以加速鹽霧試驗探討氯離子對混凝土耐久性影響之研究

研究主持人：何明錦　所長

協同主持人：楊仲家 教授

研　究　員：卓世偉、林志彥

研究助理：江慶堂、翁詩涵

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 101 年 12 月

（本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見）

目次

目次.....I
表次.....III
圖次.....V
摘要.....IX
第一章　緒論.....1
　第一節　研究緣起與背景.....1
　第二節　研究目的.....2
　第三節　本研究計畫之重要性.....3
　第四節　國內外有關本計畫之研究情況.....5
　第五節　報告內容說明.....6
第二章　文獻回顧.....9
　第一節　氯離子對鋼筋混凝土主要的危害.....9
　第二節　氯離子於混凝土中傳輸途徑與機制.....12
　第三節　現行相關氯離子對混凝土耐久性評估試驗方式.....13
　第四節　鹽霧試驗.....16
第三章　大氣氯鹽量測方法與相關文獻.....19
　第一節　大氣氯鹽量測方法.....19
　第二節　國外大氣氯鹽沉積量測文獻.....22
　第三節　國內大氣氯鹽沉積量測文獻.....25
第四章　試驗計畫.....29
　第一節　試驗變數設計.....29
　第二節　混凝土組成材料.....32
　第三節　混凝土配比設計.....35
　第四節　試驗規劃.....36
　第五節　試驗方法.....38
第五章　研究成果.....45

第一節　混凝土配比強度性質 45
第二節　自然曝曬混凝土配比氯離子貯鹽試驗結果 47
第三節　混凝土長期曝曬氯離子試驗結果 51
第四節　混凝土長期曝曬試驗與貯鹽試驗結果關聯性建立 59
第五節　OPC 混凝土配比鹽霧試驗結果 64
第六節　OPC 混凝土配比貯鹽試驗結果 71
第七節　貯鹽試驗與鹽霧試驗結果關聯性建立 74
第八節　長期自然曝曬混凝土試體循環鹽霧試驗結果驗證 81
第六章　結論與建議 85
第一節　結論 85
第二節　建議 86
附錄一 期初審查會議審查回應一覽表 89
附錄二 期中報告審查回應一覽表 91
附錄三 期末報告審查回應一覽表 95
參考書目 99

表次

表 1-1　執行工作內容與期末報告對照表 7
表 3-1　苗栗以北至基隆各地區氯鹽沉積量與離海岸線距離之迴歸式 [3].....27
表 4-1　過去研究已有長期曝曬混凝土配比資料 [3]（單位：kg/m^3）.....30
表 4-2　試驗變數設計表 31
表 4-3　拌合水試驗結果(ppm).....32
表 4-3　水泥之物理性質 32
表 4-5　水泥化學性質 33
表 4-6　篩分析試驗結果 33
表 4-7　細骨材之篩分析試驗結果 34
表 4-8　本計畫製作之水灰比 0.35 至 0.65 混凝土配比（單位：kg/m^3）.....35
表 4-9　鹽水噴霧裝置之運轉設定 39
表 5-1　自然曝曬混凝土試體各時期材齡抗壓強度試驗結果平均值（kgf/cm^2）
.....46
表 5-2　OPC35 至 OPC65 配比 28 天材齡抗壓強度試驗結果平均值（kgf/cm^2）
.....47
表 5-3　自然曝曬混凝土配比貯鹽試驗結果 48
表 5-4　I245 配比各曝曬期氯離子濃度量測結果.....51
表 5-5　I350 配比各曝曬期氯離子濃度量測結果.....53
表 5-6　II350 配比各曝曬期氯離子濃度量測結果 55
表 5-7　SCC 配比各曝曬期氯離子濃度量測結果 57
表 5-8　各曝曬期混凝土氯離子侵入總量值（$m_{expsoure}$）.....59
表 5-9　各配比混凝土貯鹽試驗氯離子侵入總量所對應之曝曬期 64
表 5-10　OPC 各配比混凝土傳統鹽霧劣化試驗氯離子總量 *m* 計算值（%.cm）
.....69
表 5-11　OPC 各配比混凝土循環鹽霧劣化氯離子總量 *m* 計算值（%.cm）....69
表 5-12　OPC 配比混凝土配比貯鹽試驗結果.....71
表 5-13　OPC 配比貯鹽試驗氯離子侵入總量所對應之傳統鹽霧試驗劣化期....79
表 5-14　OPC 配比貯鹽試驗氯離子侵入總量所對應之循環鹽霧試驗劣化期....81

表 5-15　長期自然曝曬配比混凝土循環鹽霧劣化氯離子總量 *m* 計算值.....84

圖次

圖 1-1　研究流程圖 4
圖 2-1　造成鋼筋腐蝕的混凝土氯離子濃度門檻文獻整理圖 11
圖 2-2　造成鋼筋腐蝕的混凝土 Cl^-/OH^- 門檻文獻整理圖 11
圖 2-3　透水試驗水侵入深度結果與抗壓強度文獻整理圖 [25] 15
圖 2-4　RCPT 試驗總通過電量結果與抗壓強度文獻整理圖 [25] 15
圖 2-5　貯鹽試驗擴散係數結果與抗壓強度文獻整理圖 [25] 16
圖 3-1　ISO 9225 濕燭法示意圖與其實品照片 20
圖 3-2　日本 PWRI 土研法飛來鹽分捕集器示意圖與其實品照片 21
圖 3-3　韓國 K3 系鹽分捕集器示意圖 [29] 22
圖 3-4　日本飛來鹽分量全國調查結果 [30] 23
圖 3-5　美國夏威夷 Oahu 島調查結果 [31] 24
圖 3-6　臺灣北部氯鹽年平均等位線分佈圖（單位：$mg/100cm^2/day$）[3] 26
圖 4-1　過去研究已有長期曝曬混凝土（於基隆沿海 10 公尺區域曝曬）[3] 31
圖 4-2　三分碎石之級配分布圖 34
圖 4-3　細骨材之級配分布圖 35
圖 4-4　自然曝曬試體立面圖 [3] 36
圖 4-5　自然曝曬試體剖面圖 37
圖 4-6　自然曝曬試體試體鑽心過程 37
圖 4-7　本研究團隊鹽霧試驗設備（連續噴霧試驗使用） 39
圖 4-8　Mebon Prohesion 劣化試驗法 40
圖 4-9　CTP96 鹽霧複合耐候試驗機外觀 41
圖 4-10　混凝土氯離子含量磨粉取樣設備 42
圖 4-11　將氯離子萃取液燒杯覆蓋與加熱過程 43
圖 4-12　將氯離子萃取液過濾過程 44
圖 4-13　本計畫使用之 Metrohm 702 SM 型電位滴定儀 44
圖 5-1　水灰比 0.35 至 0.65 與曝曬試驗 5 年期試體鹽霧加速劣化過程 45
圖 5-2　自然曝曬混凝土試體各時期材齡抗壓強度關係圖 46
圖 5-3　貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I245 配比） 49

圖 5-4 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I350 配比）.....49
圖 5-5 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（II350 配比）.....50
圖 5-6 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（SCC 配比）.....50
圖 5-7 720 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I245 配比）.....52
圖 5-8 840 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I245 配比）.....52
圖 5-9 1850 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I245 配比）.....53
圖 5-10 720 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I350 配比）.....54
圖 5-11 840 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I350 配比）.....54
圖 5-12 1850 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I350 配比）.....55
圖 5-13 720 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（II350 配比）.....56
圖 5-14 840 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（II350 配比）.....56
圖 5-15 1850 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（II350 配比）.....57
圖 5-16 720 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（SCC 配比）.....58
圖 5-17 840 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（SCC 配比）.....58
圖 5-18 1850 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（SCC 配比）.....59
圖 5-19 各曝曬期與貯鹽試驗混凝土氯離子侵入總量值關係圖.....60
圖 5-20 $m_{expsoure}/m_{ponding}$ 與曝曬期時間關係圖（I245 配比）.....61
圖 5-21 $m_{expsoure}/m_{ponding}$ 與曝曬期時間關係圖（II350 配比）.....61
圖 5-22 $m_{expsoure}/m_{ponding}$ 與曝曬期時間關係圖（I350 配比）.....62
圖 5-23 $m_{expsoure}/m_{ponding}$ 與曝曬期時間關係圖（SCC 配比）.....62
圖 5-24 $m_{expsoure}/m_{ponding}$ 與曝曬期時間關係圖（所有自然曝曬配比）.....63
圖 5-25 OPC35 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（傳統鹽霧試驗劣化）.....65
圖 5-26 OPC45 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（傳統鹽霧試驗劣化）.....65
圖 5-27 OPC55 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（傳統鹽霧試驗劣化）.....66
圖 5-28 OPC65 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（傳統鹽霧試驗劣化）.....66
圖 5-29 OPC35 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）.....67

圖 5-30 OPC45 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）.....67
圖 5-31 OPC55 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）.....68
圖 5-32 OPC65 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）.....68
圖 5-33 混凝土氯離子總量 *m* 計算值與劣化時間關係圖（傳統鹽霧試驗劣化）.....70
圖 5-34 混凝土氯離子總量 *m* 計算值與劣化時間關係圖（循環鹽霧試驗劣化）.....70
圖 5-35 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（OPC35 配比）.....72
圖 5-36 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（OPC45 配比）.....72
圖 5-37 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（OPC55 配比）.....73
圖 5-38 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（OPC65 配比）.....73
圖 5-39 各曝曬期與貯鹽試驗混凝土氯離子侵入總量值 *m* 與水灰比關係圖....74
圖 5-40 $m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC35 配比）.....75
圖 5-41 $m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC45 配比）.....75
圖 5-42 $m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC55 配比）.....76
圖 5-43 $m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC65 配比）.....76
圖 5-44 $m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC35 配比）.....77
圖 5-45 $m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC45 配比）.....77
圖 5-46 $m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC55 配比）.....78
圖 5-47 $m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC65 配比）.....78
圖 5-48 $m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（所有 OPC 配比）.....80
圖 5-49 $m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（所有 OPC 配比）.....80
圖 5-50 I245 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）82
圖 5-51 I350 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）82
圖 5-52 II350 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）.....83
圖 5-53 SCC 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）.....83
圖 5-54 $m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（所有長期自然曝曬配比）.....84

摘要

關鍵詞：鹽霧試驗、長期自然曝曬、貯鹽試驗、混凝土

一、研究緣起

混凝土耐久性是結構物服務年限評估與永續設計建議所必需得到的定量依據。目前雖有許多種指標可以驗證混凝土耐久性，但對海島型氣候的我國，以氯離子直接侵入混凝土速率與深度的量測對評估耐久性而言，最具有代表性。原因在於除了氯離子是導致鋼筋腐蝕主要肇因外，氯離子的離子半徑極小，可藉由連通孔隙擴散進入混凝土內，所以可做為混凝土的耐久性最重要的指標。我國雖然有各種可檢測混凝土氯離子的相關標準，世界各國也有相關評估混凝土抗氯離子能力的評估試驗，如我國的 CNS 14795（RCPT）、美國的 ASTM C1502（Ponding test）、歐洲 RCT 試驗、或本研究團隊所發展的 ACMT 法。但仍僅為混凝土配比間相互耐久性的比較，較無法提供一個建議值給設計人員去評估混凝土的使用年限。本研究即希望蒐集我國與各海島型國家大氣氯離子資料，並利用所內加速鹽霧試驗儀器快速模擬各種年期氯鹽濃度對混凝土耐久性實際的影響，以建立大氣氯離子對混凝土耐久性影響的關聯性。

二、研究方法及過程

本計畫藉由加速鹽霧試驗探討氯離子對混凝土耐久性影響。以達 5 年長期沿海自然曝曬試體，試驗其各深度氯離子侵入的濃度，同時間並製作 0.35 至 0.65 水灰比混凝土進行試驗，由不同劣化時間、不同鹽霧劣化試驗、與貯鹽試驗後所得的氯離子數據，建立加速鹽霧試驗與長期曝曬之間的關聯性。

三、重要發現

研究成果發現長期自然曝曬配比抗壓強度初期隨著齡期的增加上升的幅度較大，但到了 540 天以後，抗壓強度雖有增加，但上升幅度趨緩。而混凝土氯離子侵入總量值會隨著曝曬期的延長而增加，且貯鹽試驗的總量值（$m_{ponding}$）遠大於各曝曬期氯離子總量值（$m_{expsoure}$）。藉由長期自然曝曬配比貯鹽試驗的總量值（$m_{ponding}$）與各曝曬期氯離子總量值（$m_{expsoure}$）的比較，可以發現貯鹽試驗氯離子侵入總量可相當於 15.35 至 18.38 年的曝曬期。而由 OPC 配比貯鹽試驗的總量值（$m_{ponding}$）與 Prohesion 循環鹽霧劣化試驗氯離子總量值（$m_{prohesion}$）的比較，可以發現貯鹽試驗氯離子侵入總量可相當於 Prohesion 循環鹽霧試驗 23.06 天至

23.97 天的劣化期。且其與劣化時間有良好線性關係（R^2=0.969），其線性關係式為 Y=0.0277X+0.46600。由此可建立鹽霧試驗、自然曝曬試驗、與貯鹽試驗三者之關聯性。可對後續混凝土結構物服務年限有極大的幫助，並可由此建立適用於混凝土耐久性評估的鹽霧試驗方法。

四、主要建議事項

本研究針對實驗結果發現，提出下列建議，說明如下。

立即可行之建議—

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

1. 建議可研擬適用於混凝土鹽霧試驗的標準試驗法，以供混凝耐久性快速評估或鋼筋混凝土結構物服務年限計算參數使用。

長期性建議—

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

1. 建議針對台灣地區不同氣候型態長期自然曝曬與鹽霧試驗關聯性進行探討。
2. 可使用此試驗法對具有瑕疵（裂縫或蜂窩）、低設計強度混凝土進行相關研究。
3. 建議內政部建研所未來可進行長久曝曬與含氯量對混凝土構材劣化之研究。

ABSTRACT

Keywords: salt spray test, long-term exposure test, Ponding test, concrete

This plan is to study the chloride ion impact on durability of concrete by accelerated salt spray test. The concrete specimens with five years long term coastal nature exposure were testing its depth concentration of chloride ion intrusion. And at the same time, concrete specimens with water cement ratio 0.35 to 0.65 were produced and tested. By the different deterioration time deterioration test, salt spray, and chloride ions from the salt storage test data, establishment of accelerated salt spray test and correlation between long-term exposures. Test results found that long-term natural exposure increased compressive strength at early age, but after 540 days, the compressive strength has also increased, but the rate of increase is slowing. And total chloride ion intrusions of concrete values were increased as extensions of the period of exposure. And the total chloride ion of ponding test （$m_{ponding}$） is much larger than the concrete specimens with long term coastal nature exposure（$m_{expsoure}$）. By comparison of the total chloride amount of long-term natural exposure （$m_{expsoure}$）and ponding t test （$m_{ponding}$） with each exposure period, and found that the ponding test was equivalent to 15.35 to 18.38 years of long-term natural exposure test. When the total chloride ion of ponding test and Prohesion cycle salt spray test comparison can be found that the ponding test equivalent to Prohesion Cyclic Salt Fog test 23.06 to 23.97 days deterioration period. And its good linear relationship with the degradation time (R2=0.969), the linear relationship of the formula Y = 0.0277X +0.46600. Thus establishing salt spray test, natural exposure testing, associated with the ponding test of the three. It can be help to estimate service life of the concrete structure, and thus to create a salt spray test methods applicable to the assessment of the durability of concrete.

第一章　緒論

第一節　研究緣起與背景

國內混凝土結構物由於國內地理氣候與空氣污染關係，長期暴露於高濕度與含有氯鹽的大氣環境中。對於混凝土所保護的鋼筋而言，水汽會由吸附與毛細吸收現象進入混凝土孔隙中，並因蕊絲現象(wick action)逐漸讓孔隙充滿水分。當連通孔隙呈現水飽和狀態後，外界氯離子會利用與孔隙水中氯離子濃度上的差異進行傳輸，此即擴散現象[1]。另一方面，由於水泥中氫氧化合物的因素，使得孔隙內部的水分呈現高鹼性狀態（pH>11），當鋼筋存在鹼性環境時，可以確保其表面鈍態保護膜的存在，由於氯對鐵及不銹鋼有很大的親和力，易使鐵金屬離子化，進而造成孔蝕（pitting corrosion），並促使部分鋼材因電位不同產生伽凡尼電偶（Galvanic couple），造成鋼材電動勢（electromotive force）提昇，因而腐蝕產生紅棕色鐵銹。但由於鹼性環境，鈍態保護膜受氯離子破壞後會迅速再度形成的現象。但若受到大氣中二氧化碳的侵入，會使得孔隙水因為碳酸的形成導致 pH 值的降低。當氯離子濃度與氫氧根濃度（$[Cl^-]/[OH^-]$）大於一定值時，便有極高的腐蝕機率[2]。當鋼筋開始腐蝕，便會導致體積積膨脹，致使混凝土受到應力，造成龜裂，進而保護層剝落，鋼筋斷面縮小危害結構物安全。

過去氯離子的危害大多發生於海域環境結構物上，因海域環境大氣中的氯鹽量極高，根據最近的研究，台灣北部距海 1200 公尺內空氣中仍具有一定的氯鹽量，某些地區甚至達到 2000 公尺範圍[3]。建築物長期處於氯鹽空氣量，會使得表面附著一定濃度的氯離子，本研究團隊曾針對我國北部沿海 500 公尺內 20 年以上 22 座橋梁上部結構鑽心取樣進行氯離子含量研究，發現混凝土表面 0.5 公分氯離子含量有 50%以上超過 0.3%，甚至最高有 0.6%。由於國內並無硬固

[1] Meira, G. R., Andrade, C., Alonso, C., Borba Jr., G. R., Padilha Jr., M., "Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator ", Cement and Concrete Composites, Vol 32, 2010, pp. 427-435.

[2] Bulu Pradhan, B. Bhattacharjee, "Rebar corrosion in chloride environment", Construction and Building Materials, Vol 25, 2011, pp. 2565-2575.

[3] 詹穎雯、陳振川、吳建國、楊仲家、許鎧麟、卓世偉、陳育聖、張永昌,"台灣苗栗以北地區大氣中氯鹽與橋樑腐蝕劣化環境之研究", 交通部公路總局委託研究案報告, 2010.

混凝土氯離子含量規範，但新拌混凝土限制量為 0.3%，因此其混凝土表面所附著的氯離子均有相當大的濃度。依據物理現象如果混凝土表面含鹽量增加，由於滲透壓（osmotic pressure）的關係，使得混凝土內部的水份不易排出。加上我國沿海地區高濕度與多雨的環境，若施工時搗實不良加上施工縫處理不當，混凝土內部相對濕度很容易高於 65%，此為達鋼筋（鐵）的腐蝕臨界相對濕度，表示在此濕度下鐵的氧化可以自行產生。而高濕度更會導致孔隙結構充滿水氣，破壞鋼筋鈍態保護膜的氯離子便可藉由擴散到達鋼筋表面，而外在海域環境的鹽霧便提供氯離子的持續來源。

對混凝土抗氯離子傳輸行為而言，目前各國標準所使用的試驗大概有兩種。分別為傳統的 ASTM C1543 貯鹽試驗（Ponding test），以及 ASTM C1202 的 RCPT 試驗。其中貯鹽試驗係將混凝土上部以氯化鈉溶液浸漬，藉由量測 90 天浸漬後氯離子進入試體的濃度與深度判斷混凝土抗氯離子入侵能力。RCPT 試驗以外加電壓加速氯離子進入試體內，藉由量測電流換算 6 小時通過電量評估混凝土抗氯離子侵入的能力。兩種試驗雖為標準規範，近年來也衍生出類似的實驗，如本研究團隊的加速氯離子傳輸試驗（ACMT）。但兩種試驗法機理明顯與實際狀況中大氣氯鹽對混凝土影響的方式不同，相關文獻也無兩者關聯性的建置。若參考金屬腐蝕的試驗法，則 CNS 8886 標準中性鹽霧試驗（spray test）可與大氣氯鹽對混凝土影響機制類似。CNS 8886 係將鹽水以 0.098 MPa 壓力在 35℃環境中由上往下噴出接觸試體。由於試驗機通常均具有控制溫度的能力，故可變換多種溫濕度形式的循環劣化鹽霧試驗。因此若將蒐集的長期大氣氯鹽資訊，因可藉由循環劣化鹽霧試驗模擬沿海結構物混凝土遭遇大氣氯鹽侵蝕的影響。

第二節　研究目的

本計畫研究目的擬藉由試驗，建立大氣氯離子對混凝土耐久性影響的關聯性，並由此建立加速鹽霧試驗方法。相關研究目的細項內容說明如下。

1. 各國大氣氯離子採集標準與關聯性文獻蒐集。

（a） 蒐集 ISO、CNS、與日本等各國大氣氯鹽試驗法標準。

（b） 比較各國大氣氯鹽試驗法標準差異性與關聯性。

2. 我國與各海島型國家大氣氯離子資料分析與試驗設計。

（a） 蒐集現有各國大氣氯鹽量測資料文獻。

（b） 整理我國大氣氯鹽量測資料，並由此建立後續試驗設計變數。

3. 加速鹽霧試驗模擬各種年期氯離子濃度混凝土劣化。

（a） 探討一般中性鹽霧試驗與循環加速劣化試驗結果之差異性。

（b） 探討加速鹽霧試驗劣化時間對混凝土氯離子侵入濃度與時間的關係。

（c） 由現有長期曝曬試驗結果建立與加速鹽霧試驗結果之關聯性。

（d） 探討加速鹽霧試驗劣化時間與長期曝曬齡期的關聯性。

4. 混凝土於各種年期氯離子濃度抗氯離子能力的評估。

（a） 探討工程實務常用的混凝土在各種加速鹽霧試驗劣化時間下，內部氯離子變化情形。

（b） 由加速鹽霧試驗結果建立與加速氯離子傳輸試驗之間的關聯性。

下頁圖 1-1 為本計畫研究流程圖。

第三節　本研究計畫之重要性

一般建築物所設的服務年限大多在 50 年左右，若妥善設計、施工、與維護，鋼筋混凝土建築物國外也有許多高達百年壽命的案例。但一般工程人員在設計建築物時對於其力學性質，如各種載重或地震力的影響均會審慎考量；但對耐久性如氯離子所造成的影響均往往會忽略，大多僅以改用較設計強度略高的混凝土或增加其保護層厚度作為因應對策，對於建築成本的增加與耐震性均產生疑慮。而過去的研究均著重於配比組成材料的改變對抗混凝土氯離子性質的影響，然而較可惜的均為相對比較影響，並沒有考慮大氣氯鹽量對混凝土性質的影響，因此無法提供一個客觀數據供設計單位評估或計算結構服務年限使用。而加速鹽霧試驗雖然較符合大氣氯鹽接觸建築物的機制，但僅用於金屬材料腐蝕評估使用，對混

凝土材料耐久性評估，則無標準試驗方法，因此本計畫以加速鹽霧試驗探討氯離子對混凝土耐久性影響進行研究有其重大意義。

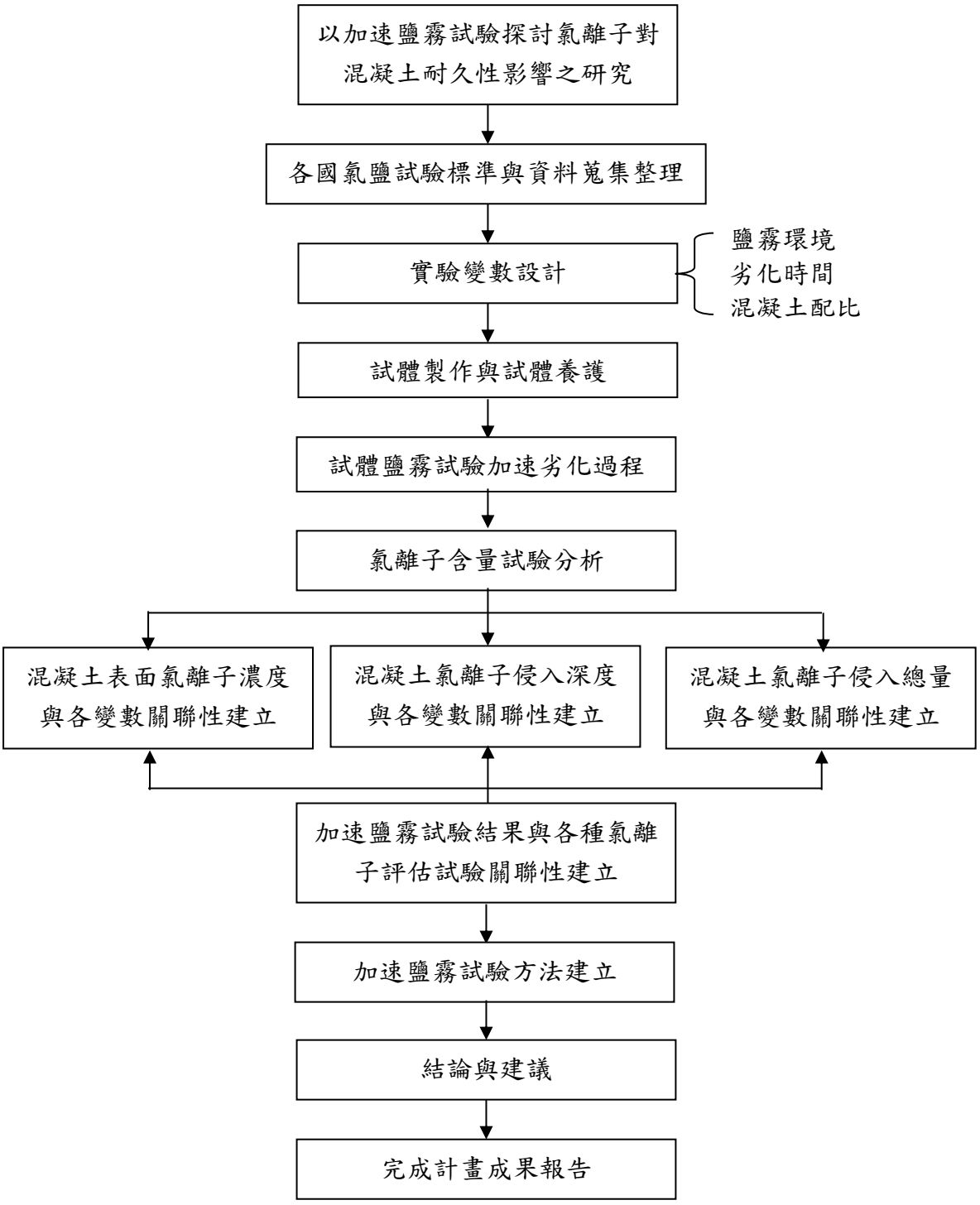

圖 1-1　研究流程圖

（資料來源：本研究自行整理）

第四節　國內外有關本計畫之研究情況

目前國內外有關加速鹽霧試驗均以金屬材料有關，各國也有相對應的試驗標準，如我國的 CNS 8886；美國的 ASTM B117；ISO 9227 與 ISO 21207 等。也有將加速鹽霧試驗運用於塗料或塑膠建材的試驗法，如 NT Build 228。但對混凝土材料的研究則較少，最近的研究為 He 等，利用加速鹽霧試驗後的混凝土試體，利用噴灑硝酸銀來建立評估氯離子入侵混凝土的試驗方法[4]；Park 等也有利用類似的方法評估含有裂縫混凝土的耐久性[5] ；Matsumura 等用高溫的鹽霧試驗評估核電廠混凝土耐久性[6]。亦有 Castro 等利用加速鹽霧試驗評估鋼筋混凝土內部鋼筋腐蝕情形[7]；Jung 等也有相關研究[8]。於大氣腐蝕研究方面，過去我國交通部運輸研究所與公路總局均有相關研究，並對各地的金屬腐蝕速率進行分類，以提供鋼結構設計參考 [3]。其他建材部分則著重於塗裝材料，塗裝材料耐久性劣化評估試驗方面，過去國內相關偏重於塗裝材料鹽霧加速劣化試驗之結果，如成大蔡文達教授針對不同塗層材料加速劣化之電化學分析[9]，以及本研究團隊過去之研究。塗裝材料耐光性方面則有台大森林系曾於南投溪頭進行塗裝木材長期曝曬試驗觀察，並與日光加速劣化之結果進行比較[10]。而林業試驗所亦有一連串木材用塗

---

[4] He, F, Shi, C., Tuan, Q., Chen, Zheng, K., "$AgNO_3$-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete", Construction and Building Materials, Vol 26, 2012, pp. 1-8.

[5] Park, S. S., Kwon, S. J., Jung, S. H., "Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation Original Research Article" , Construction and Building Materials, Vol 29, 2012, pp. 183-192.

[6] Matsumura, T., Shirai, K., Saegusa, T., "Verification method for durability of reinforced concrete structures subjected to salt attack under high temperature conditions" , Nuclear Engineering and Design, Vol 238, 2008, pp. 1181-1188.

[7] P. Castro, L. Véleva, M. Balancán, "Corrosion of reinforced concrete in a tropical marine environment and in accelerated tests" , Construction and Building Materials, Vol 26, 1997, pp. 75-81.

[8] Jung, W. Y., Yoon, Y. S., Sohn, Y. M., "Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion", Cement and Concrete Research, Vol 33, 2003, pp. 663-677.

[9]林筵進，「不同塗層在乾溼循環環境中之電化學阻抗性質研究」，國立成功大學材料工程與科學研究所碩士論文，指導教授：蔡文達教授，2002。

[10]蕭亞方，「塗裝木材人工加速與自然劣化相關性之探討」，國立台灣大學森林學研究所碩士論文，指導教授：張上鎮教授，1996。

料耐候性試驗[11,12]。長期曝曬試驗部份，國內清大施漢章教授針曾對電信材料與鋼材進行長期曝曬試驗觀察[13]，柏林塗料公司亦於麥寮地區進行 38 個月曝曬試驗[14]等。對混凝土長期曝曬試驗研究雖無少，但仍有一些老舊建築物的鑽心試驗報告可供依循。於大氣氯鹽調查方面，本研究團隊與臺灣營建研究院曾於 2006 年開始合作進行台灣苗栗以北大氣中氯鹽的調查研究。而日本土研所與美國夏威夷大學也有類似的調查研究[3]。

第五節　報告內容說明

本計畫目前已完成研究企畫書所規劃的各項工作，分別為研究背景與目的、文獻蒐集、試驗設計、4 組混凝土試體拌合養護、混凝土壓力強度量測、4 組自然曝曬混凝土與 4 組不同水灰比混凝土配比的氯離子含量、鹽霧試驗、與貯鹽試驗。表 1-1 將已執行工作內容與期末報告進行對照，此次期末報告之主要內容係於第一章介紹本計畫之研究背景與目的。第二章針對氯離子對鋼筋混凝土影響進行文獻探討。第三章蒐集並整理各國大氣氯鹽量試驗標準與相關成果文獻資料。第四章針對試驗變數設計、組成材料性質、配比設計、與實驗方法介紹。第五章針對已進行的混凝土抗壓強度試驗結果、自然曝曬混凝土與 4 組不同水灰比混凝土配比的氯離子含量、鹽霧試驗、與貯鹽試驗試驗結果進行討論。第六章針對試驗成果說明研究所獲得的結論與發現。

[11]李鴻麟、鄒哲宗、夏滄淇、顧文君，「木材用塗料耐候性之研究－塗料耐候性之比較」，林業試驗所研究報告季刊，Vol. 8, pp.321-330, 1993.

[12]鄒哲宗、夏滄淇、陳啟榮、顧文君，「木材用塗料耐候性之研究－塗料之耐候性與耐光性」，林業試驗所研究報告季刊，Vol. 10, pp.153-160, 1995.

[13]洪耀宗，「電信材料之大氣腐蝕及其防治研究」，國立清華大學材料工程研究所博士論文，指導教授：施漢章教授，2003。

[14]陳哲生、吳忠民，「耐候型塗料於麥寮地區曝曬行為研究」，中國工程師學會工程季刊，Vol. 80, pp.39-46, 2007.

表 1-1　執行工作內容與期末報告對照表

工作分項	計畫執行迄今之工作內容	期中報告位置
研究背景與目的	計畫研究流程與相關背景說明和目的確認	第一章
文獻蒐集	氯離子對鋼筋混凝土影響、各國大氣氯鹽量試驗標準與相關成果文獻資料。	第二章、第三章
試驗研究	變數設計、組成材料性質、配比設計、與實驗方法介紹	第四章
試驗研究	自然曝曬混凝土氯離子含量量測	第五章
試驗研究	貯鹽試驗與自然曝曬關聯性建立	第五章
試驗研究	鹽霧試驗與貯鹽試驗關聯性建立及驗證	第五章
結論	研究初步結論與發現	第六章

（資料來源：本研究自行整理）

第二章　文獻回顧

第一節　氯離子對鋼筋混凝土主要的危害

混凝土在鋼筋混凝土或預力混凝土中除了承受壓應力外，對結構物內部之鋼筋或鋼鍵也提供了一鹼性保護層，以延緩暴露環境中有害離子侵入，進而造成鋼筋或鋼鍵腐蝕。然而隨著結構物使用年限增加或是暴露的環境因素，可能導致混凝土劣化進而失去原有保護功能，甚且造成整體結構的毀壞。混凝土品質評估標準除抗壓強度外，耐久性亦是不可或缺之項目。影響混凝土耐久性的因素主要可以分為內部與外部的因素。內部的因素主要包括混凝土組成材料、配比設計、搗實過程、及養護等。而外部因素包括暴露環境及所承受的應力狀態等。對暴露環境中的有害離子而言，會造成鋼筋或鋼鍵腐蝕的主要因素即氯離子對鐵的親合力。由於氯對鐵及不銹鋼有很大的親和力，因此易在金屬表面上有助於在較低的相對濕度形成液膜，其在腐蝕過程中會阻止氧化膜(oxide films)的形成，進而有助於陰極上氧的還原反應，然而當金屬表面已有氧化膜或鈍態膜存在時，氯離子會破壞鈍態膜，造成孔蝕（pitting corrosion）。Cl-與鐵的作用較特別，由於 FeCl2 不是緊密結合之化合物，所以 Cl-很容易從氯化亞鐵中釋放出來，再與其他金屬作用，進而加速腐蝕反應[3]。

對氯離子進入混凝土的機制而言，氯離子必須藉由濃度差機制進行擴散運動。當水氣會由吸附與毛隙吸收現象進入混凝土孔隙中，並因蕊絲現象(wick action)逐漸讓孔隙充滿水分。當連通孔隙呈現水飽和狀態後，外界氯離子會利用與孔隙水中氯離子濃度上的差異進行傳輸，此即擴散現象。當氯離子擴散至鋼筋鈍態保護膜表面時，若此時混凝土內部孔隙水的 pH 值並未低於一定狀態（即中性化），則鋼筋並不會腐蝕。但當孔隙水中氯離子濃度與氫氧根濃度（$[Cl^-]/[OH^-]$）大於一定值時，便會開始破壞鈍態保護膜以及阻止其再形成。下列方程式為其氧化反應方程式。鋼筋腐蝕導致體積積膨脹，致使混凝土受擠壓應力，造成龜裂，進而保護層剝落，危害結構物安全。

$$2Fe + 6Cl^- \rightarrow 2FeCl_3^- + 4e^- \quad (2\text{-}1)$$

$$FeCl_3^- + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 3Cl^- \quad (2\text{-}2)$$

$$4Fe(OH)_2 + \quad 2H_20 + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3 \quad (2\text{-}3)$$

而在混凝土內氯離子濃度造成鋼筋腐蝕門檻值得研究方面，過去有許多學者進行相關研究與調查。亦有如 Ann 和 Song[15]、與 Angst[16]等將文獻進行整理分析。圖 2-1 為 Angst 整理各學者針對造成鋼筋腐蝕的混凝土氯離子濃度門檻值。其中若以實際戶外曝曬量測的試驗結果，則總氯離子量介於 0.1%至 1.96%，而在實驗室內研究情形則以 0.04%至 8.34%，雖然其範圍甚大，但扣除極端試驗結果，大部分最低門檻值以 0.4%最多。目前各國對硬固混凝土總氯離子含量限制，如歐洲相關國家均以總氯離子含量 0.4%為限制標準[17]，故有其參考性，而 Ann 和 Song 整理的結果為 0.2%至 1.5%，大部分最低門檻為 0.5%。

圖 2-2 亦為 Angst 整理的各學者 Cl^-/OH^- 門檻文獻研究資料，其值介於 0.01 至 45，扣除極端試驗結果，則 Cl^-/OH^- 最低門檻為 0.3 至 0.6 之間。若以孔隙水 pH 值 11~13 的混凝土而言，氯離子要超過水泥重的 0.2 到 0.4%，Cl^-/OH^- 才會大於 0.6。所以混凝土中性化程度也是影響鋼筋是否腐蝕的重要因素。

[15] Ann, K. Y., and Song, K. Y., “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete”, Corrosion Science, Vol.49, pp.4113-4133, 2007.

[16] Angst, U., Elsener, B., Larsen, K. C., Vennesland, O., “Critical chloride content in reinforced concrete- A review”, Cement and Concrete Research, Vol.39, pp.1122-1138, 2009.

[17] BS EN 206-1 “Eurocode 2. Design of concrete structures. General rules and rules for buildings “, British-Adopted European Standard, 2004.

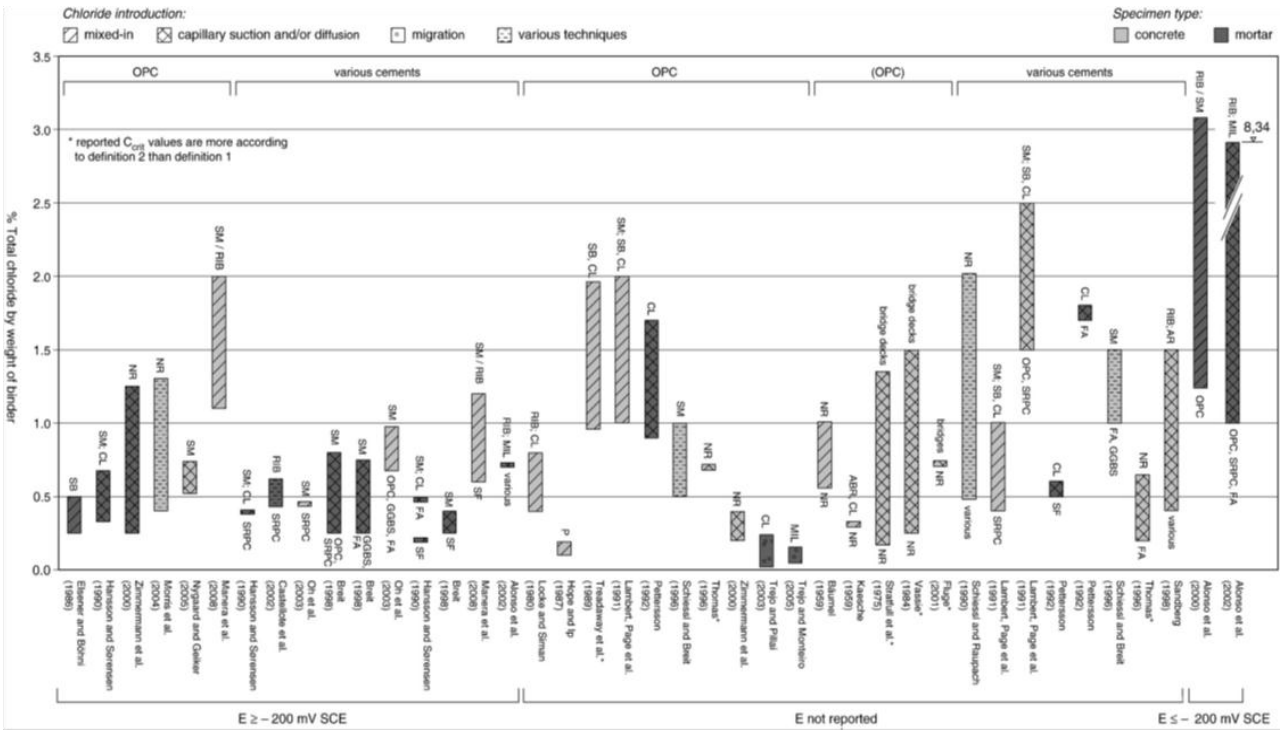

圖 2-1　造成鋼筋腐蝕的混凝土氯離子濃度門檻文獻整理圖

（資料來源：文獻 16）

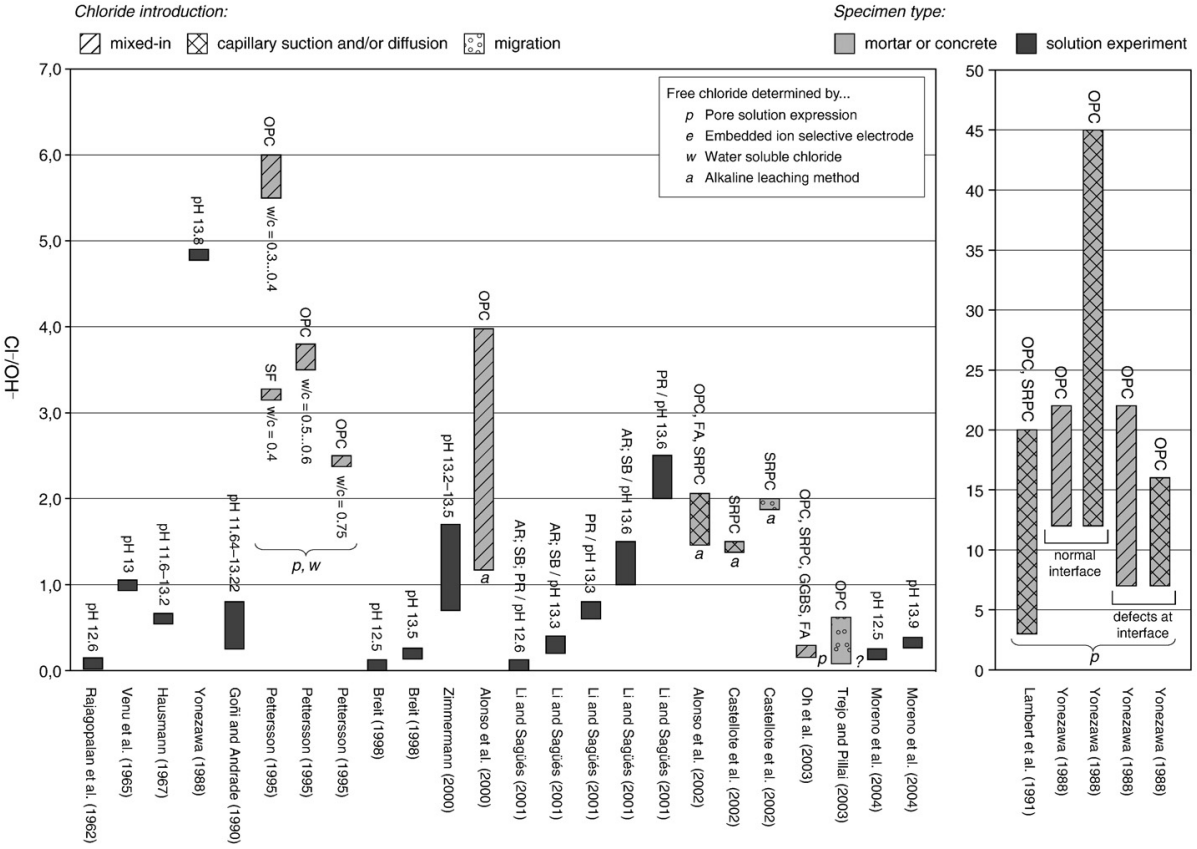

圖 2-2　造成鋼筋腐蝕的混凝土 Cl^-/OH^- 門檻文獻整理圖

（資料來源：文獻 16）

第二節　氯離子於混凝土中傳輸途徑與機制

氯離子侵入混凝土與孔隙結構之連通性有相當影響，Wu 等[18]提出氯離子侵入混凝土內部孔隙的三種傳輸途徑，其分別為(1)水泥漿體相互連通之孔隙;(2)骨材相互連通之孔隙;(3)水泥漿體與骨材間界面過渡區。對於離子的傳輸途徑，漿體的緻密性與孔隙體積會影響氯離子之擴散速率。若水化達到一定程度時，毛細孔隙體積會隨水灰比而改變，水灰比增加時，毛細孔隙體積也隨之增加，相對也影響骨材與漿體介面之鍵結強度與性質;若離子於骨材之滲透行為低於水泥漿體與骨材和漿體的界面時，會因水泥漿體內含有較多孔隙率，使得成為主要擴散途徑，導致混凝土對氯離子之抵抗降低與增加氯離子擴散係數。

氯離子於混凝土中傳輸，需以水為媒介，藉由水進入混凝土內部連通孔隙中。混凝土結構物與水接觸，混凝土表面的水首先會藉由混凝土毛細管與液面之間的壓力差吸收進入混凝土內部，再藉由內外部的濕度差，導致進入孔隙的水利用水氣蒸發擴散至混凝土內部，當混凝土內外濕度逐漸相同時，孔隙間的含水狀態亦趨近飽和。此時若混凝土處於含有氯離子環境中，氯離子便容易伴隨著水氣進入混凝土中，而後氯離子在孔隙水中藉由濃度差的擴散機制在連通孔隙網絡中移動直至接觸鋼筋表面造成腐蝕。因此離子於混凝土材料中實際的傳輸行為，依順序分別為：(1) 離子以水為媒介被吸收進入混凝土；(2) 漸轉為離子由於孔隙水蕊絲現象隨著水氣的蒸發擴散；(3) 當孔隙水飽和時，轉由利用離子於水中濃度上的差異進行傳輸。對混凝土材料本身來說，連通孔隙結構（孔隙率、孔徑、蜿蜒度）與孔隙內部相對濕度（或含水量）均影響離子傳輸速率的快慢。而由傳輸型態區分，順序（1）與（2）均屬於非穩態傳輸行為。而影響離子傳輸的機制，依 Johannesson 分類可分為五大類[19]：

1. 擴散機制：由於混凝土內部連通孔隙水所含的離子濃度較低，因此暴露環境中的離子可藉由重量濃度梯度的不同，造成離子由高濃度位置流向低濃

[18] X. Wu, L. Xu, Q. Yang, S. Huang,"The diffusion equation of chloride ions in cement mortar"Trans Shanghai Building Materials Collection Vol.4, pp.364-372(1991).

[19] B. F. Johannesson, "Diffusion of a mixture of cations and anions dissolved in water", Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp.1261-1270 (1999).

度位置。

2. 外力對流機制：離子藉由外界的力量梯度導致移動。例如毛細管孔隙水的吸收現象。
3. 離子吸附與析出機制：孔隙管壁的電雙層作用（electrical double layers）或與漿體產生化學反應導致離子吸附於水化生成物表層（孔隙管壁）和析出於孔隙水中。
4. 內部電化學反應機制：因電化學的氧化還原反應所造成的移動，如鋼筋腐蝕。
5. 外加電場機制：藉由混凝土外部施加電場使得整個電解反應產生，造成離子流在陰陽極間游動。

第三節　現行相關氯離子對混凝土耐久性評估試驗方式

目前常進行的氯離子傳輸試驗主要有 2 種，分別為傳統的 ASTM C1543 貯鹽試驗、ASTM C1202 的 RCPT 試驗。但這兩種方法仍僅為混凝土配比間相互耐久性的比較，較無法提供一個建議值，給設計人員去評估混凝土的使用年限。

貯鹽試驗 (Ponding Test)

1980 年以前貯鹽試驗就已成為 AASHTO 的試驗規範 AASHTO T259。在 2002 年 ASTM 也列入正式規範，即 ASTM C1543。此規範在適用範圍上，說明此方法主要計算 NaCl 溶液由混凝土表面進入內部的氯離子含量。但試驗最少天數為 90 天（AASHTO T259 規定為 90 天，因此亦稱為 90 days Ponding test），ASTM C1543 亦將 90 天認為是最初的取樣時間，建議必要時需進行 6 個月或 1 年浸泡的取樣間隔。由於試驗時間太長，因此相關文獻[20,21]將此試驗歸類為長期試驗與用來驗證其他加速試驗之準確性。

[20] Arsenault, J. P. Bigas, J. P. Ollivier,“Determination of chloride diffusion coefficient using two different steady-state methods：influence of concentration gradient ”Chloride Penetration into Concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop pp.150-160, (1993).

[21] 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).

快速氯離子穿透試驗（RCPT）

AASHTO T277（ASTM C1202）快速氯離子穿透試驗（Rapid Chloride Permeability Test），主要將飽和處理之試體嵌入兩個容量約為 250ml 的試驗槽之間，組合成一施加電壓單元。其中在一試驗槽中放入 0.3M 氫氧化鈉溶液作為陽極槽，另一試驗槽放入 3% 氯化鈉溶液做為陰極槽。並施加 60V 直流電壓來驅動離子，評估方式為將 6 小時試驗期間內所量測的電流值轉換成總電荷量，藉由總電荷量大小評估水泥基複合材料抗氯離子入侵能力。

此規範在適用範圍上即說明本試驗主要以混凝土導電性的決定做為評估混凝土抗氯離子入侵能力的快速指標。而表現混凝土導電性質的方式則利用外加的 60V 直流電壓使得氯離子快速進入混凝土材料中，藉由量測得到的電流值計算 6 小時內總通過電量(total charge passed)，用以評估混凝土抵抗氯離子滲透的能力。由於這個方法具有耗時較短與量測方式精簡等優點，因此目前廣泛應用於評估混凝土耐久性試驗中，但很多研究文獻[22,23,24]中指出 RCPT 尚有許多缺失，尤其是添加礦物摻料時常低估混凝土抵抗氯離子滲透的能力。

在上述各種試驗結果與抗壓強度的關係方面，A-Amoudi 等人以矽灰與飛灰礦物摻料、水膠比變數的混凝土進行試驗，並嘗試建立關聯性如圖 2-3、圖 2-4、與圖 2-5 所示[25]。由圖中的迴歸曲線可以建立耐久性指數（DI）與抗壓強度（f_c'）的關係，式中 a、b 為圖中數據的迴歸係數，而由相關係數發現耐久性指數與部分種類的混凝土強度會呈現較好的關聯性，如一

[22]T. H. Wee, A. K. Suryavanshi, and S. S. Tin, "Influence of aggregate fraction in the mix on the reliability of the rapid chloride permeability", Cement and Concrete Composites, Vol. 21, pp.59-72 (1999).

[23] W. Prince, R. Pérami, and M. Espagne, "Mechanisms involved in the accelerated test of chloride permeability", Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp.687-694 (1999).

[24] A. A. Ramezanianpour, "Effect of curing on the compressive strength resistance to chloride-ion penetration and porosity of concrete incorporating slag, fly ash or silica fume", Cement and Concrete Composites, Vol. 17, pp.125-133 (1995).

[25] O. S. B. Al-Amoudi, W. A. Al-Kutti, S. Ahmad, and M. Maslehuddin, "Correlation between compressive strength and certain durability indices of plain and blended cement concretes", Cement and Concrete Composites, Vol. 31, pp.672-676 (2009).

般混凝土與矽灰混凝土，其中以貯鹽試驗的相關係數較佳。

$$DI = {a}/{(f_c')^b} \qquad \text{式(2-1)}$$

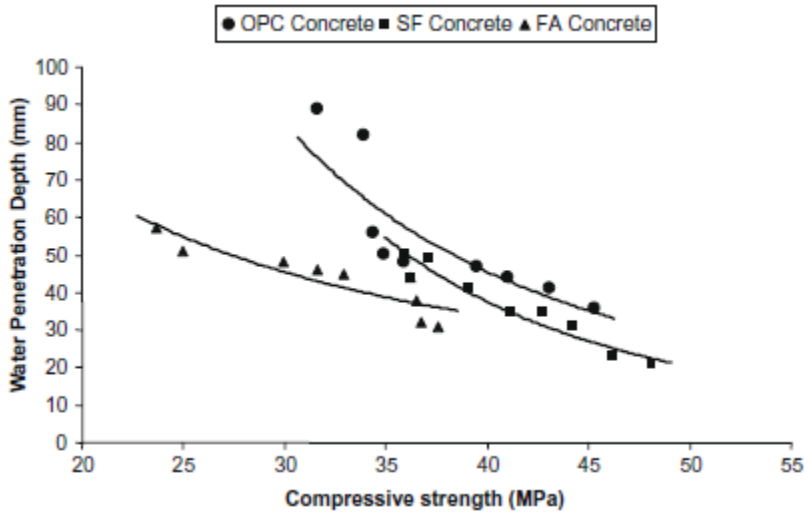

圖 2-3　透水試驗水侵入深度結果與抗壓強度文獻整理圖 [25]

（資料來源：文獻 25）

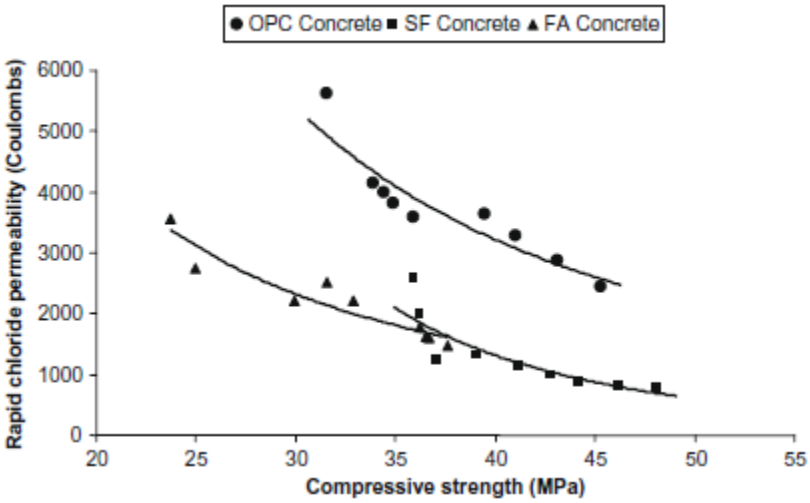

圖 2-4　RCPT 試驗總通過電量結果與抗壓強度文獻整理圖 [25]

（資料來源：文獻 25）

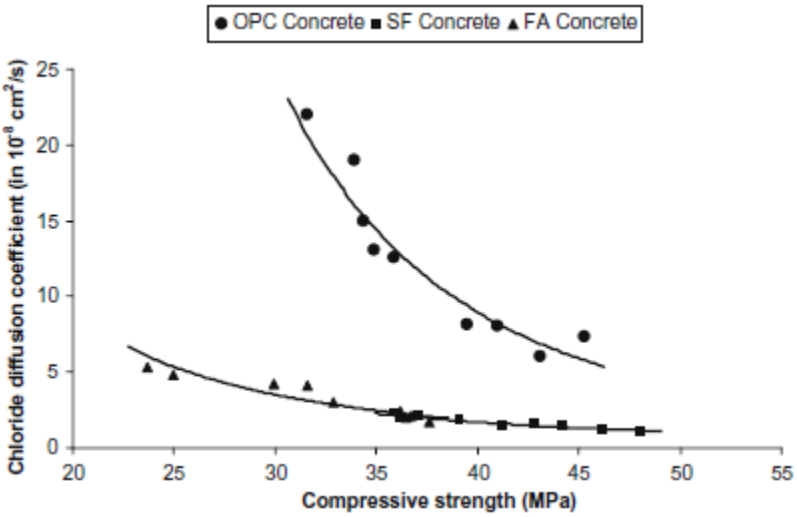

圖 2-5　貯鹽試驗擴散係數結果與抗壓強度文獻整理圖 [25]

（資料來源：文獻 25）

第四節　鹽霧試驗

鹽霧試驗（salt spray test）是目前常用於金屬建材的加速劣化試驗，並為 ISO 9227、CNS 8886 試驗標準。主要原因在於劣化過程所耗費時間較短，且可明顯看到金屬建材腐蝕生成物的產生，可以讓工程設計人員迅速得到某金屬建材的抗腐蝕能力。其主要腐蝕因子僅考量海域環境中的氯離子。所產生的腐蝕行為是氯離子具較小離子半徑特性與一定之水合能的因素。鹽霧試驗與自然曝曬試驗不同處在於鹽水噴霧試驗屬人工加速劣化試驗。將待測建材放入包含噴霧室、溫濕度調節設施、鹽液儲存設備之鹽霧劣化試驗箱。其中噴霧室的容積至少為 0.2 m^3，並包含鹽水噴霧裝置與試片支架。而鹽霧劣化的產生主要由壓縮空氣以一定的壓力將鹽水輸送至噴霧裝置噴嘴，形成 0.098±0.010 MPa 的壓力，使鹽霧均勻噴灑在試片上。其試片大多採用 70 × 150 mm 或 60 × 80 mm 的平板試片，以 20±5 度角放置在支架上。鹽霧劣化所使用的鹽液通常為 5%的氯化鈉溶液，其濃度大於海水中氯離子的濃度，其試驗過程最多不超過 1000 小時，相對於自然曝曬劣化以年為計算周期，可以說是較為迅速。鹽霧劣化試驗一般可分為中性鹽霧劣化試驗（neutral salt spray test, NSS）、醋酸鹽霧劣化試驗（acetic acid salt spray test,

AASS)、與含銅加速醋酸鹽霧劣化試驗（copper-accelerated acetic acid salt spray test, CASS ）。

在混凝土方面，目前雖無相關文獻之研究，但鹽霧試驗方式與大氣氯鹽對混凝土影響機制類似，因此本研究擬藉由試驗建立大氣氯離子對混凝土耐久性影響的關聯性，並由此建立加速鹽霧試驗方法。

第三章　大氣氯鹽量測方法與相關文獻

第一節　大氣氯鹽量測方法

由於大眾對房屋結構耐久性意識抬頭以及混凝土品管制度的重視，目前國內對新拌混凝土均需逐批進行檢測與管制，所以使用海砂作為混凝土原料的情形已鮮少發生。因此大氣飛來鹽分中所帶的氯離子便成為主要來源，尤其於海岸環境中的建築物。目前常用於測量大氣氯鹽的方式分別為 ISO 9225 濕燭法，以及日本 PWRI（Public Works Research Institute, 獨立行政法人土木研究所）的土研法。而韓國 Korea Institute of Construction Technology 也有發展類似的實驗方式 K3 與 K3h。

ISO 9225 濕燭法[26]，在我國規範為 CNS 13754[27]。係利用紗布吸收帶有氯化物的濕氣，以計算氯化物沉積量。最後再配合二氧化硫沉積量數據判斷 τ、P、S 三個因子等級交集判斷此金屬建材在大氣環境中的腐蝕特性，分別為 C1 至 C5 共五個等級。其試驗方法為利用布與塑膠材質組成的濕式蠟燭，使得帶有氯化物的濕氣經由紗布排入濕式蠟燭底部的收集瓶內，收集瓶內吸收空氣中氯鹽之溶液組成係用 200 mL 甘油 $C_3H_8O_3$ 與 1000 mL 蒸餾水混合後加入 20 滴辛酸以防止菌類繁殖。為避免下雨所導致的試驗誤差，濕式蠟燭與收集瓶需以不鏽鋼材質棚架遮蔽，如圖 3-1 所示。而依 CNS 13754 規範建議每月需將收集瓶取回，以滴定方式甘油溶液內的氯鹽含量。而取回過程需小心以約 200 mL 之蒸餾水清洗燭芯上的紗布，使附著於紗布流入收集瓶內。取回後再將濕式蠟燭裝在新的採集瓶上，繼續進行氯鹽採集工作。

日本 PWRI 土研法係由 JIS Z2382 規範紗布法改良而來[28]，係利用飛來鹽分捕集器進行，相關儀器如圖 3-2 所示。採集器整體除鹽分採集片與採集容器外幾乎均以不鏽鋼製作；鹽分採集片以壓克力材質製作且可自由更換，並以每年 1

[26] ISO 9225, “Corrosion of metals and alloys -- Corrosivity of atmospheres”, International Organization for Standardization, 2012.

[27] CNS 13754，「金屬及合金之腐蝕—大氣腐蝕性（污染之測定）」，中華民國國家標準。

[28] JIS Z2382，「大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定」，日本工業標準，1998。

次之頻率更換鹽分採級片。採集器設置前，需以去離子水洗淨採集片、矽膠水管及塑膠桶內部。採樣時先以去離子水將溝槽及矽膠水管內的鹽分洗進塑膠桶內，並量測塑膠筒內之水重，充份攪拌後取回部分水樣。回收的水樣以滴定法分析鹽分濃度，並以下式計算氯鹽分量。

$$\text{鹽分量}(mdd)=\frac{\text{鹽分濃度}(mg/ml)\times\text{塑膠桶內的水量}(ml)}{\text{調查期間}(day)\times\text{收集板面積}(dm^2)} \qquad (3\text{-}1)$$

其中鹽分量 $mdd=1mg/dm^2/day$ ，$1dm^2=100cm^2$

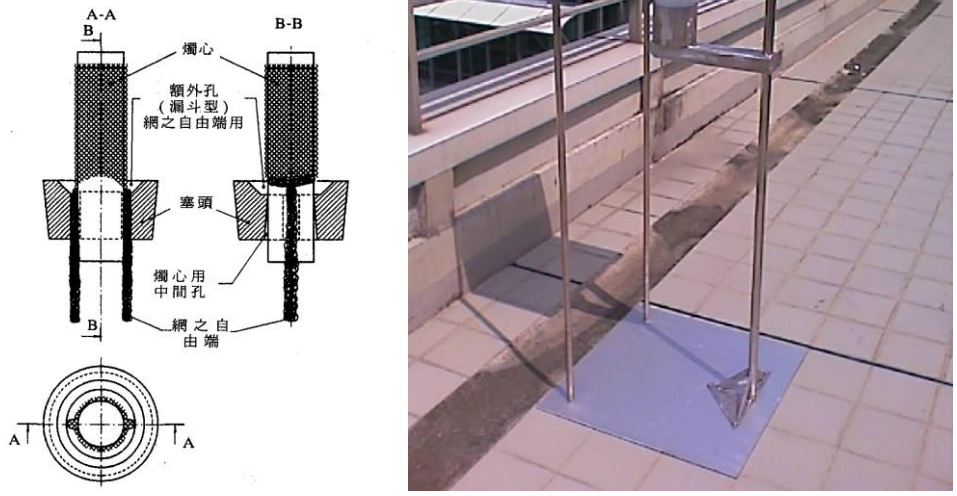

圖 3-1　ISO 9225 濕燭法示意圖與其實品照片

（資料來源：本研究自行整理）

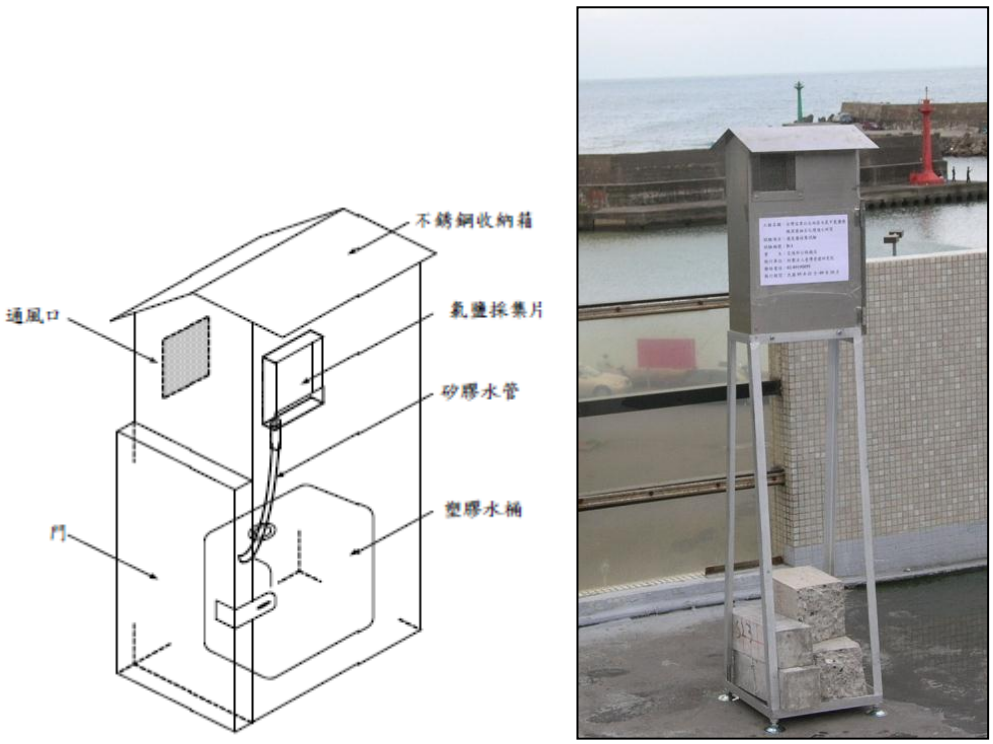

圖 3-2　日本 PWRI 土研法飛來鹽分捕集器示意圖與其實品照片

（資料來源：本研究自行整理，文獻 3）

韓國 KSCE 綜合上述日本與 ISO 濕燭法發展出 K3 與 K3h 試驗法 [29]。K3 試驗法與 PWRI 和 JIS Z2382 不同在於採用 2 組 10 cm×10 cm 氯鹽採集片，且為避免強風豪雨將氯鹽帶走在採集器下方底部設計 2cm 高度的擋版，如圖 3-3 所示。而 K3h 試驗法的收集原理與 ISO 濕燭法類似，於採集採集器下方底部放置水補給裝置。K3 與 K3h 試驗採集器如圖 3-3 所示。

[29] J. K. Lee, and H. Y. Moon, “Salinity distribution of seashore concrete structures in Korea”, Building and Environment, Vol. 41, pp.1447-1453 (2006).

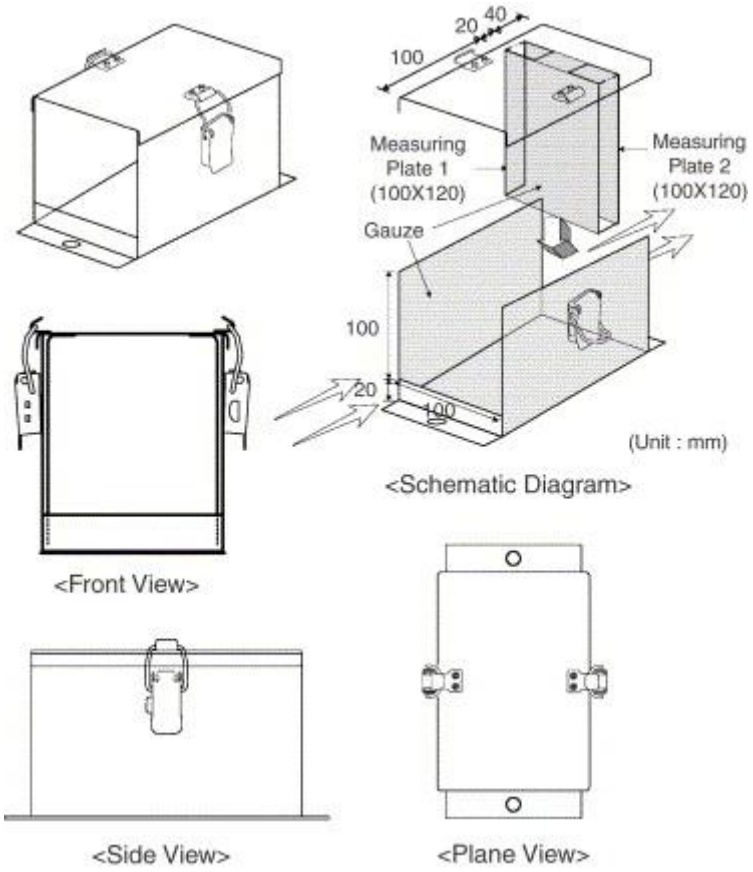

圖 3-3　韓國 K3 系鹽分捕集器示意圖 [29]

（資料來源：文獻 29）

第二節　國外大氣氯鹽沉積量測文獻

大氣氯鹽沉積量大多屬於多年期的研究成果或大型計畫。因此國內外相關文獻均較少。國外有與我國同樣為海島型氣候的日本與美國夏威夷；或沿海的孟加拉與韓國等進行相關研究。

在日本研究方面，主要以獨立行政法人土木研究所於 1984 年至 1987 年在日本全國佈設 266 個量測點，以土研法進行氯鹽沉積量研究[30]。圖 3-4 為日本飛來鹽分量全國調查結果，並將其區分成<0.1 mdd、0.1~1 mdd、1~10 mdd、與>10 mdd 共四種區域。

[30]日本獨立行政法人土木研究所構造橋樑部橋樑研究所，「飛來鹽分量全國調查（Ⅳ）-飛來鹽分量的分佈特性與風的關係-」土木研究所資料 第 3175 號 pp. 1~26，1993 年 3 月。

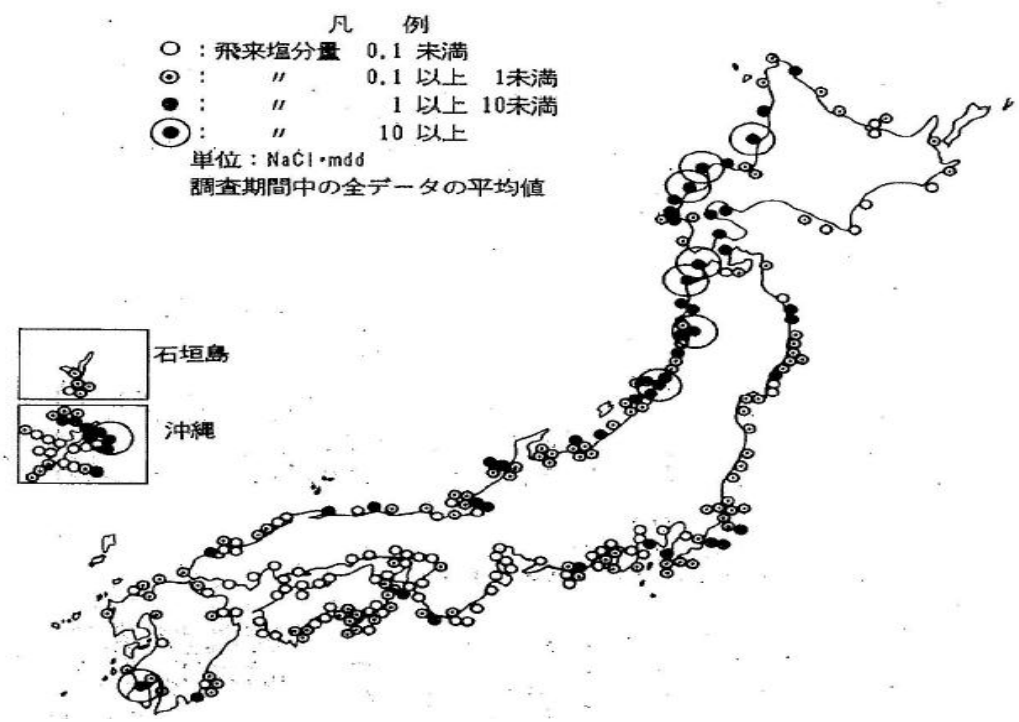

圖 3-4　日本飛來鹽分量全國調查結果[30]

（資料來源：文獻 30）

而後續秋山充良等[31]針對試驗結果以及測站與海岸線距離和所測風速整理成氯鹽沉積量與距離關係式，如下式所述。

$$C_{air} = 1.29 \times r \times u_r^{0.386} \times d^{-0.952} \qquad (3\text{-}2)$$

式中氯鹽量 C_{air} 單位為 mdd（mg/100 cm^2/day）、有效風向 r 單位為%、有效風速 u_r 單位為 *m/sec*、距離 d 單位為 Km。

美國夏威夷的研究方面，夏威夷運輸部門曾於 2003 年委託 Malalis 和

[31]秋山充良、伊東佑香、鈴木基行，「信頼性理論を用いた塩害劣化作用を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価の試み」土木学会第60回年次学術講演会，2005年9月。

Robertson 於 Oahu 島設置 50 個 ISO 濕燭法量測設備進行 2 年期研究[32]，圖 3-5 為其研究結果，其單位為 mg/m^2/day，若化成 mdd 則需除以 100，由圖中可以發現普遍大於 5 mdd，但此報告雖由風向說明氯鹽量的多寡，但未進行深入分析。

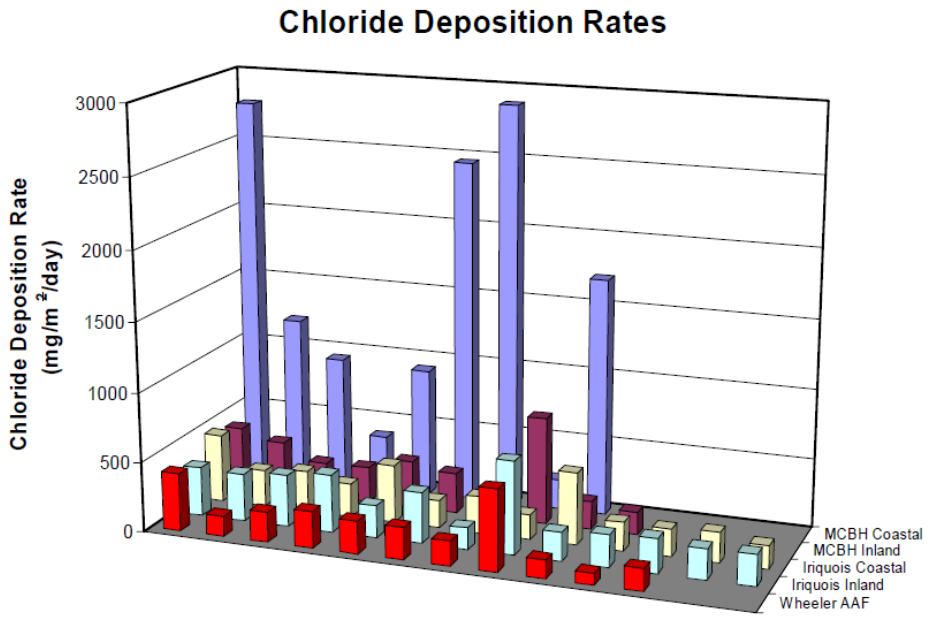

圖 3-5　美國夏威夷 Oahu 島調查結果[31]

（資料來源：文獻 31）

在孟加拉研究部分，Hossain 和 Easa[33]以 12 個距離海岸不同的濕燭法量測設備進行 1 年期研究。由量測結果得到氯鹽量與距離之間的關係為 $C_{air} = 4.478 \times L^{-0.744}$ 但此結果並未考量風向與雨量等因素。

在韓國研究方面，Lee 與 Moon 於韓國東、西、與南側進行 1 年期的飛來鹽分收集研究，並進行期開發的 K3 系列採集器與日本 PWRI 法和 ISO 濕燭法之間

[32] Malalis, R. R., and Robertson, I. N., "Island mapping of chloride deposition rate", Research Report UHM/CEE/06-05, May, 2006.

[33] Hossain, K. M. A., and Easa, S. M., "Spatial Distribution of Marine Salts in Coastal Region Using Wet Candle Sensors", International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, Vol.7, No.3, 2011,pp.228-235.

的關聯性研究 [28]。由 23 個區域，73 組測點一年度飛來鹽分收集工作發現飛來鹽分會受到四季氣候與季風的影響。且 K3 系列採集器在飛沫帶所收集的飛來鹽分結果會與 PWRI 法接近。

第三節　國內大氣氯鹽沉積量測文獻

在國內研究部分，於 ISO 濕燭法方面，近期的研究有財團法人工業技術研究院於 2007 年接受交通部運輸研究所委託的 2 年期研究[34]。此研究在我國沿海地區佈置 77 個濕燭法量測設備。並藉由其過去研究資料以距離海岸線 3 km 為邊界，選擇 9 個位置設置臨海、100m、300m、1 km、3 km 試驗線。而 2 年期試驗結果配合 54 個二氧化硫沉積量調查結果與各種金屬材料腐蝕試驗結果，建立臺灣地區大氣腐蝕劣化分區。

臺灣西部海岸的氯鹽沉積速率以初秋到冬季最為嚴重，約在6 ~ 80 mg/m^2/day之間，東部海岸的氯鹽沉積速率則以夏季至初秋，約為15~30 mg/m^2/day。比較北部與南部則以北部氯鹽沉積速率較高，南部均低於10 mg/m^2/day。並以風向與風量說明西部氯鹽沉積速率受到東北季風的影響，而東部受到夏季季風及颱風影響較大。在距海遠近方面，則與其過去研究的試驗結果相同，即距離海岸超過3000m 以上時，氯離子的沉積速率已明顯減少。

於PWRI土研法研究方面，國內財團法人台灣營建研究院3於2006年接受交通部公路總局委託的近4年（44個月）研究[3]。本研究團隊亦參與此項研究，並於計畫結束後，持續進行海洋大學試驗點觀測。此研究於臺灣北部（苗栗以北縣市）佈置50個飛來鹽分採集器。於台北金山、桃園竹圍及苗栗白沙屯3處，分別在0 m、50 m、100 m、150 m、250 m、500 m、1000 m 及3000 m 距離處佈設8 個試驗點，桃園竹圍更於9000 m 距離處佈設1個試驗點。除此之外亦於海洋大學、金山、

[34] 陳桂清、柯正龍、羅建明、羅俊雄，「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究」，交通部運輸研究所研究報告，MOTC-IOT-97-H1DB002，2009。

竹圍漁港測點增設相對高程約20公尺之採集器。因此此計畫分別探討距海遠近、風向、雨量、高程對飛來鹽分的影響。由量測結果並建立臺灣北部氯鹽年平均等位線分佈圖，如圖3-6所示。由圖中可以發現苗栗以北至基隆地區之氯鹽量的特性，基本上可將桃園竹圍漁港視為地理上之分界，桃園竹圍以北至基隆海洋大學地區的氯鹽落鹽量均較桃園竹圍以南至苗栗白沙屯地區為高。如以各季節之氯鹽量觀察之，各地區之氯鹽落鹽量均在秋季達到最高。桃園竹圍以北至基隆海洋大學地區冬季落鹽量均遠較春、夏二季來的高，而夏季通常又比春季低；桃園竹圍以南至苗栗白沙屯地區，春、夏二季落鹽量均較冬季高，而夏季通常又比春季高，此乃桃園竹圍以北至基隆海洋大學地區冬季時受東北季風響較深，而桃園竹圍以南至苗栗白沙屯地區於夏季時受西南季風影響所致。

圖 3-6 臺灣北部氯鹽年平均等位線分佈圖（單位：mg/100cm²/day）[3]

（資料來源：文獻 3）

若單以距離來進行探討，則苗栗以北至基隆各地區氯鹽沉積量與離海岸線距離之迴歸式如下表 3-1 所示。

表 3-1 苗栗以北至基隆各地區氯鹽沉積量與離海岸線距離之迴歸式 [3]

地區	迴歸公式
基隆	$C_{air}=32.1d^{-0.60}$
台北金山	$C_{air}=67.9d^{-0.62}$
台北三芝	$C_{air}=15.5d^{-0.61}$
桃園竹圍	$C_{air}=17.2d^{-0.58}$
桃園永安	$C_{air}=17.2d^{-0.58}$
新竹漁港	$C_{air}=7.6d^{-0.57}$
苗栗龍鳳	$C_{air}=8.5d^{-0.57}$
苗栗白沙屯	$C_{air}=8.9d^{-0.57}$
備註：C_{air} 為氯鹽量(mg/100cm²/day) d 為離海岸線距離（m）	

（資料來源：文獻 3）

當風向、雨量等氣象因子加入氯鹽沉積量的探討時，則藉由試驗結果迴歸分析的到下面預測公式。

$$C_{air}=0.05\times r\times u_r^{1.27}\times w_r^{0.4}\times d^{-0.6} \qquad (3\text{-}3)$$

式中 C_{air}：氯鹽量（mg/100cm^2/day）

r：有效風向百分比（%）

u_r：有效風速（m/sec）

w_r：有效雨量（mm）

d：離海岸線之距離（m）

第四章　試驗計畫

第一節　試驗變數設計

本研究計畫將混凝土進行不同劣化時間的加速鹽霧劣化試驗，由其試驗結果比對大氣氯鹽觀測資料與混凝土長期曝曬資料，分析其關聯性，進而可建立適合混凝土抗氯離子能力特性分析的加速鹽霧試驗。因此首先須建立加速鹽霧試驗所需的試驗條件設定，而後以此設定進行各種變數混凝土的加速鹽霧試驗。相關說明如下。

1.加速鹽霧試驗條件設定

A.鹽水溶液設定

加速鹽霧試驗條件設計主要為鹽水溶液設定，傳統加速鹽霧試驗所使用之鹽水溶液與噴霧量依 CNS 8886 為使用化學試藥級的氯化鈉加入導電率低於 20 μS/cm 的去離子水，其濃度為 50±5 g/L，比重在 1.029 至 1.036 之間，而 pH 必需維持在 6.5 至 7.2 間。試驗時噴霧室試片支架附近的溫度與鹽水儲存槽內的溫度需保持在 35±2℃內。其中噴霧液取樣要求在設備充滿噴霧狀態下運轉 24 小時候進行，其取樣筒的水平面積必須為 80 cm^2，每小時需平均收集 1 mL 液體樣本，取樣後測試其濃度、比重、與 pH 值判斷是否合乎標準試驗鹽液之規定。而經由本研究團隊過去 4 年之研究[3]，我國腐蝕行為較鹽重的北部地區沿海總氯鹽量平均值最高值約為 9.84 mg/100 cm^2/day。加速鹽霧試驗劣化的氯落鹽量大於現地值，表示其具模擬加速劣化之能力。

B.劣化環境狀態設定

傳統加速鹽霧試驗劣化環境係為 35℃的連續噴霧環境，由於金屬材料表面遠較混凝土緻密，因此連續噴霧環境會促使氯離子破壞表面的鈍態保護膜。然而混凝土為多孔性複合材料，氯離子需藉由吸附與擴散機制進入混凝土中到達鋼筋表面，因此連續噴霧環境是否會加速混凝土劣化仍有疑慮，因此本計畫以北歐測試合作組織（Nordisk Innovations Center test methods, nordtest）的 NT Build 228-Prohesion 鹽霧循環劣化試驗方式，採 4 個小時 20±5℃的噴霧過程和 2 個小

時 35±2℃的乾燥過程，探討乾濕循環的噴霧條件對氯離子傳輸機制的影響。

C.劣化時間設定

傳統金屬材料加速鹽霧試驗劣化進行時間最長約為 1000 小時（41.67 天），因此本研究參考過去研究與落鹽量數據，與混凝土材料大多以天數計算，進行 240 小時（10 天）、480 小時（20 天）、720 小時（30 天）、960 小時（40 天）的劣化試驗。

2.混凝土配比變數設計

於混凝土變數方面，本研究先針對過去本團隊研究已有 4 組長期曝曬氯離子含量資料的混凝土配比進行延續性試驗[3]，配比變數如表 4-1 所示，並較原服務建議書多兩組試驗配比。相關配比規劃當初係參考沿海混凝土橋樑可能使用的混凝土配比，因此除設計強度 245 kgf/cm^2 與 350 kgf/cm^2 的傳統混凝土配比外（I245、I350），亦設計地下結構單元所使用的 II 型水泥混凝土配比（II350）以及未來趨勢與有添加飛灰與爐石礦物摻料的自充填混凝土（SCC），所灌製大型試體尺寸為 225 cm×60 cm×100 cm。目前已於基隆沿海 10 公尺區域曝曬超過 5 年（如圖 4-1 所示），過去已進行 540 天、720 天、與 840 天曝曬期氯離子深度量測，此次將進行 1850 天曝曬期試驗。除此之外亦以業界常用混凝土設計強度範圍設計水灰比 0.35 至 0.65 混凝土配比共 4 組為變數設計進行試驗（較服務建議書多兩組試驗配比）。經整理後相關試驗變數如下表 4-2 所示。

表 4-1 過去研究已有長期曝曬混凝土配比資料[3]（單位：kg/m^3）

配比編號	水膠比（w/b）	水泥（型式）	爐石	飛灰	粗骨材	細骨材	水	化學摻料
I245	0.57	310 (I 型)	-	-	914	935	178	4.65
I350	0.45	400 (I 型)	-	-	945	823	180	2.20
II350	0.45	400 (Ⅱ型)	-	-	945	823	180	2.20
SCC	0.40	255 (I 型)	85	85	761	952	170	4.25

（資料來源：文獻 3）

圖 4-1　過去研究已有長期曝曬混凝土（於基隆沿海 10 公尺區域曝曬）[3]

（資料來源：文獻 3）

表 4-2　試驗變數設計表

變數項目	變數說明
鹽水溶液	50±5 g/L
劣化環境	1. 連續噴霧環境。 2. 四個小時 20±5℃的噴霧和二個小時 35±2℃的乾燥複合循環噴霧過程
劣化時間	0 小時、240 小時（10 天）、480 小時（20 天）、720 小時（30 天）、960 小時（40 天）
混凝土配比	1. 過去文獻已有長期曝曬氯離子含量資料的混凝土配比 4 組（較服務建議書多兩組試驗配比） 2. 水灰比 0.35 至 0.65 混凝土配比 4 組（較服務建議書多兩組試驗配比）

（資料來源：本研究自行整理）

第二節 混凝土組成材料

1.水

混凝土試體拌合所用的水為符合 CNS 13961 與 ASTM C94 規範所規定的混凝土拌合用水，一般常使用自來水，其相關性質如表 4-3 所示。

表 4-3 拌合水試驗結果(ppm)

試驗項目	含量
氯離子	0.35
硫酸根離子	0.20
鹼性物質 ($Na_2O+0.66K_2O$)	0.31
總固體含量	0.01

（資料來源：台灣自來水公司）

2.水泥

本計畫試驗採用台灣水泥公司所生產的卜作嵐第一型水泥，比重為 3.15，表 4-4 與表 4-5 為其物理性質與化學成分。

表 4-3 水泥之物理性質

試 驗 項 目	CNS 61-R2001	試 驗 值
細度：Fineness (cm^2/g)	Min: 2800	3520
健度：Soundness (%)	Max: 0.80	0.05
7 天抗壓強度(kgf/cm^2)	Min: 197	312
28 天抗壓強度(kgf/cm^2)	Min: 281	412
初凝：Initial set (分鐘)	Min: 45（維卡針法）	3:10
終凝：Final set (分鐘)	Max: 375（維卡針法）	5:30

（資料來源：台灣水泥股份有限公司）

表 4-5　水泥化學性質

二氧化矽(SiO_2)	---	20.89
氧化鋁(Al_2O_3)	---	5.61
氧化鐵(Fe_2O_3)	---	3.13
氧化鈣(CaO)	---	63.87
氧化鎂(MgO)	Max: 6.00	2.93
燒失量(L.O.I)	Max: 3.00	0.73
不溶殘渣(Ins. Res)	Max: 0.75	---
矽酸三鈣(C_3S)	---	50.40
矽酸二鈣(C_2S)	---	22.20
鋁酸三鈣(C_3A)	---	9.57
鋁鐵酸四鈣(C_4AF)	---	9.51

（資料來源：台灣水泥股份有限公司）

3.粗骨材

本計畫混凝土所使用之粗骨材為三分碎石，其產地均為我國花蓮地區河域。其中面乾內飽和狀態比重(SSD)為 2.77，篩分析試驗結果如表 4-6 所示，其粒徑級配分布圖如圖 4-2 所示。

表 4-6 篩分析試驗結果

篩　號	遺留重量%	累積重量%	通過重量%
1" (25.4 mm)	0.00	0.00	100.00
3/4"（19.05 mm）	0.17	0.17	99.83
1/2"（12.7 mm）	15.17	15.33	84.67
3/8” (9.5 mm)	12.83	28.17	71.83
NO.4 (4.75 mm)	53.33	81.50	18.50
底 盤	18.25	99.75	0.25

(資料來源：本研究自行整理)

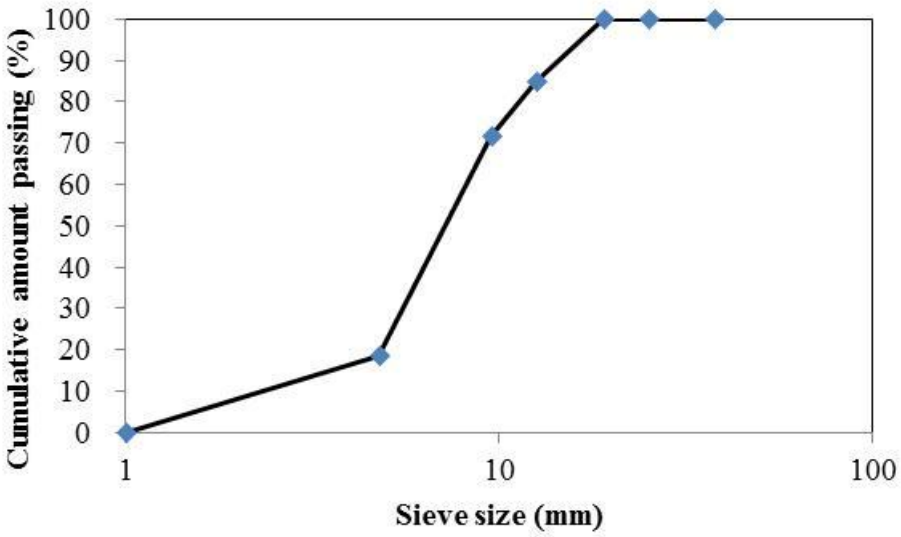

圖 4-2　三分碎石之級配分布圖

(資料來源：本研究自行整理)

4.細骨材

本計畫所使用之細骨材為我國花蓮地區河域所產之混凝土用粗砂級配。其面乾內飽和比重(SSD)為 2.69，篩分析試驗結果如表 4-7 所示，其粒徑級配分布圖如圖 4-3 所示。

表 4-7 細骨材之篩分析試驗結果

篩　號	遺留重量%	累積重量%	通過重量%
3/8” (9.5mm)	0.00	0.00	100.00
NO.4 (4.75mm)	1.24	1.24	98.76
NO.8 (2.36mm)	18.00	19.24	80.76
NO.16 (1.18mm)	22.04	41.28	58.72
NO.30 (600μm)	14.20	55.48	44.52
NO.50 (300μm)	15.00	70.48	29.52
NO.100(150μm)	20.00	90.48	9.52
底盤	9.30	99.78	0.22

(資料來源：本研究自行整理)

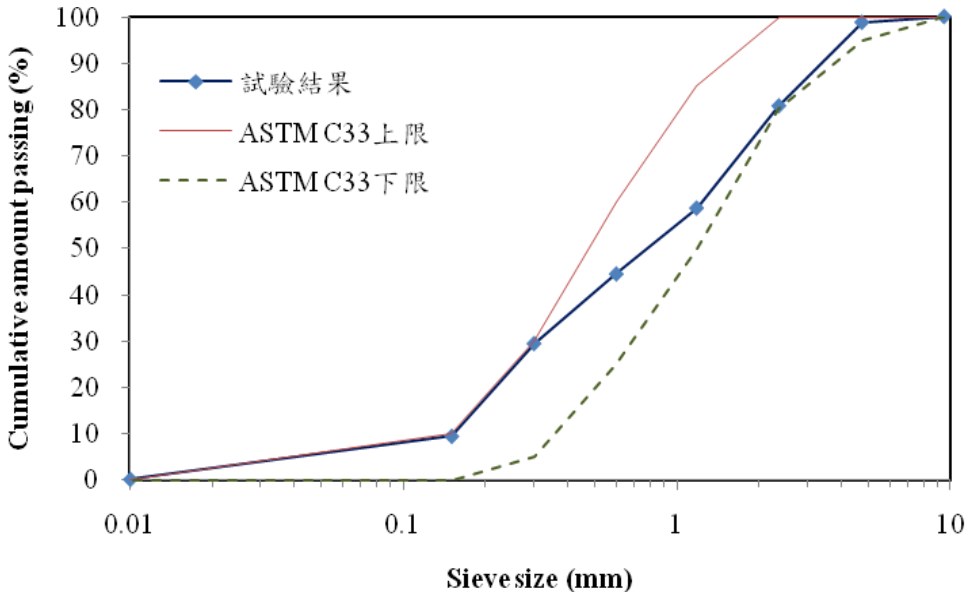

圖 4-3　細骨材之級配分布圖

(資料來源：本研究自行整理)

第三節 混凝土配比設計

將上述材料製作水灰比 0.35 至 0.65 混凝土，表 4-8 為其配比設計表，每個試驗變數均製作 30 個直徑 10 公分高度 20 公分試體進行後續試驗。

表 4-8　本計畫製作之水灰比 0.35 至 0.65 混凝土配比（單位：kg/m^3）

編號	水灰比	水泥	粗骨材	細骨材	水	化學摻料
OPC35	0.35	509	813	881	173	5.09
OPC45	0.45	443	813	881	197	--
OPC55	0.55	392	813	881	216	--
OPC65	0.65	351	813	881	228	--

（資料來源：本研究自行整理）

第四節 試驗規劃

1.自然曝曬混凝土試驗規劃

已達 5 年期的自然曝曬試體，其尺寸為 225 cm×60 cm×100 cm，原規劃便已預留 144 個直徑 10 cm ×30 cm 試體鑽心位置(含背海側)，圖 4-4 為試體立面圖。本計畫為了解經 5 年沿海環境曝曬後，氯離子進入混凝土的深度與濃度，因此將分別由面海側與背海側鑽心直徑 10cm ×25 cm 試體各 3 個，如圖 4-5 所示。由於根據 840 天試驗資料，面海側混凝土氯離子進入深度不會超過 10 cm，背海側不會超過 5 cm。因此規劃將面海側 25 cm 長度鑽心試體的前半段約 15 cm 位置進行氯離子進入混凝土的深度與濃度量測，後面剩下長度試體進行，可以視為無氯離子入侵且相同齡期的混凝土配比試體，因此可供鹽霧試驗與強度試驗使用。背海側試體則於長度 10 cm 後視為無氯離子入侵且相同齡期的混凝土配比試體。圖 4-6 為試體鑽心過程。試體於曝曬與鹽霧試驗時為考量單方向的影響，因此於長期自然曝曬試體上方與下方以緻密 Epoxy 塗料塗封。所以僅留迎風與背風兩側為受鹽面。鹽霧試驗時除受鹽面外其餘亦均以緻密 Epoxy 塗料塗封。

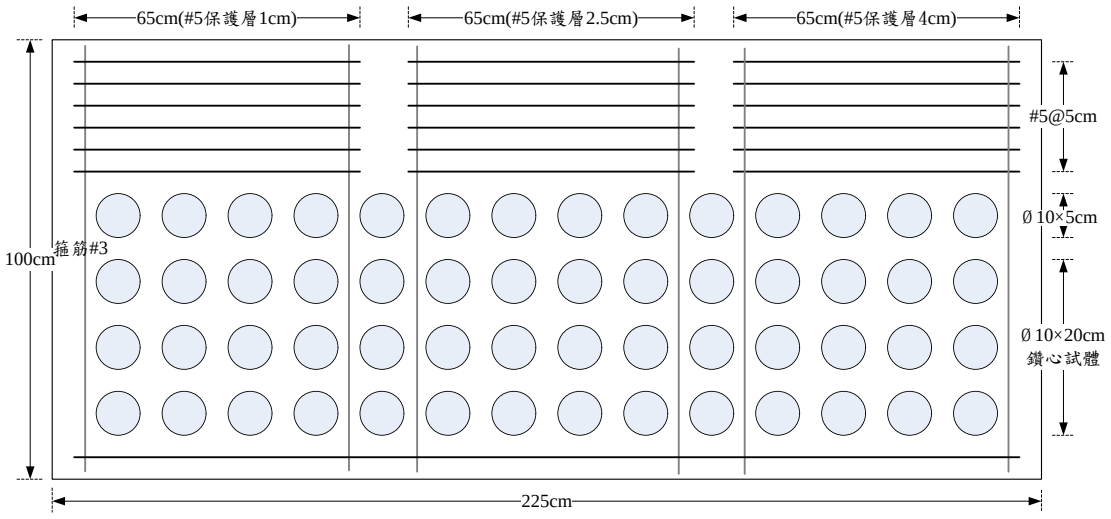

圖 4-4 自然曝曬試體立面圖 [3]

(資料來源：本研究自行整理)

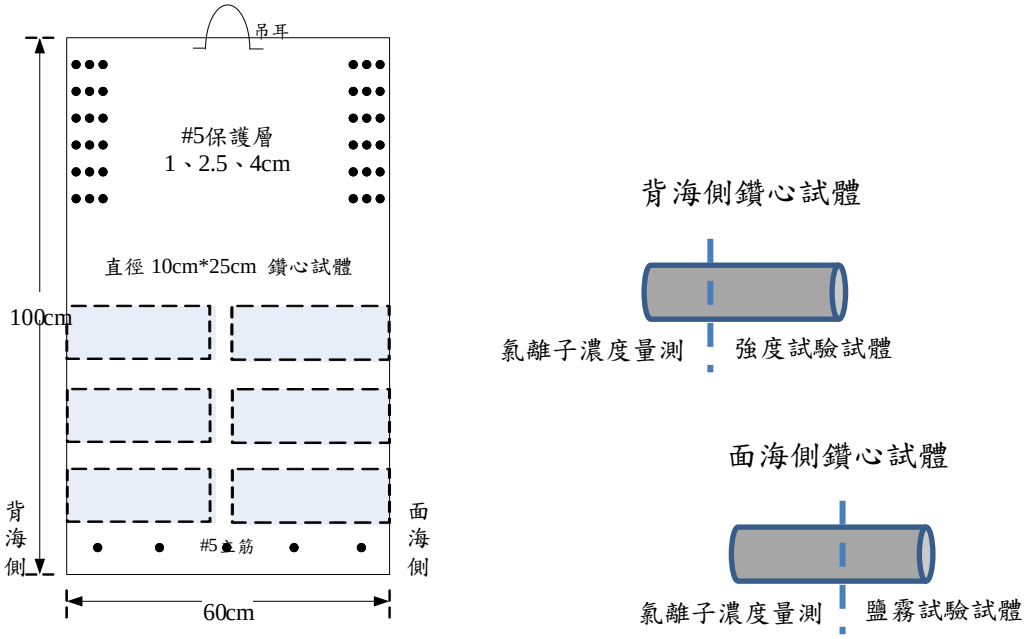

圖 4-5　自然曝曬試體剖面圖

(資料來源：文獻 3 與本研究自行整理)

圖 4-6　自然曝曬試體試體鑽心過程

(資料來源：本研究自行整理)

2.水灰比 0.35 至 0.65 配比混凝土試驗規劃

將第三節製作之試體經 28 天齡期水中養護後，切割成直徑 10 公分高度 8 公分試體，試體除接觸鹽水噴霧面外，其於試體側與試體面均以環氧樹脂塗封以確保氯離子擴散方向。而後將試體放入鹽霧試驗機中，依上述加速鹽霧試驗條件變數進行鹽霧加速劣化試驗過程。試驗過程中將定期取樣蒐集噴霧液體樣本，以確定鹽水溶液濃度與噴霧量。鹽霧試驗時除受鹽面外其餘亦均以緻密 Epoxy 塗料塗封。

第五節　試驗方法

1.鹽霧試驗

本研究鹽霧加速劣化試驗係依據 CNS 11607 標準 3.1 節進行，相關試驗方式分成 2 種型式，分別以中性鹽霧試驗法（NSS）進行的連續噴霧試驗，以及 NT Build 228-Prohesion 鹽霧循環劣化試驗方式。其中連續噴霧試驗已本研究團隊自有的鹽霧試驗設備進行。鹽霧循環劣化以建研所設置之 SUGA　CTP96 鹽霧試驗機進行。

連續噴霧試驗進行前必須調配噴霧液，相關組成依標準規定用化學試藥級的氯化鈉（純度 99.9%以上，20℃比重為 2.17，分子量為 58.44 g/mol）與導電率低於 20 μS/cm 的去離子水調配成濃度為 5±0.5 W/V%，且比重在 35℃為 1.026 至 1.032 之間的溶液，pH 值則調整於 6.5~7.2 範圍內。噴霧溫度設定為 35±1 ℃。相關運轉設定如表 4-9 所示，相關設備如圖 4-7 所示。相關噴霧時時間設定為進行 240 小時（10 天）、480 小時（20 天）、720 小時（30 天）、960 小時（40 天）的劣化試驗。

表 4-9　鹽水噴霧裝置之運轉設定

試驗槽內之溫濕度	35±1℃
試驗槽內之相對濕度	99 ~98 %
加濕器之溫度	47±1℃
鹽水濃度（35℃ ）	5± 0.5W/V %
噴霧用空氣壓力	0.098±0.002MPa { 1.0±0.O25kgf /cm²}
收集鹽水霧所得溶液	於 80 cm²/1.0 ~2.0mL/ h
pH	6.5~7. 2 (33~35℃)
收集鹽水霧所得溶液密度	1.022~1.036 (於 35℃)
鹽水貯槽水位	須保持一定水位
加濕器水位	保持於水位計之 2 標線間

（資料來源：CNS 11607）

圖 4-7　本研究團隊鹽霧試驗設備（連續噴霧試驗使用）

（資料來源：本研究自行整理）

鹽霧循環劣化試驗參考 NT Build 228－Prohesion 試驗方式進行。Prohesion 劣化試驗最初是由英國鐵道公司與 Mebon 塗料公司所發展出來的人工劣化模式，而 Prohesion 這個詞彙主要是由 Protection is Adhesion 連結而來。最初由 Mebon 所發展的方法目前被北歐測試合作組織（Nordisk Innovations Center test methods, nordtest）列入規範。規範中的 Prohesion 劣化試驗內容為噴霧與乾燥過程的循環組合。採用的噴霧溶液與連續噴霧試驗的溶液相同，以做為比較。試驗條件以 6 個小時為一個循環單位。分別為 4 個小時 20±5℃的噴霧過程和 2 個小時 35±2℃的乾燥過程。劣化試驗進行的過程一般均大於 1000 小時（167 次以上）。相關試驗流程如圖 4-8 所示。相關研究文獻均表示 Mebon Prohesion 劣化試驗與自然環境曝曬劣化試驗結果關聯性較佳。Mebon Prohesion 法經過一段時間發展之後被各國所採用，但其循環程序組合則有不同的改變，以符合各種大氣環境曝曬劣化所得到的結果。

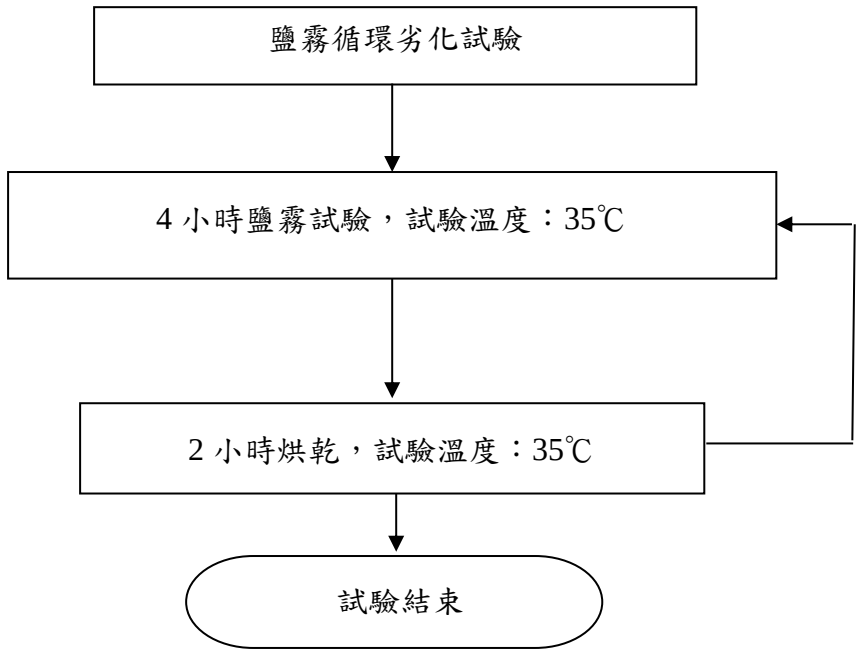

圖 4-8　Mebon Prohesion 劣化試驗法

（資料來源：本研究自行整理）

相關試驗使用建研所設置之鹽霧試驗機進行，此設備為日本 SUGA（日本須賀試驗機株式會社）之 CTP96 鹽霧複合耐候試驗機。除可進行中性鹽霧劣化試驗外，亦具備乾燥功能、濕潤功能、浸漬功能、與外氣導入等試驗功能，相關設備如圖 4-9 所示。

圖 4-9　CTP96 鹽霧複合耐候試驗機外觀

（資料來源：本研究自行整理）

2. 各深度混凝土氯離子氯離子含量分析

本研究所使用的氯離子含量分析方法為 CNS 14702 硬固混凝土酸溶法氯離子檢測法。以酸溶法進行氯離子檢測，可了解被水化生成物吸附的氯離子與在孔隙結構中存在的總氯離子含量，因此被視為硬固混凝土中氯離子的總量。相關步驟說明如下：

A. 其取樣過程係由試體上，進行研磨以取得 10 g 以上具代表性的樣本。相關研磨設備如圖 4-10 所示。

圖 4-10　混凝土氯離子含量磨粉取樣設備

（資料來源：本研究自行整理）

B. 研磨後將粉末通過孔徑 850 μm 之 20 號篩（AASHTO T260 為 50 號篩），取通過試驗篩粉末約 10 g 進行氯離子萃取工作。

C. 萃取過程係依據 CNS 1078” 水硬性水泥化學分析法”。將粉末進行秤重後放入 250 mL 燒杯中，加入 75 mL 去離子水使之分散，並加入 25 mL 稀硝酸（1:1）進行酸化過程。

D. 將燒杯覆蓋與加熱至沸騰，如圖 4-11 所示。

E. 放置室溫冷卻後，利用重力或抽氣方式將溶液以 9 cm 粗質濾紙（AASHTO T260 為 Whatman 40 與 41 號濾紙）過濾，已取得氯離子量測濾液，如圖 4-12 所示。

F. 將濾液以硝酸銀配合電位滴定進行氯離子濃度量測，如圖 4-13 所示。

G. 硬固混凝土氯離子含量計算下。

濾液滴定後依下列式(4-1)與式(4-2)計算硬固混凝土氯離子含量

$$\text{試樣濾液中氯離子濃度 } P_{cl^-} = \frac{(A-B)\times N\times 3.545}{S} \quad (\%) \qquad (4\text{-}1)$$

$$\text{硬固混凝土氯離子含量 } C_C = P_{cl^-}\times D\times \frac{1}{100} \quad (kg/m^3) \qquad (4\text{-}2)$$

式中 S 為試樣體積（g）；D 為混凝土烘乾密度或面乾內飽和密度（kg/m^3），報告須註明採用的密度。若氯離子濃度較低，本計畫亦考量利用離子層析儀進行氯離子濃度量測工作，離子層析法使用物理吸附與沖提機制，較不受到干擾，且可量測至 ppb 級之濃度，因此本研究擬採用此法進行混凝土中氯離子的分析工作，但其缺點在於無法直接量測濃度高於 100 ppm 之樣品，以及受制於分離管柱使用次數與費用，因此單次試驗成本較高。

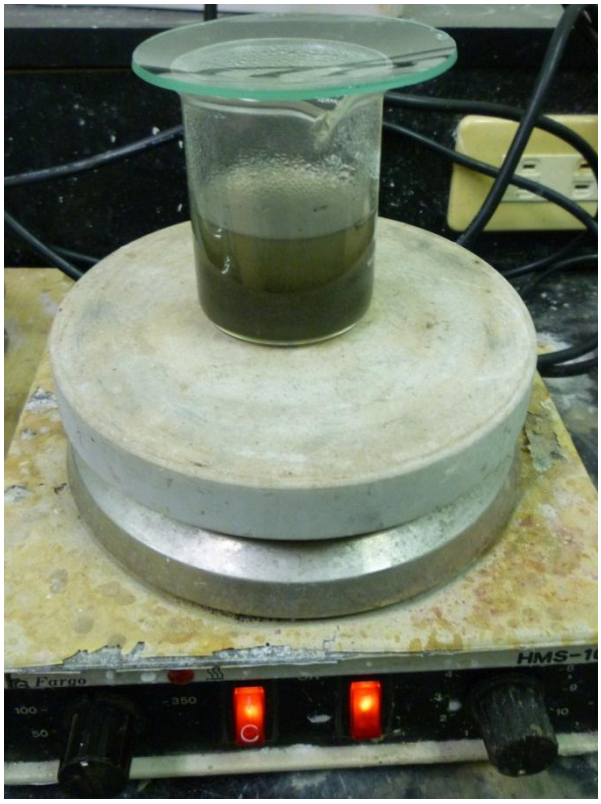

圖 4-11　將氯離子萃取液燒杯覆蓋與加熱過程

（資料來源：本研究自行整理）

圖 4-12　將氯離子萃取液過濾過程

（資料來源：本研究自行整理）

圖 4-13　本計畫使用之 Metrohm 702 SM 型電位滴定儀

（資料來源：本研究自行整理）

第五章　研究成果

本計畫目前均已完成所有試驗計畫預計規畫之工作。如水灰比 0.35 至 0.65 共 4 組配比（OPC35、OPC45、OPC55、OPC65）已完成鹽霧試驗劣化過程與分析工作，如圖 5-1 所示。現場曝曬試驗 5 年期試驗結果，目前均已完成鑽心取樣，並且完成各深度氯離子含量性質量測，並將未被氯離子侵入之試體進行鹽霧試驗劣化與相關各深度氯離子濃度分析工作。下述為所得之研究成果。

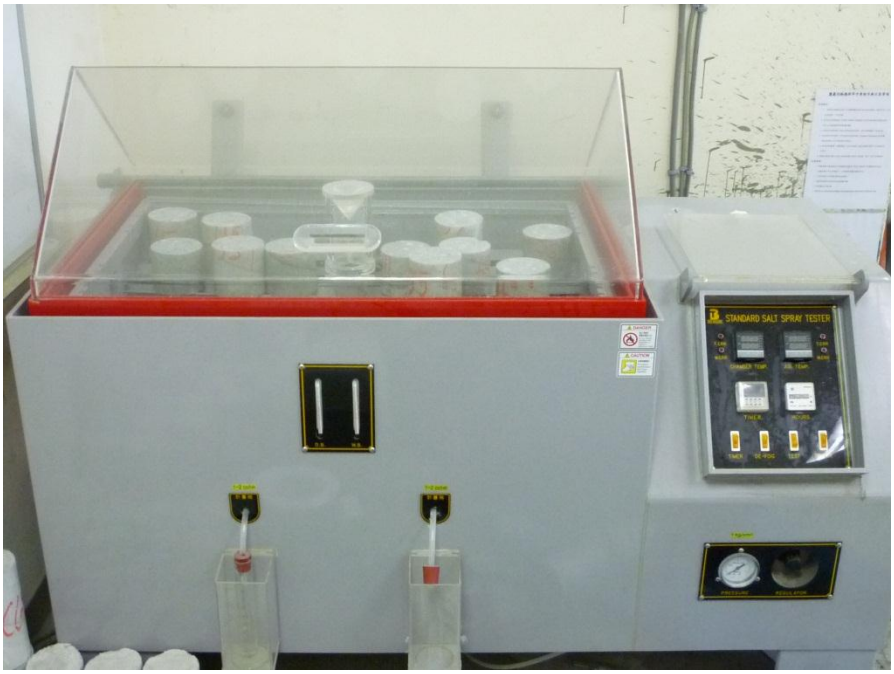

圖 5-1 水灰比 0.35 至 0.65 與曝曬試驗 5 年期試體鹽霧加速劣化過程

（資料來源：本研究自行整理）

第一節　混凝土配比強度性質

1. 自然曝曬混凝土配比部分

自然曝曬混凝土配比於鑽心取樣時將不被氯離子侵入部分做為鹽霧加速劣化與強度性質試驗的試體。而貯鹽試驗結果與齡期 28 時之強度性質量測結果說

明如下。

下表 5-1 為 28 天材齡時量測之抗壓強度試驗結果，表中並將過去 130 天、540 天、720 天、與 840 天曝曬齡期試驗結果詳列於上。圖 5-2 為各齡期之關係圖，由圖中可以發現抗壓強度初期隨著齡期的增加上升的幅度較大，但到了 540 天以後，抗壓強度雖有增加，但上升幅度趨緩。

表 5-1 自然曝曬混凝土試體各時期材齡抗壓強度試驗結果平均值（kgf/cm^2）

配比編號	28 天	130 天	540 天	720 天	840 天	1850 天
I245	336	381	446	472	477	478
I350	397	447	567	599	599	619
Ⅱ350	472	509	642	652	660	669
SCC	413	501	655	657	661	667

（資料來源：文獻 3 與本研究自行整理）

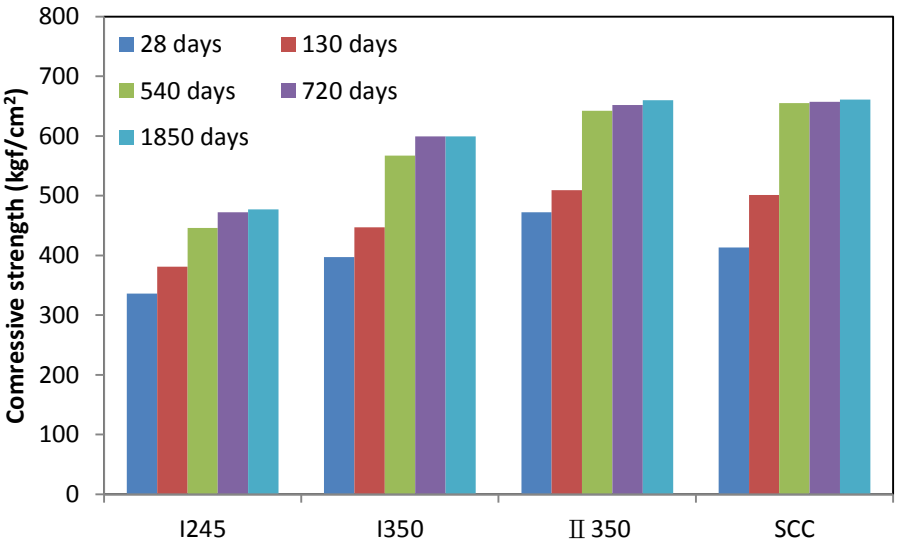

圖 5-2 自然曝曬混凝土試體各時期材齡抗壓強度關係圖

（資料來源：文獻 3 與本研究自行整理）

2.OPC35 至 OPC65 配比部分

OPC35 至 OPC65 配比於 28 天養護後進行抗壓強度試驗，表 5-2 為其試驗結果，由表中可以發現抗壓強度如預期會隨著水灰比降低而降低。

表 5-2 OPC35 至 OPC65 配比 28 天材齡抗壓強度試驗結果平均值（kgf/cm^2）

配比編號	試體 1	試體 2	試體 3	平均值	水灰比
OPC35	700	668	692	687	0.35
OPC45	649	624	654	642	0.45
OPC55	571	563	581	572	0.55
OPC65	432	445	476	451	0.65

（資料來源：本研究自行整理）

第二節　自然曝曬混凝土配比氯離子貯鹽試驗結果

自然曝曬混凝土配比於 90 天齡期曾進行 ASTM C1543 貯鹽試驗。表 5-3 為其試驗結果。圖 5-3 至圖 5-6 為 4 組配比貯鹽試驗後距離與氯離子濃度之關係圖。圖中可利用 Fick 第二定律迴歸曲線計算氯離子入侵混凝土的總量（m）。由於氯離子利用濃度梯度差，使氯離子侵入混凝土內部。因此試驗後混凝土內部所量測到的各深度氯離子含量變化，可藉由 Fick 第二定律計算氯離子於混凝土內的擴散係數（diffusion coefficient）。Fick 第二定律對單一方向的擴散行為可由下列方程式表示：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{5-1}$$

式中 D_p（m^2/sec）為貯鹽試驗計算擴散係數，C 為氯離子濃度，x 為擴散所

到達距離（m），t 為擴散所使用時間（sec）。 若假定擴散方程式是單一方向的擴散趨動方式，利用一個半無限積分，並設定 m 為總體氯離子擴散量；擴散過程中沒有任何物質來提供擴散之來源，在由邊界條件: $C_{(x=0,t>0)}=C_o$ ；初始條件: $C_{(x>0,t=0)}=0$ ；無窮遠處條件: $C_{(x=\infty,t=0)}=0$ 條件。與式(5-1)可求得下列方程式。

$$C=\frac{m}{\sqrt{\pi D_p T}}\exp\left(\frac{-x^2}{4D_p t}\right) \tag{5-2}$$

式中 m 為試體氯離子總量，即氯離子濃度迴歸曲線下包含面積（圖 5-3 斜線所涵蓋的總面積），可以由下式 (5-3)計算，表 5-3 亦將混凝土氯離子總量（m）迴歸值詳列於上。由表中可以發現 I245 配比的 m 值最高，SCC 配比最低，而 I350 略高於 II350 配比。

$$m=\int_0^\infty C dx \ ; \ t\geq 0 \tag{5-3}$$

表 5-3　自然曝曬混凝土配比貯鹽試驗結果

與表面之距離（cm）	I245（%）	與表面之距離（cm）	I350（%）	與表面之距離（cm）	II350（%）	與表面之距離（cm）	SCC（%）
0.25	0.3400	0.27	0.3421	0.27	0.3142	0.26	0.3021
0.98	0.1099	0.97	0.2743	0.99	0.2312	0.96	0.2012
1.69	0.0321	1.70	0.2165	1.68	0.0924	1.64	0.1054
2.39	0.0089	2.46	0.0922	2.41	0.0513	2.31	0.043
3.1	0.0065	3.20	0.0823	3.14	0.0092	2.99	0.0112
試體氯離子總量（m）	0.741（%.cm）	試體氯離子總量（m）	0.464%（%.cm）	試體氯離子總量（m）	0.429%（%.cm）	試體氯離子總量（m）	0.297%（%.cm）

（資料來源：本研究自行整理）

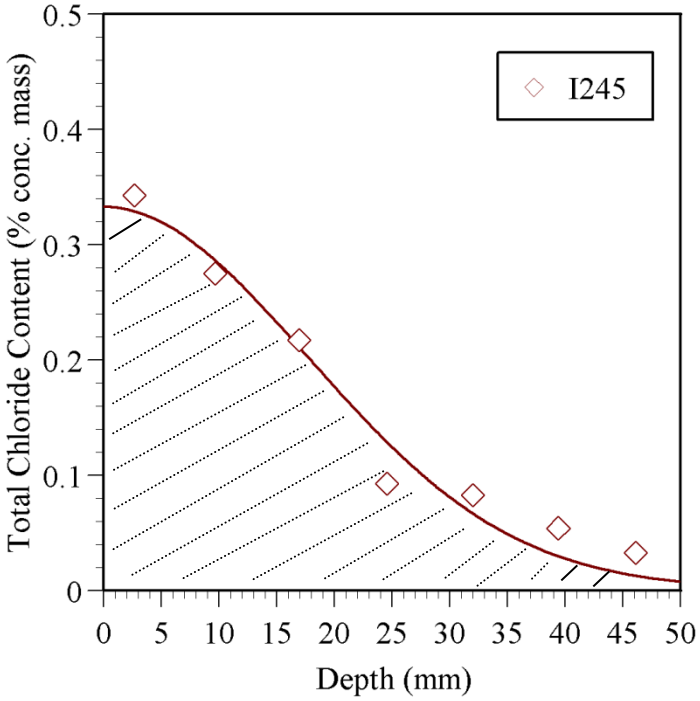

圖 5-3 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I245 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

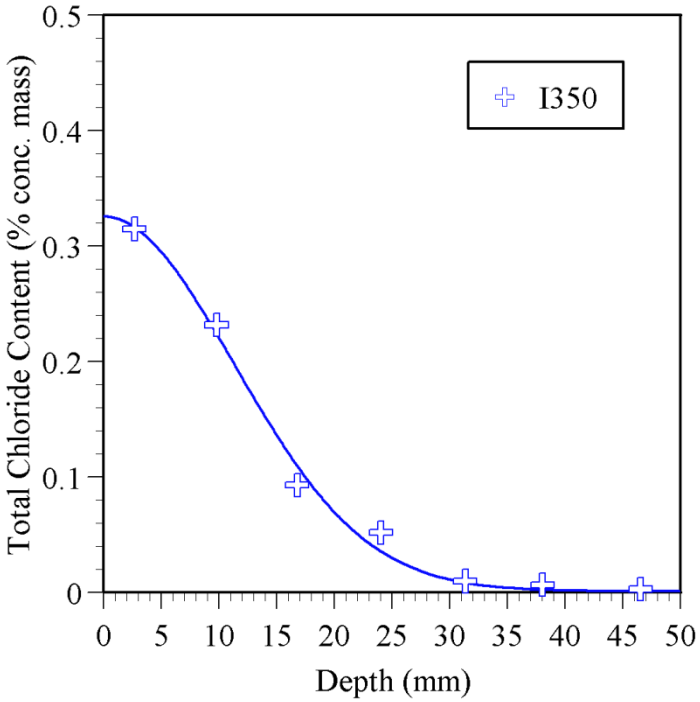

圖 5-4　I350 配比貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖

（資料來源：本研究自行整理）

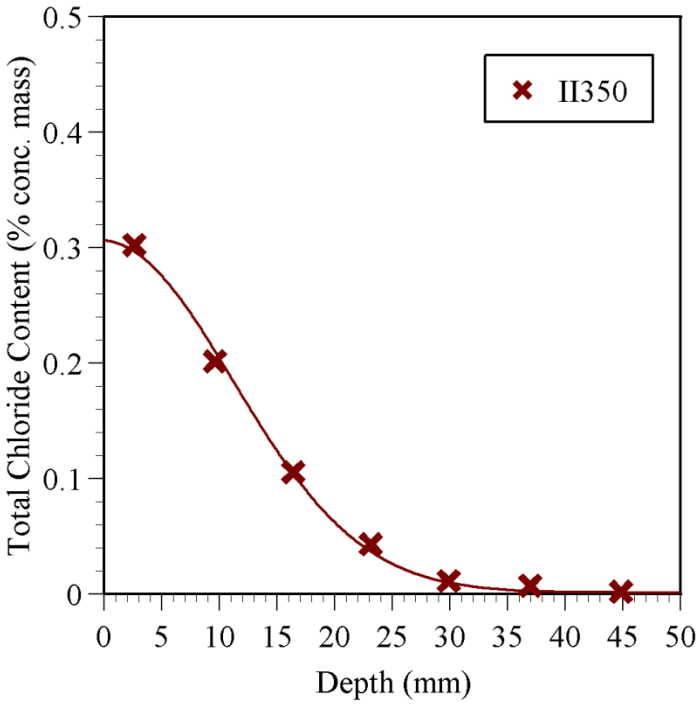

圖 5-5 II350 配比貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖

（資料來源：本研究自行整理）

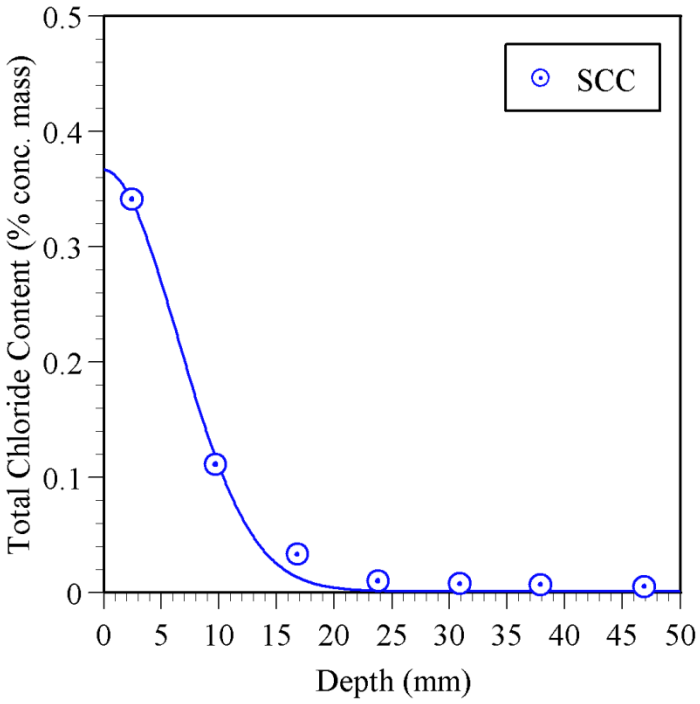

圖 5-6 SCC 配比貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖

（資料來源：本研究自行整理）

第三節　混凝土長期曝曬氯離子試驗結果

長期自然曝曬試驗 4 個配比於曝曬期 540 天量測時發現，面海側氯離子以可深入 0.5 公分內部以上。因此於 720 天與 840 天均鑽心取樣量測其各深度氯離子濃度。而本計畫亦進行 1850 天鑽心取樣氯離子量測工作。表 5-4 為 I245 配比各曝曬期量測結果，圖 5-7 至圖 5-9 為 I245 配比各曝曬期氯離子濃度與入侵深度關係圖。

表 5-5 為 I350 配比各曝曬期量測結果，圖 5-10 至圖 5-12 為其關係圖。表 5-6 為 II350 配比各曝曬期量測結果，圖 5-13 至圖 5-15 為其關係圖。表 5-7 為 SCC 為 I350 配比各曝曬期量測結果，圖 5-16 至圖 5-18 為其關係圖。

表 5-4　I245 配比各曝曬期氯離子濃度量測結果

與表面之距離（cm）	540 天曝曬期（%）	與表面之距離（cm）	720 天曝曬期（%）	與表面之距離（cm）	840 天齡期（%）	與表面之距離（cm）	1850 天齡期（%）
0.18	0.0255	0.26	0.01219	0.26	0.043226	0.11	0.030128
1.04	0.0240	0.91	0.023645	1.01	0.027787	0.31	0.041501
---	---	1.56	0.017335	1.82	0.015319	0.50	0.039544
---	---	2.63	0.010141	2.62	0.01051	0.87	0.040152
---	---	---	---	3.40	0.008364	1.66	0.033178
---	---	---	---	4.22	0.009886	3.61	0.026015
---	---	---	---	5.00	0.007752	5.00	0.018615
---	---	---	---	---	---	6.46	0.013583
---	---	---	---	---	---	11.96	0.00836

（資料來源：文獻 3 與本研究自行整理）

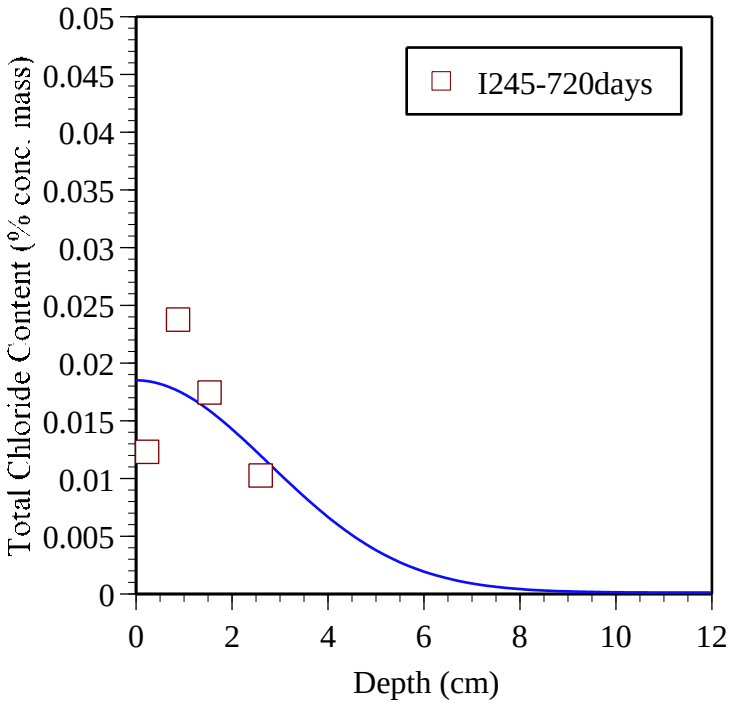

圖 5-7 720 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I245 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

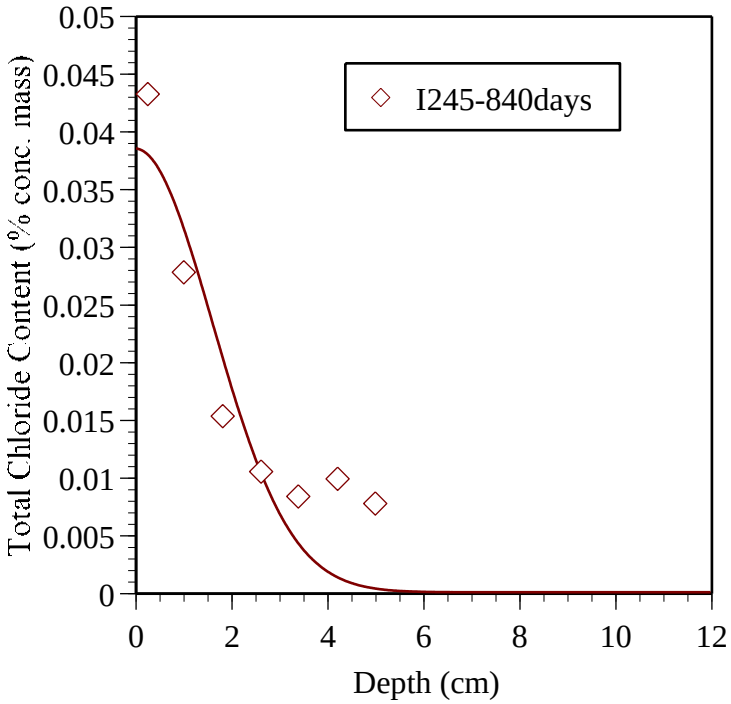

圖 5-8 840 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I245 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

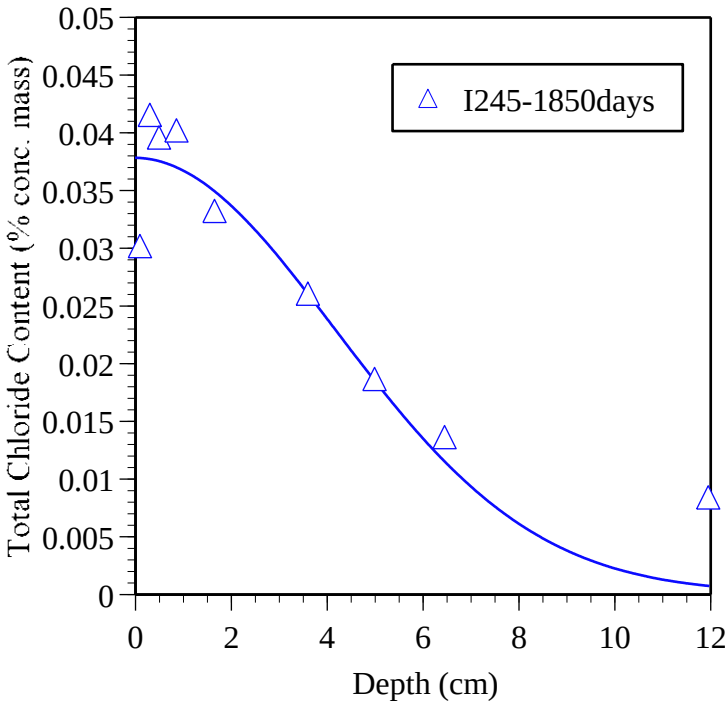

圖 5-9 1850 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I245 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

表 5-5　I350 配比各曝曬期氯離子濃度量測結果

與表面之距離（cm）	540 天曝曬期（%）	與表面之距離（cm）	720 天曝曬期（%）	與表面之距離（cm）	840 天齡期（%）	與表面之距離（cm）	1850 天齡期（%）
0.49	0.0192	0.28	0.0288	0.33	0.0515	0.09	0.0411
1.50	0.0136	0.93	0.0326	1.05	0.0167	0.30	0.0450
---	---	1.55	0.0235	1.75	0.0133	0.49	0.0336
---	---	2.53	0.0117	2.48	0.0085	0.76	0.0332
---	---	---	---	3.12	0.0002	3.71	0.0199
---	---	---	---	3.83	0.0009	7.74	0.0081
---	---	---	---	4.67	0.0002	10.29	0.0012

（資料來源：文獻 3 與本研究自行整理）

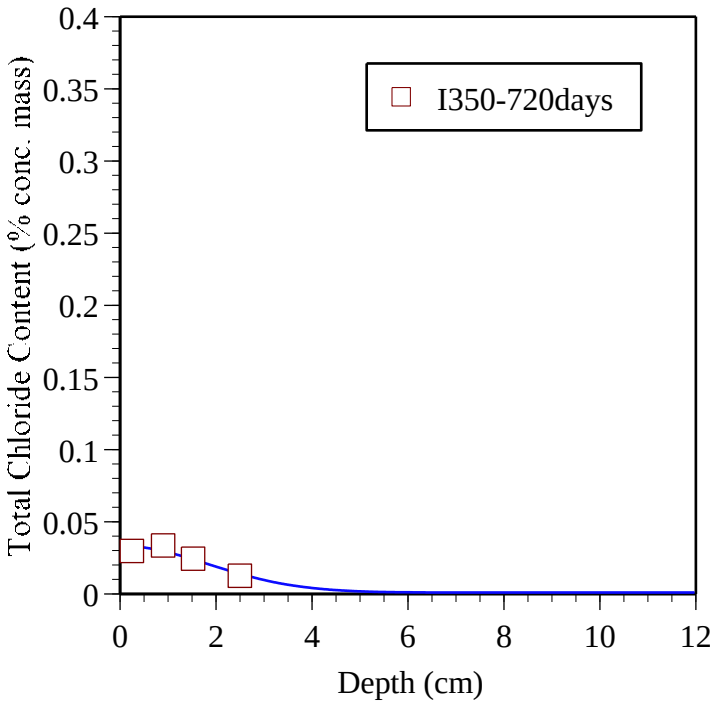

圖 5-10 720 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I350 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

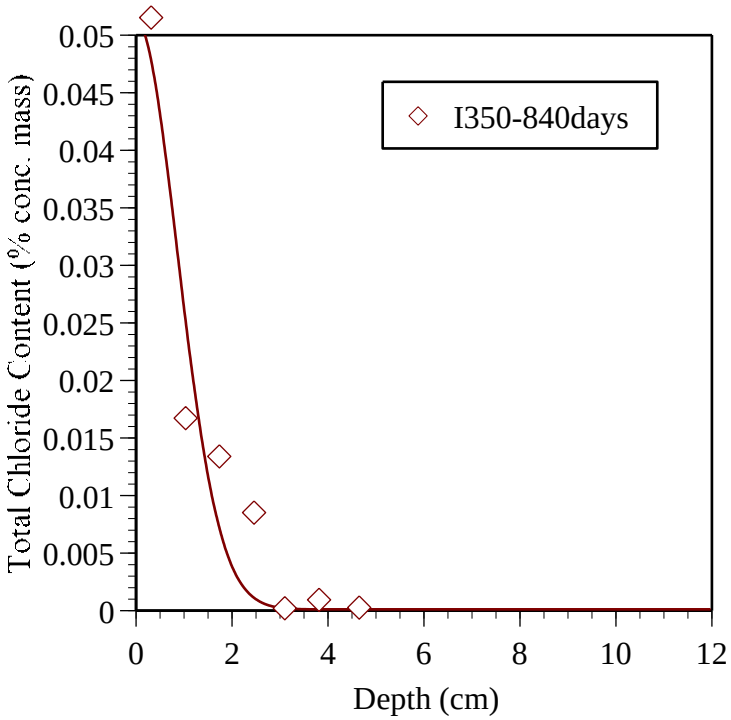

圖 5-11 840 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I350 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

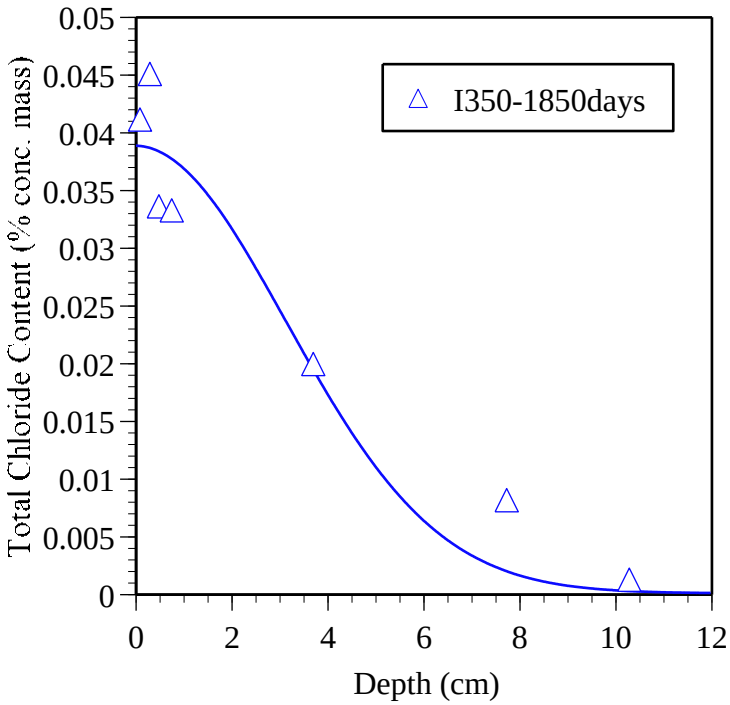

圖 5-12 1850 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（I350 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

表 5-6　II350 配比各曝曬期氯離子濃度量測結果

與表面之距離（cm）	540 天曝曬期（%）	與表面之距離（cm）	720 天曝曬期（%）	與表面之距離（cm）	840 天齡期（%）	與表面之距離（cm）	1850 天齡期（%）
0.08	0.0377	0.27	0.0324	0.34	0.048	0.07	0.0567
0.54	0.0186	0.92	0.0217	1.12	0.026	0.25	0.0683
---	---	1.56	0.0123	1.89	0.013	0.44	0.0602
---	---	2.61	0.0049	2.66	0.008	0.90	0.0412
---	---	---	---	3.44	0.009	1.92	0.0244
---	---	---	---	4.24	0.008	2.86	0.0173
---	---	---	---	5.05	0.007	3.64	0.0117
---	---	---	---	---	---	4.46	0.0078
---	---	---	---	---	---	5.48	0.0069

（資料來源：文獻 3 與本研究自行整理）

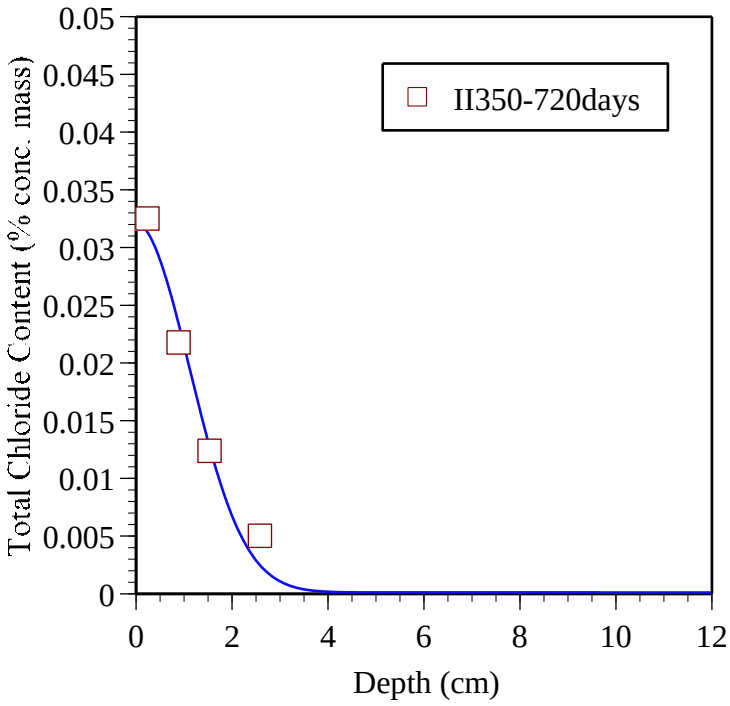

圖 5-13 720 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（II350 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

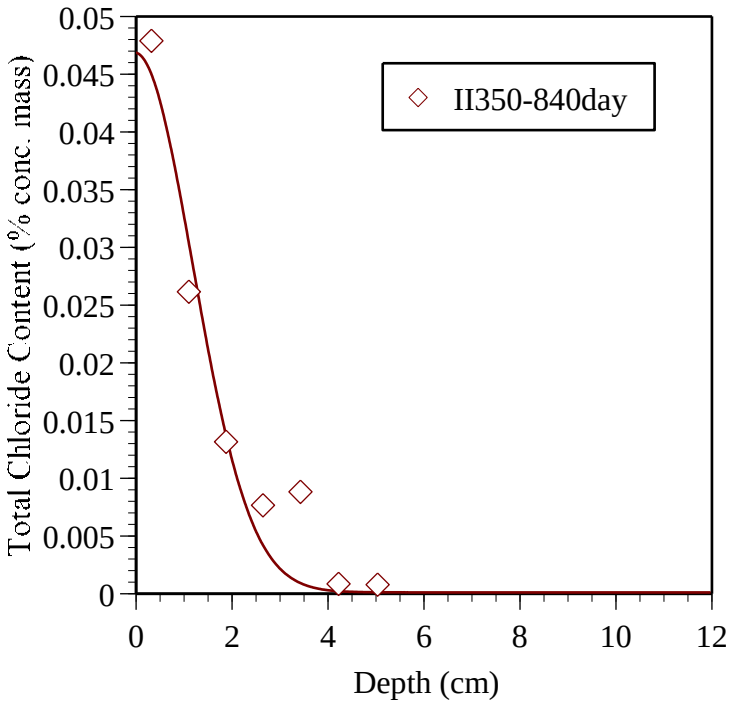

圖 5-14 840 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（II350 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

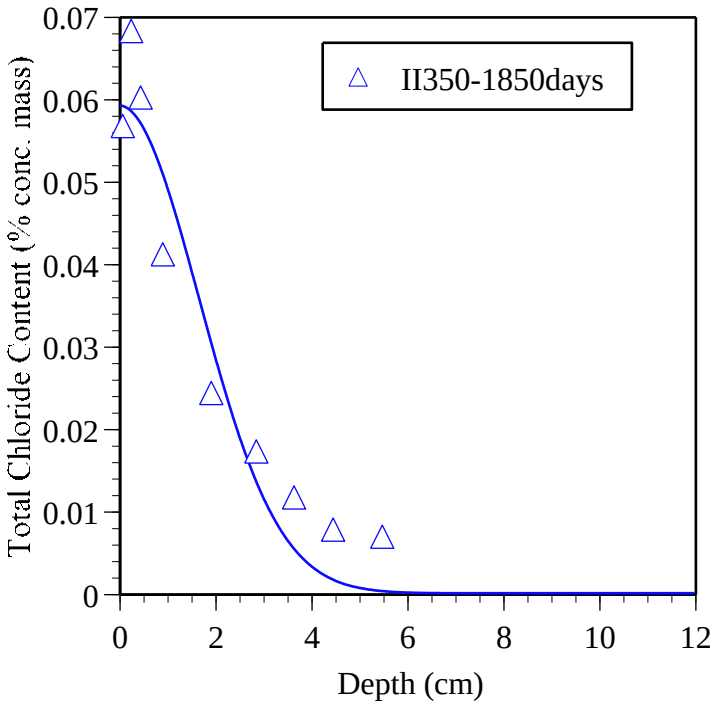

圖 5-15 1850 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（II350 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

表 5-7　SCC 配比各曝曬期氯離子濃度量測結果

與表面之距離（cm）	540 天曝曬期（%）	與表面之距離（cm）	720 天曝曬期（%）	與表面之距離（cm）	840 天齡期（%）	與表面之距離（cm）	1850 天齡期（%）
0.32	0.0621	0.29	0.0935	0.26	0.1558	0.09	0.2623
1.19	0.0252	0.96	0.0148	1.01	0.0269	0.31	0.1848
---	---	1.59	0.0115	1.80	0.0216	0.50	0.0978
---	---	2.58	0.0079	2.52	0.0117	0.77	0.0335
---	---	---	---	3.21	0.0085	1.57	0.0086
---	---	---	---	4.00	0.0083	2.59	0.0091
---	---	---	---	4.75	0.0101	3.59	0.0101
						4.52	0.0093
						5.52	0.0075

（資料來源：文獻 3 與本研究自行整理）

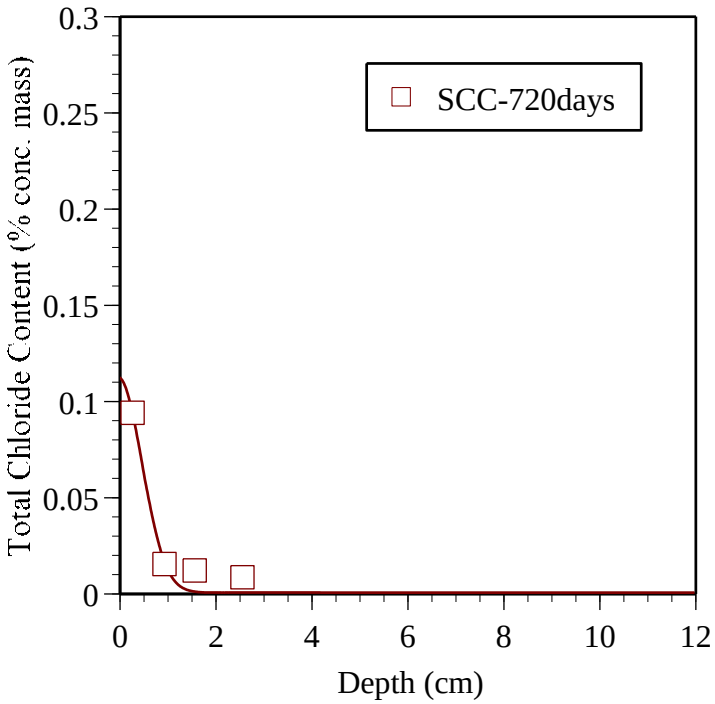

圖 5-16 720 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（SCC 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

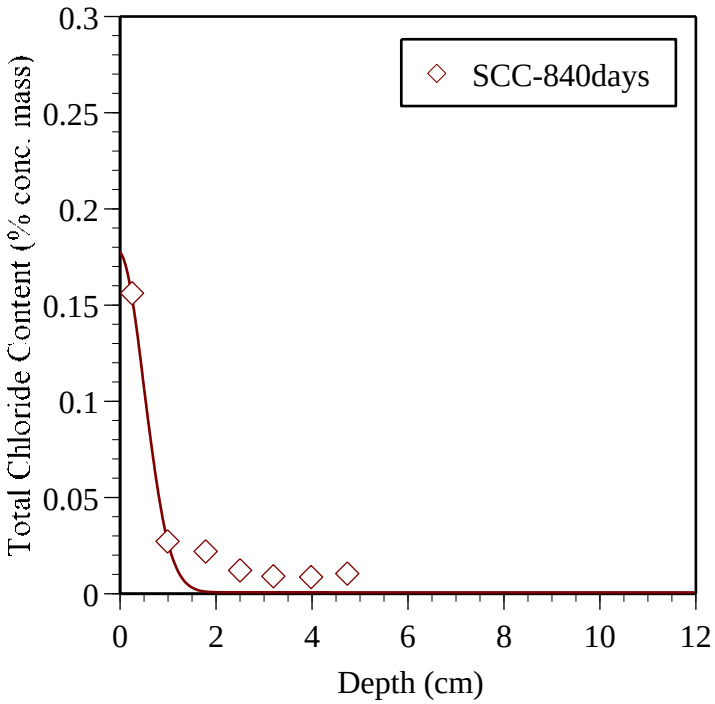

圖 5-17 840 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（SCC 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

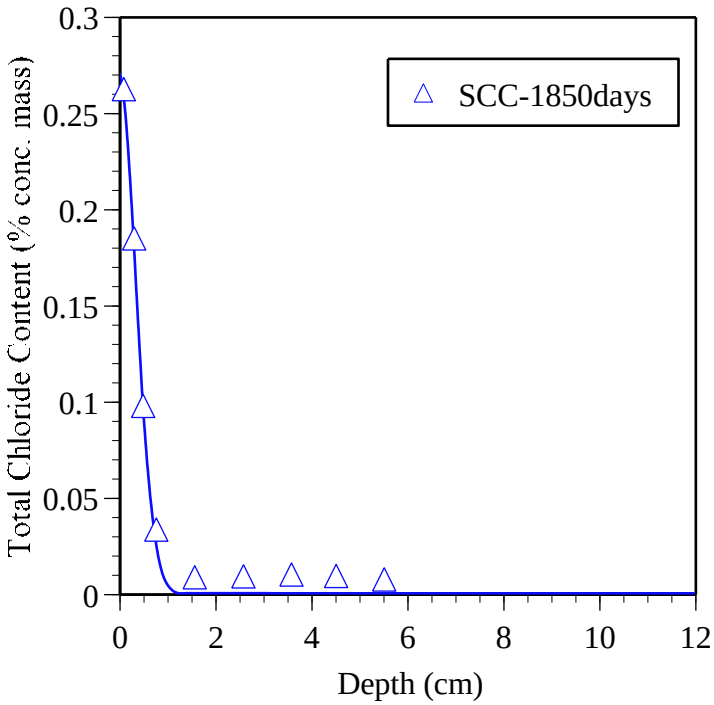

圖 5-18 1850 天曝曬試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（SCC 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

第四節　混凝土長期曝曬試驗與貯鹽試驗結果關聯性建立

將上節圖 5-7 至圖 5-18 各曝曬期氯離子濃度與入侵深度關係圖以迴歸後的關係曲線計算混凝土氯離子總量值（$m_{expsoure}$），如表 5-8 所示。

表 5-8　各曝曬期混凝土氯離子侵入總量值（$m_{expsoure}$）

配比編號	720 天曝曬期（%. cm）	840 天曝曬期（%. cm）	1850 天曝曬期（%. cm）	貯鹽試驗（%. cm）
I245	0.065	0.078	0.198	0.741
I350	0.057	0.076	0.154	0.464
II350	0.046	0.071	0.124	0.429
SCC	0.068	0.086	0.121	0.297

（資料來源：本研究自行整理）

貯鹽試驗所得之氯離子侵入總量 m 值亦列於表 5-8 中，下圖 5-19 為各曝曬期與貯鹽試驗混凝土氯離子總量值（$m_{ponding}$）關係圖。由圖中可以發現氯離子侵入總量值會隨著曝曬期的延長而增加，且貯鹽試驗的總量值遠大於各曝曬期氯離子總量值，如 I245 配比貯鹽試驗大於 1850 天曝曬期 3.74 倍。在 SCC 配比方面，720 與 840 天之 $m_{expsoure}$ 大於其他配比，而 1850 天時 SCC 反而小於其他配比，其可能為 720 與 840 天試體時試驗研究所產生的誤差導致，原因在於由圖 5-19 貯鹽試驗結果以 SCC 配比 $m_{ponding}$ 最小與 1850 天曝曬值 $m_{expsoure}$ 有相同趨勢。

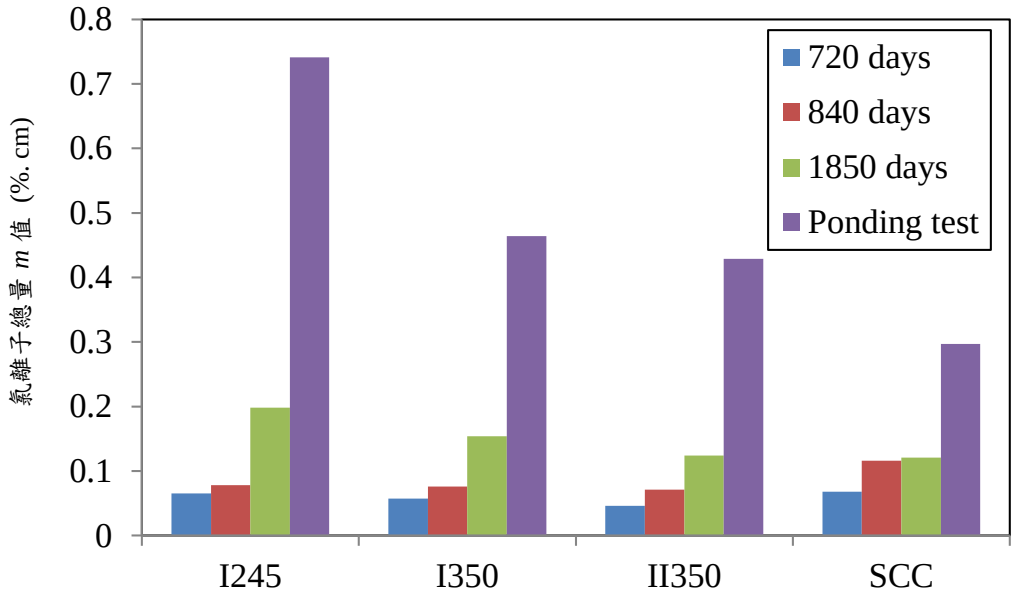

圖 5-19　各曝曬期與貯鹽試驗混凝土氯離子侵入總量值關係圖

（資料來源：本研究自行整理）

若將各曝曬期混凝土氯離子侵入總量值（$m_{expsoure}$）除以貯鹽試驗氯離子侵入總量（$m_{ponding}$）值，並將此比值與曝曬期時間繪製關係圖，如圖 5-20 至 5-24 所示。圖中亦對兩者關係進行線性迴歸，如圖中虛線，由圖中可以發現所有配比均具有良好線性關係。

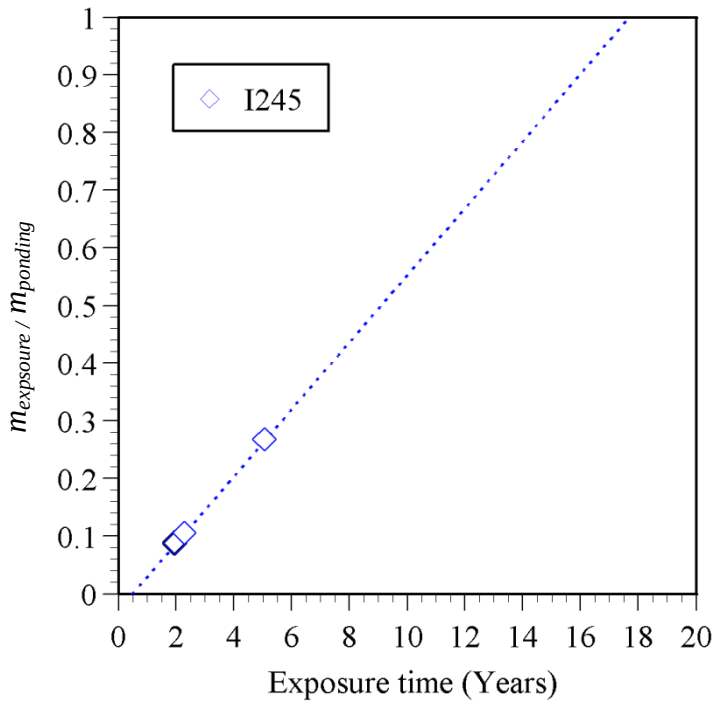

圖 5-20　$m_{expsoure}/m_{ponding}$ 與曝曬期時間關係圖（I245 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

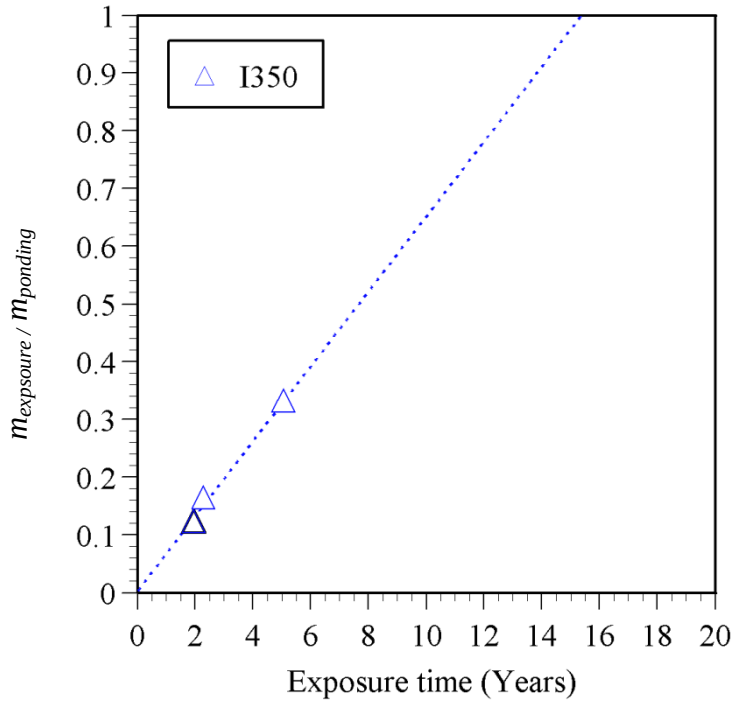

圖 5-21　$m_{expsoure}/m_{ponding}$ 與曝曬期時間關係圖（II350 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

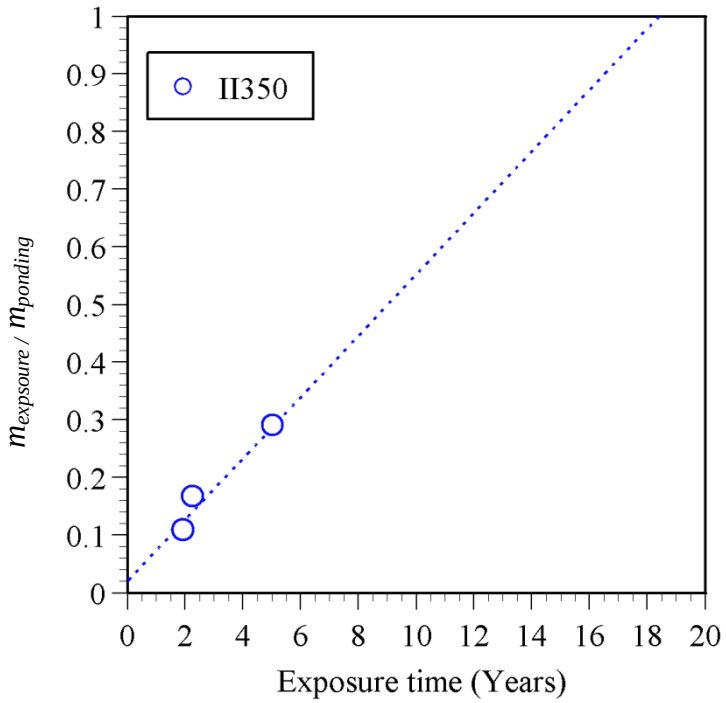

圖 5-22　$m_{expsoure}/m_{ponding}$ 與曝曬期時間關係圖（I350 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

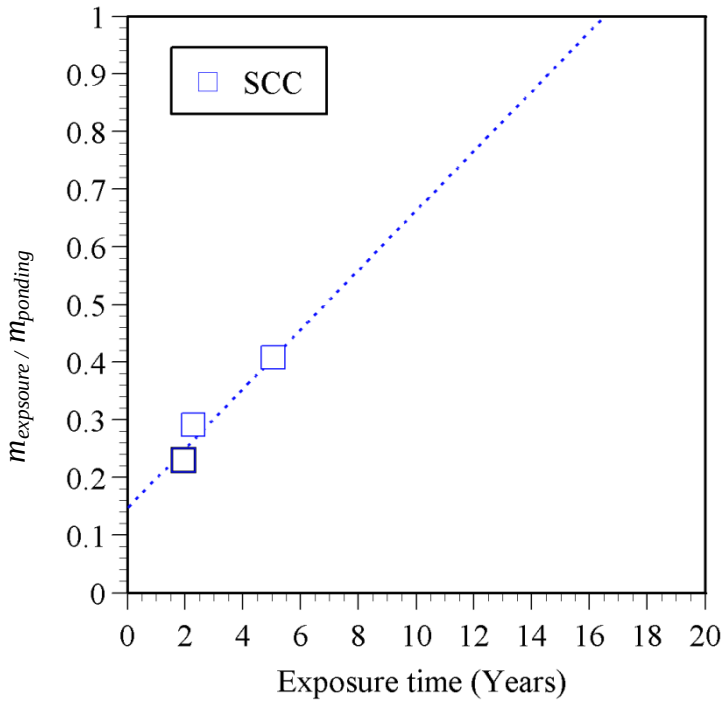

圖 5-23　$m_{expsoure}/m_{ponding}$ 與曝曬期時間關係圖（SCC 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

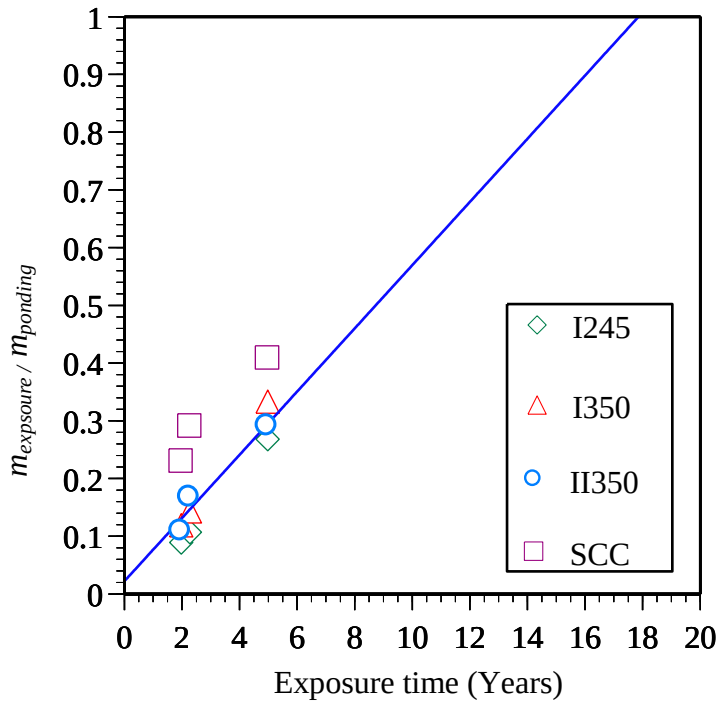

圖 5-24　$m_{expsoure}/m_{ponding}$ 與曝曬期時間關係圖（所有自然曝曬配比）

（資料來源：本研究自行整理）

若將圖 5-20 至圖 5-23 線性迴關係曲線延昇至 $m_{expsoure}/m_{ponding}$ 等於 1（即縱坐標 1）的位置，則所對應的 X 軸數值如表 5-9 所示，可以表示為貯鹽試驗氯離子侵入總量相對於長期自然曝曬混凝土的曝曬期。由表中可以發現貯鹽試驗氯離子侵入總量可相當於 15.35 至 18.38 年的曝曬期。圖 5-24 為所有長期自然曝曬試體的 $m_{expsoure}/m_{ponding}$ 與曝曬期之間的關係圖，由圖中可以發現除了 SCC 配比 $m_{expsoure}/m_{ponding}$ 明顯較高外，此與前述 720 天與 840 天試驗結果有誤有關。其餘試體的試驗結果均與曝曬期呈現良好線性關係（R^2=0.948），其關係式為 Y=0.0548X+0.0174，換算 $m_{expsoure}/m_{ponding}$ 等於 1 的對應值為 17.93 年，與 4 個配比分別計算值差異不大。

表 5-9　各配比混凝土貯鹽試驗氯離子侵入總量所對應之曝曬期

配比編號	$m_{expsoure}/m_{ponding}$ 等於 1 時對應的 X 軸曝曬期
I245	17.66 年
I350	15.36 年
II350	18.38 年
SCC	16.49 年
全部長期自然曝曬配比 （不含 SCC 配比）	17.93 年

（資料來源：本研究自行整理）

第五節　OPC 混凝土配比鹽霧試驗結果

由上述可得到貯鹽試驗氯離子侵入總量與長期自然曝曬期的關係，貯鹽試驗為混凝土評估耐久性或抗氯離子侵入特性的主要依據試驗法，因此被列入 ASTM 標準中，但貯鹽試驗所需 3 個月以上的試驗期程仍太久，因此本研究亦計畫以目前金屬材料常用的鹽霧試驗建立與貯鹽試驗關係式，藉以連結貯鹽試驗氯離子侵入總量與長期自然曝曬期的關係。相關試驗的試體以製作水灰比 0.35~0.65 之 OPC 混凝土配比進行。為確認其相關性，鹽霧試驗期程以 10 天、20 天、30 天、與 40 天為主。並嘗試探討試驗時間縮短的可行性，除傳統鹽霧試驗外以類似 Prohesion 試驗的循環鹽霧劣化試驗進行。 圖 5-25 為 OPC35 於 10 天、20 天、30 天、與 40 天傳統鹽霧劣化期程下試體氯離子濃度與入侵深度關係圖。圖 5-26 至圖 5-28 分別為 OPC45、OPC55、與 OPC65 的試驗結果。圖 5-29 至圖 5-32 為 Prohesion 試驗的氯離子濃度與入侵深度關係圖。

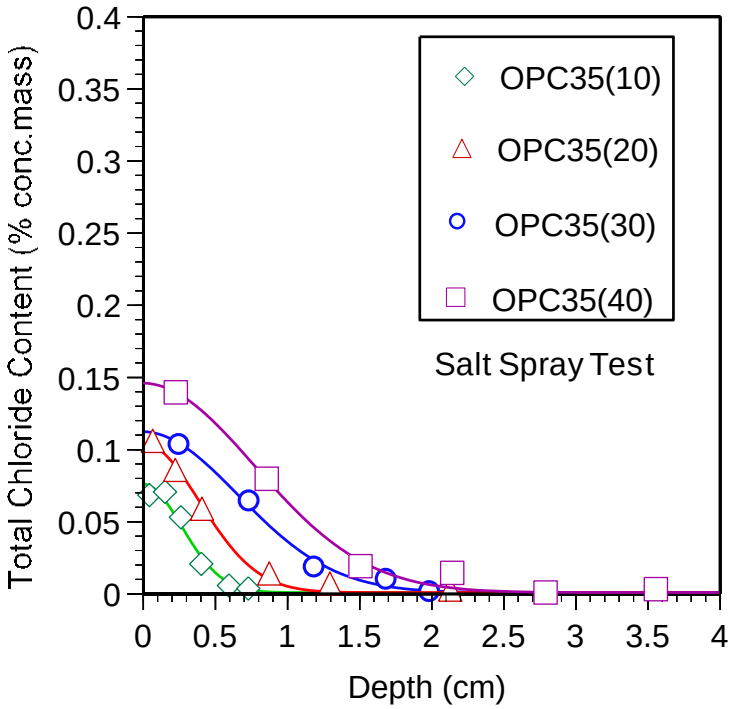

圖 5-25 OPC35 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（傳統鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

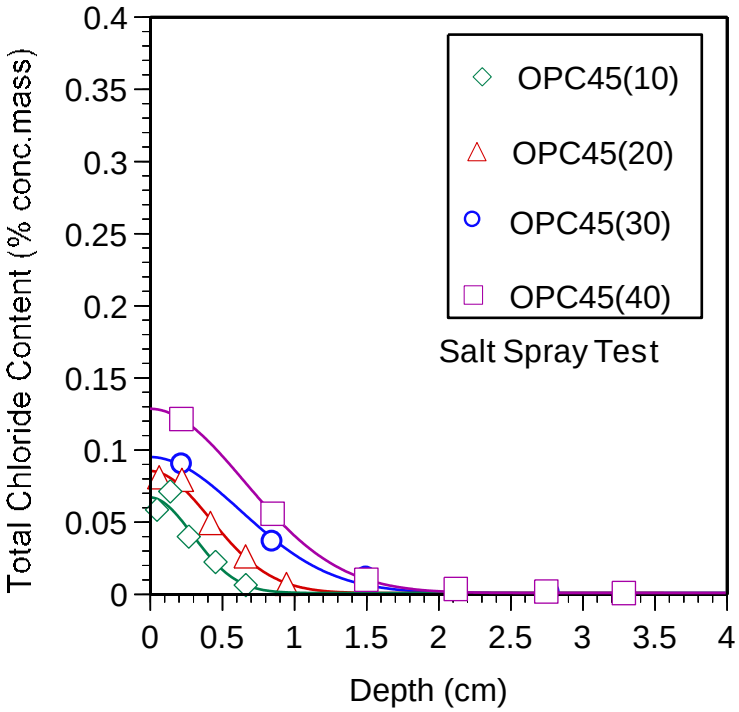

圖 5-26 OPC45 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（傳統鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

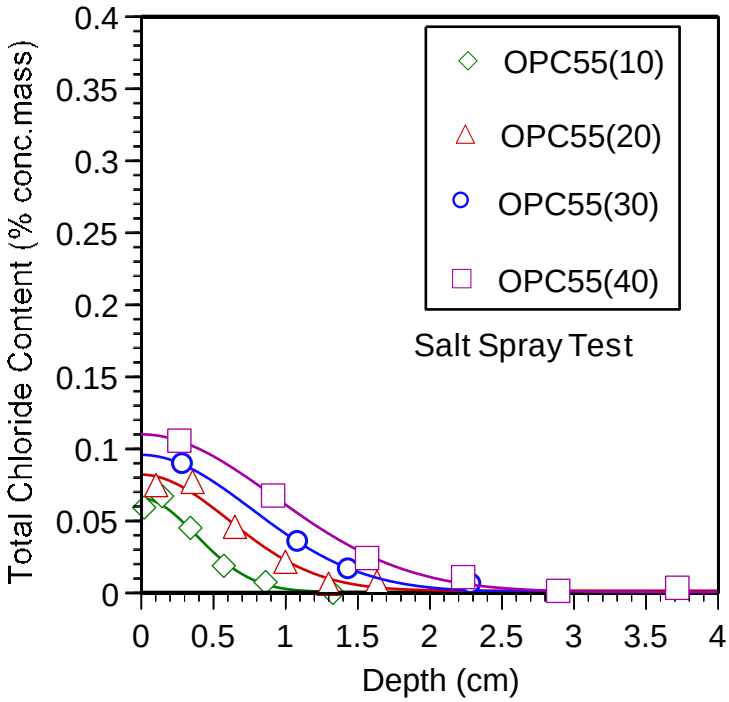

圖 5-27 OPC55 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（傳統鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

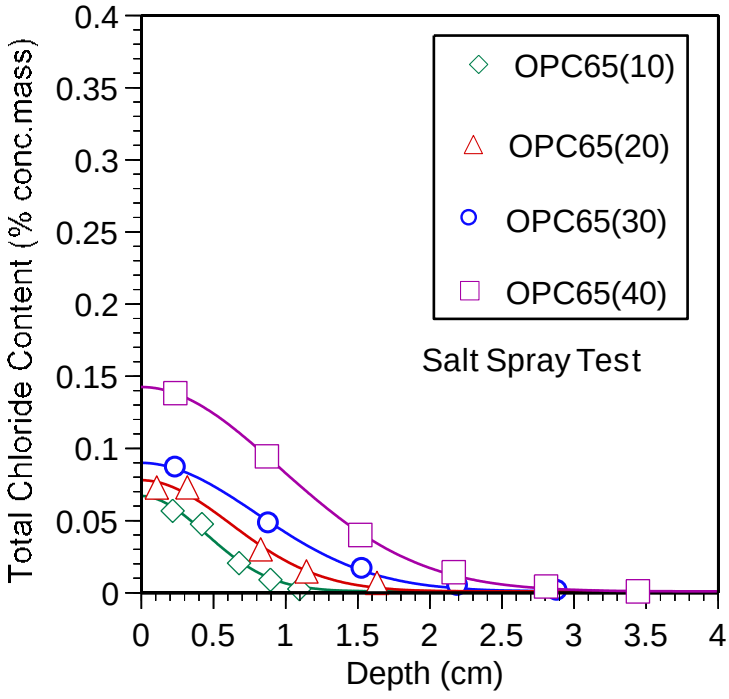

圖 5-28 OPC65 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（傳統鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

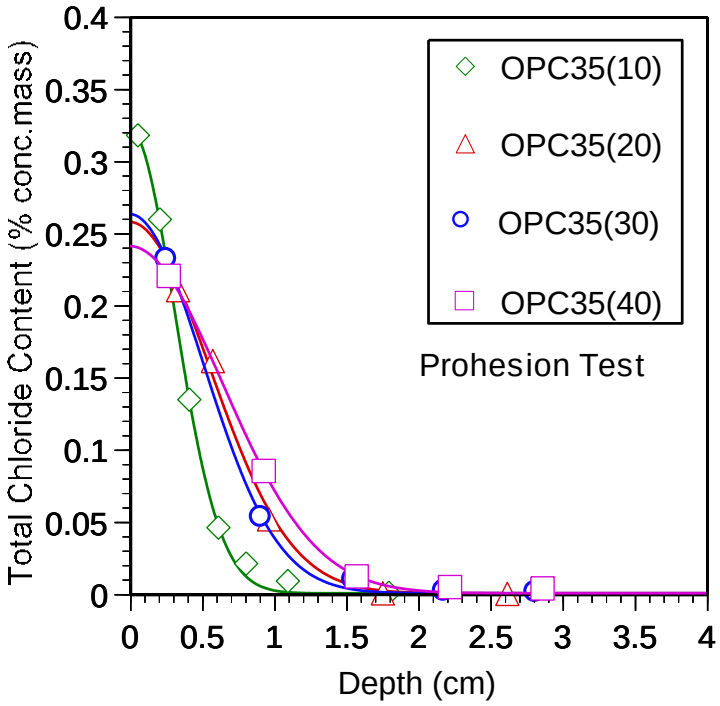

圖 5-29 OPC35 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

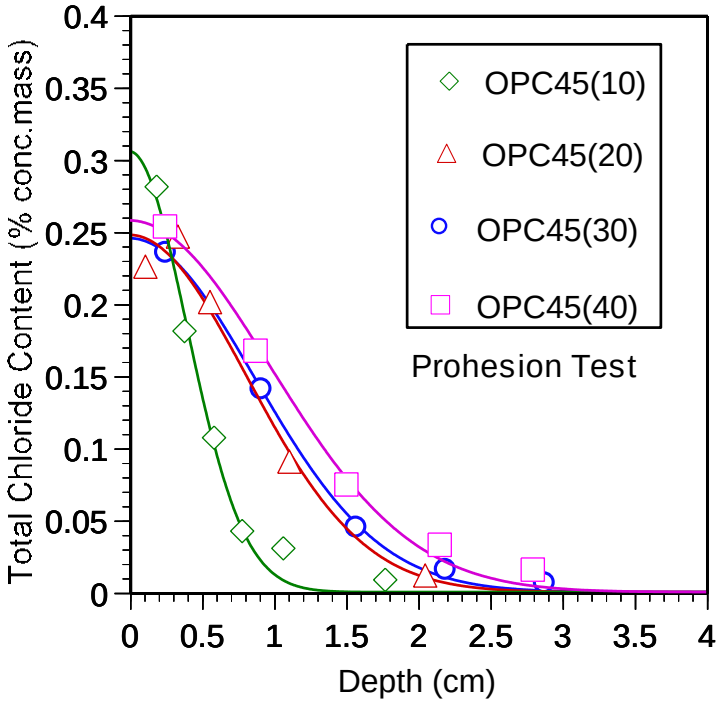

圖 5-30 OPC45 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

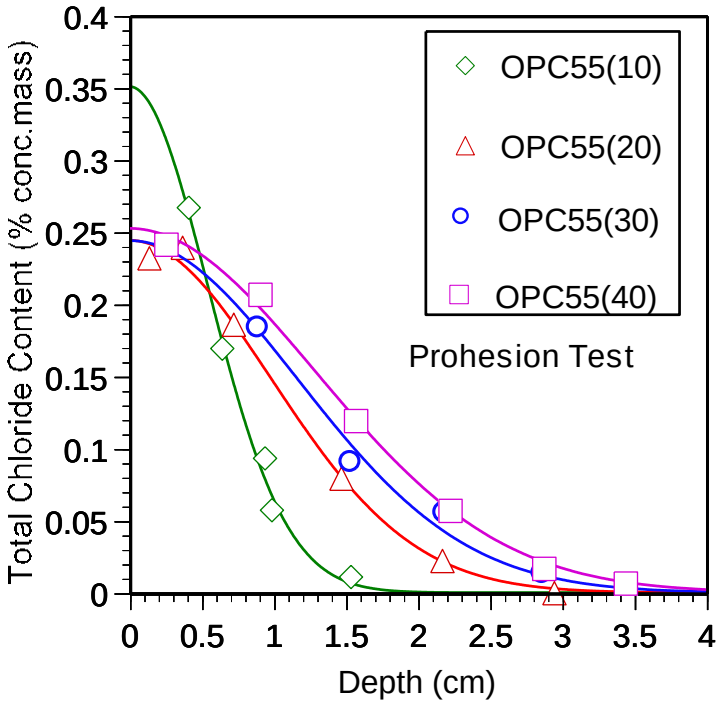

圖 5-31 OPC55 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

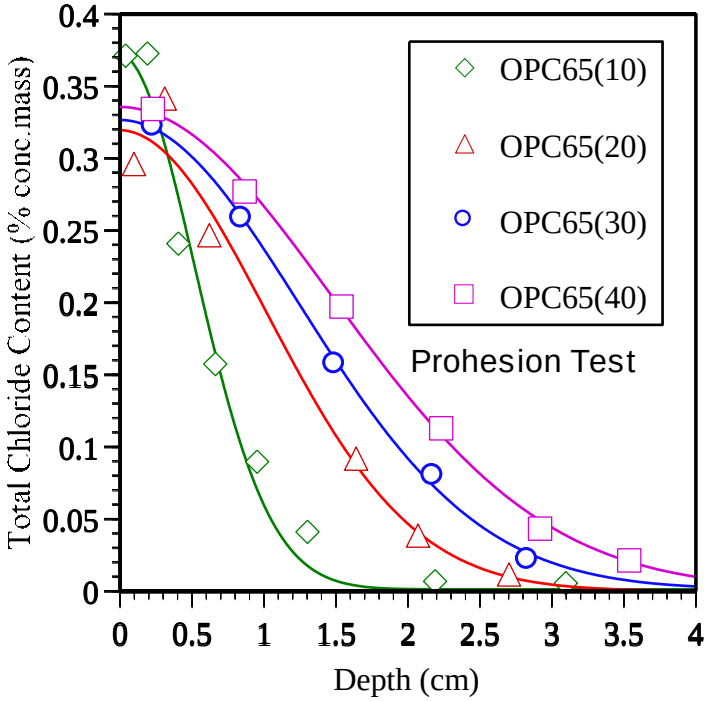

圖 5-32 OPC65 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

將上述各試驗結果計算依據式（5-3）計算各配比迴歸曲線下包含面積，即氯離子總量 *m*，如表 5-10 與表 5-11 所示。圖 5-33 與圖 5-34 為氯離子總量 *m* 與劣化時間關係圖。由圖中可以發現，氯離子總量 *m* 會隨著劣化時間而有逐步增加之情形。

表 5-10　OPC 各配比混凝土傳統鹽霧劣化試驗氯離子總量 *m* 計算值（%.cm）

配比編號	10 天劣化期程	20 天劣化期程	30 天劣化期程	40 天劣化期程
OPC35	0.020434	0.044158	0.062175	0.089043
OPC45	0.025236	0.050857	0.081968	0.112732
OPC55	0.031020	0.061394	0.091027	0.146057
OPC65	0.036852	0.072384	0.118897	0.166302

（資料來源：本研究自行整理）

表 5-11　OPC 各配比混凝土循環鹽霧劣化氯離子總量 *m* 計算值（%.cm）

配比編號	10 天劣化期程	20 天劣化期程	30 天劣化期程	40 天劣化期程
OPC35	0.123692	0.175773	0.206624	0.241919
OPC45	0.148872	0.238903	0.274208	0.331300
OPC55	0.203554	0.298188	0.346297	0.398446
OPC65	0.240219	0.382556	0.444874	0.531852

（資料來源：本研究自行整理）

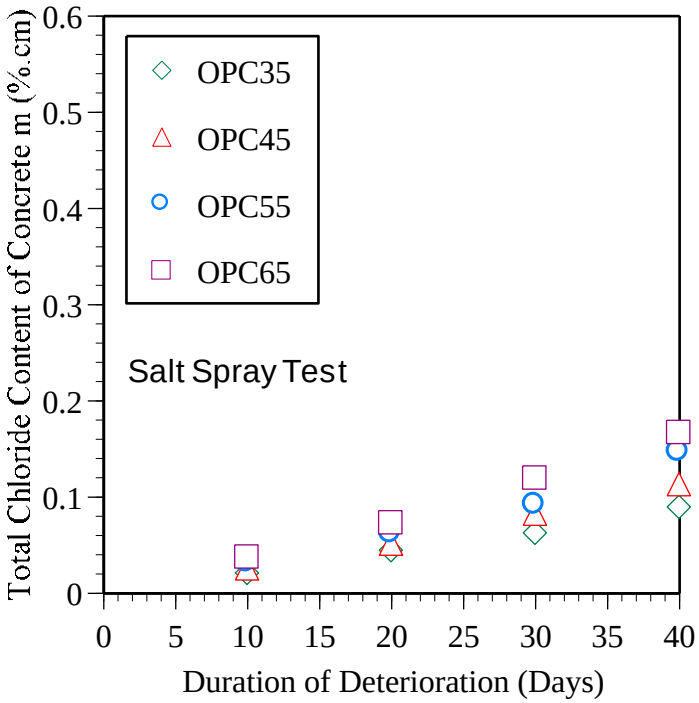

圖 5-33 混凝土氯離子總量 *m* 計算值與劣化時間關係圖（傳統鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

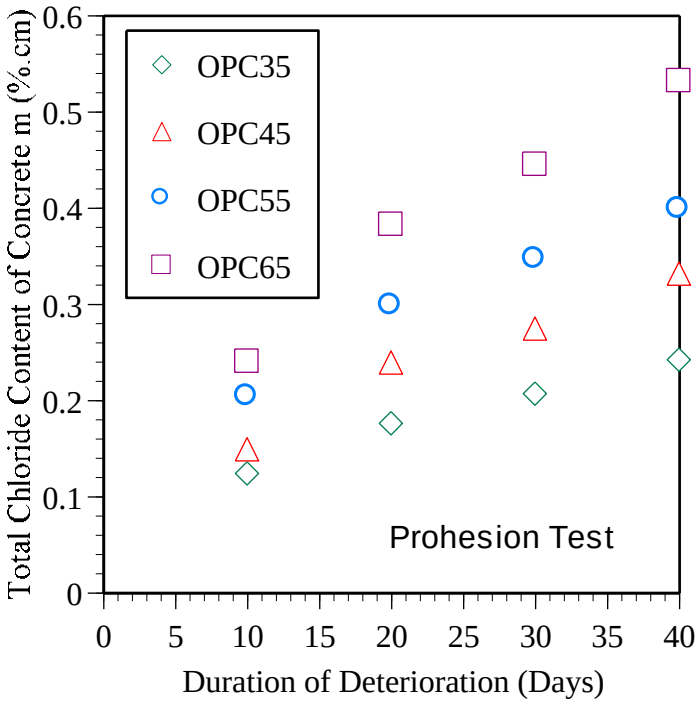

圖 5-34 混凝土氯離子總量 *m* 計算值與劣化時間關係圖（循環鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

第六節　OPC 混凝土配比貯鹽試驗結果

本計畫擬藉由 OPC 配比 90 天貯鹽試驗結果建立與鹽霧劣化試驗之關聯性。下述表 5-12 為 OPC 各配比 90 天貯鹽試驗後，各深度氯離子濃度試驗結果，表中並將依據式（5-3）計算的氯離子總量 *m* 詳列於上。圖 5-35 至圖 5-38 為 OPC 各配比氯離子濃度與深度的關係圖。圖 5-39 為 OPC 各配比氯離子總量 *m* 與水灰比的關係圖。由圖中可以發現貯鹽試驗後的氯離子總量 *m* 會隨水灰比有增加之趨勢。

表 5-12　OPC 配比混凝土配比貯鹽試驗結果

與表面之距離（cm）	OPC35（%）	與表面之距離（cm）	OPC45（%）	與表面之距離（cm）	OPC55（%）	與表面之距離（cm）	OPC65（%）
0.27	0.192968	0.27	0.202555	0.24	0.209766	0.25	0.219126
0.93	0.094478	0.93	0.117516	0.87	0.179093	0.90	0.196366
1.58	0.027876	1.58	0.058573	1.51	0.075918	1.54	0.131857
2.22	0.004244	2.21	0.014620	2.15	0.036318	2.17	0.104320
2.87	0.002684	2.85	0.003000	2.79	0.008650	2.81	0.059840
3.50	0.000444	3.51	0.001000	3.42	0.003000	3.45	0.018221
4.18	0.000000	4.23	0.000000	4.07	0.000000	4.09	0.000000
試體氯離子總量（*m*）	0.1816%（%. cm）	試體氯離子總量（*m*）	0.2423%（%. cm）	試體氯離子總量（*m*）	0.2993%（%. cm）	試體氯離子總量（*m*）	0.3862%（%. cm）

（資料來源：本研究自行整理）

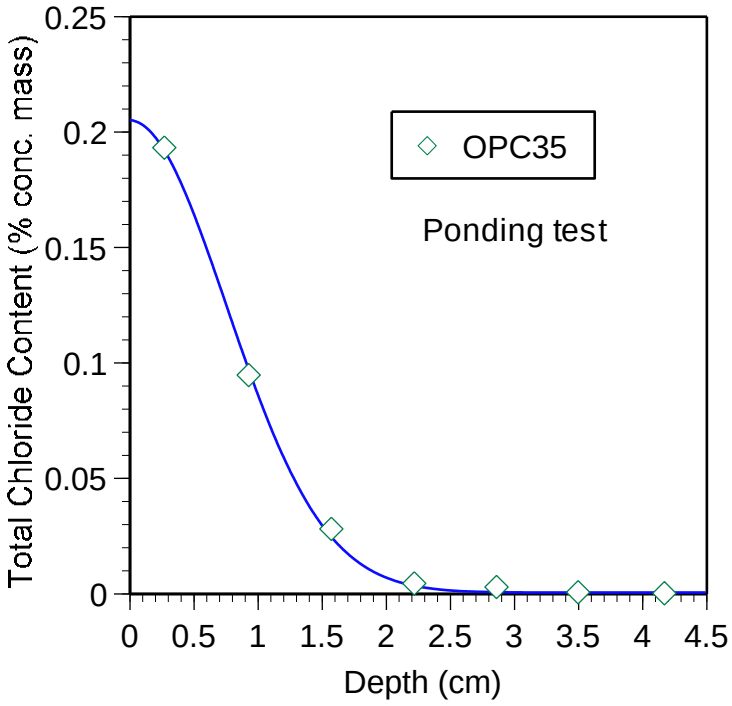

圖 5-35 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（OPC35 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

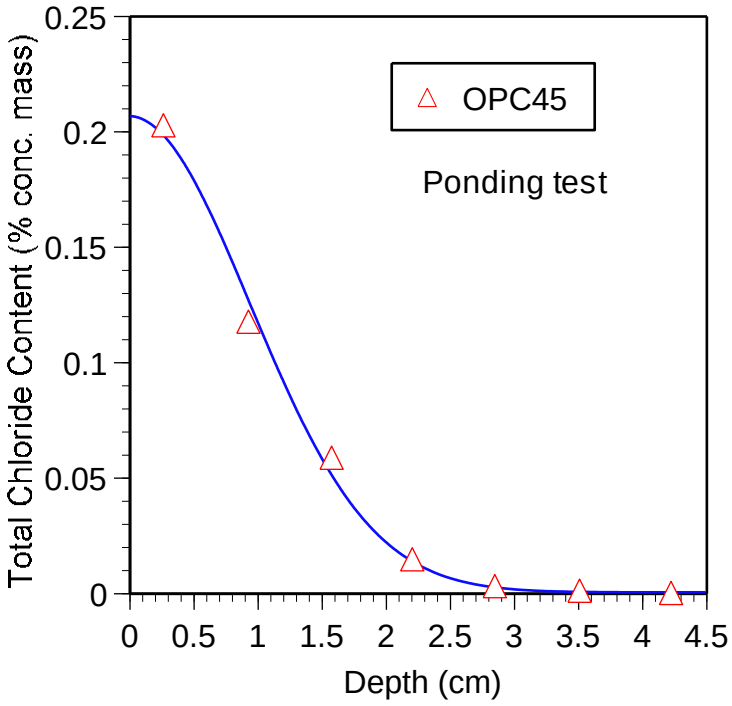

圖 5-36 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（OPC45 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

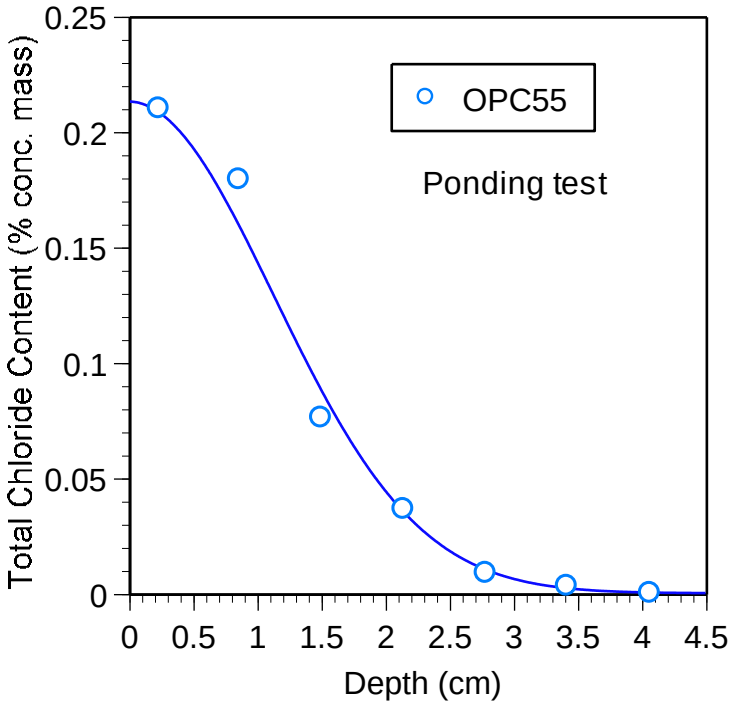

圖 5-37 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（OPC55 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

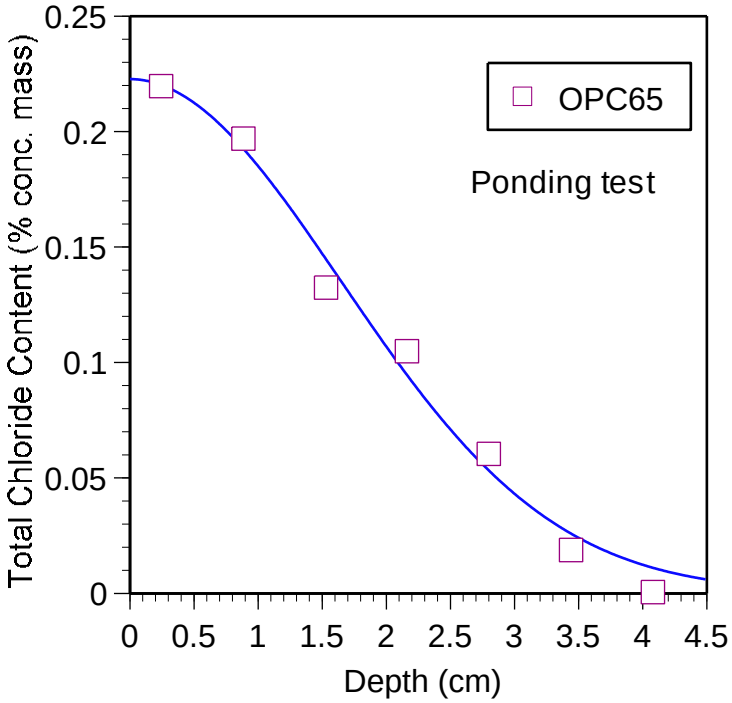

圖 5-38 貯鹽試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（OPC65 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

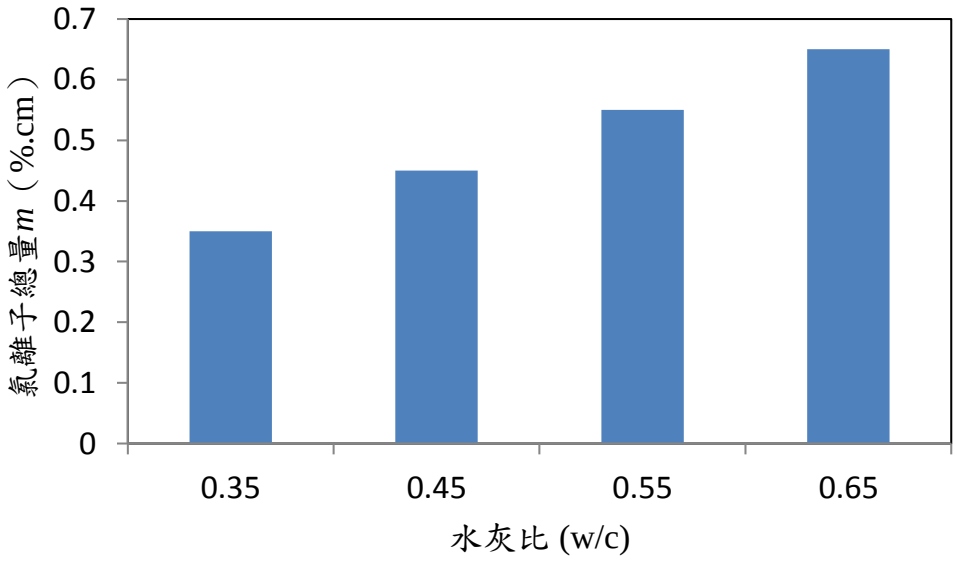

圖 5-39　各曝曬期與貯鹽試驗混凝土氯離子侵入總量值 *m* 與水灰比關係圖（資料來源：本研究自行整理）

第七節　貯鹽試驗與鹽霧試驗結果關聯性建立

前述第四節曾就長期自然曝曬與貯鹽試驗建立關聯性，但貯鹽試驗仍需 90 天試驗時間，本計畫在嘗試將鹽霧試驗與貯鹽試驗之間關聯性的建立，藉以縮短試驗時間，使未來在混凝土耐久性評估運用上更具實用性。

若將 OPC 各配比傳統鹽霧試驗氯離子侵入總量（$m_{salt\ spray}$）值除以貯鹽試驗氯離子侵入總量（$m_{ponding}$）值，並將此比值與劣化時間繪製關係圖，則如圖 5-40 至圖 5-43。循環鹽霧試驗劣化氯離子侵入總量（$m_{prohesion}$）值除以貯鹽試驗氯離子侵入總量（$m_{ponding}$）值與劣化時間關係圖如圖 5-44 至圖 5-47 所示。由圖中可以發現無論何種鹽霧試驗 4 種水灰比的 OPC 配比均呈現良好線性相關性。

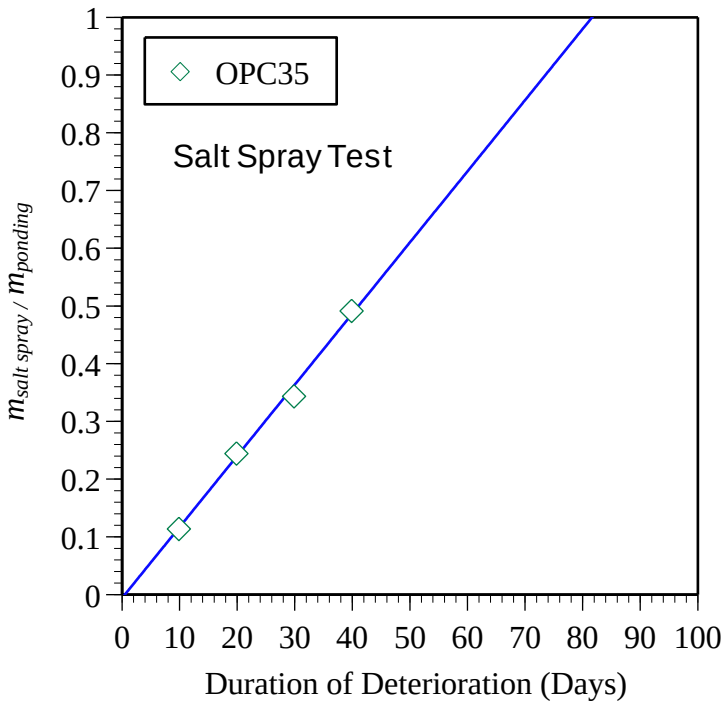

圖 5-40　$m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC35 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

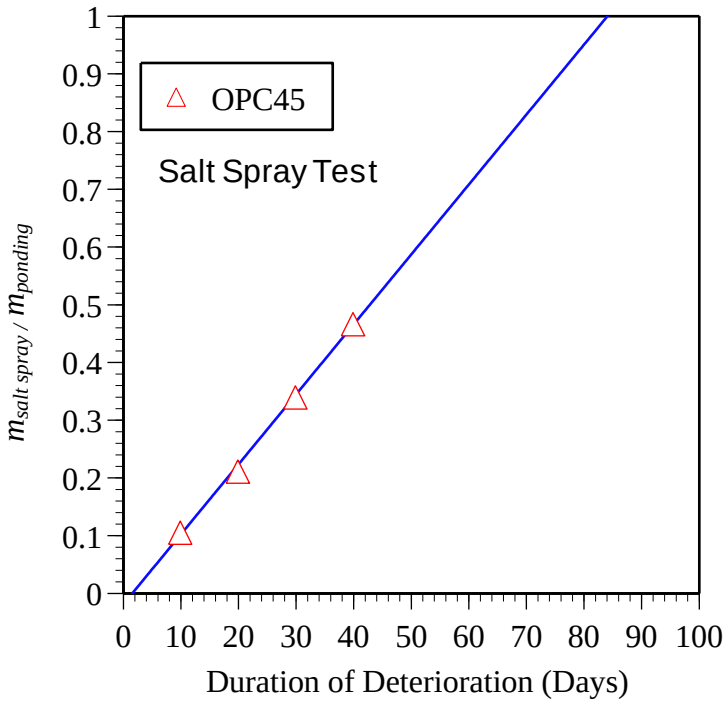

圖 5-41　$m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC45 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

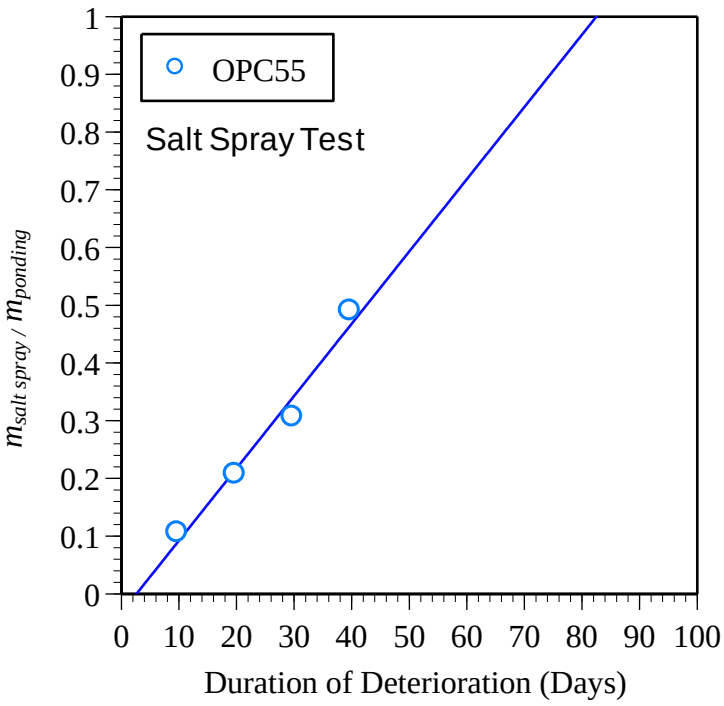

圖 5-42　$m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC55 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

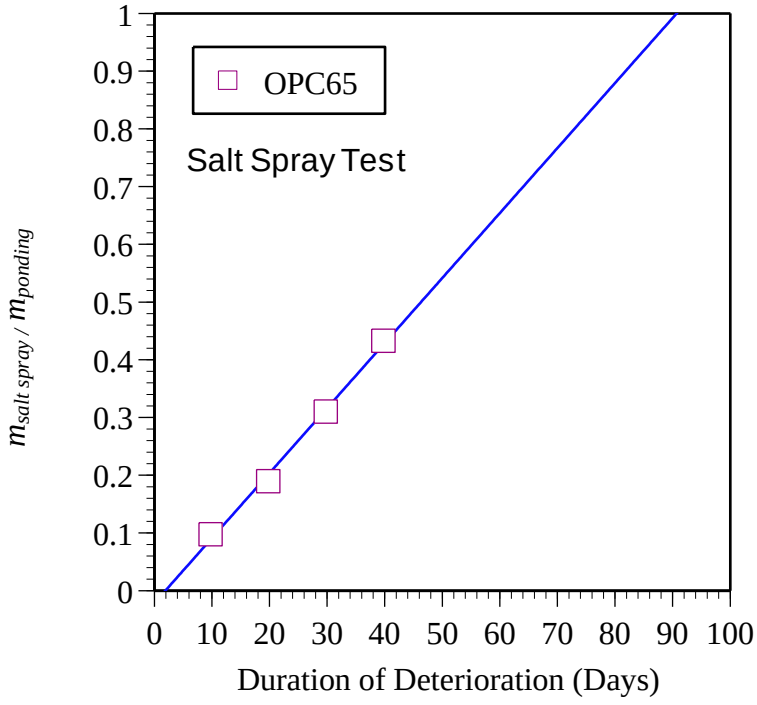

圖 5-43　$m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC65 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

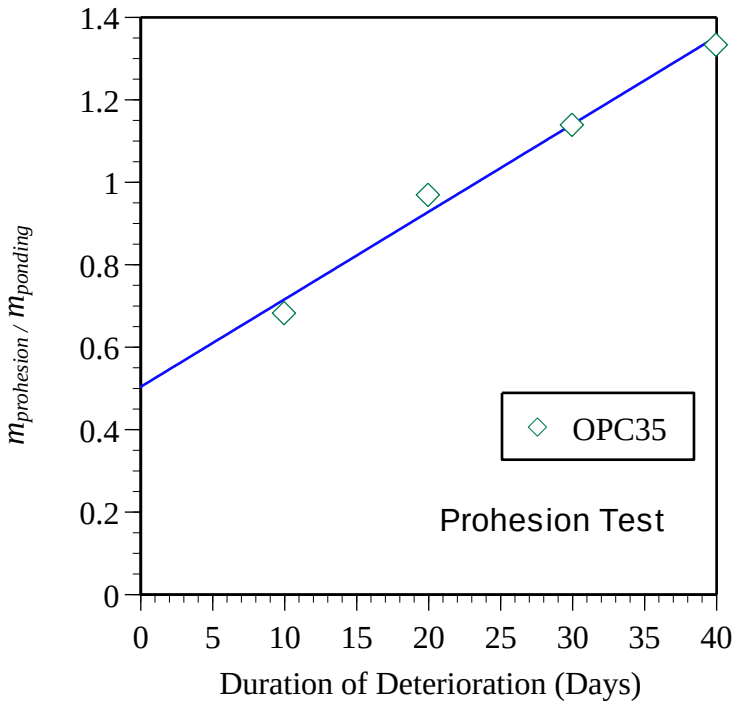

圖 5-44　$m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC35 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

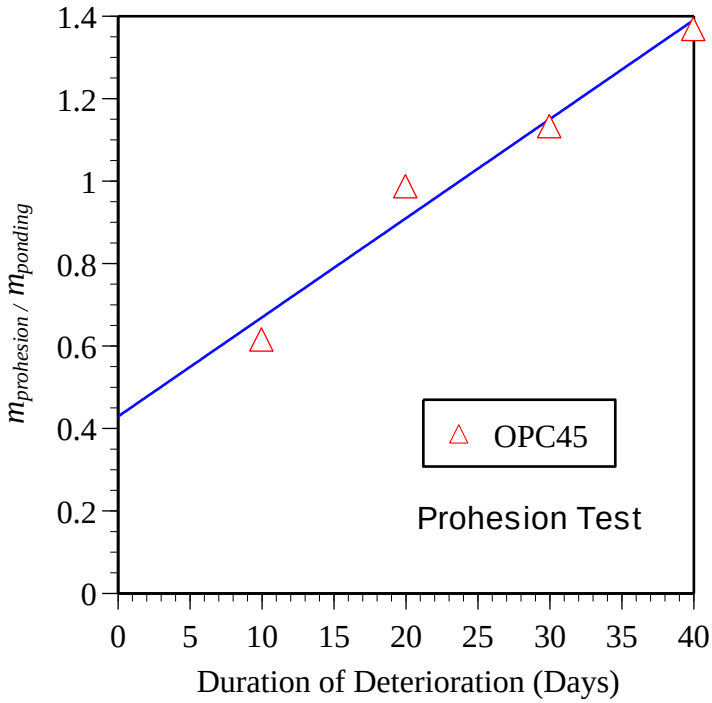

圖 5-45　$m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC45 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

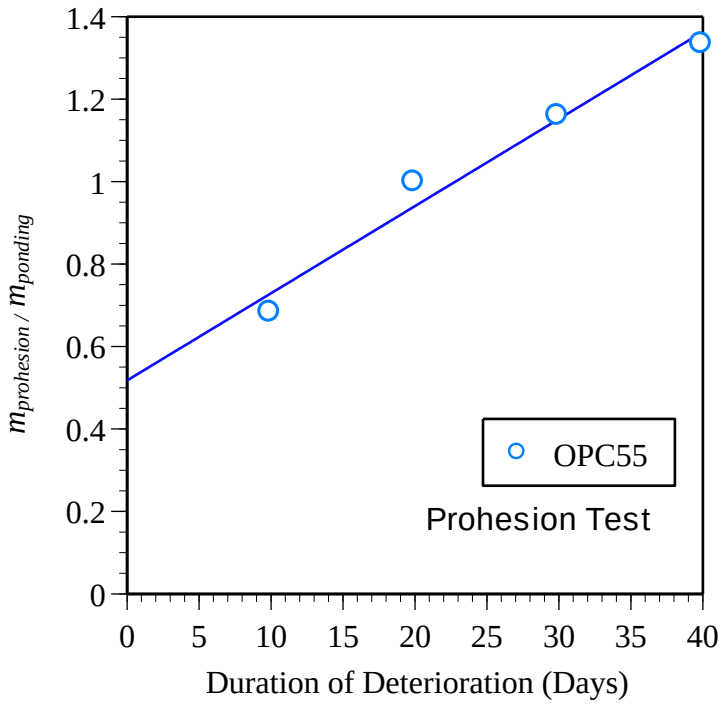

圖 5-46　$m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC55 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

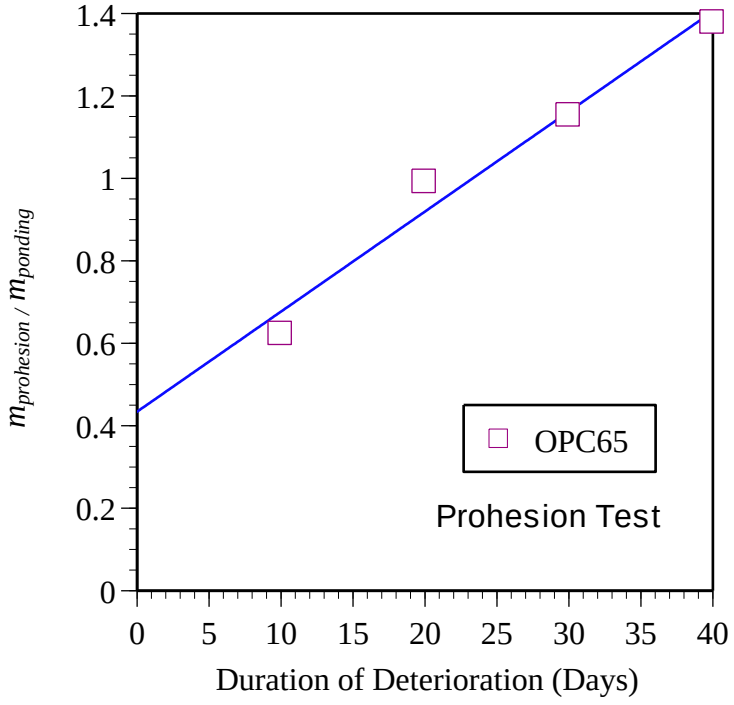

圖 5-47　$m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（OPC65 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

將每組配比線性迴關係曲線延昇至 $m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 等於 1（即縱坐標 1）的位置，則所對應的 X 軸數值如表 5-13 所示，可以表示為貯鹽試驗氯離子侵入總量相對於傳統鹽霧試驗的劣化期程。由表中可以發現貯鹽試驗氯離子侵入總量可相當於 82.05 天至 91.13 天的劣化期，由此可見以傳統鹽霧試驗替代貯鹽試驗在試驗期程上並不會有縮短的情形。圖 5-48 為所有配比的 $m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 計算值與劣化期程關係圖，圖中亦顯現良好線性關係（R^2=0.977），其線性關係式為 Y=0.0121X-0.02464，計算值亦為 84.68 天。表 5-14 為循環鹽霧試驗劣化的計算值，表中可以發現貯鹽試驗氯離子侵入總量可相當於 23.06 天至 23.97 天的劣化期，因此相對於傳統鹽霧劣化試驗，Prohesion 循環鹽霧劣化試驗可較貯鹽試驗節省 2/3 的試驗時間，係因為連續噴霧所造成的劣化結果。。圖 5-49 為所有配比的 $m_{prohesion}/m_{ponding}$ 計算值與劣化期程關係圖，圖中顯現良好線性關係（R^2=0.969），其線性關係式為 Y=0.0277X+0.46600，計算值為 23.56 天。

表 5-13　OPC 配比貯鹽試驗氯離子侵入總量所對應之傳統鹽霧試驗劣化期

配比編號	水灰比	$m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 等於 1 時對應的 X 軸劣化期
OPC35	0.35	82.05 天
OPC45	0.45	84.47 天
OPC55	0.55	82.89 天
OPC65	0.65	91.13 天
全部 OPC 配比	0.35~0.65	84.68 天

（資料來源：本研究自行整理）

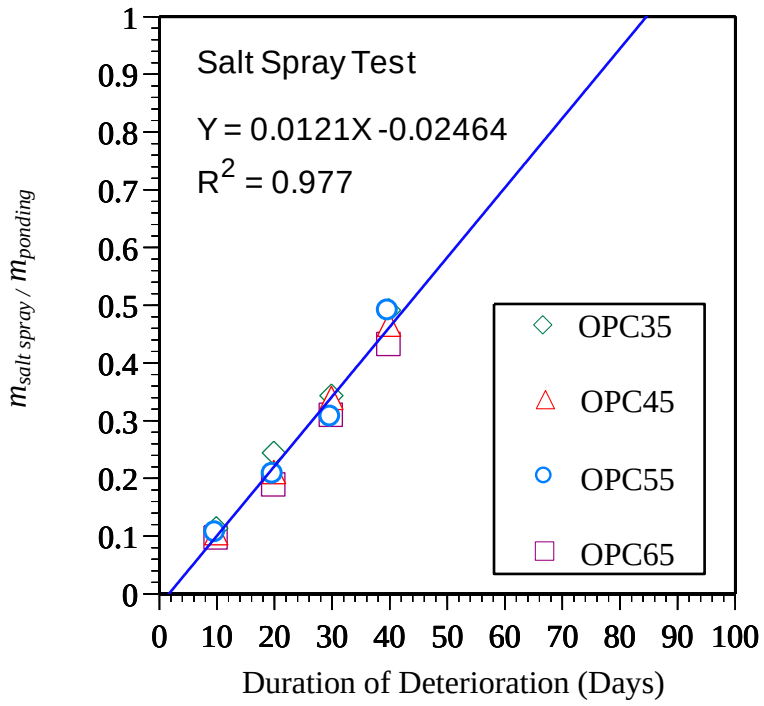

圖 5-48　$m_{salt\ spray}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（所有 OPC 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

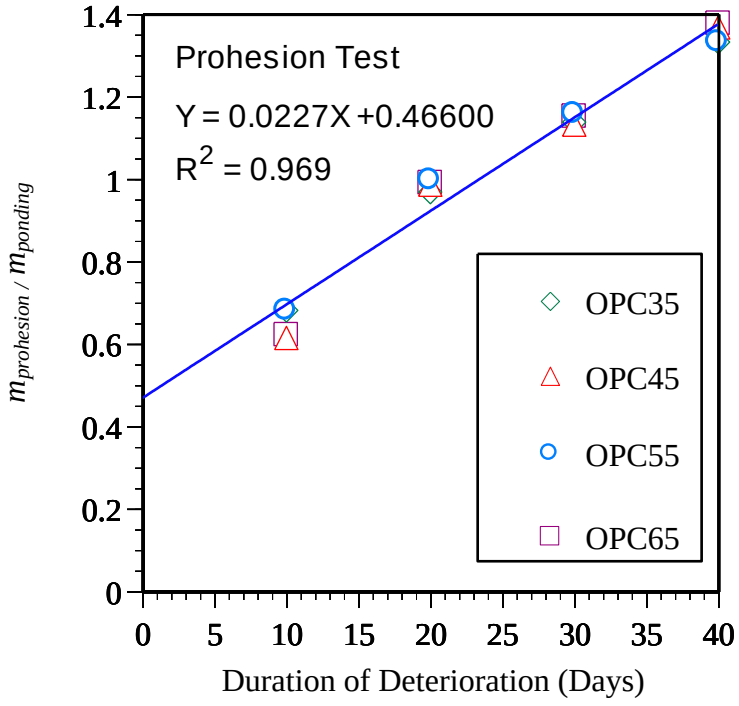

圖 5-49　$m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（所有 OPC 配比）

（資料來源：本研究自行整理）

表 5-14　OPC 配比貯鹽試驗氯離子侵入總量所對應之循環鹽霧試驗劣化期

配比編號	水灰比	$m_{prohesion}/m_{ponding}$ 等於 1 時對應的 X 軸劣化期
OPC35	0.35	23.61 天
OPC45	0.45	23.97 天
OPC55	0.55	23.06 天
OPC65	0.65	23.54 天
全部 OPC 配比	0.35~0.65	23.56 天

（資料來源：本研究自行整理）

第八節　長期自然曝曬混凝土試體循環鹽霧試驗結果驗證

本計畫長期自然曝曬試體面海側 25 cm 長度鑽心試體的後半段約 10 cm 為無氯離子入侵且相同齡期的混凝土配比試體，因此可供本計畫鹽霧試驗使用。相關試體亦進行 10 小時與 40 小時鹽霧循環劣化試驗。圖 5-50 至圖 5-53 為長期自然曝曬 4 個配比 10 小時與 40 小時鹽霧循環劣化試驗結果。並依式（5-3）將計算的氯離子總量 m 詳列於表 5-15。圖 5-54 為長期自然曝曬各配比 $m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖，圖中亦將圖 5-49 由 OPC 配比所得到的線性迴歸關係式列於其上，可以發現長期自然曝曬各配比的 $m_{prohesion}/m_{ponding}$ 均在線性迴歸線附近。由此可以驗證本計畫所建立的鹽霧試驗與貯鹽試驗結果的關係亦可以用於長期自然曝曬上。

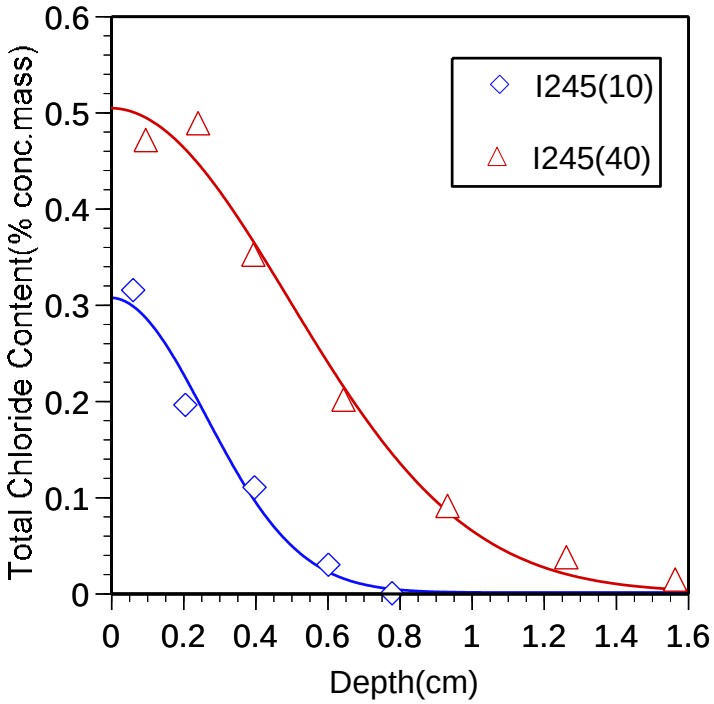

圖 5-50 I245 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

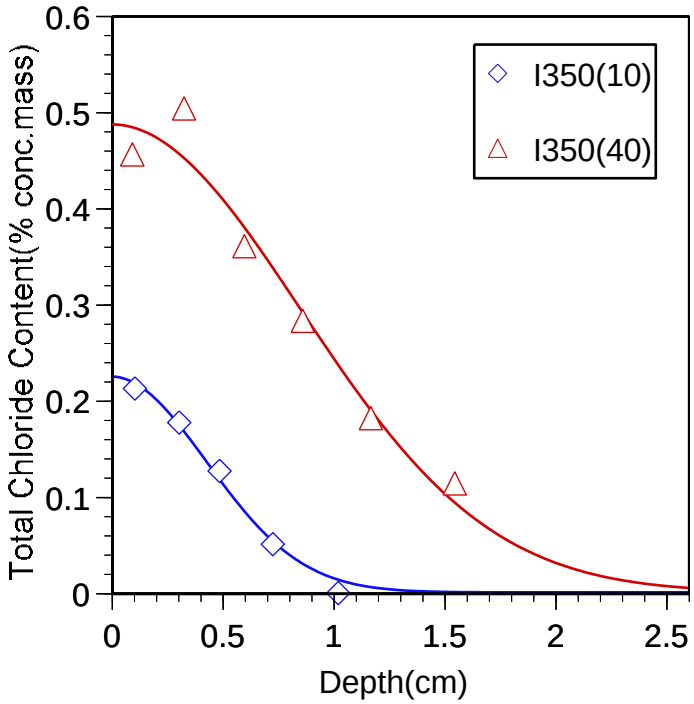

圖 5-51 I350 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

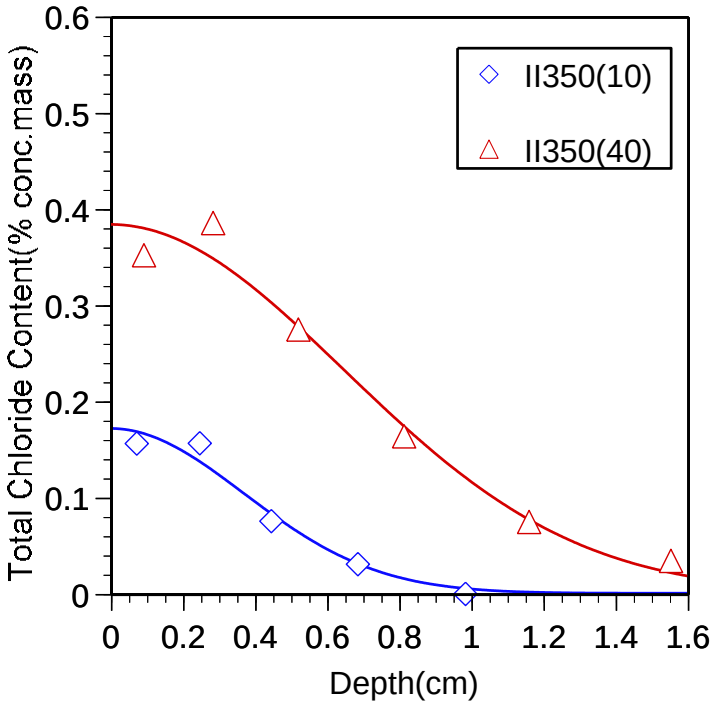

圖 5-52 II350 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

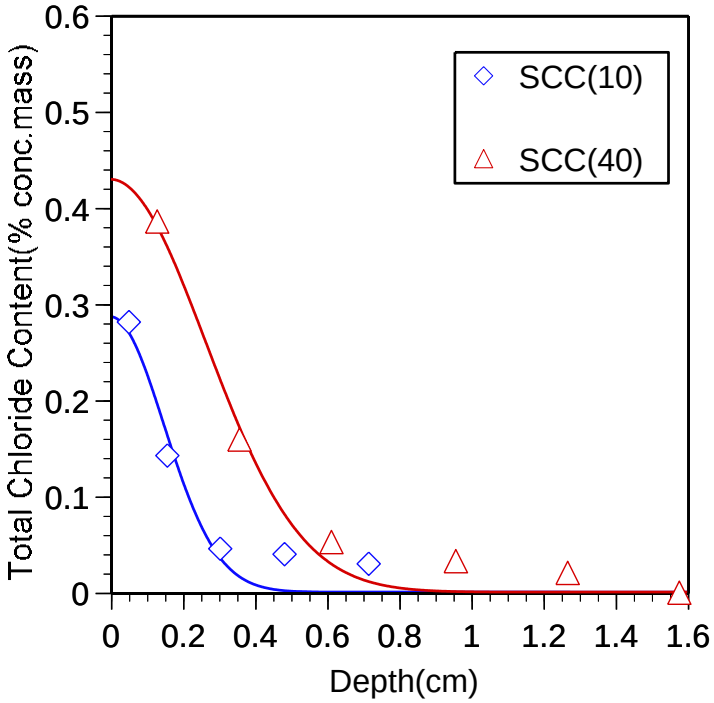

圖 5-53 SCC 配比試驗後氯離子濃度與入侵深度關係圖（循環鹽霧試驗劣化）

（資料來源：本研究自行整理）

表 5-15　長期自然曝曬配比混凝土循環鹽霧劣化氯離子總量 m 計算值

配比編號	10 天劣化期程		40 天劣化期程	
	$m_{prohesion}$	$m_{prohesion}/m_{ponding}$	$m_{prohesion}$	$m_{prohesion}/m_{ponding}$
I245	0.514056	0.693733	0.885556	1.195082
I350	0.325784	0.702121	0.624253	1.345373
II350	0.309954	0.722503	0.525725	1.225466
SCC	0.234790	0.790537	0.397526	1.338471

（資料來源：本研究自行整理）

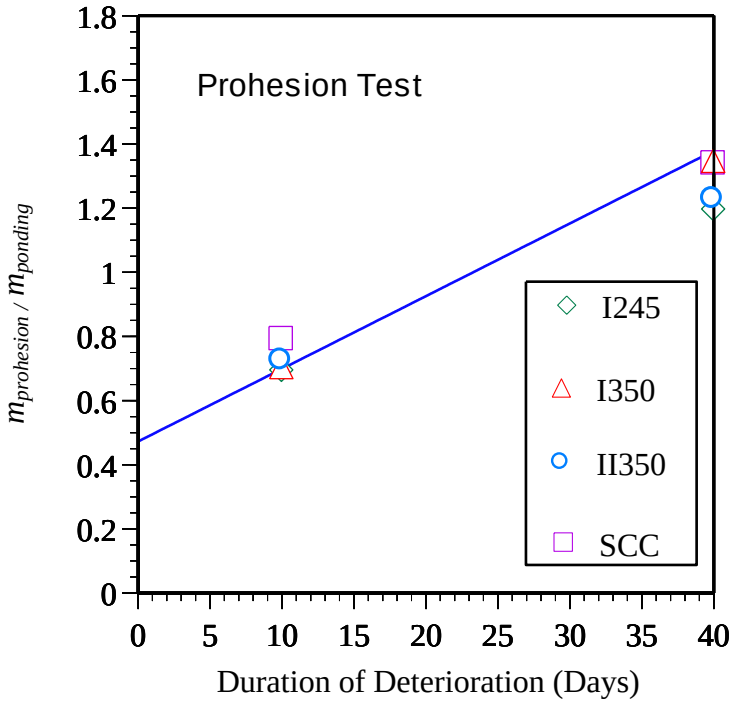

圖 5-54　$m_{prohesion}/m_{ponding}$ 與劣化期時間關係圖（所有長期自然曝曬配比）

（資料來源：本研究自行整理）

第六章　結論與建議

第一節　結論

本計畫以加速鹽霧試驗探討氯離子對混凝土耐久性影響。藉由已有達 5 年長期沿海自然曝曬試體，試驗其各深度氯離子侵入的濃度，同時間並製作不同水灰比混凝土配比進行試驗，由不同劣化時間後所得的氯離子數據，建立加速鹽霧試驗與長期曝曬之間的關聯性。計畫執行狀況良好，已獲得下述試驗結果。

1. 由強度試驗結果發現，自然曝曬配比抗壓強度初期隨著齡期的增加上升的幅度較大，但到了 540 天以後，抗壓強度雖有增加，但上升幅度趨緩。
2. 自然曝曬試驗 4 個配比於曝曬期 540 天量測時發現，面海側氯離子可以深入 0.5 公分內部以上。因此於 720 天與 840 天均鑽心取樣量測其各深度氯離子濃度。而本計畫亦進行 1850 天鑽心取樣氯離子量測工作。且具有足夠試驗點數以利用 Fick's 第二定律計算混凝土氯離子侵入總量。
3. 混凝土氯離子侵入總量值會隨著曝曬期的延長而增加，且貯鹽試驗的總量值（$m_{ponding}$）遠大於各曝曬期氯離子總量值（$m_{expsoure}$），如 I245 配比貯鹽試驗大於 1850 天曝曬期 3.74 倍。
4. 藉由長期自然曝曬配比貯鹽試驗的總量值（$m_{ponding}$）與各曝曬期氯離子總量值（$m_{expsoure}$）的比較，可以發現貯鹽試驗氯離子侵入總量可相當於 15.35 至 18.38 年的曝曬期。
5. 藉由 OPC 配比貯鹽試驗的總量值（$m_{ponding}$）與傳統鹽霧試驗氯離子總量值（$m_{salt\ spray}$）的比較，可以發現貯鹽試驗氯離子侵入總量可相當於傳統鹽霧試驗 82.05 天至 91.13 天的劣化期。
6. 藉由 OPC 配比貯鹽試驗的總量值（$m_{ponding}$）與 Prohesion 循環鹽霧劣化試驗氯離子總量值（$m_{prohesion}$）的比較，可以發現貯鹽試驗氯離子侵入總量可相當於 Prohesion 循環鹽霧試驗 23.06 天至 23.97 天的劣化期。
7. 由上述結果發現，建議可使用具不同劣化溫度的 Prohesion 循環鹽霧劣化試驗來替代貯鹽試驗，可節省約 2/3 試驗時間。而其與劣化時間有良好線性關係（R^2=0.969），其線性關係式為 Y=0.0277X+0.46600。

8. 以同齡期長期自然曝曬配比進行 Prohesion 循環鹽霧劣化試驗，其 $m_{prohesion}/m_{ponding}$ 值亦與結論7線性關係式附近，顯示不同劣化溫度的 Prohesion 循環鹽霧劣化試驗可用於混凝土長期自然曝曬劣化評估上。

本計畫完成後完整建立貯鹽試驗、自然曝曬試驗、與鹽霧試驗三者之關聯性，即由研究成果發現 Prohesion 循環鹽霧劣化試驗 23.06 天至 23.97 天的劣化期可相當於 90 天貯鹽試驗，亦可相當於 15.35 至 18.38 年的自然曝曬期。故此結果對後續混凝土結構物服務年限有極大的幫助，並可由此建立適用於混凝土耐久性評估的鹽霧試驗方法。並建議未來內政部建築研究所可針對台灣地區不同氣候型態長期自然曝曬與鹽霧試驗之關聯性進行探討，亦可對具有瑕疵（裂縫或蜂窩）、低強度的混凝土進行相關研究。

第二節　建議

建議一

（建議主題）：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

建議可研擬適用於混凝土鹽霧試驗的標準試驗法，以供混凝耐久性快速評估或鋼筋混凝土結構物服務年限計算參數使用。

建議二

（建議主題）：中長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

建議針對台灣地區不同氣候型態長期自然曝曬與鹽霧試驗關聯性進行探討。

建議二

（建議主題）：中長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

可使用此試驗法對具有瑕疵（裂縫或蜂窩）、低設計強度混凝土進行相關研究。

建議三

（建議主題）：中長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

建議內政部建研所未來可進行長久曝曬與含氣量對混凝土構材劣化之研究。

附錄一　期初審查會議審查回應一覽表

內政部建築研究所 101 年度

建築先進技術創新開發與推廣應用計畫協同研究計畫第 3 場次

第 6 案「以加速鹽霧試驗探討氯離子對混凝土耐久性影響之研究」

甄審成員發言單及廠商回應一覽表

項次	甄審意見	廠商回應
蘇南 教授	1.除了對 Cl^-耐久性(混凝土)之影響外，如現場的風速(海風)、溫度等是否會影響本案之試體(實驗室)與現場曝曬試體的關係式之建立。	由於現場的風速(海風)、溫度均會影響大氣落鹽量，因此本研究藉由比對現場長期曝曬的大氣氯鹽量與試體受到現場大氣落鹽量侵入的氯離子量進行評估。
	2.本案之試體砂石是否與現地曝曬試體相同或近似，對前述兩種試體之 Cl^-的滲入影響是否有異同？	本案長期曝曬比較的試體採用原曝曬試體未劣化部份進行鹽霧試驗，因此不受砂石來源的影響。
鄭泰昇 系主任	1.研究團隊資歷豐富。	感謝委員意見。
	2.鹽霧試驗與現地曝曬時間的關聯性？取代自然曝曬？	本計畫即嘗試建立鹽霧試驗與現地曝曬時間的關聯性，藉以成為自然曝曬的快速指標。
	3.試體已經曝曬五年 v.s.新試體？曝曬試體的地點？南部 v.s.北部的不同？	本計畫因考量新試體無法與長期曝曬比較，因此採用曝曬五年試體。由於並無南部大氣落鹽資料與長期曝曬試體，因此以採用現有試體為主。
廖肇昌組長	1.鹽霧試驗與現地曝曬的關聯性建立，會與現地環境的差異有關，因此，現地選定會成為該現地的特定關聯曲線，建議本案補充說明現地的氣候條件之描述，以利於應用。	感謝委員意見，於計畫報告中說明現地的氣候條件之描述。相關說明於期末鹽霧試驗與現地曝曬的關聯性建立後，配合現地的氣候條件之描述進行分析。
	2.自五年齡期的試體取樣，(簡報第 8 頁上)進行鹽霧試驗，在比較上有一個結果為持續 5 年曝曬，另一個結果為齡期 5 年，進行鹽霧試驗，兩者試體成長	考量此種取樣方式，係避免混凝土組成材料與配比的影響，本計畫將以強度試驗與吸水率試驗來比較兩者性質差異。

	條件不同，試驗結果會有否不同或無影響？	
邱垂德教授	1.受評協同主持人學養俱佳，具有完成本案之能力。	感謝委員意見。
	2.自然曝曬試體內有否鋼筋？有否鋼筋如何影響試驗結果？及試驗目的。	本計畫自然曝曬試體內有設計鋼筋。由於氯離子對鋼筋腐蝕現象有正相關的影響，因此本計畫探討的是保護層混凝土品質抗氯離子傳輸行為的影響。
李台光研究員	1.本案預計可得到三種數據可供分析，請說明如何與 RC 建材強度評估相結合。	混凝土內氯離子量的變化與混凝土較無關係，因此無法與 RC 建材強度評估相結合。
	2.本案混凝土試體是否考慮骨材區域的差異性？	本案長期曝曬比較的試體採用原曝曬試體未劣化部份進行鹽霧試驗，因此不受砂石來源的影響。
	3.本案若需採用內政部建築研究所之鹽霧耐候試驗機，請盡早與本所聯繫確認。	感謝委員意見。將與貴所聯繫使用日期。
林建宏組長	1.本案模擬各種年期混凝土，其規劃之試體年期級距及其代表性為何？如何取得各種年期之試體？	由於各種年期混凝土以本計畫 10 個月研究期程較難獲得，因此本計畫以不同鹽霧加速劣化時間來模擬各年期混凝土劣化情形。
	2.研究成果在實務界之應用，建議納入本案計畫說明。	感謝委員意見。將於成果報告中納入說明。

附錄二 期中報告審查回應一覽表

項次	審查委員意見	研究團隊回應	對應報告之章節
高健章委員	1. 為本所多年有系統之研究，且海島型台灣，本研究具實用價值。	感謝委員意見。	－－
	2. 建物之不耐久性至破壞，均由其瑕疵部分之不耐久來控制。本案尚未考慮各種混凝土具瑕疵（如微裂縫等）之試體加以試驗研究，可為日後進一步探討之方向。	感謝委員意見，受限於研究期程，並無法探討混凝土具瑕疵的影響，將建議於未來建研所可進行之研究課題。	第六章；P.87
顏聰委員	1. 本案採用之加速鹽霧試驗法與前人 He, Park, Matsumura 等人之研究法是否相同。又本案之研究意義及貢獻是否異於前人者？	感謝委員意見，本案之研究意義及貢獻與前人 He, Park, Matsumura 等人之研究不同，主要在獲得長期曝曬與鹽霧試驗之關聯性。	－－
	2. 研究採用之 OPC 混凝土，OPC65 試體之 28 天強度達 432 kgf/cm2，OPC55 者亦達 571 kgf/cm2，似均偏高，宜檢視之。另一般建築結構之混凝土強度較差者會低於 210 kgf/cm2，就耐久性考量而言，此類混凝土更宜注意之，故建議增加一組強度較低者，如 140~175 kgf/cm2，水灰比約 0.7~0.75。	由於配比設計水泥量較高，所以強度偏高，但受限於研究期程與鹽霧劣化時間，並無法再增加一組強度較低的配比，將建議於未來建研所可進行之研究課題。	第六章；P.87

	3. 表 5-8，氯離子侵入總量之試驗結果，720、840 天之 SCC 者最大，而 1850 天時 SCC 反而最小，宜與貯鹽試驗結果綜合檢討之。	感謝委員意見，係為過去試驗結果之誤差，已無相關試體可修正，將於第五章中檢討。	第五章第四節；P.60
李釗委員	1.研究團隊實力堅強，經驗豐富，研究規劃合理，進度符合預期，預期可獲致相當的成果。	感謝委員意見。	－－
	2.現場曝曬試驗用混凝土角柱試體平放，鹽霧試驗用混凝土圓柱試體直放，二者仍受鹽面與受鹽行為不同，建議於分析時至注意此差異。	感謝委員意見，為避免受鹽面與受鹽行為不同，於自然曝曬與鹽霧劣化試體，除受鹽面外其餘均以緻密 Epoxy 塗封	第四章第四節；P.36
蘇南委員	1. 建議將氯離子對混凝土使用年限之影響權重加以探討。	感謝委員意見，本計畫僅在建立長期曝曬與鹽霧試驗之關聯性，受限於研究期程，並無法探討氯離子對混凝土使用年限之影響權重，將建議於未來建研所可進行之研究課題。	第六章；P.87
	2. 目前實務上，大都以在新拌混凝土中用電解法測試，其與酸溶法之比較建議以予論述。	本計畫氯離子量測採用應顧混凝土酸溶法，並無採用新拌混凝土電解法測試方式。	第四章第五節；P.41
	2. 建議對於環境因子的影響也是否考量與鹽霧試驗作關聯性探討。	受限於研究期程，並無法探討環境因子的影響，將建議於未來建研所可進行之研究課題。	第六章；P.87
趙文成委員	1. 日本、韓國有大氣氯離子相關收集方法，可供參考。	已遵照委員意見整理日本、韓國大氣氯離子收集方法。	第三章第一節；P.22
	2. 有長期實驗數據，十分難得。	感謝委員意見。	－－

	3. 是否有文獻可供參考加速試驗與自然曝曬之關係。	目前較無混凝土加速試驗與自然曝曬之關係。	－－
	4. 是否可提供不同混凝土強度與擴散之關係。	已遵照委員意見，整理相關資料。	第二章第三節；P.14
	5. 天然落鹽量與結構物含鹽量可能因下雨沖走而有不同，或可做為最惡劣狀況。	感謝委員意見，目前先考量為最惡劣氣候狀況。	－－
廖肇昌委員	1. 第 26 頁「C.劣化時間」，該段文字提到傳統金屬材料為 1000 小時，又在第 25 頁「B.劣化環境狀態設定」指出鋼筋因有混凝土保護，連續噴霧環境是否會加速混凝土劣化仍有疑慮，故在前述第 26 頁「C.劣化時間設定」僅至 960 小時，是否達到驗證目標，請確認。	由於混凝土材料大多以天數來做為性值計算依據，因此本計畫以 40 天 960 小時作為試驗劣化期程。因本計畫主要探討劣化期程中試體氯離子變化性，因此有另外設計 10、20、30 天變數，以建立其關聯性。	第四章第一節；P.30
	2. 第 26 頁，表 4-1，配比資料，請補列一欄位水膠比之關係。(雖從表可計算)。	已遵照委員意見補上。	第四章第一節；P.30
	3. 近年來國內在海域工程已使用 II 型或 I 型摻加水淬高爐石粉(或飛灰)，本計畫使用水泥，未來之結果比較雖為相對性關係，則若使用前述礦物摻料取代部分水泥進行試驗，結果是否會有所不同，請參考。	已於長期自然曝曬配比變數設計中考量。	－－
	4. 在初步結論（第 61 頁）	其他地域性條件影響，受限於	－－

	得到的結果，卻有價值，實屬獲得不易，唯該等結果是否受地域性條件影響，為朝研究結果能有普遍應用價值，可否建議研究單位思考若在其他海域地區，要如何參採前述結果之應用。	計畫期程，因此先以具有 5 年曝曬試體的本校沿海環境進行。	

附錄三 期末報告審查回應一覽表

項次	審查委員意見	研究團隊回應	對應報告之章節
顏聰委員	1.研究結果發現，貯鹽試驗 Cl-侵入總量相當於傳統鹽霧試驗 82.05 天至 91.13 天劣化期，或相當於 Prohesion 循環鹽霧試驗 23.06 天至 23.97 天的劣化期建議說明造成該劣化期不同之原因，是否與連續噴霧之加速劣化相關。	劣化時間不同係因為連續噴霧所造成的劣化結果。將說明於研究成果中。	第五章第七節
	2. 期中簡報時曾對 OPC 混凝土強度有所質疑，今見報告中（p.14）提及前人對強度與 Cl-滲透之關係曲線。建議將來針對結果與該曲線作比較。	由於試驗方式與條件並不太一樣，因此較難以比對。	－－
	3. 表 5-8 中，Cl-侵入總量之試驗結果，SCC data 經分析後懷疑為試驗結果有誤，建議將 SCC 部分之報告捨棄之。	感謝委員意見，但 SCC 部分為工作建議書項目，仍加以保留。	－－
王和源委員	1. 本研究歷時高達 1850 天曝曬期，頗為可貴。。	感謝委員鼓勵。	－－
	2. 文章架構清楚，團隊陣容經驗豐富。	感謝委員鼓勵。	－－
	3. 圖 5-4 啟建議將配比代號寫在前面。	依委員意見將配比代號寫在前面。	第五章第二節
	4. 文獻放置是否每篇均要。	文獻均與本研究有關，建議每篇均要。	－－
	5. 英文名詞首字宜大寫。	依委員意見修正	－－

	6.圖 5-2，圖 5-19 表達建議以長條狀表示。	依委員意見以長條狀表示。	第五章第一、三節
	7. 研究原始材料性質建議列入更為完整。	原始材料性質可藉由文獻查閱得知，因非本計畫研究報告建議不列入。	－－
蘇南委員	1. 本報告論證嚴謹，成效良好。	感謝委員鼓勵。	－－
	2. 對於 Cl-對混凝土耐久性，交通部港灣技術研究中心以前做了不少，建議參考。	依委員意見參考辦理。	－－
	3.至於混凝土耐久性之曝曬試驗，工研院也作了不少，建議參考。	依委員意見參考辦理。	－－
	4. 請對本研究成果之應用於產業或實務的未來性作評估。	受限於研究期程，並無法探討環境因子的影響，將建議於未來建研所可進行之研究課題。	第六章；P.87
趙文成委員	1.Cl-滲透與混凝土緻密性有關，宜再說明。	已遵照委員意見整理日本、韓國大氣氯離子收集方法。	第三章第一節；P.22
	2. 曝曬期間是否受下雨之影響為何。	曝曬期間表面氯離子深度亦會受到下雨之影響。	－－
	3. 有長期試驗數據實屬難得。	感謝委員鼓勵。	－－
	4. 貯鹽與噴霧試驗如何確保其濃度，宜再說明。	貯鹽試驗的氯離子溶液採每周更換情形。噴霧試驗因受限於鹽水噴霧筒容量約 2~3 天即需補充，故其濃度可確保。	第二章第三節；P.14
	5. 外插試驗結果是否可有國外資料可供參考。	金屬鹽霧試驗有相關文獻可供參考。	－－

王榮吉 委員	1.本研究之執行工作內容、試驗方式從建立貯鹽士驗自然曝曬與鹽霧試驗。後續混凝土結構之組成產品。研究執行團隊繼續相關研究。	1.感謝委員建議，已列入第七章結論與建議德中長期性建議之一供所上參考。	第七章第二節

參考書目

1. Meira, G. R., Andrade, C., Alonso, C., Borba Jr., G. R., Padilha Jr., M., “Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator ”, Cement and Concrete Composites, Vol 32, 2010, pp. 427-435.
2. Bulu Pradhan, B. Bhattacharjee, “Rebar corrosion in chloride environment“, Construction and Building Materials, Vol 25, 2011, pp. 2565-2575.
3. 詹穎雯、陳振川、吳建國、楊仲家、許鎧麟、卓世偉、陳育聖、張永昌,“台灣苗栗以北地區大氣中氯鹽與橋樑腐蝕劣化環境之研究”，交通部公路總局委託研究案報告, 2010.
4. He, F, Shi, C., Tuan, Q., Chen, Zheng, K., “$AgNO_3$-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete”, Construction and Building Materials, Vol 26, 2012, pp. 1-8.
5. Park, S. S., Kwon, S. J., Jung, S. H., “Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation Original Research Article” , Construction and Building Materials, Vol 29, 2012, pp. 183-192.
6. Matsumura, T., Shirai, K., Saegusa, T., “Verification method for durability of reinforced concrete structures subjected to salt attack under high temperature conditions” , Nuclear Engineering and Design, Vol 238, 2008, pp. 1181-1188.
7. P. Castro, L. Véleva, M. Balancán, “Corrosion of reinforced concrete in a tropical marine environment and in accelerated tests” , Construction and Building Materials, Vol 26, 1997, pp. 75-81.
8. Jung, W. Y., Yoon, Y. S., Sohn, Y. M., “Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion”, Cement and Concrete Research, Vol 33, 2003, pp. 663-677.
9. 林筵進,「不同塗層在乾溼循環環境中之電化學阻抗性質研究」,國立成功大學材料工程與科學研究所碩士論文，指導教授：蔡文達教授，2002。
10. 蕭亞方,「塗裝木材人工加速與自然劣化相關性之探討」,國立台灣大學森林學研究所碩士論文，指導教授：張上鎮教授，1996。
11. 李鴻麟、鄒哲宗、夏滄淇、顧文君,「木材用塗料耐候性之研究－塗料耐候性之比較」,林業試驗所研究報告季刊，Vol. 8, pp.321-330, 1993.

12. 鄒哲宗、夏滄淇、陳啟榮、顧文君，「木材用塗料耐候性之研究－塗料之耐候性與耐光性」，林業試驗所研究報告季刊，Vol. 10, pp.153-160, 1995.
13. 洪耀宗，「電信材料之大氣腐蝕及其防治研究」，國立清華大學材料工程研究所博士論文，指導教授：施漢章教授，2003。
14. 陳哲生、吳忠民，「耐候型塗料於麥寮地區曝曬行為研究」，中國工程師學會工程季刊，Vol. 80, pp.39-46, 2007.
15. Ann, K. Y., and Song, K. Y., “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete”, Corrosion Science, Vol.49, pp.4113-4133, 2007.
16. Angst, U., Elsener, B., Larsen, K. C., Vennesland, O., “Critical chloride content in reinforced concrete- A review”, Cement and Concrete Research, Vol.39, pp.1122-1138, 2009.
17. BS EN 206-1 “Eurocode 2. Design of concrete structures. General rules and rules for buildings “, British-Adopted European Standard, 2004.
18. X. Wu, L. Xu, Q. Yang, S. Huang,“The diffusion equation of chloride ions in cement mortar”Trans Shanghai Building Materials Collection Vol.4, pp.364-372(1991).
19. B. F. Johannesson, “Diffusion of a mixture of cations and anions dissolved in water”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp.1261-1270 (1999).
20. Arsenault, J. P. Bigas, J. P. Ollivier,“Determination of chloride diffusion coefficient using two different steady-state methods：influence of concentration gradient ”Chloride Penetration into Concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop pp.150-160, (1993).
21. 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).
22. T. H. Wee, A. K. Suryavanshi, and S. S. Tin, “Influence of aggregate fraction in the mix on the reliability of the rapid chloride permeability”, Cement and Concrete Composites, Vol. 21, pp.59-72 (1999).
23. W. Prince, R. Pérami, and M. Espagne, “Mechanisms involved in the accelerated test of chloride permeability”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp.687-694 (1999).
24. A. A. Ramezanianpour, “Effect of curing on the compressive strength resistance to chloride-ion penetration and porosity of concrete incorporating slag, fly ash or

silica fume", Cement and Concrete Composites, Vol. 17, pp.125-33 (1995).

25. O. S. B. Al-Amoudi, W. A. Al-Kutti, S. Ahmad, and M. Maslehuddin, "Correlation between compressive strength and certain durability indices of plain and blended cement concretes", Cement and Concrete Composites, Vol. 31, pp.672-676 (2009).
26. ISO 9225, "Corrosion of metals and alloys -- Corrosivity of atmospheres", International Organization for Standardization, 2012.
27. CNS 13754,「金屬及合金之腐蝕—大氣腐蝕性（污染之測定）」，中華民國國家標準。
28. JIS Z2382,「大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定」，日本工業標準，1998。
29. J. K. Lee, and H. Y. Moon, "Salinity distribution of seashore concrete structures in Korea", Building and Environment, Vol. 41, pp.1447-1453 (2006).
30. 日本獨立行政法人土木研究所構造橋樑部橋樑研究所,「飛來鹽分量全國調查（Ⅳ）-飛來鹽分量的分佈特性與風的關係-」土木研究所資料 第 3175 號 pp. 1~26，1993 年 3 月。
31. 秋山充良、伊東佑香、鈴木基行,「信頼性理論を用いた塩害劣化作用を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価の試み」土木学会第 60 回年次学術講演会，2005 年 9 月。
32. Malalis, R. R., and Robertson, I. N., "Island mapping of chloride deposition rate", Research Report UHM/CEE/06-05, May, 2006.
33. Hossain, K. M. A., and Easa, S. M., "Spatial Distribution of Marine Salts in Coastal Region Using Wet Candle Sensors", International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, Vol.7, No.3, 2011,pp.228-235.
34. 陳桂清、柯正龍、羅建明、羅俊雄,「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究」，交通部運輸研究所研究報告，MOTC-IOT-97-H1DB002，2009。

以加速鹽霧試驗探討氯離子對混凝土耐久性影響之研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓

網址：http://www.abri.gov.tw

編者：何明錦、楊仲家、卓世偉、林志彥、江慶堂、翁詩涵

出版年月：101 年 12 月

版次：第 1 版

ISBN 978-986-03-4619-0 (平裝)