

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(80-02)

計畫編號：107A018

受委託機關(構)：國立中央大學

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 107 年 2 月至 107 年 12 月

研究經費：新臺幣 54.2 萬元

核研所聯絡人員：陳鈺沛

報告日期：107 年 11 月 30 日

中文摘要

關鍵詞：氯離子、高溫養護、電阻率。

低放射性廢棄物最終處置設施中的混凝土障壁，因服務年限長，故須針對可能遭遇不良環境探討其使用年限，本研究嘗試以不同高溫養護方式，進一步提升障壁混凝土品質及耐久性能，並針對兩種障壁混凝土受到氯離子入侵進行服務年限的推算。

本研究延續以鋼纖維混凝土為處置場工程障壁材料，針對用於製作盛裝容器(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，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，採用不同的養護溫度，包括：(1)常溫 23°C (2)80°C 熱水養護三天(3) 80°C 熱水養護四天，並分別進行抗壓強度試驗、孔隙率分析、混凝土乾縮試驗及表面電阻率量測，以觀察及評估高溫養護提升混凝土耐久性的成效。此外，由於預定採用配比添加鋼纖維以增加混凝土抗彎強度，故針對混凝土中鋼纖維分布情形，建立方法進行統計分析，評估其分布之均勻性。

研究結果顯示，經高溫養護之 C 配比與 M 配比在抗壓強度、孔隙率、乾縮量及表面電阻率等方面的表現，都優於常溫養護之配比，顯示高溫養護確實有助於提升障壁混凝土的品質。此外，106 年期末報告(II)指出以 80°C 養護 3 天再以 200°C 乾養護 12 小時(80-3D12H)，此養護方式產生之孔隙較多，可能對混凝土長期性能造成不良影響，因此後續研究不再考慮此種養護方式。

英文摘要

Concrete used as barrier material for the disposal of low-level radioactive wastes is expected to serve a long time. Thus the quality of concrete needs be enhanced to assure long term serviceability under adverse environments. In this study, high-temperature curing of concrete mixes was employed as a means of improving the quality of barrier concrete.

Continuing previous studies on steel fiber concrete used in the 2 different mixes, namely mix C for container body and mix M for sealing, specimens were prepared according to ASTM C1556 and determined for their chloride diffusion coefficient at extended periods. Concrete specimens cured at different temperatures, including (1)23°C, (2)80°C for 3 days, and (3)80°C for 4 days, were tested and the results evaluated for improvements in long term quality. In addition, the homogeneity of fiber distribution in the mix were measured by image analysis and statistical results were analyzed.

The results show that concrete specimens cured at elevated temperature exhibit higher compressive strength, lower porosity, lower drying shrinkage, and higher surface resistivity than those cured at room temperature. This indicates that high temperature curing improves the quality of concrete effectively. It is also noted from past year's finding that concrete specimens subjected to high temperature curing followed by oven-drying at 200°C showed excess porosity which is judged to be detrimental to long term performance. Hence this curing process will no longer be considered for future study.

目錄

中文摘要	2
英文摘要	2
壹、計畫緣起與目的	10
一、研究背景	10
二、研究目的	11
三、研究內容	12
貳、文獻回顧	13
一、高溫養護之影響	13
二、養護溫度對混凝土孔隙率的影響	16
三、長期氯離子浸泡	16
四、混凝土表面電阻試驗方法	16
五、影響電阻率因素	17
六、鋼纖維分佈均勻性	20
七、混凝土收縮變形	21
八、不同飽和方法對混凝土孔隙率量測影響	23
九、氯離子入侵模式	24
十、程式 LIFE-365 簡介	28
十一、服務年限推估模式	32
十二、計算程序與 LIFE-365 驗證	37
參、研究方法與過程	40
一、實驗材料	40
二、試驗規劃	44
三、試驗流程	45
四、配比	46
五、試驗方法	48
肆、主要發現與結論	55

一、混凝土坍度與凝結時間試驗	55
二、抗壓強度試驗	56
三、孔隙率試驗	58
四、孔隙分佈與孔隙結構分析	61
五、表面電阻試驗	72
六、乾縮試驗	77
七、氯離子入侵混凝土濃度量測與分析	79
八、服務年限推估	93
九、鋼纖維均勻性分析	95
伍、結論	98
陸、參考文獻	100

圖目錄

圖 2.1 不同養護溫度對抗壓強度之影響(Kaffayatullah Khan et al., 2017)	13
圖 2.2 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響 (莊美玲, 2014).....	14
圖 2.3 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響 (Lee and Chisholm., 2005)	15
圖 2.4 活性粉混凝土壓汞試驗結果(Cheyrezy et al., 1995).....	16
圖 2.5 不同溫度對表面電阻率影響(Ozkan Sengul,2014)	18
圖 2.6 圓柱試體電阻率修正因子	19
圖 2.7 試體切割方式示意圖	21
圖 2.8 不同鋼纖維含量長度變化量關係圖(李金輝, 2006).....	23
圖 2.9 不同飽和方式之孔隙率 (Safiuddin et al.,2005)	24
圖 2.10 混凝土吸附作用示意圖(Zibara et al., 2000).....	26
圖 2.11 水膠比或添加礦物摻料對表面濃度之影響(Sherman, 1996).....	28
圖 2.12 程式 Life-365 介面	29
圖 2.13 程式 Life-365 使用介面	29
圖 2.14 服務年限(初始階段 t_i +腐蝕階段 t_p).....	32
圖 2.15 實驗與推估模型之濃度剖面比較(Ann et al., 2009).....	33
圖 2.16 實驗與推估模型之濃度剖面比較(Song et al., 2008).....	33
圖 2.17 各時間名稱之定義圖(Nokken et al.,2006)	34
圖 2.18 代碼 W40D55 差值法與程式結果比較圖.....	39
圖 3.1 粗粒料粒徑分佈曲線圖.....	42
圖 3.2 細粒料粒徑分佈曲線圖	43
圖 3.3 試驗流程圖	44
圖 3.4 混凝土浸泡飽和石灰水示意圖	50
圖 3.5 試體的切割尺寸圖	50
圖 3.6 混凝土浸泡 NaCl 溶液示意圖	50
圖 3.7 試體分層示意圖	51
圖 3.8 研磨後的試體與其分層粉末	51
圖 3.9 研磨後的試體與其分層粉末分析階段	51
圖 3.10 孔隙率試驗試體	53

圖 3.11 混凝土電阻值量測圖.....	54
圖 4.1 M 配比坍度試驗.....	55
圖 4.2 C 配比坍度試驗.....	56
圖 4.3 C 配比 80°C 養護方式對抗壓強度之影響.....	57
圖 4.4 M 配比 80°C 養護方式對抗壓強度之影響.....	58
圖 4.5 C 配比養護方式與孔隙率關係圖.....	59
圖 4.6 M 配比養護方式與孔隙率關係圖.....	59
圖 4.7 養護條件對 C 配比孔隙率之影響.....	61
圖 4.8 養護條件對 M 配比孔隙率之影響.....	61
圖 4.9 C 配比不同齡期孔隙體積分布圖.....	65
圖 4.10 M 配比不同齡期孔隙體積分布圖.....	67
圖 4.11 C 配比不同齡期孔隙結構關係圖.....	70
圖 4.12 M 配比不同齡期孔隙結構關係圖.....	72
圖 4.13 28 天齡期不同水灰比與電阻率關係圖.....	73
圖 4.14 水膠比 0.24 之不同鋼纖維含量與電阻率關係圖.....	74
圖 4.15 C 配比齡期與電阻率關係圖.....	75
圖 4.16 C' 配比齡期與電阻率關係圖.....	75
圖 4.17 M 配比齡期與電阻率關係圖.....	76
圖 4.18 養護條件對 C 配比乾縮率之影響.....	78
圖 4.19 養護條件對 M 配比乾縮率之影響.....	79
圖 4.20 配比 C 各齡期與瞬時擴散係數關係圖.....	82
圖 4.21 配比 M 各齡期與瞬時擴散係數關係圖.....	82
圖 4.22 配比 C 齡期 365 天各養護方式瞬時擴散係數關係圖.....	83
圖 4.23 配比 M 齡期 365 天各養護方式瞬時擴散係數關係圖.....	83
圖 4.24 配比 C 不同齡期與不同養護之氯離子濃度剖面圖.....	85
圖 4.25 配比 M 不同齡期與不同養護之氯離子濃度剖面圖.....	86
圖 4.26 常溫配比 C 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖.....	88
圖 4.27 常溫配比 M 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖.....	88
圖 4.28 80-3D 配比 C 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖.....	89
圖 4.29 80-3D 配比 M 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖.....	90

圖 4.30 80-3D 配比 C 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖.....	91
圖 4.31 80-3D 配比 M 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖.....	91
圖 4.32 常溫配比 C 瞬時擴散係數推估及實驗數據比較圖.....	92
圖 4.33 常溫配比 M 瞬時擴散係數推估及實驗數據比較圖	93
圖 4.34 處置場封閉後受氣離子入侵濃度剖面推估圖	95
圖 4.35 圓柱試體上、中、下層之鋼纖維數量分析圖	97

表目錄

表 2.1 AASHTO T358 電阻率評估氯離子入侵可能性.....	17
表 2.2 不同探頭間距與試體尺寸修正後比較	20
表 2.3 不同搗實方式之各層鋼纖維分佈	21
表 2.4 程式 Life-365 參數設定範圍與試驗配比參數	30
表 2.5 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	31
表 2.6 台東與 Florida 各月均溫 (單位：℃).....	31
表 2.7 受氯離子入侵之混凝土時間因子可能範圍	36
表 2.8 計算濃度剖面方法比較	38
表 3.2 粗、細粒料物理性質	42
表 3.3 化學藥劑使用用途及來源	43
表 3.4 混凝土配比 C 與 M.....	47
表 3.5 水泥漿塊配比	47
表 3.6 養護方法	47
表 4.6 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	80
表 4.7 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	81
表 4.8 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	81
表 4.9 常溫配比 C 與配比 M 瞬時擴散係數與時間的關係	87
表 4.10 80-3D 配比 C 與配比 M 瞬時擴散係數與時間的關係	89
表 4.11 80-4D 配比 C 與配比 M 瞬時擴散係數與時間的關係	90

壹、計畫緣起與目的

一、研究背景

一般所稱的「核廢料」是指放射性廢棄物及可回收再利用之通過核子燃料，而「低放射性廢棄物」則為受放射性物質污染的物料，其輻射強度較弱。

低放射性廢棄物最終處置場的設計，世界各國皆採「多重障壁」的概念，也就是利用多項的防護措施，隔絕放射性廢棄物於人類生活環境之外；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。我國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，影響混凝土長期耐久性。本研究根據最終處置盛裝容器可能採用之混凝土配比，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。此外，為進一步提升盛裝容器混凝土之品質，採用高溫養護方式，以期改善混凝土微結構，並提升其性能。最後，針對常溫與高溫養護之混凝土，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護的效能。

為了提升低放射性廢棄物最終處置設施之安全性，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使用混凝土障壁之參考。

二、研究目的

低放射性廢棄物最終處置場工程障壁主要由混凝土所構成，但不同於一般結構物之混凝土用途以 60 年至 100 年為設計年限，考慮須待廢棄物之放射性衰變至不影響人類生活，因此處置設施需要維持障壁功能至少 300 年以上。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，且因使用年限至少須達 300 年，故探討混凝土服務年限為重要探討議題。本研究主要採用 ASTM C1556 之氯離子浸泡試驗，針對混凝土受到氯離子入侵進行相關試驗，探討氯離子於混凝土內部入侵之速率及其隨齡期延長而變化之模式，以及氯離子於混凝土表面隨時間增加而累積的模式，參考 ACI 所發表之 Life-365 程式，以鋼筋混凝土受氯離子入侵之服務年限推估模式方法為依據，發展一套計算程序，應用於推估未來處置設施所使用之混凝土配比受到氯離子入侵之使用年限。

相較於一般混凝土養護程序需耗時較長才能達到設計強度，且在養護初期為混凝土品質最脆弱的時間，容易受到環境影響造成混凝土品質下降，為提升混凝土材料之品質，針對混凝土養護技術加以改善，提高養護溫度至 80°C，並以不同養護時間探討提高養護溫度對混凝土品質之改善情形。針對 C 配比及 M 配比採用高溫養護，探討不同養護時間及溫度對混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；同時也將對高溫養護試體量測氯離子擴散係數，以掌握養護方法對混凝土抵抗氯離子入侵能力的影響，並與常溫養護之混凝土加以比較。

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混凝土材料，受氯離子入侵，氯離子於混凝土內部擴散，並推估至內部鋼桶可能開始腐蝕之混凝土使用年限。其主要內容分述如下：

- (一)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，養護至不同之預定齡期，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，發展類似之計算程序，可用於推估未來處置設施可能使用配比其使用年限。
- (三)利用萬能試驗機進行抗壓試驗，對不同養治溫度及齡期之試體量測抗壓強度，藉以評估混凝土之基本品質。
- (四)藉由孔隙率試驗與氣體吸附試驗，探討混凝土之孔隙率、孔隙體積等特性，以與其耐久性質進行比對並建立相關性。
- (五)以混凝土表面電阻率試驗結果建立與抗壓強度試驗、孔隙率及氯離子擴散係數量測結果之關係，嘗試建立障壁混凝土以表面電阻率品質檢定之標準，以幫助未來在現地使用電阻率快速判定混凝土之品質。
- (六)將混凝土劃分不同區塊利用影像軟體進行鋼纖維分佈量測及分析，計算出單位面積鋼纖維的數量，並據以評估所製作鋼纖維混凝土中鋼纖維分布的均勻性。
- (七)量測各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，可於短時間養護齡期內使混凝土中卜作嵐材料與水泥卜作嵐反應(Pozzolanic reaction)加速進行，提升混凝土強度及耐久性。例如活性粉混凝土中添加高含量矽灰與石英粉等高活性卜作嵐材料，因此活性粉混凝土常需施行熱養護以加速其卜作嵐反應，利用養護溫度提升混凝土強度。

Kaffayatullah Khan et al. (2017)研究以不同火山灰之細度取代部分水泥在不同養護溫度下之水泥砂漿進行抗壓試驗，結果如圖 2.1 所示，隨著養護溫度的增加可加速提升混凝土強度，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(Pozzolanic reaction)及水化作用，達到早期強度的提升。

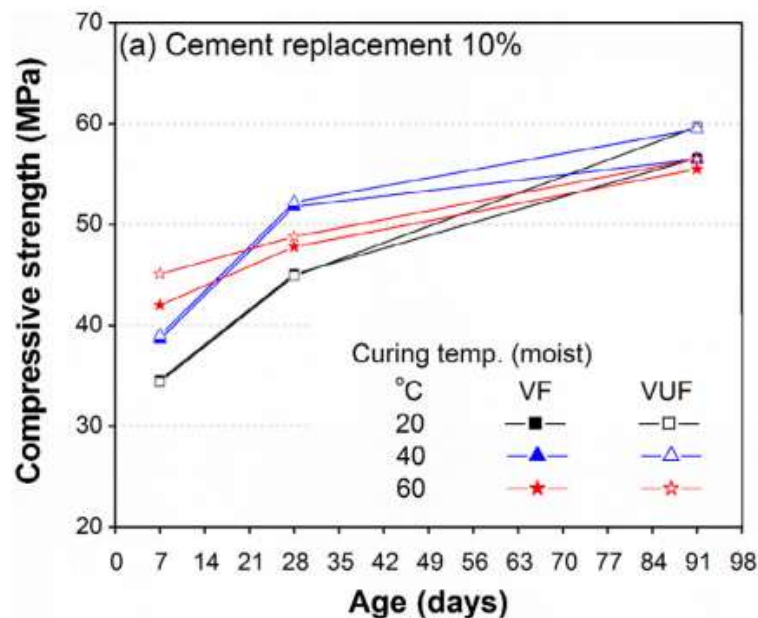


圖 2.1 不同養護溫度對抗壓強度之影響(Kaffayatullah Khan et al., 2017)

莊美玲(2014)採用 80°C 高溫方式養護活性粉混凝土，顯示高溫養護有助於提升抗壓強度，如圖 2.2 所示，利用高溫養護的方式加速水化作用形成之氫氧化鈣及水泥中所含矽鈣鋁化合物轉為 C-S-H 膠體，使活性粉漿體緻密程度提升，有利於強度提升與抵抗外界物質入侵之耐久性能。

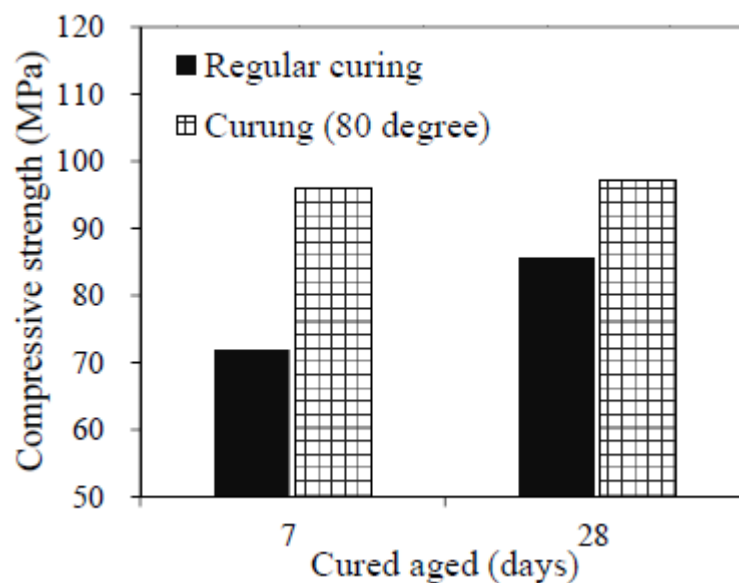


圖 2.2 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響 (莊美玲, 2014)

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，所得試體抗壓強度如圖 2.3 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)利用壓汞式孔

隙儀(Mercury porosimetry)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(配比 SC 為 1 atm、P 為 310 atm)之養護方式對於累積孔隙量之影響，結果如圖 2.4 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)，說明經過高壓處理有利於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。

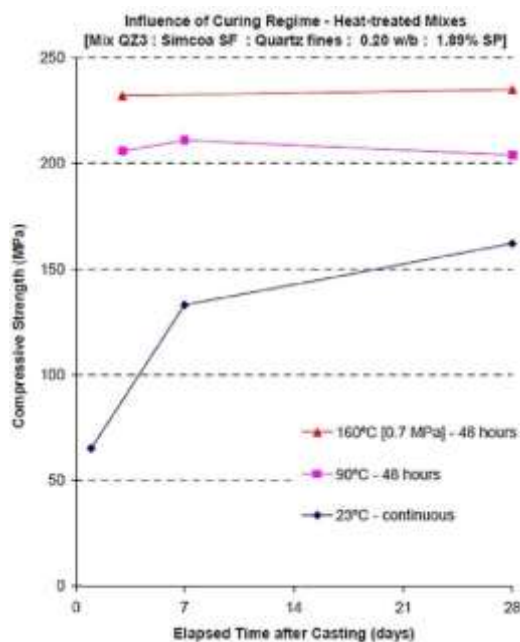


圖 2.3 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響 (Lee and Chisholm., 2005)

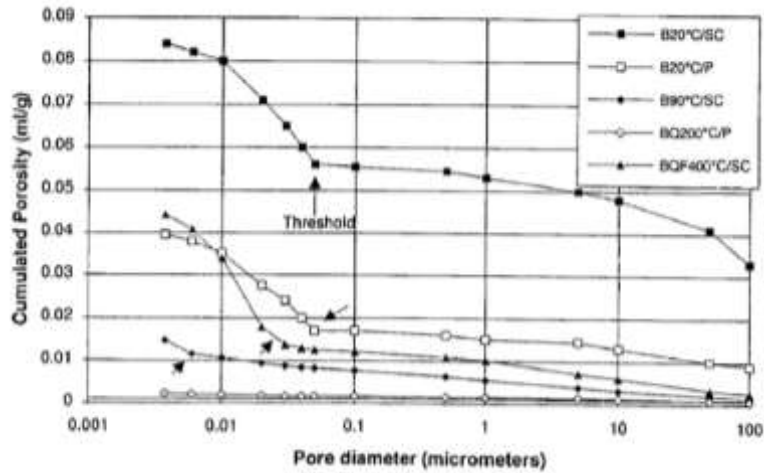


圖 2.4 活性粉混凝土壓汞試驗結果(Cheyrezy et al., 1995)

二、養護溫度對混凝土孔隙率的影響

水泥之水化反應在高溫時水化速率快，使水化產物快速的在水泥顆粒周圍形成高密度的擴散屏障，使得水化產物不均勻分布。且一般在高溫時 C_3S 會產生較粗糙的水化結構，導致孔隙體積增高。因混凝土之組成材料含有空氣和水，此具有較大的膨脹量，如因膨脹量不同而產生應力差，可能導致裂縫生成。

三、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 。同時依據 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，利用所發展之計算程序，應用於處置設施可能使用之混凝土配比，推估其使用年限。

四、混凝土表面電阻

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 T277 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

五、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

Ozkan Sengul(2014)將試體分別放入不同溫度中，量測之電阻率隨溫度升高而降低，如圖 2.5 所示。因為不同溫度會影響離子遷移率，當溫度增加時，孔隙溶液中導電因子活性增強，

電子移動得更快，提升試體導電能力，使量測之表面電阻率降低。AASHTO T358 規範中亦提到當溫度升高 1°C，可使飽和混凝土的電阻率降低約 3%。

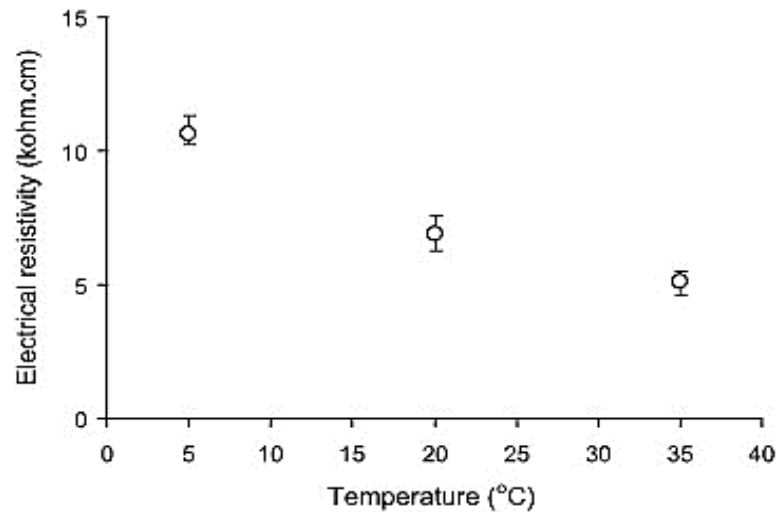


圖 2.5 不同溫度對表面電阻率影響(Ozkan Sengul,2014)

(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，故不同尺寸之試體若欲進行比較可依試體尺寸及使用的探頭間距利用圖 2.6 找出對照的修正係數 K 值，將所測得之電阻率與 K 值利用式 2.1 進行計算，求得接近真實的電阻值，比較結果如表 2.2 所示，兩個不同圓柱試體尺寸修正後之電阻率相差極小。

$$\rho = \frac{\rho_{\text{app}}}{K} \quad (2.1)$$

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

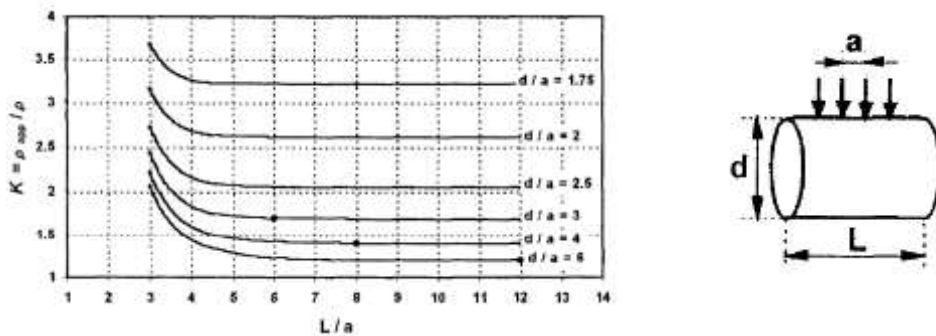


圖 2.6 圓柱試體電阻率修正因子

表 2.2 不同探頭間距與試體尺寸修正後比較

探頭間距 (cm)	$\phi 10 \times 20\text{cm}$			$\phi 15 \times 30\text{cm}$		
	原始 電阻值	K 值	修正後 電阻值	原始 電阻值	K 值	修正後 電阻值
2.5	3.86	1.4	2.76	3.22	1.2	2.68
5	6.73	2.7	2.49	3.91	1.7	2.30

六、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)的實驗中，將 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 圓柱試體力用三種不同搗實方式分別為人工搗實(分三層每層 25 下)、震動搗實(第一層以 50 Hz 的震動台震動 10 秒，其餘震動 15 秒)、過度震動搗實(第一層以 50 Hz 的震動台震動 30 秒，其餘震動 60 秒)對鋼纖維分佈均勻性的影響，方法是將試體橫向切割成高 75mm，取 β 、 γ 、 δ 試體面如圖 2.7 所示，計算混凝土單位面積內之數量，再以平均鋼纖維比較不同搗實方法之鋼纖維分布的均勻性，其結果如表 2.3 所示，以過動震動搗實可能使鋼纖維呈水平取向，故其各層之鋼纖維數量較其他兩種方式少，而人工搗實方式與正常震動搗實試驗結果相近，表示以此兩種方式較能使鋼纖維均勻分佈。

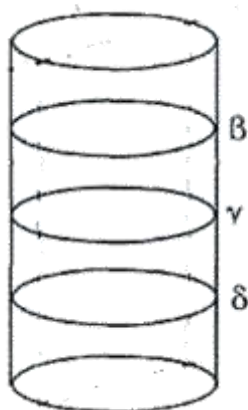


圖 2.7 試體切割方式示意圖

表 2.3 不同搗實方式之各層鋼纖維分佈

橫向切割(單位：fiber/cm ²)				
試體	距頂面 75 mm	距頂面 150 mm	距頂面 225 mm	平均值
正常震動搗實	0.45	0.51	0.53	0.50
過度震動搗實	0.38	0.30	0.35	0.34
人工搗實	0.54	0.49	0.51	0.51

七、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

指混凝土隨著水化作用的進行，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。

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

混凝土處於乾燥環境的情況下，混凝土內部的水份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。

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。

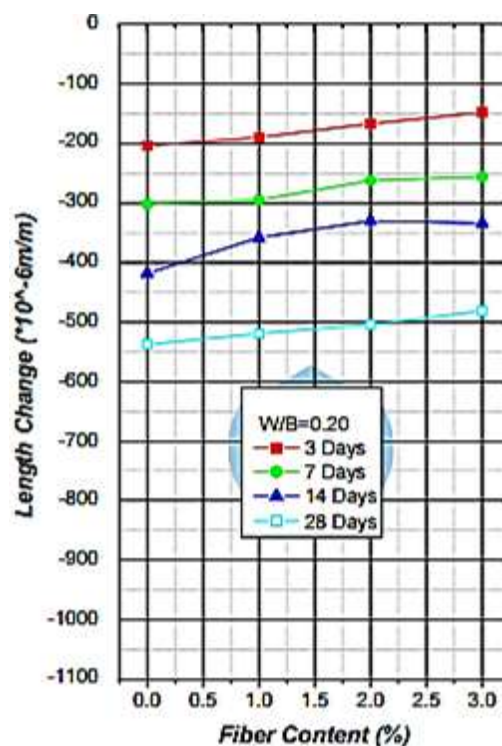


圖 2.8 不同鋼纖維含量長度變化量關係圖(李金輝，2006)

八、不同飽和方法對混凝土孔隙率量測影響

Safiuddin et al.(2005)將試體切成 $\phi 10 \times 5\text{cm}$ 利用三種實驗方式：1. 冷水飽和(CWS)，採 ASTM C642 方法在面乾內飽和步驟將試體浸泡於冷水 (21°C)中超過 48 小時。2. 沸水飽和(BWS)，亦採 ASTM C642 方法在面乾內飽和步驟將試體放置於容器中煮

沸 5 小時，再放置 19 小時待其冷卻後進行量測。3. 真空飽和 (VAS)，採 ASTM C1202 步驟，將試體放真空容器中，抽真空至壓力達 1mmHg 以下，關閉真空幫浦將試體靜置於真空容器三小時後，加入蒸餾水再抽真空一小時，再將試體浸泡水中 18±2 小時後進行量測。試驗結果如圖 2.9 所示，以真空飽和方式量測得之孔隙率較其他兩種方式高，表示以真空方式較能使殘餘氣泡排出，並在真空壓力環境下更能讓水填滿試體孔隙使試體達到最飽和狀態，而沸水飽和雖藉由較高溫度將氣泡排出試體，讓水進入試體孔隙中，但此方式不能去除所有殘餘氣泡，故為了讓試體達到飽和，建議採用真空方式來量測混凝土孔隙率。

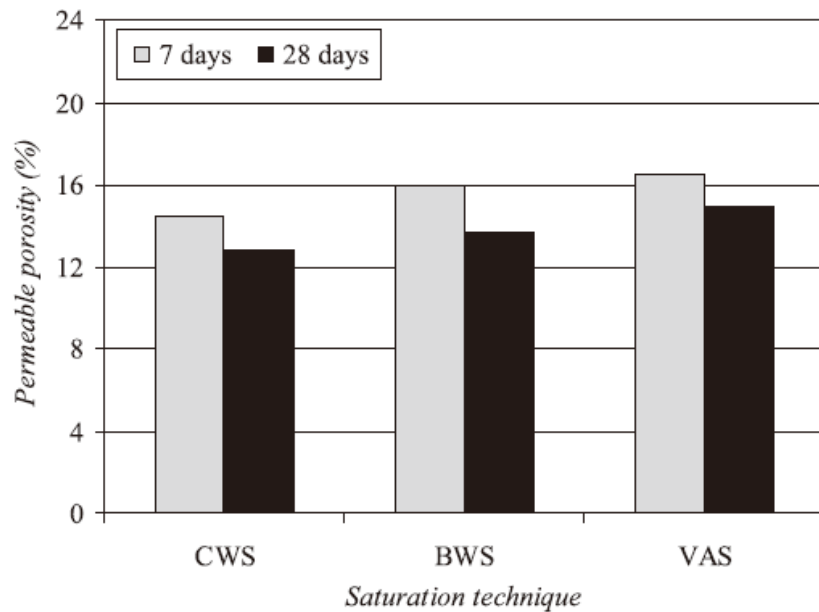


圖 2.9 不同飽和方式之孔隙率 (Safiuddin et al.,2005)

九、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：

1. 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)。

2. 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)。

3. 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)。

4. 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 2.10 所示(Zibara et al., 2000)。

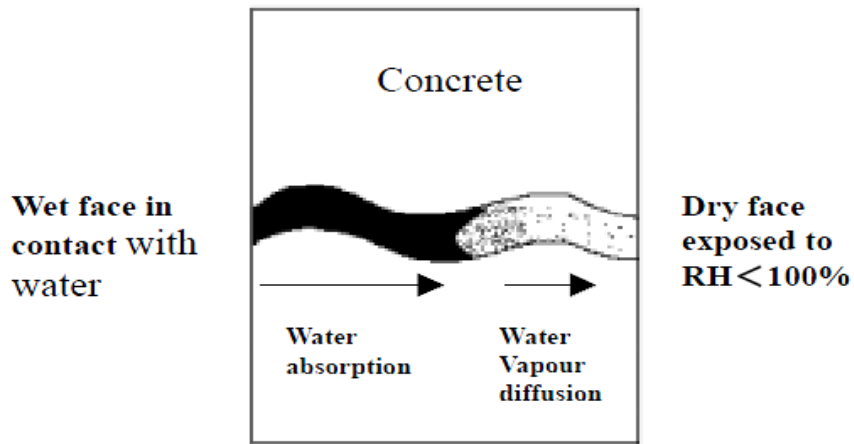


圖 2.10 混凝土吸附作用示意圖(Zibara et al., 2000)

(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

Fz：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)：

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_a \cdot t}} \right) \quad (2.6)$$

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 2.11 所示。

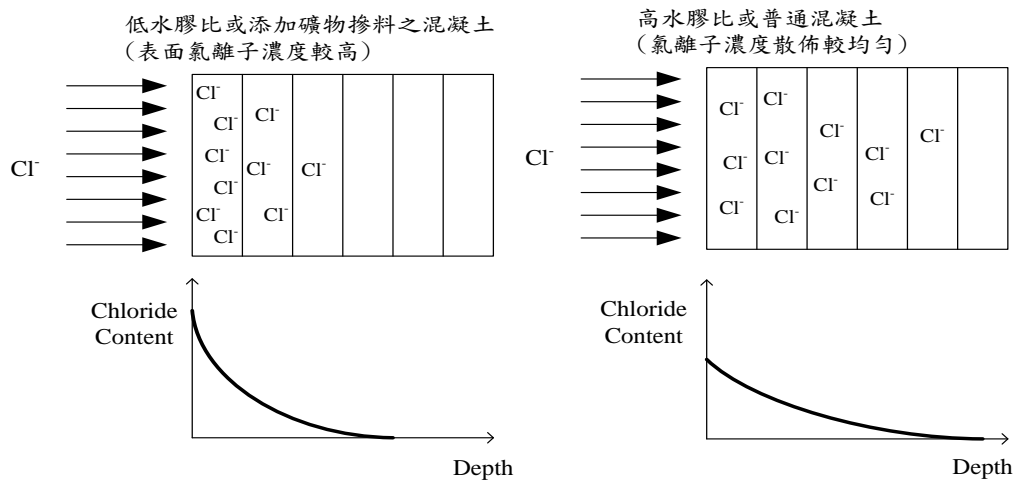


圖 2.11 水膠比或添加礦物摻料對表面濃度之影響(Sherman, 1996)

(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。因混凝土齡期增加水化程度也隨之增加，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)。

十、程式 Life-365 簡介

(一)發展背景

美國混凝土協會(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 其介面如圖 2.12 及圖 2.13 所示。

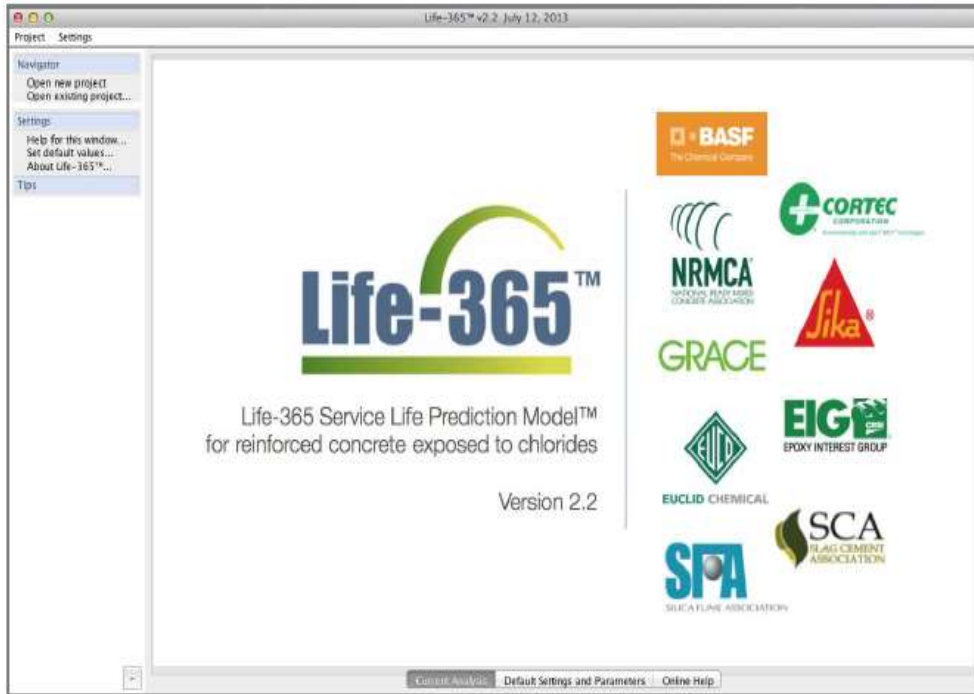


圖 2.12 程式 Life-365 介面

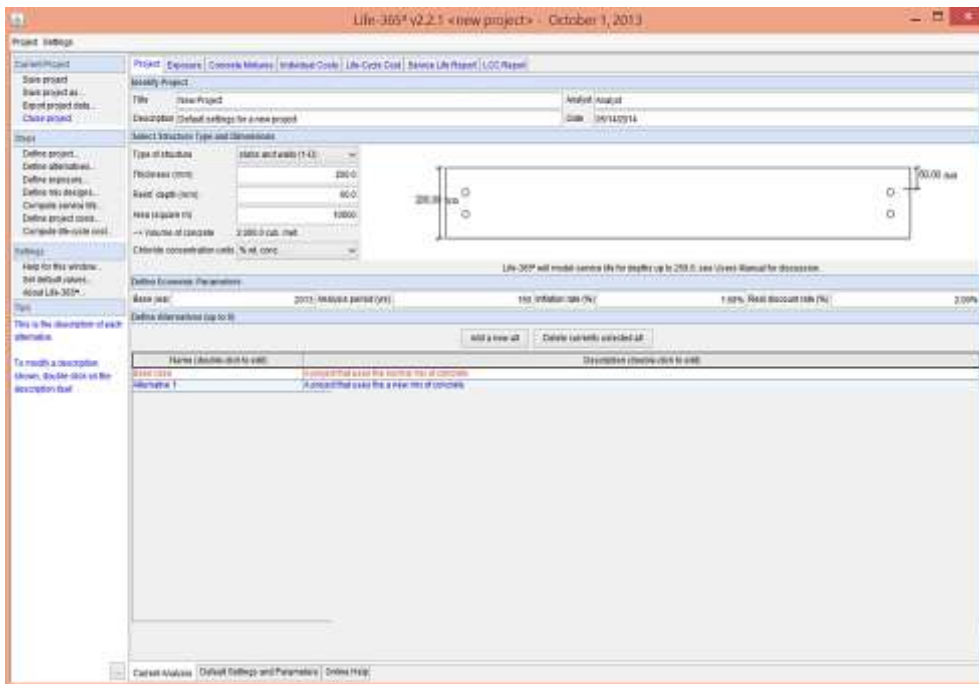


圖 2.13 程式 Life-365 使用介面

(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。

Life-365 程式中，結構物基本性質與混凝土材料參數如表 2.4 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 2.4 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 2.5 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 2.5 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地區各月均溫接近，如表 2.6 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 2.6 台東與 Florida 邁阿密各月均溫 (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 2.14。

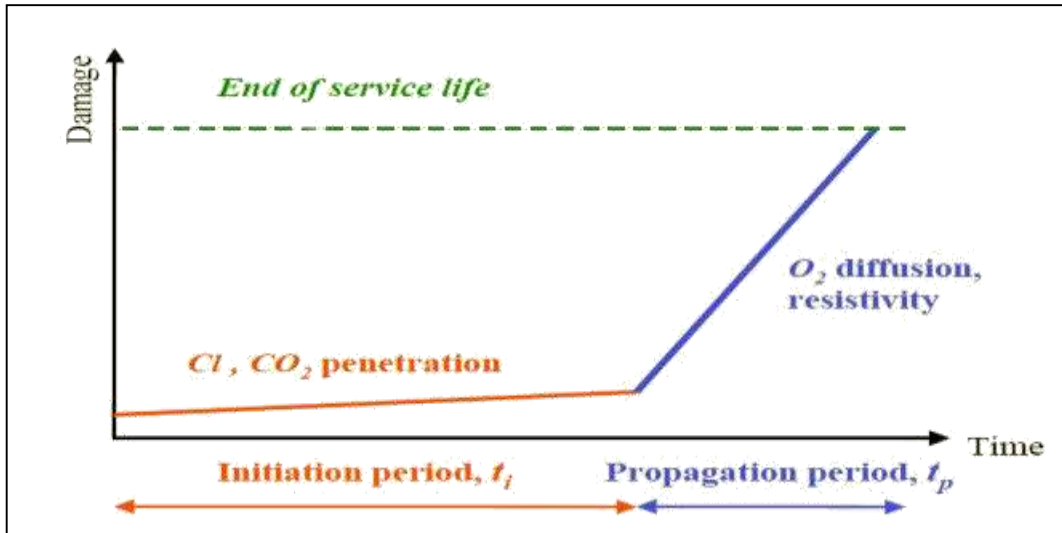


圖 2.14 服務年限(初始階段 t_i +腐蝕階段 t_p)

十一、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 2.15 及圖 2.16，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，Life-365 程式不使用試體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。

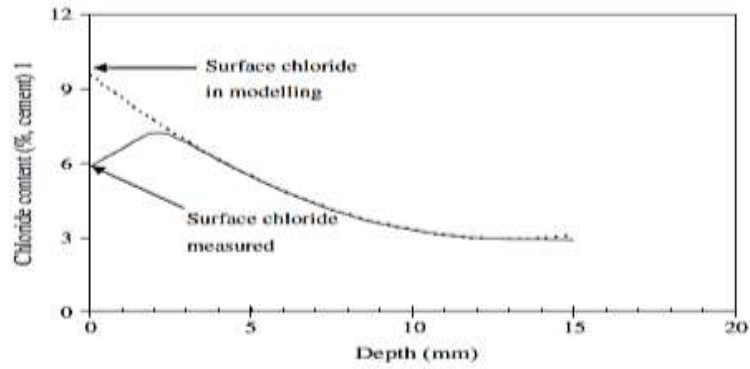


圖 2.15 實驗與模型推估之濃度剖面比較(Ann et al., 2009)

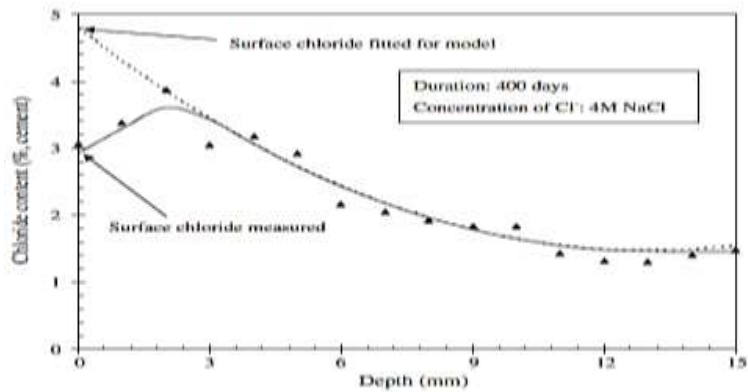


圖 2.16 實驗與模型推估之濃度剖面比較(Song et al., 2008)

(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)，對應至該試體之總時間(t_{total} , total time)，如圖 2.17，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。

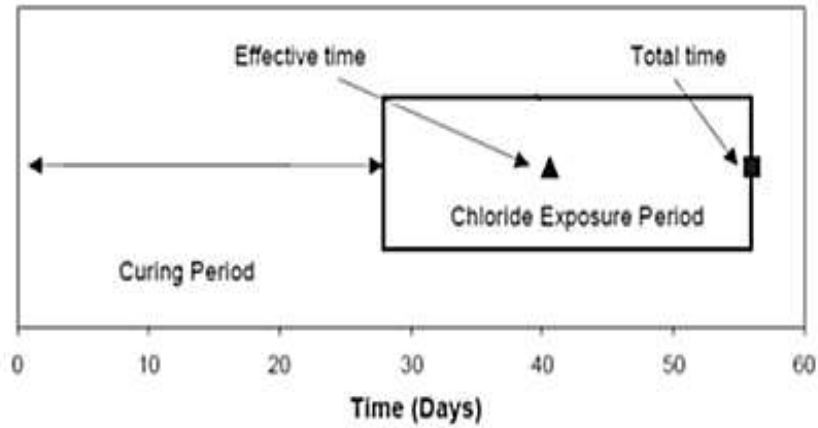


圖 2.17 各時間名稱之定義圖(Nokken et al., 2006)

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)。

$$D_{app} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m dt}{\int_{t_1}^{t_2} dt} \quad (2.7)$$

$$D_{app} = \begin{cases} D_{ref} t_{ref}^m \frac{t_2^{1-m} - t_1^{1-m}}{(1-m)(t_2 - t_1)} & m \neq 0, 1 \\ D_{ref} t_{ref}^m \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{t_2 - t_1} & m = 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

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

$$t_{eff} = \begin{cases} \left[\frac{(1-m)(t_2 - t_1)}{t_2^{1-m} - t_1^{1-m}} \right]^{1/m} & m \neq 0, 1 \\ \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} & m = 1 \end{cases} \quad (2.10)$$

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+浸泡氯化鈉溶液時間)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 ，再以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，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 2.7。

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 2.7 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 2.7 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 25%爐石粉取代	1.19

(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； t ：暴露時間。

十二、計算程序與 Life-365 驗證

彭琦茵(2015)嘗試採用平均法、差值法、單一法等三種方法，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 2.8 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 2.8 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，將達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 2.18，

由圖中可見所發展差值法計算程序與 Life-365 結果相當吻合。

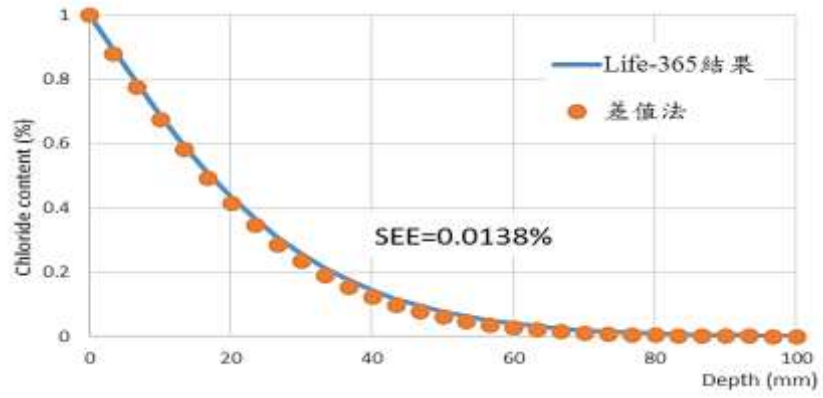


圖 2.18 代碼 W40D55 差值法與程式結果比較圖

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、細粒料的物理性質如表 3.2 所示，粗、細粒料級配符合 CNS 1240 的規定，其分別之級配曲線，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

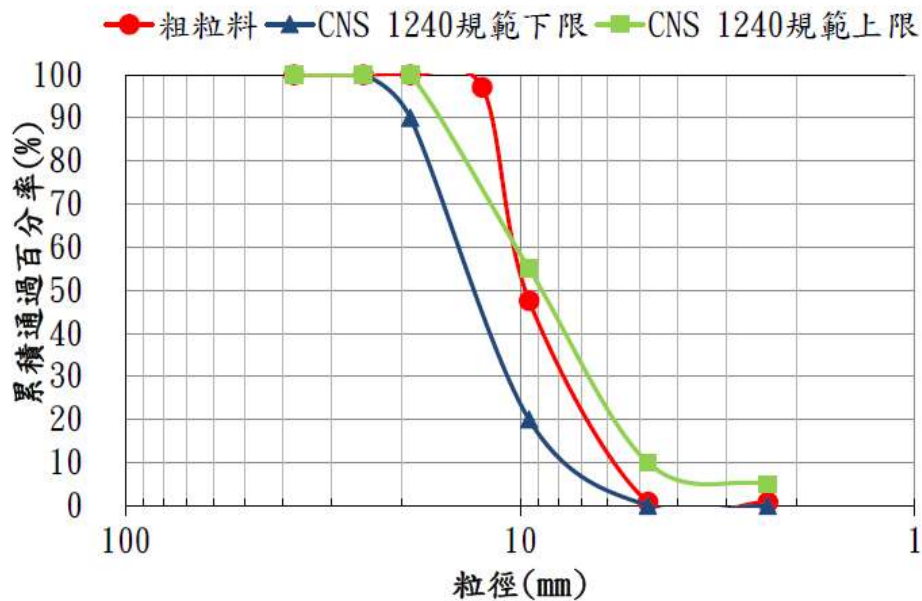


圖 3.1 粗粒料粒徑分佈曲線圖

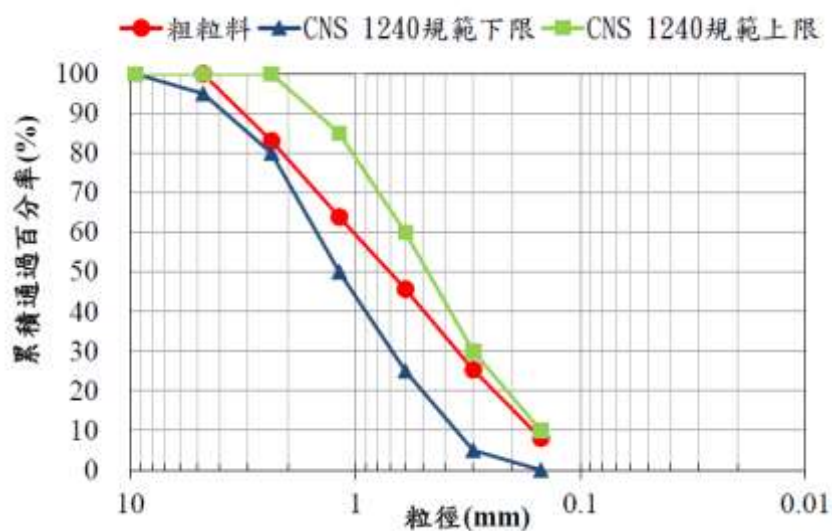


圖 3.2 細粒料粒徑分佈曲線圖

(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

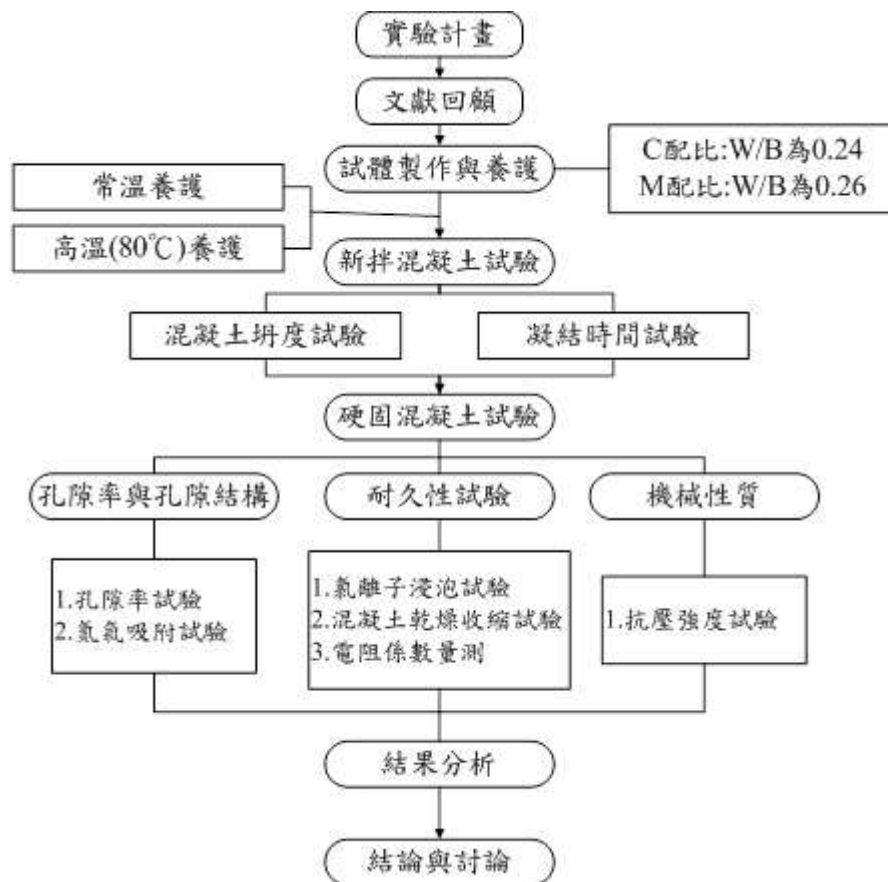


圖 3.3 試驗流程圖

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，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。

採用養護溫度 80°C 之不同養護時間養護後，同時進行硬固水泥漿試驗，參照 ASTM C642-13 方法，量測硬固水泥漿之之孔

隙率，並以氮氣吸附試驗驗證養護過後之混凝土內卜作蘭材料之二次水化反應是否有減小孔隙大小、孔隙數量之效果。

因不同養護方法，可能會影響混凝土之乾燥收縮性質，而收縮量可能會造成混凝土內部裂縫之生成，進而降低混凝土之耐久性。因此以乾燥收縮試驗檢驗混凝土高溫養護過後，混凝土之收縮特性。抗壓強度為較簡易檢測混凝土品質之方式，若混凝土之抗壓強度不良，耐久性也可能不佳，因此藉由抗壓強度試驗，檢測混凝土品質，並檢測混凝土之抗壓強度是否有持續進行水化反應，使強度隨時間上升。而表面電阻率試驗可藉以快速評估混凝土耐久性，電阻越大表示混凝土的連通孔隙越少，需要傳遞電流的路徑越長，則外界物質欲進入混凝土內部就越加困難。

三、試驗流程

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，在研究團隊先前所取得 ASTM C1556 的數據基礎下，為探討可否有方式能讓混凝土耐久性提高，於本研究尋求新方法，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。試驗項目包括抗壓強度試驗、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 的氯離子浸泡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。

在材料配合設計方面，本研究使用的混凝土配比為可能使用於盛裝容器(含蓋子) 混凝土配比(文後稱 C 配比)，以及封蓋之填縫材料(文後稱 M 配比)。C 配比之混凝土水膠比為 0.24，主要添加卜作嵐材料包含飛灰、爐石及矽灰；而 M 配比之砂漿水膠比

為 0.26，所添加之卜作嵐材料為爐石及矽灰。

在試驗設計方面，將混凝土試體拆模後置於不同的養護條件下達齡期後，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不同溫度養護達設定養護時間 3 天、4 天，再浸泡飽和石灰水達指定齡期為 28 天、90 天 183 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、氮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 天後將試體取出，再浸泡於 165 ± 1 g/L 氯化鈉水溶液中 36 天，依據 ASTM C1152 方法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。

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性廢棄物的盛裝容器(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，水泥漿塊試體用於量測其孔隙率。

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)
W	23	至齡期
80-3D	80	3
80-4D	80	4

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 (23°C)、相對溼度(50±2%)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 $50\pm 2\%$ 、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

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 $\phi 10 \times 15 \text{ cm}$ 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 $\phi 10 \times 7.5 \text{ cm}$ 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 $165 \pm 1 \text{ g/L}$ 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 1 mm ，後兩層各磨 2 mm ，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

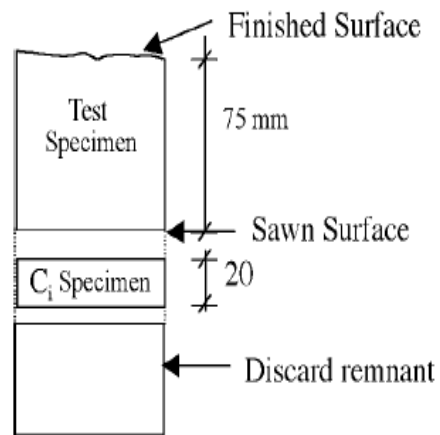


圖 3.5 試體的切割尺寸圖



圖 3.6 混凝土浸泡 NaCl 溶液示意圖

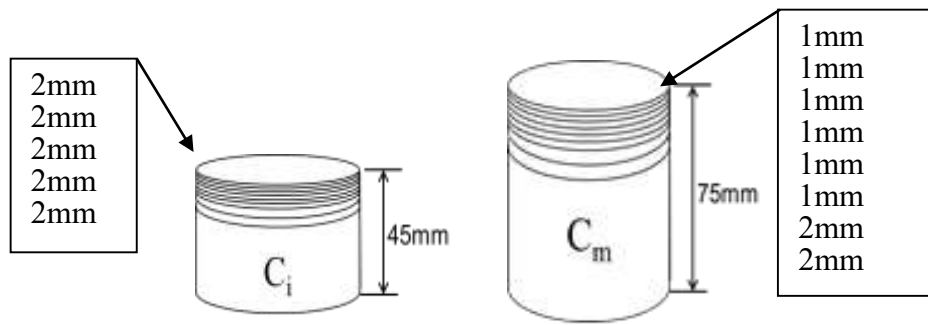


圖 3.7 試體分層示意圖



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 AgNO₃ 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)。

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

其中 V：AgNO₃ 滴定溶液耗用量的體積

N：AgNO₃ 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°C±5°C，冷卻後秤其重量，直至恆重小於 0.5 %，即得 A 為烘乾重。

2. 將試體浸泡於水中，不少於 48 hr，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. 將試體進行煮沸 5 hr，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。

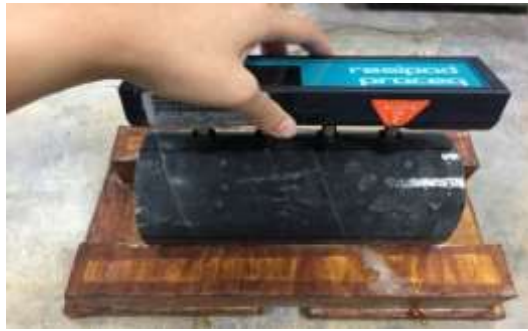


圖 3.11 混凝土電阻值量測圖

肆、主要發現與結論

依據前人研究尋求新方法以提高生產效率又能讓混凝土耐久性提高，本研究利用不同養護方式，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時間對混凝土品質之影響。

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 配比因未使用粗粒料，故如預期具有相當良好之工作性，坍度結果為全坍，直徑為 45 cm。而 C 配比為近零坍度，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，因而容易出現蜂窩的情況，但在製造試體時因有震動台之幫助，所以試體並未出現蜂窩之現象。

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，比一般水泥混凝土凝結時間稍長一些，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品質指標。本研究之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，對於試體力學強度之影響。

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，並且隨齡期增加其抗壓強度皆比常溫養護試體強度來的高，其中以 80°C 熱水養護四天(80-4D)強度增加特別顯著。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、搬運過程碰撞等影響，能確保盛裝容器早期的安全。

表 4.1 配比 C 不同養護方式之抗壓強度

養護方式	7 天	28 天	90 天	183 天	365 天
W	56.52	63.19	66.93	79.81	79.73
80-3D	61.26	67.98	68.74	71.16	80.35
80-4D	63.22	66.38	70.10	70.96	88.87

(單位：MPa)

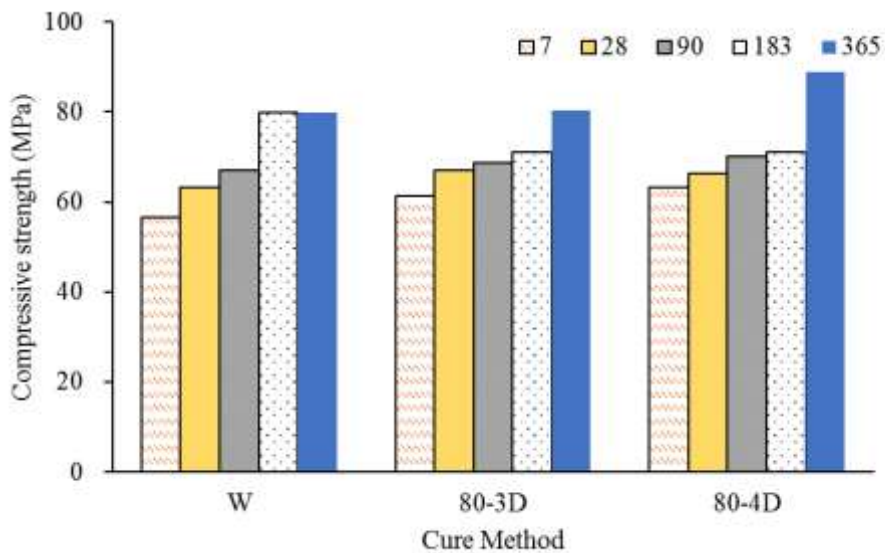


圖 4.3 80°C 養護方式對試體抗壓強度之影響

表 4.2 配比 M 不同養護方式之抗壓強度(單位：MPa)

養護方式	7 天	28 天	90 天	183 天	365 天
W	86.88	89.22	89.57	91.91	102.89
80-3D	90.10	90.69	93.67	94.03	105.33
80-4D	94.67	95.05	102.74	100.63	117.09

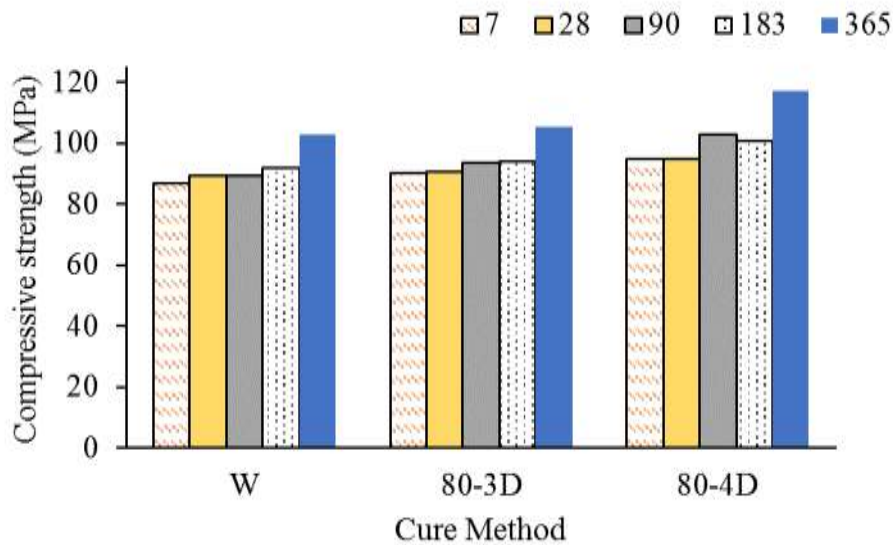


圖 4.4 M 配比 80°C 養護方式對抗壓強度之影響

三、孔隙率試驗

(一) 混凝土孔隙率

本試驗為參照 ASTM C642 進行改良，以抽真空方式使試體達到飽和，圖 4.5、4.6 分別為配比 C、M 以常溫與熱養護試體之孔隙率，由圖可以看到兩配比之試驗結果經過熱養護之孔隙率皆較常溫養護低，以配比 C 齡期 7 天進行比較，80-4D 為 3.89% 常溫為 4.38%，兩養護方式孔隙率相差 0.49%，且其他齡期之趨勢結果孔隙率含量皆以 80°C 養護 4 天(80-4D) 為最低，其次是 80°C 養護 3 天(80-3D)，而以常溫養護試體之孔隙率最高，表示以熱養護方式能讓試體內部未水化的水分加快水化，減少內部水分所占之孔隙，以及讓 C-S-H 膠體快速生成填補試體內部孔隙，試體因此變得更加緻密。

並可以發現本研究之配比 C 及配比 M 孔隙率很低，原因為本研究配比設計的水膠比極低，在拌合時係藉由減水劑

增加工作性，故試體製作完成後內部水分所占之孔隙較一般混凝土少。

比較 80-3D 及 80-4D 之孔隙率發現，兩種熱養護方式試驗結果僅有些許差異，若以經濟性為考量，則可能以 80°C 熱水養護三天為較佳的養護方式，後續試驗亦同進行比較，找出能提升混凝土品質之養護方式。

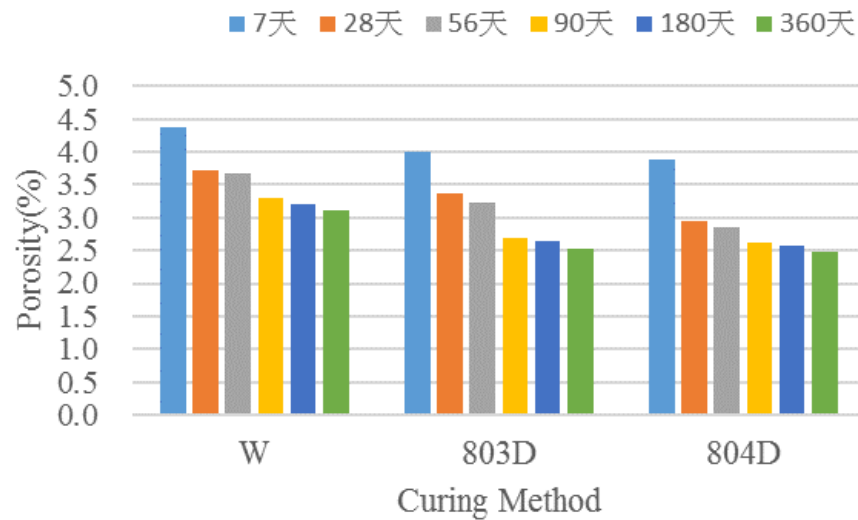


圖 4.5 C 配比養護方式與孔隙率關係圖

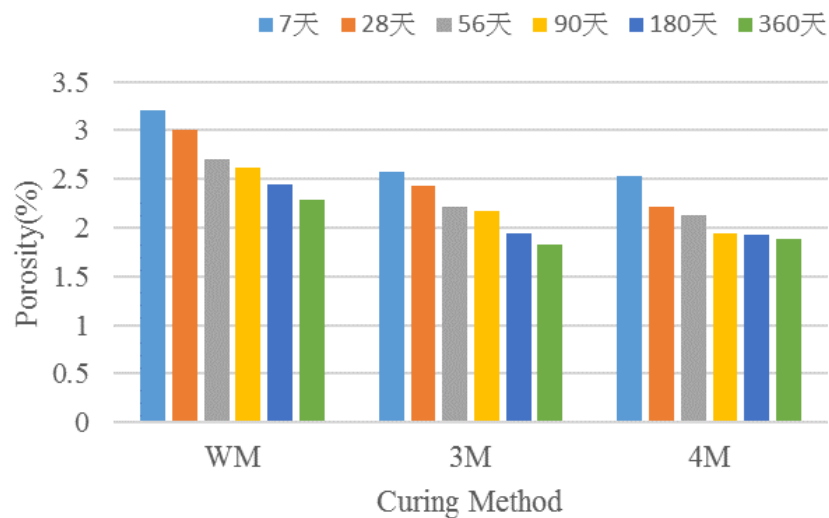


圖 4.6 M 配比養護方式與孔隙率關係圖

(二) 漿體孔隙率

氯離子入侵的速率與混凝土內部孔隙率有很大的關聯性，為了掌握高品質試體中的離子擴散傳輸，故以配比之水泥漿體進行孔隙率試驗，依 ASTM C642 規範，孔隙率試驗主要指水泥漿體在烘乾狀態下吸附蒸餾水至面乾內飽和狀態的重量差，以及試體之水中重，計算水泥漿體孔隙率。目的在於了解試體內部孔隙的含量，當試體孔隙率越高，代表外界有害物質要進入試體內部就更容易，故混凝土的耐久性就越差。

圖 4.7、4.8 為各養護方式試體於齡期 720 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。

表 4.3 配比 C、M 不同養護方式之孔隙率

養護方法	配比 C					配比 M				
	28	90	183	365	720	28	90	183	365	720
W	18.69	17.71	16.23	14.21	13.38	16.53	16.41	16.32	15.11	14.04
80-3D	18.51	18.27	13.86	12.84	11.38	15.58	14.98	12.72	10.39	10.15
80-4D	17.75	16.86	12.89	12.08	11.24	15.34	14.88	11.04	9.36	9.28

(單位：%)

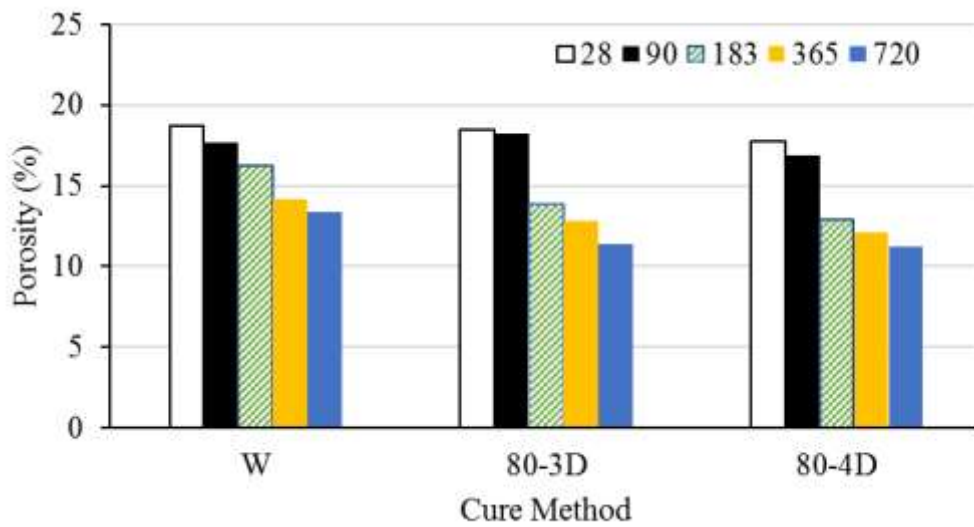


圖 4.7 養護條件對 C 配比孔隙率之影響

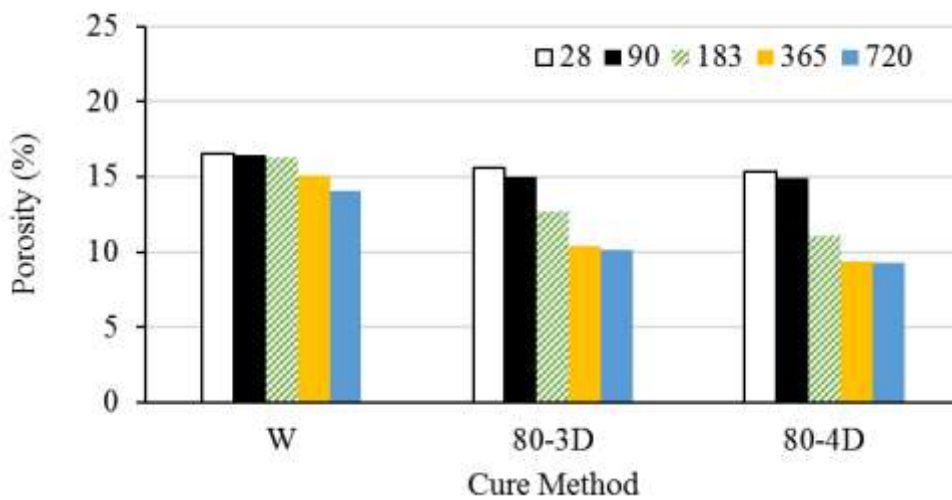


圖 4.8 養護條件對 M 配比孔隙率之影響

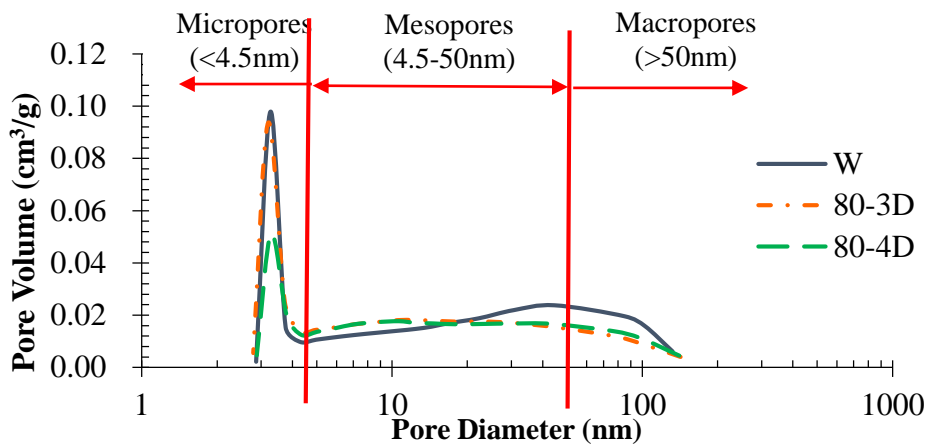
四、孔隙分佈與孔隙結構分析

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

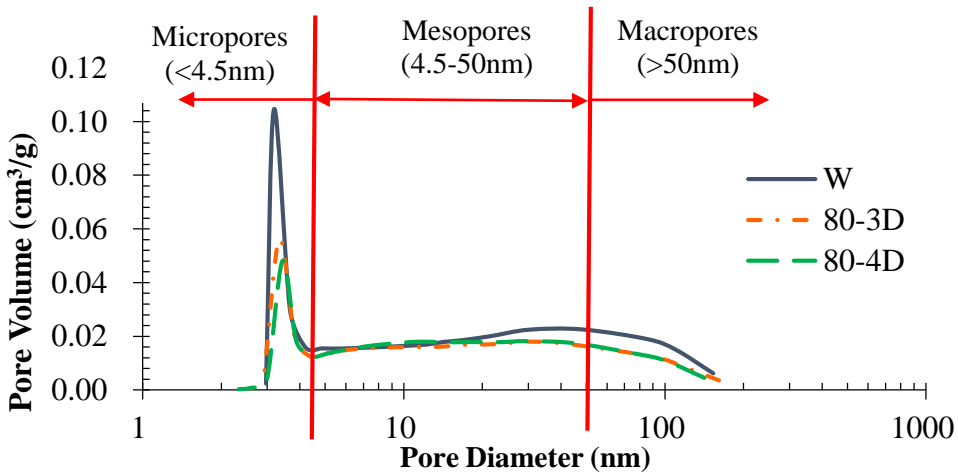
隙。而三種孔隙依小到大的作用及對物質入侵的影響分別為，膠體孔隙主要是 C-S-H 膠體間的縫隙以及針狀或板狀的結晶結構間交錯所形成的孔隙，並非影響抗壓強度的主要因素，由於互相不連通也不是離子傳輸的主要路徑，並且相較於其他孔隙尺寸而言緻密性極高；中大孔隙，主要受到水化程度、水化空間所影響；而中孔孔隙多寡主要影響混凝土離子傳輸行為，與外界有害物質侵入的重要因子，因此它會影響水泥漿體品質。本研究將針對不同養護條件與齡期做探討。

圖 4.9、4.10 分別為配比 C 和配比 M 水泥漿體進行氮氣吸附試驗齡期 7 天到 720 天之孔徑分佈圖，比較各齡期之孔徑分佈結果，結果顯示經過熱養護之試體孔隙確實皆比常溫養護少，由上一節孔隙率試驗結果驗證熱養護可以有效加速混凝土水化作用，降低試體之孔隙率之論述。

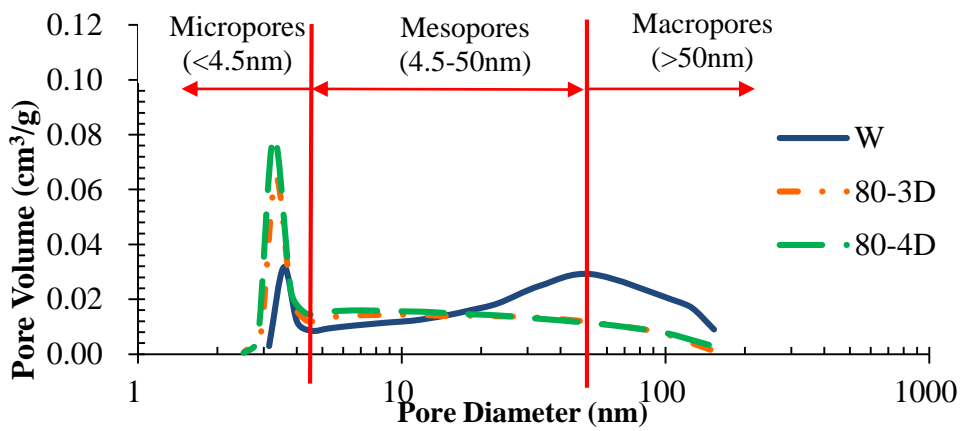
並由圖 4.9(a)(b)、4.10(a)(b)可以發現在早期 7 天到 28 天時，孔徑分佈之中大孔隙減少而轉變為中孔隙，代表在這期間孔隙內部的水分因水化作用使孔隙細化進而演變成中孔隙，晚期 365 天到 720 天之孔徑變化趨勢已經逐漸趨緩，表示水化作用依然持續進行只是內部尚未水化之孔隙相對變的較少，故孔隙變化的情形變化較不明顯。



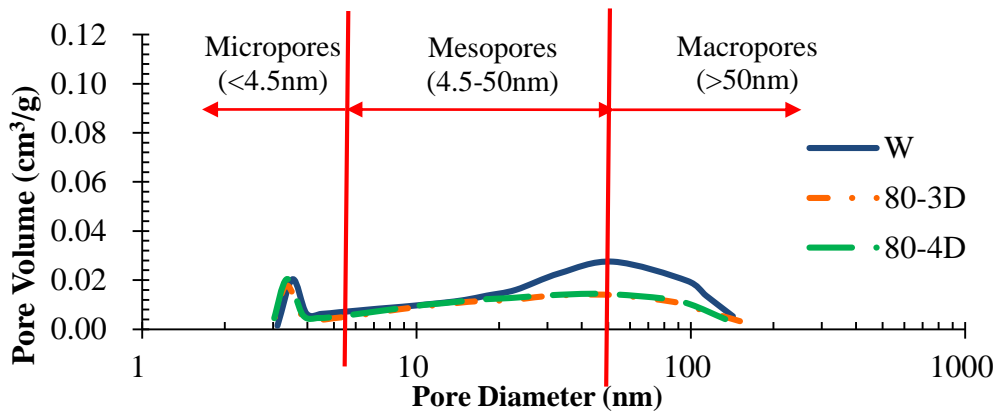
(a) 7 天



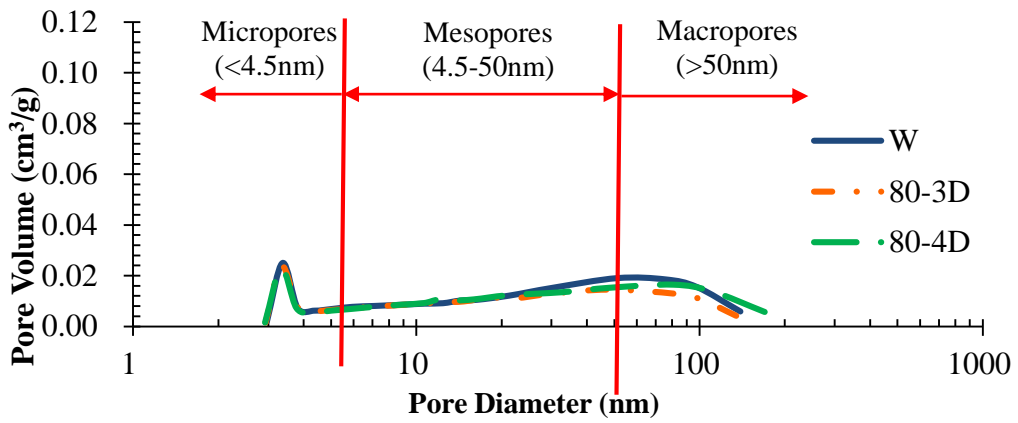
(b) 28 天



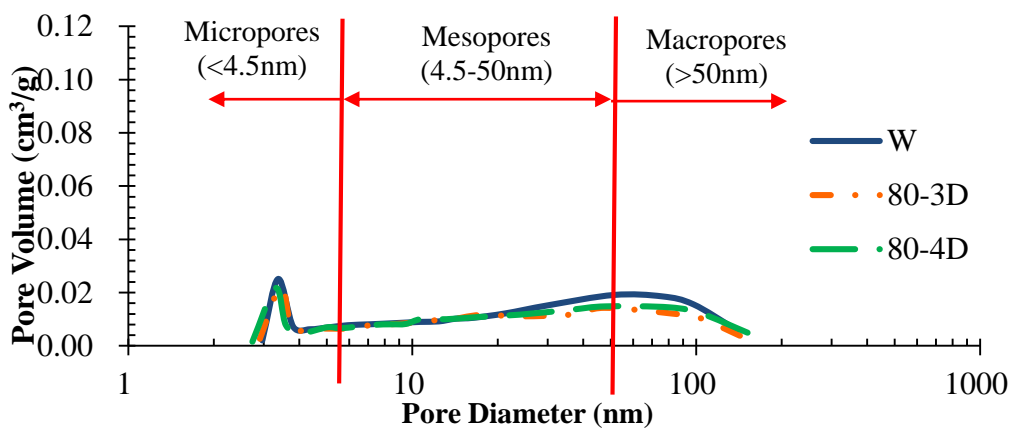
(c) 90 天



(d)183 天

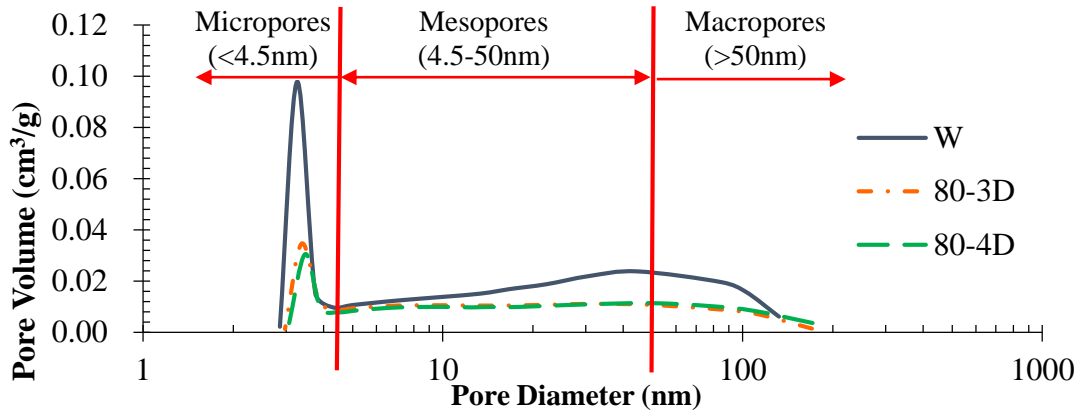


(e)365 天

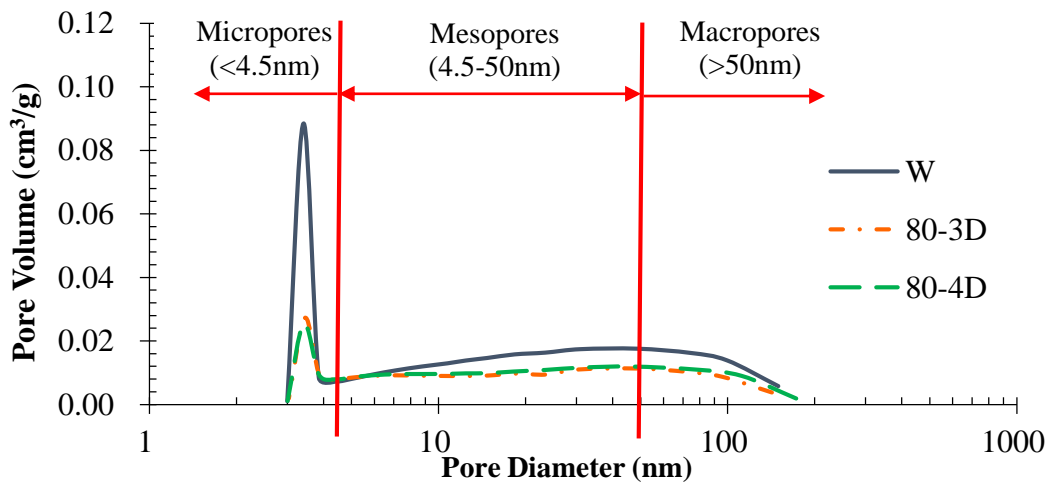


(f)720 天

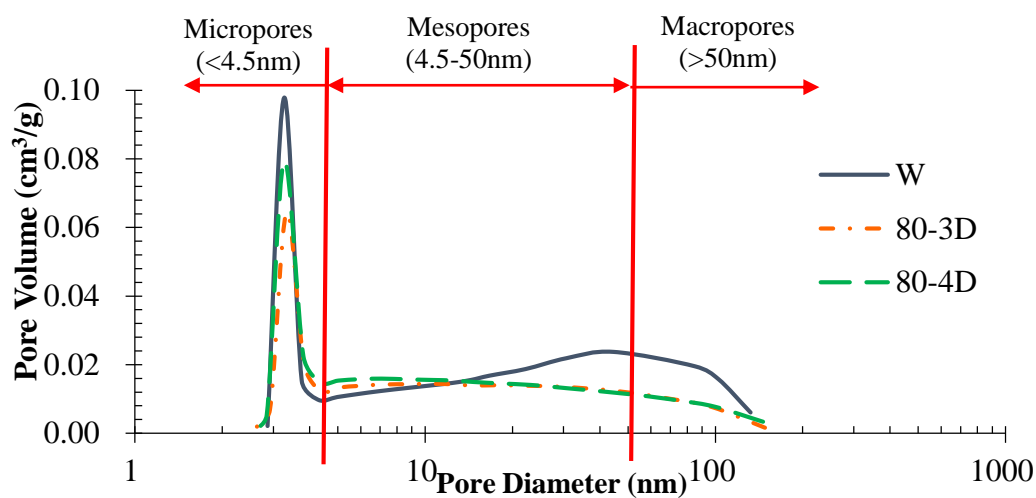
圖 4.9 C 配比不同齡期孔隙體積分布



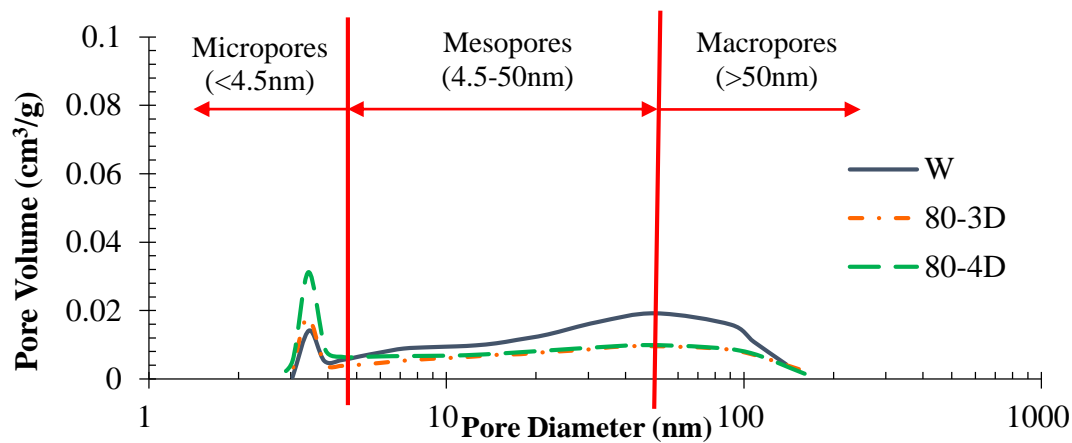
(a)7 天



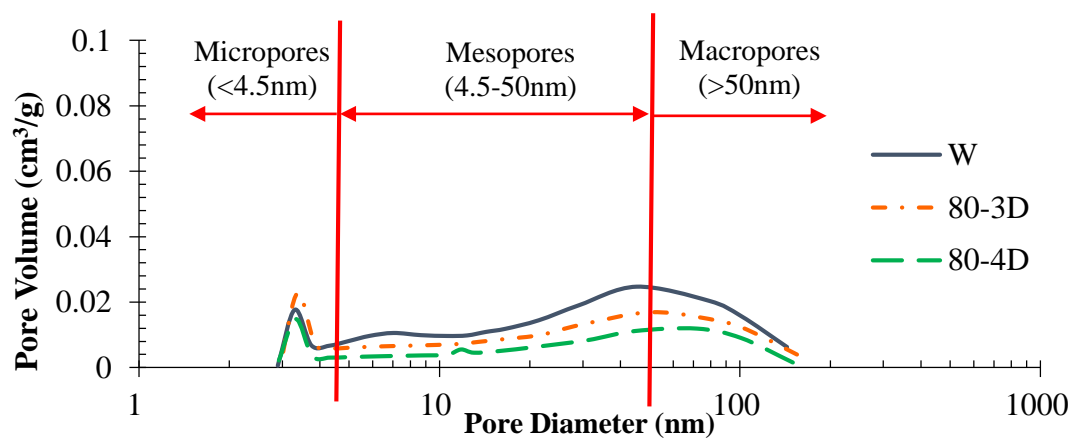
(b)28 天



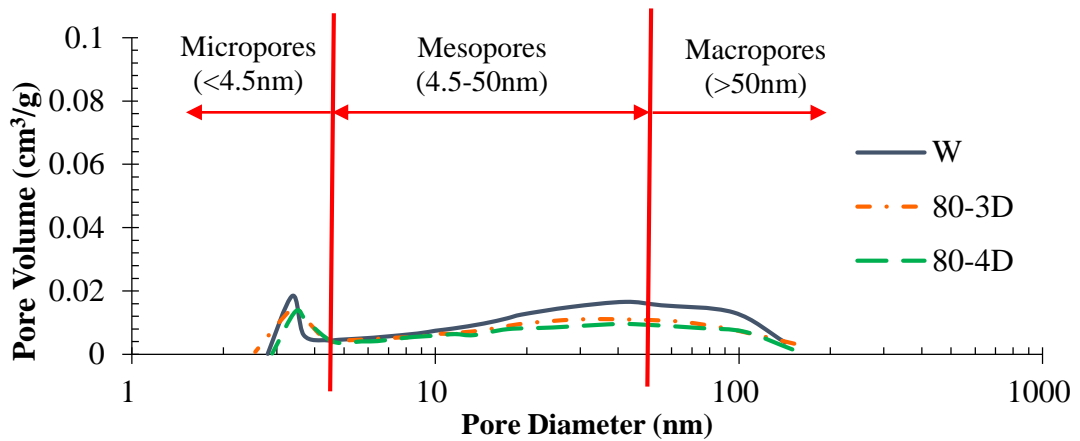
(c)90 天



(d)183 天



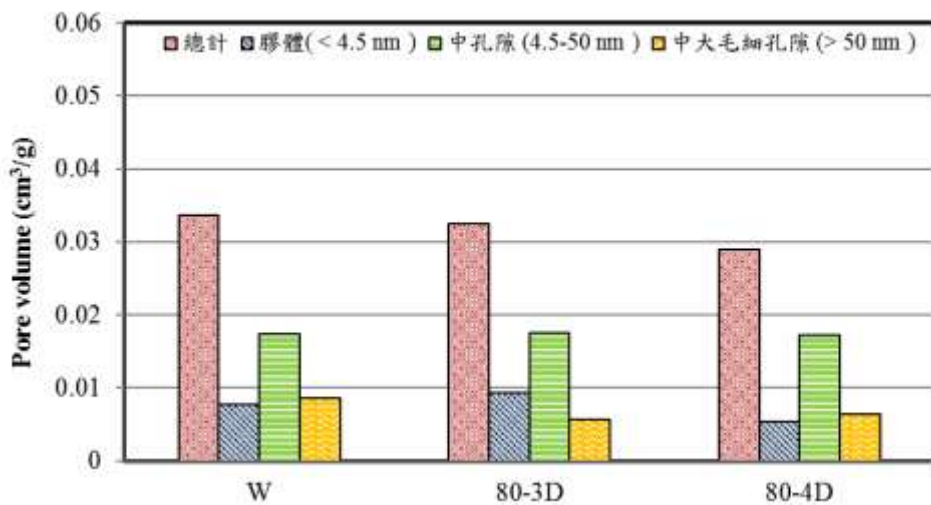
(e)365 天



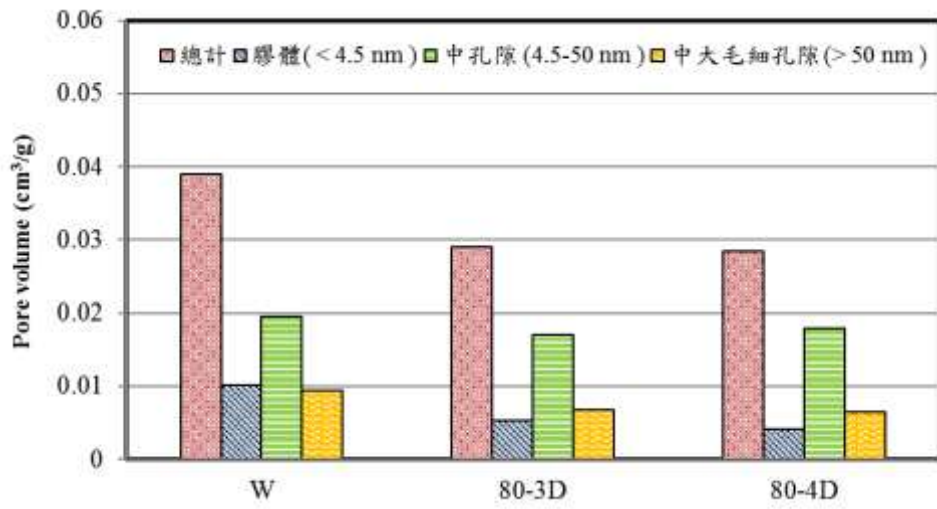
(f)720 天

圖 4.10 M 配比不同齡期孔隙體積分布圖

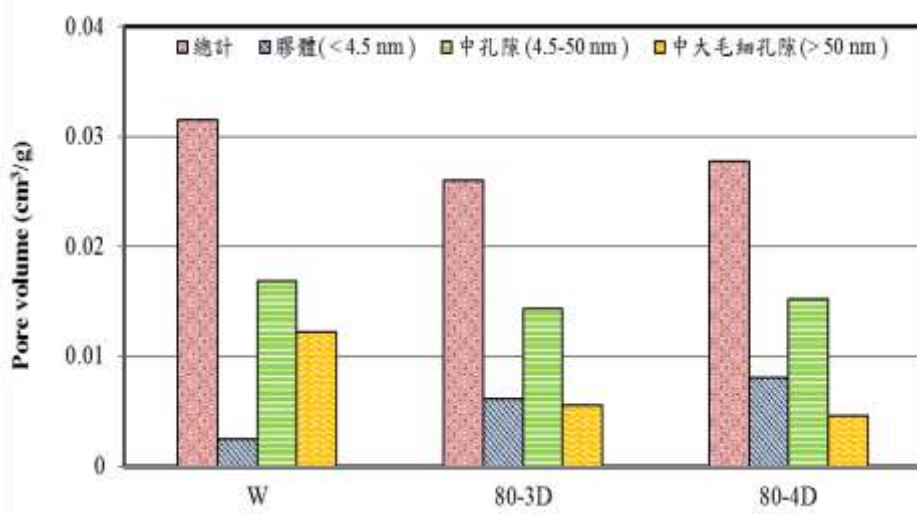
由圖 4.11、4.12 看出經過高溫養護後其孔隙結構之中孔孔隙及中大孔隙量減少，且熱水養護 3 天及 4 天的孔隙結構差異不大。而孔隙中體積量最少的為膠體孔隙，中大孔隙次之，中孔孔隙最多。此外，因為 M 配比的卜作嵐材料使用量較多，使 M 配比於各孔徑範圍的體積都低於 C 配比，孔隙量越低離子在其中的擴散越不易進行。



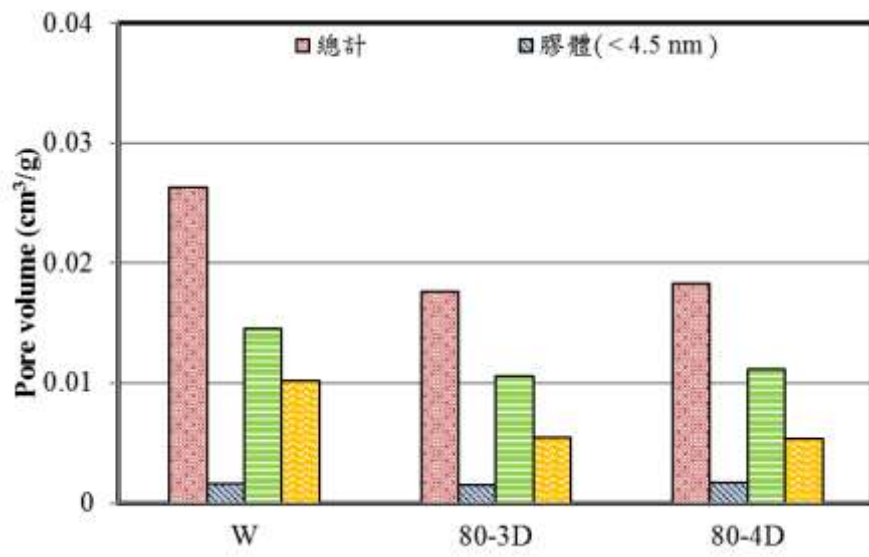
(a)7 天



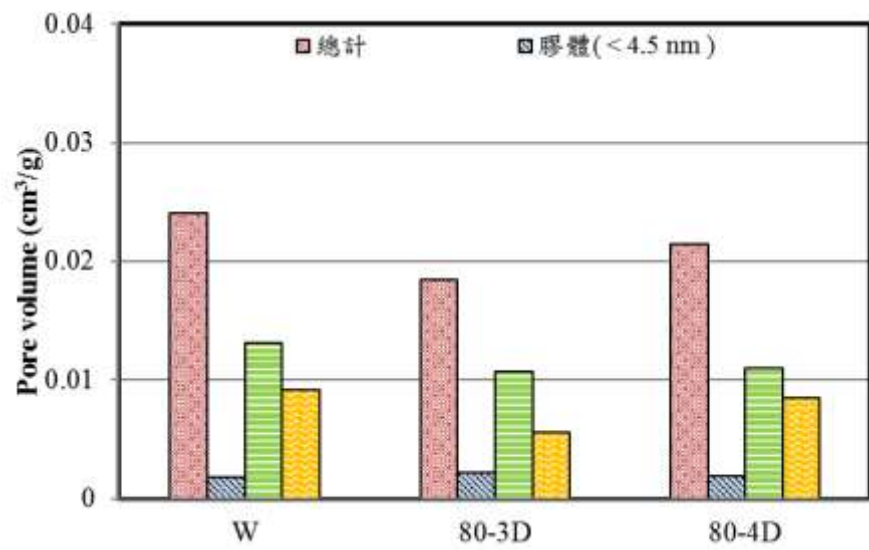
(b)28 天



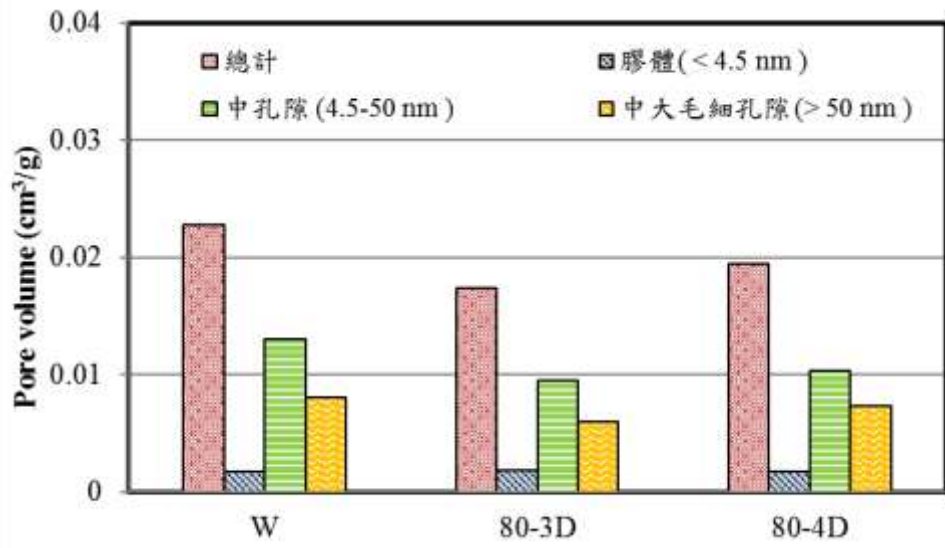
(c)90 天



(d)183 天

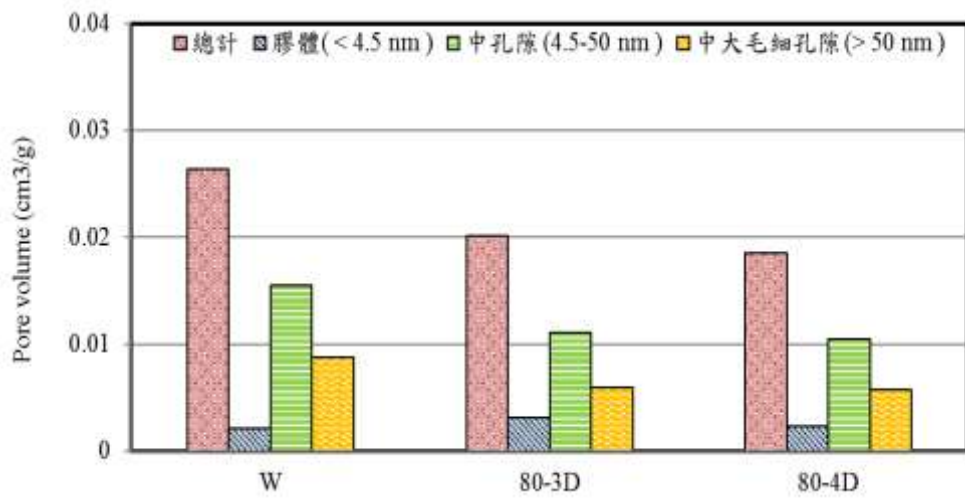


(e)365 天

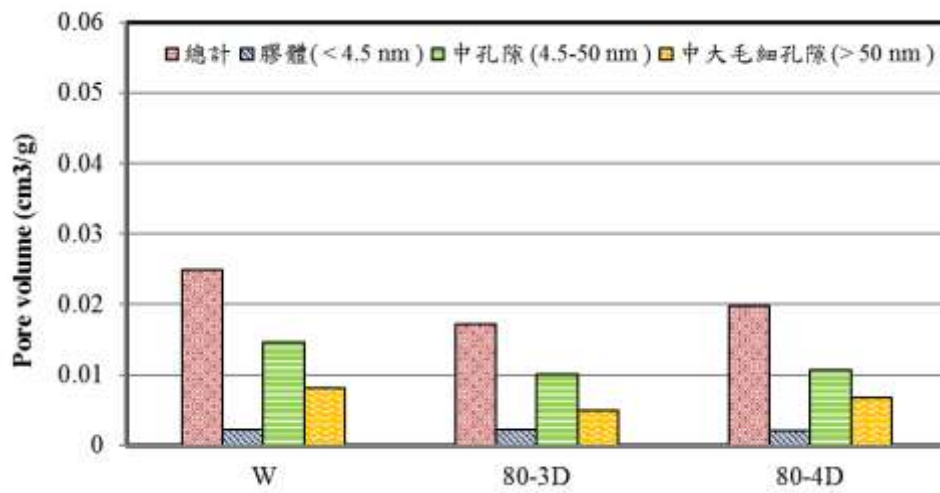


(f)720 天

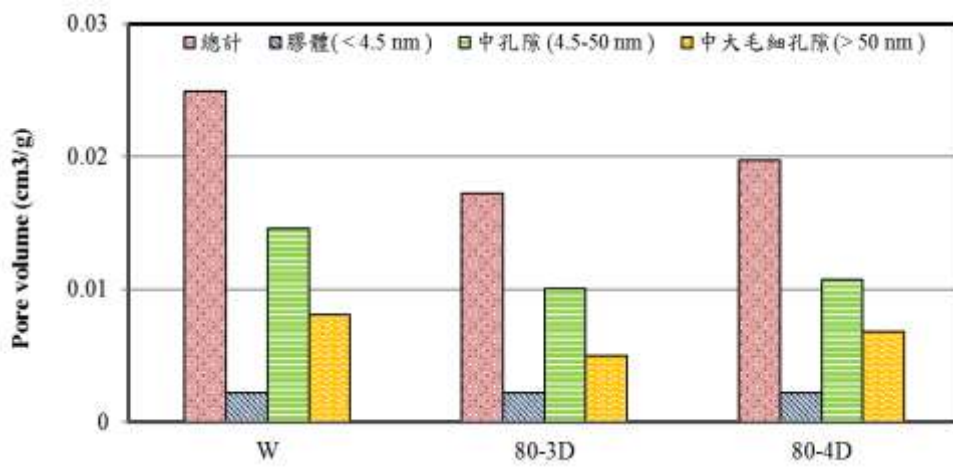
圖 4. 11 C 配比不同齡期孔隙結構關係圖



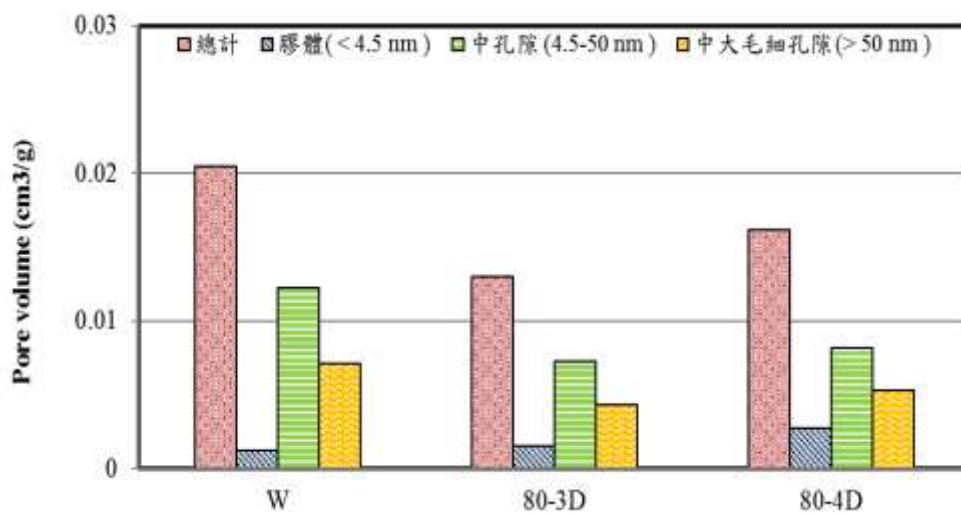
(a)7 天



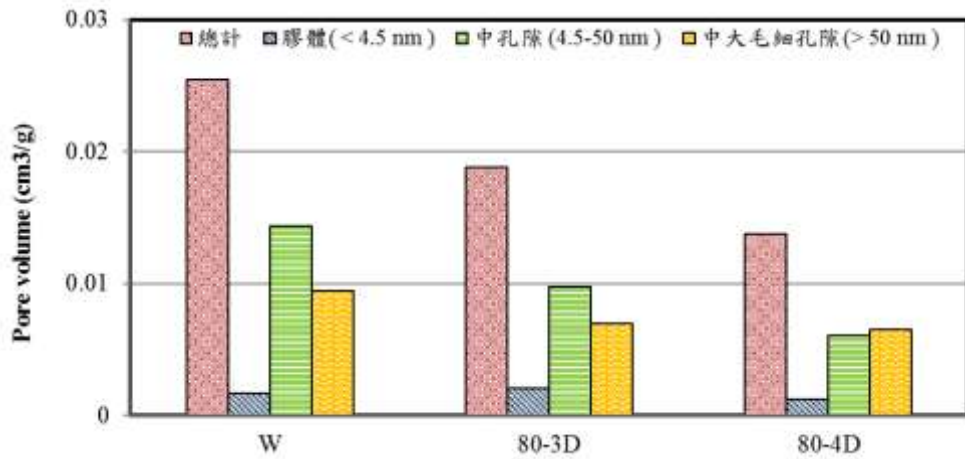
(b)28 天



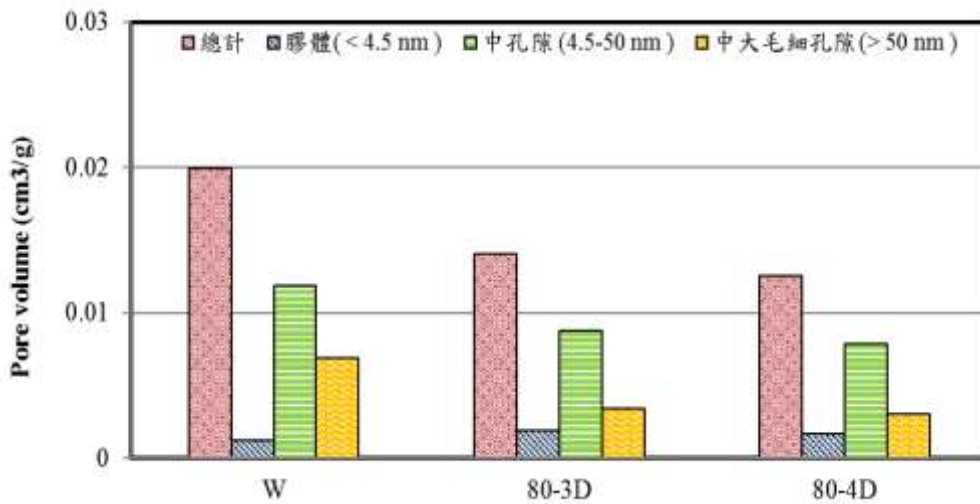
(c)90 天



(d)183 天



(e)365 天



(e)720 天

圖 4.12 M 配比不同齡期孔隙結構關係圖

五、表面電阻試驗

表面電阻率試驗為非破壞性試驗，具有快速量測實驗數據且易於操作等優點，可做為混凝土耐久性的一項指標，電阻越大表示混凝土的連通孔隙越少，需要傳遞電流的路徑越長，則外界物質要入侵混凝土內部就越加困難。

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，而本研究所使用的配比為添加 1.5% 的鋼纖維在混凝土中，因此在以電阻率評估混凝土品質前，我們先進行可行性評估，例如在量測不同水灰比、不同鋼纖維含量之混凝土時，電阻率是否也可穩定量測鋼纖維混凝土的材質變化。

圖 4.13 為 28 天齡期時不同水膠比與電阻率的關係，配比 C 的水膠比為 0.24、0.27、0.30、0.33，配比 M 為 0.23、0.26、0.29、0.32，由圖 4.31 可以看出配比 M 在改變水膠比後，電阻值有明顯的差異，而配比 C 因為添加鋼纖維的關係，所以電阻率明顯比配比 M 低很多，雖然電阻值差異不大還是可以看出其差異存在。表示電阻率量測在有添加鋼纖維的混凝土中，仍可以辨別試體間的差異。

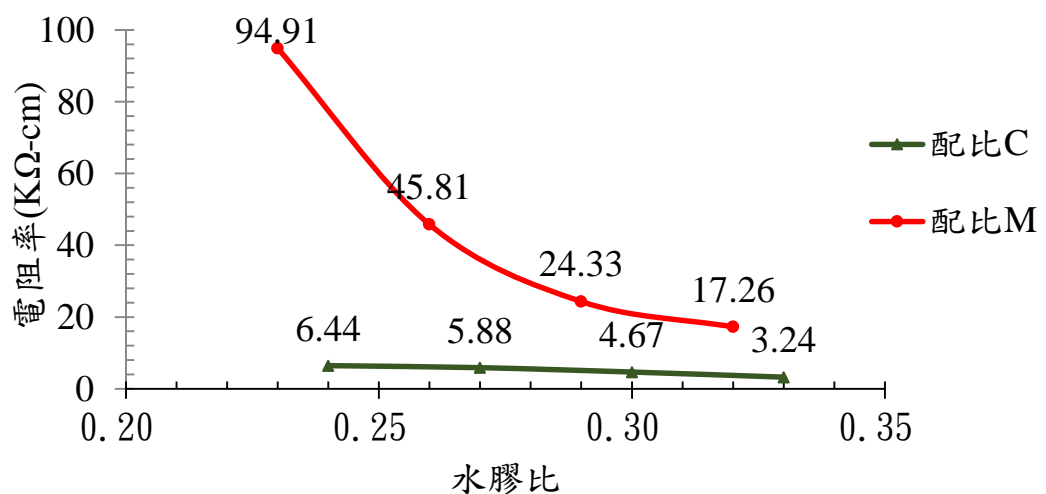


圖 4.13 28 天齡期不同水灰比與電阻率關係圖

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 4.14 可以看出當水膠比固定為 0.24 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，纖維含量與電阻率大致呈現性關係下降，並且可以看出在不同齡期水化程度不同時電阻率的明顯差異。

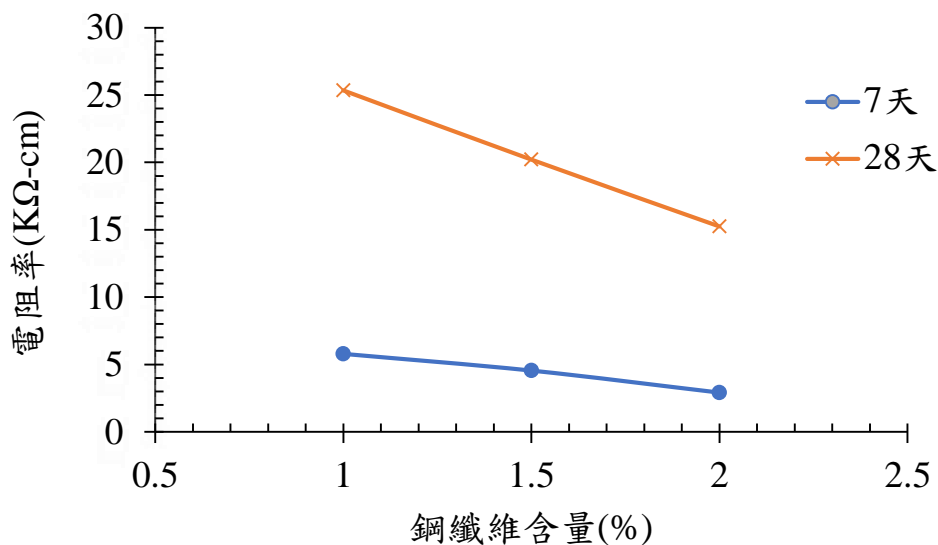


圖 4.14 水膠比 0.24 之不同鋼纖維含量與電阻率關係圖

圖 4.15、4.16 及 4.17 為 80°C 熱養護對試體電阻率之影響，因鋼纖維有導電能力，所以電阻率所使用之混凝土配比為未添加鋼纖維之 C' 配比，觀察到 C、M 配比經過高溫養護後其電阻率皆明顯的大於常溫養護，且 80-4D 之電阻率比其餘養護參數高，而 80-3D 次之。觀察齡期改變的影響，隨著齡期提升，全部養護條件的電阻率皆提升，其原因應是混凝土與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。而兩配比相較之下 M 配比之電阻率較 C 配比较高，因為 M 配比為水泥砂漿試體，其內部孔隙連接較不易，量測得到的電阻率數值也較大。

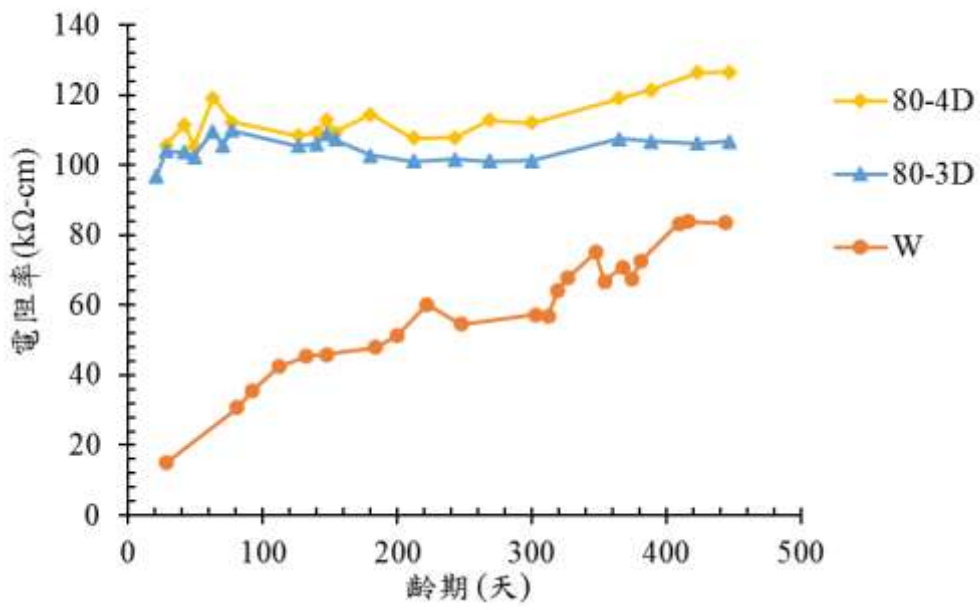


圖 4.15 C 配比齡期與電阻率關係圖

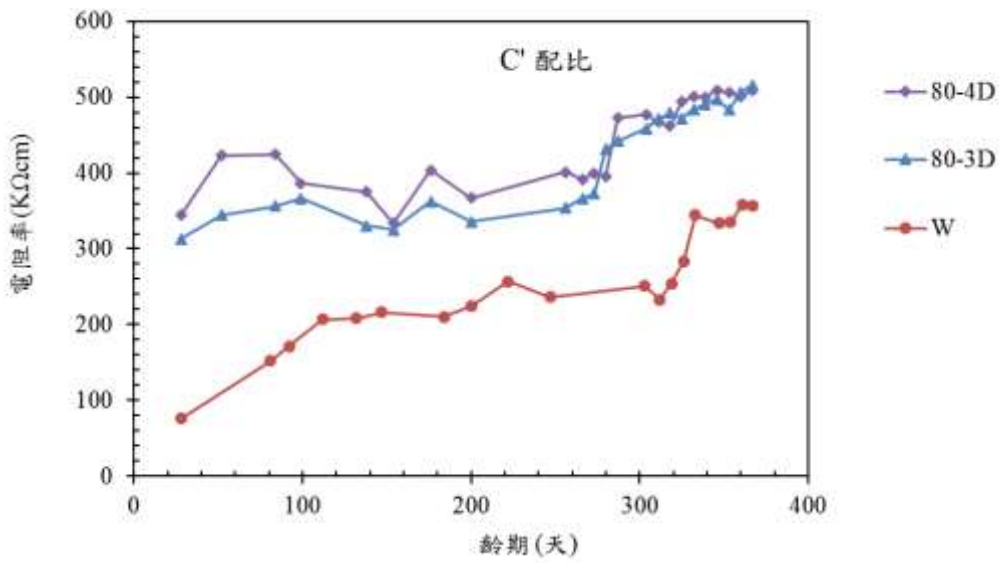


圖 4.16 C' 配比(無鋼纖維)齡期與電阻率關係圖

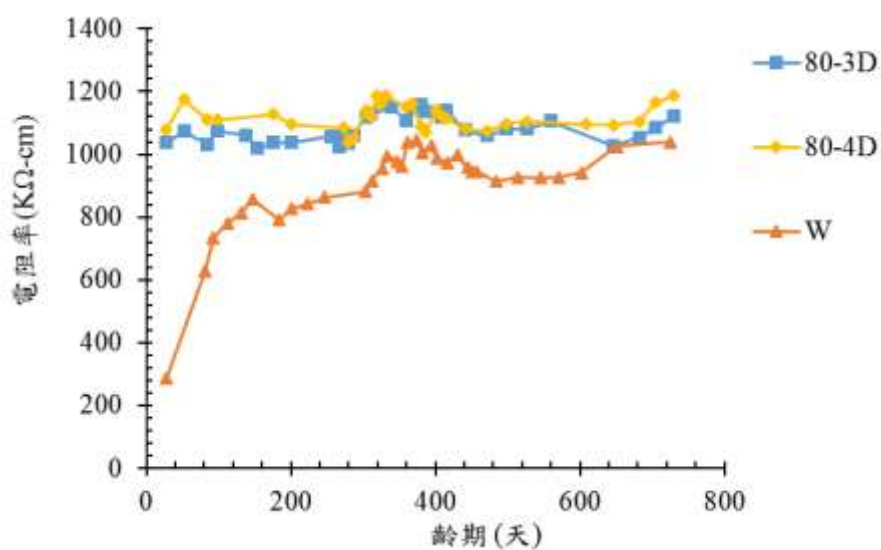


圖 4.17 M 配比齡期與電阻率關係圖

為了驗證電阻率可量測出不同低水膠比以及不同鋼纖維含量差異，故針對配比 C 之上述不同水膠比、不同鋼纖維含量試驗各變數所量測之 13 筆數據分別進行變異數分析檢定，以 F 值是否大於臨界值作為差異性判定結果，進一步作為電阻率對低水膠比鋼纖維混凝土品質評估依據。

表 4.4 為配比 C 表面電阻率量測不同水膠比差異性分析，由統計差異分析表可看到其 $F=2.883$ 大於臨界值 $F_{(3,48)0.05}=2.798$ ，表示以配比 C 調整之低水膠比 0.24-0.33 間所量測之電阻率具有差異性存在，即代表低水膠比鋼纖維混凝土隨水膠比越低其電阻率就越高，表示以表面電阻率能夠分辨低水膠比範圍之鋼纖維混凝土。

表 4.4 配比 C 表面電阻率量測不同水膠比差異性分析

變源	SS	自由度	MS	F	臨界值
組間	4058.486	3	1352.829	2.883	2.798
組內	22519.18	48	469.1495		
總和	26577.66	51			

表 4.5 為配比 C 表面電阻率量測不同鋼纖維含量差異性統計分析，由表發現鋼纖維含量 1%、1.5%及 2%所量測得電阻率有顯著差異性，其各組間之 F 值 7.112 大於臨界值 $F_{(2,39)0.05}=3.238$ ，表示鋼纖維含量多寡對電阻率量測有顯著影響，驗證隨不同鋼纖維變化之結論，即隨鋼纖維含量越多，所量測電阻率就越低，並綜合上述結果，初步評估利用電阻率量測低水膠比鋼纖維混凝土可量測出不同配比之差異性。

表 4.5 配比 C 表面電阻率量測不同鋼纖維含量差異性分析

變源	SS	自由度	MS	F	臨界值
組間	6556.049	2	3278.025	7.112	3.238
組內	17974.84	39	460.8934		
總和	24530.89	41			

六、乾縮試驗

乾縮試驗主要為量測隨齡期增加混凝土的體積變化量，若混凝土乾縮率高則可能因體積變化而產生裂縫。

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 4.18、4.19 可以看

出，由於所使用的配比水膠比皆很低，因此乾縮率也很低，而混凝土經過熱養護後，乾縮率與常溫養治的試體相比(W)更有明顯減少的現象，其中並以 80°C 養治 3 天的試體乾縮率最低。

由熱養護與常溫養護試體之乾縮量測結果可知以高溫養護混凝土可加快早期水化速率，而減少試體乾縮量，使混凝土晚期有較高的體積穩定性。

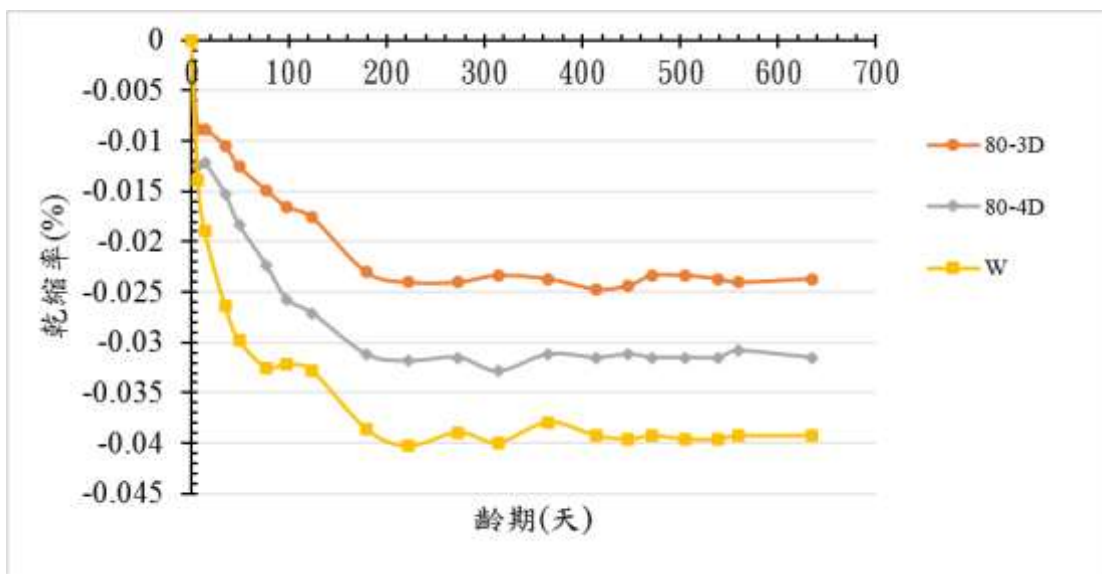


圖 4.18 養護條件對 C 配比乾縮率之影響

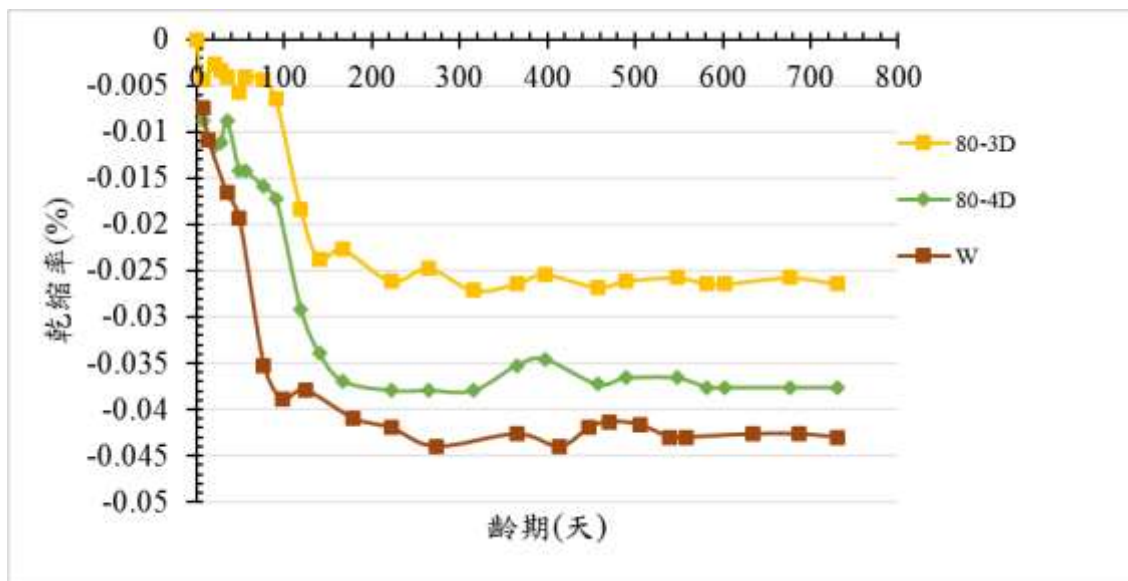


圖 4.19 養護條件對 M 配比乾縮率之影響

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、3 年及 4 年，高溫養護 28 天、90 天、183 天、365 天及 2 年進行試驗。

(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 4.6-4.8，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，可發現其相關性甚佳。

表 4.6 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
	1460	0.445	0.022	0.9820
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
	1460	0.429	0.012	0.9885

表 4.7 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
	720	0.623	0.039	0.9801
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
	720	0.252	0.031	0.9603

表 4.8 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
	720	0.575	0.038	0.9422
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
	720	0.264	0.027	0.9106

由圖 4.20、4.21 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。

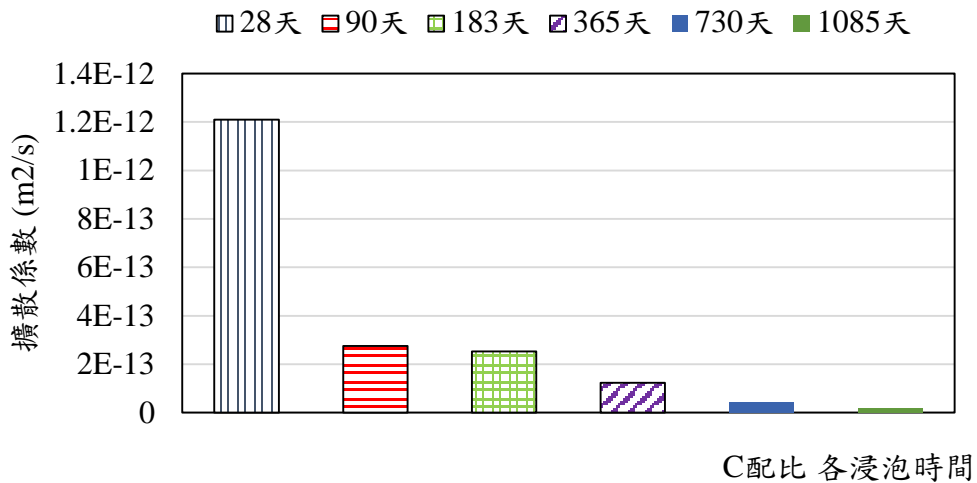


圖 4.20 配比 C 各齡期與瞬時擴散係數關係圖

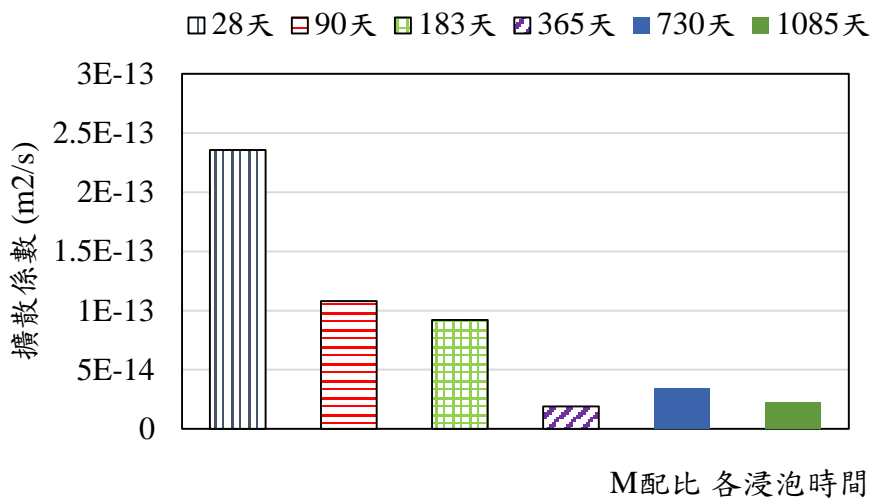


圖 4.21 配比 M 各齡期與瞬時擴散係數關係圖

由圖 4.22、4.23 看出經 80°C 養護四天後的試體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。

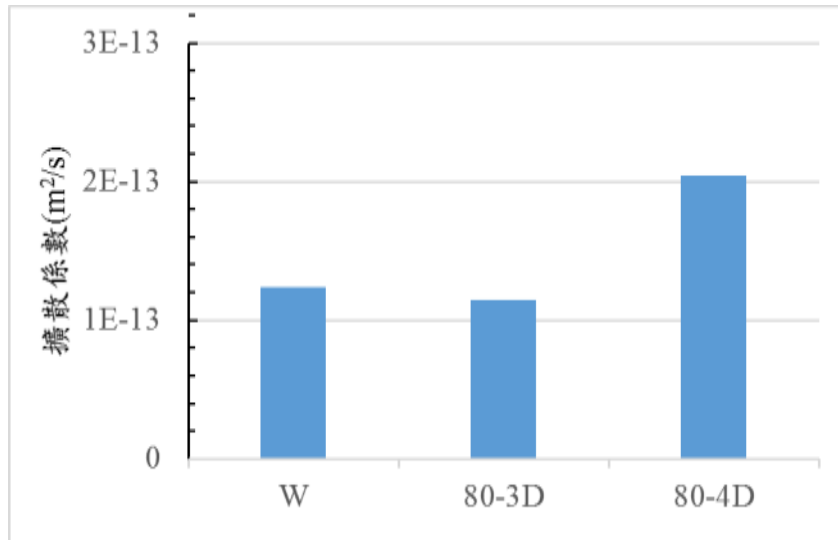


圖 4.22 配比 C 齡期 365 天各養護方式瞬時擴散係數關係圖

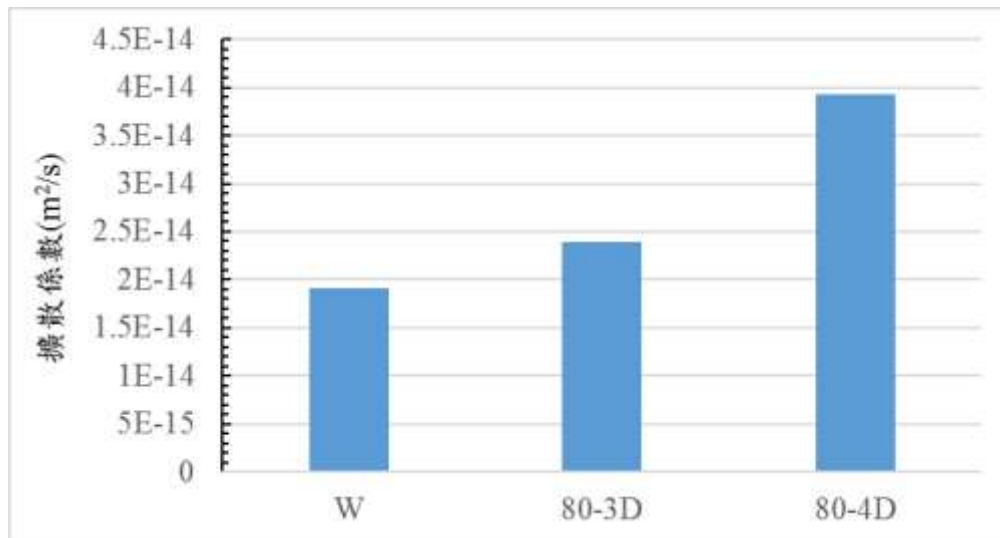


圖 4.23 配比 M 齡期 365 天各養護方式瞬時擴散係數關係圖

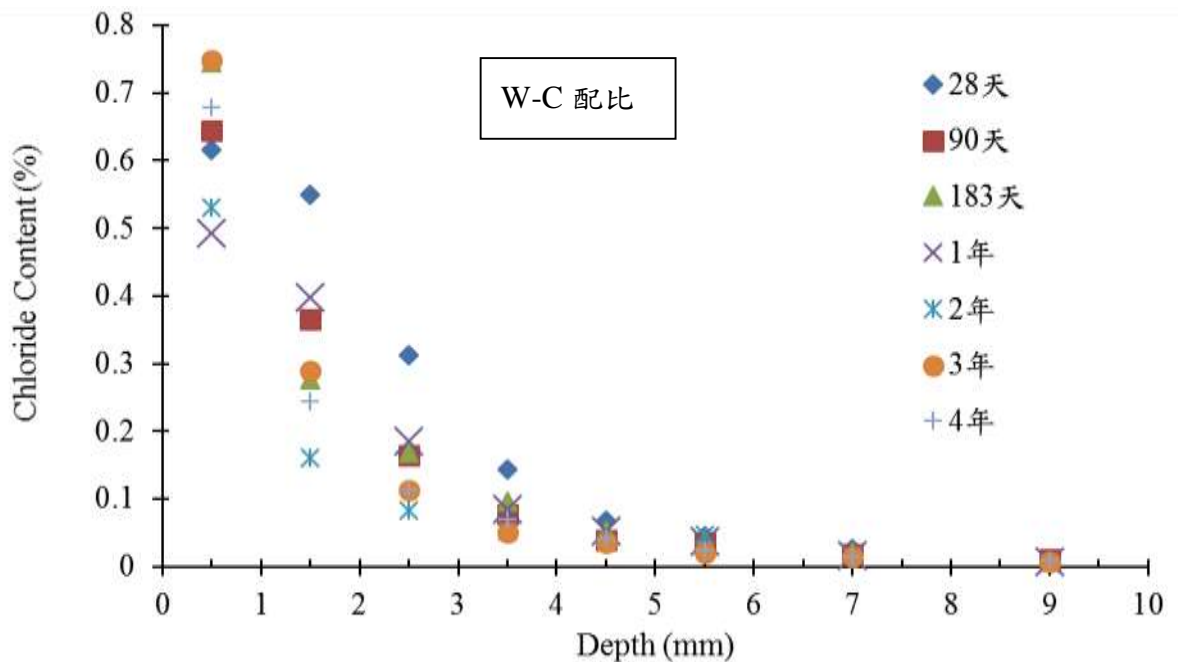
(二) 氯離子入侵試驗配比 C、M 的剖面濃度

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 4.24、4.25 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

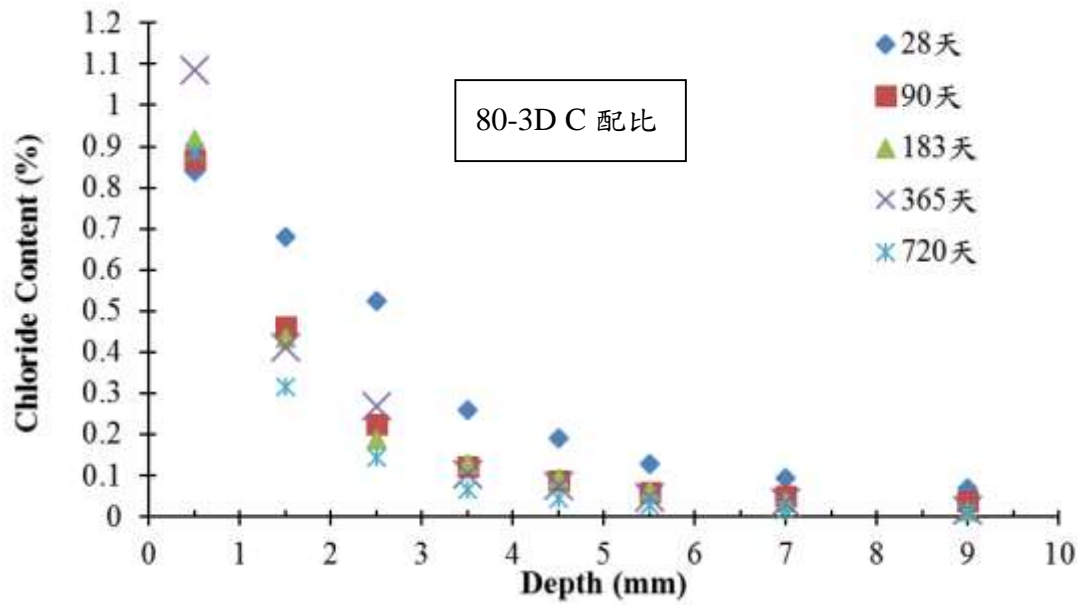
有效的阻擋在表層，使氯離子被阻擋在表層無法快速向內擴散，常溫養護齡期達4年及高溫養護齡期達兩年時，因混凝土水化程度較完全，使氯離子較難向內部入侵於3.5 mm處可看出其氯離子濃度明顯低於先前實驗齡期。

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。

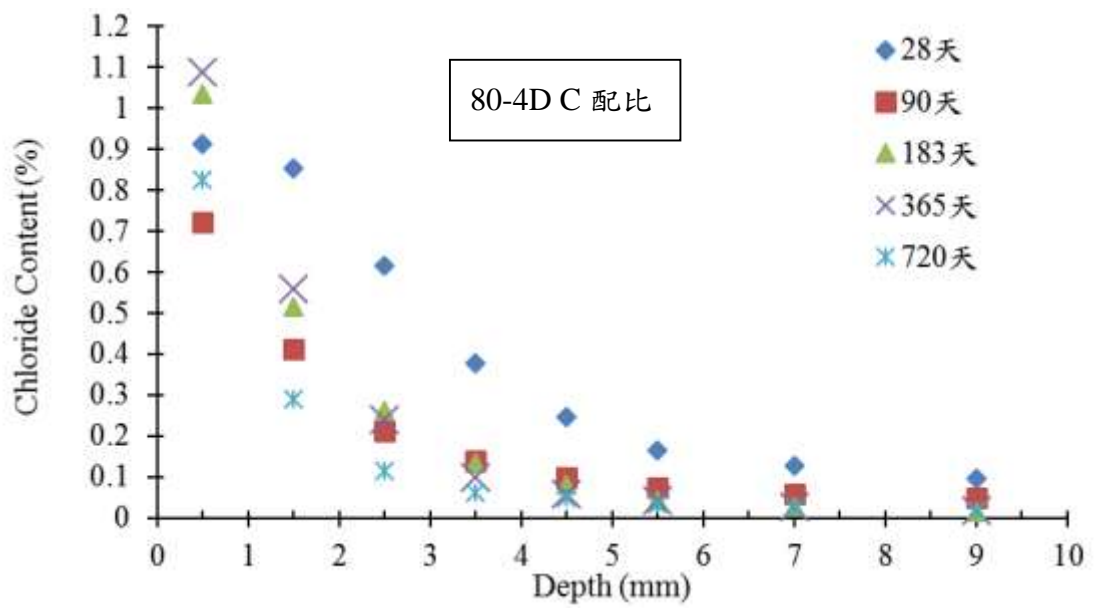
未來將持續進行實驗，以驗證混凝土在持續水化後，阻擋氯離子入侵之能力能持續上升，並依據更多的實驗數據進行時間推估，用以增加時間推估的正確性。



(a)

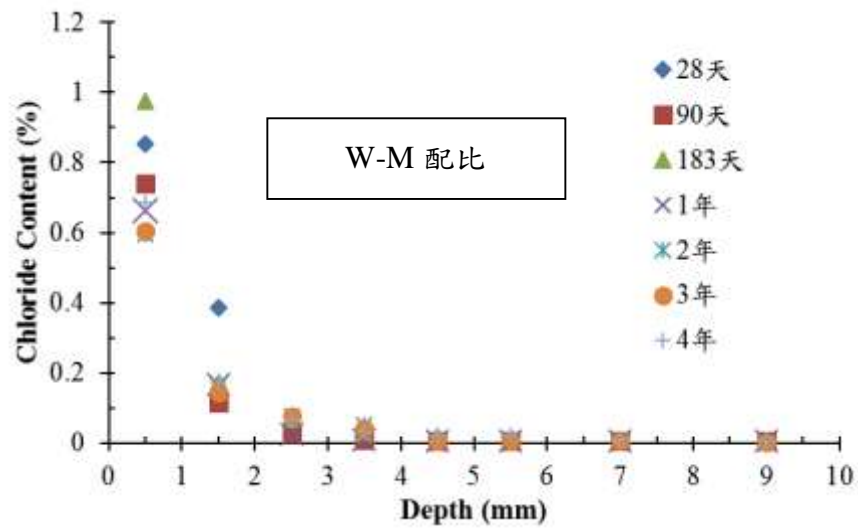


(b)

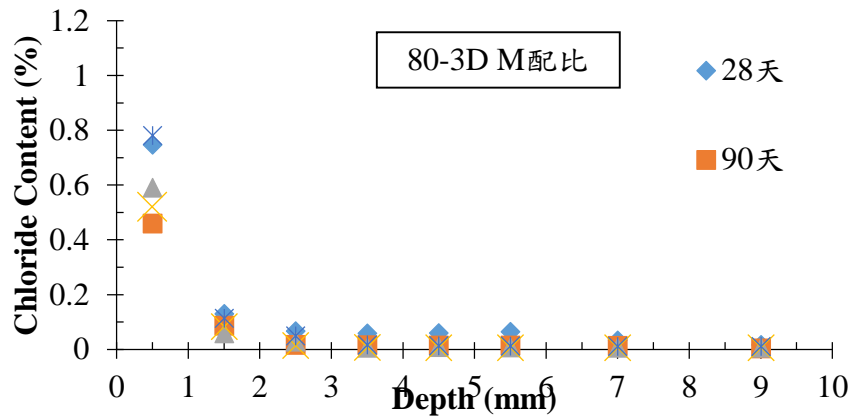


(c)

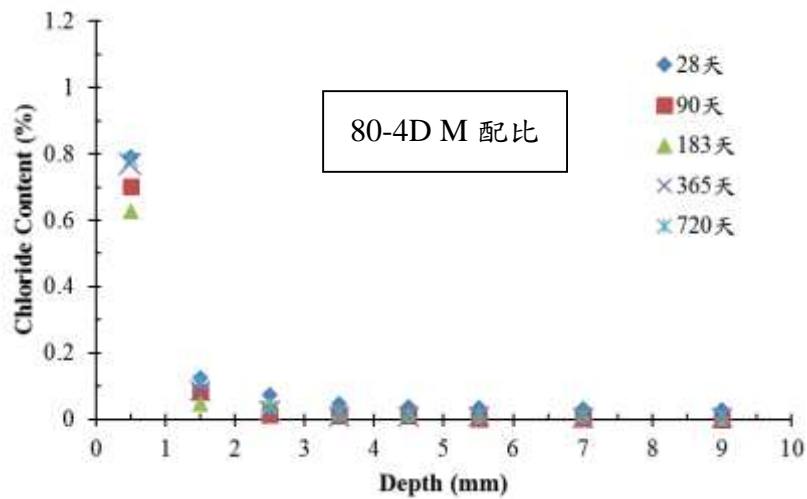
圖 4.24 配比 C 不同齡期與不同養護之氯離子濃度剖面圖



(a)



(b)



(c)

圖 4.25 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 4.9 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 4.26 與圖 4.27，得配比 C 時間因子 $m = 1.043$ ；配比 M 時間因子 $m = 0.707$ 。

表 4.9 常溫配比 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
1460	2.21E-14	1.21E-14

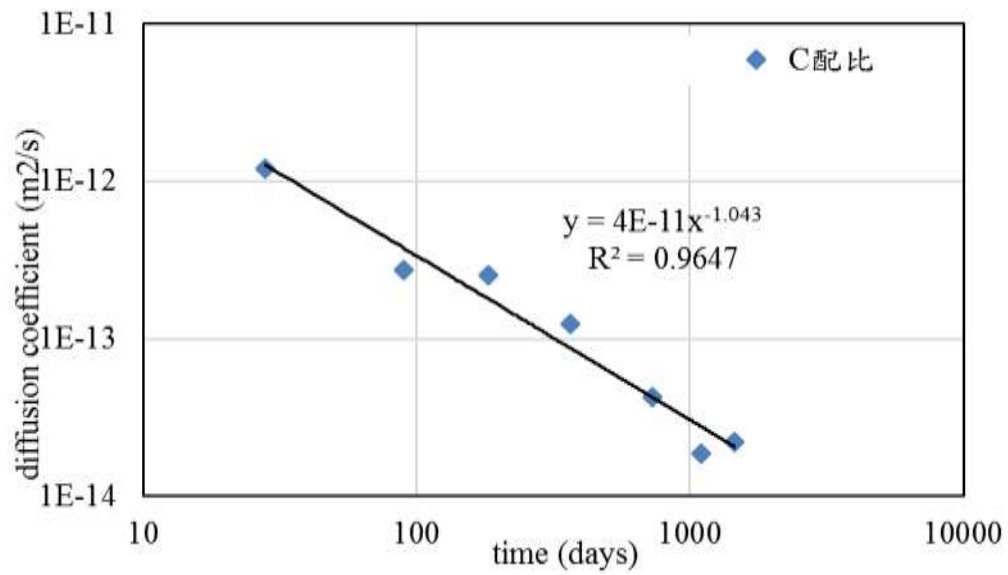


圖 4.26 常溫配比 C 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖

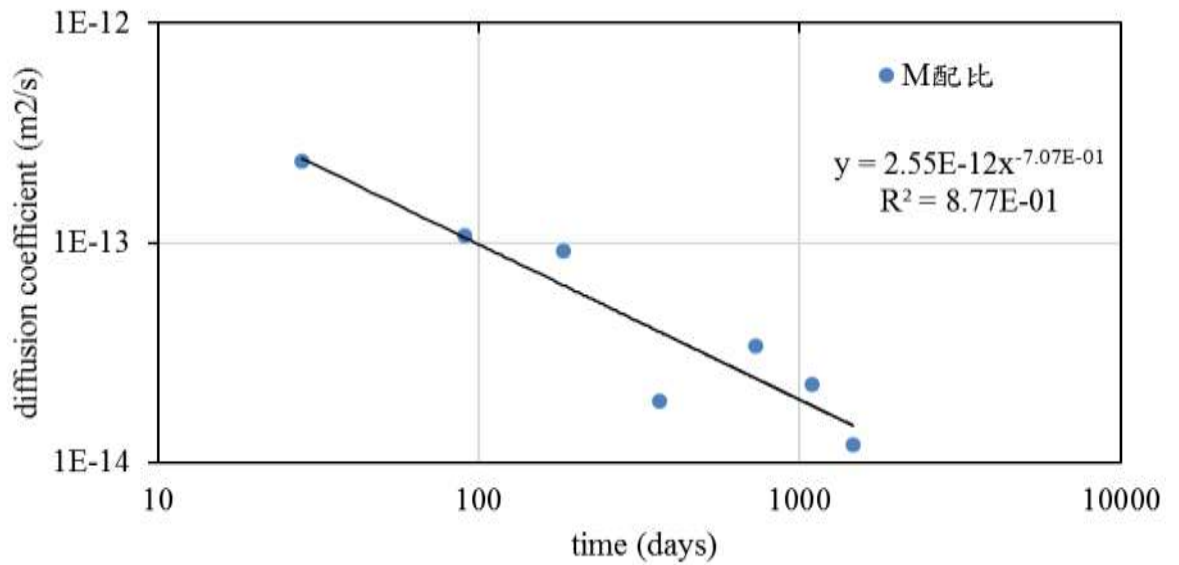


圖 4.27 常溫配比 M 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖

表 4.10 為 80-3D 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 4.28 與圖 4.29，得配比 C 時間因子 $m = 1.22$ ；配比 M 時間因子 $m = 1.14$ 。

表 4.10 80-3D 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	2.47E-12	1.21E-12
90	4.00E-13	8.20E-14
183	2.09E-13	7.68E-14
365	1.14E-13	2.39E-14
720	3.89E-14	3.01E-14

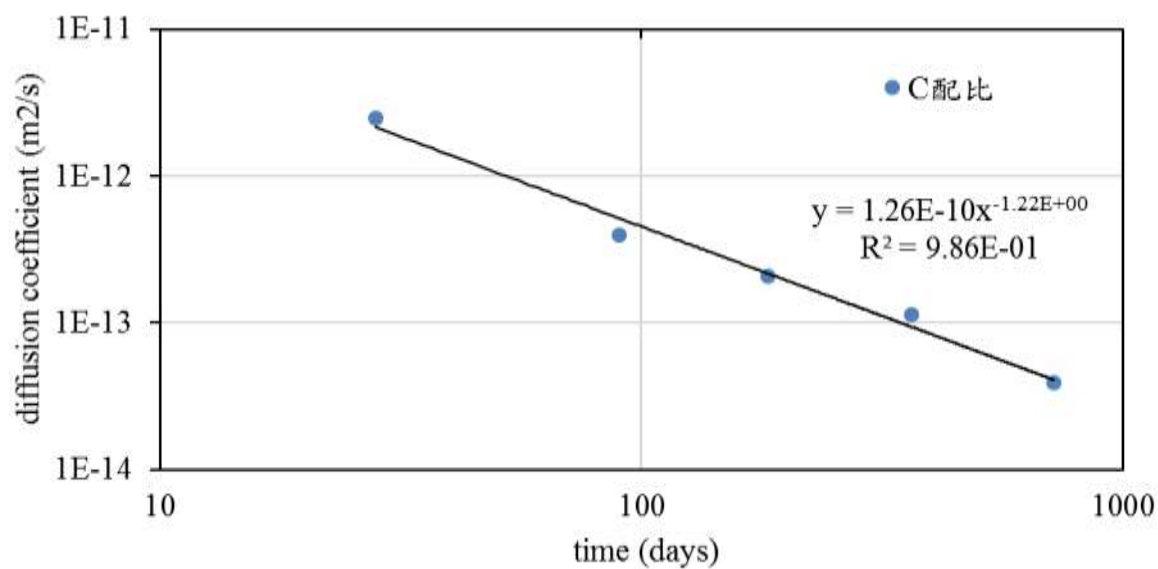


圖 4.28 80-3D 配比 C 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖

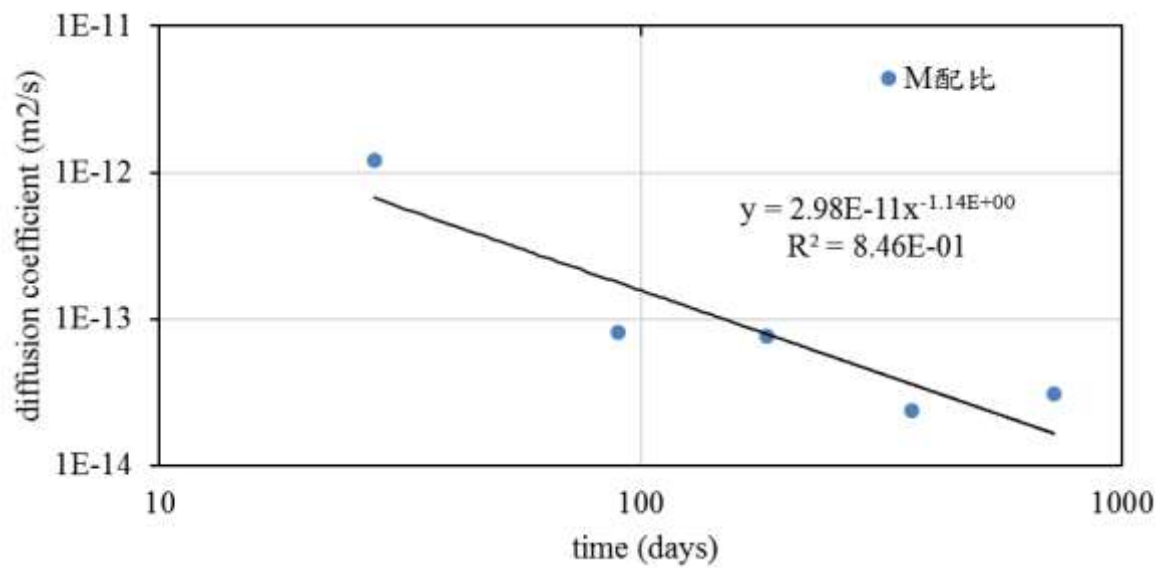


圖 4.29 80-3D 配比 M 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖

表 4.11 為 80-4D 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 4.30 與圖 4.31，得配比 C 時間因子 $m = 1.37$ 配比 M 時間因子 $m = 1.14$ 。

表 4.11 80-4D 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(m²/s)	
28	2.73E-12	3.22E-12
90	5.89E-13	8.17E-14
183	1.80E-13	1.93E-13
365	6.48E-14	3.93E-14
720	3.76E-14	2.73E-14

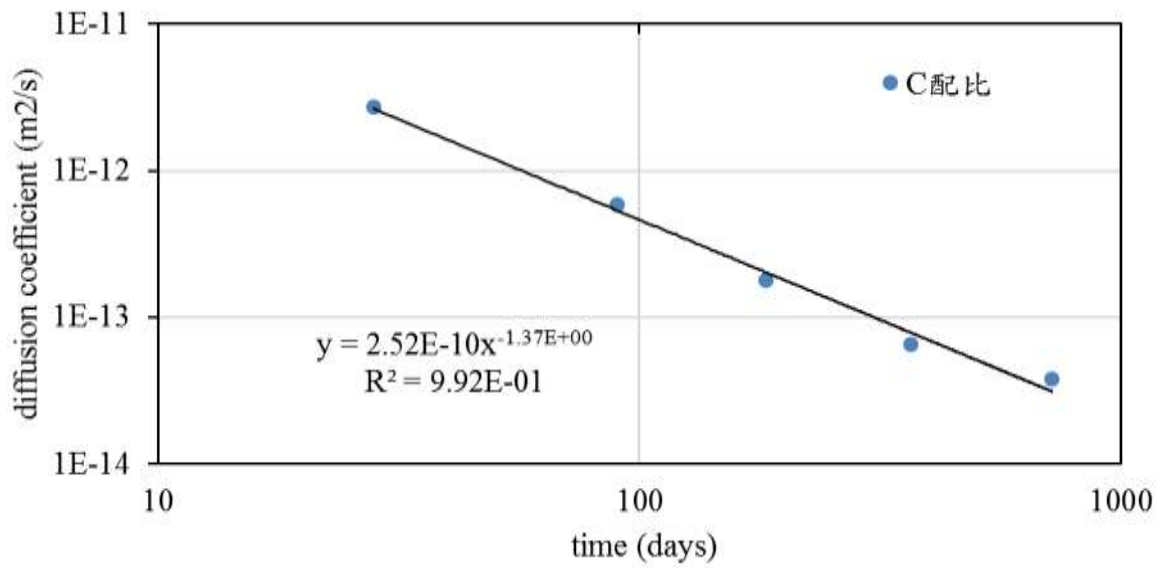


圖 4.30 80-3D 配比 C 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖

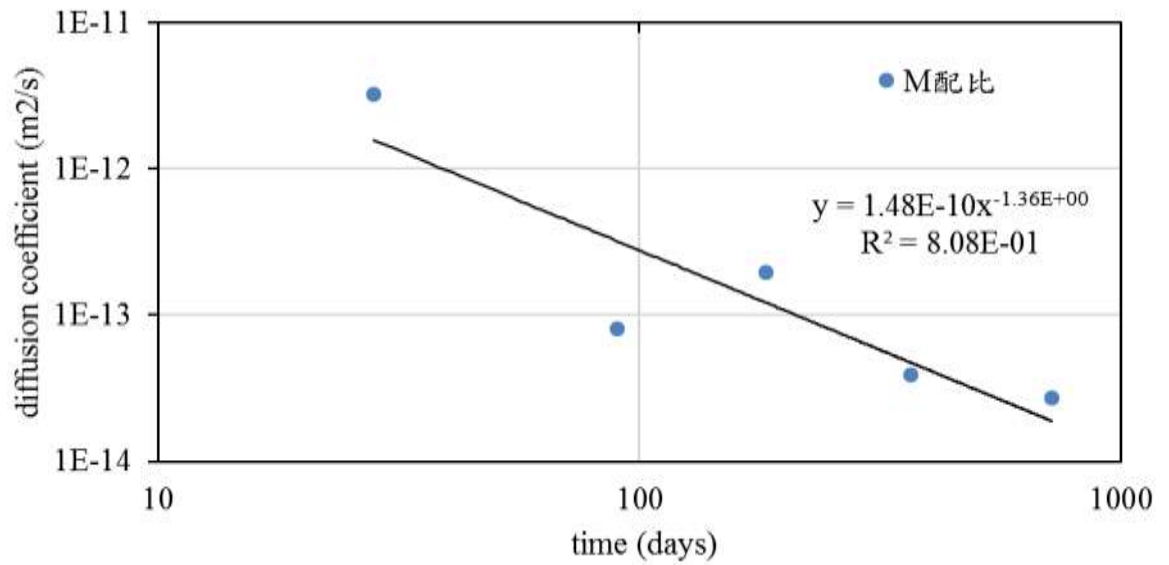


圖 4.31 80-3D 配比 M 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖

(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 $1.28E-12 \text{ m}^2/\text{s}$ ，時間因子推算結果為($m=1.043$)，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 $D(25 \text{ 年})= 2.78E-15 \text{ m}^2/\text{s}$ ，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 4.32。

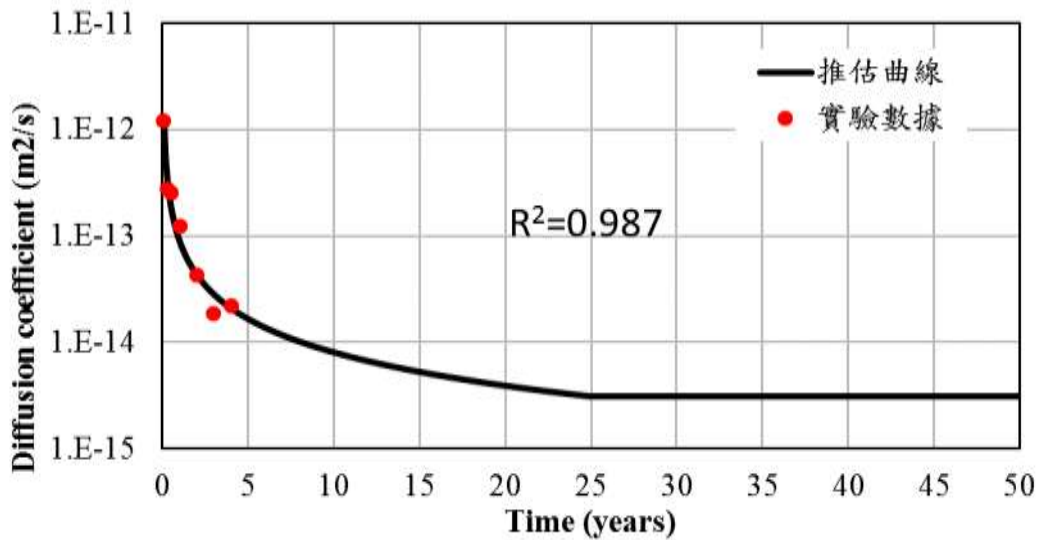


圖 4.32 常溫配比 C 瞬時擴散係數推估及實驗數據比較圖

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($m=0.707$)，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 4.33。

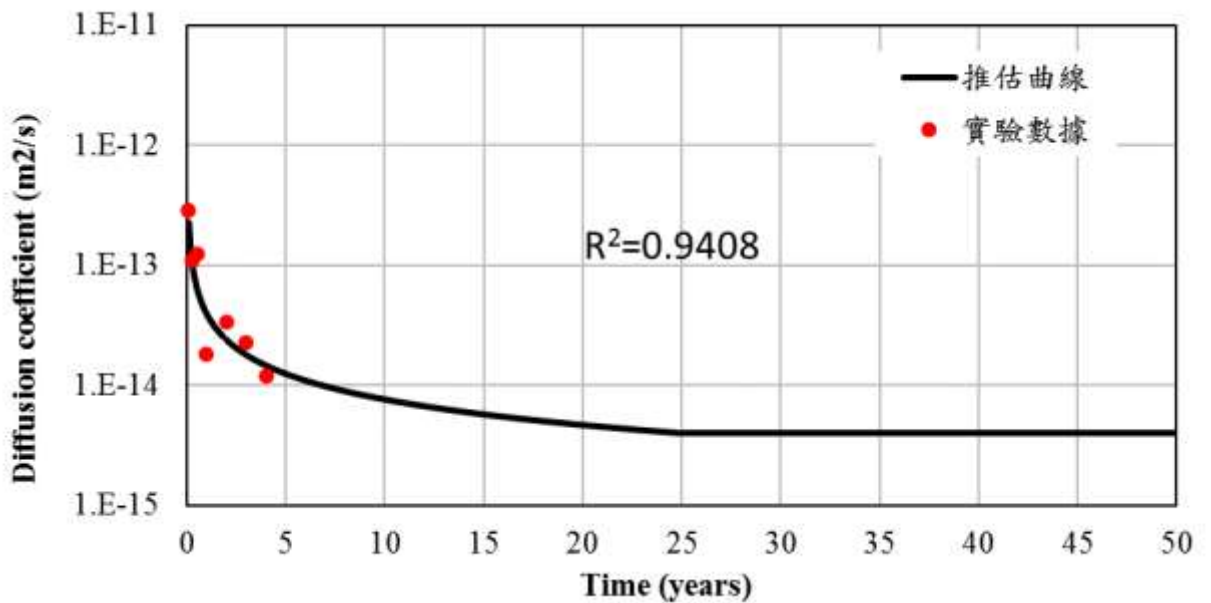


圖 4.33 常溫配比 M 瞬時擴散係數推估及實驗數據比較圖

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

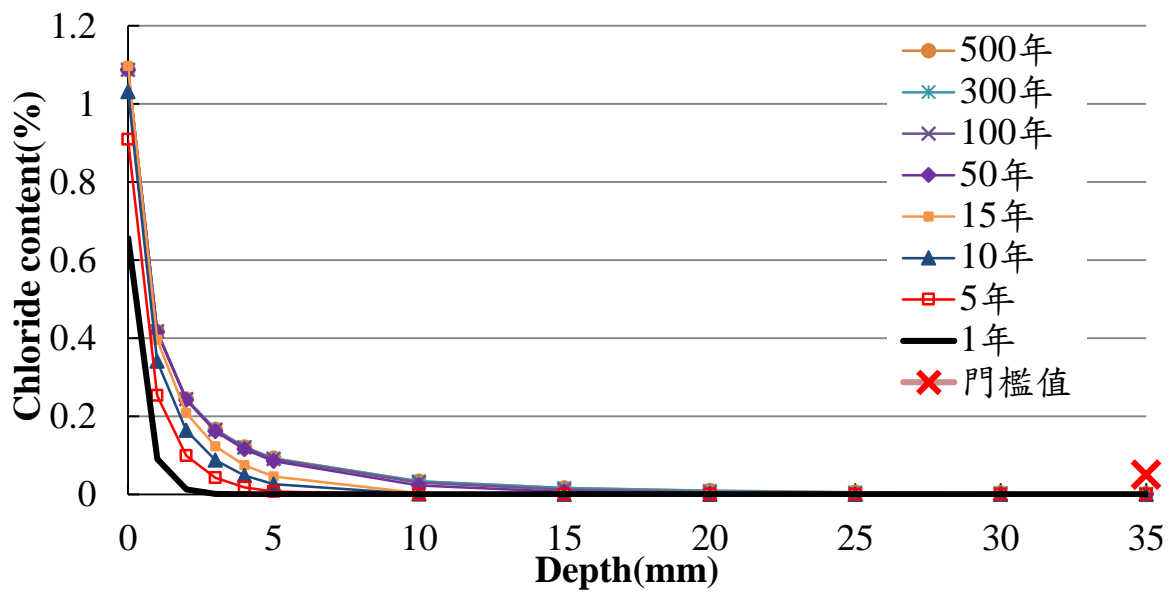
本研究所推估之「使用年限」定義為氯離子入侵混凝土容器，於混凝土深度 35 mm 即容器壁厚一半處，累積至氯離子引發腐蝕之門檻值(本研究採用 0.05 %)之時間。此外，因低放射性廢棄物最終處置設施之混凝土障壁，其設計服務年限需達三百年以上。

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%。

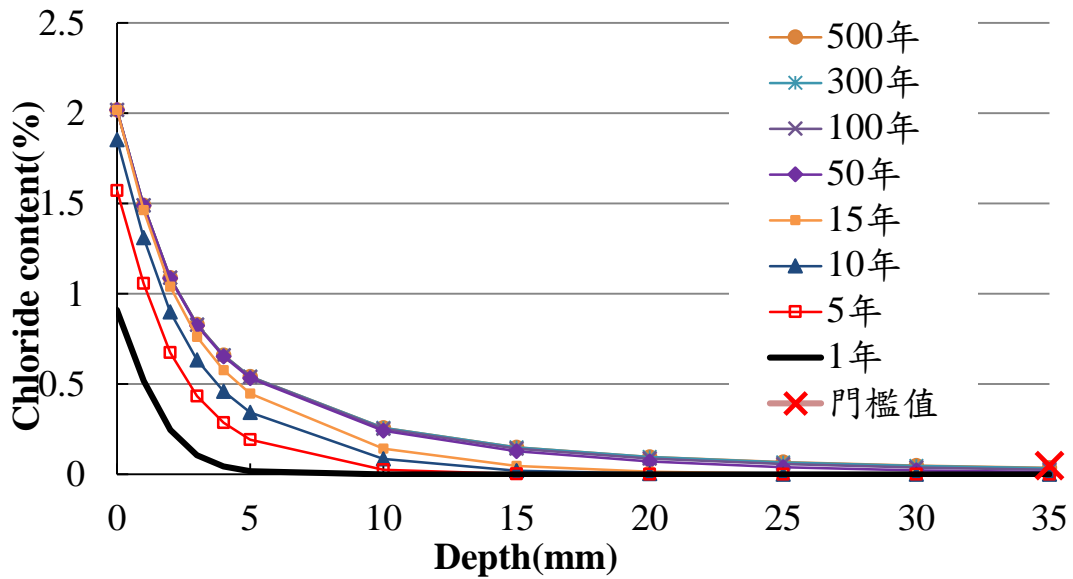
圖 4.34 為處置場封閉後受氯離子入侵濃度剖面推估圖，(a) 配比 HIC-C (b) 配比 HIC-M，如圖所示，經 25 年水化完成後，

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 4.34 處置場封閉後受氯離子入侵濃度剖面推估圖

九、鋼纖維均勻性分析

於混凝土中添加鋼纖維能夠有效防止混凝土內部微裂縫的擴展及大裂縫的形成，能提高材料的延展性改善混凝土的抗拉、抗彎、抗開裂等性能，但混凝土中的鋼纖維若分佈不均勻會影響使鋼纖維難以發揮效用，使其無法達到預期作用，而鋼纖維分佈不均勻會影響混凝土韌性發展，因而降低混凝土品質。

本研究所使用之配比 C 中有添加鋼纖維，為了確認所執行的拌合程序是否能讓試體之鋼纖維呈均勻分佈，故取 10 顆分兩批次拌合之配比 C $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 圓柱試體，將其切割成 $\phi 10 \times 5\text{cm}$ 分成上、中、下，以每層試體面所出現之鋼纖維數量(根)做計算，再利用統計變異數分析的方式探討 10 個試體間是否有變異性存在(即不均勻情形)，以及搗實程序是否會造成試體每層之鋼纖維分佈存在變異性。

由表 4.12 取 10 顆試體之鋼纖維變異性分析結果可看到，其 F 值為 2.016 小於臨界值 $F_{(9,20)0.05}=2.393$ ，表示十顆試體之間鋼纖維含量雖有差異，但差異不具有統計上的顯著性，故代表本研究所制定之拌合程序能適當將配比拌合均勻並製作品質相近之試體。

將每顆 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 試體切成 $\phi 10 \times 5\text{cm}$ 分成上、中、下層，由表 4.13 及圖 4.35 得知針對十顆試體各層之鋼纖維含量，計算一個試體面出現最多及最少根最多相差約 33 根鋼纖維，故透過表 4.13 之變異性分析，其 F 值為 1.521 小於 $F_{(9,27)0.05}=2.393$ 差異不顯著，表示試體上、中、下層並無不均勻情況發生。

由圖 4.35 可看到上、中、下層所含的鋼纖維數量大多以下層最多、中間層次之而上層最少，推斷原因為當搗實的時候放上震動台上亦會讓最下層及中間層受到影響，使較上層之鋼纖維有些微往下沉的情形發生，但不至於造成鋼纖維分佈不均勻現象，故建議若使用震動台搗實必須確切拿捏時間，避免震動搗實太久導致鋼纖維下沉造成分佈不均情形。

表 4.12 十顆試體間之鋼纖維含量變異性分析

變源	SS	自由度	MS	F	臨界值
組間	1288.533	9	143.170	2.016	2.393
組內	1420.667	20	71.033		
總和	2709.2	29			

表 4.13 圓柱試體上、中、下各層之鋼纖維含量變異性分析

變源	SS	自由度	MS	F	臨界值
組間	274.4	9	137.2	1.521	3.354
組內	2434.8	27	90.177		
總和	2709.2	29			

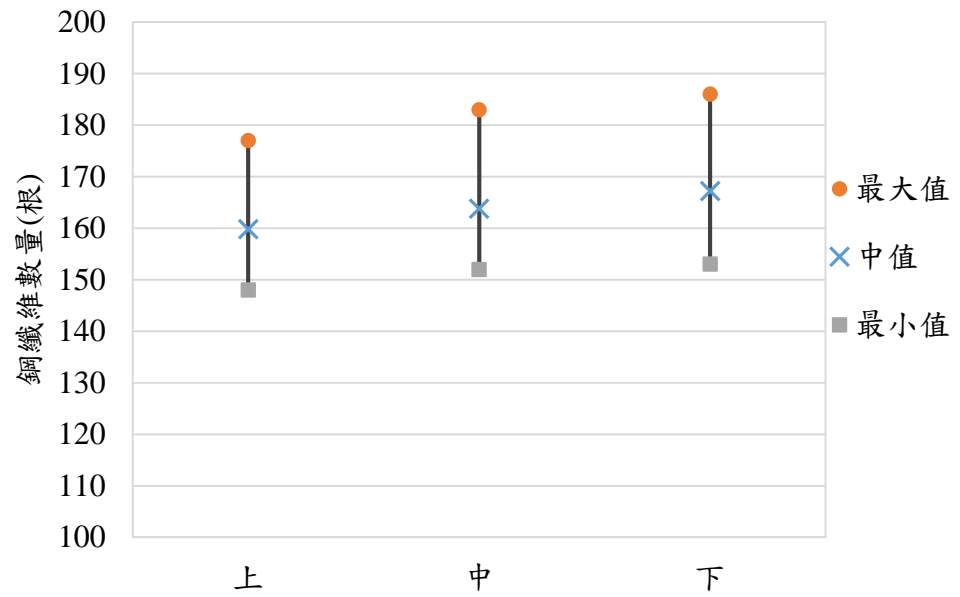


圖 4.35 圓柱試體上、中、下層之鋼纖維數量分析圖

伍、結論

低放射性最終處置場工程障壁混凝土以耐久性為主要要求，故為了探討提升耐久性方法，本研究利用熱養護方式進行抗壓強度、孔隙率、氯離子浸泡、表面電阻率以及乾縮試驗與常溫養護試體實驗結果進行比較，觀察透過熱養護是否能達到提升混凝土品質之成效，同時針對以表面電阻率做為容器混凝土進行品質評估之可行性加以探討。獲致以下結論：

- 一、依 ACI 發表之 Life-365 程式服務年限推估方法建立之計算程序，並藉由長期浸泡試驗取得之擴散係數長期推估，以保守方式採盛裝容器厚度的一半(35 mm)、最低鋼筋腐蝕門檻值(0.05%)，推估歷經長時間後才受氯離子入侵與容器製作完成後即受氯離子入侵之情形，推估配比 HIC-C 及 HIC-M 在 500 年後於深度 35mm 之氯離子濃度仍未超過門檻值，表示此混凝土配比有足夠的耐久性、緻密性能抵抗氯離子入侵。
- 二、利用變異性分析方式評估本研究拌合程序及搗實步驟所製作之鋼纖維分佈之均勻程度，結果顯示兩者之變異性不顯著，表示鋼纖維無不均勻分佈，但仍可發現試體下層鋼纖維數量較其他層多，故試體搗實的時候仍要注意避免過度震動搗實導致鋼纖維下沉造成分佈不均勻現象。
- 三、在抗壓強度上的表現發現試體經熱養護對於提升早期強度的發展效果甚為顯著，這有助於降低早期混凝土在養護齡期內受損之風險。
- 四、綜合試驗結果將熱養護方式與常溫養護進行比較，各實驗大部分結果顯示以 80°C 養護 4 天之方式對混凝土品質有最好的改

善，而 80°C 養護 3 天所得試驗結果也相當接近，且皆較常溫養護混凝土耐久性質為佳。

五、由孔隙率及氮氣吸附儀試驗結果得知經過熱養護後，混凝土孔隙減少變得更緻密，並隨著齡期增加孔隙下降；由乾縮量測結果發現經由熱養護後增加體積穩定性，加速水化反應，提高混凝土品質。

六、於氯離子入侵試驗發現，經過養護至不同之預定齡期，浸泡氯化鈉 36 天後，由於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，使瞬時擴散係降低。

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，後續將進行更長期的試體氯離子入侵濃度量測，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. 王茂齡，「輸送現象」，高立圖書有限公司，(1987)。
6. 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)。
7. 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)。
8. 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)。
9. 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)。
10. 陳雅文，「低放射性最終處置場障壁混凝土以熱養護提升品質之研究」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，(2018)。
11. 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)。
12. 莊美玲，「活性粉混凝土應用於低放射性廢棄物最終處置場工程障壁材料之耐久性評估」，博士論文，國立中央大學土木工程研究所，中壢(2014)。
13. 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)。

14. 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)。
15. 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)。
16. Kaffayatullah Khan, Muhammad Nasir Amin, “Influence of fineness of volcanic ash and its blends with quarry dust and slag on compressive strength of mortar under different curing temperatures“, *Construction and Building Materials*, pp. 514-528. (2017).
17. 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).
18. Lee, N. P. and Chisholm D. H., *Reactive Powder Concrete.*, Building Research Levy., Australia(2005).
19. 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).
20. 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).
21. 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).
22. Ozkan Sengul., “Use of electrical resistivity as an indicator for durability”, *Construction and Building Materials*, Pages 434–441 (2014).

23. 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).
24. 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).
25. R. Gettu, “Study of the distribution :and orientation of fibers in SFRC specimens ”, *Materials and Structures*, pp. 31-37. (2005).
26. Safiuddin., Md., and Hearn, N., “Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete” *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp1008-1013. (2005).
27. Young, J. F., Mindess, S., and Darwin, D., *Concrete*, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A. (2002).
28. B.Martín-Pérez., H.Zibara., R.D Hooton., M.D.AThomas., “A study of the effect of chloride binding on service life predictions” *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, Issue 8 , pp.1215-1223(2000).
29. Stanish, K., and Thomas, M., “The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffstion coefficients,” *Cement and concrete research*, Vol. 33, pp. 55-62(2003).
30. 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).
31. 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).
32. 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).
33. 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).
 34. Mangat, P. S., and Molloy, B. T., “Prediction of long term chloride concentration in concrete,” *Material and Structures*, Vol. 27, pp. 338-346(1994).
 35. 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).
 36. 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).
 37. 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).
 38. 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).
 39. 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).
 40. Klieger, Paul, “Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength”,*ACI Journal*, Proceedings Vol.54, No.12, pp. 1063-1081 (1958).

41. Marcel Cheyrezy., Vincent Maret. and Laurent Frouin.,
“Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete) ,”
Cement and concrete research , Volume 25, pp.1491-1500(1995).
42. Mehta, P. K., Concrete Structure Properties and Materials., Prentice
Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A. (1986).
43. 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).
44. Pierre Richard.,and Marcel Cheyrezy.,“Composition of reactive
powder concrexes”, *Cement and concrete research* , Volume 25,
pp.1501-1511(1995).
45. 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).