

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文



Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

以貯鹽試驗探討鋼筋混凝土之  
氯離子擴散及鋼筋腐蝕

Evaluation of the Chloride Diffusion and the Corrosion of  
Reinforced Concrete with Salt Ponding Test

陳泰誠

Tai-Chen Chen

指導教授：詹穎雯 教授

Advisor: Yin-Wen Chan, Ph. D.

中華民國 105 年 8 月

August, 2016

## 誌謝



論文得以完成，首先感謝恩師 謙穎雯老師，以及同研究群的 廖文正老師、陳振川老師，給予我論文上的指導與方向，讓我學習到專業知識和解決問題的能力與態度，使這篇論文能夠順利完成，謹在此致上學生深深的敬意。

感謝口試委員 楊仲家老師撥冗給予寶貴的建議與指導，使此篇論文能夠更加完整，謹在此表達深深的感謝。

在研究期間，感謝泓斌學長、威佑學長、Wisena 學長，不但在研究上提供見解與建議，亦教導其他有關混凝土材料性質的相關學識。感謝上一屆的學長姐季軒、可捷、士翔、又德、智強、Agie 在碩一時帶領我熟悉台大的新生活，並傳承實驗及課業上的經驗與知識。感謝同學誠竣、毓源、鈺軒、韋如、昆穎、郁珊以及學弟妹凱蔚、家禎、凱越、宜庭、祖祐、庭愷、維邑、王丞在實驗和研究上的幫忙，並帶給研究室許多歡笑，碩士生活很開心能夠擁有與你們的美好回憶。

感謝父母以及女友延勤，不斷給予遠從高雄來到台北求學的我支持與堅持下去的動力，讓我無後顧之憂地完成學業，希望在將來也能夠令你們感到驕傲。

即使碩士學業的過程有哭有笑，兩年的歲月永遠是我最深刻的回憶，以此篇論文獻給所有幫助過我的人，致上最崇高的感謝。

## 中文摘要



台灣處於亞熱帶與熱帶地區且四面環海，沿岸地區鋼筋混凝土受到海洋氯鹽的侵襲，屬於易腐蝕環境。當氯離子含量在鋼筋表層累積至一定量時，鋼筋表層的鈍化膜（passive film）會被破壞，導致鋼筋被腐蝕，降低結構物的強度與勁度，大幅縮短建物使用年限，因此在鋼筋混凝土普及的時代，氯離子對鋼筋的腐蝕行為已成為一重要課題。

本研究以貯鹽試驗將氯離子擴散進入鋼筋混凝土內，以爐石、飛灰取代部分水泥，了解卜作嵐材料對混凝土緻密程度的影響。氯離子在鋼筋表層逐漸累積，利用腐蝕電流密度量測鋼筋腐蝕情形，希望能夠得到誘發鋼筋腐蝕之臨界氯離子濃度。本研究探討影響混凝土緻密程度之參數包含擴散係數、總入滲量、固結能力，鋼筋腐蝕趨勢則是以腐蝕電流密度作為判斷依據。

擴散係數隨著水膠比增加而提高，而在早齡期爐石能夠有效降低擴散係數，但飛灰混凝土早期滲透性較高，擴散係數較大。影響鋼筋開始腐蝕時間的主要因素為緻密程度，緻密程度越佳鋼筋開始腐蝕時間越晚，pH值為影響的次要因素，酸鹼值降低使鋼筋能夠容許的氯離子濃度降低。

當腐蝕電流密度為  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  比起  $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$  更能作為達到臨界氯離子濃度的指標，以總氯離子及自由氯離子濃度分析卜作嵐取代之混凝土會產生較大的誤差，其值分別介於 0.604~1.833% 和 0.517~1.588% 佔膠結材重量，以  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  分析臨界氯離子濃度有效地縮小臨界值的範圍，其值介於 1.351~1.807。

關鍵字：耐久性、貯鹽試驗、擴散係數、腐蝕電流密度、臨界氯離子濃度



## Abstract

Due to the climate and geographic location, coastal reinforced concrete buildings in Taiwan are attacked by chloride ion and exposed to corrosive environments. When the chloride content on the surface of rebar reaches the limit, the passive film would be destroyed so that the rebar could be corroded. This result would reduce the strength and stiffness of structure and significantly shorten service life of buildings. Therefore, the issue of chloride-induced corrosion becomes important in this age.

In this study, chloride ions are accumulated on the surface of rebar and diffuse into the reinforced concrete through salt ponding test. Moreover, parts of cement of the specimens are replaced by slag and fly ash to clarify the influence of the density with different pozzolanic materials. In this study, the value of chloride threshold, which makes rebar start to corrode, is determined by measuring the corrosion current density, and the studied influenced factors are diffusion coefficient, total ingressive chloride amount, chloride binding capacity on density of concrete and corrosion current density on corrosion of rebar.

The results show that diffusion coefficients increase with the increase of water-binder ratio. At early age, the diffusion coefficient is decreased effectively by adding slag. On the other hand, adding fly ash makes higher diffusion coefficient because of the lower permeability. Also, it is discovered that the main factor influencing the initial time of corrosion is the density of concrete. The higher density takes more time corroding. The secondary factor is the pH value. The lower pH value makes the rebar corrode faster.

From the experimental results, the chloride threshold value is better defined as  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  of corrosion current density instead of  $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Additionally, it is noted that the chloride threshold value defined by  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  is of accurate range as

1.351~1.807% of binder mass, while the chloride threshold values defined by total chloride content and free chloride content are of wider ranges as 0.604~1.833% and 0.517~1.588% of binder mass.

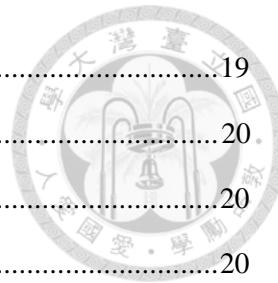


Keyword: Durability, Salt ponding test, Diffusion coefficient, Corrosion current density, Chloride threshold value

# 目錄

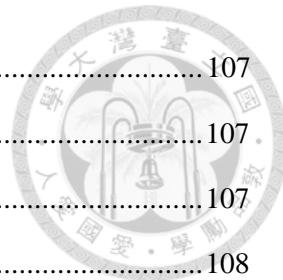


誌謝 .....	i
中文摘要 .....	ii
Abstract .....	iii
目錄 .....	v
表目錄 .....	ix
圖目錄 .....	xii
照片目錄 .....	xvi
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	1
1.3 研究流程 .....	2
第二章 文獻回顧 .....	4
2.1. 混凝土中的氯離子 .....	4
2.1.1. 氯離子的來源 .....	4
2.1.2. 氯離子存在型態 .....	4
2.1.3. 混凝土內氯鹽含量之相關規範 .....	5
2.2. 混凝土中氯離子的擴散行為 .....	6
2.2.1. 擴散方程式 .....	6
2.2.2. 時間對擴散係數的影響 .....	7
2.3. 卜作嵐材料對混凝土強度及耐久性之影響 .....	10
2.3.1. 爐石對混凝土強度及耐久性之影響 .....	10
2.3.2. 飛灰對混凝土強度及耐久性之影響 .....	12
2.3.3. 砂灰對混凝土強度及耐久性之影響 .....	13
2.4. 膠結材對氯離子的固結能力 .....	18
2.4.1. 水泥對氯離子固結能力的影響 .....	18
2.4.2. 爐石對氯離子固結能力的影響 .....	18



2.4.3.	飛灰對氯離子固結能力的影響.....	19
2.5.	鋼筋腐蝕行為.....	20.
2.5.1.	鋼筋腐蝕的原理 .....	20
2.5.2.	鋼筋鈍化作用 .....	20
2.5.3.	氯離子對鋼筋腐蝕造成的影响.....	21
2.6.	臨界氯離子濃度 .....	23
2.6.1.	臨界氯離子濃度的定義 .....	23
2.6.2.	臨界氯離子濃度的表示方式 .....	23
2.7.	氯離子含量與鋼筋腐蝕趨勢量測方法 .....	29
2.7.1.	氯離子含量之量測方法 .....	29
2.7.2.	混凝土之酸鹼值量測.....	29
2.7.3.	鋼筋混凝土中檢測鋼筋腐蝕的方法.....	29
第三章	實驗計畫 .....	39
3.1.	實驗內容.....	39
3.2.	試驗材料.....	39
3.3.	試驗儀器 .....	45
3.4.	配比及混凝土拌和流程.....	51
3.5.	抗壓強度試驗 .....	53
3.6.	貯鹽試驗.....	53
3.6.1.	試體設計 .....	53
3.6.2.	試驗步驟 .....	53
3.7.	鋼筋腐蝕電流密度量測試驗 .....	54
3.8.	氯離子含量滴定試驗.....	56
3.8.1.	試驗材料與設備 .....	56
3.8.2.	水溶性氯離子含量試驗 .....	56
3.8.3.	酸溶性氯離子含量試驗 .....	57
3.9.	混凝土 pH 值試驗.....	57
3.9.1.	試驗材料與設備 .....	57

3.9.2.	試驗方法 .....	57
第四章	實驗結果與分析 .....	59
4.1.	抗壓強度試驗結果 .....	59
4.1.1.	水膠比對抗壓強度的影響 .....	59
4.1.2.	卜作嵐取代量對抗壓強度之影響 .....	59
4.2.	腐蝕電流密度試驗結果 .....	60
4.3.	氯離子含量試驗結果與分析 .....	62
4.3.1.	貯驗試驗 28 天之氯離子含量試驗結果 .....	62
4.3.2.	貯驗試驗 91 天之氯離子含量試驗結果 .....	63
4.3.3.	腐蝕電流密度為 $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之氯離子含量試驗結果 .....	63
4.3.4.	腐蝕電流密度為 $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之氯離子含量試驗結果 .....	63
4.3.5.	59 天擴散係數分析 .....	63
4.3.6.	122 天擴散係數分析 .....	64
4.4.	混凝土 pH 值試驗結果與分析 .....	87
第五章	綜合分析與討論 .....	88
5.1.	抗壓強度 .....	88
5.1.1.	水膠比對抗壓強度之影響 .....	88
5.1.2.	卜作嵐材料對抗壓強度的影響 .....	88
5.1.3.	小結 .....	89
5.2.	鋼筋腐蝕行為探討 .....	90
5.2.1.	水膠比對腐蝕電流密度的影響 .....	90
5.2.2.	卜作嵐材料對腐蝕電流密度的影響 .....	90
5.3.	以氯鹽擴散行為探討混凝土耐久性 .....	95
5.3.1.	以抗壓強度判斷混凝土緻密程度 .....	95
5.3.2.	時間對擴散係數的影響 .....	95
5.3.3.	氯離子總入滲量 .....	97
5.3.4.	氯離子固結能力 .....	97
5.3.5.	以擴散係數及總入滲量分析混凝土抗氯離子能力 .....	98



5.4.	添加卜作嵐材料之鋼筋混凝土臨界氯離子濃度.....	107
5.4.1.	水膠比對臨界氯離子濃度之影響.....	107.
5.4.2.	以總氯離子佔膠結材比例表示.....	107
5.4.3.	以自由氯離子膠結材比例表示.....	108
5.4.4.	以 $[Cl^-]/[OH^-]$ 表示.....	108
5.4.5.	臨界氯離子濃度之綜合分析 .....	108
5.5.	以擴散係數及臨界氯離子濃度探討卜作嵐混凝土耐久性 .....	115
5.6.	卜作嵐材料對於耐久性之參數比較.....	118
第六章 結論與建議 .....		120
6.1.	結論 .....	120
6.2.	建議 .....	121
參考文獻.....		122



## 表目錄

表 2-1 氯離子含量規定[1] .....	5
表 2-2 各貯鹽試驗相關文獻中不同水膠比之擴散係數.....	8
表 2-3 各卜作嵐材料之化學性質[15].....	14
表 2-4 臨界氯離子濃度整理[56] .....	25
表 2-5 臨界氯離子濃度整理[53] .....	26
表 2-6 臨界氯離子濃度整理[53] .....	26
表 2-7 臨界氯離子濃度整理[53] .....	27
表 2-8 酸、水溶法之取樣數差異[57].....	35
表 2-9 各國酸、水溶法之試驗過程差異[57] .....	36
表 2-10 腐蝕電位對應腐蝕機率之關係[60] .....	37
表 2-11 腐蝕電流密度對應腐蝕程度之關係[62].....	37
表 2-12 腐蝕電流密度對應腐蝕程度之關係[68] .....	37
表 2-13 混凝土電阻係數對應腐蝕狀況之關係[70].....	38
表 3-1 台泥品牌第 I 型波特蘭水泥化學成份.....	41
表 3-2 台泥品牌第 I 型波特蘭水泥物理性質 .....	42
表 3-3 粗粒料之篩分析與物理性質 .....	42
表 3-4 細粒料之篩分析與物理性質 .....	43
表 3-5 飛灰主要化學成分.....	43

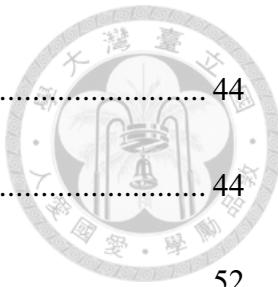


表 3-6 高爐石之物理性質與化學成分 .....	44
表 3-7 鋼筋化學成分 .....	44
表 3-8 試驗配比表 .....	52
表 4-1 混凝土圓柱抗壓強度 .....	60
表 4-2 水膠比 0.45 之腐蝕電流密度試驗結果( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	61
表 4-3 水膠比 0.55 之腐蝕電流密度試驗結果( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	61
表 4-4 水膠比 0.65 之腐蝕電流密度試驗結果( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).....	62
表 4-5 水膠比 0.45 之 28 天貯鹽試驗自由氯離子含量 .....	65
表 4-6 水膠比 0.55 之 28 天貯鹽試驗自由氯離子含量 .....	65
表 4-7 水膠比 0.65 之 28 天貯鹽試驗自由氯離子含量 .....	66
表 4-8 水膠比 0.45 之 28 天貯鹽試驗總氯離子含量 .....	66
表 4-9 水膠比 0.55 之 28 天貯鹽試驗總氯離子含量 .....	67
表 4-10 水膠比 0.65 之 28 天貯鹽試驗總氯離子含量 .....	67
表 4-11 水膠比 0.45 之 91 天貯鹽試驗自由氯離子含量 .....	68
表 4-12 水膠比 0.55 之 91 天貯鹽試驗自由氯離子含量 .....	68
表 4-13 水膠比 0.65 之 91 天貯鹽試驗自由氯離子含量 .....	68
表 4-14 水膠比 0.45 之 91 天貯鹽試驗總氯離子含量 .....	69
表 4-15 水膠比 0.55 之 91 天貯鹽試驗總氯離子含量 .....	69
表 4-16 水膠比 0.65 之 91 天貯鹽試驗總氯離子含量 .....	69

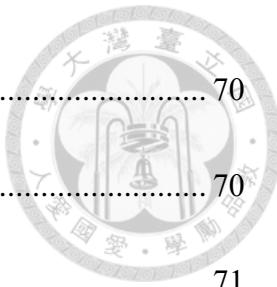


表 4-17 腐蝕電流密度為 $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之自由氯離子含量.....	70
表 4-18 腐蝕電流密度為 $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之總氯離子含量 .....	70
表 4-19 腐蝕電流密度為 $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之自由氯離子含量.....	71
表 4-20 腐蝕電流密度為 $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之總氯離子含量 .....	71
表 4-21 混凝土 122 齡期之擴散係數比較.....	72
表 4-22 各配比在不同時間對應的 pH 值 .....	87
表 5-1 各齡期自由氯離子擴散係數及分析 m 值 .....	99
表 5-2 各齡期總氯離子擴散係數及分析 m 值 .....	99
表 5-3 各配比之 m 值與文獻[14]相比.....	100
表 5-4 365 天擴散係數預測.....	100
表 5-5 促使鋼筋去鈍化之臨界氯離子濃度.....	109
表 5-6 促使鋼筋進入中度腐蝕程度之臨界氯離子濃度.....	110
表 5-7 臨界氯離子濃度佔混凝土比例之表示方式 .....	110
表 5-8 本研究之卜作嵐取代與一般混凝土綜合比較 .....	119

## 圖目錄



圖 1-1 試驗流程圖 .....	3
圖 2-1 不同卜作嵐取代擴散係數相對於 28 天之降低趨勢[14] .....	9
圖 2-2 不同卜作嵐材料水化所需時間[16] .....	15
圖 2-3 爐石粉水泥砂漿強度成長趨勢[14] .....	15
圖 2-4 28 天爐石取代率與孔隙直徑累積圖[18] .....	16
圖 2-5 混凝土添加矽灰與飛灰之孔隙直徑與貫入體積圖[29] .....	16
圖 2-6 含矽灰與飛灰混凝土之養護齡期與孔隙率關係圖[29] .....	17
圖 2-7 矽灰混凝土之孔隙累積圖[35] .....	17
圖 2-8 鋼筋腐蝕示意圖[47] .....	22
圖 2-9 混凝土中鋼筋鈍化腐蝕過程示意圖[48] .....	22
圖 2-10 臨界氯離子濃度的定義[55] .....	28
圖 4-1 045OPC 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	73
圖 4-2 045S40 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	73
圖 4-3 045F20 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	74
圖 4-4 045SF30 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	74
圖 4-5 055OPC 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	75
圖 4-6 055S40 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	75
圖 4-7 055F20 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	76

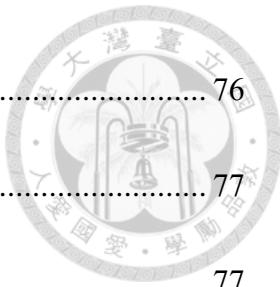


圖 4-8 055SF 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	76
圖 4-9 065OPC 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	77
圖 4-10 065S 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	77
圖 4-11 065F 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	78
圖 4-12 065SF 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	78
圖 4-13 045OPC 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	79
圖 4-14 045S 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	79
圖 4-15 045F 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	80
圖 4-16 045SF 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	80
圖 4-17 055OPC 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	81
圖 4-18 055S 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	81
圖 4-19 055F 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	82
圖 4-20 055SF 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	82
圖 4-21 065OPC 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	83
圖 4-22 065S 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	83
圖 4-23 065F 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	84
圖 4-24 065SF 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖 .....	84
圖 4-25 混凝土 59 天齡期之自由氯離子擴散係數 .....	85
圖 4-26 混凝土 59 天齡期之總氯離子擴散係數 .....	85

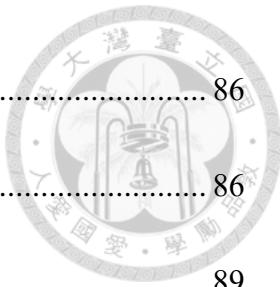


圖 4-27 混凝土 122 天齡期之自由氯離子擴散係數 .....	86
圖 4-28 混凝土 122 天齡期之總氯離子擴散係數 .....	86
圖 5-1 水膠比對抗壓強度之影響 .....	89
圖 5-2 卜作嵐材料對抗壓強度之影響 .....	89
圖 5-3 一般混凝土之不同水膠比對腐蝕電流密度的影響 .....	91
圖 5-4 爐石混凝土之不同水膠比對腐蝕電流密度的影響 .....	91
圖 5-5 飛灰混凝土之不同水膠比對腐蝕電流密度的影響 .....	92
圖 5-6 爐灰混凝土之不同水膠比對腐蝕電流密度的影響 .....	92
圖 5-7 水膠比 0.45 之間對腐蝕電流密度之關係 .....	93
圖 5-8 水膠比 0.55 之間對腐蝕電流密度之關係 .....	93
圖 5-9 水膠比 0.65 之間對腐蝕電流密度之關係 .....	94
圖 5-10 混凝土 59 天齡期抗壓強度與擴散係數之關係 .....	101
圖 5-11 混凝土 122 天齡期抗壓強度與擴散係數之關係 .....	101
圖 5-12 自由氯離子擴散係數與時間關係 .....	102
圖 5-13 總氯離子擴散係數與時間關係 .....	103
圖 5-14 時間對自由氯離子擴散係數之關係 .....	104
圖 5-15 時間對總氯離子擴散係數之關係 .....	104
圖 5-16 混凝土氯離子入滲量 .....	105
圖 5-17 固結氯離子含量 .....	106

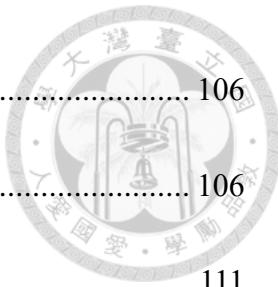


圖 5-18 氯離子固結比例.....	106
圖 5-19 擴散係數與入滲量之關係 .....	106
圖 5-20 去鈍化標準之臨界自由和總氯離子濃度與時間關係 .....	111
圖 5-21 中度腐蝕標準之臨界自由和總氯離子濃度與時間關係 .....	111
圖 5-22 去鈍化標準下 $[Cl^-]/[OH^-]$ 與時間關係 .....	112
圖 5-23 中度腐蝕標準下 $[Cl^-]/[OH^-]$ 與時間關係 .....	112
圖 5-24 去鈍化標準下臨界總氯離子濃度與混凝土酸鹼值之關係 .....	113
圖 5-25 去鈍化標準下自由氯離子濃與混凝土酸鹼值之關係 .....	113
圖 5-26 中度腐蝕標準下臨界總氯離子濃度與混凝土酸鹼值之關係 .....	114
圖 5-27 中度腐蝕標準下臨界自由氯離子濃度與混凝土酸鹼值之關係 .....	114
圖 5-28 去鈍化標準之臨界自由氯離子濃度與時間及擴散係數之關係.....	116
圖 5-29 去鈍化標準之 $[Cl^-]/[OH^-]$ 與時間及擴散係數之關係 .....	116
圖 5-30 中度腐蝕標準之臨界自由氯離子濃度與時間及擴散係數之關係.....	117
圖 5-31 中度腐蝕標準之 $[Cl^-]/[OH^-]$ 與時間及擴散係數之關係 .....	117
圖 5-32 $[Cl^-]/[OH^-]$ 與擴散係數及時間之關係圖 .....	118

## 照片目錄



照片 3-1 中型單軸拌和試驗機 .....	46
照片 3-2 MTS 萬能材料試驗機 .....	47
照片 3-3 研磨機 .....	47
照片 3-4 自動電位滴定儀 .....	48
照片 3-5 Gecor 8 鋼筋腐蝕速率測定儀 .....	48
照片 3-6 切割機 .....	49
照片 3-7 磨粉機 .....	49
照片 3-8 紅外線含水量測定儀 .....	50
照片 3-9 試驗假試體校正 .....	55
照片 3-10 試體量測 .....	55

# 第一章 緒論



## 1.1 研究動機

鋼筋混凝土發明於 19 世紀中，現今在台灣的建築上非常普及，為目前最成熟的結構之一，相較於其他結構，RC 建築的價格便宜、施工方便，而且耐火耐震，但是台灣的氣候對金屬材料屬高腐蝕環境，使得混凝土中的鋼筋腐蝕後，失去結構物的預警效果與抗拉能力，降低結構物的安全性。

台灣位於熱帶與亞熱帶交界，氣候濕熱且地形四面環海，沿海的鋼筋混凝土結構物容易受到海風中的氯鹽入侵，氯鹽含量達到某臨界值後，鋼筋表層的鈍化膜（passive film）遭到破壞，使鋼筋易發生腐蝕。腐蝕初期，鋼筋被混凝土包覆住，腐蝕不易被發現，當腐蝕的時間較長，腐蝕的生成物使得鋼筋體積會變為原本的二至六倍，而混凝土抗張強度低，和鋼筋接觸面會產生拉應力，並開裂至混凝土表層形成龜裂、剝落，不但使得有害物質入侵更迅速，還會大幅地降低構件強度，當此情形發生時已經到達腐蝕末期，對結構物造成難以挽回的傷害。

如果能夠明確地定義使鋼筋開始腐蝕的臨界氯離子濃度，並利用擴散方程式得到擴散係數，就能在設計時加以考慮更適合的混凝土使用材料，推算其使用年限及鋼筋混凝土保護層厚度。

## 1.2 研究目的

對於鋼筋的臨界氯離子濃度在國外有許多學者作出相關的研究，但目前臨界值的範圍區間仍相當廣，透過本次研究希望可以利用電化學試驗，將臨界氯離子濃度的範圍縮小，著重於對鋼筋有直接關係的自由氯離子，並探討腐蝕電流密度是否能夠直觀地了解鋼筋腐蝕狀態。

本研究希望透過貯鹽試驗的方式，模擬氯離子進入結構物的擴散行為，探討對於不同水膠比，並添加不同卜作嵐材料的混凝土中，擴散係數及促使鋼筋腐蝕

的臨界氯離子濃度之影響。使用的儀器為美國 James 儀器公司製作的 Gecor 8 腐蝕電流儀進行試驗，最後再將試體破壞取出鋼筋，觀察鋼筋表面實際的腐蝕情況。



### 1.3 研究流程

本研究之配比設計利用爐石、飛灰取代部分水泥之混凝土試體，進行 28 天水養護後進行貯鹽試驗，在抵達試驗齡期前每 14 天量測腐蝕電流密度，抵達試驗條件時分別作抗壓實驗、氯離子滴定、酸鹼值的量測，以判別出混凝土擴散係數、入滲量及鋼筋的臨界氯離子濃度範圍。本研究流程如圖 1-1 所示。

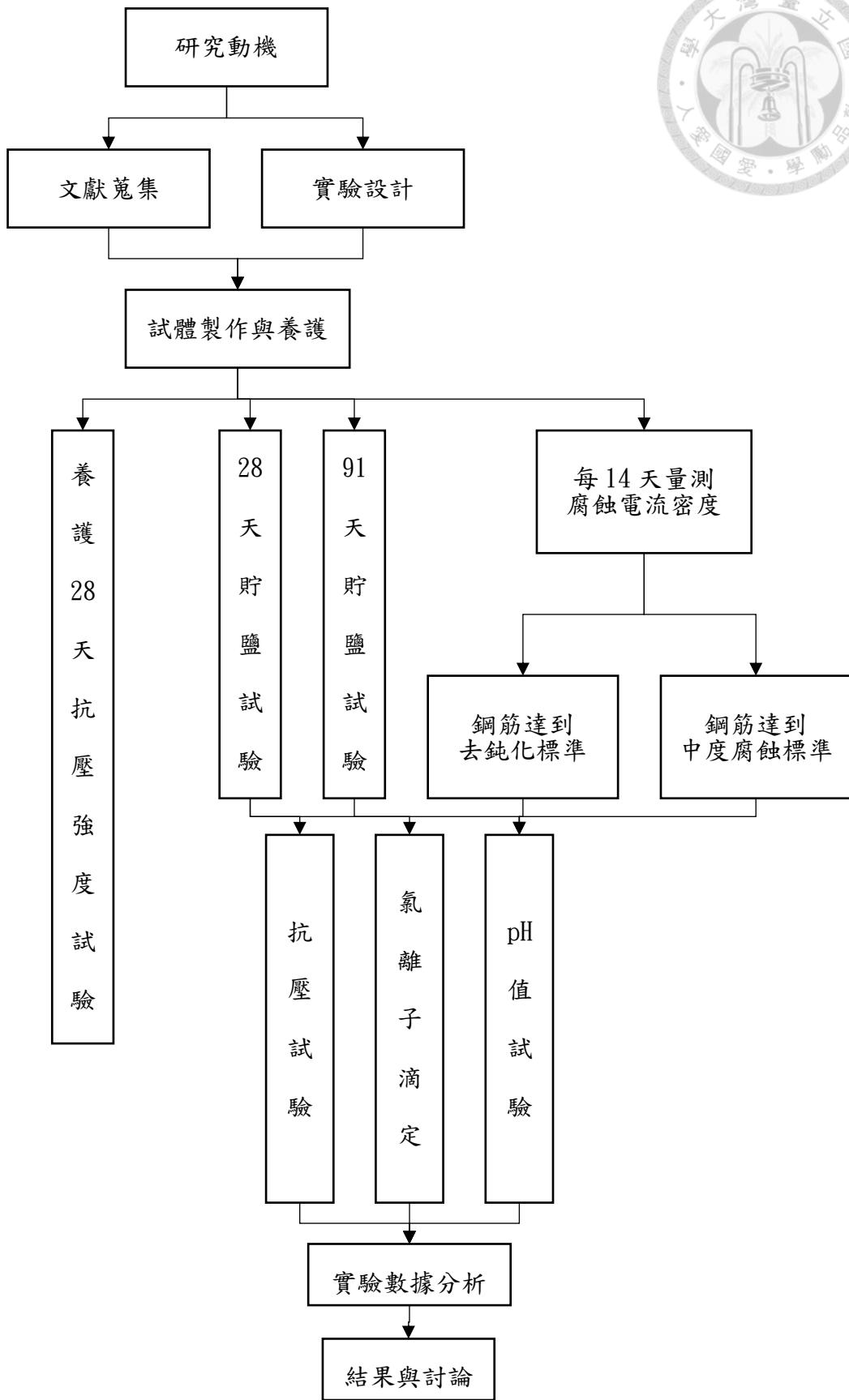


圖 1-1 試驗流程圖

## 第二章 文獻回顧



本章節先介紹氯鹽在混凝土中的情形，分別為氯離子在混凝土中的存在型態、擴散行為，卜作嵐材料對混凝土的影響，再介紹鋼筋腐蝕的機理，使鋼筋腐蝕的臨界氯離子濃度，以及氯離子含量、酸鹼值與鋼筋非破壞檢測的相關文獻。

### 2.1. 混凝土中的氯離子

#### 2.1.1. 氯離子的來源

氯離子是造成鋼筋混凝土建築潛在危險的重大影響之一，其存在於混凝土的途徑可分為兩種，第一種為拌和時材料含有氯離子，譬如海砂，混凝土拌和階段即在內部存在，另一種是從外部滲入，位於沿海地區或是長時間接觸工業廢水的建築，因為其內部和外部的氯離子濃度差異極大，促使氯離子可能會因為毛細、擴散、滲透的作用逐漸侵入到混凝土內部。

#### 2.1.2. 氯離子存在型態

氯離子在混凝土中存在的方式主要可分為游離型態氯離子及固結型態氯離子，游離型態氯離子亦稱為自由氯離子，此型態的氯離子在混凝土中不受拘束，可以在混凝土的孔隙溶液中自由移動。固結型態的氯離子可分為物理吸附型 (Physically absorbed) 和化學吸附型 (Chemically bonded)，物理吸附型氯離子主要是吸附在 C-S-H 膠體表面，化學固結型氯離子主要是和 C<sub>3</sub>A 反應生成 Friedel's 鹽。

普遍認為對於鋼筋腐蝕而言只有游離型態氯離子具侵蝕性，然而，當混凝土中的酸鹼值降低後，固結型態的氯離子將被釋放成為具侵蝕性之游離型態，因此也有學者指出在評估鋼筋腐蝕時應該包含固結型態氯離子之總氯離子濃度[1]。



### 2.1.3. 混凝土內氯鹽含量之相關規範

由於混凝土在製作時，材料或多或少都有些微的氯離子含量，國內對於混凝土的氯離子含量依 CNS 3090 規定，鋼筋混凝土及預力混凝土之新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量為  $0.15\text{kg/m}^3$ 。各國對於鋼筋混凝土結構物的氯離子含量規定不盡相同，規定如表 2-1[1][1]所示，超過規定值時，鋼筋需先做防鏽處理。

表 2-1 氯離子含量規定[1]

材料		檢測依據	氯離子標準	
組成材料	水泥	ASTM C114		
	水	JIS	$<200\text{ ppm}$	
	摻料		無	
	粗骨材	JASS 5	I 級粒料 $0.04\%$ 粒料重	
	細粒料		II 及 III 級粒料 $0.1\%$ 粒料重	
混凝土	ACI 318-89	構材種類		混凝土中最大水溶性氯離子含量
				水泥重量百分率
		預力混凝土		0.06
		鋼筋	暴露於含氯之環境	0.15
		混凝土	經常保持乾燥或防 止受潮	1.00
		其它狀況		0.30
為防止混凝土內鋼材腐蝕，齡期在 28 天至 56 天之硬固混凝土之成分，包括水、粒料、膠結材料及摻料，其氯離子含量應低於表中所規定之大含量。				



## 2.2. 混凝土中氯離子的擴散行為

混凝土中的擴散作用是游離的分子或離子在孔隙溶液中移動進而造成流動，從濃度較高往濃度較低流動。擴散係數為混凝土材料中代表孔隙結構性質，也用來描述傳遞分子或離子的濃度梯度表現。根據菲克第一定律 (Fick's First Law)，在非穩定狀態下孔隙結構的自由氯離子梯度差將會驅使氯離子移動。

### 2.2.1. 擴散方程式

考慮 Fick 第一定律：

$$J(x) = -D_{Cl} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.1)$$

式中  $J(x)$  為  $x$  處的氯離子通量， $D_{Cl}$  為氯離子擴散係數， $\frac{\partial C}{\partial x}$  為  $x$  軸方向之濃度梯度，(2-1)式適用於穩態時計算離子擴散係數。穩態的定義為水泥基複合材料中任意點之離子濃度不受時間影響，即濃度維持常數，因此  $\frac{\partial C}{\partial t}$  為一常數，故適用於 Fick 第一定律。

若考慮濃度隨時間變化，則可將(2-1)式改寫成：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{Cl} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

此即為 Fick 第二定律，適用於一維質量傳遞的非穩態擴散行為。而混凝土具多孔性，每個孔隙都是複雜的巢狀結構，若要利用 Fick 第二定律描述氯離子擴散行為，必須作以下假設[3]：

1. 混凝土的孔隙均勻分布，且每個孔隙等截面。
2. 氯離子在混凝土中為一維擴散。
3. 每一個孔隙內，毛細水所含的氯離子可擴散至混凝土中。

由於 Fick 第二定律為一偏微分方程式，求解時必須有足夠的初始條件或邊界條件，初始條件：

$$t = 0, x \geq 0, C = 0$$



邊界條件：

$$x = 0, t \geq 0, C = C_0$$

$$x = \infty, t \geq 0, C = 0$$

Collepardi[4]先論述 Fick 第二定律中關於氯離子擴散係數的計算過程，以初始條件和邊界條件將(2.2)式做 Laplace transform，則解析解為[5]：

$$C(x, t) = C_0 \times \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{Cl}t}} \right) \quad (2.3)$$

其中  $\operatorname{erfc}$  為補誤差函數， $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$ ， $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 。

藉由擴散方程式的解析解，利用一個半無限的積分，假定 M 為擴散進入混凝土內的全部氯離子含量，且沒有其他離子濃度影響擴散行為，可以導出方程式：

$$M(x) = \int_0^{\infty} \left[ C_0 \times \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{Cl}t}} \right) \right] dt \quad (2.4)$$

國內亦有許多貯鹽試驗相關研究回歸出不同水膠筆下之氯離子擴散係數，其結果如表 2-2 所示。

### 2.2.2. 時間對擴散係數的影響

氯離子在混凝土的擴散行為是藉由混凝土的孔隙傳輸，隨著時間增長，混凝土水化程度越完整，孔隙率會越小，相對地氯離子的傳輸路徑減少，擴散係數隨之降低。學者 Andrade[13]提到在現地紀錄氯離子滲透的深度，學者們大多使用 Fick 定律中的氯離子擴散係數來計算氯離子在混凝土中的擴散情形，但是許多文獻中提出對單純擴散反應中，利用菲克定律計算會有產生誤差，如擴散係數會隨著時間增加而減少，因此造成了短時間的外加電場實驗與長期實驗數據無法結合。

學者 Thomas[14]進行長時間的實驗及現地試驗研究，混凝土試體分為爐石組、飛灰組及對照組，暴露在現地六個月到八年，分析不同齡期下的擴散係數與表面氯離子濃度，結論發現會因為 Fick 定律中氯離子擴散係數沒有考慮時間因素



造成有誤差情形發生，而氯離子擴散係數對於添加了飛灰或爐石粉取代水泥量的試樣，在長期浸泡下，得到了氯離子擴散係數值是隨著時間變化的變量。在配合了傳輸機理、溫度與時間因素等有關因素下，導出經驗公式，氯離子擴散係數隨時間遞減的經驗公式：

$$D_t = D_{age} \left( \frac{t_{age}}{t} \right)^m \quad (2.5)$$

式中各項參數：

$D_t$ ：齡期為  $t$  時的擴散係數。

$D_{age}$ ：齡期為  $t_{age}$  的擴散係數。

$t_{age}$ ：實驗室試驗齡期。

$t$ ：任意齡期的時間。

$m$ ：經驗係數，與混凝土水化程度有關。

在長時間浸泡齡期後，添加飛灰或爐石粉的試樣，氯離子擴散係數會隨著時間有大幅度的下降，如圖 2-1。透過此經驗公式可大略的評估氯離子擴散係數的變化，利用短期試驗即可評估長期混凝土結構物受氯離子之影響。

表 2-2 各貯鹽試驗相關文獻中不同水膠比之擴散係數

試驗條件／天數	擴散係數 ( $10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ )				文獻
	水膠比 0.35	水膠比 0.45	水膠比 0.55	水膠比 0.65	
混凝土／90 天	4.3	9.2	15.9	25.0	劉彥志[6]
水泥砂漿／90 天	2.7-4.6	6.4-10.7	9.1-20.3	16.9-36.5	王駿紳[7]
混凝土／90 天	10.0	11.5	17.4	21.8	張廷駿[8]
混凝土／90 天	-	11.0-14.6	14.8	-	鄭佳緯[9]
混凝土／90 天	3.2	7.2	8.5	13.4	林致緯[10]
混凝土／60 天	-	16.8	26.4	80.4	蔡旻廷[11]
混凝土／120 天		7.67	12.30	11.64	何季軒[12]

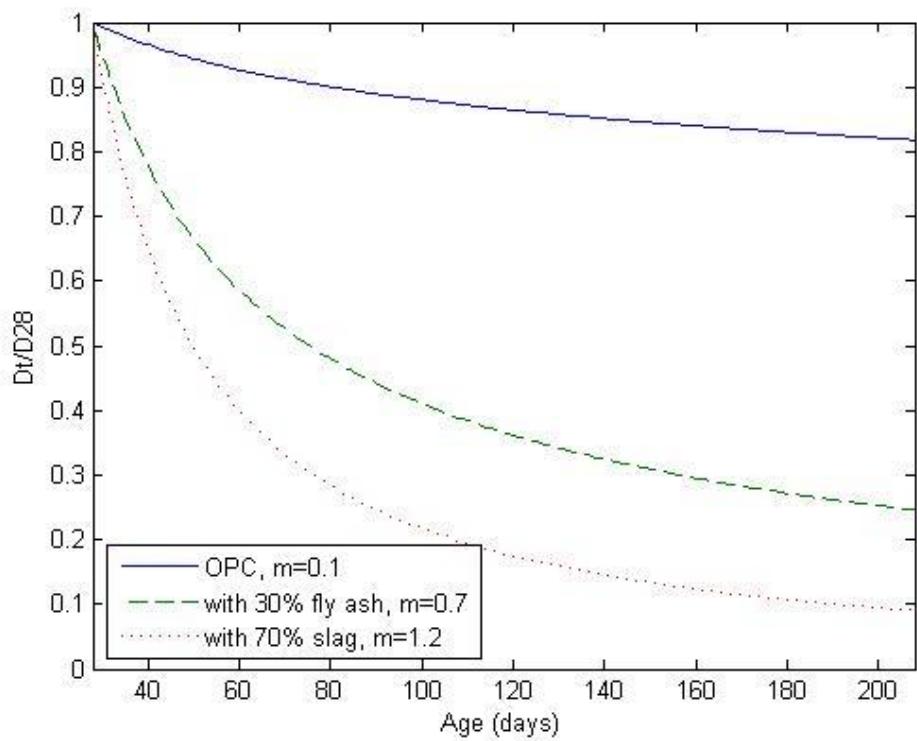


圖 2-1 不同卜作嵐取代擴散係數相對於 28 天之降低趨勢[14]



## 2.3. 卜作嵐材料對混凝土強度及耐久性之影響

水泥於水化反應中會產生氫氧化鈣( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )，氫氧化鈣對混凝土強度之貢獻不大，僅能對孔隙結構做填充用，且其容易溶於水並析出而造成白華(Efflorescence)現象，一旦析出後便會導致混凝土孔隙率變大，使有害物質更容易侵入到混凝土內部，使混凝土耐久性降低。然而氫氧化鈣對於卜作嵐反應卻是不可或缺的角色，卜作嵐材料會與氫氧化鈣起化學反應，形成新的膠結材料，能夠填充孔隙，提升水密性及強度，提高混凝土耐久性。

現今所使用的混凝土通常會添加卜作嵐材料，將其取代部分水泥，減少水泥用量降低成本，並增加耐久性和晚期強度等，主要有爐石、飛灰、矽灰三種，各自有不同的化學性質如表 2-3[15]，及水化反應所需要的時間如圖 2-2[16]。

### 2.3.1. 爐石對混凝土強度及耐久性之影響

在煉鐵的過程，高爐在高溫燃燒氧化鐵等材料後會形成熔融鐵和礦渣，浮在熔融鐵上面的副產物即為「高爐爐渣」，依不同的冷卻方式冷卻後又可分為氣冷高爐石及水淬高爐石。水淬高爐石含有大量玻璃質，本身具有潛在的膠結能力，研磨所成的細粉即為「高爐石粉」，添加於水泥成為「高爐水泥」，具有降低混凝土水化熱、成本和提升晚期抗壓強度及耐久性等優點，許多先進國家已普遍使用高爐石粉於重要工程中的混凝土，譬如水壩、橋梁、隧道等。

#### 2.3.1.1. 卜作嵐反應

使用高爐水泥時，爐石本身的鈣、矽、鋁氧化物和水泥相近，可與水泥水化生成的氫氧化鈣發生卜作嵐反應，形成和波特蘭水泥之水化產物 C-S-H 與 C-A-H 類似的膠體，可有效填充孔隙，因此可以利用適量爐石取代水泥。



### 2.3.1.2. 強度發展

爐石混凝土的強度發展和爐石粉之反應活性有密切關係，依照 ACI 233[17] 資料顯示，相較於普通水泥砂漿，採用 120 級高爐石粉(CNS 12549)早期強度較低，晚期強度較高；採用 100 級高爐石粉，早期強度較低，晚期強度相同或較高；採用 80 級高爐石粉，各期強度均較低，如圖 2-3。爐石粉取代水泥的比例和強度發展亦有很大關係，尤其是在較低的水膠比，爐石取代率越高時，對混凝土的強度提升越明顯。

### 2.3.1.3. 耐久性

爐石之顆粒比水泥細小，以適量的爐石取代部分水泥可以填充於水泥顆粒之間，將混凝土原先的孔隙填補得更緻密，而在適當的取代率下，爐石取代率越高，越能減小混凝土中水泥將體內之毛細孔隙體積如圖 2-4[18]，提高混凝土的水密性，進而增加耐久性。

除了使孔隙結構更加緻密外，爐石混凝土還具有抵抗硫酸鹽侵蝕、鹼骨材反應之能力，研究顯示[19]，以爐石粉替代 50% 之第 I 型水泥，混凝土抗硫酸鹽侵蝕之能力與使用第 V 型水泥相當，以相同比例替代第 II 型水泥，則效果更佳，這是因為爐石粉之使用使混凝土中  $C_3A$  及  $C_3S$  之含量降低，而且卜作嵐反應使  $C-S-H$  與  $C-A-H$  之膠體量增多，為水密性提昇之結果；而爐石粉的添加使得混凝土中鹼—矽比例改變，並消耗鹼性物質，混凝土的抵抗鹼骨材反應能力因此提升。

爐石粉令混凝土的緻密程度大幅提升，可有效抑制有害物質進入，例如氯離子及二氧化碳，雖然爐石粉消耗氫氧化鈣會使混凝土酸鹼值略微降低，使鋼筋腐蝕的潛在危險增加，但較緻密的微觀結構讓氯離子和二氧化碳難以深入混凝土內部，使耐久性大幅提升。

### 2.3.1.4. 爐石對臨界氯離子濃度的影響

爐石取代水泥可以增加混凝土的緻密性，降低擴散係數[20][21]，增加氯離子

固結能力[22][23]，但使用爐石會使混凝土內部孔隙溶液 pH 值下降。爐石對臨界氯離子濃度還有待確認，Schiesl 和 Breit 在 1996 年提出[24]，使用爐石取代部分水泥可以提高臨界氯離子濃度，而 Oh. B.H. 等人[25]在 2003 年以總氯離子表示使用爐石取代部分水泥之臨界氯離子濃度和 OPC 相近。而 Sergi 和 Glass 在 2000 年提出[26]，爐石取代水泥 65% 會降低臨界氯離子濃度，Ha-Won Song 等人也在 2010 年提出[27]，60% 的爐石取代水泥大幅降低臨界氯離子濃度。

### 2.3.2. 飛灰對混凝土強度及耐久性之影響

飛灰為燃煤火力發電廠之副產物，煤粉經鍋爐燃燒，由氣體排放收集而得的粉末，早期未被妥善利用，之後作為卜作嵐材料，能降低混凝土水化熱、提高混凝土晚期強度與耐久性、節省混凝土成本等優點。飛灰主要分為 C 類和 F 類兩種[28]，C 類通常具有卜作嵐活性和膠結性，含鈣量較高；F 類僅具卜作嵐活性，含鈣量較低，正確使用優良品質之飛灰可改善混凝土工程性質，而卜作嵐活性指數則可用來評估混凝土強度發展情形。

#### 2.3.2.1. 卜作嵐反應

飛灰在混凝土中取代部分水泥，因為飛灰可與水泥水化生成的氫氧化鈣發生反應，CNS 規範對 F 類飛灰要求  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  的總百分率最小值為 70%，因為玻璃質  $\text{SiO}_2$  可與氫氧化鈣反應形成 C-S-H 膠體， $\text{Al}_2\text{O}_3$  也與氫氧化鈣反應生成 C-A-H 膠體。

#### 2.3.2.2. 強度發展

飛灰會和與氫氧化鈣在水份充足的環境發生卜作嵐反應，但是養護條件顯著影響飛灰混凝土的強度成長，其養護溫度不宜過低( $20^\circ\text{C}$ )正常溫度下，早期強度低於一般混凝土，當卜作嵐反應不斷進行，生成產物不斷填充孔隙，使強度逐漸提升；到達更長齡期時，飛灰混凝土強度通常可達到甚至超越一般混凝土強度。



### 2.3.2.3. 耐久性

飛灰的耐久性提升來自於和水泥的氫氧化鈣反應生成膠體，堵塞孔隙與水路，增加水密性。在早齡期(28天以前)飛灰混凝土的水密性常較普通混凝土差[30]，最大孔徑也較大[30]，且隨飛灰取代量的增加而降低水密性；中齡期(約60天)時，飛灰混凝土的水密性可能已接近普通混凝土；晚齡期(約91天以後)時飛灰混凝土的水密性繼續提高而可能超過普通混凝土。學者 Tao Yang 等人亦同時添加爐石及飛灰探討其孔隙結構發現28天齡期時，只以飛灰取代水泥之孔隙結構較一般混凝土鬆散，但隨著爐石取代量的比例增加而緻密。

飛灰的卜作嵐反應亦可消耗氫氧化鈣，降低混凝土的酸鹼值[31]，降低發生鹼骨材反應之機率，並抑制氫氧化鈣和硫酸根離子反應，而飛灰的C<sub>3</sub>A與水泥相比較少，減少其與硫酸鹽反應生成硫鋁酸鹽的機率，故飛灰混凝土也可提高抗硫酸鹽侵蝕的性能。

### 2.3.2.4. 飛灰對臨界氯離子濃度的影響

學者 Thomas[32]在1996年提出，利用飛灰取代部分水泥的鋼筋混凝土暴露在海洋環境達四年以上，臨界自由和總氯離子濃度會降低，且飛灰取代量越高，對氯離子的容忍度越低。Oh, B.H.等人[25]也在2003年提出，飛灰取代量越大，量測到的臨界自由和總氯離子濃度越低。使臨界氯離子濃度降低的原因為添加飛灰會使混凝土內部孔隙溶液pH值下降，使[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]提高，更早達到臨界氯離子濃度。而飛灰能固結部分游離態氯離子，因為飛灰有較多的活性鋁，可以固結較多氯離子[33][34]。

### 2.3.3. 砂灰對混凝土強度及耐久性之影響

砂灰(Silica Fume)為製造矽合金與鐵矽合金時的副產品。砂灰為一種玻璃球狀體，主要成分為二氧化矽，含量約85%~98%，比重約為2.2，其粒徑非常小，平均粒徑大約在0.1μm~0.2μm之間，比表面積(細度)為20000m<sup>2</sup>/kg，與水泥顆



粒的  $250 \text{ m}^2/\text{kg}$  相較，細度約小 80~100 倍[35]，故可知矽灰具有良好的活性及填充性。由於矽灰顆粒小而能有效填充混凝土，使孔隙減少更為緻密如圖 2-5、圖 2-6 [29]、圖 2-7[36]，進而提高抗壓能力及耐久性。

相較於一般混凝土，含有矽灰的混凝土酸鹼值隨著矽灰取代率增加而降低，導致其臨界氯離子濃度降低、 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  增加[37][38][39]，矽灰混凝土對氯離子的固結能力也較差[33] [39][40]，但是孔隙細化明顯，物理吸附效果更加明顯。

表 2-3 各卜作嵐材料之化學性質[15]

化學名稱	一般水泥	高爐熟料	矽灰	飛灰	稻殼灰
氧化矽( $\text{SiO}_2$ )	20.69	28~38	94~98	20~60	92.15
氧化鋁( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	5.72	8~24	0.10~0.40	10~35	0.41
氧化鐵( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	3.29	—	0.02~0.15	5~35	0.21
氧化鈣( $\text{CaO}$ )	63.91	30~50	0.08~0.30	1~20	0.41
氧化鎂( $\text{MgO}$ )	2.04	1~18	0.30~0.90	0.3~4.0	0.45
氧化硫( $\text{SO}_3$ )	2.72	1~2.5	—	0.1~1.2	—
氧化鉀( $\text{K}_2\text{O}$ )	0.01	—	0.20~0.70	0.8~0.9	2.31
氧化鈉( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0.01	—	0.10~0.40	0.25	0.08
碳( $\text{C}$ )	—	—	0.20~1.30	—	—
燒失量( $\text{LOI}$ )	1.06	—	0.80~1.50	4.0~6.5	2.77
游離石灰( $\text{f-cao}$ )	1.50	—	—	—	—

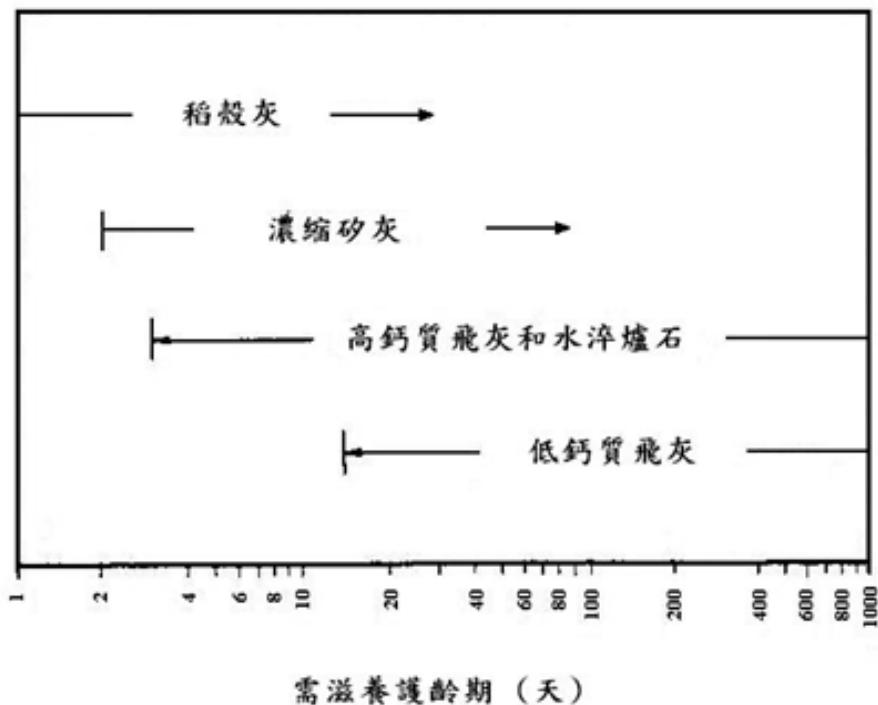


圖 2-2 不同卜作嵐材料水化所需時間[16]

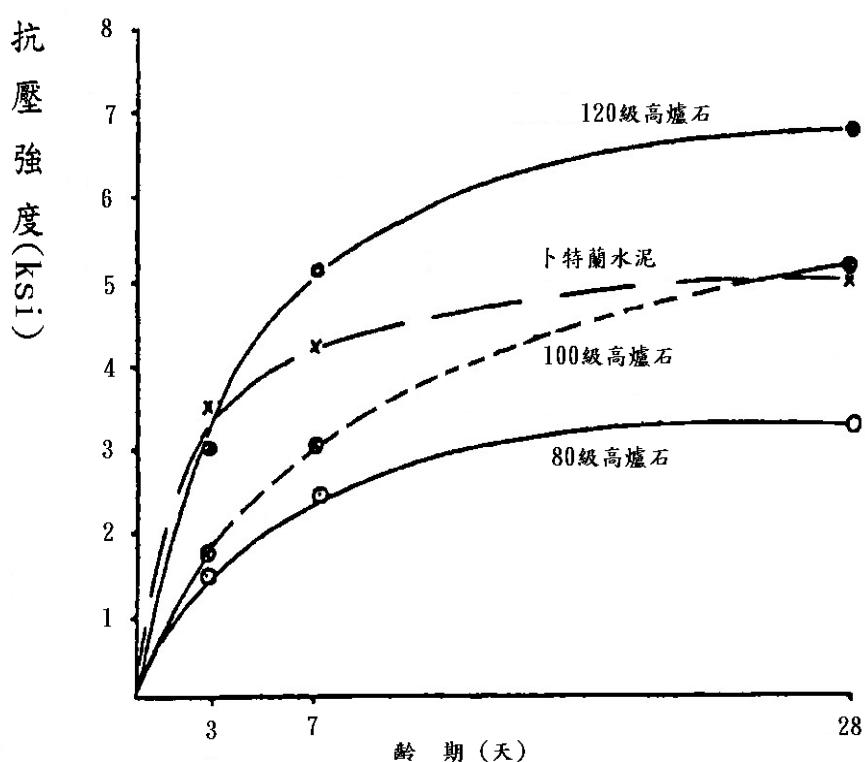


圖 2-3 爐石粉水泥砂漿強度成長趨勢[14]

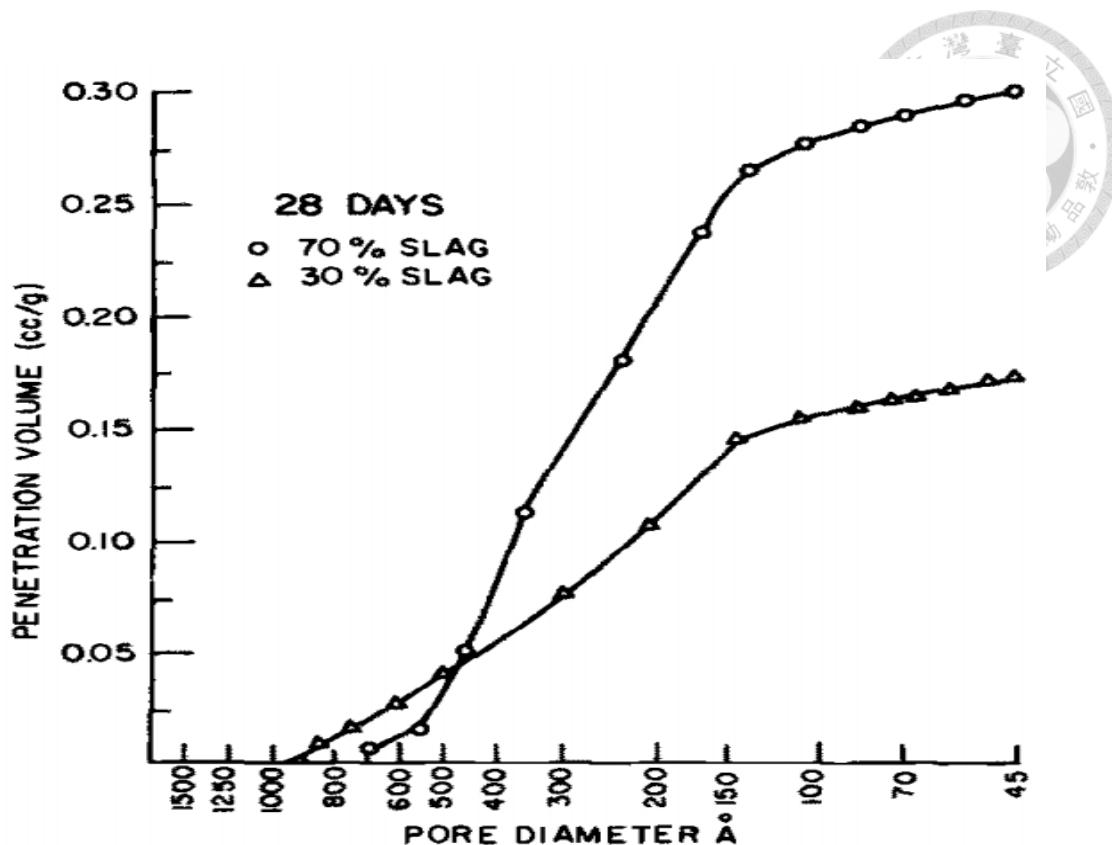


圖 2-4 28 天爐石取代率與孔隙直徑累積圖[18]

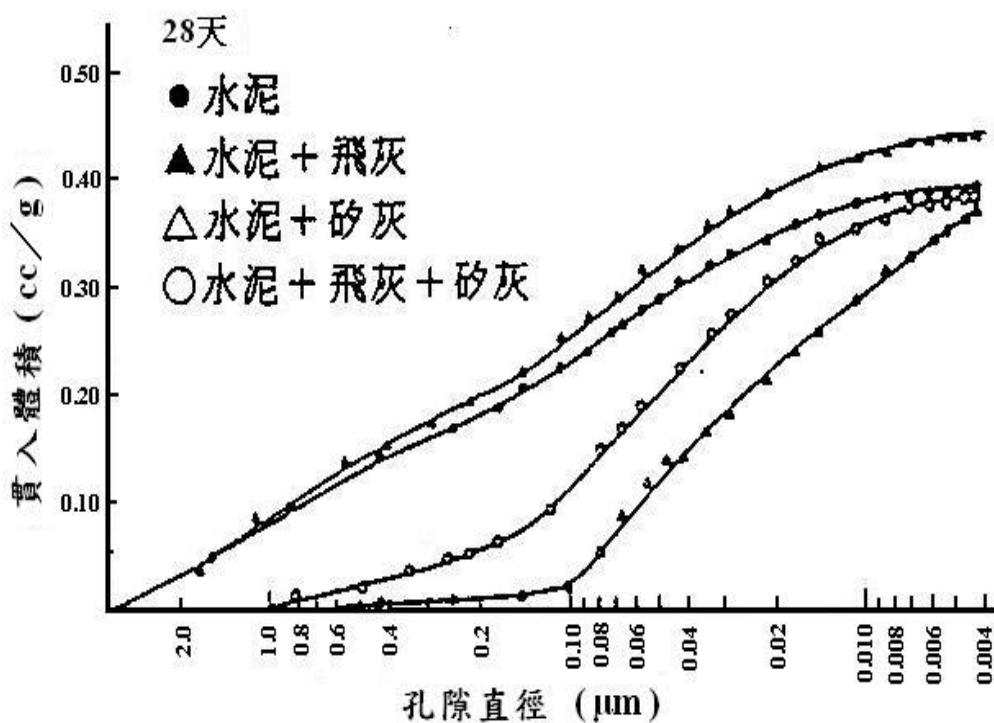


圖 2-5 混凝土添加砂灰與飛灰之孔隙直徑與貫入體積圖[29]

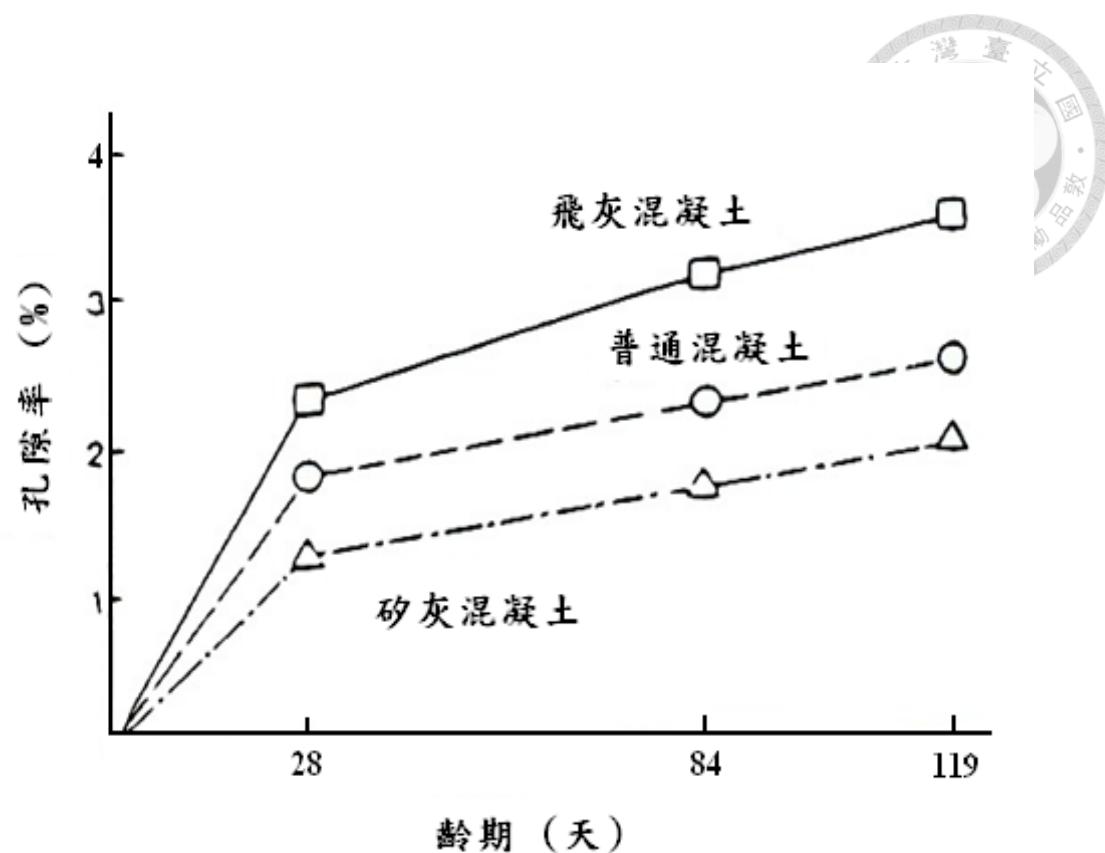


圖 2-6 含砂灰與飛灰混凝土之養護齡期與孔隙率關係圖[29]

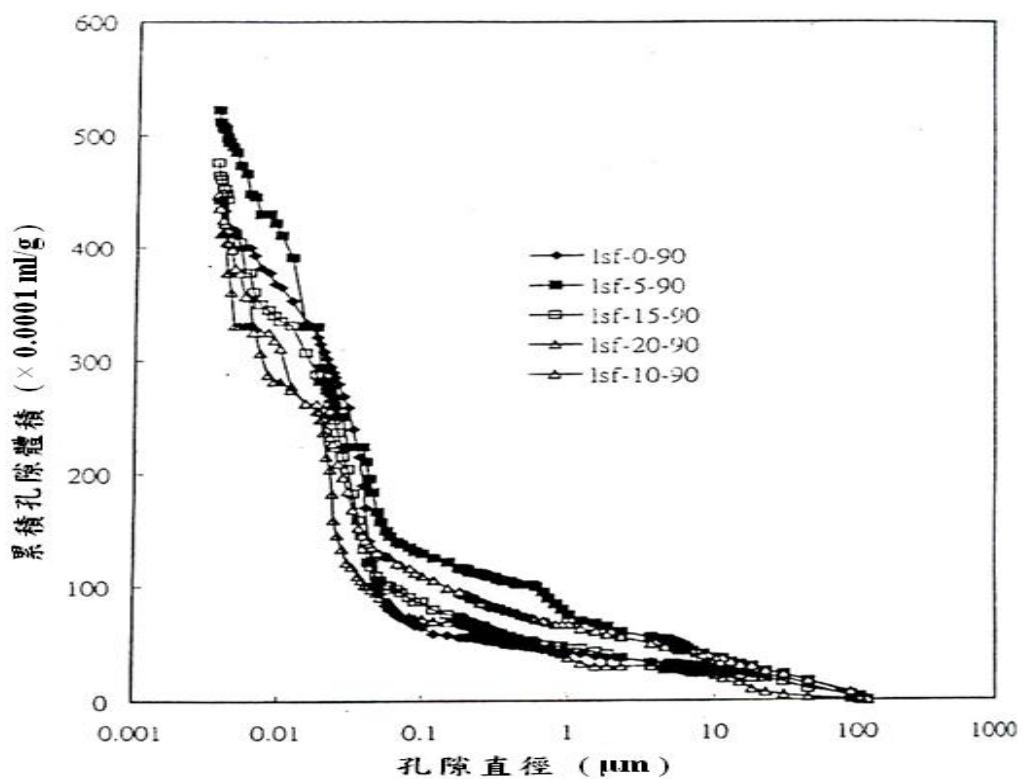


圖 2-7 砂灰混凝土之孔隙累積圖[35]



## 2.4. 膠結材對氯離子的固結能力

混凝土中的游離態氯離子隨著混凝土的水化反應，會和膠結材中的  $C_3A$  和  $C_4AF$  反應形成 Friedel's 鹽( $Ca_3Al_2O_6 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ )，或是因為被 C-S-H 膠體吸附，而使游離態氯離子含量下降，而稱此現象為混凝土的氯離子固結能力。文獻[40]對 Friedel's 鹽的穩定度作研究，在酸鹼值較低的情形下，Friedel's 鹽溶解度較高而釋放氯離子。在 1993 年 Tang 和 Nilsson 提出，混凝土的氯離子的固結能力與水灰比與骨材含量無關，與水泥的種類、水泥內部化學物質的含量、卜作嵐材料和外加藥劑等有關[41]。

### 2.4.1. 水泥對氯離子固結能力的影響

氯離子會和水泥中的  $C_3A$  反應，所以水泥中的  $C_3A$  含量越多，氯離子的固結量就越多[42]。而 Rasheeduzzafar 使用了 5 個不同含量的  $C_3A$ ，其  $C_3A$  範圍在 2.04 到 14.00 之間，而氯離子添加量為水泥重量的 0.3% 至 2.4%。發現  $C_3A$  含量越多，自由氯離子就越低，氯離子的固結量就越多，但在同樣的  $C_3A$  含量時，氯鹽量越高時，固結量越多，但並不是線性關係，因為  $C_3A$  的能力有限，當氯鹽添加量超過一特定值時，其固結能力會趨於飽和[43]。

### 2.4.2. 爐石對氯離子固結能力的影響

Dhir 等人[44]將水膠比 0.55，爐石取代量分別為 0%、33.3%、50% 和 66.7% 的試體磨碎，浸泡在不同濃度的氯離子水溶液中，藉此了解氯離子的固結能力。並在 1996 年提出，隨著爐石取代量增加，氯離子的固結能力越好。而 Rui Luo 等人[45]也在 2003 年提出使用爐石可以改善孔隙結構，降低氯離子的擴散係數。且不管氯離子是內部添加或是外部滲透，氯離子的固結能力都隨著爐石取代增加而增加。

### 2.4.3. 飛灰對氯離子固結能力的影響

Sumranwanich 等人[46]製作水膠比 0.4，F 類和 C 類飛灰取代量 30%、50%、70%的試體，並改變養護時間和氯鹽浸泡時間兩個參數，該研究指出飛灰取代量高於 30%的混凝土對於同樣暴露天數的固結能力並沒有明顯的差異，而較短的養護天數使浸泡時間較短的混凝土固結能力較低，但到長齡期（90 天）時，養護天數和固結能力無關。





## 2.5. 鋼筋腐蝕行為

鋼筋混凝土在易腐蝕的環境下存在極大的風險，在了解使鋼筋腐蝕的臨界氯離子濃度前，必須先了解鋼筋在混凝土中受到有害物質影響前後的行為，才能了解使鋼筋發生去鈍化的狀態。

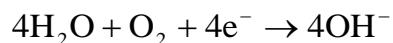
### 2.5.1. 鋼筋腐蝕的原理

金屬(金、銀除外)皆以最穩定的狀態存在自然界中，而氧化電位較高的金屬，為了達到平衡的狀態，則會釋出電子成為離子，和其他元素形成能量較低且較穩定的離子化合物，如此才能存在於自然界中。鋼筋混凝土的廣泛使用讓鋼筋腐蝕變成非常重要的課題，腐蝕的示意圖如圖 2-8[47]，一般來說，腐蝕作用的進行需要滿足以下五項條件[49]：

(1) 陽極：在電化學反應中陽極為發生氧化反應的電極，釋放出電子。



(2) 陰極：在電化學反應中陰極為發生還原反應的電極，獲得電子。



(3) 導電通路：因為電化學的氧化還原反應需有電子的轉移，因此有良好的導電通路，腐蝕反應才能順利進行。

(4) 電流：腐蝕的進行要有足夠的活化能才能使反應順利進行，亦是說需要有足夠的電動勢才能驅動電子形成電流。

(5) 電解液：電化學腐蝕又稱濕腐蝕，必須在潮濕或有水氣的情況下，氧化還原反應才能順利進行。

### 2.5.2. 鋼筋鈍化作用

鋼筋在高鹼性環境下會產生一層鈍態的氧化薄膜 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-}\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ )，通稱鈍化膜，一般鋼筋在酸鹼值高於 10.5 時，鈍化膜會穩定存在於表面，鈍化膜的作用在

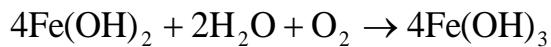
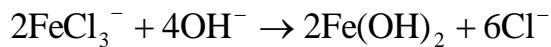
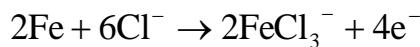


於保護鋼筋，使鋼筋和外界的有害物質隔絕[50]。

文獻中[48]提到，鋼筋從鈍化到腐蝕的過程可以由圖 2-9[48]表示，在鈍化膜完整包覆鋼筋前 (AB 段)，鋼筋處於裸露的狀態，符合上述五項條件即開始腐蝕，使腐蝕電流密度上升，腐蝕電位下降。在腐蝕的過程中鈍化膜逐漸生成，直到包覆鋼筋後，隨著電位降低腐蝕電流密度會急遽下降 (BC 段)，到特定電位值 ( $E_F$ ) 時腐蝕電流密度維持某一定值 ( $i_p$ )，鋼筋進入鈍化狀態 (CD 段)，該電位值稱為弗雷德電位 (Flade potential)。維持在鈍化階段的鋼筋若受到鹽害、中性化等易腐蝕之環境影響，使鈍化膜逐漸失去作用，電位值會逐漸下降，當鈍化膜不再保護鋼筋，進入腐蝕階段後 (DE 段)，腐蝕電流則會急遽上升，表示鋼筋腐蝕速率急速增加，使結構物有潛在危險。若鋼筋未受到有害物質破壞鈍化膜，在較高的電位才會使鈍化膜消失，鋼筋開始氧化，而在某些情形下，有可能會發生二次鈍化及腐蝕。

### 2.5.3. 氯離子對鋼筋腐蝕造成的影响

當混凝土本身的氯離子含量或外界侵入的氯離子含量到達臨界濃度時，將使混凝土內鋼筋表面的鈍化膜破壞而造成腐蝕。反應式如下[52]：



由上述反應式可知反應前後消耗掉的氯離子又再度被釋放出來，並可周而復始地再與鐵原子反應形成鐵鏽。對於總反應而言氯離子是扮演催化劑的角色，故一旦氯離子的濃度足以讓鋼筋腐蝕，腐蝕的反應就會持續進行。上述氯離子破壞鋼筋鈍態保護膜的作用，與鋼筋生成鈍態保護膜的作用，為一種動態平衡。當混凝土內酸鹼值較高時，則產生鈍態保護膜的反應較強勢，所以可以允許較高氯離子含量的存在。反之，若因為中性化等作用，使其酸鹼值降低時，則氯離子破壞

鈍態保護膜的作用較為強勢，可能僅有低含量的氯離子成份存在，就能導致鋼筋腐蝕的產生。

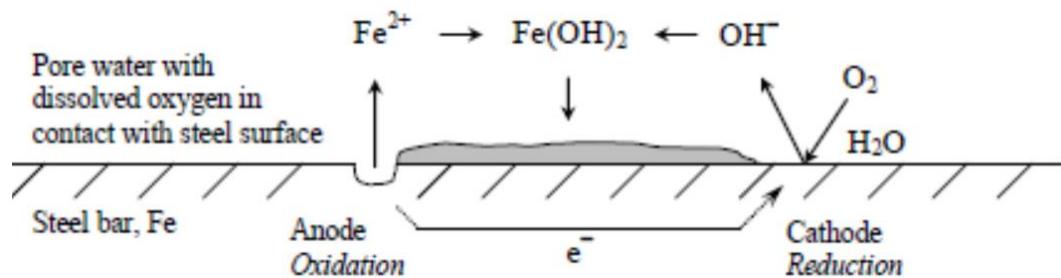


圖 2-8 鋼筋腐蝕示意圖[47]

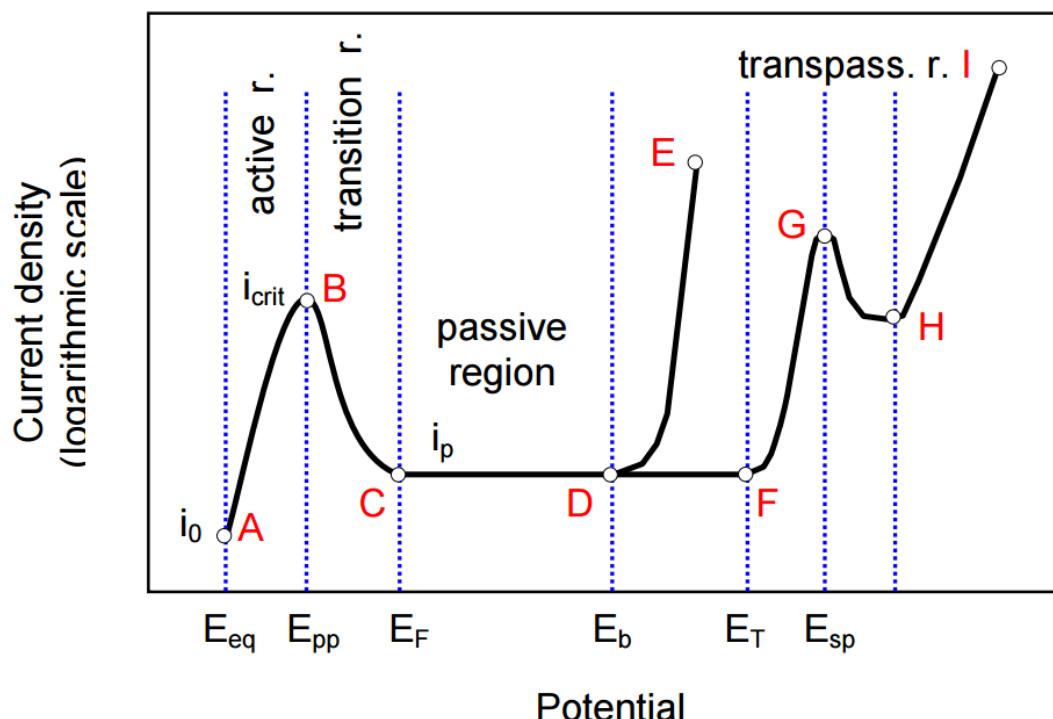


圖 2-9 混凝土中鋼筋鈍化腐蝕過程示意圖[48]



## 2.6. 臨界氯離子濃度

當內部或外部滲入的氯離子在鋼筋表層累積到一定的濃度時，鋼筋表層鈍化膜開始去鈍化，使鋼筋裸露在高風險的環境。雖然已經有許多學者試驗關於臨界氯離子濃度的研究，但是其值範圍，而不同的環境對鋼筋脫鈍的影響極大，如混凝土材料成分、材料類型、C<sub>3</sub>A含量、卜作嵐材料、鋼筋表面的溫溼度、鋼筋材質等，試驗過程、方法和暴露條件也有差異，因此沒有辦法簡單地規定出鋼筋的臨界氯離子濃度，位於現地的結構物其氣候更加多變，對於鋼筋脫鈍的值可能會有更大的變異性。

### 2.6.1. 臨界氯離子濃度的定義

氯離子藉由滲透作用通過混凝土孔隙，侵入到鋼筋表面並累積到一定濃度時會引起鋼筋腐蝕，這個引起鋼筋開始腐蝕的氯離子濃度即稱為「臨界氯離子濃度」。關於定義鋼筋腐蝕的起始點關係到臨界氯離子濃度的數值，文獻[53]中指出鋼筋臨界氯離子濃度的定義可以分為兩種，第一種是以科學的角度定義，以鋼筋表面的鈍化膜遭到破壞作為鋼筋開始腐蝕，但是以此種定義判斷的臨界氯離子濃度，由於鋼筋正值腐蝕初期，狀態介於腐蝕與非腐蝕之間，結構物尚未受到影響，有一定的安全性；第二種是根據工程型上作為判斷標準，是以鋼筋出現明顯的惡化時對應的氯離子濃度。根據 Tuutti's 模型，可以發現以科學的定義較為精準，而從工程上的定義得到的臨界值範圍較大，如圖 2-10[54]。

### 2.6.2. 臨界氯離子濃度的表示方式

表示臨界氯離子濃度的型式可分為三種：

#### (1) 總氯離子佔膠結材重量的百分比

目前最為廣泛的表示方式，因為固結的氯離子有可能隨著 pH 值降低而釋放，因此總氯離子代表對於鋼筋所有潛在的腐蝕風險，極具代表性。Alonso

研究水膠比為 0.5 的水泥砂漿，以總氯離子表示的臨界氯離子濃度介於 1.24% 到 3.08% 的膠結材重[64]，J.Xu 等人則是以直接添加和外部滲入水膠比 0.55 的混凝土使鋼筋腐蝕，氯鹽以直接添加的方式得到以總氯離子濃度表示的臨界氯離子濃度為 0.62% 到 1.12% 的膠結材重；以外部滲入的方式得到以總氯離子濃度表示的臨界氯離子濃度為 0.71% 膠結材重[55]。Oh, B.H. 等人在 2003 年提出，水膠比 0.45 時，OPC 和 30% 的 GGBS 的臨界氯離子濃度以總氯離子表示分別為 0.93% 和 0.97% 的膠結材重[25]。而 Ann 在 2007 年整理了許多學者找到的臨界氯離子濃度值，如表 2-4，其值從 0.079% 到 2.9% 的水泥重[56]。Ueli Angst 等人在 2009 年整理許多學者找到的臨界氯離子濃度，如表 2-5、表 2-7[53]，其值從 0.04% 到 8.34% 的膠結材重[53]。

## (2) 自由氯離子佔膠結材重量的百分比

被固結的氯離子一般認為不會對鋼筋造成影響，因此對於鋼筋有直接腐蝕影響的為自由氯離子，隨著時間增長，混凝土受到卜作嵐材料或中性化的影響使固結氯離子被釋放，因此以此種表示法對於臨界氯離子濃度的回歸會有一定的誤差。Pettersson 在 1993 年提出[37]，當水泥砂漿的水灰比為 0.3 到 0.75 時，其臨界氯離子濃度為 0.14 到 1.83 (mol/l)。Alonso 研究水膠比為 0.5 的水泥砂漿，以自由氯離子表示的臨界氯離子濃度介於 0.39% 到 1.16% 的膠結材重[64]。J.Xu 等人則是以直接添加和外部滲入水膠比 0.55 的混凝土使鋼筋腐蝕，氯鹽以直接添加的方式得到以自由氯離子濃度表示的臨界氯離子濃度為 0.21% 到 0.61% 的膠結材重；以外部滲入的方式得到以自由氯離子濃度表示的臨界氯離子濃度為 0.37% 膠結材重[55]。Oh. 等人在 2003 年提出[25]，水膠比 0.45 時，OPC 和 30% 的 GGBS 的臨界氯離子濃度以自由氯離子表示分別為 0.1% 和 0.13% 的膠結材重。而 Ann[56] 在 2007 年整理了許多學者找到的臨界氯離子濃度值，如表 2-4[56]，其值從 0.03% 到 0.364% 的水泥重。Ueli Angst 等人在 2009 年[53] 整理許多學者找到的臨界氯離子濃度，如表 2-6、2-



7[53]，其值從 0.07% 到 1.16% 的膠結材重。

### (3) 自由氯離子和氫氧根濃度的比值

Alonso 研究水膠比為 0.5 的水泥砂漿，以  $[Cl^-]/[OH^-]$  表示的臨界氯離子濃度介於 1.17 到 3.98[64]，J.Xu 等人[55]則是以直接添加和外部滲入水膠比 0.55 的混凝土使鋼筋腐蝕，氯鹽以直接添加的方式得到以  $[Cl^-]/[OH^-]$  表示的臨界氯離子濃度為 1.80 到 5.30；以外部滲入的方式得到以  $[Cl^-]/[OH^-]$  表示的臨界氯離子濃度為 3.20。Oh. 等人在 2003 年提出[25]，水膠比 0.45 時，OPC 和 30% 的 GGBS 的臨界氯離子濃度以  $[Cl^-]/[OH^-]$  表示分別為 0.26 和 0.23。而 Ann 在 2007 年[56]整理了許多學者找到的臨界氯離子濃度值，如表 2-4[56]，其值從 0.16 到 63。Ueli Angst 等人在 2009 年[53]整理許多學者找到的臨界氯離子濃度，如表 2-6、表 2-7[53]，其值從 0.01 到 45。

表 2-4 臨界氯離子濃度整理[56]

Chloride threshold level reported by various authors with varying conditions				Detection method	Reference
Condition	Threshold values	Total chloride (%), cem.	Free chloride (%), cem.		
Pore solution				0.6 0.3	Half-cell potential Polarisation
Specimen + internal $Cl^-$	0.5~2.0 0.079~0.19 0.32~1.9 0.78~0.93 0.45 (SRPC) 0.90 (15% PFA) 0.68 (30% PFA) 0.97 (30% GGBS) 0.35~1.00	8~63	0.11~0.12 0.10 0.11 0.07 0.03 0.14~0.22	0.16~0.26 0.27 0.19 0.21 0.23	Polarisation Macrocell current AC impedance Mass loss Half-cell potential $Cl^-/OH^- = 0.3$
Specimen + external $Cl^-$	0.227 0.5~1.5 0.70 (OPC) 0.65 (15% PFA) 0.50 (30% PFA) 0.20 (50% PFA) 1.8~2.9 0.5~1.4 0.6~1.4	0.364	1.5	Polarisation Half-cell potential Mass loss	[48] [28] [11] [15]
Structure	0.2~1.5			Mass loss	[3]

Note: SRPC: sulphate resistant Portland cement, PFA: pulverised fly ash, GGBS: ground granulated blast furnace slag, OPC: ordinary Portland cement.

表 2-5 臨界氯離子濃度整理[53]



Published  $C_{crit}$  values under outdoor exposure conditions or from real structures.

$C_{crit}$	Experimental details							Year	Reference
	Total Cl <sup>-</sup> (%bw)	Chloride cation	Chloride introduction	Specimen (w/b)	Cement type	Steel condition	Corrosion detection		
0.2–1.4 <sup>a</sup>	(Na)	CAP + DIF	C (NR)	NR	NR (RIB; AR)	E	1–2	1975	Stratfull et al. [10]
0.25–1.5	(Na)	CAP + DIF	C (NR)	NR	NR (RIB; AR)	E	1–2	1984	Vassie [12]
0.1–0.19	Ca, (Na)	MIX	C (0.45)	OPC	P	LPR, EIS, VI, WL	1	1987	Hope and Ip [16]
0.96–1.96	Ca	MIX	C (0.6, 0.75)	OPC	SB, CL	WL	2	1989	Treadaway et al. [19]
0.7	Seawater	CAP + DIF	C (0.32... 0.68)	OPC	NR	WL	1–2	1996	Thomas et al. [23,31]
0.2–0.65	"	"	FA	"	"	"	"	"	"
0.4–1.5	Seawater	DIF	C (0.3... 0.75)	SRCP, FA, SF, GGBS	RIB; AR	E, (LPR, GP)	1–2	1998	Sandberg [36]
0.2–0.4	Na	DIF	C (NR)	NR	NR	MC	1	2000	Zimmermann [39]
0.72	Seawater	CAP + DIF	C (NR)	NR	NR (RIB; AR)	VI	1–2	2001	Fluge [41]
0.4–1.3	Na	MIX, CAP, DIF	C (0.4, 0.6)	OPC	NR	LPR, E	1	2004	Morris et al. [45,48]
0.1–1.96									min... max

表 2-6 臨界氯離子濃度整理[53]

Published  $C_{crit}$  values obtained from experiments with the steel directly immersed in solution (laboratory conditions).

$C_{crit}$	Experimental details				Year	Reference	
	Free Cl <sup>-</sup> (mol/l)	Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup>	Chloride cation	Steel condition	Corrosion detection		
0.17–0.34	Na	NR	E	In "cement extract"	1955	Bird, presented in [3]	
0.02–0.13	Na	ABR, CL	GP	Solution aerated, pH 12.6	1962	Rajagopalan et al. [4]	
1.0	Na	ABR, CL	GP	Solution stirred with nitrogen, pH 13	1965	Venu et al. [5]	
0.6	Na	SM, P, CL	E, (VI)	Solution aerated pH 11.6–13.2	1967	Hausmann [6]	
0.57	Na	SM, P, CL	GP, E, (VI)	pH 11.8	1970	Gouda [8], Diamond [14] <sup>a</sup>	
0.48	"	"	"	pH 12.1	"	"	
0.29	"	"	"	pH 12.6	"	"	
0.27	"	"	"	pH 13.0	"	"	
0.30	"	"	"	pH 13.3	"	"	
0.6% <sup>b</sup>	Na	SM, P, CL	GP	OPS mortar suspension	1970	Gouda and Halaka [9]	
0.3% <sup>b</sup>	"	"	"	GGBS mortar suspension	"	"	
4.9	Na	P	LPR, E	Solution aerated, pH 13.8	1988	Yonezawa et al. [18]	
0.25–0.8	Na, Ca	P, CL	LPR, E	pH 11.64–13.22	1990	Goñi and Andrade [20]	
0.14	Na	ABR, CL	PDP	Sat. Ca(OH) <sub>2</sub>	1996	Mammoliti et al. [29]	
0.28	"	RIB, CL	"	"	"	"	
0.42	"	P	"	"	"	"	
0.056	0.26	Na	CL	PC	pH 13.5	1998	Breit [34]
0.7–1.7	Na	SB; CL	E, MC	Solution aerated, pH 13.2–13.5	2000	Zimmermann et al. [37,39]	
0.01–0.04	Na	AR (MIL); SB; PR	E, EIS	pH 12.6	2001	Li and Sagüés [40]	
0.2–0.8	"	"	"	pH 13.3	"	"	
1.0–2.5	"	"	"	pH 13.6	"	"	
0.0056	0.178	Na	CL	PDP	pH 12.5	2004	Moreno et al. [49]
0.28	0.313	"	"	"	pH 13.9	"	"
0.0056–0.42	0.01–4.9					min... max	

<sup>a</sup> Diamond evaluated the results by Gouda, that did not report specific  $C_{crit}$  values, but a linear relationship between pH and the logarithm of the chloride concentration.

<sup>b</sup> It is not clearly stated in the article whether this percentage is related to the sample weight, cement weight or water in the mix.

表 2-7 臨界氯離子濃度整理[53]



Published  $C_{crit}$  values obtained from experiments with the steel embedded in cement based material (laboratory conditions).

$C_{crit}$	Experimental details							Year	Reference		
	Total Cl <sup>-</sup>	Free Cl <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup>	Chloride cation	Chloride introduction	Specimen (w/b)	Cement type	Steel condition	Corrosion detection		
0.32				Ca	MIX	C (NR)	NR	ABR, CL	GDP, VI	Submerged	1959 Kaesche [1]
0.57-1.09				Ca, Al	MIX	C (0.7)	NR	PDP, VI	"	Submerged	1959 Bäumel [2]
>0.4				Ca	MIX	M (0.45)	OPC	SM	VI	No corrosion observed	1969 Richartz [7]
0.45% <sup>a</sup>				Na	MIX	C (0.6)	OPC	SM; P, CL	GP		1970 Gouda and Halaka [9]
0.15% <sup>a</sup>				"	"	"	GGBS	"	"		" "
0.4-0.8				Na	MIX	C (0.4)	OPC	RIB; CL	LPR, (GDP)	Exposure to air	1980 Locke and Siman [11]
0.25-0.5				Ca	MIX	M (0.5)	OPC	SB	EIS, VI	Submerged/ 60% RH	1986 Elsener and Bönni [13]
	>0.69			Na, Ca	MIX	CEP	OPC	ABR, CL	LPR		1986 Andrade and Page [15]
	>0.31			"	"	"	GGBS	"	"		" "
0.1-0.19				Ca, (Na)	MIX	C (0.45)	OPC	P	LPR, EIS, VI, WL	Wet/dry cycles	1987 Hope and Ip [16]
	7-45			Na	MIX, DIF	M (0.5)	OPC	P	LPR, E	Submerged (but aerated)	1988 Yonezawa et al. [18]
0.2-0.68				Na, (Ca)	DIF	M (0.4... 0.6)	OPC, FA, SF, SRPC, RHPC	SM, (RIB); CL	PC, E, LPR	PC at 0 V SCE	1990 Hansson and Sørensen [21]
0.48-2.02				NR	MIX, CAP+DIF	C (0.4... 0.6)	OPC, FA, SF, GGBS, SRPC	NR	MC	Macro-cell	1990 Schiessl and Raupach [22]
1.5-2.5	3-20			Na	CAP+DIF	CEP, C (0.5)	OPC, SRPC	SM; SB, CL	LPR, E, WL		1991 Lambert, Page et al. [24,25]
0.4-2.0				"	MIX	"	"	"	"	"	" "
0.5-1.8	0.36-3.22 mol/l			Na	CAP+DIF, MIX	M (0.4... 0.6)	OPC, SF, FA	CL	LPR	Exposure to air	1992 Pettersson [26]
0.14-1.83	0.14-1.83 mol/l	2.5-6		Na	CAP+DIF, MIX	M, C (0.3... 0.75)	OPC, SF	RIB	LPR	Exposure to air	1995 Pettersson [27]
0.5-1.0				Na	MIX, DIF	C (0.5... 0.7)	OPC, GGBS, FA	SM	MC	Exposure to air	1996 Schiessl and Breit [30]
1.0-1.5				"	"	"	OPC	"	"	"	" "
0.44-0.65				Na	CAP+DIF	M (0.75)	NR	E			1997 Elsener et al. [32]
0.25-0.75	0.1 mol/l			Na	DIF	M (0.5... 0.6)	OPC, SF, FA, SRPC, GGBS	SM	PC, VI	Submerged	1998 Breit [35]
1.24-3.08	0.39-1.16%bw	1.17-3.98		Na, (Ca)	MIX	M (0.5)	OPC	RIB, SM	LPR, E	100% RH	2000 Alonso et al. [38]
0.25-1.25	0.045-0.55 mol/l			Na	CAP+DIF	M (0.6)	OPC	NR	E, MC		2000 Zimmermann et al. [37,39]
0.735	0.51%bw	1.67±0.3		Na	CAP+DIF	M (0.5)	OPC, SRPC, FA	RIB; MIL	PC	E>-0.2 V SCE	2002 Alonso et al. [43]
1.0-8.34	1.0-4.0%bw	1.7-20		"	"	"	"	"	"	E<-0.2 V SCE	" "
0.62	0.36 mol/l	1.5		Na	CAP+DIF	M (0.37)	SRPC	RIB	LPR, E	95% RH	2002 Castellote et al. [42]
0.42	0.33 mol/l	2.0		"	MIG	"	"	"	"	"	" "
0.04-0.24	0.4%bw			Na	CAP+DIF	M (0.58)	OPC, FA, SF	NR	LPR, E	Exposure to air	2002 de Rincón et al. [44]
0.68-0.97	0.07-0.13%bw	0.09-0.62		NR	MIG	M (0.5)	OPC	CL	LPR	Submerged	2003 Trejo and Pillai [46]
		0.16-0.26		Na	MIX	C (0.35... 0.55)	OPC, FA, GGBS	(SM)	E, VI	95% RH	2003 Oh et al. [47]
0.45	0.10%bw	0.27		"	"	"	SRPC	"	"	"	" "
0.4-1.3				Na, seawater	MIX, CAP+DIF	C (0.4, 0.6)	OPC	NR	LPR, E	Submerged; exposure to air	2004 Morris et al. [45,48]
0.52-0.75				Na	CAP+DIF	C (0.45)	OPC	SM	PC	PC at 0 V SCE	2005 Nygaard and Geiker [50]
0.05-0.15				NR	MIG	M (0.5)	OPC	MIL	LPR	Submerged	2005 Trejo and Monteiro [51]
	0.4-0.8%bw			Seawater	CAP+DIF	C (0.5)	OPC	P, PR, MIL, PP	LPR, E, PDP, VI	Exposure to air	2006 Mohammed and Hamada [52]
1.1-2.0				Na	MIX	C (0.6)	OPC	SM, RIB; AR, SB	LPR, E	Exposure to air	2008 Manera et al. [53]
0.6-1.2				"	"	"	SF	"	"	"	" "
0.04-8.34	0.045-3.22 mol/l	0.09-45									min... max
	0.07-1.16%bw										

<sup>a</sup> It is not clearly stated in the article whether this percentage is related to the sample weight, cement weight or water in the mix.

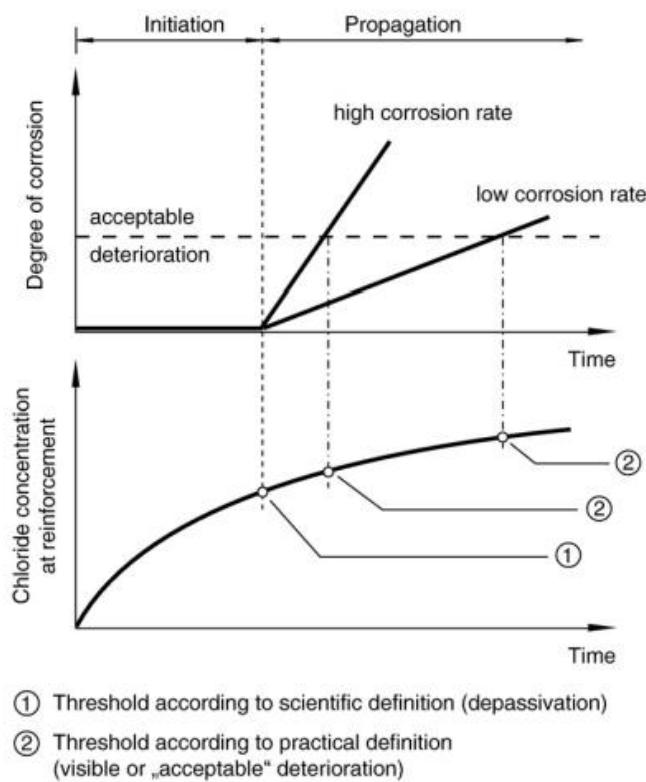


圖 2-10 臨界氯離子濃度的定義[55]



## 2.7. 氯離子含量與鋼筋腐蝕趨勢量測方法

### 2.7.1. 氯離子含量之量測方法

氯離子含量之量測主要分為檢測總氯離子的酸溶法和檢測游離態氯離子的水溶法。文獻[57]中整理各國酸、水溶法之差異，包含取樣、氯離子萃取、滴定過程試驗，並和 CNS 14702、CNS 14703 作比較如表 2-8、表 2-9。

### 2.7.2. 混凝土之酸鹼值量測

酸鹼值又稱 pH 值，其定義為在 25°C 時，溶液中氫離子濃度的負對數值，範圍接為介於 0~14，中性以 7 為標準，pH 值小於 7 為酸性，大於 7 為鹼性，且氫離子和氫氧根離子的濃度乘積為  $10^{-14}$ 。

量測硬固混凝土之酸鹼值的方法是將試體磨碎，浸泡於水中可測得混凝土之 pH 值。環保署[58]建議以 1:1 的樣品與蒸餾水比例均勻攪拌五分鐘後進行酸鹼試驗。而根據 Grubb et. Al.[59]以不同稀釋比例、溶液溫度、浸泡時間及樣品細度作酸鹼值試驗，得到的結果發現主要影響硬固混凝土酸鹼值為稀釋比例和溫度影響，而浸泡時間及樣品細度對酸鹼值量測影響較小，文獻中建議以硬固混凝土粉末與蒸餾水稀釋比例 1:2 為最便利且最具指標性。

混凝土之初始 pH 值來自於混凝土中水泥成分，越高的水泥含量酸鹼值越高，而較高的酸鹼值對鋼筋產生鈍化膜的能力較強，可以容許較多酸鹼值存在於鋼筋表面。

### 2.7.3. 鋼筋混凝土中檢測鋼筋腐蝕的方法

混凝土內的鋼筋腐蝕過程是一個緩慢且長時間的行為，若等到鋼筋腐蝕外露後或表層混凝土因鋼筋生鏽膨脹而剝落才發現，對結構物而言已經是一個致命且不可挽回之傷害。能提早以非破壞性檢測判斷鋼筋是否有腐蝕風險是必須的，但由於鋼筋混凝土是一種複雜的非均質材料，因此很難測量鋼筋的腐蝕速率或腐蝕



量。目前常用於判斷鋼筋是否有腐蝕風險的非破壞性檢測方式為量測腐蝕電位、腐蝕電流密度（腐蝕速率）及混凝土電阻係數三種。而使用破壞檢測量取鋼筋的重量損失為較直觀且傳統的判斷方式。

#### 2.7.3.1. 腐蝕勢能(Corrosion Potential)

量測鋼筋的腐蝕電位時，使用一高輸入阻抗的電位計，一端連接參考電極，另一端接工作電極（鋼筋）方可量測鋼筋之腐蝕電位，但須在鋼筋具有連續導電性時才可進行。依據 ASTM C876[60]之 6.4 節所述，首先以預定的用水量，澆濕混凝土表面，再將探頭（半電池參考電極）置於混凝土表面並不可移動，觀查電位計之電位值不隨時間改變時才可開始量測。參考電極通常使用飽和硫酸銅或氯化銀。腐蝕電位對腐蝕機率的判定方式如表 2-10[60]。混凝土不可澆濕過多的水量，以避免量測出過高的電位值[61]。

雖然腐蝕電位在使用上相當簡便，但有以下缺點：

- (1) 量測到的數據只能指出鋼筋是否有發生腐蝕之可能，卻無法告知我們腐蝕進行的速率。
- (2) 由腐蝕勢能得到的判斷只是經驗法則，在許多特殊情形並不適用，如混凝土太乾燥、混凝土中性化或混凝土品質不佳時等狀況。
- (3) 由於參考電極與鋼筋之間有混凝土的存在，而因混凝土內的氯離子變化及酸鹼值之差異所引起的介面電位差（Junction Potential）可能達 200 mV，將會影響測驗結果[62]。

#### 2.7.3.2. 腐蝕速率(Corrosion Rate)

鋼筋腐蝕的過程是一電化學反應，故量測其電化學反應速率就可獲得鋼筋的腐蝕速率，藉此判斷出鋼筋腐蝕的反應速率。以鋼筋腐蝕的氧化半反應為基礎，根據法拉第定律可以計算出腐蝕電流密度與鋼筋重量損失的關係。



$$m = \frac{M \times I \times t}{z \times F} \quad (2.6)$$

式中各項參數：

$m$ ：參與反應的鐵原子質量 (g)

$M$ ：鐵原子之原子量 (55.8 g/mole)

$I$ ：通過鋼筋與混凝土接觸面的電流 (A)

$t$ ：反應所經過的時間 (sec)

$z$ ：反應中轉移的電子數，以鐵氧化成亞鐵離子的氧化半反應而言其值為 2

$F$ ：法拉第常數 (96485 C/mole)

透過式(2.6)並且已知鐵的密度為  $7.87 \text{ g/cm}^3$ ，法拉第定律可改寫成：

$$V_{corr} = 11.6 \cdot i_{corr} \quad (2.7)$$

式中各項參數為：

$V_{corr}$ ：腐蝕速率 ( $\mu\text{m/year}$ )

$i_{corr}$ ：腐蝕電流密 ( $\mu\text{A/cm}^2$ )

意指每年鋼筋與混凝土的接觸面平均會有 11.6 微米的鐵發生腐蝕的氧化半反應，相當於每年每平方公分的接觸面積會損失 9.05 毫克的質量。

腐蝕電流密度對腐蝕程度的判定方式一般是採用學者 Broomfield 等人所建立的判定標準，如表 2-11[62]。許多研究中常取建議之鋼筋脫鈍對應到的腐蝕電流密度  $0.1\mu\text{A/cm}^2$  來當作判斷鋼筋是否開始腐蝕的依據[63][64]。但由於此時腐蝕電流密度過低，發展腐蝕所需情況甚久，鋼筋表層是否脫鈍觀察不易，因此也有文獻在實驗室中採用  $0.3\mu\text{A/cm}^2$  甚至更高作為判斷腐蝕的基準[65]。而腐蝕電流密度達到臨界值時，鋼筋並不會馬上腐蝕，文獻[68]描述不同腐蝕電流密度對腐蝕所需時間之關係如表 2-12。

腐蝕電流密度量測方法有線性極化法 (Linear Polarization Resistance, LPR)、交流阻抗法 (AC Impedance)、伽凡尼脈波法 (Galvanostatic Pulse Method, GPM) 等方法。



### (1) 線性極化法 (Linear Polarization Resistance, LPR) [66]

為一利用輸入微小電流進行金屬腐蝕速度的量測法，在輸入極小的過電位 (Over-potential) 下，電流和電位會保持線性的關係，而此線性關係的斜率即為極化電阻  $R_p$  (Polarization Resistance)。

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (2.8)$$

式中各項參數：

$R_p$ ：極化阻抗值 ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )

$\Delta E$ ：電位差 (V)

$\Delta I$ ：電流密度差 ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )

再利用 Stern-Geary 公式[63]即可得腐蝕電流密度。

$$i_{corr} = \left[ \frac{\beta_a \beta_b}{2.303(\beta_a + \beta_b)} \right] \times \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{B}{R_p} \quad (2.9)$$

式中各項參數：

$i_{corr}$ ：腐蝕電流密度 ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )

$\beta_a$ ：陽極之 Tafel 斜率

$\beta_b$ ：陰極之 Tafel 斜率

$B$ ：介於 26mV 至 52mV 間的常數，取決於鋼筋的腐蝕程度。對於進入腐蝕狀態之鋼筋， $B$  值為 26mV。

### (2) 交流阻抗法 (AC Impedance)

由線性極化法所量測之極化阻抗值，當電解液的電阻過大時，電流很小，且大部份的電壓降發生在電解液，亦即測得的腐蝕電流將遠比實際值要小。交流阻抗分析法便是針對此點，藉由微小的交流訊息輸入 (一般為 10 mV 的正弦波訊)，可以在雜訊中得到準確的金屬表層資訊[67]，進而得到混凝土電阻、電解液電阻  $R_s$ 、鋼筋表面鈍化膜電阻或電荷轉移的混凝土阻抗  $R_p$  和質傳有關的阻抗  $Z_w$  與電容值  $C_p$  等數據。直流方法中測得的電阻  $R$  值須由  $\Delta E/\Delta I$  量測，此  $R$  值包含

電解液電阻  $R_S$ 。如遇水溶液或薄膜導電性不良，則測得的腐蝕電流誤差會很大。

### (3) 伽凡尼脈波法 (Galvanostatic Pulse Method, GPM)

伽凡尼脈波法的原理是於鋼筋混凝土等效電路，外加一微小之定電流 (通常為數十至數百毫安培)，在一定的時間 (通常為數十秒) 內觀察系統的電位對時間的暫態變化反應。在未外加任何電流於系統之前，可測得一基本電位  $E_{corr}$ ，此電位即為系統的平衡電位。當對系統施以一定電流 ( $I_{app}$ ) 時，首先電流流經一電阻  $R_S$  (代表測試探頭與鋼筋之混凝土電阻)，系統之電位上升至 ( $I_{app} \times R_S$ )。當電流流經  $R_P$  (代表鋼筋的極化電阻) 與  $C_{dl}$  (代表鋼筋表面上之介質電容特性) 的並聯線路後，系統的電位為所施加電流的二次函數，並且在一定時間內達一平衡電位  $U_{max}$ 。由電路學原理可得系統的電位時間關係如式(2.10)：

$$U_t = I_{app} \left[ R_P \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_P \times C_{dl}}} \right) + R_S \right] \quad (2.10)$$

式中各項參數：

$U_t$ ：時間為  $t$  時的電位值 (V)

$I_{app}$ ：施加的電流 (I)

$R_P \times C_{dl}$ ：時間單位 (sec)

當時間為零時  $U_0 = I_{app} \times R_S$ ；由於  $I_{app}$  為已知，故可求得  $R_S$ ；當時間大於  $R_P \times C_{dl}$  數十倍時  $U_t$  趨近於  $I_{app} \times (R_P + R_S)$ ，因此可再進一步求得  $R_P$  值，再利用 Stern-Geary 公式求得腐蝕電流密度。

#### 2.7.3.3. 混凝土電阻係數(Electrical Resistivity)

影響混凝土電阻係數的因素包含混凝土本身濕度、含水量以及配比和成分等；潮濕的混凝土或較高的水灰比，皆會導致較低之混凝土電阻係數。較低的水灰比或是混凝土養護時間較長，導致混凝土緻密性提升，亦會提高混凝土之電阻係數[68]。暴露於氯離子環境中之結構，混凝土電阻愈低，表示鋼筋受到之損害愈大，氯離子滲透速度及腐蝕速率愈高[69]。混凝土電阻係數對腐蝕程度的判定



方式可見表 2-13[70]。

以混凝土電阻係數判定鋼筋腐蝕狀況之缺點為容易受到混凝土乾濕之影響，所測量到的混凝土電阻變異性較大，較難準確判斷腐蝕程度。因鋼筋傳導電流之特性優於混凝土，故電極之位置於鋼筋上方 10mm~20 mm 時，電流會受嚴重干擾而產生量測誤差。即使只有一個電極靠近鋼筋，誤差仍會產生，故量測時應避免電極位於鋼筋之正上方。

#### 2.7.3.4. 重量損失法

用失重法來判斷鋼筋是否腐蝕為較傳統的方法，常被用作估算其他腐蝕評估方法準確性的參考標準。該方法是通過計算混凝土中鋼筋腐蝕前後的重量損失來判斷腐蝕情況。當鋼筋還沒達到腐蝕臨界值時，此時鋼筋是屬於鈍化狀態，和控制組鋼筋的失重率應該相同。當試驗中的鋼筋有可察覺的失重時，此時所對應的鋼筋狀態即為活性腐蝕的起始點。而在 1996 年，學者 Thomas[32]就用此法找到氯離子和鋼筋腐蝕的關係：

$$M(\%) = -0.086 + 0.442C_{Cl^-} \quad (2.11)$$

處於鈍態的鋼筋經化學清洗後，由於除去鋼筋表面鈍化膜而造成的失重率約為 0.087%，所以當失重率高於此值時，可視為鋼筋開始腐蝕。雖然此法為一種較明顯的判斷方法，但因其為破壞試驗，因此在現場時不適用此法，且需鋼筋腐蝕較嚴重時，其失重率才較為明顯，因此所需試驗時間較長。此外，相對於使用電化學方法，失重法的精準度還有待進一步探討。

表 2-8 酸、水溶法之取樣數差異[57]

檢測方法	酸溶法取樣數	水溶法取樣數
RILEM TC 178-TMC	1 g	5 g
NT Build 208	5 g	
BS 1881:	5 g	
JIS A 1154	10 g	
FM 5-516	3 g	
AASHTO T260	3 g	3 g
ASTM C1218	10 g	10 g
AS 1012.20	>15 g	
CNS 14702	10 g	10 g

表 2-9 各國酸、水溶法之試驗過程差異[57]

檢測方法	酸溶法取樣數	水溶法取樣數
RILEM TC 178-TMC	粉樣加入50 mL HNO <sub>3</sub> 溶液中 (1:2) 後攪拌並沸騰1 分鐘，於冷卻後加入5 mL 的0.05 M 硝酸銀溶液後以稀HNO <sub>3</sub> 溶液中 (1 : 100) 沖洗過濾。	粉樣加入50 mL 去離子水中攪拌均勻後過濾
NT Build 208	粉樣加入50mL 去離子水使之分散，並加入10 mL 濃度約70%的HNO <sub>3</sub> 溶液。再加入50mL 热水混合後沸騰4到5分鐘，於冷卻後過濾。	
BS 1881	同 NT Build 208	
JIS A 1154	粉樣加入70 mL HNO <sub>3</sub> 溶液中 (1 : 6) 於靜置30 分鐘後，加熱沸騰5 分鐘，於冷卻後過濾	
FM 5-516	粉樣加入10mL 去離子水使之分散，並加入3 mL 濃度約70%的HNO <sub>3</sub> 溶液。充分攪拌後加入50mL 热水混合，加熱沸騰，於冷卻後過濾（若混凝土添加爐石需添加3 mL 過氧化氫溶液）	
AASHTO T260	同 FM 5-516	粉樣加入60~70 mL 去離子水中攪拌均勻後，加熱沸騰5 分鐘，並於冷卻24 小時後過濾
ASTM C1218	粉樣加入75 mL 去離子水使之分散，並加入25 mL HNO <sub>3</sub> 溶液 (1:1)攪拌並沸騰，，於冷卻後過濾	粉樣加入50 mL 去離子水中攪拌均勻後過濾，加熱沸騰5 分鐘，並於冷卻24 小時後過濾
AS 1012.20	粉樣加入少許水混合後加入20%濃度的HNO <sub>3</sub> 溶液50 mL 後攪拌並沸騰2 分鐘，於冷卻後過濾	
CNS 14702	同 ASTM C1218	同 ASTM C1218



表 2-10 腐蝕電位對應腐蝕機率之關係[60]

腐蝕電位(mV)	腐蝕機率
$E > -200$	小於 5%
-200~-350	50%~90%
$E < -350$	大於 90%

表 2-11 腐蝕電流密度對應腐蝕程度之關係[62]

腐蝕電流密度( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	腐蝕程度
$I_{\text{corr}} < 0.1$	腐蝕微小不計
0.1~0.5	小
0.5~1	中
$I_{\text{corr}} > 1$	大

表 2-12 腐蝕電流密度對應腐蝕程度之關係[68]

腐蝕電流密度( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	腐蝕程度
$I_{\text{corr}} < 0.2$	無腐蝕
0.2~1.0	在 10~15 年內可能發生腐蝕
1.0~10	在 2~10 年內可能發生腐蝕
$I_{\text{corr}} > 10$	在 2 年內甚至更短時間可能發生腐蝕

表 2-13 混凝土電阻係數對應腐蝕狀況之關係[70]

Resistivity	腐蝕狀況
$>20 \text{ k}\Omega \text{ cm}$	低腐蝕速率
$10\sim20 \text{ k}\Omega \text{ cm}$	低到中度腐蝕速率
$5\sim10 \text{ k}\Omega \text{ cm}$	高腐蝕速率
$<5 \text{ k}\Omega \text{ cm}$	非常高腐蝕速率

### 第三章 實驗計畫



本研究主要是探討鋼筋混凝土內鋼筋腐蝕之臨界氯離子濃度，利用貯鹽實驗使氯鹽進入混凝土中，藉此觀測混凝土的擴散行為及當鋼筋表面達到此濃度時之腐蝕行為。再改變混凝土的水膠比和卜作嵐材料取代來比較對臨界氯離子濃度之影響。判斷鋼筋腐蝕的狀況是使用美國 James 儀器公司製作的 Gecor 8 腐蝕電流儀進行試驗，量測鋼筋的腐蝕電流密度、腐蝕電位和腐蝕電阻係數，再依腐蝕電流密度來判斷鋼筋的腐蝕情況。並對混凝土圓柱試體進行強度試驗、氯離子含量滴定、pH 值試驗，藉此以不同方式來表達臨界氯離子濃度。

#### 3.1. 實驗內容

本實驗採用貯鹽浸漬的方式使氯鹽擴散進入鋼筋混凝土試體，量測 28 天、90 天下不同深度所含的氯離子濃度及每 14 天之鋼筋腐蝕電流密度，並於腐蝕電流密度達到  $0.1$  和  $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$  時破壞試體，量測對應的氯離子濃度，並回歸其擴散係數。改變水膠比與卜作嵐材料取代率，分別為水膠比  $0.45$ 、 $0.55$ 、 $0.65$  與 I 型水泥混凝土，爐石取代  $40\%$ 、飛灰取代  $20\%$  及爐灰取代  $30\%$ ，探討不同水膠比和卜作嵐材料對氯離子擴散及鋼筋臨界氯離子濃度之影響，再進一步討論各配比在 28、90 天及腐蝕電流密度達到  $0.1$ 、 $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$  的擴散係數及腐蝕電流密度與臨界氯離子濃度之關聯性。

#### 3.2. 實驗材料

各試驗所使用的基本材料包含水泥、粗粒料、細粒料、飛灰、爐石及竹節鋼筋等，分述如下：

##### (1) 水泥

採用台灣水泥公司所生產的品牌第 I 型波特蘭水泥，其主要化學成分如表

3-1 所示；物理性質如表 3-2 所示。

(2) 粗粒料：

由國產實業建設公司提供，其篩分析與物理性質如表 3-3 所示。

(3) 細粒料：

由國產實業建設公司提供，其篩分析與物理性質如表 3-4 所示。

(4) 飛灰：

取自台灣電力公司，依 CNS3036 分類為 Class F 等級的飛灰，比重為 2.26，其主要化學成分如表 3-5 所示。

(5) 爐石：

由國產實業建設公司提供，為 100 級爐石粉，其物理性質及化學成分如表 3-6 所示。

(6) 竹節鋼筋：

符合中華民國國家標準 CNS560 鋼筋混凝土用鋼筋之 D10 (#3) 竹節鋼筋，化學成分如表 3-7 所示。

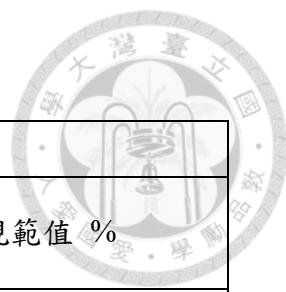


表 3-1 台泥品牌第 I 型波特蘭水泥化學成份

試 驗 報 告			
化 學 成 分	檢 驗 結 果	規範值 %	
		I 型	II 型
二氧化矽 $\text{SiO}_2$ (%)	20.90	-	
三氧化二鋁 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	3.99	-	$\leq 6.0$
三氧化二鐵 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	3.74	-	$\leq 6.0$
氧化鈣 $\text{CaO}$ (%)	62.87	-	
氧化鎂 $\text{MgO}$ (%)	3.28	$\leq 6.0$	$\leq 6.0$
二氧化硫 $\text{SO}_3$ (%)	2.67	$\leq 3.0$ 或 $\leq 3.5$	$\leq 3.0$
燒失量 LOI(%)	0.9	$\leq 3.0$	
不溶殘渣 I.R.(%)	0.15	$\leq 4.3$	
氯離子 $\text{Cl}^-$ (%)	0.01	$\leq 0.10$	
矽酸三鈣 $\text{C}_3\text{S}$ (%)	57	-	
矽酸二鈣 $\text{C}_2\text{S}$ (%)	17	-	
鋁酸三鈣 $\text{C}_3\text{A}$ (%)	4.2	-	
鋁鐵酸四鈣 $\text{C}_4\text{AF}$ (%)	11.4	-	
備 註			

(資料來源：台灣水泥公司)

表 3-2 台泥品牌第 I 型波特蘭水泥物理性質



試 驗 報 告		
物理性質	檢 驗 結 果	規範值 %
細度：比表面積 (氣透儀法)， $m^2/kg$	341	$\geq 280$
熱壓膨脹，%	0.02	$\leq 0.80$
凝結時間，分鐘	初凝	170
	終凝	330
慢料之空氣含量， 體積百分率，%	6.1	$\leq 12.0$
備 註		

(資料來源：台灣水泥公司)

表 3-3 粗粒料之篩分析與物理性質

粒料	粗粒料				
	個篩停留		累計停留	累計通過	規範通過率
	克	%	%	%	%
3/2"	0	0	0	100	95~100
3/4"	324	32.4	32.4	67.6	35~70
1/2"	414	41.4	73.8	26.2	-
3/8"	79	7.9	81.7	18.3	10~30
#4	137	13.7	95.4	4.6	0~5
底盤	45	4.5	99.9	0	

比重：2.57，面乾內飽和含水率：3.02%

表 3-4 細粒料之篩分析與物理性質

孔徑(mm)	篩號	各篩停留量(g)	殘留重量百分比	累積殘留重量百分比	累積通過重量百分比
9.52	3/8"	0.0	0.0	0.0	100.0
4.76	#4	6.2	0.5	0.5	99.5
2.36	#8	137.5	11.9	12.5	87.5
1.18	#16	206.3	17.9	30.4	69.6
0.6	#30	255.7	22.2	52.6	47.4
0.3	#50	249.7	21.7	74.3	25.7
0.15	#100	217.7	18.9	93.2	6.8
0.075	#200	50.2	4.4	97.6	2.4
底盤		28.2	2.4	100.0	0.0
總和		1151.5	100.0		

細度模數 F.M : 2.63 , 比重 : 2.42

面乾內飽和含水率 : 2.11%

表 3-5 飛灰主要化學成分

化學組成	平均值(%)	試驗標準 (CNS3036)
二氧化矽 $\text{SiO}_2$	50.00	
三氧化二鋁 $\text{Al}_2\text{O}_3$	28.41	三者合計大於 70%
三氧化二鐵 $\text{Fe}_2\text{O}_3$	6.98	
氧化鈣 $\text{CaO}$	5.99	-
氧化鎂 $\text{MgO}$	1.39	-
氧化鉀 $\text{K}_2\text{O}$	0.13	-
氧化鈉 $\text{Na}_2\text{O}$	0.09	-
三氧化硫 $\text{SO}_3$	0.47	小於 3%
燒失量	4.62	小於 6%
卜特嵐活性指數(7 天)	86.8	小於 75%
卜特嵐活性指數(28 天)	97.8	小於 75%

(資料來源：台灣電力公司)

表 3-6 高爐石之物理性質與化學成分

試驗項目			檢驗結果	規範要求(CNS12549)	
物理性質	比重		2.89	$\geq 2.0$	
	細度：比表面積 ( $m^2/kg$ )		420	$\geq 330$	
	慢料空氣含量 (%)		2.61	$\leq 12.0$	
	活性指數 (%)	7 天	100 級	75	
			120 級	95	
		28 天	100 級	95	
			120 級	115	
	#325 篩餘 (%)		1.3	$\leq 20$	
化學性質	二氧化矽 $SiO_2$ (%)		33.84	-	
	三氧化二鋁 $A_2O_3$ (%)		14.07	-	
	三氧化二鐵 $F_2O_3$ (%)		0.32	-	
	氧化鈣 $CaO$ (%)		41.31	-	
	氧化鎂 $MgO$ (%)		6.67	-	
	三氧化硫 $SO_3$ (%)		0.69	$\leq 4.0$	
	鹽基度 (%)		1.83	-	
	硫化物硫 (%)		0.71	$\leq 2.5$	

(資料來源：國產實業建設公司)

表 3-7 鋼筋化學成分

元素成分	百分比
C	0.36
Cu	0.23
Si	0.2
Mn	0.61
P	0.04
S	0.03
Ni	0.11
Cr	0.12
Mo	0.01
Sn	0.02
Fe	balance



### 3.3. 試驗儀器

本實驗所使用的基本試驗儀器包含 MTS 萬能材料試驗機 (100 噸)、瑞士 Metrohm 所製造的 809 Titrando 自動電位滴定儀、美國 James 儀器公司製造的 Gecor 8 腐蝕電流儀等相關實驗儀器，分述如下：

#### (1) 中型單軸拌和試驗機

HOQURT 生產，成都食品機械行代理，型號:HK-101，110V，60Hz，3 段變速，拌和上限為 70kg，如照片 3-1 所示。

#### (2) MTS 萬能材料試驗機

採用美國 MTS 所生產之 MTS 810 系列萬能材料試驗機，最大試驗載重為 100 噸。控制系統為 MTS Series 793 Controllers，軟體操作介面為 Model 793.00 System Software，油壓控制介面部分為 MTS FlexTest Series 60 Controllers，為一完全數位化整合之油壓操作系統，如照片 3-2 所示。

#### (3) 研磨機：

進行抗壓試驗前須以試體研磨機將試體上下側研磨至水平，如照片 3-3 所示。

#### (4) 自動電位滴定儀

瑞士 Metrohm 公司所製造的自動電位滴定儀，型號為 809 Titrando，依用途更換電極進行離子滴定試驗、酸鹼滴定試驗。測定分辨率為 0.001pH、0.1mV、0.1°C。儀器由滴定驅動區、試液交換區、滴定標準液、滴定器主機、滴定管、電磁攪拌機與所選定的參考電極所組成，如照片 3-4 所示。

#### (5) 鋼筋腐蝕速率測定儀

由美國 James 儀器公司所製造的 Gecor 8 鋼筋腐蝕速率測定儀，根據線性極化法之原理，此儀器可測得鋼筋之腐蝕電流密度、腐蝕電位及混凝土電阻係數。如照片 3-5 所示。



(6) 切割機

SAWMASTER 公司生產，型號:SDT-1030，如照片 3-6 所示。

(7) 磨粉機

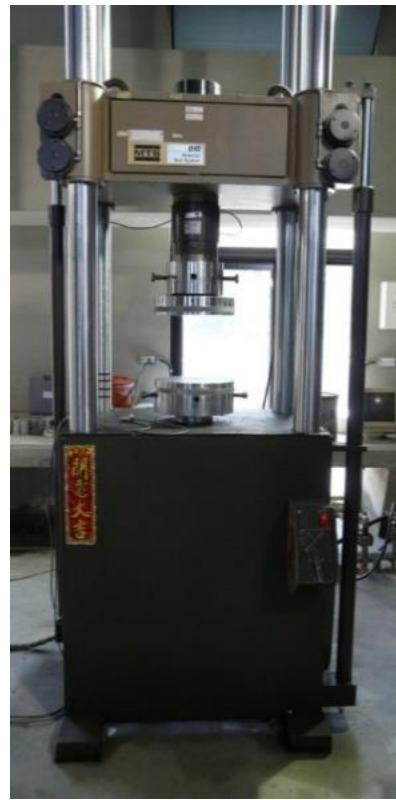
盈慶公司生產，如照片 3-7 所示。

(8) 紅外線水分測定儀

華夏科學有限公司供應，如照片 3-8 所示。



照片 3-1 中型單軸拌和試驗機



照片 3-2 MTS 萬能材料試驗機



照片 3-3 研磨機



照片 3-4 自動電位滴定儀



照片 3-5 Gecor 8 鋼筋腐蝕速率測定儀



照片 3-6 切割機



照片 3-7 磨粉機



照片 3-8 紅外線含水量測定儀



### 3.4. 配比及混凝土拌和流程

本實驗使用之材料有水泥、爐石、飛灰、粗粒料、細粒料，使用儀器為中型單軸拌和試驗機等設備。試驗共分為三種水膠比（0.45、0.55、0.65）與四種卜作嵐材料取代率（無取代、爐石取代水泥40%、飛灰取代水泥20%、爐灰取代水泥30%，其中爐灰為爐石與飛灰依重量比7:3混合而成），共計12組配比。詳細配比如表3-8所示，拌和過程如下：

1. 拌和前先將粗、細粒料取樣，分別放入紅外線水分測定儀量測含水率。
2. 將拌和水量調整至粒料為面乾內飽和。
3. 下細粒料，再下膠結材，乾拌一分鐘至均勻。
4. 將部分強塑劑加入拌和水，再將部分拌和水加入拌和試驗機直到砂漿出現剪切面。
5. 加入粗粒料，並加入少量拌和水防止粗粒料吸收過多的砂漿水分。
6. 將剩餘的拌和水加入，強塑劑視情況添加。
7. 利用坍度試驗控制坍度為 $20\pm3$ 公分，若未達標則繼續拌和並酌量加入強塑劑直到工作性符合要求。
8. 持續拌和三分鐘。

拌和完成後始澆置試體，搗實以搗棒及外部搗實法搗實，並利用鏝刀將澆置面鏝平，於24小時內拆模並放入實驗室溫度之飽和石灰水桶進行濕養護；待齡期到達時將試體取出進行試驗。

配比名稱是由前三碼的水膠比與後半的卜作嵐材料縮寫和取代率所組成。「S」代表爐石取代水泥；「F」代表飛灰取代水泥；「SF」代表爐灰取代水泥。如水膠比為0.45且無卜作嵐材料取代的配比命名為「045OPC」；水膠比0.55且爐石取代水泥40%的配比命名為「055S40」；水膠比0.65且爐灰取代水泥30%的配比命名為「065SF30」，依此類推。

表 3-8 試驗配比表

配比名稱	水膠比	水	水泥	爐石	飛灰	粗粒料	細粒料	單位重
		kg/m <sup>3</sup>						
045	0.45	184.8	410.8	0.0	0.0	956.3	841.4	2393.3
045S40	0.45	184.8	246.5	164.3	0.0	956.3	841.4	2393.3
045F20	0.45	184.8	328.7	0.0	82.2	956.3	841.4	2393.3
045SF30	0.45	184.8	287.6	86.3	37.0	956.3	841.4	2393.3
055	0.55	200.0	363.9	0.0	0.0	956.0	841.4	2361.3
055S40	0.55	200.0	218.3	145.5	0.0	956.0	841.4	2361.3
055F20	0.55	200.0	291.1	0.0	72.8	956.0	841.4	2361.3
055SF30	0.55	200.0	254.7	76.4	32.7	956.0	841.4	2361.3
065	0.65	212.1	326.4	0.0	0.0	956.0	841.4	2335.9
065S40	0.65	212.1	195.8	130.6	0.0	956.0	841.4	2335.9
065F20	0.65	212.1	261.1	0.0	65.3	956.0	841.4	2335.9
065SF30	0.65	212.1	228.5	68.5	29.4	956.0	841.4	2335.9



### 3.5. 抗壓強度試驗

本試驗參考 CNS 1232 「試驗室混凝土試體製作及養護法」及 CNS 1232 「混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法」施行。每組配比將分別進行 28、60、122 天抗壓強度試驗。試體為直徑 10 公分、高 20 公分之圓柱試體，為使試體均勻受壓，使用圓柱試體端面研磨機將受壓面磨平。再以 MTS 萬能材料試驗機進行單軸抗壓試驗，並以 0.01mm/sec 之加載速率進行。

### 3.6. 貯鹽試驗

本實驗包含對照組及實驗組，對照組以一般自來水放置於試體頂端，實驗組則以氯化鈉溶液進行貯鹽試驗，藉此了解鋼筋混凝土中鋼筋因為氯鹽滲入而腐蝕的情形。

#### 3.6.1. 試體設計

試體為直徑 15 公分、高 5 公分之圓柱試體，內置長 20 公分之 D10 竹節鋼筋，保護層為 2 公分。24 小時內拆模後為避免鋼筋露出段鏽蝕，須先以電器膠帶纏繞裸露段，再以矽氧樹脂完整包覆。

#### 3.6.2. 試驗步驟

對照組以一般自來水代替氯化鈉溶液，實驗組為加速氯離子達到鋼筋表面的時間，參照並改良自規範 ASTM C1543，以重量百分濃度 10% 之氯化鈉溶液進行貯鹽試驗。

- (1) 試體養護完成後側面塗刷防水漆，以避免試驗過程中試體邊界提供入滲之氯化鈉溶液預期以外的通路而影響試驗結果。試體上下面則必須完全暴露，不可塗封。
- (2) 使用矽氧樹脂將壓克力圍堰和試體澆置面緊密黏著，避免試驗過程中發



生漏水現象。

- (3) 圍堰架設完畢後，先以自來水添加於圍堰內，使混凝土預先飽和，令氯鹽最初以擴散的方式進入混凝土中。
- (4) 於圍堰內添加重量百分濃度 10% 之氯化鈉溶液，高度至少 1.5 公分。將頂部用保鮮膜封起，以避免溶液蒸散並防止異物落入，如所示。
- (5) 為使溶液保持在固定濃度，約每 14 天更新溶液。更換時檢查是否有漏水現象發生。

### 3.7. 鋼筋腐蝕電流密度量測試驗

本實驗之目的在於了解不同水膠比、卜作嵐取代率的混凝土對於鋼筋腐蝕的程度和趨勢之影響。

- (1) 每次量測前先以儀器連接由 Gecor 8 校正用的假試體校正，確定儀器正常運作，如照片 3-9 所示。
- (2) 以清水均勻噴濕試體量測面，以濕潤測試點。
- (3) 將露出段鋼筋之電器膠帶及矽氧樹脂移除，並將裸露之鋼筋去除表面之雜質與鏽跡。
- (4) 以電極夾具夾取裸露之鋼筋，並於圓盤探測器內注滿飽和硫酸銅溶液，置探測器於量測面，如照片 3-10 所示。
- (5) 設定儀器相關參數，待監測畫面上之兩校正參數趨於穩定後，即表示雜訊已過濾完畢，而完成腐蝕電流儀之校正。
- (6) 按下開始鈕後等待數十秒至幾分鐘，即可測得腐蝕電流密度。
- (7) 量測後試體若需持續進行貯鹽試驗，則必須再以電器膠帶和矽氧樹脂包覆住露出之鋼筋段。



照片 3-9 試驗假試體校正



照片 3-10 試體量測



### 3.8. 氯離子含量滴定試驗

本實驗的目的在於測定不同深度的總氯離子濃度和游離態氯離子濃度，再推算出混凝土當時的擴散係數和表面氯離子濃度，藉此了解不同水膠比和不同卜作嵐材料取代下對擴散行為的影響和臨界氯離子濃度的關聯性。

#### 3.8.1. 試驗材料與設備

為使化學性質試驗的樣本數足夠，取鋼筋周圍的試體，考慮切割機刀片厚度 0.2 公分後以厚度 0.5、1、1 公分將混凝土試體分三層切片後敲碎，並用磨粉機將試體磨成粉末。使用的設備有磨粉機和自動電位滴定儀。本試驗參考 CNS 14703 「硬固水泥砂漿及混凝土中水溶性氯離子含量試驗法」及 CNS 1078 「水硬性水泥化學分析法」施行。

#### 3.8.2. 水溶性氯離子含量試驗

1. 取試樣 10g，置於 250mL 的燒杯中，加入符和 CNS 3699 「化學分析用水」 A3 級之分析用水  $50\pm 1\text{mL}$ 。
2. 將試樣以錶玻璃覆蓋，加熱煮沸 5 分鐘後靜置 24 小時。
3. 以重力或抽氣過濾方式將試樣以符合 CNS 5038 「化學分析用濾紙」 G 級濾紙過濾之。
4. 將濾液移入 250mL 燒杯，加入  $3\pm 0.1\text{mL}$  比例 1:1 的稀硝酸及  $3\pm 0.1\text{mL}$  濃度 30% 的過氧化氫，將燒杯以錶玻璃覆蓋，靜置 1 至 2 分鐘。
5. 再將覆蓋錶玻璃的燒杯迅速加熱至沸騰，沸騰時立即移開燒杯，避免持續沸騰超過數秒。
6. 清洗抽氣過濾裝置 4 次，再將濾液抽氣過濾移至燒杯中，冷卻至室溫。
7. 使用 0.1N 之硝酸銀溶液作為滴定液，搭配電極碳棒為指示電極，參考電極為 3N 硝酸鉀電極棒。自動電位滴定儀根據試樣的氯離子含量高低進行微調，控



制其滴定液輸出量與靈敏度以取得合理的當量點。

### 3.8.3. 酸溶性氯離子含量試驗

1. 取試樣 10g，置於 250mL 的燒杯中，加入符和 CNS 3699「化學分析用水」A3 級之分析用水  $75\pm 1\text{mL}$ 。
2. 緩慢加入  $25\pm 1\text{mL}$  比例 1:1 的稀硝酸，用玻璃棒打散結塊。爐石粉中含有硫化氫，有強烈硫化氫臭味，加  $3\pm 0.1\text{mL}$  濃度 30%的過氧化氫。
3. 再加入  $3\pm 0.1\text{mL}$  的甲基橙指示劑，攪拌均勻。蓋錶玻璃，放置 2 分鐘。如出現黃色或黃橙色，則再加硝酸，至呈現粉紅色或紅色，然後再加 10 滴硝酸。
4. 將覆蓋的燒杯迅速加熱至沸騰，沸騰時即移開燒杯，避免持續沸騰超過數秒。
5. 清洗抽氣過濾裝置 4 次，再將濾液抽氣過濾，移至燒杯中冷卻至室溫。
6. 使用 0.1N 之硝酸銀溶液作為滴定液，搭配電極碳棒為指示電極，參考電極為 3N 硝酸鉀電極棒。自動電位滴定儀根據試樣的氯離子含量高低進行微調，控制其滴定液輸出量與靈敏度以取得合理的當量點。

## 3.9. 混凝土 pH 值試驗

本試驗的目的在於了解鋼筋周圍的酸鹼值，藉此推出氫氧根離子的濃度。

### 3.9.1. 試驗材料與設備

分層、備粉取樣方式如同 3.8.1 節所述。使用的設備有磨粉機和自動電位滴定儀。本試驗參考環署檢字第 09700791940A 號公告之「廢棄物之氫離子濃度指數(pH 值)測定方法-電極法」。

### 3.9.2. 試驗方法

- 
1. 取試樣 20g，置於 250mL 的燒杯中，加入符和 CNS 3699 「化學分析用水」 A3 等級之分析用水  $20\pm 1\text{mL}$ ，蓋上錫玻璃，持續攪拌混合液 5 分鐘。
  2. 靜置混合液約 15 分鐘，使混合液的大部分固體沉澱，以直接、過濾、離心或利用其他方法取的水相層，測定水相層之 pH 值，並記錄溫度。
  3. 使用 3N 氯化鉀玻璃電極，以 pH4、pH7 與 pH9 的校正液進行自動電位滴定儀校正。



## 第四章 實驗結果與分析

本研究在 28 天濕養護後進行抗壓強度試驗，並預飽和三天始進行貯鹽試驗，試驗期間每 14 天量測腐蝕電流密度，達到試驗標準時破壞試體，進行氯離子含量滴定及酸鹼值試驗，試驗之結果在本章節敘述並作初步分析。

### 4.1. 抗壓強度試驗結果

#### 4.1.1. 水膠比對抗壓強度的影響

試驗結果如表 4-1 所示。本研究結果顯示，隨著水膠比升高，抗壓強度越低。以水膠比 0.45 為基準，控制組中，水膠比 0.55 之混凝土抗壓強度在三個齡期皆降低了約 27%，水膠比 0.65 之混凝土抗壓強度在三個齡期則降低約 41%；爐石組中，水膠比 0.55 之混凝土抗壓強度在三個齡期皆降低了約 14%，水膠比 0.65 之混凝土抗壓強度在三個齡期則降低約 33%；飛灰組中，水膠比 0.55 之混凝土抗壓強度在三個齡期皆降低了約 25%，水膠比 0.65 之混凝土抗壓強度在三個齡期則降低約 46%；爐灰組中，水膠比 0.55 之混凝土抗壓強度在三個齡期皆降低了約 7%，水膠比 0.65 之混凝土抗壓強度在三個齡期則降低約 31%。

#### 4.1.2. 卜作嵐取代量對抗壓強度之影響

在早期強度發展，卜作嵐取代組別在齡期 28 天時均低於或與控制組相近，而以水膠比 0.65 為例，控制組在 59 天時抗壓強度較 28 天提升至 112%，122 天提升至 119%，發展趨於平緩，混凝土大致完成水化，抗壓強度在 122 天後提高些微強度；爐石的卜作嵐反應較一般混凝土晚，達到 59 天時較 28 天提升至 123%，122 天時提升至 138%；飛灰水化時間需求較長，因此飛灰組成長的幅度在中、長齡期最為顯著，在 59 天時較 28 天成長至 136%，122 天時提升至 171%；爐灰組在 59 天時較 28 天成長 28%，122 天時提升至 138%。

表 4-1 混凝土圓柱抗壓強度



配比名稱	28 天強度 (MPa)	60 天強度 (MPa)	122 天強度 (MPa)
045OPC	53.12	58.66	62.07
045S40	42.18	51.80	57.89
045F20	42.32	48.01	57.67
045SF30	40.24	49.90	56.08
055OPC	36.85	43.11	46.64
055S40	37.40	44.23	48.74
055F20	30.06	36.42	45.73
055SF30	37.04	46.12	52.31
065OPC	31.28	35.02	37.09
065S40	28.32	34.88	39.22
065F20	19.71	26.87	33.62
065SF30	27.61	35.22	38.08

## 4.2. 腐蝕電流密度試驗結果

試驗結果如表 4-2、表 4-3、表 4-4，探討鋼筋腐蝕的時間，去鈍化及中度腐蝕之標準分別為腐蝕電流密度等於  $0.1$ 、 $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，對照組以自來水進行貯鹽試驗的，達到試驗天數 154 天時並未有鈍化膜失去作用的現象發生；不論是控制組還是試驗組，添加爐石的混凝土在貯鹽試驗 28 天前皆先上升後驟降，表示並非受到氯離子侵入的影響，且其趨勢與圖 2-9 相同，且在貯鹽試驗 28 至 42 天期間低於去鈍化標準，任一配比於 42 天後處於鈍化狀態。

量測時以腐蝕電位降低作為腐蝕前兆的依據，達臨界指標時即停止試驗。水膠比 0.45 的混凝土於貯鹽試驗 154 天內均未脫鈍；水膠比 0.55 組別中，OPC 組、飛灰組於分別於 98、91 天鋼筋去鈍化，於 126、112 天達到中度腐蝕；水膠比 0.65 組別中，OPC 組、爐石組、飛灰組、爐灰組分別於 87、140、73、126 天鋼筋去鈍化，OPC 組、爐石組、飛灰組、爐灰組分別於 112、154、84、140 天達到中度腐蝕。

表 4-2 水膠比 0.45 之腐蝕電流密度試驗結果( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

配比名稱	045OPC		045S40		045F20		045SF30	
試驗天數	對照組	實驗組	對照組	實驗組	對照組	實驗組	對照組	實驗組
0	0.05	0.09	0.14	0.12	0.05	0.11	0.16	0.09
14	0.04	0.05	0.15	0.14	0.05	0.05	0.09	0.16
28	0.07	0.09	0.22	0.19	0.06	0.07	0.15	0.19
42	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.07
56	0.06	0.05	0.05	0.04	0.06	0.04	0.07	0.08
70	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
84	0.04	0.05	0.05	0.06	0.04	0.06	0.04	0.05
98	0.04	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06
112	0.06	0.05	0.04	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05
126	0.06	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.09	0.05
140	0.07	0.08	0.04	0.04	0.09	0.09	0.04	0.06
154	0.05	0.09	0.06	0.07	0.02	0.08	0.05	0.07

表 4-3 水膠比 0.55 之腐蝕電流密度試驗結果( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

配比名稱	055OPC		055S40		055F20		055SF30	
試驗天數	對照組	實驗組	對照組	實驗組	對照組	實驗組	對照組	實驗組
0	0.04	0.06	0.19	0.22	0.06	0.07	0.15	0.16
14	0.05	0.07	0.21	0.20	0.06	0.04	0.13	0.15
28	0.06	0.08	0.20	0.23	0.08	0.05	0.21	0.13
42	0.06	0.06	0.04	0.06	0.05	0.06	0.09	0.05
56	0.02	0.04	0.06	0.04	0.03	0.06	0.06	0.04
70	0.07	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05
84	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.08	0.05	0.05
98	0.04	0.10	0.07	0.07	0.04	0.18	0.05	0.07
112	0.05	0.29	0.05	0.08	0.06	0.53	0.06	0.06
126	0.05	0.51	0.03	0.06			0.05	0.06
140			0.05	0.08			0.05	0.05
154			0.06	0.07			0.07	0.06

表 4-4 水膠比 0.65 之腐蝕電流密度試驗結果( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

配比名稱	065OPC		065S40		065F20		065SF30	
試驗天數	對照組	實驗組	對照組	實驗組	對照組	實驗組	對照組	實驗組
0	0.05	0.05	0.16	0.16	0.05	0.05	0.12	0.13
14	0.05	0.05	0.22	0.20	0.02	0.04	0.15	0.15
28	0.05	0.06	0.20	0.22	0.05	0.04	0.12	0.14
42	0.01	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05	0.08	0.05
56	0.05	0.06	0.03	0.05	0.06	0.04	0.03	0.05
70	0.06	0.05	0.03	0.07	0.05	0.10	0.05	0.04
84	0.05	0.08	0.04	0.05	0.05	0.52	0.04	0.05
98	0.06	0.18	0.05	0.05			0.05	0.06
112	0.05	0.51	0.06	0.05			0.07	0.08
126			0.07	0.06			0.05	0.13
140			0.05	0.11			0.03	0.52
154			0.06	0.51				

### 4.3. 氯離子含量試驗結果與分析

本研究設定擴散係數分析的時間為養護 28 天再經過 3 天預飽和後，貯鹽試驗進行 28、91 天及腐蝕電流密度達到  $0.1$ 、 $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$  時破壞試體，分層磨粉後採用酸、水溶法製作樣本，並以自動電為滴定儀量測氯離子含量。

#### 4.3.1. 貯驗試驗 28 天之氯離子含量試驗結果

試驗結果依水膠比區分，水溶法試驗結果如表 4-5、表 4-6、表 4-7，酸溶法試驗結果如表 4-8、表 4-9、表 4-10，混凝土齡期為 59 天，將每組配比各取三個試體，量測之氯離子濃度透過擴散方程式回歸擴散係數及表面氯離子濃度，由於第三層的濃度非常小，容易造成資料奇異點，因此在回歸參數時以第一層和第二層之氯離子濃度為主。求得各配比的擴散係數及表面氯離子濃度後，利用擴散方程式模擬混凝土內氯離子含量的分布情形，如圖 4-1~圖 4-12。



#### 4.3.2. 貯驗試驗 91 天之氯離子含量試驗結果

試驗結果依水膠比區分，水溶法試驗結果如表 4-11、表 4-12、表 4-13，酸溶法試驗結果如表 4-14、表 4-15、表 4-16，混凝土齡期為 122 天，將每組配比各取兩個試體，試驗測得的氯離子濃度透過代表擴散行為的誤差方程式回歸擴散係數及表面氯離子濃度，回歸方式以第一層與第二、三層作回歸分析擴散係數與表面氯離子濃度。求得各配比的擴散係數及表面氯離子濃度後，再利用擴散方程式模擬混凝土內氯離子含量在不同深度的分布情形，如圖 4-13 至圖 4-24。

#### 4.3.3. 腐蝕電流密度為 $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之氯離子含量試驗結果

水溶法試驗結果如表 4-17，酸溶法試驗結果如表 4-18，將每組配比各取兩個試體，試驗測得的氯離子濃度透過代表擴散行為的誤差方程式回歸擴散係數及表面氯離子濃度，回歸的方式以第一層與第二、三層作回歸分析擴散係數與表面氯離子濃度。於第三層量測的實驗值為接觸鋼筋頂端的氯離子濃度，即為本研究目的中促使鋼筋去鈍化之臨界氯離子濃度。

#### 4.3.4. 腐蝕電流密度為 $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之氯離子含量試驗結果

水溶法試驗結果如表 4-19，酸溶法試驗結果如表 4-20，將每組配比各取兩個試體，試驗測得的氯離子濃度透過代表擴散行為的誤差方程式回歸擴散係數及表面氯離子濃度，回歸的方式以第一層與第二、三層作回歸分析擴散係數與表面氯離子濃度。於第三層量測的實驗值為接觸鋼筋頂端的氯離子濃度，即為本研究目的中促使鋼筋進入中度腐蝕之臨界氯離子濃度。

#### 4.3.5. 59 天擴散係數分析

經由擴散方程式分析之擴散係數如表 4-5 至表 4-10，自由氯離子之擴散係數依不同配比如圖 4-25，總氯離子之擴散係數依不同配比如圖 4-26，在相同卜作嵐取代率下，孔隙結構隨著水膠比越高，毛細孔隙越多，對於混凝土的滲透性越



明顯，從本試驗結果可以發現，不論任何一種卜作嵐取代之配比，擴散係數皆隨著水膠比升高而增加。

分析四種卜作嵐取代率的混凝土，飛灰、爐石以往被認為能夠大幅提高緻密性，試體經過養護後，對於齡期 59 天的混凝土，飛灰組的擴散係數最大，原因是飛灰在早齡期各孔徑大小的孔隙率皆較一般混凝土高，氯鹽在混凝土中有較多的路徑入侵至混凝土內部，且低養護溫度導致混凝土孔隙結構發展緩慢，使擴散係數與一般混凝土相近甚至更高；爐石組在 59 天齡期有效降低擴散係數，在早期爐石和混凝土中的氫氧化鈣反應，產生膠體填補混凝土孔隙，有較佳的緻密程度；而爐灰混凝土在相同水膠比下和爐石混凝土的表現相近。依本研究的試驗結果，短齡期的養護對爐石已經能夠發揮緻密的作用，但是對於飛灰混凝土 59 天齡期的孔隙尚未發展完整，有較大的擴散係數。然而爐灰混凝土中，飛灰使混凝土的毛細孔隙增加，而爐石經由卜作嵐反應產生的膠體有效地填補毛細孔隙，使孔隙之不連續性增加，擴散係數因而降低。

#### 4.3.6. 122 天擴散係數分析

經由擴散方程式分析之擴散係數如表 4-11 至表 4-16，自由氯離子之擴散係數依不同配比如圖 4-27，總氯離子之擴散係數依不同配比如圖 4-28，與文獻[12]比較如表 4-21。越高的水膠比其毛細孔隙體積越多，擴散係數越大。爐石混凝土在早齡期即能抵抗氯離子入滲至混凝土內部，到 122 天齡期依然保持低擴散係數；飛灰混凝土的擴散係數與 59 天齡期比較，原本較高的擴散係數在 122 天齡期時接近甚至低於一般混凝土，代表其水密性和一般混凝土相近或是更優越；爐灰混凝土在 122 天齡期仍具有和爐石混凝土相近的擴散係數，對於抵抗氯離子的效果佳。文獻[12]與本研究在相同的養護齡期和試驗環境進行貯鹽試驗，在試驗結果有相同的趨勢。

表 4-5 水膠比 0.45 之 28 天貯鹽試驗自由氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub> (%)	C <sub>1.0</sub> (%)	C <sub>2.0</sub> (%)	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (%)
045OPC	0.501	0.046	0.011	5.669	0.713
	0.522	0.027	0.011		
	0.473	0.045	0.016		
045S40	0.518	0.021	0.003	4.184	0.777
	0.526	0.016	0.003		
	0.483	0.023	0.00187		
045F20	0.642	0.127	0.016	10.637	0.819
	0.631	0.133	0.013		
	0.643	0.141	0.019		
045SF30	0.776	0.062	0.017	5.645	1.161
	0.817	0.058	0.014		
	0.852	0.075	0.013		

表 4-6 水膠比 0.55 之 28 天貯鹽試驗自由氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub> (%)	C <sub>1.0</sub> (%)	C <sub>2.0</sub> (%)	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (%)
055OPC	0.527	0.196	0.024	13.635	0.6973
	0.562	0.173	0.018		
	0.628	0.172	0.018		
055S40	0.538	0.062	0.006	6.9171	0.7771
	0.586	0.050	0.005		
	0.550	0.063	0.008		
055F20	0.638	0.218	0.018	20.3309	0.7990
	0.708	0.235	0.025		
	0.664	0.247	0.029		
055SF30	0.830	0.016	0.016	7.9988	1.0975
	0.804	0.029	0.029		
	0.847	0.023	0.023		

表 4-7 水膠比 0.65 之 28 天貯鹽試驗自由氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub> (%)	C <sub>1.0</sub> (%)	C <sub>2.0</sub> (%)	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (%)
065OPC	0.572	0.203	0.037	22.763	0.666
	0.565	0.221	0.023		
	0.556	0.249	0.042		
065S40	0.494	0.131	0.013	14.669	0.671
	0.568	0.219	0.015		
	0.594	0.186	0.021		
065F20	0.637	0.298	0.059	23.424	0.788
	0.739	0.272	0.045		
	0.628	0.234	0.031		
065SF30	0.652	0.166	0.017	10.635	0.947
	0.790	0.135	0.013		
	0.765	0.151	0.013		

表 4-8 水膠比 0.45 之 28 天貯鹽試驗總氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub> (%)	C <sub>1.0</sub> (%)	C <sub>2.0</sub> (%)	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (%)
045OPC	0.558	0.056	0.013	5.951	0.762
	0.542	0.034	0.012		
	0.518	0.052	0.014		
045S40	0.691	0.040	0.003	4.827	0.996
	0.684	0.042	0.003		
	0.654	0.033	0.003		
045F20	0.769	0.144	0.018	10.178	0.976
	0.737	0.297	0.018		
	0.763	0.150	0.023		
045SF30	0.776	0.062	0.018	5.955	1.283
	0.817	0.058	0.014		
	0.852	0.075	0.014		

表 4-9 水膠比 0.55 之 28 天貯鹽試驗總氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub> (%)	C <sub>1.0</sub> (%)	C <sub>2.0</sub> (%)	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (%)
055OPC	0.570	0.162	0.046	11.859	0.827
	0.672	0.152	0.027		
	0.697	0.140	0.055		
055S40	0.703	0.058	0.006	6.929	1.077
	0.811	0.062	0.005		
	0.741	0.050	0.008		
055F20	0.801	0.289	0.018	17.938	1.024
	0.911	0.312	0.018		
	0.835	0.265	0.023		
055SF30	1.068	0.018	0.018	8.642	1.231
	0.884	0.018	0.014		
	0.913	0.023	0.014		

表 4-10 水膠比 0.65 之 28 天貯鹽試驗總氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub>	C <sub>1.0</sub>	C <sub>2.0</sub>	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub>
065OPC	0.627	0.249	0.046	21.044	0.791
	0.661	0.219	0.027		
	0.709	0.290	0.055		
065S40	0.958	0.207	0.013	11.839	1.143
	0.904	0.208	0.017		
	0.850	0.221	0.016		
065F20	0.820	0.335	0.071	21.190	0.950
	0.813	0.296	0.049		
	0.771	0.289	0.039		
065SF30	0.832	0.188	0.020	10.038	1.098
	0.878	0.132	0.014		
	0.833	0.172	0.015		

表 4-11 水膠比 0.45 之 91 天貯鹽試驗自由氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub> (%)	C <sub>1.0</sub> (%)	C <sub>2.0</sub> (%)	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (%)
045OPC	1.019	0.279	0.013	4.163	1.316
	1.095	0.284	0.018		
045S40	1.062	0.153	0.003	2.847	1.459
	1.166	0.234	0.004		
045F20	1.148	0.353	0.044	5.469	1.484
	1.311	0.472	0.045		
045SF30	1.295	0.278	0.019	4.084	1.643
	1.341	0.410	0.020		

表 4-12 水膠比 0.55 之 91 天貯鹽試驗自由氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub> (%)	C <sub>1.0</sub> (%)	C <sub>2.0</sub> (%)	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (%)
055OPC	1.108	0.418	0.116	8.966	1.284
	1.113	0.602	0.117		
055S40	0.928	0.219	0.019	3.664	1.236
	1.027	0.239	0.021		
055F20	1.109	0.458	0.147	10.319	1.285
	1.138	0.646	0.149		
055SF30	1.224	0.381	0.030	4.758	1.557
	1.318	0.382	0.032		

表 4-13 水膠比 0.65 之 91 天貯鹽試驗自由氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub> (%)	C <sub>1.0</sub> (%)	C <sub>2.0</sub> (%)	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (%)
065OPC	0.991	0.566	0.261	17.156	1.185
	1.148	0.714	0.262		
065S40	1.032	0.443	0.034	8.021	1.230
	1.078	0.468	0.040		
065F20	1.020	0.590	0.242	13.647	1.204
	1.124	0.595	0.257		
065SF30	1.181	0.410	0.043	7.103	1.489
	1.348	0.607	0.049		

表 4-14 水膠比 0.45 之 91 天貯鹽試驗總氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub> (%)	C <sub>1.0</sub> (%)	C <sub>2.0</sub> (%)	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (%)
045OPC	1.137	0.295	0.015	4.034	1.442
	1.172	0.302	0.021		
045S40	1.316	0.147	0.003	2.794	1.766
	1.373	0.309	0.005		
045F20	1.319	0.397	0.063	5.978	1.656
	1.449	0.596	0.064		
045SF30	1.540	0.393	0.024	4.100	1.967
	1.616	0.435	0.025		

表 4-15 水膠比 0.55 之 91 天貯鹽試驗總氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub> (%)	C <sub>1.0</sub> (%)	C <sub>2.0</sub> (%)	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (%)
055OPC	1.076	0.515	0.132	9.536	1.324
	1.227	0.575	0.134		
055S40	1.159	0.193	0.021	3.588	1.591
	1.351	0.382	0.023		
055F20	1.355	0.570	0.161	9.976	1.580
	1.402	0.764	0.172		
055SF30	1.449	0.461	0.040	4.887	1.891
	1.647	0.490	0.042		

表 4-16 水膠比 0.65 之 91 天貯鹽試驗總氯離子含量

配比	C <sub>0.2</sub> (%)	C <sub>1.0</sub> (%)	C <sub>2.0</sub> (%)	D(10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (%)
065OPC	1.080	0.680	0.269	16.254	1.294
	1.249	0.690	0.270		
065S40	1.246	0.526	0.053	8.029	1.541
	1.398	0.617	0.053		
065F20	1.249	0.692	0.278	13.688	1.455
	1.343	0.742	0.288		
065SF30	1.479	0.528	0.063	7.053	1.835
	1.634	0.718	0.063		

表 4-17 腐蝕電流密度為  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  之自由氯離子含量

配比	天數	$C_{0.2}(\%)$	$C_{1.0}(\%)$	$C_{2.0}(\%)$	$D(10^{-8}\text{cm}^2/\text{s})$	$C_0(\%)$
055OPC	98	1.186	0.608	0.204	9.052	1.340
		1.149	0.515	0.183		
055F20	91	1.176	0.607	0.149	10.502	1.307
		1.114	0.534	0.123		
065OPC	87	1.067	0.607	0.233	16.043	1.135
		0.971	0.573	0.210		
065S40	140	1.370	0.738	0.073	7.200	1.535
		1.330	0.639	0.071		
065F20	73	1.060	0.580	0.134	16.394	1.158
		0.999	0.547	0.130		
065SF30	126	1.332	0.648	0.089	6.799	1.503
		1.282	0.588	0.082		

表 4-18 腐蝕電流密度為  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  之總氯離子含量

配比	天數	$C_{0.2}(\%)$	$C_{1.0}(\%)$	$C_{2.0}(\%)$	$D(10^{-8}\text{cm}^2/\text{s})$	$C_0(\%)$
055OPC	98	1.363	0.730	0.247	8.222	1.514
		1.307	0.689	0.213		
055F20	91	1.271	0.678	0.173	9.023	1.568
		1.193	0.638	0.136		
065OPC	87	1.142	0.720	0.284	15.745	1.294
		1.042	0.634	0.229		
065S40	140	1.468	0.806	0.085	7.012	1.743
		1.418	0.768	0.083		
065F20	73	1.105	0.623	0.168	16.669	1.308
		1.051	0.606	0.159		
065SF30	126	1.472	0.699	0.103	6.401	1.714
		1.386	0.651	0.095		

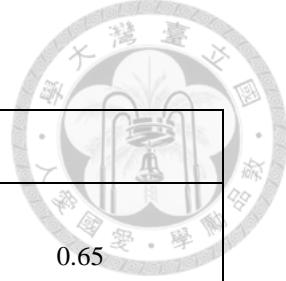
表 4-19 腐蝕電流密度為  $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$  之自由氯離子含量

配比	天數	$C_{0.2}(\%)$	$C_{1.0}(\%)$	$C_{2.0}(\%)$	$D(10^{-8}\text{cm}^2/\text{s})$	$C_0(\%)$
055OPC	126	1.315	0.631	0.281	8.832	1.508
		1.305	0.570	0.273		
055F20	112	1.365	0.667	0.190	10.042	1.391
		1.354	0.592	0.168		
065OPC	112	1.179	0.668	0.291	15.398	1.203
		1.141	0.667	0.250		
065S40	151	1.569	0.792	0.093	7.862	1.623
		1.491	0.750	0.099		
065F20	84	1.181	0.677	0.237	15.880	1.204
		1.149	0.605	0.232		
065SF30	140	1.512	0.690	0.175	6.102	1.644
		1.454	0.670	0.165		

表 4-20 腐蝕電流密度為  $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$  之總氯離子含量

配比	天數	$C_{0.2}(\%)$	$C_{1.0}(\%)$	$C_{2.0}(\%)$	$D(10^{-8}\text{cm}^2/\text{s})$	$C_0(\%)$
055OPC	126	1.538	0.812	0.294	8.298	1.704
		1.466	0.745	0.285		
055F20	112	1.500	0.758	0.219	8.954	1.669
		1.434	0.735	0.198		
065OPC	112	1.252	0.792	0.316	15.210	1.372
		1.236	0.744	0.286		
065S40	151	1.679	0.892	0.134	7.566	1.842
		1.589	0.864	0.123		
065F20	84	1.236	0.722	0.291	15.634	1.363
		1.202	0.660	0.275		
065SF30	140	1.652	0.804	0.199	6.003	1.874
		1.603	0.721	0.195		

表 4-21 混凝土 122 齡期之擴散係數比較



		擴散係數 ( $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ )					
水膠比		0.45		0.55		0.65	
卜作嵐取代	水膠比	本研究	[12]	本研究	[12]	本研究	[12]
OPC	4.03	7.47	9.54	12.30	16.25	11.64	
S40	2.79	4.57	5.68	6.30	8.03	17.48	
F20	5.98	6.83	9.98	22.56	13.69	70.88	
SF30	4.10	6.72	4.89	10.12	7.05	34.56	

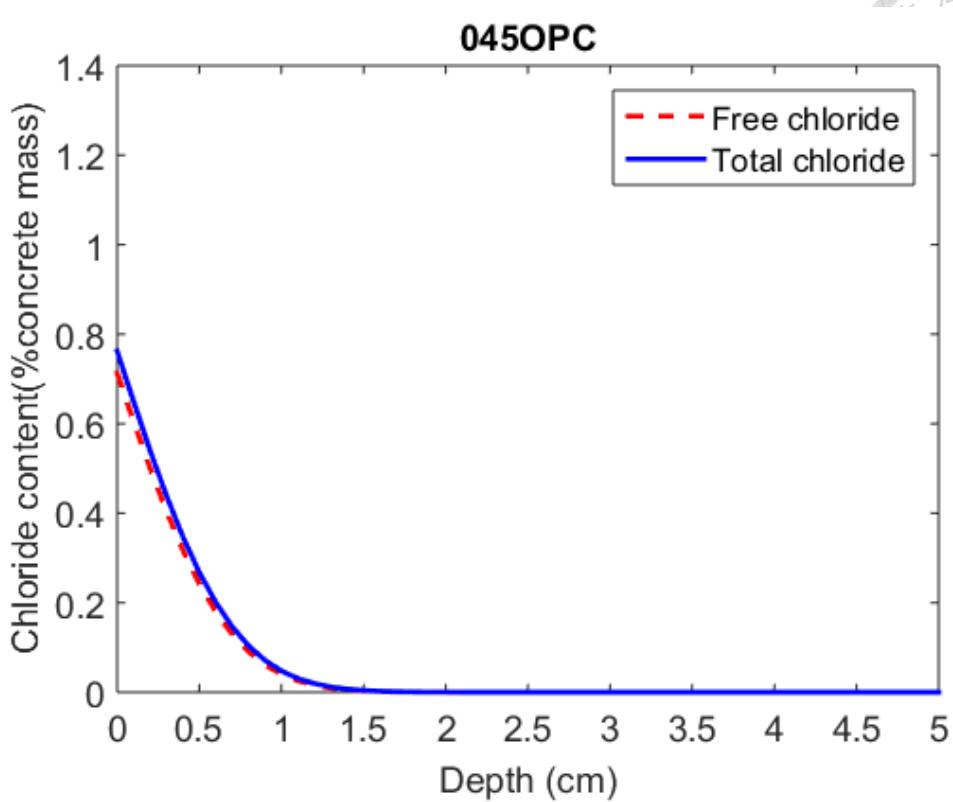


圖 4-1 045OPC 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

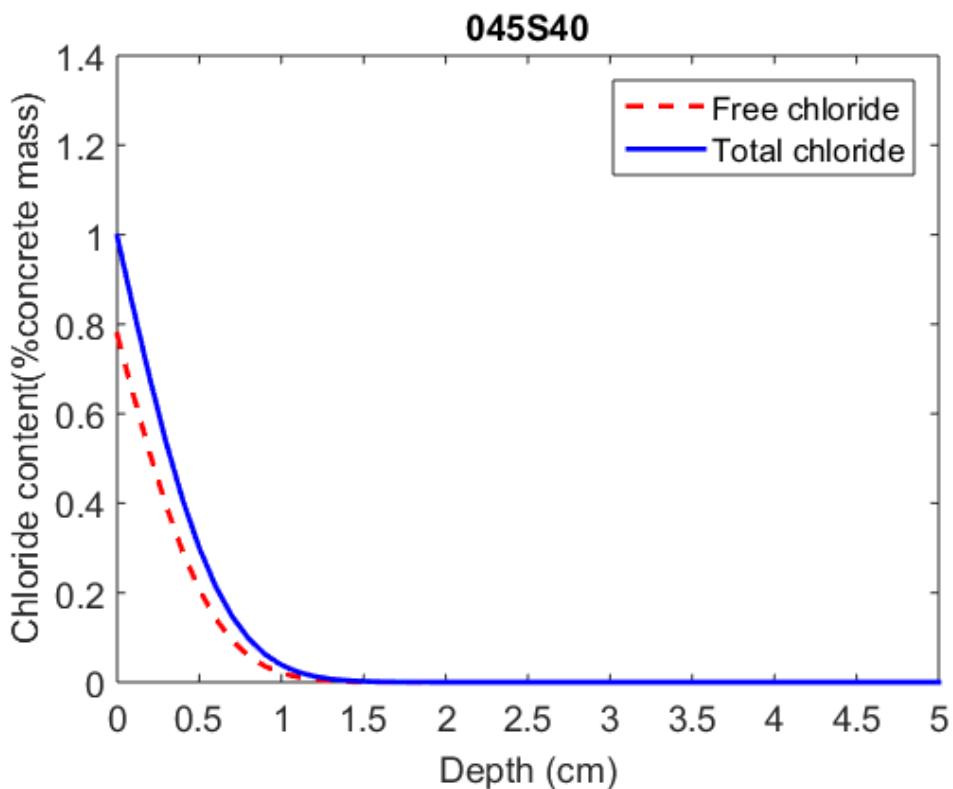


圖 4-2 045S40 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

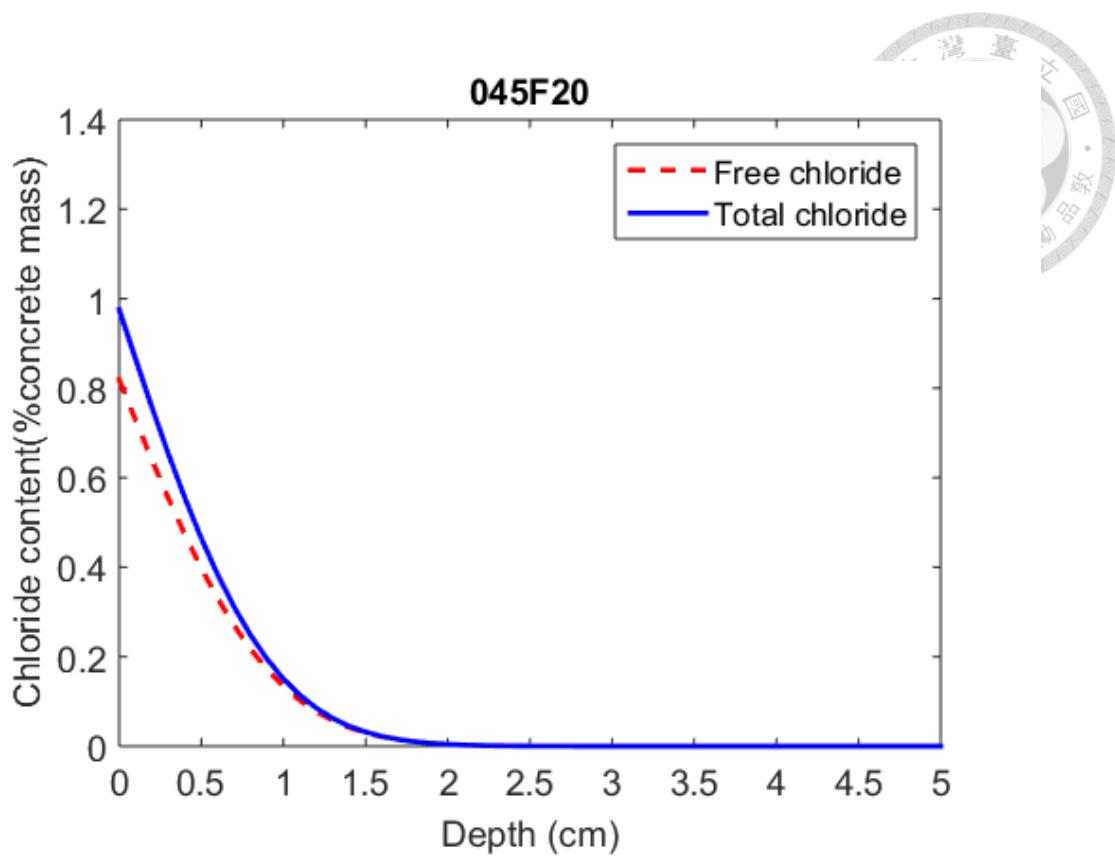


圖 4-3 045F20 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

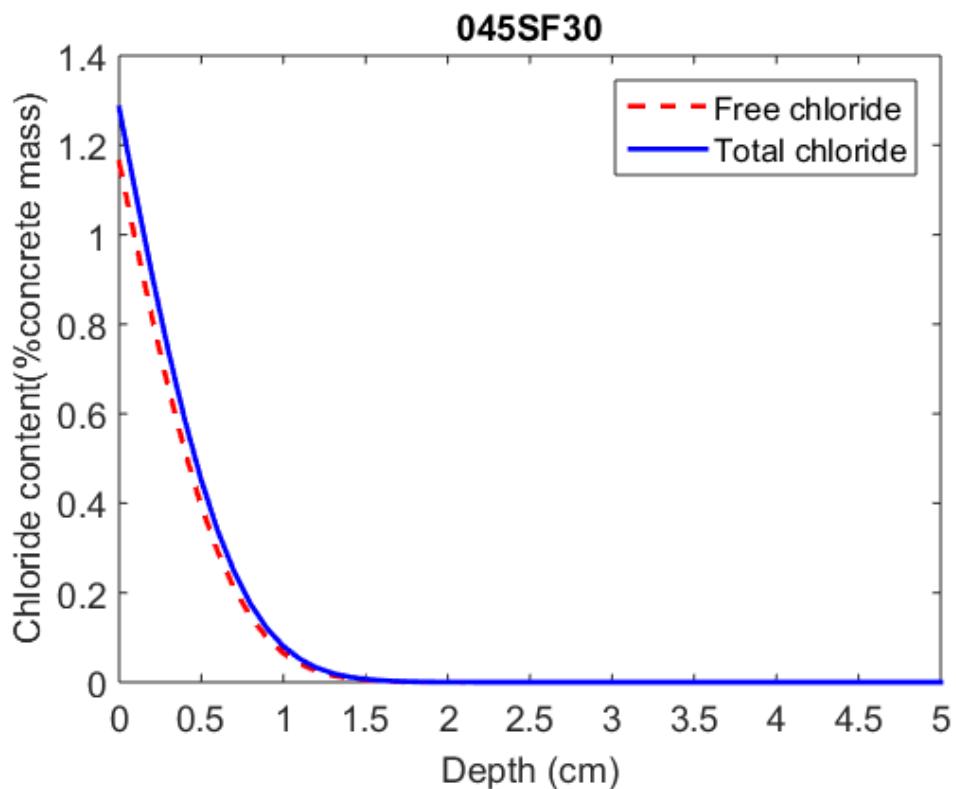


圖 4-4 045SF30 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

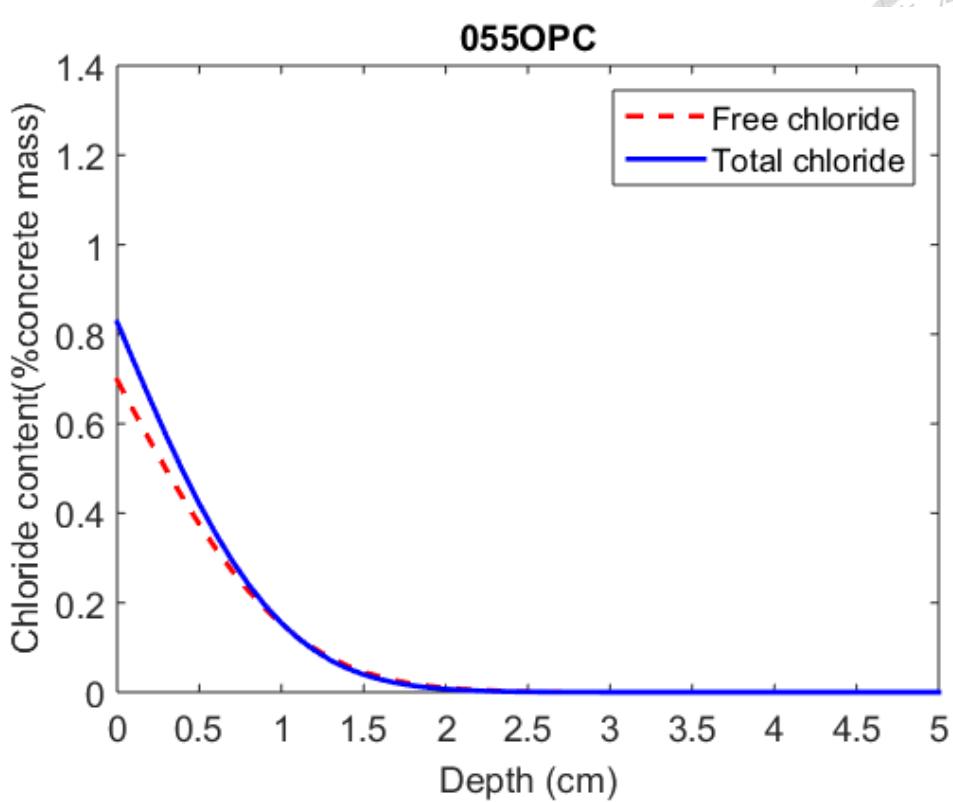


圖 4-5 055OPC 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

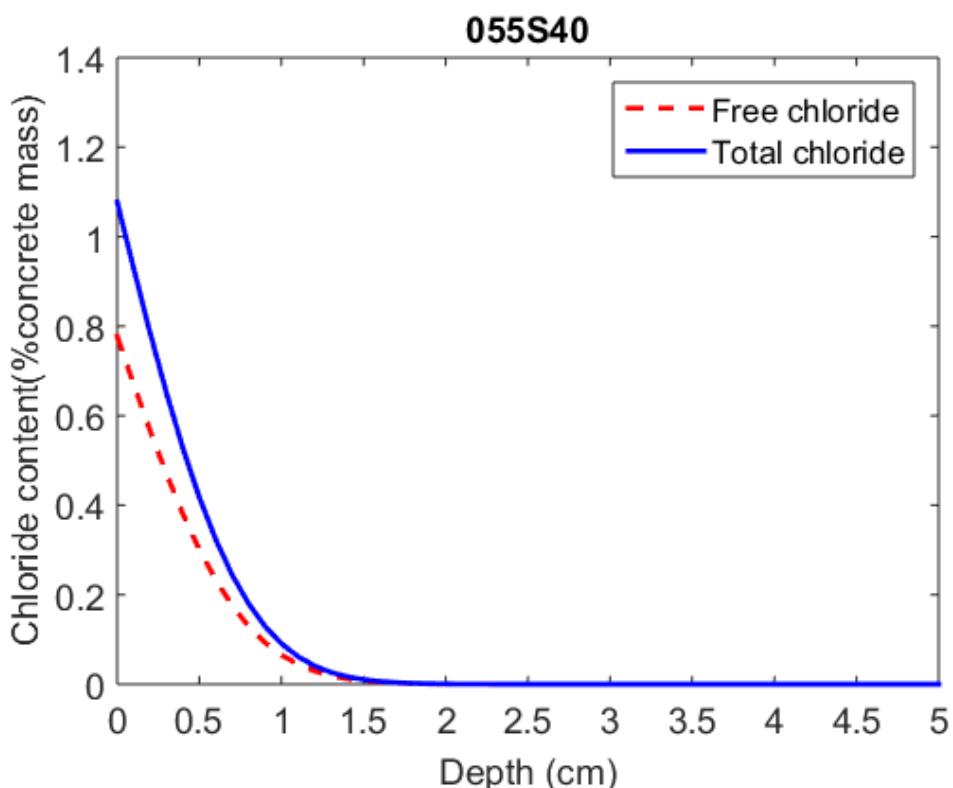


圖 4-6 055S40 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

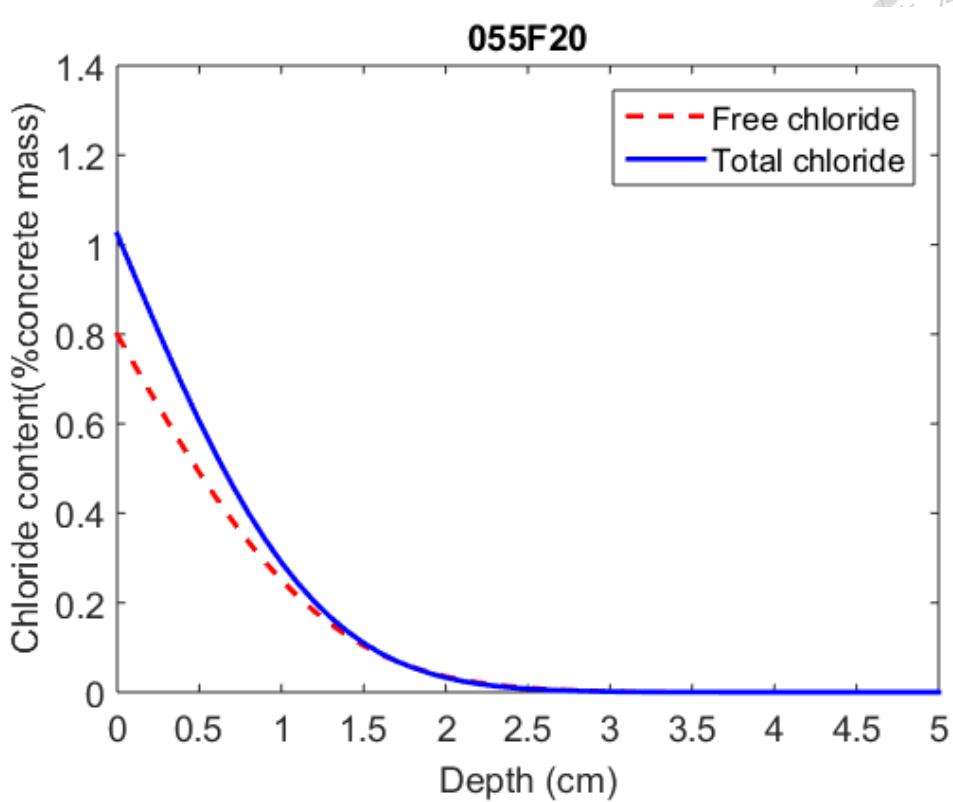


圖 4-7 055F20 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

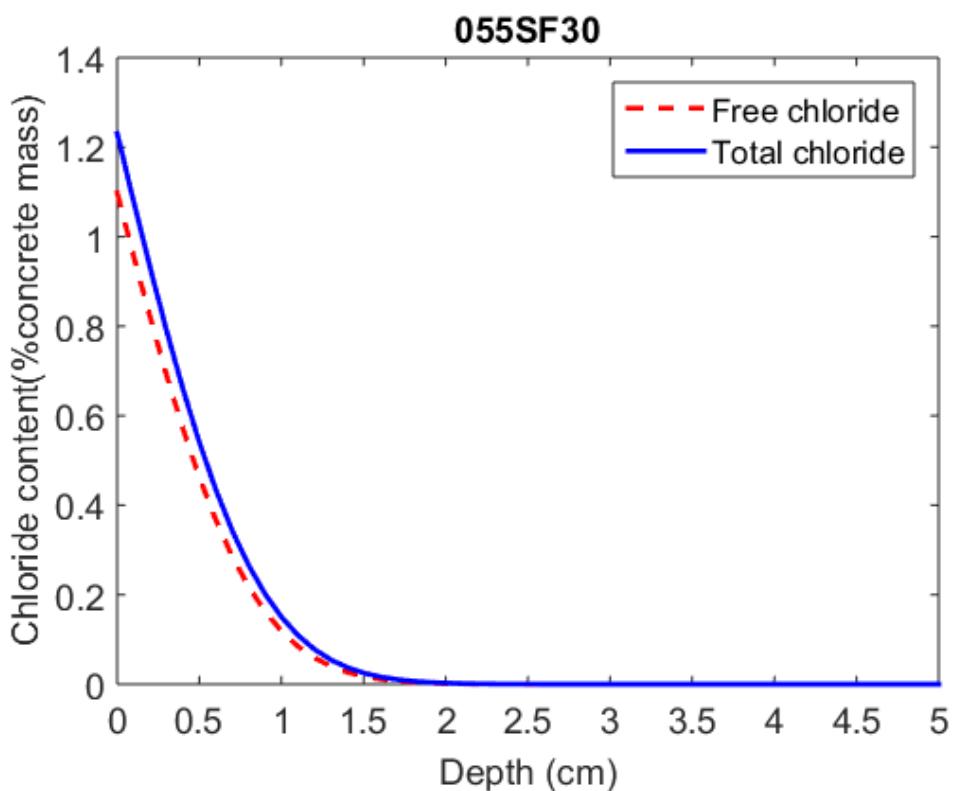


圖 4-8 055SF 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

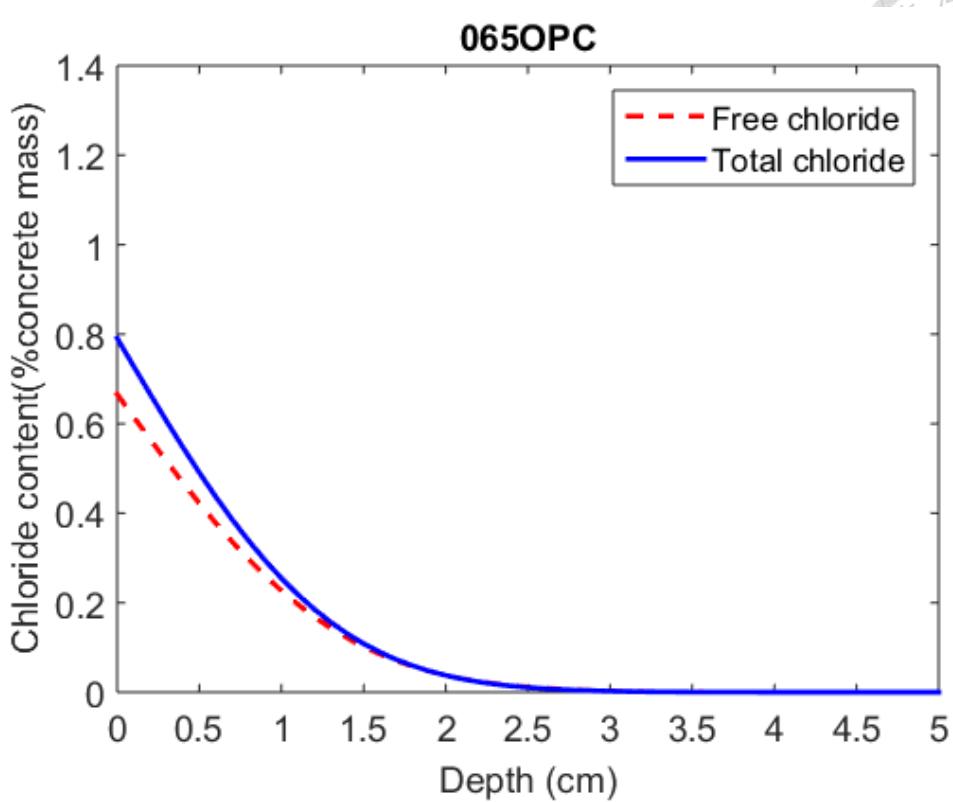


圖 4-9 065OPC 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

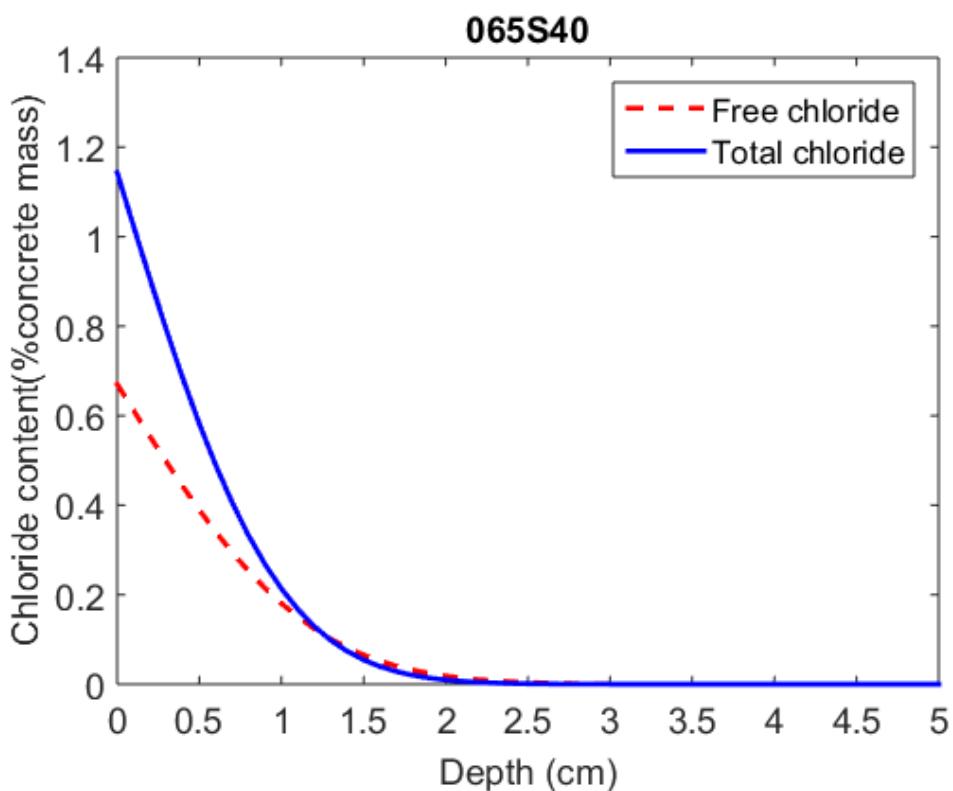


圖 4-10 065S 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

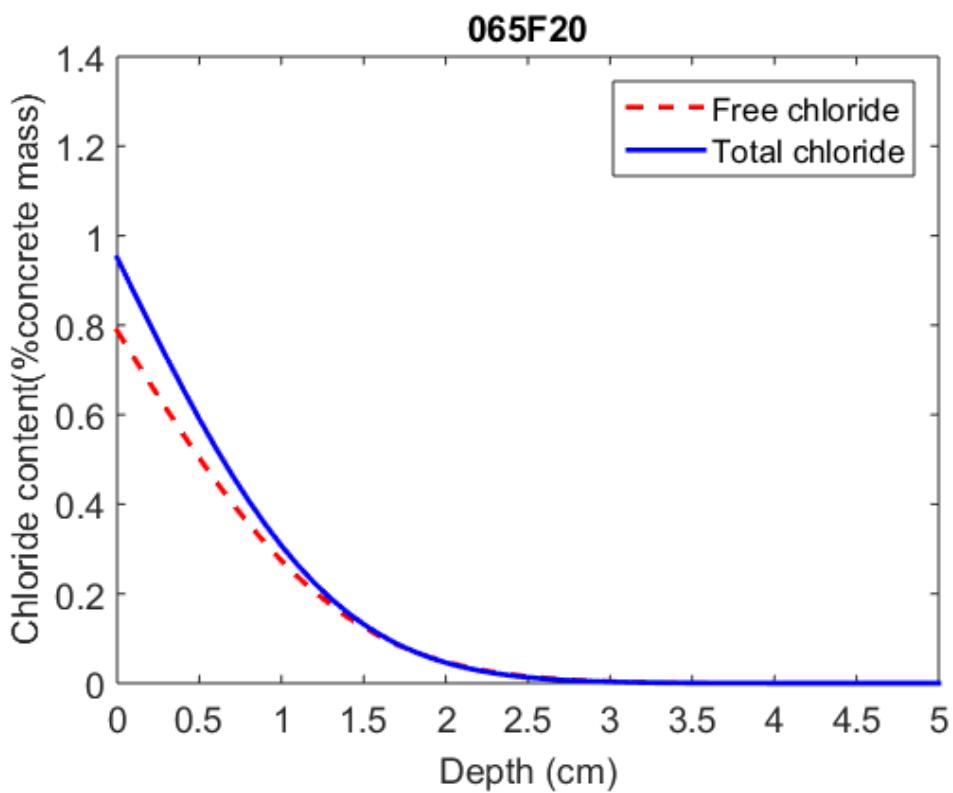


圖 4-11 065F 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

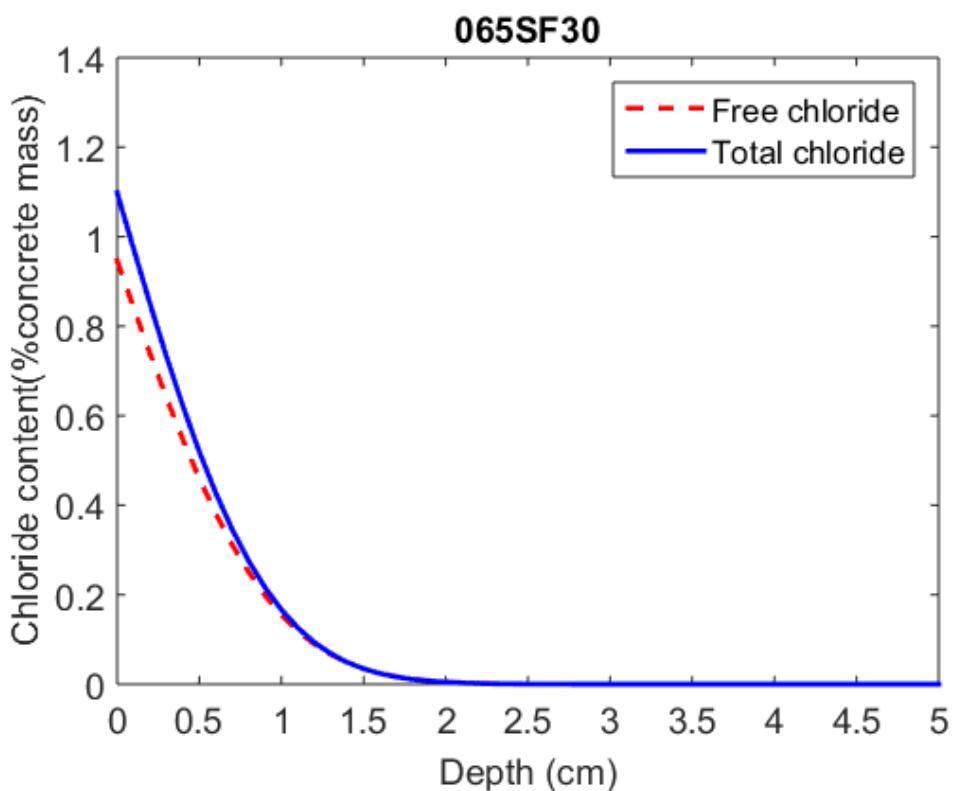


圖 4-12 065SF 之 28 天貯鹽試驗氯離子分布圖

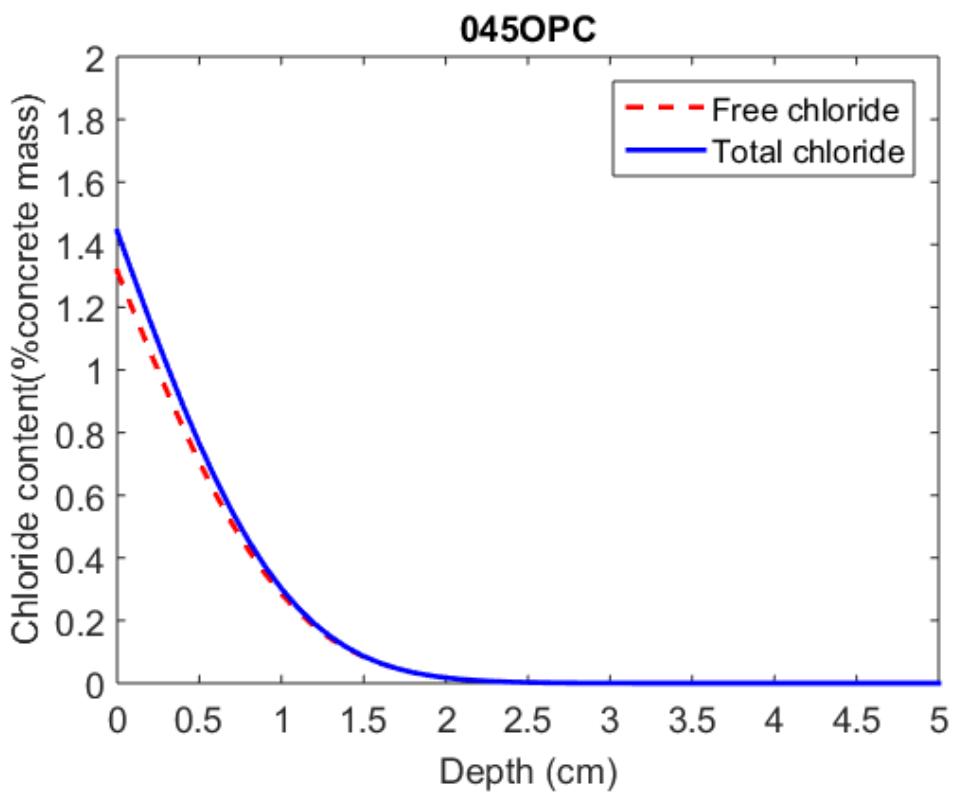


圖 4-13 045OPC 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

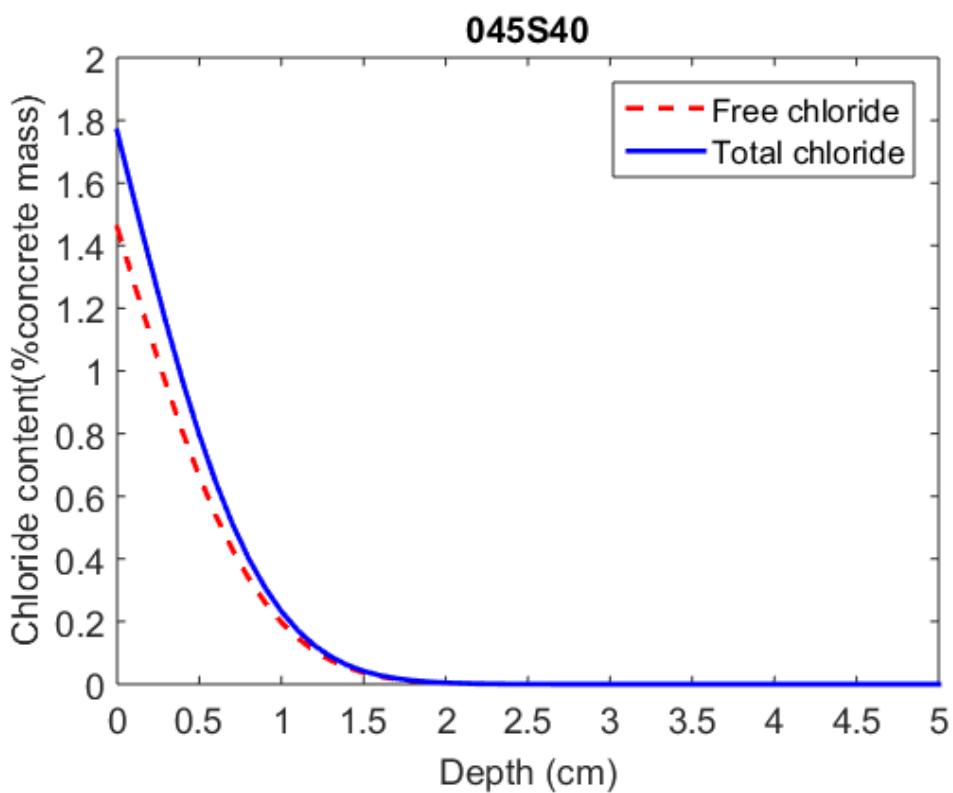


圖 4-14 045S 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

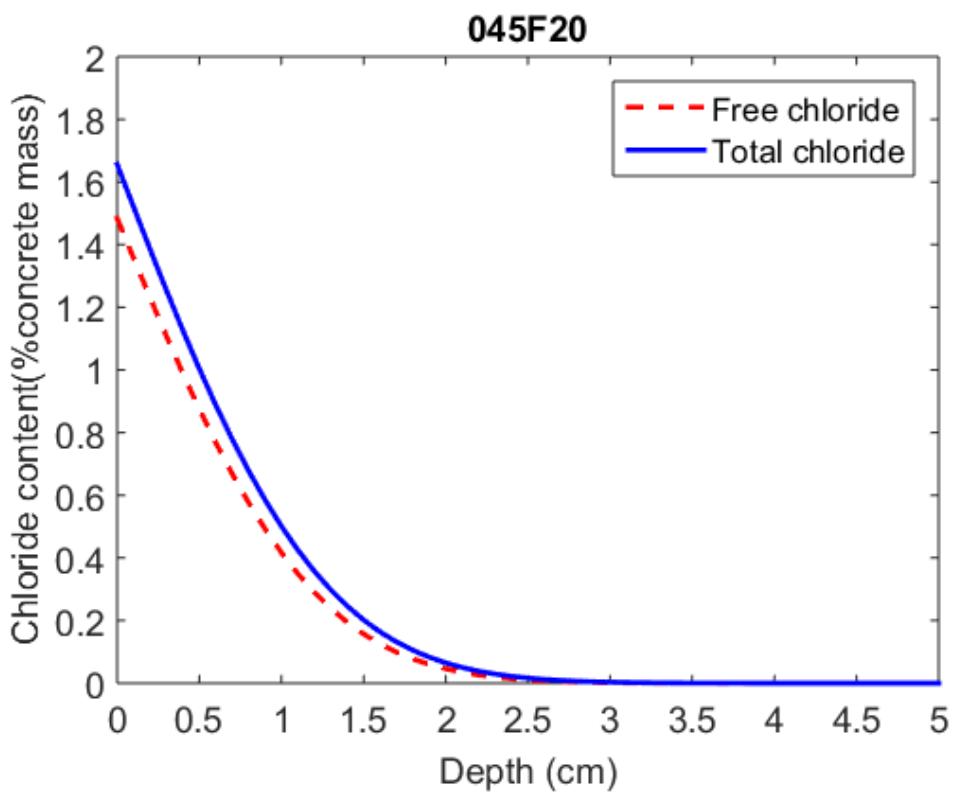


圖 4-15 045F 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

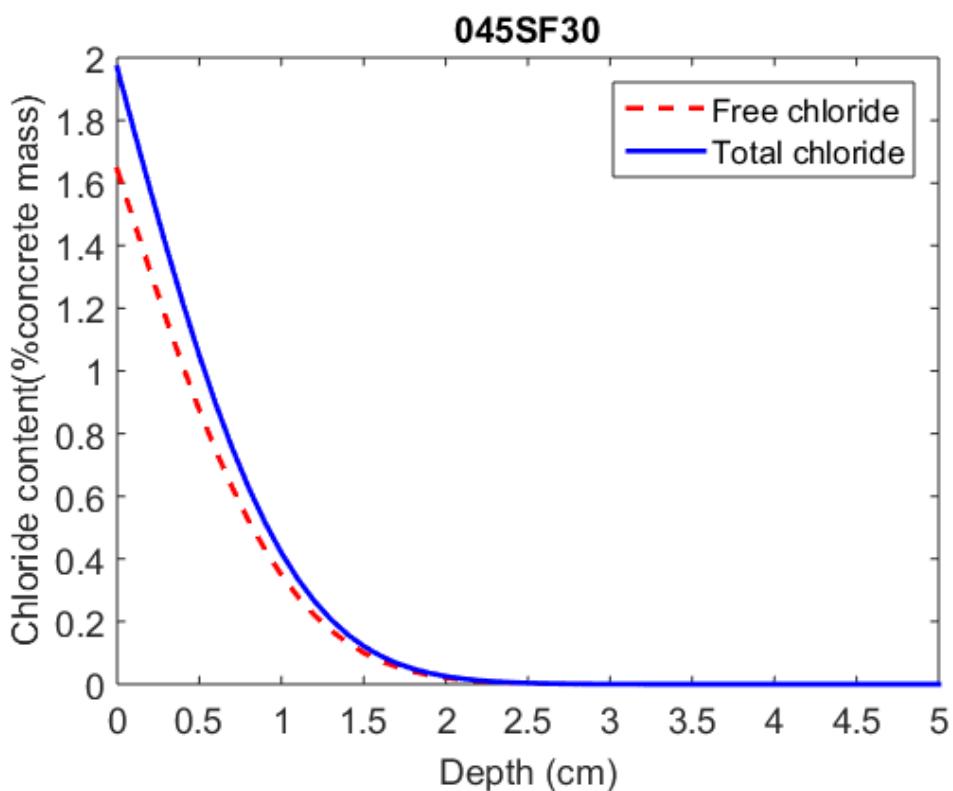


圖 4-16 045SF 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

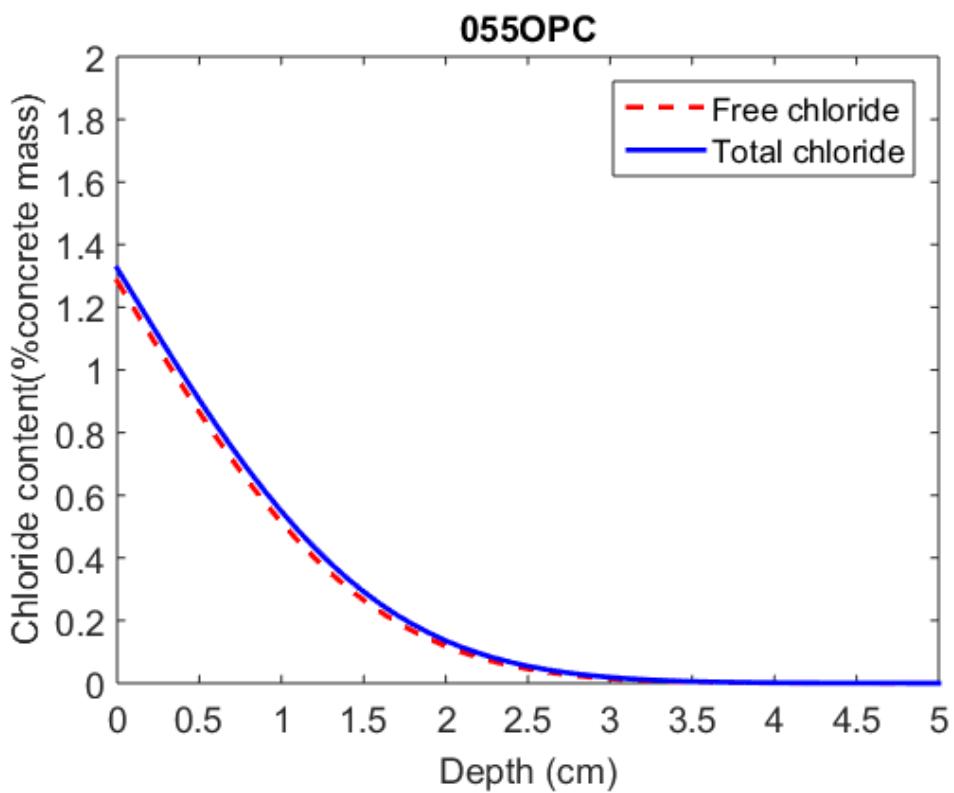


圖 4-17 055OPC 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

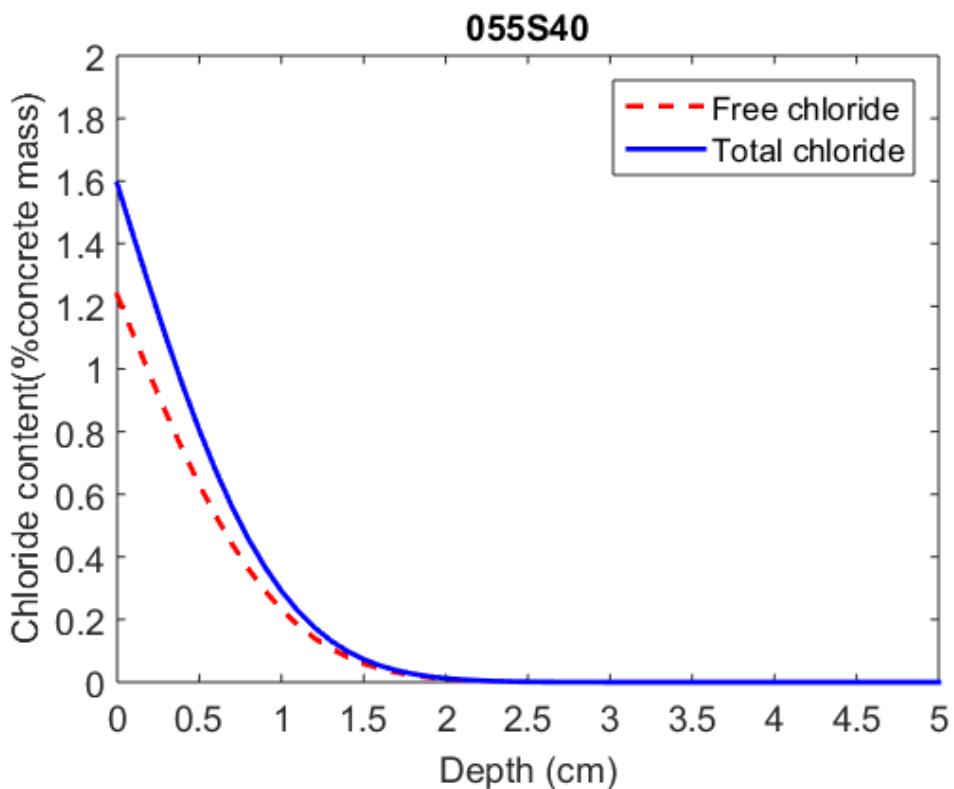


圖 4-18 055S 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

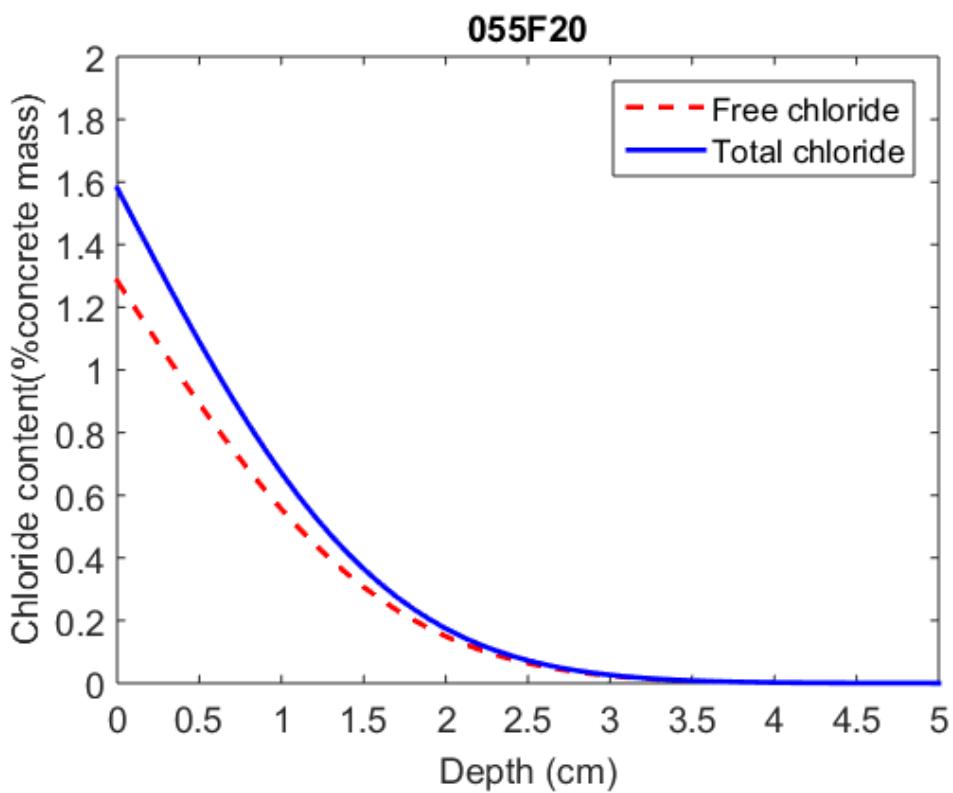


圖 4-19 055F 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

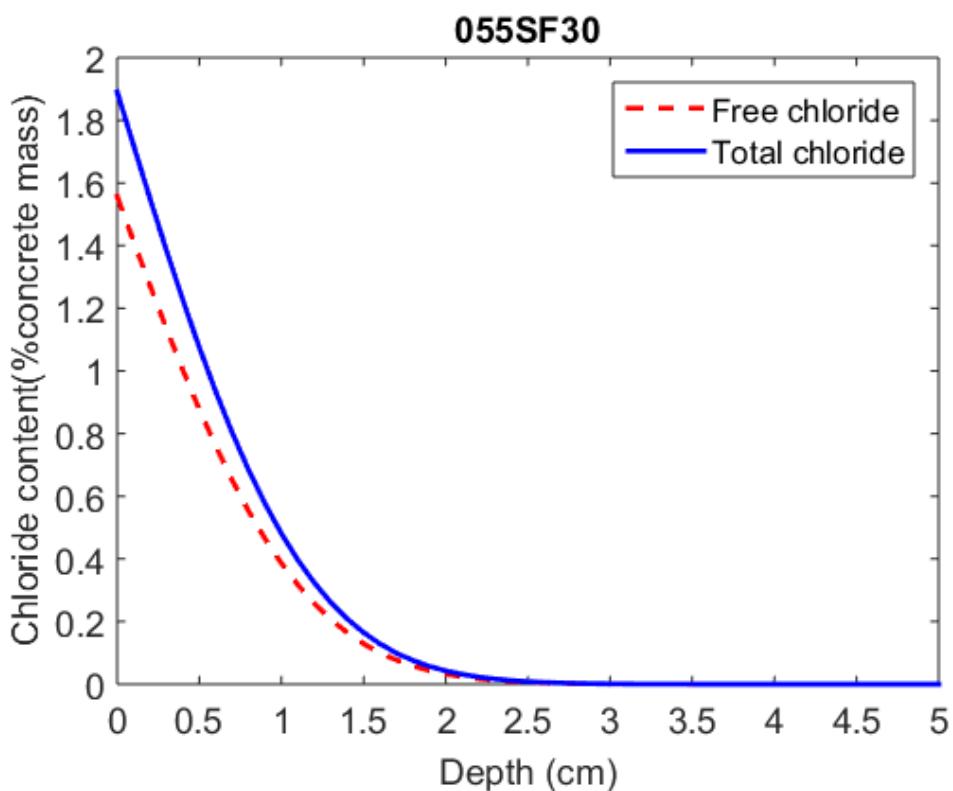


圖 4-20 055SF 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

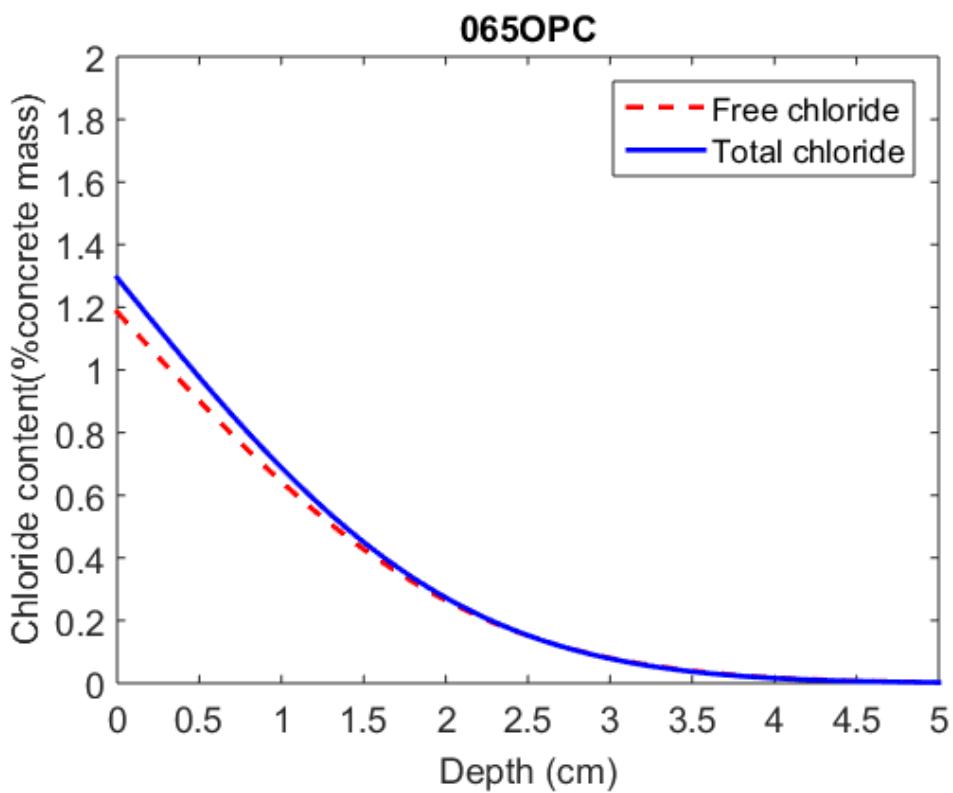


圖 4-21 065OPC 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

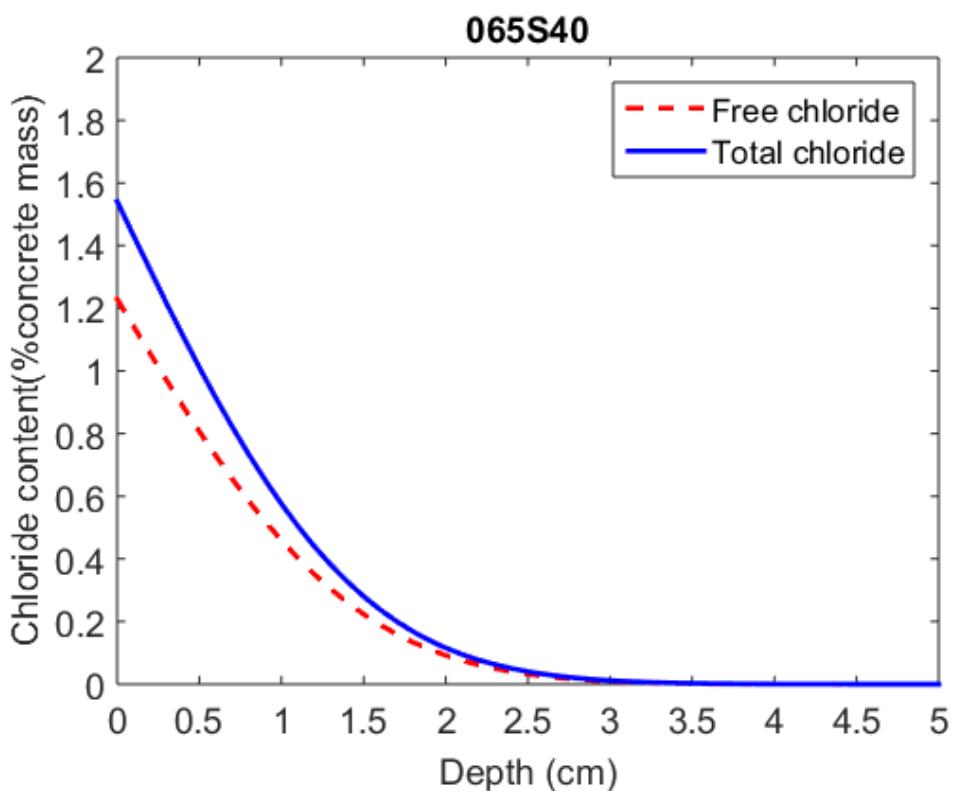


圖 4-22 065S 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

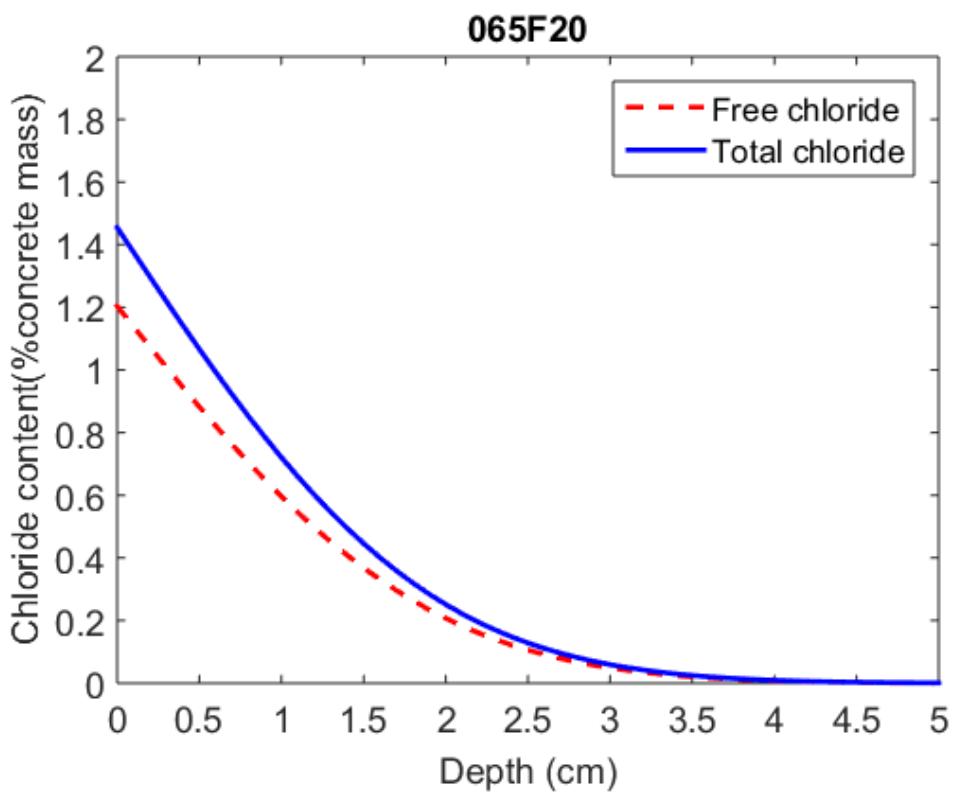


圖 4-23 065F 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

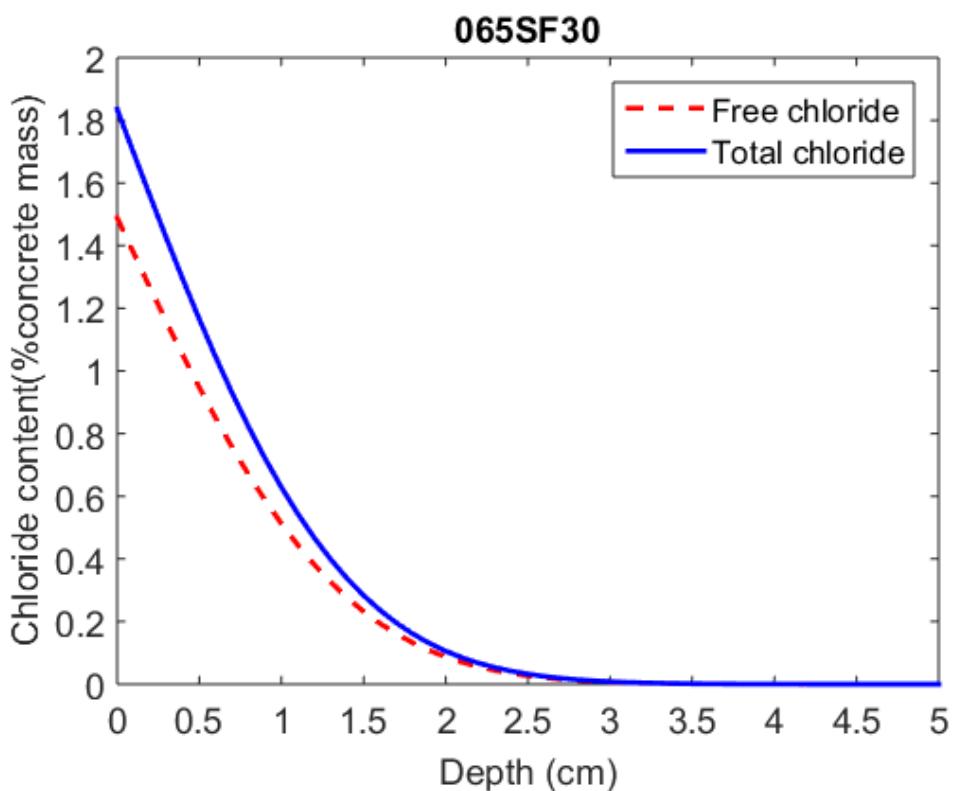


圖 4-24 065SF 之 91 天貯鹽試驗氯離子分布圖

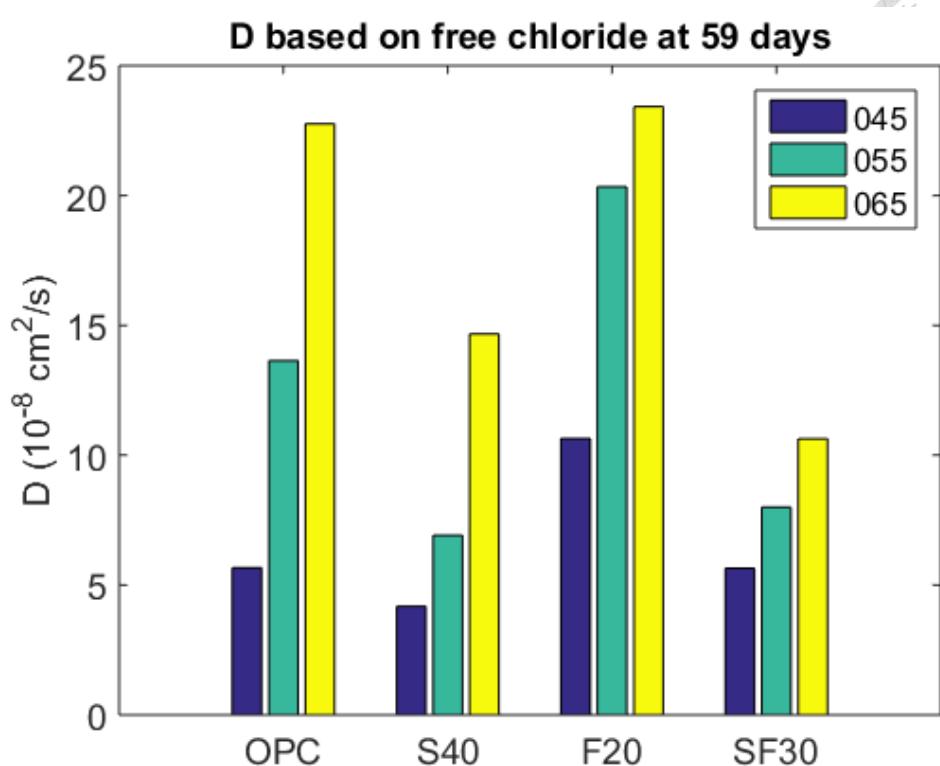


圖 4-25 混凝土 59 天齡期之自由氯離子擴散係數

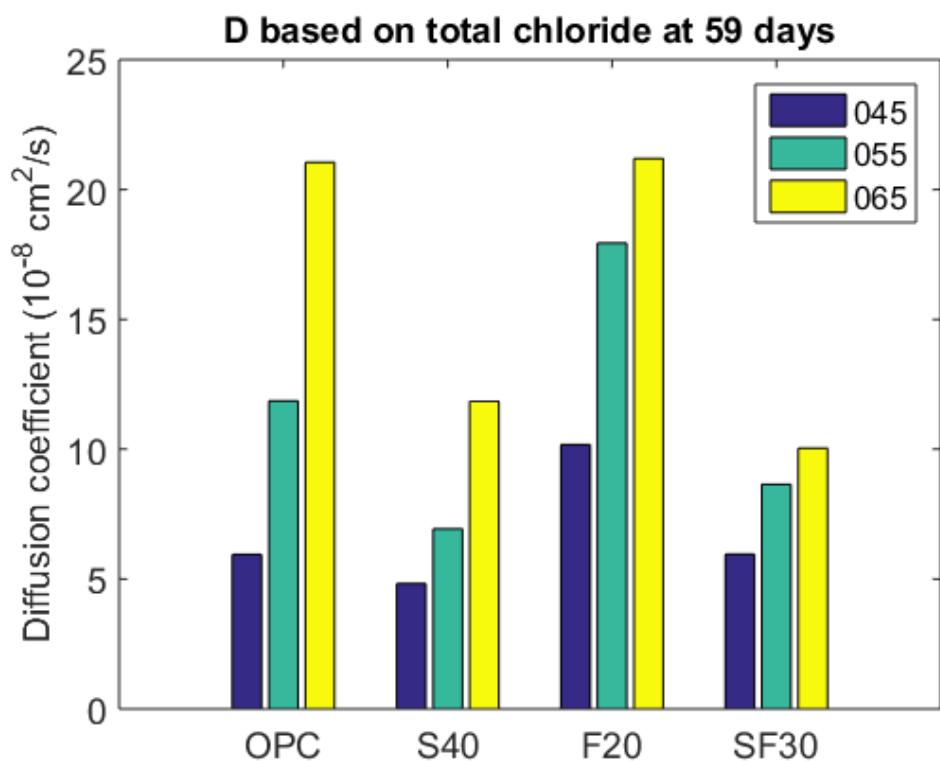


圖 4-26 混凝土 59 天齡期之總氯離子擴散係數

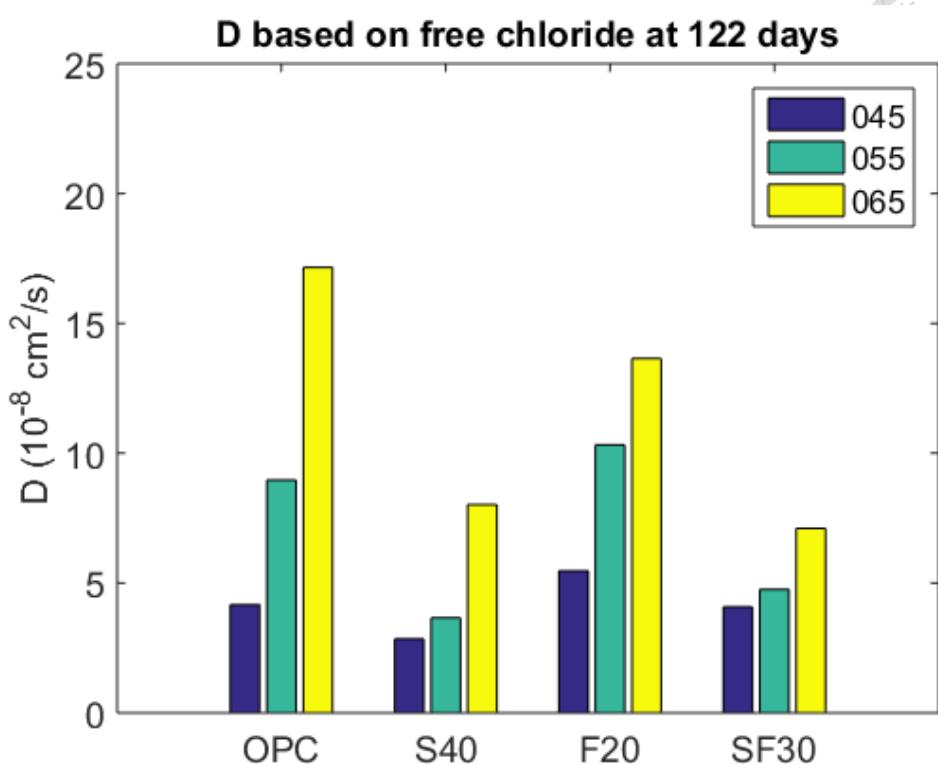


圖 4-27 混凝土 122 天齡期之自由氯離子擴散係數

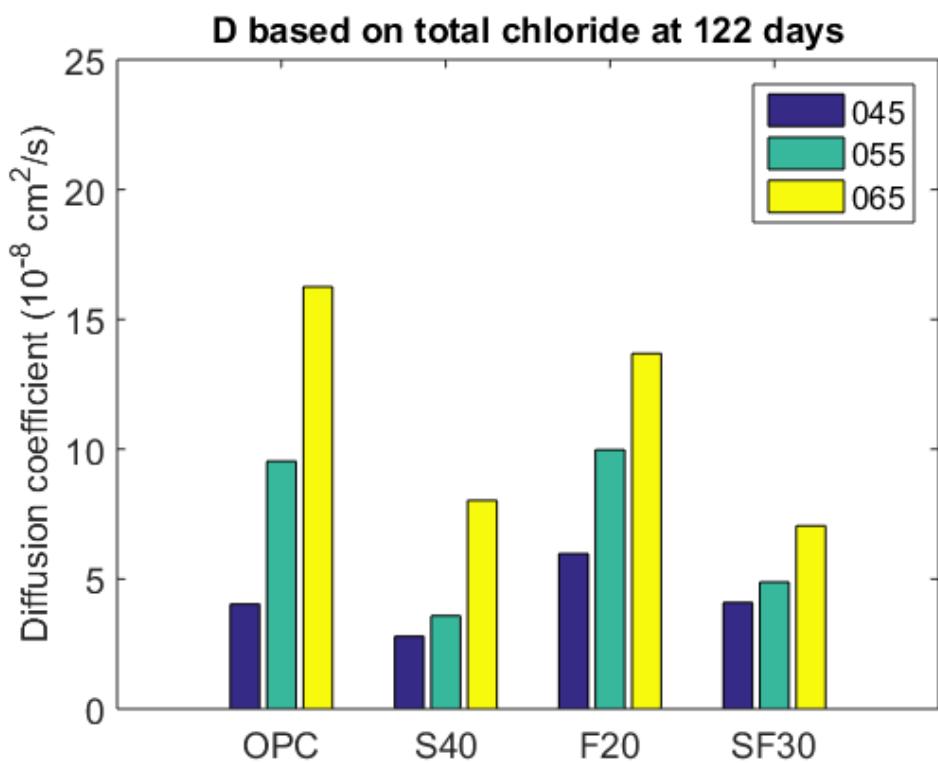


圖 4-28 混凝土 122 天齡期之總氯離子擴散係數



#### 4.4. 混凝土 pH 值試驗結果與分析

時間如氯離子含量試驗，試驗結果如表 4-22。, 不同水膠比但相同卜作嵐取代率的混凝土其酸鹼值沒有太大差異，而添加卜作嵐材料的混凝土相較於一般混凝土在較長的齡期酸鹼值變化明顯，原因在於比起添加 I 型水泥的混凝土，卜作嵐材料進行二次反應時不斷消耗氫氧化鈣，使得混凝土中的酸鹼值降低，其依 28 天至 91 天貯鹽試驗的酸鹼值改變大小排序，由大至小依序為爐石組、爐灰組、飛灰組、控制組。

表 4-22 各配比在不同時間對應的 pH 值

卜作嵐取代	水膠比	28 天貯鹽試驗	91 天貯鹽試驗	$I_{corr}=0.1\mu A/cm^2$	$I_{corr}=0.5\mu A/cm^2$
控制組	0.45	12.50	12.60		
	0.55	12.28	12.33	12.31	12.23
	0.65	12.61	12.35	12.30	12.45
爐石組	0.45	12.07	11.72		
	0.55	12.06	11.65		
	0.65	12.00	11.77	11.77	11.82
飛灰組	0.45	12.46	12.04		
	0.55	12.59	12.10	12.03	12.04
	0.65	12.40	12.00	12.03	12.00
爐灰組	0.45	12.14	11.80		
	0.55	12.23	11.93		
	0.65	12.34	11.91	11.83	11.95

## 第五章 綜合分析與討論



本研究所探討不同配比之混凝土性質及鋼筋腐蝕趨勢，所有試體皆在澆置完  
成後 24 小時內拆模，放入實驗室溫度（約 16°C）、水養護 28 天，預飽和三天後  
於 31 天齡期開始進行貯鹽試驗。試體持續觀測腐蝕趨勢至貯鹽試驗 28 天、91 天  
破壞試體其氯離子擴散係數、總入滲量、固結能力，並在腐蝕電流密度達到  
0.1、 $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$  時亦破壞試體分析擴散係數，探討不同配比之混凝土之氯離子抵  
抗能力及對臨界氯離子濃度的影響。

### 5.1. 抗壓強度

抗壓強度受到水膠比、膠結材種類及多寡、骨材強度等影響，為評斷結構物  
最基本的指標，通常以 28 天齡期之強度為標準，判斷混凝土優劣的基準。

#### 5.1.1. 水膠比對抗壓強度之影響

探討水膠比對抗壓強度的影響，依不同卜作嵐取代率之混凝土強度和齡期作  
圖如圖 5-1，混凝土抗壓強度隨著齡期增長，28 天過後試體放置於室溫，供應水  
化反應的水分減少，使增長幅度減緩。由試驗結果可以發現，水膠比越高，強度  
越低。

#### 5.1.2. 卜作嵐材料對抗壓強度的影響

一般而言，添加卜作嵐材料使早期強度降低，晚期強度提高。本研究之相同  
水膠比抗壓強度如圖 5-2，卜作嵐材料的反應使混凝土抗壓強度在 122 天齡期能  
達到和一般混凝土相近甚至高於一般混凝土，而且與一般混凝土相比，含有卜作  
嵐材料的混凝土從 59 天至 122 天齡期仍有持續上升的趨勢。



### 5.1.3. 小結

越低的水膠比能提供越高的抗壓強度，添加卜作嵐材料的混凝土在 122 天雖然抗壓強度只與一般混凝土相近，但晚期強度還有持續上升的可能，因此在足夠的養護條件及齡期下能夠提升至更好的抗壓強度。

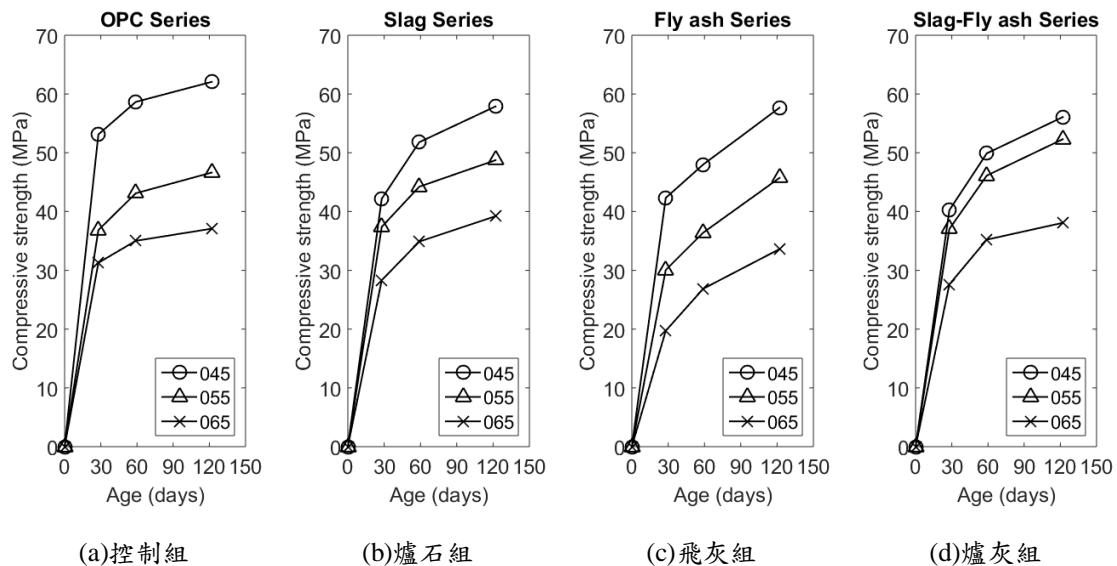


圖 5-1 水膠比對抗壓強度之影響

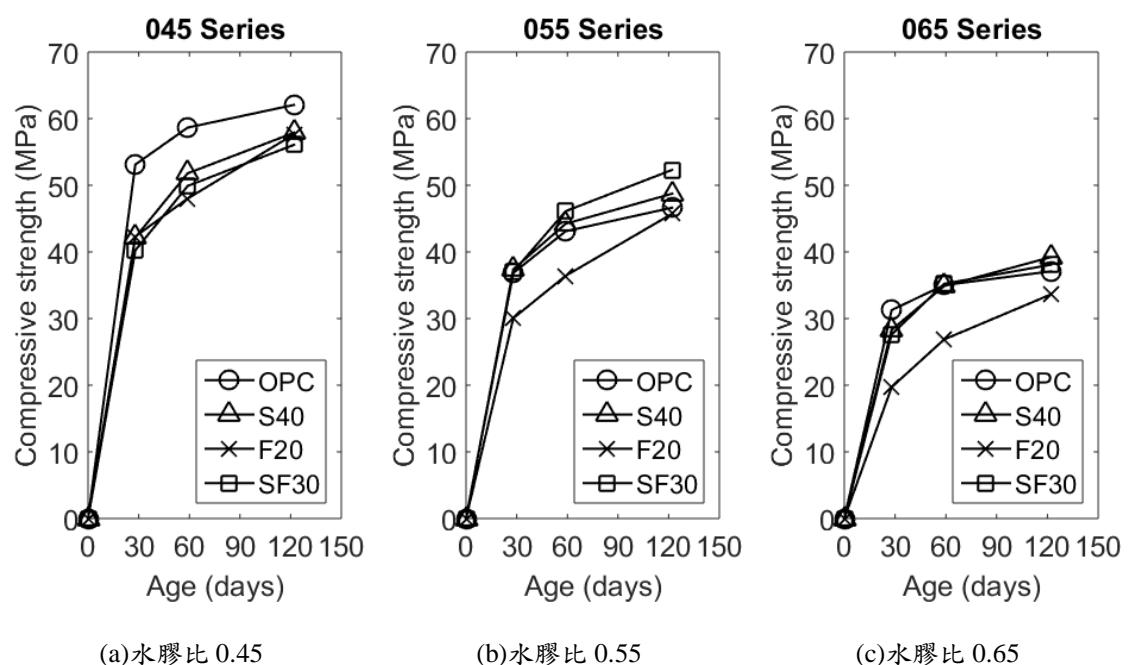


圖 5-2 卜作嵐材料對抗壓強度之影響



## 5.2. 鋼筋腐蝕行為探討

鋼筋腐蝕為長久的過程，即使周遭存在各種會使鋼筋腐蝕的因子，鋼筋仍需要反應時間產生鏽蝕，在達到腐蝕條件到生鏽的這段期間我們稱為誘發期，以腐蝕電流能判斷混凝土是否進入誘發期，並且對應鋼筋誘發至發生腐蝕的時間。本研究之試驗目的為探討氯離子濃度及混凝土酸鹼值作為鋼筋腐蝕的誘因，氯離子在鋼筋表層累積的含量影響腐蝕的時間，以試驗結果如表 4-2、表 4-3、表 4-4 分析不同水膠比和不同卜作嵐取代量對鋼筋腐蝕的影響。

### 5.2.1. 水膠比對腐蝕電流密度的影響

相同卜作嵐摻料其時間對腐蝕電流密度之關係如圖 5-3、圖 5-4、圖 5-5、圖 5-6，毛細孔隙的體積隨著水膠比升高而增加，高水膠比之混凝土在鋼筋表層的氯離子濃度累積較快，使鋼筋較快達到腐蝕電流密度之臨界值。

### 5.2.2. 卜作嵐材料對腐蝕電流密度的影響

依 4.4 節之酸鹼值的試驗結果，卜作嵐材料在長齡期消耗掉氫氧化鈣使混凝土酸鹼值下降，降低鋼筋鈍化膜的保護能力。相同水膠比其時間對腐蝕電流密度之關係如圖 5-7、圖 5-8、圖 5-9，飛灰組別之腐蝕電流密度曲線明顯較其他組別早進入去鈍化狀態，原因為其孔隙結構尚未足夠緻密，鋼筋表層迅速累積氯離子，其酸鹼值亦隨時間降低，使鋼筋最先脫鈍。爐灰混凝土擴散係數與爐石混凝土相近，但鋼筋表面氯離子濃度較爐石混凝土高，酸鹼值較低，導致較低的氯離子濃度即讓鋼筋的鈍化膜失去作用。以孔隙結構的角度探討緻密程度時，爐石混凝土將孔隙細化增加水密性，但比較不同卜作嵐材料造成的酸鹼值差異，爐石消耗較多氫氧化鈣使混凝土酸鹼值降低幅度大，對鋼筋鈍化膜的保護能力較弱，較容易被氯離子穿透。腐蝕電流密度和氯離子濃度的關係在 5.4 節作綜合分析。

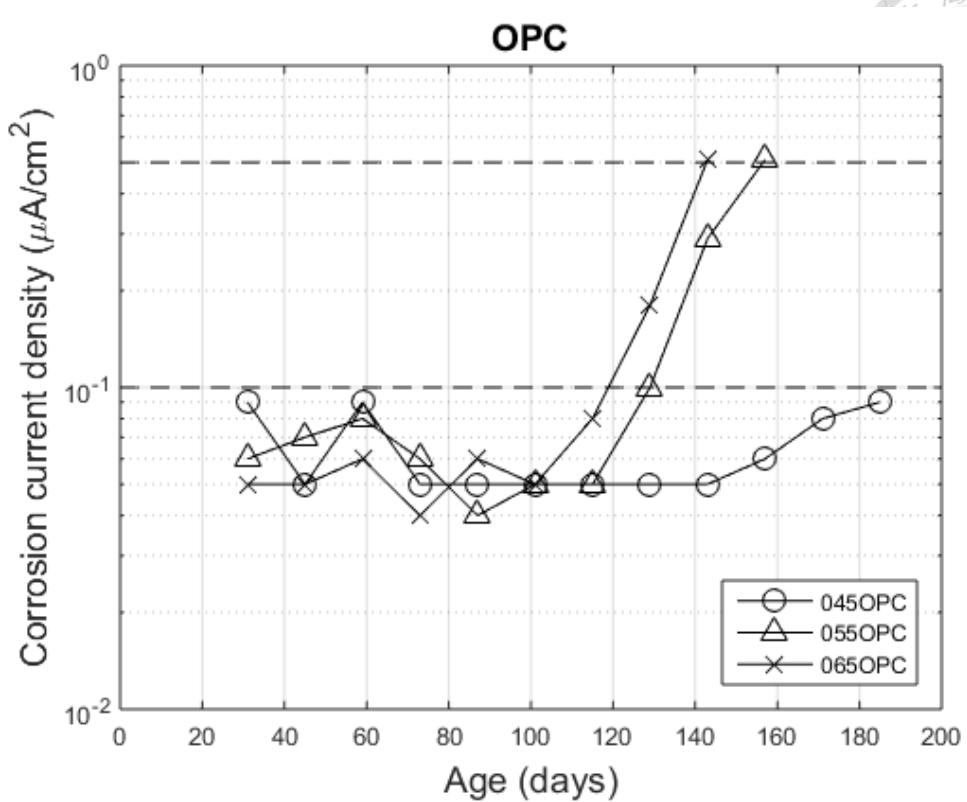


圖 5-3 一般混凝土之不同水膠比對腐蝕電流密度的影響

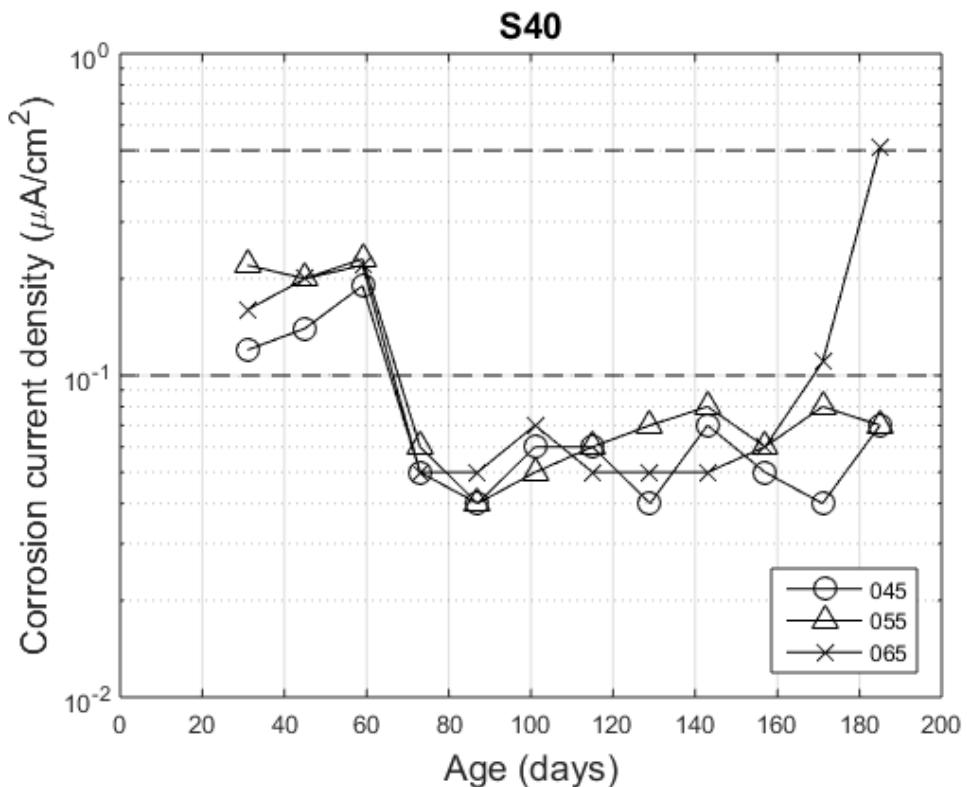


圖 5-4 爐石混凝土之不同水膠比對腐蝕電流密度的影響

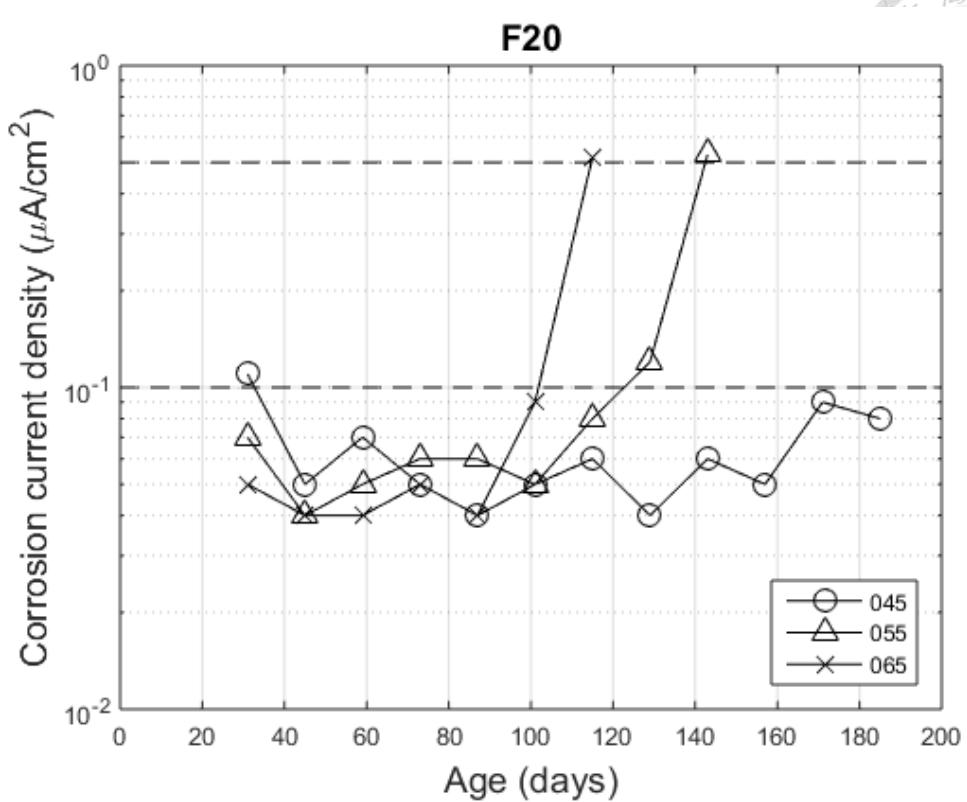


圖 5-5 飛灰混凝土之不同水膠比對腐蝕電流密度的影響

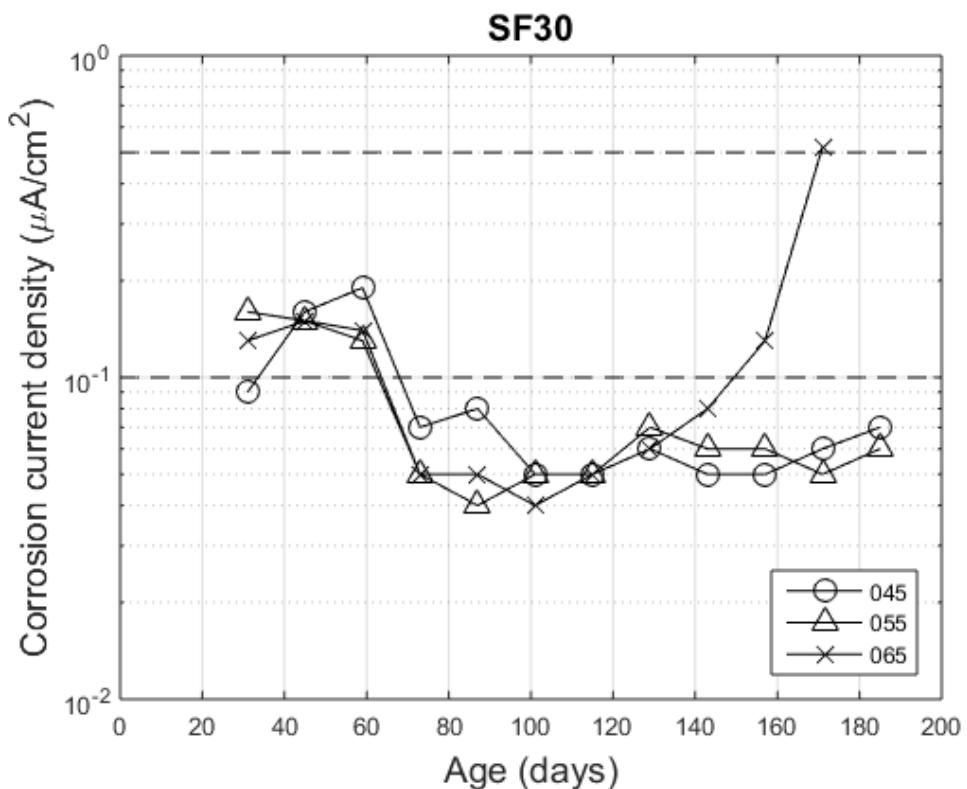


圖 5-6 爐灰混凝土之不同水膠比對腐蝕電流密度的影響

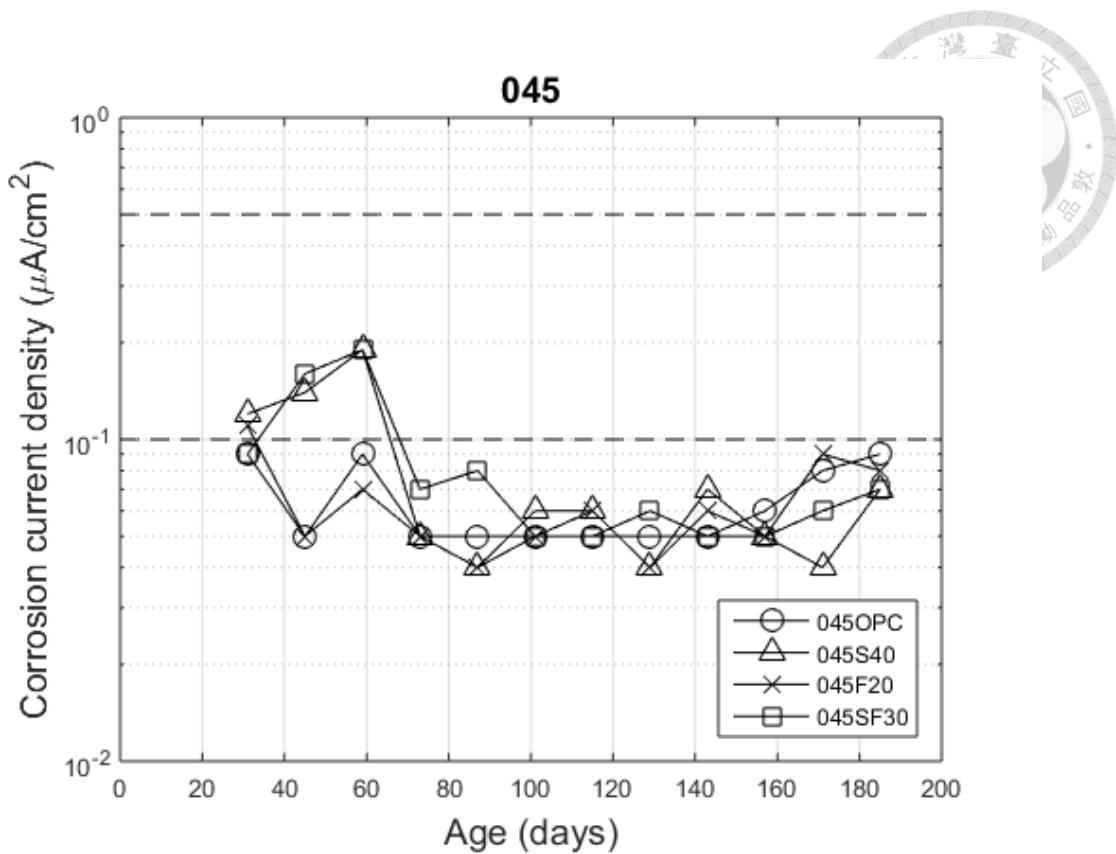


圖 5-7 水膠比 0.45 之時間對腐蝕電流密度之關係

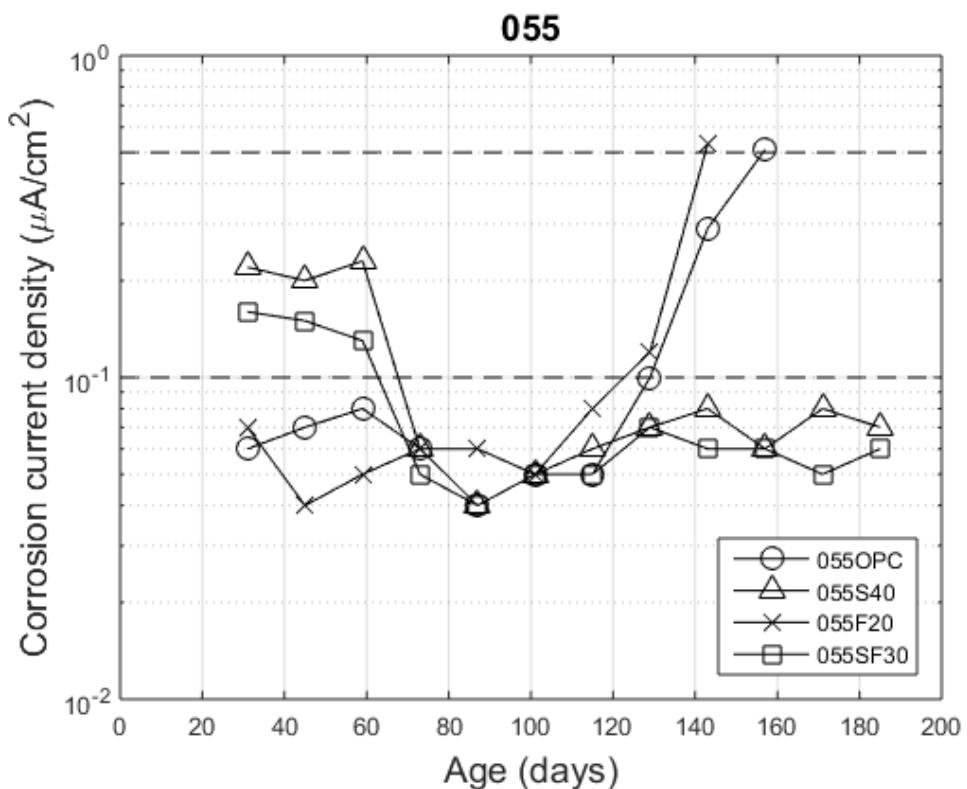


圖 5-8 水膠比 0.55 之時間對腐蝕電流密度之關係

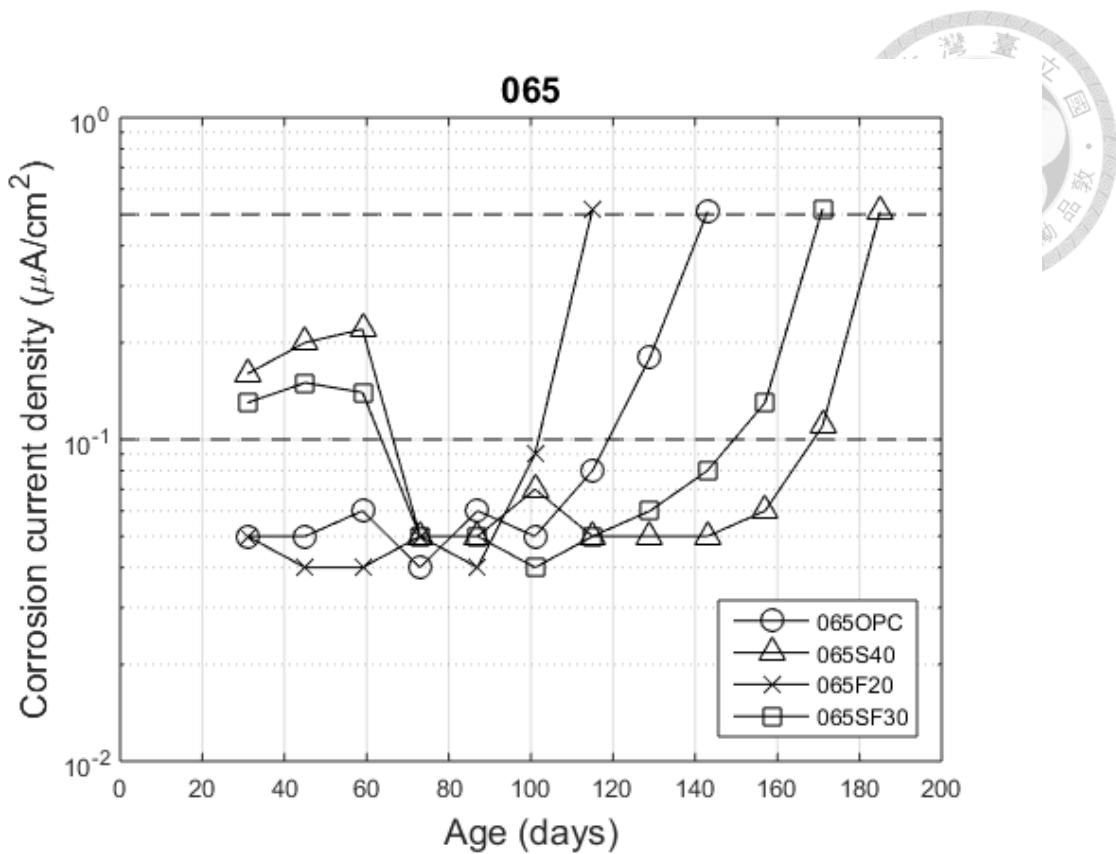


圖 5-9 水膠比 0.65 之時間對腐蝕電流密度之關係



### 5.3. 以氯鹽擴散行為探討混凝土耐久性

擴散行為是離子透過混凝土中的連通孔隙傳輸，大多以毛細孔隙為主，因此擴散係數反映混凝土孔隙結構的緻密程度，混凝土越緻密則擴散係數越低，離子越不容易擴散進入混凝土中，因此以擴散係數為探討混凝土抵抗氯鹽耐久性的指標。添加卜作嵐材料能夠使長齡期的混凝土更加緻密本研究之試體養護 28 天後即開始進行貯鹽試驗。

#### 5.3.1. 以抗壓強度判斷混凝土緻密程度

抗壓強度往往被認為是判斷混凝土優劣的標準，以本研究探討抗壓強度和擴散係數之關係如圖 5-10、圖 5-11。結果顯示，抗壓強度不適用於判斷含有卜作嵐材料的混凝土之緻密程度，越高的水膠比因為較多的大孔隙（毛細孔隙）使強度降低、擴散係數升高，但添加卜作嵐材料後，卜作嵐反應消耗氫氧化鈣生成膠體填補孔隙，膠體孔隙的多寡對於強度沒有太大的幫助，但是對水密性有大幅的提升。

#### 5.3.2. 時間對擴散係數的影響

單憑短齡期的擴散係數判斷卜作嵐材料對混凝土的優劣程度是不可靠的，擴散係數因為混凝土持續水化和孔隙中的氯鹽含量飽和而逐漸降低。飛灰混凝土在短齡期雖然水密性相對差很多，但隨著齡期增加水密性也會逐漸增加，降低擴散係數。以四個混凝土齡期之擴散係數分別為 59 天、122 天、腐蝕電流密度為  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、腐蝕電流密度為  $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，所得到的試驗結果依 2.2.2. 節的公式(2.5)回歸分析  $m$  值大小。分析過程為每個齡期對 59 天的擴散係數正規化，去除先天孔隙差異造成的影响，分析 59 天至 122 天及更長齡期的擴散係數折減幅度如圖 5-12、圖 5-13，分析使用數值如表 5-1、表 5-2，與文獻比較如表 5-3，試驗結果與  $m$  值分析比較如圖 5-12、圖 5-13。



混凝土擴散係數折減以  $m$  值大小表現， $m$  值越大表示擴散係數在經過相同齡期折減幅度越大，水膠比對  $m$  值的影響由水膠比 0.55 和 0.65 的一般混凝土和飛灰混凝土分析，055OPC 和 065OPC 的  $m$  值並未有明顯變化，055F 和 065F 的  $m$  值相比較大，然而 065F 的長試驗天數較集中，對於回歸分析容易造成誤差，因此產生較大的差異。

以水膠比 0.65 之組別為例，依各卜作嵐材料之時間與擴散係數關係繪圖如圖 5-12、圖 5-13。從自由氯離子擴散係數方面，一般混凝土在 59 天後水化緩慢，擴散係數變化較小，添加卜作嵐的混凝土，爐石混凝土之  $m$  值大於其他組別，在 182 天內齡期明顯降低擴散係數，和文獻[14]有相同的趨勢；飛灰延長混凝土內部結構發展時間，雖然其水密性在短齡期比一般混凝土差，但  $m$  值較大，在長齡期或是良好養護的情況下，飛灰混凝土比一般混凝土更加緻密，因此  $m$  值較文獻[13]大，本研究判斷為此次試驗養護環境使混凝土的水化反應更加延後，導致  $m$  值在 59 至 122 天時放大；爐灰混凝土在早齡期有較一般混凝土佳的水密性，59 天齡期之擴散係數僅有一般混凝土的一半，雖然其  $m$  值又較一般混凝土低，但更長齡期時依然明顯低於一般混凝土，有效地抵抗氯離子入侵。

總氯離子擴散係數方面，爐石混凝土的  $m$  值較依自由氯離子擴散係數分析之  $m$  值低很多，原因為爐石混凝土在短齡期時淺層固結部分氯離子，使淺層的自由氯離子濃度低於總氯離子濃度，至長齡期時混凝土擴散係數差異縮小。

綜合上述，含有卜作嵐材料的混凝土在 122 天齡期仍持續水化，一般混凝土的水化反應則是趨緩，因此以短齡期之擴散係數判斷卜作嵐材料的好壞不夠可靠。假設在 365 天時任意配比之混凝土水化非常緩慢甚至不再水化，以  $m$  值與 59 天氯離子擴散係數預測長齡期的擴散係數如表 5-4，可以發現在過了 365 天齡期後，添加卜作嵐取代的混凝土低於未取代的混凝土，表示卜作嵐材料能夠增加混凝土的耐久性。

本研究雖分析自由氯離子及總氯離子之擴散係數，但是總氯離子包含固結氯離子及自由氯離子，兩者之中僅自由氯離子能夠在孔隙中自由移動，因此本研究



認為以自由氯離子之擴散係數判斷混凝土緻密程度是較適當的參數。以下討論皆以自由氯離子之擴散係數作分析。

### 5.3.3. 氯離子總入滲量

總入滲量表示氯離子入侵至混凝土的總含量，在評斷混凝土耐久性時，依擴散係數單一參數不夠可靠。以試驗結果來看，相同水膠比下，一般混凝土、爐石混凝土、飛灰混凝土的表面氯離子濃度相近，因此較大的擴散係數有較大的總入滲量，而爐灰混凝土雖然擴散係數較低但表面氯離子濃度明顯高於其他三組配比。假設混凝土的表面氯離子濃度固定，總入滲量越多表示混凝土內的擴散係數越大，在深層的氯離子含量較多，因此以總入滲量和擴散係數作為耐久性的指標。透過試驗得到之結果代入模擬擴散行為的誤差方程式，經由對深度積分後求得混凝土內部的氯鹽總入滲量。分析各配的之 59 天和 122 天的總入滲量如圖 5-16，自由氯離子總入滲量為(a)(b)(c)，總氯離子總入滲量為(d)(e)(f)，兩種氯離子從 59 天至 122 天明顯上升。由 59 天及 122 天齡期之總入滲量可以發現，總入滲量隨著水膠比升高而增加，然而爐石使孔隙細化，將氯離子抵抗在混凝土外部，入滲量較一般混凝土低；飛灰對於混凝土在早期有較大的毛細孔隙率，造成大量的氯離子入侵混凝土，而同時使用爐石和飛灰取代部分水泥亦會造成較多氯離子入侵。

### 5.3.4. 氯離子固結能力

依文獻[41]提出固結能力和水膠比無關，和膠結材種類有關，不同卜作嵐材料對混凝土氯離子固結能力以總氯離子和自由氯離子的總入滲量差值作為固結氯離子含量，各配比之固結含量如圖 5-17，貯鹽試驗進行 28 天期間一般混凝土水化緩慢，爐石的卜作嵐反應在一般混凝土之後，進行二次反應時會產生較多的 C-S-H 和 Friedel's 鹽固結氯離子，於 59 天齡期固結較多的氯離子；含有飛灰的混凝土水化反應較慢，為固結的含量僅略高於一般混凝土，而爐灰混凝土和飛灰混凝土



土的固結能力相近。當齡期達 122 天時，一般混凝土只增加少量固結量，而飛灰和爐灰混凝土的固結量因為卜作嵐反應大幅提升；短齡期爐石混凝土雖然固結大量氯離子，但由表 4-22 發現酸鹼值隨著時間降低，即使爐石混凝土仍繼續固結氯離子，還是有釋放已固結氯離子的風險。

以固結氯離子佔總氯離子之總入滲量之百分比作固結能力的另一標準如圖 5-18，由圖可知，固結比例和水膠比無關，在 122 天齡期時，三種添加卜作嵐摻料的配比其固結比例相近，表示固結能力相近，且優於一般混凝土。

### 5.3.5. 以擴散係數及總入滲量分析混凝土抗氯離子能力

由飛灰和爐石對於孔隙結構的影響及本研究之試驗結果，可以得知較低的擴散係數表示混凝土孔隙的不連通性較佳，較低的總入滲量代表較低的孔隙率。而影響擴散係數與總入滲量關係的參數包括時間與表面氯離子濃度，假設結構受到相同環境下的氯離子濃度持續侵入內部且相同的混凝土齡期下，若擴散係數大，則總入滲量大，如一般混凝土，則耐久性差；當混凝土擴散係數小、總入滲量大，如爐灰混凝土，氯離子堆積淺層，深層氯離子累積緩慢；反之，擴散係數與總入滲量小，耐久性為最佳，同本試驗之爐石混凝土擴散行為表現。如圖 5-19，圖(a)為 59 天擴散係數與總入滲量關係，圖(b)為 122 天擴散係數與總入滲量關係，圖中越靠左下角表示擴散係數與相對總入滲量越小，耐久性越佳。從兩張圖也能發現飛灰混凝土相較於一般混凝土在 122 天內降低擴散係數，相對總入滲量也較低，在更長齡期更能提升耐久性。

表 5-1 各齡期自由氯離子擴散係數及分析 m 值

齡期	59 天	122 天	0.1 $\mu$ A/cm <sup>2</sup>	0.5 $\mu$ A/cm <sup>2</sup>	
配比	D( $10^{-8}$ cm <sup>2</sup> /s)	m			
055OPC	13.6345	8.9657	9.052	8.8321	0.51
055F20	20.3309	10.3187	10.502	10.0420	0.87
065OPC	22.7631	17.1561	16.0431	15.3981	0.44
065S40	16.9185	8.0211	7.2003	7.8623	0.84
065F20	23.4242	13.6466	16.3942	15.8801	0.65
065SF30	10.6351	7.1032	6.7993	6.1023	0.51

表 5-2 各齡期總氯離子擴散係數及分析 m 值

齡期	59 天	122 天	0.1 $\mu$ A/cm <sup>2</sup>	0.5 $\mu$ A/cm <sup>2</sup>	
配比	D( $10^{-8}$ cm <sup>2</sup> /s)	m			
055OPC	11.85867	9.5358	8.222	8.2984	0.38
055F20	17.93785	9.9759	9.0231	8.9535	0.84
065OPC	21.04423	16.2536	15.7452	15.2098	0.38
065S40	11.83938	8.0291	7.0121	7.5660	0.47
065F20	21.1904	13.6876	16.6686	15.6343	0.49
065SF30	10.03778	7.0534	6.4009	6.0034	0.48

表 5-3 各配比之  $m$  值與文獻[14]相比

	055OPC	055F20	065OPC	065S40	065F20	065SF30
$m_{\text{free}}$	0.51	0.87	0.45	0.84	0.65	0.51
$m_{\text{total}}$	0.38	0.84	0.38	0.47	0.49	0.48
$m[14]$	0.2	0.429	0.2	0.429	0.360	0.392

表 5-4 365 天擴散係數預測

配比	055OPC	055F20	065OPC	065S40	065F20	065SF30
$D$ for free $\text{Cl}^-$ ( $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ )	5.3359	4.1407	10.1130	3.6820	7.1404	4.1864
$D$ for total $\text{Cl}^-$ ( $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ )	5.9581	3.8868	10.5232	4.9837	8.6195	4.2146

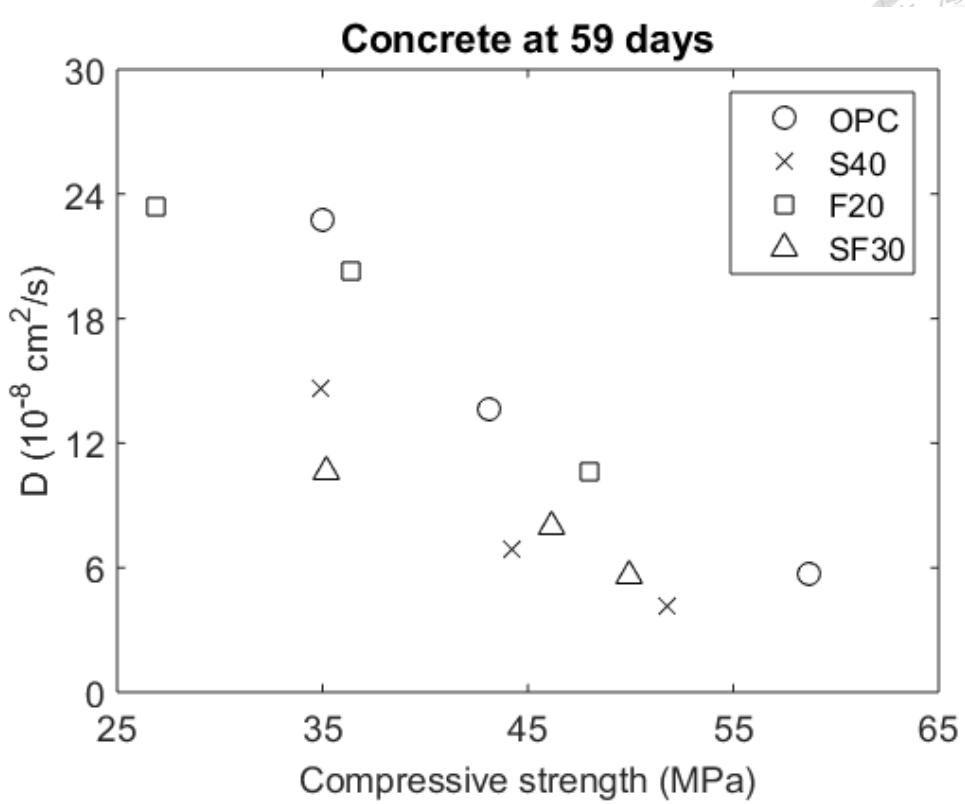


圖 5-10 混凝土 59 天齡期抗壓強度與擴散係數之關係

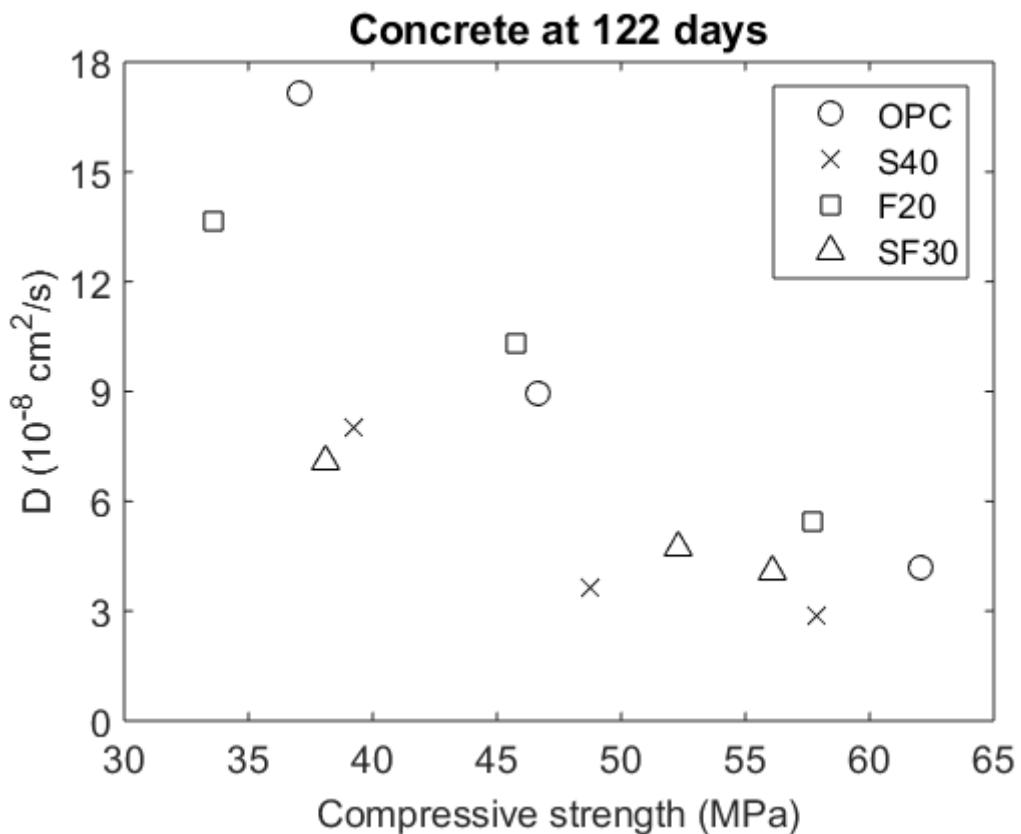
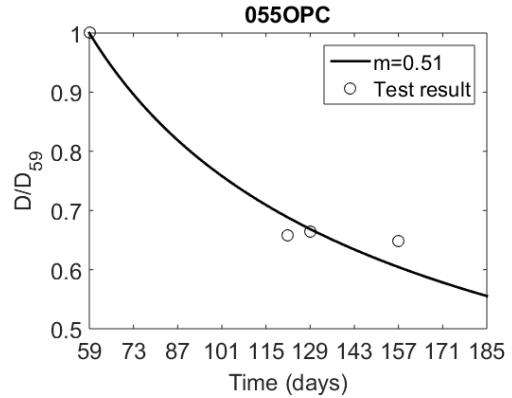
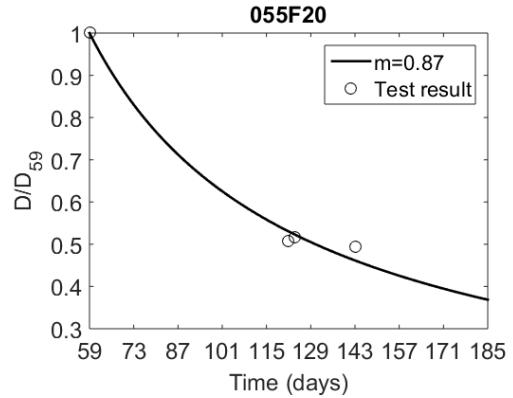


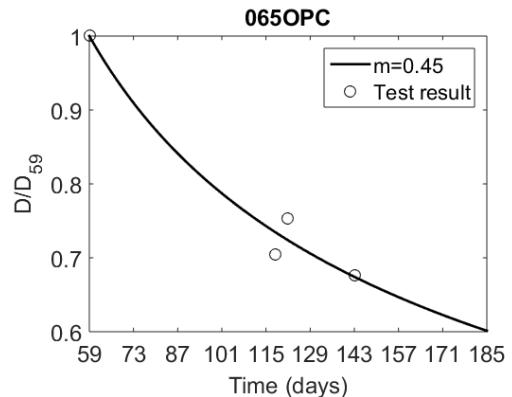
圖 5-11 混凝土 122 天齡期抗壓強度與擴散係數之關係



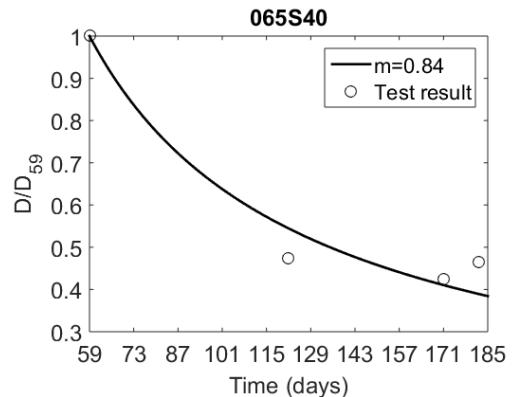
(a) 055OPC



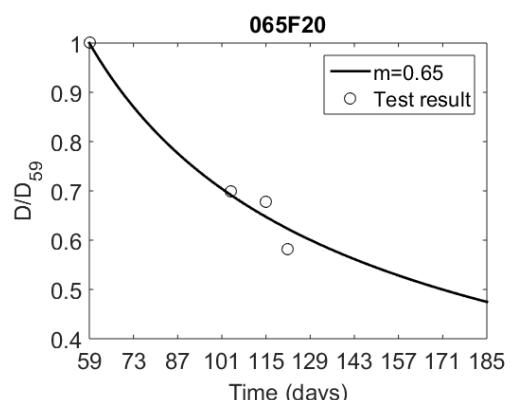
(b) 055F20



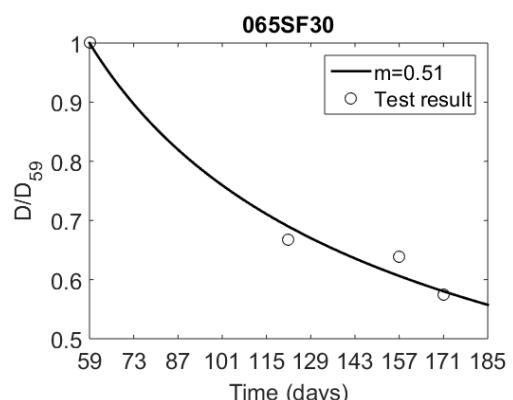
(c) 065OPC



(d) 065S40

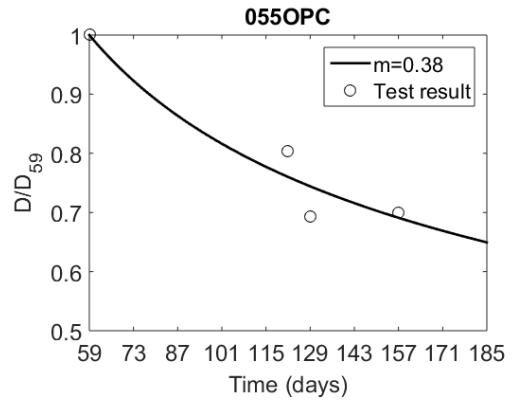


(e) 065F20

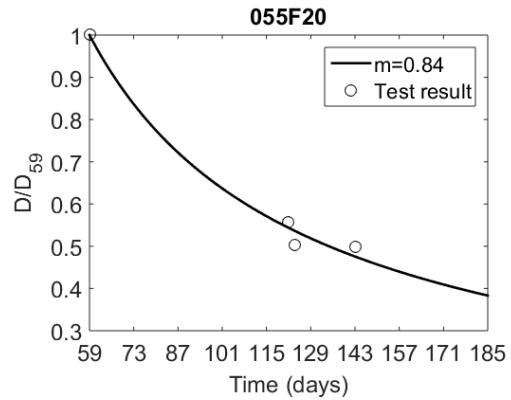


(f) 065SF30

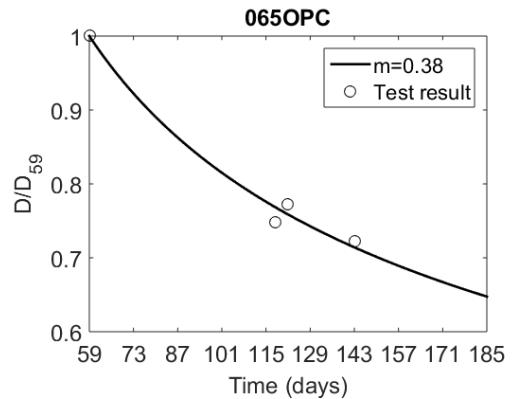
圖 5-12 自由氯離子擴散係數與時間關係



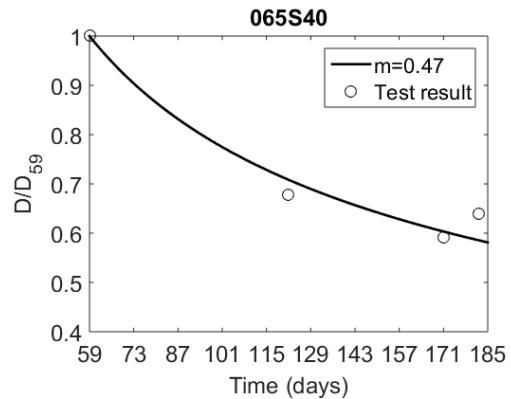
(a) 055OPC



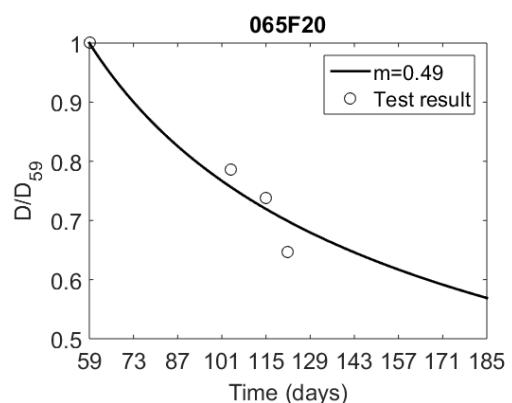
(b) 055F20



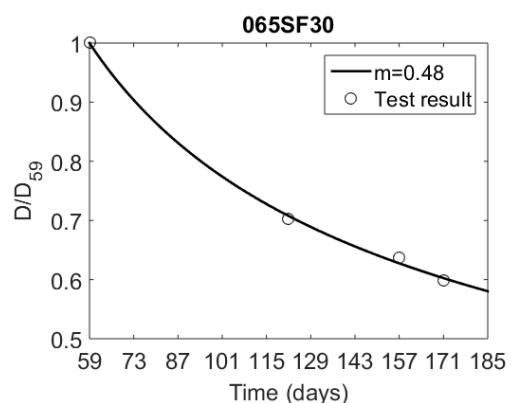
(c) 065OPC



(d) 065S40



(e) 065F20



(f) 065SF30

圖 5-13 總氯離子擴散係數與時間關係

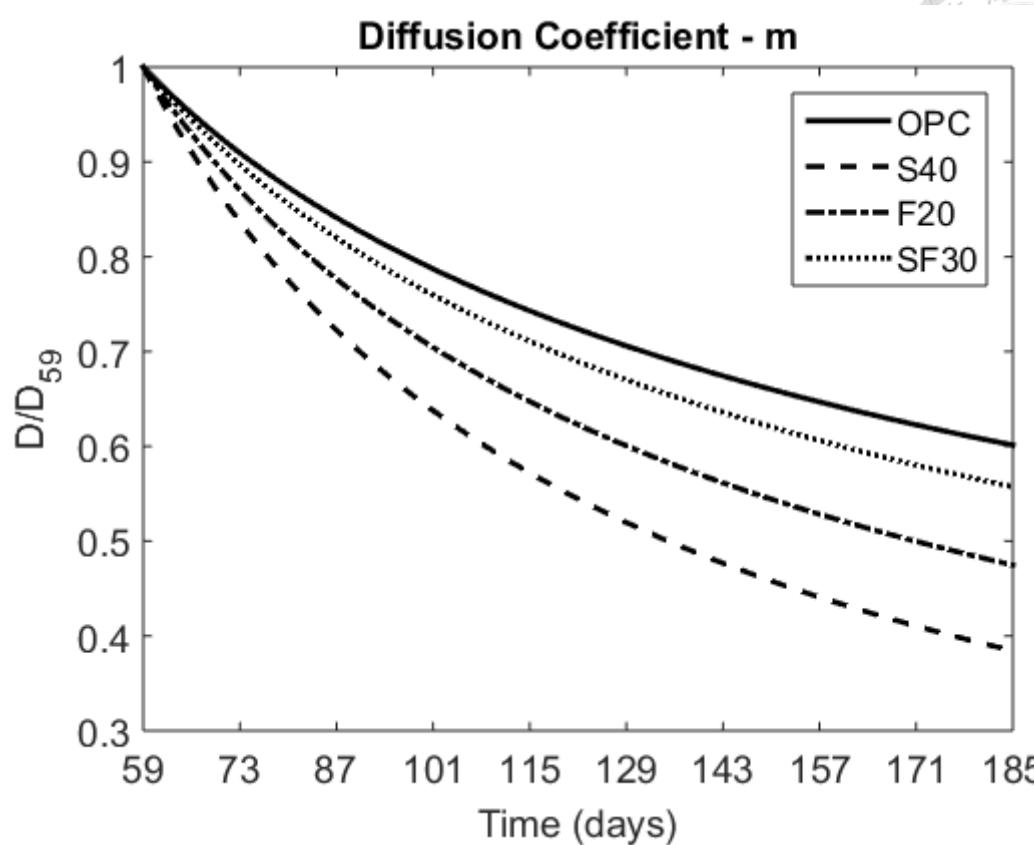


圖 5-14 時間對自由氯離子擴散係數之關係

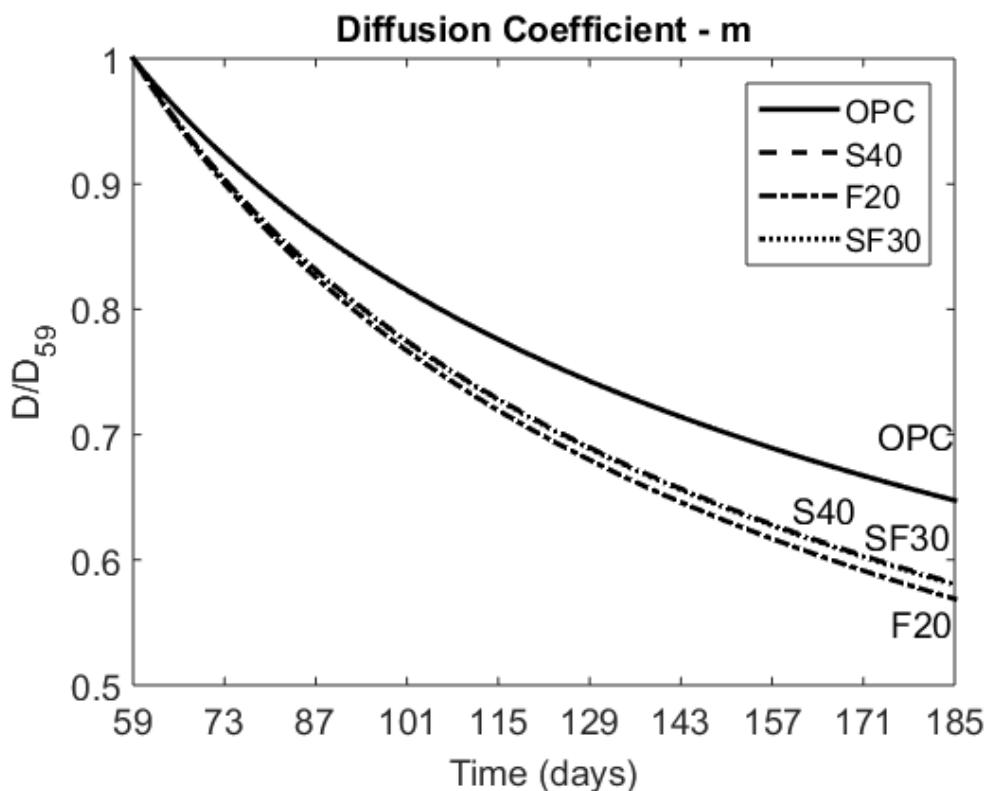


圖 5-15 時間對總氯離子擴散係數之關係

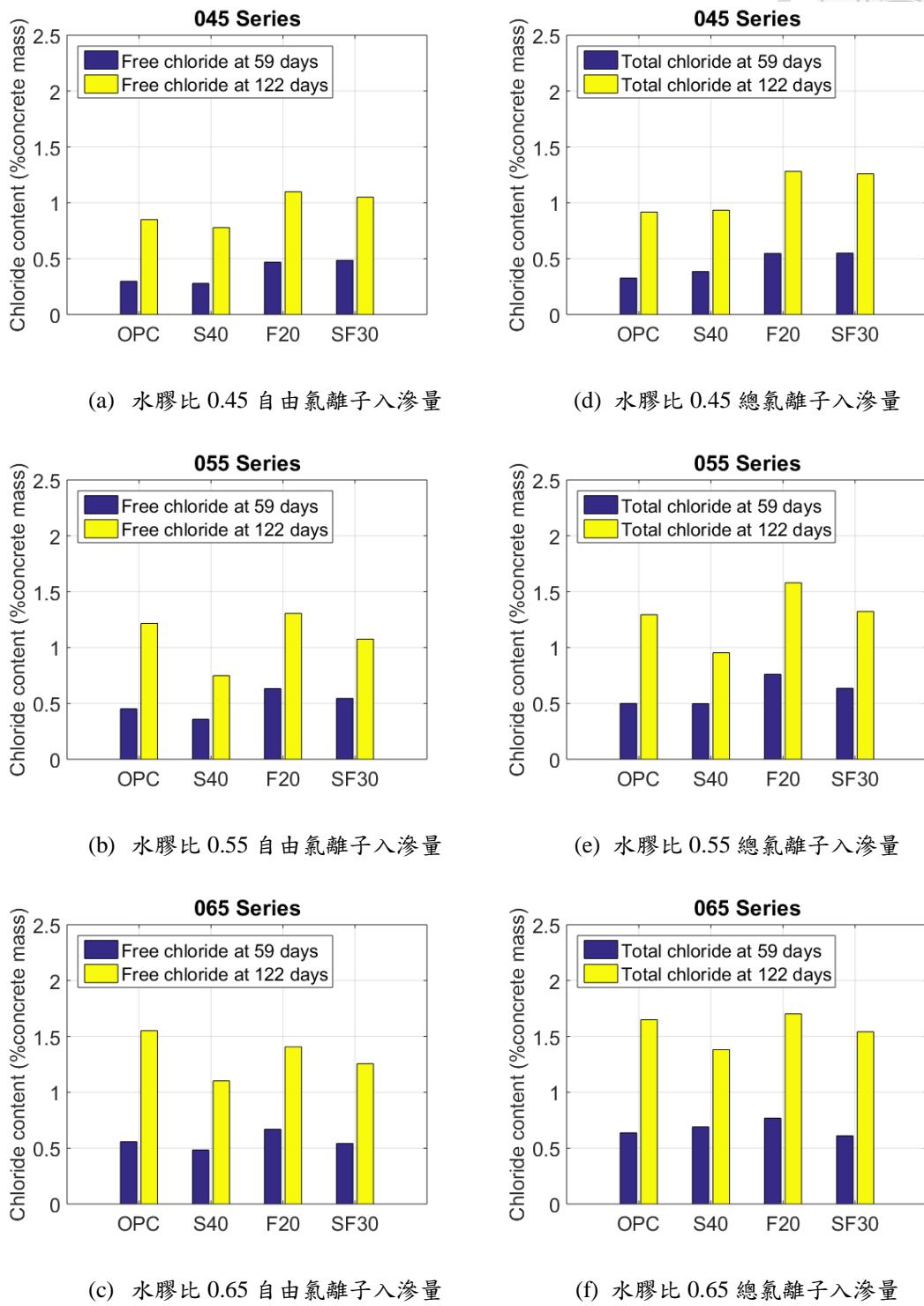


圖 5-16 混凝土氯離子入滲量

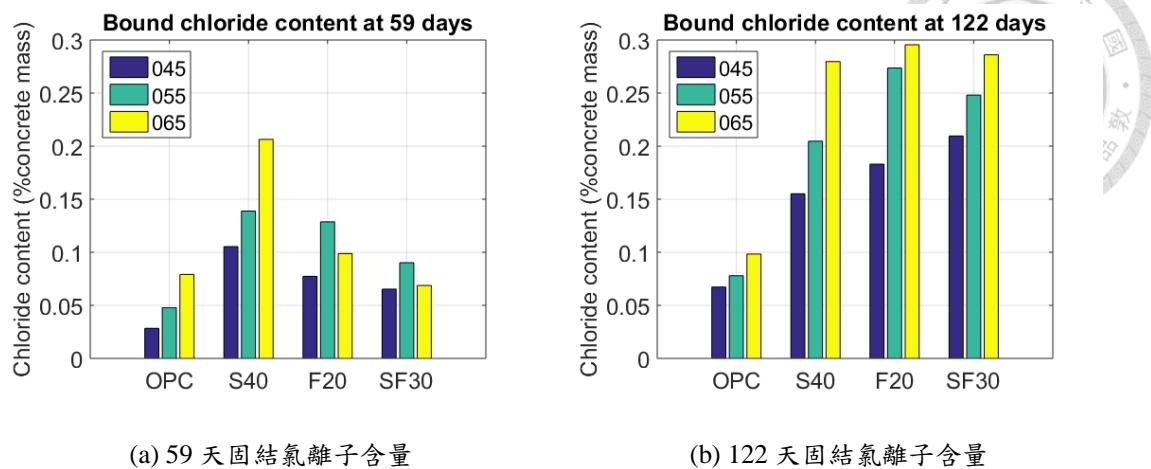


圖 5-17 固結氯離子含量

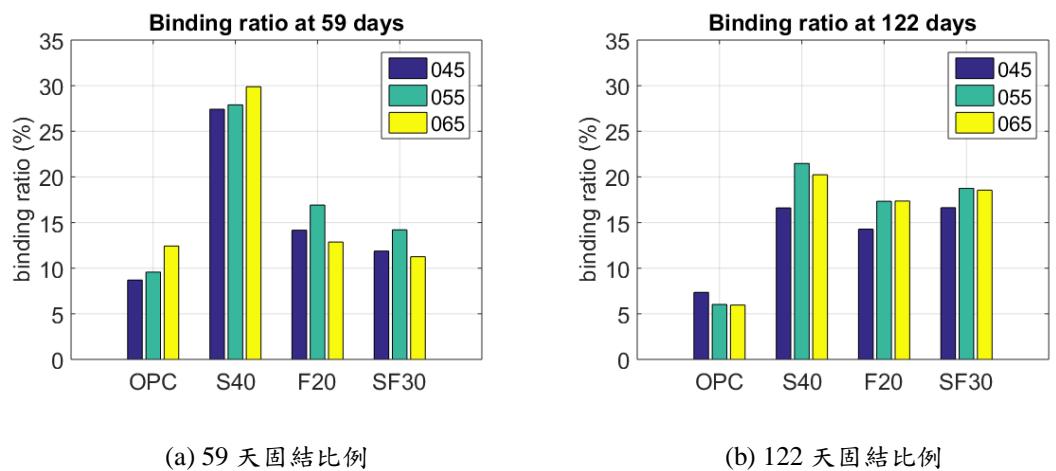


圖 5-18 氯離子固結比例

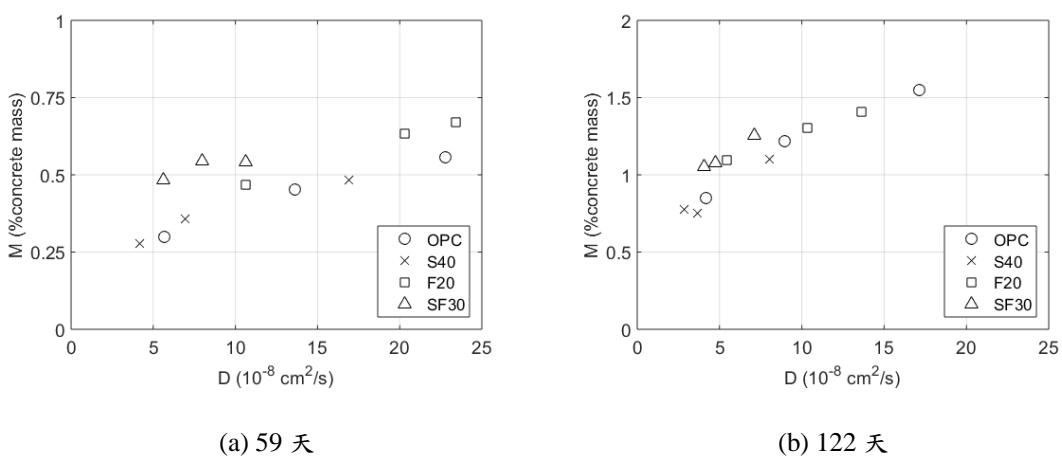


圖 5-19 擴散係數與入滲量之關係



## 5.4. 添加卜作嵐材料之鋼筋混凝土臨界氯離子濃度

影響鋼筋包括溫濕度、孔隙中氧氣濃度、氯離子濃度、混凝土酸鹼值等因素，且由於判斷鋼筋腐蝕的方法不同，定義及量測的臨界氯離子濃度也會不同。本研究之鋼筋混凝土經過濕養護 28 天後，以外部滲入的方式使保護層兩公分之鋼筋表層的氯離子濃度逐漸累積，以腐蝕電流密度作為判斷鋼筋腐蝕的依據，第一種是  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  為鋼筋從鈍化狀態進入低度腐蝕之標準，第二種是  $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$  為鋼筋從低度腐蝕進入中度腐蝕之標準。臨界氯離子濃度根據表 4-17 至表 4-20 的水溶法和酸溶法試驗結果，以及將 pH 值換算成氫氧根濃度後以 3 種表示方式分析臨界氯離子濃度，各表示方式如表 5-5，表 5-6，分別為第一種及第二種腐蝕標準。文獻[53][56]整理許多臨界氯離子濃度的值，但鋼筋在滿足腐蝕條件時，使鋼筋腐蝕的臨界值不應該是一個大範圍，而是趨近於一個值。

### 5.4.1. 水膠比對臨界氯離子濃度之影響

本研究之臨界氯離子濃度僅包含水膠比 0.55、0.65 之 OPC、F20 試驗結果如表 5-7，若採用氯離子濃度佔混凝土比例作為臨界氯離子濃度的表示方式，不論是以總氯離子或自由氯離子濃度表示都可以發現，調整水膠比對於臨界氯離子濃度沒有顯著影響，且其值非常接近，但考慮氯離子並不會進入到粗粒料內部，因此以氯離子濃度佔混凝土比例表示雖然縮小不同水膠比之臨界氯離子濃度範圍，但資料數據不足，且在物理意義上仍有待商榷。

### 5.4.2. 以總氯離子佔膠結材比例表示

大部分研究皆是以此種表示方式作為臨界氯離子濃度，當中固結住的氯離子雖然不會對鋼筋腐蝕造成直接影響但仍有可能因為中性化等原因被釋放。本研究為當腐蝕電流密度達到  $0.1$ 、 $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，以酸溶法滴定氯離子含量，並換算為佔膠結材重量百分比，以往臨界總氯離子濃度的範圍在  $0.04\sim8.34\%[53][56]$ ，本研

究之第一種臨界總氯離子濃度範圍為 0.604~1.833%，第二種為 0.920~2.151%。依不同腐蝕電流密度標準分析時間及臨界總氯離子濃度之關係如圖 5-20、圖 5-21，鋼筋最早被去鈍化的組別為 065F20，最晚的為 065S40，最晚達到腐蝕標準的組別其臨界氯離子濃度卻最低，不符合使鋼筋達到臨界氯離子濃度應該趨近於值的理念。

#### 5.4.3. 以自由氯離子膠結材比例表示

普遍認為自由氯離子才會對鋼筋造成直接影響，佔膠結材百分比分析較總氯離子濃度有代表性，腐蝕電流密度達到  $0.1$ 、 $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，以水溶法滴定氯離子含量，並換算為佔膠結材重量百分比。文獻[53][56]整理臨界自由氯離子濃度的範圍在 0.03~1.96%，本研究之第一種臨界自由氯離子濃度範圍為 0.157~1.588%，第二種為 0.686~1.936%。依不同腐蝕電流密度標準分析時間及臨界自由氯離子濃度之關係如圖 5-20、圖 5-21，鋼筋最早被去鈍化的組別為 065F20，最晚為 065S40，如上述最晚腐蝕卻表現出最低的臨界氯離子濃度。

#### 5.4.4. 以 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ 表示

考慮混凝土環境，也就是酸鹼值對臨界氯離子濃度的影響，以臨界自由氯離子濃度與氫氧根濃度比值作為卜作嵐混凝土之臨界氯離子濃度指標，在混凝土酸鹼值不低於鋼筋鈍化膜穩定存在的值時，混凝土有越高的酸鹼值表示對鋼筋的保護能力越佳。文獻[53][56]整理，臨界氯離子濃度介於 0.01~45。本研究之第一種臨界氯離子濃度介於 1.351~1.807，第二種臨界氯離子濃度介於 1.381~3.302，依不同腐蝕電流密度標準分析時間及  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  之關係如圖 5-22、圖 5-23，可知利用  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  明顯縮小去鈍化標準之臨界氯離子濃度範圍。

#### 5.4.5. 臨界氯離子濃度之綜合分析

以總氯離子和自由氯離子佔膠結材百分比定義可以發現膠結材種類會有較大

的誤差，原因是沒有考慮混凝土的環境對鋼筋保護能力的影響，氯離子具有高穿透性，較高的酸鹼值能使鈍化膜的保護能力增強，臨界自由及總氯離子濃度越高，在本研究試驗結果分析，使用卜作嵐材料取代部分水泥降低混凝土酸鹼值而造成誤差，而以臨界自由氯離子濃度除以氫氧根濃度有效縮小臨界值範圍，因此將自由氯離子濃度除以氫氧根濃度分析添加卜作嵐材料的混凝土較為適合。藉此亦能夠建立酸鹼值和臨界氯離子濃度的關係如圖 5-24、圖 5-25、圖 5-26、圖 5-27。

表 5-5 促使鋼筋去鈍化之臨界氯離子濃度

臨界氯離子濃度	齡期 (天)	Cl <sub>total</sub> (% binder mass)	Cl <sub>free</sub> (% binder mass)	pH	$\frac{[Cl^-]}{[OH^-]}$
055OPC	129	1.495	1.257	12.31	1.351
055F20	122	1.004	0.884	12.03	1.807
065OPC	118	1.833	1.588	12.30	1.551
065S40	171	0.604	0.517	11.77	1.724
065F20	104	1.172	0.946	12.03	1.748
065SF30	157	0.711	0.613	11.83	1.769



表 5-6 促使鋼筋進入中度腐蝕程度之臨界氯離子濃度

臨界氯離子濃度	天數	Cl <sub>total</sub> (%binder mass)	Cl <sub>free</sub> (%binder mass)	pH	$\frac{[Cl^-]}{[OH^-]}$
055OPC	157	1.799	1.877	12.23	2.332
055F20	143	1.354	1.160	12.04	2.278
065OPC	143	2.151	1.936	12.45	1.381
065S40	182	0.920	0.686	11.82	2.030
065F20	115	2.025	1.677	12.00	3.302
065SF30	171	1.411	1.220	11.95	2.732

表 5-7 臨界氯離子濃度佔混凝土比例之表示方式

臨界氯離子濃度	去鈍化標準		中度腐蝕標準	
	C <sub>free</sub> (%concrete mass)	C <sub>total</sub> (%concrete mass)	C <sub>free</sub> (%concrete mass)	C <sub>total</sub> (%concrete mass)
055OPC	0.194	0.230	0.272	0.290
055F20	0.136	0.155	0.177	0.209
065OPC	0.222	0.256	0.271	0.301
065F20	0.132	0.164	0.235	0.283

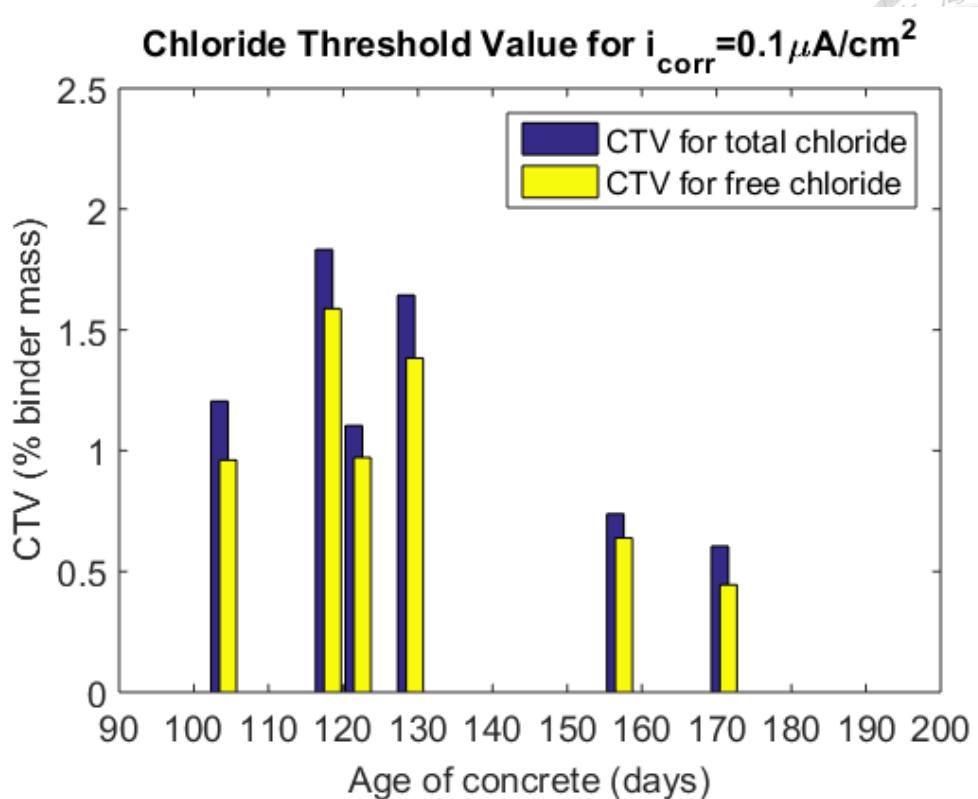


圖 5-20 去鈍化標準下臨界自由和總氯離子濃度與時間關係

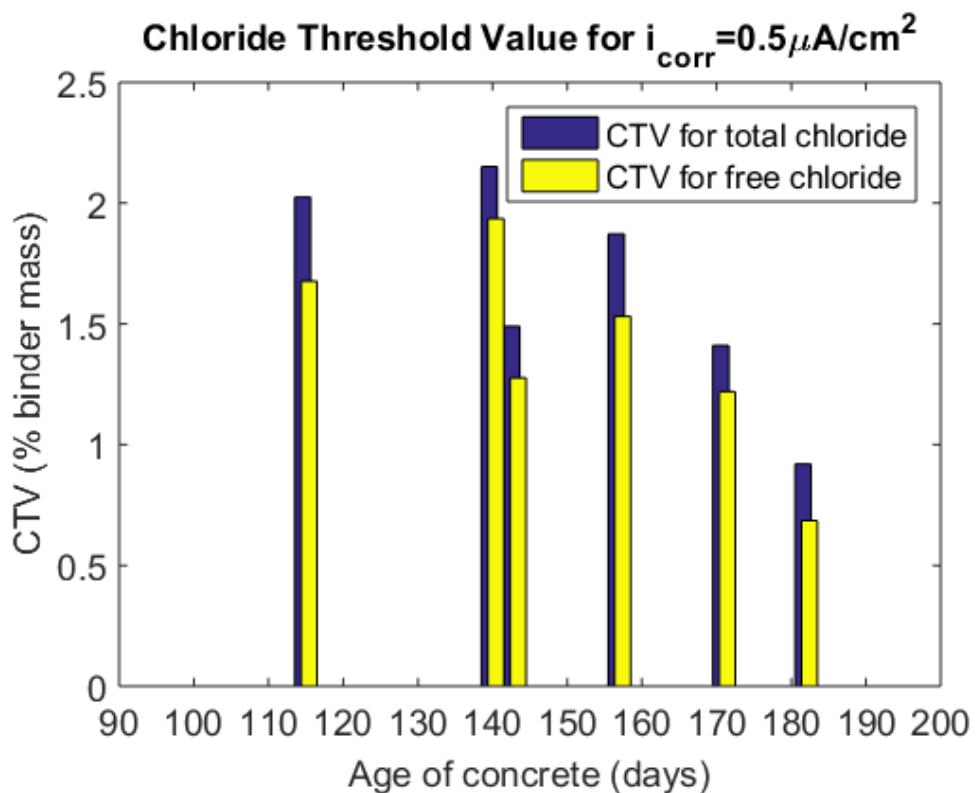


圖 5-21 中度腐蝕標準下臨界自由和總氯離子濃度與時間關係

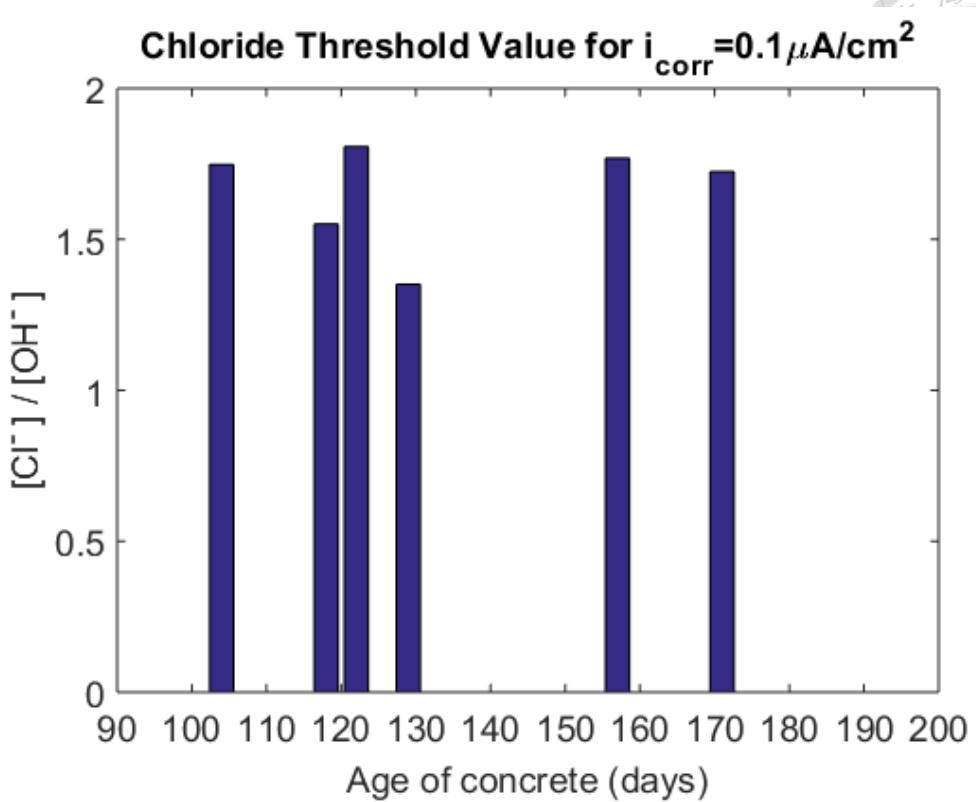


圖 5-22 去鈍化標準下  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  與時間關係

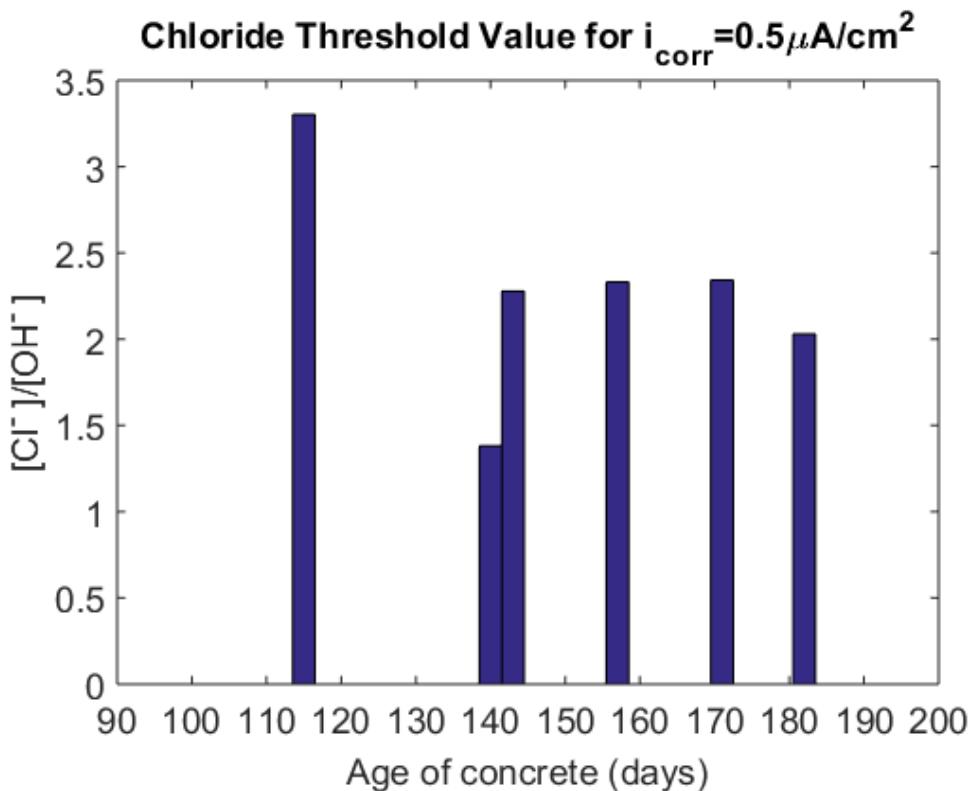


圖 5-23 中度腐蝕標準下  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  與時間關係

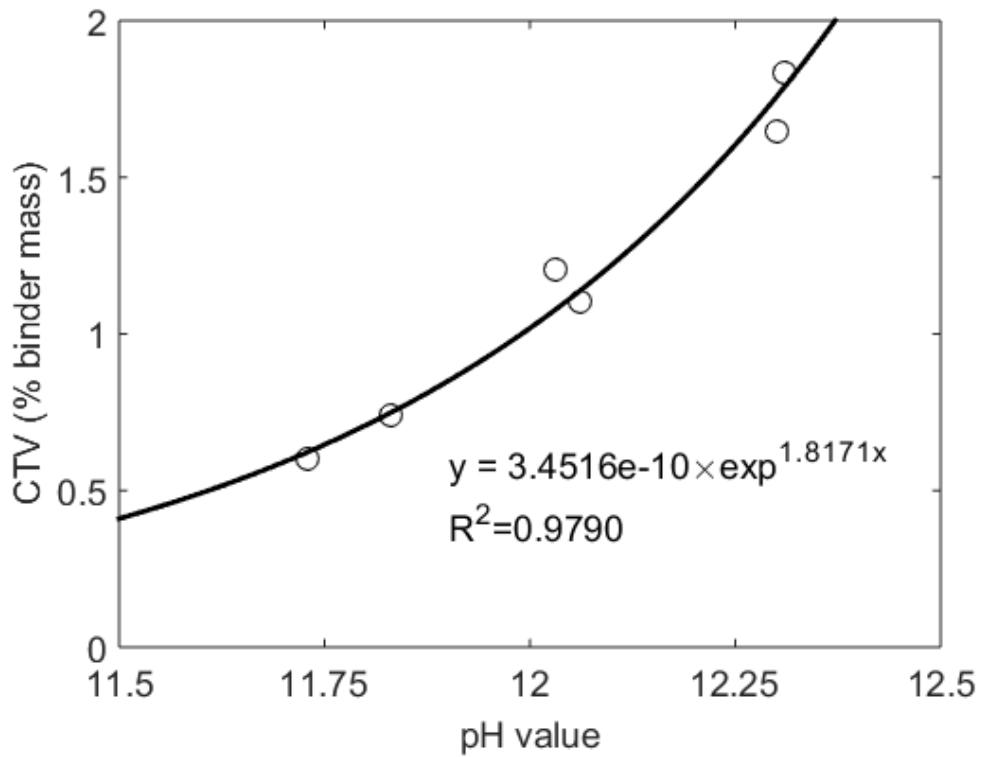


圖 5-24 去鈍化標準下臨界總氯離子濃度與混凝土酸鹼值之關係

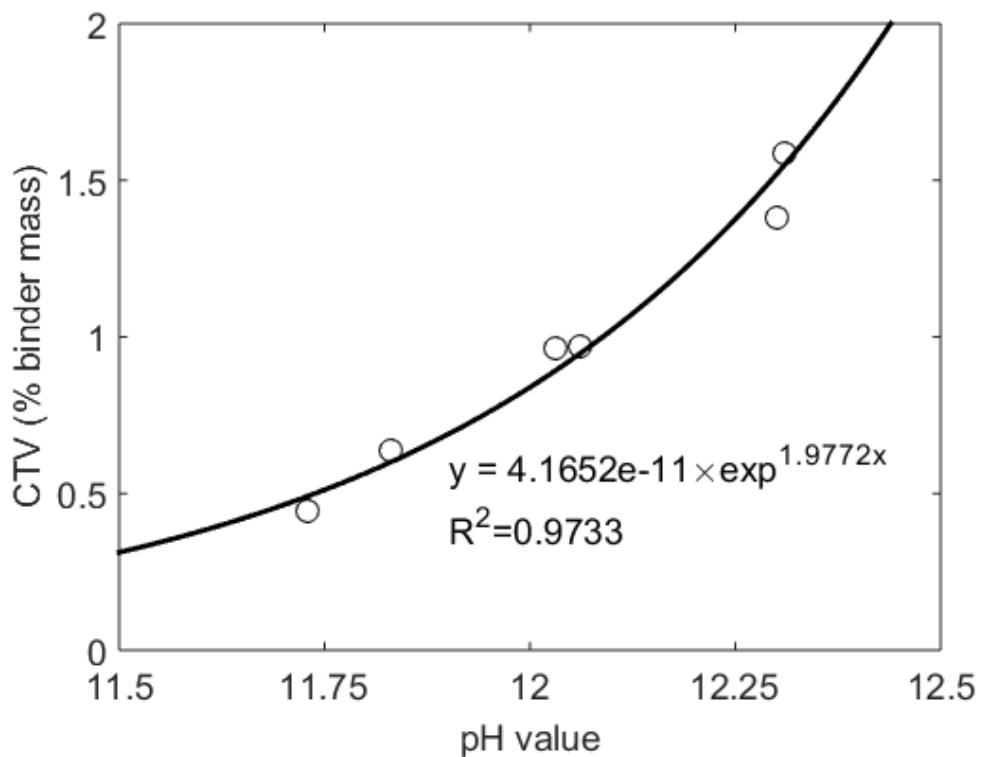


圖 5-25 去鈍化標準下自由氯離子濃與混凝土酸鹼值之關係

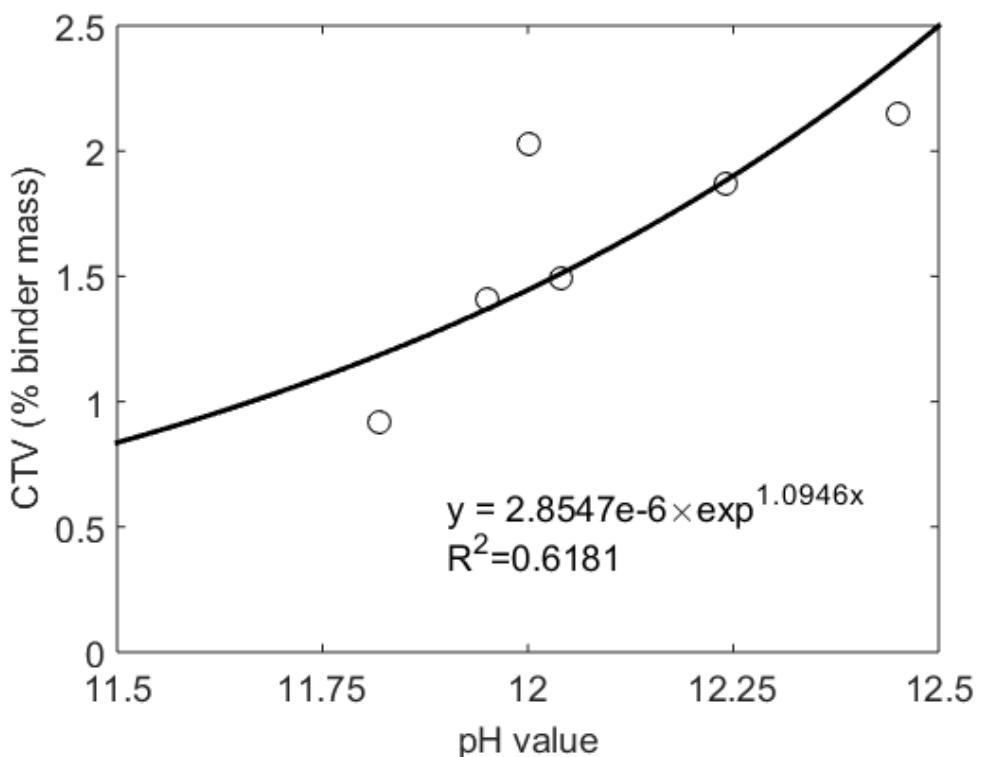


圖 5-26 中度腐蝕標準下臨界總氯離子濃度與混凝土酸鹼值之關係

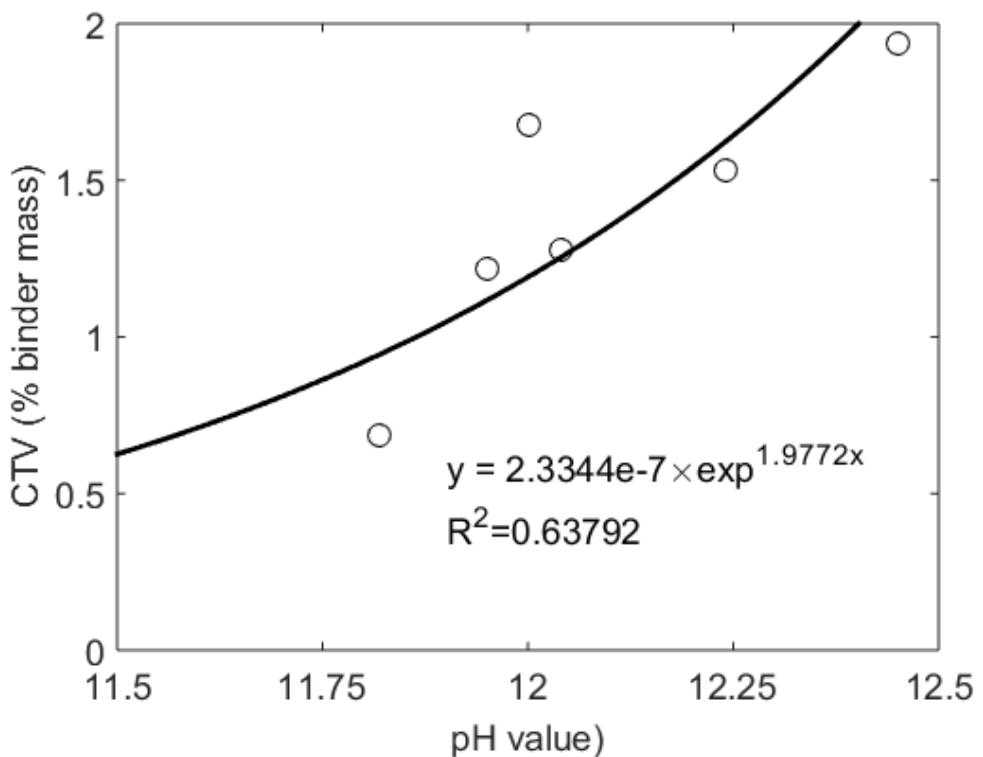


圖 5-27 中度腐蝕標準下臨界自由氯離子濃度與混凝土酸鹼值之關係



## 5.5. 以擴散係數及臨界氯離子濃度探討卜作嵐混凝土耐久性

爐石及飛灰對於混凝土有不同的作用，爐石在齡期較早的時候減少混凝土毛細孔隙，提升孔隙不連續性，降低擴散係數，使鋼筋表層的氯離子濃度累積較慢；飛灰在進行卜作嵐反應前總毛細孔隙體積較大，因此擴散係數較大使鋼筋表層氯離子迅速累積。

誘使鋼筋腐蝕為自由氯離子濃度，同時考慮混凝土緻密程度與臨界氯離子濃度的關係，以臨界自由氯離子濃度作為分析指標，與達到去鈍化標準的時間及自由氯離子擴散係數作三軸關係圖分析如圖 5-28、圖 5-29，與達到中度腐蝕標準的時間及自由氯離子擴散係數作三軸關係圖分析如圖 5-30、圖 5-31。圖 5-28 中平面為臨界自由氯離子濃度之平均值，任一峰值為試驗結果，當混凝土擴散係數越低，達到腐蝕的時間越久，但是僅需要較低的臨界氯離子濃度即能使鋼筋脫鈍，以不同標準對於評斷鋼筋混凝土的好壞是不合理的。圖 5-29 為將圖 5-28 的臨界自由氯離子濃度改為 $[Cl^-]/[OH^-]$ ，由兩張圖可知，以後者為標準，任一配比之試驗結果更加貼近平均值，且以相同的臨界值標準才能衡量添加卜作嵐材料之混凝土的耐久性。以中度腐蝕標準分析如圖 5-30、圖 5-31，有相同的趨勢。以圖 5-29、圖 5-31 分析，與一般混凝土相比，爐石混凝土因為孔隙結構較為緻密，擴散係數較低，因此需要較長的時間達到臨界氯離子濃度，飛灰混凝土在短齡期擴散係數較大，在短時間達到促使鋼筋腐蝕的標準。

透過擴散行為的誤差方程式了解短齡期時相同擴散係數下，時間和氯離子濃度成線性正比關係，將試驗結果依擴散係數分類並取其平均值，對各組數據作線性回歸，描繪出本次研究之試驗結果趨勢與臨界氯離子濃度關係，如圖 5-32。取去鈍化及中度腐蝕標準之 $[Cl^-]/[OH^-]$ 平均值如圖中兩平面作為腐蝕標準，相同擴散係數下 $[Cl^-]/[OH^-]$ 隨齡期增加而增加；相同齡期下，擴散係數越大累積的 $[Cl^-]/[OH^-]$ 越多；擴散係數越小，達到腐蝕的時間越晚。

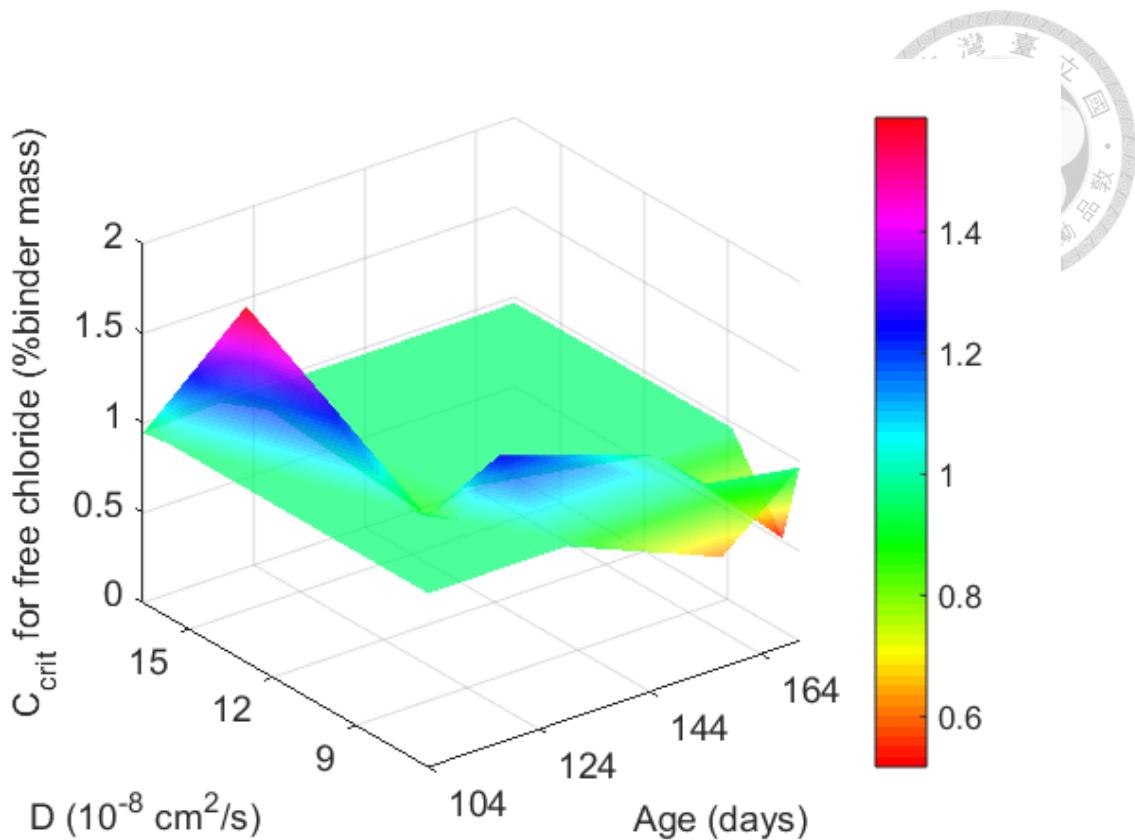


圖 5-28 去鈍化標準之臨界自由氯離子濃度與時間及擴散係數之關係

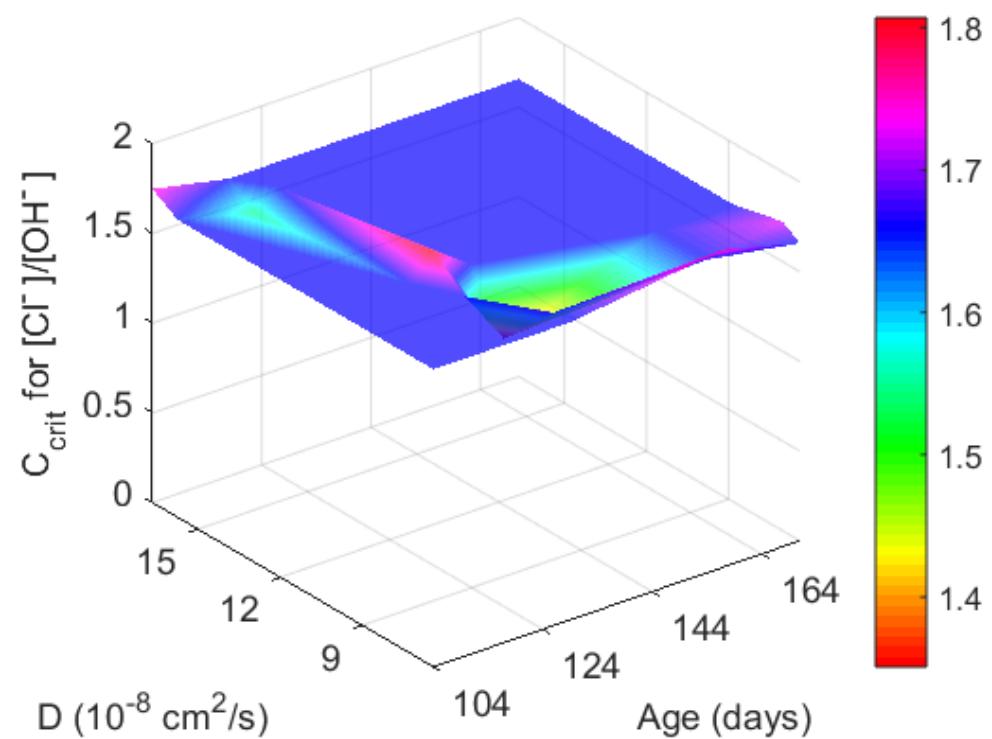


圖 5-29 去鈍化標準之 $[Cl^-]/[OH^-]$ 與時間及擴散係數之關係

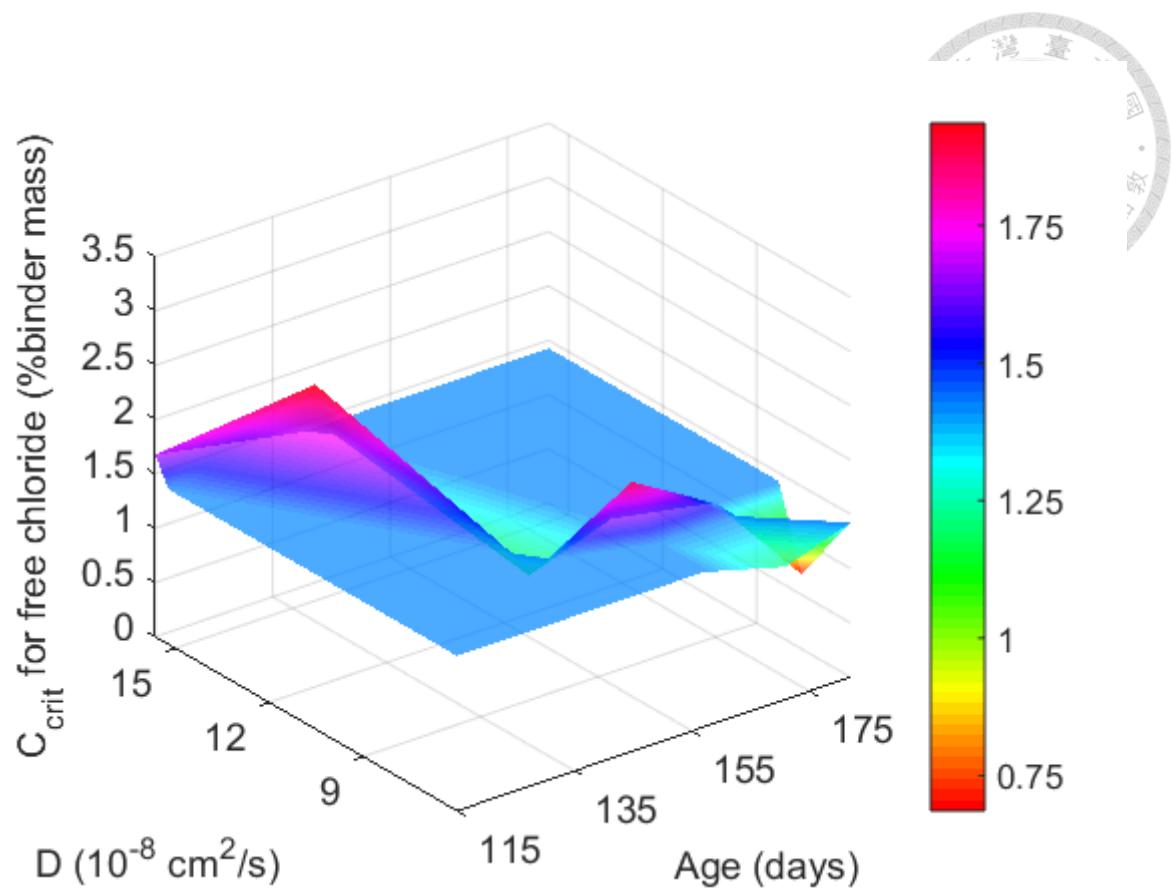


圖 5-30 中度腐蝕標準之臨界自由氯離子濃度與時間及擴散係數之關係

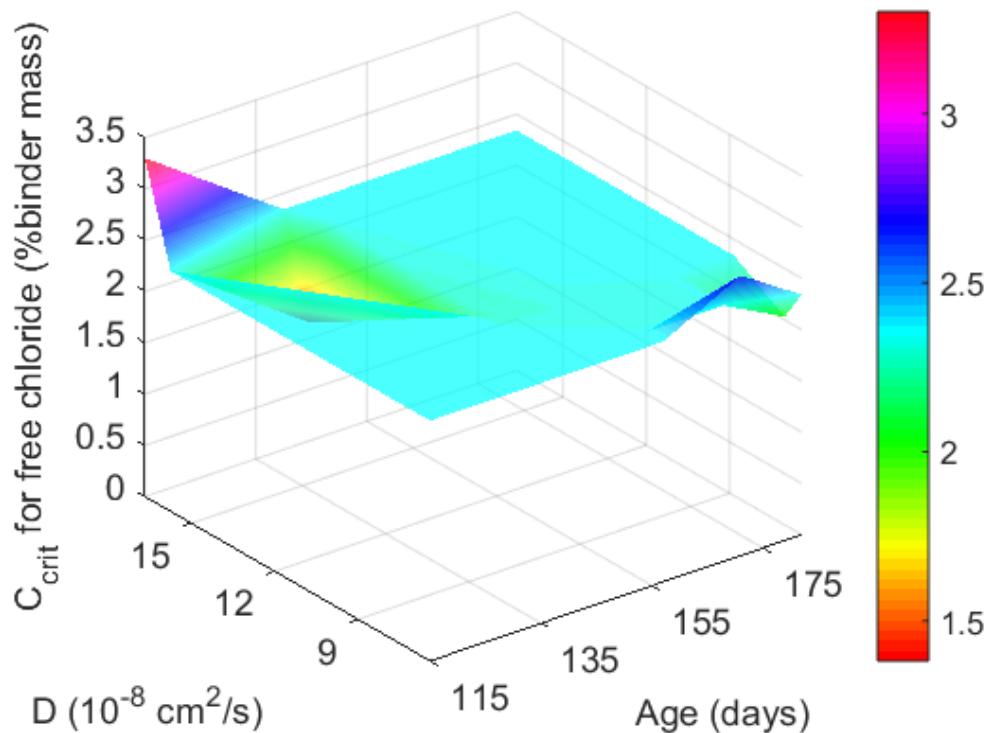


圖 5-31 中度腐蝕標準之 $[\text{Cl}]/[\text{OH}]$ 與時間及擴散係數之關係

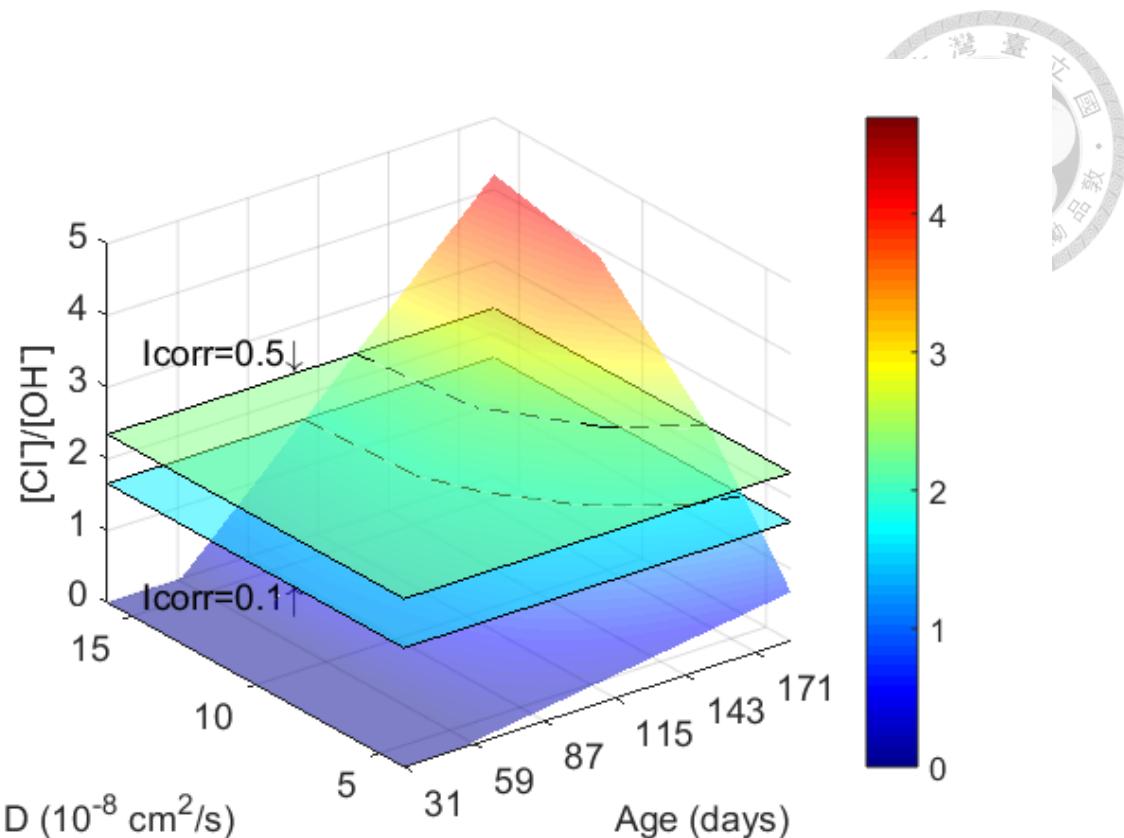


圖 5-32  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  與擴散係數及時間之關係圖

## 5.6. 卜作嵐材料對於耐久性之參數比較

透過本研究之試驗結果對混凝土之耐久性做不同參數分析，試驗條件為濕養護 28 天後進行貯鹽試驗 28、91 天，探討參數包含抗壓強度、擴散係數、總入滲量、氯離子固結能力、鋼筋腐蝕趨勢與臨界氯離子濃度，不同卜作嵐取代率對參數之影響整理如表 5-8。在 122 天齡期下，本研究認為爐石取代 40% 最能提升混凝土耐久性，其次為爐灰取代 30%，飛灰混凝土和一般混凝土之比較仍需要長齡期驗證。

表 5-8 本研究之卜作嵐取代與一般混凝土綜合比較

	爐石取代 40%	飛灰取代 20%	爐灰取代 30%
抗壓強度	122 天齡期抗壓強度能超越一般混凝土。	抗壓強度較一般混凝土低，經過更長齡期能夠繼續提升。	122 天齡期抗壓強度能超越一般混凝土。
擴散係數	短齡期降低擴散係數，使混凝土更加緻密。	孔隙結構較鬆散，使氯離子擴散至內部，但長齡期逐漸降低而緻密。	短齡期即降低擴散係數，孔隙結構較飛灰混凝土不連通。
總入滲量	總入滲量較低，將氯鹽抵抗於混凝土外。	總入滲量高，且侵入混凝土內部。	總入滲量略高，氯離子多集中在淺層。
氯離子固結能力	早齡期固化較多氯離子，且長齡期持續固化。	長齡期隨著卜作嵐反應而固化氯離子。	長齡期隨著卜作嵐反應而固化氯離子。
鋼筋腐蝕趨勢	進入鈍化狀態時間較晚，較低的氯離子濃度即能使鋼筋脫鈍。	腐蝕趨勢與一般混凝土相同。	進入鈍化狀態時間較晚，較低的氯離子濃度即能使鋼筋脫鈍。
臨界氯離子濃度 [Cl <sup>-</sup> ]/[OH <sup>-</sup> ]	臨界氯離子濃度與一般混凝土相近，達到腐蝕時間最晚。	臨界氯離子濃度與一般混凝土相近，達到腐蝕時間最早。	臨界氯離子濃度與一般混凝土相近，達到腐蝕時間僅次於爐石混凝土。

## 第六章 結論與建議



本研究主旨探討不同水膠比及卜作嵐材料取代之鋼筋混凝土的對於抵抗氯離子入侵能力，並藉由氯離子擴散行為了解誘發鋼筋開始腐蝕的臨界氯離子濃度。本研究所得到的結論如下所述。

### 6.1. 結論

- (1) 影響抗壓強度大小的主要因素為水膠比，水膠比越低，抗壓強度越高。
- (2) 在 28 天齡期，卜作嵐取代之混凝土的抗壓強度低於或接近一般混凝土。達到 122 天齡期時，添加爐石之混凝土抗壓強度超越一般混凝土，飛灰尚未反應完成，使抗壓強度略低，但在更長齡期卜作嵐取代之混凝土均仍有上升趨勢。
- (3) 擴散係數為混凝土緻密程度的表現。水膠比為主要影響混凝土緻密程度的因素，越低的水膠比有越高的緻密表現。
- (4) 爐石能夠使混凝土的孔隙細化並固結部分氯離子，使擴散係數降低，且有效抵抗氯離子於混凝土外部；飛灰進行卜作嵐反應前水密性較差，擴散係數大，且使大量的氯離子含量入侵至混凝土內部，但在長齡期能夠提升緻密程度；同時添加爐石和飛灰雖然孔隙率較大但孔隙不連通性較佳，擴散係數較低。
- (5) 透過抗壓強度並沒有辦法準確分析卜作嵐取代之混凝土的緻密性，因此應該要以更微觀的角度判斷混凝土的優劣。
- (6) 細密程度和腐蝕時間密切相關，越不緻密的混凝土達到腐蝕標準的時間越快，酸鹼值為次要因素。
- (7) 單以自由氯離子及總氯離子之臨界氯離子濃度作為卜作嵐取代的鋼筋混凝土之臨界氯離子濃度有低估的可能，少量的氯離子即能使鋼筋腐蝕。



- (8) 卜作嵐取代之混凝土降低酸鹼值，因此三種臨界氯離子濃度表示法中， $[Cl^-]/[OH^-]$ 能夠縮小臨界氯離子濃度的範圍，以此衡量卜作嵐取代之混凝土的臨界氯離子濃度較為恰當。
- (9) 當保護層 2cm 且養護齡期為 28 天，爐石取代 40% 水泥之鋼筋混凝土耐久性最好，其次為爐灰取代 30% 之混凝土、無卜作嵐取代之混凝土，耐久性最差的為飛灰取代 20% 之混凝土。

## 6.2. 建議

- (1) 目前僅完成部分水膠比及卜作嵐取代之組別，待完成有高緻密程度之組別後建立更完整的鋼筋混凝土與臨界氯離子濃度關係。
- (2) 本研究為求化學性質試驗之樣本數足夠，分層厚度較大導致有效樣本數較少，建議進行長齡期試驗並將有效樣本數至少提高到 6 個或以上。
- (3) 建議延長養護時間（90 天或 180 天）或是提高養護溫度使卜作嵐材料發揮出更好的效果，並延長試驗齡期使擴散係數的資料庫更完整。
- (4) 本研究之鋼筋混凝土中鋼筋並無明顯腐蝕情形，建議以較高的腐蝕電流密度對應鋼筋的腐蝕面積法、重量損失法，建立其關係。
- (5) 貯鹽試驗耗時長久，可利用壓力滲透試驗等加速試驗使氯離子較快滲入混凝土內部。

## 參考文獻



- [1] Ki Yong Ann, Ha-Won Song, "Chloride threshold level for coorosion of steel in concrete", *Corrosion Science* 49, pp. 4113-4133, 2007.
- [2] 黃兆龍,「混凝土中氯離子含量檢測技術及試驗」,訓練班教材,民國九十三年。
- [3] 吳建國、黃然、梁明德等,「混凝土橋樑鹽分腐蝕問題之研究」,交通台灣區國道新建工程局,民國 82 年
- [4] Mario Collepardi, Aldo Marcialis, Renato Turriziani, "Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes, *Journal of the American Ceramic Society*, Volume 55, Issue 10, pp.534-535, 1972
- [5] Modeling the transport of multiple corrosive chemicals in concrete structures , Ming-Te Linag and Shieng-Min Lin,2003
- [6] 劉彥志,「飛灰混凝土傳輸行為之研究」,碩士論文,國立臺灣海洋大學材料工程研究所,民國一百年六月。
- [7] 王駿紳,「快速評估貯鹽浸漬試驗之水泥砂漿氯離子擴散行為」,碩士論文,國立臺灣海洋大學材料工程研究所,民國一百零一年六月。
- [8] 張廷駿,「探討鹽霧試驗與貯鹽試驗對混凝土耐久性之關聯性」,碩士論文,國立臺灣海洋大學材料工程研究所,民國一百零二年六月。
- [9] 鄭佳緯,「以混凝土中氯離子滲入總含量探討實驗室內試驗及戶外曝曬試驗之關係」,碩士論文,國立臺灣海洋大學材料工程研究所,民國一百零三年六月。
- [10] 林致緯,「以鹽水浸漬試驗與快速氯離子滲透試驗探討混凝土中氯離子擴散行為」,碩士論文,國立臺灣海洋大學材料工程研究所,民國九十五年六月。
- [11] 蔡曼廷,「使用壓力滲透試驗探討混凝土中氯離子之滲透行為」,碩士論文,國立臺灣大學土木工程研究所
- [12] 何季軒,「以貯鹽試驗探討鋼筋混凝土之臨界氯離子濃度」,碩士論文,國立臺灣大學土木工程研究所
- [13] M. Castellote, C. Andrade, C. Alonso, "Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the

conductivity in the anolyte chamber comparison with nature diffusion tests”,

Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 1411-1420, 2001

[14] M. D. A. Thomas, P. B. Bamforth, “Modelling chloride diffusion in concrete Effect

of fly ash and slag”, Cement and Concrete Research 29, pp. 487-495, 1999.

[15] 日本土木學會,「高爐石粉末應用於混凝土施工指針」,平成 8 年。

[16] Mehta and P. K., “Pozzolanic and Cementitious by Products as Mineral

Admixtures for Concrete-A Critical Review”, ACI SP-79, pp. 1-46, 1983.

[17] ACI Committee 233, "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious

Constituent in Concrete," American Concrete Institute, Detroit, 1996.

[18] D Manmohan, PK Mehta – Cement, Influence of pozzolanic, slag, and chemical

admixtures on pore size distribution and permeability of hardened cement pastes,

Concrete and Aggregates, 1981

[19] Hogan, F.J., Meusel, J.W., “Evaluation for Durability and Strength Development of

a Ground Granulated Blast-Furnace Slag,” Cement, Concrete, and Aggregates, vol.

3, no.1, pp.40-52, 1981.

[20] Yuebo, L.R.C., Changyi, W., Xiaoming, H., “Study of chloride binding and

diffusion in GGBS concrete,” Cement and Concrete Research, vol. 33, no.1, pp.1-

7, 2003.

[21] An, C., Ran, H., Jiann-Kuo, W., Cheng-Hsin, C., “Influence of GGBS on durability

and corrosion behavior of reinforced concrete,” Material Chem Phys, vol. 93,

pp.404–411,2005.

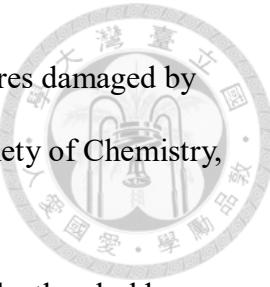
[22] Al-Gahtani, A.S., Rasheeduzzafar, Al-Saadoun, S.S., “Rebar corrosion and sulfate

resistance of blast-furnace slag cement,” J Mater Civil Eng. , vol.6, no.2, pp.223–

233,1993.

[23] VK Gouda, V.K., ”Corrosion and corrosion inhibition of reinforced steel. I.

Immersed in alkaline solutions,” Br Corros J, vol.5, pp.198–203, 1970.



- [24] Schiessl, P., Breit, W., “Local repair measures at concrete structures damaged by reinforcement corrosion— aspects of durability,” The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1996, pp. 525–534.
- [25] Oh, B.H., Jang, S.Y., Shin, Y.S., “Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures,” Magazine of Concrete Research, vol. 55, pp. 117–124, 2003.
- [26] Sergi, G., Glass, G.K., “A method of ranking the aggressive nature of chloride contaminated concrete,” Corrosion Science vol. 42, pp.2043-2049,2000.
- [27] Ha-Won, S., Min-Sun J., Chang-Jong L., Sang-hyo K., Ann, K.Y., “Influence of Chemistry of Chloride Ions in Cement Matrix on Corrosion of Steel,” ACI Materials Journal, Vol.107, No.4, July-August 2010.
- [28] 賴正義,「高飛灰量混凝土性質」,台電工程月刊,第 551 期,民國八十三年。
- [29] 宋佩瑄,「矽灰在混凝土工程上之發展與應用」,結構工程,第 113-120 頁,民國七十七年。
- [30] Zhuqing Yu, Guang Ye, “The pore structure of cement paste blended with fly ash”, Construction and Building Materials 45, pp. 30-35, 2013
- [31] Diamond, S., “Effects of two danish fly ashes on alkali contents of pore solutions of cement-fly ash pastes,” Cement and Concrete Research, vol. 11, pp. 383–394, 1981
- [32] Thomas, M. “Chloride threshold in marine concrete,” Cement and Concrete Research, vol. 26, pp. 513–519, 1996.
- [33] Arya, C., Buenfeld, N.R. and Newman, J.B., “Factors influencing chloride-binding in concrete,” Cement and Concrete Research, vol. 20, pp. 291–300, 1990.
- [34] Dhir, R.K., Jones, M.R. “Development of chloride-resisting concrete using fly ash,” Fuel, vol. 78, pp. 137–142, 1999.

[35] ACI Committee 226, "Silica Fume in Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 84, No. 6, pp. 158-166, 1987.

[36] 李修齊,「高強度混凝土水中磨耗性質之機理探討」,碩士論文,國立台灣大學土木工程研究所,民國八十六年七月。

[37] Pettersson, K., "Chloride threshold value and the corrosion rate in reinforced concrete," Proc. of the Nordic Seminar, Lund, 1995, pp. 257-266.

[38] Manera, M., Vennesland, Q. and Bertolini, L., "Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume," Corrosion Science vol. 50, pp. 554-560, 2008.

[39] Page, C.L., Vennesland, Q., "Pore solution composition and chloride binding capacity of silica fume-cement pastes," Materials and Structures, vol. 19, pp. 19-25, 1983.

[40] Larsen, C.K."Chloride binding in concrete," Norwegian University of Science and Technology, 1998.

[41] Tang, L., Nilsson, L.O., "Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars," Cement and Concrete Research, vol. 23, pp.247-253, 1993.

[42] Lambert, P., Page, C.L., Short, N.R., "Pore Solution Chemistry of the Hydrated System Tricalcium Silicate/Sodium Chloride/Water," Cement and Concrete. Research, Vol. 15, pp. 675-680, 1985.

[43] Rasheeduzzafar, Ehtesham, H.S. and Al-Saadoun, S.S., "Effect of Tricalcium Aluminate Content of Cement on Chloride Binding and Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete," ACI Materials Journal, pp. 3-12, January-February 1992.

[44] Dhir, R.K., El-Mohr, M.A.K., Dyer, T.D., "Chloride binding in GGBS concrete," cement and Concrete Research, vol. 26, no.12, pp.1767-1776, 1996.

[45] Rui, L., Yuebo, C., Changyi, W., Xiaoming, H., "Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete," Cement and Concrete Research, vol. 33, pp.1-7,

2003.

- [46] T Sumranwanich, S Tangtermisirikul, A chloride binding capacity model for cement-fly ash pastes, 27th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 29 - 30 August 2002,
- [47] Gro Markeset and Roar Myrdal, Modelling of reinforcement corrosion in concrete - State of the art, COIN Project report 7, 2008
- [48] Ľudovít KRAJČI, Ján JERGA, Assessment of steel reinforcement corrosion state by parameters of potentiodynamic diagrams, De Gruy, Vol. 11, Issue 2, 95-102, 2015
- [49] Uhlig, H.H. and Revie, R.W. Corrosion and Corrosion Control. New York: Wiley, 1985, pp.28-35.
- [50] Andrade, C., Castellote, M., Sarria, J. and Alonso, C., "Evolution of Pore Solution Chemical, Electroosmosis and Rebar Corrosion Rate Induced by Realkalisation," Materials and Structures, Vol.32, pp.427-436, 1999.
- [51] Shalon, R. and Raphael, M., "Influence of Sea Water on Corrosion of Reinforcement," ACI Journal, Vol. 55, No.12, pp.1251-1268, 1959.
- [52] Fraczek, J., "A Review of Electrochemical Principles as Applied to Corrosion Corrosion of Steel in a Concrete or Grout Environment," ACI SP 102-2, pp. 13-24, 1987.
- [53] Angst, U., Elsener, B., Larsen, C.K., Vennesland, Q., "Critical chloride content in reinforced concrete — A review," Cement and Concrete Research, vol.39, pp.1122-1138, 2009.
- [54] Tuutti, K., "Corrosion of Steel in Concrete," Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- [55] Jinxia, X., Linhua, J., Weilun, W., Jiang, Y., "Influence of CaCl<sub>2</sub> and NaCl from different sources on chloride threshold value for the corrosion of steel



reinforcement in concrete,” Construction and Building Materials, vol.25, pp.663-669, 2011.

[56] Ann, K.Y., Song, H.W., “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete,” corrosion science, vol.49, pp.4113-4133, 2007.

[57] 內政部建築研究所協同研究報告，本土性硬固混凝土氯離子含量與標準與檢測方法之研究，民國 100 年。

[58] 環保署，廢棄物之氫離子濃度指數（pH 值）測定方法—電極法，民國 97 年

[59] Jennifer, A.G., Hemant, S.L., Ashok, M.K., “Testing pH of Concrete,” Concrete International, 2007

[60] ASTM C-876, “Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”, 1999

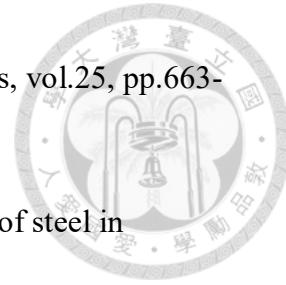
[61] Liu, Y., Weyers, R. E., “Comparison of Guarded and Unguarded Linear Polarization CCD Devices with Weight Loss Measurements”, Elsevier Science Ltd, Cement and Concrete Research Vol. 33, pp. 1093-1101, 2003.

[62] Broomfield, J. P., Rodriguez, J., L.M. Ortega, “Corrosion Rate and Life Prediction for Reinforced Concrete Structures”, Structure Faults and Repairs Symposium, Historic University of Edinburgh, Scotland, 1993.

[63] Gonza'lez, J.A., Algaba, S., Andrade, C., “Corrosion of reinforcing bars in carbonated concrete ,” Br Corros J, vol. 15, no. 3, pp.135 – 139, 1980.

[64] Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., Castro, P., “Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar,” Cement and Concrete Research, vol. 30, pp.1047 – 1055, 2000.

[65] Erhan Güneyisi, Mehmet Gesoġlu, Fatih Karaboġa, Kasım Mermerdas, “Corrosion behavior of reinforcing steel embedded in chloride contaminated concretes with and without metakaolin”, Composites: Part B 45 pp. 1288–1295, 2013.



- [66] Stern, M., Geary, A.L., “Electrochemical Polarisation. I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarisation Curves”, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 104, pp. 56-63, 1957.
- [67] 柯賢文,「腐蝕及其防制」,全華科技圖書有限公司,民國八十四年
- [68] Rodriguez, J., Ortega, L.M., Garcia, A.M., “Corrosion Rate Measurements in Concrete Bridges by Means of the Linear Polarization Technique Implemented in a Field Device,” *ACI fall convention*, Minneapolis, Minnesota, November 1993.
- [69] Morris, W., Vico, A., M. Vazquez, S. R. Sanchez, “Corrosion of Reinforcing Steel Evaluated by Means of Concrete Resistivity Measurements”, Elsevier Science Ltd, *Corrosion Science*, Vol. 44, pp. 81-99, 2002.
- [70] Polder, R.B., “Test Methods for on Site Measurement of Resistivity of Concrete - a RILEM TC-154 Technique Recommendation”, Elsevier Science Ltd, *Construction and Building Materials*, Vol. 15, pp. 125-131, 2001.
- [71] Tao Yang, Xiao Tao, “Quantification of chloride diffusion in fly ash-slag-based geopolymers by X-ray fluorescence(XRF)”, *Construction and Building Materials*, Vol. 69, pp. 109-115, 2014.