

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

不同靜水壓力下混凝土之氯離子傳輸行為
Transmission Behavior of Chloride Ion in Concrete
under Different Hydrostatic Pressures

鄭誠竣

Cheng-Jyun Jheng

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

本論文之完成，首先要感謝恩師詹穎雯教授於兩年之間的諄諄教誨與悉心教導，使我在研究以及待人處事方面能更加嚴謹、專業知識以及眼界更加寬闊，在此致上最高的敬意與感恩。

感謝陳振川教授與廖文正教授於平時研究群討論時不吝指正學生疏漏之處並導正研究方向，於研究遭遇挫折時，總有老師們的幫助，使學生的思緒更加清晰，論文亦更臻豐富。

感謝楊仲家教授在口試時給予的諸多寶貴意見，使我的論文得以更加完整且正確。

感謝育聖學長、暉仁學長、泓斌學長、永昌學長以及威佑學長，不管在生活或是研究上不時的關切與照顧，並耐心教導學弟實驗儀器使用技巧，使我在專業知識上能有更多的收穫，也讓我透過各式各樣的試驗，體會學習與工作上的樂趣。

感謝同學泰誠、毓源、鈺軒、昆穎、韋如、郁珊在這兩年的時間一起相互扶持，一起享受歡樂一起度過低潮，在沉重的實驗與論文壓力下彼此激勵與協助，此篇論文可說是沒有你們無法完成，這些點點滴滴將會是我這研究所生活中最難忘的回憶。

感謝學弟家禎、凱蔚、凱越、祖祐、王丞、維邑、庭愷，學妹宜庭，有你們在生活上時常給予研究室許多歡笑，以及在實驗上大大小小的協助，使實驗可以順利進行並完成。

最後特別感謝我的父母，因為有你們在我背後默默支持及生活上不時的關心，使我在研究生涯中能無後顧之憂地往前進，是我最強大的動力來源與精神支柱。



摘要

貯鹽試驗為常見耐久性試驗，而相關規範訂定最短取樣時間為 90 天，因此試驗過程曠日費時。本研究為使判斷混凝土耐久性的過程能夠縮短，透過加壓方式加速氯離子於混凝土中傳輸，稱為「壓力滲透試驗」。

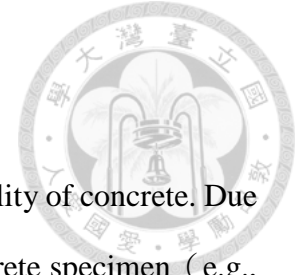
本研究透過水膠比為 0.55 之混凝土、靜水壓力大小為 3、5 kgf/cm² 進行壓力滲透試驗，相同試驗時間下，比較有無靜水壓力以及各種參數（卜作嵐材料種類及取代率、混凝土抗壓強度等）對於氯離子傳輸行為的影響。最後以「氯離子侵入深度」以及「氯離子濃度累積速率」作為指標，建立壓力滲透試驗做為加速性試驗取代貯鹽試驗的基礎。

為簡化分析靜水壓力下氯離子傳輸行為，假設滲流對於氯離子傳輸的影響由擴散作用貢獻，以擴散方程式擬合壓力滲透試驗氯離子含量，可計算得到等效氯離子傳輸係數 (D_{eq})，然而擴散方程式與滲流—擴散方程式線型不盡相同，隨著試驗時間以及靜水壓力的增加，滲流影響越顯著，兩者線型差異越大，相關係數 R^2 越低。本研究選取 R^2 為 0.900 以上做為參考，於特定試驗條件下，能利用等效氯離子傳輸係數 (D_{eq}) 取代滲流—擴散方程式。從 7 天試驗結果顯示，貯鹽試驗擴散係數 (D) 與壓力滲透試驗等效氯離子傳輸係數 (D_{eq}) 有良好線性關係，因此透過 D 與 D_{eq} ，即能建立貯鹽試驗與壓力滲透試驗之間的關係，且 D_{eq} 數值大小亦能夠判斷混凝土耐久性，其判斷結果與擴散係數 (D) 相符。

若以「氯離子侵入深度」為指標，試驗結果顯示 21 天 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗做為加速性試驗能取代 90 天貯鹽試驗；又以「氯離子濃度累積速率」為指標，亦能發現相同結果。

關鍵字：混凝土、氯離子、卜作嵐材料、貯鹽試驗、壓力滲透試驗、擴散係數、等效氯離子傳輸係數

Abstract



Salt ponding test is a common method for evaluating the durability of concrete. Due to that chloride ion requires considerable time to penetrate the concrete specimen (e.g., 90-day Salt ponding test), the salt ponding test is regarded to be a long-term test. In order to shorten the process of evaluating the durability of concrete, this study adopts hydrostatic pressure to accelerate the movement of chloride ion, and this method is defined as “Seepage pressure test”.

To know the transmission behavior of chloride ion, the influences caused by hydrostatic pressures, pozzolanic material types, replacement rates and compressive strengths under the same duration of testing time are discussed in this study. Two hydrostatic pressures 3 and 5 kgf/cm² and water-cement ratio of 0.55 are adopted in the experiments. By quantifying the influences, the seepage pressure test can be proved to be an accelerated test and able to substitute salt ponding test with the indexes like the depth of chloride ion penetration and the accumulation rate of chloride ion concentration.

In order to simplify the analysis of the transmission behavior of chloride ion under hydrostatic pressures, it is supposed that the transmission behavior is contributed by the diffusion. Therefore, the diffusion equation is fitted to the chloride concentration data from seepage pressure test to obtain equivalent chloride transmission coefficient D_{eq} . However, the curved shape of diffusion equation and convection-diffusion equation are not the same. With the testing time increasing, the greater the difference between the two curved shape will be, and the correlation coefficient R^2 will decrease. In this study, the correlation coefficient R^2 , higher than 0.900, is taken as a baseline, to make sure D_{eq} can be applied to substitute convection-diffusion equation and describe the transmission behavior of chloride ion under hydrostatic pressures. Moreover, the 7 days experimental results show that diffusion coefficient D and equivalent chloride transmission coefficient

D_{eq} have a good linear relationship. Therefore, it is expected that D and D_{eq} can be used to establish the relation between salt ponding test and seepage pressure test. In addition, D_{eq} can also be applied to determine the durability of concrete.

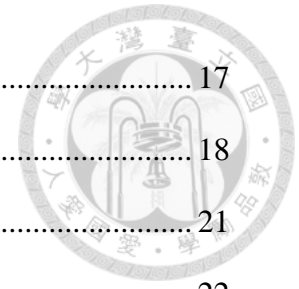
By taking the depth of chloride ion penetration as the index, experimental results show that 21-day seepage pressure test, with 5 kgf/cm^2 hydrostatic pressure, can be used to substitute 90-day salt ponding test. Similarly, by taking the accumulation rate of chloride ion concentration as the index, the experimental results show the same as above.

Keywords : concrete, chloride, pozzolanic material, salt ponding test, seepage pressure test, diffusion coefficient, equivalent chloride transmission coefficient

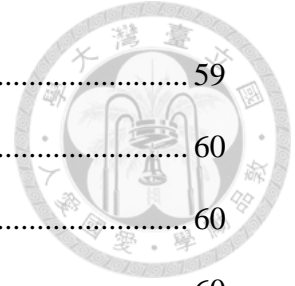
目錄



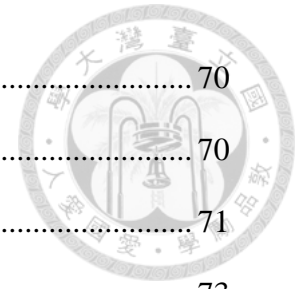
誌謝	i
摘要	ii
Abstract.....	iii
目錄	v
表目錄	x
圖目錄	xiv
照片目錄	xvii
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機與目的	1
1.3 研究方法與內容	2
第二章 文獻回顧	4
2.1 混凝土內氯離子簡介	4
2.1.1 氯離子來源	4
2.1.2 氯離子存在型態	5
2.1.3 混凝土內氯鹽含量之相關規範	6
2.2 氯離子於混凝土中的傳輸途徑與機制	7
2.2.1 擴散作用	8
2.2.2 滲透作用	8
2.2.3 毛細作用	9
2.2.4 電遷移作用	10
2.2.5 複合傳輸機制	10
2.3 混凝土孔隙結構	15
2.4 卜作嵐材料對於混凝土耐久性的影響	16



2.4.2	飛灰	17
2.4.3	爐石	18
2.5	膠結材料固結氯離子之能力	21
2.5.1	水泥對於氯離子固結能力的影響	22
2.5.2	卜作嵐材料對於氯離子固結能力的影響	22
2.6	臨界氯離子濃度	22
2.7	混凝土氯離子耐久性試驗	24
2.7.1	貯鹽試驗 (Salt Ponding Test)	25
2.7.2	壓力滲透試驗 (Seepage Pressure Test)	25
2.8	氯離子在混凝土中的擴散行為	26
2.8.1	擴散方程式	26
2.8.2	擴散係數之時間效應	29
2.9	靜水壓力對於氯離子傳輸行為之影響	34
2.9.1	滲流—擴散方程式	34
2.9.2	混凝土滲透係數	35
2.9.3	靜水壓力對於氯離子侵入深度之影響	35
2.9.4	靜水壓力下 Fick's Second Law 之適用性	35
2.10	硬固混凝土氯離子濃度檢測	40
2.10.1	比色法	40
2.10.2	酸溶法、水溶法	41
第三章	實驗計畫	44
3.1	實驗內容與方法	44
3.2	試驗材料與配比	46
3.3	試驗設備	51
3.4	試體製作	58
3.4.1	試驗材料與設備	58



3.4.2 拌和流程	59
3.5 抗壓強度試驗	60
3.5.1 試驗說明	60
3.5.2 試驗試體	60
3.5.3 試驗方法	60
3.6 壓力滲透試驗	61
3.6.1 試驗說明	61
3.6.2 試驗試體	61
3.6.3 試驗方法	61
3.7 貯鹽試驗	63
3.7.1 試驗說明	63
3.7.2 試驗試體	63
3.7.3 試驗方法	63
3.8 比色法	64
3.8.1 試驗說明	64
3.8.2 試驗方法	64
3.9 水溶性氯離子濃度滴定試驗	66
3.9.1 試驗說明	66
3.9.2 試體取樣	66
3.9.3 試驗方法	66
3.10 酸溶性氯離子濃度滴定試驗	67
3.10.1 試驗說明	67
3.10.2 試體取樣	67
3.10.3 試驗方法	67
第四章 試驗結果與討論	69
4.1 前言	69



4.2 抗壓強度試驗	70
4.2.1 卜作嵐材料取代率對於抗壓強度之影響	70
4.2.2 小結	71
4.3 比色法氯離子侵入深度	73
4.3.1 添加卜作嵐材料對於氯離子侵入深度之影響	73
4.3.2 靜水壓力對於氯離子侵入深度之影響	74
4.3.3 加壓時間對於氯離子侵入深度之影響	74
4.4 混凝土內距表面各深度氯離子濃度	78
4.4.1 混凝土內各深度總氯離子濃度與自由氯離子濃度比較	78
4.4.2 硝酸銀變色範圍之氯離子濃度	79
4.5 氯離子擴散係數	86
4.5.1 卜作嵐材料對於擴散係數之影響	87
4.5.2 擴散係數之時間效應	87
4.5.3 以抗壓強度評估混凝土氯離子擴散係數	88
4.6 氯離子滲流速度	93
4.7 氯離子侵入量	96
4.7.1 卜作嵐材料對於氯離子侵入量之影響	96
4.7.2 靜水壓力對於氯離子侵入量之影響	96
4.7.3 加壓時間對於氯離子侵入量之影響	97
4.8 混凝土內各深度氯離子濃度累積速率	100
4.9 等效氯離子傳輸係數	102
第五章 壓力滲透試驗取代貯鹽試驗可行性分析	109
5.1 前言	109
5.2 控制方程式參數分析	111
5.2.1 參數選取方式	111
5.2.2 控制方程式於不同參數下之差異	111

5.2.3 小結	113
5.3 等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 適用性分析	116
5.3.1 試驗時間與靜水壓力對於等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 的影響	117
5.3.2 各配比等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 與對照組擴散係數 D 之關係 ..	118
5.4 靜水壓力對於比色法氯離子侵入深度之效益	122
5.4.1 7 天壓力滲透試驗比色法氯離子侵入深度對照組所需試驗時間	122
5.4.2 90 天貯鹽試驗侵入深度壓力滲透試驗所需加壓時間 t_s	123
5.4.3 小結	123
5.5 氯離子侵入深度模型探討	127
5.5.1 模型中氯離子侵入深度定義	127
5.5.2 貯鹽試驗氯離子侵入深度模型	129
5.5.3 壓力滲透試驗氯離子侵入深度模型	131
5.5.4 小結	132
5.6 氯離子濃度累積速率	141
5.6.1 靜水壓力對於濃度累積之效益	141
5.6.2 靜水壓力對於特定深度氯離子濃度累積之效益	142
5.6.3 小結	143
第六章 結論與建議	147
6.1 結論	147
6.2 建議	151
參考文獻	152

表目錄



表 2-1 混凝土拌和水品質檢驗標準[2]	5
表 2-2 氯離子含量規定[7][8].....	7
表 2-3 不同環境複合傳輸機制[10]	12
表 2-4 Input parameters and range of sensitivity investigation[17]	12
表 2-5 Variation in chloride concentration at level of reinforcement after 50 years[17]	13
表 2-6 C、F 級飛灰典型化學成分[27]	19
表 2-7 飛灰混凝土 (W/B = 0.5) 抗壓強度與孔隙率[30]	20
表 2-8 爐石混凝土配比 (kg/m ³) [33].....	20
表 2-9 北歐環境臨界氯離子建議值[40]	24
表 2-10 BS EN 206-1 臨界氯離子建議值[44].....	24
表 2-11 衰減常數 m 文獻數據.....	31
表 2-12 貯鹽試驗擴散係數相關研究.....	32
表 2-13 混凝土滲透係數文獻數據.....	37
表 2-14 混凝土配比[54]	37
表 2-15 Chloride diffusion coefficients at different pressure[75]	38
表 2-16 Mix proportion and experimental parameters[76]	38
表 2-17 比色法變色深度對應氯離子濃度[80]	42
表 2-18 變色邊界氯離子濃度重複性統計結果[54]	42
表 2-19 各國酸溶性氯離子濃度檢測方式差異性[82]	43
表 2-20 各國水溶性氯離子濃度檢測方式差異性[82]	43
表 3-1 實驗參數表.....	44
表 3-2 台泥品牌第 I 型波特蘭水泥化學成分.....	47
表 3-3 台泥品牌第 I 型波特蘭水泥物理性質.....	48

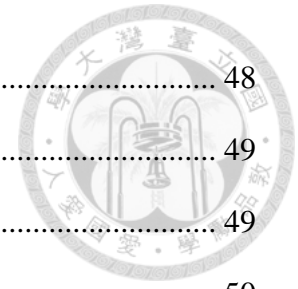


表 3-4 粗粒料篩分析與物理性質.....	48
表 3-5 細粒料篩分析與物理性質.....	49
表 3-6 高爐石化學成分.....	49
表 3-7 高爐石物理成分.....	50
表 3-8 F 級飛灰化學物理性質.....	50
表 3-9 混凝土試體配比.....	50
表 3-10 各配比實際坍度.....	59
表 4-1 第四章圖例說明.....	69
表 4-2 各配比隨齡期發展抗壓強度數據.....	72
表 4-3 貯鹽試驗比色法氯離子侵入深度.....	75
表 4-4 各配比 7 天壓力滲透試驗與對照組比色法氯離子侵入深度差異.....	75
表 4-5 055OPC 各試驗時間壓力滲透與對照組比色法氯離子侵入深度差異.....	76
表 4-6 055OPC 貯鹽試驗自由氯離子濃度數據.....	79
表 4-7 055S40 貯鹽試驗自由氯離子濃度數據.....	80
表 4-8 055F20 貯鹽試驗自由氯離子濃度數據.....	80
表 4-9 055F40 貯鹽試驗自由氯離子濃度數據.....	80
表 4-10 055SF30 貯鹽試驗自由氯離子濃度數據.....	81
表 4-11 055OPC 壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據.....	81
表 4-12 055S40 壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據.....	81
表 4-13 055F20 壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據.....	82
表 4-14 055F40 壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據.....	82
表 4-15 055SF30 壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據.....	82
表 4-16 055OPC 不同加壓時間壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據.....	83
表 4-17 055OPC 貯鹽試驗自由氯離子與總氯離子比較.....	83
表 4-18 055S40 貯鹽試驗自由氯離子與總氯離子比較.....	84
表 4-19 055F20 貯鹽試驗自由氯離子與總氯離子比較.....	84

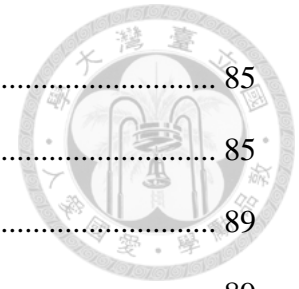


表 4-20 055F40 貯鹽試驗自由氯離子與總氯離子比較.....	85
表 4-21 055SF30 貯鹽試驗自由氯離子與總氯離子比較.....	85
表 4-22 各配比擴散係數.....	89
表 4-23 不同配比 118 天齡期抗壓強度與擴散係數比較.....	89
表 4-24 各配比壓力滲透試驗氯離子滲流速度.....	94
表 4-25 貯鹽試驗隨試驗時間發展之氯離子侵入量.....	97
表 4-26 7 天壓力滲透試驗與對照組比色法氯離子侵入量差異.....	98
表 4-27 055OPC 各試驗時間壓力滲透與對照組氯離子侵入量差異.....	98
表 4-28 各配比壓力滲透試驗等效氯離子傳輸係數 D_{eq}	104
表 5-1 圖例說明.....	109
表 5-2 參數範圍.....	113
表 5-3 本研究試驗條件.....	119
表 5-4 各試驗時間壓力滲透試驗等效氯離子傳輸係數 D_{eq}	119
表 5-5 貯鹽試驗隨試驗時間發展之氯離子侵入深度.....	124
表 5-6 預測貯鹽試驗所需試驗時間.....	125
表 5-7 貯鹽試驗於預測時間之氯離子侵入深度.....	125
表 5-8 壓力滲透試驗於預測時間之氯離子侵入深度.....	125
表 5-9 055OPC 貯鹽試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較.....	134
表 5-10 055S40 貯鹽試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較.....	134
表 5-11 055F20 貯鹽試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較.....	134
表 5-12 055F40 貯鹽試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較.....	135
表 5-13 055SF30 貯鹽試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較.....	135
表 5-14 055OPC 壓力滲透試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較.....	135
表 5-15 055S40 壓力滲透試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較.....	136
表 5-16 055F20 壓力滲透試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較.....	136
表 5-17 055F40 壓力滲透試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較.....	136

表 5-18 055SF30 壓力滲透試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較.....	136
表 5-19 21 天 5 kgf/cm^2 壓力滲透試驗與 90 天貯鹽試驗比較	137
表 5-20 貯鹽試驗侵入深度模型與比色法試驗值比較.....	137
表 5-21 壓力滲透試驗與貯鹽試驗到達目標濃度所需試驗時間 (055OPC)	144



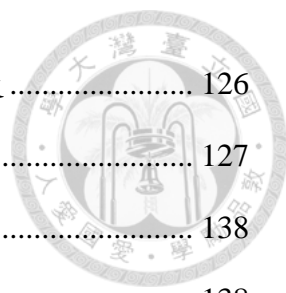
圖目錄



圖 1-1 研究流程圖.....	3
圖 2-1 50 年不同滲透係數氯離子分布預測線[17].....	13
圖 2-2 50 年不同擴散係數氯離子分布預測線[17].....	14
圖 2-3 不同參數敏感性分析結果[17].....	14
圖 2-4 水泥質複合材料孔隙結構與尺寸關係[23].....	16
圖 2-5 爐石混凝土 (W/B = 0.5) 毛細孔隙隨齡期發展[33].....	21
圖 2-6 爐石混凝土 (W/B = 0.5) 抗壓強度隨齡期發展[33].....	21
圖 2-7 滲透係數與混凝土齡期關係.....	26
圖 2-8 定量擴散示意圖[56].....	33
圖 2-9 固定濃度擴散示意圖[56].....	33
圖 2-10 擴散係數時間效應[49].....	33
圖 2-11 不同靜水壓力作用下混凝土中氯離子侵入深度[54].....	38
圖 2-12 不同水壓值氯離子擴散係數[54].....	39
圖 2-13 C30 Chloride transportation coefficient changing with hydraulic pressure[76].....	39
圖 2-14 C50 Chloride transportation coefficient changing with hydraulic pressure[76].....	39
圖 2-15 Relation between the discoloured boundary and Cl ⁻ content[77].....	43
圖 3-1 試驗流程圖.....	45
圖 3-2 配比編號說明.....	51
圖 4-1 各配比隨混凝土齡期發展之抗壓強度.....	72
圖 4-2 各配比貯鹽試驗不同試驗時間比色法氯離子侵入深度.....	76
圖 4-3 各配比 7 天試驗時間不同靜水壓力比色法氯離子侵入深度.....	77
圖 4-4 壓力滲透試驗與對照組隨試驗時間發展之比色法氯離子侵入深度差異... 77	77

圖 4-5 比色法氯離子侵入深度與變色界面氯離子濃度比較 (055OPC)	86
圖 4-6 各配比貯鹽試驗擴散係數迴歸分析結果.....	90
圖 4-7 擴散係數時間效應.....	91
圖 4-8 各配比抗壓強度與擴散係數關係.....	92
圖 4-9 各配比 7 天壓力滲透試驗滲流速度迴歸分析結果.....	95
圖 4-10 氯離子侵入量示意圖.....	98
圖 4-11 各配比貯鹽試驗不同試驗時間之氯離子侵入量.....	99
圖 4-12 各配比 7 天試驗時間不同靜水壓力之氯離子侵入量.....	99
圖 4-13 055OPC 壓力滲透試驗與對照組隨試驗時間發展之氯離子侵入量差異.....	100
圖 4-14 055OPC 貯鹽試驗隨試驗時間發展之氯離子分布情形.....	101
圖 4-15 055OPC 壓力滲透試驗隨試驗時間發展之氯離子分布情形.....	101
圖 4-16 等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 迴歸分析結果.....	105
圖 4-17 等效氯離子傳輸係數與擴散係數正規化後與靜水壓力之關係.....	106
圖 4-18 055OPC 壓力滲透等效氯離子傳輸係數與文獻相似配比之數據比較.....	107
圖 4-19 不同靜水壓力等效氯離子傳輸係數與 7 天貯鹽試驗擴散係數之關係.....	107
圖 4-20 不同靜水壓力等效氯離子傳輸係數與 90 天貯鹽試驗擴散係數之關係.....	108
圖 5-1 可行性分析流程圖.....	110
圖 5-2 滲流—擴散方程式不同滲流速度差異.....	114
圖 5-3 不同試驗時間滲流—擴散方程式與擴散方程式差異.....	114
圖 5-4 055OPC 各試驗時間壓力滲透試驗與對照組氯離子分布情形.....	115
圖 5-5 不同表面氯離子濃度擴散方程式與滲流—擴散方程式差異.....	116
圖 5-6 滲流—擴散方程式與擴散方程式線型差異.....	119
圖 5-7 試驗時間對於等效氯離子傳輸係數之影響 (055OPC)	120
圖 5-8 試驗結果中最大滲流速度對於 D_{eq} 適用性 (055F40)	121
圖 5-9 各配比 D_{eq} 與 7 天貯鹽試驗 D 之關係.....	122
圖 5-10 氯離子侵入深度在雙對數座標下線性內插示意圖.....	126

圖 5-11 壓力滲透試驗與貯鹽試驗隨試驗時間之氯離子侵入深度	126
圖 5-12 壓力滲透試驗所需時間	127
圖 5-13 滲流擴散方程式與試驗值差異 (055S40)	138
圖 5-14 耦合區擴散區示意圖	138
圖 5-15 貯鹽試驗隨試驗時間之氯離子侵入深度模擬線	139
圖 5-16 各配比貯鹽試驗氯離子侵入深度模型與試驗值比較	140
圖 5-17 靜水壓力下隨試驗時間之氯離子侵入深度模擬線	140
圖 5-18 055OPC 壓力滲透試驗氯離子侵入深度與模型比較	141
圖 5-19 055OPC 21 天壓力滲透試驗與 90 天貯鹽試驗氯離子濃度比較	144
圖 5-20 各配比 21 天壓力滲透試驗氯離子分布預測線與 90 天貯鹽試驗試驗值比較	145
圖 5-21 於深度 2 cm 處氯離子濃度累積速率	146
圖 5-22 深度 2 cm 氯離子濃度累積速率與試驗值比較	146



照片目錄



照片 3-1 中型單軸拌合機.....	53
照片 3-2 振動台.....	53
照片 3-3 恆溫恆濕室.....	54
照片 3-4 圓柱試體斷面研磨機.....	54
照片 3-5 小型混凝土切割機.....	55
照片 3-6 大型混凝土切割機.....	55
照片 3-7 MTS 萬能材料試驗機.....	56
照片 3-8 數位式混凝土透水試驗儀.....	56
照片 3-9 國際牌精密鑽床.....	57
照片 3-10 磨粉機.....	57
照片 3-11 自動電位滴定儀.....	58
照片 3-12 圓柱試體狀況.....	60
照片 3-13 圓餅試體製作.....	62
照片 3-14 壓力滲透試體架設狀況.....	62
照片 3-15 貯鹽試驗試體架設狀況.....	64
照片 3-16 試體劈裂.....	65
照片 3-17 比色法變色圖.....	65
照片 3-18 試體表面取樣.....	68
照片 3-19 試體取樣.....	68



第一章 緒論

1.1 前言


鋼筋混凝土 (Reinforced Concrete, RC) 材料由十九世紀發展至今，於土木工程界佔有不可或缺的地位。鋼筋混凝土具有價格低廉、施工容易等優點，且在發生火災或是地震時，能提供足夠的時間預警，使居住者能夠及時做出應對措施，但是，若混凝土內的鋼筋發生腐蝕，提供的預警能力以及結構物的抗拉能力將會喪失，大幅降低結構物安全性。

隨著經濟與人口快速成長，結構物超限使用情形普遍，加上天災頻繁，易使裂縫產生，腐蝕因子能更快速的侵入混凝土結構物內，所以結構物耐久性，長久以來一直是世界各國所必須注重的議題。台灣位處於亞熱帶地區，四面環海，氣候炎熱潮濕，大氣環境經常帶有一定量的鹽分或是有害汙染物，在這種環境下，濱海地區不論是鋼筋混凝土或是鋼構造建築物均面臨嚴苛的考驗。因此，若能掌握腐蝕因子侵入的原因以及過程，並提出適當的改善方式和預防策略，對於提升結構物耐久性有極大的幫助。

1.2 研究動機與目的

傳統的結構設計多偏重工程材料的力學特性，對於所處環境對於結構物耐久性的影響則相對較為忽略，台灣屬於海島氣候，位處於亞熱帶低區，終年處於高溫潮濕，沿海結構物易受海風中氯鹽侵入。當氯鹽達到一定的侵入量後，鋼筋將會開始腐蝕，膨脹壓力會對周圍混凝土產生張力，抗張能力弱的混凝土會因此產生諸多裂縫，導致表層混凝土剝落、降低鋼筋與混凝土間的握裹能力，如果腐蝕到了非常嚴重的情況，甚至會影響整個結構物的安全性。

探討混凝土對於氯離子的耐久性問題當中，最常見的試驗為貯鹽試驗 (Ponding Test)，規範 AASHTO T259 規定，貯鹽試驗試驗時間需要 90 天或以上，較為耗費人力以及時間成本。若能有其他方式加速氯離子侵入，達到有效縮短試驗時間的目



的，國內外許多研究中最常透過電場加速氯離子滲透，相關規範如 CNS 14795 的 RCPT 試驗。許多學者做了 RCPT 試驗相關研究，建立 RCPT 試驗與貯鹽試驗間的關聯性，使得 RCPT 能夠取代貯鹽試驗。本研究以施加靜水壓力的方式使氯離子加速侵入混凝土亦稱為「壓力滲透試驗」，透過靜水壓力的影響，氯離子侵入速率肯定會提升使試驗時間縮短，但目前尚未有關係式以及足夠文獻數據能夠量化「壓力滲透試驗」與「貯鹽試驗」間的關係。有鑑於此，本研究進行不同靜水壓力、加壓時間探討氯離子於混凝土中有無靜水壓力影響的傳輸行為，並從試驗結果中尋找指標，藉由指標建立壓力滲透試驗做為加速性試驗取代貯鹽試驗的基礎。

1.3 研究方法與內容

本研究基於菲克第二擴散定律 (Fick's Second Law)、對流－擴散方程式 (Convection-Diffusion Equation)，混凝土試體於 28 天水中養護後，利用加壓方式，使氯離子侵入混凝土的過程縮短。以氯離子侵入深度、氯鹽侵入量以及氯離子濃度累積速率做為指標，比較相同試驗時間下，有無靜水壓力以及各種因素 (卜作嵐材料種類及取代率、混凝土抗壓強度以及靜水壓力大小等) 對於指標的影響，透過試驗結果，建立壓力滲透試驗做為加速試驗取代 90 天貯鹽試驗的基礎，本研究流程如圖 1-1 所示。

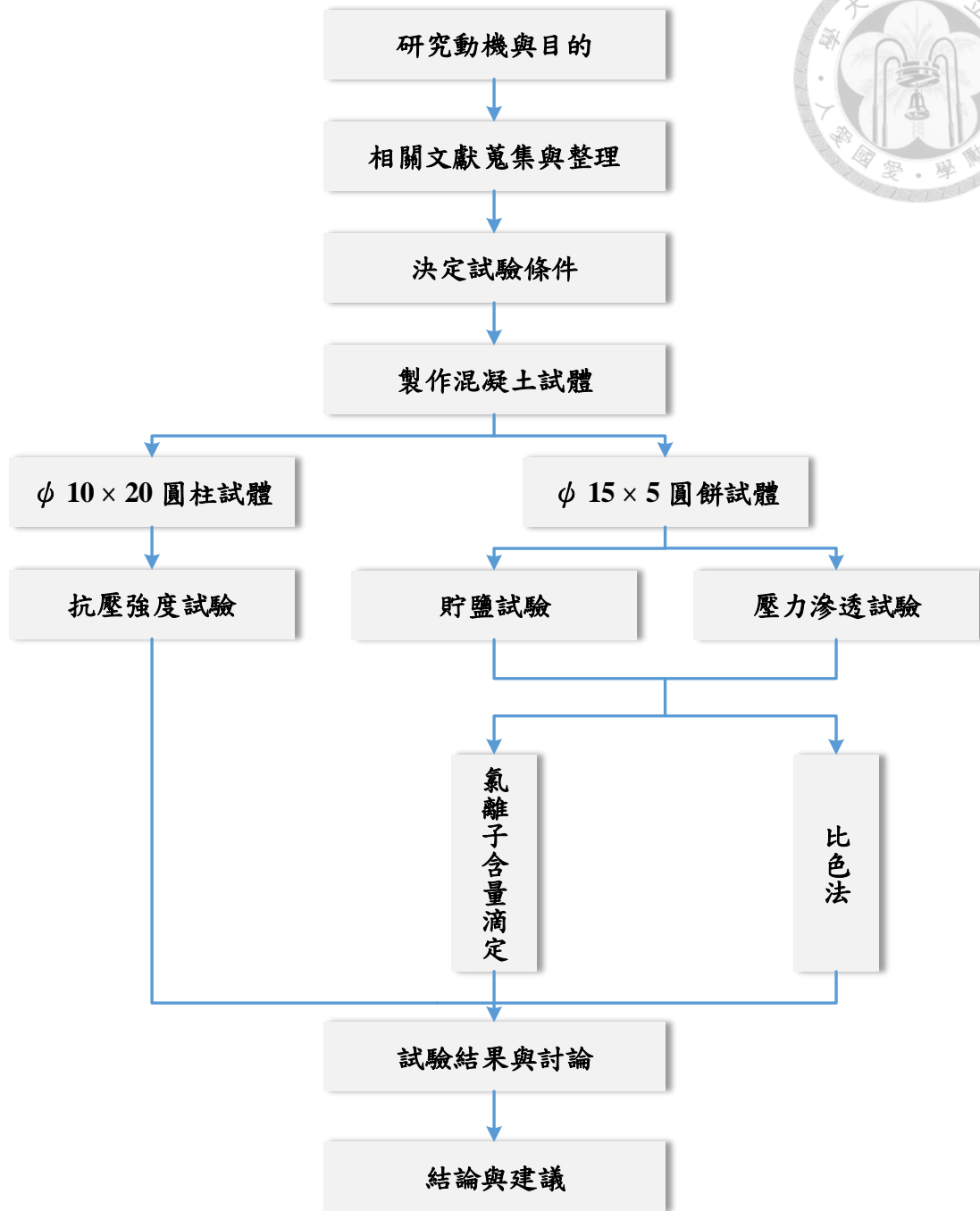


圖 1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧



2.1 混凝土內氯離子簡介

2.1.1 氯離子來源

混凝土中的氯離子是使內部鋼筋發生腐蝕的主要因素，而混凝土中氯離子的來源主要可以分為兩種，一種為拌和混凝土時混入，氯離子可能藉由水泥、粒料、拌和水以及化學摻料混入[1]。

- (1) 水泥：製作水泥的材料，如：灰石以及黏土，但這兩者含氯化物的機會不大，所以一般情況下，水泥含有的氯離子極低，只有部分的早強水泥會添加 3% 的氯化鈣，若在添加的過程中沒有嚴謹的品質管制，將會造成水泥中氯離子濃度過高。
- (2) 粒料：粒料來源若來自於海邊、海岸或河口，因浸泡於含有氯離子的液體內，導致表面吸附氯化物，在拌和過程中，氯化物易為游離態氯離子，隨著粒料摻入混凝土內，常見的案例，如：海砂屋。
- (3) 拌和水：拌和水的品質及用量，是造成混凝土品質劣化的重要原因，所以規範常規定「混凝土拌和用水品質，須不含酸、鹼、鹽、有機物或其他對鋼筋與混凝土有害物質」，若是使用地下水、工業廢水或是抽取臨海地區的海水...等，都會造成混凝土內的氯離子濃度增加[2]。混凝土拌和水品質檢測標準則如表 2-1。
- (4) 化學摻料：為因應特殊工程需求，常會在混凝土拌和過程中添加減水劑、緩凝劑、強塑劑和早強劑等化學摻料，這些化學摻料皆有可能含有氯離子。

另外一種來源則是混凝土硬固後，因為外界環境存在氯離子而隨著時間慢慢滲入混凝土中，舉例而言，如：沿海地區、潮汐區或是長期接觸工業廢水的建築物，其所含的氯離子濃度過高，導致氯離子積年累月下漸漸滲入混凝土內。

表 2-1 混凝土拌和水品質檢驗標準[2]

基本檢驗項目	檢驗方法	標準規範
酸鹼性	(1) 酚酞或甲基橙指示劑 (2) pH 測定儀 (3) 比色法	CNS 1237
固體總量與有機物	烘乾 (100 °C) 再以 132 °C 烘乾 1 小時	CNS 1237
氯離子	滴定法	CNS 5858
水質性能認定試驗： (1) 凝結時間 (2) 砂漿方塊強度	(1) 凝結時間相差不超過 30 分鐘 (2) 抗壓強度應為使用飲用水強度 90% 以上	BS 3148 CNS 1010 CNS 785 CNS 789


2.1.2 氯離子存在型態

混凝土中氯離子的存在型態可以分為，固結型態氯離子以及游離型態氯離子。

其中，固結型態氯離子又可分為物理吸附型以及化學固結型[3][4][5]。

- (1) 物理吸附型 (Physically absorbed)：混凝土中的氯離子與水泥成分中的 C_3S 水化生成的 C-S-H 膠體，產生物理吸附作用，附著於水化產物的表面，使之不易產生游離現象。
- (2) 化學固結型 (Chemically bonded)：化學固結型的氯離子與水泥中的 C_3A 起化學反應，形成難溶穩定的氯化鋁酸三鈣化合物 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ 或 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCl_2 \cdot 32H_2O$)，亦稱為法拉第鹽 (Friedel's salt)，以穩定化合物的方式存在於混凝土中。
- (3) 游離型氯離子 (Free chloride ion)：游離型氯離子亦稱為自由氯離子，其來源為拌和材料中所含有的氯離子或是外在環境滲入的氯離子，在經過上述兩種結合作用後，尚未固結的氯離子。這一型態的氯離子，可以自由游離於混凝土的孔隙溶液中，不受拘束。

上述三種不同型態氯離子中，對於鋼筋腐蝕而言，普遍認為只有自由氯離子具



有侵蝕性。然而，當混凝土的酸鹼值降至一定程度後，固結型態的氯離子會被釋放出具有侵蝕性的自由氯離子，因此有學者認為評估鋼筋腐蝕議題時，應該使用考量固結型態氯離子的總氯離子濃度[6]。關於混凝土對於氯離子的固結能力可參考本文 2.5 節。

2.1.3 混凝土內氯鹽含量之相關規範

生產混凝土所使用的水泥、粒料和藥劑等原料，有時不可避免地含有氯鹽，致使鋼筋有發生腐蝕的風險。早期日本、英國將處理妥善的海砂應用在營建工程上的案例均有所聞，但處理過程須非常嚴謹，因此建立了不少關於含氯鹽原料作為建材的研究，並制定許多相關規範。而各國針對鋼筋混凝土結構物當中，混凝土最大水溶性氯離子規定如表 2-2 所示，當超過容許值時，鋼筋須作防鏽處理[7][8]。

表 2-2 氯離子含量規定[7][8]

材料		檢測依據		氯離子含量限制				
組成材料	水泥	ASTM C114						
	水	JIS		<200 ppm				
	摻料			無				
	粗粒料	CNS 13407		預力混凝土用粒料：0.012%粒料重				
	細粒料			其他混凝土用粒料：0.024%粒料重				
混凝土	AASHTO T260 ACI 318-89 CNS 12891 CNS 3090 CNS 13465		構件材料		混凝土最大水溶性氯離子含量			
					ASTM 水泥重量百分率 (%)	CNS 每立方重量 (kg/cm ³)		
			預力混凝土		0.06	0.15		
			鋼筋混凝土	暴露於含氯鹽環境	0.15	0.3		
				其他狀況	0.3			
備註		為防止混凝土內鋼材腐蝕，齡期在 28 天至 56 天硬固混凝土成分，包括水、粒料、膠結材及摻料，其氯離子含量應低於表中所規定最大含量。						

2.2 氯離子於混凝土中的傳輸途徑與機制

混凝土抵抗氯離子侵入的能力與其孔隙結構的連通性有相當的影響，Wu *et al.* 提出氯離子侵入混凝土孔隙的三種途徑，分別為[9]：

- (1) 水泥漿體相互連通孔隙
- (2) 骨材相互連通孔隙
- (3) 水泥漿體與骨材間的介面過渡區

若氯離子於骨材之滲透行為低於水泥漿體與粒料及漿體的過渡介面時，會因水泥漿體含有較多的孔隙，使其成為主要的入侵途徑，導致混凝土抗氯離子侵入能



力降低。

漿體緻密性與孔隙體積大小會隨著水化作用的程度以及水膠比高低而變化，對於氯離子傳輸行為而言，將會影響其侵入混凝土的速率。氯離子於混凝土孔隙溶液中有許多傳輸機制，傳輸機制會隨著混凝土曝放的环境條件不同而有所差異，於下列各小節介紹 4 種氯離子在混凝土中常見的傳輸機制[10][11]。

2.2.1 擴散作用

混凝土中的擴散作用是因自由分子或離子在孔隙溶液中不規則的運動，產生高濃度區域向低濃度區域轉移的質量遷移（Mass Transfer）現象。擴散係數（Diffusion Coefficient）被用來表示分子或離子是因濃度梯度產生擴散的程度。對於混凝土而言，代表著混凝土的材料性質，氯離子擴散係數在計算實際結構物氯離子分布情況和估算結構物生命週期皆有很大的幫助[12]。

2.2.2 滲透作用

當混凝土結構物處在壓力梯度時，混凝土內部孔隙溶液會產生滲流，氯離子會藉著孔隙溶液傳輸於混凝土中，時常處於壓力梯度下的混凝土結構物則如：擋水結構物、隧道襯砌結構、離岸結構...等。混凝土的滲透性能衡量在壓力梯度下液體穿過混凝土的多寡，而滲透係數是一個代表混凝土滲透性強弱的定量指標。一般而言，混凝土滲透係數取決於孔隙結構以及液體的黏性，可視為混凝土的材料性質。滲透係數可由穩態滲透量測，以單位時間下通過單位斷面積的流量表示，因此滲透係數單位有 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{sec}$ 或是 m/s 兩種，混凝土滲透係數一般介於 10^{-16} 到 10^{-13} m/s 間，飽和混凝土中，壓力梯度造成孔隙溶液滲流可以由達西定律表示[12][13]，如式 2-1。



$$Q = \frac{k\Delta P A}{L} \dots\dots\dots 2-1$$

式中，

Q：流量 (m³/sec)

k：滲透係數 (m/sec)

ΔP：壓力水頭差 (m)

A：斷面積 (m²)

L：試體厚度 (m)

於實際應用中，CSIRO 穩態水流滲透試驗中，壓力為 0.7 MPa，水流通過厚度為 50 mm 飽和混凝土試樣，若混凝土滲透係數低於 1.3×10^{-13} (m/s) 則被視為低滲透性。規範 DIN 1048 將水分滲透深度當作一簡易指標，判斷混凝土滲透性。

2.2.3 毛細作用

混凝土內的毛細作用是由於當孔隙溶液與孔隙間分子的附着力大於液體內部分子的內聚力時，毛細管張力會驅使液體在混凝土內移動，氯離子則能藉由液體在混凝土內傳輸。毛細作用受到黏滯性、密度、液體表面張力和孔隙結構(孔隙直徑、曲折性以及不連續性)影響。

若混凝土非長久接觸到含有氯離子的液體，也就是處於不完全飽和的情況下，如：潮汐帶，則混凝土內液體傳輸通常為非穩態傳輸。一般而言，毛細吸收作用要比其他侵入作用更為迅速，但這種傳輸機理通常發生在結構物保護層較淺的區域，若保護層厚度設計得宜，氯離子較難藉由毛細吸收作用傳輸到鋼筋表面[14]，而毛細吸收的速率可以由式 2-2 表示[10]：



$$a = \frac{\Delta m}{A \times f(t^n)} \dots\dots\dots 2-2$$

式中，

a：吸附速率 (g/m²sⁿ)

Δm：吸收的液體量 (g)

A：接觸液體的面積 (m²)

f (tⁿ)：時間函數 (n 通常會取 0.5)

實際應用上，非穩態毛細吸收可藉由 ISAT (Initial Surface Absorption Test, 起始表面吸收試驗) 量測。而每單位面積吸收的液體量可以藉由 CSIRO 試驗量測，CSIRO 試驗可參考新南威爾斯州公路及交通手冊。

2.2.4 電遷移作用

電遷移作用為施加外加電場，使得孔隙溶液形成電池系統進行電解，陽離子會向陰極移動，而陰離子則向陽極移動。於濃度均勻的溶液中，外加電場會使溶液產生濃度梯度。除非結構物會有外漏電流產生電場情況，一般情況下，混凝土結構物中氯離子並不會以此機制進行傳輸。

實際應用上，規範 AASHTO T277[15]和 ASTM C1202[16]利用電位差 (60V) 通過厚度為 50mm 的混凝土圓柱試體，一端接觸 NaCl 溶液，另一端則接觸 NaOH 溶液，量測通過試體電流量，藉此判斷混凝土耐久性。

2.2.5 複合傳輸機制

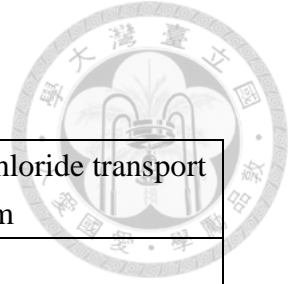
綜合上述各小節提到的傳輸途徑，不同的邊界條件產生不一樣的傳輸機制，簡單以混凝土是否為飽和狀態區分。飽和狀態時，氯離子主要傳輸機制為擴散作用，若有靜水壓力作用，氯離子會以滲透的方式進行傳輸，毛細作用在這時候對氯離子傳輸的貢獻可以忽略；而在非飽和狀態時，氯離子傳輸機制主要為毛細作用。實際案例中，除了混凝土結構物是持續性接觸含有氯離子的溶液，如：跨海大橋橋墩；大部分受到氯離子侵入的結構物當中，氯離子傳輸機制為綜合上述各節當中提到的行為。表 2-3 為各個邊界條件下的複合傳輸機制[10]。

混凝土結構物氯離子傳輸為一個複雜的行為，不同邊界條件，各個傳輸機制對於混凝土結構物服務年限的敏感性就顯得相當重要。Thomas 和 Bentz[17][18]建立了考慮擴散、滲流以及固結作用的傳輸模型，如式 2-3，Boody *et al.* [17]分析此模型當中，氯離子於不同材料性質混凝土進行擴散與滲透作用時，兩個不同傳輸機制對於氯離子濃度的敏感度。敏感度分析範圍如表 2-4 所示。以氯離子侵入至保護層厚度的濃度做為比較，如表 2-5 所示。從分析結果當中可看出，一般混凝土擴散係數量級為 $2.53 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 、滲透係數量級為 $1.86 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ ，靜水壓力對於氯離子侵入的速率有極大的影響，在相同時間和深度，氯離子濃度大幅增加，如圖 2-1 所示；而高性能混凝土擴散係數量級為 $3.30 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ，滲透係數量級為 $2.00 \times 10^{-16} \text{ m/s}$ ，靜水壓力對於氯離子侵入速率並無明顯增加情況，滲流情況很難發生在低滲透性的混凝土中，那可視為氯離子的侵入機制主要藉由擴散作用。

$$\frac{dC}{dt} = D \cdot \frac{d^2C}{dx^2} - \bar{v} \cdot \frac{dC}{dx} + \frac{\rho}{n} \cdot \frac{dS}{dt} \dots\dots\dots 2-3$$

若僅考慮擴散作用對於混凝土結構物服務年限的敏感性，從表 2-5 可知擴散係數差了一個級數，相同深度下的氯離子濃度差了 180 倍，圖 2-2 表示服務年限為 50 年的氯離子濃度分布預測線。其餘參數包含擴散衰減常數 m 、環境溫度 T 、臨界氯離子濃度 C_{crit} 、表面氯離子濃度 C_s 以及保護層厚度對於服務年限的敏感性如圖 2-3 所示

表 2-3 不同環境複合傳輸機制[10]



Exposure	Example of structures	Primary chloride transport mechanism
Submerged	Substructures below low tide	Diffusion
	Basement exterior walls or transport tunnel liners below low tide.	Permeation, diffusion and possibly wick action
Tidal	Substructures and superstructures in the tidal zone.	Capillary absorption and diffusion
Splash and spray	Superstructures about high tide in the open sea.	Capillary absorption and diffusion
Coastal	Land based structures in coastal area or superstructures above high tide in river estuary or body of water in coastal area.	Capillary absorption

表 2-4 Input parameters and range of sensitivity investigation[17]

Input	Range of investigation
m	Varied from 0 to 7 by steps of 0.1
T	5°C 、23°C
C _{crit}	Varied from 0.02 to 0.2% by weight of concrete by steps of 0.03 (0.05% by weight of concrete)
D _{ref}	High performance concrete (0.3 w/cm, 25% slag, 8% silica fume) : D_{ref} = 0.33×10⁻¹² m²/s Typical concrete (0.4 w/cm, 25% slag) : D _{ref} = 2.53×10 ⁻¹² m ² /s
k _{ref}	High performance concrete (0.3 w/cm, 25% slag, 8% silica fume) : k _{ref} = 1.86×10 ⁻¹⁶ m/s Typical concrete (0.4 w/cm, 25% slag) : k _{ref} = 1.00×10 ⁻¹³ m/s (pressure driven flow ignored in base case : hydraulic gradient, h = 0)
C ₀	Bridge deck : 0-14.8 kg/cm³ over 25 years Parking structure : 0-17.8 kg/cm ³ over 15 years Constant surface concentration of 17.8 kg/cm ³
Cover depth	Varied from 30 to 60 mm with 10 mm steps
Remark	Base case values are shown in bold

表 2-5 Variation in chloride concentration at level of reinforcement after 50 years[17]

Parameter	Value used in analysis	[Cl ⁻] at cover depth of 60 mm (% wt of concrete)
m	0	0.0008
	0.1	0.0001
	0.2	0
	0.3	0
T (°C)	5	0.0008
	24	0.1496
Dref (m ² /s)	0.33×10^{-12}	0.0008
	2.53×10^{-12}	0.1496
kref (m/s)	h = 0	0.0008
	1.86×10^{-16}	0.0008
	1.00×10^{-13}	0.1047
C ₀ (% weight of concrete)	Bridge	0.0008
	Parking	0.0014
	Marine	0.0026

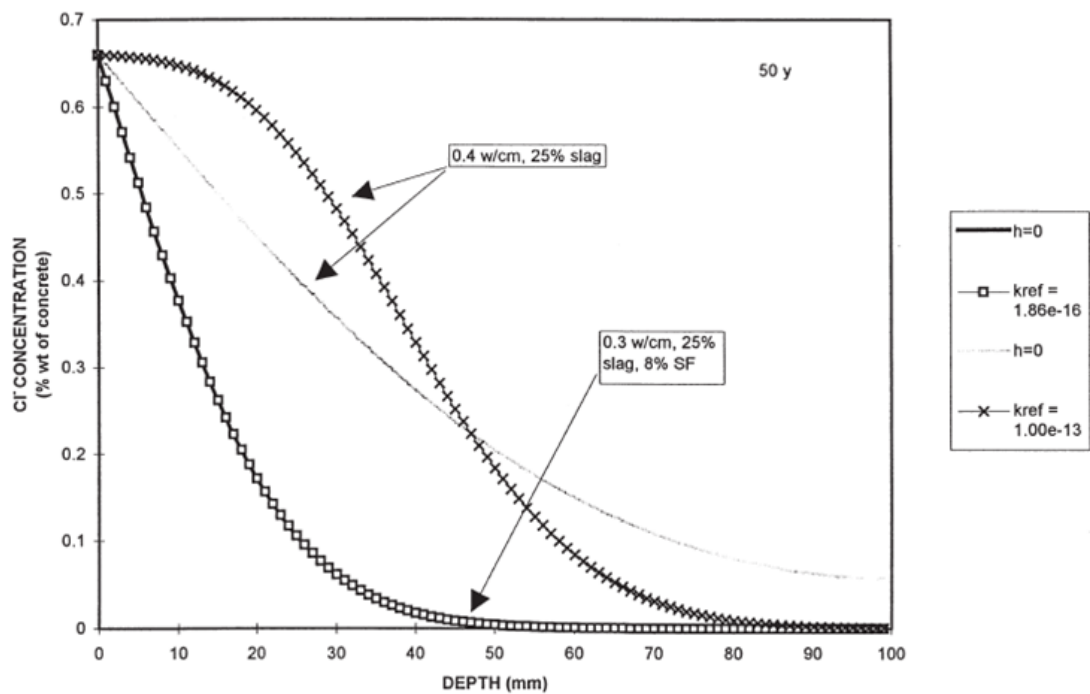


圖 2-1 50 年不同滲透係數氯離子分布預測線[17]

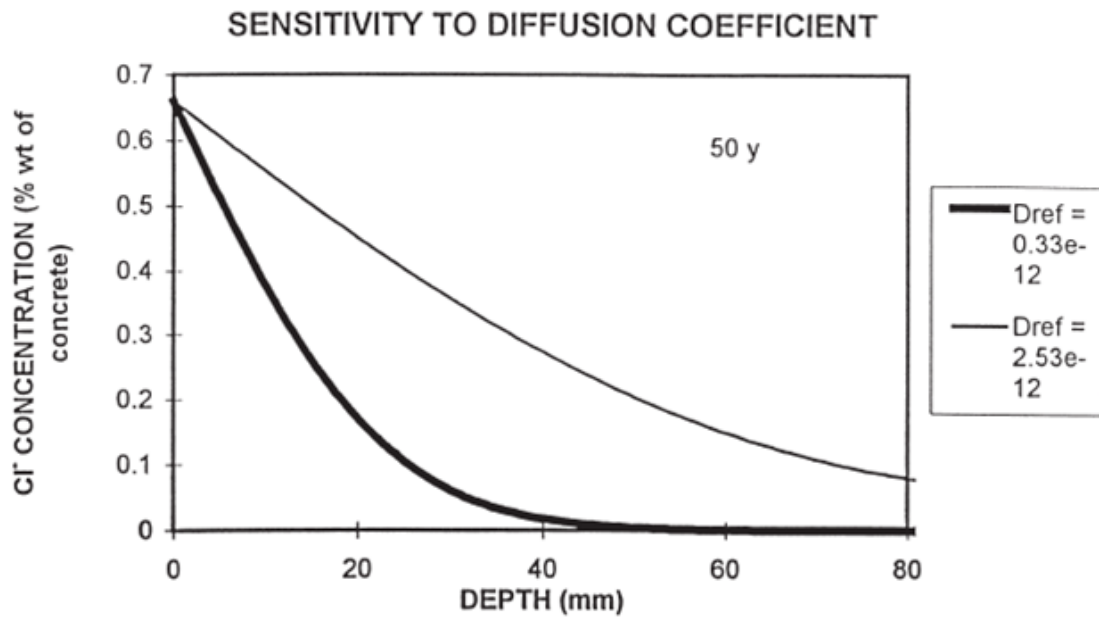


圖 2-2 50 年不同擴散係數氯離子分布預測線[17]

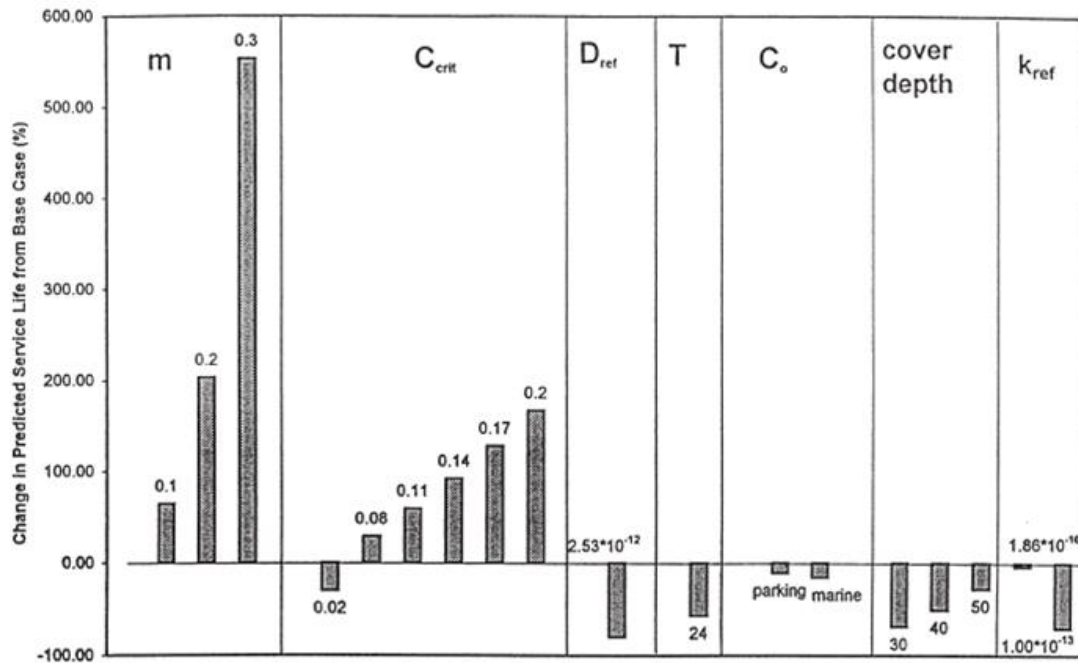


圖 2-3 不同參數敏感性分析結果[17]



2.3 混凝土孔隙結構

混凝土屬於多孔隙的複合材料，在水化反應過程中，水化產物逐漸填充混凝土孔隙，但數量不足以填充混凝土內所有的孔隙，剩餘孔隙的多寡會受到水膠比、水化時間和卜作嵐材料的使用所影響[19]，其尺寸與分布狀況，將影響混凝土劣化的主要原因。相關文獻指出，一般混凝土孔隙可依尺寸分為四大類，如圖所示，孔隙種類分述如下[20][21]：

(1) 輸氣孔隙 (Entrained air pores)：

拌和混凝土時，引入空氣或是添加化學摻料所產生的孔隙，這種類型的孔隙分布較均勻，形狀大多呈橢圓形，尺寸約在 $70 \mu\text{m} \sim 400 \mu\text{m}$ ，適當數量的輸氣孔隙能使混凝土抗凍融能力提升。

(2) 搗實孔隙 (Compaction pores)：

通常是混凝土拌和搗實未確實所產生的孔隙，其尺寸通常大於輸氣孔隙，大部分皆大於 10^{-6}m ，分布狀況及形狀皆不一致，這類型的孔隙對於水泥質材料的力學性質以及耐久性皆有負面影響。

(3) 毛細孔隙 (Capillary pores)：

由水泥水化反應所產生，多為 C-S-H 膠體與 CH 晶體彼此交錯而無法填充之孔隙，尺寸約略為 $0.01 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ ，此毛細孔隙主要受到水膠比、水化程度影響，隨著水泥水化反應以及卜作嵐反應進行，混凝土內膠體數量越多時，可以填充其毛細孔隙。

(4) 膠體孔隙 (Gel pores)：

由水泥水化反應所產生，包含 C-S-H 膠體夾層間的縫隙、表層針狀或是板狀的結晶結構間交錯形成之孔隙，尺寸約略為 $0.05 \text{nm} \sim 1 \text{nm}$ ，Kumar 和 Bhattacharjee[20]指出膠體孔隙不是影響混凝土抗壓強度主要因素，但對於乾縮潛變影響甚劇。

以孔隙尺寸區分，如圖 2-4 所示，搗實與輸氣孔隙屬於大型孔隙範圍 (Macro

pores)，而毛細孔隙為中型孔隙範圍 (Meso pores)，膠體孔隙則屬於微型孔隙範圍 (Micro pores)。大部分的膠體孔隙孔徑極小，甚至小於氯離子直徑 3.6 Å，因此氯離子不易於膠體孔隙內傳輸，容易造成阻塞導致無法前進。搗實與輸氣孔隙在一般情況下，如搗實確實以及未添加輸氣劑之混凝土，大多互相不連通。因此，毛細孔隙的多寡以及聯通性基本掌握混凝土材料氯離子傳輸行為[22][23]。

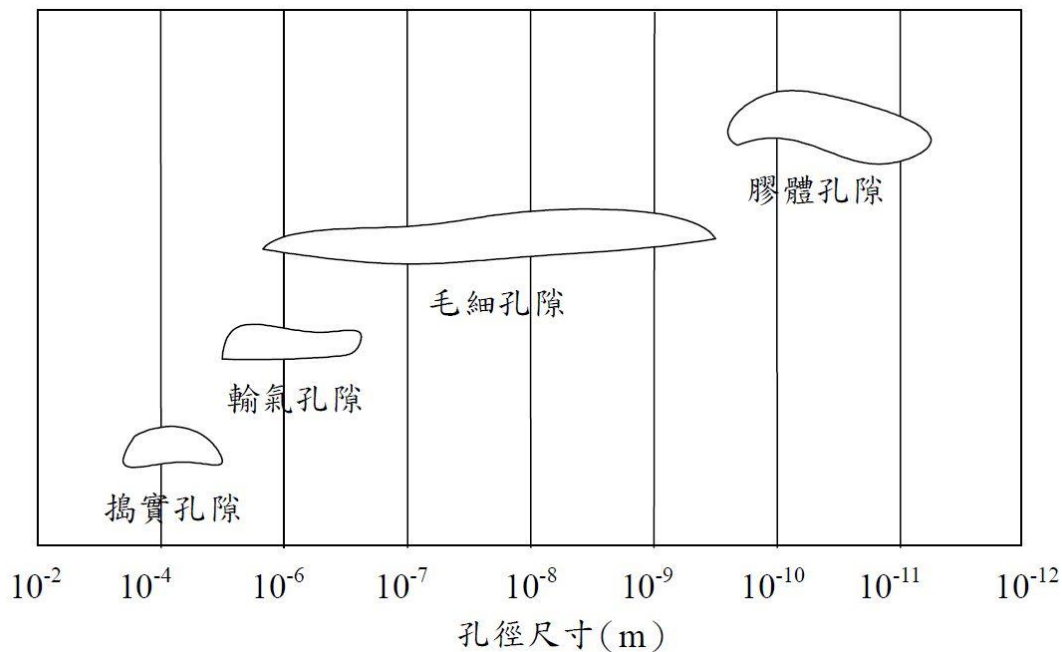


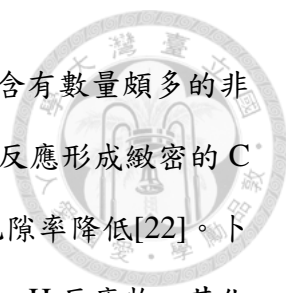
圖 2-4 水泥質複合材料孔隙結構與尺寸關係[23]

2.4 卜作嵐材料對於混凝土耐久性的影響

由於水泥水化反應會產生氫氧化鈣，其對混凝土強度貢獻不大，僅做為填充孔隙用，但是氫氧化鈣溶於水後，容易析出並造成白華 (Efflorescence) 現象，而氫氧化鈣一旦析出便會使混凝土產生孔隙，不利於混凝土耐久性。

在混凝土內添加一定量礦物摻料後，可在水份存在條件下與水泥水化生成物中的氫氧化鈣產生卜作嵐反應 (Pozzolanic Reaction)，因此這些礦物摻料又稱卜作嵐材料[24]，其化學反應過程如式 2-4 所示：





式中 CH 為氫氧化鈣，S 為二氧化矽，H 為水。卜作嵐材料含有數量頗多的非晶質矽氧化物 (Amorphous Silica)，能夠與水化生成物 CH 晶體反應形成緻密的 C—S—H 膠體。對水泥漿體孔隙而言，毛細孔隙尺寸會縮小，孔隙率降低[22]。卜作嵐材料亦含有鋁化合物，鋁化合物與 CH 晶體反應生成 C—A—H 反應物，其化學反應過程如式 2-5 所示[25]



式中 A 為鋁化合物。水泥基複合材料硬固後，反應物 C—A—H 可與硫化物再反應生成鈣礬石，屬於 DEF (Delay Ettringite Formation) 的一種，DEF 具有膨脹性，產生的應力會造成水泥基複合材料裂縫的產生。因此當有硫化物侵蝕的疑慮時，必需考量卜作嵐材料鋁含量的最低限制[26]。

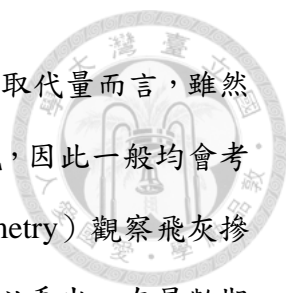
卜作嵐材料現今已成為混凝土中的重要材料，其主要目的除了能提高混凝土耐久性以外，還能提供下列幾項優點：

- (1) 經濟性：可部分取代水泥，減少水泥用量
- (2) 便利性：取代部分水泥，使凝結時間略微增加，延長混凝土輸送時間
- (3) 工作性：在不增加用水量的情況下，工作性提升且可以降低水化熱

2.4.2 飛灰

飛灰為煤燃燒廢氣經由過濾與靜電集塵器收集所得無機物質，飛灰的添加可以降低水化熱、抗硫酸鹽侵蝕、抑制鹼骨材反應與改善工作性。目前我國 CNS 3036 及美國 ASTM C618 規範將飛灰分成 C 級與 F 級飛灰兩種。C 級飛灰是由燃燒褐煤或次煙煤所生成，含鈣量較高，膠結性較佳；F 級飛灰是由燃燒煙煤或無煙煤所生，含鈣量較低，一般低於 10%，只能產生卜作嵐反應而較難產生水化反應，膠結性較差。C 級與 F 級飛灰化學及物理性質如表 2-6 所示[27]。

飛灰的卜作嵐反應與混凝土孔隙水酸鹼環境有關，相關文獻指出，F 級飛灰的卜作嵐反應需在混凝土孔隙水 pH 大於 13.2 時才會發生[28][29]，所以飛灰的卜作嵐反應須在水泥水化反應生成足夠鹼性氫氧化鈣後才會開始，因此飛灰加入混



土可以延後反應而降低水化熱、大量改善熱裂縫的產生。對飛灰取代量而言，雖然對混凝土耐久性有相當助益，但取代量過高會導致力學行為折減，因此一般均會考慮最大替代量。蔡壽楨[30]透過 MIP (Mercury Intrusion Porosimetry) 觀察飛灰摻入後，孔隙結構與抗壓強度隨齡期的變化，從 MIP 試驗結果可以看出，在早齡期時，孔隙含量隨著飛灰添加量增加而增加，如表 2-7 顯示。飛灰卜作嵐反應缺乏足夠的 CH 水化物，使得生成的 C-S-H 膠體並不多，難以填充孔隙。若以抗壓強度與齡期的發展可發現，如表 2-7 所示，當飛灰取代量越高，混凝土較早齡期的抗壓強度明顯有下降的趨勢。

2.4.3 爐石

爐石 (Blast Furnace Slag) 又稱為爐渣，為一貫作業煉鋼廠在高爐煉鐵的過程中，為了降低生產溫度，添加石灰石作為助熔劑使氧化鐵還原，在 1500°C 高溫的作用下使石灰石與鐵礦中礦物形成氧化物爐渣，由於爐渣較鐵水 (融鐵) 來的輕，因此浮在鐵水上，分離萃取及冷卻處理後形成爐石，又稱高爐熟料，而依冷卻方式可區分為水淬爐石及氣冷爐石。水淬爐石的細度約為 4000 cm²/g 至 8000 cm²/g，而目前台灣市面上所使用爐石粉為 80~100 級，細度為 4000 級[31][32]。

爐石粉由於含有高量玻璃質，其鈣、矽、鋁氧化物與波特嵐熟料相近，以氧化鈣含量最高，約 40% 以上，在適當的溫度、濕度與鹼性環境下，可與水產生水化反應，具有潛在膠結能力，亦可與氫氧化鈣產生卜作嵐反應，形成類似 C-S-H 膠體填充孔隙，使得毛細孔隙減少，因此可適量替代水泥，且爐石粉顆粒微細，可填充於水泥顆粒間，增加混凝土緻密程度，增進混凝土耐久性[32]。張裕閔[33]透過 MIP (Mercury Intrusion Porosimetry) 觀察摻有爐石配比隨著齡期增加，孔隙結構變化以及孔隙率與抗壓強度間的關係，使用配比及試體編號如表 2-8 所示。摻入爐石粉會使混凝土在較早齡期時毛細孔隙量增加，到了齡期為 28 天時，爐石的添加使混凝土毛細孔隙減少，抗壓強度則接近甚至高於純水泥混凝土，如圖 2-5 和圖 2-6 所示。

在國內，爐石粉於 1983 年開始使用，而國外以日本為例，使用高爐水泥已有 90 年之久，由於爐石混凝土具有優異的強度及抗海水、抗硫酸鹽侵蝕的能力，所以常常應用於許多重要工程上，如：水壩溢洪道、橋梁、隧道及防波堤等水工結構物工程上，知名工程案例如：台北 101 大樓、五楊高架道路。

表 2-6 C、F 級飛灰典型化學成分[27]

飛灰種類	化學成分 (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	燒失量	含水率
C 級	38.6	19.2	4.8	24.2	1.6	4.1	0.5	0.2
F 級	49.4	23.5	14.8	1.2	0.9	1.0	2.9	0.1

表 2-7 飛灰混凝土 (W/B = 0.5) 抗壓強度與孔隙率[30]

組別	飛灰取代量	齡期 (天)	毛細體積 (cc/g)	孔隙總體積 (cc/g)	孔隙率 (%)	強度 (MPa)
B50F0	0%	1	0.0810	0.0810	3.8820	6.31
		3	0.0788	0.0880	4.2225	20.28
		7	0.0616	0.0670	3.5671	33.10
		28	0.0343	0.0436	2.1752	36.27
B50F1	10%	1	0.0772	0.0805	3.9253	7.30
		3	0.0635	0.0657	3.2443	18.17
		7	0.0484	0.0574	2.7613	26.01
		28	0.0376	0.0460	2.2227	34.42
		91	0.0505	0.0600	3.0337	38.72
B50F2	20%	1	0.1124	0.1202	6.4018	6.93
		3	0.0861	0.0956	4.7838	15.94
		7	0.0575	0.0618	3.2566	23.49
		28	0.0492	0.0569	2.9595	33.01
		91	0.0498	0.0587	2.9842	40.73
B50F3	30%	1	0.1183	0.1192	5.4731	5.66
		3	0.0923	0.0977	5.2193	14.64
		7	0.0754	0.0857	4.2844	21.45
		28	0.0703	0.0799	3.9191	29.50
		91	0.0436	0.0520	2.658	42.11

表 2-8 爐石混凝土配比 (kg/m³) [33]

組別	W/B	爐石取代量	水	水泥	爐石	細粒料	粗粒料	SP
B5R0	0.5	0%	206.5	413.8	0.0	718	973	0.41
B5R1	0.5	10%	206.5	372.4	41.4	715	973	0.41
B5R2	0.5	20%	206.5	331.0	82.8	712	973	0.41
B5R4	0.5	40%	206.5	248.3	165.5	706	973	0.41

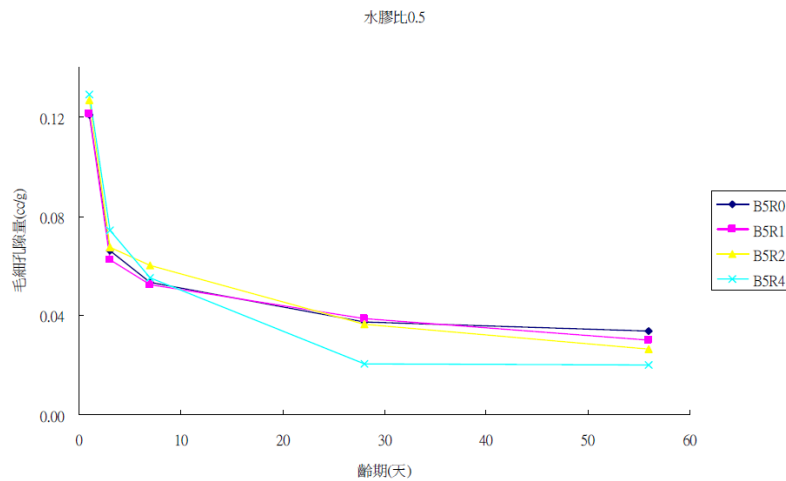


圖 2-5 爐石混凝土 (W/B = 0.5) 毛細孔隙隨齡期發展[33]

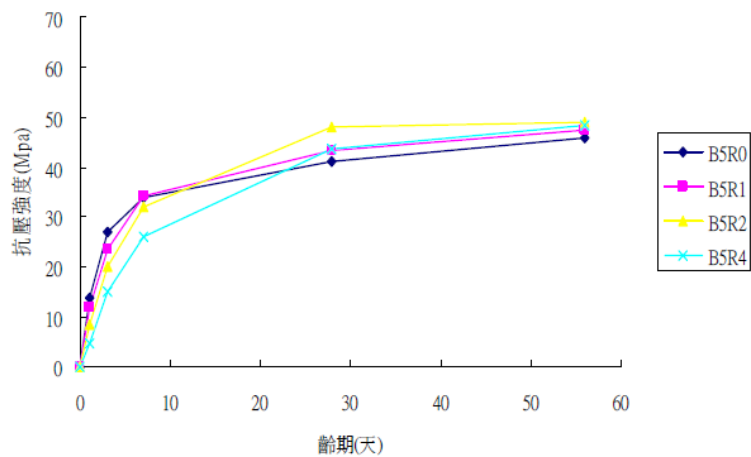


圖 2-6 爐石混凝土 (W/B = 0.5) 抗壓強度隨齡期發展[33]

2.5 膠結材料固結氯離子之能力

混凝土材料當中具有一定量 C_3A 和 C_4AF 等鋁酸鈣鹽類，氯離子會與鋁酸鈣鹽類反應形成難溶於水的氯化鋁酸三鈣化合物 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ 或 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCl_2 \cdot 32H_2O$)，亦稱為法拉第鹽 (Friedel's salt)。氯離子亦會被 C-S-H 膠體吸附，使游離於孔隙溶液中的氯離子含量下降，以上兩種現象稱為混凝土的氯離子固結能力。Tang 和 Nilsson[34]提出混凝土對於氯離子的固結能力與水灰比、粒料含量無關，但與水泥的種類、卜作嵐材料和摻入藥劑等有關。



2.5.1 水泥對於氯離子固結能力的影響

氯離子能夠與水泥中的 C_3A 反應，因此當水泥中的 C_3A 含量越高，氯離子固結的量就會越多[35]，降低鋼筋受到氯離子侵蝕發生腐蝕的風險。Rasheeduzzafar[36] 使用 5 種不同含量的 C_3A ，範圍在 2.04 至 14.00 間，氯離子添加量則為水泥重量 0.3% 至 2.4%。從試驗結果發現，當 C_3A 含量越高，自由氯離子含量越低，表示受到固結的氯離子越多。在同樣的 C_3A 含量時，氯離子添加量越高，固結量越高，但兩者並非線性關係，顯示 C_3A 固結氯離子的能力有限，當氯離子添加超過特定值時，固結能力會趨於平緩。

2.5.2 卜作嵐材料對於氯離子固結能力的影響

Dhir *et al.*[37]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，從試驗結果發現，隨著爐石取代量增加，氯離子的固結能力越好。Rui *et al.*[38]也指出摻入爐石可以改善混凝土孔隙結構，降低氯離子的擴散係數，不管氯離子由內部添加或由外部滲入，氯離子固結能力隨著爐石取代量越高而增加。

2.6 臨界氯離子濃度

氯離子自混凝土表面經保護層、孔隙傳輸，於鋼筋周圍累積到一定濃度時就會誘發鋼筋開始腐蝕，學者們將此時的氯離子濃度定義為「臨界氯離子濃度」。一般而言，以科學及物理兩種方式作為定義鋼筋開始腐蝕的參考點，科學上認為鋼筋腐蝕的依據為鋼筋表面的鈍化膜被破壞，但鋼筋開始腐蝕初期，鋼筋表面氧化鐵難以單純以肉眼觀測，且還有一定的安全性；物理上則是以工程行為判斷，當鋼筋出現明顯的或可接受的惡化時對應到的氯離子濃度。此時鋼筋腐蝕情況較前一種嚴重，對鋼筋混凝土結構物本身傷害相對明顯[39]。

國內外許多研究皆有提出引起鋼筋脫鈍 (Depassivation) 的臨界氯離子濃度，但得到的試驗結果各有差異，究其根本原因在於混凝土組成的成分，如：水泥類型、卜作嵐材料，以及外在環境或混凝土內部相對濕度、鋼筋表面條件。因此，氯鹽引

起的鋼筋鏽蝕不能簡單地規定一個臨界值就能防止鋼筋鏽蝕，因為所用混凝土材料、試驗方法以及暴露條件的差異，均會得到不同大小的臨界值。

長期以來，國內外為確保混凝土結構物的耐久性，許多研究和規範提出以水泥質量百分比的氯離子濃度作為引起鋼筋鏽蝕的臨界值，Frederiksen[40]認為臨界氯離子濃度會隨暴露環境不同影響鋼筋表面的狀態而有很大的變化，同時，保護層厚度、混凝土和鋼筋的握裹狀況也對臨界氯離子值產生影響，對於無裂縫和裂縫寬度小於 0.1 mm、保護層厚度大於 25 mm 的北歐暴露環境，臨界氯離子濃度建議值如表 2-9 所示。日本學者[41][42]指出鋼筋發生腐蝕的臨界氯離子濃度介於 1.2~2.5 kg/m³（約為 0.051~0.106% 混凝土重），此濃度與混凝土保護層厚度及暴露環境亦有關係。以實際橋梁調查結果所得的統計資料顯示，鋼筋發生腐蝕的臨界氯離子平均濃度約為 2.03 kg/m³（約為 0.0863% 混凝土重）。日本混凝土標準示方書[43]採用 1.2 kg/m³（約為 0.0863% 混凝土重）作為臨界氯離子濃度。歐洲規範 EN 206[44]指出混凝土中氯離子最大濃度，對於氣候較溫和的地區規定為 0.4% 膠結料重，氣候較嚴苛的地區則為 0.2% 膠結料重（約為 0.03~0.07% 混凝土重），如表 2-10 所示。美國 Life-365[45]則是採用 0.05% 混凝土重作為臨界氯離子濃度。

表 2-9 北歐環境臨界氯離子建議值[40]

混凝土類型	臨界氯離子濃度			
	水下區	浪濺區	除冰鹽區	海洋大氣區
W/B = 0.5				
100% CEM	1.5	0.6	0.4	0.6
5% SF	1.0	0.4	0.3	0.4
10% SF	0.6	0.2	0.2	0.2
20% FA	0.7	0.3	0.2	0.3
W/B = 0.4				
100% CEM	2.0	0.8	0.6	0.8
5% SF	1.5	0.5	0.4	0.5
10% SF	1.0	0.3	0.2	0.3
20% FA	1.2	0.4	0.3	0.4
W/B = 0.3				
100% CEM	2.2	1.0	0.8	1.0
5% SF	1.6	0.6	0.5	0.6
10% SF	1.2	0.4	0.3	0.4
20% FA	1.4	0.5	0.4	0.5

表 2-10 BS EN 206-1 臨界氯離子建議值[44]

結構類型	氯離子濃度等級	氯離子最大值 (水泥質量百分比)
無筋混凝土或有防蝕裝置	C1 1,0	1.00
鋼筋混凝土	C1 0,20	0.20
	C1 0,40	0.40
預力混凝土	C1 0,10	0.10
	C1 0,20	0.20

2.7 混凝土氯離子耐久性試驗

傳統的結構設計多偏重工程材料的力學特性，對於所處環境對於結構物耐久性的影響相對較為忽略，一般情況下，判別混凝土品質的好壞皆以 28 天齡期抗壓強度作為依據。但隨著結構體使用年限增加以及所處環境含有腐蝕因子侵入混凝土內使鋼筋生鏽，導致混凝土保護層剝落，影響整體結構安全性，維修費用大量支

出。相關案例如：美國高速公路當局於 1975 年時就投入了 6 億美元於維護混凝土橋樑與橋面版上混凝土的維護與補強工作[22]，因此，探討混凝土耐久性是否符合工程需求是必要的。以氯鹽為例，國內外目前最常使用來評估混凝土抵抗氯離子侵入能力的試驗方法如以下各個小節。

2.7.1 貯鹽試驗 (Salt Ponding Test)

貯鹽試驗藉由內外部濃度梯度，使氯化鈉溶液內氯離子在混凝土內以擴散的方式進行傳輸，並利用菲克第二定律 (Fick's Second Law) 計算混凝土擴散係數，計算方式可詳見 2.8 節。此擴散係數對於判斷結構物中氯離子的分布狀況以及估計結構物的生命週期有很大的幫助。美國州公路及運輸協會 (American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO) 於 1980 年前將此試驗列入規範內[46]，於 2002 年時，ASTM 也將此類型試驗列入規範內[47]。兩種規範試驗方法相近，如：試體尺寸、試體放置溫溼度條件，而規範規定最初的取樣時間至少為 90 天，必要時建議可進行長達 6 個月或 1 年的取樣時間。由於試驗時間過長，因此相關文獻[48][49]將此試驗歸類為長期試驗，另外，也常用來驗證其他氯離子加速性試驗適用性。

2.7.2 壓力滲透試驗 (Seepage Pressure Test)

混凝土滲透性是評判混凝土耐久性指標參數，特別是結構物暴露於惡劣的環境下時，如：地下結構物若處於受壓水層，壓力使地下水更快地滲入混凝土內，這些滲流水可能造成結構物內部電線短路，危害設備安全。學者們對於混凝土滲透性試驗的方法、原理、使用範圍以及判斷準則等作出了許多研究，如：Powers *et al.* [50]量測一般波特嵐水泥砂漿滲透係數，提出水灰比與滲透係數間的關係。Figg[51]於 1973 年利用將試體通過水流和氣流的方式，測定現地混凝土滲透性，並與實驗室結果做比對，提出水灰比、抗壓強度與滲透係數間具有高度相關。Banthia[52]探討礦物摻料對於滲透係數的影響，滲透係數隨著混凝土齡期增加而降低，且摻入礦物摻料後下降趨勢比純水泥砂漿更加明顯，如圖 2-7 所示。

若受壓水層中同時含有腐蝕因子，腐蝕因子會隨著滲流一同進入混凝土內部而侵蝕鋼筋，加快結構物劣化，如：海底隧道。Stanish *et al.*[53]提出受到靜水壓力時，混凝土內氯離子傳輸行為為擴散和滲透作用，但此類型結構物生命年限設計多以的基礎決定，而 Fick's Second Law 主要拿來描述擴散作用，結構物設計生命年限可能具不準確性，然而，國內外相關研究並不多見[54]。

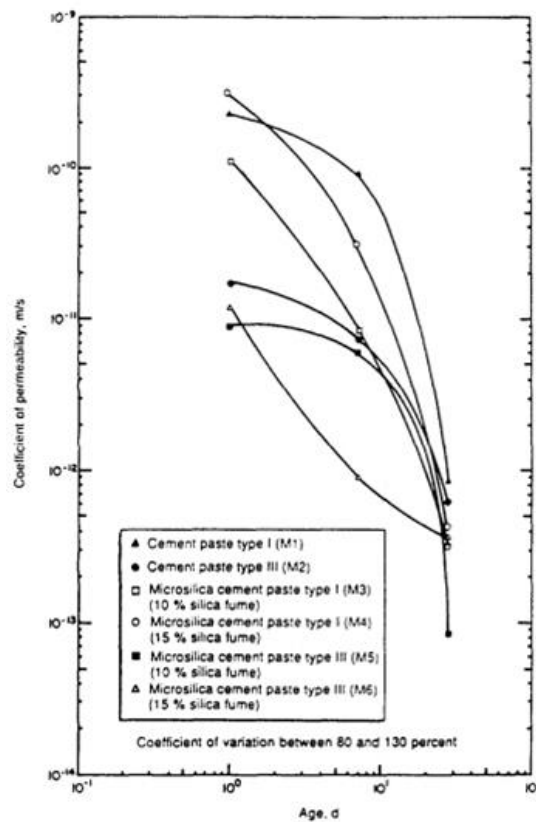


圖 2-7 滲透係數與混凝土齡期關係

2.8 氯離子在混凝土中的擴散行為

2.8.1 擴散方程式

貯鹽試驗氯離子傳輸行為主要為擴散作用，當飽和混凝土且其中一面浸泡氯離子溶液中，混凝土表面與內部孔隙溶液會產生一個濃度梯度，產生擴散作用。但混凝土為多孔性的材料，且每一個孔隙都是複雜的巢狀結構，因此，若要利用 Fick



第二擴散定律來描述混凝土中氯離子的擴散行為，須作以下假設[55]：

- (1) 均質且飽和混凝土。
- (2) 孔隙均勻分布，每一個微小孔隙為等截面的管子。
- (3) 氯離子在孔隙溶液中進行一維擴散。
- (4) 每一個細小孔隙溶液內，氯離子可擴散至混凝土任意處。

菲克第二定律 (Fick's Second Law) 為一偏微分方程式，以式 2-6 來表示，在不同的邊界條件下，會有不同的解析解[56]，以下則列舉兩種邊界條件下的解析解：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots 2-6$$

- (1) 當一定量為 m 的物質 B 吸附在 A 表面上並往 A 擴散時 (如圖 2-8)，初始以及邊界條件則為：

初始條件：

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

邊界條件：

$$\int_0^{\infty} C(x, t) dx = m = constant$$

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

對 2-6 式進行無窮積分得到 2-7 式，

$$C(x, t) = \frac{\alpha}{\sqrt{t}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \dots\dots\dots 2-7$$

已知 $\int_0^{\infty} \exp(-y^2) dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$ ，將式 2-7 代回邊界條件可以得到擴散方程式解析解式 2-8，

$$C(x, t) = \frac{m}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \dots\dots\dots 2-8$$



上述各式當中，

$C(x, t)$ ：距表面 x 公分處，在時間 t 的氯離子濃度 (%)

D ：氯離子擴散係數 (cm^2/s)

C_s ：表面氯離子濃度 (%)

x ：擴散所到達深度 (cm)

t ：擴散過程 (s)

(2) 當一固定濃度且無限量物質 B 吸附在 A 表面上往 A 擴散時 (如圖 2-9)，初始以及邊界條件為：

初始條件：

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

邊界條件：

$$t > 0, x = 0, C = C_s$$

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

Colleparidi[57]論述了求解菲克第二定律 (Fick's Second Law) 中氯離子擴散係數的計算方法，將初始與邊界條件帶入式 2-6 求解，可得到解析解如式 2-9：

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \dots\dots\dots 2-9$$

上述各式當中，

$C(x, t)$ ：距表面 x 公分處，在時間 t 的氯離子濃度 (%)

D ：氯離子擴散係數 (cm^2/s)

C_s ：表面氯離子濃度 (%)

x ：擴散到達深度 (cm)

t ：擴散過程 (s)



2.8.2 擴散係數之時間效應

離子擴散係數可在一定程度上反映混凝土的材料性質，如：孔隙結構，所以氯離子擴散係數可視為混凝土材料參數，因孔隙結構會隨著水化作用變化，在不同齡期的混凝土材料性質有明顯變化[29]。擴散係數於菲克第二定律(Fick's Second Law)中為常數，混凝土由擴散方程式計算得到的氯離子擴散係數並無考慮時間效應，若是將較短齡期混凝土的擴散係數當作長齡期試體擴散係數，預測長齡期混凝土中氯離子分布狀況，會有產生誤差的現象。

Mangat 和 Molloy[58]蒐集許多藉由菲克第二定律(Fick's Second Law)計算的氯離子擴散係數數據，數值大小與混凝土齡期長短具高度相關，當齡期越長，擴散係數越小。Thomas 和 Bamforth[29]假設氯離子傳輸機制主要為擴散，以實驗室混凝土試體長時間浸泡鹽水以及多年現地試驗結果，發現混凝土擴散係數隨著時間有下降的趨勢，且添加爐石以及飛灰的試體下降幅度更大，如圖 2-10 所示，並以此指數型經驗公式(2-10)進行迴歸分析。

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \dots\dots\dots 2-10$$

式中，

t：混凝土齡期。

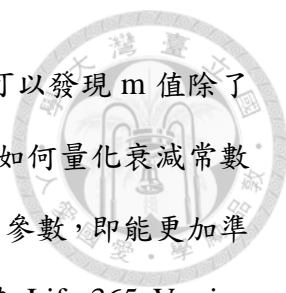
t_{ref} ：混凝土參考齡期。

D(t)：在齡期 t 時的擴散係數。

D_{ref} ：在參考齡期 t_{ref} 時的擴散係數。

m：衰減常數(取決於配比)。

許多學者做了對於衰減常數與各配比關係的相關研究，於許多齡期下，利用 NT Build 443[59]規範當中的擴散試驗方法，以菲克第二定律(Fick's Second Law)求得各個齡期擴散係數，並迴歸分析計算出相關係數 R^2 最高時的衰減常數 m[45]。不同配比 m 值的大小如表 2-11 所示，純水泥混凝土 m 值範圍為 0.10~0.45，添加



了卜作嵐材料之混凝土 m 值範圍為 0.41~0.77，從文獻數據中可以發現 m 值除了與卜作嵐摻料添加量有關，也受到混凝土水膠比的影響。但關於如何量化衰減常數 m 值跟其影響因子間的關係之研究較為缺乏，若能成功量化這項參數，即能更加準確預估結構物生命週期。常用來設計結構物生命週期的軟體 Life-365 Version 2.2[45]，根據諸多研究的試驗結果，建立衰減常數 m 值的經驗公式，如式 2-11，此經驗式僅考慮了卜作嵐材料的添加量，尚未考慮混凝土水膠比此項參數。此 Life-365 衰減常數經驗式有其適用範圍，爐石取代率上限為 70%、飛灰取代率上限為 50%，且 m 值不能超過 0.6，因此，由經驗式得到的 m 值偏保守，以符合保守設計的目標。

$$m = 0.2 + 0.4 \left(\frac{FA\%}{50} + \frac{SG\%}{70} \right) \dots\dots\dots 2-11$$

表 2-12 顯示國內外文獻中，試驗條件相似的混凝土擴散係數，時間的計算方式以混凝土齡期為基準。水膠比 0.35 混凝土擴散係數約 1.57~10.00×10⁻⁸ cm²/s、水膠比 0.45 擴散係數約 3.70~16.26×10⁻⁸ cm²/s、水膠比 0.55 擴散係數約 6.30~17.83×10⁻⁸ cm²/s、水膠比 0.65 擴散係數約 13.44~31.68×10⁻⁸ cm²/s

表 2-11 衰減常數 m 文獻數據

衰減常數 (Decay Constant, m) 文獻數據				
參考文獻	水膠比	爐石	飛灰	m
Tang and Nilsson[34]	0.70	0%	0%	0.25
	0.32	0%	0%	0.31
Bamforth[60]	0.66	0%	0%	0.26
	0.48	70%	0%	0.62
	0.54	0%	30%	0.70
Nokken <i>et al.</i> [61]	0.30	0%	0%	0.32
	0.40	0%	0%	0.27
	0.31	0%	12%	0.55
	0.33	0%	16%	0.41
	0.35	0%	12%	0.77
	0.40	0%	8%	0.69
	0.40	0%	12%	0.77
H. S. Al-alaily, A. A. Hassan[62]	0.3	0%	0%	0.16~0.45
	0.4	0%	0%	0.11~0.17
	0.5	0%	0%	0.10~0.26
Life-365, Service Life Prediction Model [45]		$m = 0.2 + 0.4 \left(\frac{FA\%}{50} + \frac{SG\%}{70} \right)$		

表 2-12 貯鹽試驗擴散係數相關研究

W/C	時間 (天)	擴散係數 D ($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)	參考文獻
0.35	28	4.95	Yang and Cho[63]
0.45		8.12	
0.55		10.29	
0.65		13.44	
0.30	28	9.64	Nokken <i>et al.</i> [61]
	90	5.87	
	140	5.39	
	1095	3.43	
0.35	118	1.67	Chiang and Yang[64]
0.45		3.70	
0.46	365	6.32	Audenaert[65]
0.46		3.80	
0.41		4.84	
0.46		7.60	
0.35	118	1.57~2.57	林致緯[66]
0.45		1.77~7.24	
0.55		1.99~8.85	
0.65		3.15~13.75	
0.45	118	4.57~7.47	何季軒[1]
0.55		6.30~22.56	
0.65		11.64~70.88	
0.35	118	10.00	張廷駿[67]
0.45		11.50	
0.55		17.40	
0.65		21.80	
0.35	180	1.65~6.88	梁智信[56]
0.45		2.65~16.26	
0.55		5.70~17.83	
0.65		8.94~31.68	

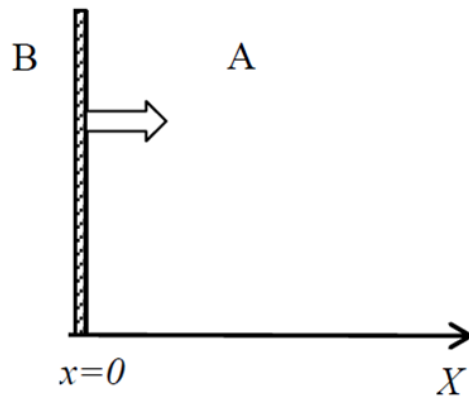


圖 2-8 定量擴散示意圖[56]

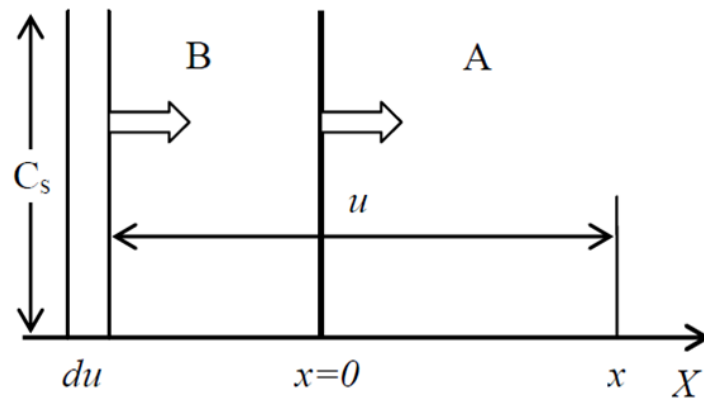


圖 2-9 固定濃度擴散示意圖[56]

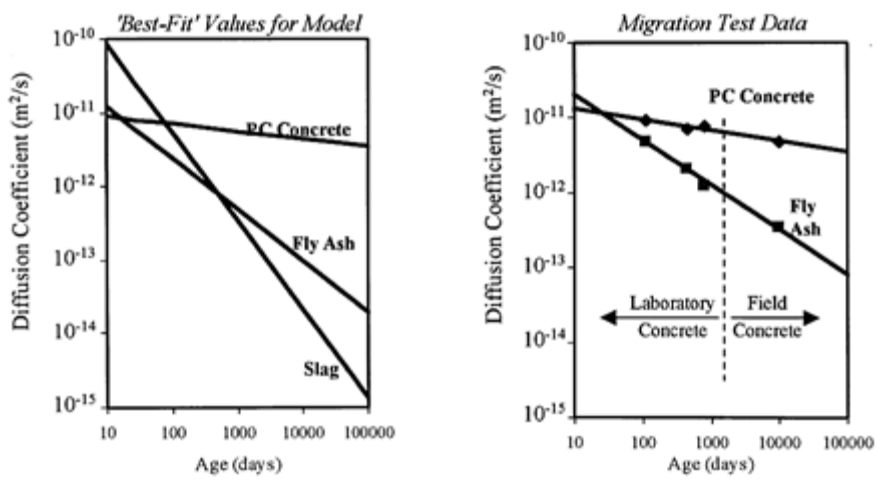


圖 2-10 擴散係數時間效應[49]



2.9 靜水壓力對於氯離子傳輸行為之影響

2.9.1 滲流－擴散方程式

混凝土受到靜水壓力時(2.7.2節)，氯離子於混凝土中傳輸行為為擴散和滲透作用組成，且隨著靜水壓力的增加，滲透作用會漸漸佔據氯離子傳輸行為的主導位置，Freeze 和 Cherry[68]和 Stanish *et al.*[53]提出離子的擴散、滲透作用可以由式2-12 控制，混凝土為多孔性材料，若要以此滲流－擴散方程式描述混凝土內氯離子的傳輸行為，需假設：

- (1) 混凝土為均質且飽和。
- (2) 混凝土孔隙均勻分布，且微小孔隙為等截面的管子。
- (3) 氯離子於孔隙溶液中一維擴散。
- (4) 每一個細小孔隙內，毛細水所含的氯離子可擴散到混凝土中並侵蝕混凝土內部。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x} \dots\dots\dots 2-12$$

$$\bar{v} = -\frac{k}{n} \frac{\partial h}{\partial x} \dots\dots\dots 2-13$$

上述各式當中，

C ：混凝土氯離子濃度 (%)

x ：擴散所到達深度 (cm)

t ：擴散過程 (s)

D ：擴散係數 (cm²/s)

\bar{v} ：滲流速度 (cm/s)

k ：滲透係數 (cm/s)

n ：混凝土孔隙率 (%)

h ：靜水壓力水頭 (m)

初始條件：



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

邊界條件：

$$t > 0, x = 0, C = C_s$$

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

將上述邊界與初始條件代入偏微分方程式，可得到解析解如式 2-14，

$$C(x, t) = \frac{C_s}{2} \left[e^{vx/D} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x+vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \dots\dots\dots 2-14$$

2.9.2 混凝土滲透係數

滲透係數是衡量混凝土耐久性的重要指標，但量測混凝土滲透係數相當不易，數值變異性極高[69]，表 2-13 整理相關文獻中經由試驗得到的滲透係數，數值級數範圍在 10^{-16} 到 10^{-13} m/s 間。滲透係數的大小影響著滲流—擴散方程式中，滲流作用對於氯離子傳輸所佔的比例[70]。

2.9.3 靜水壓力對於氯離子侵入深度之影響

趙彥迪等人[54]利用不同靜水壓力，探討混凝土中氯離子傳輸以及分布影響，使用的配比如表 2-14，比較各個不同靜水壓力壓力滲透試驗與無靜水壓力對照組比色法氯離子侵入深度的差異，如圖 2-11 所示，不同配比中氯離子侵入深度隨水壓增加而增加，但氯離子侵入深度與水壓間並不是線性關係，隨著水壓力越大，氯離子侵入深度增加的幅度會越大。

2.9.4 靜水壓力下 Fick's Second Law 之適用性

利用不同的靜水壓力，探討混凝土中氯離子傳輸以及分布的影響，先假設水壓作用下氯離子的傳輸仍符合 Fick's Second Law，分析水壓作用下，氯離子的分布情況[54]，試驗結果發現，如圖 2-12，靜水壓力在 0~0.1Mpa 時，菲克第二定律仍可準確描述氯離子的傳輸行為，表示靜水壓力小於 0.1Mpa 的情況下，氯離子傳輸行



為還是可以視為擴散作用。而當水壓大於 0.3Mpa 後，氯離子在混凝土的傳輸會受到顯著的影響，此時 Fick's Second Law 將不再適用於解釋壓力作用下的氯離子傳輸行為[54]。Lund *et al.*[75]則分別以 0.1 Mpa 和 0.8 Mpa 靜水壓力加壓，結果如圖 2-15 所示，可以發現若靜水壓力的增加，以 Fick's Second Law 計算混凝土的氯離子擴散係數，得到的擴散係數數值會受到靜水壓力影響而被放大，進而影響到設計結構物生命週期的準確性。

金祖權等人[76]透過施加不同靜水壓力以及不同加壓時間，探討靜水壓力下氯離子傳輸係數 D_h 與擴散係數 D_0 之間的關係，發現擴散係數放大的倍數似乎跟靜水壓力的大小有一定的關係，使用配比及參數如表 2-16 所示，C30 和 C50 分別代表著設計強度為 30 MPa 和 50 MPa 的混凝土。利用 Fick's Second Law 分進行迴歸分析計算氯離子傳輸係數，定義壓力組別氯離子傳輸係數為 D_h 對照組則為 D_0 ，將 D_h 對 D_0 進行正規化，試驗結果如圖 2-13 和圖 2-14 所示，以指數函數進行擬合，如式 2-15 所示。隨著壓力增加氯離子傳輸係數會越大，意味著壓力作用更能加速氯離子於混凝土中傳輸，迴歸常數 a 的大小，C30 組別大於 C50 組別意味著壓力使得氯離子於 C30 組別當中傳輸速率比 C50 組別更快。

$$D_h/D_0 = \exp(aP) \dots\dots\dots 2-15$$

其中，

D_h ：靜水壓力下傳輸係數

D_0 ：擴散係數

P ：靜水壓力

a ：迴歸常數



表 2-13 混凝土滲透係數文獻數據

W/B	齡期 (天)	材料種類	k (10 ⁻¹³ m/s)	參考文獻
0.43	28	混凝土	1.28	P. B. Bamforth[71]
0.51			9.87	
0.85			140.11	
0.6	90~120	混凝土	6.40	S. L. Lee <i>et al.</i> [72]
0.4	90~120	混凝土	0.45	S. F. Wong <i>et al.</i> [73]
0.5			1.82	
0.6			6.36	
0.7	28	混凝土	23.90	S. Tsivilis <i>et al.</i> [74]
0.69	365~500	混凝土	20.40	A. S. El-Dieb[69]
0.49			0.37	
0.29			1.86×10 ⁻³	
0.65	28	混凝土	14.50~67.50	趙川[70]

表 2-14 混凝土配比[54]

配比 編號	水泥 kg/m ³	砂 kg/m ³	碎石 kg/m ³	水 kg/m ³	礦渣粉 kg/m ³	粉煤灰 kg/m ³	減水劑 %	水膠比
A	304	579	1269	152	38	38	1	0.4
B	342	579	1269	152	0	38	1	0.4
C	304	579	1269	152	0	76	1	0.4
D	380	579	1269	152	0	0	1	0.4
E	320	653	1267	160	0	0	1	0.5
備註			減水劑用量為膠結材質量的 1%					

表 2-15 Chloride diffusion coefficients at different pressure[75]

	Pressure (kPa)	Time (days)	Diffusion Coefficient ($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)
Great Belt Concrete	800	1	28
w/c = 0.35	100	23	4
	800	1	46
w/c = 0.45	100	23	7.3
	800	5	50
w/c = 0.55	100	23	12
	800	5	38

表 2-16 Mix proportion and experimental parameters[76]

編號	Cement (kg/m^3)	Slag (kg/m^3)	Fly ash (kg/m^3)	Fine aggregate (kg/m^3)	Coarse aggregate (kg/m^3)	Water (kg/m^3)
A	360	—	—	720	1080	190
B	230	138	92	690	1150	161
Experimental parameters						
Pressure (MPa)				Duration of Test		
0.2、0.6、1.0、1.2				3h、8h、24h、13d、20d		

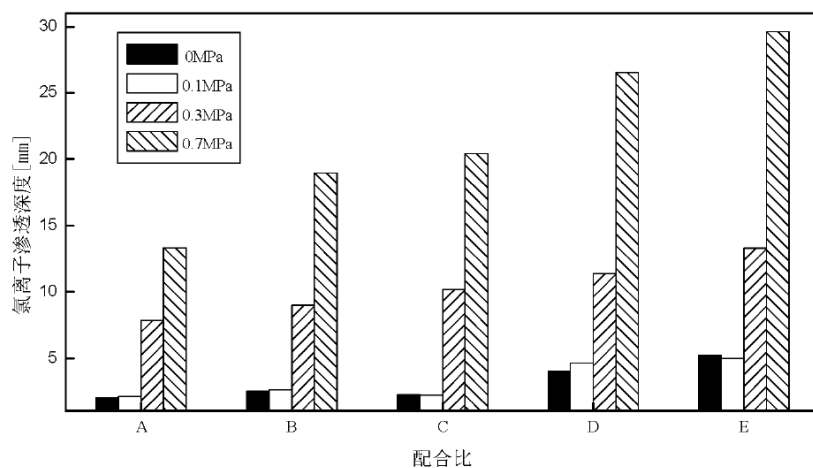


圖 2-11 不同靜水壓力作用下混凝土中氯離子侵入深度[54]

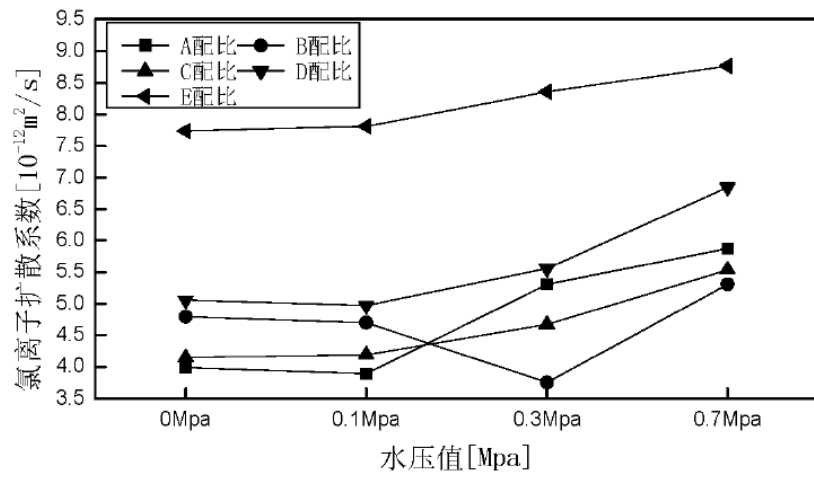


圖 2-12 不同水壓值氯離子擴散係數[54]

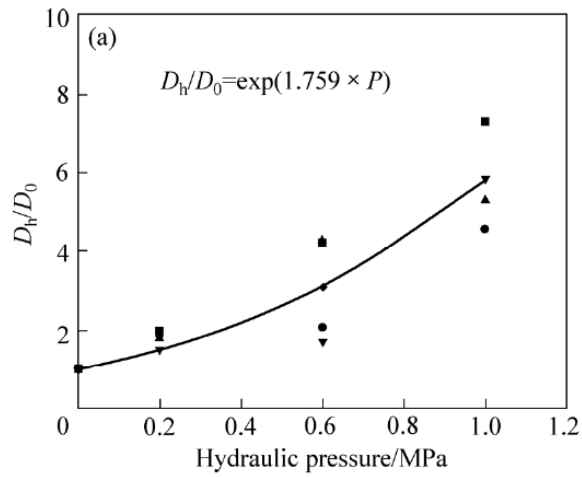


圖 2-13 C30 Chloride transportation coefficient changing with hydraulic pressure[76]

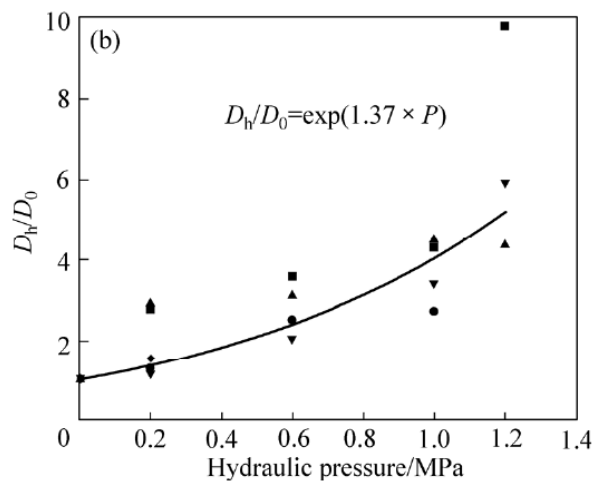


圖 2-14 C50 Chloride transportation coefficient changing with hydraulic pressure[76]



2.10 硬固混凝土氯離子濃度檢測

2.10.1 比色法

比色法為使用硝酸銀測定混凝土中自由氯離子 (Free chloride ion) 侵入深度試驗方法，自由氯離子一般被認為會引起鋼筋混凝土中鋼筋產生腐蝕[6]，但自由氯離子隨著混凝土齡期增加會逐漸轉換為固結氯離子，混凝土中若含有自由氯離子，與硝酸銀反應會生成 AgCl 並呈現白色，未含有自由氯離子的部分則呈現棕褐色，可以達到快速區分混凝土內氯離子為固結型態或是自由型態之目的，而比色法亦可滿足下列四種目標：

- (1) 利用比色法測定自由氯離子的含量。
- (2) 利用比色法量測自由氯離子轉變為不具有腐蝕性的膠結氯離子的時程。
- (3) 快速求得混凝土曝露於氯離子環境中氯離子的滲透性。

Otsuki *et al.* [77]使用濃度為 0.05N、0.1N、0.2N、0.3N、0.4N 硝酸銀，得到硝酸銀濃度為 0.1N 時，最適合觀測混凝土中氯離子滲透深度。目前對於比色法變色界面氯離子含量尚未有一致的共識，Otsuki *et al.* [77]提出比色法變色界面總氯離子含量隨配比不同而改變，例如混凝土於變色界面總氯離子含量為 0.5%，砂漿為 0.8%，水泥漿為 0.45%，但是不同配比或水膠比，自由氯離子含量都趨近於 0.15% (by weight of concrete) (圖 2-15)。Colleparidi [57]提出比色法變色界面氯離子含量最小值為 0.01% (by weight of cement)。Andrade[78]參照 ASTM C1202 中 RCPT 試驗，以探討比色法變色界面氯離子含量與深度之關係，在信賴指數為 0.95，判定係數為 0.62 情況下，混凝土變色界面自由氯離子含量約為 $0.18 \pm 0.2\%$ ，水泥漿試體變色界面自由氯離子含量約為 $1.13 \pm 1.4\%$ 。Meck[79]提出比色法於混凝土變色界面自由氯離子含量則為 0.12%。李旺達[80]以 ACMT 加速氯離子傳輸試驗探討比色法當中氯離子與硝酸銀反應之濃度，使用的配比為水膠比 0.35、0.45、0.55、0.65，並分別進行爐石 40%取代、飛灰 20%取代以及爐灰混和 30%取代，從試驗結果當中發現，變色界面總氯離子濃度會隨著水膠比增加而減少，如表 2-17 所示。趙彥迪[54]



以水膠比 0.4 混凝土進行氯離子壓力滲透試驗，從試驗結果發現，氯離子與硝酸銀反應之濃度約為 0.04~0.05%，如表 2-18 所示。

2.10.2 酸溶法、水溶法

當海水或地下水等含有氯離子的水源接觸混凝土結構物時，氯離子藉著混凝土外部與內部濃度的差異會從表面慢慢擴散至內部，當氯離子滲透深度超過混凝土保護層達到鋼筋表面且濃度達到一定量時，鋼筋會生鏽膨脹並危害到結構物的安全性，因此，我國採用美國系統氯離子檢測方法，制定規範 CNS 14702「硬固水泥砂漿及混凝土中酸溶性氯離子濃度試驗法」量測混凝土內總氯離子濃度和 CNS 14703「硬固水泥砂漿及混凝土中水溶性氯離子濃度試驗法」量測混凝土內自由氯離子濃度，試驗過程包含取樣、氯離子萃取、電位滴定，藉由此兩種試驗方法量測建築物內氯離子濃度，若超出臨界值提早提出警告[81]。

各國對於酸、水溶法檢測氯離子濃度過程有些許差異，最大不同於取樣以及氯離子萃取過程，表 2-19 和表 2-20 為各國酸溶法、水溶法取樣量的差異比較，以澳洲檢測方法取樣量大於 15 g 最高，RILEM 檢測方法取樣量 1 g 為最低。取樣量高代表混凝土試驗所含氯離子濃度高，較容易檢測，但缺點在於過程中需要耗費大量的混凝土粉末樣本；取樣量低則反之，但滴定結果的數值可能過低，極有可能落在滴定機器的誤差範圍內，產生氯離子濃度數值誤判的情形。所以 RILEM 檢測方法則是採用氫流化氮 (NH_4SCN) 作為反應溶液，分光光度計在 460 nm 波長吸光度下進行氯離子濃度判別。

各國氯離子萃取過程大同小異，最大的差異在於酸溶法氯離子濃度的過程中，加入的硝酸 (HNO_3) 溶液量。氯離子濃度滴定方式除了 RILEM 採用氫流化氮 (NH_4SCN) 發色反應溶液外，其餘皆採用硝酸銀 (AgNO_3) 滴定反應溶液[82]。

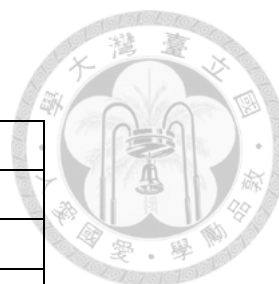


表 2-17 比色法變色深度對應氯離子濃度[80]

C _{discoloured boundary} (% by weight of concrete)	
C35	0.0465
C45	0.0385
C55	0.0219
C65	0.0225
F35	0.0284
F45	0.0249
F55	0.0104
F65	0.0160
S35	0.0500
S45	0.0559
S55	0.0349
S65	0.0395
SF35	0.0456
SF45	0.0472
SF55	0.0528
SF65	0.0336

表 2-18 變色邊界氯離子濃度重複性統計結果[54]

量次數 配比	第 1 次 (%)	第 2 次 (%)	第 3 次 (%)	平均值 (%)	標準差	變異係數 (%)
A	0.0486	0.0471	0.0488	0.0482	0.0009	1.93
B	0.0426	0.0445	0.0465	0.0445	0.0020	4.38
C	0.0429	0.0405	0.0422	0.0429	0.0012	2.95
D	0.0459	0.0486	0.0462	0.0469	0.0015	3.16
E	0.0416	0.0400	0.0439	0.0418	0.0012	2.29

表 2-19 各國酸溶性氯離子濃度檢測方式差異性[82]

規範	粉末取樣尺寸	樣本大小
歐洲 RILEM TC 178-TMC	< 0.160 mm	1 g
挪威 NT Build 208	< 0.100 mm	5 g
英國 BS 1881 : Part 124 : Clause 102	< 0.100 mm	5 g
日本 JIS A 1154	< 0.150 mm	10 g
美國 FM 5-516	< 0.300 mm	3 g
美國 AASHTO T260	< 0.300 mm	3 g
美國 ASTM C1218	< 0.850 mm	10 g
澳洲 AS 1012.20	< 0.150 mm	> 15g
中華民國 CNS 14702	< 0.850 mm	10 g

表 2-20 各國水溶性氯離子濃度檢測方式差異性[82]

規範	粉末取樣尺寸	樣本大小
歐洲 RILEM TC 178-TMC	< 0.315 mm	5 g
美國 AASHTO T260	< 0.300 mm	3 g
美國 ASTM C1152	< 0.850 mm	10 g
中華民國 CNS 14703	< 0.850 mm	10 g

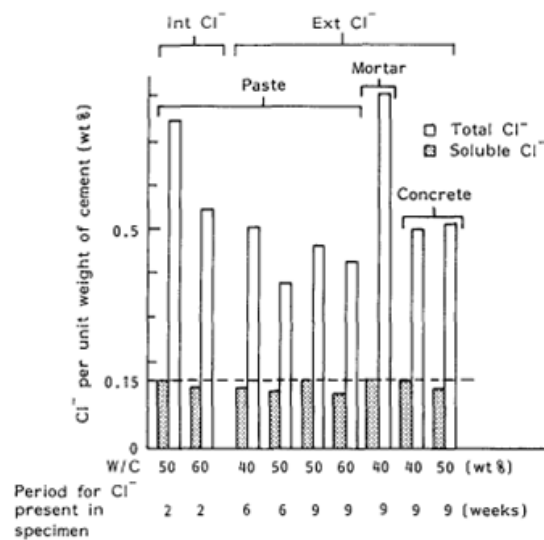


圖 2-15 Relation between the discoloured boundary and Cl⁻ content[77]

第三章 實驗計畫



3.1 實驗內容與方法

本研究將探討混凝土的耐久性，以施加不同靜水壓力的方式使鹽水（氯離子）滲入混凝土，量測氯離子侵入深度以及不同深度之氯離子濃度，建立氯離子—深度曲線的關係，探討在靜水壓力下氯離子於混凝土中的傳輸行為，並觀察不同卜作嵐材料取代下，卜作嵐材料對於氯離子的傳輸行為有何影響。另一方面，為達未來能夠以施加壓力的方式來做為氯離子加速性試驗取代貯鹽試驗之基礎，本試驗比較鹽水壓力滲透試驗和貯鹽試驗（Ponding Test）在相同試驗時間時，氯離子分布狀況的差異性，從中尋求具有指標性的基準，如：氯離子侵入深度、氯離子侵入量，最後建立兩種試驗之間的關係。實驗流程於圖 3-1。

本研究主要以混凝土材料組成、靜水壓力大小做為參數，探討這些參數對於混凝土耐久性之影響，實驗參數如表 3-1 所示。

表 3-1 實驗參數表

實驗參數	內容
水膠比	0.55
爐石取代水泥量	0、40%
飛灰取代水泥量	0、20%、40%
爐灰混合添加（7：3）取代水泥量	0、30%
水中養護齡期	28 天
靜水壓力	3、5 kgf/cm ²
加壓時間	7 天
備註	OPC 組別加壓時間：7、21、35 天

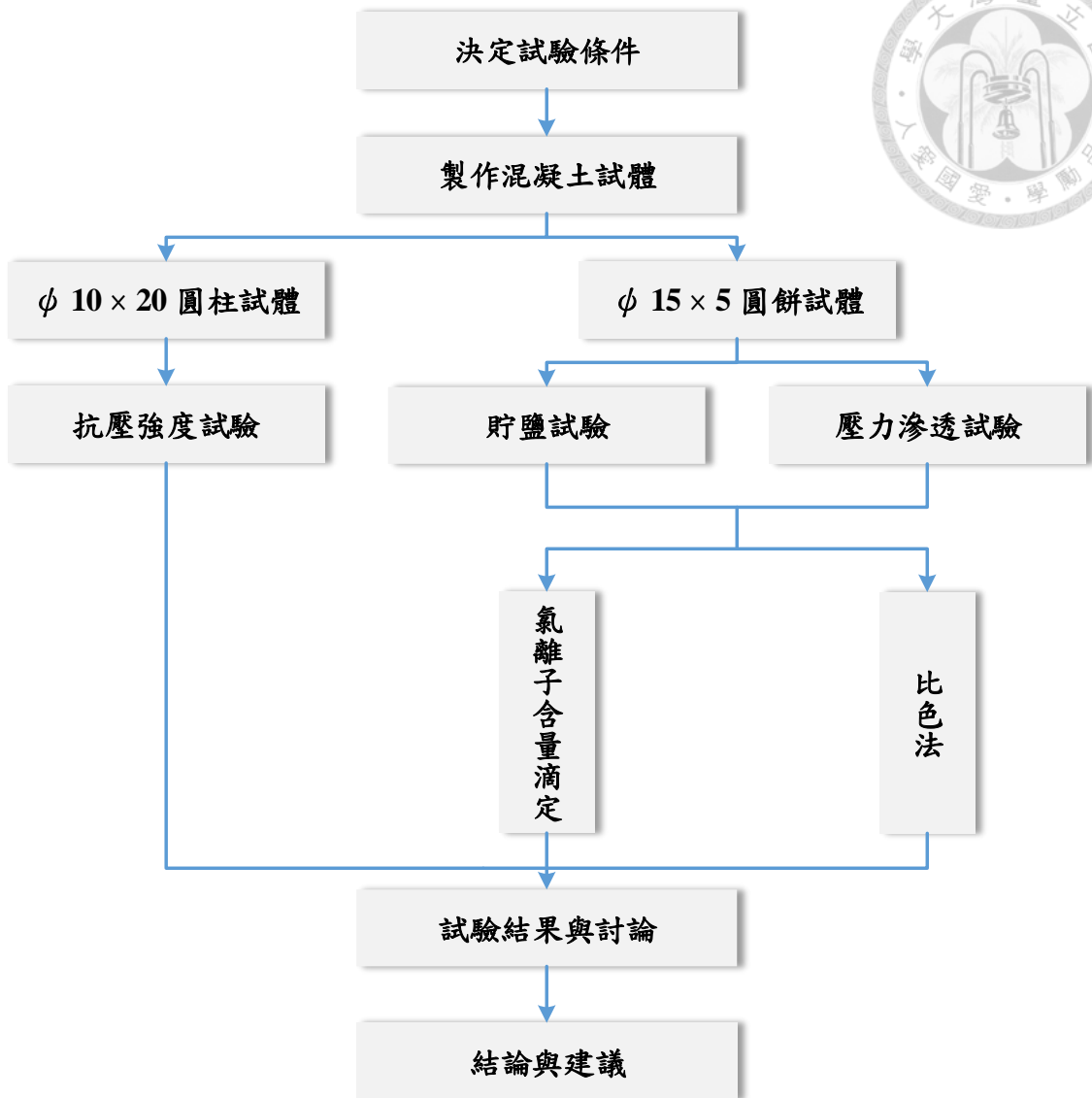


圖 3-1 試驗流程圖



3.2 試驗材料與配比

本研究所使用的基本材料包含水泥、粗粒料、細粒料、飛灰以及爐石分述如下：

(1) 水泥：

本研究採用台灣水泥公司所生產的品牌第 I 型波特蘭水泥，比重為 3.15，其物理性質與化學成份分別列於表 3-2 和表 3-3。

(2) 粗粒料：

本研究採用國產實業建設股份有限公司所提供之三分石，其篩分析與物理性質如表 3-4 所示。

(3) 細粒料：

本研究採用國產實業建設股份有限公司所提供之細粒料，其篩分析與物理性質如表 3-5 所示。

(4) 爐石：

本計畫使用 100 級爐石粉為國產實業建設股份有限公司所提供，比重為 2.9，其化學與物理成分組成如表 3-6 和表 3-7。

(5) 飛灰：

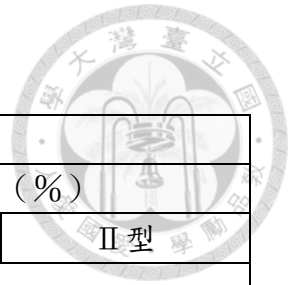
本研究所採用之飛灰取自台灣電力公司，依 CNS 3036 分類為 Class-F 等級的飛灰，比重為 2.2，其化學與物理成分組成如表 3-8。

本研究所採用試體尺寸分為以下兩種，使用配比如表 3-9 所示，而配比編號說明則如圖 3-2 所示

(1) 抗壓強度試驗： ϕ 10x20 cm 圓柱試體。

(2) 貯鹽試驗及壓力滲透試驗： ϕ 15x25 cm 圓餅試體。

表 3-2 台泥品牌第 I 型波特蘭水泥化學成分



試驗報告			
化學性質	檢驗結果 (%)	規範值 (%)	
		I 型	II 型
二氧化矽 SiO ₂	20.90	—	
三氧化二鋁 Al ₂ O ₃	3.99	—	≤6.0
三氧化二鐵 Fe ₂ O ₃	3.74	—	≤6.0
氧化鈣 CaO	62.87	—	
氧化鎂 MgO	3.28	≤6.0	≤6.0
三氧化硫 SO ₃	2.67	≤3.0 或 3.5	≤3.0
燒失量 LOI	0.9	≤3.0	
不溶殘渣 I.R	0.15	≤4.3	
氯離子 Cl ⁻	0.01	≤0.10	
矽酸三鈣 C ₃ S	57	—	
矽酸二鈣 C ₂ S	17	—	
鋁酸三鈣 C ₃ A	4.2	—	
鋁鐵酸四鈣 C ₄ AF	11.4	—	
備註			

表 3-3 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	≥280
凝結時間 (分鐘)	初凝	170	45 ≤ x ≤ 375
	終凝	330	—
壩料空氣含量 (% , 體積百分率)		6.1	≤12.0
熱壓膨脹 (%)		0.02	≤0.80
備註			

表 3-4 粗粒料篩分析與物理性質

粒料	粗粒料				
	各篩停留量 (g)	殘留重量 (%)	累積殘留重量 (%)	累積通過重量 (%)	CNS 1240 (%)
3/2"	0	0	0	100	95~100
3/4"	321	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	含水量 (SSD 狀態)	1.12%

表 3-5 細粒料篩分析與物理性質

粒料 篩號	細粒料				
	各篩停留量 (g)	殘留重量 (%)	累積殘留重量 (%)	累積通過重量 (%)	CNS 1240 (%)
3/8"	0.0	0.0	0.0	100.0	100
#4	6.2	0.5	0.5	99.5	95~100
#8	137.5	11.9	12.5	87.5	80~100
#16	206.3	17.9	30.4	69.6	50~85
#30	255.7	22.2	52.6	47.4	25~60
#50	249.7	21.7	74.3	25.7	5~30
#100	217.7	18.9	93.2	6.8	0~10
#200	50.2	4.4	97.6	2.4	0~5
底盤	28.2	2.4	100.0	0.0	
細度模數	2.63	比重	2.42	含水量 (SSD 狀態)	2.43%

表 3-6 高爐石化學成分

試驗報告		
化學性質	檢驗結果 (%)	規範值 (CNS 12549, %)
二氧化矽 SiO ₂	33.84	—
三氧化二鋁 Al ₂ O ₃	14.07	—
三氧化二鐵 Fe ₂ O ₃	0.32	—
氧化鈣 CaO	41.31	—
氧化鎂 MgO	6.67	—
三氧化硫 SO ₃	0.69	≤4.0
鹽基度	1.83	—
硫化物	0.71	≤2.5
備註		

表 3-7 高爐石物理成分

試驗報告		
物理性質	檢驗結果 (%)	規範值 (%)
比重	2.89	≥2.00
細度 (比表面積) (氣透儀法, m ² /kg)	420	≥330
壩料空氣含量 (% , 體積百分率)	2.61	≤12.0
活性指數 (%)	7 天	75
	28 天	113.4
#325 篩餘 (%)	1.3	≤20
備註		

表 3-8 F 級飛灰化學物理性質

化學性質	檢驗結果 (%)	試驗標準 (CNS 3036, %)
二氧化矽 SiO ₂	50.00	三者合計大於 70%
三氧化二鋁 Al ₂ O ₃	28.41	
三氧化二鐵 Fe ₂ O ₃	6.98	
氧化鈣 CaO	5.99	—
氧化鎂 MgO	1.39	—
氧化鉀 K ₂ O	0.13	—
氧化鈉 Na ₂ O	0.09	—
三氧化硫 SO ₃	0.47	<3
燒失量 LOI	4.62	<6
卜作嵐活性指數 (7 天)	86.8	>75
卜作嵐活性指數 (28 天)	97.8	>75

表 3-9 混凝土試體配比

配比	水膠比	水	水泥	爐石	飛灰	粗粒料	細粒料
055OPC	0.55	200.0	363.9	0	0	956.3	841.4
055S40	0.55	200.0	218.3	145.6	0	956.3	841.4
055F20	0.55	200.0	291.1	0	72.8	956.3	841.4
055F40	0.55	200.0	218.3	0	145.6	956.3	841.4
055SF30	0.55	200.0	254.7	76.4	32.7	956.3	841.4

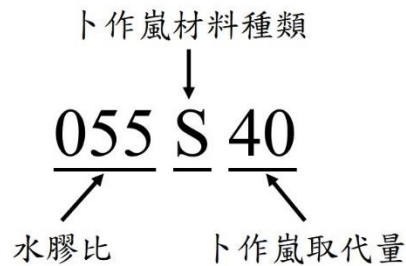


圖 3-2 配比編號說明

3.3 試驗設備

本研究所使用的基本試驗儀器有 MTS 萬能材料試驗機 (100 噸)、圓柱試體斷面研磨機、大、小型混凝土切割機、數位式混凝土透水試驗儀、小型顎碎機、瑞士 Metrohm 的 809Titrand 自動電位滴定儀等相關實驗設備，分述如下：

(1) 中型單軸拌合試驗機：

由 HOQURT 生產，成都食品機械行代理，型號為 HK-101、110V、60Hz、三段變速，拌和上限為 70 kg，如照片 3-1 所示。

(2) 振動台：

為確保混凝土澆置品質，以振動方式將氣泡排出，如照片 3-2 所示。

(3) 恆溫恆濕室：

由巨孚公司所製作，尺寸為 405 × 233 × 395 cm，符合 ASTM 標準養護室 (溫度 23°C，相對溼度 100%)，內部材質為 SUS#304 耐熱耐寒不銹鋼鋼板，外部採鋼板烤漆，如照片 3-3 所示。

(4) 圓柱試體斷面研磨機：

將圓柱試體上下兩面磨平後再進行抗壓以及鹽水壓力滲透試驗，如照片 3-4 所示。

(5) 大、小型混凝土切割機：

大型混凝土切割機為製作壓力滲透與貯鹽試驗試體，由金慶和企業有限公司製造，如照片 3-3 所示。小型混凝土切割機為進行混凝土試體氯離子取樣，由

SAWMASTER 公司生產，型號為 SDT-1030，如照片 3-5 和照片 3-6 所示。

(6) 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，唯一完全數位化整合油壓操作系統，如照片 3-7 所示。

(7) 數位式混凝土透水試驗儀：

由金慶和企業有限公司製造，此儀器依據德國規範 DIN 1048 設計，形式為數位氣壓式，最大施加壓力為 5 kgf/cm^2 ，工作電壓為 110V 1pH 60Hz，如照片 3-8 所示。

(8) 國際牌精密鑽床：

用以混凝土氣離子取樣，可控制研磨試體深度之鑽臺，型號為 CS-13，馬達為 1/4 馬力，如照片 3-9 所示。

(9) 磨粉機

用以將混凝土樣片敲碎後的碎片磨成粉末，如照片 3-10 所示。

(10) 自動電位滴定儀：

由瑞士公司 Metrohm 公司所製造自動電位滴定儀，型號為 809 Titrando，測定分辨率為 0.0001 pH 、 0.1 mV 、 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參考電極所組成，如照片 3-11 所示。自動電位滴定儀會根據試樣的氣離子含量高低進行微調，控制滴定液輸出量與靈敏度以取得合理當量點。



照片 3-1 中型單軸拌合機



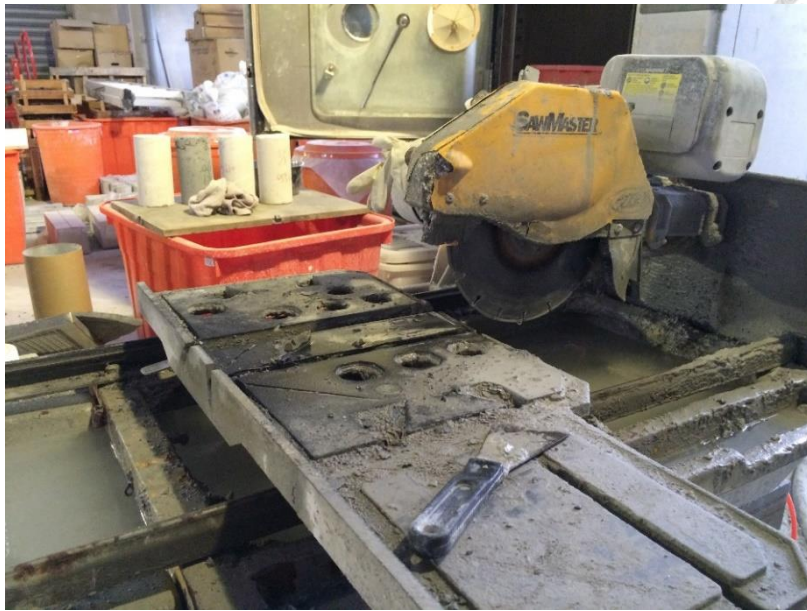
照片 3-2 振動台



照片 3-3 恆溫恆濕室



照片 3-4 圓柱試體斷面研磨機



照片 3-5 小型混凝土切割機



照片 3-6 大型混凝土切割機



照片 3-7 MTS 萬能材料試驗機



照片 3-8 數位式混凝土透水試驗儀



照片 3-9 國際牌精密鑽床



照片 3-10 磨粉機



照片 3-11 自動電位滴定儀

3.4 試體製作

由於混凝土氯離子耐久性試驗之變異性相當高，本研究為盡量降低許多不穩定因素產生的誤差，於混凝土試體製作上，要求每組配比工作性為坍度 $20\text{ cm} \pm 3\text{ cm}$ ，且所有試驗相同配比試體盡量同一批拌和，若拌和設備容量無法滿足需求，則利用混凝土 7 天抗壓強度確保每一批拌和之品質，以下各小節則詳細介紹在各個試驗當中，所需要特別注意的細節，如 3.6.2 節所述壓力滲透試驗混凝土試體表面處理方式。

3.4.1 試驗材料與設備

本研究所使用的材料有水泥、粗骨材、細骨材、爐石粉、飛灰及強塑劑，如 3.2 節所示。試驗所使用儀器如 3.3 節所示。配比表則見表 3-9，各配比實際坍度如表 3-10 所示。

表 3-10 各配比實際坍度

配比	坍度
055OPC	18.5~21.0 cm
055S40	19.0~22.0 cm
055F20	20.5~22.0 cm
055F40	21.5~23.0 cm
055SF30	20.5~22.5 cm
065OPC	21.0~23.0 cm

3.4.2 拌和流程

拌和流程如下所示，新拌混凝土完成後，灌製試體需以搗棒搗實，避免表面水分蒸散，灌製完成後於試體表面以保鮮膜覆蓋，並於 24 小時後拆模，試體狀況如照片 3-12 所示，並將試體置於恆溫恆濕室內進行水養護。待混凝土達試驗齡期時，將試體取出並進行各項試驗。

- (1) 拌和前先將粗、細骨材放入烤箱內，以 130°C 的溫度烘烤 24 小時，藉以測量骨材含水量。
- (2) 調整配比用水量至骨材面乾內飽和狀態。
- (3) 先倒一半細骨材，再倒入膠結材（水泥、爐石和飛灰），最後剩餘的細骨材倒入並乾拌至均勻。
- (4) 加約略 7 成水至砂漿流度出現。
- (5) 加入粗骨材。
- (6) 將剩餘水量全部加入，強塑劑則視坍度情況酌量加入。
- (7) 繼續拌和約 3 分鐘。



照片 3-12 圓柱試體狀況

3.5 抗壓強度試驗

3.5.1 試驗說明

本試驗參考 CNS 1232「混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法」。每組配比分別進行 7、28、35、88、118 天混凝土齡期抗壓強度試驗。

3.5.2 試驗試體

本試驗試體尺寸為直徑 10cm、高度 20cm 之圓柱試體，試體灌製完 24 小時候拆模，並隨即置於恆溫恆濕室內進行水養護，養護 28 天之後取出，一些試體開始進行抗壓強度試驗，其餘試體則以大氣養護方式至預定齡期。

3.5.3 試驗方法

為使試體均勻受壓，使用圓柱試體斷面研磨機將試體上下兩斷面磨平，以避免產生應力集中之現象，再以 MTS 萬能材料試驗機進行單軸抗壓，以加載速率為 0.01 mm/sec 進行試驗，試驗設備說明則詳見 3.4 節。



3.6 壓力滲透試驗.

3.6.1 試驗說明

本試驗利用加壓方式使重量百分濃度 10% 氯化鈉溶液滲入混凝土試體內，試驗時間為 7、21、35 天，靜水壓力為 3、5 kgf/cm²，藉此探討混凝土在靜水壓力下氯離子傳輸行為，試驗設備：數位式混凝土透水試驗儀 (DIN 型)、2hp 馬力空壓機，詳細說明見 3.4 節。

3.6.2 試驗試體

本試驗共需三顆試體，尺寸設計為直徑 15cm、高度 5cm 圓餅試體，為了消除試體澆置面以及與模具接觸面不均勻性，本研究先灌製直徑 15 cm、高度 15 cm 圓柱試體，於灌製完 24 小時後拆模，並隨即置於溫度 23°C、相對濕度 100% 恆溫恆濕室內進行水養護，養護 28 天後取出，利用混凝土大型切割機切出圓餅試體，如照片 3-13 所示。

3.6.3 試驗方法

試驗步驟如下：

- (1) 參考 NT Build 492 使混凝土試體飽和方式，使試體飽和再進行壓力滲透試驗。
- (2) 將各試體壓力室進水閥門打開，使鹽水充滿整個壓力室。
- (3) 將加壓水槽排氣、進水閥門打開，使加壓水槽水量位於 Min 跟 Max 間。
- (4) 關閉所有閥門，將試體靠緊壓力室，轉下輪盤將試體鎖緊，並以水準氣泡確認試體與輪盤是否保持水平，於止水橡膠圈周圍塗抹矽氧樹脂，以防止漏水狀況，如照片 3-14 所示。
- (5) 放置至少 12 小時後，待矽氧樹脂完全凝固，打開加壓閥門以及各試體壓力室進水閥，轉動氣壓調整閥門至試驗所需壓力 (3、5kgf/cm²)，加壓至本研究預定試驗時間。
- (6) 試驗期間，隨時檢查加壓水槽水量是否充足，若水量不足，則先關閉加壓閥門，

打開加壓水槽排氣、進水閥門，讓水量再次維持在 Min 跟 Max 間，最後打開加壓閥門繼續加壓試驗。

- (7) 試驗期間，隨時檢查各壓力表顯示是否異常，若有異常，則檢查空壓機氣壓量是否不足，或是各個管線、閥門是否有滲水現象。



照片 3-13 圓餅試體製作



照片 3-14 壓力滲透試體架設狀況



3.7 貯鹽試驗

3.7.1 試驗說明

本試驗為使氯離子濃度分佈數據較為明顯差距，參考並改良自規範 ASTM C1543[47]，以重量百分濃度 10% 氯化鈉溶液進行試驗時間為 7、28、60、90 天貯鹽試驗，藉此探討氯離子於混凝土中藉由擴散作用的傳輸行為。

3.7.2 試驗試體

本試驗試體配合壓力滲透試驗試體，尺寸設計同為直徑 15cm、高度 5cm 圓餅試體，為了消除試體澆置面以及與模具接觸面不均勻性，先灌製直徑 15cm、高度 15cm 圓柱試體，於灌製完 24 小時後拆模，隨即置於溫度 23°C、相對濕度 100% 恆溫恆濕室內進行水養護，養護 28 天後取出利用混凝土大型切割機切出圓餅試體，再開始進行貯鹽試驗，另外，貯鹽試驗試體與壓力滲透試體為避免不同批次拌和導致誤差產生，相同配比及試驗參數之試體為同一批拌和灌製。

3.7.3 試驗方法

- (1) 圓柱試體養護完成後，以大型混凝土切割機切出直徑 15cm、高度 5cm 圓餅試體，如照片 3-13。
- (2) 在試體四周塗刷防水漆，以避免試驗過程中，試體邊界提供預期以外通路讓氯化鈉溶液滲入而影響試驗結果，而試體上下兩面則不塗刷，完全暴露。
- (3) 參考 NT Build 492 使混凝土試體飽和方式，將試體進行貯鹽試驗前事先飽和。
- (4) 使用矽氧樹脂將塑膠圍堰和試體緊密黏著，避免試驗過程中發生漏水現象。
- (5) 於圍堰內添加重量百分濃度為 10% 氯化鈉溶液，高度維持約為 1.5cm。將試體頂部以保鮮膜覆蓋，避免溶液蒸散以及防止異物落入，如照片 3-15。
- (6) 使溶液保持在固定濃度，隨時搖晃圍堰內氯化鈉溶液，約每兩周即更換氯化鈉溶液，並於更換時檢查有無漏水現象發生。



照片 3-15 貯鹽試驗試體架設狀況

3.8 比色法

3.8.1 試驗說明

比色法為判斷自由氯離子滲透深度，參考規範 NT Build 492，將濃度 0.1N 硝酸銀噴灑於混凝土試體劈裂後縱剖面上，試體內自由氯離子與硝酸銀反應呈現白色，無自由氯離子部分則呈現棕褐色，關於比色法更詳細資訊則可參考 2.10.1 節。

3.8.2 試驗方法

- (1) 將貯鹽試驗以及鹽水壓力滲透試驗試體，利用 MTS 萬能材料試驗機將試體劈裂，如照片 3-16 所示。
- (2) 劈裂後的試體，在縱剖面上噴灑 0.1N 硝酸銀溶液。
- (3) 將混凝土縱剖面劃分數等分區，量測每分區變色深度並取其平均深度，如量測深度時碰到粗骨材，則須避免量測，以減少誤判氯離子滲透深度，如照片 3-17。



照片 3-16 試體劈裂



照片 3-17 比色法變色圖



3.9 水溶性氯離子濃度滴定試驗

3.9.1 試驗說明

酸溶性氯離子濃度滴定試驗為檢測混凝土中總氯離子濃度，本試驗參考規範 CNS 14703「硬固水泥砂漿及混凝土中水溶性氯離子濃度試驗法」以及 CNS 1078「水硬性水泥化學分析法」進行，試驗設備則有自動電位滴定儀、國際牌精密鑽床等，設備詳細說明見 3.4 節，而關於水溶性氯離子濃度滴定試驗詳細資訊可參考 2.10.2 節。

3.9.2 試體取樣

本試驗試體取樣方式如下：

- (1) 將試驗完成試體，利用鑽床搭配全斷面磨盤磨取粉末至深度 1 毫米，如照片 3-18 所示。
- (2) 使用 MTS 萬能材料試驗機進行劈裂。
- (3) 一半進行比色法，另外一半則使用小型混凝土切割機切取核心約長 8cm、寬 5cm、高 5cm 部分，如照片 3-19 所示。
- (4) 使用切割機將核心部分以厚度為 0.3cm 進行切片，考量刀片厚度 0.3cm，切割時會有所損耗，須注意試片厚度換算深度正確性。
- (5) 將切片後試樣敲成碎片，將碎片放進磨粉機磨成粉末，粉末須通過 20 號篩(孔徑 0.850mm)。

3.9.3 試驗方法

試驗步驟如下：

- (1) 取粉末試樣 3g 置於 250ml 燒杯中，加入符合規範 CNS 3699 A3 等級分析用水



50ml。

- (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。
- (4) 加入 3ml 比例 1:1 的稀硝酸以及 3ml 濃度 30% 過氧化氫，靜置 1 至 2 分鐘。
- (5) 將試樣迅速加熱至沸騰，沸騰時應立即移開燒杯，避免持續沸騰，加熱期間須覆蓋錶玻璃。
- (6) 清洗抽氣過濾裝置，再將溶液抽氣過濾。
- (7) 使用 0.01N 硝酸銀溶液作為滴定液，搭配電極碳棒做為指示電極，參考電極為 3N 硝酸鉀電極棒進行滴定。

3.10 酸溶性氯離子濃度滴定試驗

3.10.1 試驗說明

酸溶性氯離子濃度滴定試驗為檢測混凝土中總氯離子濃度，本試驗參考規範 CNS 14702「硬固水泥砂漿及混凝土中酸溶性氯離子濃度試驗法」以及 AASHTO T260 進行，試驗設備則有自動電位滴定儀、國際牌精密鑽床等，詳細說明見 3.4 節，而關於酸溶性氯離子濃度滴定試驗詳細資訊可參考 2.10.2 節。

3.10.2 試體取樣

同 3.9.2 節所述。

3.10.3 試驗方法

試驗步驟如下：

- (1) 取粉末試樣 3g 置於 250ml 燒杯中，加入符合規範 CNS 3699 A3 等級分析用水 10ml，並以玻璃棒打散結塊攪拌均勻。
- (2) 緩慢加入 3ml 硝酸，並以玻璃棒打散結塊並充分攪拌。
- (3) 若粉末來源含有爐石粉，則需加入 3ml 過氧化氫以避免硫化物干擾滴定結果。
- (4) 待硝酸將混凝土粉末溶解後，加入分析用水至 60ml，並將燒杯置於加熱平板



- 上加熱至沸騰，加熱期間須覆蓋錶玻璃。
- (5) 沸騰約一分鐘，立即移開燒杯，再將其放置到陰涼處使溶液溫度降至室溫。
 - (6) 清洗抽氣過濾裝置，再將溶液抽氣過濾。
 - (7) 使用 0.01N 硝酸銀溶液作為滴定液，搭配電極碳棒做為指示電極，參考電極為 3N 硝酸鉀電極棒進行滴定。



照片 3-18 試體表面取樣



照片 3-19 試體取樣

第四章 試驗結果與討論



4.1 前言

本研究以不同材料探討混凝土抵抗氯離子能力，灌製水膠比 0.55 純水泥混凝土，以及爐石取代率 40%，飛灰取代率 20%、40%，爐石飛灰混和添加 (S:F=7:3) 取代率 30% 之不同卜作嵐取代配比。貯鹽試驗時間為 28、60、90 天，壓力滲透試驗加壓時間為 7 天，其中 055OPC 組別設計加壓時間為 7、21、35 天，每次進行壓力滲透試驗時，皆有同批拌和無靜水壓力的貯鹽試驗進行比較。本研究將壓力滲透試驗相同試驗時間貯鹽試驗於後續討論中稱為「對照組」。

所有試體於水中養護 28 天後以及達目標試驗齡期進行抗壓強度試驗。於相同試驗時間下，比較貯鹽試驗以及壓力滲透試驗氯離子於混凝土中傳輸行為的差異，並與國內外相關研究資料互相比較。以試驗結果為基礎，透過擴散方程式和滲流—擴散方程式進行迴歸分析，討論在有無靜水壓力下，氯離子於混凝土中之傳輸行為。試驗參數表如表 3-1 所示，混凝土配比和編號說明則如表 3-9 和圖 3-2 所示。本章節圖標說明如表 4-1 所示。

表 4-1 第四章圖例說明

試驗	貯鹽試驗	壓力滲透試驗	
		3 kgf/cm ²	5 kgf/cm ²
試驗值圖例	X	▲	●
方程式圖例	虛線-----	實線——	



4.2 抗壓強度試驗

混凝土抗壓強度為評估混凝土品質重要指標，水泥水化反應產物 C—S—H 膠體膠結強度為提供混凝土抗壓強度主要來源，以及若添加卜作嵐材料，其卜作嵐反應能消耗游離氫氧化鈣再次生成 C—S—H 膠體，使得混凝土變得更加緻密。因此抗壓強度與混凝土水膠比、配比中粉體所占比例和卜作嵐材料取代量等因素息息相關。

本試驗設計一種水膠比為 0.55 混凝土，並採用不同比例取代量爐石粉和飛灰，抗壓強度試驗試體尺寸為直徑 10 cm、高度 20 cm 的圓柱試體，於混凝土達各目標齡期時進行抗壓強度試驗，比較各組試體隨齡期增加抗壓強度的發展趨勢，試驗結果如表 4-2 以及圖 4-1 所示。根據諸多文獻指出，顯示水膠比 0.55 純水泥混凝土於 28 天齡期抗壓強度約為 40MPa 左右，本研究純水泥組別試驗結果符合預期。

4.2.1 卜作嵐材料取代率對於抗壓強度之影響

根據節 2.4 所述，卜作嵐材料對於提升混凝土性能有明顯的幫助，以下則分述本研究不同卜作嵐材料取代與純水泥混凝土抗壓強度比較：

(1) 爐石取代量：

本研究所使用爐石為 100 級爐石粉，從表 4-2 以及圖 4-1 可以觀察出，於 7 天混凝土齡期時，爐石組別抗壓強度低於 OPC 組別，到了混凝土齡期 28 天，爐石組別抗壓強度已經接近 OPC 組別，且於混凝土齡期 35 天時已經超越 OPC 組別，顯示爐石卜作嵐反應已開始進行，符合本文 2.4.3 節當中所述，爐石卜作嵐反應於早期即開始發展。爐石組別抗壓強度隨著齡期增加有穩定的上漲，以混凝土 28 天齡期到 118 天齡期討論，055OPC 增長了 3.2%，055S40 增加了 19.6%。

(2) 飛灰取代量：

本研究所使用飛灰為 F 級飛灰，從表 4-2 以及圖 4-1 可以觀察出，於 28 天混凝土齡期時，飛灰組別抗壓強度明顯低於純水泥組別，表示添加飛灰對於混凝土抗壓強度有降低效果，而隨著混凝土齡期的增長，添加飛灰對混凝土抗壓強度的貢獻

逐漸明顯，由本文 2.4.2 節所述，顯示飛灰卜作嵐反應開始顯著，超過混凝土齡期 28 天時強度上漲幅度大過於 055OPC 部分，以混凝土 28 天齡期到 118 天齡期討論，055OPC 增長了 3.2%，飛灰部分：055F20 增加了 20.4%、055F40 增加了 48.9%。

(3) 爐灰 (7:3) 混和添加：

添加爐灰組別 055SF30 於強度高低以及強度發展的表現，除 7 天混凝土齡期時，其餘齡期皆比 055OPC 組別高。而與 055S40、055F20、055F40 組別相比能夠發現，055SF30 在抗壓強度及強度發展上皆有最好的表現。

4.2.2 小結

從混凝土抗壓強度發展來看，混凝土水化反應隨著齡期的增加會漸漸趨緩。卜作嵐材料取代混凝土需要較長的養護齡期使卜作嵐反應開始發生且較為完善，其抗壓強度才會迅速上漲並超過 OPC 組別。為方便讓實驗室試體與現地結構物比較，建議將實驗室試體進行較長時間的養護，使各試體足以充分發揮水化反應之時間後，再進行各項試驗，如此才能減少誤差，尤其以飛灰取代組別，由於飛灰晚強的特性，更需注意此情況。

表 4-2 各配比隨齡期發展抗壓強度數據

配比	混凝土各齡期抗壓強度 (MPa)					
	7 天	28 天	35 天	56 天	88 天	118 天
055OPC	33.61	43.10	44.01	44.32	44.46	44.52
055S40	24.65	40.14	45.53	46.07	47.23	47.99
055F20	27.08	38.90	40.49	43.95	46.54	46.85
055F40	19.32	27.85	32.48	33.47	36.51	41.48
055SF30	26.91	42.16	46.10	47.23	47.95	48.35

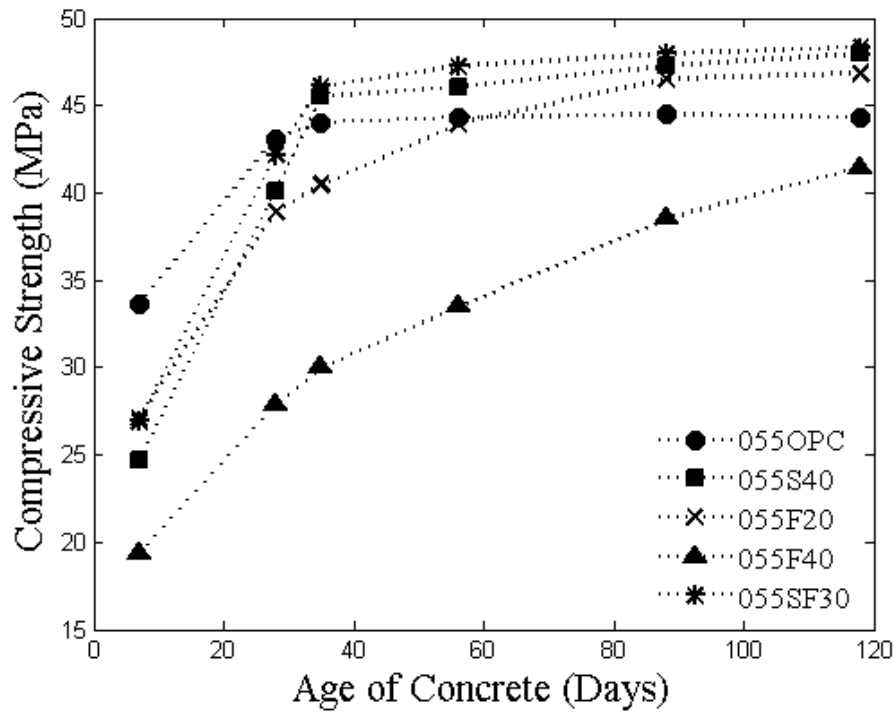


圖 4-1 各配比隨混凝土齡期發展之抗壓強度



4.3 比色法氯離子侵入深度

除了氯離子擴散係數能夠有效評估混凝土耐久性外，氯離子侵入深度也需要特別注意，尤其是當需要探討既有結構物中氯離子分布狀況，比色法試驗能夠快速得知氯離子侵入至混凝土何處。另外，設計結構物最小保護層厚度時，若能夠透過足夠的比色法試驗數據，預測氯離子侵入深度，保護層就能以最經濟的方式設計以免過於浪費。

當貯鹽試驗、壓力滲透試驗以及對照組試體到達各個相應試驗時間時，將試體取出、劈裂並進行比色法試驗，如 3.8 節所述。參考 2.10.1 節所述，噴灑 0.1N 硝酸銀於試體劈裂面。貯鹽試驗比色法判定氯離子侵入深度結果如表 4-3 所示，圖 4-2 顯示貯鹽試驗所有配比比色法氯離子侵入深度皆隨著試驗時間的增加而變大，7 天壓力滲透試驗與對照組判定結果則如表 4-4 所示。

4.3.1 添加卜作嵐材料對於氯離子侵入深度之影響

以下則分述本研究水膠比為 0.55 組別不同卜作嵐材料取代與純水泥混凝土比色法氯離子侵入深度比較：

(1) 爐石取代量：

從 055OPC 以及 055S40 組別的比色法試驗結果可以發現，如圖 4-2，添加爐石的組別在各個試驗時間的比色法氯離子侵入深度皆小於 055OPC 組別，符合爐石的添加使得混凝土較為緻密更能抵抗氯離子侵入的期待

(2) 飛灰取代量：

從 055OPC 以及 055F20、055F40 組別的比色法試驗結果可以發現，如圖 4-2，7 天試驗時間時添加飛灰的組別對於改善抵抗氯離子的能力似乎較不顯著，由於飛灰晚期發展的特性，因此觀察長期發展，以 055F20 為例，對於改善氯離子侵入深度的能力有漸漸顯著的趨勢。

(3) 爐灰取代量：

055SF30 組別氯離子侵入深度與 055OPC 比較結果趨勢與 055S40 一致。



4.3.2 靜水壓力對於氯離子侵入深度之影響

圖 4-3 顯示 7 天試驗時間時，不同壓力大小對於比色法氯離子侵入深度之影響，試驗結果發現，壓力確實使得氯離子更迅速侵入混凝土中，隨著靜水壓力變大，侵入深度增加的程度會更大，表 4-4 當中以 055OPC 組別為例，在相同 7 天試驗時間下，3 kgf/cm² 與對照組相比，侵入深度增加了 15%，5 kgf/cm² 與 3 kgf/cm² 相比，侵入深度增加了 57%。說明氯離子侵入深度與靜水壓力值並非線性關係，其餘組別皆有相同趨勢，如圖 4-3 所示，參考趙彥迪[54]試驗結果，也能發現相同趨勢。

4.3.3 加壓時間對於氯離子侵入深度之影響

以 055OPC 組別進行 7、21、35 天壓力滲透試驗，靜水壓力為 5 kgf/cm²，比色法氯離子侵入深度結果如表 4-5 所示及圖 4-4a 所示，若將貯鹽試驗以及壓力滲透試驗所有試驗時間氯離子侵入深度進行比較，如圖 4-4b 所示，發現在 35 天加壓時間時，氯離子侵入深度大於 90 天貯鹽試驗，顯示壓力滲透試驗作為加速性試驗取代貯鹽試驗判斷混凝土耐久性，試驗時間能夠縮短約 2/3，詳細說明可見 5.4 節。

表 4-3 貯鹽試驗比色法氯離子侵入深度

貯鹽試驗比色法氯離子侵入深度 (cm)					
試驗時間 (天)	055OPC	試驗時間 (天)	055S40	試驗時間 (天)	055F20
7	1.00	7	0.60	7	0.90
13	1.38	16	0.93	15	1.42
28	1.67	28	1.13	25	1.65
35	1.96	35	1.23	28	1.84
60	2.12	60	1.53	60	2.36
90	2.63	90	1.76	90	2.48
試驗時間 (天)	055F40	試驗時間 (天)	055SF30		
7	1.20	7	0.82		
14	1.62	28	1.23		
21	1.91	35	1.32		
28	2.18	60	1.71		
60	2.52	90	1.92		
90	2.81				

表 4-4 各配比 7 天壓力滲透試驗與對照組比色法氯離子侵入深度差異

7 天試驗時間比色法氯離子侵入深度 (cm)					
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	055OPC	055S40	055F20	055F40	055SF30
5	1.80	1.40	1.74	1.95	1.62
3	1.15	0.84	1.25	1.52	1.05
0 (對照組)	1.00	0.60	0.90	1.20	0.82

表 4-5 055OPC 各試驗時間壓力滲透與對照組比色法氯離子侵入深度差異

055OPC 各試驗時間壓力滲透比色法氯離子侵入深度 (cm)			
靜水壓力 (kgf/cm ²)	7 天	21 天	35 天
5	1.80	2.51	3.38
0 (對照組)	1.00	1.75	1.96

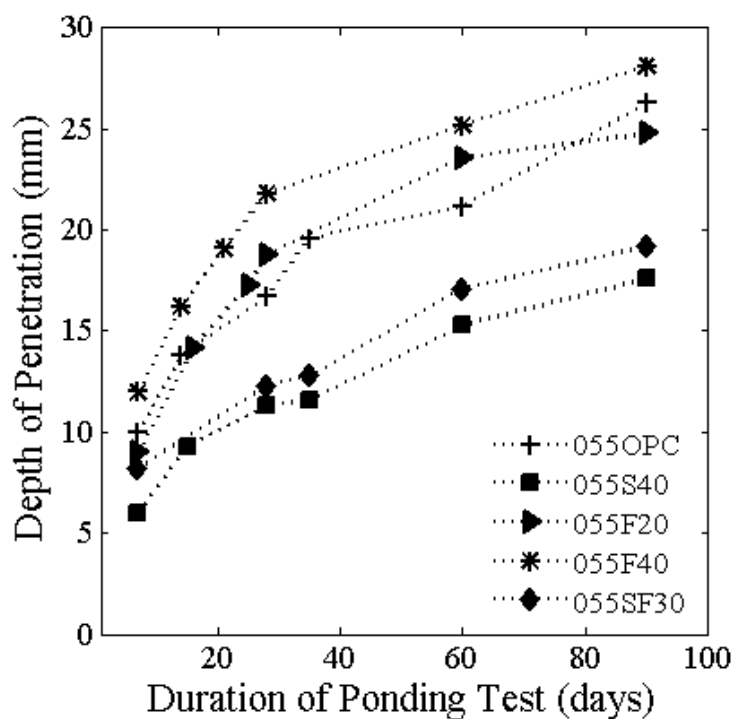


圖 4-2 各配比貯鹽試驗不同試驗時間比色法氯離子侵入深度

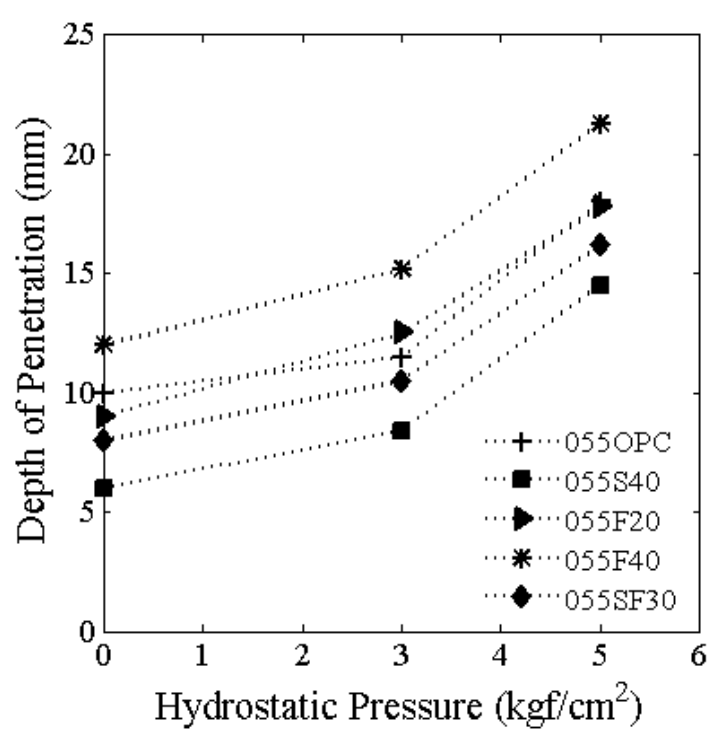


圖 4-3 各配比 7 天試驗時間不同靜水壓力比色法氯離子侵入深度

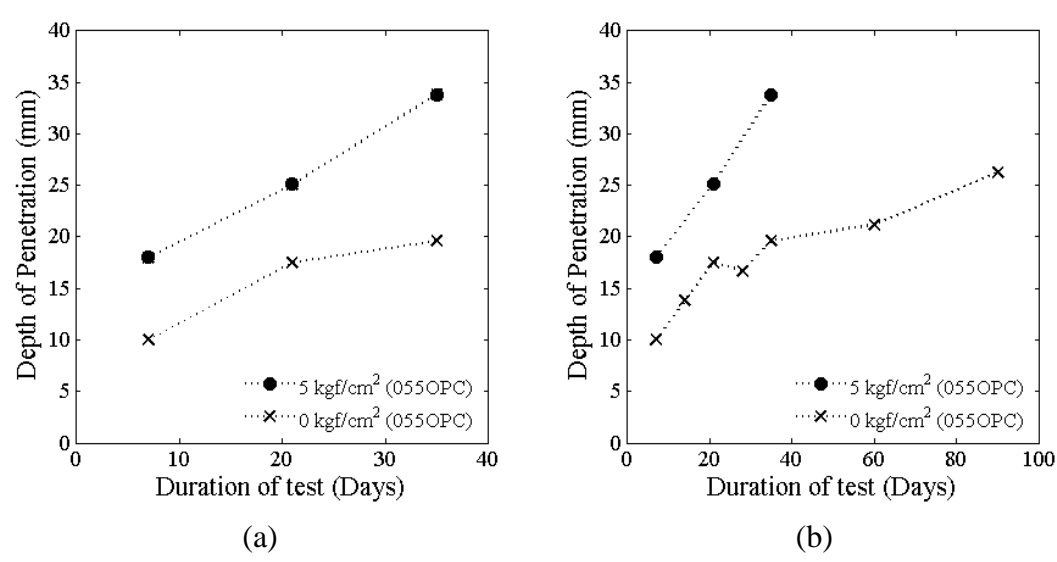


圖 4-4 壓力滲透試驗與對照組隨試驗時間發展之比色法氯離子侵入深度差異



4.4 混凝土內距表面各深度氯離子濃度

一般認為自由氯離子為引起鋼筋產生腐蝕的原因，2.10.2 節所述，透過水溶性氯離子濃度能夠檢測自由氯離子濃度。由於混凝土本身屬於變異性高的材料，而氯離子取樣以及滴定的過程中，亦會有許多影響因子摻入，如：混凝土粉末取樣是否會有不均勻現象亦或是電位滴定設備本身誤差。為增加試驗數據穩定性，每個試驗在各個試驗時間皆設置 3 顆試體，每一層深度皆配置至少 2 杯的氯離子萃取液進行電位滴定，將奇異值剔除後取平均，貯鹽試驗於各試驗時間以及 7 天壓力滲透試驗組別自由氯離子滴定結果整理如表 4-6 至表 4-15 所示。以 055OPC 貯鹽試驗自由氯離子滴定結果當中，如表 4-6，隨著試驗時間增加，自由氯離子濃度在各層當中皆穩定的上升，其餘各組配比皆有相同趨勢。

7 天壓力滲透試驗與對照組自由氯離子滴定結果如表 4-11 至表 4-16 所示。以 055OPC 為例確實隨著壓力增加，氯離子侵入混凝土的能力增加，更能在深層處累積其濃度，其餘各組別皆有相同趨勢。表 4-16 顯示 055OPC 7、21、35 天 5 kgf/cm^2 壓力滲透試驗與其對照組自由氯離子滴定結果，若壓力滲透試驗與對照組自由氯離子濃度兩兩比較可發現，隨著試驗時間的增加，壓力滲透試驗與對照組的濃度差異越大。

4.4.1 混凝土內各深度總氯離子濃度與自由氯離子濃度比較

本節比較隨著試驗時間增加，各深度自由氯離子濃度與總氯離子濃度差異，如表 4-17 至表 4-21 所示。以 055S40 貯鹽試驗組別表 4-18 為例，可發現當試驗時間較短時，各層總氯離子與自由氯離子濃度的差異相近，此與文獻[76]試驗結果相符，到了試驗時間長達 60、90 天時，從滴定結果各層可看到總氯離子濃度與自由氯離子濃度之間的差距較短試驗時間的差距稍大。可推論，水化作用趨於緩慢，氯離子受到固結的暈於較短試驗時間內較不明顯，但若有足夠試驗時間總氯離子濃度與自由氯離子濃度依然會有些許差異。

但此差距與其他影響參數相比並不明顯，如不同卜作嵐材料添加的組別中，以

055OPC 與 055S40 組別為例，於相同試驗時間 90 天、深度 1.35 cm 時，055S40 自由氯離子濃度為 0.078%、總氯離子濃度為 0.085%（如表 4-18），但 055OPC 自由氯離子濃度為 0.212%、總氯離子濃度為 0.232%（如表 4-17），因此固結所佔的影響較小，又以對於鋼筋腐蝕議題來說，自由氯離子佔據相對重要的角色。因此，本研究往後討論以自由氯離子濃度為主。

4.4.2 硝酸銀變色範圍之氯離子濃度

由於混凝土受到氯鹽侵害的議題當中受到許多因素影響，試驗結果誤差時常非常不穩定，因此將本研究比色法氯離子侵入深度與氯離子濃度數據進行比較，參考 2.10.1 節[80]透過 ACMT 試驗，探討各配比進行比色法測定氯離子侵入深度，其變色範圍氯離子濃度，試驗結果如表 2-17 所示。以本研究 055OPC 壓力滲透與對照組組別氯離子濃度分布情形為例，比色法變色界面氯離子濃度約 0.02%，可以發現比色法侵入深度分別為 1.80 cm、1.15 cm、1.00 cm 對比氯離子濃度數據，如圖 4-5 所示，雖有落差，但基本上仍符合範圍，其餘組別的結果皆為一致，表示透過比色法的簡易測定，可得氯離子濃度之估計值。

表 4-6 055OPC 貯鹽試驗自由氯離子濃度數據

055OPC					
試驗時間 (天)	各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
	0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.00 cm
7	0.49263	0.42567	0.07817	0.01524	0.01237
14	0.52279	0.44411	0.21643	0.03980	0.01622
28	0.58567	0.49752	0.24558	0.08292	0.00985
35	0.53315	0.48417	0.30481	0.11472	0.02812
60	0.58812	0.49763	0.34453	0.16640	0.05713
90	0.61040	0.50006	0.35484	0.18173	0.05432

表 4-7 055S40 貯鹽試驗自由氯離子濃度數據

055S40					
試驗時間 (天)	各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
	0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.00 cm
7	0.52568	0.40697	0.02761	0.01084	0.00614
16	0.57576	0.49697	0.05323	0.01186	0.01322
28	0.68591	0.59277	0.13185	0.02622	0.01232
35	0.69209	0.55597	0.12125	0.01514	0.01012
60	0.74260	0.62748	0.23787	0.03964	0.01627
90	0.77838	0.67543	0.29510	0.07819	0.02184

表 4-8 055F20 貯鹽試驗自由氯離子濃度數據

055F20					
試驗時間 (天)	各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
	0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.00 cm
7	0.49952	0.36018	0.008842	0.01275	0.00941
16	0.47865	0.43789	0.17450	0.04721	0.02564
25	0.61035	0.48246	0.23504	0.05485	0.01832
28	0.65210	0.59477	0.29979	0.13088	0.02970
60	0.66091	0.56227	0.36106	0.16708	0.05030
90	0.67539	0.64131	0.45184	0.23857	0.08222

表 4-9 055F40 貯鹽試驗自由氯離子濃度數據

055F40					
試驗時間 (天)	各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
	0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.00 cm
7	0.49944	0.42507	0.10616	0.01626	0.00914
14	0.62602	0.50040	0.22814	0.09064	0.00712
21	0.58555	0.52040	0.26627	0.12083	0.01332
28	0.59453	0.60384	0.30420	0.11697	0.01412
60	0.69236	0.69664	0.47158	0.21354	0.08050
90	0.69216	0.68036	0.51044	0.28958	0.15046

表 4-10 055SF30 貯鹽試驗自由氯離子濃度數據

055SF30					
試驗時間 (天)	各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
	0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.00 cm
7	0.48097	0.33153	0.05897	0.01323	0.00600
28	0.74921	0.67795	0.21015	0.04605	0.01942
35	0.58071	0.49453	0.19706	0.04998	0.02006
60	0.80611	0.75466	0.34555	0.08260	0.02839
90	0.80141	0.78671	0.40985	0.15006	0.02983

表 4-11 055OPC 壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據

055OPC					
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	7 天各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
	0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.00 cm
5	0.55263	0.45949	0.15268	0.05179	0.02426
3	0.48727	0.41745	0.09668	0.02811	0.01586
0 (對照組)	0.49263	0.42567	0.07817	0.01524	0.01237

表 4-12 055S40 壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據

055S40					
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	7 天各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
	0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.00 cm
5	0.53341	0.43749	0.08048	0.04326	0.01961
3	0.56760	0.41521	0.03253	0.01928	0.01289
0 (對照組)	0.52568	0.40697	0.02761	0.01684	0.01014

表 4-13 055F20 壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據

055F20					
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	7 天各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
	0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.00 cm
5	0.47049	0.33634	0.12160	0.02161	0.01604
3	0.45145	0.35946	0.09899	0.02290	0.01329
0 (對照組)	0.49952	0.36018	0.08842	0.01190	0.00941

表 4-14 055F40 壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據

7 天 055F40					
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
	0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.00 cm
5	0.56264	0.45323	0.18417	0.05388	0.03538
3	0.48564	0.46097	0.14497	0.02872	0.02356
0 (對照組)	0.49944	0.42507	0.10616	0.02465	0.01914

表 4-15 055SF30 壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據

055SF30					
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	7 天各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
	0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.00 cm
5	0.58257	0.44298	0.10231	0.06549	0.02051
3	0.53554	0.42339	0.07611	0.01417	0.00770
0 (對照組)	0.48097	0.33153	0.05897	0.01323	0.00600

表 4-16 0550PC 不同加壓時間壓力滲透與對照組自由氯離子濃度數據

0550PC								
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	7 天各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)							
	0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.00 cm			
5	0.553	0.459	0.153	0.052	0.024			
0 (對照組)	0.493	0.426	0.078	0.015	0.012			
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	21 天各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)							
	0.05 cm	0.15 cm	0.25 cm	0.50 cm	1.10 cm	1.70 cm	2.40 cm	3.20 cm
5	0.574	0.542	0.498	0.447	0.209	0.098	0.030	0.009
0 (對照組)	0.540	0.488	0.436	0.325	0.122	0.028	0.004	0
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	35 天各深度之自由氯離子濃度 (% Weight of Concrete)							
	0.05 cm	0.15 cm	0.25 cm	0.50 cm	1.10 cm	1.70 cm	2.40 cm	3.20 cm
5	0.659	0.630	0.589	0.561	0.328	0.187	0.114	0.029
0 (對照組)	0.533	0.484	0.456	0.364	0.183	0.073	0.019	0.003

表 4-17 0550PC 貯鹽試驗自由氯離子與總氯離子比較

0550PC						
試驗時間 (天)		各深度之氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
		0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.05 cm
7	自由	0.49263	0.42567	0.07817	0.01524	0.01237
	總	0.50245	0.43256	0.08734	0.01633	0.01563
28	自由	0.58567	0.49752	0.24558	0.08292	0.00985
	總	0.59514	0.48516	0.23995	0.07859	0.01055
60	自由	0.58812	0.49763	0.36453	0.19640	0.05713
	總	0.57826	0.50125	0.37564	0.20654	0.07055
90	自由	0.61040	0.50006	0.36484	0.21173	0.05432
	總	0.63541	0.51253	0.37499	0.23561	0.06452

表 4-18 055S40 貯鹽試驗自由氯離子與總氯離子比較

055S40						
試驗時間 (天)		各深度之氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
		0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.05 cm
7	自由	0.52568	0.40697	0.02761	0.01684	0.01014
	總	0.53907	0.41752	0.02653	0.01692	0.01171
28	自由	0.68591	0.59277	0.13185	0.02622	0.01232
	總	0.70123	0.64161	0.15941	0.02719	0.01571
60	自由	0.74260	0.62748	0.23787	0.03964	0.01627
	總	0.75623	0.65556	0.29564	0.04531	0.01745
90	自由	0.77838	0.67543	0.29510	0.07819	0.02184
	總	0.80620	0.76527	0.33938	0.08567	0.01986

表 4-19 055F20 貯鹽試驗自由氯離子與總氯離子比較

055F20						
試驗時間 (天)		各深度之氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
		0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.05 cm
7	自由	0.49952	0.36018	0.08842	0.01275	0.00941
	總	0.49566	0.37218	0.08837	0.01261	0.00923
28	自由	0.65210	0.59477	0.29979	0.13088	0.02970
	總	0.66169	0.62555	0.32241	0.14486	0.03578
60	自由	0.66091	0.56227	0.36106	0.16708	0.05030
	總	0.68123	0.58516	0.38519	0.18256	0.06153
90	自由	0.67539	0.64131	0.45184	0.23857	0.08222
	總	0.69530	0.64750	0.46756	0.25599	0.10608

表 4-20 055F40 貯鹽試驗自由氯離子與總氯離子比較

055F40						
試驗時間 (天)		各深度之氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
		0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.05 cm
7	自由	0.49944	0.42507	0.10616	0.01626	0.00914
	總	0.47985	0.41589	0.11564	0.01756	0.01004
28	自由	0.59453	0.60384	0.30420	0.11697	0.01412
	總	0.60523	0.62456	0.31569	0.13659	0.01658
60	自由	0.69236	0.69664	0.47158	0.21354	0.08050
	總	0.72358	0.70685	0.48653	0.22345	0.09512
90	自由	0.69216	0.68036	0.51044	0.28958	0.15046
	總	0.71333	0.69023	0.50546	0.30521	0.16999

表 4-21 055SF30 貯鹽試驗自由氯離子與總氯離子比較

055SF30						
試驗時間 (天)		各深度之氯離子濃度 (% Weight of Concrete)				
		0.05 cm	0.15 cm	0.75 cm	1.35 cm	2.05 cm
7	自由	0.48097	0.33153	0.05897	0.01323	0.00600
	總	0.47865	0.34012	0.05867	0.01256	0.00756
28	自由	0.74921	0.67795	0.21015	0.04605	0.01942
	總	0.76012	0.68903	0.22359	0.05343	0.01899
60	自由	0.80611	0.75466	0.34555	0.08260	0.02839
	總	0.81751	0.76561	0.35644	0.10532	0.03562
90	自由	0.80141	0.78671	0.40985	0.15006	0.02983
	總	0.80580	0.80259	0.43436	0.16967	0.03201

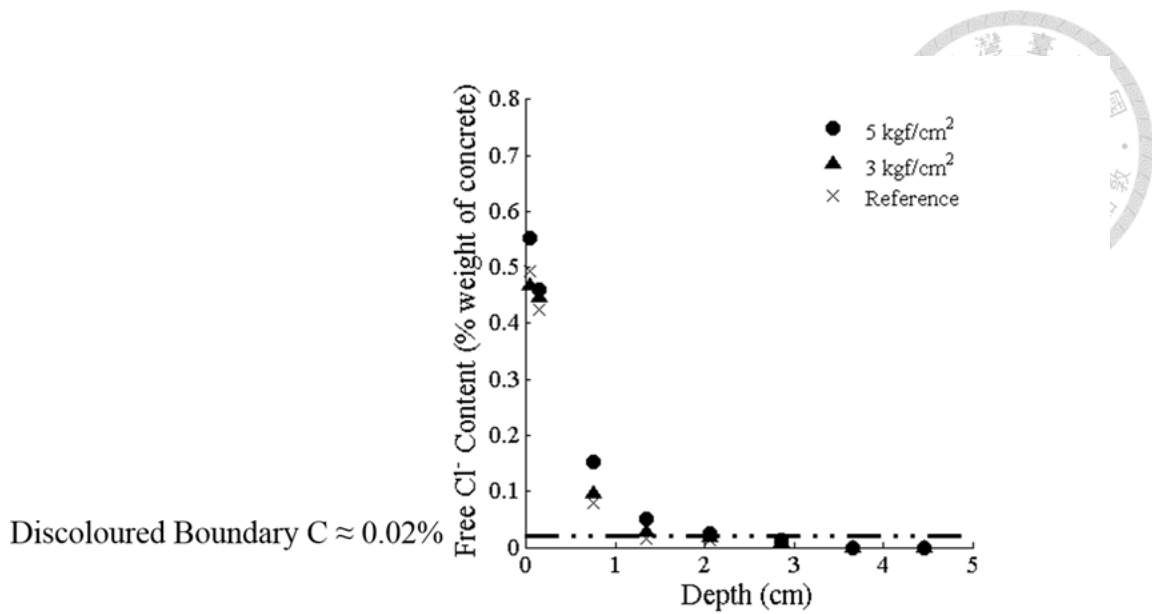


圖 4-5 比色法氯離子侵入深度與變色界面氯離子濃度比較 (0550PC)

4.5 氯離子擴散係數

本節探討氯離子於混凝土中的擴散係數，本研究貯鹽試驗參考 ASTM，於水中養護 28 天後，以切割機切成直徑 15 cm、高度 5 cm 圓餅試體，如 3.7 節所示，藉由 NT Build 492 利用抽氣真空方式使各試體先飽和後進行試驗。當達預定試驗時間時，再將鹽水去除，以 3.9 節和 3.10 節所述取樣及滴定方式得到不同深度下自由氯離子濃度和總氯離子濃度，氯離子濃度滴定結果如表 4-6 至表 4-10 所示。

氯離子擴散係數做為探討當氯離子侵入混凝土時，判斷其耐久性指標參數。本研究貯鹽試驗邊界條件符合式 2-9，計算方式則是由表 4-6 至表 4-10 和表 4-17 至表 4-21 不同深度自由氯離子濃度和總氯離子濃度，利用迴歸分析法計算出氯離子擴散係數，迴歸分析結果如圖 4-6 所示，相關係數 R^2 皆在 0.982~0.999 之間，屬於高度相關。擴散方程式當中，擴散係數代表曲線之平滑或陡峭程度，擴散係數越小，則表示氯離子分布曲線會越陡峭。

擴散係數的大小隱含著混凝土中相連的孔隙多寡，氯離子擴散係數可視為混凝土材料性質，因此時間表示方式應以「混凝土的齡期」為基準，以本研究養護時間為 28 天、貯鹽試驗 7 天的混凝土試體，其齡期為 35 天。將各配比不同齡期擴

散係數以表 4-22 表示，圖 4-7 表示自由氯離子擴散係數時間效應，縱軸表示擴散係數，橫軸則將貯鹽試驗時間換算成相應的混凝土齡期。從試驗結果可知，各組別自由氯離子擴散係數皆隨著齡期增加而降低，水化反應持續進行使混凝土越緻密，也就是擴散係數為時間的函數，總氯離子擴散係數亦有相同之趨勢。

從 4.4.1 節（表 4-22）當中發現，總氯離子擴散係數與自由氯離子擴散係數間的差距相近，此由於各層總氯離子濃度與自由氯離子濃度差距並不明顯，影響不如其他參數大（卜作嵐材料）。因此，本研究以自由氯離子擴散係數作為分析目標。

4.5.1 卜作嵐材料對於擴散係數之影響

若混凝土越緻密則氯離子越不易傳輸，因此會有較小的擴散係數，以自由氯離子擴散係數討論，從試驗結果當中發現，於混凝土 35 天齡期時，055S40 擴散係數 $10.47 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 和 055SF30 擴散係數 $14.51 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 明顯小於 055OPC 擴散係數 $24.29 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，符合對於卜作嵐材料能改善混凝土耐久性之期待，055F20 擴散係數為 $22.20 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、055F40 擴散係數為 $31.30 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，對於改善混凝土緻密性似乎沒有顯著效果，甚至大於 055OPC。由本文 2.4.2 節所述，飛灰卜作嵐反應需水泥水化反應產生足夠鹼性氫氧化鈣後才會發生，由此推論，055F20、055F40 因齡期較短不足以使孔隙足夠緻密。若觀察 055F20、055F40 後期發展趨勢，如表 4-22 當中，混凝土齡期至 118 天時，飛灰組別擴散係數下降幅度明顯大於 055OPC，如圖 4-7 所示，顯示在這段時間，飛灰卜作嵐反應開始發生，對於混凝土耐久性有顯著提升的效益。

4.5.2 擴散係數之時間效應

氯離子擴散係數隨著混凝土齡期增長而降低，許多學者透過許多研究及試驗數據提出能夠描述氯離子擴散係數隨時間變化經驗模型，如式 4-1，衰減常數 m 值佔相當重要的地位，數值大小取決於混凝土配比，當卜作嵐材料添加時， m 值會比純水泥混凝土大，表示擴散係數隨著混凝土齡期增加下降幅度越大。以擴散方程式計算各個試驗時間之貯鹽試驗擴散係數，並與相應之混凝土齡期進行迴歸分析，所



得結果如圖 4-7 所示。由本文 2.8.2 節當中對於 m 值的資料收集發現，若不考慮水膠比的影響，一般純水泥混凝土的衰減常數 m 值範圍為 0.2~0.4、美國 Life-365 取 0.2；添加卜作嵐材料的混凝土衰減常數 m 值範圍為 0.4~0.8、美國 Life-365 則取經驗式計算如式 4-2，本研究試驗結果經迴歸分析所得之 m 值如下所述：055OPC 為 0.310、055S40 為 0.600、055F20 為 0.410、055F40 為 0.478、055SF30 則為 0.520，皆落在文獻數據範圍內（本文 2.8.2 節所述）。

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \dots\dots\dots 4-1$$

式中，

t_{ref} ：混凝土參考齡期

t：混凝土齡期

D_{ref} ：於參考齡期時氯離子擴散係數

m：衰減常數

$$m = 0.2 + 0.4 \left(\frac{FA\%}{50} + \frac{SG\%}{70} \right) \dots\dots\dots 4-2$$

4.5.3 以抗壓強度評估混凝土氯離子擴散係數

一般工程設計上，皆以混凝土抗壓強度做為評估混凝土耐久性依據，當混凝土孔隙率越低、緻密性越高，抗壓強度即會越高，所以抗壓強度與孔隙率呈正相關。以混凝土受氯鹽侵蝕的議題討論，由本文圖 2-2 節可知，混凝土內部孔隙的尺寸及數量對於氯離子傳輸有相當大的影響，因此擴散係數也與孔隙率呈現正相關。

本研究將各配比在各個齡期下之壓強度與擴散係數相互比較，如圖 4-8 所示。可以發現抗壓強度能夠反應出混凝土隨著齡期越緻密、擴散係數越低的現象。若是將所有配比在混凝土 35 天齡期時之抗壓強度與擴散係數相互比較，如表 4-23 所示，抗壓強度變化不大，但擴散係數有一個級數的變化，與文獻[66]試驗結果相符，表示以混凝土抗壓強度較為巨觀的行為評估屬於微觀行為的氯離子擴散係數，可

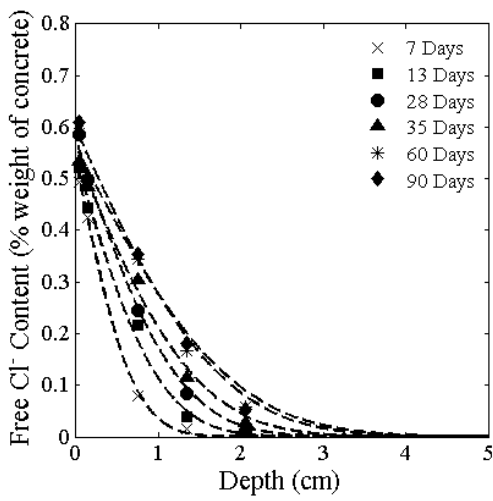
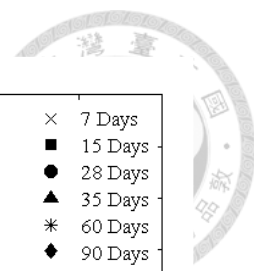
能有難以解釋的狀況。舉例來說，如文獻[83]提到摻入卜作嵐材料後，混凝土孔隙溶液離子數量增多，能夠有效束制氯離子的傳輸、文獻[20]提到當水化持續發生，孔隙結構越曲折能有效阻擋氯離子傳輸，但對於抗壓強度的提升並不明顯。

表 4-22 各配比擴散係數

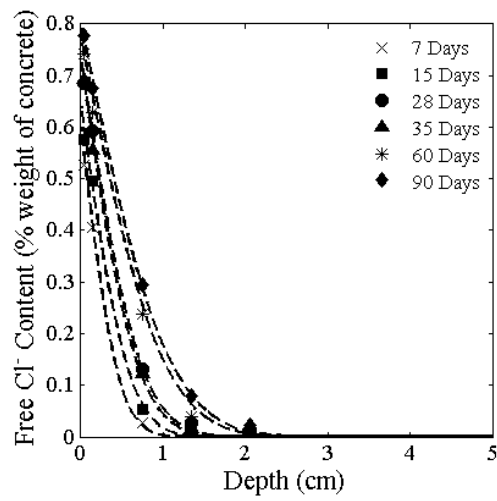
混凝土各齡期之擴散係數 ($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)							
組別 \ 齡期		35 天	41 天	56 天	63 天	88 天	118 天
055OPC	自由氯離子	24.29	26.40	19.19	21.83	20.47	13.90
	總氯離子	23.41				21.22	14.86
組別 \ 齡期		35 天	44 天	56 天	63 天	88 天	118 天
055S40	自由氯離子	10.47	7.46	6.51	4.67	5.71	4.32
	總氯離子	11.22		7.53			4.94
組別 \ 齡期		35 天	43 天	53 天	56 天	88 天	118 天
055F20	自由氯離子	22.20	21.59	15.86	21.36	14.24	12.99
	總氯離子	22.87			22.91	15.41	14.30
組別 \ 齡期		35 天	42 天	49 天	56 天	88 天	118 天
055F40	自由氯離子	31.03	30.12	27.65	22.27	19.75	17.99
	總氯離子	30.25	31.22	28.52	23.41	21.98	19.23
組別 \ 齡期		35 天	56 天	63 天	88 天	118 天	
055SF30	自由氯離子	14.51	9.31	9.77	7.32	6.75	
	總氯離子	13.99	10.16		8.15	7.37	

表 4-23 不同配比 118 天齡期抗壓強度與擴散係數比較

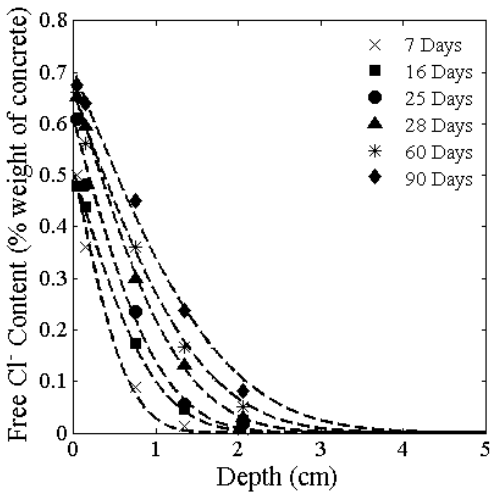
	055OPC	055S40	055F20	055F40	055SF30
抗壓強度 (MPa)	44.52	47.99	46.85	41.48	48.35
擴散係數 ($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)	13.90	4.32	12.99	17.99	6.25



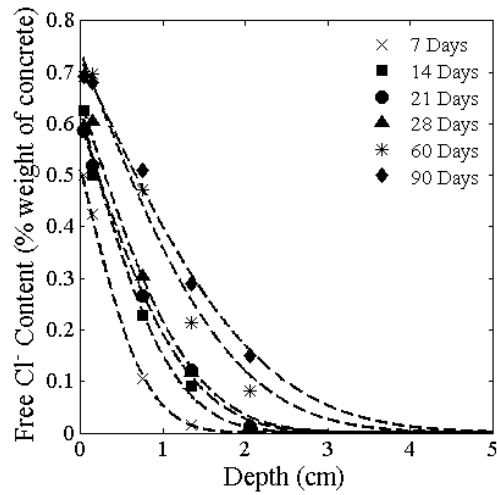
(a) 055OPC



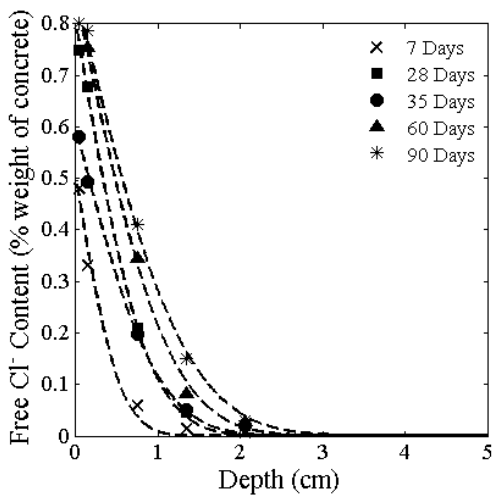
(b) 055S40



(c) 055F20

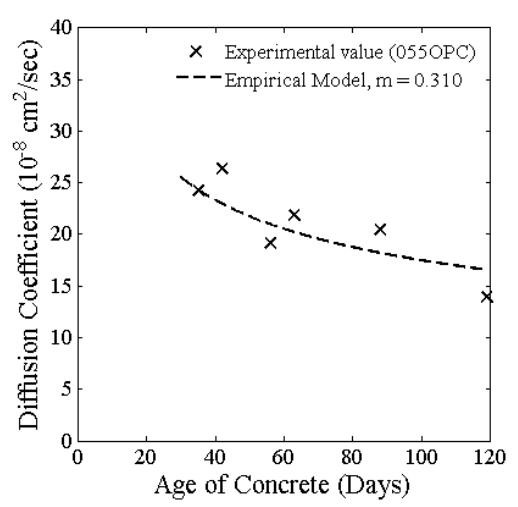
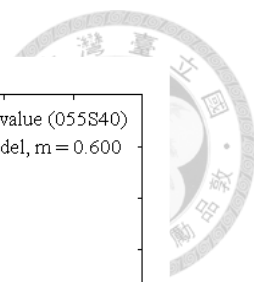


(d) 055F40

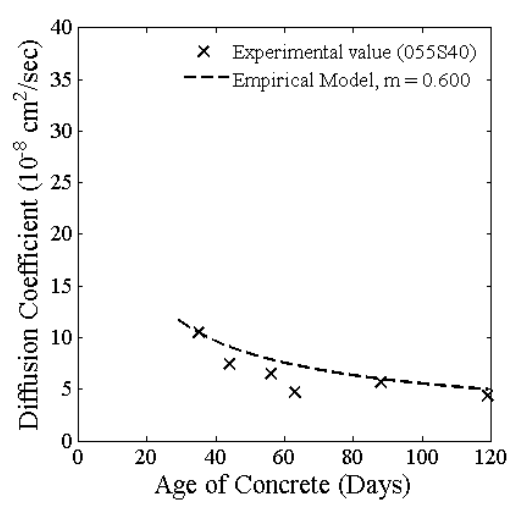


(e) 055SF30

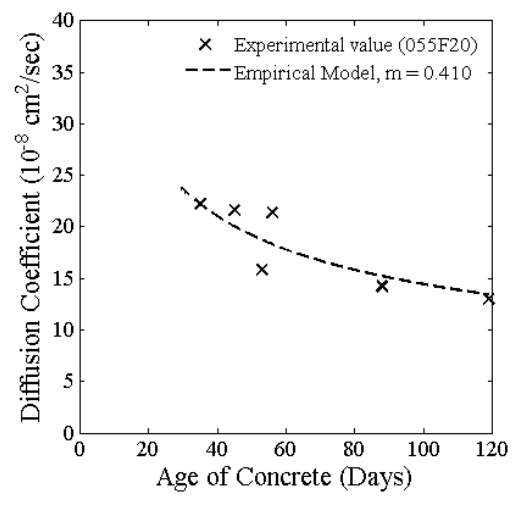
圖 4-6 各配比貯鹽試驗擴散係數迴歸分析結果



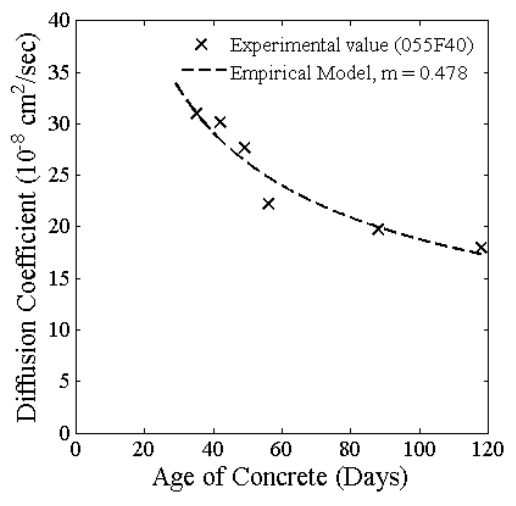
(a) 055OPC



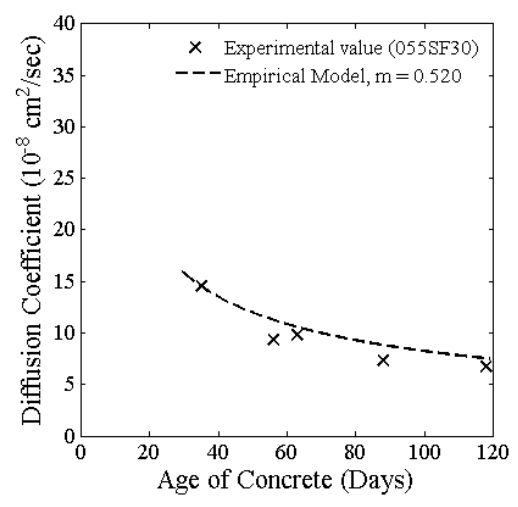
(b) 055S40



(c) 055F20

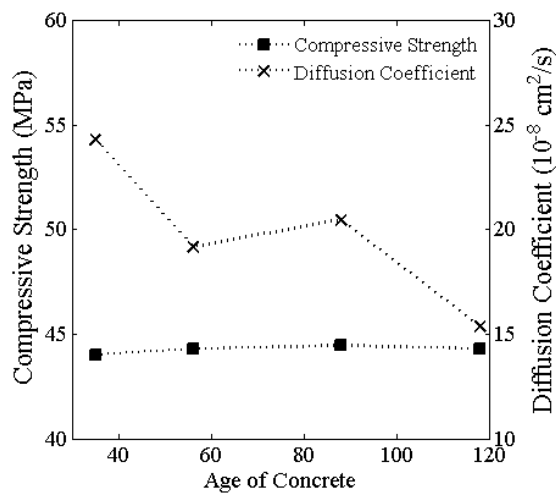


(d) 055F40

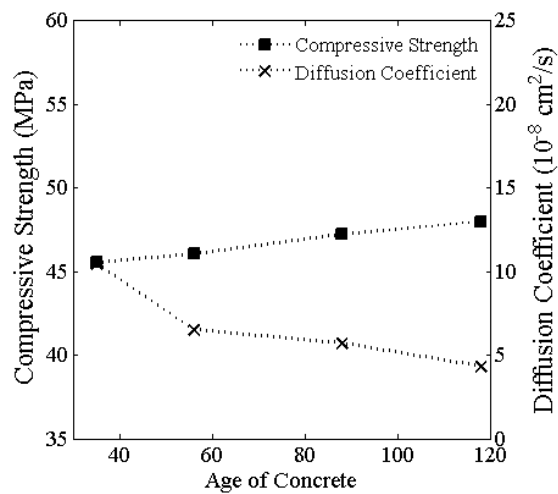


(e) 055SF30

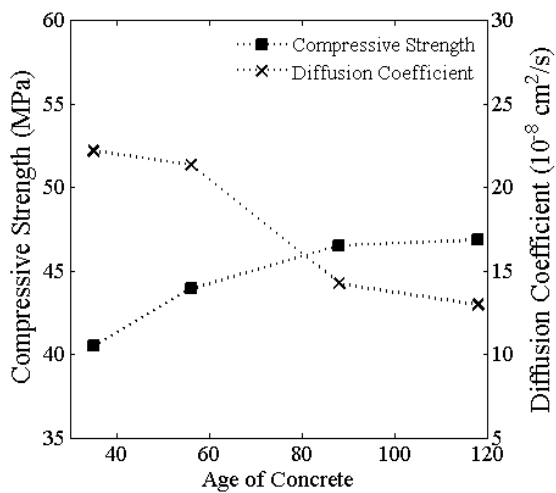
圖 4-7 擴散係數時間效應



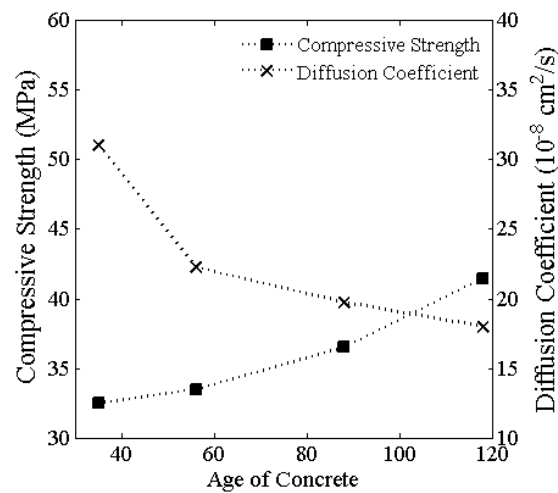
(a) 055OPC



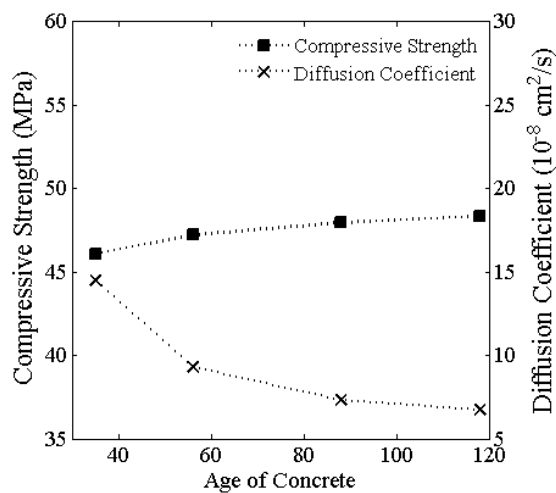
(b) 055S40



(c) 055F20



(d) 055F40



(e) 055SF30

圖 4-8 各配比抗壓強度與擴散係數關係



4.6 氯離子滲流速度

由本文 2.7.2 節所述可知，氯離子受到靜水壓力於混凝土當中傳輸的機制為擴散以及滲流作用。2.9.1 節當中，Freeze 和 Cherry[68]提出擴散及滲流作用的控制方程式，並由初始和邊界條件得到解析解，如式 4-3。

本研究氯離子滲流速度計算方式如下所述：

- (1) 相同試驗時間，由對照組經由擴散方程式計算得到擴散係數 (4.5 節)，代入式 4-3 當中，
- (2) 將式 4-3 與壓力滲透試驗各層氯離子濃度數據以迴歸分析法計算相關係數 R^2 最高時的滲流速度 (如表 4-24 所示)。

迴歸分析結果如圖 4-9 所示，相關係數 R^2 皆在 0.965~0.999 之間。本研究限於試驗設備關係，難以量測氯離子溶液穿透過混凝土流量，故不討論混凝土滲透係數受到配比不同或是齡期長短的影響。

假設不同批拌和的混凝土試體其材料性質皆為一致，根據達西定率 (Darcy's Law)，式 4-4 當中孔隙率 n 以及滲透係數 k 為固定值，因此，滲流速度 v 與水力坡降或靜水壓力大小應呈正比關係，於相同試驗時間，靜水壓力由 3 kgf/cm^2 增加至 5 kgf/cm^2 ，放大約 1.67 倍，將表 4-24 第三、四列不同靜水壓力藉由迴歸得到的滲流速度相互比較後，滲流速度放大倍率在 1.38~2.15 倍之間，如表 4-24 第五列所示，差距為 1.96%~29.02%之間。

$$C(x, t) = \frac{C_s}{2} \left[e^{vx/D} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x+vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \dots\dots\dots 4-3$$

$$v = -\frac{k}{n} \cdot i \dots\dots\dots 4-4$$



式中，

D：擴散係數

v：滲流速度

C_s：表面氯離子濃度

t：試驗時間

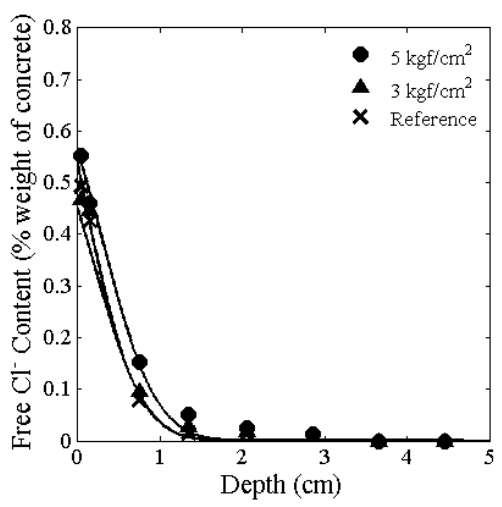
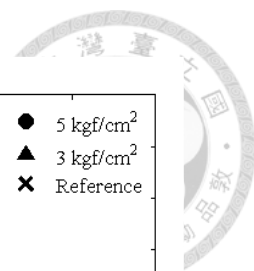
n：混凝土孔隙率

k：滲透係數

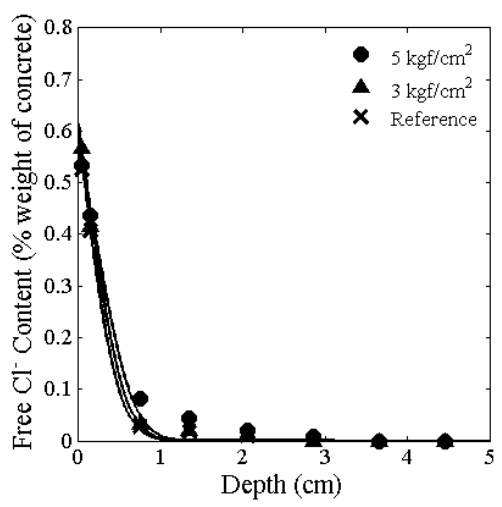
i：水力坡降

表 4-24 各配比壓力滲透試驗氯離子滲流速度

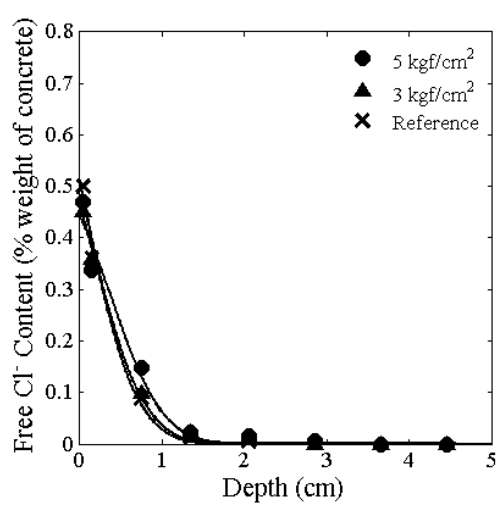
氯離子滲流速度 (10 ⁻⁷ cm/s)					
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	055OPC	055S40	055F20	055F40	055SF30
3	2.13	1.33	1.70	2.31	1.53
5	3.33、2.93*、3.02*	2.86	3.49	4.01	2.50
放大倍率	1.38~1.56	2.15	2.05	1.74	1.63
*備註	*21、35 天壓力滲透試驗滲流速度迴歸結果				



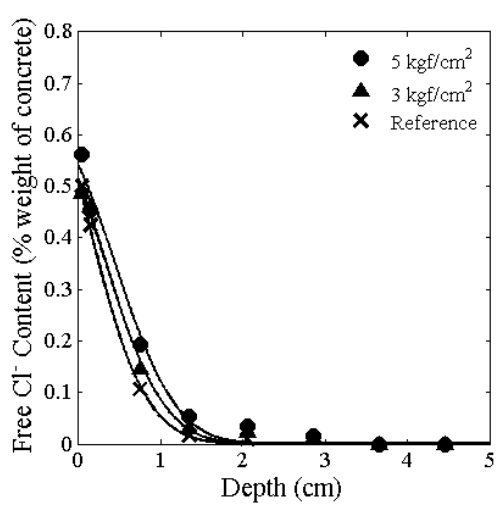
(a) 055OPC



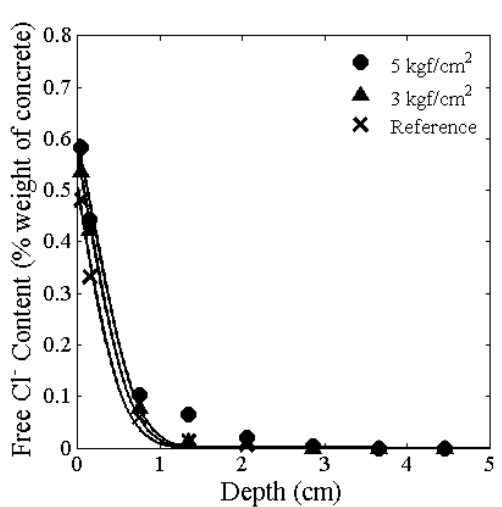
(b) 055S40



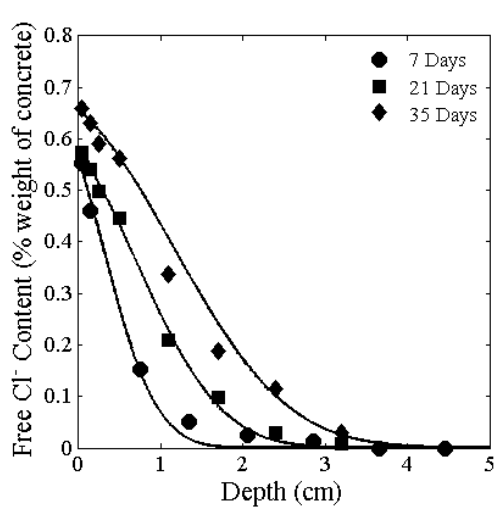
(c) 055F20



(d) 055F40



(e) 055SF30



(f) 7、21、35 天壓力滲透

圖 4-9 各配比 7 天壓力滲透試驗滲流速度迴歸分析結果



4.7 氯離子侵入量

將本文圖 4-4 節當中貯鹽試驗與壓力滲透中混凝土距表面各深度氯離子濃度，分別以式 2-9 與式 2-14 迴歸分析後，對深度 x 積分，得到曲線下面積即為氯離子侵入量，示意圖如圖 4-10 所示。積分結果如表 4-25 所示。

4.7.1 卜作嵐材料對於氯離子侵入量之影響

比較不同卜作嵐材料摻入後，對於氯離子侵入量的影響，以 7 天試驗時間為例發現（表 4-25），055S40 和 055SF30 對於抵抗氯離子侵入能力皆比 055OPC 組別佳，由於飛灰晚期發展的現象，055F20、055F40 在養護 28 天、試驗 7 天時，氯離子侵入量皆比 055OPC 高，與前述 4.5.1 節卜作嵐材料對於擴散係數影響的趨勢一致。於試驗 90 天時，發現 055F20、055F40 之氯離子侵入量還是比 055OPC 來的高，原因為早齡期時，055F20、055F40 氯離子侵入速率比 055OPC 快，導致侵入量比 055OPC 高。因此推論若養護時間不足以使卜作嵐反應發揮顯著，以氯離子侵入量辨別混凝土耐久性會有誤判或是不合理情況發生。

4.7.2 靜水壓力對於氯離子侵入量之影響

貯鹽試驗跟壓力滲透試驗氯離子侵入量相互比較，如表 4-26 所示，可以發現確實靜水壓力能夠使侵入混凝土內的氯離子量更多，以 055OPC 組別為例，在相同 7 天試驗時間下， 3 kgf/cm^2 與對照組相比，侵入量增加了 10%， 5 kgf/cm^2 與 3 kgf/cm^2 相比，侵入量增加了 19%。隨靜水壓力增加之氯離子侵入量發展如圖 4-12 所示。



4.7.3 加壓時間對於氯離子侵入量之影響

以 055OPC 組別進行 7、21、35 天長時間壓力滲透試驗，氯離子侵入量積分結果如表 4-27 所示及圖 4-13a 所示，若比較貯鹽試驗以及壓力滲透試驗在所有試驗時間氯離子侵入量進行比較，如圖 4-13b 所示，可以發現 35 天壓力滲透試驗大於 90 天貯鹽試驗，顯示壓力滲透試驗作為加速性試驗取代貯鹽試驗判斷混凝土耐久性，試驗時間能夠縮短約 2/3。

表 4-25 貯鹽試驗隨試驗時間發展之氯離子侵入量

氯離子侵入量 (%-cm)					
試驗時間 (天)	055OPC	試驗時間 (天)	055S40	試驗時間 (天)	055F20
7	0.233	7	0.172	7	0.212
14	0.343	16	0.235	16	0.328
28	0.444	28	0.335	25	0.402
35	0.506	35	0.312	28	0.544
60	0.654	60	0.448	60	0.628
90	0.701	90	0.528	90	0.799
試驗時間 (天)	055F40	試驗時間 (天)	055SF30		
7	0.251	7	0.169		
14	0.424	28	0.432		
21	0.483	35	0.369		
28	0.536	60	0.597		
60	0.846	90	0.705		
90	0.971				

表 4-26 7 天壓力滲透試驗與對照組比色法氯離子侵入量差異

7 天試驗時間氯離子侵入量 (%-cm)					
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	055OPC	055S40	055F20	055F40	055SF30
5	0.305	0.212	0.256	0.368	0.247
3	0.256	0.194	0.218	0.306	0.214
0 (對照組)	0.233	0.172	0.212	0.251	0.169

表 4-27 055OPC 各試驗時間壓力滲透與對照組氯離子侵入量差異

055OPC 各試驗時間壓力滲透氯離子侵入量 (%-cm)			
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	7 天	21 天	35 天
5	0.305	0.572	0.964
0 (對照組)	0.233	0.389	0.506

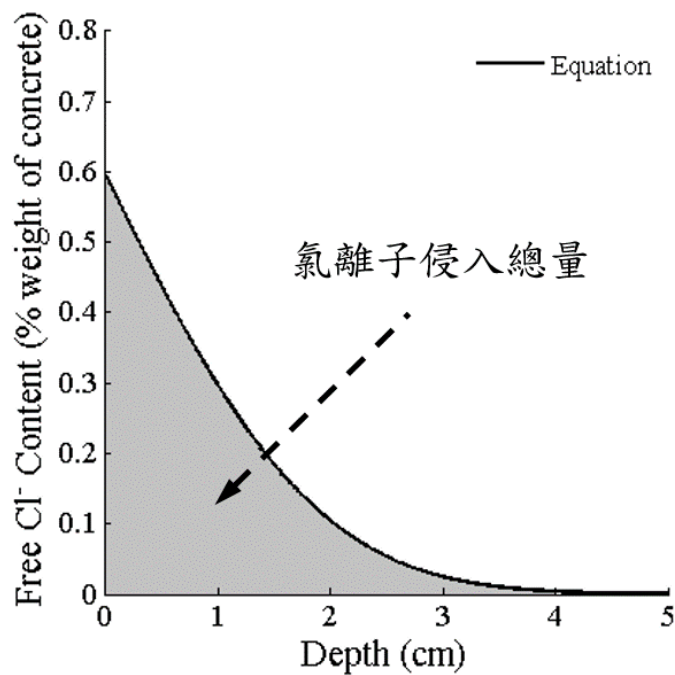


圖 4-10 氯離子侵入量示意圖

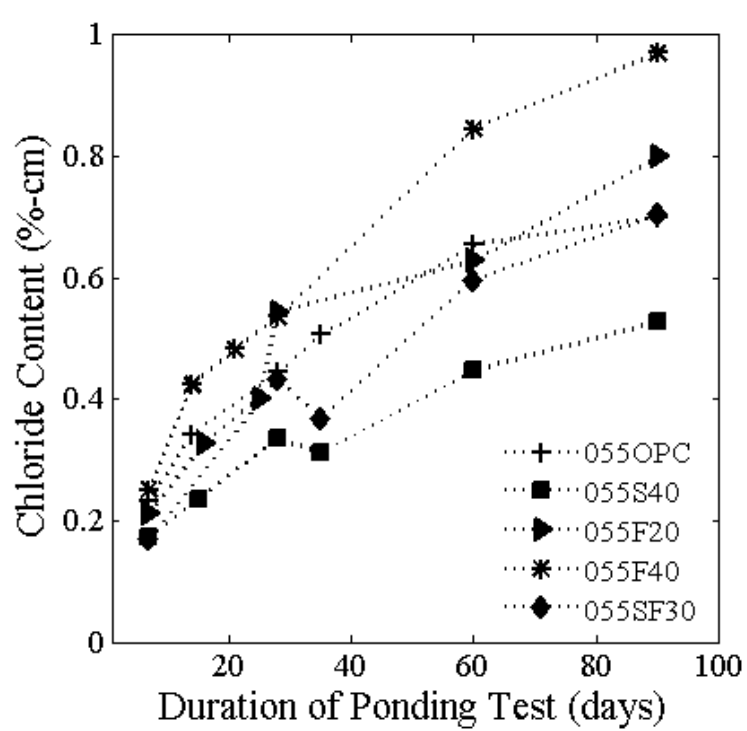


圖 4-11 各配比貯鹽試驗不同試驗時間之氯離子侵入量

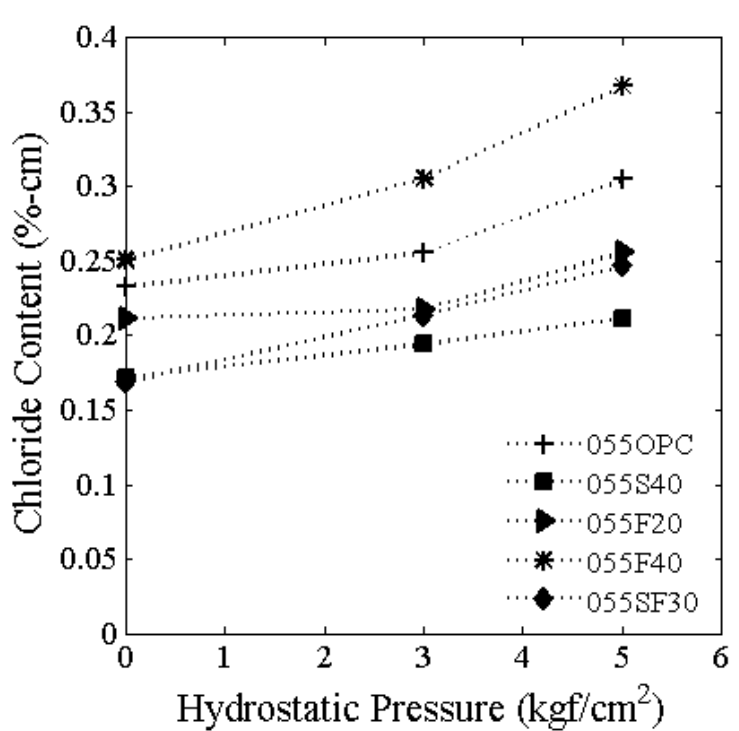


圖 4-12 各配比 7 天試驗時間不同靜水壓力之氯離子侵入量

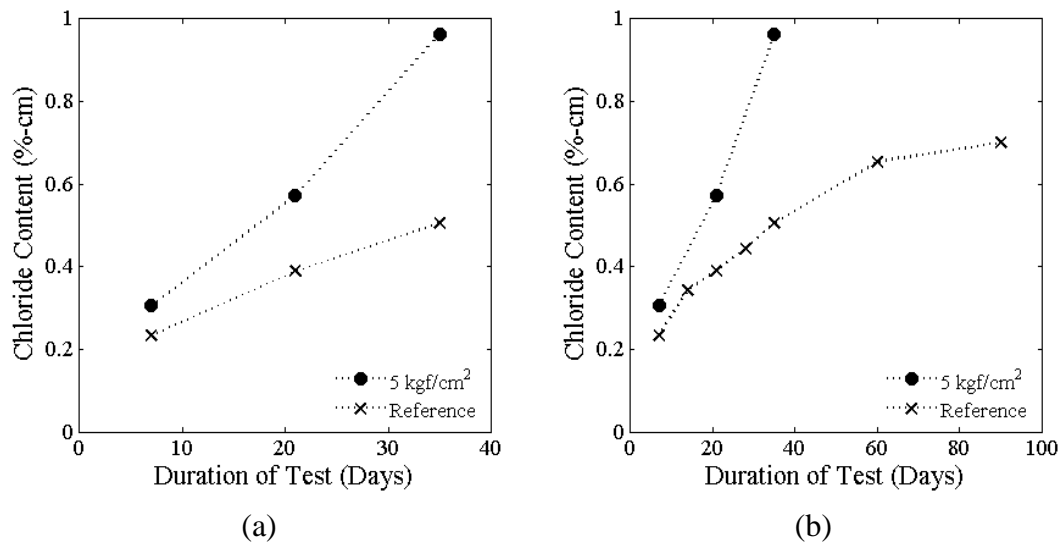


圖 4-13 055OPC 壓力滲透試驗與對照組隨試驗時間發展之氯離子侵入量差異

4.8 混凝土內各深度氯離子濃度累積速率

工程上針對氯鹽侵蝕混凝土的議題，常常在於討論氯離子於混凝土內傳輸的速度以及鋼筋周圍的氯離子濃度的累積。混凝土處於靜水壓力下，即影響著氯離子濃度累積的速率。因此，本研究透過 055OPC 組別以靜水壓力為 5 kgf/cm²、不同加壓時間的方式，觀察氯離子於混凝土中各深度濃度累積狀況，而各個試驗時間之貯鹽試驗與 7、21、35 天壓力滲透試驗氯離子分布圖如圖 4-14 和圖 4-15 所示，可以發現靜水壓力確實使得氯離子在相同深度下累積得更快。以深度 2 公分為例，壓力滲透試驗氯離子濃度從原本 7 天的 0.02%，35 天時增加至約 0.15%，已超過貯鹽試驗 90 天時位於兩公分深度的氯離子濃度約 0.05%。

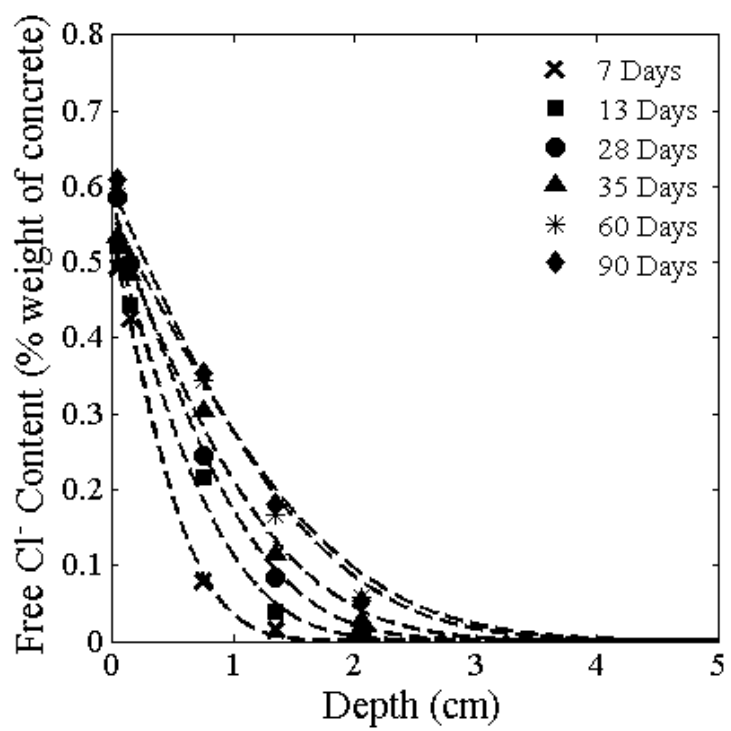


圖 4-14 055OPC 貯鹽試驗隨試驗時間發展之氯離子分布情形

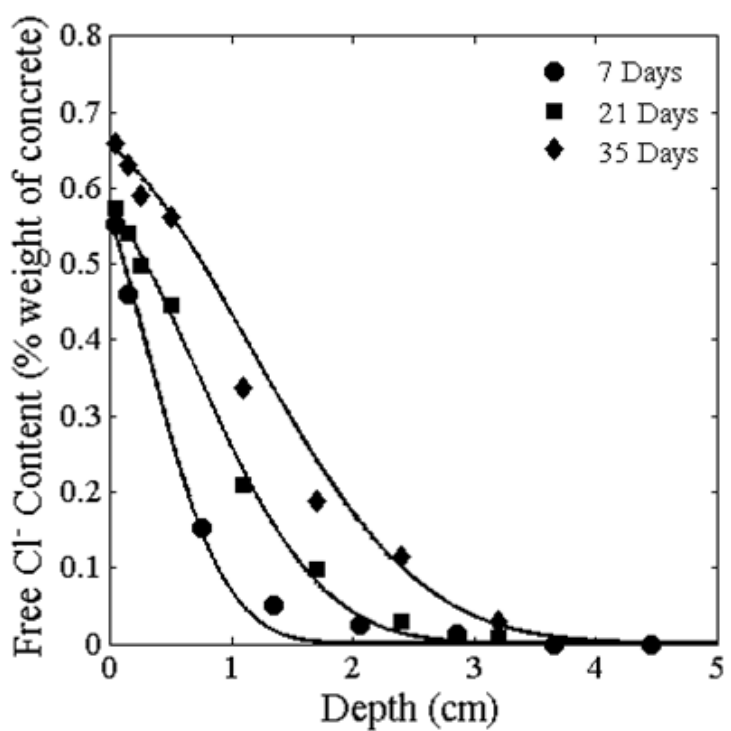


圖 4-15 055OPC 壓力滲透試驗隨試驗時間發展之氯離子分布情形



4.9 等效氯離子傳輸係數

壓力滲透試驗和貯鹽試驗的最大差別在於氯離子於混凝土傳輸機制的不同，但描述氯離子擴散及滲流作用的控制方程式，如式 4-5，所需要的參數及方程式本身較為繁雜，不利於一般應用上。根據 2.9.4 節，金祖權等人[76]透過不同靜水壓力以及加壓時間發現，氯離子擴散係數 D 與靜水壓下計算得到的擴散係數 D_h 之間有一定的倍率關係，如圖 2-13 及圖 2-14 顯示。為區分兩種擴散係數名詞上易混淆的現象，本研究將靜水壓力下的擴散係數 D_h 定義為「等效氯離子傳輸係數， D_{eq} 」，當混凝土受到靜水壓力作用時，氯離子於混凝土中受到滲流作用的傳輸行為假設為由擴散作用貢獻，並以 Fick's Second Law 去描述。

滲流－擴散方程式：

$$C(x, t) = \frac{C_s}{2} \left[e^{vx/D} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x+vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \dots\dots\dots 4-5$$

各配比壓力滲透組別之氯離子濃度分佈數據以 Fick's Second Law 進行迴歸分析，可計算得到等效氯離子傳輸係數，如表 4-28 所示，迴歸分析結果如圖 4-16 所示，相關係數 R^2 為 0.985~0.995 之間屬高度相關。將各壓力組別的等效氯離子傳輸係數與對照組之氯離子擴散係數進行正規化後，並以式 4-6 進行迴歸分析，相關係數 R^2 為 0.929~0.998 之間屬高度相關，如圖 4-17 所示，迴歸常數 a 越大可表示氯離子於混凝土內傳輸越迅速。若將金祖權等人[76]試驗結果當中取出與本研究較為相似的試驗參數以及混凝土配比，如圖 2-13 所示，一同作圖於圖 4-18 中，發現趨勢上並無偏離太多，因此推論可由 D_{eq} 與 D 之間的關係，探討靜水壓力作用下氯離子傳輸行為，簡化滲流－擴散方程式。



等效氯離子傳輸係數與擴散係數指數函數回歸式：

$$D_{eq} = D \cdot \exp(aP) \dots\dots\dots 4-6$$

將所有配比 7 天壓力滲透試驗等效氯離子傳輸係數與 7 天貯鹽試驗擴散係數作圖比較，以氯離子擴散係數 D 為橫軸，等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 為縱軸，如圖 4-19 所示，顯示等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 與擴散係數 D 兩者呈線性關係，藉由線性迴歸可得以下方程式，相關係數 R^2 為 0.900 以上，屬於高度相關，如式 4-7 和式 4-8，線的斜率越高表示靜水壓力越大，使氯離子傳輸的速率更快。而圖 4-20 顯示 7 天壓力滲透試驗等效氯離子傳輸係數與 90 天貯鹽試驗擴散係數之關係，亦呈線性關係，相關係數 R^2 為 0.900 以上，屬於高度相關。

(1) 7 天壓力滲透試驗 D_{eq} 與 7 天貯鹽試驗 D 比較：

$$D_{eq} = 1.85 \times D, \text{ when } P = 5 \text{ kgf/cm}^2, R^2 = 0.971 \dots\dots\dots 4-7$$

$$D_{eq} = 1.32 \times D, \text{ when } P = 3 \text{ kgf/cm}^2, R^2 = 0.990 \dots\dots\dots 4-8$$

(2) 7 天壓力滲透試驗 D_{eq} 與 90 天貯鹽試驗 D 比較：

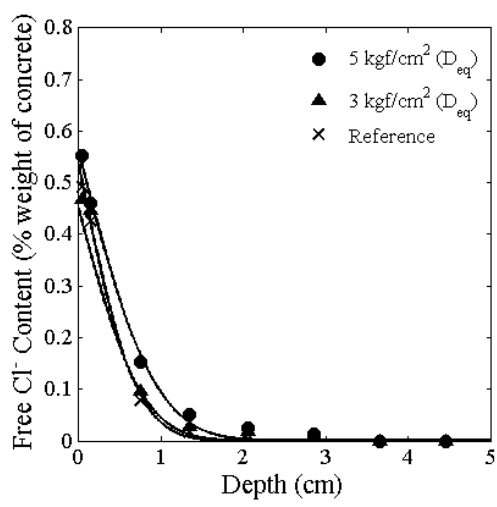
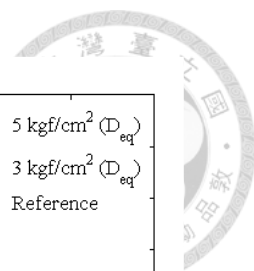
$$D_{eq} = 3.27 \times D, \text{ when } P = 5 \text{ kgf/cm}^2, R^2 = 0.962 \dots\dots\dots 4-7$$

$$D_{eq} = 2.33 \times D, \text{ when } P = 3 \text{ kgf/cm}^2, R^2 = 0.919 \dots\dots\dots 4-8$$

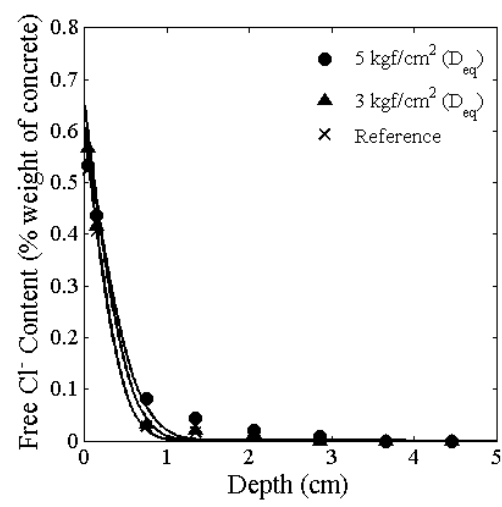
若以等效氯離子傳輸係數適用範圍討論，本研究與金祖權等人[76]壓力滲透試驗的條件處於靜水壓力值為 0.2 至 1.0MPa 之間，加壓時間為 35 天以內，若超出這個範圍，等效氯離子傳輸係數的概念之適用性，詳細討論如本文 5.3 節所述。

表 4-28 各配比壓力滲透試驗等效氯離子傳輸係數 D_{eq}

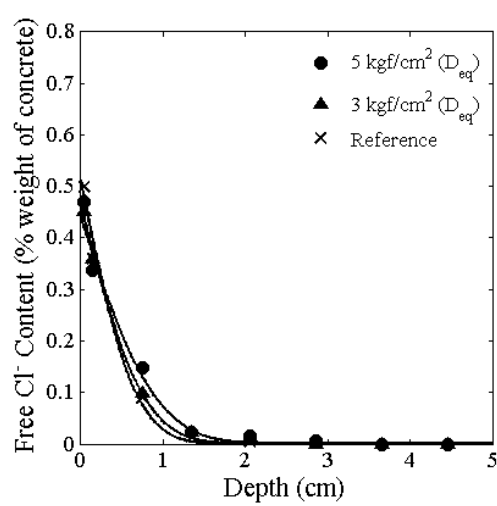
等效氯離子傳輸係數 D_{eq} ($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)					
靜水壓力值 (kgf/cm^2)	055OPC	055S40	055F20	055F40	055SF30
5	40.28、41.66*、 46.44*	18.25	42.37	58.87	25.33
3	30.22	13.88	29.50	40.64	19.87
0 (擴散係數 D)	24.29	10.47	22.20	31.03	14.51
*備註	055OPC 進行 7、21、35 天壓力滲透試驗				



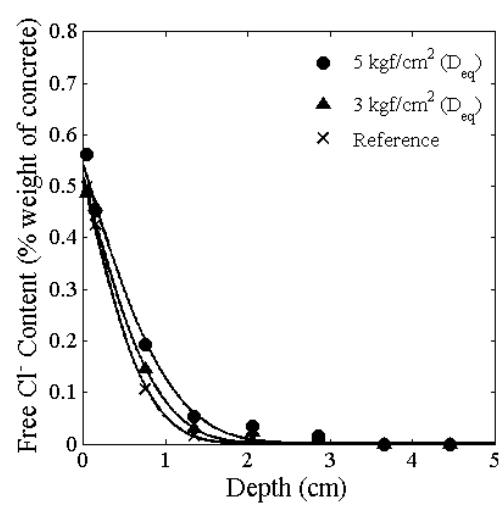
(a) 055OPC



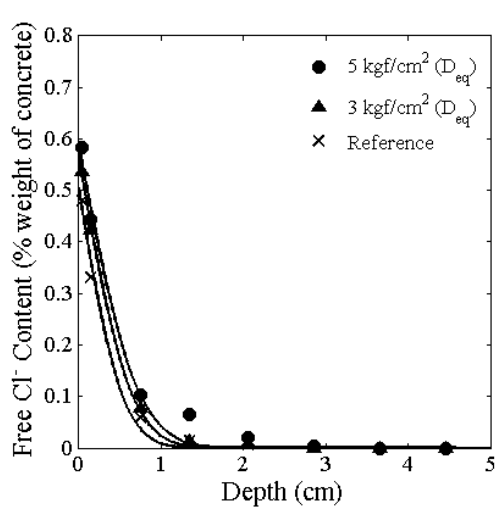
(b) 055S40



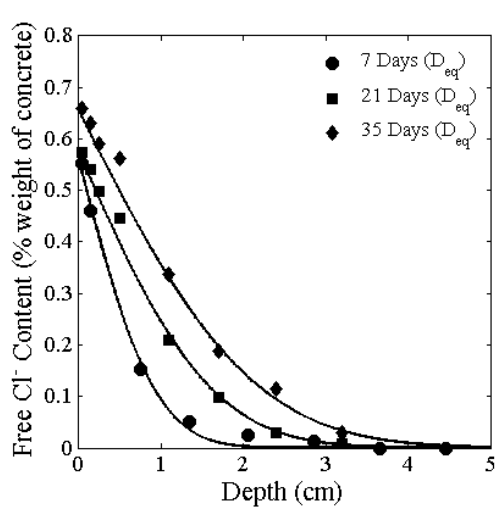
(c) 055F20



(d) 055F40

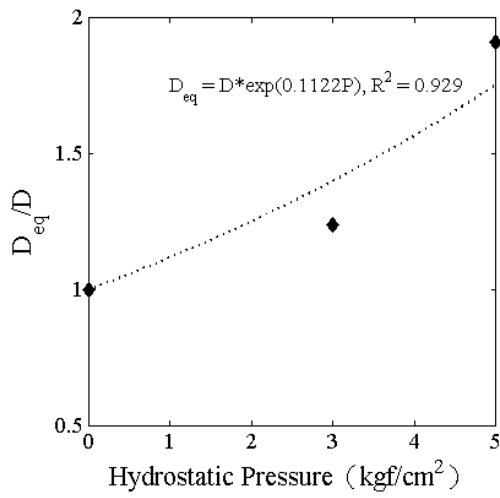
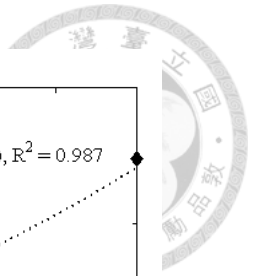


(e) 055SF30

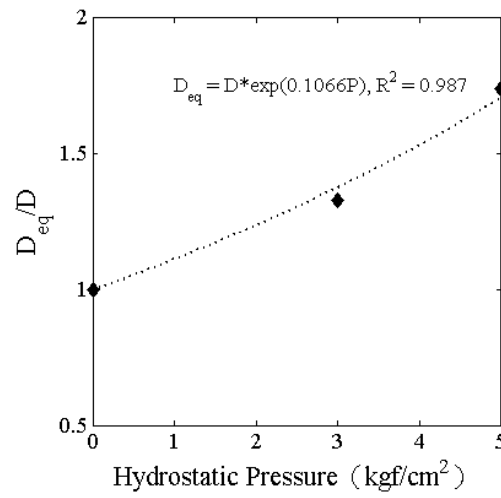


(f) 7、21、35 天壓力滲透試驗

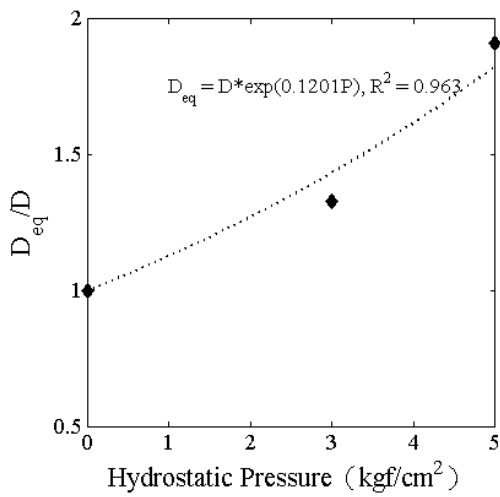
圖 4-16 等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 迴歸分析結果



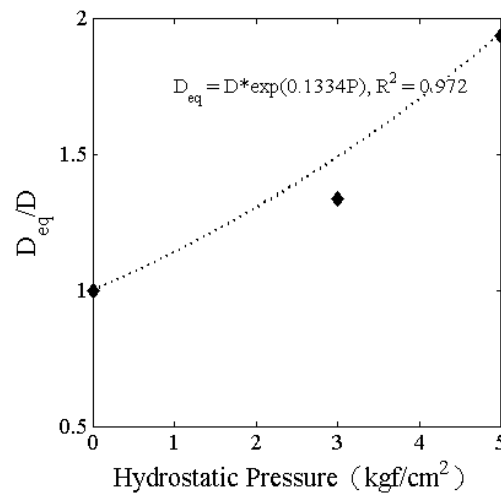
(a) 055OPC



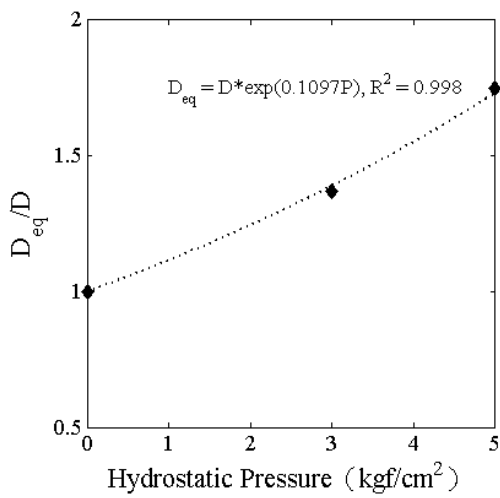
(b) 055S40



(c) 055F20



(d) 055F40



(e) 055SF30

圖 4-17 等效氣離子傳輸係數與擴散係數正規化後與靜水壓力之關係

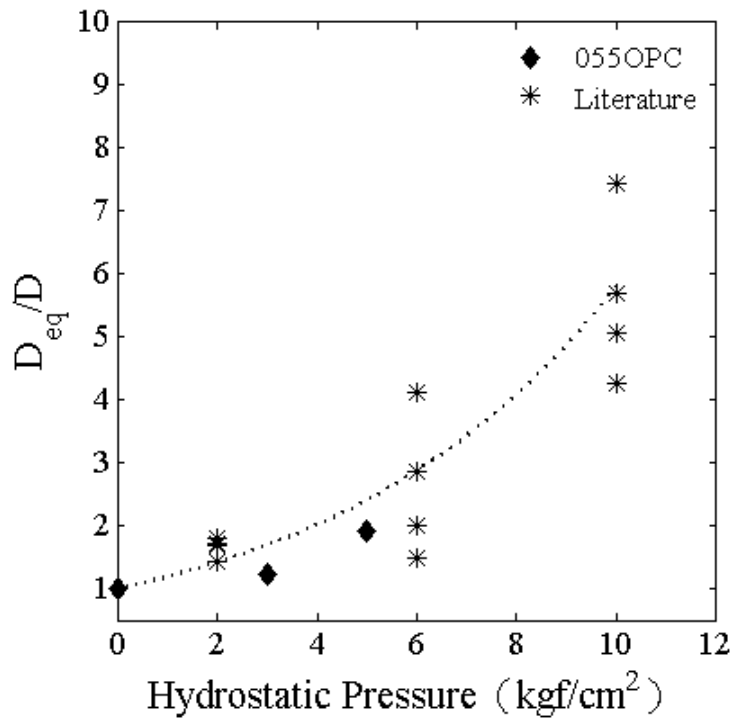


圖 4-18 055OPC 壓力滲透等效氣離子傳輸係數與文獻相似配比之數據比較

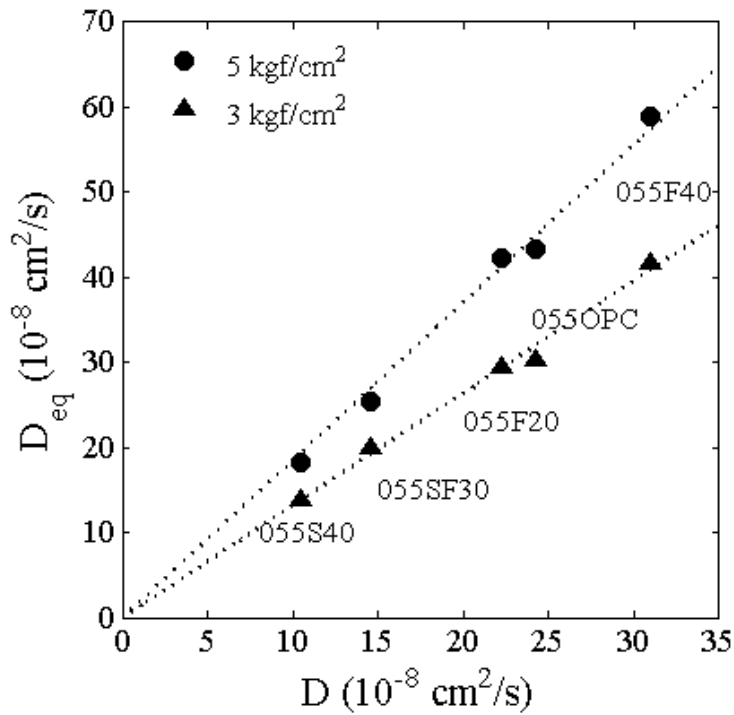


圖 4-19 不同靜水壓力等效氣離子傳輸係數與 7 天貯鹽試驗擴散係數之關係

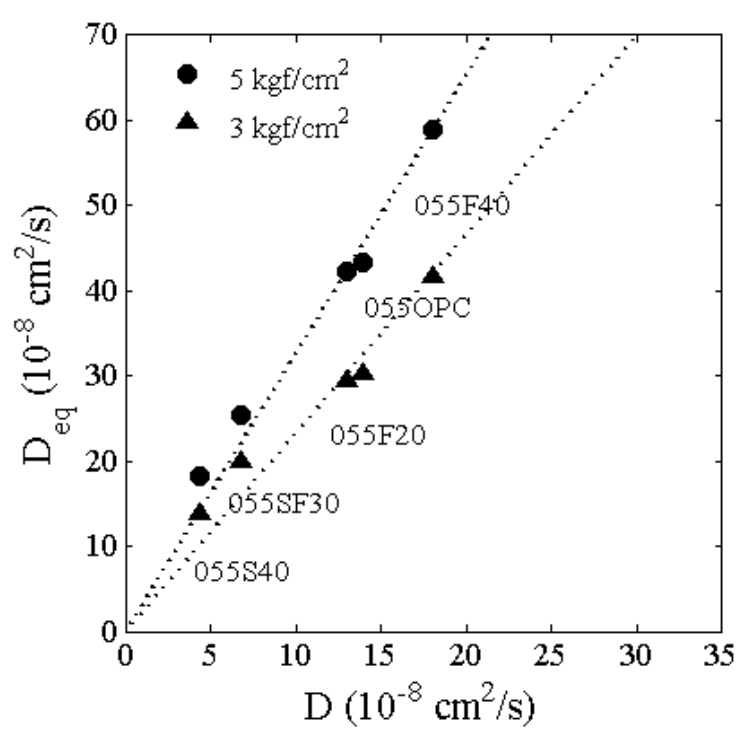


圖 4-20 不同靜水壓力等效氣離子傳輸係數與 90 天貯鹽試驗擴散係數之關係

第五章 壓力滲透試驗取代貯鹽試驗可行性分析



5.1 前言

貯鹽試驗藉由內外部濃度梯度，氯離子在混凝土內以擴散的方式傳輸，國內外規範以 90 天貯鹽試驗判斷混凝土耐久性，為縮短試驗過程，本研究以加靜水壓力的方式加速氯離子侵入混凝土內，稱為「壓力滲透試驗」。

本文 2.7.1 節和 2.7.2 節中說明貯鹽試驗與壓力滲透試驗中，氯離子傳輸行為分別為「擴散作用」與「擴散+滲流作用」，控制方程式分別為式 2-9 與式 2-14，因此針對兩種控制方程式的參數進行分析，各個參數代入不同大小的數值，比較方程式線型的差異，並從線型差異中訂定指標，如：相同試驗時間下，貯鹽試驗與壓力滲透試驗氯離子侵入深度差異。透過本文第四章試驗結果，討論指標合理性。最後，利用指標建立壓力滲透試驗作為加速性試驗取代 90 天貯鹽試驗的基礎。本章節分析流程如圖 5-1 所示。本章節圖標說明如表 5-1 所示。

表 5-1 圖例說明

試驗	貯鹽試驗	壓力滲透試驗	
		3 kgf/cm ²	5 kgf/cm ²
試驗值圖例	X	▲	●
方程式圖例	虛線-----	實線——	

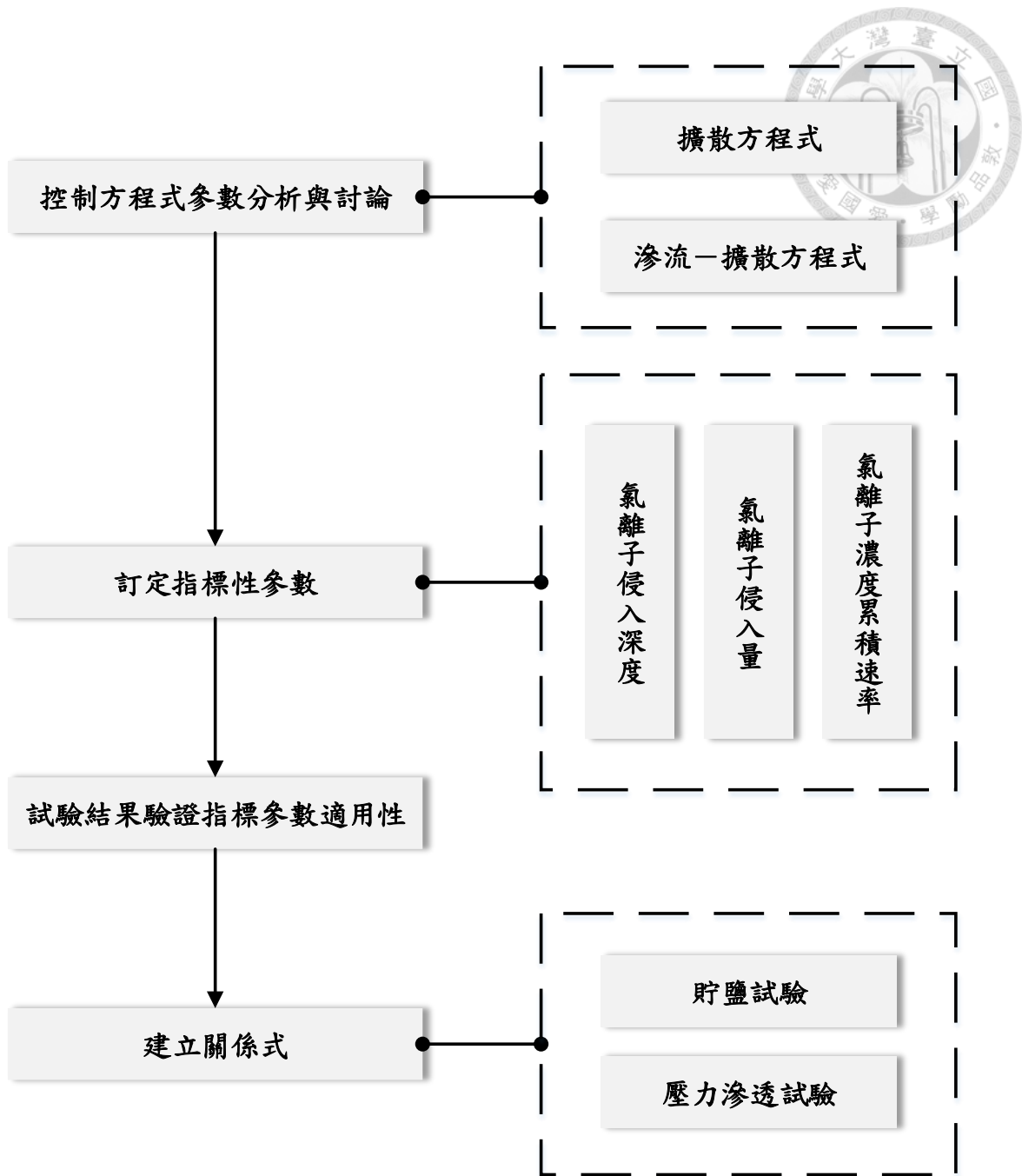


圖 5-1 可行性分析流程圖



5.2 控制方程式參數分析

由本文 2.8.1 節及 2.9.1 節所述，貯鹽試驗與壓力滲透試驗氯離子分布狀況可由擴散方程式與滲流－擴散方程式描述。以試驗結果中得到的不同參數，分別代入上述兩個控制方程式內比較線型差異，以貯鹽試驗與壓力滲透試驗氯離子分布理論線兩者差異最大處訂定為指標。

5.2.1 參數選取方式

參數數值範圍如表 5-2 所示，假設所有參數無時間效應。擴散係數 D 以及滲流速度 v 為兩種控制方程式中最重要之參數， D 的數值參考本文 4.5 節當中 055OPC 之 35 天齡期擴散係數約 $25 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，滲流速度 v 選取方式參考本文 4.6 節當中 055OPC 滲流速度，靜水壓力為 3 kgf/cm^2 和 5 kgf/cm^2 ，滲流速度 v 分別對應 $2 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 和 $3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。其餘滲流速度數值選取方式則根據式 5-1，假設混凝土孔隙率以及滲透係數為定值，靜水壓力與滲流速度呈正比關係，如當靜水壓力為 5 kgf/cm^2 ，滲流速度為 $3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ，靜水壓力增加為 10 kgf/cm^2 ，滲流速度假設為 $6 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。

$$v = -\frac{k}{n} \cdot i \dots\dots\dots 5-1$$

5.2.2 控制方程式於不同參數下之差異

將表 5-2 參數分別代入擴散方程式以及滲流－擴散方程式，並探討線型差異：

5.2.2.1 不同靜水壓力滲流－擴散方程式線型差異

不同靜水壓力使氯離子於混凝土中產生不同滲流速度，滲流－擴散方程式有如圖 5-2a 所示之線型變化，其餘參數如表面氯離子濃度、擴散係數和試驗時間等皆為定值，試驗時間為 35 天。當滲流速度為 0 時，滲流－擴散方程式即為擴散方程式，隨著靜水壓力越高、滲流速度越大，滲流－擴散方程式前段會越飽滿，線型

越接近鐘型，對於氯離子傳輸（如：氯離子濃度累積、侵入深度）的貢獻逐漸增大。

將 055OPC 35 天 5 kgf/cm^2 壓力滲透試驗各深度氯離子濃度以滲流—擴散方程式進行迴歸分析（圖 5-2b 所示），方程式與試驗值吻合，相關係數 R^2 為 0.994。由靜水壓力為 8 kgf/cm^2 以及 10 kgf/cm^2 之氯離子分布理論線，可預測若進行 055OPC 更高靜水壓力壓力滲透試驗氯離子於 35 天試驗時間的分布狀況。

5.2.2.2 不同試驗時間下控制方程式線型差異

將擴散方程式與滲流—擴散方程式代入不同試驗時間觀察兩者線型差異，滲流速度為 $3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ （相當於本研究 055OPC 靜水壓力 5 kgf/cm^2 之滲流速度），其餘參數則一致，如圖 5-3 所示，圖中虛線為擴散方程式、實線為滲流—擴散方程式，試驗時間由左到右分別為 7、21、35、60 天。圖中可以發現於 7 天試驗時間時，兩者線型極為相似，隨著試驗時間增加，滲流—擴散方程式與擴散方程式差異越大，滲流的作用使得曲線淺層處越趨於飽滿，對於氯離子傳輸（如：氯離子濃度累積、侵入深度）的貢獻逐漸增大。

滲流對於氯離子傳輸的影響需足夠試驗時間才會顯著，以本研究 055OPC 各個試驗時間壓力滲透試驗值討論，如圖 5-4 所示，方程式相關係數 R^2 為 0.993~0.999，從各層氯離子濃度試驗值可以發現隨著加壓時間越長各層濃度累積越快，35 天壓力滲透試驗淺層處有較為飽滿的現象。另外，從滲流—擴散方程式與試驗值之相關係數大小可知，兩者屬高度相關，顯示透過此方程式可得知靜水壓力下氯離子於混凝土中之傳輸行為。

5.2.2.3 不同表面氯離子濃度控制方程式線型差異

圖 5-5 表示不同表面氯離子濃度對於擴散方程式與滲流—擴散方程式的變化，數值為 0.55、0.65 和 0.75（本研究表面氯離子濃度峰值）。可以發現表面氯離子濃度在 0.55~0.75 之間變化，小於靜水壓力和試驗時間對於氯離子侵入深度、侵入量和各層濃度的影響。

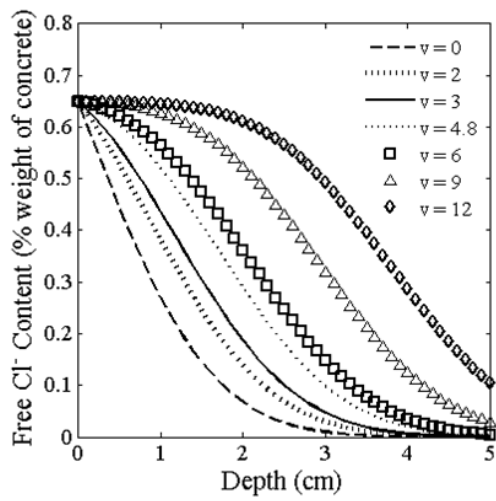


5.2.3 小結

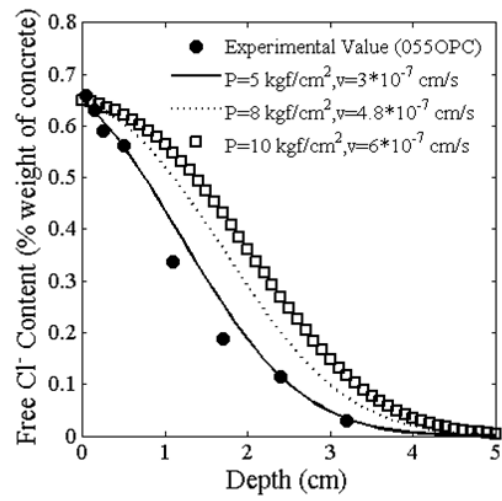
由控制方程是參數分析結果可知，滲流作用對於「氯離子侵入深度」、「氯離子侵入量」以及「氯離子濃度累積速率」皆有相當大的影響。於混凝土受到氯鹽侵害耐久性問題中，時常關注「氯離子侵入深度」以及「氯離子濃度累積速率」這兩項指標，而較少關注「氯離子侵入量」。因此，透過本文第四章試驗結果，將由以上兩項指標建立壓力滲透試驗作為加速性試驗取代貯鹽試驗判斷混凝土耐久性的基礎。

表 5-2 參數範圍

控制方程式參數範圍							
擴散係數 (10^{-8} cm ² /s)	25						
試驗時間 (天)	7、21、35、60						
表面氯離子濃度 (%)	0.55、0.65、0.75						
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	0	3	5	8	10	15	20
滲流速度 (10^{-7} cm/s)	0	2	3	4.8	6	9	12

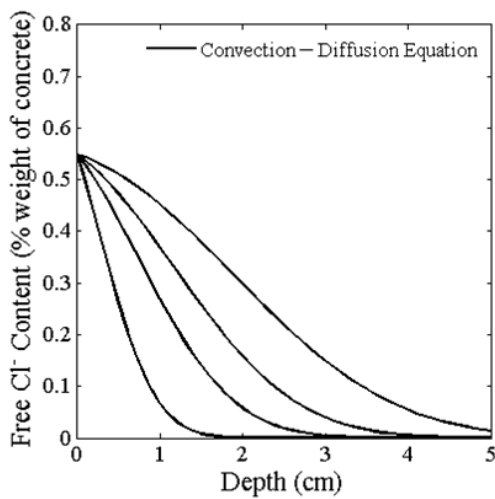


(a) 氯離子分布預測

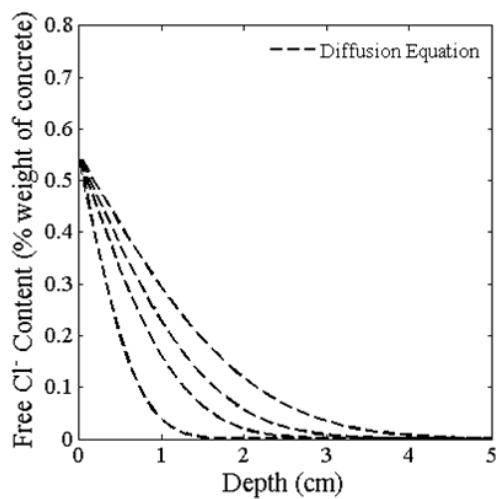


(b) 35 天壓力滲透試驗值 (0550PC)

圖 5-2 滲流—擴散方程式不同滲流速度差異

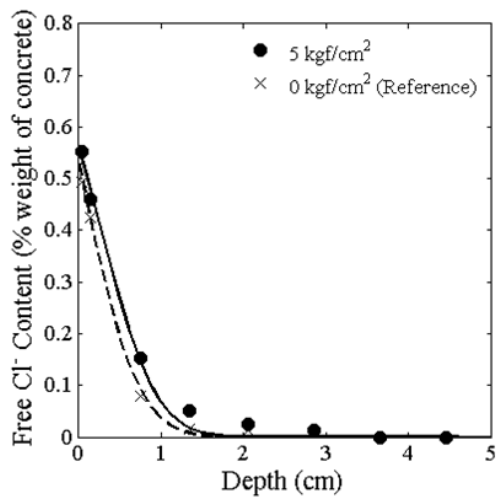
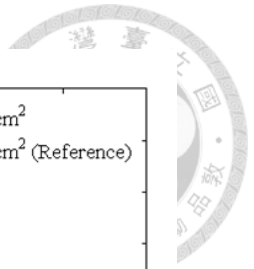


(a) 滲流—擴散方程式

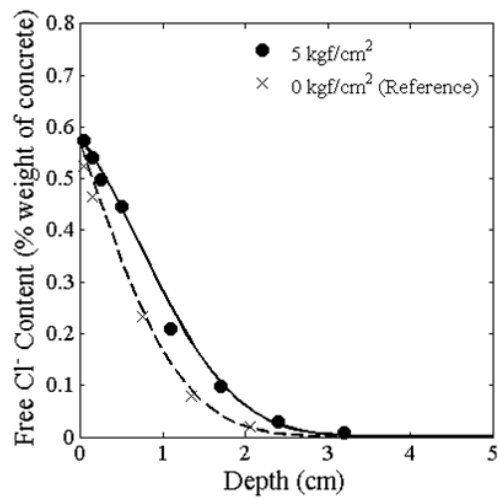


(b) 擴散方程式

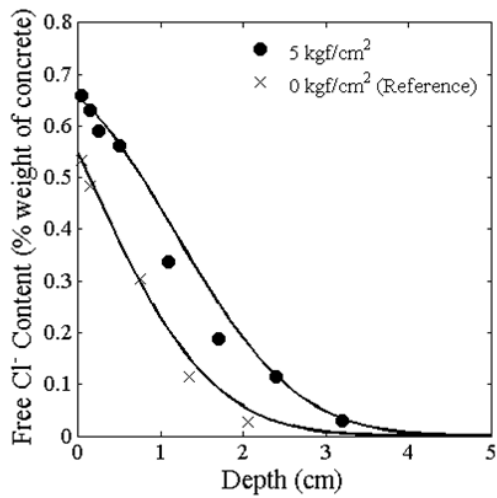
圖 5-3 不同試驗時間滲流—擴散方程式與擴散方程式差異



(a) 試驗時間 7 天



(b) 試驗時間 21 天



(c) 試驗時間 35 天

圖 5-4 0550PC 各試驗時間壓力滲透試驗與對照組氯離子分布情形

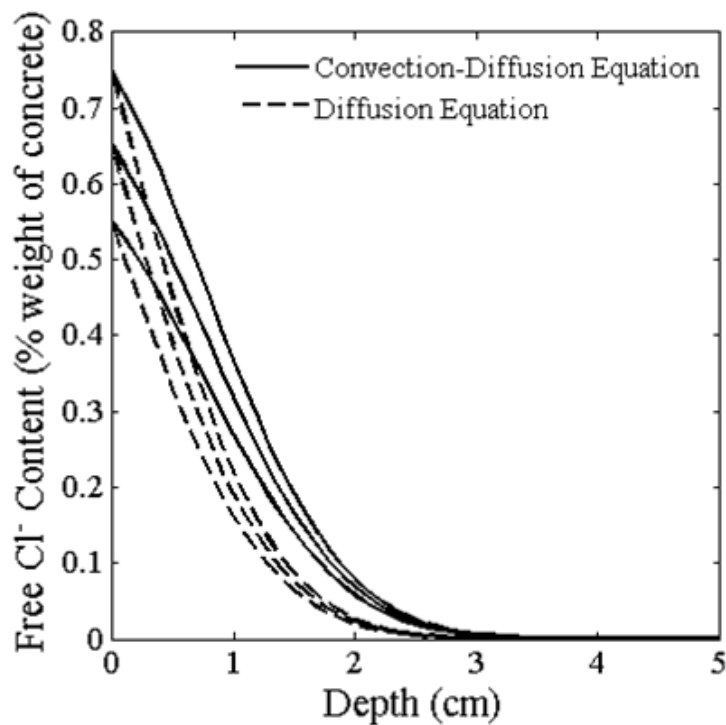


圖 5-5 不同表面氯離子濃度擴散方程式與滲流—擴散方程式差異

5.3 等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 適用性分析

本文 4.9 節當中所提到的「等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 」，其意義為假設氯離子受到滲流作用的影響轉為由擴散作用貢獻，以 Fick's Second Law 去描述，但由本文 5.2.2 節可知，滲流—擴散方程式與擴散方程式線型趨勢有所差異，如圖 5-6 所示，隨著試驗時間增加滲流開始顯著時，滲流—擴散方程式的線型會迅速趨於鐘型發展較為飽滿，此時將滲流的影響假設為擴散作用貢獻，以擴散方程式擬合壓力滲透試驗各層氯離子濃度數據，並透過擴散方程式計算得到壓力滲透試驗之等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 。所以， D_{eq} 應有時間效應且兩種方程式線型差異逐漸增大。

本研究將訂定壓力滲透試驗靜水壓力以及試驗時間的範圍，在此範圍內，滲流—擴散方程式線型受到滲流的影響尚未顯著改變，且等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 無時間效應。最後，透過「等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 」與「擴散係數 D 」之間的關係（本文 4.9 節所述），可達簡化分析靜水壓力下氯離子傳輸行為之目的，並建立貯鹽試驗以及壓力滲透試驗之間的關聯性。



5.3.1 試驗時間與靜水壓力對於等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 的影響

滲流－擴散方程式線型變化主要受到「試驗時間」、「靜水壓力」控制，若以本研究試驗條件進行適用性探討，試驗條件如表 5-3 所示。

首先，以本研究靜水壓力為 5 kgf/cm^2 ，加壓時間為 7、21、35 天，0550PC 組別試驗結果討論，進行「等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 」適用性探討，計算得到的滲流速度約為 $3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ，經由擴散方程式計算得到的等效氯離子傳輸係數如表 5-4 所示，為方便分析將等效氯離子傳輸係數假設無時間效應。

將等效氯離子傳輸係數代入擴散方程式中與 0550PC 壓力滲透試驗值以及滲流－擴散方程式進行比較，如圖 5-7 所示，以等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 代入擴散方程式與滲流－擴散方程式線型並無太大差別且 D_{eq} 也與試驗值吻合，相關係數 R^2 分別為 0.992 和 0.996；35 天試驗時間時，可以發現線型趨勢上有較為顯著差異， R^2 為 0.968，但等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 的方程式與試驗值也相當貼合， R^2 為 0.985。加壓時間為 60 天時，兩者對於氯離子分布預測差異極大，如圖 5-7d 所示，假設 60 天滲流－擴散方程式的理論線為實際試驗值，若 D_{eq} 維持常數 $42.79 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 迴歸分析 R^2 僅有 0.630，因此， D_{eq} 為了貼合滲流－擴散方程式數值會增加至 $87.44 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。本文 5.2.2 節中提到滲流的影響隨著試驗時間增加而增加，又 D_{eq} 為考量滲流作用以及擴散作用的係數，推論 D_{eq} 會隨試驗時間增加而增加，但需要更長時間試驗值進行驗證。

限於本研究靜水壓力最高為 5 kgf/cm^2 ，靜水壓力影響滲流速度，因此採取試驗結果中最大的滲流速度 $4.01 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ (055F40) 探討 D_{eq} 的適用性，分別比較 7、21、35 天 D_{eq} 與滲流－擴散方程式的差異，如圖 5-8 所示，可以發現 7 天兩者線型與試驗值差異不大， R^2 分別為 0.992 和 0.995，21 天試驗時間時，假設 21 天滲流擴散方程式線型為實際值， D_{eq} 若假設為常數 R^2 為 0.973，假設 35 天滲流擴散方程式線型為實際值， D_{eq} 若假設為常數 R^2 為 0.879，因而推論隨著試驗時間增加 D_{eq} 假設為常數越不適用，但需更長時間試驗值進行驗證。

055F40 為本研究試驗結果中抵抗氯離子侵入能力最差，考慮本研究養護條件，許多文獻指出飛灰具有晚期發展的特性，若將 055F40 養護足夠後再進行 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗，滲流速度將降低，推論 D_{eq} 於 35 天以內假設為常數可更加適用於描述靜水壓力下氯離子的分布行為，且混凝土水膠比小於本研究者， D_{eq} 於 35 天以內應能假設為常數進行簡化分析氯離子靜水壓力下的傳輸行為。

若取相關係數 R^2 為 0.900 以上視為高度相關，綜合上述推論，加壓時間少於 35 天、靜水壓力小於 5kgf/cm² 以及與本研究相似配比，可將等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 假設為常數。

5.3.2 各配比等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 與對照組擴散係數 D 之關係

本研究靜水壓力為 3 kgf/cm²、5 kgf/cm²，各配比 7 天貯鹽試驗擴散係數 D 與等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 之間的關係，如圖 5-9 所示，可以發現兩者之間呈線性關係，斜率越大表示靜水壓力值越大。相同靜水壓力下，等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 的大小亦能判斷本研究養護條件下，不同配比抵抗氯離子的能力，與擴散係數 D 判斷抵抗氯離子侵入能力的結果相符，當擴散係數 D 變大，等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 也隨之改變。由此推論，能利用以下關係式計算混凝土 D_{eq} ，但尚需更多試驗值進行比較。

$$D_{eq} = 1.85 \times D, \text{ when } P = 5 \text{ kgf/cm}^2, R^2 = 0.971 \dots\dots\dots 5-2$$

$$D_{eq} = 1.32 \times D, \text{ when } P = 3 \text{ kgf/cm}^2, R^2 = 0.990 \dots\dots\dots 5-3$$

表 5-3 本研究試驗條件

試驗參數	內容
水膠比	0.55
爐石取代水泥量	0、40%
飛灰取代水泥量	0、20%、40%
爐灰混合添加 (7:3) 取代水泥量	0、30%
靜水壓力 (kgf/cm ²)	3、5
加壓時間*	7 天
*備註	OPC 部分之加壓時間：7、21、35 天
項目	試驗結果
滲流速度 (10 ⁻⁷ cm/s)	1.33~4.01

表 5-4 各試驗時間壓力滲透試驗等效氯離子傳輸係數 D_{eq}

055OPC 壓力滲透試驗 (5 kgf/cm ²)			
試驗時間 (天)	7	21	35
等效氯離子傳輸係數 D_{eq} (10 ⁻⁸ cm ² /s)	40.28	41.66	46.44
擴散係數 D (10 ⁻⁸ cm ² /s)	24.29	20.03	21.83
滲流速度 (10 ⁻⁷ cm/s)	3.33	2.93	3.02

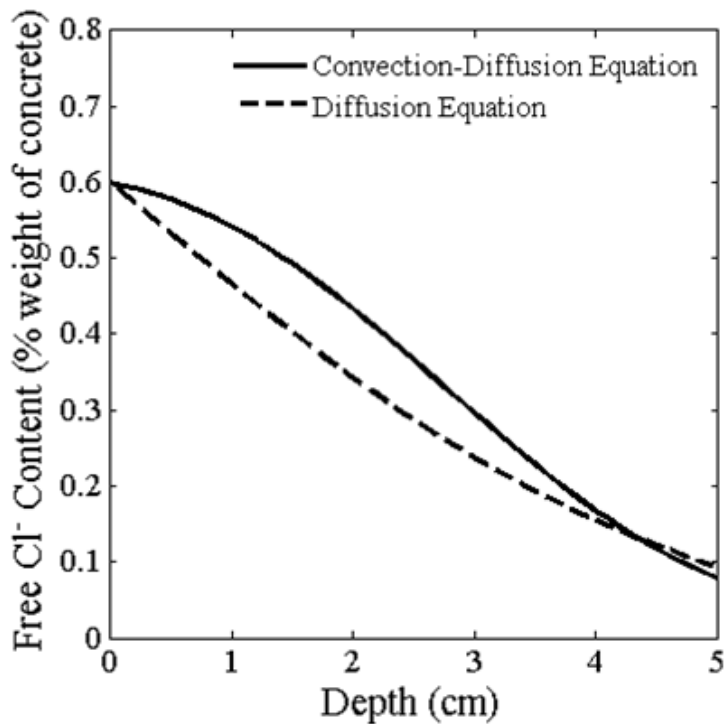
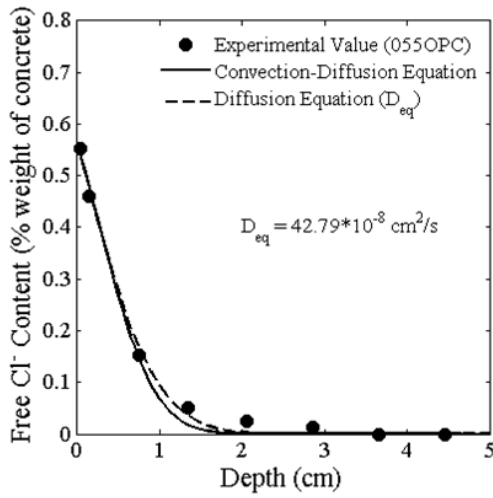
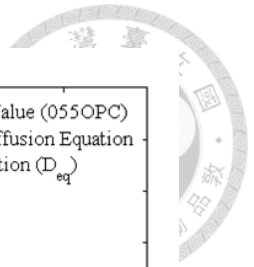
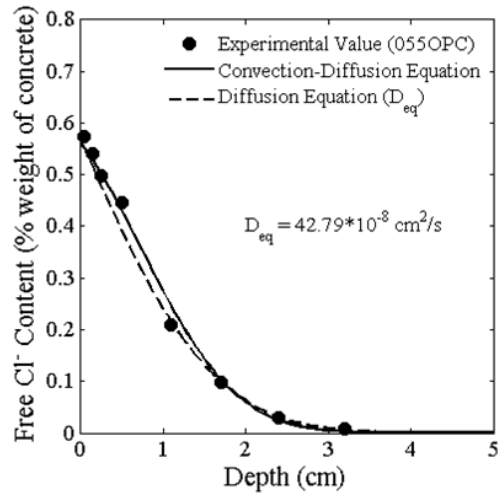


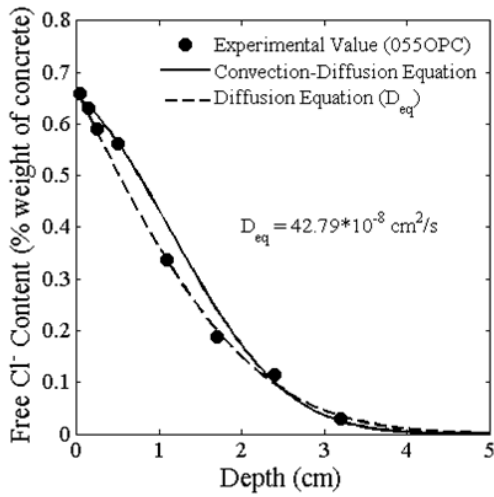
圖 5-6 滲流—擴散方程式與擴散方程式線型差異



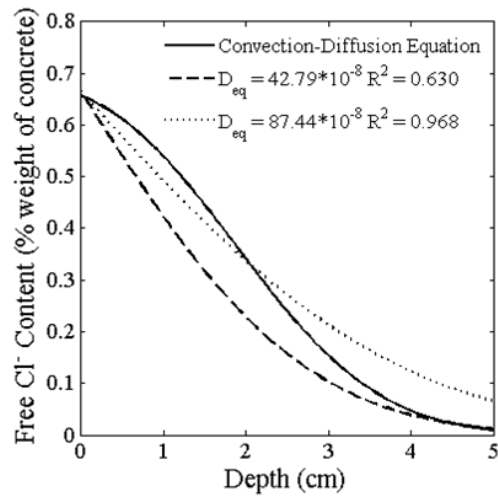
(a) 7 天試驗時間



(b) 21 天試驗時間

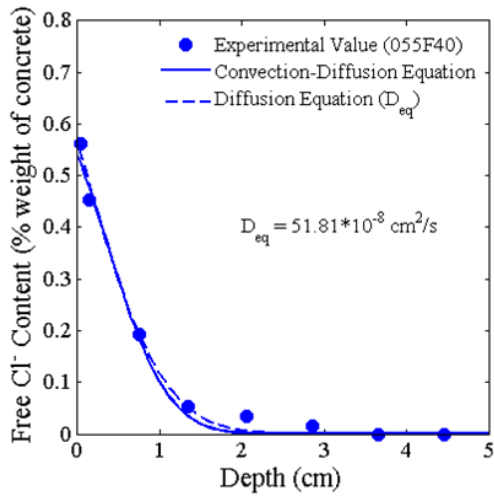
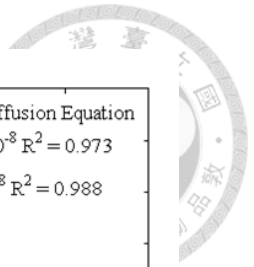


(c) 35 天試驗時間

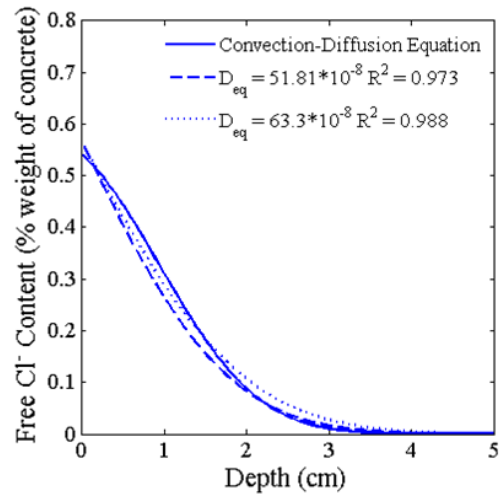


(d) 60 天試驗時間 (預測)

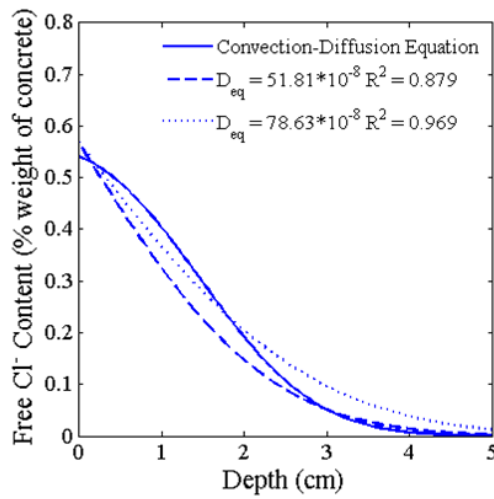
圖 5-7 試驗時間對於等效氯離子傳輸係數之影響 (055OPC)



(a) 7 天試驗時間



(b) 21 天試驗時間 (預測)



(c) 35 天試驗時間 (預測)

圖 5-8 試驗結果中最大滲流速度對於 D_{eq} 適用性 (055F40)

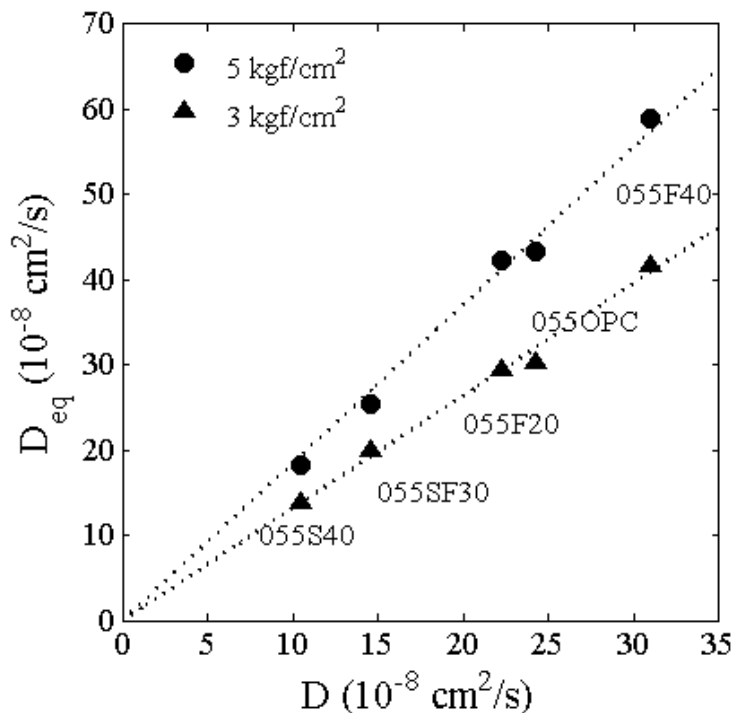


圖 5-9 各配比 D_{eq} 與 7 天貯鹽試驗 D 之關係

5.4 靜水壓力對於比色法氯離子侵入深度之效益

本節以「比色法試驗」判定的氯離子侵入深度做為指標，討論相同比色法侵入深度時，貯鹽試驗與壓力滲透試驗分別所需試驗時間。

5.4.1 7 天壓力滲透試驗比色法氯離子侵入深度對照組所需試驗時間

由表 4-4 可以知道於相同 7 天試驗時間下，各配比壓力滲透試驗與對照組侵入深度的差異，以 055OPC 壓力滲透組別為例，5 kgf/cm² 對於對照組氯離子侵入深度增加了 80%。參考 Lee[72] 試驗結果，發現貯鹽試驗氯離子侵入深度與時間關係，於雙對數座標軸呈線性關係。因此，以 055F20 壓力滲透試驗組別為例，對照組於試驗時間 7 天及貯鹽試驗 60 天氣離子侵入深度分別為 9.0 mm 和 23.6 mm，如表 5-5 所示，雙對數座標下進行線性內插，示意圖如圖 5-10 所示，預測當試驗時間到達 t_p 時，對照組與 7 天壓力滲透試驗比色法氯離子侵入深度一致，各組別預測時間如表 5-6 所示。

達預測時間進行比色法試驗，量測變色深度是否與壓力組別氯離子侵入深度一致，預測結果如表 5-7 所示，誤差在 20% 以內，約 1~2 mm 的差別。

各配比貯鹽試驗預測時間 t_p 並非一致，為受到混凝土水化反應造成的影響，以 055OPC、055S40 組別靜水壓力 5 kgf/cm² 為例，對照組分別需要 28 和 35 天，以水化反應角度解釋，由於 055S40 組別摻入了卜作嵐材料，使得擴散係數時間效應大於 055OPC 且更為緻密，氯離子侵入的速度有效減緩，使得預測 055S40 對照組與 7 天 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗氯離子侵入深度一致時所需時間較長。關於擴散係數時間效應影響氯離子侵入深度可參考 5.5 節中貯鹽試驗氯離子侵入深度模型。

5.4.2 90 天貯鹽試驗侵入深度壓力滲透試驗所需加壓時間 t_s

本研究最終目的為找出壓力滲透試驗等同於 90 天貯鹽試驗所需試驗時間，因此以 055OPC 進行 7、35 天壓力為 5 kgf/cm² 的壓力滲透試驗，探討壓力滲透試驗之氯離子侵入深度隨試驗時間之發展。

由本文 4.3.3 節可知，35 天壓力滲透試驗已超過 90 天貯鹽試驗之侵入深度，如圖 5-11 所示。假設壓力滲透試驗氯離子侵入深度與試驗時間於雙對數座標呈線性關係，預測壓力滲透與 90 天貯鹽試驗氯離子侵入深度一致時所需試驗時間 t_s ，從內插結果 t_s 約為 21 天，如圖 5-12 所示。預測結果如表 5-8 所示，可以發現誤差僅有 4.5%，約 1 mm 的差距。

5.4.3 小結

由預測結果可推論：

- (1) 在雙對數座標下，以貯鹽試驗氯離子侵入深度與試驗時間呈線性關係，計算貯鹽試驗侵入深度預測值，以本研究試驗結果而言，誤差絕對值在 20% 以內。
- (2) 未來進行任意試驗時間壓力滲透試驗，藉由(1)所述線性關係，可預測貯鹽試驗到達相同壓力滲透試驗氯離子侵入深度時所需的試驗時間。
- (3) 由本研究 055OPC 組別試驗結果，以比色法氯離子侵入深度為指標，靜水壓力 5 kgf/cm² 之 21 天壓力滲透試驗作為加速性試驗，與 90 天貯鹽試驗比色法侵

入深度值比較，誤差絕對值為 4.5%。



表 5-5 貯鹽試驗隨試驗時間發展之氯離子侵入深度

貯鹽試驗比色法氯離子侵入深度 (mm)					
試驗時間 (天)	055OPC	試驗時間 (天)	055S40	試驗時間 (天)	055F20
7	10.0	7	6.0	7	9.0
13	13.8	16	9.3	16	14.2
28	16.7	28	11.3	25	16.5
35	19.6	35	12.3	28	18.4
60	21.2	60	15.3	60	23.6
90	26.3	90	17.6	90	24.8
試驗時間 (天)	055F40	試驗時間 (天)	055SF30		
7	12.0	7	8.2		
14	16.2	28	12.3		
21	19.1	35	13.2		
28	21.8	60	17.1		
60	25.2	90	19.2		
90	28.7				

表 5-6 預測貯鹽試驗所需試驗時間

7 天試驗時間比色法氯離子侵入深度 (mm)					
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	055OPC	055S40	055F20	055F40	055SF30
5	18.0	14.5	17.8	19.5	16.2
3	11.5	8.4	13.6	15.2	10.5
0 (對照組)	10.0	6.0	9.0	12.0	8.2
預測對照組所需試驗時間 (天)					
配比 組別	055OPC	055S40	055F20	055F40	055SF30
5 kgf/cm ² 組	28	35	25	21	40
3 kgf/cm ² 組	13	16	15	14	14

表 5-7 貯鹽試驗於預測時間之氯離子侵入深度

對照組於預測時間之氯離子侵入深度 (mm)					
項目 配比	055OPC	055S40	055F20	055F40	055SF30
預測時間	28 天	35 天	25 天	21 天	40 天
對照組	16.7	12.3	16.5	19.1	14.2
目標侵入深度	18.0	14.5	17.8	19.5	16.2
誤差	7%	15%	7%	2%	12%
預測時間	13 天	16 天	15 天	14 天	14 天
對照組	13.8	9.3	14.2	16.2	10.0
目標侵入深度	11.5	8.4	13.6	15.2	10.5
誤差	20%	11%	4%	7%	5%

表 5-8 壓力滲透試驗於預測時間之氯離子侵入深度

壓力滲透試驗於 t _s 時之氯離子侵入深度 (mm)		
項目 試驗方法	壓力滲透試驗	貯鹽試驗
壓力值	5 kgf/cm ²	0 kgf/cm ²
試驗時間	t _s = 21 天	90 天
侵入深度	25.1	26.3
誤差	4.5%	

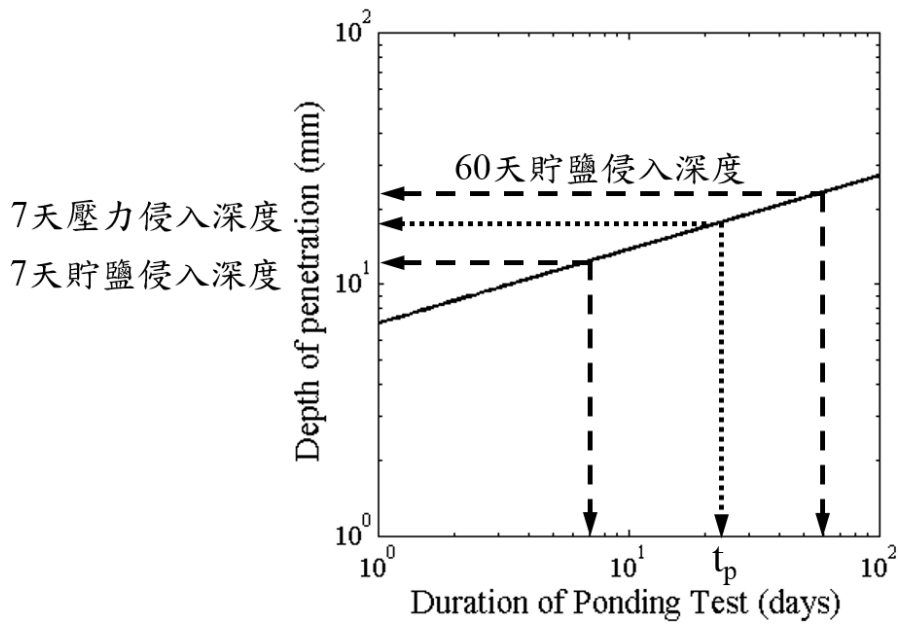
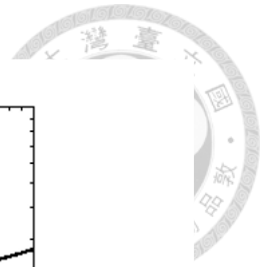


圖 5-10 氯離子侵入深度在雙對數座標下線性內插示意圖

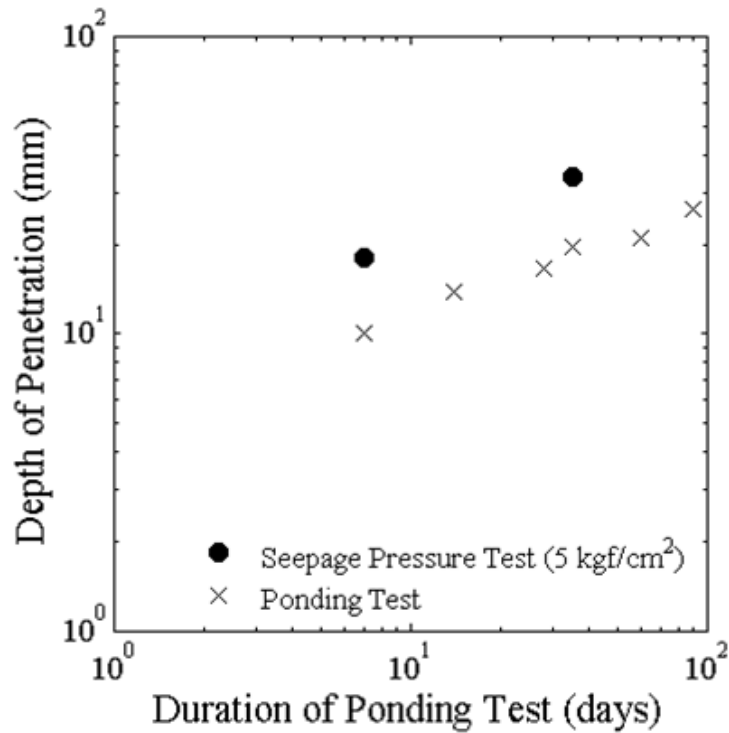


圖 5-11 壓力滲透試驗與貯鹽試驗隨試驗時間之氯離子侵入深度

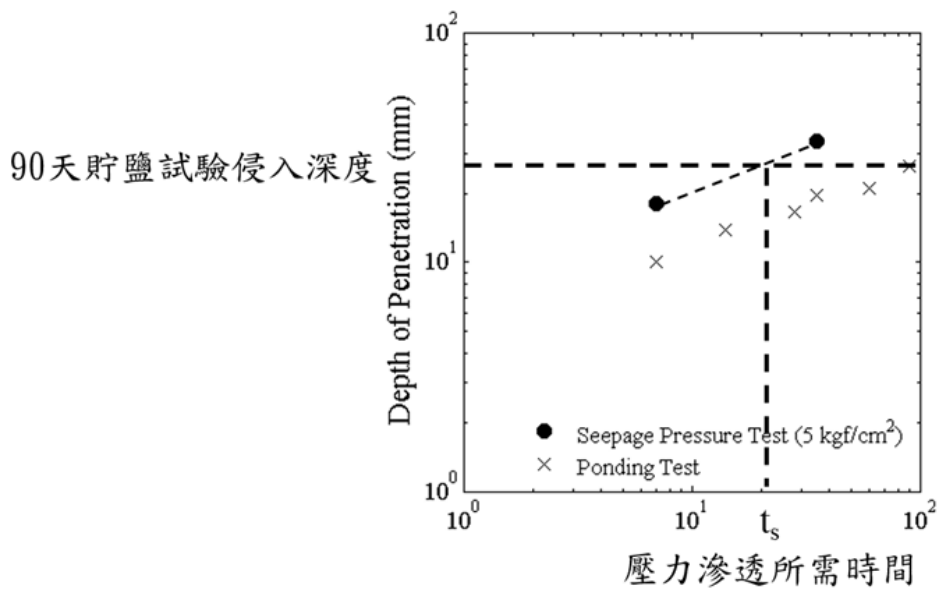


圖 5-12 壓力滲透試驗所需時間


5.5 氯離子侵入深度模型探討

本節將討論氯離子侵入深度模型與比色法試驗值之關係，以下則分述貯鹽試驗跟壓力滲透試驗氯離子侵入深度模型：

5.5.1 模型中氯離子侵入深度定義

透過比色法試驗可以迅速以目視的方式判斷氯離子侵入至混凝土何處，許多文獻指出，一般混凝土變色深度的自由氯離子濃度為 0.02%（混凝土重），但若有卜作嵐材料添加之配比，國內外文獻則無一定的趨勢，表示硝酸銀變色氯離子濃度於各個配比標準不一，並無定量關係。以 055OPC 與 055S40 組別 7 天貯鹽試驗為例，比色法滲透深度分別為 10.0 mm 和 60.0 mm，如表 5-5 所示，但是硝酸銀於不同自由氯離子濃度時變色，可能會誤判爐石混凝土抵抗氯離子侵入的能力。另外，以肉眼觀測比色法變色深度過程中可能產生些許誤差。

因此為避免上述所說狀況，本研究選擇以目標氯離子濃度作為判斷氯離子侵入深度的濃度，代入已知氯離子侵入深度模型中，於相同基準判斷不同配比混凝土抵抗氯離子侵入的能力，並與試驗值比對。參考 2.6 節各國由試驗得到的臨界氯離



子濃度，選擇以氯離子濃度達 0.05% 時做為模型的「氯離子侵入深度」。將擴散係數、滲流速度、表面氯離子濃度以及目標氯離子濃度代入式 2-9 和式 2-14，解出未知數 x 即為氯離子侵入深度 $X_{0.05\%}$ 。表 5-9 至表 5-13 顯示不同配比氯離子侵入深度 $X_{0.05\%}$ 比較結果，可得到與比色法氯離子侵入深度 X_d 同樣趨勢，055S40 與 055SF30 抵抗氯離子能力具有最佳效果，次之 055OPC 和 055F20，最後為 055F40。將比色法氯離子侵入深度 X_d 與目標氯離子濃度(0.05%)侵入深度 $X_{0.05\%}$ 進行比較，相差範圍皆在 20% 以內，約 1~2 mm 的差異，與文獻[66]試驗結果相符。

表 5-14 至表 5-18 表示壓力滲透試驗組別比色法侵入深度 X_d 與目標氯離子濃度 (0.05%) 侵入深度 $X_{0.05\%}$ 差異，發現壓力滲透組別差異非常大， $X_{0.05\%}$ 嚴重低估壓力對於氯離子侵入深度的貢獻，尤其當靜水壓力越大差異越明顯，3 kgf/cm² 組別約有 3~4 mm 的差別、5 kgf/cm² 組別約有 6.4~7.7mm 的差別。唯一造成這項誤差的來源在於滲流—擴散方程式迴歸壓力滲透試驗各深度氯離子濃度時可能有點偏差，由本文 4.6 節可知，各配比以滲流—擴散方程式迴歸結果當中相關係數 R^2 皆落在 0.965~0.999 之間。以 055S40 靜水壓力為 5 kgf/cm² 為例，如圖 5-13 所示，可以發現方程式在圖中前三個數據點緊緊貼合，但在深層處方程式偏離數據點，而相關係數計算的比重，於前三個點所佔比例最大。

本研究推論造成侵入深度有低估的情況，原因可能為靜水壓力的施加，氯離子可能僅於混凝土特定深度產生滲流，在特定深度內也就是耦合區內，氯離子傳輸機制為擴散+滲流作用，若超出特定深度（耦合區深度 $x_{coupling}$ ），氯離子可能僅由擴散作用進行傳輸，示意圖如圖 5-14 所示。滲流—擴散方程式（式 2-14），於描述壓力滲透試驗氯離子分布狀況時，尚未討論氯離子傳輸行為是否有耦合區及擴散區的區分，本研究限於實驗數據不足以及無文獻針對此現象進行討論，因此無法進行驗證。



5.5.2 貯鹽試驗氯離子侵入深度模型

從 5.4 節當中可以知道，貯鹽試驗氯離子侵入深度對時間作圖，在雙對數座標底下呈線性關係。由於貯鹽試驗之控制方程式為由 Fick's Second Law 解得的擴散方程式，將此擴散方程式 (式 5-4)，進行移項處理得到式 5-5，氯離子濃度 C 代入目標氯離子濃度 C_t 也就是 0.05%，由本文 4.5.2 節所述，考量擴散係數時間效應將式 5-5 中的擴散係數 D 以式 5-6 代入，但式 5-5 與式 5-6 中計算時間 t 的方式不一樣，前者為「試驗時間」、後者為「混凝土齡期」，因此將式 5-6 中的 t 改寫成「28+t」，28 天為本研究混凝土養護時間。將式 5-6 代入式 5-5 中得到式 5-7，表面氯離子濃度 C_s 則是第四章試驗結果當中各個組別所得之表面氯離子濃度，由於其數值隨齡期變化幅度並不大，且由參數分析討論 (5.2.2 節) 當中可以知道表面氯離子的變動對於深度之敏感性並不高，將表面氯離子濃度 C_s 當作常數代入。最後，本研究參考 Life-365 當中的經驗式計算衰減常數 m 值，如式 5-8。

符合本研究貯鹽試驗邊界條件之擴散方程式：

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \dots\dots\dots 5-4$$

經移項處理，

$$x = 2\sqrt{Dt} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - C/C_s \right) \dots\dots\dots 5-5$$

隨混凝土齡期發展之擴散係數模型，

$$D = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{28+t} \right)^m \dots\dots\dots 5-6$$

將 5-6 式代入得式 5-7，貯鹽試驗隨試驗時間發展之氯離子侵入深度模型，

$$x = 2\sqrt{D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{28+t} \right)^m t} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - C/C_s \right) \dots\dots\dots 5-7$$

衰減常數 m 值為參考 Life-365 中的經驗計算式，

$$m = 0.2 + 0.4 \left(\frac{FA\%}{50} + \frac{SG\%}{70} \right) \dots\dots\dots 5-8$$

上述各式當中，



x ：貯鹽試驗隨試驗時間發展之氯離子侵入深度

D_{ref} ：參考齡期擴散係數

t ：試驗時間

C ：目標氯離子濃度 0.05%

C_s ：貯鹽試驗表面氯離子濃度

將貯鹽試驗氯離子侵入深度模型（式 5-7）代入一些參數並以雙對數座標表示如圖 5-15 所示，擴散係數大小影響著式 5-7 曲線的高低，而衰減常數 m 值的大小影響式 5-7 曲線彎折的程度， m 值越大彎折程度越大，擴散係數隨混凝土齡期發展下降的越迅速抵抗氯離子侵入的能力成長越快。由此可知式 5-7 的趨勢在雙對數座標下並非呈線性，似乎與 5.4 節當中提到貯鹽試驗氯離子侵入深度與試驗時間的關係在雙對數座標底下呈線性相互矛盾，但若是將圖 5-15a 橫軸的試驗時間縮短為 0 至 100 天能夠發現線型在短試驗時間內，以彎折程度最大（ $m = 0.6$ ，本研究衰減常數最大值）的曲線與線性斜直線在起點（試驗 7 天）與終點（試驗 100 天）相比，差異約 2~3 mm，如圖 5-15b 所示。

將 7 天試驗時間貯鹽試驗各項數據代入式 5-7，圖 5-16 顯示貯鹽試驗氯離子侵入深度模型與比色法試驗值比較結果，可以發現模型吻合試驗值的趨勢， R^2 為 0.859~0.976。若未來得到較短試驗時間如 30 天貯鹽試驗之氯離子侵入深度、擴散係數、表面氯離子濃度等參數，接著透過此模型可以計算 90 天貯鹽試驗之氯離子侵入深度預測值或更長試驗時間預測值。



5.5.3 壓力滲透試驗氯離子侵入深度模型

由於滲流－擴散方程式無法像 5.5.1 節所述，以移項方式找出氯離子侵入深度與時間之關係式，因此本研究利用輔助程式，將擴散係數、滲流速度、表面氯離子濃度等參數假設為常數，輸入各個試驗時間解出對應的「氯離子侵入深度」，如圖 5-17a 所示，可以發現氯離子侵入深度模擬線隨著試驗時間增加有慢慢向上彎的趨勢，滲流速度越大彎折的程度越明顯，符合 5.2.2 節所述滲流速度對於氯離子傳輸的影響隨著試驗時間增加而增加。本文 5.4 節當中假設壓力滲透試驗的氯離子侵入深度與試驗時間呈線性關係會產生矛盾，但若是將試驗時間縮短至 35 天以內，如圖 5-17b 所示，可以發現其實在雙對數座標下，進行線性內插趨勢上並不會產生太大誤差，且從預測 21 天壓力滲透試驗相當於 90 天貯鹽試驗比色法氯離子侵入深度試驗結果中（如 5.4 節）即能發現誤差約 4.5%。由此推論，若在較短的試驗時間範圍以內，如 35 天以內，在雙對數座標下，能以線性內插的方式計算壓力滲透試驗氯離子侵入深度的預測值。

將滲流－擴散方程式代入本研究 055OPC 試驗參數一步步解出的侵入深度與試驗時間模擬線與比色法試驗值進行比較，如圖 5-18a 所示，能夠發現模擬線皆低估試驗值，相差約 5.5~7.1 mm，可能原因如 5.5.1 節所述，但線型趨勢上接近於試驗值的趨勢。

將滲流－擴散方程式分別輸入不同試驗時間，慢慢解出對應的氯離子侵入深度，在使用上極為不方便。因此，透過本文 5.3 節對於等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 的適用性討論可知，在試驗時間 35 天內、靜水壓力為 5 kgf/cm^2 以內， D_{eq} 能達相關係數 R^2 為 0.900 以上。由 4.9 節中計算得到的 055OPC 等效氯離子傳輸係數 D_{eq} ，代入擴散方程式中，假設混凝土材料性質、等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 於試驗時間 35 天以內無時間效應，將式 5-5 改寫為式 5-9，與 055OPC 壓力滲透試驗比色法試驗值比較，如圖 5-18b 所示，可以發現同樣有低估的現象發生，相差約 4.1~5.7 mm。但線型趨勢上與試驗值趨勢接近且分析以及預測壓力滲透試驗氯離子侵入深度的



發展較為方便。

$$x = 2\sqrt{D_{eq}t} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - C/C_s\right) \dots\dots\dots 5-9$$

式中，

x：隨試驗時間發展之壓力滲透試驗氯離子侵入深度

D_{eq} ：等效氯離子傳輸係數

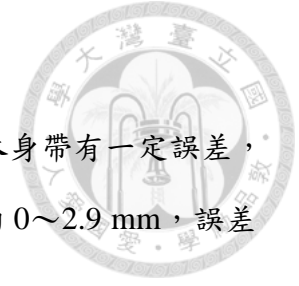
C：目標氯離子濃度 0.05%

C_s ：壓力滲透試驗表面氯離子濃度

5.5.4 小結

根據 5.4.2 節中以比色法氯離子侵入深度為指標，提出以 21 天靜水壓力為 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗做為加速性試驗，與 90 天貯鹽試驗比色法試驗值約 4.5% 之誤差、相差約 1 mm。以兩種試驗之氯離子侵入深度模型進行比較，模型中（式 5-5 和式 5-9）參數皆代入 7 天試驗時間的數據，計算貯鹽試驗以及壓力滲透試驗分別在 90 天以及 21 天時的氯離子侵入深度 $X_{0.05\%}$ ，探討各個配比是否符合上述結論，其中壓力滲透試驗以 D_{eq} 進行討論。

表 5-19 顯示 $C_t = 0.05\%$ 做為兩試驗對於「氯離子侵入深度」的定義，驗證各個配比 21 天 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗與 90 天貯鹽試驗之氯離子侵入深度差異，結果發現兩者侵入深度差異約 4.1~7.5 mm、換算百分比為 15%~28%。尤其 055OPC 誤差達 26%，而比色法侵入深度試驗值做為指標時（5.4.2 節）誤差僅有 4.5%，兩者差距稍大，造成原因如下所述：



- 貯鹽試驗氯離子侵入深度模型：

- (1) 由於以 7 天試驗數據預測 90 天貯鹽試驗侵入深度，模型本身帶有一定誤差，與比色法侵入深度比較，如表 5-20 所示，可以發現相差約 0~2.9 mm，誤差絕對值 0~11%。

- 壓力滲透試驗氯離子侵入深度模型：

- (1) 由 5.5.1 節當中所述，以 7 天 055OPC 壓力滲透試驗數據代入不管由滲流—擴散方程式亦或是 D_{eq} 侵入深度簡化模型中，計算較長試驗時間氯離子侵入深度顯示(圖 5-18)，模型本身皆低估靜水壓力對於氯離子侵入深度的貢獻，約 4.1 mm~5.7 mm 的差距。各配比 7 天 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗試驗結果中低估約 6.4~7.7 mm、相差約 49~91%，如表 5-14 至表 5-18 所示。且由氯離子濃度滴定值觀察(圖 4-9 和圖 4-16 所示)滲流—擴散方程式和 D_{eq} 迴歸分析結果，皆顯示方程式無法貼合最後幾層濃度，至以低估氯離子侵入深度。

本研究推論誤差最大來源在於壓力滲透試驗氯離子侵入深度模型過於低估靜水壓力對於氯離子侵入深度的效益。若以模型(式 5-5 和式 5-9)驗證 5.4.2 節中所述，21 天 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗做為加速性試驗等同於 90 天貯鹽試驗之氯離子侵入深度，會產生 15%~28% 的誤差。

若不討論低估的現象，仍以 21 天 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗做為加速性試驗，利用 D_{eq} (5.3.2 節) 和模型(式 5-9) 計算出各個配比氯離子侵入深度預測值，亦能夠區分不同配比對於抵抗氯離子的能力，如表 5-19 所示。本研究試驗條件為養護 28 天後開始進行試驗，以 90 天貯鹽試驗擴散係數(表 4-22) 以及比色法侵入深度(表 5-5) 判定混凝土耐久性，055S40>055SF30>055F20>055OPC>055F40；以 21 天 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗做為加速性試驗，觀察氯離子侵入深度預測值(表 5-19) 亦有相同趨勢。

表 5-9 055OPC 貯鹽試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較

055OPC 貯鹽試驗			
試驗時間 (天)	X_d (比色法) (mm)	$X_{0.05\%}$ (迴歸公式) (mm)	相差 (%)
7	10.0	9.10	10
13	13.8	13.4	3
28	16.7	16.5	1
35	19.6	19.4	1
60	21.2	24.8	15
90	26.3	25.4	4

表 5-10 055S40 貯鹽試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較

055S40 貯鹽試驗			
試驗時間 (天)	X_d (比色法) (mm)	$X_{0.05\%}$ (迴歸公式) (mm)	相差 (%)
7	6.0	6.2	3
16	9.3	8.0	16
28	11.3	10.6	10
35	12.3	10.0	23
60	15.3	14.2	8
90	17.6	15.3	15

表 5-11 055F20 貯鹽試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較

055F20 貯鹽試驗			
試驗時間 (天)	X_d (比色法) (mm)	$X_{0.05\%}$ (迴歸公式) (mm)	相差 (%)
7	9.0	8.6	5
15	14.2	12.8	11
25	16.5	14.4	15
28	18.4	18.2	1
60	23.6	21.6	9
90	24.8	25.7	4

表 5-12 055F40 貯鹽試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較

055F40 貯鹽試驗			
試驗時間 (天)	X_d (比色法) (mm)	$X_{0.05\%}$ (迴歸公式) (mm)	相差 (%)
7	12.0	10.6	13
14	16.2	19.0	9
21	19.1	17.4	10
28	21.8	18.3	19
60	25.2	26.2	4
90	28.7	30.4	12

表 5-13 055SF30 貯鹽試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較

055SF30 貯鹽試驗			
試驗時間 (天)	X_d (比色法) (mm)	$X_{0.05\%}$ (迴歸公式) (mm)	相差 (%)
7	8.2	6.9	19
28	12.3	12.5	2
35	13.2	13.3	1
60	17.1	16.5	4
90	19.2	19.4	1

表 5-14 055OPC 壓力滲透試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較

055OPC 貯鹽試驗壓力滲透試驗與對照組			
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	X_d (比色法) (mm)	$X_{0.05\%}$ (迴歸公式) (mm)	相差 (%)
5	18	10.9	65
3	11.5	9.7	19
0 (對照組)	10.0	9.1	10

表 5-15 055S40 壓力滲透試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較

055S40 貯鹽試驗壓力滲透試驗與對照組			
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	X_d (比色法) (mm)	$X_{0.05\%}$ (迴歸公式) (mm)	相差 (%)
5	14.0	7.5	87
3	8.4	6.7	25
0 (對照組)	6.0	6.2	3

表 5-16 055F20 壓力滲透試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較

055F20 貯鹽試驗壓力滲透試驗與對照組			
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	X_d (比色法) (mm)	$X_{0.05\%}$ (迴歸公式) (mm)	相差 (%)
5	17.4	10.6	64
3	12.5	9.2	36
0 (對照組)	9.0	8.6	5

表 5-17 055F40 壓力滲透試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較

055F40 壓力滲透試驗與對照組			
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	X_d (比色法) (mm)	$X_{0.05\%}$ (迴歸公式) (mm)	相差 (%)
5	19.5	13.1	49
3	15.2	11.9	28
0 (對照組)	12.0	10.6	13

表 5-18 055SF30 壓力滲透試驗 X_d 與 $X_{0.05\%}$ 比較

055SF30 壓力滲透試驗與對照組			
靜水壓力值 (kgf/cm ²)	X_d (比色法) (mm)	$X_{0.05\%}$ (迴歸公式) (mm)	相差 (%)
5	16.2	8.5	91
3	10.5	7.8	35
0 (對照組)	8.2	6.9	19

表 5-19 21 天 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗與 90 天貯鹽試驗比較

氯離子侵入深度 (mm)						
配比		055OPC	055S40	055F20	055F40	055SF30
貯鹽試驗 X_{90d}	$C_t = 0.05\%$	90 天試驗時間				
		29.2	17.9	27.2	28.7	20.9
壓力滲透試驗 (D_{eq}) X_{21d}	$C_t = 0.05\%$	21 天試驗時間				
		21.7	13.8	19.7	24.6	16.5
差異 (mm)		7.5	4.1	7.5	4.1	4.4
誤差 (% , 差異 / X_{90d})		26%	23%	28%	15%	21%

表 5-20 貯鹽試驗侵入深度模型與比色法試驗值比較

90 天試驗時間貯鹽試驗氯離子侵入深度 (mm)						
配比		055OPC	055S40	055F20	055F40	055SF30
貯鹽試驗 X_{90d}	比色法 X_d	比色法氯離子侵入深度試驗值				
	比色法 X_d	26.3	17.6	24.8	28.7	19.2
貯鹽試驗 X_{90d}	侵入深度模 型 $X_{0.05\%}$	氯離子侵入深度計算值				
	侵入深度模 型 $X_{0.05\%}$	29.2	17.9	27.2	28.7	20.9
差異值 (mm)		2.9	0.3	2.4	0	1.7
誤差 (% , 差異 / X_d)		11%	2%	10%	0%	9%

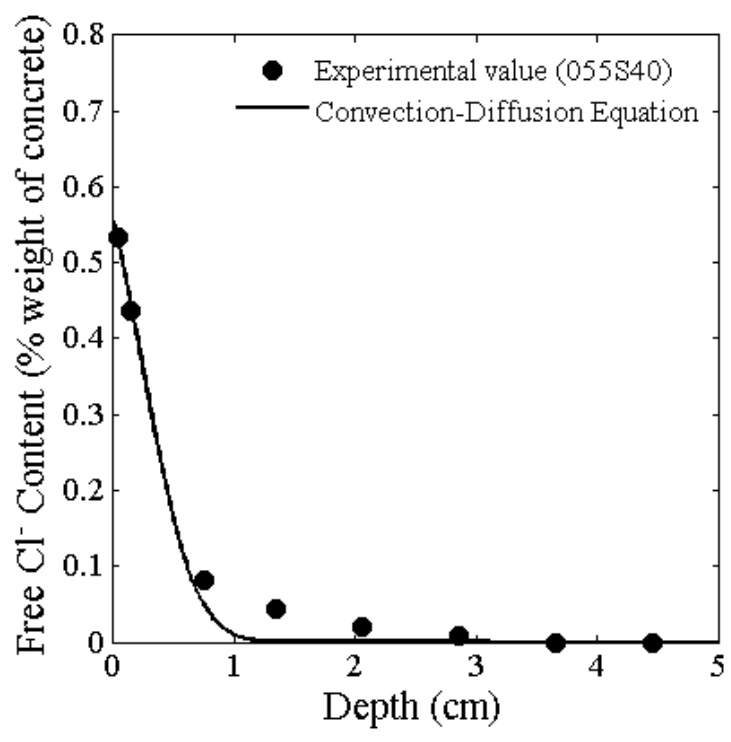


圖 5-13 滲流擴散方程式與試驗值差異 (055S40)

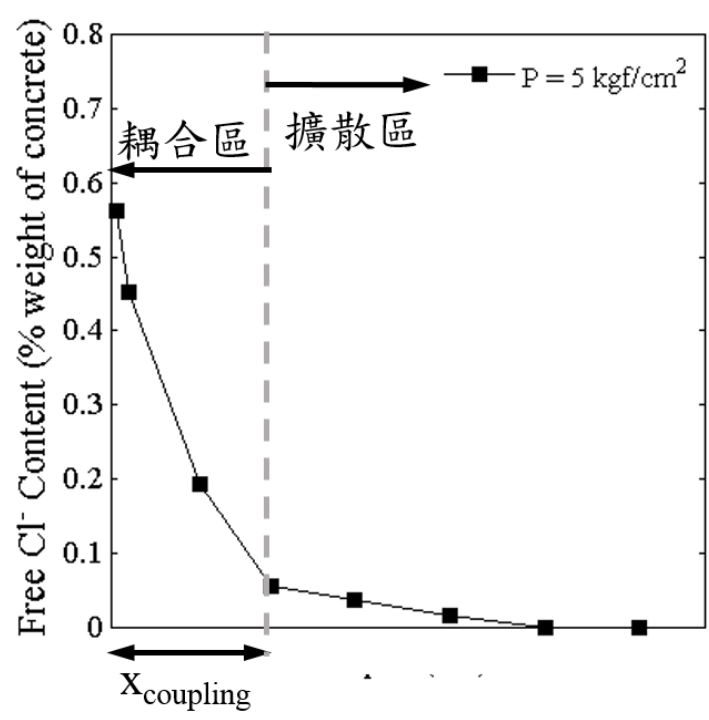
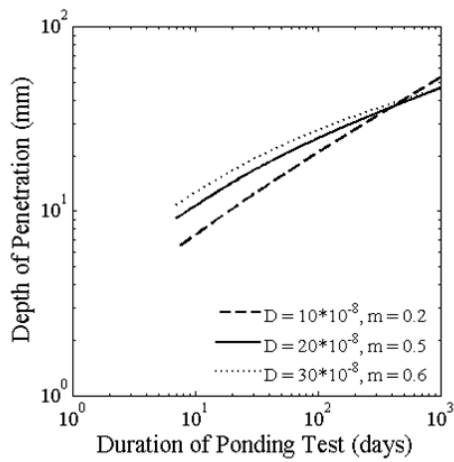
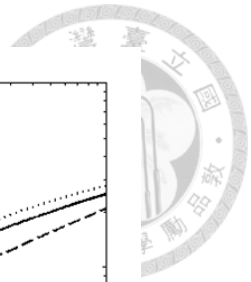
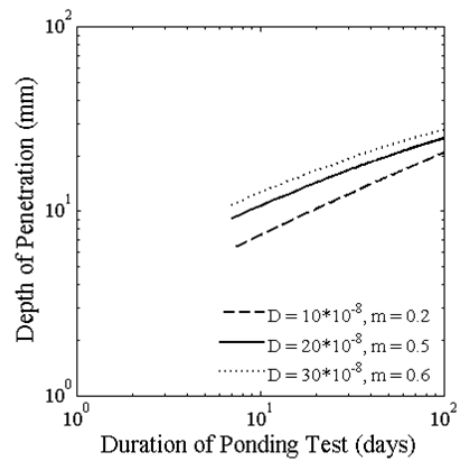


圖 5-14 耦合區擴散區示意圖

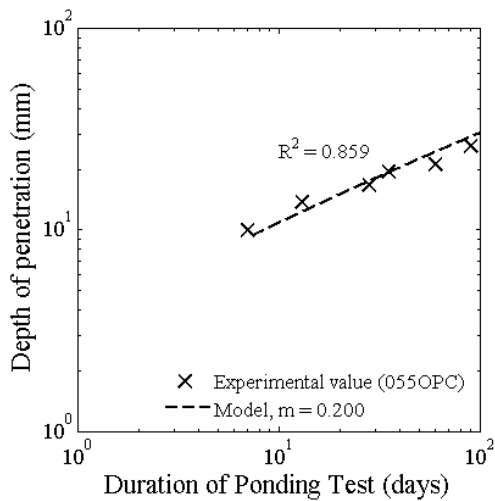


(a)

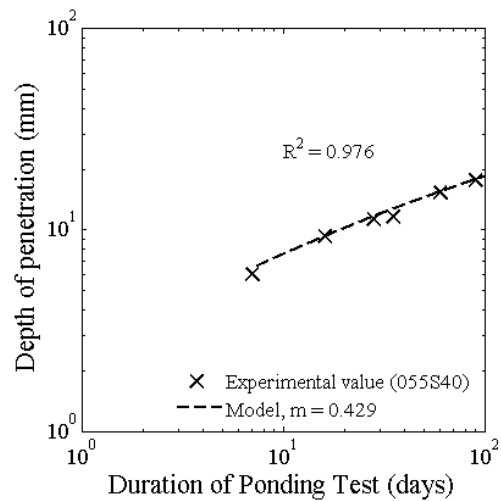


(b)

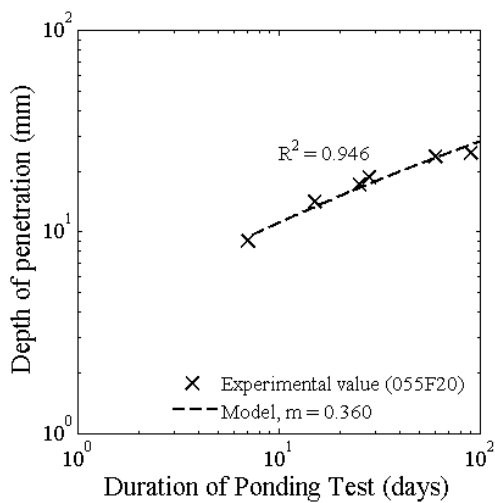
圖 5-15 貯鹽試驗隨試驗時間之氯離子侵入深度模擬線



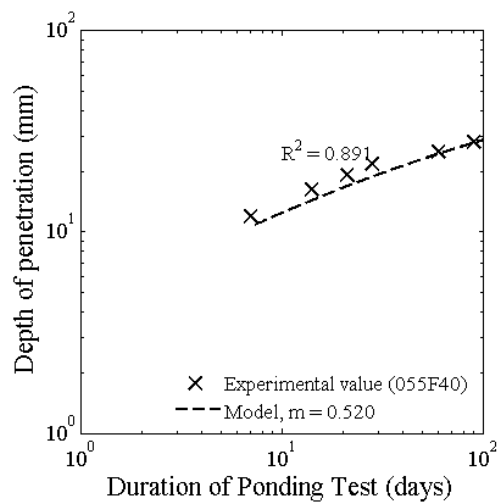
(a) 055OPC



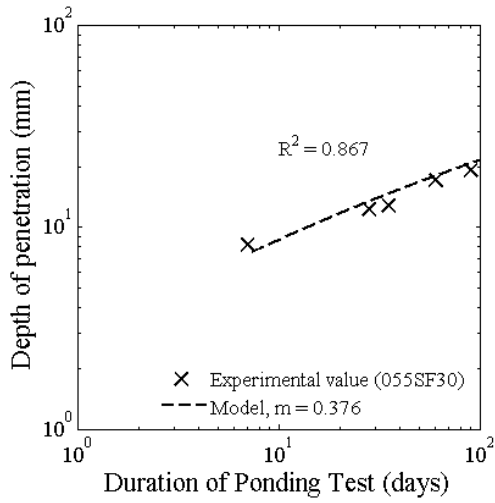
(b) 055S40



(c) 055F20

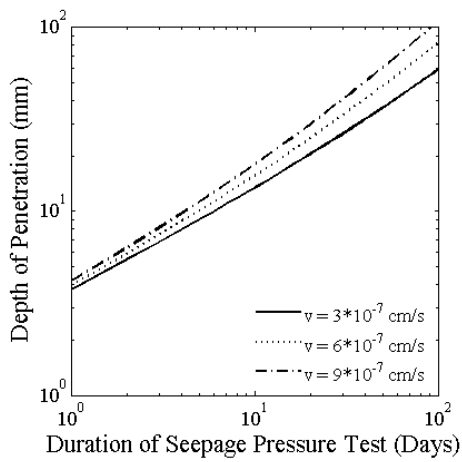


(d) 055F40

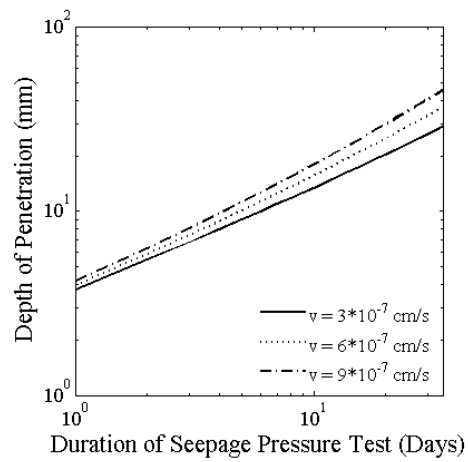


(e) 055SF30

圖 5-16 各配比貯鹽試驗氯離子侵入深度模型與試驗值比較

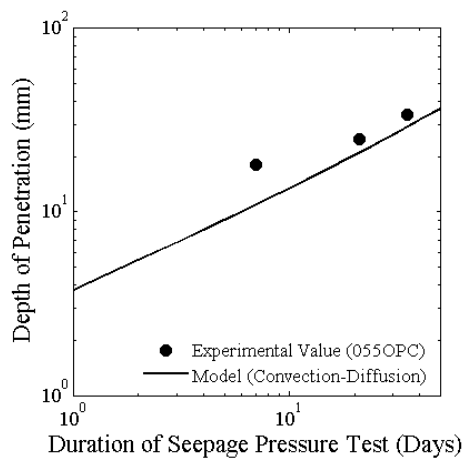


(a)

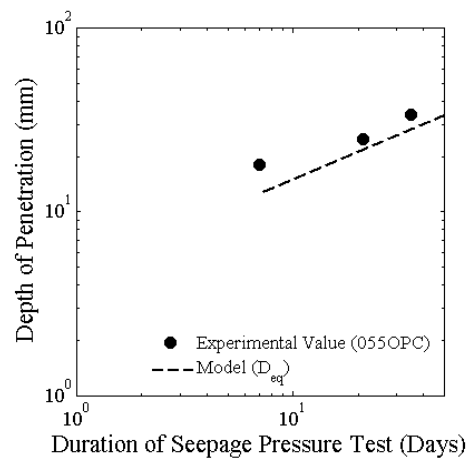


(b)

圖 5-17 靜水壓力下隨試驗時間之氯離子侵入深度模擬線



(a) 滲流—擴散方程式



(b)

圖 5-18 055OPC 壓力滲透試驗氯離子侵入深度與模型比較

5.6 氯離子濃度累積速率

由本文 4.8 節及 5.2 節所述，靜水壓力產生滲流速度，其能使混凝土各深度氯離子濃度迅速增長，如圖 4-14 和圖 4-15 所示。本節將以試驗結果討論靜水壓力對於氯離子濃度累積的效益，並與 90 天貯鹽試驗做比較。

5.6.1 靜水壓力對於濃度累積之效益

由 5.4.2 節當中所述，以「比色法氯離子侵入深度」做為指標，055OPC 組別 21 天 5 kgf/cm^2 壓力滲透試驗做為加速性試驗取代 90 天貯鹽試驗，誤差約 4.5%、相差 1 mm。比較 21 天壓力滲透試驗與 90 天貯鹽試驗各層氯離子濃度差異，如圖 5-19 所示。可以發現兩者氯離子濃度分布情形以及方程式線型幾乎重合， R^2 為 0.982。因此推論除了比色法氯離子侵入深度相近外，氯離子濃度分布情形亦相似。

從 055OPC 試驗組別中，透過 7 天擴散係數 D 與等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 關係，並將 D_{eq} 假設為常數無時間效應，可描述 35 天試驗時間以內靜水壓力為 5 kgf/cm^2 以下的氯離子傳輸行為（如圖 5-7 所示）。由 5.3.2 節所述， D_{eq} 隨著不同配比之不同擴散係數變化，且與擴散係數 D 呈線性關係，表示 D_{eq} 在一定條件下能判斷混凝土耐久性，推論其餘配比能以此基礎，預測 35 天試驗時間以內靜水壓力 5 kgf/cm^2 以下的氯離子分布情況。



以 5.3 節所述等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 預測各配比 21 天壓力滲透試驗氯離子分布情形，並與 90 天貯鹽試驗氯離子濃度分布進行比較，假設等效氯離子 D_{eq} 為常數，因此將 7 天試驗數據(表 4-28)代入式 5-10，表面氯離子濃度則根據 055OPC 試驗結果，假設 21 天壓力滲透表面氯離子濃度等同於 90 天貯鹽試驗表面氯離子濃度，因此氯離子分布影響因子僅剩等效氯離子傳輸係數 D_{eq} ，氯離子濃度分布預測線如圖 5-20 所示。從圖中發現 21 天壓力滲透氯離子分布預測線與 90 天貯鹽試驗氯離子濃度試驗值幾乎重合。以 21 天 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗做為加速性試驗取代 90 天貯鹽試驗，從預測線的結果來說是可行的，若與 90 天貯鹽試驗試驗值比較，21 天預測線相關係數 R^2 達 0.969~0.999，但需其餘配比進行 21 天 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗進行驗證。

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{eq}t}} \right) \right] \dots\dots\dots 5-10$$

5.6.2 靜水壓力對於特定深度氯離子濃度累積之效益

本研究以特定深度為 2 cm 時，探討氯離子濃度累積至 0.05%、0.1%、0.2% (Weight of Concrete) 所需的試驗時間，特定深度及氯離子濃度數值大小為參考本研究群針對混凝土臨界氯離子濃度的研究中混凝土試體保護層皆為 2 cm、臨界氯離子濃度約略在 0.05~0.2% (Weight of Concrete) 左右。

將式 5-11 和式 5-12 中的參數代入本研究 055OPC 組別試驗數據 ($D_{ref} = 24.29 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $v = 3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 、 $t_{ref} = 35 \text{ 天}$)，觀察線型趨勢，氯離子濃度對試驗時間作圖，如圖 5-21 所示，模型的斜率即是濃度累積速率，壓力滲透試驗斜率明顯大於貯鹽試驗，氯離子濃度累積最後會趨近於表面氯離子濃度。接著將 055OPC 組別 5 kgf/cm² 壓力滲透與貯鹽試驗於深度 $x = 2$ 公分處隨試驗時間的氯離子濃度，與模型進行比較，如圖 5-22 所示，可以發現有些試驗值與模型有所偏差，但線型整體趨勢來看與試驗值一致。因此，可利用此方式進行預測特定深度下試驗時間較長時的氯離子濃度。



以 055OPC 組別氯離子濃度累積速率的模型討論，濃度累積至 0.05%、0.1%、0.2% (Weight of Concrete)，壓力滲透試驗與貯鹽試驗分別所需的試驗時間預測值如表 5-21 所示。

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \dots\dots\dots 5-11$$

$$C(x, t) = \frac{C_s}{2} \left[e^{vx/D} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x+vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \dots\dots\dots 5-12$$

$$D = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{28+t} \right)^m \dots\dots\dots 5-13$$

5.6.3 小結

從本節分析結果中可推論：

- (1) 以「氯離子濃度累積速率」為指標，靜水壓力 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗做為加速性試驗，055OPC 組別試驗結果指出，21 天加壓時間與 90 天貯鹽試驗氯離子濃度值，若以 90 天貯鹽試驗為目標值，21 天加壓時間氯離子濃度值 R² 達 0.982。
- (2) 本研究其餘配比若以「氯離子濃度累積速率」做為指標，以 21 天 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗做為加速性試驗取代 90 天貯鹽試驗，雖壓力滲透試驗氯離子分佈預測線與 90 天貯鹽試驗試驗值相關係數 R² 達 0.969~0.999，但仍需試驗值進行比較。
- (3) 本研究試驗條件為水養護 28 天後進行試驗，對於一般卜作嵐材料混凝土，水化反應並不完全，因而推論若以短試驗時間之加速試驗判斷混凝土耐久性與 90 天貯鹽試驗判斷的結果應會有誤差產生。
- (4) 藉由氯離子濃度累積速率模型比對試驗值結果，相關係數 R² 為 0.604~0.901，藉由此模型能計算在各個試驗時間時，特定深度的氯離子濃度預測值。若未來



需以貯鹽試驗或壓力滲透試驗探討臨界氯離子濃度，即能預測鋼筋周圍的氯離子濃度，若達到可能會發生腐蝕的氯離子濃度值，可密切監測腐蝕電流值的變化。

表 5-21 壓力滲透試驗與貯鹽試驗到達目標濃度所需試驗時間 (055OPC)

深度 2 cm 處氯離子濃度累積至目標濃度所需試驗時間 (預測值)		
目標濃度	貯鹽試驗	壓力滲透試驗
0.05%	37 天	20 天
0.1%	64 天	26 天
0.2%	156 天	39 天

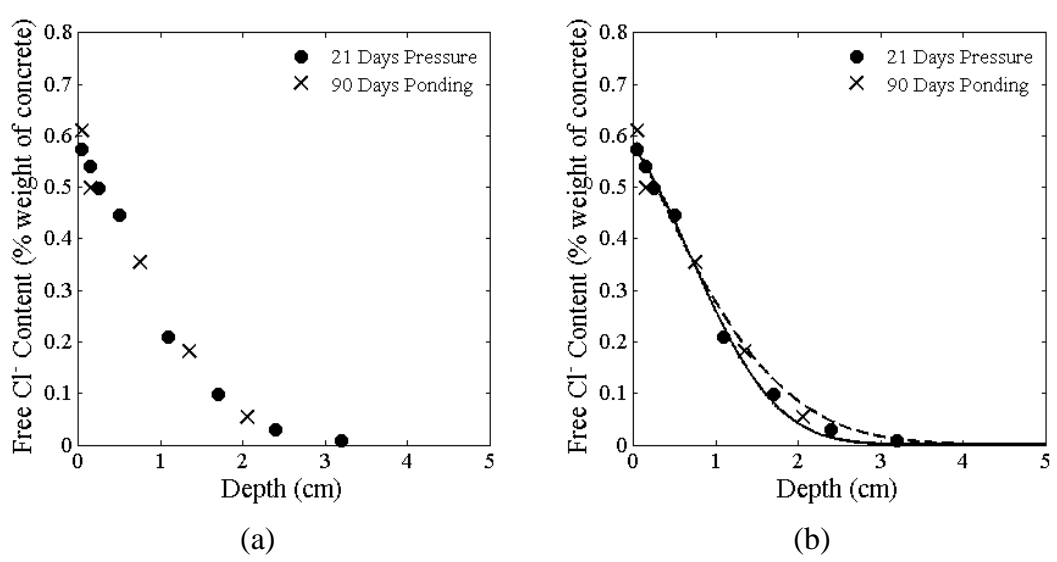
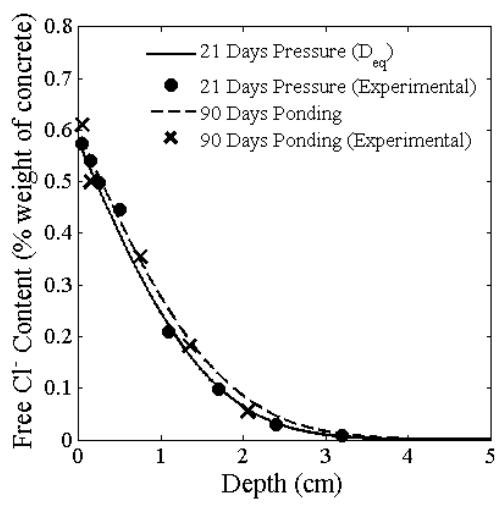
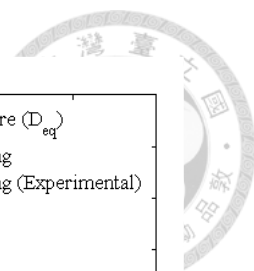
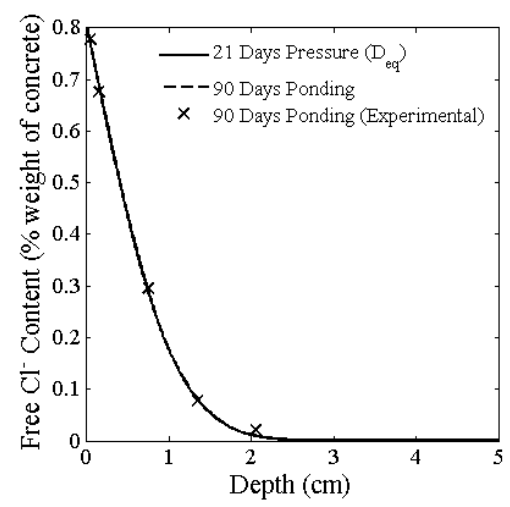


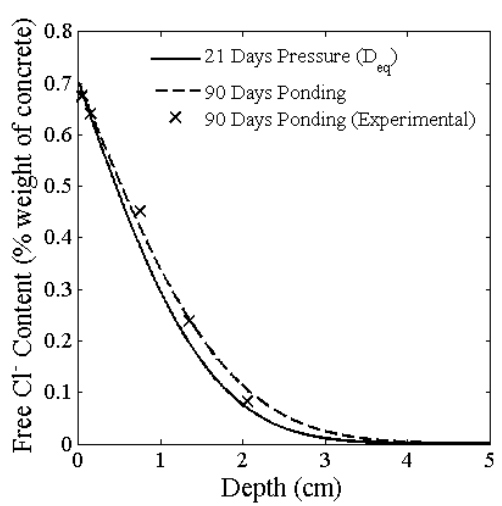
圖 5-19 055OPC 21 天壓力滲透試驗與 90 天貯鹽試驗氯離子濃度比較



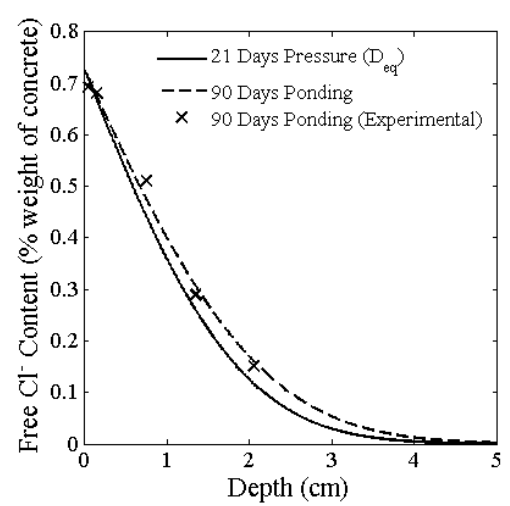
(a) 055OPC



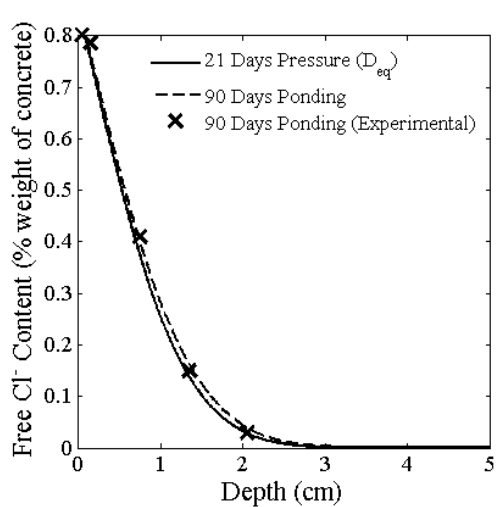
(b) 055S40



(c) 055F20

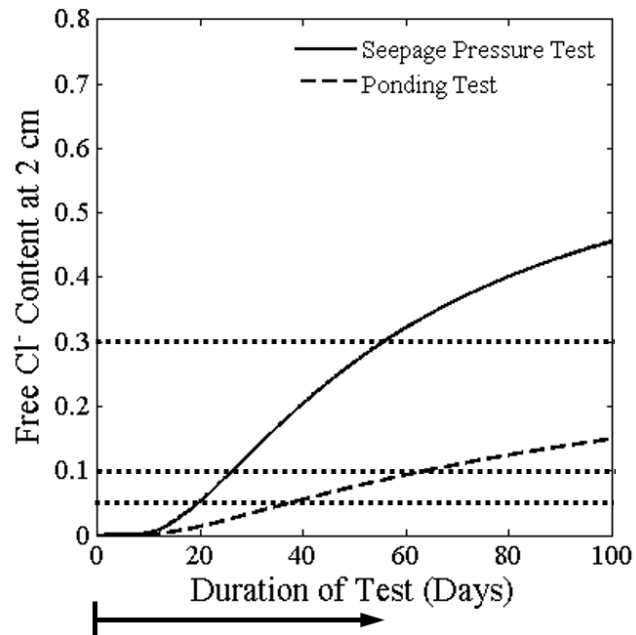


(d) 055F40



(e) 055SF30

圖 5-20 各配比 21 天壓力滲透試驗氯離子分布預測線與 90 天貯鹽試驗試驗值比較



至目標濃度所需試驗時間

圖 5-21 於深度 2 cm 處氯離子濃度累積速率

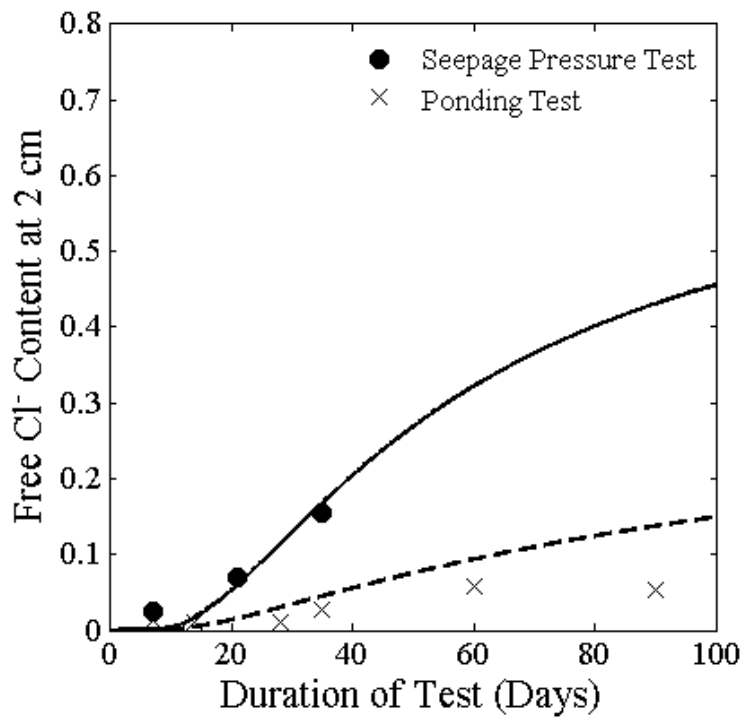


圖 5-22 深度 2 cm 氯離子濃度累積速率與試驗值比較

第六章 結論與建議



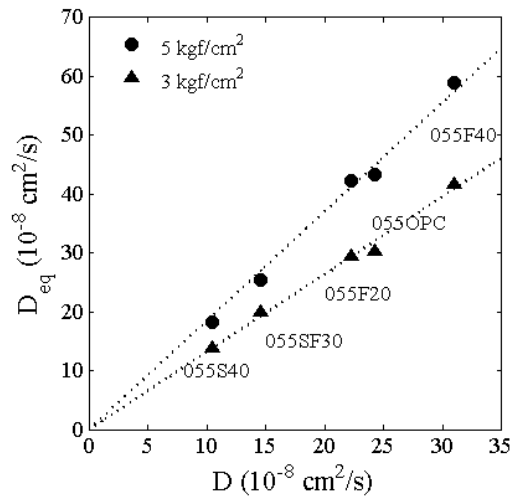
6.1 結論

本研究基於菲克第二擴散定律 (Fick's Second Law)、對流－擴散方程式 (Convection－Diffusion Equation)，混凝土試體於 28 天水中養護後，利用加壓方式，使氯離子侵入混凝土的過程縮短。比較相同試驗時間有無靜水壓力對於氯離子傳輸的影響，如氯離子侵入深度、氯鹽侵入量以及氯離子濃度累積速率之差異，同時研究各種因素(卜作嵐材料種類及取代率、混凝土抗壓強度以及靜水壓力大小等)影響下的氯離子侵入行為，建立壓力滲透試驗做為加速試驗取代 90 天貯鹽試驗的基礎。經試驗結果討論與分析後，可歸納出下列結論：

- (1) 經由控制方程式參數分析結果，滲流速度隨著試驗時間增加，對於氯離子傳輸 (氯離子侵入深度、侵入量以及各層濃度累積速率) 影響越顯著。
- (2) 等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 為透過擴散方程式迴歸分析壓力滲透試驗氯離子濃度數據計算得到，其意義為將滲流影響假設為擴散之係數，但隨著試驗時間增加滲流影響顯著，因此 D_{eq} 應有時間效應。且擴散方程式線型與滲流－擴散方程式線型不盡相同，由等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 適用性分析結果顯示，隨試驗時間增加相關係數 R^2 持續降低。
- (3) 相同 7 天試驗時間，靜水壓力為 3、5 kgf/cm²，等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 隨著 7 天貯鹽試驗擴散係數 D 大小變化兩者呈線性關係 (如下圖)，且相同靜水壓

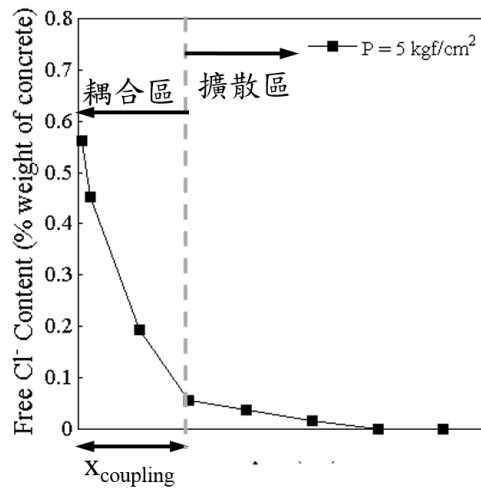


力之 D_{eq} 能夠反映混凝土耐久性，趨勢與擴散係數相同。



- (4) 等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 與滲流-擴散方程式線型分析比較後，若取相關係數 R^2 為 0.900 以上視為高度相關，與本研究相似試驗條件（如：水膠比、加壓時間少於 35 天、靜水壓力 5 kgf/cm² 以內）可將等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 假設為常數，簡化分析靜水壓力下氯離子傳輸行為。以 055OPC 各試驗時間壓力滲透試驗氯離子濃度分布情況為例，將 7 天試驗時間等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 代入擴散方程式與 35 天試驗時間氯離子濃度分布情況比較，相關係數 R^2 達 0.985。
- (5) 055F40 為本研究試驗結果中抵抗氯離子侵入能力最差，考慮本研究養護條件，許多文獻指出飛灰具有晚期發展的特性，若將 055F40 養護足夠後再進行 5 kgf/cm² 壓力滲透試驗，滲流速度將降低，推論 055F40 之 D_{eq} 於 35 天以內假設為常數可更加適用於描述靜水壓力下氯離子的分布行為，可得較高相關係數。另外，若當混凝土水膠比以及靜水壓力小於本研究者，於充分養護後 D_{eq} 於 35 天以內應能假設為常數進行簡化分析靜水壓力下氯離子的傳輸行為。

- (6) 以「比色法氯離子侵入深度 X_d 」作為指標，就 055OPC 試驗結果而言，21 天 5 kgf/cm^2 壓力滲透試驗作為加速性試驗，與 90 天貯鹽試驗比色法氯離子侵入深度比較，試驗值相差 1 mm、誤差約 4.5%。
- (7) 貯鹽試驗侵入深度模型趨勢與試驗值吻合，以本研究試驗結果，相關係數達 R^2 達 0.859~0.976，未來若進行不同時間壓力滲透試驗，可藉此模型預測貯鹽試驗所需試驗時間。
- (8) 以滲流—擴散方程式亦或是等效氯離子傳輸係數 D_{eq} ，皆無法貼合氯離子濃度滴定值最後幾層數據，本研究就此現象推論靜水壓力下氯離子傳輸可能存在耦合區與擴散區，且耦合區深度亦可能隨試驗時間增加而變化。如下圖所示。



- (9) 以「氯離子侵入深度 $X_{0.05\%}$ 」為指標，就 055OPC 試驗結果為例，將 7 天試驗時間數據分別代入 D_{eq} 與 D 關係式、貯鹽試驗氯離子侵入深度模型以及壓力滲透試驗氯離子侵入深度模型 (D_{eq})，由模型計算 90 天貯鹽試驗氯離子侵入深度是否等於 21 天壓力滲透試驗，兩者侵入深度相差 15%~28%，本研究推論誤差主要源於模型低估靜水壓力對於氯離子侵入深度的貢獻。若假設無低估現象，以 21 天 5 kgf/cm^2 壓力滲透試驗做為加速試驗判斷混凝土耐久性，由壓力滲透試驗侵入深度模型 (D_{eq}) 計算 21 天試驗時間氯離子侵入深度預測值，預測值趨勢亦能判別混凝土耐久性，且趨勢與「比色法氯離子侵入深度 X_d 」



相同。

- (10) 以「氯離子濃度累積速率」做指標，靜水壓力 5 kgf/cm^2 壓力滲透試驗做為加速性試驗，就 055OPC 組別試驗結果而言，21 天加壓時間與 90 天貯鹽試驗氯離子濃度值相近。若 90 天貯鹽試驗擴散方程式與 21 天加壓時間 D_{eq} 方程式相比，相關係數 R^2 達 0.982。其餘配比 21 天 5 kgf/cm^2 壓力滲透氯離子分布預測線與 90 天貯鹽試驗試驗值相關係數 R^2 為 0.969~0.999。
- (11) 藉由特定深度氯離子濃度累積速率模型比對試驗值結果，相關係數 R^2 為 0.604~0.901，藉由此模型能計算在各個試驗時間時，特定深度的氯離子濃度預測值。若未來需以貯鹽試驗或是壓力滲透試驗探討臨界氯離子濃度，即能預測鋼筋周圍的氯離子濃度，若達鋼筋可能發生腐蝕的氯離子濃度值，可密切監測腐蝕電流值的變化。



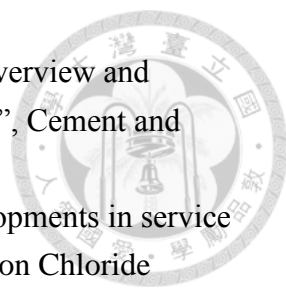
6.2 建議

- (1) 加速性試驗與長時間試驗存在混凝土齡期問題，建議進行長時間的養護，使各試體足以充分發揮水化反應之時間後，再進行各項試驗，避免氯離子侵入過程中，大量水化反應同時進行，造成誤差，尤其有添加卜作嵐材料之混凝土，更需注意此情況。
- (2) 以不同水膠比、更長加壓時間驗證等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 時間效應，以及 D_{eq} 與擴散係數 D 之間的關係。
- (3) 以不同水膠比或是較長時間的養護(如水養護 90 天)試體進行壓力滲透試驗，比較不同試驗條件下，等效氯離子傳輸係數 D_{eq} 與擴散係數 D 之間的關係。
- (4) 推論混凝土水膠比小於本研究者，於相同條件下(如：水膠比、加壓時間少於 35 天、靜水壓力 5 kgf/cm^2 以內)可將 D_{eq} 假設為常數便於分析，但建議以較低水膠比(小於 0.55)試體進行試驗，驗證此推測。
- (5) 以不同配比進行 21 天 5 kgf/cm^2 壓力滲透試驗，透過較多數據驗證 21 天 5 kgf/cm^2 壓力滲透試驗做為加速試驗能取代 90 天貯鹽試驗。


參考文獻



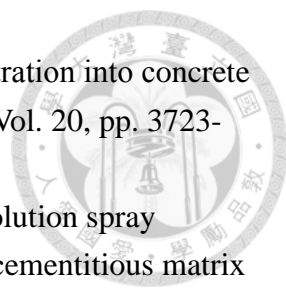
- [1] 何季軒，「以貯鹽試驗探討鋼筋混凝土之臨界氯離子濃度」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程研究所，民國 104 年。
- [2] 黃紹翔，「臨海養護環境對於高爐混凝土與一般混凝土性質影響研究」，博士論文，國立中興大學土木工程研究所，民國 101 年。
- [3] 黃兆龍，「混凝土摻用海砂之策略及檢測技術研討會論文輯」，財團法人台灣營建研究中心，民國 83 年。
- [4] J. N. Enevoldsen、C. M. Hansson、B. B. Hope, "Binding of chloride in mortar containing admixed or penetrated chlorides", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, pp. 1525-1533, 1994.
- [5] C. Arya、N. R. Buenfeld、J. B. Newman, "Factors influencing chloride-binding in concrete", *Cement and Concrete Research* Vol. 20, pp. 291-300, 1990.
- [6] K. Y. Ann、H. W. Song, "Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete", *Corrosion Science* Vol. 49, pp. 4113-4133, 2007.
- [7] K. C. Clear、R. E. Hay, "Time to Corrosion of Reinforcing Steel Slabs : Effect of Mix Design and Construction Parameters", Inter. Report No. FHWA-RA-73-32, Federal Highway Administration, Washington D. C. , pp. 103-105, 1973.
- [8] 王品方，「水泥砂漿中鋼筋腐蝕之臨界氯離子濃度探討」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程研究所，民國 102 年。
- [9] X. Wu, L. Xu, Q. Yang, S. Huang, "The Diffusion Equation of Chloride Ions in Cement Mortar", *Trans Shanghai Build Materials Collection* Vol. 4, pp. 364-372, 1991.
- [10] "Chloride Resistance of Concrete", *Cement Concrete & Aggregates*, Australia, 2009.
- [11] 蔡旻廷，「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，民國 103 年。
- [12] A. M. Neville, "Properties of Concrete", 4th Ed, Longman, New York, 1996.
- [13] O. G. Rodriguez and R. D. Hooton, "Influence of Cracks on Chloride Ingress into Concrete", *Materials Journal* Vpl. 100, pp. 120-126, 2003.
- [14] 趙彥迪，「靜水壓力下混凝土中氯離子傳輸機理研究」，碩士學位論文，青島理工大學土木工程學院結構工程，2011。
- [15] AASHTO T277-86, "Rapid Determination to the Chloride Permeability of Concrete", American Association of States Highway and Transportation Officials, Standard Specifications-Part II, Washington DC, 1990.
- [16] ASTM C1202-97, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", American Society for Testing and Materials, 1994.

- 
- [17] A. Boody、E. Bentz、M. D. A. Thomas、R. D. Hooton, “An overview and sensitivity study of a multimechanistic chloride transport model”, *Cement and Concrete Research* Vol. 29, pp. 827-837, 1999.
- [18] R. D. Hooton and P. F. McGrath, “Issues related to recent developments in service life specification for concrete structures”, 1st RILEM workshop on Chloride Penetration into Concrete, pp. 388-397, 1995
- [19] A. M. Brandt, “Cement-based Composites : Mechanical Properties and Performance”, E&FN SPON. pp. 116-119, 1995.
- [20] R. Kumar, B. Bhattacharjee, “Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 155-164, 2003
- [21] C. L. Page, N. R. Short and A. E. Tarras, “Diffusion of Chloride ions in hardened cement paste”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, pp. 395-406, 1981
- [22] P. K. Mehta and P. J. Monteiro, “Concrete-structure, properties and materials”, Prentice Hall, pp. 17-29. 1993
- [23] P. Simeonov and S. Ahmad, “Effect of Transition Zone on the Elastic Behavior of Cement-based Composites”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 165-176, 1995
- [24] ASTM C618-99, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete”, American Society for Testing and Materials, 1999.
- [25] M. Collepardi, S. Monosi, and P. Piccioli, “The influence of pozzolanic materials on the mechanical stability of cement”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 961-968, 1995.
- [26] F. Yan, D. Jian, Ding and J. J. Beaudoin, “Effect of different calcium aluminate hydrates on ettringite formation and expansion of high alumina cement-based expansive cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 417-426, 1996.
- [27] CNS 3036, 「波特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐摻合物」, 中國國家標準, 2009。
- [28] P. J. Nixon, “The effect of a Pfa with a high total alkali content on pore solution composition and alkali-silica reaction”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 38, No. 134, pp. 30-35, 1986.
- [29] M. D. A. Thomas and P. B. Bamforth, “Modelling chloride diffusion in concrete : effect of fly ash and slag”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 487-495, 1999.
- [30] 蔡壽楨, 「含飛灰混凝土之孔隙與強度關係」, 碩士論文, 國立中興大學土木工程研究所, 民國 94 年。
- [31] 詹穎雯, 「環境溫、濕度對含高爐石、飛灰與普通波特蘭水泥混凝土強度之

- 影響與變形之研究」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程研究所，民國 75 年。
- [32] 內政部建築研究所，「快速氯離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究」，協同研究報告，民國 103 年。
- [33] 張裕閔，「含爐石混凝土之孔隙與強度關係」，碩士論文，國立中興大學土木工程研究所，民國 95 年。
- [34] L. Tang and L. O. Nilsson, “Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, pp. 247-253, 1993.
- [35] P. Lambert, C. L. Page, N. R. Short, “Pore solution Chemistry of the Hydrated System Tricalcium Silicate/Sodium Chloride/Water”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, pp. 675-680, 1985.
- [36] Rasheeduzzafar, H. S. Ehtesham, S. S. Al-saadoun, “Effect of Tricalcium Aluminate Content of Cement on Chloride Binding and Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete,” *ACI Materials Journal*, pp. 3-12, 1992.
- [37] R. K. Dhir, M. A. K. El-Mohr, T. D. Dyer, “Chloride binding in GGBS concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 1767-1776, 1996.
- [38] L. Rui, C. Yuebo, W. Changyi, H. Xiaoming, “Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1-7, 2003.
- [39] U. Angst, B. Elsener, C. K. Larsen, Q. Vennesland, “Critical chloride content in reinforced concrete – A review”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, pp. 1122-1138, 2009.
- [40] J. M. Frederiksen, “Chloride threshold values for service life design”, *Second International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete*, pp. 397-414, 2000.
- [41] M. D. A. Thomas and J. D. Matthews, “Performance of PFA concrete in a marine environment – 10 years results”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 5-20, 2004.
- [42] 秋山充良、伊東佑香、鈴木基行，「鋼筋混凝土構造物於鹽害環境下耐久可靠度設計之相關基礎研究」，日本土木學會論文集 E，第 62 卷，第 2 期，地 385-401 頁，2006。
- [43] 日本土木學會，「混凝土標準示方書（維持管理編）」，2001。
- [44] EN 206-1, “Concrete – Part 1 : Specification, performance, production and conformity”, 2000.
- [45] Life 365, “Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of reinforced concrete exposed to chlorides”, Version 2.2.1, 2014
- [46] AASHTO T259-80, “Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration”,

- 
- American Association of States Highway and Transportation Officials, Standard Specifications-Part II, Washington DC, 1990.
- [47] ASTM C1543-02, “Standard test method for determining the penetration of chloride ion into concrete by ponding”, American Society for Testing and Materials, 2005.
- [48] J. P. Arsenault、J. P. Bigas, “Determination of chloride diffusion coefficient using two different steady-state method : influence of concentration gradient” , Chloride Penetration into Concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop, pp. 150-160, 1993.
- [49] M. D. A. Thomas and P. B. Bamforth, “Modelling Chloride Diffusion in Concrete Effect of Fly ash and slag,” Cement and Concrete Research, Vol.29, pp. 487-495, 1999.
- [50] T. C. Powers, L. E. Copeland, J. C. Hayes and H. M. Mann, “Permeability of Portland cement paste”, J. Amer. Concr. Inst. , Vol. 51, pp. 285-298, 1954.
- [51] J. W. Figg, "Methods of measuring the air and water permeability of concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 85, pp 213-219, 1973.
- [52] N. Banthia and S. Mindess, ”Water permeability of cement paste”, Cement and Concrete Research, Vol. 19, pp. 727-736, 1989.
- [53] K. D. Stanish, R. D. Hooton and M. D. A. Thomas, “Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review”, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 1997.
- [54] 趙彥迪、F. H. Wittmann、趙鐵軍, 「靜水壓力下混凝土中氯離子傳輸機理研究」, 碩士論文, 青島理工大學土木工程學院, 2011。
- [55] 吳建國、黃然、梁明德, 「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。
- [56] 梁智信, 「濱海地區混凝土中氯離子擴散行為之研究」, 碩士論文, 國立臺灣海洋大學材料工程研究所, 民國 102 年。
- [57] M. Collepardi, A. Marcialis, R. Turriziani, “Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 55, Issue 10, 99. 534-535, 1972.
- [58] P. S. Mangat and B. T. Molloy, “Prediction of long term chloride concentration in concrete”, Materials and Structures, Vol. 27, Issue 6, pp. 338-346, 1994.
- [59] NT Build 43, “Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration”, Nordtest method, 1995.
- [60] P. B. Bamforth, “The derivation of input data for modelling chloride ingress from eight-year UK coastal exposure trials”, Magazine of Concrete Research, Vol. 51, pp. 87-96, 1999.
- [61] M. Nokken, A. Boddy, R. D. Hooton and M. D. A. Thomas, “Time dependent

- diffusion in concrete—three laboratory studies”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 200-207, 2006.
- [62] H. S. Al-alaily, A. A. Hassan, “Time-dependence of chloride diffusion for concrete containing metakaolin”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 7, pp. 159–169, 2016.
- [63] C. C. Yang and S. W. Cho, “An electrochemical method for accelerated chloridemigration test of diffusion coefficient in cement-based materials “, *Materialschemistry and physics*, Vol. 81, pp. 116-125, 2003.
- [64] C. T. Chiang, and C. C. Yang, “Relation between the diffusion characteristic of concrete from salt ponding test and accelerated chloride migration test”, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 106, pp. 240-246, 2007.
- [65] K. Audenaert, Q. Yuan and G. De Schutter, “On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 396-402, 2010.
- [66] 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 95 年。
- [67] 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 102 年。
- [68] R. A. Freeze and J. A. Cherry, “Groundwater”, Prentice-Hall, 1979.
- [69] A. S. El-Dieb and R. D Hooton, “Water permeability measurement of high performance concrete using a high-pressure triaxial cell”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 1199-1208, 1995.
- [70] 趙川，「混凝土中臨界氯離子濃度壓力滲透法研究」，碩士論文，上海交通大學船舶海洋與建築工程學院，2012。
- [71] P. B. Bamforth, “The water permeability of concrete and its relationship with strength”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 43, pp. 231-241, 1991.
- [72] S. L. Lee, S. F. Wong, S. Swaddiwudhipong, T. H. Wee and Y. H. Loo, “Acelerated test of ingress of chloride ions in concrete under pressure and concentration gradients”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, pp. 15-25, 1996.
- [73] S. F. Wong, S. L. Lee, S. Swaddiwudhipong, T. H. Wee and Y. H. Loo, “Study of water movement in concrete”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 53, pp. 205-220, 2001.
- [74] S. Tscilis, J. Tsantilas, G. Kakali, E. Chaniotakis and A. Sakellariou, “The permeability of Portland limestone cement concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1651-1655, 2005
- [75] M. S. Lund, L. B. Sander, B. Grelk and K. K. Hansen, “Chloride Ingress into Concrete under Water Pressure”, *Nordic Concrete Research : Proceedings of XXI Nordic Concrete Research Symposium*, pp. 207-210, 2011.

- 
- [76] Z. Q. Jin、T. J. Zhao、S. Gao、B. R. Hou, “Chloride ion penetration into concrete under hydraulic pressure”, *Journal of Central South University* Vol. 20, pp. 3723-3728, 2013.
- [77] N. Otsuki, S. Nagataki, K. Nakashita, “Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials”, *ACI Materials Journal*, pp. 587-592, 1992.
- [78] C. Andrade, M. Castellote, C. Alonso and C. Gonzalez, “Relation between colorimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1202-97”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 417-421, 1999.
- [79] E. Meck, V. Sirivivatnanon, “Field indicator of chloride penetration depth”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1113-1117, 2003.
- [80] 李旺達, 「探討比色法中顏色變化界面之氯離子濃度對混凝土非穩態氯離子傳輸係數之影響」, 碩士論文, 國立臺灣海洋大學材料工程研究所, 民國 95 年。
- [81] 王柏鈞, 「以快速氯離子滲透試驗評估爐石混凝土耐久性」, 碩士論文, 國立臺灣海洋大學材料工程研究所, 民國 103 年。
- [82] 翁亨銓, 「取樣方式對量測硬固混凝土氯離子含量檢測之影響」, 碩士論文, 國立臺灣海洋大學材料工程研究所, 民國 103 年。
- [83] 內政部建築研究所, 「快速氯離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究」, 協同研究報告, 內政部建築研究所, 民國 103 年。