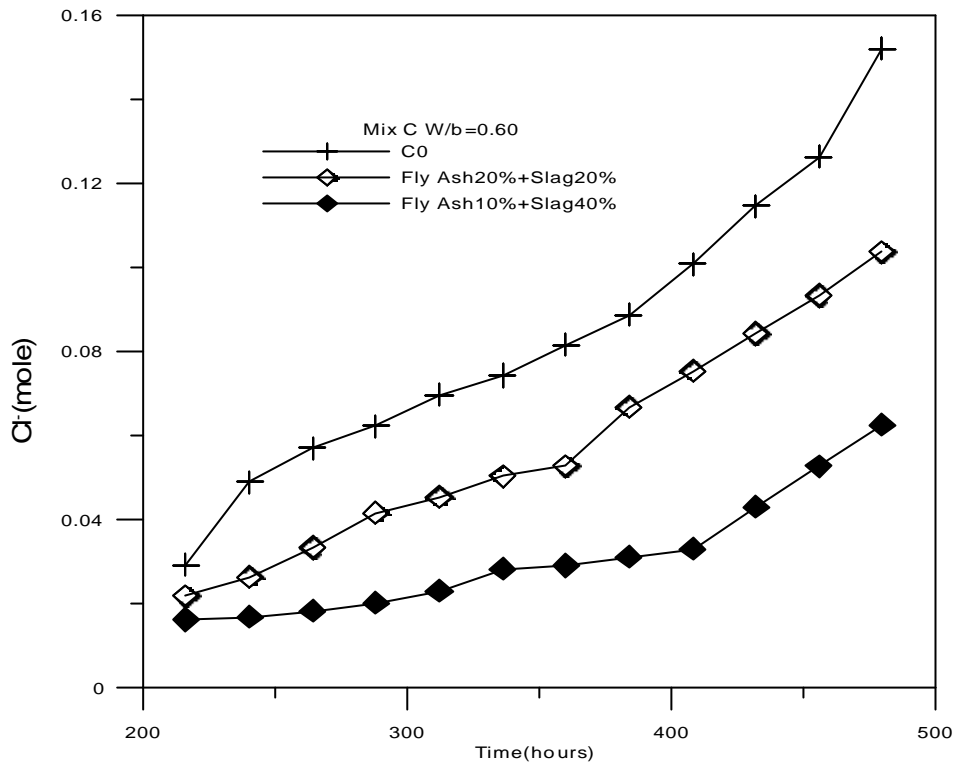


圖 4.65 爐灰組與控制組之氯離子關係圖

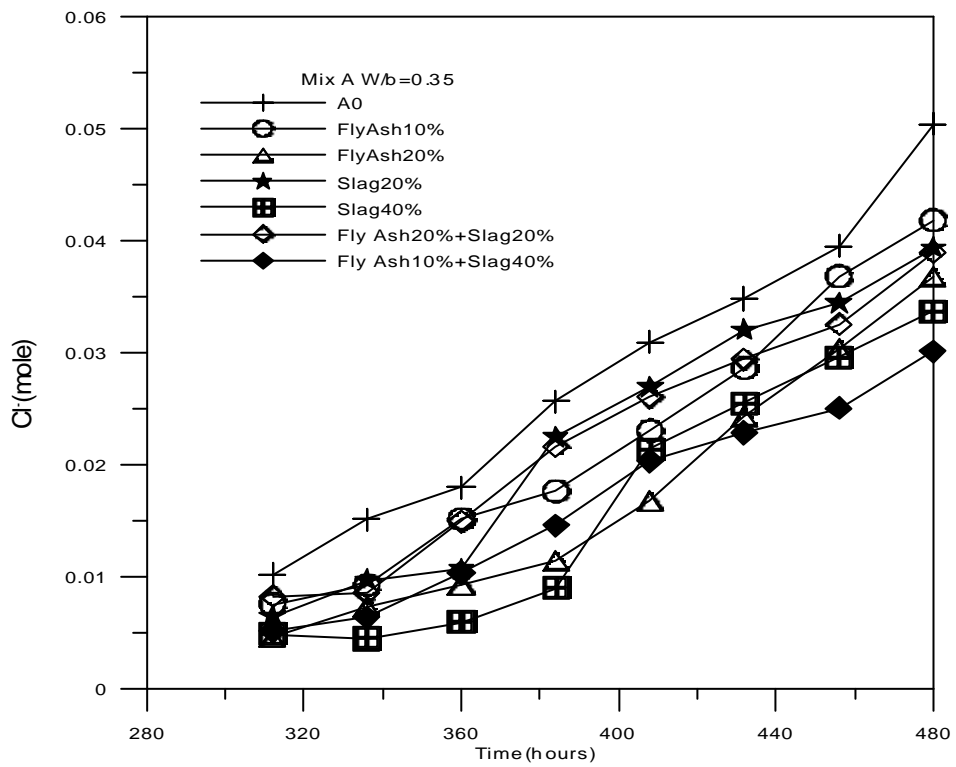


圖 4.66 氯離子擴散之關係圖

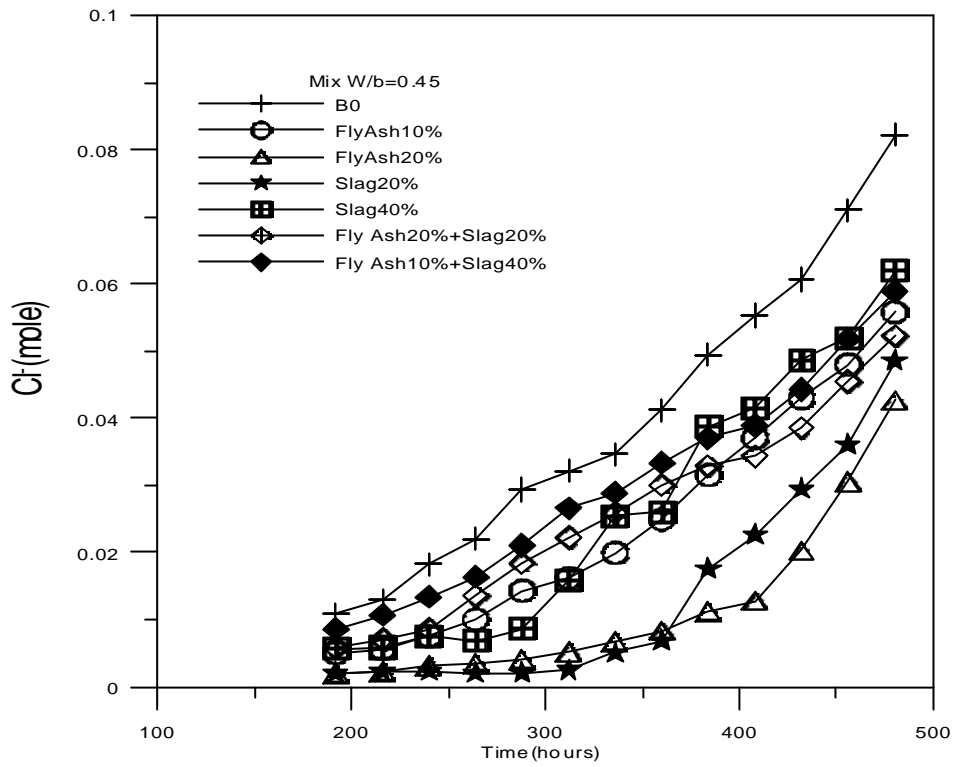


圖 4.67 氯離子擴散之關係圖

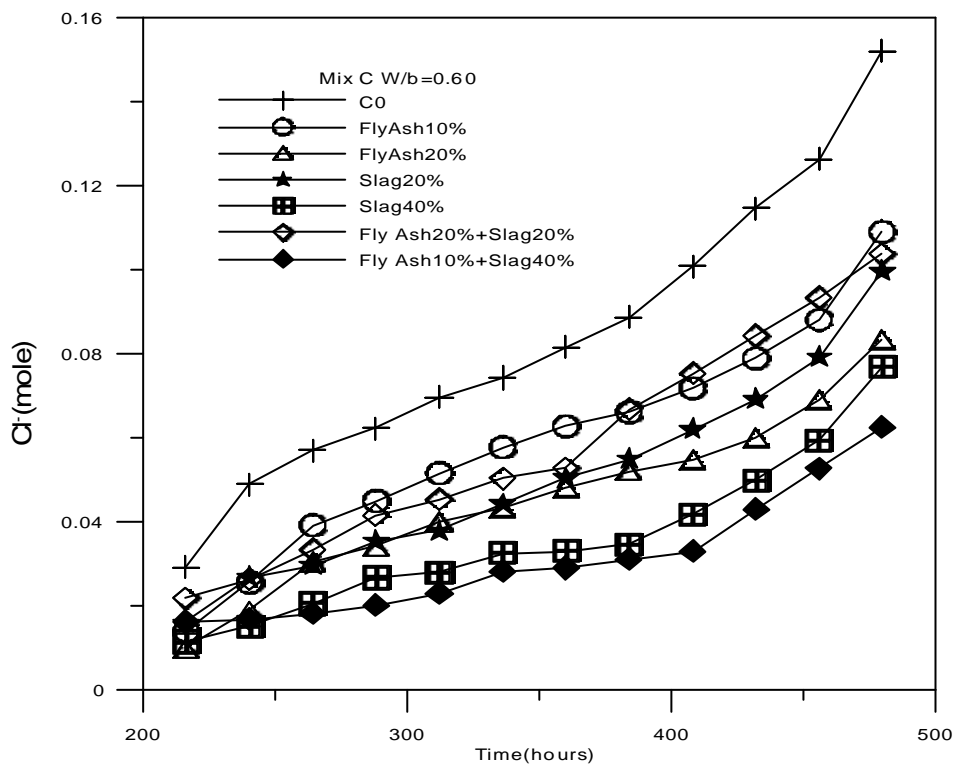


圖 4.68 氯離子擴散之關係圖

## 氣體滲透係數對於混凝土耐久性之關係

由表 4.7 及表 4.8 顯示，氣體滲透係數在本試驗中介於  $0.99\sim 1.41\times 10^{-16}(\text{m}^2)$  並不明顯，可以看出其差異，原因可能是本試驗之混凝土在飽和石灰水中養護 112 天，其孔隙結構已幾乎發展完成因此在本實驗環境下氣體滲透係數之差異並不明顯，而表 4.9 因為水膠比 0.60 屬高水膠比，孔隙結構比較不緻密，是故比較明顯可以看出其控制組與實驗組的差異，很明顯其爐灰組最為緻密。

表 4.4 水膠比 0.35 之氯離子擴散係數表

試體編號	A0	AFA1	AFA2	ASG2	ASG4	AFASG22	AFASG14
取點範圍	432	432	408	216	192	192	288
擴散曲線斜率 $\frac{\text{mole}}{\text{cm}^2 \times \text{s}}$	$4.34 \times 10^{-9}$	$4.19 \times 10^{-9}$	$3.92 \times 10^{-9}$	$6.88 \times 10^{-9}$	$3.64 \times 10^{-9}$	$7.83 \times 10^{-9}$	$3.2 \times 10^{-9}$
擴散係數 $\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	$3.02 \times 10^{-8}$	$1.08 \times 10^{-8}$	$1.01 \times 10^{-8}$	$1.78 \times 10^{-8}$	$9.41 \times 10^{-9}$	$2.02 \times 10^{-8}$	$8.28 \times 10^{-9}$

表 4.5 水膠比 0.45 之氯離子擴散係數表

試體編號	B0	BFA1	BFA2	BSG2	BSG4	BFASG22	BFASG14
取點範圍	240	384	336	336	216	240	288
擴散曲線斜率 $\frac{\text{mole}}{\text{cm}^2 \times \text{s}}$	$7.42 \times 10^{-9}$	$3.44 \times 10^{-9}$	$1.11 \times 10^{-9}$	$3.21 \times 10^{-9}$	$8.03 \times 10^{-8}$	$5.62 \times 10^{-9}$	$5.71 \times 10^{-9}$
擴散係數 $\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	$1.92 \times 10^{-8}$	$9.20 \times 10^{-9}$	$2.87 \times 10^{-9}$	$8.30 \times 10^{-9}$	$1.40 \times 10^{-8}$	$8.90 \times 10^{-9}$	$1.80 \times 10^{-8}$

表 4.6 水膠比 0.60 之氯離子擴散係數表

試體編號	C0	CFA1	CFA2	CSG2	CSG4	CFASG22	CFASG14
取點範圍	144	48	168	192	168	192	144
擴散曲線斜率 $\frac{\text{mole}}{\text{cm}^2 \times \text{s}}$	$1.73 \times 10^{-8}$	$1.51 \times 10^{-8}$	$1.13 \times 10^{-8}$	$1.05 \times 10^{-8}$	$7.58 \times 10^{-9}$	$1.29 \times 10^{-8}$	$9.04 \times 10^{-9}$
擴散係數 $\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	$4.48 \times 10^{-8}$	$3.90 \times 10^{-8}$	$2.92 \times 10^{-8}$	$3.0 \times 10^{-8}$	$1.96 \times 10^{-8}$	$4.34 \times 10^{-8}$	$1.33 \times 10^{-8}$

表 4.7 水膠比 0.35 之氣體滲透係數

試體編號	厚度 t(mm)	直徑 d(mm)	氣體流量 (ml/min)	氣體滲透係數 $K_0 (\times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{sec})$
A0	30.59	98.68	8	1.14
AFA1	29.69	98.43	7.1	0.99
AFA2	29.97	98.74	7.4	1.03
ASG2	30.04	98.28	7.2	1.02
ASG4	29.55	98.63	7.4	1.02
AFASG22	29.94	98.56	7	0.98
AFASG14	30.64	98.25	7	1.01

表 4.8 水膠比 0.45 之氣體滲透係數

試體編號	厚度 t(mm)	直徑 d(mm)	氣體流量 (ml/min)	氣體滲透係數 $K_0 (\times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{sec})$
B0	30.73	98.71	9.8	1.41
BFA1	30.83	98.64	9.6	1.38
BFA2	30.73	98.72	9.8	1.41
BSG2	30.92	98.74	9.6	1.39
BSG4	31.28	98.54	9	1.32
BFASG22	30.16	98.64	8.4	1.18
BFASG14	31.16	98.87	8.2	1.19

表 4.9 水膠比 0.60 之氣體滲透係數

試體編號	厚度 t(mm)	直徑 d(mm)	氣體流量 (ml/min)	氣體滲透係數 $K_0 (\times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{sec})$
C0	30.58	98.57	22	3.15
CFA1	30.44	98.55	18	2.57
CFA2	30.64	98.57	15.2	2.18
CSG2	30.83	98.81	11.6	1.67
CSG4	31.51	98.86	10	1.47
CFASG22	30.78	98.87	9.6	1.38
CFASG14	30.36	98.74	8.4	1.19

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

1. 試驗結果顯示抗壓強度以爐灰組(20% 飛灰+20% 爐石) > 爐石組(20%、40%) > 爐灰組(10% 飛灰+40% 爐石) > 飛灰組(10%、20%) > 控制組，其中爐灰組以 20% 飛灰與 20% 爐石為最佳，強度較控制組高出 30~40%，在高水膠比 0.6 時，強度較控制組高出 50%，其原因可能是飛灰與爐石時。粒徑互補效應成效最大，使混凝土更緻密，其次是爐石組(40% 爐石)，成長較控制組高出 25~35%，次之是爐灰組(10% 飛灰 40% 爐石)，強度較控制組高出 25% 左右，接著為飛灰組(20%)，強度較控制組高出 20%。在低水膠比 0.35 以爐石組(20% 爐石)為最佳，可能原因是爐石為針狀，飛灰為圓球形，所以與氫氧化鈣(CH)結合時，飛灰是以圓球包圍 C-S-H 膠體形成網狀結構，而爐石是以針狀結構填充於孔隙。
2. 開路電位試驗結果顯示，飛灰組 > 控制組 > 爐灰組 > 爐石組，使用大量飛灰對於腐防制並無助益，因為添加飛灰一方面雖可增加混凝土之緻密性，另一方面卻會消耗水化反應產之氫氧化鈣而降低鋼筋周圍孔隙水之 pH 值，使得鈍態保護膜易受氯離子破壞，因此大量使用飛灰導致 pH 值降低的影響比提高混凝土緻密性的影響為大。爐石可能含某些金屬成份，所以添加爐石粉會造成了其整體之氧化電位不同。
3. 試驗結果顯示腐蝕速率，飛灰組 < 控制組 < 爐灰組 < 爐石組。
4. 就電阻係數及吸水率而言，電阻係數愈高則吸水率愈低，以爐灰組 > 爐石組 > 飛灰組 > 控制組。其原因為爐灰組較為緻密，其孔隙結構較細密，爐灰組以飛灰爐石取代水泥量 20% 為最佳。
5. 就氣體擴散係數而言，爐灰組 < 爐石組 < 飛灰組 < 控制組，此說明孔隙愈小氣體擴散係數愈小，與電阻係數及吸水率得到相同之趨勢。
6. 試驗結果顯示氯離子擴散試驗，爐灰組 < 爐石組(40%) < 飛灰組(20%) < 爐石組(20%) < 控制組，飛灰在抵制氯離子侵入有莫大的功效與腐蝕速率有相同之結果。
7. 綜合前述力學及物理性質而論，爐灰組以 20% 飛灰及 20% 爐石取代水泥量為最佳；以抗腐蝕能力而言，飛灰組以 20% 代替水泥量為最佳，此說明飛灰對於在抵抗氯離子之侵入，扮演十分重要的角色。

## 參考文獻

1. 黃兆龍，台北國際金融中心超高層大樓新建工程-高性能混凝土先期品質管制(期末報告)，中華民國結構工程協會(1999)。
2. 黃兆龍，台灣高速鐵路箱形樑結構混凝土初步研發及驗證，國立台灣科技大學(1999)。
3. 黃兆龍，鋼筋混凝土施工技術與結構物腐蝕防治研討會論文輯 (1994)。
4. Detwiler, R. J., Kjellsen, K. O., and Gjorv, O. E., "Resistance to Chloride Intrusion of Concrete Cured at Different Temperatures", ACI Material, Vol. 88, No.1, pp.19-24, (1991).
5. Broomfield, John. P., "Corrosion of Steel in Concrete", first edition 1997.
6. Andrade, C., "Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete From Ionic Migration Measurement", Cement and Concrete Research Vol.23, No.43, pp.724-742, (1993).
7. Page, C.L., Short, N. R., and El Tarras, A., "Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Paste", Cement and Concrete Research, Vol. 11, No. 3, pp. 395-406, (1981).
8. Mangat, P. S., and Tu, S. C., "Chloride Ingress in Microsilica Concrete", Cement Concrete Composites, Vol. 15, No. 4, pp.215-221, (1993).
9. Byfore, K., "Influence of Silica Fume and Fly Ash on Chloride Diffusion and PH Values in Cement Paste", Cement and Concrete Research, Vol.15, No.1, pp.115-130, (1987).
10. Wenner, F., "Bulletin of the Bureau of Standards", V. 12, pp.469-478, (1915).
11. Kollek, J. J., "the Determination of Permeability of Concrete to Oxygen by the Cembureau Method—a recommendation", Material and Structure, No.22, pp.225-230, (1989).
12. Calogovic, V., "Gas Permeability Measurement of Porous Materials (Concrete) by Time-Variable Pressure Difference Method", Cement and Concrete Research, Vol.25, No.5, pp.1054-1602 (1995).
13. Natalya Hearn, Gordon Lok, "Measurement of Permeability under Uniaxial Compression-A Test Method", ACI Material Journal, V.95, No.6, (1998).
14. Sanjuan, M. A., Munoz-Martialay R., "Variable of the Concrete Air Permeability Coefficient", Building and Environment, Vol32, No.1, pp.51-55, (1997).

15. Jacobs, F., "Permeability to Gas of Partially Saturated Concrete", Magazine of Concrete Research, No.2, pp.115-212.(1998).
16. Brandt, A. M., "Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance", first edition, pp.116-128 (1997).
17. Cabrera, J. G., and Claisse, P. A., "Measurement of Chloride Penetration into Silica Fume Concrete", Cement Concrete Composites, Vol.12, pp.157-161,(1990).
18. 林炳炎, 飛灰用在混凝土, 現代營建雜誌社, (1991)。
19. 徐金泉, 水淬高爐爐渣(石)粉應用於混凝土技術, (1998)。
20. 辛穎, 混凝土耐久性試驗方法比較研究, 國立台灣海洋大學河海工程學系碩士論文, PP.34, (2000)。
21. Kefeng Tan and Xincheng Pu, "Strengthening Effects of Finely ground Fly Ash, Granulaten Blast Furnace Slag, and their Combination", Cement and Concrete Research, Vol.28, No.12, pp.1819-1825,(1998).