

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

混凝土障壁材料品質劣化速率模式研究

計畫編號：1062001INER020

受委託機關(構)：社團法人中華鋪面工程學會

計畫主持人：黃偉慶

聯絡電話：(公) 03-4257062 (宅) 02-27016775

E-mail address：t321655@ncu.edu.tw

協同主持人：

研究期程：中華民國 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 57.6 萬元

核研所聯絡人員：陳鈺沛

報告日期：106 年 12 月

中文摘要

低放射性廢棄物最終處置將使用混凝土障壁，因服務時間長，故須針對可能遭遇不良環境探討其使用年限，本研究針對兩種障壁混凝土受到氯離子入侵可能情形進行服務年限的推算，並以不同高溫養護方式，嘗試進一步提升障壁混凝土品質及耐久性能。

本研究針對可能用於製作盛裝容器(含蓋子) 配比 C、封蓋之填縫材料配比 M，依據 ASTM C1556 規範製作標準試體，於養治齡期 28 天、90 天、183 天、365 天、2 年及 3 年時，將試體浸泡氯化鈉溶液至少 35 天，再以 ASTM C1152 量測不同齡期的高溫養護方式之混凝土濃度剖面，藉由費克第二定律衍生式，計算出表面氯離子濃度與瞬時擴散係數。

利用 80°C 高溫養護觀察其提升混凝土耐久性及品質之效果，分別進行抗壓強度試驗、混凝土乾縮試驗、電阻率試驗、氯離子入侵試驗、孔隙率與孔隙結構，探討不同養護方式之影響。相較於常溫養護，使用 80°C 高溫熱水養護能有效提升品質，使孔隙更緻密，可降低氯離子入侵之能力，而試驗成效最佳高溫養護天數為 3 天。

為快速檢測添加鋼纖維之混凝土盛裝容器品質，進行混凝土電阻率的檢測，並與其他試驗結果進行比較，發現配比 C 的電阻率與孔隙率和電阻率與擴散係數之 $R^2 > 0.7$ ，顯示其電阻率與孔隙率、擴散係數有顯著的關係。

關鍵詞：氯離子、活性粉混凝土、高溫養護。

英文摘要

The final disposal of low-level radioactive wastes will be using concrete barriers. Due to the long service time, it is likely to encounter adverse environments and thus the service life of the concrete barrier needs be explored. And with different high-temperature curing methods, try to further improve the quality and durability of barrier concrete.

In this study, two concrete mixes possibly used for fabricating highly integrated containers, namely mixes C and M, will be tested by ASTM C1556 standard procedures to determine their diffusion coefficient under the attack of chloride ions. The profile of chloride concentration at various depths will be determined for concrete specimens at 28, 90, 183 and 365 days of age after immersing in NaCl solution for over 35 days. Then, Fick's second law can be used to obtain chloride diffusion coefficient and surface chloride content using non-linear regression technique. And the experimental data will be used to estimate the change in diffusion coefficient with time for the two concrete mixes.

The effects of different curing methods on compressive strength test, concrete shrinkage test, electrical resistivity test, chloride ion diffusion test, porosity and pore structure of concrete to observing the effect of improving the durability and quality of concrete by high temperature curing at 80°C. Compared with the normal temperature curing, use 80°C curing can effectively improve the quality of the pores more compact and reduce the chloride ion invasion ability, the test results the best high temperature curing days is 3 days.

Key words: chloride, reactive powder concrete, high temperature

curing.

目錄

中文摘要	2
英文摘要	3
壹、計畫緣起與目的	8
一、研究背景	8
二、研究目的	8
三、研究內容	9
貳、文獻回顧	10
一、高溫養護之影響	10
二、長期氯離子浸泡	12
三、電阻率規範	12
四、影響電阻率因素	13
五、鋼纖維分佈均勻性	15
六、混凝土收縮變形	16
七、以熱養護改善微結構	18
八、氯離子入侵模式	19
九、程式 LIFE-365 簡介	22
十、服務年限推估模式	26
十一、計算程序與 LIFE-365 驗證	31
參、研究方法與過程	33
一、實驗材料	33
二、試驗規劃	37
三、試驗流程	38
四、配比	39
五、試驗方法	41
肆、主要發現與結論	48
一、混凝土坍度與凝結時間試驗	48

二、抗壓強度試驗	49
三、孔隙率試驗	51
四、孔隙分佈與孔隙結構分析	53
五、表面電阻試驗	61
六、乾縮試驗	69
七、氯離子入侵混凝土濃度量測與分析	70
八、服務年限推估	82
伍、結論	84
陸、參考文獻	86

圖目錄

圖 2.1 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響	11
圖 2.2 活性粉混凝土壓汞試驗結果	12
圖 2.3 圓柱試體電阻率修正因子	15
圖 2.4 縱向、橫向切割方式	16
圖 2.5 橫向切割計算圓形模板	16
圖 2.6 混凝土吸附作用示意圖	20
圖 2.7 水膠比或添加礦物摻料對表面濃度之影響	22
圖 2.8 程式 Life-365 介面	23
圖 2.9 程式 Life-365 使用介面	24
圖 2.10 服務年限(初始階段 t_i +腐蝕階段 t_p)	26
圖 2.11 實驗與推估模型之濃度剖面比較.....	26
圖 2.12 實驗與推估模型之濃度剖面比較	27
圖 2.13 各時間名稱之定義圖	27
圖 2.14 代碼 W40D55 差值法與程式結果比較圖.....	33
圖 3.1 粗粒料粒徑分佈曲線圖	35
圖 3.2 細粒料粒徑分佈曲線圖	36
圖 3.3 試驗流程圖	37
圖 3.4 混凝土浸泡飽和石灰水示意圖	43
圖 3.5 試體的切割尺寸圖	44
圖 3.6 混凝土浸泡 NaCl 溶液示意圖	44
圖 3.7 試體分層示意圖	44
圖 3.8 研磨後的試體與其分層粉末	45
圖 3.9 研磨後的試體與其分層粉末分析階段	45
圖 3.10 孔隙率試驗試體	47
圖 3.11 混凝土電阻值量測圖.....	48
圖 4.1 M 配比坍度試驗.....	49
圖 4.2 C 配比坍度試驗.....	49
圖 4.3 C 配比 80°C 養護方式對抗壓強度之影響.....	50

圖 4.4 M 配比 80°C 養護方式對抗壓強度之影響	51
圖 4.5 經 12 小時 200°C 烘箱養護所產生之裂縫	52
圖 4.6 養護條件對 C 配比孔隙率之影響	52
圖 4.7 養護條件對 M 配比孔隙率之影響	53
圖 4.8 C 配比不同齡期孔隙體積分布圖	56
圖 4.9 M 配比不同齡期孔隙體積分布圖	57
圖 4.10 C 配比不同齡期孔隙結構關係圖	59
圖 4.11 M 配比不同齡期孔隙結構關係圖	61
圖 4.12 養護條件對 C 配比電阻率之影響	63
圖 4.13 養護條件對 M 配比電阻率之影響	63
圖 4.14 C 配比不同水灰比與電阻率關係圖	64
圖 4.15 M 配比不同水灰比與電阻率關係圖	64
圖 4.16 配比 C 之不同鋼纖維含量與電阻率關係圖	65
圖 4.17 齡期 183 天配比 C 不同養護方式電阻率與孔隙率比較圖	66
圖 4.18 齡期 183 天配比 M 不同養護方式電阻率與孔隙率比較圖	66
圖 4.19 齡期 90 天配比 C 不同養護方式電阻率與抗壓強度比較圖	67
圖 4.20 齡期 90 天配比 M 不同養護方式電阻率與抗壓強度比較圖	67
圖 4.21 齡期 183 天配比 C 不同養護方式電阻率與擴散係數比較圖	68
圖 4.22 齡期 183 天配比 M 不同養護方式電阻率與擴散係數比較圖	68
圖 4.23 養護條件對 C 配比乾縮率之影響	70
圖 4.24 養護條件對 M 配比乾縮率之影響	70
圖 4.25 配比 C 各齡期與瞬時擴散係數關係圖	74
圖 4.26 配比 M 各齡期與瞬時擴散係數關係圖	74
圖 4.27 配比 C 齡期 365 天各養護方式瞬時擴散係數關係圖	74
圖 4.28 配比 M 齡期 365 天各養護方式瞬時擴散係數關係圖	75
圖 4.29 配比 C 不同齡期與不同養護之氯離子濃度剖面圖	77
圖 4.30 配比 M 不同齡期與不同養護之氯離子濃度剖面圖	78
圖 4.31 配比 C 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖	79
圖 4.32 配比 M 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖	80
圖 4.33 配比 C 瞬時擴散係數推估及實驗數據比較圖	81

圖 4.34 配比 M 瞬時擴散係數推估及實驗數據比較圖	81
圖 4.35 處置場封閉後受氣離子入侵濃度剖面推估圖	83

表目錄

表 2.1 AASHTO T358 電阻率評估氯離子入侵可能性	13
表 2.2 程式 Life-365 參數設定範圍與試驗配比參數	24
表 2.3 美國各州氯離子成長速率及最大表面氯離子濃度值歸納表	25
表 2.4 台東與 Florida 各月均溫 (單位: °C)	25
表 2.5 受氯離子入侵之混凝土時間因子可能範圍	30
表 2.6 計算濃度剖面方法比較	32
表 3.1 試驗材料的化學成分	34
表 3.2 粗、細粒料物理性質	35
表 3.3 化學藥劑使用用途及來源	36
表 3.4 混凝土配比 C 與 M (單位: kg/m ³)	40
表 3.5 水泥漿塊配比 (單位: %)	40
表 3.6 養護方法	41
表 4.1 電阻率與其他試驗結果相關性判定係數比較表	69
表 4.2 常溫養護配比 C 及 M 瞬時擴散係數值及表面氯離子濃度值	71
表 4.3 80-3D 養護配比 C 及 M 瞬時擴散係數值及表面氯離子濃度值	72
表 4.4 80-4D 養護配比 C 及 M 瞬時擴散係數值及表面氯離子濃度值	72
表 4.5 80-3D12H 配比 C 及 M 瞬時擴散係數值及表面氯離子濃度值	73
表 4.6 配比 C 與配比 M 瞬時擴散係數與時間的關係	79

壹、計畫緣起與目的

一、研究背景

低放射性廢棄物最終處置場採用「多重障壁」概念，係利用多重防護設施將低放射性廢棄物與人類生活圈隔絕；由於工程障壁需長期提供圍阻功能，因此需探討障壁材料長期於最終處置場環境下可能造成劣化現象與其劣化速率情形。目前最終處置場候選場址可能建造於濱海區域且可能為淺地層處置，此環境易於造成金屬腐蝕現象之發生，使影響混凝土長期耐久性。本研究持續利用鋼纖維混凝土為處置場工程障壁材料，根據最終處置盛裝容器可能採用之混凝土配比，探討混凝土配比抵抗氯離子入侵之能力，依據 ASTM C1556 標準方法製作試體並進行實驗，求取預定使用混凝土配比之氯離子擴散係數及時間因子。此外，為進一步提升盛裝容器混凝土之品質，採用高溫養治方式，以期改善混凝土微結構，並提升其性能。最後，將針對常溫與高溫養治之混凝土，進行一系列的特性及耐久性成效比較，以評估混凝土配比高溫養治的效能。

研究成果將用於評估障壁用混凝土配比之抗氯離子入侵能力能否滿足最終處置場服務年限之需求及推算其劣化速率，以提供國內興建低放射性廢棄物最終處置場之指標參考，提升低放射性廢棄物最終處置設施之安全性。

二、研究目的

由於台灣四面環海，場址的選擇可能面臨濱海環境，因此低放射性廢棄物處置設施所使用之混凝土在設計時，必須考量氯離子入侵之可能性，其處置設施所使用混凝土不同於一般混

凝土結構物，其使用年限需至少 300 年，故探討凝土使用年限為重要探討議題。本研究主要採用 ASTM C1556 之氯離子入侵試驗針對凝土受到氯離子入侵進行相關試驗，探討氯離子於凝土內部入侵之速率及其隨時間增加而變化之模式，表面氯離子於凝土表面隨時間增加而累積的模式，依據 ACI 所發表程式 Life-365，針對鋼筋凝土受氯離子入侵之服務年限推估模式方法，發展一套計算程序，可用於推估未來處置設施可能使用配比受到氯離子入侵之使用年限。

為提升凝土材料之品質，針對配比養治技術加以改善，提高養治溫度至 80°C，探討提高養護溫度對凝土品質之改善情形。針對 C 配比及 M 配比採用高溫養治，探討不同養治時間及溫度對凝土品質改善之成效。實驗內容及項目包括抗壓強度、電阻率等量測；同時也將對高溫養治試體量測氯離子擴散係數，以掌握養治方法對凝土抵抗氯離子入侵能力的影響，並與常溫養治者加以比較。

三、研究內容

本研究探討低放射性廢棄物最終處置設施障壁凝土材料，受氯離子入侵，氯離子於凝土內部擴散，並推估至鋼筋開始腐蝕之凝土使用年限。其主要內容分述如下：

(一)本研究針對可能使用於盛裝容器之配比 C 與封蓋之填縫材料配比 M，依據 ASTM C1556 製作標準試體，養護至預定之不同齡期，然後浸泡氯化鈉至少 35 天，依據 ASTM C1152 取得在不同深度之氯離子濃度剖面，計算出表面氯離子濃度 C_s 與瞬時擴散係數 D ，以及其隨時間增加而變化之情形。

- (二)依據 ACI 所發表程式 Life-365，針對鋼筋混凝土受氯離子入侵之服務年限推估模式方法，發展一套計算程序，可用於推估未來處置設施可能使用配比其使用年限。
- (三)藉由孔隙率試驗與氮氣吸附試驗，建立孔隙率、孔隙體積與擴散係數的關聯性。
- (四)以混凝土表面電阻率試驗結果建立與抗壓強度試驗、孔隙率及擴散係數試驗結果之關係，作為表面電阻率品質檢定之標準，以便未來在現地使用電阻率快速判定混凝土之品質。
- (五)乾縮試驗量測配比混凝土的收縮變化量，確定其體積穩定性。

貳、文獻回顧

一、高溫養護之影響

根據文獻資料顯示若混凝土經熱養護處理，可加速提升混凝土強度及耐久性，亦於短時間養護齡期內使混凝土中卜作嵐材料與水泥進行卜作嵐反應，而活性粉混凝土特色係添加高含量矽灰與石英粉屬高活性卜作嵐材料，因此活性粉混凝土施行熱養護主要目的即為加速卜作嵐反應，利用養護溫度提升混凝土強度。Zanni et al. (1996)研究指出活性粉混凝土添加矽灰及石英粉，經核磁共振儀分析得知，活性粉混凝土在 20 °C 水中養護 28 天，其卜作嵐反應緩慢且不明顯，水化物 C-S-H 膠體鏈結長度較短；而在 90 °C 水中養護 48 小時，則明顯看出隨溫度增高加速卜作嵐反應，且水化物 C-S-H 膠體鏈結長度亦有變長現象，證實高溫養護可激發矽灰及石英粉活性，有助於混凝土卜作嵐反應及水化作用之進行。

Lee and Chisholm(2005)利用養護溫度分別為 23、90 與 160 °C 進行養護，如圖 2.1 所示，發現養護溫度提升其抗壓強度有明顯增強之現象。Cheyrezy et al. (1995)利用壓汞試驗測試活性粉混凝土經各養護溫度(20、90、200 及 400°C)及施予壓力(SC 為 1 atm、P 為 310 atm)之養護方式對於累積孔隙量之影響，如圖 2.2 所示，觀察粒徑 3.75 nm 至 300 μm 之孔徑，發現相較於養護溫度 20 °C(B20°C/SC)，使用養護溫度 90°C(B90°C/SC)其累積孔隙量有減少之現象，亦發現使用壓力 310 atm 之配比(B20 °C/P)其累積孔隙量低於常壓養護(B20°C/SC)，說明經過高壓處理以利消除殘留於混凝土內之空氣及增加密實程度。吳建興(2003)將試體置於恆溫恆濕櫃(90°C)養護 4 天發現 9 天抗壓強度達 192.6 MPa，且活性粉混凝土經 28 天及 90 天之飽和石灰水養護與早期強度相近。經上述文獻資料顯示活性粉混凝土經熱養護有助於加速卜作嵐反應、抗壓強度提昇。

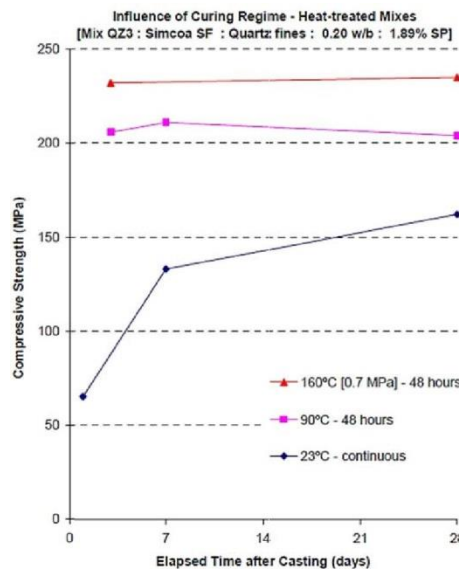


圖 2.1 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響 (Lee and Chisholm, 2005)

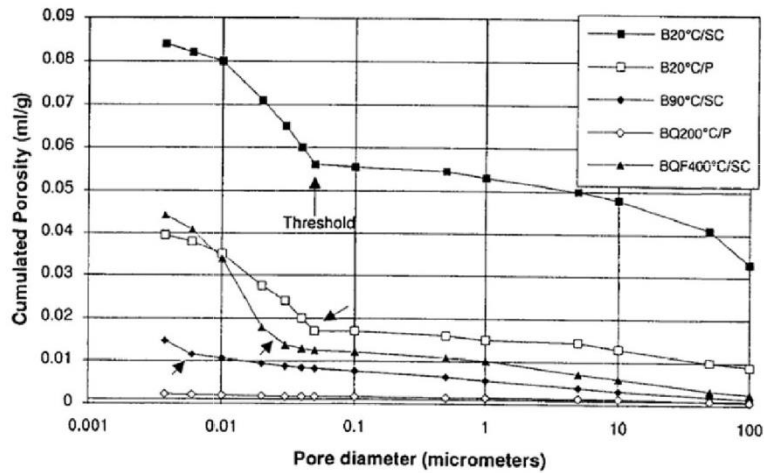


圖 2.2 活性粉混凝土壓汞試驗結果(Cheyrezy et al., 1995)

二、長期氯離子浸泡

陳品臻(2015) 氯離子於混凝土內部入侵之速率，並由費克第二定律之衍生式將已知數據帶入計算表面氯離子濃度 C_s 瞬時擴散係數 D 。依據 ACI 所發表程式 Life-365，針對鋼筋混凝土受氯離子入侵之服務年限推估模式，建立一套計算程序，使能適用於未來處置設施可能使用之混凝土配比，並推估其使用年限。

三、電阻率規範

AASHTO T358-15 規範測試方法係使用四極式溫納探頭測量圓柱試體表面電阻率，取 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 或 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 之試體進行試驗，通過表面電阻率裝置在外側兩探頭施加電流，在混凝土中產生電流流動。測量兩個內部探頭之間的電位差。以測得電位差與電流比率，及探頭間距做計算即可得電阻率。

規範內容指出，該規範試驗可提供混凝土抵抗力氯離子滲透能力的快速評估。電阻率測量與其它電滲透測試（例如

AASHTO T 277 和 ASTM C1202 測試) 具有良好的相關性。在大多數情況下，相同混凝土圓柱試體電阻率試驗結果顯示與氯離子入侵試驗 (例如 ASTM C1556) 亦有良好的相關性。

表 2.1 AASHTO T358 電阻率評估氯離子入侵可能性

單位：kΩ-cm

氯離子入侵 混凝土可能性	Ø100×200(mm) 圓柱試體	Ø150×300(mm) 圓柱試體
高	<12	<9.5
中等	12-21	9.5-16.5
低	21-37	16.5-29
非常低	37-254	29-199
微乎其微	>254	>199

四、影響電阻率因素

(一)粒料對電阻率的影響

Polder(2001)研究指出，電阻率量測是以電流流過混凝土試體中的孔隙液體，若混凝土含有粗粒料，則混凝土為不均勻的導體，會干擾測量電流的流動。故電阻儀的探頭間距應大於最大粒料粒徑，避免影響電阻率量測。

(二)溫度對電阻率的影響

溫度升高會造成電阻率降低，反之亦然。這是溫度對離子遷移率，離子-離子和離子-固體相互作用的影響結果，當溫度增加時，孔隙溶液中導電因子活性增強，因而降低電阻率。AASHTO T358 規範中提到當溫度升高 1°C，可使飽和混凝土的電阻率降低約 3%。

(三)試體狀態對電阻率的影響

王心荻(2009)將試體處理成烘乾、濕潤、面乾內飽和、放

至相對濕度 80% 及 40% 環境的狀態，進行電阻率量測，試體於相對濕度 40% 環境中所量測之電阻率不穩定，故無法量測；烘乾狀態則因試體內無溶液形成導電通路，故亦無法量測；在相對濕度 80% 試體較面乾內飽和狀態所測得電阻率高約 6.3 倍，這是因為試體放置於相對濕度 80% 環境中試體為非飽和，雖可量測得電阻率但試體含水量低造成量測之電阻率提高；而濕潤狀態與面乾內飽和狀態所測得之電阻率差異不大。AASHTO T358 規範中提到，為確保量測電阻率的準確性，試體應保持於面乾內飽和狀態下量測。

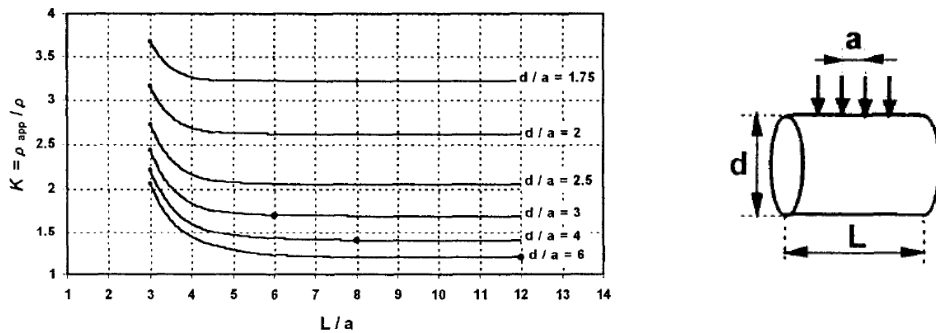
(四) 試體尺寸對電阻率的影響

Morris(1996) 量測電阻值的理論中，應於一個半無窮域的均質材料測量，但混凝土為非均質材料，且量測電阻值時，因混凝土內部電場受尺寸影響，在量測較小試體時所量測得的電阻值會有高估的情況發生。

王心荻(2009)圓柱試體使用相同探頭間距，分別量測 $\phi 10 \times 20$ 及 $\phi 15 \times 30$ 之試體，所測得結果 $\phi 10 \times 20$ 之電阻率皆高於 $\phi 15 \times 30$ 之電阻率，若欲進行比較可依試體尺寸及使用的探頭間距利用圖 2.3 找出對照的修正係數 K 值，將所測得之電阻率與 K 值進行計算，求得接近真實的電阻值，比較兩個尺寸修正後之電阻率相差極小。

$$\rho = \frac{\rho_{app}}{K}$$

(2.1)



ρ : 修正後接近真實之電阻率

ρ_{app} : 原始電阻率量測值

K : 電阻率修正常數

圖 2.3 圓柱試體電阻率修正因子

五、鋼纖維分佈均勻性

Kang(2011)對鋼纖維混凝土的研究顯示如果鋼纖維分佈不均勻，且鋼纖維呈垂直取向時，運用在增加混凝土抗彎強度的效果將會降低。

Gettu(2005)中，探討正常震動搗實(以 50Hz 的震動台震動 15 秒)、過度震動搗實(以 50Hz 的震動台震動 60 秒)及人工搗實對鋼纖維分佈均勻性的影響，方法是將試體分別以縱向切割及橫向切割如圖 2.4 所示，縱向切割的纖維密度計算是使用 30mm 方形的網格，計算在縱向切割面上的每個正方形中的纖維，橫向切割則以類似方式使用圓形模板，如圖 2.5 所示，計算切割面上的鋼纖維含量(每單位表面積的纖維量)，以平均纖維密度比較鋼纖維分佈的均勻性，並比較試體中間部分正交切口的密度以評估纖維取向。結果顯示，人工搗實的纖維取向及分佈類似於

正常振動搗實，但纖維分佈較其他兩種搗實方式均勻。

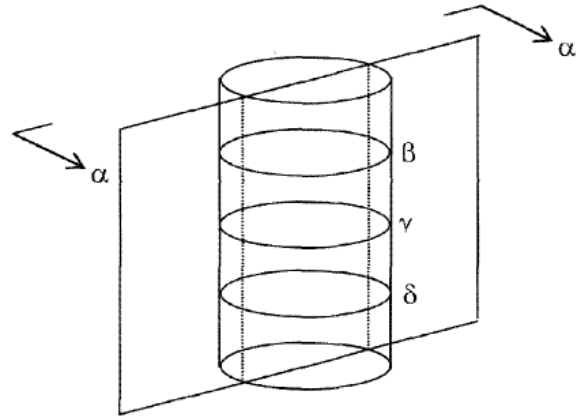


圖 2.4 縱向、橫向切割方式

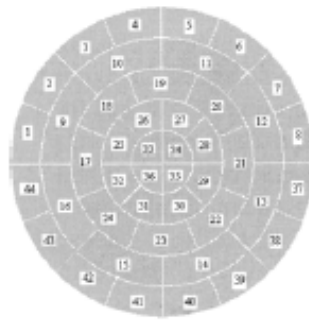


圖 2.5 橫向切割計算圓形模板

六、混凝土收縮變形

混凝土的收縮變形往往持續相當長的時間，甚至數十年後尚會持續發生；一般而言，其兩星期的收縮量會達二十年收縮量的 20-25 %；三個月內，約會完成二十年收縮量的 50-60 %；在一年內會完成二十年收縮量的 75-85 %，收縮速率隨時間而急速下降，一般而言混凝土的收縮變形，依其作用機理的不同，可分為下列三種：

(一) 塑性收縮

塑性收縮又稱毛細孔隙收縮，發生在混凝土澆置完成的初期，主要發生的原因為混凝土表面毛細孔隙中的水分，因養護不當或外界環境因素的影響而移除後，使得原本水分所佔據的孔隙產生負的孔隙壓力，而增加混凝土表面的張應力，進而導致混凝土表面的體積收縮，這種收縮經常會使得混凝土表面產生裂縫。

(二)自體收縮

在混凝土與外界無濕度交換的情況下，隨著水化作用的進行，會消耗混凝土孔隙結構內部的水份，使混凝土產生“自乾現象”而導致收縮，稱為自體收縮。根據其發生的原因，自體收縮可分為水解收縮、碳化收縮、轉化收縮，以上三種收縮均屬於化學收縮。

一般而言，普通混凝土因為水灰比較高，所以因為水化作用使得毛細孔隙所產生的負孔隙壓力，可由存在於孔隙結構內多餘的水份來平衡，因此普通混凝土的自體收縮量並不明顯，大約介於 50~100 $\mu\text{m}/\text{m}$ ，所以在計算收縮變形時，通常不考慮。但就高性能混凝土而言，由於卜作嵐材料的添加及通常採用低水灰比高漿量，使得高性能混凝土可能具有不可忽視的自體收縮量，這對於應用高性能混凝土於隔絕環境或大體積之結構上時，顯然必須加以評估與考量混凝土潛在的自體收縮量可能導致的工程問題。

(三)乾燥收縮

對普通混凝土而言，乾燥收縮是在所有收縮變形中最重要，乾燥收縮係指混凝土在未承受載重，並處於乾燥環境的情

況下，混凝土內部的水分會逐漸向外移動而散失。混凝土在乾燥的初期，所排出大孔隙內的自由水，僅會造成非常小的收縮量，而當乾燥作用持續進行時，就會使得存在於膠體間的吸附水與層間水被排出，導致膠體間的相互移動，使得混凝土產生收縮變形。Neville(1981)研究指出，當孔隙水失去時將引起膠體間吸附水之移動而產生乾縮，因此塑性乾縮將伴隨產生乾燥收縮。

李金輝(2006)以活性粉混凝土分別添加 1%、2%、3%之鋼纖維含量，結果顯示與未添加鋼纖維之混凝土相比，其乾縮量分別降低 3.4%、6.1%與 10.4%，當鋼纖維含量越多，乾縮長度變化量越少，因為鋼纖維具有抑制裂縫蔓延的作用，添加鋼纖維能使乾縮所產生的側向拉應力轉由鋼纖維的軸向應力承受，進而達到抑制收縮的效果。

七、以熱養護改善微結構

RPC(Reactive Powder Concrete)於拆模後以熱處理方式養護，一般在大氣壓力環境下加熱，依據 Richard(1995)，RPC200 可以利用 90°C 的水中養護或蒸氣養護進行混凝土的製程，主要是為了加速卜作嵐反應，改善已成型的水化物結構，但水化物的結構仍是非結晶形態，僅為鏈長加長的聚合物。RPC800 則施以 250°C 到 400 °C (僅適合於鋼纖維 RPC)的熱處理，利用鋼纖維來提升力學性質。並由 Cheryrezy(1995)RPC 的為觀結構分析中，XRD 分析其結晶形態的水化物硬矽鈣石於 200 °C 以上時生成，其分子式為 C_6S_6H ，相當於 $H/C(H_2O/CaO)$ 比例為 1/6，而此比例在常溫下為 1，到轉變為硬矽鈣石時為 1/6，因此其分子之形成是相

當多水分散失導致強烈脫水之結果。

八、氯離子入侵模式

(一)離子擴散機制

離子在混凝土中有著許多的傳輸方法，在種種研究中，離子影響鋼筋腐蝕可能是最主要原因之一，學者依照可能的傳輸原因，提出下列幾種傳輸行為：

離子擴散傳輸：混凝土中離子擴散是一種由高濃度往低濃度移動之現象。而現今在混凝土中離子擴散有幾種方式，其形式有毛細吸附和濃度梯度所引起的普通擴散，另外有因壓力、溫差、外力所引起之壓力擴散、與因溫度而加速離子移動的熱擴散及利用電流等強制力移動的強制力擴散等擴散機制(王茂齡，1987)。

離子因毛細作用移動：含有離子之水分子，因為混凝土的表面毛細作用而運動傳輸，此方式的離子大多分佈在未飽和混凝土的表面(Young et al., 2002)。

離子離散運動：離散運動又稱凡得瓦力(van der Waals' force)，是由於離子因相同極性，離子和離子或離子和介質間因相同電極而相互影響，混凝土中離子會因不同的化合物或不等向的顆粒影響，使離子因凡得瓦力互相排斥而移動(Young et al., 2002)。

離子因吸附作用而產生移動現象：吸附作用是結合了前述第 1 點與第 2 點的移動方式，混凝土中離子因水產生了吸收作用而移動，乾燥的混凝土接觸水份產生了結合毛細作用和蒸發

擴散的吸附運動進而帶動離子移動，移動過程如圖 2.6 所示 (Zibara et al., 2000)。

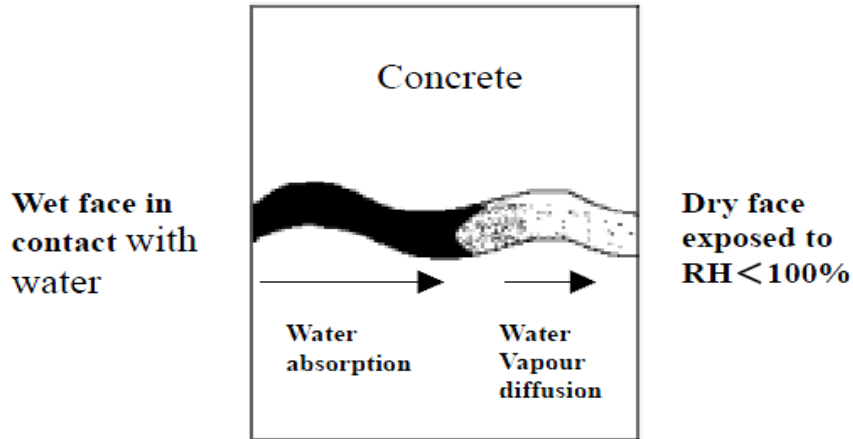


圖 2.6 混凝土吸附作用示意圖(Zibara et al., 2000)

(二) 氯離子擴散係數

氯離子擴散係數是由離子移動的化學勢能梯度和擴散通量呈正比的比例常數。而計算混凝土中氯離子的傳輸多利用費克定律來說明，費克利用質量傳輸的基本觀念引導費克第一定律，其利用擴散係數來表示某種成份體中擴散之快慢(Stanish et al., 2003)，其定理如式(2.2)所示：

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (2.2)$$

其中 J：氯離子通量

D：氯離子擴散係數

C：氯離子濃度

x：物質擴散所達到的距離

利用質量守恆定律的定義，如式(2.3)所示：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

其中 F_x : x 方向單位面積物質通過率

F_y : y 方向單位面積物質通過率

F_z : z 方向單位面積物質通過率

當擴散係數 D 固定，由式(2.2)與式(2.3)可得式(2.4)：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

若簡化成單一擴散方向，可得式(2.5)：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.5)$$

式(2.4)即為費克第二定律，又稱擴散方程式，此方程式廣泛應用於固體或靜止液體之擴散問題。

ASTM C1556 提出費克第二定律其衍生式為式(2.6)：

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_a \cdot t}} \right)$$

(2.6)

其中 $C(x, t)$: 在深度 x 與時間 t 下的氯離子濃度，單位(%)。

C_s : 表面氯離子濃度，單位(%)。

C_i : 初始氯離子濃度，單位(%)。

x : 深度，單位(m)。

D_a : 視擴散係數，單位為(m²/s)。

erf : 高斯誤差函數

(三)表面氯離子 C_s

Sherman (1996)提出添加礦物摻料與低水膠比之混凝土，其抵抗氯離子入侵能力有較佳的效果。但因其孔隙結構較不連續，造成低水膠比或添加礦物摻料的混凝土，在表面層反而比高水膠比混凝土有較高的氯離子濃度，如圖 2.7 所示。

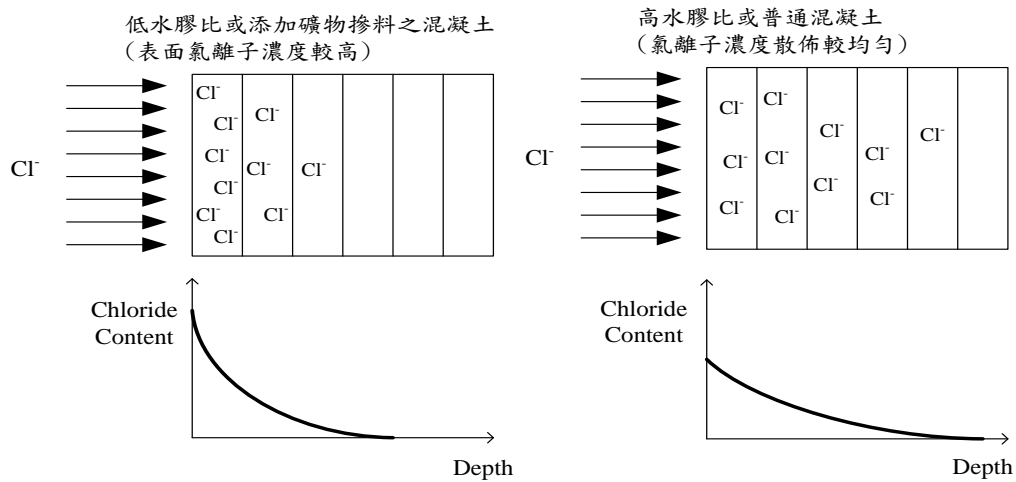


圖 2.7 水膠比或添加礦物摻料對表面濃度之影響(Sherman, 1996)

(四)時間因子 m

混凝土置於氯離子環境中，氯離子由接觸面開始向內入侵，其入侵的速度以擴散係數(diffusion, D)描述，一般經常使用的單位為 m^2/s 。藉由實驗對單一試體分層(不同深度)研磨成粉，量測不同相對深度的總氯離子濃度，利用最小平方法代入費克第二定律衍生式，求得表面氯離子濃度(Surface content of chloride, C_s)及擴散係數值。因時間改變水化程度增加，使得孔隙率下降，氯離子在混凝土內部擴散能力將受阻擋，故擴散係數下降，擴散係數隨著時間變化的關係常數，稱時間因子(m)。

九、程式 Life-365 簡介

(一)發展背景

美國混凝土協會(American Concrete Institute, ACI)的策略發展委員會(Strategic Development Council, SDC)於 1999 年成立一個機構，研發電腦程式系統 Life-365。此程式可用於預測

鋼筋混凝土結構物暴露於氯離子環境下的服務年限與生命週期成本。Life-365 為免費下載的單機版程式，目前最新版本為 2013 年版，其介面如圖 2.8 及圖 2.9 所示。

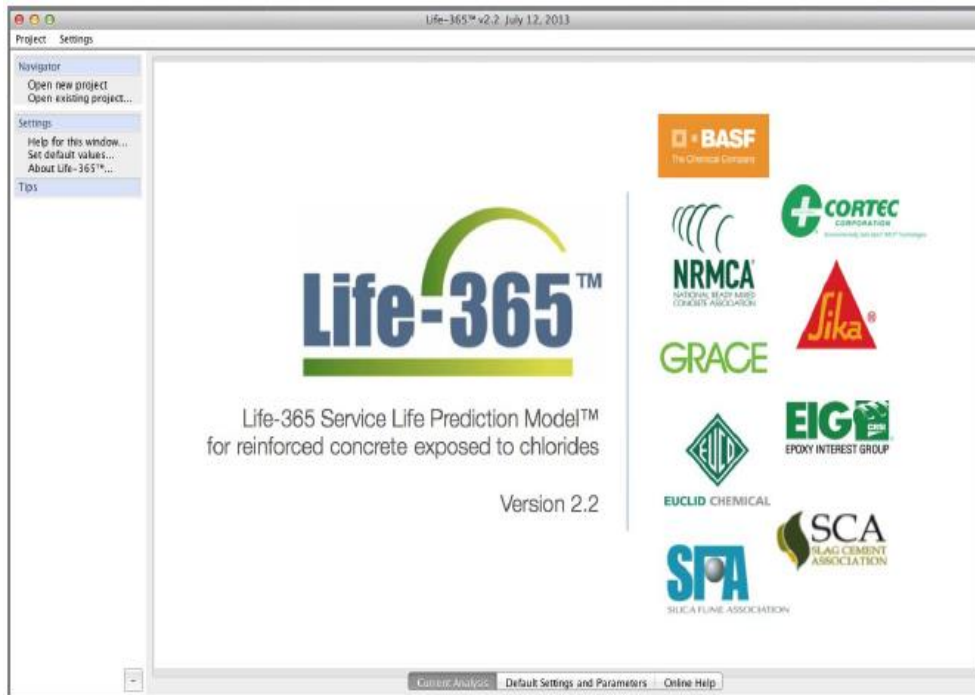


圖 2.8 程式 Life-365 介面

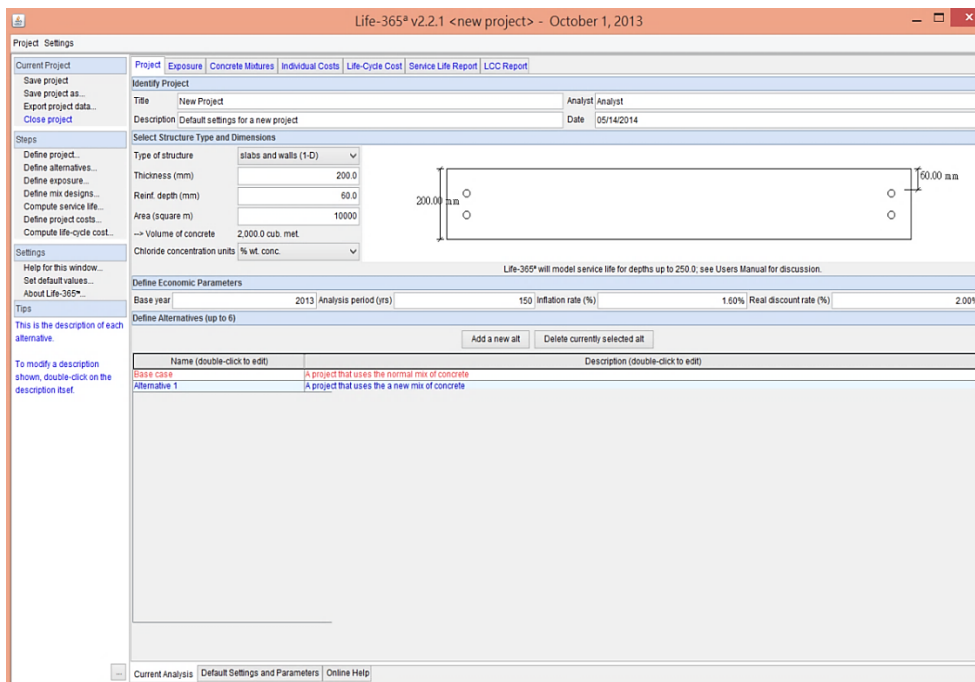


圖 2.9 程式 Life-365 使用介面

(二)參數設定

陳品臻(2015)Life-365 程式主要利用費克第二定律推算氯離子在混凝土內部的擴散，除氯離子擴散係數及其時間因子 m ，亦考慮溫度的循環對擴散係數的影響，最終目的為預測此鋼筋混凝土可使用之年限。除此之外，輸入材料成本，亦可推算其維修所需花費。若不考慮維修問題，只探討結構物受氯離子入侵至鋼筋腐蝕至需要維修的時間，使用者需輸入以下參數，參照陳品臻(2015)所設定。

結構物基本性質與混凝土材料參數如表 2.2 所示，若材料參數超越程式設定，其替代方案為使用者自行輸入齡期 28 天之擴散係數 D_{28} 、時間因子 m (限制範圍為 0.20 - 0.60)。

表 2.2 程式 Life-365 參數設定範圍與試驗配比參數

Life-365 程式參數		
	參數	設定範圍
結構物 基本性質	厚度(mm)	75-2500
	保護層厚度 (mm)	30-75
混凝土 材料參數	水膠比	0.25~0.60
	飛灰含量(%)	0.00~50.00
	爐石含量(%)	0.00~70.00
	矽灰含量(%)	0.00~15.00

所在氯離子環境之每月平均溫度及其氯離子濃度，可選用

程式中的資料庫(其範圍為美國各州)，或是使用者自行輸入相關參數。

程式 Life-365 以美國各州的氯離子環境條件作為數據庫，最大表面氯離子濃度值 C_{max} 累積方式以及最大值依各地而異，如下表 2.3 為美國各地區表面氯離子成長速率以及表面氯離子最大值與達最大值的時間，此四項為濱海地區會出現的情形，達到最大表面氯離子濃度值的時間範圍為 1 年至 30 年。

表 2.3 美國各州氯離子成長速率及最大表面氯離子濃度值歸納表

	Build-up rate (%/year)	Maximum (%)	Time to max (year)
Marine tidal zone	instantaneous	0.8	1
Marine spray zone	0.10	1.0	10
Within 800 m of the ocean	0.04	0.6	15
Within 1.5 km of the ocean	0.02	0.6	30

根據程式 Life-365 的數據庫中，找到其中 Florida 的各月均溫與候選場址的台東各月均溫接近如表 2.4 所示，此地區距海水 800 公尺內的結構物，達到最大值時間為 15 年，作為計算表面氯離子濃度達到最大值的時間參考值。

表 2.4 台東與 Florida 各月均溫 (單位：°C)

地區	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
台東	19.5	20.0	21.8	24.1	26.2	27.8	28.9	28.7	27.5	25.7	23.3	20.5	24.5
Miami of Florida	19.6	20.3	22.1	24.0	25.9	27.4	28.1	28.2	27.7	25.7	23.1	20.6	24.4

計算鋼筋表面(埋設深度處)達到其開始腐蝕之門檻值(預設為 0.05% wt. conc.)之時間為使用年限，使用年限加上鋼筋腐蝕至需要維修的時間即為程式 Life-365 定義之服務年限 (Service Life)，如圖 2.10。

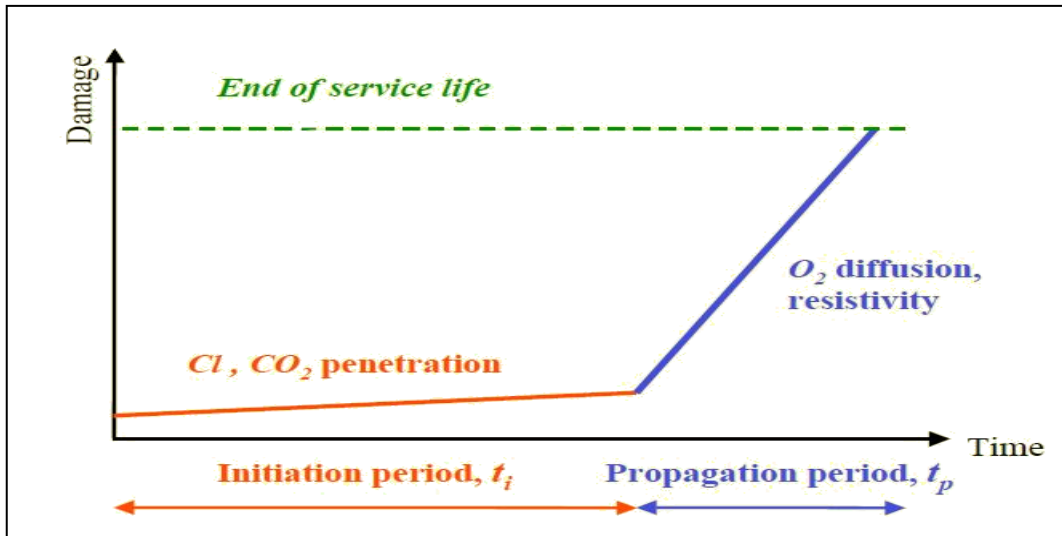


圖 2.10 服務年限(初始階段 t_i +腐蝕階段 t_p)

十、服務年限推估模式

(一)去除第一層數據

Ann et al. (2009)及 Song et al.(2008)量測試體氯離子濃度剖面時，接觸氯離子環境的表面必須與外界環境的濃度達到平衡，量測出的濃度剖面如圖 2.11 及圖 2.12，虛線為建立氯離子模型時所使用的濃度剖面線，而實線則為實際量測值，因此，在得到氯離子濃度剖面後，通常不使用表層的量測數據套入費克第二定律計算擴散係數及表面氯離子濃度值。

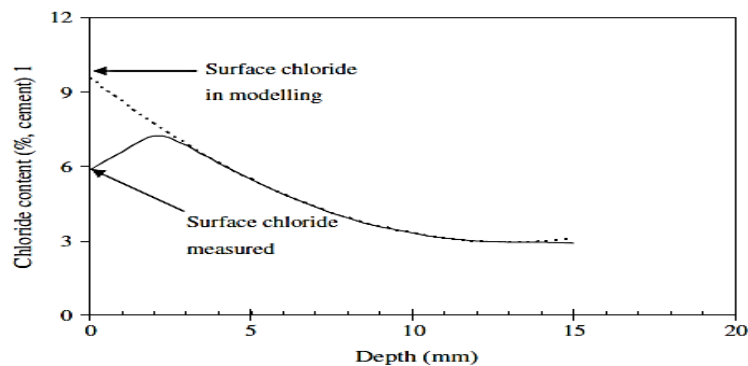


圖 2.11 實驗與推估模型之濃度剖面比較(Ann et al., 2009)

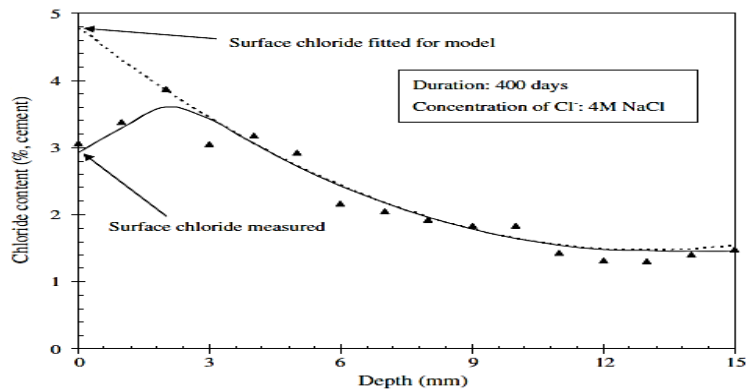


圖 2.12 實驗與推估模型之濃度剖面比較(Song et al., 2008)

(二)擴散係數推估方式

依據 AASHTO T259 所得之試體，其氯離子濃度剖面代入費克第二定律衍生式，以最小平方法求得表面氯離子濃度(C_s)及擴散係數(D)值，此擴散係數為視擴散係數(D_{app} ，apparent diffusion coefficient)稱該齡期為如圖 2.13 之總時間(t_{total} ，total time)，其總時間為(養護時間+浸泡時間)。視擴散係數為某一特定齡期之瞬時擴散係數，而此特定齡期稱為有效時間(t_{eff} ，effective time)，故有效時間(t_{eff})相對應之擴散係數為瞬時擴散係數。

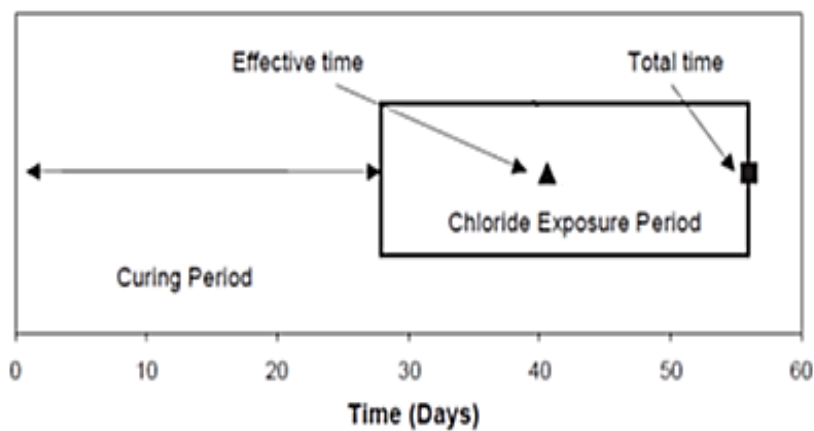


圖 2.13 各時間名稱之定義圖(Nokken et al.,2006)

Stanish et al.(2003)視擴散係數(D_{app})值於試驗某一特定時間等同於瞬時擴散係數，為尋找此視擴散係數(D_{app})等同於某一特定時間之瞬時擴散係數，如式(2.7)。其中 D_{ref} 、 t_{ref} 及 m 為常數項，而求解此積分方程式結果可表示為式(2.8)。可利用式(2.8)與式(2.9)的推導，求得有效時間的計算方式，為式(2.10)。

$$D_{app} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m dt}{\int_{t_1}^{t_2} dt}$$

(2.7)

$$D_{app} = \begin{cases} D_{ref} t_{ref}^m \frac{t_2^{1-m} - t_1^{1-m}}{(1-m)(t_2 - t_1)} & m \neq 0, 1 \\ D_{ref} t_{ref}^m \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{t_2 - t_1} & m = 1 \end{cases}$$

(2.8)

$$D_{app} = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t_{eff}}\right)^m \quad (2.9)$$

$$t_{eff} = \begin{cases} \left[\frac{(1-m)(t_2 - t_1)}{t_2^{1-m} - t_1^{1-m}} \right]^{1/m} & m \neq 0, 1 \\ \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} & m = 1 \end{cases}$$

(2.10)

D_{ref} ：參考時間 t_{ref} 之擴散係數值

m ：時間因子

t_1 、 t_2 ：暴露開始及結束時間

t_{eff} ：有效時間

程式 Life-365 在進行服務年推估時，假設 1 年為 360 天並以 30 天為一個時間步驟，28 天則當作第 1 個時間步驟(30 天)的擴散係數值 D_{28} 配合時間因子 m 計算每個時間步驟的擴散係數值，Life-365 中若無特殊情形，則假設 25 年為混凝土水

化作用完成的時間，也就是 25 年後因水化完成，孔隙結構不再改變，擴散係數值不再改變，皆為 $D(25 \text{ 年})$ 的數值。

$$D(t) = D_{\text{ref}} \left(\frac{t_{\text{ref}}}{t} \right)^m \quad (2.11)$$

D_{ref} ：參考時間 t_{ref} 之擴散係數值

$D(t)$ ：特定時間 t 之擴散係數值

m ：時間因子

(三)時間因子推估方式

Nokken et al.(2006)將實驗數據之總時間(養護 28 天+浸泡氯化鈉時間)與視擴散係數值，繪製雙對數座標圖，並求其線性迴歸，此線性迴歸之斜率(稱總時間因子， m_{total})，將此數值代入式(2.10)後求出各齡期之假設有效時間，將假設有效時間與擴散係數繪製雙對數座標圖求線性迴歸斜率，得到一時間因子 m ，將此值當作假設值 m 再與此假設值所計算出新一組有效時間因子，再繪製雙對數座標圖，求得新的斜率 m ，重複此步驟直至代入公式計算的時間因子與雙對數座標圖的斜率負值相等為止，而此時間因子 m 即為有效時間因子(m_{eff})及相對應的有效擴散係數及有效時間。

時間因子 m 為擴散係數隨著時間增加而降低的速率，為長期使用年限推估之重要參數，通常使用的單位為 m^2/s ，時間因子 m 會因所添加的卜作嵐材料的重量及含量不同而不同。整理近年來受氯離子入侵相關試驗，添加不同含量之卜作嵐材料對時間因子的影響，以及添加不同種類卜作嵐材料對時間因子的影響，整理如表 2.5。

Mangat et al.(1994)將混凝土試體放置於飛濺區與潮汐區，

設計水膠比為 0.58，利用三種卜作嵐材料取代水泥，進行 2 年的試驗，測定總氯離子含量，計算其有效時間因子，可看出混凝土以卜作嵐材料取代水泥可以提高時間因子，增加擴散係數下降的速率。

Stanish et al.(2003)設計水膠比為 0.50，將試體浸泡於氯離子水溶液，進行 90 天、180 天、1 年及 4 年試驗，量測總氯離子含量，並計算其有效時間因子，發現添加越高含量的飛灰，時間因子越大。

Nokken et al.(2006)設計水膠比為 0.30，將試體浸泡 1.0 mol/L 的氯化鈉水溶液中，浸泡時間為 28 天、90 天、140 天、1 年及 3 年，發現越高含量的卜作嵐材料取代，亦可提高時間因子值。根據表 2.5 的結果顯示，取代或添加卜作嵐材料可有效地增加時間因子 m 值，使得擴散係數下降的速率增加，越高含量的卜作嵐材料，可增加越高的時間因子 m 值。

表 2.5 受氯離子入侵之混凝土時間因子可能範圍

來源	配比內容	時間因子 m
Mangat et al.(1994)	OPC	0.53
	25% 飛灰取代	1.34
	60% 爐石粉取代	1.23
	15% 矽灰取代	1.13
Stanish et al.(2003)	OPC	0.32
	25% 飛灰添加	0.66
	56% 飛灰添加	0.79
Nokken et al.(2006)	4% 矽灰取代	0.88
	4% 矽灰取代	0.96
	25% 爐石粉取代	

8%矽灰取代	1.19
25%爐石粉取代	

(四)表面氯離子推估方式

Chalee et al. (2009)將添加卜作嵐材料之混凝土放置於濱海環境，進行五年的氯離子觀測試驗，針對表面氯離子隨著時間的變化，得到式(2.12)的表面氯離子推算公式。此外，實驗發現較低水膠比或較高含量的卜作嵐材料取代，擁有較佳抵抗氯離子入侵能力。

$$C_s = \alpha \ln(t) + \gamma \quad (2.12)$$

其中， α 、 γ ：材料參數

十一、計算程序與 Life-365 驗證

彭琦茵(2015)，嘗試平均法、差值法、單一法三種方法，進行使用年限之濃度剖面計算，以估計標準誤差(Standard Error of Estimate, 文後稱 SEE)判斷各計算方式與 Life-365 結果之誤差(離散程度)，以確認計算程序與 Life-365 結果之吻合度，計算方法為式(2.13)，SEE 越小表示此組預測值與真值越吻合。

發展出氯離子入侵混凝土濃度剖面之計算程序，分別針對混凝土水膠比設計範圍為 0.25 - 0.50，以 W 表示，如水膠比 0.4 代碼寫成 W40；鋼筋埋設深度 55 mm - 63 mm，以 D 表示，如鋼筋埋設於 55 mm 代碼寫成 D55，設計多種條件比較各計算法，所得濃度剖面並與 Life-365 結果比對。以 W40D55 為例，由表 2.6 可以得知其中以差值法為最符合 Life-365 程式方法。

$$\sigma_{est} = \sqrt{\frac{\sum(Y-Y')^2}{N}} \quad (2.13)$$

其中，Y：真值

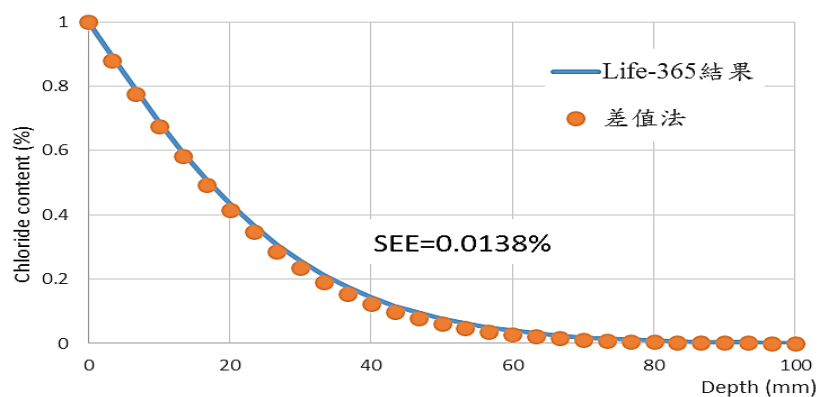
Y'：預測值

N：組數

表 2.6 計算濃度剖面方法比較

計算方法	SEE (%)	說明
平均法	0.0469	10 - 60 mm 明顯高於 Life-365 結果
差值法	0.0138	每個預測點皆貼近 Life-365 結果
單一法	0.0690	5 - 60 mm 明顯高於 Life-365 結果

差值法為第一個時間間隔(0 天至 30 天)的表面氯離子濃度值(0%)及擴散係數值，代入費克第二定律；再將第二個時間間隔(30 天至 60 天)的表面氯離子濃度增加值及擴散係數值，代入費克第二定律；以此類推，直至最後一個時間間隔之表面氯離子濃度增加值及擴散係數值，代入費克第二定律後，將所有氯離子濃度於同深度處累加起來，以此累加法計算濃度剖面線至使用年限，達最大值時間後，每個時間間隔以表面氯離子濃度的差值及擴散係數值，代入費克第二定律，而暴露時間則需扣除達最大值時間，將過最大值時間至使用年限的氯離子濃度累加後，以原累加值扣除，得到新的濃度剖面線。以此法對水膠比 0.4，保護層厚度 55 mm 之狀況(W40D55)進行濃度剖面計算，結果如圖 2.14，由圖中可見所發展差值法計算程序與 Life-365



結果相當吻合。

圖 2.14 代碼 W40D55 差值法與程式結果比較圖

參、研究方法與過程

一、實驗材料

為探討混凝土結構物受氯離子入侵行為，首先選擇最終處置工程障壁材料可能採用的混凝土配比製作試體，並以低放射性廢棄物最終處置設施遭遇四面環海的環境條件下，模擬氯離子以單一方向往混凝土內部入侵進行長期試驗，藉以瞭解氯離子入侵情形。本研究利用不同比例的卜作嵐材料取代部分水泥製作成低水膠比之水泥漿，分別進行各項試驗研究。

(一) 卜特蘭水泥

本研究所使用的水泥為卜特蘭 I 型水泥，由台灣水泥公司生產的商業產品。波特蘭水泥乃一次整批購進，並密封包裹置於乾燥的儲藏室避免受潮影響其性質，其化學成分如表 3.1 所示。

(二) 飛灰

飛灰為燃煤火力發電廠的副產物，屬於卜作嵐材料的一種。本研究中所使用的飛灰為 F 級飛灰，其主要氧化物成份 ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) 為 91.07 %，符合 CNS 3036 規範的最小值 70 % 要求。其來源為台灣電力公司的台中火力發電廠。以整批取得並加以包封儲存，材料品質穩定，其化學成分如表 3.1 所示。

(三) 爐石

爐石為煉鋼廠在煉鐵過程所產生的副產品，亦屬於卜作嵐

材料的一種。本研究中所使用的爐石為水淬高爐石，由中聯公司所生產提供。為維持試驗品質穩定，亦為整批取得並加以包封儲存，其化學成分如表 3.1 所示。

(四) 矽灰

使用 Elkem 所生產的矽灰。矽灰為提煉含有矽金屬礦物與鐵矽合金過程中所獲得的副產品。由於矽灰可與水泥水化生成物中的氫氧化鈣發生卜作嵐反應而形成具膠結性物質，補強粒料界面的結合力；且矽灰粒徑比水泥為細，可填充於粒料間隙進而降低孔隙量，增加混凝土的緻密性，其化學成分如表 3.1 所示。

表 3.1 試驗材料的化學成分

化學成分(%)	主要試驗材料			
	I 型波特蘭水泥	飛灰	爐石	矽灰
SiO ₂	19.98	54.09	33.34	94.61
Al ₂ O ₃	4.74	28.94	14.36	-
Fe ₂ O ₃	3.00	8.04	0.59	0.54
CaO	63.70	3.28	41.35	0.01
MgO	3.58	1.46	6.18	0.29
SO ₃	2.29	0.17	0.99	0.12
Na ₂ O	0.28	0.57	0.23	0.14
K ₂ O	0.51	1.54	0.20	0.11
C ₃ S	59.00	-	-	-
C ₂ S	12.00	-	-	-
C ₃ A	7.50	-	-	-

C ₄ AF	9.10	-	-	-
-------------------	------	---	---	---

(五)粗、細粒料

本實驗所使用的粗、細粒料來源為台灣大安溪的天然河砂及天然石塊碎石。粗、細粒料的物理性質分別，如表 3.2 所示，粗、細粒料級配符合 CNS 1240 的規定，其級配曲線，如圖 3.1 及圖 3.2 所示。

表 3.2 粗、細粒料物理性質

試驗項目	試驗材料		試驗規範
	粗粒料	細粒料	
比重(SSD)	2.65	2.64	CNS 488
吸水率(%)	0.87	1.01	CNS 488
單位重(kg/m ³)	1531	-	CNS 1163

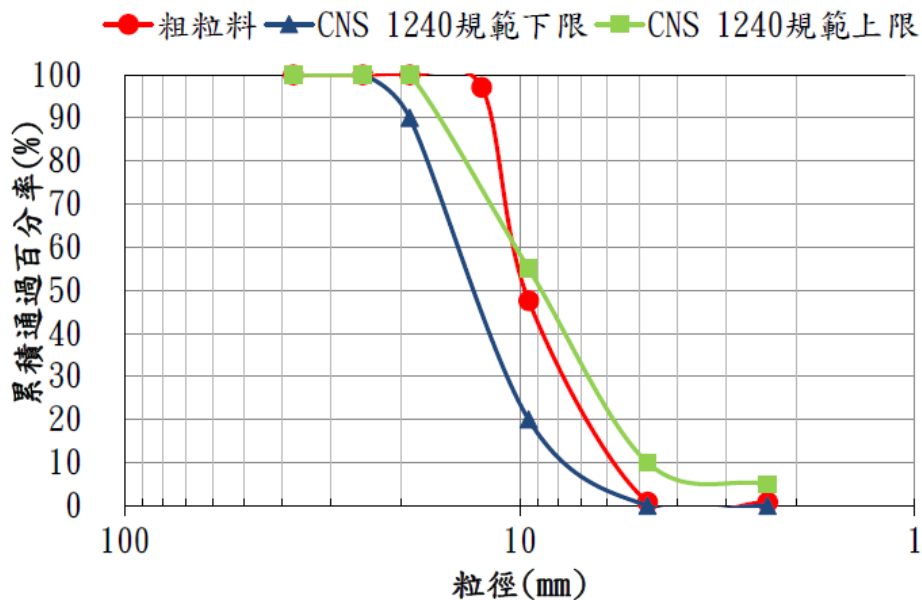


圖 3.1 粗粒料粒徑分佈曲線圖

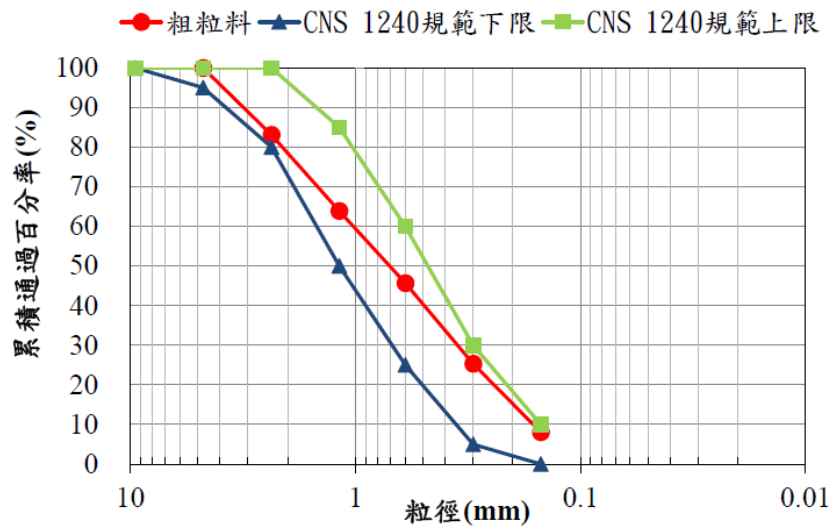


圖 3.2 細粒料粒徑分佈曲線圖

(六)減水劑

本試驗中所添加的減水劑為 F 型高性能減水劑，由台灣西卡公司所提供，其減水效能為 13 %，作為製作混凝土的化學摻料，此減水劑一次取得試驗所需用量。

(七)化學藥劑

本研究所使用的化學藥劑包括氯化鈉(NaCl)、濃硝酸(HNO₃)及 0.01 N 及 0.05 N 之硝酸銀(AgNO₃)，其用途及來源如表 3.3 所示。

表 3.3 化學藥劑使用用途及來源

藥劑名稱	用途	藥劑來源
氯化鈉(NaCl)	調配氯離子入侵試驗溶液	日本小島公司(試藥級)
濃硝酸(HNO ₃)	氯離子含量試驗的藥劑	63 Pure Chemicals (試藥級)
硝酸銀(AgNO ₃)	氯離子含量試驗的藥劑	Panreac (試藥級)

二、試驗規劃

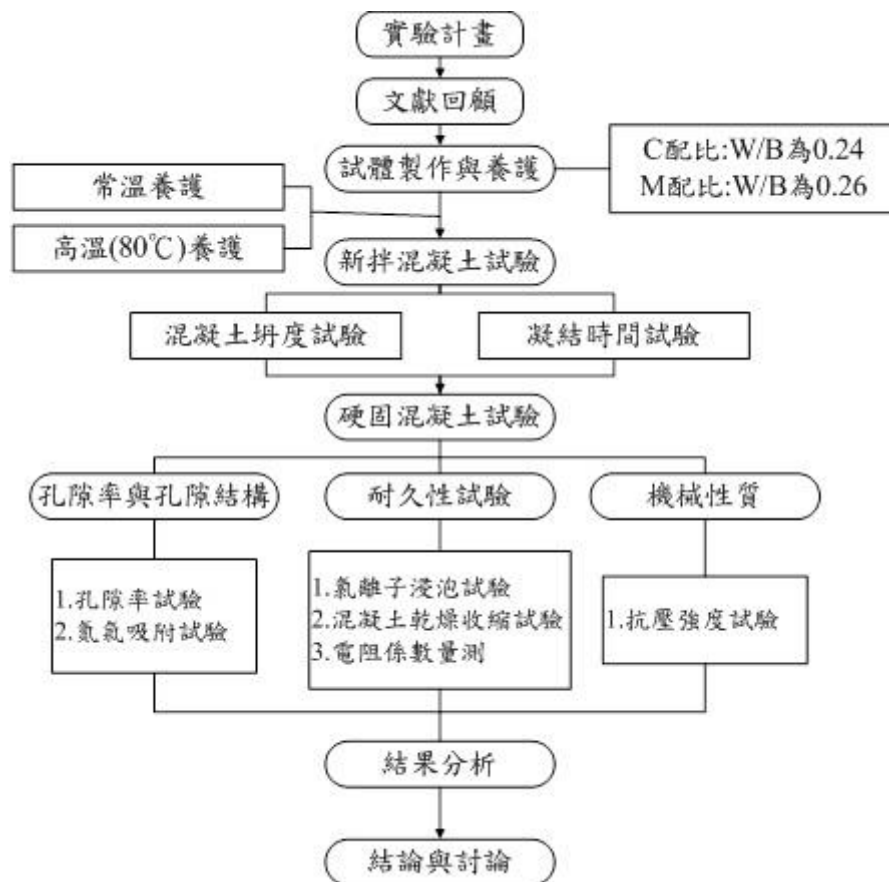


圖 3.3 試驗流程圖

為探討高溫養護方式對混凝土的影響，製作混凝土材料試體，首先選擇最終處置工程障壁材料可能採用的混凝土配比製作，建立材料基本物理性質，包括抗壓強度、孔隙率、氮氣吸附試驗、電阻率等，其次針對低放射性廢棄物最終處置設施可能處於臨海地區的環境條件下，分別進行材料耐久性之長期試驗模擬氯離子以單一方向往混凝土內部入侵之長期試驗，藉以瞭解氯離子入侵情形。本研究利用不同比例卜作嵐材料取代水泥製作成低水膠比之水泥漿，分別進行各項試驗研究。

採用養護溫度 80°C 之不同養護時間養護後，進行硬化混凝土

土試驗，參照 ASTM C642-13 確定養護後，硬固水泥砂漿之之孔隙率，並以氮氣吸附試驗探討高溫養護過後之混凝土內卜作嵐材料之二次水化反應對於孔隙大小、孔隙數量之影響。以氯離子入侵試驗確認所製作之混凝土抵抗離子滲透之能力，並藉此模擬混凝土之耐久性。以乾燥收縮試驗檢驗經高溫養護過後，混凝土之收縮特性。以 ASTM C39 進行抗壓強度試驗，檢測混凝土品質及強度發展趨勢。依 AASHTO T358-15 表面電阻率試驗快速檢測混凝土電阻率進而評估混凝土抵抗氯離子入侵能力。

三、試驗流程

在材料配合設計方面，本研究使用之混凝土為可能使用盛裝容器(含蓋子) 混凝土配比(文後稱配比 C)、封蓋之填縫材料(文後稱配比 M)。混凝土配比 C 水膠比為 0.24，添加卜作嵐材料包含飛灰、爐石及矽灰；而砂漿配比 M 水膠比為 0.26，所添加之卜作嵐材料為爐石及矽灰。

本研究探討低放射性廢棄物最終處置設施障壁混凝土材料，在先前研究團隊所使用 ASTM C1556 的數據基礎下，為探討可否有方式能讓混凝土耐用度提高，於本研究將尋求新方法，將採用不同高溫養護時間，探討是否能提升混凝土之耐久性，達到提高品質的效果。試驗進行抗壓強度試驗、孔隙率試驗、氮氣吸附試驗、電阻率試驗，以及接續之前研究者使用之 ASTM C1556 的氯離子入侵試驗來進行海水入侵模擬試驗。試驗內容主要分為材料配合設計與試驗設計兩大部分。

在試驗設計方面，利用混凝土硬固後接受不同的養護方式

達齡期後進行各項基本性質試驗及耐久性試驗。主要將各配比製作完成之混凝土試體進行 80°C 養護達設定齡期 3 天、4 天、3 天加 200°C 烘箱養護 12 小時完成後，再浸泡飽和石灰水達指定齡期為 28 天、90 天、183 天及 365 天後將試體取出，接著進行基本性質試驗中的抗壓強度試驗以及孔隙率、氯氣吸附與電阻率試驗。

另外採用研究團隊於民國 103 年製作之配比 C 與配比 M，在試驗設計方面，模擬混凝土於不同齡期受氯離子入侵，而針對其擴散行為進行探討。依據 ASTM C1156 將製作完成之混凝土試體，浸泡飽和石灰水達指定齡期為 28 天、90 天、183 天、365 天、2 年及 3 年後將試體取出，再浸泡於 $165 \pm 1 \text{ g/L}$ 氯化鈉水溶液中 36 天，依據 ASTM C1152 進行相關氯離子含量測定，並利用其結果推估混凝土之瞬時擴散係數及表面氯離子濃度情形。模擬低放射性廢棄物最終處置設施在不同齡期，遭受海水及地下水入侵的影響。

四、配比

(一) 混凝土配比

本研究使用核能研究所研發中可能使用於盛裝低放射廢棄物的盛裝容器(含蓋子)配比 C 與封蓋之填縫材料配比 M，如表 3.4 所示，水膠比採用 0.24 與 0.26，進行試體的製作與養護，並進行氯離子浸泡的實驗與分析。拌合步驟如下所述：

1. 水含藥劑先下，添加粉料(預先混合均勻)，拌合時間約一分半鐘。
2. 添加細粒料，拌合到出漿，拌合時間約三分鐘。

3.添加粗粒料，拌合時間約一分鐘。

4.添加鋼纖維，拌合時間約一分鐘。

表 3.4 混凝土配比 C 與 M (單位：kg/m³)

配比名稱	W/B	I 型水泥	飛灰	爐石	矽灰	粗粒料	細粒料	鋼纖維	水 (含藥劑)	water(ssd) 粒料用水
C	0.24	325.2	133	81.3	26	747.2	936.1	117	135.7	23.7
M	0.26	603.4	-	200.8	155.2	-	1094.3	-	253.0	10.9

藥劑用量建議為總粉料重量的 0.7%~0.9% 視當天溫溼度做調整
拌合水量應為配比中 water+water(ssd)-藥劑重量

(二)水泥漿塊配比

本研究主要係探討低放射性廢棄物最終處置設施之混凝土障壁可能面臨海水及地下水中之氯離子入侵，其氯離子入侵的速率與孔隙率有很大的關聯性，因此將可能使用於盛裝低放射廢棄物的盛裝容器(含蓋子) 配比 C 與封蓋之填縫材料配比 M，去除粗細粒料與鋼纖維製作成水泥漿塊，如表 3.5 所示，量測其孔隙率。

表 3.5 水泥漿塊配比 (單位：%)

配比	I 型水泥	飛灰	爐石	矽灰
C	57.5	23.5	14.4	4.6
M	62.9	0	20.9	16.2

表 3.6 養護方法

試體編號	水中養護溫度 (°C)	水中養護時間 (day)	烘箱 200°C 養護
W	23	至齡期	
80-3D	80	3	
80-4D	80	4	
80-3D12H	80	3	12(6+6)hr※

※ 在 6 小時之升溫時間直到溫度到達 200 °C，並維持 200 °C 之養護溫度 6 小時，總養護時間為 12 小時。

五、試驗方法

(一)凝結時間試驗

本實驗依據 ASTM C191 水泥凝結時間試驗進行量測，分為初凝時間及終凝時間，以判定標準費開氏針自漿體表面，於 30 秒內貫入深度達 25 mm 之時間為凝結時間，而直至費開氏針無法在將體表面留下痕跡時，即為終凝時間。

(二)抗壓強度試驗

本試驗參照 ASTM C39 的規定進行混凝土抗壓試驗。當混凝土試體達到所需試驗齡期時，因本研究混凝土強度較高無法使用蓋平石膏，因此使用磨平機進行混凝土圓柱表面磨平，以得到平整的混凝土表面。再將磨平完成後之混凝土試體置於萬能試驗機上，量測所需試驗齡期之混凝土試體抗壓強度。待混凝土試體破壞時，紀錄其最大荷重值，再將最大荷重值除以

受力面積即可得到混凝土試體的抗壓強度。

(三)混凝土乾縮試驗

本實驗參考 CNS 11056 規範之要求，水泥砂漿在特定溫度、相對溼度之環境下，膠結材料對砂漿試體之自體收縮之測定方法。

- 1.將水泥砂漿試體灌入試體尺寸 25×25×285 mm 之柱狀模具中，將試體移至溫度 23°C 相對溼度 95 % 以上之蒸氣養護室內養護 24 小時後才進行脫模。
- 2.再進行浸水養護 48 小時。於齡期 72 小時將試體從水中取出，並立即以數位式比長儀量測初始值，再將試體以保鮮膜確實包裹。
- 3.避免水分無法散失，並存放於相對濕度 50±2 %、溫度 23°C 環境中乾養護，往後進行各齡期量測各齡期之長度變化量，以計算其乾縮率。

(四)氯離子入侵試驗

試驗階段

氯離子入侵試驗參照 ASTM C1556，內容如下所述其詳細說明：

- 1.將表 3.4 所提供的配比製作成 ϕ 10×15 cm 混凝土試體，浸泡在飽和石灰水中如圖 3.4 所示。
- 2.等待齡期到期後將試體取出，用自來水刷洗標本，並分為三大部分如圖 3.5 所示，第一部分為浸泡氯化鈉規定厚度必須大於 75 mm，而第二部分測初始值規定厚度必須大於 20 mm，其考量試樣取得方便，將第二部分厚度取為 45 mm，

第三部分則丟棄不用。

- 3.將圖 3.5 第一部分 $\phi 10 \times 7.5$ cm 混凝土試體，利用環氧樹脂與混凝土試體緊密結合，除了切割面以外。
- 4.等待環氧樹脂乾掉後，將其試體再次放入飽和石灰水中，每 24 hr 秤一次，直到重量變化 $< 0.1\%$ 確定其試體為飽和狀態。
- 5.將其試體放入 165 ± 1 g/L 氯化鈉溶液中至少 35 天如圖 3.6 所示。
- 6.將齡期到的試體取出，待試體乾燥後，使用研磨機將試體分層深度如圖 3.7 所示，要測初始值的試體研磨一條直線，每層磨 2 mm 共磨五層，將其粉末均勻混和裝袋，將有浸泡過氯化鈉的試體研磨一個平面，前六層各磨 1mm，後兩層各磨 2mm，每層分開裝袋，如圖 3.8、3.9 所示。



圖 3.4 混

凝土浸泡飽和石

灰水示意圖

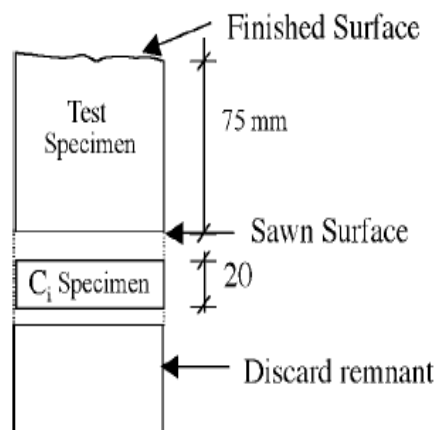


圖 3.5 試體的切割尺寸圖



圖 3.6 混凝土浸泡 NaCl 溶液示意圖

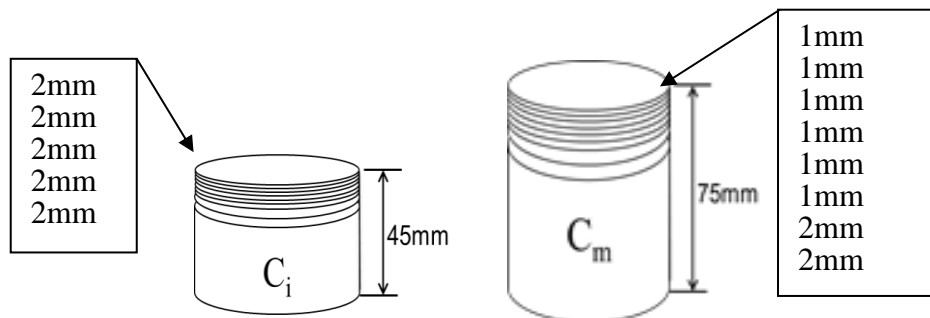


圖 3.7 試體分層示意圖



圖 3.8 研磨後的試體與其分層粉末



圖 3.9 研磨後的試體與其分層粉末分析階段

總氯離子含量試驗參照 ASTM C 1152，步驟如下所述：

- 1.取出 5 g 粉末於 250 ml 燒杯中，加入 37.5 ml 蒸餾水，輕微搖晃使粉末與蒸餾水融合。
- 2.加入 12.5 ml 稀硝酸(50%)，再次輕微搖晃燒杯直到物質完全溶解。
- 3.滴入 3 滴甲基橙試劑，判斷酸化程度，溶液呈現紅色或粉紅色，表示試液充分酸化。若溶液頂部出現黃或黃橙色，代表酸化不完全，需再加入 10 滴硝酸攪拌至紅或粉紅色為止。
- 4.接著將試液燒杯覆蓋鋁箔紙，迅速加熱至沸騰後冷卻，不可過度沸騰可能導致氧化物揮發，使液體沸騰 10 秒就足夠了。
- 5.進行過濾程序，需先將過濾紙用蒸餾水濕潤，再放置於錐形

瓶上的漏斗中，並以真空幫浦協助過濾。取 37.5 ml 加溫蒸餾水逐步使用，直到試液的泥漿完全沖洗至過濾紙上，將濾液倒入燒杯中，過濾完的最終濾液約為 87.5 ml。

6.使用 0.05N AgNO_3 進行滴定，當電位變化差值最大時，表示已達滴定終點，得到此數據後利用公式求期待測液體氯離子濃度如式(3.1)。

$$\text{Cl}^- \% = 3.5453 \times V \times N \quad (3.1)$$

其中 V： AgNO_3 滴定溶液耗用量的體積

N： AgNO_3 滴定溶液的當量濃度

(六)孔隙率試驗

使用配比如表 3.5，製作水泥漿試體，尺寸為 2.5×2.5×1.25 cm 之試體，如圖 3.10 所示。分別測定 7、28、90、183 天之孔隙率數值。分別以下敘方式量測水泥漿試體孔隙率：

烘乾→浸泡→煮沸:參照 ASTM C642-13，步驟如下：

- 1.齡期到期後取出試體，放入烘箱 24 hr 溫度為 $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ，冷卻後秤其重量，直至恆重小於 0.5 %，即得 A 為烘乾重。
- 2.將其試體浸泡於水中，不少於 48hr，直至重量變化小於 0.5 %，即得 B 為浸泡水直到面乾內飽和重。
- 3.將其試體進行煮沸 5hr，等待冷卻不少於 14 hr，即得 C 為浸泡與煮沸的面乾內飽和。
- 4.將其試體取出秤水中重，即得 D 為浸泡與煮沸的水重。



圖 3.10 孔隙率試驗試體

(七) 氮氣吸附試驗

將製作水泥漿試體，尺寸為 2.5×2.5×1.25 cm 之試體，如圖 3.10 所示。齡期到期後，先將測試樣品烘乾 105 °C 約 24 小時，藉以去除殘留於樣品上之水分，並研磨以通過#30 篩之粉末。置入 77 K 之氮氣吸附儀進行孔徑大小分佈之量測。

(八) 電阻率試驗

本研究為比較不同養護方式以及齡期對混凝土電阻值的影響，使用配比如表 3.4 之 C、M 配比，待試體達齡期後，取出試體使表面呈面乾內飽和狀態，再使用電阻儀予以量測電阻值，量測方法如圖 3.11 所示。

依據 AASHTO T358 試驗方法程序採用溫那四極式電阻儀量測，量取試體電阻值，測定試體隨齡期改變之情形。

試驗步驟如下：

1. 將試體養護至齡期後取出，將試體表面擦乾淨，呈面乾內飽

和狀態。

- 2.在試體面隨機選一點為0度，以90度取一量測點方式標記0、90、180、270度。
- 3.將儀器四個探針放在繪製線上，從0度開始依序量測四個電阻值後，計算平均電阻率。

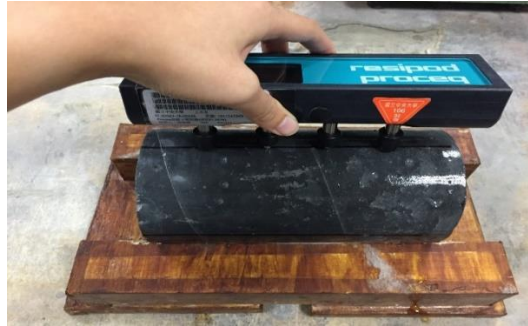


圖 3.11 混凝土電阻值量測圖

肆、主要發現與結論

依據前人研究期望尋求新方法能提高生產效率又能讓混凝土耐用度提高，此研究將利用不同養護方式，觀察是否能提升混凝土之耐用程度，達到提高品質的效果。將混凝土基本性質試驗分為力學試驗、孔隙率試驗、孔隙粒徑分布與耐久性試驗，評估不同養護方式與養護齡期之影響。

一、混凝土坍度與凝結時間試驗

進行坍度試驗結果如圖 4.1、4.2 所示，可以看出 M 配比之混凝土，如預期有相當良好之工作性，坍度結果為全坍，直徑為 45 cm，而 C 配比为近零坍度，因為工作性不佳，加上因坍度試驗無法使用震動的方式，可以看出 C 配比坍度試驗時有搗實困難之問題，因而有蜂窩的情況，但在製造試體時因有震動台之幫助，所以試體不會有出現蜂窩之現象。

兩種配比之砂漿初凝時間約為 2 小時；終凝約 5 小時 30 分到 6 小時，比一般水凝凝結時間稍長一些，推論應該是因為添加大量的卜作蘭材料，而卜作蘭材料之反應為二次水化反應，是與水泥第一次水化後之水化生成物反應，因此在添加大量卜作蘭材料後使凝結時間延緩。



圖 4.1 M 配比坍度試驗



圖 4.2 C 配比坍度試驗

二、抗壓強度試驗

抗壓強度是用來判斷混凝土品質重要性質之一，一般以抗壓強度作為衡量混凝土強度指標試驗。本研究混凝土經過常溫養護或高溫(80°C)浸水養護；試驗目的在於分別比較不同養護方式，對於其力學特性之影響。

目前台灣針對低放射性廢棄物最終處置場工程障壁材料之

力學性質尚未有設計規範要求，因此本研究利用不同養護方式嘗試進一步提高混凝土盛裝容器的品質。比較 C、M 配比對於不同養護方式之影響，試驗結果如圖 4.3、4.4 所示，圖中養護方法代號請參考表 3.6。

觀察使用 80°C 高溫浸水養護的方式的試體抗壓強度，如圖 4.3、4.4 所示，結果顯示 80°C 的熱養護試體之抗壓強度，於齡期 7 天時，較常溫養護之試體高，但在晚期強度發展上僅 3D12H 養護方式之抗壓強度明顯增加。依照以上結果來說明，推論由於高溫養護係將水化反應與卜作嵐反應加速進行，水化作用所形成的氫氧化鈣以及水泥中含有的矽鈣鋁化合物可轉換為密度較低的 C-S-H 膠體，將會增強混凝土結構。使用高溫養護使得混凝土早期強度快速增長，可以縮短養護所需要的時間，並且降低在養護期間所可能遭遇的外力因素，如地震、搬運過程碰撞等，能確保盛裝容器早期的安全。

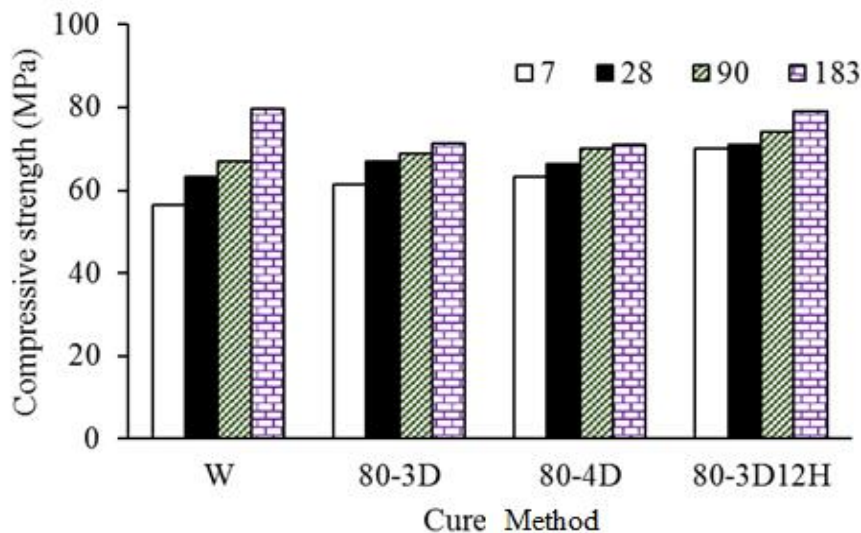


圖 4.3 C 配比 80°C 養護方式對抗壓強度之影響

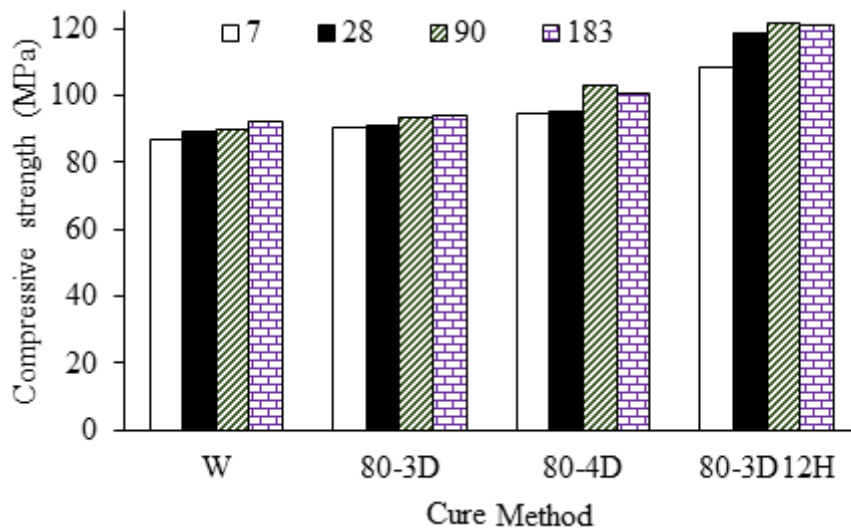


圖 4.4 M 配比 80°C 養護方式對抗壓強度之影響

三、孔隙率試驗

氯離子的入侵混凝土之行為與孔隙率有很大的關連性，因此嘗試藉由觀察孔隙率得知氯離子擴散係數的關係。

圖 4.6、4.7 為各養護方式到齡期 365 天之試驗結果，可以發現經過熱養護(80-3D、80-4D)後試體的孔隙率皆有下降的趨勢，可見高溫養護可以有效加速卜作嵐反應，其中水化產物之 C-S-H 膠體快速生成使其填補孔隙，使得連通孔隙變成封閉孔隙，讓試體內部更加緻密使外界物質更難入侵試體內部。且試體的孔隙率皆隨齡期增加而降低，表示水泥會持續進行水化反應並持續提高試體的緻密程度。

於 80°C 熱養護 3 天後 200°C 再乾養護 12 小時(80-3D12H)的試體並沒有因高溫養護狀態下產生孔隙率下降的情形，孔隙率反而比常溫養護還高，且於 C、M 配比皆有此狀況產生，這是因為試體為水泥漿體當受到烘箱高溫 200°C 12 個小時後，因材料間熱膨脹係數的差異及試體內部水分的散失使試體破壞而產

生明顯小裂縫如圖 4.5 所示，這可能是造成孔隙率高於一般常溫養護的主要原因，另外此參數隨著齡期增加孔隙率雖有降低之趨勢，但仍然遠高於其他養護條件下之試體，由此可見 200°C 熱養護 12 小時雖然在強度方面有助益，但亦有可能產生微裂縫而使孔隙率增加，這可能因而影響其抵抗氯離子擴散之能力。



圖 4.5 經 12 小時 200°C 烘箱養護所產生之裂縫

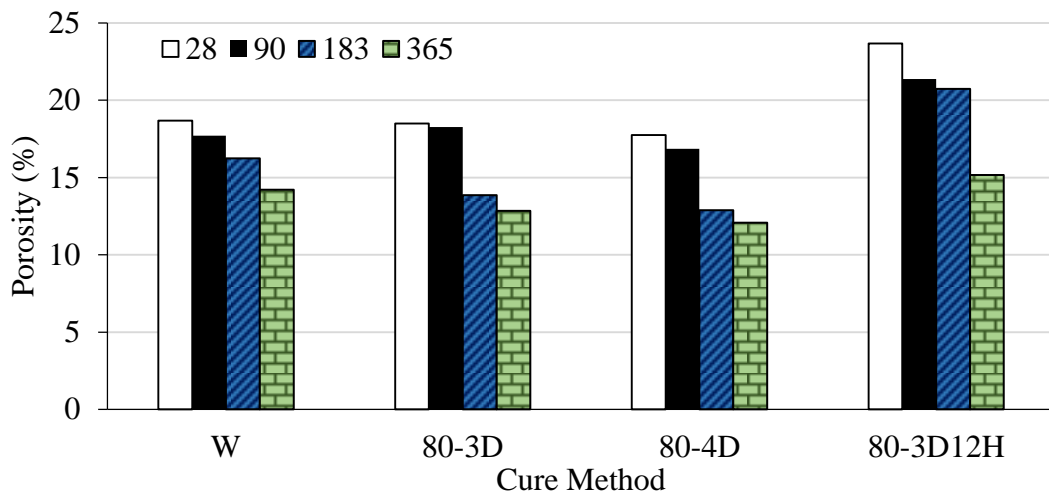


圖 4.6 養護條件對 C 配比孔隙率之影響

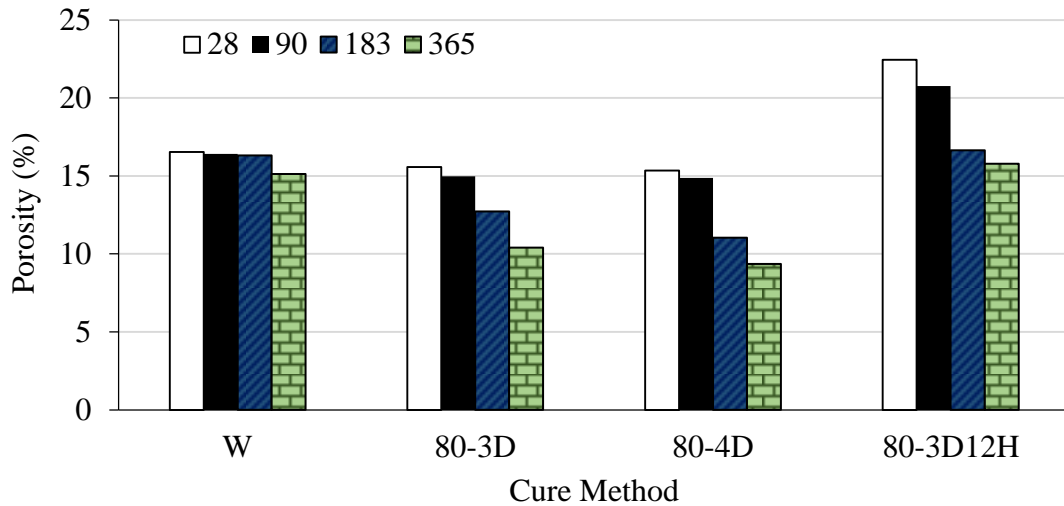


圖 4.7 養護條件對 M 配比孔隙率之影響

四、孔隙分佈與孔隙結構分析

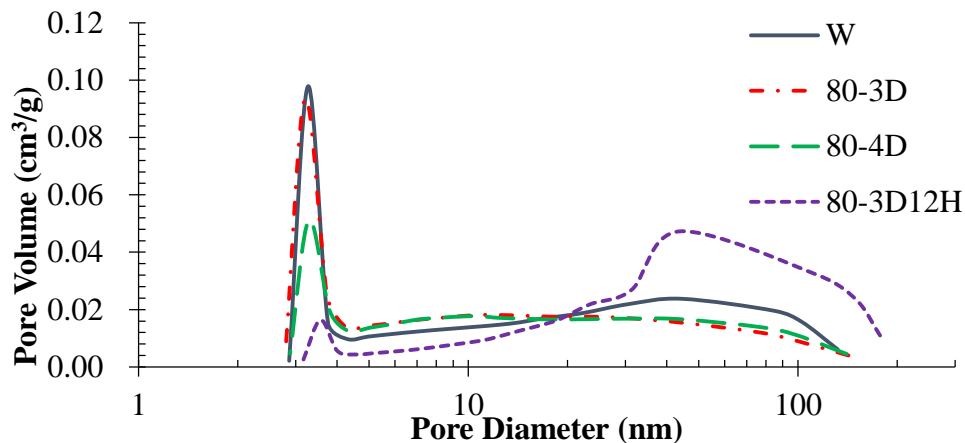
為瞭解試體內部孔徑分布與孔隙結構，故藉由氮氣吸附試驗進行微觀的孔隙分析，以便進一步了解試體內部結構。水泥漿體之孔隙體積，文獻中(Metha et al.2006)將孔隙直徑大小可以分為中大毛細孔隙(>50 nm)、中孔孔隙(4.5 nm – 50 nm)、膠體孔隙(<4.5 nm)，試體孔隙的形成從拌合過程就產生具有連通性之孔隙。而三種孔隙依小到大的作用及對物質入侵的影響分別為，膠體孔隙主要是 C-S-H 膠體間的縫隙以及針狀或板狀的結晶結構間交錯所形成的孔隙，並不是影響抗壓強度的主要因素，由於互相不連通也不是離子傳輸的主要路徑，並且相較於其他孔隙尺寸而言緻密性極高；中大孔隙，主要受到水化程度、水化空間所影響；而中孔孔隙多寡主要影響混凝土離子傳輸行為，與外界有害物質侵入的重要因子，因此它會影響水泥漿體品質，降低使用年限。本研究將針對不同養護條件與齡期做探討。

孔隙體積為配比 C 大於配比 M，與氯離子入侵試驗之混凝土配比 C 與配比 M 擴散係數結果相同，此結果是因為 M 配比

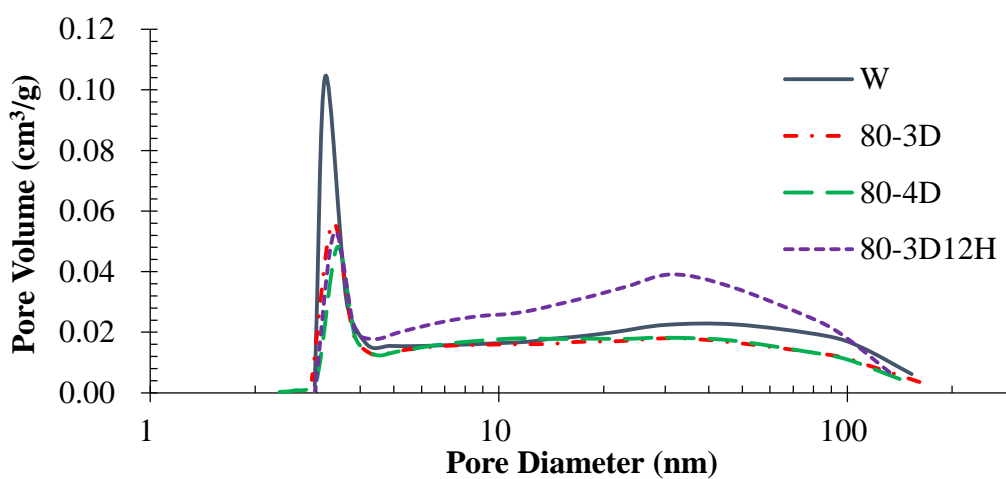
於配合設計時，其未添加粗粒料及鋼纖維，使得材料間產生孔隙的機率變低且其添加大量卜作嵐材料填充粒徑顆粒間的孔徑，增加其緻密性。配比 C 擴散係數大於配比 M 擴散係數，說明孔隙體積越大會使得氯離子越容易入侵，使得擴散係數變大。

而經過 200°C 乾燥養護之混凝土的中大毛細孔隙有增多的趨勢，這可能導致氯離子越容易入侵，使得混凝土擴散係數變大。

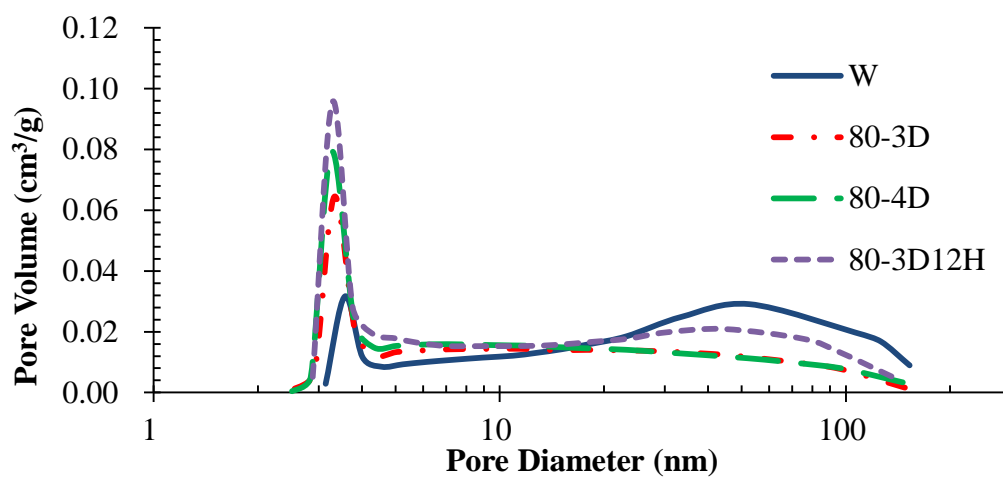
由圖 4.8、4.9 可以發現在齡期 7 天到 28 天時，28 天的中大孔隙減少而中孔隙卻增加，這可能代表在這期間孔隙因水水化產物的增加，使孔隙進行的細化的機制，不斷有中大孔隙被分割成許多中孔隙，造成這期間中孔隙的增加及中大孔隙的減少；而 28 天到 183 天中大孔隙、中孔隙、膠體孔隙的體積皆逐漸下降，表示有越來越多孔隙被填充使孔隙量減少；183 到 365 天孔隙體積減少的趨勢已經趨漸平緩，表示水化反應速率以經減緩，使孔隙填充的機制變得較不明顯。



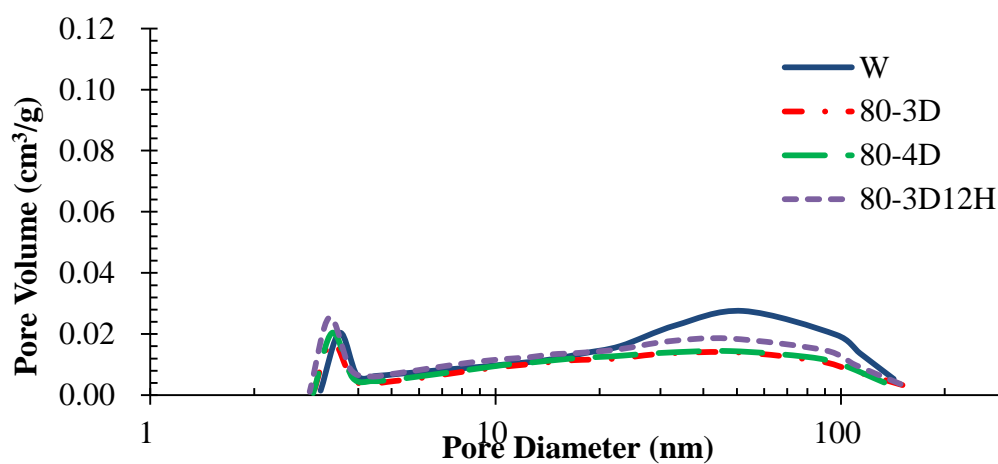
(a) 7 天



(b)28 天



(c)90 天



(d)183 天

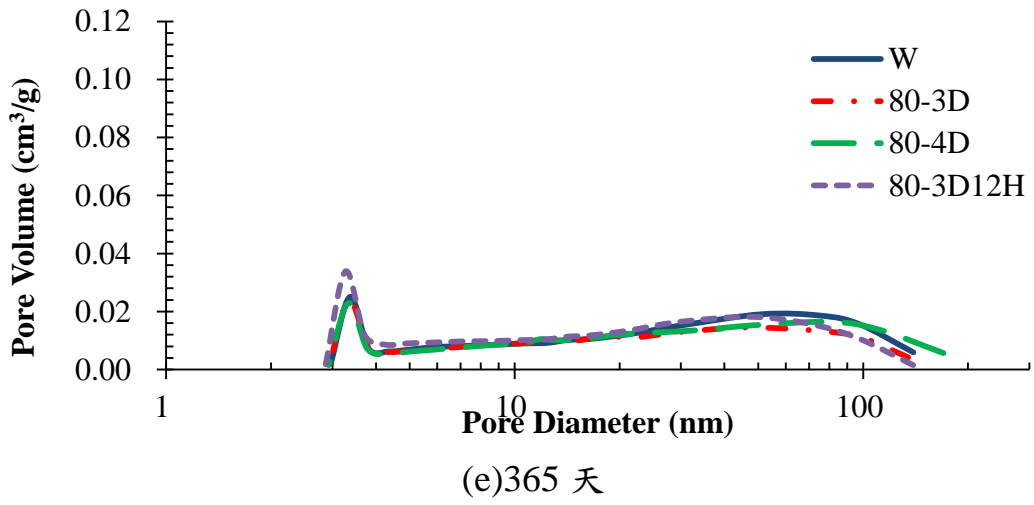
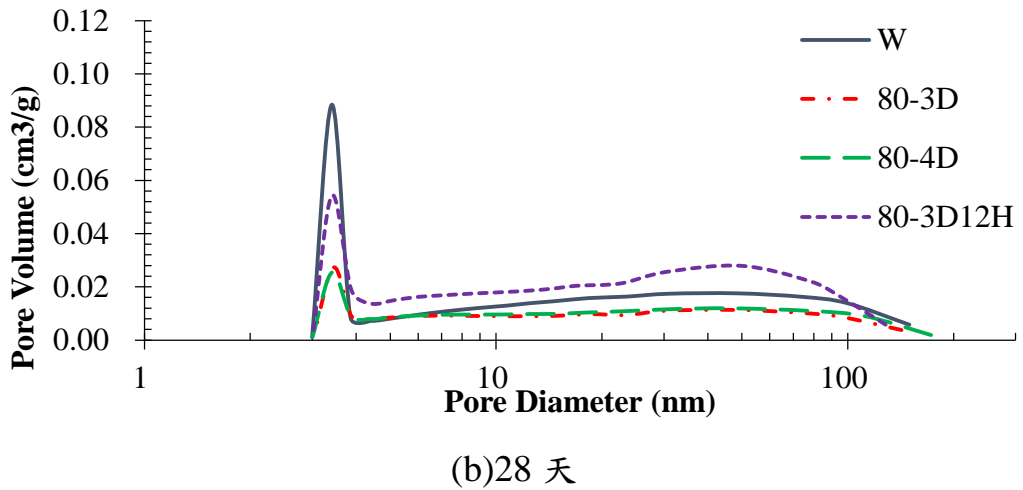
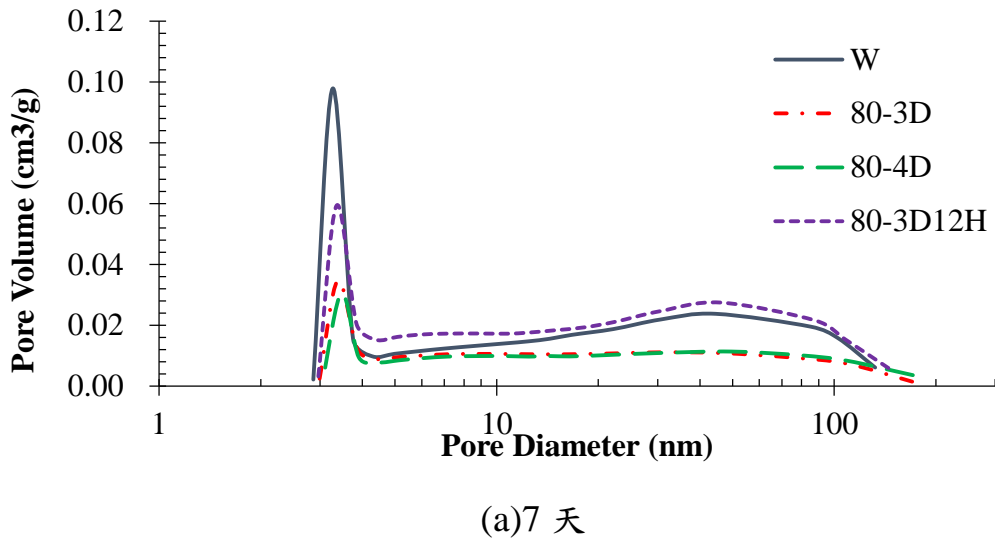
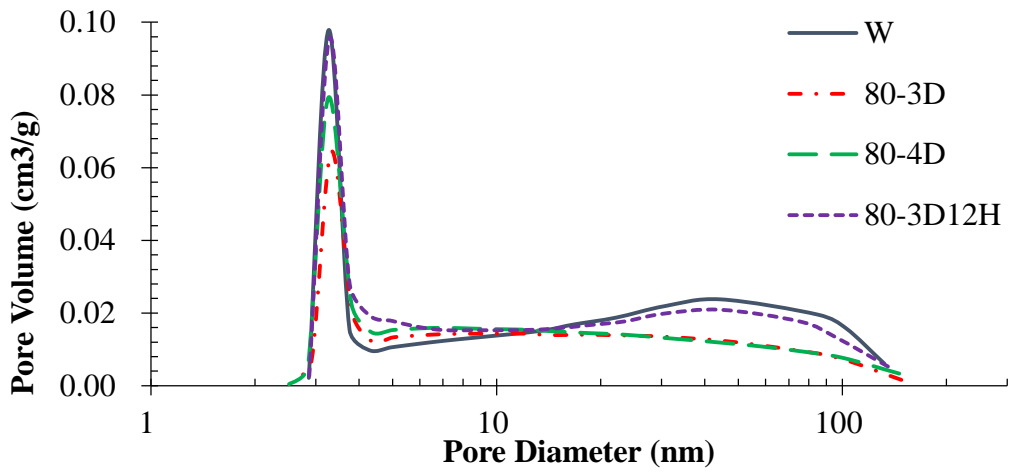
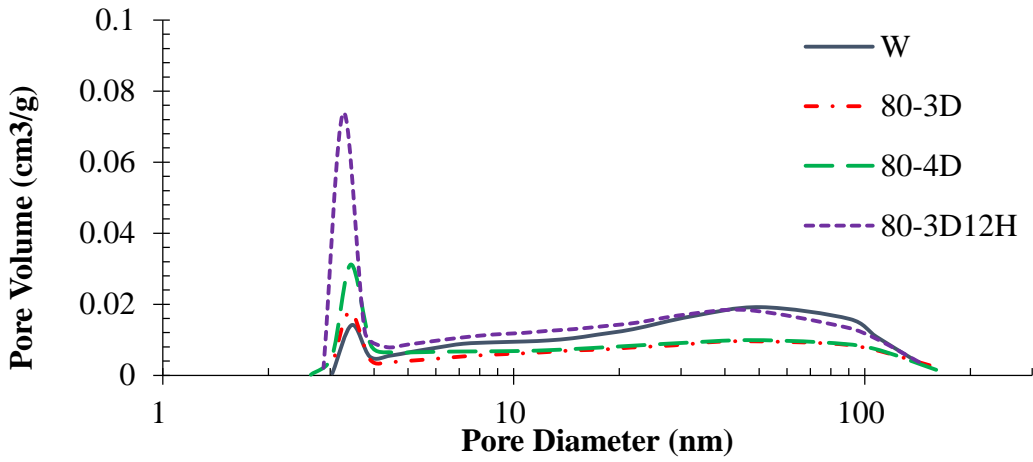


圖 4.8 C 配比不同齡期孔隙體積分布圖

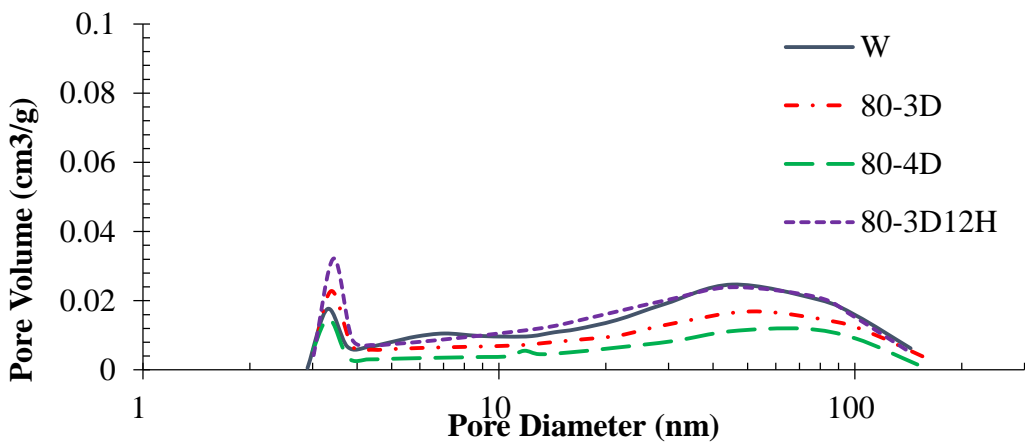




(c)90 天



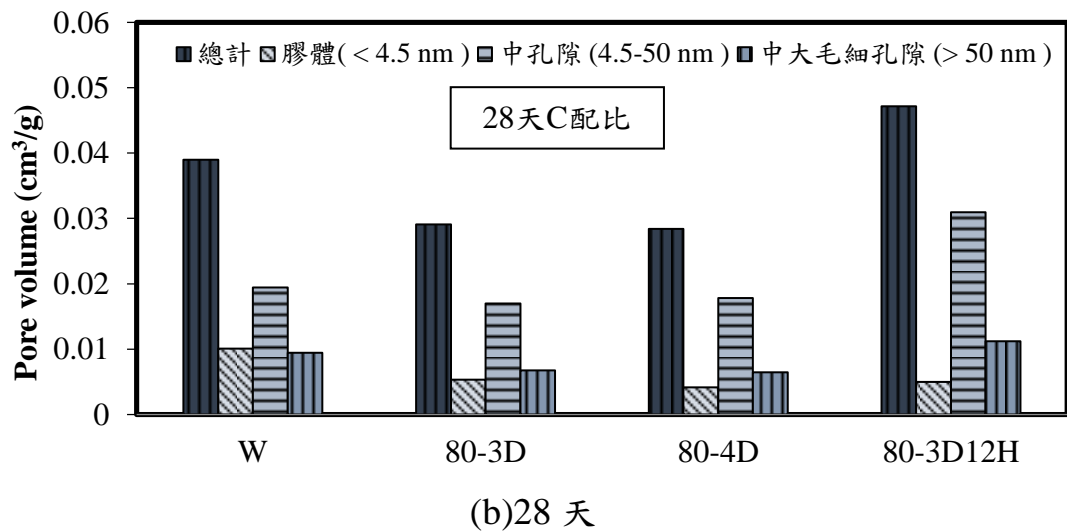
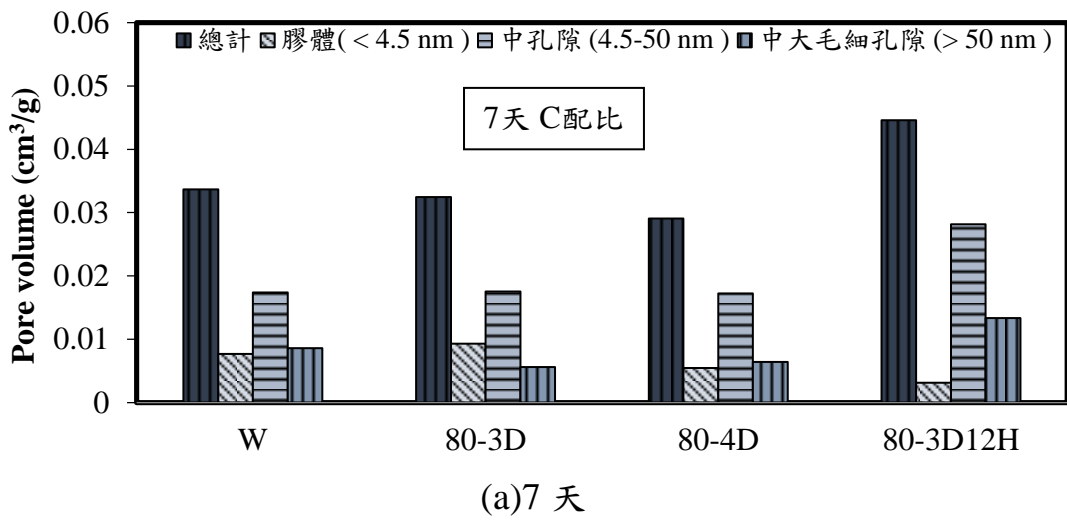
(d)183 天

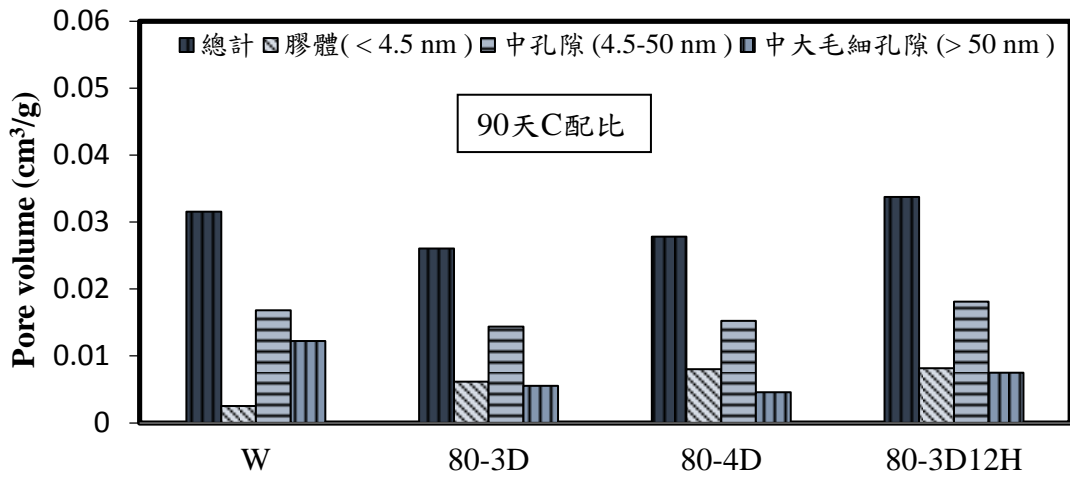


(e)365 天

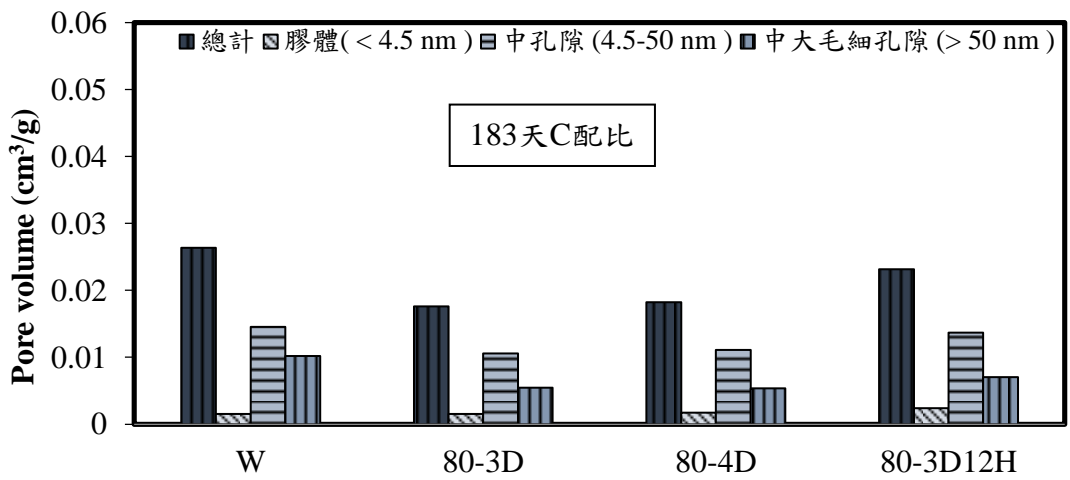
圖 4.9 M 配比不同齡期孔隙體積分布圖

由圖 4.10、4.11 看出經過高溫養護後其孔隙結構之中孔孔隙及中大孔隙量減少，且熱水養護 3 天及 4 天的孔隙結構差異不大。而孔隙中體積量最少的為膠體孔隙，中大孔隙次之，中孔孔隙最多。此外，因為 M 配比的卜作嵐材料使用量較多，使 M 配比於各孔徑範圍的體積都低於 C 配比，孔隙量越低離子在其中的擴散越不易進行。

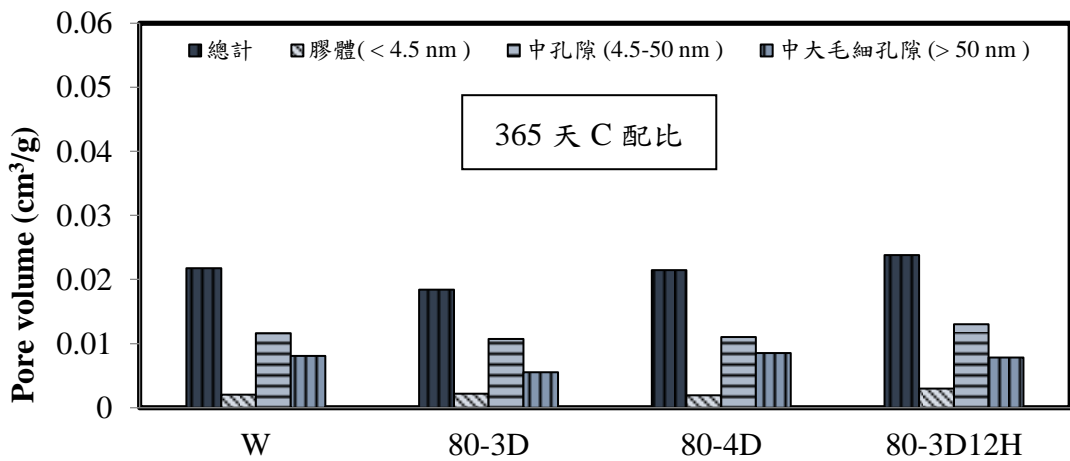




(c)90 天

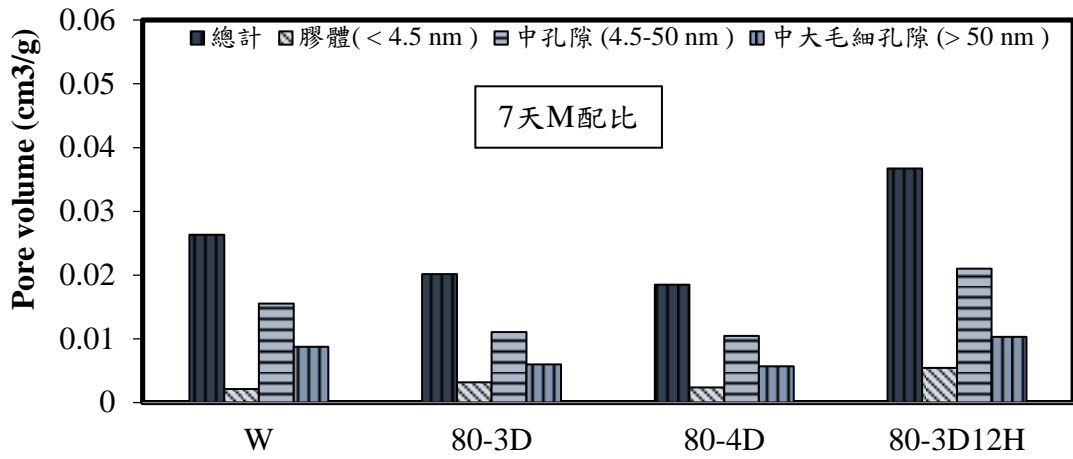


(d)183 天

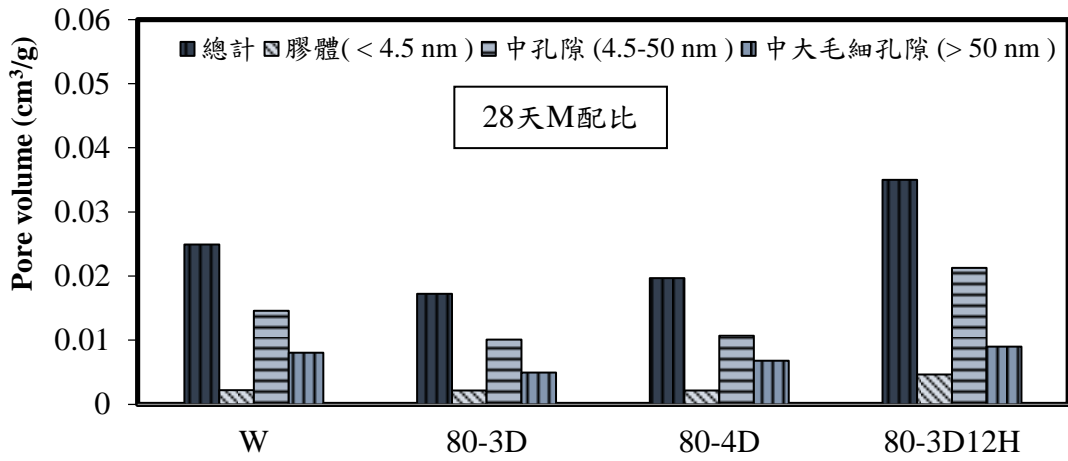


(e)365 天

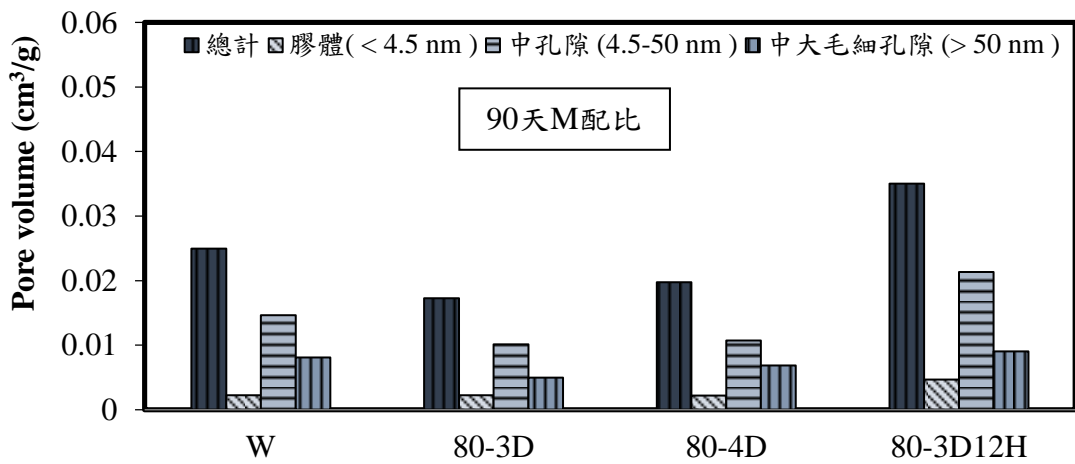
圖 4.10 C 配比不同齡期孔隙結構關係圖



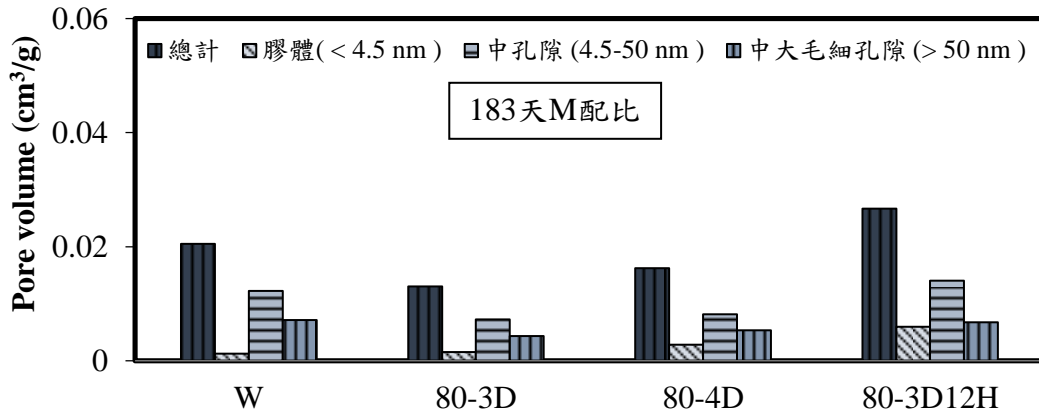
(a)7 天



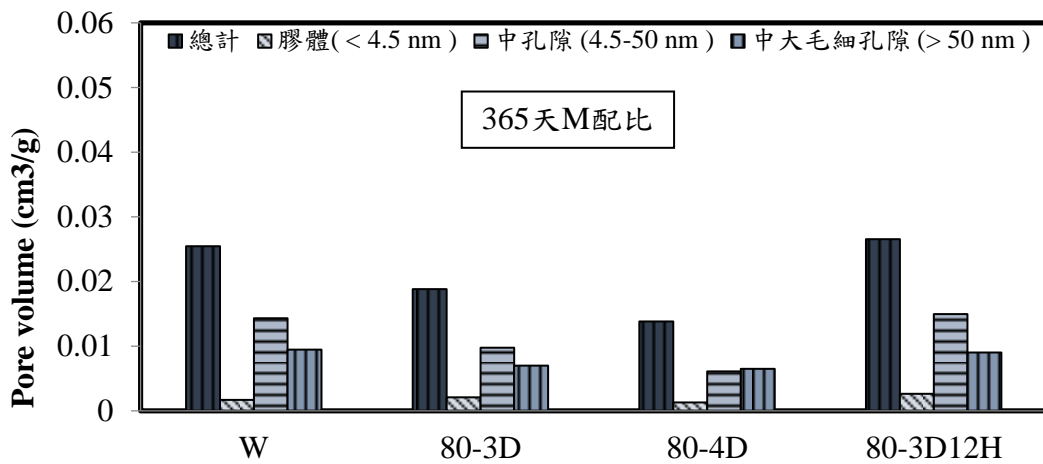
(b)28 天



(c)90 天



(d)183 天



(e)365 天

圖 4.11 M 配比不同齡期孔隙結構關係圖

五、表面電阻試驗

本研究對混凝土進行一系列檢測混凝土品質的試驗，包含抗壓強度、孔隙率、ASTM C1556 試驗，而這些試驗的試驗時間長、數據取得過程繁瑣，且為破壞性試驗，因此本研究為了簡化檢測混凝土品質的試驗過程，而使用量測混凝土電阻率來評估成裝容器混凝土品質。

量測混凝土電阻率的原理為，在儀器發射端釋放電流再經

由混凝土內部連通孔隙傳遞電流到接收端，以量測混凝土電阻率，因此當連通孔隙的路徑越長所量測出來的電阻率也會越高，則外界物質要入侵混凝土內部就越加困難，可做為評估混凝土耐久性的一項指標。

目前已有規範（AASHTO T358-15）建立以混凝土電阻率來評估混凝土抗氯離子滲透能力的指標，但此電阻率評估混凝土抗氯離子滲透能力的參考值目前僅適用於一般混凝土，對於極低水膠比的混凝土材料及使用鋼纖維的混凝土，則仍缺乏量測數據。影響混凝土電阻量測的因素有很多，例如添加鋼纖維、孔隙大小、孔隙溶液、溫度及濕度、內部水份多寡等。

圖 4.12、4.13 為 80°C 熱養護對試體電阻率之影響，觀察到 M 配比各養護方法電阻率皆遠大於表 2.1 AASHTO T358-15 所列出之電阻率(254 kΩ-cm)，評估氯離子滲透能力為微乎其微，其原因應是本研究採用極低水膠比(0.24 及 0.26)，水泥砂漿孔隙隨水化產生之 C-S-H 膠體的成長，使導電通路受阻而提高電阻率。

而 C 配比雖亦是採用極低水膠比，但其各養護方法之試體電阻率皆遠低於 M 配比，其原因為 C 配比中所添加之鋼纖維具有導電能力，使 C 配比所測得之電阻率偏低，如依照表 2.1 之標準，僅列為氯離子滲透能力低之混凝土。因此，再藉由以下試驗測試本研究之配比以電阻率評估混凝土品質的可行性。

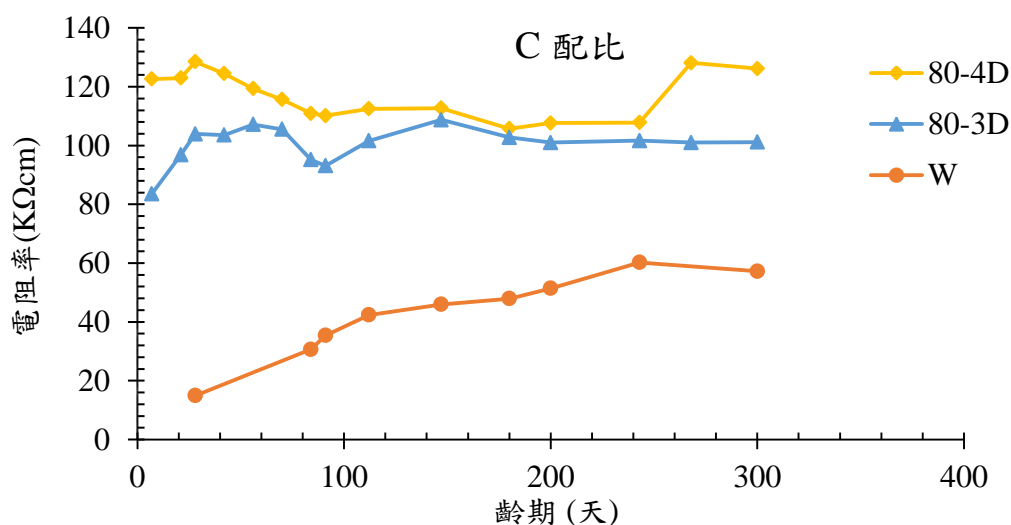


圖 4.12 養護條件對 C 配比電阻率之影響

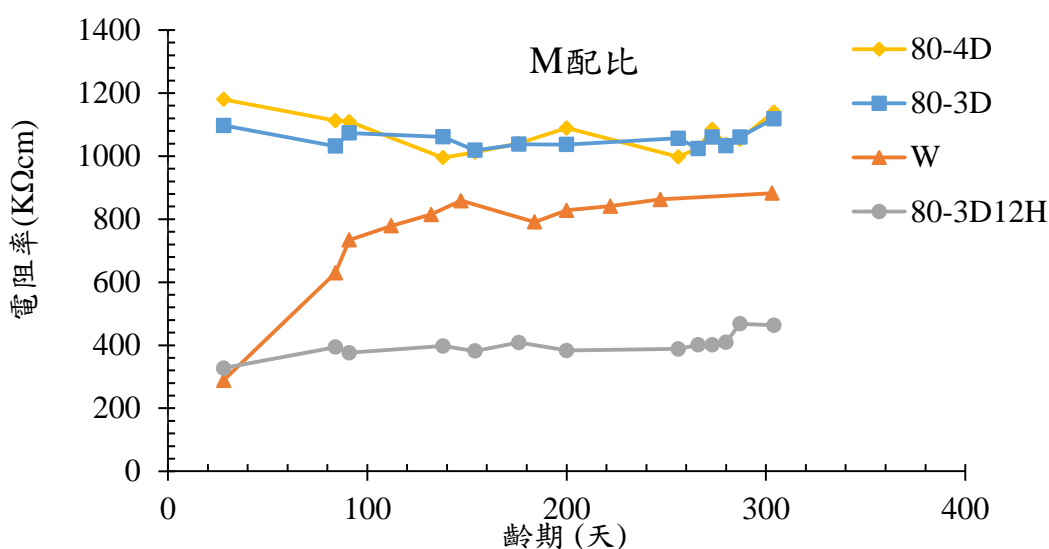


圖 4.13 養護條件對 M 配比電阻率之影響

為測試 C、M 配比試體之電阻率隨水膠比而變化，圖 4.14、4.15 為常溫養護 28 天齡期時，低水膠比範圍內電阻率的變化情形，配比 C 的水膠比範圍為 0.24、0.27、0.30 及 0.33，配比 M 為 0.23、0.26、0.29 及 0.32，配比皆為 C、M 配比材料用量比例調整用水量，由圖 4.14 可看出有添加鋼纖維之 C 配比不同水膠比測得電阻率在早期時差異較不明顯，但隨著齡期增加各水膠

比的水化作用產生的緻密程度不同，可明顯看到其不同水膠比間電阻率的差異性，圖 4.14、4.15 中 C、M 配比電阻率試驗結果皆隨水膠比越大所測得的電阻率就越低。

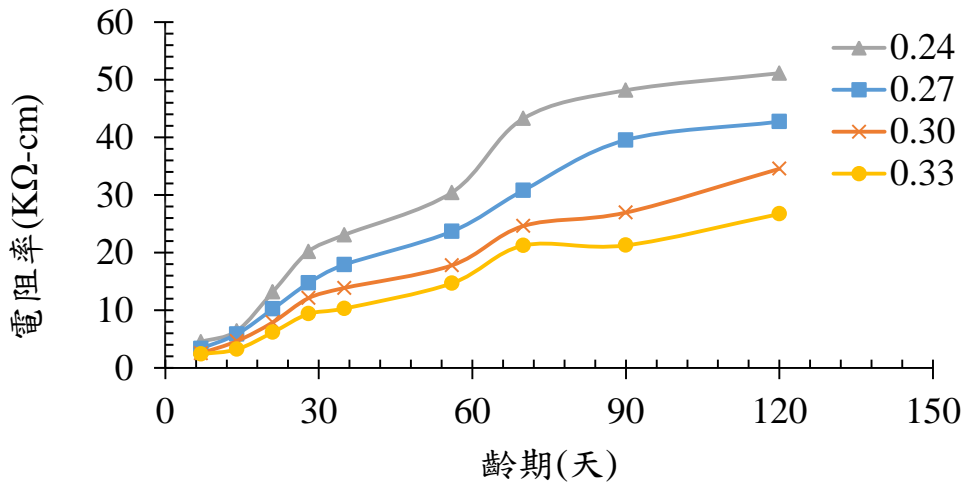


圖 4.14 C 配比不同水灰比與電阻率關係圖

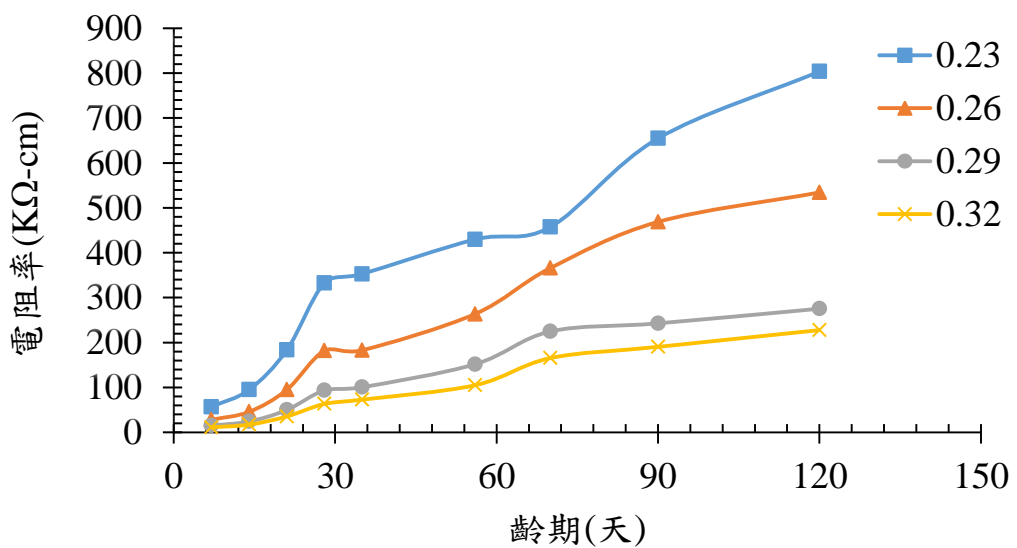


圖 4.15 M 配比不同水灰比與電阻率關係圖

當水膠比固定時，進一步測試電阻率量測是否也可用於分辨出不同試體中鋼纖維含量的差異。由圖 4.16 可以看出當水膠比固定為

0.24 配比 C 時的混凝土試體，鋼纖維含量越多，其電阻率也有明顯的降低，並且亦可看出隨齡期增加電阻率的變化情形。

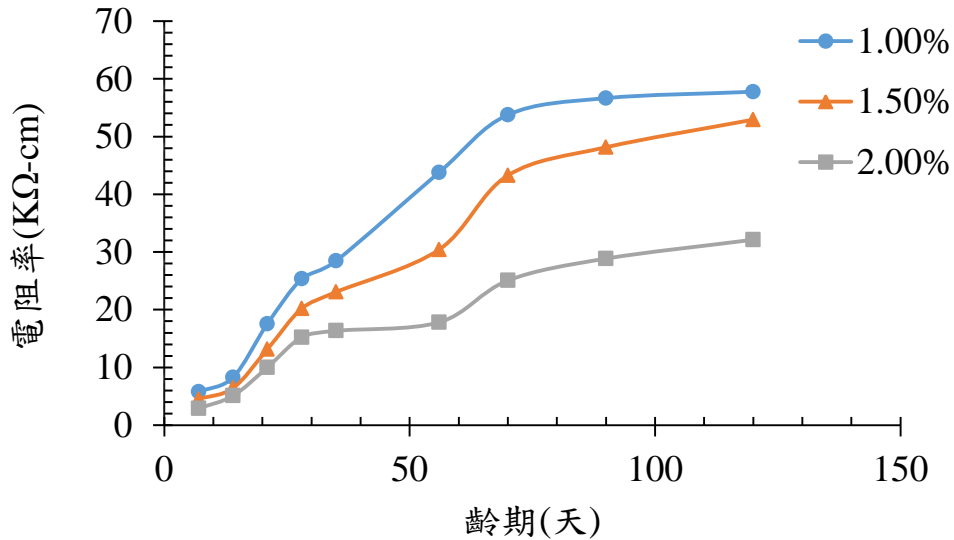


圖 4.16 配比 C 之不同鋼纖維含量與電阻率關係圖

圖 4.17、4.18 分別為齡期 183 天 C、M 配比不同養護方式電阻率與孔隙率比較圖，雖然兩個試驗所使用的配比不一樣，電阻率試驗使用混凝土配比而孔隙率試驗使用漿體配比，但由表 4.1 顯示兩個試驗結果的相關性 $R^2 > 0.7$ ，表示具有顯著的關係，亦即孔隙率越高，電阻率會越低的趨勢，這是因為當孔隙率越高表示試體內的連通孔隙越多，電流傳遞到接收端的路徑也越短，因此有較低的混凝土電阻率。

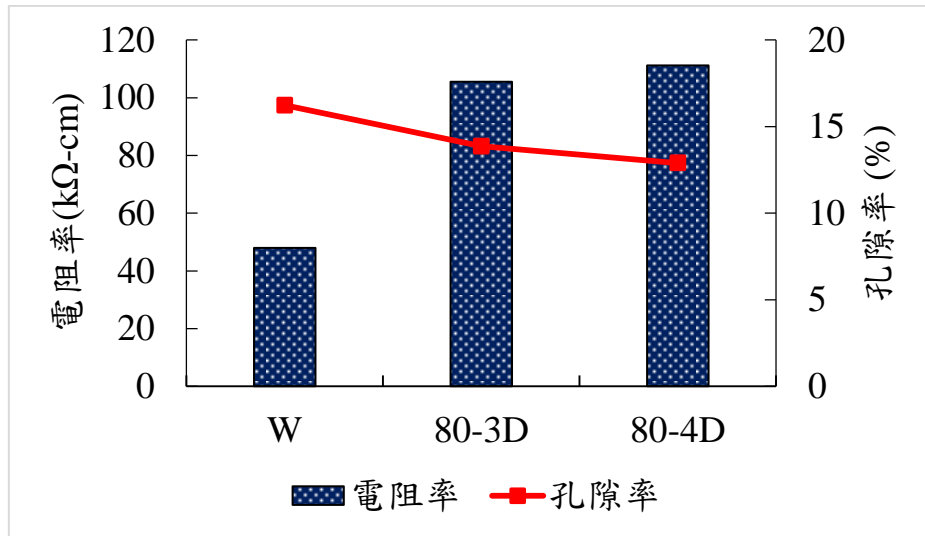


圖 4.17 齡期 183 天配比 C 不同養護方式電阻率與孔隙率比較圖

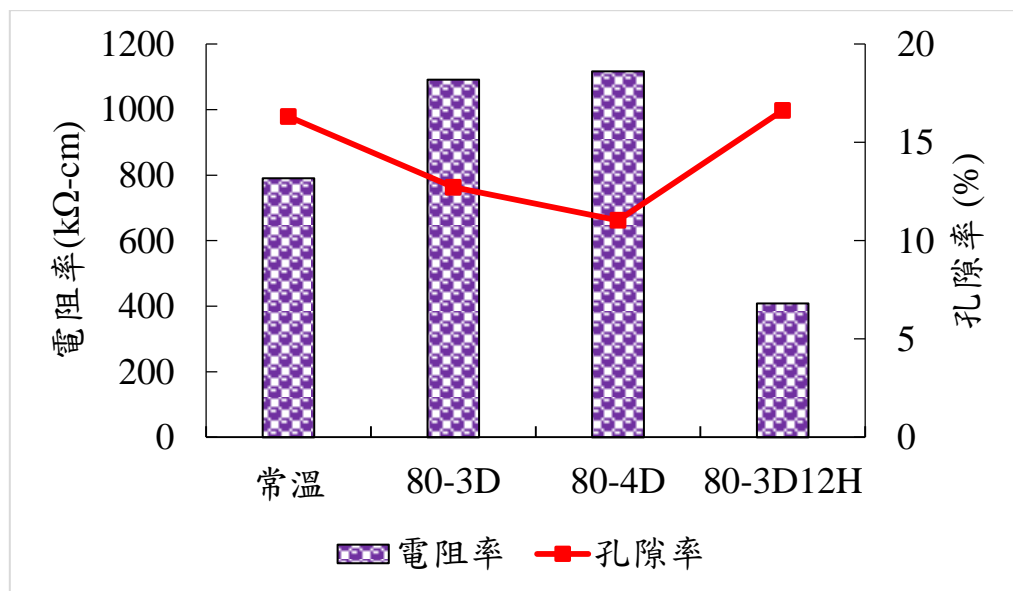


圖 4.18 齡期 183 天配比 M 不同養護方式電阻率與孔隙率比較圖

圖 4.19、4.20 分別為齡期 90 天 C、M 配比混凝土不同養護方式之試體電阻率與抗壓強度比較圖，由表 4.1 顯示 C 配比電阻率與其孔隙率及抗壓強度有較佳之相關性，而 M 配比電阻率與兩個試驗的部分結果相關性 $R^2 < 0.7$ ，相關性略低，推論是由於電阻率與抗壓強

度的試驗機理不同，以致 C、M 配比的電阻率與抗壓強度相關性產生不同結果，因此不建議使用電阻率評估混凝土抗壓強度。

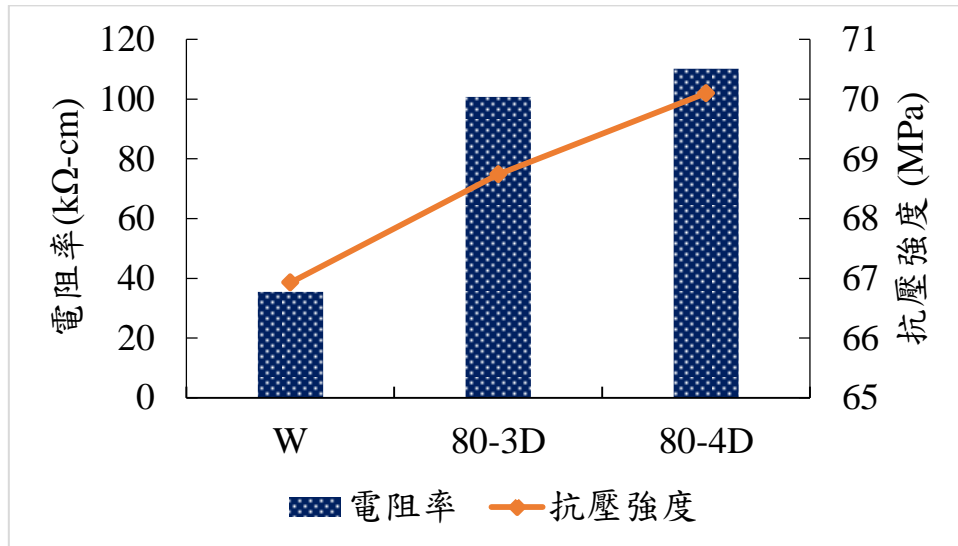


圖 4.19 齡期 90 天配比 C 不同養護方式電阻率與抗壓強度比較圖

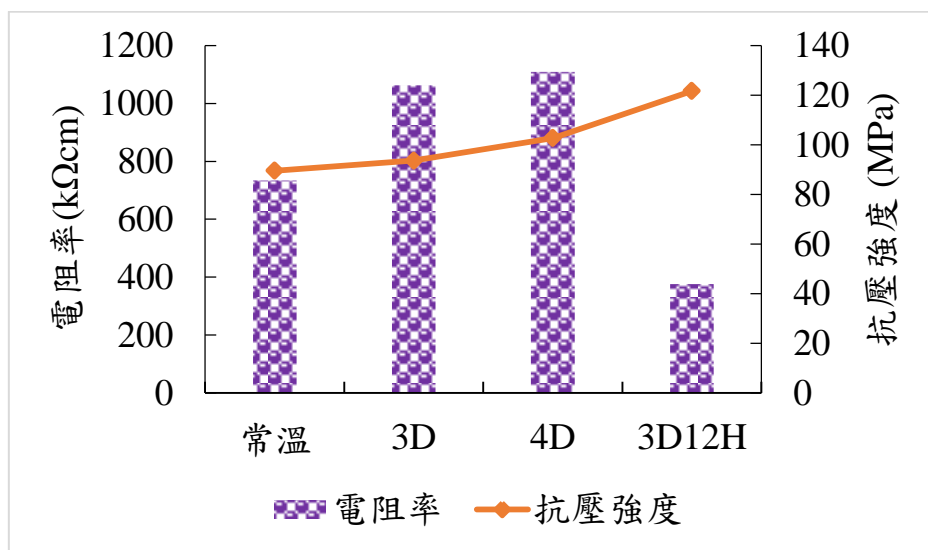


圖 4.20 齡期 90 天配比 M 不同養護方式電阻率與抗壓強度比較圖

圖 4.21、4.22 分別為齡期 183 天 C、M 配比不同養護方式電阻率與氯離子擴散係數比較圖，由表 4.1 顯示兩個試驗結果 $R^2 > 0.7$ 有顯著相關，因為氯離子的擴散也是藉由混凝土中的孔隙，因此當

混凝土越緻密其擴散係數也會變小，因連通孔隙的路徑變長電阻也會越大，因此這兩個試驗結果有良好的相關性。

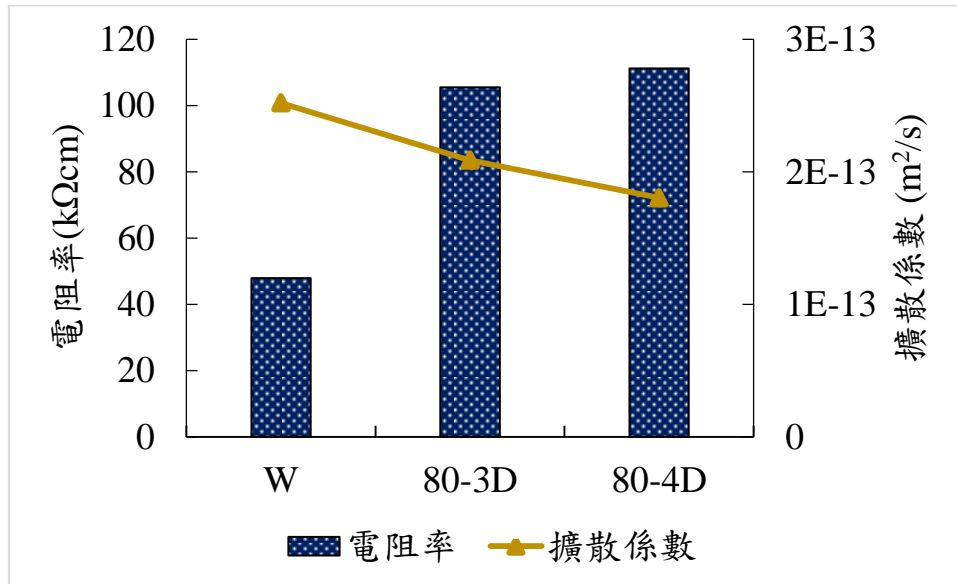


圖 4.21 齡期 183 天配比 C 不同養護方式電阻率與擴散係數比較圖

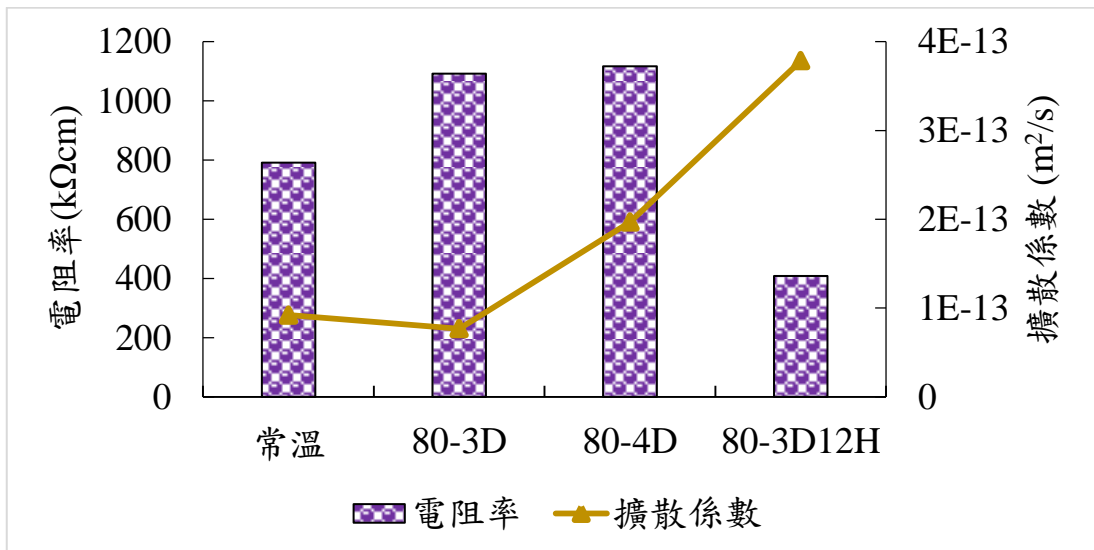


圖 4.22 齡期 183 天配比 M 不同養護方式電阻率與擴散係數比較圖

由表 4.1 發現電阻率與孔隙率、抗壓強度、擴散係數有顯著的關係，表示以量測混凝土電阻率來代表混凝土之品質之其可行性存

在，但仍須歸納出其關係性，才能建立出檢測低放射性盛裝容器之混凝土其電阻率檢測標準。

表 4.1 電阻率與其他試驗結果相關性判定係數比較表

養護方式		配比C			配比M		
		電阻率與 孔隙率	電阻率與 抗壓強度	電阻率與 擴散係數	電阻率與 孔隙率	電阻率與 抗壓強度	電阻率與 擴散係數
常溫	R ²	0.92	0.81	0.86	0.86	0.45	0.98
80-3D		0.85	0.98	0.74	0.96	0.69	0.77
80-4D		0.71	0.98	0.96	0.52	0.79	0.94

六、乾縮試驗

乾燥收縮為混凝土體積穩定性重要指標之一，其目的在於評估混凝土之體積變化量，若混凝土乾縮率高則容易因體積變化過大而產生裂縫。

當混凝土有較高乾縮率可能因材料收縮量不同，造成混凝土裂縫生成，使混凝土品質下降。由實驗結果圖 4.23、4.24 可以看出，混凝土經過高溫養護後，乾縮率相較於常溫養護試體更有明顯減少的效果。

以 80°C 養護 3 天之試體乾縮率最低，而 80°C 養護 3 天再進行 12 小時乾養護之試體，則因試體養護時已經經過烘乾，因此出現微量膨脹情形。

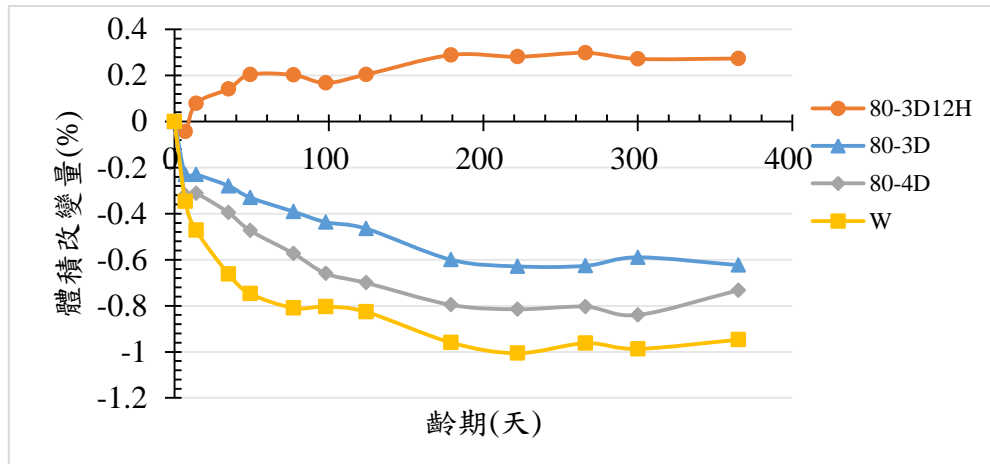


圖 4.23 養護條件對 C 配比乾縮率之影響

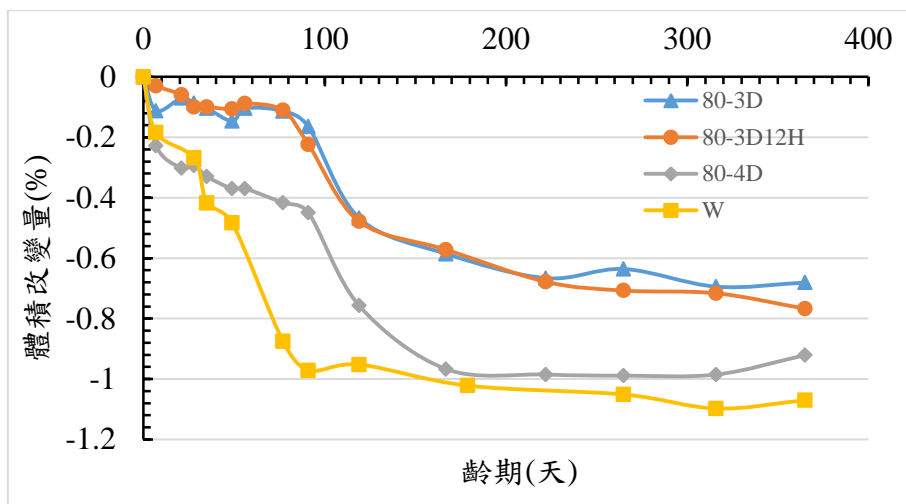


圖 4.24 養護條件對 M 配比乾縮率之影響

七、氯離子入侵混凝土濃度量測與分析

本研究依據 ASTM C1556 規範製作配比 C 及配比 M 之混凝土試體，試驗方法為試體浸泡飽和石灰水養治到預定齡期，再浸泡於 $165 \pm 1 \text{ g/L}$ 氯化鈉水溶液中，皆 36 天，將試體取出分層磨粉，依據 ASTM C1152 規範取得含氯離子濃度之溶液，再利用氯離子滴定儀進行濃度測定，得到各試體濃度剖面。以常溫養護試體於齡期 28 天、90 天、183 天、365 天、2 年及 3 年，高溫養護 28 天、90 天、183 天、365 天進行試驗。

(一) 氯離子擴散係數 D 與表面氯離子濃度 C_s

為考慮外在環境可能會對混凝土接觸面產生影響 Song et al. (2008)及 Ann et al. (2009)兩篇文獻中，認為套入擴散模式的數據應不採用最外層數據，ASTM C1556 也同樣建議，因此於文後之實驗數據呈現以及實驗數據分析，將不使用最外層(0-1 mm)氯離子濃度數據套入費克第二定律進行運算。

將費克第二定律後求得之擴散係數及表面氯離子濃度值，利用費克第二定律求得與實驗數據相對應深度的氯離子含量，稱為預測值，以此預測值與實驗數據代入統計學中判定係數 R^2 ，如表 4.2-4.5，求得預測點與實驗數據點之相關性，來說明實驗數據與費克第二定律之吻合度，可發現其相關性非常好。

表 4.2 常溫養護配比 C 及 M 瞬時擴散係數值及表面氯離子濃度值

配比名稱	齡期 (days)	C_s (% weight concrete)	D ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	R^2
C	28	1.020	1.209	0.9967
	90	0.763	0.276	0.9891
	183	0.455	0.252	0.9954
	365	0.458	0.123	0.9962
	730	0.654	0.042	0.9892
	1085	0.662	0.019	0.9809
M	28	1.390	0.235	0.9970
	90	0.454	0.108	0.9992
	183	0.295	0.092	0.9982
	365	0.952	0.018	0.9996
	730	0.336	0.034	0.9829
	1085	0.302	0.028	0.9859

表 4.3 80-3D 養護配比 C 及 M 瞬時擴散係數值及表面氯離子濃度值

配比名稱	齡期 (days)	C _s (% weight concrete)	D ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	R ²
C	28	1.023	2.471	0.9667
	90	0.807	0.400	0.9574
	183	0.726	0.209	0.9473
	365	0.719	0.114	0.9778
M	28	1.020	1.209	0.9967
	90	0.442	0.082	0.9486
	183	0.156	0.077	0.9700
	365	0.370	0.024	0.9709

表 4.4 80-4D 養護配比 C 及 M 瞬時擴散係數值及表面氯離子濃度值

配比名稱	齡期 (days)	C _s (% weight concrete)	D ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	R ²
C	28	1.234	2.724	0.9767
	90	0.618	0.588	0.9296
	183	0.948	0.180	0.9900
	365	1.202	0.065	0.9848
M	28	0.154	3.220	0.8252
	90	0.427	0.082	0.9768
	183	0.085	0.197	0.9517
	365	0.252	0.039	0.9679

表 4.5 80-3D12H 配比 C 及 M 瞬時擴散係數值及表面氯離子濃度值

配比名稱	齡期 (days)	C_s (% weight concrete)	D ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	R^2
C	28	0.600	14.98	0.9745
	90	0.653	4.236	0.9814
	183	0.557	3.837	0.9002
	365	0.397	0.716	0.9603
M	28	0.901	7.235	0.9986
	90	0.582	2.123	0.9548
	183	0.998	0.379	0.9993
	365	0.717	0.072	0.9963

由圖 4.25、4.26 顯示混凝土試體隨著齡期增長水化程度增加，使混凝土內部越來越緻密，能夠有效的阻擋氯離子的在表層，無法快速向內入侵擴散，因此瞬時擴散係數隨養護齡期增加而下降。

由圖 4.27、4.28 看出經 200°C 養護後的試體擁有明顯高出其他養護方式的瞬時擴散係數，認為因在高溫養護階段造成材料不均勻膨脹及水分喪失時所產生的裂縫有極大的關係，氯離子可由這些裂縫順利進入混凝土中，造成瞬時擴散係數的提升，這也導致混凝土品質下降。因為這些裂縫使混凝土更容易受外來物質入侵，降低混凝土耐久性。

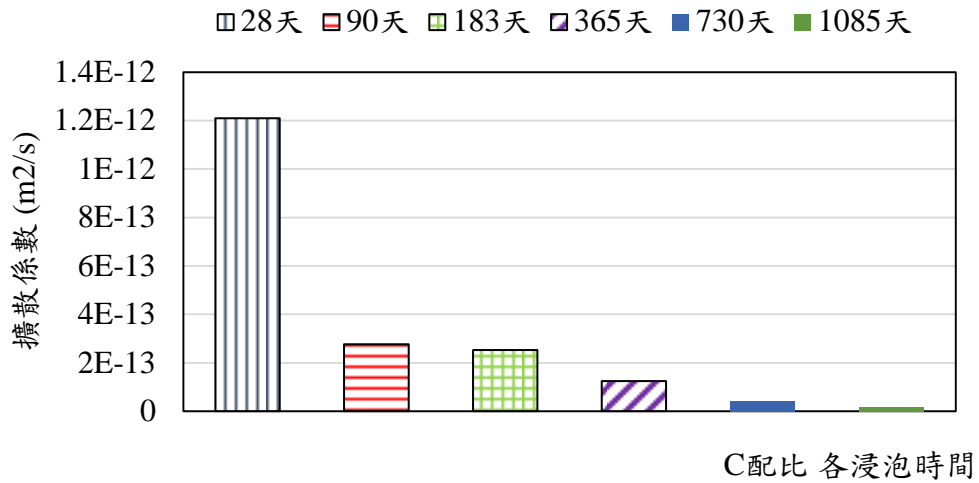


圖 4.25 配比 C 各齡期與瞬時擴散係數關係圖

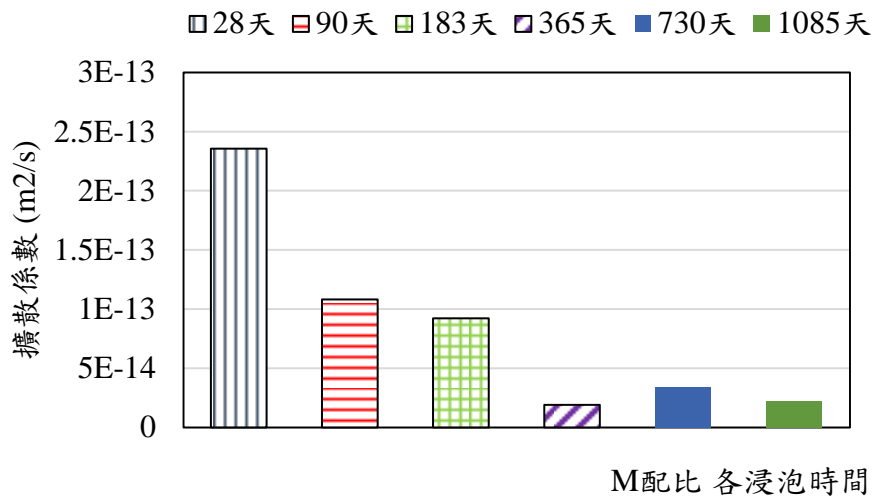


圖 4.26 配比 M 各齡期與瞬時擴散係數關係圖

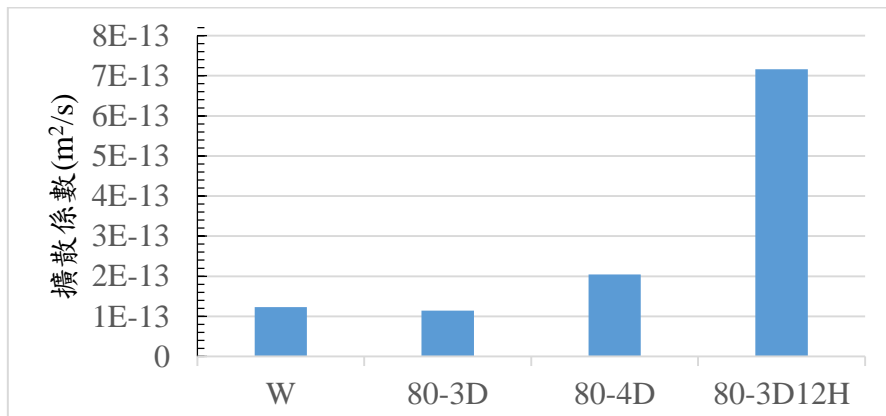


圖 4.27 配比 C 齡期 365 天各養護方式瞬時擴散係數關係圖

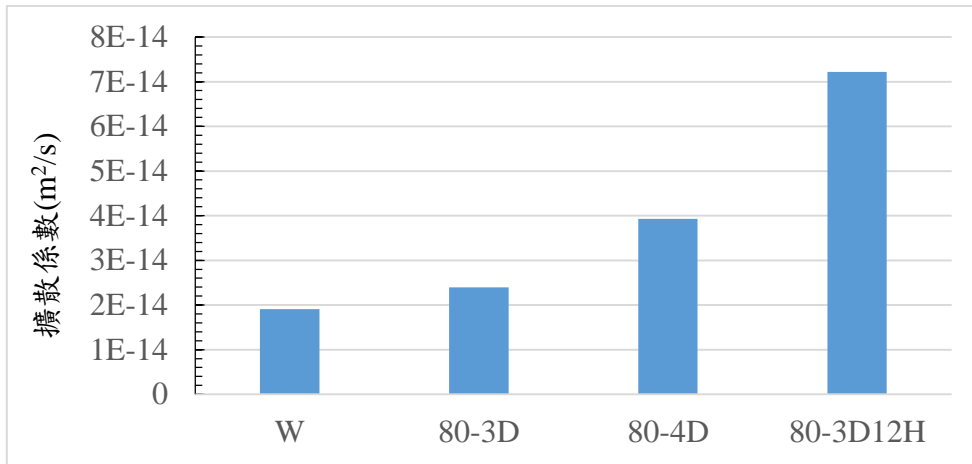


圖 4.28 配比 M 齡期 365 天各養護方式瞬時擴散係數關係圖

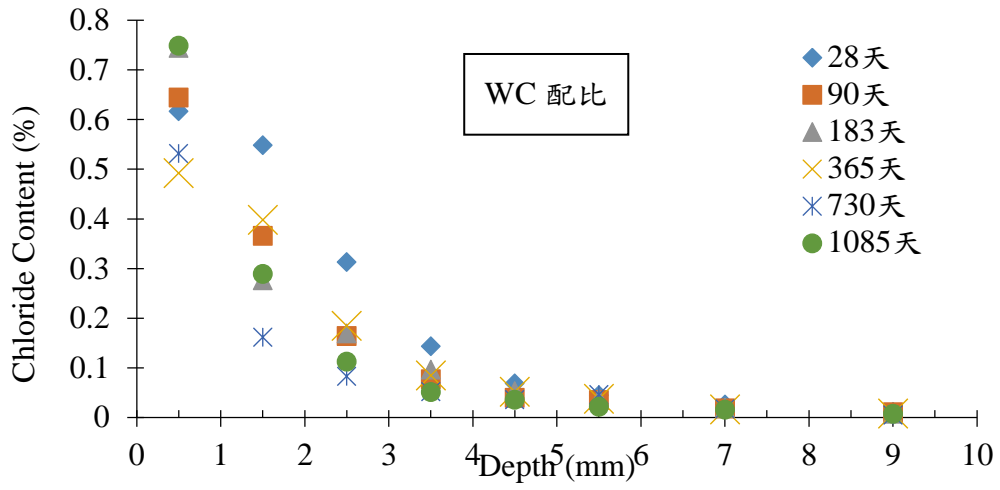
(二) 氯離子入侵試驗配比 C、M 的剖面濃度

配比 C 和配比 M 以不同養護溫度養護至預定齡期，接著浸泡 36 天氯化鈉之氯離子濃度剖面圖，由圖 4.29、4.30 可明顯看出養護齡期越長之混凝土受氯離子入侵時，能夠將氯離子有效的阻擋在表層，使氯離子被阻擋在表層無法快速向內擴散，常溫養護齡期達 1085 天及高溫養護齡期達 365 天時，因混凝土水化程度較完全，使氯離子較難向內部入侵於 3.5 mm 處可看出其氯離子濃度明顯低於先前實驗齡期。

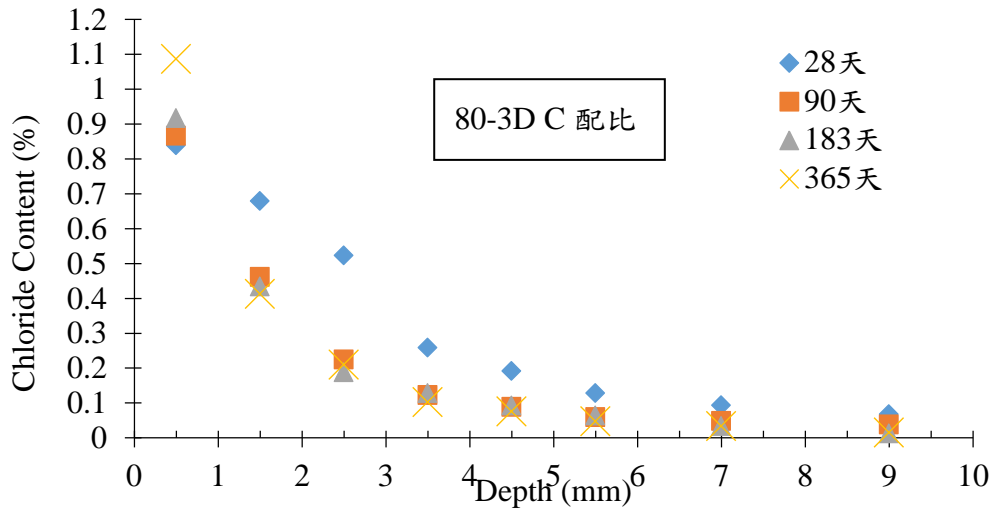
比較經高溫養護後，試體於早期時，較常溫養護有較良好阻擋氯離子滲透的能力，推論因為高溫養護使水化速率增快，增強早期阻擋氯離子滲透能力，使混凝土在最容易受到氯離子入侵之齡期，能有良好的抵抗能力。而後續齡期混凝土因持續水化，使混凝土更加緻密，因此阻擋氯離子入侵之能力能持續上升。

未來將持續進行實驗，以驗證混凝土在持續水化後，阻擋氯離子入侵之能力能持續上升，並依據更多的實驗數據進行時

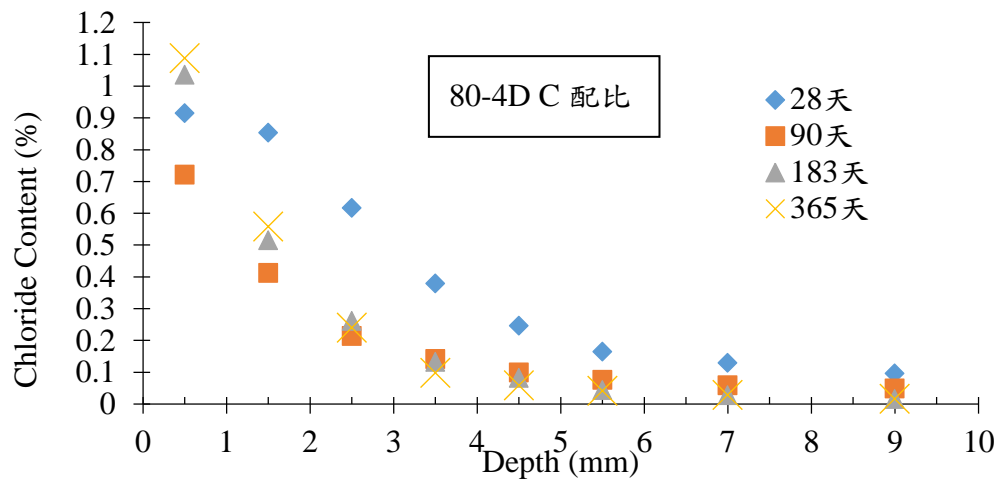
間推估，用以增加時間推估的正確性。



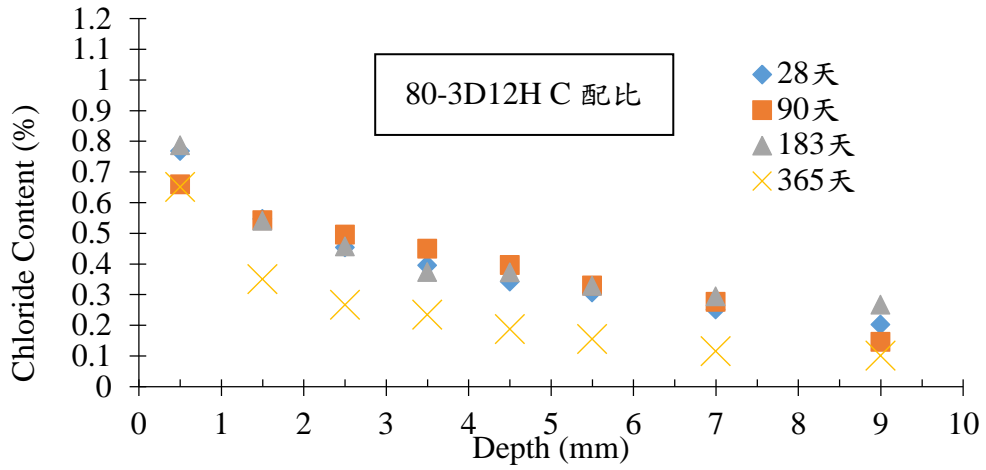
(a)



(b)

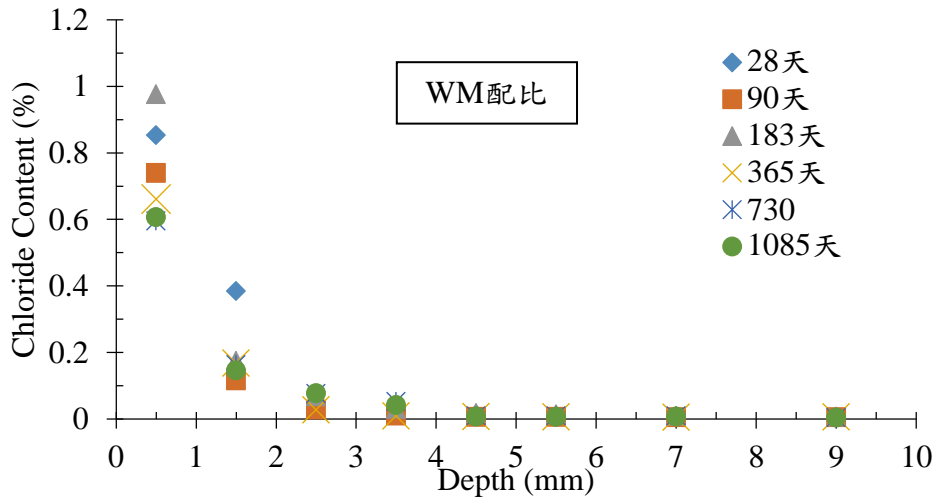


(c)

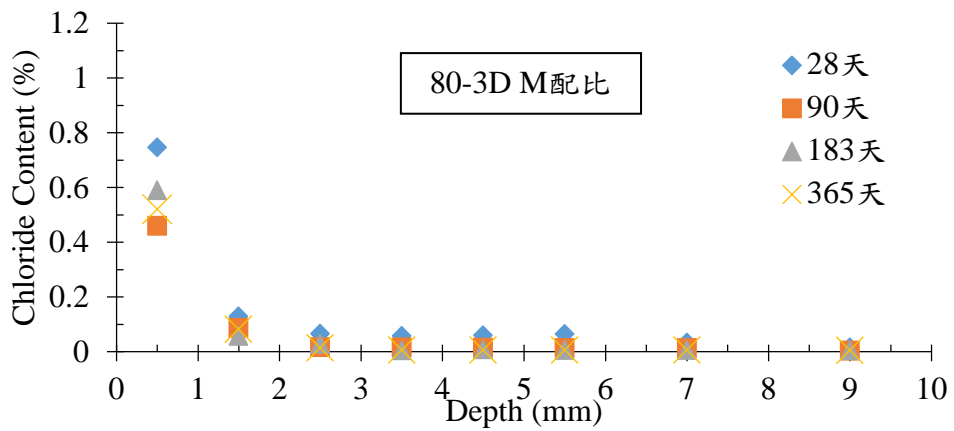


(d)

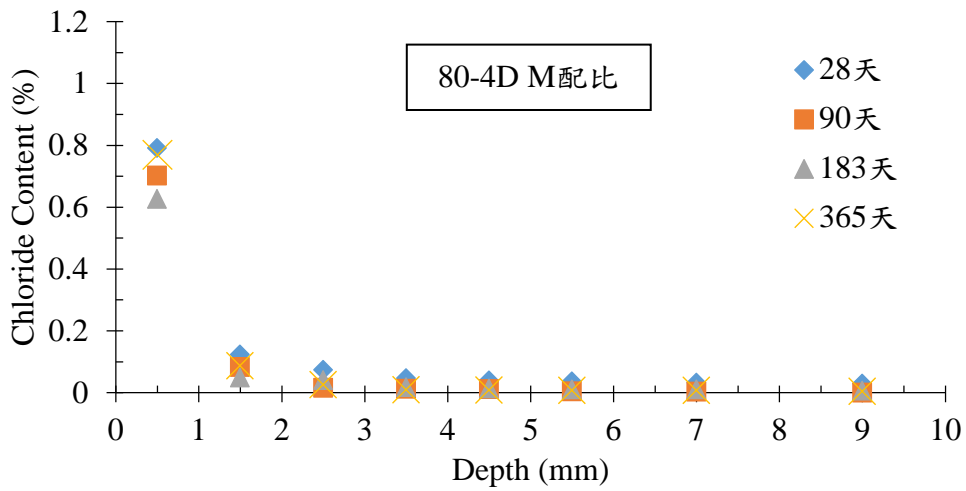
圖 4.29 配比 C 不同齡期與不同養護之氯離子濃度剖面圖



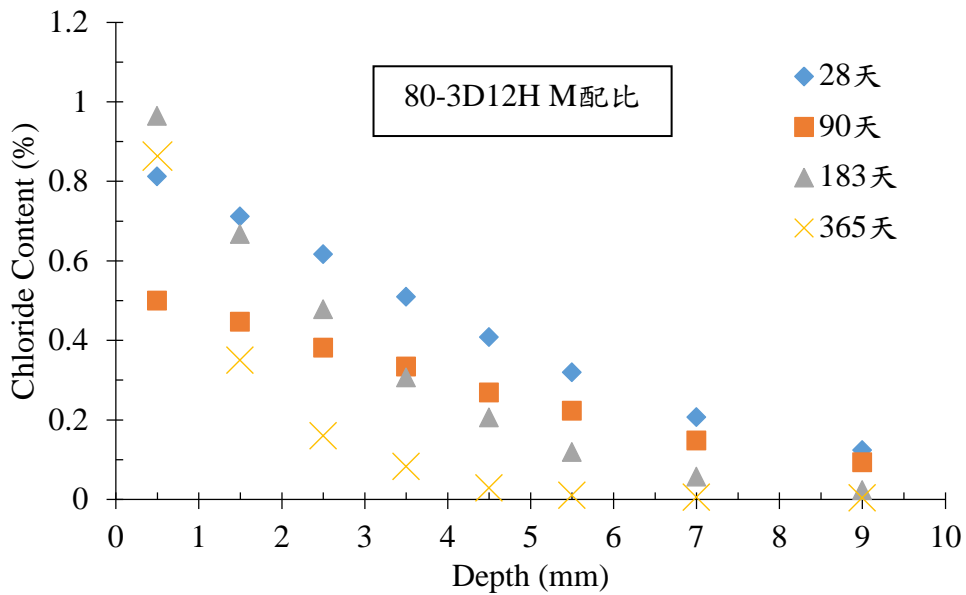
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4.30 配比 M 不同齡期與不同養護之氯離子濃度剖面圖

(三) 時間因子 m 值計算

依據 ASTM C1556 所製作的試體，浸泡飽和石灰水於預定齡期後，再利用氯化鈉溶液浸泡 36 天，所測得氯離子含量為試體指定齡期瞬時擴散係數所表現出之濃度剖面，故不需要再經過有效時間的轉換，求得瞬時擴散係數值以及表面氯離子濃度值。表 4.6 為常溫養護配比 C 與配比 M 擴散係數與時間

的關係，將齡期及擴散係數繪製雙對數圖，求出斜率即稱時間因子 m ，如圖 4.31 與圖 4.32，得配比 C 時間因子 $m = 1.06$ ；配比 M 時間因子 $m = 0.667$ ，因高溫養護試體齡期僅達 365 天，故暫不探討其時間因子。

表 4.6 配比 C 與配比 M 瞬時擴散係數與時間的關係

齡期(days)	配比 C	配比 M
	瞬時擴散係數(m ² /s)	
28	1.21E-12	2.36E-13
90	2.76E-13	1.08E-13
183	2.52E-13	9.22E-14
365	1.23 E-13	1.91 E-14
730	4.25E-14	3.39E-14
1085	1.88E-14	2.28E-14

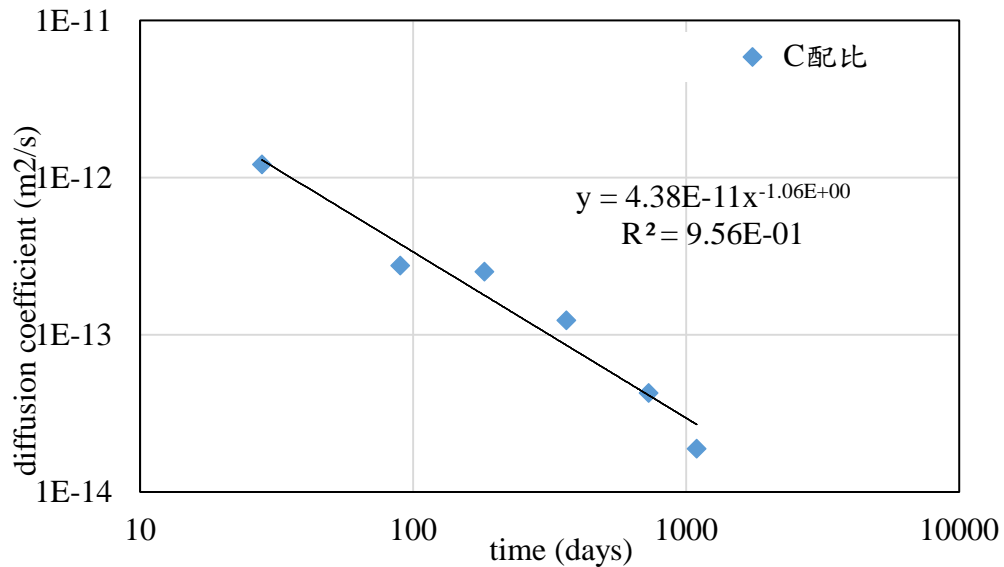


圖 4.31 配比 C 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖

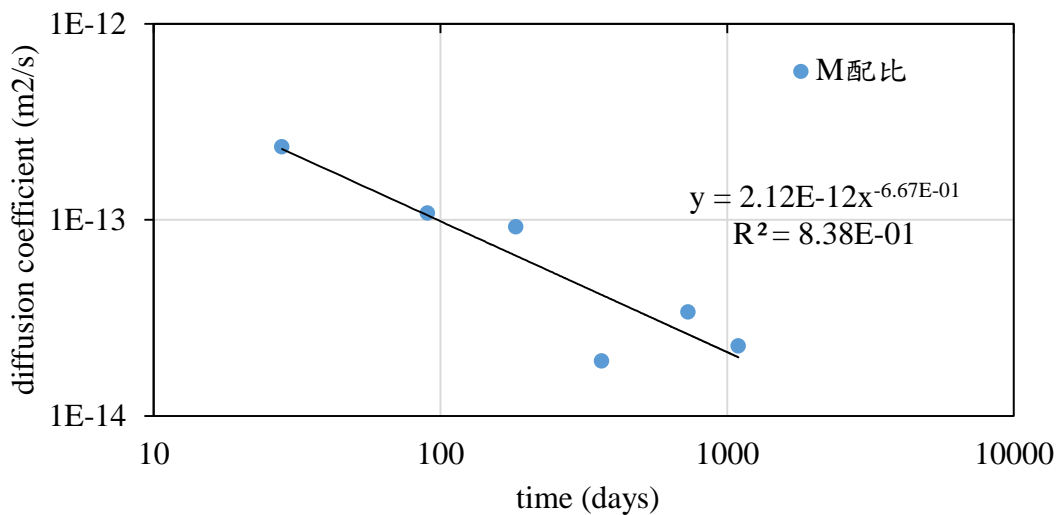


圖 4.32 配比 M 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖

(四) 氯離子擴散係數之推估方法

研究依據 ASTM C1556 規範製作配比 C 及配比 M 之試體，試驗齡期為泡飽和石灰水養治到預定齡期，然後浸泡於 165 ± 1 g/L 氯化鈉水溶液中，皆 36 天。以配比 C 進行說明，其參考時間(t_{ref})為 28 天，參考擴散係數值(D_{ref})即為瞬時擴散係數 $1.28E-12$ m²/s，時間因子推算結果為($m = 1.06$)，代入公式，依照 Life-365 程式計算程序，以 30 天為時間步驟推算至 25 年的瞬時擴散係數，同 Life-365 所述，25 年時水化作用已經完成，25 年後的瞬時擴散係數皆等於 $D(25 \text{ 年}) = 2.78E-15$ m²/s，此瞬時擴散係數推算曲線繪至 50 年，以此方式推算的結果與實驗量測之結果進行比較，如圖 4.33。

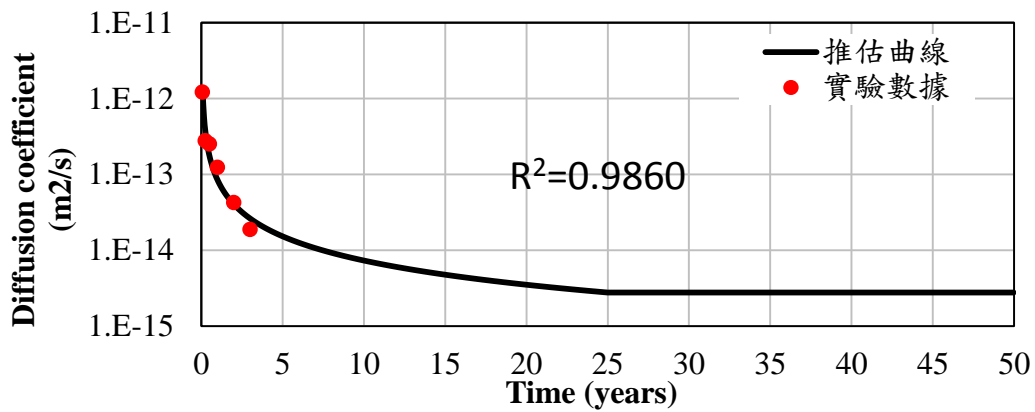


圖 4.33 配比 C 瞬時擴散係數推估及實驗數據比較圖

如前述方法，進行瞬時擴散係數及實驗數據的比較。配比 M 參考時間(t_{ref})為 28 天，其參考擴散係數值(D_{ref})即為瞬時擴散係數 $2.19E-13 \text{ m}^2/\text{s}$ ，時間因子推算結果為($m=0.667$)，代入式(2.12)，依照 Life-365 程式計算程序，以 30 天為時間步驟推算至 25 年的瞬時擴散係數，同 Life-365 所述，25 年時水化作用已經完成，25 年後的瞬時擴散係數皆等於 $D(25 \text{ 年})=4.84E-15 \text{ m}^2/\text{s}$ ，此瞬時擴散係數推算曲線繪至 50 年，如圖 4.34。

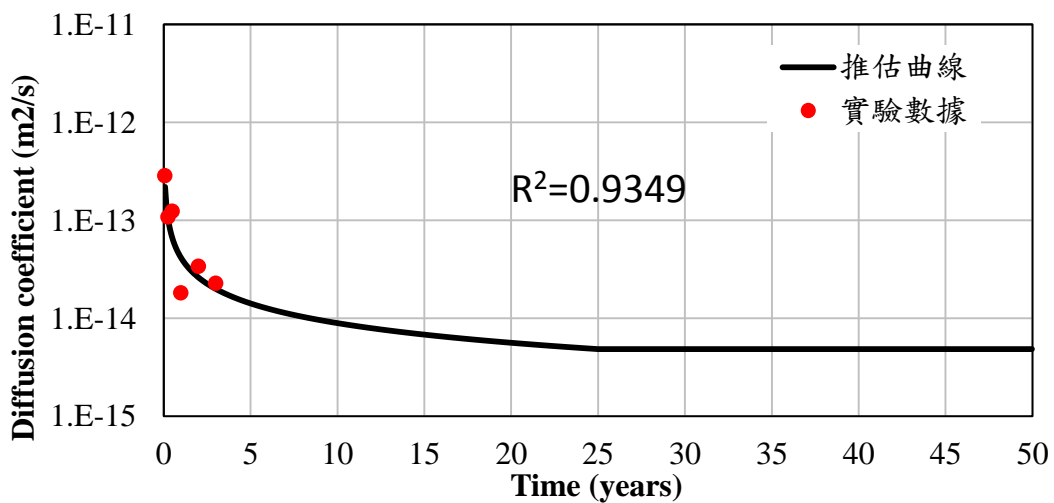


圖 4.34 配比 M 瞬時擴散係數推估及實驗數據比較圖

八、服務年限推估

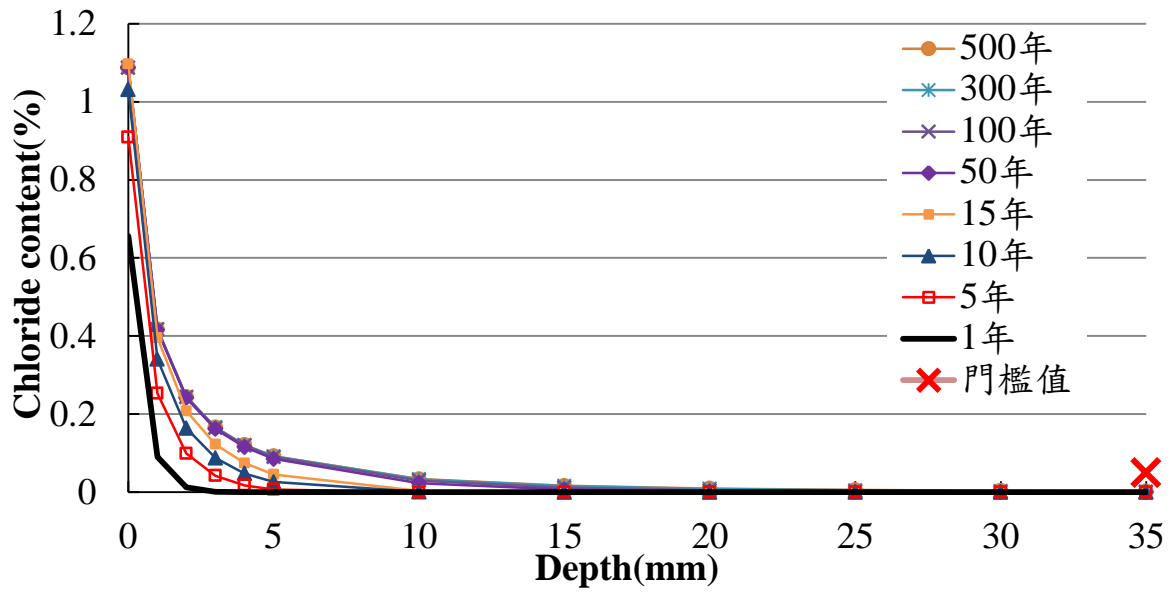
(一)處置場封閉後受氯離子入侵之使用年限推估

本研究所推估之「使用年限」定義為氯離子入侵混凝土容器，於混凝土深度 35 mm 即容器壁厚一半處，累積至氯離子引發腐蝕之門檻值(本研究採用 0.05 %)之時間。此外，因低放射性廢棄物最終處置設施之混凝土障壁，其設計服務年限需達三百年以上。

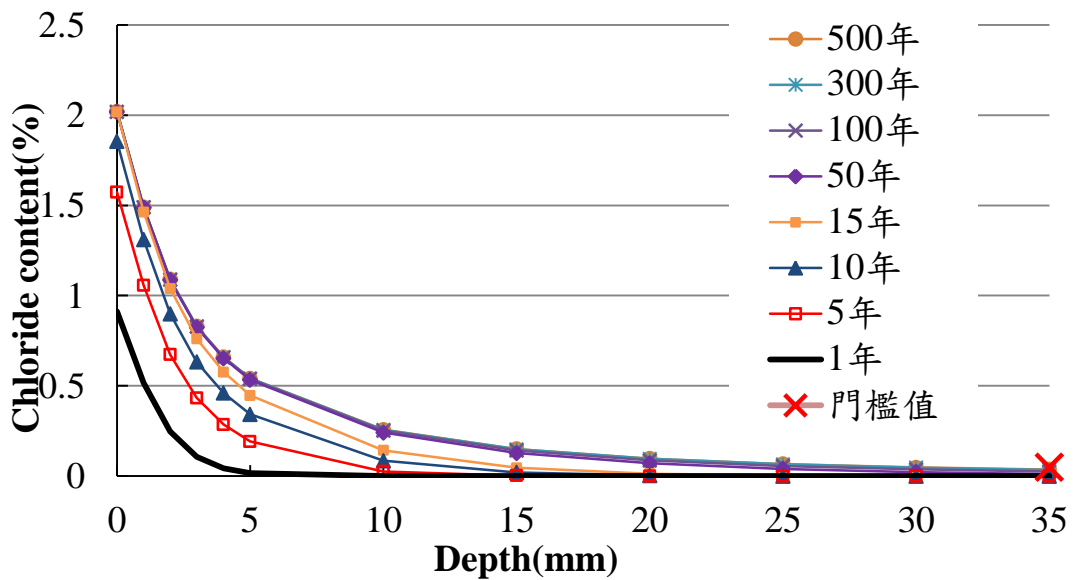
混凝土使用年限推估方法，以 15 年最大表面氯離子濃度值 C_{max} 為例，假設混凝土於水化完成時(即為 25 年)，開始遭受氯離子入侵。推估使用年限，其處置容器，厚度為 7 公分厚，避免氯離子向內入侵太快，採保守值 3.5 公分處，觀測是否超過腐蝕門檻值 0.05%。

圖 4.32 為處置場封閉後受氯離子入侵濃度剖面推估圖，(a)配比 HIC-C (b)配比 HIC-M，如圖所示，經 25 年水化完成後，以遭受氯離子入侵時間起算第一年濃度剖面，及受氯離子入侵 100 年後(實際時間為 125 年)，亦繪於圖 4.35。

若混凝土於製作完成經長時間後，才遭受氯離子入侵，表面氯離子濃度不斷增加，但由於擴散係數極低，其向內擴散的速率非常緩慢，經 500 年後在 35 mm 處的氯離子濃度仍未超過門檻值，表示這兩個配比服務年限超過 500 年。



(a) 配比 HIC-C.



(b) 配比 HIC-M

圖 4.35 處置場封閉後受氯離子入侵濃度剖面推估圖

伍、結論

本研究期望尋求新方法能讓障壁混凝土耐用度提高，利用不同養護方式，觀察能否提升混凝土之耐用程度，達到提高品質的效果。將混凝土基本性質試驗分為力學試驗、孔隙率試驗、孔隙粒徑分布與耐久性試驗，評估不同養護方式與養護齡期對障壁混凝土之影響。

結論如下：

- 一、使用高溫浸水養護促使混凝土加速卜作嵐反應，有助於提升早期抗壓強度，可縮短所需養護齡期即可完成養護程序且提升混凝土品質，降低施工期間失敗風險。
- 二、兩種障壁用混凝土經過高溫養護後，體積改變量有明顯的下降，能減少混凝土因乾燥而變形的情况。
- 三、由孔隙率及氮氣吸附試驗結果得知經熱養護後的混凝土早期的內部孔隙較減少，變得更加緻密，所以熱養護可縮短所需養護時間即可到達所需的混凝土品質，降低早期受損的風險。
- 四、混凝土經高溫養護對其品質確實有提升效果，以 80°C 熱水養護 3 天在實驗結果整體上有最佳的表現，而以 80°C 養護 3 天再以 200°C 乾養護 12 小時(80-3D12H)，雖然在抗壓試驗有最高強度，但於孔隙率試驗、氯離子入侵試驗及電阻率試驗結果顯示，其養護方式所產生之孔隙較其他養護方式多，而低放廢棄物處置場混凝土障壁的安全要求高，因此不建議使用。
- 五、配比 C、M 之電阻率與孔隙率及電阻率與擴散係數間，有顯著的關係，表示以電阻率試驗結果來評估本研究之配比混凝土品質是可行的，但仍須歸納出其關係性，才能建立出檢測低放

射性盛裝容器之混凝土其電阻率檢測標準。

六、氯離子入侵試驗將養護至預訂齡期之混凝土浸泡氯離子溶液 36 天，混凝土隨著齡期增加水化程度上升，使得氯離子入侵趨於困難，故瞬時擴散係數隨齡期增加而降低。

七、使用 ASTM C1556 方法對混凝土受氯離子入侵的服務年限進行推估，此法為試體養護至齡期才受到氯離子入侵，較能模擬隨時間增加而擴散係數降低的特性，但還尚需更長期的試體氯離子入侵濃度數據強化數據的有效性及可信度。

陸、參考文獻

1. 行政院原子能委員會：<http://www.aec.gov.tw/>。
2. 台灣電力公司：<http://www.taipower.com.tw/>。
3. DataFit (URL)：<http://www.curvefitting.com/>。
4. Life-365 (URL)：<http://www.life-365.org/>。
5. 彭琦茵，「障壁混凝土受氯離子入侵剖面及使用年限推估之方法比較」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，(2015)。
6. 陳品臻，「低放處置場混凝土障壁受氯離子入侵之使用年限推估」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，(2015)。
7. 吳桂卿，「不同養護溫度條件對提升障壁混凝土品質之成效」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，(2016)。
8. 廖文佑，「低放射性廢棄物盛裝容氣混凝土品質檢測之研究」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，(2017)。
9. 黃然，「不同養護條件下添加飛灰或爐石對水泥質材料性質影響之研究」，博士論文，國立台灣海洋大學河海工程研究所，基隆(2005)。
10. 盧凱偉，「超高強活性粉混凝土高壓高溫製程之研究」，碩士論文，國立台灣大學土木工程研究所，(2001)。
11. 王心荻，「試體參數對混凝土電阻值影響之研究」，碩士論文，國立台灣海洋大學，基隆(2009)。
12. 吳建興，「活性粉混凝土補強混凝土構件與耐久性能之測試研究」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系，台中 (2003)。
13. 李金輝，「黃氏富勒緻密配比設計法應用於活性粉混凝土性質之研究」，碩士論文，國立台灣科技大學，台北(2006)。

14. A.E.Ahmed, A.H.Al-Shaikh and T.I.Arafat.,“ Residual compressive and bond strengths of limestone aggregate concrete subjected to elevated temperatures”,*Magazine of Concrete Research*, No. 159, pp.117-125(1992).
15. Ali Akbar Ramezani pour et al.,” Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength”, *Construction and Building Materials*, Pages 2472–2479(2011).
16. Ann, K. Y., Ahn, J. H., and Ryou, J. S., “The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures,” *Construction and building materials*, Vol. 23, No. 1, pp. 230-245(2009).
17. Chalee, W., Jaturapitakkul, C., and Chindapasirt, P., “Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater,” *Marine structures*, Vol. 22, No.1, pp. 341-353(2009).
18. Erik J. Sellevold.,“Mercury porosimetry of hardened cement paste cured or stored at 97°C”, *Construction and Building Materials*, Volume 4, pp.399-404(1974).
19. Gleize, P.J.P., “Microstructural investigation of a silica fume–cement–lime mortar,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No. 2, pp.171-175(2003)
20. Helene Zanni, Marcel Cheyrezy, Vincent Maret, Samuel Philippot, and Pedro Nieto.,“Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using “Si NMR”, *Cement and concrete research* , Volume 26, pp.93-100(1996).
21. Klieger, Paul, “Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength”,*ACI Journal*, Proceedings Vol.54, No.12, pp. 1063-1081 (1958).

22. Knut O.Kjellsen, Rachel J Detwiler, Odd E.Gjørsv.,“ Backscattered Electron Imaging of Cement Pastes Hydrated at Different Temperatures”, *Cement and Concrete Research* , Volume 4, pp.308-311(1990).
23. Lee, N. P. and Chisholm D. H., *Reactive Powder Concrete.*, Building Research Levy., Australia(2005).
24. Mangat, P. S., and Molloy, B. T., “Prediction of long term chloride concentration in concrete,” *Material and Structures*, Vol. 27, pp. 338-346(1994).
25. Marcel Cheyrezy., Vincent Maret. and Laurent Frouin., “Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete) ,” *Cement and concrete research* , Volume 25, pp.1491-1500(1995).
26. Mehta, P. K., *Concrete Structure Properties and Materials.*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A. (1986).
27. Morris,W., Moreno E.I. and SagiiCs, “Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a wenner array probe”, *Cement and Concrete Research* , Volume 26, pp.1779-1787(1996).
28. Nokken, M., Boddy, A., Hooton, R. D., and Thomas, M. D. A., “Time dependent diffusion in concrete—three laboratory studies,” *Cement and concrete research*, Vol. 36, No. 1, pp. 200-207(2006).
29. Ozkan Sengul,” Use of electrical resistivity as an indicator for durability”, *Construction and Building Materials*, Pages 434–441 (2014).
30. Papadakis V. G., “Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress,” *Cement and concrete research*, Vol. 30, No. 2, pp.291-299 (2000).
31. Pierre Richard.,and Marcel Cheyrezy.,“Composition of reactive powder concretes”, *Cement and concrete research* , Volume 25,

- pp.1501-1511(1995).
32. Rao G. A., “Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars,” *Cement and concrete research*, Vol. 33, pp. 1765-1770(2003).
 33. R. Gettu, “Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens”, *Materials and Structures*, pp. 31-37. (2005).
 34. Rob B. Polder, “Test methods for on site measurement of resistivity of concrete a RILEM TC-154 technical recommendation.”, *Construction and Building Materials*, pp. 125-131. (2001).
 35. Sellevold E.J. “Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, pp.723-728(1973).
 36. Sherman, R. M., David, M. B., and Pfeifer, D. W., “Durability aspects of precast prestressed Concrete-Part 1 and 2,” *Journal of PCI*, Vol. 41, No. 4, pp. 60-64(1996).
 37. Song, H.W., Lee, C.H., and Ann, K.Y., “Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments,” *Cement and concrete composites*, Vol. 30, pp. 113-121(2008).
 38. Stanish, K., and Thomas, M., “The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients,” *Cement and concrete research*, Vol. 33, pp. 55-62(2003).
 39. Stanish, K, and Thomas, M, “The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients”, *Cement and concrete research*, 33, p. 55-62(2003).
 40. Kang,S.T., Lee,B.Y., Kim,J.K.,and Kim,Y.Y., “The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete”, *Construction and Building Materials*, pp. 2450-2457. (2011).

41. Young, J. F., Mindess, S., and Darwin, D. (2002), *Concrete*, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A..
42. Zanni, H., M. Cheyrezy, V. Maret, S. Philippot and Nieto P., "Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using ^{29}Si NMR," *Cement and concrete research*, Vol.26, No. 1, pp.93-100 (1996).